

잔향의 객관적 평가량에 근거한 5자유도 실내 잔향 모델

A Five-Degree-of-Freedom Room Reverberation Model Based on Objective Measures of Reverberation

안 상 태*, 김 양 한*

(Sang Tae Ahn*, Yang Hann Kim*)

요 약

실내 잔향을 해석하기 위하여 잔향의 주관적 지각에 대한 여러가지 객관적 평가량들이 제안되어 왔으나, 그러한 개별적인 평가량들 사이의 관계를 이해하고 그들을 통합적으로 바라보는 것은 쉬운 일이 아니다. 본 논문에서는 다섯 개의 대표적인 객관적 평가량-잔향시간, 초기감쇠시간, 초기시간지연, 명료도, 도달에너지강도-을 선정하고 잔향 감쇠 곡선을 이용하여 그러한 평가량들을 통합하는 잔향 모델을 수립한다. 제안된 모델의 기하학적 형태와 주관적 지각 특성 사이의 관계를 해석하고, 이를 잔향의 해석이나 합성에 응용할 때의 유용성과 한계에 대해 논의한다.

ABSTRACT

To analyze a room reverberation, many objective parameters have been suggested as measures of subjective perception in concert hall acoustics. However, it is difficult to understand the relationship among the individual parameters and to have a whole image of them. In this paper five primary objective parameters were selected and a reverberation model based on them was established by the reverberation decay curve. The proposed model was interpreted geometrically in terms of subjective characteristics. And finally we discuss the usefulness and the limitation of the model when it is applied to the analysis and

I. 서 론

Sabine[1]이 잔향에 대한 주관적 지각을 정량화하는 하나의 객관적 평가량으로 잔향시간을 제안한 이후, 특히 콘서트 홀 음향학 분야에서 여러 가지 평가량들이 제안되었으며[2,3] 잔향에 대한 주관적 지각 특성의 평가에 많은 도움을 주어 왔다. 그러나 용어가 시사하고 있듯이 주관적 지각이란 보편성을 갖기 어렵고 따라서 연구자에 따라 서로 다른 평가량들을 정의하여 사용하는 것이 일반적이다[2].

잔향에 대한 평가량들은 인간의 주관적인 지각을 다루고 있기 때문에, 이들 사이의 객관적 관계를 밝히려는 것은 매우 무모한 작업이라 할 수 있다. 측정된 수많은 평가량들을 정리해 놓은 표나 그래프를 앞에 두고 그들

사이의 연관성이나 독립성 등의 관계를 파악하는 것 역시 쉬운 일이 아니다. 본 논문은 기존에 정의된 평가량들의 의미와 서로 다른 평가량들 사이의 관계를 통합적으로 이해하는데 도움이 되는 도구를 마련함을 주된 목적으로 한다.

실내 잔향의 해석이나 평가와는 다른 동기에 의하여 잔향을 인공적으로 합성하기 위한 잔향기들이 제안되어 왔다. Schroeder가 빗형 필터(comb filter)와 전역통과 필터(all-pass filter)의 조합으로 이루어진 잔향기를 처음으로 제안한 이래[4, 5], 빗형 필터, 전역통과 필터, 저역통과 필터(low-pass filter)등을 기본 단위로 하는 다양한 구조의 잔향기들이 제안되었다[6-10]. 그러나 잔향기 설계 단계에서 주관적 지각 특성을 고려하는 것이 현재로서는 불가능하고 따라서 만족스러운 잔향을 얻기 위해서 시행착오 방법에 의존하여야 했다. 주관적 지각이 반영된 잔향 모델이 확립된다면 잔향의 주관적 지각을 기

술하는 언어, 이를테면 ‘음원이 멀리 느껴지며 매우 명료하고 약간 친밀한 느낌이 드는 잔향’과 같은 표현을 잔향기의 설계 조건으로 주는 것이 가능할 것이다. 본 논문에서는 그러한 시도의 하나로, 널리 사용되고 있는 다섯 개의 대표적인 객관적 평가량들(잔향시간, 초기감쇠시간, 초기시간지연, 명료도, 도달에너지강도)에 근거한 잔향 모델을 제안하여 각각의 평가량이 정량화하는 주관적 지각을 반영할 수 있도록 한다.

2장에서 잔향 모델 수립의 배경 이론으로써 실내 충격 응답의 정규화, 잔향 감쇠 곡선, 객관적 평가량들에 대해 다루며, 3장에서 잔향 모델을 제안하고 제안된 모델의 적용과 한계점에 대해 고찰한다. 4장은 본 논문의 결론부이다.

II. 배경 이론

1. 실내 충격 응답의 정규화

실내에 단극음원(monopole source)과 측정점(청취자)이 위치하고 있을 때 단극음원의 음압(sound pressure) S 를 입력으로 삼고 측정 음압 P_i 를 출력으로 삼는 시스템을 생각하기로 한다. 그러한 시스템의 충격 응답 $h_R(t)$ 를 실내 충격 응답으로 정의할 수 있고(Fig. 1(a)), 주어진 음원과 측정점의 위치에서 $h_R(t)$ 에 의해 그 실내의 잔향 특성이 완전하게 규명된다. $h_R(t)$ 는 직접음(direct sound)에 대한 응답 $h_{R,d}(t)$ 와 잔향음(reverberant sound)에 대한 응답 $h_{R,r}(t)$ 의 합으로 표현될 수 있고(Fig. 1(b), Fig. 2(a)), $h_{R,d}(t)$ 는 자유공간에서의 충격 응답과 같으며 다음과 같이 쓸 수 있다[11].

$$h_{R,d}(t) = \delta(t - r/c)/r \quad (1)$$

여기서 r 은 음원과 측정점 사이의 거리이고, c 는 음속이다. 즉, 직접음은 r/c 의 시간지연과 $1/r$ 배의 크기변화를 갖는다.

직접음에 관계없이 잔향음의 특성에만 관심을 갖기 위하여 실내 충격 응답의 정규화(normalization)가 필요하다. 즉, 본 논문에서 말하는 실내 충격 응답의 정규화란 음원과 측정점 사이의 거리 정보를 제거함으로써 잔향음의 특성에만 관심을 갖도록 하는 작업이다. 측정점에서의 음압 P_i 를 출력으로, 측정점에서의 직접음 P_d 을 입력으로 갖는 시스템의 충격 응답을 정규화된 실내 충격 응답 $h_N(t)$ 로 정의한다(Fig. 1(c)). $h_N(t)$ 는, 무향실에서 녹음한 원음을 입력으로 하고 잔향이 부가된 음을 출력으로 하는 잔향기의 충격 응답과도 같다고 볼 수 있다. $h_N(t)$ 도 역시 직접음에 대한 응답 $h_{N,d}(t)$ 와 잔향음에 대한 응답 $h_{N,r}(t)$ 의 합으로 나타낼 수 있다(Fig. 1(d)).

그런데 Fig. 1(d)를 보면 $h_{N,r}(t)$ 의 입력과 출력이 P_r 로 같다. 따라서

$$h_{N,r}(t) = \delta(t) \quad (2)$$

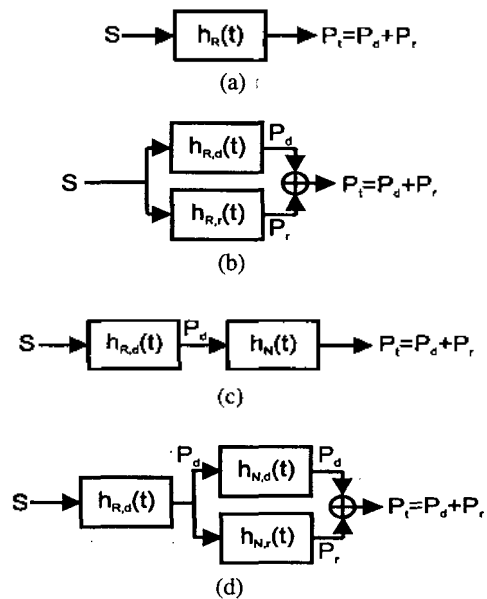
이고(Fig. 2(b)), 이는 정규화된 실내 충격 응답에서 직접음이 항상 임펄스 함수이며 더 이상 직접음의 시간 지연이나 크기 변화를 고려할 필요가 없음을 의미한다.

Fig. 1(a)와 Fig. 1(c)를 비교하면 $h_R(t)$ 는 $h_{R,d}(t)$ 와 $h_{R,r}(t)$ 의 컨벌루션임을 알 수 있고, 식(1)로부터

$$h_N(t) = rh_R(t + r/c) \quad (3)$$

을 얻을 수 있는데, 이는 실내 충격 응답 $h_R(t)$ 로부터 정규화된 실내 충격 응답 $h_N(t)$ 를 얻는 관계식이다. 측정된 실내 충격 응답 $h_M(t)$ 에서 가장 먼저 나오는 피크 즉, 직접음의 크기가 α 이고, 시간 지연이 β 라면 $h_N(t) = h_M(t + \beta)/\alpha$ 의 관계식으로 정규화된 실내 충격 응답을 얻을 수 있다.

편의상, 본 논문에서 실내 충격 응답 $h(t)$ 라 하면 정규화된 실내 충격 응답을 의미하는 것으로 한다.



- S : monopole amplitude
- P_d : direct sound pressure
- P_r : reverberant sound pressure
- P_i : total sound pressure
- $h_R(t)$: room impulse response
- $h_{R,d}(t)$: direct sound related part of $h_R(t)$
- $h_{R,r}(t)$: reverberant sound related part of $h_R(t)$
- $h_N(t)$: normalized room impulse response
- $h_{N,d}(t)$: direct sound related part of $h_N(t)$
- $h_{N,r}(t)$: reverberant sound related part of $h_N(t)$

그림 1. 실내의 음향학적 시스템을 나타내는 블록 다이어그램
Fig. 1. Block diagrams representing acoustical room system.

2. 잔향 감쇠 곡선과 잔향의 객관적 평가량

실내 충격 응답은 실내 잔향 특성을 완전하게 규명 하지만 그 모양이 복잡하고 불규칙하여 모델링하기가 쉽지 않다. 그런데 Sabine[1] 이후로 잔향에 대한 주관적 지각의 평가를 위해 제안된 많은 객관적 평가량들이 잔향 감쇠 곡선(reverberation decay curve)을 이용하여 정의될 수 있다는 사실을 주목하면[2, 3], 잔향 감쇠 곡선의 모델링에 의해 주관적 지각을 반영하는 잔향 모델을 수립하는 것이 하나의 타당한 접근 방법이라고 볼 수 있을 것이다.

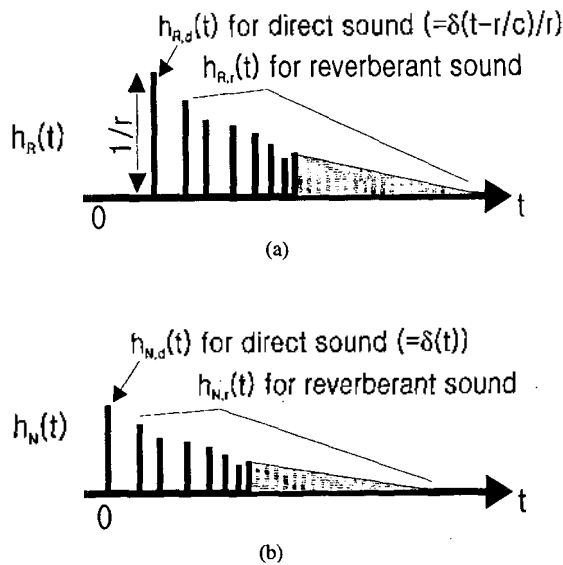


그림 2. 실내 충격 응답과 정규화된 실내 충격 응답의 비교 (a) 실내 충격 응답 (b) 정규화된 실내 충격 응답
Fig. 2. Comparison of room impulse response and normalized room impulse response (a) room impulse response (b) normalized room impulse response.

잔향 감쇠 곡선 $s(t)$ 는

$$s(t) = \int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau \tag{4}$$

로 정의될 수 있으며 여기서 $h(t)$ 는 정규화된 실내 충격 응답이다. $s(t)$ 는, $t < 0$ 일 때 자기상관 함수가 1인 백색 잡음이고 $t > 0$ 일 때 값이 0인 직접음에 대해, 잔향이 부가된 전체 음압의 제곱을 앙상블 평균(ensemble average)한 값을 의미한다[12]. $s(t)$ 는 적분 연산에 의해 $h(t)$ 보다 부드러워지며, 모델링이 상대적으로 용이해진다.

본 논문에서 관심의 대상인 다섯 개의 대표적 객관적 평가량을 간단히 살펴보면 다음과 같다.

잔향 시간(reverberation time)은 Sabine[1]이 제안한 양으로 잔향에너지가 60dB만큼 감쇠하는데 걸리는 시간으로 정의되는데 다음 두 가지가 널리 사용된다. 잔향이 -5dB에서 -35dB까지 30dB만큼 감쇠하는데 걸리는 시간에 2를 곱한 잔향 시간 RT 와, 잔향이 0dB에서 -10dB까지 10dB만큼 감쇠하는데 걸리는 시간에 6을 곱한 초기감쇠시간(early decay time) EDT 가 그것이다. EDT 는 연속적인 음을 들을 때에 주관적으로 느끼는 잔향의 감쇠를 나타내고, RT 는 음이 갑자기 끊길 때 주관적으로 느끼는 잔향의 감쇠를 나타내는 양으로 알려져 있다[2].

초기시간지연(initial-time-delay gap) t_i 는 직접음과 처음으로 도달하는 잔향음과의 시간 간격으로 정의된다. t_i 는 음장으로부터 느끼는 친밀도(intimacy)와 상관 관계를 갖는 것으로 알려져 있다[2].

명료도(objective clarity) C_{50} 또는 C_{80} 은 초기 잔향 에너지와 후기 잔향 에너지의 비로 정의되며 음성 이해도(speech intelligibility)나 주관적으로 느끼는 잔향의 명료도와 상관 관계를 갖는 것으로 알려져 있는 양이다[2]. 본 연구에서는 C_{80} 을 사용하기로 하며 이로 인해 일반성을 잃지는 않는다. C_{80} 은 다음과 같이 쓸 수 있다(식 (5)).

$$C_{80ms} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{80ms} h^2(\tau) d\tau}{\int_{80ms}^{\infty} h^2(\tau) d\tau} \right) \tag{5}$$

$$= 10 \log \left(\frac{s(0^-) - s(80ms)}{s(80ms)} \right)$$

본 논문에서 사용되는 log는 밑을 10으로 하는 로그이다.

도달에너지강도(strength of arriving energy) G 는 전체 음압 에너지와 직접음 에너지의 비로 정의할 수 있다. G 는 주관적으로 느끼는 잔향의 라우드니스(loudness)와 음원과 거리 지각과 관계 있는 양으로[2, 8] 다음과 같이 쓸 수 있다(식 (6)).

$$G = 10 \log \left(\frac{\int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} h_d^2(\tau) d\tau} \right) \tag{6}$$

$$= 10 \log \left(\frac{s(0^-)}{s(0^-) - s(0^+)} \right)$$

여기서 $h_d(t)$ 는 정규화된 실내 충격 응답 $h(t)$ 에서 직접음에 해당하는 부분으로, $\delta(t)$ 와 같다(식 (2)).

이외에도 ICCA(interaural cross-correlation coefficient)나 L_f (early lateral energy fraction)와 같은 평가량들도 중요하게 여겨지나[2, 3], 본 연구에서는 잔향 감쇠 곡선율이

용하여 정의할 수 있는 모노럴(monaural) 평가량으로 범위를 제한하기로 한다.

Ⅲ. 5자유도 실내 잔향 모델

1. 5자유도 실내 잔향 모델 수립

데시벨 (dB) 척도로 표현된 잔향 감쇠 곡선 $S(t) = 10 \log s(t)$ 을, 실제 실내에서 측정된 음에너지 감쇠 곡선의 형태에 근거하여 세 개의 서로 다른 기울기를 갖는 직선으로 모델링한다(Fig. 3). 데시벨 척도에서 음의 기울기를 갖는 직선은 지수적으로 감쇠하는 곡선을 의미하며, Fig. 3의 $S(t)$ 는 시간에 따라 변하는 세 개의 감쇄율을 모델링한다고 볼 수 있다. $S(t)$ 는 다섯 개의 모델 파라미터 a, b, c, d, e 로 완전하게 규명되는 5자유도 모델이다. 모델 파라미터들이 다섯 개의 평가량들(잔향시간 RT , 초기 감쇠시간 EDT , 초기시간지연 t_i , 명료도 C_{80} , 도달에너지강도 G)과 어떤 관계가 있는지 알아보기로 한다.

정규화된 실내 충격 응답 $h(t)$ 에서 직접음에 해당하는 부분이 $\delta(t)$ 라는 사실(식 (2))과 식 (4)로부터

$$s(0^-) - s(0^+) = \int_0^{0^+} h(\tau) d\tau = 1 \quad (7)$$

의 관계를 얻고, 다시 식 (6)으로부터

$$G = 10 \log s(0^-) = S(0^-) \quad (8)$$

를 얻을 수 있다. Fig. 3을 참조하면 모델 파라미터 a 와 도달에너지강도 G 가 같음을 알 수 있다. 즉,

$$a = G \quad (9)$$

의 관계가 성립한다. 또한 식 (7)을 $s(0^+)$ 에 대해 정리하여 로그를 취하고, 식 (8)과 식 (9)를 대입함으로써,

$$S(0^+) = 10 \log(10^{a/10} - 1) \quad (10)$$

의 관계를 확인할 수 있다(Fig. 3).

또한 초기시간지연 t_i 의 정의로부터,

$$b = t_i \quad (11)$$

의 관계를 얻는다(Fig. 3).

식 (5)를 $s(80ms)$ 에 대해 정리하여 로그를 취하면,

$$c = S(0^-) - S(80ms) = 10 \log(1 + 10^{C_{80}/10}) \quad (12)$$

의 식을 얻을 수 있다(Fig. 3).

Fig. 3과 초기감쇠시간 EDT 의 정의로부터

$$d = EDT / 6 \quad (13)$$

의 관계를 얻는다.

잔향시간 RT 를, 일반적으로 사용되는 의미인, 후기 잔향이 60dB만큼 감쇠하는데 걸리는 시간이라고 하면 Fig. 3으로부터 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$e = -60 / RT \quad (14)$$

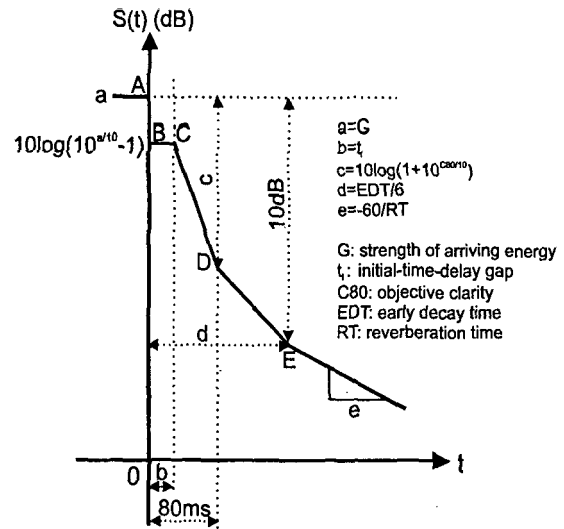


그림 3. 잔향감쇠 곡선을 이용한 5자유도 잔향 모델
Fig. 3. 5-Degree-of-freedom reverberation model using reverberation decay curve.

위에서 얻어진 관계식들은 Fig. 3에서 점 D와 점 E의 위치가 서로 바뀌어도 관계 없이 성립한다.

식 (9), (11), (12), (13), (14)에 의해 다섯 개의 모델 파라미터와 다섯 개의 객관적 평가량을 관계지을 수 있다. 제안된 모델에서 모델 파라미터 a, b, c, d, e 가 서로 독립적이므로, 그에 따라 객관적 평가량들(잔향시간, 초기감쇠시간, 초기시간지연, 명료도, 도달에너지강도)도 서로 독립적이다. 따라서 그러한 다섯 개의 평가량들이 하나의 독립적인 평가량 세트로 간주될 수 있을 것이다.

Fig. 3의 모델을 잔향의 주관적 지각 특성을 통해 해석해 보기로 한다. a 가 커질수록 도달에너지강도 G 가 커지므로(식 (9)), 청취자가 지각하는 잔향의 라우드니스가 커지고 음원이 더 멀리 있는 것처럼 느껴질 된다 [2, 8]. 또한 b 의 값이 크다는 것은 초기시간지연 t_i 가 크다는 것을 의미하며(식 (11)), 음장이 덜 친밀하게 느껴질 것이라고 해석할 수 있다[2]. c 가 커질수록 명료도 C_{80} 이 커지며(식 (12)), 따라서 잔향이 부가된 청취음이

보다 명료하게 느껴질 것이다. d 가 작다는 것은 초기감쇠시간 EDT 가 작다는 것을 의미하며(식 (13)), 이는 연속적인 음을 청취할 때에 지각되는 잔향 감쇠가 빠르다는 것을 뜻한다. 또한 ϵ 의 크기가 클수록 잔향시간 RT 가 작아지며(식 (14)), 갑자기 끊기는 음을 들을 때에 지각되는 잔향 감쇠가 빨라진다는 것을 의미한다.

2. 제안된 모델의 적용과 한계

잔향 모델은 잔향의 해석과 합성, 두 가지 경우에 적용될 수 있다. 잔향의 해석이란 주어진 잔향에 의해 어떠한 주관적 지각이 발생하는가를 예측하는 작업이다. 이는 주어진 잔향으로부터 객관적 평가량을 구하고 그러한 평가량이 나타내는 주관적 지각을 해석함으로써 가능하다.

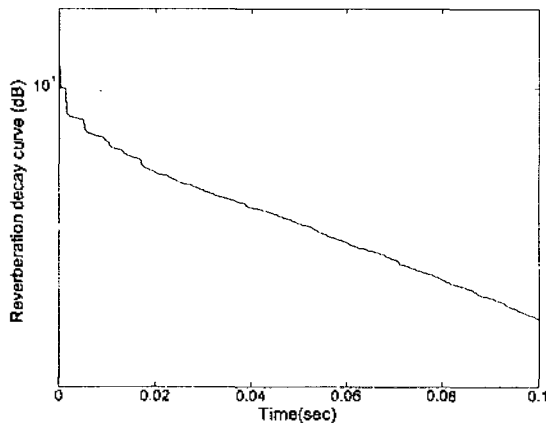


그림 4. 측정된 실내(강의실) 잔향 감쇠 곡선
Fig. 4. Measured reverberation decay curve of a lecture room.

주어진 잔향(실내 충격 응답)으로부터 본 논문에서 고려된 다섯 개의 객관적 평가량을 구한다는 것은, Fig. 4와 같은 실제 측정된 잔향 감쇠 곡선을 제안된 5자유도 잔향 모델로 곡선 맞춤(curve fitting)하여 모델 파라미터를 구하고 식 (9), (11), (12), (13), (14)에 의해 평가량들을 구함으로써 가능하다. 이는 각각의 평가량의 정의에 따라 개별적으로 평가량들을 구하는 기존의 방법과 기본적으로는 같다. 제안된 잔향 모델이 기존에 정의된 평가량들에 근거하여 수립되었기 때문이다. 그러나 앞 절에서 살펴보았듯이 제안된 잔향 모델은, 주어진 잔향 감쇠 곡선으로부터 다섯 개의 평가량들과 각각에 해당하는 지각 특성을 기하학적으로, 그리고 통합적으로 이해하는데 도움을 주며 평가량들 사이의 독립성 등과 같은 상관관계를 파악하는데도 유리하다.

RT 나 EDT , C_{50} 과 같은 평가량들은 주파수의 함수이며 일반적으로 주파수 밴드에 따라 값을 구한다. 실내 충격

응답 $h(t)$ 대신에 $h(t)$ 를 대역 필터링(band pass filtering)한 $h_{bp}(t)$ 를 사용함으로써 주파수 밴드에 따른 의존성을 고려할 수 있다. 이 경우 주파수 밴드별로 여러 개의 모델 곡선을 얻게 될 것이며, 모델 파라미터와 평가량 사이의 관계 등은 앞에서와 동일하게 유지된다.

잔향의 두번째 응용으로 잔향 합성 즉, 인공 잔향기 설계를 들 수 있다. 목표로 하는 잔향의 주관적 지각 특성을 설정하고 이를 객관적 평가량으로 나타낸 후 그러한 객관적 평가량에 근거한 잔향 모델을 잔향기의 설계 조건으로 주는 전략을 생각할 수 있다. 여기에서 잔향기의 형태나 설계 방법은 또 다른 문제이다. 그러나 식 (2)로부터 얻을 수 있는,

$$h^2(t) = -\frac{ds(t)}{dt} \quad (15)$$

의 관계식에 주목하면, 모델 곡선 $s(t)$ 의 작은 변화가 $h(t)$ 에는 큰 변화를 일으킬 수 있다는 사실을 알 수 있다. 즉, 하나의 모델 곡선에 대해 수없이 많은 잔향이 존재할 수 있고, 이는 잔향 감쇠 곡선 모델이 근거로 삼는 객관적 평가량이 곡선 맞춤 즉, 평균적인 개념에서 정의되는 양이라는 사실에서 기인한다. 따라서 합성된 잔향이 설계 조건으로 주어진 모델 곡선을 만족한다 하더라도 실제로는 존재하지 않는 잔향이 발생될 수 있고, 결과적으로 매우 부자연스러운 잔향을 유발할 수도 있다[13]. 이는 Schroeder[4, 5]에 의해 지적된 바 있으며 추후 잔향의 자연스러움을 정량화하는 평가량에 대한 연구도 필요할 것으로 보인다.

IV. 결론

본 논문에서는 다섯 개의 객관적 평가량에 근거하여 5 자유도를 갖는 잔향 모델을 제안하였다. 제안된 모델을 통해 다섯 개의 객관적 평가량들을 통합적으로 이해할 수 있는 도구를 제공하였으며, 잔향 감쇠 곡선을 잔향의 주관적 지각 특성을 표현하는 언어로써 기하학적으로 해석할 수 있었다. 즉, 잔향에 대한 주관적인 지각을 객관적 평가량에 의해 모델 파라미터와 연결시킬 수 있었다.

또한 실내 충격 응답의 정규화를 통해 직접음에 대한 정보를 제거하고 잔향음의 특성을 해석할 수 있었다.

참고 문헌

1. W. C. Sabine, *Collected Papers on Acoustics* (Harvard U. P., 1927), reprinted by Dover publication(1964), Paper No. 1, "Reverberation," pp. 3-68.
2. L. L. Beranek, "Concert Hall Acoustics-1992," J.

Acoust. Soc. Am. **92**, pp. 1-39, 1992.

3. M. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*(E & FN SPON, 1992), pp. 412-418.
4. M. R. Schroeder and B. F. Logan, "'Colorless' Artificial Reverberation," J. Audio Eng. Soc. **9**, pp. 192-197, 1961.
5. M. R. Schroeder, "Natural Sounding Artificial Reverberation," J. Audio Eng. Soc. **10**, pp. 210-223, 1962.
6. B. Dodge and T. A. Jerse, *Computer Music: Synthesis, Composition, and Performance*(Schirmer Books, 1985), pp. 223-240.
7. J. A. Moorer, "About This Reverberation Business," of *Foundations of Computer Music*(MIT Press, 1987), pp. 605-639.
8. D. R. Beault, *3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia*(Academic Press, 1994), pp. 169-190.
9. D. Rocchesso and J. O. Smith, "Circulant and Feedback Delay Networks for Artificial Reverberation," IEEE Transactions on Speech and Audio Processing **5**, pp. 51-63, pp. 106-108, 1997.
10. 구재을, 윤홍서, 방효창, 김원후, "효과음 처리를 위한 디지털 잔향 시스템에 관한 연구," 한국음향학회지 11권 6호, pp. 5-14, 1992.
11. A. D. Pierce, *Acoustics*(Acoust. Soc. Am., 1994), pp. 159-165.
12. M. R. Schroeder, "New Method of Measuring Reverberation Time," J. Acoust. Soc. Am. **37**, pp. 409-412, 1965.
13. 안상태, "자연스럽게 들리는 인공 잔향을 위한 FIR 필터 설계 필터 설계," 한국과학기술원 기계공학과 석사학위 논문, 1999.

▲안 상 태(Sangtae Ahn)



1973년 4월 24일생
 1997년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학사)
 1999년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과(공학석사)

▲김 양 한(Yang-Hann Kim)

1950년 8월 21일생
 현재 : 한국과학기술원 기계공학과 교수
 (1988년 제7권 5호 참조)