Journal of Environmental Science International
35(10); 951~961; October 2026

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2026.35.10.951

ORIGINAL ARTICLE

경상남도 유치원의 실내공기질 현황 연구

이원주 · 김종범[1] · 쉬인홍 · 류재용[2]*

경남대학교 사회기반시스템공학과, [1]경남대학교 산학협력단 환경측정분석센터, [2]경남대학교 환경에너지공학과

A Study on the Current Status of Indoor Air Quality in Kindergartens in Gyeongsangnam-do

Weon-Joo Lee, Jong-bum Kim[1], Yin-Hong Xu, Jae-Yong Ryu[2]*

Department of Infrastructure Systems Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Korea
[1]Environmental Measurement and Analysis Center, Kyungnam University, Changwon 51767, Korea
[2]Department of Environmental Energy Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Korea

Abstract

A cross-sectional field survey was conducted to characterize indoor air quality in 126 kindergartens across five cities in Gyeongsangnam-do, Korea, from March to May 2026. PM_{10}, $PM_{2.5}$, CO_2, formaldehyde (HCHO), and total culturable microorganisms (TCM) were measured, and concentration distributions were compared by city and survey month. City-specific $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratios were examined, and indoor/outdoor (I/O) ratios were calculated for 123 facilities using ambient monitoring data as outdoor reference concentrations. Mean concentrations (± SD) were 19.42 ± 4.50 $\mu g/m^3$ for PM_{10}, 4.53 ± 1.38 $\mu g/m^3$ for $PM_{2.5}$, 843.05 ± 86.82 ppm for CO_2, 35.14 ± 8.12 $\mu g/m^3$ for HCHO, and 118.60 ± 93.68 CFU/m^3 for TCM. All reported facility-level concentrations were below the reference limits applied in this study. PM concentrations were highest in facilities surveyed in March, whereas CO_2 concentrations were highest in the May survey group. These contrasts represented differences among facility groups rather than temporal trends within individual facilities. TCM concentrations exhibited considerable between-facility variability. Mean facility-level I/O ratios were 0.663 ± 0.338 for PM_{10} and 0.305 ± 0.182 for $PM_{2.5}$, with ratios below unity in 85.4% and 99.2% of facilities, respectively. Indoor particulate concentrations were therefore generally lower than the ambient reference concentrations. Because the reference data were obtained from monitoring stations rather than on-site outdoor measurements, these ratios were interpreted as relative concentration indices, not as estimates of infiltration or removal efficiency. The findings provide springtime field data for indoor air quality management in the surveyed kindergartens.

Key words : Indoor air quality, Kindergartens, Particulate matter, $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio, Indoor/outdoor ratio

1. 서 론

현대사회의 발달에 따라 도시화와 인구 밀집이 지속되고 있으며, 기후변화로 인한 폭염, 폭우 등 기상이변이 빈번하게 발생하고 있다. 또한 COVID-19와 같은 감염병의 영향으로 실내 생활이 증가하면서 국민의 건강과 삶의 질을 유지할 수 있는 쾌적한 실내 환경의 중요성이 더욱 커지고 있다. 환경부는 「제5차 실내공기질 관리 기본계획(2025~2029)」을 수립하여 기후변화에 대응한 실내공기질 관리 체계의 선진화를 추진

Received 11 September, 2026; **Revised** 30 September, 2026; **Accepted** 7 October, 2026
***Corresponding author** : Jae-Yong Ryu, Department of Environmental Energy Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Korea
Phone : +82-55-249-2245
E-mail : jae0318@kyungnam.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하고 있으며, 특히 어린이와 같은 민감 계층이 이용하는 시설의 실내공기질 관리 강화, 환기 성능 개선, 생활밀착형 공간의 공기질 개선 등을 주요 과제로 제시하였다(Ministry of Environment, 2024; Kim et al., 2025).

교육부는 어린이와 청소년의 건강을 보호하고 쾌적한 교육 환경을 조성하기 위하여 「학교보건법」 및 같은 법 시행규칙에 근거하여 학교 실내공기질 유지·관리 기준을 운영하고 있다. 대표적인 실내공기질(indoor air quality, IAQ) 관리 항목은 미세먼지(PM_{10}), 초미세먼지($PM_{2.5}$), 이산화탄소(CO_2), 폼알데하이드(formaldehyde, HCHO), 총부유세균(total culturable microorganisms, TCM) 등이 있으며 실내공기질 및 환경위생 관련 항목에 대하여 유지 · 관리 기준 및 점검기준에 따라 관리하고 있다. 이러한 기준은 학생과 교직원의 건강을 보호하고 안전하고 쾌적한 교육환경을 조성하기 위한 목적으로 운영되며, 정기적인 측정과 지속적인 환경위생 관리를 통해 실내공기질을 적정 수준으로 유지하도록 하고 있다(Ministry of Education, 2025a, 2025b).

이들 항목은 유치원의 실내환경을 평가하는 대표적인 지표이다. $PM_{2.5}$는 호흡기를 통해 폐 깊숙이 침투하여 호흡기에 영향을 줄 수 있으며(Won et al., 2026), CO_2는 재실자의 호흡과 환기상태를 반영하는 대표적인 지표로 환기가 부족할 경우 실내에 축적될 수 있다(Ministry of Education, 2021). HCHO는 건축자재와 가구 등에서 방출되는 대표적인 화학적 오염물질로 국제암연구소(IARC)에서 인체 발암물질(Group 1)로 분류하고 있다(Jang et al., 2026). 또한 총부유세균은 재실자의 활동, 실외공기의 유입, 환기와 청결 상태 등에 영향을 받는 생물학적 오염지표로서 영유아 이용시설에서 중요하게 관리할 필요가 있다(Jeon and Hwang, 2015).

국내에서는 유치원과 어린이집 등 교육·보육시설을 대상으로 실내공기질을 평가하기 위한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. Sohn et al.(2006)은 유치원과 초·중·고등학교를 대상으로 PM_{10}, CO_2, HCHO 및 총부유세균 등을 조사하여 학교시설의 지속적인 실내공기질 관리 필요성을 제시하였으며, Lim et al.(2010)과 Seong et al.(2012)은 일부 영유아 교육·보육시설에서 PM_{10}, CO_2 및 총부유세균 등의 기준 초과 사례를 보고하였다. Jung et al.(2016)은 수원시 유치원 111개소를 조사하여 일부 시설에서 PM_{10}, CO_2 및 부유세균이 기준을 초과하였으며, CO_2와 부유세균 농도 사이의 관련성을 통해 재실자의 활동과 환기 상태를 함께 고려할 필요가 있음을 제시하였다.

최근 Ryu(2025)는 2020~2023년 경남·경북·부산·울산·대구 지역 어린이집 1,338개소의 PM_{10}, $PM_{2.5}$, CO_2, CO, HCHO 및 총부유세균을 조사하여 대부분의 항목이 관리기준 이내의 수준을 보였다고 보고하였다. 이와 같이 기존 연구에서는 조사대상, 지역 및 조사시기에 따라 실내공기질이 서로 다른 특성을 나타냈으며, 전체 평균농도가 낮더라도 일부 시설에서는 기준 초과 사례가 확인되었다. 따라서 지역 단위의 다수 시설을 대상으로 오염물질별 농도 분포와 기준 초과 특성을 파악할 필요가 있다.

유치원의 실내공기 오염 원인은 환기 부족, 유아들의 신체활동에 따른 먼지의 재비산, 건축자재 및 마감재에서 발생하는 화학물질, 청소용품과 교구에서 방출되는 오염물질, 그리고 외부 대기오염의 유입 등 다양한 요인에 의해 발생한다. 특히 환기가 충분하지 않을 경우 실내에서 발생한 오염물질이 축적되어 실내공기질이 더욱 악화될 수 있으며, 이는 유아의 호흡기 건강과 집중력, 학습활동에도 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Ryu, 2025; Ji, 2026).

유아기는 신체의 발달과 성장이 활발하게 이루어지는 시기로, 성인에 비해 면역체계와 호흡기가 충분히 발달하지 않고 단위 체중당 호흡량이 많아 환경적 요인에 더욱 취약하다. 특히 미세먼지, 폼알데하이드 및 생물학적 오염물질 등 실내공기 오염물질에 노출될 경우 호흡기 질환, 알레르기 질환 및 감염성 질환의 발생 위험이 증가할 수 있다(Kim et al., 2024).

그리고 유치원은 영유아가 가정과 더불어 하루 중 많은 시간을 보내는 주요 생활공간으로, 밀폐된 실내에서 집단생활이 이루어지는 특성상 실내공기질 저하와 감염병 확산에 취약하다. 또한 영유아는 신체 및 뇌 발달이 활발한 시기에 있어 실내공기 오염물질에 지속적으로 노출될 경우 호흡기 건강뿐만 아니라 인지 발달과 학습환경에도 부정적인 영향을 받을 수 있다. 따라서 유치원의 실내공기질을 적정 수준으로 유지·관리하는 것은 영유아의 건강을 보호하고 안전하고 쾌적한 교육 환경을 조성하기 위한 필수적인 요소이며, 건강한 성장과 발달을 지원하기 위해 지속적이고 체계적인 관리가 필요하다.

본 연구에서는 경상남도 소재 유치원 126개소를 대상으로 봄철 PM_{10}, $PM_{2.5}$, CO_2, HCHO 및 총부유세균 농도를 조사하여 봄철 유치원의 실내공기질 수준과 오염물질별 농도 특성을 파악하고, 경상남도 유치원의 실내공기질 관리 및 교육환경 개선을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 측정 및 분석방법

본 연구는 2026년 봄철인 3월부터 5월까지 경상남도 지역에 소재한 유치원을 대상으로 실내공기질 측정을 수행하였다. 측정 대상 유치원은 표본 수가 상대적으로 많은 경상남도 내 5개 도시인 C시, J시, K시, G시 및 Y시로 선정하였다. 도시별 조사대상 유치원 수는 C시 51개소, J시 13개소, K시 24개소, G시 20개소 및 Y시 18개소로, 총 126개소의 유치원이 측정 대상에 포함되었다. 측정·분석 항목은 미세먼지(PM_{10}), 초미세먼지($PM_{2.5}$), 이산화탄소(CO_2), 폼알데하이드(HCHO), 총부유세균(TCM)이며, 측정 결과를 바탕으로 유치원 실내공기질 수준을 평가하고 환기량 등 실내공기질 관련 지표를 산정하여 분석에 활용하였다. 도시별 조사대상 유치원은 Table 1과 같다.

Table 1. Distribution of the investigated kindergartens

City	No. of kindergartens	Proportion (%)
C City	51	40.5
J City	13	10.3
K City	24	19.0
G City	20	15.9
Y City	18	14.3
Total	126	100.0

2.1. 시료 채취 방법

실내공기질 측정 지점은 시설의 구조, 공간의 용도, 오염원 발생 위치 및 환기설비의 가동 상태 등을 종합적으로 고려하여 선정하였다. 측정 지점은 재실자의 활동이 빈번하고 해당 공간의 실내공기질을 대표할 수 있는 위치로 설정하였으며, 국부적인 기류나 특정 오염원의 영향을 최소화하기 위하여 급기구와 배기구, 뚜렷한 오염원 및 장애물 인근은 측정 지점에서 제외하였다. 일반적인 재실자의 실제 노출 수준을 반영할 수 있도록 바닥면으로부터 1.2-1.5 m에서 측정을 수행하였다. 모든 측정은 유치원이 정상적으로 운영되는 상태에서 수행하였으며, 측정 당시의 온도, 상대습도 및 환기 방식은 실제 시설 이용 조건과 최대한 동일하게 유지하였다.

2.2. PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도 측정

본 연구에서 유치원 교실의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도는 「학교 환경위생 및 식품위생 관리 매뉴얼(Ministry of Education, 2026)」 및 「실내공기질 공정시험기준(National Institute of Environmental Research, 2025)」을 참고하여 측정하였다. PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도는 광산란방식(light scattering method)의 실시간 미세먼지 측정기 EG-AO-V10 (Egtech, Korea)을 이용하여 측정하였다. 해당 장비는 대한민국 환경부의 성능인증을 획득한 1등급 미세먼지 간이측정기이다. 광산란법은 공기 중 입자상 물질에 의해 발생하는 산란광의 강도를 검출한 후 이를 입자상 물질의 질량농도로 환산하는 방식이다. 이 방법은 단시간 동안의 입자상 물질 농도 변화를 연속적으로 파악할 수 있으므로 실내공기질 현장 조사에 적합하다. 유치원 교실 내 측정 위치를 선정하고 측정 전 기기를 충분히 예열하여 안정화한 후 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도를 연속 측정하였으며, 측정값은 $\mu g/m^3$ 단위로 기록하였다. 연속 측정은 동일한 조건에서 20분간 4분 간격으로 5회 반복 측정 후 평균값을 최종 분석자료로 사용하였다.

2.3. CO_2 농도 및 환기량 측정

본 연구에서는 유치원 교실의 실내공기질 평가를 위하여 실내 주요 오염물질인 CO_2 농도를 측정하였다. CO_2는 재실자의 호흡에 의해 발생하고 실내 환기 상태를 판단할 수 있는 지표로 활용하였다. 이산화탄소 농도의 측정은 「학교환경위생 및 식품위생 관리매뉴얼(Ministry of Education, 2026)」 및 「실내공기질 공정시험기준(National Institute of Environmental Research, 2025)」을 참고하여 IQ-610Xtra (Gray Wolf Sensing Solutions, USA)를 이용하여 비분산 적외선법(non-dispersive infrared, NDIR)으로 측정하였으며 해당 장비의 측정범위는 CO_2의 경우 0-10,000 ppm이다. 조사 대상 유치원의 각 교실을 대상으로 실제 교육 활동이 이루어지는 시간대에 측정하였다. 측정에 앞서 장비를 충분히 안정화한 후, 각 측정 지점에서

40분 동안 20분 간격으로 3회 연속 측정을 수행하였으며, 측정시간 동안 수집된 농도의 평균값을 해당 지점의 대표 농도로 산정하였다.

환기량은 「학교 환경위생 및 식품위생 관리 매뉴얼(Ministry of Education, 2026)」에서 제시한 환기량 측정방법 중 간접측정법을 적용하여 산정하였다. 간접측정법은 재실자의 호흡으로 발생하는 CO_2 농도를 이용하여 환기량을 추정하는 방법으로, 교육시설의 사용환경에서 환기 상태를 평가하는 데 활용된다. 본 연구에서는 실내 CO_2 농도와 재실 인원 등을 이용하여 매뉴얼에서 제시한 다음의 식으로 산정하였다.

$$Q = \frac{M \times 100}{C_t - C_0}$$

여기서, Q는 환기량(㎥/h), M은 교실에서 발생하는 이산화탄소(㎥/h)로 매뉴얼에서 제시한 유치원과 초등학교 저학년의 발생량 0.011 ㎥/h를 적용하였다. C_t는 t시간 후 교실의 평균 이산화탄소 농도(%)이며, C_0는 교실 외부의 이산화탄소 농도(%)를 의미한다.

2.4. 폼알데하이드 농도 측정

본 연구에서 유치원 교실의 폼알데하이드(formaldehyde, HCHO) 농도는 「학교 환경위생 및 식품위생 관리 매뉴얼(Ministry of Education, 2026)」을 참고하여 현장직독식 측정기인 AR8600 (ARCO, Korea)을 사용하여 측정하였다. 측정은 교실 중앙부의 바닥면으로부터 약 1.2-1.5 m 높이에서 실시하였으며, 일정한 시간 간격으로 반복 측정한 후 평균값을 최종 분석 자료로 사용하였다. 사용한 측정기의 측정 범위는 0.01-5.00 ppm이다. 측정에 앞서 장비를 약 30분간 충분히 안정화한 후 측정값이 안정된 것을 확인하여 폼알데하이드 농도를 측정하였다.

2.5. 총부유세균 농도 측정

총부유세균은 B-301 air sampler (A.P. Buck Inc., Orlando, FL, USA)를 사용하여 측정하였다. 측정은 「실내공기질 공정시험기준(National Institute of Environmental Research, 2025)」과 「학교 환경위생 및 식품위생 관리 매뉴얼(Ministry of Education, 2026)」에 따라 충돌법(impaction method)을 적용하여 수행하였다. 90 mm 페트리디시에 tryptic soy agar (TSA) 배지를 장착한 후 약 100 L/min의 유량으로 2분간 공기 시료를 포집하였으며, 20분 간격으로 총 3회 반복 채취하였다. 포집된 시료는 (35 ± 1) ℃에서 48시간 동안 배양한 후 형성된 집락수(colony-forming units, CFU)를 계수하였다. 총부유세균 농도는 공기 단위부피당 집락형성단위(CFU/㎥)로 환산하였으며, 3회 측정값의 평균을 최종 분석 자료로 사용하였다.

2.6. 외기 대표농도 자료 및 실내·외 농도비 산정

유치원 실내 입자상물질 농도와 외부 대기질을 비교하기 위하여 2026년 3~5월의 실내 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 측정자료와 한국환경공단 Air Korea의 대기오염측정망 자료를 이용하였다(Korea Environment Corporation, 2026). 외기자료는 유치원 부지에서 직접 측정한 값이 아니므로 대기오염측정망의 관측값을 해당 시설의 외기 대표농도로 적용하였다.

전체 조사대상 126개소 중 실내·외 농도자료가 모두 확보된 123개소를 분석하였으며, 도시별로는 G시 18개소, K시 24개소, Y시 18개소, C시 50개소 및 J시 13개소였다. 외기자료가 확보되지 않은 C시 1개소와 G시 2개소는 실내·외 농도비 분석에서만 제외하였다. 측정망 자료는 대상 유치원 소재지를 확인하여 대상 유치원과 가장 가까운 측정소를 선정하고, 대상 유치원의 측정일시를 함께 확인하여 같은 시간대의 자료를 이용하였다.

실내·외 농도비(indoor/outdoor ratio, I/O ratio)는 각 시설의 실내 대표농도(C_{in})를 해당 시설의 외기 대표농도(C_{out})로 나누어 산정하였다.

$$I/O\ ratio = \frac{C_{in}}{C_{out}}$$

도시별 I/O ratio는 개별 시설에서 산출한 농도비의 산술평균과 표본 표준편차로 제시하였으며, 전체 I/O ratio는 분석대상 123개소의 시설별 농도비를 통합하여 산출하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 평균 I/O ratio는 평균 실내농도를 평균 외기농도로 나누어 산정한 값과는 구분된다.

Table 2. Indoor air pollutant concentrations and compliance with IAQ standards in the investigated kindergartens

Pollutant	Mean ± SD	Median	Min - Max	IAQ - standard
PM_{10} (μg/㎥)	19.42 ± 4.50	19.38	10.00 - 29.50	75.00
$PM_{2.5}$ (μg/㎥)	4.53 ± 1.38	4.00	3.00 - 9.00	35.00
CO_2 (ppm)	843.05 ± 86.82	870.00	463.00 - 943.00	1000.00
HCHO (μg/㎥)	35.14 ± 8.12	37.10	12.30 - 50.00	80.00
TCM (CFU/㎥)	118.60 ± 93.68	99.80	7.50 - 574.00	800.00

Table 3. Monthly variations in indoor air pollutant concentrations from March to May

Pollutant	March (n=29)	April (n=71)	May (n=26)
PM_{10} (μg/㎥)	21.93 ± 4.58	18.55 ± 4.09	19.02 ± 4.58
$PM_{2.5}$ (μg/㎥)	6.22 ± 1.48	3.92 ± 0.89	4.31 ± 0.71
CO_2 (ppm)	836.08 ± 70.83	836.53 ± 98.90	868.17 ± 58.84
HCHO (μg/㎥)	34.22 ± 7.39	35.58 ± 8.60	34.87 ± 7.55
TCM (CFU/㎥)	118.91 ± 97.36	117.24 ± 87.26	121.99 ± 107.32

3. 결과 및 고찰

3.1. 봄철 실내공기질 농도 현황

Table 2에는 126개소 유치원에서 봄철에 측정된 실내공기오염물질 농도의 분석 결과와 학교보건법 시행규칙의 유지기준 충족 여부를 종합하여 제시하였다.

분석 결과, 126개소 유치원에서 측정된 실내공기오염물질의 농도는 모두 학교보건법 시행규칙 유지기준 및 국내 실내공기질 관련 유지기준 이하로 나타났으며, 전체 126개소 유치원의 평균 농도 또한 모든 항목에서 해당 기준 이하로 나타났다. 또한 개별 측정자료를 대상으로 기준 초과 여부를 확인한 결과, 전체 측정 항목에서 유지기준을 초과한 사례는 확인되지 않았다.

입자상 오염물질의 경우, PM_{10}의 평균농도는 19.42 ± 4.50 μg/㎥였으며, 농도 범위는 10.00-29.50 μg/㎥로 나타났다. $PM_{2.5}$의 평균 농도는 4.53 ± 1.38 μg/㎥였고, 농도 범위는 3.00-9.00 μg/㎥였다. PM_{10}과 $PM_{2.5}$의 평균농도는 각각 75 μg/㎥와 35 μg/㎥의 유지기준보다 현저히 낮게 나타나, 조사기간 동안 유치원 실내의 입자상 물질 오염 수준은 전반적으로 낮은 것으로 확인되었다.

가스상 오염물질의 경우, CO_2의 평균 농도는 843.05 ± 86.82 ppm으로 1,000 ppm의 유지기준보다 낮았다. HCHO의 평균농도는 35.14 ± 8.12 μg/㎥로, 80 μg/㎥의 유지기준보다 낮게 나타났다.

생물학적 오염물질인 총부유세균(TCM)의 평균 농도는 118.60 ± 93.68 CFU/㎥였으며, 농도 범위는 7.50 - 574.00 CFU/㎥로 나타났다. 모든 측정값은 800 CFU/㎥의 유지기준보다 낮았다. TCM은 다른 오염물질에 비해 표준편차가 상대적으로 크게 나타났으나, 최대 관측값 역시 유지기준을 초과하지 않았다.

이상의 결과를 종합하면, 조사기간 동안 126개소 유치원에서 측정된 실내공기오염물질 농도는 모두 관련 유지기준 이내의 수준을 유지하였으며, 어떠한 측정항목에서도 기준 초과 사례는 관찰되지 않았다. 이는 조사대상 유치원의 실내공기질이 전반적으로 양호하고 안정적인 수준으로 관리되고 있음을 보여준다.

3.2. 봄철 조사월별 실내공기질 특성

Table 3에는 3월부터 5월까지 유치원 실내 공기오염물질 농도의 월별 분포 특성을 제시하였다. 전반적으로 모든 측정항목은 각 월에서 실내공기질 관련 유지기준 이내의 수준을 보였으며, 오염물질별로 월별 분포 차이가 나타났다. 다만, 본 연구는 동일 유치원을 대상으로 반복 측정한 결과가 아니라 조사 일정에 따라 서로 다른 유치원을 대상으로 측정하였다. 전체 126개 유치원 중 3월에는 29개소, 4월에는 71개소, 5월에는 26개소를 대상으로 측정하였으며, 각 월의 조사대상 유치원은

Table 4. Indoor air pollutant concentrations by city

City	n	PM_{10} Mean ± SD	$PM_{2.5}$ Mean ± SD	CO_2 Mean ± SD	HCHO Mean ± SD
G City	20	18.79 ± 5.01	4.42 ± 0.67	862.31 ± 61.41	35.91 ± 7.82
C City	51	19.34 ± 3.77	4.62 ± 1.24	850.13 ± 60.25	34.57 ± 7.77
K City	24	20.52 ± 5.73	5.30 ± 2.00	818.76 ± 124.54	33.83 ± 8.78
Y City	18	19.46 ± 4.83	4.11 ± 1.22	856.67 ± 69.31	34.09 ± 7.57
J City	13	18.64 ± 3.43	3.47 ± 0.59	840.11 ± 92.20	37.77 ± 7.70

Values are presented as mean ± SD. PM_{10}, $PM_{2.5}$, and HCHO are expressed as μg/㎥, and CO_2 is expressed as ppm.

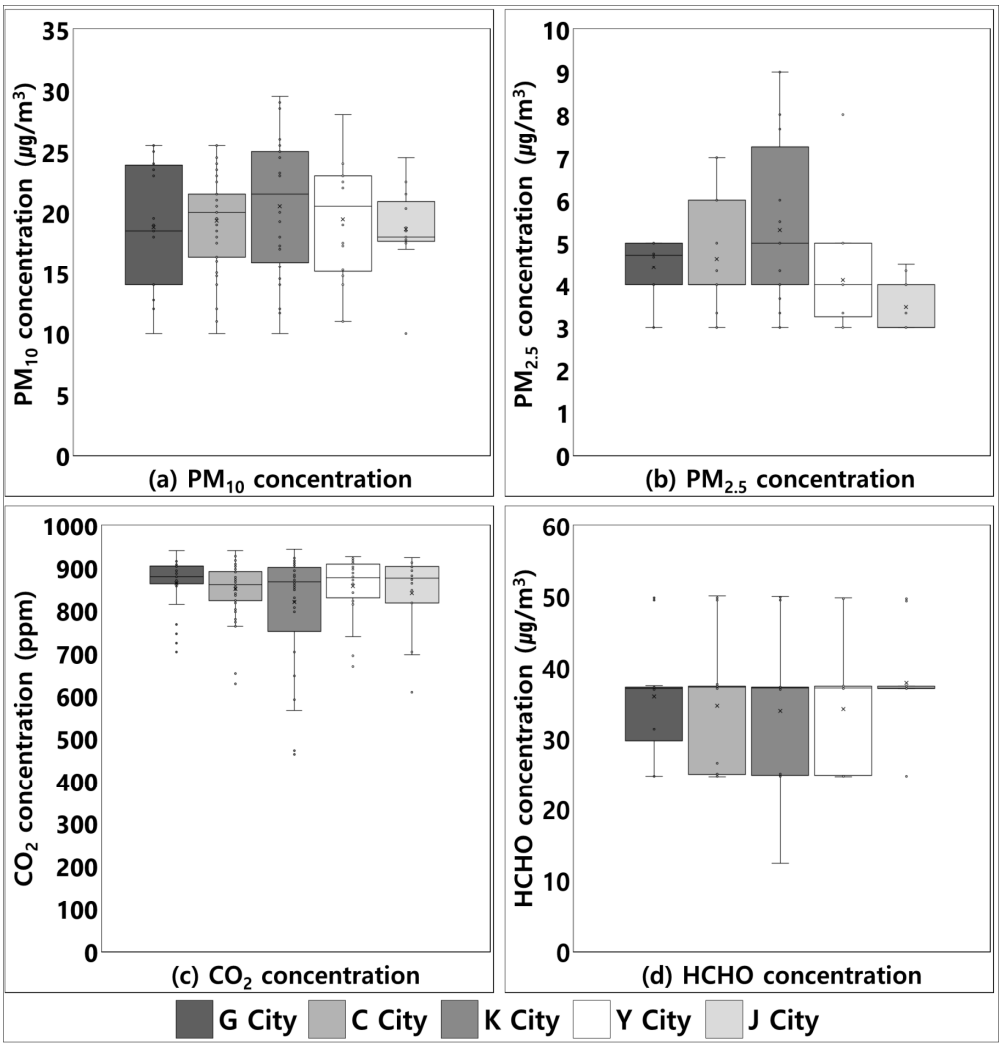


Fig. 1. Indoor air pollutant concentrations by city.

서로 상이하였다. 따라서 월별 측정 결과는 동일 시설의 시간적 변화나 월별 추이보다는, 각 조사월에 측정된 유치원 집단 간의 분포 차이를 나타내는 것으로 볼 수 있다.

입자상 오염물질의 경우, PM_{10}과 $PM_{2.5}$ 농도는 모두 3월 조사군에서 가장 높게 나타났다. PM_{10}의 평균 농도는 3월에 21.93 ± 4.58 μg/㎥, 4월 18.55 ± 4.09 μg/㎥ 및 5월 19.02 ± 4.58 μg/㎥였으며, $PM_{2.5}$는 각각 6.22 ± 1.48 μg/㎥, 3.92 ± 0.89 μg/㎥ 및 4.31 ± 0.71 μg/㎥였다. 두 항목 모두 4월과 5월 조사군에서 3월 조사군보다 낮은 평균농도를 보였으며, 5월 조사군은 4월 조사군보다 다소 높았다. 다만 조사월별 대상 시설이 서로 달랐으므로, 이러한 차이는 동일 시설의 시간적 변화가 아닌 조사월별 시설 집단의 농도 특성으로 해석하였다.

이와 같은 봄철 초기 고농도 현상은 국내 대기 환경 특성상 3월에 빈번히 발생하는 고농도 외부 미세먼지(황사 및 스모그 등)의 유입과 환기 여건의 변화가 실내공기질에 직접적인 영향을 미칠 가능성이 있다(Park et al., 2020). 이는 교육시설 내 시기별 맞춤형 환기 및 공기정화 대책의 필요성을 시사한다.

CO_2의 평균 농도는 3월에는 836.08 ± 70.83 ppm으로 나타났으며 4월에는 836.53 ± 98.90 ppm 그리고 5월에는 868.17 ± 58.84 ppm으로 나타나 5월 조사군의 평균이 가장 높았다. 그러나 모든 월평균 농도는 1,000 ppm 이하로 유지기준보다 낮았다.

HCHO의 월평균 농도는 34.22-35.58 μg/㎥의 범위로 전반적인 변동 폭이 크지 않았으며, 이 중 4월의 평균농도가 상대적으로 높게 나타났다.

생물학적 오염물질인 총부유세균(TCM)의 평균농도는 3월이 118.91 ± 97.36 CFU/㎥로 나타났으며, 4월은 117.24 ± 87.26 CFU/㎥, 5월은 121.99 ± 107.32 CFU/㎥로 나타났다. 월별 평균 농도는 서로 유사한 수준을 보여 뚜렷한 월별 변화 경향은 확인되지 않았다. 그러나 모든 달에서 TCM 농도의 표준편차가 상대적으로 크게 나타나, 유치원별 총부유세균 농도에 상당한 차이가 존재하는 것으로 확인되었다.

이상의 결과를 종합하면, 3월부터 5월까지 유치원 실내공기오염물질 농도는 모두 관련 유지기준 이내의 수준을 유지하였다. 입자상 물질 농도는 3월에 상대적으로 높았으나 4월과 5월에는 뚜렷하게 감소하였으며, CO_2 농도는 5월 조사군의 평균농도가 가장 높았다. 반면, HCHO, TCM 농도의 변화는 상대적으로 크지 않았다.

3.3. 도시별 실내공기질 특성

Table 4에 봄철 조사 기간 중 도시별로 측정된 실내공기오염물질 농도의 분석 결과를 제시하였으며, Fig. 1에 각 오염물질의 도시별 분포 양상을 그림으로 나타내었다. 상자 그림을 통해 측정값의 중앙값과 사분위 범위, 전체적인 산포 정도 및 이상치의 발생 여부를 종합적으로 확인하였다. 이를 바탕으로 도시별 실내공기오염물질의 농도 수준과 분포 특성을 비교·평가하였다.

PM_{10} 농도는 도시별로 다소 상이한 수준을 나타냈다. K시와 Y시의 평균 농도는 각각 20.52 ± 5.73 μg/㎥과 19.46 ± 4.83 μg/㎥로 상대적으로 높았으며, J시는 18.64 ± 3.43 μg/㎥로 조사 대상 도시 중 가장 낮았다. $PM_{2.5}$ 농도에서도 이와 유사한 양상이 확인되었다. K시의 평균 농도는 5.30 ± 2.00 μg/㎥로 가장 높았던 반면, J시는 3.47 ± 0.59 μg/㎥로 가장 낮은 수준을 보였다. 도시별 $PM_{2.5}$ 농도의 중앙값은 전반적으로 유사하였으나, K시에서 최댓값과 상대적으로 큰 표준편차가 확인되어 다른 도시에 비해 측정값의 산포가 크게 나타났다. 이러한 분포 특성은 K시의 일부 측정지점에서 관찰된 높은 $PM_{2.5}$ 농도가 해당 도시의 평균 농도와 전반적인 변동성에 영향을 미쳤을 가능성을 나타낸다.

5개 도시의 CO_2 평균 농도는 818.76 – 862.31 ppm 범위로 나타나 도시 간 차이가 비교적 크지 않았다. G시는 862.31 ± 61.41 ppm으로 가장 높은 평균농도를 보였으며, K시는 818.76 ± 124.54 ppm으로 가장 낮았다. 한편, K시의 표준편차는 다른 도시에 비해 상대적으로 크게 나타나 도시 내 측정지점 간 CO_2 농도의 변동성이 높은 것으로 확인되었다. 이러한 분포 특성은 K시에서 관찰된 낮은 최솟값의 영향을 받은 것으로 생각되며, 측정지점에 따른 재실 인원, 공간 점유 양상 및 환기 조건의 차이가 농도 변동에 영향을 미쳤을 가능성을 나타낸다.

HCHO 농도는 도시 간 큰 차이 없이 전반적으로 유사한 수준을 보였으며, 평균 농도는 33.83-37.77 μg/㎥ 범위로 나타났다. J시의 평균 농도는 37.77 ± 7.70 μg/㎥로 조사 대상 도시 중 가장 높았으며, K시는 33.83 ± 8.78 μg/㎥로 가장 낮았다. 상자그림을 통해 도시별 분포 특성을 비교한 결과, Y시와 J시는 다른 도시에 비해 사분위 범위와 전체적인 농도 분포 폭이 상대적으로 좁게 나타났다. 이는 두 도시의 측정값이 중앙값을 중심으로 비교적 밀집되어 있어 도시 내 HCHO 농도의 변동성이 상대적으로 낮았음을 의미한다.

Table 5. City-specific indoor and ambient concentrations and I/O ratios of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in kindergartens

City	n	Indoor PM_{10}	Outdoor PM_{10}	PM_{10} I/O ratio	Indoor $PM_{2.5}$	Outdoor $PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$ I/O ratio
G City	18	18.76	26.92	0.724 ± 0.224	4.47	25.21	0.199 ± 0.077
K City	24	20.52	42.91	0.527 ± 0.162	5.30	19.95	0.318 ± 0.165
Y City	18	19.46	30.16	0.801 ± 0.396	4.11	15.12	0.330 ± 0.130
C City	50	19.35	34.90	0.717 ± 0.395	4.65	20.32	0.336 ± 0.227
J City	13	18.64	57.56	0.429 ± 0.203	3.47	14.98	0.278 ± 0.136
Total	123	19.43	37.00	0.663 ± 0.338	4.55	19.64	0.305 ± 0.182

Concentrations are expressed in $\mu g/m^3$. I/O ratios are presented as arithmetic mean ± SD of facility-level ratios.

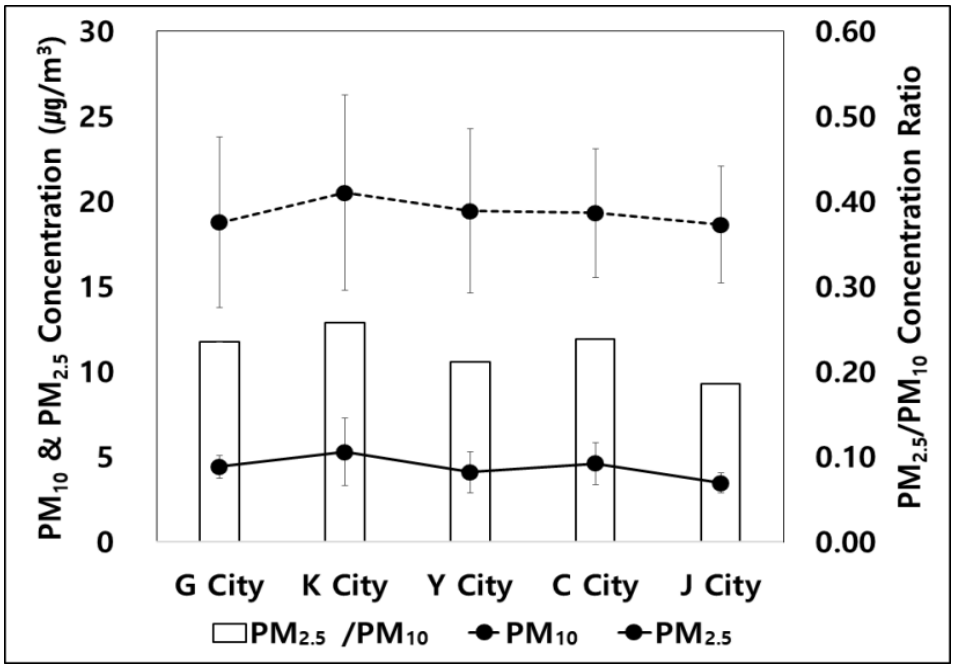


Fig. 2. City-specific concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ and their $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratios in kindergartens.

3.4. 실내외 입자상 물질 농도 및 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 특성

Fig. 2에는 전체 조사대상 126개 유치원의 도시별 PM_{10}, $PM_{2.5}$ 농도와 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비를 나타내었다. $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비는 PM_{10} 중 $PM_{2.5}$가 차지하는 상대적 비중을 나타내는 지표로 활용하였다. 도시별 비는 0.19~0.26의 범위로 나타났으며, K시가 0.26으로 가장 높고 J시가 0.19로 가장 낮았다. 이는 도시별로 실내 입자상물질의 농도뿐만 아니라 입경별 구성에도 차이가 있음을 보여준다.

실내 PM_{10}은 외기 유입뿐만 아니라 재실자의 활동에 따른 침적입자의 재비산 영향을 받을 수 있다. Benabed and Boulbair는 사람의 보행에 의해 실내 입자상물질 농도가 증가하며, PM_{10}의 재비산율이 $PM_{2.5}$보다 상대적으로 높게 나타날 수 있음을 보고하였다(Benabed and Boulbair, 2022). 따라서 유아의 이동과 신체활동이 빈번한 유치원에서도 침적입자의 재비산이 PM_{10} 농도에 일부 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 다만 본 연구에서는 재비산량을 직접 측정하지 않았으므로 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비만으로 그 영향을 단정하기는 어렵다.

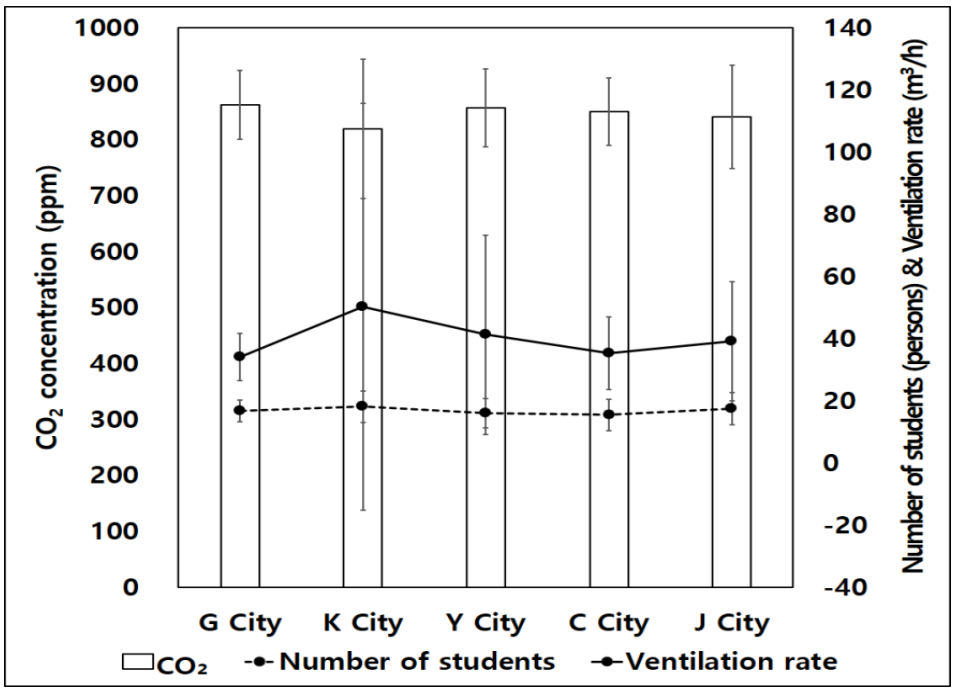


Fig. 3. City-specific CO_2 concentration, number of students, and ventilation rate.

외기자료가 확보된 123개소의 실내·외 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도와 I/O ratio는 Table 5에 제시하였다. 시설별 I/O ratio의 전체 평균은 PM_{10} 0.663 ± 0.338, $PM_{2.5}$ 0.305 ± 0.182로 나타나 두 항목 모두 1 미만이었다. 도시별 PM_{10} I/O ratio는 Y시가 가장 높고 J시가 가장 낮았으며, $PM_{2.5}$는 C시가 가장 높고 G시가 가장 낮았다.

개별 시설에서는 PM_{10}의 85.4%, $PM_{2.5}$의 99.2%에서 I/O ratio가 1 미만으로 나타났다. 특히 PM_{10}의 평균 I/O ratio가 $PM_{2.5}$보다 높게 나타난 것은 두 입경의 실내·외 농도 특성이 서로 다를 수 있음을 보여준다. 이러한 결과를 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비와 함께 고려하면, 유치원 실내 입자상물질은 외기 유입뿐만 아니라 재실자의 활동과 같은 실내 요인의 영향을 함께 받을 가능성이 있다.

다만 본 연구의 외기농도는 유치원 부지에서 직접 측정한 값이 아니라 유치원에서 가장 가까운 측정망의 동일 시간대 관측자료를 외기 대표농도로 적용한 것이다. 따라서 I/O ratio는 실내와 외기의 상대적인 농도 수준을 비교하는 지표로 해석하였으며, 이를 외기 입자의 침투율이나 공기정화설비 및 환기효율을 직접 나타내는 값으로 해석하는 데에는 한계가 있다.

3.5. CO_2 농도, 재실 원생 수 및 환기량의 관계

Fig. 3에는 5개 도시의 평균 CO_2 농도, 재실 원생 수 및 환기량의 도시별 분포를 제시하였다. 도시별 평균 CO_2 농도는 818.76 - 862.31 ppm의 범위로 나타났으며, 모든 도시에서 실내공기질 유지기준인 1,000 ppm보다 낮았다. 이 중 G시의 평균 CO_2 농도가 862.31 ppm으로 가장 높았으며, K시는 818.76 ppm으로 가장 낮았다.

환기량의 경우, K시의 평균 환기량이 50.18 ㎥/h로 가장 높았으며, 평균 재실 원생 수도 18.00명으로 5개 도시 중 가장 많았다. K시는 상대적으로 많은 원생이 재실하였음에도 불구하고 평균 CO_2 농도가 가장 낮게 나타났다. 이는 높은 환기량이 실내 CO_2의 축적을 완화하는 데 기여했을 가능성을 나타낸다. 반면, G시는 평균 환기량이 34.03 ㎥/h로 가장 낮았으나 평균 CO_2 농도는 가장 높게 나타나, 일부 시설의 환기 수준 또는 환기 관리가 상대적으로 충분하지 않았을 가능성이 있는 것으로 생각된다.

도시별 평균 재실 원생 수는 15.41-18.00명의 범위로 나타나 도시 간 차이는 크지 않았다. J시의 평균 재실 원생 수는 17.40명으로 상대적으로 많았으며, 평균 CO_2 농도는 840.11 ppm으로 나타났다. 이러한 결과는 재실 인원의 증가가 실내 CO_2 농도 상승과 관련될 가능성을 보여준다. 그러나 실내 CO_2 농도는 재실 원생 수나 환기량만으로 결정되는 것이 아니라, 측정 당시 재실자의 활동 수준, 창문 개방 상태, 실내 공간의 체적 및 기계환기설비의 가동 여부 등 다양한 요인의 영향을 받을 수 있다.

교육시설의 CO_2 농도는 재실자의 호흡에 의해 발생하는 CO_2 발생량과 환기에 의해 공급되는 외기량 간의 균형에 의해 결정되며, 재실 밀도와 환기 부족이 주요 영향 요인으로 보고되었다(Daisey et al., 2003). 또한 실내 CO_2 농도는 재실자의 호흡으로 인한 CO_2 발생량과 환기율의 상호작용에 의해 결정되며, 동일한 공간에서도 재실 인원과 환기 조건에 따라 농도 수준이 달라질 수 있다(Persily and de Jonge, 2017). 본 연구에서도 5개 도시 유치원의 평균 CO_2 농도는 모두 실내공기질 유지기준 이내였으나, 도시별 환기량과 재실 원생 수 차이에 따라 CO_2 농도 수준에는 차이가 나타났다. 특히 K시는 상대적으로 높은 환기량과 낮은 CO_2 농도를 나타낸 반면, G시는 낮은 환기량과 높은 CO_2 농도를 보여 환기 조건이 실내 CO_2 농도 변화에 중요한 영향을 미치는 요인임을 시사하였다. 또한 CO_2 농도는 재실 인원, 공간 밀도, 창문 개방 상태 및 기계환기설비 운전 여부 등 다양한 실내 환경 요인의 영향을 받을 수 있으므로, 유치원 실내공기질 관리를 위해서는 단순히 기준 충족 여부를 평가하는 것을 넘어 재실 인원 변화와 공간 특성을 고려한 적절한 환기 운영이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 2026년 3월부터 5월까지 경상남도 5개 도시의 유치원 126개소를 대상으로 입자상·가스상 및 생물학적 실내공기질 지표의 농도분포를 조사하였다. 이 중 외기자료가 확보된 123개소에 대해서는 대기오염측정망 관측농도를 이용하여 시설별 실내·외 농도비(I/O ratio)를 산정하였다.

전체 조사시설의 평균농도는 PM_{10} 19.42 ± 4.50 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 4.53 ± 1.38 $\mu g/m^3$, CO_2 843.05 ± 86.82 ppm, HCHO 35.14 ± 8.12 $\mu g/m^3$ 및 총부유세균(TCM) 118.60 ± 93.68 CFU/m^3였다. 조사기간 중 본 연구에서 적용한 유지기준을 초과한 시설은 확인되지 않았다. 다만 총부유세균은 다른 오염물질에 비해 표준편차가 상대적으로 크게 나타났다.

조사월별로는 PM_{10}과 $PM_{2.5}$의 평균농도가 3월 조사군에서 가장 높았으며, CO_2는 5월 조사군에서 가장 높았다. HCHO와 총부유세균의 조사월별 평균농도 차이는 상대적으로 작았다. 각 조사월에 포함된 시설이 서로 달랐으므로, 이러한 결과는 동일 시설의 시간적 변화가 아닌 조사월별 시설 집단의 간 농도 차이로 해석하였다.

실내·외 비교대상 123개소의 시설별 평균 I/O 비는 PM_{10} 0.663 ± 0.338, $PM_{2.5}$ 0.305 ± 0.182였으며, 각각 85.4%와 99.2%의 시설에서 1 미만이었다. 대부분의 시설에서 실내 입자상물질 농도가 외기 대표농도보다 낮았으나, PM_{10}은 일부 시설에서 1을 초과하는 것으로 나타났다. $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비와 I/O 비는 각각 입자상물질의 입경별 상대농도와 외기 대비 실내농도 수준을 검토하는 지표이며, 이들 지표만으로 외기 유입과 실내 재비산의 기여도를 구분할 수는 없다.

본 연구는 경상남도 유치원의 봄철 실내공기질 분포와 외기 대표농도에 대한 상대적 수준을 제시하였다. 실내공기질 관리에서는 기준 충족 여부와 함께 시설별 농도 차이, 재실조건 및 외기농도 등을 함께 고려할 필요가 있다. 다만, 본 연구는 제한된 기간에 수행되었으며, 외기농도 역시 유치원 부지에서 직접 측정한 값이 아니므로 조사 결과를 연중 농도 특성이나 개별 시설의 환기·공기정화 성능으로 일반화하기는 어렵다. 향후 동일 시설의 계절별 반복조사와 실내·외 동시측정에 재실밀도, 환기설비 운전조건 및 실내 활동자료를 연계하여 오염물질의 유입·발생 특성을 평가할 필요가 있다.

REFERENCES

Benabed, A., Boulbair, A., 2022, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_1, and $PM_{0.1}$ resuspension due to human walking, Air Qual. Atmos. Health, 15(9), 1547-1556.

Daisey, J. M., Angell, W. J., Apte, M. G., 2003, Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: An Analysis of existing information, Indoor Air, 13(1), 53-64.

Jang, S. E., Park, O. H., Kong, H. J., Kim, J. H., Nam, T. H., Jeon, H. D., Min, K. W., 2026, Indoor air quality and health risk assessment of formaldehyde exposured in multi-use facilities for sensitive populations in Gwangju, J. Korean Soc. Living Environ. Syst., 33(2), 216-227.

Jeon, B. H., Hwang, I. Y., 2015, Concentrations of total culturable microorganisms and its identification in public facilities, J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc., 16(1), 868-876.

Ji, H. S., 2026, Evaluation of priority pollutants for indoor air quality management in facilities used by vulnerable populations, J. Environ. Anal. Health Toxicol., 29(1), 21-32.

Jung, Y. S., Kwon, L. S., Kim, S. H., 2016, A Study on the measurement of indoor air quality of kindergartens located in Suwon-si, South Korea, J. Korean Soc. Urban Environ., 16(4), 523-529.

Kim, H. L., Park, B. Y., Song, S. R., Kim, I. Y., Jung, Y. M., Kim, S. J., Han, Y. W., Hwang, Y. H., Lee, J. I., 2025, A study on the characteristics of indoor air quality for agricultural greenhouses in Jeollanam-do, J. Korean Soc. Environ. Technol., 26(2), 116-127.

Kim, T. H., Kim, S. Y., Kim, Y., Hong, M., 2024, Design of multi-sensor system for comprehensive indoor air quality monitoring, J. Korea Soc. Comput. Inf., 29(7), 149-158.

Korea Environment Corporation, 2026, AirKorea: Local air quality information, https://www.airkorea.or.kr/web/realSearch?pMENU_NO=97

Lim, J. H., Pang, S. K., Sohn, J. Y., 2010, The evaluation of air quality in educational child care centers, J. Educ. Environ. Res., 9(1), 1-10.

Ministry of Education, 2021, Manual for environmental hygiene and food hygiene management in schools (6th revision), Government manual, Sejong, Republic of Korea.

Ministry of Education, 2025a, Enforcement rule of the School Health Act, Ordinance of the Ministry of Education No. 366, Sejong, Republic of Korea.

Ministry of Education, 2025b, School Health Act, Act No. 21065, Sejong, Republic of Korea.

Ministry of Education, 2026, School environmental hygiene and food hygiene management manual (7th revision), Government manual No. 11-1342000-100198-01, Sejong, Republic of Korea.

Ministry of Environment, 2024, The 5th basic plan for indoor air quality management (2025-2029), Government plan, Sejong, Republic of Korea.

National Institute of Environmental Research, 2025, Indoor air quality process test standard, NIER Notification No. 2025-46, Incheon, Republic of Korea.

Park, J. H., Lee, T. J., Park, M. J., Oh, H. N., Jo, Y. M., 2020, Effects of air cleaners and school characteristics on classroom concentrations of particulate matter in 34 elementary schools in Korea, Build. Environ., 167, 106437.

Persily, A., de Jonge, L., 2017, Carbon dioxide generation rates for building occupants, Indoor Air, 27(5), 868-879.

Ryu, J. Y., 2025, Comparison of indoor air quality concentrations in childcare centers across metropolitan cities and provinces, J. Korean Soc. Environ. Technol., 26(3), 185-199.

Seong, N. C., Hong, Y. S., Yoon, D. W., 2012, The investigation of indoor air contamination levels in daycare facilities focused on uncontrolled in the capital area, J. Korean Soc. Living Environ. Syst., 19(3), 305-316.

Sohn, J. R., Yoon, S. W., Kim, Y. S., Roh, Y. M., Lee, C. M., Son, B. S., Yang, W. H., Lee, Y. G., Choi, H. Y., Lee, J. S., 2006, A Survey on the indoor air quality of some school classrooms in Korea, Indoor Environ. Technol., 3(1), 54-63.

Won, T. K., Ahn, S., Won, Y. J., 2026, Relationship between home indoor air quality and depression in Korean adults, Korean Public Health Res., 52(1), 33-45.

• Ph.D. candidate. Weon-Joo Lee
Department of Infrastructure Systems Engineering, Kyungnam University
leewj8080@naver.com
• Researcher. Jong-Bum Kim
Environmental Measurement and Analysis Center, Kyungnam University
alex0979@kyungnam.ac.kr
• Ph.D student. Yin-Hong Xu
Department of Infrastructure Systems Engineering, Kyungnam University
pakhoxyh@naver.com
• Professor. Jae-Yong Ryu
Department of Environmental Energy Engineering, Kyungnam University
jae0318@kyungnam.ac.kr