

# 임의의 위치에 가상 인텐시티 형성 방법: 방법론과 그 물리적 의미

## A method to generate virtual intensity at arbitrary position: Methodology and its physical meanings

\*최정우\* · 김양한\*\*

Joung-Woo Choi, Yang-Hann Kim

**Key Words** : Acoustic Intensity(음향 인텐시티), Active Control(능동 제어)

### ABSTRACT

This paper proposes a method to generate virtual intensity field in space. The sound field of a zone enclosing the listener position is controlled to have maximum acoustic intensity to the desired direction. In order to control acoustic intensity of a zone, space-averaged active intensity is introduced. The ratio of space-averaged active intensity and control effort is defined as a cost function and expressed as a function of source control signals. It is shown that the cost function represents radiation efficiency of multiple sources. The control signals maximizing the cost function is found through eigenvalue analysis. The proposed method is verified by numerical simulations performed in free field condition, and the results provide a relation between wavelength and the size of controllable intensity field.

### 1. 서론

음향 인텐시티와 파워는 음원의 방사 효율 (radiation efficiency), 방향성(directionality)등 음원의 방사 특성을 표현하는 중요 인자이다. 그러나, 언급된 척도들은 음원의 표면이나, 자유 공간 상의 원음장(far-field)에 대한 방사 특성을 나타낼 뿐이며, 방의 경계 조건과 청취자의 위치 등 공간의 특성에 따라 변화하는 실질적인 방사 형태를 반영하지 못한다. 청취자의 입장에서 중요한 것은 청취자가 실제로 인지하는 음향 파워라 할 수 있으며, 따라서 청취하는 위치, 혹은 공간에서 원하는 음향 인텐시티 특성을 갖는 음원을 제작할 필요가 있다. 또한 음향 인텐시티를 적극적으로 제어하는 방법을 사용하여, 청취자의 필요에 따라 공간의 음향 인텐시티 특성을 자유자재로 변화시킬 수 있을 것이다.

그러나, 고정된 특성을 가지는 하나의 음원으로 다양한 경계 조건을 가지는 공간과 임의의 청취자 위치에 대해 방사 특성을 제어할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 개별적으로 제어 가능한 다수의 음원을 사용하여, 개별 음원의 방사 특성에 구애 받지 않고 청취자 위치에서 가상의 인텐시티 필드를 형성하는 방법을 제시한다. 이를 위하여

위치와 고정된 다수의 음원을 배열하고, 각 음원의 입력 신호를 제어하여 공간 내의 인텐시티 필드의 크기와 방향을 제어하는 방법에 대하여 논한다.

다수의 음원을 사용하여 소음원의 방사 특성을 제어하려는 연구는 능동 소음 제어 분야에서 수행되어 왔다. 능동 소음 제어에서는 본 연구와는 반대로, 제어 음원을 사용하여 소음의 방사 파워를 저감시킴으로써 소음 제어 효과를 얻는 방법이 연구되었다[1]-[3]. 그러나 이러한 제어 방법들은 모두 소음을 최소화하기 위한 음원 표면의 방사 파워 제어에 국한되었다. 또 다른 연구 사례로는 능동 소나(active sonar)의 지향성을 최대화하기 위해 임의의 음원 배열에 대하여 제어 신호를 최적화하는 연구[4]등을 들 수 있다. 이는 원음장(far-field)의 방사 파워 최적화라는 면에서 본 연구와 관련이 있으나, 음향 파워가 음압 레벨에 비례하는 원음장의 경우에 대한 연구로서, 임의의 공간에 대한 최적화하는 거리가 있다. 또한, 음향 파워가 아닌 음향 위치 에너지를 제어하여 청취 공간의 음향학적 밝기를 최적화 하는 것을 목적으로 하는 연구가 수행되었다[5]-[7]. 그러나, 이러한 연구는 어디까지나 청취 공간의 음압 레벨을 최적화하는 것을 목적으로 하는 것으로서, 본 연구와는 다른 응용 목적을 갖고 있는 것이다.

본 논문에서는 인텐시티 필드를 제어하기 위하여, 청취자가 위치한 공간의 음향 인텐시티를 대표할 물리량을 선정하고, 이를 음원 입력 신호의 함수로 수식화하는 방법을 정립한다. 선정된 물리량으로부터 적절한 가격 함수를 도입하여 그 최적해

\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : jwoo@webmail.kaist.ac.kr  
Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8220

\*\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

를 제시하고, 제어 후의 인텐시티 필드에 대한 관찰로부터 그 물리적 의미를 살펴본다.

## 2. 문제 정의 및 수식화

### 2.1 문제 정의

#### (1) 문제 상황 기술

임의의 경계 조건을 가지는 공간 내에서 청취자가 위치하는 공간을 청취 공간  $V_0$  라 정의한다 (그림 1). 이때, 공간  $V_0$ 의 외부에 임의의 방사 특성을 갖는 다수의 음원이 위치할 경우를 고려한다.

공간 내의 한 음원의 위치를  $\vec{r}_s$  라 할 때, 위치  $\vec{r}_s$  에서 제어 신호  $\hat{q}(\vec{r}_s, t)$  로 구동되는 음원에 의해 공간  $V_0$  내의 측정 지점  $\vec{r}_m$  에서 측정된 음압  $\hat{p}(\vec{r}_m, t)$  는, 음원과 측정 지점 간의 전달 함수  $\hat{Z}(\vec{r}_m | \vec{r}_s, t)$  를 사용하여 기술될 수 있다.

$$\hat{p}(\vec{r}_m, t) = \int_0^t \hat{Z}(\vec{r}_m | \vec{r}_s, t - \tau) \hat{q}(\vec{r}_s, \tau) d\tau \quad (1)$$

이는 주파수 영역에서

$$\hat{p}(\vec{r}_m, \omega) = \hat{Z}(\vec{r}_m | \vec{r}_s, \omega) \hat{q}(\vec{r}_s, \omega) \quad (2)$$

로 표현될 수 있다. 이 때, 음원의 제어 신호  $\hat{q}(\vec{r}_s, \omega)$  는 최적화 문제의 제어 변수가 된다. 다수의 음원의 위치를  $\vec{r}_s^{(i)}$  ( $i=1..K$ )라 할 때  $\vec{r}_m$  위치의 음장  $\hat{p}(\vec{r}_m, \omega)$  은 다음과 같이 각 음원이 형성하는 음장의 합으로 표현된다.

$$\hat{p}(\vec{r}_m, \omega) = \sum_{i=1}^K \hat{Z}(\vec{r}_m | \vec{r}_s^{(i)}, \omega) \hat{q}(\vec{r}_s^{(i)}, \omega) \quad (3)$$

앞으로 문제를 기술하고 최적해를 유도하는 과정까지의 모든 기술은 주파수 영역에서 이루어지며, 주파수 표기  $\omega$  는 편의상 생략하도록 한다. 식 (3)의 표현은 다수의 음원 위치에 대한 행렬 표현식

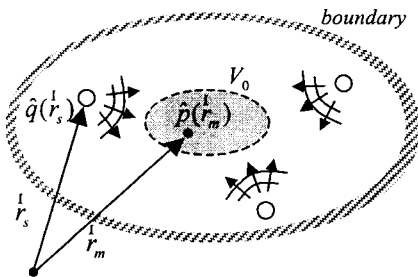


그림 1 공간 변수 점의

$$\vec{r}_s = [\vec{r}_s^{(1)}, L, \vec{r}_s^{(K)}]^T \quad (4)$$

을 도입하여 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\hat{p}(\vec{r}_m) = \hat{Z}(\vec{r}_m | \vec{r}_s) \hat{q}(\vec{r}_s) \quad (5)$$

#### (2) 공간 평균 능동 음향 인텐시티

하나의 측정지점  $\vec{r}$  에서의 순간 인텐시티는 단위 시간당 단위 면적을 전파해 나가는 음향 에너지 량이며, 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{I}_i(\vec{r}, t) = \text{Re}[\hat{p}(\vec{r}, t)] \text{Re}[\hat{u}(\vec{r}, t)] \quad (6)$$

본 연구에서 관심있게 다루는 방사 파워는 공간상의 각 지점에서 평균적인 에너지의 전파량을 다루는 것이며, 따라서 음향 인텐시티의 시간 평균 개념인 능동 인텐시티를 사용한다. 이는 다음과 같이 주파수 영역에서 정의되며,

$$\vec{I}_a(\vec{r}, \omega) = \frac{1}{2} \text{Re}[\hat{p}(\vec{r}, \omega) \hat{u}(\vec{r}, \omega)^*] \quad (7)$$

마찬가지로 최적화 할 공간의 인텐시티를 대표할 물리량으로, 공간에 대하여 평균한 능동 인텐시티를 생각하는 것이 합리적이다.

정의된 공간 내의 각 지점  $\vec{r}$  에서 최대화하고자 하는 인텐시티의 방향을  $\vec{n}_0(\vec{r})$  라 하면, 정의된 공간  $V_0$  에서  $\vec{n}_0(\vec{r})$  방향의 평균 능동 음향 인텐시티를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{V_0} &\equiv \langle \vec{I}_a(\vec{r}) \cdot \vec{n}_0(\vec{r}) \rangle_{V_0} \\ &= \frac{1}{2} \text{Re} \left[ \frac{1}{V_0} \int \hat{p}(\vec{r}) (\vec{n}_0(\vec{r}) \cdot \hat{u}(\vec{r}))^* dV(\vec{r}) \right] \quad (8) \\ &= \frac{1}{2} \text{Re} \left[ \frac{1}{V_0} \int \hat{p}(\vec{r}) \hat{u}_{\vec{n}_0}(\vec{r})^* dV(\vec{r}) \right] \end{aligned}$$

여기서,  $\langle \rangle$  는 공간에 대한 평균을 나타낸다. 실제 측정에 있어, 위의 공간에 대한 적분은 유한개의 측정 지점에서 측정된 인텐시티 값의 합으로 계산된다. 정의된 공간  $V_0$  를 이산화한 M 개의 측정 지점을

$$\mathbf{r}_m = [\vec{r}_m^{(1)}, L, \vec{r}_m^{(M)}]^T \quad (9)$$

이라 하고, 각 지점에서 측정되는 복소 음압 크기 및 최적화 방향으로의 입자 속도를 각각

$$\begin{aligned} \hat{p}(\mathbf{r}_m) &= [\hat{p}(\vec{r}_m^{(1)}), L, \hat{p}(\vec{r}_m^{(M)})]^T \\ \hat{u}_{\vec{n}_0}(\mathbf{r}_m) &= \vec{n}_0 \cdot \frac{\nabla \hat{p}(\mathbf{r}_m)}{j\rho_0\omega} \quad (10) \end{aligned}$$

로 정의한다. 여기서  $\vec{n}_0$  는  $\mathbf{r}_m$  위치에서 최적화하고자 하는 인텐시티 방향

$$\mathbf{r}_{\mathbf{n}_0}^{\mathbf{r}} = \text{diag} \left[ n_0(\mathbf{r}_m^{(1)}) L n_0(\mathbf{r}_m^{(M)}) \right] \quad (11)$$

을 나타내는 행렬이다. 본 연구에서 다루는, 최적화 하려는 인텐시티 방향이 모든 지점에서 동일한 경우는 다음과 같이 하나의 상수로 표현된다.

$$\mathbf{n}_0 = n_0 \mathbf{I} \quad (12)$$

이에 따라 식 (8)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{V_0} &= \frac{1}{2M} \text{Re}[\hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{n}_0}(\mathbf{r}_m)^H \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m)] \\ &= \frac{1}{2Mj\rho_0\omega} \text{Im}[\mathbf{r}_{\mathbf{n}_0}^{\mathbf{r}} \cdot \nabla \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m)^H \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m)] \end{aligned} \quad (13)$$

인텐시티 최적화를 수행하기 위해서는, 식 (13)을 제어 변수의 함수로 나타내어야 한다. 이를 위해 인텐시티 측정에 널리 쓰이는 쌍 음압 측정법 (p-p technique)을 도입하여 음압의 함수로 변환한다. 한 지점에 대한 쌍 음압 측정법에서, 위치  $\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}}$ 의 음압은 두 지점의 음압  $\hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}+})$ ,  $\hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}-})$ 의 평균치로 근사 되고, 입자 속도와 관련된 음압의 gradient  $\partial \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}}) / \partial n_0(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}})$ 는 두 음압 값의 유한 차분으로 근사 된다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}}) &\cong \frac{\hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}+}) + \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}-})}{2} \\ \partial \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}}) / \partial n_0(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}}) &\cong \frac{\hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}+}) - \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}-})}{\Delta r_0} \end{aligned} \quad (14)$$

공간의 각 지점에서 측정되는  $\mathbf{n}_0$  방향의 인텐시티를 나타내기 위하여, 그림 0와 같이  $\mathbf{n}_0$  방향으로 각각  $\pm \Delta r_0 / 2$  거리만큼 이동된 새로운 위치 벡터  $\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}+}$ ,  $\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}-}$ 을 도입한다. 두 위치 벡터( $\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}+}$ ,  $\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}-}$ )에서 측정되는 음압 벡터를  $\hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}+})$ ,  $\hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}-})$ 라 하면, 두 음압 벡터로 새로운 음압 벡터  $\hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}\pm})$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

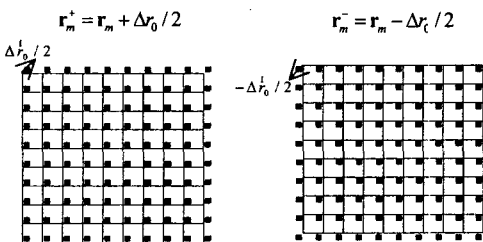


그림 0. p-p technique 적용을 위한 음압 측정

$$\hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}\pm}) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}+}) \\ \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}-}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Z}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}+} | \mathbf{r}_s) \hat{\mathbf{q}}(\mathbf{r}_s) \\ \hat{\mathbf{Z}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}-} | \mathbf{r}_s) \hat{\mathbf{q}}(\mathbf{r}_s) \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{Z}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}\pm} | \mathbf{r}_s) \hat{\mathbf{q}}(\mathbf{r}_s) \quad (15)$$

식 (14)로 주어지는 쌍 음압 측정법의 합과 차 연산을 다수 측정점에 대한 행렬 식으로 나타내기 위해 다음과 같은 연산 행렬을 도입한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{S} &= \frac{1}{2} [\mathbf{I} \quad \mathbf{I}] \\ \mathbf{D} &= \frac{1}{jk\Delta r_0} [\mathbf{I} \quad -\mathbf{I}] \end{aligned} \quad (16)$$

행렬  $\mathbf{S}$ 와  $\mathbf{D}$ 는 각각 합과 차 연산을 수행한다. 위 행렬을 사용하여,  $\mathbf{r}_m$  위치의 음압 벡터와 입자 속도 벡터는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m) \cong \mathbf{S} \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}\pm}), \quad \hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{r}_0}(\mathbf{r}_m) \cong \frac{\mathbf{D} \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}\pm})}{\rho_0 c_0} \quad (17)$$

이 기술을 사용하면, 식 (13)의 공간 평균 능동 인텐시티는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{V_0} = \frac{1}{2M \rho_0 c} \mathbf{q}^H \mathbf{Z}_{\pm}^H \mathbf{A} \mathbf{Z}_{\pm} \mathbf{q} \quad (18)$$

$\mathbf{q}$ 와  $\mathbf{Z}_{\pm}$ 는 각각  $\hat{\mathbf{q}}(\mathbf{r}_s)$ ,  $\hat{\mathbf{Z}}(\mathbf{r}_m^{\mathbf{r}\pm} | \mathbf{r}_s)$ 의 축약 표현이다. 여기서 연산 행렬  $\mathbf{A}$ 는 Hermitian 행렬이며 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{A} = \text{Re}[\mathbf{D}^H \mathbf{S}] = \frac{1}{2jk\Delta r_0} [\mathbf{0} \quad -\mathbf{I}; \mathbf{I} \quad \mathbf{0}] \quad (19)$$

### 3. 가격 함수 설정 및 최적화

#### 3.1 가격 함수의 설정

제어의 목적은 공간  $V_0$ 에 대하여 최대의  $I_{V_0}$ 를 발생시키는 것이다. 절대적인  $I_{V_0}$ 의 크기는 입력의 크기가 증가함에 따라 함께 증가하나, 실제로 사용할 수 있는 입력 파워는 항상 제한되어 있으므로 이 제한된 입력 파워를 사용하여 최대의 능동 인텐시티를 발생시켜야 한다. 사용할 수 있는 전체 입력 파워는 음원의 제어 신호의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_0 = \frac{1}{2\rho_0 c_0} \mathbf{Z}_0^2 \mathbf{q}^H \mathbf{q} \quad (20)$$

$\mathbf{Z}_0$ 는 음원의 입력을 단위 면적당 파워에 해당하는 값으로 나타내기 위해 도입되는 상수이다. 이 한정된 입력 파워로 능동 인텐시티를 최대화 하는 문제는 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$\alpha = \frac{I_{v_0}}{J_0} = \frac{\mathbf{q}^H \mathbf{Z}_{\pm}^H \mathbf{A} \mathbf{Z}_{\pm} \mathbf{q}}{M Z_0^2 \mathbf{q}^H \mathbf{q}} \quad (21)$$

이 비율은 Rayleigh 계수로 불리우며, 이를 최대화 하는 해는 행렬  $\mathbf{Z}_{\pm}^H \mathbf{A} \mathbf{Z}_{\pm} / M Z_0^2$  의 최대 고유치  $\alpha_{\max}$  에 해당하는 고유 벡터

$$\mathbf{Z}_{\pm}^H \mathbf{A} \mathbf{Z}_{\pm} \mathbf{q}_{opt} = M Z_0^2 \alpha_{\max} \mathbf{q}_{opt} \quad (22)$$

에 해당함은 잘 알려져 있다[8]. 그러므로, 선택 공간 내에서 두 전달 행렬  $\mathbf{Z}_{+}$ ,  $\mathbf{Z}_{-}$  을 측정할 수 있다면, 고유치 해석을 통하여 최적해  $\mathbf{q}_{opt}$  를 구할 수 있다.

### 3.2 가격 함수와 방사 효율과의 관계

여기서, 음원이 체적 속도 변화로 파동을 발생시키는 속도 음원으로 주어지는 경우를 생각해 보자. 이 때의 제어 변수  $\mathbf{q}$  는 각 음원의 체적 속도로,  $\mathbf{Z}$  는 음원의 체적 속도와 정의된 공간의 음압의 비를 나타내는 음향 임피던스(acoustic impedance)로 각각 대응된다. 또한 식 (21)의 가격 함수의 물리적 의미를 살펴보자. 다음과 같은 방사 효율의 정의[9]로부터,

$$\sigma \equiv \frac{W/S}{\rho_0 c_0 \langle |v_s|^2 \rangle} = \frac{\langle \hat{I}_a(\vec{r}) \cdot \hat{n}_s \rangle}{\rho_0 c_0 \langle |v_s|^2 \rangle} \quad (23)$$

( $v_s$ : surface normal velocity,  $\hat{n}_s$ : surface normal direction)

최적화 방향  $\hat{n}_0(\vec{r})$  으로의 방사효율을 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$\sigma_{n_0}^r \equiv \frac{\langle \hat{I}_a(\vec{r}) \cdot \hat{n}_0(\vec{r}) \rangle}{\rho_0 c_0 \langle |v_s|^2 \rangle} \quad (24)$$

식 (20)에서, 음향 임피던스는 비 음향 임피던스(specific acoustic impedance)를 단위 면적으로 나눈 차원과 동일하므로,

$$\sigma_{n_0}^r = \frac{\langle \hat{I}_a(\vec{r}) \cdot \hat{n}_0(\vec{r}) \rangle}{\rho_0 c_0 \langle |v_s|^2 \rangle} \propto \frac{I_{v_0}}{\frac{Z_0^2}{2\rho_0 c_0} \sum_s |\hat{q}_s(\vec{r}_s^{(i)})|^2} \quad (25)$$

주어진 가격 함수를 사용하여 얻은 최적해는 정의된 공간에 대하여  $\hat{n}_0(\vec{r})$  방향으로의 방사 효율을 최대로 하는 해임을 알 수 있다.

## 4. 모의 실험 및 결과

본 장에서는 이론적으로 얻은 결과를 검증하기 위하여 모의 실험을 통해 물리적인 현상을 관찰하

고자 한다. 이를 위해 자유 음장에서 단극 음원을 사용한 모델에 대하여 모의 실험을 수행하였다.

### 4.1 모의 실험 장치 및 구성

그림 0과 같이 자유 공간상에 유한한 면적을 가지는 평면을 설정하고, 이로부터 거리  $R_0$  만큼 떨어진 공간에 단극 음원을 등간격으로 배치하였다. 단극 음원들은 단일 주파수로 가진되었으며, 모든 변수는 파장에 대하여 정규화하여 나타내었다(표 1). 가격 함수를 무차원화 하는 변수(식 (21))로

$$Z_0 = \frac{\rho_0 \omega}{2\pi R_0} \quad (26)$$

을 사용하였으며, 이는 단위 체적 속도로 구동되는 하나의 단극 음원이 거리  $R_0$  에 발생시키는 음압을 나타낸다.

### 4.2 모의 실험 결과 및 분석

#### 4.2.1 세 개의 단극 음원을 사용한 방향별 인텐시티 형성

평면상에서 임의의 방향으로 음향 인텐시티를

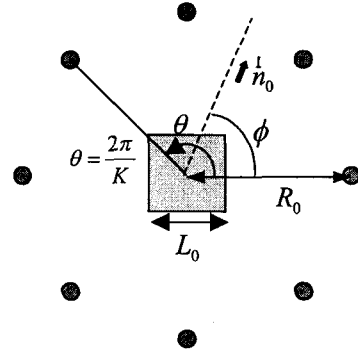


그림 0. 모의 실험 변수

$\phi$  : 인텐시티 최적화 방향각,  $K$  : 제어 음원 개수

$L_0$  : 공간의 길이,  $\Delta r_m$  : 측정 지점간 거리

실험 번호	$K$	$R_0/\lambda$	$L_0/\lambda$	$\Delta r_m/\lambda$	$\phi$ (deg)	$\alpha_{\max}$
1	3	20	$1/4\sqrt{3}$	1/40	90	1.011
2	3	20	$1/4\sqrt{3}$	1/40	150	1.011
3	3	20	$1/4\sqrt{3}$	1/40	120	0.976
4	3	20	$1/\sqrt{3}$	1/10	90	0.864
5	5	20	$1/\sqrt{3}$	1/10	90	1.034
6	9	20	$1/\sqrt{3}$	1/10	90	1.824

표 1. 전산기 모의 실험의 변수 및 결과

$\alpha_{\max}$  : 최적화 후의 가격 함수

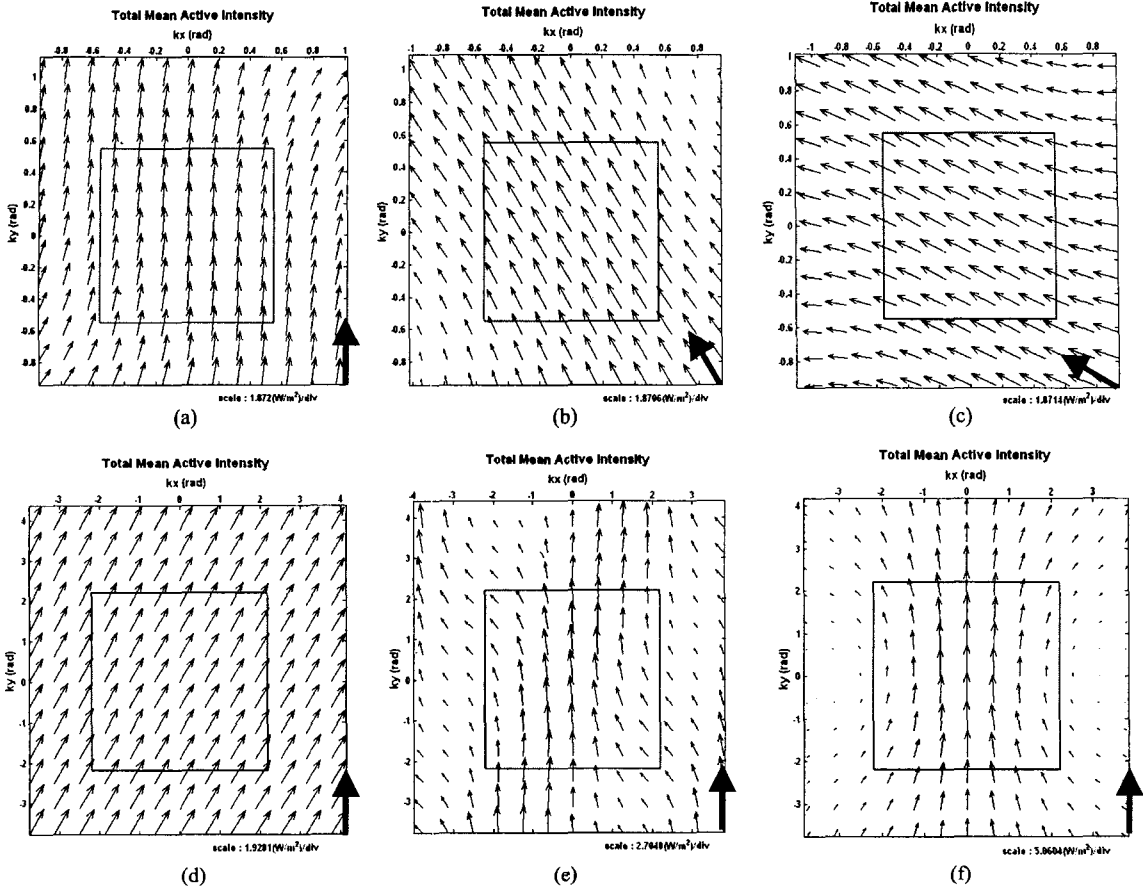


그림 0 최적화 후의 음향 인텐시티 필드 (a)~(c) 실험 1~3 : 최적화 방향을 30°씩 변화, (d) 실험 4 : 공간의 크기 증가, (e)~(f) 실험 5~6 : 제어 음원의 개수 증가(음원간 간격 감소)

발생시키기 위해 최소한으로 요구되는 3 개의 음원을 사용하여 실험을 수행하였다. 각 음원 사이의 각은 동일하게  $\pi/3$  로 설정하였으며, 각각의 음원은 평면파 음원으로 간주할 수 있도록

$$\frac{(kL_0)^2}{kR_0} \ll 2\pi \quad (27)$$

을 만족하는 거리에 위치하였다. 정의된 공간의 크기는  $L_0 = \lambda/4\sqrt{3}$  로서, 파장에 비하여 작은 크기를 갖는 공간이다. 이때, 파장보다 공간의 크기가 작으므로 공간내에서 비교적 균일한 최적화 결과를 얻을 수 있다.

(실험 1) 음원이 위치한 방향과 일치하지 않는  $\phi = 90^\circ$  방향으로 최적화를 수행한 결과가 그림 0(a)에 나타나 있다. 이 때, 각 음원은 단위 입력 파워를 갖도록 구동되었으며, 실선으로 표시된 사

각형은 최적화한 공간을, 그래프 우측의 화살표는 최적화를 수행한 방향을 나타낸다. 그림 0(a)로부터 최적화 방향으로 정렬된 공간상의 인텐시티 분포를 확인할 수 있다. 이 때 각 음원의 구동 파워가 그림 0(a)에 나타나 있으며, 최적화 방향과 근접한 두 개의 음원이 제어되어 이 같은 결과를 발생시킴을 관찰할 수 있다.

(실험 2, 3) 최적화 방향의 변화에 따른 성능을 검증하기 위하여, 방향각  $\phi$  를 30°씩 회전시켜가며 최적화를 수행한 결과가 그림 0(b)~(c)에 나타나 있다. 모든 경우에 대하여 가격 함수는 1 이상으로, 최적화 방향으로 평면파를 발생시키는 음원이 실제로 있는 것 이상의 인텐시티를 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.

#### 4.2.2 공간 크기의 영향

(실험 4) 정의된 공간의 크기가 증가함에 따라서

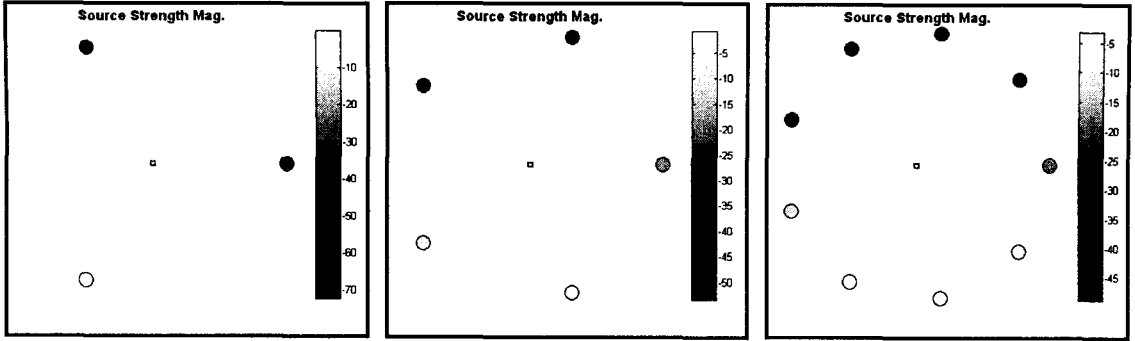


그림 0. 음원의 위치 및 구동 파워

(a) 실험 1 (K=3), (b) 실험 5 (K=5), (c) 실험 6 (K=9)

( $L_0 = \lambda/\sqrt{3}$ ) 하나의 음원만이 음장을 주도하는 경우가 발생한다. 그림 0(d)는 그러한 경우의 결과이다. 형성되는 음장의 형상 역시 하나의 음원에서 발생하는 음장에 불과하므로 진행방향이 전혀 최적화 되지 않고 있다. 이는 간섭(interference)에 의해 발생하는 음향 인텐시티의 공간 변화가 급격히 이루어지기 때문으로, 가격 함수상에는 공간 평균을 취하면서 반영되지 않아 하나의 음원을 구동하는 쪽으로 최적해가 결정된다.

(실험 5~6) 실험 4와 같은 문제점은 음원의 개수를 증가함으로써 개선할 수 있다. 그림 0(e)는 5개의 음원을 사용하여 최적화 한 결과이다. 다수의 음원, 구체적으로는 보다 인접한 각도에 위치한 음원들이 구동하는 경우(그림 0(b)), 음향 인텐시티의 공간내 변화는 감소하게 된다.

실험 6은 제어 음원의 개수를 9개로 증가시킨 경우이다. 음원의 개수가 늘어남에 따라 제어에 참여하는 음원의 개수가 증가하여(그림 0(c)) 가격 함수의 값은 2 가까이 증가하며, 이는 두 개의 매우 근접한 단극 음원으로 발생시킬 얻을 수 있는 값과 동일하다.

## 5. 결론

다수의 음원을 사용하여 정의한 공간 내의 음향 인텐시티를 최적화하는 방법을 제안함으로써, 청취자 위치에서 가상의 인텐시티 필드를 생성하는 방법을 제시하였다.

임의의 형태를 가지는 공간의 음향 인텐시티를 표현하기 위하여 공간 미분의 근사를 공간에 대한 행렬 형태로 기술하는 방법을 정립하고, 이를 바탕으로 제한된 입력 파워로 특정 방향의 인텐시티를 최대화 하기 위한 가격 함수를 구성할 수 있었다. 제안된 가격 함수는 속도 음원으로 구

동되는 경우 최적화 방향으로의 방사 효율을 최대한으로 하는 것임을 보였다.

전산기 모의 실험을 수행하여 제안된 방법의 타당성과 적용 가능성을 보였다. 이를 통하여 최적화 가능한 공간의 크기와 음원 개수의 상관 관계를 관찰할 수 있었다.

## 후기

본 연구는 한국과학기술평가원 (KISTEP)의 국가 지정연구실 사업과 교육부의 두뇌한국 21 (BK21) 프로그램의 지원에 의하여 연구되었음을 밝힙니다.

## 참고문헌

- [1] S.-W. Kang, Y.-H. Kim, "Active intensity control for the reduction of radiated duct noise," J. Snd. Vib. 201(5), 595-611 (1997)
- [2] S.-W. Kang, Y.-H. Kim, "Causally constrained active sound power control in an enclosed space," J. Snd. Vib. 204(5), 807-822 (1997)
- [3] P. A. Nelson, S. J. Elliot, "The minimum power output of a pair of free field monopole sources," J. Snd. Vib. 105, 173-178 (1986)
- [4] Roy L. Streit, "Optimization of discrete array of arbitrary geometry," J. Acoust. Soc. Am. 69(1), 199-212 (1981)
- [5] 최정우, 김양한, "음향학적으로 밝은 공간 형성에 관한 연구," 한국소음진동공학회 2000년도 추계 학술 대회 논문집, 482-488 (2000)
- [6] J. W. Choi, Y. H. Kim, "Generation of an acoustically bright zone within an illuminated zone," J. Acoust. Soc. Am. 111(4), 1695-1700 (2002)
- [7] J. W. Choi, Y. H. Kim, "Generation of acoustically bright and dark zone using multiple sources," Proc. Inter-Noise 2002, N322 (2002)
- [8] P. Lancaster, M. Tismenetsky, The theory of matrices, Academic Press, 282-294 (1985)
- [9] L. Cremer, M. Heckl, Structure-borne sound : structural vibrations and sound radiation at audio frequencies, 2nd ed., Springer-Verlag, 492-497 (1988)