

초미세 크기의 마른 안개 생성과 이를 이용한 미세먼지 제거 연구

김기웅[†]

Experimental study on the generation of ultrafine-sized dry fog and removal of particulate matter

Kiwoong Kim[†]

Abstract With the fine particulate matter (PM) poses a serious threat to public health and the environment. The ultrafine PM in particular can cause serious problems. This study investigates the effectiveness of a submicron dry fog system in removing fine PM. Two methods are used to create fine dust particles: burning incense and utilizing an aerosol generator. Results indicate that the dry fog system effectively removes fine dust particles, with a removal efficiency of up to 81.9% for PM₁₀ and 61.9% for PM_{2.5} after 30 minutes of operation. The dry fog, characterized by a mean size of approximately 1.5 μm , exhibits superior performance in comparison to traditional water spraying methods, attributed to reduced water consumption and increased contact probability between water droplets and dust particles. Furthermore, experiments with uniform-sized particles which sizes are 1 μm and 2 μm demonstrate the system's capability in removing ultrafine PM. The proposed submicron dry fog system shows promise for mitigating fine dust pollution in various industrial settings, offering advantages such as energy consumption and enhanced safety for workers and equipment.

Key Words : Indoor air quality (실내 공기질), Ultrafine particulate matter (초미세먼지), air purification (공기 정화), Dry fog (건식 안개), Submicron water droplet (초미세 물방울)

1. 서론

미세먼지는 국민의 건강과 환경에 심각한 위협을 가하고 있는 큰 위험요소이다.⁽¹⁻³⁾ 직경이 10 μm 및 2.5 μm 미만인 미세먼지 입자는 일반적으로 각각 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 로 분류된다. 특히, 극초미세먼지는 초미세먼지라고 불리는 PM_{2.5} 보다 더 미세한 직경 1 μm 미만 크기의 미세먼지로 다른 미세먼지에 비해서 상대적으로 공중

에 더 오랫동안 떠다닌다.⁽⁴⁾

이러한 입자에 장기간 노출되면 심혈관 질환을 유발할 수 있고 사람들의 호흡기에 직접적인 영향을 준다. 미세먼지에 노출된 사람들은 호흡기 질환 발생률이 높아지고 기관지염, 폐질환, 심장질환 등 다양한 건강 문제가 발생할 확률이 매우 높은것으로 알려져 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

미세먼지는 배출가스, 산업 공정, 에너지 발전, 건설 활동 등 다양한 인위적 활동과 자연적 요인이 복합적으로 작용하여 발생되고 있다.⁽⁸⁾ 특히, 건설현장 및 발전소에서 초미세먼지가 많이 발생하는데, 대기환경보전법(제43조 제1항)

[†] Department of Mechanical Engineering Hannam University, Daejeon, Korea, Assistant Professor
E-mail : kwkim@hnu.kr

등 관련 규정에 의거하여 미세먼지 발생 사업으로 분류 시 해당 지자체에 신고하고 미세먼지 발생을 억제하기 위한 시설을 설치하거나 필요한 조치를 해야 하는 등 관련해서 엄격히 규제가 되고 있다. 실내 건설공사 및 발전소에서는 작업자가 장시간 미세먼지에 노출될 가능성이 높으므로 작업자의 안전을 위해서 작업현장의 철저한 공기질 관리가 필요한 실정이다.

초미세먼지를 줄이기 위한 미세먼지 저감 시설 및 장치로 스프링클러, 이동식 집진기, 방진망 등이 활용되고 있다.^{9, 10)} 기존 스프링클러 방식의 살수 장치는 작업 별 특성에 따라 살수를 하지 못하는 경우가 발생하고 물소비량이 많은 단점이 있으며, 진공 방식의 집진기는 필터를 이용한 여과기술로 넓은 면적에 적용하기 어렵고 필터의 주기적인 교체가 필요하며 고농도의 초미세먼지 제거에 적합하지 않다는 문제가 있다. 이에 기존 시스템의 단점을 보완할 수 있는 초미세먼지 저감 시스템 개발이 필요한 실정이다.

기존에 사용되고 있는 가습방식 또는 스프링클러 방식의 살수 장치는 분사되는 물 입자의 크기가 먼지의 크기 대비 훨씬 크기 때문에 먼지와 물 입자가 접촉하지 않은 air stream 현상이 발생하게 된다. 하지만 미세액적을 이용하는 방식은 물 입자의 크기가 미세먼지의 크기와 비슷하거나 상대적으로 더 작아서 air stream 현상을 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다.^(11,12) 또한, 과습 및 시야 감소로 인한 안전사고 발생과 비효율적 에너지(물, 전기 등) 소비를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 미세 물 입자를 생성할 수 있는 dry fog system을 제작하여 submicron 크기를 갖는 dry fog를 생성하였고 이를 이용하여 미세먼지 제거 실험을 진행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 Dry fog 생성 방법

Dry fog를 생성하기 위해서는 air compressor (공기 압축기), 압축 용기, 노즐이 필요하다 (Fig. 1). 용기 내 노즐이 충분히 잠기도록 distilled water

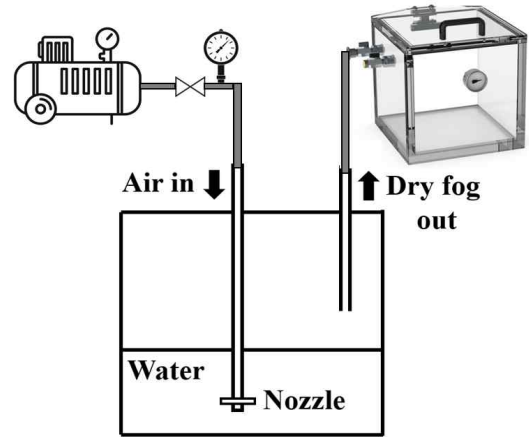


Fig. 1. Schematic of the experimental setup to generate submicron water droplet and measure PM concentration in a closed chamber.

(증류수)를 압축용기의 출구쪽으로 채워준다. 압축 용기에 가압을 하기 위해서 air compressor를 공기 입구쪽에 고압호스로 연결하고 중간에 설치된 밸브를 통해 세기를 조절한다. 압력 밸브를 열면 dry fog가 발생하여 dry fog outlet을 통해 실험용 챔버로 배출된다.

2.2 Dry fog 입자의 크기 측정 방법

생성된 dry fog의 크기를 측정하기 위해서 Phase Doppler Anemometry(PDA, 위상 도플러 풍속계, DANTEC Dynamics(c))를 사용하였다. 상기 장비를 이용하여 액적 또는 기포의 크기, 속도 등의 정보를 0.5 μm 의 공간 분해능으로 측정할 수 있다. 장치 실험부에 dry fog를 생성시키면 여러 각도에서 산란된 빛을 수신하는 3개의 구멍을 통해 신호를 받게 된다. 이때, 동일한 입자에서 수신된 신호 간에 약간의 시간 지연이나 위상 차이가 발생하게 되고 위상차는 입자 직경에 비례하므로 신호의 주파수를 측정하면 속도를 얻을 수 있고, 위상차를 측정하면 입자의 직경을 얻을 수 있게 된다.

2.3 미세먼지 생성 및 농도 측정 방법

본 연구에서는 두 가지 방법으로 미세먼지를

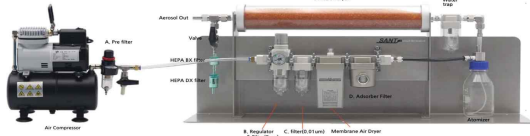


Fig. 2. Aerosol generator composition diagram used for generating fine dust with uniform size.

형성하여 제거 실험을 수행하였다. 첫 번째로 incense (향)을 태울 때 발생하는 상대적으로 크기가 큰 미세먼지를 이용하였고, 두 번째로 aerosol generator (SANT(c))를 이용하여 1 μm 와 2 μm 의 크기를 갖는 구형의 polystyrene standard 입자를 이용하여 미세먼지를 생성하였다. Air compressor를 통해 생성된 공기가 흡착제 필터를 거쳐 clean air(정화된 공기)를 생성시킨다. 생성된 clean air는 membrane air dryer 를 거쳐 atomizer에 들어가 내부에 있는 standard 입자 용액과 함께 orifice를 통해 polydisperse aerosol(다분산 에어로졸)을 생성한다. 생성된 aerosol은 water trap 과 diffusion dryer를 통해서 수분이 제거되며 aerosol out으로 배출된다 (Fig. 2).

실험에서 사용된 테스트 챔버는 투명한 유리 와 스테인레스강 프레임으로 구성되어 있다. 챔버 내부의 미세먼지 농도는 입자 계수기 (AEROTRAK 9306, TSI(c))를 사용하여 측정하였고 5분마다 2.84 l/min의 유량으로 30분 동안 연속적으로 모니터링하였다. 미세먼지 농도는 챔버 바닥에서부터 20 cm 위쪽에 위치한 측면 구멍을 통해서 측정하였고 각 실험 조건에 대해 3번의 반복 실험을 수행하였다. 미세먼지 제거 효율은 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$PM \text{ removal efficiency} = \left(1 - \frac{C_{time}}{C_{initial}}\right)$$

이때, $C_{initial}$ 은 테스트 챔버 내 초기 미세먼지 농도 값, C_{time} 는 특정 시간에서의 미세먼지 농도를 의미한다. 보다 정확한 데이터 분석을 위해서 초기 실험조건인 미세먼지 생성 직후 아무 처리도 하지 않은 상태의 챔버 내 미세먼지 농도를 측정하여 해당 데이터를 reference로 놓고

시간이 지남에 따라 챔버 내 미세먼지 농도의 변화 추이를 살펴보았다. 실험은 fume hood 안에서 진행하였고 각 실험 후에는 먼지가 없는 종이 타월과 distilled water로 테스트 챔버를 청소하였으며 매 반복 실험마다 동일한 초기조건을 유지하였다.

3. 실험 결과

3.1 생성한 Dry fog의 크기 분석

노즐에 가해진 압력을 10, 20 psi로 조절하면서 dry fog 생성 실험을 수행하였고 각 압력 별 5번의 반복실험을 진행하였다. 이때 생성된 dry fog의 크기를 0.50 μm 에서 3.5 μm 까지 0.5 μm 간격으로 분석하였다. 그 결과 submicron 크기의 dry fog를 생성하였다. 노즐에 가해진 압력이 20 psi 일 때는 약 1.5 μm , 10 psi 일 때는 약 2.0 μm 의 평균 크기를 갖는 dry fog가 생성되는 것을 확인하였다(Fig. 3).

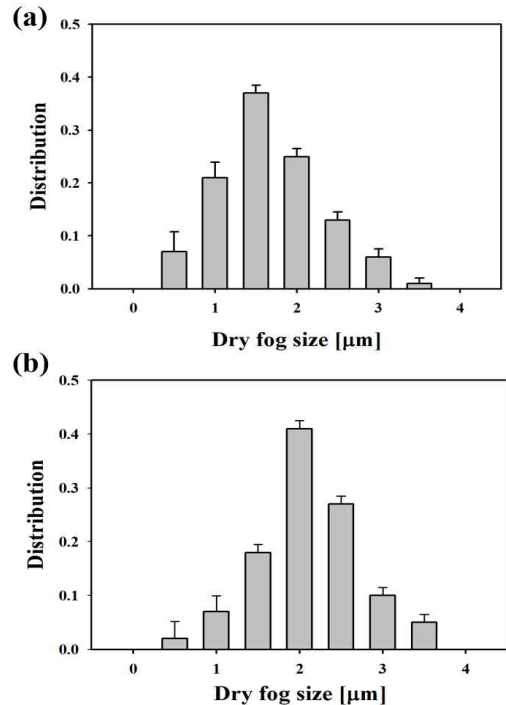


Fig. 3. Variation in dry fog size distribution according to pressure applied to the nozzle. (a) 20 psi, (b) 10 psi.

Dry fog 생성 시 사용한 노즐에는 0.5 μm 의 직경을 갖는 구멍이 1개 뚫려 있고, 물에 잠겨 있는 이 노즐로 압력이 가해질 때 노즐에서 발생하는 air jet(공기 분사)과 그 주변 액체와의 계면 사이에 작용하는 전단력으로 미세한 에어로졸이 형성되게 된다. 결과적으로 목표로 한 submicron 크기의 dry fog를 생성할 수 있었고, 가해진 압력이 세질수록 생성되는 dry fog의 크기가 작아지는 것을 확인하였다.

3.2 Dry fog의 미세먼지 제거 성능 분석

Dry fog 방식은 미세먼지와 비슷하거나 보다 작은 크기의 물 입자 생성을 통하여 air stream 현상의 발생을 최대한 줄여줌으로 인해 미세먼지

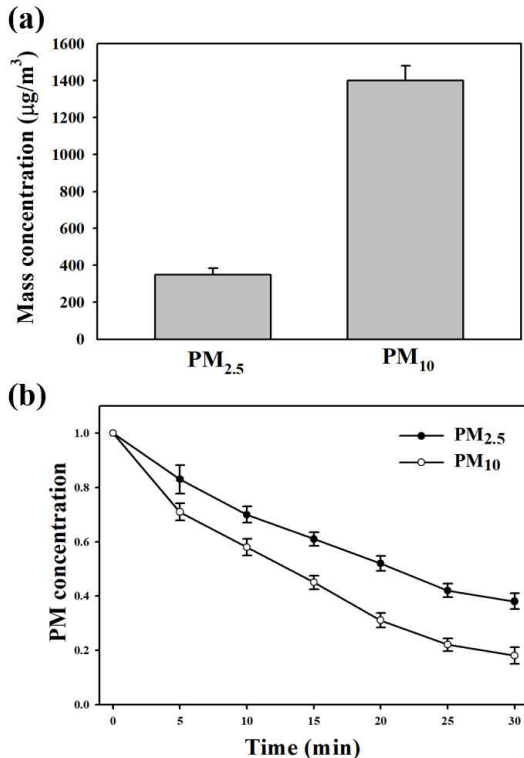


Fig. 4. (a) Size distribution of the incense as a first experimental model has fine dust particles with relatively large in size. (b) Temporal variations in PM_{2.5} and PM₁₀ particle concentrations of burning incense in the test chamber. The y-axis represents concentration relative to their initial concentrations.

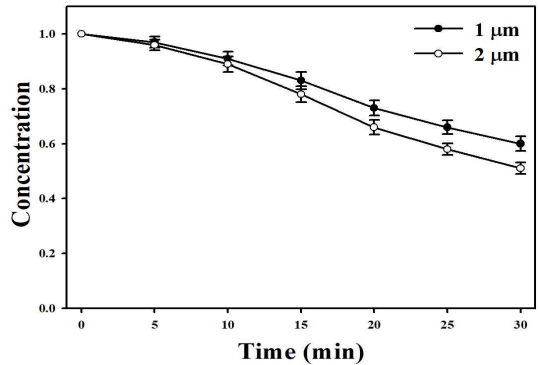


Fig. 5. Temporal variations of ultrafine dust with sizes of 1 μm and 2 μm generated in the test chamber. The y-axis represents concentrations relative to their initial concentrations.

제거에 효과적인 것으로 알려져 있는데, 이를 정량적으로 확인하기 위해 아래의 2가지 미세먼지 제거 실험을 수행하였다.

먼저 향을 이용하여 상대적으로 큰 크기를 갖는 미세먼지를 생성하여 실험 챔버로 주입하였다. 실험 진행 시 챔버 내 초기 농도는 1600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ~ 1800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 맞추었다 (Fig. 4(a)). 미세먼지 농도는 5분 간격으로 30분 동안 측정하였고, 내부에 공기 흐름을 유발하지 않고 외부와 완벽히 차단하여 20 psi로 발생된 dry fog로만 미세먼지가 제거되도록 실험을 진행하였다.

그 결과 PM_{2.5}는 5분 후 16.3%, 15분 후 38.6%, 30분 후에는 61.9%가 제거되었고, PM₁₀은 5분 후 28.6%, 15분 후 54.8%, 30분 후에는 81.9%가 제거됨을 확인하였다.

다음으로 일정한 크기(1 μm , 2 μm)를 갖는 미세먼지를 생성하여 실험 챔버로 주입하였다. 실험 조건은 앞서 향을 이용한 실험과 동일하게 설정하였고 20 psi로 생성된 dry fog를 이용하여 미세먼지 제거 정도를 시간에 따라 비교하였다.

그 결과 1 μm 의 크기를 갖는 입자의 경우 5분 후 3.9%, 15분 후 21.8%, 30분 후에는 48.8%가 제거되었고, 2 μm 의 크기를 갖는 입자는 5분 후 2.1%, 15분 후 16.3%, 30분 후에는 39.5%가 제거됨을 확인하였다.

선행연구를 통해서 PM₁₀은 PM_{2.5}보다 빠르게 바닥에 가라앉는 등 상대적으로 제거가 수월한

것으로 알려져 있다.^(11,13,14) 30분 후의 최종 실험 결과를 보면 $PM_{2.5}$ 는 PM_{10} 에 비해 제거된 정도가 떨어지지만 챔버 내 미세먼지를 형성시키고 시간에 따른 미세먼지의 증력으로 인한 제거 성능을 분석한 선행연구를 보면 30분 후 PM_{10} 의 경우 약 30%가 줄어들었고 $PM_{2.5}$ 의 경우 거의 줄어들지 않음을 알 수 있다.⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ 결과적으로 선행연구 결과들과 비교했을 때 본 연구 결과에서 개선된 최대 제거 효율을 보임을 확인하였다. 그 원인은 생성된 물방울 크기가 감소함에 따라 air stream 현상이 최소화되고 미세먼지가 물방울과 접촉할 확률이 증가하게 된 것으로 생각된다. 이 결과를 통해 초미세먼지 제거에 있어서 submicron 크기의 dry fog를 이용한 미세먼지 제거 방법이 효과적임을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 submicron 크기를 갖는 dry fog를 생성하여 미세먼지 제거 성능 실험을 수행하였다. 즉, 초미세먼지와 유사한 크기의 미세 물입자를 생성하였고, 미세먼지가 빠르게 물 입자와 응집되어 제거되는지 실험적으로 확인하였다. 그 결과 약 1.5 μm 의 평균 크기를 갖는 dry fog를 생성하였고, 이를 이용하여 미세먼지 제거 실험을 수행했을 때 30분 후 $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 는 각각 61.9%와 81.9%의 제거 효율을 나타내었다. 또한, 초미세먼지 제거 성능을 정량적으로 밝히기 위해 1 μm 와 2 μm 의 크기를 갖는 입자를 이용하여 미세먼지 제거 성능을 측정하였고 그 결과 1 μm 의 입자는 48.8%, 2 μm 의 입자는 39.5%가 제거되었다.

Dry fog는 일반 살수 대비 물 소비량이 상대적으로 적고 미세먼지 억제 효율이 높아 다양한 산업분야에서 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 일반 살수와 같이 분무된 물입자의 크기가 클 경우 대상물에 파열되어 젖게 되지만 dry fog는 대상물이 젖지 않는 효과가 있어 작업자의 안전 및 설비보호에 유리하다고 생각된다. 하지만 본 실험에서 사용한 장치는 초기 개발단계로서 앞으로 미세먼지 제거 성능 최적화 및

보완이 필요할 것으로 생각된다. 미세먼지 제거를 위해 생성된 dry fog는 미세먼지 등 어떠한 물체와 부딪히기 전까지 공기 안을 역학적으로 이동하게 된다. Dry fog의 거동에 영향을 주는 외력으로는 전기적인힘, van der Waals 힘, thermophoresis(열 영동력), 입자주위의 유체 유동에 의해 작용되는 유체 마찰력 등이 있다. 또한, dry fog의 운동특성은 입자자체가 가지는 성질 즉 입자의 크기, 밀도, 형상 등에 따라 많은 영향을 받게 되므로 이러한 요소들에 대한 후속 연구를 통해 미세먼지 제거 성능을 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 논문은 2023학년도 한남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCE

- 1) Khan, Md Firoz, et al. "Fine particulate matter in the tropical environment: monsoonal effects, source apportionment, and health risk assessment." *Atmospheric Chemistry and Physics* 16.2 (2016): 597-617.
- 2) Grantz, D. A., J. H. B. Garner, and D. W. Johnson. "Ecological effects of particulate matter." *Environment International* 29.2-3 (2003): 213-239.
- 3) Russell, Armistead G., and Bert Brunekreef. "A focus on particulate matter and health." *Environmental Science and Technology* 43 (2009): 4620-4625
- 4) Goyal, Radha, and Mukesh Khare. "Indoor air quality modeling for PM 10, PM 2.5, and PM 1.0 in naturally ventilated classrooms of an urban Indian school building." *Environmental Monitoring and Assessment* 176 (2011): 501-516.
- 5) Xia, Tian, Michael Kovichich, and Andre E. Nel. "Impairment of mitochondrial function by particulate matter (PM) and their toxic components: implications for PM-induced cardiovascular and

- lung disease." *Frontiers in Bioscience Landmark* 12.1 (2007): 1238.
- 6) Janssen, Nicole AH, et al. "Air conditioning and source-specific particles as modifiers of the effect of PM (10) on hospital admissions for heart and lung disease." *Environmental Health Perspectives* 110.1 (2002): 43-49.
- 7) Brook, Robert D., et al. "Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association." *Circulation* 121.21 (2010): 2331-2378.
- 8) Riffault, Véronique, et al. "Fine and ultrafine particles in the vicinity of industrial activities: a review." *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 45.21 (2015): 2305-2356.
- 9) Mata, Teresa M., et al. "Indoor air quality: a review of cleaning technologies." *Environments* 9.9 (2022): 118.
- 10) Kang, Dongmug, and Jong-Eun Kim. "Fine, ultrafine, and yellow dust: emerging health problems in Korea." *Journal of Korean medical science* 29.5 (2014): 621-622.
- 11) Kim, Jeongju, and Kim, Jeong J. "Solar-driven steam flow for effective removal of particulate matters (PM)." *Korean Society of Visualization* 19.3 (2021): 130-135.
- 12) Oh, Jinho, et al. "A Study on Visualization of Fine Dust Captured by FOG Droplet." *Korean Society of Visualization* 19.3 (2021): 39-45.
- 13) Chen, Jungang, et al. "The concentrations and reduction of airborne particulate matter (PM10, PM2.5, PM1) at shelterbelt site in Beijing." *Atmosphere* 6.5 (2015): 650-676.
- 14) Kwon, Kei-Jung, et al. "Comparison of the particulate matter removal capacity of 11 herbaceous landscape plants." *Journal of People, Plants, and Environment* 24.3 (2021): 267-275.
- 15) Lee, Sun Un, et al. "A sustainable water vortex-based air purification for indoor air quality." *Building and Environment* 243 (2023): 110610.
- 16) Chang, Bin, et al. "Moisturizing an analogous earthen site by ultrasonic water atomization within Han Yangling Museum, China." *Journal of Cultural Heritage* 66 (2024): 294-303
- 17) Ryu, Jeongeun, et al. "Removal of fine particulate matter (PM_{2.5}) via atmospheric humidity caused by evapotranspiration." *Environmental pollution* 245 (2019): 253-259.