

마곡사 대웅보전의 잔향특성

The Reverberation Characteristics of 'Magoksa Daeungbojeon'

장 지 호*·김 양 한**

Ji-Ho Jang, Yang-Hann Kim

Key Words : Reverberation Time(잔향시간), Early Decay Time(초기 감쇠 시간), Clarity(명료도)

ABSTRACT

The reverberation characteristics of the Korean Traditional buildings aren't well-known, but there could be many particular properties. In this study, we compare the reverberation characteristics of a Korean traditional building of a temple, 'Magoksa', with three modern buildings. We use 5 parameters which have been widely studied in architectural acoustics such as reverberation time, early decay time, clarity, initial-time delay gap and R/D ratio. .

1. 서 론

Sabine[1]이 잔향시간에 대해 연구한 이래, 건축 음향학과 콘서트 홀 음향학 등의 분야에서 교회나 성당, 콘서트 홀의 잔향특성에 대해서 많은 연구가 진행되어 왔다. 반면 한국의 고 건축물의 잔향특성에 대해서는 알려져 있는 바가 많지 않다. 한국의 고 건축물은 재질과 내부 구조, 내부 장식 등에서 현대의 건축물과 큰 차이가 있기 때문에 잔향 특성에 있어서도 다른 특성을 보일 것이라 추측할 수 있다. 그러므로 한국의 고 건축물의 잔향특성이 어떻게 다른지, 그리고 그 요인은 무엇인지 알기 위한 연구가 필요하다. 한국 고 건축물을 음향 관점에서 분류하고 그 특성을 측정하는 것 자체가 매우 방대한 연구가 될 것이다.

한국 고 건축물의 음향특성에 대한 연구의 시작으로써, 고 건축물의 하나인 마곡사 대웅보전의 잔향특성에 대해 알아보고자 한다. 마곡사 대웅보전(이하 마곡사)은, 충남 공주시의 마곡사에 위치한, 조선 중기에 건축된 2 층 목조 건물로써 보물 801 호로 지정되어 있다. 마곡사는 내부 보존이 잘 되어왔기 때문에 잔향 특성이 크게 변하지 않았을 것이라 믿을 수 있다. 이 곳의 잔향 특성을 파악하기 위해, 다른 공간의 잔향 특성과의 비교가 필요하다. 그 비교 대상이 되는 공간으로써 한국 과학기술원의 대강당(이하 대강당)과 정문술빌딩의 드림홀(이하 드림홀), 기계공학동의 1 층 로비(이하 로비)를 대상으로 선정 하였다. 대강당은 예술 공연을 위한 1000 석 규모의 2 층 건물이고 드림홀은 주로 강연을 목적으로 하는 약

200 석 규모의 강당이며, 로비는 21.6×7.2×7.8(m) 크기로서 작은 음악회가 열리기도 하는 장소이다. 그리고 비교의 기준으로는 안상태 등이 5 자유도 잔향 모델에서 선정한 5 개의 객관적인 평가량을 택하였다[2].

2. 잔향 특성의 객관적 평가량

잔향특성은 인간의 주관적 지각에 의해 평가된다. 따라서 인간의 주관적 평가와 깊은 상관 관계를 갖는 객관적 평가량을 선택하는 것이 중요하다. 이와 관련하여 안상태 등은 5 자유도 잔향모델에서 5 가지의 객관적인 평가량을 선택한 바 있다 [2]. 여기에서 선택된 5 가지 평가량은 잔향시간(reverberation time), 초기감쇠시간(early decay time, EDT), 명료도(clarity), R/D 비(reverberant-to-direct sound energy ratio), 초기 시간 지연 간격(initial-time-delay gap) 등이다.

2.1 잔향시간(RT, Reverberation Time)과 초기 감쇠 시간(EDT, Early Decay Time)

잔향시간은, 음 에너지가 60dB 감쇠하는 데 걸리는 시간으로 Sabine 에 의해 정의되었으며[1], 실내 잔향 특성을 나타내는 가장 기본적인 값이다. 잔향시간의 결정에는 두 가지 방법이 널리 쓰이는데, 하나는 음 에너지가 -5dB 에서 -35dB 까지 감소하는 시간의 두 배로 정하는 방법이고 다른



그림 1. 마곡사 대웅보전의 외부와 내부모습

* 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : vacuum0@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8220

** 한국 과학기술원 기계공학과

하나의 음 에너지가 0dB 에서 -10dB 까지 감소하는 시간의 여섯 배로 정하는 방법이다. 흔히 전자를 잔향시간(RT, reverberation time), 후자를 초기 감쇠 시간(EDT, early decay time)이라고 일컬으며 본 논문에서도 그렇게 부르기로 한다.

한편, 전자를 음 에너지가 -5dB 에서 -25dB 까지 감소하는 시간의 세 배로 결정하기도 하는데, 이 때는 전자를 T_{30} , 이 경우를 T_{20} 으로 표기하여 구별한다. 초기 감쇠시간은 연속된 음악을 들을 때 청취지각에 영향을 주고 잔향시간은 음이 갑자기 끊길 때 청취지각에 영향을 준다고 알려져 있다[3].

공간끼리 비교를 할 때 초기감쇠시간을 비교하는 것과 잔향시간 값을 비교하는 것은 큰 차이가 없다. 초기감쇠시간과 잔향시간은 서로 매우 연관되어 있기 때문이다. 그러므로 초기감쇠시간을 잔향시간과 연관이 없는 변수로 만들 필요가 있다. 본 논문에서는 잔향시간이 나타내는 음 에너지 감쇠율과 초기감쇠시간이 나타내는 음 에너지 감쇠율의 차이를 초기감쇠의 크기를 비교하는 평가량으로 사용하고자 한다. 즉 전자는 평균적인 음 에너지의 감쇠율이고 후자는 초기의 음 에너지 감쇠율을 의미하게 된다. 감쇠율의 차이는 그림 3 에서 두 직선이 이루는 각도로서 계산한다.

2.2 명료도와 R/D 비, 초기시간지연 간격

명료도(clarity)는 초기 잔향 에너지와 후기 잔향 에너지의 비로써

$$C_i = 10 \log \left(\frac{\int_0^t h^2(t) dt}{\int_t^\infty h^2(t) dt} \right) \quad (1)$$

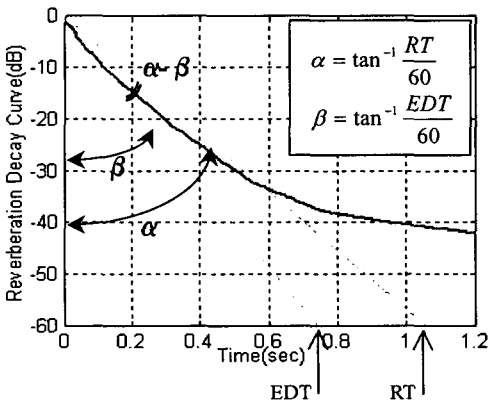


그림 2 평균 음에너지 감쇠율과 초기 음에너지 감쇠율의 차이

정의된다[2]. 여기서 $h(t)$ 는 정규화된 실내 충격 응답(normalized room impulse response)이고 t 는 음성(speech)에 대해서는 50ms, 음악에 대해서는 80ms 가 많이 이용된다. 마곡사에서 예불이나 목탁 소리는 연속적인 소리로서 음성보다 음악에 가깝다고 보여지므로 80ms 를 이용하겠다.

명료도 역시 잔향시간과 깊이 연관된 값이므로 잔향시간과 독립된 변수로 만들어 줄 필요가 있다. 본 논문에서는 잔향시간에 의한 명료도 C'_{80} 를 정의한 후, 실제 C_{80} 값과의 차이를 명료도를 비교하는 평가량으로 사용하겠다. C'_{80} 는 잔향시간을 기울기로 하는 직선이 0.08s 에 갖는 초기 에너지와 후기 에너지 비로써 정해진다. 즉, 그림 4 에서 표시한 부분을 a 라고 할 때, C'_{80} 은,

$$C'_{80} = 10 \log \left(\frac{1 - 10^{-\frac{a}{10}}}{10^{-\frac{a}{10}}} \right) \quad (2)$$

와 같이 계산된다.

R/D 비(reverberant-to-direct sound energy ratio)는 직접 음 에너지에 대한 잔향 음 에너지의 비로 정의되며 잔향강도를 나타낸다. 이 값은 음원의 거리감을 나타내며,

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

와 같이 정의된다[5]. 분모 항은 직접 음 에너지를 의미하고 분자 항은 잔향 음 에너지를 의미한다.

그리고 초기시간지연간격(t_i , initial-time-delay gap)은 직접 음과 첫 번째 반사 음과의 시

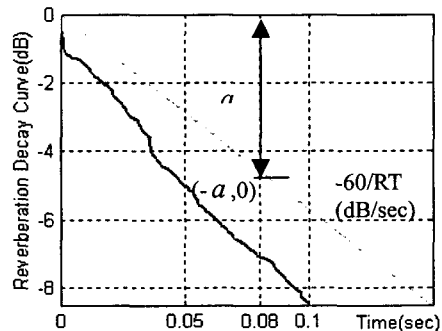


그림 3 C'_{80} 의 계산

간 간격으로 정의되며 음장의 친밀도(intimacy)와 높은 상관 관계가 있다고 알려져 있다[3].

그런데 이상의 값들은 공간 안에서 음원과 관찰자의 위치에 따라 변한다는 문제가 있다. 여기서는 각 공간에서 음원과 관찰자로 지정한 위치가 그 공간의 특성을 대표한다고 가정하고 한 공간 내의 음원과 관찰자의 위치는 문제삼지 않는다. 마곡사 대웅보전의 경우 예불을 할 때 목탁을 치는 위치를 음원의 위치로 정하였고, 마이크로폰의 위치는 나머지 스님들의 착좌 위치의 중간으로 정하였기 때문에 이 가정은 어느 정도 타당성을 지닐 수 있다. 마찬가지로 대강당과 드림홀, 로비의 경우에는 음원을 무대의 중앙, 관찰자를 관객석의 중앙으로 정하여 공간을 대표하도록 정하였다. 또한 주파수 대역별로 이 값들을 따로 구해본 결과 주파수에 따라 특별히 변화하는 경향은 없었기 때문에 모든 대역을 포함하는 하나의 값을 구하였다.

3. 음 에너지 감쇠 곡선

본 연구에서 앞 장에서 설명한 5 가지의 값들은 Schroeder 가 제안한 방법에 따라 얻은 음 에너지 감쇠곡선(Sound Energy Decay Curve)을 구한다[3]. 이 방법을 이용하면 한 번의 측정을

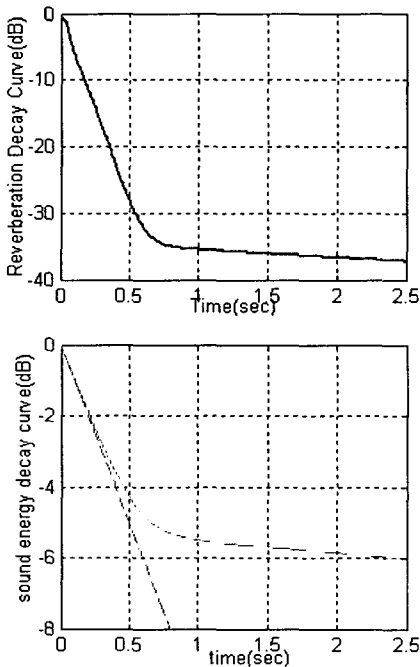


그림 4 실제로 구한 음 에너지 감쇠 곡선(위)와 잡음이 있는 경우의 이론적인 음 에너지 감쇠 곡선(위)

통해 잔향시간을 비교적 정확하게 측정할 수 있고, 계산 과정에 적분 연산을 포함하므로, 부드러운 곡선을 얻을 수 있다.

그런데, 음 에너지 감쇠 곡선을 실제로 구할 때에는 잡음의 영향에 대해 주의해야 한다. 이것은 그림 4의 두 그래프를 비교해 보면 알 수 있다. 위의 그래프는 실험 결과를 가지고 실제로 그린 음 에너지 감쇠 곡선이고, 아래의 그래프는 음압이 지수함수적으로 감소하는 이상적인 경우를 수식으로 구하여 그린 것이다. 점선은 잡음이 없는 경우, 실선은 일정한 잡음이 있다고 가정했을 경우이다. 아래 그림의 실선 그래프는 잡음의 영향 때문에 차츰 점선 그래프를 벗어나게 되고 다른 기울기를 갖게 된다. 따라서 실제 실험 결과인 위의 그래프에서도 두 개의 기울기를 갖고 마치 잔향시간이 두 개인 듯 나타나지만, 변곡점 이후의 데이터는 주로 잡음의 영향에 의한 것이며 이 경우 T_{30} 보다는 T_{20} 으로 잔향시간을 구하는 것이 더 정확할 것이라고 판단할 수 있다. -35dB 가 변곡점 부근에 위치하기 때문에 신뢰할 수 없기 때문이다.

4. 실험 방법

음 에너지 감쇠 곡선을 얻기 위해서는 먼저 충격 응답(impulse response)을 구해야 한다. 본 실험에서는 충격 응답을 구하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다. 먼저 음원으로 백색 잡음을 가진하여 정상 상태에 이르렀을 때 마이크로폰으로 음압을 측정한다. 그 다음 음원으로 입력되는 신호와 마이크로폰에서 얻은 출력 신호 간의 주파수 응답 함수를 구하고, 이를 역 푸리에 변환하였다. 이 경우 음원으로 사용한 스피커와 앰프의 특성이 주파수 응답 함수에 포함되는데, 본 연구에서는 스피커와 앰프의 영향이 거의 없다고 가정한다.

관심 주파수 영역은 인간의 가청 주파수 영역인 20Hz~20kHz 와 마이크로폰의 주파수 영역 5Hz~12.5kHz, ± 3 dB 을 고려하여 20Hz~12.5kHz 로 정하였다.

음원으로는 백색잡음을 발생시키기 위해 RION SF-06 랜덤신호발생기와 B&K 파워앰프 2716, B&K type 4296 전방향 스피커를 이용하였다. 마이크로폰으로는 1/2 인치 B&K type 4130 콘덴서 마이크로폰, type 2642 의 전치증폭기, type 2810 의 마이크로폰 파워 공급기를 사용하였다.

음원과 관찰자의 위치는 앞의 2 장에서 설명한 바와 같다. 그리고 지면으로부터의 높이는 음원이 1.3m, 관찰자는 1.1m 이다.

측정 시간은 각 측정 지점에서 1 분이었고, 이를 5 초 간격으로 50% 오버랩하여 총 23 회 평균을 취하였다. 5 초 간격으로 정한 이유는 충격 응답이 완전히 소멸하는데 걸리는 시간으로 5 초면 충분히 길다고 보았기 때문이다.

5. 실험 결과 및 고찰

마곡사에서의 실험결과를 5 가지의 객관적 평가량에 따라 하나씩 고찰해 보자.

모든 공간의 잔향시간은 T_{30} 이 정확하지 않을 수 있으므로 T_{20} 으로 구했다. 음 에너지 감쇠곡선에서 -35dB 떨어진 지점의 값이 잡음의 영향을 받았을 수 있기 때문이다. 각 공간에서의 측정된 잔향시간 값은 표 1 에 나타나 있다. 마곡사의 잔향시간이 다른 곳에 비해서 매우 짧다는 것을 쉽게 발견할 수 있다. 잔향시간이 짧은 이유는 공간의 부피가 작고 내부 벽면, 천정, 바닥의 재질이 주로 목재와 창호지로서 비교적 높은 흡음률을 갖기 때문이라고 보여진다.

마곡사의 초기감쇠시간은 잔향시간과 마찬가지로 다른 곳에 비해 짧다. 그러나, $\alpha - \beta$ 의 값을 비교해 봤을 때, 음에너지의 초기감쇠율은 평균감쇠율에 비해 작은 편이다

표 1 실험결과

	드림홀	로비	대강당	마곡사
T20(sec)	1.0110	1.0576	1.0494	0.5598
EDT(sec)	0.8284	0.7434	1.0540	0.4799
α (°)	0.0168	0.0176	0.0175	0.0093
β (°)	0.0138	0.0124	0.0176	0.0080
$\alpha - \beta$ (°)	0.0030	0.0052	-0.0001	0.0013
C80 (dB)	4.6224	6.1136	2.4831	9.5404
C80' (dB)	2.9750	2.6564	2.7112	7.9261
C80-C80' (dB)	1.6474	3.4572	-0.2281	1.6143
R/D ratio (dB)	16.9401	7.3018	6.7614	4.0881
tl (msec)	1.1000	1.6000	31.7000	2.3000

마곡사의 명료도는 다른 장소에 비해서 높지만, $C_{80}-C_{80}'$ 의 값이 특별히 크다고 할 수 없다. 따라서 마곡사의 명료도가 높은 이유는 잔향시간이 짧기 때문이다.

R/D 비는 네 곳 중에서 가장 작다. 이것은 마곡사에서 비교적 공간감이 적게 느껴진다는 것을 의미한다. 초기시간지연간격은 강당에 비해 매우 작지만, 드림홀, 로비에 비해 약간 길기 때문에 친밀도는 약간 낮은 편이다.

6. 결론

한국 고건축물 잔향특성을 알아보기 위해 마곡사 대웅보전에서 실험을 하였고 그 결과를 다른 세 장소와 비교해보았다. 비교의 기준으로는 5 자유도 잔향모델에서 선정한 5 가지 평가량을 사용하였다.

실험 결과, 마곡사는 잔향시간이 짧기 때문에 초기감쇠시간이 짧고 명료도가 높았다. 또한 공간감은 적게 느껴지는 편이고 친밀도는 약간 낮은 편이라는 사실을 알 수 있었다.

후 기

먼저 실험에 적극 협조해 주신 마곡사 관계자 여러분들께 감사드립니다. 또한 본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실(NRL)사업과 교육인적자원부의 BK21 사업에 의해 지원되었으며 지원에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Sabine, W. C. (1927), *Collected Papers on Acoustics* (Harvard U. P., Cambridge, MA), reprinted by Dover Publications (1964), Paper No. 1, "Reverberation," pp. 3-68.
- (2) Y.-H. Kim and Sang.-Tae Ahn, "A Reverberation Model Based on Objective Parameters of Subjective Perception," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol 49, No.9, 2001 September, pp. 786~794
- (3) L. L. Beranek, "Concert Hall Acoustics-1992," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 92, pp. 1-39 (1992).
- (4) M. R. Schroeder, "New Method of Measuring Reverberation Time," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 37, pp. 409-412 (1965)
- (5) Beault, D. R. (1994), *3-D sound for virtual Reality and Multimedia*, Academic Press