

강체표면 구형 빔포머에서의 센서위치 최적화 방안

Optimization of Sensor Position of a Rigid Surface Spherical Beamformer

최시홍† · 이재형* · 최종수** · 김영기***

Sihong Choi, Jaehyung Lee, Jong-Soo Choi and Young-Key Kim

1. 서론

구형 마이크로폰 어레이는 전방향으로 센서가 배치되어 있는 형태를 가짐으로써 실내 또는 닫힌 공간의 음장 해석, 측정 및 재현과 관련한 3 차원적 음장 분석에 이점을 가지고 있다. 구형 어레이 형태를 이용한 빔형성 기법은 어레이의 전자적인 지향 전환을 통해 공간상에 분포한 소음원의 위치를 추정할 수 있도록 한다.

본 논문에서는 평면과 분리 방법을 이용하여 조화 order(harmonics order)가 유한한 경우에 대하여 구형 마이크로폰 어레이가 가지는 공간 분해능을 평가하였다. 시뮬레이션을 통해 구형 어레이의 성능을 확인하고, 센서 배치 변화에 의한 영향을 분석하였다.

2. 이론적 배경

구형 마이크로폰 어레이를 이용하여 음장을 분석하기 위해 다음 두 가지 가정이 필요하다. 첫째, 전체 구면에서의 음압 정보를 알아야 한다. 이런 가정은 실제 측정에서 유한한 수의 센서와 그에 따른 배치 문제로 인해 완전히 만족되지 않으므로 본 연구에서는 센서에서 측정된 음압 정보를 적용하도록 한다. 둘째, 분석하고자 하는 음장이 평면파들의 복잡한 중첩으로 구성되어 있다고 가정한다. 이 가정을 기반으로 측정하고자 하는 음장을 구형 푸리에 변환(spherical Fourier transform)을 이용하여 평면파들의 조합으로 표현할 수 있다.

2.1 강체 구면에서의 음압

(1) 파동방정식

균일 매질에서 음압의 전파는 파동방정식

$$\nabla^2 p(\vec{r}, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(\vec{r}, t)}{\partial t^2}, \quad (1)$$

으로 표현되며 여기서 p 는 압력, \vec{r} 은 위치, t 는 시간, ∇ 은 라플라시안, c 는 매질에서의 음속이다. 이 식을 주파수 영역으로 푸리에 변환하면 다음과 같은 헬름홀츠 방정식

$$(\nabla^2 + k^2)\psi(r, k) = 0, \quad (2)$$

으로 표현할 수 있다. k 는 주파수 f 의 파수이다. 표현하고자 하는 음장은

$$\psi = \psi_i + \psi_s, \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있으며, 우변의 첫 번째 항 ψ_i 는 입사하는 평면파와 두 번째 항 ψ_s 는 강체 구면에 의한 산란파의 음장이다.

(2) 구형 푸리에 변환

구형 좌표계를 (r, θ, ϕ) 로 표현하면, 방향 $s = (\theta, \phi)$ 에 대하여 단위원에 대해 구적분이 가능한 함수 $f(s)$ 의 푸리에 변환 \tilde{f}_{nm} 은

$$\tilde{f}_{nm} = \int_{\Omega \in S^2} f(s) Y_n^{m*}(s) d\Omega = S\{f(s)\}, \quad (4)$$

이고 이의 역 구형 푸리에 변환은

$$f(s) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \tilde{f}_{nm} Y_n^m(s) = S^{-1}\{\tilde{f}_{nm}\}, \quad (5)$$

이다. Y_n^m 은 n order, m degree 인 구형 조화 함수(spherical harmonics function)이다.

(3) 음장 분리

반지름이 a 인 강체 구에서의 입사 평면파의 경우,

$$\psi_i(s_i, ka) = 4\pi \sum_{n=0}^{\infty} i^n j_n(ka) \sum_{m=-n}^n Y_n^m(s_j) Y_n^{m*}(s_i), \quad (6)$$

와 같이 표현할 수 있으며, 소음원이 위치한 방향은 $s_j(\theta_j, \phi_j)$, 마이크로폰의 위치는 $s_i(\theta_i, \phi_i)$ 이다.

$j_n(ka)$ 는 제 1 종 구형 베셀 함수이다. 이때의

† 최시홍; 충남대학교 항공우주공학과 대학원
E-mail : chltlghd@cnu.ac.kr
Tel : (042) 821-7774, Fax : (042) 825-9225

* 충남대학교 항공우주공학과 대학원

** 충남대학교 항공우주공학과

*** (주) 에스엠인스트루먼트

산란파는

$$\psi_s(s_i, k, a) = -4\pi \sum_{n=0}^{\infty} i^n \frac{j'_n(ka)}{h'_n(ka)} h_n(ka) \sum_{m=-n}^n Y_n^m(s_j) Y_n^{m*}(s_i), \quad (7)$$

으로, 따라서 강체 구면에서의 평면파에 의한 음압은

$$\begin{aligned} \psi(s_j, s_i, ka) &= \psi_i(s_i, ka) + \psi_s(s_i, ka) \\ &= 4\pi \sum_{n=0}^{\infty} i^n b_n(ka) \sum_{m=-n}^n Y_n^m(s_j) Y_n^{m*}(s_i), \end{aligned} \quad (8)$$

이고, 여기서 강체 구형의 경우, 모드 진폭 계수(mode amplitude coefficients)는

$$b_n(ka) = j_n(ka) - \frac{j'_n(ka)}{h'_n(ka)} h_n(ka), \quad (9)$$

으로 나타낼 수 있다. $h_n(ka)$ 은 제 1종 구형 헨켈 함수이다.

2.2 빔형성 방법

구형 빔형성 기법은 구형 조화 함수의 직교성(orthonormality)을 이용하여 어레이 주변에 도달하는 음장을 분리하는 것이다. 구면에서 정의된 적분 가능한 함수는 구형 조화 급수로 전개되어 원하는 빔패턴을 형성할 수 있다. 빔형성 응답 $y_j(k)$ 은

$$y_j(k) = \sum_i w(k, s_j, s'_i) \psi(k, s'_i), \quad (10)$$

로 표현되며 $w(k, s_j, s'_i)$ 는 어레이 응답, $\psi(k, s'_i)$ 는 i 번째 센서에서 측정된 음압이다.

3. 결 과

3.1 빔형성 방법에 의한 시뮬레이션 분석

정 20 면체의 모서리를 깎아 낸 준정다면체(semi-regular polyhedron, 이하 SRP 어레이) 각 면의 중심점의 좌표와 Gary W. Elko 가 제안한 좌표(이하 GWE 어레이)로 구형 어레이 센서 위치를 설정하고 이 어레이들에 의해 계산된 빔형성 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

(1) 소음원 위치 확인 예

그림 1.은 $(125^\circ, 130^\circ)$ 에서 2kHz의 음파가 전달될 때 SRP 어레이를 이용하여 반경 1m에서 계산한 결과로 최대값을 기준으로 로그 스케일로 표현한 빔파워맵이다.

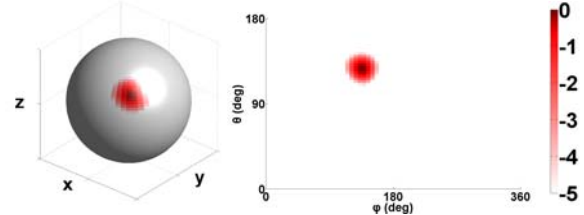


그림 1. $(125^\circ, 130^\circ)$ 에서 전파되는 음원을 SRP 어레이로 측정된 경우의 시뮬레이션 빔패턴 결과

(2) 분해능 비교

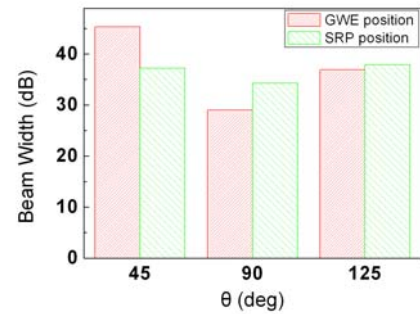


그림 2. GWE 어레이와 SRP 어레이의 빔폭비교

빔의 분해능은 빔파워가 최대인 곳의 반인 빔폭(deg)으로서, 다른 소음원을 구별할 수 있는 어레이 성능 판단 기준이 된다. 그림 2.는 각 입사각이 다른 경우 GWE와 SRP 어레이의 성능을 비교한 것이다.

4. 결 론

구형 푸리에 변환을 이용하여 음장의 평면파 조합과 설계된 구형 마이크로폰 어레이의 가중함수를 구한 후 빔형성 방법을 적용하여 음원의 전파 방향을 구하였다. 가상의 소음원을 공간에 위치시켜 음장을 구형 조화 시뮬레이션을 통하여 마이크로폰 어레이에 이용되는 센서 배치에 따라 영향을 받는 공간 분해능을 비교하여 센서 배치에 의한 영향을 분석하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- (1) Earl G. Williams, "Fourier Acoustics, Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography," Academic Press, 1999.
- (2) Boaz Rafaely, "Plane Wave Decomposition of the Sound Field on a Sphere by Spherical Convolution," ISRV Technical Memorandum, 2003.