

사무실의 실내 청소 과정에서 부유하는 미세먼지의 크기분포

지 준 호¹⁾

¹⁾㈜에코픽처스

(2018년 6월 19일 투고, 2018년 6월 22일 수정, 2018년 6월 26일 게재확정)

Size distributions of suspended fine particles during cleaning in an office

Jun-Ho Ji¹⁾

¹⁾*EcoPictures Co. Ltd., Seoul Korea*

(Received 19 June 2018; Revised 22 June 2018; Accepted 26 June 2018)

Abstract

In this study, the concentration of fine indoor dust and the size distribution of fine indoor dust were analyzed by measuring the dust generated during the cleaning process of an indoor office. We measured PM₁₀, PM_{2.5}, and PM_{1.0} and analyzed the size distributions of dust larger than 0.3 μm in diameter during cleaning. The results showed that the concentration of PM₁₀ increased rapidly during cleaning, however PM_{1.0} did not increase. Before cleaning with a broom, the fine dust concentration was about 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, but increased to about 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ as cleaning progressed. In the case of indoor cleaning with a vacuum cleaner, the concentration of PM₁₀ increased during the cleaning process and the increase of PM_{2.5} was relatively small. PM_{1.0} did not increase as in the case of cleaning the broom.

Keywords: indoor cleaning, broom, vacuum cleaner, PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0}

* Corresponding author.

Tel : +82-2-6959-5899

E-mail : caputjun@gmail.com

1. 서론

미세먼지, 초미세먼지가 건강에 치명적이라는 연구 결과가 다양하게 보고되고 있고, 최근 국내외 대기환경 개선 필요성이 크게 요구되고 있는 실정이다. 서울의 대기 미세먼지의 연평균 농도는 2007년 $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2012년 $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조금씩 감소했고 2013년 $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2014년 $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2015년 $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2016년 $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소 추세가 꺾이는 상황이지만, 아직 선진국에 비하면 높은 수준이다. 특히 세계보건기구(WTO)에서 건강한 공기의 농도로 제안하는 연평균 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 비교하면 아직도 2배 이상이다. 결국, 국내의 대기 오염원을 관리하는 것만으로는 미세먼지의 인체 노출을 획기적으로 감소시키기 어려운 상황이기 때문에, 단기적인 해결 방안은 사람들이 대부분의 시간을 보내는 실내 공간의 농도를 감소시켜 인체 노출을 최소화할 수 있도록 노력하는 것이다.

최근 연구조사에 의하면 우리나라 사람들이 하루 중 실내에 머무는 시간은 21시간 이상이었고, 직업, 성별, 연령 등의 특성에 따라 활동공간별 체류시간에 차이를 보인다고 보고하고 있다(Yoon et al., 2017). 그렇지만, 실내에서 이루어지는 다양한 사람들의 행동 양식에 따른 미세먼지 노출에 관한 상세한 분석 자료는 많지 않고, 발생원에 대한 특성을 이해할 수 있는 자료 또한 다양하지 않은 실정이다(Bae and Kim, 2017). 실내 청소 관련한 실내 미세먼지 노출 연구로 진공청소기로부터 에어로졸이 방출될 수도 있다고 다양한 연구가 보고되었다(Ozturk, 2006; Knibbs et al., 2012; Wu et al., 2012; Lee et al., 2014). Wu et al.(2012)는 소형 챔버에서 진공청소기에서 생성되는 미세먼지의 발생량을 개수농도와 개수기반 크기분포를 측정하여 분석하였다. Knibbs et al.(2012)는 21종의 진공청소기를 대상으로 덕트 시험에 적용하여 미세먼지의 방출 특성을 확인하였다. Lee et al.(2014)는 챔버 내에서 진공청소기를 구동하는 시험을 수행하여, 진공청소기가 운전되는 과정에서 미세먼지가 방출될 수 있음을 확인하였다. 그렇지만, 실제 실내 청소하는 과정에서 발생하는 미세먼지의 농도 특성과 크기분포를 분석한 연구는 많지 않았다.

본 연구에서는 신발을 신고 생활하는 국내 사무

실의 실내를 청소하는 과정에서 발생하는 미세먼지를 측정하였다. 미세먼지와 초미세먼지의 농도를 측정하였고, 비산 먼지의 크기분포 특성을 분석하였다. 미세먼지(PM_{10})와 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)와 $1 \mu\text{m}$ 보다 작은 먼지의 무게농도($\text{PM}_{1.0}$)를 분석하였고, 청소 과정에서 발생하는 $0.3 \mu\text{m}$ 이상의 먼지의 크기를 측정하여 분석하였다. 특히, 빗자루질과 진공청소기를 사용하는 과정에서 재비산 되는 미세먼지의 특성을 분석하였고, 입자의 크기에 따른 재비산 특성과 실내 농도 변화 특성을 확인하였다.

2. 측정 개요 및 장소

측정 장소는 서울 송파구에 위치한 신축 지식산업센터 건물의 13층에 위치한 전용면적 105.3m^2 (약 32평)인 사무실로 약 1.5m 높이의 칸막이로만 구역이 구분된 개방된 사무실에서 이루어졌다. 먼저 입주 이사 당일 바닥에 먼지가 많은 상태에서 빗자루로 청소하는 과정에서 나타난 비산 미세먼지를 측정하여 분석하였다. 두 번째와 세 번째 측정은 업소용 진공청소기를 사용하여 청소를 진행하였다. 진공청소기가 공기와 함께 바닥에서 흡인한 먼지는 진공청소기 내에 설치된 대용량의 먼지 수거통(dust bag)에 포집되고, 공기가 빠져나가는 토출구에는 중성능급 필터가 장착되어 빠져나가는 공기 중 먼지를 제거한 후 내보내는 구조이다. 두 번째 측정은 이사 후 3주 지난 시점에서 진공청소기를 사용한 청소 과정에서 공기 중 미세먼지를 측정하여 특성을 분석하였다. 이 날은 강우가 약 6mm 인 흐린 날로 비가 간간히 내린 날이었다. 마지막으로 이사 후 4주 지난 시점에서 진공청소기를 사용한 청소 과정에서 공기 중 미세먼지를 측정하여 특성을 분석하였다. 세 번의 측정에서 모두 OPC(Optical particle counter, GRIMM model 11A)를 사용하였고, 세 번째 진공청소기를 이용한 청소과정에서는 추가로 CPC(Condensational particle counter, GRIMM model 5400)를 사용하여 4nm 이상 크기의 입자의 개수농도를 측정하였다. 측정 장소의 사무실 실내 구조와 청소 동선은 그림 1에 나타냈다. 청소가 시작되는 위치에 계측기를 위치하였고, 그림에는 사무실에 배치된 책상과 탁자, 의자 등을 표시하였다. 사무실 내 빗자루 청소 1회

Table 1. Indoor cleaning conditions and cleaning tools.

case	cleaning method	cleaning activity	Dust amounts on the floor
1	Broom	office cleaning after moving	much
2	vacuum cleaner	vacuum cleaning	little (rainy day)
3	vacuum cleaner	vacuum cleaning	little

와 진공청소기 청소 2회의 총 3회 측정에 대한 조건은 표 1에 정리하였다.

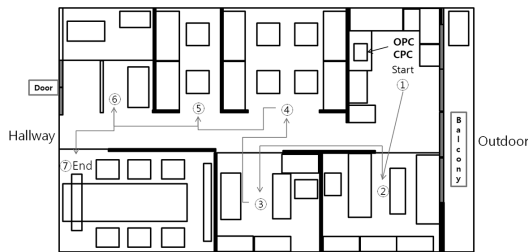


Fig. 1. Office layout and cleaning trajectory.

3. 청소 과정에서 나타나는 미세먼지의 농도 및 크기분포 특성

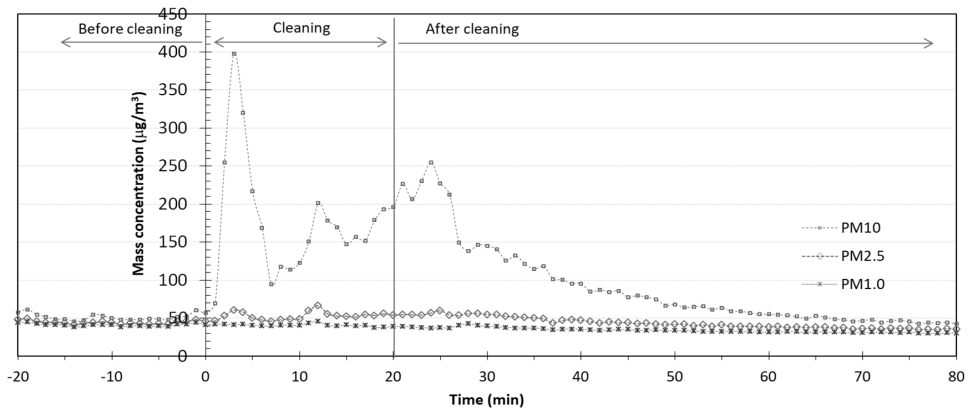
3.1 바닥 먼지가 많은 조건에서 빗자루질 청소

먼저 이사 과정에서 바닥에 먼지가 많은 상태에서 첫 번째 측정이 이루어졌다. 바닥에 먼지가 많은 상태였기 때문에 빗자루를 이용하여 먼지를 쓸어 청소하였고, 이 과정에서 발생하는 미세먼지를 측정하였다. 청소과정에서 외기와 통하는 창문을 열어두었다. 사무실에서 복도로 통하는 사무실 입구문을 열어 두었지만 바람이 거의 없어 환기가 거의 이루어지는 않는 조건이었다. 사무실은 신발을 신은 채로 생활하는 공간이기 때문에 이사 과정에서 바닥에는 먼지가 많이 쌓여 있었다. 빗자루를 이용하여 청소를 진행하는 과정은 그림 1과 같이 측정기가 위치한 공간에서 시작하여 먼 곳으로 청소를 진행하였다.

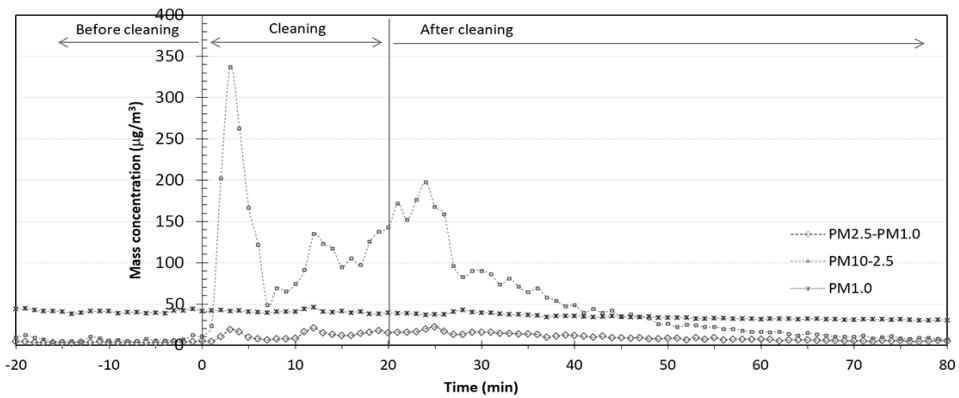
그림 2는 청소 전과 청소가 진행되는 과정 및 청소 후 미세먼지의 크기별 농도의 변화를 나타낸다.

그림 2(a)는 PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$ 의 청소 전, 청소 과정, 청소 후 변화를 나타낸다. PM_{10} 농도는 청소를 시작하기 전에 약 $50 \mu g/m^3$ 이었지만, 빗자루를 사용한 청소가 이루어지는 과정에서 약 $400 \mu g/m^3$ 까지 증가하는 것을 알 수 있다. 빗자루질을 이용한 청소는 약 15분가량 진행되었지만, 측정기 근처를 청소하는 경우에는 농도 증가가 최대였고, 측정 장소로부터 거리가 멀어지면서, 상대적으로 실내 미세먼지 농도가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 이것은 청소가 지속되면서 공기 중 부유하는 전체 비산 미세먼지 총량이 증가하여 실내에 확산되기 때문인 것으로 생각된다. 청소가 끝난 후에도 청소 전 실내 배경농도인 약 $50 \mu g/m^3$ 으로 낮아지는데 약 1시간 이상 소요되는 것을 알 수 있다. 청소과정에서는 창문을 열어 자연환기가 이루어지도록 하였지만, 사무실 특성상 공기 환기량이 많지 않았던 것으로 판단된다. 그림 2(b)는 크기별 특성을 확인하기 위해 PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$ 의 측정결과를 이용하여 1 이하, 1~2.5, 2.5~10 μm 의 크기별로 무게 농도를 나누어 표시하였다. 상대적으로 큰 먼지인 2.5~10 μm 크기 영역의 $PM_{10,2.5}$ 의 농도가 급격하게 증가하는 반면, 1.0 μm 보다 작은 먼지의 농도인 $PM_{1.0}$ 는 거의 변하지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 빗자루질과 같은 바닥과의 물리적인 힘에 의해 바닥에 떨어져 있는 먼지들이 공기 중에 재비산되기 때문이고, 1 μm 보다 작은 먼지들은 큰 먼지에서 잘 떨어지지 않기 때문으로 생각된다. 그림 2(c)는 청소 전과 비교하여 청소 과정과 청소 후 농도의 비율로 나타낸 것이다. 청소 전의 농도는 청소 전 10분 평균값을 사용하였다. 2.5~10 μm 의 상대적으로 큰 먼지가 청소 전에 비해서 약 60배까지 증가하는 것에 비해, 1~2.5 μm 의 크기의 입자는 약 5배 정도 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 반면 1 μm 보다

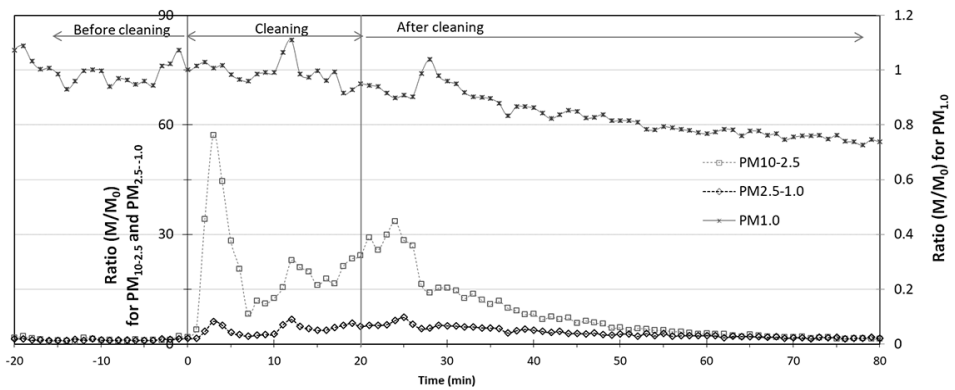
작은 입자의 증가 특성이 뚜렷이 나타나지 않았다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Mass concentrations and ratios of mass concentration of particles resuspended during cleaning with a broom.

그림 3은 빗자루를 사용한 청소 과정에서 재비산된 먼지의 크기분포 변화를 나타낸다. 광학적 입자계수기의 기본 데이터는 각 크기 채널의 개수농도를 나타내지만, 본 연구에서는 먼지의 상대적인 크기별 변화 특성을 정성적으로 비교하기 위해, 측정된 크기를 광학등가크기로 나타냈다. 각각의 먼지는 형상을 구형으로 밀도를 1.0 g/cm^3 으로 가정하여 크기분포를 추정하였다. 광학등가크기를 공기역학경으로 표현하려면 정확한 밀도를 알아야 하는데, 본 연구에서는 밀도를 1.0 g/cm^3 로 가정하였기 때문에, 공기역학경으로 표현된 대기의 크기분포에 비해 입자 크기가 작은 쪽으로 분포가 약간 이동되었다는 것은 고려해야 한다(Hinds, 1999). 본 연구에서 제안한 크기분포의 무게농도는 정확한 값이 아닌 상대적인 비교를 위한 추정 값으로 이해하면 된다. 특히, $0.25 \mu\text{m}$ 보다 작은 먼지는 OPC로 측정할 수 없기 때문에 $0.25 \mu\text{m}$ 보다 작은 크기에서 또 하나의 봉우리가 만들어진다고 생각하면 된다. 청소 전의 크기분포는 일반적인 대기 중의 미세먼지의 입자 크기분포와 같았다. 주로 자동차나 화력발전소 배출가스 등에서 기인한 $1 \mu\text{m}$ 이하의 봉우리와 토양이나 도로에서 바람에 의해 재비산된 입자가 주된 $1 \mu\text{m}$ 이상의 봉우리의 두 개의 봉우리의 크기분포가 나타났다. 청소가 시작되면, 앞서 그림 2에 나타난 것과 같이 $1 \mu\text{m}$ 이하의 먼지의 농도 변화는 거의 없지만, $1\sim 10 \mu\text{m}$ 크기 입자의 농도가 급격히 증가

하는 것을 알 수 있다. 이것은 바람에 의해 흩날리는 비산하여 생성되는 원리와 같이 빗자루질에 의한 비산된 입자들이 $1\sim 10 \mu\text{m}$ 입자라는 것을 알 수 있다. 특히, 이사 과정에서 많은 먼지들이 바닥에 쌓여있었기 때문에, 상대적으로 큰 먼지들이 재비산되고 실내에 미세먼지 농도를 크게 증가시켰다. 그림 2의 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{1.0}$ 데이터로는 확인이 어려운 $10 \mu\text{m}$ 이상의 입자들도 공기 중에 비산되는 것을 크기분포 분석을 통해 확인할 수 있었다.

4. 신을 신고 생활하는 사무실의 진공청소기 청소

그림 4는 진공청소기를 사용한 청소 과정에서 재비산된 먼지를 측정된 결과이다. 이사 후 3주와 4주가 경과한 시점으로 지속적으로 청소와 바닥 물걸레질 청소로 바닥에 먼지가 별로 없는 상태였다. 그렇지만, 신발을 신고 생활하는 공간이기 때문에 바닥에 먼지가 어느 정도는 존재하는 조건이다. 그림 4(a)는 이사 후 3주 경과한 시점으로 약 6 mm 의 강우가 있던 흐린 날이었다. 반면 그림 4(b)는 이사 후 4주 경과한 시점으로 건조한 맑은 날이었다. 그림 2에서 이사 날에 바닥에 먼지가 많은 조건에서 빗자루질로 청소한 날과 비교할 때, 미세먼지 재비산에 의한 실내 미세먼지 농도가 상대적으로 낮은 것을

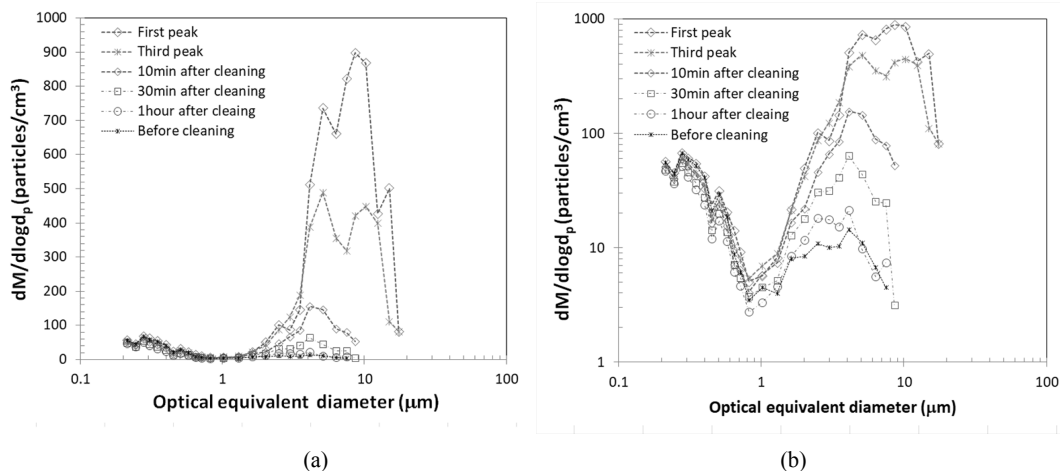
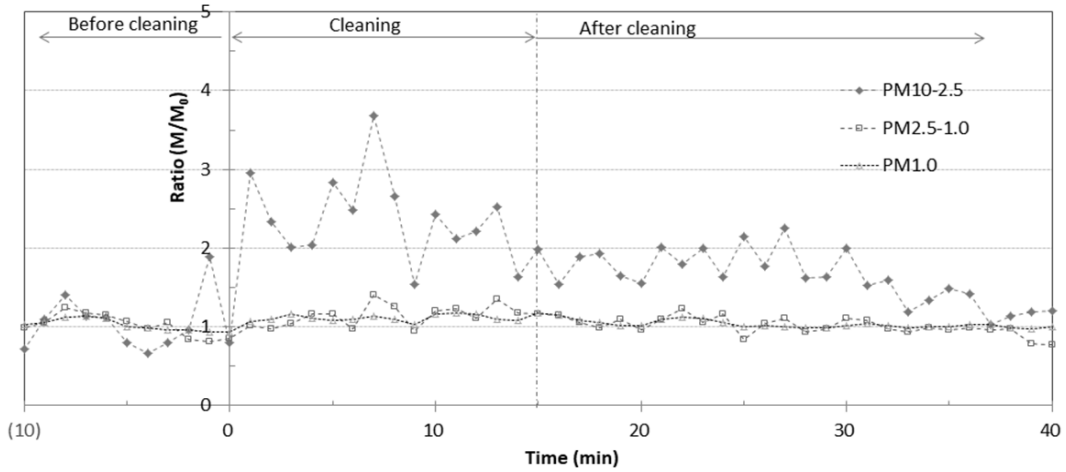
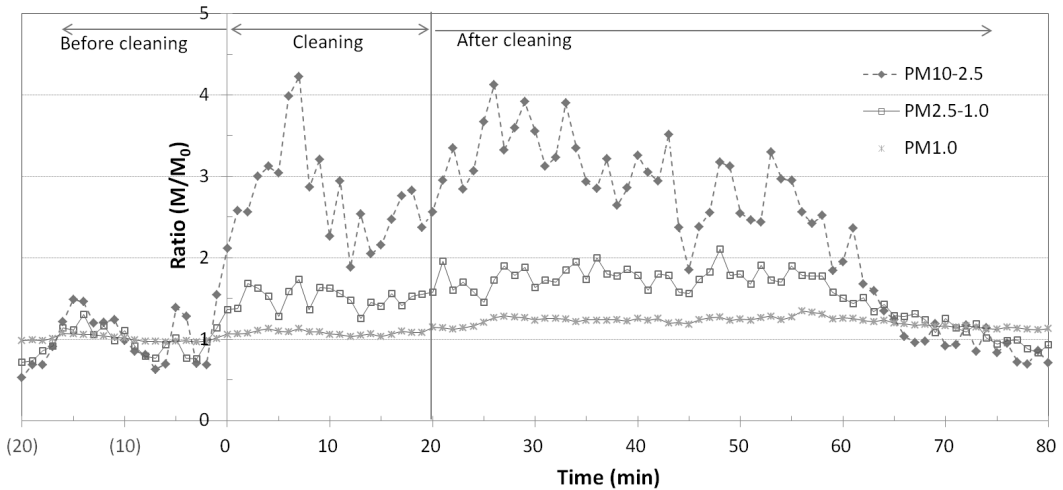


Fig. 3. Particle size distributions of resuspended dust during cleaning with a broom.



(a)



(b)

Fig. 4. Mass concentrations of particles resuspended during cleaning with a vacuum cleaner (a) rainy day, (b) sunny day.

확인 할 수 있었다. 청소 전과 비교할 때 2.5~10 μ m 크기 먼지의 무게농도가 60배까지 높아졌던 빗자루질 경우와 달리, 바닥에 먼지가 많지 않은 조건의 진공청소기를 사용한 경우 5배 이하였다. 이것은 빗자루질과 진공청소기의 차이이기도 하지만, 바닥에 존재하는 먼지의 양이 얼마나 많은가가 더 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다. 특히 그림 3의 경우는 1 μ m 보다 작은 먼지는 물론 1~2.5 μ m 크기의 입자

들도 재비산되는 특성이 거의 나타나지 않았는데, 이는 청소하는 날이 비가 오는 습한 날씨였기 때문에, 먼지가 재비산되는 과정에서 상대적으로 큰 먼지에서 떨어져 나오기 어려웠기 때문으로 생각된다. 반면에 건조한 맑은 날에 진공청소기로 청소를 진행한 경우에는 1~2.5 μ m 크기의 입자의 비산 또한 청소 전과 비교할 때 약 2배까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

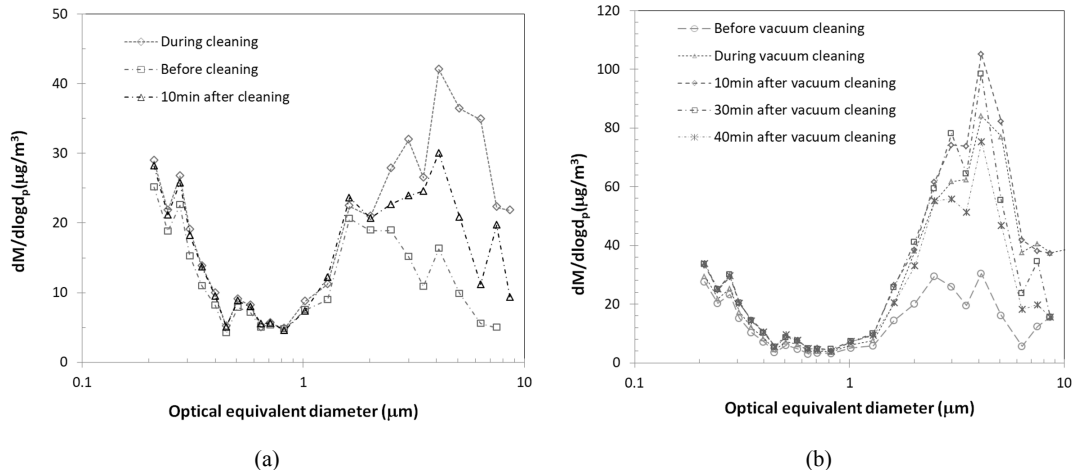


Fig. 5. Particle size distributions of resuspended dust during cleaning with a vacuum cleaner (a) rainy day, (b) sunny day.

그림 5는 진공청소기로 청소하는 과정에서 재비산된 미세 먼지의 크기분포를 나타낸다. 그림 5(a)는 약 6 mm의 강우가 있던 흐린 날이었다. 그림 5(b)는 이사 후 4주 경과한 시점으로 맑은 날이었다. 빗자루질과 마찬가지로 대부분 1 µm 이상의 입자들의 공기 중 농도가 증가하였다. 그림 5(a)와 같이 비 오는 습한 날의 경우 거의 2 µm 이상의 먼지들이 재비산 되어 측정된 것을 확인할 수 있었다. 반면 맑은 날이었던 그림 5(b)의 1 µm 이상의 먼지들이 재비산 되어 측정된 것을 확인할 수 있었다. 이사 직

후 바닥면지가 많은 조건에서 빗자루를 이용한 청소와 비교할 때, 진공청소기의 경우, 10 µm 이상의 상대적으로 큰 먼지의 비산은 많지 않았다.

그림 6은 이사 후 4주 경과 후 맑은 날에 진공청소기를 사용하여 청소한 날의 정소 전, 청소 과정, 청소 후의 재비산된 먼지의 농도 변화를 나타낸 것이다. OPC를 이용하여 얻은 측정값인 PM_{10-2.5}, PM_{2.5-1.0}, PM_{1.0}은 무게농도의 비율이고, CPC를 이용하여 측정된 결과는 개수농도(N)의 비율(N/N₀)이다. 무게농도 기준으로 1 µm 이상의 상대적으로 큰 먼

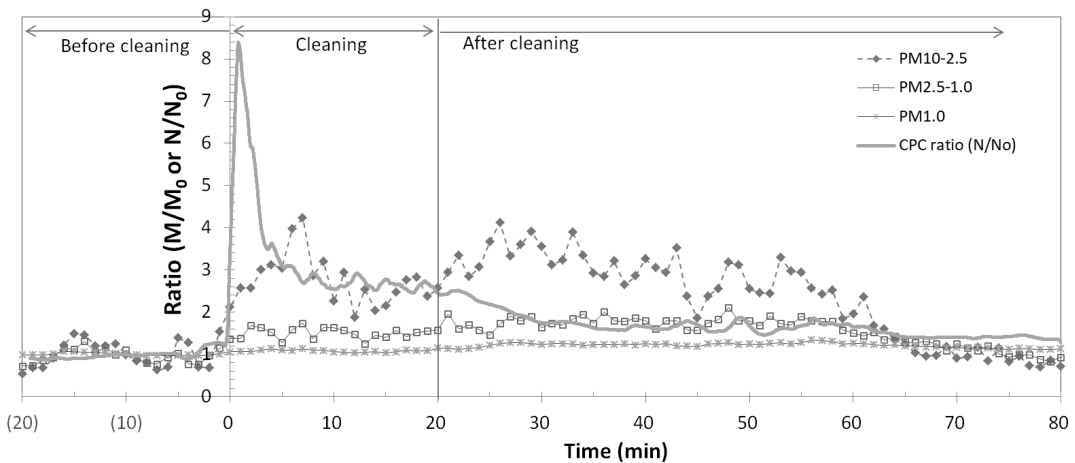


Fig. 6. Mass or number concentration ratios of particles with time during cleaning with a vacuum cleaner.

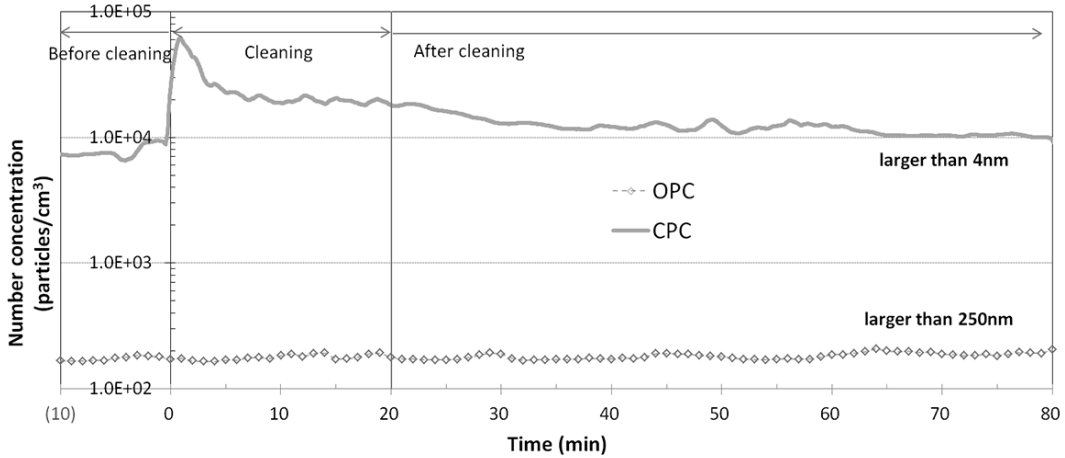


Fig. 7. Particle number concentrations with time during cleaning with a vacuum cleaner.

지들이 재비산되어 공기 중에 확산되는 것을 확인할 수 있고, 청소 후 상당시간 동안 실내에 부유하는 것을 확인할 수 있었다. 창문이 열려있었지만 사무실의 환기가 거의 이루어지지 않는 조건에서 청소 후 약 40분간 재비산된 미세먼지 농도가 유지되는 것을 확인할 수 있었고, 환기가 제대로 되면서 감소하는 특성을 확인할 수 있었다. 그림 6에서 CPC로 측정된 개수농도가 진공청소기를 작동시킨 초기에 급격히 늘어나는 것을 확인할 수 있었는데, 이것은 진공청소기의 작동 운전 과정에서 나노입자의 생성이 있을 것으로 추정되며, 초기에 많은 양이 발생된 후, 발생량이 급격히 감소하는 것으로 추정된다.

그림 7은 OPC로 측정된 250 nm 보다 큰 먼지의 총개수농도와 CPC로 측정된 4 nm 보다 큰 먼지의 총개수농도를 나타낸다. 대부분이 250 nm 보다 작은 크기의 먼지였다. 업소용 진공청소기의 공기 토출구에 CPC의 샘플링 프로브를 위치했을 때 고농도의 입자 개수농도가 측정되는 것으로 확인되었는데, 업소용 진공청소기에 장착된 토출구 필터의 성능이 HEPA급의 고성능 필터가 아니었기 때문일 것으로 생각된다. 나노입자의 발생은 진공청소기의 모터가 작동하면서 발열하여 부착된 유기물 등이 증발하여 나노입자로 생성되어 공기 중에 확산될 수 있는 가능성을 보여준다. 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

5. 요약

본 연구에서는 청소 과정에서 바닥에 먼지가 실내 공기 중으로 비산되는 특성을 공기 중 미세먼지를 측정하여 분석하였다. 신발을 벗지 않고 생활하는 국내 사무실을 대상으로 하였고, 실내 청소 과정에서 발생하는 미세먼지를 측정하였다. 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})와 1 μm 보다 작은 먼지의 무게농도(PM_{1.0})을 분석하였고, 청소 과정에서 발생하는 0.3 μm 이상의 먼지의 크기를 측정하여 분석하였다. 특히, 빗자루질과 진공청소기를 사용하는 과정에서 재비산 되는 미세먼지의 특성을 분석하였고, 입자의 크기에 따른 재비산 특성과 실내 농도 변화 특성을 확인하였다. PM_{2.5}와 PM₁₀은 청소 시작과 함께 농도가 증가하였고, 청소 이후에도 실내에 부유하여 장시간 인체에 노출될 수 있을 것으로 보인다. 반면에 PM_{1.0}은 상대적으로 청소과정에서 농도가 증가하는 경향을 확인할 수 없었다. 특히, 2.5~10 μm 크기의 먼지는 바닥에 먼지가 많은 조건에서 빗자루질로 청소하는 경우, 초기 농도의 약 60 배까지 높아질 수 있음을 확인하였다. 바닥에 먼지가 적은 조건에서 진공청소기를 사용하는 경우도 2.5~10 μm 크기의 먼지가 증가하였지만 초기 농도의 5배 이하였다. 중성능급 배기필터가 장착된 진공청소기가 가동하는 동안 CPC로 측정된 총 개수농도가 급격히 증가한 후 감소하는 특성이 나타났다. 개

수로 대부분을 차지하는 먼지는 250 nm 보다 작은 크기였다.

실내 거주자의 미세먼지 노출은 외부에서 유입된 대기 미세먼지와 실내에서 발생된 실내 생성 미세먼지가 함께 영향을 준다고 알려져 있다. 그렇지만, 국내 실내 활동 중 발생하는 미세먼지에 대한 체계적인 측정과 분석 연구가 많지 않았다. 이미 진행되고 있는 다양한 대기 미세먼지 연구 뿐 아니라 앞으로는 실내의 다양한 활동에 기인한 미세먼지 생성 특성에 대한 심도 깊은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

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

참고문헌

- 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.
- Hinds, W. C. (1998). *Aerosol Technology : Properties, behavior, and measurement of airborne particles*, John Wiley and Sons Inc, Second Edition.
- Knibbs, L. D., Congrong, H., Duchaine, C., and Morawska, L. (2012). Vacuum cleaner emissions as a source of indoor exposure to airborne particles and bacteria, *Environmental Science and Technology*, 46(1), 534-542.
- Lee, S. W., Heo, Y. M., Han, S. Y., and Kim, D. (2014). Emission characteristics of airborne particles and bacteria from household vacuum cleaners, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 13(4), 256-262.
- Ozturk, B. (2006). A comparison of the performances of dry and wet vacuum cleaners for the control of indoor particulate matters, *Journal of International Environmental Application & Science*, 1(3-4), 107-119.
- Wu, C. L. Chao, C. Y. H., Sze-To, G. N., Wan, M. P., and Chan, T. C. (2012). Ultrafine particle emission from cigarette smoldering, incense burning, vacuum cleaner motor operation and cooking, *Indoor and Built Environment*, 21(6), 782-796.
- 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.