

# 광 대역 스피커 어레이를 위한 근거리 장 빔포머 설계

## Near field beamformer design for wideband loudspeaker arrays

김대성\* · 김기현\* · 이성규\*\* · 왕세명†

Daesung Kim, Kihyun Kim, Sung Q Lee and Semyung Wang

### 1. 근거리장 빔포머 설계

어레이 시스템에서 근거리 및 원거리장에 형성되는 각도 별 음압의 분포를 살펴보고자 한다.

#### 1.1 절 라인 어레이

빔 형성을 위한 어레이의 구조는 대부분 일정 길이의 선형이다. 음원의 배치는 실제 음원(스피커)의 크기와 제어 가능한 채널의 수에 따라 결정되는데, 이는 빔 형성이 물리적으로 유효한 주파수 범위와 관련이 있다. 일반적인 음원의 배치는 균등 배치 또는 하모닉 배치이다.

#### (1) 음압의 각도 별 분포

R 만큼 떨어진 거리에서 어레이로부터 발생하는 각도 별 음압은 다음 식과 같다.

$$p_s = \sum_{m=-M}^M G_s^{(m)} q^{(m)} \quad (1)$$

식(1)에서 s 는 0~360 도 구간의 지점을 나타내는 인덱스, 그리고 m 은 음원의 인덱스를 나타낸다.  $q^{(m)}$  은 어레이의 m 번째 음원의 복소크기,  $G_s^{(m)}$  는 각 음원과 공간상의 지점 s 간의 전달함수이다. 모든  $q^{(m)}$  이 동일한 가중치를 가질 때, 식(1)을 어레이의 축 방향(어레이의 중심으로부터 방사 거리)에 대해 적용하여 레벨 강하를 살펴보면 응답이 안정되기 시작하는 거리가 나타난다. 이 거리는 원거리 장이 시작되는 거리이며, 안정되고 일정한 각도 별 응답은 빔 패턴과 동일하다. 근거리 장에서는 각도 별 응답이 거리마다 다르며 이는 빔포머 설계에서  $q^{(m)}$  의 제어 가 많은 목표 지점을 만족해야 함을 암시 한다.

#### (2) 빔 형성의 주파수 범위

균등한 음원 간 간격(d)을 가지는 선형 어레이에서 빔 형성이 가능한 주파수의 범위는 어레이의 길이 및 d 에 의해 근사적으로 결정된다. 저주파 범위는 어레이에 의해 형성되는 메인 빔의 폭이 90 도 이하가 되는 주파수, 그리고 고주파 범위는 d 가 파장과 동일한 주파수를 선택하는 것이 바람직하다.

#### 1.2 절 지향성 비(directionality ratio)의 최대화

어레이의 응답을 특정 방향으로 편중되도록 하는 문제는  $q^{(m)}$  의 개수보다 더 많은 지점에서의 음압들을 제어해야 하는 이른 바 잘 정립되지 않은 문제에 해당된다. 이는 공간 지점들의 포텐셜 에너지를 평균하여 잘 정립된 문제로 새로 명확히 하여왔다. 따

라서 근거리 장이라 할지라도  $q^{(m)}$  의 제어를 통해 빔을 형성시키는 것이 가능하다. 즉 원거리 장 조건이 아니어도 식(2)와 같이 지향성 비를 최대화 하는 문제를 정의 할 수 있다.

$$\max_{\forall q^{(m)}} D = \frac{V_T \left| \sum_{s \in A} \sum_{m=0}^M G_s^{(m)} q^{(m)} \right|^2}{V_A \left| \sum_s \sum_{m=0}^M G_s^{(m)} q^{(m)} \right|^2} \quad (2)$$

여기서  $V_A$  는 주시 방향(look direction)의,  $V_T$  는 전체 방향의 지점들의 개수를 의미한다. 식(2)는 거리에 관계없이 적용 가능한 표현으로 음향 대조 제어의 한 표현이다[1]. 빔포머의 선택은 일반적으로 지향성을 목표하는 거리가 어느 장에 있느냐에 따라 결정된다. 1.1 절의 논의로부터 원거리 장 빔포머의 설계는 단 하나의 응답을 만족시키면 됨을 이해 할 수 있다. 반면 근거리 장 빔포머의 설계는 여러 거리를 동시에 만족시켜야 한다. 즉 식(2)의 s 는 각도 뿐만 아니라 거리에 따른 인덱스가 되어야 한다.

그러나 근거리 장 빔포머의 설계에서 목표 거리의 범위를 지정하는 문제는 단순하지 않다. 그것의 최소는 감쇠파(evanescent wave)의 영향을 받지 않도록 충분히 커야 하고[2], 최대 범위는 원거리 장 시작 거리보다 충분히 작아야 한다. 만약 최대 거리 범위의 선택이 원거리 장을 포함한다면 빔포머는 원거리 장의 최적 빔을 만족하도록 설계된다. 주파수에 따라 달라지는 두 조건을 모두 고려하여 목적 범위를 설정한다 하여도 특정 지향성 평가 범위를 만족하는 목표범위의 설정은 더욱 더 어렵다. 본 논문에서는 이러한 복잡성을 피하기 위해 목표 지점과 평가 지점을 동일한 단일 거리로 설정하고 근거리 장 빔포머 설계로 문제를 정의 하였다.

### 2. 에너지 차이에 근거한 빔포머 설계

설계된 빔포머는 목표 지점에서의 방사 파워가 보장되어야 한다. 지향성 비는 그림 1 의 A(가청 영역)와 나머지 구간 간의 비율로 입력 파워와는 관련이 없다. 따라서 빔 형성이 원만하지 않은 저주파 및 고주파 영역에서는 어레이의 입력이 크게 줄어드는 경향이 있다. 하지만 단일 스피커와 같이 어레이 스피커도 전 주파수에서 균일한 민감도를 가져야 한다. 이를 위해 빔포머의 설계는 입력 파워 대비 출력 포텐셜 에너지 밀도를 최대화 하는 밝기 제어[1]의 개

범을 확장할 것이다.

### 2.1 절 공간적으로 가중된 차이 제어

입력 파워가 보장되면서 A 의 최대화 및 I(비 가청 영역)의 가중된 최소화를 위한 목적함수는 다음 식과 같이 설정 가능하다.

$$\max_{\forall q^{(m)}} \eta = \frac{\sum_{s \in A} \sum_{m=-M}^M G_s^{(m)} q^{(m)} \cdot \left( \sum_{s \in I} \alpha_s \right) \cdot \sum_{s \in A} \sum_{m=-M}^M G_s^{(m)} q^{(m)}}{V_A \sum_{m=-M}^M |q^{(m)}|^2} \cdot \frac{\sum_{s \in I} \left( \alpha_s \cdot \sum_{m=-M}^M G_s^{(m)} q^{(m)} \right)^2}{V_I \sum_{m=-M}^M |q^{(m)}|^2} \quad (3)$$

여기서  $\alpha_s$  는 공간적 가중치[3]를 나타내며 다음과 같은 범위를 가진다.

$$\alpha_s \geq 0, 0 \leq \sum_{s \in I} \alpha_s < 1 \quad (4)$$

만약  $\alpha_s$  의 합이 0 이면 식(3)은 A 의 밝기만을 제어한다. 또한  $\alpha_s$  의 합이 1 에 가까워지면 A 에서의 포텐셜 에너지 밀도는 0 에 가까워진다.

### 2.2 절 가청/비가청 영역 간 추이(transition)

$\alpha_s$  는 I 에 따라 다음 식과 같이 설정 가능하다.

$$\alpha_s = \begin{cases} 0.01, I \in 0^\circ \sim 30^\circ \\ 0.95, I \in 30^\circ \sim 60^\circ \\ 0, I \in 60^\circ \sim 90^\circ : \text{don't care region} \end{cases} \quad (5)$$

이는 60°~90° 범위의 에너지 최소화는 관심이 없고, 30°~60° 범위의 에너지 최소화에는 0.95 만큼의 가중치, 그리고 0°~30° 범위의 에너지 최소화는 0.01 만큼의 가중치를 가지고 최적화를 수행함을 의미한다. 동시에 A 영역은 밝기 제어에 비해 (1-0.96) 만큼의 최대화만 이루어 지므로 주시 방향의 음압이 줄어든 상태에서의 최적 빔 패턴을 형성하게 된다. 원하는 I 와 주파수 대역에 따라서  $\alpha_s$  는 좀 더 복잡한 형태를 가질 수 있다.

### 3. 최적 가중치에 의한 빔포머 설계

(1) 연계 최적화 문제 정의

$\alpha_s$  는 90°도 지점에서 특정 음압 레벨을 유지하면서 A 와 I 간의 최대 음압 차를 유지하도록 마땅히 설계되어야 한다. 이를 위한 설계 문제는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\max_{\forall \alpha_s, q^{(m)}} J = 10 \log_{10} \left( \frac{V_I \sum_{s \in A} p_s^2(\alpha_s)}{V_A \sum_{s \in I} p_s^2(\alpha_s)} \right) \quad (6)$$

$$\text{subject to. } g = 10 \log_{10} \left( \frac{p_{s \in 90^\circ}^2(0)}{p_{s \in 90^\circ}^2(\alpha_s)} \right) - L \leq 0$$

식(6)에서 L 은 주시 방향에서의 음압레벨의 허용 강하 범위로 본 논문에서는 3 dB 를 선택 하였다.

(2) 최적화 방법

설계 변수  $\alpha_s$  에 대한 식(6)의 목적함수는 여러 구

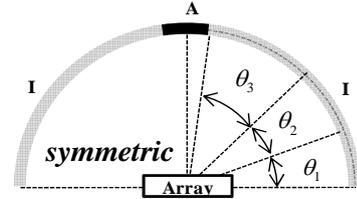


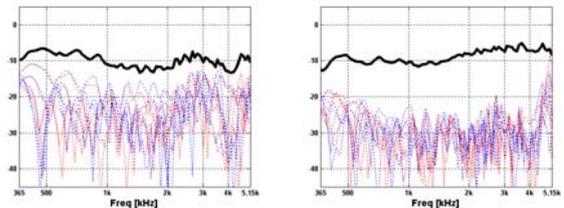
그림 1 빔포머 설계 변수 도식  
간의 지역해를 가지므로 전역해를 구하기 위해 유전자 알고리즘(GA)을 사용하였다. GA 에서 설계변수는 2 진수로 표현되어야 하는데, 식(4)와 같은 설계 변수는 그 표현이 곤란하다. 식(3)을 고찰해보면  $\alpha_s$  의 합이 1 에 가까워지는 것은 A 영역의  $\alpha_s$  의 합을 0 으로 하면서 I 영역의  $\alpha_s$  의 합을 매우 큰 값으로 하는 것과 동가이므로 각 설계 변수는 다음과 같다.

$$0 \leq \alpha'_s < H, \quad \alpha_s = \frac{\sum_{s \in I} \alpha'_s}{\sum_{s \in I} \alpha'_s + 1}, \sum_{s \in I} \alpha_s = \frac{\sum_{s \in I} \alpha'_s}{1 + \sum_{s \in I} \alpha'_s} \quad (7)$$

식(7)에서 H는 매우 큰 값을 나타낸다.

### 4. 결론

그림 2 는 13 개의 스피커로 구성된 1m 길이의 어레이에 대해 본 논문의 제어방법을 적용한 실험결과 (b)와 각 스피커에 동일한 입력을 부여한 결과(a)를 비교하였다. 굵은 실선은 90°에서의 주파수 응답을, 나머지 점선들은 0°~60° 및 120°~180°의 응답을 표시한다. 365~5kHz 의 구간에서 향상된 지향특성을 보임을 확인 가능하다.



(a) 제어하지 않음 (b) 최적 해

그림 2 실험 결과

### 후기

이 연구는 한국전자통신연구원의 위탁 지원을 받았으며 이에 감사 드립니다.

### 참고 문헌

[1] Jung-Woo Choi, and Yang-Hann Kim, "Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources", J. Acoust. Soc. Am. 111(4), 2002  
[2] Ji-Ho Chang, Chan-Hui Lee, Jin-Young Park, and Yang-Hann Kim, "A realization of sound focused personal audio system using acoustic contrast control", J. Acoust. Soc. Am. 125(4), 2009  
[3] Mincheol Shin, Sung Q Lee, Hye-Jin Kim, Kang-Ho Park, Daesung Kim, and Semyung Wang, "Maximization of the acoustic energy difference between listening and non-listening regions", ICSV17, Krakow, Poland, 2009