

5 자유도 잔향 모델을 이용한 실내 잔향 필터 설계

김 소 회, 김 양 한

한국과학기술원 기계공학과, 소음 및 진동제어 연구센터

Design of Room Reverberation Filter by Using 5 DOF Reverberation Model

Sohee Kim, Yang-Hann Kim

Center for Noise and Vibration Control, Dept. of Mechanical Engineering, KAIST

요 약

잔향에 대한 인간의 주관적인 지각을 잔향기 설계에 객관적인 수치로써 반영하는 방법으로, 5 자유도 잔향 모델이 제안된 바 있다[1]. 5 자유도 잔향 모델은 잔향에 대한 다섯 개의 객관적인 평가량들을 이용하여 시간에 따른 음 에너지 감쇠 폭선을 근사화한 것이다. 즉 5 자유도 잔향 모델을 이용하여 청취자가 원하는 특성을 갖는 잔향을 객관적으로 묘사할 수 있고, 이는 잔향을 합성할 때 잔향 필터의 설계 기준이 된다.

그러나 이 모델로부터 만들 수 있는 잔향 필터의 개수는 실로 무한하고, 그 중에는 인간이 듣기에 부자연스러운 합성음을 만들어 내는 경우도 있다. 즉 자연스러운 잔향을 만들기 위해서는 잔향 모델 외에도 부가적인 잔향 설계 기준이 필요하다. 시간, 주파수 영역에서 대표적인 특성을 갖는 몇 종류의 원음에 대한 청음실험을 통해, 필요한 잔향 설계 기준을 제시한다.

1. 서 론

현재까지 잔향 필터를 설계하기 위한 대부분의 경우는, 주어진 잔향 시간을 구현하기 위해 여러 번의 반복 청취를 통하여 가장 적합한 필터 파라미터를 결정해 주는 방식을 사용해 왔다. 그러나 이는 잔향 설계의 기준으로 잔향 시간만을 만족시키기 위한 것으로, 잔향에 대한 인간의 주관적 지각을 충분히 반영한다고 볼 수 없다. 잔향 필터 설계 단계에서 '체육관과 같은 큰 공간에서 음원이 멀리 있는 것처럼 느껴지면서 명료하게'와 같은 주관적인 지각을 반영할 수 있다면, 실제로 들었을 때 만족스러운 잔향을 얻을 수 있음은 당연하다 하

겠다.

잔향에 대한 주관적인 지각을 객관적으로 나타낼 수 있는 척도로 잔향 시간 외에도, 콘서트 홀 음향학 등의 분야에서 연구되어 온 초기감쇠시간, 명료도, 잔향음 대 직접음의 에너지 비, 초기시간지연 등이 있다. 잔향에 대한 주관적인 지각(subjective perception)을 반영하는 이러한 객관적인 척도(objective measure)를 이용하여 실내 잔향을 모델링하는 방법으로 안상태와 김양한에 의해 5 자유도 잔향 모델(5 DOF reverberation model)이 제안되었[1].

그러나 이 모델은 실제의 실내 충격 응답이 갖는 풍부한 정보를 다섯 개의 파라미터만으로 근사화하므로 정보의 많은 부분이 손실된 것이다. 따라서 이 모델 하나만이 잔향 필터의 설계 기준으로 주어진다면 무수히 많은 필터가 대응될 수 있고, 그 중에는 비현실적이거나 잔향이라고 느껴지지 않는 부자연스러운 합성음을 만들어내는 필터도 있을 수 있다. 이러한 부적절한 필터를 배제하기 위해서는, 즉 대응될 수 있는 무수히 많은 잔향 필터의 범위를 제한하기 위해서는 추가적인 잔향 설계 기준이 필요하다.

시간, 주파수 영역에서의 특성이 다른 몇 가지의 대표적인 입력 신호(원음)를 잔향 필터에 통과시켜 실제로 잔향을 들어보고, 자연스러운 잔향을 위해 필요한 설계 조건을 찾는다. 이 때 실제의 실내 잔향이 갖는 물리적인 특성이 잔향기 설계에 반영되어야 할 것이다.

2. 5 자유도 잔향 모델

실내의 음향학적 특성은 실내 충격 응답(room impulse

response)을 통해 완벽하게 표현될 수 있다. 음원(sound source)에서 방사되어 청취자에게 들리는 음은 직접음(direct sound)과 잔향음(reverberant sound)으로 나눌 수 있는데, 직접음의 도달 시간이나 크기에 관계없이 잔향음에만 관심을 갖기 위하여 직접음의 크기를 항상 1로 정규화(normalization)하여 생각하기로 한다[1]. 정규화된 실내 충격 응답을 $h(t)$ 라 할 때, 음 에너지는

$$s(t) = \int h^2(\tau) d\tau \quad (1)$$

로 정의된다[2]. 음 에너지 감쇠 곡선(sound energy decay curve)을 데시벨 척도로 나타내면 그로부터 잔향 시간뿐만 아니라 잔향 평가량들을 쉽게 구할 수 있고, 이로부터 5 자유도 잔향 모델을 정의한다.

콘서트 홀 음향학 등의 분야에서 많이 연구되어 온 잔향 평가량들[3] 중 서로 독립적이면서 중요한 다섯 개의 평가량을 선택하면 다음과 같다.

- 잔향시간(RT, reverberation time) : 음 에너지가 -5dB 에서 -35dB 까지 30dB 감쇠하는 데 걸리는 시간의 2 배
- 초기감쇠시간(EDT, early decay time) : 음 에너지가 0dB 에서 -10dB 까지 감쇠하는 데 걸리는 시간의 6 배
- 초기시간지연(t_i , initial time delay gap) : 직접음과 첫 번째 반사음의 도달 시간 간격
- 명료도(C_{80} , clarity) : 초기 잔향 에너지 대 후기 잔향 에너지의 비 (일반적으로 초기 잔향이란 직접음이 도달한 이후로 80ms 가 지나기 전까지를 말한다[3].)

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} h^2(t) dt} \quad (2)$$

- R/D 비(R/D ratio) : 잔향음 에너지 대 직접음 에너지 비

$$R/D = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}{\int_0^{x_c} h^2(t) dt} \quad (3)$$

위에서 언급한 다섯 가지의 잔향 평가량들을 사용하여 데시벨 척도의 음 에너지 감쇠 곡선

$$S(t) = 10 \log_{10} s(t) \quad (4)$$

을 그림 1 과 같이 직선의 조합으로 근사시킬 수 있다. 잔향 모델에서 미지수로 남아있는 좌표값 y_A, x_C, y_D, x_E 와 기울기 f 는 위의 잔향 평가량들의 정의로부터 일대

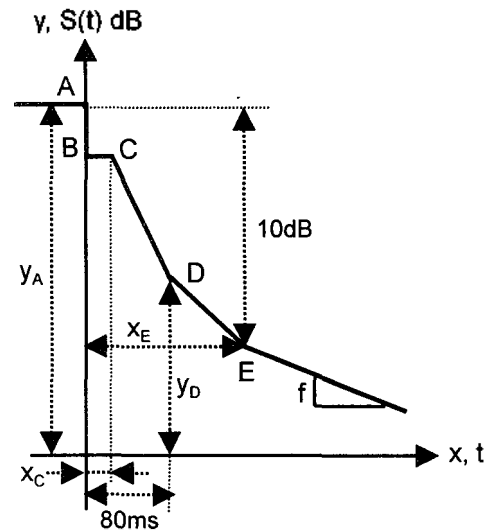


그림 1. 음 에너지 감쇠 곡선을 이용한 5 자유도 잔향 모델

일로 결정된다[1]. 즉 위의 다섯 가지 평가량들의 값을 정하는 것과 5 자유도 잔향 모델을 세우는 것은 같은 의미를 갖는다.

그림 1 의 잔향 모델은 시간 영역에서의 충격 응답을 적분과 곡선 맞춤(curve fitting) 과정을 거쳐 근사화한 것이므로, 실제의 실내 잔향이 갖는 특성을 완전히 묘사하지 못한다. 예를 들어 잔향 모델은 다음과 같은 두 경우를 구별하여 나타낼 수 없다. 그림 2 의 필터 h_1 과 h_2 의 경우 음 에너지 감쇠 곡선은 유사한 형태를 가지나, 주파수 응답은 현저히 다르다.

따라서 잔향 모델로부터 인공 잔향을 합성하고자 할 때에는 무한히 많은 잔향 필터로 대응될 수 있고, 그 중에는 부자연스러운 잔향을 유발하는 필터도 있을 수

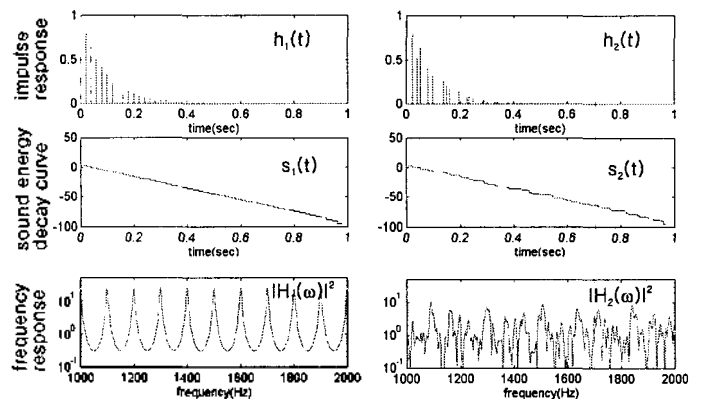


그림 2. 유사한 음 에너지 감쇠 곡선, 상이한 주파수 응답 함수를 갖는 잔향 필터의 예

있다. 이러한 부적절한 필터를 배제하기 위해서 추가적인 필터 설계 기준이 필요하다.

3. 잔향 필터의 설계 기준

5자유도 잔향 모델의 한계를 파악한다는 것은, 잔향 모델을 사용하여 잔향 필터를 만들 때 그 결과로 얻은 잔향을 평가한다는 것과 같다. 잔향이 자연스럽다, 그렇지 않다는 것은 궁극적으로 청취자의 주관적인 판단에 의해 내려지는 평가이므로, 잔향의 평가는 사람이 직접 들어보는 청음 과정을 반드시 포함해야 한다.

3.1. 청음실험 방법

2절에서 설명된 것과 같은 잔향 모델이 주어졌을 때, 그로부터 간단한 형태의 FIR 잔향 필터를 만들어 필터 구조의 변화에 따라, 또 입력 신호의 특성에 따라 잔향이 어떻게 달라지는가를 알아본다. 이를 통해, 잔향 모델로는 나타나지 않지만 자연스러운 잔향을 만들기 위해서 필요한 조건을 찾는 것이 본 청음실험의 목적이다.

일반적으로 잔향 효과를 부과하고자 하는 원음은 백색 잡음(white noise)이나 순음(pure sine)과 같은 신호음이 아니라 악기 연주 등의 음악이 될 것이다. 원음의 특성에 따른 잔향 효과를 보다 명확하게 파악하기 위하여 시간, 주파수 영역에서 대표적인 특성을 갖는 몇 종류의 악기 연주음을 원음으로 선택하였다.

원음의 종류에 따라 잔향이 어떻게 달라지는가를 알아보기 위하여, 가장 기본적인 2자유도 잔향 모델로부터 필터를 구현하였다. 2자유도 잔향 모델은 그림 3(a)와 같고, 모델을 결정하는 두 개의 파라미터는 잔향 시간(RT)과 잔향음 대 직접음의 에너지 비(R/D ratio)이다. 이 두 개의 파라미터를 구현할 수 있으면서 간단한 구조를 갖는 빗형 필터(comb filter)를 잔향 필터로 사용하였다. 빗형 필터는 그림 3(b)와 같이 일정 시간이 지날수록 크기가 지수적으로 감소하는 임펄스 열(impulse train)을 충격 응답으로 가진다는 점에서 잔향 필터의 기본 단위로 널리 사용되어 왔다[4-6].

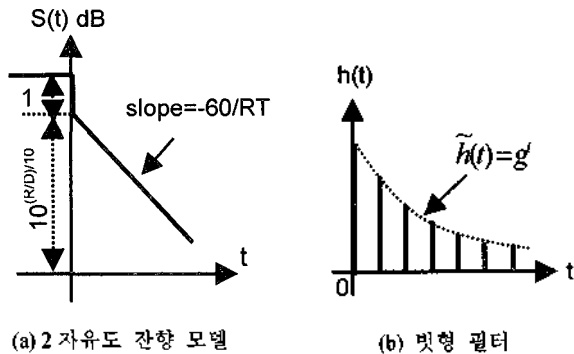


그림 3. 청음실험에 사용된 잔향 필터

여러 종류의 원음을 여러 종류의 필터에 통과시킨 잔향을 평가하기 위해서는 많은 수의 청취자들을 대상으로 동일한 실험을 여러 번 반복할 것이 요구된다. 이는 시, 공간과 노력 측면에서 비효율적이므로, 이를 해결하고 많은 사람들의 참여를 유발하기 위해서 인터넷을 사용하였다. 컴퓨터와 음악에 관심이 많거나 흥미가 있는 총 94 명의 대학(원)생이 실험에 참여하였고, 각각의 청취자는 인터넷을 통해 제시된 지시문을 읽고 실제로 원음과 잔향음을 비교하면서 들어보아 잔향의 자연스러움을 1점에서 5점까지 매긴다. 매우 자연스러운 잔향은 5점, 금속성의 음이 들린다거나 에코가 느껴지는 등의 듣기 거북한 음은 1점으로 하였다.

각각의 청취자가 매긴 점수 데이터를 분석하기 위해, 분산분석법(analysis of variance)과 다중비교법(multiple comparison method)을 사용하였다[7,8].

3.2. 청음실험 결과 및 고찰

3.2.1. 잔향 필터의 주파수 응답 특성

청음실험에서 사용된 빗형 필터는 주파수 응답(frequency response)에서 피크가 반복적으로 나타나는 특성으로 인해 바람직하지 않은 금속성의 잔향을 내게 된다[4]. 이러한 금속성 소리를 제거하기 위해서는 주파수 응답의 주기적인 피크를 억제하여 불규칙한 형상을 갖도록 할 필요가 있고, 그를 위해 빗형 필터의 충격 응답에서 펄스 사이의 간격에 불규칙한 임의성(randomness)을 도입하는 방법이 제안되었다. 충격 응답에 임의성이 도입될수록 주파수 응답에서 분산의 크기가 작아짐을 확인 할 수 있다[9].

시간 영역에서 연속적으로 들리는 원음 A(플루트)와 불연속적으로 끊어져서 들리는 원음 B(장구)에 대해 임의성의 정도를 증가시키면서 청음실험한 결과 그림 4의 결과를 얻었다.

원음 A의 경우는 임의성의 정도를 증가시킴에 따라, 즉 주파수 응답이 평탄해지면서 불규칙한 모양을 갖게

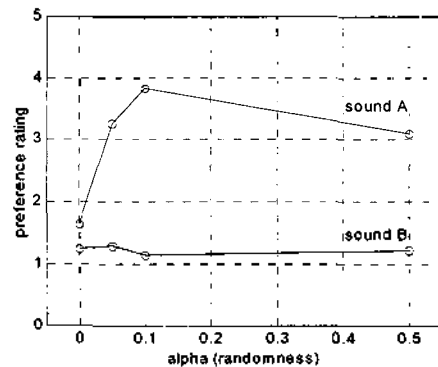


그림 4. 잔향 필터의 임의성 증가가 잔향의 자연스러움에 미치는 영향

됨에 따라 잔향의 자연스러움에 대한 점수가 증가한다. 반면, 원음 B의 경우는 임의성의 정도가 증가하여도 잔향 점수가 향상되지 않는다.

원음 A의 결과로부터 주파수 응답 크기의 분산이 작아야 한다는 것이 자연스러운 잔향을 위한 필터 설계에 하나의 필요 조건이 됨을 알 수 있다.

3.2.2. 잔향 필터의 시간 영역에서의 특성

그러나 원음 B의 경우는, 주파수 응답 크기의 분산을 작게 하여도, 즉 금속음의 발생을 억제하여도 잔향의 자연스러움이 증가되지 않는다. 이를 설명하기 위하여, 필터의 잔향 시간과 R/D 비를 달리하며 청음실험을 수행하였다. 표 1은 청음실험에 사용된 필터의 잔향 특성을 나타낸다.

Filter	1	2	3	4
RT(sec)	0.65	1.3	0.65	1.3
R/D(dB)	4.26	4.26	1.78	1.78

표 1. 청음실험에 사용된 잔향 필터의 특성

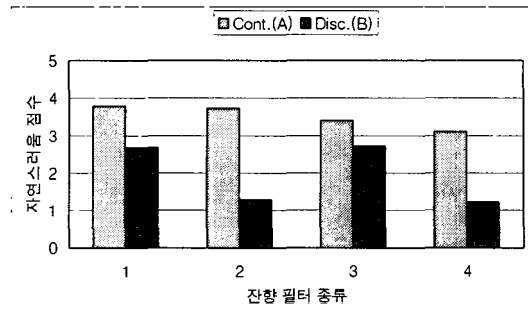


그림 5. 시간 영역에서 연속인 음(A)과 불연속인 음(B)에 대해, 필터 특성이 잔향의 자연스러움에 미치는 영향

그림 5의 실험결과로부터, 불연속적인 원음 B에 대해 잔향 시간이 긴 필터 2, 4를 사용한 경우, 잔향의 자연스러움에 대한 점수가 다른 필터를 사용한 경우에 비해 현저히 낮음을 알 수 있다. 이로부터, 원음 B와 같이 시간 상에서 끊어져서 들리는 원음의 경우 지금까지 사용된 단순한 필터로는, 잔향 밀도의 부족으로 인해 자연스러운 잔향을 낼 수 없다는 결론을 얻을 수 있다. 따라서 장구나 드럼 소리와 같은 불연속적인 원음에 대해서도 자연스러운 잔향을 얻기 위해서는, 잔향 필터의 설계 조건에 잔향 밀도에 관한 기준이 포함되어야 한다.

실내 잔향을 통계적으로 해석한 결과를 살펴보면, 잔향 밀도가 시간의 제곱에 비례하여 증가함이 알려져 있다[10]. 그러나 인간의 청각은 연속한 두 펄스 사이의 간격이 어느 한계 이하가 되면 두 개의 펄스를 구별하지 못하게 된다. 즉 인간이 지각할 수 있는 펄스 밀도

에는 한계가 있을 것이고, 이는 대략 1000/sec 임이 알려져 있다[4]. 이 한계 이상의 펄스 밀도를 구현하는 것은 실제로 잔향을 향상시키는 데 도움이 되지 않으므로, 이 한계값까지는 펄스 밀도가 시간에 따라 증가하고 그 이상이 되면 일정하게 유지되는 필터 구조가 요구된다.

4. 결 론

5 자유도 잔향 모델은 잔향에 대한 주관적인 지각을 잔향 필터의 설계에 반영하는 객관적인 도구로 사용된다. 잔향 모델로부터 실제 잔향 필터를 설계하고자 할 때는, 필터로의 일대일 대응이 이루어지지 않으므로 잔향 모델 외에도 추가적인 설계 기준이 필요하다. 대표적인 특성을 갖는 몇 종류의 원음에 대한 청음실험을 수행하였고, 그 결과 필터 주파수 응답의 모양이 평탄하고 불규칙할 것, 필터의 잔향 밀도가 시간에 따라 증가할 것 두 가지를 만족하여야 함을 알았다.

향후 잔향 모델로부터 이러한 조건을 만족할 수 있는 필터를 구현하는 방법을 정립하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] 안상태, 김양한, "잔향의 객관적 평가량에 근거한 5 자유도 실내 잔향 모델", 한국음향학회지 게재예정, 1999
- [2] M. R. Schroeder, "New Method of Measuring Reverberation Time," J. Acoust. Soc. Am., 37, pp. 409-412, 1965
- [3] L. L. Beranek, "Concert Hall Acoustics-1992," J. Acoust. Soc. Am., 92, pp.1-39, 1992
- [4] M. R. Schroeder, "Natural Sounding Artificial Reverberator," J. Audio Eng. Soc., 10, pp.219-223, 1962
- [5] D. R. Begault, 3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia, Academic Press, pp. 191-246, 1994
- [6] B. Dodge and T. A. Jerse, Computer Music, Schirmer Books, pp.223-240, 1985
- [7] J. A. Devore, Probability and Statistics for Engineering and the Science, 4th ed., Duxbury, pp.390-432, 1995
- [8] Winer, Statistical Principles in Experimental Design, 2nd ed., McGraw-Hill, pp.283-296, 1971
- [9] 안상태, "자연스럽게 들리는 인공 잔향을 위한 FIR 필터 설계에 관한 연구," 한국과학기술원 기계공학과 석사학위논문, 1999
- [10] R. H. Bolt, P. E. Doak and P. J. Westervelt, "Pulse Statistics Analysis of Room Acoustics," J. Acoust. Soc. Am., 22, pp.328-340