

전기집진 기제를 조합시킨 DPF용 금속 폼 필터의 여과 특성

박 석 주^{*1)} · 이 동 근²⁾ · 김 진 현³⁾ · 조 규 백⁴⁾ · 김 홍 석⁴⁾ · 정 용 일⁴⁾

한국에너지기술연구원¹⁾ · 충남대학교 기계공학과²⁾ · 명지대학교 기계공학과³⁾ · 한국기계연구원⁴⁾

Filtration Characteristics of Metal Foam Filters for DPF Combined with Electrostatic Precipitation Mechanism

Seok Joo Park^{*1)} · Dong Geun Lee²⁾ · Jinhyun Kim³⁾ · Gyubaek Cho⁴⁾ · Hongsuk Kim⁴⁾ · Youngil Jeong⁴⁾

¹⁾Clean Energy System Research Center, Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Myongji University, Gyeonggi 449-728, Korea

⁴⁾Engine R&D Group, Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 7 August 2006 / Accepted 25 September 2006)

Abstract : Filtration studies, using simulated test nanoparticles or diesel nanoparticles, have been performed about Inconel foam filters for DPF combined with electrostatic precipitation. The simulated test particles were synthesized by laser ablation in the nitrogen atmosphere at the standard condition. The diesel particles were exhausted from the diesel engine driven on the condition of idle or load mode. Filtration efficiency of the metal foam filter is very low because most of particles are penetrated through the large pores of filter. However, the efficiency was considerably improved by applying the electric field to the filter and/or charging the nanoparticles. Nevertheless, the pressure drop of filter hardly increased because the filter-pores were not clogged by deposited particles and kept open.

Key words : DPF (디젤 매연입자 여과필터), Diesel particulate matter (디젤 입자상 물질), Metal filter(금속필터), Electrostatic precipitation(전기집진), Penetration rate(투과율)

Nomenclature

P : penetration rate
S_p : pore size, μm
U_f : filtration face velocity, cm/s
V_a : applied voltage, kV
η : filtration efficiency

1. 서 론

경유 자동차는 열효율이 높아 가솔린 자동차에

비하여 연비가 우수하고 이산화탄소 배출량도 20% 이상 적게 배출되기 때문에 석유 가격 상승과 지구 기후변화 대책 마련의 분위기 속에서 빠른 속도로 보급되고 있는 추세이다. 그러나 경유 자동차는 가솔린 자동차에 비하여 입자상 물질(particulate matter, PM)과 질소산화물(NO_x) 배출량이 훨씬 높아 대기오염의 주원인으로 지목되고 있다.

경유 자동차에서 배출되는 입자상 물질의 저감 방안으로 현재까지는 디젤 매연입자 여과장치인 DPF(diesel particulate filter)¹⁾가 가장 효율적인 것으로 알려져 있으며, 작동 원리는 배기관에 설치된 필터

*Corresponding author, E-mail: sjpark@kier.re.kr

터에서 매연 입자를 포집하고 일정 주기마다 포집된 입자들을 태워 필터를 주기적으로 재생하는 방식을 사용하고 있다.

현재 DPF용 필터로는 다공성 탄화규소(SiC) 또는 코디어라이트(cordierite) 등 세라믹 재료의 모노리스형 필터가 일반적으로 사용되고 있으나, 일부 외국 회사에서 생산 판매를 독점하고 있으며, 생산비용이 높고, 온도 구배에 따른 내열성이 취약하다는 단점이 있다.^{2,3)} 이러한 단점들을 극복하고 필터 구조 및 DPF의 다양한 형상 변경을 위하여 최근에는 기존의 세라믹 모노리스형 필터뿐만 아니라 세라믹 섬유 필터, 펠렛(pellet) 필터, 재결정 탄화규소(recrystallized SiC), 금속 섬유 필터, 금속 폼 필터 등의 여러 재료와 형태로 이루어진 대체 필터가 활발히 연구 개발되고 있다.⁴⁾

금속 폼 필터는 큰 기공들의 다공성 구조(porous structure)로 이루어져 있기 때문에 필터 재생을 위한 촉매분말의 코팅 처리에 효과적인 필터 소재가 될 수 있으며, 기계적 강도, 내식성, 내열성이 강한 필터로 사용이 가능하다. 특히 금속 폼 필터는 큰 기공들이 발달되어 있기 때문에 낮은 차압(differential pressure) 조건에서 운전이 요구되는 DPF용 필터로써의 활용이 가능하지만, 여과 효율이 낮다는 문제점을 안고 있다.

본 연구에서는 큰 기공 구조로 이루어진 DPF용 금속 폼 필터에 전기집진 메커니즘⁵⁾(electrostatic

precipitation mechanism)을 접목시켜 차압은 낮게 유지되면서 여과효율을 극대화시킬 수 있는 새로운 방식의 DPF 장치(일명 전기집진-필터장치⁶⁾) 개발을 시도하였다. 새롭게 설계된 DPF 장치에 대하여 모사 시험입자(simulated test particles)와 디젤 매연 입자의 투과율(penetration rate)과 차압의 변화를 측정함으로써 여과 성능이 우수한 새로운 DPF 장치 개발의 가능성을 제시하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 모사 시험입자 여과실험

실험 장치는 Fig. 1과 같이 매연입자와 유사한 체인(chain) 형상의 모사 시험입자를 제조할 수 있는 레이저 애블레이션(laser ablation) 기법을 이용한 나노입자 합성 장치와 전기 집진 기제가 조합된 여과 필터 홀더(filter holder)로 구성된다. 시험입자는 Nd:Yag laser(Continuum, Surelite III-10)로부터 출력 200 mJ/pulse인 파장 532 nm의 레이저 빔을 인코넬(Inconel) 재료의 벌크 시편 타겟(bulk sample target)에 조사하여 합성되었다. 합성된 나노크기의 시험입자는 애블레이션 챔버(ablation chamber) 내로 공급되는 상온(room temperature)의 질소 이송가스(carrier gas)에 실려 하류에 설치된 필터 홀더로 유입된다. Fig. 1에서와 같이 필터 홀더에 절연된 상태로 설치된 침 형상의 방전극에 고전압을 인가시키고 금속 폼 필터를 접지시킴으로써 침 끝단과 금속 폼

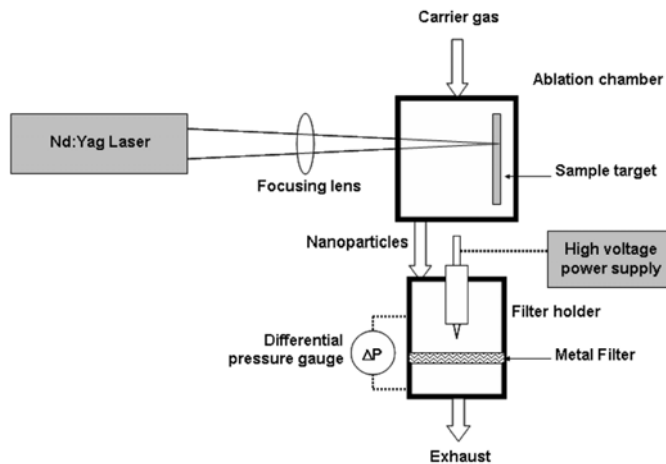


Fig. 1 Experimental apparatus

필터 사이에 높은 세기의 전기장이 형성되게 하여, 유입된 시험 입자에 쿨롱 힘(Coulomb force)을 작용시켜 금속 폼 필터 상에 시험입자를 전기집진을 통하여 부착 여과시켰다. 필터 양단의 차압 변화를 시간에 따라 측정하였으며, 필터 하류로 빠져나가는 입자의 농도분포를 DMA(differential mobility analyzer, TSI 3081)와 UCPC(ultra condensational particle counter, TSI 3025A)를 사용하여 실시간으로 측정하였다. 필터에 공급된 입자의 크기별 수농도에 대한 필터를 빠져나간 입자의 수농도의 비를 측정하여 필터의 입자 투과율 P(penetration rate)를 분석하였으며, 참고로 입자 투과율은 여과효율과 'η = 1 - P'의 관계식으로 표현된다. 실험 조건에 따른 필터의 입자 투과율을 분석하기 위하여 매 실험마다 사용하지 않은 새로운 필터를 필터 홀더 내에 장착한 후, 필터를 빠져나가는 시험입자의 입자 크기별 수농도를 채집시간(sampling time) 1분씩 10 회 측정하여 그 평균값을 사용하였다.

모사 시험입자를 이용한 여과실험의 실험조건을 Table 1에 요약 정리하였다. 레이저 애블레이션에 의하여 생성되는 시험입자를 필터 홀더로 이송시키기 위하여 공급되는 유량 1, 2, 3 slm의 질소 가스는 하류의 필터 홀더로 모두 유입되므로, 이 유량을 필터의 여과면적 7 cm²으로 나누면 여과 면속도(face velocity)는 2.4, 4.7, 7.1 cm/s가 된다. 금속 폼 필터 상에 전기장을 형성시키기 위하여 방전극에 인가된 전압의 세기는 - 7, - 9 kV이며, 방전극 끝단과 필터 사이의 거리 3.6 cm로 전압을 나눈 평균 전기장세기는 - 2, - 2.5 kV/cm가 된다. 인가전압이 - 7 kV인 경우는 코로나 방전 전류는 μA 단위 범위에서는 계측이

되지 않았으며, - 9 kV인 경우는 20 μA까지 흐르는 것으로 측정되었다. 실험에 사용된 필터는 인코넬 재질의 금속 폼 필터(Korea Nickel Co.)로써, 평균 기공 크기는 400, 600, 800 μm 이며, 필터 두께는 1.7 mm이다.

2.2 디젤 매연입자 여과실험

실제 디젤 매연입자에 대하여 본 필터 장치를 시험하기 위하여 Table 2와 같은 제원의 국산 RV 차량용 디젤 엔진의 배기 라인에서 DOC(diesel oxidation catalyst) 하단에 분지관(branch tube)을 설치하여 Fig. 1의 필터 홀더를 장착한 후, idle mode와 load mode (1940 rpm, 16.8 kgf-m)의 엔진 운전 조건에서 필터 홀더를 통하여 유출되는 디젤 매연입자의 입자크기별 수농도 분포를 희석장치(diluter, DEKATI DI-1000)와 SMPS(sequential mobility particle sizer, GRIMM)를 사용하여 실시간 측정하였다. 필터로 유입되는 디젤 매연 배출가스의 여과 면속도가 7.1 cm/s인 조건에서 평균 기공 크기가 400 μm인 필터에 대하여 인가전압에 따른 디젤 매연입자의 투과율을 측정하였다.

Table 2 Engine specifications

Direct-injection diesel engine with turbo-charger, intercooler and common rail injector	
No. of cylinder	4
Displacement volume	1991 cc
Max. torque & power	29.5 kgf-m @ 2000 rpm 126 PS @ 4000 rpm

3. 실험 결과

3.1 모사 시험입자 여과실험 결과

먼저 기공크기가 800 μm로 가장 큰 인코넬 폼 필터를 이용하여 4.7 cm/s의 여과속도로 필터를 빠져나가는 시험입자들의 입자크기별 수농도를 인가전압에 따라 측정하여, 필터의 입자 투과율을 분석하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이, 전압이 인가되지 않은 경우는 대부분의 입자들이 필터를 통과해 빠져나가지만, 코로나 방전이 일어나지 않는 - 7 kV의 전압이 인가된 경우는 직경 217 nm의 입자들이 7.7 %로 가장 많이 필터를 빠져나갔다. 217 nm보다 더

Table 1 Experimental conditions by simulated test particles

N ₂ carrier gas flow rate (slm*)	1, 2, 3
Filtration face velocity (cm/s)	2.4, 4.7, 7.1
Applied voltage (kV)	- 7, - 9
Mean electric field intensity (kV/cm)	- 2, - 2.5
Corona discharge current (μA)	0 ~ 20
Mean pore size of filter (μm)	400, 600, 800
* standard liter per minute	
※ Filtration area : 7 cm ²	
Distance between pin tip and filter : 3.6 cm	
Filter thickness : 1.7 mm	

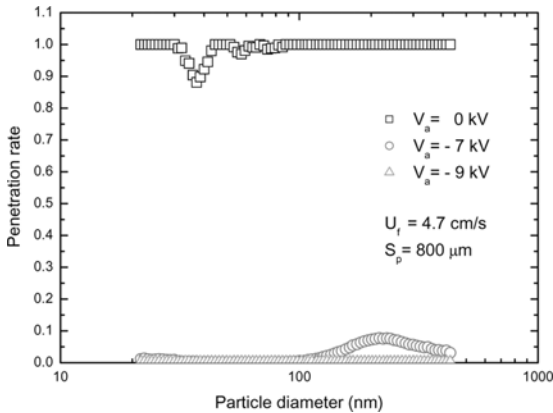


Fig. 2 Penetration rates at different applied voltages

큰 입자들과 더 작은 입자들의 투과율이 더 낮은 이유는 전기력에 의하여 필터의 고체 표면(solid surface)에 가까이 접근한 입자들이 관성(inertia) 및 차단(interception) 또는 브라운 확산(Brownian diffusion) 효과와 같은 전형적인 여과 메커니즘⁷⁾(filtration mechanism)에 지배를 받아 필터에 부착 제거되기 때문이다. 일반적으로 입자들이 필터의 기공을 따라 이동할 경우, 큰 입자일수록 관성 및 차단 효과에 의하여 여과효율이 증가하며, 작은 입자일수록 브라운 확산 운동에 의하여 여과효율이 증가한다. 코로나 전류가 20 μA 이하로 흐르는 -9 kV의 전압이 인가된 경우는 입자들이 코로나 방전에 의하여 발생된 많은 전자들에 의하여 충분히 하전⁵⁾(charging)되기 때문에 거의 모든 입자들이 필터에 의하여 제거되는 것을 알 수 있었다.

기공크기가 800 μm 인 필터에 대하여 여과속도에 따른 나노입자의 필터 투과율의 변화를 측정된 결과, 코로나전류가 충분히 흐르는 -9 kV의 전압이 인가된 경우는 대부분의 입자들이 여과되어 여과속도에 따른 투과율의 차이를 비교할 수 없었다. 그러나 코로나 전류가 흐르지 않는 -7 kV의 전압이 인가된 경우는 10% 이하의 입자들이 필터 하류로 빠져 나가기 때문에 여과속도에 따른 입자 투과율의 차이를 관찰할 수 있었다. Fig. 3에서와 같이 여과속도가 2.4 cm/s에서 4.7 cm/s로 증가함에 따라 입자의 투과율은 증가하지만, 여과속도가 4.7 cm/s에서 7.1 cm/s로 증가함에 따라 다시 입자 투과율이 감소하는 경향을 보였다. 여과속도의 증가에 따른 입자 투과율

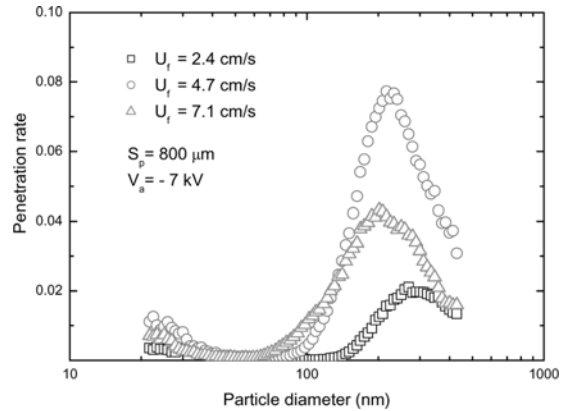


Fig. 3 Penetration rates at different flow rates

의 증가 현상은 필터를 지나는 입자의 속도가 증가하기 때문이지만, 다시 입자 투과율이 감소하는 현상은 증가한 가스 유속에 의하여 코로나 방전을 유발시키는데 필요한 가스 내에 존재하는 전자들의 방전극 주위로의 유입량이 증가하여, 아주 미미하지만 코로나 전류가 방전극과 필터 사이에서 μA 이하의 수준으로 흘러 일부 입자들이 미미하게나마 하전되기 때문인 것으로 사료된다.

인가전압이 -9 kV인 경우, 여과속도가 4.7 cm/s인 조건에서 기공크기가 서로 다른 금속필터에 대한 시험입자의 필터 투과율은 필터의 기공크기에 상관없이 거의 모든 시험입자들이 여과되는 것을 알 수 있었다. 필터의 기공크기에 따른 입자들의 투과율을 상대적으로 비교하기 위하여 코로나전류가 흐르지 않는 -7 kV의 전압이 인가된 경우에 대하여 여과속도가 4.7 cm/s인 조건에서 여과 실험을 수행하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이, 기공크기가 서로 다른 세 가지의 금속 폼 필터의 여과효율은 모두 92% 이상으로 측정되었으며, 기공크기가 작을수록 필터를 통과하여 투과되는 입자의 수가 감소함을 알 수 있었다. 또한 기공크기가 작은 필터일수록 투과율이 최대점인 입자의 크기도 더 작아지는 것을 알 수 있었다.

이상의 실험 조건에서 필터로의 입자 부착에 따른 필터의 차압 변화를 거의 볼 수 없었기 때문에, 필터 기공 내부로의 입자들의 침투를 통한 기공 막힘 현상을 기대하면서 여과속도를 24 cm/s로 증가시켜 1 시간동안 여과 실험을 수행하였다. 600 μm

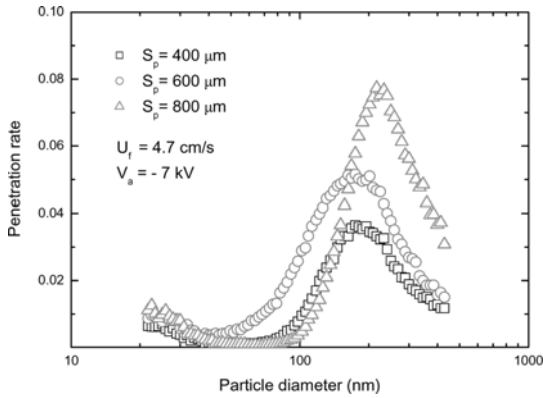


Fig. 4 Penetration rates of metal filters with different pore sizes at -7 kV in applied voltage

기공크기의 금속필터에 - 8 kV의 코로나 방전 개시 전압⁵⁾(corona discharge starting voltage)을 인가하면서 여과실험을 수행한 결과, Fig. 5에서와 같이 필터 양단의 차압이 최초 0.6 mmH₂O에서 1시간 후 1.7 mmH₂O로 상승함을 알 수 있었다. 이는 아주 미미한 차압 상승으로 기존 DPF용 필터들에 비하면 거의 무시할 수 있는 수준의 차압 변화이다. 물론 여과효율은 99 % 이상의 수준을 유지하였다.

이와 같이 대부분의 입자들이 필터에 의하여 부착 포집됨에도 불구하고 필터의 차압에 큰 변화가 없는 이유는 필터 표면에 부착된 입자 층이 Fig. 6의 SEM(scanning electron microscopy) 사진에서와 같이 필터의 기공을 완전히 막지 않고 필터의 고체 표면에 상류 방향으로 부착 형성되기 때문임을 알 수 있었다. 실제로 필터를 햇빛에 비추어 봄으로써

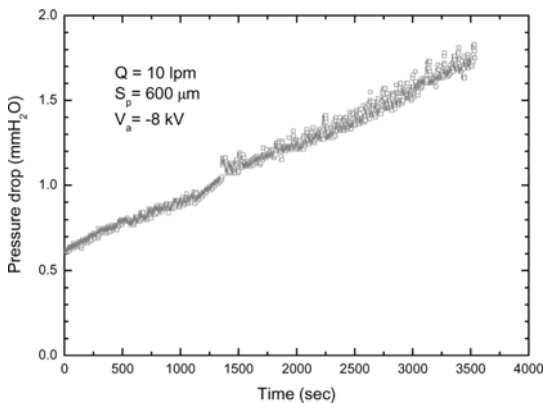


Fig. 5 Pressure drop along filtration time

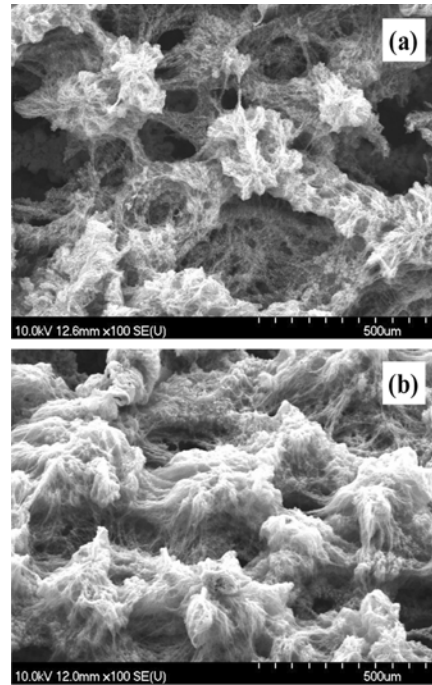


Fig. 6 SEM images of nanoparticles deposited on the metal filter; (a) a vertical image, (b) an inclined image

기공들이 뚫려있음을 확인할 수 있었다. Fig. 6(a)는 필터 표면을 수직으로 위 방향에서 찍은 사진이며, Fig. 6(b)는 필터를 기울여서 찍은 사진이다.

3.2 디젤 매연입자 여과실험 결과

먼저 idle mode로 운전되는 디젤 엔진에서 배출되는 디젤 매연입자를 배기라인의 분지관에 설치된 필터 홀더를 통과시켜 그 후단에서 측정하였다. Fig. 7의 필터가 홀더 내부에 장착되지 않은 경우('w/o filter'로 표시된 square symbol)의 입자 분포에서 나타난 바와 같이, idle mode의 운전 조건에서 배출되는 디젤 매연입자들은 이중 모드 분포(bimodal distribution)를 보인다. 이는 idle mode의 엔진 운전 시 배출되는 용해성 유기물질⁸⁾(soluble organic fraction, SOF)이 낮은 온도의 배출가스 분위기로 인하여 배기라인의 상류 부분에 위치하는 DOC의 촉매 반응에 의하여 제거되지 못한 상태로 DOC 하류로 유출되면서, 배출가스의 냉각에 의하여 용해성 유기물질이 응축되어 50 nm 이하의 작은 나노입자들이 생성되기도 하고, 입자계측기인 SMPS 전단의

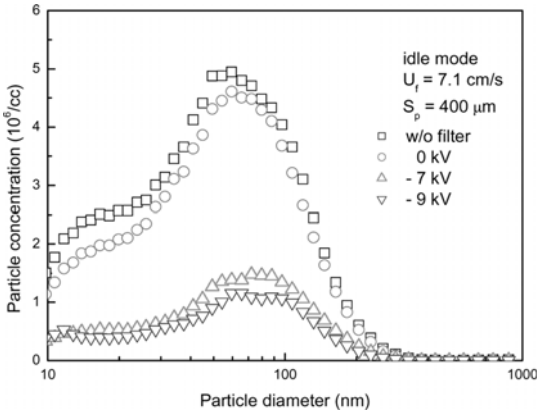


Fig. 7 Size distributions of diesel particles exhausted from the filter holder at the driving condition of idle mode

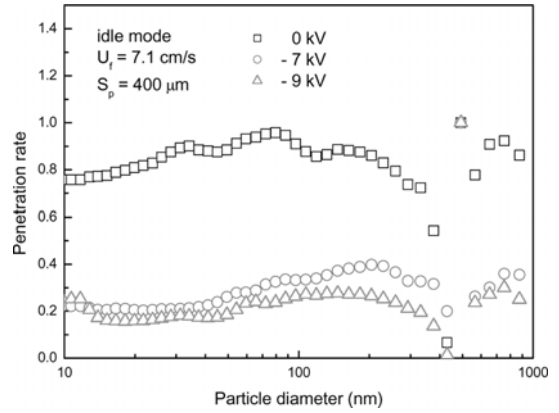


Fig. 8 Penetration rates of diesel particles passing through the filter at the driving condition of idle mode

회석장치로 유입된 용해성 유기물질이 상온의 회석 공기를 만나 응축됨으로써 부차적으로 미세한 나노 입자들이 생성되기 때문이다. 일반적으로 경유 자동차에서 대기 중으로 배출되는 용해성 유기물질들은 상온의 대기 공기에 의하여 응축되어 아주 작은 나노입자들을 생성시킴으로 인하여 도심의 대기 오염에 상당한 악영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.⁹⁾

평균 기공크기가 400 μm인 필터가 필터 홀더 내에 장착된 경우는, 디젤 매연입자들 중 미량의 일부 입자들이 브라운 확산 또는 차단 및 관성 효과에 의하여 필터 표면에 부착 제거되기 때문에 Fig. 8에서와 같이 투과율이 90 % 수준으로 감소하였다. 그러나 방전극에 -7 kV 또는 -9 kV의 고전압을 인가함으로써 필터를 투과하여 유출되는 매연입자의 수농도는 상당히 줄어들어, 40 % 또는 20 % 이하로 입자의 투과율이 감소하였다.

다음은 load mode의 디젤 엔진 운전 시, 필터 홀더 출구에서의 입자 수농도를 측정하여 필터의 입자 투과율을 분석하였다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 Fig. 7의 idle mode 경우와는 달리 배출 가스의 온도가 높아 디젤 엔진에서 배출되는 SOF 성분이 DOC의 충분한 축매 반응에 의하여 제거되기 때문에, 필터 홀더에 유입되는 디젤 매연입자들의 직경별 수농도 분포는 단일 모드(single mode)의 가우스 분포(Gaussian distribution)를 보였다. 그러나 부하가 걸리는 load mode의 엔진 운전 조건에서는 많은 양의

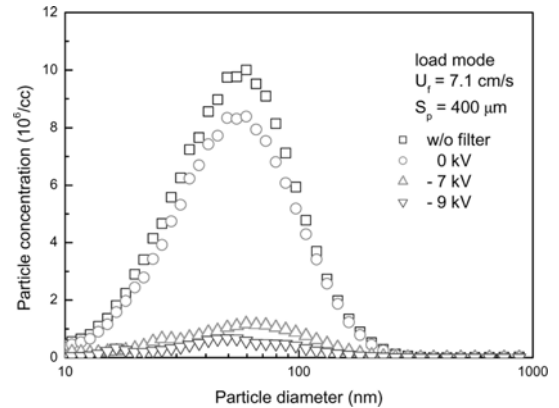


Fig. 9 Size distributions of diesel particles exhausted from the filter holder at the driving condition of load mode

연료가 공급되기 때문에 더 많은 디젤 매연입자들이 발생함을 알 수 있었다.

전압이 인가되지 않은 상태의 금속 폼 필터를 통과하여 하류로 투과되는 매연입자들의 수농도는 여전히 높게 나타났으며, 투과율은 Fig. 10에서와 같이 약 80 % 수준으로 분포하였다. 그러나 방전극에 -7 kV 또는 -9 kV의 고전압을 인가함으로써 필터를 투과하여 유출되는 매연입자의 수농도는 idle mode에서와 마찬가지로 상당히 줄어들어 20 % 또는 10 % 이하로 입자의 투과율이 감소하였다. load mode에서의 입자 투과율이 idle mode에서보다 더 낮은 경향을 보이는데, 이는 필터를 지나 빠져나가는 SOF와 같은 가스상 오염물질들이 load mode의 경우 훨씬 적기 때문에, 입자 계측을 위한 채집(sampling) 과

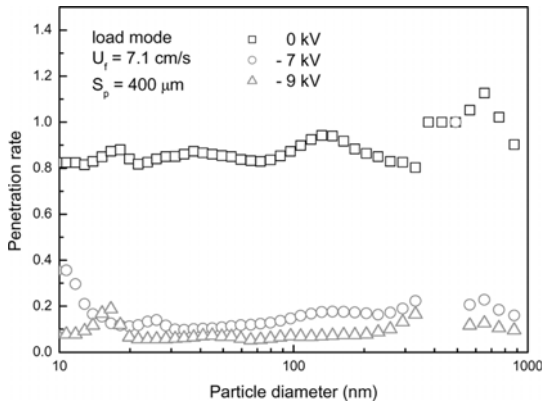


Fig. 10 Penetration rates of diesel particles passing through the filter at the driving condition of load mode

정에서의 희석 가스에 의한 응축 현상으로 생성될 수 있는 나노입자의 수가 상당히 줄어들기 때문이다. 하지만 상온의 질소 가스 분위기에서 모사 시험 입자를 이용한 여과 실험의 결과에 비하여 디젤 매연입자의 여과실험 결과에서 더 높은 투과율을 보이는 이유는 디젤 엔진에서 배출되는 가스의 온도가 높고, 여전히 가스상 물질들이 어느 정도 존재하고, 디젤 매연입자의 물리화학적 특성 등의 여러 가지 복잡한 현상들이 여과 과정에 개입되기 때문인 것으로 사료된다.

참고로 Fig. 8과 Fig. 10에서 300 nm 이상 크기의 입자에 대한 투과율 결과들은 디젤 엔진에서 배출되는 디젤 입자의 수능도가 너무 낮기 때문에 심하게 산란되어 투과율 분석에 의미가 없음을 알 수 있다.

4. 결론

큰 기공 구조로 이루어진 인코넬 재질의 DPF용 금속 폼 필터에 전기집진 효과를 적용하여 레이어 배열에 의하여 형성된 모사 시험입자를 이용한 여과 특성 실험과 디젤 엔진에서 배출되는 디젤 매연입자에 대한 여과 특성 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 가스상 오염물질이 개입되지 않은 상온의 질소 가스 분위기에서 코로나 전류가 흐르지 않는 조건인 고전압이 인가된 경우 90 % 이상의 모사 시험입자들이 여과되었으며, 가스 유속이 증가함에 따라 필터를 관통하는 입자의 속도 증가로 투

과율이 상승하기도 하지만, 반대로 미미한 코로나 방전의 발생으로 입자들이 미세하게 하전되어 투과율이 감소하기도 하는 복잡한 여과 현상을 보였다. 또한 코로나 전류가 흐르지 않는 조건에서 금속필터의 기공 크기가 클수록 필터를 통과하는 입자의 수는 증가하였다.

- 2) 코로나 전류가 흐르는 조건의 고전압이 방전극과 필터 사이에 인가된 경우, 필터로 유입되는 대부분의 모사 시험입자들은 포집 여과되었으나, 부착된 입자 층에 의한 필터의 기공 막힘 현상이 발생하지 않아 필터의 차압은 거의 증가하지 않았다.
- 3) idle mode로 운전되는 디젤 엔진으로부터 배출된 이종모드 분포의 디젤 매연입자들은 금속 폼 필터를 통하여 90 % 정도 투과되었으나, 방전극과 필터 양단에 고전압을 인가함으로써 투과율을 20 % 이하로 줄일 수 있었다.
- 4) load mode로 운전되는 디젤 엔진으로부터 배출된 단일모드 분포의 디젤 매연입자들은 금속 폼 필터를 통하여 80 % 정도 투과되었으나, 방전극과 필터 양단에 고전압을 인가함으로써 투과율을 10 % 이하로 줄일 수 있었다.
- 5) 낮은 차압 조건에서 사용 가능한 금속 폼 필터의 낮은 여과효율을 향상시키기 위하여 필터에 추가로 전기집진 효과를 부여함으로써, 디젤 매연입자의 여과성능을 극대화시킬 수 있는 새로운 DPF 장치를 개발하였다.

References

- 1) Y. Jeong and M. Yoon, "Trend of Diesel Particulate Filter Trap Technology," *Auto J.*, Vol.24, pp.39-43, 2002.
- 2) Y. Jeong, "The Trend of Exhaust Emission Standard and Diesel Particulate Filter Trap Technology for Diesel Powered Vehicles," *Busan Engine International Symposium*, pp.3-7, 2001.
- 3) A. Mayer, L. Hofer, J. Schlatter, H. Burtscher and J. Czerwinski, "Health Effects, Measurement and Filtration of Solid Particles Emitted from Diesel Engines," *Technical Report of*

- GRPE-PMP, pp.6-13, 2001.
- 4) N. Taoka, O. Kazushige, S. Hong, S. Hiroki, Y. Yutaka and K. Teruo, "Effect of SiC-DPF with High Cell Density for Pressure Loss and Regeneration," SAE 2001-01-0191, 2001.
 - 5) S. Jr. Oglesby and G. B. Nichols, Electrostatic Precipitation, Marcel Dekker, New York and Basel, 1978.
 - 6) S. J. Park, S. H. Lee, J. H. Lim, S. D. Kim and K. S. Lim, "Electrostatic Precipitation Filter Device for the Filtration of Particulate Matter Exhausted from Automobiles," Patent Application Number 2006-0058855, 2006.
 - 7) W. C. Hinds, Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
 - 8) Y. S. Yoon, M. H. Oh, M. K. Kang and C. B. Lee, "Characteristics of Particulate Matters in Exhaust Emissions from a Heavy Duty Diesel Vehicle," Int. Conf. Proceeding, IPC-13, KSAE, pp.1042-1045, 2005.
 - 9) D. B. Kittelson, "Engines and Nanoparticles: A Review," J. Aerosol Sci., Vol.29, pp.575-588, 1998.