






아파트 실내·외 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})와 블랙카본(Black Carbon)의 계절별 농도 및 시간대별 분포 특성 사례연구

박신영¹ , 윤단기² , 공혜관² , 강상현³ , 이철민^{3*} 

¹서경대학교 환경화학공학과, ²서경대학교 나노생명공학과, ³서경대학교 나노화학생명공학과

A Case Study on Distribution Characteristics of Indoor and Outdoor Particulate Matter (PM₁₀, PM_{2.5}) and Black Carbon (BC) by Season and Time of the Day in Apartments

Shinyoung Park¹, Danki Yoon², Hyegwan Kong², Sanghyeon Kang³, and Cheolmin Lee^{3*}

¹Department of Chemical and Environmental Engineering, Seokyeong University, ²Department of Nano and Biological Engineering, Seokyeong University, ³Department of Nano, Chemical and Biological Engineering, Seokyeong University

ABSTRACT

Background: Particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}) and black carbon contribute to poor air quality in urban areas, and can also affect indoor environments. Exposure to PM can be associated with respiratory and lung diseases.

Objectives: This study investigated the indoor and outdoor concentration distribution patterns of PM₁₀, PM_{2.5}, and black carbon at an apartment building, a typical residential space in the metropolitan areas of South Korea, by season, day of the week (weekday vs. weekend), and time of the day. It aims to obtain foundational data for the effective management of pollutants and investigate the difference in pollution levels between indoor and outdoor environments.

Methods: Indoor and outdoor concentrations of PM and black carbon were measured at an apartment building located in Namyangju, Gyeonggi-do Province, using dust sensors and an Aethalometer AE51 (AethLabs, San Francisco, CA, USA) over the course of a year from June 2020 to May 2021. The concentration distribution patterns were analyzed by season and time of day.

Results: PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in the outdoor environment were higher than those in the indoor environment, regardless of the season. By contrast, the indoor black carbon concentration was higher than that in the outdoor environment during summer and autumn. The concentrations of PM₁₀, PM_{2.5} and black carbon were found to be higher on weekdays than during weekends, especially during rush hour, with concentrations of 25.92~56.58 µg/m³, 21.12~44.82 µg/m³, 0.63~3.40 µg/m³.

Conclusions: The outdoor concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, and black carbon were higher during the weekdays, especially during rush hour, than during weekends. This study is expected to provide basic data for the health management of apartment occupants because it is measured over a period of more than one year.

Key words: Apartment, black carbon, PM₁₀, PM_{2.5}, season

Received July 30, 2021

Revised August 18, 2021

Accepted August 19, 2021

Highlights:

- PM₁₀ and PM_{2.5} were higher outdoors than indoors regardless of the season.
- Black carbon varied with the season.
- PM₁₀, PM_{2.5} and black carbon were higher during the week than the weekend.
- Air pollutants were higher both indoors and outdoors during commuting hours.

*Corresponding author:

Department of Nano, Chemical and Biological Engineering, Seokyeong University, 124 Seogyong-ro, Jeongneung-dong, Seongbuk-gu, Seoul 02713, Republic of Korea

Tel: +82-2-940-2924

Fax: +82-2-940-7616

E-mail: cheolmin@skuniv.ac.kr

I. 서 론

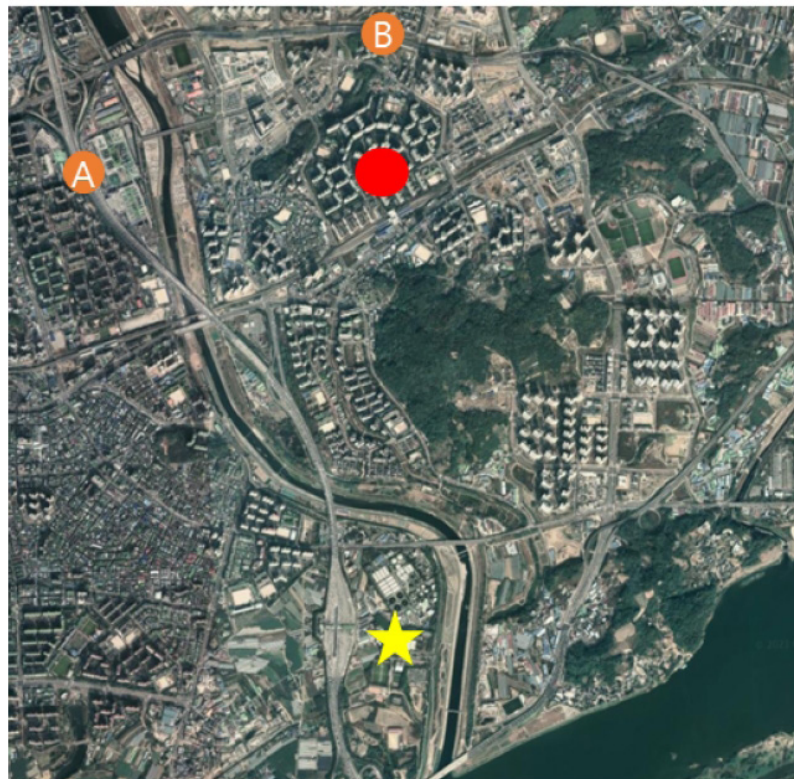
전 세계적으로 산업화와 도시화가 가속화되면서 전 세계 인구의 55%가 도시 지역에 거주하고 있으며, 이러한 도심 인구 비

중은 고소득 국가의 경우 81.5%에 이르는 것으로 보고된바 있다. 고소득 국가에 속하는 한국 역시 수도권 서울에 2020년 기준 9,985,652명으로 약 1,000만명이 거주하고 있으며, 서울 인근 도시인 경기, 인천을 포함한 수도권권에 위치한 대도시

에 전체 인구 중 50%가 거주하고 있는 것으로 조사되었다.¹⁾ 대도시에서 거주하는 인구들의 경우 다양한 도시 생활활동과 산업 활동 등을 통해 배출되어지는 다양한 대기유해물질에 직간접적으로 노출되고 있으며, 이들 대기유해물질 중 입자상 물질은 대도시 거주 인구들에 대해 심각한 건강 영향을 야기하는 것으로 보고되었다.²⁾ 세계보건기구(WHO)는 입자상 물질 중 PM_{10} 와 $PM_{2.5}$ 를 매년 3백만 명 이상의 조기 사망을 일으키는 원인으로 지목하였으며, 특히 경제협력개발기구(OECD)는 한국은 $PM_{2.5}$ 로 인해 연간 18,200명이 사망하는 등 PM_{10} 와 $PM_{2.5}$ 로 인한 대기오염이 심각한 수준이라 경고하고 있으며, 대책을 마련하지 않는다면 2060년 OECD 회원국 중 조기사망률 및 경제적 피해가 가장 클 것이라 발표하였다.³⁾

미세먼지 중 직경이 $2.5 \mu m$ 미만인 $PM_{2.5}$ 는 조기 사망, 폐염증, 가속화된 동맥경화증 및 심장 기능 변화를 포함하는 심각한 건강 영향과 관련이 있고,⁴⁾ 단기간의 대기 오염 노출에서 만성 폐쇄성 폐질환 및 천식의 악화에 유의한 영향을 미치며, 천식 만성 폐쇄성 폐질환 중첩 증후군(asthma-COPD overlap syndrom)은 $PM_{2.5}$ 노출 시 위험도가 증가한다고 하였다.⁵⁾ 혼

히 알려진 PM_{10} 와 $PM_{2.5}$ 뿐 아니라, PM_{10} 와 $PM_{2.5}$ 의 주요 구성요소인 초미립자(직경 $<100 \text{ nm}$, Ultra Fine Particle)는 동일한 질량 기준에서 입자의 크기가 작고 표면적이 넓어 동물과 인간에게 PM_{10} 와 $PM_{2.5}$ 보다 더 독성이 있는 것으로 밝혀졌다.⁶⁾ 초미립자 중 $PM_{2.5}$ 질량의 약 23%를 차지하는 블랙카본(Black Carbon)은 화석 연료의 불완전 연소와 바이오매스 및 바이오 연료의 연소로 인해 종종 배출된다.⁷⁾ 또한 블랙카본은 광흡수 특성으로 인해 대기경계층을 안정화시켜 고농도 $PM_{2.5}$ 사례를 보다 심화시킬 수 있다고 보고되었다.⁸⁾ 국제배출량 인벤토리를 살펴보면 산업부문과 경제활동을 통한 연소원에서 배출되는 블랙카본은 산업부문을 제외하면 디젤 차량에서 배출되는 비율이 상당히 높은 수준이었다.⁹⁾ 디젤자동차 후단에서는 약 50 nm 이하의 탄소 입자가 배출되는 것으로 조사되었는데, 이와 유사한 나노(nano) 수준의 블랙카본 입자가 증가하면 유전독성(DNA 손상)이 증가한다는 사례가 다수 보고 되었다.¹⁰⁾ 또한 블랙카본이 농후한 대기에서 숨을 들이켰을 경우 염증반응을 유발하며 호흡기 질병, 천식, 심혈관 질환, 폐기능 저하, 지능 지수 감소 등을 초래한다고 알려진 바 있다.¹¹⁾



● : measuring point, ★ : Guri-Resource recovery facility(Incinerator), ○ A : Seoul
 Ring Expressway, ○ B : Bukbu Expressway

Fig. 1. Location of the measuring point

대도시 대기환경 중 PM₁₀, PM_{2.5} 및 블랙카본의 주요 발생원으로는 자동차 배기가스, 도로, 건설현장 등의 영향이 크며, 요리나 양초 연소와 같은 실내 발생원도 있어 실내환경에서도 이들 오염물질에 의한 영향을 받을 수 있다.^{12,13)}

국내의 경우 이러한 PM₁₀, PM_{2.5} 및 블랙카본에 대한 저감 대책을 수립하기 위한 일환으로 대기 중 이들 유해물질의 분포 특성 및 노출량 평가를 위한 지체 측정망 확충 및 다수의 연구가 수행되고 있으나,^{14,15)} 실내환경을 대상으로 한 연구 및 노력은 부족하다. 또한 최근 들어 PM₁₀와 PM_{2.5}에 대한 연구들은 이루어지고 있으나 블랙카본을 대상으로 한 연구는 전무한 실정에 있다.¹⁶⁾ 이에 본 논문은 국내 주택 비중의 62.3%를 차지하는 대표적 주거환경인 아파트를 대상으로 실내·외 PM₁₀, PM_{2.5} 및 블랙카본 농도를 측정하고, 계절별, 시간대별 실내외 농도 분포 특성 차이의 분석을 통한 계절 및 시간에 따른 아파트 재실자 건강관리에 있어 기초적 자료를 확보하기 위한 일환으로 수행되었다.

II. 재료 및 방법

1. 조사 방법

본 연구는 2020년 6월부터 2021년 5월까지 1년 동안 경기

도 '남양주'에 위치한 아파트에서 PM₁₀, PM_{2.5} 및 블랙카본의 농도를 측정하였고, 측정된 농도 데이터를 주중과 주말, 실내와 실외, 계절별로 분류하여 시·공간적 농도분포 특성의 차이를 분석하였다.

측정이 이루어진 측정대상 아파트의 주변환경은 측정장소로부터 약 100 m 떨어진 곳에 도농역 경의 중앙선이 위치하고 있으며, 약 700 m 거리에는 공사현장이 있다. 그리고 약 2 km 떨어진 거리에는 소각시설인 구리자원회수시설이 위치하며, 약 1 km의 거리에는 수도권 제1순환고속도로와 북부간선도로가 위치하고 있다(Fig. 1).

사용된 실내·외 PM₁₀, PM_{2.5} 및 블랙카본의 농도 측정기에 사용된 측정기에 대한 정보는 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

2. 실시간 Particulate Matter (PM₁₀, PM_{2.5}) 측정

PM₁₀ 및 PM_{2.5}는 광산란법을 이용한 실외형 공기질 측정기 Dust Mon (Ssentry Co. Ltd, Korea)를 이용하여 측정하였다. 또한 재현성 검사를 수행하여 90% 이상의 효능을 보인 장비를 이용하여 측정을 진행하였다. 유량은 0.5 L/min로 고정하여 2020년 6월부터 2021년 4월까지 약 1년 동안 1분 단위로 24 시간 동안 측정하였다. 측정된 데이터는 Long Term Evolution Category M1 (LTE Cat M1)을 통한 데이터 수신 및 측정기 자체 SD Card에 저장되며, 저장된 자료를 활용하여 자료 분석을 수행하였다.

Table 1. Specifications of measuring device for PM₁₀, PM_{2.5}



Device	Dust Mon, sentry Co. Ltd	
Appearance	300(W)*150(D)*430(H) mm, 9 kg	
		
Metrics	PM	PM ₁₀ , PM _{2.5}
	Other	Temperature, humidity
Measurement range	PM	0~100,000 µg/m ³
Flux		0.5 L/min
Measuring interval		1 minute
Operating range		-30~60°C, 0~99% RH
Working power		220 VAC/60 Hz
Power		144 kW/month
Communications		LTE Cat M1
Data storage		SD CARD

Table 2. Specifications of measuring device for Black Carbon

Device	microAeth [®] AE-51, Aethlabs
Appearance	66(W)*38(D)*117(L) mm, 0.25 kg
	
Metrics	Black Carbon
Measurement range	0~1 mg BC/m ³
Flux	0.05~0.15 L/min
Measuring interval	5 minutes
Operating range	0 to 40 °C, non-condensing
Working power	100~240 VAC (50/60 Hz)
Power	Internal 3.6 V rechargeable lithium-ion battery
Communications	USB Connectivity to Windows-based PC
Data storage	4 MB flash memory

3. 실시간 블랙카본 농도 측정

공기 중 블랙카본은 휴대용 측정기인 Aethalometer AE51 (AethLabs, San Francisco, CA, USA)를 이용하여 측정하였으며, 유량은 0.05~0.15 L/min로 측정되었다. 계절별로 여름(2020.08), 가을(2020.10~11), 겨울(2021.01~02), 봄(2021.03~04)에 2주 동안 5분 단위로 24시간 동안 연속 측정하였다. Aethalometer를 이용한 블랙카본 농도 측정결과 대기 중 블랙카본 입자의 질량흡수단면은 520~550 nm의 가시광선 파장범위에서 8~14 m²/g의 값을 가지며, 측정 파장에 따라 다양한 값을 나타낸다. 그 이유는 블랙카본 입자의 오염원, 혼합 상태, 산란 코팅 셀 및 광 흡수 파장에 따라 광흡수단면 값이 변화하기 때문인 것으로 파악되고 있다.¹⁷⁾ 본 연구에서 사용된 AE51 모델은 입자에 의한 빛의 소멸을 측정하기 위해 880

nm의 근적외선 단일파장을 이용하며 실내 및 작업환경의 블랙카본 농도를 실시간 측정이 가능하도록 개발된 장비이며, Total Suspended Particulate (TSP) 중 블랙카본 농도를 측정한다.

4. 통계분석 방법

측정을 통해 획득된 농도 자료의 분석은 주중, 주말 및 실내, 실외로 구분하여 평균 농도의 차이의 경우 Student's t-test를 이용하였고, 계절별 시공간적 평균 농도의 차이는 ANOVA를 통해 유의수준 0.05를 기준으로 주중 및 주말의 농도, 실내·외 농도, 계절별 농도를 비교, 분석하였다. ANOVA를 이용한 계절별 평균 농도는 Scheffe의 사후분석을 통해 각 계절간 농도의 차이를 비교, 분석하였다. 통계분석은 SPSS (Ver. 19) 통계패키지를 이용했다.

Table 3. I/O ratio of PM₁₀ in weekdays and weekends by season

Season	Weekday/ weekend	I/O ratio	p-value*
Spring	Weekday	0.23	<0.001
	Weekend	0.28	<0.001
Summer	Weekday	0.54	<0.001
	Weekend	0.49	<0.001
Fall	Weekday	0.40	<0.001
	Weekend	0.44	<0.001
Winter	Weekday	0.36	<0.001
	Weekend	0.39	<0.001

*Verification of indoor and outdoor concentration difference.

Table 4. I/O ratio of PM_{2.5} in weekdays and weekends by season

Season	Weekday/ weekend	I/O ratio	p-value*
Spring	Weekday	0.13	<0.001
	Weekend	0.17	<0.001
Summer	Weekday	0.29	<0.001
	Weekend	0.37	<0.001
Fall	Weekday	0.26	0.517
	Weekend	0.27	0.908
Winter	Weekday	0.25	<0.001
	Weekend	0.27	<0.001

*Verification of indoor and outdoor concentration difference.

Table 5. Concentrations of PM₁₀ in weekdays and weekends by season (µg/m³)

Season	Site	Weekday/weekend	n	Mean±S.D.	Max	p-value
Spring	Indoor	Weekday	4,379	10.74±20.67	497.67	<0.001
		Weekend	1,871	8.41±13.64	272.08	
	Outdoor	Weekday	4,530	46.29±34.55	282.61	<0.001
		Weekend	1,872	29.65±22.11	204.67	
Summer	Indoor	Weekday	9,487	13.21±10.76	275.91	<0.001
		Weekend	3,740	10.77±9.32	256.16	
	Outdoor	Weekday	8,640	24.57±17.41	257.89	<0.001
		Weekend	2,448	21.81±15.10	78.63	
Fall	Indoor	Weekday	8,615	9.42±16.02	515.36	0.847
		Weekend	4,185	9.36±21.52	490.53	
	Outdoor	Weekday	8,712	23.27±24.22	696.24	<0.001
		Weekend	4,462	21.37±26.87	500.37	
Winter	Indoor	Weekday	6,278	11.51±14.17	238.09	0.246
		Weekend	2,767	11.94±19.95	509.33	
	Outdoor	Weekday	8,019	31.98±21.88	136.74	<0.001
		Weekend	3,902	30.94±20.92	111.51	

III. 결 과

1. 아파트 실내·외 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도 비교

1.1. 주중/주말 및 계절별 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도 비교

PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도는 가을철 PM_{2.5} 농도를 제외하고 사계절 모두 실외 농도가 실내농도에 비해 통계적으로 유의한 수준의 높은 농도를 나타내었다 (Table 3, Table 4). 각 계절별 주중, 주말별 실내외 농도비(I/O concentration ratio)의 범위는 PM₁₀은 0.23~0.54, PM_{2.5}는 0.13~0.37로 실외농도가 실내농도에 비해 약 2.5~4.5배 이상의 높은 농도를 보이는 것으로 나타났다. 이는 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 경우 계절 및 주중/주말에 따른 시간적 변수와는 관련 없이 실외 농도가 실내농도에 비해 높게 분포하고 있음을 시사하는 결과라 할 수 있다.

주중 및 주말별 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도의 경우 PM₁₀의 경우 겨울철 실내, PM_{2.5}의 경우 가을과 겨울철 실내를 제외하고 사계절 모두 주중의 농도가 주말의 농도에 비해 높은 농도를 나타냈고, 이는 가을과 겨울철의 실내 PM₁₀ 농도를 제외하고 공간적 변수와 관계없이 모두 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다 (Table 5, Table 6). 즉, 실내 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도는 실외 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도와 같이 주중이 주말보다 통계적으로 유의한 수준의 높은 농도를 보였다. 그러나 가을철 PM₁₀ 농도의 경우 주중이 주말에 비해 높은 농도를 나타냈으나 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았으며, 겨울은 다른 계절의 결과와는 달리 주말의 농도가 주중의 농도에 비해 높은 농도를 나타냈으나 이 역시 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다.

계절별 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도의 차이는 실내 및 실외 모두 계절 간에 통계적으로 유의한 농도 차이를 나타내었다(Table 7,

Table 6. Concentration of PM_{2.5} in weekdays and weekends by season ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Season	Site	Weekday/ weekend	n	Mean±S.D.	Max	p-value
Spring	Indoor	Weekday	4,396	4.82±10.13	225.72	<0.001
		Weekend	1,871	4.26±6.79	91.65	
	Outdoor	Weekday	4,433	37.19±26.07	193.05	
		Weekend	1,872	25.24±19.09	159.56	
Summer	Indoor	Weekday	6,348	6.52±5.69	157.83	<0.001
		Weekend	3,740	5.55±4.57	120.11	
	Outdoor	Weekday	3,296	22.30±12.76	102.37	
		Weekend	3,168	14.83±11.99	61.73	
Fall	Indoor	Weekday	8,615	4.40±7.23	222.80	<0.001
		Weekend	4,185	4.52±13.61	445.01	
	Outdoor	Weekday	8,712	16.79±18.63	244.43	
		Weekend	4,318	16.83±24.78	549.90	
Winter	Indoor	Weekday	6,278	6.52±8.00	170.28	<0.001
		Weekend	2,767	6.95±11.54	359.26	
	Outdoor	Weekday	8,019	25.79±17.73	100.52	
		Weekend	3,902	25.42±17.73	99.93	

Table 7. Seasonal difference of indoor and outdoor PM₁₀ concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Site	Season	N	Mean±S.D.	Max	p-value
Indoor	Spring	6,250	10.05±18.87	497.67	<0.001
	Summer	13,227	12.52±10.43	275.91	
	Fall	12,800	9.40±18.00	515.36	
	Winter	9,045	11.64±16.16	509.33	
Outdoor	Spring	6,402	41.42±32.82	282.61	<0.001
	Summer	11,088	23.96±16.97	257.89	
	Fall	13,174	22.62±25.17	696.24	
	Winter	11,921	31.64±21.57	136.74	

Table 8. Seasonal difference of indoor and outdoor PM_{2.5} concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Site	Season	N	Mean \pm S.D.	Max	p-value
Indoor	Spring	6,267	4.66 \pm 9.26	225.72	<0.001
	Summer	10,088	6.46 \pm 5.32	157.83	
	Fall	12,800	4.44 \pm 9.79	445.01	
	Winter	9,045	6.65 \pm 9.23	359.26	
Outdoor	Spring	6,305	33.64 \pm 24.81	193.05	<0.001
	Summer	6,464	18.64 \pm 12.94	102.37	
	Fall	13,030	16.80 \pm 20.87	549.90	
	Winter	11,921	27.47 \pm 18.99	111.51	

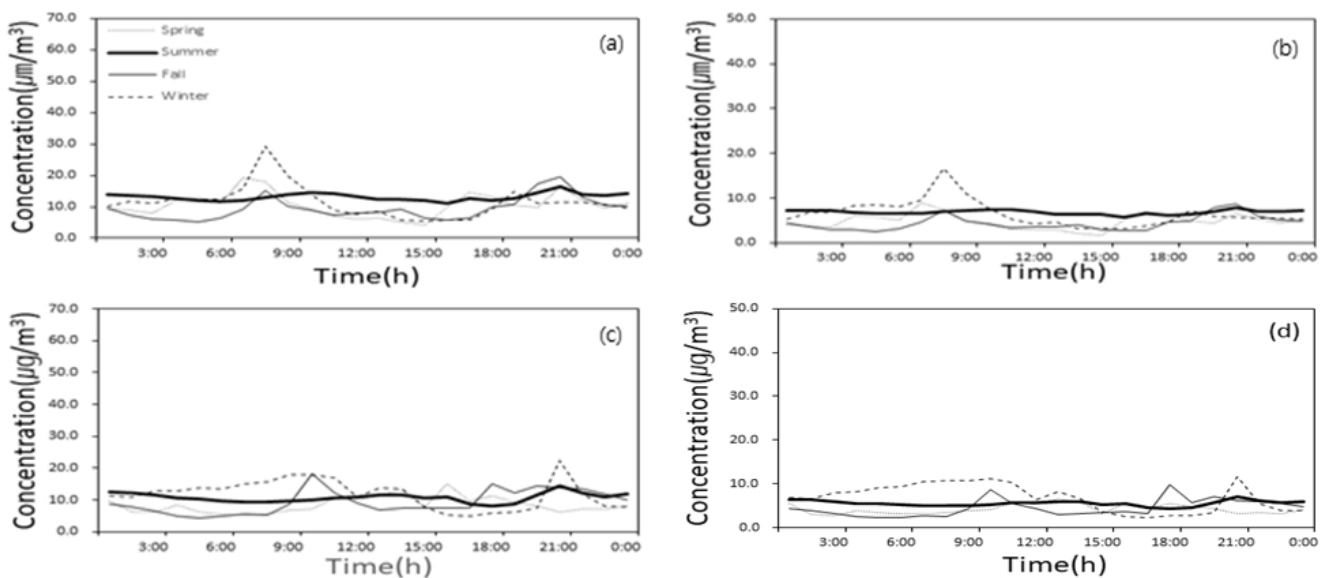
**Fig. 2.** Diurnal concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} in indoor. (a) PM₁₀ concentration in weekdays, (b) PM_{2.5} concentration in weekdays, (c) PM₁₀ concentration in weekends, (d) PM_{2.5} concentration in weekends

Table 8). Scheffe의 사후분석을 통해 각 계절간 농도의 차이를 비교한 결과, 봄과 가을철의 실내 PM₁₀, PM_{2.5} 농도 차이가 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않은 것(PM₁₀ p-value=0.07, PM_{2.5} p-value=0.47)을 제외하고 모든 계절 간 농도 차이는 통계적으로 유의했다(p<0.05). 실내의 경우 PM₁₀은 여름, 겨울, 봄, 가을의 순으로, PM_{2.5}는 겨울, 여름, 봄, 가을의 순으로 높은 농도를 나타낸 반면 실외의 경우 PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 봄, 겨울, 여름 가을의 순으로 높은 농도를 나타냈다. 즉, 실외의 경우 황사 및 비행사 등과 같은 영향, 실내의 경우 계절에 따른 환기 및 실내 거주자들의 생활환경 변화 등이 계절적 농도 분포의 차이를 나타내고 있는 것으로 생각한다.

1.2. 시간대에 따른 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도분포

하루 중 시간대별 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도 변동을 파악하고자 1시간 간격으로 평균을 구한 일 중 변화 양상을 실내, 실외로 구

분하여 각각 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

실내 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도는 주중의 경우 봄과 겨울철에는 7:00~8:00시에 각각 PM₁₀은 18.63 \pm 26.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 20.24 \pm 11.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 8.21 \pm 11.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 12.31 \pm 12.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최고농도에 도달했고, 여름과 가을철에는 21:00시에 각각 PM₁₀은 15.94 \pm 21.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 17.69 \pm 28.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 7.71 \pm 9.77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 7.86 \pm 12.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도가 나타났다(Figs. 2a, 2b). 반면, 주말의 경우 PM₁₀은 봄, 여름, 겨울에는 8:00~9:00시에 각각 6.12 \pm 7.98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 9.52 \pm 6.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 16.84 \pm 17.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최고농도에 도달했고, 가을철에는 10:00시에 18.13 \pm 37.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최고농도에 도달했다. PM_{2.5}는 봄에는 13:00시, 가을은 18:00시, 여름과 겨울에는 21:00시에 각각 6.71 \pm 9.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 9.73 \pm 35.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 7.04 \pm 8.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 11.65 \pm 32.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최고농도에 도달했다(Figs. 2c, 2d). 즉, PM₁₀과 PM_{2.5}의 시간대별 농도 변화는 주중/

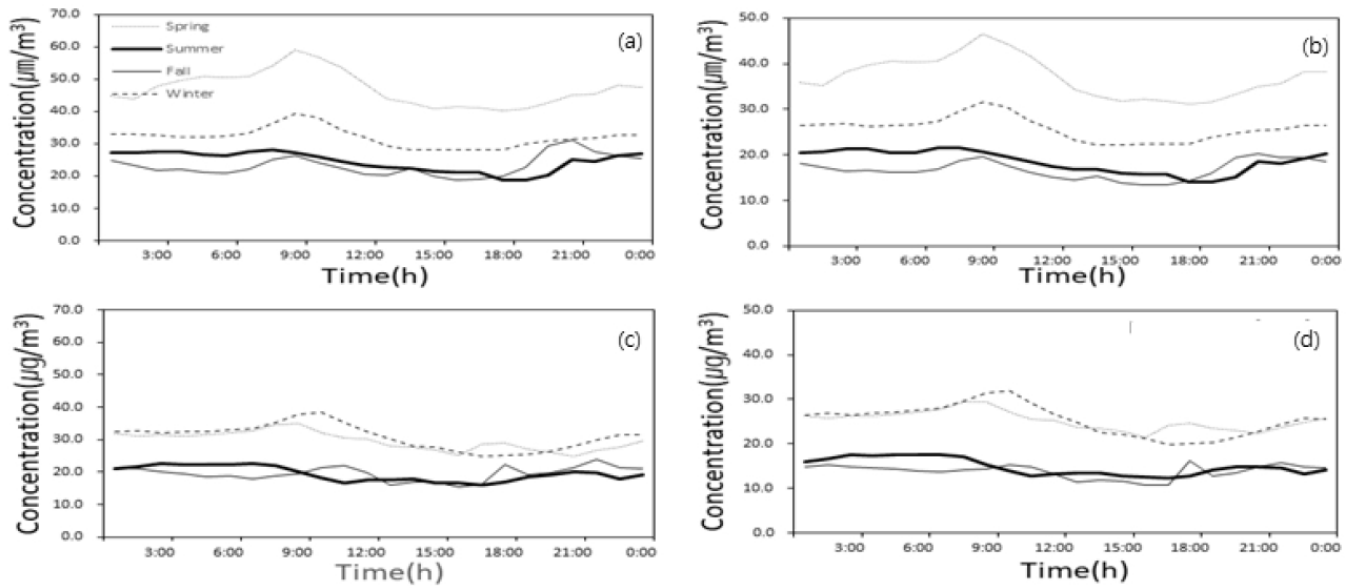


Fig. 3. Diurnal variation of concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} in outdoor. (a) PM₁₀ concentration in weekdays, (b) PM_{2.5} concentration in weekdays, (c) PM₁₀ concentration in weekends, (d) PM_{2.5} concentration in weekends

주말에 따라 다른 양상을 보였으며, 주중 PM₁₀와 PM_{2.5}는 유사한 일중 변화 양상을 보였으나, 주말 PM₁₀와 PM_{2.5}의 일중 변화는 다른 양상을 보였다.

실외 PM₁₀와 PM_{2.5} 농도는 주중의 경우 봄, 여름, 겨울철에는 8:00~9:00시에 각각 PM₁₀은 56.58±42.76 µg/m³, 25.92±18.32 µg/m³, 37.72±20.16 µg/m³, PM_{2.5}는 44.82±34.07 µg/m³, 21.12±15.15 µg/m³, 30.67±16.18 µg/m³로 최고농도에 도달했고, 가을철에는 21:00시에 PM₁₀은 27.94±29.03 µg/m³, PM_{2.5}는 18.41±19.69 µg/m³로 최고농도에 도달했다(Figs. 3a, 3b). 반면, 주말의 경우 실내 PM₁₀과 PM_{2.5}의 일중 변화 양상과 같이 PM₁₀은 봄과 겨울철에는 9:00~10:00시, 가을에는 22:00시, 여름철에는 3:00시에 각각 33.55±26.90 µg/m³, 38.08±23.33 µg/m³, 23.75±26.95 µg/m³, 22.75±15.62 µg/m³로 가장 높은 농도가 나타났으며, PM_{2.5}는 봄, 여름, 겨울철에는 7:00~10:00시에 28.40±21.91 µg/m³, 15.99±12.86 µg/m³, 30.28±µg/m³로 최고농도에 도달했고, 가을철에는 18:00시에 16.23±µg/m³로 최고농도에 도달했다(Figs. 3c, 3d).

PM₁₀과 PM_{2.5}의 일 중 변화 양상은 주중의 경우 계절 및 실내외에 따른 공간적 변수와는 관련 없이 출퇴근 시간대와 같은 인위적인 활동이 활발한 시간대에 높은 농도를 보였다. 주말의 경우 봄의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도가 주중에 비해 낮게 나타났으나, 전체적인 일 중 변화 양상은 주중과 유사한 경향을 보였다. 즉, PM₁₀과 PM_{2.5}는 실외의 경우 출퇴근 시간대, 실내의 경우 실내 거주자들의 생활활동 시간 등이 일중 농도 변화의 차이에 영향을 끼치는 것으로 생각한다.

Table 9. The I/O ratio of black carbon in and weekends by season

Season	Weekday/weekend	I/O ratio	p-value*
Spring	Weekday	0.21	<0.001
	Weekend	0.34	<0.001
Summer	Weekday	1.48	<0.001
	Weekend	1.97	<0.001
Fall	Weekday	3.77	<0.001
	Weekend	3.35	<0.001
Winter	Weekday	0.39	<0.001
	Weekend	0.32	0.079

*Verification of indoor and outdoor concentration difference.

2. 아파트 실내·외 블랙카본의 농도 비교

2.1. 주중/주말 및 계절별 블랙카본의 농도 비교

블랙카본의 농도는 봄과 겨울은 PM₁₀과 PM_{2.5}와 같이 실외 농도가 실내농도에 비해 높은 농도로 보이는 것으로 조사되었고, 이는 겨울철 주말 농도를 제외하고 통계적으로 유의한 수준이었다. 반면, 여름과 가을은 실내농도가 실외농도에 비해 통계적으로 유의하게 높은 농도로 나타났다(Table 9). 각 계절별 주중, 주말별 실내외의 농도비의 범위는 0.21~3.77으로 봄과 겨울의 경우 실외 농도가 실내 농도에 비해 약 0.4배 높은 농도를 보였고, 여름과 가을의 경우 실내 농도가 실외 농도에 비해 약 3.3배 이상의 높은 농도를 보이는 것으로 나타났으며, 사계절 평균 약 1.9배 이상의 높은 농도를 보이는 것으로 조사되었다.

Table 10. The concentration of black carbon in weekdays and weekends by season ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Season	Site	Weekday/ weekend	n	Mean \pm S.D.	Max	p-value	
Spring	Indoor	Weekday	2,005	0.46 \pm 0.38	5.47	0.379	
		Weekend	527	0.45 \pm 0.37	1.87		
	Outdoor	Weekday	3,509	2.17 \pm 1.68	14.31		<0.001
		Weekend	1,656	1.31 \pm 1.21	6.54		
Summer	Indoor	Weekday	3,620	1.23 \pm 1.12	11.90	0.092	
		Weekend	1,152	1.34 \pm 2.04	25.48		
	Outdoor	Weekday	3,560	0.83 \pm 0.51	4.65		<0.001
		Weekend	1,083	0.68 \pm 0.52	4.77		
Fall	Indoor	Weekday	2,872	2.45 \pm 1.62	11.35	<0.001	
		Weekend	1,135	1.84 \pm 6.37	1.05		
	Outdoor	Weekday	2,845	0.65 \pm 0.55	4.57		<0.001
		Weekend	1,107	0.55 \pm 0.39	2.34		
Winter	Indoor	Weekday	2,949	0.61 \pm 0.46	2.85	<0.001	
		Weekend	1,056	0.48 \pm 0.40	2.33		
	Outdoor	Weekday	2,813	1.57 \pm 1.14	7.72		<0.001
		Weekend	1,208	1.50 \pm 1.07	5.99		

Table 11. Seasonal difference of indoor and outdoor black carbon concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Site	Season	N	Mean \pm S.D.	Max	p-value
Indoor	Spring	2,532	0.46 \pm 0.38	5.47	<0.001
	Summer	4,772	1.26 \pm 1.40	25.48	
	Fall	4,007	2.27 \pm 1.51	11.35	
	Winter	4,005	0.57 \pm 0.45	2.85	
Outdoor	Spring	5,165	1.90 \pm 1.60	14.31	<0.001
	Summer	4,643	0.80 \pm 0.52	4.77	
	Fall	3,952	0.62 \pm 0.51	4.57	
	Winter	4,021	1.55 \pm 1.12	7.72	

이는 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 분포와는 다르게 블랙카본의 경우 계절에 따른 시간적 변수가 실내의 블랙카본 농도에 영향을 끼칠 수 있음을 시사하는 결과라 할 수 있다.

주중 및 주말별 실외 블랙카본 농도의 경우 주중의 농도가 주말의 농도에 비해 통계적으로 유의하게 높은 농도로 나타났다 (Table 10). 반면, 실내 블랙카본 농도의 경우 가을과 겨울은 주중의 농도가 주말의 농도에 비해 통계적으로 유의하게 높은 농도로 나타났다. 봄의 경우 주중의 농도가 주말의 농도보다 높게 나타났으나 통계적으로 유의하지 않았고, 여름은 주말의 농도가 주중의 농도보다 높게 나타났으나 이 역시 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 이는 조사대상 주거환경에서의 실외 블랙카본의 경우 계절과 관계없이 주중이 주말에 비해 높은 농도를 나타냈으나 겨울은 주중과 주말 간에 유의한 농도 차이가 없음을 나타내고 있다. 또한, 실내 블랙카본의 경우 가을과 겨울은

PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 분포와 다르게 봄, 가을, 겨울의 경우 주중의 농도가 주말의 농도에 비해 높은 농도를 나타내지만 봄은 주중과 주말 간에 유의한 농도 차이가 없으며, 여름의 경우 주중보다 주말의 농도가 높은 수준으로 나타내지만 주중과 주말 간에 유의한 농도 차이가 없음을 보여주는 결과라 할 수 있다.

계절별 블랙카본 농도의 차이는 실내 및 실외 모두 계절 간에 통계적으로 유의한 농도 차이를 나타낸 것으로 조사되었다 (Table 11). Scheffe의 사후분석을 통해 각 계절간 농도의 차이를 비교한 결과, 모든 계절간 농도 차이는 통계적으로 유의했다 ($p < 0.05$). 실내의 경우 가을, 여름, 겨울, 봄의 순으로 높은 농도를 나타낸 반면 실외의 경우 봄, 겨울, 여름, 가을의 순으로 높은 농도를 나타냈다. 이와 같은 결과는 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 와 같이 실내 및 실외 블랙카본 농도가 황사 혹은 비황사, 계절에 따른 환기 및 실내 거주자들의 생활환경 변화 등과 같은 공간별 계절

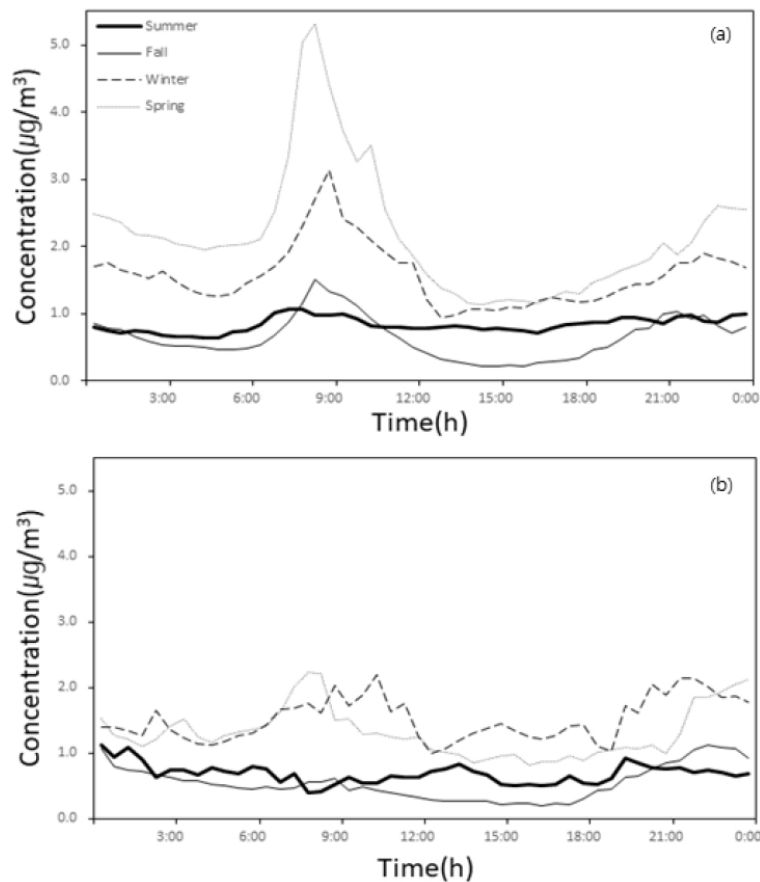


Fig. 4. Diurnal concentrations of black carbon in outdoor. (a) Weekdays, (b) Weekends

적 특성에 의해 농도 분포의 차이가 나타나는 것으로 여겨진다.

2.2. 시간대에 따른 블랙카본의 농도분포

하루 중 시간대별 블랙카본 농도 변동을 파악하고자 1시간 간격으로 평균을 구한 일중 변화 양상을 실내, 실외로 구분하여 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

실내 블랙카본 농도는 주중의 경우 봄, 가을 겨울에는 출근시간대(7:00~9:00)에 각각 $0.63 \pm 0.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3.40 \pm 1.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.22 \pm 1.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최고농도에 도달했고, 15:00~16:00시 이후 농도가 점차 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4a). 여름에는 하루 중 농도 변화가 크게 없이 $1.23 \pm 1.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 농도 수준으로 유지되는 것으로 조사되었다(Table 4). 반면, 주말의 경우 주중 일주변동과 다르게 큰 폭의 농도 변화는 나타나지 않았으나, 계절마다 모두 다른 시간대에 최고농도에 도달했다. 봄은 4시, 여름에는 14시, 가을에는 8시, 겨울에는 20시에 가장 높은 농도로 나타났고, 각각 $0.88 \pm 0.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.27 \pm 3.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3.26 \pm 1.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.87 \pm 0.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 것으로 조사되었다(Fig. 4b). 즉, 실내 블랙카본의 일중 농도 변동은 계절 및 주중/주말에 따른 시간적 변수에 의해 영향을

받을 수 있음을 시사하는 결과라 할 수 있다.

실외 블랙카본 농도는 주중의 경우 계절과 관계없이 모두 출근시간대(8:00~9:00)에 최고농도(봄: $4.53 \pm 2.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름: $1.02 \pm 0.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을: $1.22 \pm 0.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울: $0.99 \pm 0.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 도달했고, 오후에는 퇴근시간대인 18:00시 이후 블랙카본 농도가 점차 증가하다가 22:00~23:00시 이후 감소하는 결과가 나타났다(Fig. 5a). 반면, 주말의 경우 봄에는 주중과 같이 8~9시에 $1.99 \pm 1.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최고농도에 도달했으나, 여름에는 1~2시, 가을에는 23~24시, 겨울에는 21~22시에 각각 $1.01 \pm 0.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.06 \pm 0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.05 \pm 1.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 계절마다 다른 시간에 최고농도에 도달했다. 또한, 여름의 경우 1시간에서 2시간 간격으로 $1.5 \sim 2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도로 타계절 대비 큰 폭의 농도 변동이 발생했다(Fig. 5b). 즉, 실외 블랙카본의 일중 농도 변동은 계절 및 사람들의 시간대별 활동 패턴등과 같은 시간적 변수에 의해 영향을 받을 수 있음을 시사하는 결과라 할 수 있다.

블랙카본 농도의 일중 변화 양상은 PM₁₀과 PM_{2.5}와 같이 주중과 주말 모두 계절 및 실내외에 따른 공간적 변수와 실외의 경우 출퇴근, 실내의 경우 실내 거주자의 실내 활동과 같은 시

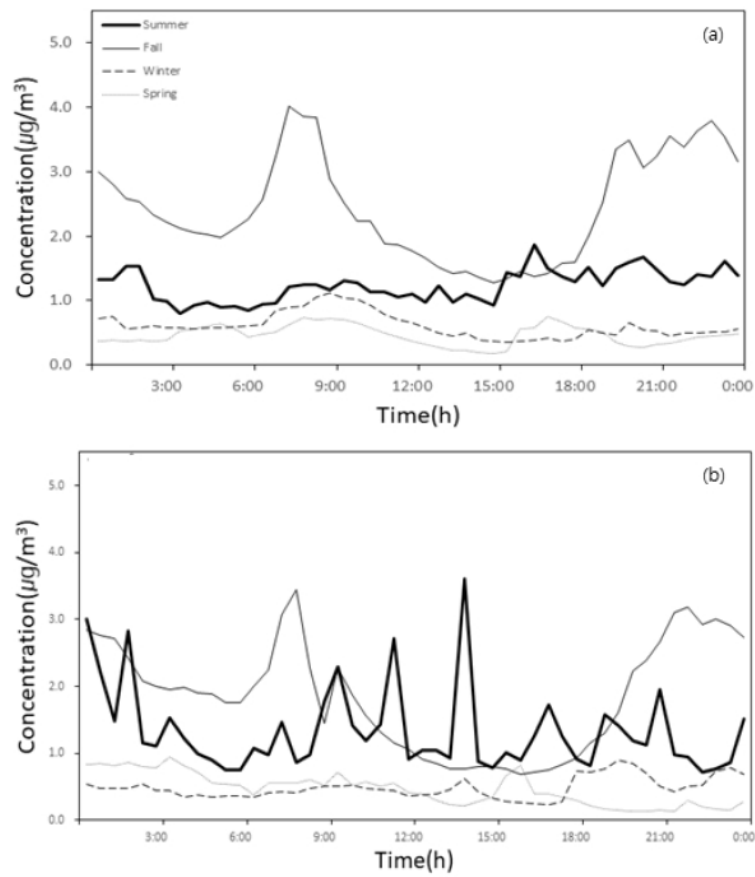


Fig. 5. Diurnal concentrations of black carbon in indoor. (a) Weekdays, (b) Weekends

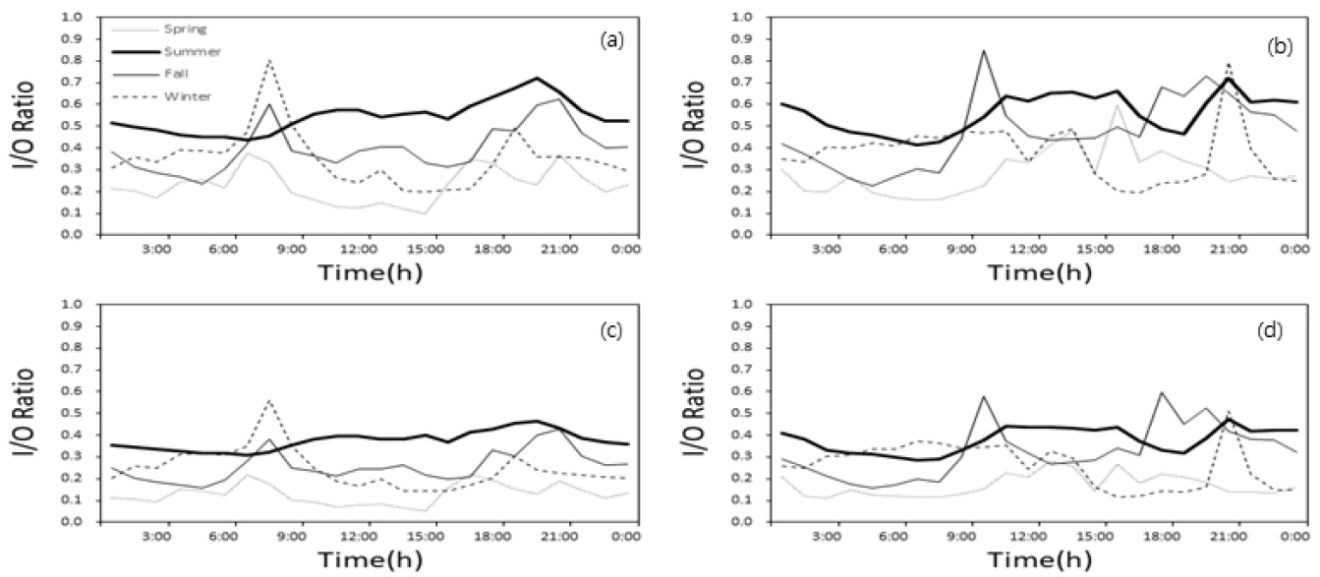


Fig. 6. Diurnal I/O ratio of PM₁₀ and PM_{2.5} during weekdays and weekends. (a) PM₁₀ I/O ratio in weekdays, (b) PM_{2.5} I/O ratio in weekdays, (c) PM₁₀ I/O ratio in weekends, (d) PM_{2.5} I/O ratio in weekends

간적 변수가 블랙카본 농도의 일주변동에 영향을 끼칠 수 있음을 시사한다.

IV. 고 찰

1. 거주지 실내·외 PM₁₀, PM_{2.5} 농도 비교

1.1. 주중/주말 및 계절별 PM₁₀ 농도 비교

PM₁₀ 농도는 계절 및 주중/주말에 따른 시간적 변수와 관계없이 실외 농도가 실내 농도보다 통계적으로 유의하게 높게 분포하고 있다(Table 3). 이는 측정지점이 서울 외곽에서 4.1 km 거리에 위치하여 서울로 왕래하는 인구가 많으며, 인근에 교통량이 하루 평균 187,520대인 수도권 제1순환고속도로가 위치해 있기 때문인 것으로 보인다. 또한, 조사대상 주거환경이 도로변에 위치하고 있고, 교통량이 많은 도심에 위치한 것이 실외 PM₁₀ 농도에 영향을 끼쳤을 것으로 생각한다. 실제로 1시간 간격으로 PM₁₀의 I/O ratio를 조사한 결과, 계절 및 주중/주말과 관계없이 사람들이 생활하는 시간대 즉, 주중에는 출, 퇴근 시간대에 주말에는 9:00~11:00시, 22:00시 이전에 실외 PM₁₀ 농도가 비교적 높은 수준으로 나타났다(Figs. 6a, 6c).

조사대상 주거환경의 실외 PM₁₀ 농도는 국내 및 국제기구에서 권장하는 농도보다는 낮은 수준이지만, 봄과 겨울에는 권장 농도와 가까운 수준의 높은 농도가 나타나는 것으로 조사되었으며, 최댓값의 경우 696.24 µg/m³으로 국내 PM₁₀의 하루 평균 기준인 100 µg/m³을 약 7배 정도 초과하였다(Table 5). 반면, 실내의 경우 PM₁₀의 평균농도는 국내 실내공기질 관리기준에 비해 현저히 낮은 수준으로 조사되었으나, 실외와 같이 최댓값은 일반 시설의 실내공기질 관리기준인 100 µg/m³을 515.36 µg/m³으로 약 5.2배 초과하는 것으로 조사되었다(Table 5). 실내의 경우 조리 활동이나 그 외 실내 활동으로 인해 단시간에 고농도에 도달할 우려가 있으며, 미국 환경청(US EPA)는 주방조리 행위를 실내 PM₁₀ 발생 주요 원인 중 하나로 규정하고 있다.^{18,19)} 실제로 본 연구에서도 재실자가 음식 조리를 했을 것으로 추정되는 7:00~9:00의 PM₁₀ 농도는 238.09~515.36 µg/m³으로 고농도의 PM₁₀이 발생하였다. 즉, 실내 PM₁₀ 농도에 주방조리 행위가 영향을 끼쳤을 것으로 추정되며, PM₁₀ 평균농도가 낮더라도 단기간 고농도의 PM₁₀에 노출될 우려가 있을 것으로 보인다.

주중 및 주말별 실외 PM₁₀ 농도는 사계절 모두 주말보다 주중에 통계적으로 유의하게 높은 농도로 나타났다(Table 5). Choi et al. (2008)²⁰⁾의 연구에 따르면, 전국의 주요 도시에서 PM₁₀ 농도를 측정된 결과 주중의 농도가 주말보다 높았고, 이는 주말의 감소된 에어로졸 배출량이 주된 원인이라고 하였다. 또한, 영국 런던의 3개 지점(도로변, 도시 중심, 교외지역)의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 주중/주말 농도를 분석한 결과, 도로변과 도시

중심의 PM₁₀ 농도는 주중이 주말보다 높게 나타났고, 이는 주말의 경우 기관 및 산업체의 휴무로 인해 승용차나 트럭의 운행량이 적어 그에 따라 PM₁₀의 배출량과 기인 물질이 비교적 감소한 것으로 보인다.²¹⁾ 반면, 실내 PM₁₀ 농도는 봄과 여름의 경우 실외 PM₁₀ 농도분포와 같이 주중이 주말에 비해 높은 농도가 나타났지만, 가을과 겨울은 주중과 주말 간에 유의한 농도 차이가 없었다. 실내환경은 실내·외 차압 및 실외 바람에 의한 풍압, 실내·외 온도차 등의 영향으로 실외 대기 중의 PM₁₀이 실내로 유입될 수 있으며,²²⁾ 실내 배출원에 직접 영향을 받을 수 있다. 주로 비산먼지나 해염 등의 물리적 작용이 주요한 발생원이며, 재실자의 이동, 실내 혹은 바닥에 가하는 충격, 파쇄와 같은 행위가 발생할 경우 특히 PM₁₀의 농도가 증가한다.²³⁾ 즉, 조사대상 주거환경의 실내 PM₁₀ 농도는 물리적 활동이 영향을 끼쳤을 것으로 추정되나, 계절에 따라 물리적 활동에 차이가 없을 것으로 보인다. 따라서 계절별 실내 주요 발생원의 차이가 없으므로, 실내 PM₁₀ 농도는 실외 PM₁₀ 농도에 의해 주말보다 주중 농도가 높게 나타난 것으로 추정된다.

계절별 PM₁₀ 농도의 차이는 실외의 경우 봄, 겨울, 여름, 가을의 순으로 높은 농도로 나타났고, 실내의 경우 여름, 겨울, 봄, 가을의 순으로 높은 농도를 나타냈으며 이는 통계적으로 유의했다(Table 7). 실외 PM₁₀ 농도는 특히 봄철에 41.42±32.82 µg/m³로 높은 수준으로 나타났으며, 이는 가을철 PM₁₀ 농도에 비해 1.5~2배 높은 수준이었다. 기상청 데이터에 따르면 PM₁₀ 및 블랙카본의 샘플링 기간 동안 발생한 12회의 황사 중 1월에 2회, 3월과 4월에 총 7회가 발생하였으며, 3월 황사 발생 시 서울의 일 평균 PM₁₀ 농도는 317 µg/m³, 최대 598 µg/m³로 황사 발생 시 PM₁₀ 농도가 매우 높은 것으로 조사되었다.²⁴⁾ 이는 황사 발생이 봄철 PM₁₀ 농도에 영향을 끼칠 수 있음을 시사하는 결과라 할 수 있다. 게다가, 봄철 주중의 PM₁₀ 농도는 주말에 비해 상당히 높은 수준으로 나타났는데, 이는 봄철 측정 기간 중 발생한 7차례의 황사 중 하루를 제외하고 6차례가 주중에 발생한 것이 주중 PM₁₀ 농도에도 영향을 끼쳤을 것으로 보인다. 실내 PM₁₀ 농도는 여름철에 12.52±10.43 µg/m³으로 가장 높은 농도로 나타났으며, 이는 가을철 PM₁₀ 농도에 비해 약 1.3배 높은 수준이었다. 홍콩의 가을과 겨울 사이 34개의 가정에서 측정된 실내 PM₁₀ 농도는 69.5 µg/m³이었으며,²⁵⁾ 폴란드의 아파트 내에서 측정된 PM₁₀ 농도는 23.1~39.7 µg/m³으로 다른 국가의 주거환경의 결과와 비교할 때 조사대상 주거환경에서의 PM₁₀ 농도는 낮은 수준이었다.²⁶⁾

1.2. 주중/주말 및 계절별 PM_{2.5} 농도 비교

PM_{2.5} 농도는 PM₁₀ 농도와 같이 계절 및 주중/주말에 따른 시간적 변수와 관계없이 실외 농도가 실내농도보다 높게 분포하고 있고, 이는 가을철 농도를 제외하고 통계적으로 유의하게 나타났다(Table 4). 이는 PM₁₀와 같이 조사대상 주거환경이

도로변에 위치하고 있어, 실외 $PM_{2.5}$ 농도에 상당한 영향을 끼쳤을 것으로 사료된다. 1시간 간격으로 $PM_{2.5}$ 의 I/O ratio를 조사한 결과 PM_{10} 에 비해 I/O ratio가 비교적 낮은 수준이었으나, PM_{10} 와 같이 계절 및 주중/주말과 관계없이 사람들이 생활하는 시간대에 실외 $PM_{2.5}$ 농도가 비교적 높은 수준으로 나타났다(Figs. 6b, 6d).

2018년 3월 기준 국내에서 권장하고 있는 연평균 $PM_{2.5}$ 농도는 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 미국, 일본도 역시 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, WHO의 경우 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 조사대상 주거환경의 실외 $PM_{2.5}$ 농도는 국내 및 국제기구에서 권장하는 농도보다 1.0~2.5배 정도 초과하는 것으로 나타났으며, 최고농도의 경우 $549.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 24시간 $PM_{2.5}$ 농도 기준인 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 약 12.7배 초과하는 것으로 조사되었다(Table 6). 반면, 실내의 경우 $PM_{2.5}$ 평균농도는 PM_{10} 와 같이 국내 실내공기질 관리기준에 비해 현저히 낮은 수준으로 조사되었으나, 이 역시 최대 농도가 $445.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 일반 시설의 실내공기질 관리기준인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 약 9배 초과하는 것으로 조사되었다(Table 6). 선행 연구에 따르면, 조리과정에서 육류를 구울 때 $188\sim 2,524 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 생선 조리 시 $335\sim 6,087 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상당히 높은 농도로 $PM_{2.5}$ 가 발생하며, 조리 전($58 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 15~100배 높은 수준이었다.²⁷⁾ 본 연구에서도 재실자가 음식 조리를 했을 것으로 추정되는 7:00~9:00시의 $PM_{2.5}$ 농도는 $91.65\sim 445.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 고농도의 $PM_{2.5}$ 가 발생했다. 이는 실내 PM_{10} 와 같이 $PM_{2.5}$ 도 역시 주방조리 행위가 영향을 끼쳤을 것으로 추정되며, $PM_{2.5}$ 는 오염물질 특성상 공기 중에 오래 머물러 있으면서 재실자의 활동 및 환기 시 재비산할 수 있어 재실자의 관리가 소홀할 경우 장기간 동안 고농도의 $PM_{2.5}$ 노출이 우려된다. 또한, PM_{10} 보다 더 높은 수준으로 국내기준을 초과하는 것으로 보아 실내 $PM_{2.5}$ 에 대한 관리가 적극적으로 이루어져야 할 것으로 보인다.

주중 및 주말별 실외 $PM_{2.5}$ 농도는 가을철 농도를 제외하고 주말보다 주중에 통계적으로 유의하게 높은 농도로 나타났다(Table 6). 선행 연구에 따르면, 주중과 주말의 교통 통행량이 많은 차이가 있는 업무상가지역의 도로변 $PM_{2.5}$ 농도는 주말($20.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 주중($44.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 약 2배 정도 더 높은 농도로 나타났다.²⁸⁾ 즉, 차량 배기가스가 $PM_{2.5}$ 의 주된 발생원인 도심의 경우 교통 통행량이 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도에 상당한 영향을 끼치는 것으로 여겨진다. 반면, 실내 $PM_{2.5}$ 농도는 봄과 여름에는 주말보다 주중에 통계적으로 유의하게 높은 농도로 나타났으나, 가을과 겨울에는 주중보다 주말에 통계적으로 유의하게 높은 농도로 나타났다. 실외의 PM_{10} 은 공기 흐름, 자연 및 기계 환기의 조합을 통해 실내로 유입되며, 특히, 입자 직경 1~2.5 μm 사이의 입자 중 70% 이상이 실내환경으로 침투한다.²⁹⁾ 또한, $PM_{2.5}$ 는 실내환경에서도 생성될 수 있는데, 조리 등으로 인한 연료의 연소 및 청소로 인한 침적 먼지의 비산은 주거용 건물의 주요 발생원이다.³⁰⁾ 이는 조사대상 주거환경의 경우 목재

나 석탄 및 바이오매스 연료를 사용하지 않으므로 요리 활동에서 발생한 $PM_{2.5}$ 가 실내 $PM_{2.5}$ 농도에 주된 영향을 끼쳤을 것으로 추정되나, 계절에 따라 요리 활동의 차이가 없을 것으로 보인다. 따라서 PM_{10} 와 같이 계절 별 실내 주요 발생원의 차이가 없으므로, 실내 $PM_{2.5}$ 농도는 실외 $PM_{2.5}$ 농도에 의해 주말보다 주중 농도가 높게 나타난 것으로 추정된다.

계절별 $PM_{2.5}$ 농도의 차이는 실외의 경우 봄, 겨울, 여름, 가을 순으로 높은 농도로 나타났고, 실내의 경우 겨울, 여름, 봄, 가을의 순으로 높은 농도를 나타냈으며 이는 통계적으로 유의했다(Table 8). 실외 $PM_{2.5}$ 농도는 PM_{10} 와 같이 특히 봄철에 $33.64\pm 24.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높은 수준으로 나타났으며, 이는 사계절 중 가장 낮은 농도가 나타난 여름철 $PM_{2.5}$ 농도에 비해 약 2배 정도 높은 수준이었다. 황사는 대부분 토양 성분을 기원으로 하는 조대입자(Coarse Particle Matters, CPM)로 입자의 직경이 상당히 크다고 알려져 있으나, 최근 중국 동부의 산업발전으로 연료 연소나 화학작용으로 생성되거나 대기 중 광화학 반응에 의해 생성되는 미세입자가 황사에 포함되어 장거리 이동된다.³¹⁾ 즉, 황사 발생이 PM_{10} 뿐만 아니라 $PM_{2.5}$ 농도에도 영향을 끼쳤을 것으로 보이며, 이로 인해 봄철 높은 수준의 $PM_{2.5}$ 농도가 나타났을 것으로 추정된다. 반면, 실내 $PM_{2.5}$ 농도는 겨울에 $6.65\pm 9.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 사계절 중 가장 높은 수준으로 나타났으며 이는 가장 낮은 농도가 나타난 가을철에 비해 약 1.5배 정도 높은 수준이었다. 유럽의 4개 도시(아테네, 바젤, 헬싱키, 프라하)에서 측정된 실내 $PM_{2.5}$ 농도는 각각 $35.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $21.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $9.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $34.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 다른 국가의 주거환경과 비교할 때 조사대상 주거환경의 실내 $PM_{2.5}$ 농도는 낮은 수준인 것으로 조사되었다.³²⁾

1.3. 시간대에 따른 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 농도 분포

실내외 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 일주변동은 입자 크기와 관계없이 유사한 양상을 보였다(Figs. 2, 3). 또한, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 일주변동은 실외에서는 계절 및 주중/주말과 같은 시간적 변수와 관계없이 유사한 모습으로 나타났으나(Fig. 3), 실내에서는 주중과 주말의 일주변동이 다른 것으로 보아(Fig. 2), 주중/주말에 따른 실내 거주자들의 생활환경 변화 등이 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

실내 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 는 주중의 경우 봄과 겨울철에는 7:00시에, 여름과 가을철에는 20:00~21:00시에 가장 높은 농도가 나타났(Figs. 2a, 2b). 반면 주말의 경우 주중의 일주변동과 다르게 계절마다 다양한 시간대에 최고농도에 도달했으며, 주로 사람들이 활발하게 생활하는 시간인 9:00~21:00시 사이에 나타났(Figs. 2c, 2d). 또한 실내 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도는 순간적으로 고농도에 도달했다가 30분에서 1시간 이내로 급격히 감소하는 경향이 있었고, 실외 일주변동(Fig. 3)에 비해 그래프 형태가 완만하지 않았다. 실내환경에서는 조리, 청소, 양초 연소

등과 같은 재실자의 활동이 실내 공기 질에 영향을 끼친다. 특히 조리과정에서 고농도의 오염물질이 배출되는 것으로 조사되었는데, 재실자가 조리 활동에 과정에서 단기간에 고농도로 배출된 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도가 창문개방 혹은 기계 환기로 인해 실내 공기 중 농도가 급격하게 감소할 수 있다.¹⁸⁾ 즉, 조사대상 주거환경의 실내 PM₁₀, PM_{2.5} 농도는 동일한 계절적 영향보다는 계절별 및 주중/주말에 따른 실내 거주자의 활동이 시간대별 농도분포의 차이에 영향을 끼치는 것으로 보인다. 그러나 본 연구에서는 실내 거주자의 활동을 체계적으로 제어하면서 측정하지 않았으므로, 재실자의 활동 별 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도를 정량적으로 분석하기는 어려울 것으로 보인다.

실외 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 경우 주중에는 전반적으로 출퇴근시간대엔 높은 농도로 나타났으며, 그 외에 새벽 및 낮에는 출퇴근시간대 대비 낮은 수준으로 나타났다. 선행 연구에 따르면, 주거지역과 도로변 지역의 PM₁₀ 농도는 출근시간대 농도가 다른 시간대 대비 상당히 높은 수준으로 나타났으며, PM_{2.5}의 출근시간대 농도 증가 폭은 PM₁₀보다 비교적 크게 나타났다. 또한, 공업지역이나 도로변 지역에서는 자동차 연료의 연소에 의한 먼지와 화학반응 또는 공장에서 배출되는 먼지가 많아 0.3

μm 부근 입자의 점유율이 높았으나 주거지역에서는 인간 생활과 밀접한 생물성 연소와 주거활동 등으로 발생하는 비산먼지의 영향으로 미세입자와 조대입자의 비율의 차이는 크지 않았다.³³⁾ 즉, 조사대상 주거환경이 도로변에 위치하고 인근에 통행량이 많은 고속도로가 있으며, 자동차 배기가스로 인해 작은 크기의 인위적인 입자가 대부분일 것이기 때문에 PM₁₀보다 PM_{2.5} 농도에 더 많은 영향을 끼쳤을 것으로 보인다. 반면 주말의 경우 주중과 유사한 일중 변화 양상을 보였으나, 주말 오전 피크는 주중에 비해 약 1시간 늦은 시간에 도달했고, 전반적으로 낮은 농도가 나타났다. 주말의 경우 주중보다 통행량이 비교적 적으며, 주중과 달리 특정 시간에 유동인구가 많지 않기 때문에 조사대상 인근의 주말 교통 특성이 영향을 끼쳤을 것으로 보이나, 본 연구에서는 차량 통행량과 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도의 상관관계에 대한 연구는 이루어지지 않았기 때문에 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

또한, 실외 PM₁₀과 PM_{2.5}는 주중과 주말 모두 조사대상 지역에 특정한 배출원이 없는 12:00~17:00 사이와 저녁 22:00부터 새벽 5:00 중, 낮 시간대 대비 저녁부터 새벽에 상당히 높은 농도로 나타났다. 오염물질의 농도와 분산의 일주 변화에는 혼

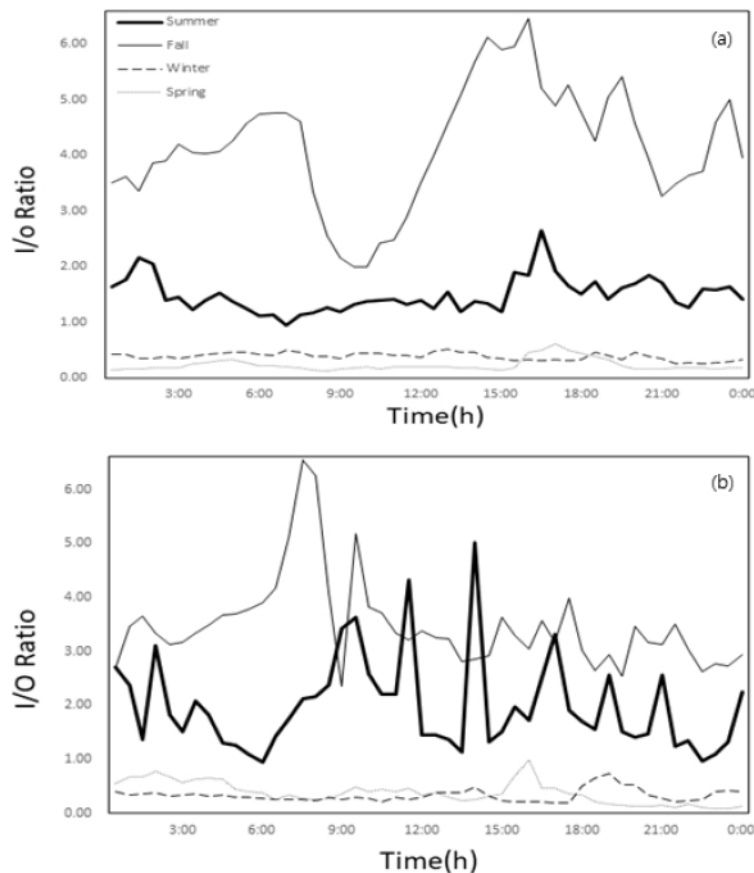


Fig. 7. Diurnal of I/O ratio of black carbon during weekdays and weekends. (a) Weekdays, (b) Weekends

합고의 높이와 대기 경계층의 풍속이 중요한 역할을 하는데, 특히 혼합고는 낮보다 저녁에 낮다.³⁴⁾ 즉, 낮에는 혼합고가 높아 오염물질이 원활하게 확산되어 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도가 낮게 나타난 반면, 저녁부터 새벽에는 혼합고가 낮아 오염물질이 확산하지 못하여 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도가 고농도로 나타난 것으로 추정된다.

결과적으로 도심에 위치하고 있는 조사대상 주거환경의 실내·외 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도가 어떠한 동일한 계절적 영향보다는 실외의 경우 출퇴근시간대의 차량 통행량 증가 및 주중/주말의 통행량 차이, 실내의 경우 계절에 따른 재실자의 실내 활동 및 주중/주말의 활동 패턴 등과 같은 시·공간적인 변수들이 시간대별 농도 분포의 차이에 복합적으로 영향을 끼치는 것으로 보인다.

2. 거주지 실내·외 블랙카본의 농도 비교

2.1. 주중/주말 및 계절별 블랙카본 농도 비교

블랙카본 농도는 PM₁₀과 PM_{2.5}와 다르게 계절에 따라 실외 농도와 실내농도의 크기 차이가 다르게 나타났다. 봄과 겨울에는 실내보다 실외 농도가 높았으며, 여름과 가을에는 실외보다 실내농도가 높게 나타났고 이는 겨울철 주말 블랙카본 농도를 제외하고 통계적으로 유의했다(Table 9). 1시간 간격으로 블랙카본의 I/O ratio를 조사한 결과 봄과 겨울에는 PM₁₀과 PM_{2.5}와 같이 1 미만으로 낮게 나타났으나, 여름과 가을에는 1을 초과하였고 6을 초과할 정도로 실내 블랙카본 농도가 실외에 비해 상당히 높은 수준이었다(Fig. 7). 즉, 이는 흔히 블랙카본은 실외에 주요 발생원이 존재하는 것으로 알려진 것과 다르게, 실내에도 발생원이 존재하며 상당히 높은 농도의 블랙카본이 배출됨을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

블랙카본 농도는 PM₁₀과 PM_{2.5}와 다르게 국내 및 국제에서

권장하는 농도가 없어 다른 연구에서 측정된 농도 결과와 비교하였다(Table 12). 먼저 실외 블랙카본 농도는 국내의 경우 4.4~9.9 µg/m³,³⁵⁾ 국외의 경우 0.4~2.7 µg/m³로 대략 0.4~9.9 µg/m³ 범위의 블랙카본 농도가 나타났다.³⁶⁻³⁹⁾ 국내 및 다른 나라에서의 실외 블랙카본 농도와 비교할 때 조사대상 주거환경의 실외 블랙카본 농도는 0.55~2.17 µg/m³로 비교적 낮은 수준으로 나타났다. 반면, 실내에서는 국내의 경우 0.93~6.32 µg/m³,³⁹⁾ 미국은 0.39~0.46 µg/m³,³⁶⁾ 몽골에서는 4.9~7.3 µg/m³으로 대략 0.39~9.9 µg/m³ 범위의 블랙카본 농도가 나타났고,⁴⁰⁾ 스페인의 경우 화학연구시설 내 블랙카본 농도는 1.57 µg/m³인 것으로 조사되었다.⁴¹⁾ 국내 및 다른 나라의 실내 블랙카본 농도와 비교할 때 조사대상 주거환경의 실내 블랙카본 농도는 0.45~2.45 µg/m³로 실외와 같이 비교적 낮거나 비슷한 수준인 것으로 조사되었다.

주중 및 주말별 블랙카본 농도는 실외의 경우 주말보다 주중이 높은 농도로 나타났으며, 통계적으로 유의한 차이가 나타났다(Table 10). 블랙카본은 주로 연료의 불완전연소에 의해 발생되며, 자동차의 배기가스에서 주로 발생된다. Lee et al. (2014)⁴²⁾의 연구에 따르면, 교외지역의 블랙카본 농도는 교통량이 많은 월요일에 가장 높은 농도가 나타났고, 교통량이 비교적 적은 일요일에 가장 낮은 농도가 나타났다. 즉, 조사대상 주거환경의 실외 블랙카본 농도는 PM₁₀과 PM_{2.5}와 같이 교통량에 영향을 받는 것으로 판단된다. 실내의 경우 봄, 가을, 겨울의 농도는 주말보다 주중 농도가 통계적으로 유의하게 높았으나, 여름의 농도 차이는 통계적으로 유의하지 않았다. 오염물질의 실내농도는 실외와 실내 배출원으로 구성되며, 환기 특성에 의해 변동된다.⁴³⁾ 실내 배출원으로는 조리행위와 양초 연소 등이 있으며, 특히 조리행위는 블랙카본 및 검명입자의 배출량을 증가시킬 수 있다.⁹⁾ 이는 조리행위 및 양초 연소등이 실내 블랙카

Table 12. Comparison of black carbon measurements with previous studies

Site		Country	Type	Concentration (µg/m ³)	References
Indoor	This study	Korea (Guri)	House	0.45~2.45	-
	Previous studies	Korea (Seoul)	House	0.93~6.32	Kim et al., 2015 ³⁹⁾
		Spain (Barcelona)	Chemical research facility	1.57	Viana et al., 2011 ⁴¹⁾
		Mongolia (Ulaanbaatar)	Traditional house	4.9~7.3	Lee et al., 2016 ⁴⁰⁾
		U.S.A (Virginia)	House	0.39~0.46	LaRosa et al., 2002 ³⁶⁾
Outdoor	This study	Korea (Guri)	Downtown	0.55~2.17	-
	Previous studies	Korea (Seoul)	Downtown	4.4~9.9	Lee et al., 2007 ³⁵⁾
		U.S.A (Virginia)	Downtown	0.74	LaRosa et al., 2002 ³⁶⁾
		U.S.A (California)	Downtown	1.3~2.7	Christoforou et al., 2000 ³⁸⁾
		U.S.A (Atlantic Coast)	Rural	0.4	Hegg et al., 1997 ³⁷⁾

본 농도에 영향을 끼쳤을 것으로 생각되나, PM₁₀과 PM_{2.5}와 같이 계절에 따라 조리 활동의 차이가 없을 것으로 보인다. 또한, 블랙카본은 입자의 크기가 매우 작아 PM₁₀과 PM_{2.5}보다 실내에 유입될 가능성이 높을 것으로 예상된다. 따라서 계절별 실내 주요 발생원의 차이가 없으므로, 실내 블랙카본 농도는 실외 블랙카본 농도의 영향을 받아 주말보다 주중 농도가 높은 수준으로 나타난 것으로 사료된다.

계절별 블랙카본 농도의 차이는 실외의 경우 봄, 겨울, 여름, 가을의 순으로 높은 농도로 나타났고, 실내의 경우, 가을, 여름, 겨울, 봄의 순으로 높은 농도를 나타냈으며 이는 통계적으로 유의했다(Table 11). 실외 블랙카본 농도는 PM₁₀과 PM_{2.5}와 같이 특히 봄철에 $1.90 \pm 1.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 사계절 중 가장 높은 수준으로 나타났으며, 이는 가을철의 농도와 약 3.1배 정도 높은 수준이었다. 교외지역의 블랙카본 농도는 여름철(6~9월)에 비해 봄철(4~5월)에 평균적으로 더 높게 나타났는데, 이는 봄의 꽃샘추위로 인하여 난방을 했을 가능성을 고려했을 때, 난방 장치로부터의 배출물로 인해 블랙카본 농도 증가에 영향을 끼쳤을 것으로 추정하였다.⁴²⁾ 인도 푸네에서는 여름철 $3.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울철 $7.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 겨울철의 BC 농도가 여름철의 농도에 비해 약 2.27배 높게 나타났다. 본 연구의 겨울철의 블랙카본 농도는 여름철보다 약 주중 1.37배, 주말 1.71배로 겨울철의 블랙카본 농도가 더 높게 나타났다는 점에서 같았으나, 인도에 비해 본 연구의 측정지점에서의 블랙카본 농도가 더 낮게 조사되었다. 이는 인도 푸네가 측정 당시 주택산업의 붐으로 인해 산업 설비, 차량의 이동이 많았기 때문에 한국보다 더 높은 블랙카본 농도가 나타난 것으로 보이며, 여름철 에어컨의 분산을 담당하는 높은 대류 활성으로 인해 여름과 겨울의 농도 차이가 큰 것으로 추정된다.⁴⁴⁾ 반면, 실내 블랙카본 농도는 PM₁₀과 PM_{2.5}와 다르게 가을철에 $2.27 \pm 1.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 사계절 중 가장 높은 수준으로 나타났으며, 이는 가장 낮은 농도가 나타난 봄철보다 약 5배 높은 수준이었다. 그러나 본 연구에서는 실내 거주자의 활동을 체계적으로 제어하면서 측정하지 않았으므로, 재실자의 활동 별 블랙카본 농도를 정량적으로 분석하기는 어려울 것으로 보인다.

2.2. 시간대에 따른 블랙카본의 농도 분포

실내의 블랙카본의 일주변동은 여름철을 제외하고 봄, 가을, 겨울에는 PM₁₀과 PM_{2.5}의 일주변동과 유사한 양상을 보였으며(Figs. 4, 5), 계절 및 주중/주말과 같은 시간적 변수와 관계없이 유사한 모습으로 나타났다(Figs. 4, 5).

실내 블랙카본 농도는 주중의 경우 봄, 가을, 겨울에는 출근 시간에 여름에는 퇴근 시간 이후 16:00~17:00시에 가장 높은 농도로 나타났다(Fig. 5a). 반면 주말의 경우 주중의 일주변동과 유사하게 출퇴근시간대에 높은 농도로 나타났으나, 주중과 달리 오전보다 오후 혹은 새벽의 농도가 더 높은 수준으로 나

타났으며, 여름철의 경우 1~2시간 간격으로 급격하게 농도가 증가하였다(Fig. 5b). 미국 버지니아에서 점거 중인 주택의 실시간 실내외 블랙카본 농도를 연구한 바에 따르면, 실내 소스가 존재할 때의 농도는 전체 블랙카본 농도의 16% (1차 측정), 31% (2차 측정)를 차지하였다.³⁶⁾ 블랙카본의 실내 발생원으로는 조리 활동이 대표적이며, 이러한 조리 활동 과정이 실내 블랙카본의 농도 변화에 가장 많은 영향을 끼쳤을 것으로 보인다. 실제로 본 연구의 주거환경에서 거주하고 있는 재실자가 주중에는 7:00~8:00시 사이, 19:00~20:00시 사이에 가스레인지 사용하여 조리 활동을 하였고 이 과정에서 고농도의 블랙카본이 발생한 것으로 추정된다. 또한 본 연구에서도 블랙카본의 실내 발생원이 존재할 것으로 추정되는 시간대(7:00~9:00, 19:00~21:00) 농도는 전체 블랙카본 농도의 34%를 차지하였다. 즉, 조사대상 주거환경의 실내 블랙카본 농도는 계절 및 주중/주말의 시간적 변수에 의해 영향을 받기보다는 실내 환경에 거주하고 있는 재실자의 생활환경 패턴에 따라 영향을 받는 것임을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

실외 블랙카본 농도는 주중에는 계절과 관계없이 출퇴근시간대에 높은 농도로 나타났으며, 특히 출근시간 중의 농도가 퇴근시간대의 농도보다 더 높은 농도로 나타났다(Fig. 4a). 반면 주말의 경우 봄과 겨울에는 주중의 일주변동과 유사하게 오전과 17:00시 이후 가장 높은 농도로 나타났으나, 여름과 가을에는 오전과 이른 오후보다는 20:00시 이후부터 새벽 중에 높은 수준으로 나타났다(Fig. 4b). 뉴욕시와 뉴욕 로체스터의 주중/주말 블랙카본 농도를 분석한 결과 두 지점에서 공통적으로 주말보다 주중의 블랙카본 농도가 높게 나타났고, 특히 주중 7:00시에 $3.0 \sim 3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 상당히 높은 수준의 농도가 나타났다. 조사대상 주거환경에서의 블랙카본 농도는 주중 7:00~8:00시의 블랙카본 농도는 $1.2 \sim 1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 뉴욕시에서 측정된 농도보다 낮은 수준으로 관찰되었다. 게다가 뉴욕의 측정지점 인근 0.5 km에 위치한 고속도로의 7:00~8:00시 통행량은 평균 8,200~8,400대로, 본 연구의 측정지점 인근 고속도로의 7:00~8:00시 통행량과 유사한 수준이었다.⁴⁵⁾ 또한, 서울의 도로변에서 블랙카본 농도를 측정한 결과 블랙카본 농도는 교통량과 비례한다는 결과가 보고된바 있다.³⁵⁾ 즉, 조사대상 주거환경의 실외 블랙카본 농도는 PM₁₀과 PM_{2.5}와 같이 교통량이 큰 영향을 끼칠 것으로 추정되며, 특히 인근 고속도로의 통행량과 연관성이 있을 것으로 사료된다. 또한, 주중/주말의 교통 특성의 차이가 주중 및 주말에 따른 블랙카본의 일주변동 차이에 영향을 끼쳤을 것으로 보인다.

V. 결 론

본 연구에서는 국내 대표적 주거환경인 아파트를 대상으로 1년 동안 실내·외 PM₁₀과 PM_{2.5} 및 블랙카본 농도를 측정하였고,

계절별, 주중/주말별, 시간대별 실내·외 농도 분포 특성의 차이를 분석하였다.

실내 및 실외의 PM₁₀, PM_{2.5} 및 블랙카본의 농도를 측정하고 결과 전반적으로 실내보다 실외 농도가 비교적 높은 수준으로 나타났다. 그러나 서울시 미세먼지 예보기준에 따르면 PM₁₀은 '보통' (30~80 µg/m³), PM_{2.5}는 '보통' (16~35 µg/m³)에서 '나쁨' (36~75 µg/m³)에 해당하는 것으로 조사되었다. 한편, 블랙카본의 경우 국내와 해외에서 규정된 기준이 없어, 선행 연구 사례와 비교한 결과 블랙카본의 농도가 선진국보다 비교적 높은 수준인 것으로 조사되었다.

주중 및 주말별 조사대상 오염물질의 농도를 조사한 결과 실내의 모두 주말보다 주중에 높은 농도로 나타났고, 특히 출퇴근시간대에 국내 대기환경 기준치 대비 실내의 모두 5~12배 높은 수준인 것으로 조사되었다. 또한, 계절별 오염물질의 농도를 조사한 결과 실외의 경우 황사 및 비황사등과 같은 영향으로 인해 PM₁₀, PM_{2.5}, 블랙카본 모두 봄과 겨울철에 높은 수준인 것으로 조사되었고, 실내의 경우 계절에 따른 실내 거주자들의 실내 생활 변화 등에 의해 PM₁₀과 PM_{2.5}는 여름, 겨울이, 블랙카본은 가을과 여름이 높은 농도인 것으로 조사되었다. 즉, PM₁₀, PM_{2.5}, 블랙카본의 평균 농도는 국내 대기환경 기준치보다 낮은 수준이나, 자동차 배기가스, 실내 거주자들의 활동등으로 인해 짧은 시간에 고농도의 오염물질에 노출될 가능성이 있으므로 PM₁₀, PM_{2.5}, 블랙카본 농도의 체계적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

이와 같은 시공간적 구분에 따른 PM₁₀, PM_{2.5}, 블랙카본의 농도 값을 통해 조사대상 주거환경에서 발생되어지는 세가지 물질의 분포 특성과 비교적 고농도로 발생하는 PM₁₀, PM_{2.5}, 블랙카본의 시간대를 알 수 있으며, 이를 바탕으로 실내·외 오염물질 관리와 추후 사람들의 시간활동패턴을 반영하여 위해성 평가를 수행함에 있어 기초적인 자료로 활용할 수 있을 것으로 보인다. 한편, 실내 환경의 경우 재실자의 생활활동을 체계적으로 제어하면서 측정하지는 않았기 때문에, 재실자의 활동 별 PM₁₀, PM_{2.5}, 블랙카본의 정량적인 농도 분석이 어렵다는 한계점이 있었다. 또한, 본 연구의 측정대상 가구가 1가구만의 결과이기 때문에 이를 전체 아파트에 해당할 것이라고 보기는 어려우며, 추후 여러 가구를 대상으로 보다 광범위한 조사가 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 생활공감환경보건기술사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: 2018001350006).

Conflict of Interest

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

References

1. Jun MJ. The effects of polycentric evolution on commute times in a polycentric compact city: a case of the Seoul Metropolitan Area. *Cities*. 2020; 98: 102587.
2. Janssen NA, Gerlofs-Nijland ME, Lanki T, Salonen RO, Cassee F, Hoek G, et al. Health Effects of Black Carbon. Copenhagen: World Health Organization; 2012.
3. Zhang S, Li G, Tian L, Guo Q, Pan X. Short-term exposure to air pollution and morbidity of COPD and asthma in East Asian area: a systematic review and meta-analysis. *Environ Res*. 2016; 148: 15-23.
4. Pope CA 3rd, Burnett RT, Thurston GD, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, et al. Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation*. 2004; 109(1): 71-77.
5. To T, Zhu J, Larsen K, Simatovic J, Feldman L, Ryckman K, et al. Progression from asthma to chronic obstructive pulmonary disease. Is air pollution a risk factor? *Am J Respir Crit Care Med*. 2016; 194(4): 429-438.
6. Renwick LC, Brown D, Clouter A, Donaldson K. Increased inflammation and altered macrophage chemotactic responses caused by two ultrafine particle types. *Occup Environ Med*. 2004; 61(5): 442-447.
7. Islam JB, Rahman AKML, Sarkar M, Ahmed KS, Begum BA. Particulate matter and black carbon concentration in ambient air of an urban-traffic influenced site at Farm Gate, Dhaka, Bangladesh. *Jagannath Univ J Sci*. 2014; 3(1): 87-96.
8. Lou S, Yang Y, Wang H, Smith SJ, Qian Y, Rasch PJ. Black carbon amplifies haze over the North China Plain by weakening the East Asian winter monsoon. *Geophys Res Lett*. 2019; 46(1): 452-460.
9. Bond TC, Streets DG, Yarber KF, Nelson SM, Woo JH, Klimont Z. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *J Geophys Res*. 2004; 109(D14): D14203.
10. Rim KT, Kim SJ, Kang MG. A Study on the Effects of Carbon Black to Reactive Oxygen Species and Inflammation Reaction. Ulsan: Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA; 2010.
11. Jansen KL, Larson TV, Koenig JQ, Mar TF, Fields C, Stewart J, et al. Associations between health effects and particulate matter and black carbon in subjects with respiratory disease. *Environ Health Perspect*. 2005; 113(12): 1741-1746.
12. He C, Morawska L, Hitchins J, Gilbert D. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmos Environ*. 2004; 38(21): 3405-3415.
13. Wallace LA, Emmerich SJ, Howard-Reed C. Source strengths of ultrafine and fine particles due to cooking with a gas stove. *Environ Sci Technol*. 2004; 38(8): 2304-2311.
14. Oh JW, Lim TJ. Regional analysis of particulate matter concentra-

- tion risk in South Korea. *J Korean Soc Saf.* 2017; 32(5): 157-167.
15. Lee SJ, Kim SJ, Park MK, Cho IG, Lee HY, Choi SD. Contamination characteristics of hazardous air pollutants in particulate matter in the atmosphere of Ulsan, Korea. *J Korea Soc Environ Anal.* 2018; 21(4): 281-291.
 16. Seo YH, Ku MS, Choi JW, Kim KM, Kim SM, Sul KH, et al. Characteristics of PM_{2.5} emission and distribution in a highly commercialized area in Seoul, Korea. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2015; 31(2): 97-104.
 17. Park SS, Yu GH, Lee SI, Bae MS. Aethalometer-based estimate of mass absorption cross section of black carbon particles at an urban site of Gwangju. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2018; 34(5): 727-734.
 18. Afshari A, Matson U, Ekberg LE. Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber. *Indoor Air.* 2005; 15(2): 141-150.
 19. Thomas KW, Pellizzari ED, Clayton CA, Whitaker DA, Shores RC, Spengler J, et al. Particle Total Exposure Assessment Methodology (PTEAM) 1990 study: method performance and data quality for personal, indoor, and outdoor monitoring. *J Expo Anal Environ Epidemiol.* 1993; 3(2): 203-226.
 20. Choi YS, Ho CH, Kim BG, Hur SK. Long-term variation in mid-week/weekend cloudiness difference during summer in Korea. *Atmos Environ.* 2008; 42(28): 6726-6732.
 21. Motallebi N, Tran H, Croes BE, Larsen LC. Day-of-week patterns of particulate matter and its chemical components at selected sites in California. *J Air Waste Manag Assoc.* 2003; 53(7): 876-888.
 22. Bang JL, Jo SM, Sung MK. Analysis of infiltration of outdoor particulate matter into apartment buildings. *J Archit Inst Korea Struct Constr.* 2018; 34(1): 61-68.
 23. Jones NC, Thornton CA, Mark D, Harrison RM. Indoor/outdoor relationships of particulate matter in domestic homes with roadside, urban and rural locations. *Atmos Environ.* 2000; 34(16): 2603-2612.
 24. Meteorological Agency. Asian dust. Available: <https://www.weather.go.kr/weather/asiandust/graph.jsp> [accessed 30 April 2021].
 25. Chao CY, Wong KK. Residential indoor PM₁₀ and PM_{2.5} in Hong Kong and the elemental composition. *Atmos Environ.* 2002; 36(2): 265-277.
 26. Ścibor M, Bokwa A, Balcerzak B. Impact of wind speed and apartment ventilation on indoor concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} in Kraków, Poland. *Air Qual Atmos Health.* 2020; 13(5): 553-562.
 27. Won SR, Ji HA, Kwon MH, Hwang ES, Lee JS, Shim IK. Characteristics of particles and gaseous pollutants generated from roasting fish and meat in kitchens. *J Environ Anal Health Toxicol.* 2019; 22(4): 224-229.
 28. Hong SH, Kang RY, An MY, Kim JS, Jung ES. Study on the impact of roadside forests on particulate matter between road and public openspace in front of building site- case of openspace of Busan City hall in Korea. *Korean J Environ Ecol.* 2018; 32(3): 323-331.
 29. Chen C, Zhao B, Zhou W, Jiang X, Tan Z. A methodology for predicting particle penetration factor through cracks of windows and doors for actual engineering application. *Build Environ.* 2012; 47: 339-348.
 30. Nadali A, Arfaenia H, Asadgol Z, Fahiminia M. Indoor and outdoor concentration of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ in residential building and evaluation of negative air ions (NAIs) in indoor PM removal. *Environ Pollut Bioavailab.* 2020; 32(1): 47-55.
 31. Kim JC. Characteristics of particle size distribution of PM₁₀ by Asian dust. *J Korean Soc Environ Anal.* 2013; 16(4): 266-271.
 32. Gotschi T, Oglesby L, Mathys P, Monn C, Manalis N, Koistinen K, et al. Comparison of black smoke and PM_{2.5} levels in indoor and outdoor environments of four European cities. *Environ Sci Technol.* 2002; 36(6): 1191-1197.
 33. Lee YK, Lee KJ, Lee JS, Shin ES. Regional characteristics of particle size distribution of PM₁₀. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2012; 28(6): 666-674.
 34. Jeon BI. Spatiotemporal variation of PM₁₀ and PM_{2.5} concentration for 2015 to 2018 in Busan. *J Environ Sci Int.* 2020; 29(7): 749-760.
 35. Lee SB, Bae GN, Park SM, Jung SG. Black carbon pollution level at a roadside of Seoul in spring. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2007; 23(4): 466-477.
 36. LaRosa LE, Buckley TJ, Wallace LA. Real-time indoor and outdoor measurements of black carbon in an occupied house: an examination of sources. *J Air Waste Manag Assoc.* 2002; 52(1): 41-49.
 37. Hegg DA, Livingston J, Hobbs PV, Novakov T, Russell P. Chemical apportionment of aerosol column optical depth off the mid-Atlantic coast of the United States. *J Geophys Res.* 1997; 102(D21): 25293-25303.
 38. Christoforou CS, Salmon LG, Hannigan MP, Solomon PA, Cass GR. Trends in fine particle concentration and chemical composition in southern California. *J Air Waste Manag Assoc.* 2000; 50(1): 43-53.
 39. Kim HY, Park CJ, Kim JC, Lee YJ, Lee CM, Gwak YK, et al. PM risk reduction in accordance with application of an air cleaner - focused on home (studio apartment). *J Odor Indoor Environ.* 2015; 14(4): 253-262.
 40. Lee BR, Chimeddulam D, Jargalsaikhan K, Lee KY. Indoor air pollution in ger, a traditional type of residence in Mongolia. *J Environ Health Sci.* 2016; 42(2): 118-125.
 41. Viana M, Diez S, Reche C. Indoor and outdoor sources and infiltration processes of PM₁ and black carbon in an urban environment. *Atmos Environ.* 2011; 45(35): 6359-6367.
 42. Lee KW, Han SC, Lee JH. Measurement of black carbon concentration in rural area. *Trans Korean Soc Mech Eng B.* 2014; 38(1): 17-24.
 43. Baxter LK, Clougherty JE, Paciorek CJ, Wright RJ, Levy JI. Predicting residential indoor concentrations of nitrogen dioxide, fine particulate matter, and elemental carbon using questionnaire and geographic information system based data. *Atmos Environ (1994).* 2007; 41(31): 6561-6571.
 44. Safai PD, Kewat S, Praveen PS, Rao PSP, Momin GA, Ali K, et al. Seasonal variation of black carbon aerosols over a tropical urban city of Pune, India. *Atmos Environ.* 2007; 41(13): 2699-2709.
 45. Rattigan OV, Civerolo K, Doraiswamy P, Felton HD, Hopke PK. Long term black carbon measurements at two urban locations in New York. *Aerosol Air Qual Res.* 2013; 13(4): 1181-1196.

<저자정보>

박신영(대학원생), 윤단기(대학원생), 공혜관(대학원생), 강상현(교수), 이철민(교수)