

논문

# IoT 센서를 이용한 내포신도시 실내공기질 현황 분석 Indoor Air Quality Analysis in Naepo New Town using IoT Sensor

황규철, 박세찬, 이가혜, 김종범\*

충남연구원 서해안기후환경연구소

Kyuchoel Hwang, Sechan Park, Gahye Lee, Jong bum Kim\*

Seohaean Research Institute, Chungnam Institute, Hongseong, Republic of Korea

접수일 2022년 12월 8일  
수정일 2022년 12월 29일  
채택일 2023년 1월 13일

Received 8 December 2022  
Revised 29 December 2022  
Accepted 13 January 2023

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)41-630-3924  
E-mail : kjb0810@cni.re.kr

**Abstract** Since most people spend about 90% of their time indoors at home or work, indoor air quality (IAQ) highly impacts human health. The first step to managing IAQ is monitoring various indoor facilities. In this study,  $PM_{2.5}$  and  $CO_2$  were measured for six months in 15 facilities using an internet of things (IoT) system and measurement devices. Before monitoring, correction was conducted through comparison between measurement sensors. Next, the measurement sensors were calibrated using the data from the air quality monitoring station (AQMS) in Naepo New Town. Monitoring was conducted in the library, cinema, educational, and several convenience facilities. The daily and weekly variations were analyzed for each site. The coffee shop and cinema had higher concentrations on weekends for both  $PM_{2.5}$  and  $CO_2$  due to the increased number of users. On the other hand,  $PM_{2.5}$  and  $CO_2$  in educational facilities decreased due to fewer users on weekends. Diurnal variation readings showed that  $PM_{2.5}$  increased during the daytime in almost all facilities, while  $PM_{2.5}$  increased in the coffee shop at night. In contrast to  $PM_{2.5}$ , the diurnal variation in  $CO_2$  was constant in nearly all facilities except in the coffee shop; the  $CO_2$  readings rose rapidly after 9 AM and peaked at 4 PM in the cafe. This study focuses on the overall indoor air quality in Naepo New Town. In the future, we plan to conduct a detailed study on each facility's IAQ management methods.

**Key words:** Indoor air quality (IAQ), Internet of things (IoT), Measurement sensor, Indoor air management,  $PM_{2.5}$ ,  $CO_2$

## 1. 서론

세계보건기구(world health organization, WHO)에 따르면 실내공기 오염으로 인해 매년 380만 명이 사망하며, 대부분의 사람들은 하루의 90% 이상을 집, 직장 등과 같은 실내에서 보내기 때문에 실내공기질은 재실자의 건강에 큰 영향을 미친다(Tran *et al.*, 2020). 최근 COVID-19 (corona virus disease-19)의 영향으로 야외 활동이 자제되면서 실내에 머무르는 시간이 증가하였으며 실내공기질 관리의 중요성은 더욱 높아지고 있다(Agarwal *et al.*, 2021). 현재 국내 실내공기질은 다중이용시설을 중심으로 환경부에서 관리하고

있으며, 교육시설과 작업장은 각각 교육부와 고용노동부가 관리하고 있다. 이로 인해 관리대상 시설에 대한 물질, 관리기준 등의 차이가 존재하여 통합적인 관리가 힘든 실정이다(KEI, 2022). 실내공기질 관리는 사전 예방 조치를 통해 노출을 예방할 수 있기 때문에 적절한 관리를 위한 효율적인 공기질 모니터링이 필요하다(Jo *et al.*, 2020). 2000년도 초반까지도 실내 노출 지표로 미세먼지(particulate matter less than 10  $\mu m$ ,  $PM_{10}$ )가 주로 사용되었지만(Polichetti *et al.*, 2009; Englert, 2004), 기술의 발달과 위해성 연구 결과를 기반으로 점차 초미세먼지(particulate matter less than 2.5  $\mu m$ ,  $PM_{2.5}$ )로 전환되고 있다(Martins and Carrilho

da Graça, 2018).

현재 환경부에서는 ‘실내공기질 종합정보망’을 통해 다중이용시설의 실내공기질 정보를 실시간으로 공개하고 있으나, 2021년 기준 수도권을 중심으로 전국 80개 지점에서만 이루어지고 있어 관리에 한계가 있다(KEI, 2022). 일반적으로 실내 공간에 대한 PM<sub>2.5</sub>의 측정은 실내공기질 공정시험기준에 따라 중량법과 베타선흡수법이 활용된다. 중량법은 상대적으로 가장 정확한 측정값을 제시하지만 8~24시간 이상 먼지를 포집해야 하며, 측정 전·후 수분의 간섭작용을 억제하기 위해 항온·항습 장비에서 약 24~48시간을 건조시켜야 한다는 단점이 있다(Lee and Park, 2019). 반대로 베타선흡수법은 비교적 측정법이 간단하고 1시간 간격으로 측정값을 제시해주지만 중량법보다는 정확도가 떨어진다는 단점이 있다(NIER, 2018). 전국의 모든 다중이용시설에 실내공기질 공정시험기준에 부합하는 장비를 설치하여 운영하는 것은 비용과 관리의 어려움으로 현실적으로 불가능하다. 이러한 문제의 대안으로 저가형 측정센서를 활용한 연구가 보고되고 있다(Bai *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2020; Dinh *et al.*, 2016). 광산란 방식(optical method)의 측정센서는 비교적 저렴하며, 경량화되어 있고 소모 전력 또한

적다. 그리고 기준장비 대비 운용법이 비교적 단순하여 전문인력이 아닌 일반인이 직접 운용할 수 있다는 장점이 있는 반면, 측정 결과에 대한 신뢰도가 낮다는 단점이 있다(NIER, 2018).

본 연구에서는 광산란 방식의 측정센서와 사물인터넷(internet of things, IoT)을 결합한 IoT 시스템을 이용하여, 충청남도 내 내포신도시에 위치한 다중이용시설 15개 장소에서 PM<sub>2.5</sub>를 포함한 실내공기질을 관측하였다. PM<sub>2.5</sub> 자료는 결과값의 신뢰도 확보를 위해 측정 전 15개 기기 간 상호 보정 및 기준기기와의 보정을 진행하였다. 다양한 실내 환경에서 오염물질의 변화 특성을 분석하였고, 연구 결과를 바탕으로 각 시설에 대한 실내공기질 관리 대책 방안을 제안하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 관측 장소 및 기간

다중이용시설의 실내공기질 현황분석을 위해 충청남도 도청 소재지인 내포신도시에서 실내공기질을 측정하였다. 내포신도시는 홍성군과 예산군에 걸쳐 있으며, 면적은 9,951 천 m<sup>2</sup>, 거주 인구는 2022년 9월 기준

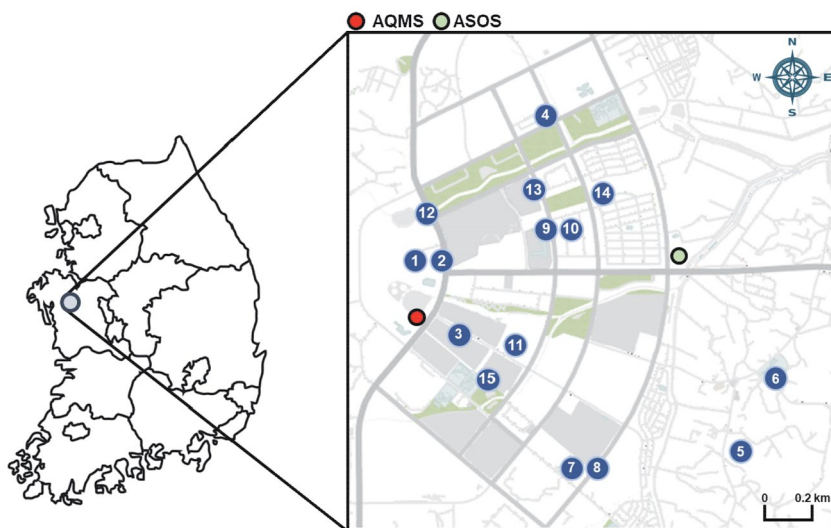


Fig. 1. Location of IoT sensor monitoring sites, AQMS, and ASOS in Naepo New Town.

약 3만 명이다 (Chungcheongnam-do, 2022). 도시의 형태는 부채꼴 모양으로 건물들이 정돈되어 있으며, 좁은 구역에 다수의 편의시설들이 밀집되어 있다. 그림 1은 내포신도시 내 충남 IoT 센서 (Chungnam IoT sensor, CIS)가 설치된 지역과 국가에서 운영하는 도시대기측정망 (air quality monitoring station, AQMS) 및 종관기상측정망 (automated synoptic observing system, ASOS) 위치를 나타낸 것이다. 내포신도시는 서쪽으로 약 20 km 부근에 바닷가가 위치해 있으며, 북서쪽 약 35 km 부근에는 대형 화력발전소들이 밀집해 있다. 동쪽으로는 차령산맥이 있어 서쪽에서 유입된 오염물질이 산맥을 넘어가지 못하고 내포신도시 전체에 정체되어 영향을 미치는 구조를 가지고 있다.

실내공기질 관측은 2022년 4월부터 9월까지 진행되었으며, 이 기간은 일반적으로 미세먼지의 연중 농도가 낮은 기간이다. 측정 기간 중 WIFI의 연결 중단이나 측정 지점의 기타 환경조건 (내부 공사, 정전 등)에 따라 손실된 데이터들은 제외하고 분석하였다.

내포신도시 내 설치된 IoT 센서는 15개이며, 다중

이용시설의 특성을 분석하기 위해 11개 시설군으로 분류하였고, 일반적으로 주민들이 빈번히 이용하는 시설들에 센서를 설치하였다. CIS 1과 CIS 2는 도서관 1층과 3층에 설치하였다. 도서관은 주중에는 9시부터 22시까지, 주말에는 18시까지 운영하며, 월요일은 정기 휴일이다. 1층은 주로 영유아가 이용하며 3층은 관람실로 운영되고 있다. CIS 3과 4는 지역 내 주민 편의 시설인 복지 센터이며, CIS 5는 보건소이다. 이곳들은 공공기관의 특성상 9시부터 18시로 일정하나 일별 주민들의 운영빈도에 큰 차이가 있는 것으로 확인되었다. CIS 6은 초등학교이며, CIS 7, 8은 유치원이다. 최근 탄소중립 등으로 전력사용 감축을 위해 교육시설에서는 해당시설 운영 시간 외에는 전체 절전모드를 사용하고 있다. 내포신도시 내 시설들 역시 해당 시설 활용자들이 퇴실한 이후 (14시~18시경) 실내 절전모드가 가동되어 일부 시설에서 7시~18시 시간대의 공기질 정보만 획득할 수 있었고, 시설의 점검 등으로 인해 전기가 단전된 경우 자료를 제외하고 분석하였다. CIS 9, 10은 영화관 내에 설치하였다. CIS 9는 극장

**Table 1.** Detailed information of IoT sensor sites installed in this study.

Category	ID	Location	Period	Main user group	Operating time
Library	CIS 1	Reading room	22. 04. 01~09. 30	Ages 3 to 15	From 9 to 22 (Weekdays)
	CIS 2	Reading room	22. 04. 01~09. 30	12 and up	From 9 to 18 (Weekend)
Community service center	CIS 3	Office	22. 04. 04~09. 30	20 and up	From 9 to 18
	CIS 4	Office	22. 04. 04~09. 30	20 and up	
Health center	CIS 5	Office	22. 04. 04~09. 02	20 and up	
Elementary school	CIS 6	Classroom	22. 04. 04~09. 30	Ages 8 to 13	From 8 to 16
Kindergarten	CIS 7	Classroom	22. 04. 01~09. 30	Ages 4 to 7	From 9 to 18
	CIS 8	Classroom	22. 04. 01~09. 30	Ages 4 to 7	
Cinema	CIS 9	Ticket box	22. 04. 01~09. 30	All ages	From 9 to 21
	CIS 10	Screen	22. 04. 01~09. 30	All ages	
PC cafeteria	CIS 11	Counter	22. 04. 01~09. 30	Ages 8 to 19	Open 24 hours
Bus terminal	CIS 12	Waiting room	22. 04. 04~09. 30	All ages	From 5 to 22
Coffee shop	CIS 13	Seats area	22. 04. 15~09. 30	20 and up	From 9 to 24
	CIS 14	Seats area	22. 05. 12~09. 30	20 and up	From 10 to 23
Supermarket	CIS 15	Sale stand	22. 04. 27~09. 30	All ages	From 10 to 22

매표소 앞에 설치하였으며, 주변에서 팝콘 등의 음식을 제조한다. CIS 10은 총 92명이 입실할 수 있는 상영관이지만, 코로나19의 영향과 상대적으로 인구수가 많지 않은 지역 특성상 1회 관람객은 평균 약 20~40명 수준으로 확인되었다. CIS 11은 PC방으로 주 손님은 지역 내 초·중·고등학교 학생들로 13시부터 20시까지 이용객이 증가하고, 그 외 시간대에는 이용객이 적은 편이다. CIS 12는 간이 버스터미널로 이용객이 다소 적은 편이며, 운영시간은 5시부터 22시까지이다. CIS 13과 14는 커피숍으로 내포신도시 내 이용자가 많을 것으로 판단되는 커피숍 두 곳을 대상으로 선정하였다. 두 곳 모두 내포신도시 내 중심상가에 위치해 있어 상대적으로 이용객이 많은 곳이며, 운영시간은 9시부터 24시까지이다. 다만 두 지점의 가격대가 상이하여 CIS 13은 20대 전후가 주소비층으로 Take-out의 비중이 높은 반면, CIS 14는 상대적으로 가격대가 높고, 매장 취식률이 높은 편이다. CIS 15는 중심상가에

위치한 대형마트로 운영시간은 10시부터 22시까지이다. 이 외 각 지점에 대한 세부 정보는 표 1에 제시하였다. 시설 그룹별 실내공기질 관리 대책 제안을 위해 공공시설 (CIS 1~5), 교육시설 (CIS 6~8), 편의시설 (CIS 9~15)로 구분하여 분석을 진행하였다.

## 2.2 관측 장비 (AirGuard K)

내포신도시의 다중이용시설 실내공기질 모니터링을 위해 센서 기반의 IoT 측정장비인 AirGuard K (IAQ-CW1, K-weather)를 사용하였다. 본 장비는 WIFI 기반으로 1초 단위로 측정된 정보를 5분 단위로 저장하여 컴퓨터나 스마트폰으로 실시간 확인할 수 있으며, 그래프 및 엑셀시트로 저장하여 분석할 수 있는 시스템을 제공하고 있다. 측정 항목은 총 7개 항목이다 (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, CO<sub>2</sub>, VOCs, 소음, 온도, 습도). 그중 PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>에 대해서는 환경부에서 인증하는 1등급 성능인증을 평가를 받았지만, 그 외 VOCs나 소음에 대해서는



Fig. 2. Image of the IoT sensor.

Table 2. Analytical conditions of IoT sensor and measurement range of each species.

Parameter	Specification	Species	Range
Operating temp.	-5 to 50°C	PM <sub>2.5</sub>	0~300 µg/m <sup>3</sup>
Flow	0.1 lpm	PM <sub>10</sub>	0~300 µg/m <sup>3</sup>
Power supply	5VDC	CO <sub>2</sub>	0~3,000 ppm
Power consumption	1 Wh	Temperature	-40~70°C
Weight	250 g	Humidity	0~100%
Communication method	WIFI	VOCs	125~3,500 µg/m <sup>3</sup>
Performance class	Class 1 (PM <sub>2.5</sub> )	Noise	32~75 dB (A)

센서 신뢰성을 확보할 수 없어 이들 자료를 제외하고 활용하였다. IoT 센서에 대한 세부 사양은 표 2에 나타냈으며, 장비의 구성 사진은 그림 2에 나타났다.

### 2.3 실내공기질 관리 규정

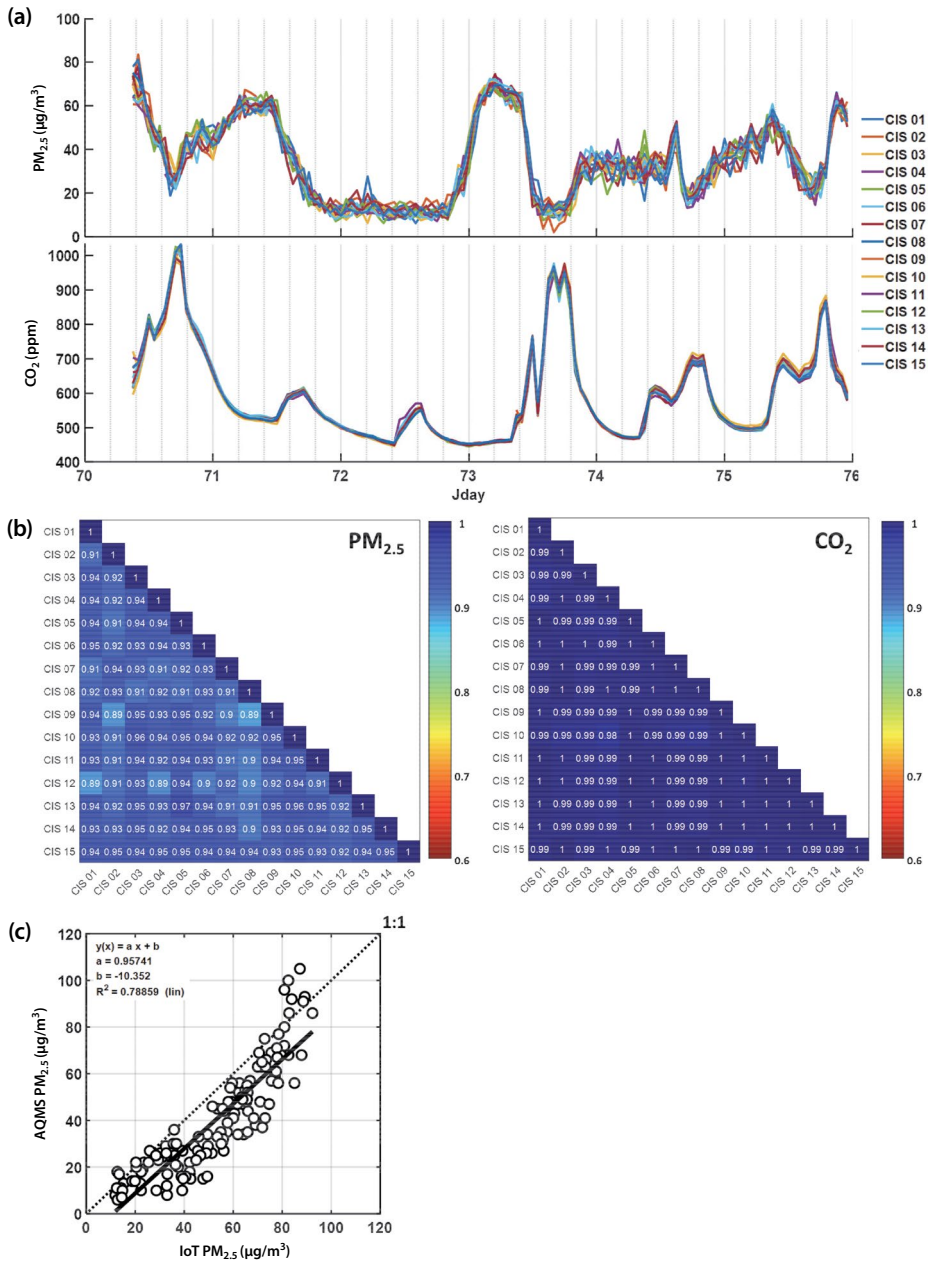
최근 고농도 미세먼지 발생 사례가 꾸준히 증가하고 있다. 이에 대한 국민적 우려와 대책 마련이 요구되고 있어 정부는 외부 대기환경뿐만 아니라 실내 공간에 대한 관리 기준 강화를 추진하고 있다. 현재 실내 환경은 크게 3개 부처로 분류되어 관련 시설에 대해 다른 기준을 지정하여 관리되고 있다. 우선 여객자동차터미널의 대합실, 도서관, 대규모 점포, 영화상영관, 인터넷 컴퓨터 게임시설 제공업의 영업시설, 어린이집

등은 환경부에 의해 「실내공기질 관리법」 시행규칙에 따라 10가지 항목이 지정되어 관리되고 있으며, 유치원이나 어린이집은 교육부의 「학교보건법」 시행규칙에 의거 17가지 항목을 관리하고 있다. 작업환경에 대해서는 고용노동부의 「화학물질 및 물리적 인자의 노출기준」에 따라 731개 물질을 관리하고 있으며, 그 외 가정집과 같은 개인 환경에 대해서는 관리하지 않고 있다. 본 연구에서 대상지역으로 선정한 11개 시설 군 중 6개소는 「실내공기질 관리법」의 규제를 받고 있으며, 2개소는 「학교보건법」을, 나머지 3개소는 현재 관리되지 않고 있는 시설들이다. 표 3은 앞서 언급한 환경부와 교육부에서 관리하고 있는 시설들과 주요 관리 물질에 대해 나타낸 것이다. 이 외에도 「학교보건법」에

**Table 3.** Summary of species and guideline at each facility managed by government.

Species	Indoor air act		School health act	
	Guideline	Target facilities	Guideline	Target facilities
PM <sub>10</sub>	200 µg/m <sup>3</sup>	c), d)	150 µg/m <sup>3</sup>	g), h)
	100 µg/m <sup>3</sup>	a)	75 µg/m <sup>3</sup>	e), f)
	75 µg/m <sup>3</sup>	b)		
PM <sub>2.5</sub>	50 µg/m <sup>3</sup>	a)	35 µg/m <sup>3</sup>	e), f)
	35 µg/m <sup>3</sup>	b)		
CO <sub>2</sub>	1,000 ppm	a)~d)	1,000 ppm	e), f)
HCHO	100 µg/m <sup>3</sup>	a), c)	80 µg/m <sup>3</sup>	e), i)
	80 µg/m <sup>3</sup>	b)		
CO	25 ppm	c)	10 ppm	k)
	10 ppm	a), b)		
NO <sub>2</sub>	0.3 ppm	c)	0.05 ppm	k)
	0.1 ppm	a)		
	0.05 ppm	b)		
TVOC	1,000 µg/m <sup>3</sup>	c)	400 µg/m <sup>3</sup>	All sites
	500 µg/m <sup>3</sup>	a)		
	400 µg/m <sup>3</sup>	b)		
O <sub>3</sub>			0.06 ppm	j)
Rn	148 Bq/m <sup>3</sup>	a)~c)	148 Bq/m <sup>3</sup>	i)
Airborne bacteria	800 CFU/m <sup>3</sup>	b)	800 CFU/m <sup>3</sup>	e), f)

a) underground station, underground shopping arcade, art museum, PC cafeteria, library, cinema, bus terminal, train terminal, airport terminal, private academy, supermarket, museum, public bath, funeral hall, b) medical center, postpartum care center, senior care center, daycare center, c) indoor parking lot, d) public indoor training center, indoor concert hall, e) classroom, f) cafeteria, g) gym, h) auditorium, i) dormitory, j) teacher's room or administration office, k) individual heating classroom or roadside classroom



**Fig. 3.** Correction test of PM<sub>10</sub> and CO<sub>2</sub> of individual IoT sensors (a), heatmap of correlation coefficient between individual IoT sensors (b), and comparison of PM<sub>2.5</sub> concentrations measured with IoT sensor versus AQMS (c).

따라 벤젠, 톨루엔 등의 방향족 탄화수소의 규정이 학교 기숙사에 대해서 존재하지만, 본 연구의 측정 항목과 측정 범위를 벗어나므로 내용에서 제외시켰다.

## 2.4 IoT 센서의 정도 관리

본 연구에서 사용한 AirGuard K는 이전의 연구에서 실내공기질 분석을 위해 다양하게 사용된 바 있다

(Guak *et al.*, 2021; Lim *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2017). 본 연구에서는 광산란 방식의 IoT 센서 값의 신뢰도 확보를 위해 기기 간 보정 및 도시대기측정소와의 비교를 수행하였다. 총 15개의 IoT 센서를 대상으로 측정 전 동일한 장소에서 기기 간 비교를 통해 장비 간 보정을 수행하였다. 측정 항목은 본 연구에 사용한 PM<sub>2.5</sub>와 CO<sub>2</sub>이다. 총 6일 동안 동일한 장소에 연속 모니터링하였고(그림 3a), IoT 센서 중 CIS 5에 맞춰 모든 장비를 보정하였다. 사전 보정 작업에서 CIS 5는 AQMS와의 PM<sub>2.5</sub> 상관성 분석 시 경향성과 정확도가 가장 높은 것으로 나타나 이를 기준장비로 선정하였다. 보정된 IoT 센서의 결과를 바탕으로 시계열 분석 및 상관성 분석을 진행하였다. 각 IoT 센서 간의 상관계수는 PM<sub>2.5</sub>의 경우 0.83~0.97이었으며, CO<sub>2</sub>는 모든 장비들 간 상관계수가 0.98 이상으로 15개 기기 간의 높은 상관관계를 나타냈다(그림 3b). IoT 센서의 신뢰성 평가와 보정을 위해 내포신도시 내 위치한 도시대기 측정소 자료에서 측정한 PM<sub>2.5</sub> 값과 CIS 5의 측정값을 비교하여 총 7일 동안 1시간 간격의 자료를 비교하였다. 분석 결과 CIS 5와 도시대기측정소의 PM<sub>2.5</sub> 상관계수 값은 0.79로 우수했다(그림 3c). 상관식에서 구해진 기울기(slope) 값(0.9574)과 y 절편(y-intercept) 값(-10.352)을 이용하여 다른 IoT 센서에 적용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 주변 대기 질 현황 및 기상개황

다중이용시설의 실내공기질 분석에 앞서 내포신도시 내 위치한 AQMS 및 ASOS 자료를 기반으로 관측 기간 동안 주변 대기오염물질의 분포 특성과 기상 조건을 검토하였다. 대상은 AQMS의 측정 항목 중, 본 연구의 분석 대상 물질인 PM<sub>2.5</sub>를 중심으로 분석하였다. 관측 기간인 2022년 4월부터 9월까지 대기환경기준의 “나쁨(>35 µg/m<sup>3</sup>)”을 초과하는 일은 전체 기간 동안 2일이었으며, 월평균 농도는 각각 21 µg/m<sup>3</sup>(4월), 15 µg/m<sup>3</sup>(5월), 9 µg/m<sup>3</sup>(6월), 12 µg/m<sup>3</sup>(7월), 7 µg/m<sup>3</sup>(8월), 11 µg/m<sup>3</sup>(9월)이었다. 평균 풍속은 전체 기간 동안 평균 2 m/s 이하의 낮은 풍속의 정체된 대기 조건이었으며, 주 풍향은 북풍과 남동풍으로 월별로 다소 상이하게 나타났다(그림 4).

#### 3.2 다중이용시설별 오염물질 변동 특성

##### 3.2.1 PM<sub>2.5</sub>의 주간 농도 변화 특징

그림 5에 각 다중이용시설별 PM<sub>2.5</sub>의 주간 변동 특성을 나타냈다. PM<sub>2.5</sub>의 주간 변동은 시설별로 상이하게 나타났다. 먼저 CIS 1, 2(도서관)은 월요일에 각각 11.2, 13.1 µg/m<sup>3</sup>으로 가장 높았다. 이후 화요일부터 금

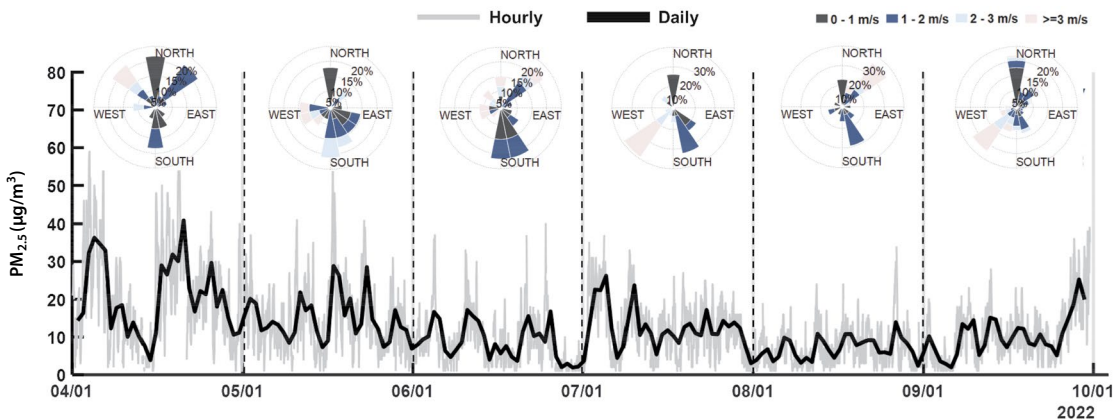


Fig. 4. Time series of ambient PM<sub>2.5</sub> concentration and wind rose diagram on each month.

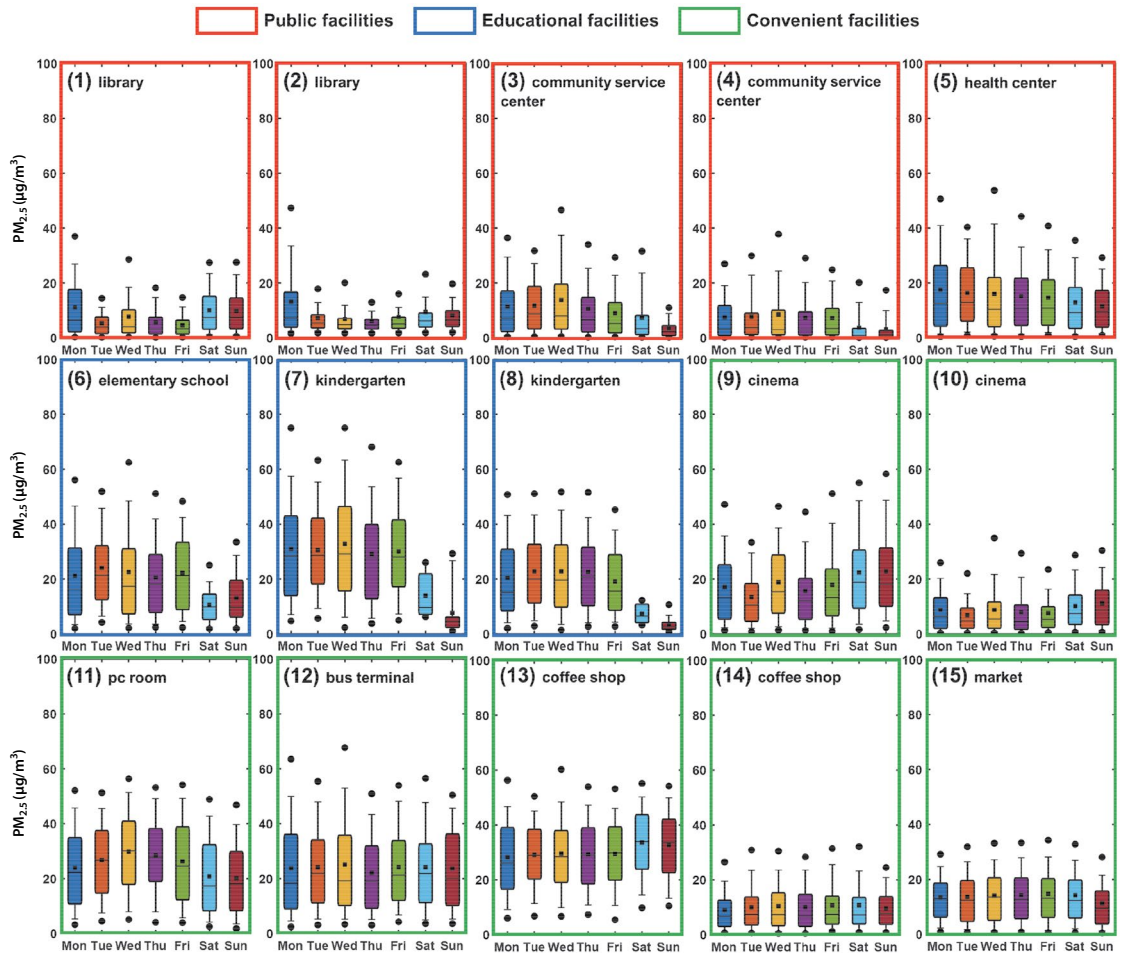


Fig. 5. Boxplot of  $PM_{2.5}$  concentration by day of the week. Each number represents an ID number presented in Table 4.

요일까지는 낮은 농도가 유지가 되었고, 주말은 다시 농도가 높아지는 패턴을 보였다. 이는 도서관의 경우 월요일이 휴관일로 이때 도서관 전체에 대한 청소와 책장정리가 이루어지면서 이에 대한 영향인 것으로 판단되며, 주말의 경우 주중 대비 이용객수가 늘어나면서 재실자의 영향으로 농도가 소폭 증가하는 것으로 판단된다. CIS 3~5는 주민 편의시설인 복지센터와 보건소로 시설의 특성상 주중에만 운영을 하므로 주중에는 높고 주말에는 낮은 일반적인 패턴이 나타났다. 주중 평균 농도는 남동쪽에 위치한 시설인 CIS 5가  $15.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 CIS 3과 4의 평균 농도  $11.3, 7.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$

$\text{m}^3$ 에 비해 높은 농도가 나타났다. 관측지인 내포신도시 내에서 상대적으로 도심지역에 위치한 CIS 3, 4 대비 CIS 5는 주변이 농축산지역으로  $\text{NH}_3$  배출이 활발한 곳이며, 배출된  $\text{NH}_3$ 가 2차 입자 생성에 기여하여 CIS 5의 농도가 상대적으로 높게 나타났을 가능성이 존재한다(Kang and Kim, 2022; Zhai *et al.*, 2021). 전체 기간 동안 CIS 5와 인접한 흥성읍 도시대기측정소의  $PM_{2.5}$  평균 농도는  $17.2 \pm 13.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, CIS 3, 4와 인접한 내포 도시대기측정소의  $PM_{2.5}$  평균 농도인  $15.7 \pm 9.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높은 값이 나타났다. 하지만 내부 활동의 영향과 외부의 영향을 분리하기 위해서는



추가적인 연구를 통한 보완이 필요하다. CIS 6~8은 모두 교육시설이며, 초등학교(CIS 6)와 유치원(CIS 7, 8)이 위치해 있다(표 1 참조). CIS 6~8은 시설의 특성상 주중과 주말의 차이가 분명하게 발생했다. CIS 6~8의 주중 평균 농도는 각각 22.2, 30.7, 21.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 주말 평균 농도는 각각 11.9, 8.76, 4.09  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 주중의 평균 농도는 주말 평균 농도에 비해 약 1.9~5.2배 높았다. 이는 시설 이용객의 방문에 따른 전형적인 결과를 나타낸다. 영화관 상영관과 매표소에 위치한 CIS 9, 10은 이용 고객이 상대적으로 많은 주말의 농도가 상승하는 것으로 나타났다. 주중 평균 농도는 상영관과 매표소에 각각 16.6, 8.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나, 주말에는 22.6, 10.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 34~36%가 증가하였다. 그리고 주중에는 수요일에 가장 높은 농도가 나타났는데, 이는 매주 수요일마다 카드사 및 통신사 행사를 통한 관람료가 할인되어 평소보다 많은 인원이 방문한 효과로 판단된다. CIS 11은 PC 방으로 주중 농도가 상승하여 수요일에 최고 농도가 나타나고(29.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 이후 감소하여 일요일에 최소 농도가 나타났다(20.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). PC 방의 경우 주요 고객이 초~고등학교 학생들로 학생들의 이용이 빈번한 주중이 주말보다 높게 난 이유로 판단된다. CIS 12(간이 버스터미널)는 주중과 주말의 평균 농도 차이가 없었으며(23.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 주간 변동 없이 일정한 값을 나타냈는데, 이는 내포신도시의 특성상 버스노선이 비교적 많지 않기 때문에 버스정류장을 이용하는 버스가 많지 않고, 승객의 빈도수 또한 주중과 주말 간 차이가 없어 나타난 결과로 해석된다. CIS 13, 14(커피숍)는 같은 종류의 시설임에도 불구하고 상이한 결과가 나타났다. CIS 13은 주중과 주말에 각각 29.1, 33.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 높은 농도가 나타났다. 반면, CIS 14는 주중과 주말 모두 약 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  수준의 농도가 유지되었다. CIS 14는 CIS 13에 비해 내부면적이 넓고 상대적으로 이용 금액이 비싼 편이며, 고객들의 편의를 위한 공기청정기 및 환기 시설이 설치되어 있다. 이는 같은 업종의 시설이라도 개별 시설마다 인구밀집도, 면적, 환기시스템 등에 의해 실내공기질의 패턴이 달라질 수 있음

을 보여준다. CIS 15(마트)는 주중의 평균 농도가 14.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 주말(12.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 다소 높게 나타났다. 주간 패턴은 크게 나타나지 않았다.

### 3.2.2 CO<sub>2</sub>의 주간 농도 변화 특징

그림 6은 각 실내 시설별 CO<sub>2</sub>의 주간 변동을 나타낸 것이다. 전통적으로 CO<sub>2</sub>는 입자상 오염물질(particulate matter, PM)과 더불어 실내 환기와 오염도를 나타내는 지표로 사용되어 왔다(Lin *et al.*, 2022). 실내 시설에서 CO<sub>2</sub> 농도 증가는 환기 부족을 의미하며(Turanjanin *et al.*, 2014), 최근 공기청정기 등의 보급으로 실내 공간에 대한 환기 중요성이 각각되면서, 오히려 실내 CO<sub>2</sub> 농도는 증가하는 추세이다(Du *et al.*, 2020). 한편, 국내 대기환경에 대한 CO<sub>2</sub> 연평균 농도는 2021년 기준으로 안면도 측정소에서 약 423 ppm로 관측되었다(KMA, 2022a).

실내 시설의 CO<sub>2</sub> 주간 변동 결과는 PM<sub>2.5</sub>의 결과와 유사하게 이용객들에 의한 영향이 큰 것으로 분석되었으나, 일부 차이는 있었다. CIS 1, 2는 주중 462~530 ppm 수준이었으며, 주말에는 499~594 ppm으로 상승했다. PM<sub>2.5</sub>는 월요일에 청소 등의 내부 활동이 증가함에 따라 주중 최고 농도가 나타났지만, 반대로 CO<sub>2</sub>는 월요일 휴관에 따라 이용객이 없어 내부 배출원이 감소하면서 가장 낮은 농도를 보였다. 주민 복지센터 및 보건소가 위치해 있는 CIS 3~5는 주말에는 운영을 하지 않기 때문에, 주중의 평균 농도(475~661 ppm)가 주말의 평균 농도(401~558 ppm)에 비해 상대적으로 더 높게 나타났다. 그리고 이용객의 빈도에 따라 CIS 3은 CIS 4, 5에 비해 상대적으로 농도가 낮게 나타났다. 교육 시설인 CIS 6~8은 주중과 주말의 차이가 분명했으며, 주중 평균 농도 수준은 623~734 ppm, 주말 평균 농도 수준은 409~544 ppm으로 주중이 약 1.3~1.8배 높게 나타났다. 상영관과 매표소에 각각 위치한 CIS 9와 10은 PM<sub>2.5</sub>와 다른 결과가 나타났다. PM<sub>2.5</sub>는 음식 제조 및 방문객들의 활동이 많은 매표소(CIS 9)에서 더 높은 값이 나타났지만, CO<sub>2</sub>의 경우 매표소(CIS 9)보다, 밀폐된 곳에서 사람들의 지속된

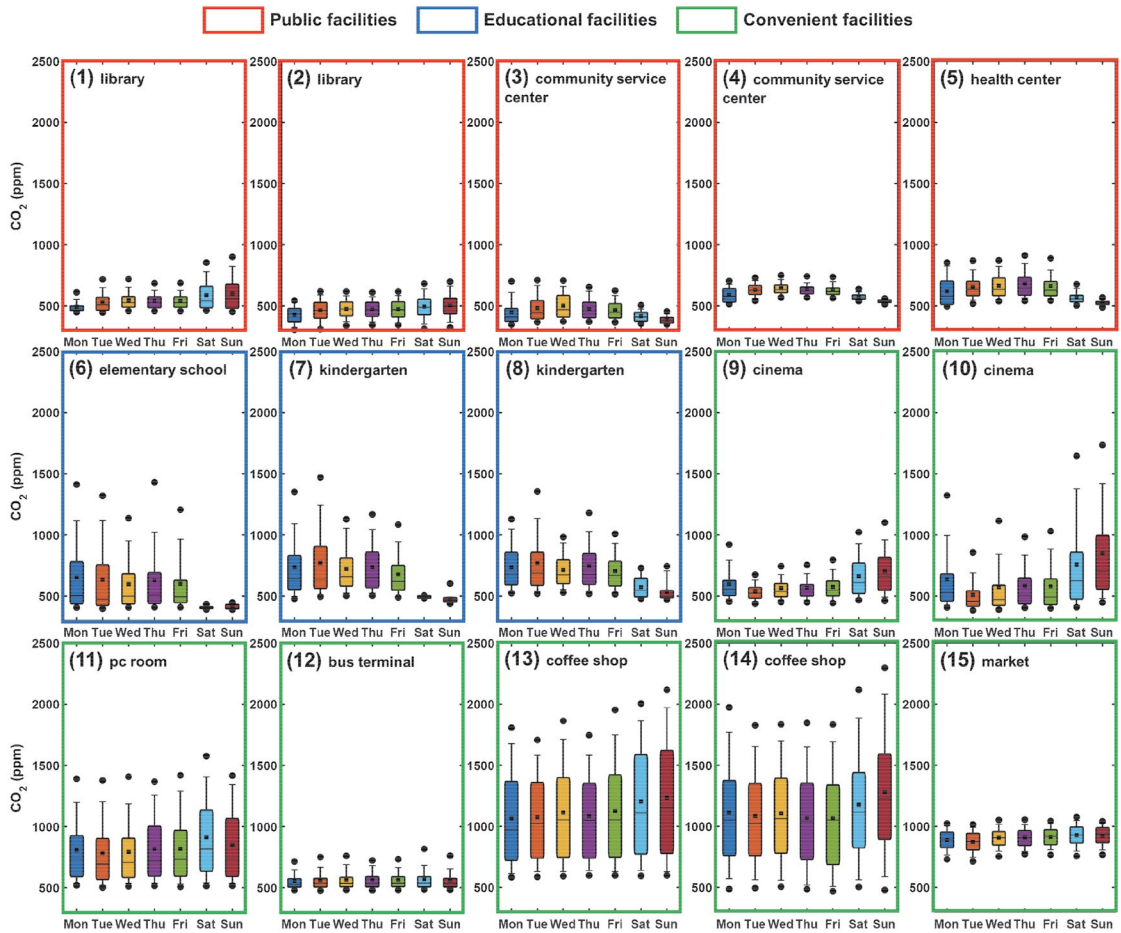
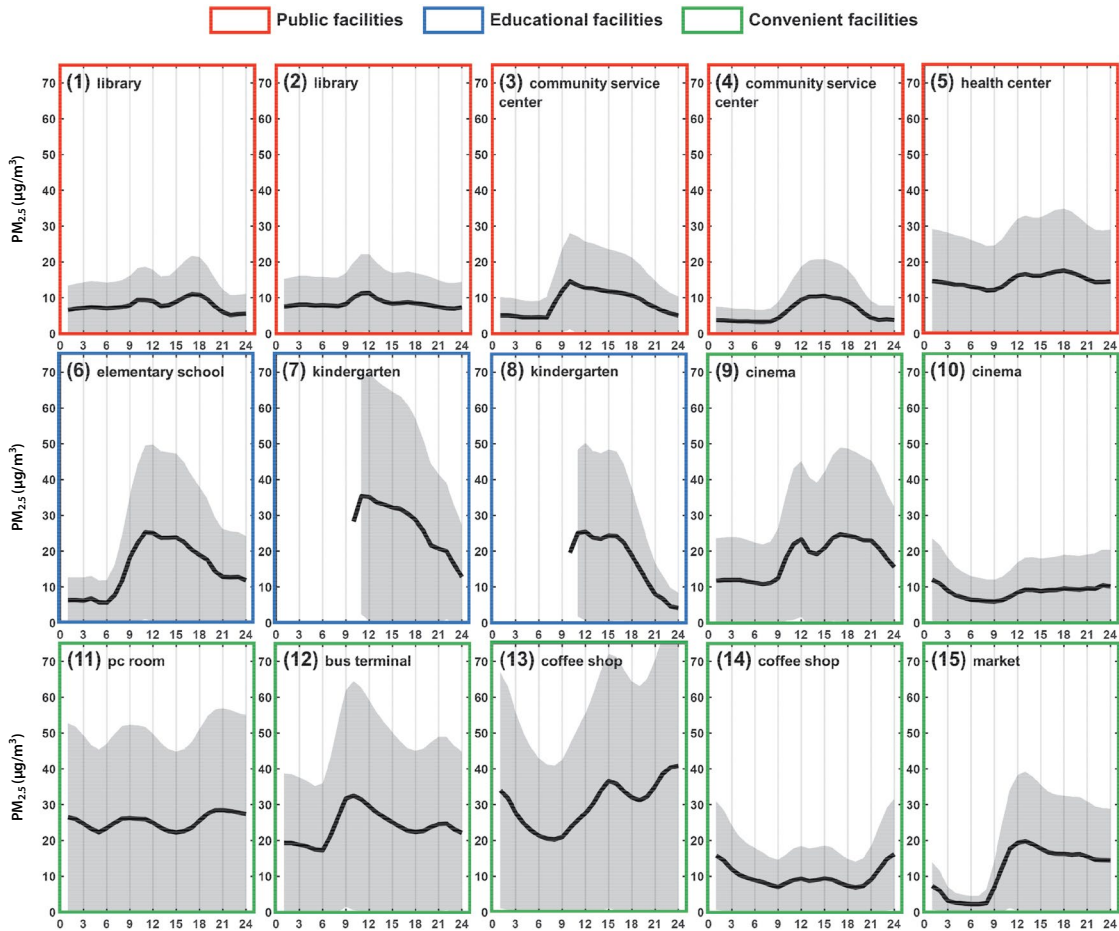


Fig. 6. Boxplot of CO<sub>2</sub> concentration by day of the week. Each number represents an ID number presented in Table 4.

호흡이 이루어지는 상영관(CIS 10)에서 더 높게 나타났다. 이용객이 많은 주말이 주중보다 높은 값이 나타났으며, 주말 평균 농도는 CIS 9와 10에서 각각 683, 804 ppm이었다. CIS 11(PC 방)의 주중 및 주말 평균 농도는 803, 880 ppm으로 PM<sub>2.5</sub> 결과와 반대로 주말에 더 높은 값이 나타났다. 이는 이용객들의 방문이 많은 주중에 출입문의 개폐가 다수 발생하여 순간적인 환기 효과가 발생하면서 CO<sub>2</sub> 농도를 떨어뜨린 결과로 판단된다. 이용객이 증가함에 따라 농도가 증가하는 것이 일반적이지만, PC 방 시설의 특성상 외부의 빛을 차단하기 때문에 창문을 통한 환기가 잘 이

루어지지 않고 오직 출입문과 공조설비를 통한 환기만 이루어진다. PC 방 내부에는 흡연실과 조리시설이 존재하여 다량의 CO<sub>2</sub>가 배출되기 때문에 이용객의 증가할 때 공조설비의 풍량이 더 커지는데 이는 재실자의 증가에 따른 농도 증가보다 출입문 개폐와 공조설비 가동에 따른 농도의 감소 효과가 더 크기 때문에 재실자가 많은 주중 CO<sub>2</sub> 농도가 주말보다 낮게 나타난 이유로 판단된다. 이용객의 빈도가 작은 CIS 12(간이 버스 터미널)는 PM<sub>2.5</sub>와 마찬가지로 주중과 주말의 농도 차이가 확인되지 않았으며, 주간 농도 범위는 561~565 ppm이었다. CIS 13, 14(커피숍)는 관측 지점



**Fig. 7.** Diurnal variation of the indoor  $PM_{2.5}$  concentration (x-axis represents hour). Black solid line represents the average and gray shaded area represents the standard deviation.

중 평균  $CO_2$  농도가 가장 높게 나타났다. CIS 13, 14 모두 이용객이 증가하는 주말에 농도가 더 높았으며, 주말 평균 농도는 각각 1,219, 1,228 ppm으로 나타났다. 이는 커피숍의 경우 타 시설에 비해 재실자가 입실 시 해당 시설에 머무르는 시간이 길고, 특히 시간적 여유가 있는 주말이 주중보다 재실시간이 길어지면서 주말  $CO_2$  농도가 주중보다 더 높게 나타난 것으로 판단된다. CIS 15 (마트)는 주중 평균 농도(898 ppm)에 비해 주말 평균 농도(925 ppm)가 다소 높게 나타났는데, 이 역시 주중보다 주말의 이용객이 증가함에 따라 나타난 결과로 풀이된다.

### 3.2.3 $PM_{2.5}$ 의 일 변화 특징

각 실내 시설별  $PM_{2.5}$ 의 일간 농도 변화를 그림 7에 나타냈다. 실내  $PM_{2.5}$ 의 일간 변동은 외부 농도와 다른 패턴이 관찰되며, 실내 시설의 활동에 따라 결정될 수 있다(Aquilina and Camilleri, 2022). CIS 1, 2 (도서관)의 일간 변동은 도서관의 개장 시간인 9시 이후 일부 상승하여 유지된 후, 폐장 시간인 20시 이후 감소하여 일정한 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 하지만 도서관이라는 시설의 특성상 이용객들의 내부 활동이 적고 기타 연소시설의 사용이 없으므로 일간 변동이 크게 나타나지는 않았다. 주민 복지센터 및 보건

소가 위치해 있는 CIS 3~5은 주간 활동시간대에 상승한 뒤 감소하는 패턴이 나타나지만 peak 시간은 시설마다 상이하게 나타났으며, CIS 3은 9시에 CIS 4는 15시 부근에서 일 최고 농도가 나타났다. CIS 5는 앞선 두 지점과 달리 일 변동이 크게 나타나지 않았다. 이는 편의시설 특징상 이용객의 이용빈도가 일정하지 않고, 시설별로 봄비는 시간과 유동인구가 상이하기 때문에 다양한 경향을 보이는 것으로 판단된다. 교육시설인 CIS 6~8은 등교 시간에 상승하고 이후 감소하는 패턴이 나타났다. CIS 6은 등교시간인 8시 이후 농도가 상승하여 11시에 일 최고 농도( $27.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 이후 감소하는 경향이 나타났다. CIS 7과 8은 스마트 절전시스템으로 새벽시간대 자료는 확보하지 못했으며, 같은 유치원 내 다른 교실에서 측정한 결과이다. CIS 7과 8 모두 11시에 일 최고 농도가 나타났으며, 농도는 각각  $36.5, 27.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 같은 시설의 공간이라도 이용자의 활동과 외부 요인에 따라 결과 값의 차이가 나타난 것으로 분석된다 (Aquilina and Camilleri, 2022). CIS 9 (영화관 매표소)는 팝콘과 같은 음식 등 제조의 영향으로 영화관 영업 시간에 약 2.3배 상승하는 것으로 나타났으며, 영업 시간 종료 후 점차 감소하는 양상을 나타냈다. CIS 10 (상영관)은 CIS 9과 같은 시설임에도 불구하고 영업 시간 중 농도가 감소하거나 유지되는 패턴이 나타났다. 이는 상영관 내에서는 특별한 이동을 하지 않고 자리에 앉아서 관람하며, 영화 상영 중 냉난방 공조설비의 가동으로 인해 농도가 낮아진 결과로 판단되며, 영업 시간 종료 이후 공조시설의 가동이 정지되면서 오히려 농도가 소폭 상승하는 것으로 나타났다. CIS 11 (PC 방)은 요리 제조 및 24시간 영업 시간의 영향으로 일간 변동은 크게 나타나지 않았으나, 일 평균 농도  $25.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높게 유지가 되었다. CIS 13, 14 (커피숍)는 상이한 결과가 나타났다. CIS 13은 9시 이후 농도가 증가하여 15시에 peak가 발생하고( $38.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 그후 다시 감소한 뒤, 20시 이후부터 다시 증가하여 0시 이후 감소했다. CIS 14는 주간시간대에 peak가 발생하지는 않았지만, 20시 이후부터 증가하여 0시 이후부터 감소하는 패턴이 나타났다. 이

는 같은 종류의 시설이지만 가격대에 따라 이용객들의 연령대와 행동 패턴에 따라 상이한 결과를 초래한다는 것을 확인할 수 있었다. CIS 15 (마트)는 마트의 영업 시간인 9시 이후 상승하여 이용객이 줄어드는 20시 이후 감소하는 전형적인 패턴이 나타났다.

### 3.2.4 CO<sub>2</sub>의 일 변화 특징

각 실내 시설별 CO<sub>2</sub>의 일간 농도 변화를 그림 8에 나타냈다. CO<sub>2</sub>의 일간 변동은 PM<sub>2.5</sub>와 다르게, 일부 시설을 제외하면 큰 변화를 확인할 수 없었다. CIS 1, 2 (도서관)은 18시 부근 일부 농도가 상승한 것을 제외하면 약 500 ppm 수준으로 일간 농도가 유지되었다. CIS 3~5 (주민 복지센터 및 보건소)도 마찬가지로 일정하게 일중 농도가 450~600 ppm 수준으로 유지되었다. CIS 6 (초등학교)은 등교 시간 이후 농도가 상승하여 하교 시간에 감소하는 일반적인 패턴이 나타났다. 일 최고 농도는 공통적으로 16시 부근에서 발생하였으며, 일 최고 농도는 780 ppm으로 나타났다. CIS 7, 8 (유치원)은 새벽시간대의 자료 확보가 어려워 전체적인 일 변동을 분석할 수는 없지만 주간시간대에는 특별한 변동없이 유지되는 것으로 나타났다. CIS 9, 10 (매표소, 상영관)은 9시 이후 농도가 상승하고 0시 이후 농도가 감소하는 공통된 패턴이 나타났다. 일 평균 농도는 CIS 9, 10 (601, 640 ppm)으로 매표소보다 상영관에서 다소 높은 농도가 나타났다. CIS 11 (PC 방)은 주 이용 연령대가 학생이므로 하교 시간인 15시 이후 농도가 상승하여 19시에 일 최고 농도 (1,153 ppm)가 나타났고, 점차 감소하는 패턴이 나타났다. CIS 13, 14 (커피숍)은 PM<sub>2.5</sub>에서 다른 패턴이 나타났던 것과는 달리, CO<sub>2</sub>의 일간 변동은 유사하게 나타났다. 0시 이후 감소한 이후 9시 이후부터 급격하게 상승하여 16시에 peak 발생 후 다시 감소하여 0시에 일 최고 농도 (각각 1,592, 1,567 ppm)가 나타났으며, 실내공기질의 가이드라인 (1,000 ppm)을 초과하는 것으로 분석되었다. CIS 12 (버스터미널)와 CIS 15 (마트)는 각각 약 500, 900 ppm 수준으로 일정하게 농도가 유지되었다. CO<sub>2</sub>는 재실자가 주요 배출원으로 재실

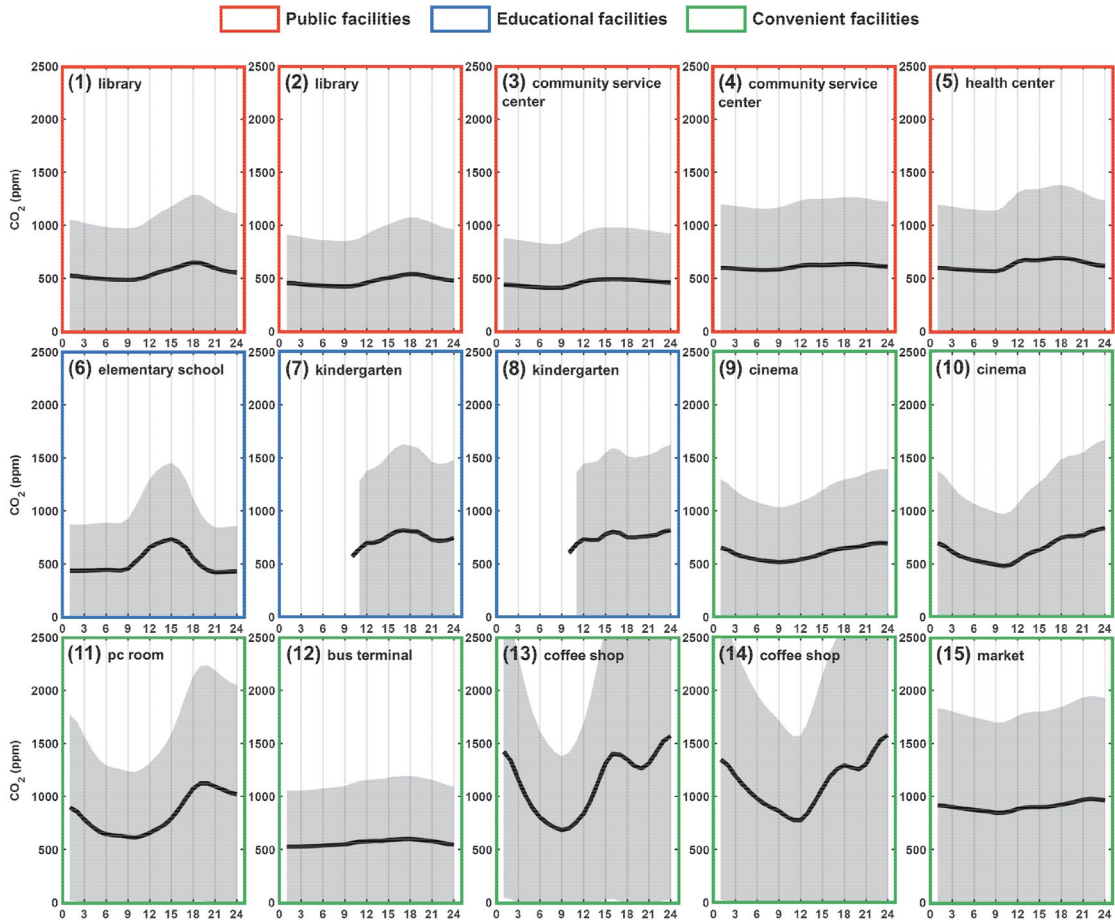


Fig. 8. Diurnal variation of the indoor CO<sub>2</sub> concentration (x-axis represents hour). Black solid line represents the average and gray shaded area represents the standard deviation.

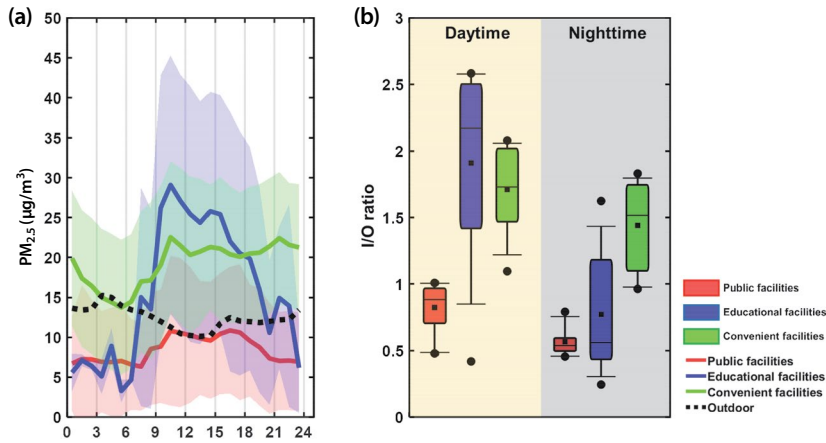
자의 활동도에 따라 상이한 결과를 나타낸다. 좁은 면적에 다수의 재실자가 활동하는 학교나 극장, 커피숍, PC 방의 경우 재실자의 존재 여부와 활동도에 따라 농도 변화가 확연히 나타나지만 그 외의 곳은 지역적 특성상 이용자가 많지 않고, 재실자의 방문도 밀집되지 않아 내부 CO<sub>2</sub> 농도가 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.3 다중이용시설의 그룹별 실내외 I/O ratio 변동 특성

다중이용시설별 실내공기질 관리 방안을 모색하기

위해 내포신도시 내 시설을 그룹별로 분류하여 일련동과 실내외 농도 비 (indoor/outdoor ratio; I/O ratio)를 분석하였다(그림 9). 시설 그룹은 2.1절에서 언급한 바와 같이 공공시설 (CIS 1~5), 교육시설 (CIS 6~8), 편의시설 (CIS 9~15)로 구분하였다. 각 그룹별 평균 및 편차를 실선과 음영으로 나타냈으며, 실외 PM<sub>2.5</sub> 농도는 검정색 파선으로 나타냈다(그림 9a).

실외 PM<sub>2.5</sub> 농도는 새벽 4시경 최고 농도(15.2 µg/m<sup>3</sup>) 이후 주간에는 감소한 뒤, 15시 이후 다시 증가하는 패턴이 나타났다. 전체 농도 범위는 10~15 µg/m<sup>3</sup>으로 하루 중 농도 변화가 크게 나타나지는 않았다. 일반적



**Fig. 9.** Average diurnal variation of PM<sub>2.5</sub> concentrations over the whole period (a), and comparison of average Indoor/outdoor ratio (I/O ratio) of PM<sub>2.5</sub> concentrations daytime and nighttime by facility (b). A shaded of each color represents the deviation, and a solid line is a mean value.

으로 도심지역의 PM<sub>2.5</sub> 일 변화 경향은 출근 시간과 퇴근 시간에 차량의 활동으로 인해 농도가 높아지지만, 교외지역의 경우 교통량이 상대적으로 적기 때문에 일 변화 특성이 다르게 나타날 수 있다 (Zhang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2009). 추가적으로 본 연구를 수행한 홍성군은 연평균 연개일수가 2018~2021년 기준으로 총 39, 43, 41, 47회였으며, 이는 백령도와 울릉도 등을 제외하면 내륙지방에서는 세 번째로 높은 수치였다 (KMA, 2022b). 관측 기간 동안 평균 시정은 새벽 시간대에 20 km 이하였으며, 새벽 시간대의 haze에 의한 영향으로 농도가 소폭 상승하여 유지되다 7시 이후 역전층이 해소되면서 대기가 혼합되고 PM<sub>2.5</sub>의 농도가 감소하는 것으로 분석된다 (Sun *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2013). 최근 수행된 국내 연구 결과에서도 본 연구의 관측지와 인접한 대산지역에서 새벽 시간대에 PM<sub>2.5</sub> 농도가 증가하고 아침에 감소하는 패턴이 나타났으며 (Kim *et al.*, 2019), I/O ratio 분석을 위해 지역적 외부공기 특성도 고려되어야 함을 시사한다. 공공시설의 경우 일 평균 농도가 가장 낮았으며 (8.43 µg/m<sup>3</sup>), 일 최고 농도는 11시경 (10.8 µg/m<sup>3</sup>)과 17시경 (10.9 µg/m<sup>3</sup>)에 나타났다. 공공시설의 경우 이용객들의 방문이 시작되는 9시 이후부터 농도가 상승하여 유지되다 업무가 종료되는 18시 이후 농도가 감소하

였으며, 시설의 이용 시간에 따른 농도 변화가 나타났다. 교육시설의 경우 세 그룹 중 일 변동이 가장 크게 나타났다. 오전 7시 PM<sub>2.5</sub> 농도 4.67 µg/m<sup>3</sup>에서 등교 및 등원 시간이 시작되는 8시경 PM<sub>2.5</sub> 농도는 15.1 µg/m<sup>3</sup>까지 급격히 상승하였다. 농도는 계속 상승하여 오전 11시 최고 농도 (29.1 µg/m<sup>3</sup>)를 기록한 뒤 점차 감소하는 양상이 나타났다. 편의시설은 시설의 종류에 따라 일 변동이 크게 달라질 수 있다 (그림 7). 편의시설은 시설별로 영업 시간이 일정하지 않기 때문에 하루 동안 일정 수준 이상의 농도가 유지되었다. CIS 11 (PC 방)을 제외하면 자정 이후 모든 시설에서 영업을 종료하기 때문에, 자정 이후에 농도가 감소하는 패턴이 나타났다. 오전 6시 이후 농도는 다시 상승하기 시작하여 주간 농도는 20 µg/m<sup>3</sup> 수준으로 높게 유지되었다.

그림 9a와 같이 주간과 야간시간의 농도 패턴이 달라지는 것을 감안하여, 주간 (daytime) 및 야간 (nighttime)을 구분하여 평균 I/O ratio를 제시하였다 (그림 9b). 먼저 공공시설의 경우 주간과 야간 모두 I/O ratio가 가장 낮게 나타났다. 주간 평균값은 0.80이었으며, 야간 평균값은 0.55였다. 공공시설의 경우 상대적으로 내부에서 활동량이 적기 때문에 실외보다 농도가 낮은 것으로 나타났으며, 주간 시간대에 대부분의 활

동이 이루어지므로 주간 평균값이 상대적으로 높은 값이 나타났다. 이전의 연구에서는 공공시설 중 보건소, 도서관의 I/O ratio 값이 각각 0.39, 0.55로 본 연구의 야간 평균값과 비슷하거나 낮은 수치였다. 동일한 시설이라도 지역적 특성과 주변 환경에 따라 비율이 달라질 수 있음을 의미한다(Lee *et al.*, 2021). 교육시설의 경우 주간과 야간의 차이가 가장 크게 나타났다. 주간과 야간의 평균 I/O ratio는 각각 1.86과 0.71로 주간이 야간에 비해 약 2.6배 높게 나타났다. 주간 시간대에 등교 및 등원이 시작되고, 교실에서 내부 활동이 발생함에 따라 값이 증가하는 것으로 분석되었다. Han *et al.* (2021) 연구에서는 초등학교 교실의 공기청정기 효과에 따른 I/O ratio를 비교하였는데, 공기청정기가 가동되는 주중과 가동되지 않는 주말의 평균 I/O ratio는 각각 0.33, 0.49였다. 해당 연구는 2019년 고농도 미세먼지 시즌에 수행된 연구로 실내 시설 내부에 의한 요인보다는 외부의 영향을 크게 받은 것으로 분석된다. 한편, 2019년 이후 학교보건법에 따라 학교 교실에 공기정화장치 설치가 의무화되고 있으며, PM<sub>2.5</sub>의 경우 공기정화장치의 가동이 실내 농도 저감에 효율적이지만 PM<sub>10</sub>의 경우 효과가 거의 없는 것으로 확인되었다(Han *et al.*, 2021). CO<sub>2</sub>의 경우 자연환기를 통해 실내 농도의 10~45%를 감축할 수 있다는 선행 연구 사례가 있기에, 교육시설의 경우 공간의 면적, 이용객의 수, 활동 패턴 등을 분석하여 효과적인 공기정화시스템의 가동과 외부 환기가 필요할 것으로 사료된다(Kim *et al.*, 2014). 마지막으로 편의시설의 경우 주간과 야간의 I/O ratio 평균값은 각각 1.68과 1.39로 주간과 야간의 차이가 상대적으로 작았다. 편의시설은 앞서 언급한대로 야간까지도 대부분 운영을 하기 때문에 차이가 크지 않은 것으로 분석되며, 주간과 야간 모두 I/O ratio 값이 1이 넘고 있어 각 시설에 따른 실내공기질 관리 방법에 대한 추가 개선 사항이 필요할 것으로 해석된다.

### 3.4 실내 시설의 공기질 관리 대책 제언

2021년 WHO는 6종의 대기오염물질(PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>,

O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO)에 대해 실내외 대기질 기준을 대폭 강화한 가이드라인을 제시하였는데 PM<sub>2.5</sub>의 경우 실내외 기준을 통합하여 5 µg/m<sup>3</sup>이었다(KEI, 2022; WHO, 2021). 현재 국내의 실내공기질 관련 최근 정책은 「제4차 실내공기질 관리 기본계획(’20~’24)」이며 관리 대상으로는 다중이용시설뿐만 아니라, 대중교통, 공동주택 등이 포함된다(MOE, 2020). 2021년 기준 전국에 등록된 45,817개의 다중이용시설 중 어린이집이 5,837개소로 가장 큰 비중을 차지하였고, 실내주차장 5,168개소, 의료기관 2,998개소 순으로 나타났다. 다중이용시설은 매년 증가하는 추세이며, 특히 민감계층이 다수 포함되어 있는 어린이집, 의료기관 등의 비율이 높기 때문에 시설별 맞춤형 실내공기질 관리가 필요할 것으로 판단된다. 이러한 관점에서 본 연구 결과를 기반으로 다음과 같은 관리 방안을 제안하고자 한다.

첫째, 현재 환경부, 교육부, 고용노동부 등에서 관리하고 있는 실내공기질 관련 법령을 WHO 신규 가이드라인 및 국내 배정농도를 고려하여 실내공기질 표준화 방안이 검토되어야 한다. 대기오염물질에 대한 인체 위해성이 실내 공간에 따라 다르지 않은 만큼 현재 각 부처에서 관리하고 있는 대상 오염물질과 기준농도 등을 통합하여 표준화된 방법으로 관리할 필요가 있다.

둘째, 실내공기질 자동측정장비의 확대 도입이 검토되어야 한다. 현재 환경부에서 관리하는 실내공기질 자동측정망은 2021년 기준 80개의 지점이 있으며, 주로 민감계층이 이용하는 학교 및 의료기관 등 8개 시설에서 측정이 이루어지고 있다. 실내공기질 자동측정망의 확대 도입을 통해 체계적이고 꼼꼼한 모니터링 시스템 구축이 요구된다. 하지만 전국에서 운영 중인 45,817개의 다중이용시설에 기존 국가측정망 수준의 시스템을 구축하여 관리하는 것은 한계가 있기 때문에, 간이센서에 대한 기술개발과 IoT 시스템을 연계한 관리 방안이 검토되어야 할 것이다.

셋째, 현재 추진되고 있는 간이측정장비에 성능인증제도에 대한 신뢰성 향상이 필요하다. 센서장비는

값이 저렴하고 설치가 간편하다는 장점이 존재하지만, 값의 신뢰도 향상을 위해 주기적인 관리가 필요하다. 현재 환경부에서는 미세먼지 간이측정기기 성능인증제도를 통해 센서장비에 대한 등급을 부여하고 있지만 너무 낮은 등급기준으로 대부분의 센서가 1등급을 받고 있는 실정이다. 현재 간이센서는 기준장비와의 비교를 통해 간단한 평가를 통해 등급이 매겨지지만, 개별 기기 간의 비교, 시간 경과에 따른 신호 감쇠 효과, 장기적인 데이터 신뢰성 검증, 주변 기상 조건 특히 수분 등 간섭물질의 영향에 대한 출력 감소 등을 추가로 고려할 필요가 있다(Masson *et al.*, 2015; Moltchanov *et al.*, 2015; Mead *et al.*, 2013).

넷째, 실내 및 실외공기질을 통합하여 관리하는 방안을 고려해야 한다. 현재 실내와 실외의 공기질은 각각의 기준에 따라 관리되고 있다. 하지만 실외 PM<sub>2.5</sub>는 실내 PM<sub>2.5</sub> 농도와 구성에 모두 영향을 미치고(Liu and Zhang, 2018), 최근 WHO 가이드라인에서 실내외 구분을 하지 않고 기준을 정했다(WHO, 2021). 개방된 공간에서 국내외를 가리지 않고 발생하는 오염물질에 대한 영향을 받는 외부공기질 대비, 실내 공간은 외부로부터의 유입을 차단하고, 내부배출원에 대한 관리가 이루어진다면 충분히 낮은 농도로 유지할 수 있다. 하지만 우리나라의 대기환경기준은 실내외 농도가 유사하거나 실내가 높은 경우도 있다. 향후에는 WHO 기준과 같이 실내외를 통합하여 관리하거나, 최소한 외기보다 낮은 실내공기질 관리 기준이 마련되어야 할 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 IoT 센서를 이용하여 내포신도시 내 다중이용시설 15개 장소에서 6개월 동안 실내공기질을 모니터링하였다. 각 시설에서 측정된 자료는 웹 기반의 저장소를 통해 사용자가 편리하게 자료를 확인할 수 있었고, 다중 시설에 대한 동시 관측이 가능하다는 장점을 통해 실내공기질 모니터링에 대한 IoT 시스템의 유용성과 가능성을 확인했다. 하지만 IoT

시스템이 현재 기준장비를 이용한 측정 방법을 완전히 대체하기 위해서는 IoT 시스템의 한계점을 극복하기 위한 연구와 기술개발이 필요하다. 특히, 장비의 신뢰성 검토를 위해 주기적인 기준장비와의 비교를 통한 보정계수 산출과 기기 간의 비교를 통한 비교 보정계수 산출하여 DB화시키는 것이 필요하다. 그리고 본 연구 결과에서도 제시되어 있듯이, 같은 시설군에서도 이용자의 밀집도, 환기 시스템, 내부 활동도 변화에 따라 상이한 결과가 나타나기 때문에, 시설별 특성 파악을 통한 맞춤형 관리 대책이 제시되어야 한다. 본 연구에서는 시설 이용자의 인원과 밀집도, 환기 시스템 등의 자료가 존재하지 않았지만, 향후 연구에서는 이를 검토하여 시설별 정밀분석과 대책 마련이 진행되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 충청남도의 정책지원과제 “IoT를 이용한 충남지역 일부 다중이용시설의 실내공기질 현황 조사”의 지원을 받아 수행된 연구이며, 측정 및 현장조사에 협조해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### References

- Agarwal, N., Meena, C.S., Raj, B.P., Saini, L., Kumar, A., Gopalakrishnan, N., Kumar, A., Balam, N.B., Alam, T., Kapoor, N.R., Aggarwal, V. (2021) Indoor air quality improvement in COVID-19 pandemic: Review, Sustainable Cities and Society, 70, 102942. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102942>
- Aquilina, N.J., Camilleri, S.F. (2022) Impact of daily household activities on indoor PM<sub>2.5</sub> and Black Carbon concentrations in Malta, Building and Environment, 207, 108422. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108422>
- Bai, L., Huang, L., Wang, Z., Ying, Q., Zheng, J., Shi, X., Hu, J. (2020) Long-term field Evaluation of Low-cost Particulate Matter Sensors in Nanjing, Aerosol and Air Quality Research, 20, 242-253. <https://doi.org/10.4209/aaq.2018.11.0424>



- Chungcheongnam-do. (2022) Overview and History of Naepo New Town. <http://naepo.chungnam.go.kr/> (accessed on Nov. 15, 2022).
- Dinh, T.V., Choi, I.Y., Son, Y.S., Kim, J.C. (2016) A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 231, 529-538. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.03.040>
- Du, B., Tandoc, M.C., Mack, M.L., Siegel, J.A. (2020) Indoor CO<sub>2</sub> concentrations and cognitive function: A critical review, *Indoor Air*, 30, 1067-1082. <https://doi.org/10.1111/ina.12706>
- Englert, N. (2004) Fine particles and human health - a review of epidemiological studies, *Toxicology Letters*, 149, 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2003.12.035>
- Guak, S., Kim, K., Yang, W., Won, S., Lee, H., Lee, K. (2021) Prediction models using outdoor environmental data for real-time PM<sub>10</sub> concentrations in daycare centers, kindergartens, and elementary schools, *Building and Environment*, 187, 107371. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107371>
- Han, B., Hong, K.J., Lee, G., Kim, S.B., Park, I.Y., Park, D.H., Kim, H.J., Kim, Y.J., Lee, Y.W., Kim, J.T., Jeong, S.H., Shim, S.H. (2021) Analysis on the Effect of an Air Cleaner in Elementary School Classrooms in Seoul, Korea for a Season of High Concentration Fine Particles in 2019, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37, 744-758, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.5.744>
- Jo, J., Jo, B., Kim, J., Kim, S., Han, W. (2020) Development of an IoT-Based Indoor Air Quality Monitoring Platform, *Journal of Sensors*, 2020, 8749764. <https://doi.org/10.1155/2020/8749764>
- Kang, Y.H., Kim, S. (2022) Seasonal PM Management: (1) What Emissions Should be Reduced? *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38, 746-763, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.5.746>
- Kim, J.B., Park, D., Park, S., Michael, V., Lee, Y., Lee, S.S., Park, J.S., Kim, J. (2019) Concentration Characteristics of Particulate Matter and Volatile Organic Compounds in Petrochemical Industrial Complex using Real-time Monitoring Devices, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35, 683-700, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.6.683>
- Kim, S.C., Kang, B.C., Lee, S.U., Kim, G.D., Seo, W.H., Kim, J.H. (2014) A Study on Characteristics of Main Indoor Air Pollutants and Ventilation in Nursery Facilities, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30, 245-250, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.3.245>
- Kim, Y., Lee, S., Ban, H., Cha, S., Kim, G., Lee, K. (2017) Temporal Variation of Indoor Air Quality in Daycare Centers, *Korean Journal of Environmental Health Sciences*, 43, 267-272, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5668/jehs.2017.43.4.267>
- Korea Environment Institute (KEI) (2022) Identification of Major Management Issues and Proposition of Policy Direction for Improvement of Indoor Air Quality. [https://www.kei.re.kr/elibList.es?mid=a1010100000&elibName=researchreport&act=view&c\\_id=741838](https://www.kei.re.kr/elibList.es?mid=a1010100000&elibName=researchreport&act=view&c_id=741838) (accessed on Nov. 24, 2022).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2022a) Annual average concentration of carbon dioxide. [http://www.climate.go.kr/home/09\\_monitoring/ghg/co2\\_global\\_trend](http://www.climate.go.kr/home/09_monitoring/ghg/co2_global_trend) (accessed on Nov. 22, 2022).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2022b) Number of fog days (2018-2021). <https://data.kma.go.kr/climate/fog/selectFogChart.do?pgmNo=706> (accessed on Dec. 08, 2022).
- Lee, B., Park, S. (2019) Evaluation of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations from online light scattering dust monitors using gravimetric and beta-ray absorption methods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35, 357-369, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.3.357>
- Lee, T.J., Kim, D.Y., Lee, S.M., Kim, S.C., Jo, Y.M. (2021) Analysis of Indoor Air Quality Characteristics of Multi-use Facilities in Gyeonggi-do using IoT-based Monitoring Data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37, 777-789, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.5.777>
- Lim, A.Y., Yoon, M., Kim, E.H., Kim, H.A., Lee, M.J., Cheong, H.K. (2021) Field-based longitudinal study design for measuring the association between indoor air quality and occupant health status in residential buildings, *MethodsX*, 8, 101426. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101426>
- Lin, Y.W., Tang, C.S., Liu, H.C., Lee, T.Y., Huang, H.Y., Hsu, T.A., Chang, L.T. (2022) Ranking the Environmental Factors of Indoor Air Quality of Metropolitan Independent Coffee Shops by Random Forest Model. PREPRINT (Version 1) available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1621230/v1>
- Liu, C., Zhang, Y. (2018) Relations between indoor and outdoor PM<sub>2.5</sub> and constituent concentrations, *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 13, 5. <https://doi.org/10.1007/s11783-019-1089-4>

- Liu, X.G., Li, J., Qu, Y., Han, T., Hou, L., Gu, J., Chen, C., Yang, Y., Liu, X., Yang, T., Zhang, Y., Tian, H., Hu, M. (2013) Formation and evolution mechanism of regional haze: a case study in the megacity Beijing, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 4501-4514. <https://doi.org/10.5194/acp-13-4501-2013>
- Martins, N.R., Carrilho da Graça, G. (2018) Impact of PM<sub>2.5</sub> in indoor urban environments: A review, *Sustainable Cities and Society*, 42, 259-275. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.011>
- Masson, N., Piedrahita, R., Hannigan, M. (2015) Quantification Method for Electrolytic Sensors in Long-Term Monitoring of Ambient Air Quality, *Sensors*, 15, 27283-27302. <https://doi.org/10.3390/s151027283>
- Mead, M.I., Popoola, O.A.M., Stewart, G.B., Landshoff, P., Calleja, M., Hayes, M., Baldovi, J.J., McLeod, M.W., Hodgson, T.F., Dicks, J., Lewis, A., Cohen, J., Baron, R., Saffell, J.R., Jones, R.L. (2013) The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks, *Atmospheric Environment*, 70, 186-203. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.060>
- Ministry of Environment (MOE) (2020) The 4th Indoor Air Quality Management Basic Plan ('20-'24). [http://www.me.go.kr/home/web/policy\\_data/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=10259&orgCd=&condition.deleteYn=N&seq=7463](http://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=10259&orgCd=&condition.deleteYn=N&seq=7463) (accessed on Nov. 24, 2022).
- Moltchanov, S., Levy, I., Etzion, Y., Lerner, U., Broday, D.M., Fishbain, B. (2015) On the feasibility of measuring urban air pollution by wireless distributed sensor networks, *Science of The Total Environment*, 502, 537-547. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.059>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) Fine particle (PM<sub>2.5</sub>) simple measuring instrument guidebook. <https://ecolibrary.me.go.kr/nier/#/search/detail/5668661> (accessed on Nov. 15, 2022).
- Park, H.S., Kim, R.E., Park, Y.M., Hwang, K.C., Lee, S.H., Kim, J.J., Choi, J.Y., Lee, D.G., Chang, L.S., Choi, W. (2020) The potential of commercial sensors for spatially dense short-term air quality monitoring based on multiple short-term evaluations of 30 Sensor nodes in urban areas in Korea. *Aerosol and Air Quality Research*, 20, 369-380. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.03.0143>
- Polichetti, G., Cocco, S., Spinali, A., Trimarco, V., Nunziata, A. (2009) Effects of particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub>) on the cardiovascular system, *Toxicology*, 261, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2009.04.035>
- Sun, X., Zhao, T., Liu, D., Gong, S., Xu, J., Ma, X. (2020) Quantifying the Influences of PM<sub>2.5</sub> and relative humidity on change of atmospheric visibility over recent winters in an urban area of east China, *Atmosphere*, 11, 461. <https://doi.org/10.3390/atmos11050461>
- Tran, V.V., Park, D., Lee, Y.C. (2020) Indoor Air Pollution, Related Human Diseases, and Recent Trends in the Control and Improvement of Indoor Air Quality, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 2927. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102942>
- Turanjanin, V., Vučićević, B., Jovanović, M., Mirkov, N., Lazović, I. (2014) Indoor CO<sub>2</sub> measurements in Serbian schools and ventilation rate calculation, *Energy*, 77, 290-296. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.028>
- World Health Organization (WHO) (2021) WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329> (accessed on Nov. 24, 2022).
- Zhai, S., Jacob, D.J., Wang, X., Liu, Z., Wen, T., Shah, V., Li, K., Moch, J.M., Bates, K.H., Song, S., Shen, L., Zhang, Y., Luo, G., Yu, F., Sun, Y., Wang, L., Qi, M., Tao, J., Gui, K., Xu, H., Zhang, Q., Zhao, T., Wang, Y., Lee, H.C., Choi, H., Liao, H. (2021) Control of particulate nitrate air pollution in China, *Nature Geoscience*, 14, 389-395. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00726-z>
- Zhang, L., An, J., Liu, M., Li, Z., Liu, Y., Tao, L., Liu, X., Zhang, F., Zheng, D., Gao, Q., Guo, X., Luo, Y. (2020) Spatiotemporal variations and influencing factors of PM<sub>2.5</sub> concentrations in Beijing, China, *Environmental Pollution*, 262, 114276. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114276>
- Zhao, X., Zhang, X., Xu, X., Xu, J., Meng, W., Pu, W. (2009) Seasonal and diurnal variations of ambient PM<sub>2.5</sub> concentration in urban and rural environments in Beijing, *Atmospheric Environment*, 43, 2893-2900. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.03.009>

## Authors Information

황규철 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)  
(khwang@cni.re.kr)

박세찬 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)  
(psc89@cni.re.kr)

이가혜 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)  
(gahya1129@cni.re.kr)

김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)  
(kjb0810@cni.re.kr)