

입자 퇴적이 승용차용 정전 필터의 미세 입자 포집 특성에 미치는 영향

지준호* · 강석훈* · 황정호† · 배귀남**
(2001년 12월 26일 접수, 2002년 4월 20일 심사완료)

Effect of Particle Loading on the Collection Performance of an Electret Cabin Air Filter for Submicron Particles

Jun-Ho Ji, Suk-Hoon Kang, Jungho Hwang and Gwi-Nam Bae

Key Words: Electret Filter(정전 필터), Collection Efficiency(포집 효율), Particle Charging(입자 하전), Charge Depletion(하전 감쇄), Particle Loading(입자 퇴적)

Abstract

An electret filter is composed of permanently charged electret fibers and is widely used in applications requiring high collection efficiency and low-pressure drop. In this work, the collection efficiency of the filter media used in manufacturing cabin air filters was investigated by using poly-disperse particles when submicron particles were loaded. Long-term experiments were conducted by applying two different charging states, which were spray electrification and charge equilibrium by bipolar ionization. In order to investigate the effect of particle loading in filter media, NaCl particles were generated from 0.1% and 1% solutions by an atomizer. Liquid DOS particles were used to evaluate the effect of liquid particles on the collection efficiency of an electret filter. The results show significant effect of charge amount and size distribution of loading particles on the collection performance of a filter media in submicron region. Smaller particles loaded in electret fibers cause a more rapid degradation in collection efficiency and have lower minimum efficiency with time. The pressure drop of a filter media do rarely increase when the collection efficiency decreases to the minimum value. For the larger particles charged by spray electrification, which have charge amounts more than that of Boltzmann equilibrium charge distribution, the pressure drop of a filter media slowly increases in comparison with that of equilibrium charged particles. For DOS particles it is shown that the charging level of an electret filter severely decreases and the collection efficiency is below 10% in some particle size range.

기호설명

c : 입자 수농도 [$\text{개}/\text{cm}^3$]
 d : 필터 두께 [cm]
 d_p : 입자의 직경 [μm]

d_{pg} : 다분산 입자의 기하 평균 직경 [μm]
 M_L : 필터 단위 면적당 퇴적된 입자의 질량 [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$]
 P : 필터의 입자 통과율
 $P(0)$: 깨끗한 필터의 입자 통과율
 x : 필터 두께 방향의 거리 [cm]

* 연세대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2821 FAX : (02)312-2159

** 회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구센터

하첨자

down : 하류(downstream)

L : 퇴적 입자

T : 시험 입자
 up : 상류(upstream)

그리스문자

α : 섬유층 효율
 β : 입자 퇴적으로 인해 섬유층 효율이 감소되는 정도를 나타내는 비례 상수
 η : 필터의 입자 총포집효율
 μ : 단위 부피 당 퇴적된 입자의 무게 [$\mu\text{g}/\text{cm}^3$]
 μ_0 : 단위 부피 당 필터 표면층에 퇴적된 입자의 무게 [$\mu\text{g}/\text{cm}^3$]

1. 서론

정전 필터는 보통 섬유 필터의 표면에 정전기를 띄게 하여 $1 \mu\text{m}$ 이하의 미세 입자도 효과적으로 제거할 수 있도록 만든 필터이다. 정전 필터의 입자 포집에 영향을 주는 인자는 기계적 메커니즘인 확산, 차단, 관성과 전기적 영향인 쿨롱력, 영상력, 분극력이 있다. 필터의 입자 포집효율, 압력강하 및 수명은 섬유 사이의 간격, 필터 두께, 섬유의 보유 하전량 등에 따라 달라진다. 일반적으로 사용 전의 깨끗한 정전 필터는 초기 입자 포집효율이 높지만 사용 과정에서 입자를 포집함에 따라 효율이 낮아진다. 운전 시간의 경과에 따른 일반 섬유 필터와 정전 필터의 입자 포집 과정을 비교하면, 일반 섬유 필터는 사용 초기에 압력강하와 포집효율이 상대적으로 낮지만 운전 시간이 경과함에 따라 필터의 압력강하가 증가하고 섬유에 퇴적(loading)된 입자로 인해 포집효율이 증가한다. 반면 정전 필터의 경우 하전 입자가 정전 섬유에 부착될 때 입자와 정전 섬유의 전하가 서로 상쇄되어 입자 포집효율은 시간이 경과함에 따라 지수함수의 형태로 감소한다고 알려져 있다.⁽¹⁾ 특히, 화학 물질 등에 노출되어 정전 섬유의 하전 보유량이 짧은 시간에 감소되는 경우 필터의 포집 성능은 급격히 저하될 수 있다.

정전 필터 섬유의 보유 하전량 감소와 입자 퇴적에 따른 필터의 포집 성능 변화에 대한 여러

연구결과에 의하면, 필터 섬유에 퇴적된 입자의 크기분포와 하전량이 필터의 성능에 영향을 미치는 주요 인자이다.

운전 시간이 증가하면 필터 섬유 내 퇴적된 입자가 정전 필터의 포집 성능에 영향을 미친다. Baumgartner와 Loeffler⁽²⁾는 제조 방법이 다른 네 가지 종류의 정전 필터를 대상으로 $0.01 \sim 5 \mu\text{m}$ 의 소금, 석영 및 파라핀 입자를 사용하여 사용 전의 깨끗한 초기 필터와 입자가 퇴적되는 과정의 필터 성능을 조사하였다. Tomas 등⁽³⁾은 HEPA(High Efficiency Particulate Air) 필터를 대상으로 고체 입자 퇴적에 의한 필터의 막힘 현상을 실험 및 이론적으로 연구했다. 소다 플루오레세인(soda fluorescein)을 시험 입자로 사용하여 필터에 포집된 무게가 같으면 입자 크기가 작을수록 압력강하가 크고, 전자현미경(SEM) 사진으로부터 필터 투과 깊이가 증가하더라도 입자가 균일하게 포집된다는 결과를 얻었다. Endo 등⁽⁴⁾은 아리조나도로 입자, 알루미늄 및 운모 입자를 사용하여 필터 섬유에 입자가 퇴적된 형태(dust cake)를 관찰했는데, 포집된 입자의 무게가 같으면 입경이 작을수록 필터의 압력강하가 크고, 입자의 다분산성(poly-dispersity)과 형상계수(shape factor)가 필터의 입자 퇴적에 영향을 미친다는 것을 발견했다.

정전 섬유와 필터를 통과하는 입자 사이에는 정전기적 인력이 작용한다. 이로 인해 입자의 하전량은 입자가 퇴적된 섬유와 함께 정전 필터의 성능에 영향을 미치게 된다. Walsh와 Stenhouse⁽⁵⁾는 혼합 섬유로 이루어진 정전 필터의 경우 입자의 크기, 하전량 및 성분이 필터 내 입자 퇴적에 영향을 미친다는 결과를 제시했다. 특히, $0.46 \sim 1.40 \mu\text{m}$ 의 단분산 스테아르산을 사용하여 운전 시간이 경과함에 따라 필터의 효율은 감소하고, 필터에 퇴적시킨 시험 입자의 크기가 클수록 필터의 최소 포집효율이 증가함을 밝혀냈다. Walsh와 Stenhouse⁽⁶⁾는 스테아르산 입자가 평형 하전 분포를 갖는 경우와 응축-증발 방법에 의해 거의 중성으로 적게 하전된 경우를 비교했다. 필터의 압력강하를 입자 질량의 함수로 나타냈는데, 평형 하전된 입자의 경우 중성에 가깝게 하전된 입자에 비해 입자 퇴적에 따른 압력강하가 서서히 증가한다는 것을 알아냈다. 또한, 입자가 필터 섬유 주위에 부착되는 형상을 이론적으로 모사하여

하전량이 큰 입자일수록 필터 섬유 주위에 균일하게 부착되어 필터 깊이에 따라 끌고루 퇴적되므로 압력강하가 낮다는 것을 밝혀냈다.

승용차에 장착되는 캐빈 필터의 경우 필터에 포집되는 대부분의 입자가 자동차에서 배출되는 미세한 입자상 물질(PM, particulate matter)이므로, 서브마이크론 입자의 여과 특성은 매우 중요하다. Braeunling과 Ptak⁽⁷⁾은 승용차용 정전 필터를 대상으로 SAE J1669와 DIN 71460의 표준 규격에 따라 0.3 μm 이상인 입자의 포집효율을 평가하였다. Lehtimaeki⁽⁸⁾는 표준 입자와 대기 입자의 퇴적량에 따른 필터 포집효율이 일치하지 않음을 실험적으로 보이고, 정전 필터를 평가할 수 있는 새로운 방법이 필요하다고 주장하였다.

국내에서도 정전 필터에 관한 연구가 일부 수행되고 있다. Ji 등⁽⁹⁾은 서브마이크론 입경 범위의 시험 입자를 사용하여 정전 필터의 성능을 평가했는데, 입자의 하전 상태에 따라 정전 필터의 초기 입자 포집효율이 달라지고, 정전 필터의 보유 하전량이 감소하면 필터의 포집 성능이 크게 저하될 수 있음을 보였다. Ahn과 Bae⁽¹⁰⁾는 중화기를 통과한 평형 하전 분포의 입자를 사용하여 정전 필터의 포집효율을 평가하였다. Ahn⁽¹¹⁾은 정전 섬유 필터의 단일 섬유 주위를 통과하는 입자의 거동을 수치해석적으로 연구하였다. Park 등⁽¹²⁾은 승용차용 정전 필터에 대한 연구를 실험적으로 수행하였다.

정전 필터의 성능 특성에 관한 연구는 주로 초기 깨끗한 필터를 대상으로 했고, 인체에 나쁜 영향을 미치는 1 μm 이하인 미세 입자를 대상으로 하는 연구는 많지 않았다. 필터의 성능은 운전 시간이 경과함에 따라 퇴적된 입자의 영향을 크게 받는다. 특히, 정전 필터의 경우 입자가 정전 섬유에 부착됨과 동시에 입자와 정전 섬유 간의 정전기력이 감소하기 때문에 입자가 퇴적되는 과정의 성능을 정량적으로 평가하기가 쉽지 않다.

본 연구에서는 먼저 정전 필터의 입자 포집에 영향을 미치는 요인을 살펴보고, 필터에 퇴적된 무게와 입자 통과율의 관계를 이론적으로 고찰하였다. 다음으로 승용차용 캐빈 필터로 사용되는 정전 필터의 여체를 대상으로 입자가 퇴적되는 동안 필터의 입자 포집 특성을 조사하였다. 시험 입자의 크기분포에 따른 영향과 입자의 하전량이

다른 경우 필터의 입자 포집효율과 압력강하의 특성을 알아보았다. 또한, 액체인 DOS(di-octyl sebacate)를 시험 입자로 사용하여 고체인 소금 입자의 경우와 비교하였다.

2. 정전 필터의 입자 포집 특성

2.1 입자 포집에 영향을 미치는 요인

운전 초기에 필터 내 입자의 퇴적량이 적은 경우 정전 필터의 성능은 시간에 따라 지수함수의 형태로 감소한다.⁽¹⁾ 이것은 정전 섬유와 입자간의 정전기력이 줄어들기 때문이다. 보통 정전 필터의 성능을 감소시키는 원인은 3가지로 추정된다.⁽¹³⁾ 첫째, 섬유 표면에 부착된 입자와 정전 섬유의 하전 상쇄에 의해 정전 필터의 보유 전하량이 직접적으로 감소한다. 둘째, 섬유 표면에 퇴적된 입자가 정전 섬유와 필터를 통과하는 입자 사이에 형성되는 전기장을 차폐시키는 차단(screen) 효과이다. 셋째, 정전 섬유와 에어로졸의 화학 작용이다. 일반적으로 첫 번째와 두 번째 이유로 인해 정전 필터의 초기 효율이 감소하지만, 퇴적된 입자들이 새로운 필터 섬유 역할을 하므로 어느 시점 이후에는 감소하던 효율이 필터가 막힐 때까지 반대로 상승한다. 결국 정전 필터의 정전기적 효과가 사라지면 일반 섬유 필터와 같은 특성을 나타낸다.

먼저 하전 상쇄에 의해 정전 필터의 보유 하전량이 감소되는 경우를 생각해 보자. 만약 X선과 같은 방사선 등에 노출되면 순간적으로 섬유의 하전량이 상쇄되어 필터의 성능이 저하된다. 또한, 고농도의 하전된 입자들이 섬유 표면에 부착되면서 섬유의 하전량을 상쇄시킬 수 있다.

섬유에 부착된 입자는 전기 전도도가 높은 재질일수록 섬유의 정전기력을 많이 차폐시키므로 전기장의 강도가 감소한다. 특히, 미세 입자 등이 표면을 덮어 퇴적되는 경우 하전된 입자와 정전 섬유의 전하 상쇄가 발생하고, 포집된 중성 입자와 더불어 섬유 표면의 전기장을 차단하여 정전 필터의 포집 성능이 저하된다. Brown 등⁽¹³⁾은 시험 입자의 재질에 따라 정전 필터의 성능이 저하되는 정도가 다르다는 것을 보였고, Walsh와 Stenhouse⁽⁵⁾는 혼합 섬유로 이루어진 정전 필터의 특성에 관한 실험을 수행하여 유전율(permittivity)

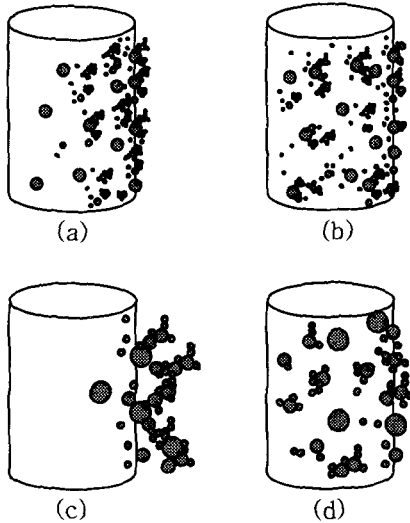


Fig. 2 Pattern of aerosol deposits on fibers (a) small, uncharged, (b) small, charged, (c) large, uncharged, (d) large, charged

이 90인 이산화티탄(TiO₂)의 경우 유전율이 2.2인 스테아르산 입자보다 필터의 입자 포집효율이 빠르게 감소한다고 보고하였다. 이것은 전도성이 큰 이산화티탄의 차단 효과가 크기 때문이라고 생각된다.

필터를 통과하는 입자의 크기분포가 다르면 정전 섬유 주위에 부착되는 입자의 퇴적 형상이 변하므로, 필터의 입자 포집효율과 압력강하 특성도 달라진다. Fig. 1은 입자 크기와 하전 상태에 따라 입자가 필터 섬유에 부착되는 형상에 대한 개념도를 나타낸 것이다.^(2,14) 입자가 섬유 직경에 비해 매우 작으면, 정전 필터의 성능이 저하되는 시점까지 Fig. 1 (a)나 (b)와 같이 필터 섬유 표면에 입자가 부착될 확률이 높다. 반면에 상대적으로 큰 입자들이 많고 입자가 중성이거나 하전량이 매우 적으면 퇴적된 입자에 부착될 확률이 증가하고, Fig. 1 (c)와 같이 쉽게 사슬 모양의 덴드라이트(dendrite)로 불리는 입자층을 형성하기 때문에 필터의 기공율(porosity)을 감소시켜 압력강하가 증가한다. 그러나, 입자의 하전량이 크면 큰 입자들이 증가해도 Fig. 1 (d)와 같이 하전된 섬유 주위에 입자가 부착될 확률이 크므로^(2,14) 섬유 표면에 퇴적된 입자는 상대적으로 느리게 입자층을 형성한다. 즉, 입자의 크기분포와 하전량은 필터의 성능 및 수명에 직접적으로 영향을 미친다.

2.2 정전 필터의 초기 성능에 대한 경험적 모델
여과 과정이 복잡하고 여러 가지 변수가 필터의 성능에 동시에 영향을 미치므로, 정전 필터의 여과 과정 초기의 성능 저하에 관한 이론은 아직까지 정립되어 있지 않다. 필터에 퇴적되는 입자가 섬유의 표면에만 부착하는 초기 여과 과정만을 고려하면, 다음과 같이 필터 섬유 내 퇴적된 입자의 무게와 입자 통과율에 관한 식을 얻을 수 있다.⁽¹³⁾

필터에 같은 종류의 입자가 퇴적되면 입자의 통과율(P , penetration)은 반경험적으로 식 (1)과 같이 필터 두께(d)의 지수함수로 표현된다.⁽¹⁾

$$P = \exp(-\alpha d) \tag{1}$$

여기서, α 는 섬유층 효율로 에어로졸과 필터의 특성에 관계된 상수이다. 필터에 퇴적되는 입자와 성능 평가를 위한 시험 입자를 구분할 필요가 있는데, 하첨자 T는 시험 입자를, L은 퇴적 입자를 나타낸다.

식 (1)에서 α 를 적절하게 선택하면 입자 퇴적이 없는 깨끗한 필터의 통과율을 나타낼 수 있다. 퇴적 입자에 대한 섬유층 효율(α_L)을 사용하면 필터의 단위 부피당 퇴적된 입자의 무게인 $\mu(x)$ 를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mu_L(x) = \mu_0 \exp(-\alpha_L x) \tag{2}$$

여기서, μ_0 는 상수로 필터 표면층의 단위 부피당 퇴적된 입자의 무게를 나타내고, x 는 필터의 두께 방향의 거리로 $0 \sim d$ 범위이다. 식 (2)를 적분하면, 필터의 단위 면적당 퇴적된 입자의 질량(M_L)을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} M_L &= \int_0^d \mu_L(x) dx \\ &= \frac{\mu_0}{\alpha_L} [1 - \exp(-\alpha_L d)] \end{aligned} \tag{3}$$

입자 퇴적량이 적은 경우 시험 입자에 대한 섬유층 효율($\alpha_T(\mu_L)$)이 단위 부피당 퇴적된 입자의 무게인 μ_L 에 비례하여 감소한다고 가정하면

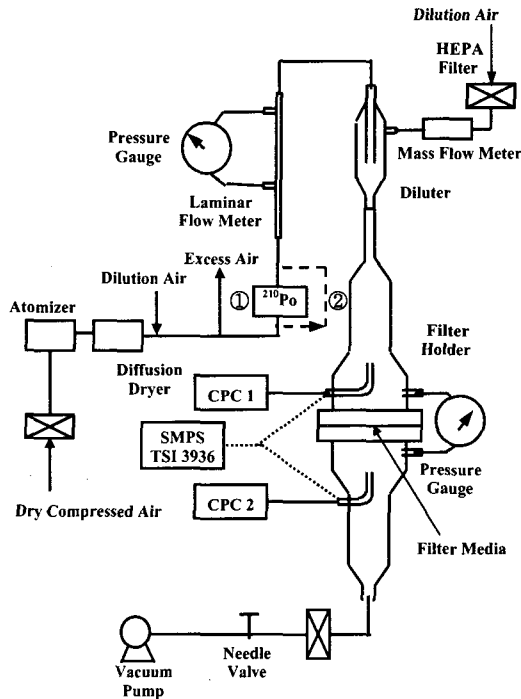


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental system for particle loading test

$$\alpha_T(\mu_L) = \alpha_T - \beta_{TL} \mu_L \quad (4)$$

이다. 여기서 α_T 는 입자 퇴적인 없는 깨끗한 필터의 섬유층 효율이고, β_{TL} 은 비례 상수로 입자 퇴적으로 인해 섬유층 효율이 감소되는 정도를 나타낸다.

식 (2)와 (4)로부터 시험 입자의 농도(c_T)는 미분 방정식의 형태로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dc_T}{dx} = -\alpha_T(\mu_L)c_T = [-\alpha_T + \beta_{TL}\mu_0 \exp(-\alpha_L x)]c_T \quad (5)$$

식 (5)를 필터의 두께인 0~d 구간에서 적분하면 다음과 같다.

$$\ln \left| \frac{c_T(x=d)}{c_T(x=0)} \right| = -\alpha_T d + \beta_{TL} \frac{\mu_0}{\alpha_L} [1 - \exp(-\alpha_L d)] \quad (6)$$

식 (6)의 좌변은 필터의 단위 면적당 퇴적 질량이 M_L 일 때의 통과율로 표현할 수 있고, 우변의 첫 번째 항은 식 (1)에 의해 입자가 퇴적되지 않은 초기 필터의 통과율과 관련된 식($\ln|P(0)|$)으로, 두 번째 항은 식 (3)에 의해 퇴적된 입자의 무게로 나타낼 수 있으므로 식 (7)을 얻는다.

$$\ln \left| \frac{P_T(M_L)}{P_T(0)} \right| = \beta_{TL} M_L \quad (7)$$

앞에서 설명했던 것처럼 β_{TL} 은 필터의 입자 포집효율을 감소시키는 퇴적 입자의 영향을 나타내는 계수로 필터 두께나 입자층 효율에 영향을 받지 않는다. β_{TL} 이 클수록 정전 필터의 성능은 입자 퇴적에 따라 빠르게 저하된다.

Brown 등⁽¹³⁾에 의하면 β_{TL} 은 정전 필터와 시험 입자의 재질 및 성분 등에 따라 달라지는데, 예를 들면 정전 필터가 수지와 양모(resin-wool)로 만들어진 경우 석탄 입자는 0.028 정도인 반면 주조 공장의 연소 배출 입자는 1.0이다. β_{TL} 은 특히 발생 입자의 크기분포, 성분 등이 다른 경우 편차가 있다.

3. 실험

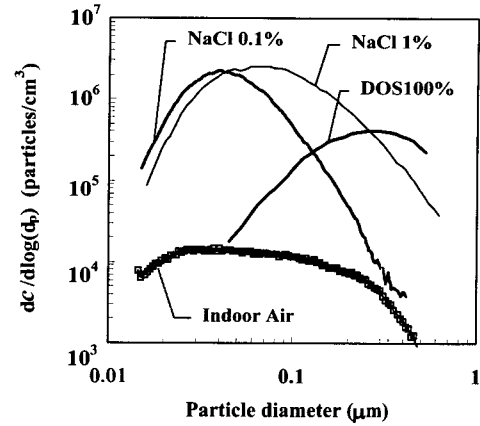
필터 여재의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 2와 같이 실험장치를 구성하였다. 다분산 입자 발생장치로 분무형 입자 발생기를 이용했고, 입자의 하전 특성을 변화시키기 위해 중화기(^{210}Po)를 사용했다. HEPA 필터를 통과한 깨끗한 희석 공기는 질량 유량계를 거쳐 희석관으로 유입되어 시험 입자와 섞인 후 압력공과 샘플링 프로브가 설치된 필터 홀더를 통과한다. 진공펌프로 필터를 통과하는 공기를 흡인하였다. 시험에 사용한 정전 필터의 여재는 프리 필터와 주 필터의 2중 구조로 되어있고, 지지층이 주 필터를 지지한다. 마

Table 1 Experimental conditions for filter media test

Test aerosol	NaCl		DOS
	0.1%	1%	100%
Geometric mean diameter (μm)	0.05	0.07	0.25
Geometric standard deviation	1.67	1.9	1.7
Charging condition	① w/ neutralizer (equilibrium charged) ② w/o neutralizer (spray electrification)		① w/ neutralizer

이크로 정전 섬유로 구성된 주 필터는 고분자 용액의 정전 방사(electrically spun) 공정으로 제조되었다. 폴리에스테르 재질인 프리 필터의 직경은 약 $35 \mu\text{m}$ 이고 폴리카보네이트 재질인 주 필터의 섬유 직경은 약 $10 \mu\text{m}$ 이다.

분무형 입자 발생기로 고체인 소금 입자와 액체인 DOS 입자를 발생시켰다. 용액의 농도에 따라 발생하는 입자의 기하학적 개수 평균 입경(geometric number mean diameter)과 기하학적 표준편차가 다르므로, 용액의 농도를 변경하여 시험 입자의 크기분포를 설정했다. 필터 여재의 상류에서 시험 입자의 수농도는 $10^5 \sim 10^6$ 개/ cm^3 였다. 필터의 상류와 하류의 시험 입자의 수농도는 같은 모델인 2 대의 CPC(Condensation Particle Counter, TSI 3022A)로 동시에 측정했다. 이 때, 샘플링 프로브와 CPC를 연결하는 튜브의 길이를 같게 했고, 기기에 따른 오차를 고려하여 실험 전후에 CPC를 바꿔 측정하여 수농도를 보정했다. 또한, 입경별 필터의 포집효율을 측정하기 위해 필터의 상류와 하류에서 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer, TSI 3936)로 크기분포를 측정하였다. 필터를 통과하는 면유속은 회석관에 유입되는 질량 유량계(mass flow meter, TSI 3063)가 나타내는 유량과 회석관에 유입되는 입자가 포함된 유량 및 필터 여재 상하류의 CPC 흡인 유량을 고려해 계산했는데, 모든 실험에서 필터 여재의 면유속을 8.4 cm/sec 로 일정하게 유지하였다. 회석 공기는 HEPA 필터를 거쳐 회석관에 유입되도록 하여 배경 농도를 0.01 개/ cm^3 이하로 유지했고, 유량을 미세하게 조절하기 위해 진공펌프 상

**Fig. 4** Size distributions of test aerosols and indoor aerosols upstream the filter media

류에 니들 밸브를 설치했다.

입자의 크기분포와 하전량이 정전 필터의 성능과 수명에 미치는 영향을 파악하기 위하여 0.1%와 1% 소금물을 분무형 입자발생기로 발생시켜 크기분포가 다른 소금 입자를 얻었다. Fig. 3을 보면, 1% 소금물 용액을 사용한 경우 0.1%에 비해 상대적으로 큰 입자들의 비율이 증가함을 알 수 있다. 시험 입자의 하전량을 변화시킬 목적으로 분무과정에서 대전된 입자와 중화기를 통과한 평형 하전 분포를 갖는 입자를 발생시켰다. 이 때, 평형 하전 분포의 경우 입자당 하전수는 $0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 으로 0을 중심으로 양과 음이 대칭으로 나타난다. 분무대전된 입자 또한 양과 음의 양극성으로 대전되고, 평형 하전 분포인 입자의 평균 하전량보다 2~3배 높게 대전된다.⁽¹⁴⁾ 분무대전된 입자를 사용하면 입자의 대전량이 큰 경우에 정전 필터의 성능 특성 변화를 확인할 수 있다. 반면에 액체인 DOS 입자의 경우 분무대전에 의한 하전량이 평형 하전 분포보다 적다.⁽¹⁵⁾

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 실내 공기 중에 존재하는 입자 농도에 비해 100배 가량 높은 농도의 입자를 사용하여 실험 시간을 줄일 수 있었다. 실험에 사용한 입자의 크기분포 특성과 입자의 하전 조건을 Table 1에 나타냈다.

4. 결과 및 고찰

승용차용 캐빈 필터의 입자 퇴적 실험에서는

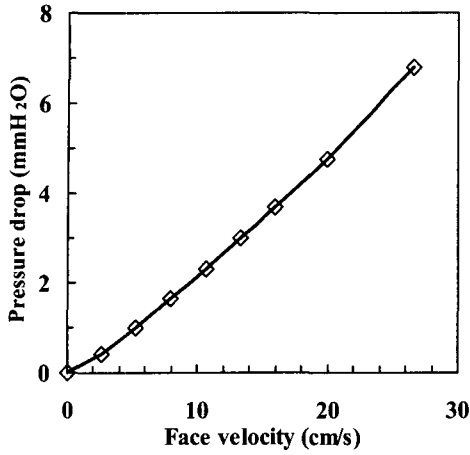


Fig. 4 Pressure drop of an electret filter media with the face velocity

보통 ASHRAE나 SAE의 표준 입자를 사용한다. 필터에 퇴적된 입자의 질량을 평가의 기준으로 하는데, 시험 입자의 평균 직경은 보통 1 μm 이하고 퇴적된 입자 무게에 따른 필터의 압력강하와 포집효율을 측정하여 성능과 수명을 평가한다. 그러나, 이런 표준 입자는 도로상에서 자동차로부터 배출되는 입자상 물질이나 도시의 대기 입자보다 상대적으로 크기 때문에 필터의 입자 제거 특성을 왜곡시킬 수 있다. 정전 필터의 경우 필터의 보유 하전량과 입자 퇴적이 동시에 영향을 미치므로, 시험 입자의 크기분포와 하전 상태에 따라 필터의 성능이 달라진다.

Fig. 4는 초기 필터 여재의 면유속에 따른 압력강하를 보여주는데, 카트리지 필터의 표면이 균일하지 않기 때문에 시험하는 여재마다 초기 압력강하는 편차를 갖는다. 필터 여재의 압력강하는 면유속이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가한다. 본 연구에서는 필터 여재의 면유속을 8.4 cm/sec로 고정시켰는데, 이 때 초기 필터의 압력강하는 약 1.9 mmH₂O이다.

4.1 정전 필터의 하전 감쇄 효과

정전 필터가 처리할 입자의 크기가 정전 섬유의 직경에 비해 매우 작으면 퇴적된 입자들이 입자충(덴드라이트, dendrite)을 형성하기 전에 정전 섬유의 하전량을 상쇄시키므로, 운전 초기에 필터의 효율이 급격히 감소할 것이다. 즉, 필터 섬유 표면의 퇴적 입자들에 의한 입자 제거 효과가

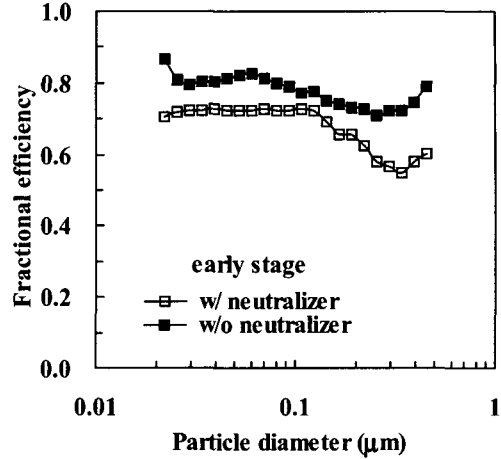


Fig. 5 Fractional efficiency of an electret filter media in the early stage ($d_{pg} = 0.05 \mu m$)

나타내기 이전에 필터 효율이 급격히 감소될 것이다.

0.1% 소금물 용액을 사용하여 정전 섬유 직경에 비해 상대적으로 매우 작은 기하 평균 입경 ($d_{pg} = 0.05 \mu m$)을 갖는 다분산 소금 입자를 발생시켰다. 시험 입자의 농도를 일정하게 유지하여 정전 필터의 포집효율의 변화를 살펴보았다. 필터 여재의 상류와 하류에서 다분산 시험 입자의 수농도를 CPC로 측정후, 필터의 입자 총포집효율(overall efficiency)을 식 (8)과 같이 구하였다.

$$\eta = 1 - \frac{C_{down}}{C_{up}} \tag{8}$$

여기서, η 는 필터의 입자 총포집효율, C_{up} 은 필터 여재 상류의 입자 수농도이고, C_{down} 은 하류의 입자 수농도이다. 또한, SMPS로 입자의 크기 분포를 측정하여 입경별 포집효율(fractional efficiency)을 얻었다.

시험 입자는 하전량에 따라 두 가지로 나누어 평가했는데, 중화기를 거친 입자는 대기의 하전 분포와 같은 양극성 평형 하전 분포를 갖고, 중화기를 거치지 않은 입자는 분무대전에 의한 하전 분포를 갖는다. 분무된 입자는 평형 하전 분포인 입자의 평균 하전량보다 2~3배 높게 대전된다.⁽¹⁴⁾ 기하 평균 입경이 0.05 μm인 다분산 소

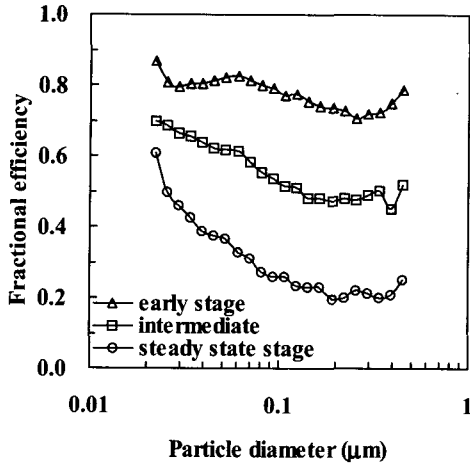


Fig. 6 Fractional efficiency of an electret media filter with time for the particles charged by spray electrification ($d_{pg} = 0.05 \mu\text{m}$)

금 입자의 경우 필터의 총포집효율은 입자의 하전 상태에 관계없이 시간에 따라 감소하고 일정 시간이 경과하면 거의 일정하다.

Fig. 5는 입자의 하전 상태에 따른 정전 필터의 입경별 초기 입자 포집효율을 나타낸 것이다. 평형 하전 분포를 갖는 입자(w/ neutralizer)의 포집효율이 분무대전된 입자(w/o neutralizer)에 비해 상대적으로 낮은데, 이것은 입자당 평균 하전량이 작기 때문이다.

Fig. 6은 분무대전된 입자에 대하여 시간 경과에 따른 입경별 포집효율의 변화를 나타낸 것이다. 초기에는 모든 입경에서 필터의 포집효율이 70% 이상이지만, 시간이 지나 필터의 효율이 감소한 후 일정해지는 시기(steady state stage)에는 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 입경 범위에서 포집효율이 약 20%로 매우 낮다. 이 시기 이후에 필터의 입자 포집효율은 거의 변하지 않았는데, 이것은 필터의 하전 보유량이 감소하여 필터의 정전 섬유와 하전 입자간의 쿨롱력이 관성력에 비해 적기 때문이다. 이처럼 시간에 따라 필터의 입자 포집효율은 계속 감소하지만, 정전 섬유의 하전 상태가 계속되면 정전기력에 의한 영향이 사라지기 때문에 필터의 입자 포집효율은 일정해진다. 필터의 입자 포집효율이 감소하여 평형상태에 이른 이후에도 압력강하의 증가량은 10% 이하로 적은데, 이것은 필터 섬유 직경에 비해 매우 작은 입자들이 섬유의 표면에 포집되므로, 필터의 기공율이 크게 감

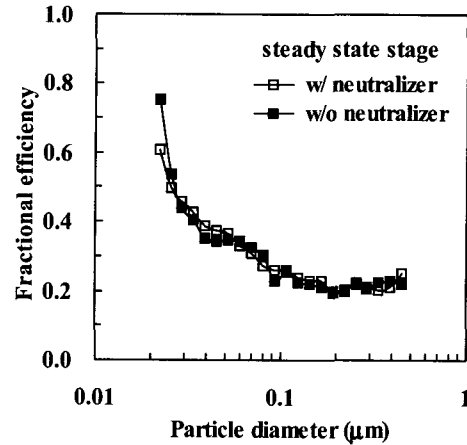


Fig. 7 Fractional efficiency in the steady state stage after charging depletion ($d_{pg} = 0.05 \mu\text{m}$)

소하지 않기 때문인 것으로 추정된다.

Fig. 7은 정전 섬유의 보유 하전량이 최소화되었다고 생각되는 시점 이후인 필터의 포집효율이 거의 변하지 않는 상태(steady state stage)에서 입자의 하전 상태에 따른 필터의 입경별 포집효율을 나타낸 것이다. 시험 입자의 두 가지 하전 조건에서 입경별 포집효율은 측정 입경 범위에서 거의 비슷하다. 즉, 평형 상태에서 입자의 하전량은 포집효율에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. Fig. 7의 결과는 Lehtimaeki⁽⁸⁾의 4개월간 수행했던 승용차용 캐빈 필터를 대상으로 실험한 포집효율의 결과와 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 범위에서 거의 일치했다. 이는 도로 상의 자동차에서 배출되는 미세한 입자상 물질이 정전 필터의 성능 저하에 크게 영향을 미치는 것을 의미하고, 실험에 사용했던 기하 평균 입경이 $0.05 \mu\text{m}$ 인 경우와 도로상의 자동차가 배출하는 미세한 입자상 물질의 크기가 비슷했기 때문이라 생각된다.

4.2 정전 필터의 하전 감쇄와 입자 퇴적의 영향

필터 섬유 표면에 입자가 퇴적되면 정전 섬유와 하전 입자간의 하전 상태로 필터의 입자 포집효율이 감소한다. 그러나, 어느 정도 퇴적된 이후에는 입자가 정전 섬유에 직접 부착되지 않고 퇴적된 입자에 부착하여 포도송이처럼 연결된 덴드라이트라는 입자층을 형성하고, 이것이 새로운 필터 섬유의 역할을 한다. 이로 인해 필터의 포집효율이 증가하는데, 퇴적된 입자가 필터 섬유

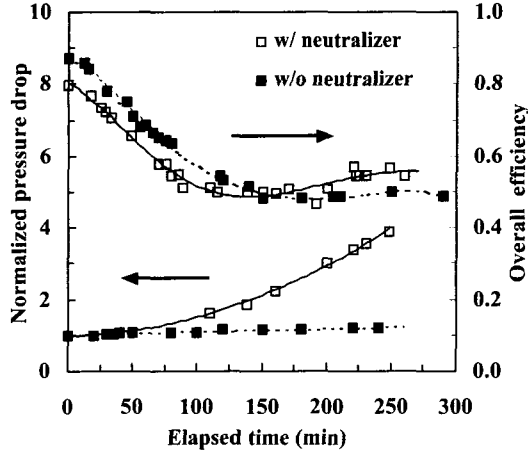


Fig. 8 Variation of pressure drop and overall efficiency with time ($d_{pg} = 0.07 \mu\text{m}$)

의 직경에 비해 무시할 수 있을 만큼 작지 않으면 정전 섬유 표면과 통과하는 입자는 퇴적된 입자들의 영향을 받는다. 또한, 퇴적된 입자는 앞에서 설명했던 것처럼 차단 효과를 증가시켜 정전기력의 효과를 감소시킨다.⁽¹³⁾ 따라서, 정전 필터의 운전 시간이 증가함에 따라 섬유에 의한 정전기력과 퇴적된 입자가 동시에 영향을 미친다.

본 연구에서는 입자의 하전량 감소와 입자 퇴적에 의한 영향을 살펴보기 위해 시험 입자의 크기분포를 변경하여 실험을 수행했다. 앞에서 0.1% 소금물 용액을 사용해서 입자를 발생시킨 경우 기하 평균 입경이 $0.05 \mu\text{m}$ 정도로 필터의 하전 보유량이 감소하여 정전기적 효과가 최소화되었다고 추정되는 시점 이후에도 필터의 포집효율이 거의 변하지 않고, 필터의 압력강하도 크게 변하지 않는다. 그러나, 시험 입자가 크면 정전 섬유로의 입자 부착에 의한 포집효율의 감소는 퇴적된 입자에 의해 영향을 받는다. 입자의 크기가 상대적으로 큰 경우 정전 필터의 효율 변화를 살펴보기 위해 1% 소금물 용액으로 만든 기하 평균 입경이 $0.07 \mu\text{m}$ 인 소금 입자를 이용했다.

Fig. 8은 평형 하전 분포 입자와 분무대전 입자의 시간 경과에 따른 필터의 입자 포집효율과 압력강하의 변화를 나타낸 것이다. 평형 하전 입자의 경우, 초기에 감소하는 필터의 입자 포집효율은 평형상태에 이른 후 상승한다. 이것은 필터에 퇴적된 입자가 새로운 필터 섬유의 역할을 하기 때문이다. 초기에 압력강하가 서서히 증가하는

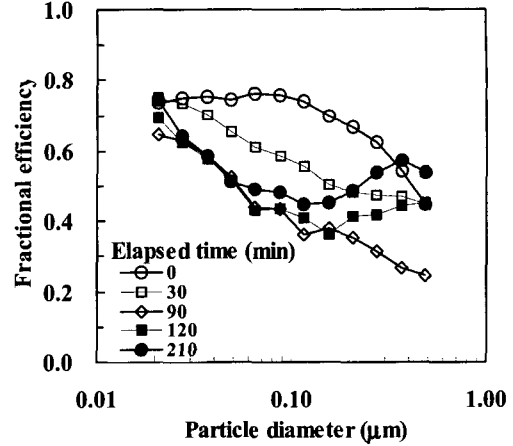


Fig. 9 Fractional efficiency for the equilibrium charged particles ($d_{pg} = 0.07 \mu\text{m}$)

것은 섬유 주위에 입자가 직접 부착하여 필터의 기공율이 천천히 감소하기 때문이고, 입자층에 의한 입자의 포집효율이 증가함에 따라 기공율이 급격히 감소하므로 필터의 압력강하 또한 빠르게 증가한다고 생각된다.

기하 평균 입경이 $0.07 \mu\text{m}$ 인 시험 입자를 사용한 경우 입자의 하전량에 따라 필터의 포집 특성이 달라진다. 분무대전된 입자는 입자 수농도에 의한 필터의 포집효율은 비슷하게 감소하지만 약 150분이 경과한 이후에 포집효율이 증가하는 경향은 나타나지 않고, 필터의 압력강하는 초기 압력에 비해 약 20% 증가한다. 이것은 입자의 평균 하전량이 크면 입자가 섬유 표면에 부착되는 비율이 증가하고, 섬유층의 깊이에 따라 골고루 부착하여^(6,14,17) 같은 양의 입자를 포집해도 입자층의 형성이 늦어지기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 9는 기하평균 입경이 $0.07 \mu\text{m}$ 인 평형 하전 분포의 입자가 퇴적되는 경우 시간이 경과함에 따른 필터의 입경별 포집효율을 나타낸 것이다. $0.1 \mu\text{m}$ 이상인 입자의 경우 처음에는 포집효율이 감소하다가 일정 시간 이후 다시 증가하는 경향을 나타내는데, 이것은 입자의 퇴적량이 증가했기 때문이다. 즉, 입자가 퇴적됨에 따라 정전기력에 의한 영향은 감소하지만 필터에 퇴적된 입자가 새로운 필터 섬유 역할을 하므로, 상대적으로 관성력이 큰 입자의 포집효율은 증가한다. 입자 퇴적으로 인하여 정전 섬유의 정전기력이 감소하면 일반 섬유 필터의 포집효율과 비슷한 양상을

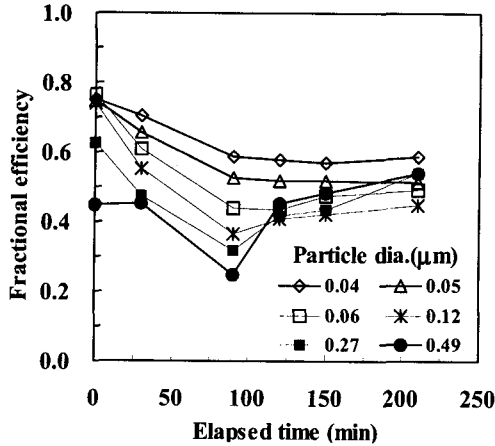


Fig. 10 Change of fractional efficiency with time for the equilibrium charged particles ($d_{pg} = 0.07 \mu\text{m}$)

보인다. 즉, $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 에서 최소 효율을 보이는 포물선 형태의 포집효율 곡선을 나타낸다.

Fig. 10은 시간 경과에 따른 필터의 입경별 포집효율의 변화를 나타낸 것이다. 초기에는 모든 입경에서 필터의 입자 포집효율이 감소하고, 시간이 경과하면 $0.1 \mu\text{m}$ 이하인 입자의 포집효율은 거의 변하지 않지만 $0.1 \mu\text{m}$ 이상인 입자의 포집효율이 증가한다. 이 때 필터의 포집효율이 증가하는 시점은 Fig. 8에서 효율이 더 이상 감소하지 않는 시점(약 100분)이고, 입경이 클수록 포집효율의 증가율이 상대적으로 크다.

앞에서 설명했던 것처럼 β_{TL} 은 필터 재질과 시험 입자에 따른 성능 감소를 나타내는 계수이다. 입자 퇴적량(M_L)과 필터의 입자 통과율의 관계를 알면, 식 (7)로부터 β_{TL} 을 알 수 있다. 시험 입자의 기하 평균 입경이 $0.07 \mu\text{m}$ 인 경우 SMPS로 측정된 입경별 수농도 분포로부터 포집된 입자 무게를 구하여 필터의 입자 퇴적량과 통과율의 관계를 Fig. 11에 나타냈다. 분무대전에 의해 하전된 입자의 경우 필터의 입자 통과율의 비는 거의 선형적으로 증가한 후 일정해진다. 반면에 평형 하전 분포를 갖는 입자의 경우 입자 통과율의 비가 거의 선형적으로 증가하다가 더 낮은 입자 퇴적량에서 서서히 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 앞에서 언급했던 것처럼 필터 섬유에 형성된 입자층이 필터를 통과하는 입자에 미치는 영향에 의한 결과이다. 그림에서 분무대

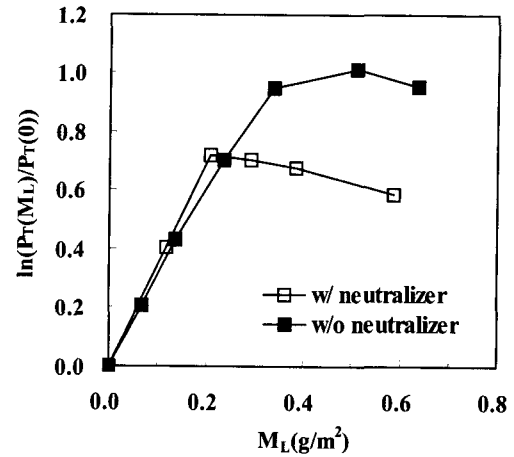


Fig. 11 Particle penetration with the particle loading

전된 입자의 통과율의 비가 평형 하전 분포인 입자에 비해 더 큰 입자 퇴적량까지 선형적으로 증가하는 것은 초기 필터의 통과율이 낮기 때문이다. β_{TL} 은 통과율의 비가 선형적으로 증가하는 영역에서 약 3.4이다.

필터 섬유가 여러 층으로 제조된다는 점을 고려하면, 입자의 하전량이 큰 경우 기류에 맨 먼저 접촉하는 필터 표면 층에 입자가 집중적으로 부착하여 필터의 기공율을 감소시키는 표면 여과(surface filtration)보다는 섬유층 깊이에 따라 입자가 골고루 부착되는 깊이 여과(depth filtration)에 의해 입자가 주로 제거된다고 생각된다. 이런 깊이 여과 메커니즘은 필터의 입자 보유 용량을 증가시킬 수 있는데, Fig. 8에서 보는 바와 같이 필터의 효율이 일정해진 평형상태에서 분무대전 입자들과 평형 하전 입자들의 필터 포집효율은 거의 같지만 분무대전 입자는 포집효율이 평형상태에 이를 때까지 수명의 척도가 되는 압력강하가 상대적으로 매우 낮다. 이것은 만약 여과 대상인 입자의 하전량을 제어할 수 있으면, 정전 필터의 수명을 상당 기간 증가시킬 수 있다는 것을 의미한다.

4.3 정전 필터의 액체 입자 포집 특성

액체 입자의 경우 필터 섬유에 부착되는 형태에 따라 입자 포집 특성이 다른 것으로 알려져 있다. Agranovski와 Shapiro⁽¹⁸⁾는 액체 입자가 필터 섬유에 부착되는 경우 표면에 막을 형성하거나

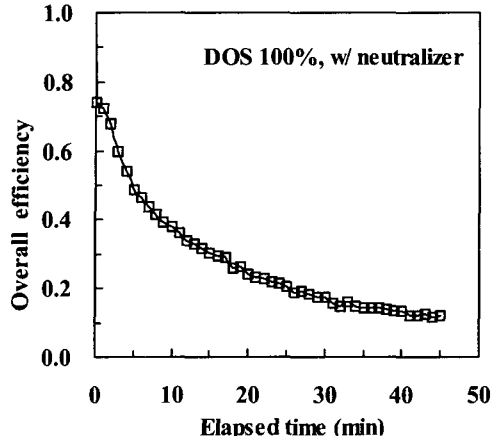


Fig. 12 Overall efficiency of an electret filter media with time for liquid particles

액적으로 달라붙을 수 있기 때문에 액체 입자와 섬유의 재질에 따라 특성이 달라질 수 있음을 밝혀냈다.

시험 입자로 액체인 다분산 DOS 입자를 사용하여 시간 경과에 따른 필터의 입자 총포집효율을 구하여 Fig. 12에 나타냈다. 시간이 경과함에 따라 필터의 포집효율은 계속 감소하고, 포집효율이 10% 이하로 낮아진 40분이 지난 시점에서 필터의 압력강하는 초기값에 비해 10% 정도 증가한다. 이처럼 효율의 급격한 감소와 압력강하의 낮은 증가 추세로 미루어보면, 섬유 표면에 부착된 DOS 입자는 막을 형성하여 정전 섬유가 보유하는 하전량을 쉽게 감소시키는 것으로 생각된다. 그러나, DOS가 아닌 다른 액체 입자의 경우(예를 들면, 물이나 수은 등) 포집 특성이 다르게 나타날 수 있다.

액체인 DOS 입자와 고체인 소금 입자가 퇴적된 경우 필터의 포집효율이 감소한 후, 더 이상 변하지 않는 평형상태에 이른 시점에서 입경별 포집효율을 비교하여 Fig. 13에 나타냈다. DOS 입자를 퇴적시킨 경우, 전체 입경에 대한 필터의 포집효율을 얻기 위해서 시험 입자로 1% 소금 입자를 사용하였다. 약 50분이 경과한 시점에서 입경이 0.1~0.3 μm 범위에서 10% 이하의 낮은 효율을 보인다. 이 결과는 Ji 등⁽⁹⁾의 연구에서 정전 필터의 하전 보유량을 모두 제거한 경우와 비슷하다. 이것은 액체인 DOS 입자에 의해 섬유 표면에 형성된 막이 정전 섬유 표면의 정전기를

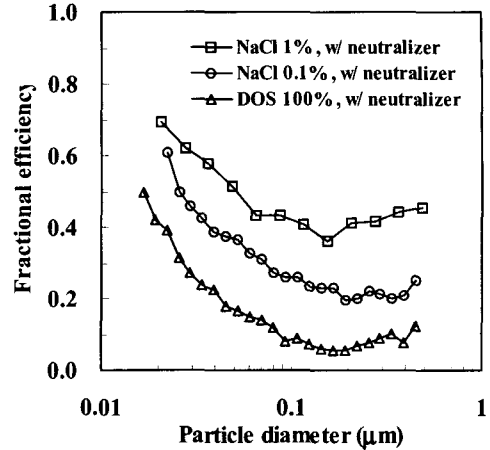


Fig. 13 Effect of the particle size and material on the fractional efficiency after charge depletion in an electret filter media

거의 제거하여 정전기력에 의한 입자 포집 효과가 나타나지 않기 때문이다.

고체인 소금 입자인 경우 퇴적 입자의 평균 입경이 클수록 최소 효율이 상대적으로 높다. 액체 입자의 경우와 달리 이것은 앞에서 언급했던 것처럼 필터 내 입자 퇴적에 미치는 영향이고, Walsh 등⁽⁹⁾의 0.46~1.4 μm 인 단분산 스테아르산 입자의 실험결과와 일치한다. 즉, 시험 입자의 크기가 작을수록 퇴적된 입자에 의한 입자의 제거 효과가 나타나지 않기 때문에 운전 시간에 따른 정전 필터의 최소 입자 포집효율은 낮아진다.

자동차용 캐빈 필터나 실내 공기청정장치가 처리해야 하는 부유 입자는 1 μm 이하인 입자들이 대부분을 차지한다. 특히, 도로상에는 자동차가 배출하는 입자상 물질로 인해 미세 입자의 농도가 높기 때문에 여과 과정에서 입자 퇴적의 영향이 나타나기 전에 정전 필터의 성능이 저하될 수 있다. 만약 필터의 운전 시간이 증가함에 따라 필터의 입자 포집효율이 급격히 떨어진다면 필터의 교체 시기를 나타내는 압력강하에 도달할 때까지 매우 낮은 효율의 필터를 사용하는 결과가 된다. Walker와 Ptak⁽¹⁹⁾에 의하면 SAE fine, SAE ultra fine, ASHRAE, 아리조나 분진 등의 표준 입자들이 퇴적된 경우, 승용차용 정전 필터의 포집효율은 0.3 μm 입자에 대해 35%에서 55%까지 다양하게 나타나는 것을 확인했다. 결국 필터의 퇴적 실험에 사용하는 표준 입자의 크기분포가

실제 처리할 입자의 분포와 다르므로, 동일한 운전 조건에서 필터의 성능과 수명을 예측하려면 도로 조건 등과 같은 필터의 사용 조건에 따라 적절한 크기분포를 갖는 시험 입자를 사용하여 성능을 평가할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 정전 필터의 운전 시간이 경과함에 따라 나타나는 필터의 성능 특성을 조사하였다. 필터 내 입자가 퇴적됨에 따라 정전 섬유와 필터를 통과하는 입자 사이의 정전기력이 감소하는데, 이것이 인체에 해로운 미세 입자의 포집효율에 미치는 영향을 평가하였다. 승용차에 장착되는 정전 필터의 여재를 대상으로 입자의 하전 상태, 재질 및 입경에 따른 필터의 입자 포집 특성에 관한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정전 필터의 초기 포집효율은 입자의 하전량이 큰 경우 높지만 시간이 경과함에 따라 효율이 급격히 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 정전 섬유의 보유 하전량이 감소하여 입자와의 정전기력에 의한 입자 포집효율이 감소하기 때문이다.

(2) 중앙 입경이 $0.05 \mu\text{m}$ 인 다분산 소금 입자의 경우 필터의 포집효율은 입자의 퇴적량이 증가함에 따라 감소하는데, 최소 효율에 이를 때까지 필터의 압력강하는 거의 증가하지 않는다.

(3) 중앙 입경이 $0.07 \mu\text{m}$ 인 다분산 소금 입자가 증화기를 통과하여 평형 하전 분포를 갖는 경우 시간이 경과함에 따라 입자 퇴적이 필터의 입자 포집효율을 증가시키므로, $0.1 \mu\text{m}$ 이상인 입자의 포집효율은 초기에 감소하여 평형 상태에 도달한 후 다시 증가한다.

(4) 분무대전으로 하전된 중앙 입경이 $0.07 \mu\text{m}$ 인 다분산 소금 입자는 평형 하전 분포를 갖는 입자에 비해 필터의 압력강하가 매우 낮는데, 이것은 입자가 섬유 주위에 상대적으로 균일하게 퇴적되고, 입구 섬유에 집중되지 않고 필터의 깊이 따라 균일하게 포집되기 때문인 것으로 생각된다.

(5) 액체인 DOS를 시험입자로 사용한 경우 필터의 최소 입자 포집효율은 $0.3 \mu\text{m}$ 에서 10% 이

하로 감소하는데, 이 때 필터의 차압은 10% 정도 증가한다. DOS와 같은 액체 입자는 필터 내 입자 퇴적에 의한 효율의 상승 효과가 나타나지 않는다.

후 기

본 연구는 연세대학교의 '2001년 연세학술연구 지원사업'에 의하여 지원되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드린다. 또한, 정전 필터 여재를 제공해 준 (주)성창에어텍 관계자에게 감사드린다.

참고문헌

- (1) Brown, R. C., 1993, *Air Filtration*, Pergamon Press.
- (2) Baumgartner, H. and Loeffler, F., 1986, "Particle Collection in Electret Fibers Filters: A Basic Theoretical and Experimental Study," *Filtration and Separation*, Sep./Oct., pp. 346~351.
- (3) Tomas, D., Penicot, P., Leclerc, D. and Vendel, J., 2001, "Clogging of Fibrous Filters by Solid Aerosol Particles: Experimental and Modelling Study," *Chemical Engineering Science*, Vol. 56, pp. 3549~3561.
- (4) Endo, Y., Chen, D., and Pui, D. Y. H., 1998, "Effects of Particle Polydispersity and Shape Factor during Dust Cake Loading on Air Filters," *Powder Technol.*, Vol. 98, pp. 241~249.
- (5) Walsh, D. C. and Stenhouse, J. I. T., 1997, "The Effect of Particle Size, Charge, and Composition on the Loading Characteristics of an Electrically Active Fibrous Filter Material," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 28, pp. 307~321.
- (6) Walsh, D. C. and Stenhouse, J. I. T., 1997, "Clogging of an Electrically Active Fibrous Filter Material: Experimental Results and Two-dimensional Simulations," *Powder Technol.*, Vol. 93, pp. 63~75.
- (7) Braeunling, V. and Ptak, T. J., 1997, "Testing

- Automotive Interior Air Filters: A Comparison of SAE and DIN Standards," *Int. Congress & Exposition*.
- (8) Lehtimaeki, M., 1995, "Development of Test Methods for Electret Filters," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 26, pp. S737~738.
- (9) Ji, J. H., Kang, S. H., Kim, D. C., Hwang, J., Yoon, W. S. and Bae, G. N., 2001, "Collection Performance of an Electret Cabin Air Filter for Fine Particles," *KSME Journal B*, Vol. 25, pp. 1650-1658.
- (10) Ahn, K. H. and Bae, G. N., 1994, "Performance Test of Air Filter Media," *SAREK Journal*, Vol. 6, No. 4, pp. 417~426.
- (11) Ahn, K. H., 1997, "Numerical Analysis of Particle Behavior Around a Bipolar Charged Electret Fiber," *KSME Journal B*, Vol. 21, pp. 1509~1517.
- (12) Park, Y. O., Koo, C. O., Lim, C. H., Kim, H. Y. and Son, J. E., 1996, "Performance of Automotive Cabin Air Filter for Passenger Cars," *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, Vol. 12, pp. 279~287.
- (13) Brown, R. C., Gray, W. R., Blackford, D. B. and Bostock, G. J., 1988, "Effect of Industrial Aerosols on the Performance of Electrically Charged Filter Material," *Ann. Occup. Hyg.*, Vol. 32, pp. 271~294.
- (14) Kanaoka, C., Hiragi, S. and Tanthapanichakoon, W., 2001, "Stochastic Simulation of the Agglomerative Deposition Process of Aerosol Particles on an Electret Fiber," *Powder Tech.*, Vol. 118, pp. 97~106.
- (15) Forsyth, B., Liu, B. Y. H. and Romay, F. J., 1995, "Particle Charge Distribution Measurement for Commonly Generated Laboratory Aerosols," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 28, pp. 489~501.
- (16) Lee, J. B., Bae, G. N., Hwang, J. and Lee, K. W., 2001, "Charge Distribution of Submicron Particles Charged by Spray Electrification or Corona Discharge," *KSME Journal B*, Vol. 25, pp. 124~132.
- (17) Oh, Y. H., Jeon, K. J. and Jung, Y. W., 2001, "Collection of Submicron Particles on a Bipolar Charged Fiber," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 32, pp. S719~720.
- (18) Agranovski, I. E. and Shapiro, M., 2001, "Clogging of Wet Filters by Dust Particles," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 32, pp. 1009~1020.
- (19) Walker, M. and Ptak, T. J., 1996, "Particulate Filter Performance in the North American Environment," *SAE Paper 960940*.