

〈논 문〉

# 덕트 내부의 고차모드 수보다 적은 수의 제어음원과 마이크로폰을 이용한 덕트 방사소음 제어에 관한 연구

A Study on Active Control of the Radiated Duct Noise with Insufficient Number of Control Sources and Microphones

윤 두 병\* · 김 양 한\*\* · 정 균 양\*\*\* · 조 대 승\*\*\*\*

Doo-Byung Yoon, Yang-Hann Kim, Kyoonyoung Chung and Dae-Seung Cho

(1997년 11월 24일 접수 ; 1998년 2월 20일 심사완료)

**Key Words** : Acoustic Radiation Power(음향 방사 파워), Sound-field Variables(음장변수), Control System Variables(제어시스템 변수)

## ABSTRACT

If one wants to control the noise from a duct, then one must have sufficient number of sensors and actuators so that the control system is observable and controllable. A number of sensors and actuators for control of radiating noise from a duct have to be incorporated with the number of modes which one wants to control. These considerations motivated the present study that considers a control system which has less microphones and actuators than required. In this work, by theoretical analysis and numerical simulation, the control performance and robust reliability of such a kind of control system is investigated in terms of sound-field variables and control system variables. Then the possibility of implementation of the robust radiation power control system is verified by theoretical analysis and numerical simulation. In addition, the control performance of the control system is verified by experiment.

## 1. 서 론

덕트의 지름이 소음의 파장에 비해서 상대적으로 큰 경우에는 덕트 내부에 고차모드 소음성분들이 전파하게 되며, 이러한 소음성분들이 외부로 방사된다. 이러한 소음을 줄이기 위한 한가지 방법으로 덕

트 내부 고차모드 갯수에 해당하는 마이크로폰과 제어음원을 이용하여 덕트 내부 소음을 모드별로 감지하고 제어하는 방법을 생각할 수 있다<sup>(1,2)</sup>. 이 경우 고차모드 수가 증가할수록 필요한 마이크로폰과 제어음원이 증가하므로 제어기의 구성이 복잡해지고 가격이 증가하는 단점이 있다.

다른 측면에서 생각해보면 제어음원과 마이크로폰의 수를 늘리기 이전에, 주어진 제한된 수의 제어음원과 마이크로폰을 어떠한 위치에 설치하면 가장 효과적으로 음향 방사파워를 제어할 수 있을까 하는 생각을 할 수 있다.

본 연구에서는 덕트 끝단에 발생하는 고차모드 수

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원  
\*\* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과  
\*\*\* 정희원, 현대중공업 선박해양연구소  
\*\*\*\* 정희원, 부산대학교 공과대학 조선해양공학과

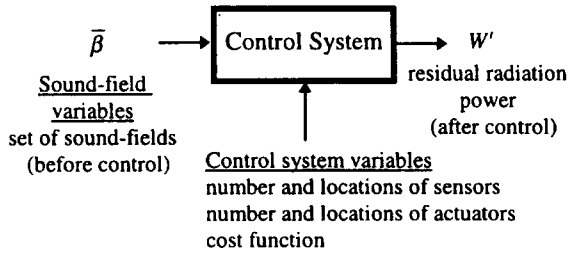


Fig. 1 The relations between sound-field variables, control system variables and residual radiation power at duct termination




보다 적은 수의 제어음원과 마이크로폰을 사용하여 덕트 외부로 방사되는 소음을 줄이기 위한 제어시스템을 구성하였을 경우, 제어시스템의 음향 방사파워 제어성능과 강건 신뢰성(robust reliability)<sup>(3)</sup>을 알아보고자 한다. 이를 위하여 외부 환경에 형성되는 음향 포텐셜에너지(acoustic potential energy)와 비례하는 제어후 음향 방사파워를 음장변수와 제어시스템변수의 합수로 표현하고, 음장변수와 제어시스템변수 변화에 따른 제어시스템의 음향 방사파워 제어성능과 강건 신뢰성을 이론해석 및 모의실험을 통하여 알아보고자 한다(Fig. 1). 또한 제어시스템의 음향 방사파워 제어성능을 실험을 통해 검증하고자 한다.

## 2. 제어후 음향 방사파워

### 2.1 소음원과 제어음원에 의한 덕트 끝단의 음장

Fig. 2에서와 같이 덕트 내부에 존재하는 임의의 소음원에 의해 덕트 끝단( $z=0$ )에 형성되는 음압  $p^p(r, \theta, 0)$ 는 덕트단면의 음장을 표현하는 고유함수

Table 1 Eigenfunction  $\Psi_n(r, \theta)$  and wave number in  $r$  direction  $k_m$

$n$	1	2	3
$k_m$	0	$1.84/r_0$	$1.84/r_0$
$\Psi_n(r, \theta)$	 1	 $N_2 J_1(k_2 r) \cos \theta$	 $N_3 J_1(k_3 r) \sin \theta$
$f_{cutoff}$	0 Hz	419 Hz	419 Hz

$r_0$  : Radius of duct (0.24 m).

$N_2, N_3$  : Normalization factor

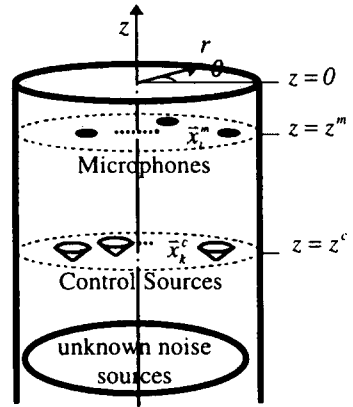


Fig. 2 Schematic diagram of the active noise control system with  $K$  control sources and  $L$  error microphones

$\Psi_n(r, \theta)$ 과 덕트 끝단에서의 모드별 음압크기를 나타내는 계수  $\beta_n$ 을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다(Table 1).

$$p^p(r, \theta, 0) = \sum_{n=1}^N \beta_n \Psi_n(r, \theta) \quad (1)$$

이때 고차모드의 갯수  $N$ 은 덕트의 반경( $r_0$ )과 소음원의 파수  $k$ 에 의해 결정되며<sup>(4)</sup>,  $p^p(r, \theta, 0)$ 를 행렬형태로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p^p(r, \theta, 0) = \overline{\Psi} \overline{\beta} \quad (2a)$$

$$\overline{\Psi} = \{\psi_1(r, \theta), \psi_2(r, \theta), \dots, \psi_N(r, \theta)\} \quad (2b)$$

$$\overline{\beta} = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N\}^T \quad (2c)$$

Fig. 2에서와 같이  $z$ 의 음의 방향으로 무반사조건을 갖는 덕트 내부의  $\vec{x}_k^c = (r_k^c, \theta_k^c, z^c)$ 에 위치한  $K$ 개의 제어음원에 의한 덕트 끝단의 음압  $p^c(r, \theta, 0)$ 는

$$p^c(r, \theta, 0) = \sum_{n=1}^N \left( \psi_n(r, \theta) \sum_{k=1}^K \left( \frac{\rho \omega}{2A k_{zn}} (1 + R_n) e^{j k_{zn} z^c} \psi_n(r_k^c, \theta_k^c) q_k^* \right) \right) \quad (3)$$

로 표현할 수 있다<sup>(5)</sup>. 이때  $\rho$ 는 매질의 밀도를,  $\omega$ 는 주파수를,  $A$ 는 덕트의 단면적을 나타낸다.  $R_n$ 은 덕트 끝단에서의 모드별 음압반사계수<sup>(5)</sup>를 나타내며,  $k_{zn}$ 은 모드별  $z$ 방향의 파수를 나타낸다.  $z = z^c$ 는 제어음원이 위치한 평면을 나타내며, 위 첨자 '\*'는 공액복소수임을 나타낸다.  $q_k$ 는  $k$ 번째 제어음원의 체적속도를 나타낸다.

$p^c(r, \theta, 0)$ 를 행렬형태로 표현하면 다음과 같다.

$$p^c(r, \theta, 0) = \bar{\psi} \mathbf{T}^c \Psi^c \bar{q} \quad (4a)$$

$$\bar{q} = \{q_1, q_2, \dots, q_K\}^T \quad (4b)$$

$$\Psi^c = \begin{bmatrix} \psi_1(r_1^c, \theta_1^c)^* & \dots & \psi_1(r_K^c, \theta_K^c)^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_N(r_1^c, \theta_1^c)^* & \dots & \psi_N(r_K^c, \theta_K^c)^* \end{bmatrix} \quad (4c)$$

$$\mathbf{T}^c = \begin{bmatrix} T_{11}^c & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & T_{NN}^c \end{bmatrix} \quad (4d)$$

$$T_{nn}^c = \frac{\rho\omega}{2Ak_{zn}} (1 + R_n) e^{jk_{zn}z^c}, \quad (n=1 \sim N) \quad (4e)$$

소음원과 제어음원에 의해서 덕트 끝단에 형성되는 음압  $p^c(r, \theta, 0)$ 는 식 (2a)와 식 (4a)로부터

$$p^c(r, \theta, 0) = \bar{\psi}(\bar{\beta} + \mathbf{T}^c \Psi^c \bar{q}) \quad (5)$$

로 표현할 수 있다.

## 2.2 가격함수 및 제어후 음장

능동소음제어를 위하여 여러가지의 가격함수, 예를 들면 음향 포텐셜에너지, 음향 인텐시티 등을 사용할 수 있을 것이다. 이러한 가격함수 중 음향 포텐셜에너지는 비교적 용이하게 측정이 가능하며 상대적으로 적은 수의 마이크로폰으로 측정할 수 있다. 본 연구에서는 적은 수의 마이크로폰을 이용하여 소음을 줄이는 것이 주 목적의 하나이므로 가격함수로서, 오차마이크로폰 위치에서의 음향 포텐셜 에너지를 사용하고자 하며, Filtered-x LMS 알고리즘을 이용하여 가격함수를 최소화하는 제어방법을 사용하고자 한다.

Fig. 2에서와 같이  $\vec{x}_i^m = (r_i^m, \theta_i^m, z^m)$ 에 위치한  $L$ 개의 오차마이크로폰에서 측정된 음압벡터  $\bar{p}^m$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{p}^m = \Psi^m \mathbf{T}^m (\bar{\beta} + \mathbf{T}^c \Psi^c \bar{q}) \quad (6a)$$

$$\Psi^m = \begin{bmatrix} \psi_1(r_1^m, \theta_1^m) & \dots & \psi_N(r_1^m, \theta_1^m) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_1(r_L^m, \theta_L^m) & \dots & \psi_N(r_L^m, \theta_L^m) \end{bmatrix} \quad (6b)$$

$$\mathbf{T}^m = \begin{bmatrix} T_{11}^m & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & T_{NN}^m \end{bmatrix} \quad (6c)$$

$$T_{nn}^m = \frac{1}{1 + R_n} e^{-jk_{zn}z^m} + \frac{R_n}{1 + R_n} e^{jk_{zn}z^m}, \quad (n=1 \sim N) \quad (6d)$$

가격함수  $J$ 는 식 (7)로 표현할 수 있으며,  $J$ 를 최소화하는  $\bar{q}$ 는 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$J = \bar{p}^m H \bar{p}^m \quad (7)$$

$$\bar{q} = -(\Psi^m \mathbf{T}^m \mathbf{T}^c \Psi^c)^+ \Psi^m \mathbf{T}^m \bar{\beta} \quad (8)$$

이때 위 첨자 '+'는 Moore-Penrose inverse를 나타낸다. 식 (8)을 식 (5)에 대입하면  $p^c(r, \theta, 0)$ 는 식 (9)로 표현할 수 있으며,  $\mathbf{I}$ 는  $(N \times N)$  단위 행렬을 나타낸다.

$$p^c(r, \theta, 0) = \bar{\psi}(\mathbf{I} - \mathbf{T}^c \Psi^c (\Psi^m \mathbf{T}^m \mathbf{T}^c \Psi^c)^+ \Psi^m \mathbf{T}^m) \bar{\beta} \quad (9)$$

이때  $\mathbf{T}^c \Psi^c (\Psi^m \mathbf{T}^m \mathbf{T}^c \Psi^c)^+ \Psi^m \mathbf{T}^m$ 을 식 (10)으로 정의하면  $p^c(r, \theta, 0)$ 은 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{C} = \mathbf{T}^c \Psi^c (\Psi^m \mathbf{T}^m \mathbf{T}^c \Psi^c)^+ \Psi^m \mathbf{T}^m \quad (10)$$

$$p^c(r, \theta, 0) = \bar{\psi}(\mathbf{I} - \mathbf{C}) \bar{\beta} \quad (11)$$

## 2.3 제어후 덕트 끝단의 음향 방사파워

소음원과 제어음원에 의해 덕트 외부로 방사되는 음향 방사파워  $W^c$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W^c = \int_A \frac{1}{2} \text{Re}\{p^c(r, \theta, 0) \bar{u}^c(r, \theta, 0)\} \cdot \bar{n}_A dA \quad (12)$$

이때  $\bar{u}^c(r, \theta, 0)$ 는 덕트 끝단에서의 입자속도를,  $\bar{n}_A$ 는  $A$ 와 직교하는 단위벡터를 나타낸다.

식 (12)에 식 (11)을 대입하고 덕트단면의 고유함수가  $\int_A \bar{\psi}^H \bar{\psi} dA = \mathbf{I}$ 를 만족함을 이용하면,  $W^c$ 는 식 (13)으로 표현할 수 있다. 이때 행렬  $\mathbf{A}$ 는 덕트 끝단의 방사임피던스 ( $Z_n$ )들로 구성된  $(N \times N)$  대각행렬이다.

$$W^c = \bar{\beta}^H (\mathbf{I} - \mathbf{C})^H \mathbf{A} (\mathbf{I} - \mathbf{C}) \bar{\beta} \quad (13)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & A_{NN} \end{bmatrix}, \quad A_{nn} = \text{Re}\left\{\frac{1}{2Z_n}\right\} \quad (14)$$

식 (13)을 보면  $W^c$ 는 음장변수 ( $\bar{\beta}$ )와, 제어시스템 변수의 함수인 행렬  $\mathbf{C}$ 에 의해 결정됨을 알 수 있다.

## 3. 제어시스템의 강건 신뢰성

### 3.1. 소음원 집합의 모델링

임의의 소음원들에 의해 덕트 끝단에 발생하는 음향 방사파워를  $W^p$ 라 하면, 식 (13)으로부터  $W^p$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W^p = \bar{\beta}^H \mathbf{A} \bar{\beta} \quad (15)$$

$N$ 보다 적은 수의 제어음원과 오차마이크로폰으로 구성된 제어시스템을 실제로 사용하기 위해서는 소음원 음장에 관계없이  $W'$ 를 항상  $W^p$  이하로 줄일 수 있는 제어시스템이 바람직하며, 본 연구에서는 이를 강건한 제어시스템이라고 정의하고자 한다. 본 연구에서는 구성된 제어시스템의 강건 신뢰성을 검증하기 위해 필요한 음장변수들의 집합으로서, 불확실도(uncertainty) 개념<sup>(3)</sup>을 이용하여, 덕트 끝단에 발생하는 음향 방사파워가  $W^p$ 인 모든 소음원 음장들로 구성된 집합  $S(W^p)$ 를 다음과 같이 정의하고자 한다 (Fig. 3).

$$S(W^p) = \{ p^p(r, \theta, 0) = \bar{\psi} \bar{\beta} \mid \bar{\beta}^H \mathbf{A} \bar{\beta} = W^p \} \quad (16)$$

### 3.2 강건 신뢰성과 강건한 제어시스템의 조건

$S(W^p)$ 에 속한 임의의 음장들을 제어할때 발생할 수 있는 가장 큰 음향 방사파워  $\hat{W}'$ 은

$$\hat{W}' = \max_{\bar{\beta} \in S(W^p)} W' \quad (17)$$

와 같이 쓸 수 있으며, 식 (13)의  $(\mathbf{I}-\mathbf{C})^H \mathbf{A} (\mathbf{I}-\mathbf{C})$ 를  $\mathbf{V}$ 라 정의하면

$$\hat{W}' = \max \bar{\beta}^H \mathbf{V} \bar{\beta}, \text{ constraint } \bar{\beta}^H \mathbf{A} \bar{\beta} = W^p \quad (18)$$

와 같이 바꾸어 표현할 수 있다.

식 (18)은 고유치문제로서 이를 풀면 최대음향 방사파워를 식 (19)와 같이 구할 수 있다<sup>(3)</sup>.

$$\hat{W}' = \lambda_{\max} W^p \quad (19)$$

이때  $\lambda_{\max}$ 는  $\mathbf{A}^{-\frac{1}{2}H} \mathbf{V} \mathbf{A}^{\frac{1}{2}}$  행렬의 가장 큰 고유치를

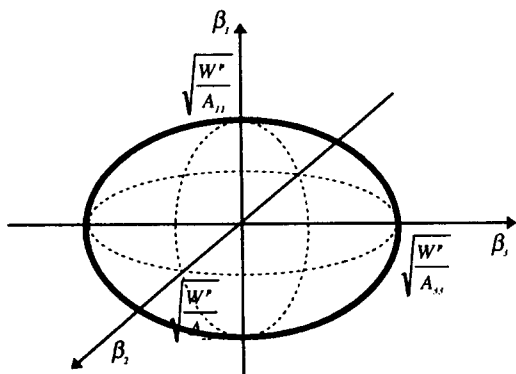


Fig. 3 Example of the set of sound-field variables  $S(W^p)$

Table 2 Eigenvalues and eigenvectors of  $\mathbf{A}^{-\frac{1}{2}H} \mathbf{V} \mathbf{A}^{\frac{1}{2}}$

$n$	1	2 ~ $N-1$	$N$
$\lambda_n$	0	1	$\left  \frac{1}{\bar{e}_1^H \bar{e}^m} \right ^2$
$\bar{e}_n$	$\begin{bmatrix} \mathbf{A}^{\frac{1}{2}} \mathbf{T}^c \Psi^c \\ \mathbf{A}^{\frac{1}{2}} \mathbf{T}^c \Psi^c \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} \bar{e}^m H \bar{e}_n &= 0 \\ \bar{e}_1 H \bar{e}_n &= 0 \\ \bar{e}_N H \bar{e}_n &= 0 \end{aligned}$	$\begin{aligned} \bar{e}_n H \bar{e}_n &= 0 \\ (n=1 \sim N-1) \end{aligned}$

나타낸다. 식 (19)를 보면  $\hat{W}'$ 은  $W^p$ 와  $\lambda_{\max}$ 에 의해 결정됨을 알 수 있으며,  $S(W^p)$ 에 속한 모든  $\bar{\beta}$ 에 대해서 음향 방사파워를 제어전보다 작게 제어하기 위해서는  $\lambda_{\max}$ 가 1이하인 제어시스템을 설계해야 함을 알 수 있다.

Table 2는  $K=L=1$ 인 경우, 행렬  $\mathbf{A}^{-\frac{1}{2}H} \mathbf{V} \mathbf{A}^{\frac{1}{2}}$ 의 고유치  $\lambda_n$ 과 정규화된 고유벡터  $\bar{e}_n$ 을 나타내고 있다. Table 2를 보면  $\lambda_{\max}$ 는  $\bar{e}_1$ 과  $\bar{e}^m$ 의 함수로 표현됨을 알 수 있으며  $\bar{e}_1$ 과  $\bar{e}^m$ 의 차이가 클수록  $\lambda_{\max}$ 가 증가함을 알 수 있다. 또한  $\lambda_{\max}$ 의 최소값은 1이며  $\bar{e}_1$ 과  $\bar{e}^m$ 이 일치하는 경우임을 알 수 있다(Fig. 4).

$$\bar{e}^m = (\Psi^m \mathbf{T}^m \mathbf{A}^{\frac{1}{2}})^H / \left| (\Psi^m \mathbf{T}^m \mathbf{A}^{\frac{1}{2}})^H \right|$$

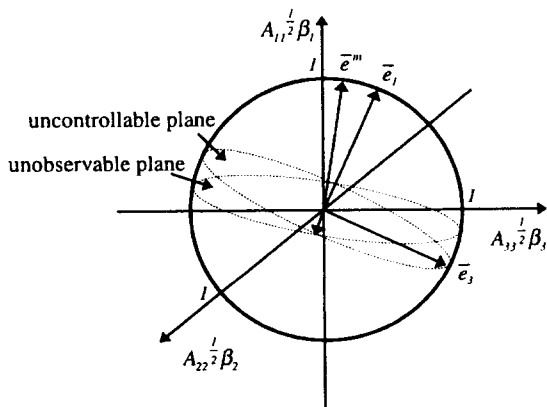


Fig. 4 Normalized eigenvectors ( $\bar{e}_n$ ) of  $\mathbf{A}^{-\frac{1}{2}H} \mathbf{V} \mathbf{A}^{\frac{1}{2}}$  and  $\bar{e}^m$  ( $K=L=1, N=3$ , see Table 2)

따라서 강건한 음향 방사파워 제어 ( $W' \leq W^p$ )를 하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족시키는 제어 시스템의 구성이 필요함을 알 수 있다.

$$AT^c \Psi^c = \alpha (\Psi^m T^m)^H \quad (20)$$

여기서  $\alpha$ 는 복소상수(complex constant)이다. 식 (20)은 제어음원을 이용하여 제어 가능한 성분만을 오차마이크로폰에서 측정하도록 하며 제어할 수 없는 성분은 측정되지 않도록  $\bar{e}_1$ 과  $\bar{e}^m$ 을 결정함을 의미한다.

### 4. 모의실험 및 실험

#### 4.1 강건한 음향 방사파워 제어시스템의 구성

제어시스템의 강건 신뢰성과 음향 방사파워 제어 성능을 검증하기 위한 실험장치로서, 실험이 용이하도록, 발생하는 모드가 3개이며, 이를 1개의 제어음원과 1개의 오차마이크로폰을 이용하여 오차마이크로폰에서의 음향 포텐셜에너지를 최소화하도록 제어하는 경우를 고려한다.

$K=L=1, N=3$ 인 경우, 식 (20)은 식 (21)로 바꾸어 표현할 수 있다(Table 1).

$$\frac{A_{22} T_{22}^c}{A_{11} T_{11}^c} J_1(k_{r2} r_1^c) = \frac{T_{22}^m}{T_{11}^m} J_1(k_{r2} r_1^m), \quad \theta_1^c = \theta_1^m \quad (21)$$

예를 들어 소음원 주파수가 460 Hz인 경우, 제어음원의 위치를  $\vec{x}^c = (0.5r_0, 0\pi, -1.3m)$ 로 정하면, 이때 강건한 제어시스템을 구성하기 위한 오차마이크로폰의 위치는  $\vec{x}_1^m = (0.28r_0, 0\pi, -0.15m)$ 이 된다. Fig. 5는 이러한 제어시스템의 실험장치도를 나타내고 있다.

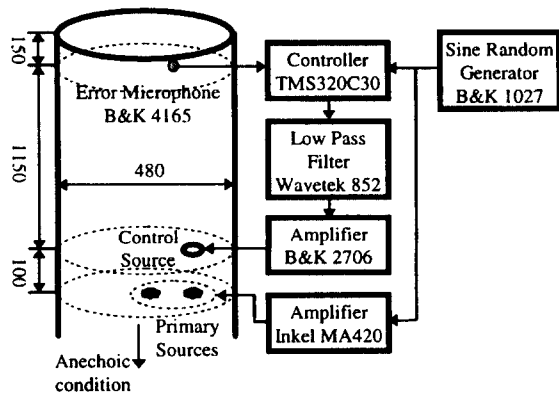


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup(unit : mm)

#### 4.2 모의실험 및 실험 결과

Fig. 6은 제어음원과 오차마이크로폰의 위치가 변화하는 경우, 최대음향 방사파워  $\hat{W}'$ 을  $W^p$ 로 정규화한 값을 데시벨(dB) 단위로 나타낸 것으로, 제어음원과 오차 마이크로폰의 위치변화에 따른 제어시스템의 강건 신뢰성을 보여주고 있다.

Fig. 6을 관찰해 보면 식 (21)을 만족하는 제어시스템은  $\hat{W}' / W^p$ 이 1이며 강건한 제어시스템임을 확인할 수 있다. 또한 이러한 조건에서 벗어날수록  $\hat{W}' / W^p$ 이 커지며  $\hat{W}'$ 가  $W^p$ 보다 커질 수 있는 가능성이 있음을 알 수 있다.

구성된 제어시스템(Fig. 5)의 소음원 음장변화에 따른 제어성능을 알아보기 위하여, 덕트내의 두 지

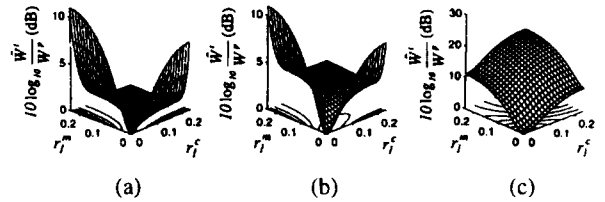


Fig. 6 Robust reliability of control system as a function of location of error microphone and control source ( $f=460$  Hz,  $z^c = -1.3$  m,  $\theta_1^c = 0\pi$ ,  $z^m = -0.15$  m) (a)  $\hat{W}' / W^p (\theta_1^m = 0\pi)$  (b)  $\hat{W}' / W^p (\theta_1^m = 0.125\pi)$  (c)  $\hat{W}' / W^p (\theta_1^m = 0.25\pi)$

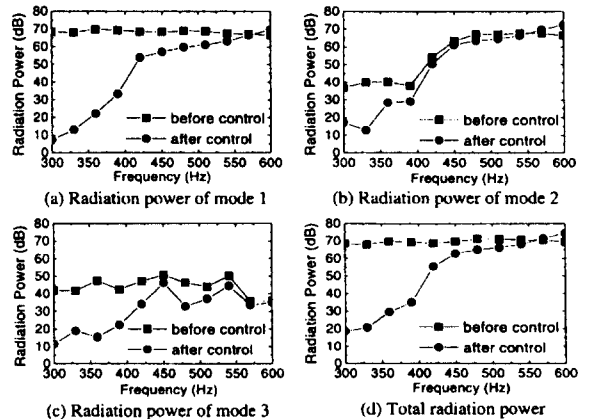


Fig. 7 Control performance of the control system when two primary sources at  $\vec{x}_1^p, \vec{x}_2^p$  are operated with equal volume velocity

점  $\bar{x}_1^p = (0r_0, 0\pi, -1.4\text{ m})$ ,  $\bar{x}_2^p = (0.5r_0, 0\pi, -1.4\text{ m})$  에 설치된 소음원들의 체적속도를 변화시키면서 실험을 수행하였다. Fig. 7은  $\bar{x}_1^p$ ,  $\bar{x}_2^p$  에 위치한 두개의 소음원을 단일 주파수 성분의 동일한 체적속도로 구동하는 상황에서, 주파수를 변화시키면서, 오차마이크로폰 위치에서의 음향 포텐셜에너지를 제어할 경우 음향 방사파워를 구한 실험결과이다.

Fig. 7을 관찰해 보면 고차모드 성분이 발생하는 차단주파수(419 Hz) 이상의 영역에서 음향 방사파워를 제어할 수 있음을 관찰할 수 있다. 또한 차단주파수 이하의 주파수영역에서는 덕트 내부에 평면파성분만이 존재하므로 소음원의 위치에 관계없이 비교적 좋은 음향 방사파워 제어성능을 보이고 있음을 관찰할 수 있다.

강건한 제어시스템의 음향 방사파워 제어성능을 식 (21)을 만족하지 않는 제어시스템과 비교하기 위하여 오차마이크로폰의 위치를 변화시키면서 실험을 통해 음향 방사파워를 구하여 보았다. Table 3은 460 Hz에서의 실험결과를 정리한 것으로 제어에 의한 음향 방사파워 감소량을 나타내고 있다.

Table 3을 보면 강건한 제어시스템(case (1))의 음향 방사파워 제어성능이, 다른 경우(case(2)~(8))보다 상대적으로 좋음을 확인할 수 있다. 또한 강건한 제어시스템 조건을 만족시키지 않는 제어시스템의 경우(case(2)~(8)) 음향 방사파워가 오히려 제어전보다 증가하는 경우 ( $W^t > W^p$ )도 발생할 수 있음을 관찰할 수 있다. 이는 강건한 제어시스템 조건을 만족하지 않는 경우, 오차마이크로폰 위치에서의 음향 포텐셜에너지는 제어되지만 전체적인 음향

**Table 3** Radiation power reductions of robust control system and non-robust control systems ( $f = 460\text{Hz}$ ,  $\bar{x}_1^p = (0.5r_0, 0\pi, -1.3\text{m})$ )

Error sources microphone( $\bar{x}_1^m$ )	A	B	C
(1) $(0.28r_0, 0\pi, -0.15\text{m})$	10.4 dB	5.8 dB	14.3 dB
(2) $(0r_0, 0\pi, -0.15\text{m})$	10.1 dB	5.2 dB	14.0 dB
(3) $(0.5r_0, 0\pi, -0.15\text{m})$	8.9 dB	4.3 dB	12.8 dB
(4) $(1.0r_0, 0\pi, -0.15\text{m})$	8.3 dB	3.6 dB	12.1 dB
(5) $(0.5r_0, 0.5\pi, -0.15\text{m})$	6.2 dB	1.2 dB	12.7 dB
(6) $(1.0r_0, 0.5\pi, -0.15\text{m})$	3.4 dB	-1.9 dB	9.8 dB
(7) $(0.5r_0, \pi, -0.15\text{m})$	-3.2 dB	-7.8 dB	1.4 dB
(8) $(1.0r_0, \pi, -0.15\text{m})$	-0.5 dB	-5.1 dB	4.0 dB

A : Two primary source at  $\bar{x}_1^p, \bar{x}_2^p$  are operated

B : Primary source at  $\bar{x}_1^p = (0r_0, 0\pi, -1.4\text{m})$  is operated

C : Primary source at  $\bar{x}_2^p = (0.5r_0, 0\pi, -1.4\text{m})$  is operated

방사파워는 증가할 수 있기 때문이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 덕트 내부를 전파하는 고차모드 수보다 적은 수의 제어음원과 오차마이크로폰을 사용하여 오차마이크로폰 위치에서의 음향 포텐셜에너지를 최소화하는 제어시스템을 구성한 경우, 제어시스템의 음향 방사파워 제어성능과 강건 신뢰성에 대한 연구를 수행하였다.

이를 위하여 제어후 음향 방사파워를 음장변수와 제어시스템변수들의 함수로 표현하였다. 또한 음장변수와 제어시스템변수 변화에 따른 제어시스템의 제어성능과 강건 신뢰성을 이론해석과 모의실험을 통하여 알아보았으며, 임의의 소음원 음장에 대해 제어후 음향 방사파워를 항상 제어전 이하로 제어할 수 있는 강건한 제어시스템의 구성이 가능함을 확인하였다.

실험에서는 음장변수를 변화시키면서 강건한 제어시스템의 음향 방사파워 제어성능을 살펴보았으며, 덕트 내부에 고차모드 성분이 존재하는 경우에도 한개의 제어음원과 오차마이크로폰을 사용한 제어시스템을 이용하여 음향 방사파워를 제어할 수 있음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) I.-S. Kim, and K.-J. Kim, 1994, Active Control of Cross Mode Waves in Rectangular Ducts, Mechanical System and Signal Processing Vol. 8 (1), pp. 93~108.
- (2) T. Morishita, C. Yamaguchi, T. Tanaka, and M. Taki, 1994, Active Control of Noise including Higher-order Acoustic Modes Propagating in a Duct, Proceedings of Inter-Noise 94, Yokohama, Japan, pp. 1373~1376.
- (3) Yakov Ben-Haim, 1996, Robust Reliability in the Mechanical Sciences, Springer-Verlag, Chapter 3.
- (4) M. L. Munjal, 1987, Acoustics of Ducts and Mufflers, John Wiley & Sons, pp. 9~12.
- (5) S. W. Kang, and Yang-Hann Kim, 1995, Green Function Analysis of the Acoustic Field in a Finite Three-Port Circular Chamber, Journal of Sound and Vibration Vol. 181 (5), pp.765~780.