

승용차용 정전 필터의 미세 입자 포집 특성

지준호* · 강석훈* · 김동철* · 황정호[†] · 윤웅섭** · 배귀남***
(2001년 5월 30일 접수, 2001년 8월 31일 심사완료)

Collection Performance of an Electret Cabin Air Filter for Fine Particles

Jun-Ho Ji, Suk-Hoon Kang, Dong-Choul Kim, Jungho Hwang,
Woong-Sub Yoon and Gwi-Nam Bae

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

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 fractional collection efficiency of the filter media used in manufacturing cabin air filters was investigated by using highly monodisperse particles ranging from 0.02 to 0.6 μm in diameter at three different charging states: singly charged, uncharged, and equilibrium charged. The face velocity was varied from 2.4 to 20.4 cm/s. It was found that the fractional efficiency curve for singly charged particles shows a typical trend that the collection efficiency is minimum at about 0.3 μm in diameter. The fractional efficiency of equilibrium charged particles were not severely varied with the particle diameter. The collection efficiency curve for uncharged particles has a minimum near 0.1 μm in diameter. Another experiment was conducted for a cartridge filter to examine the effect of charge depletion on the collection efficiency in a cabin air filter. The result shows that the charge depletion of the cartridge filter can significantly lower the collection efficiency.

1. 서 론

일반적으로 정전 필터는 기계적 메커니즘인 확산, 차단, 관성과 전기적 영향인 쿨롱력, 영상력, 분극력을 이용하여 공기 중의 입자를 제거한다. 정전 필터의 입자 포집효율에 영향을 미치는 중요 요소로는 섬유 사이의 간격, 필터의 두께 및 필터의 보유 하전량 등이 있다. 필터 섬유 사이의 간격을 좁히면 필터의 포집효율을 향상시킬 수 있고, 필터의 두께를 증가시키면 필터의 효율

과 수명을 늘릴 수 있다. 또한, 필터의 보유 하전량이 크면 필터 섬유 사이의 간격을 줄이지 않더라도 높은 포집효율을 얻을 수 있다. 입자상 물질을 여과하는 과정에서 필터의 포집효율과 압력강하는 서로 상반된 경향을 나타내므로, 낮은 압력강하로 높은 효율을 얻을 수 있는 조건을 찾는 작업이 중요하다.⁽¹⁾

정전 필터의 제조방법은 크게 3가지로 나뉜다. 접촉 하전에 의한 방법, 코로나 방전에 의한 방법 및 유도(induction)에 의해 대전시키는 방법이 있다. 최초의 정전 필터로 알려진 한센(Hansen) 필터는 군사용 방독 마스크에 사용되었는데, 하전된 수지 입자를 양모 섬유에 주입하여 생성된 정전기를 이용했다. 이때 양모 섬유는 (+) 전하를 띄고 수지 입자는 (-) 전하를 갖게되어 필터를 통과하는 입자와 필터 섬유 사이에 정전기력이 작용하여 입자가 제거된다. 접촉 하전을 이용한 다

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 연세대학교 기계공학과

[†] 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

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

*** 회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구센터

른 방식의 정전 필터로는 여러 가지 재질의 섬유를 혼합하여 섬유들의 접촉에 의해 정전기를 발생시켜 만든 것이 있다. 코로나 방전에 의한 방법은 중합체인 섬유의 막을 찢는 과정에서 분자들의 배열이 변경될 때 코로나 방전을 이용해 섬유막의 한 면은 (+)로 다른 면은 (-)로 대전시키는 것이다. 유도에 의한 방법은 필터 주위에 강한 전기장을 형성시켜 필터 섬유가 극성을 띠도록 하는 것이다.

승용차용 캐빈 필터는 일반적으로 많은 유량을 낮은 압력강하로 처리해야 하므로 정전 필터를 사용한다. 캐빈 필터는 먼유속에 따른 필터의 입자 포집효율과 압력강하로 성능을 평가할 수 있다. 필터가 입자를 수용할 수 있는 용량(holding capacity)은 필터의 수명을 결정하는 중요한 특성으로, 필터 내 입자 퇴적량에 따른 압력강하 및 입자 포집효율을 측정하여 필터의 수명을 예측할 수 있다. 승용차용 캐빈 필터에 대한 성능평가 방법은 SAE J1669⁽²⁾에 규정되어 있는데, 입자와 약취에 대한 성능 평가 방법과 조건 등이 제시되어 있다. 특히, 입자 측정에 광학입자계수기를 사용하므로 0.3 μm 이상인 입자를 평가 대상으로 하고 있다.

입자의 하전 상태가 정전 필터의 입자 포집효율에 미치는 영향에 대하여 많은 연구가 수행되었다. Fjeld와 Owens⁽³⁾는 0.5 μm 단분산 입자를 대상으로 입자 하전이 정전 필터의 포집효율에 미치는 영향을 연구하였다. 코로나 방전을 이용한 입자 하전기를 제작하여 평균 입자당 하전수를 6~20개로 만들어 실험했는데, 필터나 시험 입자가 하전된 경우의 입자 포집효율이 중성인 경우에 비해 높게 나타났다. Walsh와 Stenhouse⁽⁴⁾는 입자 크기, 하전량 및 입자 퇴적 량에 따른 정전 필터의 포집효율을 측정했는데, 입자 퇴적량이 같더라도 입자의 하전량이 크면 입자 포집효율이 높다는 결과를 얻었다. Romay 등⁽⁵⁾은 0.05~0.5 μm 인 입자를 사용하여 두 가지 먼유속에서 입자가 1개로 하전된 경우와 중성인 경우에 대하여 필터의 입자 포집효율을 평가했다. 입자가 하전된 경우 필터의 포집효율이 높고, 하전 여부에 따라 입경에 대한 포집효율 곡선의 모양이 달라지는 것을 보였다. Baumgartner와 Loeffler⁽⁶⁾는 0.01~10 μm 인 입자를 발생시키는 과정에서 분무 하전에 의해 입자가 대전된 경우와 중화기를 거

쳐 불츠만 평형 하전분포를 갖는 경우에 대해 실험했다. Kanaoka 등⁽⁷⁾은 0.02~0.4 μm 입자를 대상으로 사각 섬유로 구성된 정전 필터의 성능을 평가하였고, 단일섬유의 포집효율을 나타내는 반경험식을 제시했다. Braeunling과 Ptak⁽⁸⁾은 Freudenberg사의 승용차용 정전 필터에 대해 성능을 평가했다. SAE와 DIN 표준 규격에 따라 실험을 수행하여 0.3 μm 이상인 입자의 포집효율을 제시했다. 국내에서는 안강호와 배귀남⁽⁹⁾이 중화기를 통과한 입자를 사용하여 정전 필터의 포집효율을 평가하였고, 안강호⁽¹⁰⁾는 정전 필터의 단일 섬유 주위를 통과하는 입자의 거동을 수치해석적으로 연구하였다. 박영욱 등⁽¹¹⁾은 승용차용 정전 필터에 대한 연구를 수행하였다.

지금까지 수행된 국내의 정전 필터에 대한 연구는 많지 않고, 특히 승용차용 캐빈 필터를 대상으로 인체에 해로운 1 μm 이하인 입자의 포집효율에 대한 정량적인 연구는 거의 수행되지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 승용차 실내로 유입되는 공기를 정화하는데 사용되는 캐빈 필터를 대상으로 시험 입자의 하전 상태에 따른 필터의 포집효율 특성을 밝혀내고자 하였다. 초기의 깨끗한 필터 여재를 시험할 수 있는 실험장치를 구성한 후, 먼유속이 2.4~20.3 cm/s일 때 0.02~0.6 μm 범위인 단분산 입자를 사용하여 하전 상태에 따른 필터 여재의 포집효율을 측정했다. 또한, 실제로 승용차에 장착되는 카트리지형 캐빈 필터를 시험할 수 있는 성능평가 장치를 구성하여 정전 필터의 보유 하전량 감소가 서브마이크론 입자의 포집 특성에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 실험

필터 여재와 실차에 장착되는 카트리지 필터를 평가할 수 있는 두 가지 실험장치를 제작하였다. 승용차에 장착되는 카트리지 필터를 직접 평가하는 경우 입자 하전 상태나 유량 등에 따른 필터의 성능을 정량적으로 평가하기가 쉽지 않으므로, 필터 여재를 사용하여 다양한 성능을 평가하였다. 필터를 통과하는 공기 유량과 입자의 하전 상태에 따른 실험 조건은 Table 1과 같다.

2.1 필터 여재의 성능평가

필터 여재의 성능을 평가하기 위한 실험장치는

Table 1 Experimental conditions for filter media and cartridge filter tests

	filter media	cartridge filter
Charging conditions	① DMA only	- w/ neutralizer
	② DMA+Neutralizer	- w/o neutralizer
	③ DMA + Neutralizer + Electrostatic precipitator	
Face velocity (cm/s)	2.4, 4.4, 7.0, 10.3, 20.3	4.0 (60 m ³ /hr) 7.6 (115 m ³ /hr)

Fig. 1과 같다. 단분산 입자 발생장치로 분무형 입자발생기와 DMA (Differential Mobility Analyzer, TSI 3080 with TSI 3077 Neutralizer)를, 입자의 하전 특성을 변화시키기 위해 중화기 (²¹⁰Po)와 전기 집진기를 사용했다. 로터미터를 거쳐 HEPA (High Efficiency Particulate Air) 필터를 통과한 청정 공기(배경 농도 0.01 개/cm³ 이하)는 회석관에서 시험 입자와 섞인 후, 필터의 압력강하와 입자 수농도를 측정할 수 있도록 압력공과 샘플링 프로브가 설치된 필터 홀더를 통과한다. 진공펌프 입구에 니들 밸브를 설치해 필터를 통과하는 유량을 조절했다.

0.1% 소금물을 사용하여 분무형 입자발생기로 소금물 액적을 발생시킨 후, 확산 건조기를 거쳐 소금 입자를 얻었다. 소금 입자는 개수 중앙 입경(number median diameter)이 0.04 μm이고, 기하학적 표준편차가 1.6인 다분산으로 발생되는데, 청정 공기로 희석시켜 시험 입자의 농도가 1000 개/cm³ 이하가 되도록 했다. 입자 농도는 필터의 상류와 하류의 샘플링 프로브를 사용하여 같은 모델인 2대의 CPC(Condensation Particle Counter, TSI 3022A)로 동시에 측정하였다. 이 때, 필터 여재 상류와 하류의 샘플링 튜브의 길이를 같게 하였고, 2대의 CPC 사이의 측정 오차를 고려하여 필터의 상류와 하류를 바꿔 측정한 후 평균값을 사용했다. 필터 여재의 보유 하전량이 감소하면 필터 성능이 달라질 수 있으므로, 하전 조건이나 면유속이 달라지면 깨끗한 새로운 필터 여재를 사용했다. 필터를 통과하는 면유속은 로터미터가 나타내는 청정 공기의 유량과 DMA를 통해 발생한 입자가 포함된 유량, 필터 여재 상하류의 CPC

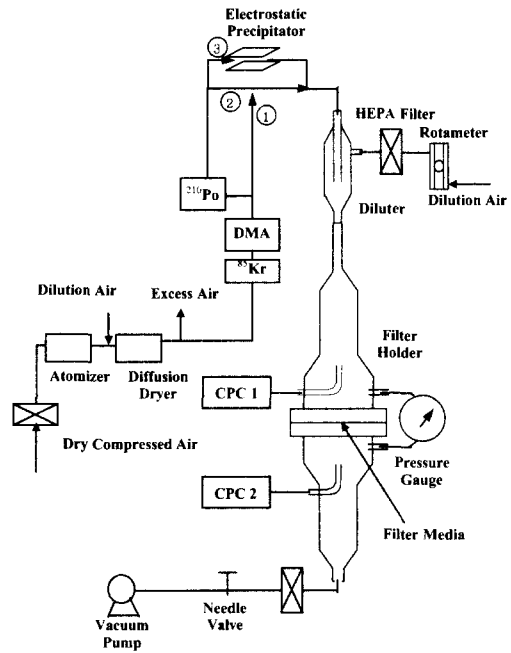


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system for an eletret filter media

흡인 유량을 고려해 계산했다.

발생된 입자들은 하전 특성에 따라 다음과 같이 세 가지 경우에 대해서 시험했다. 첫 번째로 Fig. 1의 ①과 같이 분무형 입자발생기와 확산 건조기를 거쳐 DMA를 통해 발생한 1가로 하전된 입자를 대상으로 실험을 수행했다. 이때 다중 하전(multiple charge)에 의한 입자의 다분산은 고려하지 않았는데, 발생 입자의 크기가 대수 정규분포의 우측에 해당하는 0.04 μm 이상인 입자는 다중 하전의 영향을 상대적으로 적게 받는다. 두 번째로 평형 하전 분포를 갖는 대기 입자들을 모사하기 위해 DMA를 통해 발생한 1가로 하전된 단분산 입자가 ②와 같이 중화기를 통과하도록 했다. 이때 입자의 크기에 따라 입자당 하전수는 0, ± 1, ± 2, ... 으로 0을 중심으로 양과 음이 대칭적으로 나타난다. 입자당 평균 절대 하전수는 $2.37 \times \sqrt{d_p}$ 이므로(여기서, d_p 의 단위는 μm),⁽¹²⁾ 입자 크기가 0.18 μm인 경우 입자당 평균 절대 하전수는 1개이다. 마지막으로 중화기를 거친 평형 하전 입자 중에서 하전 입자를 모두 제거하기 위해 ③과 같이 전기 집진기를 통과시켜 실험을 수행했다.

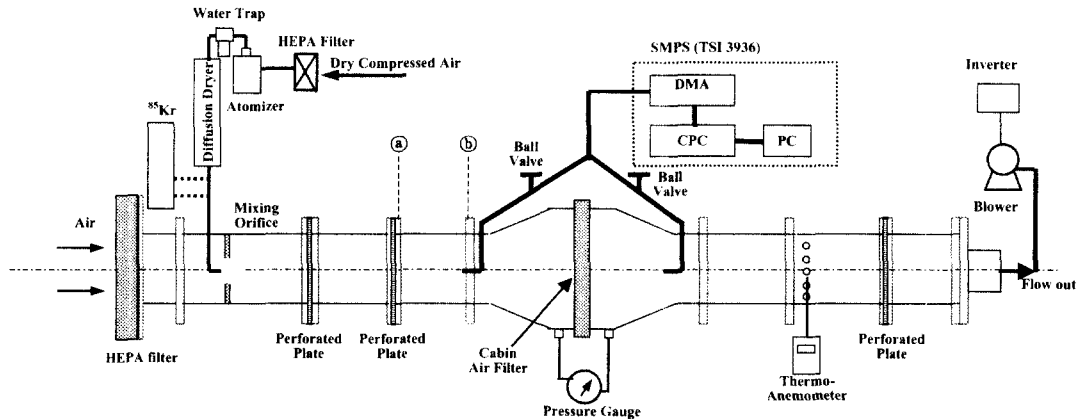


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system for a cartridge filter

2.2 카트리지 필터의 성능평가

카트리지 필터의 성능평가 장치는 Fig. 2와 같이 입자 발생부, 유동 균일화 및 입자 혼합부, 필터 고정부, 유량 제어부로 구성된다.

덕트는 10×10(cm²)인 단면을 갖고, 카트리지 필터 고정부는 필터의 크기에 맞추어 22×16(cm²)이다. 유입되는 공기에 포함된 오염입자를 제거하기 위해 HEPA 필터를 덕트 입구에 장착하여 배경 입자 농도를 10 개/cm³ 이하로 유지하였다. 시험 입자로는 소금 입자와 DOS(Di-octyl Sebacate)를 사용했다. 덕트에 유입된 입자는 혼합 오리피스를 통과하면서 HEPA 필터를 통과한 깨끗한 유입 공기와 섞인다. 혼합 오리피스를 통과한 기류를 균일하게 만들기 위하여 두 개의 다공판을 설치하였다. 시험 대상인 카트리지 필터는 덕트 내에 누설이 없도록 설치했고, 필터의 상류와 하류에서 유량에 따른 필터의 압력강하를 측정하기 위해 압력공을 설치하였다. SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer, TSI 3936) 시스템으로 필터의 상류와 하류에서 입자 크기분포를 측정하였고, 유량에 따른 총 입자 수농도를 측정하기 위해서 CPC(TSI 3022A)를 이용했다. 샘플링 프로브에서 CPC에 이르는 튜브 중간에는 각각 불 밸브를 설치하여 상류와 하류의 입자를 교대로 측정하였다. 덕트를 통과하는 유량을 제어하기 위해 속도 분포가 일정한 캐빈 필터 하류의

단면에서 속도 분포를 측정 후, 이것으로부터 유량을 환산하였다. 덕트로 유입되는 공기는 3상 송풍기(0.5 HP, 1780 rpm)로 흡인했고, 인버터를 사용해 주파수를 변환하여 유량을 제어했다.

입자가 중화기를 거치지 않고 직접 덕트로 유입되는 경우 소금 입자는 양극성으로 대전되어 있고, 입자당 절대 평균 하전수는 볼츠만 하전 분포보다 크다.^(13,14) 반면에 중화기를 통과한 입자는 평형 하전 분포를 갖는다. 액체인 DOS 입자의 경우 Forsyth 등⁽¹³⁾의 입자 하전량 측정결과에 의하면, 입자의 하전 정도는 볼츠만 분포 이하로 매우 낮다.

3. 결과 및 고찰

3.1 필터 여재의 성능 특성

일반적으로 필터의 성능은 입자 포집효율과 압력강하로 나타낼 수 있고, 필터의 면유속에 따라 달라진다. Fig. 3은 초기 필터 여재의 면유속에 따른 압력강하를 보여준다. 필터의 압력강하는 거의 선형적으로 증가하는데, 승용차 실내로 흡인되는 최대 유량에 가까운 조건인 20 cm/s에서 약 5 mmH₂O이다. 초기 정전 필터의 압력강하는 일반적인 고성능 필터에 비해 매우 낮지만,⁽⁹⁾ 필터를 사용하는 시간이 증가할수록 필터의 압력강하와 입자 포집효율의 관계는 복잡해진다. 일반

필터의 경우 필터의 입자 퇴적량이 증가함에 따라 압력강하와 포집효율이 함께 증가하지만, 정전 필터는 입자의 퇴적에 따라 필터가 보유하는 하전 용량이 감소하므로 압력강하가 증가해도 필터의 입자 포집효율이 감소할 수 있다.

필터 여재의 포집효율은 단분산 시험 입자의 하전 상태에 따라 세 가지로 분류하여 평가하였다. 즉, 분무형 입자발생기와 확산 건조기를 거쳐 DMA를 통과한 1가로 하전된 입자, DMA를 통과한 후 다시 중화기(^{210}Po)를 통과하여 평형 하전 분포를 갖는 입자, 그리고 DMA와 중화기를 거친 후 평행 평판형 전기 집진기를 통과하여 하전 입자가 모두 제거된 중성 입자를 사용하였다.

DMA를 통과하여 유입된 (+)1가로 하전된 입자 (Fig. 1의 ①의 경우)의 포집효율을 Fig. 4에 나타냈다. 면유속이 증가함에 따라 포집효율이 감소하고, $0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 범위에서 최소 포집효율을 보인다. 입자 크기가 작아질수록 포집효율이 크게 증가하는 것은 1가로 대전된 작은 입자일수록 이동도가 크고 대전된 필터 섬유와의 인력에 의해 상대적으로 쉽게 제거되기 때문이다. 반면에 입자 크기가 증가하더라도 입자당 하전수는 1개로 일정하므로, 입자의 확산력과 대전된 필터 섬유와 작용하는 정전기력이 줄어들어 입자 포집효율이 감소한다.

Fig. 5는 중화기를 통과한 단분산 입자(Fig. 1의 ②의 경우)에 대한 필터 여재의 포집효율을 나타낸 것이다. 발생된 입자가 DMA와 중화기(^{210}Po)를 거치면 볼츠만 평형 하전 분포를 갖는다. 이는 양극성으로 대전된 입자들과 중성 입자들이 혼합되어 있는 것을 의미하고, 입경이 클수록 입자당 절대 하전량이 증가하므로 쿨롱력의 효과가 증가한다. 그럼에서 보는 바와 같이 실험 입경 범위 내에서 필터의 입자 포집효율이 비슷하게 나타나는데, 이것은 일반 필터와는 다른 정전 필터의 포집효율 특성이다. 즉, 평형 하전 분포를 갖는 경우 입경이 클수록 입자당 하전량이 증가하고, 대전된 섬유와 하전 입자 간의 쿨롱력이 크게 작용하므로, (+)1가로 하전된 입자의 경우와는 다르게 $0.1\ \mu\text{m}$ 이상에서도 입자의 포집효율이 감소하지 않는다.

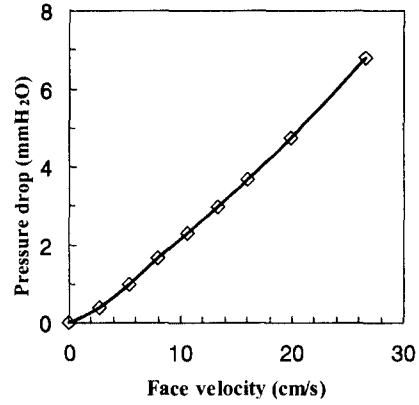


Fig. 3 Pressure drop of an electret filter media

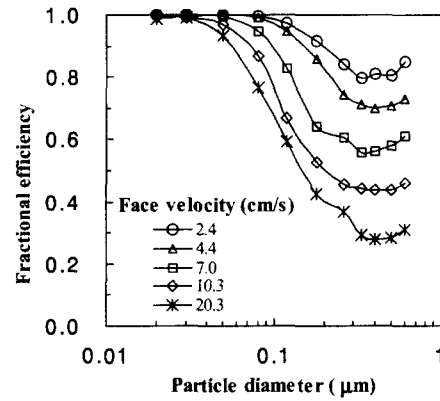


Fig. 4 Fractional efficiencies of an electret filter media for singly charged particles

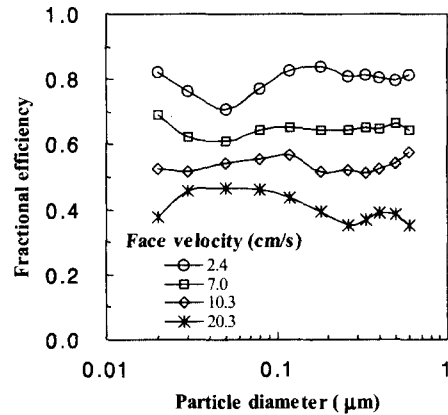


Fig. 5 Fractional efficiencies of an electret filter media for equilibrium charged particles

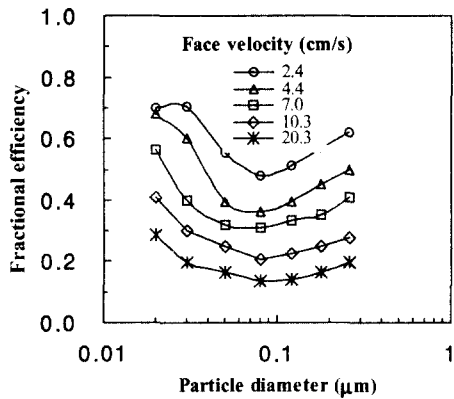


Fig. 6 Fractional efficiencies of an electret filter media for uncharged particles

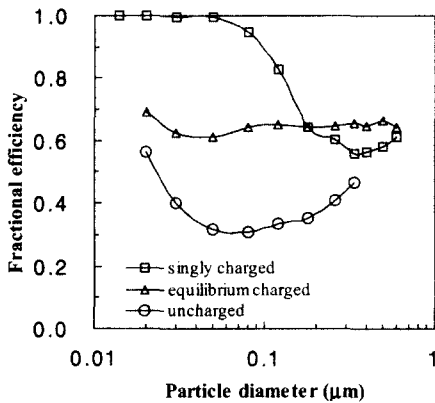


Fig. 7 Fractional efficiencies with different charging states (face vel. = 7.0 cm/s)

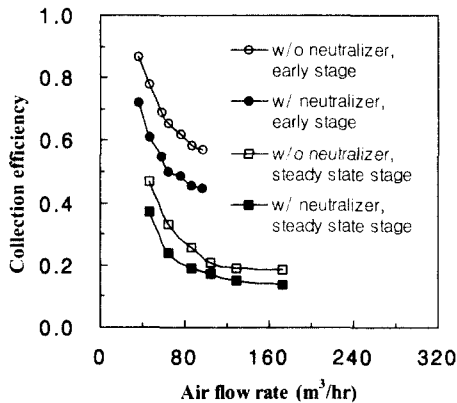


Fig. 8 Collection efficiencies with the air flow rate

Fig. 6은 DMA를 통과한 입자를 다시 중화기와 전기 집진기를 통과시킨 경우 중성 입자(Fig. 1의 ③의 경우)의 포집효율을 나타낸 것이다. 평형 하전 분포의 입자는 입경이 클수록 중성 입자의 비율이 점점 줄어들게 된다. 본 실험의 경우는 0.26 μm 보다 작은 입경 범위에서 재현성 있는 결과를 얻을 수 있었다. 그림과 같이 중성 입자에 대한 정전 필터의 최소 포집효율이 0.08 μm 근처에서 나타나는 것을 알 수 있다. 쿨롱력에 영향을 받지 않으므로, DMA를 통과한 입자나 DMA와 중화기를 거친 입자에 비해 포집효율이 낮다. 여기서 필터 섬유에 대전량이 크기 때문에, 필터 섬유와 중성 입자에 작용하는 분극력에 의해 필터의 포집효율이 증가된 것으로 생각된다. 중성 입자의 경우는 0.4 μm 이하를 사용했는데 이는 0.4 μm 이상의 발생량이 매우 적고 DMA, 중화기 및 전기집진기를 통과하면서 얻을 수 있는 중성 입자의 농도가 매우 낮기 때문이다.

Fig. 7은 필터의 면유속이 7.0 cm/s일 때 세 가지 하전 상태에 따른 필터 여재의 포집효율을 비교하여 나타낸 것이다. 볼츠만 평형 하전 분포를 갖는 입자의 경우와 DMA를 통과하여 1가로 하전된 입자를 비교하면, 0.18 μm 에서 효율이 비슷하게 나타난다. 이것은 0.18 μm 에서 볼츠만 평형 하전 분포의 절대 평균 하전수가 1개이기 때문이다. 반면에 0.18 μm 이하인 입자의 경우 입자당 평균 하전수가 1개 이하이므로, 1가로 하전된 DMA만을 거친 입자들에 비해 효율이 낮다. 전기 집진기를 통과한 중성 입자의 크기가 0.02 μm 정도로 작은 경우 하전 상태가 볼츠만 하전 분포의 결과와 비슷한 포집효율을 보이고, 0.1 μm 이상이 되면 쿨롱력의 영향이 점점 줄어들므로 1가로 하전된 입자의 포집효율과 비슷해진다. 필터 여재의 면유속이 다른 나머지 경우에도 이와 유사한 경향을 나타냈다.

3.2 카트리지 필터의 성능 특성

승용차에 장착되는 캐빈 필터는 높은 포집효율을 유지하면서 많은 유량을 처리하기 위하여 여재를 절곡하여 단면을 늘린다. 카트리지 형태로 승용차에 장착되는 캐빈 필터는 많은 유량을 처리하고 오랫동안 성능을 유지해야 한다. 그렇지만 필터가 보유하고 있는 하전량이 감소하면, 입자의 포집효율이 급격히 떨어질 수 있다. 본 연

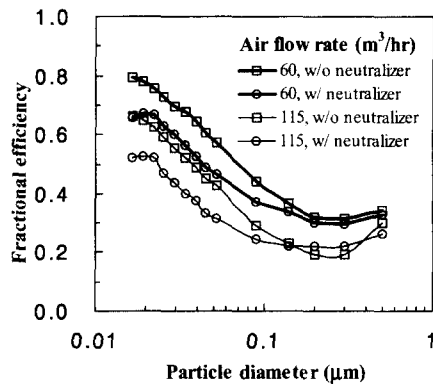


Fig. 9 Fractional efficiencies with the particle size in an early stage with the air flow rate and the particle charging conditions

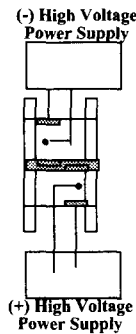


Fig. 10 Diagram of a bipolar charger

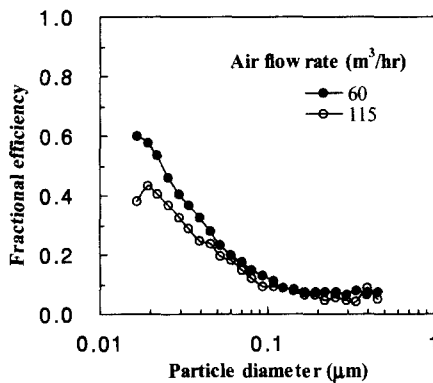


Fig. 11 Fractional efficiencies after charge depletion in an electret filter

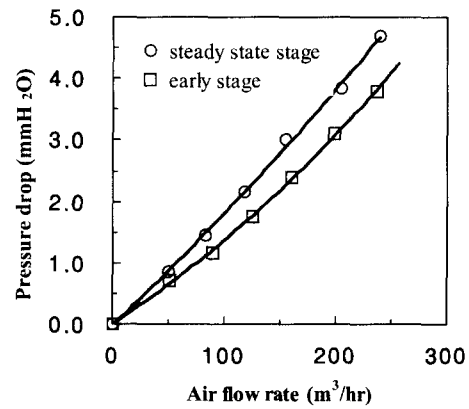


Fig. 12 Pressure drop of a cabin air filter

구에서는 시판되는 승용차용 캐빈 필터를 대상으로 성능특성 실험을 수행하였다.

Fig. 8은 유량에 따른 캐빈 필터의 입자 포집 효율 변화를 보여준다. 초기의 깨끗한 필터와 시험을 거쳐 보유 하전량이 감소한 필터를 대상으로 중화기의 통과 유무에 따른 포집효율을 측정하였다. 중앙 입경이 0.05 μm 이고 기하학적 표준편차가 1.6인 소금 입자를 사용하여, 필터의 상류와 하류에서 총 입자 개수농도를 CPC로 측정하였다. 적은 유량에서는 유량이 증가함에 따라 필터의 입자 포집효율이 급격히 감소하지만, 유량이 많아질수록 서서히 감소한다. 분무 대전 입자(w/o neutralizer)의 포집효율이 평형 하전 입자(w/ neutralizer)의 경우보다 높은데, 이것은 분무 대전 입자의 입자당 하전량이 상대적으로 크기 때문이다. 초기의 깨끗한 필터(early stage)의 포집효율이 높은 반면, 정전 필터의 보유 하전량이 감소한 경우(steady state stage)에는 입자 포집효율이 상당히 감소하고, 분무 대전 입자와 평형 하전 입자의 포집효율의 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 시험 입자의 크기에 따라 필터의 포집효율이 달라지므로, 시험 입자의 크기 분포가 다르면 측정 결과에 영향을 미칠 수 있다는 점을 고려해야 한다.

Fig. 9는 유량과 입자의 하전 상태에 따른 초기 정전 필터의 입자 크기에 따른 포집효율을 보여준다. 입경이 클수록 유량이 많을수록 필터의 포집효율은 감소한다. 필터 여재 시험에서 평형하전 입자의 포집효율을 나타낸 Fig. 5와 비교하면, 카트리지 필터의 포집효율이 낮다. 이것은 카트

리지 필터의 시험 과정에서 필터의 보유 하전량이 감소하였기 때문인 것으로 생각된다.

정전 필터의 보유 하전량 감소가 필터의 포집 효율에 미치는 영향을 파악하기 위하여 필터 상류에 양극성 코로나 하전기로 이온을 발생시켜 필터를 통과시켰다. 양극성 하전기는 와이어대 평판(wire-to-plate) 형식을 사용했고, Fig. 2의 (a)와 (b) 사이에 설치했다. Fig. 10과 같이 벽트 단면을 양분하여 (+)와 (-)의 고전압을 인가했다. 발생된 (+)이온과 (-)이온은 카트리지 필터를 통과하는 과정에서 필터의 보유 하전량을 감소시킨다.

Fig. 11은 소금 입자를 사용하여 두 가지 유량에 대해 포집효율을 측정된 결과를 나타낸 것인데, 액체인 DOS 입자의 경우에도 비슷한 경향을 나타냈다. 대부분의 입경에서 입자 포집효율이 50%를 넘지 못하고, 유량의 영향은 크지 않았다. 특히, 0.1~0.5 μm 입자의 경우 포집효율이 10% 이하로 매우 낮다. 이것은 화학 물질 등에 노출되는 경우와 같이 정전 필터의 보유 하전량이 감소하면, 정전 필터가 인체에 해롭다고 알려진 서브마이크론 입자를 거의 제거할 수 없다는 것을 보여주는 예이다. Fig. 11에 나타낸 포집효율은 일반 승용차에 장착하여 사용된 캐빈 필터의 효율에 비해 상당히 낮은데,⁽¹⁵⁾ 이것은 필터의 성능에 중요한 영향을 미치는 필터내 입자 퇴적을 고려하지 않았기 때문인 것으로 추정된다. 일반적으로 정전 필터의 경우 초기에는 하전 감쇄의 영향으로 입자 포집효율이 감소하지만, 운전시간이 경과함에 따라 다시 증가한다. 이것은 필터의 섬유에 퇴적된 입자가 필터의 입자 포집효율을 증가시키기 때문이다.⁽⁴⁾

Fig. 12는 초기의 깨끗한 필터와 양극성 이온에 노출시켜 보유 하전량이 감소된 필터의 압력강하를 나타낸 것이다. 필터의 보유 하전량이 감소하여 포집효율이 매우 낮은 경우의 압력강하는 초기의 깨끗한 필터에 비해 측정 유량 범위에서 약 20~25% 정도 높다. 이것은 입자 퇴적에 의한 효과가 본 실험에서는 나타나지 않았기 때문이다. 즉, 필터의 입자 퇴적이라는 변수를 고려하지 않으면, 보유 하전량의 감소로 인해 필터와 입자의 기계적 상호작용인 확산, 차단, 관성 등이 지배적인 메커니즘으로 작용한다. 따라서, 상대적으로 필터 섬유간의 간격이 넓은 정전 필터의 경우 정전기력의 영향이 줄어들면, 필터의 입자 포집효

율이 크게 감소될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 승용차 실내의 공기를 정화하기 위해 사용되는 캐빈 필터의 미세 입자에 대한 포집효율을 평가하였다. 필터 여재에 대해 입자의 대전 상태, 유량, 입경에 따른 입자 포집효율을 측정하였고, 카트리지 필터의 경우 필터의 보유 하전량이 포집효율에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 이러한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 필터 여재의 경우 1가로 하전된 단분산 입자는 0.3~0.5 μm 범위에서 최소 포집효율을 나타내고, 입경이 작을수록 포집효율이 높았다. 이것은 이동도가 큰 작은 입자들이 대전된 섬유에 쉽게 부착되기 때문이다.

(2) 불츠만 평형 하전 분포를 갖는 단분산 입자의 포집효율은 입경이 1 μm 이하인 경우 거의 일정하고, 입자당 절대 평균 하전수가 1인 0.18 μm 인 입자의 포집효율은 1가로 하전된 입자의 경우와 비슷하였다.

(3) 중성 입자의 포집효율은 면유속에 무관하게 0.08 μm 근처에서 최소이고, 입경이 0.03~0.3 μm 범위에서 평형 하전 입자의 포집효율보다 매우 낮다.

(4) 카트리지 필터의 초기 포집효율은 입자 대전량이 클수록 유량이 적을수록 높게 나타났는데, 시간이 경과함에 따라 정전 필터의 보유 하전량이 감소하여 필터 여재의 포집효율보다 낮다.

(5) 카트리지 필터의 경우 양극성 하전기로 이온을 발생시켜 정전 필터의 하전 보유량을 감소시키면, 0.1~0.5 μm 범위에서 유량에 무관하게 포집효율이 10% 이하로 감소한다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 '98과학기술기초중점연구(기계공학)에 의하여 지원되었으며(과제번호: 98-018-E00020), 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한, 정전 필터 여재를 제공해 준 (주)성창에어텍 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Brown, R. C., 1993, *Air Filtration*, Pergamon Press.
- (2) Society of Automotive Engineers, 1994, Passenger Compartment Air Filter Test Code, SAE J1669.
- (3) Fjeld, R. A. and Owens, T. M., 1988, "The Effect of Particle Charge on Penetration in an Electret Filter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 24, pp. 725~731.
- (4) 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.
- (5) Romay, F. J., Liu, B. Y. H. and Chae, S. J., 1998, "Experimental Study of Electrostatic Capture Mechanism in Commercial Electret Filters," *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 28, pp. 224~234.
- (6) Baumgartner, H. P. and Loeffler, F., 1986, "The Collection Performance of Electret Filters in the Particle Size Range 10 nm ~ 10 μ m," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 17, pp. 438~445.
- (7) Kanaoka, C., Emi, H., Otani, Y. and Iiyama, T., 1987, "Effect of Charging State of Particles on Electret Filtration," *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 7, pp. 1~13.
- (8) Braeunling, V. and Ptak, T. J., 1997, "Testing Automotive Interior Air Filters: A Comparison of SAE and DIN Standards," *Int. Congress & Exposition*.
- (9) 안강호, 배귀남, 1994, "필터 여재의 성능평가," *공기조화냉동공학논문집*, 제6권, 제4호, pp. 417~426.
- (10) 안강호, 1997, "정전 섬유필터 주위의 입자포집 및 거동에 관한 수치해석적 연구," *대한기계학회논문집(B)*, 제21권, 제11호, pp. 1509~1517.
- (11) 박영옥, 구철오, 임정환, 김홍룡, 손재익, 1996, "승용차용 Cabin Air Filter의 성능," *한국 대기보전학회지*, 제12권, 제3호, pp. 279~287.
- (12) Hinds, W. C., 1999, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, John Wiley & Sons, Inc.
- (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.
- (14) 이재복, 배귀남, 황정호, 이규원, 2001, "분무 및 코로나 방전에 의해 대전된 서브마이크론 입자의 대전량 분포," *대한기계학회논문집(B)*, 제25권 제1호, pp. 124~132.
- (15) Lehtimaeki, M., 1995, "Development of Test Methods for Electret Filters," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 26, pp. S737~738.