

논문

IoT 기반 데이터를 이용한 경기도 다중이용시설의 실내 공기질 특성 분석

Analysis of Indoor Air Quality Characteristics of Multi-use Facilities in Gyeonggi-do using IoT-based Monitoring Data

이태정, 김도윤, 이수민, 김상철¹⁾, 조영민*

경희대학교 환경학 및 환경공학과, ¹⁾경기도 환경안전관리과

Tae-Jung Lee, Do-Yoon Kim, Su-Min Lee, Sang-Cheol Kim¹⁾, Young-Min Jo*

Department of Environmental Science & Environmental Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Republic of Korea

¹⁾Environmental Safety Management Division, Gyeonggi Provincial Government, Suwon, Republic of Korea

접수일 2021년 9월 10일
수정일 2021년 9월 15일
채택일 2021년 9월 24일

Received 10 September 2021
Revised 15 September 2021
Accepted 24 September 2021

*Corresponding author

Tel : +82-(0)31-201-2485
E-mail : ymko@khu.ac.kr

Abstract This study evaluated IoT-based indoor air quality monitoring data collected in 118 multi-use public facilities in Gyeonggi-do such as children day care center, public medical clinics, elderly nursing home, postpartum care centers, and libraries from December 2020 to March in 2021. The average indoor concentration of PM_{2.5} and PM₁₀ were highest at postpartum care center, and the lowest at public medical clinics. The average CO₂ level was the highest in elderly nursing home, but the difference between the daily minimum and maximum concentrations was the largest in children day care centers. As a result of time-series analysis, the concentration of PM was slightly higher on weekends than on weekdays, indicating that the air quality of these facilities is relatively well maintained during working days. The behavior of indoor particulate matters was almost similar to the outdoor air concentration. In all facilities, high CO₂ concentrations were observed during the daytime on weekdays when residents were active. During the period of this study, the average concentration of all facilities did not exceed the indoor air quality standard, but it was found to be exceeded in some places as considering the outdoor 24-hour average short-term standard excess rate (99 percentiles) method. Consequently, IoT-based monitoring is very useful for air quality management in multi-use facilities.

Key words: Public space, Indoor Air Quality, IoT monitoring, PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂

1. 서론

현대인들은 일상의 80~90% 이상을 실내에서 생활하고 있다. 특히 노인이나 영유아와 같이 유해물질에 민감한 취약계층의 경우, 하루 90% 이상을 밀폐된 실내에서 생활하며, 농축된 오염물질에 장시간 노출될 수 있다(Sota *et al.*, 2018; Zhang, 2017; Lee *et al.*, 2016; Mohamed, 2009). 에너지 절약을 위한 밀폐형 건축물의 증가 및 환기율 감소는 실내오염을 가중시

킴으로써 실내 공기질 (indoor air quality, IAQ) 관리의 중요성이 높아지고 있다(Tong *et al.*, 2016; Cho *et al.*, 2011). 세계보건기구(WHO) 연구에 의하면 2016 년도의 경우, 세계 대기오염으로 인한 조기 사망자의 54%가 실내공기오염에 의한 것으로 발표한 바 있다(Consonni *et al.*, 2018; WHO, 2018).

실내에는 공기질을 저하시키는 다양한 유해물질이 존재하며, 특히 입자상물질 (particulate matter, 이하 PM으로 표기)은 주요 실내오염물질 중 하나로 간주

되고 있다. 입자상물질 중 공기역학적 직경이 5~10 μm 인 거대입자(coarse particle)는 주로 상기도에 침착 후 비염이나 각종 알러지를 유발한다. 2.5 μm 이하의 미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)는 호흡기를 통하여 흡입되어 천식이나 다른 폐질환을 유발하며, 인체 내 여러 기관으로 이동하면서 심혈관 질환 등을 유발하기도 한다(Choi *et al.*, 2020; Choe *et al.*, 2015; Dockery and Stone, 2007; Brunekreef and Holgate, 2002). 2013년 WHO 산하 국제 암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 를 1군 발암(Group One) 물질로 분류한 바 있다(IARC, 2016). 한편, 이산화탄소(CO_2)는 인체호흡 시 또는 연소과정에서 발생하는 무색, 무미, 무취의 가스상물질로서 적절한 환기가 이루어지지 않을 경우 농도가 쉽게 증가하기 때문에 실내공기질의 지표(index) 물질로 알려져 있다. 실내 공간에 존재하는 이산화탄소는 자체 독성은 크지 않으나, 일정한 농도 이상으로 증가할 경우 집중력 감소에 따른 학습 및 작업능률 저하 현상이 나타나며, 5,000 ppm 이상의 고농도의 경우 어지러움, 두통, 구토 등을 유발하는 것으로 보고된 바 있다(Chung, 2015; Yee *et al.*, 2005).

다중이용시설 내에서의 사회활동 증가로 그 시설 수가 크게 확대되고 있으며, 국내 관리대상 다중이용시설은 실내공기질관리법 제3조에 의거 총 21개 시설군이 있다. 2019년 기준, 우리나라의 관리대상 다중이용시설은 23,405개소로서 2014년 17,815개소와 비교하여 31.3% 증가하였으며(MOE, 2020), 경기도는 2015년 4,549개소에서 2019년 12월 현재 총 5,906개소로 30% 증가하였다(Gyeonggi-do, 2020). 경기도 내에 소재하는 취약계층 이용시설 중 어린이 보육시설은 1,396개소로 전체 시설의 23.6%로 가장 높은 비율을 차지하였으며, 노인요양시설은 2015년 261개소에서 2019년 472개소로 가장 높은 증가율(81%)을 보였다(Gyeonggi-do, 2020). 그러나 다중이용시설에 대한 정부의 행정관리가 연 1 회 지도점검 및 측정 등과 같이 제한적으로 시행되는 과정에서 시설관리자와 이용자들로부터 신뢰성 문제가 제기되고 있으며, 적

정한 관리에 어려움이 발생할 수 있다.

따라서 경기도는 2019년부터 「IoT 다중이용시설 실내공기질 상시측정 및 자동관제」 사업을 통해 주로 취약계층 이용시설을 포함한 5개 시설군(어린이집, 공공의료원, 노인요양원, 산후조리원, 도서관)의 118개 시설에서 실내오염물질(PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO_2) 및 온·습도를 지속적으로 모니터링하고 있다. 본 연구에서는 경기도 내 취약계층이 주로 이용하는 다중이용시설의 실내공기질 특성을 평가하기 위하여 경기도가 설치한 IoT 기반 공기질 센서로부터 수집되는 자료에 대하여 시설 유형별로 입자상물질 및 이산화탄소의 농도경향을 분석하였으며, 시간대별 각 시설군의 오염도 변화 및 실내·외 상관성을 분석하였다. 본 연구는 취약계층이 주로 이용하는 다중이용시설의 사용자 및 관리자가 실내공기질 상태를 확인하고, 적절히 대응할 수 있으며, 향후 경기도의 실내 공기질 관리 및 정책 수립을 위한 기초자료를 제공하는데 목적을 두고 있다.

2. 연구 방법

2.1 연구대상 및 측정방법

본 연구는 IoT 기반 센서를 이용하여 실내공기질을 측정하고 있는 경기도 내 118개 다중이용시설의 측정자료를 이용하였다. 측정시설은 어린이집 77개소, 공공의료원 6개소, 노인요양원 9개소, 산후조리원 1개소와 도서관 25개소이다. 대상지역은 경기도 31개 시군 중 27개 시군에 설치되어 있으며, 그림 1과 같이 수원시 18개소, 용인시 11개소, 오산시 11개소 등에 설치되어 있다. 각 시설별 측정지점은 실내 4지점과 건물 외벽 및 현관 등 외부 1지점이며, CO_2 는 실내에서만 측정하고 있다.

IoT 센서(Model R-AQM, RM tech Inc., Korea)는 온도 및 습도를 기본으로 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 와 CO_2 를 측정하도록 구성되어 있고, 10초 간격으로 연속 측정되는 데이터는 기기의 알고리즘을 통해 10분 평균값으로

계산되어 IoT 전용망을 통해 M2M (machine to machine)으로 서버에 저장된다. 측정방식은 CO₂는 비분산적외선 (Non-dispersive Infrared Spectrometer, NDIR) 방식의 측정모듈을 적용하며, 측정범위는 1~5,000 ppm이다. 미세먼지는 레이저광산란방식 (laser light scattering method)이며, 측정범위는 0~1,000 µg/m³으로서 환경부로부터 1등급 (오차를 17.7%) 인증을 받은 센서들이 설치되어 있다.

본 연구대상 시설에 설치되어 있는 IoT 기반 실내 공기질 센서의 신뢰도는 챔버시험을 통해 기준측정 장비와 실내공기질 센서를 동시에 가동하여 측정함으로써 상관관계와 오차분석을 실시하였다. 시험결과, CO₂는 기준장비 (IQ610, Gaydof, US)와의 상관계수가 0.89, 정확도는 97.1%로 나타났으므로 충분히 높은 신뢰도를 보여주고 있다고 판단하여 추가적인 보정은 하지 않았으며, 미세먼지 센서는 기준장비 (T-640, Teledyne, US)와 상대적으로 비교한 결과, PM_{2.5}와 PM₁₀ 각각 보정계수를 0.66과 0.64로 산출하여 간이측정기의 데이터를 보정한 후 통계분석에 사용하였다. 자세한 신뢰성 평가내용은 선행연구 (Kim, 2021)를 참조할 수 있다.

2.2 자료처리 및 분석

경기도지역 공공 다중이용시설에 설치되어 있는 IoT 센서로부터 측정되는 시간별 평균농도를 수집하되, 대기 중 미세먼지 농도가 높은 계절 관리제 기간인 2020년 12월부터 2021년 3월까지 4개월 간의 자료를 토대로 분석하였다. 수집된 데이터의 이상치 (outlier)를 제거하기 위하여 전체 시설의 유형별 원자료에 대한 표준편차법 (3σ) 및 합리적인 자료범위 등을 고려하여 각각 PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, 온·습도의 이상치를 제거하였다. 또한 미세먼지 농도자료는 PM_{2.5}/PM₁₀ 비 (fine/coarse ratio; 이하 F/C ratio)가 0.1~0.9 범위를 벗어나는 자료와 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도 자료 중 하나라도 결측치 (missing data)가 있는 데이터는 자료분석에서 제외하였다.

최종자료를 이용하여 경기도 다중이용시설 유형별

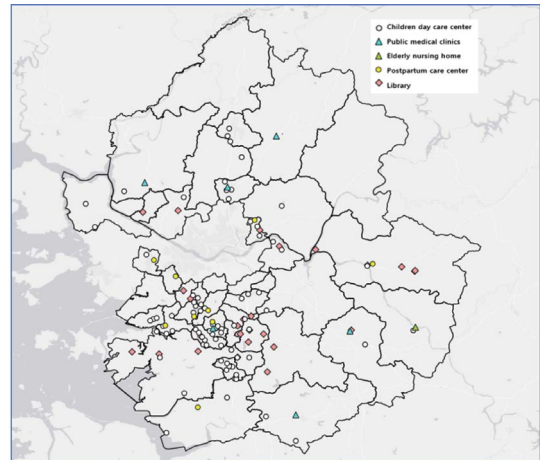


Fig. 1. Location of test facilities in this study.

미세먼지 및 이산화탄소의 평균, 표준편차 및 농도범위를 분석하였으며, 다중이용시설의 실내공기질 수준을 평가하기 위하여 실내공기질 기준 초과 여부를 확인하였다. 또한 시계열분석을 위해 각각 요일별, 시간별로 분석하였으며, 요일은 주중과 주말로, 시간은 주간과 야간으로 더욱 세분화하여 고찰하였다. 마지막으로 실내 미세먼지의 기원 (source)에 대한 정보를 파악하기 위해 미세먼지의 실내/외기 비 (indoor/outdoor ratio; 이하 I/O ratio)와 PM_{2.5}/PM₁₀ 비 (fine/coarse ratio; F/C ratio)를 산출해보았다. I/O ratio가 클수록 외부로부터의 유입이 지배적이라 볼 수 있으며 (Kim and Son, 2021), F/C ratio가 클수록 2차생성 미세입자의 영향이 크고 상대적으로 사람 활동에 의해 발생하는 거대 (coarse) 입자의 발생 비중이 적다는 것을 의미한다 (Xu *et al.*, 2017).

3. 연구결과 및 고찰

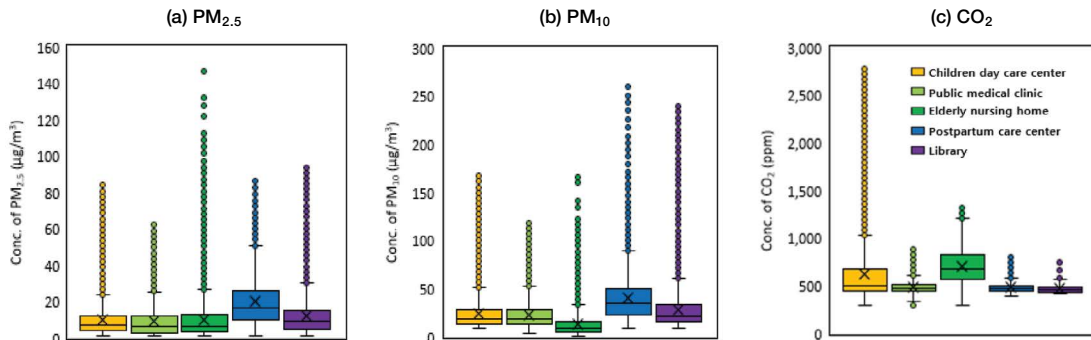
3.1 다중이용시설 유형별 실내공기질 특성

경기도 지역 다중이용시설에 설치되어 있는 IoT 센서에 의해 측정되고 있는 PM_{2.5}, PM₁₀, 이산화탄소의 1시간 평균 데이터의 시설유형별 평균농도와 표

Table 1. Statistical summary of PM, CO₂, temperature and Humidity using hourly mean values at multi-use facilities in Gyeonggi-do from Dec. 2020 to Mar. 2021.

Facility type	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO ₂ (ppm)	Temp. (°C)	Hum. (%)
Children day care center (n = 77)	9.8 ± 9.7 ^a	24.3 ± 16.8	625 ± 294	17.8 ± 3.8	36.2 ± 7.6
	7.0 ^b	19.0	502	17.8	36.0
	1.0-85.0 ^c	9.0-169.3	300-2788	7.5-26.9	13.0-80.2
Public medical clinic (n = 6)	9.3 ± 8.9	23.3 ± 15.0	490 ± 66	23.9 ± 2.6	24.5 ± 7.5
	6.3	18.7	473	24.0	23.8
	1.0-64.8	3.3-119.3	300-944	15.5-30.5	10.8-62.3
Elderly nursing home (n = 9)	10.1 ± 10.4	12.9 ± 12.5	706 ± 186	26.0 ± 3.0	26.1 ± 5.4
	6.7	8.8	686	26.8	26.0
	1.0-146.7	1.2-166.7	300-1350	16.5-31.5	12.5-64.0
Postpartum care center (n = 1)	20.2 ± 14.1	40.4 ± 24.4	486 ± 55	21.8 ± 4.5	27.2 ± 5.2
	17.0	34.8	474	24.4	26.7
	1.2-87.5	9.5-259.8	390-856	12.3-27.2	14.0-50.7
Library (n = 25)	12.3 ± 10.9	28.2 ± 19.9	507 ± 97	17.0 ± 4.3	33.4 ± 7.2
	9.0	22.0	479	17.3	34.0
	1.0-94.7	9.0-241.0	329-1383	4.5-27.9	12.0-63.3

Note: ^aMean ± SD, ^bmedian, ^cRange = minimum-maximum, ^dN = Number of facility

**Fig. 2.** Concentration comparison of PM_{2.5}, PM₁₀, and CO₂ at test facilities.

준편차와 최소값, 최대값을 표 1과 그림 2에 제시하였다.

각 시설에서의 PM_{2.5} 평균농도를 살펴보면, 산후조리원이 20.2 ± 14.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았고, 이어서 도서관 12.3 ± 10.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 노인요양원 10.1 ± 10.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 어린이집 9.8 ± 9.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 공공의료원 9.3 ± 8.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순이었다. PM₁₀ 평균농도는 산후조리원이 40.4 ± 24.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 도서관 28.2 ± 19.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 어린이집 24.3 ± 16.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 공공의료기관 23.3 ± 15.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 요양시설

12.9 ± 12.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순이었다. 가장 높은 농도를 보인 산후조리원은 1개 시설에서 측정된 결과치로서 전체 시설에 대한 대표성을 갖추기에는 미흡한 실정이라고 판단된다. 아울러 측정지점 4곳이 사람들의 이동량이 많은 엘리베이터 입구와 복도였으므로 산모와 신생아가 머무르는 공간보다는 높은 수치를 나타냈을 것으로 사료된다. 노인요양원은 PM_{2.5}에 비하여 PM₁₀이 낮게 나타남으로써 F/C 비율이 상대적으로 높았다. 이는 시설의 특성상 노인들의 활동이 제한적

으로 이루어지고 있으므로 주로 실내에서 발생하는 것으로 알려져있는 PM_{10} 이 많이 발생하지 않기 때문인 것으로 추측된다.

본 연구에서 얻어진 결과를 동일한 시설유형에서의 선행연구와 비교해보았다. Kim and Jang (2019)이 2019년 8월에서 11월까지 경기도 11개소를 포함한 전국 33개소 민감계층이 이용하는 다중이용시설에서 측정한 결과에 따르면, 어린이집의 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 농도는 각각 $8.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $15.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서 $PM_{2.5}$ 는 본 연구 결과와 비슷한 수준이었으나, PM_{10} 은 다소 낮게 나타났다. 노인요양원은 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 각각 $14.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $24.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 모두 높은 수준이었으며, 특히 PM_{10} 은 본 연구결과보다 약 2배 정도 높은 농도를 보였다. 공공 의료원의 경우 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 농도는 각각 $13.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $21.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 본 연구 결과와 유사한 수준으로 나타났다. 이는 노인요양원과 달리 공공 의료원의 출입자들은 제한이 거의 없었기 때문에 미세먼지 농도에 크게 영향이 없었을 것으로 판단된다.

이산화탄소의 오염도 수준은 노인요양원이 $706 \pm 186 \text{ ppm}$ 으로 다른 시설보다 높은 수준을 보여주었다. 이는 측정기간이 12월부터 3월까지 겨울철이어서 노인요양원 특성상 난방유지를 위한 환기부족의 영향으로 파악된다. Kim (2018)의 서울시 소재 어린이집, 산후조리원, 노인요양원에서 2018년 측정한 결과에서도 노인요양원이 이산화탄소 농도가 가장 높은 것으로 분석되었다. 다음으로 어린이집이 $625 \pm 294 \text{ ppm}$ 으로 높은 농도를 보였으며, 어린이집은 다른 시설유형보다 큰 표준편차 값과 최고농도(2,788 ppm)를 확인할 수 있었다. 이는 20~30명의 어린이들이 함께 실내에서 활동하는 경우, CO_2 농도가 상대적으로 변화율이 크고, 높은 수준을 나타낼 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

모든 측정대상시설의 평균 $PM_{2.5}$ 농도는 $12.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 환경부에서 지정한 유지기준 대비 35% 수준이었으며, PM_{10} 은 $25.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 유지기준 대비 34%의 낮은 수준이었다. 참고로 다중이용 실내공간에서 입자상오염물질의 유지기준은 어린이집, 의료

기관 등 민감계층 이용시설은 $PM_{2.5}$ $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 도서관 등 일반시설은 $PM_{2.5}$ $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 세분화되어 있다. 모든 시설에서의 평균 CO_2 농도는 562.8 ppm으로 실내 유지기준인 1,000 ppm 대비 56.3%로 나타났다. 측정대상시설 118개소 각각에 대한 $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO_2 의 유지기준 초과여부를 분석한 결과, 각 시설의 평균 농도값이 유지기준을 초과한 시설은 없는 것으로 확인되었다.

현행 실내오염 관리기준은 장·단기 기준의 구분없이 연 1회 측정하여 유지기준 초과 여부를 평가하고 있다. 그러나 대기환경기준은 장·단기 기준으로 초과여부를 판단한다. 장기기준은 연평균 값이 1년 기준을 초과하는가에 대한 여부이고, 단기기준은 24시간 기준으로 99백분위수의 값이 기준을 초과하는 경우를 '미달상'으로 정의한다. $PM_{2.5}$ 에 대한 대기환경기준의 경우, 본 연구대상 시설이 위치한 경기도 대부분의 지역에서 연평균 기준은 달성하고 있으나 24시간 단기기준은 종종 초과하는 미달성지역으로 확인할 수 있다. 이러한 이유로 다중이용시설의 관리기준 초과여부를 연 1회 측정하여 평가하는 것은 실내 공기질 관리 측면에서 한계가 있음을 알 수 있다. 예를 들어 유지기준 $PM_{2.5}$ $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 적용하는 공공도서관 25개 시설에서 측정기간 평균값의 경우, 실내공기질 관리기준을 초과하는 시설이 없었다. 그러나 24시간 평균값이 $PM_{2.5}$ 유지기준을 초과하는 횟수를 살펴보면, 화성시 소재 S도서관은 4회 초과(초과율 3.4%)하였으며, 용인시 S도서관과 화성시 N도서관이 3회 초과(초과율 2.5%)하였다. 2회 초과한 시설은 용인시 K도서관(초과율 1.7%)으로 대기환경기준의 단기기준을 적용했을 경우, 25개 시설 중 4개 시설, 즉 총 16%가 실내공기질 관리기준을 초과하고 있음을 확인할 수 있었다.

3.2 시설 유형별 시계열 분석

그림 3은 경기도 다중이용시설의 미세먼지 및 이산화탄소의 요일별 평균농도 분포이다. $PM_{2.5}$ 의 요일별 평균농도 범위는 어린이집($7.9 \sim 11.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 공공

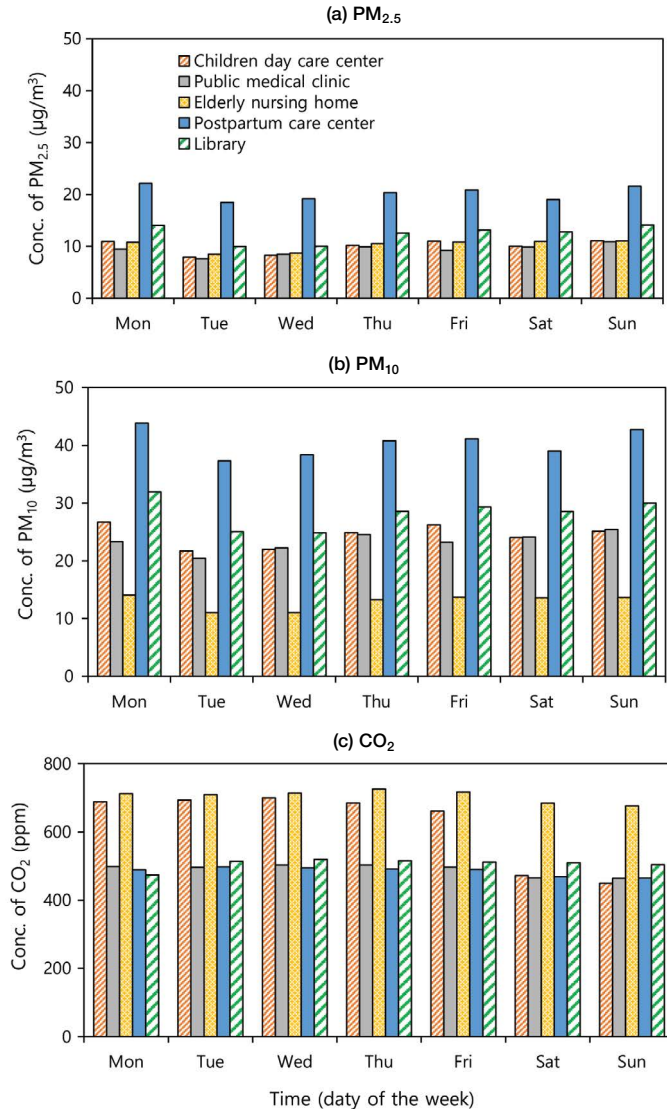


Fig. 3. Daily concentrations of (a) PM₁₀, (b) PM_{2.5}, and (c) CO₂ for a week.

의료원 (7.6~10.9 µg/m³), 노인요양원 (8.5~10.9 µg/m³), 산후조리원 (18.5~21.5 µg/m³), 도서관 (9.8~14.1 µg/m³) 등으로 나타났으며, 시설별 농도 차이는 다소 발생하였으나 최고농도와 최저농도를 보인 요일은 화요일과 일요일로 동일하였다.

PM_{2.5}의 주중과 주말 농도 비교 시 모든 시설에서 주말에 더 높은 농도를 보였다. 외기의 PM_{2.5} 농도도 동일한 요일에 최저, 최고 농도를 보였으며, 주말이

주중보다 높은 농도로 확인되었다. 실내 미세먼지 농도는 활동도가 많은 주중에 더 높을 것으로 예상하였으나 조사결과, 외부 공기질이 좋지 않을 때 실내농도도 같이 높아지는 것을 확인할 수 있었다. CO₂의 요일별 평균농도 범위는 어린이집 (450~700 ppm), 공공의료원 (464~503 ppm), 노인요양원 (677~726 ppm), 산후조리원 (465~498 ppm), 도서관 (474~520 ppm)이었으며, 최저대비 최대농도의 변화율은 어린

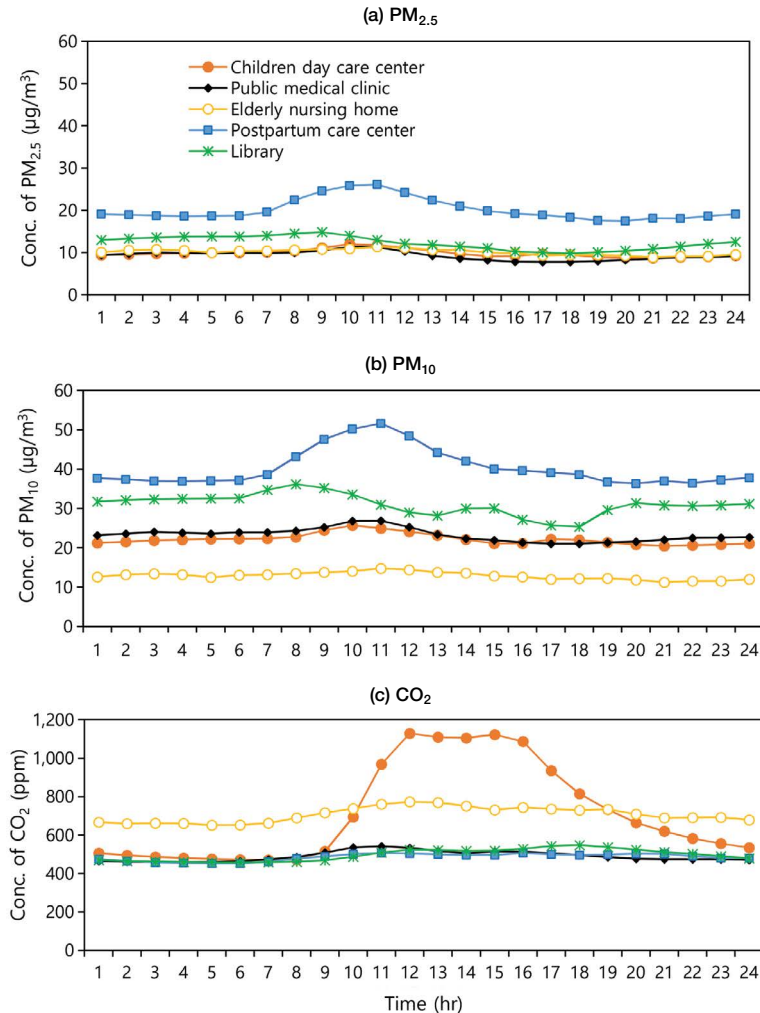


Fig. 4. Hourly concentrations of (a) PM_{10} , (b) $PM_{2.5}$, and (c) CO_2 for a day.

이집이 55.7%이었고, 그 외 시설은 10% 이하의 변화율을 보였다. CO_2 는 모든 시설유형에서 주중에 높고 주말에 낮은 특성을 보였으며, 어린이집이 주중(685 ppm)과 주말(461 ppm)의 농도 차이가 가장 큰 유형으로 확인되었다. 이러한 결과는 다중이용시설의 이산화탄소 농도는 미세먼지와 달리 실내 이용자의 활동도에 크게 영향을 받기 때문이다.

유형별 다중이용시설에서의 활동이 실내오염물질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 시간대별 평균농도 변화량을 살펴보았다. 그림 4의 시간별 $PM_{2.5}$ 농도

변화는 산후조리원이 가장 뚜렷했으며, 오전 7시부터 증가하여 10시 이후 감소하였다. 시간대별 가장 높은 농도와 낮은 농도의 차이는 노인요양시설(23%)을 제외하고 40% 이상의 차이를 보였다. 시간별 PM_{10} 농도는 도서관을 제외한 모든 시설군에서 오전 8시부터 증가하여 9시와 10시경에 최고 수준으로 상승하다가 11시 이후 감소하는 형태를 보였다. 이는 이 시간대에 시설 이용자의 활동량 증가로 인하여 실내 중 미세먼지 농도가 증가할 뿐 아니라 외기 미세먼지 농도 역시 이 시간대에 가장 높기 때문인 것으로 사

Table 2. Mass concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} and F/C and I/O ratio in public facilities in Gyeonggi-do from Dec. 2020 to Mar. 2021.

Facility type	n	Indoor			Outdoor			I/O ratio	
		$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	F/C	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	F/C	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}
Total	118	12.3	25.8	0.46	24.2	48.7	0.47	0.53	0.55
Children day care center	77	9.8	24.3	0.35	22.9	47.4	0.44	0.45	0.54
Public medical clinic	6	9.3	23.3	0.35	23.7	48.7	0.45	0.39	0.49
Elderly nursing home	9	10.1	12.9	0.77	23.1	45.4	0.51	0.46	0.28
Postpartum care center	1	20.2	40.4	0.47	27.6	52.8	0.48	0.81	0.83
Library	25	12.3	28.2	0.39	23.6	49.3	0.44	0.55	0.60

료된다. 실제로 도시지역의 특성상 하루 중 아침 시간대에 유동인구 및 생산활동이 집중되고 있기 때문이다.

주간을 07시~18시, 야간을 19시~06시까지 둘로 나누어 비교해보았다. 주·야간대 $\text{PM}_{2.5}$ 의 평균농도는 어린이집(주간: $10.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 야간: $9.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 공공의료원(주간: $9.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 야간: $9.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 노인요양원(주간: $10.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 야간: $9.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 산후조리원(주간: $21.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 야간: $18.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 도서관(주간: $13.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 야간: $8.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 공공의료원을 제외하고 모든 시설에서 주간대에 높은 농도로 조사되었다. 주·야간대 PM_{10} 의 평균농도는 어린이집(주간: $22.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 야간: $21.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 공공의료원(주간: $23.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 야간: $23.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 노인요양원(주간: $13.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 야간: $12.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 산후조리원(주간: $43.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 야간: $37.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 도서관(주간: $30.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 야간: $32.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 도서관을 제외한 모든 시설에서 주간대에 높은 농도로 나타났다.

시간별 CO_2 농도는 어린이집이 가장 뚜렷한 시계열 특성을 보여주었다. 어린이들이 등원하는 오전 9시부터 CO_2 농도는 급격히 증가하여 활동이 많은 점심시간과 오후 4시까지 1,000 ppm 이상의 높은 농도를 보였지만, 하원 시간 이후 점차 감소하였다. 어린이집을 제외한 다른 시설의 시간별 CO_2 농도는 실내공기질 기준 이내의 농도를 꾸준히 유지하였다. 주·야간대 CO_2 의 평균농도는 어린이집(주간: 891 ppm, 야간: 529 ppm), 공공의료원(주간: 512 ppm, 야간: 468 ppm), 노인요양원(주간: 740 ppm, 야간: 674

ppm), 산후조리원(주간: 498 ppm, 야간: 473 ppm), 도서관(주간: 514 ppm, 야간: 478 ppm)으로 모든 시설에서 주간에 높은 것으로 조사되었다. 주간과 야간의 CO_2 농도가 가장 큰 차이를 보이는 시설군은 어린이집으로 68%의 차이를 보였다. 실내 이산화탄소는 주로 사람의 호흡으로 영향을 받는 오염물질로서 어린이집과 같이 다수의 학생들이 제한된 실내 공간에서 활발하게 활동하므로 주간대와 야간대의 CO_2 농도 차이가 뚜렷하게 상승하는 것을 확인할 수 있었다. CO_2 농도는 환기를 통해 쉽게 낮출 수 있기 때문에 어린이들의 건강을 위해 주기적인 환기가 더욱 필요할 것으로 사료된다.

3.3 시설 유형별 실내·외 미세먼지 상관성 분석

일반적으로 실내 PM 농도는 시설 내부에서의 조리나 난방 등에 의해 크게 좌우되지만, 재실자와 이용자들의 움직임도 중요한 요소이다. 또한, 환기시설의 가동여부와 창문이나 출입문을 통한 유입·유출되는 미세먼지의 양도 무시할 수 없다. 시설 유형에 따른 실내 미세먼지의 발생특성을 평가하기 위하여 실내·외 입경별 미세먼지 농도 및 F/C ratio와 각각의 I/O ratio 분석을 실시하였다(표 2). 그림 5에는 전체 조사기간에 대한 일별 실내의 미세먼지 농도와 F/C ratio, 입경별 I/O ratio를 도시하였다. 그 결과 실내 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 은 비슷한 농도변화를 확인할 수 있었으며, 노인요양원을 제외하고 F/C ratio는 0.2~0.4 수준이었다. 노인요양원의 F/C ratio는 0.7~0.8로 다른 시설군과 비교하여 2배 이상의 값으로 분석되었다.

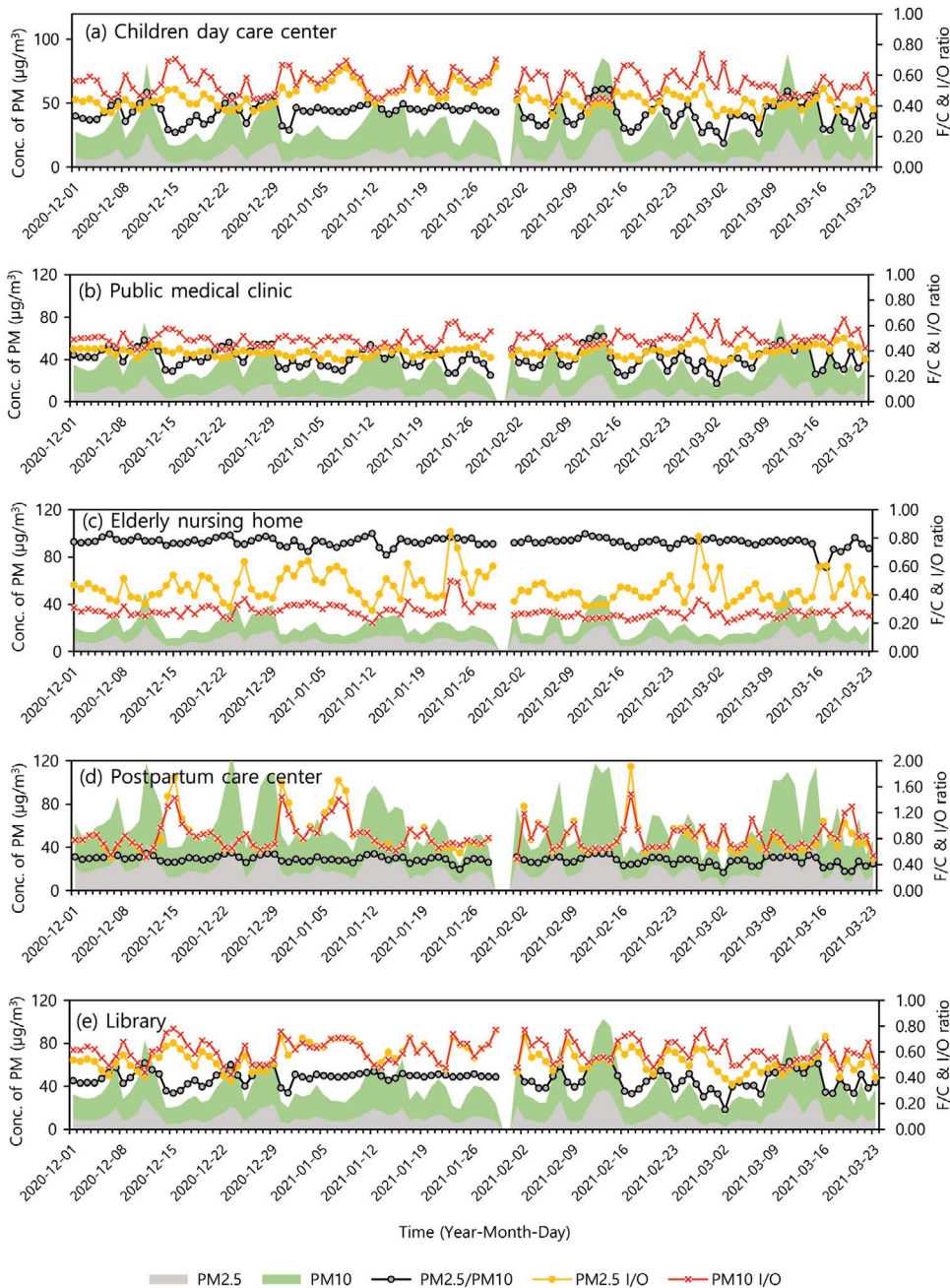


Fig. 5. Daily variation of concentration of PM_{10} and $PM_{2.5}$, and ratios of F/C and I/O.

표 2의 노인요양원의 평균 F/C ratio는 0.77로 이는 $PM_{2.5}$ 농도는 다른 시설과 비슷한 수준이었으나 PM_{10} 이 2배 이상 낮게 유지되었기 때문이다. 이러한

결과는 노인요양원 내부에 특별한 $PM_{2.5}$ 발생원이 존재하기 보다는 이용자들의 활동성이 다른 시설에 비해 낮아 상대적으로 크기가 큰 PM_{10} 의 발생량이 적

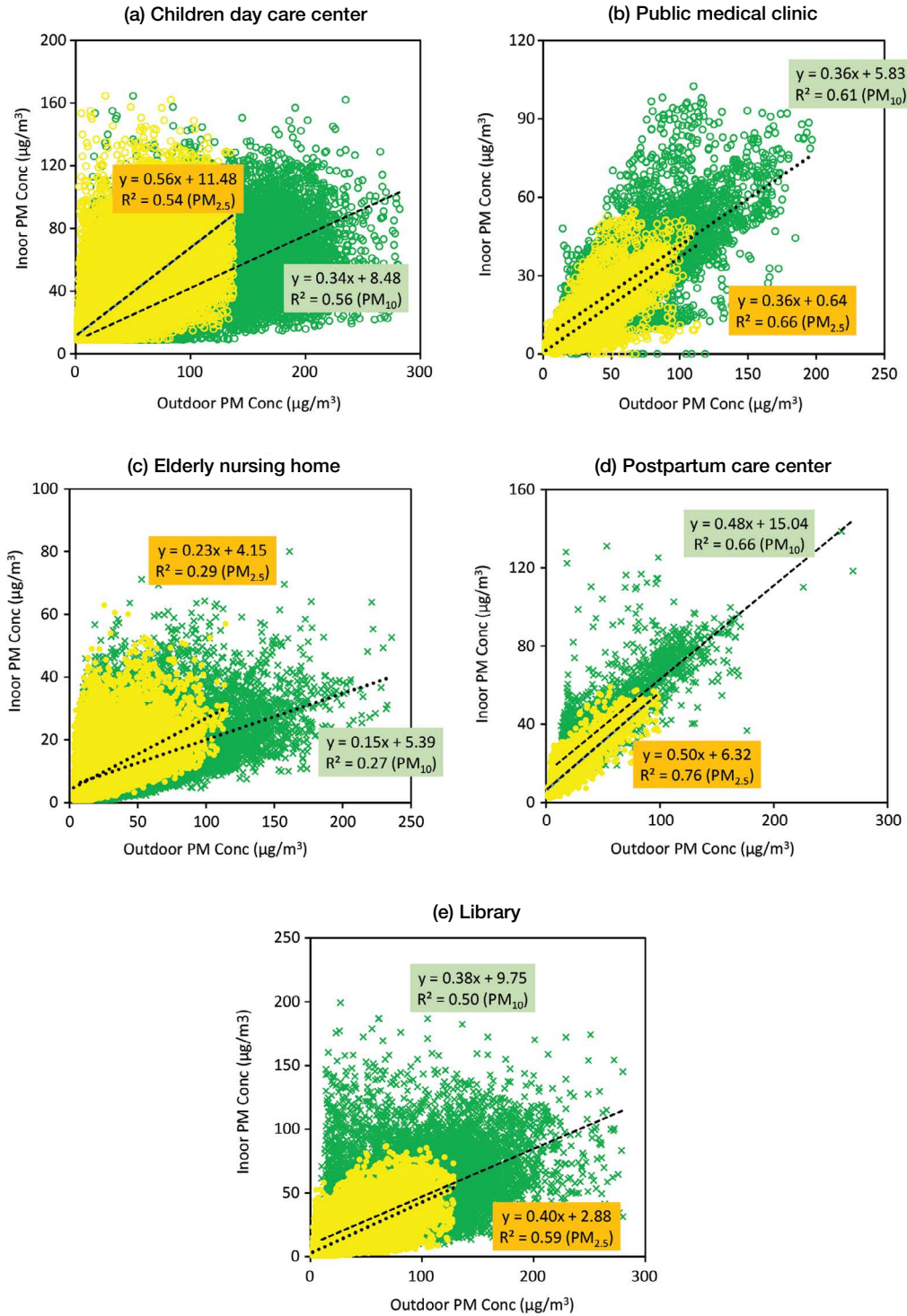


Fig. 6. Scattering distribution for indoor and outdoor $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} .

은 것으로 분석할 수 있다. 특히 본 연구의 대상기간인 2020년 12월부터 2021년 3월까지 COVID-19 상황으로 환자들의 외출이나 면회가 제한되어 이용자나 방문객들의 유출·입 등에 의해 재비산 되는 PM_{10} 농도가 크게 감소하였기 때문으로 판단된다.

또한 노인요양원 내부의 F/C ratio는 외기의 평균 F/C ratio인 0.51과 비교하여 크게 높았으며, 다른 시설군의 실내·외 F/C ratio 차이보다 큰 차이를 보여, 요양원 내부에서 거대입자가 침강한 후, 재부유되는 양이 많지 않기 때문인 것으로 분석할 수 있다. 다음으로 산후조리원 0.47, 공공도서관 0.39, 공공의료원 0.35, 어린이집 0.35 순으로, 이용자의 활동에 의한 큰 입자의 발생이 많은 어린이집, 도서관, 의료기관 등이 낮은 F/C ratio를 보였다. 실내·외 F/C ratio는 산후조리원이 0.47과 0.48로서 거의 유사한 값을 보였으며, 이는 산후조리원의 실내 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 모두 외기 영향이 큰 것으로 평가할 수 있다. 본 연구대상 시설군 중 산후조리원의 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 I/O ratio가 각각 0.81과 0.83으로 가장 높게 나타났는데, 이는 외부농도와 실내 농도가 비슷한 수준인 것을 의미하며, 외기로부터의 미세먼지 유입이 지배적이라고 볼 수 있다. 그러나 이러한 결과만으로는 실내·외 미세먼지의 상관성을 명확하게 파악하기 어렵다. 따라서 실내 미세먼지 농도와 외기 농도 간의 상관성을 그림 6과 같이 분석하였다.

실내 미세먼지 농도와 외기와의 상관성 분석을 위하여 시설유형별 각 시설 내부에 설치된 센서 4개의 평균농도와 외기 센서 자료를 비교하였다. 그 결과 노인요양원을 제외한 4개 시설 모두 실내외 상관계수(R^2)가 0.50 이상의 높은 상관성을 보였다. 가장 높은 상관성을 보인 시설은 산후조리원으로서 실내와 외기 간의 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 상관계수는 각각 0.76과 0.66으로 산출되었는 바, 상호간에 높은 상관관계가 있는 것을 확인할 수 있었다. 측정대상 산후조리원의 측정지점(엘리베이터 입구, 복도)이 외기의 영향을 직접적으로 받을 수 있는 곳이기 때문인 것으로 판단된다. 산후조리원의 실내외 높은 상관분석 결과는 표

2에서 분석된 실내·외 F/C ratio와 입경별 I/O ratio 분석결과와 동일한 결과를 도출하였다. 다음으로 공공의료원의 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 실내·외 상관계수는 각각 0.66과 0.61로 역시 높은 상관관계를 보였으며, 이는 산후조리원과 마찬가지로 공공의료원도 외부의 미세먼지가 병원 내부로 쉽게 유입되어 외부 환경요인이 실내 미세먼지 농도에 크게 영향을 미치기 때문이다.

어린이집의 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 실내·외 상관계수는 각각 0.56과 0.54로 상대적으로 낮은 상관성을 보였는데, 어린이집은 공기청정기를 시설 개소 당 5~20대를 구비하고 있었으며, 지속적으로 가동하여 실내 공기질을 관리하기 때문에 외기보다 낮은 농도의 미세먼지 수준을 유지할 수 있는 것으로 해석할 수 있다. 가장 낮은 실내외 상관관계를 보인 시설은 노인요양원으로서 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 실내·외 상관계수는 0.29과 0.27이었다. 이는 노인요양원의 경우 미세먼지 농도가 외기농도 대비 매우 낮은 것으로 평가되었으며, 실내 PM_{10} 농도는 외기 대비 0.28 수준으로 노인요양원 내부는 공기정화장치가 효과적으로 가동되고, 재실자 활동에 의한 내부 발생량도 매우 적기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 그러나 표 1과 그림 2의 이산화탄소 농도는 노인요양원이 가장 높았으며, 1시간 평균농도의 경우 CO_2 실내공기질 기준인 1,000 ppm을 초과하는 비율이 7.8%로 어린이집의 9.6% 다음으로 높은 것으로 평가되었다. 이는 창문 개방을 통한 자연환기 등이 잘 이루어지지 않고 있는 것으로 해석할 수 있으며, 적절한 실내공기질 관리를 위해서는 미세먼지뿐만 아니라 실내 오염 지표물질인 이산화탄소의 적절한 관리를 위한 주기적인 환기도 반드시 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 경기도지역 다중이용시설의 미세먼지 및 이산화탄소의 농도 특성을 평가하기 위하여 어

린이집, 공공의료원, 노인요양원, 산후조리원, 도서관 등 118개 시설에서 운영중인 IoT 기반 실내외 공기질 센서 자료 중 2020년 12월부터 2021년 3월까지 4개월간의 자료를 분석하였다. 시설의 유형별 공기질을 분석한 결과, PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도 모두 산후조리원에서 가장 높게 나타났으며, 가장 낮은 PM_{2.5} 농도는 공공의료원에서, PM₁₀은 노인요양원에서 관찰되었다. 노인요양원의 실내 F/C ratio는 0.77로서 다른 4개 시설군의 평균 값인 0.50 이하와 비교해서 상대적으로 높은 것으로 분석되었다. 각 시설군의 외기 F/C ratio와 비교하여도 노인요양원을 제외하고 대부분 실내의 F/C ratio가 작았다. 이산화탄소의 평균농도는 노인요양원이 가장 높았으나, 최소와 최고농도 차이 및 표준편차는 어린이집이 가장 크게 나는 것으로 분석되었다. 시설군별 미세먼지의 요일 변화율은 크지 않았고, 주말이 주중보다 다소 높았지만 큰 차이는 보이지 않았으며, 요일간 변화는 외기농도와 유사한 거동을 보였다.

시간대별 분석 결과, 5개 다중이용시설군 모두 미세먼지 및 이산화탄소 모두 주간대에 높은 농도를 보였으며, 외기 농도와 동시에 분석된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 실내·외, 주·야간대의 농도는 거의 유사하게 움직이고 있었다. 이산화탄소는 주중, 낮 시간에 높은 농도를 보이고 있었다. 모든 시설군의 전체기간 평균농도는 실내 유지기준을 초과하지 않았으나, 외기의 단기 기준 적용방법(99 백분위수)을 고려하여 24시간 평균농도로 기준 초과 여부를 평가한 결과, 공공도서관의 경우 25개 시설 중 16%에 해당하는 4개 시설이 PM_{2.5} 관리기준을 초과하였다. 이와 같이 다중이용시설에서 IoT 기반 센서를 적용하여 실내공기질을 관리할 경우, 현행 연 1회 현장 측정으로 이루어지는 관리 방법의 한계를 극복할 수 있으며, 시설 운영자 및 행정 관리자가 실시간으로 현황을 확인할 수 있으므로 신속하고 합리적인 실내공기질 관리가 가능할 것으로 사료된다. 다만 많은 다중이용시설에 다수의 센서를 설치해야 하므로 자료의 신뢰성을 높일 수 있는 QA/QC가 주기적으로 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 경기녹색환경지원센터의 「경기도 다중이용시설 실내공기질 빅데이터 분석 및 IAQ 지수 개발(21-05-01-40-41)」의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Brunekreef, B., Holgate, S. (2002) Air pollution and health, *The Lancet*, 360(9341), 1233-1242. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(02\)11274-8](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(02)11274-8)
- Choi, J.K., Choi, I.S., Cho, K.K., Lee, S.H. (2020) Harmfulness of particulate matter in disease progression, *Journal of Life Science*, 30(2), 191-201, (in Korean with English abstract). <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE09308649>
- Cho, Y., Lee, J.Y., Lee, Kwon, S.B., Park, D.S., Choi, J.S., Lee, J.Y. (2011) Adsorption and desorption characteristics of carbon dioxide at low concentration on zeolite 5A and 13X, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(2), 191-200, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2011.27.2.191>
- Choe, J.I., Lee, Y.S. (2015) A study on the impact of PM_{2.5} emissions on respiratory diseases, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 23(4), 155-172, (in Korean with English abstract). <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06586613>
- Chung, Y.J. (2015) Production of carbon monoxide and carbon dioxide gases in the combustion tests, *Fire Science and Engineering*, 29(5), 7-13, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15301/jepa.2015.23.4.155>
- Consonni, D., Carugno, M., De Matteis, S., Nordio, F., Randi, G., Bazzano, M., Lubin, J.H. (2018) Outdoor particulate matter (PM₁₀) exposure and lung cancer risk in the eagle study. *PloS one*, 13(9), e0203539. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203539>
- Dockery, D.W., Stone, P.H. (2007) Cardiovascular risks from fine particulate air pollution, *The New England Journal of Medicine*, 356(5), 511-513. <https://doi.org/10.1056/nejme068274>
- Gyeonggi-do (2020) Status of multi-use facilities subject to indoor air quality management in Gyeonggi-do.

- PhD thesis, <https://gg.gg.go.kr>
- International Agency for Research on Cancer (IARC) (2016) IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: Outdoor air pollution, 109, 443-444. <https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/08/14-002.pdf>
- Kim, D.H., Son, Y.S. (2021) Understanding of Indoor and Outdoor Environmental Factors Affecting Particulate Matter in Buildings, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 820-831, (in Korean with English abstract). <http://www.jekosae.or.kr/xml/27140/27140.pdf>
- Kim, D.J., Jang, H.N. (2019) Evaluation of Indoor Air Quality of Vulnerable Class Facility in Public-Use Facility, *Korea Society of Environmental Administration*, 25(2), 49-56. <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.6.820>
- Kim, S.C. (2021) Characteristics of indoor air quality of multi-use facilities using IoT-based monitoring. PhD thesis
- Lee, J.B., Kim, S.D., Baek, S.O., Kim, D.S., Choi, K.C. (2016) Atmospheric environment, Donghwa Publishing, Korea, 88-93. <https://www.cheric.org/PDF/PIC/PC19/PC19-5-0001.pdf>
- Mohamed, E.M. (2009) Indoor air quality control in case of scheduled or intermittent occupancy based building: Development of a scale model, *Building and Environment*, 44(7), 1356-1361. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.003>
- Ministry of Environment (2020) 2019 Indoor Air Quality Guidance Inspection Result Report.
- Sota, C. de la, Lumbreras, J., Pérez, N., Ealo, M., Kane, M., Youm, I., Viana, M. (2018) Indoor air pollution from biomass cookstoves in rural Senegal. *Energy for Sustainable Development*, 43, 224-234. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.02.002>
- Tong, Z., Chen, Y., Malkawi, A., Adamkiewicz, G., Spengler, J.D. (2016) Quantifying the impact of traffic-related air pollution on the indoor air quality of a naturally ventilated building, *Environment International*, 89-90, 138-146. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.01.016>
- World Health Organization (WHO) (2018) Burden of disease from household air pollution for 2016. Geneva, P. 3. (www.who.int/airpollution/data).
- Xu, G., Jiao, L., Zhang, B., Zhao, S., Yuan, M., Gu, Y., Liu, J., Tang, X. (2017) Spatial and temporal variability of the PM_{2.5}/PM₁₀ ratio in Wuhan, Central China, *Aerosol and Air Quality Research*, 17(3), 741-751. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.09.0406>
- Yee, J.J., Kim, S.K., Choi, S.Y. (2005) A field survey on the indoor air quality of newly built schools in Busan, *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 21(6), 175-182, (in Korean with English abstract).
- Zhang, J. (2017) Low level air pollution associated with death: policy and clinical implications, *Jama*, 318(24), 2431-2432. <https://doi.org/10.1001/jama.2017.18948>

Authors Information

이태정 (경희대학교 환경학 및 환경공학과 학술연구교수)
 김도운 (경희대학교 환경학 및 환경공학과 석사연구원)
 이수민 (경희대학교 환경학 및 환경공학과 석사연구원)
 김상철 (경기도 환경안전관리과 과장)
 조영민 (경희대학교 환경학 및 환경공학과 교수)