

# 역 경계요소법에 기초한 음향 홀로그래피 개념에 따른 음원 어레이 설계

## Design of Acoustic Source Array Using the Concept of Holography Based on the Inverse Boundary Element Method

조 원 호\*, 이 정 권\*  
(Wan-Ho Cho\*, Jeong-Guon Ih\*)

\*KAIST 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터  
(접수일자: 2009년 1월 21일; 채택일자: 2009년 3월 18일)

원하는 복잡한 음장을 지정된 구역에 정확히 형성하는 것은 음향 어레이를 이용한 응용에 있어서 가장 어렵고도 중요한 일이다. 이를 해결하기 위해, 본 논문에서는 역 경계요소법을 활용한 음향홀로그래피 방법을 이용하여 원하는 음장의 특성을 얻기 위한 음원 어레이의 필터 계수를 설계하는 방법을 제안하였다. 음원 파악에 적용되는 음향 홀로그래피는 음장에서 음압을 측정하여 표면에서의 음원 특성을 재구성 하게 되는데, 이와 유사한 음원 설계 문제에서는 복잡한 음장 특성이 주어진 조건이 되며, 음원의 체적 속도는 이러한 음장을 얻기 위한 출력 신호가 된다. 설계 과정에 있어서 먼저 목표 음장의 특성 제한 조건을 갖는 음장 데이터를 구성하고, 음원과 공간을 경계요소법으로 모델링 한 뒤, 소요되는 음원의 정보를 역으로 유도한다. 예제로서 16개의 스피커를 갖는 어레이를 이용해 전방의 반은 평면파 전파, 나머지 반은 정속공간을 동시에 갖도록 하는 목표 음장을 구현 하였다.

**핵심용어:** 음향 홀로그래피, 역 문제적 접근, 음향 어레이, 음장 제어

**투고분야:** 음향신호처리 분야 (1.5), 건축음향 분야 (7.7)

It is very difficult to form a desired complex sound field at a designated region precisely as an application of acoustic arrays, which is one of important objects of array systems. To solve the problem, a filter design method was suggested, which employed the concept of an inverse method using the acoustical holography based on the boundary element method. In the acoustical holography used for the source identification, the measured field data are employed to reconstruct the vibro-acoustic parameters on the source surface. In the analogous problem of source array design, the desired field data at some specific points in the sound field was set as constraints and the volume velocity at the surface points of the source plane became the source signal to satisfy the desired sound field. In the filter design, the constraints for the desired sound field are set, first. The array source and given space are modelled by the boundary elements. Then, the desired source parameters are inversely calculated in a way similar to the holographic source identification method. As a test example, a target field comprised of a quiet region and a plane wave propagation region was simultaneously realized by using the array with 16 loudspeakers.

**Keywords:** Acoustical holography, Inverse method, Source array, Rendering of sound field

**ASK subject classification:** Acoustic Signals Processing (1.5), Architectural Acoustics (7.7)

### I. 서론

다수의 음원을 이용한 음장 제어 (sound field control)의 궁극적인 목적은 청음자가 원하는 음장을 공간 내에

구현하는 것이다. 과거에는 하드웨어에 의한 한계 때문에 두 개 혹은 4개의 제한된 수의 음원을 이용하였으나 최근에는 5채널 이상의 멀티채널 시스템이 일반화되고 있으며, 많게는 수십 개에 이르는 음원을 이용한 방법들이 개발되고 상업화를 위한 연구가 진행 중이다 [1]. 이러한 다채널 음장 제어 시스템 중 대표적인 것으로는 *Ambisonic* 과 *WFS (Wave Field Synthesis)*를 들 수 있다 [2,3].

책임저자: 이 정 권 (J.G.Ih@kaist.ac.kr)  
대전시 유성구 구성동 373-1, KAIST  
(전화: 042-350-3035; 팩스: 042-350-8220)

그러나 이러한 방법들은 기본적으로 가상의 음원을 모델링 하는 방법으로 재생하는 음장과 음원이 존재했던 음장의 차이를 구현하기 위해서는 가상 음원 방법 (image source method) [4]나 마이크로폰을 이용한 보정 [5]을 필요로 한다.

이러한 음원의 모델링에 기반한 방법과 다르게 공간에서의 음압 정보에 기초한 방법은 공간에서의 음향특성 변화를 근본적으로 반영할 수 있다는 장점을 가지고 있으며 능동 소음 제어와 같이 특정한 형태의 음장 (무음 공간)에 대해 최적화된 방법으로 발전하여왔다. 여기에서 발전된 형태로 최소 자승법을 이용하여 특정형태의 음장을 재현하는 방법이 제안된 바 있다 [6].

만일 원하는 음장에 대한 음압 분포를 알 수 있고 음향 신호의 전달 경로를 모델링 할 수 있다면 필요한 음원의 응답을 역으로 유도하는 것이 가능하다. 이러한 역 문제적 접근 방법 (inverse approach)은 음향 홀로그래피와 같은 음원 재구성 과정과 유사한 과정을 통해 구해질 수 있다. 일반적인 음원 재구성 문제에서는 측정을 통해 공간에서의 음압 분포 정보를 얻고 이를 통해 음원 특성을 역으로 도출하게 된다. 본 논문에서 다루고자 하는 역 접근 방법을 이용한 음원 설계 문제에서는 청음자 (listener)의 요구를 만족 시킬 수 있는 가상의 음압 분포가 측정 데이터를 대신하게 된다. 인간의 청감은 복잡한 다수의 요소에 의해 결정되기 때문에, 몇 가지의 한정된 인자에 의해 청음자의 주관적 요구를 완벽하게 반영한다고 말하기는 어렵지만, 현재까지의 기술의 한계를 고려한 목표 음장은 객관적인 구체적 형태로 주어져서 청음자의 요구를 근사적으로 반영할 수는 있다. 예를 들어 청음자의 요구가 반영된 주파수 응답의 형태 등을 도출해 낼 수 있다면, 역 문제적 접근 방법을 통해서 음원의 설계인자를 도출해 낼 수 있다. 본 연구에서는 청음자가 원하는 음장을 얻기 위한 음향 시스템을 설계하는 일련의 과정을 구성하였다. 이를 위해 음원 재구성 방법을 응용한 역 접근 방법에 의하여 음원을 설계 하는 과정을 제시하였다.

## II. 이론적 배경

### 2.1. 역 경계 요소법에 의한 음향 홀로그래피 [7~9]

균일한 매질을 갖는 음장 내에서의 음향 전파는 다음 식과 같이 특정 체적 내에서 Green 함수에 의해 유도되는 Kirchhoff-Helmholtz 적분 방정식으로 표현될 수 있다:

$$c(\mathbf{r})p(\mathbf{r}) = \int_{\mathcal{S}} \left[ p(\mathbf{r}_0) \frac{\partial G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{r}_0)} - G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) \frac{\partial p(\mathbf{r}_0)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{r}_0)} \right] dS(\mathbf{r}_0) \quad (1)$$

이 때,  $\mathbf{r}$ 은 공간좌표,  $\mathbf{r}_0$ 는 경계면  $\mathcal{S}$  위 점의 좌표를 의미하며  $c(\mathbf{r})$ 은 입체각 (solid angle),  $p(\mathbf{r})$ 은 공간에서의 음압,  $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$ 은 Green함수 (Green function),  $\mathbf{n}$ 은 단위 법선 벡터 (unit normal vector)를 의미한다. 식 (1)은 이산화 과정을 통하여 다음과 같이 행렬식의 형태로 변형될 수 있다:

$$D_s p_s = M_s v_s, \quad p_f = D_f p_s + M_f v_s \quad (2, 3)$$

이 때,  $p_s$ 와  $v_s$ 는 경계 면에서의 음압 (sound pressure)과 속도 (particle velocity)를 의미하며,  $p_f$ 는 영역 내부에서의 음압,  $D_s$ 와  $M_s$ 는 경계면에서의 단극 (monopole) 및 쌍극 (dipole) 행렬을 나타내며,  $D_f$ 와  $M_f$ 는 영역 내부에서의 단극 및 쌍극 행렬을 나타낸다. 식 (2)는 선택 영역 표면에서의 음압과 속도의 관계를 나타내며, 식 (3)은 영역 내부에서의 음압과 속도와의 관계를 나타낸다. 식 (2)를 식 (3)에 대입하여 표면에서의 속도에 의한 공간에서의 음압을 나타내면 아래와 같이 표현된다:

$$p_f = (D_f D_s^{-1} M_s + M_f) v_s \equiv G_v v_s \quad (4)$$

여기서,  $G_v$ 는 영역 내에서의 진동-음향 전달 행렬 (vibro-acoustic transfer function)을 의미한다. 음원에 관한 정보를 얻기 위해서는  $G_v$ 의 역행렬을 취해야 하지만, 많은 경우  $G_v$ 는 정방행렬이 아니기 때문에 역 행렬이 존재하지 않는다. 그러므로, 최소 자승해 (least-square solution)와 특이치 분해 (singular value decomposition)를 이용하여 다음과 같이 해를 구하게 된다:

$$\hat{v}_s = (G_v^H G_v)^{-1} G_v^H p_f = (G_v)^+ p_f = W_v A_v^{-1} U_v^H p_f \quad (5)$$

여기서  $(G_v)^+$ 는  $G_v$ 의 유사 역행렬 (pseudoinverse matrix)을 의미하며 연산자  $^H$ 는 Hermitian 변환을 의미한다. 그리고 행렬  $A_v$ 는  $G_v$ 의 특이치로 구성된 대각행렬이며,  $U_v$ 와  $W_v$ 는 특이치 벡터로 구성된 행렬이다.

### 2.2. 음원 설계 문제에 대한 기술

2.1장의 식 (5)는 음원 설계 문제에 대해서도 유사하게

성립될 수 있다. 그러나 일반적으로 원하는 음장의 특성은 특정점에서의 음압으로 주어지기 보다, 충격응답 (impulse response) 혹은 주파수 응답 (frequency response)의 분포로 주어지게 된다. 또, 음원의 특성 역시 표면에서의 속도가 아닌 음원 신호에 적용될 필터가 되어야 한다. 앞 절에서 구한 식 (5)에서, 원하는 음장을 구현하기 위해 음원에 적용되어야 할 필터 계수를  $A_F$ 라고 하였을 때, 각 음원에 동일한 크기의 단위 신호  $v_i$ 이 주어졌다고 하면 음원의 표면 속도는 다음과 같이 구해진다:

$$v_{s,i} = A_F v_i, \tag{6}$$

만일 특정 지점에서의 목표응답을  $H_{target}$ 이라고 하면,  $v_i$ 에 의해 발생 되는 음압은 다음과 같다:

$$p_{target,i} = H_{target} v_i, \tag{7}$$

식 (6)과 (7)에 의하여 식 (5)은 아래 식과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 통해 원하는 음장을 얻기 위한 필터를 유도할 수 있다:

$$A_F v_i = (G_v)^{-1} H_{target} v_i, \tag{8a}$$

$$A_F = (G_v)^{-1} H_{target}. \tag{8b}$$

기본적으로 식 (8b)는 식 (5)와 동일한 관계를 보여주고 있으며, 무차원화 된 설계인자에 맞추어 표현을 변형한 식이다.

### III. 음원 설계

#### 3.1. 음원 설계 과정

역 경계요소법에 의한 음향 홀로그래피 방법을 이용하여 음원을 설계하는 과정은 크게 세가지 단계로 구분된다. 첫 번째 단계로 목표 음장을 정의하여야 한다. 이 과정은 일반적인 음원 재구성 문제에서 측정에 해당하는 부분으로, 음원 설계 문제에서는 아직 실제로 존재하지 않는 음장이기 때문에 물리적으로 타당한 형태의 값은 준비하는 것이 중요하다. 이를 위한 방법은 측정값을 이용한 방법과 이론식을 이용한 방법의 두 가지가 있을 수 있다. 측정값을 이용하는 방법은 우수한 음향 조건을 갖

거나 혹은 재현하고자 하는 공간의 음향특성을 실제로 측정하여 음장 데이터를 구성하는 방법이다. 예를 들어 음향특성이 잘 조정된 청음실의 좋은 자리의 주파수 혹은 충격응답을 청자가 위치하는 모든 영역에서 얻어지도록 하는 것 등을 생각할 수 있다. 이렇게 측정을 이용하는 방법은 물리적으로 타당한 분포를 얻을 수 있고 특정한 장소의 음향특성을 모사하고 싶을 때 유용하게 이용될 수 있지만, 영역이 넓은 경우에 측정에 많은 노력이 소요되며, 청자가 원하는 조건을 갖춘 공간이 존재하지 않을 경우 사용할 수 없다. 이론적 계산을 이용하여 가상의 음장 분포를 구성하는 방법은 상대적으로 적은 자원으로 목표 음장을 구성할 수 있고 자유도가 높다는 장점이 있으나 실제 청자가 느낄 청감을 직접적으로 예측하기 어렵다는 문제점이 있다.

두 번째 단계로서 공간과 음원을 경계요소 모델로 모델링 한다. 기존의 음장 제어 방법에서는 음원을 단순한 이상적 음원 (simple source)으로 두는 경우가 많았기 때문에, 라우드 스피커가 반사체 혹은 산란체로서 음장에 미치는 영향은 고려되지 않았다. 그러나 경계 요소법을 이용하면 음원의 기하학적 형상과 방향성 역시 모델에 포함시킬 수 있다.

세 번째 단계로서 경계 요소법에 따른 계산에 의해 음원과 공간점의 전달함수를 구한 후, 식 (5) 혹은 (8)를 이용하여 음원 제어기 필터 계수를 유도한다. 일반적인 소음 문제에서는 음장에서의 음압을 측정할 때 잡음 성분이 포함 될 여지가 있기 때문에 정규화 과정이 적용된다. 그러나 첫 번째 단계에서 이론식을 이용하여 목표 음장을 구성하였다면, 음장 데이터에 오차가 포함되어 있지 않기 때문에 이 과정은 생략 될 수 있다.

#### 3.2. 시뮬레이션 예제

실행 예제로서, 제어용 음원 전방에 놓인 음장에서 일부의 영역에는 평면파가 전파되고 인접한 일부 영역에는 음압이 존재하지 않는 영역을 구현하기 위해 필요한 필터를 설계하였다. 그림 1은 500 Hz에 대하여 구성된 목표 음장 데이터의 분포를 보여준다. 공간내에 평면파가 y 방향으로 진행 될 때 음향 전파는 다음 식과 같이 표현된다:

$$p(y, \omega) = A e^{ik_y y} e^{i\omega t}. \tag{9}$$

이 때,  $k$ 는 파수 (wave number)를,  $\omega$ 는 음원에 대한 상대적 위상을 의미한다. 음장 데이터의 좌표는 그림 1과

같이 영역 전체에서 0.2 m 간격으로 선택하였으며, 총 231개의 음장 점이 사용되었고, 상대적 위상은 없다고 가정하였다.

음원은 높이, 너비, 깊이가 각각 0.1 m이고 정면 중앙에 0.075 m의 진동판을 갖는 16개의 라우드스피커를 가

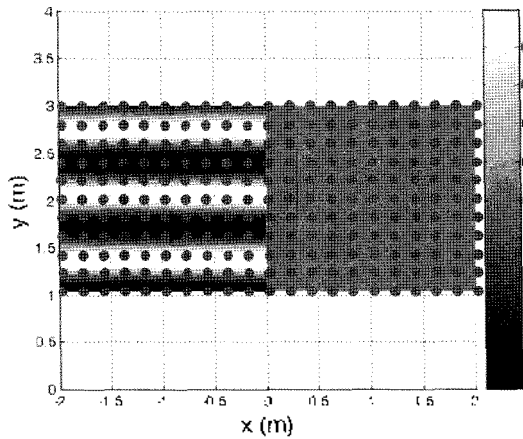


그림 1. 500 Hz에서의 목표 음장과 선택 점의 좌표(●)  
Fig. 1. Distribution of target field pressure and coordinates of selected points (●) at 500 Hz.

정하였다. 그림 2(a)는 음원 어레이의 경계요소 모델을 보여주고 있으며, 그림 2(b)는 한 개의 음원을 모델링 한 것이다. 한 개의 음원은 64개의 삼각형 요소로 모델링하였고, 요소의 가장 긴 변은 0.057 m로, 이 때 모델의 주파수 상한은 1 kHz이다 ( $\lambda/6$  기준 적용). 가진점은 진동판의 중심에 위치하는 절점으로 하였으며, 다른 부분들은 강체 (rigid body)로 가정하였다.

그림 3은 목표 음장과 설계된 음원에 의해서 만들어진 음압의 분포를 비교한 것이다. 전체적으로 목표 음장의 형태를 잘 재현하고 있는 것을 볼 수 있으며, 음압 분포가 급격하게 변화하는 영역 (평면과와 무음영역의 경계)에서는 음압의 변화 경향이 목표 음장에 비해 서서히 변화하는 것을 알 수 있다. 그림 4는 주파수에 따른 목표 음장과 얻어진 음장 간의 차이를 보여주고 있는데, 오차는 다음 식과 같이 정의하였다:

$$Error(\%) = \frac{\sum_{n=1}^N |P_{result,n} - P_{target,n}|}{\sum_{n=1}^N |P_{target,n}|} \times 100. \quad (10)$$

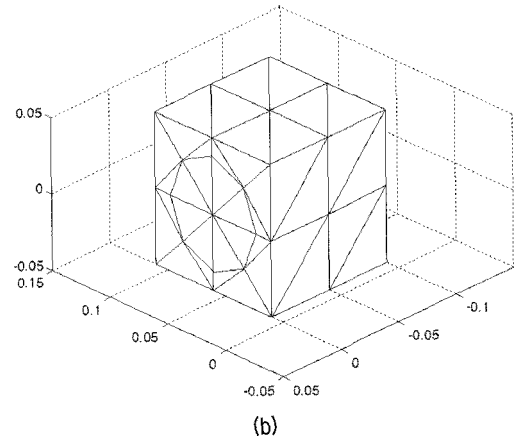
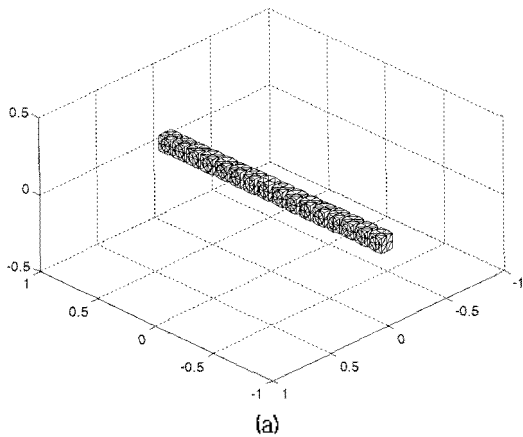


그림 2. 음원의 경계요소 모델: (a) 전체 어레이 시스템의 경계 요소 모델, (b) 단일 음원의 경계 요소 모델  
Fig. 2. Boundary element models: (a) whole array system, (b) single source of the array.

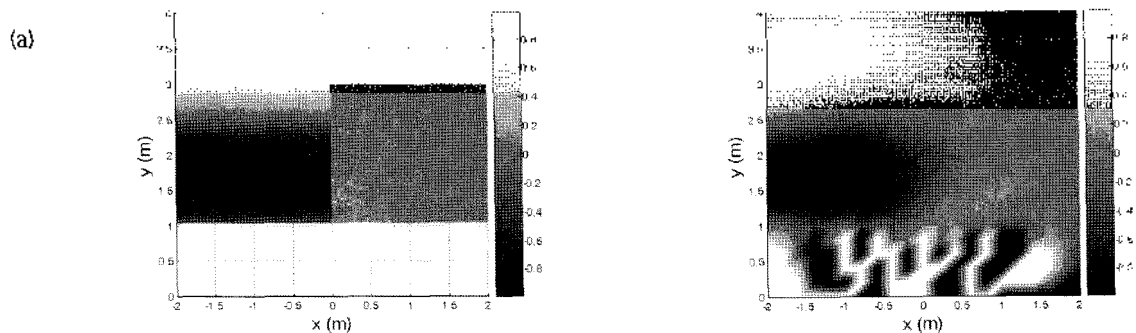


그림 3. 목표 음장 (좌측)과 설계된 음원 (우측)에 의해서 만들어진 음압의 분포: (a) 100 Hz, (b) 400 Hz, (c) 700 Hz, (d) 1000 Hz  
Fig. 3. Comparison of target field (left column) and sound field generated by designed source array (right column) at: (a) 100 Hz, (b) 400 Hz, (c) 700 Hz, (d) 1000 Hz. (continue).

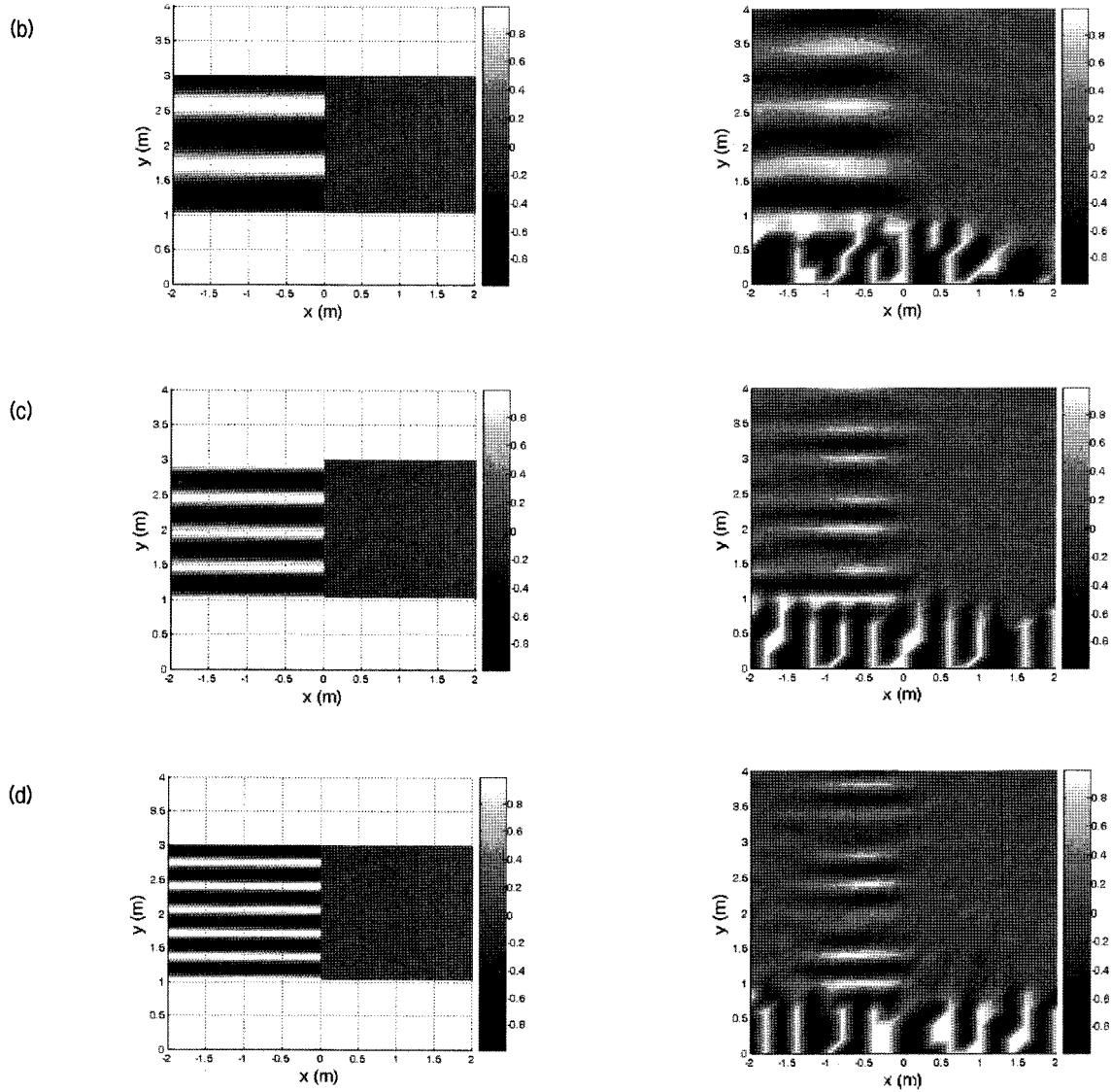


그림 3. 목표 음장 (좌측)과 설계된 음원 (우측)에 의해서 만들어진 음압의 분포: (a) 100 Hz, (b) 400 Hz, (c) 700 Hz, (d) 1000 Hz  
 Fig. 3. Comparison of target field (left column) and sound field generated by designed source array (right column) at: (a) 100 Hz, (b) 400 Hz, (c) 700 Hz, (d) 1000 Hz.

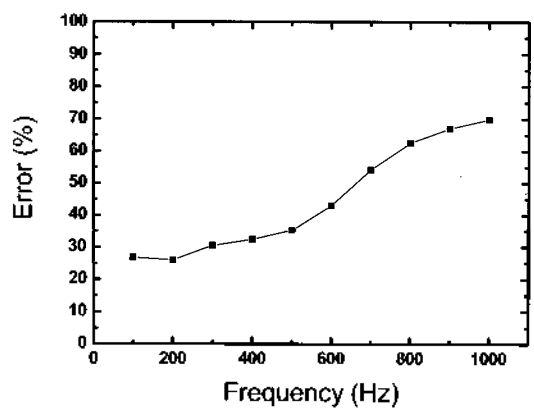


그림 4. 목표 음장과 구현된 음장 간의 오차  
 Fig. 4. Error of generated sound field compared to the target sound field.

여기서  $N$ 은 공간에서의 음장점 개수를 의미하며  $P_{target, n}$ 은  $n$ 번째 점에서의 목표 음압 응답,  $P_{result, n}$ 은 그 점에서 얻어진 음압 응답을 의미한다. 그림 4에서 나타난 것과 같이 주파수가 증가함에 따라서 오차가 증가하는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 주로 경계 요소 모델의 주파수 상한과 음원 간의 간격에 기인한 것이라고 볼 수 있다.

### 3.3. 선택 영역에 따른 오차의 변화

앞 절에서의 예제와 같이 이론식에 기반한 가상 데이터를 음장 데이터로 이용할 경우에는 상대적으로 사용되는 음장 점의 수에 크게 구애 받지 않을 수 있다. 그렇지만 실제 측정 데이터를 기반으로 하는 경우에 있어서는 작은

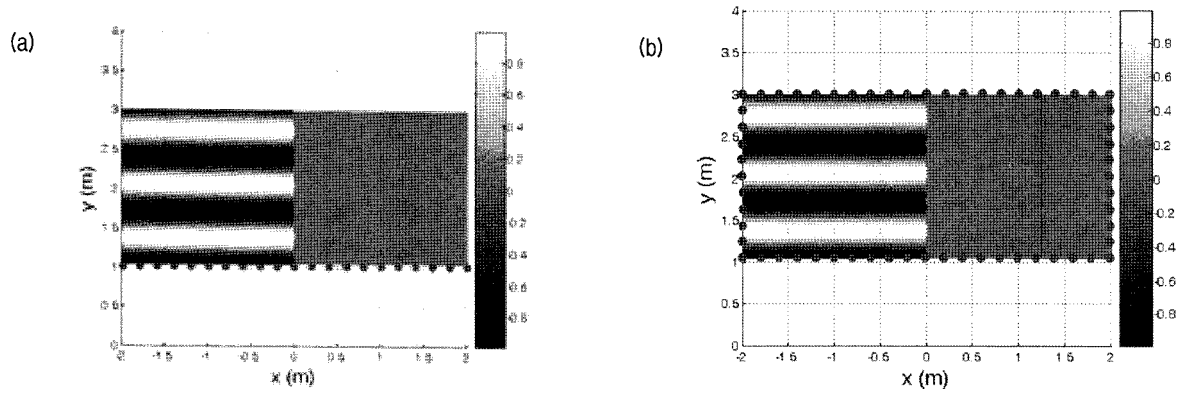


그림 5. 500 Hz에서의 목표 음장과 선택 제어점의 좌표 (●): (a) 음원과 가까운 한 번을 선택, (b) 대상 음장을 둘러 싸는 주변점들을 선택  
 Fig. 5. Distribution of the target field pressure and the coordinates of selected control points (●) at 500 Hz: (a) frontal points, (b) peripheral points.

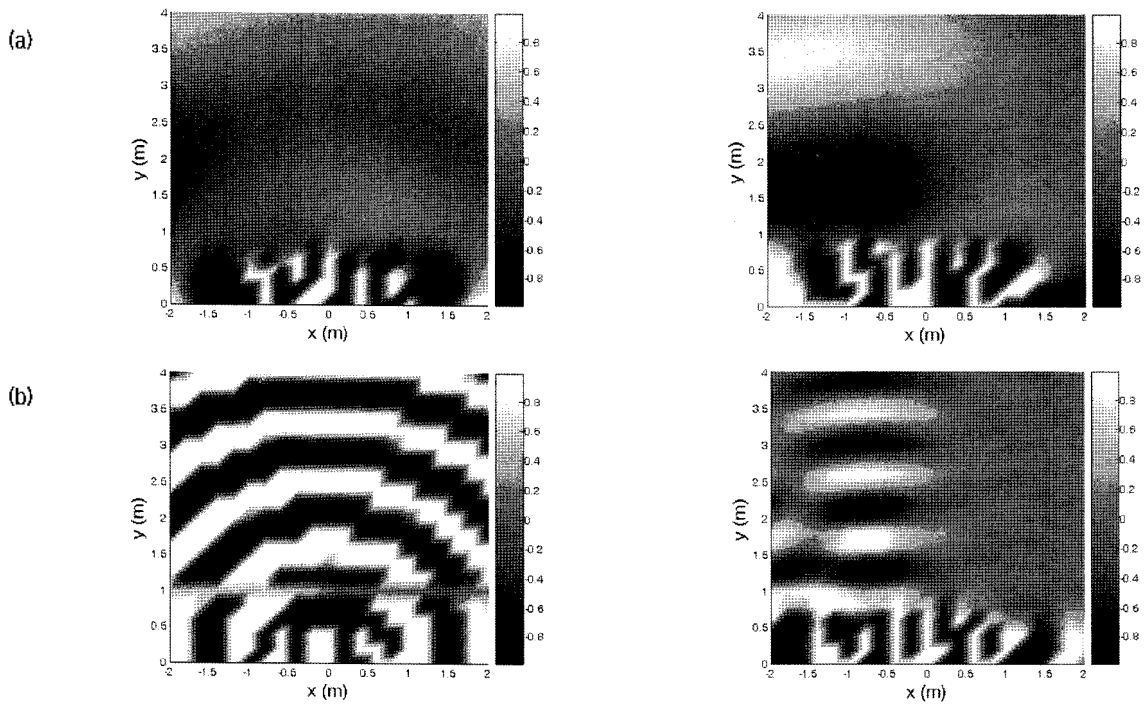


그림 6. 그림 5에 표시된 관측 제어점을 이용하여 설계된 음원으로 구현된 음장의 분포 (좌측 그림은 5(a)와 비교, 우측 그림은 5(b)와 비교): (a) 100 Hz, (b) 400 Hz, (c) 700 Hz, (d) 1000 Hz  
 Fig. 6. Comparison of sound field generated by designed source array using the selected observation points in Fig. 5(a) (left column) and Fig. 5(b) (right column) at: (a) 100 Hz, (b) 400 Hz, (c) 700 Hz, (d) 1000 Hz. (continue).

수의 측정점으로 높은 정확성을 얻는 것이 필요하다. Ise [10]는 목표로 하는 영역내에 원하는 음장을 형성시키기 위해, 해당 영역을 닫힌 공간의 형태로 간주한 후 그 경계에서 음압 조건을 맞추는 방법을 제안하였다. 이 개념이 본 연구의 방법에 의해 구현되기를 검토하기 위해, 그림 5와 같이 두 가지 방법으로 음장 점을 선택하였다. 그림 5(a)는 음원에서 목표 영역으로 이어지는 길목에 제어 대상점을 직선의 형태로 선택한 것을 보여주고 있으며, 그림 5(b)는 제어 대상점이 선택영역 전체를 둘러싸고 있다.

선택 점간의 간격의 앞 절의 경우와 마찬가지로 0.2 m로 하였다.

그림 6은 위의 그림 5의 선택 점을 이용하여 설계된 제어기 필터로 구현된 음장을 보여주고 있다. 좌측에 보여지는 것이 그림 5(a)의 선택 점들을 이용한 경우이며, 우측에 나타난 것이 그림 5(b)와 같이 선택한 점들을 이용한 경우이다. 그림 5(a)와 같이 선택된 점들을 이용한 경우 평면과 구현과 정속공간 구현 양쪽모두 잘 이루어지지 않고 있음을 볼 수 있으나, 그림 5(b)와 같이 목표 제어

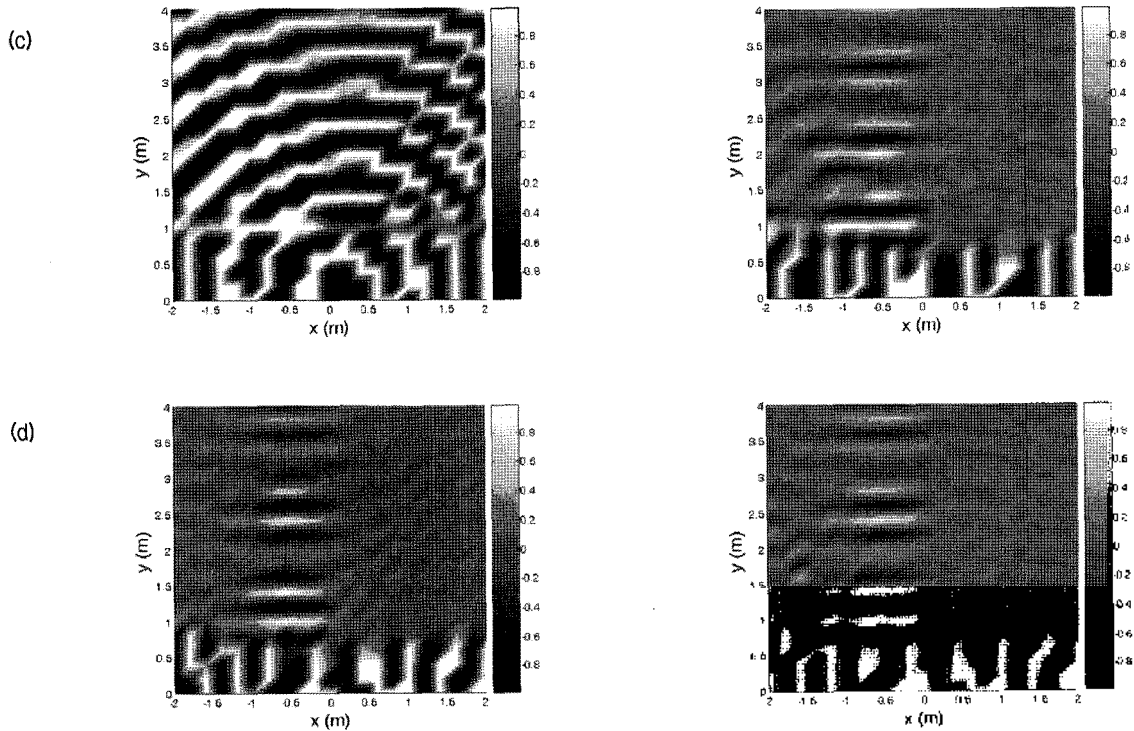


그림 6. 그림 5에 표시된 관측 제어점을 이용하여 설계된 음원으로 구현된 음장의 분포 (좌측 그림은 5(a)와 비교, 우측 그림은 5(b)와 비교): (a) 100 Hz, (b) 400 Hz, (c) 700 Hz, (d) 1000 Hz

Fig. 6. Comparison of sound field generated by designed source array using the selected observation points in Fig. 5(a) (left column) and Fig. 5(b) (right column) at: (a) 100 Hz, (b) 400 Hz, (c) 700 Hz, (d) 1000 Hz.

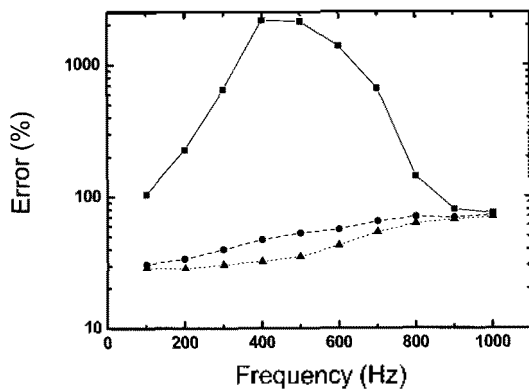


그림 7. 목표 음장과 구현된 음장 간의 오차 —■—, 목표 제어 영역의 한 변을 선택한 경우; ●---, 영역 경계 전체를 선택한 경우; ▲---, 영역 내부 전체에서 균일하게 선택한 경우  
Fig. 7. Error of generated sound field compared to the target sound field: —■—, using selected field points by the frontal edge; ●---, selected by the whole peripheral boundary; ▲---, uniformly selected in the whole domain area.

영역의 경계를 모두 포함하는 경우에는 그림 3과 같이 목표 음장을 유사하게 구현하는 것을 관찰 할 수 있다. 그림 6에 보인 바와 같이 각 경우의 오차를 살펴보면 이러한 경향을 더욱 분명히 확인할 수 있다. 경계면만을 선택하여 설계 했을 때에 비하여 영역 전체의 점들을 이용했

을 경우 최대 18%까지 오차가 감소하는 것을 확인할 수 있으나, 선택한 점의 개수는 60개에서 231개로 증가하게 된다. 만일 3차원 영역에 대하여 구현하고자 하는 경우에는, 사용되는 음장 점의 개수 차이는 더욱 증가하게 되므로, 경우에 따라서는 경계면만을 이용하는 것이 효율적이라고 볼 수 있다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 음원 재구성 방법에서 사용되는 경계요소법에 의한 음향 홀로그래피 방법을 이용하여 원하는 음장을 구현하기 위한 음원 어레이를 설계하는 과정을 제안하였다. 기본적으로 음원 재구성 문제와 목표 음장을 얻기 위한 음원 설계 문제는 음장 데이터에서 음원 정보를 유도한다는 점에서 동일한 접근방법을 적용할 수 있다. 음원 설계과정은 목표 음장의 선정, 공간과 음원의 경계 요소 모델링, 목표 음장을 얻기 위한 제어기 유도의 세 단계로 구성 된다. 본 논문에서는 이 방법을 적용하여 16개의 라우드스피커를 이용하여 원하는 형태의 음장을 구현하는 모사 시험을 수행하였으며, 목표 음장을 잘 구

현할 수 있다는 것을 확인하였다. 본 논문에서 제안된 방법은 공간의 음향학적 모사나 가상 정음환경 구현 등에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 BK21 사업과 한국과학재단을 통한 교육과학기술부의 국가지정연구실 사업으로부터 지원받아 수행되었습니다 (ROA-2005-000-10112 0).

### 참고 문헌

1. K. Hamasaki, W. Hatano, K. Hiyama, S. Komiyama, and H. Okubo, "5.1 and 22.2 multichannel sound productions using an integrated surround sound panning system," *AES 117<sup>th</sup> Convention*, paper no. 6626, Oct. 2004.
2. M. A. Gerzon, "Ambisonics in mullichannel broadcasting and video," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 33, no. 11, pp. 859-871, 1985.
3. A. J. Berkout, D. de Vries, and P. Vogel, "Acoustic control by wave field synthesis," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 93, no. 5, pp. 2764-2778, 1993.
4. A. J. Berkout, D. de Vries, and J. J. Sonke, "Array technology for acoustic wave field analysis in enclosures," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 102, no. 5, pp. 2757-2770, 1997.
5. P. A. Gauthier and A. Berry, "Adaptive wave field synthesis with independent radiation mode control for active sound field reproduction: Theory," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 119, no. 5, pp. 2721-2737, 2006.
6. P. A. Nelson "Active control of acoustic fields and the reproduction of sound," *J. Sound. Vib.*, vol. 177, no. 4, pp. 447-477, 1994.
7. B.-K. Kim and J.-G. Ih, "On the reconstruction of the vibro-acoustic field over the surface enclosing and interior space using the boundary element method," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 100, no. 5, pp. 3003-3016, 1996.
8. B.-K. Kim and J.-G. Ih, "Design of an optimal wave-vector filter for enhancing the resolution of reconstructed source field by NAH," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 107, no. 6, pp. 3289-3297, 2000.
9. J.-G. Ih, "Inverse problems in the vibro-acoustics," Keynote Speech, in *Proc. of NOVEM 2005*, April, 2005.
10. S. Ise, "A principle of sound field control based on the Kirchhoff-Helmholtz integral equation and the theory of inverse system," *Acustica*, vol. 85, no. 1, pp. 78-87, 1999.
11. E. G. Williams, *Fourier Acoustics*, Academic Press, San Diego, 1999.
12. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, New York, 2000.

### 저자 약력

#### • 조 완 호 (Wan-Ho Cho)



2002년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학사)  
 2004년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학석사)  
 2008년 8월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)  
 2008년 9월 - 현재 : KAIST 기계기술연구소 Post Doctor  
 \*관심분야: 음장 제어, 음향 어레이 시스템, 오디오 엔지니어링, 음질 해석

#### • 이 정 권 (Jeong Guon Ih)

한국음향학회지 제22권 제2호 참조