

최적 Sweet Spot 제공을 위한 스피커 구동 알고리즘

*부정용 최수진 김기준 박호중

광운대학교

*bjy0322@kw.ac.kr

Loudspeaker Driving Algorithm for Optimal Sweet Spot

*Boo, Jeong-Yong Choi, Su-Jin Kim, Ki-Jun Park, Hochong

Kwangwoon University

요약

본 논문에서는 4개의 스피커를 이용한 음향 재생 환경에서 청취자의 위치에 따라 최적의 sweet spot을 제공하도록 스피커를 구동하는 방법을 제안한다. 먼저 청취자 위치에 대하여 대칭 구조를 가지는 스피커 쌍(pair) 후보들을 선택한다. 다음, ringing 현상을 감소시키기 위하여 앞에서 선택한 스피커 쌍 후보 중에서 스피커 간 간격이 가장 먼 스피커 쌍과 이 스피커 쌍 사이에 있는 모든 스피커를 구동 스피커로 결정한다. 마지막으로, cross-talk cancellation 행렬의 크기를 제한하여 ringing 현상을 감소시킨다. 모의실험을 통해, 청취자 위치가 변할 때 제안하는 스피커 구동 방법을 사용하여 sweet spot 면적이 일정한 수준으로 유지되어 기존 방법에 비하여 성능이 향상된 것을 확인하였다.

1. 서론

최근 디지털 신호처리의 발전에 따라 고품질 음향에 대한 요구가 증가하고 있다[1]. 실제와 비슷한 환경의 소리를 제공하기 위하여 3D sound와 같은 기술들이 제공되고 있지만, 스피커를 이용한 오디오 시스템에서는 청취자가 최상의 소리를 듣기 위한 영역이 매우 제한적이다. 이처럼 제한적인 영역을 sweet spot이라 하며, 최근에는 실제 청취자의 위치에 sweet spot을 제공하기 위한 기술들이 개발되고 있다[2]. 이러한 기술들은 사용자의 위치를 인식한 후 청취 환경에 대한 행렬의 역행렬을 계산하고, 계산된 역행렬을 오디오 신호에 적용하여 환경에 대한 영향을 제거하는 방법을 사용한다[2].

이와 같은 방법을 Cross-talk Cancellation(CTC)이라 하며, 일반적으로 식 (1-3)과 (1-4)와 같이 정의된 Channel Separation Ratio (CSR)가 10dB 이상인 부분을 sweet spot으로 정의한다[2].

$$C(f) = H^{-1}(f) \quad , \quad H(f) = \begin{bmatrix} H_{11}(f) & H_{12}(f) \\ H_{21}(f) & H_{22}(f) \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

$$G(\Delta y, \Delta x) = H(y + \Delta y, x + \Delta x) C(y, x) \quad (1-2)$$

$$CSR_L = 10 \log_{10} \frac{\int_B |G_{11}(f)|^2 df}{\int_B |G_{12}(f)|^2 df} \quad (1-3)$$

$$CSR_R = 10 \log_{10} \frac{\int_B |G_{22}(f)|^2 df}{\int_B |G_{21}(f)|^2 df} \quad (1-4)$$

여기서 H 는 스피커와 청취자 사이의 환경을 나타내는 행렬이며 C 는 H 에 대한 역행렬을 나타내고, G 는 고정된 위치로부터 구해진 행렬 C 와 청취자가 Δy , Δx 만큼 움직인 환경 행렬 H 의 곱을 나타낸다. 만일, $(\Delta y, \Delta x) = (0, 0)$, 즉 청취자가 H 에서 정한 위치에 있는 경우에는 G 가 단위행렬이 되어 CSR이 무한대 값을 가지지만, 청취자의 위치가 변하여 H 가 정확한 청취 환경을 제공하지 못할 경우에는 G 가 단위행렬이 되지 않아 CSR 값이 감소한다.

기존의 CTC에는 2가지 문제점이 존재한다. 첫 번째 문제는 청취자의 위치가 두 개의 스피커의 중심에서 멀어질수록 청취자 위치 오차에 의하여 sweet spot 면적이 크게 감소하는 것이다. 그림 1은 두 개의 스피커에 대하여 청취자가 중앙에서 좌, 우로 이동할 경우 생성되는 sweet spot 면적에 대한 실험 결과이다. 여기서, H 는 free-field approximation에 의한 값을 사용하였다[2]. 중앙을 기준으로 좌, 우로 이동할수록 sweet spot 면적이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 두 번째 문제는 행렬 H 의 행렬식(determinant)이 특정 주파수에서 0에 근사하여 행렬 C 의 크기가 증가하고 이 때문에 ringing 현상이 발생하는 것이다[3].

이와 같은 문제는 3개 이상의 스피커를 사용하여 해결할 수 있다. 그러나 다수의 스피커를 잘못 사용할 경우에는 2개의 스피커를 사용할 경우보다 더 낮은 성능의 CTC가 수행될 우려가 있다. 따라서 본 논문에서는 4개의 스피커를 이용한 재생 환경에서, 청취자의 위치에 따라 최적의 sweet spot을 제공하도록 스피커를 선택하여 구동하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 청취자 위치에 대하여 대칭 구조를 가지는 스피커 쌍 후보들을 선택하고, 선택된 스피커 쌍 후보 중에서 스피커 간격이 가장 먼 스피커 쌍과 이 스피커 쌍 사이에 있는 모든 스피커를 구동 스피커로 결정한다. 최종적으로 행렬 C 의 크기를 제한하여 ringing 현상

을 감소시킨다. 모의실험을 통하여 제안한 방법에 의하여 sweet spot 제공 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

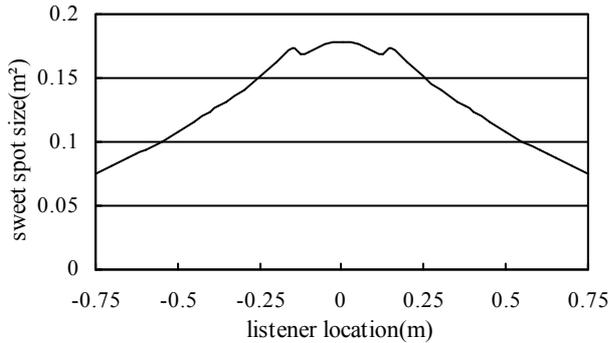


그림 1. 2개의 스피커를 이용할 때 청취자의 위치에 따른 sweet spot 면적

Fig. 1. Sweet spot size for different listener locations with two loudspeakers.

2. 제안하는 스피커 구동 방법

본 논문에서는 그림 2와 같은 4개의 스피커를 이용한 재생 환경에서 sweet spot 면적을 넓히기 위하여 청취자 위치에 따라 스피커를 선택하여 구동하는 방법을 제안한다. 그림 2에서 ds 는 스피커 간격을 나타내며 y_u 는 청취자와 스피커 배열 간의 y 축 거리를, r 은 머리의 반지름 길이를 나타낸다. 대부분의 CTC는 2개의 스피커를 이용한 재생 환경에서 계산되지만, CTC 방식의 주된 계산은 환경에 대한 역행렬을 구하는 것이기 때문에 N 개의 스피커를 이용한 재생 환경으로 확장할 수 있다. 그러나 스피커의 수가 사람 수의 두 배가 아닐 경우에는 환경 행렬이 식 (2)와 같이 정방 행렬이 아니므로 의사 역행렬(pseudo inverse)을 사용하여 역행렬을 구한다[3]. 본 논문에서는 이와 같은 방법을 사용하여 4개의 스피커를 이용한 재생 환경에 대하여 CTC 실험을 진행한다.

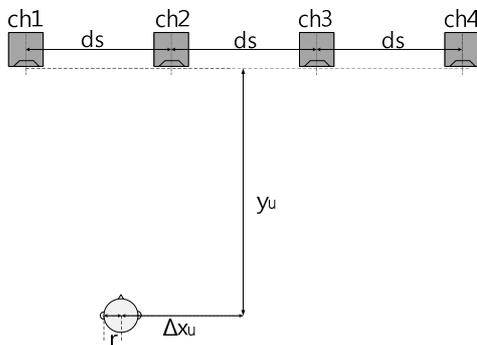


그림 2. 4개의 스피커를 이용한 실험 환경

Fig. 2. Test environment with 4 loudspeakers.

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{24} \end{bmatrix} \quad (2)$$

그림 3은 청취자가 좌, 우로 이동하는 상황에서 구동되는 스피커를 각각 다르게 선택하여 이에 따른 sweet spot 면적을 구한 것이다. 구동되는 스피커들의 중앙 부근에 청취자가 위치할 경우 sweet spot 면적이 넓어지는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 sweet spot 면적을 넓히기 위해 청취자 위치에 대하여 대칭 구조를 가지는 스피커 쌍을 구동하는 것이 필요하고, 따라서 제안하는 방법은 첫 단계로서 청취자 위치에 대하여 대칭 구조를 가지는 스피커 쌍 후보를 다수 선택한다.

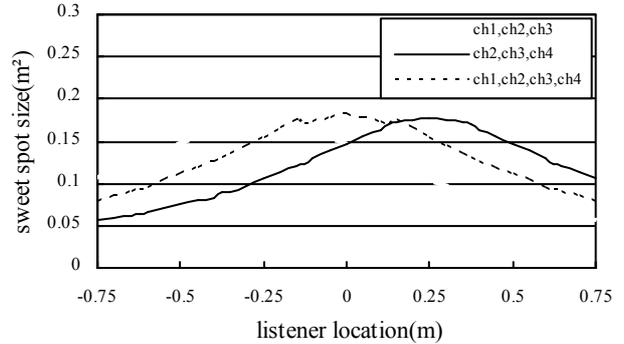


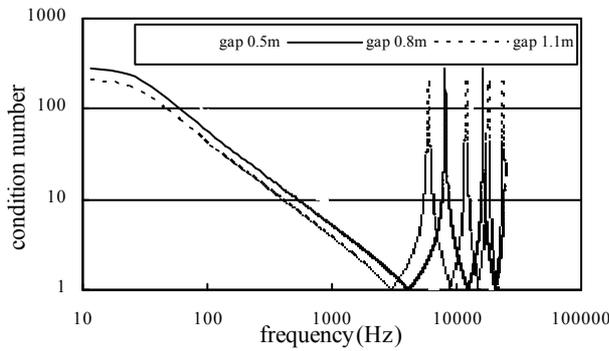
그림 3. 3가지 스피커 배열에 대한 sweet spot size 비교

Fig. 3. Comparison of sweet spot size for three loudspeaker set-ups.

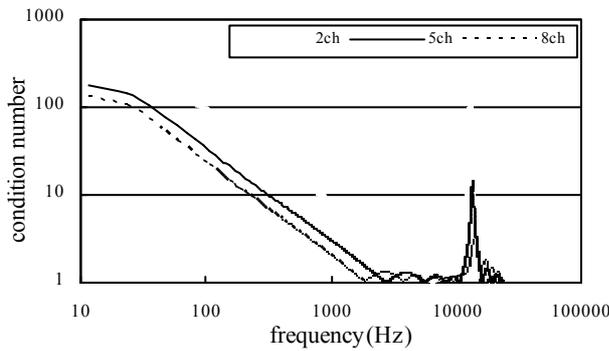
CTC를 적용할 경우에는 특정 주파수 영역에서 행렬 C 의 크기가 급격히 증가하여 피크가 발생하는 ringing 현상이 발생한다. 이 현상은 이상적인 환경에서는 청취자에게 영향이 없지만, 실제 환경에서는 영향을 미치기 때문에 행렬 C 의 크기를 제한해야 한다. 본 논문에서는 ringing 현상을 감소시키기 위하여 스피커 배치에 따른 ringing 현상의 특성을 먼저 파악하였다. 이를 위하여 행렬 C 와 유사한 크기 응답을 갖는 condition number를 이용하여 ringing 현상이 발생하는 주파수 구간을 확인한다.

그림 4는 스피커 개수와 간격을 변화시키면서 condition number를 측정 한 결과이다. (a)에서는 스피커 간의 간격이 좁을수록 피크 값은 증가하지만, 피크 사이의 주파수 간격이 넓어지면서 피크가 존재하는 주파수 영역이 감소하는 것을 확인할 수 있다. (b)에서는 스피커 개수가 증가할수록 피크 값이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 ringing 현상이 발생하는 주파수 영역을 감소시키기 위하여 구동되는 스피커 간의 간격을 좁게 설정하고, 또한 추가적인 신호처리를 통하여 피크 값을 제한하는 방법을 제안한다.

이상의 분석을 통하여 최종 구동되는 스피커는 청취자 위치에 대하여 대칭 구조를 가지면서 스피커 사이의 간격이 좁아야 하는 것을 확인하였다. 따라서 앞에서 일차적으로 선택된 대칭 스피커 쌍 후보들 중에서 스피커 간격이 가장 먼 스피커 쌍과 이 스피커 쌍 사이에 있는 모든 스피커를 구동 스피커로 선택한다. 다음으로 ringing 현상을 발생시키는 행렬 C 의 피크의 크기를 제한하기 위하여 식 (3)과 같이 행렬 C 의 요소 C_{mn} 을 조정하여 ringing 현상을 감소시킨다. 식 (3)의 $|C_{mn}|$ 는 C_{mn} 의 크기를 나타내고, Γ 는 $|C_{mn}|$ 의 최소값의 4배(6dB)를 나타낸다. 제안하는 방법은 식 (3)과 같이 $|C_{mn}|$ 값이 Γ 보다 클 때 Γ 와 같아지도록 C_{mn} 를 조정한다[4].



(a)



(b)

그림 4. 스펙트럼에서의 condition number. (a) 스피커 간격에 따른 condition number. (b) 스피커 개수에 따른 condition number
Fig. 4. Condition number in spectrum. (a) condition number for different loudspeaker distances. (b) condition number for different number of loudspeakers.

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \end{bmatrix}^T \quad (3-1)$$

$$C_{mn}(f) = \frac{C_{mn}(f)}{|C_{mn}(f)|} \times \Gamma \quad \text{if } |C_{mn}(f)| > \Gamma \quad (3-2)$$

$$C_{mn}(f) = C_{mn}(f) \quad \text{if } |C_{mn}(f)| \leq \Gamma \quad (3-3)$$

따라서 제안하는 방법은 대칭 스피커 쌍 선택과 최종 구동 스피커 선택, 그리고 ringing 현상 제한 과정으로 구성되며, 그림 5가 제안하는 스피커 구동 방법의 순서도를 나타낸다. 제안하는 과정에서 선택되지 않은 스피커는 구동되지 않는다.

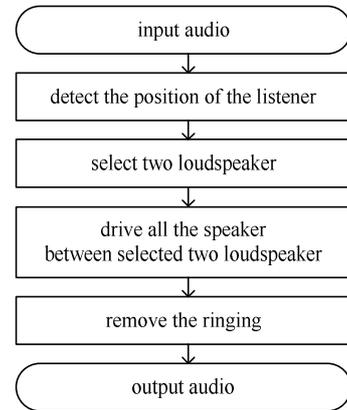


그림 5. 제안하는 시스템의 순서도

Fig. 5. Flowchart of the proposed system.

3. 모의실험

청취자 위치에 따른 최적 sweet spot 제공을 위한 스피커 구동 실험을 하기 위하여 4개의 스피커를 사용한 재생 환경에서 모의실험을 진행하였다. 모의실험 환경은 그림 2와 같다. d_s 는 스피커 간격을 나타내며 0.5m로 설정하였고, y_u 는 청취자와 스피커 배열 간의 y축 거리를 나타내며 3m로 설정하였다. r 은 머리의 반지름 길이를 나타내며 0.08m로 설정하여 실험하였다.

모의실험은 제안한 방법으로 청취자 위치에 따라 구동되는 스피커를 선택하여 수행한다. 그림 6은 제안한 방법과 같이 행렬 C 의 요소 중 C_{11} 을 조정하여 C_{11} 의 크기를 측정할 결과이며, 원본의 피크 부분이 일정한 수준으로 낮아져서 ringing 현상이 감소된 것을 확인할 수 있다.

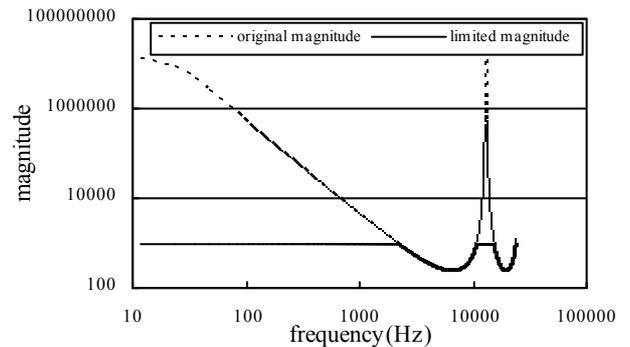


그림 6. 원본 행렬 C_{11} 의 크기와 제한된 행렬 C_{11} 의 크기

Fig. 6. Original magnitude and limited magnitude for matrix C_{11} .

표 1은 청취자 위치를 스피커가 위치한 범위(-0.75m~0.75m)에서 이동시킬 때, 최적 sweet spot을 가지도록 제안한 방법에 따라 선택된 구동 스피커를 나타낸다. 그림 7은 표 1과 같이 구동 스피커를 선택할 경우 sweet spot 면적을 측정할 결과와, 기존 방식처럼 4개의 스피커를 모두 구동시킬 때의 sweet spot 면적을 측정할 결과이다. 기존의 방법은 중심에서 멀어지면 sweet spot 면적이 줄어들지만, 스피커를 선택하여 구동하면 중심에서 멀어지더라도 sweet spot 면적이 0.17m² 부근에

서 유지되고 있어, 제안한 방법으로 스피커를 선택하여 구동시킬 때 향상된 청취 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

표 1. 청취자 위치에 따른 구동 스피커

Table 1. Selected loudspeakers for each listener position.

Listener Position (m)	Selected Speakers
-0.750 ~ -0.375	ch1, ch2
-0.375 ~ -0.125	ch1, ch2, ch3
-0.125 ~ 0.125	ch1, ch2, ch3, ch4
0.125 ~ 0.375	ch2, ch3, ch4
0.375 ~ 0.750	ch3, ch4

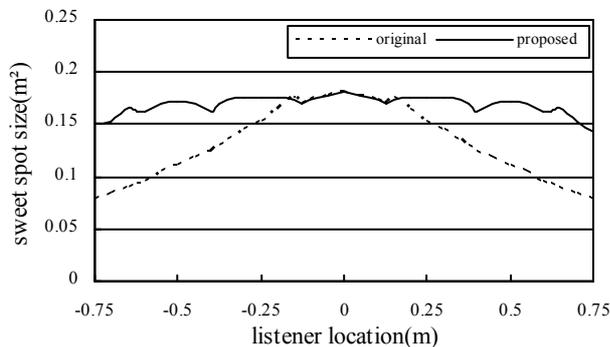


그림 7. 제안한 구동 스피커 선택에 따른 sweet spot size와 기존 방식에 의한 sweet spot size 비교

Fig. 7. Comparison of sweet spot size between the proposed method and the conventional method.

4. 결론

본 논문에서는 4개의 스피커를 이용한 음향 재생 환경에서 청취자 위치에 따라 구동 스피커를 선택하여 최적 sweet spot을 적용하는 기술을 제안하였다. 제안한 방법은 먼저 sweet spot의 면적을 넓히도록 청취자 위치에 대하여 대칭 구조를 가지는 스피커 쌍 후보들을 선택한다. 다음으로, ringing 현상을 감소시키기 위해 선택된 스피커 쌍 후보 중에서 스피커 간격이 가장 먼 스피커 쌍과 이 스피커 쌍 사이에 있는 모든 스피커를 구동한다. 마지막으로 행렬 C의 크기가 일정한 값을 넘지 않도록 제한하여 ringing 현상을 제한시킨다.

제안한 방법의 성능을 모의실험으로 측정하였고, 청취자의 위치에 따라 구동 스피커를 선택하는 방법이 기존의 구동 스피커를 고정하는 방법보다 청취자의 움직임에 대하여 향상된 성능을 제공하는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학IT연구센

터육성 지원사업(NIPA-2014-H0301-14-1021)과 미래창조과학부의 글로벌전문기술개발사업(10047031)의 연구결과로 수행되었음.

참고문헌

[1] S. M. Kim, Y. W. Lee and Y. J. Lee, "3D sound based on audio/video analysis," *The Summer Conference of IEIE*, pp. 1924-1927, vol. 36, No. 1, July 2013.

[2] K. S. Lee and S. P. Lee, "A real-time audio system for adjusting the sweet spot to the listener's position," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, pp. 835-843, vol. 56, No. 2, May 2010.

[3] Y. Kim, O. Deille and P. A. Nelson, "Crosstalk cancellation in virtual acoustic imaging systems for multiple listeners," *Journal of Sound and Vibration*, pp. 251-266, vol. 297, no. 1-2, June 2006.

[4] T. Takeuchi and P. A. Nelson, "Optimal source distribution for binaural synthesis over loudspeakers," *Journal of Sound and Vibration*, pp. 2786-2797, vol. 112, No. 6, December 2002.