

반사면이 존재하는 환경에서 빔포밍 방법을 이용한 부분 음장 재구성 Partial Field Decompositon Using Beamforming Method Under Reflective Condition

선종천* · 강연준**

Key Words : MUSIC(다중신호분리), Beamforming(빔형성), Adaptive nulling algorithm, Reflective condition(반사환경)

ABSTRACT

A beamforming method is a kind of spatial filter that focus the array's signal capturing abilities in a desired direction. In this paper, we detect the location of a source under reflective condition using the multi-dimensional MUSIC algorithm. then, we can find the image source locations from the experimental geometry, and we reconstruct the partial fields for direct wave and reflected wave by using Adaptive nulling algorithm. Numerical simulations are performed to verify its performance under various conditions.

1. 서 론

일반적으로 소음원을 찾기 위해 근접 홀로그래피(nearfield acoustics holography) 방법이나 빔포밍(beamforming) 방법 등이 많이 사용된다. 그러나 이러한 대부분의 방법들은 실험 환경이나 음원들의 특성에 따라 그 성능이 크게 차이가 나거나 부정확한 경우가 많다. 특히 음원들이 서로 상관성(correlation)이 큰 환경에서는 MUSIC 알고리즘 같은 빔포밍 방법은 많은 오차가 존재할 수밖에 없다.

여기서는 반사파가 존재하는 환경하에서 다차원 뮤직 방법(Multidimensional MUSIC)을 이용하여 음원의 위치를 찾고 어댑티브 널링 알고리즘(Adaptive nulling algorithm)으로 입사파와 반사파 음장을 각각 분리하여 보았다.

먼저, 다차원 뮤직 방법을 사용하여 음원의 위치를 정확히 찾아낸 다음, 실험 장치의 기하학적인 관계로부터 가상의 음원(image source)을 결정한다. 이러한 결과를 이용하여 어댑티브 널링 알고리즘으로부터 반사파와 입사파의 부분 음장을 재구성한다. 이렇게 재구성된 입사파와 반사파의 각 음장을 가시화 하여 각 음장의 영향을 살펴보았다.

실제의 잔향 환경과 비슷하도록 2개의 반사면이 존재할때에 시뮬레이션을 통하여 음장을 분리하여 보았다.

특히 반사파가 존재하는 환경하에서는 입사파에 못지 않게 반사파만의 영향을 따로 살펴 보는 것은 실내 음향과 같은 환경을 연구하는 분야에서 매우 유의할 것으로 사료된다.

2. 이 론

2.1 다차원(Multidimensional) MUSIC 방법

M 개의 어레이 마이크로폰에 D개의 음원으로부터 신호가 들어오고 있다면, 어레이 마이크로폰에서의 신호들은 다음과 같은 입사파들의 선형 조합으로 표현할수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t) &= \sum_{i=0}^{D-1} \mathbf{g}(\theta_i) s_i(t) + \mathbf{n}(t) \\ &= \mathbf{A} \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{g}(\theta_i)$ 는 i 번째 음원과 각 마이크로폰에 대한 전달함수이고, $s_i(t)$ 는 입사 신호, $\mathbf{n}(t)$ 는 가우시안 노이즈 벡터(Gaussian noise vector)이다.

그러면 약간의 연산을 통하여 다음과 같음을 쉽게 유도할 수 있다.

$$\mathbf{A}^H \mathbf{R}_{\mathbf{u}} \mathbf{A} \mathbf{a}_i = 0 \quad (2)$$

\mathbf{a}_i 는 기준 마이크로폰들 사이의 상호 상관 함수에서의 i 번째 노이즈에 해당하는 고유벡터이다.

만약 모든 음원들이 비상관관계에 있다면 \mathbf{A} 가 플랭크 조

* 서울대학교 대학원

E-mail : sun@acustica.snu.ac.kr

Tel : (02) 880-1692, Fax : (02) 888-5360

** 서울대학교 기계 항공 공학부

건을 만족하고 R_n 는 nonsingular하므로 위의 식은 아래의 식이 됨을 의미한다.

$$A^H a_i = 0 \quad (3)$$

즉, M-D개의 노이즈에 해당하는 고유벡터들과 D개의 음원에 해당하는 그린함수들이 서로 직교함을 의미한다. 다음과 같이 노이즈 고유벡터로 이루어진 행렬을 구성하고,

$$V_n = [a_D a_{D+1} \cdots a_M] \quad (4)$$

뮤직스펙트럼을 다음과 같이 정의하면 음원에서의 뮤직 파워가 최대가 되는 성질을 이용하여 음원의 위치를 찾을 수 있다.

$$P_{music}(\theta) = \frac{1}{a(\theta)^H V_n V_n^H a(\theta)} \quad (5)$$

그러나 앞서도 설명했듯이 모든 음원들이 비 상관관계에 있어야 한다는 전제조건이 따르므로 하나 이상의 음원들이 서로 상관성이 있는 환경에서는 R_n 가 singular 함을 의미하므로 다른 방법이 필요하다.

그러나 만약 이런 상관성이 있는 신호들을 하나의 신호처럼 표현이 가능하다면, 이렇게 구성된 새로운 음원들은 모두 비상관관계에 있게 되므로 위의 방법을 사용할 수 있게 된다.

여기서는 가장 간단한 경우로 하나의 반사면이 존재하여 입사파와 반사파가 서로 상관관계에 있는 경우에 대하여는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g(\theta) = g(\theta_1) + \alpha g(\theta_2) \quad (6)$$

α 는 반사계수이고, $g(\theta_1)$ 과 $g(\theta_2)$ 는 하나의 음원에 대한 입사파와 반사파에 대한 그린함수를 나타낸다. 그러면 서로 상관성이 있는 음원들은 하나의 음원처럼 가정되므로 비상관관계에 있는 음원들만으로 식을 표현할 수 있다.

위와 같이 새로이 구성된 전달함수의 벡터로부터 음원을 찾은 후 가상의 음원(image source)은 음원과 반사면의 기하학적인 구조로부터 쉽게 찾을 수 있다.

2.2 Adaptive nulling algorithm

위의 뮤직 방법으로 음원의 위치를 구한 후 빔포밍 방법 중 adaptive nulling algorithm을 이용하여 입사파와 반사파의 음장을 분리한다.

어댑티브 널링 방법은 다음과 같은 세가지 조건을 만족하는 빔 조정 벡터를 찾음으로써 각각의 부분 음장을 재구성하는 알고리즘이다.

$$\text{subject to } \|a_i\| = 1 \quad (7)$$

$$\text{maximize } a_i \cdot g_i \quad (8)$$

$$a_i \cdot g_j = 0 \text{ for } i \neq j \quad (9)$$

즉, 원하는 방향과의 신호는 최대로 하고 원하지 않는 방향으로는 "0"을 유지하는 빔스티어링(beam steering) 벡터를 찾는 것이다.

여기서 g_j 와 a_i 를 다음과 같이 표현한다.

$$g_j = \sum_{k=1}^{N-1} a_k \cdot e_k \quad (10)$$

$$a_i = \sum_{k=N}^M a_k \cdot e_k \quad (11)$$

그러면 위와 같은 세가지 조건을 만족하는 빔조정 벡터를 약간의 연산을 통하여 찾을 수 있다.

이 빔 조정 벡터로부터 각각의 음원신호는 아래와 같은 과정을 통해 구해 질 수 있다.

$$a_i = a_i \cdot u = [g_1 \cdots g_N] \cdot s \quad (12)$$

$$= [0 \cdots a_i \cdot g_i \ 0 \cdots 0] \cdot s$$

$$= c_i \cdot s_i$$

a_i 는 음원 s_i 에 대해 위와 같은 과정을 거쳐 추정된 음원이다.

2.3 빔조정 벡터로부터의 부분음장 재구성

앞에서 구한 추정된 음원 신호를 사용하여 d개의 홀로그래프 면상의 어레이 마이크로폰으로부터 측정된 값들은 전달함수를 이용하여 다음과 같이 표현이 가능하므로,

$$y_h = H \cdot q + n \quad (13)$$

또는

$$[y_h^1 \cdots y_h^d] = H \cdot [q^1 \cdots q^d] + [n^1 \cdots n^d] \quad (14)$$

위의 식으로부터 전달함수 H 를 구할수 있는데, 어레이 마이크로폰으로부터 측정된 값들은 이 전달 함수를 이용하여 각 음원의 부분 음장들로 재구성 될 수 있다.

$$y_h^j = \sum_{i=0}^M H_{(j)} \cdot a_i^j \quad (15)$$

위의 식은 j번째 어레이 마이크로폰에서의 값들을 부분 음장으로 재구성한 식을 나타낸다.

d개의 홀로그래프면 마이크로폰에서의 측정 값으로부터 i번째 음원의 부분음장은 위의 식을 평균냄으로써 구할수 있다.

$$|y_{h,i}|^2 = \frac{1}{d} \sum_{j=1}^d (H_{(j)} \cdot a_i^j)^* \cdot (H_{(j)} \cdot a_i^j) \quad (16)$$

$$\theta(y_{h,i}) = \text{phase} \left\{ \frac{\sum_{j=1}^d (H_{(j)} \cdot a_i^j)^* \cdot (H_{(j)} \cdot a_i^j)}{\sum_{j=1}^d a_i^j \cdot a_i^j} \right\} \quad (17)$$

3. 시뮬레이션 결과

(1) 시뮬레이션 장치

입사파와 반사파의 음장 재구성에 대한 시뮬레이션을 위해서 아래의 Fig. 1과 같은 가상의 장치를 설치하였다.

8개의 마이크로폰이 홀로그래프 면에서의 음압 측정을 위해서 사용되었고, 기준 마이크로폰은 16개를 사용하였다.

홀로그램 면은 가로와 세로가 각각 0.8m이고 음원면과 홀로그램 면은 0.08m 떨어져 있다. R=1인 반사면을 시뮬레이션의 상황에 맞게 한 개나 두 개를 홀로그램 면과 수직하고 $x=0$ 인 직선을 따라 설치하였다.

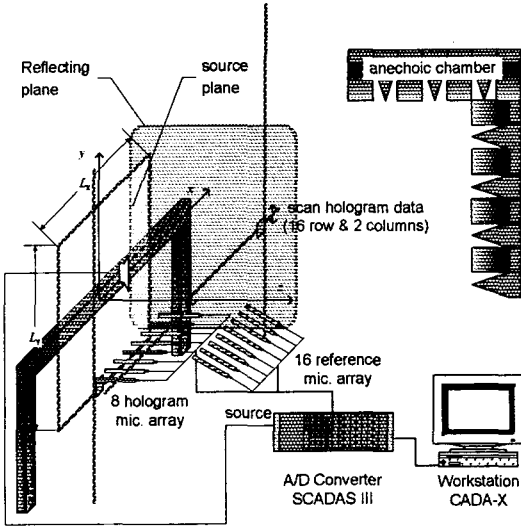


Fig. 1 Simulation setup

(2) 시뮬레이션 결과

위와 같은 장치로부터 컴퓨터 모의 실험 결과는 아래와 같다.

위의 그림과 같은 좌표축에서 음원의 위치가 (0,0,0)의 위치에 놓여 있다고 가정하고 R=1인 반사면 한개가 홀로그램 면에 수직하게 놓여 있는 경우에 대한 결과이다. 반사면은 $x=0.4$ 의 곳에 설치되어 있다.

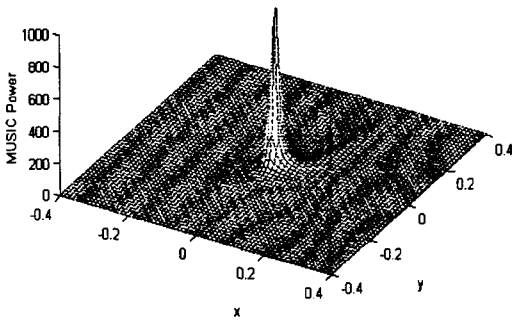


Fig. 2 MUSIC Result($f=1000\text{Hz}$)

위의 결과 그래프에서 우리는 뮤직 파워가 최대가 되는 위치로부터 쉽게 음원의 위치를 찾을수 있다. 그러면 반

사면과 음원과의 기하학적 구조로부터 가상의 음원 (image source)의 위치는 (0.8,0,0)에 있음을 쉽게 찾을 수 있다.

앞에서 구한 실제의 음원과 가상의 음원에 의하여 발생하는 음장을 어댑티브 널링 방법을 적용하여 각각의 음장으로 재 구성 하였다.

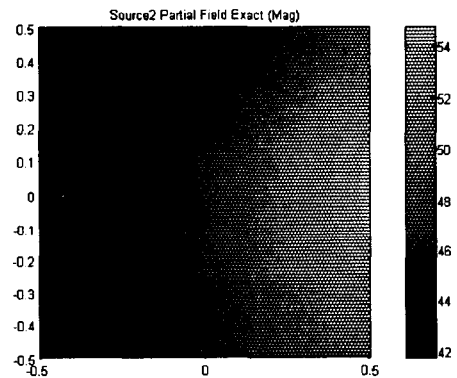
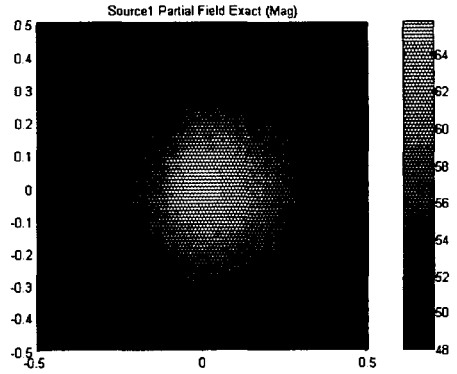
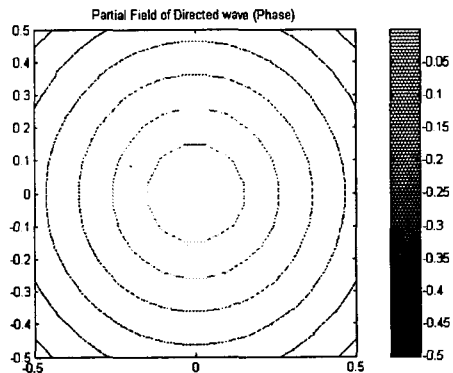


Fig.3 Reconstructed partial fields from the results of Adaptive nulling method (Magnitude, $f=1000\text{Hz}$)



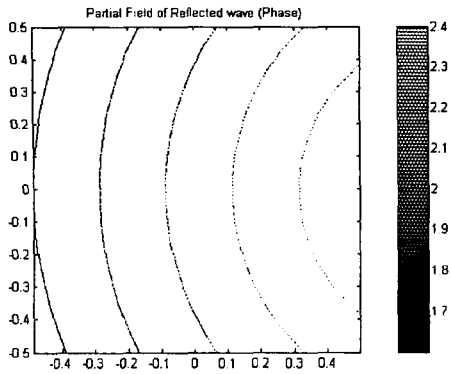


Fig. 4 Reconstructed partial fields from the results of Adaptive nulling method (Phase, $f=1000Hz$)

위의 음장 분포 그림에서 보듯이 뮤직 방법으로 음원의 위치를 정확히 확인하였으며 이덱터브 널링 알고리즘으로 명확히 입사파와 반사파의 각각의 음장을 재구성 하였음을 확인할 수 있다.

아래의 결과는 음원의 위치는 앞과 동일한 (0,0,0)에 위치 한다고 가정하고, $R=0.5$ 인 반사면이 홀로그램 평면 좌우로 두 개가 존재하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. 실제 이러한 환경하에서는 앞에서 했던 모의 실험과는 달리 첫 번째 반사파만 존재하는 것이 아니라 2차 이상의 많은 반사파들이 존재하게 된다. 그러나 여기서는 첫 번째 와 두 번째의 반사성분이 다른 반사파들에 비해 상대적으로 매우 커서 나머지 성분들은 무시할 수준으로 가정하여 첫 번째와 두 번째 반사파만을 고려하였다.

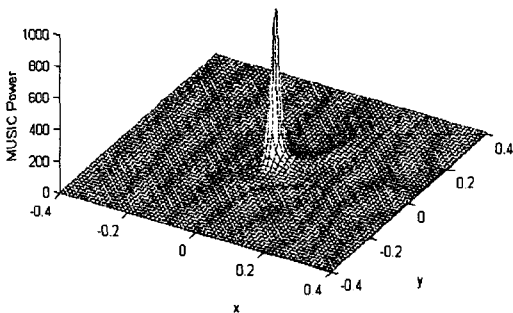


Fig. 5 MUSIC Result ($f=1000Hz$)

역시, 위의 결과로부터 가상의 두 개의 음원의 위치를 (-1.6,0,0), (-0.8,0,0), (0.8,0,0), (1.6,0,0)으로 가정하여 원래

의 음원과 반사파에 의하여 발생하는 음장들을 분리하여 보았다. 앞서도 말했듯이 여기서는 첫 번째와 두 번째 반사하는 성분만을 고려하였다.

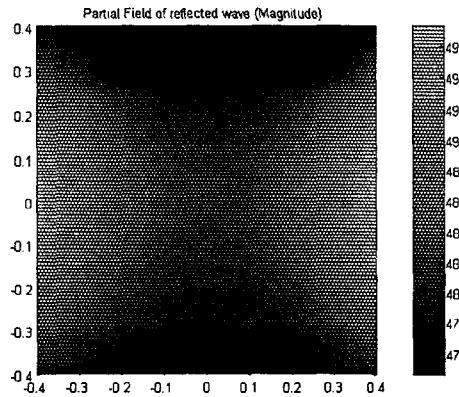
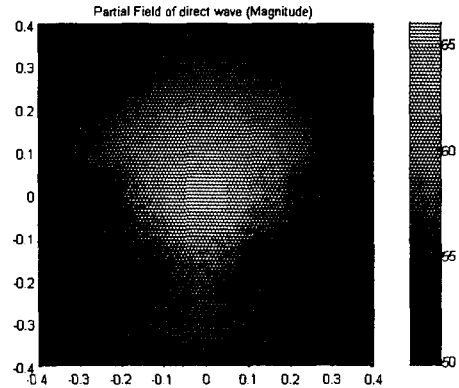
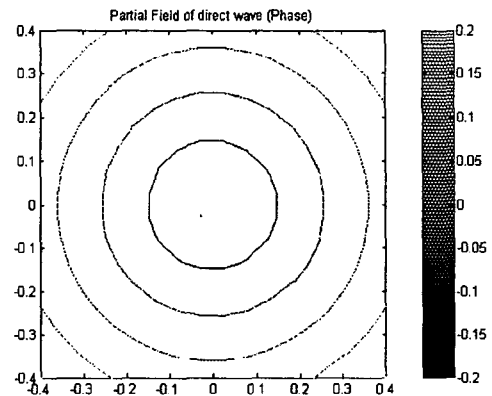


Fig. 6 Reconstructed partial fields from the results of Adaptive nulling method (Magnitude, $f=1000Hz$)



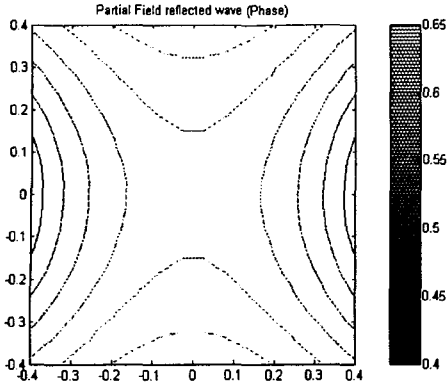


Fig. 7 Reconstructed partial fields from the results of Adaptive nulling method (Phase, $f=1000\text{Hz}$)

위의 결과 그림에서 보는 것처럼 입사파와 반사파의 각각의 음장을 서로 분리하여 표현함으로써 잔향환경하에서 어떻게 반사파가 형성되어 있는지 명확히 가시화 할 수가 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 반사파가 존재하는 환경하에서 입사파와 반사파의 음장을 각각 재구성 하여 보았다. 즉 잔향 환경하에서 발생하는 음장에 대해 입사파와 반사파의 영향만을 따로 분리함으로써 실내 음장이 어떻게 형성되는 지에 대하여 살펴 보았다.

다차원 뮤직 알고리즘을 이용하여 반사면이 존재하여 서로 상관성이 큰 여러개의 음원들에 대하여 그 위치를 찾고, 이 위치로부터 반사면에 의하여 만들어지는 가상의 음원들의 위치를 구성 하였다. 또한 어댑티브 널링 방법을 사용하여 입사파와 반사파에 대한 부분 음장을 각각 재구성 해 냄으로서 입사파와 반사파의 영향을 가시화 하였다. 실제 잔향 환경과 비슷하도록 두 개의 반사면이 존재할때에 대하여 시뮬레이션을 통하여 반사파의 음장을 분리하였다.

참 고 문 헌

- (1) W.H.Lee, E.H.Hwang, Y.J.Kang, "Beamforming based partial field decomposition in nearfield acoustical holography," Proceedings of ICSV, 155-160(2001)
- (2) M.R. Bai and J. Lee, "industrial noise source identification by using an acoustic beamforming system", Transactions of ASME 120, 426-433(1998)
- (3) Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon, Array Signal Processing : concepts and techniques (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984)
- (4) Joseph.C.Liberti,Jr., Theodore S. Rappaport, Smart antennas for wireless communications (Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1999)
- (5) T.J. Shan and T. Kailath, "Adaptive Beamforming for Coherence Signal and interference", IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. ASSP 33 No.3, 527-536(1985)
- (6) L.E. Kinsler, A.R. Freay, Fundamentals of acoustics, John Wiley & Sons, N.Y. (1982)