

흡음재 배치를 이용한 정숙 공간 형성 방법

박주배*, 김양한**

Quiet Zone Generation by Absorption Materials

Joo-Bae Park and Yang-Hann Kim

ABSTRACT

An acoustic field in a 3 dimensional enclosure is caused from interference between sound sources and the complex reflections from wall. Therefore, changing an acoustic property of wall such as admittance means generating another acoustic field. The purpose of this paper is utilizing the characteristic to make a quiet zone. 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 reflection strength of it. Second, through a numerical simulation, this paper shows that the position of the control material is an important variable of the control.

1. 서론

임의의 어드미턴스(admittance) 값을 갖는 벽면들로 구성된 3차원 공간(Room)에, 임의의 크기와 위상을 갖는 음원이 존재하는 경우를 생각해 보자. 음원으로부터 방사된 음파와 벽면으로 반사된 반사파들의 상호 간섭으로 인해, 공간 내부에는 특정한 형태의 음장이 형성되게 된다. 이 때 나타나는 음장은, 경계 조건에 해당하는 벽면 어드미턴스 값의 변화에 따라 여러가지로 나타나게 될 것이다. 이러한 공간에서 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.

다른 방법으로는, 벽면의 어드미턴스 값을 변

화시켜 공간 내부의 음장을 변화시키는 방법을 생각해 볼 수 있다. 이러한 어드미턴스 값 변화는, 흡음재의 교체나, 배열 방법의 변경 등을 통해 구현할 수 있다. 본 논문에서는, 능동 소음 제어의 제어 음원과 비교하여, 이러한 흡음재를 특별히 제어 재료(control material)라 부르기로 한다. 이러한 제어 재료를 사용하는 방법은 기본적으로는 경계 조건의 변화가 음장의 변화를 가져온다는 물리적 사실에 기초한다.

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 경우의 재료의 최적 위치 결정 방법에 대해 기술하고, 제어하고자 하는 영역이 그리 크지 않은 경우에는 재료의 위치가 중요한 변수 중의 하나임을 수치 모사를 통해 보이고자 한다.

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

2. 능동 소음 제어와의 유사성

Fig.1은 3차원 공간에서 음원과 벽면에 의해 생성되는 음장의 한 예를 나타낸 그림이다. 한 개의 음원에 의해 공간이 가진되고 있으며, 전체 벽면은 $\beta_0/\rho c$ 의 어드미턴스를 갖는다.

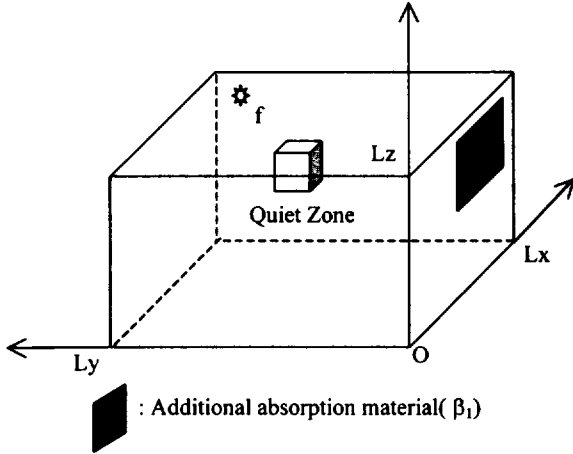


Fig. 1 Sound field in a 3 dimensional enclosure

Fig.1에서 'f'는 임의의 음원을 나타내며, 추가적으로 $\beta_1/\rho c$ 의 어드미턴스를 갖는 흡음재가 X-Z 축 평면상에 부착되어 있다. L_x , L_y , L_z 는 방의 길이 각각 나타낸다. 추가적으로 부착된 흡음재는 제어 재료의 역할을 하게 된다. Fig.1에 표시된 정속 공간(Quiet Volume)은 제어하고자 하는 공간상의 영역을 나타내며, 제어 재료의 위치 변화에 따라 다른 크기의 음향 위치 에너지를 갖게 된다.

$$p(\vec{r}) = \int_V f(\vec{r}_v)G(\vec{r}|\vec{r}_v)dV + \int_S \left\{ G(\vec{r}|\vec{r}_s) \frac{\partial p(\vec{r}_s)}{\partial \vec{n}} - p(\vec{r}_s) \frac{\partial G(\vec{r}|\vec{r}_s)}{\partial \vec{n}} \right\} dS \quad (1)$$

식(1)은, Fig.1의 공간 내부의 임의의 위치에서의 음압을 나타내는 Kirchhoff-Helmholtz 적분 방정식이다[1]. 시간에 따른 변화를 나타내는 $\exp(-j\omega t)$ 를 생략하고 나타내었기 때문에, 공간의 함수로만 나타남을 볼 수 있다.

식 (2)는 공간 내부 벽면의 물성을, 식 (3)은 경계 조건을 각각 나타내는 것이다[2]. S_1 은 제어 재료의 영역을 나타내며, S_0 은 전체 벽면 S에서 S_1

을 제외한 영역을 나타낸다.

$$\beta(\vec{r}) = \begin{cases} \beta_0 & \text{at } S_0 \\ \beta_1 & \text{at } S_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$B.C. \begin{cases} \frac{\partial p(\vec{r}_s)}{\partial \vec{n}} = jk\beta(\vec{r}_s)p(\vec{r}_s) \\ \frac{\partial G(\vec{r}|\vec{r}_s)}{\partial \vec{n}} = jk\beta(\vec{r}_s)G(\vec{r}|\vec{r}_s) \end{cases} \quad (3)$$

$$p(\vec{r}) = \int_V f(\vec{r}_v)G(\vec{r}|\vec{r}_v)dV + \int_{S_1} jk(\beta_1 - \beta_0)p(\vec{r}_s)(G(\vec{r}|\vec{r}_s)dS \quad (4)$$

식 (2)와 (3)을 식(1)에 적용하면, 식(4)를 얻는다. 경계 조건을 적용함으로써 해서, 표면 S에 대한 적분항이, 제어 재료가 위치한 S_1 에 대한 적분으로 바뀌었음을 볼 수 있다. 식(4)에서 ' $\beta_1 = \beta_0$ '인 경우를 고려하면, 추가적인 제어 재료가 부착되지 않은 경우의 압력을 나타내는 관계식 (5)를 얻게 된다.

$$p_o(\vec{r}) = \int_V f(\vec{r}_v)G(\vec{r}|\vec{r}_v)dV \quad (5)$$

$$p(\vec{r}) = p_o(\vec{r}) + \int_{S_1} jk(\beta_1 - \beta_0)p(\vec{r}_s)(G(\vec{r}|\vec{r}_s)dS \quad (6)$$

식 (5)를 다시 식(4)에 대입하면, 최종적으로 식 (6)을 얻게 된다. 식 (6)은 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 제어에 의해 추가로 생기는 음장이므로 능동 소음 제어에서 제어 음장(secondary sound field)에 해당된다. 식 (6)으로부터, 제어 음장이 흡음재의 물성 및 벽면상의 위치와 기하학적 특성에 의해 변화함을 알 수 있다. 즉 제어 재료가 공간상에서 능동 소음 제어에서의 제어 음원(control source) 역할을 하고 있음을 볼 수 있다.

식 (3)에 사용된 그린 함수(Green Function;G)의 경계 조건을 다음의 식(7)의 강체 벽 조건으로 고려하면, 식 (1)-(6)과 같은 방식으로 다음의 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial G(\bar{r} | \bar{r}_s)}{\partial \bar{n}} = 0 \quad (7)$$

$$p(\bar{r}) = p_r(\bar{r}) + \int_S jk\beta(\bar{r}_s) p(\bar{r}_s) G(\bar{r} | \bar{r}_s) dS \quad (8)$$

여기서, 다른 형태의 식 (8)을 도입한 것은, 강체 벽 경계 조건의 그린 함수를 사용하는 것이 보다 용이하기 때문이다. Kirchhoff-Helmholtz 적분 방정식에는 임의의 그린 함수를 사용할 수 있으므로, 사용된 그린 함수에 관계없이 식 (6)과 식 (8)은 같은 압력값을 계산하게 된다. 식 (8)의 항들을 살펴 보면, p_r 은 강체 벽 경계 조건에서의 공간 내부에서의 압력을 나타낸다. 그리고, 그린 함수가 바깥에 따라, 표면 적분의 영역이 S_1 에서 전체 벽면 S 로 바뀌었음을 볼 수 있다. 본 논문의 수치 모사에는 식 (8)이 사용되었다.

3. 제어 재료의 최적 위치 선정

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

$$J = \frac{1}{4\rho c^2} \iint_{V_Q} |p(\bar{r}_q)|^2 dV_Q \quad (9)$$

와 같이 쓸 수 있다.

제어 재료의 형상이 R_x, R_y 의 두 변으로 이루어진 직사각형 형상이고, 제어 재료의 중심점 위치를 \bar{r}_c 로 설정하자. 제어 재료가 \bar{r}_c 의 위치에 있을 때의 제어 음장을 $p_c(r | \bar{r}_c)$ 라고 하고 V_Q 를 등간격인 N 개의 점으로 이산화한다면, 식 (6)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p(\bar{r}_n) = p_o(\bar{r}_n) + p_c(\bar{r}_n | \bar{r}_s) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

식(10)으로 부터, 정숙 공간의 압력값을 벡터(Vector) 형태로 정리하면, 다음의 식 (11), (12), (13)과 같이 나타난다.

$$\tilde{p} = [p(1) \cdots p(N)]^T \quad (11)$$

$$\tilde{p}_o = [p_o(1) \cdots p_o(N)]^T \quad (12)$$

$$\tilde{p}_c(\bar{r}_c) = [p_c(1 | \bar{r}_c) \cdots p_c(N | \bar{r}_c)]^T \quad (13)$$

로 정의한다면(위첨자 T는 전치 연산을 나타냄), 식 (10)은 다시

$$\tilde{p} = \tilde{p}_o + \tilde{p}_c(\bar{r}_c) \quad (14)$$

로 쓸 수 있다. 이러한 이산화 과정에 의하여 식 (9)의 가격 함수는

$$J = \tilde{p}^H \tilde{p} = \tilde{p}_p^H \tilde{p}_p + \tilde{p}_p^H \tilde{p}_s(\bar{r}_c) + \tilde{p}_s^H(\bar{r}_c) \tilde{p}_p + \tilde{p}_s^H(\bar{r}_c) \tilde{p}_s(\bar{r}_c) \quad (15)$$

와 같이 고쳐 쓸 수 있다.

제어 재료를 놓을 수 있는 위치가 $\bar{r}_c^{(1)}, \dots, \bar{r}_c^{(M)}$ 로 M 개로 설정된다면, 이들 각각에 대해 식 (15)의 $J(\bar{r}_c)$ 를 구할 수 있다. 최종적으로 이들 $J(\bar{r}_c)$ 값들을 비교하여, 가격 함수를 최소화하는 위치 \bar{r}_c 를 구할 수 있다.

4. 수치 모사(Numerical Simulation)

4-1. 수치 모사 방법

제어 재료의 위치에 따른 가격 함수의 변동을 살펴기 위해서 수치 모사를 수행하였다. Fig. 1에 나타낸 바와 같은 직육면체 형상의 공간을 그 대상으로 선정하였다. 공간의 크기는 $L_x=4.5m$, $L_y=5.6m$, $L_z=2.5m$ 로 설정하였다.

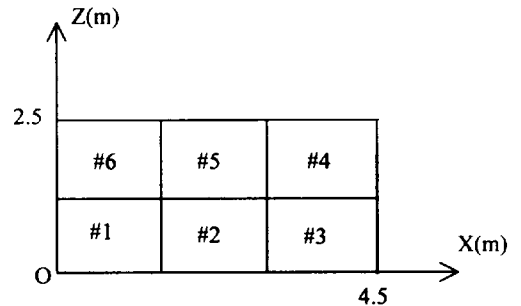


Fig.2 Locations of control material

공간을 가진하는 음원은 체적 속도 $1.0E-03(m^3)$ 로 방사하는 단극 음원 ' $jk\rho c(1.0E-03)\delta(\bar{r}-\bar{r}_o)$ '로 가정하였으며, 모드의 절점에 위치하는 것을 피하기 위해 $(0.999L_x, 0.999L_y, 0.999L_z)$ 에 위치하는 것으로 가정하였다. 가진 주파수 $f=1kHz$ 로($k=18.3$) 설정하였으며, 제어 재료의 β 값은 $0.7(1-j)$ 으로, 크기는 높이 1.5m, 너비 1.25m로 가정하였다. 제어 재료의 이동 위치는 X-Z축 평면으로 제한하여,

총 6곳의 위치를 옮겨 가며 음향 위치 에너지를 계산하였다. Fig. 2는 제어 재료의 이동 위치를 나타낸다.

정숙 공간에서의 압력을 계산하기 위해 식 (8)을 사용하였다. 식 (8)을 사용하기 위해서는 강체 벽 경계 조건에서의 압력값과 그린 함수, 그리고, 흡음재가 부착된 상태에서의 벽면에서의 압력값이 필요하게 된다.

$$\begin{cases} (\nabla^2 + k_n^2)\Psi_n(\vec{r}) = 0 \\ B.C. \frac{\partial \Psi_n(\vec{r})}{\partial \vec{n}} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$G(\vec{r} | \vec{r}_s) = \sum_n a_n \Psi_n(\vec{r}_s) \Psi_n(\vec{r}) \quad (17)$$

$$\text{where, } a_n(\vec{r}_s) = \frac{jk_p c}{V(k^2 - k_n^2)}$$

그린 함수는 강체 벽 경계 조건을 만족하는 모드의 조합(Mode Expansion)으로 나타내었다[3]. 그리고, 강체 벽 경계 조건에서의 압력값은 이 그린 함수를 이용하여 계산하였다. 식 (16)은 강체 벽 경계 조건에서의 모드 함수와 경계 조건을 나타내며, 식(17)은 이 모드 함수의 조합으로 나타낸 그린 함수이다.

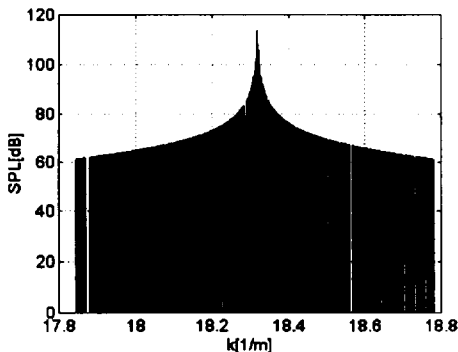


Fig.3 Modal Contribution

모드 함수의 조합으로 그린 함수를 정확히 나타내기 위해서는 무한대 개수의 모드를 사용하여야 한다. 그러나, 현실적으로 이러한 무한대 개수의 모드를 고려할 수는 없다. 본 수치 모사에서는, 가진 주파수 근처의 고유 주파수를 갖는 모드 1000개의 조합으로 그린 함수를 나타내었다. Fig.3는 이들 모드 함수들의 기여도를 나타내는 식

(17)의 a_n 항의 크기를 SPL(Sound Pressure Level)로 나타낸 것이다. 수치 모사에는 최대 52.8dB의 차이를 갖는 모드까지 고려되었다. Fig.4의 X축은 파수 k_n 을 나타내는데, 음원의 가진 파수 $k=18.3$ 근처에서 매우 크게 나타남을 알 수 있다.

흡음재가 부착된 상태에서의 벽면에서의 압력값은, 식 (8)을 이산화 한 뒤 강체 벽 경계 조건에서의 그린 함수와 압력값을 대입하여 계산하였다. 식 (18)은, 식(8)을 어드미턴스 $\tilde{\beta}$ 와 벽면에서의 압력값 \tilde{p}_s , 그린 함수 \tilde{G} 로 이산화한 것이다. 식 (18)의 이산화에는 Gaussian Quadrature적분 방법을 사용하였다. 식 (8)에서, 임의의 위치에서의 압력을 나타내는 \tilde{p} 와 \tilde{p}_o 의 위치 벡터 \vec{r} 을 벽면에서의 위치벡터 \vec{r}_s 로 대체 시키면, 벽면에서의 압력 벡터 \tilde{p}_s 를 미지수로 갖는 행렬식 (19)를 얻게 된다. 행렬식 (19)로부터 계산된 벽면에서의 압력을 다시 식(8)에 적용하면, 임의의 위치에서의 압력값을 계산할 수 있다.

$$\tilde{p}(\vec{r}) = \tilde{p}_o(\vec{r}) + jk\tilde{G}[\text{diag}(\tilde{\beta})]\tilde{p}_s(\vec{r}_s) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \tilde{p}(\vec{r}_s) &= \tilde{p}_s(\vec{r}_s) \\ &= \tilde{p}_o(\vec{r}_s) + jk\tilde{G}[\text{diag}(\tilde{\beta})]\tilde{p}_s(\vec{r}_s) \end{aligned} \quad (19)$$

식 (18)에서 ‘ \approx ’는 2차원 행렬을 의미하고, ‘diag()’는 벡터를 2차원 대각 행렬로 만드는 연산자(Operator)를 의미한다.

4-2. 수치 모사 결과

정숙 공간은 Fig.1에 나타낸 바와 같은 정육면체로(높이 1m, 너비 1m, 길이 1m) 설정하였으며, 공간상의 위치는 $1.75 \leq x \leq 2.75$, $2 \leq y \leq 3$, $1 \leq z \leq 2$ 로 설정하였다. Fig.4-9는, Fig.2에 설정된 6곳의 위치에 각각 흡음재를 부착한 상태에서, 정숙 공간의 음압 레벨(Sound pressure level)분포를 계산한 결과이다. 현재 그려진 결과는 3차원 공간의 정숙 공간에 4개의 단면을 설정하여, 각 단면에서의 음압 레벨 분포를 입체적으로 도시한 것이다. 음압 레벨 단위인 dB의 기준값(Reference)으로는 ‘50E-06(Pa)’을 사용하였다.

각 위치에서의 음향 위치 에너지를 살펴 보면, #1[6.6E-03 Joule], #2[6.7E-04 Joule], #3[3.2E-03 Joule], #4[4.0E-04Joule], #5[9.4E-04 Joule], #6[4.8E-03 Joule]로 나타나는 것을 볼 수 있다. 위치에 따라 최대

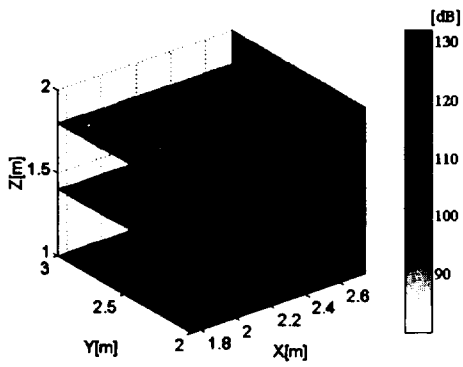


Fig.4 Distribution of sound pressure level[#1]

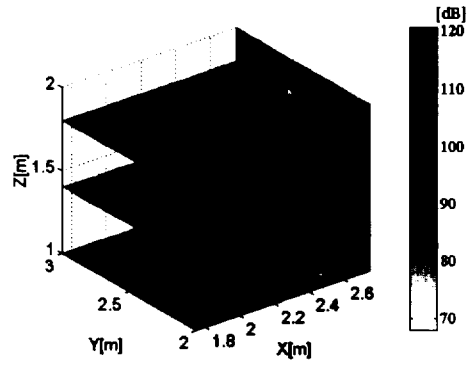


Fig.7 Distribution of sound pressure level[#4]

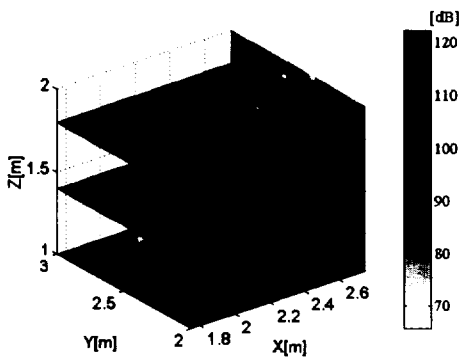


Fig.5 Distribution of sound pressure level[#2]

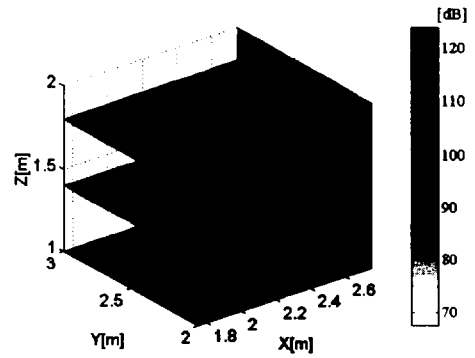


Fig.8 Distribution of sound pressure level[#5]

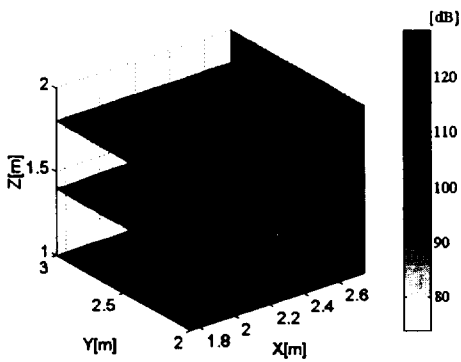


Fig.6 Distribution of sound pressure level[#3]

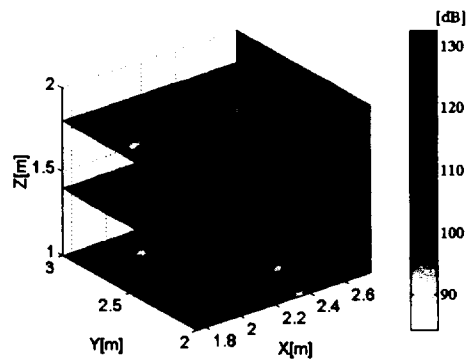


Fig.9 Distribution of sound pressure level[#6]

'6.2E-03(Joule)'의 차이가 나타나는 것을 발견할 수 있으며, 이로부터 제어 재료의 위치가 정속 공간 형성을 위한 제어 변수중의 하나임을 확인할 수 있다.

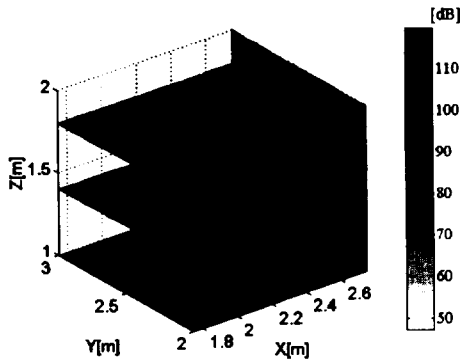


Fig.10 Distribution of sound pressure level (Totally rigid wall boundary condition)

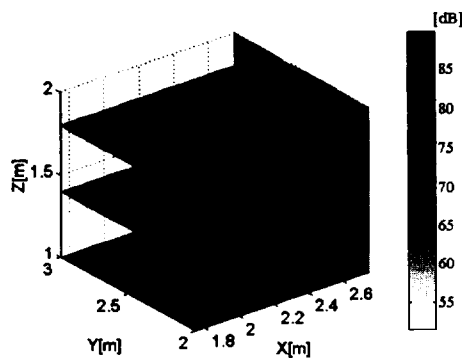


Fig.11 Distribution of sound pressure level (Totally absorption wall boundary condition)

Fig.10은 모든 벽면이 강체로 이루어진 경우의 정속 공간에서의 압력 분포를 나타내는 결과이다. 이 때의 음향 에너지 값은 '4.0E-04(Joule)'로 나타난다. 흡음재를 #4에 위치시켰을 때와 유사한 크기로 나타남을 볼 수 있다. Fig. 11은 모든 벽면에 흡음재가 부착된 경우의 결과이다. 이 때의 음향 위치 에너지 값은 '5.6E-07(Joule)'로 나타난다. 전체 벽면에 흡음재를 부착 시킨 경우이기 때문에, 가장 작은 크기의 음향 위치 에너지가 계산됨을 볼 수 있다.

5. 결론

흡음재의 제어 재료로서의 가능성을 살펴 보기 위하여, 간단한 형태의 3차원 공간에 대한 수치 모사를 수행하였다. 미리 설정한 위치에 흡음재를 위치 시키고 정속 공간에서의 음향 포텐셜 에너지를 계산한 결과, 흡음재의 위치가 정속 공간의 음압 형성에 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

실제적인 경우에 있어, 흡음재의 제어 재료로서의 위치를 결정하기 위해서는 단순 반복 계산에 의존하지 않는 최적화 알고리즘(Algorithm)이 필요하다. 불 연속적인 어드미턴스 값을 갖는 흡음재들의 조합과 배치를 통해 정속 공간을 형성할 수 있는, 최적화 기법에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

후기

본 연구는 한국과학기술평가원 (KISTEP) 의 국가지정연구실 사업과 교육부의 두뇌한국21 (BK21) 프로그램의 지원에 의해서 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] P. M. Morse and K. U. Ingard, 1986, Theoretical Acoustics, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, pp.319-322.
- [2] 김영기, 2000, "Locally reacting surface," <http://me.kaist.ac.kr/~yhklab/tech3.htm>
- [3] Allan D. Pierce, 1981, Acoustics, McGraw-Hill, pp.284-291

기호설명

β : specific acoustic admittance

k : 파수(Wave Number)

ρ : 공기 밀도

c : 음속

\vec{r} : 임의의 위치를 나타내는 위치 벡터

\vec{r}_s : 공간 벽면 위의 위치를 나타내는 벡터

\vec{r}_v : 공간 내부의 위치를 나타내는 벡터

\vec{r}_q : 정속 공간 내부의 위치를 나타내는 벡터

\vec{r}_c : 제어 요소(흡음재)의 설치 위치를 나타내는 벡터