

학교 교실의 음환경 기준에 따른 실내마감 방안

Interior surface treatment guidelines for classrooms according to the acoustical performance criteria

류다정, 박찬재, 한찬훈[†]

(Da-Jung Ryu, Chan-Jae Park, and Chan-Hoon Haan[†])

충북대학교 건축공학과

(Received September 3, 2015; revised October 21, 2015; accepted December 23, 2015)

초 록: 교실 음환경은 학생들에게 매우 중요한 요소로 학습효과와 학업 성취에 매우 큰 영향을 미친다는 연구결과가 다수 발표되고 있다. 그러나 학교 교실의 신축이나 리모델링 시에 가이드라인 및 설계방안이 제시된 바 없어 적절한 음환경을 실현하는데 큰 어려움을 겪고 있다. 따라서 본 연구에서는 이론적 수식과 현장실험을 통하여 교실의 음환경 기준을 만족하기 위한 다양한 설계방안을 제시하고자 한다. 이를 위해 국내 중·고등학교의 교실에서 실내음향성능 기준을 만족하기 위해 필요한 최소 흡음면적을 계산하였다. 또한 교실의 천장 및 뒷벽의 다양한 마감상태에 따른 실내 음향성능을 알아보려고 현장실험을 진행하여 실험 결과를 비교 분석하였다. 연구 결과, 국내 교실 천장에 현재 거의 모든 학교에서 시행하고 있는 것처럼 천정흡음재를 설치하지 않아도 잔향시간 기준인 0.8 s를 만족할 수 있는 것으로 나타났다. 특히, 천장 일부 면적에 반사재를 적용하되 면적의 비율이 흡음 2 : 반사 1 이면서 가로로 구획하는 것이 음압 레벨을 향상시키며 전체가 흡음인 경우와 비슷한 명료도(C_{50} , D_{50} , RASTI(Rapid Speech Transmission Index))를 확보할 수 있다.

핵심용어: 학교 교실, 실내음향성능 기준, 흡음재 설치면적, 잔향시간, 음압레벨, 언어명료도, 음성전달지수

ABSTRACT: There are many results in which acoustical conditions of a classroom play an important role for studying effects and academic achievement of students. However, there are very few guidelines or design proposals which could make appropriate acoustic environment when classrooms are built or renovated. The present study suggests various design proposals satisfying acoustic standards of classrooms based on theoretical calculation and acoustic field experiments. At first, minimum area of sound absorption was calculated which is required to satisfy the acoustic standard for domestic middle and high schools. Also, room acoustic measurements were carried out in order to investigate the acoustic performance of an existing classroom by changing interior finishing materials on ceiling and rear walls. As a result, it was revealed that reverberation time standard below 0.8 s can be acquired even if there is no sound absorption on ceiling which is a general practice executed in Korea. Specially, it was found that if partial area of ceiling would be treated as reflective with the ratio of sound absorption and reflection as 2:1, almost similar acoustic parameters of C_{50} , D_{50} , RASTI (Rapid Speech Transmission Index) and higher sound levels could be acquired in comparison with the case of entire sound absorption on ceiling.

Keywords: Classroom, Interior acoustic criteria, Sound absorptive area, Reverberation time, Sound pressure level, Speech intelligibility, Rapid speech transmission index

PACS numbers: 43.55.Dt, 43.55.Gx

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

학교시설에서의 핵심은 단위교실에 있으며 교실

[†]Corresponding author: Chan-Hoon Haan (chhaan@chungbuk.ac.kr)
Department of Architectural Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Republic of Korea
(Tel: 82-43-261-2438, Fax: 82-43-260-2438)

공간의 특성상 바람직한 청취환경은 매우 중요하다. 교실에서 학생은 교사의 음성전달에 의해 지식을 전달 받으며 멀티기기에 의한 시청각 교육이 활발히 이루어지고 있어 적절한 청취환경은 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 특히 적절한 청취환경은 학습효과와 학업 성취에 큰 역할을 한다는 국내외 연구결과에 따라 학생들에게 질 높은 환경을 동등하게 제공하는 것은 매우 중요하다.

이에 국외에서는 학교 교실에 관한 연구가 오랜 기간 동안 끊임없이 이루어지고 있으며 미국과 영국의 경우 학교 교실의 규모나 용도에 따라 최소 기준치를 제시하고 이를 신축이나 리모델링 시에 적용하도록 규제하고 있다.^[1,2] 또한 각각의 음향성능 기준을 만족시키기 위한 건축계획방법 및 실내마감재 적용에 대한 가이드라인을 제시하고 있으며 많은 사례 연구를 통하여 실제 교실에 적용하도록 관리하고 있다.

우리나라의 경우에도 교실에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다. 그 중에서도 국내 초등학교 및 중학교, 고등학교의 총 15개 교실을 선정하여 실내음향성능을 측정하였는데 그 결과 일부 학교에서 미국 교실의 공석시 기준(배경소음: 35 dB(A), 잔향시간: 0.6s)^[1]을 크게 초과하고 있음을 밝혀내었다.^[3] 또한 교실의 적정 음향인자를 설정하는 연구가 진행되면서 적정잔향시간, 압소음 및 신호대잡음비를 제안하고 있으며^[4] 한 연구에서는 국내 중·고등학교 교실에 대한 실내음향성능 기준을 잔향시간을 0.8s 이하로 설정해야 한다는 연구결과가 발표된 바 있다.^[5]

이러한 연구결과를 통해 국내 학교 교실의 실태와 실내음향성능 기준에 대해 확인할 수 있었으나 적절한 음환경을 실현하기 위한 설계 방안이 부족함을 알 수 있다. 따라서 일반 교실 설계 시 실내음향성능 기준을 만족시키는 다양한 설계 가이드라인이 반드시 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 이론적 수식을 이용하여 교실의 실내음향성능을 만족할 수 있는 최소 권장흡음면적과 비율에 대해 파악한 후 천장 및 뒷벽 마감재의 면적과 위치에 따른 모델을 설정하였다. 이를 시뮬레이션을 통한 사전연구를 진행하여 실내음향성능을 분석하였으며 이 중 유의한 결과를 보이는 모델을 선정하고 현장 음향실험을 통하여 적정성을 평가하였다.

1.2 교실 내 마감재 위치에 대한 연구 동향

일반적으로는 교실에서 후기 잔향음을 제어하고 높은 명료도를 얻기 위한 방법으로 교실의 천장을 비롯한 측벽 및 뒷벽에 흡음재를 설치하는 것이 일반적으로 사용되고 있다.^[6] 그러나 외국의 연구에 따르면 동일한 흡음면적에서 한 면 전체를 흡음재로 마감하는 것보다 균등하게 설치하는 것이 짧은 잔향 시간 도출에 유리하다는 연구결과를^[7] 발표한바 있으며 흡음재는 배경소음을 줄일 수 있지만 과도한 흡음면적은 오히려 언어 명료도(speech intelligibility)를 감소시킬 수 있음을 밝혀내었다.^[8]

이에 따라 국내에서도 교실 내의 마감재에 대한 관심의 증가에 따라 실내 마감재의 흡음계획에 대한 연구 결과가 다수 발표되고 있다. 교실에서 흡음재를 설치할 수 있는 부위는 측벽, 바닥, 전면벽, 뒷벽, 천장이 있다. 이 중 바닥과 전면벽은 흡음면적을 충분히 확보하기 어렵다. 또한 측벽에 흡음재를 설치한다면 양이간음량차가 발생되며 이 값이 커질수록 학생의 음명료도가 저해될 수 있다는 연구결과가 밝혀진 바 있다.^[9]

반면 수평면에서 도달하는 반사음보다 수직면에서 도달하는 초기반사음 성분이 명료도에 큰 영향을 미치기 때문에 직접음을 보강하기 위해서는 천장에 적절한 반사 부위가 필요하다는 연구결과로서 천장 마감재의 중요성을 강조하고 있다.^[10] 한 연구에서는 천장의 25% 면적에 확산체를 설치한다면 초기반사음에너지를 증가시킬 수 있음을 알아낸 바 있으며^[11] 또 다른 연구에서는 초기반사음이 직접음을 충분히 보강할 수 있도록 최소한 천장의 전면 및 중앙부위까지 반사재로 마감해야 한다^[12]는 결과가 발표된 바 있다. 또한 교실의 뒷벽은 강의실의 명료도(D₅₀, STI)를 향상시키기 위한 가장 효율적이라는 부위라는 연구결과를 발표하였다.^[13]

이와 같이 대부분의 연구가 측벽과 뒷벽에 한정되어 이루어지고 있으며 교실 내에서 가장 많은 면적인 천장의 다양한 설계방안과 이를 실제 교실에 적용한 사례는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실내음향성능 기준을 만족하기 위한 교실 내 흡음면적에 대해 알아보고, 교실 천장과 뒷벽의 흡음재 설치 면적에 따른 실내음향성능 차이를 비교 및

평가하고자 한다.

II. 연구의 방법

2.1 실험대상의 선정

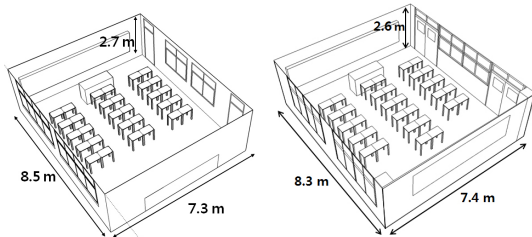
학교 교실의 음환경 기준에 따른 실내마감 방안 설정을 위해 국내 교실의 건축적 특성을 대표하는 공간으로 선정하는 것이 중요하다. 따라서 청주시 소재 중학교 17개와 고등학교 7개 학교의 일반교실의 건축제원을 조사하고 각 부위의 평균값을 이용해 작성한 표준교실을 사용하였다.^[5] 특히 표준교실을 사용하여 음환경 기준을 만족하기 위한 흡음면적을 계산하였으며 현장실험을 위한 실험대상은 표준교실과 유사한 규모를 가진 교실로 선정하였다. 다음 Table 1에는 표준교실과 실험대상교실의 건축적 제원을 나타내고 있으며 Fig. 1에서는 3차원 형상을 보여주고 있다.

2.2 교실의 최소흡음면적 산출 근거

국내 교실의 음환경 기준을 만족하기 위해 필요한 흡음면적을 산출하기 위하여 이론적 수식을 사용하

Table 1. Architectural dimension of classroom investigated.

Classification	Standard classroom	Measured classroom
Length (L)	8.5 m	8.3 m
Width (W)	7.3 m	7.4 m
Height (H)	2.7 m	2.6 m
Volume (V)	167.5 m ³	159.7 m ³
Floor Space (F)	62.1 m ²	61.4 m ²
Number of seat (N)	32 seats	32 seats



(a) standard classroom (b) measured classroom

Fig. 1. 3-D shapes of standard classroom and a classroom measured.

고자 한다. 따라서 가장 보편적으로 사용하는 Sabin의 잔향공식을 기본으로 다양한 흡음률과 교실의 높이에 따른 흡음면적을 계산하였으며 계산공식은 다음 Eq.(1)과 같다.

$$T = K \cdot \frac{V}{A} \quad (1)$$

Eq.(1)에서 T는 잔향시간(s)을 의미하며 K는 비례상수로 0.161을 사용하였으며 V는 실의 체적(m³), A는 흡음력을 나타내는 값이다. 특히 흡음력(A)은 실내에 사용된 흡음재 각각의 면적(S_i)과 흡음률(α_i)을 사용하여 산출하며 그 식은 다음 Eq.(2)와 같다.

$$A = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_i \cdot S_i + A_R \quad (2)$$

Eq.(2)에서 A_R은 흡음자재로 마감되지 않은 벽, 천장, 바닥과 책상, 의자, 선반 등과 같은 가구에 의한 흡음력을 나타내며 일반적으로 바닥면적(S_f)의 약 15%가 이에 해당한다.^[1]

표준교실[바닥면적(S_f) = 62.05m²]에서 실내마감재의 흡음률과 높이의 변화에 따라 실내음향성능 기준인 잔향시간 0.8s를 만족하기 위해 필요한 최소흡음면적 계산을 위한 식은 Eq.(3)과 같다.

$$S_1 = [(K \cdot H \cdot S_f / T_{60}) - (S_f \cdot 0.15)] / \alpha_1 \quad (3)$$

Eq.(3)에서 S₁은 흡음면적(m²)을 의미하며 H는 교실의 높이, T₆₀은 잔향시간, S_f는 바닥면적(m²)이며, α₁는 흡음률을 나타낸다. 특히 흡음재 설치 면적은 바닥, 천장, 전면벽, 뒷벽, 측벽이 해당하며 책상, 조명, 사물함 등과 같은 흡음재를 설치할 수 없는 면적은 제외하였다. 즉, 위의 Eq.(2)에서 A_R을 포함하지 않으며 Eq.(3)은 A_R/S_f값인 0.15를 제거한 식이다.

최근의 교실 건축의 특징으로 학습목적에 따라 건축제원이 다양해지고 있는 추세이므로 바닥면적과 높이 등이 표준교실과 다르다. 따라서 Eq.(3)을 응용하여 흡음재 최소설치면적을 바닥 면적에 대한 비율로써 계산하고자 한다. 이를 위해 사용한 식은 다음 Eq.(4)와 같다.

$$100 \cdot (S_i/S_f) = 100 \cdot [(K \cdot H/T_{60}) - 0.15/\alpha_1] \cdot (4)$$

2.3 흡음재 적용위치에 대한 선행연구

교실 내 실내 마감재 위치에 따른 선행 연구에 따라 본 연구에서는 실내 마감재의 위치를 천장과 뒷벽으로 설정하고 시뮬레이션을 통한 선행연구를 진행하였다. 다음 Table 2에서는 교실의 천장과 뒷벽의 흡음재 위치에 따른 모델을 보여주고 있다. 그림에서는 흡음재를 설치한 위치를 표기하였으며 시뮬레이션을 수행한 모델과 실내음향실험을 수행한 모델을 구분하여 나타내었다. 또한 Table 3 시뮬레이션에 적용한 실내마감재료의 주파수대역별 흡음률을 보여주고 있다.

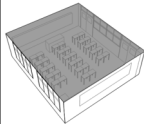
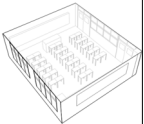
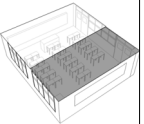
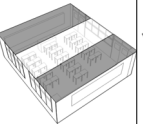
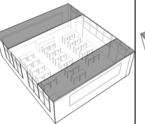
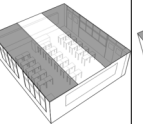
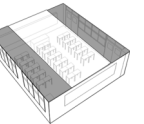
본 연구에서 시뮬레이션과 현장실험에서 사용된 천장의 흡음재와 반사재는 미네랄 흡음텍스와 석고보드이다. 이는 현재 교실에서 흡음면적을 확보하기

위하여 천장에 가장 많이 쓰이는 재료가 흡음텍스로 실제 교실에 이미 설치되어 있어 실험에 용이하기 때문이다. 반사재는 석고보드로 현재 보편적으로 사용되는 재료이며 경제성과 현장에서 시공성의 편리를 고려하여 선정하였다. 또한 뒷벽에 설치한 흡음재는 중·고주파수 대역에서 흡음성능이 우수한 다공질성 흡음재를 사용하였다.

이를 바탕으로 시뮬레이션을 통하여 선행연구를 진행한 결과 C-A, CH-2, CV-1, RW-1이 실내음향성능 기준인 잔향시간 0.8 s를 만족하는 것으로 나타났으며 음압레벨 또한 상승하는 것으로 나타났다. 특히 CH-2, CV-1의 언어명료도 및 음성전달지수 결과 현재 교실과 큰 차이를 보이지 않고 있음을 알 수 있었다.^[6]

선행연구 결과를 토대로 실내음향실험 대상을 현재 교실의 상태(C-A)와 비교를 위해 전체 면적이 반사면적인 C-R을 선정하였으며 다른 물리적 인자들

Table 2. Simulation types.

(a) Cases for installment of sound absorptive or reflective materials on ceiling							
Classification	C-A	C-R	CH-1	CH-2	CH-3	CV-1	CV-2
3-D Shape							
area	absorption	60.68 m ²	0 m ²	30.34 m ²	40.45 m ²	30.34 m ²	40.45 m ²
	reflection	0	60.68 m ²	30.34 m ²	20.23 m ²	30.34 m ²	20.23 m ²
ratio (absorb.: reflect.)	100 % absorption	100 % reflection	1 : 1	2 : 1	1 : 1	2 : 1	1 : 1
Simulation undertaken	○	○	○	○	○	○	○
Experiment undertaken	○	○	x	○	x	○	x

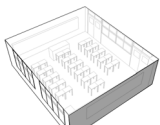
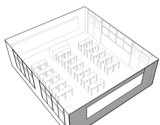
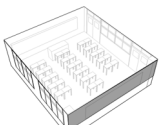
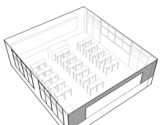
(b) Cases for installment of sound absorptive materials on rear wall				
Classification	RW-1	RW-2	RW-3	RW-4
3-D Shape				
absorption area	19.24 m ²	14.07 m ²	10.36 m ²	5.19 m ²
Simulation undertaken	○	○	○	○
Experiment undertaken	x	x	○	x

Table 3. Sound absorption coefficient of finishing materials used in simulations.^[6,14,15]

Part		Material	Sound absorption coefficient					
			Frequency (Hz)					
			125	250	500	1 k	2 k	4 k
Wall	Front	Glazed concrete and Black board	0.24	0.20	0.20	0.18	0.18	0.21
	Right	Window and Wooden Door	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
	Left	Window	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	Rear	Glazed concrete	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Polyester 50 mm		0.33	0.61	0.88	0.88	0.90	0.82	
Ceiling	Reflection	Gypsum board	0.12	0.09	0.07	0.05	0.05	0.04
	Absorption	Mineral fiber board	0.01	0.12	0.47	0.70	0.71	0.64
Floor		Concrete	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Locker		Wooden Panel	0.12	0.11	0.10	0.07	0.05	0.06
Desk		Wooden desk & chair	0.12	0.11	0.10	0.07	0.05	0.06

과 큰 편차를 나타내고 있지 않은 CH-2와 CV-1을 대상으로 하였다. 또한 뒷벽에 흡음재를 설치할 경우 큰 편차를 나타내고 있지 않은 RW-2와 RW-3 중 유지 및 관리성을 고려하여 RW-3으로 설정하여 실험을 진행하였다.

2.4 실내음향실험

실내음향실험은 학교의 방학기간인 2014년 8월 13일 오전9시부터 오후6시 사이에 수행하였으며 학생들이 없는 공석 시에 진행하였고 모든 실험은 KS F 2864를 준수하였다. 음원의 경우 교사의 발성방향을 재현하기 위하여 지향성 스피커(수평 90°, 수직 60°)를 사용하였다. 또한 대상 교실의 배경소음레벨은 약 36.7 dB(A)으로 측정되어 현장상황을 고려하고 교사의 음성을 재현하기 위하여 음원의 출력레벨을 75 dB(A)로 선정하였다. 음원의 위치는 교사가 수업을 진행하는 위치인 강단 중앙에 설치하였으며 일반적인 성인의 입 높이인 바닥으로부터 1.5 m에 설치하였다.

수음점은 교실 내 32개 좌석을 균등한 간격으로 9개소로 나누어 배치하였으며 중학생의 착석 시 귀 위치를 고려하여 1.15 m 높이에 설정하였다. 측정 시 수음점의 설치위치는 Fig. 2에 나타나있으며 Fig. 3에 나타난 장비를 사용하였다. 또한 천장과 뒷벽의 흡음재 위치에 따른 설치 모습은 Fig. 4에 나타난 것과

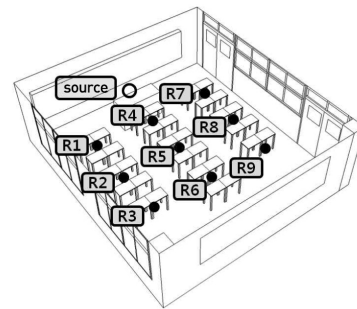


Fig. 2. A sound source and receiving positions.

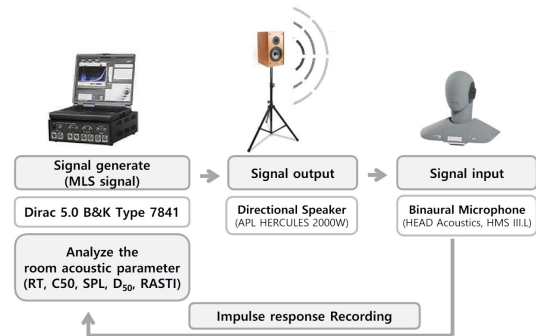


Fig. 3. Set-up of background noise devices.

같다.

교실에서 실내마감재 위치에 따른 실내음향성능은 잔향시간(Reverberation Time, RT), 초기감쇠시간(Early Decay Time, EDT), 음압레벨(Sound Pressure Level, SPL), C₅₀, 언어명료도(C₅₀, D₅₀), RASTI(Rapid Speech

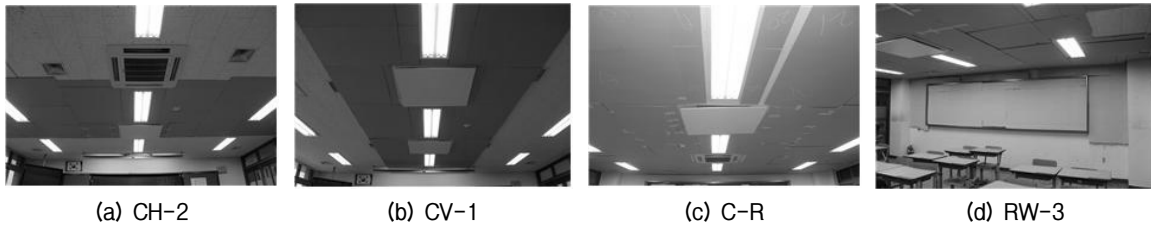


Fig. 4. Pictures of the classroom with sound absorptive materials installed in different locations.

Table 4. The acoustic performance standards of the Korea classroom (unoccupied state).

Classroom	Acoustic performance	
	Background noise level	RT
Learning space (Volume ≤ 220 m ³)	35 dB (A)	0.8 s*

* Average of reverberation time at midband frequency (500 Hz, 1 kHz)

Transmission Index)를 통해 분석하였으며 이를 국내 교실의 기준을 참고하여 평가하였다. 본 논문에서 사용된 기준은 다음의 Table 4에 나타나 있다.

III. 교실의 최소흡음면적 산출결과

표준교실의 바닥면적을 가진 국내 교실에서 실내 음향성능을 만족하기 위해 필요한 흡음재의 최소면적 산출 결과는 다음 Table 5(a)와 같다. 또한 다양한

건축제원을 사용하는 교실을 위해 Eq.(4)를 이용하여 바닥면적에 대한 비율로 나타낸 결과는 Table 5(b)로 함께 나타내었다.

표준교실을 신축 혹은 리모델링을 위해 흡음재를 설치해야 할 면적을 산출할 시 Table 5(a)를 사용하여 면적을 산출할 수 있다. 대상 교실의 높이가 2.7 m이고, 500 Hz와 1 kHz의 평균 흡음률이 0.60인 흡음재를 사용한다면 약 41 m²의 면적이 필요하며 교실의 각 부위(바닥, 천장, 측벽, 뒷벽, 전면벽)에 해당 면적을 확보한다면 교실의 실내음향성능 기준을 만족할 수 있다. 또한 표준교실의 바닥 면적이 아닌 교실은 Table 5(b)를 사용할 수 있다. 교실의 높이가 2.9 m이고 흡음재의 흡음률이 0.40 (500 Hz와 1 kHz의 평균 흡음률이 0.40)인 흡음재를 사용한다면 바닥면적의 108%가 흡음되어야 하며 바닥면적과 같은 천장을 모두 흡음하고 8%에 해당하는 면적을 교실의 각 부위에 적용해야 함을 알 수 있다.

Table 5. Minimum area of sound absorption depending on the average sound absorption coefficient and height of rooms

(a) recommended sound absorption area of standard classroom (RT = 0.8 s, floor area: 62.05 m ²)							(b) recommended sound absorption area of other classrooms except standard classroom (RT = 0.8 s)						
Average A*	Room height H (m)						Average A*	Room height H (m)					
	2.5	2.7	2.9	3.1	3.3	3.5		2.5	2.7	2.9	3.1	3.3	3.5
	sound absorption area (m ²)**							ratio of sound absorption area per floor area (%)**					
0.40	55	61	67	74	80	86	0.40	88	98	108	118	129	139
0.45	49	54	60	65	71	76	0.45	78	87	96	105	114	123
0.50	44	49	54	59	64	69	0.50	71	79	87	95	103	111
0.55	40	44	49	53	58	63	0.55	64	72	79	86	93	101
0.60	37	41	45	49	53	57	0.60	59	66	72	79	86	92
0.65	34	38	41	45	49	53	0.65	54	61	67	73	79	85
0.70	31	35	38	42	46	49	0.70	50	56	62	68	73	79
0.75	29	33	36	39	43	46	0.75	47	52	58	63	69	74
0.80	27	31	34	37	40	43	0.80	44	49	54	59	64	69

* average sound absorption coefficient of materials used (average of 500 Hz, 1 kHz)

** Desks, lightings, locker, platform and screen are not included.

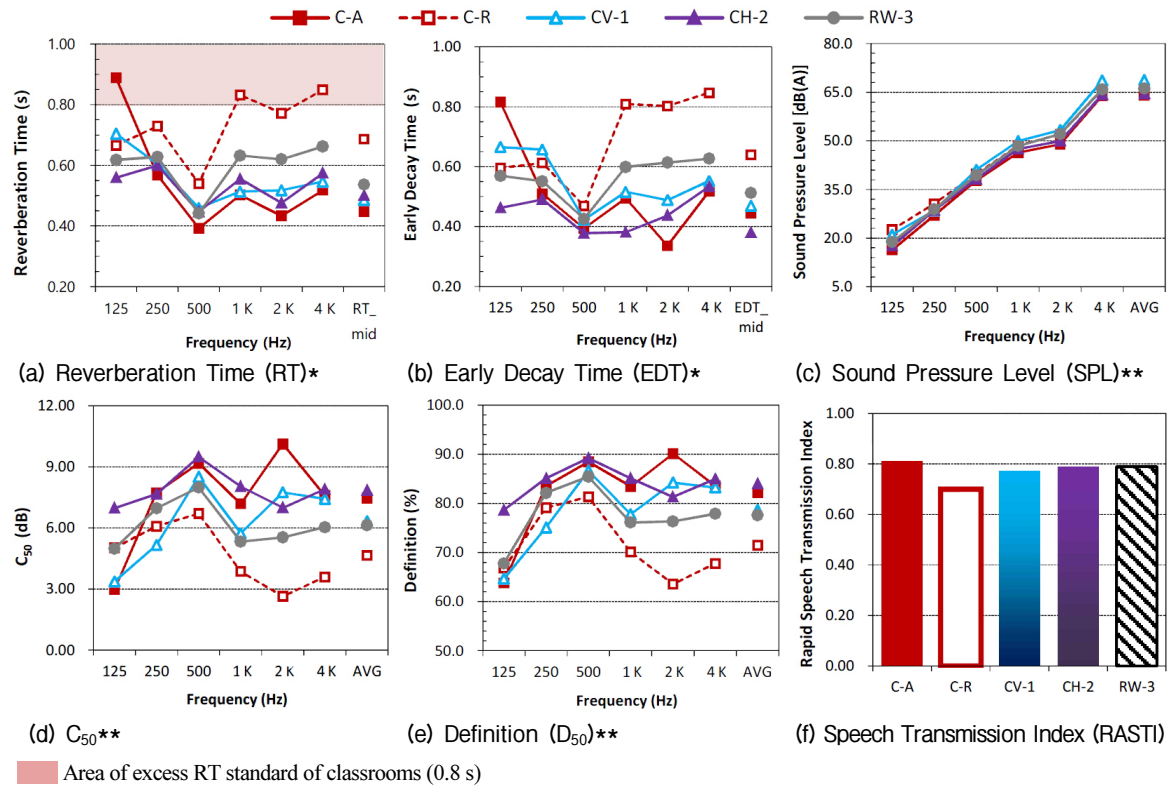


Fig. 5. Measured acoustic parameters depending on the location of sound absorptive materials.

특히 표준 교실은 높이가 2.7m이며 흡음재로 가장 많이 사용되고 있는 마이텍스 (500 Hz, 1 kHz의 평균 흡음률: 약 0.60)를 적용한다면 천장의 66%만 흡음하여도 잔향시간 0.8s를 만족할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 흡음재 설치위치에 따른 실내음향 실험 결과

흡음재 설치 위치에 따른 실내음향실험 결과를 다음 Fig. 5에 잔향시간, 초기감쇠시간, 음압레벨, C₅₀, D₅₀, STI 순으로 나타내었으며 각 음향인자 별 단일 값을 Table 6에 나타내었다.

4.1 RT (잔향시간)

다음의 Fig. 5(a)에 실험대상 교실의 6개의 수음점에서 측정한 잔향시간 평균을 도식화하여 나타낸 것이다. 한편 국내 교실의 잔향시간 기준은 0.8 s이며

Table 6. Single criterion of room acoustical performance depending on the location of sound absorption.

	RT* (s)	EDT* (s)	SPL** [dB(A)]	C ₅₀ ** (dB)	D ₅₀ ** (%)	RASTI
C-A	0.45	0.44	64.1	7.47	82.1	0.76
C-R	0.69	0.64	66.0	4.66	71.4	0.65
CH-2	0.50	0.38	64.5	7.85	84.1	0.74
CV-1	0.49	0.47	68.8	6.33	78.6	0.73
RW-3	0.54	0.51	66.1	6.14	71.4	0.72

* RT, EDT: Average of RT and EDT at midband frequency (500 Hz, 1 kHz)

** AVG: Average of sound pressure level, D₅₀, C₅₀ (125 Hz ~ 4 kHz)

이를 초과하는 범위를 Fig. 5(a)에 표시하여 모델별 잔향시간 기준의 초과여부를 보다 쉽게 알 수 있도록 하였다.

분석결과 현재 사용되고 있는 교실인 C-A에서의 잔향시간 평균은 0.45 s로 나타났으며 천장 전체가 반사인 C-R에서는 0.69s로 나타나 모두 잔향시간 기

준인 0.8s를 만족하는 것으로 나타났다. 가로와 세로로 반사재를 설치한 CH-2와 CV-1에서도 각각 0.50 s와 0.49 s로 측정되어 기준을 만족하고 있으며 편차가 나지 않고 있음을 알 수 있다. 뒷벽의 1.2m 높이 상부에 게시판을 포함하여 흡음재를 설치한 경우인 RW-3에서의 잔향시간 평균은 0.54 s로 천장이 전체 반사일 때보다 0.15 s 감소하는 것으로 나타났고 현재의 교실보다는 약 0.09 s 늘어난 것으로 측정되었다. 주파수대역별로 분석하여 보면 저주파대역에서 반사재를 설치한 모델들의 잔향시간이 표준 교실보다 짧아졌는데 이는 반사재로 쓰인 석고보드는 판재로 저주파대역에서의 흡음률이 미네랄 흡음텍스보다 높기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.

4.2 EDT (초기감쇠시간)

EDT는 음에너지가 감쇠되는 과정에서 초기부분과 연관된 시간을 말하며 0에서 -10 dB까지 음에너지 감쇠되는 데 걸리는 시간에 6배를 곱한 값으로 정의된다. 잔향시간과 유사하지만 EDT는 초기반사음으로 구성되어 있으며 짧은 EDT는 명료도를 제공할 수 있다고 알려져 있다.

다음의 Fig. 5(b)는 교실의 실내마감재 설치위치에 따른 초기감쇠시간 측정결과 값을 나타내고 있다.

측정결과 C-A의 초기감쇠시간은 0.44 s로 측정되었으며 천장의 전체 면적이 반사인 경우에는 0.64 s로 약 0.2 s의 편차가 발생하고 있다. 천장 마감재 위치에 따른 CH-2와 CV-1에서는 각각 0.38 s와 0.47 s로 C-A의 초기감쇠시간보다 약 0.06 s 감소하거나 비슷한 결과를 보이고 있다. 특히 CH-2에서 가장 짧은 초기감쇠시간으로 측정되었는데 현재의 교실과 비교하였을 때 그 편차가 최소변화감지폭(JND)인 5%를 초과하는 값으로 나타났다. 또한 RW-3에서의 초기감쇠시간은 0.51 s로 C-A보다 0.07 s 증가하였으나 C-R과 비교하였을 때 약 0.13 s 감소하는 것으로 나타났다.

4.3 SPL (음압레벨)

다음의 Fig. 5(c)는 실험대상의 교실의 6개 수음점에서 측정된 음압레벨 결과를 나타낸 것이다.

천장 전체가 흡음인 C-A의 음압레벨은 64.8 dB(A)로 측정되었으며 반사재를 전체에 설치한 C-R에서

는 66.3 dB(A)로 나타났다. 세로로 반사재를 설치한 CV-1에서의 음압레벨은 69.0 dB(A)로 C-A보다 4.2 dB(A) 증가한 것으로 나타났으며 CH-2에서는 0.4 dB(A)의 편차로 증가하여 큰 차이가 나지 않고 있음을 알 수 있다.

천장이 모두 반사인 표준모델에서 뒷벽에 흡음재를 부착하였을 때(RW-3)의 음압레벨은 66.5 dB(A)로 C-A보다는 1.7 dB(A) 증가하였으며 C-R과 비교하였을 때 근사한 값을 나타내고 있다. 음압레벨의 증가는 중고주파대역에서 이루어지고 있으며 이는 해당 주파수대역에서 높은 흡음률을 가진 흡음재가 제거되면서 나타난 현상으로 보인다.

4.4 C₅₀ (언어명료도)

C₅₀은 명료도를 정량화하기 위한 음향지표 중 하나로써 초기, 후기음에너지 차로 나타낸다. C₅₀은 50 ms 이후에 인입되는 후기 반사음은 음성의 전달성을 방해하는 요소이며 50 ms 이전에 인입되는 직접음과 초기 반사음은 음성의 인식에 유용한 음에너지로 평가한다. 특히 음압레벨 측정 결과 실내마감재 위치를 변화시킨 모델들이 표준모델보다 음압레벨이 증가한다는 결과를 얻을 수 있었다. 향상된 음압레벨이 초기음에너지에 의한 영향인지 파악하기 위하여 C₅₀을 분석하였다. 다음 Fig.5(d)에서는 C₅₀의 측정 결과를 나타내고 있다.

실험대상의 6개 수음점에서 측정된 C₅₀결과 표준모델인 C-A의 C₅₀ 값은 7.47 dB로 측정되었으며 C-R에서는 약 4.66 dB로 나타나 C-R에서의 음압레벨의 증가는 후기음에너지의 증가로 인한 것임을 알 수 있다.

설치 위치에 따라 실내마감재를 적용한 CH-2에서는 7.85 dB로 측정되어 C-A보다 0.38 dB 증가하고 있다. C₅₀의 최소변화감지폭(JND)인 1.1 dB에는 미치지 못하지만 초기음에너지가 소폭 향상하는 것으로 나타났다. 또한 CV-1의 경우 6.33 dB로 측정되어 표준모델인 C-A과 비교하였을 때 0.77 dB 감소하는 것으로 나타났다. 뒷벽의 흡음재를 적용한 RW-3에서는 6.09 dB로 측정되었으며 C-R과 비교할 경우 약 1.48 dB 증가하는 것을 알 수 있다.

4.5 D_{50} (언어명료도)

D_{50} 값은 전체에너지에 대한 초기음에너지의 비율로서 음성의 명료함을 평가하는 음향인자로 사용되며, 그 값이 클수록 명료도가 높은 것을 나타낸다. 현재 국내외 적으로 언어명료도에 대한 일반적인 기준은 없으나, 연구결과에 의해 그 값이 55% 이상일 때 청취자는 95% 이상의 인지성능을 나타내는 것으로 알려져 있다.

다음의 Fig. 5(e)은 교실의 실내마감재 위치 변화에 따른 D_{50} 값을 나타내고 있다.

현재 교실(C-A)과 실내마감재 위치를 변화시킨 경우 전체적으로 70% 이상의 높은 D_{50} 이 측정되었다. 특히 천장의 가로방향으로 반사재를 설치한 모델(CH-2)의 D_{50} 은 84.0%로 가장 높게 나타났으며 현재의 교실보다 약 1.9% 증가한 것을 알 수 있다. 이는 최소변화감지폭(JND) 범위(D_{50} 의 JND: 5%)를 초과하지 못하지만 반사재로 인해 음에너지가 증가하였으며 그 중 초기음에너지가 증가에 의하여 D_{50} 에 유의한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

실내마감재 위치 중 뒷벽에 흡음재를 설치한 경우 현재 교실보다 약 4.5% 감소하지만 천장 전체 면적이 반사면적인 경우보다 약 6.1% 증가한 결과를 보여주고 있다.

4.6 RASTI (음성전달지수)

공간의 명료도를 평가하는 다양한 음향인자 중에서 사람의 대화나 강연내용의 이해도를 나타내는 지표로써 RASTI를 사용한다.

RASTI는 듣는 사람이 음성의 내용을 얼마나 잘 이해하는가에 대한 평가지수로서 언어를 사용하는 공간의 음향환경을 평가하는데 매우 중요한 지표이다. 일반적으로 RASTI 값이 0.45~0.60 이내일 경우 보통의 음환경, 0.60 이상일 경우 준수한 수준으로 평가되며 0.75 이상일 경우 음성인자에 대한 명료함이 매우 높은 공간으로 평가된다.

각 모델의 6개의 수음점에서 측정한 RASTI의 측정결과는 Fig. 5(f)의 그래프로 도식화하였다.

천장의 전체면적이 흡음 및 반사면적인 경우 RASTI 측정결과 0.7 이상의 매우 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 천장의 일부면적에 반사재를

설치하여도 0.75 이상의 높은 RASTI를 보여주고 있으며 현재의 교실과의 편차(0.04)가 크지 않음을 알 수 있다.

천장 전체가 반사면적일 때 뒷벽의 일부 면적에 흡음재를 설치한 경우(RW-3)의 음성전달지수는 0.79로 측정되었으며 현재 교실과 큰 편차가 없음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 국내 학교 교실의 음환경 기준을 만족하는 가이드라인 설정을 위한 다양한 설계 방안을 제시하고자 하였다. 이를 위해 국내 교실의 표준 모델을 사용하여 실내음향 성능 기준을 만족시키는 흡음재의 권장설치면적과 비율에 대해 조사하였다. 이를 바탕으로 실내마감재 위치에 따른 천장 및 뒷벽의 다양한 흡음계획을 설정하여 선행연구를 진행하였으며 결과분석을 통하여 현장실험을 수행하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 국내 표준교실을 이용하여 음환경 기준을 만족시킬 수 있는 흡음면적을 산출한 결과 천장의 전체 면적을 흡음재(500 Hz와 1 kHz의 평균 흡음률: 0.40 이상 사용)로 마감하지 않아도 잔향시간 기준인 0.8s를 만족할 수 있는 것으로 나타났다.
- 2) 실내음향성능 측정 결과, 천장 전체가 흡음면적과 반사면적인 경우 모두 잔향시간 기준을 만족하는 것으로 나타났으며 천장 전체를 반사재로 마감한다면 음압레벨은 상승되지만 언어명료도(C_{50} , D_{50}), RASTI는 최소변화감지폭을 초과하여 낮아지는 것으로 나타났다.
- 3) 실내마감재의 면적은 같지만 가로(CH-2)와 세로(CV-1)로 구분한 모델에서는 세로로 구분한 경우 모두 음압레벨은 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 초기감쇠시간은 가로(CH-2)로 구분한 모델에서 감소되며 이에 따라 D_{50} 및 C_{50} 의 평균은 향상되는 것을 알 수 있다. 따라서 세로로 구분하여 계획한다면 모든 구역의 음압레벨을 증가시킬 수는 있지만 가로로 계획하는 것이 천장 전체를 흡음면적으로 사용하는 것과 같은 명료도를 실현할

수 있을 것으로 판단된다.

- 4) 천장 전체를 반사재로 마감할 경우, 벽의 1.2m 높이 위 면적에 흡음률이 높은 흡음재로 마감한다면 초기 감쇠시간은 짧아지고 이에 따라 언어명료도(D_{50} , C_{50}), RASTI를 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 국내 학교 교실의 음환경 기준을 만족하는 다양한 설계방안을 제시하고자 하였다. 비록 경우의 수가 국한되어있으나 향후 연구에서는 보다 많은 유형의 비교 실험을 통해 가이드라인을 보강할 수 있을 것이다. 또한 국내 교실의 실내 음향성능기준을 만족하기 위한 가이드라인뿐만 아니라 배경소음 기준을 만족하기 위한 연구가 필요함을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2011-0008137).

References

1. ANSI/ASA S12.60, *Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools - Part 1: Permanent Schools, American National Standard* (2010).
2. *Building Bulletin 93, Acoustic Design of Schools*; The Department for Education and Skills (2011).
3. C. J. Park, D. J. Ryu, J. Y. Kyoung, and C. H. Haan, "Analysis of the acoustic performance of classrooms in Korea" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **33**, 317-326 (2014).
4. J. H. Jung, "Design criteria for the implementation of good classroom acoustics research and improvement" (in Korean), *Fire protection technology* **42**, 17-25 (2007).
5. C. J. Park, *Establishment of the acoustical performance criteria for middle and high school classrooms (in Korean)*, (Ph.D. thesis, Chungbuk National University, 2014).
6. M. Long, *Architectural Acoustics* (Academic Press, United States, 2005), pp. 607.
7. S. R. Bistafa and J. S. Bradley, "Predicting reverberation times in a simulated classroom," *J. Acoust. Soc. Am.* **108**, 1721-1731 (2000).
8. H. Sato and J.S. Bradley, "Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms," *J. Acoust. Soc. Am.*, **123**, 2064-2077(2008).
9. C. J. Park and C. H. Haan, "Effect of the inter-aural level

differences on the speech intelligibility depending on the room absorption in classrooms" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **32**, 335-345 (2013).

10. D. U. Jeong, Y. K. Oh, and H. K. Chu, "Spatial distribution of early reflections and speech intelligibility" (in Korean), *J. Archi. Inst. Kr. Suppl.* 1(s) **21**, 537-540 (2001).
11. Y. J. Choi, "The measurements and evaluations on the configurations of absorptive and diffusing treatments in classrooms using a scale model" (in Korean), *J. Kr. Inst. Educat. Facili.* **20**, 37-44 (2013).
12. H. Kuttruff, *Room Acoustics* (Applied Science Pub.Ltd., London, 1973), pp. 239.
13. S. B. Shin, *Enhancement of the sound clarity in lecture rooms using absorptive and diffusive materials* (Master thesis, Chungbuk National University 2007).
14. M. D. Egan, *Architectural Acoustics* (J. Ross Publishing Classics, Florida, 2007), pp. 52-53.
15. *Skyniva*, <http://okviva.co.kr/>, 2011.
16. D. J. Ryu, C. J. Park, and C. H. Haan, "Interior finishing plan of the school classrooms according to the acoustical Performance criteria" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr. Suppl.* 2(s) **33**, 80-86 (2014).

저자 약력

▶ 류 다 정 (Da-Jung Ryu)



2013년 2월: 충북대학교 건축공학과 학사
2014년 2월: 충북대학교 건축공학과 석사
2014년 3월 ~ 현재: 충북대학교 건축음향 연구실 연구원

▶ 박 찬 재 (Chan-Jae Park)



2006년 2월: 충북대학교 건축공학과 학사
2009년 2월: 충북대학교 건축공학과 석사
2014년 2월: 충북대학교 건축공학과 박사
2014년 3월 ~ 현재: 충북대학교 건축음향 연구실 연구원

▶ 한 찬 훈 (Chan-Hoon Haan)



1983년 2월: 홍익대학교 건축학과 학사
1985년 2월: 연세대학교 건축공학과 석사
1993년 12월: University of Sydney Ph.D
1994년 9월 ~ 현재: 충북대학교 건축공학과 교수