

초미세먼지 주의보 시 지식산업센터 사무실의 실내 초미세먼지 농도 특성과 공기청정기와 환기장치의 영향

지 준 호^{1),*}, 주 상 우¹⁾

¹⁾(주)에코픽처스

(2020년 9월 10일 투고, 2020년 9월 22일 수정, 2020년 9월 23일 게재확정)

Characteristics of Indoor PM_{2.5} and the effect of air purifier and ventilation system on Indoor PM_{2.5} in the Knowledge Industrial Center office during the atmospheric PM_{2.5} warning

Jun-Ho Ji^{1),*}, Sang-Woo Joo¹⁾

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

(Received 10 Sep 2020; Revised 22 Sep 2020; Accepted 23 Sep 2020)

Abstract

In this study, the indoor fine dust concentration in an office of the Korea Knowledge Industry Center was measured for about 80 hours when the concentration of atmospheric PM_{2.5} was very high. The effect of the operation of the air cleaner and the forced ventilation system on the indoor PM_{2.5} was investigated, and the particle size distribution of the indoor and outdoor particles was analyzed. When forced ventilator and air purifiers were partially used, the indoor PM_{2.5} concentrations were maintained between 27.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 32.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ when the atmospheric PM_{2.5} was 127.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 141.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ during working hours. It is more effective to operate the air purifier without operating the forced ventilation system when the concentration of the PM_{2.5} is high since the PM_{2.5} penetrating the installed filter is continuously introduced indoor from the outside.

Keywords: indoor PM_{2.5}, air cleaner, air ventilation, building, particle size distribution.

*Corresponding Author

Tel : +82-2-6959-5899

E-mail : caputjun@gmail.com

1. 서론

우리나라 일반인이 하루 중 실내에 머무는 시간은 평균 21시간 이상이고, 직업, 성별, 연령 등의 특성에 따라 활동공간별로 체류시간에 차이를 보인다(Yoon et al., 2017). 그렇지만, 공공이용시설, 주택, 학교, 사무실 등 다양한 실내 공간에서 재실자의 행동 양식이나 재실 시간에 따른 미세먼지 노출에 관한 심도 깊은 상세한 분석 자료는 많지 않다(Bae and Kim, 2017). 특히, 대기의 미세먼지나 초미세먼지의 농도가 매우 높은 고농도 주의보나 경보가 발령된 경우 실내에서 미세먼지나 초미세먼지의 농도와 미세먼지 크기분포를 확인할 수 있는 자료를 찾기 어려웠다. 이것은 연 중 초미세먼지 주의보가 발생하는 날은 365일 중 불과 1주일이 넘지 않기 때문이다. 2017년~2019년 서울시의 초미세먼지가 일평균 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 “매우 나쁨”인 날은 3년간 평균 5일 정도였고, 초미세먼지 농도가 높은 날들이 특히 많았던 2019년의 경우도 9일이었다.

사무실의 경우 주택과 달리, 조리나 흡연 등 실내에서 고농도의 초미세먼지를 생성하는 활동이 많지 않다. 보통 건물에 입주한 사무실의 경우 중앙공조 장치에 의해 냉방, 난방 및 환기가 이루어지고, 환기가 이루어지는 과정에서 보통 중성능급 필터를 거친 상대적으로 깨끗한 공기가 유입되므로 상대적으로 바깥 공기에 비해 사무실 실내 미세먼지 농도가 낮게 유지될 것으로 추정된다. 그렇지만, 국내 사무실의 실내 초미세먼지 농도가 어느 정도인지 실증 측정할 연구를 찾기 어려웠다. 최근 지식산업센터는 많은 중소기업의 사무 공간을 공급하면서 확장되고 있다. 지식산업센터에 입주한 사무실은 건물 내 중앙공조장치가 설치되어 있거나 일반 아파트와 같이 개별 실별 전열교환 환기장치가 설치되어 있다. 개별 실별 환기장치가 설치되어 있는 사무실의 경우, 천장형 시스템에어컨을 냉방과 난방에 활용하고 개별 환기장치를 구동하여 실내 이산화탄소나 유해가스를 희석하게 된다. 보통 환기장치에는 중성능 혹은 저성능 필터가 채용되어 바깥에서 유입되는 공기 중 미세먼지가 일부 제거된 공기를 실내로 유입한다.

본 연구에서는 초미세먼지 주의보가 발효된 2019

년 3월 약 80시간 동안 국내 지식산업센터 사무실의 실내외 미세먼지 농도를 측정하였다. 공기청정기와 환기장치의 구동이 사무실 실내 초미세먼지 농도에 미치는 영향을 확인하였고, 초미세먼지 주의보 날의 실내와 실외의 입자 크기분포를 분석하였다. 또한 초미세먼지 주의보 날에 사무실의 평균 농도가 어느 정도로 유지될 수 있는지 분석하였다.

2. 측정 개요

측정 장소는 서울 송파구에 위치한 신축 지식산업센터 건물의 13층에 위치한 전용면적 105.3 m^2 (약 32평)인 사무실로 약 1.5 m 높이의 칸막이로만 구역이 구분된 개방된 사무실에서 이루어졌다. 상세한 구조는 Ji (2018)의 연구에 자세히 설명되어 있다. 사무실의 측정은 2019년 3월 4일~7일까지 약 80시간 동안 이루어졌고, 이 시기는 초미세먼지의 일평균 농도가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 3일을 포함한 날로써 연중 초미세먼지가 가장 높은 시기였다. 그림 1에 2018년과 2019년 3월의 일평균 초미세먼지 농도를 나타냈고, 본 측정이 이루어진 시기를 표시하였다. 미세먼지 측정은 두 대의 OPC (Optical particle counter, GRIMM model 1104)를 사용하였고, 실내와 실외에 설치하여 실내외 농도 특성을 확인하였다. 대기의 초미세먼지 농도는 주위 3군데의 기상측정소 데이터의 평균값을 사용하였고, 실내 초미세먼지 농도는 1분 측정값을 이용하여 1시간 평균값으로 계산하여 적용하였다. 외기에 사용된 OPC는 실내 OPC와 입자 크기분포 특성을 비교하는데 활용하였다. 사용한 OPC는 제습장치를 사용하지 않는 장치였기 때문에, 실외 측정 OPC는 외기의 상대습도가 50% 이상 조건에서는 주위 기상측정소 데이터와 오차가 발생했기 때문에 기상측정소의 초미세먼지 농도값과 비슷한 시점의 데이터만을 활용하였다. 실내외 2대의 OPC는 시험 전과 후에 동일한 위치에서 측정하여 농도 차이가 없음을 확인하였다. 사무실 내 공기청정기는 사용면적이 약 40 m^2 에서 자동운전 모드를 사용하였고, 재실자가 외기 농도를 확인하여 자율적으로 사용하였다. 공기청정기의 사용면적의 정확한 값은 확인하지 못했지만, 사무실 면적의 약 15~20% 수

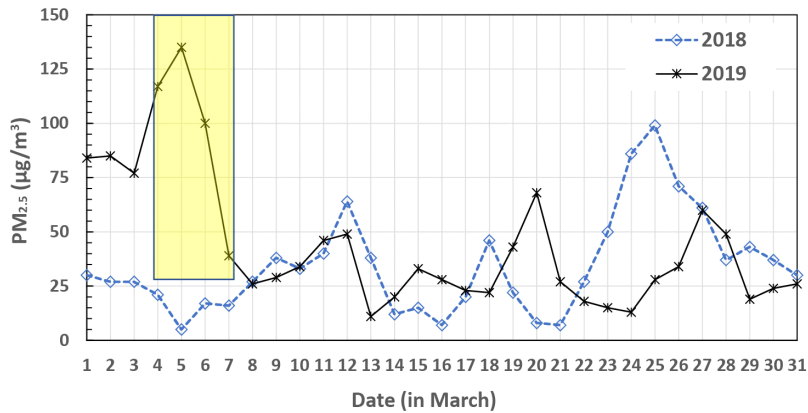


Fig. 1 Average daily PM_{2.5} concentrations in March in 2018 and 2019

준으로 추정된다. 환기 장치는 채실자가 5인이었기 때문에, 3단계 풍량 중 가장 낮은 1단계와 2단계 풍량을 사용하였다. 제조사의 사양으로 환기장치의 정격은 3단계 풍량인 350 m³/hr이고, 1단계 풍량은 225 m³/hr, 2단계 풍량은 280 m³/hr 였다. 환기장치는 이산화탄소를 측정하면서 가급적이면 이산화탄소 농도가 1000 ppm이 넘어가지 않도록 채실자가 수동으로 조정하였다. 이산화탄소는 실시간측정기 (Model IQ-610xtra, GrayWolf Sensing Solutions, USA)를 사용하여 모니터링하였다. 환기장치는 전 열교환장치를 포함한 모델로 중성능급 필터가 설치되어 있었다. 건물의 동일 층의 한쪽 편에 위치한 4개의 사무실이 공동으로 사용하는 덕트를 통해 환기장치에서 급기와 배기가 바깥 외기와 연결 되도록 되어 있다.

3. 결과

3.1 실내와 실외의 초미세먼지 농도 변화 특성

사무실의 채실자는 5명이었고, 근무시간은 오전 9시 30분에서 오후 6시 30분까지이지만, 보통 오전 9시에서 오후 9시까지 채실자가 근무하였다. 첫 날에는 근무시간 중 공기청정기를 2시간 정도 사용하였고, 환기장치는 6시간 동안 사용하였다. 둘째 날에는 근무시간 중 초미세먼지 농도가 120~150 µg/m³으로 매우 높아서 약 10시간 동안 공기청정기를 구동하였고, 채실자 수가 적었기 때문에 환기장치는 약 2시간만 작동하였다. 세 번째 날에는 공기청정기는 약 8시간, 환기장치는 약 6시간 사용하였다. 표 1은 근무시간동안 대기과 실내의 미세먼지, 초미세먼지 평균 농도를 나타냈고, 공기청정기와 환기장치의 사용시간을 표시하였다.

그림 2는 대기과 실내의 시간평균 초미세먼지 농도의 변화를 나타낸다. 실외 초미세먼지 농도가

Table 1. Indoor and outdoor conditions for working hours (for 10 hours)

Date (MM.DD)	PM ₁₀ (µg/m ³)		PM _{2.5} (µg/m ³)		PM _{10-2.5} (µg/m ³)		I/O ratio		Air cleaner operation (hour)	Forced ventilation operation (hour)
	(outdoor)	(indoor)	(outdoor)	(indoor)	(outdoor)	(indoor)	PM ₁₀	PM _{2.5}		
03.04	127.7	33.8	78.3	32.9	32.9	0.9	26.5%	42.0%	2.0	6.0
03.05	183.2	38.4	133.3	36.6	36.6	1.8	21.0%	27.5%	10.0	2.0
03.06	141.6	29.1	100.1	27.7	27.7	1.4	20.5%	27.7%	8.0	6.0

변화함에 따라 실내 초미세먼지 농도가 약간의 시간지연 후에 비슷하게 따라가며 변화하는 것을 확인할 수 있었고, 공기청정기를 구동하는 경우 실내 농도가 낮아지다가 일정한 농도로 수렴하는 특성을 보였다. 실내의 초미세먼지 농도는 측정 시기 대부분 바깥 농도의 약 20~40% 수준으로 유지되었다. 사무실의 문을 모두 닫은 상태로 공기청정기나 환기장치를 구동하지 않으면 초미세먼지의 실내외 농도비는 약 40%였다. 반면, 공기청정기를 운전하면 바깥 농도 대비 실내 농도의 비율이 20%까지 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 초미세먼지 주의보가 해제되어 대기의 초미세먼지 농도가 급격하게 낮아지는 시점에서는 실내외 초미세먼지 농도비가 오히려 100%를 초과하는 시간이 나타나는데, 이것은 바깥의 미세먼지 농도가 급격히 낮아졌지만, 환기장치에서 유입된 공기가 실내 공간을 거쳐 환기장치 배기로 빠져나가는 동안 지연시간이 있기 때문에, 실내 초미세먼지 농도가 오히려 높게 나타날 수 있음을 확인하였다. 이것은 초미세먼지 주의보가 해제되어 바깥 초미세먼지 농도가 낮아지면 오히려 창문을 열어 자연환기를 하는 것이 단시간에 초미세먼지 노출을 줄일 수 있다는 것을 의미한다.

그림 3은 공기청정기와 환기장치의 운전 유무를 구분하여, 조건별로 실내외 초미세먼지 농도비를 나타낸다. 각 조건은 공기청정기와 환기장치가 구동된 후, 초미세먼지 농도가 안정되어 유지되는 조건의 값을 사용하였고 운전 후 약 2시간 이후부터 1시간 평균값을 비교하였다.

밀폐된 조건에서 실외 대비 실내의 초미세먼지

농도비는 약 40% 정도를 유지했는데, 이것은 침기에 의해 사무실로 유입되고 사무실 내 머무르다가 누기로 빠져나가는 과정에서 외기에서 유입된 초미세먼지의 일부가 제거되기 때문이다. 미세먼지가 유입되는 과정에서 창틈이나 문틈에서 제거되고 중력이나 확산에 의해 실내 바닥 혹은 벽면 등에 부착되어 제거된다. 환기장치를 구동한 경우는 주로 대기와 실내의 공기 교환이 환기에 의해서 이루어지기 때문에 환기장치에 장착된 필터의 성능이 실내의 초미세먼지의 농도에 영향을 미치게 된다. 환기장치의 풍량을 1단으로 운전한 경우(225 m³/hr)에 외기 대비 실내 초미세먼지 농도는 밀폐만 했을 때의 조건과 비슷하게 약 40%를 유지하였다. 실내외 농도비는 환기장치를 2단으로 운전한 경우에도 40%로 비슷하게 나타났다. 환기 1단으로 운전하는 동안 공기청정기를 함께 풍량을 자동모드로 운전한 경우에는 외기 대비 평균 약 29%로 초미세먼지 농도가 감소하는 것을 확인할 수 있었지만, 환기 2단으로 작동하고 공기청정기를 작동한 경우에는 외기대비 실내 초미세먼지 농도의 비율이 약 36% 수준으로 공기청정기를 가동하지 않고 환기 1단으로 운전한 경우인 41%와 5% 정도 차이였다. 이것은 공기청정기의 처리용량에 비해 환기장치에서 유입된 공기량이 상대적으로 많기 때문에 공기청정기의 미세먼지 효과가 크지 않기 때문이다. 만약, 공기청정기의 처리용량이 충분했다면, 더 낮은 실내 초미세먼지 농도를 유지하였을 것으로 추정된다.

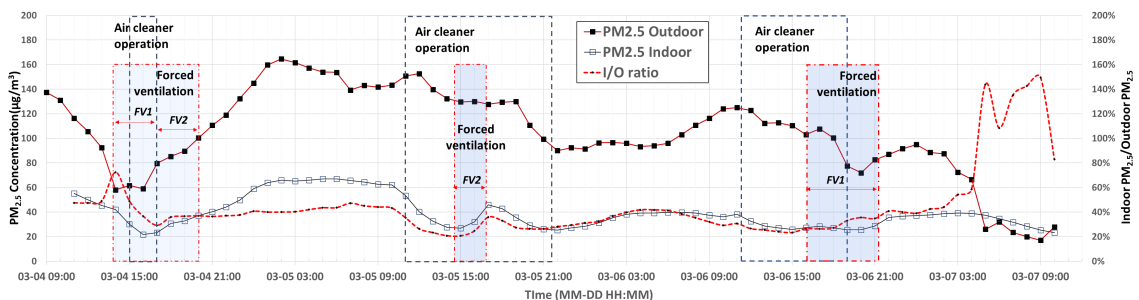


Fig. 2 PM_{2.5} concentrations and indoor/outdoor ratio changes with time in an office (Air flow rates of the forced ventilation: FV1 is 225 m³/hr and FV2 is 280 m³/hr)

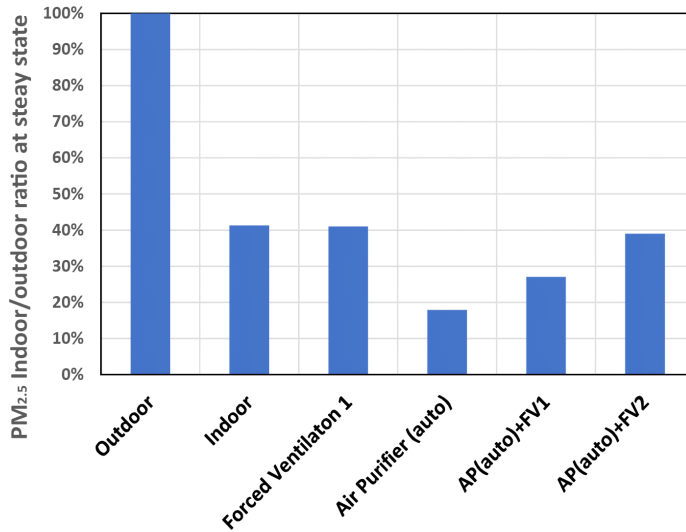


Fig. 3. Indoor/outdoor ratio of PM_{2.5} concentrations according to the use of an air purifier or/and a forced ventilation system.

3.2 실내와 실외의 미세먼지 입자 크기분포 특성

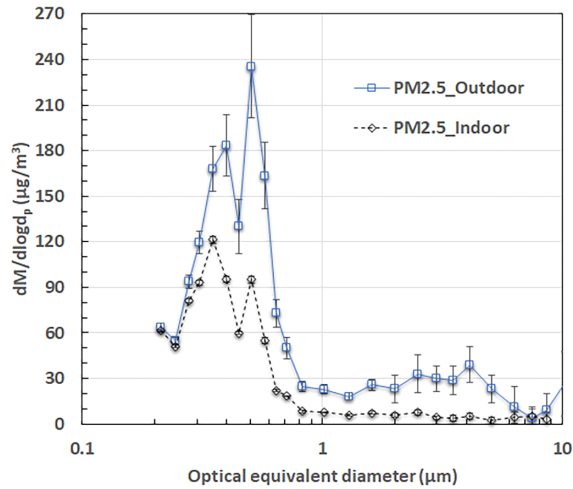
그림 4는 초미세먼지 주의보가 발효된 3월5일 10시와 15시 시점의 실외와 실내 미세먼지 크기분포를 비교한 것이다. 그림 4(a)인 10시의 경우는 사무실이 밀폐 조건에서 외기의 농도와 실내의 농도가 안정되어 일정하게 유지되는 시점의 크기분포이다. 그림 4(b)는 15시 시점으로 문을 닫을 상태에서 공기청정기를 자동으로 운전하여 실내 농도가 정상상태의 안정된 농도로 유지되는 시점의 데이터로, 마찬가지로 외기의 농도가 일정하게 유지되고 있는 시점이었다. 입자의 크기는 각각 입경에 대한 밀도와 형상을 결정할 수 없기 때문에, 밀도는 1 g/cm³으로 형상으로 구형으로 가정하여 광학등가입경으로 나타냈다. 초미세먼지 주의보 시 대기 입자의 크기분포는 주로 1 μm 보다 작은 크기의 입자의 농도가 매우 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 평균적인 대기의 초미세먼지 크기분포를 고려할 때, 1 μm 보다 작은 영역의 피크 크기 입자의 농도가 대략 50~60 μg/m³ 정도인 반면, 본 연구의 초미세먼지 주의보 날에 약 200 μg/m³ 까지 상승했다. 사무실 내 실내 미세먼지 크기분포의 특성은 1 μm 보다 큰 입자의 농도가 매우 낮다는 점이다. 대기의 크기분포는 1~10 μm 입자의

두 번째 봉우리가 나타나는데 비해, 실내 입자의 크기분포에서는 봉우리가 사라지고 상대적으로 큰 입자의 농도가 거의 미미하게 나타난다. 이와 같은 결과는 황사 때에도 주택의 외부와 통하는 문만 잘 닫아두어도 1 μm 이상의 큰 입자가 실내에 유입되는 확률이 매우 낮다는 기존의 아파트의 연구 결과와도 같다(Joo and Ji, 2019a). 사무실에서도 침기 과정에서 1 μm 보다 큰 입자들은 실내로 유입 과정에서 창틈 문틈에서 대부분 제거되고 사무실 실내로 유입되는 비율이 낮다는 것을 알 수 있다. 하지만 밀폐 조건만으로는 초미세먼지 중 1 μm 보다 작은 인체에 더 해롭다고 알려진 더 미세한 입자가 침투할 가능성이 상대적으로 높다. 입자가 작아질수록 침투율이 높아지는 것을 알 수 있는데, 주택의 경우와 비슷하게 나타났다(Joo and Ji, 2019b).

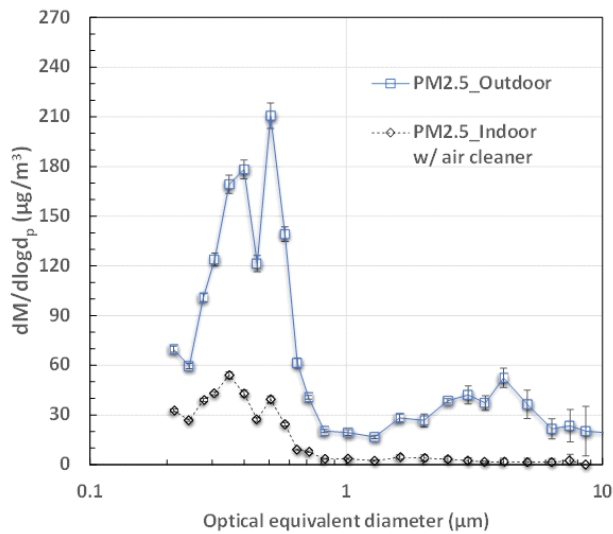
공기청정기를 가동한 경우에는 이미 실외에서 실내로 유입되는 과정에서 제거된 1~10 μm 입자의 제거보다, 창틈 문틈을 통해 유입된 1 μm 보다 작은 입자의 농도를 저감시키는데 더욱 효과적인 것을 확인할 수 있었다. 그림 3과 같이 문을 모두 닫은 사무실의 경우 주로 1 μm 보다 큰 먼지의 노출을 감소시키는데 기여했다면, 추가적으로

공기청정기를 사용한 경우 $1\ \mu\text{m}$ 보다 작은 입자의 제거에 효율적으로 작동하였기 때문에, 실내 초미세먼지 제거 효과에 공기청정기의 효과가 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. 만약, 적용 면적이 충분한 공기청정기를 최대 풍량으로 운전하여 사용했다면, 초미세먼지 주의보와 같이 외기의 초미

세먼지 농도가 매우 높은 날에도 실내 초미세먼지 농도를 매우 낮게 유지할 수 있었을 것으로 추정된다.



(a)



(b)

Fig. 4 Particle size distributions of outdoor and indoor. (a) Indoor with closed door and windows, (b) Indoor with closed door and windows during an air purifier operation

3.3 실내 미세먼지 실증 측정 연구의 문제점에 대한 고찰

실내 미세먼지 실증 연구의 어려움은 실내 미세먼지가 실내 활동만으로 나타나는 현상이 아니라는 점이다. 실내 공기는 바깥 공기와 공기의 흐름으로 연결되어 있다. 바깥 공기는 실내 공간과의 압력차에 의해 한쪽에서 유입되고, 다른 한쪽으로 빠져나가게 된다. 이 과정을 통해 외부 공기는 항상 실내공기에 영향을 미친다. 게다가 이 과정에서 기상 상태에 따라 실내로 유입되는 침기 공기량이 달라지고, 대기 먼지가 실내로 유입되는 확률이 입자 크기에 따라 달라진다. 두 번째 실내 미세먼지 실증 연구의 복잡함은 바깥 공기 중 미세먼지의 농도와 크기분포가 시간에 따라 변화한다는 점이다. 시간에 따라 변화하는 미세먼지의 농도나 크기분포와 함께 실내로 유입되는 공기량 또한 달라질 수 있으므로, 실내 평균 미세먼지나 초미세먼지 농도 변화 특성이 복잡해진다. 세 번째 어려운 점은 실시간 계측기의 특성이다. 보통 미세먼지의 실시간 계측기는 광학적 특성을 이용하는데, 보통 조리 중 오일 입자, 가슴기에 의해 발생한 액적과 같이 광학적 특성이 일반 대기 미세먼지와 다른 경우나 상대습도가 높아 미세먼지의 표면에 응축이 발생하는 경우 측정 결과에 오차가 발생할 수 있다 (Sang-Nourpour et al., 2019; Joo and Ji, 2020). 이때문에 데이터를 처리할 때, 측정 결과의 신뢰성이 떨어지는 조건을 구분하여 해당 데이터를 제외하거나 보정하여 분석할 필요가 있다. 특히, 일부 창문이 열린 상태로 지속적으로 환기가 진행되거나 날씨가 흐리거나 비가 오는 등 외부의 상대습도가 매우 높은 경우는 실내 측정까지 영향을 미칠 수 있으므로 분석 과정에서 보정이 필요할 경우가 있다.

본 연구에서는 환기장치와 공기청정기의 영향을 간단히 살펴보았는데, 이와 같이 필터가 장착된 전열교환 환기시스템이 구동되는 경우는 앞에서 살펴본 실내 미세먼지에 영향을 미치는 인자들과 복합적으로 작동하여 분석을 어렵게 만든다. 시스템의 처리 공기량과 장착된 필터의 효율성능 등이 함께 작동하기 때문에, 더욱 복잡한 구조가 되고 측정 데이터를 분석하여 신뢰성 있는 데이터로 제시하는데 많은 시간과 노력이 필요하다. 본 연구는

초미세먼지 농도가 매우 높은 단기간의 실증 측정 연구로 공기청정기의 정확한 처리용량이나 환기장치에 설치된 필터의 사양을 정확하게 검증하지 못한 한계점을 갖는다. 향후 연구에서는 이와 같은 다양한 변수의 영향을 고려하여 실증 연구를 진행하고자 한다.

4. 요약

본 연구에서는 초미세먼지 주의보가 발효된 2019년 3월 4일~7일까지 약 80시간 동안 국내 지식산업센터 사무실 내 실내 미세먼지와 초미세먼지 농도를 측정하였다. 측정이 이루어지는 동안 공기청정기와 환기장치의 구동에 의한 영향을 확인하였고, 초미세먼지 주의보 날의 실내와 실외의 입자 크기분포를 분석하였다.

사무실의 테라스 쪽 이중 창문과 복도쪽 입구 출입문을 모두 닫은 밀폐 조건에서 실외 대비 실내의 초미세먼지 농도비는 약 40% 정도를 유지했다. 초미세먼지 주의보의 시기에 중성능급 필터가 장착된 환기장치의 풍량을 1단이나 2단으로 운전한 경우에도 외기 대비 실내 초미세먼지 농도는 환기하지 않고 밀폐만 했을 때의 조건과 비슷했다. 환기장치를 구동하지 않고, 문을 닫아둔 조건에서 공기청정기를 가동하면 실내 초미세먼지 농도를 초미세먼지 주의보 시에도 대기 초미세먼지 농도 대비 약 20% 수준으로 감소시킬 수 있었지만, 환기장치의 풍량을 증가시켜 가동하면, 상대적으로 환기를 통해 미세먼지를 공급하는 공기량이 증가하여, 공기청정기의 효과가 감소하였고, 실내외 농도비를 약 36%로 유지하는 것을 확인하였다. 사무실 내 실내 부유 먼지의 크기분포의 분석 결과 $1 \mu\text{m}$ 보다 큰 입자의 농도는 매우 낮았다. 대기의 입자 크기분포는 $1 \mu\text{m}$ 이하의 입자의 봉우리와 $1\sim 10 \mu\text{m}$ 입자의 봉우리의 두 부분으로 나타나는 데 비해, 실내 입자의 크기분포에서는 $1\sim 10 \mu\text{m}$ 입자의 봉우리가 사라지고 $1 \mu\text{m}$ 이하의 입자의 봉우리만 남는 형태로 상대적으로 큰 입자의 농도가 미미했다. 사무실의 밀폐가 초미세먼지 농도의 감소에 효과가 있었지만, 대부분은 $1 \mu\text{m}$ 보다 큰 입자가 제거되었고, 인체에 더 영향을 미치는 1μ

m 이하의 입자는 실내로 쉽게 침투하였다. 결국 밀폐된 사무실 실내에서 공기청정기의 사용은 1 μm 이하의 인체에 더 해로운 크기의 입자를 제거하는데 큰 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 단지 80시간의 짧은 시간의 실증 데이터를 분석한 결과이지만, 초미세먼지 주의보가 1년 중 1주일 이내로 발생하는 한정된 기간에 발생한다는 점에서 측정 및 분석 데이터가 중요한 의미를 갖는다고 생각된다. 또한 실내 초미세먼지 농도에 영향을 미치는 다양한 변수들을 고려하여 측정 계획을 작성하여 실증 측정이 이루어졌기 때문에 비교적 신뢰성 있는 분석데이터를 제시할 수 있었다.

감사의 글

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

References

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.

Ji, J.H. (2020). Size distributions of suspended fine particles during the cleaning of an office, *Aerosol and Air Quality Research*, 20, 53-60.

Joo, S.W., and Ji, J.H. (2019a). Characteristics of indoor particulate matter concentrations by size at an apartment house during dusty-day. *Particle and Aerosol Research*, 15(1), 37-44.

Joo, S.W., and Ji, J.H. (2019b). Infiltration characteristics of particulate matter at a Korean apartment house, *Particle and Aerosol Research*, 15(4), 149-157.

Joo, S.W., and Ji, J.H. (2020). Size distribution characteristics of particulate matter emitted from cooking, *Particle and Aerosol Research*, 16(1), 9-17.

Sang-Nourpour, N., and Olfert, J.S. (2019). Calibration of optical particle counters with an aerodynamic aerosol classifier, *Journal of Aerosol Science*, 138, 105452.

Yoon, H, Shuai, J.F., Kim T., Seo J., Jung D., Ryu, H., and Yang W. (2017). Microenvironmental time-activity patterns of weekday and weekend on Korean adults, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 16(2), 182-186.