

축소모형법을 이용한 흡음재와 확산체 배치조건별 교실의 음향성능 측정 및 평가

The Measurements and Evaluations on the Configurations of Absorptive and Diffusing Treatments in Classrooms using a Scale Model

최 영 지*

Choi, Young-Ji

Abstract

The present study examines the effects of periodic type diffusers for producing the preferred acoustics for speech and determines the more successful configurations of sound-absorbing and diffusing treatments for achieving good acoustics in classrooms. The measurements were carried out in a 1/10 scale model classroom systematically adding diffusers to one or more of four surfaces of the room. A total of 13 combination of diffusers with absorptive treatments were investigated. Adding diffusers on the ceiling were more effective to increasing the early-arriving reflection energy(G_{50}) than adding absorptive materials on the entire ceiling. The late arriving reflection energy(G_{late}) was decreased with increasing amounts of diffusing treatments of upper front or rear wall and this resulted in achieving higher early-to-late ratios(C_{50}). Adding diffusers on the upper front wall($AC_{100}DUFW_{26}$) achieved more uniform acoustical conditions over the receiver positions than adding diffusers on the upper rear wall($AC_{100}DURW_{26}$). Adding diffusers on the ceiling and absorptive materials on the lower front wall($AC_{75}DC_{25}ALFW_{26}$) achieved better acoustical conditions than adding the absorptive materials on the entire ceiling and lower front wall($AC_{100}ALFW_{26}$).

키워드 : 확산체, 교실음향, 초기반사음, 후기반사음, 언어명료도, 음의 세기

Keywords : diffuser, classroom acoustics, early-arriving reflections, later-arriving reflections, clarity, sound strength

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

교실의 음향설계에 있어 적절한 흡음재의 설치에 있어 교실의 잔향시간과 소음을 줄이는데 효과적이지만 짧은 잔향시간을 얻고자 과도한 흡음재를 설치하는 경우 유효한 반사벽면이 줄어들어 따라 음성전달에 중요한 초기반사음(early reflections) 성분이 감소하여 특히 교실의 뒷좌석에서의 음성전달에 문제가 발생한다.¹⁾ 흡음재의 사용은 실

의 암소음(background noise)을 줄이는 효과가 있지만 암소음을 줄이는 동시에 신호음의 레벨을 감소시킴으로써 과도한 흡음재의 사용은 오히려 언어 명료도(speech intelligibility)를 감소시킨다. 따라서, 최적 교실음향 설계는 과도한 흡음재의 설치로 교실의 잔향시간을 무조건 짧게 하는 것을 의미하지 않고 직접음의 에너지가 부족한 원거리 지점에 초기반사음성분을 보완하여 언어 명료도를 높이는데 그 의미가 있을 것이다.²⁾

교실에서 음원에서 멀리 위치한 뒷좌석에서 직접음 및 초기반사음의 급격한 감소로 인해 언어 명료도가 저하되

* 정희원, 전북대 공과대학 건축공학과 겸임교수, 공학박사
(youngji@jbnu.ac.kr)

이 논문은 2009년도와 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2009-0063991, No. 2012R1A1B5000491).

1) J.S. Bradley, H. Sato and M. Picard: On the importance of

early reflections for speech in rooms. J. Acoust. Soc. Am. 106(2003) 3233-3244.

2) H. Sato and J.S. Bradley: Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms. J. Acoust. Soc. Am. 123(2008) 2064-2077.

는 현상을 방지하고 최소한의 흡음재 설치로 적절한 신호 음의 레벨을 확보하는 방안으로 본 저자는 선행연구에서 교실에서의 확산체 설치에 따른 효과에 관해 연구·보고하였다.³⁾ 확산체의 설치로 인하여 뒷좌석에서의 언어 명료도가 향상되었으며, 확산체를 측벽에 설치하는 것보다 교사가 위치한 전면벽에 설치하는 것이 보다 효과적으로 보고되었다. 이에 본 연구에서는 선행연구에 이어 축소모형을 활용하여 교실에서 효과적인 확산체의 배치위치 및 적절한 흡음재와의 면적에 관해 연구하여 우수한 교실음향설계를 위한 보다 성공적인 흡음재와 확산체 배치안을 제시하고자 하였다.

1.2 연구범위 및 방법

본 연구에서는 교실에서 효과적인 확산체의 배치위치 및 적절한 흡음재와의 면적을 고려한 최적 확산체 설계안에 관하여 물리적 음향지표를 바탕으로 분석하고자 하였다. 국내 초등학교 교실을 축소한 축소교실모형을 이용하여 확산체의 배치 위치와 면적에 따른 영향을 측정·분석하였다. 대상공간에서의 측정은 축소모형법을 이용하여 실시하였으며, 이 방법은 기하음향학을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션에서는 충분히 고려되지 못하는 음의 파동성에 의한 회절이나 확산과 같은 현상을 정확하게 재현 가능한 장점이 있다. 축소모형법은 연구목적에 따라 1/5~1/50까지의 축척이 주로 이용되나 본 연구에서는 대상공간의 물리적 음향특성은 물론 향후 주관적인 음향평가를 위하여 1/10 스케일의 모형을 제작하여 측정에 사용하였다. 본 실험에 게재된 모든 결과는 실제 스케일(full scale)로 환산하여 표기하였다.

2. 측정개요

2.1 축소교실모형 및 측정내용

축소교실모형은 선행연구와 동일한 교실(실물 체적: 148m³)을 이용하였으나 실내의 흡음재와 확산체의 배치위치 및 면적을 달리하여 실내음향조건을 변화시켰다. 대상공간의 경우 개구부가 설치되지 않은 좌우대칭의 실내음향조건을 모델링한 것으로 측벽 혹은 양쪽벽에 창문이 설치되어 있는 교실과 상이하며 특히 한쪽벽에 창문이 설치된 교실에서 나타나는 실내음향조건을 재현하는데 한계점이 있을 수 있다. 그림 1과 2는 각각 축소교실 및 확산

체의 형태 및 제원을 각각 보여주고 있다. 교실의 잔향시간이 전주파수대역에서 동일하게 하기 위해 각각 저주파수대역과 고주파수대역의 흡음률이 높은 저음흡음재와 다공성 흡음재가 사용되었다. 1/1 옥타브밴드에서의 저음 및 다공성 흡음재의 흡음률은 각각 0.49, 0.36, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 그리고 0.00, 0.06, 0.17, 0.36, 0.49, 0.57 이다. 확산체는 22cm*22cm(가로*세로, 실물 스케일) 규격의 각재를 22cm 간격으로 일정하게 배치하였다(그림 2 참조). 1/3 옥타브밴드에서 22cm*22cm 규격 확산체의 흡음률은 0.05, 0.10, 0.19, 0.17, 0.16, 0.18, 0.19, 0.13, 0.14, 0.21, 0.20, 0.14, 0.14, 0.16, 0.16, 0.16, 0.10, 0.11 이며, 확산계수는 0.01, 0.08, 0.12, 0.23, 0.42, 0.42, 0.54, 0.50, 0.29, 0.35, 0.66, 0.68, 0.49, 0.56, 0.61, 0.48, 0.60, 0.57 이다. 흡음재와 확산체의 도포부위는 실내배치조건에 따라 천장(51.04m²), 전면벽(13.5m²), 후벽(13.5m²), 그리고 측벽(14.4m²)의 일부분이다. 확산체는 천장, 상위 벽면, 하위 벽면, 그리고 측벽의 네 가지 부위로 구분하여 도포하였으며, 그 배치면적은 천장 전체면적에 대한 비율로 표기하였다. 예를 들어, AC₁₀₀과 AC₇₅는 각각 흡음재를 천장의 전체부위와 75% 면적에 해당하는 부위에 도포한 경우를 나타낸다. 동일한 표기방식을 13가지 실내배치조건에 적용하였으며, 각 배치조건의 이해를 돕기 위해 개념도를 그림 3에 보여주고 있으며, 표 1에는 배치조건의 약자의 의미와 함께 각 실내음향조건에 적용된 흡음재와 확산체의 설치위치 및 면적을 제시하였다.

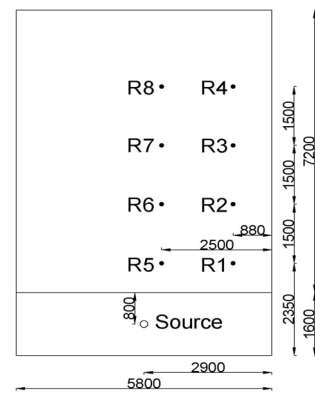


Figure 1. Dimensions of the model classroom, R: receiver, unit: mm (그림 1. 축소모형교실의 제원, R: 수음점, 단위: mm)

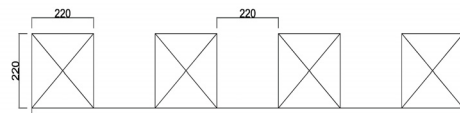


Figure 2. Periodic type diffusers, cross sections, unit: mm (그림 2. 확산체의 형태 및 제원 단면, 단위: mm).

3) 최영지: 1차 단순확산체를 적용한 교실음향설계. 한국교육시설학회논문집 84(2011) 3-11.

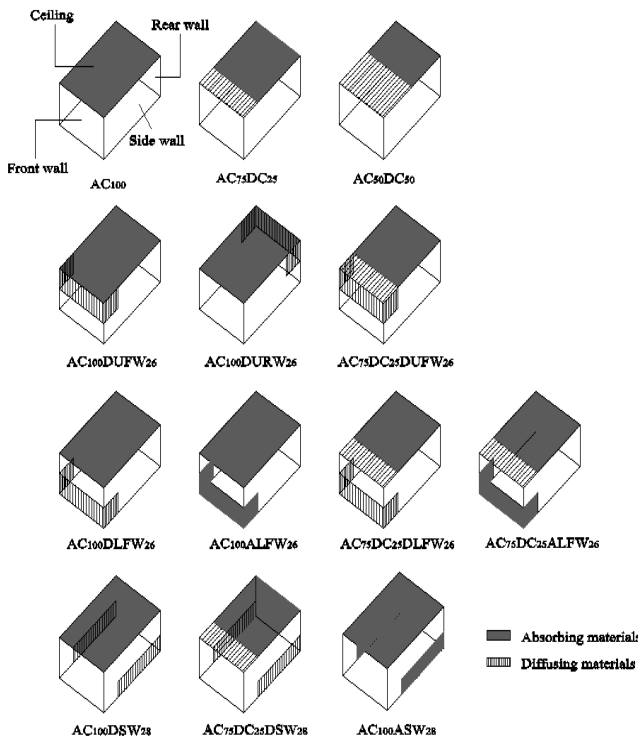


Figure 3. Model classroom showing 13 different room treatments (그림 3. 흡음재와 확산체의 배치위치 및 면적을 변화한 13가지 교실음향조건)

Table 1. The areas and absorbing and diffusing materials added for each of the 13 configurations of the model classroom (표 1. 13가지 교실음향조건에 적용된 흡음재와 확산체의 설치위치 및 면적)

설치부위	흡음면적, m ²	확산면적, m ²
1. 천장		
AC ₁₀₀	51.04	-
AC ₇₅ DC ₂₅	38.28	12.76
AC ₅₀ DC ₅₀	25.52	25.52
2. 천장과 상위 벽면		
AC ₁₀₀ DUFW ₂₆	51.04	13.5
AC ₁₀₀ DURW ₂₆	51.04	13.5
AC ₇₅ DC ₂₅ DUFW ₂₆	38.28	26.26
3. 천장과 하위 벽면		
AC ₁₀₀ DLFW ₂₆	51.04	13.5
AC ₁₀₀ ALRW ₂₆	64.54	-
AC ₇₅ DC ₂₅ DLFW ₂₆	38.28	26.26
AC ₇₅ DC ₂₅ ALFW ₂₆	52.68	12.76
4. 천장과 측벽		
AC ₁₀₀ DSW ₂₈	51.04	14.4
AC ₇₅ DC ₂₅ DSW ₂₈	38.28	27.16
AC ₁₀₀ ASW ₂₈	65.44	-

약자	의미	약자	의미
A	Absorbing	F	Front
D	Diffusing	R	Rear
C	Ceiling	U	Upper
W	Wall	L	Lower
-	-	S	Side

2.2 측정방법

측정은 중앙 음원점 1개소와 수음점 8개소에서 실시되었으며, 수음점 8개소는 교실의 좌측부분에 골고루 위치시켜 측정하였다(그림 1 참조). 음원은 1.37초의 로그스weep(logarithmic sweep)을 이용하였으며 재생주파수대역은 1kHz~100kHz(실물 환산시 100Hz~10kHz)로 하였다. 모든 측정은 지점별로 3회 반복하여 측정하였다. 음원점과 수음점의 측정높이는 각각 1.5m와 1.2m이다. 모든 측정점은 음원점에서 임계거리(critical distance)를 넘는 지점을 선정하였다. 대상공간의 물리적 음향지표는 만석인 상태에서 측정하였다. 물리적 음향지표는 교실음향의 평가에 중요한 잔향시간(reverberation times, T₃₀), 초기감쇠시간(early decay times, EDT), 언어명료도(clarity, C₅₀), 그리고 음의 세기(sound strength, G)를 위주로 분석하였다.⁴⁾

잔향시간은 음원이 발생한 후 소리가 정지했을 때 음에너지량이 60dB 감쇠하는데 소요되는 시간으로 정의되며(식 2.1 참조), 초기감쇠시간은 음에너지량이 10dB 감쇠하는데 소요되는 시간을 의미한다. 명료도는 후기반사음에너지(later-arriving sound energy)에 대한 초기반사음에너지(early-arriving sound energy) 비로 나타내며, 음악명료도를 평가하는 지표 C₈₀은 후기반사음에너지에 대한 80ms 이내에 도달하는 초기반사음 에너지비로 정의된다. 언어명료도의 경우 50 ms 이내에 도달하는 에너지를 초기에너지로 정의하며(식 2.2 참조), 언어명료도 평가에 더 적합한 지표로 보고되었다⁵⁾. 음의 세기는 동일음원을 대상으로 무향실에서 음원으로부터 10 m 거리에서 측정한 음압레벨에 대한 실제공간에서 측정한 음압레벨의 차이값으로 정의된다(식 2.3 참조). 본 연구에서 음의 세기는 임펄스 리스펀스 50ms 초기시간범위 내에 도달하는 에너지를 초기반사음성분으로, 50 ms 이후에 도달하는 에너지를 후기반사음성분으로 구분하여 각각 G₅₀과 G_{late}로 나누어 산출하였다. G는 초기와 후기반사음 성분을 합한 전체 시간범위에서의 음의 세기이며, 전체 임펄스 리스펀스에서 얻어진다.

$$RT = \frac{0.16V}{\sum A}, s \quad (2.1)$$

4) J.S. Bradley: Speech intelligibility studies in classrooms. J. Acoust. Soc. Am. 80(1986) 846-854.

5) J.S. Bradley, R. Reich and S.G. Norcross: A just noticeable difference in C₅₀ for Speech. Applied Acoustics 58(1999) 99-108.

여기서, V 는 실제적(m^3)이고, ΣA 는 실의 전체 흡음력 (metric sabins) 이다.

$$C_{50} = 10 \log \left\{ \frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right\}, dB \quad (2.2)$$

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

$$G = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \right\}, dB \quad (2.3)$$

여기서, $p_{10}(t)$ 는 무향실 10m지점에서 음압이다.

측정시 온도는 23℃와 습도는 3%로 유지하였으며, 습도는 질소치환법을 이용하여 고주파수에서의 공기중의 흡음을 배제하였다.

3. 측정결과

3.1 확산체 배치위치 및 면적에 따른 교실음향의 변화

교실에서 확산체의 배치위치 및 면적에 따른 영향에 관해 자세히 연구하고자 실내 벽면을 천장, 상위 전·후 벽면, 하위 전·후 벽면, 그리고 측벽의 네 부분으로 구분하여 확산체를 배치하였다. 따라서, 측정결과는 확산체의 4가지 배치 부위에 따라 각 세부 항목으로 나누어 기술하였다. 모든 측정결과는 언어 명료도에 중요한 중·고주파수 대역(500-4kHz)의 평균값과 그 표준편차로 나타내었다. 음의 세기값은 음원의 크기를 보정하지 않고 측정이 이루어져 흡음재를 천장 전체면적에 도포한 실내배치조건 AC_{100} 의 G값에 대한 상대 값으로 환산하여 나타내었다. 따라서, 마이너스 G값은 기준 값인 AC_{100} 의 G값보다 음의 세기가 작다는 것을 의미한다.

확산체는 실내에서 발생하는 반사음을 확산시킴으로써 초기 반사에너지를 전좌석의 청중에게 골고루 분포시키는 데 기여하며, 언어 명료도를 저해하는 후기반사음을 감소시키는 역할을 한다. 따라서, 실내에서 확산체의 설치효과는 초기/후기 반사음 에너지 비 C_{50} 값에 의한 명료도, G값에 의한 스피치 레벨, 그리고 T_{30} 과 EDT값에 의한 잔향감으로 평가할 수 있다.

3.1.1 천장의 흡음재와 확산체 배치에 따른 영향

표 2는 실내 천장면에 흡음재와 확산체 배치조건을 세 가지로 변화시켜 그 측정결과를 제시하였다. 천장에 부착한 확산체는 천장 앞부분에서 부착면을 증가시켜 천장 전체면적의 0%(AC_{100}), 25%($AC_{75}DC_{25}$), 그리고 50%($AC_{50}DC_{50}$)로 달리하였다. 여기서, $AC_{75}DC_{25}$ 는 천장 앞부분 25%에 확산체를 설치하고, 확산체가 설치된 천장 앞부분을 제외한 부분의 75%에 흡음재를 부착한 상태를 말한다. 마찬가지로 $AC_{50}DC_{50}$ 는 천장 앞부분 50%에 확산체를 설치하고, 그 나머지 부분의 50%에 흡음재를 부착한 상태를 말한다. 천장 외에 모든 벽면에는 흡음재 및 확산체가 미 부착된 상태에서 측정하였다. 천장의 확산체 부착면적의 증가는 교실의 잔향시간에 영향을 미치지 않으나 초기감쇠시간의 경우 AC_{100} 에 비해 $AC_{75}DC_{25}$ 와 $AC_{50}DC_{50}$ 의 차이값이 각각 0.07초와 0.11초로 1 JND(just noticeable difference)인 0.05초⁶⁾ 이상으로 나타났다. T_{30} 값의 경우 실내에서 측정지점별 편차가 0.05초에서 0.03초로 감소하였다. C_{50} 값은 천장에 흡음재 도포면적을 줄이고 확산체 설치면적을 증가시킴에 따라 0.9~1.3dB 감소하는 것으로 나타났다. 천장의 확산체 설치면적이 증가함에 따라 G_{50} , G_{late} , 그리고 G값은 기준 AC_{100} 에 비해 $AC_{50}DC_{50}$ 의 경우 1 JND(G의 경우 1dB) 이상 증가하였다. 천장에 확산체의 설치면적이 증가함으로써 상대적으로 천장에 도포된 흡음재의 면적이 감소하기 때문에 후기음에너지도 증가하는 것을 알 수 있다. 언어 전달에 유효한 초기반사음에너지를 증가시키고자 천장면에 흡음재 도포면적을 줄이고 확산체 도포면적을 증가시킴에 따라 G값은 증가하지만 동시에 후기 반사음 에너지도 증가하여 C_{50} 값은 감소하므로 천장 앞부분 25% 이상의 면적에 확산체를 설치하는 것은 적절하지 않은 안으로 사료된다.

Table 2. Acoustical parameters for three treatments of the classroom ceiling (표 2. 천장의 흡음재와 확산체 배치에 따른 음향지표의 변화)

설치조건	음향지표(500-4kHz)						
		T_{30} , s	EDT, s	C_{50} , dB	G_{50} , dB	G_{late} , dB	G, dB
AC_{100}	Mean	0.93	0.68	3.3	-1.7	-5.0	0.0
	s.d.	0.05	0.08	1.6	2.3	0.7	1.8
$AC_{75}DC_{25}$	Mean	0.92	0.75	2.4	-1.2	-3.6	0.8
	s.d.	0.03	0.09	1.5	2.4	1.0	1.9
$AC_{50}DC_{50}$	Mean	0.93	0.79	2.0	-0.5	-2.5	1.7
	s.d.	0.03	0.08	1.2	2.2	1.0	1.8

참고: Mean과 s.d.는 각각 평균과 표준편차를 나타냄.

6) T.T. Cox, W.J. Davies and Y.W. Lam: The sensitivity of listeners to early sound field changes in auditoria. *Acustica* 79(1993) 27-41.

3.1.2 천장과 상위 벽면의 흡음재와 확산체 배치에 따른 영향

교실 천장과 상위 벽면에 흡음재와 확산체 배치조건을 세 가지로 변화시켜 그 측정결과를 표 3에 제시하였다. 앞서 흡음재와 확산체 부착면적을 천장으로 제한하는 경우 천장 전체면적의 25% 이상을 확산체로 도포하는 것은 후기 에너지의 증가를 유도하여 적절하지 않은 방법으로 사료되어 천장에서의 확산체 부착면적은 25% 이하로 제한하여 실내 배치조건을 변화시켰다. 흡음재를 천장면에 100% 도포하고 확산체를 상위 전면벽(AC₁₀₀DUFW₂₆) 혹은 상위 후면벽(AC₁₀₀DURW₂₆)에 배치하였을 때 천장 전체면적에 흡음재만을 도포한 경우(AC₁₀₀)에 비해 T₃₀값은 5~4 JND, EDT값은 1~2 JND 감소하고, C₅₀값은 0.8dB 증가하는 것으로 나타났다. G값은 비슷하나 확산체의 설치로 G_{late}값 0.7dB 감소하였다. 상위 전면벽에 확산체의 설치로 T₃₀과 EDT의 실내 측정지점별 편차는 0.03 초 줄어들었다. 확산체를 상위 전면벽에 설치하는 것이 상위 후면벽에 설치하는 것보다 효과적으로 나타났다. 천장의 25% 면적과 상위 전면벽에 확산체를 설치할 경우(AC₇₅DC₂₅DUFW₂₆) 천장 전체면적에 흡음재만을 도포한 경우(AC₁₀₀)에 비해 T₃₀과 EDT값은 각각 4 JND와 0.04초 감소하였다.

Table 3. Acoustical parameters for three treatments of the classroom ceiling and upper wall (표 3. 천장과 상위 벽면의 확산체 배치조건에 따른 음향지표의 변화)

설치조건	음향지표(500-4kHz)						
		T ₃₀ , s	EDT, s	C ₅₀ , dB	G ₅₀ , dB	G _{late} , dB	G, dB
AC ₁₀₀ DUFW ₂₆	Mean	0.68	0.58	4.1	-1.6	-5.7	-0.1
	s.d.	0.02	0.05	1.6	2.1	0.9	1.8
AC ₁₀₀ DURW ₂₆	Mean	0.71	0.61	3.8	-1.6	-5.4	0.0
	s.d.	0.02	0.08	1.8	2.4	0.6	1.9
AC ₇₅ DC ₂₅ DUFW ₂₆	Mean	0.70	0.64	3.5	-1.3	-4.8	0.3
	s.d.	0.01	0.04	1.6	2.3	0.8	1.9

참고: Mean과 s.d.는 각각 평균과 표준편차를 나타냄.

3.1.3 천장과 하위 벽면의 흡음재와 확산체 배치에 따른 영향

교실 천장과 하위 벽면에 흡음재와 확산체 배치조건을 네 가지로 변화시켜 그 측정결과를 표 4에 제시하였다. 천장에서 확산체를 전면벽에 설치하는 것이 균등한 음향조성에 효과적으로 나타나 확산체를 하위 전면벽에 설치하였다. 흡음재를 천장면에 100% 도포하고 확산체를 하위 전면벽(AC₁₀₀DUFW₂₆)에 배치한 경우 확산체를 상위 전면벽(AC₁₀₀DUFW₂₆)에 배치하였을 때와 각 음향지표의 평균값은 비슷하지만 확산체를 하위 전면벽에 설치하였을

Table 4. Acoustical parameters for four treatments of the classroom ceiling and lower wall(표 4. 천장과 하위 벽면의 흡음재와 확산체 배치조건에 따른 음향지표의 변화)

설치조건	음향지표(500-4kHz)						
		T ₃₀ , s	EDT, s	C ₅₀ , dB	G ₅₀ , dB	G _{late} , dB	G, dB
AC ₁₀₀ DUFW ₂₆	Mean	0.67	0.59	3.8	-1.7	-5.5	-0.2
	s.d.	0.02	0.05	1.4	1.7	0.5	1.4
AC ₁₀₀ ALFW ₂₆	Mean	0.68	0.57	4.4	-1.1	-5.5	0.3
	s.d.	0.02	0.04	1.4	1.7	0.4	1.4
AC ₇₅ DC ₂₅ DUFW ₂₆	Mean	0.71	0.62	3.3	-0.4	-3.7	1.4
	s.d.	0.02	0.07	1.8	2.6	1.0	2.1
AC ₇₅ DC ₂₅ ALFW ₂₆	Mean	0.70	0.57	4.2	0.2	-4.0	1.7
	s.d.	0.02	0.10	2.2	2.7	0.8	2.3

참고: Mean과 s.d.는 각각 평균과 표준편차를 나타냄.

때 C₅₀, G값의 측정지점별 편차를 각각 0.2dB 그리고 0.4dB 줄이는데 효과적으로 나타났다. 흡음재를 천장 전면과 하위 전면벽에 도포하였을 때(AC₁₀₀ALFW₂₆) G₅₀값을 증가시켜 C₅₀값이 0.6dB 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 천장과 하위 전면벽을 흡음재로 도포하는 것보다 천장 전체면적의 25%와 하위 전면벽을 확산체로 도포하는 것(AC₇₅DC₂₅DUFW₂₆)이 오히려 G₅₀값을 0.7dB 증가시키는 것으로 나타났다. 천장 전체면적에 흡음재만을 도포한 경우(AC₁₀₀)에 비해 G₅₀값은 1.3dB 증가하였다. 천장면적의 앞부분 25%에 확산체를 설치하고 하위 전면벽을 흡음재로 도포하는 경우(AC₇₅DC₂₅ALFW₂₆) AC₁₀₀에 비해 C₅₀값은 0.9dB, G₅₀값은 1 JND이상 증가하였지만 측정지점별 편차는 오히려 0.5dB 증가하였다. 흡음재를 부착할 경우 흡음재와 가까운 좌석에서 효과가 증가하지만 교실내 균등한 음향조건을 조성하는데 있어 확산체가 흡음재보다 효과적이었다.

3.1.4 천장과 측벽의 흡음재와 확산체 배치에 따른 영향

표 5에 교실 천장과 측벽에 흡음재와 확산체 배치조건을 세 가지로 변화시켜 그 측정결과를 제시하였다. 흡음재를 천장면에 100% 도포하고 확산체를 측벽에 설치하였을 경우(AC₁₀₀DSW₂₈) 천장 전체면적에 흡음재만을 도포한 경우(AC₁₀₀)에 비해 T₃₀과 EDT값이 각각 1 JND와 2 JND 감소하고 C₅₀값이 0.7dB 증가하였다. G값은 변화가 없으나 초기 반사음 에너지인 G₅₀값이 0.2dB 증가하고 후기 반사음 에너지인 G_{late}값이 0.5dB 감소함으로써 C₅₀값이 증가하였다. 확산체를 측벽에 배치하는 것은 확산체를 전면벽 혹은 후면벽에 배치하는 것보다 측정지점별 편차가 증가하였다.

천장 전체면적의 앞부분 25%와 측벽을 확산체로 도포

Table 5. Acoustical parameters for three treatments of the classroom ceiling and side wall(표 5. 천장과 측벽의 흡음재와 확산체 배치조건에 따른 음향지표의 변화)

설치조건	음향지표(500-4kHz)						
		T ₃₀ , s	EDT, s	C ₅₀ , dB	G ₅₀ , dB	G _{late} , dB	G, dB
AC ₁₀₀ DSW ₂₈	Mean	0.87	0.58	4.0	-1.5	-5.5	0.0
	s.d.	0.04	0.08	1.8	2.0	0.6	1.6
AC ₇₅ DC ₂₅ DSW ₂₈	Mean	0.87	0.67	3.1	-0.3	-3.4	1.5
	s.d.	0.04	0.07	1.3	2.9	1.6	2.5
AC ₁₀₀ ASW ₂₈	Mean	0.86	0.56	4.5	-1.4	-5.9	0.0
	s.d.	0.05	0.09	1.9	2.8	1.0	2.4

참고: Mean과 s.d.는 각각 평균과 표준편차를 나타냄.

하는 경우(AC₇₅DC₂₅DSW₂₈) 흡음재를 천장면에 100% 도포하고 확산체를 측벽에 배치하였을 경우(AC₁₀₀DSW₂₈)에 비해 G₅₀과 G값이 1 JND 이상 증가하였다. 흡음재를 천장 전체면과 측벽에 도포하였을 때(AC₁₀₀ASW₂₈) 확산체를 측벽에 도포한 경우(AC₁₀₀DSW₂₈)보다 후기 반사음 에너지가 감소하여 C₅₀값이 0.5dB 증가하였다.

3.2 효과적인 흡음재와 확산체의 배치안

본 장에서는 앞에서 소개한 총 13개의 확산체 배치조건중에서 언어 전달에 가장 효과적인 확산체 배치안을 선정하여 음향지표별로 분석하였다. 효과적인 흡음재와 확산체 배치안으로는 기준조건인 흡음재를 천장전체면적에 도포한 AC₁₀₀에 비해 짧은 잔향시간과 높은 언어 명료도는 물론 음원과 먼 거리에 위치한 교실의 뒷좌석에서의 언어 전달에 유리한 초기 반사음에너지도 증가시키는 세 가지 확산체 배치조건을 선정하였다. 세 가지 확산체 배치조건은 천장 전체면적의 앞부분 25%와 하위 전면벽을 확산체로 도포하는 경우(AC₇₅DC₂₅DLFW₂₆), 천장 전체면적의 앞부분 25%를 확산체로 도포하고 하위 전면벽을 흡음재로 도포하는 경우(AC₇₅DC₂₅ALFW₂₆), 그리고 천장 전체면적의 앞부분 25%와 측벽을 확산체로 도포하는 경우(AC₇₅DC₂₅DSW₂₈)이다. 세 가지 성공적인 확산체 배치조건의 1kHz에서 T₃₀, C₅₀, 그리고 G₅₀값을 그림 4~6에 교실내 측정지점별 편차를 알 수 있도록 등고선으로 나타내었다.

그림 4는 흡음재를 천장 전체면적에 도포한 AC₁₀₀ 조건과 비교해 세 가지 성공적인 확산체 배치조건의 1kHz에서 T₃₀값의 변화를 등고선으로 보여주고 있다. 천장 전체면적의 앞부분 25%에 확산체를 설치하고 확산체 혹은 흡음재를 전면 하위벽에 설치한 경우(AC₇₅DC₂₅DLFW₂₆, AC₇₅DC₂₅ALFW₂₆) 천장 전체면적을 흡음재로 도포한 경우에 비해 T₃₀값은 0.1 초 이상 짧아졌다. 특히, 흡음재를 전면

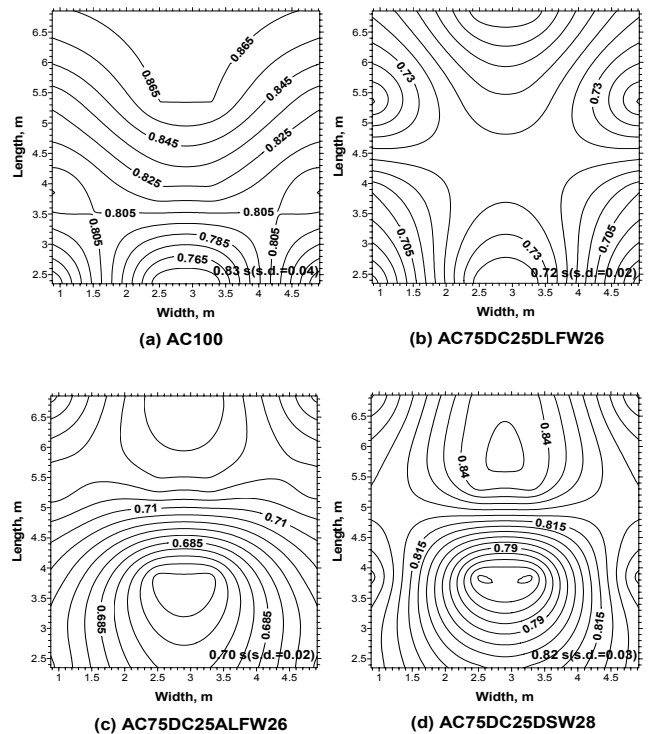


Figure 4. Contours of the T₃₀ values at 1kHz for four different room configurations (그림 4. 네 가지 확산체 배치조건에 따른 1kHz에서의 T₃₀값 등고선)

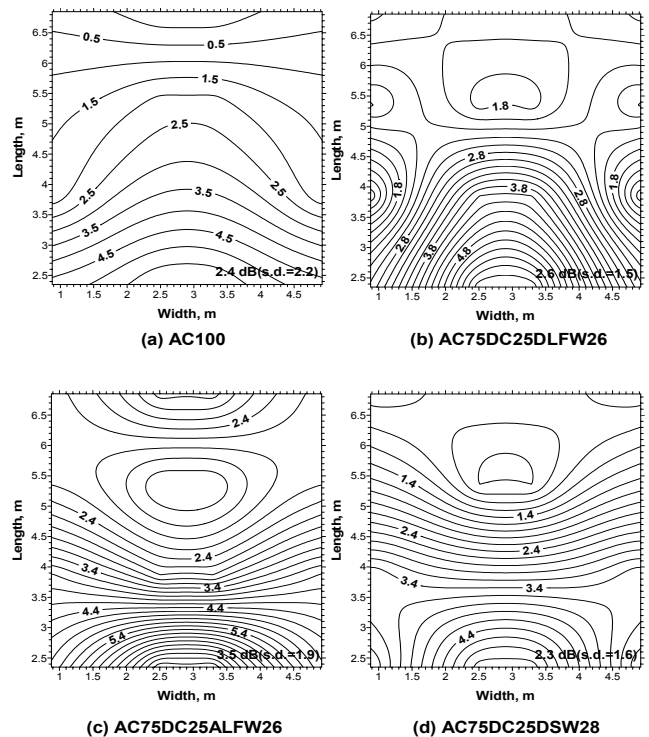


Figure 5. Contours of the C₅₀ values at 1kHz for four different room configurations (그림 5. 네 가지 확산체 배치조건에 따른 1kHz에서의 C₅₀값 등고선)

하위벽에 도포하는 경우 음원과 가까운 좌석에서의 효과가 두드러졌다. 천장 전체면의 앞부분 25%와 측벽에 확산체를 설치하는 경우(AC₇₅DC₂₅DSW₂₈) AC₁₀₀조건과 비교해

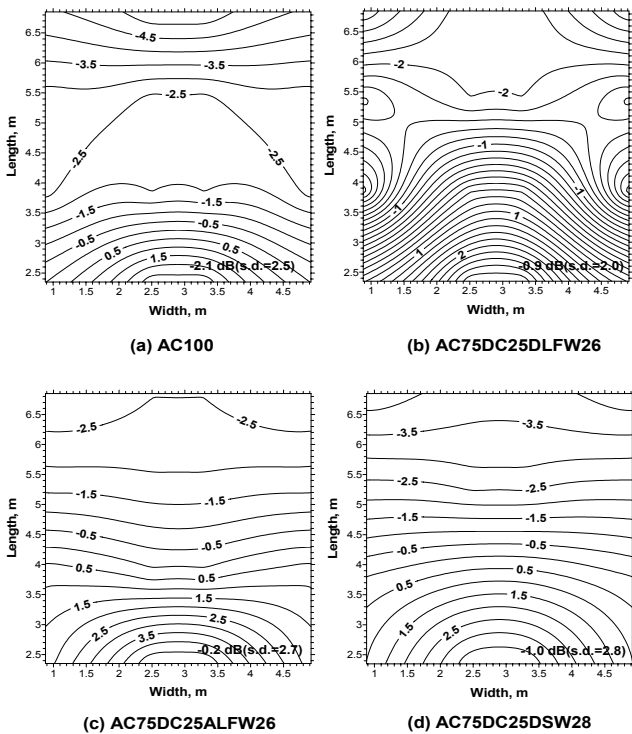


Figure 6. Contours of the G_{50} values at 1kHz for four different room configurations (그림 6. 네 가지 확산체 배치조건에 따른 1kHz에서의 G_{50} 값 등고선)

중간지점과 먼거리의 좌석에서의 T_{30} 값이 0.2~0.3 초 감소하였다. 따라서, 확산체를 설치하는 경우 실내 전좌석에서 균등한 T_{30} 값을 얻었다.

그림 5는 흡음재를 천장 전체면적에 도포한 AC₁₀₀ 조건과 비교해 세 가지 최적 확산체 배치조건의 C_{50} 값의 변화를 등고선으로 보여주고 있다. 천장 앞부분 25%에 확산체를 설치하고 확산체를 전면 하위벽에 설치한 경우 (AC₇₅DC₂₅ALFW₂₆) 천장 전체면적을 흡음재로 도포한 경우에 비해 평균 C_{50} 값이 1.1dB 증가하였다. 특히, 전면벽에 확산체 설치(AC₇₅DC₂₅DLFW₂₆)는 음원에 가까운 좌석보다 멀리 떨어진 좌석에서 효과적이었으며 그 차이값은 1 JND⁷⁾ 이상이다. 확산체를 설치하는 경우 실내 전좌석에서 균등한 C_{50} 값을 얻었다.

그림 6은 흡음재를 천장 전체면적에 도포한 AC₁₀₀ 조건과 비교해 세 가지 최적 확산체 배치조건의 1kHz에서 G_{50} 값의 변화를 등고선으로 보여주고 있다. 천장 전체면적의 앞부분 25%에 확산체를 설치하고 확산체 혹은 흡음재를 전면 하위벽에 설치한 경우 천장 전체면적을 흡음재로 도포한 경우에 비해 G_{50} 값이 증가하였으며, 그 차이값은 각각 1.2dB와 1.9dB로 1 JND 이상이다. 특히, 전면벽에 확

산체의 설치(AC₇₅DC₂₅DLFW₂₆)는 음원에 가까운 좌석보다 멀리 떨어진 좌석에서 효과적이었다.

4. 결론 및 향후과제

교실에서 확산체의 배치위치 및 면적에 따른 영향에 관해 자세히 연구하고자 실내 벽면을 천장, 상위 전·후 벽면, 하위 전·후 벽면, 그리고 측벽의 네 부분으로 구분하여 확산체를 배치하였다. 확산체 배치위치별 효과는 확산체를 전면벽과 후벽에 설치할 경우 실내의 음향지표값은 유사하지만 전면벽에 확산체를 설치하는 경우 교실내 좀더 균등한 음향을 조성하는데 기여하였다. 확산체를 상위 전면벽에 설치하는 것 보다 음원에 가까운 하위 전면벽에 설치하는 것이 교실 전좌석에서 균등한 음향을 조성하였다. 확산체를 측벽에 설치하는 것은 전면벽 혹은 후면벽에 설치하는 것보다 효과적이지 않았지만 천장전체면적에 흡음재만을 설치한 경우에 비해 교실 좌석별 균등한 음향을 형성하는데 기여하였다.

확산체의 효과적인 설치 면적은 천장의 경우 전체면적의 앞부분 25%를 확산체로 도포하는 것이 음원에서 떨어진 뒷좌석의 언어 전달에 기여하는 초기반사음에너지를 증가하는 것으로 나타났다. 교실의 천장과 전면벽 혹은 천장과 측벽에 흡음재를 도포하는 것은 확산체를 설치하는 것보다 후기반사음에너지를 감소시켜 초기에너지비를 높이는 효과가 있지만 전체적인 음의 세기 증가에는 기여하지 않았다. 또한, 흡음재는 확산체에 비해 교실 전체 균등한 음향조성에는 기여하지 않는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 언어 명료도에 가장 중요한 인자인 소음의 영향이 배제되었다. 후속 연구에서는 교실내외에서 발생하는 소음의 영향을 효과적으로 제어할 수 있는 최적안 설계가 고려되어야 한다. 또한, 최근 언어 및 음악수업을 병행하는 다목적 교실에서의 음향설계도 함께 연구되어야 한다.

참고문헌

1. J.S. Bradley: Speech intelligibility studies in classrooms. J. Acoust. Soc. Am. 80(1986) 846-854.
2. 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(1999) 1820-1828.
3. J.S. Bradley, H. Sato and M. Picard: On the importance of

7) J.S. Bradley, R. Reich and S.G. Norcross: A just noticeable difference in C_{50} for Speech. Applied Acoustics 58(1999) 99-108.

- early reflections for speech in rooms. *J. Acoust. Soc. Am.* 106(2003) 3233-3244.
4. H. Sato and J.S. Bradley: Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms. *J. Acoust. Soc. Am.* 123(2008) 2064-2077.
 5. J.S. Bradley, R. Reich and S.G. Norcross: A just noticeable difference in C50 for Speech. *Applied Acoustics* 58(1999) 99-108.
 6. T.T. Cox, W.J. Davies and Y.W. Lam: The sensitivity of listeners to early sound field changes in auditoria. *Acustica* 79(1993) 27-41.
 7. Y.-J. Choi, The application of 1-dimensional diffusers in classroom acoustics. *Journal of the Korean Institute of Educational Facilities* 84(2011) 3-11.

접수 2012. 9. 6
1차 심사완료 2012. 11. 14
게재확정 2013. 1. 18