



국내 다양한 미소환경에서의 계절별 초미세먼지 및 오존 실내·외 농도 비

김지수¹ , 곽수영¹ , 이기영^{1,2*} ¹서울대학교 보건대학원 환경보건학과, ²서울대학교 보건환경연구소

Seasonal Indoor-to-Outdoor Ratio (I/O Ratio) of Fine Particulate Matter and Ozone Concentrations in Various Microenvironments in South Korea

Ji Soo Kim¹, Sooyoung Guak¹, and Kiyoung Lee^{1,2*}¹Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University, ²Institute of Health and Environment, Seoul National University

ABSTRACT

Background: Exposure to fine particulate matter (PM_{2.5}) and ozone (O₃) poses potential health risks. The Indoor-to-Outdoor ratio (I/O ratio) is a valuable tool for understanding indoor air quality and identifying potential indoor sources.

Objectives: The objective of this study was to determine I/O ratios of PM_{2.5} and O₃ by different microenvironments and seasons in Korea.

Methods: From December 2021 to November 2023, indoor concentrations of PM_{2.5} and O₃ were monitored every hour in 13 microenvironments (residential indoor, office, school, restaurant, pub, café, study café, private educational institute, PC room, billiard room, screen golf center, supermarket, and shopping mall) in Korea. Hourly outdoor concentrations of PM_{2.5} and O₃ were obtained from local air quality monitoring stations, provided by airkorea.or.kr. The hourly I/O ratio was calculated by the indoor and outdoor concentrations.

Results: At the pub, billiard room, and PC room, the median PM_{2.5} I/O ratio exceeded 1 in all seasons, except in spring at the PC room (0.9), suggesting indoor smoking as a potential cause. The median PM_{2.5} I/O ratio at the restaurant exceeded 1 in winter, autumn, and summer, except for spring (0.9), indicating significant PM_{2.5} emission sources in the restaurant. The median O₃ I/O ratio was below 0.5 in all seasons and microenvironments.

Conclusions: This study provided useful data on relationships between indoor and outdoor pollution in various microenvironments by seasons. These I/O ratios could be applied for more accurate exposure assessment to protect health of human.

Key words: PM_{2.5}, O₃, I/O ratio, microenvironment

Received August 1, 2024

Revised August 18, 2024

Accepted August 22, 2024

Highlights:

- The I/O ratios of PM_{2.5} and O₃ in 13 microenvironments in Korea were investigated by season and time of day.
- Median PM_{2.5} I/O ratios in pubs, billiard rooms, and PC rooms exceeded 1 in all seasons except spring in PC rooms.
- Median PM_{2.5} I/O ratio in restaurants exceeded 1 in all seasons except spring, indicating emissions.
- Median O₃ I/O ratios were below 0.5 across all microenvironments and seasons.

*Corresponding author:

Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea
Tel: +82-2-880-2735
Fax: +82-2-762-2888
E-mail: cleanair@snu.ac.kr

I. 서론

대부분의 사람들은 다양한 실내 공간에서 하루 중 약 90%의 시간을 보내기 때문에,^{1,2)} 실내 공기오염물질의 농도는 개인의 노출과 관련하여 지배적인 위험 요소가 될 수 있다. 실내는 밀폐된 공간이기 때문에 환기가 제대로 이루어지지 않으면 실내 공기오염물질의 농도가 축적되어 그 정도가 실외 대기오염보다 2~5배 이상 높아지고 그에 따른 건강상 악영향을 초래한다.³⁾ 실내 공기오염은 호흡기 및 심혈관 질환, 암 등 다양한 건강 문제와 직접적으로 연관되어 있으며,⁴⁾ 세계보건기구(WHO)에 따르면, 실내 공기오염은 매년 수백만 명의 조기 사망 원인이 되고 있다.⁵⁾

주요 공기오염물질 중 초미세먼지(Particulate matter with an aerodynamic diameter of $<2.5 \mu\text{m}$, $\text{PM}_{2.5}$)와 오존(O_3)은 장시간 노출되는 경우 인체에 건강상 위해를 가한다. $\text{PM}_{2.5}$ 는 흡입 시 호흡기 및 심혈관 질환, 그리고 사망률에 대한 건강상 악영향과 유의하게 연관되어 있으며,^{6,7)} 실외로부터 환기 기류에 의해 유입되거나 실내 조리 및 난방활동으로 인한 연소에 의해 생성될 수 있다.⁸⁾ O_3 의 노출은 호흡기 및 순환기계 사망 위험에 기여하며,⁹⁾ 실외에서 유입되거나 레이저 프린터, 전기 집진 공기 청정기 등 제품의 코로나 방전에 의해 실내에서 직접적으로 발생하기도 한다.¹⁰⁾ 이처럼 실내 $\text{PM}_{2.5}$ 와 O_3 의 농도는 재실자의 활동에 따라 각 실내 미소환경에서 오염 수준이 상이하다.

실내·외 $\text{PM}_{2.5}$ 와 O_3 는 계절별 요인에 따라 농도가 변화한다. $\text{PM}_{2.5}$ 는 겨울철 난방 연료 연소와 대기 역전 현상, 봄철 황사로 인하여 겨울, 봄 계절에 농도가 높은 경향을 보인다.^{11,12)} O_3 은 대기 중 질소산화물(NO_x)과 휘발성유기화합물(Volatile organic compounds, VOCs)이 자외선에 의해 광화학반응을 일으켜 생성되는 2차 오염물질로, 햇빛이 강한 봄철과 여름철에 농도가 증가하고 겨울철에는 감소하는 경향을 보인다.¹³⁾ 한국의 사계절은 기상 조건이나 인간 활동에 따라 $\text{PM}_{2.5}$ 와 O_3 의 실외 농도에 영향을 줄 수 있으며, 실내 농도도 이에 따른 변화가 발생할 수 있다. 따라서 $\text{PM}_{2.5}$ 와 O_3 의 실내·외 농도의 평가는 계절적 요인을 고려하여 이루어져야 한다.

일반적으로 실내 공기오염은 오염된 실외 공기의 실내 유입과 실내 오염원에 따른 직접 오염에 의해 발생하기 때문에, 실내공기질 평가를 위해서는 실내·외 오염관계의 지표인 실내·외 농도 비(Indoor-to-Outdoor ratio, I/O ratio)가 고려되어야 한다. 선행 연구에서는 이러한 I/O ratio를 활용하여 국가대기측정망에서 측정된 실외 공기오염물질의 농도를 통해 직접 측정이 어려운 미소환경에서의 실내 농도를 추정하고자 모델링을 사용하였으나, 대부분 제한된 미소환경에서 단기간 조사에 근거하여 단편적인 I/O ratio 평균값을 적용해 평가하였다는 한계점이 존재한다.^{14,15)} 실내공기질 평가의 정확성을 높이기 위해서는 시공간적으로 상세한 I/O ratio의 장기 조사 및 그 분포의 적용이

필요하다.

대기환경기준물질 중 $\text{PM}_{2.5}$ 와 O_3 은 인체 악영향과 미소환경별 실내 오염원의 차이를 고려할 때, 실내·외 오염관계의 규명이 요구되는 물질이다. 실외 오염 공기의 실내 유입은 건물의 특성과 계절적 요인에 따라 변화하고, 실내 공기 오염원의 특성은 미소환경에 따라 상이하므로, 한국에서의 계절별 I/O ratio를 다양한 미소환경에서 상세히 살펴볼 필요가 있다. 본 연구는 2년간 국내 13개 미소환경에서의 계절에 따른 $\text{PM}_{2.5}$ 와 O_3 의 I/O ratio를 확인하고, 이를 통해 실내·외 오염의 동태를 이해하는 것을 목표로 한다.

II. 재료 및 방법

1. 측정 기간 및 장소

2021년 12월부터 2023년 11월까지 2년 동안 서울, 대구, 경기 지역에서 13개 미소환경에서의 $\text{PM}_{2.5}$ 와 O_3 의 실내 농도를 측정하였다. 계절은 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월), 겨울(12~2월)로 구분하였고, 13개 미소환경은 각각 (i) 가정집, (ii) 사무실, (iii) 학교, (iv) 식당, (v) 호프집, (vi) 카페, (vii) 스터디카페, (viii) 학원, (ix) PC방, (x) 당구장, (xi) 스크린골프장, (xii) 대형마트, (xiii) 쇼핑몰로 구분하였다. 선행 연구에 근거하여, 24시간 중 약 70% 이상의 시간을 머무르는 미소환경인 '가정집'과 약 32% 이상의 시간을 머무르는 '학교/사무실', 조리활동으로 인해 실내 오염원이 뚜렷한 '식당'을 '주 미소환경'으로 분류하였고,¹⁶⁾ 식당 외 취식장소로 '호프집', '카페', 학습활동 장소로 '스터디카페', '학원', 여가활동 관련 장소로 'PC방', '당구장', '스크린골프장', 쇼핑장소로는 '대형마트', '쇼핑몰'을 '기타 미소환경'으로 구분하였다. 측정시간은 사람들의 실내활동과 재실여부를 고려하여 '주 미소환경'은 24시간 동안, '기타 미소환경'은 운영시간 내 6시간 동안 측정하였다.

지역별 총 측정 횟수는 서울 291회, 대구 110회, 경기 74회 측정을 진행하였고, 미소환경별 총 측정 횟수는 가정집 85회, 사무실 70회, 학교 70회, 식당 70회, 호프집 20회, 카페 19회, 스터디카페 22회, 학원 19회, PC방 21회, 당구장 20회, 스크린골프장 20회, 대형마트 19회, 쇼핑몰 20회 측정하였다. 측정 위치는 각 미소환경의 공간을 대표할 수 있는 중앙 지점 약 1.2 m 높이에서 측정하고자 하였으며, 미소환경 이용자의 편의를 고려하여 측정하였다. 장시간 측정을 위해 전기 공급이 원활한 위치로 선정하였고, 미소환경 내 공기오염물질 주요 발생원이 있는 경우에는 발생원의 직접적인 영향을 받지 않도록 측정하였다.

2. 공기오염물질 농도

실내 미소환경에서의 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도는 실시간 레이저 광도계(SidePak AM520, TSI, USA)로 측정하였다. SidePak AM520의

측정 범위는 1~100,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최소 분해능은 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 검출 한계(Limit of detection, LOD)는 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. SidePak AM520로 측정된 모든 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도는 선행된 중량법과의 비교 실험에 따라 0.3의 보정 계수로 조정되었다.¹⁷⁾ 각 측정 전에 SidePak AM520의 내부 디스크 임팩터의 영점 보정 및 관리는 공급업체의 지침에 따라 수행되었다. 본 연구에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도를 1.7 L/min의 유량으로 1분 간격으로 측정하였다. O_3 의 농도는 휴대용 오존 모니터(Personal Ozon Monitor, POM, 2B Technologies, USA)로 측정하였다. POM은 O_3 의 농도를 미국 환경보호국의 연방 등가 방법(FEM: EQOA-0815-227)으로 측정하며, 장치의 측정 범위는 0~10,000 ppb, 최소 분해능은 0.1 ppb이고, LOD 값은 3.0 ppb이다. 본 연구에서는 O_3 의 농도를 0.8 L/min의 유량으로 1분 간격으로 측정하였다.

실외 $\text{PM}_{2.5}$ 와 O_3 의 시간당 농도는 환경부 산하 한국환경공단의 에어코리아 사이트(www.airkorea.or.kr)에서 측정 장소의 동일 자치구를 기준으로 도시대기측정망 자료를 다운받아 확보하였다(Supplementary Table 1). 도시대기측정망에서 $\text{PM}_{2.5}$ 의 실외 농도는 β -선 흡수법(No. ES 01606.2b), O_3 의 실외 농도는 자외선 흡수법(No. ES 01607.1a)을 기반으로 1시간 간격으로 측정된다. 도시대기측정망에서 측정값의 품질 보증/품질 통제(Quality assurance/quality control, QA/QC)는 매주 실시되며, 유효한 데이터는 한국 환경부가 발행한 국가 QA/QC 운영 지침에 따라 선택되었다.

3. 자료 처리 및 통계 분석

측정된 $\text{PM}_{2.5}$ 와 O_3 의 분당 실내 농도는 LOD 미만의 값을 모두 $1/2 \times \text{LOD}$ 로 같음하였고, 실외 농도의 시간 해상도에 따라 1시간 평균으로 계산하였다. 시간당 평균 실내 농도를 계산하기 위해, 각 시각(hh)시의 전 60분간, 즉 (hh-1)시 01분부터 (hh)시 00분까지의 60개 분당 데이터 평균값을 사용하였다. 1시간 동안의 데이터 개수가 60개 미만인 경우 해당 시간의 데이터는 평균 계산에서 제외하였으며, 이에 따라 24시간 측정 데이터는 23개, 6시간 측정 데이터는 5개의 시간당 평균 데이터가 도출되었다.

$\text{PM}_{2.5}$ 와 O_3 의 시간당 I/O ratio 값은 동시간대의 시간당 실내·외 농도를 통해 계산하였으며, 산출식은 아래와 같다.

$$\text{I/O ratio} = \frac{C_{in}}{C_{out}}$$

C_{in} 은 미소환경에서의 시간당 평균 실내 농도를, C_{out} 은 도시 대기측정망의 시간당 실외 농도를 의미한다.

미소환경별 $\text{PM}_{2.5}$ 와 O_3 의 실내 농도와 I/O ratio는 미소환경별 특정 장소(예: 가정집 A, 가정집 B 등)에서 수집된 2년 동안의 시간당 데이터의 평균값을 구하여, 해당 평균값들의 미소환경별 중앙값을 확인하였다. 미소환경-계절별 $\text{PM}_{2.5}$ 와 O_3 의 실

내 농도와 I/O ratio는 주 미소환경의 경우 23시간의 평균, 기타 미소환경의 경우 5시간 평균을 통해 산출한 일평균 및 일일 운영시간 평균 데이터를 기반으로, 미소환경-계절별 중앙값을 확인하였다. 미소환경-계절-시간대별 $\text{PM}_{2.5}$ 와 O_3 의 I/O ratio는 시간당 데이터를 통해 미소환경-계절-시간대별 중앙값을 확인하였다. 분포의 정규성은 데이터의 개수(n)에 따라 Kolmogorov-Smirnov test ($n \geq 50$)와 Shapiro-Wilk test ($n < 50$)로 확인한 결과, 미소환경별, 미소환경-계절별, 미소환경-계절-시간대별 $\text{PM}_{2.5}$ 와 O_3 의 실내 농도와 I/O ratio의 분포가 대부분 정규 분포를 나타내지 않았으므로($p < 0.001$), 본 연구에서는 중앙값을 사용하여 평가하였다. 등분산 검정을 Levene's test로 실시한 결과, 대부분 등분산을 만족하지 못하여, $\text{PM}_{2.5}$ 와 O_3 의 미소환경에 따른 실내 농도와 I/O ratio의 차이는 Kruskal-Wallis test를

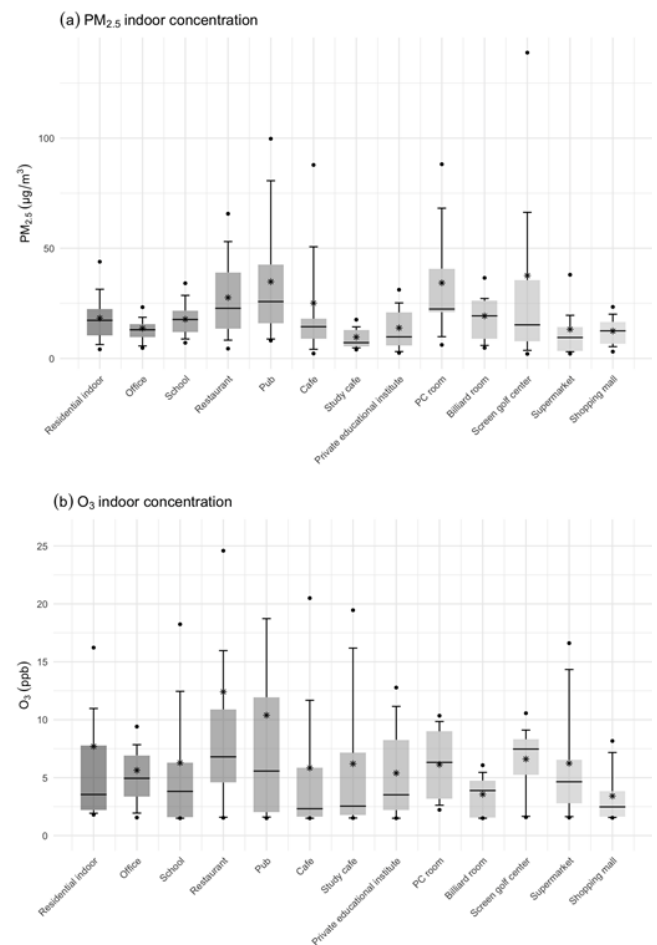


Fig. 1. Distribution of indoor (a) $\text{PM}_{2.5}$, (b) O_3 concentration across various microenvironments. Mean and median are represented by the asterisk and plain line in the box. Box limits represent the 25th and 75th percentiles. The whiskers extend to the 10th and 90th percentiles. Circles above the 90th percentile represent the 95th percentile, and circles below the 10th percentile represent the 5th percentile.

통해 확인하였다. 모든 통계 분석은 R software(version 4.3.1)을 사용하여 실시하였으며, 통계적 유의수준은 $p < 0.05$ 로 설정하였다.

III. 결 과

1. 13개 미소환경에서의 $PM_{2.5}$ 와 O_3 의 실내 농도

Fig. 1에 13개 미소환경에서의 $PM_{2.5}$ 와 O_3 의 실내 농도 2년 평균의 분포를 나타냈다. $PM_{2.5}$ 와 O_3 의 실내 농도는 13개 미소환경별로 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). $PM_{2.5}$ 의 실내 농도 중앙값은 전체 13개 미소환경 중 호프집이 $25.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가

Table 1. Seasonal variation of $PM_{2.5}$ indoor concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) across various microenvironments

Microenvironment	Winter		Spring		Summer		Autumn	
	Median	AM* \pm SD [†]	Median	AM* \pm SD [†]	Median	AM* \pm SD [†]	Median	AM* \pm SD [†]
Residential indoor	16.8	20.3 \pm 14.2	14.1	14.5 \pm 5.7	8.3	11.6 \pm 9.2	16.1	18.6 \pm 13.6
Office	10.7	15.4 \pm 10.1	10.6	11.9 \pm 7.3	8.7	9.0 \pm 5.6	12.7	15.7 \pm 10.8
School	20.1	21.1 \pm 11.6	14.3	15.2 \pm 7.6	9.8	10.9 \pm 7.3	12.7	16.1 \pm 10.0
Restaurant	35.2	33.8 \pm 21.1	17.4	20.5 \pm 13.9	18.4	24.5 \pm 24.1	23.4	28.6 \pm 18.7
Pub	26.8	36.0 \pm 26.2	29.0	32.7 \pm 12.7	11.5	33.3 \pm 47.1	21.4	39.8 \pm 37.1
Café	10.6	12.9 \pm 13.6	16.5	42.5 \pm 60.5	11.2	21.6 \pm 26.7	15.0	14.5 \pm 6.4
Study café	10.8	11.7 \pm 9.2	6.2	8.3 \pm 5.2	4.7	6.4 \pm 4.3	8.8	13.2 \pm 9.6
Private educational institute	20.6	31.4 \pm 33.2	12.8	14.7 \pm 7.3	6.0	5.9 \pm 3.9	9.2	12.0 \pm 9.0
PC room	45.6	40.2 \pm 12.6	17.4	15.9 \pm 6.1	71.2	72.0 \pm 63.8	22.4	50.4 \pm 80.2
Billiard room	14.2	16.2 \pm 9.7	12.2	14.6 \pm 13.0	16.6	22.9 \pm 15.5	19.2	16.4 \pm 10.9
Screen golf center	8.9	21.9 \pm 26.7	8.1	84.8 \pm 172.5	6.2	11.7 \pm 11.7	20.2	22.4 \pm 15.4
Supermarket	11.4	12.2 \pm 8.0	5.0	6.1 \pm 5.3	7.2	6.8 \pm 2.8	17.3	23.2 \pm 21.5
Shopping mall	20.2	16.3 \pm 12.2	11.0	12.6 \pm 12.3	7.4	8.9 \pm 6.1	15.6	18.2 \pm 9.7

*AM: arithmetic mean.

†SD: standard deviation.

Table 2. Seasonal variation of O_3 indoor concentration (ppb) across various microenvironments

Microenvironment	Winter		Spring		Summer		Autumn	
	Median	AM* \pm SD [†]	Median	AM* \pm SD [†]	Median	AM* \pm SD [†]	Median	AM* \pm SD [†]
Residential indoor	2.2	3.5 \pm 2.9	6.7	9.8 \pm 7.9	3.0	16.1 \pm 28.5	2.4	11.9 \pm 31.5
Office	2.8	3.6 \pm 2.6	6.4	8.2 \pm 5.5	4.1	11.9 \pm 27.1	2.1	3.3 \pm 2.2
School	1.5	4.4 \pm 4.5	5.5	6.6 \pm 4.3	2.0	3.9 \pm 3.6	3.9	7.8 \pm 10.3
Restaurant	4.9	5.4 \pm 4.2	8.5	9.9 \pm 9.3	6.3	18.2 \pm 38.3	4.7	7.3 \pm 5.9
Pub	2.5	5.4 \pm 4.6	12.1	22.8 \pm 24.7	9.7	9.4 \pm 6.5	3.9	3.9 \pm 2.4
Café	2.3	3.4 \pm 3.2	2.3	7.1 \pm 7.1	1.9	10.0 \pm 16.5	6.4	4.6 \pm 2.8
Study café	1.6	4.1 \pm 5.4	4.2	6.9 \pm 6.7	2.3	8.1 \pm 14.7	5.6	5.8 \pm 4.4
Private educational institute	4.4	6.1 \pm 3.9	6.1	6.0 \pm 3.5	2.0	4.8 \pm 6.1	3.5	4.4 \pm 3.5
PC room	6.5	6.4 \pm 2.7	3.5	4.7 \pm 2.7	9.1	8.2 \pm 6.7	7.8	9.4 \pm 6.7
Billiard room	3.9	3.8 \pm 2.2	5.6	6.7 \pm 3.5	1.9	2.2 \pm 1.1	1.5	2.6 \pm 1.6
Screen golf center	7.1	6.8 \pm 4.9	12.0	11.1 \pm 7.7	1.9	2.9 \pm 2.2	6.5	5.9 \pm 2.6
Supermarket	2.9	3.2 \pm 1.7	7.9	9.0 \pm 6.9	2.0	2.9 \pm 2.2	5.4	7.1 \pm 5.4
Shopping mall	1.5	1.5 \pm 0.1	1.9	2.7 \pm 2.0	3.5	3.4 \pm 1.4	4.8	6.1 \pm 4.9

*AM: arithmetic mean.

†SD: standard deviation.

장 높았고, 그 다음 식당 22.8 g/m³, PC방 22.4 μg/m³, 당구장 19.3 μg/m³ 순으로 높은 농도를 보였으며, 스타디카페는 7.2 μg/m³로 가장 낮은 실내 농도를 나타냈다. O₃의 실내 농도 중앙값은 스크린골프장이 7.5 ppb로 가장 높았으며, 그 다음으로 식당 6.8 ppb, PC방 6.3 ppb, 호프집 5.6 ppb 순으로 농도가 높았고, 카페는 2.3 ppb로 가장 낮은 농도 값을 보였다. 하루 중 가장 장시간을 머무르는 가정집에서의 PM_{2.5}의 실내 농도 중앙값은 17.3 μg/m³이었고, O₃의 실내 농도 중앙값은 3.5 ppb이었다.

13개 미소환경에서의 계절별 PM_{2.5}와 O₃의 실내 농도 평균과 중앙값을 Table 1과 Table 2에 나타냈다. 각 계절별 PM_{2.5}의 실내 농도 중앙값 상위 4개소에는 모든 계절에 PC방, 식당, 호프집이 포함되었다. 사계절 중 봄철에 가장 높은 PM_{2.5}의 실내 농도 중앙값을 보인 미소환경은 호프집, 카페였고, 가을철은 사무실, 당구장, 스크린골프장, 대형마트에서, 나머지 미소환경은 모두 겨울철에 가장 높은 농도를 보였다. 각 계절별 O₃의 실내 농도 중앙값 상위 4개소에는 봄철을 제외한 모든 계절에 PC방이 포함되었고 여름철을 제외한 모든 계절에 스크린골프장이 포함되었으며 가을철을 제외한 모든 계절에 식당이 포함되었다. 사계절 중 여름철에 가장 높은 O₃의 실내 농도 중앙값을 보인 미소환경은 PC방이었고, 가을철은 카페, 스타디카페, 쇼핑몰에서, 나머지 미소환경은 모두 봄철에 가장 높은 농도를 보였다.

2. 13개 미소환경에서의 PM_{2.5}와 O₃의 I/O ratio

Fig. 2에 13개 미소환경에서의 PM_{2.5}와 O₃의 I/O ratio 2년 평균의 분포를 로그 스케일로 나타내었다. PM_{2.5}와 O₃의 I/O ratio는 13개 미소환경별로 유의한 차이를 보였다(p<0.001). PM_{2.5}의 I/O ratio 중앙값이 1보다 큰 미소환경은 식당, 호프집, PC방, 당구장, 스크린골프장이었으며, 이 중 PC방이 1.9로 가장 높은 값을 나타냈다. 스크린골프장과 PC방은 측정기간 동안 지속적인 실내 흡연이 관찰되었으며, 카페의 경우 조리 활동과 높은 재실자 수로 특정 시간대의 실내 농도가 높았음을 확인하였다. PM_{2.5}의 I/O ratio 중앙값이 1을 나타내는 미소환경은 집, 학교, 카페였고, 1 미만인 미소환경은 사무실, 스타디카페, 학원, 대형마트, 쇼핑몰이었으며, 이 중 대형마트는 0.7의 가장 낮은 값을 나타냈다.

O₃의 I/O ratio 중앙값은 모든 미소환경에서 0.1~0.3의 범위를 보였다. O₃의 I/O ratio 95 백분위수는 쇼핑몰에서 10을 초과하였고, 카페, PC방, 당구장, 스크린골프장을 제외한 모든 미소환경에서 1을 초과하였다. 쇼핑몰에서 O₃의 I/O ratio가 10을 초과했던 원인은 겨울철 O₃의 실외 농도가 0에 근접할 정도로 낮았기 때문이었다. 또한, 식당에서 O₃의 I/O ratio가 1을 초과했던 경우 중 일부는 여름철 실외 농도보다 실내 농도가 높

았음을 확인하였다.

3. 13개 미소환경에서의 계절별 PM_{2.5}와 O₃의 I/O ratio

13개 미소환경에서의 계절별 PM_{2.5}와 O₃의 I/O ratio 평균과 중앙값을 Table 3과 Table 4에 나타냈다. 호프집과 당구장에서 PM_{2.5}의 I/O ratio 중앙값은 모든 계절에 1을 초과하였으며, 식당과 PC방은 봄철을 제외한 모든 계절에서 값이 1을 초과하였다. 식당의 경우 겨울철 PM_{2.5}의 I/O ratio 중앙값이 봄철에 비해 약 1.8배 높았고, PC방의 경우 여름철 I/O ratio 중앙값이 봄철에 비해 약 4.0배 높게 나타났다. 각 계절별 PM_{2.5}의 I/O ratio 중앙값 상위 4개소에는 모든 계절에 호프집이 포함되었고, 가을철을 제외한 모든 계절에 당구장이 포함되었으며, 봄철을 제외한 모든 계절에 PC방, 식당이 포함되었다. 사계절 중 봄철에

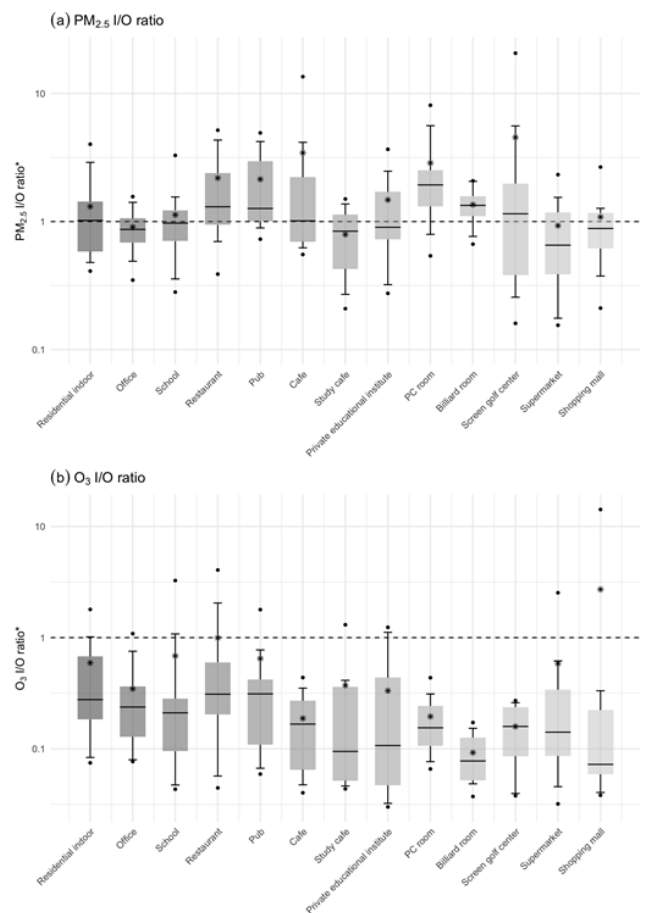


Fig. 2. Distribution of (a) PM_{2.5}, (b) O₃ I/O ratio across various microenvironments. Mean and median are represented by the asterisk and plain line in the box. Box limits represent the 25th and 75th percentiles. The whiskers extend to the 10th and 90th percentiles. Circles above the 90th percentile represent the 95th percentile, and circles below the 10th percentile represent the 5th percentile.

Table 3. Seasonal variation of PM_{2.5} I/O ratio across various microenvironments

Microenvironment	Winter		Spring		Summer		Autumn	
	Median*	AM [†] ±SD [‡]	Median*	AM [†] ±SD [‡]	Median*	AM [†] ±SD [‡]	Median*	AM [†] ±SD [‡]
Residential indoor	0.8	0.9±0.7	1.0	0.9±0.4	0.9	1.1±1.2	1.5*	1.9±1.5
Office	0.7	0.7±0.3	0.8	0.8±0.3	0.6	0.8±1.0	1.0	1.6±1.6
School	0.7	1.0±0.9	1.0	0.9±0.3	1.0	1.2±1.2	1.2*	1.3±0.9
Restaurant	1.6*	1.7±1.0	0.9	1.2±1.0	1.4*	2.1±2.1	1.4*	2.7±3.7
Pub	2.2*	2.3±1.5	1.2*	1.6±1.0	1.9*	2.6±2.4	2.4*	2.4±1.7
Café	0.7	1.1±0.8	1.9*	7.4±12.4	0.7	0.8±0.3	1.1*	1.8±1.8
Study café	0.6	0.8±0.6	0.4	0.5±0.4	1.0	0.9±0.6	0.9	1.0±0.6
Private educational institute	0.8	1.0±0.8	1.4*	2.4±2.4	1.6*	2.0±1.6	0.9	0.9±0.4
PC room	2.6*	2.4±0.8	0.9	1.6±1.7	3.6*	6.3±5.9	1.8*	3.7±5.3
Billiard room	1.1*	1.4±1.1	1.3*	1.1±0.8	1.6*	1.5±0.4	1.4*	1.6±1.1
Screen golf center	0.5	0.9±1.1	0.3	14.2±31.1	0.9	0.8±0.6	1.4*	2.0±1.5
Supermarket	0.9	0.9±0.5	1.0	0.9±0.5	0.4	0.5±0.3	1.1*	1.4±1.1
Shopping mall	0.9	0.7±0.5	1.0	0.8±0.5	2.3*	2.4±2.3	0.8	0.9±0.2

*The values indicate instances where the median of PM_{2.5} I/O ratio exceeds 1, suggesting higher indoor pollutant levels compared to outdoor levels.

[†]AM: arithmetic mean.

[‡]SD: standard deviation.

Table 4. Seasonal variation of O₃ I/O ratio across various microenvironments

Microenvironment	Winter		Spring		Summer		Autumn	
	Median	AM*±SD [†]	Median	AM*±SD [†]	Median	AM*±SD [†]	Median	AM*±SD [†]
Residential indoor	0.4	0.7±0.9	0.2	0.3±0.3	0.2	0.5±1.0	0.2	0.8±2.2
Office	0.3	0.4±0.3	0.2	0.2±0.2	0.1	0.7±1.5	0.1	0.3±0.4
School	0.3	0.5±0.8	0.1	0.2±0.3	0.1	0.1±0.1	0.3	0.9±1.9
Restaurant	0.3	1.1±2.9	0.2	0.4±0.6	0.2	0.7±1.1	0.4	0.7±0.9
Pub	0.1	0.3±0.3	0.3	0.4±0.4	0.3	0.3±0.1	0.5	1.3±2.4
Café	0.2	0.2±0.2	0.1	0.2±0.2	0.1	0.2±0.1	0.1	0.2±0.2
Study café	0.1	0.7±1.5	0.1	0.2±0.1	0.1	0.1±0.2	0.2	0.3±0.4
Private educational institute	0.2	0.4±0.4	0.1	0.1±0.1	0.1	0.4±0.6	0.1	0.4±0.5
PC room	0.3	0.4±0.4	0.1	0.1±0.0	0.3	0.2±0.2	0.2	0.3±0.2
Billiard room	0.1	0.1±0.1	0.1	0.1±0.1	0.1	0.1±0.0	0.1	0.1±0.0
Screen golf center	0.2	0.2±0.2	0.2	0.2±0.2	0.1	0.1±0.1	0.2	0.2±0.1
Supermarket	0.1	0.1±0.1	0.1	0.2±0.2	0.1	0.1±0.0	0.3	1.3±1.9
Shopping mall	0.0	6.3±13.9	0.0	0.1±0.0	0.1	0.2±0.2	0.2	0.3±0.3

*AM: arithmetic mean.

[†]SD: standard deviation.

가장 높은 PM_{2.5}의 I/O ratio 증양값을 보인 미소환경은 카페였고, 여름철은 스터디카페, 학원, PC방, 당구장, 쇼핑몰에서, 겨울철은 식당에서, 나머지 미소환경에서는 모두 가을철에 가장 높은 I/O ratio 값을 보였다.

O₃의 I/O ratio 증양값은 모든 계절과 미소환경에서 일관되게 0.5 이하의 값을 보였다. 각 계절별 O₃의 I/O ratio 증양값 상위

4개소에는 모든 계절에 식당이 포함되었고, 봄철을 제외한 모든 계절에 가정집이 포함되었으며 겨울철을 제외한 모든 계절에 호프집이 포함되었다. 사계절 중 봄철에 가장 높은 O₃의 I/O ratio 증양값을 보인 미소환경은 당구장이었고, 겨울철은 가정집, 사무실, 카페, 학원, PC방에서, 나머지 미소환경은 모두 가을철에 가장 높은 I/O ratio 값을 보였다.

4. 주 미소환경에서의 계절별 PM_{2.5}와 O₃의 I/O ratio 일중 변화

24시간 측정된 주 미소환경에서 계절에 따른 시간대별 PM_{2.5}와 O₃의 I/O ratio 중앙값의 일중 변화를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타냈다. 가정집, 사무실, 학교에서 PM_{2.5}의 I/O ratio는 대부분의 시간대에서 1 이하의 값을 확인하였다. 예외적으로, 가정집에서는 봄철 13시와 15시, 여름철 15시, 가을철 0~2시, 5시, 12~16시 시간대에 1을 초과하였고, 사무실에서는 봄철 14시, 가을철 5시, 7시, 9시, 10시, 16~18시 시간대에 1을 초과했으며, 학교에서는 봄철 12~14시, 여름철 7시, 10시, 16시, 가을철 0시, 3~7시, 16시, 22시, 23시 시간대에 1을 초과하는 값을 보였다. 식당에서 PM_{2.5}의 I/O ratio는 겨울과 가을철 대부분의 시간대에서 1을 초과하는 값을 확인하였다. 겨울철 1시, 3~5시, 7시, 8시, 18시를 제외한 모든 시간대에서 1을 초과하는 값을 확인하였고, 그 중 20시에 2.4로 가장 높은 값을 보였으며, 가을에는 0시, 5시, 6시, 8시, 11시, 23시를 제외한 모든 시간대에 1을 초과하는 값을 보였고, 그 중 17시에 1.4로 값이 가장 높았다. 또한, 식당에서 봄철 PM_{2.5}의 I/O ratio는 16시, 17시, 19~21시 시간대에 값이 1을 초과하였고 그 중 16시에 1.1로 값이 가장 높았으며, 여름철은 0시, 1시, 10시, 13~15시, 17~23시에 1을 초과하는 값을 확인하였고 그 중 19시에 1.8로 가장 높은 값을 보였다.

O₃의 I/O ratio 중앙값은 주 미소환경의 종류, 계절, 시간대와 관계없이 모두 0.8 미만이었으며, 대체로 오전 6~9시를 기점으로 I/O ratio 값이 작아지고, 오후 1~4시에 가장 낮은 값을 보였다.

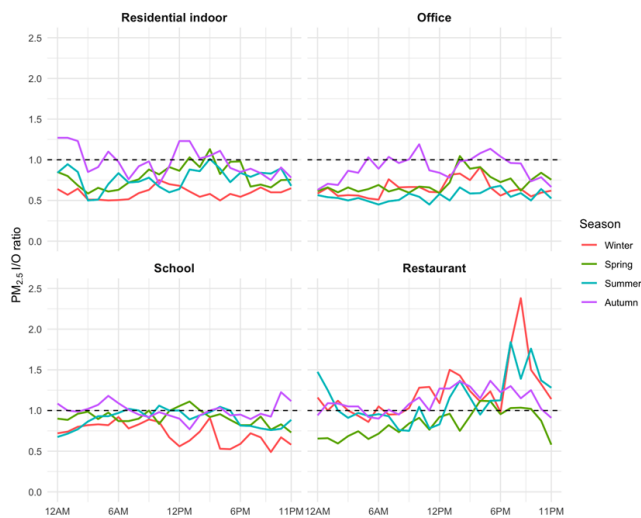


Fig. 3. Time profiles of seasonal variation of the median PM_{2.5} I/O ratio across main microenvironments

IV. 고찰

PM_{2.5}와 O₃의 실내 농도는 미소환경별로 유의한 차이를 보였다. PM_{2.5}의 실내 농도 중앙값 상위 4개소는 호프집, PC방, 식당, 당구장 순이었다. 선행 연구결과, 서울 지역 호프집에서 PM_{2.5}의 실내 농도 산술 평균은 69.4 µg/m³, 식당은 188.5 µg/m³로,¹⁸⁾ 본 연구의 산술 평균 결과의 각각 약 2배, 약 7배 수준이었으며, 창원 지역 호프집에서 PM_{2.5}의 실내 농도 산술 평균은 29.0 µg/m³, PC방은 98.2 µg/m³, 당구장은 134.2 µg/m³로,¹⁹⁾ 본 연구 결과의 각각 약 0.8배, 약 3배, 약 7배 수준을 확인했다. 본 연구와 선행 연구 모두 호프집, PC방, 식당, 당구장은 타 미소환경에 비해 높은 PM_{2.5}의 실내 농도 값을 보였다. 이는 해당 미소환경 내에 실내 흡연이나 조리과 같은 특정 PM_{2.5}의 발생원이 존재함을 시사한다. 한편 O₃의 실내 농도 중앙값 상위 4개소는 스크린골프장, 식당, PC방, 호프집 순이었다. 해당 미소환경에서 실내 농도가 높았던 이유는 스크린골프장과 PC방의 경우 각각 O₃의 실외 농도 중앙값이 41.5 ppb, 36.9 ppb로 상대적으로 높은 실외 농도에 따른 실내 확산의 영향으로 확인되며, 식당, 호프집은 각각 27 ppb, 27.6 ppb로 상대적으로 실외 농도 값이 낮았음에도 높은 실내 농도를 보여 실내 오염원의 영향이 일부 있다고 추정된다. 선행 연구 결과에 따르면 실내 O₃의 주요 원천은 실외 O₃의 유입이며,²⁰⁾ 일부 원천으로는 실내 조리 과정 중 발생하는 VOCs가 실내 O₃의 형성에 기여할 수 있음을 확인하였다.²¹⁾

한국의 실내공기질 관리 기준에 관한 법규는 환경부의 실내 공기질 관리법, 교육부의 학교보건법, 고용노동부의 산업안전보건법으로, 미소환경의 종류에 따라 해당되는 부처가 다르게 적용되어 관리되고 있다. 연구 결과, 학원, PC방, 대형마트, 쇼

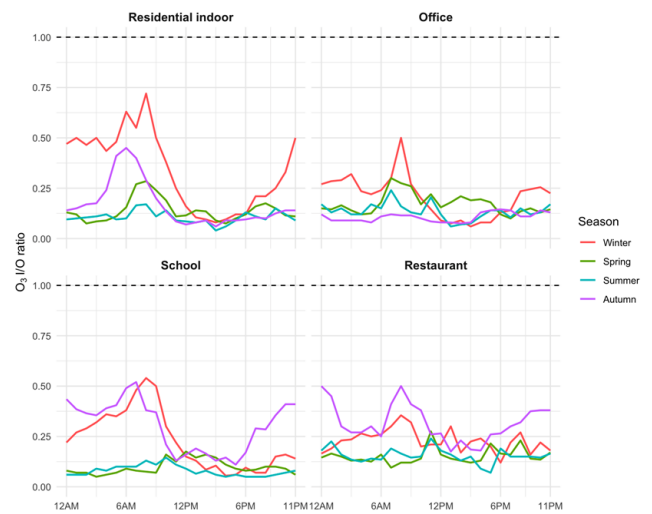


Fig. 4. Time profiles of seasonal variation of the median O₃ I/O ratio across main microenvironments

평몰에서 PM_{2.5}의 일일 운영시간 평균 실내 농도는 실내공기질 관리법 유지기준인 50 µg/m³를²²⁾ 2년 동안 학원은 5.3%, PC방은 23.8%, 대형마트는 5.3% 초과하였으며, 쇼핑몰은 기준을 초과한 경우가 없었다. 학교에서 PM_{2.5}의 일평균 실내 농도는 학교보건법 유지·관리 기준인 35 µg/m³를²³⁾ 4.3% 초과하였으며, 사무실의 경우 사무실 공기관리지침 50 µg/m³를²⁴⁾ 초과한 경우가 없었다. PM_{2.5}의 운영시간 평균을 기준과 직접 비교하는 것은 한계가 있으나, 일부 미소환경에서 기준을 초과할 수 있음을 보여주며 지속적인 평가와 관리가 필요함을 시사한다.

O₃의 경우, 2017년 12월 31일까지는 실내공기질 관리법 권고기준으로 관리되었으나 2018년 개정에 따라 제외되었고, 현재는 학교보건법 기준에서만 관리되고 있다. 연구 결과, 학교에서 O₃의 일평균 실내 농도는 학교보건법 유지·관리 기준인 60 ppb를 2년 동안 초과한 경우가 없었다. 현재는 실내공기질 관리법 기준 항목에서 제외되었으나 2017년까지 시행되었던 권고기준과 비교한 결과, 본 연구의 학원, PC방, 대형마트, 쇼핑몰에서 O₃의 일일 운영시간 평균 실내 농도는 이전 권고기준인 60 ppb를 2년 동안 초과한 경우가 없었다. 해당 결과는 O₃의 실내 농도가 실내공기질 관리법 기준에서 제외된 근거가 될 수 있다.

PM_{2.5}와 O₃의 I/O ratio는 미소환경별로 유의한 차이를 보였다. PM_{2.5}의 I/O ratio 상위 4개소는 PC방, 당구장, 식당, 호프집 순으로, I/O ratio 중앙값이 모두 1을 초과하였다. 해당 미소환경들은 PM_{2.5}의 실내 농도 상위 4개소와 일치하는 것으로 보아, 외기 영향을 고려하더라도 PC방, 호프집, 당구장, 식당은 PM_{2.5}의 실내 오염원 영향이 큰 미소환경임을 시사한다. 해당 결과는 조리 활동, 흡연, 밀폐된 공간 등이 주요 원인으로 작용했을 가능성이 크다.⁸⁾ 특히 PC방은 대부분 지하에 위치해 있으며 실내 흡연 구역이 존재하고 조리가 이루어지는 미소환경으로, 선행 연구에서도 PC방에서 9.7의 가장 높은 I/O ratio를 확인하였다.²⁵⁾ O₃의 I/O ratio 상위 4개소는 호프집, 식당, 가정집, 사무실 순이었다. 모든 미소환경에서 O₃의 I/O ratio 값은 1 미만으로, 실내 오염원의 영향이 외기의 영향보다 큰 미소환경이 없음을 확인하였다. 선행 연구에 따르면, O₃의 I/O ratio는 실내 오염원이 없을 경우 기계 환기보다 자연 환기가 이루어지는 환경에서 값이 더 높은 경향을 보였다.¹⁰⁾ 본 연구에서도 비교적 자연환기가 활발한 가정집, 사무실, 학교에서 O₃의 I/O ratio가 타 미소환경보다 높았으며, 주로 기계환기로 관리되는 쇼핑몰, 당구장, 스타벅스의 I/O ratio는 낮게 나타났다. O₃의 실내 농도와 I/O ratio 상위 4개소에 모두 포함된 호프집, 식당은 O₃의 외기 영향을 고려하더라도 실내 오염원이 일부 영향을 미치는 미소환경으로 확인된다. 해당 미소환경의 특성과 선행 연구 결과로 미루어 볼 때, 이는 조리 활동의 영향일 가능성이 있다.²¹⁾ 또한, 본 연구는 중앙값을 통해 I/O ratio를 평가하였기 때문에, 주로 평균값을 통해 가정집, 사무실, 학교 등의 특정 미소환경

과 특정 계절을 대상으로 I/O ratio를 평가한 선행 연구 결과보다 전체적으로 값이 다소 낮은 경향을 보였다.

계절적 특징으로 13개 미소환경에서 PM_{2.5}의 실내 농도는 대체로 겨울철에 높은 농도를 보였으며, PM_{2.5}의 I/O ratio는 대체로 겨울, 봄철에 낮은 값을 보이고 여름, 가을철에 높은 경향을 보였다. 해당 결과는 겨울철과 봄철에 난방 연료 연소, 대기 역전 현상, 황사 등의 영향으로 PM_{2.5}의 실외 농도가 높아지기 때문으로 추정된다.^{11,12)} O₃의 실내 농도는 대체로 봄철에 높은 농도를 보였으며, O₃의 I/O ratio는 여름, 봄 계절에 값이 낮고, 가을, 겨울 계절에 값이 높은 경향을 보였는데, 해당 결과는 야외선이 강해지는 봄과 여름철 O₃의 실외 고농도 현상에 기인한 것으로 보인다.²⁶⁾ 해당 결과들은 계절적 요인으로 실외 농도가 높아짐에 따라 확산에 의해 실내 농도가 높아지고, 실외 농도의 상승폭 대비 실내 농도의 상승폭이 작아 상대적으로 I/O ratio 값이 낮아진 결과로 사료된다.

모든 주 미소환경에서 계절에 따른 시간대별 I/O ratio의 변화를 관찰하였다. 가정집에서 PM_{2.5}의 I/O ratio는 봄철 점심시간과 이른 오후, 여름철 이른 오후, 가을철 점심시간과 늦은 오후 및 새벽 시간대에 1을 초과하였다. 사무실에서 PM_{2.5}의 I/O ratio는 봄철 점심시간, 가을철 출근 및 퇴근 시간과 새벽 시간대에 1을 초과하였으며, 학교에서 PM_{2.5}의 I/O ratio는 봄철 점심시간, 여름철 등교 및 하교시간과 오전 수업시간, 가을철 하교시간과 밤 및 새벽 시간에 1을 초과하였다. 이는 재실자의 이동으로 인한 실내 PM_{2.5}의 재비산²⁷⁾과 조리 활동²⁸⁾이 주요 원인으로 보이며, 가을철 새벽 시간대에 PM_{2.5}의 I/O ratio가 1을 초과하는 현상은 낮은 실외 농도와 환기 부족으로 인한 실내 고농도가 원인으로 추정된다. 가정집에서 아침, 저녁 식사 시간대에 1을 초과하는 값이 관찰되지 않은 이유는 출퇴근 시간대에 높아지는 실외 농도에 비하여 실내 농도가 높지 않아 발생된 결과로 보인다. 식당에서 PM_{2.5}의 I/O ratio는 겨울과 가을철 대부분의 시간대에서 1을 초과하였으며, 특히 저녁 시간대에 I/O ratio 값이 급격히 증가하는 경향을 보였다. 해당 결과는 겨울과 가을철 환기 빈도 감소로 인해 실내 고농도 현상이 심화된 영향으로 보인다. 또한 선행 연구에 따르면, 가장 높은 실내 PM_{2.5}의 증가와 개인노출은 조리에 의해 발생하는 것으로 확인되었다.²⁸⁾ 이는 조리 활동이 식당 내 PM_{2.5}의 주요 오염원임을 시사하며, 조리 시설 내 환기 시스템의 개선이 필요함을 강조한다. 한편 주 미소환경에서 O₃의 I/O ratio 중앙값은 하루 중 오전 6시~9시를 기점으로 대체로 값이 작아지고 오후 1시~4시에 가장 낮은 값을 보였다. 해당 결과는 광화학 반응으로 인해 낮시간에 높아지는 O₃의 실외 농도에 기인한 것으로 보인다.²⁹⁾ 주어진 장소에서, 일정한 공기 교환율을 유지하고 O₃의 실내 오염원이 변동하지 않았다면, O₃의 I/O ratio는 상대적으로 일정했을 것이나,²⁰⁾ 환기, 조리 등의 인간 활동으로 인해 하루 중 시간대별 I/O ratio의 변동이 관찰된 것으로 추정된다.

본 연구는 측정된 미소환경 내 환기 방식 및 빈도, 재실자 수, 공간 대비 재실 밀도 등 세부 정보를 조사하지 않아 세부 조건별 차이를 볼 수 없다는 한계점이 있으며, I/O ratio 산출에 활용된 실외 농도가 측정 장소와 가장 인접한 도시대기측정망이 아닌 측정 장소의 주소를 기준으로 해당 자치구의 도시대기측정망을 통해 확보되었다는 점에서 불확실성이 발생할 가능성이 존재한다.

선행된 개인 노출 연구에서는 실내 공기오염물질의 직접 측정이 어려운 경우 공개된 국가대기측정망의 실외 농도에 I/O ratio를 적용하여 실내 농도를 추정하였으나, 구체적인 시공간적 변이를 고려하지 못해 실제 노출을 정확히 평가할 수 없다는 한계점이 있었다.^{14,15)} 세부적인 미소환경을 구분하지 않고 일부를 포괄하여 I/O ratio를 적용하며 주/야간 구분은 있으나 계절을 구분하지 않거나,¹⁴⁾ 계절 구분이 있으나 시간대를 구분하지 않고¹⁵⁾ I/O ratio를 적용하여 노출평가를 수행하였다. 본 연구는 기존 연구들의 한계점을 극복하고자 13개의 미소환경별, 계절별, 시간대별 세부적인 I/O ratio를 2년 동안 조사하였고, 이를 통해 개인 노출 평가의 정확도 향상에 기여할 수 있을 것이다.

V. 결 론

본 연구는 한국의 13개 미소환경에서 PM_{2.5}와 O₃의 유의미한 I/O ratio 차이를 확인할 수 있었으며, 계절별 변화와 시간대에 따른 I/O ratio의 변화를 확인하였다. PM_{2.5}의 경우, 식당, 호프집, 당구장, PC방과 같이 조리, 흡연 등의 연소가 발생하는 환경에서 높은 I/O ratio를 보였고, 계절에 따라 변화하는 실외 오염 농도와 실내 활동의 영향을 받는 것으로 나타났다. O₃는 모든 미소환경에서 계절별 I/O ratio 값이 0.5 이하로 일관되게 낮은 값을 보이며, 주로 외부 오존의 유입에 크게 의존하고 있음을 시사하였으나 미소환경별로 해당 비율이 일관되지 않은 것으로 보아 실내 오염원에 의한 영향도 일부 확인되었다. 본 연구는 각 미소환경에서 계절과 시간에 따른 I/O ratio를 통해 실내·외 오염 관계의 중요 데이터를 제공하였으며, 이는 계절 및 시간 활동 패턴에 따른 인구 노출 분포 예측에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다. 해당 연구 결과는 미소환경별, 계절별, 시간대별 차이를 고려한 공기질 개선 조치의 필요성을 시사하며, 실내공기질 관리 및 건강 위험 감소를 위한 정책 수립에 기여할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 한국환경산업기술원의 환경성질환예방관리핵심기술사업(과제 번호: RS-2021-KE001337)의 지원으로 수행되었습니다. 실제 장기간의 미소환경 측정과 조사를 수행

하는데 많은 도움을 준 연구원들에게 감사를 드립니다.

Conflict of Interest

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

Supplementary Materials

Supplementary materials can be found via <https://doi.org/10.5668/JEHS.2024.50.4.257>

References

- Klepeis NE, Nelson WC, Ott WR, Robinson JP, Tsang AM, Switzer P, et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 2001; 11(3): 231-252.
- Yang W, Lee K, Yoon C, Yu S, Park K, Choi W. Determinants of residential indoor and transportation activity times in Korea. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2011; 21(3): 310-316.
- Lee S, Jeong S, Lee K, Min K, Kim H, Kim D, et al. A study on characteristics of indoor air pollutants using regression analysis in public facilities. *J Korean Soc Environ Anal*. 2013; 16(2): 123-131.
- Hoskins JA. Health effects due to indoor air pollution. In: Gökçekus H, Türker U, LaMoreaux J, editors. *Survival and sustainability: environmental concerns in the 21st century*. Berlin: Springer. 2011. p. 665-676.
- World Health Organization. Household air pollution. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health> [accessed 1 March 2024].
- Morris RD. Airborne particulates and hospital admissions for cardiovascular disease: a quantitative review of the evidence. *Environ Health Perspect*. 2001; 109(Suppl 4): 495-500.
- Pope CA 3rd, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*. 2002; 287(9): 1132-1141.
- Martins NR, Carrilho da Graça G. Impact of PM_{2.5} in indoor urban environments: a review. *Sustain Cities Soc*. 2018; 42: 259-275.
- Turner MC, Jerrett M, Pope CA 3rd, Krewski D, Gapstur SM, Diver WR, et al. Long-term ozone exposure and mortality in a large prospective study. *Am J Respir Crit Care Med*. 2016; 193(10): 1134-1142.
- Nazaroff WW, Weschler CJ. Indoor ozone: concentrations and influencing factors. *Indoor Air*. 2022; 32(1): e12942.
- Li T, Cao S, Fan D, Zhang Y, Wang B, Zhao X, et al. Household concentrations and personal exposure of PM_{2.5} among urban residents using different cooking fuels. *Sci Total Environ*. 2016; 548-549: 6-12.
- Lee M. An analysis on the concentration characteristics of PM_{2.5}

- in Seoul, Korea from 2005 to 2012. *Asia-Pacific J Atmos Sci*. 2014; 50(Suppl 1): 585-594.
13. Shin BC, Lee MH, Lee JH, Shim JS. Seasonal and diurnal variations of surface ozone at Jeodo in the East China Sea. *Korean Soc Atmos Environ*. 2007; 23(6): 631-639.
 14. Gerharz LE, Krüger A, Klemm O. Applying indoor and outdoor modeling techniques to estimate individual exposure to PM_{2.5} from personal GPS profiles and diaries: a pilot study. *Sci Total Environ*. 2009; 407(18): 5184-5193.
 15. Guak S, Lee SG, An J, Lee H, Lee K. A model for population exposure to PM_{2.5}: identification of determinants for high population exposure in Seoul. *Environ Pollut*. 2021; 285: 117406.
 16. Lee S, Lee K. Seasonal differences in determinants of time location patterns in an urban population: a large population-based study in Korea. *Int J Environ Res Public Health*. 2017; 14(7): 672.
 17. Lee K, Hahn EJ, Pieper N, Okoli CT, Repace J, Troutman A. Differential impacts of smoke-free laws on indoor air quality. *J Environ Health*. 2008; 70(8): 24-30, 54.
 18. Lim S, Kim J, Kim T, Lee K, Yang W, Jun S, et al. Personal exposures to PM_{2.5} and their relationships with microenvironmental concentrations. *Atmos Environ*. 2012; 47: 407-412.
 19. Lee JH, Park D, Ha K. Evaluation of indoor ETS exposure levels in pubs, pc game rooms, and billiards halls around a university campus using PM_{2.5} concentrations. *J Korean Soc Occup Environ Hyg*. 2016; 26(4): 411-417.
 20. Weschler CJ. Ozone in indoor environments: concentration and chemistry. *Indoor Air*. 2000; 10(4): 269-288.
 21. Zhang H, Wang X, Shen X, Li X, Wu B, Li G, et al. Chemical characterization of volatile organic compounds (VOCs) emitted from multiple cooking cuisines and purification efficiency assessments. *J Environ Sci (China)*. 2023; 130: 163-173.
 22. Ministry of Environment. Enforcement rule of the indoor air quality control act, article 3 (maintenance standards). Available: <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%EC%8B%A4%EB%82%B4%EA%B3%B5%EA%B8%B0%EC%A7%88%EA%B4%80%EB%A6%AC%EB%B2%95%EC%8B%9C%ED%96%89%EA%B7%9C%EC%B9%99> [accessed 1 March 2024].
 23. Ministry of Education. Enforcement rule of the school health act, article 3 paragraph 1 subparagraph 3-2 (standards for maintenance and management of air quality). Available: <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%ED%95%99%EA%B5%90%EB%B3%B4%EA%B1%B4%EB%B2%95%EC%8B%9C%ED%96%89%EA%B7%9C%EC%B9%99> [accessed 1 March 2024].
 24. Ministry of Employment and Labor. Guidelines for office air management under the occupational safety and health act, article 2. Available: <https://www.law.go.kr/%ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99/%EC%82%AC%EB%AC%B4%EC%8B%A4%EA%B3%B5%EA%B8%B0%EA%B4%80%EB%A6%AC%EC%A7%80%EC%B9%A8> [accessed 1 March 2024].
 25. Kim HH, Lee GW, Yang JY, Jeon JM, Lee WS, Lim JY, et al. Indoor exposure and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) via public facilities PM_{2.5}, Korea (II). *Asian J Atmos Environ*. 2014; 8(1): 35-47.
 26. Lee HK, Choi EL, Lee HJ, Lee SY, Lee JY. A study on the seasonal correlation between O₃ and PM_{2.5} in Seoul in 2017. *J Korean Soc Atmos Environ*. 2020; 36(4): 533-542.
 27. Benabed A, Boulbair A. PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, and PM_{0.1} resuspension due to human walking. *Air Qual Atmos Health*. 2022; 15(9): 1547-1556.
 28. Wallace L, Williams R, Rea A, Croghan C. Continuous weeklong measurements of personal exposures and indoor concentrations of fine particles for 37 health-impaired North Carolina residents for up to four seasons. *Atmos Environ*. 2006; 40(3): 399-414.
 29. Khoder MI. Diurnal, seasonal and weekdays-weekends variations of ground level ozone concentrations in an urban area in greater Cairo. *Environ Monit Assess*. 2009; 149(1-4): 349-362.

〈저자정보〉

김지수(연구원), 광수영(연구교수), 이기영(교수)