

# 구조물의 고유특성 제어를 통한 방사 소음 저감

## Reduction of Radiated Noise by Eigen-property Control

최 성 훈\*

(Sunghoon Choi\*)

\*한국철도기술연구원 차량기계연구본부

(접수일자: 2004년 5월 20일; 수정일자: 2004년 6월 22일; 채택일자: 2004년 6월 28일)

구조물의 의해 방사되는 음향파위는 구조물의 진동특성에 의해 결정된다. 방사소음을 저감하는 가장 간단명료한 방법으로는 구조물의 진동을 최소화하는 방법이 있다. 하지만 구조물의 진동모드 각각은 방사효율이 다르기 때문에 이를 고려하여 진동모드를 제어하면 효율적으로 방사소음을 저감할 수 있다. 본 연구에서는 피드포워드 제어를 적용하여 구조물의 고유특성을 변화시켜 진동 모드의 방사효율을 저감하는 방법을 제안한다. 단순지지 빔에 대한 수치모사를 통해 진동모드의 체적속도를 최소화 하는 제어 변수를 결정하였고, 이러한 제어를 적용하면 저주파 영역에서 방사소음을 크게 줄일 수 있다는 것을 보여 준다.

**핵심용어:** 음향 방사, 구조음향제어, 방사효율

**투고분야:** 구조음향 및 진동 분야 (11.1)

The interaction between a vibrating structure and a surrounding acoustic medium determines the acoustic power propagating into the far-field. A straightforward method to reduce the radiated power is to reduce the vibration of the structure. However it is more efficient to control the modes of the structure separately since each vibration mode of the structure has different radiation efficiency. An efficient method to reduce the sound radiation in the low frequency region is proposed by reducing the radiation efficiency of the structure. Numerical simulations are carried out for a simply-supported beam in which the feed-forward control is applied to reduce the volume velocity of each structural mode. This method is found to be very efficient in reducing low frequency sound radiation.

**Keywords:** Acoustic radiation, Structural acoustic control, Radiation efficiency

**ASK subject classification:** Structural acoustics and vibration (11.1)

## I. 서론

철도차량에서 실내로 전달되는 소음은 크게 공기전달음 (air-borne noise)과 구조전달음 (structure-borne noise)으로 나눌 수 있는데, 전자는 발생된 소음이 공기를 통해 직접 전달되는 것으로 주로 500Hz 이상의 성분이 많으며 이를 저감하기 위해서는 흡음재 등을 이용한 대책이 많이 사용된다. 반면 구조전달음은 소음원이 차량의 구조물을 가진 하여 이 진동이 소음원으로 작용하여 전달되는 소음으로 250Hz 이하의 저주파 성분이 지

배적이다[1]. 이런 저주파 소음은 흡음재 등을 이용한 방법으로 저감하기가 어렵기 때문에 이에 적절한 대책이 필요하다. 이에 대한 대책방법 중의 하나가 구조물의 진동과 이에 의한 소음방사 특성을 고려한 구조음향제어 (structural acoustic control)이다. 구조물의 진동 특성은 소음의 발생과 밀접한 관계가 있기 때문에, 고유진동 특성 중에서 특히 소음발생에 영향을 주는 성분만을 적절히 제어하면 비교적 적은 노력으로 소음저감에 큰 효과를 볼 수 있다. 본 연구에서는 철도차량에 많이 사용되는 패널 구조물의 진동 및 소음방사를 최소화하기 위한 방안으로 구조음향제어 개념을 도입하고, 이를 구현하기 위한 제어 방법의 타당성 및 해석방법에 대하여 연구한다.

전통적인 능동 소음제어에서는 소음원이 아닌 외부 제

책임저자: 최 성 훈 (schoi@krrri.re.kr)  
경기도 의왕시 월암동 360-1  
한국철도기술연구원 차량기계연구본부  
(전화: 031-460-5209; 팩스: 031-460-5279)

어음원을 이용하여 제어하고자 하는 음장 내에서 특정한 부분의 소음을 최소화 하는 것이 일반적인 방법이다. 이와 반면에 능동 구조음향제어 (active structural acoustic control)는 구조물의 방사소음을 최소화하기 위하여 구조물의 진동을 제어하는 것으로, 단순히 구조물의 진동을 최소화 하는 것이 아니라 구조물의 진동 형상에 따른 음향방사 특성, 즉 고유모드의 음향방사 효율을 고려하여 방사소음이 최소가 되도록 진동을 제어하는 것이다. 구조물의 고유모드는 각각의 형상에 따라 다른 방사효율을 갖게 되는데 이들 형상을 제어함으로써 구조물로부터의 소음방사를 저감할 수 있다. 제어이론에 의하면 피드포워드 (feed-forward) 제어에 의하여 제어된 시스템은 고유특성이 바뀐다는 것이 알려져 있기 때문에 이 방법을 이용하여 구조물의 고유특성이 낮은 방사효율을 가지도록 제어할 수 있다[2]. 본 연구에서는 구조물의 고유진동모드와 고유진동수 등의 고유특성을 제어하여 방사소음을 최소화할 수 있는 방법을 제안하며 빔 구조물에 대한 시뮬레이션을 통해 검증한다.

## II. 진동모드의 방사효율

빔이나 판과 같은 평면 구조물에서의 저주파 음향 방사는 구조물 표면에서의 속도분포와 직접적으로 연관이 있다. 예를 들면 평판 구조물 위의 속도분포를 적분한 값, 즉 체적속도 (volume velocity)가 0이 되는 모드는 저주파영역에서 쌍극자 (dipole)나 사극자 (quadrapole)처럼 고차의 방사패턴을 보이기 때문에 방사효율이 매우

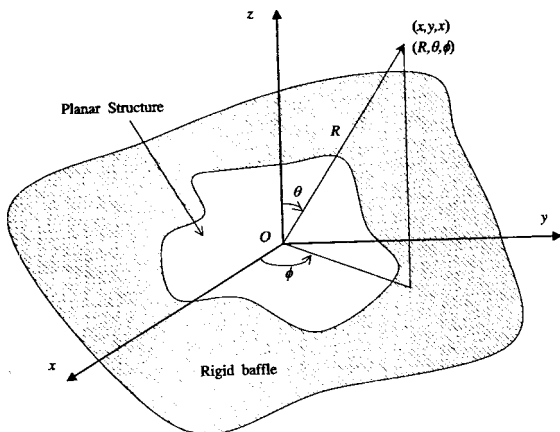


그림 1. 평면구조물과 좌표계  
Fig. 1. A planar structure and its coordinate systems.

낮다[3]. 이 모드들은 비체적 모드 (non-volumetric mode) 또는 비 방사모드 (non-radiating mode) 라고 불린다. 만약 구조물의 고유특성을 이러한 비방사모드의 특성을 갖도록 제어할 수 있다면 저주파 영역에서의 방사소음을 효율적으로 저감할 수 있을 것이다.

그림 1의 2차원의 평면 구조물로부터의 원거리 음장은 파수변환 (wavenumber domain transformation), 즉 공간 푸리에변환 (spatial Fourier transform)을 적용하여 해를 구할 수 있는데 직교좌표계에서의 공간 푸리에 변환과 역 변환은 다음과 같이 정의한다.

$$F(k_x, k_y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (1)$$

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x, k_y) e^{-j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (2)$$

진동모드의 방사특성을 살펴보기 위해 파수영역에서 구조물의 진동 분포와 원거리 음장에서 음압과의 관계를 원통형 좌표계 (cylindrical coordinates)에서 나타내면 다음과 같다 [3].

$$p(R, \theta, \phi) = \frac{j\rho_0 \omega e^{jkr}}{2\pi R} W(\bar{k}_x, \bar{k}_y) \quad (3)$$

이 식에서  $\rho_0$ 는 공기의 밀도,  $\bar{k}_x = k_0 \sin \theta \cos \phi$ ,  $\bar{k}_y = k_0 \sin \theta \sin \phi$ ,  $k_0$ 는 공기 중의 파수 (wavenumber)를 나타내며  $W(\bar{k}_x, \bar{k}_y)$ 는 평면구조물의 속도인  $w(x, y)$ 의 파수변환 이다. 구조물의 체적속도  $V$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V = j\omega \int \int_{\Omega} w(x, y) dx dy \quad (4)$$

이 식에서  $\Omega$ 는 구조물의 표면을 나타낸다. 그림 1에서와 같은 배열위의 평면 구조물의 수직방향 속도 분포는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$w(x, y) = \begin{cases} j\omega w(x, y) & \text{for } (x, y) \in \Omega \\ 0 & \text{for } (x, y) \notin \Omega \end{cases} \quad (5)$$

이 식에 식 (1)과 같은 파수변환을 적용하고,  $k_x = 0$ ,  $k_y = 0$  을 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$W(k_x=0, k_y=0) = j\omega \int \int_{\Omega} w(x, y) dx dy \quad (6)$$

식 (4)에서 알 수 있듯이 식 (6)은 체적속도를 나타낸다. 이 결과를 식 (3)과 비교하면  $k_x=0, k_y=0$ 인 경우 원거리 음장에서의 음압은 체적속도에 비례한다는 것을 알 수 있다. 이 경우는  $\theta=0$ , 즉 평면 구조물에 수직 방향으로의 소음 방사에 해당하는 것이다. 따라서 구조물의 모든 진동모드가 비방사모드 특성을 가지도록 제어할 수 있다면 그 구조물에서 수직 방향으로 방사되는 소음의 크기는 이론적으로 0이 될 것이다.

본 논문에서는 제어 방법으로 피드포워드 제어를 이용한다. 피드포워드 제어된 시스템은 새로운 고유모드와 고유진동수를 가지게 되며 이는 제어가진 (control input)과 에러센서 (error sensor)에 의해 결정된다. 제어된 시스템의 고유함수 (eigenfunction)를  $\phi_{cl}(x)$ 라고 하면 이는 제어되지 않은 시스템의 고유함수  $\phi_n(x)$ 의 선형조합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_{cl}(x) = \sum_{n=1}^N \Gamma_n \phi_n(x), \quad \text{for } l=1, 2, \dots, N-1 \quad (6)$$

이 식에서  $\Gamma_n$ 은 다음과 같이 주어진다[2].

$$\Gamma_n = -\frac{\mu_n}{\omega_{cl}^2 - \omega_n^2} \left\{ \sum_{m=1}^N [\mu_m / (\omega_{cl}^2 - \omega_m^2)]^2 \right\}^{-1/2} \quad (7)$$

이 식에서  $\mu_n$ 은 제어되지 않은 시스템의  $n$  번째 모드에 상응하는 제어입력의 공간 모드분포를 나타내며  $\omega_n$ 과  $\omega_{cl}$ 은 각각 제어 전 후의  $n$  번째 고유주파수이다.

### III. 파수영역에서의 비방사모드 제어

본 절에서는 피드포워드 제어를 이용하여 빔과 같은 1차원 구조물의 진동모드를 비방사 특성을 가지도록 하는 방법에 대하여 다룬다. 1차원 구조물의 변위  $w(x, \omega)$ 는 고유모드의 선형조합으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$w(x, \omega) = \sum_{n=1}^N q_n(\omega) \phi_n(x) \quad (8)$$

이 식에서  $q_n(\omega)$ 과  $\phi_n(x)$ 은 각각 일반좌표계 (generalized coordinates)와 고유함수 (eigenfunction)를 나타낸다. 외부 점 가진  $F(\omega)$ 가  $x_d$ 의 위치에 가해지고 제어 가진의 공간분포를  $f_c(x)$ 라고 가정하면 외부 입력과 제어 가진은 각각  $\delta(x-x_d)F(\omega)$  및  $f_c(x)U(\omega)$ 라고 쓸 수 있으므로 일반좌표계에서의 변위는 다음과 같다[4].

$$q_n(\omega) = [\nu_n F(\omega) + \mu_n U(\omega)] H_n(\omega) \quad (9)$$

이 식에서  $\nu_n = \phi_n(x_d)$ ,  $\mu_n = \int_{\Omega} \phi_n(x) f_c(x) dx$ ,  $H_n(\omega) = (\omega_n^2 - \omega^2 + 2j\zeta_n \omega_n \omega)^{-1}$ 이며,  $\omega_n$ 과  $\zeta_n$ 은 각각 고유주파수(natural frequency)와 모달댐핑계수이다. 에러센서의 위치를 나타내는 함수를  $f_s(x)$ 라고 하면 에러센서의 모드응답은 다음과 같이 주어진다.

$$\varepsilon_n = \sum_{n=1}^N q_n(\omega) \xi_n \quad (10)$$

이 식에서  $\xi_n = \int_{\Omega} \phi_n(x) f_s(x) dx$ 이다. 제어입력의 크기  $U(\omega)$ 는 에러센서 신호의 크기를 최소화하도록 결정된다. 식 (10)을 최소화 하는 제어입력은 다음과 같다[2, 5].

$$U(\omega) = -\frac{\sum_{n=1}^N \xi_n \nu_n H_n(\omega)}{\sum_{n=1}^N \xi_n \mu_n H_n(\omega)} F(\omega) \quad (11)$$

제어 후의  $l$  번째 모드가 처음  $l+1$  개의 제어 전 모드들의 선형조합이라고 가정하면,

$$\phi_{cl}(x) = \sum_{n=1}^{l+1} \bar{\Gamma}_n \phi_n(x) \quad (12)$$

라고 쓸 수 있다. 제어 후 모드가 직교성과 함께 비방사 모드의 형태를 가진다고 가정하면 다음을 만족한다.

$$\begin{cases} \int_{\Omega} \phi_{cl}(x) dx = 0 \\ \int_{\Omega} \phi_{cl}(x) m(x) \phi_{cl}(x) dx = \delta_{ll} \quad \text{for } l \leq l. \end{cases} \quad (13)$$

식 (12)를 식 (13)에 대입하면  $\bar{\Gamma}_n$ 에 대한 식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{T}_{nl} = \begin{cases} \gamma_n \gamma_{l+1} \left[ \sum_{j=1}^l \gamma_j^2 \cdot \sum_{j=l+1}^{N-1} \gamma_j^2 \right]^{-1/2}, & \text{for } 1 \leq n \leq l \\ - \left( \sum_{j=1}^l \gamma_j^2 \right) \left[ \sum_{j=1}^l \gamma_j^2 \cdot \sum_{j=l+1}^{N-1} \gamma_j^2 \right]^{-1/2} & \text{for } n = l+1 \\ 0 & \text{for } l+1 \leq n \leq N \end{cases} \quad (14)$$

이 식에서  $\gamma_n$ 은 구조 모드의 체적속도에 비례하는 값으로 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma_n = \int_0^a \phi_n(x) dx \quad (15)$$

식 (14)를 만족하는  $\bar{T}_{nl}$ 을 구하고 이들 계수를 식 (7)의 계수와 비교하여 N 개의 제어 가진변수  $\mu_n$ 과 N-1 개의 고유진동수  $\omega_{cl}^2$ 를 구할 수 있는데, 이 값들이 비방사 특성을 가지는 구조물의 고유특성인 것이다. 제어모드의 변수는  $(N-1) \times N$  개이며 구하고자 하는 미지수인 구조물의 고유특성은  $2N-1$  개 이므로 최소자승 (least square) 방법 등을 적용하여 문제를 해결해야 한다. 즉,  $\mu_n$ 과  $\omega_{cl}^2$ 는 다음과 같이 정의된 함수를 최소화하도록 구한다.

$$F(\mu_n, \omega_{cl}^2) = \sum_{l=1}^{N-1} \sum_{n=1}^N [\bar{T}_{nl} - \Gamma_{nl}]^2 \quad (16)$$

이 때 구속조건은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^N \mu_n^2 = 1 \\ \omega_1^2 \leq \omega_{c1}^2 \leq \omega_2^2 \leq \omega_{c2}^2 \leq \dots \leq \omega_{c,N-1}^2 \leq \omega_N^2 \end{cases} \quad (17)$$

위의 비선형 최소자승 최적화 문제를 이용하여  $\mu_n$ 과  $\omega_{cl}^2$ 을 구하면 에러센서의 변수인  $\xi_n$ 은 다음의 선형 방정식을 이용하여 구할 수 있다[5].

$$\begin{bmatrix} \eta_{11} & \eta_{12} & \dots & \eta_{1,N-1} \\ \eta_{21} & \eta_{22} & \dots & \eta_{2,N-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \eta_{N1} & \eta_{N2} & \dots & \eta_{N,N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{1,N} \\ \eta_{2,N} \\ \vdots \\ \eta_{N-1,N} \end{bmatrix} \quad (18)$$

이 식에서

$$\eta_{ln} = \mu_n \prod_{m=1, (m \neq n)}^N (\omega_m^2 - \omega_{cl}^2) \quad (19)$$

표 1 단순지지 빔의 고유모드 전개상수

Table 2. Expansion coefficients  $\bar{T}_{nl}$  of the simply-supported beam.

제어 전 모드	제어 모드				
	1	2	3	4	5
1	0	0.316	0	0.177	0
2	1.0	0	0	0	0
3	0	-0.949	0	0.059	0
4	0	0	1.0	0	0
5	0	0	0	-0.983	0
6	0	0	0	0	1.0

이다. 이상의 과정을 통하여 제어 입력의 변수, 즉 제어 가진의 위치 및 크기를 모드영역에서 구할 수 있다.

#### IV. 빔 구조물의 비방사 제어

본 절에서는 III절에서 기술한 설계 절차를 검증하기 위해 길이가  $a$ 이고 선밀도가  $m$ 인 단순지지 빔에 대하여 수치해석을 수행한다. 빔의 길이, 폭, 두께는 각각  $0.55m$ ,  $0.06m$ , 그리고  $0.01m$  이고, 영률은  $2.0 \times 10^{11} N/m$ , 포아송비는 0.3, 밀도는  $7860 kg/m^3$ , 댐핑계수  $\xi_n$ 은 0.01 이라고 가정한다. 이 빔은  $x_a = 0.14m$  위치에서 1 N 크기의 조화가진을 받는다고 가정한다. 단순지지 빔의 경우 고유모드 및 고유진동수는 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_n(x) = \sqrt{2/m} \sin k_n x, \quad \omega_n^2 = k_n^4 (EI/m) \quad (20)$$

이 식에서  $k_n = n\pi/a$ 이다. 식 (20)을 식 (17)에 대입하여 단순지지 빔의 모드별 체적속도를 다음으로부터 얻는다.

$$\gamma_n = \sqrt{\frac{2}{ma}} \left[ \frac{1 - (-1)^n}{k_n} \right], \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (21)$$

식 (21)을 보면 차수가 짝수인 모드는  $\gamma_n = 0$ 이 되어 비방사모드라는 것을 알 수 있다. 따라서 짝수 차수 모드의 특성은 제어할 필요가 없다는 것을 알 수 있다. 식 (12)와 (14)로부터 제어된 비방사모드를 구할 수 있는데, 표 1에 제어 후 모드의 변수  $\bar{T}_{nl}$ 를 정리 하였으며 그림 2에 제어 전후의 단순지지 빔의 모드를 비교 하였다. 최

표 2. 단순지지 빔의 최적제어 변수

Table 2. Optimal control parameters for the simply-supported beam.

Mode #	고유주파수 (Hz)		제어가진 변수 $\mu_n$	에러센서 변수 $\xi_n$
	제어 전	제어 후		
1	76.0	304.1	0.594	0.932
2	304.1	653.6	-0.012	0.
3	684.3	1216.5	0.279	0.310
4	1216.5	1883.0	0.006	-0.001
5	1900.8	2737.2	0.100	0.186
6	2737.2		0.034	0.

적 제어된 시스템의 고유치  $\omega_{ci}^2$ 와 제어가진변수  $\mu_n$ 는 식 (16)과 (17)로 주어진 최적화 문제로부터 구할 수 있으며, 에러센서의 변수  $\xi_n$ 은 식 (18)과 (19)로부터 구한다. 이러한 방법으로 단순지지 빔에 대하여 구한 변수는 표 2와 같다. 비교를 위하여 제어 전의 고유주파수도 같이 보여주고 있다. 제어 전 단순지지 빔의 모드 형상을

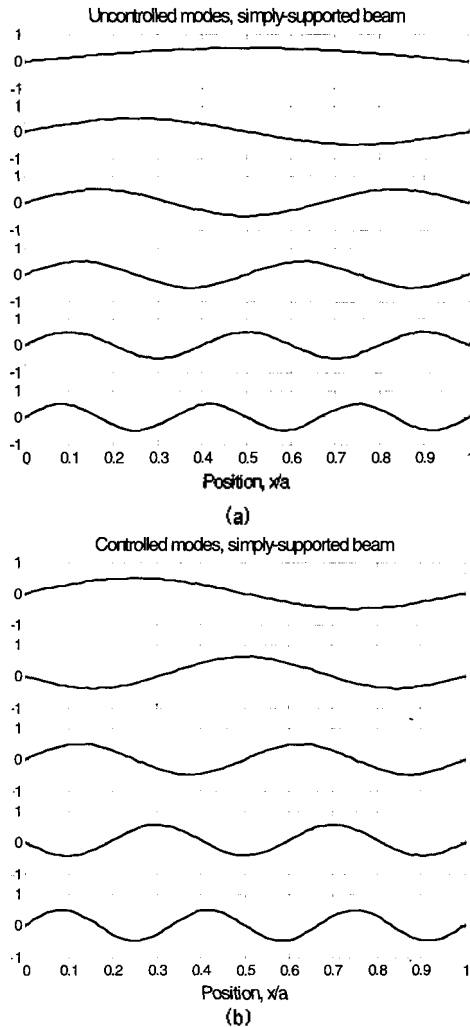


그림 2. 단순지지 빔의 제어 전후 모드 형상: (a) 제어 전, (b) 제어 후.  
Fig 2. Mode shapes of the simply-supported beam before(a) and after(b) the control.

보면 짝수 차수 모드 경우에는 이미 비방사 특성을 가지고 있기 때문이다 제어할 필요가 없고 홀수 차수 모드만 제어하면 된다는 것을 예상할 수 있다. 표 1, 2와 그림 2에서 알 수 있듯이 제어 후의 홀수 차수의 모드는 제어 전의 짝수 차수의 모드와 동일하다는 것을 알 수 있다. 또한 제어 후의 짝수 차수의 모드는 제어 전 홀수 차수 모드들의 선형조합이라는 것을 알 수 있다. 예를 들어 제어 후 2차 모드는 제어 전 1차 모드와 3차 모드의 선형조합이다.

표 2에 주어진 변수들은 모드영역에서의 변수들이고 이들 값을 이용하여 실제 물리적 영역 (physical domain)에서의 변수를 결정할 수 있다. 이러한 과정을 통해 제어가진기와 에러센서의 위치를 나타내는 함수  $f_c(x)$ 와  $f_s(x)$ 를 구하게 된다. 실제 구조물에서 이를 구현할 때는 가속도계와 같이 한 점에서 작용하는 센서를 사용 하거나 PVDF (polymer polyvinylidene fluoride) 필름이나 PZT 세라믹과 같은 연속적으로 분포하는 센서를 사용할 수 있다. 후자의 경우는 경량이며 적절한 모양으로 부착위치를 쉽게 바꿀 수 있기 때문에 적용 가능성이 크다. 모드영역에서의 센서 설계와 선택에 대한 자세한 내용은 참고문헌[6, 7]에서 자세히 다룬바 있다.

방사소음 비교를 위하여 공간상의 위치  $r(5a, \theta=0, \phi=0)$ 에서의 제어 전후의 음압 (dB ref. 20  $\mu$ Pa)을 그림 3에 비교 하였다. 두 경우 모두 제어 후 음압이 상당히 큰 폭으로 감소한다는 것을 알 수 있다. 특히 저주파 영역에서의 감소 폭이 크다는 것을 알 수 있다. 이는 비방사 모드의 방사특성이 쌍극자음원의 특성과 유사하며, 평면에 수직방향으로의 방사효과가 상대적으로 매우 작기 때문이다. 그림 4에서는 빔으로부터 x-z 평면으로의 음향방

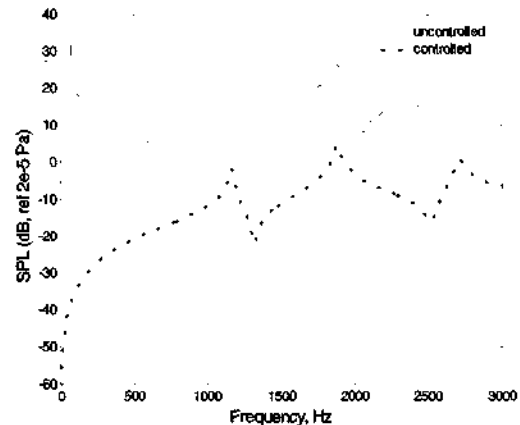


그림 3. 단순지지 빔에서 수직 방향의 원거리 음압  
Fig 3. Far-field pressure normal to the simply-supported beam.

사 방향성을 76.0Hz와 653.6Hz의 가진 주파수에 대하여 각각 보여주고 있다. 이 때 음압은  $R=5a$  거리에서의 값이며  $\theta=0$ 은 빔에 수직방향이다. 빔의 제어 전 첫 번째 고유주파수에 해당하는 76.0Hz의 경우에는 제어 효과가 가장 크게 나타나며, 제어 전 단극자 (monopole) 형태의 방사특성이 제어 후에는 쌍극자 (dipole) 형태가 된다는 것을 알 수 있다. 제어 후의 첫 번째 고유주파수에 해당하는 653.6Hz의 경우에는 빔에 수직인 방향으로의 음향 방사는 감소하였지만 일부 방향으로서는 증가하는 경우도 있다는 것을 알 수 있다.

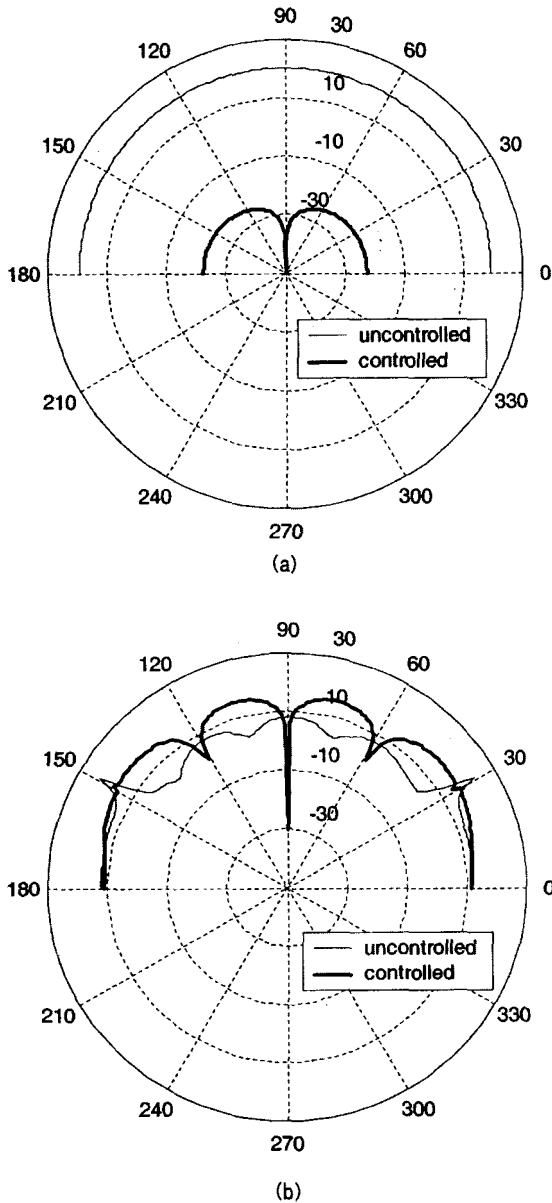


그림 4. 단순지지 빔으로부터의 음향 방사 방향성: (a) 76.0 Hz. (b) 653.6 Hz.

Fig. 4. Directivity pattern of the radiated noise from the simply-supported beam: (a) 76.0 Hz. (b) 653.6 Hz.

## V. 결론

본 연구에서는 평면 구조물의 체적속도가 0이 되는 비방사모드의 개념을 이용하여 빔 구조물의 방사소음을 효율적으로 제어하는 방법을 제안하였다. 수치해석의 예로 단순지지 빔의 모드 특성이 최대한 비방사모드에 가깝도록 제어하여 빔에 수직인 방향으로의 소음 방사를 최소화 할 수 있다는 것을 보여주었다. 이 방법은 파수영역 또는 모드영역에서의 구조음향 특성을 이용하는 것으로 실제 물리적 영역 (physical domain)에서의 제어보다 효율적이다. 본 연구에서는 2차원 빔 구조물에 대해서 적용 예를 보여주었으나 모드영역의 해를 확장하면 3차원 구조물에 대해서도 동일한 방법을 적용할 수 있을 것으로 본다. 유사한 방법으로는 구조물로부터 방사되는 총 음향파워를 가격함수로 하고 이를 최소화하도록 변수를 최적화할 수 있는데 이 경우에도 마찬가지로 본 연구에서의 설계 절차를 적용할 수 있다.

## 참고 문헌

1. J. Farm, "Interior structure-borne sound caused by the sleeper passing frequency," *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 831~837 (2000).
2. R. A. Burdisso and C. R. Fuller, "Theory of feedforward controlled system eigenproperties," *Journal of Sound and Vibration*, 153(3), 437~452 (1992).
3. Earl G. Williams, *Fourier Acoustics*, Academic Press, 1999.
4. L. Meirovitch, *Analytical Methods in Vibration*, The MacMillan Company, New York, 1967.
5. R. A. Burdisso and C. R. Fuller, "Design of active structural acoustic control systems by eigenproperty assignment," *Journal of Acoustical Society of America*, 96(3), 1582~1591 (1994).
6. C. R. Fuller, S. J. Elliot, and P. A. Nelson, *Active Control of Vibration*, Academic Press, London, 1996.
7. C. K. Lee and F. C. Moon, "Modal sensors/actuators," *Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics*, 57, 434-441 (1990).

## 저자 약력

### • 최성훈 (Sunghoon Choi)

1990년 2월: 한국과학기술원 기계공학(공학사)  
 1992년 6월: Northwestern University, Evanston, IL, USA, 응용역학(공학석사)  
 1995년 2월: Northwestern University, Evanston, IL, USA.



응용역학(공학박사)  
1995년~2000년: 삼성종합기술원 CSE Center  
전문연구원  
2000년~2002년: 한국과학기술원 기계공학과 연구교수  
2002년~현재: 한국철도기술연구원 선임연구원  
\* 주관심분야: 구조음향, 파동전달, 철도소음/진동