

승용차용 정전 필터 내의 정전 섬유에 의한 하전 감쇄에 의한 미세 입자 포집효율 변화

지준호* · 강석훈* · 황정호** · 배귀남***

Charge Depletion Effect on Collection Efficiency 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(포집효율), 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 are loaded. Long-term experiments were conducted by applying different charging states, which are spray electrification and charge equilibrium by bipolar ionization. In order to investigate on the effect of particle loading in filter media, NaCl particles were generated from 0.1% and 1% solutions by an atomizer. In NaCl 0.1%, the collection efficiency of electret filter decreased and then did not change in equilibrium state. In the case of relative larger particles of NaCl 1%, collection efficiency for the equilibrium charged particles increases due to the particle loading on the filter fibers. Particles charged by spray electrification are small in collection efficiency after equilibrium state and increase of filter media's pressure drop was very low in comparison of the equilibrium charged particles.

1. 서론

정전 필터는 보통 섬유형 필터의 표면에 정전기를 띄게 하여 1 μm 이하의 미세 입자도 효과적으로 제거할 수 있는 집진 장치이다. 정전 필터의 입자 포집에 영향을 주는 인자는 기계적인 메커니즘인 확산, 차단, 관성력과 전기적인 영향인 쿨롱력, 영상력, 분극력이 있고 섬유 사이의 간격, 필터 두께, 필터 섬유의 보유 하전량 등은 입자 포집효율과 필터의 압력강하 및 수명을 결

정한다. 일반적으로 사용 전의 깨끗한 정전 필터는 높은 초기 입자 포집효율을 보이지만 입자를 제거하는 과도 과정을 거치면서 필터의 성능이 변하게 된다. 입자가 필터 섬유에 포집되는 과도 과정을 비교하면, 일반 섬유 필터는 사용 초기에 필터의 압력강하와 포집효율이 상대적으로 낮지만 운전 시간이 경과하면 필터의 압력강하가 증가하고, 필터 내에 퇴적된 입자가 새로운 필터 섬유의 역할을 하기 때문에 필터의 포집효율이 증가한다. 반면 정전 필터의 경우에는 섬유 표면에 하전 입자가 정전 섬유에 부착될 때 입자와 정전 섬유의 전하가 서로 상쇄되어 초기의 입자 포집효율은 시간이 경과함에 따라 지수함수의 형태로 감소한다고 알려져 있다.⁽¹⁾ 특히, 화학 물질 등에 노출되는 경우와 같이 짧은 시간에 정전 섬유의 하전 보유량을 감소되는 경우에는 필터의 포집 성능은 급격히 저하될 수 있다.

* 연세대학교 대학원 기계공학과
 ** 회원, 연세대학교 기계공학과
 E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr
 Tel : (02)2123-2821 Fax : (02)312-2159
 *** 회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구센터

필터 섬유유리의 보유 하전량 감소와 입자 퇴적에 따른 특성 변화에 대한 여러 연구들이 수행되었다. Baumgartner와 Loeffler⁽²⁾는 제조 방법이 다른 네 가지 종류의 정전 필터를 대상으로 사용 전의 깨끗한 초기 필터와 입자가 필터에 퇴적되는 과도 과정의 성능 변화를 실험했다. Walsh와 Stenhouse⁽³⁾은 혼합섬유로 이루어진 정전 필터의 특성에 관한 실험적 연구를 수행하여 입자의 크기와 하전량 및 성분이 필터 내의 퇴적에 영향을 미친다는 결과를 제시했다. Walsh와 Stenhouse⁽⁴⁾은 스테아르산 입자가 평형 하전 분포를 갖는 경우와 응축-증발 방법에 의해 발생한 상대적으로 낮게 하전된 경우를 비교하여 실험했다. Braeunling과 Ptak⁽⁵⁾은 승용차용 정전 필터의 성능을 평가했는데, SAE와 DIN 표준 규격에 따라 실험을 수행하여 0.3 μm 이상 입자의 포집효율을 제시했다. Lehtimaeki⁽⁶⁾는 표준 입자와 대기 입자의 퇴적량에 따른 필터 포집효율 시험의 결과가 일치하지 않음을 보이고 정전 필터를 평가하는 새로운 방법의 필요성을 제안했다. Tomas 등⁽⁷⁾은 HEPA 필터를 대상으로 고체 입자 퇴적에 의한 필터의 막힘 현상을 실험과 이론으로 연구했다. Endo 등⁽⁸⁾은 입자가 필터 섬유에 입자가 퇴적된 형태(dust cake)를 관찰했는데, 포집 무게가 같다면 입경이 작을수록 필터의 압력강하가 크고 입자의 다분산성과 입자의 형상계수(shape factor)가 필터의 입자 퇴적에 큰 영향을 준다는 것을 발견했다. 국내의 정전 필터에 관한 연구는 다음과 같다. 지준호 등⁽⁹⁾은 서브마이크론 입경 범위의 시험 입자를 사용하여 정전 필터의 성능 평가를 수행했는데 입자의 하전 상태에 따라 정전 필터의 초기 입자 포집효율이 달라지고 정전 필터의 보유 하전량이 감소하면 필터의 포집 성능이 크게 저하될 수 있음을 보였다. 안강호와 배귀남⁽¹⁰⁾은 중화기를 통과한 평형 하전 분포의 입자를 사용하여 정전 필터의 포집효율을 평가하였다. 안강호⁽¹¹⁾는 정전 섬유필터의 단일 섬유 주위를 통과하는 입자의 거동을 수치해석적으로 연구하였다. 박영옥 등⁽¹²⁾은 승용차용 정전 필터에 대한 연구를 수행하였다.

정전 필터의 성능 특성에 관한 연구는 초기 깨끗한 필터를 대상으로 하는 경우가 많았고 인체에 악영향을 주는 미세한 1 μm 이하 입자를 대상으로 필터에 입자가 퇴적되는 과정 과정의 특성

에 관한 연구는 많지 않았다. 필터의 성능은 운전 시간이 경과함에 따라 필터 내 퇴적된 입자의 영향을 크게 받는다. 게다가 정전 필터의 경우는 입자가 정전 섬유에 부착됨과 동시에 하전 상태가 일어나기 때문에 과도 과정 중의 정량적인 실험은 간단하지 않다. 본 연구는 승용차용 캐빈 필터로 사용되는 정전 필터의 여재를 선택하여 입자가 퇴적되는 과도 과정의 특성 변화를 실험했다. 시험 입자의 크기분포에 따른 영향을 확인했고 입자의 대전량이 다른 경우 필터의 입자 포집효율과 압력 강하의 특성 변화를 알아보았다.

2. 실험

필터 여재를 평가하기 위한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 다분산 입자 발생장치로 분무형 입자 발생기를 이용했고 입자의 하전 특성을 변화시키기 위해 중화기(²¹⁰Po)를 사용했다. HEPA 필터를 통과한 깨끗한 희석 공기는 질량유량계를 거쳐 희석판으로 유입되고 시험 입자와 섞인 후 압력공과 샘플링 프로브가 설치된 필터 홀더를 통과한다. 필터를 통과하는 전체 유량은 진공펌프로 흡인했다. 이 때, 시험에 사용한 필터 여재는 프리필터와 메인 필터의 2중 구조로 되어있는데, 각각 필터 섬유유리의 직경은 약 35와 10 μm 였다.

분무형 입자 발생기로 고체인 소금 입자를 얻었다. 발생 입자는 농도에 따라 기하학적 개수평균 입경(geometric number mean diameter)과 기하학적 표준편차가 다르기 때문에 용액의 농도를 변경하여 시험 입자의 크기분포를 설정했다. 필터 여재를 통과하는 시험 입자의 개수농도는 $10^5 \sim 10^6$ 개/ cm^3 였다. 필터의 상류와 하류의 시험 입자의 수농도는 두 대의 같은 모델의 CPC(Condensation Particle Counter, TSI 3022A)로 동시에 측정했다. 이 때, 샘플링 프로브에서 CPC에 이르는 튜브는 같은 길이로 연결했고, CPC마다 측정 오차를 고려하여 상류 수농도를 실험 전 후에 CPC를 바꿔 측정하여 보정했다. 또한 입경에 따른 필터의 포집효율을 측정하기 위해 필터의 상류와 하류에서 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer, TSI 3936) 시스템을 통해 크기분포를 측정하였다. 필터를 통과하는 먼유속은 희석판에 유입되는 질량 유량계(mass flow meter, TSI 3096)가 나타내는 유량과 희석판에

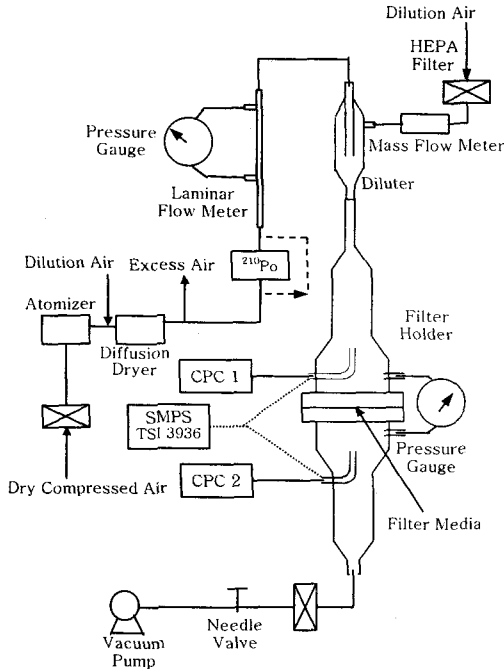


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system for an electret filter media

유입되는 입자가 포함된 유량 및 필터 여재 상하류의 CPC 흡인 유량을 고려해 계산했는데, 전체 실험에서 필터 여재의 면유속을 8.4 cm/sec로 유지하였다. 유량을 미세하게 조절하기 위해 진공 펌프 상류에는 니들 밸브를 설치했고, 희석 공기는 HEPA 필터를 거쳐 희석관에 유입되도록 하여 배경 농도를 0.01 개/cm³ 이하로 유지했다.

정전 필터의 보유 하전량 감소가 필터의 입자 포집효율에 미치는 영향을 실험하기 위해 크기 분포가 다른 0.1%와 1% 소금물을 분무기로 발생시켜 소금 입자를 얻었다. 시험 입자가 평형 하전 분포를 갖도록 중화기를 통과시켜서 입자 하전량에 따른 필터의 포집효율을 실험하였다. 이때, 입자당 하전수는 0, ±1, ±2... 으로 0을 중심으로 양과 음이 대칭으로 나타난다. 분무과정에서 대전된 소금 입자의 하전량은 중화기를 거친 경우에 비해 상대적으로 높다^(13,14)

3. 결과 및 고찰

입자 퇴적(loading) 실험에는 보통 ASHRAE 표

준 입자나 SAE 표준 입자 등을 사용하고, 보통 입자분산발생기(dust feeder)를 통해 발생시켜 필터에 퇴적시킨 후 성능을 평가한다. 무게를 평가의 기준으로 하고 입자의 평균 직경은 보통 1 μm 이상이다. 퇴적된 입자 무게에 대한 필터의 압력강하와 포집효율을 측정하여 성능과 수명을 평가한다. 그렇지만 이런 표준 입자는 일반적인 대기 입자보다 크기 때문에 필터의 입자 제거 특성을 왜곡하여 평가할 수 있다. 정전 필터의 경우는 필터의 보유 하전량과 입자 퇴적이 동시에 영향을 미칠 수 있고, 이 때 시험 입자의 크기분포와 하전 상태에 따라 다른 특성을 보인다.

초기 필터 여재의 면유속에 따른 압력강하는 카트리지 필터의 표면이 균일하지 않기 때문에 여재마다 초기 압력강하는 편차를 갖는다. 본 연구에 사용했던 필터 여재의 면유속 조건은 8.4 cm/sec로 고정했고, 이 때 압력강하는 대략 1.8 ~ 2.0 mmH₂O였다.

3.1 정전 필터의 하전 감쇄 효과

소금물 0.1% 용액을 사용하여 기하 평균 입경이 0.05 μm인 다분산 소금 입자를 발생시켰다. 입자가 퇴적되는 과도 과정에서 시험 입자의 농도를 균일하게 유지하여 정전 필터의 포집효율 변화를 실험하였다. Fig. 2는 필터 여재의 상류와 하류에서 다분산 시험 입자의 수농도를 측정 한 후, 식(1)을 사용하여 계산한 필터의 입자 포집효율을 보여준다.

$$\eta = 1 - \frac{C_{down}}{C_{up}} \quad (1)$$

여기서 η 는 입자 수농도에 대한 필터 포집효율, C_{up} 은 필터 여재 상류의 입자 수농도이고 C_{down} 은 하류의 수농도이다. 이 때, 입자의 하전 상태를 두 가지로 나누어 평가했는데, 중화기를 거친 입자는 대기의 하전 분포와 같은 양극성 평형하전 분포를 갖는 반면, 중화기를 거치지 않은 입자는 분무 대전에 의한 하전 분포를 갖는다. 이 때, 분무 대전된 입자들은 평형 하전된 입자와비교할 때 평균 대전량이 2배에서 3배 정도 높다.⁽¹³⁾ 기하 평균 입경이 0.05 μm인 다분산 소금 입자의 경우에는 하전 상태에 관계 없이 시간에

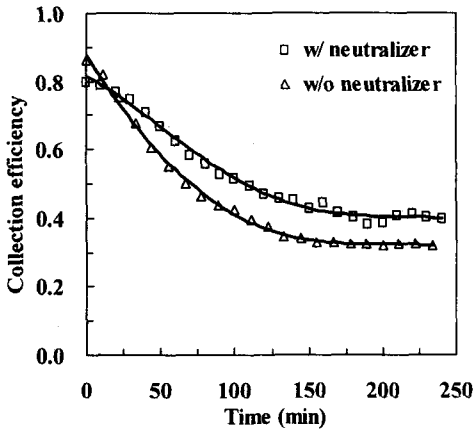


Fig. 2 Collection efficiency of an electret filter media with time ($d_{pg}=0.05 \mu m$)

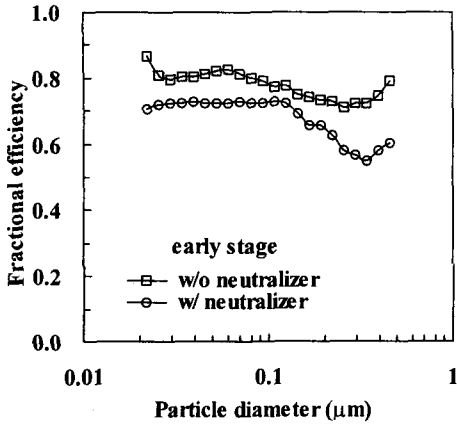


Fig. 3 Collection efficiency of an electret filter media in the early stage ($d_{pg}=0.05 \mu m$)

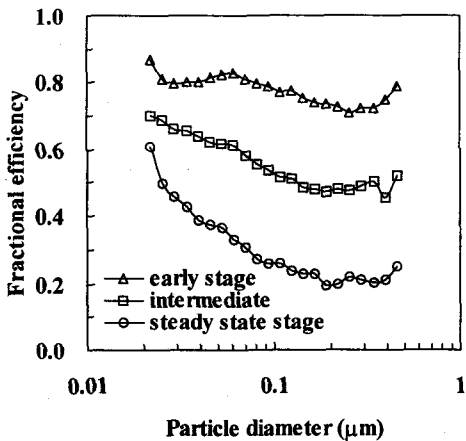


Fig. 4 Fractional efficiency with particle loading time of an electret media filter ($d_{pg}=0.05 \mu m$)

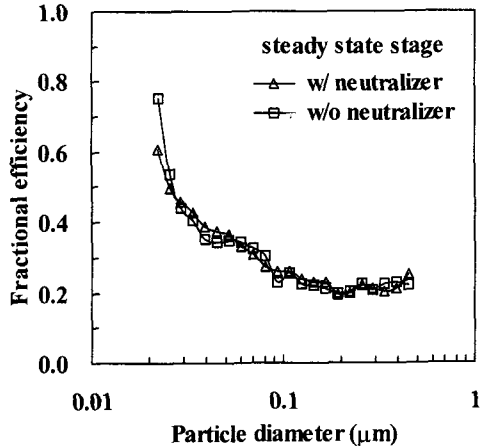


Fig. 5 Fractional efficiency of steady state stage after charging depletion ($d_{pg}=0.05 \mu m$)

따른 필터의 입자 포집효율이 감소하는데 평형상태에 이른 후에는 일정한 효율을 유지한다.

정전 필터의 초기 포집효율은 입자의 대전량에 영향을 받는다. Fig. 3은 입자의 대전상태에 따른 초기 정전 필터의 입자 포집효율을 나타낸다. 평형하전 분포를 갖는 입자의 포집효율이 분무 대전 입자에 비해 상대적으로 낮게 나타나는데, 이는 입자당 평균 하전량이 작기 때문이다.

Fig. 4는 분무 대전 입자의 경우 초기 필터 포집효율과 시간에 따른 과도 과정에서 필터의 포집효율의 변화를 보여준다. 초기에는 전체 입경 영역에서 필터의 포집효율을 70% 이상이었지만, 시간이 지나 필터의 효율이 감소하여 더 이상 변하지 않는 시점에서는 0.1~0.5 μm 범위에서 대략 20% 정도였다. Fig. 2에서 150분 경과한 시점 이후에는 총 입자 수농도가 거의 변하지 않았는데, 입경에 따른 필터의 입자 포집효율 또한 거의 변화가 없었다. 이는 필터의 하전 보유량이 감소하여 대전된 필터 섬유와 하전 입자간의 쿨롱력이 관성력에 의한 효과에 미치지 못하기 때문이다.

정전 섬유의 보유 하전량이 최소화되었다고 생각되는 시점 이후에는 필터의 포집효율이 거의 변하지 않는 상태(steady stage)에 이르는데, 평형 하전 분포의 입자와 분무 대전 입자의 두 경우 Fig. 5에와 같이 필터의 포집효율은 입자의 하전 정도에 관계없이 전체 입경 영역에서 비슷했다.

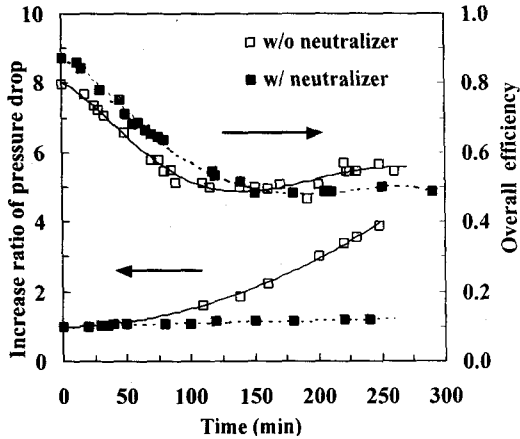


Fig. 6 Pressure drop and collection efficiency of equilibrium charged particles ($d_{pg}=0.07 \mu\text{m}$)

3.2 정전 필터의 하전 감소와 입자 퇴적의 영향

입자의 하전량 감소와 입자 퇴적에 의한 영향을 살펴보기 위해 시험 입자의 크기분포를 변경하여 실험을 수행했다. 소금물 0.1% 용액으로 소금 입자를 발생시킨 기하 평균 입경이 $0.05 \mu\text{m}$ 정도에서는 필터의 하전 보유량이 최소화되었다고 추정되는 시점 이후에도 필터의 포집효율이 $0.1 \mu\text{m}$ 에서 20% 정도로 거의 변하지 않았고 필터의 압력강하의 변화도 크지 않았다. 그렇지만 시험 입자가 크면, 과도 과정 중의 필터의 입자 포집효율 감소는 필터 섬유에 퇴적된 입자들에 의해 영향을 받는다. 정전 섬유의 직경에 비해 입자의 크기가 상대적으로 큰 경우 정전 필터의 효율 변화를 확인하기 위해 기하 평균 입경이 $0.07 \mu\text{m}$ 인 소금 입자를 이용했다.

Fig. 6은 평형 하전 분포 입자의 시간에 따른 효율 변화와 필터의 압력강하를 보여준다. 평형 하전 입자의 경우는 과도 과정 초기에 필터의 효율이 감소하지만, 기하 평균 입경이 $0.05 \mu\text{m}$ 의 경우와는 달리 평형상태에 도달하면 다시 효율이 상승한다. 압력강하 또한 초기에는 느린 상승은 섬유 주위의 직접 부착의 영향으로 다공도가 감소가 느리기 때문이고, 포집효율이 증가함에 따라 다공성의 빠른 시간에 감소하기 때문에 압력강하 또한 빠르게 증가한다. 상대적으로 하전량이 큰 분무대전 입자는 입자 수농도에 의한 필터의 포집효율의 감소는 비슷했지만, 같은 시험 시간에서 포집효율 증가 경향은 나타나지 않았고, 필터의 압력강하는 약 20% 증가했는데, 이는 평

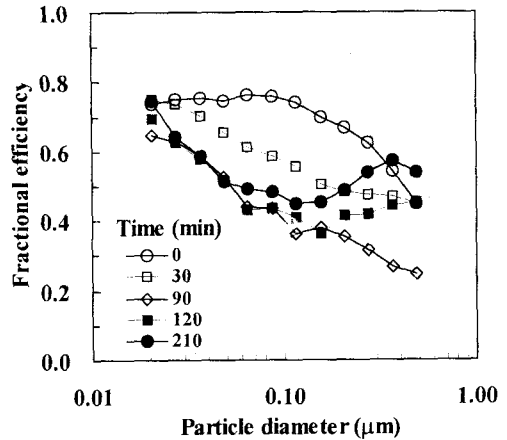


Fig. 7 Fractional efficiency of equilibrium charged particles ($d_{pg}=0.07 \mu\text{m}$)

형하전 분포 입자와 비교할 때 매우 낮다.

Fig. 7은 기하평균 입경이 $0.07 \mu\text{m}$ 인 평형 하전 분포의 입자를 사용한 경우에 필터의 포집효율을 보여준다. $0.1 \mu\text{m}$ 이상의 입자들의 경우는 효율이 감소한 후 다시 증가하는 경향을 보였는데, 이는 입자 퇴적에 의한 경향이다. 즉, 필터 효율은 정전기력에 의한 더 이상 크게 영향을 받지 않는 반면 필터에 퇴적된 입자가 새로운 필터 섬유 역할을 하기 때문에 상대적으로 관성력이 큰 입자의 포집효율은 다시 증가한다.

자동차용 캐빈 필터나 실내 공기청정장치가 처리해야 하는 부유 입자의 크기 분포는 개수농도로 $1 \mu\text{m}$ 이하의 입자들이 대부분을 차지한다. 특히, 도로상에는 자동차가 배출하는 입자상 물질(particulate matter, PM)의 미세 입자의 농도가 높기 때문에 입자의 여과 과정에서 입자 퇴적의 영향이 나타나기 전에 정전 필터의 성능이 저하될 수 있다. 실제 운전 과정의 필터의 성능 및 수명을 예측하려면 필터의 퇴적 실험에 사용되는 규격 입자의 크기 분포가 실제로 처리해야 하는 입경 분포와 다르기 때문에 필터의 사용 조건에 따라 적당한 크기 분포를 갖는 시험 입자를 선택하여 사용할 필요가 있다.

4. 결론

정전 필터의 운전 시간이 경과함에 따라 나타나는 과도 과정 중의 정전 필터의 성능 특성을 확인하였다. 필터 내의 입자 퇴적으로 인한 정전

섬유의 하전 보유량 감소가 인체에 악영향을 주는 미세 입자의 포집효율에 미치는 영향을 평가하였다. 승용차에 장착되는 정전 필터의 여재를 대상으로 시험을 수행했고, 입자가 필터 섬유에 퇴적되는 과도 과정에서 입자의 대전 상태, 재질 및 입경에 따른 필터의 입자 포집 특성을 알아보았다.

(1) 정전 필터의 초기 포집효율은 입자의 대전량이 큰 경우 높았지만 시간이 흐르면서 효율이 계속해서 감소하는 경향을 보였다. 이는 정전 섬유의 보유 하전량이 감소하여 입자와의 정전기력에 의한 입자 포집효율이 감소하기 때문이다.

(2) 다분산 입자의 중앙입경이 0.05 μm 인 경우에는 필터의 포집효율이 계속 감소했는데 최소 효율에 이를 때까지 필터의 압력강하는 거의 증가하지 않았다.

(3) 다분산 시험 입자의 중앙입경이 0.07 μm 인 경우는 입자 포집이 진행되는 과정에서 필터의 효율이 감소했지만, 입경당 최소 효율이 40% 정도로 20%인 중앙입경이 0.05 μm 인 경우와 비교할 때 상대적으로 필터 효율이 높았다. 이는 입자가 클수록 초기에는 필터의 보유 하전량 감소의 영향이 지배적이지만 시간이 지나면 필터 내 입자 퇴적에 의한 포집효율 증가가 영향을 미치기 때문이다.

(4) 다분산 시험 입자의 중앙입경이 0.07 μm 인 소금 입자가 중화기를 통과하여 평형하전 분포를 갖는 경우, 시간이 지남에 따라 0.1 μm 이상 입자들의 포집효율이 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 이는 입자 퇴적이 필터의 입자 포집효율을 증가시키기 때문이다.

(5) 분무 대전으로 하전된 중앙입경이 0.07 μm 인 다분산 소금 입자는 평형 하전분포의 입자의 경우와 비교할 때 필터의 압력강하가 매우 낮았는데, 이는 섬유 주위의 입자 퇴적이 상대적으로 균일하고 입구 섬유에 집중되지 않고 필터의 깊이 따라 균일하게 포집되기 때문인 것으로 보인다.

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) 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.
 (4) 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.
 (5) Braeunling, V. and Ptak, T. J., 1997, "Testing Automotive Interior Air Filters: A Comparison of SAE and DIN Standards," *Int. Congress & Exposition*.
 (6) Lehtimaeki, M., 1995, "Development of Test Methods for Electret Filters," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 26, pp. S737~738.
 (7) 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.
 (8) 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.
 (9) 지준호, 강석훈, 김동철, 황정호, 윤용섭, 배귀남, 2001, "승용차용 정전 필터의 미세입자 포집 특성," 대한기계학회논문집(B), 게재 예정.
 (10) 안강호, 배귀남, 1994, "필터여재의 성능평가," 공기조화냉동공학논문집, 제6권 제4호, pp. 417~426.
 (11) 안강호, 1997, "정전 섬유필터 주위의 입자포집 및 거동에 관한 수치해석적 연구," 대한기계학회논문집(B), 제21권 제11호, pp. 1509~1517.
 (12) 박영옥, 구철오, 임정환, 김홍룡, 손재익, 1996, "승용차용 Cabin Air Filter의 성능," 한국대기보전학회지, 제12권 제3호, pp. 279~287.
 (13) 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.