

Research Paper

소음 발생원별 교사 내 실내 소음 예측기법 및 평가방법에 관한 연구

- 도로, 철도 소음을 중심으로 -

박원형**** · 윤성철** · 정재우***

한국토지주택공사*, 주식회사 이너턴스**, 경상국립대학교***

A Study on Indoor Noise Prediction Methods and Evaluation Techniques in Classrooms According to Noise Sources

- Focusing on Road and Railway Noise -

WonHyung Park**** · SoungCheol Yoon** · JaeWoo Chung***

Korea Land and Housing Corporation*
Inertance Inc.**
Gyeongsang National University***

요약: 교사 내 소음 영향을 미치는 소음은 도로 및 철도 소음을 포함하며, 각 음원의 음향 특성(주파수 대역별 음의 높낮이 등)에 따라 실외에서 실내로 전달된다. 본 연구에서는 실외 소음이 실내로 전파될 때 전달 특성의 주된 영향인자가 실내 흡음률과 창호 개구부 면적이라고 가정하였으며, 도로교통 소음을 대상으로 실외·실내 실측값과 시뮬레이션을 통한 예측값을 서로 비교하여 실내 전달 특성에 대한 예측기법의 적정성을 검토하였다. 실측 데이터와 예측 결과의 비교를 통해 면음원 모델이 점음원 모델 대비 탁월한 성능을 확인하였으며, 예측 오차가 평균 ± 1 dB(A) 이내로 분포하는 것으로 나타났다. 도로 및 철도 소음의 교사내 평균 전달계수가 -8.0, -8.2 dB(A)로 나타났으며, 두 소음원이 유사한 음향특성을 갖는 것에 기인한 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 향후 신설 학교 계획 시 환경영향평가 및 교육환경평가(기존학교 포함)에 활용될 수 있는 유용한 자료로 사용될 것으로 기대된다.

주요어: 환경영향평가, 교육환경평가, 신설학교, 도로교통소음, 철도소음, 교사 내 소음

Abstract: This study investigates the transmission characteristics of outdoor noise into indoor classroom environments, with a focus on road and railway noise. Since each noise source exhibits distinct acoustic properties-such as differences in frequency spectrum and sound pressure level-the propagation of sound from outdoor to indoor spaces varies accordingly. In this research assumes that the primary factors influencing indoor noise levels are the indoor sound absorption rate and the area of window and opening surfaces.

Using road traffic noise as the baseline, both field measurements and simulation-based predictions were conducted to evaluate the reliability of indoor noise transmission prediction methods. Results showed that the line source model demonstrated superior predictive performance compared to the point source model, with prediction errors remaining within ± 1 dB(A) on average. The average indoor transmission coefficients for road and railway noise were -8.0 and -8.2 dB(A), respectively, attributed to the similar acoustic characteristics of both sources.

The findings of this study provide a validated predictive framework that may serve as a useful reference for environmental impact assessments and educational environment evaluations(including existing schools) in the planning of new school facilities.

Keywords: Environmental Impact Assessment, Educational Environment Assessment, Newly-planned School, Road Traffic Noise, Railway Noise, Noise in the Classroom

I. 서론

학생들이 가장 많은 시간을 보내는 공간인 학교는 교육적 권리와 건강 측면에서 안정적이고 쾌적한 환경 조성이 필수적이다. 특히, 소음은 민감한 성장기에 있는 학생들의 학습 집중력에 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 지속적으로 노출될 경우에 신체적, 정신적 발달에도 해로운 결과를 초래할 수 있다(Diaco, 2014, Shield and Dockrell, 2008). 그러나 학생들의 통학 편의성 및 접근성을 우선적으로 고려하다 보면, 교육시설이 도로 인근에 위치하는 경우가 빈번하게 발생한다. 그 결과, 도로에서 발생하는 소음이 교실 내부까지 전달되어 안정적인 학습 환경의 조성을 어렵게 만드는 실정이다(Choi, 2005, Kim et al., 2002).

이를 해소하고 최소한의 교육환경을 보장하기 위해 환경영향평가와 교육환경평가 제도가 시행되고 있으며, 학교 신설 단계에서는 입지 여건을 바탕으로 주변 소음원이 교육시설에 미칠 영향을 사전에 평가하고 있다. 「학교보건법」에 따라 교실 내부 소음기준인 55 dB(A)를 충족하기 위한 적절한 소음 저감 방안 마련을 의무화하고 있다. 우리나라 환경부는 소음 관리 기준을 모두 실외 소음 중심으로 설정하고 있으며, 이로 인해 교실 내부 소음기준과는 괴리가 존재한다. 환경부 고시인 「소음지도의 작성방법」 역시 실외 소음 예측 방법만 규정하고 있을 뿐, 실내 소음의 예측에 대한 세부 기준은 부재한 실정이다.

학교 시설의 소음 영향 예측 및 개선방안에 관한 선

행연구는 교실 개방 창호를 통한 소음저감 효과 및 그 원인에 대한 분석이 수행되었으며, 입면설계 방법 등을 중심으로 연구되었다. 한국토지주택공사 토지주택 연구원은 입사각도 변화에 따른 개방 창호의 소음 저감 효과를 분석하기 위해 19개 학교 시설을 대상으로 4개 배치 형태로 분류하여 현장실험을 진행하였으며, 도로와 교실창호의 배치 유형에 따라 H(Hallway)타입 > V(Vertical)타입 > PV(Parallel-Vetical)타입 > P(Parallel)타입 순서로 소음 저감 효과가 발생하는 것으로 분석하였다. 또한, 4개의 주 영향요인(배치 형태, 개구부 면적 비율, 도로-외벽 이격거리, 실내 흡음 조건)을 설정하여 각 영향요인에 대한 소음도 영향 분석 후, 각 배치 유형별 설계변수 변화에 따른 간이 예측식을 제시하였다(Yang et al., 2018). 또한, 류다정 등은 청주시 내 2개 학교를 대상으로 실내·외 벽체의 차음성능 및 측로 전달 소음을 비교 분석하기 위하여 실내 5개소, 실외 1개소에 수음점을 설치하여 투과손실, 가중표준화 음압 레벨차, 음향감쇠계수, 신호대잡음비 등을 측정하여 폐쇄된 창호의 수에 따라 달라지는 차음성능, 건습식 벽체 간 투과 손실 값 차이, 복도 측 창호 개폐 여부에 따른 측로전달소음 차이 등을 분석하였으며 교실의 정온한 학습환경 조성을 위한 기준을 제시하기 위해 교실 내에 유입되는 다양한 경로를 조사하였다(Ryu et al. 2017).

김태우 외(2011)는 대구광역시 내의 초·중·고등학교를 대상으로 학교 주변의 도로분포 현황을 조사하고 학교건축물의 내·외부 환경 및 배치 등에 따라 주변도

로 분포가 학교건축물의 소음상태에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 학교 건축물의 배치형태를 폐쇄형, 분산형, 집합형으로 나누어 분류한 후, 가장 선호도가 높은 분산형을 대상으로 접하고 있는 도로면의 수에 따라 소음 분포를 해석하였고 실외소음도를 이용하여 학교건축물의 개구부 및 창호로 투과되어 유입되는 실내소음을 분석하였다. 교사내 실내 소음도 예측은 첫째, 실외 소음도의 결정, 둘째 창호의 음향투과손실(transmission loss) 값 결정, 셋째 실외소음도와 창호의 음향계수 값의 차이 산출, 넷째 실내 흡음력 보정, 다섯째 합성에 의해 실내소음도를 산출하였다(Kim et al., 2011).

박원형 외(2024)는 32개 학교, 총 55가지 유형의 실내·외 동시 측정 자료를 분석하여 도로교통소음에 대한 배치 유형별 보정치(평행 6.4 dB(A), 수직 6.9 dB(A), 혼합 6.5 dB(A))를 제안하고, 간단한 보정 절차만으로 교실 내 소음을 추정할 수 있는 방법을 제시하였다(Park et al., 2024). 다만 이 연구는 도로소음에 한정되고 주파수별 전달 특성을 충분히 반영하지 못했으며, 철도 등 복합 소음원에 대해서는 추가 검증이 필요하다는 한계를 남겼다.

본 연구에서는 기존 연구에서 미흡했던 환경영향평가 및 교육환경평가 단계에서 활용할 수 있는 소음원별 교사 내 소음 예측 기법을 검토하였다. 이를 위해 학교 설치 계획 단계에서 수행되는 평가 조건을 고려하여 도로 및 철도 등 소음 발생원별로 실외 소음이 실내로 전달될 때의 특성을 분석하고, 각 음원의 음향적 특성에 따라 교실 내부 소음을 정확하게 예측할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

II. 연구방법

교사 내 소음에 영향을 주는 주요 소음원은 도로교통과 철도교통 등으로 나눌 수 있으며, 각 소음원은 주파수 대역별 음의 높낮이(pitch)와 같은 음향적 특성에 따라 실외에서 실내로 전달된다. 한편 교사내 건축부재들은 각 주파수 대역에서 서로 다른 흡음능을 갖고 있으며, 외부 유입 소음의 흡음량이 달라지는데, 본 연구에서는 실외 소음이 실내로 전달될 때 나타나는

전파 특성의 주요 원인이 실내 공간의 흡음률에 있다고 가정하였고, 도로교통 소음을 대상으로 실외 및 실내 소음도를 현장 측정된 실측값과 소음 시뮬레이션을 통해 산출된 예측값을 비교·분석함으로써 실외에서 실내로의 소음 전파를 예측하는 기법의 적정성을 검증하였다.

이후, 검증된 예측기법을 바탕으로 철도소음에 대해서도 실내 소음도를 예측하였으며, 이를 통해 음원의 특성에 따른 실외-실내 간 소음 전달계수의 차이를 비교·분석하였다.

1. 소음발생원별 소음측정 방법

소음발생원의 음향특성을 분석하기 위하여, 각 지점에서 측정된 데이터를 5분 등가소음도($L_{Aeq, 5min}$)로 분석하였다. 소음진동공정시험기준에 따른 음원별 측정시간은 도로 10분, 철도 1시간이나, 평가대상이 학교이기 때문에 학교보건법 및 학교 환경위생 및 식품위생 관리 매뉴얼(6차 개정)에 따라 평가하였다(Ministry of Education, 2022). 이에 따른 소음 측정 방법은 교실 내부의 생활환경이 학습과 건강에 적합한지를 평가하기 위해 정해진 절차에 따라 수행된다. 일반적으로 교실 내 소음도는 창문을 연 상태에서 창문 측(창가)과 출입문 측(복도 방향)의 두 지점에서 각각 측정하며, 이 두 측정값의 평균값을 해당 교실의 소음도로 평가한다. 측정은 수업이 이루어지지 않는 정온한 상태에서 수행되어야 하며, 주변 소음원이 일정하게 유지되는 환경에서 등가소음도(L_{Aeq} , dB(A))로 기록한다. 또한, 도로와 철도 등의 외부 소음원 영향을 판단하기 위한 실외 측정이 병행될 수 있으며, 이 경우 건물 외부와 실내의 소음 차이를 통해 건축적 차폐 성능도 간접적으로 평가할 수 있다. 음원별 음향특성 및 실내 흡음률에 따른 예측 결과를 산정하기 위하여 1/3 octave band 분석 결과를 함께 검토하였다.

1) 도로교통소음

도로교통 소음이 측정된 학교의 상황과 소음 측정의 세부사항은 Table 1 및 Figure 1과 같다. 측정 대상 학교들은 학교 주변 도로의 배치 형태와 접한 면의 수, 도로 등급(주요 간선도로, 보조도로 등) 및 차량 통행량 등

Table 1. Measurement location of road traffic noise

Category	School Name	Meas. Location #	Floor	Relation to the road
A	Nakwon Mid.	1	1 / 4	Vertical
B	Pangyo Daejang Ele.	1	2 / 4	Vertical
C	Dochon Mid.	1	3 / 5	Vertical
		2	3 / 5	Behind
D	Unjung Mid.	1	2 / 4	Behind
E	Wirye Jungang Mid.	1	2 / 5	Vertical
		2	2 / 5	Complex
F	Wirye Pureun Ele.	1	2 / 5	Complex
		2	2 / 5	Parallel
G	Seongnam Jeongja Ele.	1	2 / 5	Vertical
		2	3 / 4	Parallel

* V: Vertical, B: Behind, C: Complex, P: Parallel

다양한 조건을 종합적으로 고려하여 선정되었으며, 그 결과 도로 배치 유형을 수직배치(Vertical), 배면배치(Behind), 복합배치(Complex), 수평배치(Parallel)로 분류하였다. 한편 박원형 등의 선행연구에서는 신축 초·중학교 32개교, 총 55가지 유형에 대해 다섯 가지 세부 배치 유형과 복도 유무까지 포함한 대규모 표본을 구축한 바 있다(Park et al. 2024). 본 연구는 사전 연구와 달리, 배치·교통 조건이 상이한 학교를 소수 선정함으로써 배치 유형별·측정 위치별 고해상도 데이터를 확보하고, 주파수 분석 및 저층·고층 특성 비교에 초점을 맞추고자 총 7개 학교 22개 지점의 소음 측정 결과를 검토하였다. 소음 측정은 각 지점에서 동시에 이루어졌으며 30분간 데이터를 수집하여 학교보건법 기준에 따라 5분 등가소음도(L_{Aeq})를 산출하였다.

2) 철도소음

철도소음의 음향 특성을 분석하기 위하여, 철도와 인접한 7개 측정지점을 선정하여 Table 2 및 Figure 2와 같이 소음을 조사하였다. 대상 철도는 고속열차, 지하철 및 복합(고속열차+지하철) 구간으로 구성하였으며, 열차 통과 시간 및 빈도 등을 고려하여 측정 시간을 설정하였다. 철도소음은 소음진동공정시험기준에 따라 1시간 등가소음도로 평가해야 하나, 평가 대상이 학교이기 때문에, 본 연구에서는 학교보건법의 기준에 따라 철도가 통행하는 시간의 5분 등가소음도(L_{Aeq})를 산출하였다.

2. 실내 전달소음 예측 방법 및 모델링 구축

예측기법의 정확도 향상을 위해 교실 내 주요 마감재의 흡음특성을 반영한 음향 모델을 구축하였다. 시뮬레이션은 SoundPLAN(Ver.9.1)을 소프트웨어를 활용

Table 2. Measurement location of railway noise

Category	Measurement location	Floor	Types of trains
a	17-5, Nongheung 1-gil, Osan-myeon, Iksan	2	High-speed rail
b	62, Beotkkot-ro, Jeongeup	1	High-speed rail
c	154, Chunghyeon-ro, Jochiwon-eup, Sejong	1	Integrated
d	154, Chunghyeon-ro, Jochiwon-eup, Sejong	1	Integrated
e	58, Ogeum-ro, Songpa-gu, Seoul	16	Subway
f	11, Olympic-ro 35ga-gil, Songpa-gu, Seoul	15	Subway
g	355, Gyeongchun-ro, Namyangju	5	Subway

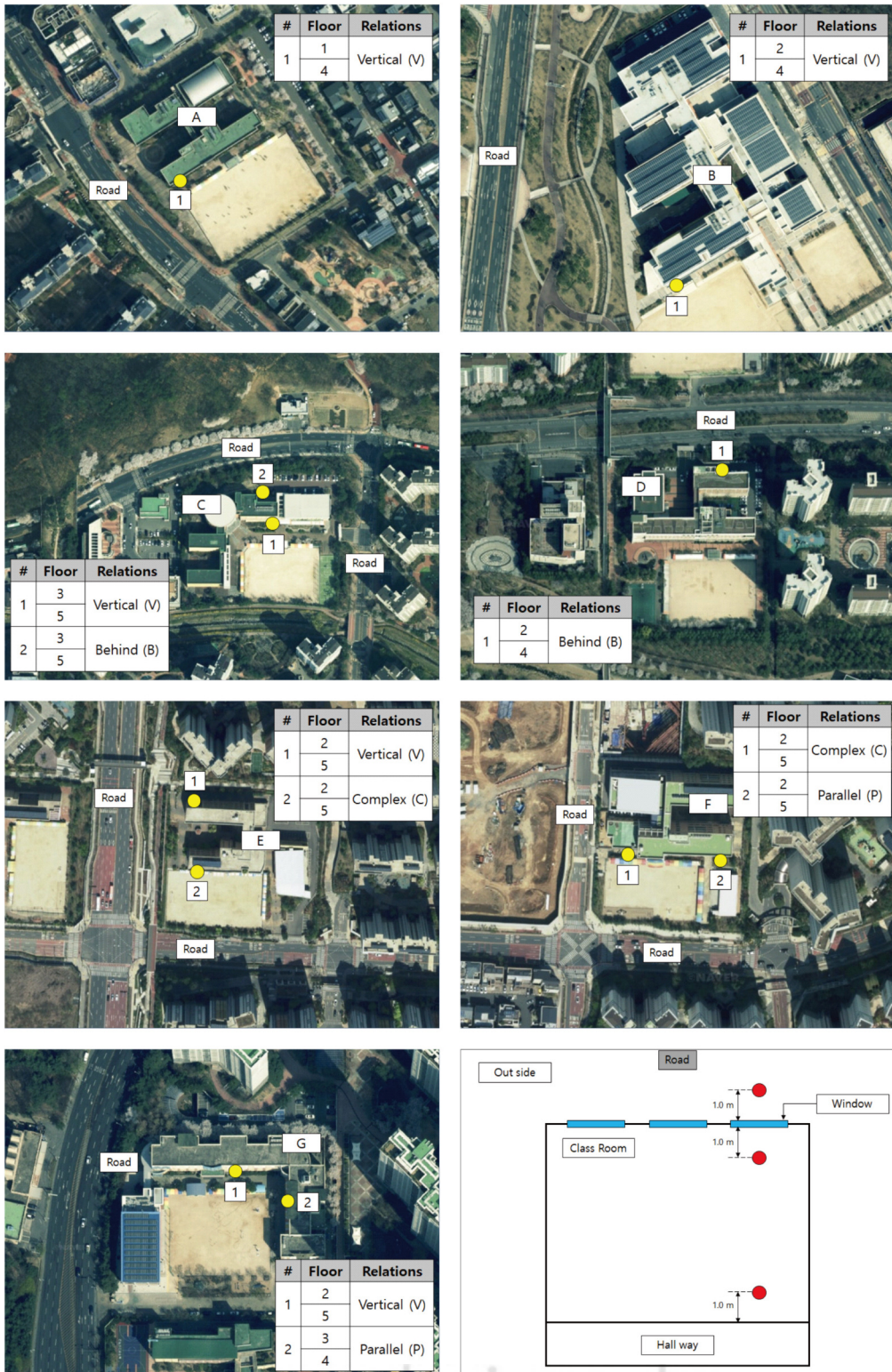


Figure 1. Relationship between school measurement points and roads



Figure 2. Picture of measuring point by type of railway

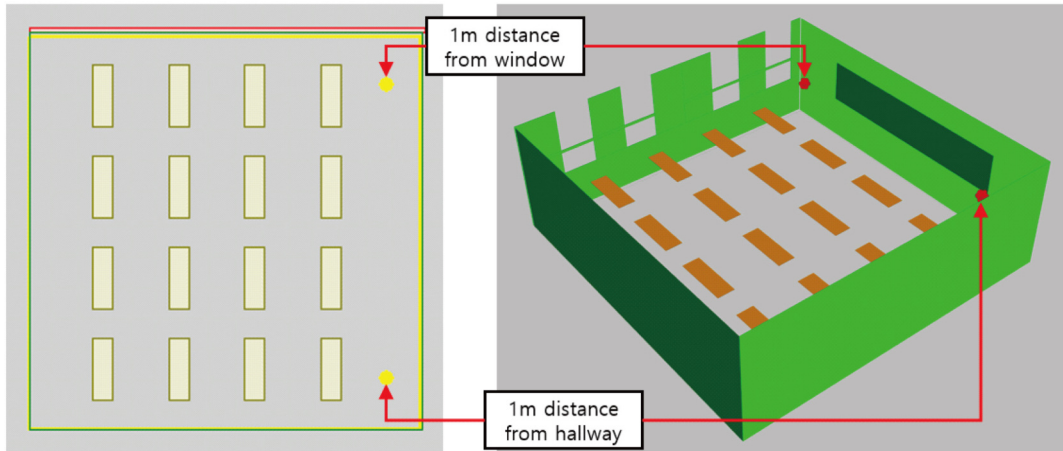


Figure 3. Indoor noise prediction model and prediction point

Table 3. Sound Absorption Characteristics by Frequency for Classroom Interior Materials

Category		Absorption Coefficient by Frequency					
Category	Material	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Window Frame	Double Layer of PVC	0.318	0.091	0.036	0.015	0.006	0.001
Window Glass	Glass,ordinary window glass	0.350	0.250	0.180	0.120	0.070	0.040
Blackboard	Blackboard in classroom	0.240	0.200	0.200	0.180	0.180	0.210
Wooden Desk Panel	6mm Hard wooden board, 50mm cavity	0.037	0.039	0.013	0.004	0.003	0.014
Classroom Wall	Plaster board on steel frame, 50mm mineral wool in cavity, surface painted	0.150	0.100	0.060	0.040	0.040	0.050
Wood Floor	Wood flooring	0.150	0.110	0.100	0.070	0.060	0.070
Ceiling Tile	Ceiling tex	0.220	0.320	0.150	0.140	0.080	0.070

Ref. : A Study on Integrating Noise-Environment Assessments to Foster Tranquil Educational Settings, 2024.05., Korea Land & Housing Corporation

하였으며, 음향 전파 모델은 Sound Particle Diffraction: Low resolution impulse response를 사용하였고, 창문, 창틀, 칠판, 책상 등의 교실 내 대표 자재를 Figure 3과 같이 구현하였다. 교실 창문측에 실측한 소음도를 음원으로 적용하였으며, 개구부(열린 창문)을 통해 전파되는 음을 외창 1m, 복도측 1m 이격된 지점에서 각각 예측하였다. 교실 내 각 구성 요소 및 표면의 흡음 특성을 시뮬레이션에 반영하고, 실제 교실에서 사용되는 주요 마감 재료들의 주파수별 흡음률을 적절히 고려함으로써, 실측 환경과의 차이를 최소화한 예측 결과를 도출할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션에 적용된 교실 내 대표 자재의 표준 흡음률은 Table 3과 같으며, 음원은 점음원(point source)과 면음원(area source)으로 나누어 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 소음 발생원별 음향특성 분석 결과

1) 도로소음의 음향특성 분석 결과

도로소음이 교사내로 유입되는 소음의 전달특성을 검토하기 위하여, 위에서 기술한 과정에 따라 총 131개의 도로소음 데이터를 분석하였으며, 산출된 도로소음은 Figure 4와 같은 소음특성을 보였다. 학교 배치 유형에 따른 실외 소음과 실내 소음의 차이를 분석한 결과, 배면(B)과 복합(C) 배치에서는 소음의 차이가 10dB(A) 이상으로 크게 나타난 반면, 수직(V) 및 수평(P) 배치는 상대적으로 소음 차이가 작게 나타났다. 또한, 수직(V) 및 수평(P) 배치를 비교해 본 결과, 실외 및 실내 소음도 모두 약 2dB(A) 정도의 차이로 수직(V) 배치가 소

음도가 더 적게 나오는 것을 알 수 있었다. 이는 수직 (V) 배치가 소음에 다소 유리하여 학생들에게 정온한 학습 환경 제공하기 위해 학교 신설시 고려할 요소로 판단된다.

도로교통 소음의 주파수 특성을 1/3 Octave Band로 분석한 결과는 Figure 5와 같으며, 1 kHz를 중심으로 200 Hz~3.15 kHz 사이의 주파수 대역에서 지배적인 소음이 발생하는 것으로 나타났다. 이 주파수 범위는 차

량 엔진 작동음, 배기계 소음, 타이어와 노면 간의 마찰음 등 도로소음의 주된 구성 요소들이 포함되는 영역으로, 실내로의 소음 유입 가능성이 높은 대역이다.

2) 철도소음의 음향특성 분석 결과

철도소음이 교사내로 유입되는 소음의 전달특성을 검토하기 위하여, 총 57개의 철도소음 데이터를 분석하였으며, 철도 유형별 소음 측정 결과는 Figure 6과 같다.

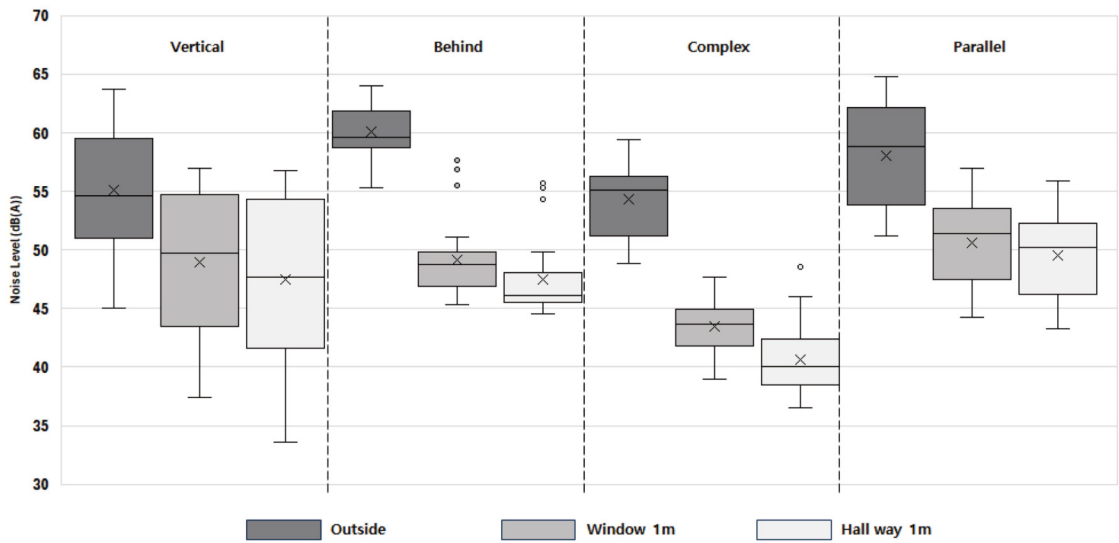


Figure 4 L_{Aeq} (5min) Measured at Representative Locations in Each Site

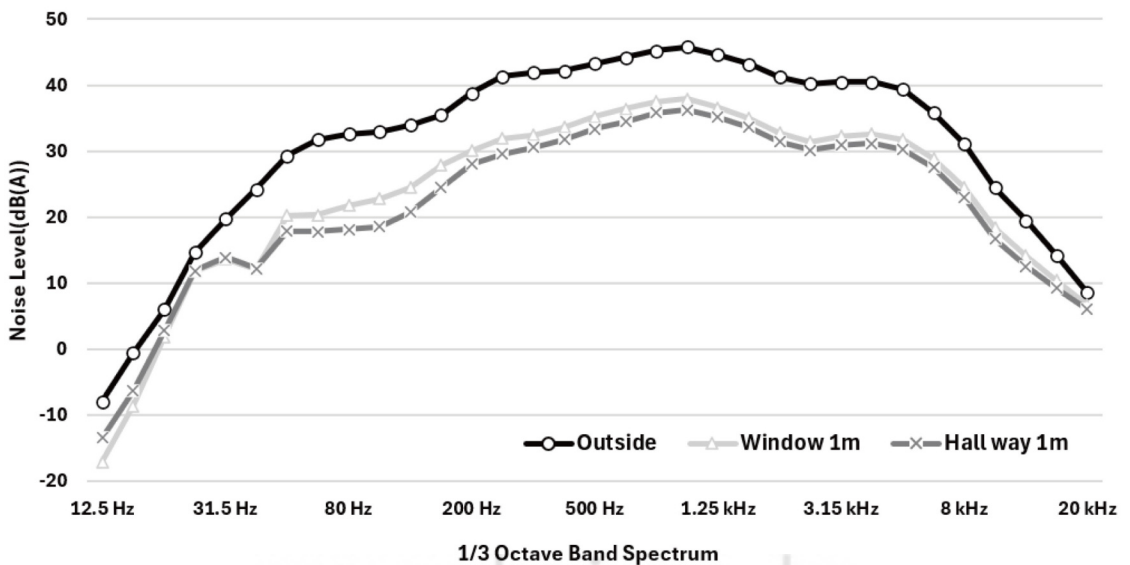


Figure 5. Mean SPL per 1/3 Octave Band for Road Traffic Noise

본 결과는 도로변과의 이격거리가 유사한 도로변 소음 측정에 비해 철도 소음원과의 거리 이격이 상이하여 철도 유형별로 소음도 비교 검토는 어려웠으나, 다만, 위 측정결과는 철도 실외 소음도를 바탕으로 교사내 전달 계수를 파악하는데 활용하고자 하였다.

철도소음의 주파수 특성을 1/3 Octave Band로 분석

한 결과는 Figure 7과 같다. 도로소음에 비해 전체적으로 높은 소음도를 나타내고 있으며, 500 ~ 1kHz를 중심으로 200 ~ 3.15kHz 사이의 주파수 대역에서 가장 지배적인 소음이 발생하고 있다. 고속철도의 경우 500 Hz 이상의 주파수대역에서, 지하철과 복합철도의 경우 모든 주파수 대역에서 도로교통소음의 특성과 유사한 경

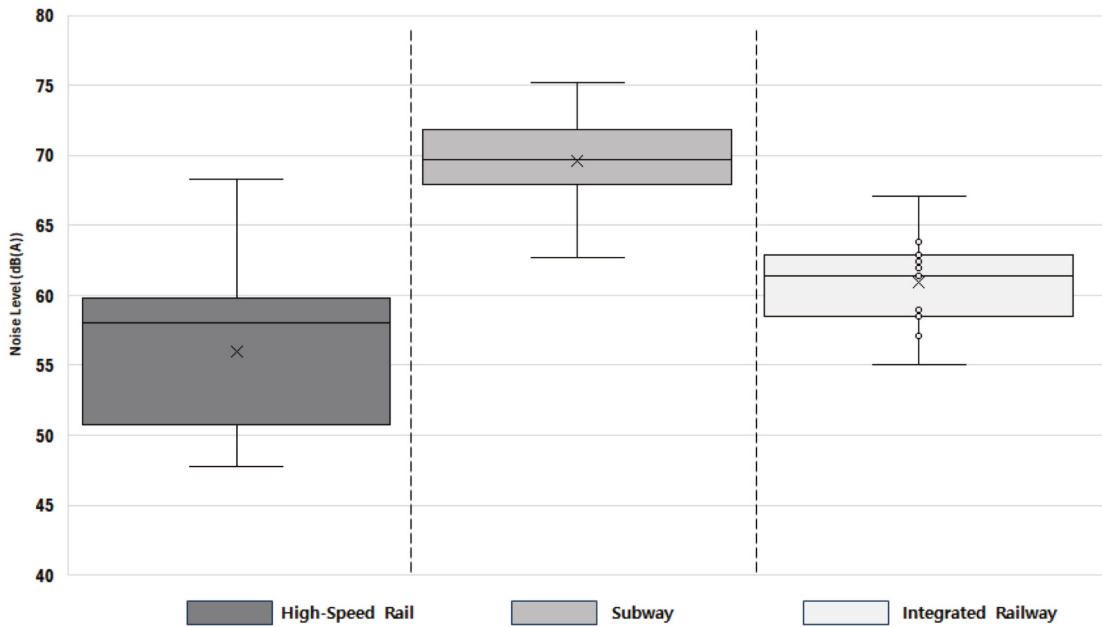


Figure 6. $L_{Aeq}(5min)$ Measured at Representative Locations in Each Site

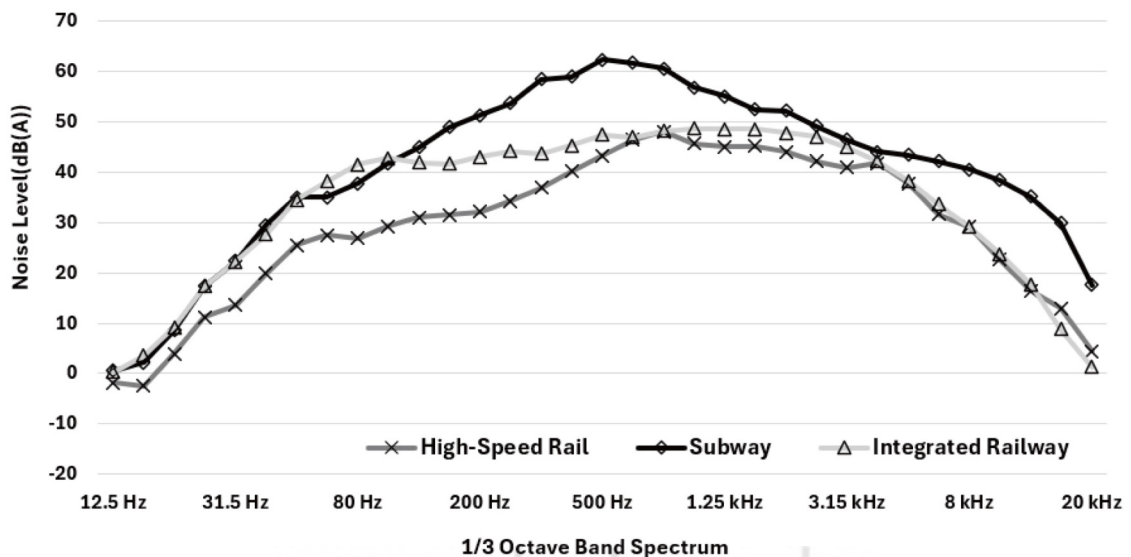


Figure 7. Mean SPL per 1/3 Octave Band for Railway Traffic Noise

향을 나타내는 것으로 분석되었다. 이러한 철도소음과 도로교통소음 간의 음향 특성 유사성에 기반하여, 본 연구에서는 도로교통소음의 실측값과 시뮬레이션 결과를 비교하여 교사 배치에 따른 합리적인 소음 예측 방안을 도출하고, 이를 철도소음에 적용하여 그 적용 가능성과 예측 경향을 검토하였다.

2. 예측기법 적정성 검토 결과

본 연구에서는 실외 측정값을 기반으로 교실 내 소음을 예측하는 과정에서 점음원(point source)과 면음원(area source) 입력 방식에 따른 예측 정밀도를 비교하였다. 점음원은 창문의 개구부 중앙에 음원을 위치하였으며, 면음원은 개구부 면적에 적용하였다. 해당 조건을 반영한 소음 예측 결과는 Figure 8과 같으며, 면음원 해석결과는 창측에서 균일하게 소음이 분포하는

특성을 보인 반면 점음원은 음원이 위치한 지점을 중심으로 소리가 방사되는 것으로 검토되었다.

점음원 및 면음원 예측모델 두 방식 모두 동일한 실내 조건 하에서 시뮬레이션을 수행하였으며, Table 4와 같이 실제 측정값과의 오차를 산출하여 분석하였다. 점음원(point source)과 면음원(area source) 입력 방식 모두 창문 개방상태를 가정하고 수행하였다. 음원 입력방식에 따른 성능 비교 결과, 면음원 예측모델이 점음원 예측모델보다 정밀한 것으로 나타났으며, 특히 수평(P) 및 수직(V) 배치에서는 창측 평균절대오차가 1.7 dB(A) 이하, 복도측 평균절대오차가 0.4 dB(A) 이하로 실측값에 거의 근접하였다. 학교 건축 배치 유형에 따른 비교결과, 수평(P) < 수직(V) < 복합(C) < 배면(B) 배치 순으로 오차가 증가하였다. 수평(P)과 수직(V) 배치는 외벽과 소음원 사이의 음향 전달경로가 단순해 모

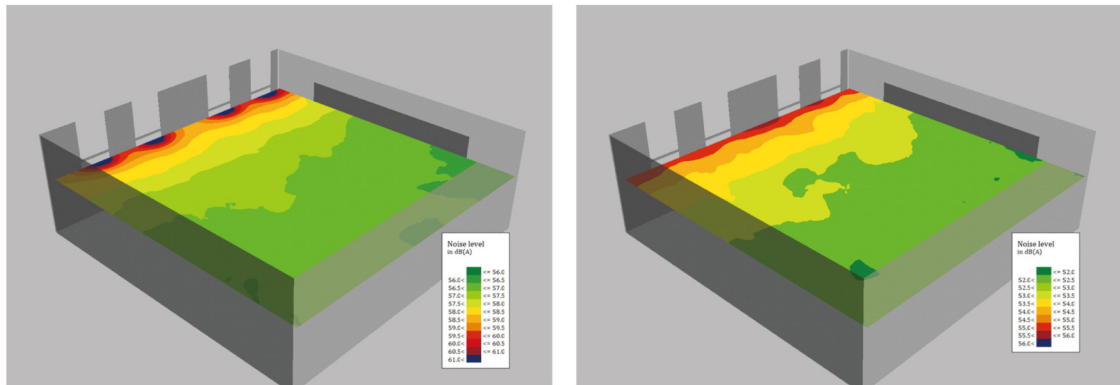


Figure 8. Indoor noise prediction results, point source (left), area source (right)

Table 4. Comparison of mean absolute error (Standard Deviation of Absolute Error) between measurement and prediction results

[Unit: dB(A)]

Layout type*		Window - @1m			Hallway - @1m		
		Lower Floors	Upper Floors	All Floors	Lower Floors	Upper Floors	All Floors
Point source	V	2.8 (1.4)	3.6 (1.3)	3.2 (1.3)	2.4 (2.2)	2.7 (1.8)	2.6 (2.0)
	B	8.6 (2.0)	7.7 (3.2)	8.1 (2.6)	8.9 (2.8)	6.7 (3.0)	7.8 (2.9)
	C	7.2 (0.9)	8.9 (1.4)	8.1 (1.2)	8.4 (1.7)	9.0 (3.6)	8.7 (2.7)
	P	4.5 (0.5)	4.3 (0.7)	4.4 (0.6)	3.3 (0.6)	3.4 (0.7)	3.3 (0.7)
Area source	V	1.7 (1.4)	0.9 (1.2)	1.3 (1.3)	1.4 (2.1)	1.1 (1.9)	1.2 (2.0)
	B	4.4 (2.0)	3.2 (3.1)	3.8 (2.6)	5.0 (2.8)	2.8 (3.0)	3.9 (2.9)
	C	2.6 (1.0)	4.6 (1.4)	3.6 (1.2)	4.4 (1.8)	5.3 (3.5)	4.8 (2.6)
	P	0.1 (0.7)	0.1 (0.8)	0.1 (0.8)	0.4 (0.9)	0.3 (0.9)	0.4 (0.9)

* V: Vertical, B: Behind, C: Complex, P: Parallel

델 재현성이 높았던 반면, 복합(C)과 배면(B)은 회절·반사 등 복합적인 음향 현상으로 인해 예측 불확실성이 커진 것으로 사료된다.

측정 위치(저층/고층)에 따른 비교결과, 수직(V)·복합(C) 배치에서는 고층부 평균절대오차가 저층부보다 다소 높았고, 후면(B) 배치에서는 저층부 오차가 더 크게 나타났다. 배치 유형별로는 수직(V), 후면(B), 복합(C) 배치에서 절대오차의 표준편차가 상대적으로 높게 나타났으며, 음원과 교실 사이 회절, 반사 경로가 복합적일수록 예측 불확실성이 증가함을 보여주었다. 반면 수평(P) 배치는 평균오차뿐 아니라 절대오차의 표준편차도 1 dB(A) 이하로 수렴하여 모델 신뢰도가 가장 우수하였다. 이는 소음원과 교사의 배치 유형별 실내 유입 소음의 지향성 변화, 이격거리, 전달경로 상 위 치한 기타 시설물에 의한 전달 영향이 저층부에서 특

히 두드러지기 때문으로 해석된다.

면음원 모델을 적용할 경우 잔여 예측 오차는 주로 학교의 배치 형태에 의해 결정되며, 층간 변동성은 대부분 1 dB(A) 이하로 수렴한다. 따라서, 교실 내 소음 전 파경로 예측의 정확도를 높이기 위해서는 면음원 입력 방식을 기본으로 채택하고, 배치 유형별 음향 특성을 세밀하게 반영하는 것이 합리적인 예측방안으로 사료 된다.

3. 소음 발생원별 실내 전달계수 비교 분석

1) 도로소음의 교사내 전달계수

앞서 검토된 면음원 예측기법을 바탕으로 실내 전달 계수를 산출하였고, 실측값과 비교하여 적정성을 검증 하였다(Table 5). 학교 건축 배치 유형에 따른 비교 결과

Table 5. Comparison of measured and predicted indoor propagation values of road traffic noise (area noise source prediction model)

[Unit: dB(A)]

Layout type*		Window - @1m			Hallway - @1m		
		Lower Floors	Upper Floors	All Floors	Lower Floors	Upper Floors	All Floors
Measurement (①)	V	-5.9	-6.6	-6.3	-7.7	-8.0	-7.9
	B	-11.5	-10.4	-10.9	-13.7	-11.5	-12.6
	C	-10.1	-11.8	-10.9	-13.5	-14.0	-13.7
	P	-7.6	-7.3	-7.5	-8.5	-8.5	-8.5
Prediction (②)	V	-7.6	-7.6	-7.6	-9.1	-9.1	-9.1
	B	-7.1	-7.2	-7.1	-8.6	-8.7	-8.6
	C	-7.5	-7.2	-7.4	-9.1	-8.7	-8.9
	P	-7.5	-7.4	-7.5	-9.0	-8.9	-8.9
Difference (①-②)	V	1.7	0.9	1.3	1.4	1.1	1.3
	B	-4.4	-3.2	-3.8	-5.0	-2.8	-3.9
	C	-2.6	-4.6	-3.6	-4.4	-5.3	-4.8
	P	-0.1	0.1	0.0	0.5	0.4	0.4

* V: Vertical, B: Behind, C: Complex, P: Parallel

Table 6. Indoor noise transmission characteristics based on predicted data

[Unit: dB(A)]

Layout type		Differences in outdoor and indoor noise level (All Floors)		
		Window - @1m	Hallway - @1m	Average
Prediction	Vertical	-7.6	-9.1	-8.4
	Behind	-7.1	-8.6	-7.9
	Complex	-7.4	-8.9	-8.2
	Parallel	-7.5	-8.9	-8.2
Average		-7.4	-8.9	-8.2

Table 7. Predicted indoor propagation values of railway noise (area noise source prediction model)

[Unit: dB(A)]

Category		Differences in outdoor and indoor noise level		
		Window - @1m	Hallway - @1m	Average
Prediction	High-speed rail	-7.0	-8.4	-7.7
	Subway	-7.4	-9.1	-8.3
	Integrated Railway	-7.4	-8.9	-8.2
Average		-7.3	-8.8	-8.0

는 배치 유형에 따라 실측값과 예측값의 차이가 뚜렷하게 나타났으며, 예측기법의 적정성 검토 결과와 동일하게 수평(P) < 수직(V) < 복합(C) < 배면(B) 배치 순으로 오차가 증가하였다. 예측 위치(저층/고층)에 따른 해석값과 실측값의 비교 결과도 수평(P) 배치형에서 오차가 ±0.5 dB(A) 이내로 가장 탁월하게 나타났고, 수직(V), 복합(C), 배면(B) 배치 순으로 오차의 크기가 증가하였다. 평균적으로 창문측에서 -7.4 dB(A), 복도측에서 -8.9 dB(A)의 전달계수를 나타냈으며, 학교보건법에 따라 평가한 교실 내 소음 전달특성은 평균 -8.2 dB(A)로 나타났다.

한편, 학교보건법에 따른 교사내 소음 평가는 창문측 측정값과 복도측 측정값의 평균값으로 평가하기 때문에, 예측 데이터 기반의 배치 유형별 실내 소음 전달 특성을 Table 6과 같이 정리하였다. 배면(B) 배치에서 -7.9 dB(A)로 실외-실내 소음의 차가 가장 적은 값을 나타내었고, 가장 큰 차이를 보이는 수직(V) 배치 -8.4 dB(A)까지 0.5 dB(A)의 편차를 보이며 근소한 양상을 나타내었다. 이는 선행연구에서 제안된 일괄 보정치 (-6.4 dB(A))와 비교할 때 최소 1.5 dB(A) 이상 차이를 보인다. 이러한 차이는 창문, 복도 개구부 조건, 실내 흡음률, 배치 유형 세분화 등 입력 인자의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

2) 철도소음의 교사내 전달계수

철도 유형별 소음 측정 결과를 예측모델에 입력하여 교사내 소음도를 Table 7과 같이 예측 데이터 기반으로 평가하였다. 도로소음 검증 과정에서 실내 공간의 흡음률에 따라 실외 소음의 전파 특성이 결정되는 것을 확인하였으며, 철도 소음의 실외 측정값을 기반으로 교실 내 소음을 예측하였다. 음원의 입력 방식은 보다

정밀한 예측 결과를 보여준 면음원(area source) 입력 방식을 사용하였으며, 철도와 교사의 배치유형(수평, 수직 등)은 고려하지 않았다.

철도소음의 실내 전달특성을 예측한 결과, 고속철도 음원은 -7.7 dB(A), 지하철 음원은 -8.3 dB(A), 복합철도 음원은 -8.2 dB(A)의 전달계수를 각각 나타냈다. 창문측과 복도측의 예측값은 평균 1.5 dB(A)의 차이를 나타내었으며, 이는 소음의 거리감쇠와 실내 흡음률이 복합적으로 작용한 데에서 기인한 것으로 판단된다.

한편 도로소음과 철도소음의 실내 전파 특성은 평균 -8.2 dB(A)와 -8.0 dB(A)로 근소한 차이를 나타내었으며, 이는 도로소음과 철도소음의 1/3 octave band 음향 특성이 200 Hz ~ 3.15 kHz 주파수 대역에서 가장 지배적인 특징이 유사한 데에서 기인한 것으로 사료되며, 동일한 교사내 전달계수를 도로 및 철도 소음 모두에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구는 학교 내 실내 환경의 안정성 및 쾌적성 확보를 목적으로 도로교통소음과 철도소음의 교실 내 전달 특성을 분석하고, 점음원 및 면음원 입력 방식의 예측 정확성을 비교 평가하였다. 실측 데이터와 예측 결과의 비교를 통해 면음원 모델이 점음원 모델 대비 탁월한 성능을 확인하였으며, 예측 오차가 평균 ±1 dB(A) 이내로 분포하는 것으로 나타났다. 특히 층간 차이는 미미하나 복합적이고 복잡한 배치 조건에서는 추가적인 미세 조정 및 분석이 필요하다는 결론을 얻었다.

도로 및 철도 소음의 교사내 평균 전달계수가 각각 -8.0, -8.2 dB(A)의 값을 가지는 것으로 나타났으며, 두 소음원이 유사한 음향특성 때문에 이와 같은 결과가 산

출된 것으로 판단된다. 이에 본 연구결과를 토대로 선행 연구에서 제시한 교사내 소음도 보정치(전달계수)는 도로소음원 뿐 만 아니라 철도변 학교 교사내 소음 예측시에도 동일하게 적용 가능할 것으로 사료된다. 다만, 철도소음에 대한 예측 결과는 실측값과의 정량적 검증이 이루어지지 않았기 때문에, 향후 다양한 학교 배치 조건에서 철도소음의 실측값을 확보하고 이를 통한 예측 결과의 타당성 검토가 필요하다.

본 연구는 기존의 일반적인 보정값과 달리 다양한 학교 배치 조건 및 설계 요소를 반영한 맞춤형 예측과 관리 방법의 필요성을 보여준다. 특히, 복합 및 배면 배치와 같은 환경에서는 예측 오차가 커지는 경향이 나타났기 때문에, 향후 학교 설계 및 평가 과정에서 이와 같은 복잡한 배치의 경우 추가적인 실내 흡음 처리나 창호의 차음 성능 개선을 통한 소음 관리 전략이 필요할 것으로 판단된다.

한편, 교육환경에 영향을 미칠 수 있는 영향인자로 항공기 운행으로 인한 교통 소음과, 공사로 인한 교사내 소음 영향이 있다. 항공기소음은 넓은 주파수 대역, 상대적으로 큰 소음을 지니고 있어 도로나 철도의 예측기법을 적용하기에 불합리하고, 공사 소음은 공사 장비의 종류 및 운영 시간에 따라 소음 발생 경향이 상이할 수 있다. 따라서, 향후 항공기소음과 공사로 인한 소음의 실내 전달계수를 적용한 예측기법 연구가 필요하다. 이를 통해 더욱 포괄적이고 효과적인 교육환경 평가 시스템 구축이 가능할 것으로 기대된다. 또한, 실험 및 예측의 표본 수를 확대하여 학교 건축물의 배치 유형과 환경 조건에 따른 보다 구체적이고 실효성 있는 소음 관리 가이드라인을 마련하는 것이 바람직할 것이다. 본 연구의 결과는 향후 신설 학교 계획 시 환경영향평가 및 교육환경평가(기존학교 포함)에 활용될 수 있는 유용한 자료가 될 것으로 기대된다.

References

- Diacio, S. B. (2014). Effects of noise pollution in the learning environment on cognitive performances. *Liceo Journal of Higher Education Research*, 10(1), 83.
- Shield, B. M., & Dockrell, J. E. (2008). The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(1), 133-144.
- 최윤정. (2005). 항공 및 도로 교통 소음권내 초등학교의 소음실태분석. *대한가정학회지*, 43(4), 31-47.
- Choi, Y. J. (2005). An Analysis of Noise Conditions in Elementary Schools Located near Airports and Roads. *Human Ecology Research*, 43(4), 31-47.
- 김중수 외. (2002). 학교주변 도로교통 소음 및 그에 따른 학생 청감반응과의 상관관계 연구. *대한위생학회지*, 17(2), 55-62.
- Kim, J. S. et al. (2002). A Study on the correlation between the traffic noise around the school buildings and the students' response to it. *Journal of Environmental and Sanitary Engineering*, 17(2), 55-62.
- Jain, L. C., Balas, V. E., & Wu, Q. (2023). A study on innovative design and application of noise barrier from the perspective of urban culture. *Design studies and intelligence engineering*. IOS Press.
- 양홍석, 정종석, 정소이. (2018). 학교시설 교육환경평가제도 개선방안 연구. 토지주택연구원, 한국토지주택공사.
- Yang, H. S., Jeong, J. S. and Jeong, S. Y. (2018). A study for revision on environmental impact assessment method on noise in schools. Land and Housing Institute. Korea Land and Housing Corporation.
- 류다정, 박찬재, 한찬훈. (2017). 현장실험을 통한 학교 교실의 벽체 차음성능 및 측로전달소음 조사. *한국음향학회지*, 36(5), 329-337.
- Ryu, D. J., Park, C. J. and Han, C. H. (2017). Investigation of the sound insulation performance of walls and flanking noises in classrooms using field measurements. *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, 36(5), 329-337.
- 김태우, 이강국, 홍원화. (2011). 주변도로 분포가 학교 건축물의 소음실태에 미치는 영향에 관한 연구. *한국교육시설학회논문집*, 83, 3-12.

- Kim, T. W., Lee, K. G. and Hong W. H. (2011). The Effect of Road Distribution Around the School Buildings on the Status of Study on the Effect of Noise. *The Journal of Korean Institute of Educational Facilities*, 83, 3-12.
- 이장욱, 김명준. (2009). RLS-90 및 CRTN 모델에 의한 도로 인접 건물에서의 도로소음 영향예측 및 고찰. *한국소음진동공학회 논문집*, 19(4), 425-432.
- Lee, J. W., Kim, M. J. (2009). Prediction and Evaluation of the Road Traffic Noise according to the Conditions of Road-side Building Using RLS-90 and CRTN Model. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 19(4), 425-432.
- 박원형 외. (2024). 도로교통으로 인한 신설학교 교사 내 소음영향 예측방법. *한국소음진동공학회 논문집*, 34(2), 209-218.
- Park, W. H., et al. (2024). Road-traffic Noise-impact Estimation Method for Classroom of Newly Planned School. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 34(2), 209-218.
- Berglund, B., Lindvall, T. and Schwela, D. H. (1999). Guidelines for Community Noise. *WHO Reference No. a68672*.
- 장서일 외. (2024). 정온한 교육환경 조성을 위한 소음환경평가 일원화 방안 연구. 한국토지주택공사.
- Chang, S. I., et al. (2024). *A Study on Integrating Noise-Environment Assessments to Foster Tranquil Educational Settings*. Korea Land & Housing Corporation.
- 교육부. (2022). 학교 환경위생 및 식품위생 관리 매뉴얼(6차 개정판). 교육부.
- Ministry of Education. (2022). *School Environmental and Food Hygiene Management Manual* (6th Revised Edition). Ministry of Education, Republic of Korea.