

측정된 실내 충격 응답 신호 모델링에 의한 잔향 필터 설계

안 상 태, 김 양 한

한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터

Reverberator Design By Measured Room Impulse Response Signal Modeling

Sangtae Ahn*, Yang-Hann Kim**

Center for Noise and Vibration Control, Department of Mechanical Engineering, KAIST

E-mail : stahn@cais.kaist.ac.kr*, yhkim@sorak.kaist.ac.kr**

요 약

본 논문에서는 실측된 실내 충격 응답을 모델링하여 실내 잔향 필터 설계를 시도하였다. 급강하법(steepest descent method)을 이용하여 측정된 실내 충격 응답을 4 개의 콤 필터(comb filter)와 2 개의 올패스 필터(allpass filter)로 이루어진 잔향 필터로 모델링하여, 잔향 필터의 계수를 결정하였다.

1. 서 론

일상 생활에서 듣는 음은 거의 모든 경우 잔향 즉 반사음이 섞인 음이다. 자유 공간에서처럼, 음원에서 방사되는 음만을 듣는 경우는 아주 특별한 경우를 제외하고는 상상하기 힘들다. 실내에서 음을 청취하는 경우, 잔향의 정도에 따라 실내 공간의 크기, 벽의 세질 등의 공간감을 느끼는 것으로 알려져 있으며[1-2], 잔향은 음의 강화(enhancement)에 기여하기도 한다.

무향실에서 녹음한 원음에 인공적으로 합성된 잔향을 부가하여 자연스럽게 실감나는 음을 재생하려는 시도가 오래 전부터 방송, 음악 산업 등에 적용되었고, 최근에는 3 차원 음장 시스템(3-D sound system) 개발에도 적용되어 자연스러운 공간적 청취(spatial hearing)를 재현하려는 연구가 행해지고 있다[1].

잔향 효과를 얻기 위하여 가장 좋은 방법은 원하는 잔향을 갖는 실내에서 실내 충격 응답(room impulse response)을 측정하고 무향실에서 녹음한

원음과 컨벌루션(convolution)하는 방법일 것이다

(Fig. 1 참조). 그러나 44.1kHz 로 샘플링하여 얻은 1 초간의 실내 충격 응답 함수만 하더라도 데이터의 개수가 44,100 개에 이르며, 많은 계산량과 그에 따른 계산 시간을 필요하여 실시간 처리가 어렵게 된다.

낮은 차수의 잔향 필터를 설계하여 적은 계산량으로 자연스러운 잔향 효과를 얻을 수 있다면 효율적일 것이다. Schroeder 와 Logan [3-4] 등이 콤 필터(comb filter)와 올패스 필터(allpass filter)의 조합으로 구성된 잔향 필터를 소개한 이후 여러 가지 종류의 잔향 필터들이 제안되었다[1]. 그러나 자연스러운 잔향을 얻기 위한 필터 계수의 결정을 시행 착오에 의존해야 하는 단점이 있다. 또한 잔향 필터에 의하여 자연스러운 잔향을 얻었다 하더라도 실제의 잔향을 얼마나 잘 표현하는가는 또 다른 문제이다.

적은 개수의 파라미터로 이루어진 낮은 차수의 잔향 필터는 실제 실내에서 측정한 실내 충격 응답이 갖고 있는 풍부한 정보의 많은 부분을 잃어버리려는 사실은 틀림없다. 그렇다면 실제 발생하는 잔향과 별개로, 듣기에 자연스러운 잔향을 합성해주는 잔향 필터 구조와 측정된 실내 충격 응답 즉 실제 잔향이 주어졌을 때, 주어진 잔향 필터로 실제 잔향을 모델링하는 최선의 필터 계수를 구하는 문제를 제기할 수 있다. 본 논문에서는 그러한 문제 해결의 첫 단계로, 슈로더(Schroeder)가 제안한 4 개의 콤 필터(comb filter)와 2 개의 올 패스(allpass filter)로 이루어진 잔향 필

터의 계수를 실측된 실내 충격 응답과의 최소 자승 오차 방법으로 결정하였다. 최소 자승 오차를 위하여 급강하법(steepest descent method)을 시도하여 잔향 필터의 계수를 결정하였다.



Fig. 1 잔향 구현

II. 실내 충격 응답 측정

11.5m×8.1m×2.25m 크기의 강의실(Fig. 2 참조)에서 실내 충격 응답을 측정하였다. 측정 장치는 Fig.3 과 같다. 강의실 내에서 20Hz-20kHz 의 백색 잡음(white noise)을 입력 신호로 스피커를 가진시키고 마이크로폰에서 측정되는 음압신호를 출력 신호로 하여 입력 신호와 출력 신호 사이의 충격 응답(impulse response)을 구하였다.

구하여진 충격 응답은 Fig. 4 와 같다. 충격 응답은 입력 신호로 임펄스 신호가 가해졌을 때의 출력 신호를 의미한다. Fig. 4 의 충격 응답은 입력 신호와 출력 신호 사이의 지연을 제거하고, t=0 에서의 충격 응답의 크기를 1로 표준화(normalization) 시켜서 구한 것이다.

Fig. 4 를 보면, 음원으로부터 방사되어 수음점에 직접 도달하는 직접 음(direct sound)과 벽에 한번 이상 반사한 후 수음점에 도달하는 잔향 음(reverberation sound)을 구분할 수 있고, 초기 반사음(early reflection)을 관찰할 수 있다. 초기에 불규칙한 패턴에서 후기로 갈수록 지수적으로 감소하

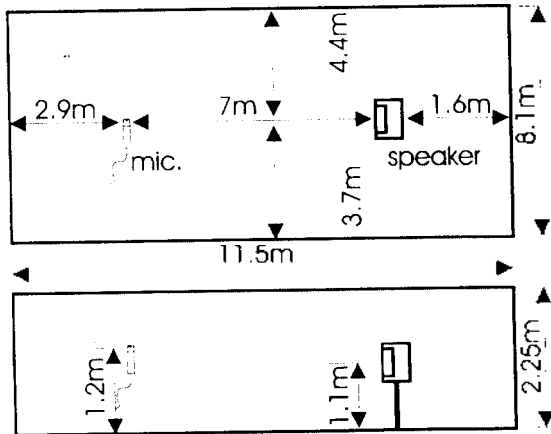


Fig. 2 강의실과 스피커, 마이크로폰 배치도 위에서 본 모습(위), 옆에서 본 모습(아래)

는 모습을 볼 수 있다. 잔향음이 60dB 만큼 감소

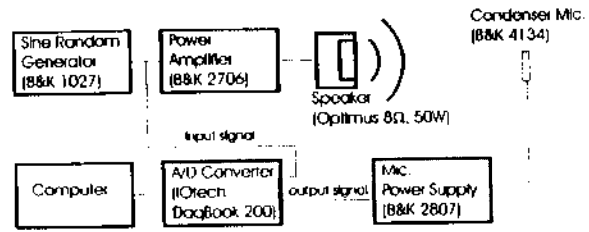


Fig.3 측정 장치도

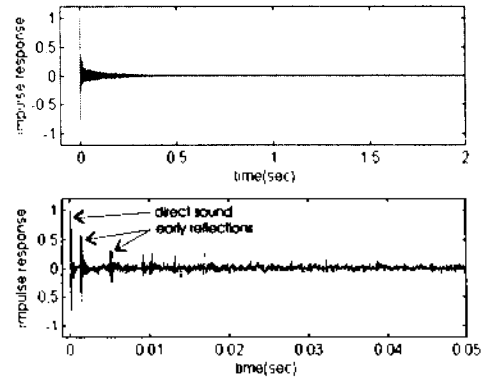


Fig.4 실측 실내 충격 응답

하는 데에 걸리는 시간인 잔향 시간(reverberation time)은 대략 1 초 정도 된다.

결국 실측 충격 응답을 원음 신호에 컨벌루션시키면, 그 원음 신호를 강의실의 스피커에 가했을 때에 마이크로폰에서 나오는 출력 신호를 얻을 수 있다.

III. 잔향 필터

Schroeder 와 Logan 이 콤 필터(comb filter)와 올패스 필터(allpass filter)를 잔향 필터로 제안한[3-4] 아래로 콤 필터와 올패스 필터는 잔향 필터를 구성하는 기본적인 요소로 널리 이용되고 있다. 콤 필터는 다음과 같은 전달 함수를 갖는다.

$$H_{comb}(z) = \frac{1}{1 - gz^{-m}} \quad (1)$$

여기서 g 는 이득, m 은 지연 시간이다. 콤 필터의 충격 응답은 다음과 같이 지수적으로 감소하는 포락(envelope)을 갖는 펄스 열이다.

$$h_{comb}(n) = \sum_{i=0}^{\infty} g^i \delta(n - im) \quad (2)$$

Fig 4 의 실측 충격 응답 역시 지수적으로 감소하는 패턴을 보이기 때문에 잔향 필터의 요소로 사용될 수 있는 가능성을 볼 수 있다.

그러나 콤팩트 필터 하나만으로 잔향 필터를 구현할 때에 문제점은 첫째, 충격 응답 펄스 열이 지연 시간 m 의 간격만큼 떨어져 있어 실측 충격 응답에 비해 펄스 밀도가 작아 청취시 거친 느낌이 난다는 것이다. 두 번째, 콤팩트 필터의 주파수 응답 함수가 주기적인 피크를 가져 특정 주파수와 그 조화 주파수 성분이 증폭되어 자연스럽지 못한 청취를 유발시키는 급속음이 섞여 들린다.

첫번째 문제점을 해결하기 위하여 여러 개의 콤팩트 필터를 직렬로 연결하면 충격 응답의 펄스 밀도가 높아져 부드러운 느낌의 잔향을 얻을 수 있다. 두 개의 콤팩트 필터를 직렬로 연결하면 시간에 비례하는 충격 응답 펄스의 밀도를 얻고, 세 개의 콤팩트 필터를 직렬로 연결하면 시간의 제곱에 비례하는 펄스의 밀도를 얻는다. 실내 충격 응답의 펄스 밀도는 시간의 제곱에 비례한다고 알려져 있다[5]. 따라서 자연스럽게 느껴지는 잔향 여부를 떠나서 세 개의 콤팩트 필터를 직렬로 연결하는 것이 물리적인 의미에서 충분한 잔향 밀도를 얻을 수 있다.

두 번째 문제점을 해결하기 위하여 각기 다른 이득과 지연 시간을 갖는 여러 개의 콤팩트 필터를 병렬로 연결할 수 있다. 각 콤팩트 필터의 주파수 응답 함수가 서로 다른 곳에서 피크를 갖도록 피크의 위치를 배치하여 전체 주파수 응답의 피크가 불규칙하게 배치된다면 급속음의 발생을 피할 수 있다. 이는 실내의 음향학적 그린 함수(Green's function)가 무한 개의 모드들의 합으로 표현되는 상황[6]과 유사하다고 볼 수 있다.

위와 같은 관점에서 Schroeder 가 제안한 4 개의 콤팩트 필터와 2 개의 올패스 필터로 구성된 잔향 필터를 바라볼 수 있다(Fig.5 참조). 올패스 필터의 충격 응답은 콤팩트 필터와 유사하게 지수적으로 감소하는 펄스 열을 가지나 주파수 응답에서 급속음 방지 측면에서 콤팩트 필터보다 유리하다고 볼 수

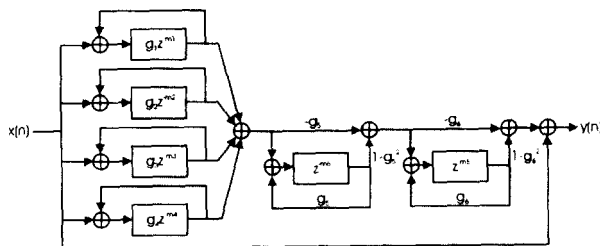


Fig. 5 잔향 필터

있다.

IV. 잔향 필터 계수 결정

4.1 급강하법

Fig. 5 의 잔향 필터의 전달 함수 $\hat{H}(z)$ 는 다음과 같다.

$$\hat{H}(z) = 1 + \sum_{i=1}^4 \frac{g_i z^{-m_i}}{1 - g_i z^{-m_i}} \prod_{j=5}^6 \frac{z^{-m_j} - g_j}{1 - g_j z^{-m_j}} \quad (3)$$

실측치 $H(z)$ 가 주어졌을 때, 오차 $E(z)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$E(z) = H(z) - \hat{H}(z) \quad (4)$$

그때에

$$e(n) = h(n) - \hat{h}(n) \quad (5)$$

이고, 자승 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$\epsilon_{LS} = \sum_{n=0}^{\infty} e(n)^2 \quad (6)$$

지연 시간 m_i ($i=1,2,3,4,5,6$) 가 주어졌을 때 ϵ_{LS} 를 최소화 시키는 g_i ($i=1,2,3,4,5,6$) 는 급강하법[7] 을 이용하여 다음과 같이 반복적으로 구할 수 있다. 단, 잔향 필터의 안정성을 위하여 $-1 < g_i < 1$ 이 제약조건으로 포함된다.

$g = [g_1 \ g_2 \ g_3 \ g_4 \ g_5 \ g_6]^T$ 라면

Step 1: 초기값 g^0 결정

Step 2: $g^{k+1} = g^k - \alpha \nabla_g \epsilon_{LS}$

Step 3: $k=k+1$, 수렴할 때까지 Step 2 반복

여기서

$$\nabla_g \epsilon_{LS} = \left[\frac{\partial \epsilon_{LS}}{\partial g_1} \ \frac{\partial \epsilon_{LS}}{\partial g_2} \ \frac{\partial \epsilon_{LS}}{\partial g_3} \ \frac{\partial \epsilon_{LS}}{\partial g_4} \ \frac{\partial \epsilon_{LS}}{\partial g_5} \ \frac{\partial \epsilon_{LS}}{\partial g_6} \right]^T$$

이다.

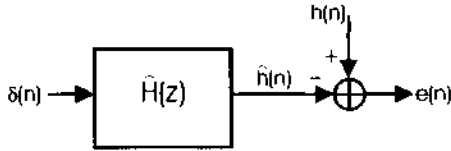


Fig. 6 충격 응답 모델링 블럭 다이어그램

4.2 필터 계수 결정 결과

II 절에서 측정한 충격 응답을 Fig. 5의 잔향 필터로 모델링을 시도하였다.

$m_1=1321, m_2=1511, m_3=1601, m_4=1987, m_5=221, m_6=73$ 로 놓았고, 초기 g 는 $g=[0.9141 \ 0.9023 \ 0.8968 \ 0.8736 \ 0.7 \ 0.7]^T$ 로 주었다. $\alpha = 0.00001$ 로 주었다. 실측 충격 응답 초기의 불규칙한 패턴보다 후기 잔향의 모델링에 중점을 둘 목적으로 오차 $e(n)$ 를 계산할 때에 가중치 함수 $w(n) = 1/(0.0875e^{-8.2485 \times 10^{-3}n})$ 를 $e(n)$ 에 곱하였다.

20번의 반복을 통해 $g=[0.8340 \ 0.8280 \ 0.8243 \ 0.8108 \ 0.7004 \ 0.6996]^T$ 을 얻었다.

Fig. 7(위)에서 반복 계산에 따라 오차 ϵ_{LS} 가 감소하는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 7(아래)에서 20번의 반복 계산후 구한 잔향 필터의 충격 응답을 볼 수 있다.

V. 결론 및 향후 과제

주어진 실측 충격 응답을 4개의 콤 필터와 2개의 올패스 필터로 이루어진 잔향 필터로 모델링을 시도하였다. 즉, 차승 오차의 함이 최소가 되도록 급강하법을 이용하여 잔향 필터의 계수 결정을 시도하였다.

반복 계산에 따라 오차가 점차 감소하는 결과가 나왔다. 하지만 그것이 청각으로 판단했을 때 바람직한 방향으로 주어진 충격 응답을 모델링하는 지에 대한 연구가 요구된다.

또한 잔향 필터에서 지연 시간 m_i 는 주어진 값으로 보고 이득 g_i 만을 구하였는데 지연 시간까지 모델링 할 수 있는 알고리즘에 대한 연구 역시 요구된다.

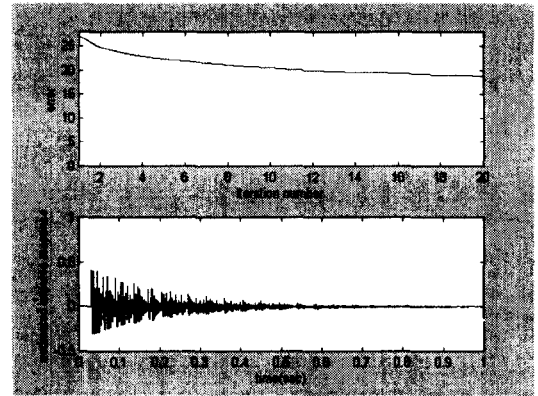


Fig. 7 반복 계산에 따른 ϵ_{LS} (위)
20번의 반복 계산으로 구한 충격 응답(아래)

후기

본 연구는 한국전자통신연구원의 지원으로 이루어졌음을 밝히며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고 문헌

- [1] D. R. Begault, *3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia*, Academic Press, 1994
- [2] J. Blauert, *Spatial Hearing*, MIT press, 1997
- [3] M. R. Schroeder, "Natural Sounding Artificial Reverberation," *J.Audio Eng. Soc.*, **9**, pp.219-223, 1961
- [4] M. R. Schroeder, "'Colorless' Artificial Reverberation," *J.Audio Eng. Soc.*, **9**, pp.192-197, 1961
- [5] R. H. Bolt, P. E. Doak, & P. J. Westervelt, "Pulse Statistics of Room Acoustics," *J. Acous. Soc. Am.*, **22**, pp.328-340, 1950
- [6] A. D. pierce, *Acoustics An Introduction to Its Physical Principles and Applications*, Acous. Soc. Am., 1994
- [7] D. G. Luenberger, *Linear and Nonlinear Programming*, Addison-Wesley, 1989