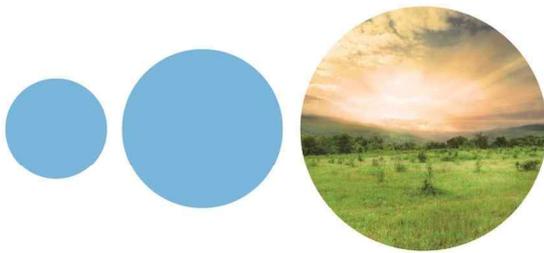


IoT를 이용한 충남지역 일부 다중이용시설의 실내공기질 현황 조사

기후변화대응연구센터



충청남도 서해안기후환경연구소



2022. 10

IoT를 이용한 충남지역 일부
다중이용시설의 실내공기질 현황 조사

2022. 10



Contents

목차	i
표목차	iii
그림목차	iv
1장 연구개요	2
1. 연구배경 및 목적	2
2. 연구방법	6
2장 실내공기질 관리 현황	9
1. 실내공기질관련 법규	9
2. 충청남도의 실내공기질 관리 현황	12
3. 충청남도의 다중이용시설 현황	13
3장 IoT센서를 이용한 실내공기질 현황 분석	17
1. 측정개요	17
2. IoT 센서	23
3. IoT 센서 검증	24
4. 측정분석 결과	26
4장 IoT 기술을 이용한 실내공기질 관리	38
1. IoT 기술을 이용한 실내공기질 관리 현황	38
2. IoT 기술을 이용한 충청남도의 실내공기질 관리 방안	42
3. 정책 제안	45
참고문헌	49

[부록]

A. 측정지점별 주중 및 주간 PM _{2.5} 농도	53
B. 측정지점별 주중 및 주간 CO ₂ 농도	54
C. 측정지점별 PM _{2.5} 농도의 일변화	55
D. 측정지점별 CO ₂ 농도의 일변화	56

표목차

[표 1] 실내공기질 유지 및 권고기준	3
[표 2] 전국 대기환경측정망 설치운영 현황	4
[표 3] 전국 실내공기질 자동측정망 운영 현황	5
[표 4] 미세먼지 간이측정기 성능인증관련 내용	6
[표 5] 전국과 충청남도의 대기환경 기준	10
[표 6] 실내공기질관리법과 학교보건법에 따른 실내공기질 관리 물질	11
[표 7] 국가 및 충청남도의 실내공기질 유지기준	12
[표 8] 충청남도 내 다중이용시설 등록현황	13
[표 9] 충청남도 내 대형배출시설 배출량 순위	14
[표 10] IoT센서 설치위치 및 세부 사항	20
[표 11] IoT센서의 세부 사양	23
[표 12] PM _{2.5} 모니터링 방법에 따른 특성 비교	39
[표 13] 실내공기질 관리방안 수립을 위한 순서도	42

그림목차

[그림 1] 연구추진 흐름	7
[그림 2] 충청남도 시군별 대기오염물질 배출량	13
[그림 3] 중앙정부와 충청남도의 환경보건계획 추진 과정	15
[그림 4] IoT 측정센서 설치 및 주변 주요시설의 위치	18
[그림 5] IoT 측정센서 현장설치 모습	22
[그림 6] IoT 측정센서의 세부 구조	24
[그림 7] IoT 측정센서 현장설치 전 정도관리 결과	25
[그림 8] 측정기간동안 주변지역 PM _{2.5} 농도와 월간 풍향변화	26
[그림 9] 각 측정지점에 대한 주간 PM _{2.5} 농도 변화	28
[그림 10] 각 측정지점에 대한 주간 CO ₂ 농도 변화	30
[그림 11] 각 측정지점에 대한 일간 PM _{2.5} 농도 변화	32
[그림 12] 각 측정지점에 대한 일간 CO ₂ 농도 변화	34
[그림 13] 측정기간 전체에 대한 PM _{2.5} 의 일변화 패턴(a)과 주간과 야간시간 대 I/O ration(b)	36
[그림 14] 스마트 홈케어 서비스 예시	40
[그림 15] 스마트시티의 컨셉	41
[그림 16] 지하철사 스마트 공기질관리시스템 실증사업 로드맵	44

제 1 장

연구개요

1. 연구배경 및 목적
2. 연구방법

연구개요



1. 연구배경 및 목적

최근 사회적으로 미세먼지를 포함한 대기환경문제가 이슈이다. 미세먼지(PM₁₀)는 공기역학적 직경을 기준으로 10 μm 이하의 입자를 뜻하는 말이나 사회적으로는 입자상 오염물질에 의한 영향을 총괄하여 사용되고 있다. 우리나라에서는 미세먼지에 대한 영향이 최근 나타난 현상이 아니라 과거부터 지속적으로 공존해 오고 있었다. 지금은 활동을 완전히 멈춤 것으로 알려져 있는 백두산이나 한라산에서 배출된 화산에도 다량의 입자상 오염물질이 존재하였으며, 동시에 분출된 마그나 역시 대기 중에서 확산·회석과정에서 온도 감소와 함께 상(phase)변화를 거쳐 고체상태의 입자로 전환되었다. 그 외에도 꽃가루나 해염입자 역시 자연적인 입자발생원이고, 황우(黃雨)라고 전해져 내려오는 황사는 조선시대 이전부터 기록에 남겨져 있다. 이처럼 과거부터 우리와 함께 해오던 대기오염물질이 이슈가 되기 시작한 건 2016년 고농도 미세먼지 사례가 발생한 이후이다. 2016년 3월 전국적으로 고농도 미세먼지 사례가 2~4일까지 지속된 이후 국민적 관심이 커지기 시작하였고, 그 뒤 관련된 뉴스와 연구보도가 올라오면서 우려가 증가하였다. 이에 대한 국가차원의 대책마련을 위해 2018년 “미세먼지 관리 종합계획(2020~2024)”이 수립되었고(관계부처 합동, 2018), 이에 대한 세부근거로 2019년 “미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(이하 미특별법)”이, 2020년에는 “대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법(이하 대기관리법)”이 수립되었다(환경부, 2019a, 2020).

한편 실내공기질에 대한 관리는 1997년 “지하생활공간 공기질관리법”이 지정되면서 시작되었다(환경부, 1997). 초창기 법은 지하생활공간 즉, 도시철도 승강장과 역사, 이를 연계해주는 지하도 상가를 중심으로 공기질 관리를 위해 도입되었다. 이 법이 2003년 확대되어 “다중이용시설 등의 실내공기질 관리

법”으로 개정되면서 기존 지하공간에서 다중이용시설로 확대되었다(환경부, 2004). 지하역사나 대합실, 지도상가 중심에서 여객터미널, 의료기관, 어린이집, 도서관, 박물관, 산후조리원 등으로 확대되었고, 이후 “실내공기질관리법”으로 재개정되면서 대중교통, 대규모 점포, 영화상영관, 실내체육관 등으로 확대되어 관리 중에 있다(환경부, 2022).

[표 1] 실내공기질 유지 및 권고기준

	유지기준						권고기준			
	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO ₂ (ppm)	HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	총 부유세균 (CFU/ m^3)	CO (ppm)	NO ₂ (ppm)	라돈 (Bq/ m^3)	TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	곰팡이 (CFU/ m^3)
지하역사, 지하도상가, 철도역사의 대합실, 여객자동차터미 널의 대합실, 항만시설 중 대합실, 공항시설 중 여객터미널, 도서관, 박물관 및 미술관, 대규모 점포	100 이하	50 이하	1,000 이하	100 이하	-	10 이하	0.1 이하	148 이하	500 이하	-
의료기관, 산후조리원, 노인요양시설, 어린이집, 실내 어린이놀이시설	75 이하	35이하		80 이하	800 이하		0.05 이하		400 이하	500 이하
실내주차장	200 이하	-		100 이하	-	25 이하	0.3 이하		1,000 이하	-
실내 체육시설, 실내공연장, 업무시설, 둘 이상의 용도에 사용되는 건축물	200 이하	-	-	-	-	-	-	-	-	

환경부에서는 내국인들을 대상으로 연령별 활동지수를 조사한 “한국노출계수 핸드북”을 작성하였는데, 여기서 대부분의 현대인들은 하루의 90% 이상을 실내환경에서 보낸다는 연구결과가 나오면서 실내공기질에 대한 중요성이 부각되고 있다(환경부, 2007). 정부는 국내 대기질에 대한 중장기적인 변화추이와

정책효과 분석을 위해 대기오염 측정망을 설치하여 운영 중에 있으며(환경부, 2021), 2022년 6월 기준 전국에 총 901개소의 측정소가 운영 중에 있다(국립환경과학원, 2022).

[표 2] 전국 대기환경측정망 설치운영 현황(2022년 6월 기준)

	구분	목적	지점수			
			소계	환경부	지자체	
일반 대기 오염 측정망	도시대기측정망	도시지역의 평균 대기질 농도를 파악하여 환경 기준 달성 여부 판정	515	-	515	
	교외대기측정망	도시를 둘러싼 교외 지역의 배경 농도를 파악	27	27	-	
	국가배경농도 측정망	도시	국가적인 배경농도를 파악하고 외국으로부터의 오염물질 유입, 유출상태 등을 파악	11	11	-
		선박	장거리 이동 미세먼지의 경로, 농도 등을 확인	35	35	-
	배출원 감시 측정망	도로변대기 측정망	자동차 통행량과 유동 인구가 많은 도로변 대기질을 파악	56	-	56
		대기중금속 측정망	도시지역 또는 공단 인근 지역에서의 중금속에 의한 오염 실태를 파악	18	18	-
		유해대기물질 측정망	인체에 유해한 VOCs, PAHs 등의 오염 실태 파악	53	53	-
		항만	항만지역 등의 대기질 현황 및 변화에 대한 실태조사	73	-	73
	특수 대기 오염 측정망	산성강하물 측정망	대기 중 오염물질의 건성 침착량 및 강우·강설 등에 의한 오염물질의 습성 침착량 파악	42	42	-
		광화학대기오염 물질측정망	오존생성에 기여하는 VOCs에 대한 감시 및 효과적인 관리대책의 기초자료 파악	18	18	-
		지구대기측정망	지구 온난화 물질의 대기 중 농도 파악	1	1	-
		PM _{2.5} 성분 측정망	인체위해도가 높은 미세먼지(PM _{2.5})의 농도 파악 및 성분파악을 통한 배출원 규명	42	42	-
	집중 측정망	대기오염집중 측정망	국가 배경지역과 주요권역별 대기질 현황 및 유입·유출되는 오염물질 파악, 황사 등 장거리 이동 대기오염물질을 분석하고 고농도 오염현상에 대한 원인 규명	10	10	-
	총계			901	257	644

실내공기질에 대한 관심이 증가하면서 다중이용시설에 대한 연속측정도 수행되기 시작하였다. 2022년 기준 지하역사, 여객터미널 등 18개 항목, 90개 지점에서 측정이 수행되었고, 관련 정보를 “실내공기질 관리 종합정보망”을 통해 대국민 정보제공을 하고 있다(환경공단, 2022). 하지만 전국에서 운영 중인 다중이용시설이 45,817개소(2018년 기준)인 점을 감안한다면 한없이 부족한 실정이다(환경부, 2019b). 현재 환경부 등에서 운영 중인 대기오염측정망은 형

식승인을 받은 공정시험법에 준하는 방법으로 모니터링이 수행 중에 있으며, 측정장비 또한 해당 수천만원을 넘는 장비들로 대략 1개 측정소 구성에 약 2억원이 소모되며, 연간 운영비로 약 2천만원정도가 소비되는 것으로 알려져 있다. 하지만 이러한 고성능의 측정장비를 다중이용시설 및 주민이용 편의시설 모두에 설치·운영하기에는 비용과 인력 등 한계가 있다.

[표 3] 전국 실내공기질 자동측정망 운영 현황(2022년 기준)

구분		시설수	지점수	측정기수
1	지하역사	5	9	22
2	지하도상가	1	2	7
3	여객터미널	1	1	4
4	공항터미널	1	2	6
5	어린이집	2	3	4
6	의료기관	1	2	3
7	도서관	2	5	5
8	항만시설	1	1	2
9	박물관	1	2	3
10	철도역사	2	4	12
11	노인요양시설	1	2	3
12	대규모점포	1	2	3
13	실내주차장	1	1	5
14	장례식장	1	1	3
15	학원	1	1	2
16	전시시설	1	1	2
17	산후조리원	1	1	2
18	영화상영관	1	1	2
계		25	41	90

이러한 한계점을 감안하여 최근에는 IoT(internet of things, IoT)와 센서기술을 활용한 간이측정장비가 다수 활용되고 있다. 간이측정장비는 광학센싱 방식을 이용하여 미세먼지 또는 초미세먼지(PM_{2.5})를 포함한 다양한 환경인자(CO, CO₂, 온습도, VOCs 등)를 계측하여 측정된 농도를 통신망을 통해 전송, 사용자가 앱이나 컴퓨터를 통해 관찰할 수 있도록 정보를 제공해주고 있으며, 이미 대도시를 중심으로 많이 보급·활용하고 있다(경기도, 2019). 특히 미세먼지 간이센서는 기존 광산란장비(500~수천만원) 대비 십만원대 전후로 구매하여 활용할 수 있고, 수초에서 수분 단위로 농도정보를 제공해줘 공기청정기나 실내공간에 대한 모니터링용으로 다수 활용되고 있다(Sung and Hsiao, 2021; Wall et al, 2021).



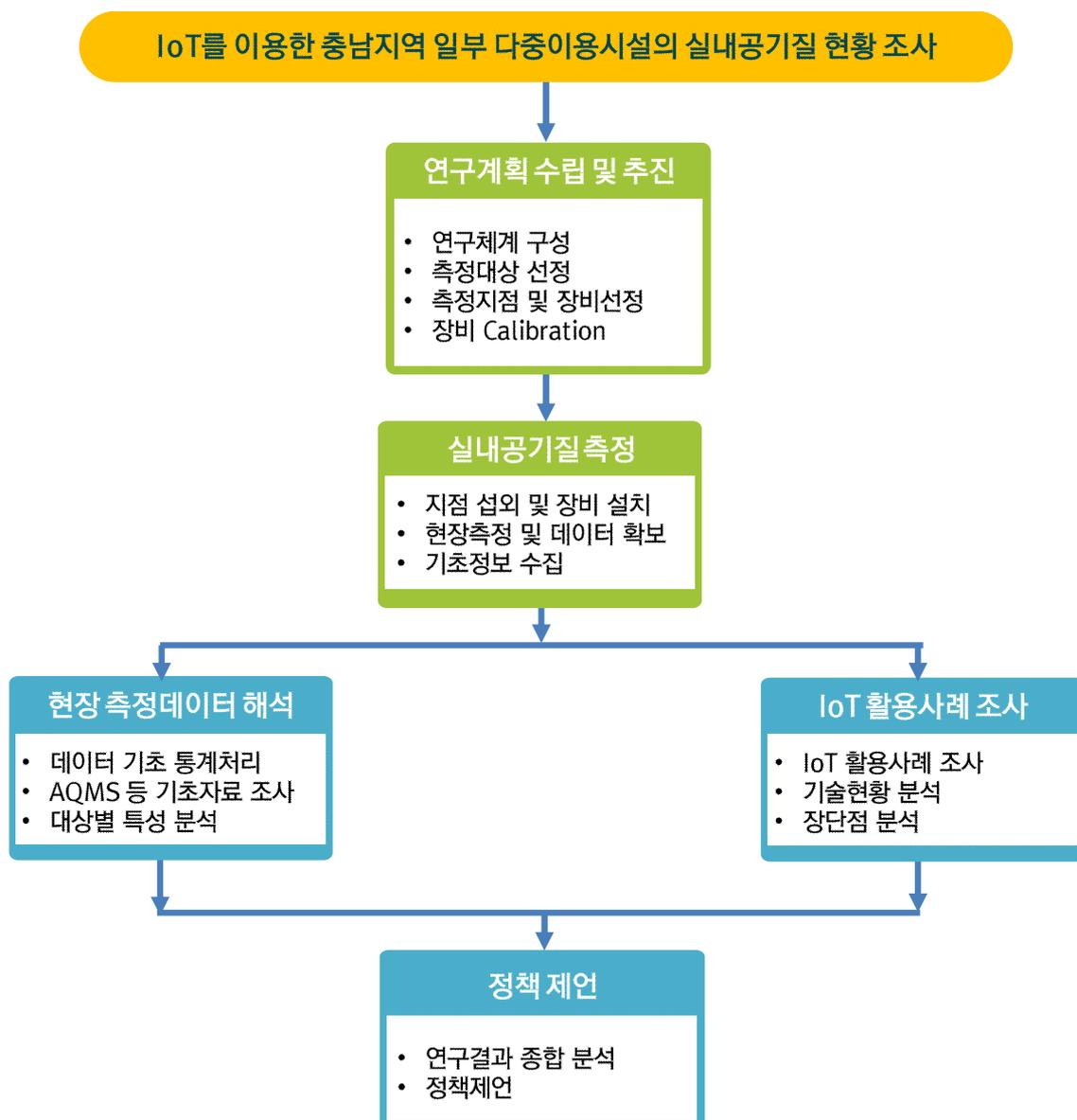
2. 연구방법

어떤 목적으로 연구과제를 추진할 것인가와 대상범위는 어디로 설정할 것인지 선정 후 측정장비를 선정한다. 현재 시중에는 다양한 성능과 가격, 데이터 활용 툴을 제공하는 장비들이 시판되고 있는데 그 중 데이터 확보 편리성과 장비에 대한 신뢰성을 검토하여 장비를 선정해야 한다. 이후 대상지점을 선정할 때 용도에 맞게 측정장비를 구매하여, 장비간 데이터 신뢰성 확보 과정이 필요하다. 시판되고 있는 간이센서들은 장비마다 다양한 측정항목을 제시하고 있는데, PM_{2.5}나 PM₁₀에 대한 신뢰성도 담보할 수 없는 현 시점에서 VOCs, 소음 등의 데이터는 신뢰도를 담보할 수 없기 때문에 신뢰성이 있는 장비와 항목 선별이 중요하다. 환경부에서는 미특법에 <미세먼지 간이측정기 성능인증>을 명시하여 실내외 공기질 측정에 사용되는 간이측정장비에 대한 성능인증을 받도록 하였다(환경부, 2019a).

[표 4] 미세먼지 간이측정기 성능인증관련 내용 (미세먼지특별법 제24조)

<p>제24조(미세먼지 간이측정기 성능인증 등) ① 환경부장관은 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」에 따른 형식승인이나 예비형식승인을 받지 아니한 미세먼지 측정기기(이하 “미세먼지 간이측정기”라 한다)에 대하여 성능인증제를 시행하여야 한다.</p> <p>② 누구든지 제1항에 따른 성능인증을 받지 아니한 미세먼지 간이측정기를 제작·수입하여서는 아니 된다.</p> <p>③ 환경부장관은 제1항에 따른 성능인증을 위하여 성능평가 등에 필요한 인력과 시설을 갖춘 법인이나 단체 중에서 성능인증업무를 수행하는 기관(이하 “성능인증기관”이라 한다)을 지정할 수 있다.</p> <p>④ 제1항에 따라 성능인증을 받은 미세먼지 간이측정기의 성능인증 유효기간은 성능인증을 받은 날부터 5년 이내의 범위에서 환경부령으로 정한다. <신설 2022. 6. 10.></p> <p>⑤ 환경부장관은 제1항에 따라 성능인증을 받아 제작·수입한 미세먼지 간이측정기가 성능인증기준에 맞는지를 확인하기 위하여 환경부령으로 정하는 바에 따라 검사할 수 있다. <개정 2022. 6. 10.></p> <p>⑥ 미세먼지 간이측정기를 사용하는 자가 그 측정 결과를 일반에 공개하는 경우에는 환경부령으로 정하는 방법을 따라야 한다. <신설 2022. 6. 10.></p> <p>⑦ 제6항에 따라 미세먼지 측정의 결과를 일반에 공개하는 자는 환경부령으로 정하는 바에 따라 사용하는 미세먼지 간이측정기의 성능을 정기적으로 점검받아야 한다. <신설 2022. 6. 10.></p> <p>⑧ 그 밖에 성능인증제의 대상·등급·규격·표시·절차 및 성능인증기관의 지정 기준·절차 등에 필요한 사항은 환경부령으로 정한다. <개정 2022. 6. 10.></p>
--

장비가 선정되면 기준장비와의 비교검증을 거쳐야 하는데 기준장비가 없는 경우 지역 AQMS데이터와의 비교분석으로 대체하기도 한다. 지자체 혹은 정부에서 관리·운영하는 AQMS 장비는 일정 주기를 기준으로 정도관리를 받기 때문에 신뢰성이 높은 값을 제시한다. 간이센서를 활용한 중장기적인 데이터 확보와 함께 IoT 기술을 이용한 자료를 수집한다. IoT 기술을 활용하여 실내외 자료를 확보한 사례와 확보된 자료를 기반으로 어떻게 활용되고 있는지에 대한 정보를 수집할 필요가 있다. 그림 1은 본 연구의 흐름을 나타낸 것이다.



[그림 1] 연구추진 흐름

제 2 장

실내공기질 관리 현황

1. 실내공기질 관련 법규
2. 충청남도의 실내공기질 관리 현황
3. 충청남도의 다중이용시설 현황

실내공기질 관리 현황



1. 실내공기질 관련 법규

대기오염은 국민의 건강을 위협할뿐만 아니라 동식의 생육 저하와 재산의 피해까지 다양한 분야로 악영향을 줄 수 있다. 산업공정이나 자동차, 생활환경을 통해 환경 중으로 배출된 오염물질은 환경용량 안에서 자정작용을 통해 청정하게 유지된다. 하지만 이러한 환경용량을 초과한 오염물질은 대기를 포함한 환경을 오염시키고 오염된 환경은 인간에게 다양한 악영향을 미친다. 이러한 환경문제에 대응하기 위해 국가차원의 개선노력이 요구된다. 국가는 국민의 건강보호와 환경개선을 위해 다양한 정책을 수립, 추진하는데 그 중 하나가 관련 법규이다. 환경분야는 크게 환경기준과 허용기준으로 구분된다. 환경기준은 환경정책 기본법에 의거하여 지정·고시된 물질로 현재 8가지 물질이 설정되어 관리되고 있다. 환경기준은 법적 규제가 있다기 보다는 정책적 목표로 설정되어 있어 관련 농도를 초과한다고 해도 어떠한 규제나 제재가 가해지지 않는다. 그렇기 때문에 국가 농도 외에 지자체 차원에서 이 농도값으로는 지역 대기질이 관리되기 어렵다고 판단될 경우 그 지역 특색에 맞는 환경기준을 수립하여 운영할 수 있다. 충청남도는 대기오염물질 배출량 기준 전국 3위(2019년 기준)의 다배출 지역이다. 전국에서 운영 중인 석탄화력발전소 59기 중 29기가 위치해 있으며, 전국 3대 석유화학단지 및 제철소인 대산석유화학단지와 당진 현대제철이 위치해 있어 대형배출시설에 의한 배출기여도가 높다. 이러한 환경적 특성을 고려하여 충청남도는 더욱 강화된 대기환경기준을 설정하여 운영하고 있다. 표 5는 국가와 충청남도에서 운영 중인 대기환경기준을 나타낸 것이다.

[표 5] 전국과 충청남도 대기환경 기준

오염물질		국가 기준	충청남도 기준
아황산가스 (ppm)	연평균 농도	0.02	0.01
	일평균 농도	0.05	0.03
	시간평균 농도	0.15	0.1
이산화질소 (ppm)	연평균 농도	0.03	0.02
	일평균 농도	0.06	0.04
	시간평균 농도	0.1	0.08
일산화탄소 (ppm)	8시간 평균 농도	9	5
	시간평균 농도	25	10
오존 (ppm)	8시간 평균 농도	0.06	0.06
	시간평균 농도	0.1	0.1
미세먼지 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	연평균 농도	50	40
	일평균 농도	100	80
초미세먼지 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	연평균 농도	35	20
	일평균 농도	15	40
납 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	연평균 농도	0.5	0.3
벤젠 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	연평균 농도	5	3

환경기준과 다르게 허용기준은 관리를 위한 기준으로 이 기준을 상회할 경우 법적인 제재나 범칙금 등의 규제를 받을 수 있다. 허용기준의 대표적인 것은 사업장에 대해 설정되는 배출허용기준이다. 대기환경보전법 시행규칙 별표8에 배출시설별 대기오염물질 배출허용기준이 설정되어 관리되고 있으며, 이 기준 농도는 특별한 사유가 없는한 그 농도 이하로 배출농도가 유지되어야 한다. 이와 유사하게 실내환경에 대해서도 기준이 존재한다. 크게 환경부에서 관리하는 “실내공기질 관리법” 과 교육부에서 관리하는 “학교보건법”, 그리고 마지막으로 고용노동부에서 관리하는 “화학물질 및 물리적 인자의 노출기준” 이 있다. 고용노동부에서 관리하는 노출기준은 유해화학물질을 취급하는 작업환경을 대상으로 근로자 건강보호를 목적으로 설정되었는데 본 연구에서는 범위 외 내용으로 판단되어 제외하겠다. 환경부에서 관리하는 실내공기질 관리법은 앞서 1장에서 언급한 것처럼 초기 지하생활공간에 대한 관리를 위해 수립되었으나 점차 다중이용시설로까지 확장되어 현재는 18개 시설에 대해 총 10가지 항목을 관리하고 있다. 이 항목들은 유지기준과 권고기준으로 구분되는데 유지기준은 연 1회, 권고기준은 2년에 1회 측정하여 농도값을 제시하도록 하고 있다 (환경부, 2022). 만약 측정값이 기준치를 초과할 경우 1천만원 이하의 과태료를 부과하도록 하고 있다. 이와 마찬가지로 학교보건법에서도 PM_{10} 을 포함한 총 18개 항목에 대해 관련 기준을 설정하여 관리하고 있다.

[표 6] 실내공기질관리법과 학교보건법에 따른 실내공기질 관리 물질

오염물질	실내공기질관리법		학교보건법	
	기준	대상시설	기준농도	대상시설
미세먼지	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	a)	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	e), f)
	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	b)		
	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	c), d)	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	g), h)
초미세먼지	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	a)	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	e), f)
	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	b)		
이산화탄소	1,000 ppm	a)~d)	1,000 ppm	e), f)
포름알데하이드	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	a), c)	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	e), i)
	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	b)		
부유미생물	800 CFU/ m^3	b)	800 CFU/ m^3	e), f)
일산화탄소	10 ppm	a), b)	10 ppm	k)
	25 ppm	c)		
이산화질소	0.1 ppm	a)	0.05 ppm	k)
	0.05 ppm	b)		
	0.3 ppm	c)		
라돈	148 Bq/ m^3	a)~c)	148 Bq/ m^3	i)
총휘발성 유기화합물	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	a)	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	all site
	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	b)		
	1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	c)		
곰팡이	500 CFU/ m^3	b)	-	-
낙하세균			10 CFU/ m^3	f), j)
석면			0.01 ea/cc	all site
오존			0.06 ppm	l)
진드기			100 ea/ m^3	
벤젠			30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	j)
톨루엔			1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	i)
에틸벤젠			360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	i)
자일렌			700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	i)
스틸렌			300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	i)

- ※ a) 지하역사, 지하도상가, 철도역사의 대합실, 여객자동차터미널의 대합실, 항만시설 중 대합실, 공항시설 중 여객터미널, 도서관·박물관 및 미술관, 대규모 점포, 장례식장, 영화상영관, 학원, 전시시설, 인터넷 컴퓨터 게임시설 제공업의 영업시설, 목욕장업의 영업시설
- ※ b) 의료기관, 산후조리원, 노인요양시설, 어린이, Q 실내 어린이놀이시설
- ※ c) 실내주차장
- ※ d) 실내 체육시설, 실내 공연장, 업무시설
- ※ e) 교사 / f) 급식시설 / g) 체육관 / h) 강당 / i) 기숙사 / j) 보건실
- ※ k) 개별 난방교실 및 도로변 교실 / l) 교무실 및 행정실

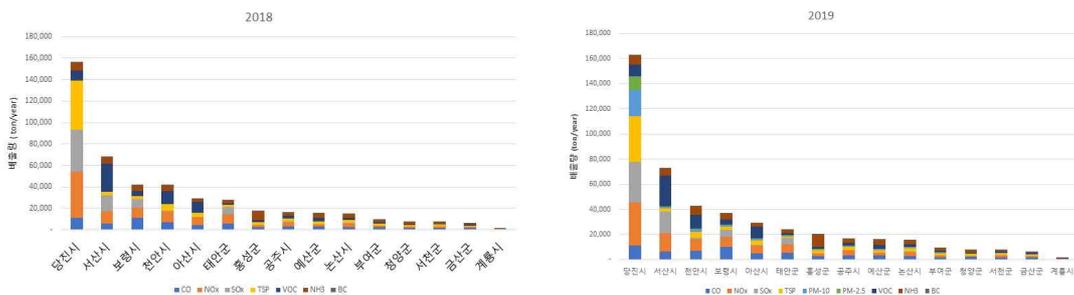


3. 충청남도의 다중이용시설 현황

2022년 기준 충청남도에는 총 954개소의 다중이용시설이 등록되어 있다. 시군별로는 천안이 311개소로 전체 32.6%가 위치해 있고, 아산 113개소, 당진 72개소, 서산 72개소 등으로 나타났다. 충남 서북부에 위치한 4개 시군에 충청남도 전체 등록업체의 61.3%가 위치하고 있다.

[표 8] 충청남도 내 다중이용시설 등록현황(2022년 기준)

시군	개소수	비율(%)	시군	개소수	비율(%)
천안	311	32.6	부여	34	3.6
아산	133	11.8	서천	31	3.2
당진	89	9.3	예산	27	2.8
서산	72	7.5	태안	25	2.6
논산	70	7.3	계룡	17	1.8
공주	56	5.9	금산	13	1.4
홍성	49	5.1	청양	8	0.8
보령	39	4.1	충청남도	954	100.0



[그림 2] 충청남도 시군별 대기오염물질 배출량(2018, 2019)

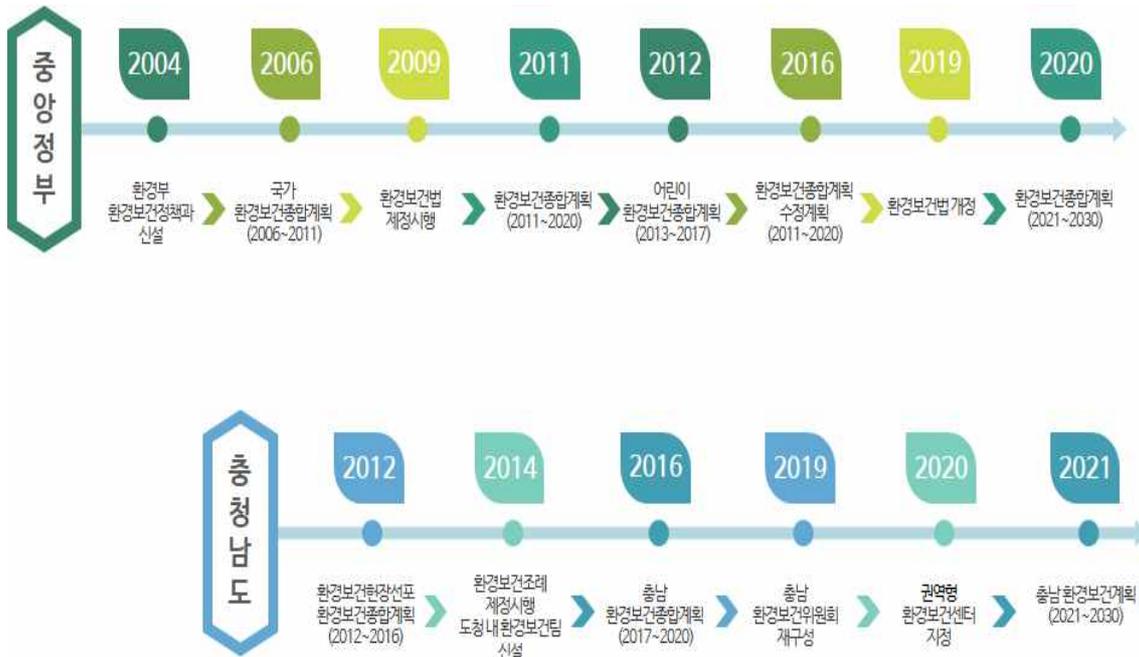
그림 2는 충청남도의 대기오염물질 배출량을 시군별로 나타낸 것이다. PM₁₀과 PM_{2.5}의 배출량은 TSP 안에 포함되어 있어 제외하였다. 2018년과 2019년 모두 당진시가 압도적인 배출량 1위를 차지하고 있으며, 2위인 서산시의 거의 2

배에 가까운 배출량을 보였다(국가미세먼지정보센터, 2022). 당진시에는 충청남도 전체에서 배출량이 가장 많은 현대제철과 4위의 동서발전이 위치해 있어 전반적인 배출량이 가장 높게 나타난다. 그 뒤로는 서산의 배출량이 많은데 서산의 경우 대산석유화학단지가 위치해 있어 타 지역보다 VOCs에 대한 배출기여도가 높으며, 충청남도 전체 배출량 순위에서 각각 5등, 8등, 10등을 차지하는 현대오일뱅크(주), (주)씨텍, 한화토탈에너지스(주)의 기여도가 큰 것으로 확인되었다. 보령의 경우 중부화력발전(보령, 신보령)의 배출량이 압도적으로 많은 것으로 확인되었고(환경공단, 2022), 천안과 아산의 경우 충청남도의 대도시로 도로오염원 등에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다.

[표 9] 충청남도 내 대형배출시설 배출량 순위(자료 : Clean SYS)

순 번	사업장명 (2019년도)	대기오염물질 연간 배출량(ton/년)							
		소계	TSP	SOx	NOx	HCl	HF	NH ₃	CO
1	현대제철(주)	17,832	481	10,311	7,040				
2	한국서부발전(주) 태안발전본부	10,792	344	4,821	5,627				
3	한국중부발전(주) 보령발전본부	9,240	307	4,428	4,505				
4	한국동서발전(주) 당진발전본부	9,136	436	4,315	4,385				
5	현대오일뱅크(주)	4,243	44	1,958	2,241				
6	한국중부발전(주) 신보령발전본부	2,307	84	1,503	720				
7	지에스이피에스(주)	1,104	11	23	945	61			64
8	(주)씨텍	640	4	245	391				
9	현대그린파워(주)	629			629				
10	한화토탈에너지스(주)	603	14	21	568				

충청남도는 전국 지자체 중 최초로 환경보건 조례를 지정하였고, 이를 근거로 “충청남도 환경보건 종합계획”을 수립하여 추진해 나가고 있다. 2021년 제3차 충청남도 환경보건 종합계획(2021~2030)을 수립하여 지역 내 환경보건 개선을 위한 방향을 제시하였다.



[그림 3] 중앙정부와 충청남도의 환경보건계획 추진과정 (자료 : 충청남도)

여기서 충청남도는 타 지역 대비 많은 환경보건 유해인자를 가지고 있는 지역적 특성에 따라 유해인자에 대한 실태조사 및 공간적 집중관리 구역을 설정하는 것으로 계획을 수립하고 있다. 환경유해시설의 배출량과 종류, 석면과 라돈, 토양 중금속, 수질·지하수 오염, 대기오염물질 등 각 매체별 오염도와 연계하여 조사, 우선 관리지역을 선정하는 것으로 계획하고 있다. 이렇게 선정된 우선 관리지역은 환경오염과 건강(증상, 질환)에 대한 지속적인 모니터링과 노출인구에 대한 환경보건 프로그램 운영, 주변 사업장에 대한 환경유해물질 배출량 저감 및 환경공정 개선 컨설팅을 수행하고, 여기에 2021년부터 2030년까지 약 25억을 투자할 계획이다(충청남도, 2021).

제 **3** 장

IoT센서를 이용한 실내공기질 현황 분석

1. 측정 개요
2. IoT 센서
3. IoT 센서 검증
4. 측정분석 결과

IoT센서를 이용한 실내공기질 현황 분석



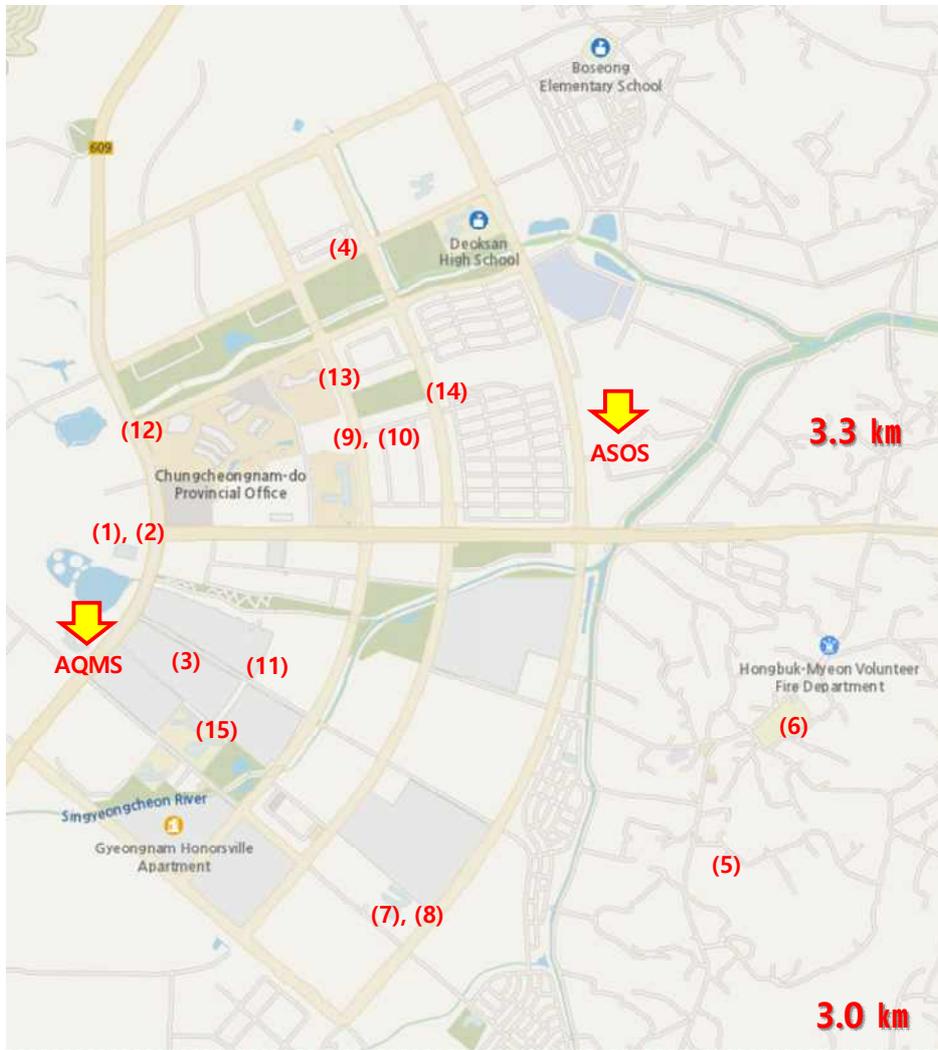
1. 측정개요

미세먼지 고농도 사례가 지속적으로 나타나고, 이에 대한 국민적 관심과 우려가 증가하면서 정부차원의 개선대책이 마련되고 있다. 이러한 가운데 하루 중 90% 이상을 실내에서 생활한다는 연구결과가 보고되면서 실내환경에 대한 관리가 중요한 화두로 부각되고 있다. 이에 정부에서는 실내공기질 관리법 등을 강화하면서 강력한 개선 의지를 보이고 있다. 과거 도시나 도로변의 대기질 모니터링을 위해 설치·운영되던 AQMS와 동일한 성능의 측정망을 실내 다중이용시설에 설치하기 시작하였으며, 2022년 기준 전국 90개 측정망이 운영 중에 있다. 하지만 이러한 측정망은 공간도 많이 차지하고, 비용이 고가로 전국의 모든 다중이용시설에 설치·운영하기에는 한계가 있다.

한편 소형의 간이센서와 IoT기술을 접목한 모니터링 기술이 최근 도심과 다중이용시설 등에서 활용되고 있다. 간이센서의 경우 정확도 면에서 많은 오차 범위를 가지나 경향성 파악면에서는 활용도가 높아 대상 공간에 대한 단순 모니터링용으로는 활용 가능성이 높은 것으로 알려져 있다. 환경부에서는 이러한 장비의 필요성을 인지하고 무분별한 활용을 막고자 미세먼지 간이센서에 대한 성능인증 평가제도를 도입하였다. 간이센서를 1~3등급으로 분류하고 되도록 성인인증을 필한 장비를 활용하도록 유도하고 있다. 충청남도는 발전소 등 대형 배출시설들이 많아 주변 취약시설들에 대한 연속 모니터링 필요성이 높아 이들에 대한 활용 가능성 평가가 필요하다. 이에 본 연구에서는 간이센서를 활

용한 다중이용시설에 대한 모니터링과 활용 가능성 여부를 검토하였다.

IoT센서를 이용한 실내공기질 현황분석을 위해 충청남도청 소재지의 내포신도시내 다중이용시설 15곳을 대상으로 선정하여 장치를 설치하였다. 내포신도시는 충남 홍성과 예산에 걸쳐 구성되어 있으며, 면적은 9,951 천㎡이다. 도시형태는 부채꼴형의 계획도시로 도시 앞으로는 농, 축산업을 주로 하는 마을이 위치해 있고, 뒤로는 용봉산을 대표하는 산들로 둘러싸여 있다. 그림 4는 IoT센서를 설치한 15개 장소와 주요 시설(내포 도시대기측정망, 홍성기상대)의 위치를 나타낸 것이다.



[그림 4] IoT 측정센서 설치 및 주변 주요시설의 위치

내포신도시 내 설치된 IoT 센서는 15개이며, 다중이용시설의 특성을 분석하기 위해 11개 시설군으로 분류하였고, 일반적으로 주민들이 빈번히 이용하는 시설들에 센서를 설치하였다. CIS 1과 CIS 2는 도서관 1층과 3층에 설치하였고, 도서관은 평일에는 9시부터 22시까지, 주말에는 18시까지 운영하며, 1층은 주로 영유아가 3층은 관람실로 운영되고 있다. CIS 3과 4는 지역 내 주민 편의시설인 복지 센터이며, CIS 5는 보건소이다. 이곳들은 공공기관의 특성상 운영은 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 시간외에는 전체 절전모드를 사용하는데 내포신도시 내 시설들 역시 해당 시설 활용자들이 퇴실한 이후 14시-18시경 모두 실내 절전모드가 가동되어 일부 시설에서 7시-18시 시간대의 공기질 정보만 측정할 수 있고, 시설의 점검 등으로 인해 전기가 단전된 경우 일부 자료만 획득할 수 있었다. CIS 9, 10은 영화관 내에 설치되었다. CIS 9는 극장 매표소 앞에 설치하였으며 주변에서 팝콘 등의 음식을 제조한다. CIS 10은 총 92명이 입실할 수 있는 상영관이나 코로나19의 영향과 상대적으로 인구수가 많지 않은 지역특성상 1회 관람객은 20-40명 수준이었다. 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 적은 편이며, 운영시간은 5시부터 22시까지이다. CIS 13과 14는 커피숍으로 내포신도시 내 이용자가 많을 것으로 판단되는 커피숍을 대상으로 선정하였다. 두 곳 모두 내포신도시 내 중심상가에 위치해 있어 상대적으로 이용객이 많은 곳이며, 운영시간은 9시부터 24시까지이다. CIS 15는 중심상가에 위치한 마트이며, 운영시간은 10시부터 22시까지이다. 이외에 지점에 대한 세부 정보는 표 1에 제시하였다. 시설 그룹별 실내 공기질의 관리 대책을 제안하기 위해 공공시설(CIS 1-5), 교육시설(CIS 6-8), 편의시설(CIS 9-15)로 나누어 분석을 진행하였다. 표 10은 각 측정지점에 대한 측정기간, 위치, 특징을 요약하였다.

[표 10] IoT센서 설치위치 및 세부 사항

측정위치	측정장비	설치장소	측정기간	주요 사용자	운영시간
도서관	CIS 1	Reading room	22. 04. 01 ~ 09. 30	Ages 3 to 15	From 9 to 22 (Weekdays) From 9 to 18 (Weekend)
	CIS 2	Reading room	22. 04. 01 ~ 09. 30	12 and up	
주민센터	CIS 3	Ofiice	22. 04. 04 ~ 09. 30	20 and up	From 9 to 18
	CIS 4	Ofiice	22. 04. 04 ~ 09. 30	20 and up	
보건소	CIS 5	Ofiice	22. 04. 04 ~ 09. 02	20 and up	Open 24 hours
초등학교	CIS 6	Classroom	22. 04. 04 ~ 09. 30	Ages 8 to 13	From 8 to 16
유치원	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	From 10 to 23
영화관	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	From 7 to 20
PC방	CIS 11	Counter	22. 04. 01 ~ 09. 30	Ages 8 to 19	Open 24 hours
버스터미널	CIS 12	Waiting room	22. 04. 04 ~ 09. 30	All ages	From 5 to 22
커피숍	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
마트	CIS 15	Sale stand	22. 04. 27 ~ 09. 30	All ages	From 10 to 22



< CIS 1 >



< CIS 2 >



< CIS 3 >



< CIS 4 >



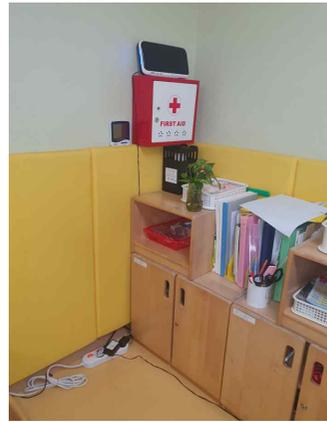
< CIS 5 >



< CIS 6 >



< CIS 7 >



< CIS 8 >



< CIS 9 >



< CIS 10 >

22 | IoT를 이용한 충남지역 일부 다중이용시설의 실내공기질 현황 조사



< CIS 11 >



< CIS 12 >



< CIS 13 >



< CIS 14 >



< CIS 15 >

[그림 5] IoT 측정센서 현장설치 모습



2. IoT 센서

내포신도시 내 다중이용시설 내 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 자료를 확인할 수 있으며, 그래프 및 엑셀시트로 저장하여 분석할 수 있는 시스템을 제공해 주고 있다. 측정항목은 총 7개 항목이며 (PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, VOCs, 소음, 온도, 습도), 그 중 PM₁₀ 및 PM_{2.5}에 대해서는 환경부에서 인증하는 1등급 성능인증 평가를 받았지만, 그 외 VOCs나 소음에 대해서는 센서 신뢰성을 확보할 수 없어 이들 자료를 제외하고 활용하였다. IoT 센서에 대한 세부 사양은 표 11에 나타냈으며, 장비의 구성 사진은 그림 6에 나타냈다.

[표 11] IoT센서의 세부 사양

항목	사양	측정항목	측정범위
운전온도	-5~50℃	초미세먼지	0~300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
유량	0.1 lpm	미세먼지	0~300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
전원	5 VDC	이산화탄소	0~3,000 ppm
소비전력량	1 WH	온도	-40~70℃
무게	250 g	습도	0~100%
통신방법	WIFI	VOCs	125~3,500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
센서 성능평가 등급	Class 1(PM _{2.5})	소음	32~75 dB(A)

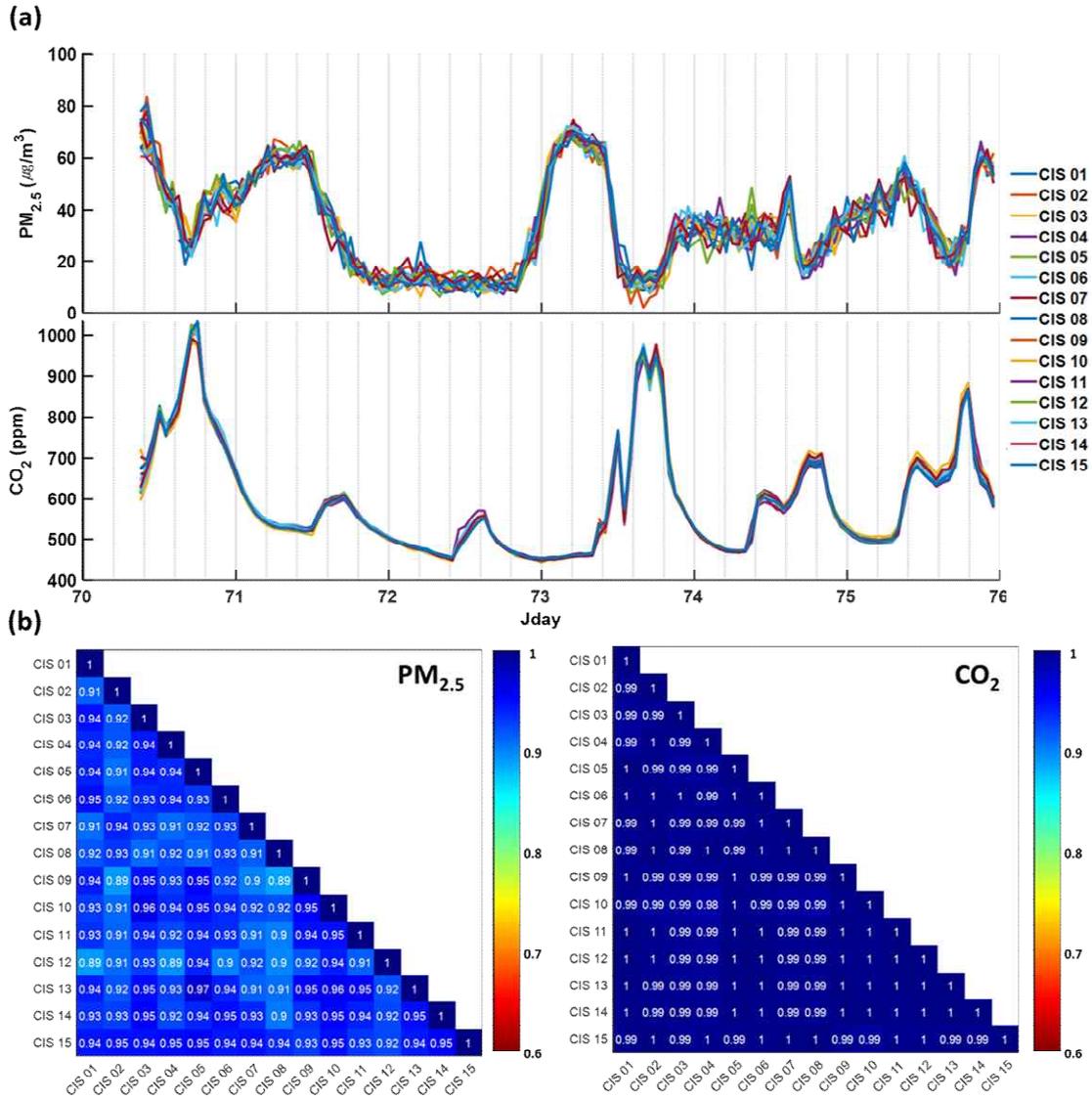


[그림 6] IoT 측정센서의 세부 구조



3. IoT 센서 검증

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 센서의 값의 신뢰도 확보를 위해 기기간 보정 및 기준기기와의 보정을 통해 값을 비교하였다. 총 15개의 IoT 센서를 대상으로 각 시설별 측정 전 동일한 장소에서 기기간 비교를 통해 장비간 보정을 수행하였다(그림 7). 측정항목은 본 연구의 분석에 사용한 PM_{2.5}와 CO₂이다. 총 6일 동안 동일한 장소에 연속 모니터링하였고, 기준장비로 선정된 CIS 5에 맞춰 모든 장비를 보정하였다. 보정된 IoT 센서의 결과를 바탕으로 시계열 분석 및 상관성 분석을 진행하였다. 각 IoT 센서 간의 상관계수는 PM_{2.5}의 경우 0.83-0.97 였으며, CO₂의 경우 모든 장비들 간 상관계수가 0.98 이상으로 15개 기기간의 높은 상관관계를 나타냈다(그림 3). 기준기기와의 보정을 위해 내포신 도시 내 위치한 도시대기측정소 자료를 이용하였다. CIS 5를 이용하여 총 7일 동안 1시간 간격의 자료를 비교하였다. 분석 결과 CIS 5와 도시대기측정소의 PM_{2.5} 자료의 상관계수 값은 0.79로 우수했다. 상관식에서 구해진 기울기(slope) 값(0.9574)과 y 절편(y-intercept) 값(-10.352)을 이용하여 다른 IoT 센서에 적용하였다.

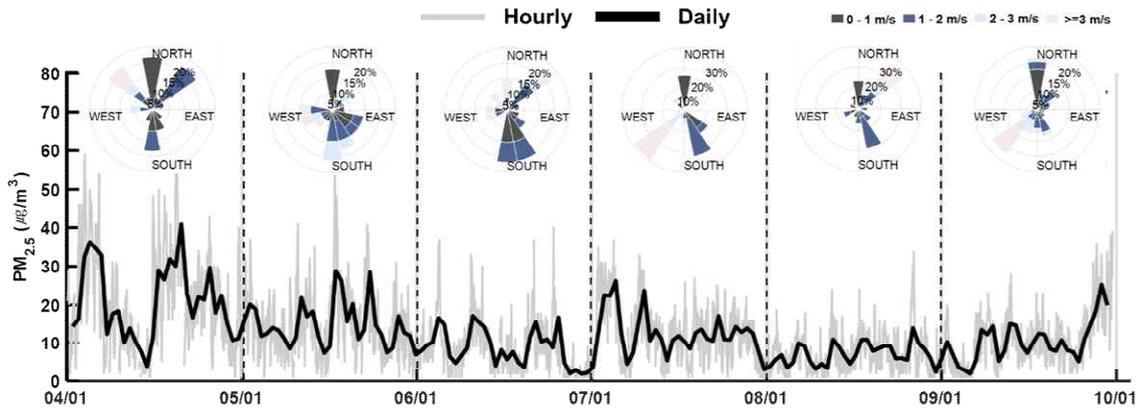


[그림 7] IoT 측정센서 현장설치 전 정도관리 결과



4. 측정분석 결과

다중이용시설의 실내공기질 분석에 앞서 내포신도시 내 위치한 AQMS 및 ASOS 자료를 기반으로 관측기간 동안 주변 대기 오염물질의 분포특성과 기상 개황을 검토하였다. 대상은 AQMS의 측정 항목 중, 본 연구의 분석 대상 물질인 PM_{2.5}를 중심으로 분석하였다. 관측기간인 2022년 4월부터 9월까지 대기환경기준의 “나쁨(>35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)”을 초과하는 일은 전체기간동안 2일이었으며, 월평균 농도는 각각 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (4월), 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (5월), 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (6월), 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (7월), 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8월), 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (9월)이었다. 평균 풍속은 전체 기간동안 평균 2 m/s 이하의 낮은 풍속의 정체된 대기 조건이었으며, 주 풍향은 북풍과 남동풍으로 월별로 다소 상이하게 나타났다(그림 8).

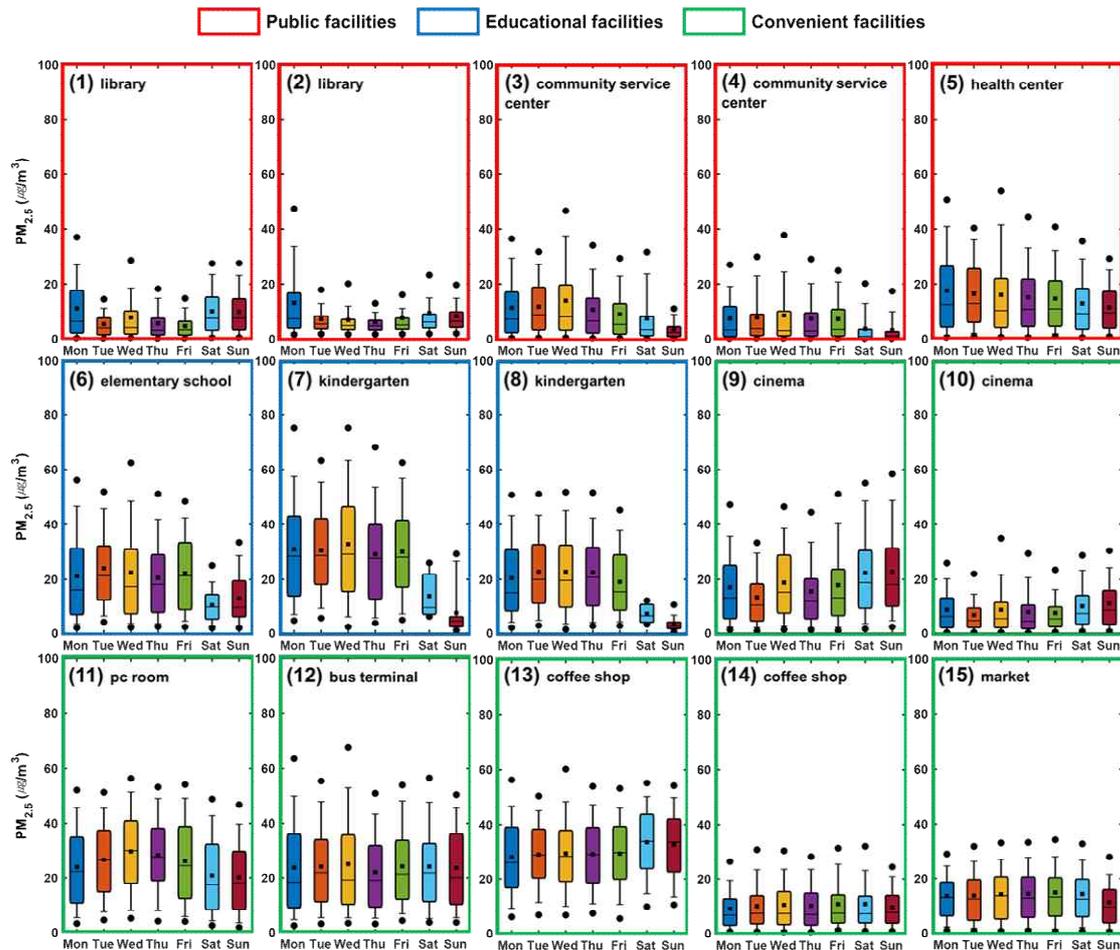


[그림 8] 측정기간동안 주변지역 PM_{2.5} 농도와 월간 풍향변화

그림 9에 각 다중이용시설별 PM_{2.5}의 주간 변동 특성을 나타냈다. PM_{2.5}의 주간변동은 시설별로 상이하게 나타났다. 먼저 CIS 1-2(도서관)은 월요일에 각각 11.2, 13.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았다. 이후 화요일부터 금요일까지는 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

3-5은 주민 편의시설인 복지센터와 보건소로 시설의 특성상 주중에만 운영을 하므로 주중에는 높고 주말에는 낮은 일반적인 패턴이 나타났다. 주중 평균농도는 남동쪽에 위치한 시설인 CIS 5가 $15.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 CIS 3과 4의 평균농도 $11.3, 7.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 높은 농도가 나타났다. 관측지인 내포신도시 내에서 상대적으로 도심지역에 위치한 CIS 3, 4 대비 CIS 5는 주변이 농축산지역으로 NH_3 배출이 활발한 곳이며, 배출된 NH_3 가 2차 입자 생성에 기여하여 CIS 5의 농도가 상대적으로 높게 나타났을 가능성이 존재한다(Kang and Kim, 2022; Zhai et al., 2021). 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)에 위치해 있는 지점이다. 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 평균농도는 주말 평균농도에 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 $22.6, 10.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 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 PC방으로 주중 농도가 상승하여 수요일에 최고 농도가 나타나고($29.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 이후 감소하여 일요일에 최소 농도가 나타났다($20.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). PC방의 경우 주요 고객이 초~고등학교 학생들로 학생들의 이용이 빈번한 주중이 주말보다 높게 난 이유로 판단된다. CIS 12(간이 버스 터미널)는 주중과 주말의 평균 농도 차이가 없었으며($23.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 주간 변동이 없이 일정한 값이 나타났는데, 이는 내포신도시의 특성상 버스노선이 많지 않기 때문에 버스정류장을 이용하는 버스가 많지 않고, 승객의 빈도수 또한 주중과 주말간 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, 이에 따라 고객들의 편의를 위한 공기청정기 및 환기 시

설이 설치되어 있다. 이는 같은 업종의 시설이라도 개별 시설마다 인구밀집도, 면적, 환기시스템 등에 의해 실내 공기질의 패턴이 달라질 수 있음을 보여준다. CIS 15(마트)는 주중의 평균 농도가 $14.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 주말($12.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 다소 높게 나타났으며, 주간 패턴은 크게 나타나지 않았다.

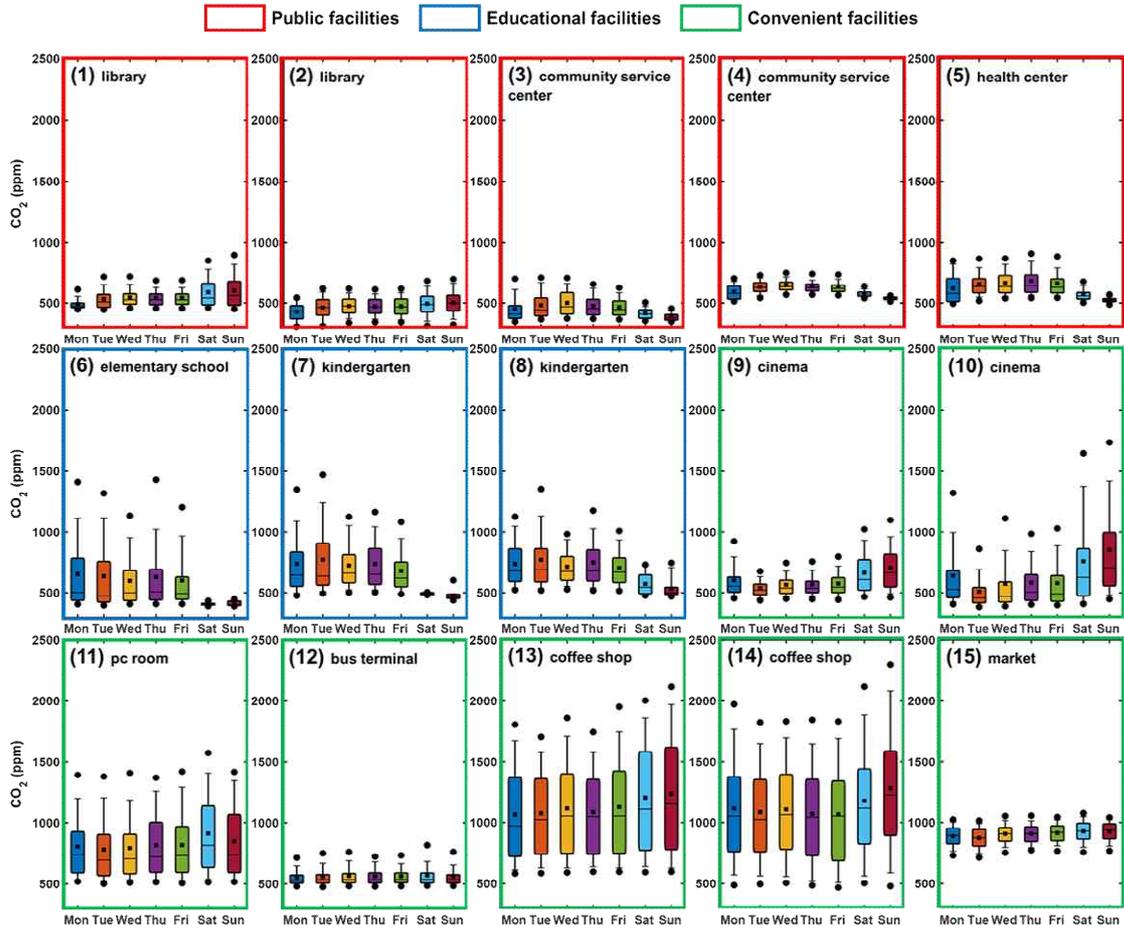


[그림 9] 각 측정지점에 대한 주간 PM_{2.5} 농도변화

그림 10은 각 실내시설별 CO₂의 주간 변동을 나타낸 것이다. 전통적으로 CO₂는 PM(particulate matter)과 더불어 실내 환기와 실내오염도 지표로 사용되어 왔다(Lin et al., 2022). 실내 시설에서 CO₂ 농도 증가는 환기 부족을 의미하며 (Turanjanin et al., 2014), 최근 공기청정기 등의 보급으로 실내공간에 대한 환기 중요성이 망각되면서, 오히려 실내 CO₂ 농도는 증가하는 추세이다(Du et al., 2020). 한편, 국내 대기환경에 대한 CO₂ 연평균 농도는 2021년 기준으로 안

면도 측정소에서 약 423 ppm로 관측되었다(KMA, 2022a).

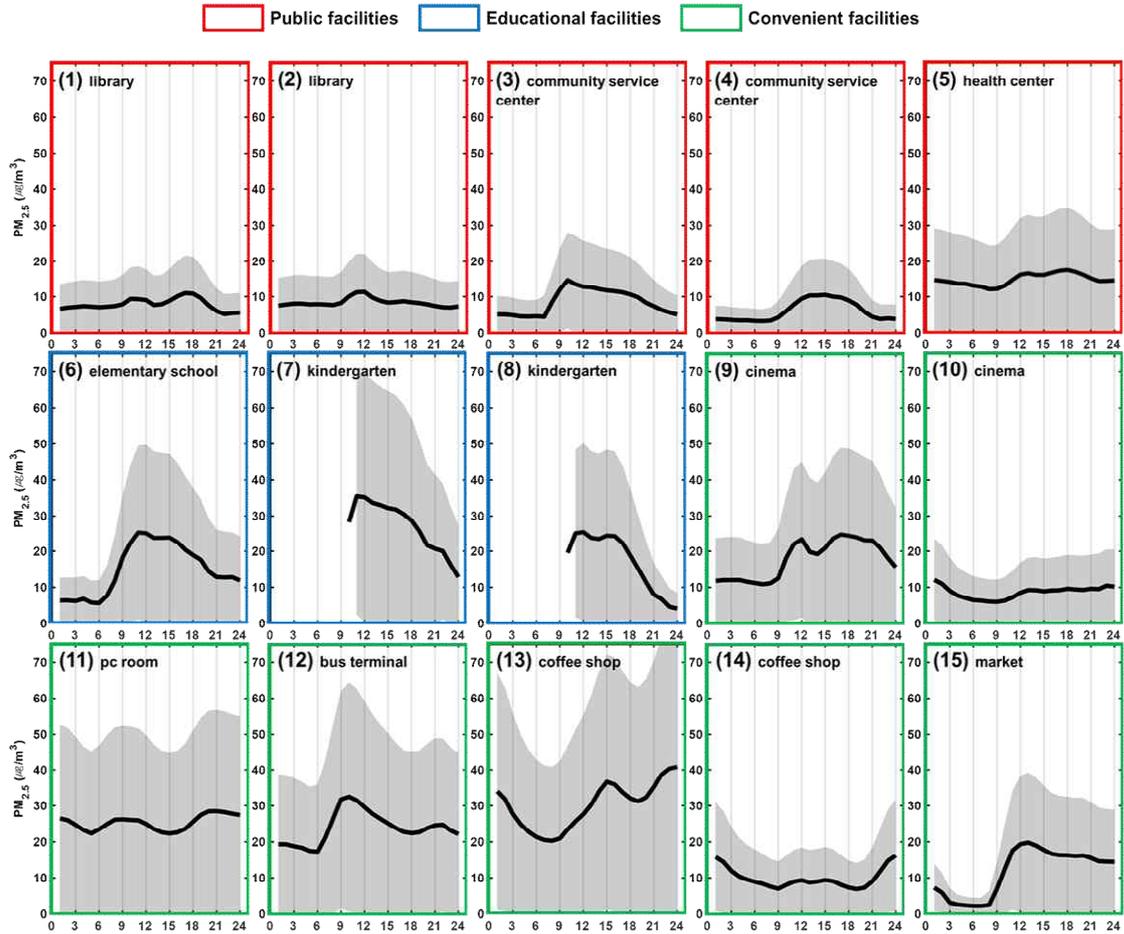
실내 시설의 CO₂ 주간 변동 결과는 PM_{2.5}의 결과와 유사하게 이용자들에 의한 영향이 큰 것으로 분석되었으나, 일부 차이는 있었다. CIS 1-2는 주중 462-530 ppm 수준이었으며, 주말에는 499-594 ppm으로 상승했다. PM_{2.5}는 월요일에 청소등의 내부 활동이 증가함에 따라 주중 최고 농도가 나타났지만, 청소 등의 활동에 따라 환기가 이루어지면서 CO₂ 농도는 월요일에 가장 낮게 나타났다. 주민 복지센터 및 보건소가 위치해 있는 CIS 3-5는 주말에는 운영을 하지 않기 때문에, 주중의 평균 농도(475-661 ppm)가 주말의 평균 농도(401-558 ppm)에 비해 상대적으로 더 높게 나타났다. 하지만 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_{2.5}와 다른 결과가 나타났다. PM_{2.5}는 음식 제조 및 방문객들의 활동이 많은 매표소(CIS 9)에서 더 높은 값이 나타났지만, CO₂의 경우 매표소(CIS 9)보다, 밀폐된 곳에서 사람들의 지속된 호흡이 이루어지는 상영관(CIS 10)에서 더 높게 나타났다. 이용객이 많은 주말이 주중보다 높은 값이 나타났으며, 주말 평균 농도는 CIS 9과 10에서 각각 683, 804 ppm이었다. CIS 11(PC 방)의 주중 및 주말 평균 농도는 803, 880 ppm으로 PM_{2.5} 결과와 반대로 주말에 더 높은 값이 나타났다. 이는 주말에 PC방을 이용하는 이용객들의 방문이 많은 주중에 출입문의 개폐시 순간적인 환기효과가 발생하면서 CO₂ 농도를 떨어뜨린 효과가 반영된 것으로 판단된다. 이용객의 빈도가 작은 CIS 12(간이 버스 터미널)은 PM_{2.5}와 마찬가지로 주중과 주말의 농도 차이가 확인되지 않았으며, 주간 농도 범위는 561-565 ppm이었다. CIS 13-14(커피숍)는 관측 지점 중 평균 CO₂ 농도가 가장 높게 나타났다. CIS 13-14 모두 이용객이 증가하는 주말에 농도가 더 높았으며, 주말 평균 농도는 각각 1,219, 1,228 ppm으로 나타났다. CIS 13의 PM_{2.5} 평균 농도가 CIS 8에 비해 약 3배 높았던 것과 비교하면, 매우 유사한 값이 나타났다. 이는 PM_{2.5}와 CO₂의 실내 농도 수준이 단순 시설의 이용객에만 영향을 받는 것이 아닌, 다른 여러가지 요소에도 복합적으로 영향을 받는 것으로 판단된다. CIS 15(마트)는 주중 평균 농도(898 ppm)에 비해 주말 평균 농도(925 ppm)가 다소 높게 나타났다.



[그림 10] 각 측정지점에 대한 주간 CO₂ 농도변화

각 실내시설별 PM_{2.5}의 일간 농도 변화를 그림 11에 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 보건소가 위치해 있는 CIS 3-5은 주간 활동시간대에 상승하여 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. 교육시설인 CIS 6-8은 등교 시간에 상승하고 이후 감소하는 패턴

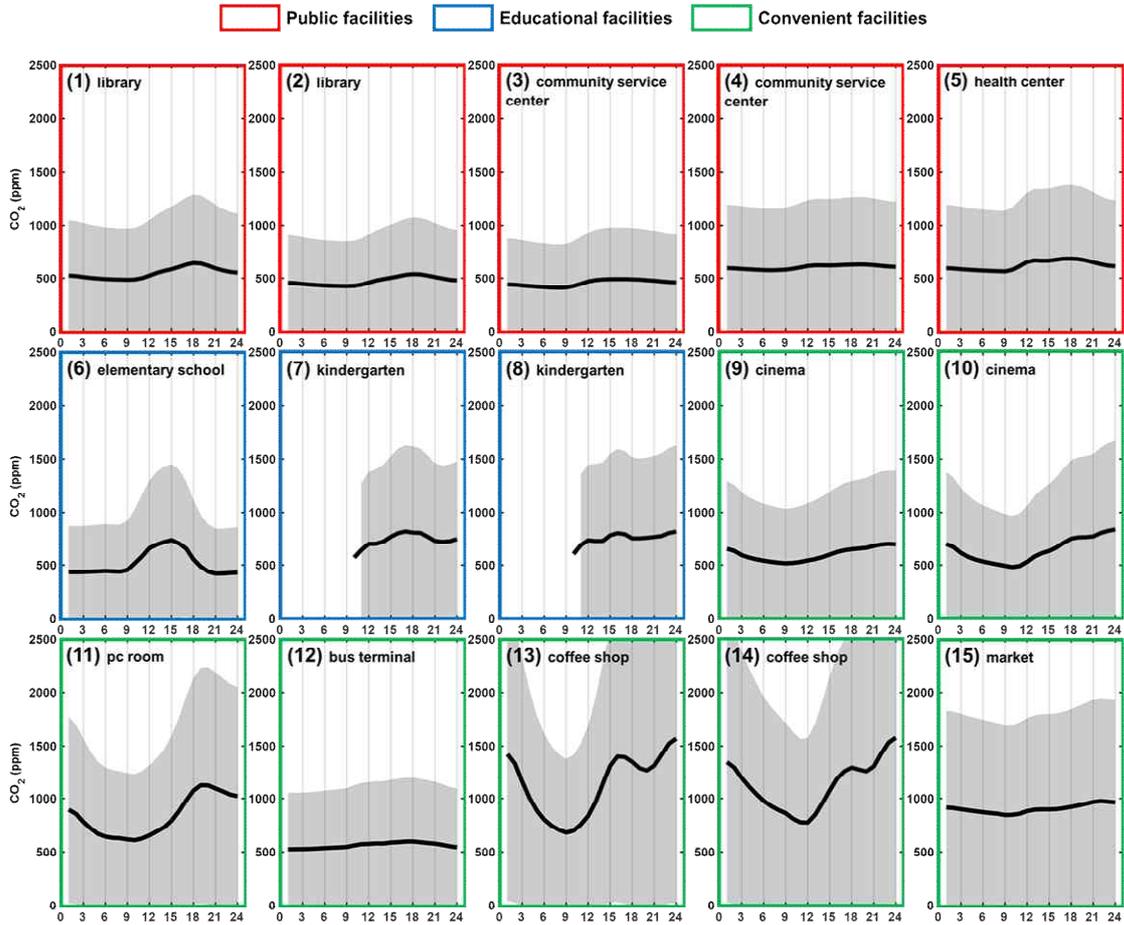
이 나타났다. CIS 6은 등교시간인 8시이후 농도가 상승하여 11시에 일 최고농도($27.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 이후 감소하는 경향이 나타났다. CIS 7과 8은 같은 유치원의 다른 교실에서 측정된 결과이며 CIS 7과 8 모두 11시에 일 최고 농도가 나타났으며, 농도는 각각 36.5 , $27.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 같은 시설의 공간이라도 이용자의 활동과 외부 요인에 따라 결과 값의 차이가 나타난 것으로 분석된다(Aquilina and Camilleri, 2022). CIS 9(영화관 매표소)는 팝콘과 같은 음식 등 제조의 영향으로 영화관 영업시간에 약 2.3배 상승하는 것으로 나타났으며, 영업시간 종료 후 점차 감소하는 양상을 나타냈다. CIS 10(상영관)은 CIS 9과 같은 시설임에도 불구하고 영업시간 중 농도가 감소하거나 유지되는 패턴이 나타났다. 이는 상영관 내에서는 특별한 이동을 하지 않고 자리에서 앉아서 관람하며, 상영중 냉난방 공조설비의 가동으로 인해 농도가 낮아지는 것으로 판단되며, 영업시간 종료 이후 오히려 농도가 소폭 상승하는 것으로 나타났다. CIS 11(PC 방)은 요리 제조 및 24시간 영업시간의 영향으로 일간 변동은 크게 나타나지 않았으나, 일 평균 농도 $25.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높게 유지가 되었다. CIS 13-14(커피숍)는 상이한 결과가 나타났다. CIS 13은 9시 이후 농도가 증가하여 15시에 peak가 발생하고 ($38.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 감소한 뒤, 20시 이후부터 다시 증가하여 0시 이후 감소했다. CIS 14은 주간 시간대에 peak가 발생하지는 않았지만, 20시 이후부터 증가하여 0시 이후부터 감소하는 패턴이 나타났다. 이는 같은 종류의 시설이지만 가격대에 따라 이용객들의 연령대와 행동패턴에 따라 상이한 결과를 초래한다는 것을 확인할 수 있었다. CIS 15(마트)는 마트의 영업시간인 9시이후 상승하여 이용객이 줄어드는 20시이후 감소하는 전형적인 패턴이 나타났다.



[그림 11] 각 측정지점에 대한 일간 PM_{2.5} 농도 변화

각 실내시설별 CO₂의 일간 농도 변화를 그림 12에 나타냈다. CO₂의 일간 변동은 PM_{2.5}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 일 중 농도가 450-600 ppm 수준으로 유지되었다. CIS 6(초등학교)은 등교시간 이후 농도가 상승하여 하교시간에 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(매포소, 상영관)은 9시이후 농도가 상승하고 0시 이후 농도가 감소하는 공통된 패턴이 나타났다. 일 평균 농도는 CIS

9-10(601, 640 ppm)로 매표소 보다 상영관에서 다소 높은 농도가 나타났다. CIS 11(PC 방)은 주 이용 연령대가 학생이므로 하교 시간인 15시 이후 농도가 상승하여 19시에 일 최고 농도(1153 ppm)가 나타났고, 점차 감소하는 패턴이 나타났다. CIS 13-14(커피숍)는 PM2.5에서 다른 패턴이 나타났던 것과는 달리, CO₂의 일간 변동은 유사하게 나타났다. 0시 이후 감소한 이후 9시 이후부터 급격하게 상승하여 16시에 peak 발생 후 다시 감소하여 0시에 일 최고 농도(각각 1592, 1567 ppm)이 나타났으며, 실내 공기질의 가이드라인(1000 ppm)을 초과하는 것으로 분석되었다. CIS 12(버스터미널)와 CIS 15(마트)는 각각 약 500, 900 ppm 수준으로 일정하게 농도가 유지되었다. CO₂는 재실자가 주요 배출원으로 재실자의 활동도에 따라 상이한 결과를 나타낸다. 좁은 면적에 다수의 재실자가 활동하는 학교나 극장, 커피숍, PC방의 경우 재실자의 존재여부와 활동도에 따라 농도변화가 확연히 나타나지만 그 외의 곳은 지역적 특성상 이용자가 많지 않고, 재실자의 방문도 밀집되지 않아 내부 CO₂ 농도가 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다.



[그림 12] 각 측정지점에 대한 일간 CO₂ 농도 변화

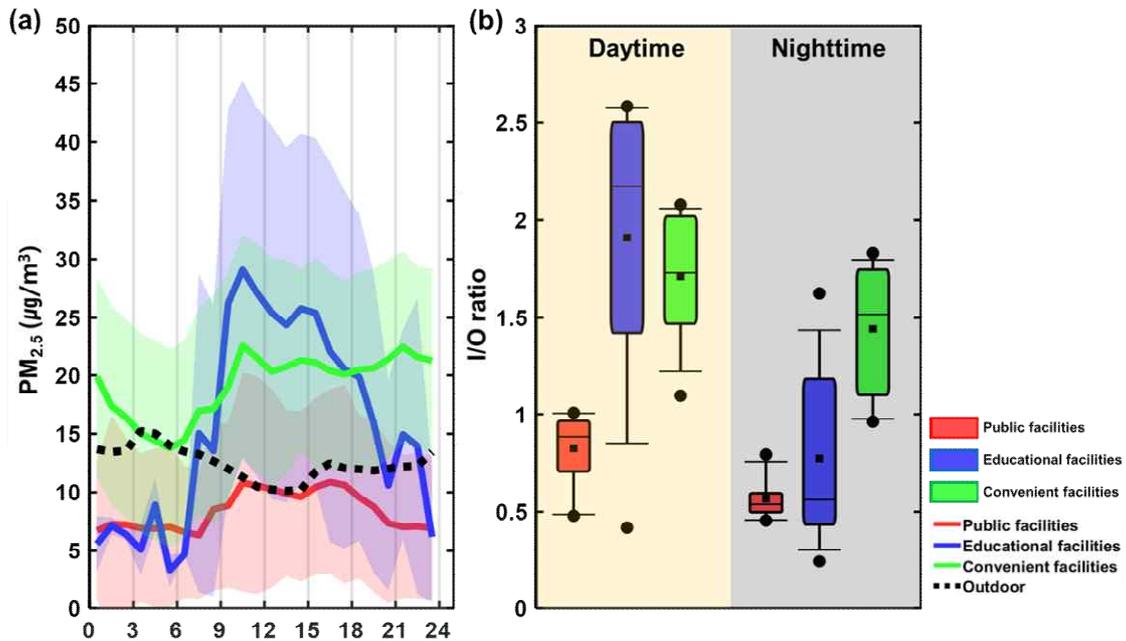
다중이용시설별 실내공기질 관리 방안을 모색하기 위해 내포신도시 내 시설을 그룹별로 분류하여 일변동과 실내외 농도 비(indoor/outdoor ratio; I/O ratio)를 분석하였다(그림 13). 시설 그룹은 2.1 절에서 언급한바와 같이 공공시설(CIS 1-5), 교육시설(CIS 6-8), 편의시설(CIS 9-15)로 구분하였다. 각 그룹별 평균 및 편차를 실선과 음영으로 나타냈으며, 실외 PM_{2.5} 농도는 검정색 파선으로 나타냈다(그림 13a).

실외 PM_{2.5} 농도는 새벽 4시경 최고농도(15.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 이후 주간에 감소한 뒤, 15시 이후 다시 증가하는 패턴이 나타났다. 전체 농도 범위는 10-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 일 농도 변동이 크게 나타나지는 않았다. 일반적으로 도심지역의 PM_{2.5} 일 변화 양상은 출근시간과 퇴근시간에 차량의 활동으로 인해 농도가 높아지지만, 교외지역의 경우 교통량이 상대적으로 적기 때문에 일변화 특성이 다르게 나

타날 수 있다(Zhang et al., 2020; Zhao et al., 2009). 추가적으로 본 연구를 수행한 홍성군은 연평균 안개일수가 2018-2021년 기준으로 총 39, 43, 41, 47회였으며, 이는 백령도와 울릉도 등을 제외하면 내륙지방에서는 세번째로 높은 수치였다(KMA, 2022b). 관측기간동안 평균 시정은 새벽시간대에 20 km 이하였으며, 새벽시간대의 haze에 의한 효과로 농도가 소폭 상승하여 유지되다 7시 이후 역전층이 해소되면서 대기가 혼합되고 PM_{2.5}의 농도가 감소하는 것으로 분석된다(Sun et al., 2020; Liu et al., 2013). 최근 수행된 국내연구 결과에서도 본 연구의 관측지와 인접한 대산지역에서 새벽시간대에 PM_{2.5}가 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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 일 최고 농도는 11시경(10.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)과 17시경(10.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 나타났다. 공공시설의 경우 이용객들이 방문이 시작되는 9시 이후부터 농도가 상승하여 유지되다 업무가 종료되는 18시 이후 농도가 감소하였으며, 시설의 이용시간에 따른 농도변화가 나타났다. 교육시설의 경우 세 그룹 중 일 변동이 가장 크게 나타났다. 오전 7시 PM_{2.5} 농도 4.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 등교 및 등원 시간이 시작되는 8시경 PM_{2.5} 농도는 15.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 급격히 상승하였다. 농도는 계속 상승하여 오전 11시 최고농도(29.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 기록한 뒤 점차 감소하는 양상이 나타났다. 편의시설의 시설의 종류에 따라 일 변동이 크게 달라질 수 있다(그림 11). 편의시설은 시설별로 영업시간이 일정하지 않기 때문에 하루동안 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 주간농도는 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 높게 유지되었다.

그림 13a와 같이 주간과 야간 시간의 농도 패턴이 달라지는 것을 감안하여, 주간(daytime) 및 야간(nighttime)을 구분하여 평균 I/O ratio를 제시하였다(그림 13b). 먼저 공공시설의 경우 주간과 야간 모두 I/O ratio가 가장 낮게 나타났다. 주간 평균 값은 0.80 이었으며, 야간 평균 값은 0.55 였다. 공공시설의 경우 상대적으로 내부에서 활동량이 적기 때문에 실외보다 농도가 낮은 것으로 나타났으며, 주간시간대에 대부분의 활동이 이루어지므로 주간 평균 값이 상대적으로 높은 값이 나타났다. 교육시설의 경우 주간과 야간의 차이가 가장 크게 나타났다. 주간과 야간의 평균 I/O ratio는 각각 1.86과 0.71로 주간이 야

간에 비해 약 2.6배 높게 나타났다. 주간시간대에 등교 및 등원이 시작되고, 교실에서 내부 활동이 발생함에 따라 값이 증가하는 것으로 분석되었다. 최근 초등학교 및 유치원 내부에 공기 정화 시스템이 다수 설치되고 있으나, 효율적인 측면에서 오히려 외부 환기를 통한 효과보다 미흡한 것으로 분석되었다. 교육 시설의 경우 공간의 면적, 이용객의 수, 활동 패턴 등을 분석하여 효과적인 공기 정화 시스템의 가동과 외부 환기가 필요할 것으로 사료된다. 마지막으로 편의시설의 경우 주간과 야간의 I/O ratio 평균 값은 각각 1.68과 1.39로 주간과 야간의 차이가 상대적으로 작았다. 편의시설의 경우 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 실내 공기질 관리 방법에 대한 추가 개선사항이 필요할 것으로 판단된다.



[그림 13] 측정기간 전체에 대한 PM_{2.5}의 일변화 패턴(a)과 주간과 야간시간대 I/O ratio(b)

제 4 장

IoT 기술을 이용한 실내공기질 관리

1. IoT 기술을 이용한 실내공기질 관리 현황
2. IoT 기술을 이용한 충청남도의 실내공기질 관리 방안
3. 정책 제언

IoT 기술을 이용한 실내공기질 관리



1. IoT 기술을 이용한 실내공기질 관리 현황

환경부에서 대기질 모니터링을 위해 대기오염측정망을 설치한 것과 마찬가지로 실내공간에 대한 모니터링의 필요성이 대두되어 실내공기질 관리 종합정보망을 설치하여 운영하고 있다. 하지만 2022년 기준 대기오염측정망이 901개소나 되는 반면 실내측정망은 90여개소로 턱 없이 부족한 실정이다. 미국환경청이나 환경부에서 조사결과 하루 중 90% 이상이 실내공간에서 이루어진다는 점을 감안했을 때 실내공기질의 모니터링과 관리의 중요성은 더 이상 설명할 여지가 없다. 하지만 이 90%는 가정집을 포함하여, 교육시설, 사무실, 마트, 다중이용시설 등 너무 다양하여 이 모든 곳들을 기존의 공정시험방법을 활용하여 관리한다는 것엔 기술적, 비용적 한계가 있다. 이러한 부분을 보완하여 정확하진 않더라도 경향성과 농도수준 파악을 위해 간이센서가 활용되고 있으며, 이들은 IoT 기술과 만나 데이터의 축적과 관리가 이루어지고 있다.

표 12는 현재 주 측정방법인 베타선흡수법과 연구용으로 많이 활용되는 광산란 측정법을 간이센서와 비교한 것이다. 베타선 흡수는 현재 대기환경 및 실내공기질 연속 모니터링에 활용되고 있는 주 시험방법으로 1대당 설치된 입자분리기의 설계유량에 따라 절단입경이 달라져 PM₁₀ 또는 PM_{2.5}만을 측정할 수 있다. 하지만 가장 기본이 되는 중량법과 오차가 가장 적은 것으로 알려져 있어 3개 측정방법 중 가장 정확한 값을 제시해 줄 수 있다. 광산란방식은 크게 네탈로메타(nephelometer)와 스펙트로메타(spectrometer)로 구분되며, 가격은

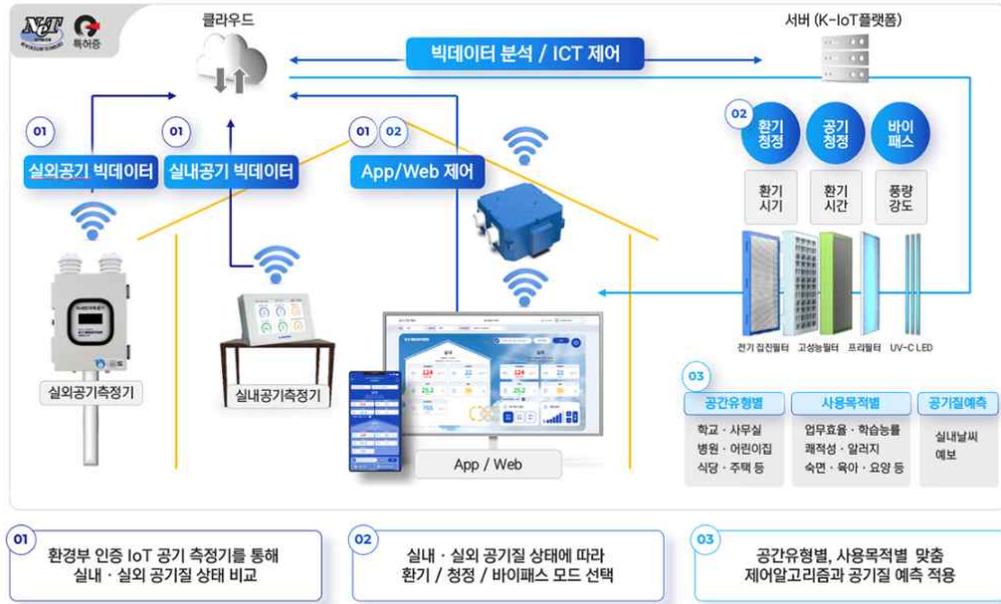
대당 수백에서 3천만원까지 올라간다. 네팔로메타는 단순히 PM₁₀과 PM_{2.5}에 대해 경험식에 의한 중량 농도값만을 제시해 줄 수 있지만 스펙트로메터는 입자의 광학적 특성을 이용해 크기별 입자 개수농도와 입경분포를 알 수 있다. 이러한 장점으로 연구용으로 다수 사용되며, 일부 장비들의 경우 기존의 베타선 흡수법에 유사한수준의 환산 농도값을 제시하고 있다. 마지막으로 간이센서는 사용이 간단하여 전문적인 지식없이 사용할 수 있고, 가격부담이 적어 다수 공간에 설치하여 지역적인 특성 확인에 활용되고 있다. 특히 과거에는 단순히 측정된 값을 표면에 가시화해주는 것에서 발전하여 IoT 기술과 결합하여 데이터를 저장, 분석이 가능해지면서 활용도가 더욱 커지고 있다.

[표 12] PM_{2.5} 모니터링 방법에 따른 특성 비교

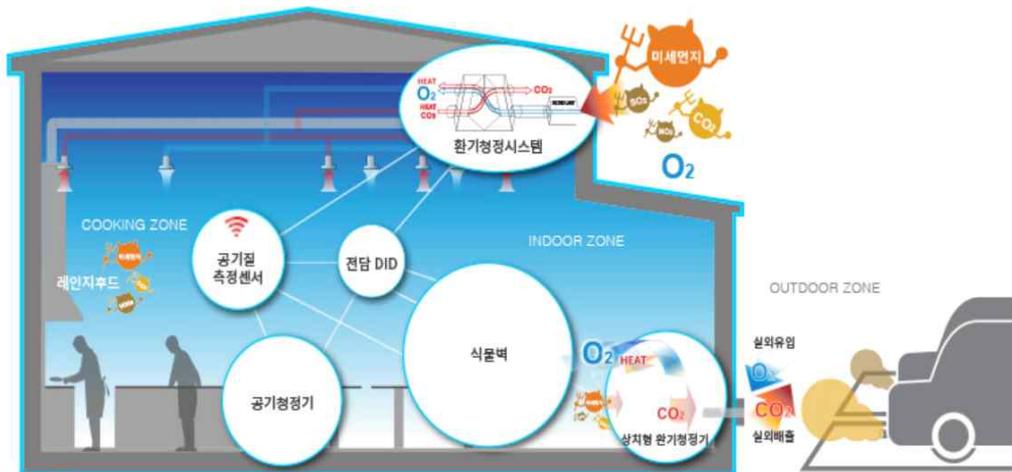
항목	베타선흡수법	광산란방법	간이센서
주요 활용도	공정시험법으로 주측정소에 적용	주로 경향성 파악 및 연구용으로 활용	다수공간에 공간분포 측정에 활용
측정항목	PM ₁₀ or PM _{2.5}	입자개수농도, 입경분포, 중량농도(PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₁₀)	PM _{2.5} , PM ₁₀ , 온습도, CO ₂ , VOCs 등
가격	2천만원/대	0.3~2천만원/대	2~100만원/대
설치	어려움	비교적 간단	쉬움
부피	큼	비교적 적음	초소형
무게	20kg전후	1~3kg 이내	500mg 이내
검교정	1회/2년	1회/2년	없음(소모품)
교정항목	등가성평가 정도관리	레이저 감도	-
운영자 전문성	필요함	필요함	필요없음
데이터 가시화	통신 연결을 통한 수신화면	통신 연결을 통한 수신화면	WIFI연결을 통한 웹화면

이러한 활용성을 이용하여 최근 스마트 홈케어의 일환으로 간이센서가 포함되기 시작했다. IoT기술을 이용하여 실내에 있는 모든 가전기기를 제어할 수 있게 되면서 AI와 융합하여 자동관리 방식으로 진화하였다. 외부공기와 내부공기질을 파악하여 농도변화를 감지, 환기와 공조설비 및 공기청정기를 가동시키고, 주방 인덕션의 작동과 반응하여 상부 레인지후드가 켜지고, 실내 온도유지 및 안전관리까지 모든 것이 가능해지고 있다.

공간유형과 사용목적에 따라 실외 및 실내 공기질 빅데이터를 이용한 환기정정용 제어기술



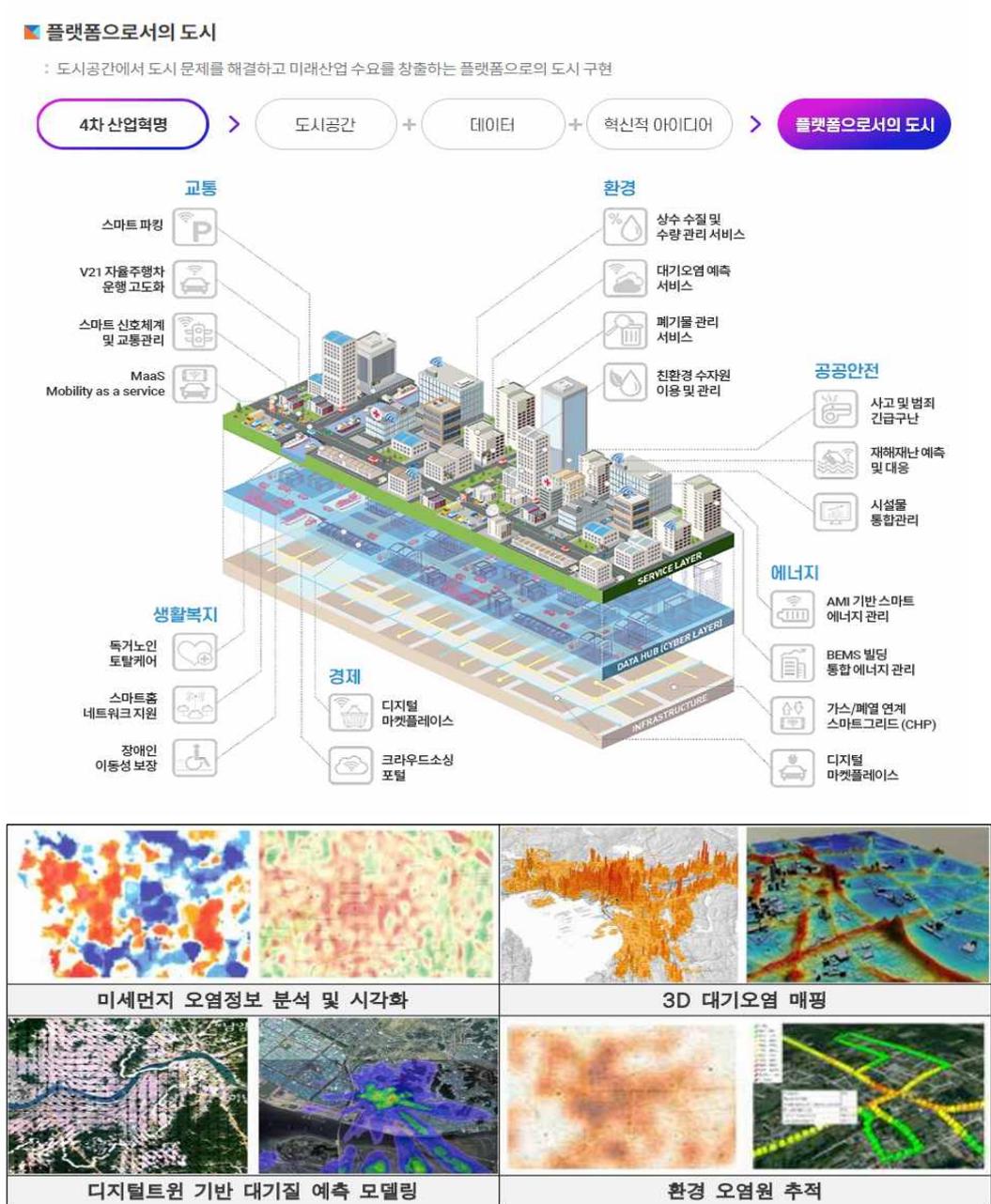
다중이용시설 공기질 관리 솔루션 흐름도



[그림 14] 스마트 홈케어 서비스 예시 (자료:케이웨더, 핫츠)

일부 서울을 포함한 시흥 등에서는 이러한 기술을 이용한 스마트시티 추진사업을 추진 중에 있다. 스마트시티는 재난관리, 지능형 교통시스템, 시설물 및 환경관리 등 도시 전반에 시스템으로 관리함으로써 도시 운영 효율성을 증대

시키는 것을 목적으로 추진되고 있다. 여기서 IoT를 접목한 간이센서는 도심지역에 대한 모니터링과 실내환경 스마트 홈케어로 역할을 해내고 있다.



[그림 15] 스마트시티의 컨셉 (자료:시흥시)



2. IoT 기술을 이용한 충청남도의 실내공기질 관리 방안

IoT기술을 접목한 간이 센서기술은 앞서 조사한바와 같이 다양한 분야에서 활용되고 있다. 하지만 대부분의 기술이 IoT 즉, 통신망을 기반으로 하고 있어 통신망이 적절히 설치되어 있고, 이에 대한 어느 정도의 인지와 기기연결 수준의 장치 조작이 가능하여야 한다. 다행히 국내에는 산속 깊숙한 곳까지 촘촘히 통신망이 구축되어 있어 국내 어디서든 별 불편함없이 통신을 이용할 수 있는 시스템이 구축되어 있고, IT 강대국답게 동네 식당을 가더라도 카드단말기와 연결된 WIFI 회선이 제공되고 있다. 이러한 강점을 살려 대부분의 다중이용시설에서는 이러한 간이센서 방식을 이용한 공기질 모니터링과 관리가 가능할 것으로 판단된다. 특히 본 조사에서 나타난 것처럼 그룹별 오염물질의 농도변화가 상이하게 나타나며, 같은 그룹안에서도 사용자의 연령대와 사용패턴에 따라 다르게 변화한다는 것을 감안했을 때 결과론적으로는 개별 패턴분석을 통한 관리방안이 마련되어야 하는 것을 의미한다. 일반적으로 실내공기질 관리 방안 마련을 위한 공정은 표 13과 같다.

[표 13] 실내공기질 관리방안 수립을 위한 순서도

No.	단계	내용
1	기초조사	대상공간에 대한 면적, 재실자, 활동패턴, 내부배출원 및 개선장치 설치 및 운영 현황 등을 조사
2	주변환경조사	가장 가까운 측정망자료를 활용한 연간, 계절별, 주간, 일별 농도변화 특성 조사
3	실내모니터링	측정장비를 활용하여 현장조사, 대부분 이단계에서 중장기적 모니터링시 IoT를 이용한 간이센서 활용 / 재실자의 활동패턴, 개선장치 운영 패턴도 같이 조사
4	기여도 분석	실내외 오염원과 농도변화, 행동 패턴 등을 분석하여 실내공기질 악화의 주요원인 분석
5	개선대책 수립	오염원별 대응방법과 개선방안 제시
6	현장대입	개선방안을 현장에 대입하여 개선효과 분석
7	현장 적용	현장대입 결과를 피드백하여 최종개선대책을 수립하고, 이를 기반으로 대상구간 실내공기질 관리 방안 완성

표 13과 같은 프로세스는 대부분 전문가의 경험과 장비 운영의 노하우, 그리고 실내외 자료 분석 결과 등이 제공되어야 한다. 과거에는 많은 공간에 대한 제한점과 필요성 인지 부족으로 이러한 부분이 막막하게 다가왔었으나, 최근 실내공기질에 대한 관심 증대와 비용지출 의지가 강해짐에 따라 삼성, LG, 케이워드, 핫츠, 코웨이 등 다양한 기업들에서 이 분야에 대한 시장가능성을 보고 도전하고 있다. 이제는 이러한 부분이 인프라 부족이 아닌 의지와 비용이 있다는 관리가 가능한 지역으로 바뀌게 되었다는 것이다.

충청남도는 발전소, 산업단지, 제철소 등 대형배출시설들이 다수 밀집되어 있어 지역 주민들의 건강피해가 큰 곳이다. 특히 대기오염물질 배출시설들이 다수 밀집되어 있는 서산, 당진, 천안, 아산에 피해가 클 것으로 예측된다. 이에 도와 시군차원의 미세먼지 집중관리구역을 선정하여 관리하고 있다. 하지만 이러한 집중구역 외에도 IoT 기술을 이용한 취약계층 생활공간에 대해 저렴한 가격으로 손쉽게 관리가 가능하다는 것을 알 수 있었다. 충청남도는 충남연구원과 함께 화력발전소 주변지역에 대한 건강양향조사와 기후환경영향조사 등의 연구과제를 발주하여 석탄 화력발전소 주변 지역에 거주하는 지역 주민들의 건강피해도와 사회적 피해비용 등을 산정하고 있으며, 향후 개선 예정인 지역자원시설세의 신규 활용처를 이러한 취약계층 생활공간 IoT 설치비용으로 활용할 수 있다면 중장기적으로 해당지역 주변에 대한 실내외 농도수준과 영향 파악에 도움이 될 수 있을 것으로 판단되며, 이 자료들은 향후 정책방향 결정과 세부방안 수립에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 발전소 주변지역 외에도 대산석유화학단지나 당진제철단지 인근에도 동일한 시스템을 구축, 활용한다면 저렴한 가격으로 충분히 관련 정보를 제공해 줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한 천안, 아산의 경우 인구밀집지역으로 불특정다수가 이용하는 다중이용시설이 많이 위치해 있다. 백화점, 대형마트, 극장, 병원 등에도 IoT를 이용한 간이센서를 설치 운영하도록 하고, 관련 시군 또는 최소단위 관리기관이나 해당시설의 관리처에서 오염물질의 농도를 파악하고 관리하도록 한다면 좀 더 개선도니 공기질을 이용자들에게 제공할 수 있다.

예를 들어 본 컨셉을 백화점에 적용한다면 외기정보는 주변 AQMS 자료를 받아 활용하고, 실내자료는 간이센서를 설치하도록 한다. AQMS 자료는 Open API자료로 공공의 목적으로 제공 요청시 무상으로 받아 활용할 수 있으며, 이것이 번거로운 경우 에어코리아(<https://www.airkorea.or.kr>) 또는 충청남도마

을대기측정망통합정보센터(<http://61.81.47.250/cni/main.do>)에서 자료를 실시간으로 보거나 다운받을 수 있다. 이렇게 받은 자료와 내부에서 측정된 자료를 기반으로 CO₂나 PM₁₀(또는 PM_{2.5}) 기준 실내공기질 관리법의 유지기준에 도달할 경우 외부공기를 유입시켜 순환시키거나 공조설비나 공기청정기를 가동하는 등의 조치를 취한다면 더 쾌적한 공기질을 유지할 수 있다. 오래전부터 터널과 대합실, 승강장의 공기질 관리가 최대 화두였던 도시철도의 경우 이러한 실내외 오염물질 농도와 공조설비를 빅데이터 분석을 통해 AI에 학습시켜 자동으로 제어할 수 있는 방안이 고안되어 일부 역사에서 시범운영 되고 있다(권순박, 2018).



그림 8. 스마트 공기질관리시스템 및 운영계획서 예시



[그림 16] 지하역사 스마트 공기질관리시스템 실증사업 로드맵 (자료 : 서울교통공사)



3. 정책 제안

2021년 WHO는 6종의 대기오염물질($PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , SO_2 , CO)에 대해 실내외 대기질 기준을 대폭 강화한 가이드라인을 제시하였는데 $PM_{2.5}$ 의 경우 실내외 기준을 통합하여 $5 \mu g/m^3$ 이었다(KEI, 2022; WHO, 2021). 현재 국내의 실내 공기질 관련 최근 정책은 「제4차 실내공기질 관리 기본계획('20~'24)」이며 관리 대상으로는 다중이용시설 뿐만 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 연구결과를 기반으로 다음과 같은 관리방안을 제안하고자 한다.

첫째, 충청남도의 실내공기질관련 조례에 대한 수정·보완이 필요하다. 전통적으로 대형배출시설이 많은 충청남도의 특징으로 실내보다는 외부 대기질에 대한 관리와 대책마련이 중심으로 추진되어 왔다. 그러다보니 정부의 강화되는 정책에 따라 외기에 대한 환경기준이나 배출허용기준은 흐름에 따라 강화되어 왔으나 실내공기질에 대한 관리기준을 이를 따라가지 못하고 있는 실정이다. 충청남도의 실내공기질 관련 기준은 2011년에 수립된 “충청남도 다중이용시설의 실내공기질 유지기준에 관한 조례”로 2015년 일부 개정된 이후 7년간 개정된 사례가 없다. 최근 가장 중요한 오염물질로 관리의 중심인 $PM_{2.5}$ 는 항목에 포함되지도 않았으며, PM_{10} 은 $10 \sim 20 \mu g/m^3$ 높은 수준이다. 충청남도 내 다중이용시설에 대한 조사가 최근 이루어지고 있는데 이들 자료를 기반으로 전문가의 의견수렴을 거쳐 빠른 시일 내로 이들 항목에 대한 개선이 필요하다. 또한 충청남도는 전국 3대 석면광산 밀집지역으로 타 지역 대비 석면과 라돈에 대한 위험도가 높는데 이들에 대한 현장조사가 요구되며, 필요하다면 관련 규정도 같이 제정되어야 할 것으로 판단된다.

둘째, 현재 환경부, 교육부, 고용노동부 등에서 관리하고 있는 실내공기질 관련 법령을 WHO 신규 가이드라인 및 국내 배경농도를 고려하여 실내공기질 표준화 방안이 검토 되어야한다. 대기오염물질에 대한 인체 위해성이 실내공간에 따라 다르지 않는 만큼 현재 각 부처에서 관리하고 있는 대상 오염물질과 기준 농도 등을 통합하여 표준화된 방법으로 관리할 필요가 있다.

셋째, 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.

넷째, 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 센서 장비에 대한 등급을 부여하고 있지만 너무 낮은 등급기준으로 대부분의 센서가 1등급을 받고 있는 실정이다. 현재 간이센서는 기준장비와의 비교를 통해 간단한 평가를 통해 등급이 매겨지지만 이외에도, 개별 기기간의 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).

다섯째, 실내 및 실외 공기질을 통합하여 관리하는 방안을 고려해야 한다. 현재 실내와 실외의 공기질은 각각의 기준에 따라 관리되고 있다. 하지만 실외 PM_{2.5}는 실내 PM_{2.5} 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, 실내공간은 외부로부터의 유입을 차단하고, 내부배출원에 대한 관리가 이루어진다면 충분히 낮은 농도로 유지할 수 있다. 하지만 우리나라의 대기환경기준은 실내외농도가 유사하거나 실내가 높은 경우도 있다. 향후에는 WHO 기준과 같이 실내외를 통합하여 관리하거나, 최소한 외기보다 낮은 실내공기질 관리 기준이 마련되어야 할 것이다.



참고문헌

1. 관계부처 합동, 2018, 미세먼지 관리 종합계획(2020~2024)
2. 환경부, 2019a, 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법
3. 환경부, 2020, 대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법
4. 환경부, 1997, 지하생활공간 공기질관리법
5. 환경부, 2004, 다중이용시설등의 실내공기질 관리법
6. 환경부, 2022, 실내공기질관리법
7. 환경부, 2007, 한국노출계수 핸드북
8. 환경부, 2021, 대기오염측정망 설치·운영 지침
9. 국립환경과학원 2022, 대기환경월보(2022년 6월호)
10. 환경공단, 2022, 실내공기질관리 종합정보망(<https://www.inair.or.kr>)
11. 환경부, 2019b, 2018년 다중이용시설·신축 공동주택·대중교통차량 실내공기질 지도·점검 결과 보고
12. 경기도, 2019, IoT 다중이용시설 실내공기질 상시측정 및 자동관제
13. Sung, W.T., and Hsiao, S.J., 2021, Building an indoor air quality monitoring system based on the architecture of the Internet of Things, Journal on Wireless Communications and Networking, 53
14. Wall, D., McCullagh, P., Cleland, I., Bond, R., 2021, Development of an internet of things solution to monitor and analyse indoor air quality, Internet of Things, 14
15. 국가미세먼지정보센터, 2022, <https://www.air.go.kr/main.do>
16. 환경공단, 2022, 굴뚝자동측정기기(TMS) 측정결과, <https://cleansys.or.kr/index.do>
17. 충청남도, 2021, 충청남도 환경보건계획(2021~2030)
18. 케이웨더, 2022, https://www.kweather.co.kr/sub/data_4.php
19. 하츠, 2022, <http://haatz.com/ProductIntroduce>
20. 시흥시, SMART 시흥, SMILE 시민 - 시흥시 스마트도시계획 2020~2024년
21. 권순박, 2018, 지하역사 스마트 공기질관리시스템 연구 사례, 공기청정기술, 제31권, 제3호, 39-46

22. 충청남도, 2015, 충청남도 다중이용시설의 실내공기질 유지기준에 관한 조례
23. Aquilina, N.J., Camilleri, S.F. (2022) Impact of daily household activities on indoor PM_{2.5} and Black Carbon concentrations in Malta. *Building and Environment*, 207, 108422
24. Du, B., Tandoc, M.C., Mack, M.L., Siegel, J.A. (2020) Indoor CO₂ concentrations and cognitive function: A critical review. *Indoor Air*, 30, 1067-1082
25. Guak, S., Kim, K., Yang, W., Won, S., Lee, H., Lee, K. (2021) Prediction models using outdoor environmental data for real-time PM₁₀ concentrations in daycare centers, kindergartens, and elementary schools. *Building and Environment*, 187, 107371
26. Kang, Y.-H., Kim, S. (2022) Seasonal PM Management: (I) What Emissions Should be Reduced? *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38, 746-763
27. 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
28. 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
29. Korea Meteorological Administration (KMA) (2022a) Annual average concentration of carbon dioxide
30. 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

31. 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.
32. Liu, C., Zhang, Y. (2018) Relations between indoor and outdoor PM_{2.5} and constituent concentrations. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 13, 5
33. Sun, X., Zhao, T., Liu, D., Gong, S., Xu, J., Ma, X. (2020) Quantifying the Influences of PM_{2.5} and Relative Humidity on Change of Atmospheric Visibility over Recent Winters in an Urban Area of East China. *Atmosphere*, 11, 461
34. Turanjanin, V., Vučićević, B., Jovanović, M., Mirkov, N., Lazović, I. (2014) Indoor CO₂ measurements in Serbian schools and ventilation rate calculation. *Energy*, 77, 290-296
35. 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
36. 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_{2.5} concentrations in Beijing, China. *Environmental Pollution*, 262, 114276,
37. Zhao, X., Zhang, X., Xu, X., Xu, J., Meng, W., Pu, W. (2009) Seasonal and diurnal variations of ambient PM_{2.5} concentration in urban and rural environments in Beijing. *Atmospheric Environment*, 43, 2893-2900



부록

- A. 측정지점별 주중 및 주간 $PM_{2.5}$ 농도
- B. 측정지점별 주중 및 주간 CO_2 농도
- C. 측정지점별 $PM_{2.5}$ 농도의 일변화
- D. 측정지점별 CO_2 농도의 일변화

◀ A. 측정지점별 주중 및 주간 PM_{2.5} 농도

단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$		월	화	수	목	금	토	일
도서관	CIS 1	11.2	5.4	7.8	5.6	4.7	10.1	9.9
	CIS 2	13.1	7.2	6.9	6.1	7.6	9.5	8.2
주민센터	CIS 3	11.4	11.8	13.9	10.6	9.0	7.4	3.5
	CIS 4	7.4	7.8	8.6	7.4	7.3	3.7	3.2
보건소	CIS 5	17.6	16.4	16.0	15.2	14.7	12.9	11.5
초등학교	CIS 6	21.2	24.1	22.5	20.6	22.3	10.6	13.1
유치원	CIS 7	31.0	30.6	32.9	29.1	30.1	40.7	7.6
	CIS 8	20.5	22.8	22.8	22.6	19.1	23.6	3.4
영화관	CIS 9	17.1	13.5	18.8	15.7	17.9	22.4	22.8
	CIS 10	8.8	6.8	8.8	8.0	7.6	10.1	11.2
PC방	CIS 11	24.0	26.8	29.8	28.4	26.3	20.8	20.1
버스 터미널	CIS 12	23.8	24.2	25.1	22.1	24.2	24.2	23.7
커피숍	CIS 13	28.2	29.1	29.5	29.3	29.4	33.6	32.7
	CIS 14	9.0	9.9	10.4	10.1	10.7	10.7	9.5
마트	CIS 15	13.5	13.6	14.1	14.2	14.7	14.2	11.2

◀◀ B. 측정지점별 주중 및 주간 CO₂ 농도

단위 : ppm		월	화	수	목	금	토	일
도서관	CIS 1	492	532	546	542	542	588	600
	CIS 2	428	464	475	471	473	495	504
주민센터	CIS 3	449	482	501	477	466	415	387
	CIS 4	591	631	645	635	631	577	539
보건소	CIS 5	619	655	665	681	661	570	526
초등학교	CIS 6	653	635	597	629	601	407	412
유치원	CIS 7	737	771	723	736	679	493	479
	CIS 8	735	770	713	748	704	573	534
영화관	CIS 9	600	538	566	568	575	663	703
	CIS 10	637	510	574	583	578	758	850
PC방	CIS 11	806	781	793	817	818	911	848
버스터미널	CIS 12	553	559	565	562	563	570	560
커피숍	CIS 13	1,064	1,075	1,114	1,084	1,125	1,203	1,235
	CIS 14	1,113	1,084	1,106	1,070	1,066	1,177	1,279
마트	CIS 15	887	873	906	907	914	927	924

《 C. 측정지점별 PM_{2.5} 농도의 일변화

단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
도서관	CIS 1	6.7	6.5	7.7	7.2	7.2	7.3	6.7	7.7	7.8	8.2	12.2	7.6	7.4	8.0	8.4	10.2	11.8	11.0	9.8	8.1	4.8	5.2	5.5	5.6
	CIS 2	7.2	7.9	8.5	7.9	7.8	7.8	8.2	7.6	7.3	9.9	13.0	10.8	0.2	8.3	.2	8.6	8.8	8.9	7.7	8.1	7.8	6.3	7.1	7.6
주민센터	CIS 3	4.8	5.4	5.1	4.2	4.4	4.9	4.5	3.9	17.2	14.8	11.9	13.7	12.6	11.5	12.2	11.5	10.9	11.2	9.8	8.5	6.8	6.8	5.4	4.7
	CIS 4	4.0	3.5	3.6	3.5	3.2	3.7	3.0	3.0	4.1	5.7	8.2	9.7	10.6	10.8	9.8	11.0	9.3	9.1	8.5	5.8	3.1	4.3	4.0	3.7
보건소	CIS 5	14.3	15.0	13.9	13.4	13.7	13.7	11.8	12.8	11.6	12.0	15.5	16.7	6.5	6.6	15.2	16.5	18.6	16.9	17.3	16.9	14.5	14.1	14.5	14.6
초등학교	CIS 6	5.6	7.1	6.4	5.1	8.9	3.3	4.7	15.0	15.7	24.1	2.7	24.7	23.4	23.2	24.7	23.6	19.2	18.4	19.3	15.2	8.6	14.7	14.9	8.8
유치원	CIS 7	N/D	13.8	34.6	36.5	35.2	33.8	32.0	33.3	31.4	30.8	29.5	8.0	21.7	17.3	23.1	19.6	6.0							
	CIS 8	N/D	9.0	22.4	27.2	25.6	23.5	22.2	24.6	6.4	21.8	18.7	15.9	11.0	7.5	5.6	71.1	1.1							
영화관	CIS 9	12.0	11.6	12.4	12.0	11.7	10.9	11.0	10.6	11.7	15.2	27.5	23.3	19.4	16.8	21.4	24.4	25.0	24.8	23.4	23.6	22.2	23.2	17.4	13.8
	CIS 10	13.8	10.4	8.7	8.0	6.4	6.7	6.2	6.0	5.9	6.0	7.1	8.6	9.8	9.4	8.5	8.8	10.1	8.6	10.0	8.6	8.2	11.0	9.3	11.1
PC방	CIS 11	26.5	26.5	25.0	22.6	22.2	22.1	26.1	26.6	25.8	26.4	26.0	25.5	23.5	21.7	22.7	22.5	22.7	25.7	28.4	28.3	28.7	28.5	27.5	27.3
버스 터미널	CIS 12	19.9	18.9	19.3	18.2	17.6	16.6	17.6	29.5	32.6	33.2	31.7	9.5	27.5	26.3	25.5	23.6	22.4	22.2	22.6	23.1	25.6	25.1	23.6	20.7
커피숍	CIS 13	36.8	31.2	27.5	24.4	22.7	21.3	20.1	20.1	20.7	22.0	27.7	27.4	7.8	35.5	38.5	35.9	33.3	32.0	30.8	30.9	35.2	39.5	41.4	40.3
	CIS 14	17.4	14.2	11.6	10.1	9.5	9.0	8.2	7.9	6.7	6.5	11.	9.4	7.6	9.1	10.3	8.9	8.1	7.4	6.6	6.8	8.6	11.8	15.1	17.3
마트	CIS 15	10.7	4.0	3.1	2.5	2.3	2.4	2.0	2.3	3.2	15.3	18.8	18.8	20.5	20.1	16.3	16.8	16.9	15.2	16.7	16.3	15.6	14.7	13.6	15.3

※ N/D : No data

《 D. 측정지점별 CO₂ 농도의 일변화

단위 : ppm		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
도서관	CIS 1	532	519	510	502	496	491	488	486	486	483	494	524	558	571	583	608	635	654	654	621	590	576	561	547	
	CIS 2	461	451	444	438	433	429	427	425	424	423	432	459	482	493	501	518	534	543	540	526	509	497	486	472	
주민센터	CIS 3	444	437	430	425	419	415	411	407	410	416	450	471	484	489	491	491	491	492	483	485	473	470	465	454	
	CIS 4	601	595	591	586	582	579	577	575	586	587	605	622	630	624	622	627	629	634	633	636	627	620	613	607	
보건소	CIS 5	602	593	587	582	578	574	571	568	565	564	616	673	683	664	661	686	692	690	687	678	653	635	622	611	
초등학교	CIS 6	434	434	435	437	443	445	447	433	435	496	620	628	724	722	701	780	628	552	478	424	415	419	430	430	
유치원	CIS 7	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	524	533	653	737	703	657	803	839	763	853	803	756	742	678	733	757
	CIS 8	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	527	570	710	777	711	687	780	873	750	749	752	751	766	775	780	853
영화관	CIS 9	685	620	589	568	553	540	530	522	514	512	533	542	554	571	597	624	642	647	654	662	667	707	702	685	
	CIS 10	733	661	606	572	549	532	518	505	494	479	469	526	596	616	619	660	712	757	774	751	762	796	851	824	
PC방	CIS 11	938	853	777	715	669	625	639	634	614	606	613	664	693	719	783	877	981	1,000	1,153	1,131	1,087	1,065	1,048	996	
버스 터미널	CIS 12	527	527	527	529	532	537	542	542	546	555	585	582	562	598	579	591	607	596	593	587	574	575	553	535	
커피숍	CIS 13	1,519	1,326	1,156	995	872	796	742	705	677	664	757	852	903	1,143	1,367	1,421	1,417	1,347	1,283	1,233	1,278	1,427	1,549	1,582	
	CIS 14	1,412	1,280	1,187	1,112	1,040	974	924	891	866	832	736	765	827	951	1,094	1,183	1,283	1,305	1,291	1,222	1,256	1,437	1,591	1,567	
마트	CIS 15	923	910	901	890	881	872	864	857	853	27	862	886	900	902	896	899	908	924	935	949	969	986	975	952	

※ N/D : No data

연구책임	김종범 기후변화대응연구센터 책임연구원
	황규철 기후변화대응연구센터 연구원
연구참여	이상신 기후변화대응연구센터 연구위원
	박세찬 기후변화대응연구센터 책임연구원
	최영남 기후변화대응연구센터 연구원
	이가혜 기후변화대응연구센터 연구원

정책지원과제 2022-03

IoT를 이용한 충남지역 일부 다중이용시설의 실내공기질 현황 조사

발행일 : 2022년 10월

발행인 : 충남연구원장

발행처 : 충남연구원 서해안기후환경연구소

(32258) 충청남도 홍성군 홍북읍 홍예로 360

홈페이지 <http://www.shari.re.kr>

발간등록번호 : -
