

논문

건물 내 미세먼지에 영향을 미치는 실내외 환경인자에 대한 이해 Understanding of Indoor and Outdoor Environmental Factors Affecting Particulate Matter in Buildings

김대현, 손운석^{1),*}

부경대학교 지구환경시스템과학부

¹⁾부경대학교 환경공학과

Dae-hyeon Kim, Youn-Suk Son^{1),*}

Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

접수일 2020년 11월 29일
수정일 2020년 12월 14일
채택일 2020년 12월 15일

Received 29 November 2020
Revised 14 December 2020
Accepted 15 December 2020

*Corresponding author
Tel : +82-51-629-6522
E-mail : sonys@pknu.ac.kr

Abstract Due to change in the industrial and residential environment, many of people live in indoor space. In addition, this transformed lifestyle expose the people to indoor air pollution who spend most of the day in indoor space. This study was conducted to investigate indoor and outdoor environmental factors affecting indoor PM (particulate matter). For this goal, indoor and outdoor PM concentrations were measured and correlation analysis was carried out using data measured through correction between different devices (AM520, Grimm, Aerocet531s). In addition, the influence of various environmental factors (such as student activity and window opening) were evaluated on indoor PM. As a result, the correlation between indoor and outdoor PM was changed according to student activity, and PM₁₀ was more prominent than PM_{2.5}. Also, the correlation coefficients (r^2) of PM₁₀ and PM_{2.5} were as follows. Window closed: PM₁₀ (r^2 : 0.2135), PM_{2.5} (r^2 : 0.3271) and Window opened: PM₁₀ (r^2 : 0.1046), PM_{2.5} (r^2 : 0.6079). This shows that the indoor PM_{2.5} is greatly affected by the external inflow and the PM₁₀ is more affected by the student activity than the window condition.

Key words: Particulate matter, Indoor air quality, Environmental factor, I/O ratio, PM₁₀, PM_{2.5}

1. 서론

대기오염물질은 크게 가스상과 입자상 물질로 구분된다. 그 중 입자상 물질은 입자의 직경에 따라 일반적으로 미세먼지 (PM₁₀: 입경 10 μm 이하)와 초미세먼지 (PM_{2.5}: 입경 2.5 μm 이하)로 분류된다. 지난 수 년 동안 미세먼지에 대한 사회적 인식의 증대로 인하여 PM₁₀과 PM_{2.5}에 대한 관심이 급증하고 있다. 이에 따라 대기환경기준에 추가적으로 PM_{2.5}에 대한 기준 (연간 평균 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 신설 하였고, 2015년부터 적용하고 있다 (Han and Kim,

2015). 이와 같이 매우 작은 입자 직경을 가지는 PM₁₀과 PM_{2.5} 등의 미립자들에 노출될 시 호흡기를 통해 우리 몸에 침투가 가능하며 그 크기가 작아질수록 침투능력이 증가하는 것으로 보고되었다 (Park *et al.*, 2019a). 또한, 이들 물질은 폐 기능 감소, 기관지염 발생 등과 같은 호흡기 질환을 유발할 수 있으며, 혈관 기능 장애, 혈전증과 같은 심혈관계 질환의 주요 원인 물질로도 알려져 있다 (Deng *et al.*, 2019).

현대사회는 산업 및 주거 환경의 변화로 인하여 현대인이 실내에 거주하는 시간이 점차 늘어나고 있으며 (Klepeis *et al.*, 2001), 세계적으로 실내환경에 대한

문제점이 대두되고 있다(Khovalyig *et al.*, 2020). 실제로 국내에서 진행된 연구에 따르면 현대인들이 실내에서 보내는 시간은 하루 24시간 중 80%에 달하는 것으로 보고되고 있으며(Jeung and Choi, 2007), 실내 환경에 대한 재실시간은 연령 및 직업에 따라 상이한 것으로 나타났다(Park *et al.*, 2019b). 사무실에서 근무하는 사회인의 경우 하루 24시간 중 97%에 해당하는 23시간 12분을 실내에서 보내는 것으로 조사되었다(Shin and Kim, 2017). 대학생 및 연구종사자는 대학건물에서 장시간 생활하며(Suh *et al.*, 2014), 기숙사의 경우 수면시간 동안 실내환경에 오랫동안 노출되므로 실내 공기질의 관리는 매우 중요한 요소이다(Choi *et al.*, 2017). 또한 Yang *et al.* (2009)의 연구에 따르면 국내 10대 학생 집단의 39.6%는 학교 및 학원 등의 실내공간에서 대부분의 시간을 보내는 것으로 나타났다. 학생의 경우 신체성장이 가장 활발하게 이루어지는 시기이며 어른에 비해 상대적으로 단위체중당 호흡량이 더 많기 때문에 실내의 공기오염에 대해 더 민감하다고 알려져 있다(Park *et al.*, 2018b). 실내 공기질은 건물의 밀폐 및 환기 부족 등의 이유로 더욱 악화될 수 있으며 이러한 실내공기질의 악화는 건물병증후군(sick building syndrome), 새집증후군(sick house syndrome) 등을 유발할 수 있다(Son, 2020). 그리고 건물의 신축 시 사용되는 각종 도료 및 접착제 등을 통해 발생하는 휘발성유기화합물(VOCs), 폼알데하이드(HCHO) 등의 화학물질로 인하여 만성적인 두통 및 구토, 어지럼증, 천식 등의 증상이 나타날 수 있다(Kim *et al.*, 2008). 그러나 많은 시간을 실내공간에서 보내고 있으며 실내공기질의 악화로 인해 많은 질병이 발병하고 있으나 사람마다 체감의 정도가 다르기 때문에 실내공기질에 대한 인식 및 관련 연구는 실외 대기질에 비해 상당히 미흡한 실정이다(Jung *et al.*, 2016; Bae and Ji, 2013).

실내 미세먼지는 실외에서의 유입과 실내에서의 발생, 그리고 실내외에서 발생된 가스상물질에서 입자상물질로 전환되어진 2차생성물로 구성되어진다(Suh *et al.*, 2014). 이때, 실내 미세먼지의 농도는 환기

율, 주변 대기의 오염 정도, 재실자의 활동 등과 같은 다양한 변수에 영향을 받는다(Choi, 2008). 그러므로, 실내 미세먼지를 효율적으로 관리하기 위해서는 이러한 환경인자에 대한 연구가 충분히 진행되어야 한다. 그러나 현재까지의 실내공기질 연구는 상대적으로 사람들이 오랜 시간 머무르지 않는 지하상가, 지하역사 등의 다중이용시설에 대하여 주로 수행되어졌으며(Sim and Kim, 2006), 또한 그 연구에 있어서도 해당 시설의 실내공기질의 측정에만 집중하였다. 게다가 대부분의 국내 선행 연구들에서는 물리적 및 재정적인 한계로 인하여 실내에서 직접 측정된 값과 외부 공기질 간의 상호 관계를 평가하기 위하여 실내 공기질 측정 장소 주변의 Air quality monitoring station(AQMS)의 자료를 주로 활용하는 것으로 보고되고 있어, 그 결과의 해석에 있어서 한계점을 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 건물 내에서 직접 측정된 미세먼지 농도와 주변 AQMS에서 제공된 미세먼지 농도를 비교해 그 한계점을 평가해 보았고, 이와 더불어 이중 측정기기 간의 동시 사용 가능 여부를 파악하였다. 마지막으로 다양한 환경인자가 실내 미세먼지에 미치는 영향을 평가하기 위하여 재실자의 활동 등과 같은 환경인자로 인한 실내 미세먼지의 농도 변화를 분석하고 I/O ratio와 같은 통계분석을 실시하여 건물 내 미세먼지에 미치는 영향을 이해하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 측정장소 및 기간

2.1.1 실내외 미세먼지 상관성 분석

측정기간은 2019년 06월 21일에서 07월 01일이며 공휴일 및 특정일자(측정장비 오작동 등)를 제외하고 총 6일간 진행되었다. 실내 미세먼지의 측정은 부경대학교 실내 A호실과 B호실에서 재실자가 사무실 내에 상주해 있던 오전 9시부터 오후 6시 사이에 진

행되었다. A호실의 경우 2019년 06월 21일에서 25일 까지 측정했으며, B호실의 경우 06월 26일에서 07월 01일까지 측정하였다.

2.1.2 이종기기 간의 미세먼지 측정

측정기간은 2020년 04월 07일에서 05월 04일까지 이며 공휴일 및 특정일자를 제외하였으며 총 7일간 진행되었다. 실내 미세먼지의 측정은 부경대학교 실내 C호실에서 재실자의 활동이 가장 많은 점심시간인 12시부터 퇴근시간인 오후 6시까지 이루어졌다.

2.1.3 환경인자에 따른 실내외 미세먼지의 변화

창문 개폐 여부와 같은 실내 환경인자에 대한 실내외 미세먼지 변화를 측정하기 위하여 2020년 05월 25일에서 29일까지 총 5일간 실험을 수행하였다. 실내 미세먼지의 측정은 앞선 이종기기 간의 측정이 이루어진 C호실에서 진행되었으며, 재실자의 활동이 가장 많은 12시부터 퇴근시간인 오후 6시까지 측정을 수행하였다.

2.2 측정장비 및 제원

본 연구에서는 미세먼지의 거동을 이해하기 위하여 광산란법을 사용하는 다양한 장비들을 이용하여 연구를 진행하였다. 이를 위하여 사용된 장비에 대한

구체적인 사양은 표 1에 제시하였다.

2.3 연구 방법

2.3.1 실내외 미세먼지 상관성 분석

실내에서 직접 측정된 미세먼지 농도와 주변 지역의 AQMS의 공개 자료를 사용하여 상관성 분석을 수행하였다. 이때 실외의 미세먼지가 실내의 미세먼지에 미치는 영향을 보다 명확하게 평가하기 위하여 A와 B호실의 조건을 달리 하였다. 실험 기간 중 A호실의 경우 재실자가 존재하였으며, 에어컨 및 공기청정기가 가동되었다. 이와 반대로 B호실은 재실자가 없었으며, 창문이 닫혀 있는 밀폐된 공간으로 모사하였다. 또한 B호실의 경우, 에어컨 및 공기청정기가 가동되지 않았다. 실내 미세먼지의 측정에는 Aerocet531s (미세먼지 측정기, Met One Instrument, Inc., USA)를 사용하였으며, Aerocet531s의 제원은 표 1에 나타났다. 실내 미세먼지는 15분 간격으로 측정되었으며 측정된 데이터는 한시간 간격으로 평균하여 사용하였다. 이는 AQMS 데이터가 한시간 간격으로 측정 및 기록되기 때문에 이와 동일하게 정리하여 분석하기 위함이다. AQMS 데이터의 경우 대기오염물질의 시간별 농도자료를 제공하는 ‘에어코리아’ (<https://www.airkorea.or.kr/index>) 사이트에서 부경대학교와 근접한 4개의 도시대기측정망(광안동 (GA), 대연동

Table 1. Specification of measurement instruments.

Factors	Conditions		
	Aerocet531s	AM520	Grimm 11-D
Company	Met One Instrument, Inc., USA	TSI Incorporated., USA	Grimm Aerosol Technik Ainring., Germany
Measuring range	PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₄ , PM ₇ , PM ₁₀ , and TSP	0.1 to 10 µm	PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₄ , PM ₁₀ , and TSP
Concentration range/ Volume flow	0~1000 µg/m ³	0.001 to 100 mg/m ³	1.2 L/min
Sample time	1 minute	User setting	6 sec (normal), 1~3 sec (fast mode)
Light source	Laser diode, 90 mW, 780 nm	90° light scattering, 650 nm laser diode	Diode-Laser (λ = 683 nm, Pmax = 40 mW)
Temperature	Operating: 0°C to + 50°C Storage: -20°C to + 60°C	Operating: 0°C to + 50°C Storage: -20°C to + 60°C	0 to + 40°C (32 to 104°F)

(DY), 전포동(JP), 수정동(SJ))과 1개의 도로변대기측정망(부산북항(BB))의 최종확정자료(PM_{10} , $PM_{2.5}$)를 사용하였다. 이때 장비점검 및 통신장애 등의 이상 데이터가 발생했을 때 나타나는 “음수값”과 기기 오류로 인한 “0” 값과 이와 동일시간의 실내 측정 자료는 상관분석에서 제외하였다. 상관분석은 Excel 프로그램의 데이터 분석 함수를 사용하였으며, 데이터의 전처리에는 매크로 함수를 사용하였다. 이러한 실내 미세먼지의 농도와 각 지점의 AQMS 데이터의 시간에 따른 농도변화 및 상관분석을 통해 실내 미세먼지를 분석할 때 어떤 지점의 AQMS 데이터를 사용해야 할지 그 적합성에 대하여 판별하고자 연구를 진행하였다.

그림 1은 실내 미세먼지의 측정이 이루어진 부경대학교와 본 연구에서 사용된 5곳의 AQMS의 위치 및 거리를 나타내고 있다.

2.3.2 이종기기 간의 미세먼지 측정

실제로 광범위한 실내외 미세먼지 연구를 진행할 때 동일한 측정기기로 모든 지점을 측정하면 가장 이상적이겠지만, 이는 현실적으로 불가능하다. 따라서 실제 측정 현장에서는 다양한 측정 장비가 동시다발적으로 사용된다. 이때 이와 같은 연구를 신뢰성 있게 진행하기 위하여서는 측정 전에 반드시 교정이 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 부경대학교 C호실에서 서로 다른 세 종류의 기기를 사용하여 실내 미세먼지를 측정하여 연구를 수행하였다. 실내 미세먼지의 측정이 이루어진 C호실의 경우 재실자가 존재했으며, 창문은 닫힌 상태이다. 또한 공기청정기는 가동되지 않았다. 실내 미세먼지의 측정은 Aerocet-531s (미세먼지 측정기, Met One Instrument, Inc., USA) 1대, 11-D (Portable Aerosol Spectrometer, GRIMM Aerosol Technik Ainring, Germany) 1대, AM520 (Sidepak Personal Aerosol Monitor, TSI, USA) 2대로 총 4대를 사용하였으며 각 측정기기의 제원을 표 1에 나타냈다. 이때 AM520은 2대를 사용하였기 때문에 AM520_1, AM520_2라고 표기하여 구분하였다. 측정

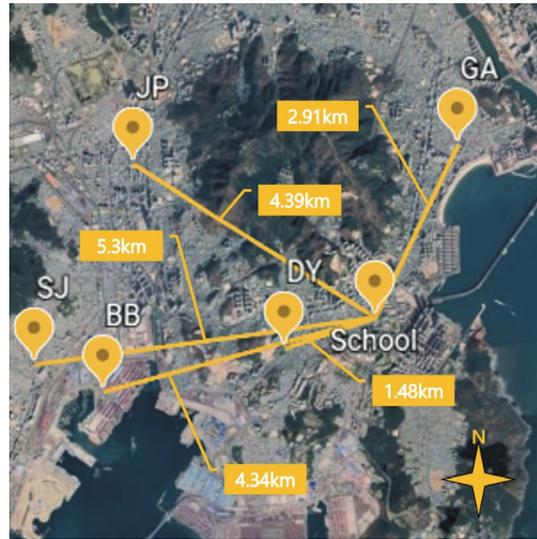


Fig. 1. The location of air quality monitoring stations (AQMS).

에 사용된 기기들은 실내공기질 공정시험기준에 따라 실내 공간의 가운데 지점의 바닥면으로부터 약 1.2m~1.5m 높이에 설치되었다. 측정 데이터의 경우 1분 간격으로 측정되었으며, 한시간 간격으로 평균하여 사용하였다. 그리고 서로 다른 측정기에서 측정된 결과값을 교정하기 위하여 측정된 데이터 간의 교정 작업을 수행하였다. 교정작업의 경우 AM520_1 기기를 기준으로 각 기기의 측정값과 선형회귀분석을 진행하였고 이를 통해 도출해낸 교정 곡선을 사용하여 수행하였다. 이러한 이종기기 간의 교정작업을 통하여 건물 내외의 미세먼지 측정시스템을 구축할 때 사용되어질 측정기기들의 동시 측정 가능성을 확인할 수 있으며, 측정 데이터에 대한 신뢰도 또한 높일 수 있다.

2.3.3 환경인자에 따른 실내외 미세먼지의 변화

실내 미세먼지에 실내외 환경인자가 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 연구를 수행하였다. 이를 위하여 앞선 연구에서 교정작업이 끝난 이종기기 4대를 C호실의 실내외에 각각 2대씩 설치하여 동시 간대에 연속측정을 진행하였다. 측정기기는 실외의

경우 건물 2층의 높이에, 실내의 경우 2층에 위치한 C호실 중앙에 1.2m 높이에 설치하였다. 측정이 진행된 C호실은 측정기간 동안 재실자가 평상시와 같이 활동하였으며 05월 25일에서 26일까지는 창문을 닫은 상태로 실내외 미세먼지를 측정하였으며, 05월 27일에서 29일까지는 창문을 개방한 상태로 실내외 미세먼지를 측정하였다. 또한 창문의 개폐 여부에 따른 실내외의 미세먼지의 농도를 중점적으로 비교하기 위해 창문 개폐 조건을 제외한 다른 실내 조건들은

모두 동일하게 유지하였다. 측정기간 동안 C호실 재실자의 수는 6명이며, 공기청정기와 에어컨 등의 미세먼지 저감장치들은 일체 가동되지 않았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실내외 미세먼지 상관성 분석

실내 미세먼지의 측정 데이터와 AQMS 데이터의

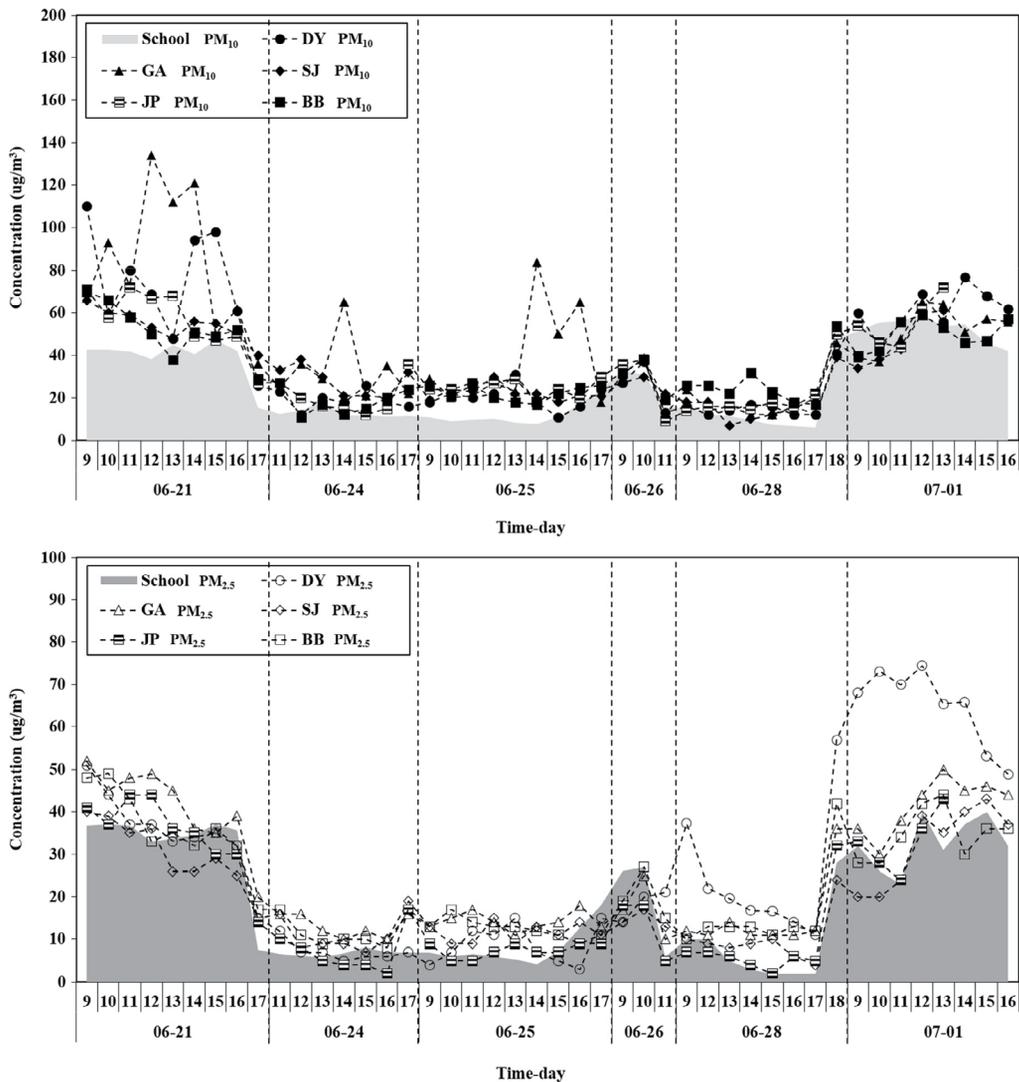


Fig. 2. The PM levels measured in indoor and outdoor environments.

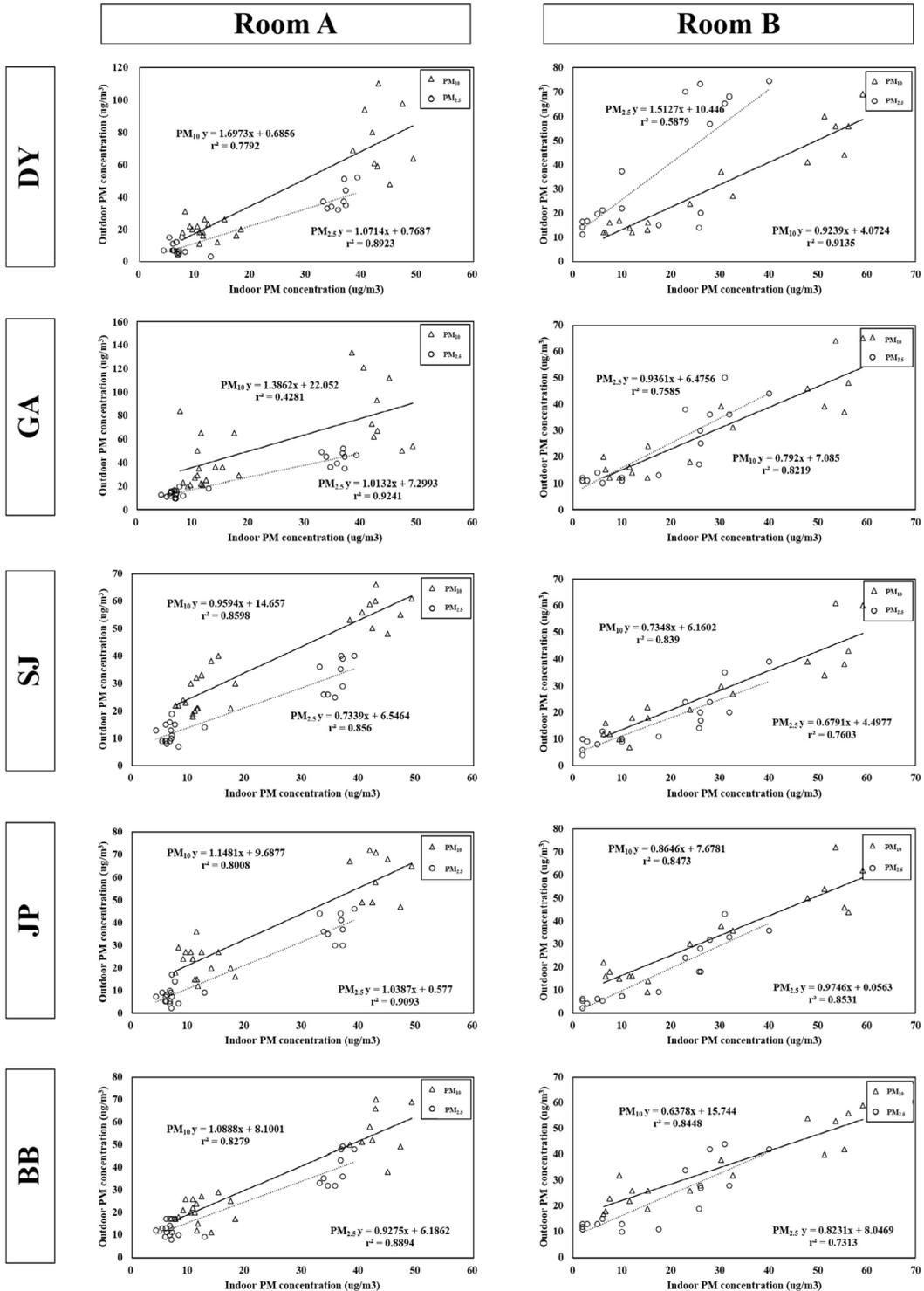


Fig. 3. Correlation analysis between indoor and outdoor PM concentrations.

시간에 따른 농도변화는 그림 2에 도시하였다. 그 결과 실내의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 가 AQMS 데이터와 대체적으로 비슷한 농도 변화를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 결과만으로는 실내 미세먼지와 각각의 AQMS 지점의 데이터 간의 상관성을 명확하게 알기 어렵다. 따라서 실내 미세먼지와 AQMS 데이터 간의 상관분석을 진행하였다.

그림 3은 A호실과 B호실의 실내 미세먼지의 측정 결과와 AQMS 데이터와의 상관분석을 진행한 결과를 나타낸 것이다. A호실의 상관분석 결과 PM_{10} 의 r^2 값은 DY (0.7792), GA (0.4281), SJ (0.8598), JP (0.8008), BB (0.8279)으로 나타났으며, $PM_{2.5}$ 의 r^2 값은 DY (0.8923), GA (0.9241), SJ (0.8560), JP (0.9093), BB (0.8894)으로 나타났다. PM_{10} 의 경우 수정동(SJ: (PM_{10} : 0.8598, $PM_{2.5}$: 0.8560))을 제외한 모든 AQMS 지점에서 $PM_{2.5}$ 의 상관성이 PM_{10} 보다 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 광안동(GA)의 PM_{10} 의 경우 다른 4지점의 AQMS 중 가장 작은 상관성을 보이나 (GA: 0.4281), 이와 반대로 $PM_{2.5}$ 는 거리상으로 가장 가까운 대연동(DY) AQMS 지점보다 약 2배 떨어져 있는 광안동(GA) AQMS 지점의 상관성이 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 풍향 및 풍속 등과 같은 외부

환경요인이 실내외 PM 농도의 상관성에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 실제로 해당 연구의 측정기간 동안 부산의 바람장미를 확인하였을 때 주풍이 남서풍이었으며 이를 통해 광안동 방향의 미세먼지가 학교방향으로 이동하였다고 추측할 수 있다. B호실의 상관분석 결과 PM_{10} 의 r^2 값은 DY (0.5879), GA (0.7585), SJ (0.8390), JP (0.8473), BB (0.8448)으로 나타났으며, $PM_{2.5}$ 의 r^2 값은 DY (0.9135), GA (0.8219), SJ (0.7603), JP (0.8531), BB (0.7313)으로 나타났다. B호실의 상관분석 결과 또한 A호실의 결과와 마찬가지로 수정동(SJ) 관측결과 (PM_{10} : 0.8390, $PM_{2.5}$: 0.7603)를 제외한 모든 AQMS 지점에서 $PM_{2.5}$ 의 상관성이 PM_{10} 보다 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 따라서 실내에서 측정된 PM의 데이터 값과 주변의 AQMS 데이터를 비교 분석할 때는 무조건적으로 거리가 가까운 AQMS 지점의 데이터를 사용하였을 때 분명한 한계점을 내포할 수 있어서 바람방향과 같은 영향들을 추가적으로 고려하여야 한다. 따라서 실외의 PM이 실내 PM에 미치는 영향을 보다 정확히 평가하기 위해서는 실내공기의 측정대상 주변에 자체적인 PM 모니터링 시스템을 구축하여야만 보다 신뢰성 있는 상관관계를 도출할 수 있다. 그리고 본 연

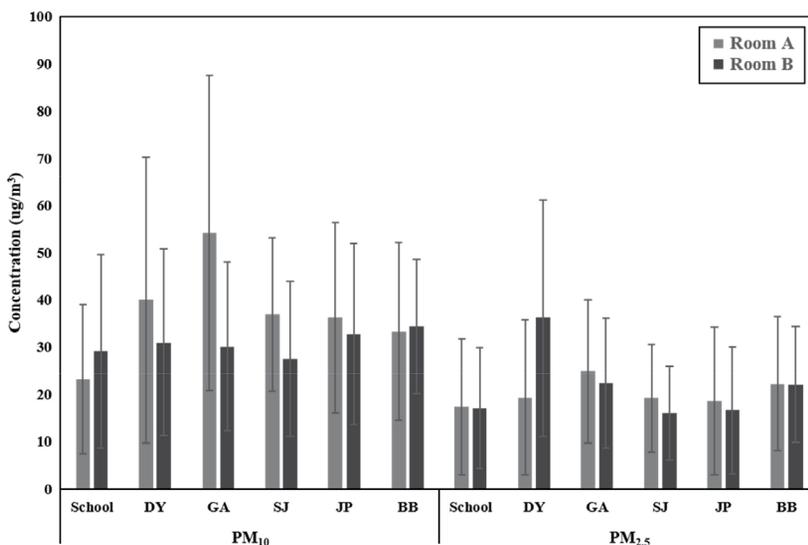


Fig. 4. Comparison of average concentrations of PM in indoor and outdoor.

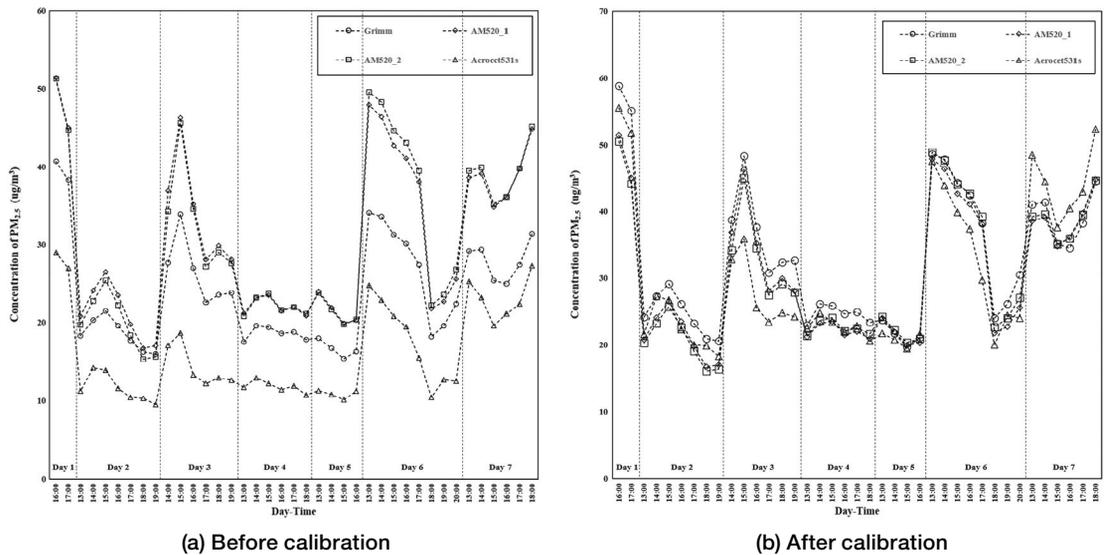


Fig. 5. Measurements and calibration of between different devices.

구를 통하여 재실자의 유무에 따라 실내외 PM 간의 상관관계가 확연히 달라지는 것을 알 수 있다. 실내에서 일반적으로 재실자가 존재할 때 실내외의 PM의 상관관계가 낮아지며, 이와 같은 현상은 PM_{2.5}보다 PM₁₀에서 더 두드러지게 나타났다. 실제로 재실자의 활동에 의해서 PM₁₀의 재비산이 이루어지는 것으로 보고된 바 있다(Partti-Pellinen *et al.*, 2000). 또한 인체의 세포탈락으로 인한 생성도 원인으로 알려져 있다(Park, 2018; Fadeyi *et al.*, 2013).

그림 4는 A호실과 B호실에서 측정기간 동안의 실내외 AQMS에서 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 평균값을 나타낸 것이다. PM₁₀의 경우 학교와 부산북항(BB: 도로변대기측정망)에서 B호실의 측정기간 동안의 평균농도가 A호실의 평균농도보다 높게 나타났으며 나머지 AQMS(도시대기측정망)들에서는 이와 반대의 결과가 나타났다. A호실의 경우 재실자가 존재하여 PM₁₀의 재비산과 같은 환경요인이 영향을 미쳤을 가능성이 있으나 공기청정기와 에어컨과 같은 미세먼지의 저감 요인으로 인하여 실내 PM₁₀의 농도를 감소시키는 영향을 미친 것으로 판단된다. 실제로 밀폐된 공간에서 에어컨을 가동했을 때 미세먼지의 농도

가 감소한다는 연구결과가 존재한다(Park *et al.*, 2018a). 이와 반대로 PM_{2.5}의 경우 학교와 부산북항(BB: 도로변대기측정망)에서 A호실과 B호실의 측정기간 동안의 평균농도 값의 차이가 거의 없었으며 AQMS 중에서는 대연동(DY: 도시대기측정망)에서만 B호실의 측정기간 동안의 평균값이 높게 나타났다. 일반적으로 학교의 교실에는 흡연, 연소, 조리과 같은 PM_{2.5}의 실내배출원이 없으며, 외부 유입에 의한 증가가 대부분의 원인으로 알려져 있다(Son, 2020). 따라서 본 연구에서 A호실과 B호실 모두 창문이 닫혀 있는 밀폐된 공간에서 측정하였기 때문에 PM_{2.5}의 평균값에 차이가 거의 없었던 것으로 판단된다. 그러나 다른 측면에서 보면 A호실에서는 공기청정기와 에어컨과 같은 미세먼지 저감 장치가 가동되었음에도 B호실과 비교하였을 때 PM_{2.5}의 농도 수준이 비슷한 결과를 나타내므로, 미세먼지 저감 장치의 제거효율이 낮다고 볼 수도 있으나, 해당 저감 장치들의 작동에 있어서 필터가 새 것으로 교체되었는지, 혹은 이미 필터 혹은 저감 장치의 제거효율이 포화상태에서 가동되었는지와 같은 저감 장치의 작동 상황을 본 연구에서는 고려하지 않았으므로 향후 연구에서는

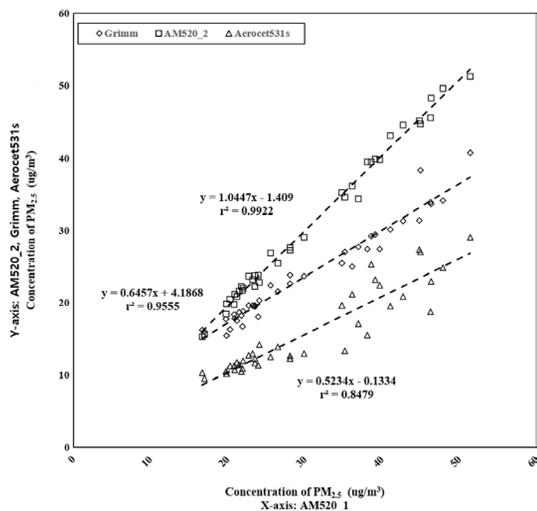
Table 2. Results of statistical analysis by window conditions.

PM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Factors	Window closed					Window opened				
		N	Mean	\pm SD	Min-Max	r^2	N	Mean	\pm SD	Min-Max	r^2
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Outdoor	74	56.9	8.6	41.5~78.6	0.2135	134	34.7	10.0	20.3~65.9	0.1046
	Indoor	74	41.4	13.7	21.8~86.3		134	32.5	12.7	17~86.2	
	I/O ratio	74	0.73	0.21	0.41~1.52		134	0.97	0.41	0.48~2.62	
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Outdoor	74	43.9	5.5	33.8~51.9	0.3271	134	24.1	7.8	13.8~47.4	0.6079
	Indoor	74	22.8	3.3	17.1~31.1		134	13.4	5.5	6.9~31.6	
	I/O ratio	74	0.52	0.07	0.42~0.89		134	0.56	0.15	0.34~1.30	
PM _{2.5} /PM ₁₀	Outdoor	74	0.78	0.06	0.61~0.85		134	0.69	0.10	0.36~0.87	
	Indoor	74	0.59	0.12	0.32~0.83		134	0.43	0.14	0.18~0.74	

이 점을 고려하여 환경 인자들 간의 간섭을 최소화하여야 할 것이다.

3. 2 이종기기 간의 미세먼지 측정

그림 5는 4대의 이종 측정기기를 사용하여 C호실의 PM_{2.5}를 측정된 결과값을 도시한 것이다. 그림 5(a)를 보면 전체적인 경향은 비슷하나 각 기기 간의 농도 수준이 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이들 이종기기를 실제 측정에 동시에 사용하기 위해서는 현장 측정 전에 교정작업을 통하여 측정값을 보정해 주어야 한다. 이를 위해 AM520_1의 측정값을 기준으로 하여 선형회귀분석을 진행하였다. 선형회귀분석의 결과 나온 수식을 통하여 교정을 진행하였으며 선형회귀분석의 결과는 그림 6에 도시하였다. 그림 6의 결과에서 AM520_1과 AM520_2의 r^2 값은 0.9922로 상관성이 매우 높게 나타난다. 또한 11-D (Grimm)와 Aerocet531s의 r^2 값은 각 0.9555와 0.8497로 AM520_2보다 낮게 나타난다. 이와 같은 결과는 그림 5에서도 확인할 수 있다. 상관성이 가장 높은 AM520_2의 측정값이 AM520_1의 측정값과 가장 유사한 농도를 보이며, 그 다음 11-D (Grimm), Aerocet531s 순서로 유사하게 보이는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 그림 6의 교정 곡선을 사용하여 교정을 진행한 후의 미세먼지 농도를 나타내고 있다. 모든 기기의 측정치가 유사한 농도와 경향을 보이는 것

**Fig. 6.** Calibration curves between different devices.

을 확인할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 보유 장비의 한계로 인하여 측정기기 간의 보정 작업을 수행할 때 광산란법 장비들 간의 측정을 수행하여 분석하였기에 농도의 변화 정도를 확인하는 용도로만 사용할 수 있는 한계점을 가지고 있다. 따라서 이와 같은 한계점을 극복하기 위해서는 중량법 또는 베타레이 측정기와 같은 기준장비 등의 절대 농도 측정기기들이 실제 현장 측정에 병행되어 사용되어야만 광산란법 측정기기에서 산출된 농도값의 신뢰성을 확보할 수 있다.

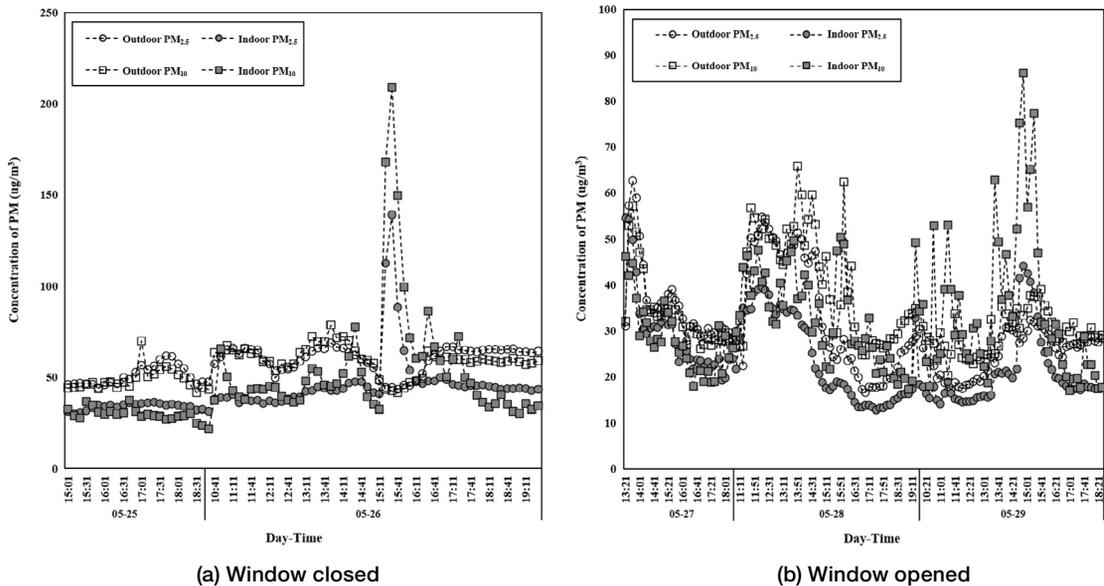


Fig. 7. Variations on concentration of PM_{2.5} and PM₁₀ by environmental factors.

3.3 환경인자에 따른 실내외 미세먼지의 변화

그림 7은 창문의 개폐 유무에 따른 실내외 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 농도 변화를 시간의 흐름에 따라 나타낸 것이다. PM_{2.5}는 창문이 닫혀 있을 때 실내외의 농도가 서로 다른 변화를 보인다(그림 7(a)). 이와 반대로 창문이 개방되어 있을 때에는 거의 동일한 농도변화를 보인다(그림 7(b)). PM₁₀의 경우 창문이 닫혀 있을 때에는 PM_{2.5}와 마찬가지로 실내외의 농도가 서로 다른 변화를 보이나, 창문이 개방되어 있을 때에는 실외의 농도보다 실내에서 더 높게 나타나며 PM_{2.5}와 달리 실외 농도와 전혀 다른 농도변화를 보인다. 이는 PM_{2.5}의 경우 실외로부터의 유입이 실내 농도에 큰 영향을 미친다고 볼 수 있으며 반대로 PM₁₀의 경우 외부유입에 의한 영향보다 재실자와 같은 실내환경인자에 더 큰 영향을 받는다고 볼 수 있다. 표 2는 창문의 개폐 유무에 따른 실내외 미세먼지의 농도에 대한 통계분석의 결과를 나타낸 것이다. 표 2의 I/O r²값은 실내 미세먼지와 실외 미세먼지 사이의 상관분석 결과 산출되어진 결정 계수를 나타낸 것이다. 창문이 닫혀 있을 때 PM₁₀과 PM_{2.5}의 I/O ratio는 각

각 0.73, 0.52였으며 창문이 개방되어 있을 때의 I/O ratio는 각각 0.97, 0.56이었다. PM₁₀과 PM_{2.5}의 실내외 농도에 대한 상관분석 결과 창문이 닫혀 있을 때의 상관계수(r²)는 각각 0.2135, 0.3271이며, 창문이 개방되어 있을 때의 상관계수는 각각 0.1046, 0.6079였다. 창문이 개방되어 있을 때 PM₁₀의 I/O ratio가 0.97로 가장 높게 나타났는데 이는 외부로부터의 유입이 지배적이라고 볼 수 있다. 그러나 앞선 그림 7의 농도변화의 경향을 보았을 때 단순히 재실자의 활동으로 인해 실내 PM₁₀의 평균농도가 증가하여 I/O ratio의 값이 높게 나타났다고 볼 수 있으며 상관분석 결과 PM₁₀의 r²값은 창문의 개폐여부에 상관없이 모두 낮게 나타났다. 따라서 단순히 이러한 I/O ratio의 결과값을 통해 실내외 미세먼지의 연관성에 대하여 판단할 시 그 신뢰성이 떨어질 수 있다. 창문이 닫혀 있을 때에는 개방되어 있을 때보다 크게 감소하는데 (0.97에서 0.73) 이는 외부 유입이 차단되었을 때 실내 재실자와 같은 환경인자가 작용했다고 볼 수 있다. PM_{2.5}의 I/O ratio는 창문이 닫혀 있을 때(0.52)에 비해 창문이 개방되어 있을 때(0.56) 증가하였다. 또

한 상관분석 결과 PM_{2.5}의 r²의 값은 창문이 닫혀 있을 때 0.3271에서 개방되어 있을 때 0.6079로 크게 증가한다. 따라서 이는 앞선 분석결과에서 나타났던 PM_{2.5}의 실외로부터의 실내유입에 대한 근거로 볼 수 있다.

4. 결 론

산업 및 주거 환경의 변화로 인해 현대인들이 실내에 거주하는 시간이 점차 증가하고 있으며 이에 따라 실내공기질의 중요성이 대두되고 있다. 또한 실내공기질의 악화로 인해 많은 질병이 발병할 수 있으나, 사람마다 느끼는 체감의 정도가 다르기 때문에 실내공기질에 대한 인식 및 연구는 현재까지 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 건물 내에서 직접 측정된 미세먼지의 농도와 주변 AQMS에서 측정된 자료를 비교하는데 있어서 그 한계점을 평가하고자 하였다. 그 결과 무조건적으로 거리가 가까운 AQMS 지점의 데이터를 사용하여 실내공기질과의 관계를 해석하면 실내공기질을 이해하는데 있어서 한계점이 있는 것으로 나타났고, 풍속 및 풍향 등과 같은 인자들을 추가적으로 고려해 주어야만 한다는 것을 확인할 수 있었다. 추가적으로 이종기기 간의 동시 사용 여부를 파악하였으며, 그 결과 이종기기 간의 보정이 선행된다면 측정데이터를 신뢰할 수준으로 향상시킬 수 있었다. 또한, 다양한 환경인자가 실내 미세먼지에 미치는 영향을 평가하기 위하여 재실자의 활동 및 창문 개폐 등과 같은 인자로 인한 미세먼지 농도 변화를 분석하여 건물 내 미세먼지에 미치는 영향을 평가했다. 그 결과 위와 같은 인자들이 작용하였을 때 I/O ratio의 결과값만 가지고는 실내외 미세먼지 농도의 관계를 파악하는 데 있어서 신뢰성이 떨어지는 한계점을 확인하였고 상관성분석과 같은 추가적인 통계분석이 동시에 이루어져야 결과를 해석하는 데 있어서 보다 바람직하다. 본 연구의 결과는 앞에서 말한 것과 같이 현장에서 기준장비와 함께 측정하지 않아

서 절대 농도 값을 이야기 하기에는 연구의 한계점이 분명히 존재하지만, 광산란기기의 실제 현장(학교, 보육시설 등)에서의 적용 가능성을 보여주고 있다. 본 연구의 결과는 학교와 같은 취약군이 존재하는 시설에서 미세먼지 실시간 측정 및 관리를 위한 정책 및 지원을 마련하는 데 있어서 활용될 수 있을 것이며 향후 통합관리시스템 및 실내 미세먼지 예측 프로그램 등을 만드는 데 반영될 수 있을 것이다.

감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT, MOE) and (No. 2019M3E7A1113103).

References

- Bae, G.N., Ji, J.H. (2013) Management policy and control technology for indoor air quality in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 378-389, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572.KOSAE.2013.29.4.378>
- Choi, S.J. (2008) The Effect of Outdoor Air and Indoor Human Activity on Mass Concentrations of Size-Selective Particulate in Classroom, *Journal of Environmental Health and Science*, 34(2), 137-147, (in Korean with English Abstract). <https://doi.org/10.5668/JEHS.2008.34.2.137>
- Choi, Y.J., Lee, G.Y., Baek, G.H., Kang, N.E. (2017) Difference Analysis on Indoor Air Quality by Ventilation during Sleeping Time in University Housing, *Korean Journal of Human Ecology*, 26(6), 609-622. <https://doi.org/10.5934/kjhe.2017.26.6.609>
- Deng, Q., Deng, L., Miao, Y., Guo, X., Li, Y. (2019) Particle deposition in the human lung: Health implications of particulate matter from different sources, *Environmental Research*, 169, 237-245. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.014>
- Fadeyi, M.O., Weschler, C.J., Tham, K.W., Wu, W.Y., Sultan, Z.M. (2013) Impact of Human Presence on Secondary

- Organic Aerosols Derived from Ozone-Initiated Chemistry in a Simulated Office Environment, *Environmental Science & Technology*, 47(8), 3933-3941. <https://doi.org/10.1021/es3050828>
- Han, S.H., Kim, Y.P. (2015) Long-term Trends of the Concentrations of Mass and Chemical Composition in PM_{2.5} over Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(2), 143-156. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.2.143>
- Jeung, Y.H., Choi, S.J. (2007) Assessment of formaldehyde concentration in indoor and outdoor environments of schools in Incheon, *Korean Journal of Environmental Health*, 33(5), 372-378.
- Jung, Y.S., Kwon, L.S., Kim, S.H. (2016) A study on the measurement of indoor air quality of Kindergartens located in Suwon-si, South Korea, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 16(4), 523-529 (in Korean with English abstract).
- Khovaly, D.L., Kazanci, O.B., Halvorsen, H., Gundlach, I., Bahnfleth, W.P., Toftum, J., Olesen, B.W. (2020) Critical review of standards for indoor thermal environment and air quality, *Energy and Buildings*, 213, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109819>
- Kim, H.J. (2008) Analysis and Improvement of Indoor Air Quality in University Dormitory by measurement, *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 2(2), 20-26.
- Klepeis, N.E., Nelson, W.C., Ott, W.R., Robinson, J.P., Tsang, A.M., Switzer, P., Behar, J.V., Hern, S.C., Engelmann, W.H. (2001) The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 11(3), 231-252. <http://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>
- Park, H.J., Wie, J.E., Kim, S.W., Song, Y.J., Ji, Y.N., Jang, S.Y., Kim, J.S., Moon, B.K. (2018a) Assessment of Indoor Air Pollution at School and Home, *Journal of Science Education for the Gifted*, 10(1), 43-54. <https://doi.org/10.29306/jseg.2018.110.1.43>
- Park, J.H. (2018) Significance of indoor particulate matters, *KIC News*, 21(2), 1-8. <https://www.cheric.org/PDF/PIC/PC21/PC21-2-0001.pdf>
- Park, J.H., Son, Y.S., Kim, K.H. (2019a) A review of traditional and advanced technologies for the removal of particulate matter in subway systems, *Indoor Air*, 29, 177-191. <https://doi.org/10.1111/ina.12532>
- Park, J.H., Yang, S.Y., Park, Y.K., Ryu, H.S., Kim, E.C., Choe, Y.T., Heo, J., Cho, M.S., Yang, W.H. (2019b) Exposure and Risk Assessment of Benzen and PM₁₀ for sub-populations using Monte-Carlo Simulations, *Journal of Environmental Health Sciences*, 45(3), 247-257. <https://doi.org/10.5668/JEHS.2019.45.3.247>
- Park, S., Park, T., Park, S., Kim, Y., Kwon, M., Jung, J., Lee, C. (2018b) Levels of the concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} in elementary school classroom at Yeongwol county, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 17(1), 11-17, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie2018.17.1.11>
- Partti-Pellinen, K., Marttila, O., Ahonen, A., Suominen, O., Haahntela, T. (2000) Penetration of Nitrogen Oxides and Particles from Outdoor into Indoor Air and Removal of the Pollutants through Filtration of Incoming Air, *Indoor Air*, 10(2), 126-132. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2000.010002126.x>
- Shin, E.Y., Kim, G.H. (2017) A study on university office worker's perception of indoor air quality (Focused on K university), *The Journal of Design and Educational Environmental Research*, 16(3), 69-76. <https://doi.org/10.7743/kisee.2017.16.3.069>
- Sim, S.H., Kim, Y.S. (2006) Characterization and Assessment of Indoor Air Quality in Newly Constructed Apartments - Volatile Organic Compounds and Formaldehyde -, *Korean Journal of Environmental Health Sciences*, 32(4), 275-281.
- Son, Y.S. (2020) Particulate matter and influencing factors in domestic elementary schools, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(2), 153-170. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.2.153>
- Suh, J.M., Wang, B., Jang, S.H., Park, J.H., Choi, K.C. (2014) Characteristics of Size-segregated Mass Concentrations of Indoor Aerosol Particles in University Buildings, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 24(4), 453-461. <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2014.24.4.453>
- Yang, W.H., Sohn, J.R., Kim, J., Son, B.S., Park, J.C. (2009) Indoor air quality investigation according to age of the school buildings in Korea, *Journal of Environmental Management*, 90(1), 348-354. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.10.003>

Authors Information

김대현 (부경대학교 지구환경시스템과학부 석박사연계과정)
손윤석 (부경대학교 환경공학과 조교수)