

조용한 공간 만들기 (방법론과 예)

Design and control of quiet zone (principle and example)

°김 양 한*, 윤 두 병**, 남 경 옥***

ABSTRACT

In order to make a quiet zone, one can consider methods to generate a secondary sound field that cancels a primary sound field. Active noise control (ANC) is one of the kinds. This paper mainly deals with the issues on determining the optimal positions of control sources and sensors for making a desired quiet zone. The issues address the reason why the positions are important, how the positions are optimized, and what the measure on the optimal positions is in an uncertain sound field. It is also shown that a power control is applicable to a specific uncertain sound field. In addition, this paper shows that a control material method, which passively changes a boundary condition, is essentially found to be on the same road of ANC.

I. 서론

소리를 만들기 위한 방법, 즉 각종 스피커의 발달과, 소리를 측정하기 위한 수단, 즉 각종 형태의 마이크로폰의 발달과 아울러 제어기 성능의 향상으로 이제는 임의의 공간을 실제로 원하는 수준까지 소음을 낮추는 것은 이론적으로 항상 가능하다. 필요한 만큼 많은 수의 센서와 액츄에이터를 쓴다면 사실상 공간상에서 일종의 강제 경계 조건과 같은, 즉 속도가 0이 되는 일종의 가상적인 표면을 만드는 것도 가능하다 할 것이다. 그러나 공학적으로는 이러한 가상적인 혹은 원하는 조용한 공간을 구현하는 가장 현실적인 방법을 찾아내는 것이 연구의 대상이라 할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 관점에서 조용한 공간을 만드는 현재까지 알려진 방법들, 즉 능동 소음 제어 방법, 혹은 수

동적인 면에서 흡음재를 공간 상에 배열하여 만드는 방법, 음향 파워 제어를 이용하여 소음원 자체의 방사 임피던스를 줄여 제어하는 방법, 주 소음원 혹은 음장에 불확실성, 즉 소음원 혹은 음장의 특성을 정확히 알지 못 할 경우에 소음 제어 방법의 가능성과 현실적인 적용 가능성 등을 살펴본다.

II. 능동 소음 제어

능동 소음 제어의 가장 기본이 되는 내용은 음향학적으로 가장 간단한 계라고 할 수 있는 덕트를 통해 이해할 수 있다. Fig. 1과 같이 무한 길이의 덕트를 통해 전파하는 음파(원음장)를 생각하자. 제어 음원을 통해 원음장에 대해 크기는 같지만 위상은 반대인 음파(제어 음장)를 발생시키면, 제어 음원 하류(quiet zone)에서 두 음장은 서로 상쇄되어 전파하지 않는다. 이는 제어 음원 하류에 있는 한 센서에서 측정되는 음압을 0이 되도록 제어 음원을 구동시킴으로써 구현 가능하다⁽¹⁾. 하

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국타이어 중앙연구소 NVH 연구팀

*** 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

지만 이러한 간단한 개념을 3 차원에서 적용하는 것은 쉽지 않다. 이것은 음향학적으로는 주로 원음장과 모양이 같은 제어 음장을 만들기 어렵다는 점과 제어 영역의 소음 특성, 즉 음향 위치 에너지를 측정하기 어렵기 때문이다.

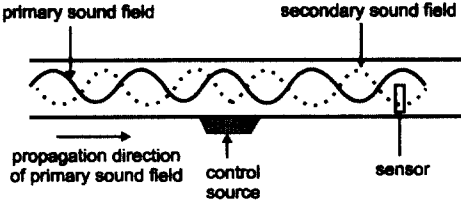


Fig. 1 Active noise control in a duct

우선 음장의 모양과 관련된 문제를 생각하자. q_p 와 q_s 는 각각 한 특정 주파수 ω 에서 원래 소음원과 제어 음원의 입력 신호, $h_p(x, y, z)$ 와 $h_s(x, y, z)$ 는 그 주파수에서 원래 소음원과 제어 음원의 전달 함수라고 하자. 그러면 음압은

$$p(x, y, z) = p_p(x, y, z) + p_s(x, y, z), \quad (1)$$

$$\text{where } p_p(x, y, z) = h_p(x, y, z)q_p,$$

$$p_s(x, y, z) = h_s(x, y, z)q_s,$$

과 같이 쓸 수 있다. 만약 제어 영역(V_Q)에서

$$h_p(x, y, z) = -c h_s(x, y, z) \quad (c \text{ 는 상수}) \quad (2)$$

와 같은 관계가 성립하면, q_s 를

$$q_s = -c q_p \quad (3)$$

로 구동 시켜 모든 제어 영역에서 음압을 0 으로 만들 수 있다. 이는 식 (2)가 의미하듯 원음장과 제어 음장의 모양이 서로 같으면, 완벽한 제어가 가능함을 의미한다. 그러나 덕트와 달리 여러 개의 모드가 중첩되는 3 차원에서는 원음장의 모양과 같도록 제어 음장을 만드는 것은 쉽지 않다.

원음장과 제어 음장의 모양이 비슷해지도록 만드는 한가지 방법은 제어 음원의 위치를 최적화하는 것이다. 이는 제어 음원의 위치에 따라 전달 함수 $h_s(x, y, z)$ 가 달라지기 때문이다. 최적 위치는 이상의 논의로부터 원음장과 얼마나 비슷한 모양의 제어 음장을 만드느냐에 의해 결정된다⁽⁶⁾.

이제 측정 문제를 생각하자. 제어 음원의 위치

가 결정되어 있고 제어 영역에서 평균 음향 위치 에너지를 제어하고자 한다면, 가격 함수 J 는 식 (1)로부터

$$J = \frac{1}{V_Q} \int_{V_Q} |p_p(x, y, z) + p_s(x, y, z)|^2 dV_Q \quad (4)$$

와 같이 쓸 수 있다. 그러나 이러한 가격 함수는 실제로 측정하려면, 제어 영역 내의 모든 점을 측정해야 하는 문제를 갖고 있다. 이에 대한 대안은 식 (4)의 가격 함수와 같은 효과를 갖는 센서의 위치를 찾는 것이다. 즉 식 (4)의 가격 함수를 최소화하는 q_s 를 q'_s 라고 하면, 하나의 센서만을 사용하는 경우 그 측정 음압을 최소화하기 위한 q_s 가 q'_s 로 구동되는 위치를 찾으려 한다. 이것은 앞서 설명한 덕트의 경우에 쉽게 보여질 수 있다. 덕트의 경우 제어 음원 하류 전체가 제어 영역이라고 한다면, 한 점의 음압만을 0 으로 만들어도 하류 전체에서의 음압을 0 으로 만들 수 있다. 그러나 제어 음원과 마찬가지로 3 차원에서 센서의 최적 위치를 찾는 것이 쉬운 작업은 아니다.

참고 문헌 6 에서는 제어 시스템에서 제어 음원의 위치가 잘못되었는가, 아니면 센서의 위치가 잘못되었는가를 판별하는 방법을 제안하고 있다.

III. 제어 재료의 사용

임의의 벽에 음파가 입사할 때, 제어 영역에서의 소음 감소를 위해 벽면에 새로운 재료를 붙여 경계 조건을 바꾸는 방법을 생각할 수 있다. 이 방법 역시 능동 소음 제어처럼 원음장과 제어 음장의 상쇄라는 맥락에서 생각할 수 있다.

이를 살피기 위해 Fig. 2 처럼 한 특정 주파수 ω 에서 z 축에 대해 θ 의 각으로 강체 벽에 입사하는 평면파(y 에 대한 변화는 없음)를 생각하자. 이 경우 반사파가 고려된 전체 음장은

$$p_p(x, y, z) = 2\hat{P}_1 \cos(k \cos \theta z) \exp(jk \sin \theta x) \quad (5)$$

와 같이 쓸 수 있다. \hat{P}_1 은 입사파의 강도를, k 는 파수를 나타낸다.

이 경우 국부 반응하며 어드미턴스가 $\beta/\rho c$ 인 제어 재료를 강체 벽 위에 놓는다면, 음장은

$$p(x, y, z) = p_p(x, y, z) + \frac{jk\beta}{4\pi} \int_A p(x_0, y_0, 0) G_N dA \quad (6)$$

과 같이 쓸 수 있다⁽⁷⁾. 여기서 A는 제어 재료가 놓인 영역이고, G_N 은 $z=0$ 평면에서 노이만 경계 조건을 만족하는 그런 함수이다. 식 (6)에서 첫번째 항은 재료가 놓이기 전의 음장이므로 제어 전의 음장이라고 할 수 있고, 능동 소음 제어에서 원음장에 대응된다. 두 번째 항은 제어에 의해 추가로 생긴 것이므로 능동 소음 제어에서 제어 음장에 해당된다. 즉 제어 재료는 능동 소음 제어에서 제어 음원의 역할을 함을 볼 수 있다. 이보다 더 일반적인 경우도 유사하게 생각할 수 있다⁽⁷⁾.

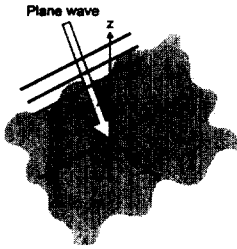


Fig. 2 Plane wave incident on a rigid wall

식 (6)에서 제어 음장을 구하기 위해서는 제어 재료 표면에서의 음압을 우선 구해야 한다. 이 음압은 재료의 크기가 관심 주파수에 해당하는 파장보다 크면, 제어 재료가 무한대의 크기를 가질 때의 음압으로 근사할 수 있다⁽⁷⁾. 따라서 식 (6)은

$$p(x, y, z) = p_p(x, y, z) + \frac{jk}{2\pi} \frac{\beta \cos \theta}{\beta + \cos \theta} \hat{p}_1 \int_A \exp(jk \sin \theta x_0) G_N dA \quad (7)$$

과 같이 다시 쓸 수 있다.

능동 소음 제어와의 유사성에 비취볼 때 재료의 위치는 제어 음원의 위치처럼 중요한 변수일 수 있다. 이를 알아보기 위해 간단히 x 와 y 방향으로 길이가 L_x 와 L_y 인 직사각형의 재료를 생각하자. 재료의 중심 위치가 (x_c, y_c) 라면, 식 (7)은 다시

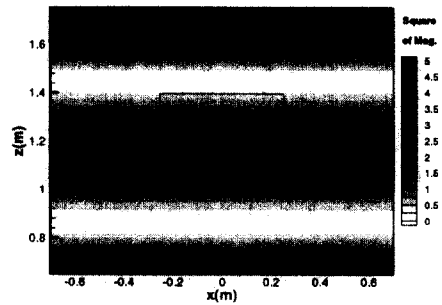
$$p(x, y, z) = p_p(x, y, z) + q \exp(jk \sin \theta x_c) h(x - x_c, y - y_c, z) \quad (8)$$

$$\text{where } q = \frac{jk}{2\pi} \frac{\beta \cos \theta}{\beta + \cos \theta} \hat{p}_1,$$

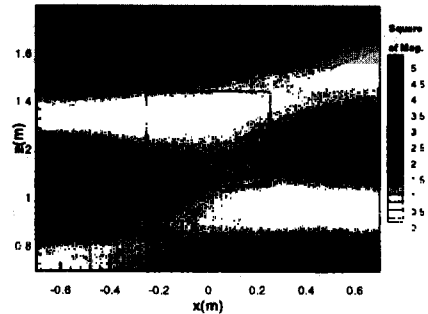
$$h(x, y, z) = \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} \int_{-\frac{L_y}{2}}^{\frac{L_y}{2}} \exp(jk \sin \theta x_0) G_N(x - x_0, y - y_0, z) dx_0 dy_0,$$

와 같이 쓸 수 있다. 즉 재료의 위치는 제어 음장을 x 와 y 좌표상으로 이동시키는 역할을 한다.

재료의 최적 위치는 재료의 위치를 변화 시키며 제어 영역에서 평균 위치 에너지(식 (4))를 최소화시키는 위치로부터 구할 수 있다. 능동 소음 제어에서는 제어 음원의 입력을 임의로 조절할 수 있으므로 음장 매칭의 개념에서 최적 위치를 구하는 반면, 수동적인 방법인 제어 재료에서는 제어 음장의 강도를 임의로 조절할 수 없으므로 음향 위치 에너지라는 가격 함수를 직접 사용해야 한다.



(a) before control



(b) after control

Fig. 3 Sound pressure level on $y = 0$ plane; (a) primary sound field ($J=2.7$), (b) minimum sound field ($J=0.92$) when the control material is located at $(-1.7m, 0)$

Fig. 3은 제어 재료에 대한 모의 실험 결과를 보여준다. 입사파는 $z=0$ 인 강체 벽에 30도의 각도로 입사한다. 주파수는 343Hz, 재료의 β 값은 $0.7(1-j)$, 크기는 $2m \times 2m$ 이다. 제어 영역의 중심은

(0, 0, 1.2m)이고, 크기는 0.5m×0.5m×0.4m이다. Fig. 3(a)는 제어 재료를 사용하기 전 $y = 0$ 평면에서 제어 영역 부근의 음압 분포를 보여 준다. 이 경우 가격 함수는 2.7이다. Fig. 3(b)는 재료가 최적화된 위치에 있을 때의 음압을 보여 준다. 이때 제어 재료의 위치는 (-1.7m, 0)이고, 가격 함수는 0.92였다. 즉 위치의 최적화에 의해 이 모의 실험에서는 약 4.7dB의 소음 감소를 얻을 수 있다. 이 결과는 재료의 위치가 중요한 변수임을 보여 준다.

IV. 불확정성을 갖는 음장에 대한 능동 소음 제어

앞의 두 절에서 다룬 제어 음원과 센서, 제어 재료의 최적 위치 결정 방법은 원음장에 대한 정보를 필요로 한다. 즉 원음장에 대한 정보가 없을 때는 그 방법들을 적용할 수 없다. 이 절은 이런 경우에 능동 소음 제어에서 제어 음원과 센서의 위치가 적절한 지를 파악하는 방법을 설명한다.

N 개의 모드의 선형 조합으로 음장을 표현할 수 있는 계를 생각하자. 이 경우 원음장은

$$p_p(\bar{x}) = \sum_{n=1}^N \beta_n \psi_n(\bar{x}) = \bar{\psi} \bar{\beta}, \quad (9)$$

$$\text{where } \bar{\psi} = [\psi_1(\bar{x}) \cdots \psi_N(\bar{x})], \quad \bar{\beta} = [\beta_1 \cdots \beta_N]^T$$

와 같이 쓸 수 있다. 위첨자 'T'는 전치 연산을, $\psi_n(\bar{x})$ 은 n 번째 모드, β_n 은 그 계수를 나타낸다. 여기서 β_n 은 원음장에 대한 정보가 없으므로 미지수이고, 원음장의 불확정성과 관련된 변수이다.

\bar{x}_k^c 에 위치한 $K(N \geq K)$ 개의 단극 음원을 제어 음원으로 사용한다면, 제어 음장은

$$p_s(\bar{x}) = \bar{\psi} T^c \Psi^c \bar{q}, \quad (10)$$

$$\text{where } T^c = \begin{bmatrix} T_{11}^c & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & T_{NN}^c \end{bmatrix}, \quad \Psi^c = \begin{bmatrix} \psi_1(\bar{x}_1^c) & \cdots & \psi_1(\bar{x}_K^c) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_N(\bar{x}_1^c) & \cdots & \psi_N(\bar{x}_K^c) \end{bmatrix},$$

$$\bar{q} = [q_1 \cdots q_N]^T$$

와 같이 쓸 수 있다^(1,8). 위첨자 '**'는 공액 복소수를, q 는 제어 음원의 체적 속도를, T^c 는 제어 음원에 의해 가진되는 각 모드의 입력과 출력 사이

의 관계를 나타낸다.

식 (9)와 (10)으로부터 \bar{x}_k^m 에 위치한 L ($N \geq L \geq K$)개의 센서에 의해 측정된 음압 벡터 $\bar{p}^m = [p(\bar{x}_1^m) \cdots p(\bar{x}_L^m)]^T$ 은

$$\bar{p}^m = \Psi^m (\bar{\beta} + T^c \Psi^c \bar{q}), \quad (11)$$

$$\text{where } \Psi^m = \begin{bmatrix} \psi_1(\bar{x}_1^m) & \cdots & \psi_1(\bar{x}_K^m) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_N(\bar{x}_1^m) & \cdots & \psi_N(\bar{x}_K^m) \end{bmatrix}$$

와 같이 쓸 수 있다. 이로부터 $\bar{p}^{mH} \bar{p}^m$ 을 최소화하도록 제어 음원들을 구동시키면 체적 속도 \bar{q} 는

$$\bar{q} = -(\Psi^m T^c \Psi^c)^+ \Psi^m \bar{p} \quad (12)$$

와 같이 쓸 수 있다. 위첨자 '+'는 무어-펜로즈 역행렬을 나타낸다. 따라서 식 (12)를 식 (10)에 대입하면, 제어 후의 음장은

$$p(\bar{x}) = \bar{\psi} (I - C) \bar{\beta}, \quad \text{where } C = T^c \Psi^c (\Psi^m T^c \Psi^c)^+ \Psi^m \quad (13)$$

와 같이 쓸 수 있다.

최종적으로 제어하려는 가격 함수가 제어 영역 V_Q 에서 평균 위치 에너지라면, 가격 함수는

$$J = \frac{1}{V_Q} \int_{V_Q} |p(\bar{x})|^2 dV_Q = \bar{\beta}^H (I - C)^H W (I - C) \bar{\beta}, \quad (14)$$

$$\text{where } W = \frac{1}{V_Q} \int_{V_Q} \bar{\psi}^H \bar{\psi} dV_Q$$

와 같이 쓸 수 있다.

제어 전($C = 0$)의 가격 함수는

$$J_p = \bar{\beta}^H W \bar{\beta} \quad (15)$$

이므로 제어 전과 제어 후의 가격 함수를 비교함으로써 제어 시스템의 성능을 알 수 있다.

이 경우 성능 평가에서 중요한 점은 원음장에 대한 정보가 없으므로, $\bar{\beta}$ 값이 식 (15)의 제한 조건을 만족하는 어떤 값도 가능하다는 것이다. 즉 $\bar{\beta}$ 와 식 (15)의 가격 함수는 랜덤 변수이다. 따라서 이러한 점이 고려되어 J 의 통계적인 특성인 평균, 분산, 최대값, 최소값 등으로부터 제어 음원과 센서의 위치의 적절성을 판단해야 한다.

J 의 평균 J_{mean} 은 제어 시스템 성능의 기대치를, 분산 $\sigma^2(J)$ 는 제어 성능이 원음장의 형태에 따라 얼마나 민감하게 변하는 지를, 최댓값 J_{max} 은 제어 시스템이 얼마나 강건한 지를, 최솟값 J_{min} 은 이 제어 시스템이 가장 잘 작동하는 경우의 가격 함수를 나타낸다.

참고 문헌 1의 결과로부터, J_{mean} 과 J_{max} 은

$$V = W^{\frac{1}{2}H} (I-C)^H W (I-C) W^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

의 고유치(eigenvalue)를 $\lambda_1 \leq \dots \leq \lambda_N$ 라면,

$$J_{\text{mean}} = \frac{J_p}{N} \sum_{n=1}^N \lambda_n \quad (17)$$

$$J_{\text{max}} = \lambda_N J_p \quad (18)$$

과 같이 쓸 수 있다.

이러한 제어 척도의 예를 보기 위해 벽에서 약간의 댐핑을 갖는 2차원 계를 생각하자(Fig. 4). 이 경우 고려된 모드는 처음 세 개의 모드만이고, 각 모드의 고유 주파수는 0, 343Hz, 343Hz이다. 가진 주파수는 220Hz이다. 제어 음원과 센서의 수는 각각 한 개이다. Table 1은 제어 음원의 위치가 (0,0)으로 고정된 경우에 센서의 위치를 옮겨가면서, 앞에서 설명한 J_{mean} 과 J_{max} 를 구한 것이다. 센서가 (0.75 L_x , 0.75 L_y)에 놓일 때, $J_{\text{max}} = J_p$ 이므로 이 경우에는 원음장이 어떠한 형태이든 제어가 가능하다는 것을 볼 수 있다. 또한 이 경우가 평균도 가장 낮다. 따라서 Table 1에 있는 7개의 센서 위치들 중에서는 이 위치가 가장 적합함을 알 수 있다.

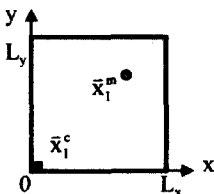


Fig. 4 Two-dimensional enclosure with $L_x = L_y = 0.5\text{m}$, $N = 3$, $K = L = 1$, and $f = 220\text{Hz}$

\bar{x}_1^m	J_{mean} / J_p	J_{max} / J_p
(0.75 L_x , 0.75 L_y)	0.67	1.00
(0.5 L_x , 0.75 L_y)	0.83	1.49
(0.25 L_x , 0.75 L_y)	3.29	8.86
(0.25 L_x , 0.25 L_y)	3.43	9.28
(0.5 L_x , 0.5 L_y)	1.32	2.95
(1.0 L_x , 1.0 L_y)	0.68	1.03

Table 1 Control performance of the control systems with varying microphone position

V. 단극 음원에 대한 음향 파워 제어

제어 영역이 극단적으로 커지는 많은 경우에는 제어 영역에서의 위치에너지는 소음원들의 음향 파워에 비례한다⁽³⁾. 이것이 음향 파워 제어⁽⁹⁾의 개념이 나온 배경이다. 음향 파워 제어는 원소음원과 제어 음원에서 발생하는 파워를 최소화하도록 제어하는 것이다. 그러나, 많은 경우 음향 파워는 측정하기가 어려우므로 그 적용에 한계가 있다.

한 가지 재밌는 현상은 원소음원과 제어 음원이 단극 음원인 경우 파워 제어는 제어 음원에서 발생하는 파워를 0으로 만들므로써 수행할 수 있다는 것이다⁽⁹⁾. 이것은 경계 조건이나 원소음원의 위치 등에 상관없이 성립하므로 측정상에서 많은 유리함을 가진다. 즉 IV 절에서처럼 원음장이 불확정성을 가지더라도 그 소음원이 단극 음원이라면, 제어 음원의 파워를 0으로 만들므로써 제어가 가능하다. 참고 문헌 3은 이를 Fig. 5와 같은 환경에서 실험적으로 입증해 보였다(Fig. 6).

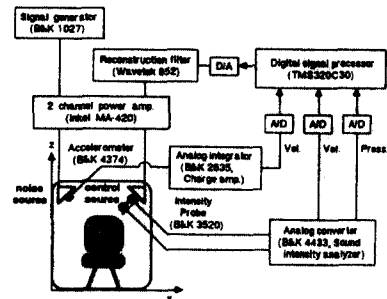


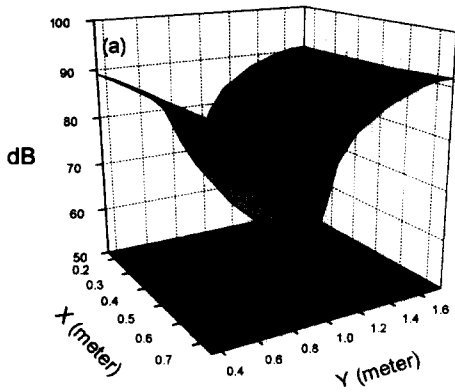
Fig. 5 Experimental schematic diagram of a sound power control in a heavy industrial equipment cabin. The cabin is approximately a rectangular box with the dimension of 0.9m × 1.9m × 1.8m

후기

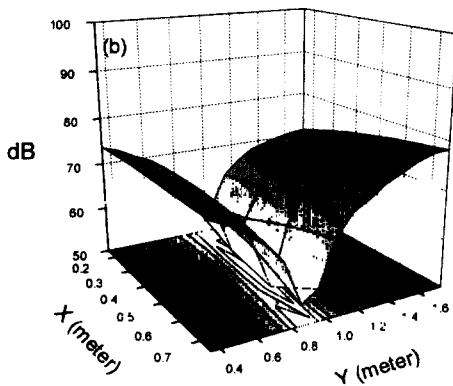
본 연구는 한국과학기술연구원 (KISTEP) 의 국가 지정연구실 프로그램 지원에 의해서 연구되었음을 밝힙니다.

참고 문헌

- (1) D.-B. Yoon and Y.-H. Kim, "Control performance and robustness of an active noise control system for uncertain primary sound fields," this paper was accepted for the publication of *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000.
- (2) D.-B. Yoon and Y.-H. Kim, "Active control of radiated duct noise with an insufficient number of sensors and actuators," *J. Sound and Vib.*, **221**(3), 351-369 (1999)
- (3) 김양한, 강성우, "능동소음제어-제어음장의 물리적 성질 및 제어 방법론," 한국소음진동공학회지 제 5 권 제 4 호, 440-452 (1995).
- (4) P. A. Nelson and S. J. Elliott, *Active control of sound*, Academic press, 116-128 (1992)
- (5) P. A. Nelson, "Active control of acoustic fields and the reproduction of sound," *J. Sound and Vib.*, **177**(4), 447-477 (1994).
- (6) 서재준, 김양한, "벡터 개념으로 능동소음제어 시스템 변수들의 실내 음장 제어 성능에 미치는 영향," 한국소음진동공학회 1998년 추계학술대회논문집, 861-866 (1999)
- (7) P. M. Morse and K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill, 441-443 (1968).
- (8) P. A. Nelson, A. R. D. Curtis, S. J. Elliott and A. J. Bullmore, "The active minimization of harmonic enclosed sound fields, part I: Theory," *J. Sound and Vib.*, **117**(1), 1-13 (1987).
- (9) M. E. Johnson and S. J. Elliott, "Measurement of acoustic power output in the active control of sound," *J. Acoust. Soc. Am.*, **93**(3), 1453-1459 (1993)



(a) Sound pressure before control



(b) Sound pressure of after control

Fig. 6 Sound pressure level on $z = 1.0\text{m}$ plane in the three dimensional cabin for the first resonant frequency ($f = 104\text{ Hz}$)

VI. 결론

본 논문은 능동 소음 제어에서 제어 음원과 센서 위치의 중요성과 최적화에 대해 논하였다. 이는 원음장 정보가 있을 때와 없을 때에 대해 나누어 설명되어졌다. 또한 파워 제어의 한 방법 역시 원음장 정보가 불충분하더라도 적용 가능함을 보였다. 더하여 수동 방법인 제어 재료 방법에서의 위치 문제도 능동 소음 제어와 유사하게 생각할 수 있음을 보였다.