

스피커 어레이를 사용한 공간의 음향 파워 제어 방법

A Method to Manipulate Sound Power within a Selected Region Using Source Array

최정우*·김양한**

Joung-Woo Choi, Yang-Hann Kim

Key Words : acoustic intensity(음향 인텐시티), active control(능동 제어), sound power(음향 파워)

ABSTRACT

Multiple sound sources are controlled to enhance sound power within a zone of interest. The problem of enhancing acoustic variable can be regarded as an optimization problem, which seeks an optimal control input that maximizes the acoustic variable. It should be noted that enhancing sound power of a selected region requires both the magnitude and direction to be controlled. For this reason, two kinds of cost functions that can represent the spatially distributed intensity are defined. Theoretical formulation shows the possibility of sound power control in a zone, and the detailed procedures of the proposed method are validated by numerical simulations.

1. 서론

다수의 음원을 제어하는 것은 보다 다양한 변수를 제어할 수 있다는 장점과 동시에 제어 변수를 하나의 지점이 아닌 체적을 가지는 공간에 대하여 제어할 수 있다는 장점을 갖는다. 공간에 대한 제어를 목적으로 다수의 음원을 활용 하는 연구는 일찍이 능동 소음 제어의 정숙 공간(Quiet zone) 개념에서 찾아볼 수 있으며, 근래에는 이와 반대되는 개념으로 음질의 향상을 도모하고자 하는 연구들이 진행되어 왔다. 대표적인 것으로, 음향 위치 에너지를 제어하여 공간 별로 소리의 크기 분포를 조율하는 연구[1], 혹은 원하는 음장을 재현하는 연구[2]등을 들 수 있다.

음장의 재현, 혹은 음향 위치 에너지 외에도, 음향 파워 혹은 인텐시티는 음원의 방사 효율이나 방향성 등 음원의 방사 특성을 표현하는 중요 인자이다. 하지만, 기존의 음원 설계 방법은 청취 공간을 고려하지 않고 자유 음장만을 가정하거나, 음원 표면의 방사 파워를 중심으로 성능을 개선시키는데 초점이 맞추어져 있다. 실제적으로 중요한 것은 청취자 위치에서의 방사 파워라는 점을 생각할 때, 다수의 음원을 이용한 공간 음향 변수의 선택적 제어는 음향 파워를 제어하는데 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

이전의 연구들이 다루는 음향 변수들이 일련의 스칼라 양인데 반해(예: 음장의 mean square error, 음향 위치 에너지 등), 본 연구는 방향과 크기를 갖는 벡터량인 음향 파워를 선택한 공간 내에서 제어하는 문제를 다룬다. 벡터량을 제어하는데 있어서 발생하는 문제점은, 그 크기와 방향을 동시

에 제어하여야 한다는 것이다. 음향 파워의 크기와 방향 중 어느 것에 더 중점을 두어 제어하는가는 명확한 기준이 존재하지 않는다. 청취자가 위치한 공간에 대해 최대의 음향 파워를 갖도록 제어하는 문제를 생각한다면, 음향 파워의 크기에 중점을 둔 제어가 필요하며, 청취자가 속한 공간 내에서 가상의 인텐시티 필드를 형성하는 문제에 있어서는 그 방향 제어가 중요시 된다.

본 논문에서는 선택한 공간 내의 음향 파워의 크기 및 방향을 제어하기 위하여, 공간의 파워를 나타낼 수 있는 물리량을 선정하고, 이를 다수의 음원의 입력 신호의 함수로 수식화 하는 방법을 제시한다. 제어 방법에 따른 음향 파워의 크기 및 방향의 공간 분포에 대한 연구로부터, 제어 성능에 미치는 영향과 물리적 의미를 살펴보고자 한다.

2. 문제 정의

2.1 수학적 기술

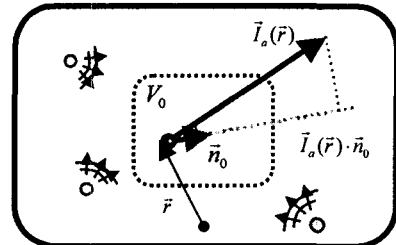


그림 1 인텐시티 제어 문제의 변수 정의

본 연구에서는 다수의 제어 가능한 음원이 공간상에 고정적으로 위치한 것으로 간주한다. 공간의 경계 조건이나 크기, 음원의 위치 등에는 제한을 두지 않으며, 이는 문제 정의 단계에서 보다 일반적인 기술 방법을 도입하기 위함이다. 주어진 공간상의 한 지점 r 에서의 음향 인텐시티의 시간 평균은 다음과 같이 기술된다.

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

** 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

$$\bar{I}_a(\bar{r}) = \frac{1}{2} \text{Re} [P(\bar{r}) \bar{U}(\bar{r})^*], \quad (1)$$

여기서, $P(\bar{r})$ 과 $\bar{U}(\bar{r})$ 은 각각 특정 주파수에서 음압과 입자 속도 성분의 복소 크기를 나타낸다.

본 연구의 목적은 선택된 공간의 음향 파워를 특정 방향으로 최대화 하는 것이다. 그림 1에 도시된 바와 같이, 선택된 공간을 제어 공간 V_0 로 정의하며, 제어하고자 하는 방향을 제어 방향 벡터 $\bar{n}_0(\bar{r})$ 로 표기한다. 다음으로, 선택된 공간의 음향 파워의 크기와 방향을 대표할 수 있는 물리량을 선정하여 이를 제어하여야 할 것이다. 많은 물리량이 선택 가능하지만, 첫째로 본 연구에서 시도하는 것은, 평균적인 개념에서 공간의 음향 파워를 정의하는 것이다. 즉, 제어 방향으로 투영된 공간 평균 음향 파워를 최대화 하는 것이다. 제어 공간 내에서 제어 방향을 향하는 평균 파워량은 다음과 같이 기술된다.

$$\langle \bar{I}_a \cdot \bar{n}_0 \rangle_{V_0} = \frac{1}{V_0} \int_{V_0} \bar{I}_a(\bar{r}) \cdot \bar{n}_0(\bar{r}) dV \quad (2)$$

여기서, 제어 방향 벡터는 공간의 함수이다. 즉, 공간의 각 지점에서 다른 방향으로 제어하는 것을 생각할 수 있으나, 문제를 단순화하기 위하여 논문에서는 선택 공간 내에서 모두 동일한 방향으로 제어하는 것으로 간주한다. ($\bar{n}_0(\bar{r}) = \bar{n}_0$)

정의된 물리량을 실제로 제어하는 방법은 다수의 음원에 입력되는 입력 신호를 조절하는 것이다. 다수의 음원의 입력 신호를 다음과 같이 벡터 형태로 정의하고,

$$q(\bar{r}_s) = [q(\bar{r}_s^{(1)}) \cdots q(\bar{r}_s^{(K)})]^T \quad (3)$$

이를 사용하여 식 (2)에서 정의된 물리량을 기술해보자. (여기서, $\bar{r}_s^{(i)}$ 는 i 번째 음원의 공간상 위치를 표현한다.)

음원의 입력 신호와 공간내의 한 지점 \bar{r} 사이의 전달 함수를 생각한다. 이는 다음과 같은 행렬로 기술할 수 있으며,

$$H(\bar{r} | \bar{r}_s) = [H(\bar{r} | \bar{r}_s^{(1)}) \cdots H(\bar{r} | \bar{r}_s^{(K)})] \quad (4)$$

음압과 입자 속도는 다음과 같이 전달 함수 및 음원 입력 신호의 행렬식 연산으로 표현된다.

$$p(\bar{r}) = H(\bar{r} | \bar{r}_s) q(\bar{r}_s), \quad (5)$$

$$\bar{U}(\bar{r}) = \frac{1}{j\rho_0\omega} \nabla H(\bar{r} | \bar{r}_s) q(\bar{r}_s). \quad (6)$$

따라서, 식 (2)에서 정의된 공간 평균 파워는 아래와 같이 입력 신호 행렬의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\langle \bar{I}_a \cdot \bar{n}_0 \rangle_{V_0} = \frac{1}{2\rho_0c} \mathbf{q}^H \mathbf{C}_{V_0} \mathbf{q} \quad (7)$$

$$\mathbf{C}_{V_0} = -\text{Im} \left[\frac{1}{kV_0} \int (\bar{n}_0 \cdot \nabla \mathbf{H})^H \mathbf{H} dV \right]$$

\mathbf{H}, \mathbf{q} 는 각각 $H(\bar{r} | \bar{r}_s), q(\bar{r}_s)$ 의 축약 표현이다.

3. 제어 방법론

3.1 가격 함수의 정의

본 절에서는 앞에서 정의된 공간 평균 음향 파워를 최대화 하는 제어 방법을 제시한다. 기본적으로 공간 평균 음향 파워의 크기를 원하는 방향으로 증대시키기 위하여는 음원의 입력을 증가시키는 것이 타당하나, 실제적으로 사용 가능한 입력의 총 파워 또한 제한되어 있으므로, 총 입력 파워($J_0 = \mathbf{q}^H \mathbf{q}$)에 대한 제한 하에서 제어가 이루어져야 한다. 제한된 입력으로 최대의 제어 방향 파워를 얻기 위한 가격 함수는 다음과 같이 정의할 수 있다[3-4].

$$\alpha = \frac{\langle \bar{I}_a \cdot \bar{n}_0 \rangle_{V_0}}{J_0} = \frac{\mathbf{q}^H \mathbf{C}_{V_0} \mathbf{q}}{H_0^2 \mathbf{q}^H \mathbf{q}} \quad (8)$$

여기서, $J_0 = \frac{1}{2\rho_0c_0} H_0^2 \mathbf{q}^H \mathbf{q}$ 로서, 정규화 상수 H_0 로

정규화된 입력의 총 파워를 나타낸다. 제안된 가격 함수를 최대화 하는 입력을 찾음으로써, 입력 대비 최대 공간 파워를 갖는 해를 결정할 수 있다.

위 가격 함수를 실제적으로 구성하기 위해서는, 선택된 공간 내의 전달함수 H 및 gradient ∇H 를 예측하는 작업이 선행되어야 한다. 이를 위해서는 기존의 인텐시티 계측기에서 널리 활용되는 두 지점의 음압 측정 방법을 활용하거나[3], 센서 어레이를 이용해 공간을 둘러 싸는 표면에 대한 정보를 측정하여, 공간 내부의 음압과 입자속도를 예측하도록 경계 요소법([5,6]) 등이 사용될 수 있다. 식 (8)의 최적해는 다음과 같이 고유치 해석으로 간단히 구할 수 있다.

$$\mathbf{C}_{V_0} \mathbf{q}_{opt} = \alpha H_0^2 \mathbf{q}_{opt} \quad (9)$$

즉, 행렬 \mathbf{C}_{V_0} 의 최대 고유치에 해당하는 고유 벡터가 주어진 가격 함수를 최대로 하는 최적해가 된다.

그림 2는 3차원의 자유 음장 상에 2차원 평면 형태로 제어 공간을 설정하여 수치 모의 실험을 수행한 결과이다. 그림 2(a)는 제어 음원 및 제어 공간의 배치를 나타낸다. 제어 공간은 사각 평면 형태로 설정하고(구경 $L_0 = 0.55\lambda$), 5개의 단극 음원을 $R_0 = 3\lambda$ 위치에 등간격으로 배치하였다. 그림 2(b)에서 볼 수 있듯이, 제어 방향 \bar{n}_0 를 상향 90로 설정하여 제어하였을 때, 공간 내의 인텐시티가 제어 방향을 잘 추종하고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 식 (8)의 제어 방법이 항상 효과적으로 작동하는 것은 아니다. 주어진 가격 함수는 제어 방향으로 투영된 인텐시티의 절대 크기만을 고려하므로, 그 투영된 크기의 최대성은 보장되나, 그것이 곧 방향이 제어된다는 것을 나타내진 않는다. 이는 다음의 예제에서 확인할 수 있다. 제어 음원이 공간으로부터 서로 다른 위치에 있도록 위치시키고 제어를 수행하였다. (시계 방향 순서로 $R_0 = [1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0]\lambda$). 여기서 보여지는

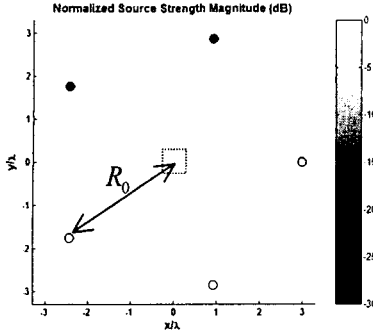


그림 2(a) 음원의 배치 및 정규화된 제어 입력 크기

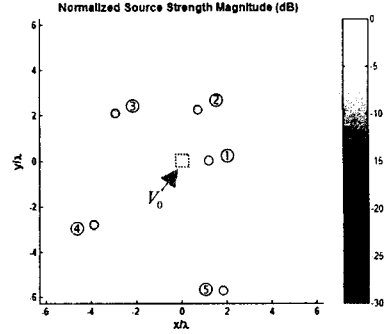


그림 3(a) 음원의 배치 및 정규화된 제어 입력 크기

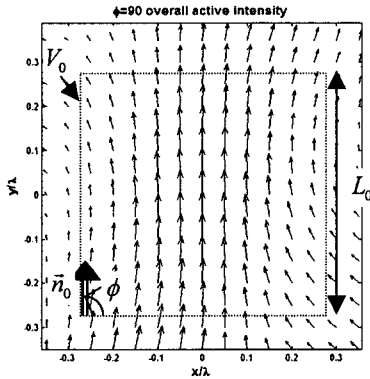


그림 2(b) 제어후의 음향 인텐시티 분포

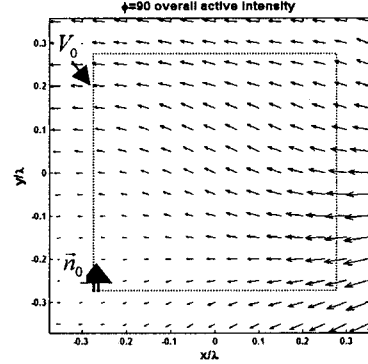


그림 3(b) 제어후의 음향 인텐시티 분포

결과는, 제어 방향과 실제 음향 파워 흐름 사이에 차이가 있음을 나타내고 있다(그림 3(b)). 이는 제어 공간에 근접해 있는 음원이 그렇지 않은 음원보다 절대적으로 큰 음향 파워를 방사함으로써, 비록 제어 방향과 일치하지 않더라도, 제어 방향으로 투영된 음향 파워는 큰 값을 가지기 때문이다. 따라서 전체적으로 근접해 있는 음원이 큰 입력력을 받도록 구동되고 있음을 볼 수 있다(그림 3(a)). 제어 방향 변화에 따른 가격 함수 변화가 그림 3(c)에 도시되어 있다. 제어 방향에 따라 제어 성능이 크게 변화함을 알 수 있다.

3.2 방향 제어를 위한 수정된 가격 함수 제안

이전의 예제에서 볼 수 있듯이, 음향 파워의 방향과 크기, 두 물리량을 동시에 제어하기 위해서는 가격 함수의 수정이 불가피하다. 본 절에서는 기존의 가격 함수보다 음향 파워의 방향에 더 비중을 두어 제어하는 수정된 가격 함수를 제안한다. 먼저, 음향 인텐시티는 다음과 같이 음향 위치 에너지와 공간상의 위상 변화량의 곱으로 표현됨[7]에 주목한다.

$$\bar{I}_a(\vec{r}) = \frac{1}{2\rho_0\omega} |P(\vec{r})|^2 \nabla\theta(\vec{r}) \quad (10)$$

여기서, $P(\vec{r}) = |P(\vec{r})|e^{j\theta(\vec{r})}$ 이다. 중요한 것은, 음향 파워의 전파 방향은 오직 공간상의 위상 변화량에만

Cost function versus control direction(ϕ)

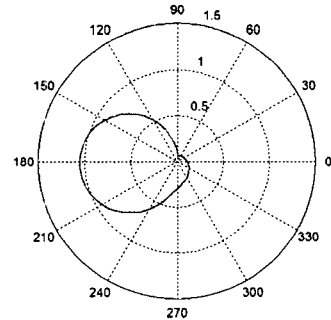


그림 3(c) 제어 방향에 따른 가격 함수 분포

관계된다는 사실이다. 그러므로, 가격 함수의 구성 과정에서 음향 위치 에너지의 영향을 배제하면 보다 음향 파워의 전파 방향에 중점을 두어 제어할 수 있을 것이다. 음향 위치 에너지의 영향을 감소시키기 위하여, 다음과 같이 가격 함수의 크기를 정규화 하는 방법을 제안한다.

$$\alpha' = \frac{\mathbf{q}^H \mathbf{C}_{V_0} \mathbf{q}}{\left(\mathbf{q}^H \text{Diag} \left[\int H^H H dV / 2\rho_0 c V_0 \right] \mathbf{q} \right)} = \frac{\mathbf{q}^H \mathbf{C}_{V_0} \mathbf{q}}{\mathbf{q}^H \mathbf{E}_{V_0}^P \mathbf{q}} \quad (11)$$

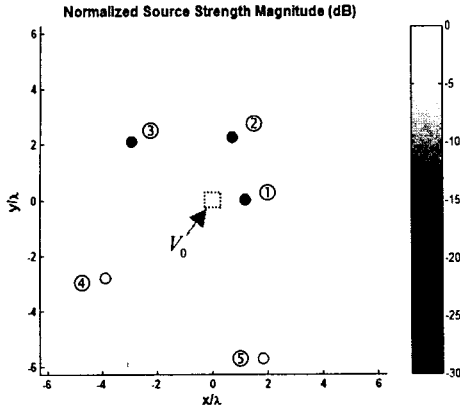


그림 4(a) 음원의 배치 및 정규화된 제어 입력 크기

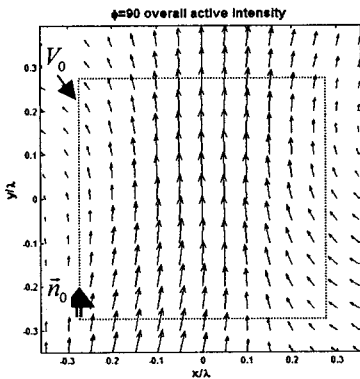


그림 4(b) 제어후의 음향 인텐티 분포

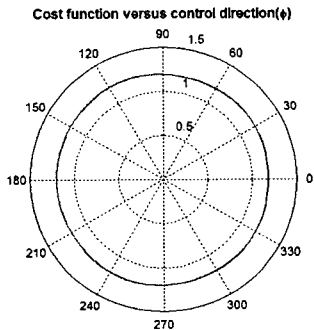


그림 4(c) 제어 방향에 따른 가격 함수 분포

여기서, $Diag[\mathbf{A}]_{nm} = \mathbf{A}_{nm} \delta_{nm}$.

식 (11)의 분모는 각 음원이 개별적으로 구공될 때 발생시키는 음향 위치 에너지의 합을 나타낸다. 따라서, 위 가격 함수는 음향 위치 에너지의 크기에 비례하는 penalty를 주어 제어하는 것으로 해석될 수 있다.

식 (9)에서 기술된 바와 마찬가지로, 식 (11)의 최적해 역시 다음과 같은 고유치 해석으로부터 결정

할 수 있다. (예, 참고 문헌 [8] 참조).

$$(\mathbf{E}'_0)^{-1} \mathbf{C}'_0 \mathbf{q}'_{opt} = \alpha'_{max} \mathbf{q}'_{opt} \quad (12)$$

그림 4는 수정된 가격 함수를 사용하여 이전의 음원 배치로 제어를 수행한 결과를 나타낸다. 그림 3에서 보았던 결과와는 달리, 제어 방향과 일치하도록 음향 파워가 전파되고 있으며, 제어 방향 변화에도 강건한 제어 성능을 얻을 수 있다.

4. 결론

선택된 공간 내의 음향 파워의 크기와 방향을 제어하는 방법에 대하여 논하였다. 제어하고자 하는 방향으로 투영된 음향 파워량을 제한된 입력 크기로 최대화 하는 방법을 제시하였다. 제시된 방법이 임의의 음원 배치에 대하여 방향 제어 성능이 저하되는 단점을 보완하기 위하여, 방향 제어에 보다 중점을 둔 새로운 가격 함수를 제시하고, 그 성능을 검증하였다. 불규칙하게 분산된 형태로 배치된 음원을 사용한 수치 실험을 통하여, 제안된 가격 함수가 보다 나은 방향 제어 성능을 가짐과 함께, 제어 방향에 보다 강건한 특성을 가짐을 검증하였다.

감사의 글

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

참고 문헌

- (1) J. -W. Choi, Y. -H. Kim, 2002, "Generation of an acoustically bright zone within an illuminated region," J. Acoust. Soc. Am. 111(4), 1695-1700
- (2) Kirkeby, O. and P. A. Nelson, 1993, "Reproduction of Plane-Wave Sound Fields," J. Acoust. Soc. Am. 94(5), 2992-3000.
- (3) 최정우, 김양한, 2003, "임의의 위치에 가상 인텐시티 형성 방법: 방법론과 그 물리적 의미," 한국소음진동공학회 2003년도 춘계학술대회, 652-657
- (4) J. -W. Choi, Y. -H. Kim, 2003, "Acoustic intensity optimization using source array," Proc. Inter-Noise 2002, N777
- (5) C. G. Mollo, R. J. Bernhard, 1990, "Numerical evaluation of the performance of active noise control systems," ASME Trans. J. Vib. Acoust. 112, 230-236
- (6) K. A. Cunefare, G. H. Koopmann, 1990, "A boundary element approach to optimization of active noise control sources on three-dimensional structures," ASME Trans. J. Vib. Acoust 113, 387-394
- (7) F. J. Fahy, 1989, Sound Intensity, Elsevier Applied Science, London
- (8) P. Lancaster, M. Tismenetsky, 1985, The theory of matrices, Academic Press