

차량용 에어클리너의 미세입자 제거특성

박병현^{**} · 김상범^{*} · 김경수^{*} · 이상열^{***} · 이명화[†]

Fine Particle Removal by a Vehicle Air Cleaner

Byung Hyun Park, Sang Bum Kim, Gyung Soo Kim, Sang Ryul Lee and Myong-Hwa Lee

Key Words: Remanufacturing(재제조), Air cleaner(에어클리너), Fine particles(미세입자), Air pollution control(대기오염제어), Polyurethane foam(폴리우레탄 폼)

Abstract

There is a growing interest to develop an eco-friendly air cleaner with high performance through a remanufacturing process. Two kinds of polyurethane filter media, a coarse (Filter-A) and a fine filter media (Filter-B), are used in this study to protect a vehicle engine from airborne particles. In order to improve the collection performance of the filters (Filter-A, Filter-B), an oil coating technology on the filter surface was introduced. As a result, inertial force is a dominant collection mechanism for a dry filter media, so that collection efficiency increases with increasing filtration velocity. However, intra-structure change of an oil-coated filter media influences on the collection mechanism, which shows a non-linear collection efficiency curve in terms of filtration velocity. The result shows that the developed filter media are eco-friendly and effective to protect a vehicle engine from airborne particles especially at low filtration velocity.

1. 서 론

국민의 생활수준이 높아짐에 따라 생활환경 중에 존재하고 있는 각종 오염물질로부터 인체 및 각종 장비를 보호하는 것에 대한 관심이 증대되고 있다. 현재까지는 대부분 인간의 건강보호 차원에서 각 오염물질의 인체 위해성 평가 연구가 이루어져 왔으나⁽¹⁻³⁾, 고가의 장비가 나타남에 따라 점차 오염물질로부터 이들을 어떻게 보호할 것인가 하는 것에까지 연구의 범위가 넓혀지고 있다⁽⁴⁾. 대표적인 것이 운송장비로서, 이들은 환경오염을 발생시키는 주범이기도 하지

만 인간이 생활하는데 없어서는 안 될 필수적인 생활도구가 되었다.

먼지와 같은 외부의 오염물질이 아무런 여과장치를 거치지 않고 엔진부로 유입될 경우, 엔진의 출력이 저하되고 연료소비량이 증가하는 현상이 나타날 뿐만 아니라 실린더와 피스톤의 마모에 결정적인 영향을 미치게 된다. 더욱 심각한 문제는 엔진오일이 오염되는 상황이 발생되기 때문에 결과적으로 엔진이 손상되고 수명이 단축되는 결과를 초래하게 된다. 이에 따라 각종 차량에서는 엔진으로 유입되는 외부 공기로부터 엔진을 효과적으로 보호하기 위해 다양한 에어필터를 사용하고 있다. 그렇지만 환경오염의 측면에서 살펴보면, 이러한 필터의 사용이 오히려 환경오염의 시발점이 된다는 것을 확인할 수 있다. 현재 대부분의 차량용 에어필터는 종이나 부직포로 된 여과지를 사용하고 있어 통기저항이 큰 특성이 있다. 또한 사용기간이 짧고 한번 사용하고 폐기하는 일회

(2007년 3월 5일 접수 ~ 2007년 3월 19일 심사완료)

*한국생산기술연구원 환경에너지본부

**경희대학교 환경응용화학부

***미라클(주)

†이명화, 회원, 한국생산기술연구원 환경에너지본부

E-mail : myonghwa@kitech.re.kr

TEL : (041)589-8268 FAX : (041)589-8580

용 제품으로 사용되고 있기 때문에 에너지자원 측면에서 커다란 손실을 초래하고 있으며, 막대한 양의 폐기물을 발생시킨다는 문제점을 가지고 있다. 각종 차량의 등록대수(승용차 : 11,268,247대, 버스: 1,110,595대, 트럭: 3,109,861대)⁽⁵⁾와 에어클리너의 교환주기(승용차 : 3개월, 버스 : 1개월, 트럭 : 2개월)를 고려하여 폐기물 발생량을 계산하면, 연간 116,010톤의 폐기물이 발생한다는 것을 알 수 있다. 그렇지만 미세입자의 유입으로 인한 엔진의 수명단축을 막기 위한 에어필터의 사용을 금지할 수는 없기 때문에 환경적인 요인과 기계적인 요인 모두를 충족시킬 수 있는, 즉 폐기물 발생량을 줄이면서 동시에 조대먼지와 미세먼지를 효과적으로 여과할 수 있는 제품의 개발이 필수적이다.

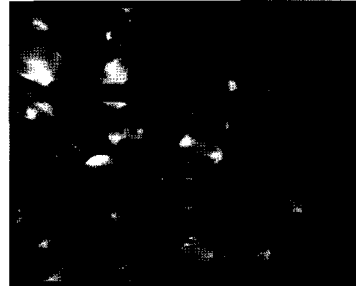
최근에는 “환경친화적산업구조로의 전환촉진에 관한 법률”이 개정되었는데, 여기에 재제조산업의 육성이라는 것이 포함되어 있다. 재제조의 개념은 사용한 제품을 일련의 과정을 거쳐 새로운 제품과 동등한 성능을 가질 수 있도록 하는 것으로서, 국가 경제적으로 대단히 중요한 전략이며 총체적 제품정책과도 깊은 관련을 맺고 있다. 일반적으로 제품의 효율 및 수명주기를 강화하기 위해서는 장기적으로 내구성 있는 제

품의 생산, 재사용, 수선, 자재의 재수거, 재활용 및 서비스 등과 같은 세분화된 전략으로 추구할 수 있는데, 이러한 새로운 생산개념은 개별적인 사례로서 문헌에 나타나 있을 뿐 선진국에 있어서도 큰 확산을 보이지 못하고 있다⁽⁶⁾. 우리나라의 경우, 90년대 이후 기업들의 환경의식이 매우 제고되었음에도 불구하고 환경 친화적 생산개념 및 전략에 관한 연구가 매우 미미한 상황이다. 이런 다양한 기계적, 환경적 측면을 두루 만족시키기 위해서는 재제조가 가능한 필터를 개발하는 것이 무엇보다 시급한 실정이다. 이와 관련하여 강하고 내유 및 내용제성이 뛰어나며 고무탄성이 있는 폴리우레탄 재질의 필터를 이용하여 엔진으로 유입되는 미세입자를 효과적으로 제거하며, 필터로서의 수명이 다하면 이를 회수하여 재제조 공정을 거친 후 다시 사용하는 것이 이 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 한 가지 방법이라 판단된다.

따라서 본 연구에서는 디젤 및 가솔린 엔진차량의 엔진 상류측에 장착되는 에어클리너의 성능과 관련하여 재제조 가능한 폴리우레탄으로 된 2가지 종류의 차량 엔진용 에어필터에 대한 각 여과속도별 집진효율을 비교하였으며, 효율을 높이기 위해 동일한 필터에 오일을 도포하였을 때의 미세입자 제거특성



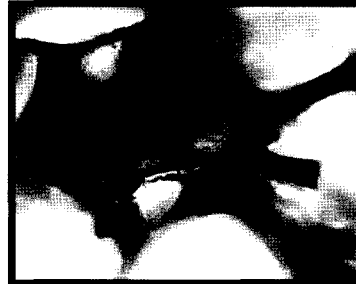
(a) Filter-A (×100)



(b) Filter-B (×100)



(c) Filter-A (×100, oil coated)



(d) Filter-B (×200, oil coated)

Fig. 1 Morphology of a polyurethane filter media

을 비교, 평가하는데 초점을 두었다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 필터의 광학현미경(Olympus, DigicamII BX51)사진을 그림 1에 나타내었다. 여기에서 전단에 조대입자 처리용으로 사용한 필터를 Filter-A, 후단에 미세입자 처리용으로 사용한 필터를 Filter-B라 명명하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 Filter-A와 Filter-B는 각각 폴리우레탄으로 제조된 폼 형태의 필터이며, 3차원의 벌집구조로 이루어져 있다.

또한 이 2종류의 에어필터에 대한 그 물리적인 특성을 표 1에 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이 Filter-A와 Filter-B의 평균 섬유경은 각각 252 μm , 50 μm 이며, Filter-A는 육안으로 폼의 구조를 쉽게 관찰할 수 있는 거친 형태의 필터로써 조대입자를 제거하는

역할을 하고, Filter-B는 미세한 폼의 형태로써 미세입자를 제거하는데 효과적인 것으로 판단된다.

또한 표에서 α 는 충전율(packing density)을 나타내며, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{W}{\rho_f AL} \quad (1)$$

여기에서, W 는 필터의 무게, ρ_f 는 필터섬유의 밀도, A 는 필터의 면적 그리고 L 은 필터의 두께를 나타낸다. 섬유상 필터의 α 는 일반적으로 0.01에서 0.3의 값을 가진다고 알려져 있으나, 본 연구에서 사용한 필터는 충전율이 0.037로서 압력손실이 낮은 특성을 가진 반면 집진효율이 낮을 것으로 추정되어진다. 이에 필터의 집진효율을 높이기 위해 기류가 유입되는 쪽의 필터표면에 고점도의 오일(Y사, 점도 : 2500 cps at 25°C)을 60 g/m² 도포하여 사용하였다. 그림 1에서 (a)와 (b)는 폴리우레탄 에어필터에 오일을 도포하지 않은 기본형태의 폼을 관찰한 사진이며, 아래쪽의 (c)와 (d)는 각각의 필터에 오일을 도포했을 때의 섬유형상을 관찰한 사진이다. 폴리우레탄 에어필터에 오일을 도포한 (c)와 (d)필터는 그림에서 볼 수 있듯이 벌집모양의 폼이 연결되는 부분마다 오일층이 형성되어 있으며, 막의 형태로도 존재한다는 것을 관찰할 수 있다.

Filter-A와 Filter-B에 대하여 각각의 성능 테스트를 실시하였으며, 또한 이 두 필터를 겹친 필터, Filter-AB에 대하여도 동일한 방법으로 그 성능을 파악하였다. 이와 더불어 오일 도포된 필터에 대해서도 동일하게 필터성능 테스트를 실시하여 오일도포가 집

Table 1. Physical properties of test air filters

	Filter-A	Filter-B
Average fiber diameter, d_f [μm]	252	50
Packing density of a filter, α [-]	0.037	0.036
Fiber density, ρ_f [g/cm^3]	1	1
Filter thickness, L [mm]	8.0	6.0
Pressure drop at $u=5$ cm/s, ΔP [Pa]	0.0	2.0

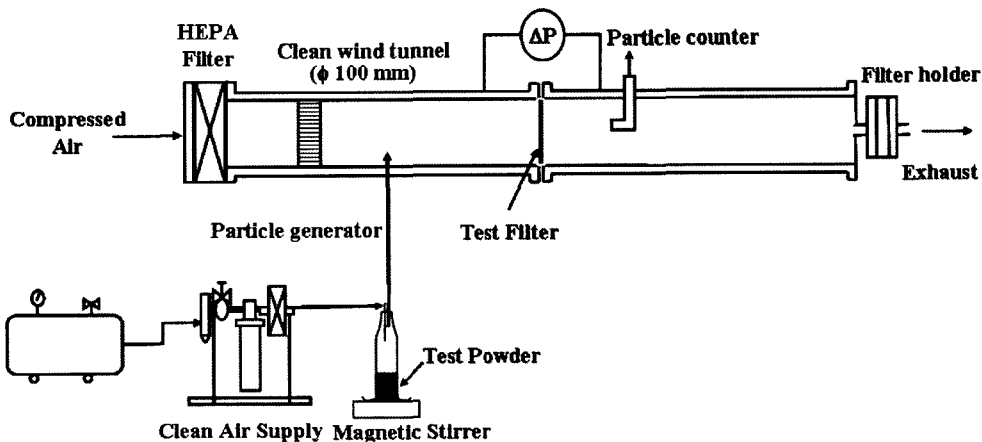


Fig. 2 Experimental setup for a filtration test

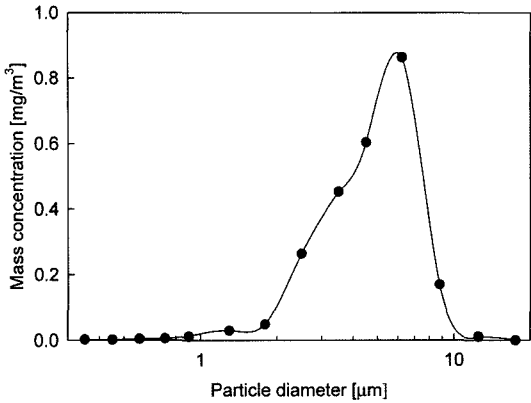


Fig. 3 Particle size distribution of introduced dusts based on mass

진성능에 미치는 영향을 파악하였다.

대상 에어필터의 집진효율을 측정하기 위하여 그림 2에 도시한 필터성능시험장치를 이용하였다. 필터를 통과하는 유속은 먼지를 제거하기 위해 설치된 HEPA Filter의 전단부에서 MFC(Mass Flow meter/ Controller, Bronkhorst)를 이용하여 조절하였고, 테스트용 필터의 차압은 미량차압계(Pressure transmitter, Model 616, Dwyer Instruments)를 이용하여 측정하였다. 에어필터의 집진효율을 측정하기 위해 ISO 표준 입자(A2 fine dust, Powder Technology Inc.)를 이용하였으며, 입자발생기로부터 발생된 입자의 질량기준

입경분포는 그림 3과 같다. 질량기준의 입경분포는 그림 2에 표시되어 있는 바와 같이 particle counter(Model 1.108, Grimm Aerosol Technik)를 이용하여 0.3-20 μm의 발생입자들의 개수농도를 측정하고, 발생된 입자들이 원형이며 실리카와 동일한 밀도(2.65 g/cm³)를 가진다고 가정하여 계산하였다. 그림에서 보는 바와 같이 6 μm에서 최대질량농도를 가진다는 것을 알 수 있다.

또한 에어필터의 집진효율은 테스트필터와 절대필터(Whatman®, GF/C)가 설치된 상태에서 일정유량으로 표준입자를 통과시킨 후 테스트필터에 포집된 먼지의 양과 절대필터(테스트 필터의 하류부에 설치)에 포집된 먼지의 양을 측정한 후, 식 (2)에 의해 계산하였다. 여기에서 W₁은 장착된 에어필터에 포집된 먼지의 양이고, W₂는 절대필터에 포집된 먼지의 양을 나타낸다.

$$\eta(\%) = \frac{W_1}{W_1 + W_2} \times 100 \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 입력손실

그림 4는 각각의 필터에 대해서 오일 도포전후의 여과속도에 따른 압력손실을 측정, 비교한 그래프이

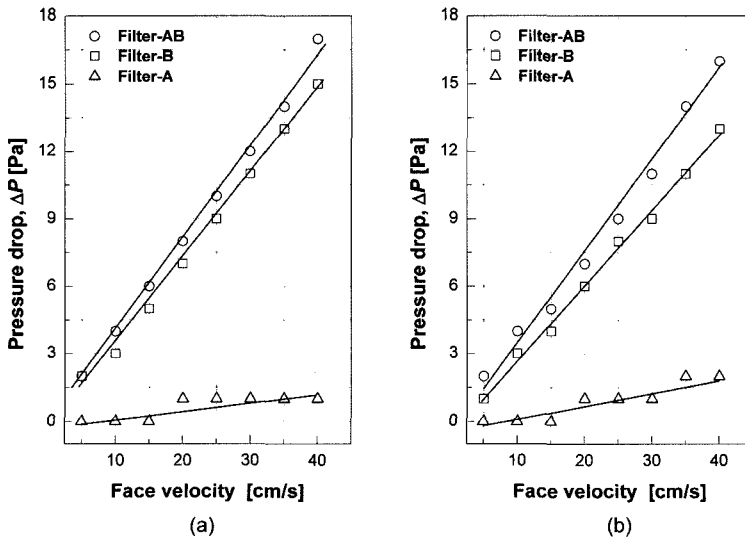


Fig. 4 Effect of face velocity on pressure drop of an air cleaner (a) uncoated filter, (b) oil coated filter

다. 여기서 (a)는 오일이 도포되지 않은 상태의 에어 필터, (b)는 오일이 도포된 상태의 에어필터를 사용하여 압력손실을 측정된 결과를 나타낸다. 그래프에서 볼 수 있는 바와 같이 오일을 도포하였을 때의 압력손실 값이 오일을 도포하지 않았을 때의 압력손실 값보다 작게 나타나고 있다(유속이 증가함에 따라 차이가 현저해짐(Filter-B)). 이러한 압력손실의 데이터로부터, 폴리우레탄 미세필터와 도포된 오일이 상호작용을 일으켜 필터의 내부적인 구조를 변화시켰다는 것을 알 수 있다.

3.2 집진효율

그림 5에는 각각의 필터에 대해서 오일 도포 전과 후의 집진효율을 여과속도별로 나타내었다. Filter-A, Filter-B 및 Filter-AB에 대한 실험을 각각 실시하였으며, 또한 각 필터별로 여과속도를 5, 10, 15, 20 cm/s로 나누어 실험을 실시함으로써 여과속도에 따른 집진효율의 변화를 비교, 관찰하였다.

그림에서 오일 도포 전의 실험 결과를 살펴보면, 조대필터인 Filter-A가 가장 낮은 40~50%의 집진효

율을 보였으며, 미세필터인 Filter-B의 경우 50~60% 정도의 효율을 나타내었다. 또한 두 가지 필터를 조합해서 사용한 Filter-AB의 경우 Filter-A에 의한 조대 입자 제거효과와 Filter-B에 의한 미세입자 제거효과가 동시에 작용하지만, 필터내로 유입된 입자에 대해서 Filter-B보다 약간 높은 제거효율을 나타냄을 알 수 있었다. 표 1에 나타낸 물리적인 특성치와 집진효율 값을 비교하여 살펴보면, 동일한 층진율(표 1참조)을 가진 필터에서 섬유경이 작을수록 높은 집진효율을 가진다는 것을 알 수 있다. 또한 유입되는 입자의 입경범위에서 필터의 집진효율은 여과속도와 비례하여 높아진다는 것을 알 수 있다.

그러나 조대 및 미세필터에 오일을 도포하여 여과 속도에 따른 집진효율을 살펴보면, 오일도포전의 집진효율 결과와 상이하게 Filter-A의 경우 여과속도가 낮을 때, 즉 5 cm/s의 여과속도에서 70%의 높은 집진효율을 나타내었고, 여과속도가 증가할수록 집진효율이 점차 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 유속에 따른 집진효율의 변화가 가장 큰 Filter-A의 경우 오일 도포로 인하여 낮은 여과속도에

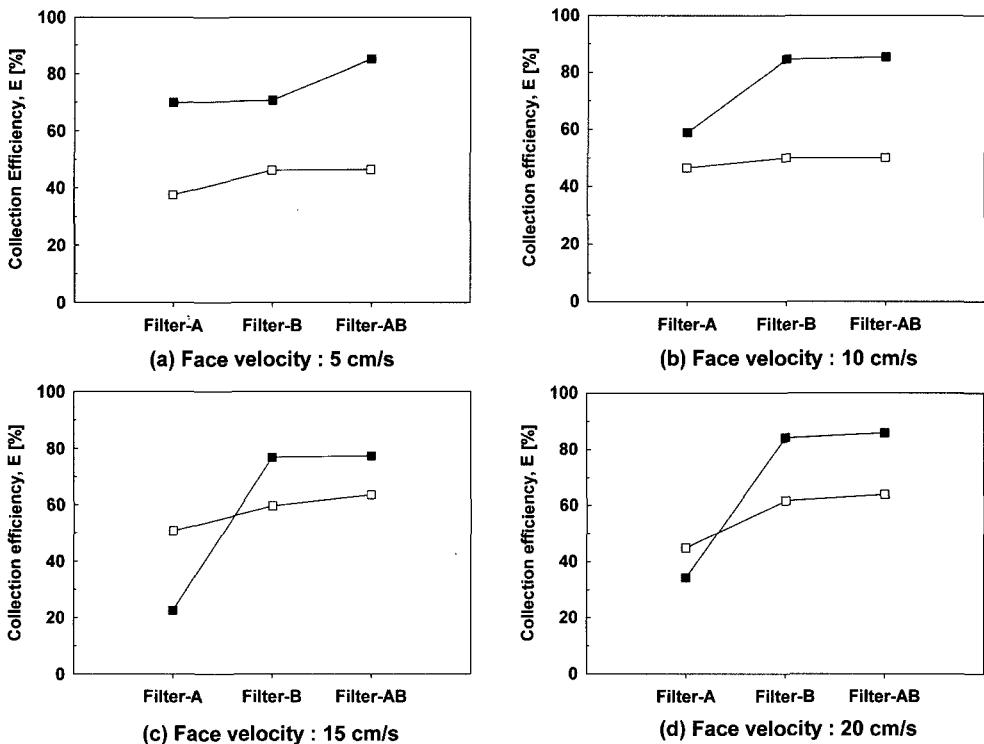


Fig. 5 Collection efficiency of a filter media as a function of face velocity (□ : uncoated filter, ■ : oil coated filter)

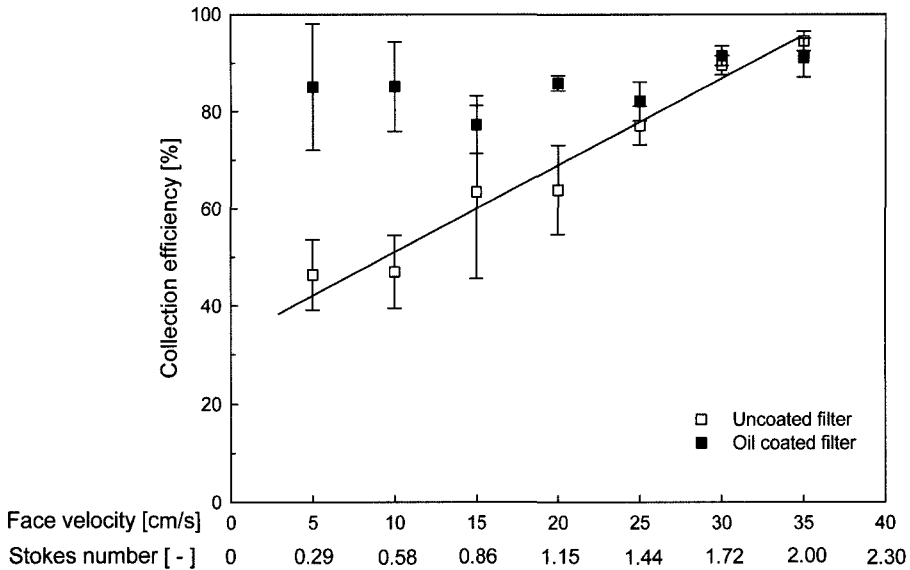


Fig. 6 Collection efficiency of a Filter-AB with face velocity and Stokes number

서 확산과 직접차단에 의한 집진효과가 높아져 집진 효율이 증가한 것으로 사료된다.

그림 6은 Filter-AB에 대해서 오일도포 전, 후의 집진효율을 여과속도와 관성력 파라메타인 Stk수의 함수로 나타낸 그래프이다. 여기에서 Stk수는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 g u}{18 \mu_d} \quad (3)$$

그래프에서 볼 수 있는 바와 같이 오일을 도포하지 않았을 때의 필터의 집진효율은 여과속도에 비례하여 지속적으로 증가하는 경향을 보인다. 반면에, 오일을 도포한 필터는 여과속도가 증가함에 따라 집진효율이 감소하다가 다시 증가하는 특성을 보인다. 즉, 여과속도가 25 cm/s 이하에서는 오일을 도포하지 않은 필터보다 오일을 도포한 필터가 높은 집진효율을 보이고 있으며, 그 이상의 여과속도에서는 거의 비슷한 집진효율을 나타낸다. 이는 필터에서의 미세입자 집진기작이 여과속도가 높아짐에 따라 확산과 직접차단에서 관성력으로 바뀌어 감을 의미한다. 다시 말해서 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 오일을 도포하지 않은 필터의 집진효율은 Stk수에 대하여 선형적인 관계를 가진다. 이로부터 이 필터에 대해서는 관성력이 주요 집진기작으로 작용한다는 것을 알 수 있다. 그러나 오일을 도포한 필터의 미세입자 집진기작이

낮은 여과속도에서는 관성력이외의 집진기작, 즉 확산과 직접차단이 지배적이며, 여과속도가 증가함에 따라 관성력 지배 영역으로 바뀌어 감을 알 수 있다.

3.3 필터의 성능지수

상기에서 고찰한 Filter-AB에 대하여 그 성능지수를 이용하여 필터로서의 성능을 비교하였다. 성능지수는 집진효율과 압력손실의 비로서 식 (4)와 같이 표현된다⁽⁷⁾.

$$q_F = \frac{-\ln(1-E/100)}{\Delta P} \quad (4)$$

필터의 성능지수 값(q_F)은 필터의 성능을 나타내는

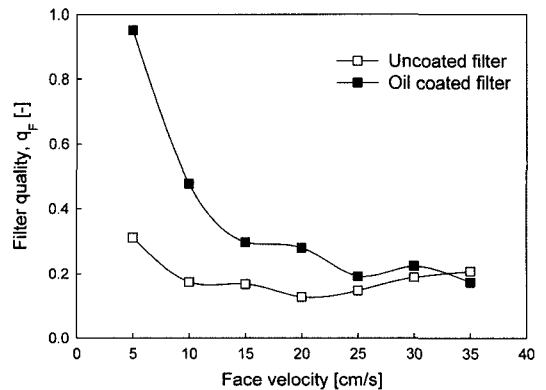


Fig. 7 Filter quality as a function of face velocity

지표이며, q_f 값이 높으면 우수한 성능을 나타낸다. 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 낮은 여과속도에서 오일을 도포한 필터의 성능이 월등히 뛰어나다는 것을 알 수 있다.

3.4 여과속도에 따른 오일의 손실효과

오일을 도포한 필터가 오일을 도포하지 않은 필터에 비해 낮은 압력손실에서 높은 집진효율을 가진다는 것을 보였지만, 차량용 에어클리너로서 사용하기 위해서는 도포된 오일이 엔진으로 유입되는 것을 최소화하여야 한다. 이에 따라 여과속도에 따른 오일의 손실효과를 확인하기 위해서 Test Filter로서 Filter-AB를 설치하고 청정공기를 유입하여, 여과속도에 따른 도포오일의 무게감량실험을 실시하였다. 테스트는 시내주행시 일반적으로 에어클리너에서 사용되는 여과속도의 범위(0~40 cm/s)로 하였다. 그림8에는 초기에 도포된 오일의 무게와 실험 후에 남아 있는 오일의 무게의 비를 여과속도의 함수로서 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 30분 운전 후 각 필터의 무게를 확인한 결과 여과속도에 따른 무게의 변화는 관찰되지 않았다. 그러므로 오일로 코팅된 에어필터를 차량용 에어클리너로서 사용하더라도, 엔진으로 오일이 유입되지 않는다는 것을 알 수 있다.

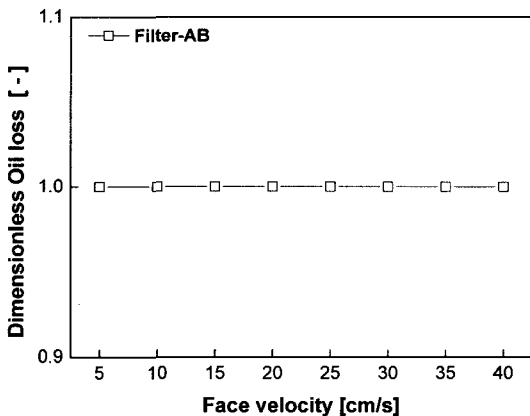


Fig. 8 Effect of face velocity on oil loss

4. 결 론

본 연구에서는 조대입자 및 미세입자가 외부공기

와 함께 엔진 내부로 유입되는 것을 방지하기 위해 사용하는 다양한 에어필터 중에서 재제조가 가능한 폴리우레탄 에어필터의 성능을 평가하였다. 테스트 결과, 오일을 도포하지 않은 필터의 경우 관성력이 주요 집진기작으로 작용하여 여과속도가 증가함에 따라 집진효율이 증가하는 경향을 보였다. 반면, 오일을 도포한 필터의 경우에는 낮은 여과속도에서는 확산과 직접차단에 의한 집진기작이 지배적으로 작용하여 오일을 도포하지 않은 필터보다 높은 집진효율을 보였으며, 여과속도가 증가함에 따라 오일을 도포하지 않은 필터와 비슷한 경향을 나타내었다. 또한 고점도의 오일로 도포된 폴리우레탄 필터를 에어클리너로 사용할 경우, 사용 여과속도 범위에서는 도포된 오일이 엔진으로 유입될 가능성이 거의 없다는 것을 알 수 있다.

결론적으로 재제조가 가능한 에어필터와 기존의 일회용 에어필터와 비교했을 때, 성능적인 측면에서 뿐만 아니라 경제적, 환경적인 측면에서 우수하기 때문에 이들의 사용이 적극 장려되고 권장되어야 할 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 부품소재종합기술지원사업에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) K. T. Kelsey, F. Xia, W. J. Bodell, J. D. Spengler, D. C. Christiani, D. W. Dockery and H. L. Liber, "Genotoxicity to human cells induced by air particulates isolated during the Kuwait Oil Fires", Environmental Research, 1994, Vol.64, Issue 1, pp. 18~25.
- (2) D. W. Dockery, F. E. Speizer and D. O. Stram, "Effects of inhalable particles on respiratory health of children", Am Rev Respir Dis, 1989, Vol.139, Issue 5, pp.87~94.
- (3) D. W. Dockery, J. Cunningham, A. I. Damokosh, L. M. Neas, J. D. Spengler, P. Koutrakis, J. H. Ware, M. Raizenne and F. E. Speizer, "Health effects of acid aerosols on North American children: respiratory

symptoms”, Environ Health Perspect, 1996, Vol.104, Issue.5, pp.500~505.

- (4) S. Rossi, F. Deflorian, M. Risatti, “Modified Taber apparatus and new test geometry to evaluate the reduction of organic coatings corrosion protective properties induced by abrasive particles”, Surface & Coatings Technology, 2006, Vol. 201, pp.1173~1179.
- (5) '06년 12월말 현재 자동차 등록 현황, 건설교통부,

2006. 12.

- (6) W. R. Stahel, “The utilization-focused service economy: resource efficiency and product-Life extension”, The greening of industrial ecosystems, 1994, Washington DC: National academy press., pp.178~191.
- (7) W. C. Hinds, Aerosol Technology, 2nd ed., 1999, John Wiley and Sons, Inc., New York.