

전기방사 나노섬유 에어필터의 정전기적 특성 및 에어로졸 여과특성

박 현 설* · 임 경 수
한국에너지기술연구원 기후변화기술연구본부
(2009년 5월 21일 접수, 2009년 6월 27일 채택)

Aerosol filtration and electrostatic properties of electrospun nanofiber air filters

Hyun-Seol Park* and Koungh Soo Lim
*Climate Change Technology Research Division, Korea Institute of Energy Research,
Daejeon 305-343, Korea*

(Received 21 May 2009, accepted 27 June 2009)

Abstract

In this study, Nylon 6,6 electrospun (ES) nanofiber filter media were prepared at various spinning conditions. The ES filters tested had no intrinsic electrical charges. The ES filters were triboelectrically charged in the course of filter sample handling, and the charge was drastically decayed in a few hours. On the other hand, the corona charged melt blown filter media showed a permanent electrical charge. The electrical charge state of the ES filters was also examined by comparing collection efficiencies of ES filters for uncharged and charged aerosol particles.

Key words : Aerosol filtration, Electrospun filter, Electrostatic charge, Charge decay

1. 서 론

에어필터(air filter)는 공기 중의 입자상 오염물질
을 제거하는 수단으로서 반도체와 같은 초정밀 산업
공정의 공기질 제어에서부터 건물 또는 자동차의 공
조용 설비, 일반 주택의 공기청정기, 진공식 청소기,

개인위생을 위한 마스크 등에 이르기까지 다양한 적
용 분야를 갖는다.

에어필터는 높은 에어로졸(aerosol) 제거효율과 성
능 안정성, 사용 편의성 등의 장점을 갖고 있지만, 타
집진기술에 비해 상대적으로 높은 압력손실을 갖기
때문에 에너지 소모가 높다는 단점이 있다. 에어필터
의 높은 압력손실 특성을 보완하기 위해 지난 수 십
년간 다양한 기술이 시도되었는데, 주로 정전기력을
이용하는 기술과 필터 섬유 크기(직경)를 줄이는

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)42-860-3052, E-mail : phs@kier.re.kr

기술이 적용되어 왔다.

섬유 필터에 정전기력을 부여하는 기술은 필터 섬유를 제조하는 과정에서 섬유를 대전시키는 기술과 제조된 섬유 필터를 코로나 방전에 의해 대전시키는 기술, 대전 특성이 상이한 재질의 섬유를 혼합하여 마찰에 의해 대전시키는 기술, 코로나 방전 등에 의해 대전된 고분자 면체(sheet)를 섬유화한 후 필터를 제조하는 기술, 그리고 섬유 필터 전후 면에 금속망을 설치하고 여기에 수 kV/cm 수준의 외부 전기장을 인가하여 유전체인 필터 섬유의 분극화(polarization)를 통해 정전기력을 부여하는 기술 등으로 분류될 수 있다. 정전기력 부여기술은 에어필터의 구조적 특성에 기인한 압력손실을 그대로 유지하면서도 에어로졸 제거 효율을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 즉, 에어로졸의 확산(diffusion), 직접차단(direct interception), 관성충돌(inertial impaction)에 의한 필터에서의 제거 기작 외에 쿨롱력(coulombic force), 분극력(dielectrophoretic force)과 같은 정전기력이 추가로 작용하여 에어로졸의 제거효율을 크게 개선할 수 있다. 에어필터의 성능에 대한 정전기력의 영향에 대한 방대한 연구가 지난 반세기 동안 이루어 왔다. 이에 대한 연구는 Brown(1993)과 Spurny(1998)에 의해 잘 정리되어 있다.

에어로졸의 여과제거에 있어서 정전기력은 제거 효율에만 관계되는 데 비해 필터 섬유의 직경은 효율뿐만 아니라 필터의 압력손실에도 직접적으로 영향을 준다. 필터섬유 직경의 여과성능에 대한 영향을 정성적으로 기술하자면, 예를 들어 동일한 충진율을 갖는 섬유필터에 있어서 섬유의 직경이 감소하면 필터의 비표면적이 증가하게 되어 필터를 통과하는 에어로졸이 제거될 가능성이 증가함과 동시에 필터를 통과하는 공기저항이 커져 압력손실이 증가하게 된다. 그러나 섬유의 직경이 100 nm 수준까지 감소하면 섬유 표면에서의 유체의 미끄럼효과(slip effect)에 의해 마이크론 섬유에서 예상할 수 있는 압력손실에 비해 낮은 압력손실 값을 보이게 된다. 필터 섬유의 직경이 여과특성에 미치는 영향에 대한 대표적인 연구는 Lee and Liu(1982a, b)에 의해 수행되었다. Lee and Liu는 섬유필터의 충진율, 섬유의 직경을 변수로 하여 다양한 여과속도와 에어로졸 입자의 크기에 따른 여과특성을 해석적인 방법과 실험을 통해 규명하였다.

본 연구에서는 전기방사(electrospinning) 기술을 적용하여 제조된 섬유필터를 다루었다. 전기방사 섬유필터는 제조과정 중에 섬유가 대전되는 것으로 알려져 있으며 섬유의 직경을 수십에서 수백나노미터 크기까지 제어할 수 있기 때문에 에어필터로서 매우 큰 장점을 갖추고 있다. 즉, 전기방사 섬유 필터는 정전기력으로 인한 효율향상과 나노섬유로 인한 압력손실 감소를 동시에 기대할 수 있는 필터 소재라 할 수 있다.

전기방사에 대한 연구는 지난 10년간 섬유 분야에서 최고의 관심분야이었던 만큼 수많은 연구가 진행되었다. 전기방사에 대한 기존의 연구는 Ramakrishna *et al.*(2005)에 잘 정리되어 있다. 전기방사기술은 고분자를 특정 용매에 용해하여 고분자용액을 만들고 이를 노즐을 통해 방사하는 용액방사의 한 종류로서 기존 용액방사와의 차이점은 노즐에 고전압을 인가하는 점이다. 고전압을 인가하면 노즐 끝단의 방사용액 액적에는 정전기적 반발력과 방사용액 고유의 표면장력이 작용하게 되고 인가 전압이 일정한 한계를 넘어서면 정전기력이 표면장력을 능가하면서 액적이 테일러 콘(Taylor cone)이라는 형태로 변하고 테일러 콘 끝단에서 줄기형태로 용액의 방사가 이루어진다. 방사가 진행되면 용액에 포함된 용매가 증발하면서 방사용액 줄기는 점점 가늘어지고 방사용액 줄기의 전하밀도(charge density)가 증가하면서 방사용액 줄기의 축방향 연신이 가속화되어 최종적으로는 전하밀도가 높고 매우 가는 섬유가 제조된다. 전기방사에서 방사용액 줄기는 나선(spiral) 형태의 궤적을 그리며 연신하게 되는데 이때 형성된 섬유의 직경은 전기방사 조건 및 방사용액의 특성에 따라 제어될 수 있다. 현재까지 보고된 바로는 전기방사 방식에 의해 제조된 섬유의 직경은 수십 나노미터 수준에 이른다.

본 논문에서는 전기방사 기술에 의해 제조된 나노 섬유 필터의 정전기적 특성과 이러한 정전기적 특성이 필터의 여과성능에 미치는 영향에 대한 실험결과를 소개하고자 한다. 전기방사로 제조된 수백 나노미터 직경의 섬유로 이루어진 필터의 여과특성에 대한 연구 논문들이 그간 수 편 발표되었지만(Park and Park, 2005; Ahn *et al.*, 2006; Podgórski *et al.*, 2006; Barhate and Ramakrishna, 2007), 정전기적 특성에 관한 연구결과는 찾아보기 어렵다. 본 연구에서는 전기방사 섬유 필터의 정전기적 특성 및 여과특성을 기

존의 코로나 방전기술에 의해 대전된 멜트브로운 (melt-blown) 기술에 의해 제조된 섬유 필터와 비교하였다.

2. 실험방법

2.1 전기방사 섬유필터 제조

본 연구에서 사용된 고분자는 Nylon 6,6로서 이를 포름산에 용해하여 방사 용액을 제조하였다. 방사 용액은 Nylon 6,6의 무게농도를 기준으로 준비되었는데, 10 wt.%에서 30 wt.%까지 변화시켜 제조하였다. 그림 1은 본 연구에서 사용된 전기방사 장치를 나타내고 있다. 고전압은 방사용액에 직접 인가하는 방식을 선택하였으며, 방사된 섬유는 회전하는 원통의 표면에 수거되도록 하였다. 인가 전압의 크기는 20 kV에서 70 kV의 범위에서 조정되었으며, 수거장치의 회

전수는 30 RPM에서 100 RPM 사이에서 제어되었다. 노즐끝단과 수거장치인 원통 표면까지의 최단거리는 110 mm로 고정하였으며, 원통 표면에는 알루미늄 박막필름을 붙여서 방사된 섬유가 알루미늄 박막필름 위에 부착되도록 하였다. 방사 시간은 수 분 정도를 유지하였으며, 방사가 끝나면 알루미늄 박막을 원통으로부터 떼어낸 채로 상온에서 24시간 이상 건조하여 섬유에 남아있는 용매가 완전히 증발할 수 있도록 하였다. 여과성능 평가를 위한 필터 샘플은 알루미늄 박막위에 섬유필터가 붙어 있는 상태로 직경 52 mm인 원형으로 절단하여 사용 전까지 항습 캐비닛에 보관하였다.

2.2 필터 대전량 측정

본 연구에서 대상으로 하는 전기방사 나노섬유 필터와 같이 전기적으로 대전된 필터의 성능이 정전기력으로 인해 크게 향상된다는 사실은 명분하나, 필터의 대전량을 정량적으로 측정하는 것은 매우 어려운 과제이다. 섬유 필터의 대전량 측정방법에 관한 내용은 Brown (1993)에 의해 정리되어 있다. 본 연구에서는 필터의 대전량을 직접 측정하는 대신 필터 표면의 정전 전위를 측정하는 방법을 이용하였다. 사용된 측정장비는 비접촉식 표면 전위 측정기인 정전 전위 모니터 (Electrostatic Voltage Monitor, EVM, Model 102, Sun Je Hi-Tek Co. Ltd., Korea)로서 유전체 또는 도체 표면의 정전하량을 간접적으로 측정할 수 있다. 본 연구의 정전 전위 모니터 (이하, EVM)는 표면 전위를 측정하는 데 매우 효과적인 방법으로 잘 알려진 진동 캐퍼시터 (vibrating capacitor) 기술을 채택하고 있다. EVM을 이용한 필터 표면 전위 측정실험장치 구성도는 그림 2에 잘 나타나 있다. 측정방법은 직경 52 mm의 원형 필터 샘플을 접지된 알루미늄

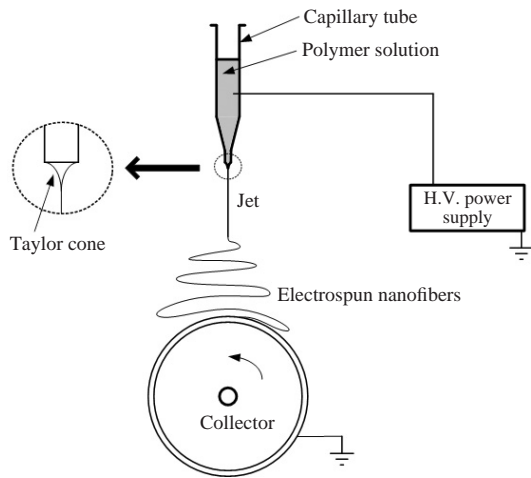


Figure 1. Schematic of electrospinning apparatus.

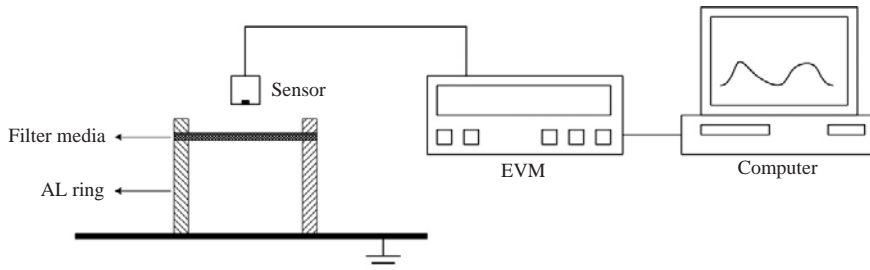


Figure 2. Schematic diagram of filter charge measuring system.

재질의 링에 올려놓은 후, 필터 위에 추가로 두께가 얇은 알루미늄 링을 올려 고정한다. EVM은 그림 2에 나타난 바와 같이 본체와 센서로 구성되는데 EVM 센서를 고정된 필터 샘플의 상단 10mm인 지점에 위치시켜 필터의 표면 전위를 측정하며, 측정 자료는 EVM 본체와 연결된 컴퓨터에 저장된다. 그림 3은 필터 샘플 장착부의 상세 구성도를 보여주고 있다. 하단의 알루미늄 링은 내경 40 mm, 두께 6 mm, 높이 30 mm의 치수를 갖으며, 상단의 링은 하단의

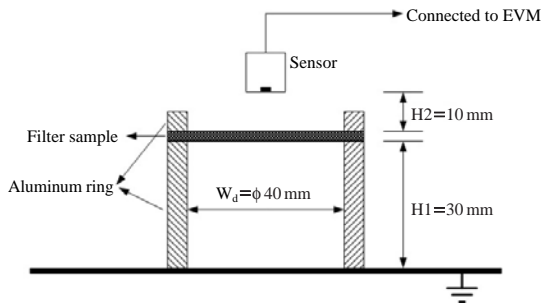


Figure 3. Detailed illustration of filter mounting for electrostatic potential monitoring.

링과 내경과 두께는 동일하나 높이가 8 mm이다.

2.3 필터 성능 평가

에어필터의 성능은 에어로졸 제거효율과 압력손실로 평가된다. 에어로졸 제거효율은 필터를 통과하기 전후의 에어로졸 농도를 측정하여 계산하였다. 본 연구에서는 실험용 에어로졸로 NaCl 입자를 사용하였다. 그림 4는 본 연구에서 사용된 필터 성능 평가용 실험장치의 구성을 보여주고 있다. NaCl 용액을 충돌형 분무장치(Atomizer, Model 3079, TSI Inc., USA)를 통해 분무하여 NaCl 액적을 발생하고 이를 실리카겔로 채워진 확산형 건조기(diffusion dryer)를 통과시키면 수증기는 증발 흡수되고 결정화된 NaCl 입자가 발생한다. 이를 방사성 동위원소인 Kr-85가 적용된 에어로졸 대전 중화장치(Aerosol Neutralizer, Model 3077, TSI Inc.)를 통과시키면 NaCl 입자는 평형 대전 상태에 이르게 된다. 평형 대전 상태의 에어로졸은 일반 대기 중 에어로졸의 대전 상태와 동일하다고 가정되며, 에어로졸의 크기에 따라 특정한 대전 상태를 보인다. 즉, 에어로졸 대전 중화장치를 통과하여도 모든 에어로졸이 전기적으로 중성을 나타

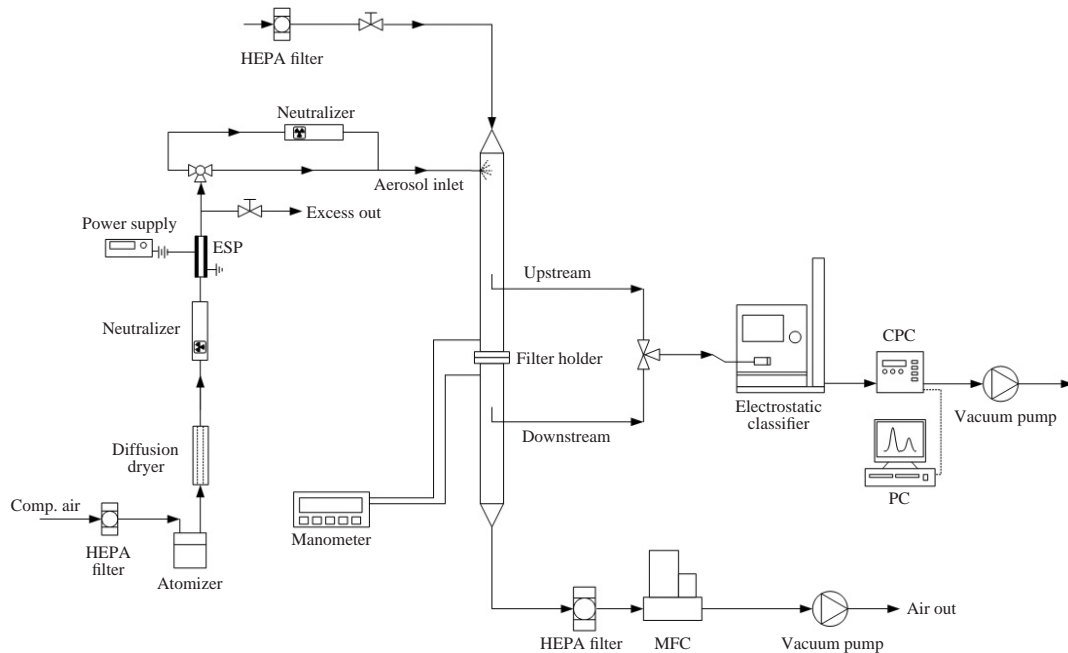
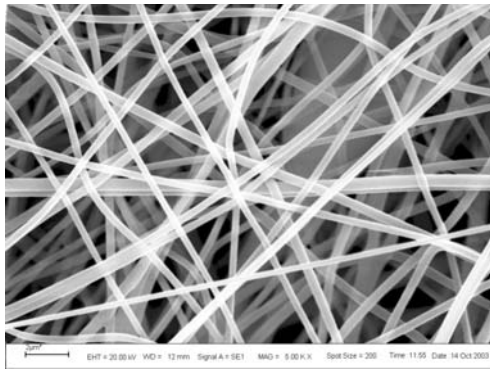
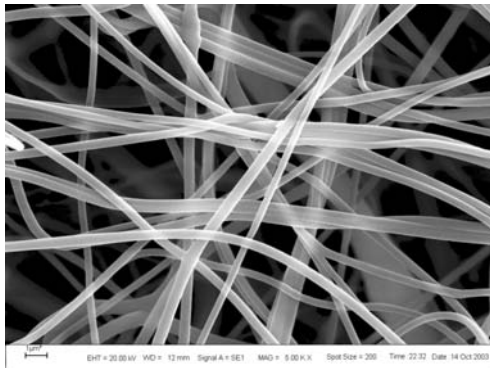
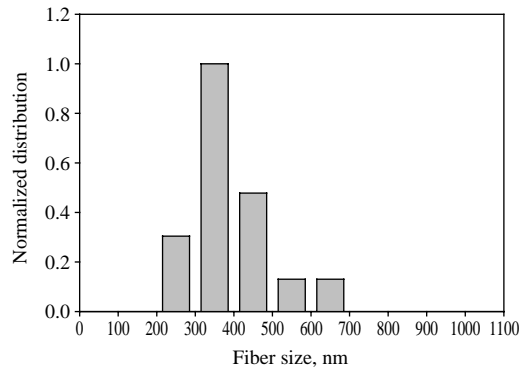


Figure 4. Experimental set up for evaluating filter performance.



(a) 0.6233 g/min



(b) 0.8567 g/min

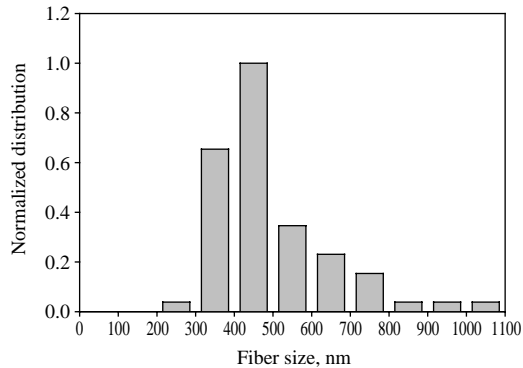


Figure 5. SEM images (left) and fiber size (diameter) distributions (right) of electrospun nanofiber filters prepared with 25 wt.% Nylon 6,6/formic acid solution at the applied voltage of 50 kV and collector speed of 50 RPM for different solution feeding rates.

내지 않고 일정한 대전 분포를 갖게 된다. 따라서 전기적으로 중성인 에어로졸을 얻기 위해서는 대전된 에어로졸을 제거할 수 있는 별도의 장치가 필요하며 본 연구에서는 이를 위해 소형 전기집진장치를 적용하였다. 즉, 발생된 에어로졸이 Kr-85 대전 중화장치와 전기집진장치를 순차적으로 통과하면서 대전된 에어로졸은 모두 제거되고, 전기적으로 완전 중성인 에어로졸만 남는다. 전기집진장치를 통과한 에어로졸은 필터가 설치된 원형관 내부로 유입되고 필터 전단과 후단에서 에어로졸의 농도를 측정한다. 에어로졸의 농도는 전기이동도를 이용한 에어로졸 분리기 (Electrostatic Classifier, Model 3080, TSI Inc., USA)와 광학적 입자 계수기 (Condensation Particle Counter, CPC, Model 3010, TSI Inc., USA)가 조합된

SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer, Model 3936, TSI Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 필터의 압력 손실은 일정한 여과속도 조건에서 측정하였으며, 본 연구에서는 미소차압계 (Micro-manometer, FCO510, Furness Controls Ltd., UK)를 이용하였다.

전기집진기 사용 유무에 따라 필터로 유입되는 에어로졸의 대전특성을 분석하기 위해서 별도의 실험이 수행되었으며, 전기집진기에 인가되는 전압에 따라 전기집진기 후단에서의 에어로졸 농도를 측정하여 비교하는 방법과 전기집진기 후단에 에어로졸 전하량 측정장치 (Aerosol Electrometer, Model 3068A, TSI Inc., USA)를 설치하여 에어로졸의 대전량을 직접 측정하는 방법을 모두 사용하여 전기집진기의 대전 에어로졸 제거성능을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전기방사 필터 섬유 외형적 특징

전기방사에 의해 제조된 섬유는 방사조건에 따라 다양한 직경과 형상을 갖는다. 본 연구에서와 동일한 회전 원통형 섬유 수거장치를 사용하는 조건에서 제조된 나노섬유의 특성에 대해서는 Park and Park (2005)의 연구에 보다 상세히 언급되었다. 또한 Ramakrishna *et al.* (2005)은 전기방사 나노섬유의 제조 특성에 대한 다양한 연구를 소개하고 있다. 본 연구에서는 전기방사 섬유 필터의 정전기적 특성에 대해 다루고자 하며, 연구에 주로 사용된 섬유 필터의 외형적 특성을 살펴보았다. 전기방사 변수 중, 인가 전압, 방사 용액의 점도, 방사 용액의 토출량은 섬유 형상에 크게 관여하며, 방사 용액의 점도는 일정한 온도를 가정한다면 용해된 고분자의 무게농도에 비례한다. 그림 5는 25 wt.% Nylon 6,6-포름산 용액을 이용하여 인가전압 50 kV에서 제조된 섬유의 전자현미경 사진과 섬유의 직경크기 분포를 보여주고 있다. 그림 5(a)는 방사 용액의 토출량이 0.6233 g/min이고 그림 5(b)는 토출량이 0.8567 g/min인 경우의 섬유특성을 각각 보여주며, 토출량이 증가할수록 섬유의 직경이 커진다는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용된 전기방사 섬유 필터는 주로 그림 5(a)의 조건에서 제조된 필터이며, 그 외의 경우에는 해당 조건을 별도로 명기하였다. 그림 5의 결과로부터 본 연구에 사용된 전기방사 필터 섬유의 평균 직경은 약 300 nm에서 400 nm 정도로 확인되었다. 그림 6은 다양한 방사용액의 농도와 전기장 조건에서 제조된 섬유의 평균직경의 변화 경향을 보여주고 있다. 그림 6의 전기장 세기는 인가 전압과 방사노즐-수거장치표면 간 거리의 비로 계산되어진다. 그림 6에서 확인할 수 있듯이 인가된 전압이 증가할수록, 방사용액의 고분자 농도가 감소할수록 제조된 섬유의 직경은 감소하였다.

3.2 전기방사 섬유 필터의 대전 특성

대전된 섬유 필터의 정전기적 특성을 파악하는 것은 필터의 성능평가를 위해 매우 중요한 일이나 필터 소재의 불균일성, 필터 섬유 형상의 불균일성, 그리고 개별 섬유의 표면 전하밀도 불균일성으로 인해

필터의 대전 특성을 정확히 측정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 그림 2와 그림 3에서 보여준 바와 같이 필터의 표면전위를 측정하는 방식으로 필터의 대전특성을 살펴보았다. 그림 7은 방사용액 농도 25 wt.%, 인가 전압 70 kV 조건의 전기방사에 의해 제조된 섬유 필터의 표면전위 특성을 보여주고 있다. 그림 7에는 두 건의 측정결과를 나타내었는데, 필터 전면의 표면전위를 측정된 후에, 필터를 뒤집어서 필터 후면의 표면전위도 측정하여 하나의 그래프에 나타내었다. 측정방법은 그림 3과 같이 직경 52 mm의 필터를 준비하여 알루미늄 링에 고정한다. 다음, 센서를 알루미늄 링의 한 쪽 끝단에서 다른 쪽 끝단까지 수동으로 스캔하는 방식으로 이동하며 측정하였다. 따라서 그림 7에 표시된 필터 전면과 후면에서 측정된 표면전위 측정결과 그래프의 횡축 길이는

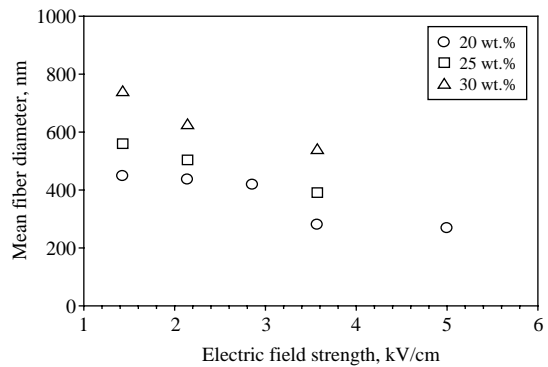


Figure 6. Mean fiber diameter of electrospun fiber filters with respect to applied electric field strength.

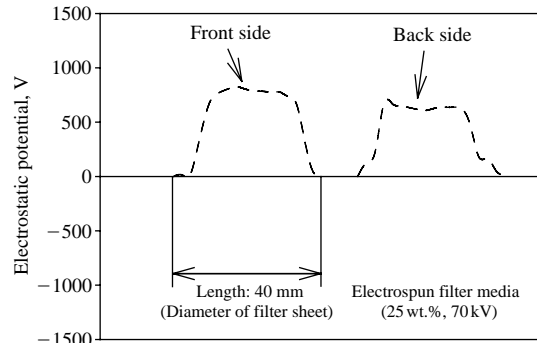


Figure 7. Electrostatic surface potential of an electrospun fiber filter.

는 알루미늄 링의 내경에 해당된다고 할 수 있다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 전기방사 섬유필터는 전면과 후면 모두에서 양(+)의 전위가 확인되었으며, 전면과 후면의 전위차는 크지 않았다.

그림 8은 멜트블로운(melt-blown) 기술에 의해 제조되고 코로나 대전방식에 의해 대전된 섬유필터의 표면전위 특성을 보여주고 있다. 멜트블로운 기술은 고분자 용융물을 노즐을 통해 분출하면서 노즐 양측면에서 고온의 공기를 일정한 경사각으로 동시에 분사하는 방식으로 부직포 형태의 섬유소재를 얻는 기술이다. 또한 섬유필터의 코로나 방전기술을 이용한 대전 방식은 고전압이 인가된 핀(pin) 형태의 방전극과 일정한 거리로 이격된 접지판 사이로 섬유 필터를 통과시키면서 필터를 대전시킨다. 이때 방전극에 면한 필터 전면은 방전극에 인가된 전압의 극성과 동일한 극성으로 대전되며 접지판에 면한 필터 후면은 접지판을 이탈할 때 필터 전면의 대전에 대한 보상 전하(compensating charge)가 생성되어 방전극의 극성과 반대의 극성으로 대전되는 특성이 있다.

본 연구에서 코로나 대전 멜트블로운 섬유필터는 전기방사 섬유필터와의 성능비교 및 대전 섬유필터의 특성 분석을 위해 사용되었다. 사용된 멜트블로운 섬유필터의 중량은 약 30 g/m²이며, 섬유의 평균직경은 약 2.5 μm 정도로 측정되었다. 그림 8의 멜트블로운 섬유필터에 대한 표면전위 측정은 그림 2와 그림 3의 알루미늄 링을 사용하지 않고, 센서를 필터 표면으로부터 10mm 상단에 위치시킨 후, 스캔길이를 500 mm로 하여 측정하였다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 전면과 후면의 전위 극성이 반대로 나타났다.

전기방사 섬유필터의 전위를 측정하는 과정에서 측정값이 시간에 따라 변하는 것이 확인되어, 전기방사 섬유필터의 표면전위를 장시간 측정하고 그 변화 특성을 살펴보았다. 그림 9는 25 wt.% 방사용액을 사용하고 인가전압이 50 kV인 경우, 방사시간이 각각 3, 5, 7 min인 조건에서 제조된 필터에 대해, 그림 2와 그림 3과 같이 센서를 필터의 정중상 상단에 위치시켜 필터 표면전위의 시간에 따른 변화특성을 측정된 결과이다. 그림 9의 방사조건 중 방사시간에 대해서는, 본 연구에서 사용된 전기방사 실험장치의 경우, 방사시간이 증가할수록 필터의 두께가 증가하게 된다. 방사시간이 3, 5, 7 min인 경우, 필터의 두께는 각각 185, 204, 246 μm로 측정되었다. 그림 9를 통해

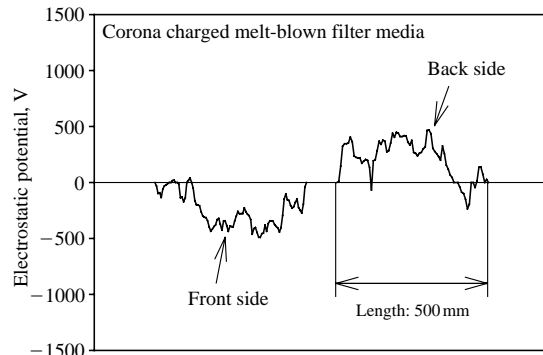


Figure 8. Electrostatic surface potential of a corona charged melt blown filter.

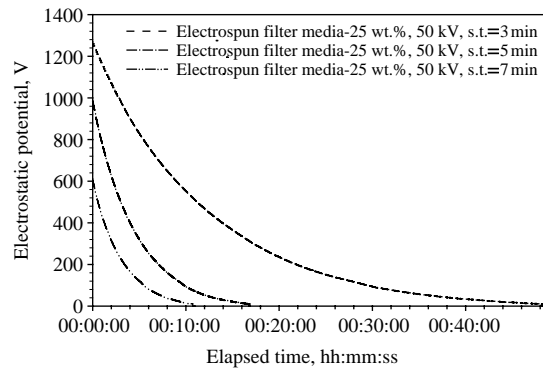


Figure 9. Charge decay of electrospun fiber filters.

확인할 수 있듯이 모든 필터에 대해 표면전위 값이 시간에 따라 급격히 감소하였으며, 최종적으로 표면전위가 0에 도달하였다. 특히 필터의 초기 표면전위 값은 방사시간이 짧아 두께가 얇은 필터일수록 높게 형성되었으며, 표면전위가 0에 도달하는 시간도 필터의 두께가 얇을수록 증가하였다. 두께가 얇을수록 전기방사 필터의 표면전위가 높게 형성되는 원인은 건조과정에서 발견되는 용매 증발에 따른 필터의 수축 현상으로 인해 두꺼운 필터일수록 알루미늄 박막에서 이격된 부분이 증가하고, 측정을 위해 필터 샘플을 알루미늄 박막으로부터 떼어내는 과정에서 마찰이 감소하기 때문인 것으로 추정된다. 또한 그림 9에서 볼 수 있듯이 전기방사 필터의 표면전위 값은 시간에 따라 지수 함수적으로 감소하며 이러한 결과는

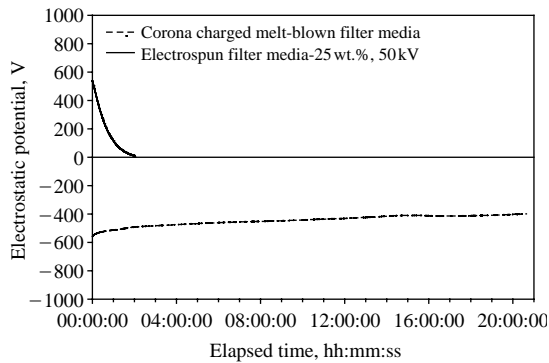


Figure 10. Comparison of charge decay between electrospun filter and corona charged melt blown filter.

Brown(1993)이 언급한 필터 전하량 소실 특성과 매우 유사함을 확인할 수 있다.

그림 10은 코로나 대전 멜트블로운 섬유필터와 전기방사 섬유필터의 시간에 따른 표면전위 변화특성을 비교한 것이다. 전기방사 조건은 용액농도가 25 wt.%, 인가전압은 50kV, 그리고 방사시간은 1min이었다. 전기방사 섬유필터의 경우 약 2시간 후에 표면전위가 0에 도달하였지만, 코로나 대전 멜트블로운 섬유필터의 경우에는 20시간까지 거의 일정한 전위값을 유지함을 알 수 있다.

그림 9와 그림 10에서 나타난 전기방사 섬유필터의 표면전위 변화특성을 토대로 본 연구에서 제조된 전기방사 필터의 대전 특성을 다음과 같이 유추하였다. 본 연구의 전기방사 장치에서 사용된 원통형 섬유수거장치는 강철로 만들어진 도체이고 그 위에 알루미늄 박막필름이 씌워진 형태로 사용되었다. 전기방사 섬유는 기본적으로 인가 전압의 극성과 동일한 극성으로 대전되고 본 연구에서는 인가전압의 극성이 (-)이기 때문에 제조된 필터도 (-)로 대전되어야 한다. 그러나 그림 7, 그림 9와 그림 10의 결과를 보면 본 연구의 전기방사 섬유필터의 극성은 (+)로 확인되었다. 따라서 그림 7에 나타난 전기방사 섬유필터의 표면전위는 전기방사가 아닌 다른 요인에 의한 것이라고 판단되었다. 이러한 결과에 대한 원인을 찾기 위해 표면전위 측정 실험과정을 면밀히 분석하였다. 그림 7의 실험은 알루미늄 박막 필름위에 부착된 상태의 직경 52mm 필터를 알루미늄 박막에서 떼어내어 곧바로 그림 2와 그림 3의 실험 장치에 설

치하여 표면전위를 측정하는 과정으로 진행되었다. 필터를 알루미늄 박막으로부터 떼어낼 때 필터의 정전기를 확인하였으며 이때 발생된 정전기가 그림 7의 결과로 나타난 것으로 판단되었다. 즉, 알루미늄 박막에서 필터를 떼어내는 과정에서 마찰에 의해 필터표면이 대전되었으며, 이러한 마찰대전 정전기가 시간이 지남에 따라 소멸하여 그림 9와 그림 10의 결과로 나타났다고 유추할 수 있다. 특히 본 연구에서 사용된 필터섬유의 원재료가 마찰대전시 (+)로 대전되기 쉬운 Nylon 6,6인 것과 그림 7의 (+) 표면전위 값을 고려한다면 그림 7, 그림 9와 그림 10의 결과는 전기방사 섬유필터의 마찰대전에 기인한 것으로 판단된다. 또한 그림 10에서 볼 수 있듯이 전기방사 필터의 표면전위가 멜트블로운 필터에 비해 급격히 감소하는 원인은 코로나 대전되어 분극 전하(polarized charge) 상태를 유지하는 멜트블로운 필터는 대전 상태가 외부적 요인에 의해 쉽게 변하지 않지만(Pinchuk *et al.*, 2002), Brown(1993)이 언급한 바와 같이 마찰 대전 섬유의 전하량은 작고 매우 불안정하며 대기 중의 이온, 수분 등에 의해 쉽게 소실되기 때문인 것으로 추정할 수 있다.

이러한 실험결과를 토대로 본 연구의 필터 성능평가에 사용된 전기방사 섬유필터는 미리 알루미늄 박막으로부터 떼어내어 24시간 이상 마찰대전이 발생할 수 없는 조건에 보관하였으며 실험 직전에 표면전위 값을 측정하여 전위가 0임을 확인한 후 실험에 사용하였다.

3.3 에어로졸 및 필터의 대전 유무에 따른 초기 집진효율

전기방사 섬유필터의 대전특성을 분석하기 위해 에어로졸의 대전 유무에 따라 필터의 초기 집진효율을 측정하였다. 이러한 방법은 필터의 대전량을 직접 측정할 수 있는 방법인 반면에 비해 간접적인 수단이나, 필터 대전량 측정분석의 목적이 결국 여과성능에 대한 필터 대전량의 영향을 파악하기 위한 것임을 고려한다면 매우 유용한 방법이라 할 수 있다.

필터의 대전 효과를 분석하기 위해서는 실험용 에어로졸의 대전특성을 제어해야 한다. 즉, 에어로졸을 일정한 대전 상태에 있게 하거나 전기적으로 완전 중성의 상태에 있도록 한 후, 에어로졸의 대전 유무에 따라 필터의 여과특성을 분석하여 필터의 대전

영향을 파악하여야 한다. 본 연구에서는 그림 4의 실험 장치를 사용하여 에어로졸의 대전 유무에 따른 필터의 초기 집진효율을 측정하였다. 본 연구에서 대전 에어로졸은 그림 4의 에어로졸 발생부에서 전기 집진기를 지난 후 에어로졸 대전 중화장치(Neutralizer)를 통과한 상태의 에어로졸을 의미한다. 이 경우 에어로졸의 대전 상태는 일반 대기환경에 존재하는 에어로졸의 대전 상태와 동일하다고 가정된다. 본 연구에서 사용된 전기집진기는 하전부가 없는 이중관형 전기집진기로서, 이를 통과한 에어로졸은 전기적으로 완전 중성인 상태에 있으며, 이때의 에어로졸을 대전되지 않은 상태로 간주하였다. 그림 4의 전기집진기를 통과한 에어로졸의 대전 특성을 분석하기 위해 본 연구에서는 전기집진기에 인가된 전압의 크기에 따라 전기집진기 후단의 에어로졸 농도와 에어로졸의 대전량을 측정하여 비교 분석하였다. 그림 11은 인가 전압의 크기에 따른 전기집진기 후단에서 측정된 에어로졸의 농도를 보여주고 있다. 전기집진기 전단에 위치한 에어로졸 대전 중화장치를 통과한 에어로졸은 일정한 대전분포를 갖고 있기 때문에, 이때의 에어로졸을 전기집진기에 통과시키면 대전된 에어로졸은 집진기에서 제거된다. 따라서 특정 크기 이상의 전압에 대해 전기집진기 후단의 에어로졸 농도가 전압의 크기에 관계없이 일정해진다 면 해당되는 특정 전압에서 모든 대전 에어로졸은 전기집진기에서 제거되고 전기적으로 완전히 중성인 에어로졸만 통과됨을 의미한다. 그림 11에서 볼 수 있듯이 전기집진기에 전압이 인가되면 전기집진기 후단의 에어로졸 농도가 급격히 감소함을 알 수 있으며, 인가된 전압이 3kV 이상인 경우 에어로졸 농도의 감소율이 크게 줄어든 것이 확인되었다. 그림 12는 인가 전압의 크기에 따른 전기집진기 후단에서 측정된 에어로졸의 대전량을 에어로졸 전하량 측정장치(Aerosol electrometer, Model 3068A, TSI Inc., USA)로 측정된 결과이다. 그림 11과 그림 12의 결과를 토대로 본 연구에서는 완전 중성의 에어로졸 입자 생성을 위해 그림 4의 전기집진기에 7kV의 전압을 인가하여 사용하였다.

그림 13은 전기방사 필터와 코로나 대전 멜트블로운 필터에 대해 에어로졸의 대전 유무에 따른 집진 효율의 변화 특성을 보여주고 있다. 만약 필터가 대전되었다면 에어로졸이 대전된 경우 정전기력에 의

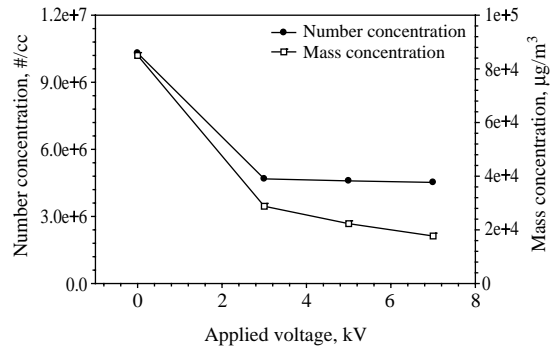


Figure 11. Variation of total particle concentrations after passing through the ESP for different applied voltages.

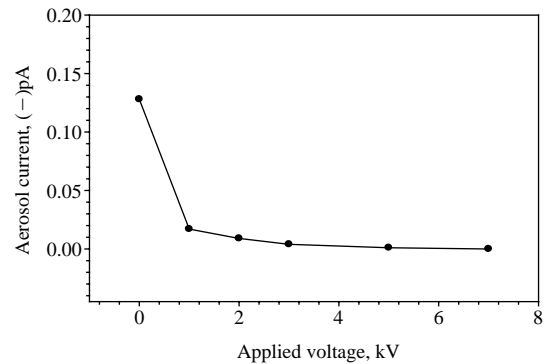


Figure 12. Variation of electrical currents transferred by charged aerosol after passing through the ESP for different applied voltages.

해 집진효율이 증가할 것이다. 그림 13(a)에서 볼 수 있듯이 전기방사 섬유필터의 경우, 에어로졸의 대전 여부에 관계없이 에어로졸 크기별 집진효율의 변화가 거의 없음을 보여주고 있다. 반면, 그림 13(b)에 표시된 코로나 대전 멜트블로운 섬유필터의 경우 대전된 에어로졸의 집진효율이 10% 정도 향상된 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 사용된 전기방사 섬유필터는 전기적으로 대전되지 않았으며, 코로나 대전 멜트블로운 필터는 일정한 대전량을 갖고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 그림 13은 그림 10에 나타난 전기방사 섬유필터의 대전 특성을 재확인하는 결과라 할 수 있다.

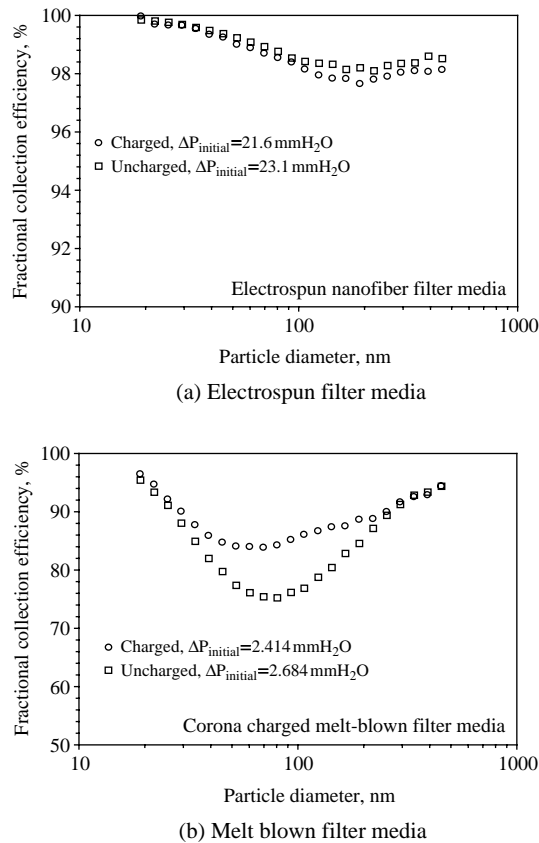


Figure 13. Effect of particle charges on the fractional collection efficiency of (a) electrospun filter media prepared with 25 wt.% Nylon 6,6/formic acid solution at 50 kV and 5 bar and (b) corona charged melt blown filter media.

4. 결 론

본 연구에서는 전기방사 방식에 의해 제조된 나노섬유필터의 정전기적 특성과 여과특성에 대해 살펴 보았다. Nylon 6,6을 포름산에 일정한 농도로 용해한 방사용액과 다양한 전기방사 조건에 대해 나노섬유필터를 제조하였다. 전기방사 필터 섬유의 평균직경은 약 300 nm~400 nm 수준이었으며, 방사용액의 농도가 낮을수록 그리고 인가된 전압의 세기가 클수록 제조된 필터 섬유의 크기는 감소하는 경향을 보였다. 필터의 표면전위를 측정하는 방식으로 전기방사 나노섬유 필터의 대전특성을 분석한 결과, 본 연구에서

사용된 전기방사 필터는 필터 샘플을 준비하는 과정에서 마찰대전에 의해 순간적으로 대전되나 시간이 경과함에 따라 자연적으로 방전되어 수 시간 내에 대전량이 0에 가까워짐을 확인할 수 있었다. 반면 비교 대상으로 선정되어 평가된 코로나 대전 멜트블로운 섬유필터의 경우, 전면과 후면이 서로 상반된 극성으로 대전되며 시간에 따른 자연 방전이 발생하지 않고 지속적으로 대전량이 유지됨을 알 수 있었다. 이러한 정전기적 특성에 기인하여 전기방사 나노섬유 필터의 경우, 에어로졸의 대전 유무에 상관없이 일정한 초기 집진효율을 보였으며, 코로나 대전 멜트블로운 필터는 대전된 에어로졸의 경우에 보다 높은 초기 집진효율 특성을 나타냈다.

결론적으로 본 연구에서 제조된 전기방사 섬유필터는 실험과정에서 발생한 마찰대전을 제외하고는 정전기적 특성이 없다는 것이 확인되었다. 전기방사에 의해 제조된 섬유가 전기적으로 대전된다는 것은 잘 알려진 사실이기 때문에, 본 연구의 전기방사 섬유필터 제조 실험 조건에서는 제조과정 중에 대전 섬유의 전하가 소실되었다는 것을 추측할 수 있다. 전기방사 섬유의 전하가 소실되었다고 추정되는 제조과정은 원통형 섬유 수거장치에 전기방사 섬유가 수거되는 과정이며, 원통형 섬유 수거장치에 부착된 섬유는 용매가 완전히 증발하지 않고 남아서 섬유 표면의 전하가 전기적으로 접지된 수거장치를 통해 소실되었을 것으로 판단된다. 본 연구의 전기방사 실험이 일반적인 전기방사 조건을 충분히 반영한 점을 감안할 때, 본 연구의 결과는 최근 수 년간 관심이 증가된 전기방사 나노섬유 필터의 제조 및 응용에 크게 기여할 것으로 판단된다. 또한 전기방사 섬유필터의 대전 및 전하 소실 특성에 대한 보다 명확한 이해를 위해서는 향후 보다 구체화되고 체계적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- Ahn, Y.C., Park, S.K., Kim, G.T., Hwang, Y.J., Lee C.G., Shin, H.S., and Lee, J.K. (2006). Development of high efficiency nanofilters made of nanofibers, *Current Applied Physics*, 6, 1020-1035.
- Barhate, R.S., and Ramakrishna, S. (2007). Nanofibrous filter-

- ing media: Filtration problems and solutions from tiny materials, *Journal of Membrane Science*, 296, 1-8.
- Brown, R.C. (1993). *Air filtration: An integrated approach to the theory and applications of fibrous filters*, Pergamon Press.
- Lee, K.W., and Liu, B.Y.H. (1982a). Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters, *Aerosol Science and Technology*, 1, 147-161.
- Lee, K.W., and Liu, B.Y.H. (1982b). Experimental study of aerosol filtration by fibrous filters, *Aerosol Science and Technology*, 1, 35-46.
- Park, H-S., and Park, Y.O. (2005). Filtration properties of electrospun ultrafine fiber webs, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 22(1), 165-172.
- Pinchuk, L.S., Goldade, V.A., Makarevich, A.V., and Kestelman, V.N. (2002). *Melt Blowing: Equipment, Technology, and Polymer Fibrous Materials*, Springer.
- Podgórski, A., Balazy, A., and Gradoń, L. (2006). Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters, *Chemical Engineering Science*, 61, 6804-6815.
- Spurny, K.R. (1998). *Advances in Aerosol Filtration*, Lewis Publishers.