

< 논문 >

자연재생방식 DPF시스템 부착 경유승용차량의 PM재생 특성 연구

이진욱* · 조규백* · 김홍석* · 정용일*
(2006년 9월 27일 접수, 2006년 12월 16일 심사완료)

A Study on PM Regeneration Characteristics of Diesel Passenger Vehicle with Passive Regeneration DPF System

Jinwook Lee, Gyubaek Cho, Hongsuk Kim and Youngil Jeong

Key Words: Diesel Particulate Filter Trap(DPF, 디젤매연여과장치), Particulate Matters(PM, 입자상 물질), Passive Regeneration System(자연 재생시스템), Chassis Dynamometer(차대동력계), Diesel Passenger Vehicle(경유 승용차)

Abstract

New diesel engines equipped with common-rail injection systems and advanced engine management control allow drastic decreases in the production of particulate matters and nitrogen oxides with a significant advantage in terms of the fuel consumption and CO₂ emissions. Nevertheless, the contribution of exhaust gas aftertreatment in the ultra low emission vehicles conception has become unavoidable today. Recently the passive type DPF(Diesel Particulate Filter Trap) system for diesel passenger vehicle has been manufactured into mass production from a French automotive maker since the year of 2000. This passive DPF system fully relies on the catalytic effects from additives blended into the diesel fuel and additives injected into the DPF system. In this study, the effects of PM regeneration in the commercial diesel passenger vehicle with the passive type DPF system were investigated in chassis dynamometer CVS(constant volume sampler)-75 mode. As shown in this experimental results, the DPF regeneration was observed at temperature as low as 350°C. And the engine-controlled the DPF regeneration founded to be one of the most promising regeneration technologies. Moreover, the durability of this DPF system was evaluated with a season weather in terms of the differential pressure and exhaust gas temperature traces from a road test during the total mileage of 80,000km.

기호설명

P : 압력
km : 차량 주행속도
ΔP : DPF전·후단 차압
CVS : 정용적 시료채취장치
TPS : 쓰로틀(throttle)위치센서

1. 서론

지구기후변화 협약 이후, 자동차 배출가스 중 에서 이산화탄소(CO₂) 배출허용기준을 유럽연합(EU)에서는 2008년에 140g/km으로, 2012년에 120g/km으로 설정하였는데, 이는 자동차 산업에 있어 새로운 무역장벽으로 부각되고 있다. 따라서 국내의 유럽수출 자동차도 2009년부터 140g/km을 적용받게 되어 있어, 향후 국내 자동차 산업에도 지대한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 특히 자동

† 책임저자, 회원, 한국기계연구원 친환경엔진연구센터
E-mail : immanuel@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7386 FAX : (042)868-7305

* 회원, 한국기계연구원 무·저공해자동차사업단

차 산업에 있어서, 이러한 이산화탄소 저감은 연비저감 기술이 핵심이며, 따라서 연소 효율이 우수한 디젤엔진이 주종으로 사용되어 향후 경유자동차의 급속한 증가가 예상되고 있다. 그러나 디젤엔진은 가솔린엔진에 비해 연소특성상 질소산화물(NOx)과 입자상물질(PM; Particulate Matters, 이하 본 논문에서는 PM으로 약칭 표기함.)이 많이 배출되며, 이에 대한 개선책이 우선적으로 요구되고 있다. 선진국 특히 유럽에서는 경유자동차의 배출가스를 휘발유자동차 수준으로 저감시킨 후, 적극적인 보급을 추진하는 것을 기본 전략으로 삼고 있다. 현재 입자상물질의 저감기술로는 매연여과장치(DPF; Diesel Particulate Filter Trap)가 가장 효과적이며, 선진국에서는 제작차와 함께 운행차 보급(retrofit)에도 본격적으로 적용하고 있다.⁽¹⁻³⁾ 이 매연여과장치는 디젤엔진에서 배출되는 매연과 PM을 저감하는 후처리 시스템으로써, 국내의 경우, 1996년도에 환경부에서 제정한 “매연여과장치 성능기준 및 시험방법에 관한 규정(환경부고시 제1996-14호)”의 평가기준에서는 PM 70%, 매연 80% 이상을 저감하도록 규정하고 있으며, 일반적으로 DPF장치의 PM저감성능은 85% 이상이다. Table 1의 각 단계 기술세대별 DPF기술 중에서 제2세대 기술로 분류되는 자연재생방식(passive regeneration type)은 촉매나 첨가제를 사용하여 PM의 재생온도를 650℃에서 300℃ 수준으로 낮추고, 자동차 배출가스 온도만으로 PM을 연속적으로 태우는 방식이다. 이 기술은 비교적 구조가 간단하고 고장이 적은 등의 장점으로 실용화 단계에 있다고 볼 수 있지만, 배출가스 온도가 낮은 자동차에는 적용이 어려운 한계를 갖고 있다. 미국의 경우 배출가스 온도가 높은 대형차(시내버스 등)에 적용하고 있으나, 우리나라의 경우는 시내버스의 주행속도가 낮고 정차가 잦아 배출가스 온도가 낮기 때문에 적용이 곤란한 실정이다.⁽⁴⁻⁶⁾

따라서 본 연구에서는 2000년부터 첨가제방식 매연여과장치를 장착하여 본격적으로 상용·시판 중인 2.2리터 경유승용차를 대상으로, 자연 연속 PM재생방식의 DPF특성을 차대동력계와 실제 도로상에서의 내구시험과 함께 분석하였다. 특히 PM재생이 발생하는 영역 및 이의 영향을 배출가스 온도와 배압의 변화를 통해 분석하였으며, 또한 국내 계절변화 조건에서 총 80,000km 차량 내

구시험을 수행하여, 본 자연재생방식 DPF장치의 실제 내구성능을 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 시험 차량 및 적용 DPF시스템 특징

Fig. 1은 시험 차량에 장착된 매연여과장치의 개략도를 나타낸 것이다. 본 시스템은 배기량 2.2리터의 커먼레일 직접분사식 디젤엔진, 전단 촉매(pre-catalyst), 산화촉매(oxidation catalyst)와 DPF 시스템으로 구성된 배기여과장치, 용량 5리터의 PM 재생보조용 Ceria(CeO₂) based FBC(fuel borne catalyst)와 이의 저장·공급시스템(dosing system) 그리고 배출가스 온도 및 압력을 측정하기 위한 고정밀도를 갖는 센서류 등으로 구성되어 있다. 그리고 상기 매연여과장치를 장착하여 본 연구에 사용된 시험 차량에 대한 자세한 제원은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 DPF system technologies

Tech. Stage	Classification	Device Type
1gene.	Active regeneration type	-Electric heater -Burner -Throttling type
2gene.	Passive regeneration type	-Catalytic type -Additive type
3gene.	Passive+Active regeneration type	-Engine control assistance type -Electric heater assistance type

Table 2 Specification of test vehicle

Type	Range
Model	Peugeot 607 HDI
Displacement (cc)	2,200
Bore × Stroke (mm)	89 × 92.4
Compression ratio	22:1
Max. Torque (kg·m/rpm)	23.4 / 2400

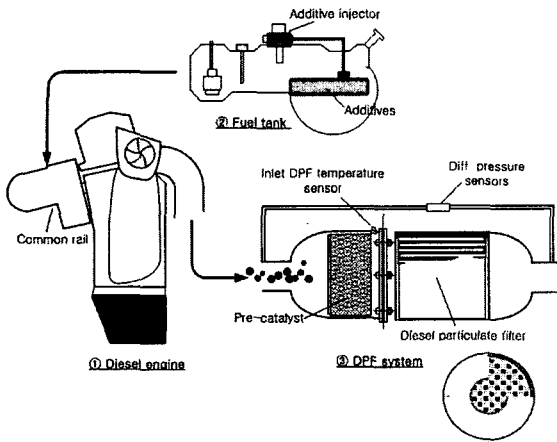


Fig. 1 Schematic diagram of the passive type DPF system equipped in diesel vehicle

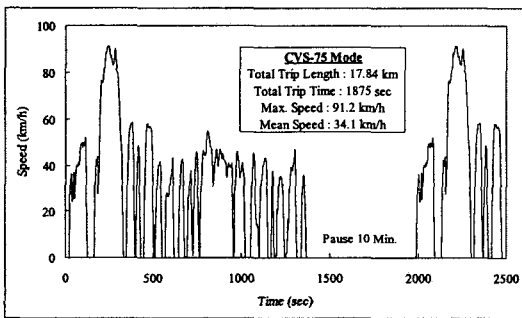
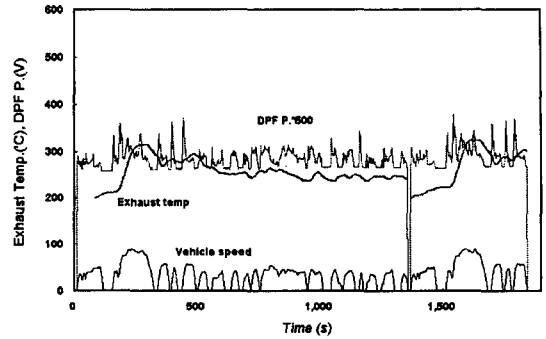


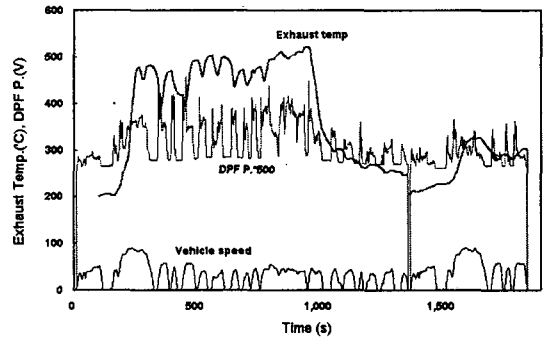
Fig. 2 Test driving cycle of CVS(constant volume sampler)-75 mode

2.2 시험 방법

본 연구에서는 상기 DPF시스템을 분석하기 위한 차량 주행시험방법으로서, 차대동력계 상에서의 CVS-75모드(국내 공인 연비·배출가스 모드) 시험과 정속(75 및 100km/h) 주행시험을 포함한 실제 도로상에서의 장기 내구시험을 각각 수행하였다. 국내 대기환경보전법에 규정된 제작자동차 배출가스 인증시험모드인 CVS-75모드는 Fig. 2와 같이 총 3단계로 구분되어져 있다. 1단계는 약 20~30℃에서 12시간 이상 시험차량이 soak된 상태에서 저온 시동하는 단계로서 505초 동안(주행거리 5.78km에 해당) 차량이 주행되며, 2단계는 저온시동의 안정화 단계로 867초 동안(주행거리 6.29km에 해당) 계속 운전된다.



(a) Without regeneration



(b) With regeneration

Fig. 3 Effect of PM regeneration in CVS-75 test mode

이 후, 600초 동안 차량의 엔진을 정지시킨 후 (10-minute soak), 3단계인 고온시동단계로서 505 초 동안(주행거리 5.78km에 해당) 주행한다. 총 시험 주행시간은 1,877초이며, 이는 총 주행거리 17.85km를 평균 속도 34.1km/h, 최대 속도 91.2km/h로 시험 주행한 것에 해당된다. 각 시험 모드의 가중치는 다음 식 (1)과 같다.

$$\text{가중치} = 0.43 \times \text{Phase1} + 1.0 \times \text{Phase2} + 0.57 \times \text{Phase3} \quad (1)$$

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 자연재생방식 DPF의 차량 재생 특성

3.1.1 CVS-75 모드 주행시, PM 재생 특성

Fig. 3은 CVS-75모드로 시험 차량을 주행하는 경우에 있어서 DPF 재생이 발생한 경우와 발생하지 않은 경우의 각각에 대하여 차속, 매연여과 장치 상류의 온도 및 차압 등을 실시간으로 계속

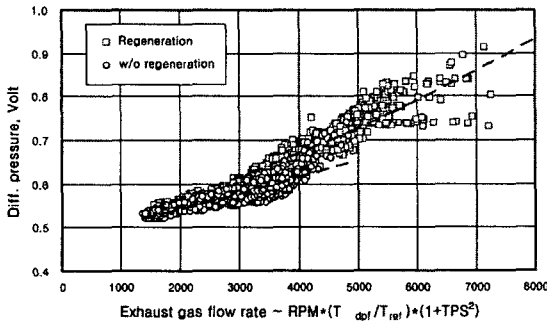


Fig. 4 Relationship between exhaust gas flow rate and DPF's differential pressure in CVS-75 test mode

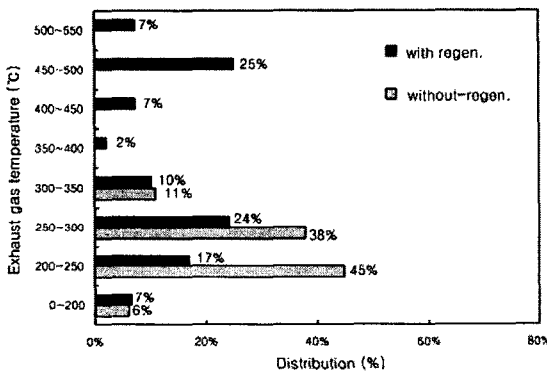
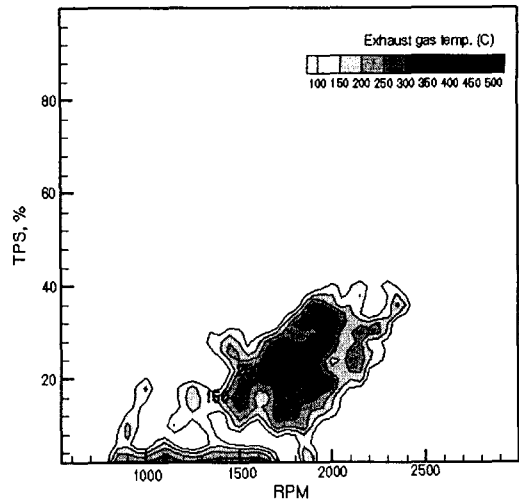


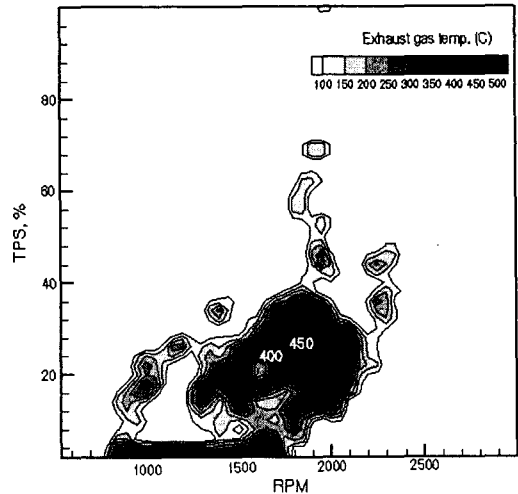
Fig. 5 Distribution of exhaust gas temperature at CVS-75 test mode

한 결과를 비교해서 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 재생이 발생하지 않는 경우이며, Fig. 3(b)는 재생이 발생하는 경우이다. Fig. 3(b)에서 보듯이, 재생이 시작되어 종료되는 시점까지에 소요되는 시간은 대략 800초임을 알 수 있었다. 또한 재생이 일어나지 않는 경우의 매연여과장치 전단의 배기 온도는 300℃ 이하를 나타낸 반면에, 재생이 일어나는 경우에는 연료 후분사와 산화촉매에서의 미연탄화수소의 연소에 기인하여 200℃ 이상 온도가 상승한 500℃ 부근을 나타냄을 알 수 있었다. 그리고 매연여과장치 전·후단의 차압도 재생이 일어나는 경우가 크게 증가함을 알 수 있었는데, 이는 후분사에 기인한 배기온도의 증가에 따른 배출가스 체적유량의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 CVS-75 모드 시험 중 배기유량에 따른 매연여과장치 전·후단 차압의 관계를 나타낸



(a) Without regeneration



(b) With regeneration

Fig. 6 2-D map of exhaust gas temperature at CVS-75 test mode

것이다. PM 재생이 있는 경우와 없는 경우를 비교하였으며, PM이 재생되는 경우, 연료 후분사에 의해 배기유량과 차압이 동시에 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 5는 CVS-75 모드 시험 중, PM 재생이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 배출가스 온도 분포를 비교하여 나타낸 것이다. PM 재생이 없는 경우, CVS-75 모드 시험 중 나타나는 최고 온도는 350℃이며, 200~300℃ 영역의 배기 온도가 80% 정도 차지한다. 반면에 PM 재생이 있는 경

우에는 최고 온도가 500℃ 정도이며, 400℃ 이상 인 배기 온도가 40% 정도를 차지함을 알 수 있었다.

Fig. 6은 CVS-75 모드 운전 시간 100~1000초 동안에 배출되는 배출가스 온도를 엔진회전수와 흡기스스로를 위치센서(TPS) 값으로 나타낸 2차원 맵이다. Fig. 6(a)는 재생이 없는 경우이며, Fig. 6(b)는 재생이 있는 경우이다. 이 두 그림으로부터 차량 운전은 엔진회전수 1,400~2,400rpm 영역과 TPS값 10~40%에서 대부분 이루어짐을 알 수 있었다. 그리고 이 영역에서 재생이 없는 경우의 배출가스 온도는 약 200~300℃ 정도이고, 재생이 있는 경우는 400~500℃로 상승함을 알 수 있었다.

3.1.2 실도로 주행시, PM 재생 특성

Fig. 7은 실제 도로상에서 정속에 가까운 형태로 주행할 때의 PM 재생 특성을 나타낸 것이고, Fig. 8은 발진 가속 및 감속 정차가 반복되는 시가지 주행 형태로 주행할 때의 PM 재생 특성을 나타낸 것이다.

Fig. 7의 정속 주행형태에 의하면 주행 중에 연속적인 PM의 재생이 이루어지고, 재생에 소요되는 시간도 약 350초이다. 그러나 Fig. 8에서와 같이 발진 가속 및 감속 정차가 반복되는 시가지 주행 형태에서는 그 재생특성이 크게 다를 수 있었다. 즉, 재생을 시작하다가, 차량이 감속 정차하면 일시적으로 재생을 중지하고, 다시 발진 가속하여 어느 정도 속도가 상승하면 다시 재생을 시작하지만, 차량이 감속 정차하게 되면 재생을 다시 중지하고 어느 이상의 속도가 계속 유지되어야 지속적인 PM의 재생을 실시하여 종료하는 것을 알 수 있었다.

이와 같이 차량의 발진 가속 및 감속 정차에 따라서 재생을 시작 또는 중지하는 이유는 연료의 후분사에 기인하는 것으로(David, 2000),⁽⁷⁾ 차량이 아주 저속으로 주행하거나 정차하여 있는 경우에 후분사를 실시하여 PM을 재생하면 엔진 부하가 증가하여 차속을 유지하기가 어렵고, 정차중의 엔진 회전속도의 증가로 운전자의 불편함을 유발할 수 있기 때문이다. 따라서 이때에는 일시적으로 재생을 중지하고 어느 일정속도 이상이 유지되는 경우에 재생을 실시하는 PM 재생 로직에 의한 영향인 것으로 사료된다.

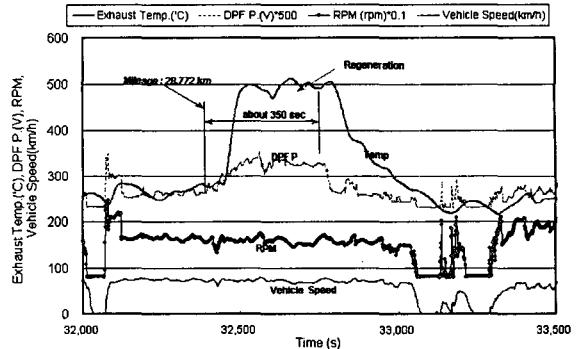


Fig. 7 PM regeneration characteristics during constant speed driving at real road

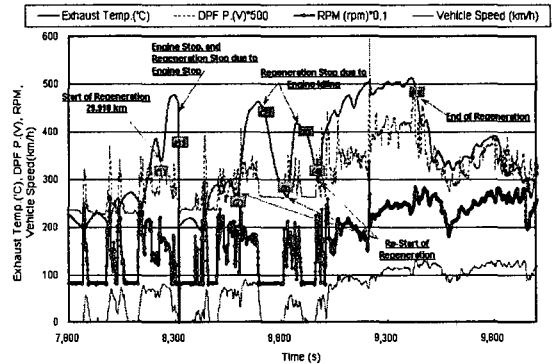


Fig. 8 PM regeneration characteristics at urban road with transient driving patterns

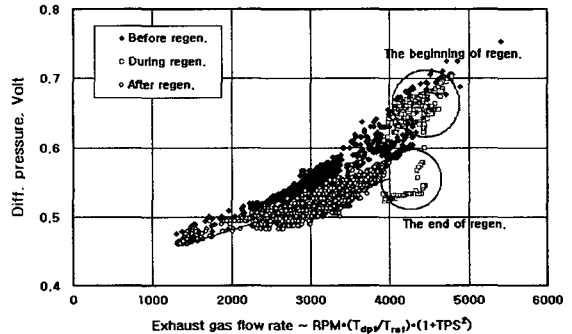


Fig. 9 PM regeneration logic during constant speed driving at real road

그리고 시험 차량에 장착된 매연여과장치 의 이러한 PM 재생 로직을 살펴보기 위하여, 배출가스 체적 유량과 차압의 관계를 구한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 이를 위해 본 연구에서는 정속 운전 중에 PM 재생이 일어나는 경우인 Fig. 7의

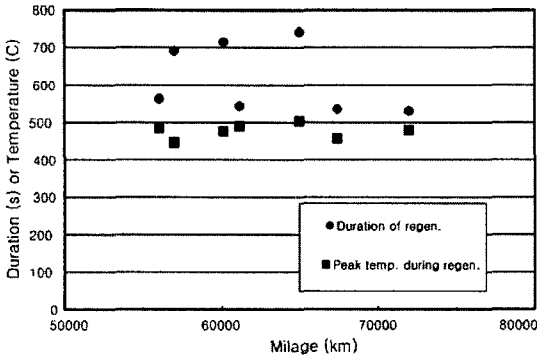


Fig. 10 PM regeneration duration time and regeneration maximum temperature during 50,000~80,000km

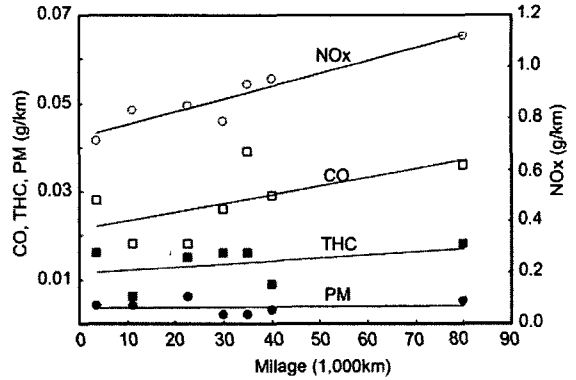


Fig. 12 Variation of 4-emission according to vehicle mileage

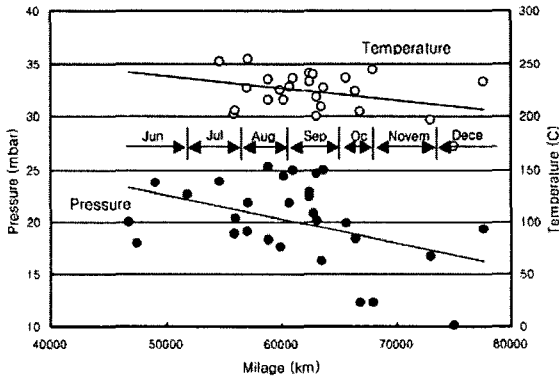


Fig. 11 Effect of a season weather on exhaust temperature and DPF's differential pressure

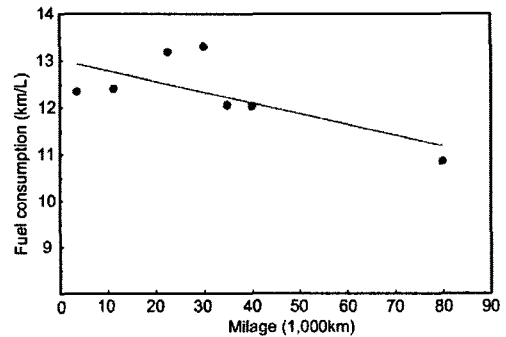


Fig. 13 Variation of fuel consumption according to vehicle mileage

데이터를 사용하였다. 본 시험 차량의 PM 재생 여부는 차량에 장착된 자연재생방식 매연여과장치 전·후단의 차압 변화에 따라 판단할 수 있다. 그러나 본 매연여과장치내의 PM 포집량이 동일한 경우에도 매연여과장치 전·후단의 차압은 엔진의 배출가스 유량의 증가에 비례하여 증가하기 때문에 배출가스 유량과 매연여과장치 차압의 이차원 맵을 사용하여 주어진 배출가스 유량에서 차압이 어느 정도 이상이면 재생을 시작하도록 재생로직이 구성되어져 있음을 알 수 있었다.

또한 Fig. 9로부터 PM 재생 전에는 PM 재생 후보다 매연여과장치 전·후단의 차압이 높게 나타나며, 재생기간중에는 연료 후분사에 따라 배출가스 체적유량이 증가함을 알 수 있었다. 그리고 동일한 배기유량에서 재생 초기에는 차압이 높았다가, 재생 말기에는 차압이 감소되어 연료

후분사를 종료함으로써, PM 재생과정을 마치게 됨을 알 수 있었다.

Fig. 10은 실제 도로상에서 50,000~80,000km 운행하는 동안 PM재생에 소요되는 시간과 이 때 나타나는 최고 배출가스 온도 변화를 나타낸 것이다. PM재생에 소요되는 시간은 차량 주행 운전조건에 따라 크게 영향을 받음을 알 수 있었는데, 약 520~730초 정도이다. 그리고 이때 최고 배출가스 온도는 약 450~500℃이다.

Fig. 11은 시험 차량을 50,000~80,000km 운행하는 동안, 엔진 아이들(idle) 조건에서 매연여과장치 전·후단 차압과 배출가스 온도 변화를 나타낸 것이다. 국내 계절적인 요인으로 배출가스 온도가 감소하고 있으며, 이에 따라 매연여과장치 전·후단 차압이 감소되는 경향을 보임을 알 수 있었다. 특히, 동절기 경우(12월)의 배출가스 온도는 하절기 경우(8월)의 배출가스 온도에 비해 약 50℃ 정도 감소됨을 알 수 있었다.

3.2 배출가스 및 연비 특성

또한 본 연구에서는 배출가스의 농도와 연비를 분석하기 위하여 80,000km 운행 중간에 차대동력계를 이용한 CVS-75 모드 시험을 수행하여 시험 차량의 배출가스 중 대기환경보전법에 의한 규제 물질인 CO, THC, NO_x, PM을 측정·비교하였다.

Fig. 12는 차량의 내구시험 기간 중에 측정된 배출가스의 농도 변화 특성을 나타낸 것이다. 총 80,000km 내구시험 동안에 NO_x, CO, HC는 악화되고 있으나, 이는 차량의 내구시험 기간 중에 측정된 연비 변화를 나타낸 Fig. 13의 결과와 일치한다. 즉, 총 80,000km 내구시험 동안에 연비는 약 14% 악화됨을 알 수 있었다.

4. 결론

2000년도에 상용화된 경유 승용자동차용 자연재생방식 DPF시스템에 대한 PM재생 특성을 해석하고자, 이 DPF시스템이 부착된 경유 승용차를 대상으로 해서 약 1년 동안 80,000km를 주행하면서 차량의 배기성능과 자연재생방식 DPF시스템의 내구성능을 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) PM 재생여부는 배출가스 유량과 DPF 차압의 2차원 맵을 이용하여 분석하였으며, PM이 재생될 때 매연여과장치 전단의 배기 최고온도는 연료후분사와 산화촉매에 의해서 약 450~500℃까지 상승함을 알 수 있었다. 또한 PM 재생에 소요되는 시간은 차량 운전조건에 따라 변화였으며, 정속 운전인 경우, 약 350초, 시가지 운전인 경우에는 약 800초 정도 소요됨을 알 수 있었다.

(2) 시험차량의 THC, CO, NO_x는 기존 국산 디젤 RV차량의 실험치(Eom et al., 1999)⁽⁸⁾와 비교해볼 때, 비슷한 배출농도를 나타내었으나, PM의 경우, 시험 주행기간동안에 약 1/10 이하로 배출됨을 알 수 있었다. 그리고 PM 재생시, 모든 배출가스의 농도는 증가하는데, 이는 추가적인 연료 후분사에 따른 과농 연료의 연소에 기인하는 것으로 판단된다.

(3) 그리고 PM 재생시에는 연료 후분사로 인해 연료소모량이 본 연구의 시험 주행기간동안 약

14% 악화됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2006년도 NRL과제(연구과제명: 경유 자동차 매연 및 입자상물질 저감기술)의 연구비로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Sluder, C. S. and Brian, H. W., 2000, "Catalyzed Diesel Particulate Filter Performance in a Light-Duty Vehicle," SAE Paper, 2000-01-2848.
- (2) Jeong, Y., 2001, "The Trend of Exhaust Emission Standard and Diesel Particulate Filter Trap Technology for Diesel Powered Vehicles," Busan Engine International Symposium.
- (3) Hawker, P., Myers, N., Huthwohl, G., Vogel, T., Bates, B., Magnusson, L. and Bronneberg, P., 1997, "Experience with a New Particulate Trap Technology in Europe," SAE Paper, 970182.
- (4) Hawker, P., Myers, N., Henn, J., Koch, W., Luders, H., Luers, B. and Stommel, P., 1998, "Effect of a Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter on Non-Regulated Emissions and Particulate Size Distribution," SAE Paper, 980189.
- (5) Vincent, M. W. et al., 1999, "Improved Diesel Particulate Filter Regeneration Performance Using Fuel Soluble Additives," SAE Paper, 1999-01-3562.
- (6) Vincent, M. W. and Richards, P. J., 2000, "The Long Distance Road Trial of a Combined Diesel Particulate Filter and Fuel Additive," SAE Paper, 2000-01-2849.
- (7) David, L. H., 2000, "Diesel Particulate Filter Regeneration: Thermal Management Through Filter Design," SAE Paper, 2000-01-2847.
- (8) Eom, M. D., Yoo, J. H. and Lim, C. S., 1999, "The Evaluation of Diesel Emission Reduction Characteristics by DOC in Light-duty Vehicle," KSAE No. 99370249, Vol. 7, No. 8, pp. 34~42.