

환기장치와 필터를 활용한 미세먼지 제거특성 조사

전태영 · 김재용[†]

충북대학교 환경공학과
(2015년 2월 24일 접수, 2015년 3월 10일 심사, 2015년 3월 24일 채택)

Characterization of Fine Dust Collection Using a Filter Ventilation

Tae-Yeong Jeon and Jae-Yong Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Chungcheongbuk-do 362-763, Korea
(Received February 24, 2015; Revised March 10, 2015; Accepted March 24, 2015)

초 록

본 연구에서는 폐암을 유발하는 발암물질이며 다양한 문제의 원인이 되고 있는 유해물질인 미세먼지 제거특성을 조사하였다. 변수로는 습도, 초기미세먼지 주입량, 유속을 고려하였다. 실험결과 습도가 높은 경우 제거에 소요되는 시간동안 평균 농도는 낮아지지만, 최종농도에는 큰 차이가 없었다. 세 가지 초기미세먼지주입량의 변화는 모두 비슷한 제거경향을 나타내었다. 또한 유속이 0.6 m/s에서 0.3 m/s로 변할 경우 제거소요시간이 약 1.4배 증가하는 결과가 관찰되었다. 본 연구에서는 습도, 미세먼지 주입량, 유속 중 미세먼지 제거에 가장 큰 변화를 보이는 것은 유속으로 관찰되었다.

Abstract

In this study, we examined the removal characteristics of suspended particulate matters which are one of carcinogens to cause lung cancer. The fine dust capture by a pilot scale filtration system depends on several important variables such as humidity, initial fine dust injection volume, and flow rate. The average concentration of particulate matters in the test chamber decreased, but the ultimate collection efficiency did not change during the filtration under high humidity, compared to those of using ambient conditions. The initial injection amount of fine dust did not influence the particle capturing efficiency. When the flow rate reduced from 0.6 m/s to 0.3 m/s, the dust collection time increased approximately 1.4 times. Among all variables tested, the flow rate showed the most significant effect on the removal efficiency of fine particulate matter.

Keywords: filter, fine dust, PM10, ventilator, indoor air quality

1. 서 론

실내의 환경에서 여러 가지 경로를 통해 유해물질들이 우리 몸에 많이 유입된다. 특히 호흡기를 통해 많은 양의 유해물질들이 유입되지만 대부분의 입자상 오염물질은 호흡기의 점막을 통해 많이 걸러지게 된다. 특히 미세먼지(fine particle)란 학술문헌상으로 실내공기 중 이중모델(bimodel)에 의하여 0.1~0.2 μm 이하의 입자상 물질로 정의하고, 보다 큰 입자상 물질(coarse particle)은 20 μm 이상의 영역으로 표현된다[1]. 최근 발생하는 중국산 스모그나 황사현상으로 인해 미래 창조과학부나 환경부에서 미세먼지는 PM10 (particle matter, aerodynamic equivalent diameter (AED)가 10 μm 이하)과 PM2.5 (particle matter, aerodynamic equivalent diameter (AED)가 2.5 μm 이하)를 초미세먼지로 규정할 바 있고 미세분진이란 단어와 혼용하여 사용하기

도 한다. 미세먼지는 대부분 각종 산업에서의 공정과 연료의 연소 특히 자동차의 연료연소와 같은 인위적인 발생원에 의해 주로 배출된다. 인위적인 발생원에 의해 배출되는 미세먼지는 대부분 직경이 작은 편이고, 이때 배출되는 미세먼지는 표면에 각종 유해물질이 붙어있다. 미세먼지의 크기분포는 약 0.005~500 μm 사이에 분포되어있다. 이러한 미세먼지는 화학적으로 보면 크게 이온성분, 탄소성분, 금속성분 등으로 이루어져 있으며, 화학적 조성을 조사하여 발생원을 역 추적하여 미세먼지 저감방안 도출에 활용하고 있다[2,3]. 거주용 건물에서 발생하는 미세먼지의 발생원은 취사 및 흡연 등에 의해 발생되는데, 이 입자들은 대부분이 입자크기가 작기 때문에 PM2.5의 농도가 일반 수준보다 최대 30배까지 높아지는 것으로 보고되고 있다[4,5]. 또한 실외에서 유입되는 미세먼지는 크게 문과 창호의 틈으로 유입되는 미세먼지와 2004년에 시행된 실내공기질 관리법에 의해 설치된 전열교환기를 통해 유입되는 미세먼지로 나뉘며, 이때 유입되는 미세먼지의 입경은 0.1 μm 보다 작다. 미세먼지 중 PM2.5는 점막에서 걸러지지 않고 호흡기계 특히 폐에 깊숙이 침투하고, 폐포에 쉽게 흡착될 수 있어 인체에 미치는 영향이 매우 크고, 심한 경우 폐암을 유발하기 때문에 2013년 WHO에서는 미세먼지를 1급 발암물질로 규정했다[6,7]. 미세

[†] Corresponding Author: Chungbuk National University, Department of Environmental Engineering, Chungcheongbuk-do 362-763, Korea
Tel: +82-43-261-2471 e-mail: jykim4@korea.com

Table 1. Test Dust Particle Size Distribution by Volume%

Size Micrometer	Test Dust% Less Than
0.97	3.0~5.0
1.38	7.0~10.0
2.75	23.0~27.0
5.50	65.0~69.0
11.00	95.5~97.5
22.00	100.0

Table 2. Test Dust Chemical Makeup

Chemical Ingredient	CAS Number	% of Weight
SiO ₂	14808-60-7	68~76
Al ₂ O ₃	1344-28-1	10~15
Fe ₂ O ₃	1309-37-1	2~5
Na ₂ O	1313-59-3	2~4
CaO	1305-78-8	2~5
MgO	1309-48-4	1~2
TiO ₂	13463-67-7	0.5~1.0
K ₂ O	12136-45-7	2~5

먼지는 국내에서도 다량 발생하지만 지형적 위치로 인해 중국에서 발생한 미세먼지가 서풍 또는 북서풍을 타고 우리나라로 유입되는 양이 국내 미세먼지량의 30~50% 정도 될 것으로 예측하고 있다. 따라서 국가적 차원에서 큰 관심을 갖고 해결하고자 2014년에 미래부에서 사회문제 해결과제를 공고한 예도 있다. 외부활동 시 오염물질의 농도도 큰 문제이지만 국민들이 대부분의 일상시간을 보내는 실내공기질(indoor air quality, IAQ)의 상태가 신체에는 더 큰 영향을 미치게 된다. 실내공기질은 주로 담배연기, 조리, 스토브, 벽면의 입자상 물질 등과 같은 실내오염원으로부터 발생하는 오염물질들이 각종 질환의 원인이 된다[8-12]. 미세먼지의 발생원은 실외에만 존재하는 것이 아니라 실내에서의 요인도 굉장히 크게 작용하는데, 실내미세먼지 농도는 특히 환경담배연기(environmental tobacco smoke, ETS)의 영향을 상대적으로 많이 받으며, PM_{2.5} 기준 흡연 사무실이 비흡연 사무실보다 약 1.5배가량 높게 측정된다는 결과도 있다[13]. 서울에서 미세먼지 농도가 증가할 때 65세 이상 노인 등의 호흡기관련 질환 사망률이 0.4%씩 증가하고, 임신부와 태아에게도 악영향을 미친다는 연구결과가 있다. 이처럼 외부의 미세먼지도 건강에 큰 영향을 주지만, 실내 특히 심리상 자택은 안전할 것으로 생각하기 때문에 비교적 실내의 미세먼지 방지대책을 세우지 않는 경우가 많다. 하지만 실내의 미세먼지 또한 영·유아기 아이들과 노약자들에게 큰 영향을 미치고 전업 주부들처럼 실내에서 대부분의 시간을 보내는 경우 가족구성원 중 흡연자가 없는데도 불구하고 폐암에 걸리는 사례 또한 조사되었다. 이처럼 미세먼지는 어디에나 존재하고 누구에게나 인체내부로 유입될 수 있고, 체내로 유입된 후에는 배출이 어렵고, 미세먼지로 인한 피해가 점점 광범위해지고 언론에서 각종 미세먼지관련 피해사례들을 보도하여, 국민들의 관심이 많아지고 있다. 이러한 미세먼지를 제거하는 방법은 크게 기계적인 방법과 자연적인 방법이 있다. 기계적인 방법으로는 필터를 활용한 환기장치를 이용한 여과방법, 공업적으로 활용하는 전기집진 방법 등이 있다[14]. 또한 자연적인 방법으로는 자연

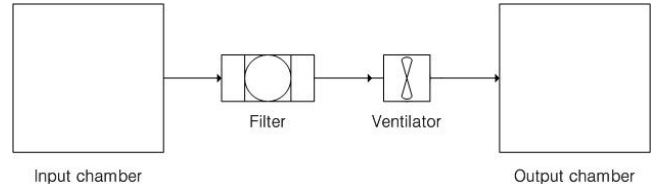


Figure 1. Schematic diagram of the experimental set-up.

강우에 의한 미세먼지 제거, 자연 환기에 의한 제거 방법 등이 있다 [15]. 대부분의 사람들은 실내 미세먼지를 제거하기 위해 환기장치를 기본으로 필터를 장착한 여과방법을 사용하기 때문에 실내에서 제거할 때, 최상의 조건을 찾아내는 것이 시급하다. 따라서 본 연구를 통해 실내공기질 상황에 대한 여러 조건을 변수로 선택하여 미세먼지 제거 특성을 조사하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

본 실험에 사용된 미세먼지는 POWDER TECHNOLOGY INC.에서 ISO 12103-1, A1 ULTRAFINE TEST DUST를 구입하여 건조 후 사용하였다. 본 실험에 사용한 미세먼지의 제원은 Tables 1, 2와 같으며, Table 1에 나타난 것과 같이 11 μm 이하가 90% 이상이며 PM₁₀의 D 값은 0.7 이상이다. 그리고 본 실험에서의 Sample Dust 화학적조성은 75% 정도가 SiO₂이며 15% 정도의 알루미늄이 섞여있고 그 외 일부 산화물들로 구성되어있다. 대기분진의 분포영향을 검토하기 위한 실험에 있어서는, 분진의 밀도나 인체에 유해한 중금속성분 등을 체크하기 위하여 대상분진들에 대한 화학적 조성 검토가 필요하다고 판단된다. 실험 장치의 모식도를 Figure 1에 나타내었다. 본 실험에서는 환기장치와 미세분진 제거를 위한 실험으로써 두 개의 BOX를 설치하고, FLUX를 연결하여 BATCH 형태의 실험을 진행하였다. 본 실험에서는 우선적으로 환기장치와 함께 먼지제거 성능을 비교하고자 시도하였으며, 추후 연속식으로 풍동장치를 설치하여 필터에 의한 분진 제거능력에 대한 실험을 진행할 예정이다. 따라서 본 실험의 변수로는 습도, 초기 미세먼지 농도, 유속 등 총 3가지를 선택하여 제거효율을 평가하였으며, 각각 3회씩 실시한 실험의 결과 값의 평균을 기재하여 신뢰도를 높이고 오차를 줄이고자 노력하였다. 실험에 사용한 박스의 크기는 1 m × 1 m × 1 m 정육면체의 크기로 제작하여 사용하였으며, 환기장치의 유속은 0.3, 0.6 m/s로 총 2단계로 조절하였으며, 최대한 유속의 손실이 없도록 하기 위해 연결부는 일직선으로 고정시켰고, 또한 연결부의 길이 또한 최소한의 길이로 연결하였다. 습도의 경우 50, 55, 60% 세 가지의 경우로 나누어 실험하였으며, 초기 미세먼지의 농도는 Test dust의 무게를 측정하여 균일하게 주입해 주었고, 그 무게는 각각 15, 10, 5 mg을 측정하여 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 장비로는 미세먼지 측정 및 습도 측정에 적합한 CEM사의 Particle Counter MODEL DT-9880M (PM_{2.5}와 PM₁₀ 측정 가능)과 유속측정이 가능한 TSI사의 VELOCICALC AIR VELOCITY METER MODEL 9515를 이용하여 모든 분석에 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 습도와 미세먼지 제거특성과의 관계

필터를 통과시켜 미세먼지를 제거하는 방식을 사용할 경우 대기 중 습도와 미세먼지제거효율 사이에 어떠한 관계가 있는지 알아보기 위

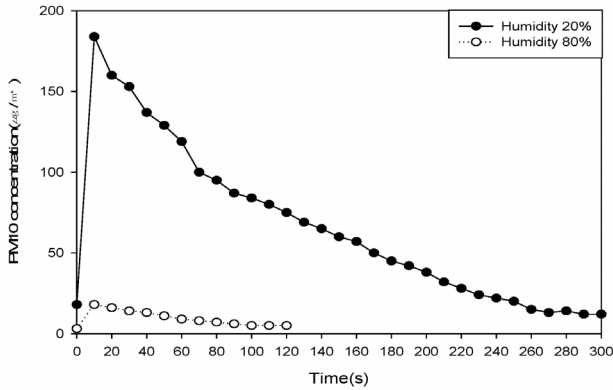


Figure 2. Effect of filtration time on PM10 concentration with two different humidities at inlet position.

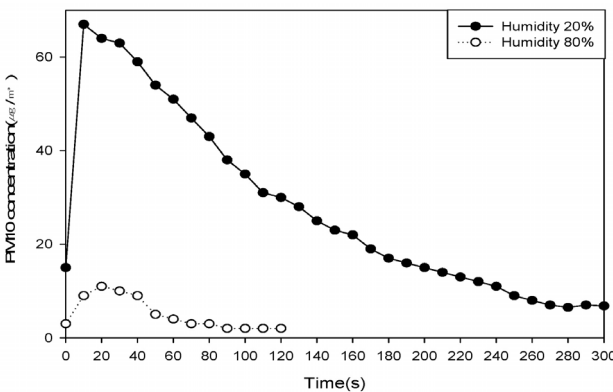


Figure 3. Effect of filtration time on PM10 concentration with two different humidities at outlet position.

해, 시험 챔버 내의 습도를 변화시켜가며 여과실험을 진행하였다. 습도 20%와 80%의 예비실험 결과를 Figure 2와 Figure 3에 도시하였다. 예측한 바와 같이 20%의 건조한 분위기 에서는 초기 부유 분진량이 많았고, 상대적으로 습도가 높은 80%의 경우는 수분의 영향으로 미세 먼지 입자가 응집하는 현상이 두드러지게 나타남으로써 챔버 내 공간 체류시간이 짧아짐으로써 부유분진의 양이 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 본 실험에서의 Test dust는 10 mg을 주입하였으며, 유속은 0.6 m/s, 측정간격은 10 s이며, 습도는 보편적 대기상태인 50, 55, 60%로 유지시켜 집중적으로 고찰하였다.

실험 종료 시점은 세 경우 모두 분진의 농도변화가 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이내로 30초 이상 유지되었을 경우로 하였다. 입구 측 PM10의 결과 값은 Figure 4에 도시하였고, 출구 측 PM10의 결과 값은 Figure 5에 표시함으로써 서로를 비교하여 습도와 PM10의 제거특성을 분석하였다. 측정결과, 우선 가장 크게 눈에 띄는 것은 동일한 양의 미세먼지를 주입해 주었을 때 관측되는 초기 농도의 차이이다. 입구 측은 물론 출구 쪽의 최고농도는 습도가 높을수록 감소된 값을 관찰할 수 있었다 또한 입구 측의 미세먼지 농도를 살펴보면 습도가 60%인 경우 농도가 안정화되는 데까지 약 180 s가 소요되었고, 습도가 55%인 경우 200 초, 습도가 50%인 경우에는 약 210 s의 시간이 소요된 것을 볼 수 있었다. 이와 마찬가지로 출구 측의 농도 또한 습도가 높을수록 미세먼지 농도가 빠르게 안정화되고 있음을 관찰할 수 있다. 이와 같은 결과가 나타난 원인은 습도가 높아질 경우 미세먼지 입자가 대기 중 수분을 흡수하거나 수분이 바인더 역할을 함으로써 미세입자들이 서로 응

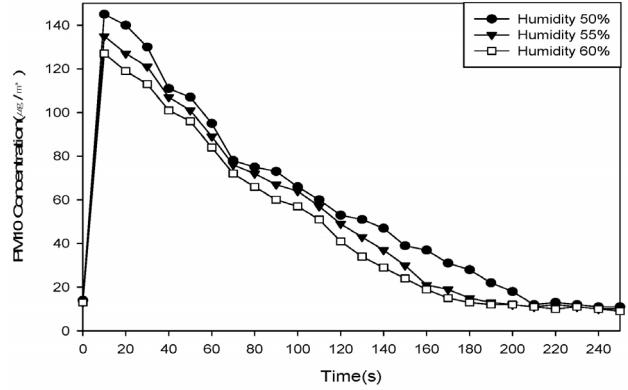


Figure 4. Variation of PM10 concentration at inlet position with space humidity during filtration.

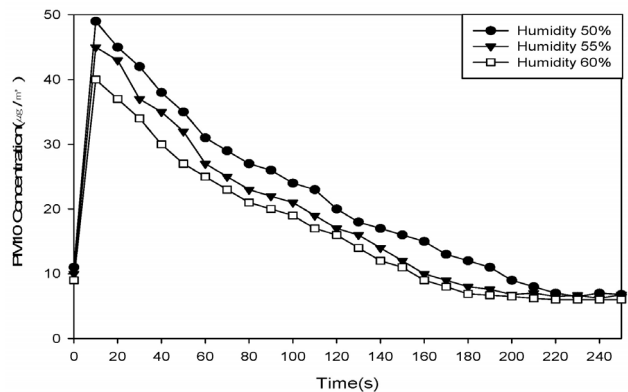


Figure 5. Variation of PM10 concentration at outlet position with space humidity during filtration.

집함으로써 무게가 증가하여 중력침강이 빈번히 발생하기 때문으로 사료된다.

3.2. 초기농도와 미세먼지 제거특성과의 관계

미세먼지를 제거하는데 있어 초기농도는 필터의 흡착 한계점에 도달하는 기간에 큰 영향을 미치게 된다. 미세먼지 제거에 있어 초기농도가 필터의 흡착 한계점 이외에 어떠한 영향을 미치는지 알아보하고자 본 실험을 하였다. Test dust는 각각 15, 10, 5 mg을 선택하여 시험 챔버로 주입하였으며, 유속은 0.6 m/s로 조절하였고, 습도는 50%로 고정하였다. 실험 종료 시점은 위의 실험과 마찬가지로 측정값의 변화 폭이 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이내로 30 s 이상 유지되었을 경우에 종료하였다. Figure 6는 미세먼지를 15, 10, 5 mg을 주입하였을 때 입구 측의 PM10의 농도를 측정하여 나타난 결과 값이다. 출구 측의 시간에 따른 PM10의 농도는 Figure 7에 나타냈으며 초기 미세먼지 농도에 따른 미세먼지 제거 특성을 비교 분석하였다. 입구와 출구 측 모두 최종 안정화농도가 미세먼지의 초기 주입량과는 관계없이 $11 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위의 값이 최종 농도 값으로 나타났으며, 미세먼지 초기 주입량이 더 많을수록 입구와 출구 측 모두 안정화에 도달하는 시간이 더 소요되었다.

3.3. 유속과 미세먼지 제거특성과의 관계

유속을 변화시키면 필터의 단위면적당 접촉하는 미세먼지양이 변하게 되는데, 이때의 미세먼지의 제거특성을 알아보기 위하여 유속은

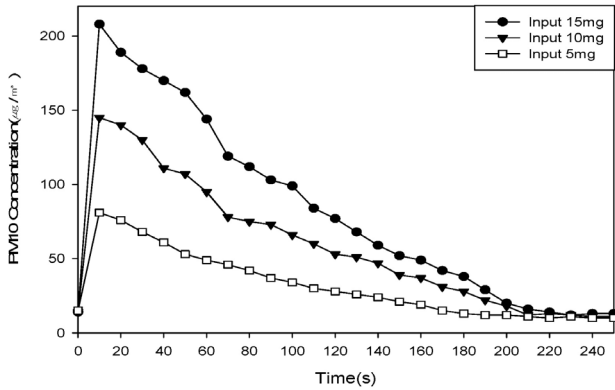


Figure 6. Variation of PM10 concentration at inlet position in terms of dust feed amount during filtration.

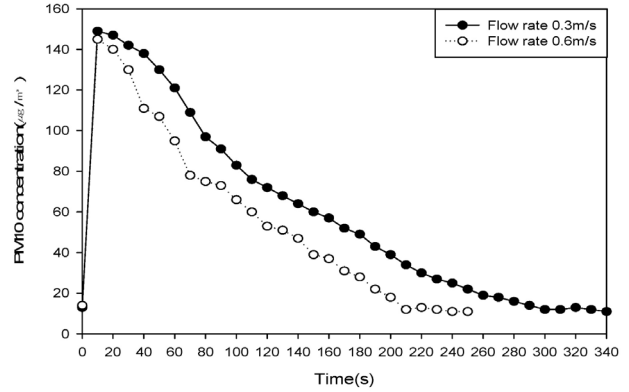


Figure 8. Variation of PM10 concentration at inlet position in terms of flow rate during filtration.

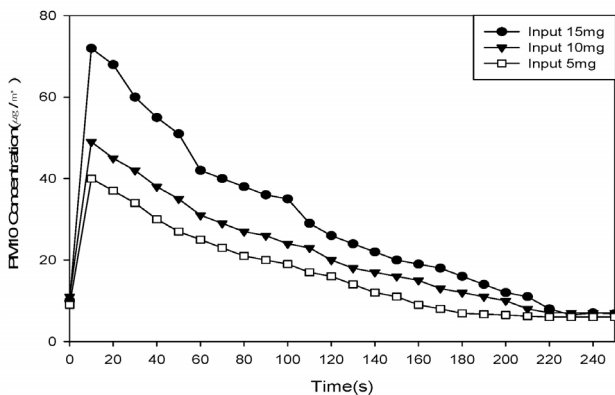


Figure 7. Variation of PM10 concentration at outlet position in terms of dust feed amount during filtration.

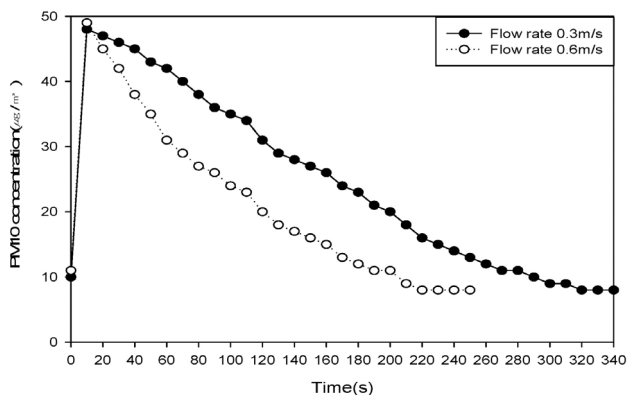


Figure 9. Variation of PM10 concentration at outlet position in terms of flow rate during filtration.

0.3 m/s와 0.6 m/s로 조절하였으며, 미세먼지의 주입량은 10 mg으로 습도는 50%로 조절하여 실험에 임하였다. 실험 종료 시점은 농도가 안정화되어 30 s 이상 유지되었을 경우에 종료하였다. Figure 8은 입구 측의 PM10의 농도를 측정하여 나타낸 결과 값이다. 또한 Figure 9에는 출구 측의 PM10의 농도를 각각 나타내었다. 입구와 출구 측 모두 최종농도까지 소요되는 시간이 유속이 0.3 m/s인 경우 340 s 소요되었고, 유속이 0.6 m/s인 경우가 250 s 소요되어 실험 종료 시까지 약 1.4배의 시간이 소요되었다. 입구 측의 최고 미세먼지농도와 출구 측의 안정화된 미세먼지농도를 이용하여 제거효율을 산출했을 때 0.3 m/s의 경우 약 92.6%이고 0.6 m/s인 경우 약 92.4%로 관찰되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 사회적 문제로 대두되고 있는 미세먼지를 저감하기 위하여 설정한 세 가지 변수에 따른 미세먼지의 제거특성에 대하여 실험 하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일상생활에서의 습도범위에서는 습도가 높은 경우 평균 농도는 낮아지지만, 안정화된 최종 농도 값에는 큰 차이가 없었다. 따라서 습도가 높으면 미세먼지의 농도가 일시적으로 낮아질 수는 있지만, 미세먼지 자체가 제거되는 것이 아니기 때문에 습도가 낮아지고, 외부의 힘에 의해 미세먼지가 다시 부유할 수 있기 때문에 평소보다 미세먼지의 농도가 높아질 수 있는 잠재적 위험성이 있다고 판단된다.
- 2) 초기 주입량에 따라 최고농도의 값은 변하는 반면 최종 안정화

단계에서의 농도는 거의 변화가 없는 것으로 보아, 필터의 한계를 초과하는 양이 유입되거나 필터자체의 흡착능이 변화되지 않는 이상 안정화에 도달하는 소요시간의 차이만 존재한다는 것을 알 수 있다.

3) 유속이 변할 경우 안정화에 도달하는 소요시간에 가장 큰 차이를 보였다. 따라서 습도, 미세먼지의 주입량, 유속 중 미세먼지의 제거에 가장 큰 영향을 미치는 것은 유속인 것으로 확인되었다. 입구 측의 최고 미세먼지농도와 출구 측의 안정화 된 미세먼지농도를 이용하여 제거효율을 산출했을 때 0.3 m/s의 경우 약 92.6%이고 0.6 m/s인 경우 약 92.4%로 관찰되었다. 한계 여과속도가 존재하기 때문에 필터소재와 먼지입자의 종류에 따라 최적 유속을 선정하여 운전해야 하며, 본 실험에서 변수로 적용한 유속범위에서의 0.3 m/s인 경우와 0.6 m/s 경우, 최종제거효율에는 영향을 거의 미치지 않는 것으로 나타났다.

감 사

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2014년도 산학연협력기술개발사업(No. C0199172)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝히며, 이에 감사드립니다.

References

1. Richard W. Boubel, Donald L. Fox, D. Bruce Turner, and Arthur C. Stern, *Fundamentals of Air Pollution*, 3rd ed. 203-206,

- Academic Press, California, USA (1994).
2. Y. H. Yoon, J. C. Joo, H. S. Ahn, and S. H. Nam, Analyses of the current market trend and research status of indoor air quality control to develop an electrostatic force-based dust control technique, *J. Kor. Academia-Industrial. Co. Soc.*, **14**(12), 6610-6617 (2013).
 3. J. S. Park, C. H. Kim, J. J. Lee, J. H. Kim, U. H. Hwang, and S. D. Kim, A study on The Chemical Mass Composition of particle Matter in Seoul, *J. Kor. Soc. Urban. Eng.*, **10**(3), 293-303 (2010).
 4. O. O. Hänninen, E. Lebet, V. Ilacqua, K. Katsouyanni, N. Künzli, R. J. Srám, and M. Jantunen, Infiltration of ambient PM_{2.5} and levels of indoor generated non-ETS PM_{2.5} in residences of four European cities, *Atmos. Environ.*, **38**, 6411-6423 (2004).
 5. G. Gramotnev and Z. Ristovski, Experimental investigation of ultra-fine particle size distribution near a busy road, *Atmos. Environ.*, **38**(12), 1767-1776 (2004).
 6. D. F. S. Natucsh, J. R. Wallace, and Jr. C. A. Evans, Toxic trace elements: preferential concentration in respirable particles, *Science*, **183**, 202-204 (1974).
 7. D. W. Dockery and III C. A. Pope, Acute respiratory effects of particulate air pollution, *Annu. Rev. Publ. Health*, **15**, 107-132 (1994).
 8. B. H. Nam, I. J. Hwang, and D. S. Kim, Pattern Classification of PM-10 in the Indoor Environment Using Diskoint Principal Component Anlysis, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, **18**, 25-37 (2002).
 9. T. Larson, T. Gould, C. Simpson, L.-J. S. Liu, C. Claiborn, and J. Lewtas, Source apportionment of indoor, outdoor, and personal PM_{2.5} in Seattle, Washington, using positive matrix factorization, *J. Air Waste Manage.*, **54**, 1175-1187 (2004).
 10. M. D. Geller, M. Chang, C. Sioutas, B. D. Ostro, and M. J. Lipsett, Indoor/outdoor Relationship and chemical composition of fine and coarse particles in the southern California deserts, *Atmos. Environ.*, **36**, 1099-1110 (2002).
 11. D. A. Olson, J. Tirlington, R. M. Duvall, S. R. McDow, C. D. Stevens, and R. Williams, Indoor and outdoor concentrations of organic and inorganic molecular markers: Souce apportionment of PM_{2.5} using low-volume samples" *Atmos. Environ.*, **42**, 1742-1751 (2008).
 12. J. M. Lim, J. H. Jeong, J. H. Lee, J. H. Moon, Y. S. Ching, and K. H. Kim, The analysis of PM_{2.5} and associated elements and their indoor/outdoor pollution status in an urban area, *Indoor Air*, **21**, 145-155 (2011).
 13. J. M. Lim and J. H. Lee, Indoor Air Quality Pollution of PM_{2.5} and Associated Trace Elements Affected by Environmental Tobacco Smoke. *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **36**(5), 317-324 (2014).
 14. Josep Grau-Bové and Matija Strlič, Fine particulate matter in indoor cultural heritage: a literature review, *Herit. Sci.*, **1**(8), 1-17 (2013).
 15. Ling-Chuan Guo, Lian-Jun Bao, Juan-Wen She, and Eddy Y. Zeng, Significance of wet deposition to removal of atmospheric particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons: a case study in Guangzhou, China, *Atmos. Environ.*, **83**, 136-144 (2014).