포집량에 따른 p-DPF의 정화효율 및 BPT 특성에 관한 실험적 연구

오 광 철* · 이 경 복 · 이 춘 범

자동차부품연구원 친환경디젤/하이브리드연구센터

An Experimental Study on Filtration Efficiency and BPT Characteristics by PM Loading in Partial-diesel Particulate Filter

Kwang-chul Oh* · Kyung-bok Lee · Chun-beom Lee

Diesel & Hybrid R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Dongnam-gu,
Chunan-si, Chungnam 330-912 Korea

(Received 20 June 2011 / Revised 8 August 2011 / Accepted 8 August 2011)

Abstract : The number of vehicles applied diesel engine are rapidly rising for fuel economy. Accompanying this trend, application of an after-treatment system is strictly required as a result of reinforced emission regulation. The Diesel Particulate Filter (DPF) system is considered as the most efficiency method to reduce particulate matter (PM) by car makers but also in retrofit market. In recently, various kinds of partial flow DPF are widely used for proper filtration performance and reducing of pressure drop but it is difficult to define the characteristics of these filters because the filtration mechanism is obscure according to the status of these systems. In this paper we investigated the characteristics of cell open type DPF according to the status of filter especially, PM loading. The PM loading mass in the p-DPF are predicted from increase of differential pressure of DPF and the trend of filtration efficiency so that we can measure filtration efficiency and Balance Point Temperature (BPT) of this p-DPF according to PM loading.

Key words : p-DPF(부분유량 매연여과장치), PM(입자상 물질), Filtration efficiency(정화효율), BPT(균형점 온도), Pressure drop(압력손실)

Nomenclature

cpsi : cells per square inch, cell/in²
 ΔP : differential Pressure, mbar
BPT : balance Point Temperature, °C
r : cell open ratio

1. 서 론

디젤엔진은 확산 연소 형태의 특성 때문에 질소 산화물(NOx) 생성뿐만 아니라 부분적 과농 지역에 서는 매연이 다량 생성되는 문제를 근본적으로 안

고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 고압분사 등과 같은 분사 전략의 향상과 유동에 의한 혼합 조절 등으로 많은 배출 가스의 저감을 이루었지만 현재 강화되는 배출 규제를 만족시키기 위해서는 후 처리의 개발은 필수적이다.

그 중 입자상물질의 제거를 위한 DPF(Diesel Particulate Filter)는 입자상물질 제거기술 중에 가장 효과적인 기술^{1,2)}로 인식되고 있다. 따라서 최근에는 운행차 보급(Retrofit)시장 뿐만 아니라 대부분의 제작사에서도 필수적인 시스템으로 고려되고 있고 이러한 시스템의 최적화에 많은 시간을 할애하고 있다. DPF는 입자상물질인 PM을 필터방식으로 포집하고 재생하는 기술이다. 재생방식은 촉매에 의

*Corresponding author, E-mail: kooh@katech.re.kr

한 자연재생식³⁾과 전열장치나 버너^{4,5)}에 의한 강제 재생방식이 있으며, 최근에는 저온에서의 재생효율을 증대시키기 위해 자연재생방식과 강제재생방식이 복합된 복합재생방식이 활발히 연구되어 적용^{6,7)}되고 있다. 그 중에 발열 DOC(Diesel Oxidation Catalyst)를 이용하여 엔진에서 후분사된 미연연료를 이용한 재생방식은 현재(Euro-4)차량에 적용되고 있다.

운행차 보급시장(Retrofit Market)에서도 초기에는 자연재생방식의 DPF 시스템을 많이 적용하였으나 적절한 운행 정보의 분석을 통한 차량 선정(BPT 이상온도의 비율)의 한계 때문에 적용범위가 제한적이었다. 그리고 자연재생방식은 근본적으로 DPF 시스템의 재생을 조절할 수 없기 때문에 재생효율의 감소나 배기온도 조건의 감소에 의해 PM이 정상적으로 재생되지 못하면 배압에 의한 연비 손실을 뿐 아니라 비정상적인 재생에 의한 필터의 파손의 원인⁸⁾이 된다.

한편, 최근 들어 이러한 단점들을 해결하고 약 50% 정도의 PM을 정화할 수 있는 개방단 형식의 Corrugation Structured Foil과 Metal Flat Fleece 가 층층히 겹쳐진 형태의 금속형 부분유량 DPF가 개발되어 높은 수준의 PM 정화성능을 요구하지 않는 EURO-4 수준의 대형차량 등에 적용되고 있다. 이와 같은 부분유량 필터(partial DPF)는 매연이 다공성의 금속 소결판에 일정량 쌓이면 더 이상 매연이 쌓이지 않고 배출되어 필터가 막히지 않는다는 장점이 있으나 배출가스 온도가 낮아 자연재생이 안 되는 조건에서는 매연정화효율이 급감하고 필터에 쌓였던 매연이 고유량 조건에서 순간적으로 blow-off가 발생하기도 한다.⁹⁾ 그리고 부분 유량 타입의 필터는 필터 상태에 따라 매우 다른 특성을 보이기 때문에 한상태의 성능으로 그 특성을 규정짓기가 매우 어렵다.

본 논문에서는 필터의 상태에 따른 cell open type의 partial DPF의 특성을 파악하기 위하여 동일한 DOC 촉매 후단에 open 홀의 크기를 변경한 p-DPF의 PM 퇴적량에 따른 정화 효율의 변화와 BPT 특성의 변화를 관찰하였다. 그리고 full 타입 DPF의 특성과 비교를 통하여 p-DPF의 특성의 변화를 이해하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 부분 유량 DPF(Partial DPF)

본 실험에서는 COT(Cell Open Type)-PDPF을 특성을 파악하기 위해 PM loading 따른 ESC mode (ND-13)에서의 정화 효율과 BPT test를 수행할 수 있도록 구성하였다.

Fig. 1에 (a)와 (b)는 본 실험에 사용된 COT 필터의 후단 모습을 보여준다. 기존의 wall flow 타입의 DPF의 플러징 부분에 작은 홀을 뚫으로써 배기가스의 경로를 만들었다. 홀 크기에 따라 PM 퇴적량 및 홀을 통과하는 유량과 wall을 통과하는 유량의 비율($r=Q_1/Q_2$)이 변화하고 그에 따라 필터의 포집 효율 및 BPT특성이 변화한다. 그림 (c)는 후단의 사진을 이용하여 측정된 홀의 크기의 분포를 보여준다. 평균 Hole 직경은 0.7mm와 0.9mm인 COT 필터로 각 필터의 홀들의 오차는 각각 ± 0.06 과 0.03mm이다.

Fig. 1 Hole diameter of COT filter (a) hole size=0.7mm, (b) hole size=0.9mm

2.2 엔진 및 실험장치

Fig. 2는 본 실험에 사용된 실험 장치의 개략도이다. 엔진은 실린더 부피가 3.907 리터인 4기통의 TCI 엔진을 이용하였고 배기 후단에 차례대로 DOC, p-DPF가 장착되었다. DOC 전단의 배기가스 온도를 측정하기 위한 온도 센서와 DOC+DPF시스템의 차압을 측정하기 위한 차압계가 설치되었고 DPF 시스템 후단에 PM의 blow-off 특성 파악을 위한 광투과 방식의 opacity-meter를 설치하였다.

정화 효율 측정을 위해서 MDT(Micro Dilution Tunnel)를 이용하였고 필터 전후단에서 가스를 샘플링하여 여지에 쌓인 무게를 비교하여 정화 효율을 측정하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 엔진 및 p-DPF 시스템의 사양을 보여준다.

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Specification of Engine and DPF system

engine	D4DA TCI	
	Displacement (cc)	3,907
	Max power (ps/rpm)	155/3,200
	Max torque (kgm/rpm)	38/1,800
	Combustion system	DI
	NO _x (g/kwh, ESC)	5.76
	PM (g/kwh, ESC)	0.25
	BSFC (g/kwh, ESC)	236
DOC	Dia. × L	7.5" × 4.0"
	Volume (liter)	2.9
	Cell size (cpsi)	400
DPF	Dia. × L	7.5" × 9"
	Volume (liter)	6.5
	Cell size (cpsi)	100

Fig. 3 NO₂ conversion of DOC (1500rpm)

BPT(Balance Point Temperature)측정은 1500rpm에서 배기온도를 증가시키면서 수행이 되었다. BPT 온도는 쌓이는 PM과 산화되는 PM이 평형을 이루는 온도로 BPT에 영향을 미치는 큰 요소는 엔진의 PM 배출 특성과 필터의 정화 효율 그리고 쌓인 PM의 저온산화에 가장 큰 요소인 DOC 촉매의 NO₂ 전환 효율이다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같은 온도에 따른 NO₂ 전환 효율 특성을 갖는 DOC 촉매를 사용하였다.

2.3 실험 방법

개방 홀 크기가 다른 COT 필터의 PM loading 양에 따른 정화효율을 측정하기 위하여 PM loading 시간을 증가시키면서 PM을 쌓고 ESC mode(ND-13)에서 정화효율을 측정하였다. 필터 내의 PM을 모두 태워주기 위해서 기관회전수 3,000rpm, 토크 300Nm (배기가스 온도 450°C)에서 1시간 동안 유지시키고 차압(PM loading=0에서의 차압, 기준차압)을 기록하였다. 그런 다음 PM loading을 위해 배기가스의 온도가 255°C인 기관회전수 1,500rpm, 토크 150Nm 인 조건에서 시간을 증가시키면서 PM 로딩량을 조절하였다.

Partial 필터이기 때문에 시간에 따른 정화 효율이 감소하며 이는 PM의 storage volume의 감소 및 다공성의 벽으로의 유량의 증가 등에 의한 것으로 생각된다. 따라서 정확한 PM 로딩량을 구하기 위해서 1시간 마다 10분 동안의 포집시간을 두어 PM loading 사이에 정화 효율을 측정하였다. Fig. 4는 그런 과정

Fig. 4 PM loading in PDPF according to elapsed time (PM loading: 1500rpm, 150Nm, base PM emission=1.13g/(liter×hr))

을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 PM이 필터에 쌓임에 따라서 p-DPF의 정화 효율이 감소하고 실제 필터에 쌓인 PM의 양은 아래 그림에서 엔진에서 배출되는 PM과 순간마다 배출된 PM의 차이 부분의 면적으로부터 유추해볼 수 있다.

이러한 PM loading 조건에서의 DPF 시스템의 차압의 변화를 측정한 결과가 아래의 Table 2과 같다. Table 2에서 보는 바와 같이 두 p-DPF 모두 PM loading 시간에 따라 차압증가가 감소함을 알 수 있다. 이는 Fig. 4와 같이 p-DPF의 정화 효율의 감소에 기인한 현상이다.

Table 2 Differential Pressure by Soot loading time

DPF_DP(mbar)	0 hour	4 hour	8 hour
Hole size=0.7mm	24.5	36.7	46.1
Hole size=0.9mm	22.3	29.2	34.8

ESC 모드에서 초기 p-DPF의 정화 성능을 측정하기 위해서 필터가 없는 상태에서 엔진에서의 PM 배출량을 5회 측정하여 그 값들의 평균을 구하였고, p-DPF를 장착하여 PM의 배출량을 측정하였다. 이렇게 초기 정화효율을 측정하고 전술한 바와 같이 PM을 로딩하여 ESC 모드를 연속으로 수행하여 정화효율의 변화를 살펴보았다. 그리고 PM loading에 따른 BPT의 변화를 1500rpm에서 토크를 증가시켜 배기가스온도를 10°C씩 높여 살펴보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 정화효율

Full DPF와 개방된 홀 크기가 다른 두 p-DPF의 ESC 모드에서의 PM 정화효율결과를 Fig. 5에 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 Full DPF의 경우 10회 정도의 측정에서 비교적 일정한 91% 정도의 정화효율을 얻었다. 그리고 p-DPF의 경우, hole 크기가 0.7mm와 0.9mm의 경우 각각 78%와 65%의 평균 정화효율을 나타내고 있다. Full DPF의 경우는 초기 burning 후의 포어가 막힌 후에는 정화 효율이 변화가 크지 않음을 볼 수 있다. 그러나 p-DPF의 경우 정화 효율 변동이 full DPF에 비해 크게 나타났다. 이는 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 정화 효율이 주기적인 변동의 결과이다. 홀 크기가 0.7mm의 경우, 정화 효율 변동이 75%~79%사이로 주기적인 변동 특성을 명확히 볼 수 있다. 이는 홀 크기의 deviation의 결과로 유추할 수 있다. 상대적으로 작은 홀이 초기에 PM 정화 효율에 기여가 크다가 어느 정도 쌓이면 다른

Fig. 5 Filtration efficiency (ESC mode, w/o PM loading)

Fig. 6 Trend of filtration efficiency according to the number of ESC mode

Fig. 7 Change of filtration efficiency for PM loading (1500rpm, 150Nm, exhaust gas T=255°C)

사이즈로 옮겨가서 정화 효율이 낮아지다가 어느 이상 쌓이면 재생이 되면서 다시 작은 사이즈 홀로 돌아오는 순환을 보여준다. 반면에 0.9mm의 경우는 정화 효율이 낮아서 이러한 순환이 보다 길어짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 엔진운전조건(1500rpm, 150Nm)을 고정하고 PM을 로딩하면서 시간 마다 측정된 정화 효율을 보여준다. 로딩 조건은 전술했듯이 1500rpm, 150Nm에서 수행되었고 정화 효율은 이 조건에서 10분간 PM을 샘플링하여 p-DPF 시스템이 없는 PM 배출량과 비교를 통하여 측정되었다.

고온의 배기가스 조건인 ESC 모드의 정화 효율의 변화와는 달리 두 실험 샘플 모두 PM이 로딩되면서 정화 효율이 감소하는 모습을 보이고 있다. 그 원인으로는 PM 로딩 시 배기가스 온도가 250°C정

Fig. 8 The effect of exhaust gas distribution on filtration efficiency in modified ESC mode (hole size=0.7mm)

도로 낮기 때문에 촉매가 제 역할을 못하는데 기인한다. 따라서 p-DPF는 사용 온도 변화에 따라 정화 효율의 변화가 생김을 알 수 있고 hole 사이즈가 작을수록 정화 효율의 감소가 두드러짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 온도에 대한 정화 효율의 변화 특성을 살펴보기 위해 ESC 모드에서 토크를 낮추어 측정된 정화 효율의 변화를 보여준다. ESC 모드에서 토크를 60%로 변경한 경우 모드가 반복될수록 정화 효율이 감소함을 알 수 있다. 배기온도에 따른 정화 효율의 감소특성을 명확히 보여주고 있다.

1500rpm, 150Nm에서 PM을 필터에 로딩시킨다음 ESC 모드에서 정화 효율의 변화를 살펴보았다.

Fig. 9 Recovery of filtration efficiency in ESC mode according to PM loading

PM 로딩을 4시간했을 때 홀 크기가 0.7mm의 경우 ESC 모드 첫 번째에서 65%의 정화 효율을 얻을 수 있었다. 이는 로딩이 없을 때에 비해서 13% 정도의 정화 효율의 감소가 일어난 결과이다. 그러나 ESC 모드를 반복 수행한 경우 5회 이후 다시 PM 로딩이 안 된 정화 효율로 회복함을 알 수 있다. 첫 회 ESC 모드에서는 PM loading 유량에 비해 늘어난 배기유량(ESC 2번 모드)에 의해 blow-off의 영향이 배기가스 온도의 증가에 의한 포집된 PM의 산화의 영향보다 지배적이어서 정화 효율이 많이 감소하는 결과를 보이나 이후 배기가스의 온도 증가의 효과가 커지면서 초기의 효율을 회복하는 결과를 보인다. 8시간 로딩한 결과도 전체적인 경향은 4시간의 결과와 같고 초기의 정화 효율이 4시간에 비해 7% 더 감소된 모습(정화 효율: 58%)을 보인다. 홀 사이즈가 0.9mm인 경우에는 4시간, 8시간 PM 로딩시 10%, 20%의 정화 효율의 감소를 보이고 회복이 0.7mm에 비해 빠름을 알 수 있다. 이는 ESC 모드 첫 회에 blow-off가 0.7mm에 비해 크게 일어났다고 유추해 볼 수 있다.

3.2 BPT 특성

앞 절에서는 정화 효율 측면에서 p-DPF의 특성을 살펴보았다. 정화 효율의 결과에서 알 수 있듯이

Fig. 10 Tendency of balance point temperature according to PM loading (hole size=0.7mm, 1500rpm)

p-DPF는 PM 로딩량 및 배기가스 온도에 따라서 정화 효율이 변화하기 때문에 PM 로딩량이 일정하게 유지되는 조건은 정화 효율의 유지 및 blow-off 최소화 측면에서 중요하다. 본 절에서는 PM 로딩에 따른 BPT(Balance Point Temperature) 변화를 살펴보았다.

Fig. 10은 hole 크기가 0.7mm인 p-DPF의 PM loading에 따른 BPT의 경향을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 PM 로딩 시간이 길어지면 길어질수록 BPT가 낮아짐을 알 수 있다. 이는 PM이 필터에 쌓임에 따라 p-DPF의 정화효율 감소의 영향으로 생각된다. Fig. 7의 결과와 같이 p-DPF내에 PM이 로딩되면서 PM이 축적될 수 있는 공간이 감소하고 그에 따라 PM 정화효율이 감소한다. 따라서 쌓이는 PM의 양과 산화되는 PM의 양이 균형이 되는 온도, 즉 BPT가 낮아지는 결과를 보인다.

홀 크기에 따른 영향을 살펴 보기 위하여 홀 크기가 0.8mm, 0.9mm인 PDPF에 0.7mm와 같은 시간을 로딩하여 비교하였다. Fig. 11은 홀 사이즈에 따른 BPT 변화를 보여준다.

Fig. 11은 hole size를 증가하면서 BPT를 측정 한 결과이다. 동일한 촉매 시스템에서 hole size가 증가할수록 BPT 온도가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 앞에서 언급했듯이 홀 크기 변화에 따른 투과 유량 비율($r=Q_1/Q_2$, Fig. 1)의 변화에 기인한다고 볼 수 있다. 홀 사이즈가 커질수록 투과 유량 비가 커지고 촉매와 접촉하는 확률이 감소한다. 따라서 BPT 온

Fig. 11 Balance point temperature according to open hole size at PM loading time=750min (engine speed=1500rpm)

Fig. 12 Comparison of BPT between Full and cell open type partial DPF (engine speed=1500rpm)

도가 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 12는 full DPF의 BPT와 pDPF의 BPT를 비교한 그림이다. full DPF의 BPT는 pDPF의 BPT 변화와 다르게 PM loading에 따라 변화가 거의 없다. 이는 DPF의 정화효율이 PM loading에 따라 변하지 않고 쌓이는 부분이 명확하며 모든 유량이 포러스 월(porus wall)을 투과하기 때문이다. pDPF의 투과 유량비율이 크면 클수록 PM loading이 작은 경우 촉매와의 접촉을 줄이기 때문에 BPT가 높다. 그러나 PM이 로딩되면서 pDPF의 정화 효율이 감소하고 그에 따라 BPT가 감소하는 결과를 보여 주고 있다.

4. 결론

본 연구는 cell open type의 p-DPF의 특성을 파악하기 위하여 필터의 상태에 따른 정화 효율과 BPT를 full DPF와 비교하여 설명하였다.

- 1) cell open type p-DPF의 정화 효율은 open cell의 홀 크기가 증가함에 따라 감소한다. 이는 PM이 쌓일 수 있는 부피의 감소로 설명된다.
- 2) 정화 효율은 배기가스 온도에 따라 크게 변화함을 알 수 있었다. BPT보다 작은 온도, 즉 255°C인 경우 확연히 정화효율이 선형적으로 감소하였으나 배기가스 온도분포가 275°C 이상이 15% 이상이 조건에서는 초기 정화 효율을 유지함을 알 수 있었다.
- 3) p-DPF의 BPT는 PM loading에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이는 PM이 로딩되면서 낮은 배기 온도에서 정화효율의 감소에 기인한다. 그러나 PM로딩이 작은 경우에는 투과 유량비($r=Q_1/Q_2$, Fig. 1)가 클수록 높은 BPT를 보였다. 이는 촉매와 접촉할 수 있는 DPF 포러스 wall로의 유량감소에 의한 영향이다.
- 4) 따라서 p-DPF의 특성은 PM 로딩상태 및 사용조건(배기가스 온도, 배기가스 농도)에 따라 확연히 다르며 사용 조건에 적절한 정화 효율의 설정이 중요하다.

후 기

본 연구는 지식경제부 부품소재 국제협력사업의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) M. W. Vincent, P. J. Richards and T. J. Rogers, "Effective Particulates Reduction in Diesel Engines through the Use of Fuel Catalyzed Particulate Filter," Int. J. Automotive Technology, Vol.3, No.1, pp.1-8, 2002.
- 2) A. G. Konstandopoulos and M. Kostoglou, "Reciprocating Flow Regeneration of Soot Filter," Combustion and Flame 121, pp.488-500, 2000.
- 3) H. Zheng and J. M. Keith, "Ignition Analysis of

- Wall-flow Monolith Diesel Particulate Filters,” Catalysis Today 98, pp.403-412, 2004.
- 4) S. K. Oh, D. S. Baik and Y. C. Han, “Performance and Exhaust Gas Characteristics on Diesel Particulate Filter Trap,” Int. J. Automotive Technology, Vol.3, No.3, pp.111-115, 2002.
 - 5) Y. Kong, T. Kozakiewicz, R. Johnson, C. Huffmeyer, J. Huckaby, J. Abel, J. Baurley and K. Duffield, “Active DPF Regeneration for 2007 Diesel Engines,” SAE 2005-01-3509, 2005.
 - 6) Y. Ham, D. Kim and K. Kim, “A Study on the PM Oxidation Characteristics of Electrical Heater DPF System,” Transactions of KSAE, Vol.14, No.1, pp.183-190, 2006.
 - 7) J. Lee, G. Cho, H. Kim and Y. Jeong, “A Study on PM Regeneration Characteristics of Diesel Passenger Vehicle with Passive Regeneration DPF System,” Transactions of KSME(B), Vol.31, No.2, pp.188-194, 2007.
 - 8) S.-W. Rah, Y.-K. Choung and K.-C. Oh, “An Experimental Study on Active Regeneration Timing for the Minimization of Fuel Penalty in Active Regeneration DPF System Using Diesel Injection,” Transactions of KSAE, Vol.17, No.5, pp.91-96, 2009.
 - 9) K. C. Oh, C. Lee and T. Cho, “Uncontrolled Regeneration Characteristics of SiC DPFs using DPF Test Rig,” Transactions of KSAE, Vol.16, No.2, pp.80-86, 2008.
 - 10) A. Mayer, J. Czerwinski, P. Comte and F. Jaussi, “Properties of Partial-flow and Coarse Pore Deep Bed Filters Proposed to Reduce Particle Emission of Vehicle Engines,” SAE 2009-01-1087, 2009.
 - 11) Y. Park, Y. Choi, H. Jung, N. Kim and J. Lee, “A Study on Emission Reduction Performance of a Partial Flow Diesel Particulate Filter,” Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.248-253, 2006.