

외부전기장 적용 섬유상 에어필터의 절연 전극 사용에 따른 여과특성

Filtration Performance of Fibrous Air Filter under External Electric Field using Insulated Electrodes

지 성 미^{1),2)} · 손 증 렬¹⁾ · 박 현 설^{2),*}

¹⁾고려대학교 환경보건학과, ²⁾한국에너지기술연구원 기후변화연구본부
(2012년 11월 2일 접수, 2012년 11월 14일 수정, 2012년 11월 15일 채택)

Sung-Mi Ji^{1),2)}, Jong-Ryeul Sohn¹⁾ and Hyun-Seol Park^{2),*}

¹⁾Department of Environmental Health, Korea University

²⁾Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research

(Received 2 November 2012, revised 14 November 2012, accepted 15 November 2012)

Abstract

Applying an external electric field across air filter media is one of methods to improve the filtration performance. Metal wire meshes have been commonly used as electrodes situated on both sides of a thick filter pad. For a thin filter medium a short circuit, known as the biggest drawback for applying an external electric field to air filter, can occur at the closest point between electrodes. In this study several types of insulated meshes were prepared by coating #50 meshes with a dielectric material, Nylon 66, and the filtration property of air filter was evaluated at the presence of external electric field using those insulated meshes as electrodes and compared with that of filters using bared meshes. The collection efficiency of tested filter was increased from 78% to 95% for singly charged 100 nm particles by application of external electric field. As a result, there was no significant difference in collection efficiency between filters with insulated and bared electrodes. Similar results could be also seen from the tests using polydisperse particles. Finally, through this study, we found that the insulation of mesh electrodes doesn't affect the filtration performance of fibrous air filter under external electric field.

Key words : External electric field, Air filter, Insulated electrode, Collection efficiency, Particle charge

1. 서 론

에어필터는 공기 중의 오염물질을 제거할 수 있는

수단으로 빌딩 공조용, 실내 공기청정기용, 그리고 산업체 청정실용 등으로 널리 사용되고 있다. 에어필터는 일정한 집진효율을 안정적으로 유지할 수 있다는 장점이 있으나 전기집진기 등에 비해 압력손실이 높다는 단점이 있으며, 일반적으로 일회용으로 사용되기 때문에 주기적인 교체에 따른 비용이 소요된다.

*Corresponding author.

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

이러한 에어필터의 성능을 개선하기 위해 정전기력 부가기술이 적용되어 왔으며, 필터 소재를 대전시키는 방법과 유입되는 입자를 대전시키는 방법, 그리고 필터에 외부전기장을 인가하는 방법 등이 사용되고 있다. 전기적으로 대전된 필터인 정전 필터는 비용과 적용성 측면에서 유리하지만 입자가 필터에 포집됨에 따라 성능이 저하되는 현상이 발생하기 때문에 (Walsh and Stenhouse, 1998, 1997) 입자 오염에 대한 높은 관리수준이 요구되는 분야에는 적용이 제한될 수 있다.

본 연구에서 필터 성능 개선을 위해 사용한 방법은 에어필터에 외부전기장을 인가하는 것이다. 섬유 필터의 양면에 전극을 적용하고 양 전극사이에 고전압을 인가하면 필터를 구성하는 개별 섬유 주변에는 일정한 형태의 전기장이 형성되며, 이때 필터 내부로 유입되는 입자는 정전기력을 받게 되어 높은 효율로 제거된다. 정전기력 적용 필터에 대한 연구가 매우 긴 역사를 가지고 있는 것과 같이, 외부전기장을 인가한 필터의 여과특성에 대한 연구도 1960년대 이전부터 시작되었다. 대표적인 초기 연구로는 Havlíček (1961), Zebel (1965), Hochrainer *et al.* (1969), Kirsch (1972) 등이 있다. 이 중 Zebel (1965)의 연구는 이론적인 방법을 이용해 외부전기장이 인가된 단일 섬유 주변의 전기장 및 유입되는 입자에 작용하는 정전기력장을 제시하였으며 입자 궤적 계산을 바탕으로 입자의 포집 계수를 보여주었다. 에어필터의 외부전기장 적용에 관한 1980년대 이후의 주요 연구는 섬유상 필터의 복잡한 내부구조를 단순화한 이른바 셀 (cell) 모델을 이용하여 주변 섬유에 의한 유동장 및 전기장 변형을 고려한 연구가 수행되었으며, 대표적인 연구로는 Henry and Ariman (1981a, b), Kao *et al.* (1987), Podgórski *et al.* (1998), 그리고 Luckner *et al.* (1998) 등이 있다.

외부전기장이 적용된 에어필터의 실제 적용은 두꺼운 패드 형태의 섬유 필터에 메쉬와 같은 금속망 전극을 필터 양면에 위치시키고 고전압을 인가하는 방식으로 이루어져 왔다. 이러한 외부전기장 인가 필터는 전처리 필터 등으로 주로 사용되어 왔으며, 실용성이 우수한 얇은 소재의 필터를 사용하는 데는 전기적 단락 등의 문제로 인해 한계가 있었다. Brown *et al.* (1994)은 Nylon 66을 포함한 다양한 고분자 합성 섬유 필터에 카본 섬유, 알루미늄 섬유, 구리 섬유 등과 같은 전도성 섬유로 이루어진 전극을 적용하여

유연성이 개선된 외부전기장 인가 필터에 대한 실험을 수행하였다. 일부 전극은 전도성 섬유와 Nylon 66을 혼합한 후 니들펀칭 (needle punching) 방식으로 성형한 후 사용되었으며, 외부전기장 인가로 인한 성능 향상과 유연성을 개선할 수 있다는 점을 확인하였으나, 실용적인 측면에서 전기적 단락으로 인한 필터 섬유의 가연 가능성과 전원 연결 문제 등을 지적하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 에어필터에 외부전기장을 적용하였을 경우 필터의 집진성능은 큰 폭으로 개선할 수 있으나 전극 사이에 전기적 단락 가능성이 있어 적용분야를 확대하는 것이 제한되어 왔다. 본 연구에서는 이러한 외부전기장 인가 에어필터의 전기적 단락 문제를 해결하기 위한 방안으로 전기장 형성을 위해 사용되는 메쉬 전극의 표면을 절연물질로 코팅 처리한 후 필터에 적용하였다. 특히 본 연구에서는 실험용 필터로 두께가 1 mm 이하인 매우 얇은 섬유상 필터를 사용하였으며, 메쉬 전극의 절연 유무와 절연물질 코팅 정도에 따라 필터의 압력손실과 집진효율 특성을 살펴보았다. 또한 전극의 절연 특성에 따른 외부전기장 인가 효과를 보다 명확히 분석하기 위해 실험용 입자의 대전 상태 및 크기에 따른 여과 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 외부전기장 적용 조건 및 전극

필터의 외부에서 전기장을 인가하기 위해서는 그림 1에 나타난 바와 같이 필터 양면에 전극이 설치되어야 한다. 필터에 전기장을 적용하기 위한 전극은 공기투과가 용이하면서도 전도성이 우수하여야 하기 때문에 본 연구에서는 스테인리스 재질의 메쉬 (mesh)를 사용하였으며, 필터 양면의 전극에는 직류 1,000 V를 인가하여 전기장을 형성시켰다. 메쉬의 기공크기에 따른 성능 비교를 위해 #50 메쉬와 #200 메쉬를 선정하였으며, 절연 전극으로 사용하기 위해 #50 메쉬를 절연 물질인 나일론66으로 코팅하였다. 메쉬 전극의 코팅은 폼산에 용해된 나일론 66용액에 전극을 침지한 후 건조하고, 이를 다시 260~300°C 온도 범위의 전기오븐에서 용융시키는 방식으로 이루어졌으며, 메쉬 전극에 코팅된 절연물질의 두께는 코팅

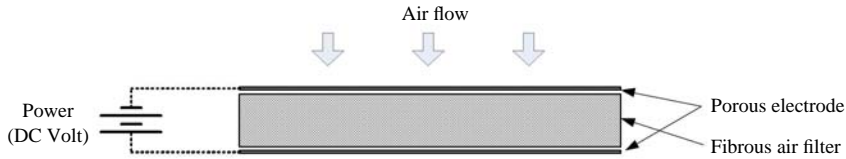


Fig. 1. Application of external electric field across air filter media.

Table 1. Details of mesh electrodes used in this study.

Notation of electrodes	Description	Basis weight, g/m ²
#50 mesh_bared	not coated	467.3
#50 mesh_insulated 4x	coated, four times	505.3
#50 mesh_insulated 8x	coated, eight times	532.9
#200 mesh_bared	not coated	129.9

반복 횟수로 조절하였다. 본 연구에서 사용된 각 전극에 대한 표식어 및 특성을 표 1에 정리하였다. 표 1에 설명된 바와 같이 절연 전극 표식어의 '4x' 및 '8x'는 각각 절연물질의 코팅횟수가 4회 및 8회임을 나타낸다. 또한 전극으로 사용된 메쉬의 와이어에 코팅된 절연물질의 두께는 일정하지 않기 때문에 절연물질의 코팅 정도를 표시하기 위해 본 연구에서는 코팅 두께를 사용하지 않고 각 전극에 코팅된 절연물질의 양을 나타내는 방법을 택하였으며 이를 표 1에 정리하였다. 그림 2는 각 메쉬 전극에 대해 코팅된 절연물질의 양을 보다 직관적으로 판단할 수 있도록 절연 코팅되지 않은 메쉬 전극의 단위 무게와 여기에 코팅된 절연물질의 단위 무게를 덧붙이는 방식으로 나타난 것으로 코팅횟수에 따라 절연물질의 양이 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 본 연구에서는 절연물질 코팅 조건에 따른 메쉬 전극의 형상을 살펴보았다. 광학현미경 (iCAMSCOPE, Sometech Inc., Korea)을 이용하여 절연 코팅 횟수에 따른 메쉬 기공 크기의 변화를 살펴보았으며, 좀 더 명확한 형상을 확인하기 위해 전자현미경 (FE-SEM, Hitachi S-480)도 함께 사용되었다.

2. 2 실험용 필터

본 연구의 실험용 필터는 단위면적당 무게가 60 g/m²인 섬유필터로서 지지층, 주 여과층, 그리고 표면층의 3개 층으로 형성되어 있으며 전체 두께는 약 0.65 mm이다. 주 여과층은 멜트블로운 (melt-blown)

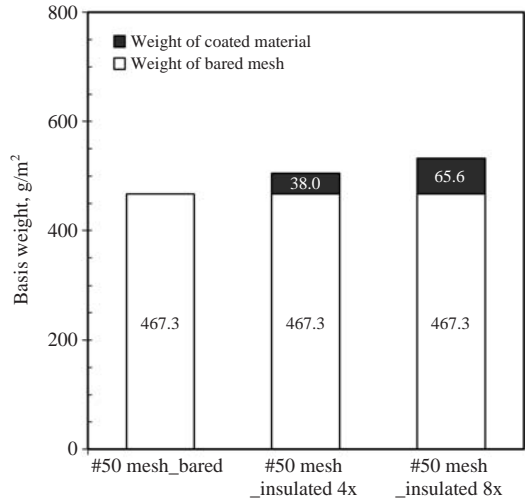


Fig. 2. Basis weight of bared mesh and coated material for electrodes used in this study.

방법에 의해 제조되었고 평균 직경이 약 3µm인 폴리프로필렌 (polypropylene) 재질의 섬유로 구성된 것이다. 필터제조업체로부터 공급받은 상기 실험용 필터는 당초 전기적으로 대전된 상태였으나 본 연구에서는 필터 대전으로 인한 집진성능 변화 요인을 제거하기 위해 ISO/TS 21220 (ISO, 2009)의 필터 제전 방법을 따라 필터를 이소프로판올 (isopropyl alcohol, IPA)에 침지한 후 건조하는 방법으로 제전 처리하였다. 실험용 필터 샘플은 직경 50 mm인 원형으로 절단하여 준비하였으며 필터 홀더에 장착식 직경 42 mm에 해당되는 면적만이 실제 여과에 사용되도록 하였다.

2. 3 실험용 입자

본 연구에서는 단일 직경으로 구성된 단분산 입자에 대한 실험과 일정한 크기분포를 갖는 다분산 입자에 대한 실험을 별도로 수행하였다. 단분산 입자와 다

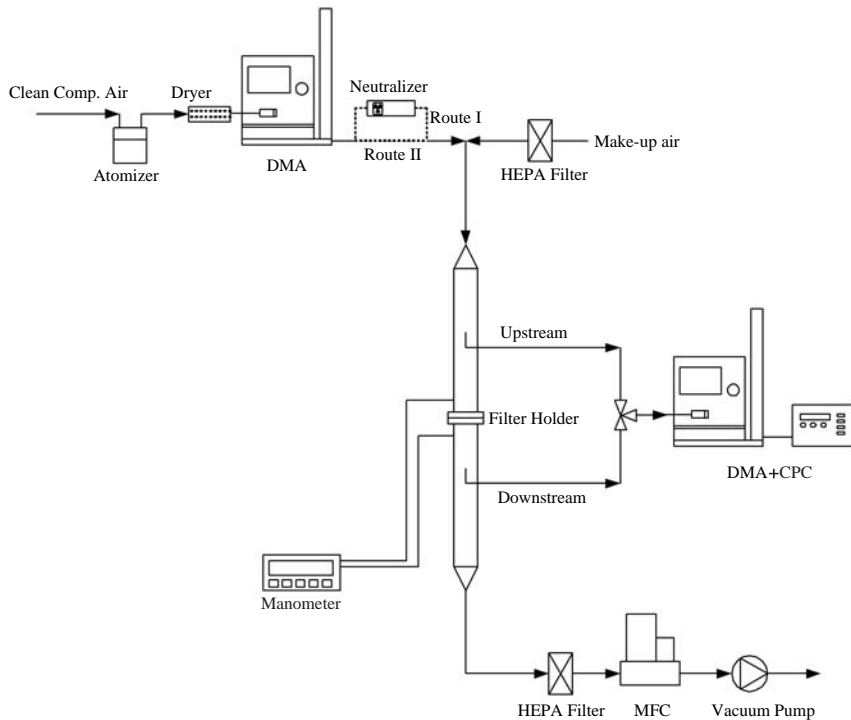


Fig. 3. Schematic diagram of filter test apparatus for monodisperse particles.

분산 입자 모두 NaCl 입자를 사용하였다. 단분산 입자의 경우 그림 3에 나타낸 바와 같이 0.1N NaCl 용액을 분무장치 (atomizer, Model 9302A, TSI Inc., USA)를 사용하여 분무하고 실리카겔로 채워진 확산건조기 (diffusion dryer, Model 3062, TSI Inc., USA)를 통과시킨 후 입자의 전기적 이동도 차이를 이용해 단분산 입자를 분리할 수 있는 DMA (Differential Mobility Analyzer, Model 55-900, GRIMM Aerosol Technik, Germany)를 통해 100 nm 입자를 발생하였다. DMA를 통과한 입자는 (-)1e로 대전되어 있기 때문에 그림 3에 표시된 바와 같이 입자대전중화기 (aerosol neutralizer, GRIMM Model 5.621, Germany)를 통과시켜 입자의 대전상태를 볼츠만 평형 하전상태 (Boltzmann equilibrium charge state)로 만드는 경로 (Route I)와 DMA에서 발생된 입자를 그대로 사용하는 경로 (Route II)를 통해 입자의 대전상태를 제어하였다. 즉, 그림 3에서 Route I을 통한 입자는 볼츠만 평형상태의 대전상태를 갖고 있으며 이를 본 연구에서는 ‘neutralized’ 입자로 표현하였고, (-)1e의 대전량을 갖는

Route II의 입자는 ‘singly charged’ 입자로 표기하였다.

다분산 입자의 발생 방법은 별도의 그림으로 나타내지는 않았으나, 그림 3에서 DMA만 없는 경우에 해당되며, 입자대전중화기를 거친 입자는 단분산 입자의 경우와 동일하게 ‘neutralized’ 입자로 나타내었고 입자대전중화기를 통과시키지 않고 확산건조기를 거친 후 바로 필터로 유입되는 입자는 ‘atomized’ 입자로 표기하였다.

본 연구에서 사용된 단분산 입자와 다분산 입자의 크기분포를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 y축은 입경별 최대 농도값으로 표준화된 농도를 보여주며, x축의 입자 직경은 전기적 이동도 상당 직경을 의미한다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 사용된 단분산 입자는 100 nm에서 농도가 최대인 DMA를 이용하여 발생된 단분산 입자의 전형적인 크기분포를 갖고 있음을 확인할 수 있다. 단분산 입자의 경우 150 nm와 200 nm 근방에서 나타난 작은 피크는 (-)1e로 대전된 100 nm 입자와 전기적 이동도 값이 동일한 각

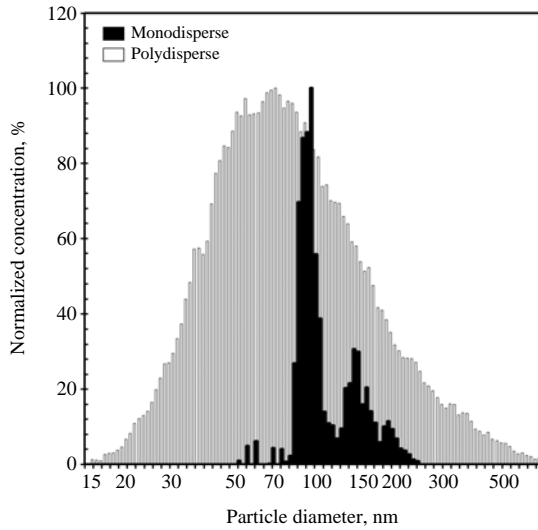


Fig. 4. Size distribution of polydisperse (white column) and monodisperse (black column) particles used in this study.

각 (-)2e와 (-)3e로 대전된 입자를 보여주고 있다. 다분산 입자의 경우 최대 농도가 약 70 nm에서 형성되고 기하학적 평균입경이 80 nm, 그리고 기하학적 표준편차가 1.93인 크기분포를 보였다.

2. 4 필터 시험 방법

본 연구에서는 필터로 유입되는 입자의 농도와 필터를 통과한 입자의 농도를 각각 측정하여 필터의 집진효율을 계산하였다. 본 연구에서는 단분산 입자와 다분산 입자 두 경우 모두에 있어서 입자 농도 측정을 위해 SMPS (Scanning Mobility Particle Size)를 사용하였다. 그림 3에 나타난 바와 같이 본 연구에서 사용한 SMPS는 DMA (Model 3080, TSI Inc., USA)와 응축입자계수기 (Condensation Particle Counter, CPC, Model 3025A, TSI Inc., USA)로 구성된 것으로 입경이 1.0 μm보다 작은 입자의 크기분포를 측정할 수 있다. 본 연구에서 집진효율 실험을 위해 사용된 여과속도는 5.3 cm/s로 이때의 필터 통과 유량은 4.4 slpm이었으며, 일정한 유량을 유지하고 제어하기 위해 질량유량제어기 (Mass Flow Controller, Model 5850E, Brooks Instrument, USA)를 사용하였다. 집진효율 외에 본 연구에서는 필터와 메쉬 전극에 대한 공기저항 특성을 파악하기 위해 최대 측정범위가 10

mmH₂O인 전자식 차압계 (Model 332, Furness Controls, UK)를 사용하여 압력손실을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 메쉬 전극의 형상

본 연구에서 전극으로 사용된 메쉬는 #50와 #200 메쉬이며, 절연물질을 코팅하여 사용한 것은 #50 메쉬이다. 절연물질이 메쉬 전극에 어떠한 형태로 코팅이 되었는지를 확인하기 위해 광학현미경과 전자현미경을 각각 사용하여 이미지를 분석하였다. 광학현미경의 경우 절연물질 코팅으로 인한 기공크기 변화를 보다 명확히 확인하기 위해 현미경 후면광원을 이용하여 명암 대비가 뚜렷한 형태의 메쉬 전극 형상을 얻었다. 그림 5는 #50 메쉬 전극의 절연물질 코팅 조건에 따른 광학현미경 사진을 보여준다. 본 연구에서 사용된 모든 그림에 나타난 메쉬 전극의 표식어는 앞서 언급된 표 1의 표식을 따른다. 그림 5에서 보듯이 절연물질 코팅 횟수가 증가할수록 메쉬 공극의 크기가 감소됨을 알 수 있다. 코팅되지 않은 메쉬 전극의 공극 형상이 사각형인데 반해 절연물질 코팅횟수가 증가함에 따라 공극의 형상이 원형으로 변하며 그 크기도 점점 작아짐을 확인할 수 있다. 그림 5의 광학현미경 사진은 메쉬 공극의 크기와 형상 변화를 명확하게 보여주고 있으나 실제 형상에 대한 정보는 부족하다. 따라서 본 연구에서는 전자현미경 (SEM)을 이용해 메쉬 전극의 형상을 분석하였으며, 그림 6에 #50 메쉬 전극의 전자현미경 (SEM) 사진을 나타내었다.

그림 6에서 볼 수 있듯이 절연물질이 코팅된 전극 메쉬에 있어서, 메쉬 와이어의 표면에 절연물질 코팅이 잘 이루어졌으며 그림 5에서도 확인하였듯이 코팅횟수가 증가함에 따라 메쉬 공극의 크기가 감소함을 알 수 있다. 또한 메쉬 와이어가 교차되는 지점에는 더 많은 양의 절연물질이 코팅되어 메쉬 공극의 형태가 원형으로 변하였고, 특히 절연물질이 8회 코팅된 경우 일부 공극은 절연물질로 막혀 있는 것도 볼 수 있다. 그림 5와 6을 통해 절연물질이 코팅된 메쉬 전극의 경우 기공크기의 감소로 인해 절연물질이 코팅되지 않은 메쉬 전극에 비해 공기저항이 증가할 것으로 예측할 수 있다.

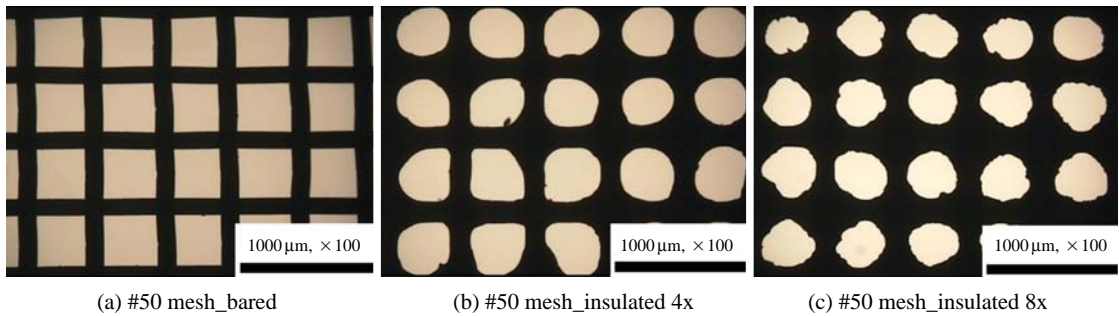


Fig. 5. Microphotographs of #50 mesh electrodes.

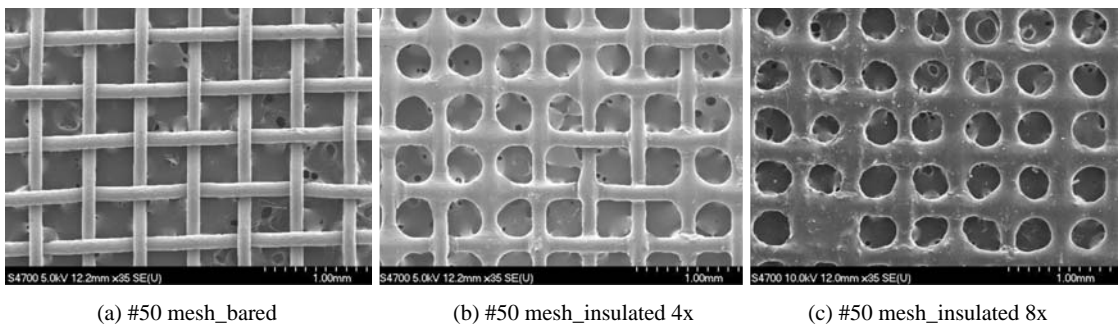


Fig. 6. SEM images of #50 mesh electrodes.

3.2 필터 압력손실

그림 1에 나타내었듯이 본 연구에서는 필터의 양면에 메쉬 전극을 두고 여기에 1,000 V 직류전압을 인가하여 전극 사이에 있는 필터에 전기장을 형성시켰다. 필터의 양면에 기공성 전극을 사용하였기 때문에 필터 본래의 공기저항보다 전극이 사용된 경우의 공기저항이 다소 높을 것으로 예상할 수 있으며, 특히 본 연구에서는 메쉬 전극을 절연물질로 코팅하였기 때문에 앞의 그림 5와 6에서 확인하였듯이 절연물질로 코팅된 메쉬 전극의 경우 원래 메쉬에 비해 기공크기가 감소하였고 따라서 공기저항이 더 증가할 것으로 예측된다.

본 연구에서 필터의 압력손실은 필터 통과 유량을 각각 2.0, 4.4, 6.0 slpm으로 조정하여 측정하였으며, 이때 각 유량에 해당되는 여과속도는 각각 2.4, 5.3, 7.2 cm/s이다. 메쉬 전극이 사용되지 않은 필터, 절연물질이 코팅되지 않은 #50 메쉬 전극이 사용된 필터, 절연물질이 4회 코팅된 #50 메쉬 전극이 적용된 필

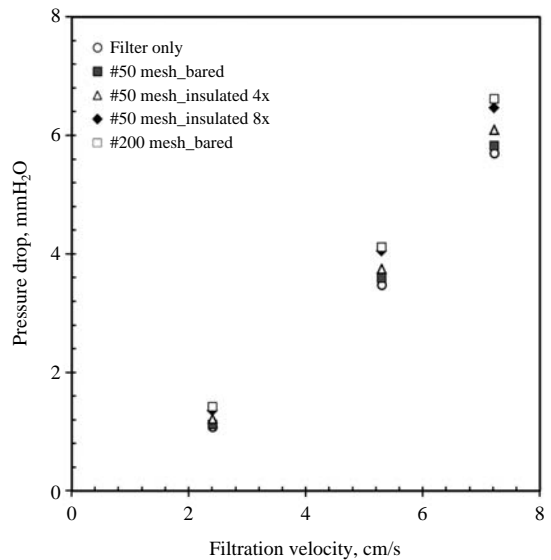


Fig. 7. Pressure drop as a function of filtration velocity for tested filters assembled with various electrodes.

터, 절연물질이 8회 코팅된 #50 메쉬 전극을 사용한 필터, 그리고 절연물질이 코팅되지 않은 #200 메쉬 전극을 사용한 필터 등 총 5 종류의 필터-전극 조합에 대한 압력손실 측정결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7의 결과는 필터 양면에 동일한 메쉬 전극이 적용되었을 때의 압력손실을 보여주고 있으며, 그림에서 보듯이 필터자체의 압력손실에 비해 메쉬 전극 사용으로 인한 압력손실 증가분은 크지 않았으며 최대 16% 정도 증가하였다. 그리고 앞에서 보여준 메쉬 전극 형상분석 결과를 통해 예상할 수 있었듯이 #50 메쉬 전극이 사용된 경우 코팅횟수가 증가할수록 압력손실도 함께 증가하였으며, 절연물질이 8회 코팅된 #50 메쉬 전극이 적용된 경우는 코팅되지 않은 #200 메쉬 전극이 적용된 경우와 유사한 압력손실을 보였다.

3.3 단분산 100nm 입자 집진효율

그림 4에 나타난 크기분포를 갖는 100 nm 단분산 입자에 대한 다양한 필터-메쉬전극 조합에서의 집진효율을 측정하였다. 필터에 외부전기장이 인가된 경

우 유입되는 입자의 대전 상태에 따라 집진효율의 차이가 발생하게 되며, 따라서 본 연구에서는 앞서 보여준 그림 3과 실험 방법에 언급한 바와 같이 불츠만 평형 하전상태를 갖는 ‘neutralized’ 입자와 ‘singly charged’ 입자에 대해 외부전기장 적용유무에 따른 집진효율을 구하였다. 표 2는 ‘neutralized’ 100 nm 입자를 사용한 경우, 그리고 표 3은 ‘singly charged’ 100 nm 입자에 대해서 다양한 절연물질 코팅조건을 갖는 메쉬 전극을 사용하였을 때 외부전기장 인가 전후의 집진효율을 각각 보여준다. 표 2와 3에 나타난 집진효율 값은 동일 조건에서 3회 측정된 결과에 대한 평균값이다. 또한 표 2와 3에서는 필터 전면(upstream) 전극과 필터 후면(downstream) 전극의 절연물질 코팅조건이 각각 다른 전극 조합에 대한 결과도 포함되어 있다.

표 2의 결과를 보면 ‘neutralized’ 100 nm 입자의 경우 #50 메쉬 전극의 절연물질 코팅유무 및 코팅 정도와는 관계없이 외부전기장이 인가되지 않은 조건에서는 56~61% 정도의 집진효율을 보이며, 외부 전기장이 인가된 조건에서는 집진효율이 75~79%

Table 2. Collection efficiency of tested filter assembled with various electrodes for neutralized 100 nm particles when external electric field is on or off.

Upstream electrode	Downstream electrode	Applied voltage, Volt	Collection efficiency, %
#50 mesh_bared	#50 mesh_bared	0	55.86
		1,000	77.80
#50 mesh_bared	#50 mesh_insulated 4x	0	57.39
		1,000	78.28
#50 mesh_insulated 4x	#50 mesh_insulated 4x	0	61.21
		1,000	75.49
#50 mesh_bared	#50 mesh_insulated 8x	0	58.35
		1,000	79.78
#50 mesh_insulated 8x	#50 mesh_insulated 8x	0	58.58
		1,000	79.60

Table 3. Collection efficiency of tested filter assembled with various electrodes for singly charged 100 nm particles when external electric field is on or off.

Upstream electrode	Downstream electrode	Applied voltage, Volt	Collection efficiency, %
#50 mesh_bared	#50 mesh_bared	0	58.70
		1,000	95.90
#50 mesh_bared	#50 mesh_insulated 4x	0	62.17
		1,000	95.64
#50 mesh_insulated 4x	#50 mesh_insulated 4x	0	54.00
		1,000	95.53
#200 mesh_bared	#200 mesh_bared	0	57.28
		1,000	94.88

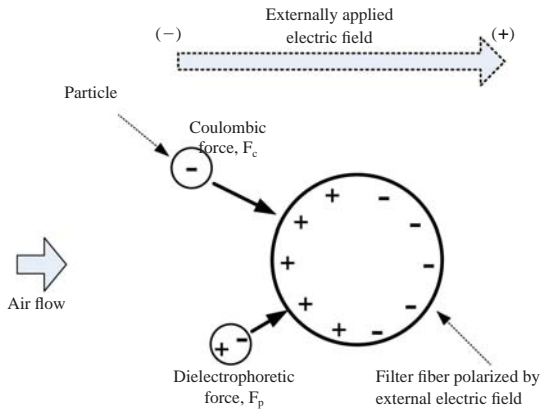


Fig. 8. Electrostatic forces between particles and a filter fiber under external electric field.

범위 내에 있음을 알 수 있다. 즉, 메쉬 전극의 절연 물질 코팅으로 인한 집진효율의 저하 현상이 존재하지 않음을 확인할 수 있다. 표 3의 ‘singly charged’ 100 nm 입자의 경우에도 #50 메쉬 전극의 절연 코팅 유무와 무관하게 외부전기장이 인가되지 않은 조건에서는 집진효율이 55~62% 사이에서 나타나고 전기장이 인가된 조건에서는 약 95%의 집진효율을 보이고 있다. #50 메쉬 전극을 적용한 경우의 집진효율 결과는 표 3에 나타내었듯이 코팅되지 않은 #200 메쉬를 전극으로 사용한 경우의 집진효율과도 거의 동일한 값을 보임을 알 수 있다. 이와 같은 단분산 100 nm 입자에 대한 집진효율 실험 결과를 통해, 필터의 양면에 외부전기장 인가를 위해 사용된 전극의 절연 물질 코팅으로 인해 집진효율이 감소하는 성능저하 문제는 발생하지 않는다는 것을 파악할 수 있었다.

표 2와 3에서 외부전기장이 인가된 조건의 경우 집진효율이 증가한 것은 외부전기장과 100 nm 입자의 대전상태에 기인한 것으로 이러한 결과를 보다 면밀히 분석하기 위해서는 본 연구의 조건에서 입자와 필터 섬유사이에 작용하는 정전기력에 대해 상세히 살펴볼 필요가 있다. 외부전기장이 인가된 필터에서 입자에 작용하는 정전기력은 단일 섬유 모델을 이용하여 간략히 도시하면 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

그림 8에 나타난 쿨롱력(coulombic force)은 대전된 입자가 전기장 안에 놓여 있을 때 작용하는 정전기력이며, 정전기적 영동력(dielectrophoretic force)은 전기장으로 인해 분극된 필터 섬유와 입자에 작용하

는 정전기력이다. 외부전기장의 세기가 E_0 이고 입자의 대전량이 q_p 인 경우 그림 8의 섬유와 입자사이에 작용하는 쿨롱력, F_C 은 아래의 수식 (1)로 나타낼 수 있다(Donovan, 1985).

$$F_C = E_0 q_p \left[1 + \left(\frac{k_f - 1}{k_f + 1} \right) \frac{D_f^2}{4r^2} \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 k_f 는 섬유의 유전상수, D_f 는 섬유의 직경, 그리고 r 은 섬유와 입자의 중심간 거리를 각각 나타낸다. 식 (1)의 첫 번째 항은 인가된 외부전기장으로 인해 대전된 입자에 작용하는 쿨롱력(F_{C1})을, 두 번째 항은 분극된 섬유에 의한 전기장으로 인해 대전된 입자에 작용하는 쿨롱력(F_{C2})를 각각 나타낸다.

그림 8에 표시한 정전기적 영동력, F_p 는 입자 대전 여부에 관계없이 작용하는 정전기력으로 아래의 식 (2)로 나타낼 수 있다(Donovan, 1985).

$$F_p = \frac{\pi \epsilon_0}{4} \left(\frac{k_p - 1}{k_p + 2} \right) \left(\frac{k_f - 1}{k_f + 1} \right) \frac{E_0^2 D_p^3 D_f^2}{r^3} \left[1 + \left(\frac{k_f - 1}{k_f + 1} \right) \frac{D_f^2}{4r^2} \right] \quad (2)$$

식 (2)에서 ϵ_0 는 진공상태의 유전율, k_p 는 입자의 유전상수, k_f 는 섬유의 유전상수, E_0 는 외부전기장 세기, D_p 는 입자 직경, D_f 는 섬유 직경, r 은 섬유와 입자의 중심간 거리를 각각 나타낸다. 식 (2)의 첫 번째 항은 외부전기장으로 인해 정전기적으로 분극된 입자에 작용하는 정전기적 영동력(F_{p1})을, 그리고 두 번째 항은 분극된 섬유에 의해 형성된 전기장으로 인해 분극된 입자에 작용하는 정전기적 영동력(F_{p2})을 각각 나타낸다. 식 (1)과 식 (2)의 각 항에 해당하는 정전기력을 본 연구에서 사용된 실험조건을 이용해 계산하면, 섬유와 입자간 중심거리(r)에 따른 각 정전기력은 표 4에 나타낸 바와 같다. 표 4의 계산에 사용된 식 (1)과 식 (2)의 각 변수 값은 입자 직경 100 nm, 섬유 직경 3 μ m, 외부전기장 세기 10 kV/cm, 진공 상태의 유전율 8.85E-12 F/m, 입자 대전량 1e, 입자(NaCl)의 유전상수 6.1, 필터 섬유(폴리프로필렌)의 유전상수 1.5이다. 표 4에서 r 은 입자와 섬유 중심간 거리를 나타내며, r 이 1.55 μ m인 경우는 입자가 섬유에 부착된 경우로 정전기력이 최대가 되는 지점이다. 표 4에서 보는 바와 같이 본 연구의 실험 조건에서는 단 1e으로 대전된 입자에 작용하는 쿨롱

Table 4. Electrostatic forces acting on a spherical particle calculated by using Eqs. (1) and (2).

r, μm	Electrostatic force, N			
	F_{C1}	F_{C2}	F_{P1}	F_{P2}
1.55	1.600E-13	2.997E-14	2.115E-15	3.962E-16
3.00	1.600E-13	8.000E-15	2.918E-16	1.459E-17
6.00	1.600E-13	2.000E-15	3.647E-17	4.559E-19
9.00	1.600E-13	8.889E-16	1.081E-17	6.004E-20

력(F_C)도 정전기적 영동력(F_P)에 비해 최소 75배 이상 높은 값을 보이며, 입자와 섬유 중심간 거리가 3 μm 만 되더라도 정전기적 영동력은 쿨롱력의 1/548 수준으로 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 입자와 섬유 중심간 거리에 따른 정전기력의 크기에 대한 결과는 Park *et al.* (1999)이 수행한 외부전기장내 단일 섬유에서의 입자 포집 형상에 대한 수치모사 결과에서도 확인할 수 있다.

표 4의 결과를 바탕으로 표 2와 표 3의 100 nm 다분산 입자에 대한 실험결과를 분석하면, 외부전기장이 인가되지 않은 조건에서는 ‘neutralized’ 입자와 ‘singly charged’ 입자 간의 집진효율의 차이가 거의 나타나지 않았는데 이러한 결과는 두 입자 모두 입자의 대전량이 미미하기 때문에 외부전기장이 인가되지 않는다면 입자와 필터섬유 사이에 작용하는 정전기력은 무시할 만한 수준으로 매우 작은 값을 갖기 때문이다. 표 2와 3의 결과를 보면 외부전기장이 인가된 조건에서는 ‘neutralized’ 입자의 집진효율이 약 78%이고 이에 비해 ‘singly charged’ 입자의 집진효율이 약 17% 정도 증가한 95% 수준으로 나타났다. 이러한 차이는 ‘neutralized’ 100 nm 입자의 하전분포가 볼츠만 평형 하전분포를 따른다고 가정했을 때 전체 ‘neutralized’ 100 nm 입자 중 약 42.6%에 해당되는 입자의 대전량이 0이며 (Hinds, 1999), 따라서 입자 대전으로 인한 쿨롱력이 작용하지 않기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

3. 4 다분산 입자 집진효율

다분산 100 nm 입자의 실험결과에서 보았듯이 외부전기장이 인가된 필터의 경우 입자의 대전특성이 집진효율에 미치는 영향은 매우 크다. 볼츠만 평형 하전분포를 갖는 입자의 대전량은 입자 직경의 함수로 나타나며 (Hinds, 1999), 실험용 입자로 보편적으

로 사용하는 가압 분무된 입자의 경우에도 입자의 평균 대전량은 입자 직경에 따라 증가한다 (Forsyth *et al.*, 1998). 입자 크기에 따른 절연 전극 사용 및 외부전기장 인가시 여과특성을 파악하기 위해 본 연구에서는 그림 4에서 보여준 크기 분포를 갖는 다분산 입자에 대해 필터의 집진효율을 측정하였다. 다분산 입자의 발생은 앞선 실험 방법에서 언급하였듯이 가압 분무 후 건조된 입자를 그대로 필터에 유입시키는 경우와 동일 상태의 입자를 입자하전중화기를 추가로 통과시킨 후 필터로 유입시키는 경우의 두 가지 방법을 이용하였다. 단분산 입자의 경우와 동일하게 다분산 입자의 경우에도 입자하전중화기를 거친 입자를 ‘neutralized’ 입자로 표기하였고, 가압 분무후 건조기만 통과한 입자는 ‘atomized’ 입자로 나타냈다. 다분산 입자에 사용된 외부전기장 인가용 메쉬 전극 또한 단분산 입자 실험에서 사용했던 표 1에 나타난 전극과 동일한 것으로 절연물질이 코팅되지 않은 ‘#50 mesh_bared’, 절연물질의 코팅횟수가 4회인 ‘#50 mesh_insulated 4x’ 전극, 절연물질 코팅횟수가 8회인 ‘#50 mesh_insulated 8x’ 전극, 그리고 절연물질이 코팅되지 않은 ‘#200 mesh_bared’ 전극의 총 4종류를 사용하였다.

위의 4가지 메쉬 전극을 사용하여 다분산 입자의 대전상태 및 외부전기장 인가 유무에 대한 필터의 집진효율을 그림 9~12에 나타냈다. 그림에서 x축에 표시한 다분산 입자의 직경은 SMPS를 이용한 입자농도 측정시 보편적으로 사용되는 전기적 이동도 상당 직경이다. 또한 외부전기장이 인가되지 않은 조건을 ‘Filter 0V’로 표기하였으며, ‘Filter 1000V’는 외부전기장이 인가된 상태를 나타낸다. 그리고 그림 9~12의 집진효율 결과는 동일 조건에서 총 3회 연속 측정된 결과의 평균값을 보여주며, 각 그림에 나타난 4가지 입자대전 및 전기장 인가 조건에 대한 실험 결과는 동일한 샘플의 필터를 사용하여 얻은 것이다.

그림 9는 필터의 양면에 ‘#50 mesh_bared’ 전극을 사용하였을 때, 입자의 대전상태와 외부전기장 인가 유무에 따른 입자 직경별 필터의 집진효율을 보여주고 있다. 입자 대전 상태에 따른 결과는 ‘neutralized’ 입자에 비해 ‘atomized’ 입자의 경우가 전 입자 크기 영역에서 높은 집진효율을 보였다. 이러한 결과는 ‘atomized’ 입자의 대전량이 ‘neutralized’ 입자에 비해 높기 때문인데, Forsyth *et al.* (1998)는 가압분무

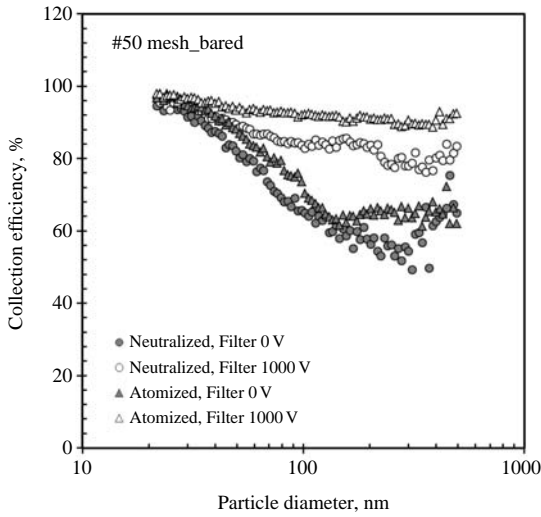


Fig. 9. Collection efficiency of tested filters assembled with bared #50 mesh electrodes for each of neutralized and atomized particles when externally applied electric field is on or off.

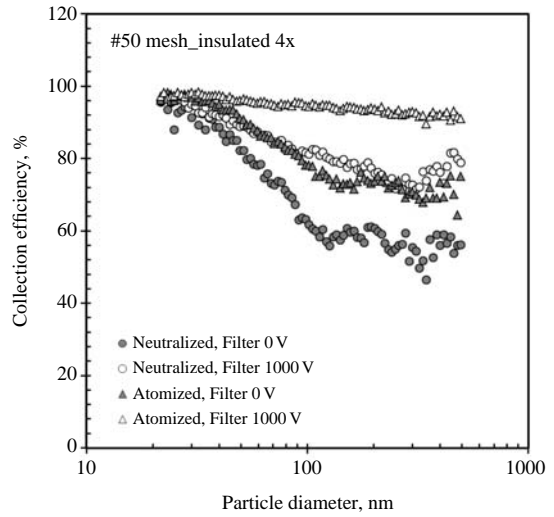


Fig. 10. Collection efficiency of testes filters assembled with #50 mesh_insulated 4x electrodes for each of neutralized and atomized particles when externally applied electric field is on or off.

방식으로 발생된 직경 150 nm 이상의 입자에 대한 하전량을 측정하였는데, 1.0 wt% NaCl 용액을 가압 분무하여 발생한 직경 200 nm 입자의 평균 하전량은 약 3.5e로 측정되었으며, 볼츠만 평형 하전분포를 갖는 동일 직경 입자의 이론적 평균 하전량인 약 1.0e 인 것에 비해 3.5배 수준으로 높게 나타났다. 이러한 두 대전상태를 갖는 입자의 대전량 차이에 의해 그림 9의 ‘atomized’ 입자와 ‘neutralized’ 입자의 집진 효율에서 크기는 약 10% 정도의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

외부전기장 인가로 인한 집진효율의 차이는 입자 대전상태에 따른 영향보다 더욱 크게 나타났다. 그림 9의 결과에서는 외부전기장이 적용된 경우 150~300 nm 크기의 입자에서 약 25% 정도 집진효율이 증가하였다. 또한 입자 크기에 따라 입자 대전 및 전기장 인가에 의한 정전기력의 효과에 차이가 있었다. 30 nm 이하의 입자에서는 정전기력의 효과가 매우 작았으며 입경이 증가할수록 정전기력에 의한 집진 효율의 차이도 점점 증가하였고, 필터의 효율이 가장 낮은 입자 크기영역에서 정전기력의 효과는 최대가 되었으며 320 nm보다 큰 입자의 경우에는 다시 정전기력의 효과가 조금씩 감소하였다. 그림 9에서 외부

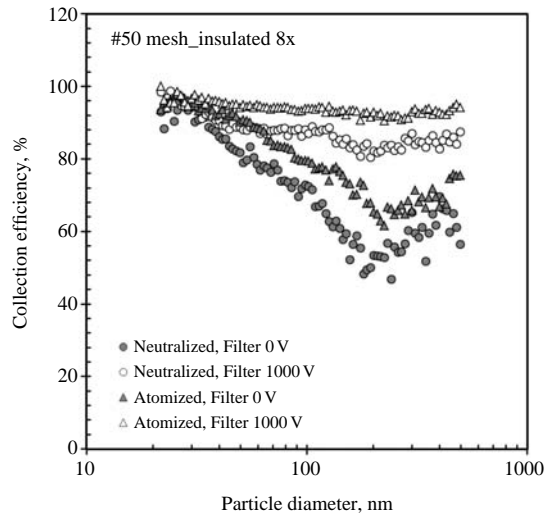


Fig. 11. Collection efficiency of tested filters assembled with #50 mesh_insulated 8x electrodes for each of neutralized and atomized particles when externally applied electric field is on or off.

전기장이 작용하지 않을 때 집진효율이 최소가 되는 입자 크기 범위는 약 100~300 nm이며, 이러한 결과는 전형적인 섬유필터의 집진효율 특성과 일치한다

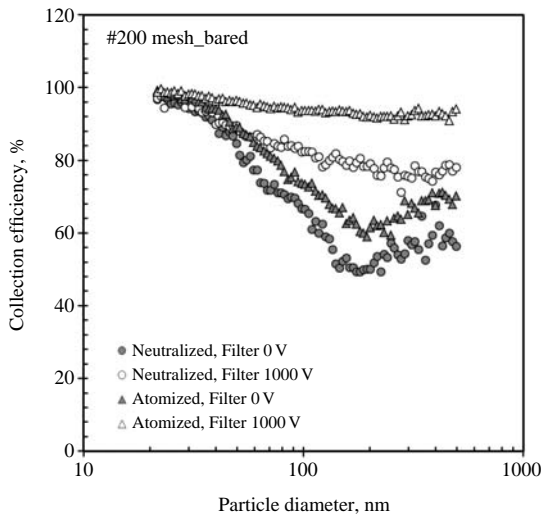


Fig. 12. Collection efficiency of tested filters assembled with bared #200 mesh electrodes for each of neutralized and atomized particles when externally applied electric field is on or off.

(Hinds, 1999).

볼츠만 평형 하전상태에 있는 20 nm 입자의 약 90 %는 대전량이 0이기 때문에 (Hinds, 1999) 평균 하전량은 거의 0에 가까우며, 이 입경 범위의 'atomized' 입자 또한 매우 낮은 전하량을 갖고 있을 것으로 판단된다. 따라서 외부전기장으로 인한 쿨롱력이 집진 효율에 미치는 영향은 미미하며, 식 (2)에서 볼 수 있듯이 정전기적 영동력은 입자 직경의 세 제곱에 비례하기 때문에 외부전기장 인가로 인해 30 nm 이하의 입자에 작용하는 정전기적 영동력의 크기도 무시할 만한 수준으로 볼 수 있다. 이러한 이유로 인해 직경 30 nm 이하의 입자에 대한 집진효율이 정전기적 조건과 관계없이 유사한 값을 보이게 된다. 다만 30 nm 이하의 입자에서 95% 수준의 높은 집진효율을 보이는 것은 잘 알려진 바와 같이 입자의 브라운 운동에 의한 확산 효과 때문이다 (Brown, 1993; Lee and Liu, 1982a, b).

그림 10과 11은 필터 양면에 '#50 mesh_insulated 4x' 전극과 '#50 mesh_insulated 8x' 전극을 각각 사용하였을 때 집진효율을 나타낸 것이다. 이때 사용된 전극은 그림 5와 6에서 사진으로 보여준 바와 같이 절연물질이 메쉬 와이어 표면에 코팅되어 있으며, 표

1과 그림 2에 나타난 것처럼 '#50 mesh_insulated 8x' 전극이 '#50 mesh_insulated 4x'에 비해 대략 2배 정도 코팅량이 많다. 그림 10과 11의 집진효율 결과는 그림 9의 결과와 매우 유사한 값과 경향을 나타내고 있다. 'Atomized' 입자의 경우 'neutralized' 입자에 비해 높은 집진효율을 보이며, 외부전기장이 인가된 경우에는 최대 20~30% 정도 집진효율이 증가하였다. 즉, 절연물질로 코팅된 메쉬 전극을 사용하였을 경우라도 외부전기장 인가 효과는 절연 처리되지 않은 전극과 동일한 집진성능을 유지할 수 있음을 확인할 수 있다. 특히, 그림 12에 나타난 메쉬 전극의 공극이 #50 메쉬보다 매우 작은 '#200 mesh_bared' 전극이 사용되었을 경우에도 집진효율 특성은 그림 9~11과 매우 유사함을 알 수 있다.

그림 9~12의 결과를 서로 비교하였을 때 동일한 정전기적 조건에 따라 집진효율의 차이가 다소 존재하는 이유는 각 메쉬 전극의 특성에 기인하기 보다는 사용된 필터 소재의 불균일성에 의한 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용된 필터와 같이 폭이 1 m 이상의 대면적으로 제조되는 필터소재는 전체 면적에 걸쳐 완벽히 동일한 물성을 갖지 못한다. 따라서 동일한 필터 소재를 사용하였더라도 본 연구에서와 같이 직경 50 mm 정도의 작은 크기의 샘플을 사용할 경우 각 필터 샘플 사이에는 물성차이가 존재할 수 있으며, 이로 인해 집진성능에 차이가 발생할 수 있다. 그림 9~12의 결과 비교시 나타나는 집진효율의 차이도 이러한 필터 샘플의 물성차이에 기인한 것으로 판단된다.

4. 결 론

에어필터에 외부전기장을 직접 인가하여 여과성능을 개선하고자 할 때, 필터 양면에 적용된 전극의 직접적인 노출은 안전성 문제를 야기할 수 있다. 이에 본 연구에서는 표면이 절연물질로 코팅된 전극을 사용하는 것을 고려하였으며, 절연 처리된 전극의 사용시 외부전기장 인가 조건에서 에어필터의 여과성능에 대한 특성을 살펴보았다. 보다 구체적으로는 절연 물질이 코팅된 #50 메쉬 전극과 절연되지 않은 #50 및 #200 메쉬 전극을 사용하였을 때 입자의 대전량과 외부전기장의 인가 유무에 따른 필터의 집진효율

을 측정하여 메쉬 전극 표면의 절연 처리에 따른 여과성능의 변화 특성을 파악하였다. 절연 물질의 코팅량이 증가할수록 메쉬 전극의 기공크기는 감소하였으며 이로 인해 절연 코팅 전극이 적용된 필터의 압력손실이 증가하였다. 절연물질 코팅횟수가 8회인 #50 메쉬 전극을 사용했을 경우 필터의 압력손실은 코팅되지 않은 #50 메쉬 전극에 비해 최대 16% 정도 증가하였다. 단분산 100nm 입자에 대해 다양한 조합의 메쉬 전극을 적용한 필터의 집진효율을 측정하였으며, 그 결과 전극의 코팅 유무 및 코팅 정도에 관계없이 외부전기장이 인가된 조건에서 볼츠만 평형하전분포를 갖는 입자의 집진효율은 약 78%로 나타났다. (-)로 대전된 입자는 이보다 17% 정도 증가한 95% 수준의 효율을 보였다. 입자 크기에 따른 영향을 살펴보기 위해 평균 입경이 80nm인 다분산 입자를 사용하였을 경우에도 메쉬 전극의 절연 조건과는 상관없이 필터의 집진효율은 거의 유사한 값과 경향을 보였다. 즉, 직경이 30nm 이하인 입자의 경우에는 정전기력의 영향이 미미하였으며 입경이 증가할수록 외부전기장 적용 유무에 따른 집진효율의 차이가 점차 증가하였고, 특히 최소 집진효율을 보이는 약 100~300nm 입자의 경우 외부전기장 인가로 인한 집진효율의 차이가 20~30% 정도로 가장 높게 나타났다.

본 연구를 통해 외부전기장이 인가된 섬유상 에어 필터는 전기장 형성을 위해 사용된 메쉬 전극의 절연물질 코팅 유무 및 정도에 관계없이 동일한 여과성능을 보인다는 것을 확인하였다. 이상과 같은 본 연구의 결과는 향후 외부전기장 인가 방식의 필터 적용을 확대하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단-신기술융합형 성장동력사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

- Brown, R.C. (1993) Air Filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters, Pergamon Press, Ltd.
- Brown, R.C., D. Wake, and P.A. Smith (1994) An electrically augmented filter made from conducting and dielectric fibers, *J. Electrostatics*, 33, 393-412.
- Donovan, R.P. (1985) Fabric Filtration for Combustion Sources: Fundamentals and Basic Technology, Marcel Dekker Inc.
- Forsyth, B., B.Y.H. Liu, and F.J. Romay (1998) Particle charge distribution measurement for commonly generated laboratory aerosols, *Aerosol Sci. and Tech.*, 28, 489-501.
- Havlíček, V. (1961) The improvement of efficiency of fibrous dielectric filters by application of an external electric field, *Int. J. Air and Water Poll.*, 4, 225-236.
- Henry, F. and T. Ariman (1981a) Cell model of aerosol collection by fibrous filters in an electrostatic field, *J. Aerosol Sci.*, 12, 91-103.
- Henry, F. and T. Ariman (1981b) The effect of neighboring fibers on the electric field in a fibrous filter, *J. Aerosol Sci.*, 12, 137-149.
- Hinds, W.C. (1999) Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc.
- Hochrainer, D., G.M. Hidy, and G. Zebel (1969) Creeping motion of charged particles around a cylinder in an electric field, *J. of Colloid and Interface Sci.*, 30, 553-567.
- ISO (2009) Particulate air filters for general ventilation-Determination of filtration performance, ISO/TS 21220, 1st Ed.
- Kao, J.-N., G.I. Tardos, and R. Pfeffer (1987) Dust deposition in electrostatically enhanced fibrous filters, *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-23, 464-473.
- Kirsch, A.A. (1972) The influence of an external electric field on the deposition of aerosols in fibrous filters, *J. Aerosol Sci.*, 3, 25-29.
- Lee, K.W. and B.Y.H. Liu (1982a) Experimental study of aerosol filtration by fibrous filters, *Aerosol Sci. and Tech.*, 1, 35-36.
- Lee, K.W. and B.Y.H. Liu (1982b) Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters, *Aerosol Sci. and Tech.*, 1, 147-161.
- Luckner, H.J., L. Gradoń, A. Podgórski, and Z. Wertekuk (1998) Aerosol particle filtration in the fibrous filters at the presence of external electric field. II. Experimental investigations, *Inzynieria Chemiczna I Pro-*

Brown, R.C. (1993) Air Filtration: An Integrated Approach to

- cesowa, 19, 891-903.
- Park, H.S., Y.W. Jung, Y.O. Park, and K.W. Lee (1999) Numerical simulation of particle deposition pattern on cylindrical fiber under external electrical field, J. of Korean Soc. for Atmos. Environ., 15, 41-51. (in Korean with English abstract)
- Podgórski, A., H.J. Luckner, L. Gradoń, and Z. Wertejuk (1998) Aerosol particle filtration in the fibrous filters at the presence of external electric field. I. Theoretical model, Inzynieria Chemiczna I Procesowa, 19, 865-889.
- Walsh, D.C. and J.I.T. Stenhouse (1997) The effect of particle size, charge, and composition on the loading characteristics of an electrically active fibrous filter material, J. Aerosol Sci., 28, 307-321.
- Walsh, D.C. and J.I.T. Stenhouse (1998) Parameters affecting the loading behavior and degradation of electrically active filter materials, Aerosol Sci. and Tech., 29, 419-432.
- Zebel, G. (1965) Deposition of aerosol flowing past a cylindrical fiber in a uniform electric field, J. of Colloid Sci., 20, 522-543.