

# 실내 정숙 공간 형성을 위한 흡음재 배치 방법

## Absorptive material arrangement to make a quiet zone in a three dimensional enclosure

° 박 주 배\*, 김 양 한\*\*

Joo-Bae Park, Yang-Hann Kim

### ABSTRACT

This study proposes an analytic method that determines an optimal arrangement of absorptive materials on an enclosure surface. Under the optimal arrangement, a quiet zone in the enclosure has the minimum  $\epsilon_p$  (acoustic potential energy density). The proposed method has been implemented by using a BEM simulation and a genetic algorithm. The BEM simulation evaluates the  $\epsilon_p$  under the prescribed arrangement of the absorptive materials. The genetic algorithm searches the optimal arrangement by referring the  $\epsilon_p$  evaluated from the BEM simulation. In the BEM simulation, the absorptive material arrangement is expressed as a vector, which is denoted as an absorptive material arrangement (AMA) vector. Besides, an admittance vector of which elements are admittances of available absorptive materials and an AMA matrix that transforms the admittance vector into the AMA vector are defined. The AMA matrix is also used as a chromosome in the genetic algorithm so that it functions to relate the BEM simulation to the genetic algorithm. As a verification example, the proposed method is applied to make the quiet zone in a parallelepiped enclosure.

### 1. 서 론

실내 정숙 공간의 음향 위치 에너지 밀도  $\epsilon_p$  를 최소화 하기 위한 제어 방법으로는, 음장 내에 제어 음원을 추가하여 제어하는 능동 소음 제어 방법 (ANC)과 음장의 경계 조건을 제어 대상으로 하는 수동 소음 제어 방법 (PNC)의 두 가지를 들 수 있다. 수동적인 방법 즉 소음 제어 요소를 공간에 고정적으로 배치하는 방법은 사실 많은 경우 실질적인 응용성이 있으나 능동 소음제어 방법에 비하여 체계적인 연구가 미흡하다. 주된 이유는 일반적으로 수동적인 방법을 통하여 능동적인 방법에서 추구하고 또 실현 가능하였던 정숙공간의 선택 주파수의 선택 등이 현실적으로 실현 가능하

지 않으리라는 생각 때문이었다. 그러나 공간에 배치된 흡음재도 공간에 위치한 주파수 선별적인 임피던스 요소인 점을 고려하면 주파수 선택적인 정숙 공간의 형성이 가능하리라는 것을 상상할 수 있다.

이와 같이 흡음재 설치를 통하여 수동 제어 시스템 (system)을 구현하는 경우, 수동 제어 시스템을 최적화 하기 위해서는 최적의 흡음재 배치를 결정할 수 있어야 한다. 본 논문의 목적은 이러한 최적의 흡음재 배치를 찾는 것이며, 이를 위해 경계 요소법 (BEM)과 유전 알고리즘 (genetic algorithm)을 함께 사용하는 방법을 제안한다.

최적의 흡음재 배치를 통하여 수동 제어 시스템을 구성하려 한 기존의 연구들을 살펴 보면 다음과 같다. Bernhard와 Takeo는[1] 2차원으로 모델링한 프린터의 내부 및 방사 음향 에너지의 최소화를 위해, 위치가 고정된 흡음재의 임피던스

\* 한국과학기술원 대학원 기계공학과  
archer@kaist.ac.kr

\*\* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

(impedance)를 최적화 하였다. Yang, Tseng 그리고 Ling은[2] 3차원 자동차 실내 음장의 음향 위치에너지를 최소화 하기 위하여, 흡음재의 위치와 임피던스 값을 동시에 최적화 하였다. 그리고, Martin과 Bodrero는[3] 위성 발사체 (Arian 5 launcher)의 탑재실 내부 음장을 수동 제어하기 위해, 한 가지 값을 가진 흡음재의 위치 최적화를 수행 하였다. 그러나, 흡음재의 위치 최적화는 탑재실 내부의 전체 벽면이 아닌 특정한 한 개 선 위에서만 수행 하였다.

이상의 기존 연구 결과들은, 흡음재 배치 최적화를 위한 해석적인 최적화 방법들을 제안하고, 그 적용 예들을 제시하였다. 그러나, 이들 연구들의 최적화 과정을 살펴 보면, 실제적으로 사용 가능한 흡음재의 임피던스 값들이 제한적이라는 사실을 고려하지 않고 있다. 따라서, 제안하는 방법들을 통해 선정된 최적 임피던스 값을 갖는 흡음재가 존재하지 않거나 새로이 제작할 수 없는 경우에는, 실제적으로는 구현할 수 없는 한계를 갖게 된다. 이러한 이유로 본 연구에서는, 최적 흡음재 배치에 사용되는 흡음재가 실제 사용 가능한 흡음재들 중에서 선정되도록 최적화 과정에 고려 하였다. 그리고, 추가적으로 벽면에 부착할 흡음재의 최소 크기를 설정하여, 해석적으로 설계된 흡음재 배치가 너무 복잡하여 실제적인 구현이 불가능한 경우가 발생하지 않도록 하였다.

본 연구에서는, 최적화 과정을 위한 가격 함수로 정속 공간의  $\epsilon_p$ 를 설정하였으며 실내 공간 벽면에서의 흡음재 배치를 나타내는 흡음재 배치 벡터를 가격 함수의 설계 변수로 선정하였다. 최적화 과정에서, 정속 공간의  $\epsilon_p$ 는 경계 요소법을 사용하여 계산하였으며, 최적 흡음재 배치 벡터는 유전 알고리즘을 적용하여 결정하였다.

## 2. 흡음재 배치 벡터의 정의

해석적인 방법을 사용하여 최적 흡음재 배치를 결정하기 위해서는 공간 벽면에서의 흡음재 배치를 수학적으로 정의할 수 있어야 한다. 본 연구에서는, 이를 위해 벽면에 부착할 흡음재의 단위 크기를 특정 값으로 고정하고, 벽면이 이 단위 크기 흡음재의 배열로 구성되어 있다고 가정하였다. 이와 같이, 최적화 해석을 수행하기 전에 실제 시공성을 고려하여 흡음재의 단위 크기를 결정하면, 최적화 해석을 통해 얻어진 흡음재 배치가 너무 복잡하여 실제 구현이 불가능해 지는 상황을 방지

할 수 있다.

Fig.1은 흡음재의 단위 크기가 전체 벽면의 1/6인 것으로 가정하고, 서로 다른 3가지 종류의 흡음재를 한 개 평면 위에 배치한 경우를 나타내는 그림이다. Fig.1의 흡음재 배치를 각 흡음재 설치 위치에 부여한 일련 번호 (#1~#6)와 관련 지으면, 다음의 식 (1)에 나타낸  $\bar{\mathbf{b}}_A$ 와 같이 벡터 형태로 나타낼 수 있다.

오류! 편집 중 필드 코드에서는 개체를 만들 수 없습니다. (1)

식 (1)에서,  $\beta_i$  ( $i=1,2,3$ )는 흡음재의 어드미턴스를 나타낸다.

#1 ( $\beta_1$ )	#2 ( $\beta_2$ )	#3 ( $\beta_1$ )
#4 ( $\beta_3$ )	#5 ( $\beta_1$ )	#6 ( $\beta_2$ )

Fig. 1. Absorptive material arrangement on a wall that is divided into 6 equal regions.

#1 ( $\beta_1$ )	#2 ( $\beta_1$ )	#3 ( $\beta_1$ )
#4 ( $\beta_3$ )	#5 ( $\beta_1$ )	#6 ( $\beta_2$ )

Fig. 2. Absorptive material arrangement on a wall that is divided into 6 equal regions. Each region is remodeled with 8 triangular BEM elements

본 연구에서는, 실제로 사용 가능한 흡음재들로 최적 흡음재 배치를 구성 하고자 하였으며, 이를 위해서는 흡음재 배치 벡터  $\bar{\mathbf{b}}_A$ 와 실제 사용 가능한 흡음재들 사이의 관계가 정의 되어야 한다.

사용 가능한 흡음재의 종류가 총 4가지인 것으로 가정하고, 이를 벡터 형식으로 나타내면 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 식 (2)의  $\bar{\mathbf{a}}$ 를 흡음재 종류 벡터라 정의하였다.

$$\bar{\mathbf{a}} = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3 \ \beta_4]^T \quad (2)$$

이 경우, 흡음재 배치 벡터  $\bar{\mathbf{b}}_A$ 와 흡음재 종

류 벡터  $\bar{a}$  사이의 관계는 식 (3)의 변환 행렬  $A$ 로 정의할 수 있다. 변환 행렬  $A$ 는 흡음재 배치 행렬이라 정의하였으며, 이 행렬  $A$ 는 요소(element)의 값으로 0 또는 1만을 가지며 열 벡터 간에는 서로 직교하는 (orthogonal) 특성을 갖는다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

최종적으로, 흡음재 배치 행렬  $A$ 를 이용하여 흡음재 배치 벡터  $\bar{b}_A$ 와 흡음재 종류 벡터  $\bar{a}$ 의 관계를 나타내면 다음의 식 (4)와 같이 나타난다.

$$\bar{b}_A = A\bar{a} \quad (4)$$

Fig.1의 흡음재 배치는 흡음재 판넬 (panel)의 최소 크기를 평면의 1/6로 가정한 경우이다. 경계 요소법을 사용하여, Fig.1 평면의 흡음재 배치가 실내 음장에 미치는 영향을 평가하기 위해서는, 평면을 다시 유한한 개수의 경계 요소로 분할하는 과정이 필요하다. Fig.2는 Fig.1의 평면을 다시 48개의 경계 요소로 분할한 경우를 가상적으로 나타낸 그림이다.

식 (1)의 흡음재 배치 벡터  $\bar{b}_A$ 는, 흡음재 시공시의 단위 크기를 기준으로 정의된 것이다. 따라서,  $\bar{b}_A$ 를 바로 경계 요소법에 사용할 수는 없으며  $\bar{b}_A$ 로부터 각 경계 요소의 어드미턴스 값을 지정하는 추가적인 과정이 필요하게 된다.  $\bar{b}_A$ 의 정의 방법과 유사하게 경계 요소의 어드미턴스 값을 나타내는 벡터를  $\bar{b}_e$ 로 나타내면, 추가적인 변환 행렬  $T_{Ae}$ 를 정의하여 식 (5)와 같이  $\bar{b}_A$ 와  $\bar{b}_e$ 의 관계를 나타낼 수 있다.

$$\bar{b}_e = T_{Ae}\bar{b}_A \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 각 경계 요소에서의 어드미턴스 값이 지정되면, 기존의 교재나[4,5] 논문들에서 설명된 경계 요소법을 사용하여 정속 공간에서의  $\epsilon_p$  값을 평가할 수 있다. 본 논문에서는 이 과정에 대한 구체적인 설명은 생략하였다.

### 3. 유전 알고리즘을 사용한 흡음재 배치 최적화

본 연구에서는 가격 함수로 음향 위치 에너지 밀도  $\epsilon_p$ 를, 설계 변수로 흡음재 배치 벡터  $\bar{b}_A$ 를 설정하였다. 설정된 가격 함수를 설계 변수에 대해 최소화 하기 위해서는, 우선적으로 가격 함수

와 설계 변수 사이의 수학적 관계를 파악하여 적절한 최적화 기법을 선정하여야 한다. 가격 함수  $\epsilon_p$ 는 다음의 식 (6)과 같이 정의된다.

$$\epsilon_p = \frac{1}{4\rho c^2 V_q} \int_V |p(\bar{r})|^2 dV \quad (6)$$

식 (6)에서,  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $c$ 는 음속,  $V_q$ 는 정속 공간의 크기, 그리고  $p(\bar{r})$  정속 공간에서의 압력을 나타낸다. 식 (6)에서는 설계 변수  $\bar{b}_A$ 가 직접적인  $\epsilon_p$ 의 독립 변수로 나타나지 않으며, 압력  $p(\bar{r})$ 의 내재적인 변수로 포함되어 있다.

설계 변수  $\bar{b}_A$ 와  $p(\bar{r})$ 의 관계를 살펴 보기 위해, Kirchhoff-Helmholtz 적분 방정식을 사용하여  $p(\bar{r})$ 을 나타내면 다음의 식 (7)과 같이 나타난다.

$$c(\bar{r})p(\bar{r}) = - \int_S [jk\beta(\bar{r}')p_s(\bar{r}')G(\bar{r}|\bar{r}')] + p_s(\bar{r}') \frac{\partial G(\bar{r}|\bar{r}')}{\partial n} ] dS \quad (7)$$

식(7)은 가격함수의 수식을 간단히 하기 위해 실내 공간에 음원이 없는 것으로 가정한 경우의 표현이다 식 (7)에서,  $c(\bar{r})$ 은 고체각 (solid angle),  $G(\bar{r}|\bar{r}')$ 는 자유 음장 그린 함수 (Green function),  $\beta(\bar{r}')$ 는 벽면 어드미턴스 분포, 그리고,  $p_s(\bar{r}')$ 는 벽면 압력을 각각 나타낸다.

식 (7)을 이산화 시켜 수치적으로 해석하는 경우, 벽면에서의 어드미턴스 분포를 나타내는  $\beta(\bar{r}')$ 은 앞서 정의한 흡음재 배치 벡터  $\bar{b}_A$ 로 대체되게 되며 벽면에서의 압력  $p_s(\bar{r}')$ 는 다시 경계 조건인  $\bar{b}_A$ 의 함수로 나타나게 된다. 최종적으로,  $p(\bar{r})$ 은  $\bar{b}_A$ 에 대한 직접 미분이 불가능한 함수 형태로 나타나게 되는데, 이는 가격 함수  $\epsilon_p$ 를 설계 변수  $\bar{b}_A$ 에 대해 미분하여 구배 (gradient)를 따라 추적하는 최적화 기법을 사용할 수 없음을 의미한다. 이 때문에, 본 연구에서는 가격 함수를 미분하지 않고 최적화 하는 유전 알고리즘을 사용하여 최적 흡음재 배치를 결정하였다.

#### 3.1 유전 알고리즘의 적용

유전 알고리즘을[6,7] 사용하기 위해서는, 설계 변수인 흡음재 배치 벡터를 유전 연산자의 적용이 가능한 문자 배열(string), 즉 유전자(chromosome)로 변환하는 코딩(coding) 과정이 필요하다. 그러나, 본 연구에서는 이를 위한 별도의 코딩 과정을 사용하지 않았다. 흡음재 배치 행렬  $A$ 의 요소가 0, 1로만 구성되어 있고 각 행이 각

흡음재 위치에서의 흡음재 배치를 나타낸다는 점에 착안하여, 행렬  $A$ 를 유전자로서 활용하였다.

흡음재 배치 행렬  $A$ 는 기존의 유전 알고리즘에서 사용되는 벡터 형태의 문자 배열이 아닌, 여러 개의 열 벡터로 구성된 행렬 형태를 갖는다. 이 때문에, 새로운 형태의 유전 연산자 (교배, 돌연변이)를 정의하여 적용하였다. 이들 연산자의 연산을 통해, 설계 변수는 최적의  $\bar{b}_A$ 에 수렴하게 된다.

교배 연산은 랜덤 (random)하게 정의된 특정 행 이하에서의 행렬  $A_1, A_2$  간의 행들을 상호 교환하는 것으로 정의 되었다. 행을 대상으로 한 것은 각각의 행이 흡음재 설치 위치에서의 어드미턴스 값을 결정하는 독립적인 요소로 작용하기 때문이다. 그리고, 돌연 변이 연산은 랜덤하게 정의된 특정 행에서, 그 행의 요소들이 다시 랜덤하게 지정된 수 만큼 순환 열수 이동 (cyclic column shift)을 수행 하는 것으로 정의하였다. 다음은 교배 연산과 돌연변이 연산의 간단한 예들이다.

### 3.1 교배 연산 (crossover operation)의 예

흡음재 배치 행렬이 4개의 행과 3개의 열로 정의되고, 4번째 행에서의 교배 연산을 수행하는 경우에는 다음의 식 (8,9)과 같이 수행된다. 식 (8)과 (9)는 각각 교배 연산을 수행하기 전과 후의 상태를 나타낸다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (8)에서 \*는 교배 연산 위치를 나타낸다.

### 3.2 돌연변이 연산 (mutation operation)의 예

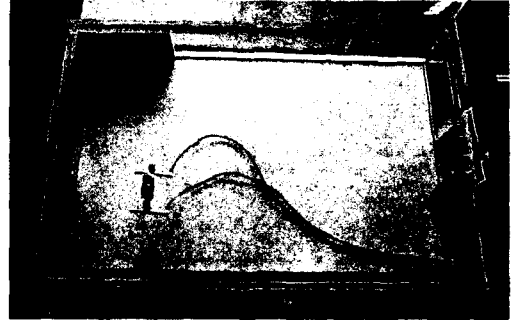
흡음재 배치 행렬의 첫번째 행에서 순환 열수 1개의 돌연변이 연산을 수행하는 경우, 다음의 식 (10)과 같이 나타난다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{Mutation}} A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

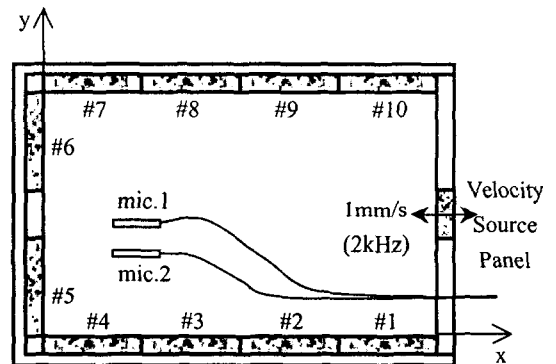
식 (10)에서 \*는 돌연변이 연산 위치를 나타낸다.

### 4. 직육면체 실내공간에서의 최적 흡음재 배치

제안하는 최적 흡음재 배치 방법의 유용성을 확인하기 위해, 직육면체 형상 실내 공간을 대상으로 경계 요소법과 유전 알고리즘을 사용한 흡음재 배치 최적화를 수행하였다. Fig. 3은 실험을 위해 아크릴 판넬 (acrylic panel)로 제작된 직육면체 실내 공간의 모형과 평면도를 나타낸다.



(a) The photo of the experimental apparatus



(b) Plane view

Fig. 3. A parallelepiped enclosure (a width of 50cm, a length of 80cm and a height of 10cm).

Fig. 3 (b)를 살펴 보면 #1~#10의 번호가 지정된 10개의 회색 사각형을 볼 수 있다. 이들 사각형들은 각각 임의의 어드미턴스를 갖는 높이 10cm, 너비 20cm, 두께 2cm의 흡음재 판넬 (panel)을 나타낸다. 10곳의 흡음재 위치를 제어하여 임의의 음장 경계 조건을 구현하기 위하여 Fig. 3 (b)와 같이 가변식의 흡음재 설치 위치를 설정하였다.

흡음재는 흡음률 값이 0.5이상의 값을 갖는 고주파 영역에서 주로 사용된다. 그러나, 경계 요소의 크기가 일정한 경우, 경계 요소법의 오차는 고주파수로 갈수록 증가하게 된다. 이러한 상호

반대적인 주파수 특성을 고려하여 소음원의 가진 주파수를 2kHz로 설정하였으며, 실제 실험에서의 가진은 Fig. 3 (b)의 음원 판 (velocity source panel)을 2kHz의 주파수로 조화 가진하여 수행하였다.

$$3\text{cm} \leq x \leq 77\text{cm}, 2\text{cm} \leq y \leq 48\text{cm}, 1\text{cm} \leq z \leq 9\text{cm} \quad (11)$$

제어 대상이 되는 정속 공간의 크기는 식 (11)과 같이 설정하였다. 국부적인 제어 효과가 아닌 전체 공간에서의 제어 효과를 살펴 보기위해, 경계 요소법의 오차가 크게 나타나는 벽면 부근을 제외한 나머지 공간을 정속 공간으로 설정하였다.

Table 1. Four absorptive materials at 2kHz

Specimen	A	B	C	D
Impedance	1332.9 +j564.3	545.8 +j332.2	443.2 +j333.9	$\infty$
Absorption Coefficient	0.66	0.88	0.87	0

Table 2. Two verification cases

Case	Free alterable locations	Fixed rigid locations
1	#4, #5, #6, #7	#1, #2, #3, #8, #9, #10
2	#5, #6, #7, #8, #9, #10	#1, #2, #3, #4

사용 가능한 흡음재들로는 Table.1 에 나타낸 A, B, C, D의 4가지를 설정하였다. Table. 1은 각 흡음재 별로 30개의 시편을 측정하여 평균한 임피던스 (impedance)와 흡음률 값을 나타낸다. D는 강제벽 경계 조건을 의미한다.

Table.2는 제안하는 방법의 적용 예로 설정한 두 가지 경우들을 나타낸다. Table.2 의 항목들 중, 'Fixed rigid locations'는 강제벽 경계 조건으로 흡음재 배치를 통해 경계 조건을 변화시킬 수 없는 위치이며, 'Free alterable locations'는 유전 알고리즘을 사용하여 최적 흡음재 배치를 구현하려는 위치이다.

Table 3. Number of cost function evaluations

Case	Proposed method	Full domain search	Cost function evaluation ratio
1	62	$4^4 (=256)$	0.242
2	215	$4^6 (=4096)$	0.053

Table. 3는 가능한 모든 흡음재 배치 경우를 해석하여 엄밀 해 (흡음재 배치)를 구한 경우와 유전 알고리즘을 사용하여 구한 경우의 가격 합수

계산 회수를 비교한 것이다. 'Proposed method'는 본 연구에서 제안한 방법을, 'Full domain search'는 모든 가능한 흡음재 배치에 대해 해석하는 경우를 각각 나타낸다. 유전 알고리즘을 사용하는 경우, Case.1, 2 각각 24.2%, 5.3%의 계산만으로 최적 흡음재 배치를 구할 수 있음을 보이고 있다.

Fig. 6, 7은 Case1, 2의 각 경우에 적용한 유전자 알고리즘의 수렴성을 보여주는 그림이다. 초기 1 세대 (generation)를 시작으로 선택 (selection), 교배 (crossover), 돌연변이 (mutation)의 유전자 연산을 통해 다음 세대로의 진화 (evolution)가 이루어지고, 이러한 진화의 반복을 통해 최적 흡음재 배치 (엄밀 해)에 수렴하고 있음을 볼 수 있다. 각 세대의 인구 (population)수는 10으로, 교배 확률은 70%, 돌연 변이 확률은 10%로 설정하였다. Case 1, 2 각각 6번 째와 27번 째 세대에서 최적 흡음재 배치에 수렴하는 결과를 보이고 있다. 유전 알고리즘 해석을 통해 얻어진 최적 흡음재 배치는 Table. 4에 나타내었다.

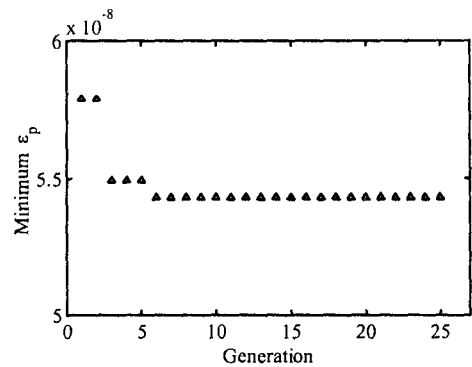


Fig. 6. Minimum  $\epsilon_p$  at each genetic algorithm generation. The exact minimum  $\epsilon_p$  from full domain search is 5.4325E-08.

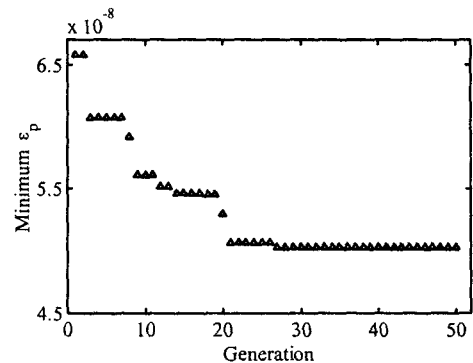


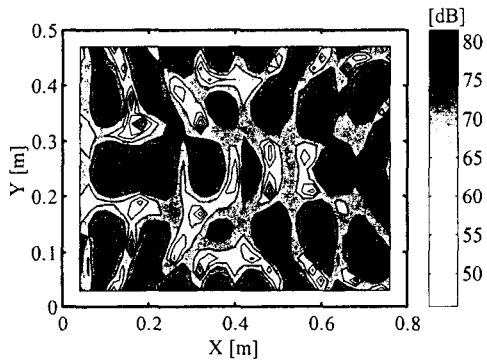
Fig. 7. Minimum  $\epsilon_p$  at each genetic algorithm

generation. The exact minimum  $\varepsilon_p$  from full domain search is 5.0325E-08.

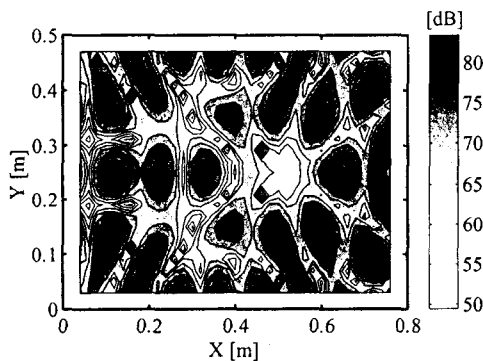
Table.4 Optimal absorptive material arrangement

Case	$\bar{\mathbf{b}}_{A\_min}$
1	$[D D D C D D C D D D]^T$
2	$[D D D D A D D D A C]^T$

제안하는 방법의 정확도를 평가하기 위하여, 해석적인 방법으로 얻어진 최적 흡음재 배치의 음장을 실험적으로 구현하고 이를 이론 해와 비교하였다. 결과를 살펴보면, Fig. 8 (a)는 Table. 4에 나타낸 Case.1 의 최적 배치를 실험적으로 구현하여 정속 공간의 중간 높이 평면에서의 음압 레벨 (SPL)을 측정한 것이다. 경계 요소법으로 계산된 Fig. 8 (b)와 비교할 때, 값 자체는 다소 차이를 보이나 전체적인 분포는 근사적으로 일치하고 있음을 볼 수 있다.



(a) Experiment ( $45.4 \leq SPL \leq 81.6$ )



(b) BEM simulation ( $49.5 \leq SPL \leq 83.4$ )

Fig. 8. SPL contours on the mid plane under the optimal absorptive material arrangement of the case 1.

## 5. 결론

3차원 실내 공간에서의 정속 공간 형성을 위하여, 경계 요소법과 유전 알고리즘을 함께 사용하는 흡음재 배치 최적화 방법을 제안 하였다. 흡음재 배치를 수학적으로 고려하기 위하여 흡음재 배치 벡터  $\bar{\mathbf{b}}_A$ , 흡음재 배치 행렬  $\mathbf{A}$ , 흡음재 종류 벡터  $\bar{\mathbf{a}}$ 를 정의하였으며, 이들 중 흡음재 배치 행렬  $\mathbf{A}$ 를 유전 알고리즘의 유전자로 사용하였다.

제안하는 방법을 직사각형 실내 공간에서의 흡음재 배치 최적화에 적용 하였으며, 이를 통해 그 유용성을 확인 하였다.

본 연구에서는, 실제 사용 가능한 흡음재들만을 사용하여 최적의 흡음재 배치를 결정하였다. 따라서, 해석 결과를 바로 현장에 적용할 수 있다는 장점과 함께, 사용 가능한 흡음재의 종류에 따라 제어 성능이 결정된다는 단점을 갖는다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술평가원(KISTEP)의 국가지정연구실(NRL) 사업과, 교육인적자원부의 두뇌한국21(BK21) 사업의 지원으로 수행되었습니다. 실험에 사용된 흡음재를 제공하여 주신 남양 노비텍 (주)에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. R. J. Bernhard and S. Takeo 1988 *J. Acoust. Soc. Am.* **83**, 2224-2230. A finite element procedure for design of cavity acoustical treatment
2. T. C. Yang, C. H. Tseng, and S. F. Ling 1995 *J. Acoust. Soc. Am.* **98**, 302-312. A boundary-element-based optimization technique for design of enclosure acoustical treatments.
3. V. Martin and A. Bodrero 1997 *J. Sound Vib.* **204**, 331-357. An introduction to the control of sound field by optimizing impedance locations on the wall of an acoustic cavity.
4. C. A. Brebbia 1984 *Boundary Element Techniques*, Springer-Verlag Berlin.
5. R. D. Ciskowski and C. A. Brebbia 1991 *Boundary Element Methods in Acoustics*, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston. Co-published with Elsevier Applied Science, London, New York.
6. Z. Michalewicz 1996 *Genetic Algorithms + Data Structure = Evolution Programs*. Springer-Verlag, Berlin.
7. D. E. Goldberg 1999 *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley.