

최소자승법을 이용한 음장 재현 기법과 Wave Field Synthesis 의 비교

Comparison of Sound Field Reproduction Technique Using Least-Squares Method and Wave Field Synthesis

이정민* · 박영진† · 박윤식**
JungMin Lee, Youngjin Park, Youn-sik Park

1. 서 론

최근 영상 매체의 발달로 인해, 3 차원 입체 음향에 대한 연구 역시 화두에 오르고 있다. 3 차원 입체 음향에 대한 연구로는, 듣고자 하는 가상 음원을 다수의 스피커 어레이로 재현해주는 음장 재현 기법이 있으며, 대표적인 방법으로 Wave Field Synthesis 와 Ambisonics 등이 있다. 기존의 음장 재현 기법과 달리 시간영역에서의 접근법을 이용한 “최소자승법을 이용한 음장 재현 기법”을 Noh 가 제안하였으며, 본 논문에서는 이 음장 재현 기법과 Wave Field Synthesis 를 비교하고자 한다.

2. 본 론

2.1 음장 재현 방법

(1) Wave Field Synthesis

Wave Field Synthesis는 Kirchhoff-Helmholtz Integral Equation을 기반으로, 가상의 음원으로 부터 방사되는 파면을 다수의 스피커를 제어하여 재생해주는 기술이다. 이 방법은 수학적으로 임의의 형태의 공간에 대해 해를 계산할 수 있다.

(2) 최소자승법을 이용한 음장 재현 기법

최소자승법을 이용한 음장 재현 기법의 목표는 가상 점음원에 의해 형성되는 제어 영역의 음장을 다수의 스피커 어레이를 이용하여 재생해주는 것이다. 이를 위해, 목적함수 J 는 재현하고자 하는 가상 음

원에 의한 음장 $p_{target}(r, t)$ 과 제어 음원에 의해 재현되는 음장 $p_{reproduced}(r, t)$ 간의 음압 오차의 제곱을 시간 영역과 공간 영역에서 적분한 값으로 정의되었으며, 이러한 목적함수를 최소화하는 제어 음원 별 필터 $k_i(t)$ 가 목적함수 J 의 해가 된다. 이 방법은 제어공간을 지정해줄 수 있으며, 스피커 어레이의 개수나 형태에 구애받지 않고 음장을 재현할 수 있다.

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

$$p_{target}(r, t) = h(r | r_d) * s_0(t) \quad (2)$$

$$p_{reproduced} = \sum_{i=1}^N h(r | r_{si}) * k_i(t) * s_0(t) \quad (3)$$

2.2 음장 재현 방법의 비교

본 절에서는 2.1절에서 명시한 Wave Field Synthesis와 최소자승법을 이용한 음장 재현 기법의 비교를 하기 위해 여러 파라미터를 설정한다. 최소자승법을 이용한 음장 재현 기법의 목적함수 J 는 시간영역에서 정의되었기 때문에, Wave Field Synthesis와 동등한 비교를 위해 주파수 영역에서 정의되어야 한다. 따라서, Parseval's Theorem을 이용하여 주파수 영역에서의 목적함수 J 를 식 (4) 와 같이 정의할 수 있다. 이로 인한 제어 필터는 단일주파수 별로 계산되며, 식 (5)와 같다.

$$J = \int_{-\infty}^{\infty} \int_V [p_{target}(r, f) - p_{reproduced}(r, f)]^2 dV df \quad (4)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} J_f(r, f) df$$

$$\mathbf{k}_{optimal}(f) = \arg \min_k J(f) \quad (5)$$

† 교신저자; KAIST 기계공학과

E-mail : yjpark@kaist.ac.kr

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

* KAIST 기계공학과

** KAIST 기계공학과

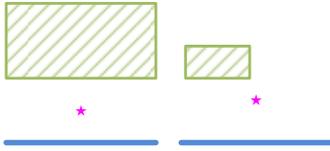


Figure 1 Simulation cases. (Left) Case 1: Symmetric, (Right) Case 2: Asymmetric

2.3 모의 실험을 통한 비교

(1) 모의 실험 조건

Wave Field Synthesis와 최소자승법을 이용한 음장 재현 기법을 비교해보기 위해서 Figure 1와 같은 모의 실험 조건을 사용하였다. Case 1은 제어 영역 (녹색 네모), 가상 점음원과 (분홍 별) 스피커 어레이 (파란 선)가 대칭으로 위치한 대칭형 조건이다. 이 조건은 최소자승법 방법의 제어 영역을 Wave Field Synthesis의 Reference Line과 일치시켜주었기 때문에 두 방법을 동등하게 살펴볼 수 있다. Case 2는 제어 영역, 가상 점음원과 스피커 어레이가 비대칭으로 위치해있으며, 제어 영역을 설정하여 제어하는 최소자승법 방법이 유리한 조건이다. 스피커 어레이는 10cm 간격으로 21개를 배치하였다.

(2) 모의 실험 결과 및 분석

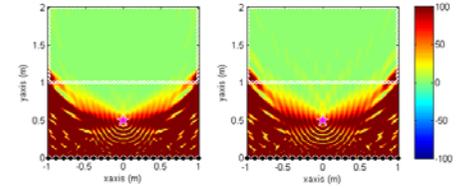
위의 모의 실험 조건을 이용하여 각각 Wave Field Synthesis와 최소자승법을 이용한 음장 재현 기법에 대한 음장을 생성하였다. 이 때, 두 방법 모두 목표 음장을 재현하려 하는 것을 볼 수 있었다.

두 음장 재현 기법을 분석하기 위한 지표로, 음장의 상대오차를 식 (6)과 같이 정의하여 주파수 별로 살펴보았으며, Figure 2에서 그래프로 나타내었다.

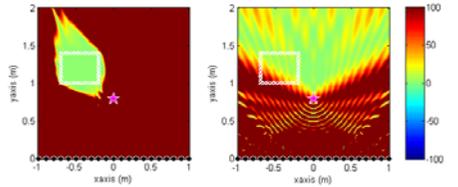
$$\text{error}^2 = \frac{|p_{\text{target}} - p_{\text{reproduced}}|^2}{|p_{\text{target}}|^2} \times 100\% \quad (6)$$

Figure 2에서 나타난 바와 같이, Case 1의 제어 영역 내에서 주파수 별 평균 오차 제곱 값은 1kHz, 3kHz일 때, 최소자승법 방법은 각각 0.33%, 3.1%, Wave Field Synthesis는 각각 4.4%, 3.9%으로, 목표 음장과 재현된 음장 간의 상대 오차가 작은 것을 볼 수 있다.

Case 2에서 최소자승법 방법은 설정된 제어 영역에서 목표 음장을 재현하려 노력하는 것을 볼 수 있지만, Wave Field Synthesis는 제어 영역을 지정해 줄 수 없기 때문에 그러한 노력을 살펴보기 어렵다. 이 때, 제어 영역 내에서 주파수 별 평균 오차 제곱 값은 1kHz, 3kHz일 때, 최소자승법 방법은 각각 0.51%, 0.76%, Wave Field Synthesis는 각각 21.1%, 27.6%으로, 최소자승법 방법이 Case 2의



(a) Case 1



(b) Case 2

Figure 2 Relative error of pressure field at 3kHz. (Left) Least-Squares Method, (Right) Wave Field Synthesis

경우에 더 적합한 것을 볼 수 있다. 그러나, 제어 영역 이외의 영역에서는 오차가 굉장히 큰 것을 확인하였다. 이는 지정된 제어 영역에서 목표 음장을 만들어주기 위해 계산된 제어 필터가 굉장히 크기 때문에 발생한 현상이다. 따라서, 최소자승법을 이용한 음장 재현 기법에 의해 계산된 제어 필터는 실용적이지 않으며, 추후에 정의된 목적 함수에 스피커 입력에 대한 제약조건을 주어야 할 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 Wave Field Synthesis와 최소자승법을 이용한 음장 재현 기법에 대한 비교분석을 수행하였다. 두 방법을 동등하게 평가할 수 있는 대칭형 조건과, 제어 영역이 한 쪽으로 치우쳐져 있는 비대칭형 조건에 대해 음장의 상대 오차를 살펴보았다. 그 결과, 대칭형 조건에서 두 방법의 상대 오차가 크게 차이나지 않았으나, 최소자승법 방법이 약소하게나마 더 정확하였다. 비대칭형 조건에서는 최소자승법 방법에서만 제어영역 내에 음장을 재현하려는 노력을 확인하였으며, 상대 오차 역시 더 작은 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 계산된 제어 필터의 크기가 너무 크기 때문에, 실용적인 적용이 어려우며, 목적함수의 보완이 필요하다.

후 기

이 논문은 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업[KI001865, 전자과, 음향 및 건물 환경을 개선하는 지능형 건설 IT 융합 신기술 개발]의 일환으로 수행하였음.