

대형디젤엔진 배출가스 저감을 위한 DPF의 재생특성 연구 A Study on Characteristics of DPF for Heavy-duty Diesel Engine on Pollutant Emission Reduction

엄동섭 · 이승호 · 오상기

D. K. Eom, S. H. Lee and S. K. Oh

(접수일 : 2008년 1월 8일, 수정일 : 2008년 5월 7일, 채택확정 : 2008년 10월 30일)

Key Words : Diesel Particulate Filter(DPF, 디젤산화촉매제) Particulate Matter(PM, 입자상물질), Diesel Oxidation Catalyst(DOC, 디젤산화촉매제), Catalyzed Soot Filter(CSF, 수트촉매필터), Balance Point Temperature(BPT, 재생평형온도), European Transient Cycle(ETC, 유럽과도운전모드), Light Off Temperature(LOT, 재생개시온도)

Abstract : The combustion purpose of diesel engine is to reduce the emission of green gas and to produce high output. Generally, the regulation matter of emission gas is largely divided by 'THC', 'NOx', 'CO' and 'PM'. Among those matters, the most problem is to disgorge into 'PM', the character of diesel combustion. Diesel PM can be controlled using Diesel Particulate Filter, which can effectively reduce the level of soot emissions to ambient background levels. 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 exactly evaluate the DPF devices according to the regulation of DPF certificate test procedure for retrofit. To do carry out the above-mentioned description the understanding of that regulation like the standard of PM reduction 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 was showed.

1. 서 론

환경오염문제가 전 세계적인 문제로 인식되고 자동차 배출가스가 대기오염의 주원인으로 밝혀지면서, 이에 대한 규제가 강화되고, 그 대책들이 마련되고 있다. 디젤기관의 연소방식은 다른 연료들의 연소방식에 비해 연소효율과 온실가스 배출을 줄이는 측면에서 더 효과적이며, 동력성능면에서도 고출력을 낼 수 있어, 그 효용가치가 크다. 현재 배출가스 규제는 크게 가스상오염물질인 미연탄화수소(THC), 질소산화물(NOx), 일산화탄소(CO) 및 입자상 물질(PM)에 대해 이루어지고 있다.^{1,2)} 그 중에서 가장 문제가 되는 것은 디젤연소의 특성으로 인한

PM의 배출이다. 이런 문제를 해결하기 위해 후처리 장치에서의 입자상물질저감기술은 현재 많은 발전을 이루어 상용화 단계에 있으며, 이에 대한 다양한 방법들이 연구되고 있다.^{3,4,5)} 우리나라의 수도권 대기오염은 선진국의 주요도시와 비교할 때 매우 심각한 수준이며, 미세먼지와 이산화질소 오염도는 OECD국가 주요도시 중 최고수준으로 서울의 미세먼지 농도는 런던의 3.5배, 이산화질소 농도는 파리의 1.7배 수준으로서 매우 심각한 상태이다. 따라서 이러한 대기질 환경개선을 위해서는 기본적으로 엔진연소기술의 개발과 더불어 후처리장치의 적용이 필수적으로 현재 국내에서도 DPF, SCR 및 DOC 등과 같은 디젤 후처리기술에 관한 연구개발이 활발히 진행중에 있다.⁶⁾ 특히 DPF는 디젤기관의 후처리장치 중 PM 저감에 가장 효과적인 후처리장치로써 전 세계적으로 활발히 연구가 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 실용화 가능성이 높은 촉

엄동섭(책임저자) : 국립환경과학원
E-mail : dseom@me.go.kr, Tel : 032-560-7626
이승호 : 경기공업대학 자동차과
오상기 : 경기공업대학 자동차과

매형 자연재생방식 DPF에 대한 재생특성평가실험을 실시하고 상용화를 위한 선행연구로서 Transient cycle test를 실시함으로써 실차 운행 조건을 위한 타당성을 검토하였다.

Table 1 Objective of air quality improvement in the capital region

Pollutant concentration	2001year(seoul)	2014year(seoul)
PM10	65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NO2	37 ppb	22 ppb

2. 촉매형 자연재생방식 DPF의 원리 및 특징

DPF는 디젤엔진 배출가스 중의 PM을 필터에서 포집하고, 필터를 재생시키기 위해 포집된 PM을 저온에서 산화 또는 강제로 연소시켜 제거하는 배기 후처리기술이다. 현재는 3세대 DPF기술인 첨가제방식, 전기히터 보조재생방식, 플라즈마방식 및 신축매시시스템(DPNR)이 개발되어 연구되고 있으며 상용화된 기술로 운행차에 가장 널리 적용되는 시스템은 PM의 자연발화 개시온도인 550~600°C이하의 250°C정도에서 PM을 산화 연소시키는 촉매를 적용한 자연재생방식 DPF 시스템(Passive DPF system)이다. 이 시스템은 경유차량의 운행 중 배기 온도조건이 충분할 경우, 별도의 외부열원 없이 엔진자체의 배기열만으로도 필터의 재생이 가능하다.^{7,8,9)}

일반적으로 PM은 대기 중의 산소농도조건인 550°C 이상에서 연소되어 CO₂와 H₂O로 분해된다. 그러나 NO₂가 풍부한 가스 분위기에서는 그 연소 분해온도는 낮아진다. 이런 원리를 이용하여, 본 연구에 사용한 촉매형 자연재생방식 DPF는 Cordierite재질을 사용함으로써 SiC계열 필터보다 열팽창계수가

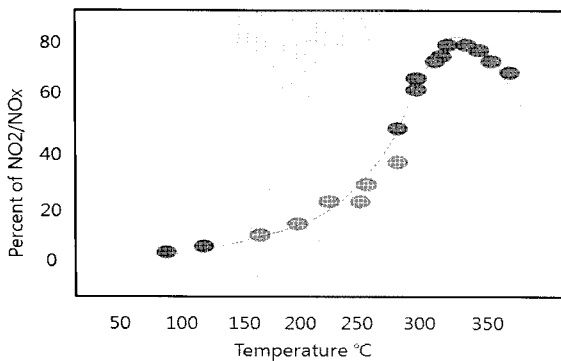


Fig. 1 NO-Light-off temperature of DPF catalyst

낮고, 기계적 특성이 우수한 장점이 있다.¹⁰⁾ 또한 배압의 상승으로 인한 급격한 온도상승과 열손상 등의 대비와 PM의 포집효율을 최대화 할 수 있도록 셀밀도, 기공율 및 공간속도를 최적화함으로써 Fig. 1과 같이 150~272°C에서 배기가스 중의 NO를 NO₂로의 전환하도록 설계하였다.

촉매반응으로 인해 NO₂가 풍부해지고, 포집된 PM의 산화 및 발화가 개시되는 온도가 낮아진다. 따라서 배기가스온도가 산화개시온도(NO-LOT50)인 250°C에서 PM의 연소가 개시된다. 따라서 운행 중 배기가스 온도가 NO-LOT50 이상에 도달할 때마다 PM이 제거되어 필터를 재생시킨다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

실험샘플의 제원은 Table 2와 같이 촉매필터 전단부에 산화촉매(DOC : Diesel Oxidation Catalyst)를 적용한 Oxi. cat + CSF(Catalyzed Soot Filter)장치를 사용하였다.

Table 2 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

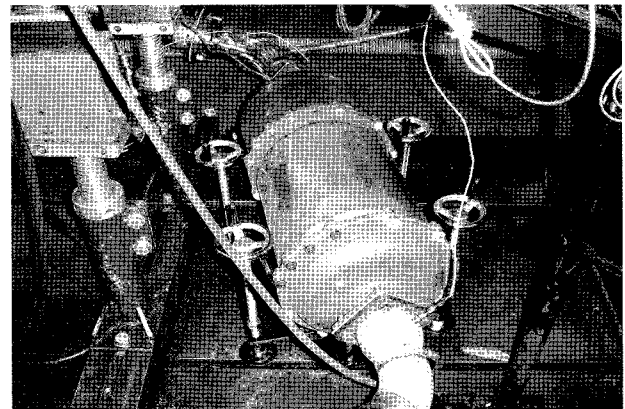


Fig. 2 Oxi.cat. and CSF structural DPF catalyst

3.1.1 엔진실험장비

본 연구의 실험장치는 440kWh급 AC엔진동력계를 사용하였으며, 필터전단 온도 및 압력 등을 실시

간으로 측정하였다.

실험엔진 제원은 Table 3과 같고 연료는 황함량 15ppm(wt%)의 초저유황경유를 사용하였다.

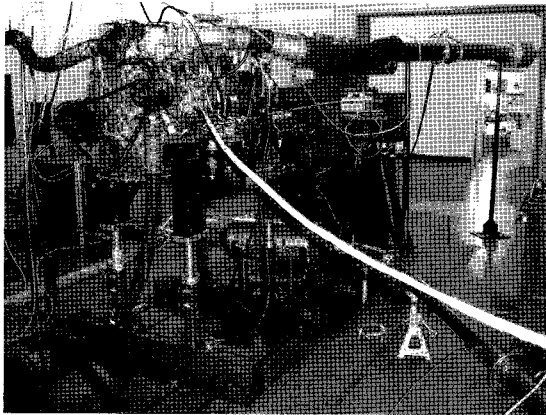


Fig. 3 Heavy-duty Diesel engine and DPF

Table 3 Specification of the test engine

Item	Spec.	Item	Spec.
Displacement	8,505 cc	CR	16.5
Charge air	TCI	Max. Power	275 bhp/ 2,100rpm
NO. of Cyl.	4 Inline	Max.Torque	1,085 Nm/ 1,200rpm
Injection	Electric Unit Injection	Bore x Stroke	130mm x 160mm

3.2 실험 방법

축매형 자연재생방식 DPF의 재생개시온도(LOT, Light Off Temperature)와 재생평형온도(BPT, Balance Point Temperature)를 찾기 위해 특성실험을 실시하여 최적의 재생시작온도 및 재생평형온도를 찾고, 유럽대형차법규인증 시험방법인 ESC모드와 EURO-4모드인 ETC로 실험함으로써 다양한 배출가스 저감효과를 알아보고, 저감효율시험을 실시하였다.

3.2.1 특성 실험

특성실험은 재생성능 및 간이내구성을 분석하는 실험으로, Seoul-10모드를 사용하여 50시간 동안 반복 운전하면서, 엔진의 운전조건과 장치전·후의 온도 및 배압 등을 실시간 모니터링 하여 장치의 포집 및 재생성능을 분석하였다. 또한, 0시간, 25시간, 50시간에 각 3회씩 ND-13모드를 이용하여 장치부착에 따른 입자상물질과 가스상물질의 배출가스 저감성능을 통하여 장치의 내구성, 열화특성 및 단축내

구성능을 분석하였다.

한편, BPT를 확인하기 위해 장치 전단부에서의 온도 및 압력을 실시간 기록하였으며 장치의 재생시점을 확인하였다.

Table 4 Dynamometer operation schedule on Seoul-10 cycle

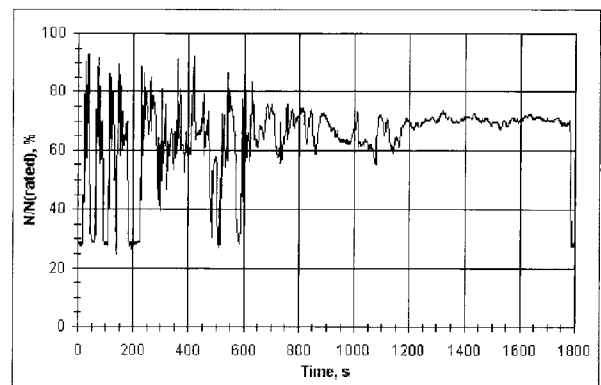
No.	Engine Speed(%)	Load Rate(%)	Driving Time(min)
1	Idling	0	2
2	40	25	2
3	60	100	2
4	60	50	2
5	Idling	0	2
6	80	100	2
7	80	50	2
8	Idling	0	2
9	100	100	2
10	100	50	2

재생성능은 기관 회전수보다는 부하율에 영향을 많이 받으므로, 기관회전수를 중속으로 고정된 상태에서 부하율을 조금씩 증가시키는 방법으로 진행하였다.

3.2.2 배출가스실험

축매형 자연재생방식 DPF 장착에 따른 최종저감 효율 실험방법은 전부하모드로 장치 장착 전·후의 성능특성 및 연비를 비교하였고, 입자상물질과 가스상물질의 저감성능은 유럽대형디젤차량 인증 모드인 ETC모드로 실시하였다.

배출가스 계산은 PPM 단위로 측정된 배출가스 농도를 흡기온도, 습도, 엔진출력 등을 고려한 EC-Regulation에 따라 실시하였다.



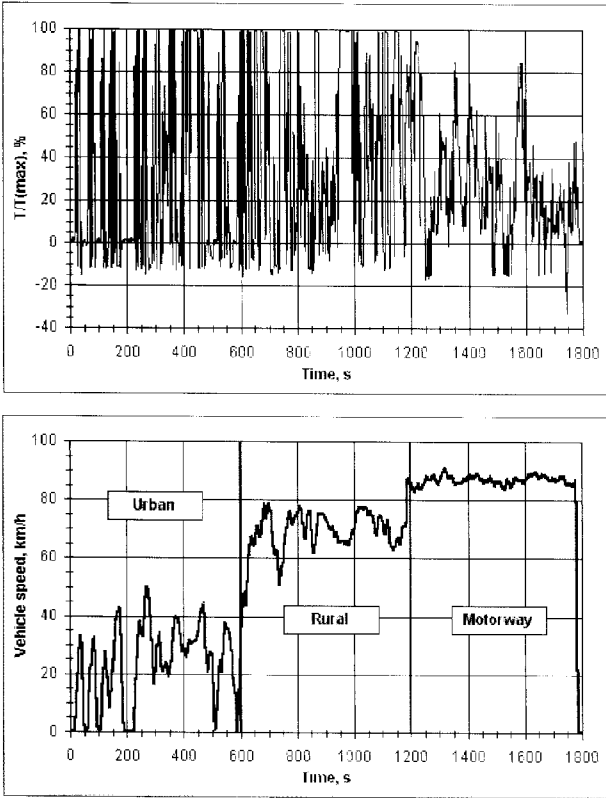


Fig. 4 Dynamometer operation schedule on ETC mode

4. 실험결과

4.1 특성실험

4.1.1 Seoul-10 모드

축매형 자연재생방식 DPF장치의 재생성능을 Seoul-10모드로 50시간 동안 반복하여 측정, 분석하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 Seoul-10모드에서의 엔진운전 조건(엔진 회전수, 토크)과 장치 전단부에서의 배기온도 및 압력 등을 실시간 모니터링한 측정결과를 나타낸 것이다.

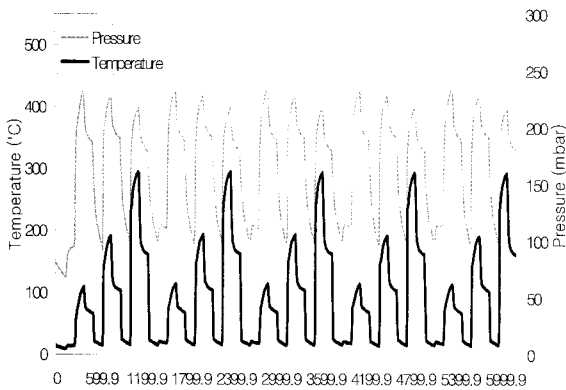


Fig. 5 DPF inlet temperature and back pressure trend on Seoul-10 cycle

Seoul-10 모드의 운전 조건으로 50시간 실험을 진행하는 동안 장치 전단부에서의 온도 및 압력이 뚜렷하게 증가 또는 감소하는 부분이 없으며, 배출가스 측정결과에 있어서도 실험 초기의 값에 비해 크게 변화한 부분이 없었다.

향후 내구성능시간을 확대하여 보다 면밀한 연구가 수행되어야 하겠으나 Seoul-10 모드에서의 50시간 특성실험결과, 장치의 내구성능에 있어 열화정도는 크게 나타나지 않는 것으로 분석되었다.

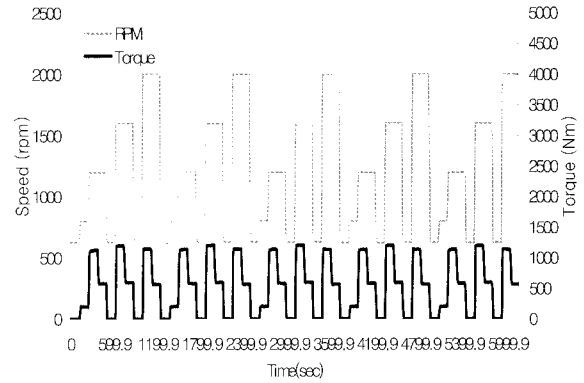


Fig. 6 Torque and rpm trend on Seoul-10 cycle

4.1.2 BPT(재생평형온도) 실험

BPT측정 시에는 엔진의 회전 속도를 중속인 1200rpm로 고정시키고, 부하를 조절하면서 배출가스 온도를 240℃부터 340℃까지 단계적으로 변화시켜가며, 필터 전단부의 압력변화를 측정하였다. Fig. 7은 운전조건 변화에 따른 필터 전단부의 배기온도와 배압특성을 나타낸 것이다.

Fig. 7에서는 320℃근처에서 온도가 주기적으로 감소하는 것으로 보아, 320℃ 근방을 BPT로 추정할 수 있으며 보다 정확한 실험을 위해서 Fig. 8과 같이 각 온도별 배압의 기울기를 계산하였다.

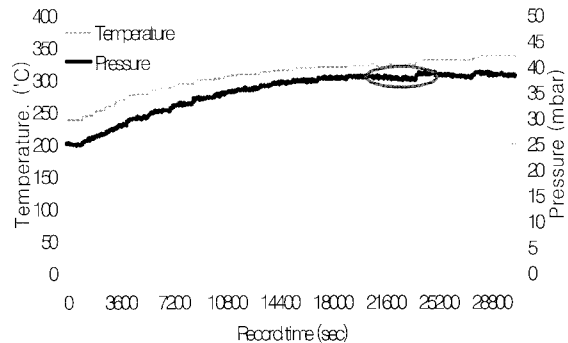


Fig. 7 Back pressure according to exhaust gas temperature at 1200rpm

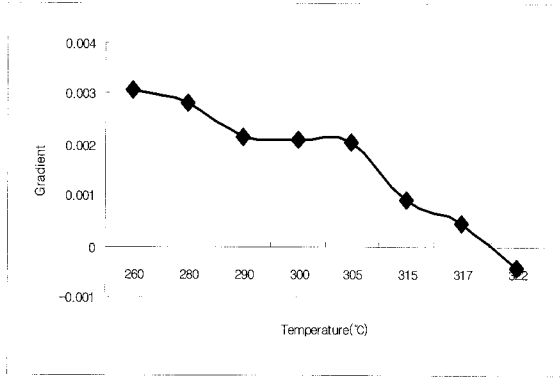


Fig. 8 Back pressure increase to exhaust gas temperature at 1200rpm

4.1.3 장치성능시험

1) 출력 및 연료소비율

축매형 자연재생방식 DPF장치 장착에 따른 내구 시간별 엔진출력 및 연료소비율을 측정된 결과, 출력의 경우 전체 50시간 운전 중 0시간, 25시간, 50시간에서 측정하였고, 최대 1.2% 이내의 감소율을 나타내어 출력에 거의 영향이 없음을 알 수 있었다. 또한 연료소비율도 출력과 거의 동일하게 영향이 없음을 확인하였다.

Table 5 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 (장착전 기준)

Table 6 Emission test result on Seoul-10 cycle

Row	Mass of emissions (g/kWh)			
	CO	NOx	THC	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

2) 배출가스 저감효율

장착 전·후의 오염물질별 저감효율에서 CO, THC, PM의 경우는 상당히 높은 저감율을 나타내었지만, NOx의 경우 미미하지만 다소 증가하였다.

0시간, 25시간, 50시간 경과 후의 시간대별 저감 성능은 CO, THC, PM, NOx 모두 시간이 경과하여도 저감성능에는 큰 변화가 없었다.

4.2 최종배출가스실험

축매형 자연재생방식 DPF장치의 최종 배출가스 특성 실험을 위해 EURO-4모드인 ETC모드로 저감 효율실험을 한 결과는 아래 Table 7과 같다.

축매형 자연재생방식 DPF장치 장착 전·후 최대 출력조건에서의 기관출력은 약 0.12%, 연비는 약 0.31% 차이를 보였는데, 장치 부착이 기관성능에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단할 수 있고, PM 저감율은 83.1%로써 높은 효율을 보였다.

Table 7 Final emission reduction efficiency test result

Row	Engine performance			
	Power(kw)		Fuel consumption (g/kwh)	
Base engine	234.2		208.5	
DPF	233.9(0.12)		207.84(0.31)	
Row	mass of emissions(g/kwh)			
	CO	NOx	NMHC	PM
Base engine	2.11	8.52	0.55	0.26
DPF	0.086 (95.9)	8.42 (1.04)	0.037 (93.2)	0.050 (83.1)

※() : Reduction rate (장착전 기준)

5. 결 론

본 연구에서는 대형 디젤기관용 배출가스 저감장치인 축매형 자연재생방식 DPF의 재생특성평가실험을 실시하고 상용화를 위한 선행연구로서 Transient cycle test를 실시함으로써 실차운행조건을 위한 타당성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 엔진동력계상에서 축매형 자연재생방식 DPF의 성능시험결과, 저감장치의 장착으로 인한 배압의 상승이 크지 않았고, 출력 및 연비의 저하가 나타나지

않았다.

2. 과도운전 싸이클인 ETC모드 시험결과 PM이 83.1% 저감되었고, 가스상 물질인 CO, THC에 대해서도 90% 이상의 높은 저감효율을 나타내었다.

3. NOx의 경우에는 NO₂의 환원에도 불구하고 연속적인 NO의 산화로 인하여 그 변화량이 크지 않았다.

4. 촉매형 자연재생방식 DPF의 특성시험 결과, 배출가스 저감성능의 저하가 일어나지 않아, 촉매형 자연재생방식 IICC가 높은 내구성을 나타내었다.

5. 향후 촉매형 자연재생방식 DPF의 상용화를 위해서는 간이내구성실험을 기초로 운행차에 의한 내구성 및 성능실험이 수반되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. 세계경제포럼(WET), 2005, "2005 OECD Environmental Data".
2. 김종춘, 류정호 외 5, 2006, "대형디젤엔진 후처리 Plasma/Oxidation Catalyst/IICC 시스템의 재생성능에 관한 연구", 교통환경연구소.
3. EC regulation 2005/77/88.
4. Official Journal of the European Communities, 1999, "Directive 1999/96/EC of the european parliament and of the council of 13 December 1999".
5. R. Allansson, P. G. Blakeman, B. J. Cooper, H. Hess, P. J. Silcock, and A. P. Walker, A.P., 2002, "Optimizing the Low Temperature Performance and Regeneration Efficiency of the Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter (CR-IICC) System", SAE 2002-01-0428.
6. 신동길, 정용일, 2004, "자연재생식 촉매방식 매연 여과장치의 실차실험에 관한 연구", 한국자동차공학회 2004년도 춘계학술대회 논문집, pp. 307~312.
7. 정용일 외 22인, 2003, "경유자동차 후처리장치 평가", 한국기계연구원.
8. A. G. Konstandopouls and M. Kostoglou, 2000, "Fundamental Studies of Diesel Particulate Filters : Transient Loading, regeneration and Aging", SAE paper No. 2000-01-1016.
9. <http://www.dieselnet.com/standards>.
10. Ministry of environment(MOE) announcement, NO. 2005-16.