

# 다수의 음원을 사용한 공간의 소리 제어 방법론

## Spatial Manipulation of Sound Using Multiple Sources

최정우\* · 김양한\* · 박영진\*

Joung-Woo Choi, Yang-Hann Kim and Young-Jin Park

(2005년 9월 27일 접수 ; 2005년 11월 23일 심사완료)

**Key Words** : Active Sound Control(능동 음향 제어), Acoustic Brightness(음향 밝기), Acoustic Contrast(음향 대조), Wavenumber Domain Focusing(파수 영역 집중)

### ABSTRACT

Spatial control of sound is essential to deliver better sound to the listener's position in space. As it can be experienced in many listening environments, the quality of sound can not be manifested over every position in a hall. This motivates us to control sound in a region we select. The primary focus of the developed method has to do with the brightness and contrast of acoustic image in space. In particular, the acoustic brightness control seeks a way to increase loudness of sound over a chosen area, and the contrast control aims to enhance loudness difference between two neighboring regions. This enables us to make two different kinds of zone - the zone of quiet and the zone of loud sound - at the same time. The other perspective of this study is on the direction of sound. It is shown that we can control the direction of perceived sound source by focusing acoustic energy in wavenumber domain. To begin with, the proposed approaches are formulated for pure-tone case. Then the control methods are extended to a more general case, where the excitation signal has broadband spectrum. In order to control the broadband signal in time domain, an inverse filter design problem is defined and solved in frequency domain. Numerical and experimental results obtained in various conditions certainly validate that the acoustic brightness, acoustic contrast, direction of wave front can be manipulated for some finite region in space and time.

### 1. 서론

청취자에게 보다 나은 소리를 들려준다는 오디오 시스템의 목적을 생각하면, 소리의 시간적인 변화를 충실히 재현하여야 할 뿐만 아니라 청취자의 위치 혹은 청취자가 속한 공간에서 보다 나은 소리를 제공할 필요가 있다. 즉, 소리의 시간적인(temporal) 특성뿐

만 아니라 소리의 공간적인(spatial) 분포도 제어되어야 함은 분명하다.

소리의 시간적인 특성을 제어하는 연구는 신호 처리 분야에서 광범위하게 진행되어 왔으나, 공간적 특성은 상대적으로 적은 주목을 받아온 것이 사실이다. 이는 소리의 공간적인 분포가 방의 경계 조건이나 음원의 방사 패턴에 의해 수동적으로 결정되어, 상대적으로 사용자의 입장에서 변화시키기 까다롭기 때문이다.

소리를 시공간 상에서 제어하는 문제를 시각적인 이미지를 만드는 문제에 빗대어 생각하여 보자. 소리의 시간적 특성은 이미지의 색깔 혹은 시간에 따른 색의 변화로 생각할 수 있고, 그 공간적인 변화는 이미지의 모양과 형상에 해당한다.

† 책임저자 : 정희원, 한국과학기술원 소음 및 진동제어 연구센터  
E-mail : jwoo@kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8211

\* 정희원, 한국과학기술원 소음 및 진동제어 연구센터

그렇다면 어떻게 원하는 위치에 원하는 모양의 소리를 형성할 수 있을까? 시각적인 이미지를 그리는 기본적인 방법은 붓으로 여러 번 칠을 하여 그 겹침 효과를 통해 원하는 색깔과 모양을 표현하는 것이다. 여기서, 하나하나의 기본적인 소리의 모양을 발생시키는 음원(sound source)을 소리의 붓(sound brush)으로 생각한다면, 다수의 음원을 동시에 구동함으로써 그 소리들의 겹침으로 원하는 모양을 만들어 낼 수 있을 것이다.

여기서 소리의 모양이란 소리가 공간상에 분포된 형태를 통칭하는 개념으로, 어떠한 목적으로 음장을 제어하는가 혹은 어떠한 음향 변수를 제어하는가에 따라 여러 가지로 정의될 수 있다. 예를 들면, 음향 에너지의 공간 분포를 그 모양으로 정의할 수도 있고, 음압의 분포 또는 음향 인텐시티의 분포<sup>(1)</sup> 등을 소리의 모양으로 생각할 수 있다.

그 중에서도, 음향 밝기(acoustic brightness) 및 대조(acoustic contrast)<sup>(2, 3)</sup>는 소리의 크기와 관련된 음향 위치 에너지를 그 모양으로 정의한 예이다. 예를 들어, 우리는 때때로 소리를 청취하는 위치에 따라 그 크기가 매우 다른 것을 경험할 수 있다. 음향 밝기 및 대조 제어는 청취 위치에 따라 소리의 크기를 조절하기 위한 것으로서, 구체적으로 음향 밝기는 선택된 공간의 소리 크기, 즉 음향 위치 에너지의 크기와, 그리고 음향 대조는 서로 다른 공간의 음향 밝기의 비와 관련되어 있다. 음향 밝기 제어는 공간상의 특정 영역에 소리를 집중(focusing)하여 난청 영역을 해소할 수 있으며, 음향 대조 제어를 실시하여 한 공간은 조용하게 하면서 다른 공간은 최대한 높은 소리의 크기를 갖도록 할 수 있다. 이는 공간의 위치 별로 다른 소리의 크기를 부여하는데 폭넓게 사용될 수 있다.

음향 밝기 및 대조 제어가 소리의 크기를 표현하는 정적인 인자인데 반해, 종종 우리는 좀 더 동적인 그림을 그릴 필요가 있다. 예를 들어, 시공간상을 전파해 나가는 파면(wavefront)의 진행 방향을 그릴 수 있을까? 파면의 진행 방향을 자유자재로 그리는 문제는, 선택한 공간 내에 위치한 청취자에게 인공적으로 그려진 파면을 경험하게 하여, 청취자가 가상의 방향에서 음원을 인지하도록 단서를 제공할 수 있다는 점에서 가상 현실을 구현하는 문제에서 중요하게 응용될 수 있다.

이 논문에서는 음향 밝기 및 대조, 그리고 파면의

진파 방향을 시·공간 상에서 제어하는 통합적인 방법론을 제시하고, 구체적인 적용 예제로부터 발생할 수 있는 문제점과 적용 범위에 대하여 살펴보고자 한다.

## 2. 단색(Monochromatic)의 음장 제어

### 2.1 문제 정의

먼저 간단한 문제로, 공간이 하나의 주파수로 가진 되어 정상 상태에 다다른 경우에 대하여 생각하여 보자. 이와 같은 경우, 음장은 하나의 톤(tone)을 가지며, 시각적으로 비유하면 단색(monochromatic)으로 소리의 모양을 만드는 문제로 생각할 수 있다.

Fig. 1은 다수의 음원을 통해 소리를 제어하는 일반적인 음향 시스템을 나타낸 것이다. 먼저, 공간상에 재생하고자 하는 신호(원음 : source signal)의 주파수 영역의 복소 크기를  $\hat{x}(\omega)$ 라 표기하자.

다음으로, 다수의 음원을 제어하기 위한 제어 입력을 발생시키는 다채널 필터를 통과시키는데, 이는 실제적으로 제어하게 될 제어변수에 해당한다.  $n$ 번째 음원의 위치를  $\vec{r}_s^{(n)}$ 로 표현한다면, 각 음원과 연결된 필터의 계수들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{s}(\omega) = [\hat{s}(\vec{r}_s^{(1)}, \omega), \dots, \hat{s}(\vec{r}_s^{(N)}, \omega)]^T \quad (1)$$

다채널 필터를 통과한 신호들은 다수의 음원을 통해 실제 소리로 변환되고, 발생된 소리는 공간을 전파하여 청취자 위치로 전달된다. 이 때 소리는 개개의 음원, 파워 앰프의 전기적인 특성과 방의 음향학적 특성에 따라 다르게 발생되는데, 이러한 음원 및 방의 특성을 전달함수라는 개념으로 포괄하여 지칭한다. 위치  $\vec{r}_s^{(n)}$ 에 고정된 음원의 입력 신호와 한 청취 지점  $\vec{r}$  사이의 전달 함수를 다음과 같은 행렬식으로 표현된다.

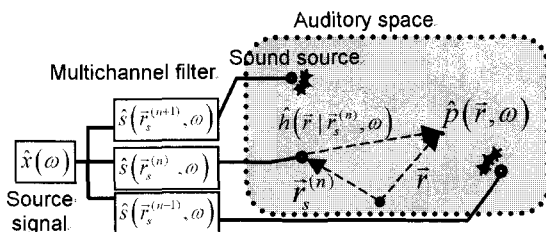


Fig. 1 Schematic of multichannel control problem

$$\mathbf{h}(\vec{r}, \omega) = [\hat{h}(\vec{r} | \vec{r}_s^{(1)}, \omega), \dots, \hat{h}(\vec{r} | \vec{r}_s^{(N)}, \omega)] \quad (2)$$

여기서, 공간의 경계 조건이나 크기, 음원의 방사 특성에는 특별한 제한을 두지 않으며, 모든 개별적 특성은 전달함수에 포함된 것으로 간주한다.

단일 주파수 신호의 경우를 다루고 있으므로, 편의상 원음의 복소 크기를 1이라 하면, 음원을 통하여 지점  $\vec{r}$  에서 발생하는 음압의 복소 크기 ( $\hat{p}(\vec{r})$ )를 다음과 같은 행렬식 연산으로 표현할 수 있다.

$$\hat{p}(\vec{r}, \omega) = \mathbf{h}(\vec{r}, \omega)\mathbf{s}(\omega) \quad (3)$$

따라서, 공간에 원하는 모양의 소리를 형성하는 것은, 그 모양을 발생시키는 제어 변수( $\mathbf{s}$ )를 결정하는 문제와 같다. 다양한 소리의 모양 중에서 먼저 소리 크기의 모양, 즉 음향 밝기와 대조의 관점에서 모양을 그리는 방법을 살펴보자.

### 2.2 음향 밝기 제어

음향 밝기는 서론에서 언급된 바와 같이 소리 크기, 구체적으로는 음향 위치에너지의 크기와 관련되어 있다. 공간상에서 음향 밝기를 제어하는 목적은 기본적으로 청취공간에서 충분한 음량을 제공하기 위한 것이다. 그러나, 소리의 크기는 입력 신호의 크기에 따라 변화하는 양이므로 이를 객관적으로 평가하기 위해서는 입력 신호의 크기에 대한 상대적인 개념으로 표현하여야 한다. 이러한 상대적인 크기를 음향 밝기로 정의하고, 선택한 공간의 음향 밝기를 향상시키도록 소리를 그리는 문제를 생각해보자.

먼저, 음향 밝기를 향상시킬 공간의 체적을  $V_b$ 라 하자(Fig. 2). 공간  $V_b$  전체의 음향 밝기를 향상시키기 위해서는 먼저 선택한 공간의 음향 밝기를 대표할 수 있는 하나의 척도가 제시되어야 한다. 이러한 논

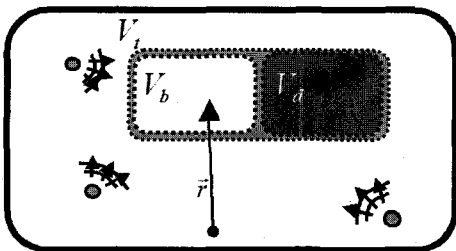


Fig. 2 Brightness and contrast problem

리로, 다음과 같이 공간에 대해 평균한 음향 밝기를 공간의 음향 밝기로 정의한다.

$$\alpha = \frac{e_{V_b}}{J_0} = \frac{\langle |\hat{p}(\vec{r})|^2 \rangle_{V_b}}{\mathbf{s}^H \mathbf{s}} \quad (4)$$

여기서,  $e_{V_b}$ 는 공간  $V_b$ 내에서 평균된 음향 위치 에너지를 나타내며,  $\langle \rangle$ 는 공간 평균을, 그리고  $J_0$ 는 입력 신호의 총 파워를 나타낸다. 여기서는 단일 주파수 음장을 다루고 있으므로, 편의상 주파수  $\omega$ 의 표기는 생략되었다.

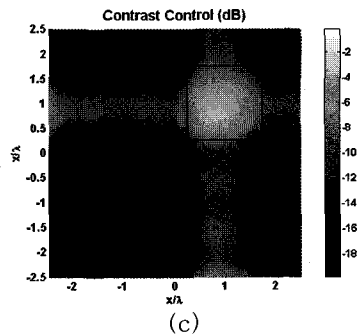
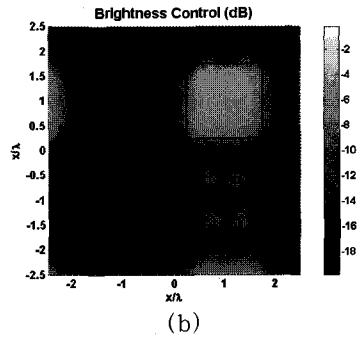
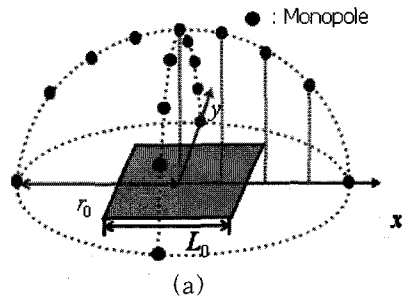


Fig. 3 Normalized potential energy field generated by acoustic brightness and contrast control (a) source and zone configuration (b) brightness control (c) contrast control

이제 정의된 공간의 음향 밝기를 향상시키는 방법을 살펴보자. 먼저, 식 (4)는 식 (3)에서 정의된 기술 방법을 사용하여 다음과 같이 입력 신호의 함수로 쓸 수 있다.

$$\alpha = \frac{\mathbf{s}^H \langle \mathbf{h}(\vec{r})^H \mathbf{h}(\vec{r}) \rangle_{V_b} \mathbf{s}}{\mathbf{s}^H \mathbf{s}} = \frac{\mathbf{s}^H \mathbf{R}_{V_b} \mathbf{s}}{\mathbf{s}^H \mathbf{s}} \quad (5)$$

여기서, 행렬  $\mathbf{R}_{V_b}$ 는 공간  $V_b$ 에서 전달 함수가 갖는 공간 상관성(spatial correlation)을 나타낸다. 식 (5)는 입력 신호  $\mathbf{s}$ 에 대한 2차 형식(quadratic form)이며, 이러한 함수를 최대화 하는 해는 다음과 같이 공간 상관 행렬의 최대 고유치에 따르는 고유 벡터로서 주어진다(예를 들면, 참고문헌 (4)).

$$\alpha_{\max} \mathbf{s}_{opt} = \mathbf{R}_{V_b} \mathbf{s}_{opt} \quad (6)$$

### 2.3 음향 대조 제어

음향 대조는 음향 밝기의 개념을 다수의 공간에 대하여 확장한 것으로, 음향 밝기가 입력 파워에 대한 소리의 크기를 나타낸다면, 음향 대조는 서로 다른 공간의 음향학적 밝기 비를 나타내는 상대적인 양이다.

Fig. 2에 보여진 바와 같이 서로 다른 두 공간  $V_b$ ,  $V_d$ 를 고려하면, 두 공간의 음향 밝기 비는 식 (4), (5)에 따라 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\beta = \frac{e_{V_b}}{e_{V_d}} = \frac{\mathbf{s}^H \mathbf{R}_{V_b} \mathbf{s}}{\mathbf{s}^H \mathbf{R}_{V_d} \mathbf{s}} \quad (7)$$

여기서,  $\mathbf{R}_{V_d}$ 는  $V_d$  내부의 공간 상관성을 나타내는 행렬이다. 정의된 음향 대조를 최대화 하는 문제 역시 일반화된 고유치 문제로서, 그 해는 다음과 같은 상관 행렬 연산의 최대 고유치에 해당하는 고유 벡터로 주어진다.

$$\beta_{\max} \mathbf{s}_{opt} = \mathbf{R}_{V_d}^{-1} \mathbf{R}_{V_b} \mathbf{s}_{opt} \quad (8)$$

Fig. 3은 단일 주파수에서 음향 밝기 및 대조 제어를 수행하기 위해 사용된 단극 음원(monopole) 어레이 및 제어 후 음향 위치에너지 분포를 나타낸다. 단극 음원은 자유 음장(free-field)상에 놓여져 있는 것

으로 간주하여 전달함수를 모델링 하였으며, 총 17개의 음원을 중심으로부터 원거리( $r_0 = 20\lambda$ )에 위치시키고, 총 입력 파워의 크기를 1로 고정한 후 제어를 수행하였다. Fig. 3(b), (c)는  $1.5\lambda$  크기의 공간에 대하여 음향 밝기 제어를, 우측은 동일한 공간과 나머지 공간과의 음향 대조를 제어한 결과이다. 서로 다른 두 제어 방법을 비교하기 위하여, 결과 그래프는 다음의 상수로 정규화 되었다.

$$|\hat{h}_0|^2 = N |j\rho_0 \omega / (4\pi r_0)|^2 \quad (9)$$

이는 총 입력파워가 1인  $N$ 개의 단극 음원이 동시에 가진 되었을 때 좌표 중심에 발생시키는 음향 위치 에너지를 나타낸다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 음향 밝기 제어의 경우에 보다 밝은 음향 위치에너지 얻을 수 있으나, 주변 공간의 음향 에너지와 비교하여서는 음향 대조 제어를 수행한 경우가 더 뚜렷한 음향 밝기 차이를 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

### 2.4 파면의 전파 방향 제어

다음으로, 선택한 공간에서 파면의 전파 방향을 제

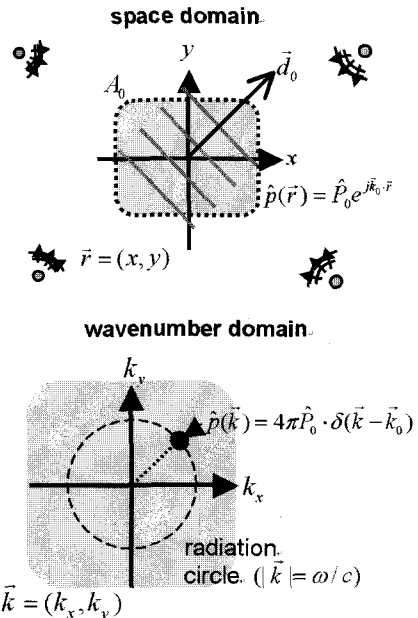


Fig. 4 Schematic of lateral localization problem, and its representation in wavenumber domain. (top) space domain,  $A_0$ : control area,  $\vec{d}_0$ : control direction (bottom) wavenumber domain

어하는 문제를 생각하여 보자. 이 경우, 제어의 목적은 공간 내부에 위치한 청취자가 가상의 음원의 위치를 경험하도록 가상의 파면을 형성하는 것이다. 제어하고자 하는 파면의 모양은 여러 가지가 있을 수 있으나, 가장 기본적인 평면파의 방향을 제어하는 문제를 생각하여 보자. Fig. 4에 도시된 바와 같이 공간상의 한 평면  $A_0$ 를 제어 공간으로 설정한 후 여기에 제어하고자 하는 방향( $\vec{d}_0$ )으로 진행하는 평면파를 그리는 문제이다.

여기서 주목할 것은, 공간 영역에서 하나의 방향으로 진행하는 평면파는, 이를 푸리에 변환한 영역인 파수(wave number)영역에서는 방사원(radiation circle)위의 한 지점(point)으로 표현된다는 점이다(Fig. 4). 즉, 주어진 문제를 파수 영역의 한 지점에 에너지를 집중(focusing)하는 문제로 생각할 수 있다. 파수 영역에서 한 지점에 소리를 집중시키는 문제는, 2.3절에서 다룬 음향 대조 제어를 응용하여 해결할 수 있다.

이러한 개념은 다음과 같이 수학적으로 기술할 수 있다. 먼저, 식 (2)의 공간에 대한 전달 함수를 푸리에 변환하면 파수 영역의 전달 함수를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\vec{k}, \omega) &= \mathbf{F}_s[\mathbf{h}(\vec{r}, \omega)] \\ &= \int_{A_0} \mathbf{h}(\vec{r}, \omega) e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}} dA(\vec{r}) \end{aligned} \quad (10)$$

제어하고자 하는 방향  $\vec{d}_0$ 의 평면파는 파수 영역에서  $\vec{k}_0 = k\vec{d}_0$ 의 파수를 가지며, 이 지점에 대한 전달 함수는

$$\mathbf{H}(\vec{k}_0, \omega) = \int_{A_0} \mathbf{h}(\vec{r}, \omega) e^{-j\vec{k}_0 \cdot \vec{r}} dA(\vec{r}) \quad (11)$$

와 같이 쓸 수 있다. 이를 이용하면, 파수 영역에서  $\vec{k}_0$ 에 해당하는 지점의 음향 밝기와 나머지 영역의 음향 밝기 비를 최대화 하는 음향 대조 향상 문제를 정의할 수 있다. 즉, 다음과 같이 음향 대조를 정의하고 이를 최대화 하는 해를 구한다.

$$\beta_k = \frac{e_{k_0}}{e_k} \quad (12)$$

여기서,  $\beta_k$ 는 파수 영역에서의 음향 대조를 나타내며,  $e_{k_0}$ 는  $\vec{k}_0$  지점의 에너지, 그리고  $e_k$ 는 전체 파

수 영역의 평균 에너지를 표현하고 있다. 여기서, 식 (12)의 분모항이 전체 파수 공간의 에너지로 나타난다는 점이 식 (7)과 다르지만, 수학적으로는 두 경우 모두 동일한 고유 벡터를 얻을 수 있다.<sup>(8)</sup> 또한, 전체 파수 영역의 에너지는 Parseval의 원리에 의하여 공간 영역의 전체 에너지( $e_t$ )와 동일하므로, 식 (12)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\beta_k = \frac{e_{k_0}}{e_t} = \frac{\mathbf{s}^H \mathbf{H}(\vec{k}_0)^H \mathbf{H}(\vec{k}_0) \mathbf{s}}{\mathbf{s}^H \mathbf{R}_t \mathbf{s}} \quad (13)$$

식 (13)의  $\mathbf{R}_t$ 는 전체 공간에 대한 공간 상관성을 표현하는 행렬이다. 식 (13) 역시 입력 함수의 이차 형식으로 표현되므로, 식 (8)과 같은 고유치 해석으로 그 해를 구할 수 있다.

### 2.5 적용 예제

Fig. 5와 6은 제안된 방법을 자유 음장조건에서 적용한 예이다. 수평(lateral) 방향의 제어를 다루고 있으므로, 청취 공간(평면)과 동일한 높이에 10개의 단극 음원을 배치하였으며, 각 방향으로 다양한 파수 성분들을 갖도록 원주 방향으로 균등한 각도로 위치시켰다(Fig. 5). 제어 공간은 한 파장 길이의 구경을 갖도록( $L_t = \lambda$ ) 설정하였으며, 설정된 공간에서 음원이 실제하지 않는 다양한 각도( $0 \sim 18^\circ$ )로 파면을 제어하였다. Fig. 6(a)는 제어 후의 파수 스펙트럼을 나타낸 것으로, 백색의 원은 방사원을, 실선은 제어하고자 하는 파면의 방향을 보여주고 있다. 제어

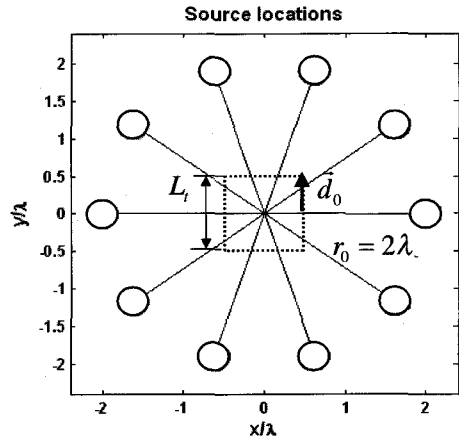


Fig. 5 Configuration of sources and zone ( $L_t$ : size of zone of interest,  $r_0$ : distance from the center)

가 수행된 모든 방향에 대하여, 제어하고자 하는 방향으로 에너지가 효과적으로 집중되는 것을 확인할 수 있다. 각각의 경우에 공간 영역에서 음파의 파면 진행을 확인하기 위하여, 공간 영역의 위상 변화를 Fig. 6(b)에 도시하였다. 파수 영역과 마찬가지로 공간 영역에서도 평면파가 원하는 방향으로 전파하도록 제어되었음을 확인할 수 있다.

### 3. 시간 영역 제어

실제의 소리는 매우 다양한 주파수 성분을 포함하고 있으며, 소리의 시간에 따른 변화는 최종적으로 청취자가 느끼는 음질을 결정하게 된다. 따라서, 앞서 2장에서 설명된 방법이 소리의 모양을 만드는 방법이

라면, 이러한 소리의 모양에 색깔을 입히고 시간에 따라 움직이게(animate) 하는 작업이 필요함을 알 수 있다.

문제를 구체화하기 위하여 Fig.1에서 원음  $\hat{x}(\omega)$  가 단일 주파수가 아닌 넓은 대역폭을 갖는 일반적인 신호인 경우에 대하여 다시 살펴보도록 하자. 원음이 넓은 주파수 대역을 갖는 경우의 전체 시스템의 응답 역시 여러 개의 주파수 성분들의 합으로 표현할 수 있음은 시간과 주파수 영역의 푸리에 변환(Fourier transform)관계로부터 쉽게 짐작할 수 있다. 2장에서 살펴보았던 모든 방법들은 원음이 단일 주파수 신호인 경우 각각의 주파수에서 최적의 모양을 그리는 해이다. 따라서, 각 주파수의 최적의 모양을 시간영역에서 적절히 조합함으로써, 공간적인 특성을 잃지 않

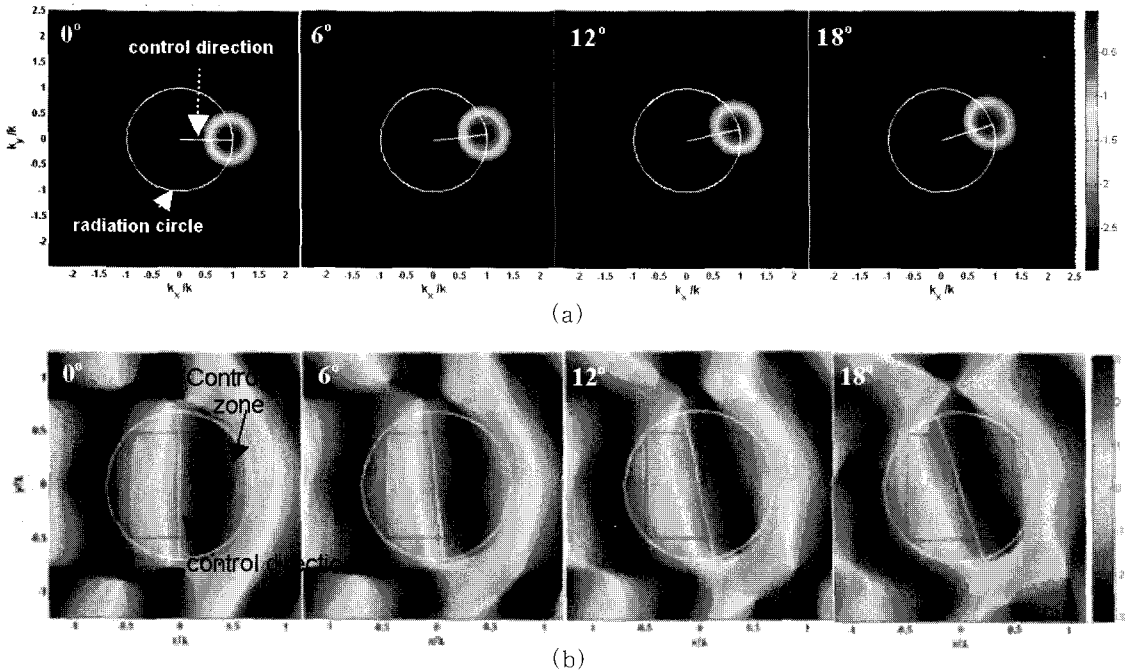


Fig. 6 Example of wavefront control (a) wavenumber spectrum (dB) (b) phase change in space (radian)

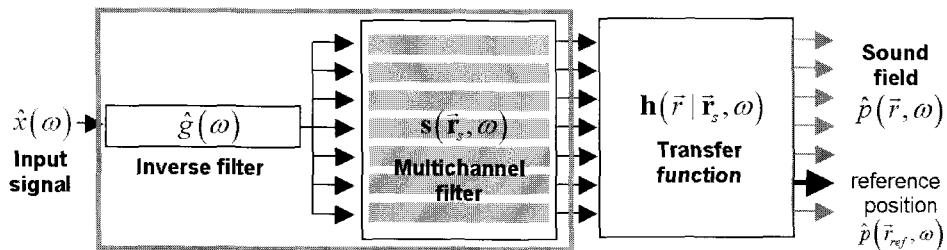


Fig. 7 Structure of the multichannel system for time domain control

면서 원하는 시간 영역의 특성을 갖도록 제어를 수행할 수 있다.

이는 서로 독립적인 색상의 그림을 혼합하여 원하는 색깔의 그림을 그리는 것에 비유할 수 있다. 주의할 점은, 공간 영역 제어의 목적이 원하는 음향 변수의 공간 분포, 즉 모양을 형성하는 데 있는데 반해, 시간 영역에서는 청취자가 원하는 소리를 왜곡 없이 재현하는 데 그 목적이 있다는 점이다. 시간 영역에서 신호가 왜곡 없이 재현된다는 것은, 원음이 임펄스 형태로 주어지는 경우 청취 공간에서도 임펄스 형태의 소리가 재현되어야 함을 뜻한다. 이러한 특성은 임펄스 불변성(impulse invariance)으로 널리 알려져 있으며(예를 들면, 참고문헌 (5)) 시스템이 임펄스 불변성을 만족하도록 하는 기법으로 역변환 필터(inverse filter)를 설계하는 방법을 생각할 수 있다.<sup>(6,7)</sup>

이와 같은 논의를 구체적으로 기술하면 다음과 같다. 먼저 공간 영역에서 특성을 제어하도록 관심 주파수 대역의 각 주파수 성분에 대하여 2장에서 전술된 방법을 사용, 다채널 필터의 계수들을 결정한다.

다음으로, 시간 영역에서 최대한 임펄스 불변성을 만족하도록 하기 위해 단일 채널 역변환 필터를 추가한다(Fig. 7). 이 단일 채널 필터는 각 주파수 별로 결정된 다채널 필터의 계수들에 가중치를 주어 시간 영역에서 적절히 파형을 만들어 내는 역할을 수행한다.

전술된 바와 같이 단일 채널 필터의 계수들은 시간 영역에서 전체 시스템이 임펄스 불변성을 만족하도록 설계되어야 한다. 그러나, 이미 다채널 필터의 설계를 통하여 소리의 공간 분포가 주파수별로 고정되어 있기 때문에, 단일 채널 필터만으로 공간상의 모든 지점에서 임펄스 불변성을 만족하도록 제어하는 것은 불가능하다. 따라서 공간상의 한 지점에 기준 위치( $\vec{r}_{ref}$ )를 설정하고, 그 지점의 음압과 원음 사이에 임펄스 불변성이 만족되도록 단일 채널 필터를 설계하는 것이 효과적이다.<sup>(8)</sup> 기준 위치와 원음 사이의 임펄스 불변성은 시간 영역과 주파수 영역에서 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p(\vec{r}_{ref}, t) = h_0 x(t - \tau) \tag{14}$$

$$\hat{p}(\vec{r}_{ref}, \omega) = h_0 \hat{x}(\omega) e^{j\omega\tau} \tag{15}$$

여기서,  $\tau$ 는 발생한 음압과 원음 사이의 시간 지연을 나타내며,  $h_0$ 는 두 신호 사이의 증폭비로, 사용

가 적절히 모델링하여 설정할 수 있는 값이다. Fig. 7을 참조하면, 기준 위치의 음압은 전술된 변수들을 사용하여 다음과 같이 기술할 수 있으며,

$$\hat{p}(\vec{r}_{ref}, \omega) = \mathbf{h}(\vec{r}_{ref} | \vec{r}_s, \omega) \mathbf{s}(\vec{r}_s, \omega) \hat{g}(\omega) \hat{x}(\omega) \tag{16}$$

그 음압이 식 (15)의 임펄스 불변성을 만족하도록 하기 위한 단일 채널 필터의 계수를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\hat{g}(\omega) = \frac{h_0 e^{j\omega\tau}}{\mathbf{h}(\vec{r}_{ref} | \vec{r}_s, \omega) \mathbf{s}(\vec{r}_s, \omega)} \tag{17}$$

식 (17)과 같이 주파수 영역에서 역변환 필터의 계수를 결정하는 방법(frequency domain deconvolution)은 기본적으로 인과성(causality)문제를 안고 있으며, 시간 지연  $\tau$ 를 충분히 고려하지 않거나, 전달 함수가 특이성(singularity)을 갖는 경우, 계수들이 발산하거나 잘못된 결과를 도출할 수 있다. 그러나, 이러한 문제들이 발생하더라도 적절한 regularization을 통하여 해결될 수 있음이 알려진 바 있다.<sup>(9)</sup>

제한된 방법으로 음향 밝기와 대조 제어를 모의 실험한 예가 Fig. 9에 나타나 있다. Fig. 3(a)와 마찬가지로 17개의 음원을 반구 위에 십자형으로 분포시켰으며, 중심으로부터의 거리는  $r_0 = 2\lambda$ 로 설정하였다. 이 경우의  $\lambda$ 는 설계한 필터의 최고 주파수에서의 파장 길이를 나타낸다. 모든 필터는 소리 신호의 주요한 성분들을 포함하도록 20 Hz ~ 1 kHz의 대역폭에 대하여 설계되었으며, 제어 공간( $V_b$ 와  $V_d$ )은 Fig. 8에 도시된 것과 같이 중심으로부터 대칭적인 위치에 있는 두 공간으로 설정하였다. 역변환 필터를 설계하기 위한 기준 위치는  $V_b$ 의 중심점으로 설정하였는데,

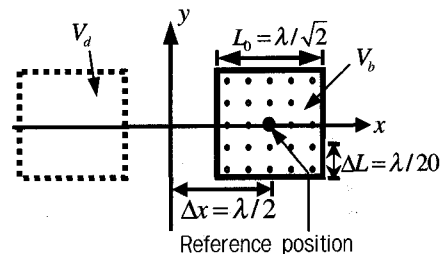


Fig. 8 Location of the control zones for time domain control ( $L_0$ : aperture of control zone,  $\Delta L$ : sampling interval,  $\Delta x$ : offset of control zone)

이는 소리를 작게 만들 공간의 음질은 상대적으로 중요하지 않기 때문이다.

또한, 광대역 신호를 제어함에 있어서 발생할 수 있는 특이성(singularity) 문제를 제거하기 위하여 식 (7)과 같은 에너지 비 대신에 에너지의 차로 가격함수를 설정하여 제어하였다.

Fig. 9는 임펄스 신호를 원음으로 입력하였을 때 공간상에 발생된 음압의 시간에 따른 변화를 선형 스

케일로 도시한 것이다. 그림의 실선과 점선으로 둘러싸인 사각 영역은 각각 Fig. 8의  $V_b$ 와  $V_d$ 를 나타내며, Fig. 9의 좌측은  $V_b$ 위치에 음향 밝기 제어, 우측은 두 공간에 대해 음향 대조 제어를 실시한 결과이다. 시간 영역에서 음향 밝기 제어의 결과를 살펴보면, 각 음원들로 발생된 작은 크기의 파면이 제어 공간 내에서 보강간섭을 일으켜 높은 크기의 음압을 발생 시킬 수 있다. 주목할 것은, 음향 밝기 제어의

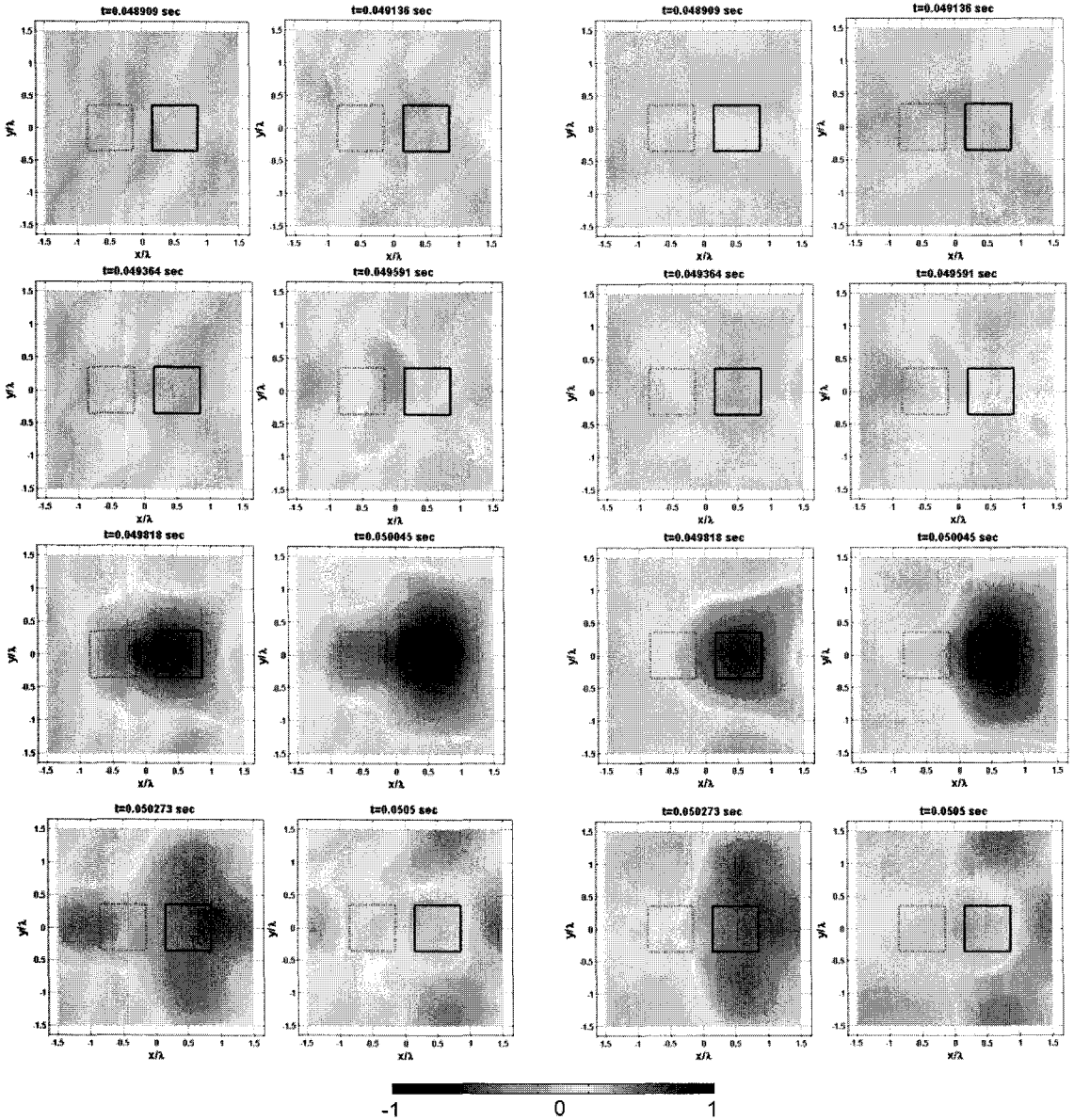


Fig. 9 Pressure fields controlled in time domain, (left) brightness control (right) contrast control (pressure fields are presented in linear scale(normalized to 1))



경우, 비록 제어 공간에 소리 에너지가 집중되지만, 그 주변 영역(예를 들면  $V_a$ )에도 상대적으로 높은 음압이 형성된다는 점이다. 이러한 현상을 감소시키기 위하여,  $V_a$  위치에서 음향 밝기가 낮아지도록 음향 대조 제어를 실시한 결과, 밝기 제어에 비하여  $V_a$  위치에서 비교적 낮은 음압을 유지하면서  $V_b$  위치에서 큰 소리를 발생시키도록 제어가 수행됨을 확인할 수 있다.

다음으로, 시간 영역에서 파면 방향 제어를 수행하는 예제를 살펴보자. Fig. 10은 그 실험 장치도를 나타낸 것이다.

12개의 상용 스피커(JBL control-1x)를 사용하여 무향실 내에서 제어를 수행하였으며, 동시에 음원을

제어하기 위하여 12채널 이상의 신호를 동시에 발생시킬 수 있는 DAC장비(NI PXI-6713×2)를 사용하고, 동시에 32채널의 음압 신호를 계측할 수 있는 ADC장비(NI PXI-4472×4)를 사용하여 공간의 음압 신호 및 출력 신호를 계측하였다. 상용 어레이 마이크로폰(1/4", B&K 4935×20)을 사용하여 단계적 측정으로 1.2×1.2 m<sup>2</sup> 넓이의 공간을 3 cm 간격으로 측정하였다. 음원과 공간 사이의 전달 함수를 계측하는 시간을 감소시키기 위하여, 독립적인 백색 잡음으로 음원들을 동시에 가진하고, 부분 기여도 분리(partial field decomposition) 방법<sup>(10)</sup>을 사용하여 각 음원 별 전달 함수를 분리하였다.

각 주파수 밴드별 성능을 검증하기 위하여 옥타브

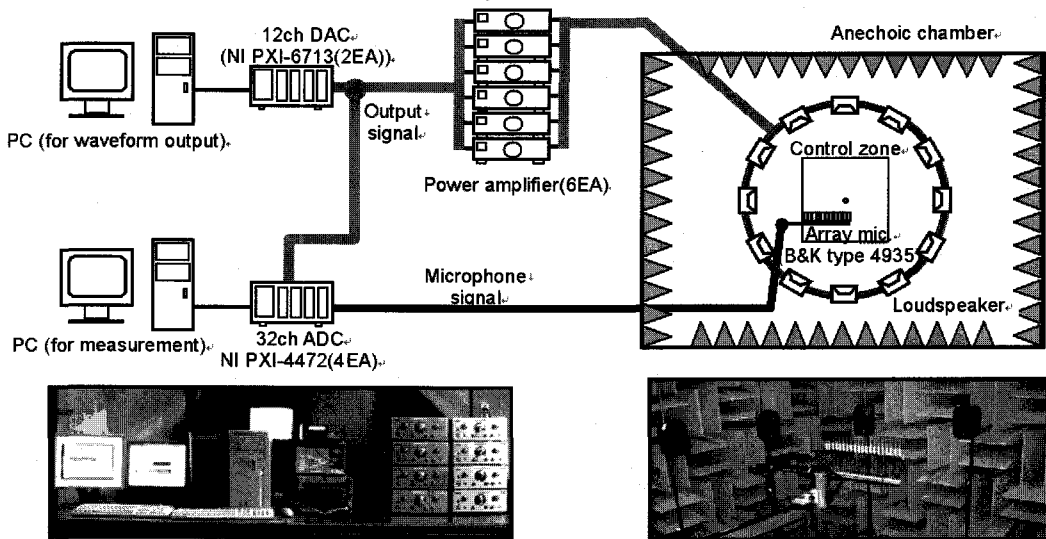


Fig. 10 Experimental setup of wavefront control system (top) general structure (bottom) photograph of the system

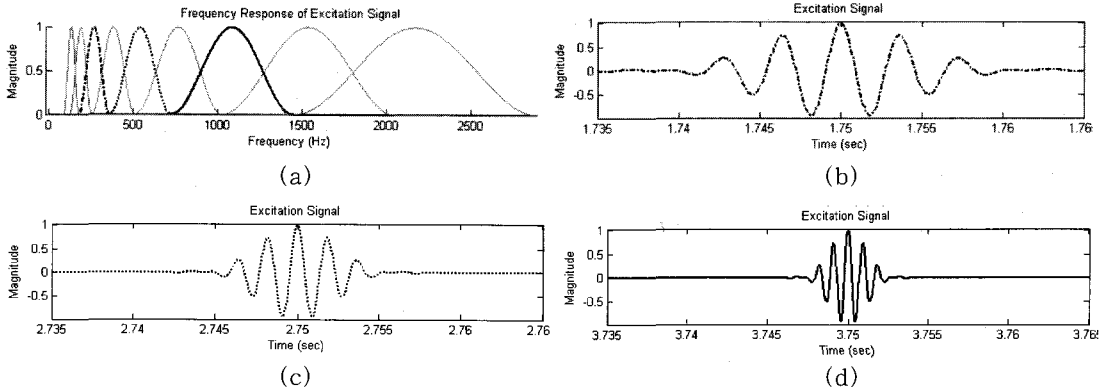


Fig. 11 Waveform of the source signals (a) frequency spectrum (b) waveform of 250 Hz band signal (c) 500 Hz band (d) 1 kHz band

밴드를 중심으로 하는 대역 신호를 원음으로 발생시켜 그 음장을 계측하였다(Fig. 11). 사용된 대역 신호는 조화웨이블릿(harmonic wavelet) 함수를 응용한

것으로, 옥타브 밴드 별로 조화웨이블릿 함수를 생성하고 주파수 영역에서 Hanning 창문 함수를 곱하여, 주파수 영역과 시간 영역에서 적당한 길이를 갖도록 설계하였다.

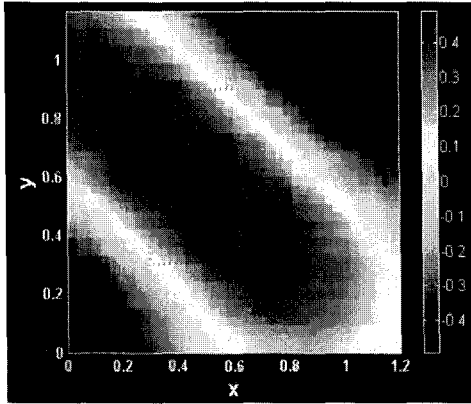
Fig. 12는 이와 같은 제어 시스템을 사용하여 225° 방향으로 파면을 제어한 결과이다. 시간이 진행함에 따라 원음의 주파수 대역에 관계없이 제어 방향으로 파면이 정렬되어 전파됨을 확인할 수 있다. 다만 높은 주파수 대역에서는 제어되는 영역이 제한되는 현상이 발생하는데, 이는 유한한 개수의 음원으로 파형을 발생시키면서 발생하는 공간 에일리어싱(spatial aliasing) 현상이다. 공간 에일리어싱은 실제로 제어 가능한 음장의 크기를 제한하는 물리적 현상으로, 주파수, 제어 공간의 크기, 그리고 음원의 배치 및 개수와 같은 많은 변수들과 연관되어 있어, 앞으로 그 연관성에 대해 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다.

#### 4. 결 론

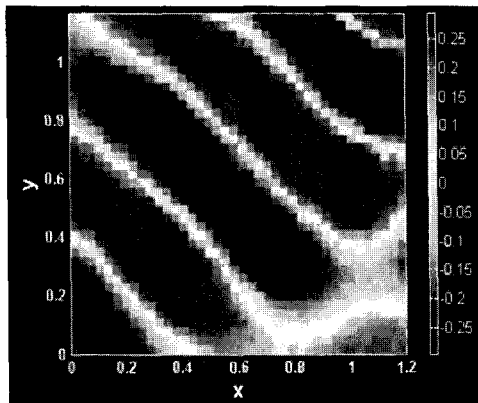
이상과 같이 다수의 음원을 사용하여 선택한 공간의 소리를, 음향 밝기, 대조, 파면의 전파방향의 관점에서 그리는 방법에 대하여 설명하였다. 제안된 방법은 선택한 공간에서 선택한 음향 특성을 향상시키는 것으로서, 음향 밝기와 대조 제어를 수행함으로써 소리의 크기를 공간별로 조절할 수 있다. 이 개념을 확장하여 파수 영역에 적용함으로써 입체 음향을 구현하는데 필요한 파면의 전파 방향 제어를 수행할 수 있음을 살펴보았다. 간단한 경우인 단일 주파수의 경우에 소리의 그림을 그리는 방법, 즉 단일 색상으로 모양을 그리는 방법을 제시하였으며, 이를 바탕으로 여러 주파수에 대해 얻어진 소리의 모양을 더함으로써 시간 영역에서 소리의 색깔을 제어하는 방법을 제안하였다. 다양한 실험 결과를 통해 제안된 방법이 실제로 소리의 그림을 시·공간상에 그릴 수 있음을 확인하였다. 제안된 방법은 청취자가 원하는 음향 특성을 선택한 공간에서 자유자재로 제어할 수 있다는 점에서 폭넓은 응용성을 가지고 있다.

#### 후 기

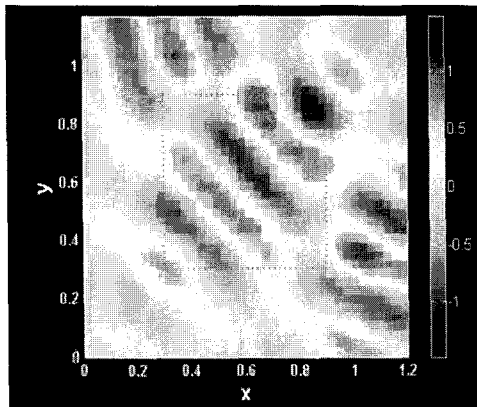
이 연구는 한국과학기술평가원(KISTEP)의 국가지정연구실(NRL)사업과 교육부의 두뇌한국21 (BK21) 프로그램의 지원에 의하여 이루어졌음을 밝힙니다.



(a)



(b)



(c)

**Fig. 12** Snapshot of the pressure field manipulated by wavefront control (a) 250 Hz (b) 500 Hz (c) 1 kHz band signal

참 고 문 헌

- (1) Choi, J. -W. and Kim, Y. H., 2004, "Manipulation of Sound Intensity Within a Selected Region Using Multiple Sources," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 116, No. 2, pp. 843~852.
- (2) Choi, J. -W. and Kim, Y. -H., 2002, "Generation of an Acoustically Bright Zone Within an Illuminated Region," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 111, No. 4, pp. 1695~1700.
- (3) Choi, J. -W. and Kim, Y. -H., 2002, "Generation of Acoustically Bright and Dark Zone Using Multiple Sources," in Proc. of Inter-Noise 2002, Held in Dearborn, Michigan, paper N322(on CD-ROM).
- (4) Lancaster, P. and Tismenetsky, M., 1985, The Theory of Matrices, 2nd Edition, Academic Press, San diego, pp.282~294.
- (5) Oppenheim, V., Schafer, R. W. and Buck, J. R., 1998, Discrete-time Signal Processing, 2nd Edition Prentice Hall, New Jersey, pp.160~161.
- (6) Miyoshi, M. and Kaneda, Y., 1988, "Inverse Filtering of Room Acoustics," IEEE Trans. Acoust. Speech and Signal Processing, Vol. 36, No. 2, pp. 145~152.
- (7) Kirkeby, O. and Nelson, P. A., 1999, "Digital Filter Design for Inversion Problems in Sound Reproduction," J. Audio Eng. Soc., 47(7-8), pp. 583~595.
- (8) Choi, J. W. and Kim, Y. H., 2004, "Active Control for Enhancement of Sound Field," in Proc. of Active 04, Held in Williamsburg, Virginia, paper 042(on CD-ROM).
- (9) Tokuno, H., Kirkeby, O., Nelson, P. A. and Hamada, H., 1997, "Inverse Filter of Sound Reproduction Systems Using Regularization," IEICE Trans. Fundamentals, E80-A(5), pp. 809~820.
- (10) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1991, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Singapore, pp. 240~244.