

<논 문>

고차모드 수보다 적은 수의 제어음원과 센서를 이용한 덕트 방사소음 제어시스템의 제어성능

The Control Performance of the Active Control System with Insufficient Number of Control Sources and Sensors for the Reduction of Duct Noise

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

Doo-Byung Yoon, Yang-Hann Kim, Kyoony Y. Chung and Dae-Seung Cho

(1998년 3월 16일 접수 : 1998년 6월 11일 심사완료)

Key Words : Sound-Field Variable(음장 변수), Control System Variable(제어 시스템 변수), Uncertainty(불확실도), Robust Control System(강건한 제어 시스템)

ABSTRACT

When the lateral dimensions of a duct is larger than or comparable to the wavelengths of interest, higher order modes propagate in the duct. These modes will be radiated and produce noise. A number of sensors and actuators for control of radiating noise from the 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 control sources than required. In this work, by theoretical analysis, the control performance of such a kind of system is investigated in terms of sound-field variables and control system variables. The possible maximum and minimum value, mean and variance of residual acoustic potential energy are derived for the set of primary sound fields.

1. 서 론

덕트의 지름이 소음의 파장에 비해서 상대적으로 큰 경우에는 덕트 내부에 고차모드 소음성분들이 전파되며, 이러한 소음성분들이 덕트 외부로 방사된다. 이러한 소음을 줄이기 위한 방법으로 덕트 내부 고

차모드 개수에 해당하는 제어음원과 센서를 이용하여 덕트 내부 소음을 모드별로 감지하고 제어하는 방법을 생각할 수 있다^(1,2). 이 경우 고차모드의 수가 증가할수록 필요한 제어음원과 센서의 수가 증가하게 된다. 결국은 많은 측정과 제어 노력이 고차모드의 증가에 따라 필요하게 된다.

본 논문에서는 고차모드 수보다 적은 수의 제어음원과 센서로 구성된 제어시스템을 이용하여 덕트 방사소음을 제어할 경우의 제어성능에 대하여 다루고 있다.

참고문헌 (3)에서는 이러한 제어를 할 경우, 제어 후 음향 방사 파워를 음장 변수와 제어시스템 변수

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

*** 정회원, 현대중공업 선박해양연구소

**** 정회원, 부산대학교 조선해양공학과

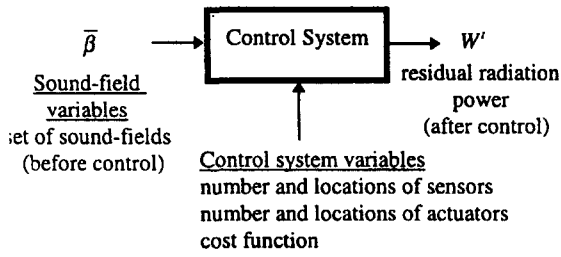


Fig. 1 The relations between sound-field variables, control system variables and residual radiation power at duct termination

의 함수로 표현하고, 음장 변수와 제어시스템 변수 변화에 따른 제어 후 음향 방사 파워에 대하여 검토하고 제어가능성을 증명하고 있다 (Fig. 1).

본 연구에서는 제어 후 음향 방사 파워를 표현하는 행렬에 대한 고유치해석을 통하여, 덕트 내부에 발생하는 고차모드의 수보다 적은 수의 제어음원과 마이크로폰을 사용하여 덕트 외부로 방사되는 소음을 줄이기 위한 제어시스템을 구성하였을 경우, 제어시스템의 음향 방사 파워 제어성능(제어 후 음향 방사 파워의 최대, 최소값, 평균, 분산)을 구하고 이의 물리적인 의미에 대해 알아보하고자 한다.

2. 제어 후 음향 방사 파워

Fig. 2에서와 같이 덕트 내부에 존재하는 임의의 소음원에 의해 덕트 끝단 ($z = 0$)에 형성되는 소음원 음장을 $\bar{x}_k = (r_k^c, \theta_k^c, z^c)$ 에 위치한 K 개의 제어음원과 $\bar{x}_l^m = (r_l^m, \theta_l^m, z^m)$ 에 위치한 L 개의 오차 마이크로폰을 사용하여, Filtered-x LMS알고리즘을 이용, 오차 마이크로폰 위치에서의 음향 포텐셜 에너지를 최소화하는 제어시스템을 구성한 경우, 덕트 외부로 방사되는 음향 방사 파워 W' 는 다음과 같이 표현할 수 있다⁽³⁾.

$$W' = \bar{\beta}^H (I - C)^H A (I - C) \bar{\beta} \quad (1)$$

이때 $\bar{\beta}$ 는 덕트 끝단에서의 소음원에 의한 모드별 음압크기 (β_n)들로 이루어진 $(N \times 1)$ 행렬이며, A 는 덕트 끝단의 방사임피던스 (Z_n)⁽⁴⁾들로 구성된 $(N \times N)$ 대각행렬이다. C 는 식 (4)로 정의되며 제어음원과 오차 마이크로폰의 위치 및 개수의 함수이다.

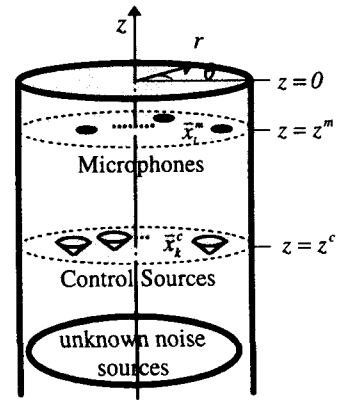


Fig. 2 Schematic diagram of the active noise control system with K control sources and L error microphones

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

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & A_{NN} \end{bmatrix}, \quad A_{nn} = \text{Re} \left\{ \frac{1}{2Z_n} \right\} \quad (3)$$

$$C = T^c \Psi^c (\Psi^m T^m T^c \Psi^c)^+ \Psi^m T^m \quad (4)$$

$$\Psi^c = \begin{bmatrix} \psi_1(r_1^c, \theta_1^c)^* & \dots & \psi_1(r_K^c, \theta_K^c)^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_N(r_1^c, \theta_1^c)^* & \dots & \psi_N(r_K^c, \theta_K^c)^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

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

$$T^c = \begin{bmatrix} T_{11}^c & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & T_{NN}^c \end{bmatrix}, \quad T_{nn}^c = \frac{\rho \omega}{2A k_{zn}} (1 + R_n) e^{jk_{zn} z^c} \quad (7)$$

$$T^m = \begin{bmatrix} T_{11}^m & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & T_{NN}^m \end{bmatrix}, \quad T_{nn}^m = \frac{1}{1 + R_n} e^{-jk_{zn} z^m} + \frac{R_n}{1 + R_n} e^{jk_{zn} z^m} \quad (8)$$

이때 $\psi_n(r, \theta)$ 는 덕트 단면의 음장을 표현하는 각 모드에 해당하는 고유함수를 나타내며 ρ 는 매질의 밀도를, ω 는 주파수를, A 는 덕트의 단면적을 나타낸다. k_{zn} 은 모드별 z 방향 파수를 나타내며, R_n 은 덕트 끝단에서의 모드별 음압반사계수⁽⁴⁾를 나타낸

다. $z = z^c$ 는 제어음원이 위치한 평면을 나타내며, $z = z^m$ 은 오차 마이크로폰이 위치한 평면을 나타낸다. 또한 위 첨자 '*'는 공백복수임을, '+'는 Moore-Penrose inverse⁽⁵⁾를 나타낸다.

식 (1)을 관찰해 보면 제어 후 음향 방사 파워는 음장 변수 ($\bar{\beta}$)와, 제어시스템 변수들의 함수인 행렬 C에 의해 결정됨을 알 수 있다.

3. 제어시스템의 제어성능

3.1 소음원 음장 집합의 모델링

덕트 내부의 소음원들에 의해 덕트 끝단에 발생하는 음향 방사 파워(W^p)는 다음과 같이 표현할 수 있다⁽³⁾.

$$W^p = \bar{\beta}^H A \bar{\beta} \tag{9}$$

본 연구에서는 구성된 제어시스템의 제어성능을 알아보기 위해 필요한 음장 변수들의 집합으로서, 불확실도(uncertainty) 개념⁽⁶⁾을 이용하여, 덕트 끝단에 발생하는 음향 방사 파워가 W^p 인 모든 소음원 음장들을 원소로 하는 집합 $S(W^p)$ 를 다음과 같이 정의한다⁽³⁾(Fig. 3).

$$S(W^p) = \{ p^p(r, \theta, 0) = \bar{\nu} \bar{\beta} \mid \bar{\beta}^H A \bar{\beta} = W^p \} \tag{10}$$

3.2 제어 후 음향 방사 파워

$S(W^p)$ 에 속한 임의의 $\bar{\beta}$ 에 대한 제어 후 음향 방사 파워는 식 (11)로 표현되며, 이때 $(I-C)^H A (I-C)$ 를 V라 하고 제한조건을 Lagrange multiplier(λ)를 이용하여 표현하면 식 (12)로 표현할 수 있다.

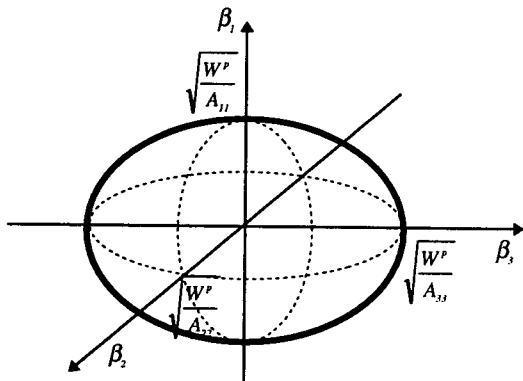


Fig. 3 Example of the set of sound-field variables $S(W^p)$

$$W^t = \bar{\beta}^H (I-C)^H A (I-C) \bar{\beta}, \text{ constraint } \bar{\beta}^H A \bar{\beta} = W^p \tag{11}$$

$$W^t = \bar{\beta}^H V \bar{\beta} + \lambda (W^p - \bar{\beta}^H A \bar{\beta}) \tag{12}$$

$\bar{\beta}$ 의 변화에 따른 W^t 의 최대, 최소값을 구하기 위해, $\frac{\partial W^t}{\partial \bar{\beta}} = 0, \frac{\partial W^t}{\partial \lambda} = 0$ 을 취하고, $\bar{\beta} = a^{-\frac{1}{2}} \bar{\beta}$ 라 하면 식 (12)로부터 다음과 같은 고유치 문제를 구할 수 있다.

$$A^{-\frac{1}{2}H} V A^{-\frac{1}{2}} \bar{\beta}'_n = \lambda_n \bar{\beta}'_n \tag{13a}$$

$$\bar{\beta}'_n{}^H \bar{\beta}'_n = W^p \tag{13b}$$

이때 $A^{-\frac{1}{2}H} V A^{-\frac{1}{2}}$ 은 $(N \times N)$ 행렬이므로 N 개의 고유치(λ_n)와 고유벡터($\bar{\beta}'_n$)를 가지며 각 고유치와 고유벡터는 식 (13)을 만족한다.

$\bar{\beta}'$ 을 $A^{-\frac{1}{2}H} V A^{-\frac{1}{2}}$ 의 고유벡터 $\bar{\beta}'_n$ 을 이용하여 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{\beta}' = \sum_{n=1}^N a_n \bar{\beta}'_n, \text{ constraint } \sum_{n=1}^N |a_n|^2 = 1 \tag{14}$$

$\bar{\beta} = A^{-\frac{1}{2}} \bar{\beta}'$ 과 식 (14)를 식 (12)에 대입하고 식 (13)을 이용하면, 제어 후 음향 방사 파워는 식 (15)로 표현할 수 있다. 이때 편의상 고유치의 크기가 작은 순서대로 번호 ($\lambda_1 < \dots < \lambda_N$)를 붙이기로 한다.

$$W^t = (|a_1|^2 \lambda_1 + |a_2|^2 \lambda_2 + \dots + |a_N|^2 \lambda_N) W^p \tag{15}$$

식 (15)를 보면 음장 변수($\bar{\beta}'$)에 의해 결정되는 a_n 과 제어시스템 변수에 의해 결정되는 λ_n 에 의해 제어 후 음향 방사 파워 W^t 가 결정됨을 알 수 있다. 또한 λ_n 은 각 고유벡터($\bar{\beta}'_n$) 방향에서의 제어 전과 제어 후의 음향 방사 파워의 비를 나타내는 무차원수임을 알 수 있다.

따라서 $S(W^p)$ 에 속한 음장 제어시 발생 가능한 최대 및 최소 음향 방사 파워는 각각 식 (16a)와 식(16b)로 표현할 수 있으며, $S(W^p)$ 에 속한 음장 제어시 발생가능한 W^t 는 식 (16 c)를 만족한다.⁽⁷⁾

$$W^t_{\min} = \lambda_1 W^p, (|a_1|^2 = 1) \tag{16a}$$

$$W'_{\max} = \lambda_N W^p, \quad (|a_N|^2 = 1) \quad (16b)$$

$$\lambda_1 W^p \leq W' \leq \lambda_N W^p \quad (16c)$$

식 (16b)를 보면 $S(W^p)$ 에 속한 모든 $\bar{\beta}$ 에 대해서 W' 를 W^p 이하로 제어하려면 λ_N 이 1이하인 제어시스템을 설계해야 함을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 제어시스템을 강건한 제어시스템이라고 정의하고자 한다⁽³⁾.

$S(W^p)$ 에 속한 모든 $\bar{\beta}$ 에 대한 제어 후 음향 방사 파워의 평균과 분산은 각각 식 (17), 식 (18)로 구할 수 있다.

$$W'_{\text{mean}} = \frac{W^p}{N} \sum_{n=1}^N \lambda_n \quad (17)$$

$$\sigma^2(W') = \left[\frac{2(N-1)}{N^2(N+2)} \sum_{n=1}^N \lambda_n^2 - \frac{2}{N^2(N+2)} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1, m \neq n}^N \lambda_n \lambda_m W^p \right] \quad (18)$$

식 (17), 식 (18)을 보면 W'_{mean} 과 $\sigma^2(W')$ 는 λ_n 과 N 에 의해 결정됨을 알 수 있다.

3.3 덕트 방사소음 제어시스템의 제어성능

전절에서 제어시스템의 제어성능을 대표하는 제어 후 음향 방사 파워의 최대 및 최소값, 평균 및 분산은 $A^{-\frac{1}{2}H} V A^{-\frac{1}{2}}$ 의 고유치와 고유벡터에 의해서 결정됨을 알 수 있었다. 이 절에서는 단순화된 경우로써 덕트 내부에 3개의 모드가 발생하는 경우, $A^{-\frac{1}{2}H} V A^{-\frac{1}{2}}$ 의 고유치와 고유벡터를 구해보고, 제어시스템의 음향 방사 파워 제어성능에 대해 고찰해보기로 한다.

Table 1과 Fig. 4는 $N=3, K=1$ 인 경우 행렬 $A^{-\frac{1}{2}H} V A^{-\frac{1}{2}}$ 의 고유치(λ_n)와 정규화된 고유벡터(\bar{e}_n)를 나타내고 있다.

$\bar{e}^c (= \bar{e}_1)$ 는 제어음원 위치에 의해 결정되는 단위벡터로서 \bar{x}_1^c 에 위치한 제어음원을 이용하여 음향 방사 파워를 완벽히 제어할 수 있는 $\bar{\beta}' (= A^{\frac{1}{2}} \bar{\beta})$ 의 방향을 나타낸다. 즉, $\bar{\beta}'$ 이 고정된 경우, \bar{e}^c 의 방향을 $\bar{\beta}'$ 과 일치하도록 제어음원의 위치를 결정하

Table 1 Eigenvalues(λ_n) and normalized eigenvectors (\bar{e}_n) of $A^{-\frac{1}{2}H} V A^{-\frac{1}{2}}$ ($N=3, K=1, N \geq L \geq K$)

n	1	2	3
λ_n	0	1	$\left \frac{1}{\bar{e}^{cH} \bar{e}^o} \right ^2$
\bar{e}_n	\bar{e}^c	\bar{e}^o $\bar{e}_2 = 0$ \bar{e}^c $\bar{e}_2 = 0$	\bar{e}_1 $\bar{e}_3 = 0$ \bar{e}_2 $\bar{e}_3 = 0$

$$\bar{e}^o = \frac{1}{\left[(\Psi^m T^m T^c \Psi^c)^H + \Psi^m T^m A^{-\frac{1}{2}} H \right]} \left[(\Psi^m T^m T^c \Psi^c)^H + \Psi^m T^m A^{-\frac{1}{2}} H \right]$$

$$\bar{e}^c = \frac{1}{A^{\frac{1}{2}} T^c \Psi^c} \left[\frac{1}{A^{\frac{1}{2}} T^c \Psi^c} \right]$$

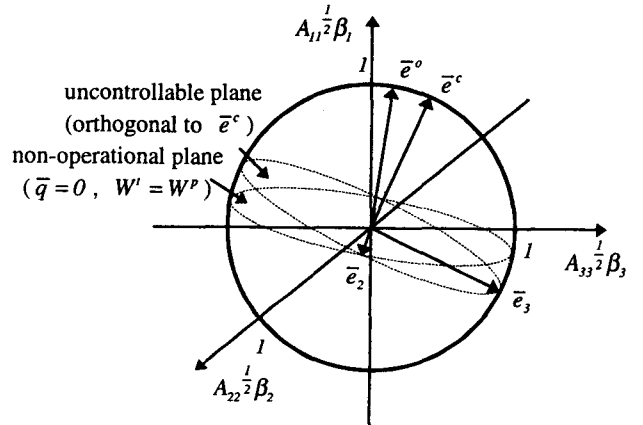


Fig. 4 Normalized eigenvectors \bar{e}_n of matrix $A^{-\frac{1}{2}H} V A^{-\frac{1}{2}}$, \bar{e}^o (operational direction) and \bar{e}^c (controllable direction) ($N=3, K=1, N \geq L \geq K$)

면 W' 를 0으로 만들 수 있다. \bar{e}^o 는 제어음원과 오차 마이크로폰 위치에 의해 결정되며, 제어시스템이 작동하지 않는 $\bar{\beta}'$ 의 방향들로 구성된 평면($\bar{q}=0, W'=W^p$)에 직교하는 단위벡터이다. 따라서 W'_{\max} 는 제어음원이 작동하여 오차 마이크로폰 위치에서의 음향 포텐셜 에너지는 줄이지만 음향 방사 파워는 줄일 수 없는 $\bar{\beta}'$ 의 방향, 즉 \bar{e}_3 방향에 해당하는 $\bar{\beta}'$ 에 대해 발생한다.

Table 2와 Fig. 5은 $N=3, K=2$ 인 경우 고유치와 정규화된 고유벡터를 나타내고 있다. $\bar{e}^{nc} (= \bar{e}_3)$ 는 \bar{x}_1^c, \bar{x}_2^c 에 위치한 제어음원으로는 음향 방사 파워의 제어가 불가능한 $\bar{\beta}'$ 의 방향을 나타내는 단위벡터이다. \bar{e}^{no} 는 제어음원과 오차 마이

Table 2 Eigenvalues(λ_n) and normalized eigenvectors (\bar{e}_n) of $A^{-\frac{1}{2}H}VA^{-\frac{1}{2}}$ ($N=3, K=2, N \geq L \geq K$)

n	1	2	3
λ_n	0	0	$\left \frac{1}{\bar{e}^{ucH} \bar{e}^{no}} \right ^2$
\bar{e}_n	$\bar{e}^{ucH} \bar{e}_1 = 0$	$\bar{e}^{ucH} \bar{e}_2 = 0$	\bar{e}^{uc}

$$[(\Psi^m T^m T^c \Psi^c)^+ \Psi^m T^m A^{-\frac{1}{2}}] \bar{e}^{no} = 0 \quad (A^{\frac{1}{2}} T^c \Psi^c)^H \bar{e}^{uc} = 0$$

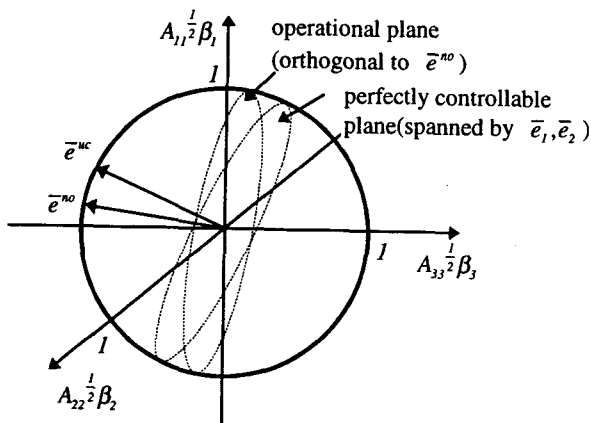


Fig. 5 Normalized eigenvectors \bar{e}_n of matrix

$$A^{-\frac{1}{2}H}VA^{-\frac{1}{2}}, \bar{e}^{no} \text{ (non-operational direction) and } \bar{e}^{uc} \text{ (uncontrollable direction) } (N=3, K=2, N \geq L \geq K)$$

크로폰 위치에 의해 결정되며, 제어시스템이 작동하지 않는 $\bar{\beta}$ 방향 ($\bar{q}=0, W^t=W^p$)을 나타내는 단위벡터이다. 따라서 \bar{e}_1, \bar{e}_2 에 의해 결정되는 가상의 평면상에 위치하는 $\bar{\beta}$ 에 해당하는 소음원 음장에 대해서는 음향 방사 파워를 완벽히 제어할 수 있다. 반면에 \bar{e}_1, \bar{e}_2 에 직교하는 방향, 즉 \bar{e}^{uc} 와 같은 방향을 갖는 $\bar{\beta}$ 에 대해서는 W^t_{max} 가 발생한다.

Table 3은 $N=3$ 인 경우 제어음원 개수에 따른 제어 후 음향 방사 파워의 평균과 분산, 최대, 최소값을 나타내고 있다. $K=1$ 인 경우 제어음원과 오차 마이크로폰의 위치를 조정하여 $\bar{e}^c = \bar{e}^o$ 인 제어시스템을 구성하면 최적의 음향 방사 파워 제어성능을 갖게 됨을 알 수 있다. 마찬가지로 $K=2$ 인 경우 $\bar{e}^{uc} = \bar{e}^{no}$ 를 만족하도록 제어시스템을 구성하면 최적의 음향 방사 파워 제어성능을 얻을 수 있음을 알

Table 3 Control performance of active noise control system ($N=3, N \geq L \geq K$)

K	1	2
W^t_{mean}	$\frac{1}{3} \left(1 + \left \frac{1}{\bar{e}^c H \bar{e}^o} \right ^2 \right) W^p$	$\frac{1}{3} \left \frac{1}{\bar{e}^{ucH} \bar{e}^{no}} \right ^2 W^p$
$\sigma^2(W^t)$	$\frac{4}{45} \left(1 + \left \frac{1}{\bar{e}^c H \bar{e}^o} \right ^4 - \left \frac{1}{\bar{e}^c H \bar{e}^o} \right ^2 \right) W^p^2$	$\frac{4}{45} \left \frac{1}{\bar{e}^{ucH} \bar{e}^{no}} \right ^4 W^p^2$
W^t_{max}	$\left \frac{1}{\bar{e}^c H \bar{e}^o} \right ^2 W^p$	$\left \frac{1}{\bar{e}^{ucH} \bar{e}^{no}} \right ^2 W^p$
W^t_{min}	0	0

수 있다. 이는 음향 방사 파워를 줄일 수 없는 $\bar{\beta}$ 에 대해서는 제어시스템이 작동하지 않도록 ($\bar{q}=0$) 하며, 음향 방사 파워를 줄일 수 있는 $\bar{\beta}$ 에 대해서만 제어시스템이 작동하도록 제어음원과 오차 마이크로폰의 위치를 결정함을 의미한다. 따라서 $\bar{e}^c = \bar{e}^o$, 또는 $\bar{e}^{uc} = \bar{e}^{no}$ 를 만족하는 제어시스템은 강건한 제어시스템 ($W^t_{max} \leq W^p$)임을 알 수 있다.

예를 들어 주파수가 460 Hz인 소음원이 반지름이 24 cm인 덕트 내부에 존재하고 $N=3, K=1, L=1$ 인 경우, 제어음원의 위치를 $\bar{x}^c = (0.5r_0, 0\pi, -1.3m)$ 로 정하면, 강건한 제어시스템 $\bar{e}^c = \bar{e}^o$ 을 구성하기 위한 오차 마이크로폰의 위치는 $\bar{x}^m = (0.28r_0, 0\pi, -0.15m)$ 이 된다.

Fig. 6은 $N=3$ 인 경우 K 의 변화에 따른 강건한 제어시스템의 제어 후 음향 방사 파워의 평균과 분산을 나타내고 있다. Fig. 6을 관찰해 보면 K 의 증가에 따라 W^t_{mean} 이 감소함을 볼 수 있다. 즉 $K=1$ 인 경우에는 제어 전의 2/3, $K=2$ 인 경우는 1/3로

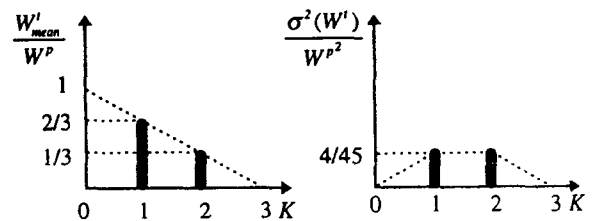


Fig. 6 Mean(W^t_{mean}) and variance($\sigma^2(W^t)$) of W^t (robust control system with $N=3, N \geq L \geq K$)

Table 4 Control performance of robust control system and non-robust control systems ($N=3, K=1, L=1, f=460\text{ Hz}, r_0=0.24\text{ m}, \bar{x}_1^c=(0.5r_0, 0\pi, -1.3\text{ m})$)

Microphone position	$\frac{W'^{mean}}{W^P}$	$\frac{\sigma^2(W')}{W^P}$	$\frac{W'^{max}}{W^P}$	$\frac{W'^{min}}{W^P}$
(1) (0.28r ₀ , 0π, -0.15m)	0.667	0.089	1.000	0
(2) (0r ₀ , 0π, -0.15m)	1.385	0.693	3.155	0
(3) (0.5r ₀ , 0π, -0.15m)	0.681	0.093	1.044	0
(4) (1.0r ₀ , 0π, -0.15m)	0.702	0.099	1.105	0
(5) (0.5r ₀ , 0.5π, -0.15m)	7.577	40.125	21.729	0
(6) (1.0r ₀ , 0.5π, -0.15m)	13.673	138.773	40.019	0
(7) (0.5r ₀ , 1.0π, -0.15m)	1.437	0.769	3.311	0
(8) (1.0r ₀ , 1.0π, -0.15m)	1.160	0.415	2.479	0

Table 5 Control performance of robust and non-robust control systems ($N=3, K=2, L=2, f=460\text{ Hz}, \bar{x}_1^c=(0.5r_0, 0\pi, -1.3\text{ m}), \bar{x}_2^c=(0.5r_0, 0.5\pi, -1.3\text{ m})$)

Microphone position	$\frac{W'^{mean}}{W^P}$	$\frac{\sigma^2(W')}{W^P}$	$\frac{W'^{max}}{W^P}$	$\frac{W'^{min}}{W^P}$
(1) (0.28r ₀ , 0π, -0.15m) (0.28r ₀ , 0.5π, -0.15m)	0.333	0.089	1.000	0
(2) (0.28r ₀ , 0.5π, -0.15m) (0.28r ₀ , π, -0.15m)	1.243	1.235	3.728	0
(3) (0.28r ₀ , π, -0.15m) (0.28r ₀ , 1.5π, -0.15m)	253.4	51382	760.2	0
(4) (0.28r ₀ , 0π, -0.15m) (0.28r ₀ , 1.0π, -0.15m)	1.385	1.535	4.155	0

제어할 수 있음을 알 수 있다. 또한 이때의 분산은 각각 4/45임을 알 수 있다.

강건한 제어시스템의 제어성능을 강건한 제어시스템 조건을 만족하지 않는 제어시스템들과 비교하기 위하여 오차 마이크로폰의 위치를 변화시키면서 각각의 제어시스템의 제어성능을 구하여 보았다.

Table 4와 Table 5는 460 Hz에서의 모의실험결과를 정리한 것으로 각각 $K=L=1, K=L=2$ 인 경우를 나타내고 있다. Table 4와 Table 5를 보면 강건한 제어시스템 조건을 만족시키지 않는 제어시스템의 경우 음향 방사 파워가 제어 전보다 증가하는 경우 ($W'^{max} > W^P$)가 발생할 수 있음을 관찰할

수 있다. 이는 강건한 제어시스템 조건을 만족하지 않는 경우, 오차 마이크로폰 위치에서의 음향 포텐셜 에너지는 제어되지만 전체적인 음향 방사 파워는 증가할 수 있기 때문이다. 또한 Table 4와 Table 5를 보면 강건한 제어시스템(case (1))의 음향 방사 파워 제어성능이 다른 경우보다 상대적으로 좋음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 덕트 내부를 전파하는 고차모드 수보다 적은 수의 제어음원과 마이크로폰을 사용하여 오차 마이크로폰 위치에서의 음향 포텐셜 에너지를 최소화하는 제어시스템을 구성한 경우, 제어시스템의 음향 방사 파워 제어성능에 대한 연구를 수행하였다.

이론해석을 통하여 덕트 끝단에 발생 가능한 소음원 음장 집합에 대하여 제어 후 음향 방사 파워의 평균과 분산, 최대 및 최소값을 구하였으며, 임의의 소음원 음장에 대해 제어 후 음향 방사 파워를 항상 제어 전 이하로 제어할 수 있는 강건한 제어시스템의 구성이 가능함을 확인하였다. 또한 고차모드 수보다 적은 수의 제어음원과 오차 마이크로폰을 사용한 제어시스템을 이용하여 음향 방사 파워를 효과적으로 제어할 수 있는 제어음원과 오차 마이크로폰의 위치가 존재함을 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 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) 윤두병, 김양한, 정균양, 조대승, 1998, "덕트 내부의 고차모드 수보다 적은 수의 제어음원과 마이크로폰을 이용한 덕트 방사소음 제어에 관한 연구", 한국소음진동공학회지, 제 8 권, 제 2 호, pp. 283~288.
- (4) S. W. Kang, and Yang-Hann Kim, 1995, "Green Function Analysis of the Acoustic 한국소음진동공학회지/제 8 권 제 6 호, 1998년/1035

- Field in a Finite Three-Port Circular Chamber”,
Journal of Sound and Vibration Vol. 181 (5),
pp.765~780.
- (5) Peter Lancaster, and Miron Tismenetsky,
1985, The Theory of Matrices with Applications
(second edition), Academic Press, pp.432~440.
- (6) Yakov Ben-Haim, 1996, Robust Reliability in
the Mechanical Sciences, Springer-Verlag,
Chapter 3.
- (7) S. Haykin, 1991, Adaptive Filter Theory
(second Edition), Prentice Hall, Chapter 4.