

경계의 음압 제어를 통한 음장 재현 방법론 제안 Sound Field Reproduction by Manipulating Sound Pressure on Boundary

장지호† · 김양한*
Ji-ho Jang, Yang-Hann Kim

Key Words: Sound Field Reproduction(음장 재현)

ABSTRACT

If sound pressure values on boundary are available, then we can predict the sound field in it. Similarly, we can reproduce sound field by manipulating sound pressure values on boundary. In this paper, a noble method of sound reproduction using this concept is introduced and evaluated for the case in which sound field is 2-D half-infinite plane by computer simulation.

1. 서론

스테레오, 서라운드, 5.1채널 등 오디오 기술의 발달에 따라 더 향상된 입체 음향에 대한 요구 역시 함께 높아지고 있다. 여기서 입체 음향이란, 음향의 공간적인 특성까지 고려하여 마치 현장에 있는 것과 동일한 효과를 주는 음향을 말한다. 이러한 입체 음향을 구현하는 방법은 크게 두 가지로 나누어 생각해볼 수 있는데, 하나는 청취자의 양쪽 귀에 적용되는 신호를 직접 제어하는 바이너럴 사운드에 대한 연구로써 주로 HRTF(Head Related Transfer Function: 머리 관련 전달 함수)와 관련되어 있고, 다른 하나는 다수의 스피커를 이용하여 청취자를 포함한 음장 자체를 제어하는 것이다.

후자에 대한 연구로는 대표적으로 WFS(Wave Field Synthesis)^[1]와 Ambisonic^[2]을 들 수 있다. WFS는 레일리 적분(Rayleigh integral)을 근사(approximation)하여 음장을 모사하는 방법이고 Ambisonic은 재생하고자 하는 음장을 모드 전개하여 그 계수에 일치하는 조합을 찾는 방식이다. 그밖에 Nelson 등^[3]은 음장에서의 RMS(root mean square) 오차를 최소화하여 음장을 제어하는 방법을 연구하였고 최정우^{[4]-[6]}는 파수 영역에서의 음향 에너지 포커싱(wave domain focusing)을 통해 평면파를 제어하는 방법을 연구하였다.

본 연구 역시 후자에 속하는 것으로써 다수의 스피커를 이용하여 음장 경계의 음압값들을 제어

함으로써 음장을 재현하는 것을 목표로 한다. 즉 재현하려고 하는 대상이 되는 공간(예를 들면 콘서트홀)에서, 임의의 음장을 설정하고 그 경계에서의 음압값들을 일정 시간동안 저장한 후, 그 음압값들을 재현시키려는 다른 공간(예를 들면 무향실이나 주거공간)에서 다수의 2차 음원, 즉 스피커를 통해 앞서 저장한 경계의 음압값들을 재현시킴으로써 음장 전체가 재현되도록 하는 것이다. 이런 의미에서 본 연구에서 제안하는 방법을 음장 복사(sound field copy)라고 말할 수 있다. 이 경우 이론적으로 음장 전체를 완벽히 재현하게 되므로, WFS나 Ambisonic와 달리 특별한 별도의 노력 없이 음파의 파면이나 방향, 잔향까지 재현할 수 있고, 2차 음원으로 쓰이는 스피커를 단극 음원 또는 평면파 음원으로 가정하지 않고도 적용할 수 있다. 또한 경계값만을 제어하므로 음장 전체를 제어하는 것보다 제어 노력을 줄일 수 있다.

2. 이론적 배경

2.1 경계의 음압과 내부 음장

3 차원에서 음원이 음장 내에 존재하지 않을 때 K-H 적분식(integral)은 다음과 같이 나타난다.

$$p(\vec{r}) = \int_S \left[p(\vec{r}_0) \frac{\partial G(\vec{r}|\vec{r}_0)}{\partial \vec{n}} - \frac{\partial p(\vec{r}_0)}{\partial \vec{n}} G(\vec{r}|\vec{r}_0) \right] dS_0 \quad (1)$$

여기서 p 는 음압, G 는 그린함수(Green's function)를 의미하고 \vec{n} 은 경계에서 바깥쪽을 향하는 단위 법선 벡터이다. 그린 함수는 다음 식을 만족하는 어떠한 함수라도 될 수 있다.

† 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : vacuum0@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8220

* 한국 과학기술원 기계공학과

$$\nabla^2 G(\vec{r}|\vec{r}_0) + k^2 G(\vec{r}|\vec{r}_0) = -\delta(\vec{r} - \vec{r}_0) \quad (2)$$

디리클레트 경계 조건(Dirichlet Boundary Condition)을 만족시키는 그린함수를 G_D 라고 하면 정의에 의해 경계에서의 G_D 는 0 이므로, 식 (1)에서 그린함수로서 G_D 를 사용하면,

$$p(\vec{r}) = \int_S \left[p(\vec{r}_0) \frac{\partial G_D(\vec{r}|\vec{r}_0)}{\partial \vec{n}} \right] dS_0 \quad (3)$$

로 정리된다. 따라서 경계에서의 음압값을 측정하고 G_D 를 구하면 음압 분포를 알 수 있고 이것이 음향 홀로그래피의 기본 원리이다.

이러한 사실을 음장 재현의 입장에서 살펴본다면, 재현하고자 하는 음장의 경계 음압값들을 모두 측정하여, 다른 공간에서 스피커를 이용하여 그대로 만들어냄으로써 내부 음장은 그에 따라 저절로 재현시킬 수 있을 것이라는 사실을 유추할 수 있다. G_D 는 주어진 \vec{r} 과 \vec{r}_0 에 대해 항상 유일하며 (3)식에서 알 수 있듯이 음장은 G_D 와 경계의 음압값만으로 결정되기 때문이다.

음향 홀로그래피의 입장에서는 G_D 를 구해내는 것이 쉽지 않기 때문에 반무한구를 경계로 갖는 음장이 아니면 이러한 방법으로 음장 분포를 구하기 어렵다. 그러나, 음장 재현의 입장에서는 G_D 를 굳이 구할 필요가 없다. 따라서 경계의 음압값만을 제어함으로써 내부 음장을 재현할 수 있다.

2.2 경계 음압의 제어

실제 음장에서 측정한 경계 음압값들을 다른 공간에서 스피커를 이용하여 만들어내는 것은 대표적인 역문제에 해당한다.

실제 음장에서 센서로 측정한 경계 음압값들을 $\vec{p}_0 = [p_0(\vec{r}_1) p_0(\vec{r}_2) \dots p_0(\vec{r}_n)]^T$, 스피커의 입력신호를 $\vec{q} = [q(\vec{r}'_1) q(\vec{r}'_2) \dots q(\vec{r}'_m)]^T$ 라고 하면,

$$\vec{p}_0 = T \cdot \vec{q} \quad (4)$$

의 관계를 갖는다. 여기서 T 는 $(n \times m)$ 행렬로서

전기-음향 전달함수(electro-acoustic transfer function)이다. 최종적으로 \vec{q} 값을 구하기 위해서는 (4)식의 역문제를 풀어야 한다.

이러한 역문제를 풀기 위해서, 일반적으로는 스피커의 개수와 센서의 개수에 따라 최적화 문제를 포함하게 될 수도 있고, 음장을 재현하려고 하는 공간의 특성을 제거하는 역필터링 과정을 포함하게 될 수도 있다. 본 연구에서는 이러한 일반적인 경우의 실현을 위한 시작 단계로서 음장을 재현하려고 하는 공간이 반사파가 없는 경우이고, 스피커의 개수와 센서의 개수가 같아서 T 가 정방행렬(square matrix)인 경우를 다루기로 한다.

(1) 1차원 문제

1차원부터 3차원까지 본 문제에 단계적으로 접근해 보도록 하자. 먼저 1차원의 경우는, 덕트 내의 음장을 재현하는 예를 들 수 있다. 그림 1과 같이 음장이 $0 < x$ 인 반무한 공간일 때와, 그림 2와 같이 음장이 $0 < x < l$ 인 유한 공간일 때로 나누어 생각할 수 있다.

전자의 경우에는 실제의 음원이 한쪽 방향에만 존재할 수 있고 경계는 사실상 $x=0$ 인 한 점뿐이므로 센서와 스피커가 각각 하나씩 필요하다. 따라서 (4)식의 차원은 1이 되고 q 는 $p_0(x=0)/T$ 로 구해지게 된다. 후자의 경우에는 센서와 스피커가 각각 두 개씩으로써 T 는 (2×2) 행렬이 된다. 따라서 T 의 역행렬을 계산함으로써 q 를 쉽게 구할 수 있다.

(2) 2,3차원 문제

2차원의 경우에는 그림 3과 같이 관심음장이 반무한원인 경우와 그림 4와 같이 유한한 임의의 평면일 때로 나누어 볼 수 있다. 전자의 경우 무

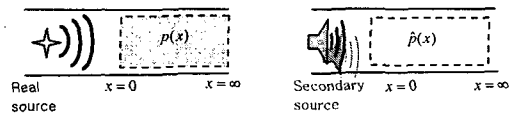


그림 1. 음장이 1차원 반무한 공간일 때

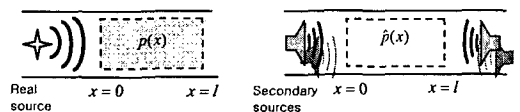


그림 2. 음장이 1차원 유한공간일 때

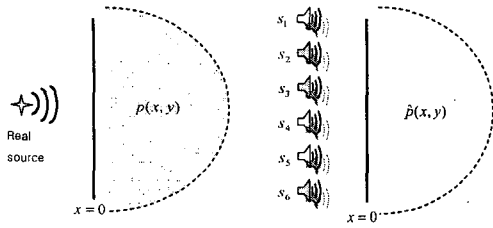


그림 3. 음장이 2차원 반무한 공간일 때

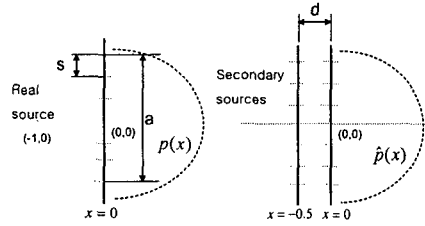


그림 5. 2차원 반무한 공간의 재현

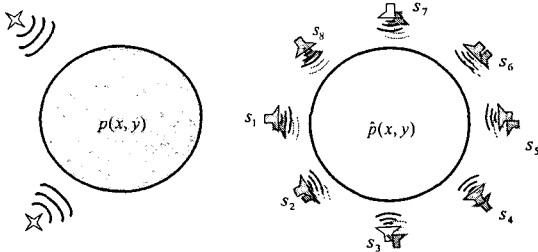


그림 4. 음장이 2차원 유한 공간일 때

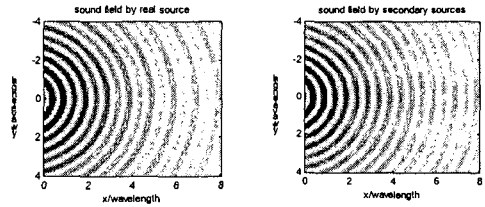


그림 6. 2차원 반무한 공간의 재현 결과
(좌: 원래 음장, 우: 재현된 음장)

한원에 해당하는 경계는 고려하지 않아도 되므로 선에 해당하는 경계만 고려한다. 두 경우에 모두 센서와 스피커의 개수만큼의 크기를 갖는 전달행렬 T 를 갖게 되고 T 의 역행렬을 구하게 된다. 따라서 이 경우 상황에 따라서 T 가 특이행렬에 가까워지면 문제가 될 수 있다.

3차원의 경우에도 관심음장이 반무한구인 경우와 유한한 임의의 공간일 때로 나누어 볼 수 있다. 전달 행렬에 대해서는 2차원의 경우와 같이 생각해 볼 수 있다.

3. 전산 모의 실험

위에서 제안된 방법을 평가하기 위해 전산 모의 실험을 수행하였다. 연구의 시작단계로서 가능성을 알아보는 목적으로 음장이 2차원 반무한 공간일 때의 문제를 다루어 보자. 2차원 문제는 한쪽 방향으로는 변화가 없는 음장을 가정하므로 실험 재료는 비현실적이지만 제안된 방법의 성능과 파라미터에 대한 정보를 얻을 수 있다는 점에서 의미가 있다.

편의상 실제 음원과 2차 음원(스피커)을 모두 2차원 단극 음원으로 가정하였다. 그러나 실제로 이 방법을 구현할 때는, 실제 음원이 단극 음원이 아닌 어떤 임의의 음원이어도 상관없이 2차 음원 역시 어떤 음원이어도 상관없다.

3.1 실험 설계

그림 5와 같이 $(-1,0)$ 에 위치한 실제 음원에

의해 형성되는 음장을 $x=0$ 인 선 위에서 측정하고, 이 값들을 $x=-0.5$ 인 선 위에 위치한 2차 음원에 의해 재현시켰다. 그리고 총 측정 길이는 8로 하였고 측정간격은 1/3로 하였는데, 여기서는 센서와 스피커의 간격도 일치시켰다. 따라서 사용된 센서와 스피커의 개수는 각각 25개가 된다. 여기서 모든 수치는 파장에 대해 정규화된 값들이다.

이와 같은 설정을 기본으로 하고, 센서의 간격, 구경 (aperture) 크기, 스피커와 재현 음장의 거리를 변화시키면서 음장 재현이 얼마나 잘 되는지를 알아보고 그 결과는 표 1과 같다. 음장의 재현이 효과적으로 되었는지를 평가하기 위한 기준은 원래 음장에 대한 재현된 음장의 평균 오차 비율로 정하였다. 예를 들어 그림 6에서 원래 음장에서 음장 내의 한 지점의 평균 음압 크기는 0.0361 이고 원래 음장과 재현된 음장의 평균 오차 크기는 5.30×10^{-5} 으로써 평균 오차 비율은 0.15% 가 된다.

3.2 실험 결과 및 고찰

(1) 센서 간격

센서 간격은 공간상의 엘리어싱과 관련되어 있는 중요한 인자이다. 표 1에서 알 수 있듯, 간격이 파장과 같을 때 오차는 67.74% 로 매우 크고 공간상의 엘리어싱이 일어났음을 알 수 있다. 그리고 간격이 $1/2, 1/3, 1/4$ 로 줄어들수록 오차가 적어지는데, 간격이 줄어들수록 이론적인 음장 재현에 가까워지기 때문이다. 단, 간격이 줄어들

센서 간격(s)	1	1/2	1/3	1/4
평균오차	67.74%	9.47%	0.15%	0.077%
구경 크기(a)	2	4	6	8
평균오차	7.94%	1.79%	0.45%	0.15%
스피커와 재현 음장의 거리(d)	2	1	0.5	0.1
평균오차	0.36%	0.00%	0.15%	13.41%

표 1. 각 파라미터에 따른 오차

때, 필요한 센서와 스피커의 수가 늘어나서 실제에 적용하기에는 더 어려워진다는 단점이 있다.

(2) 구경 크기

표 1에서 구경의 크기가 클수록 오차가 적어짐을 알 수 있다. 구경의 크기는 이론적으로 무한대가 되어야 하지만 실제로는 한정되므로, 구경의 바깥에 존재하는 음압값이 상대적으로 아주 작을 때까지 구경을 넓혀야 한다. 그러나 이 경우에도 구경 크기가 커지면 그만큼 필요한 센서와 스피커의 수가 증가한다는 단점이 있다.

(3) 스피커와 재현 음장의 거리

스피커와 재현 음장의 거리는 1일 때, 즉 스피커가 실제 음원과 같은 거리에 있을 때 오차가 가장 적고, 그 값에서 멀어질수록 오차가 커진다. 거리가 1일 때 오차가 가장 적은 것은, 실제 음원과 스피커를 모두 단극 음원으로 모델링하여 나타난 결과이다. 실제로는 실제 음원과 스피커의 특성이 서로 다를 것이므로 최적의 거리는 그에 따라 달라지게 될 것이다. 거리가 작아지면, 재현된 경계의 음압값이, 센서 사이의 측정하지 않은 지점에서 실제와 점점 더 큰 차이를 나타내게 되므로 오차가 커진다. 반면 거리가 커지면 이러한 오차는 적은 대신 스피커의 입력신호가 커지게 되어 효율적이지 않게 된다.

(4) 오차와 재현된 음장의 성능

음장의 재현이 잘 되었는지 아닌지 성능을 판단하는 기준은 결국 인간의 청감이 되어야 할 것이다. 오차가 적을수록 실제 음장과 가까우므로 청취자 역시 재현이 잘 되었다고 느낄 것이지만, 어느 정도 오차 아래에서는 청취자가 잘 구별하지 못할 수도 있다. 이러한 오차 한도 내까지의 제어 노력은 의미가 없으므로 청감 시험을 통해 오차 한도를 정할 필요가 있다.

4. 결론

경계값을 이용한 음장 재현 방법을 제안하였고, 음장이 2차원 반무한 평면인 경우에 대해 전산 모사 실험을 통해 제안된 방법을 평가하여 보았다. 실험 결과 센서 간격, 구경 크기, 스피커와 재현 음장의 거리가 음장 재현 성능을 결정하는 인자가 됨을 알 수 있었고, 이 인자들을 적절히 설정할 때 1% 내의 오차를 갖는 음장을 재현할 수 있었다.

향후에는 본 방법을 2차원 유한 평면과 3차원에 대해 적용해 보아야 할 것이고, 적절한 근사화를 통해 필요한 센서와 스피커의 숫자를 줄임으로써 실제에 적용이 가능하도록 연구를 진행해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실(NRL) 사업과 교육인적자원부의 BK21 사업에 의해 지원되었으며 지원에 깊이 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) A. J. Berkhout and D. de Vries, and P. Vogel, "Acoustic control by wave field synthesis," J. Acoust. Soc. Am., Vol.93(5), pp.2764-2778, 1993.
- (2) M. A. Gerzon, "Ambisonics in Multichannel Broadcasting and Video," J. Audio Eng. Soc., Vol. 33, No. 11, 1985.
- (3) P. A. Nelson, "Active Control of acoustic fields and the reproduction of sound," J. Sound. Vib., Vol.177(4), pp.447-477, 1994.
- (4) 최정우, "소리의 공간 제어 방법론," 한국과학기술원 박사학위 논문, 2005.
- (5) J.-W. Choi and Y.-H. Kim, "Generation of an acoustically bright zone within an illuminated region using multiple sources," J. Acoust. Soc. Am., Vol.111(4), pp.1695-1700, April 2002.
- (6) J.-W. Choi and Y.-H. Kim, "Manipulation of sound intensity within a selected region using multiple sources," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 116(2), pp.843-852, August 2004.