

연구논문

건강민감계층 이용시설 실내공기질 관리를 위한 중점관리물질 평가

지화성[†]

부산광역시보건환경연구원

Evaluation of Priority Pollutants for Indoor Air Quality Management in Facilities Used by Vulnerable Populations

Hwa-Seong Ji[†]

Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, Busan, 46616, Korea

Received January 23, 2026 / Revised February 26, 2026 / Accepted March 18, 2026

This study aimed to analyze the characteristics of indoor air quality (IAQ) in facilities, particularly child care centers and elderly care facilities, used by vulnerable populations in Busan and to identify priority pollutants requiring focused management for each facility type. Based on a comprehensive analysis of pollutant concentration levels, the frequency of high-concentration episodes, exceedance rates of IAQ maintenance standards, and environmental influencing factors, PM-2.5 was identified as the priority pollutant in elderly care facilities, whereas carbon dioxide (CO₂) and total airborne bacteria (TAB) were determined to be the pollutants requiring priority management in child care centers. Although PM-2.5 is largely influenced by outdoor air quality, cases of high indoor PM-2.5 concentrations suggest the potential presence of additional indoor sources in addition to outdoor air infiltration. CO₂ and TAB concentrations tended to increase in indoor spaces with higher occupancy density and elevated indoor temperatures, indicating that indoor sources were the dominant contributors. Therefore, differentiated IAQ management strategies are required for facilities used by vulnerable populations, focusing on priority pollutants that reflect the spatial and user characteristics of each facility type.

Key words: Indoor air quality, Vulnerable populations, Priority pollutants

1. 서 론

현재 국내에서는 다중이용시설, 신축 공동주택 및 대중교통을 이용하는 국민의 건강을 보호하고 환경상의 위험을 예방하기 위하여 “실내공기질 관리법”을 통해 실내공기질을 제도적으로 관리하고 있으며, 학교는 “학교보건법”, 산업현장은 “산업안전보건법” 등 개별 법령에 따라 실내공기질을 관리하고 있다. 국제적으로는 세계보건기구(World Health Organization, WHO)가 1987년 “유럽 대기질 가이드라인(Air Quality Guideline for Europe)”을 발간한 이후, 현재까지 실외 대기와 실내공기질에 모두 적용 가능한 미세먼지(PM-10), 초미세먼지(PM-2.5), 일산화탄소(CO), 폼알데하이드(HCHO), 휘발성유기화합

물질(VOCs) 등에 대한 가이드라인을 제시하고 있으며, 다수의 국가에서 실내공기질 기준 및 가이드라인 설정 시 이를 참고하고 있다.

한편, 잦은 폭염과 폭우 등 기후변화의 심화, 건물의 밀폐화, 재택근무와 원격수업의 보편화로 인해 실내 체류시간은 지속적으로 증가하고 있다. 또한, 다양한 실내 건축자재, 생활용품 및 인간 활동에서 기인하는 오염물질에 대한 노출 시간이 늘어나면서 쾌적하고 안전한 실내공기질에 대한 사회적 관심도 확대되고 있다. 이러한 실내환경 문제는 건물의 새집증후군과 헌집증후군, 차량의 새차증후군 등 환경성 질환 문제로까지 확대되는 추세이며, 환경복지사회의 전환과 함께 환경오염에 민감한 건강취약계층의 실내 생활공간 관리에 대한 중요성도 커지고 있

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: 051-309-2793, Email: hs121@korea.kr

다¹⁾. 특히, 다중이용시설 중 어린이집과 노인요양시설은 영유아와 노인이라는 특정 연령집단이 장시간 실내에 체류하는 생활공간이라는 점에서 일반 다중이용시설과 구별된다. 이들 연령층은 비자발적으로 특정 실내 공간에 집단적으로 체류하는 시간이 길어짐에 따라 오염물질에 노출될 가능성도 높고, 환경오염과 기후변화 등 외부 환경 요인에 의한 건강 영향에 상대적으로 민감하므로 대표적인 건강민감계층(Vulnerable populations)으로 분류될 수 있다²⁾. 이에 따라 “실내공기질 관리법”에서는 어린이집, 노인요양시설, 의료기관, 산후조리원, 실내어린이 놀이시설 등 건강민감계층 이용시설에 대해서는 일반 다중이용시설보다 강화된 실내공기질 유지기준을 적용하고 있다. 그러나 기후에너지환경부의 “전국 다중이용시설 등 지도·점검 결과보고서(2019~2023)”에 따르면, 전국 다중이용시설 11,456개소를 대상으로 실시한 실내공기질 검사 결과 유지기준을 초과한 233개 시설 중 어린이집이 106개소로 가장 높은 비중을 차지하였으며, 노인요양시설 역시 12개소에서 유지기준을 초과한 것으로 확인되었다³⁾. 이러한 결과는 건강민감계층 이용시설에 대한 제도적 관리에도 불구하고, 실질적인 오염도 저감과 효과적인 관리대책 마련이 여전히 필요함을 시사한다.

따라서, 본 연구에서는 부산지역 어린이집과 노인요양시설을 대상으로 실내공기오염물질의 농도 분포와 오염 특성을 분석하고, 실내공기질에 영향을 미칠 수 있는 환경요인을 평가하고자 하였다. 이를 통해 시설유형별 중점 관리가 필요한 오염물질을 도출함으로써, 건강민감계층 이용시설의 실내공기질 저감 및 효율적인 관리대책 수립을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상

전국적으로 저출산과 고령화의 영향으로 어린이집 수

는 감소하는 반면에 노인요양시설은 지속적으로 증가하는 추세를 보이고 있다. “실내공기질 관리법”의 적용을 받는 전국 다중이용시설 중 어린이집은 2019년 5,981개소에서 2023년 5,541개소로 440개소(7.4%) 감소한 반면, 노인요양시설은 같은 기간 1,683개소에서 2,155개소로 355개소(28.0%) 증가하였다³⁾. 부산지역 역시 전국적인 추세와 유사하게 나타났으며, 다중이용시설 중 어린이집은 2019년 269개소에서 2024년 248개소로 21개소(7.8%) 감소한 반면, 노인요양시설은 같은 기간 62개소에서 69개소로 7개소(10.1%) 증가한 것으로 확인되었다(Table 1). 본 연구에서는 2019년부터 2024년까지 부산지역 다중이용시설 중 어린이집 203개소와 노인요양시설 55개소를 포함한 총 258개소를 대상으로 실내공기질 검사 결과를 평가하였다.

2.2. 실내공기오염물질

실내공기오염은 건축자재, 생활용품 및 인간 활동 등에서 기인하는 내부 요인과 오염된 외부 대기의 실내 유입에 따른 외부 요인에 의해 발생한다. 본 연구에서는 어린이집과 노인요양시설을 대상으로 “실내공기질 관리법”에서 유지기준으로 규정하고 있는 미세먼지(PM-10), 초미세먼지(PM-2.5), 이산화탄소(CO₂), 폼알데하이드(HCHO), 총부유세균(Total Airborne Bacteria, TAB)을 측정하였다.

미세먼지는 공기역학적 직경 10 μm 이하의 PM-10과 2.5 μm 이하의 PM-2.5로 구분되며, 외부 대기의 실내 유입 또는 실내 활동 과정에서 발생하여 천식, 기침 등 호흡기질환을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이산화탄소는 대기의 자연적 구성 성분이자 사람의 호흡 과정에서 발생하며, 실내 농도가 증가하는 경우 두통, 졸림 및 현기증 등의 증상을 유발할 수 있다. 총부유세균은 음식물쓰레기나 비위생적 환경 등에서 발생하여 공기 중에 부유하거나 인체와 접촉하여 염증 반응 및 피부질환을 유발할 수 있다. 또한 폼알데하이드는 건축자재, 가구 및 생

Table 1. Child care centers and elderly care centers in this study

	Public-use facilities in Busan			Study subjects		
	Total	Child care centers	Elderly care centers	Total	Child care centers	Elderly care centers
				258	203	55
2024	1,488	248	69	49	36	13
2023	1,475	251	69	50	34	16
2022	1,490	259	66	59	55	4
2021	1,504	266	63	38	35	3
2020	1,493	267	59	7	0	7
2019	1,441	269	62	55	43	12

활 화학제품 등에서 방출되는 대표적인 실내 오염물질로 눈·코·목에 자극을 주고 두통, 구토 및 호흡기계 질환을 유발하는 것으로 보고되고 있다⁴⁾. 실내공기질 관리법에 규정된 각 오염물질의 유지기준은 세계보건기구(WHO) 가이드라인과 비교하여 Table 2에 제시하였다. 본 연구에서는 “실내공기질 관리법”보다 더 엄격한 기준을 적용하고 있는 “부산광역시 실내공기질 관리에 관한 조례(제 7768호, 2025.12.10.)”에 따라 실내공기질을 평가하였다.

2.3. 시료채취 및 분석방법

모든 시료의 채취 및 분석은 “실내공기질 공정시험기준”에 따라 수행하였으며, 각 오염물질별 시료 채취 시간, 분석 방법 및 사용 장비는 Table 3에 제시하였다⁵⁾. 미세먼지는 시료채취장비(Minivol-TAS 등)에 테플론 여과지를 장착한 후 5~7 L/min의 유량으로 24시간 동안 채취하여 채취 전후의 여과지 중량의 차이로 농도를 측정하였다. 이산화탄소는 비분산적외선법을 사용하는 이산화탄소 측정기(G150 등)를 이용하여 1시간 연속으로 자동 측정하였다. 폼알데하이드는 시료채취펌프(MP-Σ100KNⅡ)에 오존스크러버(Supelco)를 장착한 2,4-DNPH 카트리지를(Supelco)를 연결하여 1.0 L/min의 유량으로 30분씩 2회 채취하였고, 채취된 시료는 아세트나이트릴로 추출하여 고성능액체크로마토그래프(HPLC)를 이용하여 분석하였

다. 총부유세균은 공기포집기(MAS-100)를 이용하여 100 L/min의 유량으로 1분씩 공기를 흡입하여 장비 내에 미리 장착된 배지(TSA, Tryptic Soy Agar)에 충돌시켜 각 3회 채취하였다. 부유세균이 흡착된 배지를 35°C 배양기에서 48시간 배양하여 증식된 세균의 집락(Colony)수를 세어 포집한 공기의 단위 체적당 집락수(CFU/m³)로 산출하였다.

시료 채취 및 측정은 대상 시설의 실내공기질을 대표할 수 있으면서 주변의 직접적인 오염 발생원이나 환기 설비의 영향을 받지 않는 지점을 선정하여 바닥면으로부터 1.2 m~1.5 m 높이에서 실시하였으며, 실내 온도와 상대습도를 함께 측정하였다. 본 연구에서 대상 시설 258 개소는 모두 연면적 10,000 m² 이하로 공정시험기준에 따라 각 시설별로 2개의 대표 지점에서 시료 채취 및 측정하였고, 각 지점에서의 산술 평균값을 해당 시설의 실내 공기질 농도로 평가하였다. 어린이집은 어린이들의 활동이 많은 보육실 264개 지점과 유희실 73개 지점을 주요 시료채취 및 측정지점으로 선정하였고, 노인요양시설도 재실자들의 활동시간이 많은 생활실 53개 지점과 로비 및 휴게실 44개 지점을 중심으로 선정하였다. 시설별 주요 시료 채취 및 측정지점은 Table 4에 제시하였으며, 실내 공기질에 영향을 줄 수 있는 시설 환경 요인을 파악하기 위하여 2024년 조사대상시설 49개소에 대해서는 시설입

Table 2. Standards of indoor air quality

Indoor air pollutants	Maintenance standards on Indoor Air Quality Control Act for vulnerable facilities	Mandatory standards on indoor air quality management in Busan for vulnerable facilities	WHO Guideline
PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	75	75	50
PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	35	35	25
CO ₂ (ppm)	1000	950	-
HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	80	70	100
TAB (CFU/m ³)	800	800	-

Table 3. Sampling and analysis method of indoor air pollutants

Indoor air pollutants	Sampling	Methods	Equipment
PM-10	24 hr	ES 02302.1d	Minivol-TAS (Airmetrics, US) BMW-2500 (Totaleng co.,LTD, KR)
PM-2.5	24 hr	ES 02302.1d	Minivol-TAS2.5(Airmetrics, US) BMW-3500 (Totaleng co.,LTD, KR)
CO ₂	1 hr	ES 02905.1a	IQ-610extra (Graywolf, US) G150 (Geotech, UK)
HCHO	30 min (2 times)	ES 02601.1e	MP-Σ100KNⅡ (Sibata, JP), HPLC (LC-20A, Shimadzu, JP)
TAB	100 L (3 times)	ES 02701.1e	MAS-100 (Merck, GER)

Table 4. Sampling sites of child care centers and elderly care centers in this study

Child care centers		Elderly care centers	
Total	406	Total	110
Child care room	264	Nursing space	53
Play room	73	Lobby and lounge	44
Hall and hallway	69	Therapy room, etc	13

지, 형태, 운영기간, 연면적, 이용자수 등 시설현황을 추가로 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 실내공기오염물질별 농도 분포 및 고농도 발생 특성

2019년부터 2024년까지 부산지역 어린이집과 노인요양시설 총258개소를 대상으로 실내공기오염물질을 측정 한 결과, 그 중 96.5%에 해당하는 249개소는 실내공기질 유지기준 이내로 조사되었다. 반면, 어린이집 7개소(3.4%)와 노인요양시설 2개소(3.6%)에서는 일부 오염물질이 유지기준을 초과하였다. 어린이집은 이산화탄소 2개소, 폼알데하이드 2개소, 총부유세균 3개소가 유지기준을 초과 하였으며, 노인요양시설은 초미세먼지 1개소와 총부유세균 1개소가 유지기준을 초과하였다. 또한 어린이집 36개소(17.7%)와 노인요양시설 5개소(9.1%)에서는 1개 항목 이상이 유지기준의 90%를 초과하는 고농도로 조사되어, 실내공기오염물질의 고농도 발생 우려가 잠재적으로 존재하는 것으로 나타났다. 전체 농도 분포는 Table 5에 제시하였으며 각 농도 구간에 따른 시설 분포를 Fig. 1에 제시하였다.

미세먼지의 전체 평균 농도는 $19.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며 농도 범위는 $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $59.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지로 모든 시설에서 유지기준 이내였다. 시설 유형별 평균 농도는 어린이집 $19.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 노인요양시설 $20.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 유사한 수준을 보였으며, 통계적으로도 유의한 차이가 나타나지 않았다

($p>0.05$). 유지기준의 90%에 해당하는 $67.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과한 시설은 없었고, 전체 시설의 92.6%(239개소)는 유지기준의 50%인 $37.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 낮은 농도 수준으로 조사되었다. 초미세먼지의 전체 평균 농도는 $11.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 농도 범위는 $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $48.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 시설 유형별 평균농도는 어린이집 $10.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 노인요양시설 $13.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노인요양시설에서 유의하게 높게 나타났다($p<0.05$). 유지기준의 90%인 $31.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과한 시설은 어린이집 1개소와 노인요양시설 2개소로 전체 시설의 1.1%에 해당하였으며, 이 중 노인요양시설 1개소는 유지기준을 초과하였다.

이산화탄소의 전체 평균 농도는 607 ppm이었고, 농도 범위는 364 ppm에서 975 ppm로 나타났다. 시설 유형별 평균농도는 어린이집 620 ppm, 노인요양시설 560 ppm으로 어린이집에서 유의하게 높았다($p<0.05$). 유지기준의 90%인 855 ppm을 초과한 시설은 어린이집 15개소(7.4%)와 노인요양시설 1개소(1.8%)로 어린이집에서 고농도 발생 빈도가 높았으며, 이 중 어린이집 2개소는 유지기준을 초과하였다. 총부유세균의 전체 평균 농도는 345 CFU/ m^3 였고, 농도 범위는 33 CFU/ m^3 에서 1083 CFU/ m^3 였다. 시설 유형별 평균 농도는 어린이집 372 CFU/ m^3 , 노인요양시설 244 CFU/ m^3 로 어린이집에서 유의하게 높게 나타났다($p<0.05$). 유지기준의 90%인 720 CFU/ m^3 를 초과한 시설은 어린이집 20개소(9.9%)와 노인요양시설 1개소(1.8%)로 어린이집에서 고농도 발생 빈도가 높았으며, 이 중 어린이집 3개소와 노인요양시설 1개소는 유지기준을 초과하였다.

Table 5. Analysis results of indoor air pollutants from 2019 to 2024

Indoor air pollutants	Total				Child care centers				Elderly care centers			
	Avg.	Min.	Max.	n	Avg.	Min.	Max.	n	Avg.	Min.	Max.	n
PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	19.2	2.6	59.6	258	19.0	2.6	59.6	203	20.0	6.4	59.2	55
PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	11.3	1.0	48.9	213	10.6	1.0	33.3	160	13.3	4.3	48.9	53
CO ₂ (ppm)	607	364	975	258	620	364	975	203	560	365	856	55
TAB (CFU/ m^3)	345	33	1083	258	372	33	1083	203	244	48	961	55
HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	17.5	1.2	103.2	258	17.8	2.1	103.2	203	16.5	1.2	61.7	55

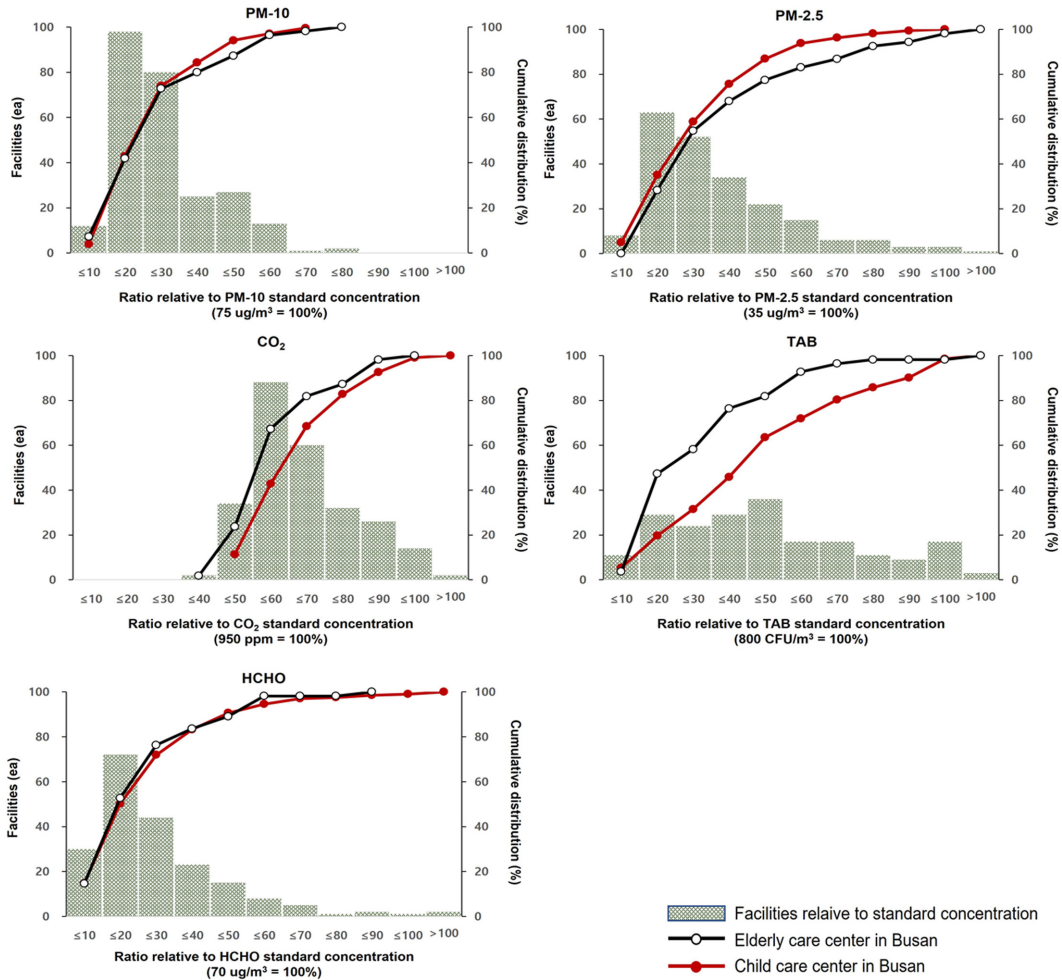


Fig. 1. Facility distribution by concentration ratio.

폼알데하이드의 전체 평균 농도는 17.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였고 농도 범위는 1.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 103.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지였다. 시설군별 평균 농도는 어린이집 17.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 노인요양시설 16.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 어린이집에서 다소 높은 경향을 보였으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다($p>0.05$). 유지기준의 90%인 63.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과한 고농도 시설은 어린이집 3개소(1.2%)였으며, 이 중 2개소는 유지기준을 초과하였다. 반면 전체 시설의 90.3%에 해당하는 233개소가 유지기준의 50%인 35.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 낮은 농도 수준으로 조사되었다.

3.2. 시설 유형별 실내공기질 경향성 검토

실내공기질은 시설의 환경 조건, 이용 특성, 시료 채취 시점 등 다양한 요인에 따라 변동성이 크다. 이에 부산지역 어린이집과 노인요양시설의 오염물질 농도 분포 수준

과 시설 유형별 특성이 일반적인 경향으로 해석 가능함을 검토하기 위하여, 전국 다중이용시설 중 어린이집과 노인요양시설의 연도별 평균 농도와 비교하였다. 전국 평균 농도는 기후에너지환경부에서 공개한 2019년부터 2023년까지의 다중이용시설 실내공기질 지도·점검 결과를 활용하였으며, 부산지역 자료는 연도별 일부 미측정 자료를 제외한 평균값과 비교하였다. 그 결과 각 오염물질별로 시설 유형에 따른 농도 분포는 전국과 부산지역에서 유사한 경향으로 나타났다(Fig. 2).

시설 유형별로 미세먼지와 초미세먼지는 노인요양시설에서 어린이집보다 평균 농도가 높은 경향을 보였으며, 특히 2021년과 2022년 부산지역 노인요양시설 평균 농도는 부산지역 다중이용시설 전체 평균 농도보다 높은 수준을 나타내기도 하였다. 이러한 결과는 서울, 인천 및 울산 지역의 건강민감계층이 이용하는 다중이용시설을 대

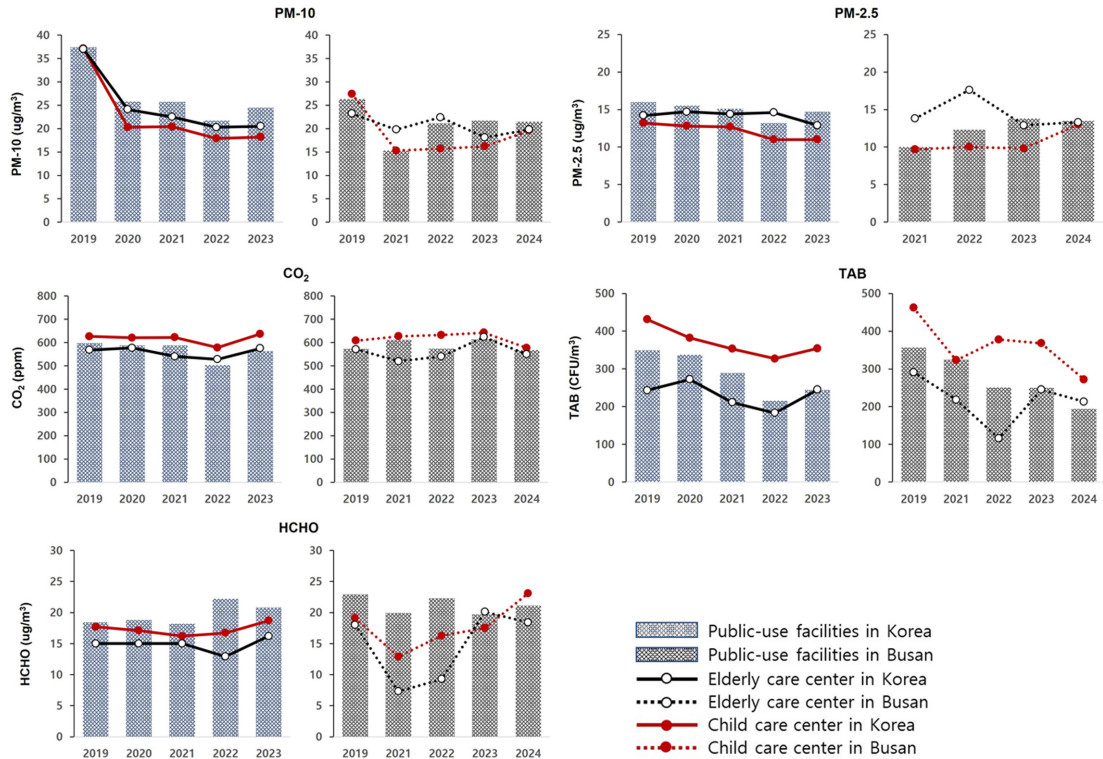


Fig. 2. Comparison of indoor air pollutants by year in Korea and Busan.

상으로 수행된 선행 연구들에서도 공통적으로 확인되었는데, 노인요양시설은 장시간의 실내 체류, 온도 유지를 위한 제한적인 환기 특성 등으로 인해 재실자들의 활동에서 발생하는 오염물질이 실내에 축적되기 쉬워 미세먼지 및 초미세먼지 농도가 어린이집보다 높게 나타나는 것으로 보고되고 있다⁶⁻⁸⁾.

이산화탄소와 총부유세균의 평균 농도는 부산지역뿐만 아니라 전국적으로도 어린이집에서 노인요양시설보다 높았으며, 전체 다중이용시설 평균과 비교하더라도 상대적으로 높은 경향을 보였다. 이는 노인에 비해 영유아의 신체활동과 호흡률이 커서 실내 이산화탄소 농도가 증가하기 쉬운 특성을 반영한 결과이며, 어린이집 특성상 보육공간과 조리실, 화장실 등이 인접한 경우가 많아 총부유세균 농도가 유의하게 높다는 기존 연구 결과와도 일치하였다^{3,9,10)}. 따라서 어린이집에서 이산화탄소와 총부유세균의 농도가 높은 것은 상대적으로 소규모 공간에서 이용 밀집도가 높고 실내 활동이 많은 공간적 이용 특성에 기인한 것으로 판단되었다.

폼알데하이드의 평균 농도는 어린이집과 노인요양시설 모두 전체 다중이용시설에 비해 낮은 수준을 보였으나, 노인요양시설보다는 어린이집에서 농도가 다소 높은 경향

을 나타내었다. Joen et al.(2021)의 연구와 환경부(2023) 조사 결과에 따르면 다중이용시설 중 폼알데하이드 농도가 높은 시설은 미술관, 박물관, 전시시설 등이며, 전시·진열물품이 많고, 전시를 위한 잦은 내부공사를 원인으로 보고하고 있다.^{3,10)} 이러한 점을 고려할 때 어린이집은 시설 규모는 상대적으로 작지만 보육실과 유희실을 중심으로 교육 및 놀이용품, 매트, 장식품 등이 밀집되어 있어 폼알데하이드 방출 가능성이 큰 것으로 판단되었다.

측정 시설과 지점별 환경 조건의 차이에도 불구하고 시설 유형별 상대적인 농도 수준이 일관되게 나타났고, 전국과 부산지역에서 각각 조사한 결과에서 유사한 농도 분포 경향이 확인되었다. 비록 시설 유형에 따른 평균 농도를 단순 비교하는 것으로 결과를 일반화하는 데에 한계는 있으나, 어린이집과 노인요양시설에서 실내공기질의 차이는 두 시설의 이용 특성과 공간 구조 등 고유한 시설 특성에서 기인한 일반적인 차이로 해석할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3. 실내공기오염물질 고농도 발생 시설 특성

실내공기오염물질이 유지기준의 90%를 초과하여 고농도로 발생한 시설의 특성을 파악하기 위하여 시설환경 조

Table 6. Average concentration of indoor air pollutants by various facility factors in 2024

Facility factors	Total	Child care center	Elderly care center	Average concentrations					
				PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO ₂ (ppm)	HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	TAB (CFU/ m^3)	
Zones of use	Industrial	3	3	0	11.1	5.9	555	19.2	135
	Commercial	9	5	4	20.9	14.7	590	25.4	239
	Residential	29	25	4	18.6	12.0	562	21.4	290
	Green	8	3	5	25.6	17.8	583	20.7	227
Type of building	Isolate	41	30	11	20.5	13.6	561	21.3	243
	Complex	8	6	2	15.8	10.3	619	25.0	352
Operating period (year)	< 1	15	12	3	18.5	11.8	551	17.5	287
	< 10	10	7	3	18.6	13.0	588	22.5	233
	< 20	12	8	4	15.2	9.9	587	30.8	218
	≥ 20	12	9	3	26.7	17.9	563	18.1	295
Area (m^2)	< 1000	36	36	0	19.6	13.0	577	23.0	278
	≥ 1000	13	0	13	20.1	13.2	551	18.8	215
Number of users (people)	< 50	9	8	1	21.5	15.2	605	28.5	278
	< 100	28	23	5	19.2	12.3	565	21.0	270
	≥ 100	12	5	7	19.7	13.1	556	19.0	227

사가 수행된 49개 시설에 대한 입지, 건물 형태, 운영 기간, 연면적 및 이용자 수 등 시설 환경요인을 구간별로 구분하여 실내공기질 농도와 함께 Table 6에 제시하였다.

어린이집은 36개소 중 주거지역에 25개소가 위치하여 가장 높은 비율을 차지하였으며, 노인요양시설은 13개소 중 5개소가 녹지지역에 위치한 것으로 나타났다. 건물 형태는 대부분 단독 건물로 운영되고 있었으나, 8개 시설은 건물 내 다른 용도 시설과 함께 일부 공간을 사용하고 있었다. 이러한 입지 및 건물 형태는 실내공기질 농도와 유의미한 상관성은 확인되지 않았다. 시설 운영 기간이 20년 이상인 시설 12개소 중 9개소는 어린이집이었으며, 노인요양시설은 13개소 중 10개소가 운영 기간 20년 이내로 조사되었다. 운영 기간이 1년 미만인 구간에는 최근 1년 이내 바닥재, 벽지, 페인트 등 부분 또는 전체 개보수가 이루어진 시설도 포함하였다. 새집증후군의 주요 원인 물질로 알려진 폼알데하이드는 운영 기간이 1년 미만이거나 최근 1년 이내 개보수가 이루어진 시설에서 평균 농도 $17.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮게 나타나 신축건물에서 폼알데하이드가 높게 검출된다는 일반적인 경향과는 차이를 보였다⁷⁾. 반면 미세먼지와 초미세먼지는 운영 기간이 20년 이상인 시설에서 각각 $26.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $17.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평균 농도가 가장 높았다. 이는 노후 건축물에서 건축자재의 마모 및 시설 노후화로 인해 실내 먼지 발생이 증가

할 수 있다는 선행 연구 결과와도 유사하였다^{8,11)}. 시설 연면적이 $1,000 \text{m}^2$ 이상인 시설 13개소는 모두 노인요양시설이었으며, $1,000 \text{m}^2$ 미만인 시설 36개소는 모두 어린이집이었다. 이용자 수는 직원 수를 포함한 일평균 이용자 수를 기준으로 조사하였으며, 이용자 수가 100명 미만인 시설은 어린이집이 31개소로 대부분이었고 이용자 수가 100명 이상인 시설 12개소 중 7개소는 노인요양시설로 나타났다. 연면적 $1,000 \text{m}^2$ 미만이고 이용자 수가 100명 미만인 구간은 대부분 어린이집에 해당하였으며, 이 구간에서 이산화탄소, 총부유세균 및 폼알데하이드 농도가 상대적으로 높게 나타났다. 이는 시설 규모와 이용자 수에 따른 농도 분포가 단순한 물리적 규모 자체의 영향보다는 앞서 서술한 어린이집과 노인요양시설의 밀집도와 실내활동 등 시설 유형별 특성을 반영한 결과로 해석된다. 본 연구에서는 시설의 입지, 건물형태, 운영 기간 등 개별 물리적 환경요인이 실내공기오염물질 고농도 발생 시설에 미치는 영향을 검토하였으나, 뚜렷한 경향성이나 통계적으로 유의한 상관관계는 확인되지 않았고 일부 시설에 대해서만 이루어졌다는 점에서 한계가 있었다.

실내공기질은 시설의 물리적 환경요인뿐만 아니라 이용 형태, 재실자 활동, 측정지점 등 다양한 내부 요인에 의해 영향을 받을 수 있으므로 시설 내 측정 지점에 따른 실내공기질 특성을 추가로 분석하였다. 총 258개 대

Table 7. Substances exceeding 90% maintenance standards by sampling sites

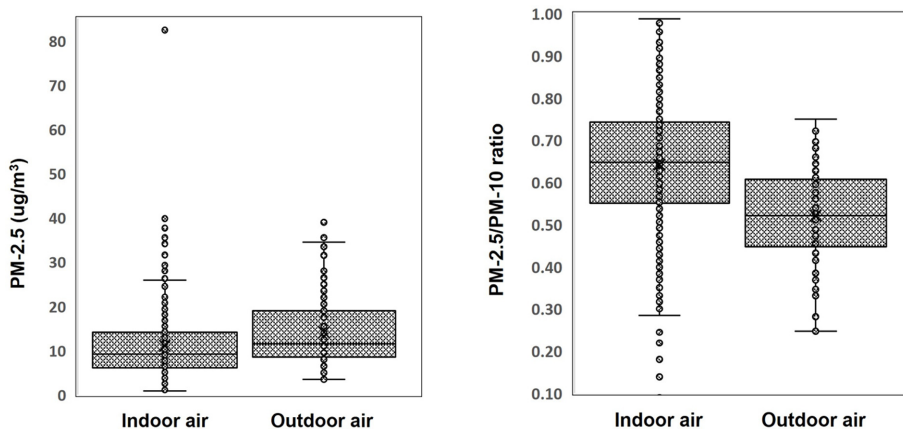
Facilities	Sampling sites (N)	Number and percentage of substances exceeding 90% of the maintenance standards				
		PM-10	PM-2.5	CO ₂	TAB	HCHO
Total (406)						
Child care centers	Child care room (264)	1 (0.4%)	2 (2.1%)	31 (11.7%)	34 (12.9%)	5 (1.9%)
	Play room (73)	-	1 (1.4%)	7 (9.6%)	7 (9.6%)	2 (2.7%)
	Hall and hallway, etc (69)	-	-	7 (10.1%)	3 (4.3%)	1 (1.4%)
Total (110)						
Elderly care centers	Nursing space (53)	1 (1.9%)	2 (3.8%)	4 (7.5%)	3 (5.7%)	-
	Lobby and lounge (44)	-	4 (9.1%)	2 (4.5%)	1 (2.3%)	1 (2.3%)
	Therapy room, etc (13)	-	-	-	1 (0.1%)	-

상 시설에서 시설별로 2개 지점을 선정하여 어린이집 406개 지점과 노인요양시설 110개 지점에서 측정된 결과 중에서 유지기준의 90%를 초과하여 고농도로 검출된 지점의 수와 빈도를 Table 7에 제시하였다.

어린이집에서는 보육실에서 총부유세균과 이산화탄소가 각각 12.9%와 11.7%의 빈도로 높게 검출되었으며, 노인요양시설에서는 로비 및 휴게실에 초미세먼지가 9.1%로 가장 높은 빈도를 보였으며 생활실에서는 이산화탄소가 7.5%의 빈도로 나타났다. 이산화탄소는 각 시설에서 재실자의 호흡에 의한 발생 특성과 관련된 것으로 해당 공간에서 이용자 밀집도와 활동시간이 상대적으로 높았음을 반영하는 결과였다.

노인요양시설에서 고농도 발생 빈도가 높은 초미세먼지는 외부에서 유입되거나, 실내에서는 조리나 청소 활동 등 사람의 활동에 의해 발생하거나 새로운 2차 에어로졸 입자가 형성될 수 있는 것으로 보고된 바 있다^{12,13}. 이에 초미세먼지의 실내 발생 가능성을 검토하기 위하여 지점별 실내·외 초미세먼지 농도 분포와 초미세먼지와 미세먼

지의 농도 비율(PM-2.5/PM-10 ratio)을 비교하여 Fig. 3에 제시하였다. 초미세먼지의 지점별 실내 평균 농도는 11.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 0.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 82.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 범위였으며, 실외 평균 농도는 14.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 3.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 35.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 범위로 나타나 실내 평균 농도가 통계적으로 유의하게 낮았다($p < 0.05$). 반면에 초미세먼지와 미세먼지의 농도비를 비교한 결과, 실외 대기 중 평균 농도비는 0.52였으나, 실내에서는 평균 0.64로 나타나 실내에서 초미세먼지의 상대적 농도 비율이 통계적으로 유의하게 증가하는 경향을 보였다($p < 0.05$). 이는 초미세먼지가 미세먼지보다 입자크기가 작고 가벼워 상대적으로 실내로 유입되기 쉬운데 환기 부족으로 실내에 축적되었거나, 실내에서 추가적인 발생원이 존재할 가능성을 시사한다. 특히, 유지기준의 90% 이상 고농도로 발생한 6개 지점에서 초미세먼지 실내 평균 농도는 43.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (32.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 82.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로, 이는 동일 지점의 실외 평균 농도 27.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (12.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 39.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 통계적으로 유의하게 높은 수준이었다($p < 0.05$). 또한 해당 지점의 초미세

**Fig. 3.** Indoor and outdoor PM-2.5 concentrations and PM-2.5/PM-10 ratio.

먼지와 미세먼지 농도비는 평균 0.82로 전체 평균보다 높게 나타나 실내 미세먼지 중 초미세먼지가 차지하는 비율이 높은 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 실내 초미세먼지가 고농도로 나타나는 경우 외부 대기 유입뿐만 아니라 실내에서의 추가적인 발생원이 존재할 가능성이 있음을 보여준다. 노인요양시설은 시설 운영 특성상 장시간 체류 인원이 많고 실내 온도 유지를 위해 환기율이 낮은 구역이 존재하는 경우가 있으며, 청소소독 및 의료용 화학물질 사용 빈도가 높아 실내 휘발성 유기화합물(VOCs)의 방출과 산화제가 존재할 가능성이 높은 환경을 가진

다. 이러한 물질들은 실내 환경 조건에 따라 산화반응을 통해 2차 유기 에어로졸 형성으로 이어질 수 있는 것으로 보고되고 있어 노인요양시설에서 초미세먼지의 고농도 발생 빈도가 높은 특성과의 관련성이 있을 것으로 판단된다^{12,13}).

3.4. 환경영향요인 분석

실내공기질에 영향을 미치는 환경요인과 실내공기오염물질 간의 상호작용을 규명하기 위하여 대기 중 미세먼지 및 초미세먼지 농도와 실내 온도 및 습도를 포함한 상

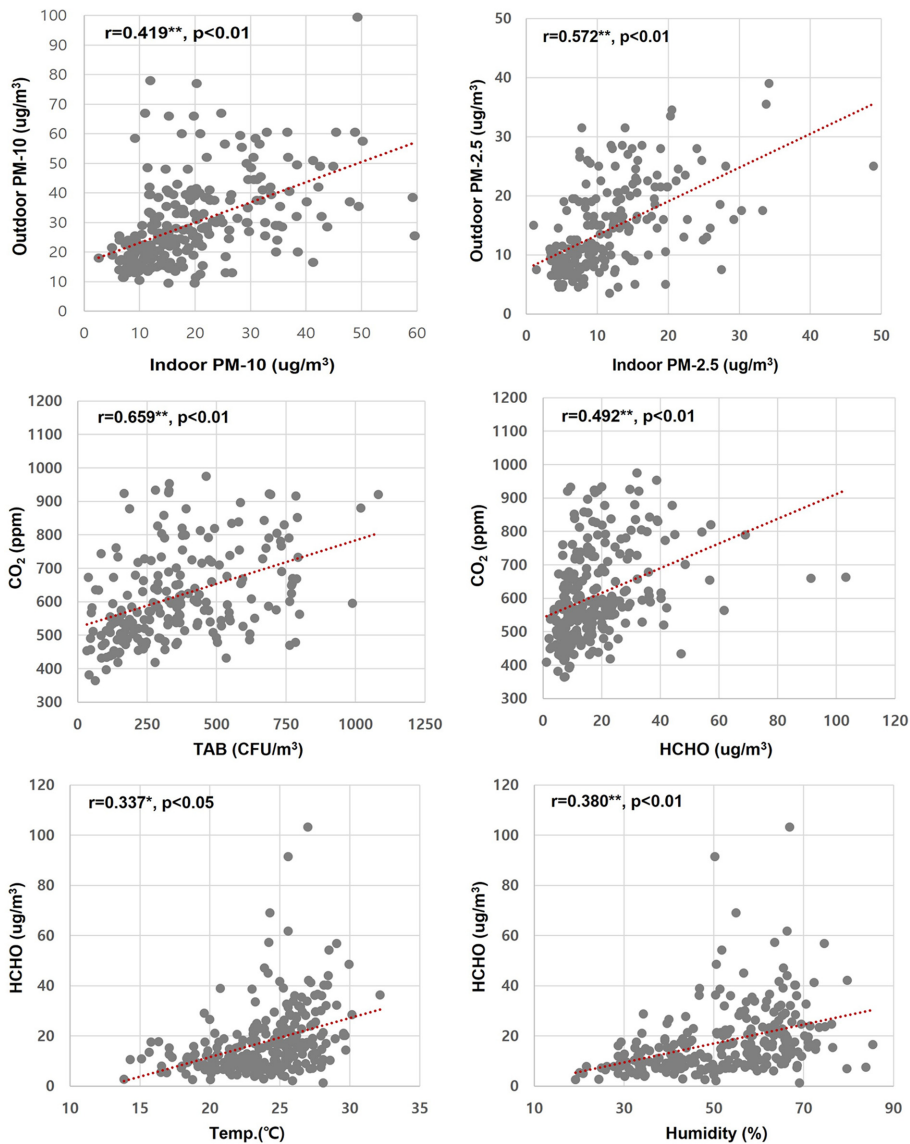


Fig. 4. Scatter plots and spearman's correlation coefficients among factors.

관분석(Spearman's correlation analysis)을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 제시하였다. 또한 계절적 영향과 실내 환경조건 변화를 고려하기 위해 월별 농도 분포를 Fig. 5에 나타내었고, 대기 중 미세먼지와 초미세먼지 농도가 실내공기질에 미치는 영향을 평가하기 위해 실내·외 농도비(I/O ratio)를 산정하여 Fig. 6에 제시하였다. 이때 대기 중 미세먼지와 초미세먼지 농도는 시료 채취일부터 다음날까지의 부산 지역 일평균 농도를 사용하였다¹⁴⁾. 상관분석 결과 실내 미세먼지와 초미세먼지는 각각 대기 중 미세먼지(0.419**, $p < 0.01$) 및 초미세먼지(0.572**, $p < 0.01$)와 유의한 상관관계를 나타내어 실외 대기질이 실내 농도에 직접적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 또한 실내 미세먼지와 초미세먼지는 3월부터 증가하여 각각 5월(27.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)과 6월(16.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 농도가 높았으며, 여름철에 감소한 후 10월 이후 다시 증가하는 계절적 변동 특성을 나타내었다. 이러한 변화 양상은 대기 중 미

세먼지와 초미세먼지의 계절적 변동과 유사하여, 실내 미세먼지 농도가 외부 대기질 변화에 크게 의존함을 나타낸다. 실내외의 농도비(I/O ratio) 분석 결과에서도 미세먼지는 전체 시설의 85%, 초미세먼지는 76%에서 I/O ratio가 1 이하로 나타나, 실내 발생 요인보다는 실외 유입에 의해 실내 농도가 주로 결정되는 것으로 확인되었다. 이는 실내 미세먼지 농도가 대기 중 미세먼지 농도 증감 수준에 따라 직접적으로 변동하며, 외부 영향요인이 지배적임을 명확하게 보여준다.

한편, 이산화탄소는 총부유세균(0.659**, $p < 0.01$) 및 폼알데하이드(0.492**, $p < 0.01$)와 각각 유의한 상관관계를 보여, 이들 물질이 실내에서 유사한 거동 특성을 가지는 것으로 나타났다. 이산화탄소는 3월, 6월, 7월 및 12월에 높은 농도를 보였는데, 이는 난방 및 냉방으로 인해 실내 밀폐율이 증가하는 시기에 환기 부족, 실내 활동 및 인체 호흡에 의한 발생이 증가하기 때문으로 해석된다. 총부유

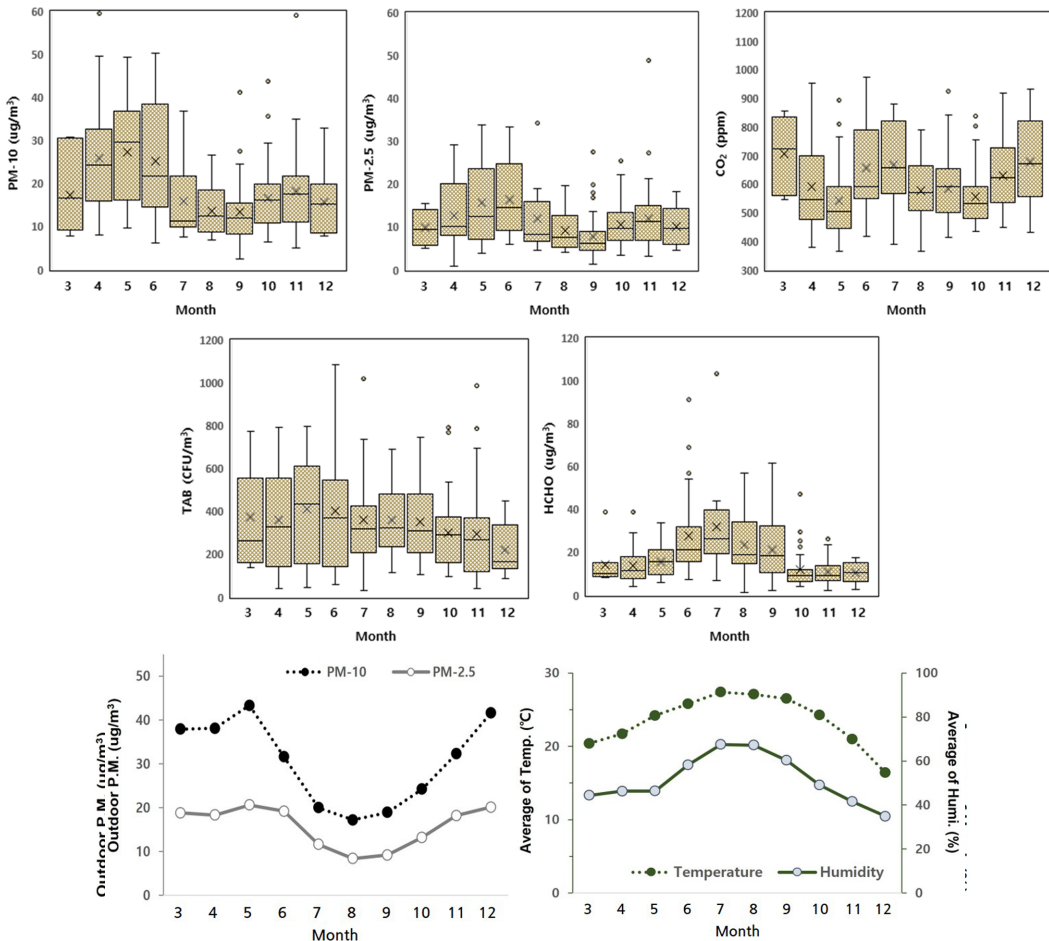


Fig. 5. Monthly distribution of indoor air pollutants.

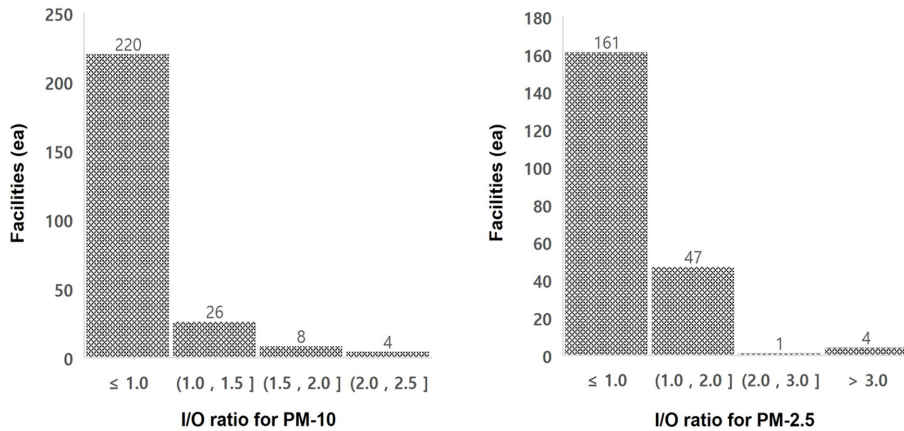


Fig. 6. I/O ratio of PM-10 and PM-2.5.

세균은 실내 온도와 습도가 상승하는 5월과 6월에 농도가 증가하는 경향을 보였는데, 이는 기온 상승에 따른 미생물 활성도가 증가하기 때문으로 판단되었다¹⁰⁾. 폼알데하이드는 6월에서 9월까지 높은 농도 분포를 보였고, 특히 7월에 최대 농도를 나타내었다. 상관분석 결과에서도 실내 온도(0.337*, $p < 0.05$) 및 습도(0.380**, $p < 0.01$)와 유의한 상관관계를 나타내어, 실내 온도 상승에 따른 휘발성 증가가 주요 원인으로 판단되었으며, 이러한 특성은 선행 연구 결과와도 일치한다¹⁵⁾. 이산화탄소가 대표적인 환기 지표로 활용되고 있다는 점을 고려할 때¹⁶⁾, 실내 이산화탄소가 증가하고 환기가 부족한 환경에서 총부유세균 또는 폼알데하이드의 농도 또한 함께 증가할 가능성이 큰 것으로 해석된다. 특히, 실내 온도가 상승하는 계절에는 총부유세균의 생물학적 활성 증가와 폼알데하이드의 휘발성 증가 등 각 물질의 고유 특성이 복합적으로 작용하여 실내 농도 축적이 더 심화될 수 있음을 시사한다.

아울러, 이산화탄소, 총부유세균 및 폼알데하이드는 실외 농도를 직접 측정하지 않아 문헌 고찰을 통해 실외 농도비를 검토하였다^{11,17,18)}. 그 결과, 이산화탄소(1.6~2.7), 총부유세균(2.4~4.9), 폼알데하이드(2.3~5.5) 모두 1.0 이상으로 나타나, 실외보다 실내 발생원의 영향이 상대적으로 큰 것으로 판단되었다. 이는 환기가 부족한 실내 환경에서 내부 오염원이 증가하고 축적되는 특성을 실내·외 농도비를 통해서도 뒷받침하는 결과이다.

4. 결 론

본 연구는 부산지역 어린이집과 노인요양시설을 대상으로 건강민감계층 이용시설의 실내공기질 특성을 분석

하고, 오염물질별 농도 수준, 고농도 발생 빈도, 실내공기질 유지기준 초과 비율 및 환경영향요인을 종합적으로 고려하여 시설 유형별 중점관리물질을 도출하고자 하였다. 연구 결과, 대부분의 시설은 실내공기질 유지기준 이내로 관리되고 있으나, 일부 시설에서 특정 오염물질은 유지기준의 90%를 초과하는 고농도 발생 및 유지기준 초과 사례가 확인되었고 시설에 따라 실내공기질 특성이 뚜렷하게 구분되었다.

미세먼지(PM-10)는 모든 시설에서 유지기준 이내로 관리되고 고농도 발생 빈도도 낮게 나타났으나, 초미세먼지(PM-2.5)는 시설 유형별로 차별적인 특성을 보였다. 노인요양시설의 초미세먼지 평균 농도는 어린이집보다 유의하게 높았으며, 고농도 검출 빈도와 유지기준 초과 사례 역시 상대적으로 높게 나타났다. 실내 초미세먼지는 대기 중 초미세먼지와 유의한 상관관계를 보였고, 실내·외 농도비(I/O ratio) 분석에서도 대부분 1 이하로 나타나 실외 대기질의 영향을 크게 받는 특성을 확인하였다. 특히, 초미세먼지가 고농도로 검출된 경우에는 실내 농도가 실외보다 높고 실내미세먼지 중 초미세먼지가 차지하는 비율이 평균 0.82로 높게 나타나 외부 유입뿐만 아니라 실내 축적 또는 추가적인 실내 발생원의 영향 가능성이 확인되었다.

반면, 어린이집에서는 이산화탄소와 총부유세균 평균 농도가 노인요양시설보다 유의하게 더 높았고, 고농도 발생 빈도와 유지기준 초과 사례도 더 많았다. 이산화탄소와 총부유세균 농도는 실내 온도 상승 및 환기 부족 시 농도가 함께 증가하는 경향을 보였으며, 통계적으로도 유의한 상관관계를 보였다. 문헌 고찰을 통한 실내·외 농도비 분석에서도 모두 1 이상으로 나타나 실내 발생원의 영

향이 지배적인 오염물질로 판단되었다. 특히 어린이집 공간 중 보육실에서 이산화탄소와 총부유세균의 고농도 검출 빈도가 높게 나타났으며, 이는 해당 공간에서 이용자 밀집도와 신체활동이 상대적으로 높았음을 반영하는 결과로 해석되었다. 따라서 어린이집은 소규모 공간에서 이용 밀집도가 높고 신체활동과 호흡률이 큰 영유아가 장시간 체류하는 특성으로 인해 실내 이산화탄소와 총부유세균의 증가와 축적이 쉬우므로 이 두 물질의 관리 중요성이 더욱 크다고 할 수 있다.

실내공기질은 다양한 요인에 의해 변동성이 크며 시설의 개별적인 물리적 환경요인보다 시설 이용 특성과 재실자의 활동 패턴이 실내공기질 형성에 더 중요한 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 따라서, 실내공기질 유지 기준 대비 농도 수준, 고농도 발생 양상 및 원인, 시설의 주 이용자와 공간별 특성 등을 종합적으로 고려할 때 노인요양시설에서는 초미세먼지를 중점관리물질로 설정할 필요가 있으며, 어린이집에서는 이산화탄소와 부유세균을 중점적으로 관리하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 건강민감계층 이용시설의 실내공기질 관리 전략을 보다 정밀화할 수 있는 근거를 제시하였으며, 향후 시설 유형별 맞춤형 관리기준 및 점검체계 마련을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단한다

감사의 글

본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원 지원(과제번호 : 2025-01-03-002)을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

1. 배귀남, 지준호, “국내 실내공기질 관리정책의 변천 및 제어기술의 현황”, *한국대기환경학회지*, **2013**, 29(4), 378-389.
2. 김도운, 이태정, 권오중, 조영민, “다중이용시설의 공기질 관리를 위한 실내공기질지수 개발-어린이집과 노인요양시설을 대상으로”, *실내환경 및 냄새 학회지*, **2021**, 20(4), 304-310.
3. 기후환경에너지부, “다중이용시설 등 지도점검 결과”, **2019-2024**.
4. 기후환경에너지부, “실내공기 제대로 알기 100문 100답”, **2019**, 1-3.
5. 국립환경과학원, “실내공기질공정시험기준”, 국립환경과

학원고시 제2024-20호.

6. 김원미, “울산지역 건강민감계층 이용시설 실내공기질 특성 및 건강위해성평가 연구”, *울산대학교 석사 학위논문*, **2019**.
7. 진용균, 임종성, 이현주, 이병욱, 박선영, 김혜진, 이범열, 방준상, 이충대, 권문주, “민감계층 이용시설 실내환경질환 영향물질 조사”, *인천광역시보건환경연구원보*, **2022**, 18, 209-225.
8. 류인철, “다중이용시설 실내공기질 특성 및 건강위해성평가에 대한 연구”, *부경대학교*, **2010**.
9. 전정인, 이해원, 최현진, 전형진, 이철민, “다중이용시설별 실내공기 오염물질 농도분포 및 기준치 이상 값의 구성비 조사”, *한국환경보건학회지*, **2021**, 47(5), 398-409.
10. 손해준, 이강혁, 정연훈, 김진길, 임윤정, 유한조, 최인태, 윤수현, 최형주, 김종수, “경기북부지역 어린이집 부유미생물 발생과 실내공기와의 상관관계 분석”, *실내환경 및 냄새 학회지*, **2021**, 20(3), 219-227.
11. 국립환경과학원, “노인요양시설 실내공기 실태조사 및 오염특성 연구”, **2007**.
12. R. Bhoonah, M. Mendez, and A. Maury-Micolier, “Human health impacts and indoor chemical reactions of VOCs from cleaning products and occupants”, *Atmospheric Environment*, **2024**, 338, 120846.
13. N. Korukire, J. Claude Kwizera, C. Duhekunyurwa, S. Makaka, F. R. Kitema, F. Irafasha, J. Muhire, P. Dukuziyaturemye, E. Musabwa, C. Banamwana, and P. Karakwende, “Indoor and Outdoor air quality concentration levels in selected hospital environments in Kigali, Rwanda”, *Rwanda Journal of Medicine and Health Sciences*, **2023**, 6(3), 389.
14. 한국환경공단, <https://www.airkorea.kr>, 2025년 1월.
15. 박화미, 황성호, 이길봉, 김임순, “보육시설의 실내 폼알데하이드 및 이산화탄소 농도와 실내 환경 요인과의 관계”, *Journal of the Air & Waste Management Association*, **2017**, 67(3), 306-312.
16. 최영태, 허정, 박진현, 김은채, 류현수, 김동준, 조만수, 이채관, 이종대, 양원호, “초·중·고등학교의 이산화탄소 농도 및 환기량 평가”, *한국환경보건학회지*, **2020**, 46(3), 344-352.
17. 손종렬, 노영만, 손부순, “국내 일부학교 건축물의 실내공기질 평가”, *한국환경보건학회지*, **2006**, 32(2), 140-148.
18. 전병학, 황유경, 김형아, 이세훈, 안규동, 허용, “서울·경기 일부지역 다중이용시설 실내공기 중 미세먼지와 미세먼지 중 내독소의 농도”, *한국산업보건학회지*, **2008**, 18(4), 262-270.