ISSN 1738-8716(Print)
ISSN 2287-8130(Online)
Particle and Aerosol Research
Par. Aerosol Res. Vol. 18, No. 1: March 2022 pp. 9-21
http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.20022.18.1.011

지하역사 승강장 공조 시스템 필터용 항바이러스 코팅 성능 및 재생 성능 평가

박대훈[1)] · 황정호[2)] · 신동호[1)] · 김영훈[1)] · 이건희[1)] · 박인용[1)] · 김상복[1)] · 홍기정[1)] · 한방우[1)*]
[1)]한국기계연구원 환경기계연구실
[2)]연세대학교 기계공학과

(투고 2022년 2월 4일, 수정 2022년 3월 17일, 게재확정 2022년 3월 18일)

Development of Optimal Antiviral Coating Method for the Air Filtration System of Subway Station

Dae Hoon Park[1)] · Jungho Hwang[2)] · Dongho Shin[1)] · Younghun Kim[1)] · Gunhee Lee[1)] · Inyong Park[1)] · Sang Bok Kim[1)] · Keejung Hong[1)] · Bangwoo Han[1)*]
[1)]Department of Environmental Machinery, Korea Institute of Machinery and Materials
[2)]Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

(Received 04 February 2022; Revised 17 March 2022; Accepted 18 March 2022)

Abstract

In this study, a novel antiviral coating method for the air filtration system of subway station was investigated. Using dry aerosol coating process, we developed a high-performance antiviral air filter with spark discharger and carbon brush type ionizer. Silver nanoparticles were produced by a spark discharge generation system with ion injection system and were used as antiviral agents coated onto a medium grade air filter. The pressure drop, filtration efficiency, and antiviral ability of the filter against aerosolized MS2 virus particles as a surrogate of SARS-CoV-2 virus were tested with dust contamination. Dust contamination caused the increase of the filtration efficiency and pressure drop, while the antiviral agents (in this study, silver nanoparticles) coating did not have any significant effect on the filtration efficiency and pressure drop. Using these properties, we suggested a novel method to maximize the antiviral performance of the antiviral air filter that was contaminated by dust particles. Moreover theoretical analysis of antiviral ability with dust contamination and re-coated antiviral agents was carried out using a mathematical model to calculate the time-dependent antiviral effect of the filter under actual conditions of subway station. Our model can be used to apply on antiviral air filtration system of subway station for prevention of pandemic diffusion, and predict the life cycle of an antiviral filter.

Keywords: Antiviral air filter, Bioaerosols, Air filtration system, Indoor air quality, Subway station

*Corresponding author.
Tel : +82-42-868-7068, Fax : +82-42-868-7284
Email : bhan@kimm.re.kr

1. 서론

코로나바이러스감염증-19 (COVID-19)은 신종코로나바이러스 (Severe Acute Respiratory Syndrome-Coronavirus-2; SARS-CoV-2)를 병원체로 하여 전파되는 감염증(Britton et al, 2020; Nie et al, 2020)으로, 2019년 중국에서 처음 발병하여 2021년 9월 현재까지 전 세계를 공포로 몰아넣은 감염병이다. (2021년 9월30일 기준 전 세계 누적 확진자 수 : 약 2억3천3백만 명, 사망자 수 : 약 477만 명)(Center for Systems Science and Engineering, 2021) 이는 우리나라도 예외가 아니다. 2021년 국내 확진자 수는 9월 현재까지 가파르게 상승하여 9월25일 3,271명의 최다 확진자 수를 보였으며, 이 경향은 서울 확진자 수 경향과도 일치하였다(Korea Centers for Disease Control & Prevention, 2021). (그림 1) 서울 시민들을 포함한 전 국민이 코로나 확진 위험에서 자유롭지 못하다는 것을 시사한다.

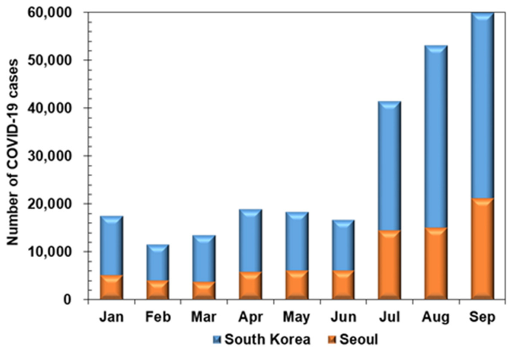

Figure 1 Number of COVID-19 cases in South Korea and Seoul in 2021

특히, 불특정 다수의 사람들이 이용하는 지하철 이용에 대한 국민의 불안감이 커지고 있다. 인구밀도가 집중되어있는 서울 지하철은 2020년 하루 평균 약 542만명이 이용하고 출퇴근 시간대에 약 150만명(서울교통공사 제공)이 이용하는 대규모의 실내 시설이기 때문에 감염의 위험에서 자유롭지 않으며 감염이 일어날 경우 감염 경로를 파악하는 것 또한 어렵다. 서울교통공사에서는 역마다 출입문이 열리고 닫힐 때 자연 환기되고 지하철 역사 내 승강장과 대합실은 자체 공조 시스템이 가동되어 공기의 정화 및 환기가 원활히 일어나고 있기 때문에 마스크만 잘 쓴다면 감염 확률은 매우 낮을 것이라고 밝혔으나, 미국 질병통제예방센터에서 코로나 바이러스의 비말 및 에어로졸 등의 공기흡입을 통한 감염이 주요 전염방식으로 최근 인정된 사실(Centers for Disease Control & Prevention, 2021; Wang et al, 2021)과 더불어, 지하철 역사 내 공기 중에 코로나 바이러스가 검출되는 해외 사례가 여러 차례 보고되고 있으며, (Hadei et al, 2021; Moreno et al, 2021) 공조 시스템이 보다 엄격하게 동작하는 병원 내의 음압 병동의 환기구에서 조차도 코로나 바이러스가 검출되는 연구 결과가 발표(Ahn et al, 2020)되고 있기 때문에 지하철 역사 내에서의 코로나 바이러스 확진 가능성을 배제시킬 수 없다. 따라서 지하역사 내 실내 공기질 제어의 중요성이 대두되고 있다.

지하역사 내 실내 공기는 에어필터가 포함된 공기조화기(이하 공조기)로 관리되는데, 에너지 절감을 위해 외부에서 유입되는 공기와 일부 실내에서 리턴되는 공기를 혼합하여 실내로 유입하고 있다. 공조기에 포함된 에어필터는 대부분 미세먼지를 여과하는 데에 초점이 맞추어져 있기 때문에(Jung et al, 2008; Kwon et al, 2010; Kim et al, 2010) 코로나 바이러스와 같은 바이오에어로졸(Bioaerosol)을 포함한 미생물 오염에 취약하다. 실제로 최근 대중교통에 활용되는 공조 시스템 에어필터에서 코로나 바이러스가 검출이 되고(Hadei et al, 2021), 필터 위에서 장시간 동안 생존성 및 감염성을 유지할 수 있다는 연구 결과(Chin et al, 2019)가 발표됨에 따라서 코로나 바이러스에 오염된 공조 시스템에 의해 코로나 바이러스가 포함된 실내 공기가 다시 지하역사로 유입되고 널리 순환되어 감염의 대확산을 초래시킬 수 있다. 최근 지하역사 내의 항바이러스 성능이 탑재된 대용량 공기청정기 개발 및 보급(Park et al, 2019b)을 통해 코로나 바이러스 확진을 막는 노력을 하고 있으나, 이는 공기청정기가 위치되어 있는 공간에 국부적인 효과만을 나타내기 때문에 지하역사 내의 공기 전체를 순환시키는 공조기에 항바이러스 기술이 반드시 도입될 필요가 있다. 따라서 공조기에서 실내 공기를 정화하는데 사용되는 에어필터 표면에 항바이

러스 물질을 코팅하여 코로나 바이러스와 같은 바이오에어로졸이 여과됨과 동시에 감염성을 잃게 만드는 기술이 지하역사 내 감염의 확산을 효과적으로 막을 수 있는 방법으로 제안될 수 있다.

또한 지하역사 내 공조기의 에어필터는 실내/외 미세먼지 등의 오염물질이 쉽게 유입되면서 필터의 기공이 막히고 압력손실(Pressure drop)이 급격하게 상승하게 된다. 먼지에 의해 필터의 압력손실이 일정 이상 커지면 공기가 필터를 통과할 수 없게 되기 때문에 필터를 교체 해야하는 시기가 도래하면서 필터의 수명이 짧아지는 문제로 운영상 애로사항을 가지게 된다(Xu et al, 2013). 항바이러스 필터의 경우, 먼지에 의해 상승하는 압력손실 뿐만 아니라, 항바이러스 처리가 된 필터의 표면이 먼지에 의해 가려지며 필터의 항바이러스 성능이 급격하게 저하되기 때문에 항바이러스 성능 저하 부분도 필터의 수명에 영향을 주게 된다(Joe et al, 2016). 따라서 항바이러스 필터의 수명을 최대화 시키기 위해 필터의 미세먼지 오염에 따른 항바이러스 성능 저하 정도를 정확히 예측하고 보완할 수 있는 기술 개발의 필요성이 대두된다.

본 연구에서는 건식 에어로졸 공법을 이용하여 지하역사 공조기용 필터에 고성능의 항바이러스 능력을 부여하고, 미세먼지 오염에 의해 저하되는 항바이러스 성능을 다시 재생시키는 방법을 제안함과 동시에 이를 이용해 필터의 수명을 최대화 시킬 수 있는 방법을 수식적으로 모델링 하였다. 또한 이를 실제 바이오에어로졸(부유 바이러스)을 대상으로 저감 성능을 평가하여 본 연구 결과의 실효성을 검증하였으며, 궁극적으로 실제 지하역사 승강장의 조건을 모사하였을 경우 공조 시스템에 적용되는 최적의 항바이러스 솔루션을 제시하였다.

2. 실험방법

2.1 건식 에어로졸 공정을 이용한 지하역사 고성능 공조기용 항바이러스 필터 제작

본 연구에서는 공조기용 필터에 대표적인 항바이러스 물질로 알려진 은나노 입자를 코팅하여 항바이러스 능력을 부여하였다. 서울시 지하역사 공조기에서 많이 사용되고 있는 판넬형 부직포 필터 여재(Hwang et al, 2010)를 선정하여 코팅 공정에 사용하였으며, 여재의 특성을 표 1에 나타냈다.

Table 1. Specification of air filter in this study

Specification	
Material	Glass fiber
Thickness (L)	0.045 ± 0.005 cm
Solidity (α)	0.009 ± 0.0005
Fiber diameter (d_f)	1.1 ± 0.35 μm

Rod-to-Rod 타입의 스파크 방전 장치를 사용하여 은나노 입자를 에어로졸 형태로 발생시켰으며, 은나노 입자의 비표면적 증가 및 코팅의 균일도 향상을 위해 카본 섬유 이온 발생기를 스파크 채널 전단에 설치하여 단극성 이온을 다량으로 주입하였다. 코팅 공정으로는 에어로졸 공정을 이용한 건식 코팅 공정을 사용하였다.

그림 2a에 건식 에어로졸 공정을 이용한 항바이러스 물질 코팅 공정을 나타냈다. 스파크 방전을 이용해 발생시킨 은나노 입자를 항바이러스 물질로 사용하였다. 스파크 방전기에는 지름 10 mm, 길이 100 mm의 Rod 타입 은 전극 (AG-402651, Nilaco, Japan) 두 개를 300 μm 간격으로 이격시켜 사용하였으며, 스위칭 회로가 내장되어 있는 고전압 발생기를 이용해 펄스 폭 변조 교류 전원 (전압 : 3.5 kV, 주파수 : 4.0 kHz, BPI-2K, Best Power) 을 인가해주었다. 전원을 통해 일정한 전류가 공급되면, 전극 양단 사이에 전압이 상승하게 된다. 전극 사이의 전압이 스파크 방전 개시 전압이 되면, 전극 사이의 공기 절연 파괴로 인해 순간적으로 전기적 에너지가 전극 사이로 방전되어 스파크가 발생하게 된다. 스파크 방전기 안으로 유입된 이송유체(carrier gas)는 방전에 의해 방출된 전자와의 충돌에 의해 이온화된다. 이온화된 이송유체와 방출된 전자는 은 전극과 충돌을 일으키며 국부적으로 전극 표면의 온도를 초고온으로 만들어 전극 표면을 기화시킨다. 기화된 은 가스는 유동을 타고 방전영역을 벗어나며 급속히 냉각되어, 응축 및 응집 과정을 통해 은나노 에어로졸이 된다(Byeon et al, 2008). 이 때, 스파크 영역에 다량

의 단극성 이온을 주입할 경우 응축된 에어로졸이 순간적으로 단극성으로 하전되어 에어로졸 간의 전기적 척력에 의해 응집이 극한으로 억제되어 약 수 nm 수준의 매우 작은 은나노 에어로졸을 얻을 수 있다고 보고된 바 있다(Park et al, 2020a). 응집이 억제된 은나노 입자는 응집된 은나노 입자에 비해 비표면적이 넓기 때문에 필터에 코팅되었을 시 높은 항바이러스 성능을 보일 것으로 기대할 수 있다.

$$\eta_{coat} = 1 - \frac{C_{down}}{C_{up}} \tag{1}$$

$$\rho_{coat} = \frac{\eta_{coat} C_{up} Q}{A_{filter}} t \tag{2}$$

여기서 C_{up}, C_{down}은 각각 필터 전/후단에서의 은나노 입자의 농도, Q는 유량, A_{filter}는 필터의 총 단면적, t는 코팅 시간을 의미한다. 또한 필터 상에

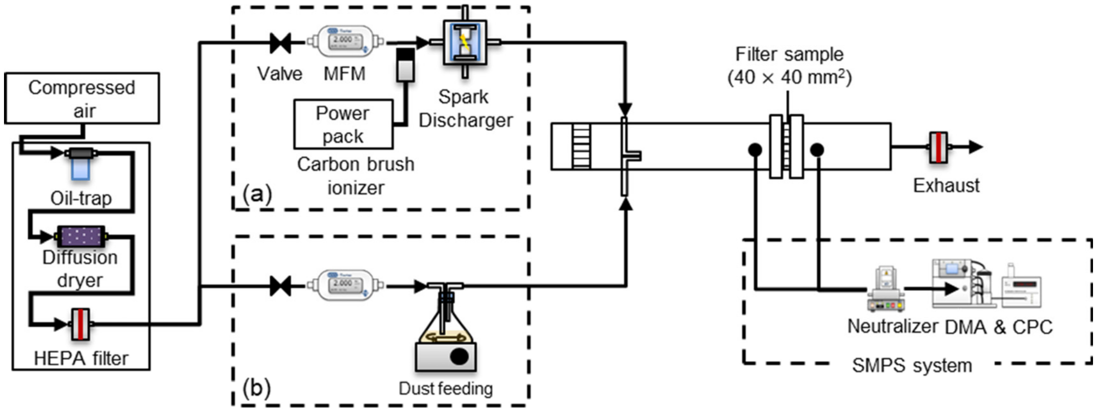

Figure 2 Schematic for (a) antiviral coating and (b) dust loading process an air filter

은나노 에어로졸 발생을 위해 오일 여과장치(Oil trap), 확산건조장치(Diffusion dryer), 해파필터(HEPA filter)로 구성된 청정압축공기 공급장치를 거친 청정공기를 유량 측정 장치(MFM, mass flow meter, model 4043, TSI Inc., USA) 및 유량 제어 밸브를 이용해 2 L min^{-1} 의 유량을 스파크 방전 장치에 유입하였으며, 제조된 은나노 에어로졸 입자를 원패스 덕트에 설치된 필터 (40 × 40 mm2) 상에 코팅되도록 하였다. 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.

은나노 입자가 적절히 코팅되어 있는지를 평가하기 위해 주사전자현미경 (field emission scanning electron microscope; FESEM; JSM-7610F-Plus, JEOL, Japan) 분석을 수행하였다. 또한 코팅 후 필터의 압력손실, 입자 제거 성능 및 항바이러스 성능의 변화를 평가하였다.

2.2 지하역사 공조기용 필터 미세먼지 오염 모사

그림 2b에 제작된 지하역사 공조기용 항바이러스 필터의 미세먼지 오염 모사 공정을 나타냈다. 시험 먼지는 ISO 12103-1 규격 표준 먼지이자 지하철에서 발생하는 미세먼지의 특성과 가장 유사하며 그 모사체로 사용되는 아리조나 시험 먼지 (Arizona test dust A4)를 사용하였다(Woo et al, 2018). 유리 삼각 플라스크와 막대자석 및 교반기로 구성된 Lab-made dust feeder에 아리조나 시험 먼지를 일정량 넣고 5 L min^{-1} 의 청정 공기를 흘려주어 시험 먼지가 원패스 덕트에 설치된 필터

($40 \times 40\ mm^2$) 상에 포집하였다. 필터에 포집된 먼지의 질량을 포집 전, 후의 필터 무게를 전자식 미세 저울 (AS 82/220, RADWAG Corp., Poland)을 통해 측정하였다. 먼지의 포집에 의해 변화하는 필터의 압력손실 ($\triangle P$)은 아래와 같은 수식으로 계산될 수 있다(Brown, 1993).

$$\triangle P = \frac{4\mu\alpha L u_0 (1+1.996Kn)}{0.25 d_f^2 \left[-0.5\ln\alpha - 0.75 + \alpha - \frac{\alpha^2}{4} + 1.996Kn\left(-0.5\ln\alpha - 0.25 + \frac{\alpha^2}{4}\right)\right]} \tag{3}$$

여기서 L은 필터의 두께, μ는 공기의 동점성계수 (dynamic viscosity), d_f는 필터 섬유의 직경, Kn은 크누센 수 (Knudsen number), 그리고 u_0는 필터를 통과하는 유속을 의미한다. 필터의 충진율 (solidity)을 의미하는 α는 포집되는 먼지에 따라 변화하기 때문에 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\alpha = \alpha' + \alpha_{dust} \tag{4}$$

여기서 α'는 먼지가 포집되기 전 필터의 충진율이고, α_{dust}는 먼지의 포집에 의해 상승한 필터의 충진율이며 이는 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\alpha_{dust} = \frac{volume\ of\ loaded\ dust}{volume\ of\ the\ sample} = \frac{\rho_{dust} A_{filter} / \rho_p}{A_{filter} L} \tag{5}$$

여기서 ρ_p는 먼지의 유효 밀도 (effective dust particle density)로 본 연구에서 사용된 아리조나 시험 먼지의 유효 밀도는 화학 조성을 고려하여 3.1 $g\ cm^{-3}$로 설정되었다(Joe et al, 2016).

본 연구에서는 지하역사 내 공조기 필터의 시험기준에 맞춰 시험풍속이 2.5 $m\ sec^{-1}$인 시험조건에서 압력손실이 초기에 비해 2배로 늘어났을 때를 필터의 수명이 다한 것으로 판단하였으며(Kim et al, 2010), 따라서 면적당 먼지 포집량 (ρ_{dust})을 0 (먼지 포집 전 필터), 330±54, 660±85, 1000±93 $\mu g\ cm^{-2}$ 총 네 가지로 설정하였다. 또한 먼지 포집 후 필터의 압력손실, 바이러스 포집 성능 및 항바이러스 성능의 변화를 평가하였다.

2.3 에어로졸 공정을 이용한 항바이러스 성능 재생

여러 선행연구들에서 섬유형 필터에 nm 수준의 항바이러스 입자를 코팅하여 항바이러스 성능을 부여한 경우, 코팅 물질에 의한 압력손실의 변화가 유의미하지 않게 나타났다(Joe et al, 2014; Joe et al, 2016; Gautam et al, 2019; Park et al, 2019a; Park et al, 2019b, Park et al, 2020a; Park et al, 2021). 이는 압력손실의 변화는 미세먼지 오염이 주된 원인임을 시사한다. 또한 항바이러스 필터의 경우, 미세먼지 오염이 압력손실의 증가보다 항바이러스 성능의 저하에 상대적으로 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(Joe et al, 2016). 즉, 미세먼지 오염에 의해 필터의 압력손실이 초기에 비해 2배로 늘어나는 것 보다 필터의 항바이러스 성능이 먼저 저하되어 항바이러스 필터로써의 기능을 하지 못하게 되어 필터의 실질적인 수명이 다해버리는 것이다.

본 연구에서는 지하역사 내 공조기 적용 항바이러스 필터가 미세먼지 오염에 의해 일정 이하로 항바이러스 성능이 저하될 경우 에어로졸 공정을 이용한 항바이러스 물질을 재코팅하여 항바이러스 성능을 재생시켰다. 그림 3에 항바이러스 성능 재생 실험의 개념도를 나타냈다. 그림 2b과정을 통해 미세먼지 오염에 의해 항바이러스 성능이 50 % 이하가 될 경우 그림 2a의 과정을 통해 은나노 입자를 재코팅하였고 재코팅하였을 시 필터의 압력손실, 바이러스 포집 성능 및 항바이러스 성능의 변화를 평가하였다.

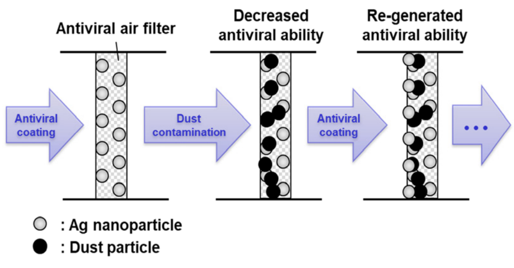

Figure 3 Concept for regeneration of antiviral ability of the filter

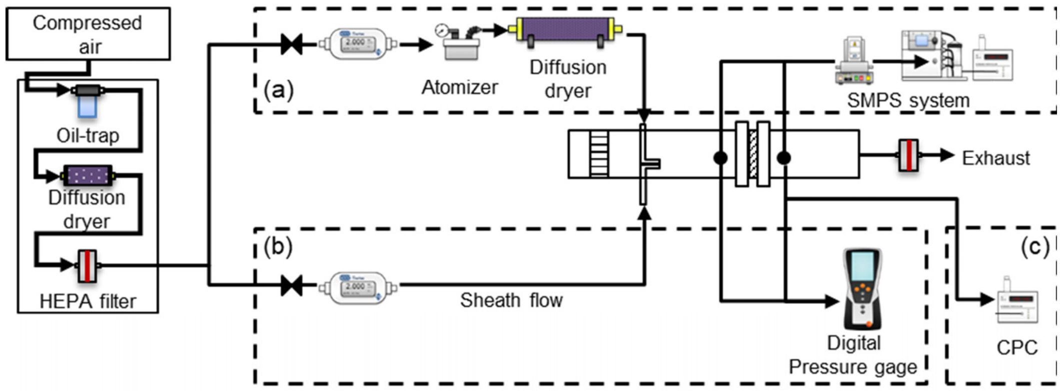

Figure 4 Schematic for (a) bioaerosol filtration efficiency test, (b) pressure drop test, and (c) detachment test

2.4 제조된 항바이러스 필터의 성능 평가 (바이러스 포집 및 항바이러스 성능, 압력손실, 코팅 물질 탈착률)

제조된 지하역사 공조기용 항바이러스 필터의 바이러스 포집 및 항바이러스 성능 (그림 4a), 압력손실 (그림 4b), 코팅 물질 탈착률 (그림 4c)을 평가하였다.

기상 부유 바이러스 포집 및 항바이러스 성능 평가를 위해서 시험용 바이러스 입자로 코로나 바이러스와 같은 RNA 바이러스이며 감염성 바이러스의 모사체로 많이 사용되는(Joe et al, 2016; Park et al, 2019b; Park et al, 2020a; Park et al, 2020b; Kang et al, 2021) 박테리오파지 MS2 바이러스 (Bacteriophage MS2 virus (ATCC 15597-B1))를 분무 입자 발생장치 (Atomizer, 9302, TSI Inc., USA)를 통해 에어로졸화시켜 사용하였다. (그림 4a) 시험간 덕트 내 유속은 분무 입자 발생장치의 구동조건을 고려하여 0.05 m sec^{-1}로 제어하였다. 바이러스 포집 효율 측정을 위해서 시험용 바이러스 입자를 시험 덕트 내에 유입하고, SMPS를 통해 필터 샘플의 전단 및 후단에서의 입경별 입자 수농도를 측정하였으며, 아래 수식을 이용해 포집 효율(η_{filt})을 산출하였다.

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

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

용균반검사 (plaque assay)를 통해 필터의 항바이러스 성능을 평가하였다. 분무 입자 발생 장치를 이용하여 각각의 필터 샘플 (코팅이 되지 않은 필터 및 제조된 필터)에 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 (Trypic soy agar) 용액 29 ml를 섞은 후, 페트리 디쉬에 도말하여 37℃의 조건에서 하루 간 배양하였다. 배양이 끝난 페트리 디쉬에 생성된 플라크의 수를 세어서, 아래의 수식을 통해 항바이러스 효율(η_{anti})을 산출하였다.

$$\eta_{anti} = 1 - \frac{PFU_{sample}}{PFU_{pristine}} \quad (7)$$

여기서 $PFU_{pristine}$, PFU_{sample}은 각각 코팅이 되지 않은 필터 샘플과 제조된 필터 샘플에서 용출되어 나온 플라크 수 (Plaque forming unit; PFU)를 의미한다.

제조된 필터의 압력손실 측정을 위해서 필터 샘플이 장착되어있는 시험 덕트에 청정 공기를 유입하고 지하역사 내 공조기 필터의 시험 기준에 맞춰 시험풍속 2.5 m sec^{-1}으로 제어하여, 필터 샘플

전, 후단에서의 압력손실을 디지털 압력계 (Model 435-1,Testo, Germany)를 이용하여 측정하였다. (그림 4b) 또한 코팅 물질의 탈착률을 평가하기 위해 같은 조건에서 필터 후단에 CPC를 장착하여 60분간 탈착되는 입자 수를 측정하였다. (그림 4c)

3. 결과 및 토의

3.1 건식 에어로졸 공정을 이용한 지하역사 고성능 공조기용 항바이러스 필터 제작

그림 5a 에서 스파크 영역에 다량의 단극성 이온 (음이온 농도: ~10^7 ions cm^{-3})를 주입하여 발생시킨 은나노 입자의 크기 분포를 나타내었다. 이온을 주입하지 않은 경우 입경의 최빈값은 약 25.94 nm, 수농도는 6.11 × 10^6 particles cm^{-3}, 이온을 주입한 경우 입경의 최빈값은 약 10.55 nm, 수농도는 3.47 × 10^6 particles cm^{-3}를 보였다. 선행연구와 마찬가지로 스파크 영역에 다량의 단극성 이온을 주입할 경우 응축된 에어로졸이 순간적으로 단극성으로 하전되어 에어로졸 간의 전기적 척력에 의해 응집이 억제되어 더 작은 은나노 에어로졸을 발생시킬 수 있던 것으로 생각된다(Park et al, 2020a). 또한 이를 필터 상에 같은 양 (ρ_{coat}: 10^{10} particles cm^{-2})을 코팅하였을 때 이온을 주입하여 코팅한 필터에서 응집이 억제되어 비표면적이 넓은 입자들이 더 고르게 분포한 것을 SEM 이미지를 통해 확인 할 수 있었다 (그림 5b). 또한 실제로 항바이러스 성능이 비표면적이 넓은 입자가 코팅된 필터가 더 우수하고 편차가 적은 것을 확인 할 수 있었다 (그림 5c). 따라서, 본 연구에서는 건식 에어로졸 공법을 이용하여 지하역사 공조기용 필터에 고성능의 항바이러스 능력을 부여하기 위해 스파크 방전 전단에 다량의 단극성 이온을 흘려주어 고성능의 항바이러스 필터를 제작하였다. 필터 후단에서의 수농도는 3.34 × 10^5 particles cm^{-3}을 보여, 필터 코팅 효율은 약 90.4%를 보였으며, 이를 이용하여 4가지 종류의 코팅 면밀도 (0, 2.0 × 10^9, 6.0 × 10^9, 1.0 × 10^{10} particles cm^{-2})를 가지는 필터 샘플을 제작하였다.

3.2 지하역사 공조기용 필터 미세먼지 오염 모사 및 항바이러스 성능 재생

그림 6a 은 코팅면밀도 및 미세먼지 오염도 (먼지 포집량)에 따른 필터의 압력손실을 변화를 나타낸다. 지하역사 공조기용 필터의 시험 기준에 맞춰 시험 풍속 2.5 m sec^{-1}인 시험조건에서 수행되었다. 실험결과 값들은 식(3)에서 먼지의 포집에 의해 변화하는 필터의 압력손실 계산 값과 유사한 경향을 보였다. 또한 코팅면밀도에 따른 압력손실의 변화는 미미하였으나, 미세먼지 오염도에 따른 압력손실의 변화는 극명하게 나타났다. 이는 바이러스 포집 성능 결과에도 확인할 수 있다. 그림 6b 에서는 제작된 필터의 기상 부유 바이러스인 박테

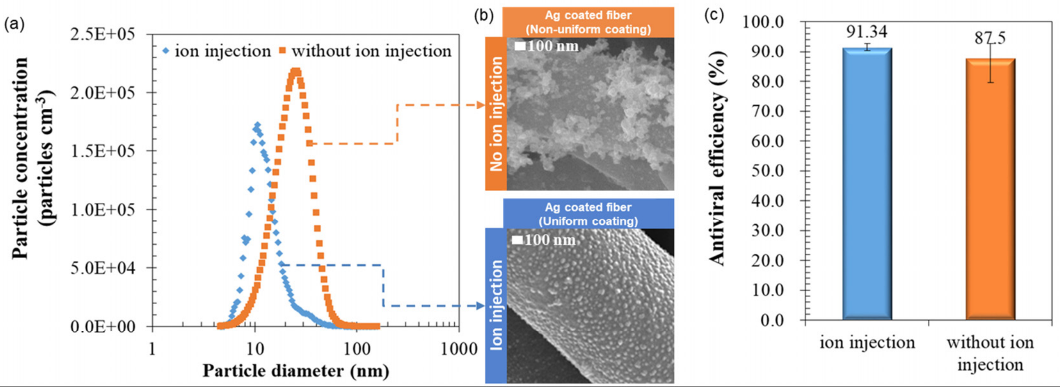

Figure 5 (a) Size distributions of Ag nanoparticles, (b) FE-SEM images and (c) antiviral efficiencies of the Ag coated filters with or without ion injection

리오파지 MS2 바이러스 포집 성능 결과를 나타낸다. 바이러스 에어로졸의 입경 최빈값은 20.1 nm, 수농도는 1.63 × 10^6 particles cm^{-3}를 보였다. (그림 6b, inset) 선행 연구에서 미세먼지 오염에 따른 필터의 포집 성능 변화는 아래의 식과 같이 나타난다(Brown et al, 1988).

$$\eta_{filt} = 1 - P_0 \exp(-\beta \rho_{dust}) \tag{8}$$

여기서 P_0는 먼지가 포집되기 전 필터의 투과율(penetration), 그리고 β는 필터의 재질이나 성능을 대변하는 계수이다. 본 연구에서는 β는 1.75 × 10^{-3} cm^2 μg^{-1}로 설정할 경우 계산식과 실험 결과의 일치도가 높았다. 필터의 포집 성능면에서도 코팅면밀도에 따른 변화는 미미하였고, 미세먼지 오염도에 따른 변화는 극명하게 나타났다. 이는 은나노 입자의 코팅으로 인한 필터의 충진율 증가보다 미세먼지 오염으로 인한 필터의 충진율 증가가 월등히 크기 때문이다. (100,000 배 수준). 따라서, 미세먼지 오염은 필터 상의 유동을 방해하여, 압력손실과 포집 효율을 극명하게 높이며(Joe et al, 2016), 은나노 입자 코팅 필터 상의 유동을 유의미하게 방해하지 않기 때문에 필터의 성능 (압력손실과 포집 효율)에 유의미하게 변화시키지 않는다고 할 수 있다. 이에 착안하여 미세먼지 오염으로 인해 항바이러스 성능이 저하된 필터에 다시 재코팅을 해줌으로써 필터의 성능 변화없이 항바이러스 성능만 재생시키는 방법을 고안하였다. 그림 6c 에서는 코팅면밀도 및 미세먼지 오염도에 따른 제작된 필터의 기상 부유 바이러스에 대한 항바이러스 성능 결과를 나타낸다. 항바이러스 성능의 경우 코팅면밀도가 증가할수록 증가하였으며, 미세먼지 오염도가 낮아질수록 확연히 증가하는 경향을 보였다. 코팅면밀도가 1.0 × 10^{10} particles cm^{-2}이고 미세먼지 오염도가 0일 때 약 90.2 %의 항바이러스 성능을 보였으며, 코팅면밀도가 1.0 × 10^{10} particles cm^{-2}이고 미세먼지 오염도가 330 μg cm^{-2}일 때 약 52.5 %의 항바이러스 성능을 보였다.

위 조건에서 본 연구에서 설정한 항바이러스 성능 재생 실험 기준 (항바이러스 성능 50 % 이하)과 은나노 입자 재코팅을 통한 항바이러스 성능 재생 실험을 수행하였다. 그림 7a는 코팅면밀도가 1.0 × 10^{10} particles cm^{-2}이고 미세먼지 오염도가 330 μg cm^{-2}인 항바이러스 필터를 재코팅 하였을 때, 재생되는 항바이러스 성능을 평가한 것이다. 재코팅 면밀도 ($\rho_{re\text{-}coat}$)가 3.0 × 10^9 particles cm^{-2} 될 때, 항바이러스 성능이 90 %까지 재생되는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 은나노 입자 재코팅을

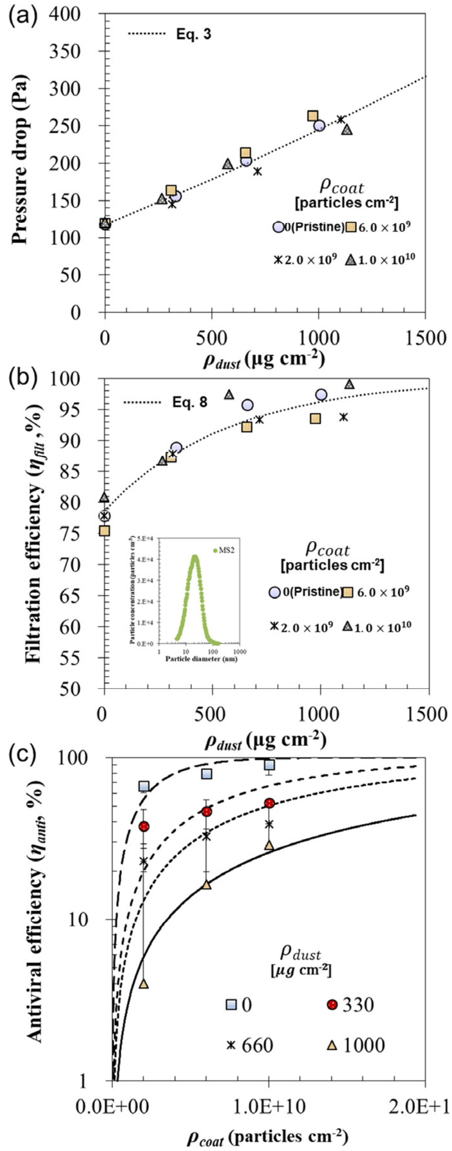

Figure 6 (a) Pressure drops, (b) filtration efficiencies and antiviral efficiencies of the Ag coated filters with various coating areal densities

통해 압력손실 또는 바이러스 포집 효율은 유의미하게 변하지 않음을 확인하였다. (그림 7b) 위 결과를 통해 항바이러스 필터의 경우 미세먼지 오염으로 인한 압력손실의 증가로 인한 필터의 수명이 다하기 전에, 항바이러스 성능 저하로 인한 필터의 수명이 먼저 다한다는 것을 실험적으로 확인하였으며, 이를 재코팅을 통해 필터의 다른 성능에는 변화없이 항바이러스 성능만을 다시 재생시킬 수 있음을 확인하였다. 따라서, 본 내용을 서울시 지하역사 내 공조 시스템에 적용한다면 지하 역사에서 감염의 위험을 최소화 시킬 하나의 솔루션을 제안할 수 있을 것이다.

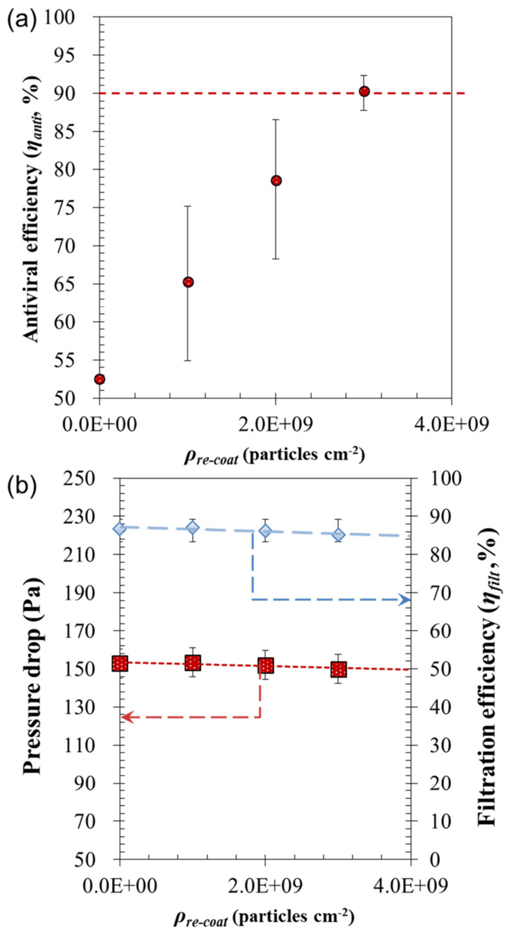

Figure 7 (a) Antiviral efficiencies and (b) pressure drops and filtration efficiencies of the Ag re-coated filters

3.3 제조된 필터의 탈착률 평가

본 제조된 모든 필터(일반 필터, 은나노 입자 코팅 필터, 미세먼지 오염 필터, 은나노 입자 재코팅 필터)에 대하여 코팅 물질의 탈착률을 평가하기 위해 필터 샘플이 장착되어있는 시험 덕트에 청정 공기를 유입하고 지하역사 내 공조기 필터의 시험 기준에 맞춰 시험풍속 2.5 m sec^{-1}으로 제어하여 필터 후단에 CPC를 장착하여 60분 간 탈착되는 입자 수를 측정하였다. 그림 8에 1시간 동안 탈착 된 입자의 개수 농도를 나타내었다. 1시간 동안 일반 필터의 경우 평균 0.025 particles cm^{-3}, 은나노 입자 코팅 필터의 경우 평균 0.007 particles cm^{-3}, 미세먼지 오염 필터의 경우 평균 0.006 particles cm^{-3}, 은나노 입자 재코팅 필터의 경우 0.003 particles cm^{-3}의 개수 농도가 측정되었다. 청정 공기에서도 1시간 동안 평균 0.005 particles cm^{-3}의 개수 농도가 측정되었으며, 계측기의 측정 오차 범위가 0.01 particles cm^{-3} 임을 감안할 때, 본 연구 방법으로 코팅된 필터는 지하역사 공조시스템 조건에서 코팅 물질이 탈착되지 않는다고 판단하였다.

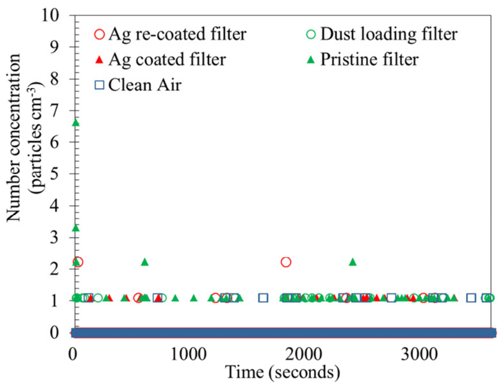

Figure 8 Detachment rate of the fabricated filters for 1 hour

3.4 지하역사 공조 시스템 최적 솔루션 제안

본 연구 결과를 서울 지하역사 공조 시스템에 적용하기 항바이러스 필터의 수명 최적화를 위한 수식적 모델링을 수행하였다. 지하역사 공조기용 항바이러스 필터의 시간에 따른 항바이러스 성능 ($\eta_{anti}(t)$)은 선행 연구에 아래와 같이 모델링 될 수 있다(Joe et al, 2016).

$$\eta_{anti}(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\kappa_0}{1+\gamma \dot{M}_{depo} t}\right)\frac{\rho_{coat}}{\dot{N}_{depo} t}\right] \quad (9)$$

여기서 κ_0는 바이러스와 항바이러스 필터 간의 민감성을 대표하는 상수이고, γ는 변환계수 [cm^2 μg^{-1}]이고, $\dot{M}_{depo}$ [μg cm^{-2} × min]와 $\dot{N}_{depo}$[PFU cm^{-2} × min]는 각각 먼지와 바이오에어로졸이 항바이러스 필터 위에 쌓이는 양을 의미하며 각각 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{N}_{depo} = \eta_{filt}\dot{N}_{enter} \quad (10)$$

$$\dot{M}_{depo} = \eta_{filt}\dot{M}_{enter} \quad (11)$$

여기서 $\dot{M}_{enter}$ [μg cm^{-2} × min]와 $\dot{N}_{enter}$ [PFU cm^{-2} × min]는 각각 먼지와 바이오에어로졸이 항바이러스 필터로 들어가는 양을 의미하며, t는 필터의 가동시간을 나타낸다. 위 식을 기반으로 시간에 따른 지하역사 공조기 적용 항바이러스 필터의 수명을 예측하기 위해 서울의 대표적인 지하철 역들의 지하역사의 공조기의 규격을 조사하여 표 2 에 나타내었다(Kim et al, 2010).

Table 2. Specification for air handling unit of subway station

Station	Specification		Filtration
	Flow rate (m^3 min^{-1})	Pressure drop (mmH_2O)	Efficiency (%)
Seoul	642	89	80
Myeongdong	600	100	
Yeouido	499	120	

공조기 유입 유량(Q)은 평균 값인 580 m^3 min^{-1}을 사용하였고, 포집 효율(η_{filt})은 80 %를 사용하였다. 지하역사 공조기 필터의 단면적은 10 m^2를 사용하는 것으로 알려져 있으며, 또한 선행 연구에서 지하역사에서 공조기로 가는 먼지의 농도가 100 μg m^{-3} 와 같다는 연구 결과를 사용하였다(Jung et al, 2008). 바이오에어로졸의 농도는 100 PFU m^{-3}로 가정하였으며, 항바이러스 성능이 50 % 이하로 내려가면 다시 재생해주는 과정을 포함하였다. 그림 9a에는 식 (3)을 이용해 압력손실 증가에 의해 얻어진 필터 수명과 식 (9)을 이용해 항바이러스 성능 저하에 의해 얻어진 필터 수명을 보여준다. 본 연구에서 도출된 모델링이 유효한 지 확인하기 위한 모사 실험을 수행하였다. 그림 9b는 항바이러스 필터에 시간에 따른 미세먼지 오염도를 모사한 후 여러 지점(P1~4)에서 용균반검사 결과를 보여준다. 이를 통해 항바이러스 물질 재코팅에 의한 항바이러스 성능 재생이 항바이러스 필터의 수명을 효과적으로 늘릴 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 이를 적용하여 그림 10과 같이 필터의 압력손실이 일정 이상이 되면 자동으로 항바이러스 재코팅을 수행하는 방식을 본래 존재하던 공조시스템에 큰 수정없이 적용하는 최적 방법을 제안할 수 있다. 따라서, 본 연구방법에 의한 항바이러스 성능 재생을 이용한다면 항바이러스 필터의 수명을 늘려 더욱 지하역사에서의 코로나 바이러스 확진을 효과적으로 방지할 수 있는 한 가지 방법이 될 수 있을 것이다.

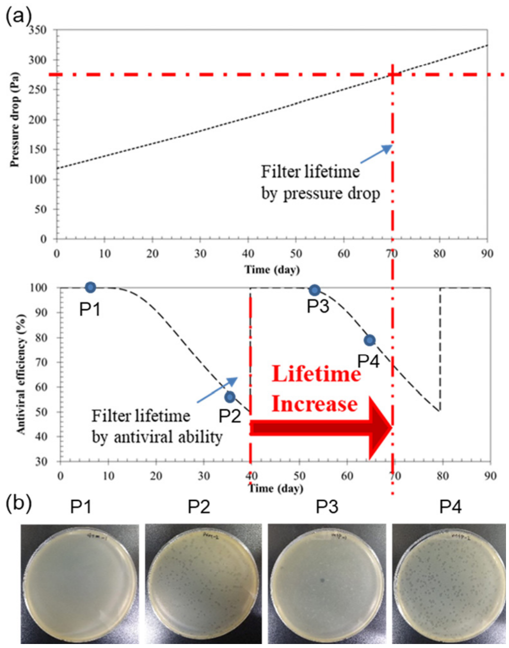

Figure 9 (a) Regeneration modeling of filter lifetime and (b) plaque assay results with specific points (P1~P4)

4. 결론

본 연구에서는 지하역사 승강장 대응 공조 시스템 적용 항바이러스 최적 솔루션의 한 가지 방안으로써 건식 에어로졸 공정을 이용한 지하역사 고성능의 공조기용 항바이러스 필터를 개발하는 방법을 소개하고, 이를 이용해 항바이러스 성능을 최적화하기 위해 먼지에 의해 저하되는 항바이러스 성능을 재생할 수 있는 새로운 방안을 제안하였다. 제안된 방법이 실효성이 있는지 실제 코로나바이러스 모사 기상 부유 바이러스를 대상으로 평가하였다. 실제로 본 연구에서 개발된 방법이 필터의 다른 성능은 그대로 유지한 채 저하된 항바이러스 성능을 재생시켜주었으며, 이 방법을 토대로 실제 서울 지하역사 공조기에 적용할 경우의 효과를 수식적으로 모델링 하였다. 본 연구 개발은 실제 사용되는 지하역사 공조기 필터에 (복잡한 수정없이) 그대로 적용할 수 있기 때문에 실현 가능성이 높으며 기상 부유 바이러스를 대상으로 실효성을 입증했기 때문에 지하역사 승강장 대응 공조 시스템 적용 항바이러스 최적 솔루션의 한 가지 방안으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 기술을 토대로 서울 지하철, 나아가 전국의 대중교통, 더 나아가 전 세계의 다중이용시설에서 코로나바이러스 확진이 최소화되고 제2, 제3의 코로나바이러스의 확산을 효과적으로 막을 수 있는 디딤돌이 되기를 기대한다.

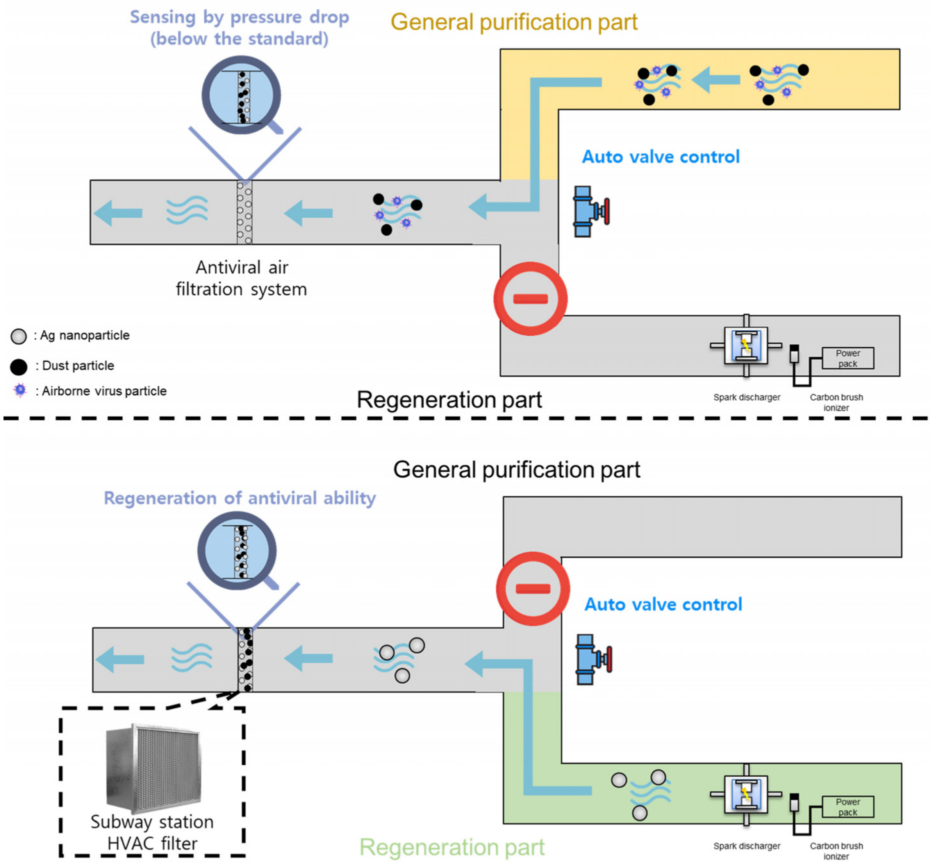

Figure 10 Concept of antiviral air filtration system in subway station

감사의 글

"서울특별시 서울산업진흥원 <서울글로벌챌린지 2021> 사업을 통해 우수 논문으로 선정되어 작성된 논문입니다"

References

Ahn, J. Y., An, S., Sohn, Y., Cho, Y., Hyun, J. H., Baek, Y. J., Kim, M. H., Jeong, S. J., Kim, J. H., Ku, N. S., Yeom, J. -S., Smith, D. M., Lee, H., Yong, D., Lee, Y. -J, Kim, J. W., Kim, H. R., Hwanh, J., and Choi, J. Y. (2020). Environmental contamination in the isolation rooms of COVID-19 patients with severe pneumonia requiring mechanical ventilation or high-flow oxygen therapy. Journal of Hospital Infection, 106(3), 570-576.

Britton, T., Ball, F., and Trapman, P. (2020). A mathematical model reveals the influence of population heterogeneity on herd immunity to SARS-CoV-2. Science, 369(6505), 846-849.

Brown, R. C. (1993). Air Filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters. Pergamon Press, New York

Brown, R. C., Wake, D., Gray, R., Blackford, D. B., and Bostock, G. J. (1988). Effect of industrial aerosols on the performance of electrically charged filter material. The Annals of Occupational Hygiene, 32(3), 271-294.

Byeon, J. H., Park, J. H., and Hwang, J. (2008). Spark generation of monometallic and bimetallic aerosol nanoparticles. Journal of Aerosol Science, 39(10), 888-896.

Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University (JHU), 2021, https://www.arcgis.com/apps/dashboards/bda7594740fd40299423467b48e9ecf6

Centers for Disease Control & Prevention (CDC), 2021, https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/sars-cov-2-transmission.html (Accessed 7 May 2021)

Chin, A. W., Chu, J. T., Perera, M. R., Hui, K. P., Yen, H. L., Chan, M. C., Peiris, M., and Poon, L. L. (2020). Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions. The Lancet Microbe, 1(1), e10.

Gautam, M., Park, D. H., Park, S. J., Nam, K. S., Park, G. Y., Hwang, J., Yong, C. S., Kim, J. O., and Byeon, J. H. (2019). Plug-in safe-by-design nanoinorganic antibacterials. ACS Nano, 13(11), 12798-12809.

Hadei, M., Mohebbi, S. R., Hopke, P. K., Shahsavani, A., Bazzazpour, S., Alipour, M., Jafari, A. J., Bandpey, A. M., Zali, A., Yarahmadi, M., Farhadi, M., Rahmatinia, M., Hasanzadeh, V., Nazari, S. S. H., Asadzadeh-Aghdaei, H., Tanhaei, M., Zali, M. R., Kermani, M., Vaziri, M. H., and Chobineh, H. (2021). Presence of SARS-CoV-2 in the air of public places and transportation. Atmospheric Pollution Research, 12(3), 302-306.

Hwang, S. H., Bae, S. J., Shin, C. H., Park, Y. H., Kwon, S. B., and Kim, S. Y. (2010). A study on panel structure filter performance of air handling units for subway stations. In Proceedings of the KSR Conference, The Korean Society for Railway, pp. 1328-1334.

Joe, Y. H., Park, D. H., and Hwang, J. (2016). Evaluation of Ag nanoparticle coated air filter against aerosolized virus: Anti-viral efficiency with dust loading. Journal of Hazardous Materials, 301, 547-553.

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.

Jung, Y. K., Park, J. H., Lee, R. H., Yoon, K. Y., and Hwang, J. (2008). Study of HVAC system with air cleaning system for indoor air quality of subway station. The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 11, 537-540.

Kang, S., Park, D. H., and Hwang, J. (2021). Hierarchical ZnO Nano-spines Grown on a Carbon Fiber Seed Layer for Efficient VOC Removal and Airborne Virus and Bacteria Inactivation. Journal of Hazardous Materials, 127262.

Kim, S. -Y., Kwon, S. -B., Kim, M., Kim, T., and Shin, C. -H. (2010). Survey of Air Filters and the Establishment of Evaluation Method for the Air Handling Unit of Subway Station. The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 6, 546-550.

Korea Centers for Disease Control & Prevention (KCDC), 2021, http://ncov.mohw.go.kr/en/

Kwon, S. -B., Kim, S. -Y., Kim, M., Kang, J. -G., Shin, C. -H., and Kim, T. (2010). Development of Novel Air Filtration System for AHU Using Cyclone Panels. The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 11, 141-145.

Moreno, T., Pint?, R. M., Bosch, A., Moreno, N., Alastuey, A., Minguill?n, M. C., Anfruns-Estrada, E., Guix, S., Fuentes, C., Buonanno, G., Stabile, L., Morawska, L., and Querol, X. (2021). Tracing surface and airborne SARS-CoV-2 RNA inside public buses and subway trains. Environment International, 147, 106326.

Nie, C., Stadtmu?ller, M., Yang, H., Xia, Y., Wolff, T., Cheng, C., and Haag, R. (2020). Spiky nanostructures with geometry-matching topography for virus inhibition. Nano Letters, 20(7), 5367-5375.

Park, D. H., Gautam, M., Park, S. J., Hwang, J., Yong, C. S., Kim, J. O., and Byeon, J. H. (2019). Plug-and-play safe-by-design production of metal-doped tellurium nanoparticles with safer antimicrobial activities. Environmental Science: Nano, 6(7), 2074-2083.

Park, D. H., Joe, Y. H., and Hwang, J. (2019). Dry aerosol coating of anti-viral particles on commercial air filters using a high-volume flow atomizer. Aerosol and Air Quality Research, 19(7), 1636-1644.

Park, D. H., Joe, Y. H., Hwang, J., and Byeon, J. H. (2020). Evaporation-condensation in the presence of unipolar ionic flow for solvent-free production of ultrasmall antibacterial particles. Chemical Engineering Journal, 381, 122639.

Park, D. H., Joe, Y. H., Piri, A., An, S., and Hwang, J. (2020). Determination of air filter anti-viral efficiency against an airborne infectious virus. Journal of Hazardous Materials, 396, 122640.

Park, G., Park, S., Koo, H. B., Kim, S., and Hwang, J. (2019). Evaluation of anti-viral efficiency of TiO2 coated air filter for airborne virus. Particle and Aerosol Research, 15(4), 173-182.

Park, K., Kang, S., Park, J. W., and Hwang, J. (2021). Fabrication of silver nanowire coated fibrous air filter medium via a two-step process of electrospinning and electrospray for anti-bioaerosol treatment. Journal of Hazardous Materials, 411, 125043.

Wang, C. C., Prather, K. A., Sznitman, J., Jimenez, J. L., Lakdawala, S. S., Tufekci, Z., and Marr, L. C. (2021). Airborne transmission of respiratory viruses. Science, 373(6558), eabd9149.

Woo, S. H., Kim, J. B., Bae, G. N., Hwang, M. S., Tahk, G. H., Yoon, H. H., and Yook, S. J. (2018). Investigation of diurnal pattern of generation and resuspension of particles induced by moving subway trains in an underground tunnel. Aerosol and Air Quality Research, 18(9), 2240-2252.

Xu, B., Liu, J., Ren, S., Yin, W., and Chen, Q. (2013). Investigation of the performance of airliner cabin air filters throughout lifetime usage. Aerosol and Air Quality Research, 13(5), 1544-1551.