

다중이용시설별 실내공기 오염물질 농도분포 및 기준치 이상 값의 구성비 조사

전정인¹ , 이해원² , 최현진³ , 전형진³ , 이철민^{4*}

¹서경대학교 나노생명공학과, ²서경대학교 위해성평가연구소, ³한국환경연구원 환경평가본부, ⁴서경대학교 나노화학생명공학과

The Distribution of Indoor Air Pollutants by the Categories of Public-Use Facilities and Their Rate of Guideline Violation

Jeong-In Joen¹, Hye-Won Lee², Hyun-Jin Choi³, Hyung-Jin Jeon³, and Cheolmin Lee^{4*}

¹Department of Nano & Biological Engineering, Seokyeong University, ²Institute of Risk Assessment, Seokyeong University, ³Environmental Assessment Group, Korea Environment Institute, ⁴Department of Nano Chemical & Biological Engineering, Seokyeong University

ABSTRACT

Background: The types and effects of hazardous pollutants in indoor air may vary depending on the characteristics of the sources and pollutants caused by physical and chemical properties of buildings, the influence of outdoor air, and the exposure and use characteristics of residents.

Objectives: This study was conducted to provide basic data on the establish of indoor air quality management for different classes of public-use facilities by presenting the characteristics of concentration distribution of hazardous pollutants by different public-use facilities and the status of the excess proportion of exceeding standards.

Methods: This study analyzed self-measurement data from public-use facilities taken from 2017 to 2019. A total of 133,525 facilities were surveyed. A total of 10 types of pollutants that have maintenance and recommended standards stipulated in the Indoor Air Quality Control Act from the Ministry of Environment were investigated. The excess proportion and the substances exceeding the criteria for each type of public-use facilities for these pollutants were investigated.

Results: As a result of the analysis of the proportion of exceeding the standard for each type of public-use facility, the facilities with the highest excess proportion of the standards for each hazardous pollutant were: PM₁₀ in railway stations (8.93%), PM_{2.5} in daycare centers (7.36%), CO₂ in bus terminals (2.37%), HCHO in postpartum care centers (4.11%), total airborne bacteria in daycare centers (0.69%), CO in museums (0.1%), NO₂ in postpartum care centers (1.15%), Rn in museums (0.78%), total volatile organic compounds in postpartum care centers (7.20%) and mold in daycare centers (1.44%).

Conclusions: Although uncertainty may arise because this study is a result of self-measurement, it is considered that this study has significance for providing basic data on the establishment in the future of indoor air quality management measures customized for each type of public-use facility.

Key words: Indoor air quality, public-use facility, excess proportion of guidelines, indoor air pollutants

Received August 3, 2021

Revised September 2, 2021

Accepted September 9, 2021

Highlights:

- The concentration of indoor air pollutants by public-use facilities showed statistically significant differences between all facilities.
- The difference in the excess proportion of pollutants by public-use facility showed statistically significant differences between all facilities.
- It is necessary to manage air quality customized for indoor spaces by public-use facilities.

*Corresponding author:

Department of Nano Chemical & Biological Engineering, Seokyeong University, 124 Seogyong-ro, Seongbuk-ku, Seoul 02713, Republic of Korea
 Tel: +82-2-940-2924
 Fax: +82-2-940-7616
 E-mail: cheolmin@skuniv.ac.kr

I. 서 론

현대인들은 하루 생활 중 80% 이상을 실내에서 생활하고 있으며, 환경에 대한 인식이 향상됨에 따라 실내공기오염(Indoor Air Pollution, IAP)은 새로운 환경문제로 인식되고 있다.¹⁾ 실내는

실외와는 달리 환경이 오염될 경우 쉽게 정화되지 않아 쾌적한 실내환경의 저해요인이 될 뿐만 아니라 재실자의 건강까지도 위협하는 것으로 알려져있다.¹⁻³⁾ 실내공기오염은 주택, 학교, 사무실, 공공건물, 병원, 지하시설물, 교통수단 등 다양한 실내공간의 공기가 오염된 상태를 말하며 매우 복합적인 원인

들에 의해서 야기될 수 있는데 그 영향은 실내 거주자들의 생명을 위협할 정도는 아닐지라도 장기적으로 볼 때 건강에 나쁜 영향을 미치고 있음에 틀림없다.⁴⁻⁶⁾ 또한, 다중이용시설은 다수인이 이용함으로써 이용자의 건강 및 공중위생에 영향을 미칠 수 있는 건축물 또는 시설^{7,8)}로서 특성상 짧은 시간에 많은 사람들이 공동으로 활용하는 공간이기 때문에 실내 환경이 쾌적하게 유지되지 못하면 실내오염물질은 지속적으로 증가하여 재실자 및 이용자의 건강을 위협하게 된다.⁹⁾

산업의 발달과 고도화는 인간생활에 있어 질적 향상과 다양한 편리함 등 많은 혜택을 주지만 환경오염 등의 중요한 문제점을 야기하고 있으며,¹⁰⁾ 최근에는 이러한 환경문제 중 일반 대기환경과 더불어 실내공기질(Indoor Air Quality, IAQ)에 관한 관심이 고조되고 있다. 실내오염물질의 종류와 발생원은 매우 다양하며, 최근에는 인체에 발암성과 위해성을 갖는 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)과 포름알데히드(Formaldehyde, HCHO)를 비롯하여 유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutants, HAPs)에 대한 중요성이 부각되고 있고, 특히 건축물에 사용되는 건축 내장재는 실내에서 VOCs와 HCHO의 중요한 발생원이며, 고농도로 방출되는 특징이 있어 빌딩증후군(Sick Building Syndrome, SBS)과 같은 문제를 유발하고 있다.^{10,11)} 또한, 실내공기 중에는 물리적, 화학적 및 생물학적으로 다양한 오염물질이 존재할 가능성이 있으며, 이러한 오염물질들은 외부공기의 유입, 담배연기, 난방기, 오븐, 취사도구, 시멘트, 세정제, 건축자재, 페인트 등과 같은 복합적인 배출원에서 기인되므로 그 배출량 역시 오염물질에 따라 상당한 편차를 나타내는 것으로 알려져 있다.^{5,12)}

환경부에서는 지하철역, 지하상가 등 지하생활공간의 규모나 이용객 수의 급증에 따른 실내공기오염에 대한 심각성이 사회적으로 인식됨에 따라 1996년에 「지하생활공간 공기질 관리법」을 입법화하여 시행한 바 있으며, 그 시행규칙로 7개 항목에 대한 지하공기질 허용기준을 설정한 바 있다.^{12,13)} 이후 환경부에서는 국민의 건강증진과 불특정다수가 이용하는 다중이용시설의 보다 쾌적한 실내공기질 확보를 위해 2003년 5월 29일 「다중이용시설등의 실내공기질관리법」을 개정·공표하였으며, 2004년 5월 30일부터 유지기준 5개 항목(미세먼지(PM₁₀), 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO), 포름알데히드(HCHO), 총부유세균(Total Airborne Bacteria, TAB))과 권고기준 5개 항목(이산화질소(NO₂), 라돈(Rn), 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs), 석면(Asbestos), 오존(O₃)) 총 10개 항목을 17개 시설군에 적용 및 관리하고 있다.¹¹⁾ 현재 다중이용시설 실내공기질 관리는 2020년 4월 3일 실내공기질관리법 개정에 의해 유지기준 6개 항목(PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, HCHO, TAB, CO)과 권고기준 4개 항목(NO₂, Rn, 총휘발성유기화합물(Total Volatile Organic Compounds, TVOC), 곰팡이(Mold)) 총 10개 항목에 대해 관리되고 있으며, 관리대상 시설군도 25

개로 확대 관리되고 있다.

이와 같이 실내공기 중 유해오염물질의 종류 및 영향은 건축물의 용도에 따른 물리·화학적 특성에 기인한 발생원 및 오염물질의 특성과 실외공기의 영향 및 거주자들의 실내공간별 노출 및 이용특성 등에 따라 실내공간별 서로 상이한 실내공기질의 차이를 보일 수 있다.

이에 본 연구는 다중이용시설별 실내 공간 맞춤형 공기질 관리 및 다중이용시설별 건강위해 관리에 대한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 2017년부터 2019년까지 환경부에서 측정된 다중이용시설의 자가측정 데이터를 활용하여 다중이용시설별 오염물질의 기준치 이상에 대한 구성비 현황을 제시함으로써, 향후 다중이용시설별 실내 공간 맞춤형 실내공기질 관리의 필요성 제기 및 이를 위한 기초적 자료로서의 활용을 목적으로 수행되었다.

II. 연구 방법

1. 다중이용시설 현황 조사 및 조사대상 물질

본 연구에서는 다중이용시설별 오염물질에 대해 유지·권고 기준 이상의 값을 나타낸 물질의 기준치 이상 값의 구성비를 검토하기 위해 2017년부터 2019년까지 「실내공기질 관리법」에서 정한 기준에 의거하여 환경부에 보고된 다중이용시설 실내공기질 자가측정 결과 데이터를 활용하여 기준치 이상 값의 구성비 분석을 실시하였다. 본 연구의 자가측정의 조사대상시설은 지하역사, 지하도상가, 철도역사의 대합실, 여객자동차터미널의 대합실, 항만시설 중 대합실, 공항시설 중 여객터미널, 도서관·박물관 및 미술관, 대규모점포, 장례식장, 영화상영관, 학원, 전시시설, PC영업시설, 목욕장, 의료기관, 산후조리원, 어린이집, 실내주차장 및 실내 체육시설이다. 본 연구의 분석대상 시설은 총 133,525개소이며, 각 시설별 측정연도와 측정 장소에 대해 다음 Table 1에 나타내었다.

조사대상 오염물질은 환경부 「실내공기질 관리법」에서 규정하고 있는 유지기준 오염물질 6종 항목(PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, HCHO, TAB, CO) 및 권고기준 오염물질 4종(NO₂, Rn, TVOC, Mold)에 대해 분석하였다. 「실내공기질 관리법」에서는 총 10종에 대해 유지기준에 해당하는 물질에 대해서는 1년에 한 번, 권고기준에 해당하는 물질에 대해서는 2년에 한 번 측정하도록 규정하고 있으며, 본 연구의 목적인 실내 공간별 맞춤형 실내공기질 관리를 위해 유지·권고기준의 10종에 대한 항목을 조사대상 오염물질로 선정하여 분석을 수행하였다.

2. 다중이용시설별 기준치 이상 구성비 분석

본 연구에서는 다중이용시설별 유해화학오염물질에 대한 실내공기질 유지·권고기준 10종에 대해 기준치 이상으로 조사된 시설에 대해 구성비 현황을 분석하였으며, 시설별 기준치 이

Table 1. Number of observations by facility type and measurement year

Facility	2017	2018	2019
Subway station	1,404	1,418	1,485
Underground shopping center	161	145	143
Railway station	82	71	71
Bus terminal	58	56	55
Airport facility	13	11	11
Harbor facility	47	47	53
Library	551	541	566
Museum	312	309	366
Gallery	87	86	89
Large store	3,680	3,663	3,658
Funeral hall	348	348	350
Theater	804	857	936
Academy	572	561	580
Exhibition facility	114	117	147
PC room	2,053	2,362	2,889
Steamroom	1,827	1,753	1,855
Medical facility	5,564	7,360	5,799
Postpartum care center	634	849	653
Elderly care center	2,434	3,130	2,693
Day care center	9,101	13,512	9,594
Indoor parking	11,089	11,338	12,059
Indoor sports facility	-	-	2
Total	40,937	48,534	44,054

상 물질을 조사하였다. 시설별 기준치 이상 물질의 선정은 조사 대상 시설 중 한 시설에서라도 기준치 이상의 값을 나타냈을 경우 해당 시설에서 기준치 이상 물질로 선정하여 수행하였다.

3. 통계분석

다중이용시설별 오염물질의 평균 농도 차이 검정은 SPSS (Ver. 19) 통계패키지를 이용하여 모수통계 검정인 일원분산분석(one-way Analysis of Variance, ANOVA)을 수행하였으며, ANOVA 분석에 앞서 원자료의 정규분포 검정을 수행한 결과 한쪽으로 치우친 로그-노말 분포를 나타내 원자료의 로그변환을 통한 정규분포화 이후 분석을 수행하였다. 이 때 통계적 유의수준(α)은 0.05로 설정하였다.

또한, 다중이용시설별 오염물질의 기준치 이상 구성비 사이 연관성을 확인하기 위해 다중이용시설별 오염물질 구성비 차이 검정은 SPSS (Ver. 19) 통계패키지를 이용하여 교차분석인 카이제곱 검정(Chi square test)을 수행하였으며, 이 때 통계적 유의수준(α)은 0.05로 설정하였으며, 카이제곱 값(χ^2)을 함께 제시하였다.

III. 결 과

1. 실내공기 오염물질의 시설별 분포현황

Table 2는 다중이용시설 자가측정 검사에 따른 다중이용시설별 유지·관리기준 오염물질의 농도 분포현황을 나타낸 것이다.

조사된 다중이용시설의 PM₁₀ 평균농도는 53.3±26.6 µg/m³로 조사되었다. 각 시설별 PM₁₀의 평균농도를 살펴보면 가장 높은 농도를 보인 시설은 실내주차장으로 77.6±27.7 µg/m³의 농도를, 가장 낮은 농도를 보인 시설은 공항시설 중 여객터미널로 35.6±14.2 µg/m³의 농도를 나타내었다. 환경부에서는 다중이용시설의 가 그룹(지하역사, 지하도상가, 철도역사의 대합실, 여객자동차터미널의 대합실, 항만시설 중 대합실, 공항시설 중 여객터미널, 도서관·박물관 및 미술관, 대규모점포, 장례식장, 영화상영관, 학원, 전시시설, 인터넷컴퓨터게임시설제공업 이 영업시설, 목욕장)에 대하여 100 µg/m³ 이하, 나 그룹(의료기관, 산후조리원, 노인요양시설, 어린이집, 실내 어린이놀이시설)에 대하여 75 µg/m³ 이하 그리고 다 그룹(실내주차장)과 라 그룹(실내 체육시설, 실내 공연장, 업무시설, 둘 이상의 용도에 사용되는 건축물)에 대해 200 µg/m³ 이하로 유지하도록 규제하고 있는데, 조사결과 PM₁₀의 평균농도는 유지기준을 초과하지 않는 것으로 조사되었다.

PM_{2.5}가 측정된 다중이용시설은 의료기관, 산후조리원, 노인요양시설, 어린이집이었으며, 그 외 다중이용시설에서는 PM_{2.5}가 측정되지 않은 것으로 조사되었다. 측정된 시설에서의 PM_{2.5} 평균농도는 18.2±11.6 µg/m³로 조사되었다. 각 시설별 PM_{2.5} 평균농도를 살펴보면 의료기관에서 19.1±12.0 µg/m³로 가장 높은 농도를 나타내었으며, 산후조리원에서 16.2±9.9 µg/m³로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 조사된 시설은 모두 민감계층 이용시설로 환경부에서는 PM_{2.5}에 대해 민감계층 이용시설은 35 µg/m³ 이하로 유지하도록 규제하고 있으며, 조사결과 PM_{2.5}의 평균농도는 유지기준을 초과하지 않는 것으로 조사되었다.

조사된 다중이용시설의 CO₂ 평균농도는 613.7±144.9 ppm으로 조사되었다. 각 시설별 CO₂ 평균농도를 살펴보면 산후조리원에서 667.9±147.3 ppm으로 가장 높은 농도를 나타내었으며, 전시시설에서 492.9±117.9 ppm으로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 환경부에서는 다중이용시설의 가, 나, 다 그룹에 대하여 CO₂ 항목은 1,000 ppm 이하로 유지하도록 규제하고 있는데, 조사결과 CO₂의 평균농도는 유지기준을 초과하지 않는 것으로 조사되었다.

조사된 다중이용시설의 HCHO 평균농도는 21.4±18.1 µg/m³로 조사되었다. 각 시설별 HCHO의 평균농도를 살펴보면 미술관에서 34.9±27.2 µg/m³로 가장 높은 농도를 나타내었으며, 지하역사에서 8.7±7.9 µg/m³로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 환경부에서는 다중이용시설의 가, 다 그룹에 대하여

Table 2. Distribution of indoor air pollutants by target public-use facilities from 2017 to 2019 (mean±SD)

	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO ₂ (ppm)	HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	TAB (CFU/ m^3)	CO (ppm)	NO ₂ (ppm)	Rn (Bq/ m^3)	TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mold (CFU/ m^3)
Subway station	66.6±25.1	-	508.9±107.9	8.7±7.9	-	0.9±0.5	0.03±0.01	23.6±16.0	77.7±87.4	-
Underground shopping center	51.9±22.0	-	612.6±140.1	23.1±16.8	-	1.4±0.5	0.02±0.01	26.6±16.0	235.1±87.4	-
Railway station	62.8±26.9	-	535.9±115.6	13.1±9.9	-	1.3±1.4	0.02±0.01	18.7±13.2	145.9±154.2	-
Bus terminal	53.9±19.7	-	577.8±209.9	15.2±13.5	-	1.2±1.2	0.02±0.01	16.8±8.6	139.0±125.3	-
Harbor facility	43.2±9.8	-	523.0±136.4	20.3±16.2	-	1.2±1.1	0.02±0.00	20.7±10.5	170.3±114.9	-
Airport facility	35.6±14.2	-	540.4±145.9	15.6±10.7	-	1.0±0.9	0.02±0.01	20.3±14.6	134.1±97.9	-
Library	46.5±17.6	-	598.3±153.0	24.7±18.5	-	1.0±0.8	0.02±0.01	27.5±17.7	150.6±148.7	-
Museum	43.2±18.4	-	507.7±117.7	33.0±27.0	-	1.0±0.9	0.01±0.01	37.6±26.3	177.9±191.2	-
Gallery	45.1±16.9	-	511.9±107.7	34.9±27.2	-	1.1±0.8	0.01±0.01	40.2±26.5	176.4±123.1	-
Large store	51.4±15.9	-	618.1±117.3	23.5±17.5	-	1.1±0.8	0.02±0.01	25.6±13.2	225.9±280.1	-
Funeral hall	48.4±18.9	-	550.5±121.2	26.2±28.5	-	1.2±0.9	0.02±0.01	26.5±19.8	171.2±177.2	-
Theater	49.0±18.9	-	609.4±119.5	24.7±19.0	-	1.2±1.1	0.02±0.01	28.2±18.9	226.4±193.0	-
Academy	47.7±16.9	-	623.5±145.4	31.9±24.8	-	1.0±0.7	0.02±0.01	26.7±18.5	160.1±167.2	-
Exhibition facility	48.0±20.8	-	492.9±117.9	33.3±26.2	-	1.0±0.8	0.01±0.01	29.3±19.7	183.7±212.2	-
PC room	54.1±21.0	-	642.6±151.9	34.9±23.9	-	1.4±6.0	0.02±0.01	25.0±17.1	186.2±238.7	-
Steamroom	51.2±19.4	-	596.1±130.6	26.3±17.4	-	1.4±1.0	0.02±0.01	26.1±37.5	215.8±328.7	-
Medical facility	40.5±17.0	19.1±12.0	651.2±155.5	21.5±17.0	315.2±192.2	1.2±7.5	0.02±0.01	27.3±17.4	148.2±169.7	181.5±116.7
Postpartum care center	36.0±16.8	16.2±9.9	667.9±147.3	32.5±23.9	270.6±198.9	1.2±0.9	0.02±0.01	30.9±20.6	187.1±181.3	138.2±115.8
Elderly care center	36.9±16.9	17.7±10.6	609.3±147.6	18.8±14.6	302.7±190.7	1.1±4.7	0.02±0.01	31.9±25.0	141.5±162.5	207.7±134.0
Day care center	37.5±16.9	18.0±11.8	661.7±153.9	21.2±16.5	369.9±211.8	1.1±0.9	0.02±0.16	36.9±25.6	142.5±136.8	201.4±197.7
Indoor parking	77.6±27.7	-	571.9±121.8	17.2±15.6	-	2.6±3.7	0.03±0.06	31.8±20.4	268.4±362.6	-
Indoor sports facility	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	53.3±26.6	18.2±11.6	613.7±144.9	21.4±18.1	339.8±205.2	1.5±3.9	0.02±0.08	30.5±22.1	193.6±260.3	194.2±166.9
p-value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

HCHO 항목은 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 나 그룹에 대해 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 유지하도록 규제하고 있는데, 조사결과 HCHO의 평균농도는 유지기준을 초과하지 않는 것으로 조사되었다.

TAB가 측정된 다중이용시설은 의료기관, 산후조리원, 노인요양시설, 어린이집이었으며, 그 외 다중이용시설에서는 TAB가 측정되지 않은 것으로 조사되었다. 측정된 시설에서 TAB의 평균농도는 $339.8 \pm 205.2 \text{ CFU}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. 각 시설별 TAB의 평균농도를 살펴보면 어린이집에서 $369.9 \pm 211.8 \text{ CFU}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 나타내었으며, 산후조리원에서 $270.9 \pm 198.9 \text{ CFU}/\text{m}^3$ 로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 조사된 시설은 모두 민감계층 이용시설로 환경부에서는 TAB에 대해 나 그룹에 대해서만 $800 \text{ CFU}/\text{m}^3$ 이하로 유지하도록 규제하고 있으며, 조사결과 TAB의 평균농도는 유지기준을 초과하지 않는 것으로 조사되었다.

조사된 다중이용시설의 CO 평균농도는 $1.5 \pm 3.9 \text{ ppm}$ 으로 조사되었다. 각 시설별 CO 평균농도를 살펴보면 실내주차장에서 $2.6 \pm 3.7 \text{ ppm}$ 으로 가장 높은 농도를 나타내었으며, 지하역사에서 $0.9 \pm 0.5 \text{ ppm}$ 으로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 환경부에서는 다중이용시설의 가, 나 그룹에 대하여 CO 항목은 10 ppm 이하, 다 그룹에 대해 25 ppm 이하로 유지하도록 규제하고 있으며, 조사결과 CO의 평균농도는 유지기준을 초과하지 않는 것으로 조사되었다.

조사된 다중이용시설의 NO₂ 평균농도는 $0.02 \pm 0.08 \text{ ppm}$ 으로 조사되었다. 각 시설별 NO₂ 평균농도를 살펴보면 실내주차장에서 $0.03 \pm 0.06 \text{ ppm}$ 으로 가장 높은 농도를 나타내었으며, 박물관, 미술관 그리고 전시시설에서 $0.01 \pm 0.01 \text{ ppm}$ 으로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 환경부에서는 NO₂ 항목의 경우 다중이용시설의 가 그룹에 대하여 0.1 ppm 이하, 나 그룹에 대해 0.05 ppm 이하 그리고 다 그룹에 대해 0.30 ppm 이하로 유지하도록 규제하고 있으며, 조사결과 NO₂의 평균농도는 권고기준을 초과하지 않는 것으로 조사되었다.

조사된 다중이용시설의 Rn 평균농도는 $30.5 \pm 22.1 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. 각 시설별 Rn의 평균농도를 살펴보면 미술관에서 $40.2 \pm 26.5 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 나타내었으며, 여객자동차터미널의 대합실에서 $16.8 \pm 8.6 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 환경부에서는 Rn 항목의 경우 다중이용시설의 가, 나, 다 그룹에 대해 $148 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 이하로 유지하도록 규제하고 있으며, 조사결과 Rn의 평균농도는 권고기준을 초과하지 않는 것으로 조사되었다.

조사된 다중이용시설의 TVOC의 평균농도는 $193.6 \pm 260.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. 각 시설별 TVOC의 평균농도를 살펴보면 실내주차장에서 $268.4 \pm 362.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 나타내었으며, 지하역사에서 $77.7 \pm 87.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 환경부에서는 TVOC의 경우 다중이용시설의 가 그룹에 대하여 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 나 그룹에 대해 $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$

이하 그리고 다 그룹에 대해 $1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 유지하도록 규제하고 있으며, 조사결과 TVOC의 평균농도는 권고기준을 초과하지 않는 것으로 조사되었다.

Mold가 측정된 다중이용시설은 의료기관, 산후조리원, 노인요양시설, 어린이집이었으며, 그 외 다중이용시설에서는 Mold가 측정되지 않은 것으로 조사되었다. 측정된 시설에서 Mold의 평균농도는 $194.2 \pm 166.9 \text{ CFU}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. 각 시설별 Mold의 평균농도를 살펴보면 노인요양시설에서 $207.7 \pm 134.0 \text{ CFU}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 나타내었으며, 산후조리원에서 $138.2 \pm 115.8 \text{ CFU}/\text{m}^3$ 로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 조사된 시설은 모두 민감계층 이용시설로 환경부에서는 Mold에 대해 나 그룹에 대해서만 $500 \text{ CFU}/\text{m}^3$ 이하로 유지하도록 규제하고 있으며, 조사결과 Mold의 평균농도는 권고기준을 초과하지 않는 것으로 조사되었다.

다중이용시설별 오염물질 10종(PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, HCHO, TAB, CO, NO₂, Rn, TVOC, Mold) 농도의 차이는 모든 시설간에 통계적으로 유의한 농도 차이를 나타낸 것으로 조사되었다(Table 2). 이와 같은 결과는 다중이용시설별 실내공기 오염물질의 농도분포 특성이 유의한 차이가 있음을 시사하며, 향후 다중이용시설별 실내공기질 관리방안을 도출할 때 시설별 실내 공간 맞춤형 관리방안 수립이 필요하다고 사료된다.

2. 다중이용시설별 기준치 이상 건수 및 기준치 이상 구성비 현황

Table 3은 다중이용시설 자가측정 검사에 따른 다중이용시설별 유지·권고기준 오염물질의 기준치 이상 건수 및 기준치 이상 값의 구성비 현황을 나타낸 것이다.

PM₁₀은 22개 시설군에서 모두 측정이 이루어졌으며, 공항시설, 실내체육시설, 항만시설을 제외한 다중이용시설에서 개별 한 개 시설 이상이 기준치 이상의 결과를 보인 것으로 조사되었다. PM₁₀의 경우 기준치 이상 건수는 노인요양시설에서 1,659건으로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 높은 기준치 이상 건수는 의료기관에서 508건으로 조사되었다. 시설별 기준치 이상 값의 구성비는 철도역사에서 8.93%로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 높은 구성비는 지하역사에서 5.53%로 조사되었다.

PM_{2.5}의 경우 민감계층 이용시설에서만 측정이 이루어진 것으로 조사되었으며, 노인요양시설, 산후조리원, 어린이집, 의료기관의 모든 시설군에서 기준치 이상인 시설이 하나 이상 존재하는 것으로 나타났다. 각 시설별 기준치 이상 건수와 시설별 기준치 이상 값의 구성비를 살펴보면 기준치 이상 건수의 경우 노인요양시설, 어린이집, 의료기관, 산후조리원 순으로 높았으며, 각각 1,759건, 1,072건, 537건 그리고 41건으로 나타났으며, 시설별 기준치 이상 값의 구성비의 경우 어린이집, 의료기관, 노인요양시설, 산후조리원 순으로 높았으며, 각각 7.36%,

Table 3. The excess proportion of pollutants by public-use facility

	Number of excess facilities (excess proportion, %)										
	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO ₂	HCHO	TAB	CO	NO ₂	Rn	TVOC	Mold	
Subway station	238 (5.53)	-	0 (0)	0 (0)	-	0 (0)	0 (0)	1 (0.05)	6 (0.24)	-	
Underground shopping center	12 (2.73)	-	0 (0)	0 (0)	-	0 (0)	0 (0)	0 (0)	19 (5.97)	-	
Railway station	20 (8.93)	-	0 (0)	0 (0)	-	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (1.85)	-	
Bus terminal	3 (1.78)	-	4 (2.37)	0 (0)	-	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (1.10)	-	
Harbor facility	0 (0)	-	0 (0)	0 (0)	-	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	-	
Airport facility	0 (0)	-	0 (0)	0 (0)	-	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	-	
Library	14 (0.85)	-	15 (0.91)	5 (0.30)	-	0 (0)	0 (0)	0 (0)	14 (1.59)	-	
Museum	7 (0.71)	-	2 (0.20)	17 (1.73)	-	1 (0.10)	0 (0)	4 (0.78)	8 (1.51)	-	
Gallery	2 (0.77)	-	0 (0)	3 (1.15)	-	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	-	
Large store	88 (0.80)	-	0 (0)	33 (0.30)	-	0 (0)	1 (0.01)	0 (0)	137 (2.00)	-	
Funeral hall	20 (1.92)	-	0 (0)	8 (0.76)	-	0 (0)	0 (0)	1 (0.18)	15 (2.65)	-	
Theater	35 (1.36)	-	2 (0.08)	14 (0.54)	-	0 (0)	0 (0)	3 (0.23)	59 (3.94)	-	
Academy	10 (0.59)	-	9 (0.53)	16 (0.94)	-	0 (0)	0 (0)	0 (0)	15 (1.76)	-	
Exhibition facility	10 (2.65)	-	0 (0)	5 (1.32)	-	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (1.76)	-	
PC room	179 (2.48)	-	58 (0.80)	89 (1.22)	-	2 (0.03)	2 (0.05)	4 (0.11)	78 (2.14)	-	
Steamroom	79 (1.46)	-	3 (0.06)	7 (0.13)	-	0 (0)	1 (0.03)	4 (0.14)	116 (3.99)	-	
Medical facility	508 (3.04)	537 (6.71)	58 (0.35)	186 (1.11)	22 (0.13)	3 (0.02)	35 (0.41)	4 (0.05)	170 (1.96)	15 (0.27)	
Postpartum care center	37 (1.95)	41 (4.60)	1 (0.05)	79 (4.11)	10 (0.53)	0 (0)	11 (1.15)	1 (0.11)	69 (7.20)	1 (0.16)	
Elderly care center	1,659 (2.20)	1,759 (5.14)	5 (0.07)	54 (0.72)	15 (0.20)	2 (0.03)	6 (0.14)	6 (0.14)	130 (3.09)	28 (1.10)	
Day care center	615 (2.22)	1,072 (7.36)	64 (0.23)	297 (1.06)	190 (0.69)	2 (0.01)	68 (0.49)	32 (0.23)	312 (2.25)	140 (1.44)	
Indoor parking	8 (0.02)	-	24 (0.04)	9 (0.03)	-	3 (0.01)	4 (0.02)	10 (0.06)	2,661 (1.38)	-	
Indoor sports facility	0 (0)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Total	2,050 (1.63)	1,825 (6.79)	245 (0.19)	822 (0.65)	237 (0.44)	13 (0.01)	128 (0.19)	70 (0.11)	1,415 (2.09)	184 (1.00)	
χ^2	1,581.7***	14.27**	331.97***	743.55***	84.41***	15,084.9***	196.69***	62.60***	344.66***	53.48***	

***<0.01, **<0.05, *<0.1

6.71%, 5.14% 그리고 4.60%의 구성비를 나타내었다.

CO₂의 경우 실내체육시설에서 측정된 현황은 없었으며, 21개 시설군에 대해 PC영업시설, 노인요양시설, 도서관, 목욕장, 박물관, 산후조리원, 실내주차장, 어린이집, 여객자동차터미널, 영화상영관, 의료기관 그리고 학원에서 기준치 이상인 시설이 하나 이상 존재하는 것으로 나타났다. CO₂의 경우 기준치 이상 건수는 어린이집에서 64건으로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 높은 기준치 이상 건수는 의료기관과 PC영업시설에서 58건으로 조사되었다. 시설별 기준치 이상 값의 구성비는 여객자동차터미널에서 2.37%로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 높은 구성비는 도서관에서 0.91%로 조사되었다.

HCHO의 경우 21개 시설군에 대해 PC영업시설, 노인요양시설, 대규모점포, 도서관, 목욕장, 미술관, 박물관, 산후조리원, 실내주차장, 어린이집, 영화상영관, 의료기관, 장례식장, 전시시설 그리고 학원에서 기준치 이상인 시설이 하나 이상 존재하는 것으로 나타났다. HCHO 경우 기준치 이상 건수는 어린이집에서 297건으로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 높은 기준치 이상 건수는 의료기관에서 186건으로 조사되었다. 시설별 기준치 이상 값의 구성비는 산후조리원에서 4.11%로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 높은 구성비는 박물관에서 1.73%로 조사되었다.

TAB의 경우 민감계층 이용시설에서만 측정이 이루어진 것으로 조사되었으며, 노인요양시설, 산후조리원, 어린이집, 의료기관의 모든 시설군에서 기준치 이상인 시설이 하나 이상 존재하는 것으로 나타났다. 각 시설별 기준치 이상 건수와 시설별 기준치 이상 값의 구성비를 살펴보면 기준치 이상 건수의 경우 어린이집, 의료기관, 노인요양시설, 산후조리원 순으로 높았으며, 각각 190건, 22건, 15건 그리고 10건으로 나타났으며, 시설별 기준치 이상 값의 구성비의 경우 어린이집, 산후조리원, 노인요양시설, 의료기관 순으로 높았으며, 각각 0.69%, 0.53%, 0.20% 그리고 0.13%의 구성비를 나타내었다.

CO의 경우 21개 시설군에 대해 PC영업시설, 노인요양시설, 박물관, 실내주차장, 어린이집 그리고 의료기관에서 기준치 이상인 시설이 하나 이상 존재하는 것으로 나타났으며, 각각의 기준치 이상 건수는 2건, 2건, 1건, 3건, 2건 그리고 3건으로 조사되었다. 시설별 기준치 이상 값의 구성비의 경우 박물관에서 0.1%로 가장 높은 구성비를 나타내었다.

NO₂의 경우 21개 시설군에 대해 PC영업시설, 노인요양시설, 대규모점포, 목욕장, 산후조리원, 실내주차장, 어린이집, 의료기관에서 기준치 이상인 시설이 하나 이상 존재하는 것으로 나타났다. NO₂의 경우 기준치 이상 건수는 어린이집에서 68건으로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 높은 기준치 이상 건수는 의료기관에서 35건으로 조사되었다. 시설별 기준치 이상 값의 구성비는 산후조리원에서 1.15%로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 높은 구성비는 어린이집에서 0.49%로 조사되었

다.

Rn의 경우 21개 시설군에 대해 PC영업시설, 노인요양시설, 목욕장, 박물관, 산후조리원, 실내주차장, 어린이집, 영화상영관, 의료기관, 장례식장 그리고 지하역사에서 기준치 이상인 시설이 하나 이상 존재하는 것으로 나타났다. Rn의 경우 기준치 이상 건수는 어린이집에서 32건으로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 높은 기준치 이상 건수는 실내주차장에서 10건으로 조사되었다. 시설별 기준치 이상 값의 구성비는 박물관에서 0.78%로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 높은 구성비는 어린이집과 영화상영관에서 0.23%로 조사되었다.

TVOC의 경우 21개 시설군에 대해 PC영업시설, 노인요양시설, 대규모점포, 도서관, 목욕장, 박물관, 산후조리원, 실내주차장, 어린이집, 여객자동차터미널, 영화상영관, 의료기관, 장례식장, 전시시설, 지하도상가, 지하역사, 철도역사 그리고 학원에서 기준치 이상인 시설이 하나 이상 존재하는 것으로 나타났다. TVOC의 경우 기준치 이상 건수는 실내주차장에서 2,661건으로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 높은 기준치 이상 건수는 어린이집에서 312건으로 조사되었다. 시설별 기준치 이상 값의 구성비는 산후조리원에서 7.20%로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 높은 구성비는 지하도상가에서 5.97%로 조사되었다.

Mold의 경우 민감계층 이용시설에서만 측정이 이루어진 것으로 조사되었으며, 노인요양시설, 산후조리원, 어린이집, 의료기관의 모든 시설군에서 기준치 이상인 시설이 하나 이상 존재하는 것으로 나타났다. 각 시설별 기준치 이상 건수와 시설별 기준치 이상 값의 구성비를 살펴보면 기준치 이상 건수의 경우 어린이집, 노인요양시설, 의료기관, 산후조리원 순으로 높았으며, 각각 140건, 28건, 15건 그리고 1건으로 나타났으며, 시설별 기준치 이상 값의 구성비의 경우 어린이집, 노인요양시설, 의료기관, 산후조리원 순으로 높았으며, 각각 1.44%, 1.10%, 0.27% 그리고 0.16%의 구성비를 나타내었다.

다중이용시설별 오염물질 10종(PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, HCHO, TAB, CO, NO₂, Rn, TVOC, Mold)의 시설별 기준치 이상 구성비 차이 검정 결과는 Table 3에 제시하였으며, 다중이용시설별 오염물질의 기준치 이상 구성비 차이는 모든 시설 간에 통계적으로 유의한 차이를 나타낸 것으로 조사되었다(p<0.05).

3. 시설군별 기준치 이상 물질 검토

Table 4는 다중이용시설 자가측정 검사에 따른 다중이용시설별 기준치 이상 물질을 나타낸 것이다.

지하역사의 경우 PM₁₀, Rn 그리고 TVOC가 기준치 이상 물질로 조사되었으며, 지하역사의 경우 PM₁₀ 항목의 기준치 이상 값의 구성비가 가장 높게 나타난 것으로 조사되었다.

지하도상가와 철도역사 대합실의 경우 PM₁₀과 TVOC가 기준치 이상 물질로 조사되었으며, 지하도상가의 경우 PM₁₀ 항목

Table 4. Pollutants exceeding the standard by public-use facility

	Pollutants exceeding the standard									
	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO ₂	HCHO	TAB	CO	NO ₂	Rn	TVOC	Mold
Subway station	●							●	●	
Underground shopping center	●								●	
Bus terminal	●		●						●	
Airport facility										
Harbor facility										
Library	●		●	●					●	
Museum	●		●	●		●		●	●	
Gallery	●			●						
Medical facility	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Indoor parking	●		●	●		●	●	●	●	
Railway station	●								●	
Large store	●			●			●		●	
Day care center	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Elderly care center	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Funeral hall	●			●				●	●	
Steamroom	●		●	●			●	●	●	
Postpartum care center	●	●	●	●	●		●	●	●	●
Theater	●		●	●				●	●	
Academy	●		●	●					●	
Exhibition facility	●			●					●	
PC room	●		●	●		●	●	●	●	
Indoor sports facility										

● Exceeded standard at least once.

의 기준치 이상 값의 구성비가 가장 높게 나타났으며, 철도역사 대합실의 경우 TVOC 항목의 기준치 이상 값의 구성비가 가장 높게 나타났다.

여객자동차터미널 대합실의 경우 PM₁₀, CO₂ 그리고 TVOC가 기준치 이상 물질로 조사되었으며, CO₂ 항목의 기준치 이상 값의 구성비가 가장 높게 나타난 것으로 조사되었다.

민감계층 이용시설 중 의료기관, 어린이집, 노인요양시설의 경우 모든 오염물질이 기준치 이상 물질로 조사되었으며, 산후조리원의 경우 CO 항목을 제외한 물질이 기준치 이상 물질로 조사되었다. 의료기관, 어린이집, 노인요양시설의 경우 PM_{2.5} 항목의 기준치 이상 값의 구성비가 가장 높게 나타났으며, 산후조리원의 경우 TVOC의 기준치 이상 값의 구성비가 가장 높게 나타났다.

실내주차장과 PC영업시설의 경우 PM₁₀, CO₂, HCHO, CO, NO₂, Rn 그리고 TVOC가 기준치 이상 물질로 조사되었으며, 특히 실내주차장의 경우 TVOC의 기준치 이상 값의 구성비가 가장 높게 나타났으며, PC영업시설의 경우 PM₁₀ 항목의 기준치 이상 값의 구성비가 가장 높게 나타났다. 도서관과 학원의 경

우 PM₁₀, CO₂, HCHO 그리고 TVOC가 기준치 이상 물질로 조사되었으며, 두 시설 모두 TVOC의 기준치 이상 값의 구성비가 가장 높게 나타났다.

장례식장의 경우 PM₁₀, HCHO, Rn 그리고 TVOC가 기준치 이상 물질로 조사되었으며, 목욕장의 경우 PM₁₀, CO₂, HCHO, NO₂, Rn 그리고 TVOC가 기준치 이상 물질로 조사되었다. 두 시설 모두 TVOC 항목의 기준치 이상 값의 구성비가 가장 높게 나타났다.

미술관의 경우 PM₁₀, HCHO 항목이 기준치 이상 물질로 조사되었으며, 전시시설의 경우 PM₁₀, HCHO 그리고 TVOC가 기준치 이상 물질로 조사되었다. 미술관의 경우 HCHO 항목의 기준치 이상 값의 구성비가 가장 높게 조사되었으며, 전시시설의 경우 PM₁₀ 항목의 기준치 이상 값의 구성비가 가장 높게 조사되었다. 박물관의 경우 PM₁₀, CO₂, HCHO, CO, Rn 그리고 TVOC가 기준치 이상 물질로 조사되었으며, 특히 TVOC의 기준치 이상 값의 구성비가 가장 높게 나타났다.

또한, 공항시설 중 여객터미널과 항만시설 중 대합실의 경우 유지·권고기준의 기준치 이상 물질은 없는 것으로 조사되었다.

IV. 고찰

유해화학오염물질에 대한 노출과 건강위해는 실내공기질의 영향이 크다고 말할 수 있어, 수용체 중심의 환경관리 측면에서 실내공기질 관리를 비롯한 실내환경 관리의 중요성 및 필요성이 증대되고 있으나, 현재까지의 실내공기질의 관리는 매체 중심의 환경관리, 특히 대기환경 관리 관점의 연계 선상에서 이루어지고 있어 실내환경의 특성이 반영되지 못한 실정이다. 우리의 건강과 밀접한 실내공기질 개선을 위해서는 인체에 유해한 실내 공기오염에 대한 정밀한 노출평가뿐만 아니라, 이로 인한 인체 노출 용량 및 주요 실내 오염원을 결정하고, 특히 실내공기오염으로 인한 건강위해성 평가를 통해 주요 위해 요인을 결정하고 이를 바탕으로 개인 건강 증진 방안 및 예방 대책을 수립하는 것이 필요하다.⁷⁾ 이에 본 연구는 다중이용시설별 실내 공간 맞춤형 공기질 관리대책 마련 및 다중이용시설별 건강위해 관리에 대한 기초자료 제공을 위한 선행적 연구의 일환으로 자가측정으로 수행된 다중이용시설의 유지·권고기준 오염물질의 농도 분포 특성을 확인하고, 기준치 이상으로 조사된 유해화학오염물질에 대한 구성비 현황을 제시함으로써 향후 다중이용시설별 실내 공간 맞춤형 실내공기질을 관리방안 수립에 있어 기초적 자료를 제공하고자 수행되었다.

본 연구는 상기에서 제시한 것과 같이 선행적 연구이며, 또한 다중이용시설 실내공기질 자가측정 데이터를 활용한 연구로서 획득된 자료가 한정적인 한계점을 가지고 있으나 이를 극복하기 위해 2017년부터 2019년까지 측정된 자가측정 데이터를 통해 총 133,525개소 다중이용시설의 농도 분포 비교 및 기준치 이상 값의 구성비 현황을 분석하여 연구에 활용하였다. 현재 다중이용시설의 실내공기질 유지 및 관리는 환경부에서 정하고 있는 「실내공기질 관리법」에 따라 이루어지고 있으나, 다중이용시설 유형에 따라 주요 시설 이용자의 특성이 달라질 것으로 예상되며 이에 따른 다중이용시설별 시설 이용자의 건강위해를 관리하는 기술 또한 달라져야 할 것으로 사료된다. 그러나 현재 국내 다중이용시설별 실내 공간 맞춤형 실내공기질 관리방안 수립을 위한 연구는 전무한 실정으로 다중이용시설별 존재하는 유해화학오염물질의 종류, 농도 분포 특성 및 기준치 이상 값의 구성비 현황을 분석함으로써 향후 관련 연구에 본 연구에서 획득된 결과가 기초적 자료로서의 활용 가능성이 클 것으로 기대된다.

국내 환경부의 「실내공기질 관리법」에 따른 다중이용시설 내 유지·권고기준 유해화학오염물질인 PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, HCHO, TAB, CO, Rn, TVOC와 Mold의 각 시설별 평균 농도는 모두 현 기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 이들 농도는 다중이용시설의 자가측정 결과로, 다중이용시설 실내공기질 자가측정의 경우 유지기준 항목에 대해서는 1년에 1회, 권고기준 항목에 대해서는 2년에 1회 측정된 결과라는 한

계점을 가지고 있다. 또한, PM_{2.5}, TAB, Mold 항목의 경우 민감계층 이용시설인 의료기관, 산후조리원, 노인요양시설, 어린이집 시설에서만 자가측정이 이루어진 것으로 조사되었다. 따라서 다중이용시설 실내공기질 실태조사 연구에 대한 확대가 요구되는 실정이다.

Lee et al. (2010)¹⁵⁾ 연구에 따르면 지하철 승강장에서 PM₁₀의 주요 오염원은 철 관련오염원, 토양 및 도로 비산 먼지 관련 오염원, 미세 이차분진 등 3가지 오염원인 것으로 조사되었다. 또한, Lee et al. (2015)¹⁶⁾ 연구에 따르면 역사 내 PM₁₀ 농도가 높은 것은 지하철 터널에서 생성된 큰 입자의 영향을 받았기 때문이라고 설명하였다. 지하역사 시설의 오염물질 기준치 이상 값의 구성비를 살펴보면 PM₁₀의 기준치 이상 값의 구성비는 5.53%로 가장 높게 나타났다. 이런 결과는 역사 내 PM₁₀ 농도가 높은 것은 지하철 터널에서 생성된 큰 입자의 영향을 받았기 때문이라고 설명 가능하며, 즉, 지하철이 역사에 정차하여 출입문이 개폐될 때 열차풍에 의해 지하터널이나 선로 내부로부터 미세먼지가 재비산하여 승강장 미세먼지 농도가 나타난 것으로 사료된다. 이러한 영향 외에도 미세먼지는 불충분한 공기교환 횟수와 부적절한 환기시스템 관리와 같은 문제로도 미세먼지 농도를 증가시키는 원인이 될 수 있기 때문에 적절한 환기시스템 관리가 중요하다.¹⁴⁻¹⁶⁾

CO₂는 그 자체로 인체 건강에 영향을 미치는 물질은 아니나 일반적인 실내오염의 주요 지표로 이용되며, 주요 발생원으로는 인간의 대사 작용에 의해 생성되는 물질로 호흡기로 배출되면서 생성되거나 연료가 연소되면서 생성되는 물질로 알려져 있다.¹⁷⁾ 본 연구에서 CO₂의 기준치 이상 값의 구성비를 살펴보면 여객자동차터미널, 도서관, 박물관, 영화상영관, 학원, PC영업시설, 목욕장, 의료기관, 어린이집에서 기준치 이상 값의 구성비는 높지는 않았으나, 기준치 이상인 시설이 존재하는 것으로 나타났다. CO₂의 평균농도를 살펴보면 산후조리원, 어린이집, 의료기관, PC영업시설에서 타 시설 대비 높은 농도를 나타내었으며, 이는 Choi et al. (2020)¹⁸⁾ 연구와 유사한 결과를 나타내고 있다. 이러한 결과는 해당 시설의 특성상 시설 규모 대비 이용자의 밀집도가 높고, 상대적으로 자연환기가 어려운 시설의 특성이 반영된 결과로 판단된다. 최근 고농도 미세먼지 발생에 따른 시설별 공기청정설비 도입이 증가함에 따라 환기 횟수가 감소할 개연성이 있으므로, 주기적인 환기의 필요성을 지속적으로 홍보할 필요가 있다고 사료된다.¹⁸⁾

HCHO의 경우 일반적으로 건축자재, 세정제, 접착제에 이용되는 화학성분으로써 실내환경에서 발생원으로는 최근 증축되고 있는 건물 내 단열재, 카페트, 파티클보드 등을 들 수 있다.¹²⁾ 본 연구에서 HCHO의 경우 산후조리원, 박물관, 전시시설에서 높은 기준치 이상 값의 구성비를 나타냈는데, 이는 시설의 용도상 진열상품 및 전시를 위한 잦은 공사 등이 주요 원인인 것으로 볼 수 있으며,¹⁸⁾ 이는 Park et al. (2017)¹⁷⁾ 연구의

결과와 유사한 것으로 조사되었다. 산후조리원의 경우 자연환기설비의 부족, 신생아의 빠른 회복을 위한 높은 온·습도의 유지로 인해 침대, 싱크대, 수납장 등의 가구로부터의 포름알데히드 방출, 신생아의 건강 상 적정 온도범위 유지를 위한 환기량의 최소화가 주요 원인으로 보고된 바 있다.¹⁹⁾ HCHO의 기준치 이상 값의 구성비가 높은 시설의 경우 민감계층이 주로 이용하는 시설임에 따라 HCHO가 방출될 우려가 있는 건축자재, 장식품, 소독제의 사용유무 등에 대한 조사가 추가적으로 이루어진 합리적인 관리방안 도출이 이루어져야할 것으로 사료된다.¹⁷⁾

TVOC의 경우 항만시설, 공항시설, 전시시설을 제외한 모든 시설에서 기준치 이상 건수가 있는 것으로 나타났다. 다중이용시설은 자동차 및 상가 내 각종 진열대에서 진열되어 있는 생활용품 등 휘발성유기화합물의 발생원이 다수 존재하는 특성을 가지고 있으며, 환기 등이 원활히 이루어지지 않아 실내 휘발성유기화합물의 기준치 이상 건수가 많이 나타난 것으로 여겨진다.⁵⁾ 또한, 본 연구 조사 결과 대부분의 다중이용시설에서 TVOC의 기준치 이상 건수가 많은 것으로 보아 다중이용시설의 TVOC 관리가 이루어질 필요가 있으며, 발생량을 줄이기 위해서는 친환경건축자재로서 인증된 건축자재를 사용하도록 하고, 잘 이행하고 있는지 사용자나 관리자가 중간점검을 하여 친환경제품을 사용하도록 지도해야 한다고 사료된다.²⁰⁾

또한, PM_{2.5}로 인한 건강영향에 대한 국민들과 언론의 관심이 고조되고 있어 국민 건강 증진을 위한 미세먼지의 체계적 관리정책 수립이 필요성이 증대되고 있는 실정으로, 이에 따른 2018년 1월 1일부터 PM_{2.5} 항목이 「실내공기질 관리법」에 추가되어 기준 이하로 유지되도록 규정하고 있다. 본 연구의 PM_{2.5} 항목은 민감계층 이용시설인 의료기관, 산후조리원, 노인요양시설, 어린이집에서만 측정되었으며, 모든 시설에서 기준치 이상의 경우가 있는 것으로 조사되었다. PM_{2.5} 항목의 시설별 기준치 이상 값의 구성비를 살펴보면 각각 의료기관에서 6.71%, 산후조리원에서 4.60%, 노인요양시설에서 5.14% 그리고 어린이집에서 7.36%로 조사되었다. 또한, 민감계층 이용시설의 기준치 이상 오염물질을 살펴보면 의료기관, 노인요양시설, 어린이집 시설에서는 유지·권고기준 10종 오염물질이 기준치 이상 물질로 조사되었으며, 산후조리원 시설의 경우 유지·권고기준 오염물질 중 CO를 제외한 9종의 오염물질이 기준치 이상 물질로 조사된 것을 확인할 수 있었다. 다중이용시설 중 민감계층 이용시설의 경우 실내공기오염에 의한 건강영향의 가능성은 수용체별로 다양한 양상을 갖게 되는데 그 중 노인, 영·유아, 어린이, 환자, 임산부 등과 같이 환경보건학적으로 약자인 민감집단은 일반 성인에 비하여 더욱 민감할 수 있어 「실내공기질 관리법」에서는 민감계층 이용시설에 대해서는 오염물질에 대해 더욱 엄격한 공기질 기준을 설정하여 관리하고 있다. 이에 관리기준이 더욱 엄격한 민감계층 이용시설의 경우 다른 다중

이용시설보다 기준치 이상인 오염물질 개수가 더 많이 조사된 것으로 사료된다.

CO는 난방, 주방 연료 등의 불완전연소와 흡연, 자동차 등으로부터 주로 발생하는 것으로 알려져 있으며,⁶⁾ NO₂는 고온 연소의 부산물로서 차량, 발전소 및 산업공정에서 주로 발생되며, 실내에서는 가스렌지, 케로센(Kerosene) 난방기, 흡연 등과 같은 연소과정에서 발생된다.²¹⁾ 본 연구에서 CO와 NO₂의 경우 타 오염물질에 비해 기준치 이상 값의 구성비가 낮은 것으로 조사되었으며, 이와 같은 결과는 공공장소와 다중이용시설 특성상 실내 연소과정이 발생하지 않으며, 시설 내 금연을 지정하거나 별도의 흡연 장소를 설치하는 등 발생원에 대한 대책이 수립됨에 따른 결과인 것으로 사료된다.

본 연구는 다중이용시설 내 자가측정을 통한 농도 분포 분석 및 기준치 이상 값의 구성비 현황을 평가한 연구로 몇 가지 제한점이 있다. 첫째, 다중이용시설 내 실내공기질을 연속적으로 측정할 데이터가 아닌 유지기준의 경우 1년에 한 번, 권고기준의 경우 2년에 한 번 측정된 데이터로서 각 시설을 대표할 수 있을 만큼의 충분한 기간과 시료수가 아니라고 판단되며 해당 시설의 농도 수준을 대표할 수가 없다고 사료된다. 둘째, 2017년부터 2019년에 측정된 다중이용시설의 자가데이터를 활용하였으나 실내 농도와 실외 농도를 동시에 측정하여 비교하지 못하였다. 또한, 온도, 습도, 시설 부피와 같은 환경요인 자료를 함께 고려하여 측정농도 값과 비교하지 못하였다. 그러나 본 연구는 다중이용시설 133,525개소 측정 결과에 대해 평가 및 분석하였기 때문에 각 시설별 농도 수준을 알 수 있는 근거가 되는 기초 자료로 활용될 수 있다.

따라서 이와 같은 연구결과는 실내공기질 개선을 위한 실내 공간별 노출 및 이용 특성, 실내공기 오염물질 발생원 및 오염물질 특성, 실외공기의 영향 정도에 대한 고려에 대해 유용하게 활용될 수 있으며, 또한 최종적으로 인체에 유해한 영향을 야기할 수 있는 원인들을 규명하고, 이들을 제어하여 시설 이용자의 건강위해를 관리하는 기술 개발 연구의 선도적 역할을 수행하였다는 의미에서 본 연구결과가 어느 정도 의미를 가질 수 있다고 판단된다.

V. 결 론

본 연구는 다중이용시설별 실내 공간 맞춤형 공기질 관리 및 다중이용시설별 건강 위해 관리에 대한 기초자료를 제공을 위한 선행연구의 일환으로 수행되었으며, 2017년부터 2019년까지 다중이용시설의 자가측정 데이터에 따른 시설별 유해화학 오염물질 농도분포 조사 및 기준치 이상 값의 구성비 현황 분석 결과를 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하여 제시하면 다음과 같다.

1. 국내 다중이용시설 실내공기질 유지·권고기준 물질인

PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, HCHO, TAB, CO, NO₂, Rn, TVOC, Mold 총 10개 항목을 조사한 결과 조사대상 시설에서의 각각의 평균 농도는 55.3±26.6 µg/m³, 18.2±11.6 µg/m³, 613.7±144.9 ppm, 21.4±18.1 µg/m³, 339.8±205.2 CFU/m³, 1.5±3.9 ppm, 0.02±0.08 ppm, 30.5±22.1 Bq/m³, 193.6±260.3 µg/m³, 194.2±166.9 CFU/m³으로 나타났으며, 다중이용시설별 오염물질의 평균 농도 차이 검정 결과 다중이용시설별 오염물질 10종의 농도 차이는 모든 시설 간에 통계적으로 유의한 차이를 보이는 것으로 조사되었다(p<0.05). 이와 같은 결과는 다중이용시설별 재실자의 특성, 건물 용도 그리고 이용자들의 행동 패턴에 따라 시설별 오염물질에 대해 유의한 차이를 보이는 것으로 사료되며, 따라서 다중이용시설별 실내 공간 맞춤형 관리가 필요하다고 판단된다.

2. 다중이용시설별 기준치 이상 값의 구성비 분석 결과, 각 유해화학오염물질별 기준치 이상 값의 구성비가 가장 높은 시설은 PM₁₀은 철도역사 대합실(8.93%), PM_{2.5}는 어린이집(7.36%), CO₂는 여객자동차터미널(2.37%), HCHO는 산후조리원(4.11%), TAB는 어린이집(0.69%), CO는 박물관(0.1%), NO₂는 산후조리원(1.15%), Rn은 박물관(0.78%), TVOC는 산후조리원(7.20%) 그리고 Mold는 어린이집(1.44%)에서 기준치 이상 값의 구성비가 가장 높은 것으로 조사되었으며, 다중이용시설별 오염물질의 기준치 이상 값의 구성비 차이는 모든 시설 간에 통계적으로 유의한 차이를 나타낸 것으로 조사되었다(p<0.05).

3. 다중이용시설별 기준치 이상 물질 분석 결과, 각 시설별 기준치 이상인 유해화학오염물질은 지하역사(PM₁₀, Rn, TVOC), 지하도상가(PM₁₀, TVOC), 여객자동차터미널(PM₁₀, CO₂, TVOC), 공항시설(기준치 이상 물질 없음), 항만시설(기준치 이상 물질 없음), 도서관(PM₁₀, CO₂, HCHO, TVOC), 박물관(PM₁₀, CO₂, HCHO, CO, Rn, TVOC), 미술관(PM₁₀, HCHO), 의료기관(PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, HCHO, TAB, CO, NO₂, Rn, TVOC, Mold), 실내주차장(PM₁₀, CO₂, HCHO, CO, NO₂, Rn, TVOC), 철도역사(PM₁₀, TVOC), 대규모점포(PM₁₀, HCHO, NO₂, TVOC), 어린이집(PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, HCHO, TAB, CO, NO₂, Rn, TVOC, Mold), 노인요양시설(PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, HCHO, TAB, CO, NO₂, Rn, TVOC, Mold), 장례식장(PM₁₀, HCHO, Rn, TVOC), 목욕장(PM₁₀, CO₂, HCHO, NO₂, Rn, TVOC), 산후조리원(PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, HCHO, TAB, NO₂, Rn, TVOC, Mold), 영화상영관(PM₁₀, CO₂, HCHO, Rn, TVOC), 학원(PM₁₀, CO₂, HCHO, TVOC), 전시시설(PM₁₀, HCHO, TVOC), PC영업시설(PM₁₀, CO₂, HCHO, CO, NO₂, Rn, TVOC) 그리고 실내주차장(기준치 이상 물질 없음)으로 조사되었다.

4. CO와 NO₂의 경우 타 오염물질에 비해 기준치 이상 값의 구성비는 낮은 것으로 조사되었으며, 이와 같은 결과는 CO와

NO₂는 연소과정에 의해 발생하는 것으로 알려져 있으나, 공공 장소와 다중이용시설 특성상 실내 연소과정이 발생하지 않으며, 시설 내 금연을 지정하거나 별도의 흡연 장소를 설치하는 등 발생원에 대한 대책이 수립됨에 따른 결과인 것으로 사료된다.

이상의 결과를 통해 다중이용시설별 유해화학오염물질의 농도분포 및 기준치 이상 값의 구성비 현황을 확인할 수 있었으며, 다중이용시설별 실내 공간 맞춤형 공기질 관리가 필요함을 확인할 수 있었다. 본 연구는 유지기준에 대해서는 1년에 1회, 권고기준에 대해서는 2년에 1회로 단기간에 수행된 자가측정 결과임에 따라 불확실성이 발생될 수 있으나, 다중이용시설별 기준치 이상 물질을 검토하였으며, 향후 다중이용시설별 실내 공간 맞춤형 실내공기질을 관리방안 수립에 있어 기초적 자료를 제공하였다는데 큰 의미를 가진다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국환경공단의 「실내공기질 측정망 중장기 운영 계획 수립」 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 대기환경 관리기술 사업화 연계 기술개발사업(No. 2021003400008)으로 진행되었으며 이에 감사드립니다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. Yee JJ, Kim SK, Choi SY. A field survey on the indoor air quality of newly built schools in Busan. *J Archit Inst Korea*. 2005; 21(6): 175-182.
2. Kim TW, Kim HT, Hong WH. A study on the measurement and evaluation of indoor air quality in school. *J Archit Inst Korea*. 2006; 22(4): 301-308.
3. Kim YS. Sustainable development of indoor air quality management. *Indoor Environ Technol*. 2004; 1(1): 1-11.
4. Kim YS, Roh YM, Lee CM, Jang BK. Health risk assessment of exposure to indoor air pollutants in house. *Indoor Environ Technol*. 2006; 3(2): 180-198.
5. Kim YS, Roh YM, Lee CM, Kim KY, Kim JC, Jun HJ. Pattern classification of volatile organic compounds in various indoor environment. *J Environ Health Sci*. 2007; 33(1): 49-56.
6. Lee SH, Jeong SK, Lee KS, Min KW, Kim HS, Kim DS, et al. A study on characteristics of indoor air pollutants using regression analysis in public facilities. *J Environ Anal Health Toxicol*. 2013; 16(2): 123-131.

7. Lim YW. Health risk assessment of indoor pollutants. *J Korean Soc Environ Eng.* 2007; 29(5): 502-511.
8. Bae JH. An exploratory research on social workers' attitude and related factors about indoor air quality management of social welfare facilities. *J Korea Contents Assoc.* 2017; 17(5): 273-284.
9. Kim DJ, Jang HN. Evaluation of indoor air quality of vulnerable class facility in public-use facility. *J Korean Soc Environ Adm.* 2019; 25(2): 49-56.
10. Seo BR, Jeong MH, Jeon JM. Indoor air quality in various type of public facilities at Honam province. *J Environ Health Sci.* 2006; 32(5): 387-397.
11. Seo BR, Jeong MH, Jeong KH, Jeon JM. A study of indoor air quality (IAQ) in the public facilities. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2005;55-56.
12. Lee CM, Kim YS. Analysis of research trend for indoor air pollutants and health risk assessment in public facilities. *Indoor Environ Technol.* 2004; 1(1): 39-60.
13. Jeon HJ, Kim DY, Han KJ, Kim DW, Son SW, Lee CM. An analysis of indoor environment research trends in Korea using topic modeling: case study on abstracts from the Journal of the Korean Society for Indoor Environment. *J Odor Indoor Environ.* 2018; 17(4): 322-329.
14. Kim KH, Ho DX, Jeon JS, Kim JC. A noticeable shift in particulate matter levels after platform screen door installation in a Korean subway station. *Atmos Environ.* 2012; 49: 219-223.
15. Lee TJ, Jeon JS, Kim SD, Kim DS. A comparative study on PM10 source contributions in a Seoul metropolitan subway station before/ after installing platform screen doors. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2010; 26(5): 543-553.
16. Lee TJ, Lim HJ, Kim SD, Park DS, Kim DS. Concentration and properties of particulate matters (PM10 and PM2.5) in the Seoul metropolitan. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2015; 31(2): 164-172.
17. Park TH, Kim KR, Kwon SM, Eo SM, Shin JH, Jung K, et al. Distribution characteristics of pollutants in facilities for medically sensitive users in Seoul. *J Odor Indoor Environ.* 2017; 16(4): 345-355.
18. Choi HJ, Kim YM, Lee BK. Suggestions for management of indoor air quality in public facilities- focusing on national policy and current status. *J Odor Indoor Environ.* 2020; 19(2): 101-110.
19. Jung SD, Kim TW, Jang SL, Kim SH, Lee SJ. Indoor environment of infant units in postnatal care center- focus on indoor air quality by types of wooden furniture and intensity of illumination by arrangement of lights. *J Korea Furnit Soc.* 2013; 24(1): 33-41.
20. Lee DH, Lee SH, Bae SJ, Kim NH, Park KS, Kim DS, et al. The concentration of indoor air quality and correlations of materials at multiple-use facilities in Gwangju. *J Korean Soc Environ Eng.* 2010; 32(11): 1001-1010.
21. Jung SW, Yang WH, Son BS. Health risk assessment by potential exposure of NO2 and VOCs in apartments. *J Environ Health Sci.* 2007; 33(4): 242-249.

〈저자정보〉

전정인(대학원생), 이혜원(대학원생), 최현진(부연구위원),
전형진(초빙연구원), 이철민(교수)