

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 15, No. 4: December 2019 pp. 173-182

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2019.15.4.173>

공간 내 부유한 바이러스에 대한 광촉매 TiO₂가 코팅된 에어 필터의 항바이러스 효율 평가

박근영¹⁾ · 박성재¹⁾ · 구현본²⁾ · 김성준²⁾ · 황정호^{1)*}

¹⁾연세대학교 기계공학과

²⁾한국건설기술연구원

(2019년 11월 18일 투고, 2019년 12월 18일 수정, 2019년 12월 23일 게재확정)

Evaluation of anti-viral efficiency of TiO₂ coated air filter for airborn virus

Geunyoung Park¹⁾ · Sungjae Park¹⁾ · Hyun-Bon Koo²⁾ · Seongjun Kim²⁾ · Jungho Hwang^{1)*}

¹⁾*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University*

²⁾*Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)*

(Received 18 Nov 2019; Revised 18 Dec 2019; Accepted 23 Dec 2019)

Abstract

Since airborne viruses have been known to aggravate indoor air quality, studies on the development of anti-viral air filter increase recently. In this study, the pressure drop and anti-viral efficiency of TiO₂ coated ceramic ball filter were evaluated. After the filter being inserted into a commercial room air cleaner, chamber test with aerosolized bacteriophage MS2 was performed. The porosity of TiO₂ coated ceramic ball filter was 0.85, and pressure drop was about 13 Pa for 1 m/s of air velocity. The anti-viral efficiency was about 93% when the reaction time was 25 minutes in a 1 m³ chamber.

Keywords: airborne viruses, TiO₂, air filter, pressure drop, anti-viral efficiency

* Corresponding author.

Tel : +82-2-2123-2821

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

1. 서론

현대인의 경우 생활의 대부분을 일반 주택이나, 사무실을 포함한 실내공간에서 보내는 것으로 보고되고 있으며, 그에 따라 실내 공기질(IAQ, Indoor Air Quality)에 대한 관심도 점점 높아지고 있다(Matz et al., 2014). 특히 도시 거주자의 경우 실내에서 보내는 시간의 비중이 더욱 크고, 최근 에너지 문제 및 건물의 고층화 현상 등으로 실내공기의 환기가 제한되어 밀폐된 공간에서의 공기오염에 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 오염원으로는 기상 부유균(bio-aerosol)이 있다(Perez-Padilla et al., 2010). 기상 부유균이란, 바이오(Bio)와 에어로졸(Aerosol)의 합성어로서 살아있는 유기체에서 방출되거나 살아있는 유기체를 포함한 공기 중에 부유 입자상 물질을 의미한다(Kalogerakis et al., 2005). 실제로 기상 부유균에 의한 실내 공기질 오염에 의해 환경성 질환인 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), 신종인플루엔자(novel swine-origin influenza A), 중동 호흡기 증후군(MERS, Middle East Respiratory Syndrome) 등의 바이러스에 의한 호흡기성 질환의 전파로 인해 실내 공기질 관리 및 기상 부유균 제거 기술의 중요성이 부각되고 있다(Kim et al., 2016; Li et al., 2005; Pearce et al., 2012). 이에 따라, 실내 공기질 개선을 위해 공기청정기의 수요가 급증하고 있다(Bloomberg L.P., 2019). 현재 유통되는 필터기반의 공기청정기는 HEPA(High Efficiency Particulate Air)필터 등의 섬유필터를 이용하여 기상 부유균을 공기유동으로부터 분리하는 방식이다. 하지만 이러한 방식의 공기청정기는 기상 부유균이 에어필터에 포집된 후 증식하여 재탈착되거나, 실내로 유입되는 2차 오염이 발생할 수 있으며, 이 과정에서 악취물질인 MVOCs(Microbial Volatile Organic Compounds)가 발생되어 유입될 수 있다(Verdenelli et al., 2003). 이를 방지하기 위해, 최근 개발되는 상용 공기청정기의 필터 모듈에는 에어필터 전단에 항균/항바이러스

효과를 줄 수 있는 장치나 기능성 에어필터를 장착하여 기상 부유균의 증식을 억제함으로써 이러한 문제를 해결하고 있다(Cooper et al., 2013; Lee et al., 2013).

광촉매(Photocatalyst)는 미생물, VOC 등 다양한 유해물질들을 광원의 보조를 통해 쉽게 분해할 수 있는 친환경 물질로써 많이 연구되고 있다(Low et al., 2017; Podporska-Carroll et al., 2015; Shayegan et al., 2018). 빛 에너지를 받은 광촉매에서 발생된 라디칼(radical)은 박테리아, 곰팡이의 저감뿐만 아니라 바이러스의 항균에도 사용된다(Liga et al., 2013).

위와 같은 연구의 일환으로, 본 연구에서는 광촉매 TiO₂입자를 코팅한 세라믹 볼 필터의 차압, 표면 특성 그리고 항바이러스 효율을 확인하였다. 항바이러스 효율 평가는 실제 공간 상에서 바이러스를 저감하는 상황을 모사하기 위해 상용 공기 청정기에 볼 필터를 장착한 뒤 챔버 내부에서의 공기 중 항바이러스 능력을 평가하였다.

2. 실험 방법

사용된 세라믹 볼 필터는 240 mm x 7 mm x 30 mm 크기의 다공성 틀 내부에 지름 4 mm의 상용 세라믹 볼(Bentech Frontier, Republic of Korea)을 넣어 제작되었다. 사용된 상용 세라믹 볼의 종류는 총 2가지로 광촉매 TiO₂입자가 코팅되어 있는 TiO₂ 코팅 세라믹 볼(볼 1개당 면밀도 약 10 습식 코팅)과 코팅되어 있지 않은 일반 세라믹 볼이다. 각각의 세라믹 볼을 두 개의 240 mm x 7 mm x 30 mm 크기의 다공성 틀에 따로 넣어 TiO₂입자가 코팅된 세라믹볼로 만들어진 볼 필터, 그리고 대조군으로써 일반 세라믹볼로 만들어진 볼 필터가 제작되었다. 제작한 필터는 그림 1에 나타내었다.

일반 세라믹 볼과 TiO₂ 코팅 세라믹 볼 각각의 재료적 특성을 확인하기 위해 주사전자현미경(SEM, Field Emission Scanning Electron Microscope, 7610f-plus, JEOL, Japan)을 통한 표면분석, EDS(Energy Dispersive Spectrometry)를 통한 화학적 조성 분석이 진행되었다.

필터의 형상은 사각 틀에 볼이 가득 차 있는 형상이며, 이러한 형상의 공극률(ϵ)은 아래와 같은 식으로

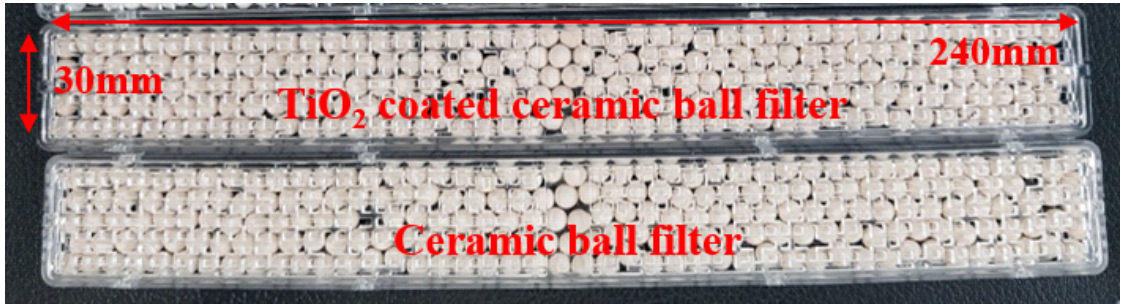


Figure 1. Two fabricated ball filter.

결정될 수 있다.

$$\epsilon(\text{porosity}) = 1 - \frac{V_{ball}}{V_{total}} \quad (1)$$

여기서 V_{total} 는 필터의 전체의 부피, V_{ball} 는 볼 전체의 부피를 의미한다.

필터의 차압을 측정하기 위한 실험 방법은 그림 2에 나타나 있다. 필터의 샘플과 같은 공극률을 가지도록 세라믹 볼과 틀로 시험 덕트(단면적 40 mm x 40 mm)에 맞게 필터를 제작하여 장착한 후, 시험 덕트에 청정공기를 유입하고, 필터 샘플 전/후단에서의 유속에 따른 압력손실 차압 측정기(Testo 512, Testo, Germany)를 이용하여 측정하였다.

항바이러스 효율을 평가하기 위해 상용 공기청정기(Aircure4, Bentech Frontier, Republic of Korea)를 사용하였다. 본 연구에서는 TiO₂ 코팅 볼 필터의 항바이러스 기능만을 평가하기 위해 상용 공기청정기

에서 프리필터와 헤파필터를 제거한 상태로 사용하였다. 상용 공기청정기의 구체적인 규격은 표 1에 나타났다.

Table 1. Specification of commercial air sterilizer.

Model name	Aircure 4
Weight	1.2 kg
Dimensions	310 x 220 x 45 (mm)
Capacity	500 L/min

상용 공기청정기의 외형 및 필터 모듈은 그림 3에 나타났다. 내부는 파장 360 nm UV-LED, 팬, PCB기판으로 구성되어 있다. 내부의 팬이 회전하면서 외부 공기가 상용 공기청정기의 내부로 유입되어, TiO₂코팅된 볼필터와 UV-LED를 거쳐 다시 배출구로

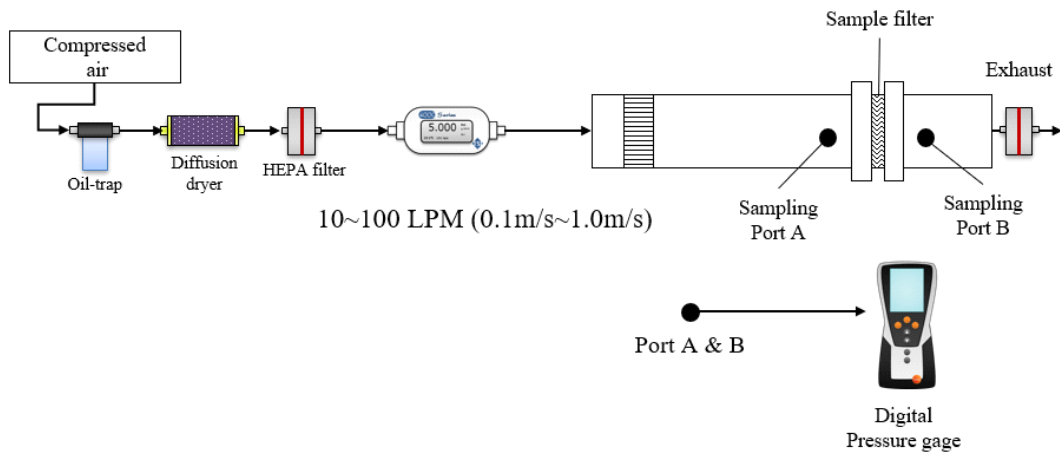


Figure 2. Experiment set up for evaluation of pressure drop.

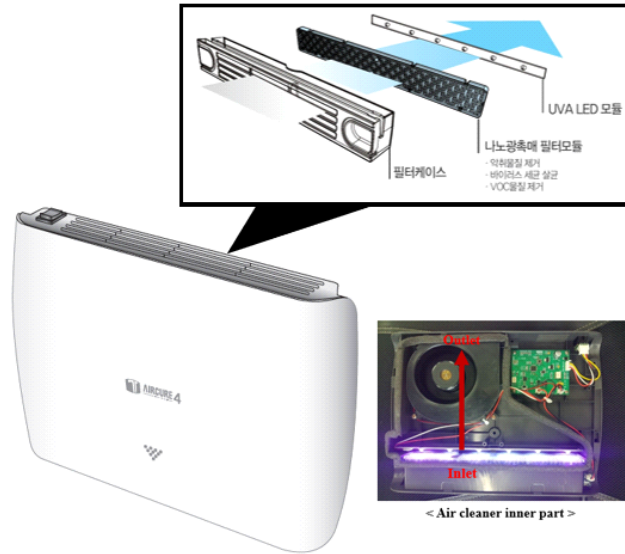


Figure 3. Commercial air sterilizer appearance and filter module.

나가게 된다. 이 때, UV-LED에서 조사된 360 nm 파장의 자외선에 의해 광촉매 TiO_2 가 활성화가 되면서 라디칼이 발생하게 되고(Sun et al., 2013), 공기중에 바이러스에 대해 살균작용을 일으키게 된다(Liga et al., 2013; Pichat et al., 2000).

공간 항바이러스 성능 평가를 위해서 가로 0.8 m, 세로 0.8 m, 높이 1.56 m 크기의 챔버 시스템을 구축

하였다. 챔버 시스템은 1개의 유입구와 2개의 배출구, 상용 공기청정기, 거치대로 구성되어 있다. 또, 시험용 바이러스 입자로 박테리오파지 MS2 바이러스 (Bacteriophage MS2 virus (ATCC 15597-B1))를 사용하였다. 공간 살균 평가 방법은 그림 4에 나타났다. 또, 표 2에서 보는 바와 같이 6가지 경우에 대해서 실험이 이루어졌다.

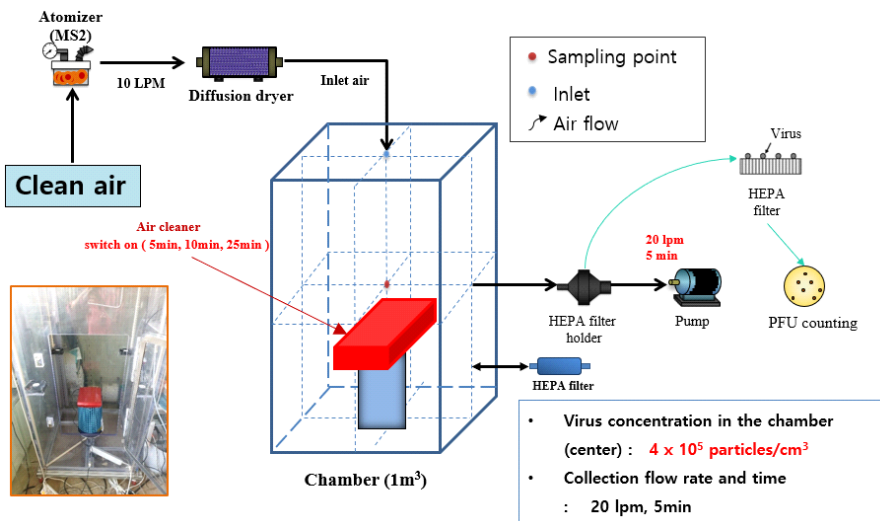


Figure 4. Experiment set up for evaluation of antiviral efficiency in the chamber.

Table 2. Experiment cases.

	Condition		
	Filter	UV	Fan
Control	(No filter)	Off	Off
Case 1	Ceramic ball filter	Off	On
Case 2	TiO ₂ coated ceramic ball filter	Off	On
Case 3	(No filter)	On	On
Case 4	Ceramic ball filter	On	On
Case 5	TiO ₂ coated ceramic ball filter	On	On

먼저, 오일트랩(Oil trap)과 확산건조기(Diffusion Dryer), 해파필터가 내장되어 있는 청정공기 공급장치를 통해 공급된 청정공기는 질량유량계를 통해 10 L/min의 유량으로 시험용 바이러스가 담겨있는 미립화기(6-jet nebulizer, CH tech, USA)를 통과하여 바이러스 입자가 포함된 액적을 발생시켰다. 발생된 액적은 확산건조기(Diffusion Dryer)를 통과하여 수분을 제거되어 에어로졸화된 바이러스 입자만이 남게

되고, 공기 중 바이러스 입자들은 상용 공기청정기가 설치된 챔버(0.8 m x 0.8 m x 1.56 m)로 유입되었다. 챔버 내의 바이러스 입자 수농도가 4×10^5 particles/cm³ 가 될 때까지 바이러스 입자를 주입하였고, 그 후 주입을 끊고 공기청정기를 작동시켰다. 챔버 내 바이러스 입자 수농도는 condensation particle counter (CPC, TSI model 3776; 0.3 L/min)으로 실시간 측정하였다. 공기청정기의 작동시간은 5분, 10분, 25분 3가지로 설정되었다. 작동 후에는 공기청정기를 끄고 챔버 내의 바이러스를 해파필터 상에 20 L/min의 유량으로 5분간 포집하였고, 그 후 Urea-arginine phosphate buffer (U-APB)용액을 이용해 필터 상의 바이러스를 용액상에 용출하였다. 바이러스가 용출된 U-APB 용액 0.1 ml와 호스트 박테리아 (*E. coli strain C 3000* (ATCC 15597))용액 0.3 ml, Tryptic soy agar (TSA)용액 29 ml를 섞은 후, 페트리 디쉬에 도말하여 37 °C의 조건에서 하루동안 배양하였다. 배양이 끝난 페트리 디쉬에 생성된 플라크의 수를 세어서, 아래의 수식을 통해 제작한 필터의 항바이러스 효율을 산출하였다.

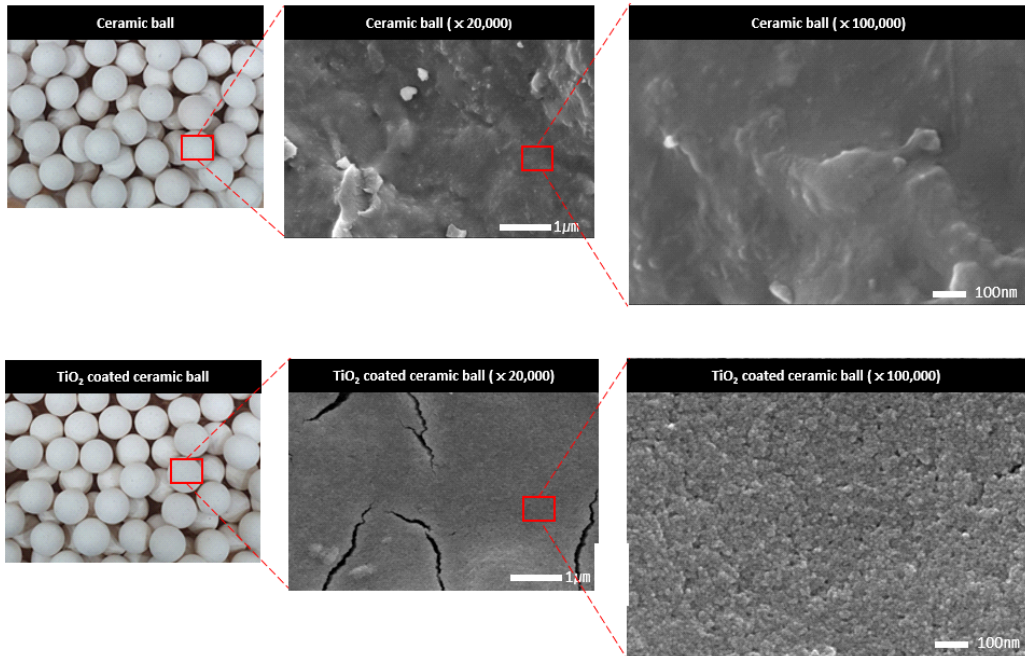


Figure 5. FE-SEM images of two balls.

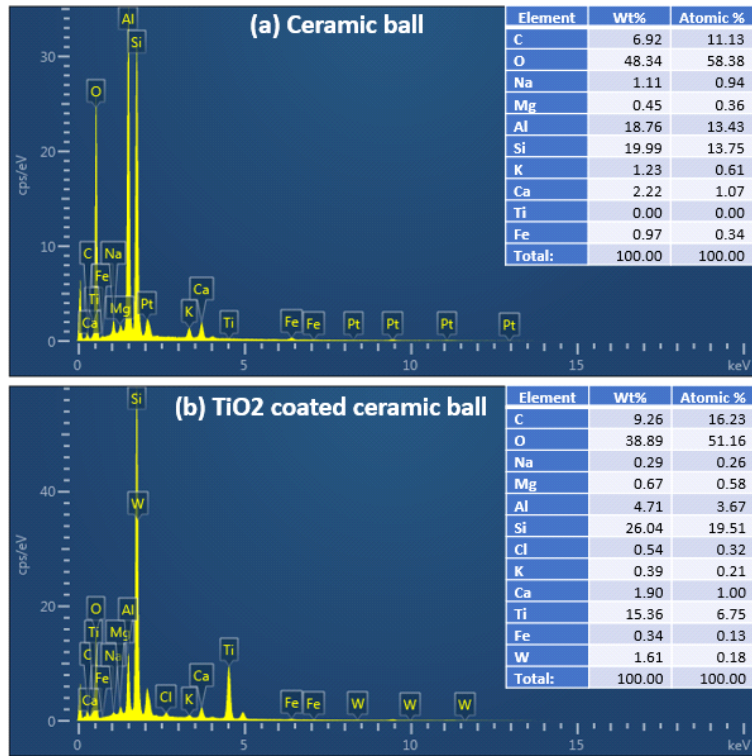


Figure 6. EDS analysis of two balls.

$$\eta_{antiviral} = 1 - \frac{PFU_{case}}{PFU_{control}} \quad (2)$$

여기서 $PFU_{control}$ 은 Control 조건, PFU_{case} 은 5가지 경우에서의 플라크 수를 말한다.

3. 결과 및 토의

그림 5는 2가지 볼(TiO_2 를 코팅하지 않은 일반 세라믹 볼, TiO_2 코팅 세라믹 볼)의 표면특성을 알기 위해 수행한SEM분석 이미지다. TiO_2 코팅 세라믹 볼의 표면에는 일반 세라믹 볼의 표면과는 다르게 TiO_2 입자가 고르게 분포되어 있음을 확인하였다. TiO_2 코팅 세라믹 볼의 경우, 습식 코팅한 후, 건조과정으로 인해 갈라짐 현상이 있음을 확인하였다. 각 볼의 화학적 조성을 관찰하기 위해 수행한 EDS 분석 결과는 그림 6에 나타났다. 그림 6(a)는 TiO_2 를 코팅하지 않은 일반 세라믹 볼의 화학적 조성으로

주로 산소(O), 규소(Si), 알루미늄(Al)이 포함된 것을 확인할 수 있다. 산소(O)가 가장 높은 비율을 차지하는 이유는 규소와 알루미늄이 SiO_2 , Al_2O_3 형태로 존재하기 때문이다. 그림 6(b)는 TiO_2 코팅 세라믹 볼에 대한 화학적 조성으로 일반 세라믹 볼의 구성 성분에서 추가적으로 타이타늄(Ti)이 확인되었다. 이것으로 TiO_2 코팅 세라믹볼에는 TiO_2 가 존재하고 있음을 확인하였다.

필터의 공극률(ϵ)은 볼의 부피와 필터의 부피를 계산하여 식 (1)에 각 값들을 대입하여 계산하였다. 필터의 부피는 240 mm x 7 mm x 30 mm크기의 다공성 틀 부피로 50400 mm³의 값을 가진다. 볼의 부피는 (지름 4 mm 볼 1개의 부피) x (볼의 개수) = (33.49 mm³) x (220개) = 7368.53 mm³의 값을 가진다. 이에 공극률은 0.85의 값이 도출하였다.

필터의 유속에 따른 차압을 측정한 결과는 그림 7에 나타냈다. TiO_2 코팅에 의한 차압변화는 보이지 않았으며, 필터의 차압은 유속이 0.1 m/s때 최솟값인 0.2 Pa, 1 m/s때 최댓값 13 Pa를 보였다. 또, 유속이

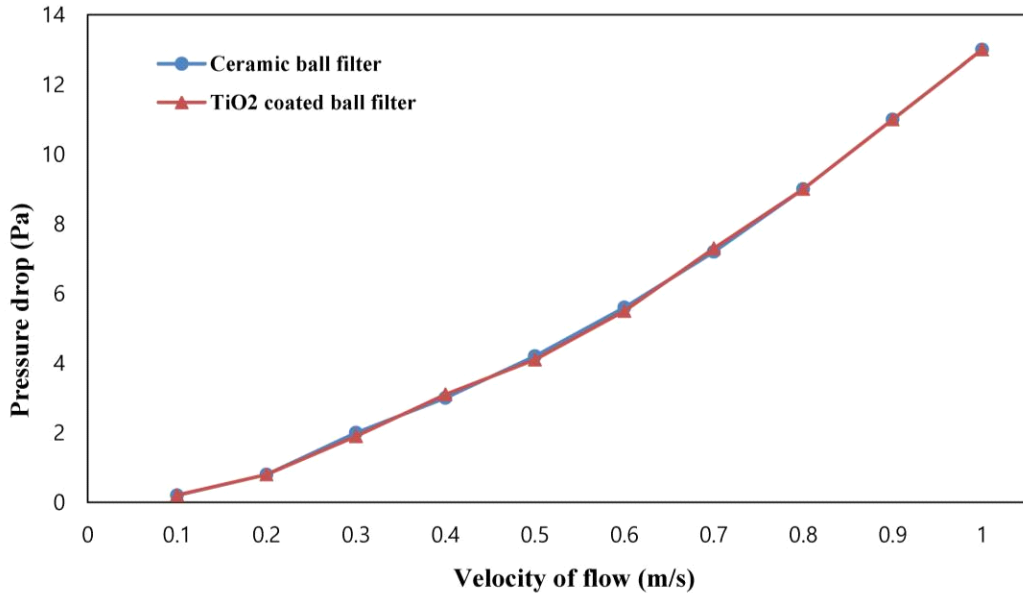


Figure 7. The result of pressure drop measurement experiments.

증가함에 따라 필터의 차압도 증가하는 경향성을 보였다.

공간 항바이러스 성능 평가에 대한 결과는 그림 8에 나타났다. Case 1, Case 2는 모든 작동 시간 조건에서 항바이러스 효율이 0%로 나타났다. 이것으로 제작한 2가지 필터의 바이러스의 물리적 흡착에 의한 항바이러스 효율은 없는 것을 확인할 수 있다. Case 3에서 작동시간이 5분일 때 최소 20%에서 25분일 때 최대 57%의 항바이러스 성능을 보였다. 이는 UV자체의 항바이러스 능력에 의한 것으로 보인다. UV는 그 자체만으로도 UV 광자(photon)가 바이러스의 DNA 혹은 RNA를 타격하는 방식으로 바이러스의 감염성을 잃게 한다(Sharma, 2012). UV-A (400 nm ~ 320 nm)과장대의 UV는 UV-B (320 nm ~ 290 nm), UV-C (290 nm ~ 100 nm)에 비해 비교적 낮은 항바이러스 효과를 지니지만 투여량(dose)에 따라 살균효과가 높아지기도 한다(Lee and Ko, 2013). Case 3에서의 살균효율에서도 이와 같은 경향성을 확인할 수 있다. Case 4 (일반 세라믹 볼 필터)에서는 5분, 10분일 때는 항바이러스 효율이 0%로 나타나다가 25분일 때, 33%의 효율이 나타났다. Case 3과 Case 4를 비교해보면 볼필터가 없는 Case 3이 오히려 Case 4에

비해 항바이러스 효율이 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 원인은 Case 3과 Case 4에서 바이러스 입자의 UV 섭취량(UV-dose)값이 다르기 때문으로 보인다. 공기청정기의 내부 구조사진을 보면 UV-LED에 거의 인접하여 볼 필터가 위치한 것을 알 수 있다. Case 3의 경우 볼 필터가 존재하지 않기 때문에 공기 중 바이러스가 공기청정기에 흡입되는 과정 내내 UV에 노출되는 반면, Case 4의 경우 일반 세라믹 볼 들이 UV를 차폐하는 효과를 보여 공기 중 바이러스 입자가 UV에 노출되는 시간을 줄여주게 된다. 이는 각 바이러스 입자가 섭취하는 UV 섭취량(UV-dose)의 차이를 가져오고, 그 결과 바이러스가 높은 UV 섭취량을 가지는 Case 3에서 더 높은 항바이러스 효율이 나타난다(Tseng and Li, 2007; 2005). 반면 Case 4에서는 바이러스 입자가 받는 UV 섭취량(UV-dose)가 낮아 Case 3보다 더 낮은 효율을 보인다. Case 5(TiO₂ 코팅 세라믹 볼 필터)에서는 모든 작동시간이 5분일 때 33% 항바이러스 성능을 보이고 25분일 때 93%의 항바이러스 성능을 보였다. 이는 모든 시간에 대해서 다른 Case들 보다 높은 항바이러스 성능을 보인 것인데, UV와 함께 TiO₂ 광촉매로부터 발생된 라디칼(radical)의 항바이러스

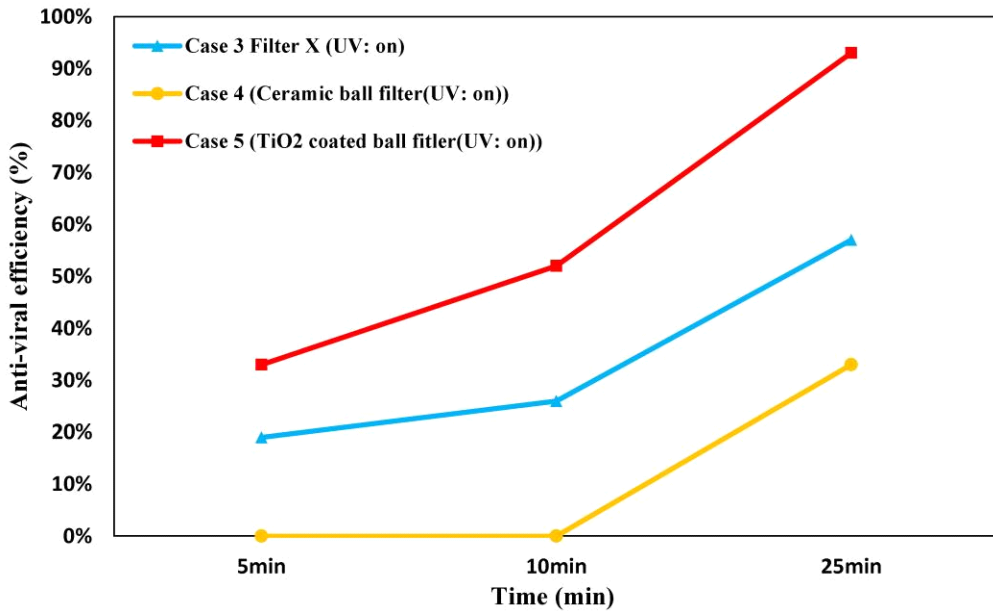


Figure 8. The result of the Anti-viral experiments.

효과가 함께 나타났기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 광촉매 TiO₂를 일반 세라믹 볼에 코팅한 TiO₂ 코팅 세라믹 볼을 다공성 틀에 넣어 공기가 통과할 수 있는 필터 형태로 구성한 항바이러스 에어필터의 차압과 항바이러스 효율을 평가하였다. TiO₂ 코팅 세라믹 볼의 SEM분석과 EDS분석을 통해 TiO₂ 입자가 표면에 고르게 코팅이 이루어진 것을 확인하였다. 필터는 0.85의 공극률을 가지고 있으며, 필터의 차압 측정을 통해 TiO₂ 코팅이 필터의 차압에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 확인하였다. 또, 필터에 발생하는 차압도 유속이 1 m/s 조건에서 13 Pa이 발생하는 것을 확인하였다. 항바이러스 효율은 UV-LED만으로도 작동시간이 5분 조건에서 최소 19%에서 25분 조건에서 최대 53%의 항바이러스 효율을 보였고, TiO₂ 코팅 세라믹 볼 필터의 경우에는 작동시간이 25분일 때 93%로 가장 높은 항바이러스 효율을 보였다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(과제번호:NRF-2019R1A2A1A05021996)과 환경부의 환경산업선진화기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- Bloomberg L.P. (2019). Air Purifier Market Size Worth \$7.3 Billion by 2025 | CAGR: 8.2%: Grand View Research, Inc. Bloomberg.com.
- 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.
- Cooper, A., Oldinski, R., Ma, H., Bryers, J.D., and Zhang, M. (2013). Chitosan-based nanofibrous membranes for antibacterial filter applications, *Carbohydrate Polymers*, 92, 254-259.

- Kalogerakis, N., Paschali, D., Lekaditis, V., Pantidou, A., Eleftheriadis, K., and Lazaridis, M. (2005). Indoor air quality—bioaerosol measurements in domestic and office premises, *Journal of Aerosol Science*, 36, 751–761.
- Kim, S.-H., Chang, S.Y., Sung, M., Park, J.H., Bin Kim, H., Lee, H., Choi, J.-P., Choi, W.S., and Min, J.-Y. (2016). Extensive Viable Middle East Respiratory Syndrome (MERS) Coronavirus Contamination in Air and Surrounding Environment in MERS Isolation Wards, *Clinical Infectious Diseases*, 63, 363–369.
- Lee, J.E., and Ko, G. (2013). Norovirus and MS2 inactivation kinetics of UV-A and UV-B with and without TiO₂, *Water Research*, 47, 5607–5613.
- Lee, K.M., Lee, B.H., and Park, C.J. (2013). A Study on the Control of Bio-Aerosol for Prevention of Indoor Aerial Infection Using Antimicrobial Air Filter, *Applied Mechanics and Materials*, 284-287, 1601-1605.
- Li, Y., Huang, X., Yu, I.T.S., Wong, T.W., and Qian, H. (2005). Role of air distribution in SARS transmission during the largest nosocomial outbreak in Hong Kong, *Indoor Air*, 15, 83–95.
- Liga, M.V., Maguire-Boyle, S.J., Jafry, H.R., Barron, A.R., and Li, Q. (2013). Silica Decorated TiO₂ for Virus Inactivation in Drinking Water – Simple Synthesis Method and Mechanisms of Enhanced Inactivation Kinetics, *Environmental Science & Technology*, 47, 6463–6470.
- Low, J., Cheng, B., and Yu, J. (2017). Surface modification and enhanced photocatalytic CO₂ reduction performance of TiO₂: a review, *Applied Surface Science*, 392, 658–686.
- Main, C.E. (2003). Aerobiological, ecological, and health linkages, *Environment International*, 29, 347–349.
- Matz, C.J., Stieb, D.M., Davis, K., Egyed, M., Rose, A., Chou, B., and Brion, O. (2014). Effects of Age, Season, Gender and Urban-Rural Status on Time-Activity: Canadian Human Activity Pattern Survey 2 (CHAPS 2), *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11, 2108–2124.
- Pearce, M.B., Jayaraman, A., Pappas, C., Belser, J.A., Zeng, H., Gustin, K.M., Maines, T.R., Sun, X., Raman, R., Cox, N.J., Sasisekharan, R., Katz, J.M., and Tumpey, T.M. (2012). Pathogenesis and transmission of swine origin A(H3N2)v influenza viruses in ferrets, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 3944–3949.
- Perez-Padilla, R., Schilman, A., and Riojas-Rodriguez, H. (2010). Respiratory health effects of indoor air pollution [Review article], *The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, 14, 1079–1086.
- Pichat, P., Disdier, J., Hoang-Van, C., Mas, D., Goutailler, G., and Gaysse, C. (2000). Purification/deodorization of indoor air and gaseous effluents by TiO₂ photocatalysis, *Catalysis Today*, 63, 363–369.
- Podporska-Carroll, J., Panaitescu, E., Quilty, B., Wang, L., Menon, L., and Pillai, S.C. (2015). Antimicrobial properties of highly efficient photocatalytic TiO₂ nanotubes, *Applied Catalysis B: Environmental*, 176–177, 70–75.
- Sharma, A. (2012). An Ultraviolet-Sterilization Protocol for Microtitre Plates, *Journal of Experimental Microbiology and Immunology*, 16, 144–147.
- Shayegan, Z., Lee, C.-S., and Haghight, F. (2018). TiO₂ photocatalyst for removal of volatile organic compounds in gas phase – A review, *Chemical Engineering Journal*, 334, 2408–2439.
- Sun, J., Yan, X., Lv, K., Sun, S., Deng, K., and Du, D. (2013). Photocatalytic degradation pathway for azo dye in TiO₂/UV/O₃ system: Hydroxyl radical versus hole, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 367, 31–37.
- Tseng, C.-C., and Li, C.-S. (2007). Inactivation of Viruses on Surfaces by Ultraviolet Germicidal Irradiation, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 4, 400–405.
- Tseng, C.-C., and Li, C.-S. (2005). Inactivation of Virus-Containing Aerosols by Ultraviolet

Germicidal Irradiation, *Aerosol Science and Technology*, 39, 1136-1142.

Verdenelli, M.C., Cecchini, C., Orpianesi, C., Dadea, G.M., and Cresci, A. (2003). Efficacy of antimicrobial filter treatments on microbial colonization of air panel filters, *Journal of Applied Microbiology*, 94, 9-15.