〈학술논문〉 DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.5.358

연속재생 DPF의 재생 성능에 미치는 차량 운행패턴의 영향

황 진 우* · 이 창 식†

(2008년 12월 30일 접수, 2009년 3월 26일 수정, 2009년 3월 28일 심사완료)

Influence of Driving Pattern on Regeneration Performance of Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter

Jin Woo Hwang and Chang Sik Lee

Key Words: BPT(Balance Point Temperature), CSF(Catalyzed Soot Filter), DOC(Diesel Oxidation Catalyst), DPF (Diesel Particulate Filter), PM(Particulate Matter), SLI(Soot Loading Index)

Abstract

This paper is to investigate the influence of driving patterns of slow and high speed vehicles on the performance of continuously regenerating diesel particulate filter(DPF) system matched with operating conditions in field application. The DPF performance test for field application was carried out for two identical DPFs installed to slow and high speed vehicles. A slow speed vehicle was selected among local buses which have driving patterns to repeat running and stop frequently, while a high speed vehicle was prepared to have long route of high speed over 60km/h like inter-city buses. In this test, the regeneration performance on the DPF of slow speed vehicle deteriorated because of high soot load index(SLI) in spite of same balance point temperature(BPT) distribution for high speed vehicle. The DPF of slow speed vehicle melted in the end because the rapid increase of back pressure caused high temperature over 1200℃ in the ceramic wall of DPF. The PM components like ash collected to the filter in the DPF were analyzed in order to investigate the cause of the defect and provide an operation performance of DPF system. In the result of the analysis, high levels of lubrication oil ash(Ca, Mg, P, Zn) were detected.

1. 서 론

디젤기관으로부터 배출되는 입자상 물질의 획기적인 저감을 목표로 적용되고 있는 매연여과장치(DPF : Diesel Particulate Filter) 부착 사례가 전 세계적으로 확산되고 있는데, 국내에서도 “운행경유자동차 배출가스 저감장치·저공해엔진 인증방법 및 절차 등에 관한 규정(환경부고시 제2005-16호)”에 따라 DPF 인증이 이루어지고 있으며 2008년 현재 수도권을 중심으로 100,000대 이상 부착 운행되고 있다.

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : cslee@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0427 FAX : (02)2281-5286
* 한양대학교 대학원 기계공학과

DPF는 디젤 엔진 배출가스 중의 PM을 벽류유동(wall flow)에 따른 유동저항으로 필터에서 포집하고 필터를 재생시키기 위해 포집된 PM을 저온에서 산화 또는 강제로 연소시켜 제거하는 배기후처리기술이다. 현재까지 상용화된 기술로 운행차에 가장 널리 적용되는 시스템은 PM의 자연발화 개시온도인 550~600℃ 이하의 300℃ 수준에서 PM을 산화 연소시키는 촉매를 적용한 자연재생방식 DPF 시스템(passive DPF system)이 있으며, 이 시스템은 경유 차량의 운행 중 배기온도 조건이 충분할 경우 별도의 외부열원 없이 엔진 자체 배기 열만으로 필터의 재생이 가능하다.

촉매방식의 DPF는 PM의 포집과 필터 재생이 연속해서 발생되기 위해서는 운행 중 엔진배출 배기온도조건이 재생성능 및 장치의 내구성을 보장하기

위한 가장 중요한 요소로 작용한다. 적용배기온도조건을 설정하거나, DPF 재생성능을 평가하기 위하여 현재까지는 재생평형온도(BPT: Balance Point Temperature)를 동력계상에서 정량적으로 측정하는 방식을 채택하여 왔고, BPT온도 이상의 운행조건에서 다양한 실차시험 연구가 진행된 바 있다.[1~3]

BPT는 DPF 시스템에서 엔진에서 배출되는 PM량보다 PM의 산화제거량이 동등 이상이 되는 엔진의 운전영역에 대하여 배기온도의 값으로 표현한 것이며 BPT 온도에서는 장치 전단 배기압력이 떨어져 배압증가율이 0이하가 된다.

운행차에서 DPF장치를 적용할 수 있는 배기가스 온도 조건으로는 일반적으로 BPT 온도의 1일 누적 분포율을 사용하고 있다. 그러나 동일한 BPT 온도의 누적 분포를 나타내더라도 차량 운전 특성에 따라 BPT 온도의 지속시간 등이 상이한 관계로 재생성능도 크게 차이날 수 있을 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 동일한 수준의 재생평형온도(BPT)의 누적 분포율을 갖는 차량 중 매연여과장치(DPF) 적용 시 재생이 원활히 일어나는 고속 차량과 재생성능이 떨어져 필터 용손(melting) 등의 결함이 발생하는 저속 차량에 대하여 운행패턴을 비교분석하고 운행패턴이 재생성능에 미치는 영향을 분석하여 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 저속 및 고속 차량의 운행 패턴 및 재생성능 분석을 위하여 Table 1과 같이 동일한 제원을 가지는 촉매방식 연속재생 DPF를 각 차량에 적용하여 실험하였다.

촉매방식 DPF는 Fig.1과 같이 코팅된 필터 전단에 산화촉매, 즉 DOC가 장착되어 있다. 필터 전단에 위치한 DOC는 NO의 산화반응 및 배출가스를 산화시켜 발열을 일으키고 후단의 필터에 코팅되어 있는 촉매가 추가적인 NO 산화반응을 일으켜 전체적인 촉매반응 영역이 증가되어 NO의 산화 개시온도를 더 낮출 수 있다.[1]

운행특성에 따른 장치 성능을 비교 평가하기 위하여 BPT 온도(300℃) 분포율이 3~5%로 동등 수준을 나타내는 평균시속 27 km/h의 저속 차량 1대와 평균시속 63 km/h의 고속차량 1대를 각각 선정하여 운행특성을 분석하고 장치 재생성능을 확인하였다. 저속 차량은 출발 정지를 자주 반복하고 오르막 운전이 많은 마을버스 중에서 선정하였으며 고속차량은 정속 중부하 운전이 많은 시외버스 중에서 선정하였다.

재생성능을 확인하기 위해서 각 차량에 대하여 일일 10시간 이상 및 총 20일 이상 주행하면서 일일 평균 배압 상승을 확인하였으며 저속 및 고속 차량에 부착된 엔진은 동일한 엔진으로써 제원은 Table 2와 같고 연료는 황함량 30ppm(wt%) 이하의 초저유황 경유를 사용하였다.

DPF 장치의 설치는 엔진의 과급기로부터 1.5m 하류 위치에 설치하였으며, DPF가 머플러 기능을 병행하므로 별도의 머플러는 부착하지 않았으며,

Table 1 Specification of the DPF

Item	DOC	CSF
Material	Cordierite	Cordierite
Cell density	62 cell/cm^2	31 cell/cm^2
Diameter	266.7 mm	266.7 mm
Length	76.2 mm	304.8 mm
Volume	4,255 cc	17,019 cc

Table 2 Specification of the test engine

Item	Spec.	Item	Spec.
Displacement	11,149 cc	compression ratio	16.5
Charge air	NA	Max. Power	235 / 2,200 (kW/rpm)
No. of cylinder	6 Inline	Max.Torque	1,085/1,400 (NM/rpm)
Fuel Injection	Bosch PS3000	Bore × Stroke	130 × 140 (mm)
Manufacturing Year	2001	Emission level	Euro-2

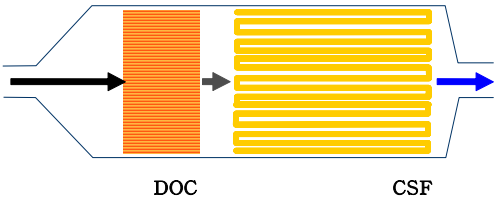

Fig. 1 Configuration of the DPF system

Fig 2와 같이 장치 전단에 배기온도센서, 배기압력센서, 흡기유량을 계산하기 위한 엔진속도 및 흡기온도압력센서를 장착하여 주행 데이터를 분석하고 재생성능을 확인하였다. 시험주행은 각각 5,000km 이상 주행하였다.

시험차량에서 측정된 센서 값으로 필터 내부에 포집된 매연의 축적량을 추정할 수 있으며, 이론적 기준은 다공질 매체에서 압력강하와 매체를 통과는 유체의 유량에 대한 관계를 정의한 Darcy's Law를 기초로 하였다.[4]

$$\frac{Q_{exh}}{A} = \frac{\Delta P}{\mu RL}$$

여기서, Q_{exh}는 다공질 매체인 필터를 통과하는 배기유량(m^3/hr)을, A는 필터의 유효면적(m^2)을, ΔP는 필터에서의 압력강하(mbar)로 필터의 배압, 즉 배기압력($B.P$:back pressure)과 같고, μ는 유체의 점성계수(mbar.s), R은 한계값(restriction number), 그리고 L은 필터의 두께(m)를 나타낸다. 여기서, L과 μ는 필터의 특성에 따라 고정되는 상수이고, 필터 내에 매연이 포집될수록 필터를 통과하는 유체의 유효면적(A)이 감소되고 이에 수반하여 배기압력($B.P$)이 증가하게 된다. 필터 내의 포집된 매연농도지수는 이 공식을 변형하여 도출할 수 있으며, 단위배기유량에 대한 배압을 매연 부하 지수(*SLI*)로 정의하고 다음의 식과 같이 나타내었다.

$$SLI = \frac{\mu RL}{A} = \frac{B.P}{Qexh}$$

$B.P$ = Exhaust Back Pressure(mbar)

Q_{exh} = Exhaust Flow Rate(m^3/s)

동일 배기유량 조건에서 필터의 배압이 상승하면 SLI가 증가하고 이는 최초의 필터에 매연이 포집된 정도를 지시하는 기준이 될 수 있다.

여기에서 $B.P$는 배기가스 압력으로써 배압센서로부터 초당 1개의 데이터를 측정하였고 $Qexh$는 시간당 배기유량으로써 표준상태의 흡기유량을 배기가스의 온도와 압력에 따른 공기밀도로 환산하여 계산하였다.

실차시험에서 활용한 데이터 취득장치의 구성과 그 제원은 각각 Fig. 2와 Table 3에 나타난 바와 같다.

그리고 이상이 발생한 저속차량의 DPF장치는 분해하여 내부에 축적된 PM 성분을 분석하여 엔진오일에 의한 영향을 평가하였다. PM 성분분석 절차 및 방법으로, Fig. 3과 같이 필터 용손이 발생한 장치를 분해하여 필터에 부착된 PM을 필터의 전단, 중단, 후단별로 각각 20g의 샘플링하고, 샘플링한 시료를 교반기(shaker)에서 30분간 혼합한 후, PM입자성분의 분광 흡수를 돕기 위해 탄소(Carbon)를 PM입자에 코팅한 후, 분광분석기(EDS: energy dispersion spectroscopy)에 투입하여 PM 성분을 분석하였다. 분광 분석기는 원자의 에너지 궤도 차이를 이용하여 성분비를 분석하는데 그 주요 제원은 Table 4와 같다.

Table 3 Specification of vehicle data monitoring system

Model	ACT-B OBD Unit
Power input	DC 7~24 V
Boost pressure-temperature sensor	Pressure 70~270 abs.kPa Temperature -40~130℃
Engine RPM sensor	Magnetic type
Vehicle speed sensor	GPS sensor type
3 channel Temperature sensor	K-type thermocouple 0~1000 ℃
1 channel back pressure sensor	Diaphragm type 0~1 bar

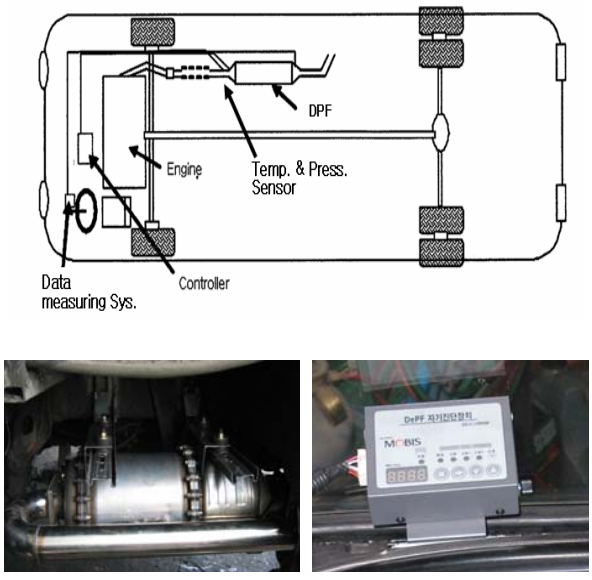

Fig. 2 Configuration of vehicle data monitoring system

Table 4 Specification of energy dispersive X-ray spectroscopy

Model	INCAEnergy EDS]
Energy Resolving Power	1000~10000 cps
Detection Atom	Be(4)~U(92)
Detection Limit	0.15%

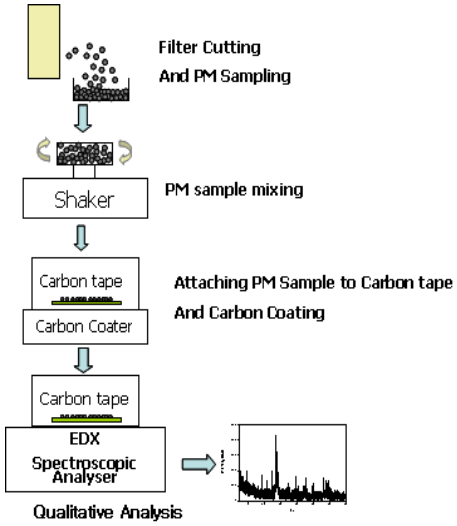

Fig. 3 Schematic of the PM sampling and analysis

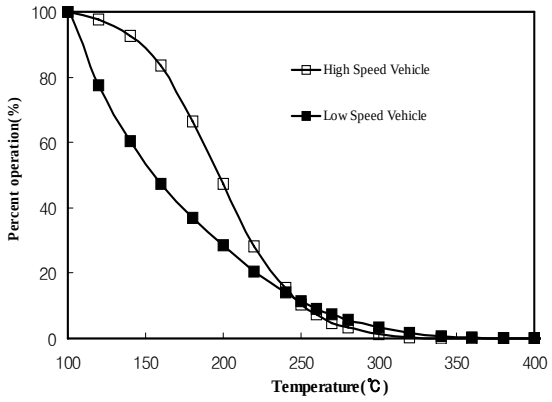

Fig. 4 Daily distribution rate of exhaust temperature

3. 실험결과 및 고찰

3.1 배기가스온도특성 분석

3.1.1 일일누적 온도 분포

Fig. 4는 장치 장착 전 저속차량 및 고속차량에 대하여 장치가 위치할 머플러 전단의 배기관에서의 배기온도를 1주일간 측정하여 평균한 누적배기온도분포(temperature histogram)를 나타낸 것이다. 저속차량에서 배기온도는 연속재생 DPF의 BPT 온도 수준인 300℃ 이상이 5.2%, 고속차량은 2.8%로써 저속차량이 더 높은 분포율을 나타내고 있지만 250℃ 이하에서는 출발 정지를 반복하는 저속차량이 훨씬 낮은 온도분포 특성을 나타내고 있다. 특히 촉매 활성화가 힘든 150℃ 부근에서는 30%이상 차이를 보이고 있다.

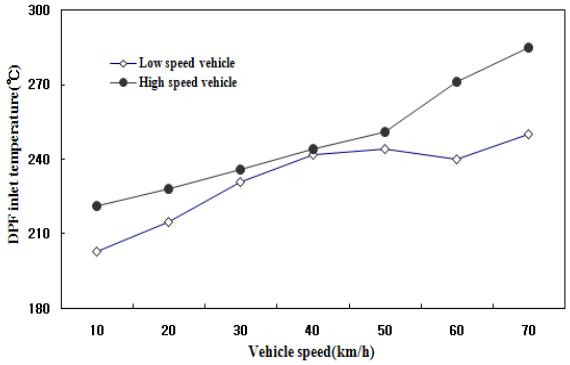

Fig. 5 The comparison of DPF inlet temperature distribution based on vehicle speed

저속 차량의 경우 출발 시 고 부하 운전으로 배기가스 온도는 증가하지만 온도가 지속되기 전에 차량이 정차되는 운행패턴으로 300℃ 이하 온도 분포 중에서 150℃ 이상이 50% 미만으로 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 영향으로 저속차량의 평균 배기가스 온도는 162℃ 이었으며 고속차량은 207℃이었다.

3.1.2 차속별 온도분포

운행조건에 따른 배기가스 온도 특성을 확인하기 위하여 저속차량 및 고속차량의 일주일간 차량 속도별로 배기가스 온도를 측정하여 Fig 5에 나타내었다. 저속차량은 출발 정지 반복의 운행패턴의 영향으로 저속에서 배기가스의 저온 및 고온이 넓게 분포되어 상대적으로 고속차량의 주 운전영역 범위내의 온도 분포인 250℃ 안팎의 온도분포가 낮게 되어 속도별 전체 평균 온도는 Fig. 5와 같이 속도 전 구간에 걸쳐 고속 차량 보다 평균 온도가 낮게 분포되었다. 이는 부하변동이 큰 저속운전과 공회전이 연속되어 배기가스 온도가 지속되기 전에 온도저하가 일어나기 때문

인데 이로 인해 300℃ 이상의 고온 분포는 Fig. 4와 같이 고속차량과 동등 수준 이상이지만 전체 평균온도 및 250℃ 안팎의 온도분포는 고속차량에 비해 낮아지는 것으로 판단된다.

그리고 40 km/h 속도에서 평균 배기가스 온도가 240℃로써 저속 및 고속 차량이 거의 동일한데 이는 정지운전이 잦아 온도확보가 힘든 저속차량일지라도 동일 속도에서 엔진부하가 높아 배출가스 상승률이 높기 때문인 것으로 사료된다.

3.2 매연 부하지수(*SLI*) 분석

Fig. 6 및 7은 실차 주행 중 배기유량, 배압, 배기온도를 측정하여 4시간동안의 단위배기유량 에 대한 매연 부하 지수를 나타낸 것이다.

단위시간당 부하지수 변화율(△*SLI*/s)은 저속차량이 고속차량보다 3.3배 높은 수준이었다.

출발 정지를 반복하는 저속차량의 경우 저속 고부하 운전에서 배기유량 증가에 비해 재생 가능한 온도의 지속 시간이 짧아 배압 증가율이 증가하는 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 저속차량일 경우라도 출발 시 고 부하 운전에 의한 BPT 온도 도달 빈도수가 높아 누적분포율은 동등한 수준인 것으로 나타났다. 여기서 부하지수 변화율이 높다는 것은 배기온도 미확보로 매연 재생율이 낮아져 단위 배기유량에 대한 배기가스 압력이 증가하는 것을 의미하는 데 장치 용손이 발생하는 한계점 설정에도 사용될 수 있을 것이다. 따라서 연속재생 DPF를 운행경유차 적용가능성에 대한 정량적 기준을 설정하기 위해서는 BPT 누적분포율 뿐만 아니라 필터 물성 및 촉매 효율에 따라 차이는 날 수 있지만 적정 부하지수 증가율이 반드시 검토되어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 8은 100℃이하가 80% 이상 존재하는 공회전 위주의 극저온차량에 대하여 배기유량, 배압, 배기가스온도, 그리고 부하지수를 나타낸 것인데 평균 온도 110℃ 이하로 배기가스 온도가 낮아 연속재생 DPF적용을 위한 배기가스 온도 확보가 힘든 차량일지라도 △*SLI*/s은 $5x10^{-7}$로 고속차량의 1/60 수준임을 알 수 있다. 이렇게 온도가 낮아 연속재생 DPF 적용이 곤란할 것으로 판단되는 차량에서도 부하지수가 낮아 장기간 사용에도 필터 용손 등의 문제가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

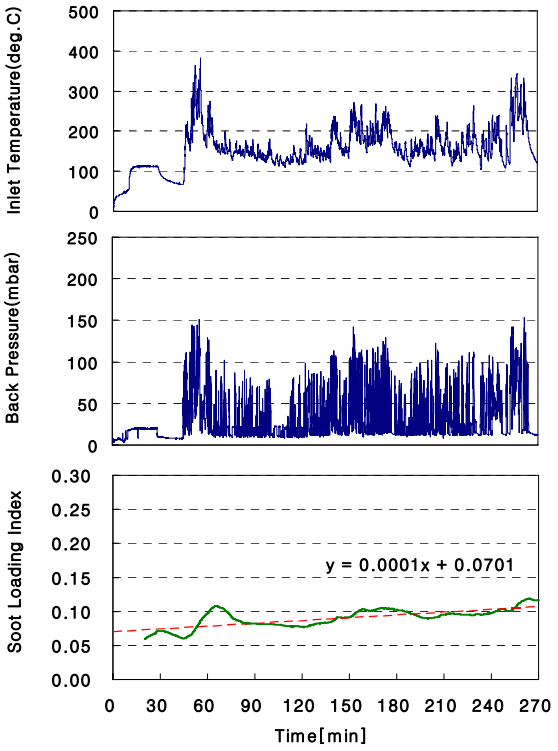

Fig. 6 Soot Loading index of low speed vehicle

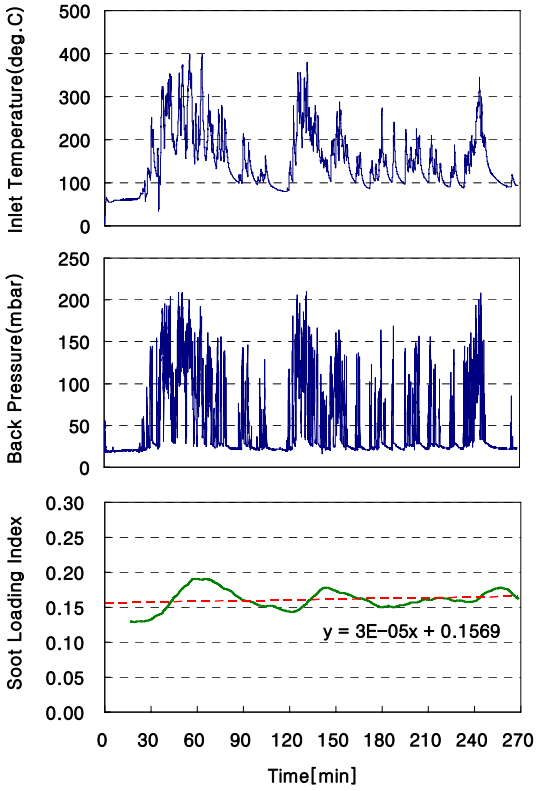

Fig. 7 Soot loading index of high speed vehicle

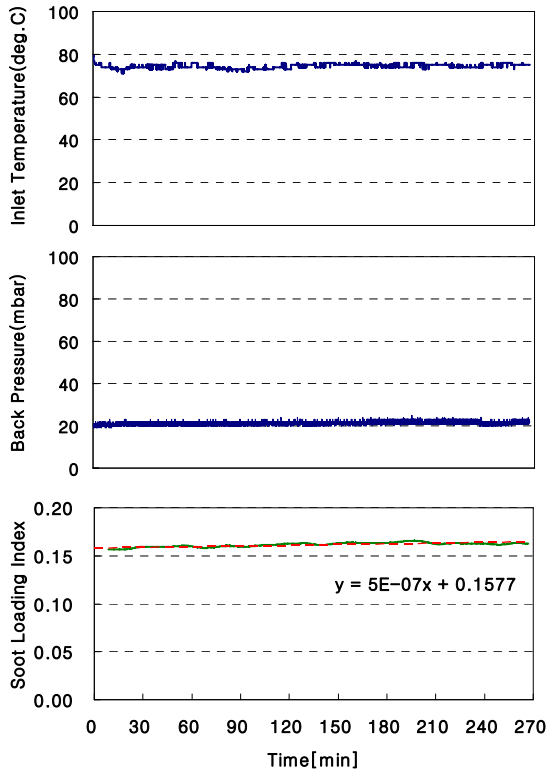

Fig. 8 Soot loading index of extremely low exhaust gas temperature vehicle

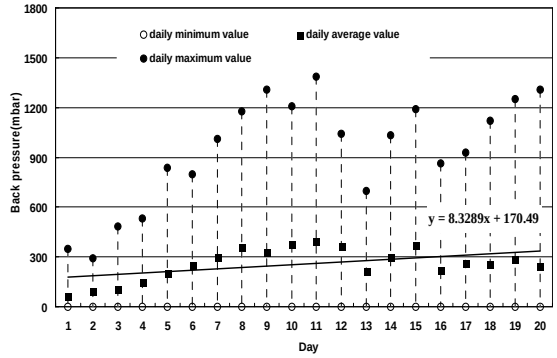

Fig. 9 Daily average back pressure trend of low speed

3.3 재생 및 결함 특성 분석

3.3.1 재생성능 분석

Fig. 9 및 10은 장치 장착 후 20일간의 일일 평균 배압을 나타낸 것으로서 저속차량은 시험주행 3일 경과 이후부터 배압이 지속적으로 상승하여 1400 mbar까지 지속적으로 증가되었고, 고속차량의 경우 배압이 100 mbar 이하로 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다.

Table 5 Element of PM deposited on the catalyst

Item	Mg	P	S	Ca	K	Zn
%.wt /test(5,000km)	3.2	2.4	4.6	9.1	2.4	2.2
Item	Al	Si	Cl	Fe	O or C	
%.wt /test(5.000km)	10.9	19.1	1.9	20.7	23.5	

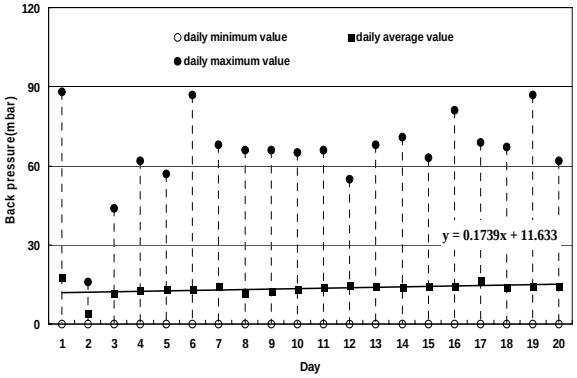

Fig. 10 Daily average back pressure trend of high speed

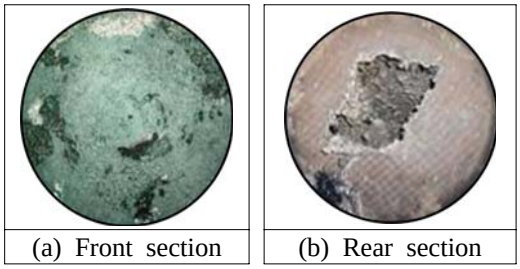

Fig. 11 View of front & rear section of filter

고속차량의 경우 매연이 쌓여 배압이 상승되기 전에 전 구간에 걸쳐 재생온도 확보를 통한 원활한 매연 재생이 이루어지고 있는 것으로 판단된다.

3.3.2 PM 성분 분석

지속적인 배압상승으로 필터 용손이 발생한 저속차량 장착 DPF의 산화촉매 전단에는 Fig. 11의 (a)와 같이 부분적으로 습(wet) PM이 셀 입구를 덮고 있었다. 필터에 쌓여 있는 PM 성분분석 결과 Table 5와 같이 주로 엔진오일의 성분 물질인 Mg, P, S, Ca, K 그리고 Zn이 다량 검출되었으며, 짧은 시험기간에 비해 검출농도가 높은 것으로서 엔진오일이 배기관으로 유출되어 산화촉매(DOC)에 축적된 것으로 판단된다.[5,6]

필터에 퇴적되어 있는 금속성분은 재생온도가 확보되지 않은 저속 구간에서 출발 및 정지를 반복하면서 엔진 부하 및 배기유량, 배압의 증가로 인해 엔진 크랭크케이스 내부의 일부 엔진 오일이 누유된 것으로 판단된다. 배기량 10.8 리터 대형트럭에서 160,000km이상 주행 시험한 DPF 장치의 잔류분 및 회분 분석결과를 제시한 Kimura 등의 연구결과(Mg 0.86%.wt, P 12%.wt, Ca 12.1%.wt, Zn 8.1%.wt, Fe 16%.wt)[6]와 비교해보면 5,000km의 단기간의 시험에서 Mg는 3.7배 Fe는 1.3배 높았다.

배출가스에 포함된 오일성분은 촉매의 산화력을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 필터 내부 온도 상승으로 비정상 매연 발화를 유발할 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 11의 (b)와 같이 필터 후단은 세라믹 필터 용융점인 1200℃ 이상의 온도에 의한 필터 용손의 흔적이 발견되었는데 재생온도 미확보로 필터 후단에 축적된 PM 및 오일 재 성분이 필터 내부 온도 상승을 유발한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 촉매방식 DPF의 재생성능에 미치는 차량 운행패턴의 영향을 분석하기 위하여 국내의 Euro-2급 차량 중 보급대수가 많은 배기량 11L 차량을 대상으로 저속 및 고속 주행 차량에서 각각에 동일 DPF를 적용하여 장치 성능 및 운행 패턴을 비교 분석하였다.

(1) BPT의 일일 누적분포가 비슷한 차량일지라도 운행 패턴에 따라 고온 지속시간의 차이로 고온과 저온 분포 범위가 다르게 나타났으며 저속 차량의 경우 촉매 활성화 분포가 힘든 200℃ 이하 분포율이 70% 이상을 차지하였다.

(2) 단위 배기유량에 대한 배압상승율, 즉 부하지수 변화율은 저속차량이 고속 차량에 비해 3배 이상 높게 나타났는데 부하지수 상승률은 BPT 온도 분포율과 동시에 장치 적용 가능성을 결정하는 지표로 활용되어야 할 것으로 판단된다.

(3) 필터 용손이 발생한 저속차량에 부착된 DPF의 PM성분을 분석한 결과, 오일성분별로 정상조건보다 많이 검출되는 경향을 나타내었다. 이러한 원인은 청소차나 마을버스 또는 도심 정체구간 주행 시내버스 등에서 배기가스 온도가 BPT 온도 이상으로 지속되지 않고 순간적이고 산발적으로 도달할 경우에는 PM을 연속적으로 재생시키지 못하기 때문이다. 또한 배압증가로 발생되는 엔진 오일 혼합 배출가스에 의해 비정상적인 연소가 발생하여 필터 용손이 일어난 것으로 판단된다.

참고문헌

(1) Dongkil Shin and Youngil Jeong, 2004, "A Study of Fleet Test of Passive Type Catalytic DPF System," KSAE04-SC049.

(2) Joon-Seok Min, Chang-Q Lee, Seong-Hwan Kim, Hong-Seok Jung and Yong-Woo Kim, "Development and Performance of Catalytic Diesel Particulate Filter Systems for Heavy-Duty Diesel Vehicles," SAE 2005-01-0664.

(3) Jinwook Lee, Gyubaek Cho, Hongsuk Kim and Youngil Jeong, 2007, "A Study on PM Regeneration Charcteristics of Diesel Passenger Vehicle with Passive Regeneration DPF System," *Trans. of the KSME B*, Vol. 31, pp. 188~194.

(4) Gang Guo, Ning Xu, Paul M. Laing, Robert H. Hammerle and M. Matti Maricq, “Performance of a Catalyzed Diesel Particulate Filter System During Soot Accumulation and Regeneration,” SAE, 2003-01-0047.

(5) Manni, M., Pedicillo, A., G. Del Piero, and E. Previde Massara, “An Experimental Evaluation of the Impact of Lubricating Oils and Fuels on Diesel Particulate Filters," SAE, 2007-01-1925.

(6) Ken Kimura and Mike Lynskey, “Real World Study of Diesel Particulate Filter Ash Accumulation in Heavy-Duty Diesel Trucks,” SAE, 2006-01-3257.