

생성된 가상 음장의 Pre-echo 감소를 위한 시간 및 공간 영역의 오차 가중치 함수 설계

Design of temporal and spatial error weighting function that reduces pre-echo artifact in reproduced sound field

이정민* · 최정우** · 박영진†

JungMin Lee, Jung-Woo Choi, Youngjin Park

1. 서 론

현재 연구되고 있는 대부분의 음장 재현 방법들은 다수의 제어 스피커들에 의해 형성되는 음파들의 조합으로 원하는 음장을 재현한다. 음장 재현 기법의 청취를 위해서는 연속적인 스피커 어레이를 불연속적인 스피커로 근사해야 하며, 에일리어싱 주파수 이상인 입력 신호에 대해 공간 상의 에일리어싱이 발생한다. 따라서, 청취자가 재현된 음장을 제어 영역에서 청취할 때, 듣고자 하는 음장의 파면보다 먼저 도달하는 프리에코 (Pre-echo) 성분을 먼저 인지하게 되어 가상 점 음원의 위치를 잘못 파악하거나, 음색이 변질된 음원을 청취하게 된다.⁽¹⁾

기존의 음장 재현 기법들은 주파수 영역에 대한 접근이 대다수이지만, 주파수 영역 접근법은 음장의 인과관계에 대한 고려와 음장의 가중치 적용이 어렵기 때문에 시간 영역 접근법을 사용하여 해결할 수 있는 방법을 제안한다. 본 논문에서는 Noh⁽²⁾가 제안한 최소 자승법을 이용한 음장 재현 기법의 시간 영역 접근을 사용하여 시간 및 공간의 오차 가중치를 설계하고, 이를 통해 프리에코를 감소시켜 위치 지각 왜곡 및 음원의 착색에 관한 문제를 해결할 수 있는 지에 대한 타당성 검토를 수행한다.

2. 본 문

2.1 Pre-echo 현상

최소 자승법을 이용한 음장 재현 기법의 재현된

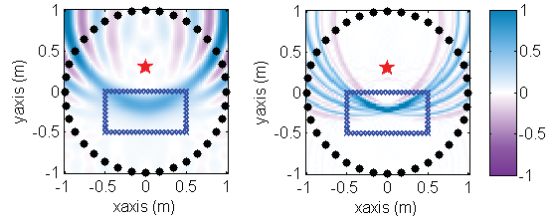


Figure 1. (Left) Sound field reproduction of 1kHz Gaussian pulse signal, (Right) Sound field reproduction of 5kHz Gaussian pulse signal, at time $t = 3.5$ msec.

음장의 모의실험 결과는 Figure 1과 같이 나타난다. 이 때, 반지름 1m, 10° 간격의 원형 배치된 점 음원을 제어 음원으로 사용되었고, 제어 영역의 크기는 1m × 0.5m, 가상 점 음원은 빨간 별 지점에 위치해있다. 이와 같은 배치에서, 1kHz 미만의 가우시안 펄스 신호는 재현되지만, 5kHz 미만의 가우시안 펄스 신호는 공간 상의 에일리어싱이 발생하여 Figure 1의 우측 그림과 같이 음장 전방에 여러 갈래의 파면인 프리에코가 나타나는 것을 볼 수 있다.

2.2 목적함수 정의

Noh가 제안한 최소 자승법을 이용한 원하는 공간 내의 음장 재현 기법은 가상 점 음원에 의해 형성되는 제어 공간의 음장을 다수의 제어 음원을 이용하여 재현해주는 방법이다. 시간 및 공간의 오차 가중치를 포함하는 목적 함수 J 는 식 (1)과 같다.

$$J = \int_V \int_{-\infty}^{\infty} [W(r, t) \cdot (p_{desired}(r, t) - p_{reproduced}(r, t))]^2 dt dV \quad (1)$$

$$p_{desired}(r, t) = h(r | r_d) * s_o(t) \quad (2)$$

$$p_{reproduced}(r, t) = \sum_{i=1}^N h(r | r_{s_i}) * k_i(t) * s_o(t) \quad (3)$$

정의된 목적 함수 J 는 가상 점 음원에 의해 생성되는 음장인 $p_{desired}(r, t)$ 와 다수의 제어 음원에 의해 생성되는 음장인 $p_{reproduced}(r, t)$ 간의 차이에 제어 영역에서의 시간 및 공간의 오차 가중치 $W(r, t)$ 를 곱한 값을 최소화시키도록 한다. Noh는 가중치

† 교신저자; KAIST 기계공학과

E-mail : yjpark@kaist.ac.kr

Tel : 042-350-3060, Fax : 042-350-8220

* KAIST 기계공학과

** KAIST 기계공학과

를 고려하지 않았기 때문에 1로 가정하였다. 식 (2), (3)의 $h(r|r_d)$ 와 $h(r|r_s)$ 는 제어 위치 r 에서 각각 가상 점 음원과 다수의 제어 음원에 의해 형성되는 음압과 입력 신호 간의 전달함수, $k_i(t)$ 는 스피커의 제어 필터, $s_o(t)$ 는 입력 신호이다. 편리한 계산을 위해 입력 신호 $s_o(t)$ 는 모든 주파수 대역을 고르게 고려할 수 있는 임펄스 (Impulse) 함수로 가정하였다. 위의 식 (1)을 전개하면 식 (4)와 같은 최적 제어 필터 $k_i(t)$ 를 구할 수 있다.

$$k_i(t) = \left[\int_V \int_{-\infty}^{\infty} W h_s h_s^T W^T dt dV \right]^{-1} \cdot \left[\int_V \int_{-\infty}^{\infty} W h_d h_s^T W^T dt dV \right] \quad (4)$$

2.3 오차 가중치 함수

오차 가중치 $W(r,t)$ 는 프리에코를 줄이기 위해 제어 영역 내의 시간 및 공간에 대한 오차 가중치이고, 식 (5)와 같이 정의하였다.

$$W(r,t) = \int_{\tau=t}^{\tau=\infty} \delta_a \left(r, \tau - \frac{r_w}{c} \right) d\tau = \int_{\tau=t}^{\tau=\infty} \frac{1}{a\sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{\tau - \frac{r_w}{c}}{a}\right)^2} d\tau \quad (5)$$

오차 가중치는 입력 신호인 가우시안 함수를 적용한 것으로, 오차 가중치 함수가 포함하는 주파수 대역과 입력 신호의 주파수 대역을 동일하게 맞추어주기 위해 사용하였다. 식 (5)에서 거리 r_w 는 가상 점 음원의 위치 r_d 와 제어 지점 r 간의 거리, c 는 음속, a 는 관심 주파수 대역과 연관 있는 상수이다. 목표 음장이 도달하는 시간 $t = r_w/c$ 을 기준으로, 시간 t 이전에 발생하는 파면인 프리에코에는 가중치를 주어 제어하도록 하고, 듣고자 하는 음장이후에 발생하는 음장에는 0의 가중치를 주어 제어하지 않도록 하였다.

2.4 모의실험

2.2절과 2.3절에서 정의한 목적 함수와 오차 가중치 함수를 이용하여 설계된 최적 제어 필터 $k_i(t)$ 를 토대로 수행한 모의 실험의 결과이다.

오차 가중치를 적용하지 않고 재현한 음장인 Figure 2의 좌측 그림을 살펴보면 프리에코 성분이 도드라지는 것을 볼 수 있고, 오차 가중치를 적용하

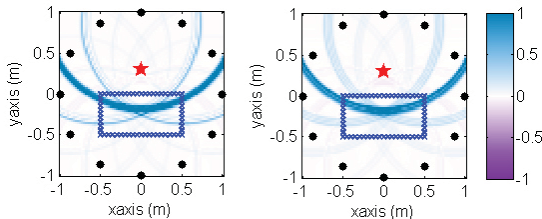


Figure 2. (Left) Sound field reproduced without error weighting, (Right) Sound field reproduced with error weighting, at time $t = 3.5$ msec with 5kHz Gaussian pulse.

여 재현한 음장인 우측 그림은 프리에코 성분이 줄어들어 목표 음장이 상대적으로 부각되는 것을 볼 수 있다. 오차 가중치를 적용하지 않았을 때와 적용하였을 때, 제어 영역 $x=-0.5m, y=-0.3m$ 위치에 재현된 목표 음장과 프리에코의 크기 비가 4dB 정도 감소되었다. 그러나, 오차 가중치를 적용한 음장의 프리에코는 최대 피크 값은 줄어들었지만, 오차 가중치가 적용되지 않은 음장에 비해 0.2msec 정도 더 지속된다. 따라서, 본 논문에서는 제안한 시간 영역의 시간 및 공간에 대한 오차 가중치를 이용한 방법이 프리에코의 최대 피크를 줄일 수 있는 방법인 것을 확인하였다.

3. 결 론

기존의 음장 재현 기법은 사용하는 불연속적인 스피커 시스템에 의해 공간 상의 에일리어싱이 발생하여 프리에코 현상이 일어난다. 프리에코는 청취자가 재현된 음장을 청취할 때, 가상 점 음원의 위치 지각 왜곡 및 음원의 착색을 유발한다. 본 논문에서는 프리에코 현상을 줄여보기 위해 시간 및 공간 영역의 오차 가중치 함수를 정의하고, 시간 영역의 접근법인 Noh의 최소 자승법을 이용한 음장 재현 기법을 사용하였다. 최적 제어 필터를 계산한 후, 모의 실험을 수행해본 결과, 시간 및 공간 영역의 오차 가중치를 사용하여 프리에코의 최대 피크 값을 줄이는 것이 가능한 것을 확인하였다. 따라서, 오차 가중치를 포함하는 음장 재현 기법을 사용하여 청취자가 인지하지 못하는 크기의 프리에코 설계를 통해 위치 지각 왜곡 및 착색 현상을 줄일 수 있는 가능성이 있음을 볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 국방무인화기술 특화연구센터를 통한 국방과학연구소 연구비 지원과 두뇌한국(BK)21 사업의 협력으로 수행되었습니다.

참 고 논 문

- (1) Sascha Spors, Hagen Wierstorf, Matthias Geier and Jens Ahrens. "Physical and Perceptual Properties of Focused Sources in Wave Field Synthesis." AES 127th Convention. 2009.
- (2) Jeein Noh. *Sound field reproduction at specified control volume using least squares approach.* Master Thesis. 2011.