

# 은나노 입자가 코팅된 항균 필터를 이용한 바이오에어로졸 제어 기술

○ 황정호 | 연세대학교 기계공학부 정교수  
[hwangjh@yonsei.ac.kr](mailto:hwangjh@yonsei.ac.kr)  
 윤기영 · 변정훈 · 박재홍 · 박철우  
 연세대학교 기계공학부 연구원

## 1. 서 론

바이오에어로졸(Bioaerosol)이란 생물학적 기원을 갖는, 공기 중에 부유하여 존재하는 입자상 물질을 의미한다. 이는 세균, 곰팡이, 바이러스 등뿐만 아니라, 꽃가루, 진드기 등을 포함한다. 이들은 매우

다양한 범위의 크기 분포를 갖는데, 바이러스의 경우 0.02~0.3 $\mu\text{m}$ , 박테리아의 경우 0.3~10 $\mu\text{m}$ , 곰팡이 포자의 경우 0.5~30 $\mu\text{m}$  정도이며, 꽃가루의 경우 10~100 $\mu\text{m}$  정도의 크기를 가진다.<sup>(1)</sup> 이들은 특정 온·습도 조건 하에서 번식하여 그 수가 증가하는 특징을 보인다. 최근 에너지 문제 및 건물의 고층화

표 1. 다중이용시설등의 실내공기질관리법

오염물질	유지기준					권고기준				
	PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	CO <sub>2</sub> (ppm)	HCHO (ppm)	총부유세균 (CFU/ $\text{m}^3$ )	CO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	Rn (pCi/L)	TVOC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	석면 (#/cc)	오존 (ppm)
지하역사, 지하도상가, 여객자동차터미널 대합실, 공항시설 중 여객터미널, 항만시설중 대합실, 도서관, 박물관, 미술관, 장례식장, 찜질방, 대규모점포, 지하상점가	150 이하	1,000 이하	120 이하	-	10 이하	0.05 이하	4.0 이하	500 이하	0.01 이하	0.06 이하
의료기관, 보육시설, 노인의료시설, 산후조리원	100 이하			800 이하				400 이하		
실내주차장	200 이하			-				25 이하		

현상 등으로 인해 실내 공기의 환기가 제한되고, 건물 내 환경이 항상 일정한 온·습도를 유지함에 따라 실내 환경은 미생물이 번식하고, 바이오에어로졸의 농도가 증가하기에 적절한 환경을 제공하고 있다. 이들 바이오에어로졸은 고양이, 개 등의 동물, 카펫, 사람, 가습기, 냉장고, 공기청정기 등에서 발생되며, 실내 환경조건에 따라 더욱 증가되어 전염병을 매개시키는 역할을 하거나 직접적으로 피부 질환, 알레르기성 질환, 기관지 천식 등을 유발시킨다.<sup>(2)</sup> 이러한 바이오에어로졸의 인체 유해성으로 인해 2004년 5월 30일 시행된 환경부의 “다중이용시설등의 실내공기질관리법”에서는 의료기관, 보육시설, 노인의료시설, 산후조리원 등에서 바이오에어로졸의 농도를 800 CFU/m<sup>3</sup> 이하로 유지하도록 하고 있다.<sup>(3)</sup>

이러한 유지 기준을 만족하기 위해, 다양한 기술들이 개발되어 왔으며, 또한 연구 개발이 진행 중이다. 그 중 대표적인 기술로는 UV를 이용한 방법이 있다. UV를 이용한 살균은 254nm 파장의 빛을 이용하여 미생물의 번식을 억제한다.<sup>(4-7)</sup> 일반적으로, UVGI (Ultraviolet Germicidal Irradiation)라 불리며, 공조 덕트 내부에 삽입되는 형태<sup>(8, 9)</sup>, 또는 재실 공간의 상층부에 설치되는 형태 (Upper-room UVGI)로 연구가 진행되고 있다.<sup>(10, 11)</sup>

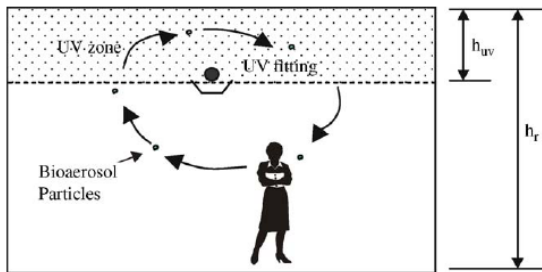


그림 1. Upper-room UV<sup>(10)</sup>

또 다른 방법으로 필터를 이용하는 방법이 있다. 입자상으로 부유하는 바이오에어로졸을 필터를 이

용해 유동으로부터 분리하여 제거하는 방식이다. 이 때, 바이오에어로졸의 경우 필터 상에서 번식하여 바이오에어로졸과 MVOCs (Microbial Volatile Organic Compounds)의 발생원으로 작용할 수 있기 때문에<sup>(12, 13)</sup>, 필터에 대한 항균 처리가 필요하다. 이에 대한 연구로, 필터 상에 다양한 항균 물질을 코팅하는 연구가 주로 이루어지고 있다.<sup>(14, 15)</sup> 또한, 필터의 양면에 플라즈마를 발생시킬 수 있는 시스템을 설치하여 필터에 포집된 미생물을 살균하는 연구가 진행된 바 있다.<sup>(16)</sup> 그 외에도, 가열튜브를 이용하는 방법<sup>(17)</sup>, 은나노 입자를 필터에 통과시켜 필터에 포집된 미생물을 살균하는 방법<sup>(18, 19)</sup> 등이 바이오에어로졸을 제어하기 위해 연구되고 있다.

다양한 필터 소재 중 섬유상 활성탄(ACF; Activated Carbon Fiber)은 표면에 많은 미세기공(micropores)이 존재하여 뛰어난 흡착 특성을 보이는 물질로 유해가스의 흡착에 주로 사용된다. 반면, 박테리아 등의 바이오에어로졸은 ACF 필터와 친화적이며, 따라서 ACF 필터에 부착·번식하여 ACF 필터를 오염시킨다.<sup>(20)</sup> 이러한 오염된 ACF 필터는 바이오에어로졸의 발생원으로 작용할 수 있기 때문에, ACF 필터를 공기청정 시스템에 적용하기 위해서는 이에 대한 항균 처리가 필수적이다. ACF 등과 같은 부도체성 물질에 은과 같은 금속성 물질을 코팅하기 위한 방법으로 무전해 도금법 (Electroless plating)이 대표적이다. 무전해 도금은 원하는 물질을 높은 순도로 표면에 코팅할 수 있으며, 무전해 도금에 의해 코팅된 물질은 표면에 강하게 부착되어 용출량이 적다는 특징이 있다. 본 글에서는 섬유상 활성탄에 은나노 입자를 코팅하여 바이오에어로졸을 제어하는 방법과 그 특성을 평가하는 방법에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 본론

은나노 입자가 코팅된 항균 필터를 무전해 도금

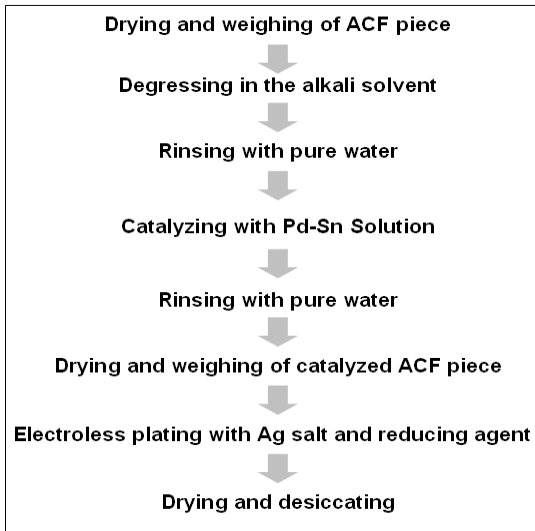


그림 2. 무전해 은도금 수행 절차

법을 이용해 제작하고 그 표면 특성을 분석하였으며, 제작된 필터의 바이오에어로졸 여과 특성 및 항균 특성을 실험을 통해 살펴보았다.

### 2.1 은입자가 코팅된 필터 제작 및 특성 분석

무전해 은도금법을 이용하여 ACF (KF-1500,

Toyobo) 표면에 은 입자를 코팅하였다. 먼저 ACF 표면의 유분 등 불순물을 제거한 후, Pd-Sn을 이용해 예민화(Sensitization) 하였으며, 이를 통해 Pd를 ACF 표면에 형성하였다. 예민화된 ACF 표면에서 Pd 이외의 물질을 제거하기 위해 가속화(Acceleration) 과정을 거치며, 가속화된 ACF에  $\text{AgNO}_3$  용액을 이용하여 무전해 은도금을 수행하였다. 무전해 은도금 수행 시간을 10, 20, 30분으로 달리하여 수행하였다. 그림 2는 ACF 필터에 은입자를 도금하기 위한 방법을 간략하게 나타낸 것이다.

무전해 은도금된 ACF 필터의 형상을 SEM (Scanning Electron Microscopy; JSM-6500F, Jeol)를 통해 관찰하였으며, XRD (X-ray Diffraction; D/MAX-Rint 2000, Rigaku) 분석을 통해 무전해 은도금된 ACF 필터의 성분을 확인하고 그 결정 크기를 계산하였다. 그림 3은 순수한 ACF 필터 (ACF/Ag-0)와 은입자가 코팅된 ACF 필터의 SEM 사진이다. 도금이 진행된 필터의 표면에 약 1  $\mu\text{m}$  크기의 입자가 형성된 것을 확인할 수 있으며, 그 농도는 도금 시간이 증가할수록 증가하여, 30분 도금한 경우, 필터의 전 표면을 코팅하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

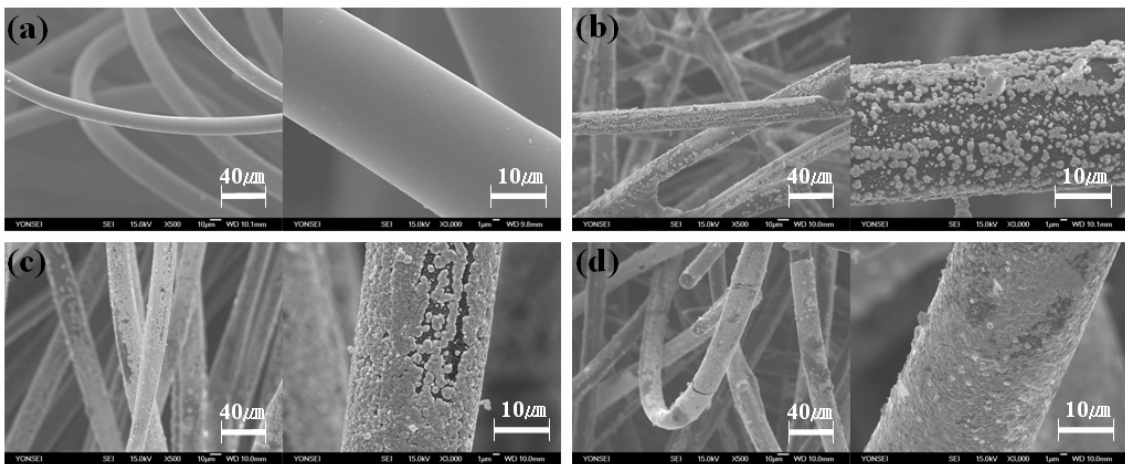


그림 3. SEM 사진 : (a) ACF/Ag-0, (b) ACF/Ag-10, (c) ACF/Ag-20, and (d) ACF/Ag-30.<sup>(21)</sup>

그림 4는 ACF 필터의 XRD 분석 결과이다. 2θ의 값은 38.1°와 44.3°, 64.5°, 77.5°에서 피크를 보였으며 이는 각각 은 결정의 (111), (200), (220), (311) 면에 해당한다. 이처럼 결정학적 면을 명명하는 일련의 세 개의 정수를 밀러 지수(Miller indices)라 하며, 이는 면과 결정축이 만나는 절편의 축에 대한 길이 비의 역수로부터 결정된다. 이러한 특성을 통해 ACF 필터의 표면에 코팅된 물질이 은이라는 것을 확인할 수 있다.<sup>(22)</sup>

ACF 필터의 표면에 형성된 은 입자 결정의 평균 크기는 다음의 Scherrer 식을 통하여 계산할 수 있다.

$$d = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta}$$

여기서 d는 입자의 크기, λ는 사용된 X-ray의 파장(CuKα=0.154056nm), β는 반가폭(FWHM; Full-Width at Half-Maximum)을 의미한다. 위의 식을 이용해 38.1°의 결과를 통해 계산한 결과, 무전해 은도금 수행 시간이 10, 20, 30분으로 증가할수록 은 입자 결정의 크기는 12.13, 13.17, 15.52nm로 증가하는 경향을 보였다.

이 밖에도, EDX (Energy Dispersive X-ray)

또는 ICP (Inductively Coupled Plasma) 분석 등을 이용하여 정성적 또는 정량적인 은 입자 함유량을 측정할 수 있다.

## 2.2. 바이오에어로졸 여과 특성

ACF 필터의 바이오에어로졸 여과 특성을 확인하기 위해 한국미생물보존센터에서 분양받은 *E. coli*와 *P. fluorescens*, *B. subtilis*, *M. luteus*의 4가지 균종을 사용하였다. *E. coli*와 *P. fluorescens*는 Gram 음성 세균에 속하며, *B. subtilis*와 *M. luteus*는 Gram 양성에 속하는 세균이다. 위의 4가지 균을 Nutrient broth를 이용해 배양하여 원심분리를 사용하여 배양액으로부터 분리하여 초순수에 현탁하였다. 바이오에어로졸을 발생시키기 위해 위의 4가지 균을 동일한 비율로 혼합하여 분무입자 발생장치(Nebulizer)를 이용해 공기 중으로 분사하였다. ACF 필터의 양단에서 APS (Aerodynamic Particle Sizer)를 사용해 바이오에어로졸의 입경 분포를 측정하였으며, 전후단의 바이오에어로졸 농도와 다음 식을 이용해 ACF 필터의 바이오에어로졸 여과 효율을 계산할 수 있다.

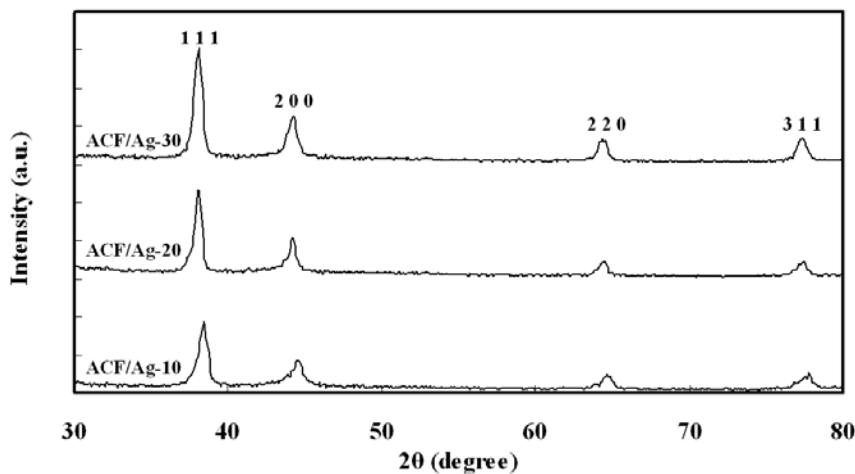


그림 4. 은도금된 ACF 필터의 XRD 분석 결과<sup>(21)</sup>

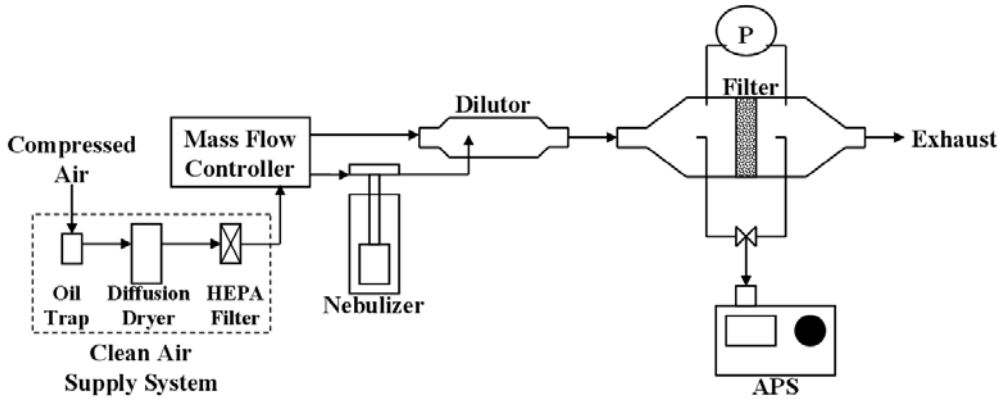


그림 5. 실험 장치 구성<sup>(21)</sup>

$$\eta = 1 - \frac{C_{down}}{C_{up}}$$

여기서  $C_{down}$  과  $C_{up}$  은 각각 필터 후단과 전단에서 측정된 바이오에어로졸의 수농도를 의미한다. 또한, ACF 필터의 양단에 차압계를 설치하여 필터의 차압을 측정하였다. 단면유속은 0.1, 0.3, 0.5 m/s로 설정하여 실험을 수행하였다. 그림 5는 본 실험을 위한 실험장치 구성을 나타낸다.

그림 6은 차압 측정의 결과이다. 모든 경우의 필터에 있어 유속이 증가함에 따라 차압은 증가하는 특성을 보였다. 필터에 도금된 은의 양과 차압의 관계에 있어서는 특별한 경향성을 확인할 수 없었다. 또한 그림 7은 본 실험에 사용된 바이오에어로졸의 입경 분포와 ACF 필터의 바이오에어로졸 여과 특성을 나타낸다. 발생된 바이오에어로졸은 약  $0.78\mu\text{m}$  에서 피크를 보였다. ACF 필터의 바이오에어로졸

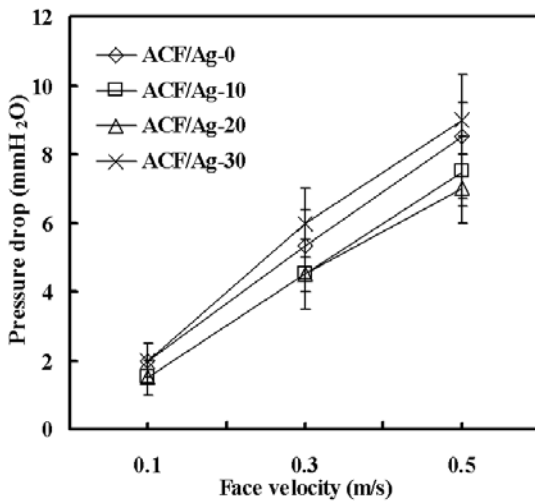


그림 6. ACF 필터의 차압특성<sup>(21)</sup>

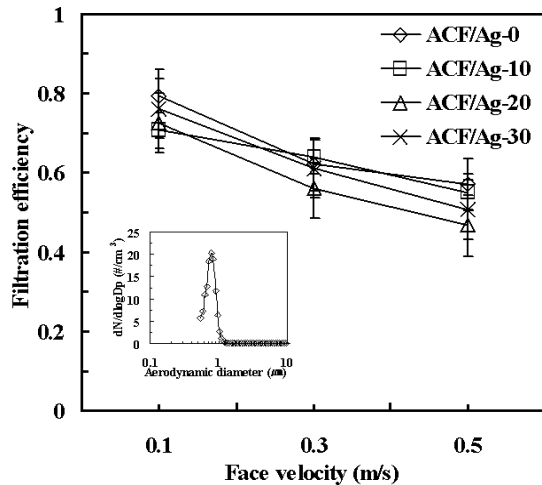


그림 7. ACF 필터의 바이오에어로졸 여과 특성<sup>(21)</sup>

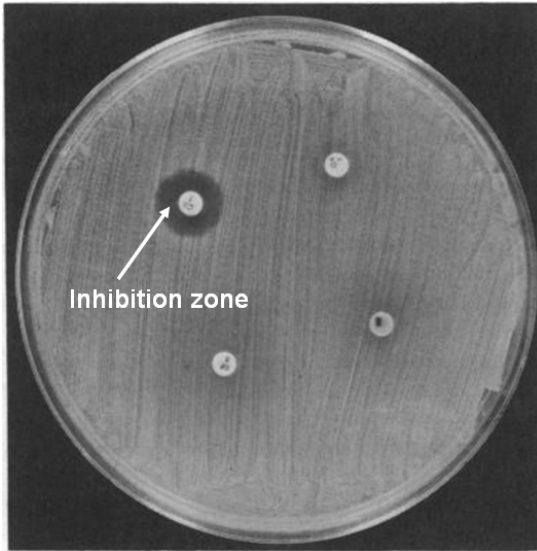


그림 8. Disc diffusion 방법 실험의 예<sup>(23)</sup>

여과 특성은 0.1m/s 조건에서 약 0.8이었으며, 유속이 증가할수록 감소하여 0.5m/s 조건에서는 약 0.6의 효율을 보였다. 이러한 유량에 따른 차압과 여과 효율의 특성은 필터에서 일반적으로 나타나는 현상이라 할 수 있다. 이를 통해 은도금 여부는 필터의 차압 및 여과 효율에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 은 도금에 의해 형성되는 은입자가 필터의 표면으로부터 성장하여 필터의 전

체적인 공극률에 영향을 미치지 않기 때문이다. 이는 그림 3의 SEM 사진을 통해서도 확인할 수 있다.

### 2.3. 항균 특성

은도금 된 ACF 필터의 경우, disc diffusion 방법에 의해 그 항균 특성을 확인할 수 있다. 그림 8은 disc diffusion 방법을 이용해 항균 특성을 확인한 실험의 예이다. *E. coli*와 *P. fluorescens*, *B. subtilis*, *M. luteus*의 4가지 균을 각각 nutrient agar plate 위에 도말한 후, 그 위에 필터 샘플을 올려놓고 적정 온도에서 배양한다. 항균 특성을 갖는 필터의 경우, 그림 8에서 보이는 바와 같이 필터와 필터 주변으로 세균이 번식하지 못하는 영역 (inhibition zone)이 형성되며, 이를 통해 필터의 항균 특성을 확인할 수 있다.

그림 9는 순수한 ACF 필터와 은도금된 ACF 필터의 항균 실험 결과를 나타낸 것이다. 은이 도금되지 않은 순수한 ACF 필터의 경우, 필터와 세균의 접촉면에서 세균이 번식하였으며, 따라서 순수한 ACF 필터는 항균 특성이 없음을 확인할 수 있었다. 반면, 은이 도금된 필터는 본 실험에서 사용된 모든 종류의 세균에 대해 번식 억제 영역을 보였으

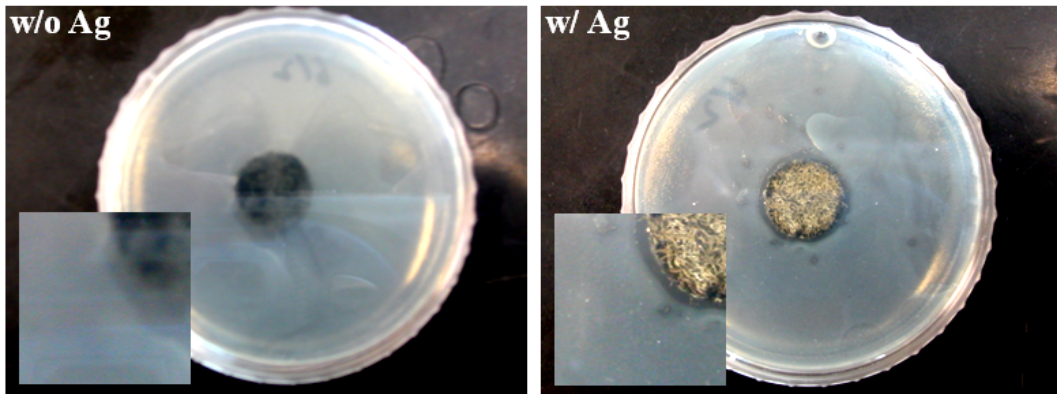


그림 9. 순수한 ACF 필터와 은이 코팅된 ACF 필터의 항균 특성 (*B. subtilis*, ACF/Ag-20)

며, 이를 통해 ACF 필터에 부착된 은에 의해 항균 작용이 수행되는 것을 알 수 있다.

### 2.4. 흡착 특성

ACF는 기본적으로 가스상 물질을 흡착하기 위한 구조로 되어있다. 항균 기능을 추가하기 위해 은도금을 할 경우, 미세기공이 막히는 현상으로 인해 가스 흡착 특성이 변화할 수 있기 때문에, 은도금된 ACF 필터의 흡착 특성을 평가하는 것은 중요한 작업이다. 필터의 흡착 특성을 평가하기 위해 BET 분석을 수행하여 필터의 비표면적을 측정하였다. 그 결과는 표2와 같았으며, 은도금 양이 증가함에 따라 비표면적의 양은 감소하는 경향을 보였다. 이러한 비표면적의 감소는 가스 흡착에 필요한 ACF 필터의 미세기공이 은도금의 영향으로 인해 감소하는 것을 의미하며, 따라서 이는 가스 흡착 특성에도 영향을 미칠 수 있다.

표 2. ACF 필터의 비표면적 측정 결과

	ACF/ Ag-0	ACF/ Ag-10	ACF/ Ag-20	ACF/ Ag-30
BET surface area (m <sup>2</sup> /g)	1598	1441	1383	1341

### 3. 결론

바이오에어로졸은 실내 공간에서 심각한 건강 문제를 유발시키는 물질 중 하나로 관리의 대상이며, 이를 위해 바이오에어로졸 제어 기술의 개발은 필수적이며, 또한 바이오에어로졸을 발생시키는 발생원을 제어하는 방법이 효과적이다. 흡착 특성을 갖는 ACF 필터에 무전해 도금을 통해 은나노 입자를 코팅함으로써 항균 특성을 부가하였고, 이를 바이오에어로졸 저감 장치로의 적용 가능성에 대해 살

펴보았다. 은도금된 ACF 필터는 순수한 ACF 필터에 비해 항균 특성을 보였으며, 은 입자의 부착으로 인한 차압의 증가 등은 나타나지 않았다. 단, 은도금으로 인해 ACF 필터의 비표면적이 감소하는 경향을 보였으며, 따라서 과도한 양의 은도금은 ACF 필터의 가스 흡착 성능을 현격하게 저하시킬 수 있는 문제를 지니고 있다. 따라서 항균 특성을 보임과 동시에 가스 흡착 특성을 최대도 유지하기 위해 최적화된 은도금 양을 결정하는 것이 중요한 과제라 할 수 있다.

### - 참고문헌 -

- Hinds, W. C., 1999, *Aerosol Technology*, 2nd, John Willey & Sons.
- 윤기영, 변정훈, 박재홍, 황정호, 2005, "바이오에어로졸 측정 기술", *공기청정기술*, 18권, 2호, 26-32.
- 환경부, 2004, "다중이용시설등의실내공기질관리법시행규칙"
- Collins, F. M., 1971, "Relative Susceptibility of Acid-Fast and Non-Acid Fast Bacteria to Ultraviolet Light", *Applied Microbiology*, Vol. 21, pp. 411-413.
- Gates, F. L., 1929 "A Study of Bactericidal Action of Ultraviolet Light", *Journal General Physiology*, Vol. 13, p. 231.
- Hollander, A., 1942, *Abiotic and Sublethal Effects of Ultraviolet Radiation in Microorganisms*. In *Aerobiology*, Publication number 17, American Association for the Advancement of Science, edited by F. R. Moulton. The Science Press Printing Co., Lancaster, PA.
- Riley, R. L., and Kaufman, J. E., 1972, "Effect



- of Relative Humidity on the Inactivation of Airborne *Serratia marcescens* by Ultraviolet Radiation", *Applied Microbiology*, Vol. 23, pp. 1113-1120.
8. Ko, G., First, M. W., and Burge, H. A., 2000, "Influence of Relative Humidity on Particle Size and UV Sensitivity of *Serratia marcescens* and *Mycobacterium bovis* BCG Aerosols", *Tubercle and Lung Disease*, Vol. 80, pp. 217-228.
  9. Fletcher, L. A., Noakes, C. J., Beggs, C. B., Sleight, P. A., and Kerr, K. G., 2003, "The Ultraviolet Susceptibility of Aerosolised Microorganisms and the Role of Photo-reeactivation", Second international congress of the IUVA, Vienna, 9-11th July.
  10. Beggs, C. B., Noakes, C. J., Sleight, P. A., Fletcher, L. A., and Kerr, K. G., 2006, "Methodology for Determining the Susceptibility of Airborne Microorganisms to Irradiation by an Upper-room UVGI System", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 37, pp. 885-902.
  11. Miller, S. L., and Macher, J. M., 2000, "Evaluation of a Methodology for Quantifying the Effect of Room Air Ultraviolet Germicidal Irradiation on Airborne Bacteria", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 33, pp. 274-295.
  12. Maus, R., Goppelsroder, A., and Umhauer, H., 2001, "Survival of Bacteria and Mold Spores in Air Filter Media", *Atmospheric Environment*, Vol. 35, pp. 105-113.
  13. Schleibinger, H., and Ruden, H., 1999, "Air Filters from HVAC Systems as Possible Source of Volatile Organic Compounds (VOC) - Laboratory and Field Assays", *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 4571-4577.
  14. 이성화, 이성환, 현옥천, 진심원, 조관식, 2006, "김치유산균 응용 필터에 의한 조류독감 Virus (H5N1)의 항바이러스 특성에 관한 실험적 연구", 한국입자에어로졸학회 학술대회, 용평, 7월 6-8일.
  15. 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 Filter", *Journal of Applied Microbiology*, Vol. 94, pp. 9-15.
  16. Kelly-Wintenberg, K., Sherman, D. M., Tsai, P., Gadri, R. B., Karakaya, F., Chen, Z., Roth, J. R., and Montie, T. C., 2000, "Air Filter Sterilization Using a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma (the Volfilter)", *IEEE Transaction on Plasma Science*, Vol. 28, pp. 64-71.
  17. 이병욱, 이윤하, 2005, "대장균 바이오에어로졸의 생명성 제어를 위한 가열튜브에 관한 연구", *Particle and Aerosol Research*, Vol. 1, pp. 39-45.
  18. 지준호, 윤선화, 배귀남, 정재희, 김상수, 2006, "소형 에어로졸 생성장치의 항균 장치 적용 특성", 한국입자에어로졸학회 학술대회, 용평, 7월 6-8일.
  19. 윤선화, 배귀남, 이병욱, 지준호, 2006, "은 나노 입자의 공기 중 대장균 박테리아 항균 특성", 한국입자에어로졸학회 학술대회, 용평, 7월 6-8일.
  20. Park, S. J., and Jang, Y. S., 2003, "Preparation and Characteristics of Activated Carbon Fibers Supported with Silver Metal



- for Antimicrobial Behavior”, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 261, pp. 238-243.
21. 윤기영, 변정훈, 고병주, 박재홍, 김명운, 윤희승, 황정호, 2006, “무전해 은도금된 활성탄소섬유 필터의 바이오에어로졸 저감 특성”, 한국실내환경학회지, 제3권, 제2호, 141-149.
22. Callister, W. D., Jr., 2003, Materials Science and Engineering - An Introduction, 6th Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
23. Drew, W. L., Barry, A. L., O’Toole, R., and Sherris, J. C., 1972, Reliability of the Kirby-Bauer Disc Diffusion Method for Detecting Methicillin-Resistant Strains of *Staphylococcus aureus*, Applied Microbiology, Vol. 24, pp. 240-247.