

음향 대조 및 밝기 제어: 이론적 배경

Fundamentals of Bright and Dark Zone: Theoretical Backgrounds

최정우† · 김양한*
Jung-Woo Choi and Yang-Hann Kim

Key Words : Acoustic Contrast(음향 대조), Loudspeaker Array(스피커 어레이), Sound Focusing(소리 집중).

ABSTRACT

Acoustic brightness and contrast control are promising techniques for manipulating acoustic energy over selected zones of interest using loudspeaker arrays. In this paper, the fundamental theory and concept of the brightness and contrast control is reviewed. The similarity and difference of two different strategies are explained in terms of the constraint required to determine a unique solution among many possible candidates. The application examples and recent progresses of the brightness and contrast control are presented.

1. 서 론

사용자가 원하는 대로 소리의 공간 분포를 조절할 수 있는 오디오 시스템은 다양한 응용 가능성을 가지고 있다. 예를 들면, 한 공간에서 음악을 청취하면서 다른 공간에서는 정숙을 유지한다거나, 혹은 공간상에 발생하는 파면의 모양 자체를 원하는 형태로 조종하는 것 등이 이에 해당한다. 물론, 하나의 스피커로는 소리의 모양을 제어하는데 한계가 있으므로, 다수의 스피커로 구성된 어레이 시스템을 사용함으로써 이와 같은 목적을 달성할 수 있다.

과거에는 이러한 오디오 시스템이 멀티채널 구성의 어려움 등으로 인해 비현실적인 것으로 여겨졌으나, 급속한 멀티채널 시스템 및 신호 전송 기술의 발달로 현재는 현실적인 가능성을 논할 수 있는 수준에 이르게 되었다. 일례로, 현재 방송 시장에 널리 보급된 AES-10 확장규격(eMADI)은 미 단일 동축선으로 64채널의 오디오 신호를 전송할 수 있으며, 일반 소비자용 전자 기기에서 널리 쓰이고 있는

Class-D 증폭기 중 일부는 단일 칩으로 8채널 이상의 오디오 신호 증폭이 가능하다.

이와 같은 스피커 어레이 시스템으로 원하는 소리의 모양을 선택한 공간별로 만들어 낼 수 있다면 어떠한 기능을 사용자에게 제공할 수 있을까? 앞서 언급된 정숙 공간과 청취 공간을 동시에 만들어 내는 연구의 경우, 음향학적으로 밝은 공간(acoustically bright zone)과 어두운 공간이라는 개념⁽¹⁾을 통해 잘 알려져 있다. 일반 스피커를 사용하여 특정 사용자만 소리를 들을 수 있게 하는 연구는 2000년대 이후부터 본격적으로 시작되어⁽¹⁾⁽⁵⁾, 최근 들어 Monitor⁽²⁾, TV⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾, Mobile phone⁽⁶⁾ 등 다양한 장치를 대상으로 시험되고 있다.

스피커 어레이 시스템이 활발히 적용되는 또 다른 분야는 음장 재현(Sound field reproduction) 분야이다. 이는 선택한 공간내의 파면의 전파 모양을 원하는 형태로 재현해 내는 방법을 일컫는데, 주로 입체 음향을 제공을 목적으로 연구되고 있다⁽⁴⁾⁽¹¹⁾.

본 고에서는 공간 선택적으로 소리의 분포를 조절하기 위한 음향 밝기 및 대조 제어의 이론적인 배경을 살펴보고, 그 응용 분야에 대해 소개하고자 한다.

2. 음향 밝기 및 대조 제어

2.1 문제 정의

† 정회원, 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과소음 및 진동제어 연구센터(NOVIC)

E-mail : khepera@kaist.ac.kr

Tel : 042-350-1425, Fax : 042-350-8220

* 정회원, 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터(NOVIC)

먼저, 유한한 크기의 관심 공간 V_b 와 공간 내의 소리를 제어하기 위한 다수의 스피커 어레이를 고려하자(그림 1(a)). 각 스피커의 위치를 $\vec{r}_s^{(l)}$ ($l=1, \dots, L$)이라 하고, 스피커에 입력되는 신호를 $\hat{q}(\vec{r}_s^{(l)})$ 로 표기하면, 관심 공간내의 위치 \vec{r} 에 있는 청취자 위치의 음압 $\hat{p}(\vec{r})$ 은 다음과 같이 스피커 입력 신호와 청취자 위치 음압 간의 전달함수 \hat{h} 를 사용하여 기술할 수 있다.

$$\hat{p}(\vec{r}) = \sum_{l=0}^{L-1} \hat{h}(\vec{r} | \vec{r}_s^{(l)}) \hat{q}(\vec{r}_s^{(l)}) \quad (1)$$

여기서, 편의상 각 변수는 단일 주파수로 구동되는 경우를 표현하고 있다. 식 (1)을 행렬 형태로 표현하면, 다음과 같이 행 벡터 $\hat{\mathbf{h}}(\vec{r} | \vec{\mathbf{r}}_s)$ 와 열 벡터 $\hat{\mathbf{q}}(\vec{\mathbf{r}}_s)$ 의 곱으로 표현할 수 있게 된다.

$$\hat{p}(\vec{r}) = \hat{\mathbf{h}}(\vec{r} | \vec{\mathbf{r}}_s) \hat{\mathbf{q}}(\vec{\mathbf{r}}_s) \quad (2)$$

위의 표기 방법에 따라, 공간상의 음향 에너지 분포, 보다 정확히는 음향 위치 에너지 분포를 기술하여 보자. 선택한 공간의 음향 에너지 분포를 대표하기 위해, 공간 V_b 에 대한 평균 음향 에너지를 고려하는 것이 바람직 할 것이다. 식 (2)를 이용하면, 공간 평균 음향 에너지는 다음과 같은 행렬 연산으로 표현할 수 있다.

$$e_b = \frac{1}{4\rho_0 c^2 V_b} \int_{V_b} |\hat{p}(\vec{r})|^2 dV(\vec{r}) \\ = \mathbf{q}^H \left[\frac{1}{4\rho_0 c^2 V_b} \int_{V_b} \hat{\mathbf{h}}(\vec{r} | \vec{\mathbf{r}}_s)^H \hat{\mathbf{h}}(\vec{r} | \vec{\mathbf{r}}_s) dV(\vec{r}) \right] \mathbf{q} \quad (3)$$

여기서, ρ_0 는 공기의 밀도, 그리고 c 는 공기중의 음파 속도를 나타내며, 변수 \mathbf{q} 는 벡터 $\hat{\mathbf{q}}(\vec{\mathbf{r}}_s)$ 의 축약 표현이다. 식 (3)의 괄호 내의 행렬 연산은 각 스피커가 발생시키는 음장의 공간 상관도(spatial

correlation)를 나타내며, \mathbf{R}_b 로 축약하여 표기하기로 한다.

$$\mathbf{R}_b = \frac{1}{V_b} \int_{V_b} \hat{\mathbf{h}}(\vec{r} | \vec{\mathbf{r}}_s)^H \hat{\mathbf{h}}(\vec{r} | \vec{\mathbf{r}}_s) dV(\vec{r}) \quad (4)$$

편의상, 식 (3)의 상수 $1/4\rho_0 c^2$ 는 생략하여 표기하였다. 정의된 공간 상관 행렬을 사용하면, 관심 공간 V_b 내의 평균 음향 에너지는 다음과 같이 간략하게 표현된다.

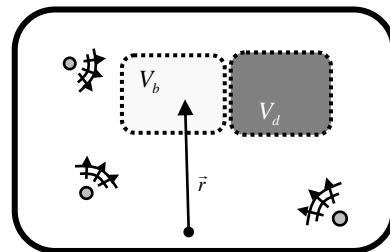
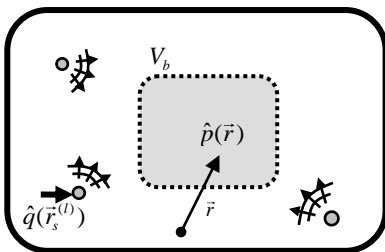
$$e_b = \mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q} \quad (5)$$

위 식은 선택한 공간의 평균 음향 에너지와 이를 제어하기 위한 스피커 입력 신호 \mathbf{q} 의 관계를 표현하고 있다.

2.2 음향 밝기 제어

그렇다면, 선택한 공간상에 원하는 음향 에너지 e_b 를 발생시키기 위한 입력 신호는 어떻게 결정될 수 있을까? 간단히 생각하면, 모든 스피커를 사용하지 않고 한 스피커의 gain만을 조절하여도 원하는 음향 에너지를 발생시키는 데는 문제가 없을 것이다. 두 개의 스피커를 사용하는 경우에도, 두 스피커 사이의 크기와 위상을 잘 조절하면 원하는 바를 이룰 수 있을 것이다. 따라서, 원하는 음향 에너지를 발생시키는 문제는 기본적으로 무수히 많은 해를 가진다 할 수 있으며⁽¹⁴⁾, 이와 같이 무수히 많은 해를 갖는 경우에 역으로 입력 신호를 결정하는 문제는 수학적으로 ill-posed problem에 해당한다.

Ill-posed problem을 well-posed problem으로 변환하려면, 추가적인 제한 조건(constraint)이 필요할 것이다. 그렇다면, 현실적으로 유용한 제한 조건과 그 의미는 무엇인지 생각해 볼 필요가 있다. 예를 들어, 앞서 언급한 하나의 스피커만을 가동하는 경우를 생각하여 보자. 공간의 평균 음향 에너지는 음압의 자승에 비례하므로, 단위 입력당 1이라는 음



압을 발생시키는 스피커가 있다면 ($\hat{h}=1$), 이를 이용해 $|\hat{p}|^2=1$ 의 음향 에너지를 발생시키기 위해서는 $|\hat{q}(r_s^{(1)})|=1$ 의 입력 신호가 필요하다.

만일, 이와 마찬가지로 특성($\hat{h}=1$)을 갖는 두 개의 스피커가 공간 내에서 동일한 위상으로 음압을 발생시킨다면, 음압은 두 입력 신호의 합으로 나타나므로 ($\hat{p}^2 = |\hat{q}(r_s^{(1)}) + \hat{q}(r_s^{(2)})|^2$), $|\hat{p}|^2=1$ 의 음향 에너지를 발생시키기 위해서는 $\hat{q}(r_s^{(1)})=0.5$ 의 입력 신호면 충분하다. 즉, 독립된 채널을 갖는 시스템이 공간 내에서 높은 공간 상관성(spatial correlation)을 갖는 경우, 작은 크기의 입력으로도 동일한 에너지 출력을 달성하는 것이 가능하므로, 입력 파워 대비 출력 에너지가 하나의 유용한 제한 조건으로 사용될 수 있다⁽¹⁾⁽⁹⁾.

음향 밝기 제어는 이러한 입력과 출력의 에너지 비를 제한 조건으로 삼아 제어를 수행하는 방식이다. 먼저, 입력 에너지는 다음과 같이 각 채널을 구동하는 입력 신호의 자승 합으로 표현할 수 있다.

$$e_i = H_0^2 \mathbf{q}^H \mathbf{q} \quad (6)$$

여기서, H_0 는 출력 에너지와 차원을 일치하여 주기 위한 상수이다. 만일 위의 입력 에너지가 e_i 로 제한되어 있는 상태에서 최대의 출력 e_b 를 얻고자 한다면, 그 문제는 다음과 같이 Lagrange multiplier α 를 도입하여 제한 조건이 없는 최대화 문제로 변환할 수 있다.

$$\text{Maximize: } J = \mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q} + \alpha(e_i - H_0^2 \mathbf{q}^H \mathbf{q}) \quad (7)$$

위 가격함수(cost function)를 최대로 하는 해는 간단한 고유치 문제로부터 그 해를 찾을 수 있다. 즉,

$$\mathbf{R}_b \mathbf{q}_\alpha = \alpha_{\max} H_0^2 \mathbf{q}_\alpha \quad (8)$$

을 만족하는 해로서, 최대 고유치 α_{\max} 에 해당하는 고유 벡터 \mathbf{q}_α 로 주어진다. 다중 고유치를 갖는 시스템을 제외하면, 식 (8)의 고유벡터는 대체로 유일하게 결정될 수 있다. 식 (8)의 고유치 α_{\max} 가 최대의 값을 갖는다는 것은 는 다음과 같이 입력과 출력 에너지의 비(음향 밝기)가 최대가 됨을 뜻하므로,

$$\alpha_{\max} = \frac{e_b}{e_i} = \frac{\mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q}}{H_0^2 \mathbf{q}^H \mathbf{q}} \quad (9)$$

식 (7)의 입력과 출력 에너지의 차를 최대로 하는

해(식 (8))은 위의 에너지 비 역시 자동으로 최대화하는 성질을 갖고 있다.

2.3 음향 대조 제어

또 다른 유용한 제한 조건은 서로 다른 두 공간 사이의 음향 에너지를 비교함으로써 정의될 수 있다. 하나의 공간을 다루는 음향 밝기 문제와 달리, 음향 에너지를 증대시킬 공간 V_b (밝은 공간)과 정숙을 유지할 공간(어두운 공간) V_d 를 고려하자(그림 1(b)). 두 공간의 공간 평균 음향 에너지를 각각 e_b, e_d 로 표기하고, 그에 따른 공간 상관 행렬을 \mathbf{R}_b 와 \mathbf{R}_d 로 기술하기로 한다.

음향 밝기 문제와 유사한 과정으로, 어두운 공간 V_d 의 음향 에너지를 e_d 로 유지하도록 제한 조건을 부여하자. 이러한 제한 조건하에서, 밝은 공간 V_b 의 음향 에너지를 최대로 하는 문제를 생각할 수 있다. 즉, 한 공간의 에너지는 낮게 유지하면서 다른 공간의 에너지를 최대로 하는 문제이다.

Lagrange multiplier β 를 도입하면 다음과 같은 가격 함수를 설정할 수 있으며,

$$\text{Maximize: } J = \mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q} + \beta(e_d - \mathbf{q}^H \mathbf{R}_d \mathbf{q}) \quad (10)$$

위 가격함수는 다음의 고유치 해석의 최대 고유치에 해당하는 고유벡터 \mathbf{q}_β 로 구동될 때 최대값을 갖는다.

$$\mathbf{R}_b \mathbf{q}_\beta = \beta_{\max} \mathbf{R}_b \mathbf{q}_\beta \quad (11)$$

식 (11)의 양 변에 \mathbf{q}^H 를 곱하면, 최대 고유치 β_{\max} 는 다음과 같이 밝은 공간과 어두운 공간의 에너지 비

$$\beta = e_b / e_d = \frac{\mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q}}{\mathbf{q}^H \mathbf{R}_d \mathbf{q}} \quad (12)$$

를 최대로 한다는 것을 알 수 있다. 식 (12)의 밝고 어두운 공간의 에너지 비를 음향 대조로 정의한다.

2.4 음향 밝기/대조 동시 제어⁽⁸⁾⁽¹¹⁾

음향 밝기와 대조 제어는 각각 다른 목적과 그에 따른 제한 조건을 가지고 있다. 만일 음향 밝기와 대조를 동시에 제어하고자 하는 경우, 두 제한 조건을 동시에 대입하여 다음과 같은 가격 함수를 설정할 수 있다.

$$J = \mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q} + \alpha(e_i - H_0^2 \mathbf{q}^H \mathbf{q}) + \beta(e_d - \mathbf{q}^H \mathbf{R}_d \mathbf{q}) \quad (13)$$

하지만, 아쉽게도 두 제한 조건을 동시에 만족하는 해는 존재하지 않을 수 있다(Over-constrained case). 예를 들어, 행렬 \mathbf{R}_b 의 최소 고유치가 1 이상인 상황에서 입력 에너지가 1로 제한되어 있고, 어두운 공간의 에너지를 0.1로 만드는 제한 조건을 추가로 부여하면 조건을 만족하는 해 자체가 존재하지 않는다.

따라서, 가능한 제한 조건은 두 개의 제한 조건을 두는 대신에, 입력 에너지와 어두운 공간의 에너지의 총 합을 특정 값으로 제한하는 것이다. 여기서, 입력 에너지와 어두운 공간의 음향 에너지는 서로 다른 물리량이므로, 일대일로 합하는 것은 바람직하지 않으며, 일련의 가중치(weighting)의 도입이 필요하다. 이 가중치를 σ 로 표현하면, 가격 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$J = \mathbf{q}^H \mathbf{R}_b \mathbf{q} + \gamma(e_0 - \sigma H_0^2 \mathbf{q}^H \mathbf{q} - \mathbf{q}^H \mathbf{R}_d \mathbf{q}) \quad (14)$$

가중치 σ 가 클 경우, 입력 에너지에 더 비중을 두어 constraint를 만족하게 되며, 작은 경우 어두운 공간의 에너지에 비중을 두어 제어를 수행하게 된다.

위 식을 \mathbf{q} 에 대하여 미분하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{R}_b \mathbf{q} = \gamma(\mathbf{R}_d + \sigma H_0^2 \mathbf{I}) \mathbf{q} \quad (15)$$

즉, 위의 고유치 문제에서 최대 고유치 γ_{\max} 를 갖는 고유 벡터 \mathbf{q}_γ 가 최적해로 결정된다.

위 문제와 등가적으로, 상관행렬 함수를 좌변으로 정리하여 다음과 같이 사용할 수도 있다.

$$(\mathbf{R}_b - \gamma \mathbf{R}_d) \mathbf{q}_\gamma = \sigma H_0^2 \mathbf{q}_\gamma \quad (16)$$

식 (16)의 형태를 활용하는 경우, 밝은 공간과 어두운 공간의 음압차⁽⁵⁾를 최대로 하는 고유치 σH_0^2 를 찾는 것으로 이해할 수도 있다. 이 경우, γ 가 σ 대신 일종의 tuning 변수가 되지만, 그 최적해는 식 (15)와 전혀 다르지 않다.

3 응용 사례

음향 밝기 혹은 대조 제어가 오디오 시스템의 형태로 구현된 예는 대표적으로 장지호 등⁽²⁾의 연구나, Elliott 등⁽⁶⁾⁽⁷⁾의 연구에서 찾아 볼 수 있다. 그 중에서도, 장지호 등⁽²⁾은 9개의 스피커를 사용한 모니터용 선형 어레이 시스템을 구현하여 음향 대조 제어가 성공한 바 있다. 그림 2와 3은 각각 모니터용 스

피커 시스템과 그 제어 예를 도시한 것으로, 32cm의 비교적 작은 aperture size로도 20dB 이상의 높은 음향 대조 달성성이 가능함을 보여주고 있다. 또한, 모니터로부터 근접장에서는 청취자에 의한 산란이 발생할 수 있으므로, 산란파를 고려하여 제어하기 위한 음향 대조 제어 기법⁽³⁾이 연구되었으며, 그림 4에 도시된 바와 같이 청취자에 의한 산란이 존재하는 경우에도 높은 음향 대조를 달성할 수 있음이 실험적으로 증명되었다.

보다 최근에는 소리의 집중을 통해 공간상의 sound ball을 형성하는 연구⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾도 수행되고 있다. 그림 5는 구체 형상에 가까운 스피커 어레이 시스템을 사용하여 sound ball을 형성한 연구의 예이다.

Elliott 등⁽⁷⁾은 항공기와 같은 다수의 좌석이 있는 공간에서, 각 좌석마다 독립적으로 음향을 재생하기 위한 목적으로 음향 대조 제어를 적용한 바 있다. 이 외에도, 소형의 mobile 기기에서 단일 청취자만이 소리를 들을 수 있도록 스피커 어레이를 제어하는 연구를 수행하였다⁽⁶⁾. 그림 6은 mobile 기기의 유한 요소 모델과 이에 적용된 음향 대조 제어의 성능을 도시한 것이다.

보다 대형의 Digital TV용으로 제안된 loudspeaker array 제어 예제⁽⁸⁾가 그림 7(a)에 도시되어 있다. 음향 대조와 밝기를 동시에 최적화 하기 위하여, 식 (15)의 가중치 σ 를 변화시키면서 음향 밝기와 음향 대조의 변화 추이를 기록하고, 각 주파수 별 성능을 도시한 것이다. 가중치 σ 의 감소에 따라 입출력 에너지 비 보다는 밝고 어두운 공간의 음압차를 중시하게 되므로, 음향 밝기는 감소하고, 음향 대조는 상승하는 경향을 보여주고 있다. 그림 7(b)는 도출된 최적해가 저주파수 대역에 발생시키는 음장을 도시한 것이다. 그림 좌측에 세로 방향으로 스피커 어레이가 위치하며, 표시된 원호는 반지름 2m로서, DTV 정면 2m 거리에 위치한 청취자에게 독립된 음향 공간을 생성할 수 있음을 보이고 있다.

음향 대조 제어 기법은 이와 같이 특정 공간의 음압 레벨을 조절하는 목적 외에도, 공간상의 소리의 모양을 조절하기 위해 사용될 수 있다. 이는 일련의 변환(transform)을 통하여 공간 영역의 집중이 아닌, 우리가 재현하고자 하는 음파를 표현하는 특정 basis function에 대해 에너지를 집중함으로써 가능하다. 그림 8은 특정 각도로 전파하는 plane wave를 형성하기 위해 wavenumber domain의 한 지점에 focusing 한 예⁽⁴⁾를 보여주고 있다.

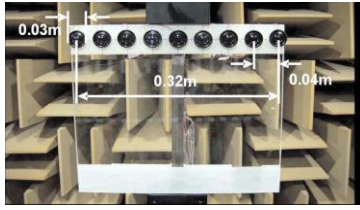


Figure 2 Loudspeaker system for the monitor⁽²⁾

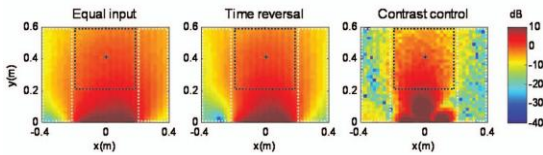


Figure 3 Generation of an acoustically bright zone using the loudspeaker array of Fig. 2(2)(10) (left) Equal input (middle) Time-reversal (right) Contrast control at 800Hz

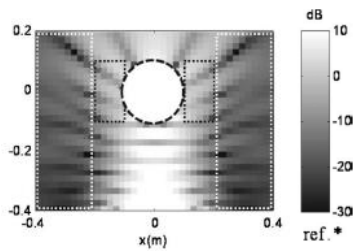
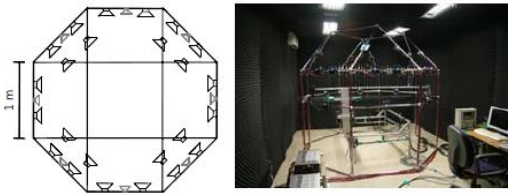
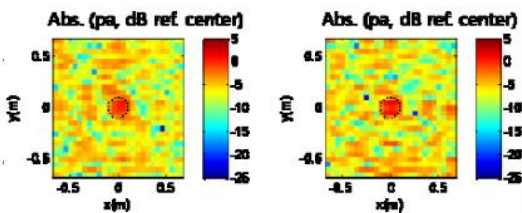


Figure 4 Generation of an acoustically bright and dark zone with head scattering⁽³⁾. Contrast control at 3.15kHz

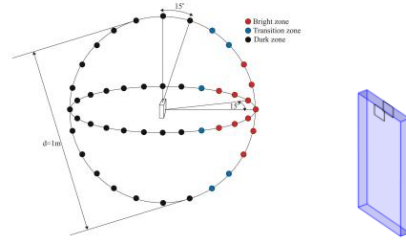


(a)



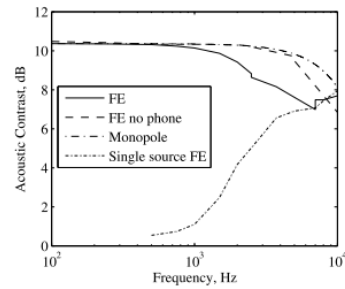
(b)

Figure 5 A 32-channel Sound Ball system⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ (a) System configuration and loudspeaker arrangement (b) Sound pressure field generated by (left)acoustic brightness and (right)acoustic contrast control



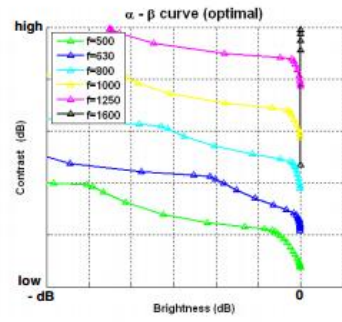
(a)

(b)

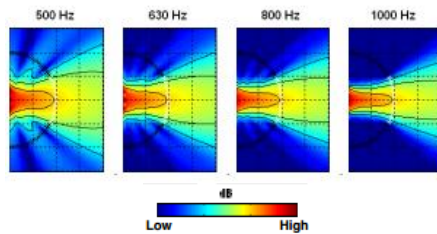


(c)

Figure 6 Acoustic contrast control for mobile devices⁽⁶⁾. (a) configuration of the bright and dark zone (b) two loudspeaker arrangement on the mobile device (c) Acoustic contrast comparison of a FE(Finite Element) model and a monopole source



(a)



(b)

Figure 7 Performance simulation of a TV-sized array⁽⁸⁾ (a) Trade-offs between the brightness and contrast with varying σ (b) Resultant beam patterns at low frequencies

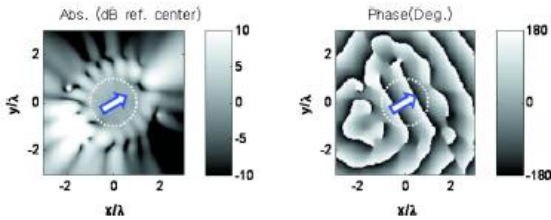


Figure 8 Plane wave reproduction using the wavenumber-domain focusing method⁽⁴⁾ (left) Pressure magnitude and (right) phase distribution

4. 요약

본 논문에서는 공간상의 서로 다른 영역에 소리를 집중하거나 파면의 전파 형상을 제어 가능케 하는 음향 밝기 및 대조 제어의 기초 이론을 서로 다른 제한 조건의 관점에서 살펴보았다. 밝기 및 대조 제어는 소형 모바일 기기에서 DTV, 항공기 실내 등 다양한 분야에서 활발히 연구되고 있으며, 향후 홈 환경과 같이 음향반사가 심한 공간에서도 사적이고 쾌적한 음향청취 공간을 제공하는데 활용될 수 있다.

후 기

본 논문의 연구는 2012년도 정부(지식경제부) 재원의 산업원천기반구축사업의 지원(No. 10037244), 한국과학기술원 국방무인화기술 특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비지원 및 국방과학연구소기초연구과제(ADD-07-07-01)로부터 지원, 두뇌한국21 프로그램, 휴먼인식환경사업본부-신기술융합형 성장동력사업의 지원(2011K000-665)으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Choi, J.-W.; Kim, Y.-H., "Generation of an acoustically bright zone within an illuminated region using multiple sources," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 111(4), 1695-1700, Apr. 2002

(2) Chang, J.-H., Lee, C.-H., Park, J. -Y., Kim, Y. -H., "A realization of sound focused personal audio system using acoustic contrast control," J. Acoust. Soc. Am., Vol.125(4), pp. 2091-2097, 2009

(3) Chang, J.-H., Park, J. -Y., Kim, Y. -H.,

"Scattering effect on the sound focused personal audio system," J. Acoust. Soc. Am, Vol.125(5), pp.3060-3066, 2009

(4) Chang, J.-H., Choi, J.-W., and Kim, Y.-H., "A plane wave generation method by wave number domain point focusing," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 128(5), pp. 2758-2767, 2010

(5) Choi, J.-W., Kim, Y.-H., "Active Control for the Enhancement of Sound Field", presented in Active 04, Williamsburg, Virginia, 20-22 September 2004

(6) Cheer, J., Elliott, S. J., Youngtae, K., Choi, J.-W., "The Effect of Finite Sized Baffles on Mobile Device Personal Audio," in Proc. of th 130th convention of the Audio Eng. Soc., Held in London, UK, preprint 8326.

(7) Jones, M., Elliott, S. J., "Personal audio with multiple dark zones," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 124(6), pp. 3497-3506, 2008

(8) Choi, J.-W., Kim, Y.; Ko, S., Kim, J., "Super Directive Loudspeaker Array for the Generation of Personal Sound Zone," in Proc. of the 125th convention of Audio Eng. Soc., Preprint 7620, 2008

(9) Choi, J.-W., Kim, Y., Ko, S., Kim, J., "A differential approach for the implementation of superdirective loudspeaker array," in Proc. of the 128th convention of Audio Eng. Soc., Preprint 8032, 2010

(10) Chan-Hui Lee, Ji-Ho Chang, Jin-Young Park and Yang-Hann Kim, "Personal Monitor & TV Audio System by Using Loudspeaker Array," J. Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17(8), pp.701-710,2008

(11) Choi, J.-W., Kim, Y.-H., Park, Y.-J., "Spatial manipulation of sound using multiple sources," J. Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15(12), pp. 1378-1388, 2005

(12) Wen, Y., Yang, J., Gan, W.-S., "Strategies for an acoustical-hotspot generation," IEICE Trans. Fund., Vol. E88-A, No. 7, pp.1739-1746, July 2005

(13) Chang, J. -H., Song, M.-H., Park, J.-Y, Kim, Y.-H., "Realization of sound balls by using 32-channel loudspeaker system," in Proc. of KSNVE 2009 Autumn Conf., pp. 866~867, 2009

(14) Kim, Y. -H, "Sound visualization and manipulation: theories and applications," in Proc. of InterNoise2011, plenary lecture-2, September 4-7, 2011, Osaka, Japan