

반향 환경에서의 스피커 어레이를 이용한 소리 집중 기술

A Speaker Array System for Sound Spotlight in a Reverberant Environment

백 순 호*, 송 명 석*, 강 홍 구*, 이 석 필**

(Baek, Soonho*, Song, Myung-Suk*, Kang, Hong-Goo*, Lee, Seok-Pil**)

*연세대학교 전기전자공학부, **한국전자부품연구원

(접수일자: 2009년 2월 2일; 수정일자: 2009년 4월 15일; 채택일자: 2009년 7월 4일)

본 논문에서는 반향이 있는 환경에서 스피커 어레이를 이용하여 소리를 집중 시키는 기술을 제안한다. 제안 방법은 각 스피커에서 원하는 지점까지의 시스템 응답 함수의 에너지 합을 최대화함으로써 반향이 있는 환경에서도 원하는 지점에서의 음압을 최대화할 수 있다. 기존에 제안된 광대역 빔 형성기 (Broadband beamformer)를 이용한 소리 집중 기술의 반향 환경 하에서의 문제점에 대하여 살펴본 후, 제안 방법이 갖는 장점을 시술한다. 16채널로 구성된 스피커 어레이 시스템을 이용한 실험 결과를 통해 반향이 있는 환경에서 제안 방법이 음압 집중도 측면에서 기존 방법보다 우수한 성능을 나타냄을 확인 하였다.

핵심용어: 스피커 어레이, 빔 형성기, 반향, 소리 집중 기술

투고분야: 음향 신호처리 분야 (1.1)

This paper proposes an efficient speaker array system to spotlight a sound into a target position in a reverberant environment. The proposed method introduces a criterion of maximizing the energy of system response from each channel to the target position. Simulation results with a sixteen channel speaker array system prove that the performance of the proposed method improves that of the conventional method that uses a broadband beamformer in a reverberant environment.

Keywords: Speaker array, Sound spotlight, Reverberant environment, Broadband beamformer

ASK subject classification: Acoustic Signal Processing (1.1)

I. 서론

최근 스피커 어레이를 이용해 주위 사람들에게 방해받지 않고 원하는 지점에서만 높은 음압을 형성시키는 사운드 스포트라이트 (sound spotlight) 기술이 주목을 받고 있다 [1-3]. 인렬로 배열된 스피커 어레이를 이용한 기술은 비용 측면에서 저렴하고, 기존의 다채널 스피커 시스템과 상존할 수 있다는 장점이 있다. 스피커 어레이를 이용한 소리 집중 기술을 이용해 TV나 홈씨어터 등 실내 디지털 멀티미디어 시스템의 부가가치를 한 단계 높여줄 수 있을 것으로 판단되며, 해당 기술을 도입한 실내 디지털 멀티 미디어 시스템의 상용화가 해외에서 진행 중이다 [4].

스피커 어레이 기술은 각 스피커 출력의 크기와 위상을 조절하여 원하는 방향 혹은 지점에서의 음압이 최대가 되도록 하는 방법으로, 디지털 멀티 미디어 시스템 환경에는 일반적으로 광대역 Delay-and-Sum Beamformer (DSBF)가 사용되어 왔다 [4-7]. 목적 지점에서 각 스피커 출력의 위상을 일치시킴으로써 높은 음압을 얻는 DSBF는 상대적으로 사이드 로브 (sidelobe)의 레벨이 높고, 특히 반향 (reverberation)이 존재하는 환경에서는 성능이 저하되는 문제점을 갖는다 [1][2]. 이를 극복하기 위해 제안된 Constrained-Optimized Beamformer (COBF)는 메인 로브 (main lobe)의 너비가 일정하도록 유지하는 동시에 사이드 로브의 레벨을 최소화하도록 사운드 빔을 형성함으로써 반향이 존재하는 환경에서도 DSBF에 비해 상대적으로 높은 음압 집중도를 가질 수 있다. 그러나 COBF는 반향 성분에 대한 정량적 분석 없이 목적 방향으로의 빔에 대한 사이드 로브의 레벨을 최소화하도록 설

책임저자: 강 홍 구 (hgkang@dsp.yonsei.ac.kr)
서울 서대문구 신촌동 연세대학교 제2공학관 디지털 신호처리 연구실
(전화: 02-2123-4534; 팩스: 02-364 4870)

계된 기술로 공간의 반향 특성과는 무관하게 독립적으로 동작한다 [1].

본 논문에서는 각 스피커로부터 목적 지점까지의 시스템 응답, 즉 반향 성분이 알려져 있다는 가정 하에서 음압 집중 성능을 높일 수 있는 스피커 어레이 기술을 제안한다. 목표 지점에서의 시스템 응답 에너지를 최대화 하는 시스템을 설계한다. 반향 성분을 알고 있다는 가정하에 16채널 스피커 어레이 시스템을 설계하고, 컴퓨터 시뮬레이션과 측정 실험을 수행하여 제안 방법의 성능을 검증한다. 성능 검증 방법으로 실험 환경으로 설정한 공간의 음압 차이를 색 대비로 나타낸 음압분포도를 사용하였다.

II. 문제 정의

그림 1은 반향이 있는 방에서의 스피커 어레이 시스템을 나타낸 것이다. 각 스피커에서 필터링 된 음압 출력을 각기 다른 시스템 응답을 갖는 방향 채널을 통과한 뒤 임의의 측정 위치에 도달한다. N개의 스피커에 대해 측정 위치에서의 출력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Y(z) = S(z) \sum_{i=1}^N W_i(z) G_i(z) \quad (1)$$

여기서 $S(z)$ 는 입력 신호이고, $W_i(z)$ 는 i 번째 채널의 필터를 나타낸다. $G_i(z)$ 는 i 번째 스피커에서 측정 위치까지의 반향 성분의 주파수 응답을 나타낸다.

측정 위치에서의 평균 음향 에너지는 다음과 같다.

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |y(n)|^2 \propto \int |Y(z)|^2 dz \quad (2)$$

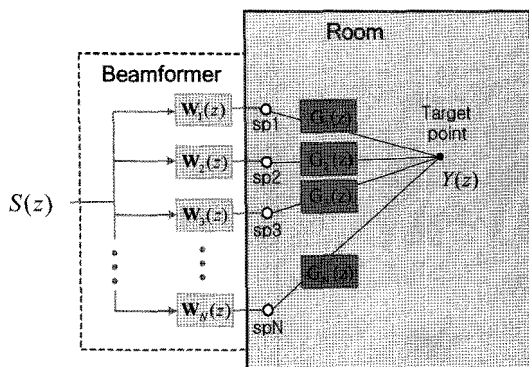


그림 1. 반향이 있는 방에서의 스피커 어레이 시스템
Fig. 1. Speaker array system in a reverberant room.

해당 공간의 음압 분포를 나타내기 위한 평균 음향 에너지의 비를 다음과 같이 설정한다.

$$E_{ratio} = \frac{E}{E_{ref}} \quad (3)$$

여기서 E_{ref} 는 소리를 집중 시키려는 목표 지점 (target point)에서의 평균 에너지이다.

III. DSBF

그림 2는 가장 널리 알려진 광대역 빔 형성기인 DSBF의 개념도이다. 목표 지점에서 각 채널 출력의 위상이 일치되도록 각 스피커에 적당한 지연시간을 줌으로써, 목표지점에서 음압을 최대화 할 수 있다. 실선으로 그려진 스피커는 스피커가 실제로 위치하는 지점이고, 점선으로 그려진 스피커는 가상 스피커의 위치이다. 가상 스피커의 위치는 목표 지점에서 가장 멀리 떨어진 스피커와 목표지점의 거리를 기준으로 목표지점으로부터 해당 스피커 방향으로 기준만큼 떨어진 곳에 위치하게 된다. 가상 스피커의 위치와 해당 스피커의 실제 위치의 차이만큼 지연시간을 주게 되면 목표지점에서의 각 채널의 신호는 모두 동일 위상을 가짐으로써 음압이 최대가 된다. 스피커가 N개가 있을 때 i 번째 스피커에 주어지는 지연시간 d_i 는 다음과 같다.

$$d_i = \frac{R_{max} - R_i}{c} \quad (4)$$

여기서 R_i 은 목표 지점과 i 번째 스피커간의 거리이고,

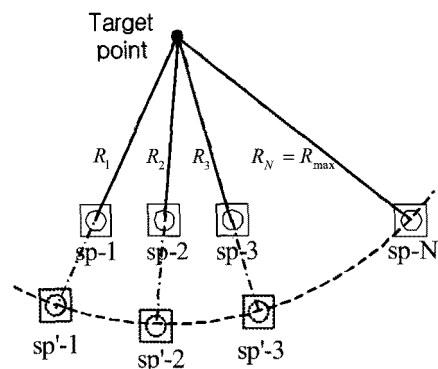


그림 2. DSBF 개념도
Fig. 2. Diagram of the DSBF algorithm.

4.2. 시스템 응답 에너지 최대화

목표 지점에서 시스템 응답의 에너지를 최대화 함으로써 해당 지역에 소리를 집중시킬 수 있다. 목표 지점에서 빔 형성기와 채널에 의한 전체 시스템 응답의 에너지를 최대화 하는 유한임펄스응답 필터는 다음 식을 통해 얻을 수 있다.

$$w_{opt} = \arg \max_w \frac{w^T C w}{w^T w} \quad (19)$$

여기서 행렬 C 는 대칭 행렬이고, positive definite이다. 그러므로 레일리 부등식에 의해 다음과 같은 성질을 가진다 [9]

$$\lambda_{min}(C) \leq \frac{w^T C w}{w^T w} \leq \lambda_{max}(C) \quad (20)$$

여기서 λ_{min} 와 λ_{max} 는 각각 행렬 C 의 최소 고유값과 최대 고유값이다. 그러므로 비용 함수를 최대화 하는 w 는 행렬 C 의 최대값을 가지는 고유벡터가 된다.

V. 시뮬레이션 결과

5.1. 시뮬레이션 환경

$4 \times 6 \times 2[m^3]$ 의 크기를 갖는 방에 좌표 (2, 0.5)를 중심으로 16채널 일렬 등간격 스피커 어레이를 x축 방향으로 설치하였다. 각각의 스피커는 점음원이라고 가정한다. 일반적으로 빔 형성기에서 제어 가능한 주파수 대역의 상한과 하한은 어레이를 구성하는 스피커들간의 간격과 어레이의 총 길이에 의해 결정된다. 파장이 상대적으로 짧은 고주파 신호는 엘리어싱이 발생하고, 파장이 상대적으로 긴 저주파 신호는 방향성이 낮아져 빔 형성이 어려워지므로 스피커 간격이 d 이고 어레이 길이가 L 인 빔 형성기에서 소리의 속도가 c 일 때 컨트롤 가능한 주파수 대역의 상한 주파수 f_h 와 하한 주파수 f_l 는 다음과 같이 정해진다.

$$f_h = \frac{c}{2d} \quad (21)$$

$$f_l = \frac{c}{L} \quad (22)$$

따라서, 실험에서 가정한 스피커 배열로 제어 가능한

주파수 대역은 500~3500 Hz이다. 방의 반향은 정확하게 알고 있다는 이상적 상황을 가정하기 위해 Image method를 이용하여 각 스피커로부터 목표 지점까지의 임펄스 응답을 계산한다 [8]. 이때 천후좌우 벽의 반사 계수는 0.9이고, 바닥과 천장의 반사 계수는 0.7로 설정하였다.

이번 장에서 시뮬레이션을 통해 좌표 (2, 3.5)과 좌표 (1, 3.5)을 목표 지점으로 하여 필터 길이를 100차, 200차, 그리고 300차로 변화한 후 제안 방법과 DSBF의 음압 분포도를 비교한다. 시뮬레이션에 사용되는 신호의 샘플링 주파수는 36 kHz이고, 입력신호는 500~3500 Hz로 밴드패스된 백색잡음을 사용한다.

5.2. 결과

그림 3은 목표 지점이 (2,3.5)일 때 DSBF를 이용했을 때와 제안한 방법을 이용했을 때의 음압 분포도다. 음압

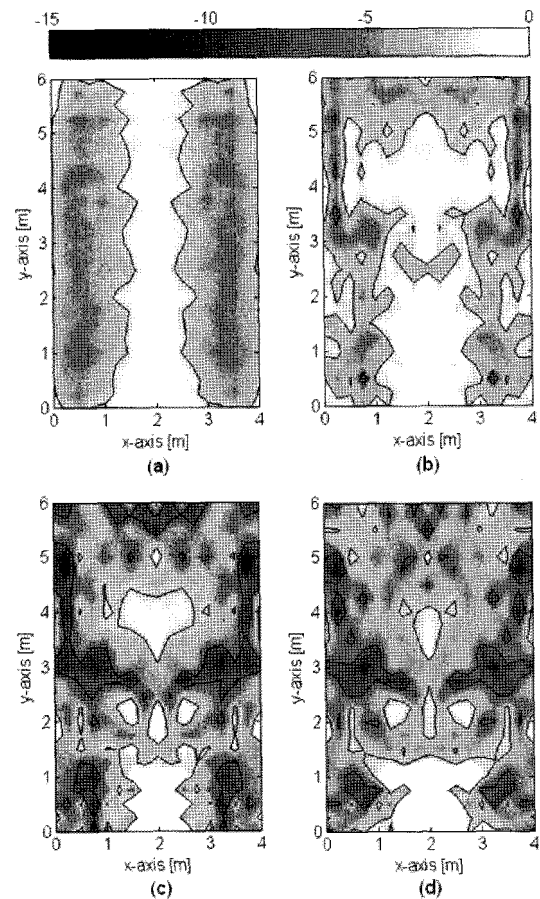


그림 3. 목표 지점이 (2, 3.5)일 때 음압 분포도 시뮬레이션 결과. (a) DSBF, (b) 제안한 방법 (유한임펄스응답 필터 길이=100), (c) 제안한 방법(200), (d) 제안한 방법 (300)

Fig. 3. The sound pressure distribution simulated when target point is (2,3.5). (a) DSBF, (b) proposed method (order of FIR filter =100) (c) proposed method(200), (d) proposed method (300).

분포도는 해당 지점의 평균 음향 에너지의 비를 로그 스케일로 나타낸 것으로 해당 지점과 다른 지점의 음압의 차이를 색의 대조로 나타낸 것이다. 음압 분포도에서 공간 좌표 (m, n) 에 해당하는 음압 $P(m, n)$ 는 다음과 같다.

$$P(m, n) = 10 \log E_{ratio} = 10 \log \frac{E(m, n)}{E_{ref}} \quad (23)$$

여기서 $E(m, n)$ 는 공간 좌표 (m, n) 에서 구한 평균 음향 에너지이다. 음압 분포도를 통해 상대적으로 음압이 높은 곳과 낮은 곳을 알 수 있다. 목표 지점을 둘러 싸고 있는 첫 번째 경계선은 목표 지점의 음압보다 3 dB 낮은 지점을, 두 번째 경계선은 목표 지점의 음압보다 9 dB 낮은 지점을 나타낸 것이다.

길이가 100차인 필터를 사용했을 때에는 음압이 높은 구역이 DSBF에 비해 목표 지점을 중심으로 넓게 나타난다. 그러나, 200차 그리고 300차인 필터를 사용했을 때에는 DSBF에 비해 음압이 높은 구역이 좁고, 목표 지점을 제외한 다른 지점은 상대적으로 낮은 음압을 보이는 것을 확인 할 수 있다.

그림 4는 목표 지점 (2, 3.5)를 중심으로 일정 반경 떨어진 지점의 평균 음압을 나타낸 것이다. 목표 지점으로부터의 거리에 따른 음압 감소율을 통해서 음압이 집중되는 구간의 크기와 목표 지점을 제외한 구간에서의 음압의 크기를 비교할 수 있다. 음압이 집중 되는 지역이 좁고 목표 지점을 제외한 구간에서의 음압이 낮을수록 음압 집중도가 높은 것으로 해석 할 수 있다. 그림 4의 결과에 의하면 길이가 100차인 필터를 사용했을 때, 기존의 DSBF보다 반경 0.75 m 범위 밖의 구간에서 음압이 높는데, 이는 목표 지점을 제외한 구간에서의 음압 크기가 기존의 DSBF보다 높아 음압 집중도가 기존의 방법에 비해

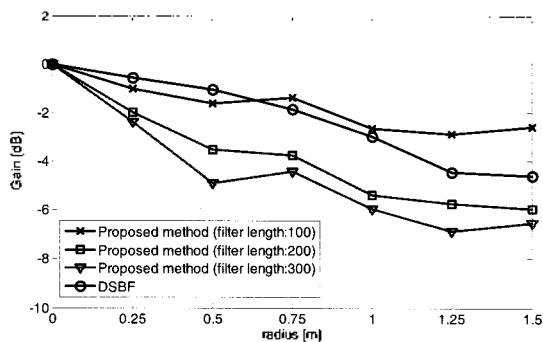


그림 4. 목표 지점이 (2, 3.5)일 때 거리에 따른 평균 음압 시뮬레이션 결과
Fig. 4. The average sound pressure per distance from target point simulated when target point is (2, 3.5).

낮은 것을 의미한다. 반면, 길이가 200차, 300차인 필터를 사용했을 때의 실험 결과는 제안한 방법이 기존의 DSBF에 비해 목표 지점에서 상대적으로 높은 음압 집중도를 보인다.

그림 5는 목표 지점이 (2, 3.5)일 때 전체 측정 넓이에 대한 음압이 특정 레벨 이하인 지역의 넓이의 비를 나타낸 것으로 소리가 들리지 않는 지역의 상대적인 넓이를 보여준다. 즉, 이 비율이 높을수록 음압이 낮은 지역이 넓고, 상대적으로 음압 집중도가 높은 것으로 이해 할 수 있다. 그림 5의 결과에 의하면 길이가 100차인 필터를 사용했을 때에 기존의 DSBF보다 음압이 일정 이하인 지역이 좁은 반면 길이가 200차, 300차인 필터를 사용했을 때에는 기존의 DSBF보다 음압이 일정 이하인 지역이 넓다. 그러므로 목표 지점을 제외한 구간에서 낮은 음압을 얻기 위해서는 충분한 길이의 필터가 필요하다는 사실을 알 수 있다.

그림 6은 목표 지점이 (1, 3.5)일 때 DSBF를 이용했을 때와 제안한 방법을 이용했을 때의 음압 분포도이다. 그림 7은 목표 지점 (1, 3.5)를 중심으로 일정 반경 떨어진 지점의 평균 음압을 나타낸 것이고, 그림 8은 목표 지점이 (1, 3.5)일 때 전체 측정 넓이에 대한 음압이 일정 이하인 지역의 넓이의 비를 나타낸 것이다. 이전과 실험과 마찬가지로 100, 200, 300차의 필터를 사용하여 결과를 비교하였다. 그림 6, 7, 8의 실험 결과에 의하면 제안한 방법이 DSBF보다 목표 지점을 제외한 구간에서 낮은 음압 분포를 보이고, 저음압 지역 분포 비율이 높은 것을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과로부터 반향 환경에서 충분한 길이의 필터를 사용하면 제안 방법이 기존 방법 보다 목표 지점을 제외한 구간에서 음압이 낮고, 목표 지점에 비해 음압

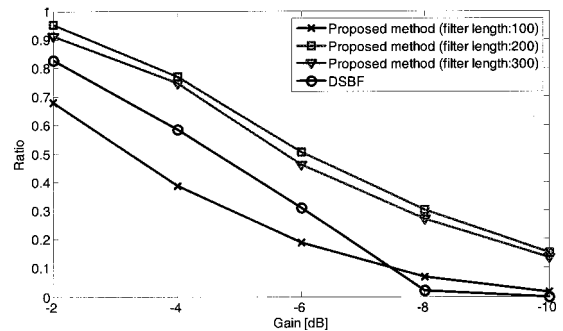


그림 5. 목표 지점이 (2, 3.5)일 때 전체 측정 넓이에 대한 음압이 특정 레벨 이하인 지역의 넓이 비 시뮬레이션 결과
Fig. 5. The ratio of the area below certain level of sound pressure to the total measuring area simulated when target point is (2, 3.5).

이 특정 dB 낮은 지역의 분포가 상대적으로 넓어져 소리를 집중 시키는 성능이 뛰어난 것을 알 수 있다.

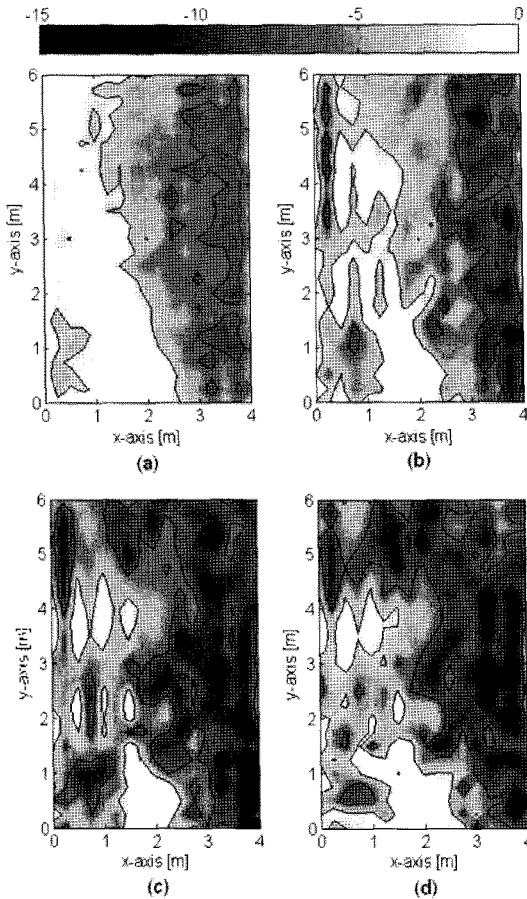


그림 6. 목표 지점이 (1,3.5)일 때 음압 분포도 시뮬레이션 결과. (a) DSBF, (b) 제안한 방법 (유한임펄스응답 필터 길이 = 100), (c) 제안한 방법(200), (d) 제안한 방법(300)

Fig. 6. The sound pressure distribution simulated when target point is (1,3.5). (a) DSBF, (b) proposed method (order of FIR filter = 100) (c) proposed method(200), (d) proposed method (300).

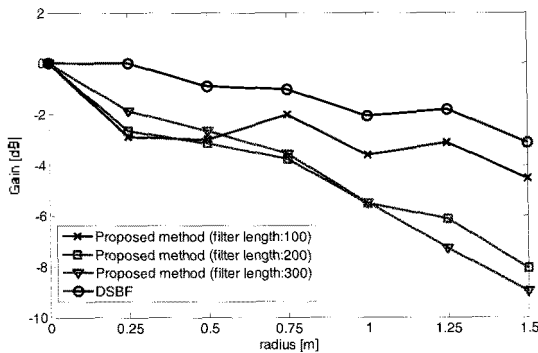


그림 7. 목표 지점이 (1, 3.5)일 때 거리에 따른 평균 음압 시뮬레이션 결과

Fig. 7. The average sound pressure per distance from target point simulated when target point is (1, 3.5).

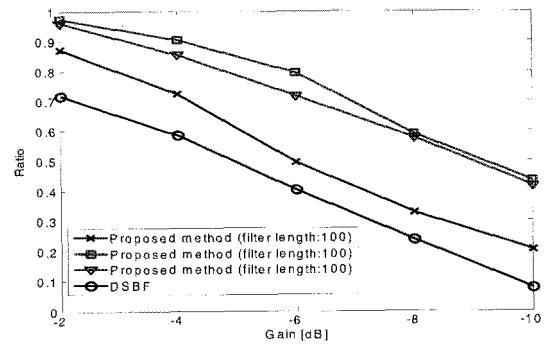


그림 8. 목표 지점이 (1, 3.5)일 때 전체 측정 넓이에 대한 음압이 특정 레벨 이하인 지역의 넓이 비 시뮬레이션 결과
Fig. 8. The ratio of the area below certain level of sound pressure to the total measuring area simulated when target point is (1, 3.5).

VI. 측정 실험

6.1. 실험 환경

그림 9와 같이 $4 \times 6 \times 2 [m^3]$ 크기의 방에 지름이 40 mm 인 스피커 16개를 등간격 (0.045 m)으로 배열하였다. 멀티채널 제어를 위해 MOTU Audio 24 I/O를 이용하였다. 목표 지점은 스피커 어레이의 정면 (정면 1.5 m 앞)과 측면 (정면 1.5 m 앞에서 좌측으로 1 m 떨어진 지점)으로 한다. 사람에 의해 발생하는 왜곡은 없다는 가정하에 RION NL-32 음압 측정기를 이용하여 스피커 어레이에서 정면 1 m 떨어진 $2 \times 1 [m^2]$ 크기의 측정 구간을 매 0.25 m 간격으로 음압을 측정하였다. 길이가 150차인 유한임펄스응답 필터를 사용하여 제안한 음압 집중기법을 구현하였다.

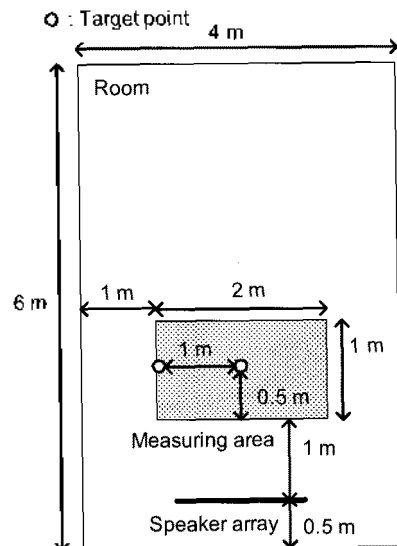


그림 9. 측정 실험 환경

Fig. 9. The experimental environment.

6.2. 결과

그림 10은 목표 지점이 스피커 어레이의 정면일 때 기존의 DSBF와 제안한 방법의 음압 분포도이다. 그림 11은 목표 지점을 중심으로 일정 반경 떨어진 지점의 평균 음압을 나타낸 것이고, 그림 12는 그림 10에서 전체 측정 넓이에 대한 음압이 특정 레벨 이하인 지역의 넓이의 비를 나타낸 것이다. 음압 분포도로부터 제안한 방법이 목표 지점을 제외한 구간에서의 음압이 DSBF보다 낮은 것을 알 수 있다. 그림 10에서 목표 지점으로부터 1 m 떨어

진 지점들의 평균 음압이 기존의 DSBF는 목표 지점의 음압보다 10 dB 낮고, 제안한 방법은 15 dB 낮다. 그리고 그림 12에서 목표 지점의 음압보다 10 dB 낮은 지역의 넓이의 비율은 기존의 DSBF는 측정 구간의 27%이고, 제안한 방법은 80%이다. 목표 지점이 정면일 때 제안한 방법이 기존의 DSBF보다 목표 지점으로부터 거리에 따른 음압 감쇠율이 높고, 음압이 낮은 구간도 넓다.

그림 13은 목표 지점이 스피커 어레이의 측면일 때 기존의 DSBF와 제안한 방법의 음압 분포도이다. 그림 14는

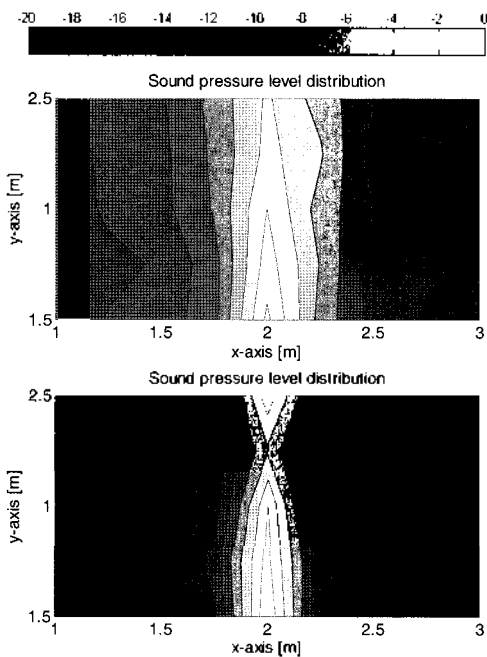


그림 10. 목표 지점이 정면일 때 음압 분포도 측정 실험 결과 (a) DSBF, (b) 제안한 방법 (유한임펄스응답 필터 길이=150)

Fig. 10. The sound pressure distribution experimented when target point is front of speaker array. (a) DSBF, (b) proposed method (order of FIR filter = 150).

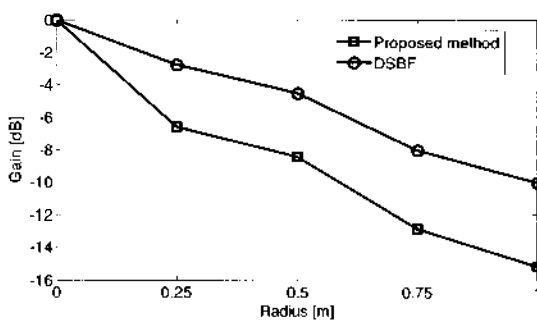


그림 11. 목표 지점이 정면일 때 거리에 따른 평균 음압 측정 실험 결과

Fig. 11. The average sound pressure per distance from target point experimented when target point is front of speaker array.

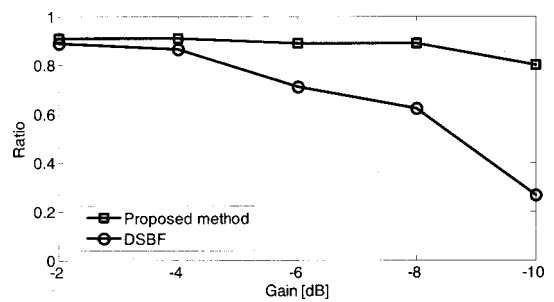


그림 12. 목표 지점이 정면일 때 전체 측정 넓이에 대한 음압이 특정 레벨 이하인 지역의 넓이 비 측정 실험 결과

Fig. 12. The ratio of the area below certain level of sound pressure to the total measuring area experimented when target point is front of speaker array.

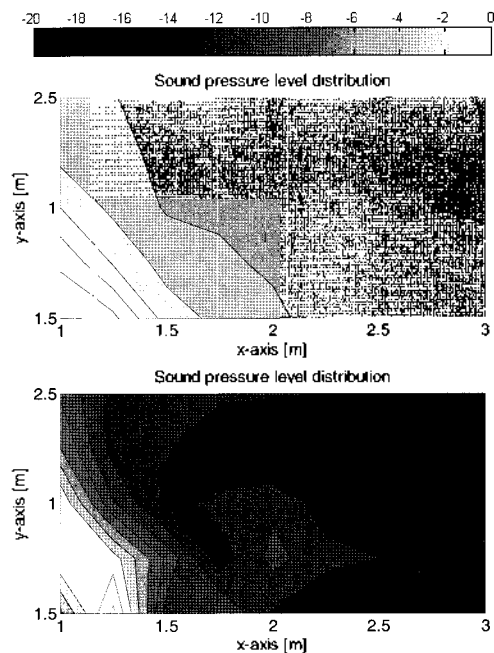


그림 13. 목표 지점이 측면일 때 음압 분포도 측정 실험 결과 (a) DSBF, (b) 제안한 방법 (유한임펄스응답 필터 길이=150)

Fig. 13. The sound pressure distribution experimented when target point is the side of speaker array. (a) DSBF, (b) proposed method (order of FIR filter = 150).

VII. 결론

본 논문에서는 필터와 반향 채널에 의한 전체 시스템 응답을 최대화 하는 필터 계수를 설계하여 반향 환경에서 원하는 지점에 소리를 집중 시키는 스피커 어레이 기술을 제안하였다. 시뮬레이션 결과와 측정 실험 결과로부터 제안한 방법이 반향이 있는 환경에서 기존의 기술보다 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. 제안한 알고리즘은 목표 지점에서의 주파수 응답을 고려하지 않아 목표 지점에서의 신호가 왜곡 될 수 있는 문제점이 있다. 사용자에게 음원을 왜곡 없이 전달하기 위해 반향에 의한 영향을 제거하는 기술로 탈반향 기술이 있다. 제안한 소리 집중기에 기존의 탈반향 기술을 접목 시켜 사용자에게 최대한 음원에 가까운 음질을 제공 하는 알고리즘의 개발이 필요하다.

참고 문헌

1. 백순호, 송명석, 이석필, 강홍구, "제약 조건 하에서의 최적화 기법에 기반한 사운드 빔 형성 기술," *한국음향학회 2008년도 춘계 학술발표대회 논문요약집*, 27권, 1호, 25쪽, 2008.
2. M. Song, S. Lee, H. Kang, "Simulation and Measurement of Sound Beam Forming by Speaker-Array in Room Reverberation Environment," in *Proc. ICEIC2008*, pp. 1050-1054, Jun. 2008.
3. C. Lee, J. Chang, J. Park, and Y. Kim, "Person Monitor & TV Audio System by Using Loudspeaker Array," *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference*, vol. 18, no. 7, pp. 701-710, 2008.
4. Yu Fukasawa, Hiroshi Takemura and Hiroshi Mizoguchi, "Implementation of Luggable Linear Speaker Array System and Formation of Sound Spot," in *Proc. SICE Annual Conference 2007*, pp. 668-671, Sept. 2007.
5. Barr D. Van Veen and Kevin M. Buckley, "Beamforming: A Verstaile Approach to Spatial Filtering," *IEEE Trans. On ASSP*, vol. 5, no. 2, pp. 4-24, 1988.
6. F. Kusunoki, I. Satoh, S. Inagaki, and H. Mizoguchi, "Sound Spot: A Next-generation Audio-guide System for Museums," in *Proc. ACE'07*, pp. 272-273, Jun. 2007.
7. K. Sakaya, T. Toba, H. Mizoguchi, S. Kagami, T. Takano, K. Nagashima, "Measurement of 3D Sound Field Formed by Orthogonal Lines Speaker Array," *IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics*, Vol. 3, pp. 2757-2762, 2004.
8. Jont B. Allen and David A. Berkley, "Image Method for Efficiently Simulating Small-Room Acoustics," *Acoustical Society of America*, vol. 65, no. 4, pp. 943-950, 1979.
9. Edwin K.P. Chong and Stanislaw H. Zak, *An Introduction to Optimization second edition*, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 2001.

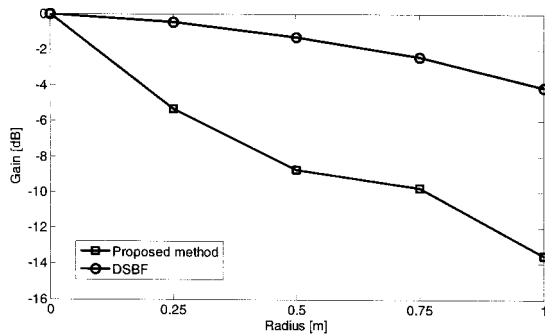


그림 14. 목표 지점이 측면일 때 거리에 따른 평균 음압 측정 실험 결과

Fig. 14. The average sound pressure per distance from target point experimented when target point is the side of speaker array.

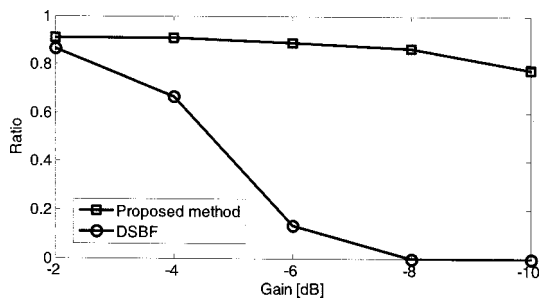


그림 15. 목표 지점이 측면일 때 전체 측정 넓이에 대한 음압이 특정 레벨 이하인 지역의 넓이 비 측정 실험 결과

Fig. 15. The ratio of the area below certain level of sound pressure to the total measuring area experimented when target point is the side of speaker array.

목표 지점을 중심으로 일정 반경 떨어진 지점의 평균 음압을 나타낸 것이고, 그림 15은 그림 13에서 전체 측정 넓이에 대한 음압이 일정 이하인 지역의 넓이의 비를 나타낸 것이다. 목표 지점이 정면일때와 마찬가지로 음압 분포도로부터 제안한 방법이 목표 지점을 제외한 구간에서의 음압이 DSBF보다 낮은 것을 알 수 있다. 그림 13에서 목표 지점으로부터 1 m 떨어진 지점들의 평균 음압이 기존의 DSBF는 목표 지점의 음압보다 4 dB 낮고, 제안한 방법은 13.5 dB 낮다. 그리고 그림 15에서 목표 지점의 음압보다 10 dB 낮은 지역의 넓이의 비율은 기존의 DSBF는 존재하지 않고, 제안한 방법은 78%이다. 목표 지점이 측면일 때 제안한 방법의 성능이 기존의 DSBF의 것 보다 우수하다.

그림 11과 그림 14, 그리고 그림 12와 그림 15의 결과를 비교해보면 기존의 DSBF는 목표 지점이 측면일 때 반향에 의해 성능이 크게 저하되는 반면, 제안한 방법은 반향에 의한 성능저하가 거의 없다는 것을 볼 수 있다.

저자 약력

•백 순 호 (Baek, Soonho)



2008년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 학사
2008년 3월~ 현재: 연세대학교 전기전자공학부 석박사
통합과정

•송 명 석 (Song, Myung-Suk)



2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 학사
2005년 3월~ 2007년 2월: 연세대학교 전기전자
공학부 석사
2007년 3월~ 현재: 연세대학교 전기전자공학부 박사
과정

•강 홍 구 (Kang, Hong-Goo)

연세대학교 전기전자공학부 교수

•이 석 필 (Lee, Seok-Pil)

한국음향학회지 제28권 제2호 참조