

자동차용 정전 필터의 미세 입자 포집 특성

지준호* · 강석훈* · 김동철* · 황정호** · 윤웅섭** · 배귀남***

Collection Performance of an Electret Cabin Air Filter for Fine Particles

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

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

Abstract

This work presents experimental results of filter media test by using particles from 0.02 to 0.6 μm in diameter and by applying different charging states. In order to investigate the electret filter performance, the collection efficiency and the pressure drop of filter were measured. The face velocities of test filters varied from 2.4 to 20.4 cm/s. Another experiment setup for the cartridge cabin air filter was used to get an collection efficiency in submicron region. After charging level of electret filter severely decreased, the change of collection efficiency was verified. Experimental results show that the reliability of electret filters can be poor in some conditions.

1. 서론

일반적으로 필터의 입자 포집효율에 영향을 미치는 중요 요소로는 섬유 사이의 간격, 필터 두께, 그리고 필터의 압력 강하 등이 있다. 섬유간의 평균 간격은 입자 제거 효율과 필터 압력 강하에 영향을 주고, 압력 강하는 필터의 운전비용과 연결된다. 그러므로 입자상 물질의 여과에서 포집효율과 압력 강하의 최적 조건을 찾는 작업은 매우 중요하다.⁽¹⁾ 최근에는 정전 필터를 이용

하여 낮은 압력강하와 높은 포집효율을 얻는 두 가지 목적을 달성하고 있는데, 이 때 필터가 보유하는 하전 용량은 필터의 성능 및 수명과 관계된다. 정전 필터의 입자 포집에 영향을 주는 인자는 기계적인 메커니즘인 확산, 차단, 관성력과 전기적인 영향인 쿨롱힘, 영상력, 분극력이 있다.

자동차용 캐빈 필터는 일반적으로 높은 풍량을 낮은 압력강하로 처리해야 하므로 정전 필터를 사용한다. 캐빈필터는 필터의 단면 유속에 따른 입자 포집효율과 압력 강하를 통해 성능을 평가할 수 있고, 필터가 먼지를 수용할 수 있는 용량(Holding Capacity)과 필터의 먼지 수용량에 따른 압력강하와 입자 포집효율 변화 등에 대한 실험을 통해 필터의 수명을 예측할 수 있다. 자동차용 캐빈 필터에 대한 성능평가 방법은 SAE J1669라는 규격⁽²⁾으로 표준화되어 있지만, 이 규격에는 미세입자에 대한 평가 방법이 규정되어

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

있지 않다. 입자의 하전 상태가 정전 필터의 입자 포집 성능에 미치는 영향에 대한 많은 연구가 수행되었다.⁽³⁻⁸⁾ 정전 필터에 관한 국내 연구로는 중화기를 통과한 입자를 대상으로 한 필터 여재 성능 평가,⁽⁹⁾ 정전 단일 섬유필터 주위의 입자 거동에 관한 수치해석적 연구,⁽¹⁰⁾ 자동차용 정전 필터의 성능평가에 관한 연구⁽¹¹⁾ 등이 있다.

국내의 정전 필터에 대한 연구는 미미하고, 특히 자동차용 캐빈 필터를 대상으로 인체에 해로운 입자 크기인 $1 \mu\text{m}$ 이하에 대한 정량적인 연구는 거의 수행되지 않았다. 본 연구에서는 자동차 실내로 유입되는 공기를 정화하는 캐빈 필터의 성능을 평가하고, 시험 입자의 하전 상태에 따른 필터의 포집효율을 얻는 것을 목적으로 한다. 직경 47mm 필터 여재를 고정할 수 있는 필터 홀더와 실제로 차량에 장착되는 절곡 카트리지형 캐빈 필터를 시험할 수 있는 성능평가 덕트를 구성하여 입자 하전에 따른 정전 필터의 서브마이크론 입자 포집 특성을 살펴보았다.

2. 실험

2.1 필터 여재의 성능평가

필터 여재를 평가하기 위한 실험장치는 입자 발생장치로 충돌분무기를 사용하였고, 발생한 입자의 하전 특성을 결정하기 위해 DMA(TSI 3080 with TSI 3077 Neutralizer), 중화기(^{210}Po), 전기집진기의 조합을 구성했다. 로터메터를 거쳐 HEPA 필터를 통과한 깨끗한 공기는 발생입자와 섞여 필터 홀더 내로 유입되고, 필터 압력강하를 측정할 수 있는 차압공과 샘플링 프로브가 설치된 필터 홀더를 통과한다. 전체 유량은 진공펌프 입구의 니들 밸브와 입구의 로터메터로 제어했다.

0.1% 소금물을 사용하여 충돌 분무기로 소금물 액적을 발생시킨 후, 확산 건조기를 거쳐 소금 입자를 얻었다. 발생 입자는 개수 중앙 입경이 $0.04 \mu\text{m}$ 이고, 표준편차가 1.6 의 다분산으로 발생되는데, 청정 공기로 희석시켜 시험 입자의 농도가 $1000 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 이하가 되도록 제어했다. 이때, CPC는 개수 측정 모드에서 측정이 이루어지기 때문에 두 CPC의 오차를 최소화할 수 있다. 또한 실험 과정에서 필터의 보유하전량 감소가 성능에 영향을 주지 않도록 실험조건마다 새로운

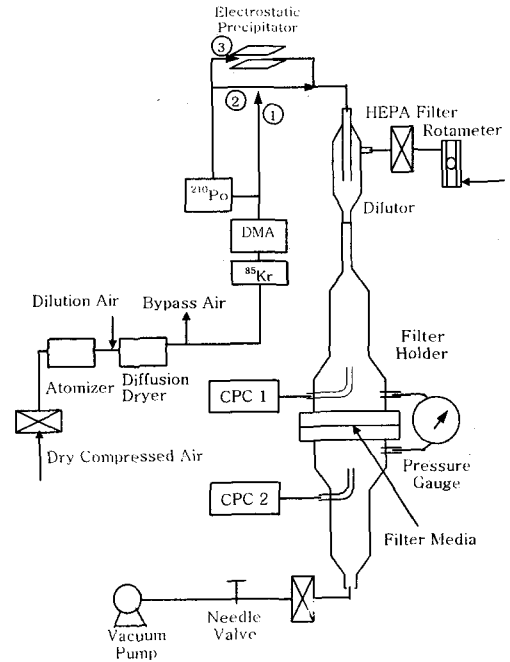


Fig. 1 Schematics for filter media test

필터 여재를 사용했다.

필터 여재 성능 시험은 입자 하전 특성에 따라 세 가지로 분류했다. 첫 번째는 충돌 분무기와 확산 건조기를 거쳐 DMA를 통해 발생한 1가로 하전된 입자를 대상으로 했고, 두 번째로 평형 하전 분포를 갖는 대기 입자들을 모사하기 위해 DMA를 통과한 단분산 입자가 중화기를 통과하도록 했는데, 이 때 입자당 평균 절대하전수가 $2.37 \times \sqrt{d_p}$ 이므로(여기서 d_p 의 단위는 μm)⁽¹²⁾ 입자 크기가 $0.18 \mu\text{m}$ 인 경우 입자당 평균 절대하전수는 1개이다. 마지막으로 DMA와 중화기를 통과한 평형 하전분포를 갖는 입자들을 전기 집진기를 통과시켜 하전입자들을 모두 제거한 후, 중성 입자만의 대상으로 시험했다.

입자 농도는 필터의 상류와 하류의 샘플링 프로브를 사용하여 같은 모델의 CPC (Condensation Particle Counter, TSI 3022A)를 통해 동시에 측정했다. 이 때, 샘플링 프로브에서 CPC에 이르는 튜브의 길이는 같게 연결했고, CPC마다 측정 오차를 고려하여 필터의 상류와 하류를 바꿔 측정한 후 평균값을 사용했다. 필터를 통과하는 단면 속도 설정은 입구의 로터메터가 나타내는 유량과

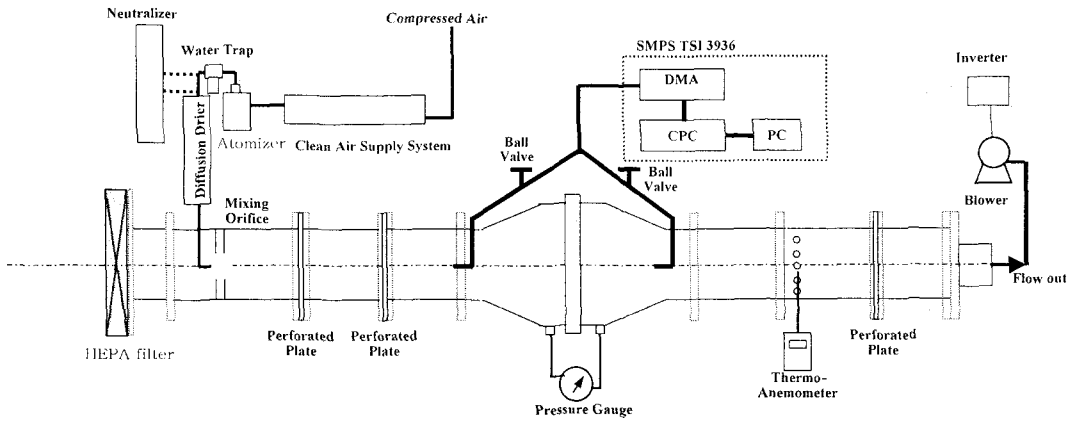


Fig. 2 Schematics for cabin air filter test

DMA를 통해 유입되는 입자가 포함된 유량, CPC의 흡인 유량을 고려해 설정했다. 진공펌프 상류에는 미세한 유량 조절을 위해 니들 밸브를 설치했고, 테스트 장치의 입구에는 HEPA 필터를 장착하여 배경 농도를 0.01 개/cm³ 이하로 유지했다.

2.2 카트리지 필터의 성능평가

성능평가 장치는 입자 발생부, 유동 균일화 및 입자 혼합부, 필터 시험부, 유량 제어부로 구성된다.

덕트로 유입하는 공기에 포함된 오염입자를 제거하기 위해 HEPA 필터를 덕트 입구에 장착하여 배경 입자 농도를 10 개/cm³ 이하로 유지하였다. 시험 입자는 충돌분무기를 통해 발생시켰는데,

소금 입자와 DOS(Di-octyl Sebacate)를 시험 입자로 사용했다. 충돌분무기를 통해 발생한 입자는 혼합 오리피스스를 통과하면서 입구 HEPA 필터를 통과한 깨끗한 유입 공기와 섞이게 했고, 다공판을 설치하여 기류 분포를 균일하게 하고 발생입자가 충분히 섞일 수 있도록 했다.

시험 대상인 카트리지 필터는 덕트 내에 틈새가 없도록 고정 설치했고, 필터의 상류와 하류에서 덕트 풍량에 따른 필터 차압을 측정하기 위해 차압공을 설치하였다. 필터의 포집 효율을 얻기 위해 SMPS(TSI 3936) 시스템을 통해 입자 크기 분포를 상류와 하류의 샘플링 프로브로 측정하였다. 덕트를 통과하는 유량은 3상 송풍기(0.5 HP, 1780 rpm)로 흡인했고 인버터를 사용해 주파수를 변환하여 유량을 제어했다. 필터 여재와 카트리지 필터에 대한 시험 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Test conditions

	47mm media filter	cartridge filter
Charging conditions	DMA only ①	w/ neutralizer
	DMA+ Neutralizer ②	
	DMA + Neutralizer + Electrostatic precipitator ③	w/o neutralizer
Face velocity (cm/sec)	2.4	4.0 (60 m ³ /hr)
	4.4	
	7.0	7.6 (115 m ³ /hr)
	10.3	
	20.3	

3. 결과 및 고찰

3.1 필터 여재의 성능 특성

Fig. 3은 초기 필터 여재의 단면 속도에 따른 압력강하를 보여준다. 단면속도가 20 cm/sec의 압력강하가 5 mmH₂O 정도로 매우 낮고 거의 선형적으로 증가한다.

필터 여재의 성능평가는 시험 단분산 입자의 하전 상태에 따라 3가지로 분류하여 시험했다. 충돌 분무기와 확산 건조기를 거쳐 DMA를 통해 발생한 1가로 하전된 입자, DMA를 통해 발생한 단분산 입자를 다시 중화기(²¹⁰Po)를 통과시켜 평

형 하전 분포를 갖는 입자, 그리고 DMA와 중화기를 거친 입자들을 평행평판형 전기 집진기를 통과시켜 중성 입자만을 시험했다.

DMA를 통과한 후, 유입된 (+)1가로 하전된 입자들의 포집 효율이 Fig. 4에 나타나는데, 단면 유속이 증가함에 따라 효율이 감소하고, 효율이 최소가 되는 입경 또한 감소하는 것을 알 수 있다. 이처럼 입자 크기가 증가할수록 필터의 포집 효율이 감소하는 이유는, 크기가 큰 입자일수록 확산력을 덜 받는 반면 입자 크기에 관계없이 1가의 하전량을 보유하기 때문이다.

Fig. 5는 중화기를 통과한 단분산 입자에 대한 필터 여재의 입자 포집효율을 보여준다. 충돌분무기를 통해 발생한 입자는 DMA와 중화기(^{210}Po)를 거친 경우 볼츠만 평형 하전 분포를 갖는다. 이는 양극성으로 대전된 입자들과 중성 입자들이 혼합되어있는 것을 의미하고 입경이 클수록 입자당 절대 하전량이 증가하므로 쿨롱힘의 효과가 증가하게 된다.

Fig. 6은 DMA 발생 입자를 중화기와 전기집진기를 통과시킨 경우로 필터 여재의 중성 입자 포집효율을 보여준다. 100 nm 근처에서 필터의 최소 포집효율이 나타나는 것을 알 수 있다. 전체적인 입자의 포집 효율은 입자의 크기가 증가할수록 감소하고, 쿨롱힘을 받지 않으므로 DMA를 통과한 1가로 대전된 입자나 DMA와 중화기를 거친 입자에 비해 효율이 낮다.

Fig. 7은 필터 여재의 단면 속도가 7.0 cm/s 인 경우, 세 가지 입자 하전 상태에 따른 필터 여재 성능을 비교한다. 볼츠만 평형 하전 분포를 갖는 입자의 경우와 DMA를 통과한 1가로 하전된 입자를 비교하면, 180 nm에서 효율이 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 180 nm에서 볼츠만 평형하전분포의 평균 절대하전수가 1이기 때문이다. 반면 180 nm 이하의 입자에 대해서는 볼츠만 하전의 경우 입자당 평균 하전수가 1이하이므로 1가로 하전된 DMA만을 거친 입자들에 비해 효율이 낮다. 전기집진기를 통과한 중성 입자들의 효율은 20 nm 정도로 작아지는 경우 볼츠만 분포의 경우와 비슷한 효율을 보이고 100 nm 이상이 되면 쿨롱힘의 영향이 점점 줄어들기 때문에 1가로 하전된 입자에 대한 필터의 포집효율에 접근한다. 여재의 단면 속도가 다른 나머지 경우도 모두 같은 경향을 나타내는데, 200 nm 근처에

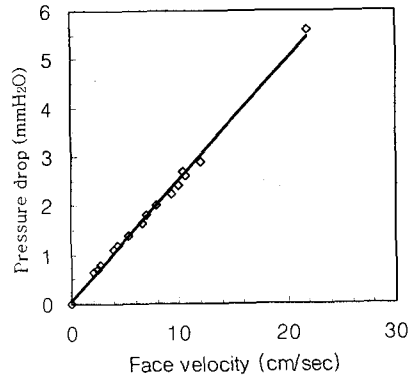


Fig. 3 Pressure drop of media filter

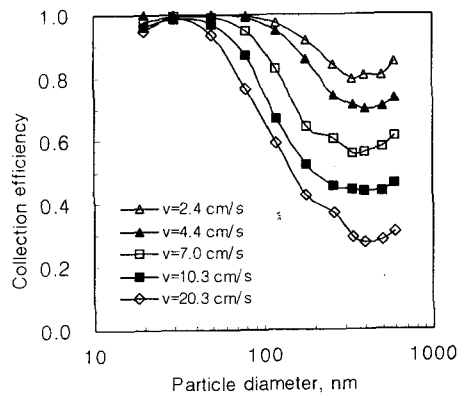


Fig. 4 Collection efficiency of electret filter in case of singly charged monodisperse particles

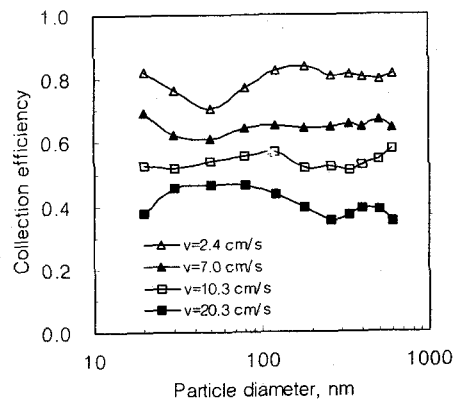


Fig. 5 Collection efficiency of electret filter in case of particles in charge equilibrium

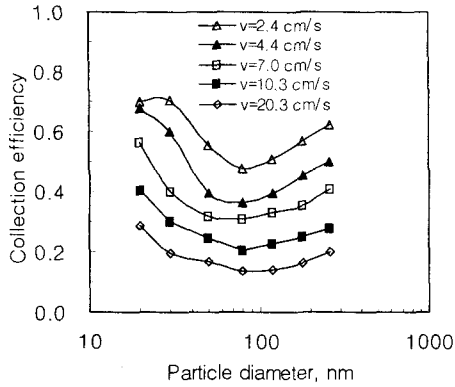


Fig. 6 Collection efficiency of electret filter in case of uncharged particles

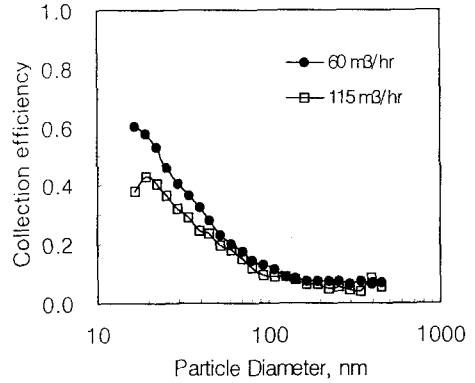


Fig. 9 Collection efficiencies after charging depletion

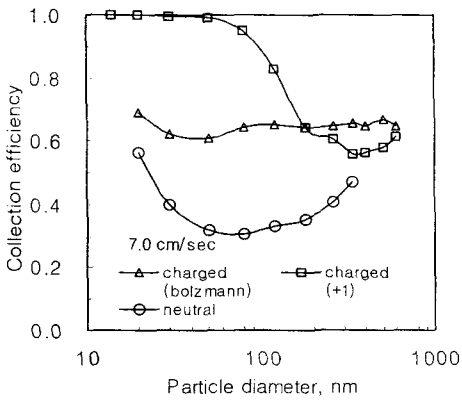


Fig. 7 Collection efficiencies with different charging states (face vel. = 7.0 cm/s)

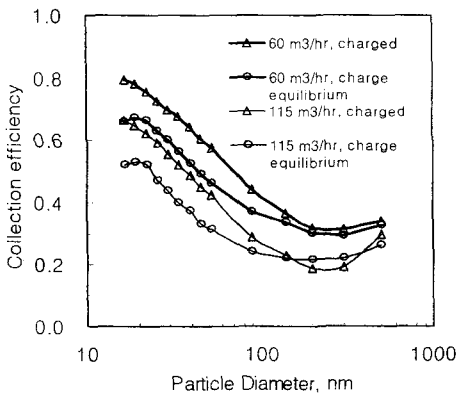


Fig. 8 Change of early stage collection efficiency with change of charging condition and flow rates

서는 입경이 증가하거나 필터 단면 속도가 증가할수록 입자의 하전 상태에 관계없이 필터 효율이 비슷하게 나타난다.

3.2 실차용 캐빈 필터 유닛 테스트

Fig. 8은 유량과 하전 양상에 따른 초기 정전 필터의 입자 포집효율을 보여준다. 100 nm 이상에서는 발생 입자의 농도가 낮기 때문에 SMPS를 통해 안정적으로 측정하기 어렵다. 따라서 80 nm 이하에서는 SMPS 시스템을 사용하여 측정하였고, 발생 입자 크기 분포의 오른쪽에 위치하기 때문에 2가나 3가의 다중 하전 영향이 작은 80 nm 이상 입자들에 대해서는 DMA로 단분산 입자만을 분류하여 CPC로 수농도를 측정하였다. 결과를 통해 알 수 있는 것처럼 풍량이 증가할수록 중화기를 통과한 작은 입자들의(200 nm 이하) 포집효율은 분무 대전에 의해 하전된 입자들에 비해 감소하고, 큰 입자들의 효율은 비슷하거나 상대적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 필터 여재 시험의 결과와 비교하면 중화기를 거친 평형 하전 분포 입자들의 포집효율이 카트리지 필터의 경우 상대적으로 낮게 나타나는데, 이는 카트리지 필터의 시험 과정에서 어느 정도 필터의 보유 하전이 감소한 영향이다.

실험이 진행되는 과정에서 정전 필터의 포집효율이 감소하는 경향을 확인할 수 있었는데, 이는 정전 필터의 보유 하전량이 줄어들면 필터의 포집효율이 영향을 받을 수 있다는 것을 의미한다. Fig. 9는 필터 상류에 (+)와 (-) 이온을 발생시

킬 수 있는 양극성 코로나 하전기를 통해 이온을 발생시켜 필터의 전하 보유 정도를 최소화시킨 후 포집효율을 측정한 결과이다. 소금 입자를 발생시켜 두 가지 유량에 대해 포집 효율을 측정했는데, 대부분 입경에서 입자 포집효율이 50%를 넘지 못하고 유량의 영향을 크게 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 특히 100~500 nm 입자의 경우 입자의 90% 이상이 필터를 통과한다.

4. 결론

자동차 실내의 공기 정화를 위해 사용되는 캐빈 필터의 미세 입자에 대한 성능을 평가하였다. 필터 여재와 카트리지 필터에 대해 입자의 대전 상태, 풍량, 입경에 따른 초기 입자 포집효율을 실험적으로 얻었고, 정전 필터의 하전 보유량이 감소한 경우 포집효율의 변화를 알아보았다.

(1) DMA를 통해 발생한 1가로 하전된 입자는 입자 크기에 상관없이 중성 입자에 비해 포집 효율이 높았고, 입자 크기가 작을수록 상대적으로 효율이 높았다.

(2) DMA를 통과한 단분산 입자를 중화기를 통과시켜 볼츠만 평형 하전 분포를 갖는 입자는 1 μm 이하 전체 입경 영역에서 비슷한 포집효율을 나타냈다.

(3) DMA와 중화기를 거친 평형 하전분포를 갖는 입자를 전기집진기를 통과시켜 중성 입자만을 시험한 경우 하전 입자의 경우와 비교할 때 포집 효율이 매우 낮았다.

(4) 자동차용 정전 필터의 초기 효율은 입자 대전량이 클수록 유량이 적을수록 상대적으로 높게 나타났다.

(5) 시판되는 카트리지 필터의 경우 하전 감쇄가 이루어진 후, 0.1~1 μm 사이의 포집 효율은 20% 이하로 매우 낮았다.

후기

본 연구는 한국학술진흥재단의 98과학기술기초중점연구(기계공학)에 의하여 진행되었으며(과제번호: 98-018-E00020), 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

본 연구에 필터 여재를 제공해 준 (주)성창에 어택에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Brown, R. C., 1993, *Air Filtration*, Pergamon Press.
- (2) SAE J1669, 1994, Passenger Compartment Air Filter Test Code, Dec.
- (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., Benjamin 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 μm , *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, 필터여재의 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, 임정남, 김홍룡, 손재익, 1996, 승용차용 Cabin Air Filter의 성능, 한국대기보전학회지, 제12권, 제3호, pp. 279~287.
- (12) Hinds, W. C., 1999, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, John Wiley & Sons, Inc.