한국대기환경학회지 제 28 권 제 6 호
J. KOSAE Vol. 28, No. 6 (2012) pp. 644～655
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
DOI: http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.6.644

입자 및 필터 대전상태에 따른 입자부하조건에서 공기정화 필터의 여과특성

Influence of Particle and Filter Charge on Filtration Property of Air Filter under Particle Loading

지 성 미[1),2)] · 손 종 렬[1)] · 박 현 설[2),*]
[1)]고려대학교 환경보건학과, [2)]한국에너지기술연구원 기후변화연구본부
(2012년 10월 2일 접수, 2012년 10월 11일 수정, 2012년 10월 23일 채택)

Sung-Mi Ji[1),2)], Jong-Ryeul Sohn[1)] and Hyun-Seol Park[2),*]
[1)]*Department of Environmental Health, Korea University*
[2)]*Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research*
(Received 2 October 2012, revised 11 October 2012, accepted 23 October 2012)

Abstract

As soon as a new air filter is applied to an air purification process, the filter gets loaded with dust particles. Thus, the study on the particle loading characteristics of air filter is very essential in order to understand the real filtration phenomena during filter use. In this study, we investigated the effect of particle and filter charge on the particle loading property of air filter. Charged filter and uncharged filter prepared by discharging the charged filter by isopropyl alcohol were used as test samples, and three types of particle having different charge states were supplied to filters tested. For neutralized particles there was a big difference in areal mass loading rates between charged and uncharged filters due to the very small amount of particle charge, on the other hand the difference was diminished for atomized particle and finally almost vanished for corona charged particles. The pressure drop of filter loaded with corona charged particles was only half of those for neutralized and atomized particles at the same areal mass loading because of the porous structure of particle deposit formed on filter fibers, caused by the space charge effect between particles.

Key words : Particle loading, Air filter, Particle charge, Filter charge, Collection efficiency, Pressure drop

1. 서　　론

공기정화용 필터의 성능을 평가하기 위한 대표적인 항목으로는 제거하고자 하는 입자에 대한 집진효율, 공기가 필터를 통과할 때 발생하는 압력손실, 그리고 필터의 사용 수명이 있다. 일반적으로 집진효율이 높은 필터는 압력손실이 높고, 반대로 집진효율이 낮은 필터는 압력손실도 낮다. 공기저항이 낮은 필터의 집진효율을 높이기 위해 정전기력을 이용하는 방

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

법이 폭넓게 사용되고 있으며 대표적인 예로는 필터를 전기적으로 대전시킨 정전필터를 들 수 있다. 정전필터는 마찰대전이나 코로나대전 방법을 이용하여 제조할 수 있으며 대전 처리하기 전의 필터와 동일한 압력손실을 유지하면서도 집진효율을 큰 폭으로 증가시킬 수 있다(Brown, 1993).

필터의 사용수명은 입자가 필터에 지속적으로 포집됨에 따라 필터의 공기저항이 점점 증가하여 최종 압력손실 값에 도달할 때까지의 시간이라고 할 수 있다. 표준시험방법에 의한 필터의 사용수명은 최종 압력손실 값에 이르는 동안 필터의 단위 여과면적당 포집된 입자 무게인 입자포집용량(dust holding capacity)으로 나타낸다. 필터의 등급에 따라 최종 압력손실 값에 차이가 있으나, 필터시험규격인 ISO/TS 21220의 미세입자 및 조대입자 사용 시험방법에 따르면 최종 압력손실 값은 각각 375 Pa와 250 Pa이다(ISO, 2009). 필터에 유입되는 입자에 작용하는 정전기력은 필터의 수명에도 영향을 준다. 필터와 입자의 정전기적 상태에 따라 입자가 필터에 포집되는 형상이 변하기 때문에 필터의 공기저항특성 및 집진효율도 변하며 결과적으로 입자포집용량과 필터수명에도 변화가 생긴다.

필터에 입자가 부착되는 형상에 대한 연구는 주로 단일 섬유 모델을 이용하여 이루어졌다. 단일 섬유에 입자가 덴드라이트(dendrite) 구조로 포집되는 현상에 대한 연구는 Payatakes and Gradoń (1980), Bhutra and Payatakes (1979), Tien *et al.* (1977), Payatakes and Tien (1976)에 의해 수행되었다. 또한 3차원 수치모사 방법을 통해 다양한 여과조건에서 단일 섬유에 쌓이는 입자층에 대한 연구가 수행되었다(Schmidt, 1996; Kanaoka and Hiragi, 1994; Baumgartner and Friedrich, 1987; Kanaoka *et al.*, 1980). 정전기력이 작용하는 조건에서 단일 섬유에 입자가 부착되는 형상에 대한 연구도 Park *et al.* (1999)과 Nielsen and Hill (1980)에 의해 보고된 바가 있다.

필터의 입자부하특성에 대한 연구는 필터의 전체 사용기간 동안 이루어지는 여과특성을 이해하기 위한 것임과 동시에 필터 수명 예측에 대한 것이기 때문에 많은 연구자들의 관심을 받아왔다. 섬유필터에 대한 단분산 입자 부하조건에서의 여과특성에 대한 연구는 Brown and Wake (1999), Japuntich *et al.* (1994), 그리고 Novick *et al.* (1992)에 의해 수행된 바가 있으며 Kanaoka and Hiragi (1990)는 입자가 포집된 필터의 압력손실을 예측하기 위한 모델을 제시하기도 하였다. 정전필터라 불리는 전기적으로 대전된 필터는 입자와 필터소재의 특성에 따라 초기 입자부하 단계에서 집진효율이 저하되는 현상이 나타나기 때문에 많은 연구가 수행되었다. Walsh and Stenhouse (1998, 1997a, b)는 대전 필터의 입자 포집에 따른 집진성능 저하 특성을 이해하기 위해 다양한 변수에 대한 체계적인 실험적 연구를 수행하였다. Brown *et al.* (1988)도 산업공정에서 발생하는 다양한 입자를 이용하여 대전 필터의 입자부하 조건에 대한 여과특성에 대해 보고하였으며, Barrett and Rousseau (1998)은 호흡기 보호장비에 대한 적용가능성을 파악하기 위해 다양한 종류의 대전 필터를 대상으로 입자 부하조건에서의 여과성능을 평가하였다.

본 연구에서는 공기정화 필터로 유입되는 입자의 대전상태와 필터의 대전유무에 따라서 입자가 필터에 지속적으로 포집되는 입자부하조건에서 필터의 압력손실과 집진효율 변화 특성을 살펴보았다. 특히 필터사용시간에 따른 입자포집량 변화 특성, 단위면적당 입자포집량에 따른 필터 여과성능, 그리고 필터에 포집되어 형성된 입자층의 구조 등을 복합적으로 분석하여 다양한 정전기적 조건에서 입자부하시 필터의 여과특성을 파악하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험용 입자

본 연구에서 사용한 입자는 KCl로서 가압 아토마이저(atomizer, Model 9302A, TSI Inc., USA)를 사용하여 KCl 1.0wt% 용액을 분무한 후 실리카겔로 채워진 확산건조기(diffusion dryer, Model 3062, TSI Inc., USA)를 통과시키는 방법으로 발생하였다. 발생된 KCl 입자의 대전 상태를 제어하기 위해 그림 1에서 보는 바와 같이 입자가 3개의 서로 다른 경로를 통해 필터로 유입되도록 하였다. 첫 번째 경로(Route I)는 확산건조기를 거친 입자가 입자하전중화기(aerosol neutralizer, GRIMM Model 5.621, Germany)를 통과한 후 필터로 유입되는데 이 경로를 통과한 입자는 볼쯔만평형상태(Boltzmann equilibrium state)의 전하분포를 갖게 된다. Route I을 통해 발생된 입자를 본

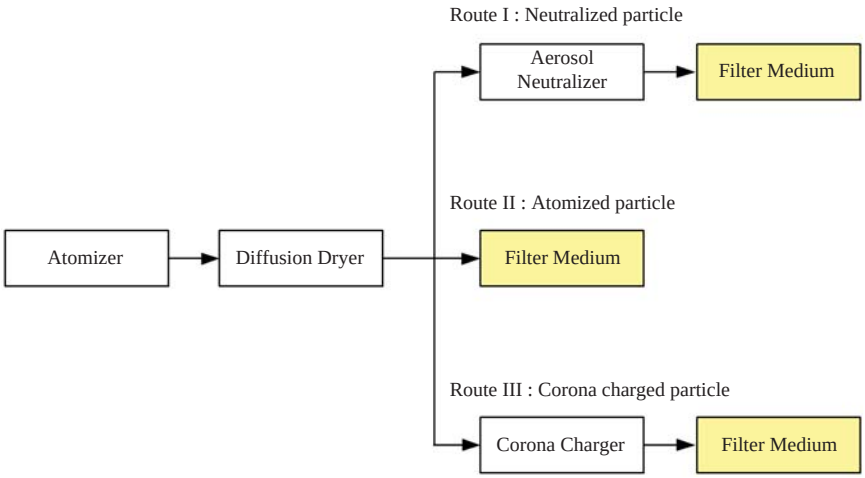


Fig. 1. Particle generation routes for KCl particles of different charge states.

연구에서는 'neutralized' 입자로 표기하였다. 두 번째 경로(Route II)는 아토마이저와 확산건조기를 통과한 입자를 그대로 필터에 유입시키는 것으로 이때 발생된 입자를 'atomized' 입자로 표시하였다. 마지막 경로(Route III)는 두 번째 경로의 확산건조기 후단에 코로나대전장치(corona charger, customized) 가 설치된 것으로 매우 높은 하전량을 갖는 단일 극성 입자가 공급되도록 하였다. 이때 발생된 입자는 'corona' 대전 입자로 나타냈다. Route III에서 코로나대전장치는 통로의 단면크기가 10 mm × 10 mm, 길이는 40 mm인 형태로, 평판-방전침 형태를 갖고 있으며 방전침에는 +7 kV가 인가되며 평판은 접지된다.

2. 2 실험용 필터

본 연구에 사용된 실험용 필터는 멜트블로운 방법으로 제조되고 평균 직경이 약 2 μm인 섬유로 구성된 단일층의 필터로서 필터제조업체로부터 제공받았다. 위의 실험용 필터는 전기적으로 대전된 필터였으며, 본 연구에서는 필터의 대전 유무에 따른 영향을 파악하기 위해 대전 필터를 이소프로판올(isopropyl alcohol, IPA)에 침지한 후 건조하는 방법을 통해 제전시킨 무대전 필터를 별도로 준비하였다. 본 연구에서 사용한 대전 필터는 업체로부터 공급받은 상태 그대로의 필터이며, 무대전 필터는 위의 대전 필터를 제전 처리한 것이다. 필터 성능평가를 위한 필터 샘플의 크기는 직경 50 mm인 원형으로 준비하였으며, 실제 여과면적은 직경 42 mm에 해당되도록 하였다.

2. 3 필터성능시험

입자가 필터에 지속적으로 포집되는 입자부하조건에서 시간에 따른 필터 여과성능은 일정한 시간간격에 따라 필터의 압력손실과 집진효율을 측정하는 방식으로 평가하였다. 필터의 압력손실은 차압계(Model CP 300, KIMO, France)를 이용하여 2초 간격으로 측정하였으며 측정된 값은 데이터 저장장치에 자동 저장되도록 하였다. 그리고 입자부하실험에서 필터의 최종 압력손실은 500 Pa로 설정하였다. 즉 필터의 압력손실이 500 Pa에 도달하였을 때 실험을 종료하였다. 필터의 집진효율은 실험 시작과 함께 110초 간격으로 측정된 필터 후단의 입자 농도와 필터 압력손실이 500 Pa에 이른 후 일정시간 동안 측정된 필터 전단의 입자 농도 평균값을 이용하여 계산하였다. 입자의 농도는 서브마이크론 입자에 대해 입경별 농도를 측정할 수 있는 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)를 사용하였는데, 본 연구에서는 독일 GRIMM Aerosol Technik사의 L-DMA (GRIMM Model 55-900), 그리고 FCE (Faraday Cup Electrometer, GRIMM Model 5.705)로 구성된 SMPS를 사용하였다. 또한 본 연구의 모든 필터 실험에서 여과속도는 5.3 cm/s로 고정하였고 이를 위해 질량유량제어기(Mass Flow Con-

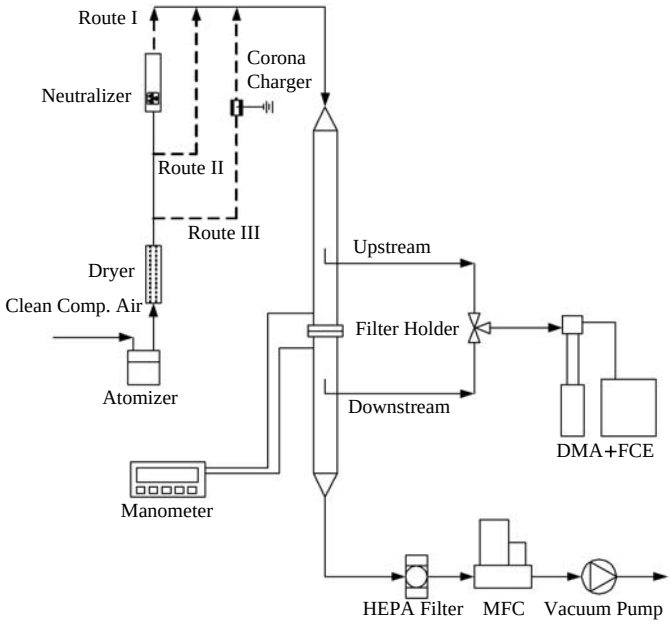


Fig. 2. Schematic diagram of filter test apparatus used in this study.

troller, Model 5850E, Brooks Instrument, USA)를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 필터시험장치의 개략도를 그림 2에 나타내었다. 그림 1에서 보여주었던 세 가지 입자 발생 경로를 그림 2에도 점선으로 각각 표시하였다.

2. 4 입자 포집 형상 분석

본 연구에서는 입자의 대전상태에 따라 필터에 포집된 입자의 형상을 분석하였다. 이를 위해 입자대전조건이 다른 경우에 대해 동일한 양의 입자가 포집된 필터를 전자현미경(FE-SEM, Hitachi S-4800)으로 관찰하였다. 또한 입자포집량에 따른 입자층 형상을 비교하기 위해 필터 단위면적당 입자포집량이 각각 500 mg/m^{2}과 2,000 mg/m^{2}일 때 입자 포집 형상을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 입자부하 시간에 따른 필터 단위면적당 입자포집량

일반적으로 필터에 대한 입자부하실험은 장시간에 걸쳐 수행되며 필터의 집진효율과 압력손실은 필터 단위면적당 입자포집량에 대해 측정된다. 즉, 동일한 량의 입자가 포집된 필터에 대해 집진효율과 압력손실을 서로 비교하여 평가한다. 단위면적당 입자포집량은 필터로 유입되는 입자 농도, 여과속도, 집진효율, 그리고 경과시간을 이용하여 계산되며, 따라서 동일한 입자 농도와 여과속도에 대해 집진효율에 차이가 있다면 동일 경과시간에 대한 단위면적당 입자포집량에도 차이가 발생한다.

그림 3은 본 연구에서 사용된 대전상태가 각각 상이한 세 종류의 입자에 대해 본 연구의 실험용 대전필터(charged filter) 및 이를 IPA로 제전 처리한 무대전 필터(uncharged filter)의 입자 부하시간에 따른 필터 단위면적당 입자포집량을 보여주고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 본 고에서 사용된 그림들에서는 그림 1의 Route I을 통해 발생되어 볼쯔만평형하전량을 갖는 입자를 ‘neutralized’ 입자로 나타내었으며, 그림 1의 Route II를 통해 발생한 입자는 ‘atomized’ 입자, 그리고 그림 1의 Route III를 통해 발생한 입자는 ‘corona’ 대전 입자로 각각 표시하였다. 그림 3(a)는 ‘neutralized’ 입자를 사용한 경우 대전 필터 및 무대전 필터의 입자부하시간에 따른 필터 단위면적

Table 1. Electrostatic forces between a particle and a filter fiber (Donovan, 1985).

Particle charge, q_p	Fiber charge per unit length, Q	Electrostatic force	
○	○	$\frac{q_p Q}{2\pi\varepsilon_0 r}$	Coulombic force
×	○	$\left(\frac{k_p-1}{k_p+2}\right)\frac{d_p^3 Q^2}{8\pi\varepsilon_0 r^3}$	Dielectrophoretic force
○	×	$\frac{q_p^2 N_p d_f^2}{8\varepsilon_0 r}$	Space charge effect
○	×	$\left(\frac{k_f-1}{k_f+1}\right)\frac{q_p^2}{4\pi\varepsilon_0(2r-d_f)^2}$	Image force

※ Q: fiber charge per unit length, q_p: particle charge, r: distance between the centerline of cylindrical fiber and the center of a spherical particle, ε_0: electrical permittivity of vacuum, k_p: dielectric constant of particle, k_f: dielectric constant of fiber, d_p: particle diameter, d_f: fiber diameter, N_p: particle number concentration.

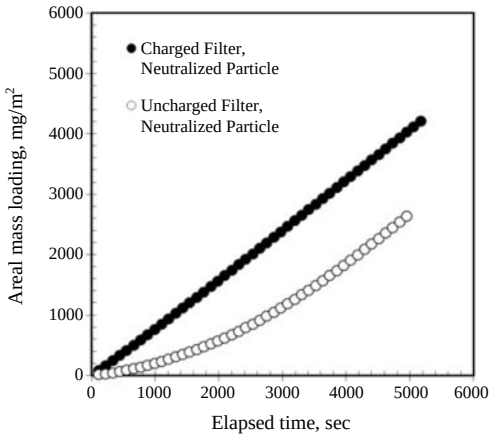
당 입자포집량의 변화를 나타내고 있다. 대전 필터의 경우, 시간에 따른 입자포집량이 선형적으로 증가하는 반면, 무대전 필터는 초기에는 입자포집량이 느린 속도로 증가하다가 어느 지점을 넘어서는 급격히 증가하는 2차 곡선의 형태를 보이고 있다. 이러한 결과는 'neutralized' 입자에 작용하는 정전기력의 차이에 기인한 두 필터의 집진효율 차이 때문인 것으로 판단된다.

정전기력에 의한 필터 집진효율의 차이를 보다 명확히 보기 위해서는 본 연구에서 사용된 정전기적 조건에서 필터와 입자 사이에 작용하는 정전기력에 대해 자세히 살펴보아야 한다. Donovan (1985)이 정리한 섬유필터에서 입자에 작용하는 정전기력 중 본 연구와 관계되는 정전기력의 종류와 크기를 표 1에 나타내었다. 표 1은 구형 입자와 원통형 필터섬유사이에 섬유의 중심으로부터 반경 방향으로 작용하는 정전기력의 크기를 나타낸 것으로 정전기력이 작용하는 방향은 표시하지 않았다.

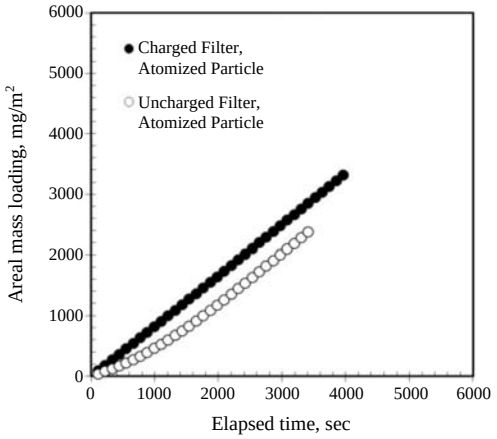
표 1에 표시한 정전기력을 참고하고 다시 그림 3(a)로 돌아가면, 입자의 대전량이 매우 낮은 수준인 'neutralized' 입자에 작용하는 정전기력은 대전된 필터섬유와의 사이에 작용하는 쿨롱력 (coulombic force)과 섬유대전으로 인해 입자에 작용하는 분극력인 정전기적 영동력 (dielectrophoretic force)이 지배적이라 할 수 있다. 그 외의 동일 극성으로 대전된 입자사이의 반발력으로 인한 공간전하효과 (space charge effect)와 대전 입자로 인해 필터 섬유를 전기적으로 분극시켜 작용하는 가상력 (image force)은 극히 미미한 수준으로 작용하게 된다. 따라서 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 무대전 필터에는 정전기력의 효과가 거의 없으며 대전 필터에 비해 시간당 포집된 입자의 양에서 차이가 발생하게 된다. 단지 시간이 지난 후 입자포집량이 일정 수준이상이 되면 포집된 입자로 인해 집진효율이 증가하게 되어 입자포집량의 증가속도에서 대전필터와의 차이가 감소하게 된다.

그림 3(b)는 'atomized' 입자의 경우 시간에 따른 필터에 쌓이는 입자포집량을 보여주고 있다. 'atomized' 입자는 'neutralized' 입자에 비해 평균 하전량이 2～3배 사이인 것으로 알려져 있다 (Forsyth *et al.*, 1998; Kousaka *et al.*, 1981). 따라서 입자의 하전으로 인해 쿨롱력, 공간전하효과, 그리고 가상력이 증가하게 되어 무대전 필터와 대전 필터사이의 시간에 따른 필터 단위면적당 입자포집량의 차이가 'neutralized' 입자의 경우에 비해 감소하게 되며, 그림 3(b)에서 이를 확인할 수 있다.

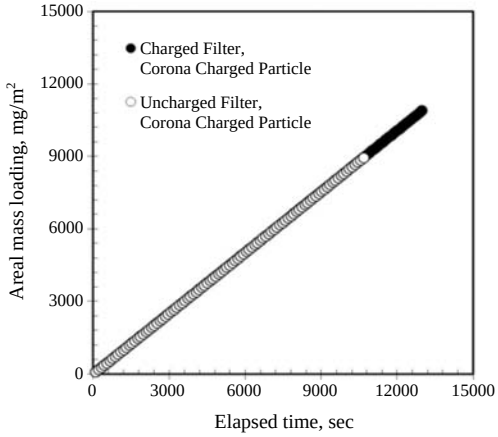
그림 3(c)는 'corona' 대전입자에 대한 시간에 따른 입자포집량의 증가 추이를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 'corona' 대전입자의 경우에는 필터의 대전유무에 관계없이 시간에 따른 필터 단위면적당 입자포집량이 동일함을 알 수 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 사용된 크기범위의 'corona' 대전 입자의 경우 하전량이 $1e \sim 10^3 e$ 수준으로 매우 높아 (Alguacil and Alonso, 2006; Hernadez-Sierra *et al.*, 2003; Reist, 1993; Emets *et al.*, 1991; Johnston, 1983) 필터의 대전유무와 관계없이 입자의 대전으로 인한 정전기력인 공간전하효과 및 가상력이 보다 중요한 역할을 했기



(a) Neutralized particle



(b) Atomized particle



(c) Corona charged particle

Fig. 3. Areal mass loading as a function of elapsed time for differently charged particles.

때문인 것으로 판단된다.

그림 3에서 각 대전 상태의 입자에 따라 동일 경과시간에 대한 입자포집량의 차이가 발생하는 이유는 본 연구에서의 실험 종료 조건 때문이다. 즉, 본 연구에서는 일정 경과시간을 실험 종료 조건으로 하지 않고 입자 부하에 따른 필터의 압력손실이 500 Pa에 도달했을 때 실험을 종료하였다. 따라서 실험 조건에 따라 필터 압력손실의 증가속도가 낮다면 실험 종료시의 경과시간에서 차이가 발생하게 된다. 그림 3(c)의 'corona' 대전 입자의 경우 다른 입자를 사용한 결과와 비교하였을 때 실험 종료 시점까지의 경과 시간과 이에 해당되는 입자포집량이 크게 증가하였으며 추후 상세히 언급되겠지만 이러한 결과로부터 'corona' 대전 입자의 부하로 인한 필터 압력손실의 증가 속도가 다른 대전 상태를 갖는 입자의 경우에 비해 매우 낮았음을 예상할 수 있다.

3. 2 입자포집량에 따른 필터 여과성능

앞서 언급하였듯이 필터의 입자부하 연구는 필터 단위면적당 입자포집량의 증가에 따른 필터 성능 변화를 분석하는 방식으로 수행된다. 본 연구에서도 필터 대전유무 및 입자대전 상태에 따른 다양한 정전기적 조건에서 입자부하에 따른 여과성능을 단위면적당 입자포집량에 대해 나타내었다. 그림 4는 'neutralized' 입자를 사용한 경우 대전 필터 및 무대전 필터에 대한 입자부하 실험 결과를 보여주고 있다. 그림 4(a) 대전필터와 그림 4(b) 무대전 필터의 집진효율을 비교하면 단위면적당 입자포집량이 2,000 mg/m^2 이하에서 매우 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다. 특히 'neutralized' 입자에 대한 대전 필터의 초기 집진효율이 80% 수준임에 비해 무대전 필터의 초기 집진효율은 15% 수준으로 매우 낮다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 앞서 보여준 그림 3(a)의 시간에 따른 입자포집량에서 대전 필터와 무대전 필터 사이에 존재하는 간격에 대한 원인이 집진효율의 차이임을 확인시켜주고 있다. 그림 4에서 대전 필터와 무대전 필터의 집진효율 차이가 큰 반면 입자포집량에 따른 압력손실 변화 특성은 거의 유사하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 동일한 구조를 갖는 필터의 경우, 포집된 입자의 양이 같다면 필터의 압력손실은 필터의 대전유무와 관계없이 동일한 값을 보인다는 것을 의미한다. 필터의 압력손실은 필터의

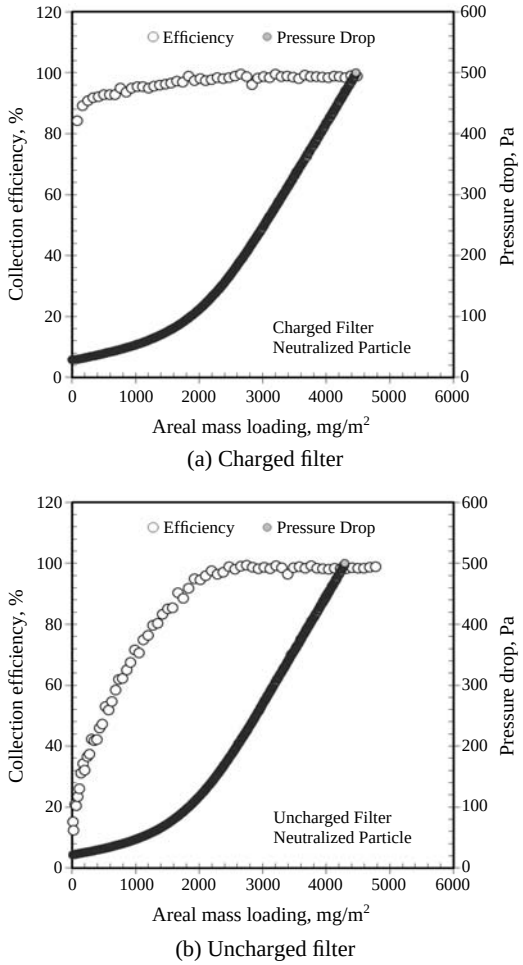


Fig. 4. Collection efficiency and pressure drop of (a) charged filter and (b) uncharged filter as a function of areal mass loading for neutralized particles.

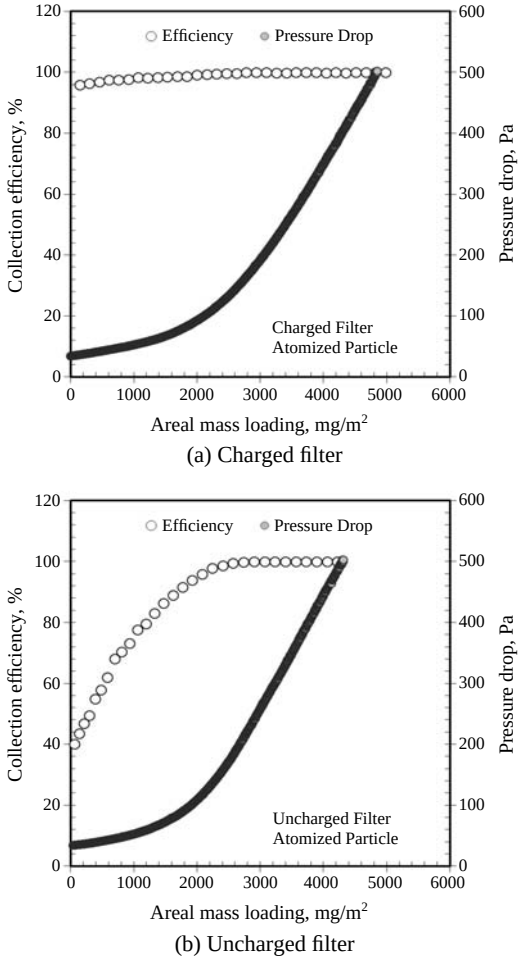
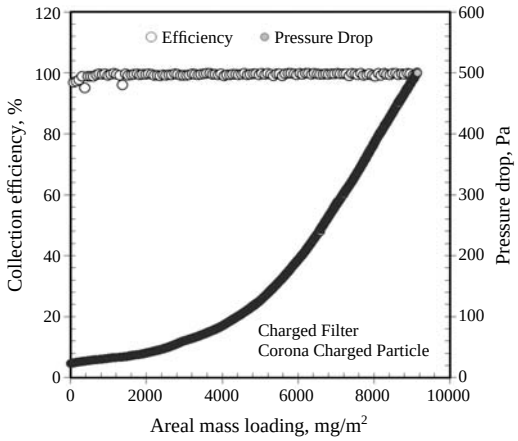


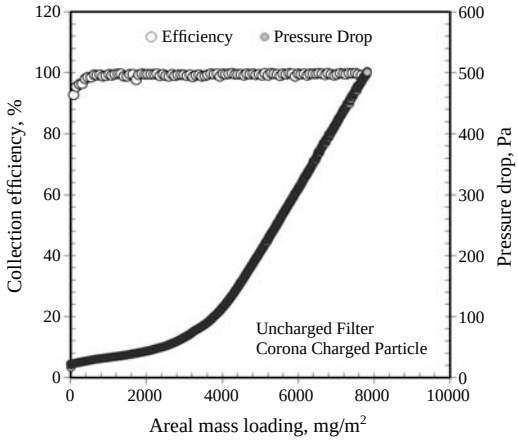
Fig. 5. Collection efficiency and pressure drop of (a) charged filter and (b) uncharged filter as a function of areal mass loading for atomized particles.

내부 구조에 의존하기 때문에 입자가 포집된 필터의 압력손실은 필터에 형성된 입자층의 구조에 따라 변하게 된다. 따라서 그림 4는 'neutralized' 입자의 경우 필터의 대전유무에 관계없이 필터에 포집되는 형태와 필터내부에 형성된 입자층의 구조가 유사함을 나타내는 결과라 할 수 있다.

그림 5는 'atomized' 입자에 대한 입자부하조건에서의 여과성능 결과이다. 동일 조건에 대해 'atomized' 입자와 그림 4의 'neutralized' 입자의 집진효율을 비교했을 때 그림 5의 'atomized' 입자의 경우에 집진효율이 보다 높은 것으로 나타났으며 이러한 결과는 앞서 언급하였듯이 'atomized' 입자의 대전량이 'neutralized' 입자에 비해 높기 때문에 이로 인한 정전기력의 효과가 증가된 결과로 판단된다. 또한 그림 5(a)와 그림 5(b)의 대전 필터와 무대전 필터 사이의 집진효율은 그림 4의 결과와 유사하게 큰 차이를 보임을 알 수 있으며, 이는 그림 5의 경우 입자대전량이 증가하였지만 입자 대전으로 인한 정전기력의 영향은 필터 대전으로 인한 정전기력에 비해 여전히 매우 낮다는 것을 보여주는 결과라 할 수 있다. 그림 5(a)와 그림 5(b)의 압력손실 변화특성을 비교하면 무대전 필터의 경우 압력손실의 증가속도가 대전 필터에 비해 다소



(a) Charged filter



(b) Uncharged filter

Fig. 6. Collection efficiency and pressure drop of (a) charged filter and (b) uncharged filter as a function of areal mass loading for corona charged particles.

높다는 것을 알 수 있으며, 최종 압력손실값인 500 Pa에 도달하였을 때 필터 단위면적당 입자포집량이 대전필터에서 약 500 mg/m^2 정도 증가한 결과를 보였다.

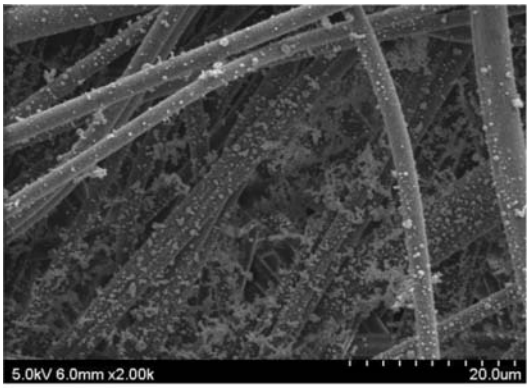
그림 6은 'corona' 대전 입자에 대한 결과를 보여준다. 'corona' 대전 입자는 대전량이 'atomized' 입자에 비해 수십 내지는 수백 배 정도의 수준이기 때문에 입자대전으로 인한 정전기력이 필터의 여과성능에 큰 영향을 주게 된다. 그림 4와 그림 5의 경우와는 달리 'corona' 대전 입자의 경우 필터 대전유무와는 관계없이 집진효율이 매우 높다는 것을 알 수 있다. 이는 'corona' 대전 입자의 공간전하효과 및 가상력이 증가하였기 때문으로 판단된다. 다만 그림 6에서 알 수 있듯이 최종 압력손실 500 Pa에 해당되는 단위면적당 입자포집량이 대전 필터의 경우가 무대전필터에 비해 약 1,200 mg/m^2 이상 높으며, 이러한 결과는 해당조건에서 필터 수명이 15% 정도 증가하였음을 보여준다. 그림 6과 그림 4 및 그림 5 사이의 가장 큰 차이는 입자포집으로 인한 필터의 압력손실 증가 속도에 있다. 즉, 최종 압력손실인 500 Pa에 도달하였을 때 단위면적당 입자포집량을 보면 'neutralized' 입자는 약 4,500 mg/m^2, 'atomized' 입자는 약 5,000 mg/m^2, 그리고 'corona' 대전 입자의 경우는 약 9,000 mg/m^{2}로, 동일한 양의 입자가 포집되었을 때 필터의 압력손실이 'corona' 대전 입자의 경우가 다른 경우에 비해 1/2 수준 정도임을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 'corona' 대전 입자의 경우 필터에 형성되는 입자층의 형상과 구조가 다른 입자의 경우와는 명확히 구별되는 특징이 있을 것이라는 점과 특히 필터의 압력손실이 낮아지는 형태로 입자층이 형성되었을 것을 예상할 수 있다.

3. 3 입자층 형상

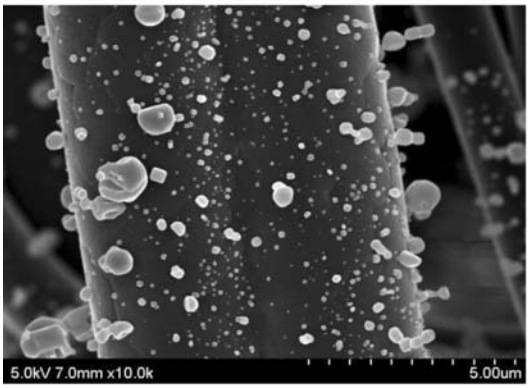
기존의 연구 중 'corona' 대전 입자가 산업용 집진필터에 포집되었을 때 일반 입자에 비해 낮은 압력손실을 보였음을 보고한 연구는 있었으나(Kwetkus, 1997; Mori *et al.*, 1982), 'corona' 대전 입자의 필터 섬유에 대한 포집 형상을 명확히 보여준 예는 찾기 어렵다.

본 연구에서는 앞서 보여준 'corona' 대전 입자의 포집량 대비 낮은 압력손실의 주요 원인으로 예상되는 필터에 형성된 입자층의 구조를 전자현미경으로 확인하였다. 'corona' 대전 입자와 비교하기 위해 'neutralized' 입자를 선택하였고 두 경우 모두 대전필터를 사용하였다. 또한 입자포집량에 따른 형상을 비교하고자 필터 단위면적당 입자포집량이 각각 500 mg/m^{2}과 2,000 mg/m^{2}일 때의 입자 포집 형상을 분석하였다.

그림 7은 'neutralized' 입자가 대전 필터에 포집된 형상으로 이때의 입자포집량은 500 mg/m^{2}이다. 입자포집 형상을 보다 자세히 확인하기 위해 전자현미경 배율을 각각 2,000배와 10,000배로 하였다. 그림 8은 그림 7과 동일한 입자포집량인 500 mg/m^{2}에서 'corona' 대전 입자의 포집 형상을 보여주고 있다. 그림 7

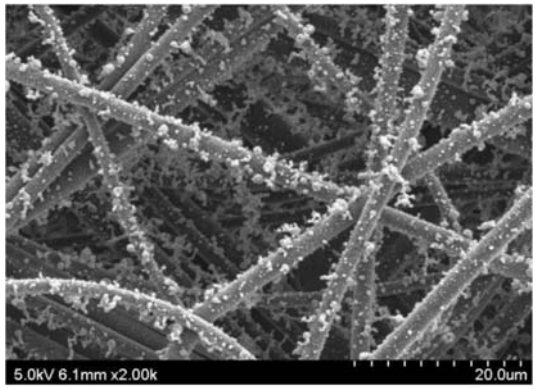


(a) ×2,000

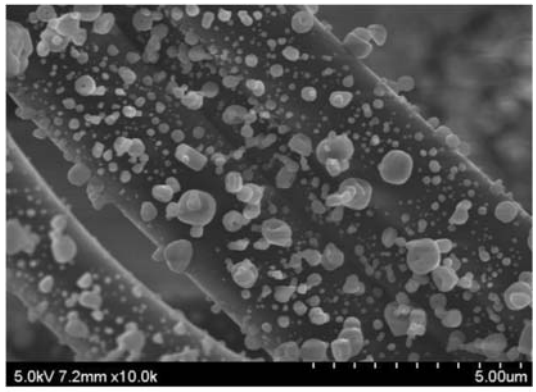


(b) ×10,000

Fig. 7. Deposition pattern of neutralized particle on charged filter at areal mass loading of 500 mg/m^2. SEM images for magnification of (a) ×2,000 and (b) ×10,000.



(a) ×2,000



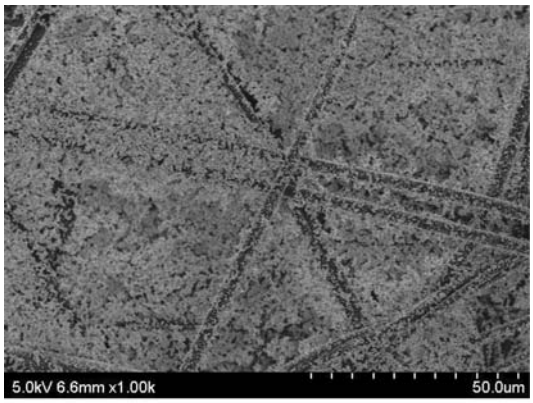
(b) ×10,000

Fig. 8. Deposition pattern of corona charged particle on charged filter at areal mass loading of 500 mg/m^2. SEM images for magnification of (a) ×2,000 and (b) ×10,000.

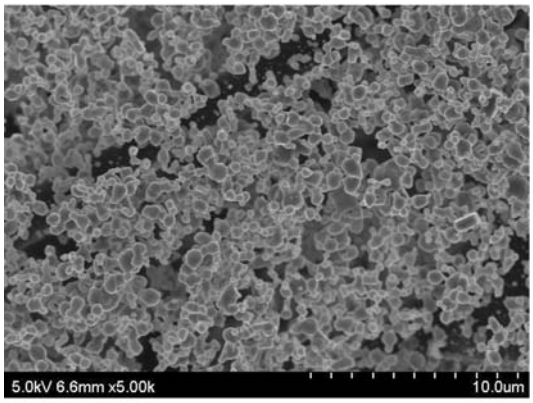
과 그림 8을 비교하면 'corona' 대전 입자의 경우, 보다 많은 양의 입자가 필터 섬유에 포집되었다는 것 외에는 구조적으로 확실한 차이점을 확인하기 어렵다. 따라서 입자의 포집량이 보다 증가된 2,000 mg/m^{2}인 경우의 입자 형상을 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 그림 9는 'neutralized' 입자가 대전필터에 포집된 형태를 보여주고 있으며, 필터 섬유사이의 거의 모든 공간이 입자로 채워졌음을 알 수 있다. 반면 그림 10에 나타난 'corona' 대전 입자의 경우에는 입자들이 다수 개의 클러스터 형상으로 포집되어 있으며 필터 섬유사이에 빈 공간이 충분히 형성되어 있어서 공기저항이 그림 9의 경우에 비해 큰 폭으로 감소할 것임이 명확해 보인다. 'corona' 대전 입자가 그림 10과 같은 형상으로 필터에 포집되는 이유는 입자들간의 정전기적 반발력에 기인한 공간전하효과와 유동장, 필터섬유 및 입자 크기, 그리고 여과속도 등과 같은 물리적인 조건에 의해 입자에 작용하는 기계적인 힘의 상호 작용에 의한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 공기정화용 필터에 입자가 제거되어 쌓이는 과정인 입자부하조건에서 필터 성능의 변화 특성을 살펴보았다. 특히, 필터에 유입되는 입자의 대전상태와 필터의 대전 유무에 따라 입자가 지속적

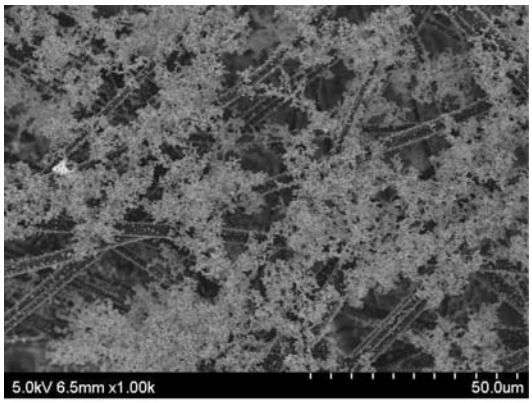


(a) ×1,000

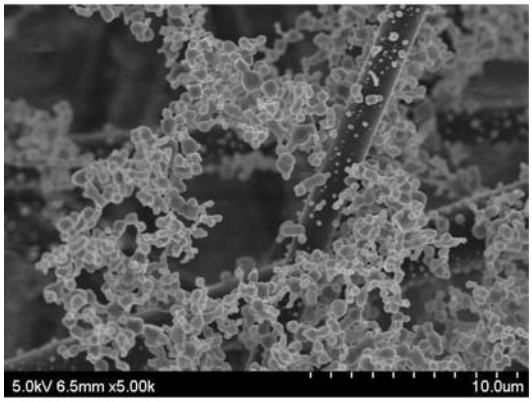


(b) ×5,000

Fig. 9. Deposition pattern of neutralized particle on charged filter at areal mass loading of 2,000 mg/m^2. SEM images for magnification of of (a) ×1,000 and (b) ×5,000.



(a) ×1,000



(b) ×5,000

Fig. 10. Deposition pattern of corona charged particle on charged filter at areal mass loading of 2,000 mg/m^2. SEM images for magnification of (a) ×1,000 and (b) ×5,000.

으로 필터에 포집되었을 때 필터의 집진효율과 압력손실 특성을 분석하였다. 볼쯔만 평형상태의 하전량을 갖는 'neutralized' 입자의 경우 시간에 따른 필터 단위면적당 입자부하량의 증가속도가 대전 필터가 무대전 필터에 비해 매우 높았으며, 입자의 하전량이 보다 큰 경우인 'atomized' 입자에서는 대전 필터와 무대전 필터사이의 시간에 따른 입자부하량 간격이 감소하였고, 'corona' 대전 입자의 경우는 필터의 대전유무에 관계없이 거의 동일한 증가속도를 보였다. 단위면적당 입자포집량에 따른 여과 성능을 비교하였을 때, 'neutralized' 입자와 'atomized' 입자의 경우에는 입자 포집이 진행되는 초기 단계에서는 필터 대전조건에서 집진효율이 무대전 필터에 비교하여 매우 높은 값을 보였지만, 압력손실은 입자포집량에 따른 차이가 크지 않았다. 즉, 'neutralized' 입자와 'atomized' 입자는 대전 필터와 무대전 필터에 포집되는 형상이 유사하여 동일한 양의 입자가 포집되었을 경우 필터의 압력손실에 큰 차이를 보이지 않는다는 것을 알 수 있었다. 'corona' 대전 입자는 'neutralized' 입자 및 'atomized' 입자의 경우와는 다른 여과특성을 보였다. 'corona' 입자의 경우, 입자 하전량이 매우 높아 입자사이에 작용하는 공간전하효과와 필터섬유와의 사이에 작용하는 가상력의 영향이 증가하여 필터의 대전유무에 관계없이 초기 입자 포집 단계에서부터

높은 집진효율을 보였으며, 특히 'neutralized' 입자 및 'atomized' 입자와 비교하였을 때 동일한 입자포집량에 대해 'corona' 대전 입자의 경우 압력손실이 1/2 수준으로 낮게 나타났다. 이러한 결과는 'corona' 입자가 필터에 포집될 때 입자들 사이에 작용하는 정전기력에 기인한 공간전하효과로 인해 클러스터 형태의 기공성이 높은 입자층을 형성하기 때문인 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과는 공기정화용 필터를 적용함에 있어서 정전기력을 효과적으로 이용할 경우 필터의 사용기간 동안에 높은 집진효율과 낮은 압력손실을 달성하면서도 필터의 수명을 향상시킬 수 있음을 보여주고 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

Alguacil, F.J. and M. Alonso (2006) Multiple charging of ultrafine particles in a corona charger, J. Aerosol Sci., 37, 875-884.

Barrett, L.W. and A.D. Rousseau (1998) Aerosol loading performance of electret filter media, Am. Ind. Hyg. Assoc. Journal, 59, 532-539.

Baumgartner, H. and F. Löffler (1987) Three-dimensional numerical simulation of the deposition of polydisperse aerosol particles on filter fibres - Extended concept and preliminary results, J. Aerosol Sci., 18, 885-888.

Bhutra, S. and A.C. Payatakes (1979) Experimental investigation of dendritic deposition of aerosol particles, J. Aerosol Sci., 10, 445-464.

Brown, R.C. (1993) Air Filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters, Pergamon Press, Ltd.

Brown, R.C. and D. Wake (1999) Loading filters with monodisperse aerosols: Macroscopic treatment, J. Aerosol Sci., 30, 227-234.

Brown, R.C., D. Wake, R. Gray, D.B. Blackford, and G.J. Bostock (1988) Effect of industrial aerosols on the performance of electrically charged filter material, Ann. Occup. Hyg., 32, 271-294.

Donovan, R.P. (1985) Fabric Filtration for Combustion Sources: Fundamentals and Basic Technology, Marcel Dekker Inc.

Emets, E.P., V.A. Kascheev, and P.P. Poluektov (1991) Simultaneous measurement of aerosol particle charge and size distributions, J. Aerosol Sci., 22, 389-394.

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.

Hernandez-Sierra, A., F.J. Alguacil, and M. Alonso (2003) Unipolar charging of nanometer aerosol particles in a corona ionizer, J. Aerosol Sci., 34, 733-745.

ISO (2009) Particulate air filters for general ventilation-Determination of filtration performance, ISO/TS 21220, 1st Ed.

Japuntich, D.A., J.I.T. Stenhouse, and B.Y.H. Liu (1994) Experimental results of solid monodisperse particle clogging of fibrous filters, J. Aerosol Sci., 25, 385-393.

Johnston, A.M. (1983) A Semi-automatic method for the assessment of electric charge carried by airborne dust, J. Aerosol Sci., 14, 643-655.

Kanaoka, C. and S. Hiragi (1990) Pressure drop of air filter with dust load, J. Aerosol Sci., 21, 127-137.

Kanaoka, C. and S. Hiragi (1994) Structure of particle accumulates on a cylindrical fiber in a fibrous air filter, Proceedings of the 12th ISCC in Yokohama, 59-62.

Kanaoka, C., H. Emi, and T. Myojo (1980) Simulation of the growing process of a particle dendrite and evaluation of a single fiber collection efficiency with dust load, J. Aerosol Sci., 11, 377-389.

Kousaka, Y. and K. Okuyama (1981) Measurement of electric charge of aerosol particles generated by various methods, J. Chem. Eng. of Japan, 14, 54-58.

Kwetkus, B.A. (1997) Particle precharging and fabric filtration - Experimental results of a corona precharger, J. of Electrostatics, 40&41, 657-662.

Mori, Y., T. Shiomi, N. Katada, H. Minamide, and K. Iinoya (1982) Effects of corona precharger on performance of fabric filter, J. Chem. Eng. of Japan, 15, 211-216.

Nielsen, K.A. and J.C. Hill (1980) Particle chain formation in aerosol filtration with electrical forces, AIChE Journal, 26, 678-679.

Novick, V.J., P.R. Monson, and P.E. Ellison (1992) The effect of solid particle mass loading on the pressure drop

of HEPA filters, J. Aerosol Sci., 23, 657-665.

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)

Payatakes, A.C. and C. Tien (1976) Particle deposition in fibrous media with dendrite-like pattern: A preliminary model, J. Aerosol Sci., 7, 85-100.

Payatakes, A.C. and L. Gradoń (1980) Dendritic deposition of aerosol particles in fibrous media by inertial impaction and interception, Chem. Eng. Sci., 35, 1083-1096.

Reist, P.C. (1993) Aerosol Science and Technology, 2ed., McGraw-Hill Book Co.

Schmidt, E. (1996) Simulation of three-dimensional dust structures via particle trajectory calculations for cake-forming filtration, Powder Tech., 86, 113-117.

Tien, C., C.-S. Wang, and D.T. Barot (1977) Chainlike formation of particle deposits in fluid-particle separation, Science, 196, 983-985.

Walsh, D.C. and J.I.T. Stenhouse (1997a) Clogging of an electrically active fibrous filter material: experimental results and two-dimensional simulations, Powder Tech., 93, 63-75.

Walsh, D.C. and J.I.T. Stenhouse (1997b) 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.