

〈논 문〉

흡음재 배치를 이용한 정숙 공간 형성 방법

Quiet Zone Generation by Absorption Materials

남 경 옥* · 박 주 배* · 김 양 한**

Kyoung-Uk Nam, Joo-Bae Park and Yang-Hann Kim

(2001년 8월 4일 접수 : 2001년 3월 5일 심사완료)

Key Words : Quiet Zone(정숙공간), Active Noise Control (능동소음제어), Absorption Material(흡음재)

ABSTRACT

In order to make a quiet zone, one can consider various methods. Of the methods, this paper deals with the method using control materials such as absorption materials. This method controls sound fields by changing boundary conditions. First, this paper shows that the control material is essentially on the same road as active noise control (ANC). That is, we can consider the control material as the control source of ANC. However we cannot control the source strength. Second, this paper shows that the position of the control material is an important variable by a numerical simulation. And the strategy to optimize the position is addressed.

1. 서 론

Fig. 1처럼 임의의 어드미턴스(admittance)를 가진 벽에 임의의 크기와 위상을 갖는 음파가 입사하면 벽의 존재로 인하여 이 음파는 반사, 투과될 것이다. 이러한 상황에서 만일 구체적인 어떤 영역을 조용히 하고자 한다면, 즉 정숙 공간(quiet zone)을 만들고자 한다면, 그 방법에는 여러 가지가 있을 수 있다.

그 중에 한 방법은 능동 소음 제어 방법을 이용하는 것이다. 이 방법은 벽면 혹은 음장 안에 임의의 제어 음원을 배열하고, 이 제어 음원을 이용하여 정숙 공간을 만드는 방법이다.

능동 소음 제어 외에 또 다른 방법으로 벽면에 흡음재 등의 새로운 재료를 붙여서 소음 감소를 꾀하는 방법을 생각할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 재료를 특별히 제어 재료(control material)라 부르기로 한다. 이러한 제어 재료를 사용하는 방법은 기본적으로는 경계 조건의 변화가 음장의 변화를 가져온다는 물리적 사실에 기초한다.

본 논문에서는 우선 이렇게 제어 재료를 사용하는 방법과 능동 소음 제어 방법이 사실상 유사한 방법임을 설명한다.

능동 소음 제어에서 그 성능에 영향을 미치는 여러 변수가 존재하는 것처럼 제어 재료를 사용하는 경우에도 여러 변수가 그 성능에 영향을 미칠 것을 상상할 수 있다. 이 중에 제어 재료와 관련된 변수는 재료의 수, 어드미턴스 등으로 표현할 수 있는 재료의 물성, 재료의 기하학적 특성, 재료의 위치가 있을 수 있다. 본 논문에서는 이 중에서 특히 제어 재료의 위치가 미치는 영향을 다루고자 한다. 즉 다른 변수들이 고정되어 있는 경우에 재료의 최적 위치 결정 방법에 대해 기술하고, 제어하고자 하는 영역이 그리

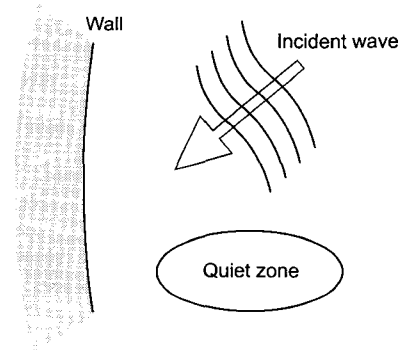


Fig. 1 Illustration of the problem that this paper deals with.

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

** 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : yhkim@mail.kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3025, Fax : (042) 869-8220

크지 않은 경우에는 재료의 위치가 중요한 변수 중의 하나임을 모의 실험을 통해서 보이고자 한다.

2. 제어 재료에 의한 음장(acoustic field)의 재형성

2.1 능동 소음 제어와의 유사성

우선 가장 간단한 경우에 대하여 살펴 보기 위하여 Fig. 2(a)와 같이 특정 주파수 ω 에서 무한 크기의 강체 벽 ($z=0$ 인 평면)에 z 축에 대해 θ 의 각으로 입사하는 평면파(y 방향에 대한 변화는 없음)를 생각하자. 시간에 대한 특성을 나타내는 $\exp(-j\omega t)$ 를 생략하면, 이 입사파는

$$p_i(x, y, z) = \hat{P}_I \exp[jk(\sin \theta x - \cos \theta z)] \quad (1)$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서 \hat{P}_I 은 평면파의 강도(strength)를, k 는 파수를 나타낸다. 따라서 반사파가 고려된 전체 음장 $p_p(x, y, z)$ 는

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

와 같이 쓸 수 있다.⁽¹⁾

$z=0$ 인 평면이 강체 벽이 아니라 $\beta(x, y)/\rho c$ (ρ : 공기 밀도, c : 음파 속도)의 어드미턴스를 갖는 국부 반응(locally reacting)⁽²⁾ 벽이라면, 음장은

$$p(x, y, z) = p_p(x, y, z) + \frac{jk}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \beta(x_0, y_0) \times p(x_0, y_0, 0) G_N(x-x_0, y-y_0, z) dx_0 dy_0 \quad (3)$$

와 같이 쓸 수 있다.⁽¹⁾ 여기서 G_N 은 노이만(Neumann) 경계 조건 ($\frac{\partial G_N}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$)을 만족시키는 그린 함수(Green function)이다.

Fig. 2(b)와 같이 무한 강체 벽 위에 $\beta/\rho c$ 의 어드미턴스를 갖는 제어 재료가 놓여 있는 경우, 제어 재료 밖에서의 어드미턴스는 0이므로, 식 (3)은

$$p(x, y, z) = p_p(x, y, z) + \frac{jk\beta}{4\pi} \int_A \int p(x_0, y_0, 0) \times G_N(x-x_0, y-y_0, z) dx_0 dy_0 \quad (4)$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서 A 는 제어 재료가 놓인 영역을 나타낸다.

식 (4)는 두 개의 항으로 이루어져 있는데, 이는 능동 소음 제어의 경우와 아주 유사함을 알 수 있다. 첫번째 항은 제어 재료가 놓이기 전의 음장을 나타내므로 제어 전의 음장이라고 할 수 있다. 따라서 이는 능동 소음 제어에서 원음장(primary sound field)에 대응된다. 두 번째 항은 제

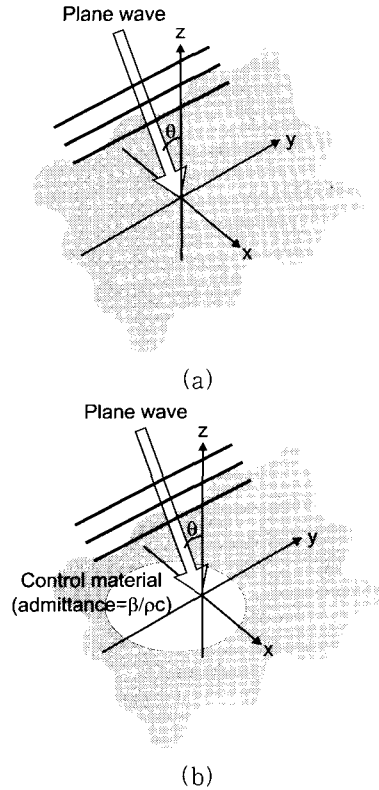


Fig. 2 Plane wave incident on a rigid wall ($z=0$ plane): (a) before control, (b) after control.

어에 의해 추가로 생기는 음장이므로 능동 소음 제어에서 제어 음장(secondary sound field)에 해당된다. 즉 제어 재료는 능동 소음 제어에서의 제어 음원(control source)처럼, 기존의 음장을 변화시키는 역할을 함을 볼 수 있다. 물론, 능동 제어 요소의 제어 음원과는 달리, 흡음재는 소음원과 무관한 독립적인 음원으로의 역할을 할 수는 없다.

제어 전의 벽면이 강체 벽이 아니라, 국부 반응(locally reacting)하는 β_0/ρ 의 균일 어드미턴스를 갖는 벽이라면⁽²⁾,

$$\frac{\partial G_B}{\partial z} \Big|_{z=0} = -jk\beta_0 G_B(x, y, 0|x_0, y_0, z_0) \quad (5)$$

의 경계 조건을 만족하는 그린 함수를 사용하여 식 (4)와 유사하게 표현할 수 있다. 이 경우 $\beta/\rho c$ 의 어드미턴스를 갖는 제어 재료에 의한 제어 후의 음장은

$$p(x, y, z) = p_{p, B}(x, y, z) + \frac{jk(\beta - \beta_0)}{4\pi} \times \int_A \int p(x_0, y_0, 0) G_B(x, y, z|x_0, y_0, 0) dx_0 dy_0 \quad (6)$$

과 같이 쓸 수 있다.⁽¹⁾ 여기서 $p_{p, B}(x, y, z)$ 는

$$p_{p, B}(x, y, z) = \hat{P}_I \exp(jk \sin \theta x)$$

$$\times \left[\exp(-jk \cos \theta z) + \frac{\cos \theta - \beta_0}{\cos \theta + \beta_0} \exp(jk \cos \theta z) \right] \quad (7)$$

로서 식 (4)의 $p_p(x, y, z)$ 와 마찬가지로 제어 전의 음장을 나타낸다. 식 (4)와 마찬가지로 식 (5)의 두 번째 항은 제어 재료에 의한 음장을 나타내므로 이 경우에도 제어 재료가 제어 음원처럼 작용함을 알 수 있다.

다수의 제어 재료가 임의의 공간 상에 분포한 경우도 앞서 유도된 식들과 유사하게 얻어질 수 있다. 분명한 사실은 다루고 있는 음장이 선형 음향 방정식을 만족하는 경우라면 여러 개의 제어용 재료가 있는 경우도 가장 간단한 경우라 할 수 있는, 즉 식 (4)로 표현되는 경우를 잘 이해함으로써 그 근본적인 내용을 이해할 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 식 (4)로 표현되는 경우를 우선 다루기로 한다.

2.2 제어 재료 표면에서의 음압

식 (4)에서의 음장을 구하기 위해서는 제어 재료 표면에서의 음압 $p(x_0, y_0, 0)$ 을 우선 구해야 한다. 일반적으로 제어 재료 표면에서의 음압은 제어 재료에 의한 영향과 그 주변의 영향에 의하여 결정된다. 그러나 제어 재료의 크기가 어느 이상, 즉 관심 주파수에 해당되는 파장보다 월등히 크다면 재료의 경계 부근을 제외한 대부분의 영역에서 강체 벽의 영향을 거의 받지 않는다고 볼 수 있고 따라서 재료가 무한대인 경우의 음압으로 근사할 수 있다.⁽¹⁾

이러한 가정으로 부터, $z=0$ 인 제어 재료 표면에서의 음압을 식 (7)과 같이 입사파와 반사파의 합으로 나타내면

$$p(x_0, y_0, 0) = \frac{2 \cos \theta}{\beta + \cos \theta} \hat{P}_I \exp(jk \sin \theta x_0) \quad (8)$$

과 같이 쓸 수 있다. 식 (8)을 식 (4)에 대입하면, 제어 재료의 음장은

$$p(x, y, z) = p_p(x, y, z) + \frac{jk \beta \cos \theta}{2\pi \beta + \cos \theta} \hat{P}_I \int_A \exp(jk \sin \theta x_0) G_N(x - x_0, y - y_0, z) dx_0 dy_0 \quad (9)$$

과 같이 정리할 수 있다.

3. 제어 재료의 최적 위치 선정

3.1 제어 재료 변수

식 (9)를 보면 재료의 물성치인 β 는 제어 음장의 공간상의 모양에는 영향을 미치지 못하고, 오직 음장의 강도에만 영향을 미침을 볼 수 있다. 또한 어떠한 재료를 선택하

는 경우에도, 만들 수 있는 제어 음장의 강도는 제한됨을 알 수 있다. 이는 다루고 있는 수동적인 재료는 에너지를 흡수만 할 수 있고 내보낼 수는 없기 때문이다. 즉 β 의 실수부는 항상 양수이기 때문이다.

능동 소음 제어에서 제어 음원의 위치가 중요한 것처럼, 제어 재료를 사용하는 경우에도 제어 재료의 위치가 중요한 변수일 수 있다. 제어 재료의 위치의 영향을 살피기 위해서 면적이 $L_x \times L_y$ 인 직사각형의 제어 재료를 생각하자. (x_c, y_c) 가 제어 재료의 중심이라면, 식 (9)는

$$p(x, y, z) = p_p(x, y, z) + \frac{jk \beta \cos \theta}{2\pi \beta + \cos \theta} \hat{P}_I \int_{-L_x/2+y_c}^{L_x/2+y_c} \int_{-L_y/2+x_c}^{L_y/2+x_c} \exp(jk \sin \theta x_0) \times G_N(x - x_0, y - y_0, z) dx_0 dy_0 \quad (10)$$

와 같이 쓸 수 있다. 식 (13)에서 적분식을 $x_0' = x_0 - x_c$, $y_0' = y_0 - y_c$ 로 치환하여 정리하면, 식 (10)은 다시

$$p(x, y, z) = p_p(x, y, z) + q \exp(jk \sin \theta x_c) h(x - x_c, y - y_c, z) \quad (11)$$

where $q = \frac{jk \beta \cos \theta}{2\pi \beta + \cos \theta} \hat{P}_I$

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

와 같이 쓸 수 있다. 식 (11)에서 $h(x, y, z)$ 는 제어 음장의 공간 분포를 결정하며, 제어 재료의 크기와 모양에 의해 결정됨을 볼 수 있다. 제어 재료의 위치 (x_c, y_c) 는 이 제어 음장의 분포를 x 와 y 좌표상으로 이동시키는 역할을 한다. 주의할 사항은 입사파가 θ 의 각으로 입사하는 평면 파이므로 재료 이동시 $k \sin \theta x_c$ 만큼의 위상 변화가 생긴다는 것이다. 이는 (x_c, y_c) 에 재료가 있을 때 재료 표면에서의 입사파 성분은 재료가 원점에 있을 때보다 $k \sin \theta x_c$ 만큼의 위상차를 갖기 때문이다.

3.2 최적 위치의 결정

제어하고자 하는 영역이 V_Q 이고 V_Q 에서의 음향 위치 에너지(acoustic potential energy)를 줄이고자 한다면, 가격 함수 J 는

$$J = \iiint_{V_Q} |p(x, y, z)|^2 dV_Q \quad (12)$$

과 같이 쓸 수 있다.

제어 재료가 (x_c, y_c) 의 위치에 있을 때의 제어 음장을 $p_s(x, y, z; x_c, y_c)$ 라고 하고 V_Q 를 등간격인 N 개의 점으로

이산화한다면, 식 (12)는 다시

$$p(n) = p_p(n) + p_s(n|x_c, y_c) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{p} &= [p(1) \dots p(N)]^T, \\ \hat{p}_p &= [p_p(1) \dots p_p(N)]^T, \\ \hat{p}_s(x_c, y_c) &= [p_s(1|x_c, y_c) \dots p_s(N|x_c, y_c)]^T \end{aligned} \quad (14)$$

로 정의한다면(위첨자 T 는 전치 연산을 나타냄), 식 (13)은 다시

$$\hat{p} = \hat{p}_p + \hat{p}_s(x_c, y_c) \quad (15)$$

로 쓸 수 있다. 이러한 이산화 과정에 의하여 식 (12)의 가격 함수는

$$\begin{aligned} J &= \hat{p}^H \hat{p} = (\hat{p}_p^H \hat{p}_p + \hat{p}_p^H \hat{p}_s(x_c, y_c) \\ &+ \hat{p}_s^H(x_c, y_c) \hat{p}_p + \hat{p}_s^H(x_c, y_c) \hat{p}_s(x_c, y_c)) \end{aligned} \quad (16)$$

와 같이 고쳐 쓸 수 있다.

제어 재료를 놓을 수 있는 위치가 $(x_c^{(1)}, y_c^{(1)})$, ... $(x_c^{(M)}, y_c^{(M)})$ 로 M 개라면, 이들 각각에 대해 식 (16)의 J 를 구할 수 있다. 이로부터 가격 함수를 최소화하는 위치를 구할 수 있다.

4. 모의 실험

제어 재료의 위치에 따른 가격 함수의 변동을 살펴기 위해서 모의 실험을 수행하였다. Fig. 3은 모의 실험에 사용된 물리적 상황을 표시하고 있다.

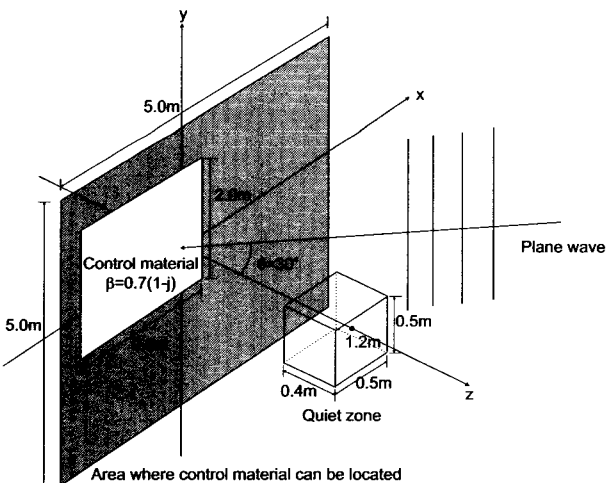
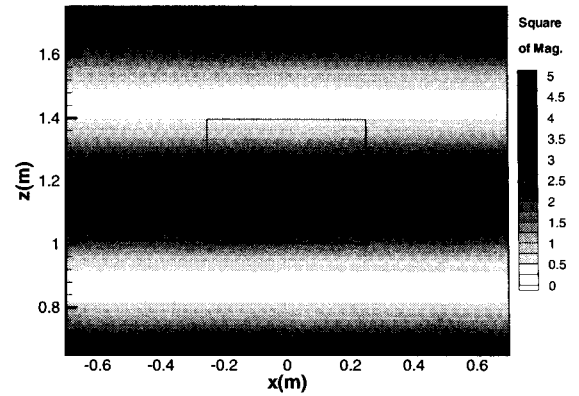
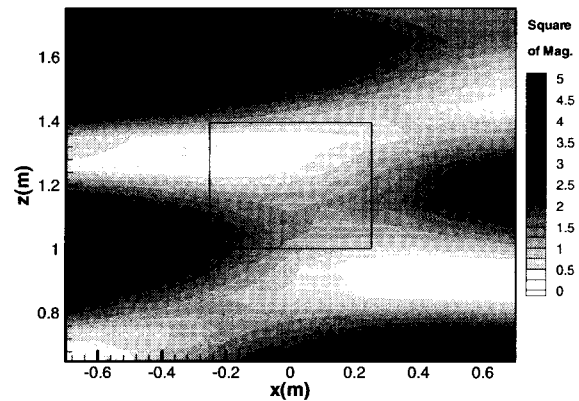


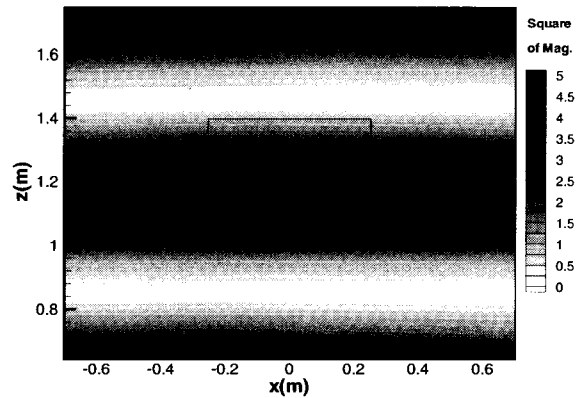
Fig. 3 Schematic diagram of physical arrangement used in the simulation.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Distribution of magnitude square of pressure: (a) primary sound field ($J/V_Q=2.7$), (b) minimum sound field($J/V_Q=0.92$) when the control material is located at $(-1.7 \text{ m}, 0)$, (c) maximum sound field($J/V_Q=3.5$) when the control material is located at $(-1.3 \text{ m}, 2.2 \text{ m})$

사용된 주파수는 343 Hz였고, 파장은 1 m이다. 재료의 β 값은 $0.7(1-j)$ 이고, 크기는 2 m \times 2 m였다. 재료의 중심 (x_c, y_c) 가 놓일 수 있는 영역은 원점을 중심으로 5 m \times 5

m의 크기이다. (x_c, y_c) 를 이 영역에서 x 와 y 방향으로 0.1 m씩 옮겨가며 가격 함수를 구하였다. 제어하고자 하는 영역은 중심의 위치가 (0, 0, 1.2 m)였고, 크기는 0.5 m×0.5 m×0.4 m이다. 이 영역에서의 가격 함수는 x, y, z 방향으로 0.1 m 간격으로 이산화하여 구하였다. 입사각은 z 축에 대해 임의로 30°를 채택하였다.

사실, 보다 실질적인 상황을 모사하기 위해서는 랜덤 입사(random incidence)의 경우를 다루어야 한다. 그러나, 기본적인 개념 정립을 위해, 임의의 입사각에 대한 모의 실험을 하는 것도 그 의미가 있다 할 수 있다.

Fig. 4는 $y=0$ 평면에서 제어하고자 하는 영역과 그 주변에서의 음압 분포를 보여 준다.

Fig. 4(a)는 제어 전의 음장을 보여주며, 이때 제어 영역에서의 평균 위치 에너지 밀도 (J/V_Q)는 2.7이다.

Fig. 4(b)는 가격 함수가 최소가 되는 경우의 음장을 보여 주는데, 이때 재료의 위치는 (-1.7 m, 0 m)이고, 평균 위치 에너지 밀도는 0.92이다. 이로부터 위치의 최적화에 의해 이 모의 실험 사양에서는 4.7 dB의 소음 감소를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 제어 영역 밖에서는 오히려 제어 전보다 소음 레벨이 커지는 영역이 있음을 볼 수 있다. 이는 제어 영역에서는 본래 음장과 제어 음장이 서로 상쇄되지만 그 밖에서는 보강도 일어날 수 있기 때문이다. 이는 능동 소음 제어에서도 골잘 관측되는 결과이다. 따라서 제어 영역이 넓어질수록 상쇄 영역뿐만 아니라 보강 영역도 포함하게 되어 전체적인 제어 성능은 떨어진다.

Fig. 4(c)는 가격 함수가 최대가 되는 경우를 보여 주는데, 이때 재료의 위치는 (-1.3 m, 2.2 m)였고 평균 위치 에너지 밀도는 3.5이다. 이 결과는 재료의 위치에 의해 이 모의 실험에서는 최대 5.8 dB의 소음 레벨의 차이가 있을 수 있음을 보여 준다. 이로부터 제어 재료의 위치는 제어 영

역이 그다지 크지 않은 경우에는 중요한 변수가 될 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 343 Hz를 중심 주파수로 하는 옥타브 대역(octave band)에 대한 제어 재료의 영향을 보여주는 결과이다. 제어 재료의 위치는 (-1.7 m, 0 m)로서, 343 Hz에서 최적의 효과를 보이는 위치로 고정한 채 주파수만을 변화시켜 해석하였다. 250 Hz 근방에서는 오히려 평균 위치 에너지 밀도가 증가하나, 그 외의 구간에서는 제어 재료에 의해 평균 위치 에너지가 감소하고 있다. 따라서, 중심 주파수인 343 Hz 근방에서의 제어 재료의 β 값 변화가 거의 없는 경우, 단일 주파수에서 해석된 결과를 일정 폭을 가진 주파수 대역에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은, 무한 크기의 강체 벽에 평면파가 입사하는 경우에 대한 수식화 과정을 통해, 능동 소음 제어와 흡음재를 사용한 수동 제어간에 유사성이 있음을 보였다. 또한, 제어 재료인 흡음재 위치를 최적화 하는 방법에 대해 기술하고 그 가능성을 보였다. 모의 실험을 통해 능동 소음 제어에서 제어 음원의 위치가 중요한 것과 같이, 제어 재료의 위치가 정속 공간을 효율적으로 형성하는데 있어 주요한 인자임을 밝혔다.

본 이론을 확장하여, 입사각이 랜덤한 경우나 재료의 배열이 공간상에 있는 경우 등에 적용하면 실질적인 응용이 가능하리라 생각한다.

후 기

본 연구는 한국과학기술평가원(KISTEP)의 국가지정연구실 사업과 교육부의 두뇌한국21(BK21) 사업의 지원으로 수행되었습니다

참 고 문 헌

- (1) Morse, P. M. and Ingard, K. U., 1968, "Theoretical Acoustics", Princeton University Press, Princeton New Jersey, pp. 441~443.
- (2) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., 1980, "Fundamentals of Acoustics", 3rd edition, John Wiley & Sons, pp. 137~139.

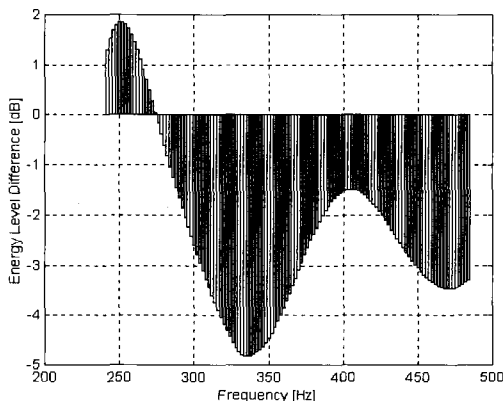


Fig. 5 Acoustic potential energy difference before and after the passive control.