

# 서울시 다중이용시설 실내공기 중 입경별 미세먼지 특성 연구

실내환경팀

서장원 · 민병철 · 조석주 · 어수미 · 신용승

## Study on PM Characteristics of Indoor Air in Public Facilities in Seoul based on Particle Size

*Indoor Environment Team*

**Jang-won Seo, Byung-chul Min, Suk-joo Cho,  
Soo-mi Eo and Young-seong Shin**

### Abstract

Particulate matter(PM) in the air directly affects human health. This study investigated the correlation between indoor and outdoor PM in hospitals, libraries, game centers, child-care centers, postnatal care centers, indoor parking lots, and multiplex stores, using a light-scattering technique. The results showed different correlations according to the particle size. In an indoor environment, particles flowed in from outdoors through air circulation were slightly eliminated by various means such as air cleaners and occupant's respiratory system. Hence, indoor PM concentration is generally lower than outdoor PM concentration. The results showed that small-sized PM in indoor air has a strong relationship with outdoor PM. Conversely, large-sized PM has a weak relationship with each other. Small-sized PM has a strong relationship with cooking and smoking, and large-sized PM is related to the physical activity of the occupant. Comparing the outdoor air on building rooftops with that on the ground, the concentration of large-sized PM on the rooftop was lower than that on the ground; the concentration of small-sized PM was similar both on the rooftops and the ground. The concentration of small-sized PM at a nursery being cleaned using a vacuum cleaner was almost 3 times higher than that of a nursery not being cleaned.

**Key words** : particulate matter, indoor air, particle size, I/O ratio

## 서 론

하루 중 대부분의 시간을 실내에서 보내는 현대인에게 실내공기의 오염상태는 재실자의 건강에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소이다. 실내공기에 큰 영향을 미치는 요소로는 바깥의 대기와 재실자의 활동이 있는데 공기 중의 오염물질 중 인간의 활동으로 인해 발생하는 미세먼지가 큰 관심을 받고 있다. 특히, 겨울, 봄에 자주 발생하는 대기 중의 고농도 미세먼지로 인해 차량 배출가스 등급제 등 국가 차원의 정책들이 국민 생활에 제약을 가하는 수준에까지 이르렀다.

이처럼 고농도 미세먼지와 관련하여 강력한 조치들이 가해지는 이유는 미세먼지의 인체 위해성이 여러 연구들을 통해서 속속 밝혀지고 있기 때문이다. 각종 호흡기질환 뿐만 아니라 미세먼지가 폐를 통해 혈액 속으로 침투하여 정신질환, 뇌혈관계, 심혈관계에 악영향을 주고 임산부의 태아 건강에도 영향을 미치는 것으로 발표 되고 있다(1, 2).

실내공기질 관리의 기본은 환기에서 시작한다. 환기는 실내에 쌓여 있는 오염물질을 밖으로 내보내서 농도를 낮추고 낮아진 산소 농도를 올리는 효과가 있다. 그러나 환기는 실외의 미세먼지가 실내로 유입되는 과정이 되기도 한다. 환기를 통해 실내로 유입된 바깥의 미세먼지는 공기청정기 등에 의해 일부 제거되기도 하고 시간이 지남에 따라 서서히 가라 앉아 바닥에 쌓이기도 한다. 미세먼지 발생원이 건물 내에 있는 경우로는 어린이집은 조리실, PC방은 조리대와 흡연실, 대규모 점포는 식당가 등이 있는데 이들의 공통점은 연료의 연소가스와 가열된 식용유에서 나온 유증기가 매우 작은 입자의 미세먼지를 만든다는 것이다. 난방용 보일러, 화력발전소, 공장, 자동차 배출가스에서 나온 미세먼지와 국외 유입 미세먼지 등으로 구성된 외기의 미세먼지는 환기를 통해 실내로 유입된 후 실내에서 제거, 침착, 재부유 과정을 거치면서 농도가 변한다. 그러나 같은 농도의 미세먼지라도 입경의 분포가 다르면 인체의 건강에 미치는 영향이 달라지고 공기 중에서의 확산속도, 침강속도, 공기청정기 제거 효율 등 실내공기 환

경에 미치는 영향도 달라진다(6). 입경이 작아질수록 공기 중에서의 부유시간이 길어지고 노출시간이 길어짐에 따라 호흡을 통한 유입량도 증가해 인체 위해도가 증가하고(7) 폐 깊숙이 침투해 혈액 속까지 녹아 들어가 전신에 악영향을 미치기도 한다(2). 반면, 자연발생적 미세먼지는 주로 물리적 마찰에 의해 생성되어 입자가 큰 편인데(3) 이러한 입자에 대해서는 기관지에서 상당부분 제거되어 인체에 미치는 위해도가 크지 않다.

본 연구는 많은 사람들이 이용하는 서울시의 다중이용시설 실내공기 중의 미세먼지를 입경별로 분석하여 외기와외의 상관관계를 알아보고자 하였다. 또한 환기나 침기를 통해 실내로 유입된 외기의 미세먼지가 입경별로 어떠한 움직임의 차이를 보이는지를 알기 위해 실내·외 농도비(I/O ratio: indoor - outdoor concentration ratio)를 기반으로 분석을 실시하였다.

## 연구방법

### 1. 대상시설

서울시의 어린이집(10곳), 병원(5곳), 산후조리원(1곳), 대규모점포(5곳), 지하주차장(1곳), PC방(3곳), 도서관(2곳) 등 총 27개 시설을 측정하였다.

### 2. 측정기간

2019년 6~10월 오전 10시~오후 1시

### 3. 측정위치

재실자가 활동하는 공간의 바닥에서 1.2~1.5m 높이에서 측정하였고 외기의 경우는 1층 출입문 근처와 4~9층짜리 건물 옥상에서 측정하였다. 어린이집의 경우 보육실과 조리실을, 산후조리원은 산모 휴게실과 응접실을, PC방은 일반석과 흡연실, 조리대 주변을, 병원은 입원실과 접수처를, 대규모점포는 상품 판매층과 식당가를 측정하여 1개 시설 당 그곳의 실내공기질을 대표할 수 있는 3~6개 지점, 총 146개 지점을 측정하였다.

#### 4. 측정장비

기기 내부로 유입된 미세먼지에 레이저를 쏘아 산란된 빛의 세기를 측정하여 입자의 개수와 크기 (0.25~32 μm)를 알아내는 광산란법 장비(Light Scattering Method, Grimm 1.109, Germany)를 사용하였다.

#### 5. 측정방법 및 통계처리

현재 사용 중인 미세먼지의 공식적인 농도단위는 중량농도(μg/m<sup>3</sup>)이나 입자의 개수농도(particles/m<sup>3</sup>)를 가지고 분석을 하면 많은 이점이 있다. 인체 위해성이 높은 아주 작은 먼지 입자들은 다 합해도 중량농도로는 미미한 수준이나 개수로는 상당히 높은 비율을 차지하고 있음을 본 연구를 위해 직접 측정된 결과들을 통해서 알 수 있었다(그림 1, 2). 따라서 개수농도를 가지고 분석을 하면 중량농도에서는 쉽게 드러나지 않는 사실들을 찾아낼 수가 있다.

측정을 위해 해당시설을 방문했을 때 그 시설의 성격을 대표할 수 있는 장소 중에서 환기 상태가 비교적 좋지 않다고 판단되는 지점 즉, 이산화탄소 농도가 1,000 ppm이 넘는 지점을 선택하여 측정을 하였는데 이는 환기 후 외기와 단절된 상태에서 재실자의 실내 활동이 어느 정도 이루어진 후 변화된 실내공기의 상태를 알기 위해서이다. 창문이 열려 있거나 환풍기를 가동 중인 공간은 실내공기가 외기에 가깝기 때문에 실내공기로서의 특성을 덜 반영한다고 판단하여 제외하였다. 외기는 실내공기를 측정할 장소의 창문 밖에 측정장비의 흡입구를 설치하고 창문을 닫은 상태에서 측정하였다. 옥상 외기는 배기구나 에어컨 실외기 근

처를 피해 외부 공기가 잘 통하는 장소에서 측정하였다.

측정한 자료는 실외 미세먼지와 실내 미세먼지의 상관관계를 알아보기 위해 Linear regression model을 이용하여 기울기와 R<sup>2</sup> 값을 구하였는데 1에 가까울수록 서로의 상관관계가 높음을 의미한다.

본 연구에서는 실내 미세먼지의 개수농도를 외기와 비교하여 입경별로 분석하였고 I/O Ratio를 구하여 비교·분석 하였다.

$$I/O\ Ratio = \frac{C_{IN}}{C_{OUT}}$$

여기서,

$C_{IN}$  : 실내 개수농도(Particles/m<sup>3</sup>)

$C_{OUT}$  : 실외 개수농도(Particles/m<sup>3</sup>)

### 결과 및 고찰

#### 1. 실내·외 미세먼지 개수농도 간 입경별 상관관계

실내 공기 환기를 위해 창문을 열거나 환풍기를 켜면 실외 공기가 실내로 유입되고 이때 들어온 미세먼지는 공기청정기나 재실자의 호흡에 의해서 제거되기도 하고(4) 실내에서 발생된 미세먼지가 추가되기도 한다. 따라서 실내 미세먼지는 실외 미세먼지의 영향을 많이 받기 때문에 실외 미세먼지와 비교해서 입경별로 0.3 μm, 0.5 μm, 1.0 μm, 3.0 μm, 5.0 μm, 10 μm로 나누어 분석하였다(5).

각 시설마다 그 시설을 대표할 수 있는 지점을 측정하여 입경별로 개수농도 단위로 실외 미세먼지와 비교하여 표시한 그래프를 보면(그림 3) 입경이

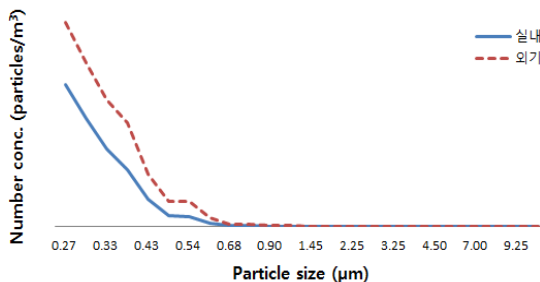


Fig. 1. Number distribution by particle size.

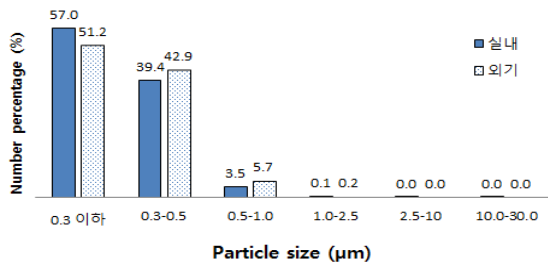


Fig. 2. Number percentage by particle size.

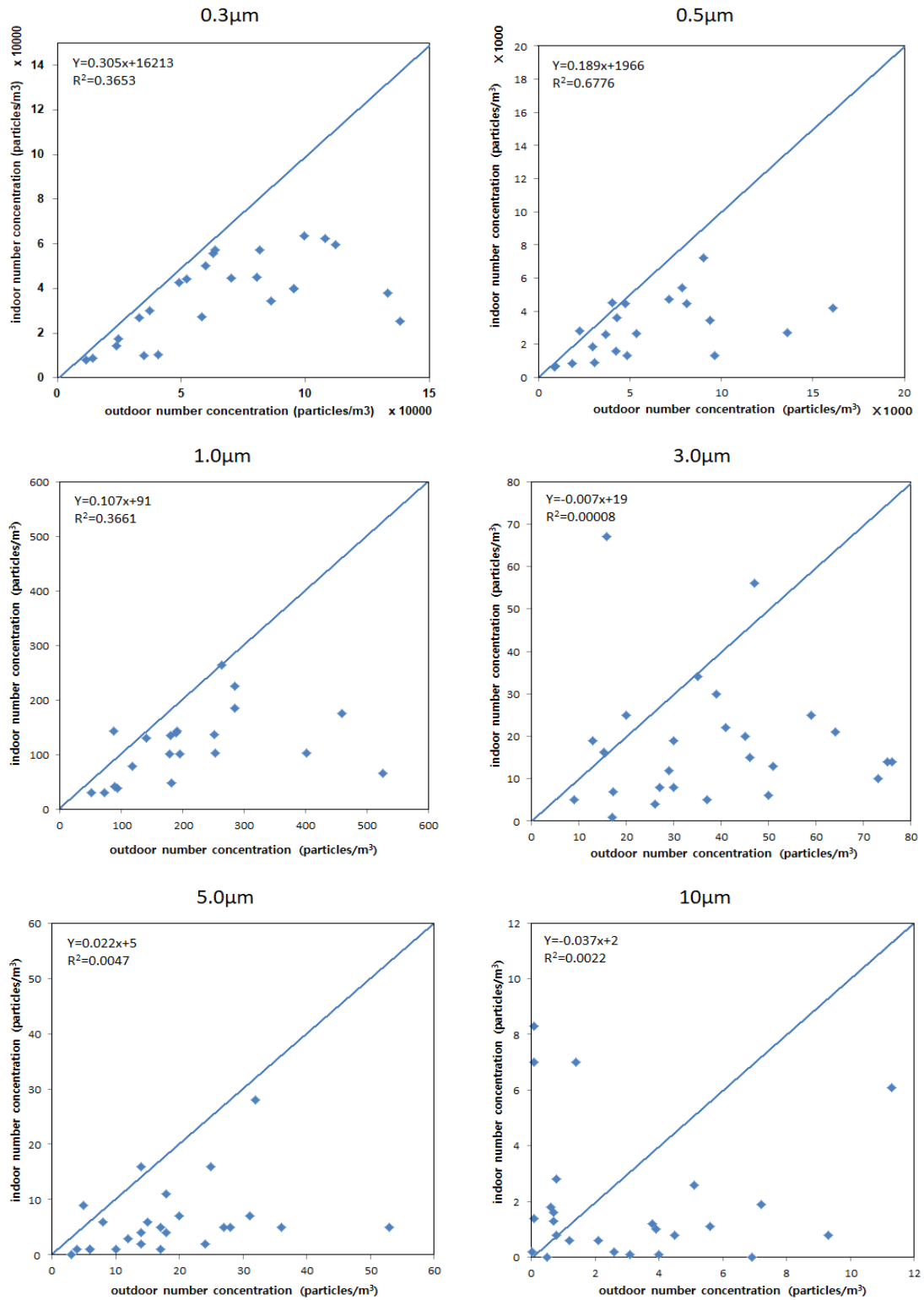


Fig. 3. Correlation between outdoor and indoor particle number concentration.

0.3  $\mu\text{m}$ , 0.5  $\mu\text{m}$ , 1.0  $\mu\text{m}$ 인 미세먼지 농도 분포는 기율기 1에 근접하거나 1보다 작은 값을 보이고 있어 서로 높은 상관관계가 있음을 알 수 있다. 이는 실내 미세먼지가 실외 미세먼지의 영향을 많이 받고 있음을 보여준다. 입경이 3.0  $\mu\text{m}$ , 5.0  $\mu\text{m}$ 의 경우 기율기가 1보다 많이 작아 실외 농도보다 실내 농도가 더 작음을 알 수 있다. 환기 등을 통해 실내로 유입된 실외 미세먼지는 실내의 공기청정기나 재실자의 호흡, 바닥 침착에 의해 제거되기 때문에 일반적으로 실외보다 농도가 낮아진다. 입경이 10  $\mu\text{m}$ 인 경우는 기율기 1 근처에 농도 분포가 거의 존재하지 않아 실내 미세먼지가 실외 미세먼지와 상관관계가 낮음을 알 수 있다. 기율기 1보다 작은 경우는 실외에서 유입된 미세먼지가 실내에서 많이 제거되었음을 나타내는 것이고 기율기가 1보다 큰 경우는 실외에서 유입된 미세먼지에 실내에서 발생한 미세먼지가 더해져서 농도가 더 높아진 경우이다. 즉, 실내에서 재실자의 활동에 의해 발생한 미세먼지는 입경이 큰 입자들이 많은 의미이다.

## 2. 오염발생원이 있는 지점과 외기의 개수농도 상관관계

어린이집과 PC방의 미세먼지 발생원으로 지목되는 조리실과 흡연실의 I/O ratio를 어린이집 보육실과 비교해 보면(그림 4), 대부분의 보육실은 입경을 불문하고 1.0보다 작아 외기보다 농도가 낮음을 알 수 있다. 그러나 연료의 연소가스와 식용유를 튀겨서 나오는 유증기의 발생원인 조리실은 입경을 불문하고 외기보다 높게 나오고 있고 PC방의 흡연실 또한 외기보다 높은 수치를 보이고 있다. 흡연실의 경우  $\text{PM}_{10}$  보다  $\text{PM}_{2.5}$ 와  $\text{PM}_{1.0}$ 의 I/O ratio가 더 높게 나와 입경이 작은 미세먼지가 더 많이 발생되고 있음을 알 수 있다.

입경별로 측정 당시 외기와 비교해 보면(그림 5.), 입경이 0.3  $\mu\text{m}$ , 0.5  $\mu\text{m}$ , 1.0  $\mu\text{m}$ 인 경우 농도 분포가 기율기 1 근처이거나 1보다 커 조리, 흡연 등 주로 연소에 의해 발생된 미세먼지는 작은 입경의 미세먼지를 많이 발생시킴을 알 수 있다. 또한, 입경이 3.0  $\mu\text{m}$ 인 경우는 양쪽에 골고루 분포되어 있고 5.0  $\mu\text{m}$ 인 경우는 기율기가 1 근처이거나

나 1보다 작은 경우가 더 많음을 알 수 있어 실외보다 작은 실내 미세먼지 농도의 일반적인 경우를 보여주고 있다. 입경이 10  $\mu\text{m}$ 인 경우는 상관관계가 매우 낮게 나왔다.

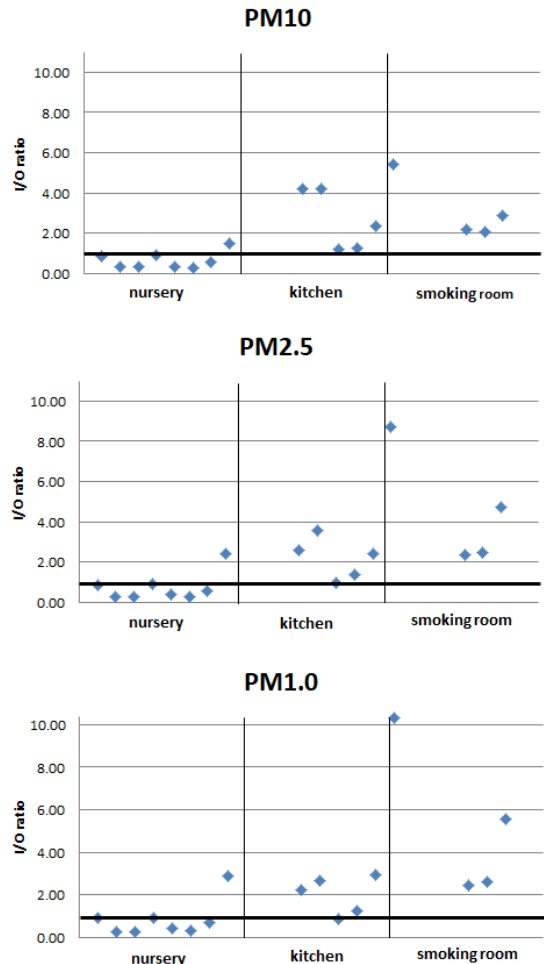


Fig. 4. I/O ratio of nursery, kitchen and smoking room of child-care center, PC game center.

## 3. 1층 외기와 건물 옥상 외기의 개수농도 상관관계

어린이집, 병원, 산후조리원 등 다중이용시설이 있는 건물의 1층 외기와 4층~9층 건물의 옥상 외기의 미세먼지를 입경별로 비교해 보았다(그림 6).

입경이 0.3  $\mu\text{m}$ , 0.5  $\mu\text{m}$ , 1.0  $\mu\text{m}$ 인 미세먼지는 농도 분포가 기율기 1에 가까워 1층과 옥상 외기가

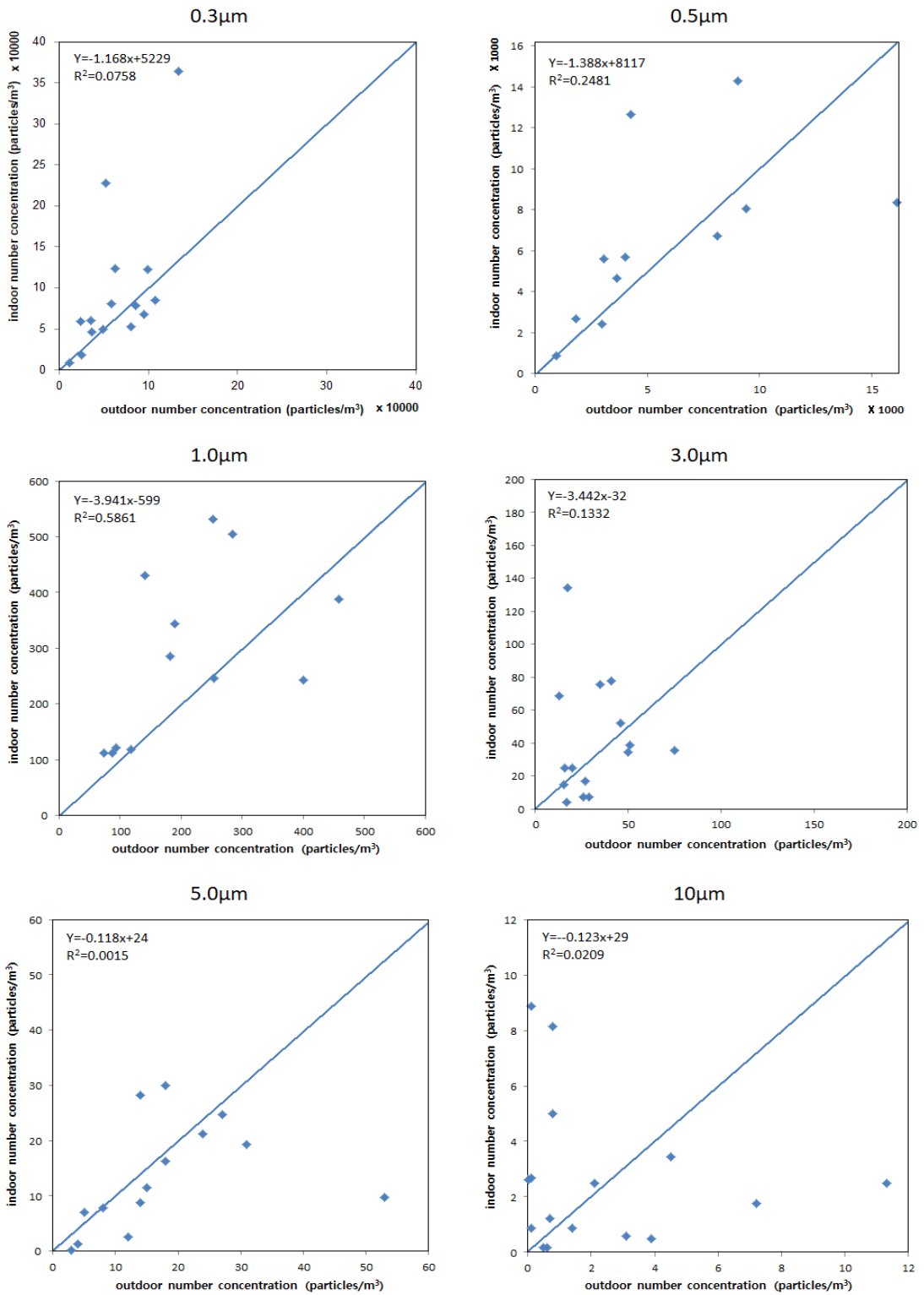


Fig. 5. Correlation between outdoor and kitchen, smoking room.

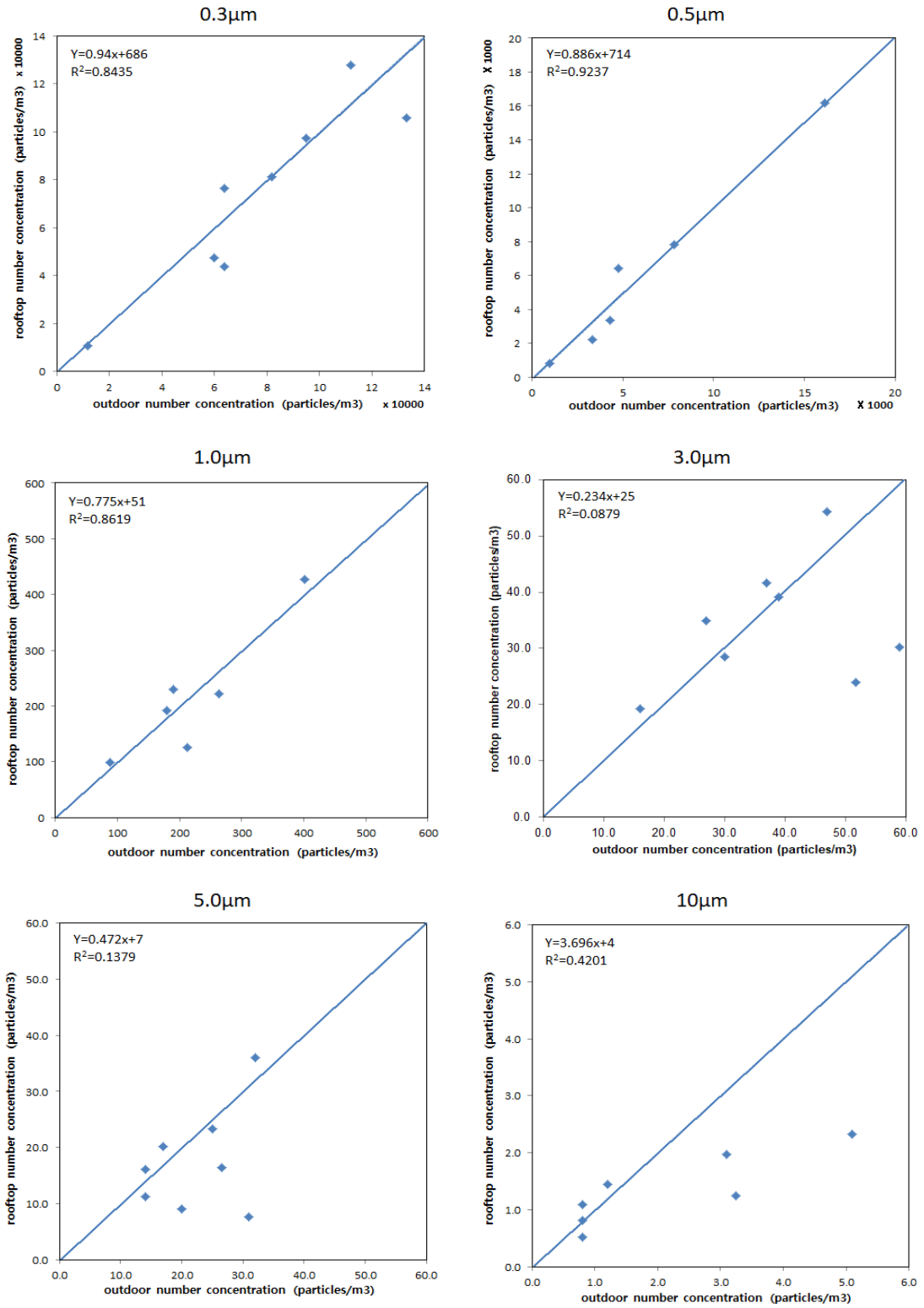


Fig. 6. Correlation between outdoor and building rooftop.

강한 상관관계가 있음을 알 수 있다. 반면 입경이  $3.0\mu\text{m}$ ,  $5.0\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ 인 입자들은 기울기가 1보다 작게 나타나고 있다. 이는 옥상 외기가 1층 외기보다 미세먼지 농도가 낮다는 것을 보여준다.

즉, 입경이 작은 미세먼지는 건물 9층 정도의 높이까지는 농도가 균일하게 분포되어 있으나 입경이 큰 미세먼지는 높이 올라갈수록 농도가 낮아진다. 다시 말해, 입경이 큰 미세먼지는 주로 지면 근처에 많이 존재하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 9층보다 높은 곳의 외기에 대해서는 확인을 해 보지 않았고 외기 특성상 건물의 위치나 풍향, 풍속의 영향을 많이 받기 때문에 다양한 경우에 대해서 추가 연구가 필요하다.

#### 4. 활동적인 보육실과 외기의 개수농도 상관관계

어린이집에서 환기상태가 안 좋은 상태에서 아이들이 활발하게 신체활동을 하고 있는 보육실의 미세먼지를 외기와 비교하여 입경별로 분석하였다(그림 7). 입경이  $0.3\mu\text{m}$ ,  $0.5\mu\text{m}$ ,  $1.0\mu\text{m}$ 인 경우 기울기가 1에 가깝거나 조금 작은 것을 알 수 있다. 이는 환기시 유입된 외기에서 유래된 미세먼지가 그대로 있거나 실내에서 약간 제거되었음을 의미한다. 즉, 실내 미세먼지 농도와 실외 미세먼지 농도가 강한 상관관계가 있음을 보여준다. 반면 입경이  $3\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ 인 경우는 기울기가 1보다 크게 나타나고 있고 특히 입경이 커질수록 기울기는 점점 커지는 경향을 보여주고 있다. 이는 아이들의 신체활동으로 인해 실내에 침강되어 있던 입경이 큰 입자들이 재부유 되거나 옷 등에 붙어 있던 입자들이 떨어져 나와 농도를 증가시킨 것으로 볼 수 있다. 즉, 아이들의 신체활동이 주로 입경이 큰 입자의 농도를 증가시킨다는 것을 알 수 있다.

#### 5. 진공청소기로 청소 중인 공간과 외기의 개수농도 상관관계

환기상태가 안 좋은 상태에서 활발한 신체활동을 하고 있는 어린이집 보육실의 입경 별 실내외 농도비(I/O ratio)를 보면(그림 8), 세 보육실(1, 2, 3지점)은 입경이 커질수록 I/O ratio가 커지고

있어 재실자의 물리적인 신체활동이 주로 입경이 큰 입자의 개수를 증가시킨다는 사실을 알려준다. 또한, 진공청소기를 사용하여 청소를 하고 있는 보육실에서 측정된 결과를 보면 입경이 작을수록 입자의 I/O ratio가 커지고 있어 진공청소기로 청소를 하면 입경이 큰 입자의 수보다 입경이 작은 입자의 수가 더 많이 증가한다는 사실을 알 수 있다. 따라서 진공청소기로 청소를 하고 난 후에는 반드시 환기를 하거나 공기청정기를 가동하여 미세먼지의 농도를 낮춰야 한다.

#### 6. 수업 중인 강당의 증량농도 변화

수업을 진행하고 있는 강당에서 경과시간에 따른  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{1.0}$ 의 증량농도 변화를 분석한 결과(그림 9) 수업을 위해 사람들이 강당으로 들어 왔을 때 농도가 급격히 치솟은 후 수업 시작 후 시간이 지날수록 서서히 떨어지고 있다. 그리고 쉬는 시간이 되어 사람들의 움직임이 시작되면서 다시 농도가 치솟고 있다. 농도의 변화는  $\text{PM}_{2.5}$ 보다  $\text{PM}_{10}$ 이 훨씬 큰데 이는 재실자의 움직임이 주로 입경이 큰 미세먼지의 농도를 증가시킴을 알려준다. 반면  $\text{PM}_{1.0}$ 은 농도 변화가 거의 없어 재실자의 신체적 움직임이 입경이 작은  $\text{PM}_{1.0}$ 의 농도에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

### 결론

재실자의 건강에 직접적인 영향을 미치는 실내공기와 실내로 유입되는 실외공기의 미세먼지의 개수농도를 광산란식 기기로 측정된 후 입경별로 분석하여 상관관계를 도출하였다. 환기, 침기를 통해 실내로 유입되는 실외공기의 미세먼지는 입경에 따라 실내공기와 다른 상관관계를 보였다.

1. 일반적으로 실내 미세먼지 농도는 실외 보다 작은 경우가 많다. 환기를 통해 실내로 들어온 미세먼지는 공기청정기, 재실자의 호흡 등으로 비교적 큰 입경의 미세먼지는 제거가 많이 되지만 작은 입경의 미세먼지는 제거되는 양이 많지 않고 그대로 실내에 머무는 경우가 많았다.



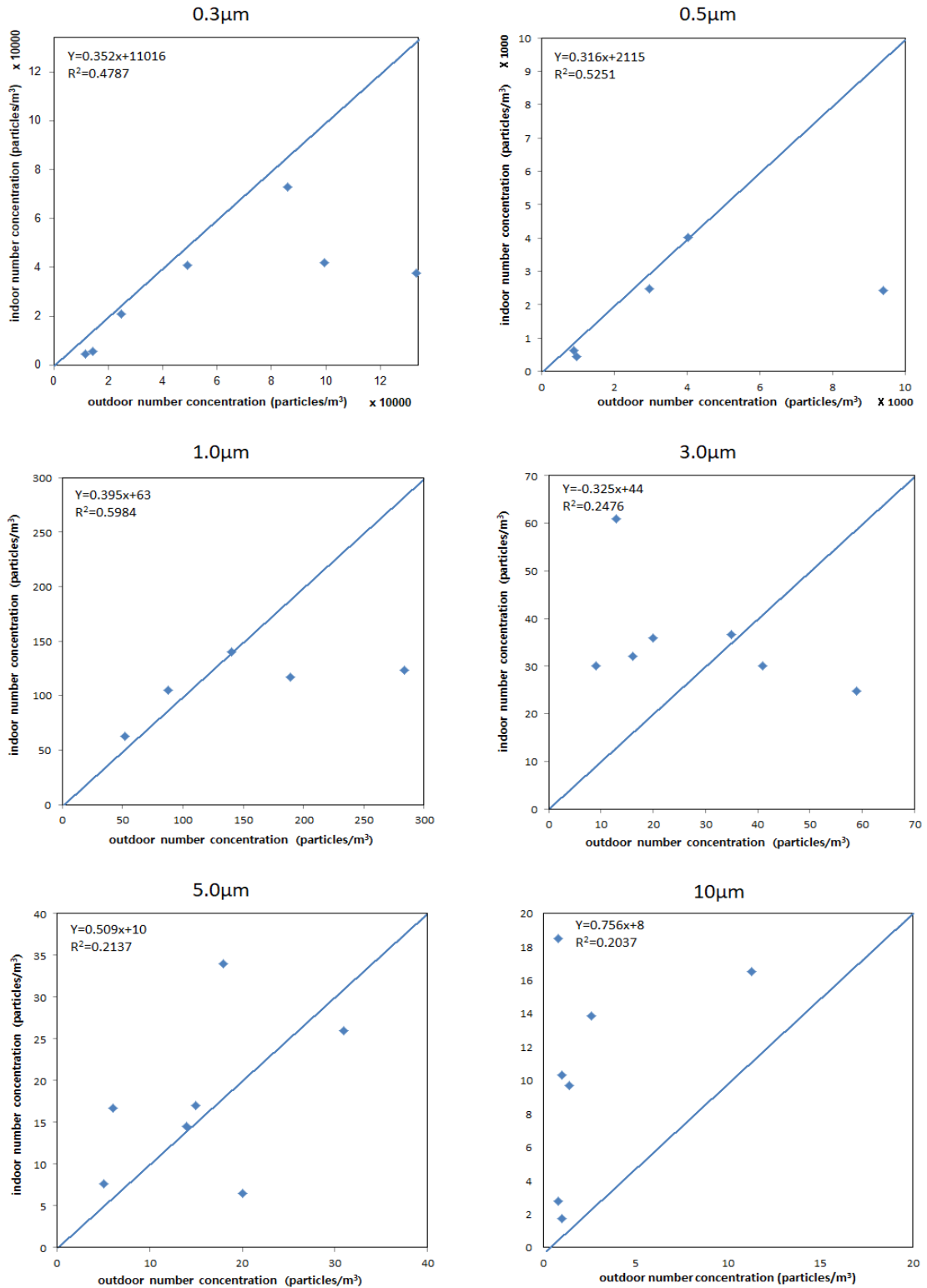


Fig. 7. Correlation between outdoor and active nursery.

분석 결과 입경이  $0.3\mu\text{m}$ ,  $0.5\mu\text{m}$ ,  $1.0\mu\text{m}$ 인 미세먼지는 외기와 실내공기가 높은 상관관계를 보여주어 외기가 실내 미세먼지에 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 입경이  $3.0\mu\text{m}$ ,  $5.0\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ 인 미세먼지는 상관관계가 낮게 나왔다. 이는 내부로 유입된 외기의 큰 미세먼지가 실내에서 제거되기도 하고 재실자의 활동에 의해 농도가 높아지기도 하기 때문이다.

2. 어린이집과 PC방의 조리실은 연료의 연소가스와 식용유를 튀길 때 나오는 유증기로 인해 외기와 외기의 I/O ratio가 1~5가 나와 대부분 1 이하로 나오는 일반적인 공간 보다 높았다. PC방의 흡연실 또한 마찬가지로 결과가 나왔다. 따라서 시설 전체공간으로의 확산을 방지하기 위해서 배기시설을 반드시 설치할 필요가 있다. 특히, 작은 입자의 발생이 많아 빠른 확산속도를 보이므로 강한 흡입력을 가지도록 고효율 배기

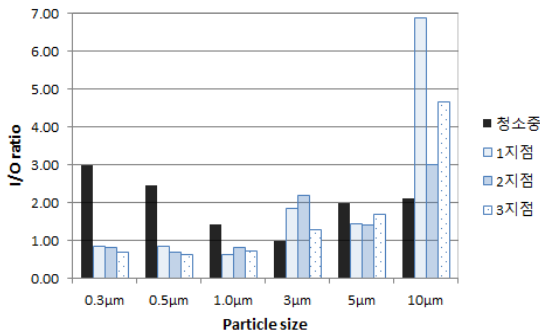
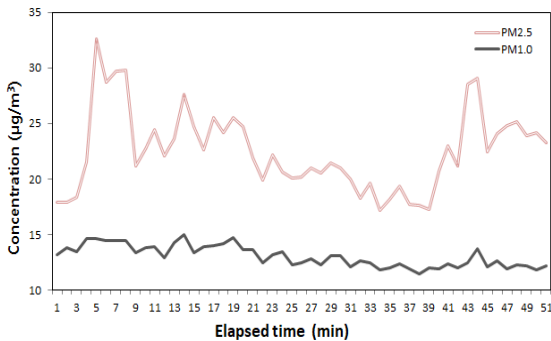


Fig. 8. I/O ratio of general nurseries and a nursery being cleaned by vacuum cleaner.

시설을 설치해야 한다.



3. 1층 외기와 4~9층 건물 옥상 외기의 미세먼지를 입경별로 비교한 결과 입경이  $0.3\mu\text{m}$ ,  $0.5\mu\text{m}$ ,  $1.0\mu\text{m}$ ,  $3.0\mu\text{m}$ 인 작은 미세먼지는 농도가 거의 비슷하나 입경이  $5.0\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ 인 미세먼지는 옥상의 농도가 1층보다 낮은 경우가 더 많았다. 즉, 입경이 작은 미세먼지는 4~9층 정도의 높이까지는 농도가 균일하게 분포되어 있으나 큰 입자는 주로 지면 근처에 많이 분포하고 있음을 알 수 있다. 따라서 호흡기 질환이 있는 재실자는 위층에 거주하는 것이 건강에 도움이 될 것으로 판단된다.
4. 어린이집에서 활발한 신체활동을 하고 있고 환기상태가 안 좋은 보육실의 경우 입경이 작은 미세먼지는 외기와 농도차이가 별로 없으나 입경이 큰 미세먼지는 외기보다 높게 나왔다. 즉, 재실자의 신체활동은 작은 입자보다는 큰 입자의 미세먼지 농도를 증가시킨다는 것을 알 수 있다. 따라서 환기를 통해서 증가된 미세먼지를 바깥으로 배출시키거나 공기청정기를 사용하여 발생된 미세먼지를 제거해야 할 것이다.
5. 진공청소기를 사용한 청소는 공기 중 미세먼지의 농도를 높이며 주로 작은 입자의 미세먼지 농도를 높이는 것으로 나와 청소 후에는 반드시 환기나 공기청정기를 가동해 인체 위해도가 높은 작은 미세먼지의 농도를 낮춰야 한다.
6. 수업 중인 강당에서의 미세먼지 증량농도 변화를 분석한 결과 수업 시작 전 사람들이 들어올 때 큰 폭으로 증가했다가 30여분이 흐르면서 원래 농도로 낮아지고 쉬는 시간에 사람들의 움직임이 시작되면서 다시 큰 폭으로 농도가

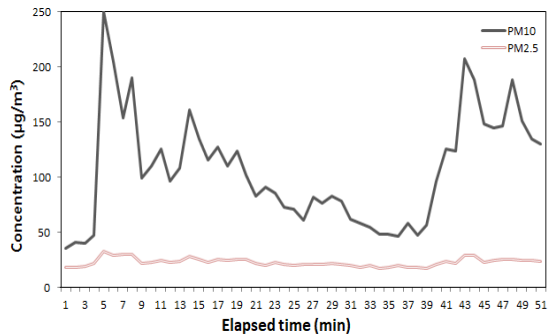


Fig. 9. Concentration change of  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{1.0}$  according to time.

증가 되었는데 변화폭은 PM<sub>10</sub>이 150 µg/m<sup>3</sup>, PM<sub>2.5</sub>가 10 µg/m<sup>3</sup>이고 PM<sub>1.0</sub>은 거의 변화가 없어 재실자의 신체적 움직임은 주로 입경이 큰 미세먼지의 농도를 증가시키므로 쉬는 시간에 환기 또는 공기청정기의 가동이 필요함을 알 수 있다.

### 참고문헌

1. 조용민, 홍윤철 : 미세먼지로 인한 건강영향과 대한의사협회의 역할, 의료정책포럼, 12(2): 32~36, 2014.
2. 강공언, 김신도, 이정실, 최경순 : 실내공기질 관리학, 초판, 문운당, 서울, p.15~17, 2012.
3. 여명석, 이병희 : 건물에서의 미세먼지 유입 및 이동, Review of Architecture and Building Science, 61(11):16~20, 2017.
4. Berico, M, Luciani, A and Formignani, M : Atmospheric Aerosol in an Urban Area - Measurements of TSP and PM<sub>10</sub> Standards and Pulmonary Deposition Assessments, Atmospheric Environment, 31(21):3659~3665, 1997.
5. 박성준, 김지혜, 조구상, 여명석, 김광우 : 보육시설 실내 미세먼지의 입경별 실내·외 발생원 분석, Journal of the Architectural Institute of Korea, 31(12):215~222, 2015.
6. 이병희 : 미세먼지의 입경에 따른 특성 및 실내 영향, 건축환경설비, 12(2):6~15, 2018.
7. Lee, JT : Domestic case of epidemiological studies on health effects, Environmental health and toxicology, p.129~142, 2003.