

음향학적으로 밝은 공간 형성에 관한 연구

°최정우*, 김양한**

A Study on the Generation of Acoustically Bright Zone

°J. Woo. Choi*, Yang-Hann. Kim**

Abstract

This paper deals with a method to generate an acoustically bright zone that has a higher acoustic potential energy than the others. The acoustically bright zone can be generated by optimally excited multiple sources. A method to determine the volume velocity distribution of the sources was presented in this paper. For different applicative purpose, two kinds of cost functions are defined and through the eigenvalue analysis the optimal solution is obtained.

1. 서론

청취자의 위치, 혹은 그 주변의 공간에 대해, 음원을 제어하여 특정 음향 특성을 최적화하는 음장을 형성하고자 하는 연구는 여러 측면에서 진행되어왔다. 능동 소음 제어에서 다루어온, 배경 소음이 존재할 때 선택된 공간의 음향 포텐셜 에너지를 최소화하여 정숙성을 획득하는 정숙 공간(quiet zone) 형성에 대한 연구⁽¹⁾나, 선택 공간 내에서 미리 기록된 음장에 가깝게 음장을 재현(sound field reproduction)하는 연구⁽²⁾등이 그것이다.

이들과 달리 음향을 적극적으로 청취하는 상황에서는 설정한 공간에 높은 음향 포텐셜 에너지를 부과하여야 하는 문제가 발생한다. 예를 들어, 그림 1-1(a)와 같이 공간상에 다수의 음원이 존재할 때, 음원이 시스템에 줄 수 있는 입력 신호의 크기가 제한됨으로 인하여 청취자 위치에서 정숙 공간이 형성된 경우나, 그림 1-1(b)와 같이 음장의 형태로 인해 청취자 위치에서는 정숙 공간이 형성되고, 정숙성을 유지하고자 했던 다른 공간에 대하여는 높은 음향 포텐셜 에너지가 형성되는 경우이다.

본 논문에서는 통상적으로 낮은 포텐셜 에너지를 갖는 공간을 일컫는 정숙 공간(quiet zone)에 상반되는 개념으로, 특정 공간에 음향 포텐셜 에너지를 집중시켜 타 공간에 비하여 상대적으로 높은 포텐셜 에너지 밀도를 가지는 음향학적으로 밝은 공간(acoustically bright zone)을 형성하거나, 다른 영

역을 상대적으로 낮은 포텐셜 에너지를 가지는 정숙 공간(quiet zone) 혹은 음향학적으로 어두운 공간(acoustically dark zone)으로 만들므로써, 수음자 위치에 최적화된 음장을 제공하는 방법론에 대하여 기술한다.

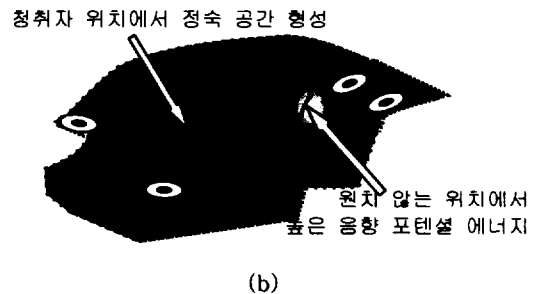
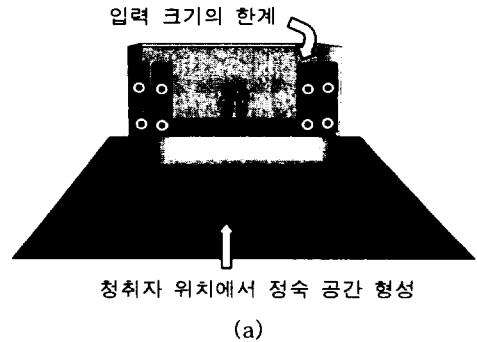


그림 1-1. 청취자 위치에서 정숙 공간 형성
(a) 제한된 입력 크기로 인한 정숙 공간
(b) 음장의 형태로 인한 정숙 공간

* 한국과학기술원 기계공학과

** 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

2. 문제 정의 및 음장의 기술

2.1 문제 정의

본 논문에서는 1장에서 언급하였듯이, 정숙 공간의 상대 개념으로, 높은 음향 포텐셜 에너지 밀도를 가지는 공간을 '음향학적으로 밝은 공간'으로 정의한다.

공간 상에서 위치와 개수가 정해진 다수의 제어 가능한 음원을 사용하여, 원하는 특정 영역에서의 음향 포텐셜 에너지 밀도가 다른 영역에 비해 높은 수치를 갖도록 각 음원의 입력 신호를 결정하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 다음의 단순화 된 문제를 정의한다.

단일 주파수로 가진 되는 다수의 단극 음원이 존재할 때, 이를 사용하여 임의의 경계 조건을 가지는 시스템 내부의 특정 영역에서 음향학적으로 밝은 공간이 형성되도록 각 단극 음원의 체적 속도를 결정한다.

2.2 음장의 기술



그림 2-1. 음장의 표현식

단일 주파수 ω 의 소리를 방사하는 단극 음원에 의해 공간상의 한 관측 지점 \bar{x} 위치에서 형성되는 음압의 복소 진폭 크기를 $\hat{p}(\bar{x})$ 라 하자. K개의 음원이 각각 $\bar{x}_c^{(i)}$ 위치에서($i=1..K$), $\hat{q}_c(\bar{x}_c^{(i)})$ 의 체적 속도를 가지고 구동 되는 경우, $\hat{p}(\bar{x})$ 는 그 린 함수 $\hat{G}(\bar{x}|\bar{x}_c^{(i)})$ 를 사용하여

$$\hat{p}(\bar{x}) = \sum_{i=1}^K \hat{G}(\bar{x}|\bar{x}_c^{(i)}) \hat{q}_c(\bar{x}_c^{(i)}) \quad (2-1)$$

와 같이 표현된다. 여기서, 아래 첨자 'c'는 제어 음원(control source)의 위치를 나타낸다.

정의된 행렬들을 사용하여 식 (2-1)을 표현하면

다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{p}(\bar{x}) &= \left[\hat{G}(\bar{x}|\bar{x}_c^{(1)}) \quad \dots \quad \hat{G}(\bar{x}|\bar{x}_c^{(K)}) \right] \begin{bmatrix} \hat{q}_c(\bar{x}_c^{(1)}) \\ \vdots \\ \hat{q}_c(\bar{x}_c^{(K)}) \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{G}(\bar{x}|\bar{\mathbf{x}}_c) \mathbf{q}_c \end{aligned} \quad (2-2)$$

본 연구에서는 음향학적으로 밝은 공간 내부의 음향 크기를 대표하는 물리량으로서, 체적 V_b 를 갖는 음향학적으로 밝은 공간 내부의 평균 음향 포텐셜 에너지 밀도 e_b 를 다음과 같이 정의한다.

$$e_b = \frac{1}{V_b} \int_{V_b} \hat{p}(\bar{x})^* \hat{p}(\bar{x}) dV \quad (2-3)$$

여기서, '**'는 공액 복소수(complex conjugate)를 나타낸다. 이는 새로이 행렬 \mathbf{R}_b 를 도입하여,

$$\begin{aligned} e_b &= \mathbf{q}_c^H \left(\frac{1}{V_b} \int_{V_b} \mathbf{G}(\bar{x}|\bar{\mathbf{x}}_c)^H \mathbf{G}(\bar{x}|\bar{\mathbf{x}}_c) dV \right) \mathbf{q}_c \\ &= \mathbf{q}_c^H \mathbf{R}_b \mathbf{q}_c \end{aligned} \quad (2-4)$$

와 같이 나타낼 수 있다. $K \times K$ 행렬 \mathbf{R}_b 의 한 요소를 살펴보면,

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1}{V_b} \int_{V_b} \mathbf{G}(\bar{x}|\bar{\mathbf{x}}_c)^H \mathbf{G}(\bar{x}|\bar{\mathbf{x}}_c) dV \right]_{(r,s)} \quad (2-5) \\ &= \frac{1}{V_b} \int_{V_b} \hat{G}(\bar{x}|\bar{x}_c^{(r)})^* \hat{G}(\bar{x}|\bar{x}_c^{(s)}) dV \end{aligned}$$

이는 단위 체적 속도로 가진된 $\bar{x}_c^{(r)}, \bar{x}_c^{(s)}$ 위치의 음원이 각각 형성하는 음장 $\hat{G}(\bar{x}|\bar{x}_c^{(r)})$, $\hat{G}(\bar{x}|\bar{x}_c^{(s)})$ 이 음향학적으로 밝은 공간 V_b 내에서 갖는 상관 정도를 나타냄을 알 수 있다.

마찬가지로, 체적 V_t 를 갖는 관심 있는 전체 공간 내부의 평균 포텐셜 에너지 밀도를 e_t 로 정의하면, 전체 공간에 대한 상관 행렬 \mathbf{R}_t 을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e_t = \mathbf{q}_c^H \left(\frac{1}{V_t} \int_{V_t} \mathbf{G}(\bar{x}|\bar{\mathbf{x}}_c)^H \mathbf{G}(\bar{x}|\bar{\mathbf{x}}_c) dV \right) \mathbf{q}_c \quad (2-6)$$

3. 음향학적으로 밝은 공간을 형성하기 위한

음원의 체적 속도 결정

3.1 입력 크기가 제한된 상황의 밝은 공간 형성

첫번째로, 그림 1-1과 같이 입력의 크기가 제한되어 있을 때 설정한 공간을 음향학적으로 밝은 공간을 만드는 문제에 대하여 생각해보자.

입력의 크기를 나타내는 체적 속도 벡터의 내적 값 $\mathbf{q}_c^H \mathbf{q}_c$ 은 음향학적으로 밝은 공간을 형성하기 위한 제어 노력(control effort)를 나타내는 변수이기도 하다. $\mathbf{q}_c^H \mathbf{q}_c$ 가 제한되어 있을 때, 밝은 공간내의 포텐셜 에너지를 최대화 하는 체적 속도 벡터를 결정하는 것은 다음의 레일리 몫(Reyleigh quotient) κ 를 최대화 하는 $\mathbf{q}_c = \mathbf{q}_{opt}$ 를 찾는 문제로 정식화 할 수 있다.

$$\kappa = \frac{e_b}{\mathbf{q}_c^H \mathbf{q}_c} = \frac{\mathbf{q}_c^H \mathbf{R}_b \mathbf{q}_c}{\mathbf{q}_c^H \mathbf{q}_c} \quad (3-1)$$

κ 의 최대, 최소 값은 다음의 고유치 문제의 최대, 최소 고유치 κ_{max} , κ_{min} 와 일치한다.

$$\mathbf{R}_b \mathbf{q}_c = \kappa \mathbf{q}_c \quad (3-2)$$

위 가격 함수를 제 1종 가격 함수로 정의하면, 이를 최대화 하는 \mathbf{q}_{opt} 는 상관 행렬 \mathbf{R}_b 의 최대 고유치 κ_{max} 에 따르는 고유 벡터가 됨을 알 수 있다. 그러므로, 주어진 시스템에 대한 음원의 그런 함수를 알고 있거나 V_b 내에서 측정할 수 있다면, 음향학적으로 밝은 공간내의 상관 행렬 \mathbf{R}_b 을 얻는 것이 가능하며, 식 (3-2)의 고유치 문제를 풀어냄으로써 최적해 \mathbf{q}_{opt} 를 찾을 수 있다.

다음으로, 음향학적으로 밝은 공간 V_b 가 체적을 가진 공간이 아닌 $\bar{\mathbf{x}}_b$ 위치의 한 점인 극한 상황을 생각해보자.

이 경우 상관 행렬 \mathbf{R}_b 는,

$$\begin{aligned} & \frac{1}{V_b} \int_{V_b} \mathbf{G}(\bar{\mathbf{x}} | \bar{\mathbf{x}}_c)^H \mathbf{G}(\bar{\mathbf{x}} | \bar{\mathbf{x}}_c) dV \\ & \Rightarrow \mathbf{G}(\bar{\mathbf{x}}_b | \bar{\mathbf{x}}_c)^H \mathbf{G}(\bar{\mathbf{x}}_b | \bar{\mathbf{x}}_c) \end{aligned} \quad (3-3)$$

와 같이 기술될 수 있으며, 행렬 $\mathbf{G}(\bar{\mathbf{x}}_b | \bar{\mathbf{x}}_c)$ 은 rank 1의 행렬이므로, 상관 행렬 \mathbf{R}_b 의 rank도 역시 1로서, 유일한 고유치와 고유 벡터를 가지게

됨을 알 수 있다. \mathbf{R}_b 의 고유 벡터와 고유치를 구해보면 다음과 같다.

$$\mathbf{q}_{opt} = \mathbf{G}(\bar{\mathbf{x}}_b | \bar{\mathbf{x}}_c)^H = \mathbf{G}(\bar{\mathbf{x}}_c | \bar{\mathbf{x}}_b)^* \quad (3-4)$$

$$\kappa = \mathbf{G}(\bar{\mathbf{x}}_b | \bar{\mathbf{x}}_c) \mathbf{G}(\bar{\mathbf{x}}_b | \bar{\mathbf{x}}_c)^H \quad (3-5)$$

3.2 빔 형성 방법의 관점에서 본 음향학적으로 밝은 공간 형성 문제

이 절에서는 앞 절의 결과를 사용하여 음향학적으로 밝은 공간 형성 문제와 빔 형성 방법과의 유사성에 대하여 기술한다.

먼저 간단한 경우로, 자유 음장에서 단극 음원이 구동되는 경우의 구면파 모델 빔형성 방법을 살펴보자

공간상의 $\bar{\mathbf{x}}_s$ 위치에 있는 단극 음원이 단위 체적 속도로 가진되었을 때, $\bar{\mathbf{x}}_m$ 위치의 M개의 마이크로폰에서 측정된 음압 신호를 다음과 같이 \mathbf{p}_m 로 정의 하자

$$\mathbf{p}_m = [\hat{p}(\bar{\mathbf{x}}_m^{(1)}), \hat{p}(\bar{\mathbf{x}}_m^{(2)}), \dots, \hat{p}(\bar{\mathbf{x}}_m^{(M)})]^T \quad (3-6)$$

이는 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$\mathbf{p}_m = \begin{bmatrix} \hat{G}(\bar{\mathbf{x}}_m^{(1)} | \bar{\mathbf{x}}_s) \\ \vdots \\ \hat{G}(\bar{\mathbf{x}}_m^{(M)} | \bar{\mathbf{x}}_s) \end{bmatrix} = \mathbf{G}(\bar{\mathbf{x}}_m | \bar{\mathbf{x}}_s) \quad (3-7)$$

빔 형성 방법에서의 가중 함수를 \mathbf{w}_B 로 표현하자.

$$\mathbf{w}_B = [\hat{w}_1(\bar{\mathbf{x}}), \hat{w}_2(\bar{\mathbf{x}}), \dots, \hat{w}_M(\bar{\mathbf{x}})]^T \quad (3-8)$$

일반적으로 가중 함수 \mathbf{w}_B 가 그런 함수로 주어졌을 때는, 그런 함수 행렬 \mathbf{G} 를 사용하여

$$\mathbf{w}_B = \mathbf{G}(\bar{\mathbf{x}}_m | \bar{\mathbf{x}}) \quad (3-9)$$

로 표현할 수 있으므로, 최종적으로 $\bar{\mathbf{x}}$ 위치에서의 빔 형성 파워는 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} Power(\bar{\mathbf{x}}) &= |\mathbf{w}_B^H \mathbf{p}_m|^2 = |\mathbf{w}_B^T \mathbf{p}_m^*|^2 \\ &= |\mathbf{G}(\bar{\mathbf{x}} | \bar{\mathbf{x}}_m) \mathbf{G}(\bar{\mathbf{x}}_m | \bar{\mathbf{x}}_s)^*|^2 \end{aligned} \quad (3-10)$$

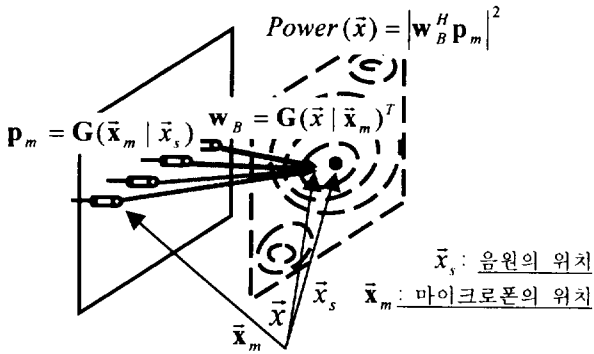
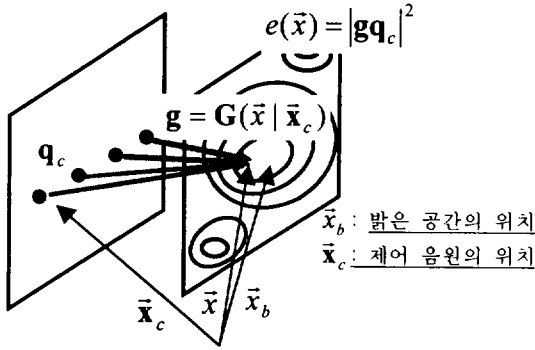


그림 3-1. 빔 형성 방법과 밝은 공간 형성 문제의 비교

- (a) 빔 형성 방법의 개념도
- (b) 다수의 음원을 사용한 밝은 공간 형성

다음으로 공간 상에 위치가 고정된 다수의 단극 음원을 이용하여 특정 영역에 음향학적으로 밝은 공간을 형성하는 문제를 살펴보자.

다수의 단극 음원이 $\bar{x}_c = [\bar{x}_c^{(1)}, \bar{x}_c^{(2)}, \dots, \bar{x}_c^{(K)}]$ 에 배치되었을 때 음원들의 체적 속도 \mathbf{q}_c 에 의하여 \bar{x} 위치에 형성되는 음압은 식 (2-2)에서 언급한 바와 같이 그런 함수를 도입하여 표현될 수 있다.

$$\hat{p}(\bar{x}) = \mathbf{g}\mathbf{q}_c = \mathbf{G}(\bar{x} | \bar{x}_c)\mathbf{q}_c \quad (3-11)$$

이를 이용하면 \bar{x} 위치의 음향 포텐셜 에너지 밀도를 나타내는 상수 $e(\bar{x})$ 은

$$e(\bar{x}) = |\mathbf{g}\mathbf{q}_c|^2 = |\mathbf{G}(\bar{x} | \bar{x}_c)\mathbf{q}_c|^2 \quad (3-12)$$

과 같이 표현된다.

이 식을 식 (3-10)와 비교해보면, 빔 형성 파워를 구하는 과정과 포텐셜 에너지 장을 형성하는 방법에 수식상의 유사성을 발견할 수 있다. 즉 빔 형성 방법에서 정의한 스캔 벡터 \mathbf{w}_B 를 통하여 빔 형성 파워를 형성하는 것과 유사하게, 그런 함수에 관련된 벡터 \mathbf{g} 를 통하여 포텐셜 에너지 필드가 형성된다. 다만, 빔 형성 방법에서 \mathbf{w}_B 를 변경하여 원하는 형상의 빔 형성 파워를 만드는 것과는 달리 벡터 \mathbf{g} 는 \bar{x}_c 위치에서 \bar{x} 위치로의 그런 함수로 유일하게 결정된다. 반대로, 빔 형성 방법에서 식 (3-7)로 유일하게 결정된 음압 벡터 \mathbf{p}_m 와는 달리 음원의 체적 속도 벡터 \mathbf{q}_c 를 사용자가 원하는 형태로 결정하는 것이 문제가 된다.

특이 상황으로, 식 (3-12)이 (3-10)과 완전히 동일하게 $\mathbf{q}_c = \mathbf{G}(\bar{x}_c | \bar{x}_b)^*$ 와 같이 설정하면, 음원이 \bar{x}_b 위치에 존재할 때의 빔 형성 파워 분포와 동일한 형태를 가지는 포텐셜 에너지 장이 형성됨을 알 수 있다.

또한, 이것은 제 1종 가격 함수를 사용하여 한 지점에 포텐셜 에너지를 최대화 하는 해 (3-4)와 동일한 것이다.

따라서 빔 형성 방법과 동일하게 체적 속도 벡터 $\mathbf{q}_c = \mathbf{G}(\bar{x}_c | \bar{x}_b)^*$ 를 설정한 경우는, 제한된 입력력으로 \bar{x}_b 위치에 최대 포텐셜 에너지를 집중시키도록 하는 해임을 알 수 있다.

본 장에서는 단극 음원의 경우에 구면파 모델을 사용한 빔 형성 방법과 예를 들어 비교하였지만, 임의의 시스템에 대하여도, 빔 형성 방법에서의 스캔 벡터 \mathbf{w}_B 를 그 시스템의 경계조건을 만족하는 그런 함수 $\mathbf{w}_B = \mathbf{G}(\bar{x}_m | \bar{x})$ 로 두었을 경우에는, 관계가 그대로 성립한다.

3.3 밝은 공간과 나머지 공간의 밝기 비를 최대로 하는 체적 속도 결정

두번째로, 음향학적으로 밝은 공간과 그 이외의 공간의 밝기 대비를 가장 크게 하는 음원의 체적 속도를 결정하는 방법에 대하여 알아보자. 이 경우, 전체 공간의 포텐셜 에너지 밀도에 대한 음향학적으로 밝은 공간내의 포텐셜 에너지 밀도 비 e_b/e 가 최대가 되도록 음원의 체적 속도 벡터 \mathbf{q}_c 를 결정해야 할 것이다.

따라서 다음과 같은 가격 함수를 제 2종 가격 함수로 정의하면,

$$\mu = \frac{e_b}{e_i} = \frac{\mathbf{q}_c^H \mathbf{R}_b \mathbf{q}_c}{\mathbf{q}_c^H \mathbf{R}_i \mathbf{q}_c} \quad (3-13)$$

음향학적으로 밝은 공간을 구성하는 문제는 제 1종 가격 함수의 경우와 마찬가지로 위의 레일레이 몫 μ 를 최대로 하는 $\mathbf{q}_c = \mathbf{q}_{opt}$ 를 찾는 문제로 생각할 수 있다.

각 음원에 의한 음장이 V_i 내에서 서로 선형 독립(linearly independent)인 경우, \mathbf{R}_i 는 항상 역행렬이 존재하게 된다.

이와 같은 경우, 레일레이 몫의 최대치는 다음의 고유치 문제의 최대 고유치와 동일하다.

$$(\mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{R}_b) \mathbf{q}_c = \mu \mathbf{q}_c \quad (3-14)$$

즉, μ 를 최대로 하는 최적해 $\mathbf{q}_c = \mathbf{q}_{opt}$ 와 그 최대치 μ_{max} 는 행렬 $(\mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{R}_b)$ 의 최대 고유치와 그에 따르는 고유 벡터와 일치한다.

그러므로, 전체 공간의 음장을 측정할 수 있다면, 상관행렬 \mathbf{R}_i 와 \mathbf{R}_b 를 구성하는 것이 가능하므로 위의 고유치 문제의 해를 구하여 음원들의 체적 속도를 결정하는 것이 가능하다.

또한, 전체 공간의 포텐셜 에너지는, 음향학적으로 밝은 공간의 포텐셜 에너지와 나머지 공간의 포텐셜 에너지 합과 같으므로, 음향학적으로 밝은 공간 이외의 공간의 체적을 $V_q = V_i - V_b$, 그 공간의 평균 포텐셜 에너지 밀도를 E_q 로 표현하면, $E_i V_i = E_b V_b + E_q V_q$ 의 관계가 성립하므로, $\mu = E_b / E_i$ 를 정의한 것과 마찬가지로 $\alpha = E_q / E_i$ 를 정의하였을 때,

$$\mu \frac{V_b}{V_i} + \alpha \frac{V_q}{V_i} = 1 \quad (3-11)$$

과 같이 μ 와 α 의 합은 일정한 값을 가진다. 그러므로, $\mu = \mu_{max}$ 가 되도록 체적 속도 벡터 \mathbf{q}_c 가 구성된 경우, 음향학적으로 밝은 공간 이외의 공간에 대하여는 전체 공간의 평균 포텐셜 에너지 밀도에 대한 공간 V_q 내의 평균 포텐셜 에너지 밀도 비를 최소로 하는, 즉 $\alpha = \alpha_{min}$ 인 상대적인 정숙 공간이 형성됨을 알 수 있다.

4. 모의 실험

4.1 모의 실험 환경

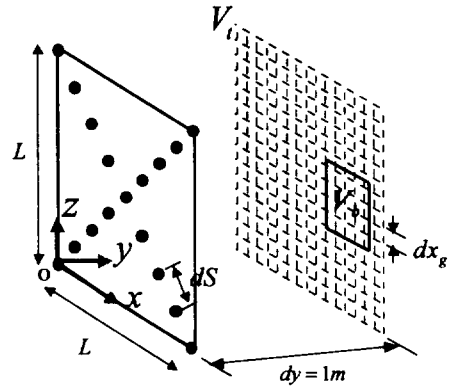


그림 4-1. 모의 실험 환경

$$d\tilde{S} = dS / \lambda = 0.49, \frac{1}{dx_g} = \frac{\lambda}{dx_g} = 5.71$$

$$f = 600\text{Hz}, \tilde{L} = L / \lambda = 2.8, 5.6$$

그림 4-1과 같이 $z=0$ 평면에 X자 형태로 600Hz로 가진되는 총 17개의 단극 음원 어레이를 배열하고, $z=1\text{m}$ 위치의 같은 크기의 영역을 관심있는 전체 공간 V_i 로 설정하여, 그 내부에서 밝은 공간을 형성하도록 하는 모의 실험을 수행하였다.

4.2 모의 실험 결과

음향학적으로 밝은 공간이 $(x, y) = (1.1, 0.6)$ 위치한 하나의 점으로 주어지는 경우에 대한 결과가 그림 4-2, 3에 나타나 있다.

3.2절에서 기술된 바와 같이 음향학적으로 밝은 공간이 한 점으로 주어진 경우의 포텐셜 에너지 분포는 빔 형성 파워의 분포와 동일하게 생각할 수 있으며, 이 경우 잘 알려진 바와 같이^{[3][4]}, 어레이의 구경(aperture)의 크기는 빔 형성 방법의 분해능을 결정하며, 어레이 사이의 간격은 공간상의 에일리어싱(aliasing)과 관련되어 있다.

첫번째로, 음원들이 600Hz로 가진될 때의 결과가 그림 4-2에 나타나 있다. (a)는 모든 음원이 동일한 신호로 가진 되었을 경우, (b),(c)는 각각 제 1종, 2종 가격 함수로 최적화된 결과이다.

1종 가격 함수를 사용한 경우, 입력 신호의 크기와 밝은 영역의 평균 포텐셜 에너지 밀도의 비 κ 가 제어전보다 11dB 이상 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이 경우 2종 가격 함수 값 역시 9dB 이상 증가하였다.

밝은 공간을 관찰해 보면, 빔 형성 방법에서 분해능의 한계가 존재하는 것과 마찬가지로, 한 지점에 대하여 최적화를 수행하였음에도 불구하고 그 점을 중심으로 일련의 밝은 공간이 형성되는 것을 알 수 있었다. 빔 형성 방법에서의 분해능은 어레이의 구경 크기와 비례하므로, 그림 4-3과 같이 파장 대비 구경 크기를 증가시킨 경우, 밝은 공간의 크기는 줄어들음을 알 수 있었다.

제 2종 가격 함수를 사용하여 최적화 한 경우 (그림 4-2(b),3(b))에 평균 포텐셜 에너지 밀도 비 μ_{max} 를 살펴보면 밝은 지점으로 설정한 위치의 포텐셜 에너지 밀도가 전체 공간의 평균 포텐셜 에너지 밀도보다 9dB 이상 높은 것을 알 수 있었다. 이것은 음원들을 동일하게 가진 경우의 평균 포텐셜 에너지 밀도 비 보다 8dB 이상 높은 수치이다.

다음으로, 밝은 공간이 한 점이 아닌 특정 크기를 가지는 공간($(x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}) = (1.05, 1.3500, 0.3500, 0.6500)$)에 대하여 모의 실험을 수행하였다(그림 4-4). 이 경우 역시 앞선 실험과 마찬가지로, 제 1종 가격 함수를 사용한 경우는 10dB, 제 2종 가격 함수를 사용한 경우는 9dB 이상 증가하는 결과를 확인할 수 있었다.

5. 결론

음향학적으로 밝은 공간을 높은 포텐셜 에너지 밀도를 갖는 공간으로 정의하고, 특정 공간에 음향학적으로 밝은 공간을 형성하기 위하여 다수의 단극 음원이 단일 주파수로 가진되는 경우에 음원들의 체적 속도를 결정하는 단순화된 문제를 정의하였다. 문제 해결에 앞서 음원의 가진에 의해 형성되는 음장을 그린 함수를 이용하여 표현하고, 이를 행렬식으로 정의하였다.

다수의 음원을 구동하여 포텐셜 에너지 장을 형성하는 것과 다수의 센서를 사용하여 빔 형성 파워를 구하는 것의 유사성과 차이점에 대하여 설명하였다. 다음으로, 음원의 체적 속도를 결정하기 위하여, 제한된 입력으로 공간의 밝기를 최대

하는 제 1종 가격 함수와 밝은 공간과 나머지 공간의 밝기 대비를 최대로 하는 제 2종 가격 함수를 정의하여 각각의 경우에 고유치 해석을 통하여 최적해를 찾는 방법에 대하여 설명하였으며, 음향학적으로 밝은 공간이 하나의 점으로 주어질 경우에는 제 1종 가격 함수를 사용하여 제어하면 포텐셜 에너지 분포가 빔형성 파워의 분포와 완전히 동일한 것임을 알았다.

선형 어레이 형태로 음원이 배열되었을 때, 자유 음장에 대한 모의 실험을 통하여, 음향학적으로 밝은 공간의 형성 방법의 타당성을 입증하였다.

후기

본 연구는 한국과학기술평가원 (KISTEP)의 국가 지정연구실 사업과 교육부의 두뇌한국21 (BK21) 프로그램의 지원에 의하여 연구되었음을 밝힙니다.

참고 문헌

- (1) S. J. Elliott and P. A. Nelson, 1994, "Active Noise Control", *Noise/News International*, pp. 75-98
- (2) P.A. Nelson, 1994, "Active Control of Acoustic Fields and the Reproduction of Sound, *Journal of Sound and Vibration*", pp.447-477
- (3) 김영기, 1997, "평판에서의 음향방사파워와 구면파 모델을 이용한 빔 형성 파워와의 비교", *한국음향학회지*, 제16권 6호, pp.12-18
- (4) Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon, 1993, *Array Signal Processing*, Prentice Hall, pp. 120-151

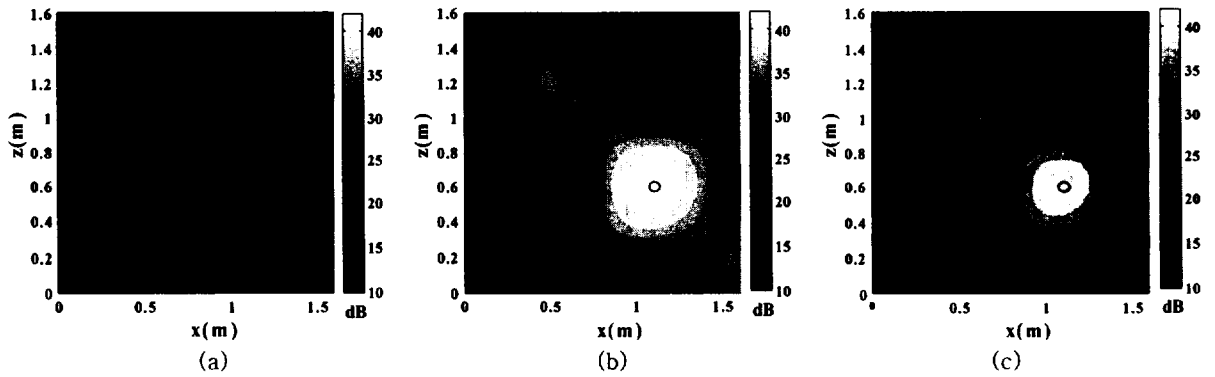


그림 4-2 밝은 지점 형성 전후의 음압 분포.

(a) 음원을 동일한 신호로 가진한 경우 (b) 1종 가격 함수로 최적화 (c) 2종 가격 함수로 최적화

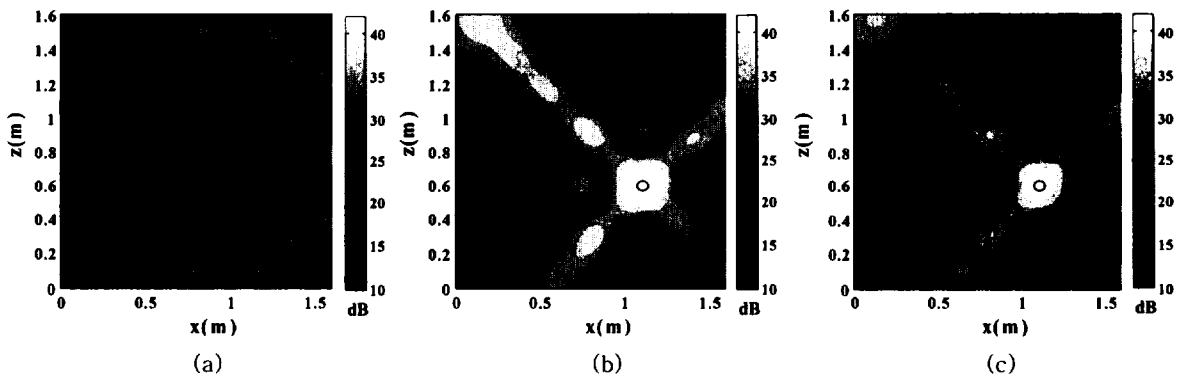


그림 4-3 밝은 지점 형성 전후의 음압 분포 - 구경의 크기를 증가시킨 경우.

(a) 음원을 동일한 신호로 가진한 경우 (b) 1종 가격 함수로 최적화 (c) 2종 가격 함수로 최적화

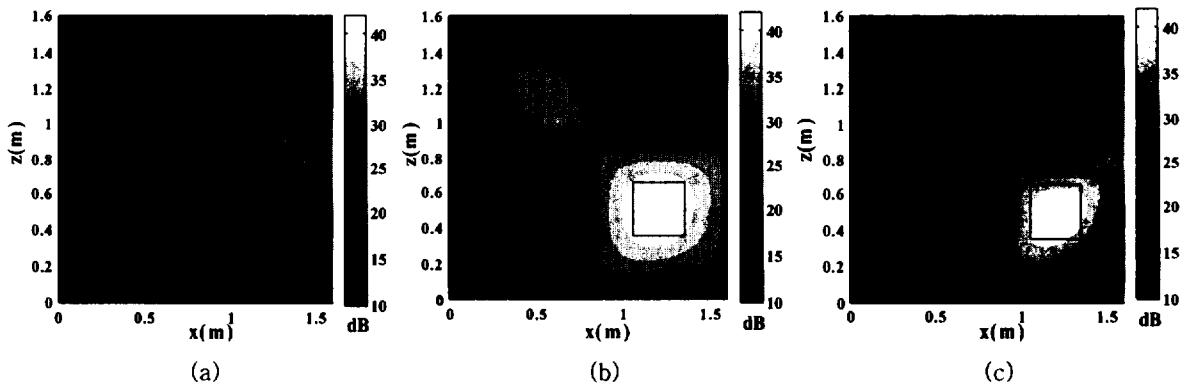


그림 4-4 밝은 공간 형성 전후의 음압 분포

(a) 음원을 동일한 신호로 가진한 경우 (b) 1종 가격 함수로 최적화 (c) 2종 가격 함수로 최적화