

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 12, No. 4: December 2016 pp. 151-159

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2016.12.31.151>

대용량 입자 발생 장치 개발 및 이를 이용한 항바이러스 공조용 공기필터 제조

박 대 훈¹⁾ · 조 윤 행²⁾ · 황 정 호^{1)*}

¹⁾연세대학교 기계공학과, ²⁾한국에너지기술연구원 기후변화연구본부

(2016년 11월 14일 투고, 2016년 12월 26일 수정, 2016년 12월 27일 게재확정)

Development of mass aerosol particle generator and fabrication of commercial anti-viral air filter

Dae Hoon Park¹⁾, Yun Haeng Joe²⁾, Jung-ho Hwang^{1)*}

¹⁾*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University*

²⁾*Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research*

Abstract

Since airborne viruses have been known to aggravate indoor air quality, studies on development of anti-viral air filter increase recently. In this study, a mass aerosol particle generator for coating a commercial air filter (over 300x300 mm²) was built, and evaluated by comparing a commercial particle generator. Then, via this device, a commercial air filter was coated with anti-viral material (SiO₂-Ag nanoparticles in this study), so fabrication of commercial anti-viral air filter was performed and the pressure drop, filtration efficiency, and anti-viral ability of the filter were evaluated against aerosolized bacteriophage MS2 in a continuous air flow condition. The result showed that the particle generation of the new generator was more than about 8.5 times over which of the commercial one. Consequently, SiO₂-Ag particle coating on a filter does not have significant effects on the filtration efficiency and pressure drop with different areas, and the average anti-viral efficiency of the SiO₂-Ag filter was about 92% when the coating areal density was 1.0×10¹² particles/m².

Keywords : Mass aerosol, Particle generator, Air filter, Anti-viral

* Corresponding author.

Tel : +82-2-2123-2821

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

1. 서 론

현대인의 경우 생활의 대부분을 일반 주택이나, 사무실뿐만 아니라 실내 작업장, 공공건물, 학교, 병원, 상가 및 각종 교통수단(자동차, 지하철, 택시 등)을 포함한 실내공간에서 보내는 것으로 보고되고 있으며, 그에 따라 실내 공기질(IAQ, indoor air quality)에 대한 관심도 점점 높아지고 있다. 특히 도시 거주자의 경우 실내에서 보내는 시간의 비중이 더욱 크고, 고기밀화, 고단열화로 구조가 변경되면서 신선한 외기 도입의 감소함에 따라 밀폐된 공간에서의 공기 오염에 의한 피해가 더욱 클 것으로 우려된다. 최근 많은 연구와 보고서에 의하면 모든 질병의 상당수가 오염된 실내공기에 의해 발생되고 있음이 밝혀지고 있으며, 이러한 실내 공기질 저해의 주 오염원으로서 기상 부유균(bio-aerosol)이 크게 이슈화되고 있다. 실제로 기상 부유균에 의한 실내 공기질 오염에 의해 환경성질환인 천식, 아토피, 피부염, 알레르기 비염의 환자가 증가하는 추세이다(Chao, et al, 2002, Main, 2003). 또한, 최근 몇 년간 유행되었던 중증급성호흡기증후군(SARS, severe acute respiratory syndrome), 조류인플루엔자(HPAIV, highly pathogenic avian influenza virus), 신종인플루엔자(novel swine-origin influenza A) 등의 바이러스에 의한 호흡기성 질환의 전파로 인해 실내 공기질 관리 및 기상 부유균 제거 기술의 중요성이 부각되고 있다. 따라서, 많은 건축물에서 실내 공기질 개선을 위해 HVAC(heating ventilation air conditioning) 시스템을 이용하고 있다(Barhate et al, 2007, Yu et al., 2009). 이러한 HVAC 시스템은 입자상으로 부유하는 기상 부유균을 필터를 이용해 유동으로부터 분리하여 제거하는 방식이다. 그러나 HVAC 시스템을 통한 외부 공기의 유입 시, 외부 공기에 포함된 미생물이 필터 표면에 포집된 후 증식하여 실내로 유입되는 2차 오염이 발생될 수 있으며, 이 과정에서 미생물의 실내 유입뿐 만 아니라 미생물 증식 과정에서 발생하는 악취물질도 동시에 유입될 수 있다. 따라서 최근 필터 표면에 항바이러스 물질을 코팅하여 효과적으로 포집된 바이러스를 제거할 수 있는 항바이러스 필터 개발에 대한 연구들이 증가하고 있다(Park, et al, 2014, Joe, et al, 2014). 그러나 이러한 연구들의 공기필터 코팅법의 경우, 2-5 lpm의

낮은 유량에서 진행되는 에어로졸 공정을 이용하므로 Lab-scale의 필터 여재(40×40 mm²)를 코팅하기에는 적합하나, 건축물의 HVAC 시스템에 들어가는 공조용 공기필터(300×300 mm² 이상)를 코팅하기에는 적은 입자 발생량으로 인해 어려움이 있다.

본 연구에서는 실제 공조용 공기필터의 코팅에 적용될 수 있는 고유량(200 lpm 이상)에서 동작 가능한 대용량 입자 발생 장치를 개발하였으며, 이를 이용해 공조용 항바이러스 필터를 제작하였다. 또한 시험 바이러스를 비산시켜, 제작된 항바이러스 필터의 기상에서의 바이러스 제거 능력을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 대용량 입자 발생 장치 설계 및 제작

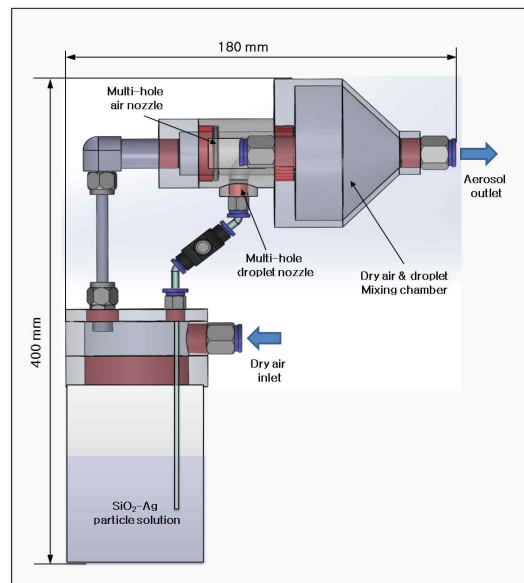


Fig. 1. Lab-made atomizer

건식 에어로졸 공법을 이용한 공조장치(HVAC)용 필터의 항바이러스 입자 코팅을 위해 고유량에서 동작 가능한 대용량 입자 발생 장치를 설계 및 제작하였다(Fig. 1). 대용량 입자 발생 장치는 압력 용기, 다공형 공기 노즐(직경 500 μm 의 원형 홀 70개), 다공형 액적 노즐(직경 500 μm 의 원형 홀 5개), 건공기-액적 혼합부로 구성되어 있다. 건공기는 항바

Table 1. Pressure drops of the SiO₂-Ag coated filter with different areas

| Vel. (m/s) | Pressure drop (Pa) | | | | | |
|---------------|--------------------|----|----|----|----|----|
| | Pristine | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 |
| 0.016 | 22 | 22 | 23 | 22 | 21 | 23 |
| 0.021 | 34 | 34 | 36 | 34 | 36 | 36 |
| 0.026 | 47 | 46 | 48 | 46 | 47 | 46 |
| 0.031 | 61 | 60 | 62 | 58 | 61 | 60 |
| 0.036 | 75 | 73 | 76 | 75 | 74 | 76 |

이러스 입자 수용액이 채워져 있는 압력 용기 내로 유입되어 다공형 공기 노즐에 의해 가속된 후 건공기-액적 혼합부를 거쳐 장치 외부로 빠져 나온다. 이때, 다공형 공기 노즐에서의 급격한 유선(stream line) 변화에 의해 압력 용기 내의 압력이 증가하게 되며, 노즐에 의해 가속된 공기의 벤츄리 효과(Venturi effect)로 인해 공기 노즐 후단에서는 압력 강하가 발생하게 된다. 압력 용기에 채워져 있는 항바이러스 입자 수용액은 공기 노즐 후단과 압력 용기와의 압력 차이로 인해 호스를 통해 공기 노즐 후단에 장착된 다공형 액적 노즐로 빨려 올라가며 건공기에 의해 에어로졸화(aerosolization)되어 건공기-액적 혼합부로 유입된다. 건공기-액적 혼합부는 에어로졸화된 액적을 건조 시키고, 장치에서 배출되는 공기 내에 입자의 분산을 균일화 하기 위해 설치되

었다. 액적 노즐의 전단에는 유량 조절 밸브를 설치하여 액적 노즐로 토출되는 액적의 양을 조절 할 수 있도록 구성하였다. 노즐 후단과 압력 용기의 압력 차이로 인해 액적 노즐로 유입되는 항바이러스 입자 수용액의 유량(Q_{liq})은 건공기와 수용액의 베르누이 수식(Bernoulli equation)에 의해 아래와 같이 결정 될 수 있다.

$$P_N - P_B = \rho_{air} (V_{up}^2 - V_{down}^2) \tag{1}$$

$$Q_{liq} = A_{LN} V_{liq} = A_{LN} \sqrt{\frac{2}{\rho_{liq}} (P_N - P_B)} \tag{2}$$

여기서 P_N 은 노즐 후단에서의 압력, P_B 는 압력 용기의 압력, V_{up} 과 V_{down} 은 각각 노즐 전단과 후단에서의 건공기의 유속, A_{LN} 은 액적 노즐에서 흡의

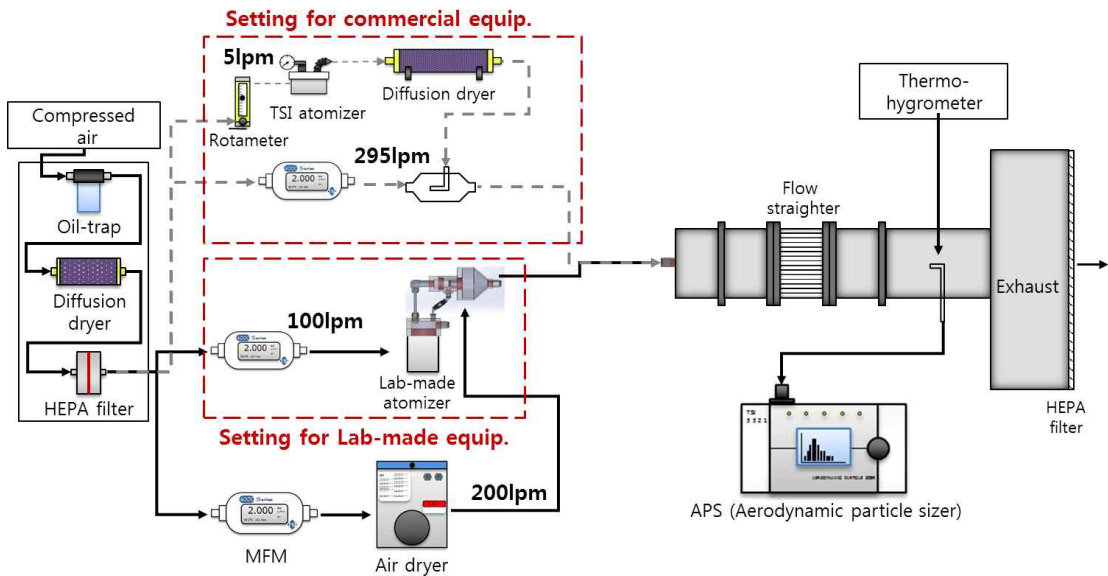


Fig. 2. Performance evaluation of Lab-made atomizer

총 넓이, V_{liq} 은 액적 노즐에서의 항바이러스 입자 수용액의 유속, ρ_{air} 와 ρ_{liq} 은 각각 건공기와 항바이러스 입자 수용액의 밀도를 의미한다.

2.2 대용량 입자 발생 장치 성능 평가

제작된 대용량 입자 발생 장치를 상용 분무 입자 발생 장치(Atomizer; model 9302, TSI Inc., USA)와 비교 평가하였다(Fig. 2). 상용 입자 발생장치의 성능 평가를 위해 오일 여과장치(Oil trap), 확산건조장치(Diffusion dryer), 헤파필터(HEPA filter)로 구성된 청정압축공기 공급장치를 거친 공기 5 lpm을 상용 입자 발생 장치에 유입시켜 시험 입자를 발생하였고, 확산건조장치를 이용해 발생된 입자의 수분을 제거하였다. 발생된 입자는 대용량 입자 발생 장치와의 비교 평가를 위해 청정공기 295 lpm과 혼합되었다. 제작된 대용량 입자 발생 장치의 경우 100 lpm의 청정 압축 공기를 대용량 입자 발생 장치의 압력 용기에 유입시켜 시험 입자를 발생하였고, 건공기-액적 혼합부에 냉동식 에어드라이어(TX15K, Jemaco, Korea)를 통해 수분이 제거된 청정압축공기 200 lpm을 유입시켜 액적 노즐을 통해 발생된 에어로졸화된 입자의 수분을 제거 하였다. 시험 입자로 는 직경 0.75 μm 크기의 PSL 입자를 사용하였으며, 각 장치에서 발생된 시험 입자를 공기역학적 입자 계수기(APS; Aerodynamic particle sizer; model 3321,

TSI Inc., USA)가 설치된 테스트 덕트(크기)로 유입시켜 입경별 수농도를 측정하였다. 또한 덕트 내에 유입된 시험 입자의 건조도를 평가하기 위해 온습도계를 설치하였다. 각각의 발생 장치가 발생시키는 입자의 수농도를 통해 발생량을 아래의 수식을 통해 계산 및 비교하였다.

$$G[\text{partides}/\text{sec}] = C[\text{partides}/\alpha] \times Q[\alpha/\text{sec}] \quad (3)$$

여기서 G 은 시간 당 입자 발생량, C 는 발생된 입자의 수농도, Q 는 유량을 의미한다.

2.3 에어로졸 공정을 이용한 필터 코팅

제작된 대용량 입자 발생 장치를 이용한 상용 공조용 필터 코팅을 위한 대면적 코팅 시스템을 아래와 같이 구성하였다(Fig. 3). 입자 발생을 위해 유량 측정 장치(MFM, mass flow meter, model 4043, TSI Inc., USA) 및 유량 제어 밸브를 이용해 150 lpm의 청정공기를 대용량 입자 발생 장치에 유입하였으며, 입자 건조 및 분산을 위해 250 lpm의 청정공기를 냉동식 에어드라이어를 거쳐 대용량 입자 발생 장치의 건공기-액적 혼합부에 유입하였다.

본 연구에서는 항바이러스 입자로 $\text{SiO}_2\text{-Ag}$ 기능성 나노 입자를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 기

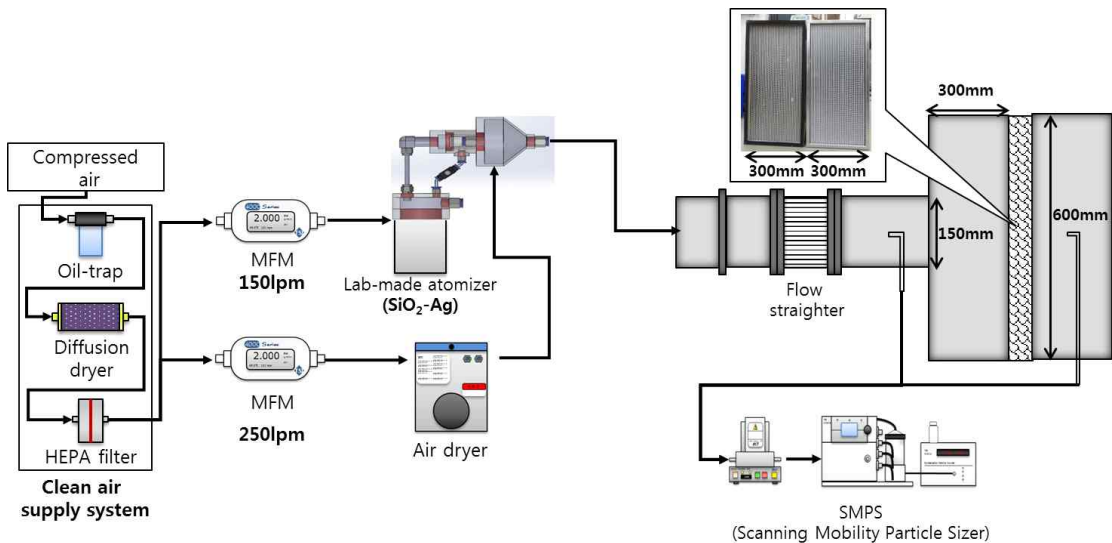


Fig. 3. Schematic for coating a commercial air filter

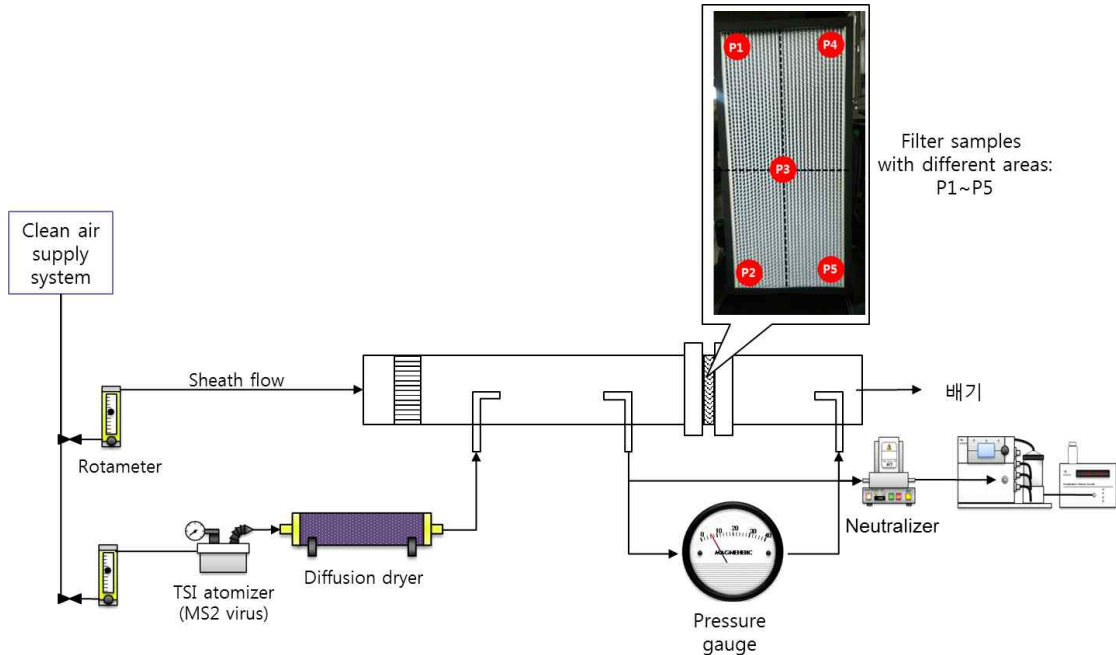


Fig. 4. Evaluation for pressure drop and filtration efficiency with different coating areas

능성 나노 입자는 제조 과정에서 용액 상의 은 나노 입자가 서로간의 응집에 의한 항바이러스 능력 저하를 최소화 시키고자, aminopropyl (AP) group으로 기능화된 실리카 표면에 은 나노 입자를 부착시켜 성장시키는 방법으로 제조하였다. 결과적으로 SiO₂ 입자 하나 당 포함하고 있는 은 나노 입자의 개수는 약 300개로, 약 18 %의 실리카 나노 입자 표면이 은 나노 입자로 덮여있는 형태로, 약 30 nm 크기의 은 나노 입자가 400 nm 크기의 SiO₂ 입자 표면에 코팅되어 있는 SiO₂-Ag 기능성 나노 입자를 제조하였다. 자세한 입자 제조 방법은 Ko et al.의 연구에 소개되어있다.

제조된 항바이러스 입자를 코팅 챔버에 설치된 필터 상에 코팅되도록 하였다. 항바이러스 입자 코팅을 위해서 600x300 mm² (총 단면적: 10 m²)의 공조용 필터를 사용하였다. 필터의 전단 및 후단에는 샘플링 포트를 설치하여 중화기(Soft X-ray charger 4530, HCT Co., Ltd., Korea), classifier controller (model 3080, TSI Inc., USA), DMA(Differential mobility analyzer; model 3081, TSI Inc., USA), CPC (condensation particle counter; model 3022A, TSI Inc., USA)로 구성된 SMPS(Scanning Mobility Particle

Sizer)을 통해 필터의 코팅 효율(η_{coat}) 및 코팅면밀도 (ρ_{coat})를 아래의 수식을 통해 계산하였다.

$$\eta_{coat} = 1 - \frac{C_{down}}{C_{up}} \quad (4)$$

$$\rho_{coat} = \frac{\eta_{coat} C_{up} Q}{A_{filter}} t \quad (5)$$

여기서 C_{up} , C_{down} 은 각각 필터 전/후단에서의 항바이러스 입자의 농도, Q 는 유량, A_{filter} 는 필터의 총 단면적, t 는 코팅 시간을 의미한다.

2.4 제조된 필터의 코팅 균일도 및 성능 평가
에어로졸 공정을 이용하여 대면적 코팅을 수행한 후, 필터의 코팅 균일도 및 성능 균일도 평가를 위해서 공조 필터의 위치별(P1~P5) 필터 샘플(40x40 mm²)을 채취하여 SEM(ESEM; XL30-ESEM, FEI, USA) 분석 및 압력손실, 바이러스 포집 효율, 바이러스 제거 효율을 평가하였다(Fig. 4). 시험 간 덕트 내 유속은 실제 필터 구동조건을 고려하여 0.015~0.035 m/s로 제어하였으며, 바이러스 포집 및 제거

성능 평가를 위해서 시험용 바이러스 입자로 분부 입자 발생장치를 통해 부유화된 박테리오파지 MS2 바이러스(Bacteriophage MS2 virus (ATCC 15597-B1))를 사용하였다. 또한 차압 측정을 위해서 필터 샘플이 장착되어있는 시험 덕트(단면적 40×40mm²)에 청정공기를 유입하고, 필터 샘플 전/후단에서의 압력손실을 측정하였다. 바이러스 포집 효율을 위해서 시험용 바이러스 입자를 시험 덕트 내에 유입하고, SMPS를 통해 필터 샘플의 전단 및 후단에서의 입경별 입자 수농도를 측정하였으며, 아래 수식을 이용해 포집 효율을 산출하였다.

$$\eta_{fil} = 1 - \frac{N_{down}}{N_{up}} \quad (6)$$

여기서 N_{up} , N_{down} 은 각각 필터 전/후단에서의 바이러스 입자의 수농도를 나타낸다.

용균반검사(plaque assay)를 통해 필터의 위치별 바이러스 제거 성능을 평가하였다. 분무 입자 발생장치를 이용하여 각각의 필터 샘플 및 일반 필터 샘플에 15분간 바이러스 입자를 포집한 후, Urea-arginine phosphate buffer (U-APB) 용액을 이용해 필터 상의 바이러스를 용액상에 용출시켰다. 바이러스가 용출된 U-APB 용액 0.1 ml와 호스트 박테리아 (*E. coli strain* C3000(ATCC 15597)) 용액 0.3ml, TSA (Tryptic soy agar) 용액 29 ml를 섞은 후, 페트리 디쉬에 도말하여 37°C의 조건에서 하루 간 배양하였다. 배양이 끝난 페트리 디쉬에 생성된 플라크의 수를 세어서, 아래의 수식을 통해 항바이러스 효율을 산출하였다.

$$\eta_{anti} = 1 - \frac{PFU_{sample}}{PFU_{pristine}} \quad (5)$$

여기서 $PFU_{pristine}$, PFU_{sample} 은 각각 필터 일반 필터, 각 위치에서의 필터 샘플을 의미한다.

3. 결과 및 토의

3.1 대용량 입자 발생 장치 성능 평가

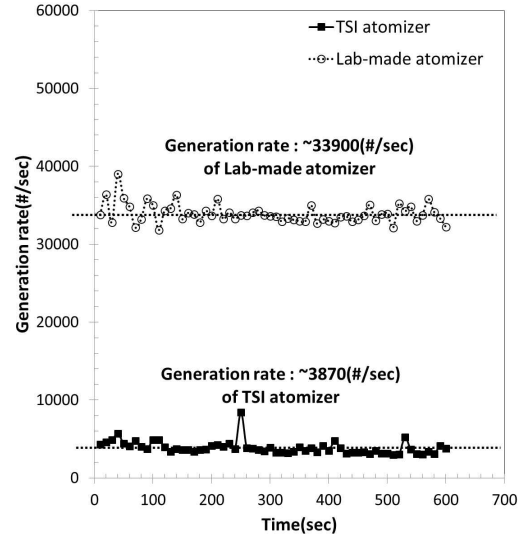


Fig. 5. Comparison of particle generation rate between Lab-made and TSI atomizer

상용 입자 발생 장치와 제작된 대용량 입자 발생 장치의 입자 발생량 비교 평가 실험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 상용 입자 발생 장치는 약 3,900 particles/sec의 입자 발생량을 보인 반면, 제작된 대용량 입자 발생 장치는 약 34,000 particles/sec의 입자 발생량을 보여 기존의 장치에 비해 약 8.5배 이상의 입자를 발생하였다. 제작 대용량 입자 발생 장치 동작 시 덕트 내의 온도와 습도는 각각 25.5°C, 33%로 유지되어 비교적 건조한 입자를 발생시킬 수 있음을 확인하였다.

3.2 에어로졸 공정을 이용한 필터 코팅

Fig. 3의 코팅 시스템을 이용해, SiO₂-Ag 기능성 나노 입자의 코팅을 진행하였으며, Fig. 4에 표시된 각각의 위치별 필터의 코팅 효율을 수식 (4)를 통해 산출하였다. P1의 위치를 제외한 모든 위치에서 99% 이상의 코팅 효율을 보였다. 입자의 유입구와의 이격거리가 큰 P1의 위치는 코팅 효율이 약 98%로 다른 위치에서의 코팅 효율보다 낮았으나 그 차이는 미비하였다. 코팅된 필터의 각 위치별 필터 샘플

플의 SEM 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. SiO₂-Ag 입자가 필터 샘플의 전면에 고르게 분포되어 있는 것을 확인하였고, 위치별 필터 샘플 간의 유의미한 차이점은 발견되지 않았다. 필터 성능 평가를 위해 33.3시간 동안 필터 상에 SiO₂-Ag 기능성 나노 입자를 코팅하였으며 이때의 코팅 면밀도는 수식 (5)를 통해 약 1.0×10¹² particles/m² 으로 계산되었다.

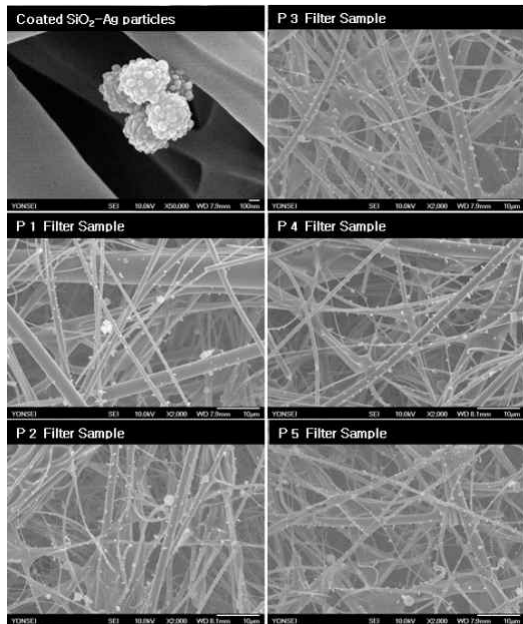


Fig. 6. FE-SEM images of the SiO₂-Ag coated filter with different areas

3.3 제조된 필터의 코팅 균일도 및 성능 평가

제조된 필터의 위치별 차압변화를 Table. 2에 나타내었다. 모든 필터 샘플에서 미디어 속도가 증가할수록 필터의 차압이 증가되는 경향을 보였다. 하지만, 필터 상에 코팅된 물질에 의한 유의미한 차압 변화는 보이지 않았으며 필터의 위치별 차압의 차이도 미미하였다. 바이러스 포집 효율의 실험 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 일반 필터의 경우, 미디어 속도가 증가할수록 바이러스 포집 효율이 감소하는 경향을 보였으나, 제작된 필터는 고속의 필터링 속도에서도 99.9% 이상의 바이러스 포집 성능을 보였다. 비교적 코팅이 양이 적을 것으로 예상되는 P1 지점의 바이러스 포집 성능이 다른 지점의 포집 성능보다 약간 떨어지는 것으로 나타나나, 그 차이는 미미하였으며, 평균적으로 99.99% 이상의 바이러스 포집 효율을 보였다.

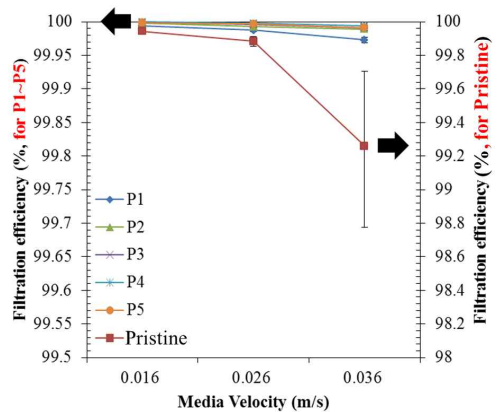


Fig. 7. Filtration efficiencies of the SiO₂-Ag coated filter with different areas

Table 2. Coating characteristics of the SiO₂-Ag coated filter with different areas

| Position | Inlet particle concentration (Particles/cm ³) | Outlet particle concentration (Particles/cm ³) | Coating efficiency (%) | Coating time (hour) | Coating areal density (Particles/m ²) |
|----------|--|---|---------------------------|------------------------|--|
| P1 | 25026 | 563 | 97.75±5 | 33.3 | 9.77501E+11 |
| P2 | 25026 | 69 | 99.87±0.07 | 33.3 | 9.98734E+11 |
| P3 | 25026 | 32 | 99.72±0.16 | 33.3 | 9.97239E+11 |
| P4 | 25026 | 96 | 99.69±0.17 | 33.3 | 9.96888E+11 |
| P5 | 25026 | 78 | 99.62±0.23 | 33.3 | 9.96152E+11 |

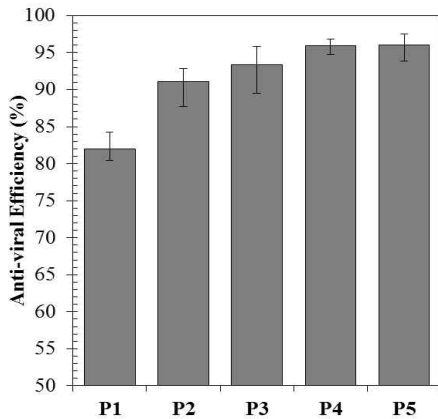


Fig. 8. Anti-viral efficiencies of the SiO₂-Ag coated filter with different areas

바이러스 제거 성능 실험 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 비교적 코팅이 양이 적을 것으로 예상되는 P1 지점의 바이러스 제거 성능은 약 82%로 나타났으나, 나머지 지점에서는 모두 90% 이상의 바이러스 제거 성능을 보였으며, P4 지점이 96%의 바이러스 제거 성능으로 최고의 성능을 보였다. 위치에 따라 약간의 항바이러스 능력 차이는 보였으나, 평균적으로 제작된 필터의 바이러스 제거 성능은 약 91.7%이었다.

4. 결 론

본 연구에서는 개발된 대용량 입자 발생 장치와 에어로졸 공정을 이용하여 SiO₂-Ag 기능성 나노 입자를 공조용 공기필터에 코팅해 항바이러스 능력을 부여하였다. 제작된 대용량 입자 발생 장치는 기존의 상용 입자 발생 장치보다 단위 시간당 약 8.5배 이상의 입자를 발생하였으며 장치에서 배출되는 공기의 온도 및 습도는 각각 25.5°C, 33 RH%로 유지되어 비교적 건조한 상태를 유지하였다. 제작된 필터의 위치별 필터의 코팅 효율은 모두 98% 이상으로 큰 차이를 보이지 않았으며, SEM 분석을 통해 비교적 고르게 코팅이 이루어진 것을 확인하였다. 제작된 필터의 성능 평가 결과, 필터 상에 코팅된 물질에 의한 유의미한 차압변화는 보이지 않았으며, 필터의 위치별 차압의 차이도 미미하였다. 바이러스

포집 효율은 고속의 여과속도에서도 평균적으로 99.9% 이상을 유지하였으며, 항바이러스 능력의 경우 위치에 따라 약간의 차이는 보였으나, 평균적으로 약 91.7%의 바이러스 제거 성능을 보였다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 (과제번호 : NRF-2015R1A2A1A01003890)과 환경부의 환경산업선진화기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- Barhate, R. S. and Ramakrishna, S. (2007) Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials, *Journal of Membrane Science*, 296(1-2), 1-8.
- Chao, H. J., Schwartz, J., Milton, D. K. and Burge, H. A. (2002) Populations and determinants of airborne fungi in large office buildings, *Environmental Health Perspectives*, 110, 777-782.
- Joe, Y. H., Woo, K. and Hwang, J. (2014) Fabrication of an anti-viral air filter with SiO₂-Ag nanoparticles and performance evaluation in a continuous airflow condition, *Journal of Hazardous Materials*, 280, 356-363.
- Ko, Y. S., Joe, Y. H., Seo, M. H., Lim, K., Hwang, J. and Woo, K. (2014) Prompt and Synergistic Antibacterial Activity of Silver Nanoparticle-Decorated Silica Hybrid Particles on Air Filtration, *Journal of Materials Chemistry B*, 2, 6714-6722.
- Main, C. E. (2003) Aerobiological, ecological, and health linkages, *Environment International*, 29(2-3), 347-349.
- Park, K. T. and Hwang, J. (2014) Filtration and inactivation of aerosolized bacteriophage MS2 by a CNT air filter fabricated using electro-aerodynamic deposition, *Carbon*, 75, 401-410.

Yu, B. F., Hu, Z. B., Liu, M., Yang, H. L., Kong, Q. X. and Liu, Y. H. (2009) Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health, *International Journal of Refrigeration*, 32(1), 3-20.