

실측을 통한 대학 강의실 음향 특성에 관한 연구

Room acoustic analysis in university classrooms using experimental results

김운선* · 송민호* · 박인선** · 박상규†

Yeun Seon Kim , Min Ho Song , In Sun Park and Sang Kyu Park

Key Words : room acoustic measurement (실내 음향 측정), acoustics of classrooms (교실 음향)

ABSTRACT

Measurements of RT, EDT, D50, C50 and STI carried out in three different unoccupied University classrooms. For acoustic measurements, various sound sources are used (white noise, pistol shot, MLS and sweep signal). In this study, It found that interaction exists between sound source and place. Also there was high correlation between STI and various acoustic parameter.

1. 서론

실내 음향 측정과 관련된 규격으로는 국제 표준인 ISO 3382, ISO 18233, 국내의 KS 2864가 있다. 특히 ISO 18233은 2006년 새로이 개정되었으며 MLS(Maximum-Length Sequence), sweep 신호를 이용한 새로운 측정 방법에 대한 표준을 제시하고 있다.

여러 가지 측정 신호는 각각의 특징을 가지고 있고 실내의 음향 특성은 대상 실의 크기나 마감 재료에 따라 영향을 받으므로 측정 장소에 따른 적절한 음향 신호의 선택은 정확한 측정 결과를 위해 중요하다. 이와 관련한 국내의 연구로 김정중, 손장렬(2004)이 강당과 실내 체육관에서 pistol음원과 MLS로 측정을 하고 그 결과를 비교한 바 있다.⁽¹⁾ 연구 결과에 따르면 실의 종류에 상관없이 pistol과 MLS는 RT에 대해서만 비슷한 값을 보이는 것으로 밝혀졌다. 본 논문에서는 실의 크기가 다른 3곳의 대학 강의실을 중심으로 white noise, 경기용 pistol, MLS, sweep신호를 사용하여 RT, EDT, D50, C50, STI를 측정하고 그 결과를 통해 실의

종류에 따른 적절한 측정 신호를 알아보려고 한다.

대학 강의실에서 학생들의 학습과 집중도를 위해 강연자의 정확한 음성 전달은 매우 중요하다. 따라서 음성 전달 지수인 STI는 강의실 평가에 중요하게 고려되어야 한다. 최근 발표된 논문에 따르면 STI와 RT 사이에는 상관관계가 매우 높다는 사실이 밝혀졌다.⁽³⁾ 또한 초기-후기음 에너지 비율인 C50에 대해 주파수별 가중치를 주어 STI와 같이 주관적 평가 지표로서 나타내는 방법이 1995년 Marshall에 의해 제안되기도 하였다.^{(4),(5)} 이 연구 결과들을 바탕으로 본 논문에서는 octave band의 RT, EDT, D50, C50과 STI를 상관분석하였다. 이 결과를 통해 STI에 영향을 미치는 음향 파라미터가 무엇인지 알아보고 강의실의 STI 개선을 위한 RT, EDT, D50, C50의 활용 방법을 알아보려고 한다.

2. 측정 방법 및 개요

2.1 측정 대상 강의실의 개요

실험 장소로 선정된 강의실은 크기별로 소강의실과 중강의실, 대강의실로 구분된다. 소강의실은 평면형 구조이고 중강의실과 대강의실은 계단형 구조이다. 실의 모습과 구체적인 개요는 Table 1과 같다.

† 종신회원, 연세대학교 환경공학부

E-mail: tankpark@yonsei.ac.kr

Tel: (033)760-2442, Fax: (033)763-5224

* 정회원, 연세대학교 환경공학부 대학원

** 정회원, 연세대학교 환경공학부

Table 1 General characteristics of classrooms

구분	소강의실	중강의실	대강의실
그림			
좌석 (개)	90	84	168
폭 (m)	8.24	10.22	12.22
깊이 (m)	12.41	10.00	12.60
높이 (m)	2.94	3.73	3.79
실용적 (m ³)	301	381.4	583.41
흡음 시설	유공아미텍스(천정) 커튼	나무섬유흡음보드/ 페브릭천 (실내마감벽) 커튼	유공아미텍스(천정) 코펜하겐 리브(뒷벽) 커튼

2.2 측정 방법

실의 측정은 ISO 3382와 KS 2864에 준하여 스피커는 무대의 중앙에 놓고 그 높이는 스피커의 저음 출력이 영향을 받는 것을 피하기 위해 1.5m로 하였다. 마이크로폰의 높이는 사람의 앉은 키 높이를 고려하여 1.2m로 하였으며 반사면으로부터의 영향을 고려하여 벽면에서 최소 1m 이상 이격시킨 곳에서 측정하였다.

Table 2 Acoustical measurement equipments

측정 장비	모델	제작사
Omni-directional Speaker	Type223 Nr.20856	Lautsprecher
Power Amplifier	260	Norsonic
1/4" Freefield Microphone	Type MI 17	G.R.A.S
Laptop computer	AVERATEC 5500	삼보 TG
Microphone preamp	UA-25	EDIROL
Symponie dBATI32		01dB
DIRAC 3.0	Type 7841	B&K

Table 3 Acoustic parameters and each sound sources

음향 파라미터	비교 대상 음원
RT	white noise, pistol shot, MLS, lin-sweep
EDT	pistol shot, MLS, lin-sweep
D50	pistol shot, MLS, lin-sweep
C50	pistol shot, MLS, lin-sweep
STI	pistol shot, MLS, lin-sweep

측정 포인트는 대강의실은 20지점, 중강의실은 12지점, 소강의실은 9지점을 선정하여 실험하였다. 이 가운데 음원에 따른 결과의 비교에는 측정 지점들 중 음원에서 5m이상 떨어지고 벽면으로부터 3m이상 떨어진 지점들이 사용되었다. 그 결과 대

강의실 6지점, 중강의실 2지점, 소강의실 2지점이 결과 비교에 사용되었다. 이렇게 비교 지점을 다시 분류한 이유는 음원으로부터의 직접음과 벽면으로부터의 반사음의 효과를 없애기 위함이다.

white noise, 경기용 pistol, MLS 신호를 이용한 측정과 분석은 01dB社의 Symponie와 dBATI32를 사용하였고 sweep신호를 이용한 측정과 분석에는 B&K社의 Dirac 3.0 소프트웨어를 사용하였다. 측정 횟수는 white noise와 경기용 pistol의 경우 각 5회 씩 측정하여 그 평균값을 계산하였다. MLS신호는 배경소음의 영향을 어느 정도 배제할 수 있고 sweep 신호는 신호 왜곡이 매우 적고 time variant한 환경에서도 정확한 측정이 가능하다는 장점 때문에 각각 3회씩 측정하여 그 평균값을 계산하였다.⁽²⁾ 실험에 사용된 장비 및 소프트웨어는 Table 2와 같다. 또한 각각의 음향 파라미터에 사용할 음원은 Table 3과 같다.

측정 시 실의 온도는 23℃~27℃이며 상대습도는 60~70%이다.

3. 측정 결과 분석 및 고찰

실의 종류와 측정 음원 사이의 관계를 알아보기 위해 이원분산분석(two way ANOVA)을 실시하였다. 이원분산분석을 통해 F 검정 값과 유의확률(p)을 구할 수 있는데 유의확률에 의한 판정법은 다음과 같다.

$p \leq$ 유의수준(α) :실별·음원별 상호작용이 존재함
 $p >$ 유의수준(α) :실별·음원별 상호작용이 없음

또한 각각의 실에 대해서 음원에 따른 측정값의 평균비교를 위해 일원분산분석(one way ANOVA)을 실시하였다. 일원분산분석의 유의확률(p)에 대한 판정법은 다음과 같다.

$p \leq$ 유의수준(α) :음원 간 평균값이 다름
 $p >$ 유의수준(α) :음원 간 평균값이 같음

분석을 위해 통계 프로그램인 SPSS 10.0을 사용하였고 분석 시 유의수준(α)은 5%로 하였다.

3.1 잔향 시간 (Reverberation time)

Table 4는 T30에 대한 이원분산분석을 한 결과이다. 모든 주파수 대역에서 유의확률(p)이 유의수준($\alpha=.05$)보다 작은 값을 보이므로 T30의 실별·음원별 상호작용이 있음을 알 수 있다.($p<.05$) Table 5는 T30의 일원 분산분석을 한 결과이다.

Table 4 two way ANOVA test for T30

		주파수 (Hz)					
		125	250	500	1k	2k	4k
F	실별X	5.212	17.010	30.543	51.617	74.464	77.148
(p)	음원별	(.000)	(.000)	(.000)	(.000)	(.000)	(.000)

Table 5 one way ANOVA test for T30 (N=표본 수, M=평균, SD=표준편차, p=유의확률)

주파수 (Hz)	측정 장소	음원	N	T30(s) M	SD	평균 동일 집단	p value
125	소강의실	white	10	1.536	0.557	white, pistol, mls, sweep	0.412
		pistol	10	2.596	2.102		
		mls	6	1.630	0.365		
		sweep	6	1.603	0.400		
	중강의실	white	10	0.829	0.207	white, mls white, pistol pistol, mls white, sweep mls, sweep	0.919 0.316 0.312 0.083 0.058
		pistol	10	0.679	0.102		
mls		6	0.760	0.055			
sweep		6	1.369	0.373			
대강의실	white	30	2.043	0.405	white, mls	0.834	
	pistol	1	2.520	.			
	mls	18	1.966	0.291			
	sweep	18	3.292	1.092			
250	소강의실	white	10	1.279	0.139	white, pistol, mls, sweep	0.144
		pistol	10	2.156	1.467		
		mls	6	1.480	0.179		
		sweep	6	1.585	0.059		
	중강의실	white	10	0.655	0.073	pistol, mls mls, sweep pistol, sweep	0.999 0.058 0.051
		pistol	10	0.767	0.030		
mls		6	0.771	0.013			
sweep		6	0.995	0.136			
대강의실	white	30	1.729	0.193	white, pistol pistol, mls	0.999 0.962	
	pistol	30	1.685	0.297			
	mls	18	1.600	0.089			
	sweep	18	2.069	0.118			
500	소강의실	white	10	1.231	0.084	white, pistol, mls, sweep	0.123
		pistol	10	1.902	1.305		
		mls	6	1.145	0.101		
		sweep	6	1.181	0.027		
	중강의실	white	10	0.563	0.064	mls, sweep white, mls white, pistol	0.353 0.352 0.282
		pistol	10	0.517	0.013		
mls		6	0.615	0.040			
sweep		6	0.657	0.030			
대강의실	white	30	1.497	0.109	white, mls white, sweep mls, sweep	1.000 0.286 0.287	
	pistol	30	1.873	0.175			
	mls	18	1.490	0.102			
	sweep	18	1.548	0.071			
1k	소강의실	white	10	1.014	0.051	white, pistol, mls, sweep	0.077
		pistol	10	1.766	1.230		
		mls	6	1.006	0.013		
		sweep	6	1.099	0.012		
	중강의실	white	10	0.375	0.030	white, pistol, sweep white, mls, sweep	0.298 0.128
		pistol	10	0.400	0.024		
mls		6	0.361	0.023			
sweep		6	0.393	0.010			
대강의실	white	30	1.332	0.056	white, mls mls, sweep	0.782 0.133	
	pistol	30	1.784	0.155			
	mls	18	1.353	0.058			
	sweep	18	1.402	0.063			
2k	소강의실	white	10	1.020	0.020	white, pistol, mls, sweep	0.083
		pistol	10	1.668	1.097		
		mls	6	1.008	0.015		
		sweep	6	1.042	0.026		
	중강의실	white	10	0.356	0.023	pistol, sweep white, pistol white, sweep	0.940 0.576 0.489
		pistol	10	0.343	0.009		
mls		6	0.285	0.016			
sweep		6	0.331	0.027			
대강의실	white	30	1.308	0.034	white, sweep white, mls mls, sweep	0.999 0.084 0.163	
	pistol	30	1.648	0.130			
	mls	18	1.287	0.023			
	sweep	18	1.304	0.022			
4k	소강의실	white	10	0.912	0.022	white, mls mls, sweep white, sweep white, pistol pistol, mls pistol, sweep	1.000 0.951 0.930 0.299 0.297 0.288
		pistol	10	1.568	0.953		
		mls	6	0.910	0.012		
		sweep	6	0.903	0.012		
	중강의실	white	10	0.367	0.018	white, pistol, sweep	0.429
		pistol	10	0.354	0.013		
mls		6	0.316	0.016			
sweep		6	0.356	0.003			
대강의실	white	30	1.141	0.029	white, mls	0.826	
	pistol	30	1.430	0.077			
	mls	18	1.148	0.014			
	sweep	18	1.164	0.013			

Fig.1은 octave band에 대해서 강의실별 음원에 따른 잔향시간의 평균과 표준편차를 비교한 그래프이다. 소강의실은 모든 음원이 전 주파수 대역에 걸쳐 최소 유의확률 0.077로 평균값에 차이가 없었다.($p>.05$) 그러나 Fig.1을 보면 white noise, MLS, sweep 신호의 측정 결과는 거의 일치하는 반면 pistol은 다른 음원의 결과와 최대 1초정도 차이가 발생하고 표준편차도 크게 발생함을 알 수 있다. 중강의실 에서 white noise는 250Hz를 제외하고는 최소 유의확률 0.083으로 다른 음원과 평균값이 일치했다.($p>.05$) pistol은 전 주파수대역에서 최소 유의확률 0.282로 다른 음원과 평균값이 동일하게 나타났고($p>.05$) MLS는 2kHz이상에서 평균값에 차이를 보였다.($p<.05$) sweep 신호는 최소 유의확률 0.051로 전 주파수 대역에 걸쳐 다른 음원과 평균값이 같은 것으로 나타났다.($p>.05$) 그러나 Fig.1을 보면 125Hz대역에서 다른 음원과 0.7초 정도 편차가 크게 발생함을 알 수 있다. 대강의실의 경우 Table 5의 표본 수(N)를 보면 pistol 음원은 125Hz 대역에서 총 측정횟수 30회 중 1회만 측정값이 나와 정확한 측정이 불가능했고 250Hz대역을 제외한 모든 주파수 대역에서 다른 음원의 결과와 평균값에 차이가 발생하였다.($p<.05$) sweep 신호는 125Hz, 250Hz, 4kHz 대역에서 white noise, MLS와 평균값에 차이를 보였다.($p<.05$) white noise와 MLS는 전 주파수 대역에 걸쳐 최소 유의확률 0.084로 평균값이 동일하게 나타났다.($p>.05$)

3.2 초기 감쇠 시간 (EDT)

Table 6은 EDT에 대해 이원분산분석을 한 결과이다. 모든 주파수 대역에서 유의확률(p)이 유의수준($\alpha=.05$)보다 작은 값을 보이므로 EDT의 실별·음원별 상호작용이 있음을 알 수 있다.($p<.05$)

Fig.2는 octave band에 대해서 강의실별 음원에 따른 EDT의 평균과 표준편차를 비교한 그래프이고 Table 7은 EDT에 대해 일원 분산분석을 한 결과이다. 소강의실의 경우 pistol은 모든 주파수 대역에서 MLS, sweep 신호와 평균값에 큰 차이를 보이고 있다.($p<.05$) 반면 MLS와 sweep 신호는 500Hz대역을 제외한 모든 주파수 대역에서 최소 유의확률 0.064로 평균값이 일치하고 있다.($p>.05$) 중강의실의 경우 pistol 신호는 4kHz 대역을 제외한 전 주파수대역에서 최소 유의확률

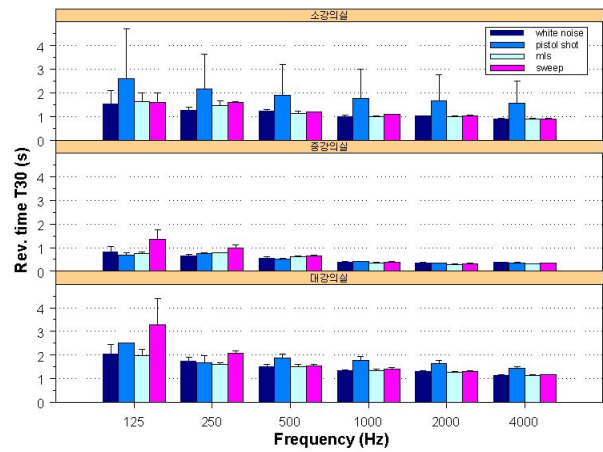


Fig. 1 T30 versus frequency at each sound source in each classroom

Table 6 two way ANOVA test for EDT

		주파수 (Hz)					
		125	250	500	1k	2k	4k
F	실별X	3.688	171.414	600.628	552.847	843.995	705.203
(p)	음원별	.008	.000	.000	.000	.000	.000

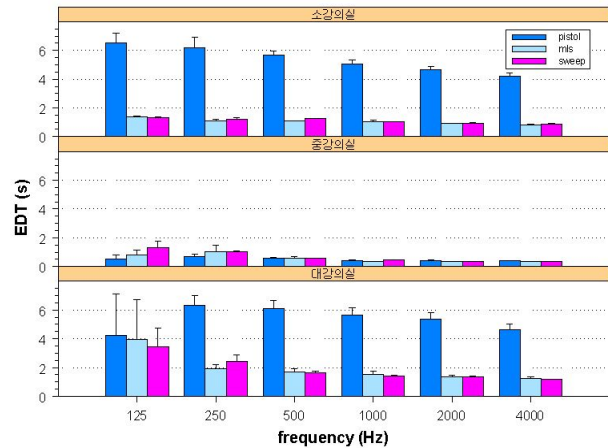


Fig. 2 EDT versus frequency at each sound source in each classroom

0.162로 MLS와 평균값이 일치하는 것으로 나타났다.($p>.05$) 또한 MLS와 sweep 신호는 1kHz를 제외한 전 주파수대역에서 최소 유의확률 0.202로 평균값이 일치하였다.($p>.05$)

대강의실의 경우 pistol은 125Hz대역에서만 MLS, sweep신호와 각각의 유의확률 0.98, 0.43으로 평균값이 일치하였다.($p>.05$) MLS와 sweep 신호는 250Hz대역을 제외한 모든 주파수대역에서 최소 유의확률 0.067로 평균값이 일치하였다.($p>.05$)

Table 7 one way ANOVA test for EDT (N=표본 수, M=평균, SD=표준편차, p value=유의확률)

주파수 (Hz)	측정 장소	음원	N	EDT(s) M	SD	평균 동일 집단	p value
125	소강의실	pistol	10	6.500	0.702	mls, sweep	0.615
		mls	6	1.351	0.094		
		sweep	6	1.296	0.067		
	중강의실	pistol	10	0.527	0.303	pistol, mls	0.484
		mls	6	0.775	0.368		
		sweep	6	1.286	0.495		
대강의실	pistol	30	4.263	2.867	pistol, mls	0.98	
	mls	18	3.972	2.724			
	sweep	18	3.418	1.341			
250	소강의실	pistol	10	6.198	0.749	mls, sweep	0.138
		mls	6	1.071	0.126		
		sweep	6	1.223	0.106		
	중강의실	pistol	10	0.692	0.185	mls, sweep	1.000
		mls	6	1.038	0.444		
		sweep	6	1.037	0.036		
대강의실	pistol	30	6.351	0.663	동일 집단 없음		
	mls	18	1.942	0.274			
	sweep	18	2.453	0.444			
500	소강의실	pistol	10	5.694	0.253	동일 집단 없음	
		mls	6	1.095	0.017		
		sweep	6	1.242	0.019		
	중강의실	pistol	10	0.571	0.067	mls, sweep	1.000
		mls	6	0.588	0.114		
		sweep	6	0.584	0.010		
대강의실	pistol	30	6.113	0.570	mls, sweep	0.619	
	mls	18	1.703	0.231			
	sweep	18	1.637	0.096			
1k	소강의실	pistol	10	5.070	0.252	mls, sweep	0.945
		mls	6	1.033	0.110		
		sweep	6	1.057	0.012		
	중강의실	pistol	10	0.389	0.089	pistol, mls	0.685
		mls	6	0.358	0.018		
		sweep	6	0.455	0.034		
대강의실	pistol	30	5.668	0.492	mls, sweep	0.067	
	mls	18	1.526	0.201			
	sweep	18	1.399	0.093			
2k	소강의실	pistol	10	4.660	0.239	mls, sweep	0.287
		mls	6	0.910	0.040		
		sweep	6	0.943	0.017		
	중강의실	pistol	10	0.391	0.052	mls, sweep	0.539
		mls	6	0.350	0.018		
		sweep	6	0.324	0.047		
대강의실	pistol	30	5.345	0.492	mls, sweep	0.995	
	mls	18	1.352	0.123			
	sweep	18	1.345	0.049			
4k	소강의실	pistol	10	4.197	0.246	mls, sweep	0.064
		mls	6	0.830	0.018		
		sweep	6	0.877	0.035		
	중강의실	pistol	10	0.395	0.028	mls, sweep	0.967
		mls	6	0.333	0.016		
		sweep	6	0.336	0.004		
대강의실	pistol	30	4.645	0.411	mls, sweep	0.238	
	mls	18	1.214	0.113			
	sweep	18	1.162	0.048			

3.3 명료도(D50)와 초기-후기음 에너지(C50)

정확한 음성 전달을 위한 지표로 활용되는 D50과 함께 음의 초기와 후기 도달 에너지 비율인 C50의 분석을 위해 ISO 3382에 제시되어 있는 (1)을 이용하여 측정값 D50으로부터 C50을 계산하였다.

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{D_{50}}{100 - D_{50}} \right) (dB) \quad (1)$$

Table 8과 Table10은 각각 D50과 C50에 대한 일원분산분석 결과이다. D50과 C50 모두 전체 주파수대역에서 유의확률(p)이 유의수준($\alpha=.05$)보다 작은 값을 보이므로 실별·음원별 상호작용이 있음을 알 수 있다. ($p<.05$)

Table 9와 Table 11은 각각 D50과 C50에 대한 일원분산분석 결과이다. 그리고 Fig.3과 Fig.4는 강의실별 음원에 따른 D50과 C50 각각의 평균과 표준편차를 나타낸 그래프이다. Fig.3과 Fig.4 두 그래프를 비교해 보면 D50과 C50이 매우 유사함을 알 수 있다. 이는 Table 9와 Table11을 비교하면 주파수별 음원들의 평균 동일집단이 비슷하게 나타나는 것으로도 확인 가능하다.

D50은 소강의실에서 MLS와 sweep 신호가 500Hz, 1kHz, 4kHz에서 평균값에 차이가 발생했지만($p<.05$) 그 외의 주파수대역에서는 최소 유의확률 0.367로 평균값이 일치하였다. ($p>.05$) pistol은 125Hz를 제외한 주파수대역에서는 MLS, sweep신호와 평균값이 일치하지 않았다. ($p<.05$) 중강의실에서는 125Hz부터 1kHz까지의 중저주파수대역에서 pistol과 MLS가 최소 유의확률 0.281로 평균값이 일치했고($p>.05$) 250Hz, 500Hz, 4kHz 대역에서는 MLS와 sweep신호가 최소 유의확률 0.117로 평균값이 일치했다. ($p>.05$) 대강의실에서 pistol은 전 주파수대역에서 다른 음원과 평균값이 일치하지 않았고 ($p<.05$) MLS와 sweep 신호는 250Hz를 제외한 전 주파수대역에서 최소 유의확률 0.091로 평균값이 일치했다. ($p>.05$)

3.4 음성전달지수(STI)

실내에서 음성의 전달에 따른 이해도(speech intelligibility)를 나타내는 척도로서 STI의 평가기준은 Table 12와 같다.

Fig.5는 실별·음원별 STI 측정값을 비교한 것이다. 그래프의 오른쪽 y축은 STI 수치에 따른 주관적 평가 척도를 나타낸 것이다.

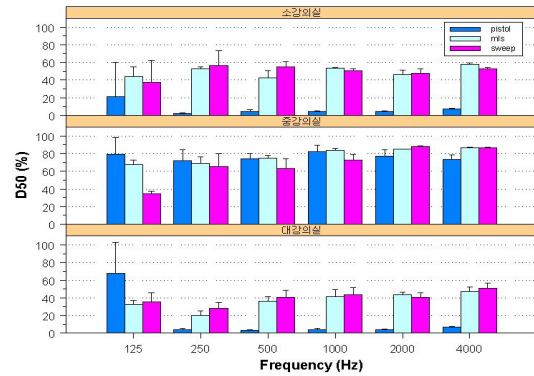


Fig. 3 D50 versus frequency at each sound source in each classroom

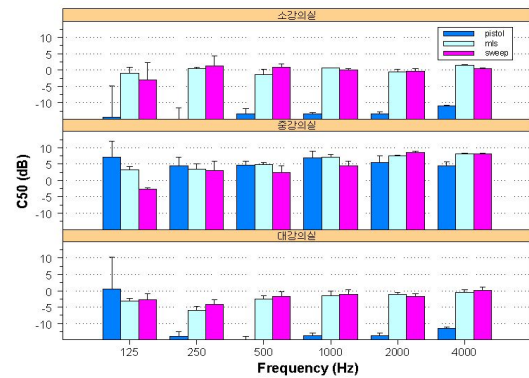


Fig. 4 C50 versus frequency at each sound source in each classroom

모든 실에 대해서 MLS와 sweep 신호가 비슷한 측정 결과를 보이고 있으나 전체적으로 MLS가 sweep 신호보다 평가 수치가 더 높게 나타남을 알 수 있다. pistol의 경우 대강의실과 소강의실에서 MLS, sweep 신호와 차이를 보였지만 중강의실에서는 일치하는 것으로 나타났다. ($p>.05$)

Table 12 Definition of the STI transfer function

STI	Subjective intelligibility scale
0 - 0.3	Bad
0.3 - 0.45	Poor
0.45 - 0.6	Fair
0.6 - 0.75	Good
0.75 - 1	Excellent

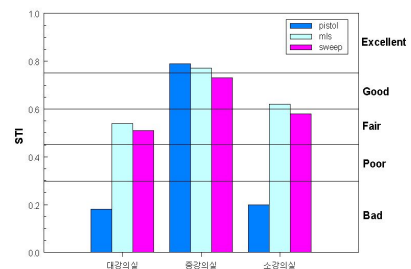


Fig. 5 STI at each sound source in each classroom

Table 8 two way ANOVA test for D50

		주파수 (Hz)					
		125	250	500	1k	2k	4k
F	실별 X	6.945	36.667	48.337	61.637	164.883	149.090
(p)	음원별	.000	.000	.000	.000	.000	.000

Table 9 one way ANOVA test for D50 (N=표본 수, M=평균, SD=표준편차, p value=유의확률)

주파수 (Hz)	측정 장소	음원	N	D50(%) M	SD	평균 동일 집단	p value
125	소강의실	pistol	10	20.82	39.490	pistol, mls, sweep	0.367
		mls	6	44.316	10.866		
		sweep	6	37.333	24.524		
	중강의실	pistol	10	79.24	19.320	pistol, mls	0.281
		mls	6	67.65	5.228		
		sweep	6	34.83	2.401		
대강의실	pistol	30	67.93	34.710	mls, sweep	0.512	
	mls	18	32.45	4.390			
	sweep	18	35.67	9.710			
250	소강의실	pistol	10	1.810	0.773	mls, sweep	0.946
		mls	6	52.85	1.923		
		sweep	6	56.50	16.979		
	중강의실	pistol	10	71.88	12.858	pistol, mls, sweep	0.627
		mls	6	68.833	7.276		
		sweep	6	65.50	14.432		
대강의실	pistol	30	4.023	1.254	동일 집단 없음		
	mls	18	20.31	4.649			
	sweep	18	28.111	6.163			
500	소강의실	pistol	10	4.63	1.756	동일 집단 없음	
		mls	6	42.60	8.353		
		sweep	6	55.166	5.419		
	중강의실	pistol	10	74.07	5.764	pistol, mls, sweep	0.930
		mls	6	75.216	2.371		
		sweep	6	63.166	10.815		
대강의실	pistol	30	3.21	0.725	mls, sweep	0.206	
	mls	18	36.166	5.195			
	sweep	18	40.333	8.000			
1k	소강의실	pistol	10	4.320	0.541	동일 집단 없음	
		mls	6	53.60	0.282		
		sweep	6	50.833	1.834		
	중강의실	pistol	10	82.390	6.818	pistol, mls	0.942
		mls	6	83.45	2.615		
		sweep	6	73.00	6.603		
대강의실	pistol	30	4.08	0.849	mls, sweep	0.760	
	mls	18	41.438	8.193			
	sweep	18	43.833	7.905			
2k	소강의실	pistol	10	4.440	0.533	mls, sweep	0.952
		mls	6	46.283	4.736		
		sweep	6	47.666	5.125		
	중강의실	pistol	10	76.90	7.208	동일 집단 없음	
		mls	6	85.066	0.484		
		sweep	6	87.833	0.752		
대강의실	pistol	30	4.126	0.684	mls, sweep	0.091	
	mls	18	43.427	3.169			
	sweep	18	40.222	5.093			
4k	소강의실	pistol	10	7.310	0.495	동일 집단 없음	
		mls	6	57.866	1.473		
		sweep	6	52.833	1.471		
	중강의실	pistol	10	73.370	5.472	mls, sweep	0.495
		mls	6	86.85	0.281		
		sweep	6	86.50	0.547		
대강의실	pistol	30	6.533	0.713	mls, sweep	0.212	
	mls	18	47.344	4.669			
	sweep	18	50.666	6.116			

Table 10 two way ANOVA test for C50

		주파수 (Hz)					
		125	250	500	1k	2k	4k
F	실별X	9.024	60.034	105.503	114.095	285.529	246.517
(p)	음원별	.000	.000	.000	.000	.000	.000

Table 11 one way ANOVA test for C50 (N=표본 수, M=평균, SD=표준편차, p value=유의확률)

주파수 (Hz)	측정 장소	음원	N	C50(dB) M	SD	평균 동일 집단	p value
125	소강의실	pistol	10	-14.463	9.668	mls, sweep	0.885
		mls	6	-1.033	1.939		
		sweep	6	-2.939	5.118		
	중강의실	pistol	10	7.0250	4.911	pistol, mls	0.115
		mls	6	3.240	1.043		
		sweep	6	-2.726	0.460		
대강의실	pistol	30	0.536	9.694	mls, sweep pistol, sweep pistol, mls	0.589 0.462 0.319	
	mls	18	-3.216	0.898			
	sweep	18	-2.654	1.845			
250	소강의실	pistol	10	-18.085	3.379	mls, sweep	0.923
		mls	6	0.496	0.335		
		sweep	6	1.260	3.112		
	중강의실	pistol	10	4.409	2.783	pistol, mls, sweep	0.611
		mls	6	3.512	1.500		
		sweep	6	3.036	2.884		
대강의실	pistol	30	-13.994	1.499	동일 집단 없음		
	mls	18	-6.044	1.305			
	sweep	18	-4.157	1.309			
500	소강의실	pistol	10	-13.419	1.734	mls, sweep	0.058
		mls	6	-1.326	1.495		
		sweep	6	0.910	0.956		
	중강의실	pistol	10	4.632	1.247	pistol ,mls pistol, sweep mls, sweep	0.961 0.141 0.102
		mls	6	4.836	0.556		
		sweep	6	2.449	2.055		
대강의실	pistol	30	-14.903	1.037	mls, sweep	0.122	
	mls	18	-2.501	1.016			
	sweep	18	-1.747	1.471			
1k	소강의실	pistol	10	-13.484	0.572	mls, sweep	0.177
		mls	6	0.626	0.049		
		sweep	6	0.144	0.319		
	중강의실	pistol	10	6.952	1.938	pistol, mls	0.990
		mls	6	7.070	0.827		
		sweep	6	4.416	1.478		
대강의실	pistol	30	-13.791	0.861	mls, sweep	0.752	
	mls	18	-1.538	1.473			
	sweep	18	-1.102	1.416			
2k	소강의실	pistol	10	-13.355	0.525	mls, sweep	0.952
		mls	6	-0.651	0.829		
		sweep	6	-0.409	0.894		
	중강의실	pistol	10	5.463	2.101	동일 집단 없음	
		mls	6	7.557	0.165		
		sweep	6	8.591	0.308		
대강의실	pistol	30	-13.710	0.747	mls, sweep	0.084	
	mls	18	-1.152	0.560			
	sweep	18	-1.738	0.921			
4k	소강의실	pistol	10	-11.040	0.318	동일 집단 없음	
		mls	6	1.379	0.262		
		sweep	6	0.493	0.256		
	중강의실	pistol	10	4.481	1.279	mls, sweep	0.502
		mls	6	8.199	0.107		
		sweep	6	8.069	0.203		
대강의실	pistol	30	-11.579	0.497	mls, sweep	0.207	
	mls	18	-0.467	0.822			
	sweep	18	0.119	1.071			

4. STI와 음향 파라미터들 사이의 상관관계

octave band의 잔향시간을 식 (2)~(6)을 이용하여 정의할 수 있다.⁽³⁾

$$RT_{speech} = (RT_{250} + RT_{500} + RT_{1000} + RT_{2000} + RT_{4000})/5 \quad (2)$$

$$RT_{SIL1} = (RT_{250} + RT_{500} + RT_{1000} + RT_{2000})/4 \quad (3)$$

$$RT_{SIL2} = (RT_{500} + RT_{1000} + RT_{2000} + RT_{4000})/4 \quad (4)$$

$$RT_{RC} = (RT_{500} + RT_{1000} + RT_{2000})/3 \quad (5)$$

$$RT_{mid} = (RT_{500} + RT_{1000})/2 \quad (6)$$

(2)는 사람 음성의 주요 주파수 대역이 250Hz부터 4kHz임을 고려하여 잔향 시간을 표현한 것이다. 대화가 방해되는 정도의 표현인 speech interference level(SIL)에 대해 참고적 수단으로 (3),(4)와 같이 잔향시간을 정의하기도 한다. (5)는 실내 음 환경 표준(room criteria)으로서의 잔향시간이다. (6)과 같이 중간주파수 대역 평균값으로 잔향시간을 나타내기도 한다.

C₅₀을 STI같이 주관적 평가 척도로 나타낼 수 있는데 D₅₀ 또한 (1)의 식을 이용하면 C₅₀과 같은 방법으로 표현가능하다. C₅₀에 대한 주파수 가중치와 C₅₀,D₅₀의 주관적 평가 척도는 (7)과 같다.(4),(5)

Table 13은 측정을 통해 얻은 STI와 음향 파라미터들의 상관분석을 한 것이다. 상관분석결과 RTspeech, 2kHz의 EDT, D_{50av}, C_{50av}가 STI와 높은 상관관계를 보였다.

Fig.6(3)과 Fig6.(4)를 보면 D_{50av}와 C_{50av}의 STI에 대한 상관관계가 매우 비슷하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. STI와의 주관적 평가 척도를 비교해 보면 Fair에서는 D_{50av}와 C_{50av} 모두 STI와 일치하는 경향이 있으나 D_{50av}와 C_{50av}에서 good으로 평가된 것이 STI에서는 Excellent로 나타나는 차이가 발생함을 알 수 있다.

$$C_{50av} = 0.15C_{50}(500Hz) + 0.25C_{50}(1kHz) + 0.35C_{50}(2kHz) + 0.25C_{50}(4kHz) \quad (7)$$

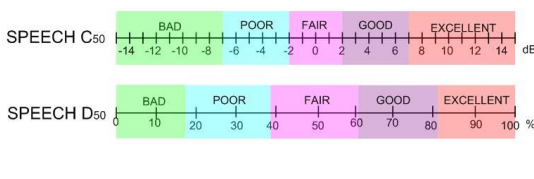


Table 13 Correlations between the STI and various acoustic parameters

Acoustic Measure	R ²	Fig.	Acoustic Measure	R ²	Fig.
RT(125)	0.797		D50(125)	0.687	
RT(250)	0.924		D50(250)	0.728	
RT(500)	0.949		D50(500)	0.754	
RT(1k)	0.952		D50(1k)	0.855	
RT(2k)	0.961		D50(2k)	0.868	
RT(4k)	0.959		D50(4k)	0.782	
RTspeech	0.980	6(1)	D50av	0.916	6(3)
RTSIL1	0.979		C50(125)	0.652	
RTSIL2	0.966		C50(250)	0.652	
RTmid	0.963		C50(500)	0.753	
RTRC	0.966		C50(1k)	0.854	
EDT(125)	0.365		C50(2k)	0.829	
EDT(250)	0.728		C50(4k)	0.747	
EDT(500)	0.754		C50av	0.900	6(4)
EDT(1k)	0.879				
EDT(2k)	0.924	6(2)			
EDT(4k)	0.914				

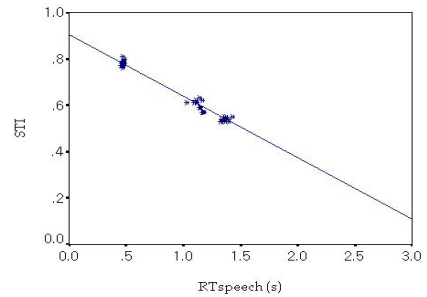


Fig. 6(1) Correlation between RTspeech and STI

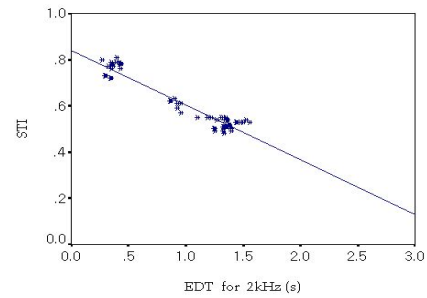


Fig. 6(2) Correlation between 2kHz EDT and STI

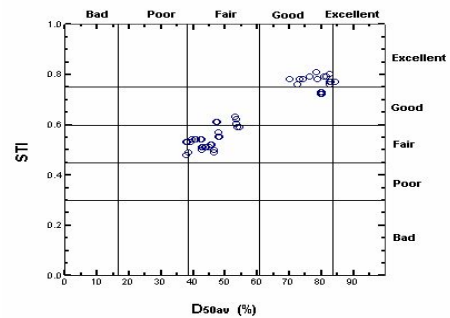


Fig. 6(3) STI versus D_{50av} with their subjective qualification ranges

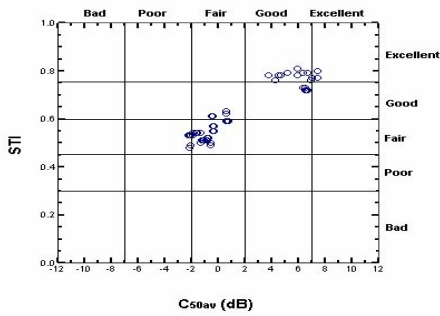


Fig. 6(4) STI versus C_{50av} with their subjective qualification ranges

5. 결론

1) 본 연구를 통해 대학 강의실을 중심으로 실내 음향 측정 시 실별·음원별 상호작용이 있는지 알아보았다. 연구 결과 음향 파라미터인 RT, EDT, D₅₀, C₅₀, STI에 대해 실의 종류와 측정 음원 사이에 상호작용이 있음이 밝혀졌다. 즉 실의 종류에 따라 정확한 결과를 얻기 위해서는 적합한 측정 신호의 선택이 중요하다는 사실을 확인할 수 있었다. Table 14는 각 실에 대해서 가장 정확한 결과를 보인 음원들을 음향 파라미터에 대해 정리한 것이다.

Table 14 The most suitable sound source in each classroom

음향 파라미터	소강의실	중강의실	대강의실
RT	white, MLS, sweep	pistol	white, MLS
EDT	MLS, sweep	MLS	MLS, sweep
D ₅₀	MLS, sweep	MLS	MLS, sweep
C ₅₀	MLS, sweep	MLS	MLS, sweep
STI	MLS, sweep	pistol, MLS, sweep	MLS, sweep

white noise는 소강의실과 대강의실 에서 정확한 RT값을 보였다.

pistol은 중강의실 에서만 RT와 STI에 대해서 정확한 값을 보였다. 중강의실은 흡음시설이 잘 갖춰진 곳으로 잔향시간이 실험한 3곳 중 가장 짧아 pistol은 잔향시간이 짧은 곳에서 정확한 RT와 STI값을 보여준다는 사실을 알 수 있다.

MLS는 중강의실의 RT를 제외하고는 실의 종류에 상관없이 모든 음향 파라미터에 대해서 정확한 측정값을 보여주었다.

sweep 신호는 소강의실 에서 모든 음향 파라미터에 대해 정확한 결과를 보여주었고 중강의실 에서는 STI에 대해서만 정확한 측정 결과를 나타냈다. 대강의실 에서는 RT를 제외한 모든 음향 파라미터에서 정확한 결과를

보였다. 특히 sweep 신호의 RT값은 대강의실, 중강의실, 소강의실 순서로 실의 크기가 작아짐에 따라 측정값이 정확하게 나오는 특징을 보였다.

2) 강의실의 STI 개선을 위한 RT, EDT, D₅₀, C₅₀의 활용을 위해 STI와 이들의 상관관계를 알아보았다. 그리고 RT_{speech}, 2kHz의 EDT, D_{50av}, C_{50av}가 STI와 높은 상관관계를 갖고 있음을 확인하였다. 이 결과를 통해 STI 수치가 0.6이상(주관적 평가 척도로 Good이상)이 되기 위해서는 RT_{speech}는 1.1초 이하, 2kHz의 EDT는 1초 이하, D_{50av}는 60%이상, C_{50av}는 2dB이상이 요구된다는 사실을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 김정중, 손장렬, 2004, "음향 측정 시 실의 종류와 음원에 따르는 음향인자 측정 분석에 관한 연구", 소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.1028~1031
- (2) Swen Müller, 2001, "Transfer-Function Measurement with Sweeps", Journals of Audio Engineering Society. Vol. 49, No. 6, pp. 443~471.
- (3) S.K. Tang, M.H. Yeung, 2006, "Reverberation times and speech transmission indices in classrooms", Journals of sound and vibration. 294, 596~607
- (4) L. Gerald Marshall, 1995, "An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio", Journals of Acoustic Society of America. 96(4), 2251~2261
- (5) L. Gerald Marshall, 1995, "Speech intelligibility prediction from calculated C₅₀ values", Journals of Acoustic Society of America. 98(5), 2845~2847