

라우드스피커 어레이의 빔형성법 비교: 음향 에너지 제어방법과 선형제한 최소분산법

Comparison of loudspeaker array beamforming methods: acoustic potential energy control method and linear constraint minimum variance method

유호민* · 황미경* · 김기현* · 왕세명†
Homin Ryu, Mikyung Hwang, Kihyun Kim and Semyung Wang

1. 서 론

라우드스피커 어레이를 이용한 빔형성법은 한 공간 내 특정영역으로 소리를 집중 시킬 수 있으며, 주로 개인음향공간의 형성을 목적으로 연구되어왔다. 대표적인 기법으로 영역별 음향위치에너지를 제어하는 밝기제어, 대조제어⁽¹⁾, 차이제어⁽²⁾가 있으며 같은 목적으로 선형제한 최소분산법⁽³⁾이 사용될 수 있다.

본 연구에서는 두 가지 빔형성법인 차이제어와 선형제한 최소분산법을 비교하였다. 수치해석을 통해 두 기법이 비교되었으며, 선형-라우드스피커 어레이와 음원으로는 단극음원을 사용하였다.

2. 본 론

2.1 문제의 정의

Fig 1은 빔포머의 설계변수를 나타내고 있다. 11개의 스피커가 8cm 등간격으로 배치되었으며 제어 주파수 구간은 750Hz~3870Hz 이다. 가청영역과 비가청영역은 반지름 1m인 반원에서 $\theta_A=85^\circ$, $\theta_I=65^\circ$ 로 설정하였다.

어레이 중심으로부터 R의 거리에서 각도 별 음압은 식(1)과 같다.

$$p_m = \sum_{n=1}^N G_{mn} q_n = \mathbf{G}_{mn} \mathbf{q} \quad (1)$$

여기서 m은 거리가 R이고 각도가 0~180°인 구간

의 지점을 나타내는 인덱스, 그리고 n은 음원의 인덱스를 나타낸다. q_n 은 어레이의 n번째 음원의 복소 크기, G_{mn} 은 각 음원과 m간의 전달함수이다.

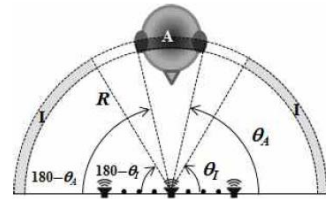


Fig. 1 빔포머 설계변수 도식

2.2 음향위치에너지 제어법⁽²⁾

가청영역에서의 평균 음향위치에너지는 $e_A = \mathbf{q}^H \mathbf{R}_A \mathbf{q}$, 비가청영역에서의 평균 음향위치에너지는 $e_I = \mathbf{q}^H \mathbf{R}_I \mathbf{q}$ 로 각각 정의되며 \mathbf{R}_A 와 \mathbf{R}_I 는 각각 가청영역과 비가청영역의 공간 상관 행렬 함수이다. 음향위치에너지 제어법 중 차이제어는 다음과 같은 최적화 문제로 표현된다.

$$\begin{aligned} \max. e_A &= \mathbf{q}^H \mathbf{R}_A \mathbf{q} \\ \min. e_I &= \mathbf{q}^H \mathbf{R}_I \mathbf{q} \\ \text{s.t. } J_0 &= \mathbf{q}^H \mathbf{q} \end{aligned} \quad (2)$$

라그랑지 승수(α)를 도입하면 식(2)는 식(3)과 같이 된다.

$$\max. A_\alpha = \frac{\mathbf{q}^H (\mathbf{R}_A - \alpha \mathbf{R}_I) \mathbf{q}}{\mathbf{q}^H \mathbf{q}} \quad (3)$$

α 의 크기에 따라 가청영역과 비가청영역의 출력 효율을 조절할 수 있다.

2.3 선형제한 최소분산법⁽³⁾

선형제한 최소분산(Linear Constraint Minimum Variance; LCMV)은 목표로 하는 출력을 선형제한으로 두고, 다른 지정된 출력은 최소화 하는 방법으로

† 교신저자; 정회원, 광주과학기술원 기전공학부

E-mail : smwang@gist.ac.kr

Tel: (062) 970-2390, Fax: (062) 970-2384

* 광주과학기술원 기전공학부

로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min. \quad & J = \mathbf{q}^H \mathbf{R} \mathbf{q} + \beta \mathbf{q}^H \mathbf{q} \\ \text{s.t.} \quad & (\mathbf{A} \mathbf{G}_A \mathbf{q})^H = T^H \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ A & A & \dots & A \end{bmatrix}$ 으로 A 는 가청영역의

측정지점 개수를 나타내고, 구속조건은 가청영역에서의 평균음압이 목표응답(T)을 갖도록 한다. 즉 LCMV는 가청영역의 평균음압을 선형제한으로 설정하고, 비가청영역의 음향위치에너지와 입력에너지를 최소화 하는 것이다. 목표응답은 크기가 일정하고, 위상이 주파수가 커짐에 따라 선형적으로 감소하는 응답으로 설정하였다.

목적함수 중 비가청영역의 음향위치에너지 항이 없다면 이것은 밝기제어처럼 작동하고, 입력에너지 항이 없다면 대조제어처럼 작동한다. 목적함수에 두 가지 항이 모두 있는 경우에는 β 를 조절함에 따라 차이제어처럼 작동한다.

2.4 제어결과 비교

두 가지 빔형성법을 비교하기 위하여 식(5)와 식(6)으로 정의되는 Audible gain과 Directivity를 사용하였다. Audible gain은 가청영역에 대한 출력효율을, Directivity는 가청영역과 비가청영역의 출력비를 나타낸다.

$$\text{Audible Gain} = \frac{\mathbf{q}^H \mathbf{R}_A \mathbf{q}}{\mathbf{q}^H \mathbf{q}} \quad (5)$$

$$\text{Directivity} = \frac{\mathbf{q}^H \mathbf{R}_A \mathbf{q}}{\mathbf{q}^H \mathbf{R}_I \mathbf{q}} \quad (6)$$

차이제어에서 α 는 1000으로 설정되었고, LCMV의 β 는 차이제어 결과의 Audible gain과 같은 Audible gain을 갖도록 설정하였다. 추가적으로 가청영역에서의 크기응답과 위상응답을 비교하고, 식(7)로 정의되는 입력에너지를 비교하였다.

$$\text{Input Energy} = \mathbf{q}^H \mathbf{q} \quad (7)$$

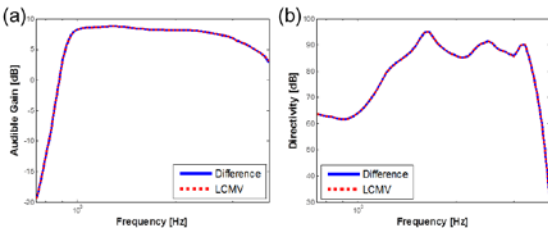


Fig. 2 제어결과: 차이제어와 LCMV의 (a) Audible gain. (b) Directivity.

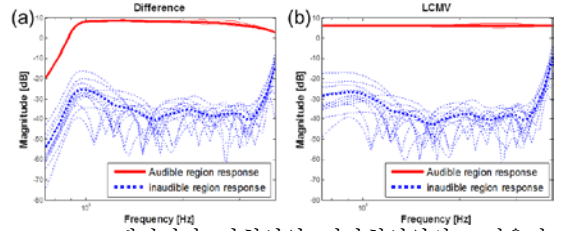


Fig. 3 제어결과: 가청영역, 비가청영역의 크기응답 (a) 차이제어. (b) LCMV.

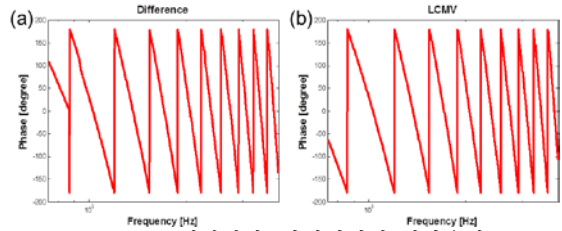


Fig. 4 제어결과: 가청영역의 위상응답 (a) 차이제어. (b) LCMV.

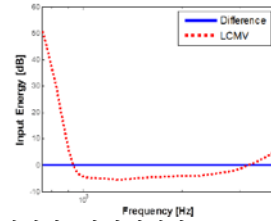


Fig. 5 제어결과: 차이제어와 LCMV의 입력에너지

3. 결론

차이제어와 LCMV는 동일한 Audible gain을 가질 때 동일한 Directivity를 가진다. 하지만 차이제어는 직접적으로 가청영역의 주파수응답을 제어할 수 없지만 LCMV는 가능하다. 그리고 차이제어와 비교해 가청영역에서 평탄한 응답을 얻기 위해 LCMV의 입력에너지는 일정하지 않은 결과를 보인다.

참고 문헌

- [1] J.W.Choi et al., "Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources", JASA, 111(4), pp.1695~1700, 2002
- [2] D.Kim et al., "Maximization of the directivity ratio with the desired audible gain level for broadband design of near field loudspeaker arrays", JSV, 330, pp.5517~5529, 2011
- [3] O. L. Frost III, "An algorithm for linearly constrained adaptive array processing," Proc. IEEE, vol. 60, pp. 926-935, 1972.