촉매이용 디젤 PM 저감기술

정 홍 석 | SK(주) 대덕기술원
석유제품기술팀 부장
E-Mail : junghs@skcorp.com

1. 머리말

최근 에너지 절약이 관심사로 대두되면서 가솔린 엔진에 비해 30~40% 연비가 좋은 경유자동차에 대한 관심이 증가하는 추세이다. 특히, 교통체증이 심한 도심 구간에서 연비 향상을 보여주고 있어 교통량이 많은 미국, 일본 및 유럽을 중심으로 경유자동차의 소비율도 증가하고 있는 상황이다.

경유자동차는 기상변화를 일으키는 지구 온난화의 주 요인인 CO_2의 배출량이 가솔린 차량에 비해 30%정도 적은 편으로, 차량의 증가로 CO_2의 생성량이 많아지고 있지만 현재로서는 CO_2 자체를 연소나 후처리 기술로 저감할 수 있는 기술이 없어 연료를 적게 사용하여 CO_2의 생성량을 줄이는 것이 가장 효율적인 대책으로 알려져 연료소모가 적은 경유자동차의 필요성이 제기되고 있는 것이다.

우리나라는 2001년말 기준 1300만 여대의 자동차를 보유하고 있으며, 그중에서 디젤자동차는 2001년 한해에만도 75만 여대의 다목적차량을 포함하여 총 120 만여대가 생산되어 2001년 현재 350만 여대가 운행중에 있다. 이같이 우리나라는 디젤자동차의 비율이 급격히 증가하고 있어 세계 어느 나라보다도 디젤매연 및 오존으로 인한 대기공해가 심각한 수준이다.

본 지면에서는 수도권 대기오염의 주범으로 지적받고 있는 입자상물질의 대폭적인 저감에 기여할 수 있는 세계 각국의 대표적인 기술에 대해 촉매 이용 PM 저감기술을 중심으로 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 경유차량 및 후처리장치(DPF)의 필요성

압축 착화 방식을 사용하는 디젤 엔진은 에너지 효율이 높아 경제적이며 이에 따른 온실 가스 배출이 적은 장점을 지니고 있다. 또한 디젤 엔진은 대형 자동차에 대한 적용성이 탁월하여 전세계적으로 널리 이용되고 있다. 경유 차량은 동급 휘발유 차량에 비하여 30%~50% 정도 연비가 높다.

그림 1은 스파크 점화 방식의 엔진을 사용하는 차량과 디젤 엔진을 사용하는 차량에 대하여 100Km를 주행할 때 소모되는 연료량을 비교한 통계 그래프로 경유차량의 우수성을 파악할 수 있다.

표 1은 국내에서 개발된 동급 차량에 대한 휘발유 차량과 경유 차량의 성능비교 테이블이다. 이 비교에서는 경유 차량은 50% 정도 연비의 우위를 나타내고 있으며 이산화탄소는 30% 정도 적게 배출되는 것으로 나타나고 있다. 그러나 경유 차량은 매연으로 통칭되는 입자상물질(PM)과 NOX를 상대

표 1. 가솔린차와 디젤차의 배기가스

(단위 : g/km)

차 량	연 료	배기량(ℓ)	CO	HC	NOx	PM	CO2	연비
차량 A	경 유	2.0	0.129	0.016	0.326	0.033	170.0	15.5
	가솔린	2.0	0.24	0.03	0.04	-	223.0	10.5
차량 B	경 유	1.5	0.16	0.011	0.417	0.036	163.4	16.4
	가솔린	1.5	0.92	0.03	0.07	-	213.7	10.9

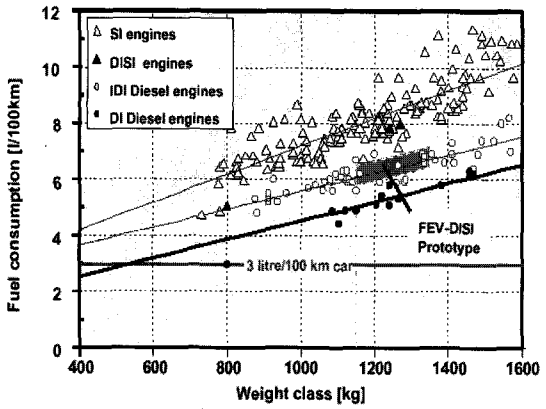


그림 1. Spark Ignition 엔진과 Compression Ignition 엔진의 연비 비교

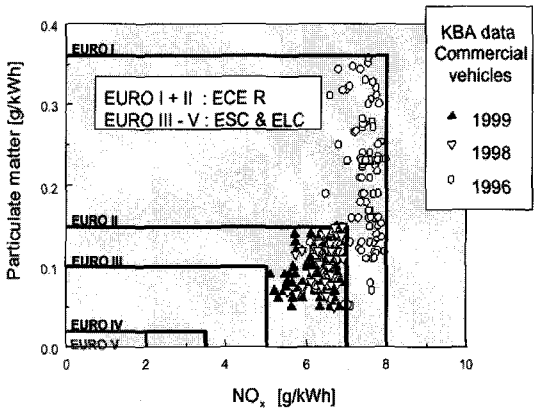


그림 2. EU의 배기가스 규제

적으로 많이 배출하는 문제점을 지니고 있다.

특히 경유차에서 발생하는 검은 매연은 심각한 도시 환경 오염 문제를 유발하고 있으며 호흡기 질환을 유발할 수 있는 것으로 알려지고 있어 선진국에서는 매연 발생량을 축소하기 위한 규제 강화가 이루어지고 있다. 그림2는 자동차 배출 규격을 대표하고 있는 유럽의 규제 수준을 나타낸 것이다.

유럽에서는 2005년부터는 신규 제작되는 경유차의 배출 허용 기준을 EURO IV로 강화하도록 되어 있다. Common Rail 방식으로 통칭되고 있는 고압 직접 분사 기술 등의 자동차 기술로 EURO III 수준의 배출 허용 기준을 만족시킬 수 있으나 EURO IV 수준을 충족시킬 수 없으며, 이에 따라서 DPF(Diesel Particulates Filter)를 부착해야 해당 수준을 충족시킬 수 있는 것으로 업계에서는 판단하고 있다. 프랑스 푸조 자동차사는 승용차용 DPF를 개발하여 현재까지 20 만대 정도를 부착 판매하고 있다.

또한 영국,독일,스위스,프랑스 등의 유럽 국가와 미국에서는 이미 대형 경유 운행 차량에 DPF를 부착하는 Retrofit 프로그램을 실시하여 전세계적으로 이미 4만대 이상의 차량에 DPF를 부착하여 운행하고 있다.

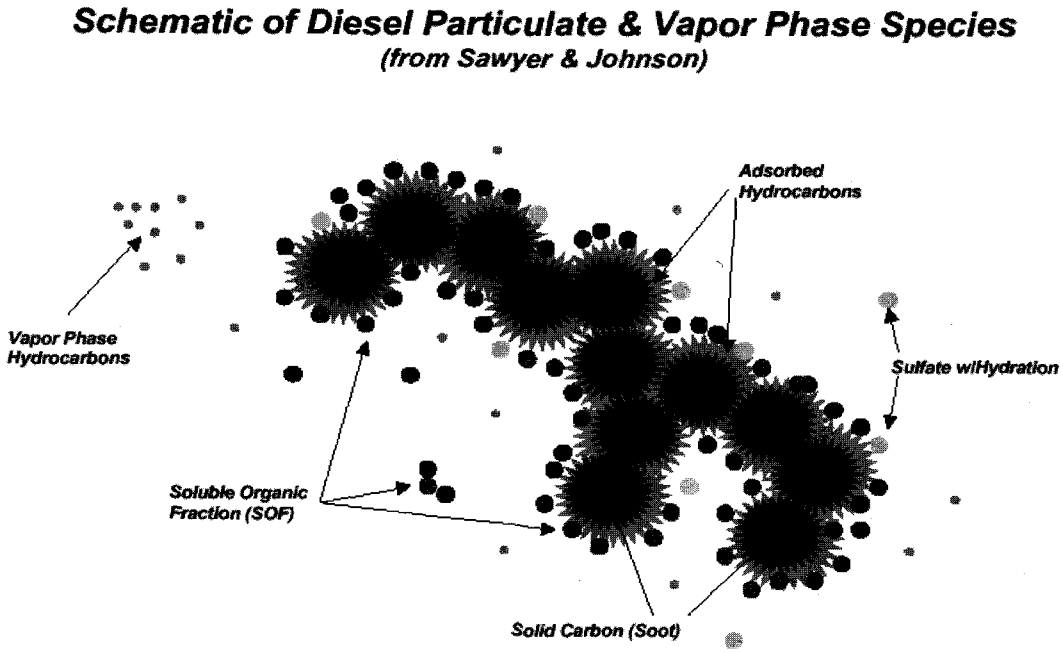


그림 3. 디젤 PM 구조도

2.2. 디젤입자상물질(PM: Particulate Matter)이란

(1) 디젤입자상물질의 생성

디젤엔진 soot는 온도 1000-2800k, 압력 50-100atm 조건에서 수 millisecond 사이에 생성되며, 국부적으로 공기가 과부족한 곳에서 long-chain molecule의 산소부족에 따른 열분해(thermal cracking)에 의해 발생하는데 탄소원자 12-22개 범위이며 H/C비 2인 연료가 연소에 의한 화학반응으로 H/C비 0.1인 직경 20-30nm의 입자 수백 개가 뭉쳐진 형태로서 초기입자는 연료분자가 열분해에 의해 탈수분 반응을 일으켜 soot 전 단계의 미립자핵을 생성하며 acetylene과 higher homologogues(C2nH2)과 PAH로 구성되어 있고 직경이 2nm 이하의 초미립자이다.

입자가 surface growth(표면성장), agglomeration(응집), coagulation(엉김), aggregation(합체) 등의 과정을 통하여 그림 3과 같은 soot로 성장하며, 엔진에서의 soot 발생은 국부적 산소부족, 탈수분(dehydration), 분해반응(cracking reaction) 등에 기인하는데 디젤엔진의 확산연소 중에 대량의 soot가 발생하며 연소후기에 화염 중에 도입되어 재연소가 발생하여 soot가 급속히 감소하는 경우도 있다.

PM은 분위기조건 및 유동조건에 따라 상이한 성상을 나타내는데, 배기가스온도 500℃ 이상에서는 대부분 직경 15-30nm의 탄소입자 덩어리로서 H/C비가 0.2-0.3인 고체상이고, 500℃ 이하에서는 H/C비가 1.2-1.7로서최대 40%정도의 SOF(soluble organic fraction)가 흡착되어 있는 구조를 갖는다.

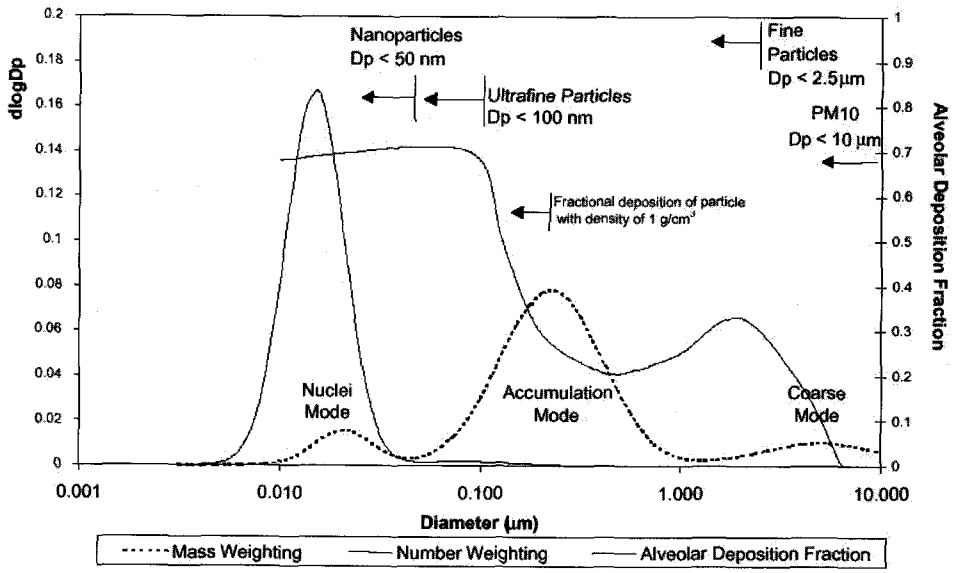


그림 4. 디젤 PM의 수분포 및 질량분포도

여기에서 SOF는 미연탄화수소, 산화탄화수소(oxygenated hydrocarbons; ketones, esters, ethers, organic acids), PAH 등으로 구성되어 있는 유기용매에 녹는 성질을 갖는 액상의 물질이다.

그림 4의 디젤 PM의 분포도에 나타나 있는 바와 같이 디젤엔진에서 배출되는 PM은 중량기준(accumulate mode)으로 볼 경우 입자직경이 0.1-0.25㎛에 집중되어 있으나, 수량기준(nuclei mode)으로 볼 경우에는 입자직경 10~20nm에 집중되어 있는데, 인체 유해성 측면에서 중량비율은 미미하나 입자수량 면에서는 대부분을 차지하고 있는 50nm 이하의 Nano-particles이 호흡기계통에 흡착비율이 높아 인체유해도가 훨씬 큰 것으로 알려져(미국의 HEI 연구결과) 있어 앞으로 Nano-particles 저감이 중요 과제로 다루어질 전망이고, 이미 선진국의 환경연구기관에서는 미세 입자상물질의 수량분포에 대한 데이터를 수집·평가 중에 있다.

(2) 연료중 황함량에 따른 PM 및 DPF의 영향

전술한 바와 같이 디젤 입자상물질은 고체상의 탄소를 주성분으로 한 Primary Particle과 미연탄화수소와 연료중의 황성분으로 인해 생긴 황산가스가 워시코트상에 저장되어 있다가 그림 5와 같이 350℃ 이상의 배기가스 분위기상에서는 산소와 결합하여 에어로졸상의 Sulfate로 성장하게 되는데 이럴 경우 입자상물질이 급격히 증가하는 현상을 보이고 있어 디젤엔진에 후처리장치를 적용할 경우 연료중의 황함량이 중요한 변수로 작용하고 있다.

CRT(Continously Regeneration Trap)를 장착하고 D-13모드와 같이 고부하 운전시 6번과 8번 모드에서는 Sulfate에 의해 입자상물질이 오히려 증가하는 경향을 보이고 있는데 Sulfate 생성을 억제시키기 위하여는 연료중의 황함량과 방향족 화합물을 줄이는 방법이 유일한 수단이라 할 수 있다.

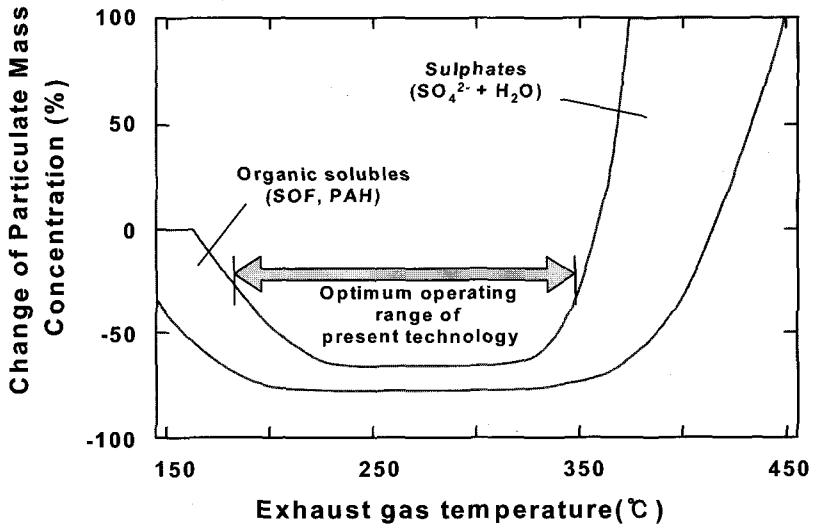
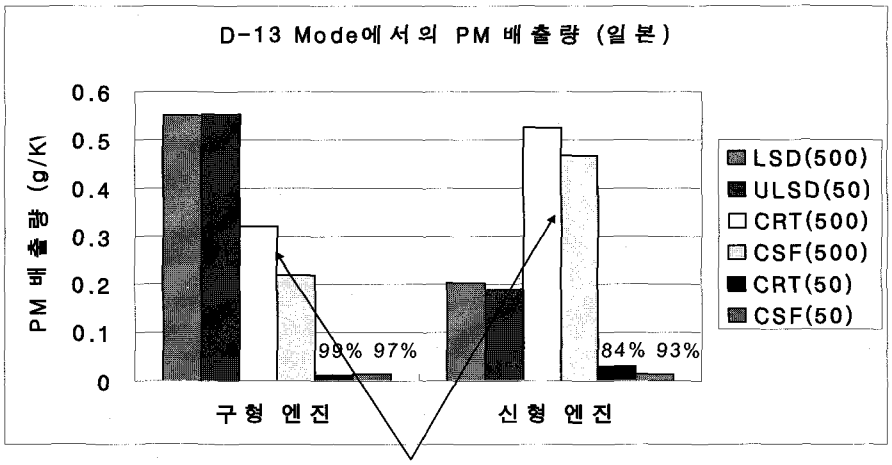


그림 5. DOC에 의한 SOx의 Sulfate 전환 특성



LSD(500ppm)의 경우 DPF에서의 Sulfate PM생성에 의한 PM 제거 효과 감소 또는 PM 증가 발생

LSD(500) : Sulfur 500ppm인 Low Sulfur Diesel을 사용한 시험결과
ULSD(50) : Sulfur 50ppm인 Ultra Low Sulfur Diesel을 사용한 시험결과
CRT(500) : Sulfur 500ppm인 Low Sulfur Diesel을 사용한 CRT 시험결과
CSF(500) : Sulfur 500ppm인 Low Sulfur Diesel을 사용한 CSF 시험결과
CRT(50) : Sulfur 50ppm인 Ultra Low Sulfur Diesel을 사용한 CRT 시험결과
CSF(50) : Sulfur 50ppm인 Ultra Low Sulfur Diesel을 사용한 CSF 시험결과

그림 6. 연료별 DPF 사양별 PM 배출량 특성

그림 6과 같이 LSD(500ppm)의 경우 DPF에서의 Sulfate PM생성에 의한 PM이 급격히 증가하는 현상을 보이고 있다.

따라서 디젤차량에 매연제거필터와 질소산화물 저감장치를 장착하여 소정의 목표를 달성하기 위해서는 연료중의 함량량을 낮추어야 한다.

이를 위하여 미국은 2006년까지 15ppm이하의 연료를 공급하고 2007년부터 규제를 강화하는 것으로 법제화 하였고, 일본은 2003년까지 동경도에 50ppm이하의 경유를 공급하는 정책을 추진하고 있으며, 우리나라의 환경부에서도 유사한 정책수립을 준비 중에 있다

각국의 디젤유 황함량 저감정책은 다음의 그림 7에 나타낸 바와 같이 정리할 수 있다.

2.3 디젤차량 저공해 대응기술

선진국의 규제강화에 따라 날로 강화되는 디젤자동차 청정이미지를 확보하기 위한 기술로는 크게 엔진기술, 촉매기술 및 보조기술과 CNG 등 경쟁기술로 나눌 수 있는데 적용가능성이 큰 기술을 기술적 성숙도에 따라 중장기적으로 정리하면 표 2에 나타낸 바와 같다.

그중에서 미국을 중심으로 추진되어 왔던 연료의존적 정책에 의해 보급이 활성화되어 오고 있는

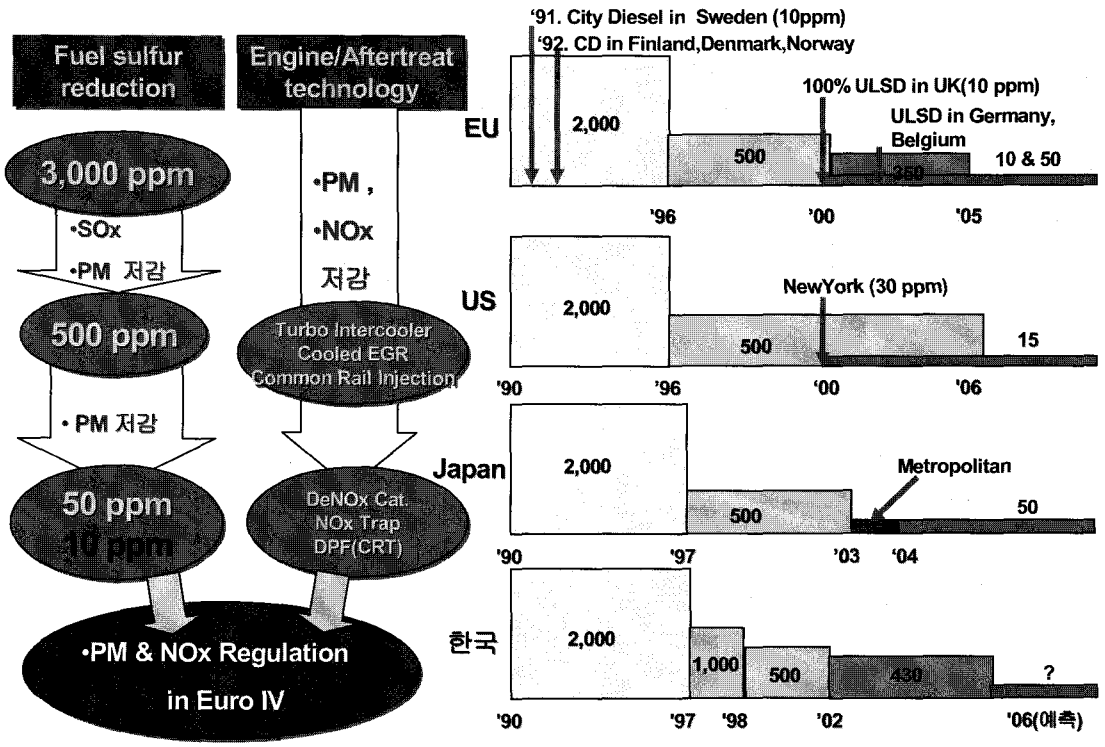


그림 7. 배기규제에 대응한 각국의 경유 황함량 저감정책

표 2. DPF 기술의 구분

기술 구분			기술 확보 시기 및 성숙도		
			1~3년	3~6년	6~10년
엔진기술		CRDI	◎	●	●
		CRDI+EGR	○	◎	●
		Adv(High NOx)		○	◎
촉매 기술	Catalytic Converter	DOC	●	●	●
		DeNOx/LNT		○	◎
	SCR	UREA		○	◎
		HC		○	◎
보조기술		Plasma		○	◎
		Additive	○	◎	●
		Heater/Burner	○	◎	●
연 료		경유(황함량 ppm)	350	50	<10
		DME	○	○	◎
		CNG	●	●	●
계측 및 평가기술		중량 분포	○	◎	●
		수량 분포		○	◎ ※ 수량규제 진입 예상
		인체유해성 및 지구온난화 효과	○	○	◎

※ 기술 단계 : 도입기 ○, 발전기 ◎, 성숙기 ●

CNG 기술이 연료의 안전성 및 시스템의 가격적인 약점으로 인해 좀더 경제적인 기술인 DPF 기술 등 다른 대체기술(기술 의존 정책)로 전환하는 추세로 발전하고 있으며, 그림 8에 나타낸 바와 같이 미국 뉴욕시의 버스에서 수행한 배기가스 배출 특성을 보면 DPF 기술이 질소산화물을 제외하고 CNG 보다 우수한 효과를 보이고 있다.

또한 CNG 차량은 DPF장착 차량에 비하여 한 대당 30,000$의 비용이 추가로 들어가는 것으로 알려져 경제적 부담이 상대적으로 큰 것으로 보고되고 있다.

2.4 세계의 DPF 기술동향

앞서 언급한 바와 같이 PM(디젤입자상물질)의 저감을 위해 상용화되고 있는 대표적인 촉매식 DPF 시스템을 소개하면 다음과 같다.

① CRT(연속재생식 필터)

연속재생방식(산화촉매+Filter) 필터로써 그림 9와 같은 구조를 갖고 초저유황 연료(ULSD)를 사

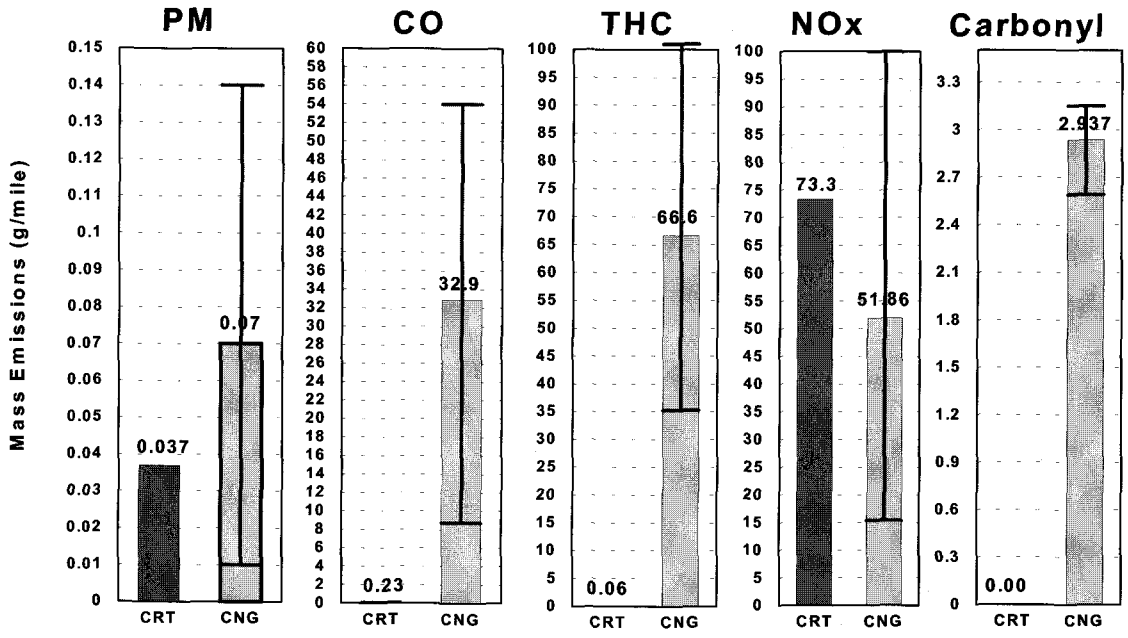


그림 8. 미국 뉴욕시 시내버스의 CNG 및 DPF 장착 특성 비교

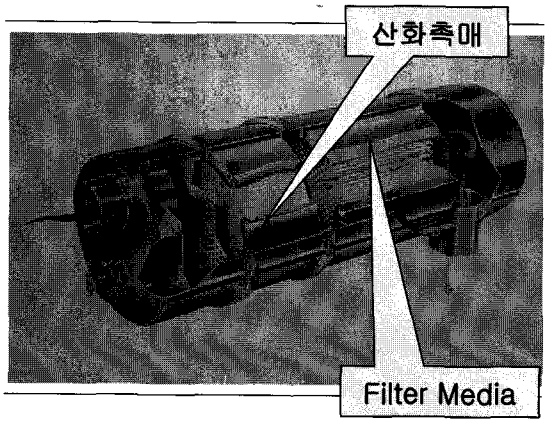


그림 9. 존슨메티사의 CRT

용하며, 2001년8월 미국 CARB 입증시험 통과한 제품으로 산화촉매에 의해 NO를 NO_2로 산화시키고, Filter에서 Active 한 NO_2에 의해 NO+O 반응을 유도하여 여기서 생성된 산소원자에 의해 Soot를 산화시키는 구조를 이용하는 장치로 정상적인 운전을 위하여 D-13모드에서 NOx/Soot비가 15 이상 되어야 하고, NO_2 발생메카니즘은 그림 10과 같다.

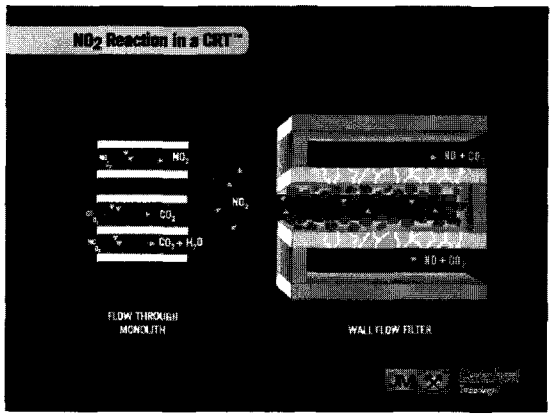


그림 10. 존슨메티사의 CRT 반응 구조도

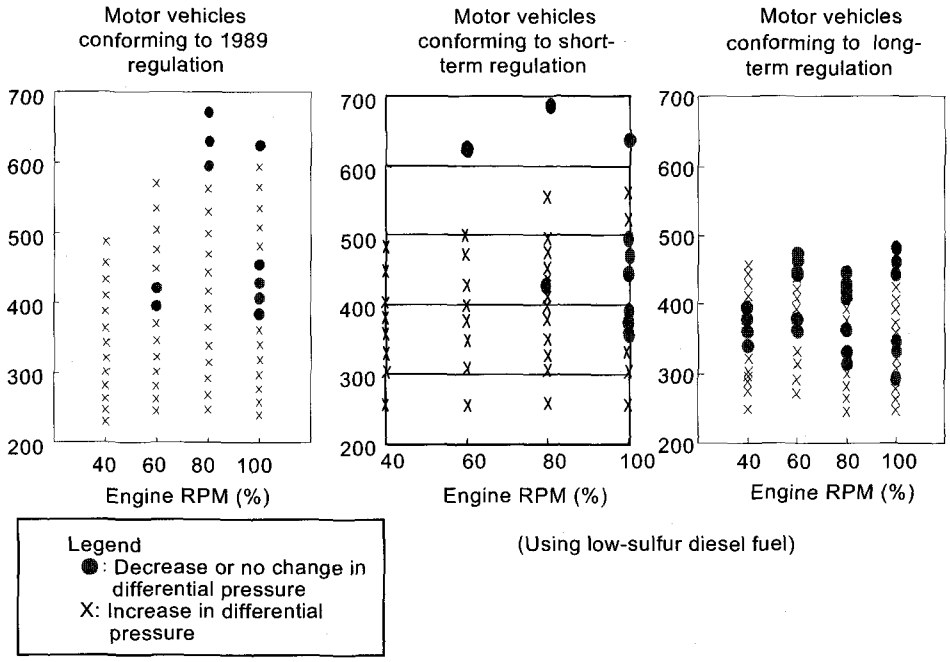


그림 11. 존슨메티사의 CRT BPT 특성

D13 모드에 있어서 Total NOx의 증가는 없으나, 배출가스 중의 NO_2의 비율이 증가하여 NOx 배출량의 26%에 이르고 있는데 일본의 동경도 인증을 위한 엔진동력계 시험결과 그림 11과 같이 1989년 규제차와 단기규제차에 적용할 경우 BPT(Balance Point Temperature)를 이루는 작동구간이 적어 실차 적용이 불가능할 것으로 보이며, 장기규제차의 경우에도 CRT를 적용하는데는 문제가 있을 것으로 보여 도시간 운행차량 등 350℃ 이상의 배기가스온도 구간이 많은 한정된 차량에만 적용될 수 있을 것으로 보인다.

② Catalyzed Soot Filter

2종류의 금속촉매 코팅 필터로서 350~500ppm 유황연료 사용가능하며 CRT와 같이 2001년 8월 CARB 인증시험을 통과한 장치로 필터 내에 유해가스와 Soot을 동시에 저감시키는 장치로 저감성능 및 엔진에서의 BPT (Balance Point Temperature)가 CRT와 유사한 특성을 보이고 있는 DPF 필터이다.

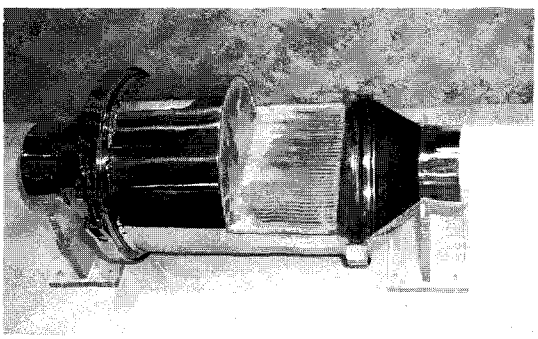


그림 12. 엥겔하드사의 DPX Soot Filter

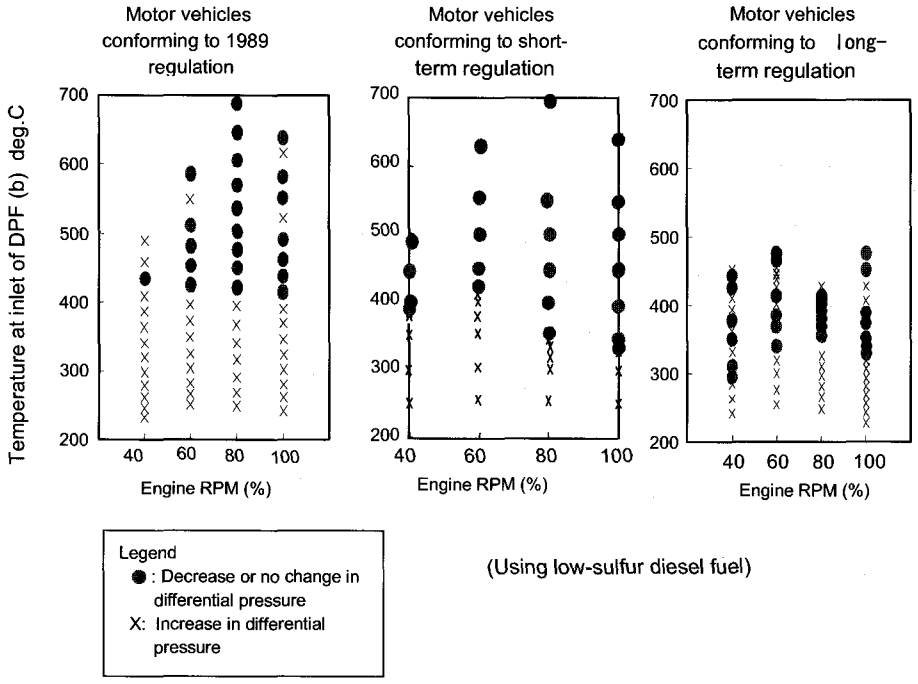


그림 13. 엥겔하드사의 DPX BPT 특성

D13 모드에 있어서 Total NOx의 증가는 없으나, 배출 가스 중의 NO2의 비율이 증가하여 NOx 배출량의 32~42%에 이르고 있다.

일본의 동경도 인증을 위한 엔진동력계 시험결과 그림 13과 같이 CRT에 비해 비교적 넓은 작동구간에서 BPT(Balance Point Temperature)를 이루나 CRT와 마찬가지로 도시간 운행차량 등 350℃ 이상의 배기가스온도 구간이 많은 한정된 차량에만 적용될 수 있을 것으로 보인다.

그림 14와 같이 엥겔하드의 Catalyzed Soot Filter(CSF) 인 DPX 와 존슨메티사의 CRT를 비교하면 다음과 같은 특성이 있음을 알 수 있다.

-CSF는 연료중의 황함량 의존성이 CRT 보다 크지 않아 일반 저유황경유도 사용가능 한 수준이고, -BPT(Balance Point Temperature)를 보면 CSF가 325℃~445℃수준으로 280℃~400℃ 수준인 CRT 보다 높아 시내버스와 같이 배출가스 온도가 낮은 시내주행에 불리함을 알 수 있다.

③ EnCPF(Enhanced Catalytic Particulate Filter)

촉매방식의 디젤 차량용 Soot 필터로서 SK-Mobis에서 사용하는 DPF 시스템으로, 서울시 혼잡지역 실차시험결과 신뢰성있는 재생성능을 보이고 있다.

12리터 대형 직분식 엔진에서의 BPT 시험결과 310~350℃로 고르게 분포하고 있어 엔진과의 matching이 잘 이루어지는 것으로 판단하고 있으

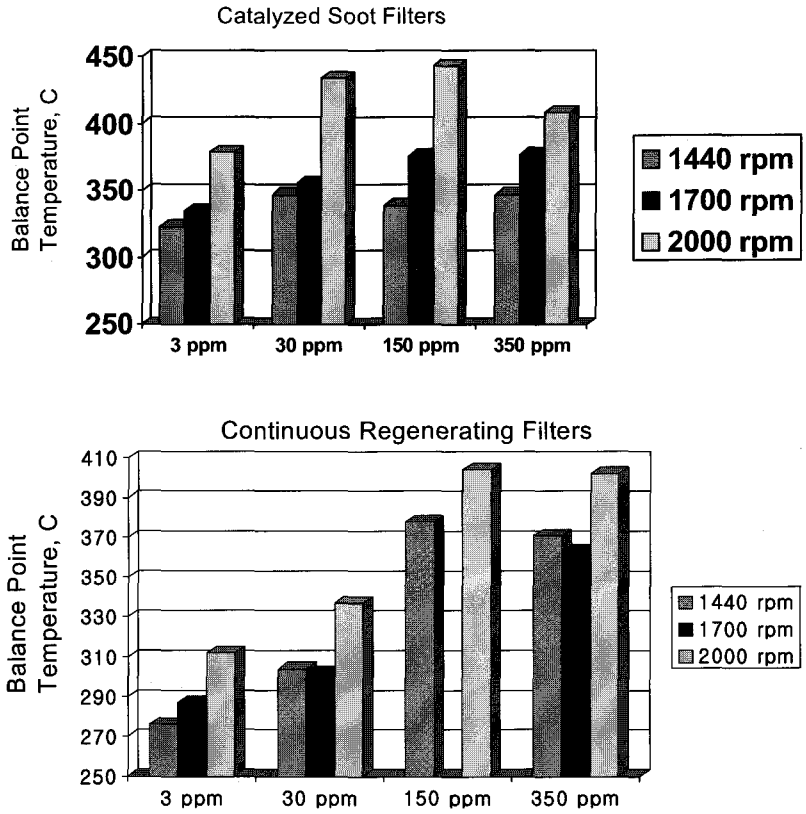


그림 14. 연료의 황함량에 따른 BPT 특성비교(CRT Vs CSF)

며, 특히 서울시 도심지에서의 낮은 온도특성(150~250℃)에서도 연료의 손실은 증가하나 쓰로틀링 및 배압에 의한 효과로 인해 재생이 잘 이루어 지는 결과를 나타내고 있다.

EnCPF는 낮은 온도에서 PM을 연소시키는 촉매를 Wall Flow Type의 필터에 코팅한 그림 15와 같은 장치이며 촉매 및 배기가스 열에 의한 자연재생방식(Self-Regeneration, Passive Regeneration)의 매연제거장치이다.

EnCPF는 시내버스, 시외 및 고속버스, 대형트럭 산업용 특장차 등에 적용될 수 있으며 PM여과효과

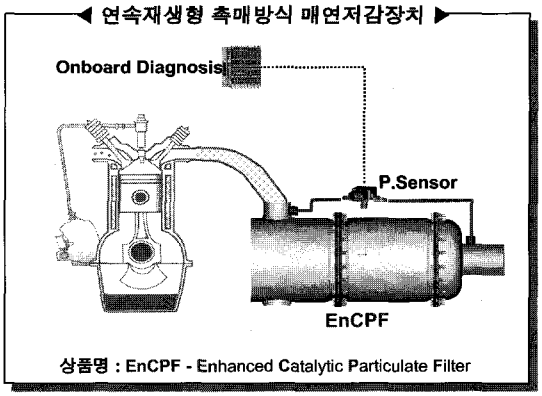


그림 15. SK-Mobis EnCPF System

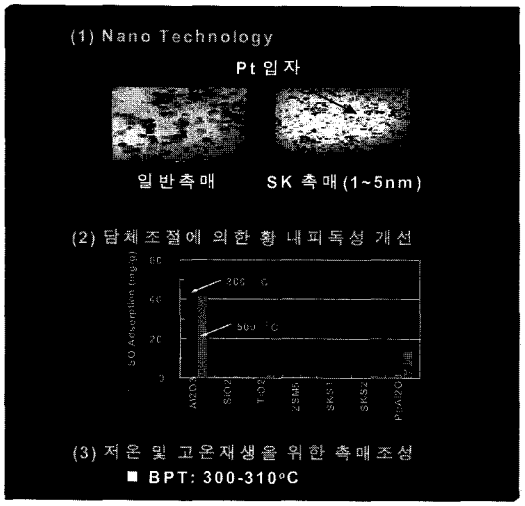


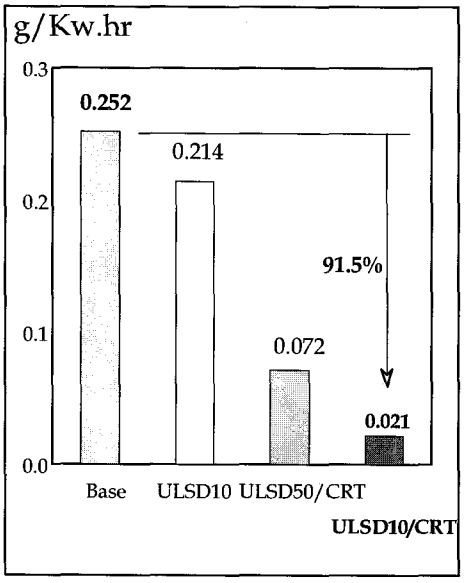
그림 16. 적용 촉매기술

는 90%이상이고 기존 머플러를 대체함으로써 출력 감소가 1%이내인 제품이다.

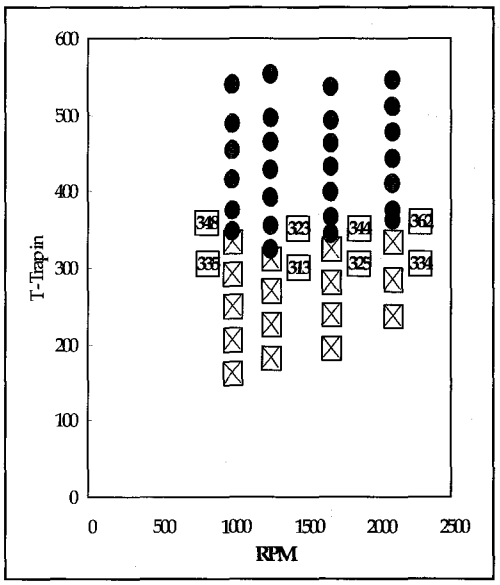
또한 그림 16에서 보여주는 것처럼 촉매 Coating 시 Nano Technology를 적용하여 촉매사용량을 감소시켰으며, 저온 및 고온에서 재생이 잘 이루어 질 수 있는 촉매 조성을 이루었고 황에 의한 내피독성을 향상시켰다.

그림 17와 18은 엔진 동력계상의 장치성능을 나타낸 것으로 특별한 연비 및 출력저하 없이 우수한 PM제거성능(D-13모드에서 PM 88%이상, J-13 모드에서 96% 이상 제거)과 THC 및 CO의 산화 성능을 나타내고 있다.

BPT(Balance Point Temperature)측면에서 Enhenced Catalytic DPF는 여타장치와 유사하게 310~350℃로 고루게 분포하고 있으나, 그림 19에서처럼 영역측면에서는 타제품 보다 광범위한 영역에서 재생되는 것으로 평가되는데 이는 Total NOx 배출량은 동일하나 NO_2 발생과 Soot와의 접촉이

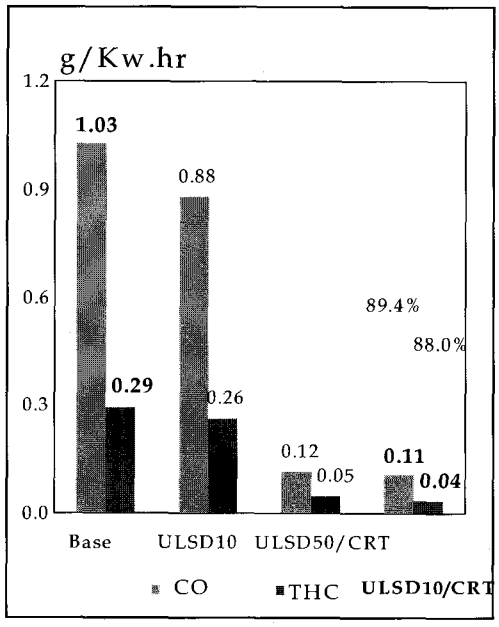


[PM 저감특성]

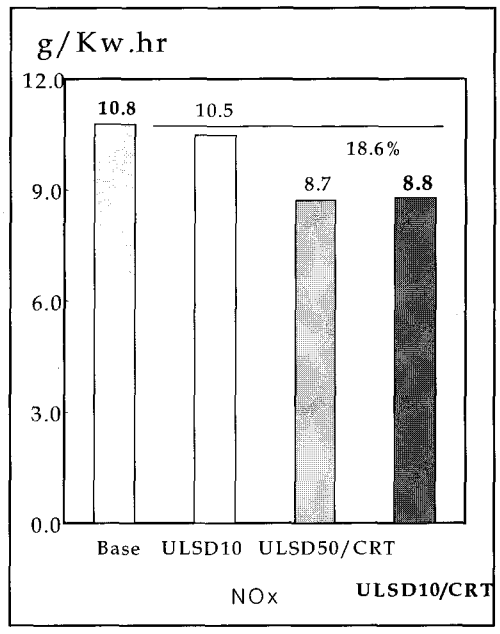


[Balance Point Temperature]

그림 17. DPF의 배기가스중 입자상물질 정화성능 및 BPT

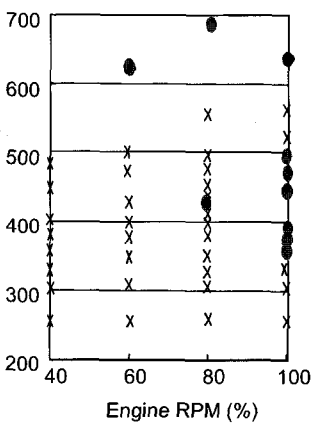


【CO, THC 저감 특성】

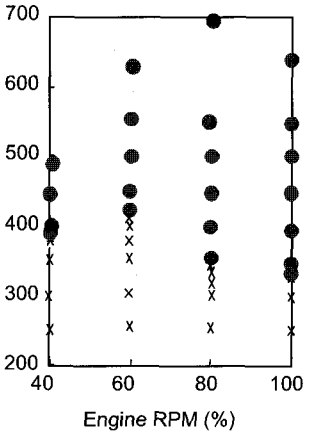


【NOx 저감특성】

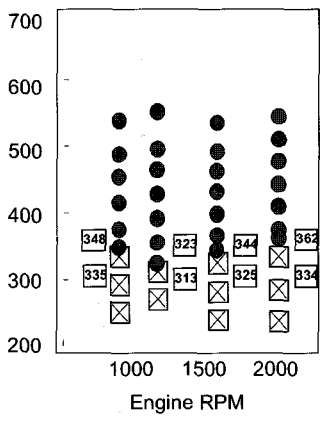
그림 18. 배기가스 정화성능



BPT of CRT



BPT of CSF



BPT of Hybrid

그림 19. 일본의 단기규제 차량수준에서의 BPT 특성

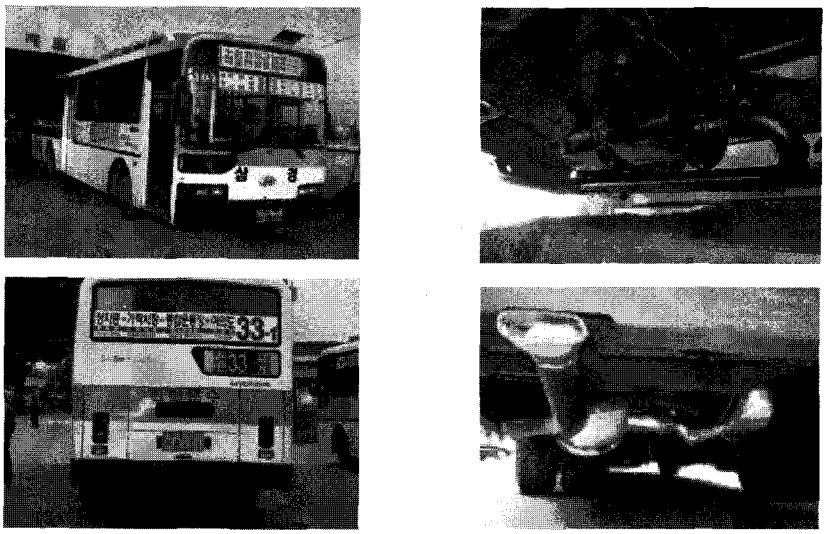


그림 20. 시내버스 장착 예

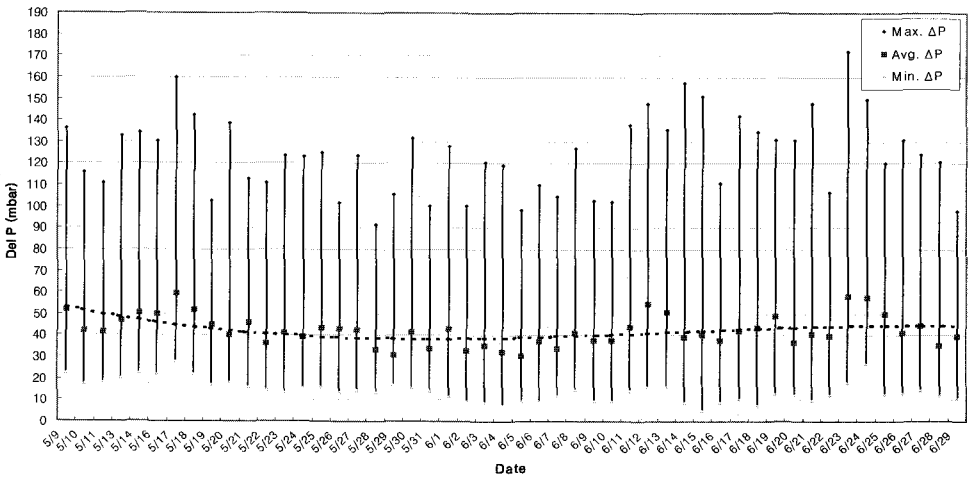


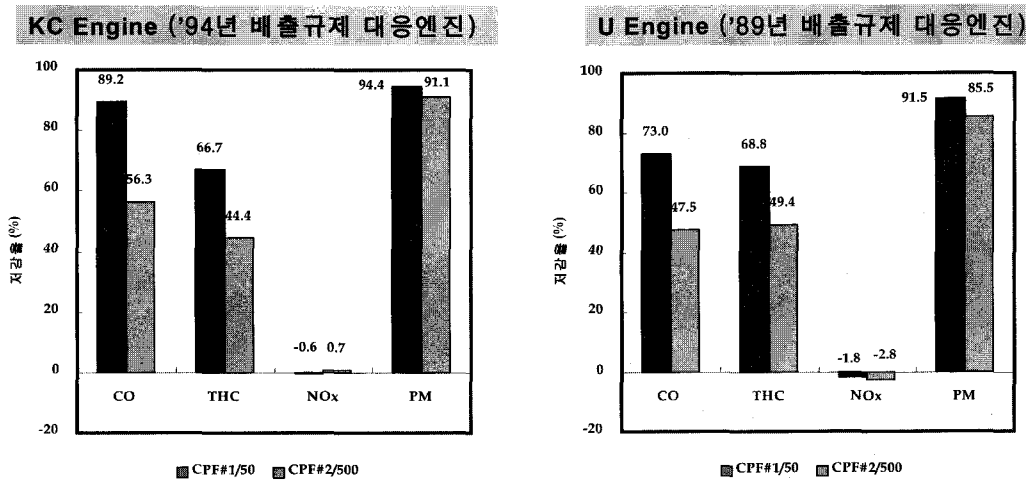
그림 21. 실차 내구시험시의 배압 특성

지속적이고 안정적으로 일어남으로써 전영역에서 안정적으로 산화되기 때문으로 판단된다.

본 촉매장치는 '02년 5~6월 월드컵기간 중에 서울/인천/수원 소재 시내버스 20여대의 Fleet Test 결과 결함사항 없이 양호한 결과를 얻었으며, 환경부의 경유차 매연저감장치 평가사업을 통해서도 현재 90,000Km 실차내구시험이 진행 중이다.

월드컵 기간 중에 20여대의 시내 버스에 장착하

❖ **Exhaust Emission Test Results at Nissan Diesel Lab. (7/20 – 7/30)**



Test Mode : Japan D-13 Mode

CPF#1 : ULSD용 Standard CPF
CPF#2 : High Sulfur용 CPF

그림 22. 닛산디젤기술연구소에서의 엔진벤치 시험결과

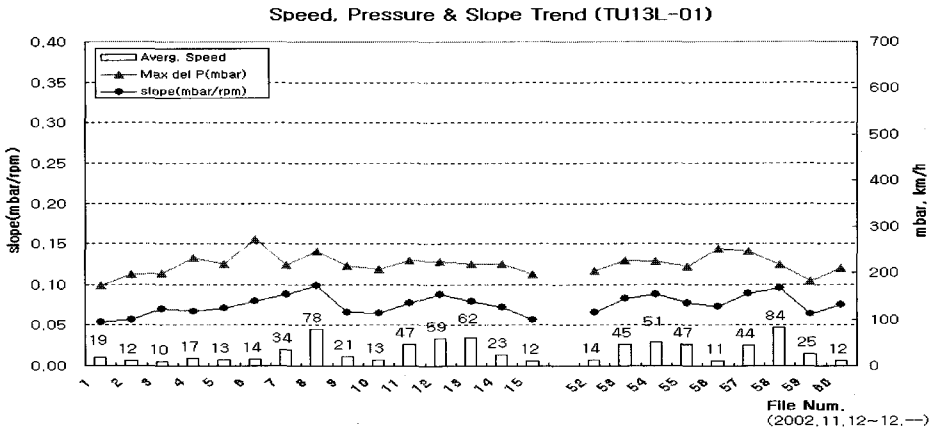


그림 23. 동경도 실차 인증시험 결과

여 운행한 날자 별 압력분포를 도시한 그림 21에서와 같이 규정된 압력치(150mbar 이하)에서 연속적인 재생이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

일본 동경도 인증을 위해 엔진동력계상의 시험은 일본 닛산디젤기술연구소에서 수행하여 89년 규제치에 대응한 U엔진과 94년 규제치에 대응한 KC엔진에서 그림 22와 같은 양호한 결과를 얻었으며 표 3의 트럭을 이용하여 차량 실차 성능 시험을 수행

표 3. 실차시험 대상 트럭

Vehicle	Engine			Operating Mode	Fuel
	Type	Displacement	Manufacturer		
Truck #1	U-PF6T, TCi	12.5 L	Nissan Diesel	Highway Mode	ULSD (S<50ppm)
Truck #2	U-6RB, TCi	13.7 L (340 PS)	Isuzu	General Mode	ULSD (S<50ppm)

하여 그림 23와 같은 결과를 얻어 장치인증을 성공적으로 승인 받았다.

3. 맺음말

경유자동차는 연비가 그 어느 엔진보다 높을 뿐만 아니라 지구 온난화의 주 요인인 CO_2의 배출량이 적어, 배출되는 입자상물질과 질소산화물을 제거하기 위한 신속하고 다양한 방법이 모색되면 환경 친화적엔진으로 개발이 가능하다.

디젤 후처리기술 특히 DPF는 21세기의 자동차 산업분야에서 부가가치 창출규모가 무엇보다 큰 차세대 전략상품으로서 적용가능한 제품기술을 보유하고 있는 기업이 현재 50여개 이상 난립하고 있는 상황이고, 선진업체에서는 각종 DPF, CRT, NOx Trap, SCR 촉매, Plasma 장치 등 핵심기술 및 다양한 복합시스템을 개발 중에 있으며 존슨메티(영), 엥겔하드(미), 푸조 자동차(프) 등에서는 가격 및 내구성 측면에서 실용성이 우수한 디젤매연저감장치를 양산중에 있다.

디젤 유해배기 물질 중 1차적으로 2005년까지 입자상 물질에 대한 규제에 초점이 맞추어져 규제 및 기술개발이 추진되고 있으며, 그 이후에는 대도시 주요 유해물질인 오존발생의 전구물질로 평가되고 있는 질소산화물 저감에 초점이 주어질 것으로 예측된다.

즉 1차적으로 DPF/CDPF 등을 적용하여 입자상 물질을 저감시키고 그 후에는 엔진의 작동조건을 저 PM · 고 NOx로 운전하고 SCR을 사용하여 질소산화물을 저감시키는 방향으로 기술이 적용될 것으로 예측된다.

이미 스위스 등 선진국에서는 자동차뿐 만아니라 호수를 운행하는 선박, 터널 등 지하 굴착장비 및 건설용장비 등에서 매연저감필터를 적용하고 있는 실정으로 가솔린엔진의 3원 촉매장치와 같이 인체 유해성으로 인한 사회적 요구에 의해 시장이 형성될 것으로 예측되는 디젤엔진을 동력원으로 사용하는 장비의 마지막 남은 고부가가치 부품이라고 할 수 있다.

우리나라의 디젤기술 및 후처리기술은 선진국에 비해 많이 뒤진 상태이고, 핵심부품 및 소요기술을 전량 수입하고 있는 상황이나 향후 5~6년 후에는 가솔린 후처리 시장 규모와 대등한 시장으로 발전할 것으로 예측되어 산업정책적인 육성이 필요한 분야이다.

또한 이미 기술적으로 입증된 촉매방식의 DPF는 일본 동경도의 예에서와 같이 정부의 정책적인 지원과 시장보급을 위한 재정적인 지원이 이루어진다면 우리나라 수도권 대기오염의 주범으로 지적

받고 있는 입자상물질(SPM)의 대폭적인 저감에 기여할 것으로 판단된다.

그러나 우선적으로 대규모의 시범운행을 통해 경유자동차 저감장치의 경제성 및 사회적 효과 등에 대한 엄밀한 분석이 필요하고, 여기에서 얻어진 자료를 바탕으로 국민적 공감대 형성과 이를 바탕으로 한 적극적인 DPF 보급정책으로 산업적 파급효과 및 삶의 질 향상에 기여할 수 있는 정책이 요구되고 있다.

- 참고문헌 -

1) www.dieselnet.com
2) A.Mayer. Particulate traps for heavy duty vehicles, Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), 2001
3) Diesel Emission Control-Sulfur Effects (DECSE) Program, Jan. 2000
4) www.dieselforum.org
5) Emission Control of Diesel-Fueled Vehicles, MECA, 1977
6) 조강래, 엄명도, 류정호, 임철수, Performance Evaluation of the Diesel Particulate Trap System and Development of Regeneration Technologies, 1995
7) 정용일, 저공해자동차 보급방안에 관한 전문가 토론회, 2002.
8) Peter O. Witze, Combustion Research Facility, Sandia National Laboratories Livermore, California, Diagnostics for the Measurement of Particulate Matter Emissions from Reciprocating Engines, July, 2001
9) Matsuo Odaka, Recent Trend of Automotive Emission Control Technologies, NTSEL, 2001
10) Robert O. McLean, Corning Incorporated Diesel Emission Control Systems Technology Trends, 2001
11) SAE SP-1698, In-Cylinder Diesel Particulates and NOx Control, 2002
12) 이춘범, 한국 동력기계공학회지 제 6권 제 2호
13) 이춘범, 유영환, 김용우, 자동차공학회지 제 24권 제 4호, 디젤자동차 입자상물질 저감기술의 현황과 전망, 2002.8
14) Particulate Traps for Heavy Duty Vehicles, SAEFL
15) Available Particulate Trap Systems forDiesel Engines, VERT
16) Evaluation Report on Countermeasures forPM Emission of Diesel Vehicles in use, JCAP, PEC-2000JC