

## 항균성 천연물질의 도포방법에 따른 에어필터 여재의 항균 특성 비교

### Comparison of Antibacterial Ability of Air Filter Media Treated with a Natural Antibacterial Agent by Three Treatment Methods

박선영<sup>1),2)</sup> · 정재희<sup>1)</sup> · 황기병<sup>1)</sup> · 배귀남<sup>1),\*</sup> · 김용표<sup>2)</sup> · 노주원<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>한국과학기술연구원 환경복지연구단, <sup>2)</sup>이화여자대학교 환경공학과,

<sup>3)</sup>한국과학기술연구원 강릉분원 기능성천연물센터

(2011년 3월 17일 접수, 2012년 3월 28일 수정, 2013년 3월 4일 채택)

Sun Young Park<sup>1),2)</sup>, Jae Hee Jung<sup>1)</sup>, Gi Byung Hwang<sup>1)</sup>, Gwi-Nam Bae<sup>1),\*</sup>  
Yong Pyo Kim<sup>2)</sup> and Chu Won Nho<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Center for Environment, Health and Welfare Research,  
Korea Institute of Science and Technology

<sup>2)</sup>Department of Environmental Science & Engineering, Ewha Womans University

<sup>3)</sup>Functional Food Center, KIST Gangneung

(Received 17 March 2011, revised 28 March 2012, accepted 4 March 2013)

### Abstract

Various antimicrobial technologies have been developed to inactivate bioaerosols in indoor environments. In this study, air filter media were treated with a natural antibacterial agent of *Sophora flavescens* in order to inactivate the bacteria collected on the air filter. Three treatment methods were applied to manufacture the test antibacterial air filter media: electrospray, nebulization and dip-coating methods. In case of electrospray and nebulization processes, the size distribution of aerosolized natural antibacterial agent was measured using a scanning mobility particle sizer. *Staphylococcus epidermidis* bacteria were aerosolized to test inactivation of the filter media treated with a natural antibacterial agent. The pressure drop and the antibacterial efficiency of the filter media increased with increasing the mass loading of natural antibacterial agent in each treatment method. The antibacterial efficiency per loaded antibacterial agent mass by the electrospray method was the highest and the filter treated by the dip-coating method was the lowest among three treatment methods.

**Key words :** Antibacterial, *Staphylococcus epidermidis*, Natural product, Electrospray, Nebulization, Dip coating

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-958-5676, E-mail : gnbae@kist.re.kr

## 1. 서 론

최근 조사에 의하면 한국인은 하루 중 약 87%의 시간을 실내공간에서 생활하고 있다고 보고되고 있으며 (Yang *et al.*, 2009), 급성호흡기증후군 (SARS, severe acute respiratory syndrome), 신종인플루엔자, 조류독감, 구제역 등을 비롯한 다양한 공기감염의 문제로부터 실내 공기질에 대한 관심이 더욱 더 높아지고 있다 (Kwon and Kim, 2010). 우리나라에서는 2004년부터 ‘다중이용시설 등의 실내공기질관리법’이 시행되고 있으며, 현재 이 법에서 관리하고 있는 총 10개의 오염물질은 총부유세균, 이산화탄소, 일산화탄소, 폼알데하이드, 미세먼지 (PM<sub>10</sub>), 오존, 석면, 총휘발성유기화합물, 라돈, 이산화질소이다. 이 가운데 총부유세균에 대한 기준은 미생물의 종과 관계없이 공기 중에서 포집되어 배양이 가능한 총세균의 수농도를 의미하고, 실내공간이 비위생적이거나 환기가 불충분할 때 이러한 총부유세균의 농도가 높아지게 된다. 이러한 부유 미생물은 천식이나 알레르기를 유발하여 인체와 환경에 나쁜 영향을 미칠 수 있는 것으로 알려져 있다 (Jung *et al.*, 2009). 그러므로 의료기관, 보육시설, 노인의료시설 및 산후조리원에서 총부유세균에 대한 유지기준 (800 CFU/m<sup>3</sup>)을 설정하여 관리하고 있다 (Seo *et al.*, 2006). 이러한 부유 미생물을 포함한 바이오에어로졸 (bioaerosol)은 일반 에어로졸과 달리 생장이나 증식이 가능하며, 이 과정에서 MVOCs (microbial volatile organic compounds)를 발생하여 실내에서 냄새를 유발하기도 한다.

실내 부유 미생물 오염에 대응하기 위하여 자외선 조사, 열에너지, 이온발생, 항균필터 등에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다 (Park *et al.*, 2010). 또한, 항균성 물질로 천연물질뿐만 아니라 나노물질을 사용하기 위하여 은 나노입자, 탄소나노튜브 등의 항균 특성을 규명하는 연구도 함께 수행되고 있다 (Yun *et al.*, 2009, 2007; Yoon *et al.*, 2005).

총부유세균 농도를 유지기준 이하로 관리하기 위하여 가장 일반적으로 적용할 수 있는 방법으로서, 건물의 공조 시스템이나 실내 공기정화설비에 항균필터를 설치할 수 있다. 항균필터를 제조하는 방법은 크게 액상공정과 기상공정으로 나눌 수 있다. 액상공정은 다시 항균물질을 액상화시켜 필터 원재료와 혼

합하여 필터 제조과정에서 항균물질을 사용하는 경우와 제조된 필터를 액상의 항균물질에 담지시켜 코팅하는 방법으로 구분할 수 있다. 기상공정은 입자 또는 증기화된 항균물질을 기체의 흐름에 따라 이동시킴으로써 필터 표면에 도포하는 방법이다.

액상공정 중 담지법 (dip-coating method)은 항균물질의 용액에 필터를 함침시켜 코팅하는 방법으로서 특별한 기술이나 많은 시간이 걸리지 않기 때문에 가장 흔하게 사용하는 항균필터 제조방법이다. 항균물질이 액상으로 존재하는 경우, 필터여재에 코팅이 간편하고 기상공정에 비해 많은 양을 짧은 시간에 도포할 수 있지만, 액상공정 중에 여재가 손상될 우려가 있으므로 HEPA (high efficiency particulate air) 필터와 같은 고성능 필터에는 적용하지 못하고 있는 실정이다.

기상공정 중 정전분무법 (electrospray method)은 전기력을 이용하여 액적을 분열시킴으로써 높은 전하를 갖는 입자를 발생시키는 방법이다. 이때, 하전된 입자 사이의 전기적 상호 반발력에 의하여 입자간의 응집이 줄어들기 때문에 단분산 분포의 나노입자를 발생시킬 수 있으며, 주위 전기장을 이용하여 입자의 거동을 쉽게 제어할 수 있다. 정전분무법을 이용하여 나노입자를 발생시키는 연구는 많이 수행되어왔고 (Jung *et al.*, 2011, 2009; Kim *et al.*, 2008), 비교적 간단하게 시스템을 구축할 수 있어 다양한 환경과 분야에 적용할 수 있지만 (Kim *et al.*, 2008), 아직 항균필터의 제조와 관련하여 적용된 사례는 보고된 바가 거의 없다.

가압분무법 (nebulization method)은 일정한 유량으로 액상의 물질을 고압의 공기와 함께 미세 노즐로 분사시킴으로써 액상의 물질을 공기 중으로 입자화시키는 방법이다. 비교적 간편하고, 고도의 기술이 필요하지 않아 다양한 분야에 널리 사용되고 있다 (Eninger *et al.*, 2009).

항균필터는 대부분 액상공정에 의해 제조되고 있는데, 최근 항균성 금속 나노입자를 제조하여 기상공정으로 필터여재에 도포하여 항균 특성을 평가하는 연구들이 수행되고 있다 (Lee *et al.*, 2008).

항균물질을 사용하여 항균필터를 제조하는 경우 원료에 따라 생산비용의 차이가 크며, 항균물질을 얻는 과정이 복잡하고 원료를 구하기 어려울수록 소량의 물질로 최대의 항균효율을 나타내는 필터를 제조

하는 것이 중요하다. 그러므로 항균물질의 정량화에 따른 항균효율의 비교는 항균필터의 경제성을 평가 하는데 유용한 정보를 제공할 수 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 다양한 방법으로 항균필터가 제조되고 있으나, 이들 제조방법에 따른 항균효율의 비교에 대한 연구는 잘 알려져 있지 않다. 본 연구팀에서 처음으로 시도하는 정전분무법에 의한 항균필터 제조방법의 특징을 객관적으로 파악하기 위하여 본 연구에서는 대표적인 항균성 천연물질로 알려진 고삼(*Sophora flavescens*)을 이용하여 3가지 제조방법(기상공정인 정전분무법과 가압분무법 및 액상공정인 담지법)으로 항균성 필터여재를 제조하였다. 박테리아 시험균주(*Staphylococcus epidermidis*)를 공기부유화시킨 후 필터여재로 집진시켜 이들 제조방법에 따른 박테리아에 대한 항균력의 차이를 필터여재에 도포된 천연물질의 질량을 기준으로 비교하였다. 또한, 각 방법에 대해 천연물질의 도포량에 따른 필터여재의 차압 및 박테리아에 대한 항균력의 변화를 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 항균성 천연물질의 물리화학적 특성

한약재로 널리 사용되는 고삼은 암, 위장의 출혈, 피부병 등에 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 항균성 천연물질로 고삼의 뿌리 부분을 에탄올로 추출한 후 동결 건조시킨 갈색 분말을 사용하였다. 필터여재에 도포하기 위해 고삼 분말을 에탄올(순도 ≥99.9%, 밀도 0.790 kg/L)에 녹여 설정한 농도로 만들어 사용하였다. 에탄올에 녹인 용액은 밝은 노랑색을 띠고 향은 없었다.

용액 제조 시 발생할 수 있는 오차를 최소화시키기 위해 모용액을 제조한 후 설정한 농도로 희석하여 사용하였다. 모용액은 에탄올 40 mL에 고삼 분말 0.5 g을 녹인 0.016 wt%의 농도로 vortex와 초음파로 각각 5분, 10분씩 처리한 후, 기공 크기가 0.45 μm인 필터에 걸러 사용하였고, 4°C에서 냉장 보관하였다.

고삼 추출물의 물리적 특성을 파악하기 위하여 천연물질의 용액과 에탄올의 전기전도도, 점도, 표면장력 및 밀도를 측정하여 표 1에 나타냈다. 분무 시 직접 사용한 0.008 wt% 용액의 밀도는 에탄올과 거의

Table 1. Physical properties of ethanol and antibacterial suspension.

	Electrical conductivity [S/m]	Viscosity [mPa · s]	Surface tension [mN/m]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]
Pure water	1.5 × 10 <sup>-4</sup>	1.0	73	994
Pure ethanol	0.2 × 10 <sup>-4</sup>	1.1	22	784
Antibacterial suspension	0.4 × 10 <sup>-4</sup>	1.0	21	785

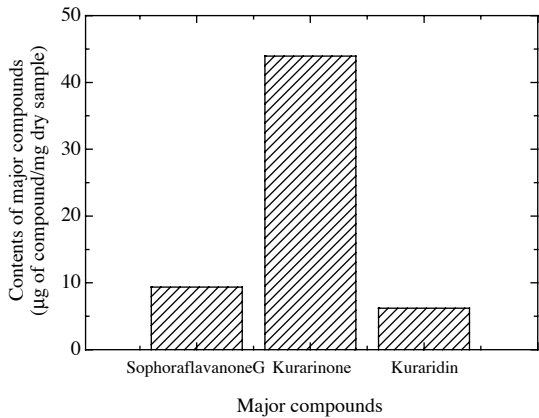


Fig. 1. Contents of major compounds of *Sophora flavescens*.

비슷하였고, 전기전도도는 0.04 mS/m로 에탄올에 비해 2배 가량 높았다.

고삼 추출물의 화학적 특성을 알아보기 위해 유리 섬유 필터에 천연물질을 가압분무 방식으로 30분 동안 집진하여 액체 크로마토그래피(Liquid Chromatography, Agilent Technologies, Santa Clara, CA)로 성분을 분석하였다. 그림 1을 보면, 본 연구에서 사용한 고삼 추출물의 주요 성분은 sophoraflavanone G, kurarinone, kuraridin이다. Tim Cushnie and Lamb (2005)의 연구에 의하면, 고삼의 주요 성분인 플라보노이드는 핵산의 합성을 방해하고 세포막에 영향을 주어 항균작용을 하는 것으로 나타났다. *Proteus vulgaris*의 경우 DNA 합성이 강하게 억제되었고, *Staphylococcus aureus*의 경우 RNA의 합성이 억제되었다. 특히, sophoraflavanone G는 세포 내벽과 외벽 사이의 유동을 확실히 감소시키는 역할을 함으로써 세포의 정상적인 활동을 방해하는 것으로 알려져 있다.

## 2.2 항균 필터여재의 제조

본 연구에서 사용한 항균 처리를 하지 않은 필터여재는 비교적 높은 집진효율을 가지며 (Park, 2011), 폴리우레탄 섬유로 만들어진 것이다. 이 필터여재에 사용된 섬유의 직경은 10~20  $\mu\text{m}$ , 여재의 두께는 0.3 mm, 압축률은 33%이었다.

담지법은 항균필터를 대량으로 간편하게 만들 수 있는 장점으로 인하여 가장 흔하게 사용되는 방법이다. 본 연구에서는 0.004, 0.008 및 0.016 wt% 용액을 사용하였다. 각 농도의 용액을 피펫으로 50  $\mu\text{L}$ 를 덜어내어 필터여재에 천천히 적셨다. 필터여재를 담지하는 과정에서 필터여재가 모두 젖어 여재 내부의 공기가 모두 빠져 나온 것을 확인하여 여재의 내부 섬유까지 천연물질로 코팅될 수 있도록 하는 것이 중요하다. 용액을 접종한 뒤 담지된 상태로 5분 이상 충분히 기다린 후, 클린 벤치(JSCB-1500SB, JSR, Korea)에서 24시간 이상 건조하였다. 건조 시 필터여재에 항균물질이 골고루 코팅될 수 있도록 평평한 곳에서 건조시켰고, 건조과정 중 필터여재의 오염이나 손상이 일어나지 않도록 주의하였다. 24시간 건조 후에 테스케이터에서 다시 24시간 동안 보관한 후 필터여재를 칭량하고 항균시험에 사용하였다.

가압분무 항균필터는 모용액(0.016 wt%)을 2배 희석한 0.008 wt% 농도의 용액을 분무하여 제조하였다. 분무에 사용된 유량은 1 L/min이었으며, 9 L/min의 희석공기를 공급하여 총 10 L/min의 공기가 필터여재를 통과하도록 하였다.

정전분무 항균필터는 시린지 펌프로 천연물질 용액을 공급하고 정전분무 장치로 들어가는 입구에 전압을 인가하여 제조하였다(Park, 2011). 모용액(0.016 wt%)을 2배 희석한 0.008 wt%의 천연물질 용액이 30  $\mu\text{m}$  직경의 모세관을 따라 흘러 아래에서 걸어주는 전압에 의해 입자화되었다. 분무조건은 50  $\mu\text{L}/\text{h}$ , 3.75 kV이었다.

기상공정과 액상공정의 도포량 차이를 파악하기 위해 항균물질의 코팅 전과 후에 필터여재의 무게를 측정하였다. 필터여재의 무게를 측정할 때 사용한 저울(HM-202, A&D Co. Ltd, Japan)은 10  $\mu\text{g}$  단위까지 측정할 수 있는 것으로 측정값의 최소값과 최대값의 차이가 40  $\mu\text{g}$ 보다 작은 값이 3개가 나올 때까지 측정하여 세 값의 평균을 사용하였다.

가압분무 및 정전분무와 같은 기상공정의 경우 천

연물질을 필터여재에 도포하기 전에 공기 중에 부유한 천연물질 입자의 크기분포를 scanning mobility particle sizer (SMPS, CPC model 3010, DMA model 3080, TSI, MN, USA)로 측정하였다. 이때 샘플링 유량과 희석공기 유량은 각각 0.3, 3 L/min으로 설정하였다.

천연물질의 도포량에 따른 항균필터의 항균력 차이를 파악하기 위하여 담지법의 경우 천연물질의 액상농도를 변화시켰고, 가압분무법과 정전분무법의 경우 천연물질의 도포시간을 다르게 설정하였다. 가압분무법의 경우 천연물질을 30초, 60초, 120초, 정전분무법의 경우 5분, 30분, 60분, 120분 동안 도포시킨 항균 필터여재와 컨트롤 필터여재를 하나의 세트로 실험하였다.

## 2.3 항균 필터여재의 성능평가

3가지 공정에 의해 천연물질로 도포된 필터여재의 차압 및 항균력을 평가하기 위하여 그림 2와 같이 실험장치를 구성하였다. 먼저 분무기를 작동하지 않은 상태에서 희석공기만을 사용하여 필터여재의 상류와 하류의 압력 차이를 조사하였다. 보통 필터여재의 설계 면유속(face velocity)이 0.1 m/s이므로(Hinds, 1999), 필터여재의 면유속을 0.02~0.16 m/s 범위로 변화시켜 차압계(FCO12, Furness Controls Ltd., East Sussex, UK)로 차압을 측정하였으며, 장비의 측정범위인 20 mmH<sub>2</sub>O 이내에서만 사용하였다.

필터여재의 항균력을 평가하기 위하여 시험균주로 구형의 그람 양성균을 대표하는 *S. epidermidis* 박테리아를 사용하였다. 균액의 농도는 29 mL의 증류수에 1 mL 스탁(stock) 1개를 풀어 사용하거나 28 mL의 증류수에 1 mL 스탁 2개를 풀어 사용하였다. 실험에 사용한 스탁의 농도는  $1 \times 10^{10}$  CFU/mL이었다. 이들 균액을 분무기(nebulizer) 용기에 넣은 후 압축공기를 공급하여 공기부유화시켰고, 습기를 제거하기 위하여 확산건조기를 사용하였으며, 추가로 희석공기를 사용하여 설정한 필터여재의 시험유량을 맞추었다. 발생된 시험균주는 모두 시험 필터여재를 경유하므로, 이 과정에서 필터여재에 집진되었다.

공기부유화된 *S. epidermidis* 입자의 크기분포를 ultraviolet aerodynamic particle sizer (UVAPS model 3314, TSI, MN, USA)로 측정하였다. 대표적인 크기분포를 나타낸 그림 3을 보면, 모드 입경이 약 0.9  $\mu\text{m}$

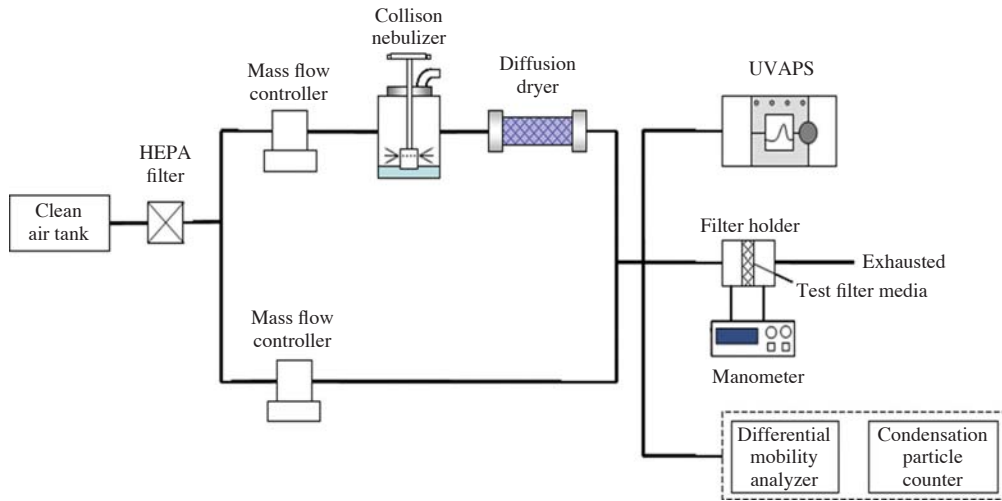


Fig. 2. Experimental setup of an antibacterial air filter media test.

인 단분산 분포로 상당히 균일한 크기의 *S. epidermidis* 입자가 발생되었음을 알 수 있다. 모든 시험에서 필터여재에 시험균주를 5분 동안 포집하였으며, 공기 중 부유미생물의 총 입자 수농도는 약 75 particles/cm<sup>3</sup>이었고, 필터여재의 입자 포집효율은 약 82% 이상이었다. 한 세트의 필터여재에 미생물 포집이 모두 끝난 후, 이들 필터여재에서 동시에 균주를 추출하였다. TWEEN80을 0.05% (v/v)로 만든 PBS 용액 5 mL에 필터여재를 넣은 다음 vortex 2분, 초음파 5분, vortex 2분, 초음파 5분, vortex 2분의 추출과정을 거쳤다 (Burton *et al.*, 2005). TWEEN80은 계면활성제와 같은 역할을 하여 여재 표면에서 균주가 쉽게 떨어져 나올 수 있도록 한다. 이러한 과정을 통해 얻은 추출액을 1배, 10배, 100배로 희석하여 영양배지 (Nutrient Agar, Becton Dickinson, NJ, USA)에 0.1 mL씩 도말하였고, 24시간 후에 CFU (colony forming unit)를 계수하였다. 식 (1)에 나타낸 바와 같이 컨트롤 필터여재의 CFU에 대한 항균 처리된 필터여재의 CFU의 비로 상대적 생존율 (relative viability)을 구하여 항균력을 평가하였다 (Jung *et al.*, 2013).

$$\text{Relative viability (\%)} = \text{CFU}_A / \text{CFU}_C \times 100 \quad (1)$$

여기서, CFU<sub>A</sub>는 항균 처리된 필터여재의 CFU 수, CFU<sub>C</sub>는 컨트롤 필터여재의 CFU 수이다.

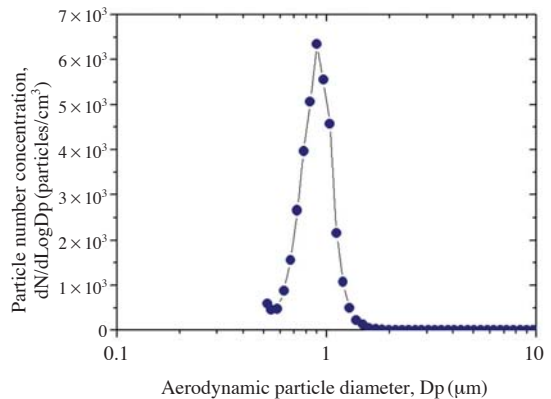


Fig. 3. Size distribution of nebulized *S. epidermidis* bio-aerosols.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 항균성 천연물질의 입경분포 및 도포형상

기상공정에 의해 천연물질을 공기부유화시켰을 때 입경분포를 파악하기 위하여 시험 필터여재의 상류에서 SMPS로 입경분포를 측정하였다. 즉, 가압분무법의 경우 그림 2에 나타낸 실험장치에서 분무기의 용기에 천연물질 용액을 넣은 후 분무시켜 시험 필터여재 상류에서 SMPS로 공기 중 천연물질 입자의 크기분포를 측정하였다. 정전분무법의 경우에도 이와

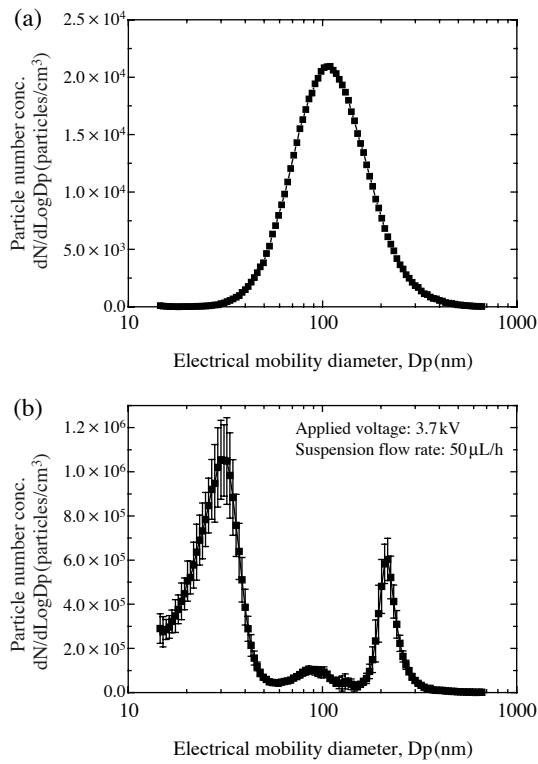


Fig. 4. Size distribution of antibacterial natural particles generated by (a) nebulization method, (b) electro-spray method.

유사하게 입경분포를 측정하였다 (Park, 2011). 그림 4를 보면, 가압분무법에 의해 제조된 천연물질 입자의 크기분포는 약 100 nm에서 피크농도를 나타내는 단일모드 형태이고, 정전분무법의 경우 약 30 nm 및 200 nm에서 피크농도를 나타내는 이중모드(bimodal) 분포를 나타낸다. 가압분무법의 경우 100 nm 근처의 서브마이크론 입자들이 주로 발생되고 피크농도가 약  $2 \times 10^4$  particles/cm<sup>3</sup>으로 낮았다. 이에 비해 정전분무법의 경우 200 nm 근처의 서브마이크론 입자도 발생되지만, 30 nm 근처인 나노입자의 피크농도가 약  $1 \times 10^6$  particles/cm<sup>3</sup>으로 천연물질 입자가 다량으로 발생됨을 알 수 있다.

제조공정에 따라 천연물질이 필터여재의 표면에 도포되는 양상을 파악하기 위하여 전자현미경 이미지를 촬영하였으며, 대표적인 예를 그림 5에 나타냈다. 그림 5(a)는 용액의 농도가 0.016 wt%인 천연물

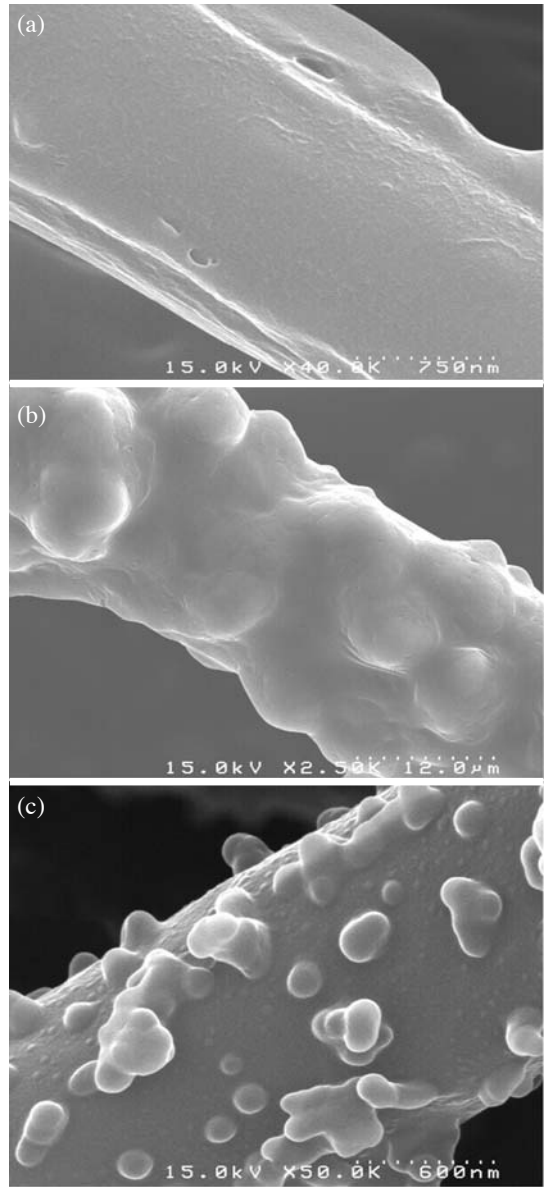


Fig. 5. Deposition patterns of antibacterial natural agent on the filter media manufactured by (a) dip-coating method (solution concentration: 0.016 wt%), (b) nebulization method (deposition time: 120 s), and (c) electro-spray method (deposition time: 30 min).

질 용액에 필터여재를 담지시킨 후 건조하였을 때 표면의 형상을 나타낸 것으로, 여재 섬유에 상당한 두께의 천연물질이 도포되어 있고, 도포된 두

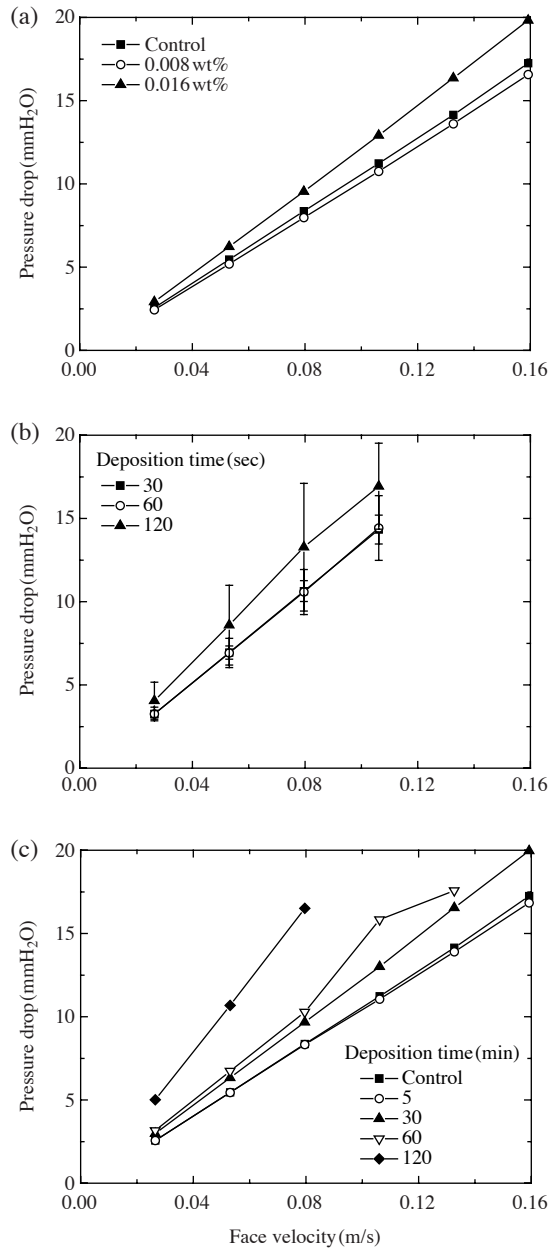
계가 일정하지 않음을 알 수 있다. 그림 5(b)는 가압분무법을 적용하여 120초 동안 천연물질을 도포하여 제조한 필터여재의 표면을 나타낸 것으로, 개별 입자들이 불록하게 분산되어 여재 섬유 표면에 도포되어 있음을 알 수 있다. 그림 5(c)는 정전분무법을 적용하여 30분 동안 천연물질을 도포하여 제조한 필터여재의 표면을 나타낸 것으로, 서브마이크론 크기의 입자뿐만 아니라 나노 크기의 작은 입자가 여재 섬유 표면에 등성등성 도포되어 섬유 표면과 확연하게 구별할 수 있다.

**3.2 항균 필터여재의 차압 및 항균력 특성**

3가지 공정에 의해 제조한 필터여재 전후의 압력 차이를 그림 2에 나타낸 바와 같이 측정하여 그림 6에 나타냈다. 담지법으로 제조한 필터여재의 경우 필터여재의 면유속이 증가하면 차압이 증가하는 일반적인 특징을 나타내고, 천연물질 용액의 농도가 0.008 wt%로 낮으면 차압은 거의 변하지 않으나 농도가 0.016 wt%로 높아지면 차압이 뚜렷하게 증가하였다. 즉, 면유속이 0.08 m/s일 때 컨트롤 필터여재에 비해 농도가 0.016 wt%인 천연물질로 도포된 필터여재의 차압이 약 14% 증가하였다.

가압분무법으로 제조한 필터여재의 경우에도 도포시간이 30초, 60초로 짧으면 차압은 거의 증가하지 않으나 120초로 길어지면 차압의 증가가 뚜렷하게 나타났다. 즉, 면유속이 0.08 m/s일 때 도포시간이 30초에서 120초로 길어지면 차압이 25% 가량 증가하였다.

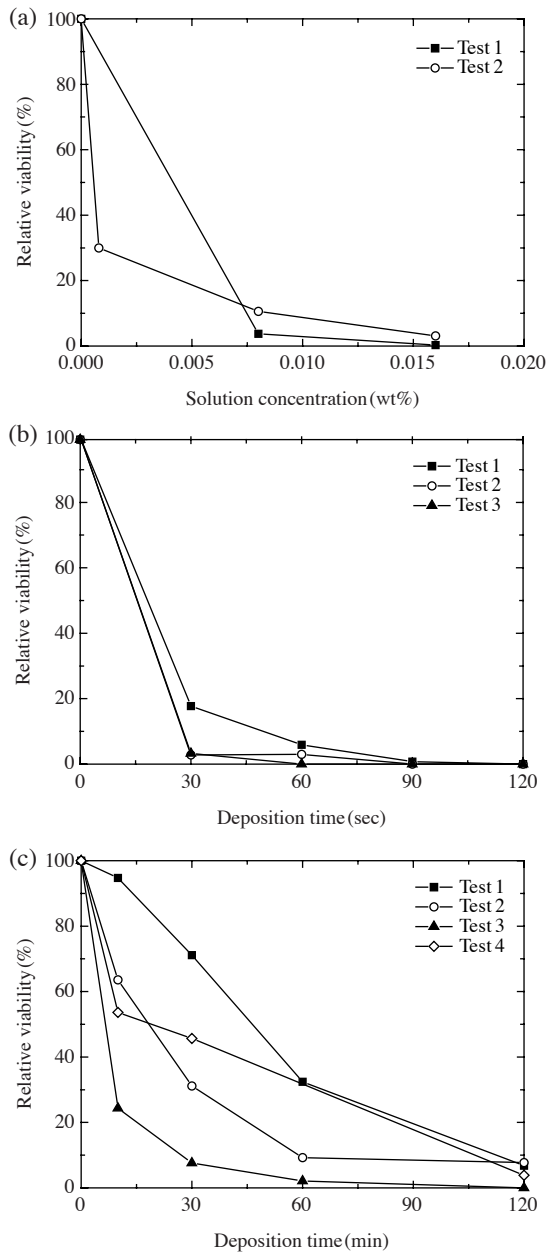
정전분무법으로 제조한 필터여재의 경우에도 도포시간이 5분 정도로 짧으면 차압이 거의 변하지 않으나, 30분 이상 길어지면 차압이 뚜렷하게 증가함을 알 수 있다. 면유속이 0.08 m/s일 때 도포시간이 30분, 120분으로 증가함에 따라 컨트롤 필터여재의 차압에 비해 각각 16%, 97% 정도 증가하였다. 이것은 그림 5에서 보는 바와 같이 가압분무법에 비해 나노구조체를 포함하는 다량의 천연물질 입자가 필터여재에 도포되어 표면의 거칠기가 커져 차압의 증가를 유발한 것으로 판단된다 (Heikkila, 2008; Jain and Pradeep, 2005). 차압이 증가하는 단점이 있지만, 천연물질이 나노구조체 형태로 여재 표면에 고르게 분포하여 여재에 집진되는 박테리아와 접촉할 수 있는 면적이 증가하여 항균력은 증가할 것으로 추정된다.



**Fig. 6. Pressure drop across the antibacterial filter media manufactured by (a) dip-coating method, (b) nebulization method, and (c) electro spray method.**

필터의 차압은 실제 사용 시 매우 중요한 특성이므로, 정전분무법에 의한 필터여재의 제조 시 적절한 양의 천연물질을 도포할 수 있는 최적화 연구가 추

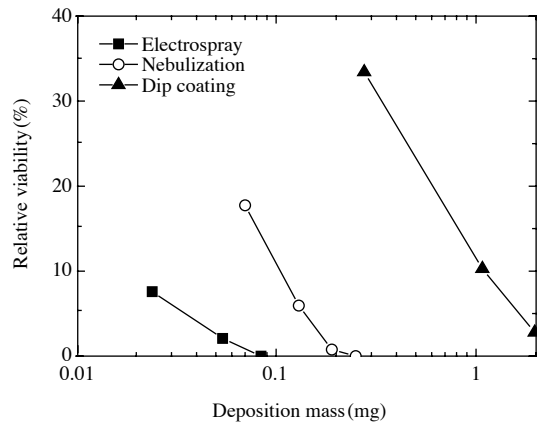




**Fig. 7. Relative viability of antibacterial filter media manufactured by (a) dip-coating method, (b) nebulization method, and (c) electro spray method.**

가로 필요할 것으로 생각한다.

3가지 제조방법에 대하여 천연물질 용액의 농도 또는 도포시간에 따른 항균 필터여재의 항균력(상대



**Fig. 8. Comparison of antibacterial ability of the filter media manufactured by three methods in terms of deposition mass.**

적 생존율) 변화를 그림 7에 나타냈다. 담지법의 경우 컨트롤 필터여재의 생존 균주 수를 기준으로 구한 상대적 생존율이 용액의 농도가 증가함에 따라 급격히 감소하고, 용액의 농도가 0.016 wt%일 때 상대적 생존율이 10% 이하로 항균력이 우수함을 알 수 있다. 가압분무법의 경우에도 도포시간이 증가함에 따라 천연물질이 도포된 필터여재의 항균력이 급격하게 증가하고, 도포시간이 60초일 때 상대적 생존율이 10% 이하로 매우 낮았다. 정전분무법의 경우 도포시간에 따라 항균력이 상대적으로 완만하게 증가하고, 도포시간이 120분일 때 상대적 생존율이 10% 이하로 낮아졌다. 이것은 정전분무에 의해 나노 크기의 천연물질 입자들이 많이 발생되지만 노즐로 공급되는 절대적인 유량이 적어 담지법이나 가압분무법에 비해 필터여재 표면에 도포된 천연물질의 양이 상대적으로 적었기 때문이다.

3가지 방법으로 제조한 항균 필터여재의 항균력 차이를 비교하기 위하여 추가 실험을 실시하여 필터여재에 도포된 천연물질의 양을 기준으로 상대적 생존율을 구하여 그림 8에 나타냈다. 필터여재의 질량을 칭량하는 작업이 매우 번거로워 그림 7에 나타난 실험에서는 필터여재의 질량을 측정하지 않았다. 천연물질이 필터여재에 도포된 양의 범위가 제조방법에 따라 차이가 있는데, 담지법, 가압분무법, 정전분무법 순으로 적게 도포됨을 알 수 있다. 정전분무법이 상대적으로 적은 양의 천연물질을 필터여재에 도



포하여도 상대적 생존율이 낮음을 알 수 있다. 이 실험조건에서 가압분무법 및 담지법의 경우 10% 상대적 생존율을 나타내기 위하여 필터여재에 도포하는 천연물질의 양이 정전분무법에 비해 각각 약 5배, 50배 더 많아야 한다. 결론적으로 정전분무법이 적은 양의 항균성 천연물질을 사용하여도 높은 항균력을 나타내는 우수한 항균물질 도포공정이라고 판단된다.

#### 4. 결 론

집진필터에 항균력을 부여하기 위하여 항균성 천연물질을 필터여재에 도포하는 방법으로 다양한 액상공정과 기상공정이 사용되고 있는데, 본 연구에서는 항균성 천연물질로 알려진 고삼 추출물을 사용하여 액상공정으로 담지법, 기상공정으로 가압분무법과 정전분무법을 항균 필터여재의 제조에 적용하여 이들 제조방법에 따른 필터여재의 항균력 및 차압 특성의 차이를 비교하였다.

전자현미경 이미지와 입경분포 측정자료에 의하면, 액상공정인 담지법에 의해 제조된 필터여재의 표면 전체가 상당한 두께의 천연물질로 도포되어 있었고, 기상공정인 가압분무법에 의해 약 100 nm 크기에서 피크농도를 나타내는 단일모드 분포의 천연물질 입자가 필터여재의 표면에 불룩하게 분산되어 도포되어 있었다. 기상공정인 정전분무법에 의해 제조된 천연물질 입자는 200 nm 근처의 서브마이크론 입자 뿐만 아니라 30 nm 근처의 나노입자가 다량으로 필터여재 표면에 분산되어 도포되어 있었다.

제조공정마다 다량의 천연물질이 필터여재에 도포되면 차압이 크게 증가하며, 특히 정전분무법의 경우 도포시간이 120분으로 길어지면 차압이 거의 2배 가량 증가하였다. 이것은 나노 및 서브마이크론 크기의 천연물질 입자들이 다량으로 필터여재 표면에 분산되어 표면의 거칠기가 매우 커져 차압이 큰 폭으로 증가한 것으로 판단된다.

필터여재 표면에서 천연물질의 도포 형상의 차이로 인해 정전분무법으로 제조한 필터여재의 차압 특성은 나빠졌지만, 필터여재의 항균력은 오히려 높아졌다. 즉, 동일한 항균력을 얻기 위해서는 정전분무법, 가압분무법, 담지법 순으로 더 많은 천연물질을 필터여재에 도포하여야 한다. 결론적으로 이 연구를

통해 정전분무법을 사용하여 나노 크기의 천연물질을 기상공정으로 필터여재에 도포하여 항균력이 우수한 필터여재를 제조할 수 있음을 알았다. 그러나 구조저항에 의해 필터여재의 차압이 증가하는 문제가 수반되므로, 향후 차압 증가를 억제하면서 항균력을 높일 수 있는 최적화 연구가 수행될 필요가 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 휴먼인지환경사업본부-신기술융합형 성장동력사업(No. 2012K001370)과 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업(RACS\_2010-3006)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

Burton, N.C., A. Adhikari, S.A. Grinshpun, R. Hornung, and T. Reponen (2005) The effect of filter material on bioaerosol collection of *Bacillus subtilis* spores used as a *Bacillus anthracis* simulant, *Journal of Environmental Monitoring*, 7, 475-480.

Enginger, R., C. Hogan, P. Biswas, A. Adhikari, T. Reponen, and S. Grinshpun (2009) Electro spray versus nebulization for aerosolization and filter testing with bacteriophage particles, *Aerosol Science and Technology*, 43, 298-304.

Heikkila, P. (2008) Nanostructured Fibre Composites, and Materials for Air Filtration, Tampere University of Technology, Publication 749, Tampere, Finland.

Hinds, W.C. (1999) *Aerosol Technology*, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley-Interscience, New Jersey, USA.

Jain, P. and T. Pradeep (2005) Potential of silver nanoparticle-coated polyurethane foam as an antibacterial water filter, *Biotechnology and Bioengineering*, 90, 59-63.

Jung, J.H., J.E. Lee, and S.S. Kim (2009) Generation of nonagglomerated airborne bacteriophage particles using an electro spray technique, *Analytical Chemistry*, 81, 2985-2990.

Jung, J.H., J.E. Lee, and G.N. Bae (2013) Use of electro sprayed *Sophora flavescens* natural-product nanoparticles for antimicrobial air filtration, *Journal of Aerosol Science*, 57, 185-193.

Jung, J.H., S.Y. Park, J.E. Lee, C.W. Nho, B.U. Lee, and G.N.

- Bae (2011) Electrohydrodynamic nano-spraying of ethanolic natural plant extract, *Journal of Aerosol Science*, 42, 725-736.
- Kim, K., W. Kim, S.H. Yun, J.H. Lee, S. Kim, and B.U. Lee (2008) Use of an electrospray for the generation of bacterial bioaerosols, *Journal of Aerosol Science*, 39, 365-372.
- Kwon, S.B. and C.S. Kim (2010) Review of recent studies on the airborne infection, *Particle and Aerosol Research*, 6(2), 81-90. (in Korean with English abstract)
- Lee, B.U., S.H. Yun, J.H. Ji, and G.N. Bae (2008) Inactivation of *S. epidermidis*, *B. subtilis*, and *E. coli* bacteria bioaerosols deposited on a filter utilizing airborne silver nanoparticles, *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 18(1), 176-182.
- Park, C.W., Y.H. Yoon, and J. Hwang (2010) A study on the situation and development for the antimicrobial technologies of bioaerosol, *Particle and Aerosol Research*, 6(2), 69-80. (in Korean with English abstract)
- Park, S.Y. (2011) Evaluation of the Antimicrobial Ability of Air Filter Treated with an Antimicrobial Natural Agent by Three Different Treating Methods, Master Thesis, Department of Environmental Science & Engineering, Ewha Womans University. (in Korean with English abstract)
- Seo, B.-R., M.-H. Jeong, and J.-M. Jun (2006) Indoor air quality in various type of public facilities at Honam Province, *Korean Journal of Environmental Health*, 32, 387-397.
- Tim Cushine, T.P. and A.J. Lamb (2005) Antimicrobial activity of flavonoids, *International Journal of Antimicrobial Agents*, 26, 343-356.
- Yang, W.H., K. Lee, K.H. Park, C. Yoon, B.S. Son, J.M. Jeon, H. Lee, W.H. Choi, S.D. Yu, and J.S. Han (2009) Microenvironmental time activity patterns of weekday and weekend on Korean, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 6(4), 267-274. (in Korean with English abstract)
- Yoon, K.Y., S.J. Lee, J.E. Lee, G.N. Bae, J.H. Ji, J. Hwang, and H.I. Jung (2005) Evaluation of antimicrobial characteristics of nanoparticles against bacteria, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 2(1), 46-53. (in Korean with English abstract)
- Yun, S.H., G.N. Bae, B.U. Lee, and J.H. Ji (2007) Antifungal characteristics of metallic nanoparticles against indoor fungi, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 4(2), 154-162. (in Korean with English abstract)
- Yun, S.H., G.N. Bae, B.Y. Lee, J.H. Ji, and S.J. Kim (2009) Evaluation of antifungal activities of nanoparticles against *Cladosporium cladosporioides* spore bioaerosols, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(4), 255-263. (in Korean with English abstract)