

디젤입자상물질 여과장치의 배기저감성능 효과 분석

박용희[†] · 신대윤*

국립환경과학원 교통환경연구소, *조선대학교 에너지환경공학부

An Investigation of the Effect of Diesel Particulate Filter for Heavy-duty Diesel Engine on Emission Reduction

Yong-hee Park[†] · Dae-Yewn Shin*

National Institute of Environmental Research, Korea

*Department of Environmental Engineering, Chosun University, Korea

(Received January 20, 2007/Accepted February 7, 2007)

ABSTRACT

Diesel PM can be controlled using Diesel Particulate Filter, which can effectively reduce the level of soot emissions to ambient background levels. In the Heavy Duty Diesel area, the Continuously Regeneration trap has been widely applied in the retrofit market. As the Special act for the improvement of air quality in the capital area, the retrofit program for DPF to used diesel vehicle has progressed favorably and there are currently over 1,000 of these DPF in use in retrofit applications in Korea. These DPF comprise a specially formulated Diesel Oxidation Catalyst upstream of a DPF. The NO₂ generated by the DOC is used to combust the carbon collected in the DPF at low temperature. To certificate DPF device that is suitable to domestic circumstances, it is necessary to evaluate exactly the DPF devices according to the regulation of DPF certificate test procedure for retrofit(ministry of environment(MOE) announcement NO. 2005-16). To do so the understand of that regulation like the standard of PM reduction rate is needed. In this study the test procedure including test cycle and BPT test condition was examined and also the test result for specific DPF was analyzed. In every test like field test, PM reduction efficiency test and seoul-10 mode test, no defect could be showed.

Keywords: DPF(Diesel Particulate Filter), PM(Particulate Matter), DOC(Diesel Oxidation Catalyst), CSF(Catalyzed Soot Filter), BPT(Balance Point Temperature)

I. 서 론

우리나라 수도권의 대기오염은 선진국의 주요도시에 비할 때 매우 심각한 수준이다. 미세먼지, 이산화질소 오염도는 OECD 국가의 주요도시 중 최고수준으로, 서울의 미세먼지 농도는 런던의 3.5배, 이산화질소 농도는 파리의 1.7배 수준으로서 매우 심각한 상태이다.^{1,2)}

대기오염이 심각한 수도권지역의 대기환경을 개선하기 위하여 종합적인 시책을 추진하고 대기오염원을 체계적으로 관리함으로써 지역주민의 건강을 보호하고 쾌적한 생활환경을 조성하기 위하여 2003. 12. 31에 「수도권대기환경 개선에 관한 특별법(법률 제7041호)」이 제정 되었다. 특별법 제8조에 따르면 10년마다 먼지 등

의 대기오염물질의 저감을 위한 수도권대기환경관리기 본계획을 수립하도록 되어 있는데 환경부는 대기환경 개선 목표를 다음과 같이 설정하였다.^{3,4)}

Table 1. Objective of improvement of air quality in the capital region

Pollutant concentration	2001year (seoul)	2014year (seoul)
PM10	65 µg/m ³	40 µg/m ³
NO ₂	37 ppb	22 ppb

이런 대기환경 개선을 위해서는 제작차의 배출허용기준 강화뿐만 아니라, 노후된 운행차의 배출가스 관리가 절실한 상황인데 이를 위해 특정경유자동차의 관리에 관한 사항이 특별법 제25조에 규정되어 있다. 여기서 특정경유자동차란, 대기관리권역에 등록된 경유자동차(소형 승용(승용 1) 경유자동차는 제외하며, 다목적형

[†]Corresponding author : National Institute of Environmental Research
Tel. 82-32-560-7620, Fax. 82-32-568-2043
E-mail : nierpark@me.go.kr

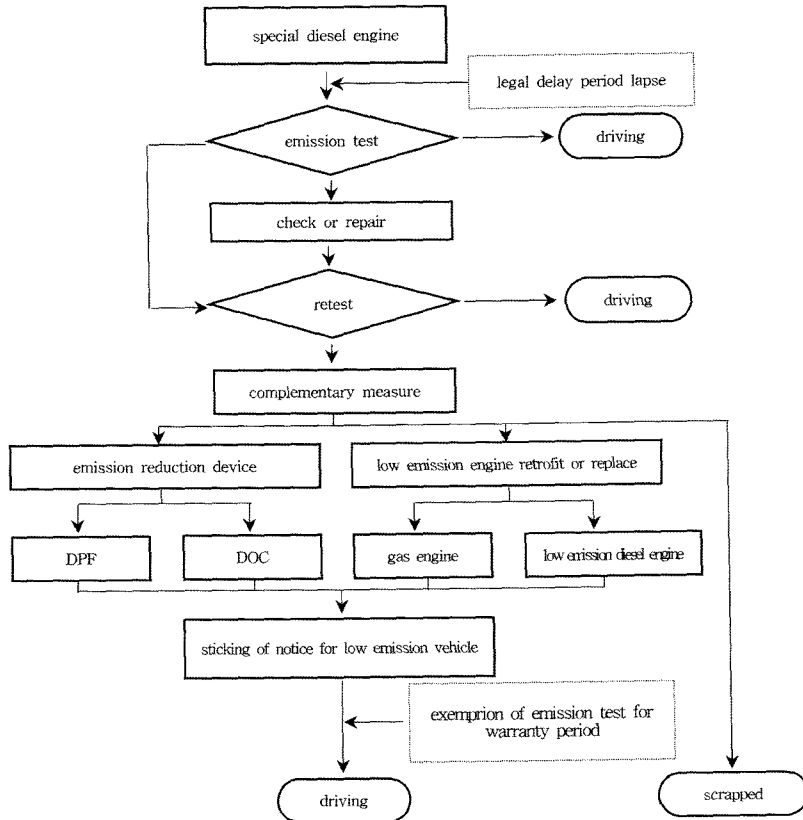


Fig. 1. Flow chart of special diesel vehicle control for emission regulation.

승용자동차(RV)는 포함)중 당해 자동차의 배출가스 보증기간이 경과한 자동차를 말하며, 특정경유자동차에 대하여는 2006년부터 대기환경보전법보다 강화된 운행차 매연기준을 적용하도록 정하고 있다.

특정경유자동차의 소유자는 매년 소유차량이 강화된 매연기준에 적합한지 여부에 대한 검사를 받아야 하며, 기준에 불합격한 특정경유자동차의 소유자는 제1종~제3종의 배출가스 저감장치(DPF, DOC)를 부착하여야 한다. 이 경우 환경부장관 및 시·도지사는 소요경비의 전부 또는 일부를 지원할 수 있다.

배출가스저감장치는 보증기간이내에 다음의 배출가스 저감효율 기준을 만족하여야 한다³⁾.

Table 2. Standard of reduction rate of aftertreatment device for retrofit

Row	Reduction rate(%)	Warranty period
Category 1	PM or NOx 70% or over	3 year or 160,000 km
Category 2	PM or NOx 50% or over	3 year or 80,000 km
Category 3	PM or NOx 25% or over	3 year or 80,000 km

본 연구에서는 배출가스 저감장치 중에서 제1종 장치에 해당되는 DPF의 인증시험 방법 및 시험결과를 분석하였다.

DPF는 디젤엔진 배출가스 중의 PM을 필터에서 포집하고 필터를 재생시키기 위해 포집된 PM을 저온에서 산화 또는 강제로 연소시켜 제거하는 배기후처리기술이다.³⁾ 현재까지 상용화된 기술로 운행차에 가장 널리 적용되는 시스템은 PM의 자연발화 개시온도인 550~600°C 이하의 250°C 정도에서 PM을 산화 연소시키는 촉매를 적용한 자연재생방식 DPF 시스템(passive DPF system)이 있으며, 이 시스템은 경유차량의 운행 중 배기온도조건이 충분할 경우 별도의 외부열없이 엔진 자체 배기 열만으로 필터의 재생이 가능하다.

일반적으로 PM은 대기 중의 산소농도조건에서 550°C 이상에서 연소되어 CO₂와 H₂O로 분해된다. 그러나 NO₂가 풍부한 가스 분위기에서는 그 연소 분해온도가 낮아진다. 이러한 원리를 이용하여, 촉매방식의 DPF는 Fig. 2와 같이 150~272°C에서 배기가스 중의 NO를 NO₂로 전환하는 백금족 산화촉매(PGM :

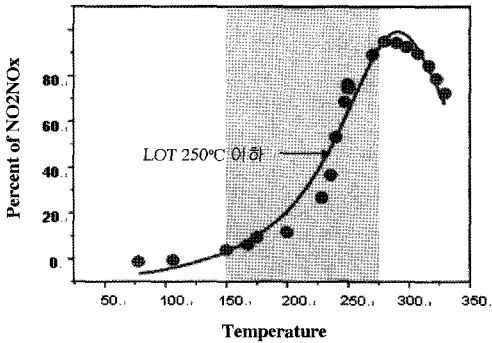


Fig. 2. NO-light-off temperature of DPF catalyst.

Precious Group Metal)가 필터의 벽면에 코팅되어 있다.

촉매반응에 의해 NO₂가 풍부해짐으로 인해 포집된 PM의 산화 및 발화가 개시되는 온도가 낮아짐으로써 배기가스온도가 NO-산화개시온도(NO-LOT50)인 250°C에서 PM의 연소가 개시된다. 따라서 운행 중 배기가스 온도가 NO-LOT50 이상에 도달할 때마다 PM이 제거되어 필터를 재생시킨다.⁷⁻¹⁰⁾

II. 연구방법

1. 시험 대상 장치 제원

시험샘플의 제원은 Table 3과 같이 촉매필터 전단부에 산화촉매(DOC : Diesel Oxidation Catalyst)를 적용한 Oxi.cat+CSF(Catalyzed Soot Filter) 장치가 사용되었다.

Table 3. Specification of DPF

Classification	Oxi. cat.	CSF
Material	Cordierite	Cordierite
Cell density	400 cpsi	400 cpsi
Diameter	11.25 inch	11.25 inch
Length	3 inch	14 inch
Volume	4.89 liter	22.8 liter

Table 4. Specification of the test engine

Item	Spec.	Item	Spec.
Displacement	8,505 cc	CR	16.5
Charge air	TCI	Max. power	275 bhp / 2,100 rpm
No. of cyl.	4 Inline	Max. torque	1,085 Nm / 1,200 rpm
Injection	Electric Unit Injection	Bore × stroke	130 mm × 160 mm

2. 시험 장비 제원

본 연구의 실험장치는 400 kWh급 AC 엔진동력계를 사용하였으며 필터전단 온도 및 압력 등을 실시간으로 측정하였다.

시험엔진 제원은 Table 4와 같고 연료는 황함량 30 ppm(wt%) 이하의 초저유황경유를 사용하였다.

3. 시험 방법

DPF 인증을 위해서는 「운행경유차 배출가스저감장치·저공해엔진 인증방법 및 절차 등에 관한 규정(환경부고시 제2005-16호)」에 따라 다음 배출가스 저감 효율 시험, 특성시험, 실차내구시험을 통해 성능기준 만족 여부가 확인되어야 한다.

1) 특성 시험

특성시험은 재생성능 및 간이내구성용 Seoul-10 모드를 사용하여 50시간 동안 반복 운전하면서 엔진의 운전조건과 장치전후의 온도 및 배압 등을 실시간 모니터링 하여 장치의 포집 및 재생성능을 분석한다. 또한, 0시간, 25시간, 50시간에 각 3회씩 ND-13모드를 이용하여 장치부착에 따른 입자상물질과 가스상 물질의 배출가스 저감성능을 통하여 장치의 내구 및 열화 특성을 분석하고 단축내구성능도 함께 분석한다.³⁾

또한, BPT를 확인하기 위해 장치 전단부에서의 온도 및 압력을 실시간 기록하며 장치의 재생시점을 확인하고, 배기가스 온도는 먼저 BPT 장치의 입구온도를 예상 BPT 온도보다 낮은 light-off temp. 지점에서 시작하며, 기관 회전수보다는 부하율에 영향을 많이 받으므로, 기관 회전수를 중속(intermediated speed)으로 고정된 상태에서 부하율을 조금씩 증가시키는 방법으로 진행한다.

Table 5. Dynamometer operation schedule on Seoul-10 cycle

No.	Engine speed (%)	Load rate (%)	Driving time (min)
1	idling	0	2
2	40	25	2
3	60	100	2
4	60	50	2
5	idling	0	2
6	80	100	2
7	80	50	2
8	idling	0	2
9	100	100	2
10	100	50	2

Table 6. Dynamometer operation schedule on ND-13 mode

No.	Engine speed	Load rate (%)	Weight factor	Driving time (min)
1	Idle	-	0.15	4
2	rpm A	100	0.08	2
3	rpm B	50	0.10	2
4	rpm B	75	0.10	2
5	rpm A	50	0.05	2
6	rpm A	75	0.05	2
7	rpm A	25	0.05	2
8	rpm B	100	0.09	2
9	rpm B	25	0.10	2
10	rpm C	100	0.08	2
11	rpm C	25	0.05	2
12	rpm C	75	0.05	2
13	rpm C	50	0.05	2

rpm A = $N_{low} + 0.25 \times (N_{high} - N_{low})$

rpm B = $N_{low} + 0.50 \times (N_{high} - N_{low})$

rpm C = $N_{low} + 0.75 \times (N_{high} - N_{low})$

2) 배출가스 저감효율 시험

최종저감효율 시험방법은 전부하모드로 장치 장착 전후의 성능 특성 및 연비를 비교하고, 입자상물질과 가스상물질, 기타 유해물질의 저감 성능은 유럽의 엔진동력계 배출가스 인증시험방법과 동일한 ND-13 모드로 평가한다.^{3,6)}

실차에 사용된, 즉 내구 주행 시험을 거친 평가하는데 장치 장착 전후 3회씩 실시하고 입자상물질, 일산화탄소, 탄화수소, 질소산화물 등을 질량단위로 측정하여 그 저감율을 확인한다.

3) 실차시험

실차시험은 엔진동력계 실험과 달리 실험 조건이 일정하지 않아 운전패턴이 예측불가능하고, 랜덤한 실차

에서의 장치 정상 작동 여부를 판단하기 위한 실험이다. 매연여과장치를 차량에 장착하여 운행할 경우, 장치의 문제점이 상당 기간 동안의 주행 중에 나타날 가능성이 많기 때문에 실차시험은 장기간의 시험기간을 요하는데, 그래서 3대에 대하여 3만km 이상 실도로에서 주행하도록 규정되어 있다.³⁾

실차시험은 시내버스 3대에 촉매자연 재생방식 초저유황경유(ULSD) 사용 장치를 장착하여 수행된다. 장치의 작동상태를 면밀히 관찰하기 위해 엔진회전수, 차속, 장치 전후 온도와 압력 등의 데이터를 2초 간격으로 취득하여 분석하고, 장치 고장 여부를 판단하기 위해 2주 1회 장치 후단에서 배출되는 매연농도를 측정한다.

시험차량의 노선 선택은 제작사의 배기가스 온도에 따른 장치적용 조건 중에서 재생성능에 있어서 가장 열악한, 즉 가장 낮은 온도 분포를 가지는 노선을 선택한다.^{9,10)}

III. 결과 및 고찰

1. 특성시험

1) Seoul-10 모드

Seoul-10 모드로 50시간 동안 반복하여 배출가스저감 장치의 재생성능을 측정, 분석하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 Seoul-10 모드에서의 엔진운전 조건(엔진 회전수, 토크)과 장치 전단부에서의 배기온도 및 압력 등을 실시간 모니터링한 측정결과를 보여준다.

Seoul-10 모드의 운전 조건으로 50시간 시험을 진행하는 동안 장치 전단부에서의 온도 및 압력이 뚜렷하게 증가 또는 감소하는 부분이 없으며, 배출가스 측정 결과에 있어서도 시험 초기의 값에 비해 크게 변화한

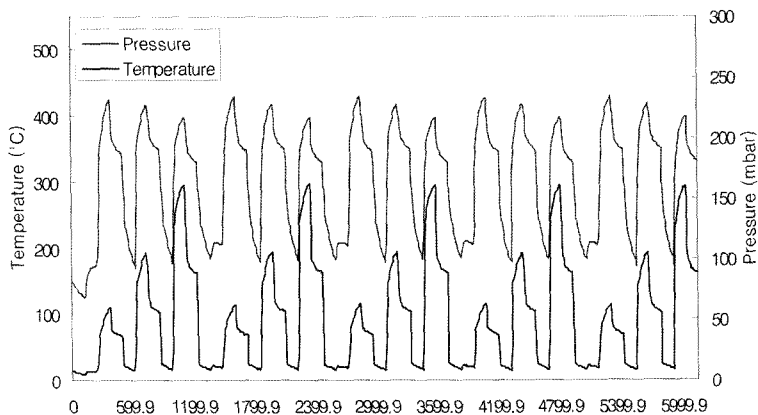


Fig. 3. DPF inlet Temperature and back pressure trend on Seoul-10 cycle.

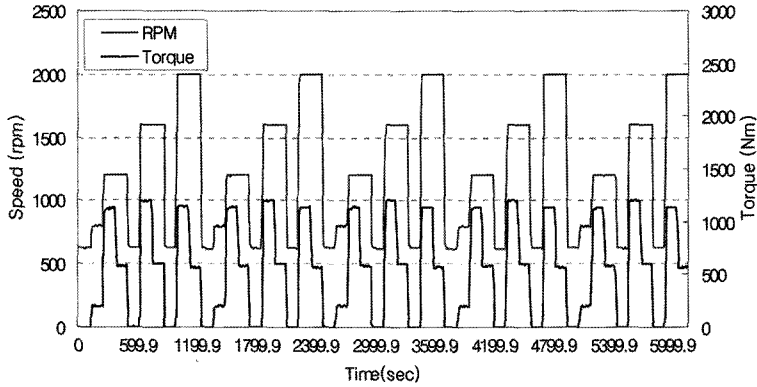


Fig. 4. Torque and rpm trend on Seoul-10 cycle.

부분이 없는 것으로 보아 Seoul-10 모드에서의 50시간 특성시험 결과 장치의 열화 정도는 크게 나타나지 않는 것을 나타냈다.

2) BPT(재생평형온도) 시험

BPT 측정시 엔진의 회전 속도는 중속인 1200 rpm에 고정시키고, 부하를 조절하면서 배출가스 온도를 240°C 부터 340°C까지 단계적으로 변화시켜가며, 필터 진단부

의 압력변화를 측정하였다. Fig. 5는 운전조건 변화에 따른 필터 진단부의 배기가스 온도와 배압특성을 보여 준다.

Fig. 5에서 320°C 근처에서 온도가 주기적으로 감소하는 것으로 보아, 320°C 근방을 BPT로 추정할 수 있다. 보다 정확한 시험을 위하여 Fig. 6과 같이 각 온도 별 배압의 기울기를 계산하였다.

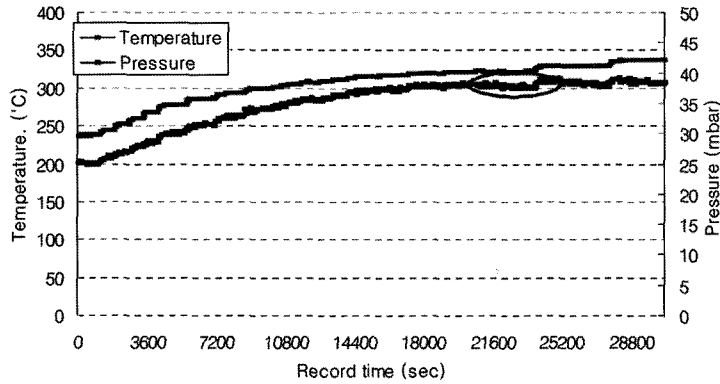


Fig. 5. Back pressure trend according to exhaust gas temperature at 1200 rpm.

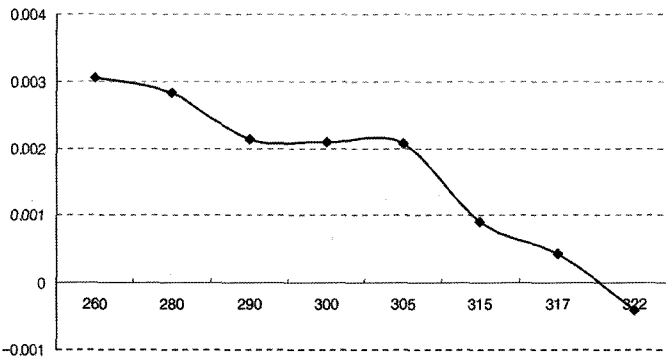


Fig. 6. Slope for back pressure increase to exhaust gas temperature at 1200 rpm.

3) 장치내구 및 성능확인

(1) 출력 및 연료소비율

장치 장착에 따른 내구시간별 엔진 출력 및 연료소비율을 측정 결과, 출력의 경우 전체 50시간 운전 중 0시간, 25시간, 50시간에 측정하였고, 최대 1.2% 이내의 감소율을 나타내어 출력에 거의 영향이 없음을 알 수 있었다. 또한 연료소비율도 출력과 거의 동일하게 영향이 없음을 확인하였다.

Table 7. Engine performance test result on Seoul-10 cycle

Row	Base engine	0 h	25 h	50 h
Power	235.13	236.90 (0.8)	237.83 (1.2)	237.47 (1.0)
Fuel consumption rate	209.42	210.24 (0.4)	210.67 (0.6)	210.67 (0.6)

※(): reduction rate with DPF.

(2) 배출가스 저감효율

장착 전후의 오염물질별 저감효율에서 CO, NMHC,

Table 8. Emission test result on Seoul-10 cycle

Row	Mass of emissions (g/kWh)			
	CO	NOx	NMHC	PM
Base engine	0.792	8.509	0.460	0.177
0 h	0.030 (96.2)	8.685 (-2.1)	0.027 (94.1)	0.021 (88.3)
25 h	0.018 (97.7)	8.558 (-0.6)	0.032 (93.0)	0.020 (88.5)
50 h	0.030 (96.2)	8.626 (-1.4)	0.041 (91.2)	0.021 (88.2)
AVG.	0.026 (96.7)	8.623 (-1.3)	0.033 (92.7)	0.021 (88.3)

※(): reduction rate

PM의 경우 상당히 높은 저감율을 나타내었지만, NOx의 경우 미미하지만 다소 증가하였다.

0시간, 25시간, 50시간 경과 후의 시간대별 저감성능은 CO, NMHC, PM, NOx 모두 시간이 경과하여도 저감성능에는 큰 변화가 없음을 보였다.

2. 최종배출가스 저감효율 시험

3만km 이상 실차시험에 사용되었던 장치 중 한 대를 엔진동력계상에서 ND-13 모드로 최종 배출가스 저감효율 시험을 하였는데 그 결과는 아래 Table 9와 같다.

배출가스 저감장치 장착 전후 최대출력조건에서의 기관출력은 약 0.75%, 연비는 약 0.39% 차이를 보였는데 장치 부착이 기관성능에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단할 수 있고 PM 저감율은 83.1%로써 인준 기준 70% 이상을 만족하였다.

Table 9. Final emission reduction efficiency test result

Row	Engine performance	
	Power (kw)	Fuel consumption (g/kwh)
Base engine	235.13	209.42
DPF	236.9 (-0.75)	210.24 (-0.39)

row	Mass of emissions (g/kwh)			
	CO	NOx	NMHC	PM
Base engine	0.792	8.509	0.460	0.177
DPF	0.032 (95.9)	8.310 (2.3)	0.031 (93.2)	0.030 (83.1)

※(): Reduction rate with DPF.

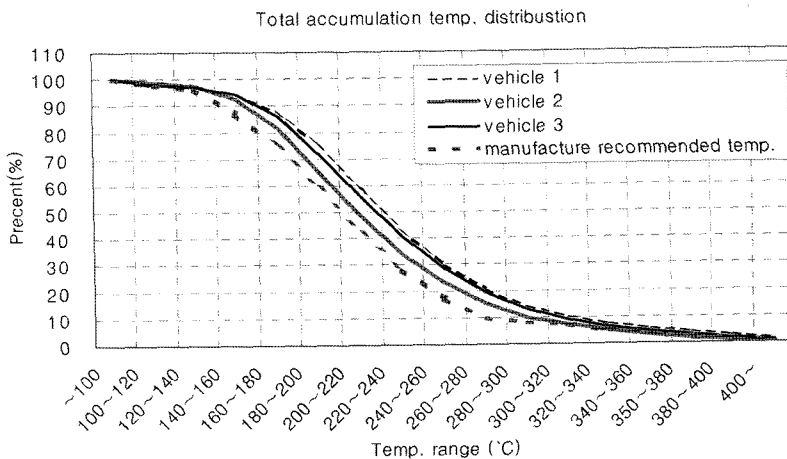


Fig. 7. DPF inlet temperature histogram of test vehicle #1, #2, #3.

3. 실차 시험

Fig. 7은 시험차량 3대 차량에 대해서 주행 시작일부터 주행종료일까지의 누적온도분포를 나타내었으며, 장치제작사가 제시하는 장치의 적용조건(96~99 연식 차량의 경우 270°C의 비율이 10% 이상) 보다 장치전단 온도가 전반적으로 높은 조건에서 실차시험이 진행되었음을 알 수 있다.

시험차량 3대중에서 가장 낮은 온도분포를 보이는 vehicle 2의 10% temperature는 280~300°C이며, 이는 장치제작사에서 제시하는 장치적용조건보다 약 10~30°C 높은 온도조건이다. 이는 장치제작사의 장치적용조건이 도출된 온도조사 구간이 3월 중에 진행되었고, 인증시험은 4월~7월 중에 진행되어 계절 변화에 따른 온도상승 효과가 반영되었기 때문인 것으로 보인다.

장치의 장착일부터 주행 완료일까지의 1일 장치 전단 배압의 평균데이터를 분석하여, 장치의 정상작동 여부를 모니터링 하였는데 일정한 노선을 주행하는 시내버스의 경우 1일 단위 운전패턴이 비교적 일정하므로 전단압력을 관찰하여 정상작동을 판단할 수 있을 것이다. 시험차량의 장치전단 배압은 1000~1150 mbar(절대압) 범위로서 주행완료시까지 비교적 일정한 수준을 유지하였다. 이때 장치전단 온도는 200~250°C 범위로서 최대 50°C 정도의 편차를 나타내었다.

실차주행시험 동안 2주 주기마다 1회 매연을 측정한 결과 시험완료시까지 매연은 0%로써 필터 손상 같은 결함이 발생하지 않았다는 것을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 국내 대형 디젤기관에 부착된 DPF에 대한 오염물질 저감효과를 분석해 보았다.

1. 엔진동력계 최종배출가스 저감효율 시험결과 PM 80% 이상 저감율을 보였고 특성시험에서도 배압증가 등 장치의 특별한 이상현상이 발견되지 않았다.

2. 3만km 이상 실차시험 전반에 걸쳐 배압이 안정적으로 유지되었고 매연 배출량이 0%를 보였는데 이로써 필터의 용손 같은 결함이 발생하지 않은 것으로 판단할 수 있겠다.

3. DPF 장착 전후 출력 및 연비를 비교한 결과 그

감소율이 1% 이내로써 거의 동등한 수준을 유지하였다.

이로써 본 연구에 사용된 Oxi.cat+CSF 형식의 연속 자연재생 DPF는 주행온도 조건이 적합한 차량에 적용될 시 엔진성능을 악화시키지 않고 80% 이상의 PM 저감효과를 나타낼 수 있을 것으로 예상된다. 아울러 배출계수 및 연간주행거리 등으로 산출되는 대형경유 트럭 현대의 연간 PM 배출량 370 kg을 DPF 적용으로 차량 1대 당 약 330 kg 이상 저감시킬 수 있어 경유 차량으로 인해 발생될 수 있는 호흡기 및 폐질환의 발병을 줄일 수 있으며 예방의학의 요소로 작용할 수 있을 것으로 판단된다.^{11,12)}

참고문헌

1. 박기학 외 1인 : 도시대기의 미세먼지 및 주변토양 중 다환방향족 탄화수소의 농도분포에 관한 연구. 한국환경위생학회지, 24(2), 1-8, 1998.
2. 2005 OECD Environmental Data, 세계경제포럼(WET).
3. 수도권 대기환경 개선에 관한 특별법(법률 제7041호) 및 운행경유자동차 배출가스 저감장치.저공해엔진 인증방법 및 절차 등에 관한 규정, 환경부 고시 제2005-16호
4. 환경부 수도권 특별 대책 기초자료(10-3).
5. 류정호 외 7인 : 저공해기술 적용에 따른 대기오염물질 저감특성 연구. 국립환경과학원(행정간행물 등록번호 11-1480124-000012-14).
6. Directive 1999/96/EC of the European Parliament and of the Council of 13 December 1999, Official Journal of the European Communities.
7. Allansson, R., Blakeman, P. G., Cooper, B. J., Hess, H., Silcock, P. J. and Walker, A. P. : Optimising the Low Temperature Performance and Regeneration Efficiency of the Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter (CR-DPF) System, SAE 2002-01-0428.
8. 신동길, 정용일 : 자연재생식 촉매방식 매연여과장치의 실차시험에 관한 연구. 한국자동차공학회 2004년도 춘계학술대회 논문집, 307-312.
9. 양원호 외 4인 : 아산 및 서울 일부 지역의 대기 중 PM₁₀의 농도 및 금속원소 성분의 특성 연구. 한국환경위생학회지, 30(2), 123-132, 2004.
10. 임국환 외 3인 : 디젤엔진 폐기물질의 변이원성 연구. 한국환경위생학회지, 17(1), 13-19, 1991.
11. 류정호 외 11인 : 자동차 오염물질 배출계수 산정에 관한 연구(II). 국립환경과학원(행정간행물 등록번호 11-1480083-000253-10).
12. 자동차주행거리 보고서, 교통안전공단, 2005.