

강의실 내 에어컨과 공기청정기 운영조건에 따른 소음레벨 및 음성 명료도 평가

Evaluation of Noise Levels and Speech Intelligibility in a Classroom under Different Air Conditioner and Air Purifier Operational Conditions

홍 다 혜* · 김 명 준†
Da-Hye Hong* and Myung-Jun Kim†

(Received August 27, 2024 ; Revised November 14, 2024 ; Accepted December 24, 2024)

Key Words : Classroom(강의실), Air Conditioner(에어컨), Air Purifier(공기청정기), Indoor Equipment Noise(실내 설비기기 소음), Speech Intelligibility(음성 명료도), Speech Transmission Index(음성 전달지수), Signal to Noise Ratio(신호대잡음비)

ABSTRACT

The use of air quality systems in school classrooms has grown to enhance the indoor environment and reduce the spread of airborne infections. However, this has resulted in increased noise levels and reduced speech intelligibility during classes. This study examined noise levels and the STI in a classroom, focusing on the operational conditions of an air conditioner and an air purifier. Strategies for achieving optimal speech intelligibility under different operational scenarios were evaluated using acoustic simulations in a typical classroom setting. The findings revealed that reducing reverberation time did not always improve speech intelligibility due to the elevated noise levels generated by the equipment. The minimum noise level produced by the equipment was approximately 36 dBA. Considering the practical constraints of developing low-noise devices, an alternative approach is to increase the speech level to achieve a signal-to-noise ratio (SNR) of at least 10 dBA. Additionally, positioning the equipment at the front of the classroom, near the speaker, proved beneficial for ensuring a uniform distribution of speech intelligibility across all listening areas.

1. 서 론

학교 내 학습공간은 명료한 소리와 음성전달이 중요한 공간이다. 그 중 교실은 최선의 음환경을 보장함으로써 교사의 음성을 재실하는 모든 위치의 학생들에게 명료하게 전달해야 한다. 특히 학습공간 내

소음의 영향은 꾸준히 강조되어왔다. WHO는 소음이 교사와 학생 간 음성 전달에 간섭을 일으키고 학생들의 읽기 능력과 이해력을 통한 정보 추출을 방해할 수 있음을 강조하였다⁽¹⁾. 또한 10세 아이들을 대상으로 교실 소음과 건강 이상 증상의 관계에 대해 분석한 연구 결과에서 교실 소음이 높을수록 피로, 두통 등의 증상 발생률과 스트레스가 증가한다는 사실이

† Corresponding Author ; Member, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Professor
E-mail : mjunkim@uos.ac.kr

* Member, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, M.S. Student

A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2024 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Wan Ho Cho

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

검증되었다⁽²⁾. Mealings는 교실의 내외부 소음과 학생들의 신체적 증상 및 스트레스 간 상관관계에 대한 연구들을 리뷰함으로써 학생들의 신체 건강에 영향을 미치는 소음 수준에 대한 연구 필요성을 서술하였다⁽³⁾. 하지만 국내에서는 학습환경의 소음 관련 기준에 대하여 현재 학교보건법에서 교사 내 소음을 55 dBA로 제한하는 정도이며⁽⁴⁾, 잔향시간, 음성 명료도, 교실 내 배경소음 등 음향지표별 요구성능을 고려한 구체적인 기준 마련이 미흡한 실정이다.

이와 더불어 최근까지 미세먼지 증가와 공기질 악화로 실내 공기질 개선에 대한 요구 품질이 향상되었고, 특히 코로나-19 등 공기감염 바이러스의 확산 방지를 위해 교실 내 공기조화 설비기에 대한 요구량이 급격히 증가해왔다⁽⁵⁾. 학교 내 공기조화설비의 올바른 사용과 관련하여 Han et al.은 공기청정기 설치 위치와 토출구 방향, 재질자와의 이격거리 유지 등 사용지침에 대한 정확한 이행과 올바른 활용을 통해 공기감염 확산을 억제할 수 있다고 서술하였다⁽⁶⁾. 하지만 음향적 측면에서 수업 중 설비기 도입과 사용 증가로 인해 교실 배경소음은 증가하고 원활한 음성 전달을 방해하는 문제가 발생한다. 이는 심지어 수업 중에 설비기 작동을 중단시키는 선택에 이르게 할 수 있다.

교실 내 설비기 사용으로 인한 소음과 관련된 연구 중 음성 명료도 평가 연구는 대부분 에어컨을 대상으로 진행되었다. 무향실과 교실에서 에어컨 소음에 대한 FFT 분석 결과를 비교하고 음질 변화에 따른 주관적 반응과 허용음압레벨을 도출하는 연구가 수행되었다^(7,8). 또한 STI 'good' 이상을 확보하기 위해서 최소 10 dBA 이상의 신호대잡음비가 필요한 것으로 보고되었다⁽⁹⁾. Kang et al.은 교실과 음악감상실에서 5개 에어컨의 소음레벨을 측정하였고 음성 명료도 평가 실험을 통해 신호대잡음비 증가에 따른 명료도 증가를 확인하였다⁽¹⁰⁾.

반면, 환기량 평가와 관련하여 소음레벨을 제한하고 수업 시간과 쉬는 시간의 환기량을 다르게 제어하는 환기 방법이 제안되기도 하였다. Kim et al.은 노후화됨에 따라 기밀성능이 떨어지는 교실과 대형강의실을 대상으로 성가심(annoyance)을 최소화할 수 있는 환기 운영 방안에 대해 검토하였다⁽¹¹⁾. 공기청정기와 환기설비 소음레벨을 45 dBA로 고정하고 수업 시간과 쉬는 시간에 각기 다른 풍량 조건을 제시하여

그에 따른 PM2.5와 CO₂ 농도를 분석하였다^(11,12). Kim et al.은 환기장치 소음레벨을 43.3 dBA에서 51.1 dBA로 유지하고 환기량 기준을 만족하기 위한 제어 알고리즘을 제안하였고⁽¹³⁾, 이를 적용하였을 때 시뮬레이션과 실제 강의실의 CO₂ 농도 변화를 비교 분석하였다.

앞선 언급된 바와 같이 설비소음의 음성 명료도 평가 연구들은 개별 설비기기, 특히 에어컨의 운영조건에 대한 검토가 주를 이루었으며, 소음의 특성이 다른 2개 이상의 설비기기 운영조건에 따른 음성 명료도 평가 연구의 필요성은 여전히 존재한다. 공기청정기의 경우 환기량 평가 이외에 설비 소음에 대한 음향적 평가 연구는 비교적 제한적으로 수행되었다. 최근 학습공간에서는 주로 에어컨과 공기청정기를 동시에 사용하는 경우가 많으며, 설비기기의 실제 사용 환경에서 이용자들도 하여금 소음레벨에 대한 구체적인 직관적인 조정이 어려울 수 있음을 고려할 필요가 있다. 따라서 음성 명료도 확보를 위한 최소 설비 소음레벨을 포함하여 설비기기 운영 방법에 대한 전반적인 검토가 필요하다. 이때, 음성 명료도 평가는 학습공간 내 모든 위치의 청취자에게 최선의 음환경을 보장할 수 있는 방안을 검토할 필요가 있다. 따라서 공간 전체에 대한 단일 평가지표 외에도 모든 수음 위치에 대한 면밀한 평가가 함께 수행되어야 한다.

이 연구에서는 에어컨과 공기청정기가 실제 사용되는 학습공간 내에서 발생하는 설비소음을 평가하고 설비기기 운영조건에 따른 음성 명료도를 분석하고자 한다. 이를 위해 표준 교실 규격과 유사한 조건의 대학 강의실을 선정하고 에어컨과 공기청정기 운영조건에 대한 범위를 설정하여 적정 음성 명료도 확보를 위한 설비기기 운영 방법을 검토하였다.

2. 측정 방법

2.1 측정 개요

(1) 실험대상 공간

실내음환경 및 설비소음 측정 실험은 서울시립대학교 내 1개 강의실을 대상으로 진행하였으며 Fig. 1을 통해 강의실 규격을 나타내었다. 강의실 내 설치된 설비기기 규격은 Table 1에 제시하였다.

실험대상 공간 선정 조건은 총 3가지로 설정하고 이를 모두 만족하는 공간을 선정하였다. 첫째로, 국내

표준 교실 규격과 유사한 공간이어야 한다. 둘째로, 강의실에 설치된 설비기기로는 냉난방, 청정, 환기 등이 있으며, 이 연구에서는 냉방과 청정을 연구 범위로 한정하여 에어컨과 공기청정기 운영조건을 조정하였다. 이에 따라 실내 에어컨과 공기청정기가 설치된 공간을 선정하였다. 마지막으로 건축음향해석 시뮬레이션 진행 시 오차 최소화를 위해 설계 도면 확보가 가능해야 한다.

선정된 실험대상 공간은 가로 8 m, 세로 10.3 m, 층고 2.7 m, 체적 222 m³의 장방형 강의실이다. 수용 인원은 70명에 해당한다. 국내 교실 표준 규격은 가로 8.5 m, 세로 7.3 m, 층고 2.7 m이며⁽¹⁴⁾, 이와 가장 유사한 규격의 공간으로 선정하였다. 강의실 내에는 창측 후면벽 모서리에 스탠드형 에어컨 1대와 스탠드형 공기청정기 1대가 설치되어 있다.

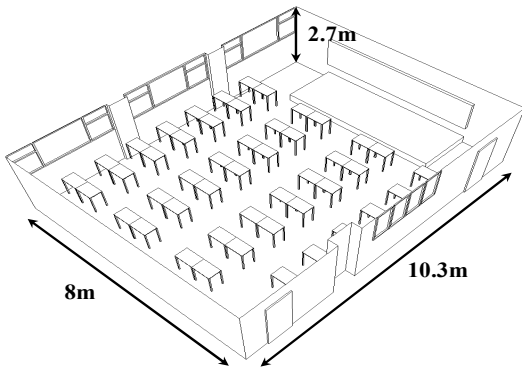


Fig. 1 3D shape and dimensions of the classroom

Table 1 Specifications of air conditioner and air purifier

Equipment	Specifications	Value
Air conditioner (cooling only)	Type	Floor standing
	Dimensions (W × H × D) [mm]	610 × 1850 × 400
	Cooling capacity (min/rated/max) [kW]	3.8/14.5/16.2
	Airflow rate (min/mid/max) [m ³ /min]	27/30/35
Air purifier	Type	Floor standing
	Dimensions (W × H × D) [mm]	490 × 1700 × 294
	Power consumption (max/avg) [W]	120/80
	Using area [m ²]	165 (1774 ft ²)

2.2 측정방법

(1) 강의실 음향성능 측정

Fig. 2의 S1은 음원, R1 ~ R9는 현장측정과 시뮬레이션에 적용된 수음점을 나타내며 현장측정 시 중양을 포함한 총 5개 지점(R1, R3, R5, R7, R9)에서 측정을 진행하였다. 측정 장비 제원은 Table 2에 나타내었다.

현장측정에서는 실험대상 공간을 3차원 해석 모델에 구현하기 위해 강의실 음환경에 대한 물리적 음향인자를 측정하였으며, ISO 3382에 의거하여 강의실 잔향시간, 음성전달지수(STI; speech transmission index), 배경소음레벨을 포함한 음향성능을 측정 및 평가하였다. 음원은 강의실 전면에 놓인 강단 중심에 높이 1.5 m로 무지향성 스피커 1대를 통해 출력하였다. 수음점에는 총 5대 마이크를 설치하였고, 재실자가 의자에 착석하였을 때 귀 높이를 기준으로 높이 1.2 m로 설정하였다. 측정과 동시에 무지향성 스피커로부터 방

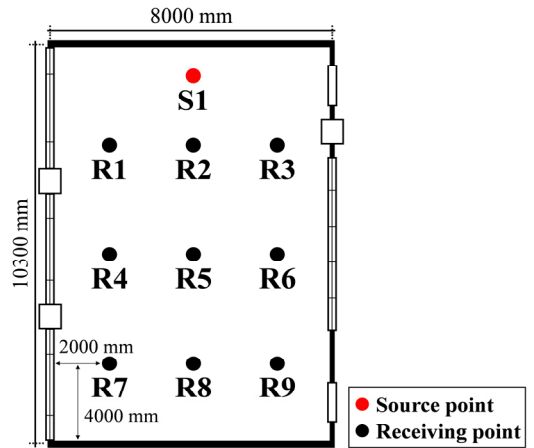


Fig. 2 Source and receiving points on floor plan of the classroom

Table 2 Measurement and analysis equipment

Equipment	Model(company)
Sound level meter	NA-28(Rion)
Microphone	UC-59(Rion)
Omnidirectional sound source	SL103AC-DC(LookLine)
Analyzer	H/W : 01 dB dB4(ACOEM) (4 ch. sound and vibration analyzer) S/W : Dirac 3.0(B&K)

사된 음원을 51 200 Hz의 샘플링 주파수로 레코딩하였다. 레코딩된 wav 형식의 음원은 01 dB dB4 (ACOEM)와 Dirac(B&K)을 활용하여 잔향시간, 음성 명료도, 음성전달지수에 대한 결과로 산출 및 평가하였다.

강의실의 배경소음레벨 측정 시에는 5개 수음점에 정밀 소음계를 설치하여 진행하였다. 이때 설비기기를 모두 가동하지 않고, 모든 창과 문을 닫아 외부 소음을 차단한 상태에서 5분간 3회 반복하여 측정하였다. 배경소음레벨 평가는 측정회차별 결과를 산술평균한 뒤 주파수대역별 소음레벨과 NC 값을 분석하였다.

(2) 설비소음레벨 측정

Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 설비소음레벨 측정 모습을 나타내며, 측정은 두 가지로 나누어 진행하였다. 측정은 모두 5분간 3회 반복하여 진행하였다. 설비기기 블레이드 각도는 정면으로 고정하였으며, 설비기기 각각 ‘강’에서 ‘약’으로 풍량 모드를 조절하며 최대 및 최소 소음을 발생시켰다.

Fig. 3(a)는 각 설비기기 패널의 중앙으로부터 1.5 m 이격하여 1대의 정밀 소음계를 설치하고 풍량 조절에 따른 최대 소음레벨과 최소 소음레벨을 측정하는 것이다^(8,15). Fig. 3(b)는 강의실 음향성능 측정과 동일한 5개 수음점에 정밀 소음계를 설치하여 설비기기 풍량 조절에 따라 강의실 내에 분포되는 최대 및 최소 소음레벨을 측정하였다.

2.3 측정결과

(1) 강의실 음향성능

Table 3을 통해 실내음향성능과 배경소음레벨 측정결과를 나타내었다. 잔향시간(T_{30})은 비재실 시 500 Hz와 1 kHz의 평균값을 기준으로 1.36초이며, 음성전달지수(STI) 0.47로 ‘fair’ 등급이 확보되었다. 강의실 배경소음레벨은 26.9 dBA이며, NC20으로 자체적으로 정온한 공간으로 판단된다.

(2) 설비소음레벨

Table 4는 두 가지 측정방법에 대한 주파수대역별 설비소음의 최대 및 최소값을 나타낸다. 이는 개별 설비기기 패널 중앙으로부터 1.5 m 이격하여 측정한 설비소음(이하 직접소음레벨, direct noise level)과 중앙을 포함한 총 5개 수음점에서 측정한 설비소음레벨

(이하 분포소음레벨, distributed noise level)로 나뉜다.

에어컨의 직접소음레벨은 풍량을 ‘약’ 모드일 때 최소 46.0 dBA에서, ‘강’ 모드일 때 최대 53.1 dBA의 소음레벨이 발생하였다. 이 연구와 유사한 실험공간에서



(a) Measurement 1.5 m apart from equipment (left one is air purifier, right one is air conditioner)



(b) Measurement throughout the classroom

Fig. 3 Measurement of noise levels produced by air conditioner and air purifier

Table 3 Measured acoustic parameters of the classroom

Acoustic parameter	Octaveband center frequency [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
RT (T_{30}) [s]	1.30	1.24	1.33	1.39	1.44	1.35
EDT [s]	1.43	1.38	1.59	1.56	1.62	1.57
D50 [%]	34	35	31	30	27	28
Background noise level [dBA]	15.4	19.0	20.5	19.7	20.1	15.4
STI	0.47					

의 에어컨 소음레벨 스펙트럼은 40 dBA에서 68 dBA 였으며⁽⁸⁻¹⁰⁾, 측정결과가 해당 범위 내에 있음을 확인 하였다. 공기청정기의 경우 최소 46.4 dBA에서 최대 51.4 dBA의 소음레벨이 발생하였다. 두 설비기기 소 음 모두 시간에 따른 음압레벨이 정상소음의 특성을 띠며 일정하게 유지되었다. 두 기기 간 소음레벨 차 이는 크지 않으나, 에어컨의 최대 및 최소 소음레벨 편차가 좀 더 큰 것을 확인하였다. 분포소음레벨의 경우, 에어컨은 풍량 조절에 따라 최소 41.9 dBA에서 최대 49.7 dBA로 발생하였으며, 직접소음레벨 대비 강의실로 전파됨에 따라 소음레벨이 감소하였다. 공 기청정기의 분포소음레벨은 46.5 dBA에서 51.0 dBA 로 에어컨보다 좀 더 높은 소음 분포를 보였으며, 에 어컨과 달리 강의실로 전파됨에 따른 레벨 감쇠가 크 게 나타나지 않았다.

3. 건축음향 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 개요

강의실 음성 명료도에 대한 에어컨과 공기청정기 운영조건 및 소음의 영향을 분석하고자 실험대상 공 간의 규격과 측정된 음향성능을 토대로 3D 모델을 구 현하고 건축음향 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이 션은 ODEON 14 combined를 사용하여 수행하였다. 마감 재료는 실험대상 공간의 도면에 표기된 재료를 ODEON 라이브러리와 기존 문헌에서 찾아 Table 5와 같이 입력하였다⁽¹⁶⁾. 시뮬레이션 진행 시 음원과 수음 점 위치는 Fig. 2에 제시하였다. 음원은 실제 강의 상 황에서 강의자 음성이 지향성을 갖는 음원으로 발생

한다는 점을 고려하여 ODEON 라이브러리에 제공된 ISO 3382 음원을 적용하였다. 음원 출력레벨은 일반 적인 강의자 음성레벨로 57.6 dBA(61.0 dB)를 입력하 였다. 강의자 음성레벨은 강의자의 성별 및 연령, 실 의 잔향시간과 재실 조건 등에 따라 달라질 수 있으 며, 이를 고려하여 음성 명료도에 대한 설비기기 소 음의 영향을 보수적으로 평가할 수 있도록 강의자 음 성레벨을 선정하였다⁽¹⁷⁻¹⁹⁾. 수음점 조건은 분석 정밀 도 향상을 위해 현장실험 시 사용된 5개 수음점을 포 함하여 총 9개 수음점으로 세분화하였다. 수음점 개 수를 제외한 음원 및 수음점 설정은 현장측정 조건과 일치시켰다. 시뮬레이션 설정값(room setup) 중 사용 음선수는 100 000으로 설정하였다.

3.2 설비기기 운영조건 설정

강의실 음성 명료도에 대한 설비기기 운영조건을 총 네가지로 제한하여 조건별 음성 명료도 변화를 분 석하였다. 설비기기 운영조건은 강의실 잔향시간, 설 비소음레벨, 신호대잡음비(SNR; signal to noise ratio), 설비기기 위치이다. 시뮬레이션 진행 시 설정 된 네가지 조건 외의 공간 내 음성전달성능에 영향을 미치는 요인을 배제하고자 모든 시뮬레이션에 대한 모델링 조건 및 구체성 정도, 재료 흡음률, 사용음선 수를 동일하게 적용하였다. 분석 기준이 되는 음향지 표는 강의실을 포함한 다양한 공간에서 발생하는 음 성에 대한 명료도 분석에 주로 사용되며 음성 명료도 와의 상관성이 검증된 STI를 사용하였다^(20,21). STI는 125 Hz에서 8000 Hz의 7개 옥타브대역과 0.63 Hz에 서 12.5 Hz의 14개 변조 주파수를 사용하며 변조파의

Table 4 Noise level of air conditioner and air purifier measured by airflow adjustment

Measurement method	Equipment		Noise level [dBA]								
			Octaveband center frequency [Hz]								
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Total
Direct noise level (1.5 m apart)	Air conditioner	Max	30.8	43.1	44.9	46.3	47.1	46.8	40.6	26.9	53.1
		Min	22.0	34.7	39.1	39.4	40.2	39.2	30.9	17.6	46.0
	Air purifier	Max	29.1	40.1	41.1	43.7	47.5	44.6	38.2	28.1	51.4
		Min	24.1	37.0	35.5	38.8	42.9	38.2	30.1	19.9	46.4
Distributed noise level (throughout classroom)	Air conditioner	Max	25.3	38.7	40.8	43.7	43.9	43.2	37.0	23.5	49.7
		Min	18.4	31.0	34.0	36.3	35.8	34.3	27.1	17.1	41.9
	Air purifier	Max	25.6	48.0	37.1	40.9	44.1	41.8	35.2	24.1	51.0
		Min	20.7	44.7	31.2	34.6	38.5	35.3	27.3	17.3	46.5

저하를 측정하고 변조 전달 함수(MTF; modulation transfer function)를 통해 명료도의 손실을 표현한다⁽²²⁾. STI 평가 기준은 0.75 이상일 때 ‘excellent’, 0.60 ~ 0.75일 때 ‘good’, 0.45 ~ 0.60일 때 ‘fair’, 0.30 ~ 0.45일 때 ‘poor’, 0.30 미만일 때 ‘bad’로 나뉜다⁽²⁰⁾. 이 연구에서는 적정 음성 명료도에 대한 평가기준을 ‘fair’ 등급으로 설정하였다.

(1) 설비기기 운영조건 1(강의실 잔향시간)

첫 번째 조건은 강의실 잔향시간으로, 이 연구에서는 두 가지 잔향시간 조건에 따른 음성 명료도 변화를 분석하였다. 첫 번째 잔향시간은 실험대상 공간 실측 잔향시간이며 500 Hz와 1 kHz의 평균 기준 1.36 초이다. 두 번째 잔향시간은 국외 관련 음향성능 기준과 국내 기존 연구를 참고하여 실험대상 공간과 유사한 체적 및 용도의 공간에서 권장되는 잔향시간으로 설정하였다.

영국은 학교 내 공간별 용도, 연령층, 신축 및 리모델링 여부 등에 따른 권장 잔향시간 기준을 제안하고 있다⁽²³⁾. 특히 primary school(refurbishment)과 secondary school(new build)의 학습공간에 대하여 35 dBA

이하의 배경소음레벨과 0.8초 이하의 잔향시간을 최소 허용기준으로 규제하고 있다⁽²³⁾. 이때 잔향시간은 비재실 시 중주파수대역(500 Hz, 1 kHz, 2 kHz)에서의 산술 평균값인 T_{mf} 를 의미한다. 미국에서는 이 연구의 실험대상 공간과 유사한 체적 283 m³ 이하의 학습공간에 대하여 영국과 동일한 35 dBA 이하의 배경소음과 0.6초 이하의 잔향시간을 최소 성능 기준으로 제한하고 있다⁽²⁴⁾. 국내 연구에서는 5단계 잔향시간 조건에 대한 청감실험을 통해 체적 220 m³ 이하 교실의 이상적인 음향성능 기준으로 35 dBA 이하의 배경소음과 0.8초 이하의 잔향시간을 제시하였다^(14,25).

이러한 국외 기준과 기존 연구를 참고하여 두 번째 잔향시간인 교실의 권장 잔향시간을 0.8초로 설정하였고 실측된 잔향시간보다 감소하였을 때 음성 명료도 변화를 분석하고자 하였다. 잔향시간 0.8초 해석 모델 구성을 위해 Table 5와 같이 강의실 벽체 4면 중 창, 문, 칠판, 기둥을 제외한 부위에 콘크리트 대신 추가 흡음재가 설치된 조건을 가정하여, 주파수대역별 흡음률을 적용하였다. 이후, 두 개 잔향시간에서 설비기기를 모두 가동하지 않은 강의실 배경소음레벨, 에어컨과 공기청정기 각각의 최대 및 최소 분포

Table 5 Sound absorption coefficient of interior finishing materials in classroom used in simulation

Building element	Interior finishing material	Sound absorption coefficient						
		Octaveband center frequency [Hz]						
		125	250	500	1000	2000	4000	
Wall	Front	Concrete	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
		Blackboard	0.24	0.2	0.18	0.18	0.18	0.21
		Perforated acoustic panel ^{a)} ^{b)}	0.27	0.30	0.25	0.26	0.23	0.28
	Left	Concrete	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
		Window	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
		Perforated acoustic panel ^{a)} ^{b)}	0.27	0.30	0.25	0.26	0.23	0.28
	Right	Concrete	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
		Window	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
		Door	0.29	0.26	0.13	0.08	0.07	0.07
		Perforated acoustic panel ^{a)} ^{b)}	0.27	0.30	0.25	0.26	0.23	0.28
	Rear	Concrete	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
		Perforated acoustic panel ^{a)} ^{b)}	0.27	0.30	0.25	0.26	0.23	0.28
Column	Concrete	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	
Ceiling	Sound absorbing tex ^{b)}	0.28	0.28	0.24	0.22	0.21	0.15	
Floor	Deco-tile	0.02	0.04	0.05	0.05	0.01	0.05	

a): Perforated acoustic panel was applied in place of the ‘concrete’ material in the simulation RT 0.8 s model.
 b): Followed by Kim with minor modification of sound absorption coefficient

소음레벨, 총 5가지 배경소음조건에 대한 시뮬레이션을 진행하였다.

(2) 설비기기 운영조건 2(설비소음레벨)

두 번째 조건은 설비기기 사용으로 인해 발생하는 소음레벨이다. 강의자 음성레벨은 고정하고, 설비기기 풍량 조절을 통해 변화하는 설비소음레벨에 대한 음성 명료도를 분석하였다. 실험대상 공간에 설치된 에어컨과 공기청정기는 모두 스탠드형이며 강의실 창측 후면벽 모서리에 고정되어 설치되었다. 따라서 수음 위치에 따라 설비소음레벨이 달라질 수 있다. 이러한 점을 고려하여 강의실 수음 위치별로 에너지 평균한 분포소음레벨을 주파수대역별 배경소음으로 입력하여 시뮬레이션을 진행하였다. Table 4에 제시된 에어컨과 공기청정기 각각의 주파수대역별 소음레벨을 '최소값 -15 dBA'를 기준으로 5 dBA씩 증가하여 '최대값 +5 dBA'까지 변화하였다. 이에 따른 설비소음레벨 범위는 에어컨의 경우 최소 26.9 dBA에서 최대 54.7 dBA이며, 공기청정기는 31.5 dBA에서 56.0 dBA이다.

(3) 설비기기 운영조건 3(신호대잡음비)

세 번째 조건은 신호대잡음비이다. 신호대잡음비는 신호음과 소음의 음압레벨차를 의미하며, 강의자를 통해 발생한 신호음이 교실 내 재실자들에게 전달되는 과정에서 소음으로 인한 명료도의 저해 정도를 평가한다. 설비기기 사용으로 인해 소음레벨이 증가하고 음성 명료도가 저해됨에도 불구하고, 기존 강의실에 설치된 설비소음레벨에 대한 정밀하고 직접적인 조절이 현실적으로 어려울 수 있다. 이때 소음레벨에 대한 조정 외에 신호음의 음압레벨을 증가시켜 음성 명료도를 확보하는 전략을 사용할 수 있다. 이에 따라 설비기기 최대 분포소음레벨(공기청정기, 51.0 dBA)을 기준으로 신호대잡음비가 '-5 dBA(46.0 dBA)'에서 '+20 dBA(71.0 dBA)'까지 되도록 강의자 음성레벨을 조정하였으며 적정 음성 명료도 확보를 위한 신호음의 최소 음압레벨을 제시하였다. 이에 따른 강의자 음성레벨 조정 범위는 최소 46.0 dBA에서 최대 71.0 dBA이다.

(4) 설비기기 운영조건 4(설비기기 위치)

네 번째 조건은 설비기기 위치로, 설비기기 1대와 2대 위치 조합의 영향을 검토하였다. 설비기기 위치

는 강의실 앞, 뒤, 천장 중앙의 총 세가지 조건으로 설정하였다. 강의실 앞과 뒤에 배치할 경우, 창측 전면벽과 후면벽 모서리에서 맞은편 모서리를 지향하도록 하였으며, 천장은 실 중앙에 배치하였다. 이러한 위치는 강의실 출입구와 재실자 이동 동선, 토출 공기 순환 효율 등을 고려하여 선정하였다. 설비소음 발생 높이는 바닥면에서 기기 패널의 중앙까지 높이인 1.6 m로 설정하였다. 지향성은 두 기기 모두 전면을 향하여 반구 형태인 'semi directional'로 적용하여 실제 설비기기 소음 발생 지향 특성과 유사한 조건을 설정하고자 하였다. 소음레벨의 경우 앞선 운영조건들과 달리 설비기기 위치를 특정하여 입력하기 때문에 분포소음레벨이 아닌 직접소음레벨을 적용하였다. 설비기기 1대 위치를 검토할 때 에어컨은 최소 직접소음레벨, 공기청정기는 최대 직접소음레벨로 적용하였다. 설비기기 2대 위치를 조합할 경우, 총 6개 위치 조합을 검토하였다. 공기청정기는 일반적으로 천장 매립형이 아닌 스탠드형이 사용됨을 고려하여, 공기청정기를 강의실 앞과 뒤에 배치하는 두가지 위치 조건과 에어컨을 강의실 앞, 뒤, 천장 중앙에 배치하는 세가지 위치 조건을 조합한 것이다. 설비소음레벨은 두 기기 모두 최대 직접소음레벨을 입력하여 가장 열악한 소음 조건에서 음성 명료도에 대한 영향을 분석하고자 하였다.

진행 순서는 먼저 설비기기를 음원으로 설정하고 개수, 배치 위치, 지향성, 소음레벨을 입력하여 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 통해 A-보정치가 적용되지 않은 dB 단위로, 설비기기로부터 개별 수음점에 도달하는 음압레벨(SPL [dB])을 산출하였다. 이를 개별 수음점에 대한 주파수대역별 배경소음으로 입력하여 수음점별 시뮬레이션을 진행하였다. 이후 수음점별 설비소음에 대한 음압레벨과 강의자 음성에 대한 명료도를 평가하였다.

3.3 해석 모델 검증

음성 명료도에 대한 네가지 운영조건의 영향을 검토하기 위해서 해석 모델의 음향지표별 신뢰성 검증이 필요하다. 이를 위해 음향지표별 허용 오차율을 만족함으로써 해석 모델 검증을 수행하였다. 음성 명료도 영향 요인은 세가지로, 잔향시간, 배경소음레벨, 음압레벨이 있다. 그중 잔향시간과 음압레벨에 대한 최소인지한계(JND; just noticeable difference)를 만

축하고자 하였다. Fig. 4(a)를 통해 현장측정과 3D 해석 모델상 구현된 주파수대역별 잔향시간을 비교하였으며, Fig. 4(b)는 수음점 R7에서의 에어컨 소음레벨에 대한 음압레벨을 비교하였다. 실측된 잔향시간은 1.36초(unoccupied, 500 Hz & 1 kHz)였으며 에어컨 소음에 대한 수음점 R7에서의 음압레벨은 500 Hz에서 39.5 dB로 나타났다. 따라서 시행 착오법을 통한 해석 모델 칼리브레이션을 통해 동일한 산출 조건에서 해석 모델의 잔향시간은 1.36초, 오차율은 0.01%로 권장 JND를 만족하도록 하였다⁽²⁶⁾. 음압레벨은 500 Hz 기준 40.7 dB로 현장측정 결과와 1.2 dB 차이를 보였다. 이는 권장 JND인 1 dB보다 0.2 dB 높으나⁽²⁷⁾, 시뮬레이션에서 에어컨 위치에 설비기로부터 1.5 m

이격하여 측정된 직접소음레벨을 입력하였기 때문에 거리감쇠를 감안하였을 때 허용 가능한 오차범위로 판단하였다.

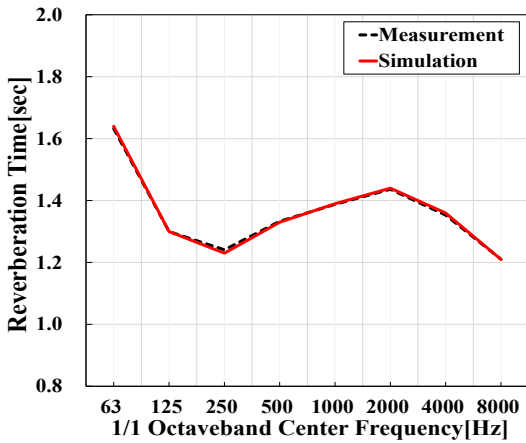
4. 강의실 설비기기 운영조건에 따른 음성 명료도 평가

4.1 강의실의 잔향시간

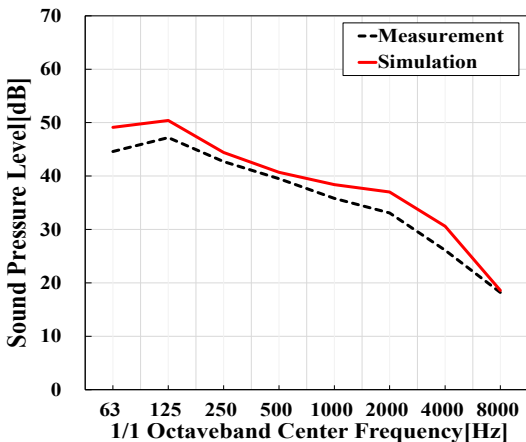
Table 6을 통해 강의실 권장 잔향시간 0.8초와 실험대상 공간 실측 잔향시간 1.36초의 두 가지 잔향시간 조건에 대한 음성 명료도 분석 결과를 나타내었다. Fig. 5를 통해서서는 수음점 9개의 음성 명료도 결과를 비교 분석하였다.

설비기기를 가동하지 않았을 때 1.36초의 잔향시간에서 STI는 0.52로 나타났다. 반면, 잔향시간이 0.8초로 감소함에 따라 STI는 0.61로 증가하였으며, 평가 등급 역시 ‘fair’에서 ‘good’으로 한 단계 상승하였다. 하지만 설비기기를 가동함에 따라 배경소음레벨이 증가하면 잔향시간 및 설비소음레벨에 관계없이 적정 음성 명료도(STI ‘fair’)를 확보하기 어려웠다. 주파수대역별 에어컨 최소 분포소음레벨을 적용하였을 때, 실측 잔향시간 조건에서 STI는 0.39로 ‘poor’ 등급으로 나타났으며, 잔향시간이 감소함에 따라 0.41로 값이 증가하였으나 STI 등급은 동일하게 유지됨을 확인할 수 있었다. 이는 공기청정기 최소 분포소음레벨에 대해서도 동일하게 나타났다. 또한 에어컨과 공기청정기 최대 분포소음레벨 조건에 대하여 실측 잔향시간보다 권장 잔향시간에서 STI 값이 더 낮아지는 결과도 발생하여, 경우에 따라 잔향시간과 음성 명료도의 경향성이나 비례관계를 찾기 어려웠다.

이를 통해 일정 수준 이상으로 배경소음레벨이 증가하면 잔향시간이 감소하더라도 반드시 음성 명료도가 향상되지 않음을 확인하였다. 또한 짧은 잔향시간



(a) Reverberation time



(b) Sound pressure level

Fig. 4 Comparison between measurement and simulation results

Table 6 STI according to the noise level of air conditioner and air purifier in two different RT

Noise level		Turn off	Air conditioner		Air purifier	
			Max	Min	Max	Min
RT 1.36 s	Mean	0.52	0.22	0.39	0.25	0.37
	Quality	Fair	Bad	Poor	Bad	Poor
RT 0.8 s	Mean	0.61	0.20	0.41	0.24	0.39
	Quality	Good	Bad	Poor	Bad	Poor

보다 설비기 소음을 고려한 낮은 배경소음레벨 확보가 선행되는 것이 음성 명료도 확보에 유리할 것으로 판단하였다. 따라서 실험대상 공간의 잔향시간 조건에서 적정 음성 명료도 확보를 위해 필요한 최소 설비소음레벨을 확인할 필요가 있다.

4.2 설비소음레벨

Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 에어컨과 공기청정기 소음레벨에 따른 STI 결과이며, 설비소음레벨 증가에 따른 음성 명료도 감소를 확인할 수 있다. 두 기기 모두 최소 분포소음레벨일 때에도 STI는 각각 0.39, 0.37로 ‘bad’ 등급이 확보되었다. 또한 최대 분포소음레벨 발생 시 STI는 에어컨이 0.22, 공기청정기가 0.25로 감소하였으며, ‘poor’ 등급까지 음성 명료도가 낮아짐을 확인하였다. 공기청정기의 경우 에어컨보다 큰 분

포소음레벨을 발생시키지만 STI 결과는 유사한 경향과 값을 나타내었다. 결과적으로 강의자 음성에 대한 적정 음성 명료도 확보를 위해 에어컨은 최소 36.8 dBA, 공기청정기는 36.5 dBA 이하로 낮아져야 함을 확인하였다.

하지만 실제 강의실에 설치된 설비기 소음레벨을 정밀하게 조정하는 것에는 현실적 어려움이 있을 수 있다. 이러한 경우, 강의자 음성레벨을 증가시켜 높은 신호대잡음비를 확보하는 전략을 통해 적정 음성 명료도를 구현할 수 있다.

4.3 신호대잡음비

Fig. 7은 설비기 최대 분포소음레벨을 기준으로 강의자 음성레벨을 조정하여 ‘-5 dBA’에서 ‘+20 dBA’까지의 신호대잡음비에 대한 음성 명료도 결과를 나

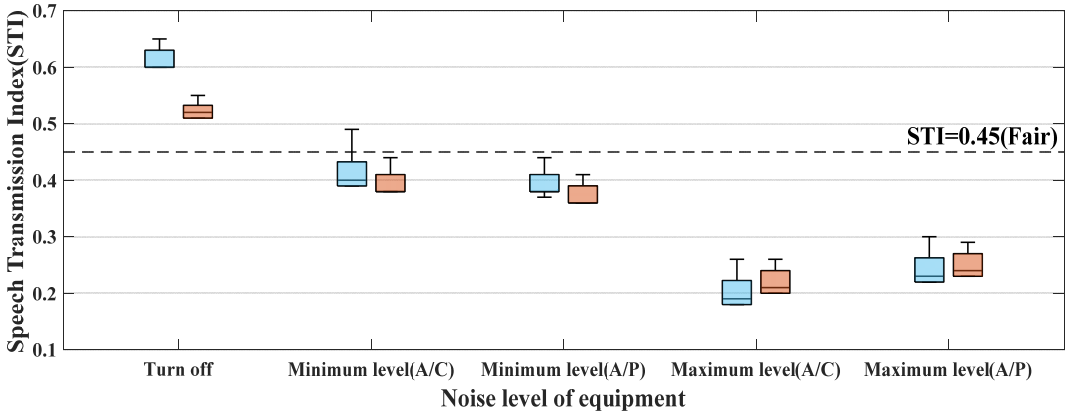


Fig. 5 Boxplot of STI at the receiving points according to the noise level of air conditioner and air purifier in two different RT

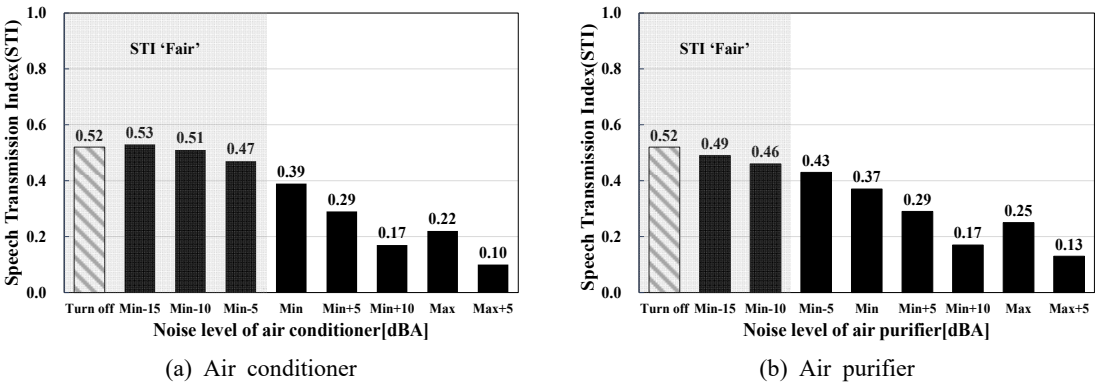


Fig. 6 STI according to the noise levels produced by air conditioner and air purifier

타낸다. 설비기기 최대 분포소음레벨은 51.0 dBA로 공기청정기의 최대값이다.

분석 결과, 강의자 음성레벨과 설비소음레벨이 같을 때 STI는 0.32였으며, 신호대잡음비가 증가할수록 STI 수치는 증가하였다. 결과적으로 이 연구의 대상 공간 및 설비기기 조건에 대하여 적정 음성 명료도 확보를 위한 최소 신호대잡음비는 10 dBA임을 확인하였다. 이는 51 dBA의 설비소음레벨보다 10 dBA 이상 큰 음성레벨이 확보되어야 함을 의미한다. 입력된 강의자 음성레벨이 57.6 dBA임을 고려하였을 때, 그 이상의 음압레벨 확보를 위해서는 더 높은 음성레벨이 필요하며 경우에 따라 마이크-스피커를 사용한 음성 보강 시스템의 추가사용이 필요할 것으로 판단된다.

학습환경에서는 주로 15 dBA 이상의 신호대잡음비를 권장하고 있다. ANSI S12.60의 학교 음향성능 기준 및 설계지침에서는 15 dBA 이상의 신호대잡음비를 확보함으로써 모든 학생과 교사의 음성에 대한 청각적 접근을 용이하게 하고자 하였다²⁴⁾. 또한 Houtgast는 도로교통소음을 포함한 다양한 배경소음조건에서 명료도 실험을 통해 신호대잡음비가 15 dBA 이상일 때 음성 명료도를 충족할 수 있음을 확인하였다²⁸⁾. Boothroyd는 이러한 신호대잡음비는 음성신호의 직접음과 실제 소음, 초기 및 후기 잔향음을 모두 고려하여 산출되어야 한다고 언급하였다²⁹⁾. 그러나 많은 연구를 통해 신호음과 소음의 종류 및 크기, 청취자 연령층 및 청각 특성, 사용 언어 등에 따라 요구되는 신호대잡음비 조건은 달라질 수 있으며, 그에 대한 연구 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다³⁰⁻³³⁾. 따라서 이 연구에서 권장되는 최소 신호대잡음비는 10 dBA로 나타났다

나, 강의자 음성레벨, 학생들의 연령 및 청각 특성, 사용 언어, 설비소음 이외 소음의 영향을 고려하였을 때 요구되는 신호대잡음비는 달라질 수 있다.

4.4 설비기기 위치

Fig. 8은 설비기기 1대를 기기 별로 강의실 앞, 뒤, 천장 중앙에 배치하였을 때 수음점에 도달되는 설비소음의 음압레벨을 나타낸다. Fig. 9는 에어컨과 공기청정기, 두 대의 설비기기 위치에 따른 결과이다. Fig. 10과 Table 7을 통해서 강의자 음성신호에 대한 수음점별 STI를 분석하였다. 이를 통해 설비 배치의 계획적 측면에서 강의실 내 전체 수음점에 대해 균일한 명료도 확보가 가능한 배치 위치를 분석하고자 하였다.

Fig. 8에서 에어컨의 경우, 수음점 9개의 평균 음압레벨(SPL_{avg})은 강의실 앞일 때 43.1 dB, 뒤일 때 44.4 dB, 천장 중앙일 때 45.0 dB로 나타나 강의실 앞에서 최소가 되었다. 공기청정기의 경우, 수음점별 평균 음압레벨은 강의실 앞일 때 49.0 dB, 뒤일 때 49.2 dB, 천장 중앙일 때 49.8 dB로 강의실 앞에서 최소로 나타났다. 또한 에어컨과 공기청정기 모두 설비기기와의 거리 증가에 따라 음압레벨이 감소하였다. 수음점 간 최대 편차는 에어컨의 경우 강의실 앞일 때 3.0 dB, 뒤일 때 4.0 dB, 천장 중앙일 때 2.5 dB로 천장 중앙에서 최소가 되었다. 공기청정기는 강의실 앞일 때 2.4 dB로 최소가 되었다. 수음점별 설비소음의 평균 음압레벨과 최대 편차를 고려하였을 때 설비기기 1대는 강의실 앞에 배치하는 것이 전체 수음점에 대한 균일한 음성 명료도 분포에 유리하다고 판단하였다.

Fig. 9에서 설비기기 2대 위치를 조합하여 총 6개 위치를 검토한 결과, 설비기기 1대를 배치하였을 때 대비 위치 변화에 따른 설비소음레벨 분포의 명확한 경향성을 찾기 어려웠다. 2대의 설비기기를 강의실 앞에 배치하였을 때 설비소음에 대한 수음점별 평균 음압레벨은 53.6 dB로 최소가 되었지만, 수음점별 소음레벨의 최대 편차는 에어컨을 앞, 공기청정기를 뒤에 둔 배치 방식에서 1.7 dB로 최소가 되었다.

다음으로 Fig. 10과 Table 7에서 설비기기 설치 위치에 대한 수음점별 음성 명료도를 평가한 결과, 에어컨 1대의 경우 모든 배치 위치에 대하여 'fair'로 동일한 STI 등급을 유지하였다. 하지만 동일한 소음레

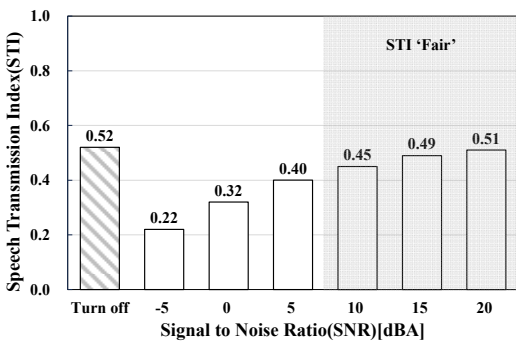


Fig. 7 STI according to SNR by changing speech level

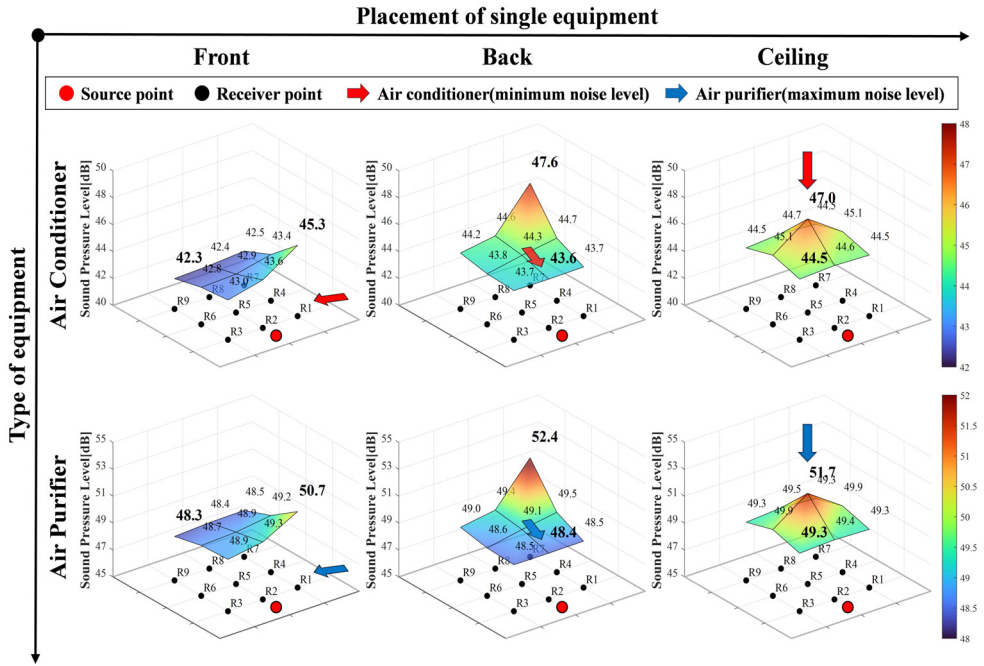


Fig. 8 Sound pressure level at each receiving point according to the placement of a single equipment(air conditioner/air purifier)

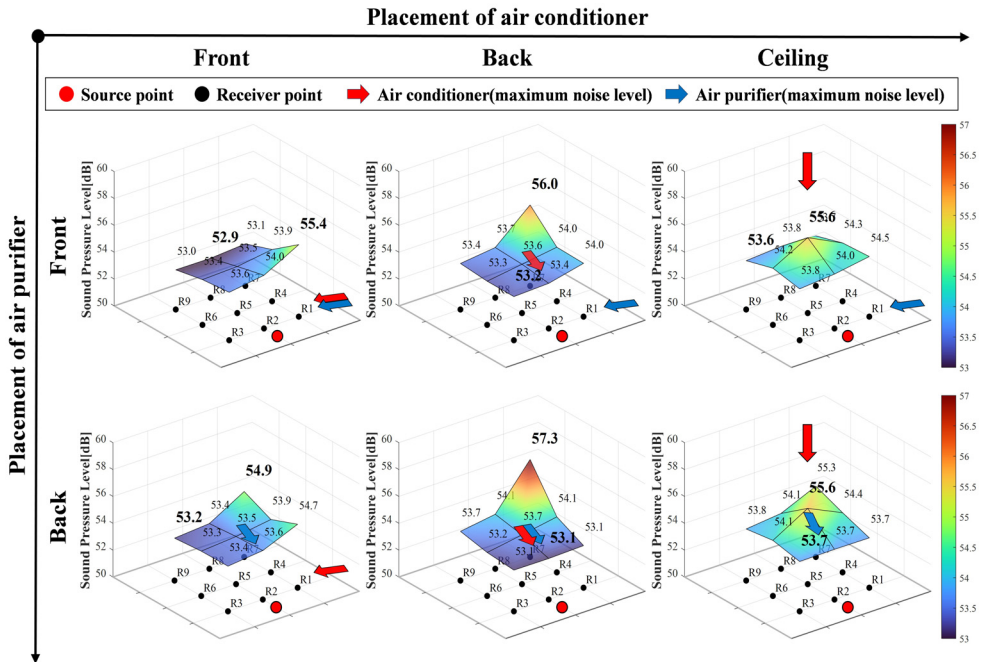


Fig. 9 Sound pressure level at each receiving point according to the placement of two equipment(one air conditioner and one air purifier)

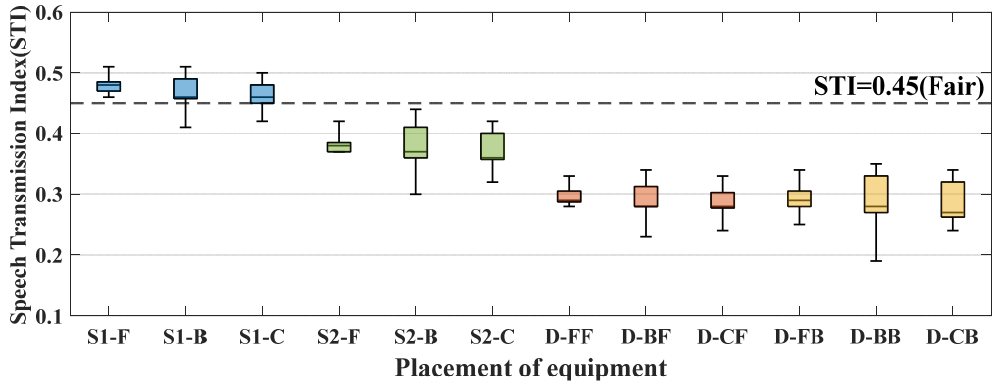


Fig. 10 Boxplot of STI at the receiving points according to the placement of equipment

Table 7 STI according to the placement of equipment

Case	Single equipment (air conditioner)			Single equipment (air purifier)			Combination of two equipment (air conditioner & air purifier)					
	S1-F	S1-B	S1-C	S2-F	S2-B	S2-C	D-FF	D-BF	D-CF	D-FB	D-BB	D-CB
Mean	0.48	0.47	0.46	0.38	0.38	0.37	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28
S.D.	0.015	0.027	0.022	0.016	0.038	0.029	0.016	0.030	0.024	0.024	0.045	0.034

*S: Single equipment, D: Two pieces of equipment, F: Front, B: Back, C: Ceiling
 ex) D-FB: Combination of two equipment - Front(air conditioner) and back(air purifier)
 *S.D. means standard deviation of sample data

벨 조건임에도 S1-F(앞)에서 음성 명료도의 표준편차가 최소가 됨을 확인하였다. S1-F에서 9개 수음점이 모두 STI ‘fair’를 만족한 반면, S1-B(뒤)와 S1-C(천장 중앙)에 배치하게 되면 일부 수음점에서 STI 등급이 ‘poor’로 낮아졌다. 공기청정기 1대 위치를 검토한 결과, 에어컨보다 소음레벨이 증가함에 따라 수음점별 음성 명료도의 절대값이 감소하였다. 하지만 에어컨과 동일하게 수음점별 평균 음성 명료도는 모든 배치 위치에 대하여 ‘poor’로 동일하였으며, S2-F(앞)에서 음성 명료도의 표준편차는 최소가 되었다. 종합하면 에어컨과 공기청정기 모두 1대 배치 시 강의실 앞에 배치하여 강의자와 가깝게 하는 것이 전체 수음점에 대해 균일한 음성 명료도 분포에 유리하다고 판단된다.

설비기기 2대 배치 시 6가지 위치 조합에 대한 수음점별 평균 음성 명료도는 0.28 ~ 0.30으로 0.02 이내의 차이를 보이며 일정하게 유지되었다. 하지만 음성 명료도 표준편차는 D-FF(2대 모두 앞)에서 최소로 감소하였고, D-BB(2대 모두 뒤)에서 표준편차는 약 3배 증가하였다. 따라서 전체 수음점에 대한 균일

한 음성 명료도를 제공하기 위해서는 설비기기 2대를 모두 강의실 앞쪽에 배치하는 것이 가장 유리하다고 판단된다. 만약 공간의 제약조건으로 인해 이러한 배치가 어려울 시 두 기기를 모두 강의실 뒤쪽에 배치하는 것은 지양해야 하며, 강의실 앞, 뒤, 천장 중앙에 분산 배치하는 것을 차선책으로 적용할 수 있다.

세 가지 위치조건에 대한 설비소음레벨은 모두 실험대상 공간의 스탠드형 설비기기 측정값이 적용되었다. 그러나 천장형, 스탠드형 등 설비기기 형태에 따라 공기 토출 및 소음 방사 특성이 상이할 수 있다⁽⁷⁻¹⁰⁾. 따라서 정확한 분석을 위해서 위치별로 측정된 설비소음레벨을 적용한 추가 해석이 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

이 연구에서는 에어컨 및 공기청정기가 설치된 강의실의 적정 음성 명료도를 확보하기 위한 방안을 검토하였으며, 주요 연구 결과는 아래와 같다.

(1) 강의실 권장 잔향시간과 실험대상 공간 실측 잔향시간에서 음성 명료도를 분석한 결과, 설비기기

가동 시 배경소음레벨이 증가함에 따라 잔향시간이 감소함에도 적정 음성 명료도를 확보하는데 어려움이 있었다. 따라서 적정 음성 명료도를 위해서는 잔향시간과 함께 낮은 배경소음레벨이 선행되어야 함을 확인하였다.

(2) 에어컨과 공기청정기의 설비소음레벨이 감소함에 따라 STI는 증가하였다. 에어컨과 공기청정기의 설비소음레벨을 각각 36.8 dBA, 36.5 dBA 이하로 제한하였을 때 적정 음성 명료도 확보가 가능한 것으로 분석되었다.

(3) 저소음 설비기기 확보에 현실적인 한계를 고려할 때, 강의자 음성레벨을 증가하여 음성 명료도를 향상시킬 수 있으며, 최대 설비소음레벨에 대한 적정 음성 명료도 확보를 위해 최소 10 dBA 이상의 신호대잡음비가 필요함을 확인하였다.

(4) 설비기기는 가능한 강의자가 위치한 강의실 앞쪽에 배치하는 것이 균일한 음성 명료도 분포에 유리하며, 앞쪽 배치에 어려움이 있는 경우 앞, 뒤, 천장 중앙에 1대씩 분산 배치하는 방식을 차선으로 선택할 수 있다.

이 연구에서는 전형적인 교실과 설비기기를 대상으로 검토한 연구 결과이나, 이외 다양한 규격의 공간 및 설비에 대한 추가 연구가 필요하다. 이때 설비기기 운영조건을 더욱 세분화하여 검토할 필요가 있다. 또한 실제 강의 중 재실 조건이나 교실 노후화 정도에 따라 설비소음레벨과 공간의 음환경이 달라질 수 있으며 이를 고려한 음성 명료도 분석이 필요할 것으로 사료된다.

References

- (1) Berglund, B., Lindvall, T. and Schwela, D. H., 1999, Guidelines for Community Noise, World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- (2) Wälinder, R., Gunnarsson, K., Runeson, R. and Smedje, G., 2007, Physiological and Psychological Stress Reactions in Relation to Classroom Noise, Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, Vol. 33, No. 4, pp. 260~266.
- (3) Mealings, K., 2022, A Scoping Review of the Effects of Classroom Acoustic Conditions on Primary School Children's Physical Health, Acoustics Australia, Vol. 50, No. 3, pp. 373~381.
- (4) Jeong, J.-H., 2018, Standardization of Room Acoustic Parameters and Guideline in Educational Facility, Journal of Standards, Certification and Safety, Vol. 8, No. 4, pp. 1~17.
- (5) Park, S.-W. and Song, D.-S., 2023, Investigation of Ventilation Installation, Usage and User Perceptions in School Classrooms, Magazine of the SAREK, Vol. 52, No. 3, pp. 42~47.
- (6) Han, B., Kim, S.-B., Lee, G., Hong, G.-J. Park, I.-Y. et al., 2020, Analysis on Applicability of Air Purifiers in Schools to Prevent the Spread of Airborne Infection of SARS-CoV-2, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 36, No. 6, pp. 832~840.
- (7) Jeon, J. Y., You, J. and Kim, S. Y., 2006, Evaluation of Sound Quality of Air-conditioning Noise, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 5, pp. 551~558.
- (8) You, J., Jeong, C.-I. and Jeon, J.-Y., 2008, Allowable Sound Pressure Levels of Ceiling Mounted Air-conditioning Sounds, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 679~682.
- (9) You, J., Kim, S.-Y. and Jeon, J.-Y., 2005, Evaluation of Speech Intelligibility in Classrooms with Air Conditioning Noise, Proceedings of the 60th Anniversary Conference on Architectural Institute of Korea, Vol. 25, No. 1, pp. 371~374.
- (10) Kang, J.-K., Song, G.-G., Park, H.-K., Lee, T.-K. and Kim, S.-W., 2010, Analysis of Air-conditioning Noise in Lecture Room in Terms of Speech Intelligibility Test, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 171~172.
- (11) Kim, H., Na, H. and Kim, T., 2022, Operation Method of Ventilation System for Old School Classrooms Considering Noise of Air Cleaner and Stand-type System, Proceedings of the KIEAE Annual Autumn Conference, Vol. 22, No. 2, pp. 102~103.
- (12) Kim, H., Na, H. and Kim, T., 2022, Evaluation of the Noise and Suggestion of the Ventilation System in Large Lecture Room, Proceedings of the KIEAE Annual Spring Conference, Vol. 22, No. 1, pp. 124~125.
- (13) Kim, S.-I., Park, S.-H., Jo, J.-H. and Kim, E.-J., 2020, Operating Method of Classroom Ventilators for Mitigating Operating Noise, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building

Systems, Vol. 14, No. 3, pp. 260~270.

(14) Haan, C. H. and Park, C. J., 2016, Establishment of the Acoustical Standard of the Korean Classrooms using Speech Intelligibility Test, Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics, ICA 2016-76, Buenos Aires, Argentina.

(15) Byun, W.-S., Choi, D. and Kim, J.-S., 2009, A Study on the Evaluation and Characteristics of Architectural Facility-equipment Noise in Building, Korea Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 21, No. 10, pp. 537~544.

(16) Kim, J.-S., 2012, Noise and Vibration Engineering, 3rd Edition, Sejinbook, Seoul, Korea.

(17) Sato, H., Sato, H., Morimoto, M. and Ota, R., 2007, Acceptable Range of Speech Level for Both Young and Aged Listeners in Reverberant and Quiet Sound Fields, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 122, No. 3, pp. 1616~1623.

(18) Choi, Y.-J., 2020, Measurements and Evaluations of Predictors for Speech Intelligibility using Speech and Noise Levels Measured during Lectures, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Vol. 14, No. 1, pp. 91~100.

(19) Lee, H.-J. and Sakamoto, S., 2015, Determination of Speech Levels of Japanese Talkers Focusing on Room Acoustic Conditions, Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings, pp. 5904~5913.

(20) British Standards Institution, 2011, Sound System Equipment - Part 16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index, British Standard Institution, BS EN 60268-16:2011, London, United Kingdom.

(21) Van Wijngaarden, S. J., Bronkhorst, A. W., Houtgast, T. and Steeneken, H. J. M., 2004, Using the Speech Transmission Index for Predicting Non-native Speech Intelligibility, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 115, No. 3, pp. 1281~1291.

(22) Letowski, T. R. and Scharine, A. A., 2017, Correlational Analysis of Speech Intelligibility Tests and Metrics for Speech Transmission, US Army Research Laboratory ARL-TR-8227, NY, United States.

(23) Department for Education and Skills, 2015, Acoustic Design of Schools, Building Bulletin 93, Department for

Education and Skills, London, United Kingdom.

(24) Acoustical Society of America, 2010, Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools, ANSI/ASA S12.60-2010/Part 1, Acoustical Society of America, NY, United States.

(25) Ryu, D.-J., Park, C.-J. and Haan, C.-H., 2016, Interior Surface Treatment Guidelines for Classrooms according to the Acoustical Performance Criteria, Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 35, No. 2, pp. 92~101.

(26) Bork, I., 2000, A Comparison of Room Simulation Software - The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation, Acta Acustica United with Acustica, Vol. 86, No. 6, pp. 943~956.

(27) Park, C.-J. and Haan, C.-H., 2011, Effects of the Complexity of 3D Modeling on the Acoustic Simulations and Auralized Sounds, Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 30, No. 1, pp. 22~32.

(28) Houtgast, T., 1981, The Effect of Ambient Noise on Speech Intelligibility in Classrooms, Applied Acoustics, Vol. 14, No. 1, pp. 15~25.

(29) Boothroyd, A., 2002, Room Acoustics and Speech Perception, Seminars in Hearing, Vol. 25, No. 2, pp. 155~166.

(30) Sato, H., Morimoto, M. and Ota, R., 2011, Acceptable Range of Speech Level in Noisy Sound Fields for Young Adults and Elderly Persons, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 130, No. 3, pp. 1411~1419.

(31) Park, C.-J., Lee, S.-M., Jo, A.-H. and Haan, C.-H., 2022, Influence of SNR on the Speech Perception of Incomplete Hearing People, Applied Acoustics, Vol. 201, 109091.

(32) Park, C.-J., Jo, S.-M. and Haan, C.-H., 2019, Influence of SNR Difference on the Korean Speech Intelligibility in Classrooms, Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 38, No. 6, pp. 651~660.

(33) Jo, A.-H., Park, C.-J. and Haan, C.-H., 2021, Investigation of the Acoustic Performance of Lower Grade Elementary School Classrooms, Journal of the Korean Institute of Educational Facilities, Vol. 28, No. 3, pp. 3~14.