

소리의 공간 제어를 위한 구형 다채널 스피커 어레이 설계

Design of Multichannel Spherical Loudspeaker Array for the Spatial Sound Manipulation

강동수 · 최정우 · 이정민 · 김양한

(Dong-Soo Kang, Jung-Woo Choi, Jung-Min Lee, Yang-Hann Kim)

KAIST 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터 (NOVIC)
(접수일자: 2012년 01월 30일; 채택일자: 2012년 3월 15일)

초 록: 본 논문의 목적은 가우스 배치, 레베데프 배치 등 다양한 구 표면의 음원 배치 방법을 고려하여 구형 다채널 스피커 시스템을 설계하는 것이다. 다수의 스피커를 이용하여 원하는 음장을 만들어내는 소리의 공간 제어 (spatial sound manipulation)에 있어, 키르코프-헬름홀츠 적분 방정식 (K-H 적분 방정식)은 표면에 연속적으로 배치된 음원의 음압 및 입자 속도의 제어를 통해 내부의 음장을 제어할 수 있음을 의미한다. 하지만 현실적으로 사용가능한 음원의 수에 제한이 있으므로, 한정된 수의 음원을 표면에 효과적으로 배치하여 연속적으로 배치된 경우를 모사할 필요가 있다. 3차원 형상의 대표적인 예로, 구 표면에 음원을 배치하여 내부의 음장을 제어할 때, 표면에 음원을 배치하는 다양한 방법들을 검토하고, 각각의 방법들에 대해 시간 역전 연산자와 고차 앰비소닉을 이용한 음장 제어 성능을 비교하였다. **핵심용어:** 소리의 공간제어, 음장 재현, 고차 앰비소닉, 시간 역전 연산자, 레베데프 구, 스피커 어레이 **투고분야:** 건축음향 분야(7.7)

ABSTRACT: The objective of this paper is to design multichannel spherical loudspeaker array by considering various positioning methods such as Gaussian grid, Lebedev grid and packing method. For the spatial sound manipulation, which is to make desired sound field by controlling multiple sound sources, the Kirchhoff-Helmholtz integral states that sound fields can be reproduced in terms of infinite control sources on the integral surface. But since we cannot control infinite number of sources for the implementation, we have to allocate finite number of sound sources which can approximately act as infinite number of sources. To manipulate sound field inside of a sphere (which is typical example of three dimensional array) by controlling sound sources on the surface, three methods of allocating sound sources, which are Gaussian grid, Lebedev grid and packing method, are reviewed. For each geometry, the performances of manipulation rendered by time-reversal operator and higher-order ambisonics are compared.

Key words: Spatial sound manipulation, Sound field reproduction, Higher-order ambisonics, Time-reversal operator, Lebedev grid, Loudspeaker array system

ASK subject classification: Architectural Acoustics (7.7)

1. 서 론

청자에게 보다 나은 소리를 들려주기 위해서는 소리의 시간적인 변화를 재현하는 것만이 아니라 청자의 위치 혹은 다수의 청자가 속한 공간에서 보다 나

은 소리를 제공하여야 한다. 즉, 소리의 공간적인 분포 역시 제어가 되어야 한다. 그렇다면 어떻게 원하는 위치에 원하는 형태의 소리를 형성할 수 있을까? 이는 기본적인 단위 소리를 발생시키는 음원 (sound source)의 구동이 겹침으로 원하는 소리의 모양을 만들어 내는 것으로 생각할 수 있다^[1]. 키르코프-헬름홀츠 적분 방정식에 따르면 어떤 공간 내부의 음장은 그 음장을 둘러싸고 있는 경계 면에서의 음압과

*Corresponding author: 강동수 (dooly0819@kaist.ac.kr)
305-701 대전광역시 유성구 구성동 KAIST
기계공학과 NOVIC 센터
(전화: 042-350-3065; 팩스: 042-350-8220)

입자속도에 의해 결정된다. 이것을 음장 제어 관점에서 생각해 보면, 우리가 원하는 어떤 임의의 음장이라도 그 경계면에 배치된 무한히 많은 개수의 음원들을 제어하여 만들어 낼 수 있다는 것을 의미한다^[2].

그러나 현실적으로는 사용 가능한 음원의 개수의 한계가 있으므로, 한정된 수의 스피커로 키르코프-헬름홀츠 적분 방정식을 근사적으로 이산화(discretization)할 수 있는 형태로 음원들을 배치하는 방안을 고안해야 한다. 이를 위해 먼저 경계 면의 형태를 결정하고, 이 경계 면에 최대한 많은 수의 스피커를 배치해야 한다. 사용하는 스피커의 개수에 한계가 있을 경우, 한정된 수의 음원으로 효과적으로 음장 제어를 할 수 있도록 배치하는 것이 중요하다.

다채널 스피커 시스템의 경우, 스피커를 배치하는 다양한 방법 중 구의 표면에 스피커를 배치하는 방법이 있다. 구형 배치의 경우 스피커가 청자를 둘러싸고 있으므로 청자를 향해 전 방향에서 전파되는 음파를 만들어 낼 수 있다는 장점과 함께 구 좌표계에 대해서 이론적으로 전개하기가 용이하다는 장점이 있다.

스피커를 구 표면상에 배치한 예로는 Fazi 등이 구성한 40채널 구형 스피커 시스템이 있다^[3]. Fazi 등은 Simple source approach^[4]를 통해 각 음원의 입력을 얻는 방법을 사용하여 원하는 음장을 재현하거나 음향 에너지 집중을 위해, 무향실 내에 40개의 스피커들이 구형 프레임 상에 배치된 스피커 시스템을 구성하였다. 설치된 프레임의 각 연결점에 스피커를 부착하였다.

Seo 등은 다양한 음장 제어 방법을 사용하여 원하는 음장을 형성하기 위한 21채널 스피커 시스템을 구성하였다^[5]. 3층으로 구성된 스피커 어레이는 둘러싸인 영역의 중심으로부터 동일한 거리에 스피커를 위치시켰다. 그러나 스피커가 구 표면상에 고르게 분포되지는 않았다.

또한, Epain 등은 32채널 스피커 시스템을 구성하여 고차 앰비소닉(higher-order ambisonics, 이하 HOA)^[6,7]을 통해 원하는 음장을 재현하였다^[8]. 필요 이상의 어레이 프레임을 사용하는 것은 프레임에 의한 반사 및 산란을 일으켜 음장 형성 시 오차를 유발할

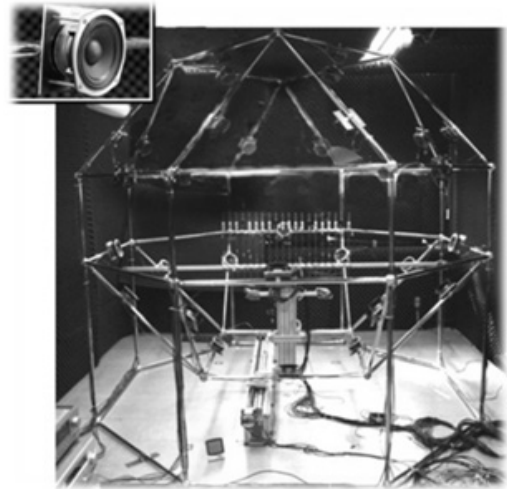


그림 1. 32채널 스피커 시스템 (한국과학기술원 소음 및 진동제어 연구센터)^[10]

Fig. 1. 32 Channel speaker system (KAIST, center for Noise and Vibration Control).

수 있고, 실용적이지 못하다는 단점이 있기 때문에 구형으로 스피커를 배치하되 어레이 프레임을 사용하지 않고 스탠드, 행거 등을 사용하여 스피커를 배치함으로써 불필요한 반사를 막았다. 그러나 스피커의 위치를 결정하기 어렵고 스피커의 개수가 많아지면 배치가 힘들어지는 단점이 있다.

저자인 Kim 등은 MEROFORM^[9] 프레임을 이용하여 32채널 스피커 시스템을 구성^[10], 음향 밝기 제어와 음향 대조 제어^[11]를 이용하여 음향 에너지를 공모양의 영역에 집중한 소리 공(sound ball)을^[12,13,14] 구현하였다(그림 1). 그러나 공간상에 배치된 스피커가 정확한 구형을 이루지는 않아 이론적인 고찰을 하기에 어려운 점이 있다^[15].

본 논문의 목적은 구형 다채널 스피커 시스템 구성을 위하여, 설계를 위해 다양한 스피커의 배치 방법을 고려해(3장 참조), 설계 방법을 제시하는 데 있다. 구 표면상에 스피커를 배치하기 위한 세 가지 방법에 대해 검토, 시뮬레이션을 통해 음장 제어 성능을 확인하여 배치를 결정하고자 한다.

II. 문제정의

다채널 스피커 시스템 설계방법을 제시하는 과정에서 스피커를 구형으로 배치하기 위해 다음과 같이

두 단계로 문제를 나눌 수 있다. 첫째, 구 표면에 스피커를 배치하는 방법은 어떤 것이 있는가?, 둘째, 음장 제어 성능을 어떻게 정의하여 각 배치 방법을 비교하는가? 하는 문제이다.

2.1 스피커의 배치 방법

공간에 한정된 수의 스피커를 배치할 경우, 스피커의 분포에 따라 특정 영역에서의 음장 제어 성능이 저하될 수 있으며 재현하는 소리의 왜곡이 생길 수 있다. 최적의 스피커 배치 방법을 찾기 위해 먼저 구 표면에 스피커를 이산화하여 분포할 수 있는 방법들을 찾아보아야 한다. III장에서, 세 가지 방법으로 분포된 구에 대해 설명하였다.

2.2 스피커 배치의 성능 비교

III장에서 제시한 각 배치 방법이 어떤 음장 제어 성능을 보이는지 모의실험을 통해 확인하여야 한다. 이를 위해 먼저 음장 제어 성능을 정의하여야 한다. 음향 밝기 제어의 관점에서 구 표면에 연속적으로 음원이 배치된 경우와 이산화하여 배치된 각각의 경우가 어떤 차이를 보이는가를 확인하여 성능의 비교를 할 수 있다.

III. 스피커 배치

본 논문에서는 구를 한정된 개수의 교점으로 구성하는 이산화 방법으로 대표적으로 가우스 구 (Gaussian sphere)^[16], 레베데프 구 (Lebedev sphere)^[17],

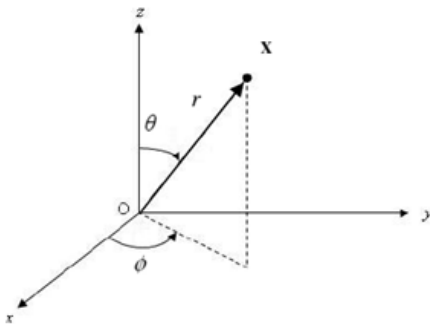


그림 2. 극좌표계

Fig. 2. Polar coordinates.

58ch Gaussian Sphere distribution

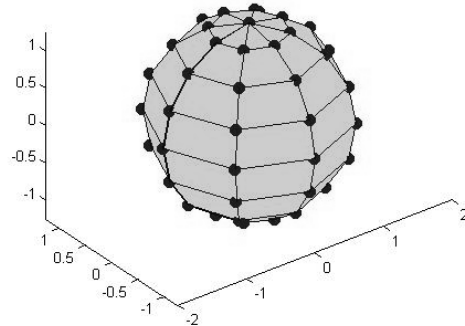


그림 3. 가우스 구 (꼭지점: 58개)

Fig. 3. Gaussian sphere with 58 nodes.

패킹 방법 (packing method)^[18]의 세 가지 방법을 다루었다.

가우스 구는 구 표면을 극좌표계 그림 2를 기준으로 θ , ϕ 방향으로 각각 일정한 간격으로 나누어 구성한다. 각 축을 같은 개수의 간격으로 나눌 경우, 표면에 위치한 꼭지점이 특정한 개수로 정해지게 된다 (7-by-7의 경우 44개, 8-by-8의 경우 58개 등). 58개의 꼭지점으로 구성된 가우스 구는 그림 3과 같다. 가우스 구의 경우 2차원 좌표계에서 간격을 일정하게 나누어 형성된 것으로, 이를 구 형상으로 만들면서 각 꼭지점이 공간상에 일정한 간격으로 분포되어 있지 않다.

레베데프 구는 단위구 위의 표면적분을 일정한 가중치를 가진 이산화된 구로 나누는 과정에서, 팔면체의 대칭성 (octahedral symmetry)를 만족시킬 수 있도록 배열한다. 레베데프 구의 경우 각 꼭지점에서의 구면조화함수 (spherical harmonics)가 직교하기 때문에 이론적 고찰이 편리한 장점이 있다. 레베데프 구의 꼭지점의 개수는 일정한 조건에 의해 정해지며, 조합 가능한 구면조화함수의 모드에 영향을 준다. 점 50개로 구성된 레베데프 구는 그림 4와 같다.

패킹은 각 꼭지점끼리 연결하는 가장 짧은 모서리의 길이를 최대화함으로써 구 표면에 점을 고르게 분포하는 방법이다. 그림 5은 50개의 점을 구 표면에 분포시킨 경우이다.

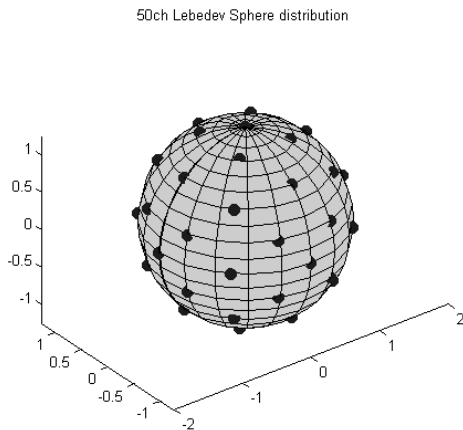


그림 4. 레베데프 구 (꼭지점: 50개)
Fig. 4. Lebedev sphere with 50 nodes.

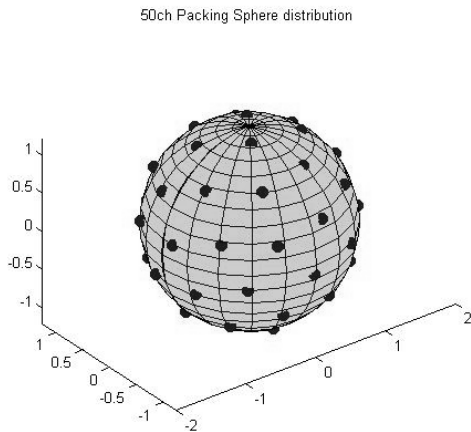


그림 5. 패킹 방법으로 계산된 구 (꼭지점: 50개)
Fig. 5. Sphere with 50 nodes by packing.

IV. 음장 제어 성능 비교

4.1 모의 실험 조건

3장에서 언급한 세 가지 배치방법이 음장 제어 성능에 미치는 영향을 비교하기 위해 실제 환경을 모사한 모의실험을 구성하였다. 음장 제어방법은 음향 밝기 제어의 극한 형태로, 영역 내 한 지점의 음향 밝기를 최대화하는 경우인 시간 역전 (time reversal)^[19] 연산자와 구면 조화함수 (spherical harmonics)의 차수를 제어함으로써 음장을 재현하는 방법인 HOA (higher-order ambisonics)^[6,7]를 사용하였다.

레베데프와 패킹 구의 각 꼭지점에 50개의 스피커

를 배치하는 경우 그림4, 5를 기준으로, 그보다 많은 58개의 꼭지점을 가진 가우스 구 그림 3을 사용하였다. 구의 지름은 2.5 m이며, 각 꼭지점에 단극 음원을 배치하였다.

Ward 등^[20]은 평면파 (plane wave)를 재현하기 위해 스피커를 구형으로 배치하던 중, r_0 의 반지름을 갖는 구 내부에 k 의 파수를 갖는 평면파를 만들기 위해 필요한 스피커의 개수 L 는

$$L \geq ([kr_0] + 1)^2 \tag{1}$$

와 같이 정하였다. 이는 구 내부의 평면파를 재현할 경우 정규화 오차 (normalized reproduction error)가 약 4% 내의 오차를 가지기 위한 조건이다. 이 조건에 따르면, 50개 내외의 스피커에 대해 반지름 30 cm 정도의 영역에서 재현할 수 있는 음파의 주파수는 1 kHz 이하이다. 따라서 본 실험에서는 구의 중심을 기준으로 30 cm의 반지름을 갖는 구 내부를 관심영역으로 설정, 1 kHz의 단일 주파수에 대한 결과를 고찰한다.

4.2 시간 역전 어레이

음향 밝기 제어의 극한 형태로, 영역 내 한 지점의 음향 밝기를 최대화 하는 해는 시간 역전 어레이 (time reversal arrays)의 제어해와 같다^[21]. 시간 역전 연산자를 이용해 어레이 내부에 가상의 점 음원을 재현할 경우, 포터-보자스키 적분 (Porter-Bojarski's integral)^[22] 식 (2)에 의해 결과 음장은 가상 음원으로

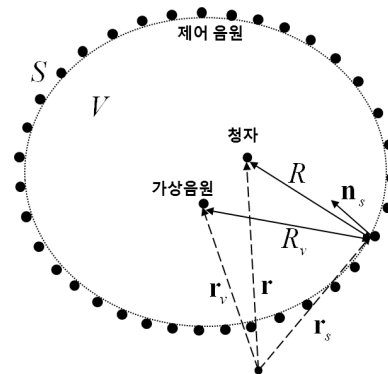


그림 6. 제어 음원으로 둘러싸인 내부 음장
Fig. 6. Sound field surrounded by control sound sources.

부터 퍼져나가는 파면과 모여드는 음원의 조합에 의한 정재파 형태로 나타나게 된다^[23,24].

$$p(\vec{r}) = - \int_S [G(\vec{r}_s|\vec{r}_v)^* \frac{\partial G(\vec{r}|\vec{r}_s)}{\partial n_s} - \frac{\partial G(\vec{r}_s|\vec{r}_v)^*}{\partial n_s} G(\vec{r}|\vec{r}_s)] dS(\vec{r}_s) = G(\vec{r}|\vec{r}_v) - G(\vec{r}|\vec{r}_v)^* \quad (2)$$

\vec{r} 은 관심영역 내 청자의 위치, \vec{r}_s 는 영역을 둘러싸고 있는 음원의 위치, \vec{r}_v 는 집중점의 위치이다. n_s 는 영역 내부로의 법선 벡터이다. 만약 청자와 집중점이 제어 표면으로부터 원거리에 위치하며 ($kR, kR_v \gg 1$) 제어 표면이 매끄럽다면 (smooth), 식 (2)는

$$p(\vec{r}) = G(\vec{r}|\vec{r}_v) - G(\vec{r}|\vec{r}_v)^* \approx 2jk \int_D G(\vec{r}_s|\vec{r}_v)^* G(\vec{r}|\vec{r}_s) dS(\vec{r}_s) \quad (3)$$

와 같이 근사할 수 있다.

식 (3)의 우항의 구 표면에 대한 적분을 L 개의 조각으로 나누어 연산하는 경우,

$$p(\vec{r}) \approx 2jk \int_D G(\vec{r}_s|\vec{r}_v)^* G(\vec{r}|\vec{r}_s) dS(\vec{r}_s) \approx 2jk \sum_{l=1}^L G(\vec{r}_s(l)|\vec{r}_v)^* G(\vec{r}|\vec{r}_s(l)) \Delta S(\vec{r}_s(l)) \quad (4)$$

와 같다. l 은 각각의 스피커를 의미한다. 즉, 각 제어 음원에 집중 점에 대한 시간 역전 해를 입력하게 된다. 본 식은 제어 영역 내의 한 가상의 음원에서 방사하거나 수렴하는 경우의 음장과 주위를 둘러싼 어레이에서 시간 역전 연산자를 이용해 만들어지는 음장이 같음을 뜻한다. 즉, 청자와 집중 지점 주변의 음장을 표면에 배치된 음원의 시간 반전 해를 이용해 구성할 경우, 배치 음원의 개수와 분포에 따라서 가상 음원에 의한 음장과 일치하는 정도에 따라 구 표면에 연속된 무한한 수의 음원을 배치한 경우와의 유사도를 평가할 수 있다.

원거리 영역 조건을 만족하기 위해, 청자와 가상 음원 모두 중심에서 1.25m 떨어진 거리에 위치한 가상 음원에서 먼 거리에 위치하여야 한다. 앞서 제시한 중심에서 0.3m 거리 내에 있는 관심영역에서, 1kHz

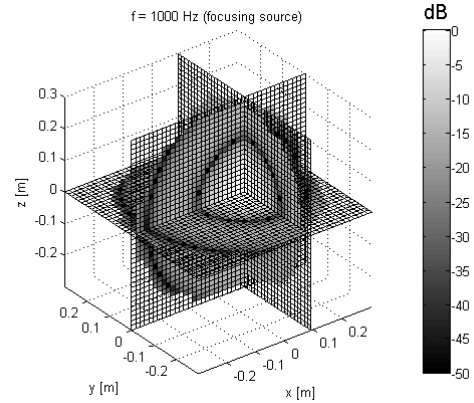


그림 7. 목표 음장 (집중점 (0.09m, 0, 0), $G(\vec{r}|\vec{r}_v) - G(\vec{r}|\vec{r}_v)^*$ 에 의해 연산)

Fig. 7. Desired sound field (focusing at (0.09m, 0, 0) calculated by $G(\vec{r}|\vec{r}_v) - G(\vec{r}|\vec{r}_v)^*$).

에 대해 원거리 영역 조건을 만족한다고 가정한다.

원점에서 x 축 방향으로 0.09 m 떨어진 위치 (0.09 m, 0, 0)에 연속적인 구 표면에서의 시간 역전 연산자로 구해진 이론적인 음장 ($G(\vec{r}|\vec{r}_v) - G(\vec{r}|\vec{r}_v)^*$)은 그림 7과 같이 나타난다.

구 표면에 음원이 연속적으로 배치된 경우를 모사함과 동시에 식 (3)의 원거리 음장 가정이 타당한지를 살피기 위해, 50개보다 많은 경우 (2030개의 음원을 배치한 경우)를 살펴보았다. 그림 8은 구 표면에 다수의 음원 (2030개, 레베데프 배치)에 의해 시간 반전 연산된 음장이다. 2030개 이상으로 구 표면을 나누어 연산한 경우 결과가 수렴하게 되므로 본 경우를 연속적인 음원의 배치로 가정할 수 있다. 그림 8이 그림 7과 같게 나타난다면, 식 (3)에서의 원거리 음장 가정이 옳음을 알 수 있다. 2030개를 배치한 경우 원 음장에 유사한 음장을 보임으로서, 설정 제어영역에서 원거리 음장 조건을 만족하는 것으로 가정한다.

그림 9는 4.1 절에서 설명한 세 종류의 스피커 배치에 의해 이산화하여 연산된 음장 ($2jk \sum_{l=1}^L G(\vec{r}_s(l)|\vec{r}_v)^* G(\vec{r}|\vec{r}_s(l)) \Delta S(\vec{r}_s(l))$)과 가상 음원에 의한 음장 ($G(\vec{r}|\vec{r}_v) - G(\vec{r}|\vec{r}_v)^*$)의 음압 크기 차이를 나타낸다. 이 그림들은 식 4에서의 근사를 각 배치 방법이 얼마나 잘 만족하는지 나타낸다.

레베데프 구가 패킹 구에 비해 목표 음장과 오차가 작음을 확인하였으며, 가우스 구의 경우, 집중점

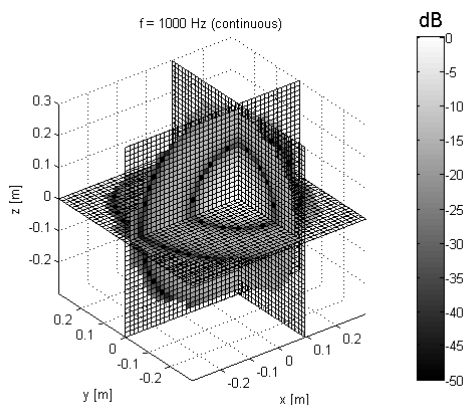


그림 8. 다수의 제어 음원에 의한 음장 (집중점 (0.09m, 0, 0), $2jk \sum_{l=1}^L G(\vec{r}_s(l)|\vec{r}_v)^* G(\vec{r}|\vec{r}_s(l)) \Delta S(\vec{r}_s(l))$ 에 의해 연산, $L=2030$, 레베데프 배치)

Fig. 8. Sound field by multiple control sources (focusing at (0.09m, 0, 0), calculated by $2jk \sum_{l=1}^L G(\vec{r}_s(l)|\vec{r}_v)^* G(\vec{r}|\vec{r}_s(l)) \Delta S(\vec{r}_s(l))$, $L=2030$, Lebedev distribution).

에 멀리 떨어진 곳에서 매우 큰 오차가 발생함을 확인할 수 있다. 평가 결과의 정량적인 비교를 위해 목표 음장과 실제 이산화된 시스템에 의한 제어 음장의 오차를 식(5)와 같이 공간 평균 정규화 오차로 정의한다.

$$error = \left(\frac{\int_V |P(\vec{r}) - P'(\vec{r})|^2 dV}{\int_V |P(\vec{r})|^2 dV} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$P(\vec{r})$ 은 가상음원에 의해 만들어진 음장

$(G(\vec{r}|\vec{r}_v) - G(\vec{r}|\vec{r}_v)^*)$, $P'(\vec{r})$ 은 제어 음원에 의한 음장 $(2jk \sum_{l=1}^L G(\vec{r}_s(l)|\vec{r}_v)^* G(\vec{r}|\vec{r}_s(l)) \Delta S(\vec{r}_s(l)))$ 과 같다. 본 오차는 목표 음장(가상음원에 의해 만들어진 음장)과 실제 음장 간의 차이를 목표 음장의 크기에 대해 정규화한 것으로, 전체 공간에서의 차이를 하나의 값으로 보기 위한 하나의 지표이다.

그림 10은 각 배치 방법에 대해 청취 영역 내에서 점 집중 위치를 변경시키며 오차를 관찰한 것이다. 좌측의 58채널 가우스 배치의 경우 다른 두 배치 방법의 결과와 다른 축척을 가짐을 유의한다.

레베데프와 패킹 배치 모두 집중 점이 중앙에서 멀어질수록 오차가 조금씩 증가하는 경향을 보이며, 같은 위치에서 레베데프 배치가 패킹 배치에 비해 적은 오차를 보인다. 레베데프 구는 팔면체 대칭(octahedral symmetry)을 만족시키며, 패킹 배치 역시 제어음원이 고르게 배치되어 있어 점 집중 위치의 방향에 큰 영향을 받지 않지만, 가우스 구의 경우 점 집중 위치에 따라 중심에서부터 같은 거리에 떨어져 있다 하더라도 다른 오차의 크기를 보인다. 그림 3을 참조할 때 제어 음원이 비교적 많이 분포된 곳에 집중 점에 가까이 위치할 때에 비해 제어 음원 사이의 간격이 먼 방향에 집중 점이 위치할 때에는 큰 오차를 보임을 확인할 수 있다. 표 1은 점 집중의 위치에 따른 오차의 최대, 최소, 표준편차를 비교한 것이다.

가우스 배치의 경우, 그림 10에서 살펴본 것처럼 최대 오차의 크기가 다른 배치 방법에 비해 매우 크

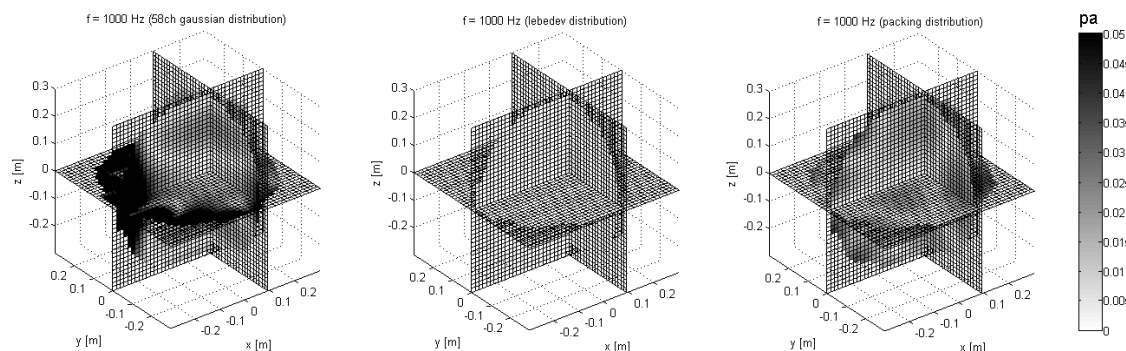


그림 9. 목표 음장 그림 7과 다수의 제어음원에 의한 음장의 음압 크기 차이 (좌측: 58채널 가우스 배치, 중앙: 50채널 레베데프 배치, 우측: 50채널 패킹 배치)

Fig. 9. Difference between the desired sound field Fig. 7 and the field by multiple control sources (left: 58 channel Gaussian distribution, center: 50 channel Lebedev distribution, right: 50 channel by packing).

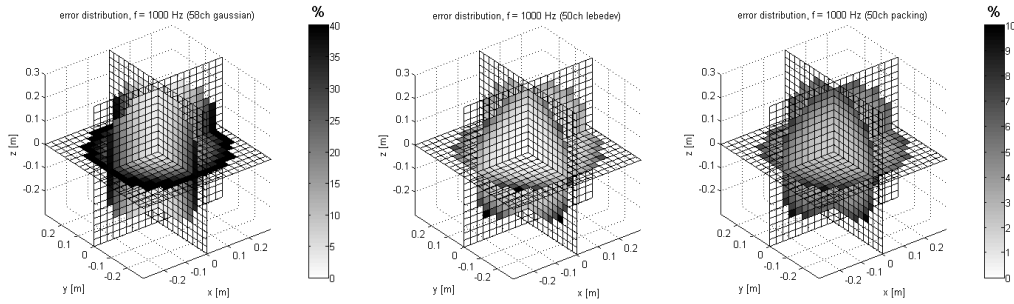


그림 10. 점 집중의 위치 변화에 따른 음장 재현 오차의 변화

(좌측: 58채널 가우스 배치, 중앙: 50채널 레베데프 배치, 우측: 50채널 패킹 배치)

Fig. 10. Error distribution due to the location of the focused point (left: 58 channel Gaussian distribution, center: 50 channel Lebedev distribution, right: 50 channel by packing)

표 1. 시간 역전 연산에 대한 음장 재현 오차 비교

Table 1. Error comparison of the time reversal solution.

배치 방법	최대 (%)	최소 (%)	평균 (%)	표준편차 (%)
가우시안 배치	68.5	0	6.0×10^{-3}	0.434
레베데프 배치	10.2	0	8.2×10^{-4}	0.065
패킹 배치	11.1	0	1.3×10^{-3}	0.091

며, 표준 편차 역시 큰 편이다. 레베데프와 패킹 배치는 대동소이하나, 패킹이 레베데프보다 오차가 조금 큰 것을 확인할 수 있다.

4.3 고차 앰비소닉

1973년 Gerzon에 [25, 26] 의해 제안된 앰비소닉에 기반하여 고차 항의 구면 조화함수까지 제어하는 방법을 사용하여 각 배치 방법을 비교하였다.

임의의 동차의 (homogeneous) 음장을 구면 조화함수의 조합으로 표현하면 식 6과 같다.

$$P(\vec{r}) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n A_{nm} j_n(kr) Y_n^m(\theta, \phi) \quad (6)$$

$\vec{r} = (r, \phi, \theta)$ 는 제어 영역 내부의 위치 (그림 6 참조), $A_{nm}(\omega)$ 는 계수, j_n 는 n차의 1종 구면 베셀 함수, Y_n^m 는 n차 구면 조화함수이다. $Y_n^m(\theta, \phi)$ 는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$Y_n^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi} \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} P_n^m(\cos\theta) e^{jm\phi} \quad (7)$$

P_n^m 은 부 르장드르함수 (associated Legendre function) 이다. 각 제어 음원에 의한 음장은 식 (8)과 같이 그린 함수의 구면 조화 함수의 조합으로 나타난다.

$$G(\vec{r}|\vec{r}_s^{(l)}) = jk \sum_{n=0}^{\infty} j_n(kr) h_n(kr_s^{(l)}) \sum_{m=-n}^n Y_n^m(\theta, \phi) Y_n^m(\theta_s^{(l)}, \phi_s^{(l)})^* = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n B_{nm}^{(l)} j_n(kr) Y_n^m(\theta, \phi) \quad (8)$$

h_n 은 n차의 1종 구면 한켈 함수이며, $B_{nm} = jk h_n(kr_s^{(l)}) Y_n^m(\theta_s^{(l)}, \phi_s^{(l)})^*$ 로 정의한다. 각 제어음원들에 의해 식 (6)으로 표현된 음장을 제어하게 될 경우, 식 (9)와 같은 관계를 가진다.

$$P(\vec{r}) = \sum_{l=1}^L G(\vec{r}|\vec{r}_s^{(l)}) q(\vec{r}_s^{(l)}) \quad (9)$$

$q(\vec{r}_s^{(l)})$ 은 l번째 스피커의 입력해이다. 이 때, A_{nm} 과 B_{nm} 의 계수의 매칭을 통해 입력해를 계산하게 된다. 사용할 수 있는 제어 음원의 개수가 한정되어 있을 때, 제어 음원의 개수 L과 최대 제어 가능 차수 N과의 관계는 식 (10)과 같다.

$$L \geq (N+1)^2 \tag{10}$$

본 관계에 의해, 재현 음장은 식 (6)의 최대 차수를 N 으로 한정지음으로서 결정된다(식 (11)).

$$P(\vec{r}) \approx \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n A_{mn} j_n(kr) Y_n^m(\theta, \phi) \tag{11}$$

최대 제어 차수를 한정함에 따라 재현하고자 하는 원 음장과 차가 생기게 된다. 고차 항의 모드들은 주로 중앙에서 먼 곳의 음장에 기여를 하게 되며, 이에 따라 최대 제어 차수가 증가할수록 제어 가능 영역이 넓어지게 된다. 제어 가능 영역(반지름 r)과

제어 가능 차수 N 의 관계는 $kr \leq N$ 과 같이 알려져 있다^[20]. 관련된 내용을 4.1에 언급하였다.

모의실험에서는 구 외부에서 입사하는 1kHz의 구면파(예를 들면, 그림 11)를, 50개(가우시안 구의 경우 58개)의 스피커를 이용해서 최대 6차의 구면 조화 함수까지 제어하여 재현, 식 (5)와 같이 정의한 오차를 이용해 비교하였다.

제어 영역 외부에서 입사한 구면파의 방향에 따른 음장 재현 오차는 그림 12와 같이 나타난다. 흰색 원은 제어 영역에 투사된 제어 음원들의 위치이다. 레베데프 구와 패킹 구의 경우 전 방향에서 고른 오차를 보여주지만, 가우스 구의 경우 역시 제어 음원 사이의 간격이 넓은 부분 곳에서 입사하는 구면파를 만들 때 성능이 저하됨을 확인할 수 있다. 표 2는 평면파의 입사 방향에 대한 오차의 최대, 최소, 표준편차를 나타낸 것이다.

가우스 배치의 경우가 최대, 평균 오차가 크며, 최소 오차는 레베데프 배치와 비슷한 수준이다. 표준편차가 다른 두 배치 방법에 비해 매우 크다. 레베데프 배치는 패킹에 비해 최대 오차는 작으나 최소 오차는 크다. 표준편차와 평균 오차는 거의 같다.

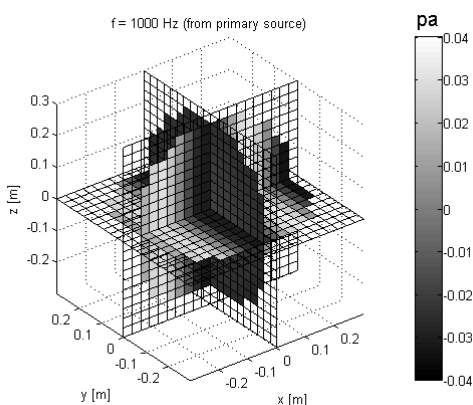


그림 11. 목표 음장 ((2.5 m, 0, 0)에 위치한 단극음원에서 입사하는 1 kHz의 구면파)
Fig. 11. Desired sound field (Spherical wave by monopole source located at (2.5 m, 0, 0)).

V. 고 찰

모의실험 수행 결과 음원의 배치 방법에 따라 제어 영역 내에 재현 오차가 크게 나타나는 영역이 발생함을 확인할 수 있다. 즉, 무한히 배치된 구 표면상

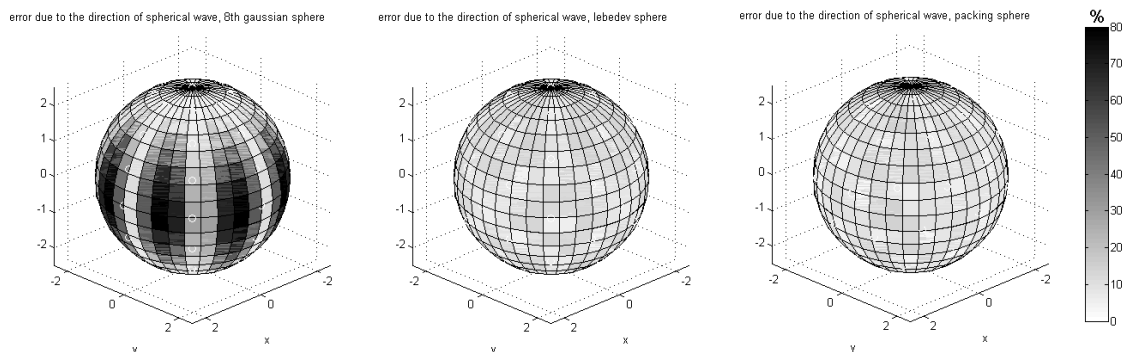


그림 12. 구면파의 입사 방향에 따른 음장 재현 오차의 변화 (좌측: 58채널 가우스 배치, 중앙: 50채널 레베데프 배치, 우측: 50채널 패킹 배치)
Fig. 12. Error distribution due to the direction of incident spherical wave (left: 58 channel Gaussian distribution, center: 50 channel Lebedev distribution, right: 50 channel by packing).

표 2. 고차 앰비소닉에 대한 각 배치 방법의 음장 재현 오차 비교
Table 2. Error comparison of the higher-order ambisonics.

배치 방법	최대 (%)	최소 (%)	평균 (%)	표준편차 (%)
가우시안 배치	79.0	4.3	23.3	22.1
레베데프 배치	13.8	4.9	9.4	2.7
패킹 배치	14.7	1.9	9.2	2.6

의 제어 음원을 모사한 음원 배치 방법에 따라 제어 가능 영역의 크기 역시 다르게 정의된다는 것이다.

고차 앰비소닉스에 의한 음장 재현의 경우, 구면 조화함수의 특징에 따라 제어 가능 영역이 구의 중심에서부터 일정한 반지름을 갖는 구 형태의 영역으로 확장되거나 시간 반전 연산자 등 구면 조화함수로 제어하지 않은 경우에는 제어 가능 영역이 같은 형태로 표현되지 않음을 그림 9를 통해 예상할 수 있다. 특히, 가우스 구와 같이 음원의 분포가 고르지 않은 경우, 가상 음원의 위치나 방향 역시 음장 제어 성능에 큰 영향을 미치게 된다.

본 모의실험은 음원의 개수, 음장 제어 방법, 주파수를 한정된 경우에 비교하였기 때문에 추가적인 배치에 대한 고찰이 필요하다. 특히 음원의 개수는 제어 영역의 크기와 주파수에 큰 영향을 미치게 된다. 많은 음원을 사용할수록 더욱 짧은 파장을 갖는 고주파수의 음파를 제어할 수 있으며, 더욱 넓은 가청 영역을 가지게 된다. 한정된 개수의 음원을 사용하는 실제의 경우, 음원의 배치 방법이 원하는 청취 영역에서의 음장 제어 성능에 영향을 줌을 예상할 수 있다.

VI. 결 론

음장 제어를 위한 구형 스피커 시스템을 구성하기 위해 구 표면을 이산화하는 다양한 방법-가우스 배치, 레베데프 배치, 패킹 방법-을 고찰한 후, 시간반전 연산자를 이용한 점 집중 해의 결과로 각 경우를 시간 반전 연산자를 이용한 점 집중, 고차 앰비소닉을 이용한 구면 파 재현의 한정된 경우들에 대해 비교하였다.

제어 음원의 배치 방법에 따라 제어 가능한 영역의 차이가 있음을 확인하였으며, 음원이 고르게 배치되지 않은 경우 음원의 입사 방향이나 집중 점의

위치에 따라 음장 제어 성능이 큰 차이를 보임을 확인하였다. 즉, 음원의 배치 방법에 따라 음장 제어 성능이 다르게 나타남을 예상할 수 있다.

한정된 경우에 대하여 레베데프 배치가 타 배치에 비하여 논문에서 정의한 공간 평균 정규화 오차가 적다는 것을 확인하였으며, 이후 음원의 개수, 주파수, 제어 방법 변화에 따른 결과의 변화를 확인하는 과정이 필요할 것이다.

감사의 글

본 논문은 2011년도 정부 (지식경제부)의 재원으로 산업원천기반구축사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 10037244).

참고문헌

1. Y.-H. Kim, "Sound visualization and manipulation: theories and applications," in *Proc. InterNoise 2011*, plenary lecture 2, Sep. pp. 4-7, 2011.
2. Y.-H. Kim, *Sound Propagation: An Impedance Based Approach*, John Wiley & Sons, 2010.
3. F. M. Fazi, P. A. Nelson, J. E. Christensen and J. Seo, "Surround system based on three dimensional sound field reconstruction," in *Proc. 102nd Convention of the Audio Engineering Society*, preprint 4456, 1997.
4. F. M. Fazi and P. A. Nelson, "Application of functional analysis to the sound field reconstruction," in *Proc. the Institute of Acoustics, 23rd Conference on Reproduced Sound*, 2007.
5. J. Seo, J. -H. Yoo, K. Kang and F. M. Fazi, "21-channel surround system based on physical reconstruction of a three dimensional target sound field," in *Proc. 128th Convention of the Audio Engineering Society*, preprint 7973, 2010.
6. J. S. Bamford and J. Vanderkooy, "Ambisonic sound for us," in *Proc. 99th Convention of the Audio Engineering Society*, preprint 4138, 1995.

7. J. Daniel, J. B. Rault, and J. D. Polack, "Ambisonics Encoding of Other Audio Formats for Multiple Listening Conditions," in *Proc. 105th Convention of the Audio Engineering Society*, preprint 4795, 1998.
8. N. Epain, P. Guilon, A. Kan, R. Kosobrodov, D. Sun, C. Jin and A. van Schaik, "Objective evaluation of a three dimensional sound field reproduction system," in *Proc. 20th International Congress on Acoustics*, 2010.
9. *MERO Spaceframe system*, (n.d.), Retrieved September 9, 2009, from Website: <http://www.mero.com.my>
10. 이태웅, 장지호, 이정민, 강동수, 김양한, "음장 제어 실험을 위한 32채널 스피커 시스템 구성," *한국소음진동 공학회 2009년 추계학술대회논문집*, pp. 868-869.
11. J.-W. Choi and Y.-H. Kim, "Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 111, no. 4, pp. 1695-1700, 2002.
12. 장지호, 송민호, 박진영, 김양한, "32채널 스피커 시스템을 이용한 소리 공 형성," *한국소음진동 공학회 2009년 추계학술대회논문집*, 866-867쪽.
13. Y.-H. Kim, M.-H. Song, J.-H. Chang, J.-Y. Park, "Generation of Sound ball: Its theory and implementation," *Principles and Applications of Spatial Hearing*, World Scientific, 2011. 03, pp. 393-406.
14. KAIST Acoustics & Vibration Laboratory "Soundball Project" (<http://soundmasters.kaist.ac.kr/research/soundball/mainpage.htm>)
15. J.-M. Lee, "In-situ calibration of a multichannel loudspeaker system by modeling transfer functions," Master Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2011, pp. 49-55.
16. S. L. Sobolev, "On mechanical quadrature formulae on the surface of a sphere," *Sibirskii matem. Zh.*, 3, no. 5, pp. 486-496, 1962.
17. V. I. Lebedev, "Quadratures on a sphere," *Zh. Vychisl. Mat. Mat. Fiz.* vol. 16, no. 2, pp. 293-306, 1976.
18. N. J. A. Sloane, R. H. Hardin, and W. D. Smith et al., *Tables of spherical codes*. [Online]. Available: www.research.att.com/~njas/packings/
19. M. Fink, "Time Reversal of Ultrasonic Fields-Part I: Basic Principles," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric and Frequency Control* vol. 39, no. 5, pp. 555-566, 1992.
20. D. B. Ward and T. D. Abhayapala, "Reproduction of a Plane-Wave Sound Field Using an Array of Loudspeakers," *IEEE Transactions on speech and audio processing*, vol. 9, no. 6, pp. 697-707, 2001.
21. J.-W. Choi, "Spatial Manipulation and Implementation of Sound," Ph.D. thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2005, pp. 32-33.
22. R. P. Porter, "Diffraction-limited, scalar image formation with holograms of arbitrary shape," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 60, pp. 1051-1059, 1970.
23. A. J. Devaney, R. P. Porter, "Holography and the inverse source problem part II: Inhomogeneous media," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 2, no. 11, pp. 2006-2011, Nov 1985.
24. J.-W. Choi, "Integral approach for the reproduction of a virtual sound source surrounded by loudspeaker arrays," *IEEE Trans. Audio Speech Proc.* submitted, 2011.
25. M. A. Gerzon, "Periphony: with-height sound reproduction," *J. Audio Eng. Soc.* vol. 21, no. 1, pp. 2-10, 1973.
26. M. A. Gerzon, "Ambisonics in multichannel broadcasting and video," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 20, pp. 859-871, 1985.
27. 강동수, 이정민, 최정우, 김양한, 장세진, 이석필, "음장 제어를 위한 구형 다채널 스피커 시스템 설계 및 성능 비교," *한국음향학회 2011년도 추계학술발표대회 논문집*, 39-48쪽.

저자 약력

▶ 강 동 수 (Dong-Soo Kang)

2009년: 한국과학기술원 기계공학과 (학사)
 2011년: 한국과학기술원 기계공학과 (석사)
 2011년 ~ 현재: 한국과학기술원 기계공학과 박사과정
 ※ 주관심 분야: 3차원 음장 제어, 음장 재현, 오디오 신호처리

▶ 최 정 우 (Jung-Woo Choi)

1999년: 한국과학기술원 기계공학과 (학사)
 2001년: 한국과학기술원 기계공학과 (석사)
 2005년 8월: 한국과학기술원 기계공학과 (박사)
 2005년 9월 ~ 2006년 8월: 박사 후 연구원, 소음 및 진동제어 연구센터 (NOVIC), 한국과학기술원
 2006년 9월 ~ 2007년 8월: 방문연구원, Institute of Sound and Vibration Research (ISVR), University of Southampton, UK
 2007년 9월 ~ 2010년 12월: 삼성전자 종합기술원 (SAIT) 전문 연구원
 2011년 1월 ~ 2011년 8월: 삼성전자 DMC 연구센터 음향기술 랩 책임 연구원
 2011년 9월 ~ 현재: 한국과학기술원 기계공학과 연구 부교수 <관심분야> 오디오 신호처리, 스피커 어레이를 이용한 음장 제어

▶ 이 정 민 (Jung-Min Lee)

2009년: 한양대학교 기계공학부 (학사)
 2011년: 한국과학기술원 기계공학과 (석사)
 2011년 ~ 현재: 한국과학기술원 기계공학과 박사과정 <관심분야> 3차원 음장 제어, 음장 재현, 디지털 신호 처리

▶ 김 양 한 (Yang-Hann Kim)

1977년: 서울대학교 조선공학과 (학사)

1985년: Massachusetts Institute of Technology Mechanical Engineering (O.E. Program) (박사)
 1985년 3월 ~ 1989년 1월: 한국과학기술대학 메카트로닉스 전공 조교수, 부교수
 1989년 2월 ~ 현재: 한국과학기술원 기계공학과 부교수, 교수
 1989년 11월 ~ 1990년 8월: 한국과학기술원 학생처장, 생활 상담 소장
 2003년 9월 ~ 2005년 8월: 한국과학기술원T 기계공학과 학과장
 2004년 2월 ~ 2006년 2월: BK21 기계 사업 단장 (대통령상 수상)
 2005년 9월 ~ 2009년 12월: 한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터 (NOVIC) 센터장
 2006년 8월 ~ 2006년 11월: 한국과학기술원 교육혁신본부장
 Editorial board, Journal of Sound and Vibration
 Editor, Mechanical Systems and Signal Processing
 Advisory board, Journal of Noise Control Engineering
 Board of directors, I-INCE (International Institute of Noise Control Engineers)
 Plenary lecture (ICA, International Congress on Acoustics, 2004, Inter-Noise, 2011)
 Keynote lecture (ICSV, International Congress on Sound and Vibration, 2008)
 저서: 음향학 강의 (청문각, 2006), Sound Propagation: an impedance based approach (John Wiley and Sons, 2010)
 <관심분야> 오디오 신호 처리, 음장 가시화, 다채널 신호 분석 및 제어