

대학 강의실의 공석 시 측정값을 이용한 만석 시 음향지표의 예측

Estimating occupied university classroom acoustical parameters from unoccupied values

최영지[†]

(Young-Ji Choi^{1†})

¹강원대학교 공과대학 건축·토목·환경공학부 건축공학전공

(Received July 17, 2018; revised August 21, 2018; accepted September 17, 2018)

초 록: 본 연구에서는 대학 강의실에서 공석 시 음향지표를 이용하여 만석 시 강의실의 음향지표를 예측하는 방법을 제시하였다. 먼저 공석 시 측정된 강의실의 T_{30} 값으로 공석 시 실의 총 흡음력을 계산할 수 있다. 선행연구(Choi, 2016)에서 제시한 12개 강의실의 공석 시 총 흡음력에 대한 만석 시 총 흡음력의 선형 회귀식을 이용하여 만석 시 실의 총 흡음력을 예측할 수 있다. 공석 시에 대한 만석 시의 총 흡음력 비를 토대로 재실자의 부가흡음에 의한 강의실의 음향지표 변화폭을 예측할 수 있다. 이 예측방법을 이용하여 공석 시 실의 음향지표 값을 알면 비슷한 규모의 만석 시 강의실의 음향상태의 예측이 가능하다.

핵심용어: 재실자, 실의 총 흡음력, 강의실, 음향지표

ABSTRACT: This paper proposes a simple procedure for estimating the acoustical parameter values in an occupied classroom from measurements in the unoccupied classroom. The total sound absorption in an unoccupied classroom can be calculated from measured reverberation times in the room. The expected occupied absorption can be calculated using equation that was obtained in a previous study (Choi, 2016) by fitting a linear regression line to a plot of total occupied absorption versus the corresponding unoccupied total absorption values measured in 12 university classrooms. The ratios of occupied-to-unoccupied sound absorption are used to predict increments in the values of acoustical parameters when occupants are added to the rooms. Occupied values of acoustical parameters can be estimated from unoccupied values and the change in total room absorption due to adding occupants.

Keywords: Occupants, Total room sound absorption, Classrooms, Acoustical parameters

PACS numbers: 43.55.Br, 43.55.Ev

1. 서 론

대학 강의실에서 재실자에 의한 흡음영향은 실의 음향 상태에 따라 상이하며 이는 실의 총 흡음력에 대한 재실자의 흡음력의 비율에 따른 것이다.^[1,2] 재실자에 의한 부가 흡음은 강의실의 잔향감 이외에

언어 명료도와 음의 크기 값에 영향을 주며 실의 음향 상태에 따라 이 음향지표의 변화 값이 다르다.^[2] 이와 같은 방법으로 재실자의 부가 흡음에 의한 실의 음향지표의 변화폭이 예측가능하며 재실자의 부가 흡음이 강의실의 높은 언어 명료도 성취에 기여하는지 예측가능하다.

선행연구^[2]에서 12개 대학 강의실의 측정결과를 바탕으로 재실자의 부가흡음력을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다 (Reference[2]의 Eq. (3) 참조). 이에

[†]Corresponding author: Young-Ji Choi (youngji.choi@kangwon.ac.kr)
Major in Architectural Engineering, Kangwon National University,
1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon, Kangwon-do 24341, Republic of Korea
(Tel: 82-33-250-6224, Fax: 82-33-259-5542)

측식은 500 Hz와 1000 Hz에서의 공석 시 실의 총 흡음력에 대한 만석 시 실의 총 흡음력의 관계를 선형 회귀식으로 나타내었다. 이 예측식을 토대로 선행연구와 유사한 체적과 착석률의 강의실에서 공석 시 실의 총 흡음력을 이용하여 만석 시 실의 총 흡음력의 산정이 가능하다.

이와 같이 공석 시 실의 총 흡음력을 알면 재실자의 부가흡음력의 예측이 가능하고 만석 시 재실자 흡음에 의한 실의 음향지표의 변화 값의 예측도 가능하다. 따라서, 본 연구에서는 선행연구^[2]에 대한 후속연구로 20개 대학 강의실에서 공석 시 실의 평균 흡음력과 음향지표를 이용하여 만석 시 강의실의 음향지표의 예측이 가능한 방법을 제시하였다.

II. 측정개요

2.1 강의실

대상공간은 K대학의 20개 강의실로 17개의 강의실과 3개의 컴퓨터실, 화상 회의실, 회의실이다. 컴퓨터실, 화상 회의실은 전공 강의실로, 회의실은 대형 강의로 사용되어 대상공간에 포함하였다. 20개 강의실중 12개 강의실은 선행연구결과^[2]를 이용하였으며 나머지 8개 강의실을 추가하여 측정하였다. 20개 강의실중 15곳은 측벽에 창이 있는 장방형이고, 5 곳은 부정형이다. 강의실 만석 측정 시 평균 착석률은 58%로 강의실별로 11~84명이 착석하였다. 실제 강의중인 강의실에서 측정을 실시하여 모든 실에서 100% 착석률 상태의 음향측정은 현실적으로 불가능하였다. 타 대학 강의실을 대상으로 한 선행연구^[3]에서 평균 착석률이 70%으로 현장 측정에서 100% 착석률의 재현은 현실적이지 않다. 3월~4월 초에 측정을 실시하여 재실자는 두꺼운 외투를 입고

있었다. Table 1에 20개 강의실의 평균체적을 비롯하여 공석과 만석시의 500 Hz와 1000 Hz의 평균잔향시간, T_{30} , 을 나타내고 있다.

2.2 측정방법

Table 2. Mean 1000 Hz total sound absorption for occupied and unoccupied classrooms and the ratios of occupied-to-unoccupied total room sound absorption along with their volume and occupied 1000 Hz T_{30} values.

No.	Volume	Occupied 1000 Hz T_{30} values, s	Mean 1000 Hz total sound absorption, m^2		The ratio of occupied-to-unoccupied total room sound absorption
			Occupied	Unoccupied	
#1	199	0.90	35.5	23.1	1.53
#2	193	0.73	42.1	35.5	1.19
#3	284	0.76	59.9	40.5	1.48
#4	248	0.82	48.4	33.8	1.43
#5	354	0.79	72.0	31.2	2.30
#6	238	0.72	53.0	22.9	2.31
#7	1310	0.55	381.8	377.0	1.01
#8	1227	0.63	313.6	245.1	1.28
#9	690	0.27	415.0	388.7	1.07
#10	226	0.20	184.5	153.2	1.20
#11	2535	0.89	454.7	428.8	1.06
#12	888	0.55	258.3	242.9	1.06
#13	258	0.49	84.7	65.2	1.30
#14	216	0.51	68.3	34.4	1.98
#15	239	0.80	48.0	33.2	2.06
#16	253	0.54	75.4	31.6	2.39
#17	343	0.81	67.4	30.8	2.18
#18	235	0.78	48.3	25.0	1.94
#19	259	0.34	121.7	73.4	1.66
#20	188	0.37	81.6	54	1.51

Table 1. Mean dimensions of the 20 classrooms and the mean percentage of seats occupied during the measurements including mean (500 Hz-1000 Hz) T_{30} values for both occupied and unoccupied cases.

	Volume, m^3	Percentage of seats occupied, %	Number of occupants	Unoccupied 500 Hz - 1000 Hz T_{30} values, s	Occupied 500 Hz - 1000 Hz T_{30} values, s
Mean	519	58	47	1.04	0.65
s.d.	584	26	23	0.47	0.20
Max	2535	100	84	1.81	0.89
Min	188	20	11	0.31	0.26

강의실의 음향측정은 ISO 3382법^[4]을 토대로 실시하였다. 음원은 로그스weep(logarithmic sweep)을 이용하였으며 12면체 스피커(Norsonic, Nor276)로 음원을 방출하였다. 강단의 중심에 1.5 m 높이의 음원점 1개소와 각 강의실의 좌석에 1.2 m 높이로 균등히 분포한 수음점 4개~9개소에서 1/2인치 마이크로폰(G.R.A.S. Type 46 AF)을 통해 충격응답을 측정하였다. 각 강의실별 평균 음향지표 값 도출을 위해 각 수음점의 충격응답에서 산출한 측정값을 산술평균하였다.

2.3 공석 시에 대한 만석 시 실의 총 흡음력 비 계산

20개 강의실에서 측정한 공석 시와 만석 시의 평균잔향시간을 이용하여 강의실의 총 흡음력을 산정하였다. Table 2에 1000 Hz의 공석 시와 만석 시 실의 총 흡음력, 실의 체적, 그리고 1000 Hz의 만석 시 T_{30} 값을 제시하였다. 공석 시와 만석 시 강의실의 총 흡음력 값을 이용하여 공석 시에 대한 만석 시 실의 총 흡음력 비(the ratios of occupied-to-unoccupied total room sound absorption)도 Table 2에 함께 제시하였다. Table 2에서 강의실 #1~#12는 선행연구 측정결과^[2]를 이용하였으며, 강의실 #13~#20은 새로운 측정결과를 바탕으로 하였다.

III. 결과 및 토의

3.1 재실자 흡음에 의한 음향지표 변화 값 예측

음향지표는 강의실 음향평가에 중요한 초기감쇠 시간 (Early Decay Times, EDT), 언어명료도(clarity, C_{50}), 음의 크기 (sound strength, G), 그리고 초기 대 후기음 에너지 비 (useful-to-detrimental ratio, U_{50})를 위주로 분석하였다.^[2,5,6] 초기감쇠시간은 음에너지량이 10 dB 감쇠하는데 소요되는 시간을 의미한다.

명료도는 후기반사음에너지(later-arriving sound energy)에 대한 초기반사음에너지(early-arriving sound energy) 비로 나타내며, 음악명료도를 평가하는 지표 C_{80} 은 후기반사음에너지에 대한 80 ms 이내에 도달하는 초기반사음 에너지비로 정의된다. 언어명료도의 경우 50 ms 이내에 도달하는 에너지를 초기에너

지로 정의하며[Eq. (1) 참조], 언어명료도 평가에 더 적합한 지표로 보고되었다.^[5]

음의 크기는 50 ms 이내에 도달하는 초기 음압레벨(G_{50})과 50 ms 이후에 도달하는 후기 음압레벨(G_{late})로 구분할 수 있다[Eq. (2) 참조]. 선행연구^[2]에서 재실자 흡음에 의한 음의 크기 변화는 실의 후기 반사음을 주로 흡음하여 후기 음압레벨에 변화(2 dB ~ 4 dB 감소)에 유의하게 나타났다.

U_{50} 는 초기음(useful sound)에 대한 후기음(detrimental sound)의 대수비로 정의되며, C_{50} 값과 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)값에 의해 산출할 수 있다[Eq. (3) 참조].^[5] Useful sound는 초기에 도달하는 신호음 에너지를 말하며, detrimental sound는 후기에 도달하는 언어와 소음 에너지의 합을 말한다. 선행연구^[5,6]에서 U_{50} 는 STI(Speech Transmission Index)와 대등하게 정확한 언어 명료도 (speech intelligibility)의 평가지표라고 보고하였다.

$$C_{50} = 10 \log \left\{ \frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_{0.05}^{\infty} p^2(t) dt} \right\}, dB \quad (1)$$

여기서 $p(t)$ 는 실임펄스리스펀스(impulse response)의 음압이다.

$$G = 10 \log \left\{ \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \right\}, dB \quad (2)$$

여기서 $p_{10}(t)$ 는 무향실 10 m 지점에서의 음압이다.

$$U_{50} = 10 \log \left\{ \frac{E/L_{50}}{1 + (E/L_{50} + 1)N/S} \right\}, dB \quad (3)$$

여기서 N 은 소음 에너지, S 는 신호음 에너지, 그리고 E/L_{50} 는 초기음에너지에 대한 후기음에너지의 선형 비이다.

선행연구^[2]에서 500 Hz과 1000 Hz에서의 공석 시

Table 3. Summary of: the correlation coefficients (R^2), the statistical significance (p-value) of the correlation coefficients (* $p < 0.2$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$), the values of slopes (β), and intercepts (α) for incremental changes in rooms (N = 20).

	Incremental changes to acoustical parameter values			
	ΔEDT	ΔC_{50}	ΔG_{late}	ΔU_{50}
R^2	0.925	0.839	0.711	0.873
p	***	***	***	***
β	-0.772	4.594	-4.267	0.729
α	0.828	-4.557	3.177	-0.779

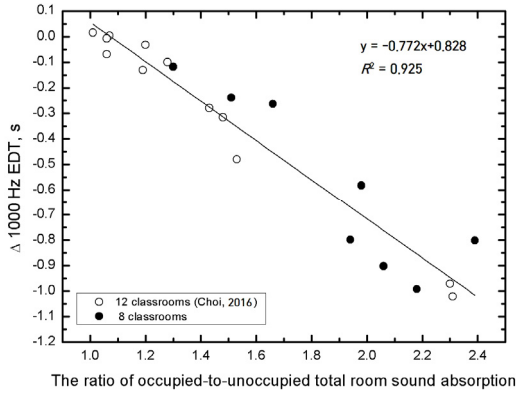


Fig. 1. Measured incremental changes to EDT values at 1000 Hz due to adding occupants to each classroom versus the ratio of occupied-to-unoccupied total room sound absorption at 1000 Hz.

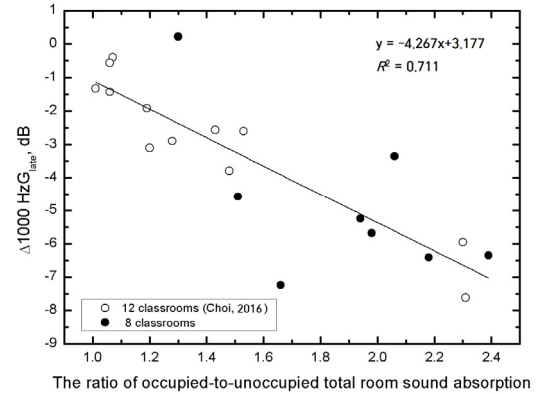


Fig. 3. Measured incremental changes to G_{late} values at 1000 Hz due to adding occupants to each classroom versus the ratio of occupied-to-unoccupied total room sound absorption at 1000 Hz.

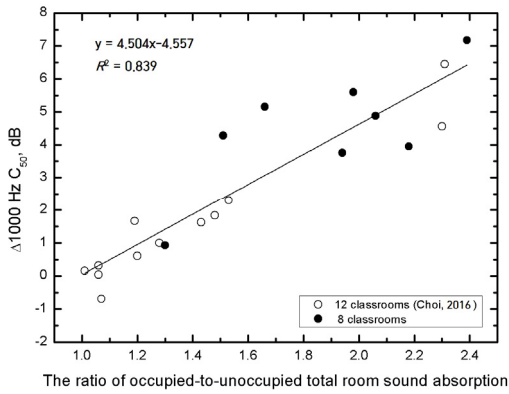


Fig. 2. Measured incremental changes to C_{50} values at 1000 Hz due to adding occupants to each classroom versus the ratio of occupied-to-unoccupied total room sound absorption at 1000 Hz.

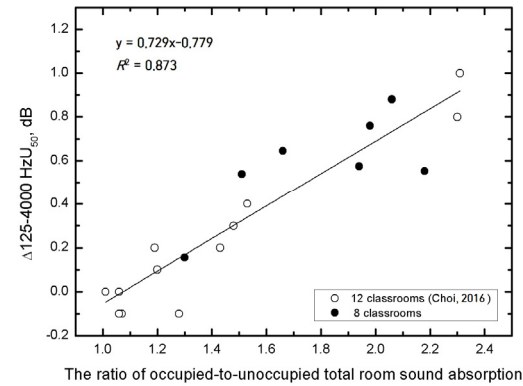


Fig. 4. Measured incremental changes to U_{50} values at 1000 Hz due to adding occupants to each classroom versus the ratio of occupied-to-unoccupied total room sound absorption at 1000 Hz.

실의 총 흡음력을 이용하여 만석 시 실의 총 흡음력의 예측이 가능한 식을 제안하였다. 500 Hz과 1000 Hz에서의 평균 흡음력을 이용한 이유는 강의실에서의 재실자 흡음에 의한 잔향시간(T_{30})의 변화가 두 주

파수 대역에서 가장 커 재실자의 흡음에 의한 실의 음향지표의 차이 값을 예측하는데 적합하기 때문이다.

본 장에서는 20개 강의실에서 공석 시와 만석 시의 재실자 흡음에 따른 4개 음향지표, EDT , C_{50} , G_{late} ,

그리고 U_{50} , 차이 값(incremental changes to acoustical parameter values, Δ)을 산정하여 공석 시에 대한 만석 시 실의 총 흡음력 비로 각 음향지표의 차이 값이 예측가능한지 분석하였다. 공석 시와 만석 시의 재실자 흡음에 따른 4개 음향지표 차이 값을 기준 주파수인 1000 Hz의 예측 결과를 예시로 보여주고자 한다.

Figs.1~4에 공석 시에 대한 만석 시 실의 총 흡음력 비에 대한 각 음향지표의 1000 Hz에서의 재실자 흡음에 의한 차이 값의 관계를 선형 회귀선과 함께 보여주고 있다. Table 3에 공석 시에 대한 만석 시 실의 총 흡음력 비에 대한 각 음향지표의 변화 값의 관계를 선형 회귀 분석하여 그 결과를 제시하였다.

Table 3의 선형 회귀 분석 결과에 의하면 공석 시와 만석 시 실의 총 흡음력 비에 대한 각 음향지표의 변화 값은 유의한 선형관계($p < 0.01$)에 있음을 알 수 있다. 이들 4개 음향지표 중에 재실자 흡음에 의한 EDT 값의 변화가 가장 높은 상관계수($R^2 = 0.925$)를 나타내었고 U_{50} , C_{50} , G_{late} 순으로 나타났다. Table 3의 선형 회귀식을 이용하여 만석 시 재실자 흡음에 의한 각 음향지표 변화 값의 예측이 가능하다.

3.2 만석 시 강의실의 음향지표 예측

본 장에서는 3.1 장 Table 3의 선형 회귀식을 이용하여 만석 시 강의실의 음향지표 값을 예측하는 방법에 대해 기술하였다. 먼저, 공석 시 강의실의 총 흡음력은 Sabine식을 이용하여 측정한 T_{30} 값으로 계산할 수 있다. 공석 시 강의실의 총 흡음력을 이용하여 체적과 착석률이 유사한 강의실의 만석 시 실의 총 흡음력을 아래 Eq. (4)를 이용하여 산정할 수 있다.

Eq. (4)는 20개 강의실의 500 Hz과 1000 Hz에서의 공석 시 실의 총 흡음력에 대한 만석 시 실의 총 흡음력의 관계를 선형 회귀식($R^2 = 0.987$, $\sigma = 0.028$)으로 도출한 것이다.

$$A_{occ} = 1.04 \cdot A_{unocc} + 23.5, m^2 \quad (4)$$

여기서 A_{occ} 는 만석 시 실의 총 흡음력(m^2), A_{unocc} 는 공석 시 실의 총 흡음력(m^2)이다.

공석 시와 만석 시의 실의 총 흡음력 비를 알면

Table 3의 선형 회귀식을 이용하여 만석 시 재실자 흡음에 의한 각 음향지표 변화 값의 예측이 가능하다. 이때 공석 시 각 음향지표의 값으로부터 만석 시 강의실의 음향지표 값을 예측할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 대학 강의실에서 공석 시 음향지표를 이용하여 만석 시 강의실의 음향지표를 예측하는 방법을 제시하였다. 공석 시 측정된 강의실의 T_{30} 값으로 공석 시 실의 총 흡음력을 계산할 수 있다. 본 연구에서 제시한 20개 강의실의 공석 시 총 흡음력에 대한 만석 시 총 흡음력의 선형 회귀식 Eq. (4)를 이용하여 만석 시 실의 총 흡음력을 예측할 수 있다. 공석 시에 대한 만석 시의 총 흡음력 비를 이용하여 본 연구에서 대상으로 한 와 비슷한 조건 (평균 체적: 519, 평균 착석률: 58%, Table 1 참조)의 강의실의 만석 시 음향지표 (EDT , C_{50} , G_{late} , U_{50}) 변화폭을 예측할 수 있다. 이 예측방법을 이용하여 강의실에서 공석 시 실의 음향지표를 측정하여 재실자의 착석 없이 동일한 강의실에서 재실자의 착석률에 따른 음향지표의 예측이 가능하다. 그 결과 재실자 착석에 의한 강의실의 음향 상태를 미리 예측 가능하여 높은 언어 명료도에 성취에 기여할 수 있다.

감사의 글

실제 강의현장에서의 음향측정을 허락해준 강원대학교 공과대학 교수진과 측정에 도움을 준 건축공학과 학생들에게 이에 감사를 표한다. 이 논문은 2015년과 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2015R1D1A1A01056575, 2018R1A2B6001279)으로 수행한 기초 연구임.

References

1. M. Hodgson, "Experimental investigation of the acoustical characteristics of university classrooms," J. Acoust. Soc. Am. **106**, 1810-1819 (1999).
2. Y. J. Choi, "Effect of occupancy on acoustical conditions in university classrooms," Appl. Acoust. **114**, 36-43 (2016).

3. M. Hodgson and E. M. Nosal, "Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms," J. Acoust. Soc. Am. **111**, 931-939 (2002).
4. ISO 354-Acoustics, Measurement of sound absorption in a reverberation room (2003).
5. J. S. Bradley, R. Reich, and S. G. Norcross, "On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility," J. Acoust. Soc. Am. **106**, 1820-1828 (1999).
6. Y. J. Choi, "Comparison of two types of combined measured, STI, and U50, for predicting speech intelligibility in classrooms ," Archives of Acoustics **42**, 527-532 (2017).

저자 약력

▶ 최 영 지 (Young-Ji Choi)



1996년 2월: 계명대 건축공학과 학사
 2000년 3월: 큐슈대 건축공학과 석사
 2004년 9월: 시드니대 건축공학과 박사
 2014년 3월 ~ 현재: 강원대학교 공과대학
 도시건축학부 건축공학 전공 조교수