

황사 발생시 아파트 실내에서 미세먼지 크기별 농도 특성

주 상 우¹⁾ · 지 준 호^{1)*}

¹⁾(주)에코픽처스

(2019년 3월 25일 투고, 2019년 3월 28일 수정, 2019년 3월 29일 게재확정)

Characteristics of Indoor Particulate Matter Concentrations by Size at an Apartment House During Dusty-Day

Sang-Woo Joo¹⁾ · Jun-Ho Ji^{1)*}

¹⁾*EcoPictures Co., Ltd., Seoul, Korea*

(Received 25 Mar 2019; Revised 28 Mar 2019; Accepted 29 Mar 2019)

Abstract

It is recommended for the public to stay at home and to close the doors and windows when a high-particulate-matter environment such as a yellow sand event occurs outside. However, there are lack of empirical studies describing how much outdoor PM infiltrates into a closed house and how much indoor PM an inhabitant is exposed to during the period. In this study, the PM₁₀ and PM_{2.5} were measured at the kitchen in an apartment house by an optical particle counter for 3 days including a yellow sand event. The outdoor PMs and the outdoor wind speeds were referred from surrounding weather stations. We analyzed the penetration of PM_{10-2.5} and PM_{2.5} at the test house against the outdoor wind speed supposed corresponding to the change of air exchange rate. In addition, the effect of an indoor activity on change in the indoor PM was investigated. In result, the indoor PM_{10-2.5} was very low even a yellow sand event occurred outside; rather, a contribution of indoor activities to increase in PM_{10-2.5} was higher. In contrast, the indoor PM_{2.5} fluctuated following the outdoor PM_{2.5} trend at high wind speeds or remained almost constant at low wind speed.

Keywords: Yellow sand (Asian dust), Apartment building, PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{10-2.5}

* Corresponding author.

Tel : +82-2-6959-5899

E-mail : caputjun@gmail.com

1. 서론

미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})는 호흡계 질환, 폐암의 원인이 되어 사망률을 증가시킬 뿐 아니라 심혈관계 질환 및 호흡기계 질환을 초래할 수 있는 것으로 알려져 있다(Myong, 2016). 그럼에도 불구하고 국내 연평균 미세먼지 및 초미세먼지 농도는 2018년까지도 각각 41, 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 세계보건기구(WTO)에서 권고하는 연평균 20 및 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하지 못하고 있다. 특히 황사나 초미세먼지 주의보에 해당하는 고농도 미세먼지의 발생은 비교적 짧은 시간에 집중되는 경우가 많기 때문에, 이에 해당하는 일평균 농도나 시간평균 농도는 연평균 농도에 비해 훨씬 높다. 그러나 대기 중에 고농도 미세먼지가 발생했을 때 어떤 행동을 취해야 하는지에 대한 연구는 부족한 실정이다.

황사는 국내에서 고농도 미세먼지를 유발하는 대기현상 중 하나이다. 이는 강풍에 의해 흩먼지와 모래가 이동하는 현상으로서 흩먼지의 크기는 보통 0.1에서 10 μm 사이이고 평균 직경은 2 μm 이며, 크기에 따라서 부유시간이 다른 것으로 알려져 있다(Wang, 2017). 우리나라에서는 황사가 발생할 때 미세먼지 중 상대적으로 큰 먼지(PM_{10-2.5})의 질량농도가 매우 높게 증가하는 것이 여러 연구에서 보고되었다(Lee et al., 2004; Kim et al., 2006; Choi, 2008). 기존 황사 연구는 실내에 있는 사람이 실제 미세먼지에 얼마나 노출되는지 보다는, 황사의 성분 조사나 발생지역 및 이동경로 파악, 발생원 저감 등을 중심으로 이루어져 왔다(Kim et al., 2007).

실내 미세먼지는 조리나 흡연, 청소 등의 사람의 활동에 관련된 실내 발생원과, 환기 과정 중에 혹은 문을 닫은 상태에서 창과 문틈의 침기를 통해 실내로 유입되는 대기 미세먼지로 구성된다(Bae et al., 2017). 이 중 실내유입의 경우 입자 크기, 입자 성분, 건물 요소, 대기 기상상태 등의 다양한 요인을 고려한 분석이 이루어져 왔다(Bang et al., 2018). 그러나 대기에 고농도 미세먼지가 발생했을 때 실제 사람이 거주하는 주택 실내에서 농도변화를 분석한 실증 연구자료는 많지 않다.

본 연구에서는 국내에서 가장 일반적인 유형의 주택으로서 3인 가구가 거주하는 공급면적 117.69 m²의 일반형 아파트를 측정 주택으로 선정하였으며, 황사발생이 포함된 3일의 측정기간 동안 미세먼지

변화 특성을 관찰하여 분석하였다. 미세먼지를 크기별로 측정하여 무게농도의 변화와 실내외 농도비를 분석하였다. 특히, 측정 주택이 언덕 위 20층 아파트의 20층이었기 때문에 외기의 바람속도의 변화와 침기의 상관성이 높을 것으로 판단하여 외기 바람속도와 실내외 농도비의 상관관계를 분석하였다. 또한 실외 미세먼지 조건이 황사와 같은 고농도 시기와 일상 농도 조건 시기를 비교하였고, 재실자 활동이 없는 외출이나 취침 시간과 재실자 활동에 나타나는 일상 조건을 구분하여 미세먼지의 실내 농도 특성을 분석하였다.

2. 측정 개요 및 장소

실증 측정은 2004년 준공된 경기도 용인 지역에 위치한 20층 아파트의 20층에서 수행했는데, 실증 측정 주택은 국내 가장 일반적인 주택으로 2016년 통계청 자료에 기초하여 선정하였다. 자료에 따르면, 일반가구 중 49%의 가구가 아파트에 거주하는 것으로 조사되었으며, 아파트 연면적을 40 m² 이하, 40~60 m², 60~85 m², 85~130 m², 130 m² 초과로 나뉘었을 때 60~85 m²에 속하는 아파트가 42%로 제일 많았다. 60~85 m² 연면적 아파트의 노후기간을 살펴 보았을 때, 누적비율이 50%가 되는 노후연수는 10년~15년 미만 구간에 속했다. 빈 아파트를 제외한 전국 모든 아파트의 평균 거주인 수는 2.9명으로 나타났다으며, 대표 연면적인 60~85 m² 아파트의 평균 거주인 수는 3.1명이었다. 그림 1과 같이 측정 주택은 발코니를 확장하지 않은 일반형이었으며, 공급면적 117.69 m², 전용면적이 84.9 m², 거실 및 주방을 포함하는 중앙공간의 면적은 40.3 m²였다. 대기 미세먼지의 추정 유입 경로는 화살표로 나타났다. 시험주택에는 성인남성, 성인여성, 남아아기로 구성된 3인 가족이 거주하고 있었으며, 한국 CA인증 기준 적용면적 90 m² 공기청정기 1대를 거실에 설치한 것 외에는 실험을 위한 별도의 지시 없이 일상생활을 영위하며 실내 활동을 세세하게 기록하였다. 거주자들은 시험기간 중에 보통 창문과 방문을 닫고 생활하였으며, 공기청정기 사용은 자동모드로 재실자의 판단에 따라 자율적으로 사용하였다. 첫째날인 4월 6일에는 황사 때문에 출입 외에는 창과 문을 열지 않았고, 들

째 날인 4월 7일에는 15시경 단시간의 재실을 제외하고는 10시부터 23시까지 구성원 모두가 외출하였다. 그 이후인 4월 8일과 4월 9일에는 재실자는 일상적으로 생활하였다. 미세먼지, 초미세먼지 측정은 OPC (Optical particle counter, model 11A, Grimm, Germany)를 사용하였고, 자연환기와 재실자 유무와 재실시간을 확인하기 위해 이산화탄소 측정기(Model IQ-610extra, GrayWolf Sensing Solutions, USA)를 사용했다. OPC는 주방에서 식탁에 앉았을 때의 호흡기 높이인 1.3 m에, 이산화탄소 농도 측정기는 거실 소파에 앉았을 때 호흡기의 높이인 0.9 m에 설치하였다.

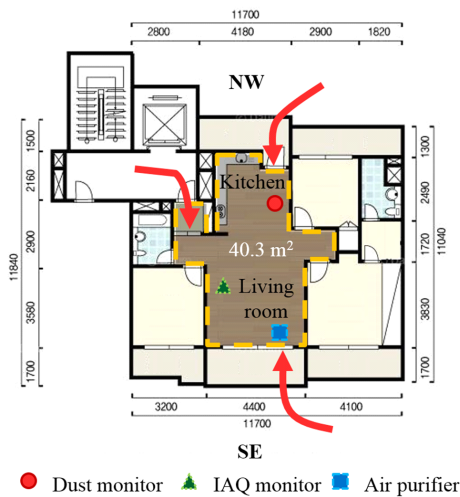


Fig. 1. A layout of the test house showing the sampling points and the location of an air purifier.

OPC와 이산화탄소 농도 측정기를 이용한 실내 공기 측정은 황사가 발생했던 2018년 4월 6일부터 4월 9일까지 66시간 동안 1분 단위로 관측하여 분석하였다. 이산화탄소 농도는 자연환기, 외출 등 에피소드의 참고 자료로 사용했다. 실외 미세먼지 농도 값으로는, 각 방위의 영향을 반영하고 특정 측정소에서의 이상 값으로 인한 데이터 공백을 피하기 위해, 측정 주택을 중심으로 반경 2.3~6.7 km 이내 위치한 한국환경공단 관측소 5곳(기흥, 김량장동, 동탄, 영통동, 중부대로)의 평균 측정값을 사용하였다. 이 값들은 매 5분마다의 베타선법을 이용하여 측정된 PM_{2.5}, PM₁₀의 시평균 값으로 한국환경공단에서 운영하는 에어코리아(<http://www.airkorea.or.kr>)에서 얻었다. 시험주택에서 가장 가까운 기상자료 측정소는 수원 서둔동에 위치한 수도권기상청으로 측정 아파트로부터 약 22 km 떨어져 있다. 이곳에서 측정한 여러 기상자료는 분 단위로 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr>)에서 얻을 수 있으며, 본 연구에서는 실외 풍속데이터를 이용하였다. 측정 주택이 언덕 위 20층에 위치하므로 풍속 데이터의 변화가 침기의 변화와 상관성이 있을 것으로 추정하였다.

3. 실내외 미세먼지의 크기별 농도 변화

먼저 미세먼지 측정은 황사가 발생한 날로부터, 황사로 인한 미세먼지가 점차 줄어들던 날, 황사가

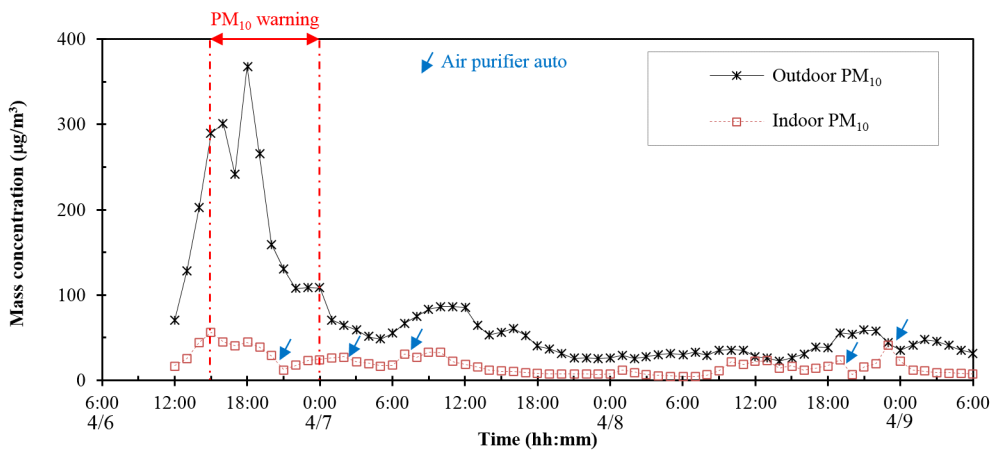


Fig. 2. The time-series of the interior and exterior PM₁₀ during the experimental period.

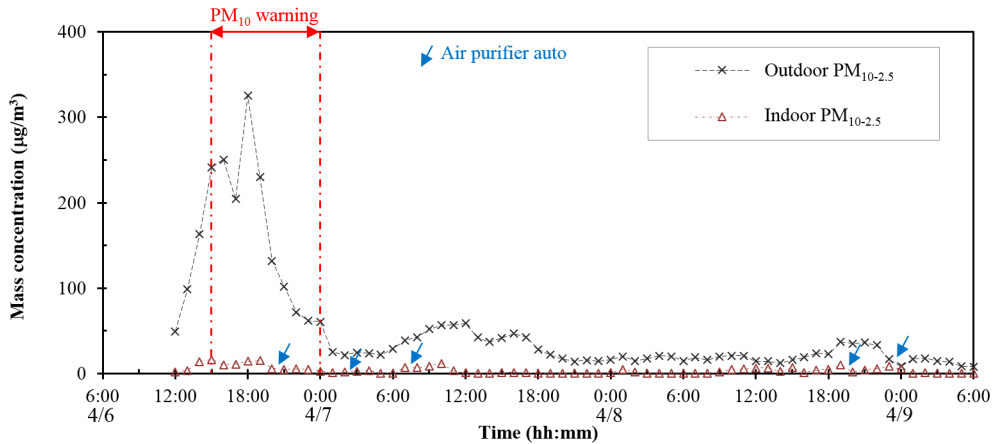


Fig. 3. The time-series of the interior and exterior $PM_{10-2.5}$ during the experimental period.

사라진 날까지 이루어졌다. 그림 2는 시험기간 중의 대기와 실내의 PM_{10} 농도를 나타낸 것이다. 대기 PM_{10} 농도는 측정이 시작된 4월 6일 12시경 이미 급격하게 상승 중이었다. 이 때 PM_{10} 은 측정 시작점으로부터 초기 3시간 동안 시간당 $70 \mu g/m^3$ 씩 급격히 증가하여 $300 \mu g/m^3$ 를 초과하였다. 실외에 비해 실내에서의 미세먼지 노출은 매우 낮았다. PM_{10} 농도는 실외에서 약 $300 \mu g/m^3$ 까지 증가했지만, 실내에서는 약 $50 \mu g/m^3$ 이하를 유지하였다. 이를 상세히 분석하기 위해 OPC에서 측정된 PM_{10} 농도를 크기에 따라 $PM_{2.5}$ 와 $PM_{10-2.5}$ 로 구분하여 실내 미세먼지 농도 특성을 분석하였다. 실외 미세먼지 농도 역시 환경공단 측정소의 측정 결과를 이용하여 PM_{10} 농도를 $PM_{2.5}$ 와 $PM_{10-2.5}$ 로 구분하여 분석하였다.

그림 3은 시험기간 중에 측정된 실내의 $PM_{10-2.5}$ 농도이다. 미세먼지 주의보 전후에 관측된 PM_{10} 의 대부분은 $PM_{10-2.5}$ 농도로 일반적인 황사의 특징을 보이고 있다. 첫째 날 대기의 $PM_{10-2.5}$ 농도는 최고 시간당 $325 \mu g/m^3$ 까지 올라갔다. 그러나 황사가 시작되어 끝나는 동안 전체적으로 실내 $PM_{10-2.5}$ 농도는 대기 농도에 비해 매우 낮았다. 황사가 가장 심했던 4월 6일 18시에 실내 $PM_{10-2.5}$ 는 $15 \mu g/m^3$ 로 실외 대비 5%에 불과하였다. 특히 거주자들이 집을 장시간 비웠던 둘째 날 12~24시까지 $PM_{10-2.5}$ 는 $0 \mu g/m^3$ 에 가까웠다. 잠시 거주자가 출입했던 15시에 소폭 증가했던 농도도 1시간 이내에 0에 수렴하였다. 즉, 2.5~10 μm 크기 입자의 경우 실외 입자들의

실내에 대한 영향이 거의 없으며, 발생한 입자도 금방 제거된다. 이것은 이 영역대의 입자들의 관성이 크기 때문에 실내로 침투하는 과정에서 대부분 제거되고, 실내로 유입된 먼지도 중력의 영향을 받아 금방 침착되기 때문으로 생각된다.

실제 재실자의 활동이 많았던 셋째 날의 데이터를 통해서 실내 $PM_{10-2.5}$ 농도가 재실자의 실내활동에 영향을 받는 것을 확인하였다. 실내 미세먼지가 없었던 둘째날에 비해, 셋째 날에는 실내활동이 있는 시간 대에 시간당 $PM_{10-2.5}$ 농도가 5~10 $\mu g/m^3$ 로 유지되었다. 한편, 첫째 날 오후의 시간당 $PM_{10-2.5}$ 농도는 10~16 $\mu g/m^3$ 로 일반적인 실내활동이 있을 때보다 소폭 높았다. 당시 강풍이 불어 베란다 창문이 세게 흔들렸다는 기록이 있는 것으로 보아, 창틈이 벌어지면서 순간적으로 외기가 여과없이 집으로 유입된 것으로 생각된다. 따라서, 실내 $PM_{10-2.5}$ 의 원인은 주로 자연환기에 의한 실내 유입이거나 사람활동에 의한 내부 발생이며, 창과 문이 닫힌 상태에서 침기의 영향은 거의 없었다.

그림 4는 시험기간 중의 실내의 $PM_{2.5}$ 변동을 나타낸 것이다. 직경 2.5 μm 이하의 입자들은 첫째 날 황사가 발생한 시간대에 질량농도가 $50 \mu g/m^3$ 까지 상승하였다. 이것으로 보아 시험기간에 발생한 황사에 초미세먼지도 상당량 포함된 것으로 추정된다. 실내의 $PM_{2.5}$ 는 대기 $PM_{2.5}$ 의 추이에 따라 함께 변동하는 경향을 보이고 있다. 이를 통해 작은 먼지의 경우 큰 먼지에 비해 실외로부터 실내 유입이 실

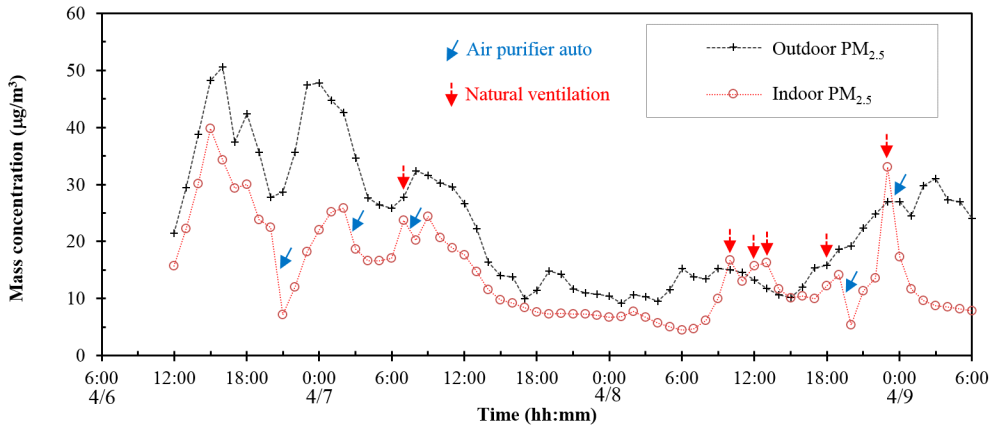


Fig. 4. The time-series of the interior and exterior PM_{2.5} during the experimental period.

내 미세먼지 농도의 주요 변수임을 알 수 있다. 이는 초미세먼지 입자 크기가 작아서 침기 과정에서 문틈이나 창틈 등에서 모두 제거되지 않고, 상당부분 통과하기 때문인 것으로 보인다.

재실자가 주로 외출해 있던 둘째 날에는 실내 PM_{2.5} 농도가 약 7 µg/m³로 일정하게 유지되는 구간을 확인할 수 있었다. 이것은 대기 PM_{2.5} 농도가 비교적 일정하여 침기에 의한 실내외 공기 교환이 일어나는 중에 평형상태에 도달한 것으로 보인다. 그러나 4월 8일 새벽에는 실외 미세먼지 농도의 상승과 달리 실내 미세먼지 농도가 감소하는데, 이는 외부 풍속이 낮아져서 침기량이 감소하며 새로 유입되는 입자가 거의 없는 상황에서 중력에 의해 일부 먼지가 감쇄된 것으로 추정된다. 이후에 다시 농도가 일정한 구간이 등장하는 것은, 2.5 µm보다 작은 입자들 중 중력영향을 거의 받지 않는 입자들만 남아 부유한 것으로 생각된다.

실내 PM_{2.5} 농도의 변동에는 자연환기의 영향이 매우 크다. 재실자들이 자연환기를 하자 실내 미세먼지 농도가 실외 미세먼지 농도에 가깝게 증가하는 모습을 볼 수 있다. 초미세먼지는 실내에서 중력에 의해 제거되기까지 상당한 시간이 필요하고, 침기에 의해 지속적으로 유입되면서 일정한 농도를 유지한다. 측정 기간 중간에 공기청정기를 사용했을 때 실내 미세먼지 농도가 크게 감소한 것을 볼 수 있는데, 초미세먼지에 대한 노출을 줄이기 위해서는 공기청정장치를 사용하는 것이 효과적인 것을 알

수 있다.

4. 대기 바람 속도에 따른 실외/실내 미세먼지 농도비 변화

4.1 재실자 활동이 없을 때 미세먼지 실내유입 특성

실내외 농도비는 여러 연구에서 실외 미세먼지의 실내 미세먼지에 대한 영향력을 평가하는 지표로써 활용되어 왔다(Back et al., 2015). 전체 측정기간 동안 재실자가 존재하는 경우에는 침기에 의한 대기 미세먼지의 실내 유입 영향과 사람 움직임이나 조리, 흡연 등 사람 활동에 의한 미세먼지의 실내 발생이 모두 반영된 농도 정보를 얻을 수 있다(Kang et al., 2015). 반면, 재실자의 활동이 없는 외출이나 취침 기간에는 주택의 침기에 의한 실내 미세먼지 농도변화 특성을 따로 분리하여 확인할 수 있다.

그림 5(a)는 재실자가 취침하거나 외출하여 주택 내 인위적인 활동이 없는 경우 시평균 값을 분류하여 외기 풍속에 따른 실내외 농도비를 나타낸 것으로 바깥의 미세먼지가 고농도인 상황에서 재실자의 활동이 없는 경우이다. 미세먼지를 크기별로 분석해보면, 실내 PM_{10-2.5} 농도는 대기에 비해 매우 낮았는데, 외기 풍속이 5 m/s로 바람이 강할 때에도 PM_{10-2.5} 농도는 실외대비 7% 이하였다.

PM_{2.5}의 실내외 농도비는 풍속대에 따라 조금씩

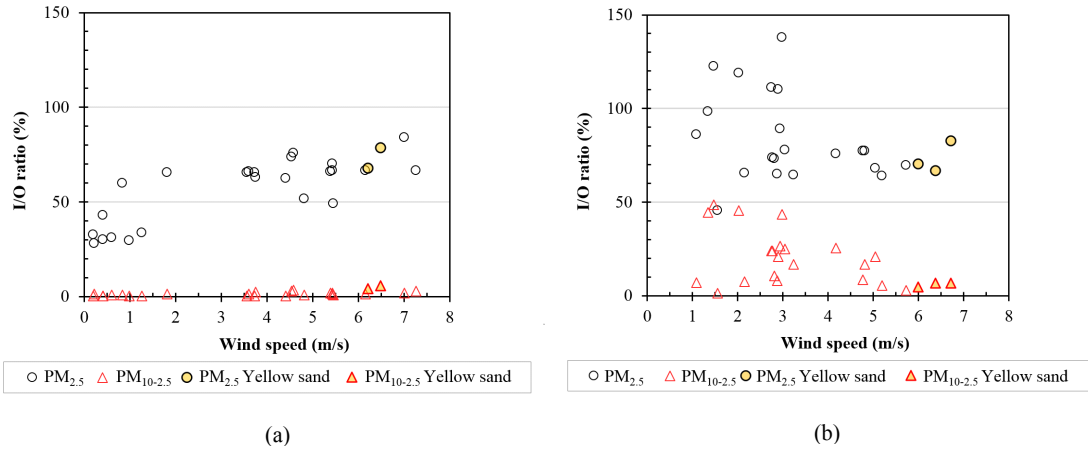


Fig. 5. Indoor-outdoor ratio (I/O ratio) of the PM_{2.5} and the PM_{10-2.5} corresponding to wind speed without an indoor activity by the residents (a) and with one (b).

다른 모습을 보인다. 대기의 풍속이 약 2 m/s 이하로 낮아 침기에 의한 공기 실내 유출입이 거의 없을 때 실내 초미세먼지의 절대 농도는 약간 감소하다가 일정하게 유지되었다. 외기 풍속이 낮은 조건에서는 대기의 초미세먼지 농도가 증가하면 실내외 농도비가 작아지고, 대기 초미세먼지 농도가 감소하면 대기 농도 대비 실내 농도는 높게 나타난다. 그림 5(a)에서 바람이 약할 때의 초미세먼지 실내외 농도비가 낮은 이유는 측정 기간 중 대기의 풍속이 약할 때, 주로 대기의 초미세먼지 농도가 유지되거나 증가하는 경향을 나타냈기 때문이다.

반면 외기 속도 3 m/s 이상 구간에서는 대기의 초미세먼지 농도가 변화함에 따라 실내의 초미세먼지 농도가 따라서 움직였다. 시험주택에서의 실내 초미세먼지 농도는 대기의 풍속이 3~6 m/s일 때 대기 농도의 약 66% 수준임을 알 수 있었다. 평소보다 초미세먼지의 절대 농도가 높다고 해서 실외 초미세먼지가 실내로 유입되는 비율이 뚜렷하게 높아지는 것은 않았다. 6 m/s 이상의 강한 풍속 조건에서는 실외 초미세먼지의 실내에 대한 영향력이 크게 나타났다. 강풍으로 인해 창 틈이 벌어지는 현상이 나타났고, 외부의 미세먼지가 창 틈에서 제거되지 않고 일부 침기와 함께 그대로 실내로 들어왔을 것으로 추정된다.

4.2 재실자에 의한 활동이 있을 때의 실내 미세먼지 특성

그림 5(b)는 실내에서 거주자의 활동이 있을 때의 대기 농도 대비 실내 농도비를 1시간 평균값으로 나타낸 것으로, 공기청정기 가동의 영향을 받은 데이터들은 제외하고 재실자의 행동이 포함된 데이터들만 나타났다.

재실자가 없는 외출이나 취침 기간과 비교하여 재실자 활동이 있는 경우, PM_{10-2.5}의 실내 농도의 비율이 대기 농도와 비교할 때 전반적으로 높은 것을 확인할 수 있다. PM_{10-2.5}의 실내외 농도비는 재실자 활동이 없을 때 대략 7% 이하였으나, 재실자 활동이 있을 때는 57%까지 상승했다. 측정이 이루어지는 기간의 PM_{10-2.5}의 주된 발생원은 자연환기와 재실자의 움직임이었다.

PM_{2.5}의 경우 재실자의 움직임과 같은 활동의 영향은 미미한 것으로 보이고, 주로 대기 초미세먼지의 침기에 의한 실내 농도 변화와 자연환기에 의한 실내 유입의 영향이 컸다. 자연환기가 이루어진 동안 초미세먼지의 실내외의 시간평균 농도비는 77~139%로 높았다. 4월 8일 13~14시의 경우 자연환기 후 실내의 초미세먼지 농도가 실외보다 높아졌는데, 환기 후 실내 농도는 천천히 떨어지는 반면, 실외 초미세먼지 농도는 급하게 떨어진 경우였다. 즉, 대기의 농도가 낮아지면 창문을 열어 환기하는 것이 닫고 있는 것보다 초미세먼지 노출을 줄일 수 있다.

5. 요약

본 연구에서는 국내에서 가장 일반적인 유형의 주택으로서 3인 가구가 거주하는 공급면적 117.69 m²의 일반형 아파트를 측정 주택으로 선정하여 실증 측정을 진행하였다. 황사 발생이 포함된 3일 측정기간 동안 미세먼지 변화 특성을 관찰하여 분석하였다. 관측된 미세먼지(PM₁₀)를 상대적으로 큰 먼지(PM_{10-2.5})와 초미세먼지(PM_{2.5})로 나누어 대기와 실내의 먼지의 농도변화를 분석하였다.

연구 결과로 채실자의 활동이 없는 외출이나 취침 기간에는 주택의 침기 특성을 확인할 수 있었다. 미세먼지 중 상대적으로 큰 PM_{10-2.5} 크기 입자는 외기의 풍속이 5 m/s까지 증가하여 침기량이 증가해도 대기 농도 대비 실내 농도비가 7% 이하인 반면, PM_{2.5}의 경우 외기 속도가 5 m/s까지 증가하면 50% 이상으로 증가하였다. 황사가 심한 대기 상태에도 본 연구의 측정 주택의 경우 실내 PM_{10-2.5}는 시평균 15 μg/m³로 대기 농도의 5% 수준으로 일상 조건과 비슷했다.

채실자의 활동이 있는 경우에는 미세먼지 중 초미세먼지를 제외한 상대적으로 큰 먼지는 자연환기와 실내 사람의 움직임과 같은 행동 영향이 지배적이었다. 실내 PM_{10-2.5} 농도는 대기 농도가 낮은 경우에는 대기 농도의 약 50%를 차지하는 경우도 있었다. 채실자의 활동 중, 초미세먼지의 발생이 클 것으로 예상되는 굵기나 튀기기가 포함된 조리나 실내 흡연이 없었기 때문에, 채실자가 없는 경우와 마찬가지로 초미세먼지는 실내 농도가 실외 농도의 추이에 따라 함께 변동하는 양상을 보였다. 외부공기가 침기에 의해 창틈, 문틈으로 유입되는 과정에서 초미세먼지는 약 30~40% 정도가 제거되고 실내로 많은 비율이 유입되기 때문에 실외 초미세먼지의 실내에 대한 영향이 컸다.

본 연구의 분석 데이터는 측정이 이루어진 대표 주택에 해당하는 것으로, 새로 지어진 기밀 성능이 높은 신축 아파트나 침기가 상대적으로 클 것으로 예상되는 오래된 단독주택에서는 다른 특성이 나타날 것으로 예상되므로, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부)의 재원으로 한국연구재단-미세먼지 국가전략프로젝트사업(과제번호: 2017M3D8A1091924)의 지원을 받아 수행함.

참고문헌

- Back, J.M., Yee, S.W., Lee, B.H., Kang, D.H., Yeo, M.S., and Kim, K.W. (2015). A study on the relationship between the indoor and outdoor particulate matter concentration by infiltration in the winter, *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 31(9), 137-144.
- Bae, G.N., and Kim, J.B. (2017). Research trend on behavior and control of indoor aerosols, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 16(2), 99-112.
- Bang, J.I., Jo, S.M., and Sung, M.K. (2018). Analysis of infiltration of outdoor particulate matter into apartment buildings, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 34(1), 61-68.
- Choi, H. (2008). Characteristics of PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ Concentrations in the influence of yellow sand event, 2008 Spring Conference of Korean Society of Environmental Engineers, 391-394.
- Kang, D.H., and Choi, D.H. (2015). A preliminary study to evaluate the impact of outdoor dust on indoor air by measuring indoor/outdoor particle concentration in a residential housing unit, *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 9(6), 462-469.
- Kim, A.R., and Lee, B.K. (2006). A study on characteristics of particle size distribution of the asian dusts in Ulsan, *Proceeding of the 43rd Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*, 377-378.

- Kim, W.S., Lee, H.H., Jun, Y.S., and Choi, Y.J. (2007). Yellow sand and countermeasures against domestic and overseas, Urban Information Service of Korea Planning Association, 300(3), 3-19.
- Lee, B.K., Jun, N.Y., and Lee, H.K. (2004). Comparison of particulate matter characteristics before, during, and after Asian dust events in Incheon and Ulsan, Korea, Atmospheric Environment, 38, 1535-1545.
- Myong, J. P. (2016). Health effects of particulate matter, The Korean Journal of Medicine, 91(2), 106-113.
- Wang, F., Zhao, X., Gerlein-Safdi, C., Mu, Y., Wang, D., and Lu, Qi. (2017). Global sources, emissions, transport and deposition of dust and sand and their effects on the climate and environment: a review, Frontiers of Environmental Science and Engineering, 11(1), 13.