

여름과 가을의 주택실내 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 측정 및 영향요인 비교

김동준¹ , 민기홍^{1*} , 신지훈¹ , 최영태¹ , 최길용² , 심상호³ , 양원호^{1*}

¹대구가톨릭대학교 보건안전학과, ²안양대학교 환경에너지공학과, ³한양여자대학교 보건행정학과

Measurement of PM_{2.5} Concentrations and Comparison of Affecting Factors in Residential Houses in Summer and Autumn

Dongjun Kim¹, Gihong Min^{1*}, Jihun Shin¹, Youngtae Choe¹, Kilyoong Choi², Sang Hyo Sim³, and Wonho Yang^{1*}

¹Department of Health and Safety, Daegu Catholic University, ²Department of Environmental Energy Engineering, Anyang University, ³Department of Health Administration, Hanyang Women's University

ABSTRACT

Background: Indoor PM_{2.5} concentrations in residential houses can be affected by various factors depending on the season. This is because not only do the climate characteristics depend on the season, but the activity patterns of occupants are also different.

Objectives: The purpose of this study is to compare factors affecting indoor PM_{2.5} concentrations in apartments and detached houses in Daegu according to seasonal changes.

Methods: This study included 20 households in Daegu, South Korea. The study was conducted during the summer (from July 10 to August 10, 2023) and the autumn (from September 11 to October 9, 2023). A sensor-based instrument for PM_{2.5} levels was installed in the living room of each residence, and measurements were taken continuously for 24 hours at intervals of one minute during the measurement period. Based on the air quality monitoring system data in Daegu, outdoor PM_{2.5} concentrations were estimated using ordinary kriging (OK) in Python. In addition, the indoor activities of the occupants were investigated using a time-activity pattern diary. The affecting factors of indoor PM_{2.5} concentration were analyzed using multiple regression analysis.

Results: Indoor and outdoor PM_{2.5} concentrations of the residences during summer were 15.27±11.09 µg/m³ and 11.52±7.56 µg/m³, respectively. Indoor and outdoor PM_{2.5} concentrations during autumn were 13.82±9.61 µg/m³ and 9.57±5.50 µg/m³, respectively. The PM_{2.5} concentrations were higher in summer compared to autumn both indoors and outdoors. The primary factor affecting indoor PM_{2.5} concentration in summer was occupant activity. On the other hand, during the autumn season, the primary affecting factor was outdoor PM_{2.5} concentration.

Conclusions: Indoor PM_{2.5} concentration in residential houses is affected by occupant activity such as the inflow of outdoor PM_{2.5} concentration, cooking, and cleaning, as found in previous studies. However, it was revealed that there were differences depending on the season.

Key words: PM_{2.5}, residential house, indoor activity, ordinary kriging, exposure

Received January 4, 2024

Revised January 18, 2024

Accepted January 25, 2024

Highlights:

- Various factors affect indoor PM_{2.5} concentration in residential houses which could vary depending upon the season.
- Indoor PM_{2.5} concentration was more affected by outdoor PM_{2.5} concentration in autumn than in summer.
- On the other hand, indoor activities had a greater effect in summer (cooking, cleaning, ventilation) than autumn (cooking).

*Corresponding author:

Gihong Min: Department of Health and Safety, Daegu Catholic University, 13-13 Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsan 38430, Republic of Korea
 Tel: +82-53-850-3739
 Fax: +82-53-850-3736
 E-mail: alsrlghd000@naver.com
 Wonho Yang: Department of Health and Safety, Daegu Catholic University, 13-13 Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsan 38430, Republic of Korea
 Tel: +82-53-850-3739
 Fax: +82-53-850-3736
 E-mail: whyang@cu.ac.kr

I. 서 론

세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 실내공기오염으로 인해 전 세계적으로 매년 320만 명이 조기 사망한다고 보고하고 있다.¹⁾ 실내에 존재하는 공기오염물질의 독성은 실외보다 2~5배 더 높거나 최대 100배까지 높을 수 있다.²⁾ 또한 실내에서 발생하는 1 g의 공기오염물질에 대한 흡입 노출은 실외에서 발생하는 1,000 g의 공기오염물질에 상응한다고 할 수 있다.³⁾ 실내에 존재하는 공기오염물질 중 초미세먼지(Fine Particulate Matter, PM_{2.5})는 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 지정한 1급 발암물질이며 실내·외에 발생원이 존재한다.⁴⁾ 호흡기를 통해 PM_{2.5}에 노출될 경우 심혈관계 및 폐 질환, 천식, 폐 기능 감소, 기도 자극, 기침 또는 호흡기 증상 등 폐와 심장에 악영향을 미칠 수 있다.⁵⁾ 또한 Jung 등(2020)⁶⁾의 연구에서는 PM_{2.5}의 노출이 영유아 사망률 증가와 태아 발달과도 관련이 있다고 보고하였다.

사람은 하루 중 60% 이상의 시간을 집에서 보내기 때문에 실내환경 중 집에서의 PM_{2.5} 노출이 중요하다고 할 수 있다.⁷⁾ 일반적으로 주택실내환경에 존재하는 PM_{2.5} 농도의 주요 영향요인은 실외 PM_{2.5} 농도의 실내 유입 및 재실자의 활동(요리, 청소, 환기 등)으로 인한 실내 발생원이 있다.^{8,9)} 그 중 실외 PM_{2.5} 농도는 주택실내 PM_{2.5} 농도의 주된 요인이며 실외 PM_{2.5} 농도를 측정하기 위해 정부에서는 도시대기측정망(Air Quality Monitoring Station, AQMS)을 설치하여 그 지역의 PM_{2.5} 농도 대푯값으로 사용하고 있다.¹⁰⁾ 하지만 실제 거주하고 있는 지역과 AQMS가 설치된 곳의 PM_{2.5} 농도는 다르기 때문에 공간보간법을 이용하여 해당 지점의 농도를 추정할 필요가 있다. 공간보간법 중 정규크리깅(Ordinary Kriging, OK)은 주어진 위치에서의 관측값과 주변 지역의 관측값 간의 공간적 상관성을 이용하여 값을 예측하는 모델이며 해당 지점의 실외 PM_{2.5} 농도를 예측하는데 활용되고 있다.^{11,12)}

우리나라의 실외 PM_{2.5} 농도는 일반적으로 계절에 따라 유의미한 차이를 보인다. 겨울은 화석연료 사용의 증가 및 대기 정체, 봄은 황사로 인해 PM_{2.5} 농도가 증가하며 이에 반해 여름과 가을은 비교적 PM_{2.5} 농도가 낮은 경향을 보인다.¹³⁾ 실외 PM_{2.5}는 환기를 통해 주택실내로 유입되며, 이것은 계절의 변화에 따라 그 영향의 차이가 있을 수 있다.¹⁴⁾ 또한, 계절의 변화는 재실자의 활동 양상에도 영향을 미칠 수 있다. 여름과 겨울의 경우 냉·난방 장치의 사용으로 인한 환기 횟수가 감소하며 실내의 공기오염물질이 실외로 배출되지 못해 실내에 체류함에 따라 농도가 높아지게 되고 나아가 분해되거나 상호 반응하여 새로운 오염물질이 생성될 수 있다.¹⁵⁾ 또한 봄과 가을에 비하여 실외 활동이 감소하고 실내에서 보내는 시간이 증가하며 이는 실내활동의 증가로 이어져 실내 PM_{2.5} 농도가 높아질 수 있다.¹⁶⁾ 이와 같은 이유로 계절의 변화에 따라 실외 PM_{2.5} 농도 및 재실

자의 활동 양상에 차이가 있을 수 있다. 사계절 중 여름은 실외 기온이 가장 높고, 다습한 기후이자 일반적으로 실외 PM_{2.5} 농도가 가장 낮은 계절이며, 기후적 특성 및 교육시설의 방학 등으로 인해 주택 재실률이 비교적 높아 재실자의 활동으로 인한 주택실내 PM_{2.5} 농도가 증가할 수 있다.¹⁷⁾ 이에 반해 가을은 기후가 안정되어 대기 정체 현상이 감소함에 따라 미세먼지 확산이 감소하여 실외 PM_{2.5} 농도가 여름에 비해 높은 경향을 보인다.¹⁸⁾ 그러나 기후적 특성 및 실외 활동의 증가에 따라 실내 발생원이 감소하여 주택실내 PM_{2.5} 농도가 감소할 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 여름과 가을의 계절적 변화에 따른 실내·외 환경요인과 재실자의 행동 변화를 분석하여, 각 계절의 실내 PM_{2.5} 농도 특성과 이에 영향을 미치는 주요인을 분석하고 비교 및 평가하는 것이다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 대상 및 기간

연구 기간은 여름의 경우 2023년 7월 10일부터 8월 10일까지 가을의 경우 2023년 9월 11일부터 10월 9일까지 각 한 달씩 진행하였다. 연구 대상 지역은 대구광역시로 여름철 평균 온도는 26.62°C 상대습도는 75.26%이며, 가을의 경우 평균 온도는 19.14°C 상대습도는 72.94%를 보인다.¹⁹⁾ 연구 대상 지역은 대구광역시에 거주하는 20가구를 대상으로 하였으며, 지역의 대표성을 위해 각 구 및 군별로 1~5가구를 선정하였다(Fig. 1). 선정 기준은 원룸이나 오피스텔에 거주하는 1인 가구를 제외하고, 가족 구성원이 함께 거주하는 아파트 및 단독주택으로 하였다. 본 연구는 대구가톨릭대학교 연구윤리심의위원회(Institutional Review Board, IRB)의 승인(No.

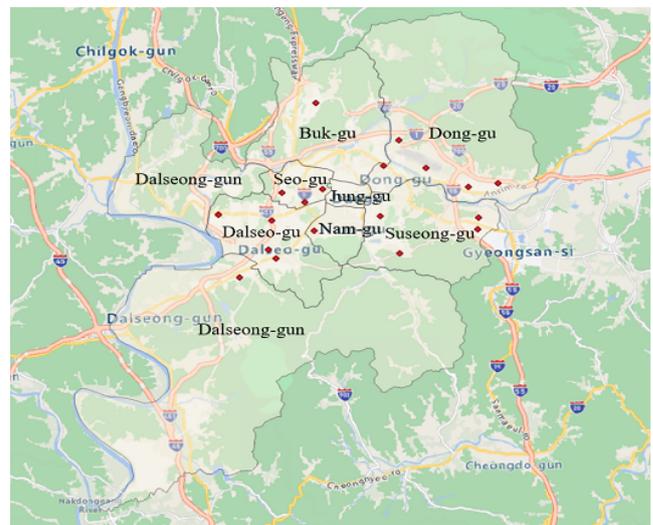


Fig. 1. Measurement point for 20 households in Daegu

CUIRB-2023-0046)을 취득한 후 표준 절차에 따라 진행하였다.

2. 주택실내 PM_{2.5} 농도 측정

주택의 실내 PM_{2.5} 농도를 측정하기 위하여 센서형 측정기(IAQ-CW1, K-weather Co., Ltd., Korea)를 사용하였다. 센서 측정기는 각 가구당 1대씩 거실 바닥에서 1~1.5 m 위치에 설치하여 측정하였다. 측정값은 1분 단위로 SD카드에 수집되었으며, 24시간 연속적으로 측정하였다. 센서 측정기는 레이저 광산란 방식(light scattering laser)이며, 측정범위는 0~1,000 µg/m³, 분해능은 1 µg/m³이었다. 센서 측정기는 공기 측정 오차범위 90.4%의 정확도를 가지며 환경부 1등급 성능을 받은 제품이다.²⁰⁾ 또한 선행연구에서 MicroPEM (RTI International, NC, USA)과 co-location test에서 83.1%의 결정계수(coefficient of determination, R²)를 보였다.²¹⁾ 센서 측정기는 PM_{2.5}를 포함하여 이산화탄소(Carbon Dioxide, CO₂), 온도 및 상대습도의 동시 측정이 가능하며, 1분 단위로 PM_{2.5}와 함께 측정하였다.

3. 주택실외 PM_{2.5} 농도 추정(Ordinary Kriging)

본 연구에서는 연구 대상 주택실외의 PM_{2.5} 농도를 직접 측정하지 않고 에어코리아(Air Korea)에서 제공하는 대구광역시 AQMS 데이터를 이용하였다. AQMS는 해당 지역을 대표하는 농도 값이지만 AQMS의 측정 지점과 연구 대상 지점의 PM_{2.5} 농도 값은 상이하며, 그 거리가 멀어질수록 정확도가 떨어진다.²²⁾ 따라서 공간보간을 이용하여 해당 지점의 주택실외 농도 값을 추정하였다.²³⁾ 각 주택의 실외 PM_{2.5} 농도 추정을 위하여 대구광역시 22개의 AQMS 데이터를 실내 PM_{2.5} 농도 측정 기간과 동일하게 1시간 단위로 수집하였고, 수집한 농도 데이터를 오픈소스 기반 언어프로그래밍 Python ver. 3.11을 이용하여 공간보간법 중 OK를 이용하여 실시하였다(식 (1)).

$$Z(u) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}(u) Z(u_{\alpha}) \quad (1)$$

여기서 $Z(u_{\alpha})$ 는 u_{α} 지점의 확률변수 모델, $Z(u)$ 는 추정값, $\lambda_{\alpha}(u)$ 는 OK의 가중치, n 은 OK에 사용된 데이터 위치의 개수이다.

4. Ordinary Kriging 검증

공간보간법을 이용한 특정 지점의 농도 추정 방법은 실측에 비해 측정이 어려운 지역의 농도를 빠르게 예측하여 시간을 단축하고, 측정자료 누락에 대응하여 공간적 분포를 시각화하여 특성과 경향을 확인할 수 있는 장점이 있다.^{24,25)} 하지만 예측을 기반으로 하기 때문에 데이터 수의 부족 또는 불균형으로 인해 추정 오차가 발생할 수 있다. 따라서 검증을 통해 공간보간법의 정확성과 신뢰도를 평가할 필요가 있다. 검증을 위해 중앙

에 위치한 AQMS 한 지점(one-point)의 데이터를 제외하고, 나머지 21개의 AQMS 데이터를 이용하여 해당 AQMS 좌표의 농도를 추정하였다. 추정된 농도 값과 해당 지점 AQMS 데이터와 비교 및 검증하였다. 검증지표는 R², 평균 절대 오차(Mean Absolute Error, MAE), 평균 제곱근 오차(Root Mean Squared Error, RMSE)로 나타내었다(식 (2)~(4)).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

여기서 y_i 는 실제 측정값, \hat{y}_i 는 모델의 예측값, \bar{y} 는 측정값의 평균, n 은 데이터의 개수이다.

5. 시간활동양상

여름과 가을의 시간활동양상을 조사하기 위해 우편조사 방식을 사용하여 설문조사를 실시하였다. 설문지는 24시간을 1시간 단위로 구분하여 주택에서의 재실 유무와 그에 따른 실내 활동(요리, 청소, 환기 등)을 작성하도록 하였다. 설문지의 경우 2주에 1번 가족 중 3명(아버지, 어머니, 자녀 1명)을 대상으로 실시하였으며, 평일과 주말의 시간활동양상이 상이하기에 구분하여 설문하였다.

6. 주택실내 PM_{2.5} 영향요인 분석

여름과 가을의 주택실내 PM_{2.5} 농도에 영향을 주는 각각의 요인을 분석하기 위하여 다중회귀분석을 실시하였다. 각 계절의 실내 PM_{2.5} 농도를 종속변수로 설정하였고, 실외 PM_{2.5}, 실내 CO₂, 실내 온도 및 상대습도를 포함한 환경요인 변수와 재실자의 실내활동을 독립변수로 설정하였다. 본 연구의 통계분석은 SPSS ver. 19 (IBM Co., USA)를 사용하였으며, 유의수준(p-value) 0.05 미만을 통계적으로 유의하다고 판단하였다.

III. 결 과

1. 주택실내·외 PM_{2.5} 농도

대구광역시 20가구의 여름과 가을 주택실내·외 PM_{2.5} 농도, 실내 CO₂ 농도, 실내 온도 및 상대습도를 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 여름의 주택실내 PM_{2.5} 농도는 15.27±11.09 µg/m³로 측정되었으며, 예측 모델을 사용하여 추정된 주택실외의 PM_{2.5} 농도는 11.52±7.56 µg/m³로 나타났다. 여름의 주택 실내·외 농도비(Indoor/Outdoor ratio, I/O ratio)는 1.42±0.65로 산출되었다. 가을의 경우 주택실내 PM_{2.5} 농도는 13.82±9.61 µg/m³

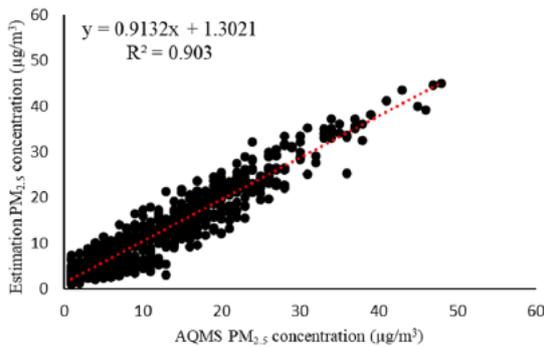
Table 1. Residential houses indoor and outdoor PM_{2.5} concentrations

Variable	Summer (n=27,732)						Autumn (n=26,936)						p-value
	Mean±SD	Percentile					Mean±SD	Percentile					
		Min	25	50	75	Max		Min	25	50	75	Max	
Indoor PM _{2.5} concentration (µg/m ³)	15.27±11.09	2.40	5.85	11.32	23.25	43.76	13.82±9.61	3.39	7.07	10.76	18.78	44.87	<0.01
Outdoor PM _{2.5} concentration (µg/m ³)	11.52±7.56	1.68	4.57	10.62	16.91	30.41	9.57±5.50	2.73	5.39	8.68	12.76	26.81	<0.001

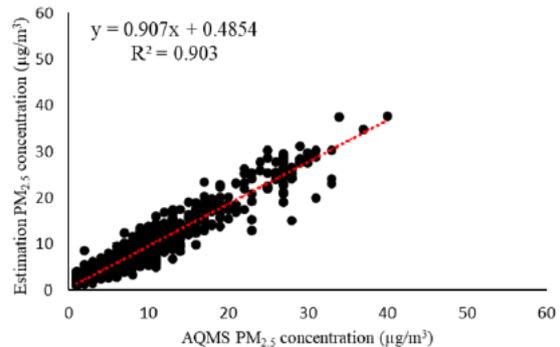
SD: standard deviation.

Table 2. Residential houses indoor CO₂ concentration, temperature, and relative humidity

Variable	Summer (n=41,598)						Autumn (n=40,404)						p-value
	Mean±SD	Percentile					Mean±SD	Percentile					
		Min	25	50	75	Max		Min	25	50	75	Max	
Indoor CO ₂ concentration (ppm)	663.49±158.28	463.91	550.91	618.73	744.14	1,092.05	600.64±116.56	468.22	513.31	564.33	657.46	931.66	<0.001
Indoor temperature (°C)	30.20±0.93	28.41	29.56	30.11	30.83	32.26	27.15±1.59	24.51	25.80	27.10	28.37	30.03	<0.001
Indoor relative humidity (%)	50.70±4.34	42.95	46.60	51.35	54.45	57.83	45.68±8.08	28.48	40.13	46.05	52.44	59.14	<0.001



(a) Summer



(b) Autumn

Fig. 2. Correlation analysis for validation of estimation models

로 측정되었다. 주택실외 PM_{2.5} 농도는 9.57±5.50 µg/m³, I/O ratio는 1.49±0.61로 산출되었으며, 여름이 가을보다 실내 및 실외의 PM_{2.5} 농도가 유의하게 더 높았다(p<0.001).

주택실내 CO₂ 농도는 여름이 663.49±158.28 ppm, 가을이 600.64±116.56 ppm으로 여름이 더 높게 나타났다. 온도와 상대습도는 여름이 각각 30.20±0.93°C, 50.07±4.34%, 가을이 각각 27.15±1.59°C 및 45.68±8.08%로 여름이 온도와 습

도 모두 높았다(p<0.001).

2. Ordinary Kriging 검증

OK를 이용한 여름과 가을의 주택실외 PM_{2.5} 추정 농도에 대하여 one-point 검증을 실시하였다(Fig. 2). 주택실내 PM_{2.5} 측정기간과 동일하게 1시간 단위의 샘플을 수집하였으며 여름(n=715), 가을(n=679)로 수집되었다. 수집한 데이터를 바탕으로

로 검증한 결과 여름의 경우 R^2 가 0.903, MAE가 2.37, RMSE가 2.97로 산출되었고, 가을의 경우 R^2 는 0.903, MAE가 1.72, RMSE가 2.29로 나타났다.

3. 시간활동양상

총 34명이 설문에 참가하였으며 0시부터 24시까지 여름과 가을의 주택 내 재실률 및 실내활동과 그에 따른 실내·외 $PM_{2.5}$ 농도를 평일과 주말로 구분하여 나타내었다(Fig. 3). 실내활동은 설문지를 분석하여 재실자의 활동을 요리, 청소, 환기 및 그 외 4가지로 구분하였다. 여름과 가을의 평일을 비교하였을 때 재실자가 실외활동을 하는 시간대인 09~17시까지 여름이 가을보다 재실률이 비교적 더 높게 나타났다. 실내 $PM_{2.5}$ 농도는 여름과 가을 모두 실외 $PM_{2.5}$ 농도와 유사한 양상을 보였고, 퇴근 및 실외활동이 끝나고 주택으로 복귀하는 시간대인 17시부터 요리 및 실내활동으로 인해 $PM_{2.5}$ 농도가 급격한 증가 추이를 보였다. 평일의 경우 여름과 가을 모두 아침 시간대인 06~10시와 저녁 시간대인 17~21시까지 실내활동이 집중되어 있었다. 주말의 경우 여름과 가을 모두 평일에 비해 실내활동의 일정한 시간대에 집중되어 있지 않고 비교적 넓게 분포되는 경향을 나타내었다.

4. 주택실내 $PM_{2.5}$ 영향요인 분석

주택실내 $PM_{2.5}$ 농도에 대하여 실외 $PM_{2.5}$ 농도, 실내 CO_2 , 실내 온도 및 실내 상대습도를 포함한 환경요인 변수와 재실자의 24시간 동안의 시간활동양상을 요리, 청소, 환기, 그 외, 재실했지만 활동을 알 수 없음 및 외출 6가지로 분류한 실내활동 변수로 구분하여 다중회귀분석을 실시하였다(Table 3,

4). 여름의 경우 환경요인 변수에서 실외 $PM_{2.5}$ 농도, 실내 온도 및 실내 상대습도와 통계적으로 유의한 양(+)의 연관성을 보였고($p < 0.001$), 실내 CO_2 농도와 음(-)의 연관성을 보였다($p < 0.01$). 재실자의 실내활동에서는 요리, 청소 및 환기에 대해서 통계적으로 유의한 양의 연관성을 보였다($p < 0.05$). 가을의 경우 환경요인에서는 실외 $PM_{2.5}$ 농도와 실내 상대습도가 양의 연관성을 보였고($p < 0.001$), 여름과 반대로 온도와 음의 연관성을 보였다($p < 0.05$). 실내활동의 경우 요리와 양의 연관성을 보였다($p < 0.001$) 다른 활동과는 유의한 연관성을 나타내지 않았다.

IV. 고 찰

본 연구는 대구광역시 20가구를 대상으로 여름과 가을 한 달간의 주택실내 $PM_{2.5}$ 농도를 측정하였고, 예측 모델을 이용하여 주택실외 $PM_{2.5}$ 농도를 추정하였다. 또한 설문지를 통해 재실자의 24시간 동안의 시간활동양상을 1시간 단위로 나누어 설문하였으며, 다중회귀분석을 통해 계절별 주택실내 $PM_{2.5}$ 농도의 주요 영향요인을 분석하였다.

측정한 주택실내·외 $PM_{2.5}$ 농도는 여름이 가을보다 높았으며, 이것은 기존의 선행 연구들과 상반된 결과로 나타났다.^{26,27} Liu 등(2020)²⁸의 연구에 따르면 약한 비나 적당량의 비는 실외 $PM_{2.5}$ 농도의 증가와 관련이 있으며, 9월과 10월은 찬 공기가 이동하고 바람이 증가하여 대기가 깨끗해진다고 보고되었다. 국내의 일부 선행연구에서도 여름이 가을에 비해 실외 $PM_{2.5}$ 농도가 더 높게 측정된 사례를 확인하였으며,^{13,29} Li 등(2015)³⁰의 연구에서는 여름의 높은 기온은 광화학 반응을 일

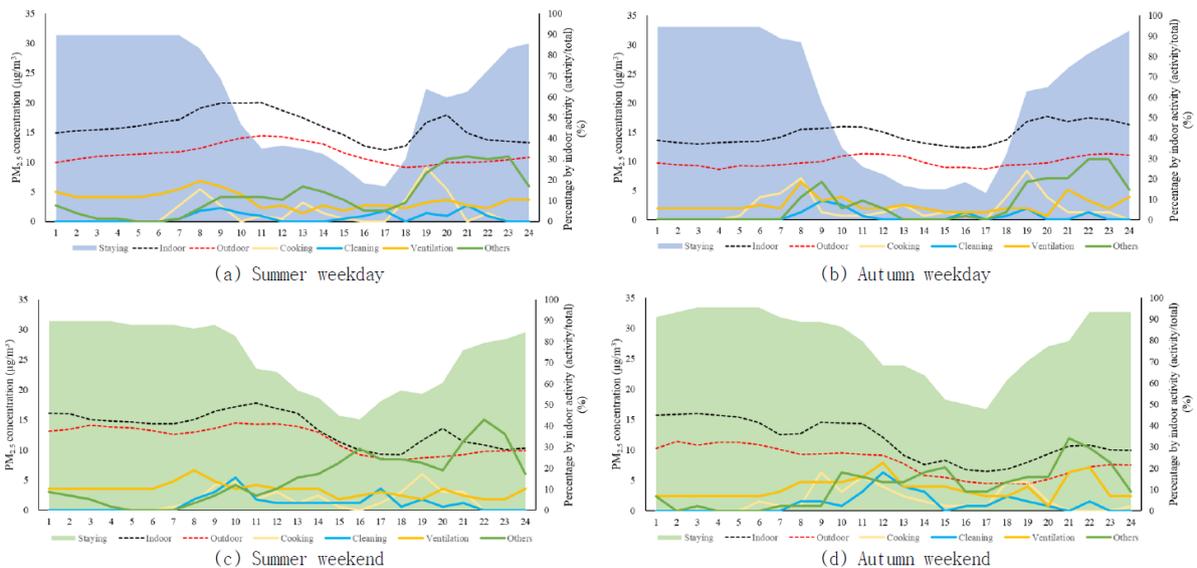


Fig. 3. Indoor activities and $PM_{2.5}$ concentration by the time of day

Table 3. Factors affecting indoor PM_{2.5} concentration in summer

Category	Variable	β	p-value	R ² (Adj. R ²)
Environmental factor	(Constant)		<0.001	0.468 (0.465)
	Outdoor PM _{2.5} concentration	0.673	<0.001	
	Indoor CO ₂ concentration	-0.060	0.005	
	Indoor temperature	0.077	<0.001	
	Indoor relative humidity	0.127	<0.001	
Indoor activity	Cooking	0.044	0.022	
	Cleaning	0.042	0.024	
	Ventilation	0.053	0.009	
	Others	0.020	0.559	
	Unknown	-0.008	0.803	
	Absence	0.051	0.108	

Adj. R²: Adjusted R².**Table 4.** Factors affecting indoor PM_{2.5} concentration in autumn

Category	Variable	β	p-value	R ² (Adj. R ²)
Environmental factor	(Constant)		0.030	0.638 (0.636)
	Outdoor PM _{2.5} concentration	0.781	<0.001	
	Indoor CO ₂ concentration	0.014	0.396	
	Indoor temperature	-0.036	0.026	
	Indoor relative humidity	0.171	<0.001	
Indoor activity	Cooking	0.105	<0.001	
	Cleaning	0.009	0.622	
	Ventilation	0.007	0.755	
	Others	0.007	0.850	
	Unknown	0.048	0.204	
	Absence	-0.012	0.742	

Adj. R²: Adjusted R².

으며 오존과 PM_{2.5}의 2차오염물질을 더 많이 생성할 수 있기 때문에 여름철이 가을보다 높을 수 있다고 보고되었다. 따라서 선행연구들에서 관찰된 실외 PM_{2.5} 농도는 여름이 가을에 비해 높은 경향을 보였으며, 이는 실내 PM_{2.5} 농도에 영향을 미칠 수 있기 때문에 여름이 가을에 비해 실·내외 PM_{2.5} 농도가 더 높았다고 판단된다.

일반적으로 실내발생원이 존재하지 않거나 적은 경우는 주택에서의 I/O ratio는 1 미만이지만 여름과 가을 모두 1 이상으로 산출되어 실내에 발생원이 존재한다고 할 수 있다.^{31,32)} 실외 PM_{2.5} 농도의 경우 직접 측정하지 않고, 예측 모델을 이용하여 간접적으로 추정하였으며, 불확실성이 존재할 수 있기 때문에 모델검증을 실시하였다. 검증지표인 R², MAE, RMSE가 여름의 경우 0.903, 2.37, 2.97로 각각 산출되었으며, 가을의 경우 0.903, 1.72, 2.29로 각각 산출되었다. OK를 이용하여 PM_{2.5} 농도의 공간모델링을 진행한 선행연구와 비교했을 때, 테헤란

도시의 대규모 PM_{2.5} 농도의 공간적 분석을 진행한 연구에 따르면 R²는 0.798, RMSE는 9.32로 나타났다.³³⁾ 또한 PM_{2.5}와 호흡기 및 심혈관 질환의 발병률간의 상관성을 분석하기 위하여 시공간 크리깅(spatio-temporal kriging)과 OK를 비교한 연구에서는 OK의 경우 MAE가 7.91, RMSE가 10.70으로 나타났다.³⁴⁾ 따라서 본 연구의 예측 모델은 기존 연구들과 비교하여 비교적 높은 예측력을 보였다고 판단한다.

우리나라의 도시별 시간활동양상을 분석한 연구에 따르면 대구광역시와 서울특별시를 비롯한 광역시간의 시간활동양상은 비교적 유사한 것으로 조사되었다.³⁵⁾ 따라서 대구광역시 20가구의 시간활동양상을 분석한 결과 서울특별시 및 부산광역시의 시간활동양상과 유사한 경향을 보였다.^{16,31)}

다중회귀분석 결과 가을의 β 값이 0.781로 여름($\beta=0.673$)에 비해 실외 PM_{2.5} 농도의 유입으로 인한 영향이 더 높게 분석되어 가을이 여름에 비해 실외 PM_{2.5} 농도에 영향을 더 높게 받

는 것으로 판단할 수 있다.^{36,37)} 실내 온도는 실내 PM_{2.5} 농도와 여름의 경우 양(+)의 연관성, 가을은 음(-)의 연관성으로 나타났다. 이것은 실외 기온이 높은 여름과 상대적으로 낮은 가을의 계절적 특성이 환기 등으로 인해 실내에 유입되어 영향을 미친 것으로 판단한다.^{38,39)} 재실자의 실내활동의 경우 여름은 요리, 청소 및 환기와 유의한 양의 연관성이 있었지만, 가을의 경우 요리에서만 유의한 연관성이 있는 것으로 나타났다. 따라서 계절별 재실자의 활동에 따른 주택실내 PM_{2.5} 농도의 영향을 비교하였을 때 여름이 가을에 비해 재실자의 활동에 의한 영향이 더 높다고 할 수 있다. 실내활동 중 요리는 여름과 가을의 공통적인 실내 PM_{2.5} 발생요인이며, 대표적인 주택실내 발생원 중 하나이다.⁴⁰⁻⁴²⁾ 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에 따르면 요리 시 PM_{2.5}, PM₁₀, 알데히드류 및 휘발성유기화합물이 포함된 요리매연이 발생하며 이때 발생하는 요리매연을 발암성 물질 Group 2A로 구분하여 인체 발암성이 예측되는 물질(probably carcinogenic to humans)로 보고하였다.⁴³⁾ 청소의 경우 여름철 실내 PM_{2.5} 농도와 통계적 유의성을 보였다. 청소 시 바닥에 침적되어있던 미세먼지가 재부유(resuspension)할 수 있고 이로 인해 실내 PM_{2.5} 농도가 높아질 수 있다.⁴⁴⁾

여름의 실내 CO₂ 농도는 가을보다 높았으며, 이는 실내 활동의 증가와 냉방 장치의 사용 등으로 인해 가을에 비해 환기가 비교적 덜 이루어졌기 때문일 수 있다.^{45,46)} 반면, 가을에는 여름에 비해 환기량이 더 많아져 실내 CO₂ 농도가 감소하고, 실외 PM_{2.5}가 실내로 유입되어 농도가 높아질 수 있다. 그러나 환기의 경우 여름에는 실내 PM_{2.5} 농도와 통계적으로 유의하였고 가을에는 통계적으로 유의성이 나타나지 않았다. 이는 설문지를 통해 주택의 환기 수준을 설문하였기 때문에 응답과정에서 정보 바이어스(information bias)가 발생할 수 있으며, 표본 수가 상대적으로 적기 때문에 불확실성이 증가할 수 있다.⁴⁷⁾ 환기는 오염된 실내공기를 실외로 배출하여 실내환경을 개선하는 중요한 행위이다. 그러나 환기로 인해 오염된 실외공기가 실내로 유입될 수 있기 때문에 지속적인 환기는 실내공기질 유지 및 관리에 적합하지 않을 수 있으며, 공조 시스템을 이용한 정화된 공기가 실내로 유입되는 것이 관리방안이 될 수 있다.⁴⁸⁾

본 연구는 대구광역시 20가구에 대하여 계절에 따른 주택실내 PM_{2.5} 농도를 측정하였으며 계절별 주요 영향요인을 규명하였다. 또한 일반적으로 실외 PM_{2.5} 농도가 상반되는 계절인 봄/겨울 및 여름/가을의 비교가 아닌 여름과 가을의 계절적 변동성을 고려하여 계절별 주택실내 PM_{2.5} 농도에 영향을 미치는 주요 인자를 식별하였음에 연구 의의가 있다. 그러나 여름과 가을 두 계절을 대상으로 진행하여 봄과 겨울의 계절적 특성을 반영하지 못하였다는 한계가 있다. 또한, 공기청정기 및 생활화학용품의 사용 유무 등 주택실내 PM_{2.5} 농도에 영향을 미칠 수 있는 영향 변수에 대해서 조사되지 않았다. 따라서, 사계절 및

실내 PM_{2.5} 농도의 영향 변수를 충분히 고려한 추후 연구가 필요하다.

V. 결 론

본 연구는 여름과 가을의 대구광역시 20가구 주택실내 PM_{2.5} 농도를 측정하였고, OK 방법을 이용하여 주택실외 PM_{2.5} 농도를 추정하였다. 추정한 농도값은 기존 선행연구들과 유사한 경향을 보였고, 비교적 높은 설명력을 보였다. 또한, 다중회귀분석을 통해 각 계절에 따른 영향요인을 분석하였다. 주택실내·외 PM_{2.5} 농도는 여름의 경우 각각 15.27±11.09 µg/m³, 11.52±7.56 µg/m³이었으며, 가을의 경우 각각 13.82±9.61 µg/m³, 9.57±5.50 µg/m³로 나타났다. 계절별 주택실내 PM_{2.5} 농도에 영향을 미치는 요인을 분석한 결과 가을이 여름에 비해 실외 PM_{2.5} 농도의 영향이 더 높게 나타났다. 여름은 실내활동 중 요리가 주택실내 PM_{2.5} 농도에 가장 큰 영향을 주었으며 다음은 청소와 환기 순이었으며, 가을의 경우 요리가 실내 PM_{2.5} 농도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 주택실내 PM_{2.5} 농도는 여름이 가을에 비해 실내활동의 영향이 더 높은 것으로 나타났다. 본 연구는 계절적 변동성을 고려하여 주택실내 PM_{2.5} 농도에 영향을 미치는 주요 인자를 식별하였고, 이를 통해 추후 계절에 따른 주택실내 PM_{2.5} 노출평가 연구에 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경성질한 예방관리 핵심 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었으며(과제번호: 2021003320001), 환경부, 환경보건학회 환경보건센터 “2023년 환경보건 전문인력 양성사업 위탁사업(환경보건학회)”에서 지원받아 수행된 결과이며 이에 감사드립니다.

Conflict of Interest

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

References

1. World Health Organization. Household air pollution. Available: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health?gclid=Cj0KCQiAmNeqBhD4ARIsADsYfTf2iN52jV1-AiqB7-VXNNTGFw4ypYvTXfTobPygNe-EpdB4XMAXTEaAhfgEALw_wcB [Accessed 1 December 2023].
2. Tan CCL, Finney KN, Chen Q, Russell NV, Sharifi VN, Swithenbank J. Experimental investigation of indoor air pollutants in resi-

- dential buildings. *Indoor Built Environ.* 2013; 22(3): 471-489.
3. Elgethun K, Yost MG, Fitzpatrick CT, Nyerges TL, Fenske RA. Comparison of global positioning system (GPS) tracking and parent-report diaries to characterize children's time-location patterns. *J Expo Sci Environ Epidemiol.* 2007; 17(2): 196-206.
 4. International Agency for Research on Cancer (IARC). Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. Lyon: IARC; 2013.
 5. U.S. Environmental Protection Agency. Health and environmental effects of particulate matter (PM). Available: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm> [Accessed 1 December 2023].
 6. Jung EM, Kim KN, Park H, Shin HH, Kim HS, Cho SJ, et al. Association between prenatal exposure to PM_{2.5} and the increased risk of specified infant mortality in South Korea. *Environ Int.* 2020; 144: 105997.
 7. Burke JM, Zufall MJ, Ozkaynak H. A population exposure model for particulate matter: case study results for PM_{2.5} in Philadelphia, PA. *J Expo Anal Environ Epidemiol.* 2001; 11(6): 470-489.
 8. Riley WJ, McKone TE, Lai AC, Nazaroff WW. Indoor particulate matter of outdoor origin: importance of size-dependent removal mechanisms. *Environ Sci Technol.* 2002; 36(2): 200-207. Erratum in: *Environ Sci Technol.* 2002; 36(8): 1868.
 9. Abt E, Suh HH, Allen G, Koutrakis P. Characterization of indoor particle sources: a study conducted in the metropolitan Boston area. *Environ Health Perspect.* 2000; 108(1): 35-44.
 10. AirKorea. Available: <https://www.airkorea.or.kr/web/?isPC=Y> [Accessed 1 December 2023].
 11. Kim SY, Yi SJ, Eum YS, Choi HJ, Shin H, Ryou HG, et al. Ordinary kriging approach to predicting long-term particulate matter concentrations in seven major Korean cities. *Environ Health Toxicol.* 2014; 29: e2014012.
 12. Solihah KI, Martono DN, Haryanto B. Identifying the best spatial interpolation method for estimating spatial distribution of PM_{2.5} in Jakarta. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 2021; 893: 012043.
 13. Lee M. An analysis on the concentration characteristics of PM_{2.5} in Seoul, Korea from 2005 to 2012. *Asia Pac J Atmos Sci.* 2014; 50(Suppl 1): 585-594.
 14. Leung DYC. Outdoor-indoor air pollution in urban environment: challenges and opportunity. *Front Environ Sci.* 2015; 2: 69.
 15. Weschler CJ, Shields HC. The influence of ventilation on reactions among indoor pollutants: modeling and experimental observations. *Indoor Air.* 2000; 10(2): 92-100.
 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. Choi JK, Heo JB, Ban SJ, Yi SM, Zoh KD. Chemical characteristics of PM_{2.5} aerosol in Incheon, Korea. *Atmos Environ.* 2012; 60: 583-592.
 18. Kim HS, Huh JB, Hopke PK, Holsen TM, Yi SM. Characteristics of the major chemical constituents of PM_{2.5} and smog events in Seoul, Korea in 2003 and 2004. *Atmos Environ.* 2007; 41(32): 6762-6770.
 19. Korea Meteorological Administration. Available: <https://www.weather.go.kr/w/index.do> [Accessed 1 December 2023].
 20. Kweather. Available: <https://www.kweather.co.kr/sub/vent/view.php?pnum=111> [Accessed 1 December 2023].
 21. Guak S. Estimation of population exposure to particulate matter in Seoul [dissertation]. [Seoul]: Seoul National University; 2021.
 22. Lin YC, Chi WJ, Lin YQ. The improvement of spatial-temporal resolution of PM_{2.5} estimation based on micro-air quality sensors by using data fusion technique. *Environ Int.* 2020; 134: 105305.
 23. Fitri DW, Afifah N, Anggarani SMD, Chamidah N. Prediction concentration of PM_{2.5} in Surabaya using ordinary kriging method. *AIP Conf Proc.* 2021; 2329: 060030.
 24. Ahmed SO, Mazloum R, Abou-Ali H. Spatiotemporal interpolation of air pollutants in the Greater Cairo and the Delta, Egypt. *Environ Res.* 2018; 160: 27-34.
 25. Alimissis A, Philippopoulos K, Tzani CG, Deligiorgi D. Spatial estimation of urban air pollution with the use of artificial neural network models. *Atmos Environ.* 2018; 191: 205-213.
 26. Jung CC, Lin WY, Hsu NY, Wu CD, Chang HT, Su HJ. Development of hourly indoor PM_{2.5} concentration prediction model: the role of outdoor air, ventilation, building characteristic, and human activity. *Int J Environ Res Public Health.* 2020; 17(16): 5906.
 27. Yang Q, Yuan Q, Li T, Shen H, Zhang L. The Relationships between PM_{2.5} and meteorological factors in China: seasonal and regional variations. *Int J Environ Res Public Health.* 2017; 14(12): 1510.
 28. Liu Z, Shen L, Yan C, Du J, Li Y, Zhao H. Analysis of the influence of precipitation and wind on PM_{2.5} and PM₁₀ in the atmosphere. *Adv Meteorol.* 2020; 2020: 5039613.
 29. Hwang SH, Park DU. Ambient endotoxin and chemical pollutant (PM₁₀, PM_{2.5}, and O₃) levels in South Korea. *Aerosol Air Qual Res.* 2019; 19(4): 786-793.
 30. Li R, Li Z, Gao W, Ding W, Xu Q, Song X. Diurnal, seasonal, and spatial variation of PM_{2.5} in Beijing. *Sci Bull.* 2015; 60(3): 387-395.
 31. Park J, Kim E, Choe Y, Ryu H, Kim S, Woo BL, et al. Indoor to outdoor ratio of fine particulate matter by time of the day in house according to time-activity patterns. *J Environ Health Sci.* 2020; 46(5): 504-512.
 32. Kim H, Jung KM. Seasonal variations of human exposure to residential fine particles (PM_{2.5}) and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in Chuncheon. *J Environ Toxicol.* 2006; 21(1): 57-69.
 33. Birjandi N, Ghobadi M, Ahmadi M. Analysis and zoning of air pollution in urban landscape using different models of spatial analysis (case study: Tehran). *Adv Environ Technol.* 2019; 5(3): 185-191.
 34. Lin J, Zhang A, Chen W, Lin M. Estimates of daily PM_{2.5} exposure in Beijing using spatio-temporal kriging model. *Sustainability.* 2018; 10(8): 2772.
 35. Yang WH, Kim DH, Son BS, Yoon CS, Lee KY, Lee JD, et al. Research on personal exposure assessment according to national daily activity time patterns (II). Incheon: National Institute of Environmental Research; 2010 Jul. Report No.: TRKO201300007829.
 36. Ścibor M, Balcerzak B, Galbarczyk A, Targosz N, Jasienska G. Are we safe inside? Indoor air quality in relation to outdoor concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} and to characteristics of homes. *Sustain Cities Soc.* 2019; 48: 101537.
 37. Kim S, Kang K, Park D, Kim T. Assessment of PM_{2.5} penetration

- based on airflow paths in Korean classrooms. *Build Environ.* 2024; 248: 111103.
38. Yang J, Nam I, Sohn JR. The influence of seasonal characteristics in elderly thermal comfort in Korea. *Energy Build.* 2016; 128: 583-591.
 39. Lee K, Lee D. The relationship between indoor and outdoor temperature in two types of residence. *Energy Procedia.* 2015; 78: 2851-2856.
 40. See SW, Balasubramanian R. Risk assessment of exposure to indoor aerosols associated with Chinese cooking. *Environ Res.* 2006; 102(2): 197-204.
 41. See SW, Karthikeyan S, Balasubramanian R. Health risk assessment of occupational exposure to particulate-phase polycyclic aromatic hydrocarbons associated with Chinese, Malay and Indian cooking. *J Environ Monit.* 2006; 8(3): 369-376.
 42. See SW, Balasubramanian R. Chemical characteristics of fine particles emitted from different gas cooking methods. *Atmos Environ.* 2008; 42(39): 8852-8862.
 43. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Household use of solid fuels and high-temperature frying. *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum.* 2010; 95: 1-430.
 44. Wang B, Tang Z, Li Y, Cai N, Hu X. Experiments and simulations of human walking-induced particulate matter resuspension in indoor environments. *J Clean Prod.* 2021; 295: 126488.
 45. Geng Y, Lin B, Yu J, Zhou H, Ji W, Chen H, et al. Indoor environmental quality of green office buildings in China: large-scale and long-term measurement. *Build Environ.* 2019; 150: 266-280.
 46. Tanaka N, Munaka T. Influence of human behavior on indoor air quality in a care facility for the elderly in Japan. *Asian J Atmos Environ.* 2021; 15(4): 2021089.
 47. Delgado-Rodríguez M, Llorca J. Bias. *J Epidemiol Community Health.* 2004; 58(8): 635-641.
 48. Seppänen OA, Fisk WJ, Mendell MJ. Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *Indoor Air.* 1999; 9(4): 226-252.

〈저자정보〉

김동준(연구원), 민기홍(연구원), 신지훈(연구원),
 최영태(연구원), 최길용(교수), 심상효(교수),
 양원호(교수)