

### 디젤 배기 미세입자상 물질의 저감기술 현황과 전망

## Status and Trends of Diesel Exhaust Fine PM (Particulate Matters) Reduction Technology

이춘범

C. B. Lee

#### 1. 입자상 유해물질 PM이란?

미국 캘리포니아 대기보전국(CARB)의 정의에 의하면 입자상 물질(PM : Particulate Matters)이란 “미세 필터로 포집한 배기의 고형 성분으로서, 51.7℃ 이하의 온도가 되도록 공기로 희석된 후에 필터에서 포집한 것(fines, dust, soot, mist, fog, smog)”을 가리킨다. 디젤엔진의 경우 연료량의 약 0.2~0.5%(중량)가 PM으로 발생하며, 대부분의 PM은 탄화수소계의 불완전 연소에 의해 발생하는 탄소가 주성분이고, 일부는 윤활유에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다.

PM은 분위기 조건 및 유동 조건에 따라 상이한 성상을 나타내는데, 배기가스 온도 500℃ 이상에서는 대부분 직경 15~30nm의 탄소입자 덩어리로서 H/C비가 0.2~0.3인 고체상이고, 500℃ 이하에서는 H/C비가 1.2~1.7로서 최대 40% 정도의 SOF(soluble organic fraction)가 흡착되어 있는 구조를 갖는다. 여기서 SOF는 미연 탄화수소, 산화 탄화수소(oxygenated hydrocarbons; ketones, esters, ethers, organic acids), PAH 등으로 구성되어 있는 유기용매에 녹는 성질을 갖는 액상의 물질이다.

그림 1의 디젤 PM의 분포도에 나타나 있는 바와 같이, 디젤엔진에서 배출되는 PM은 중량기준(accumulate mode)으로 볼 경우 입자 직경이 0.1~0.25µm에 집중되어 있으나, 수량기준(nuclei mode)으로 볼 경우에는 입자 직경 10~20nm에 집중되어 있다. 중량비율로는 미미하나 입자수량 면에서는 대부분을 차지하고 있는 50nm 이하의 Nano particles이 호흡기 계통에 흡착 비율이 높아 인체 유해도가 훨씬 큰 것으로 알려져(미국의 HEI 연구 결과) 있다. 따라서 앞으로 디젤 배기 PM과 관련하여 Nano particles 저감이 중요 과제로 다루어질

전망이다. 이미 선진국의 환경 연구기관에서는 미세 입자상 물질의 수량 분포에 대한 데이터를 수집·평가 중에 있다.

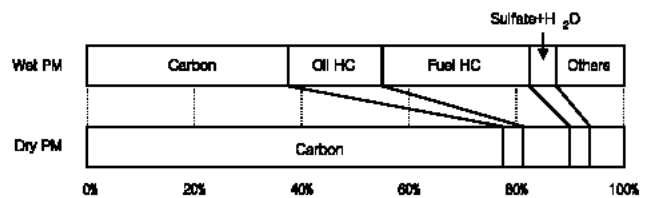


그림 1. 디젤 PM의 구성

전술한 바와 같이 디젤 PM의 주성분은 탄소이고, Soot는 연료중의 탄소를 주성분으로 하는 복합체이며, 디젤 Soot는 온도 1000~2800K, 압력 50~100기압 조건에서 수천분의 1초 사이에 국부적으로 공기가 과부족한 곳에서 열분해(thermal cracking)에 의해 생성되는 것으로 알려져 있다.

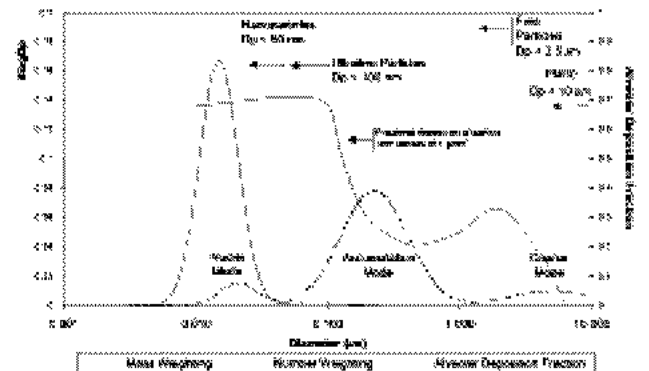


그림 2. 디젤 PM의 수분포 및 질량분포도

Soot의 초기입자는 연료분자가 열분해에 의해 탈수분 반응을 일으켜 Soot 전 단계의 미립자핵을 생성하며 Acetylene(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), C<sub>2</sub>nH<sub>2</sub>와 벤젠계의 방향족 화합물인 PAH로 구성되고 직경이 2nm 이하의 초미립자이다. 이 초기입자는 표면성장, 응집, 엉김, 합체 등의 과정을 통하여 거대한 Soot로 성장하며, 주로 디젤엔진의 확산 연소과정 중에 대

접수일 : 2002년 2월 27일

이춘범 : 자동차부품연구원 동력시스템실

환경기술팀장

량의 Soot가 발생 한다. 연소 후기에 고온의 화염 중에 도입되어 재연소가 발생하여 Soot가 급속히 감소하는 경우도 있다.

## 2. 디젤자동차의 PM 관련 기술 전망

우리나라는 2001년도 말을 기준으로 1300여만대의 자동차를 보유하고 있다. 2001년 한해에만도 75만 여대의 다목적 차량을 포함하여 총 120여만대의 디젤 자동차가 생산되었으며, 2001년 현재 350여만대의 디젤차를 보유하고 있다. 작년 한해동안에 79만대가 국내에 판매되어 디젤자동차의 비율이 급격히 증가하고 있는 우리나라는 세계 어떤 나라보다도 디젤 매연 및 오존으로 인한 대기공해가 심각한 수준이다.

그러나 에너지 경제성 및 지구 온난화 가스 배출 억제 정책에 따른 EU의 자동차 연비규제(우리나라의 경우 2009년  $\leq 140$  g/km)등에 따라 디젤 차량의 수요가 급격히 증가하고 있으며, 지구 환경 보호를 위한 EU의 공동 전략에 따르면 승용차용 HSDI(High Speed Direct Injection) 디젤 엔진의 시장 점유율이 2~3년 내에 25%에서 30% 이상으로 급증할 것으로 예상하고 있다.

가솔린 자동차로 인한 유해가스의 획기적인 저감은 26여년전 휘발유 자동차에 3원 촉매장치를 부착하면서부터인 것을 감안하면, 갈수록 국민들의 환경의식이 높아지고 있는 요즘의 상황에서 대도시 주요 오염원인 디젤차에 디젤 입자상 물질 및 질소산화물 저감장치의 장착이 의무화될 것으로 예측된다.

표 1 유럽의 디젤 승용차 규제수준과 국내 MPV 배기수준

모델명	CO (g/km)	THC (g/km)	NOx (g/km)	PM (g/km)	CO <sub>2</sub> (g/km)
Euro-VI (HSDI엔진)기준	0.5	0.05	0.25	0.025	-
국산 7인승 MPV	0.597	0.063	0.711	0.054	276.2

그러나, 근년에 디젤시장을 주도하고 있는 A사의 디젤차량의 배출가스 수준을 보면 2005년 EURO IV 기준(표 1 참조)의 200~300%를 초과하고 있어 기술 개발이 요구되고 있는 상황이다. 환경 친화적인 디젤차 시장의 확대를 위해서는 EURO IV 등 선진국의 규제에 대응할 수 있는 엔진 설계기술, 촉매 기술, 연료 분사장치, 연료 개선

등이 복합적으로 적용 되어야하며, 많은 기술 개발과 투자가 요구된다.

상기의 표 1에서 보듯이 유럽에서는 2005년 EURO IV기준으로 PM 배출한도는 0.025g/km이다. 이는 휘발유 및 CNG 자동차와 유사한 수준이며, 매연 저감장치의 부착이 필수적일 것으로 예측된다. 이러한 배기 후처리 기술이 적용될 수 있는 환경을 만들어 주기 위하여 미국의 환경청(EPA)에서는 2006년까지 ULSD 공급을 의무화하였고, 2007년부터는 첨단 후처리 기술을 적용하지 않고서는 PM 및 NOx 규제를 만족시킬 수 없도록 규제를 강화하고 있다. 유럽과 미국의 중량(重量)자동차(HDV)의 배기 규제(EURO IV/V 및 US 2007)에 대응할 수 있는 적용 가능 기술(AVL 예측)을 보면, 초저유황(ULSD : Ultra Low Sulfur Diesel) 경유의 적용이 필수적이며, 그와 병행하여 EGR, Soot 제거용 DPF(Diesel Particulate Filter)

표 2 EU 경유 중량자동차 배출규제 동향(g/kWh)

규제	적용시기 및 범주	CO	HC	NOX	PM
Euro-I	1992, <85kW	4.5	1.1	8.0	0.612
	1992, >85kW	4.5	1.1	8.0	0.36
Euro-II	1996.10	4.0	1.1	7.0	0.25
	1998.10	4.0	1.1	7.0	0.15
Euro-III	2000.10	2.1	0.66	5.0	0.10
Euro-IV	2005.10	1.5	0.46	3.5	0.02
Euro-V	2008.10	1.5	0.46	2.0	0.02

표 3 디젤 배기 내용 및 시행 년도

		디젤 배기 내용 및 시행 년도		
		EURO-IV (2005)	EURO-V (2008)	US 2007 (2007)
규제 수준	NOx (g/kWh)	3.5	2.0	0.2
	PM (g/bhp-hr)	0.02	0.02	0.01
적용 가능 기술				
HP-EGR+DPF		S<50		
LP-EGR+DPF		S<50	S<50	
SCR+(DOC)		S<50	S<50	
EGR+DPF+SCR				S<15
EGR+DPF+NOx Adsorber				S<15

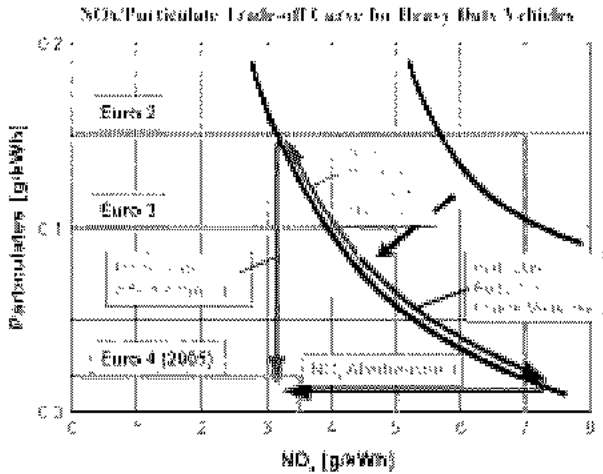


그림 3 중량 디젤차량의 NOx/PM 규제 동향과 대응 방안

및 SCR(Selective Catalytic Reduction)기술의 적용이 요구될 것으로 예측하고 있다.

### 3. 디젤 PM의 저감 기술

현재 경유 자동차의 PM 등 유해 배출가스를 줄이기 위해 신뢰성/내구성 및 가격적인 측면에서 실용 가능성이 입증되어 보급 중에 있는 기술로는 크게 네가지로 나눌 수 있는데,

첫째로 자동차 배출가스 성분 중 입자상 물질(Soot를 포함한 Particulate)을 포집하여 Burner, Heater등 별도의 방법으로 제거시키는 Trap 기술, 둘째로, 필터 자체에 촉매를 담지하여 일정온도 이상 조건에서 연속 재생이 가능하도록 하는 연속 재생식 디젤필터(CRT : Continuously Regeneration Trap, CDPF : Catalyzed Diesel Particulate Filter),

셋째로, 가솔린 자동차의 삼원 촉매처럼 배출가스 내의 Gas상 물질 (Hydrocarbon, CO, NOx)과 입자상 물질내의 SOF 등을 촉매를 이용하여 산화시키는 디젤 산화 촉매(DOC : Diesel Oxidation Catalyst) 방법,

네째로, 엔진 제어 기술과 촉매 후처리 기술 및 첨가제 기술 등을 통합적으로 제어하여 PM 및 유해 배기가스를 산화시키는 기술을 들 수 있다.

### 4. 각국의 디젤 PM 저감 정책 및 기술

미국은 디젤 자동차의 청정화를 위하여 운행 중인 디젤 자동차에 디젤 입자상 물질 저감장치를

부착하는 수개의 프로그램을 진행하고 있고, 그 대표적인 예로 뉴욕시 학교 버스 1000대에 존슨메타사의 CRT 시스템을 장착하고 있다. 또한 CNG 차량을 보급하고 있으나 유사한 성능을 갖는 DPF대비 차량 한대당 30,000\$의 비용이 추가로 들어가는 것으로 보여 가격 경쟁력이 약한 것으로 보고 되고 있다.

프랑스 푸조사는 2000년부터 경유 승용차(Peugeot 607)에 DPF 시스템을 부착하여 양산 중에 있으며, 이 자동차는 흡입하는 연소 공기 중의 입자상 물질보다도 더 적은 입자상 물질만을 배출하는 것으로 평가되고 있어, 소위 입자상물질 면에서는 공기청정기 역할을 하는 것으로 평가받고 있으며, 디젤 승용차의 기술적 지표로 높은 평가를 받고 있다.

또한 일본의 동경도에서는 2003년부터 모든 경유차에 DPF 등 입자상 물질 저감장치를 부착하도록 의무화하고 있으며, 카나가와현/사이타마현 등 7개 지자체는 시민들의 소송에 걸려 입자상 물질 저감장치 부착 의무화를 추진 중에 있다.

일본 동경도 사례를 좀더 세밀히 정리하면, PM 제거장치를 장착하거나 처음 등록시기로부터 7년이 경과하지 않는 차량 또는 도내의 배출기준을 만족하는 차량은 2003년 10월(평성15년 10월) 이후에도 도내운행이 가능하나 그렇지 않을 경우 2003년 10월 이후에 도내 운행이 불가능하며, 차량 카테고리별 사용 기한을 한정하여 신차(신단기 규제차 0.18g/kWh이하 배출차 차기배출기준 만족차 평성15년 10월기준차) 사용을 유도하고 있으며, 평성 17년(2005년)부터는 차차기 배출기준(신장기 규제 0.09g/kWh)에 만족하는 차량만 운행할 수 있도록 되어 있다. 즉 배출기준(0.18g/kWh)에 만족하는 차량은 운행 가능하고 현재의 배출기준(0.2518g/kWh)에 해당하는 차량이면서 처음 등록일로부터 7년이 경과하지 않는 차량은 평성 17년(2005년)까지는 운행이 가능하도록 되어 있다.

스위스 환경청은 스위스, 독일, 오스트리아와 공동으로 VERT 프로젝트를 수행하여 디젤차량 및 매연 저감 필터의 평가 사업을 통해 필터의 적용 가능성을 확인하였고 평가 절차를 확정하여 시험 평가를 수행 중에 있다. 현재 400여대의 DPF가 장착되어 있으며, 2002년 12월 말까지 스위스의 모든 시내버스에 DPF를 장착토록 추진하고 있다. 주로 CRT 방식의 필터를 채택할 예정이며, 버스 장착용 Test Sample 10개를 인증기관(Biel 대학 자동차학부)에서 시험 중이며 가격은 9000~10,000\$로

산정하고 있다. 스위스는 지하 굴착사업 등이 많은 관계로 터널공사에 투입되는 건설장비 등에 DPF 장착을 의무화하고 있는 실정이다.

우리나라의 경우 Green World Cup을 표방하는 서울시에서는 정유업계의 도움으로 월드컵 행사 기간 중 서울시 전역에 초저유황 경유(ULSD)를 공급하였다. 한편 정부의 노력을 보면 환경부는 환경기술개발사업을 통해 초저유황 경유(ULSD) 파 일터 테스트 설비개발을 지원하고 있으며, 금년부터 경유 차량의 매연 저감 기술에 대한 평가 사업으로 10억원을 책정하여 국내 여건에 적합한 장치를 선정하여 보급하기 위한 기반을 구축하고자 디젤 PM 평가 사업을 추진하고 있다. 현재 앵겔하드사의 DPX, 존슨메티사의 CRT를 비롯하여 8개 시제품에 대한 평가가 진행되고 있다.

그러나 우리나라는 미국과 마찬가지로 선진국의 어떤 기술로도 국내의 디젤승용차 규제를 만족할 수 없는 정도의 배기수준을 요구하고 있어 디젤 승용차의 판매가 원칙적으로 불가능한 실정이나 프랑스의 푸조사와 같은 기술적 향상이 이루어진다면 시장이 열릴 것으로 예측된다. 일본의 동경도와 같이 대도시의 공기질 향상을 위한 서울시 등 지자체를 중심으로 디젤 매연 저감장치 장착 의무화, 초저유황 연료 보급정책과 인센티브 제도가 시행될 것으로 예측된다.

상기에서 언급한 바와 같이 PM(디젤 입자상 물질)의 저감을 위해 상용화되고 있는 대표적인 DPF 시스템을 소개하면 다음과 같다.

① 존슨메티사의 CRT

연속재생방식(산화촉매 + Filter) 필터와 함께 초저유황 연료(ULSD) 사용

2001. 8 : 미국 CARB 입증시험 통과  
산화촉매에 의한 NO→NO<sub>2</sub> 전환, Filter에서 NO<sub>2</sub> NO+O 반응에 의해 생성된 산소원자에 의해 Soot 산화구조 이용  
정상적인 운전을 위하여 NO<sub>2</sub>/Soot비가 D 13 모드에서 15이상 요구

② 앵겔하드사의 DPX Soot Filter

2종류의 금속촉매 코팅 필터로서 350~500ppm 유황연료 사용가능  
2001. 8 : CARB 인증시험 통과

③ 푸조사의 PSA SiC Filter System

2000년부터 Peugeot 607 디젤승용차에 적용  
양산 중  
Ibiden사(일)의 SiC filter 사용하여 직경 0.01 μm 매연 99% 제거

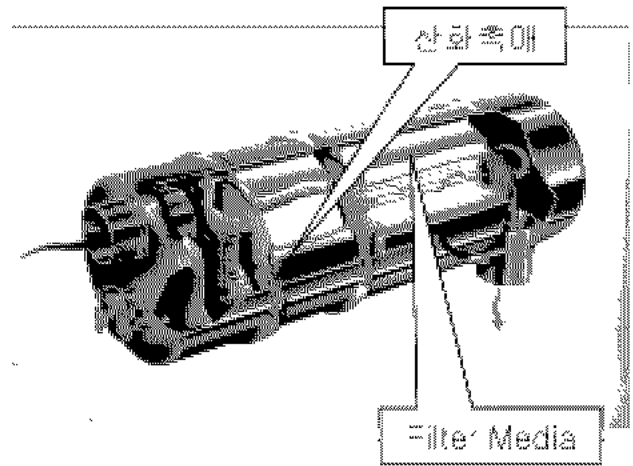


그림 4 존슨메티사의 CRT

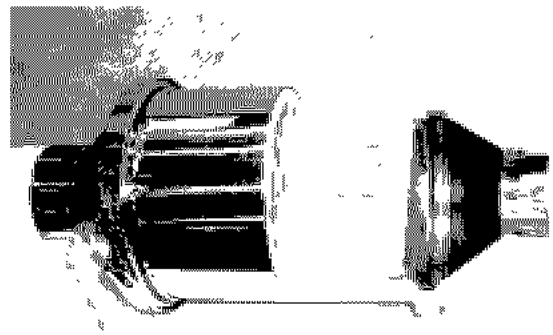


그림 5 앵겔하드사의 DPX Soot Filter

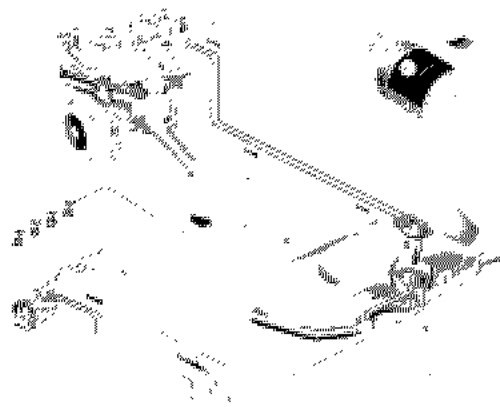


그림 6 PSA SiC Filter System의 재생 원리

산화촉매 전치, Cerium 첨가제 사용 및 Common Rail 고압 연료분사장치에 의한 매 400~500km마다 Post injection으로 배출가스 온도 상승으로 강제 재생 일반적으로 Soot는 산소

분위기에서 550℃에서 산화되나 디젤 차량은 낮은 배출가스 온도로 인해 Soot의 산화가 어려운 조건으로 이를 위하여 산화촉매, Post injection의 방법으로 배출가스의 온도를 상승시키고, 첨가제를 사용하여 Soot의 산화온도를 낮추기 위한 그림 7과 같은 제어 기구를 사용하고 있다.

④ TOYOTA DPNR

최근 토요타 자동차에서는 NOx와 PM을 동시에 제거할 수 있는 DPNR(Diesel Particulate NOx Reduction) 시스템을 세계 최초로 상용화하여 실차에 장착하였다(그림 8).

이 시스템은 Lean(희박연소) 상태에서는 PM 포집과 NOx를 흡장시키고 Rich상태에서는 흡장된 NOx를 환원시킴으로써 필터 내에서 PM과 NOx를 동시에 저감시킬 수 있는 일종의 4 way 촉매이다.

⑤ MOBIS SK KATECH의 CPF(Catalyzed Particulate Filter)

ULSD (Sulfur 10ppm wt.)를 사용하는 촉매 방식의 디젤 버스용 Soot 필터로서 우리나라의 대표적인 촉매 기술 업체인 SK와 부품 업체인 현대 MOBIS 및 자동차부품연구원이 공동으로 개발한 DPF 시스템으로서,

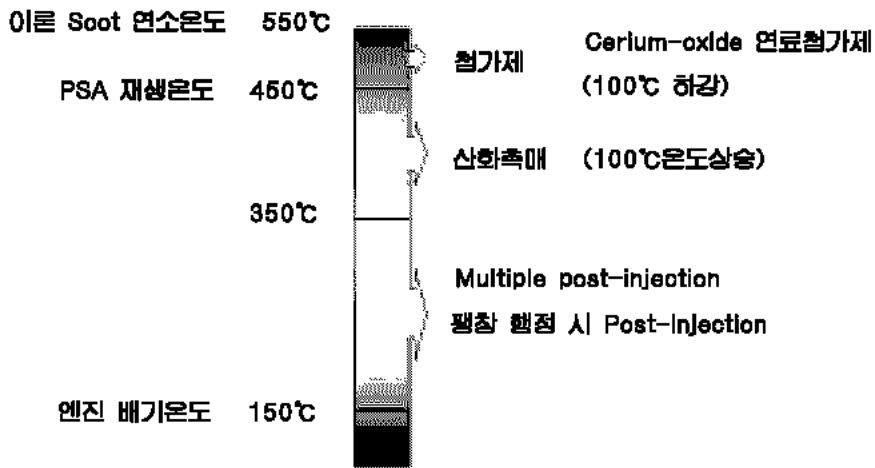
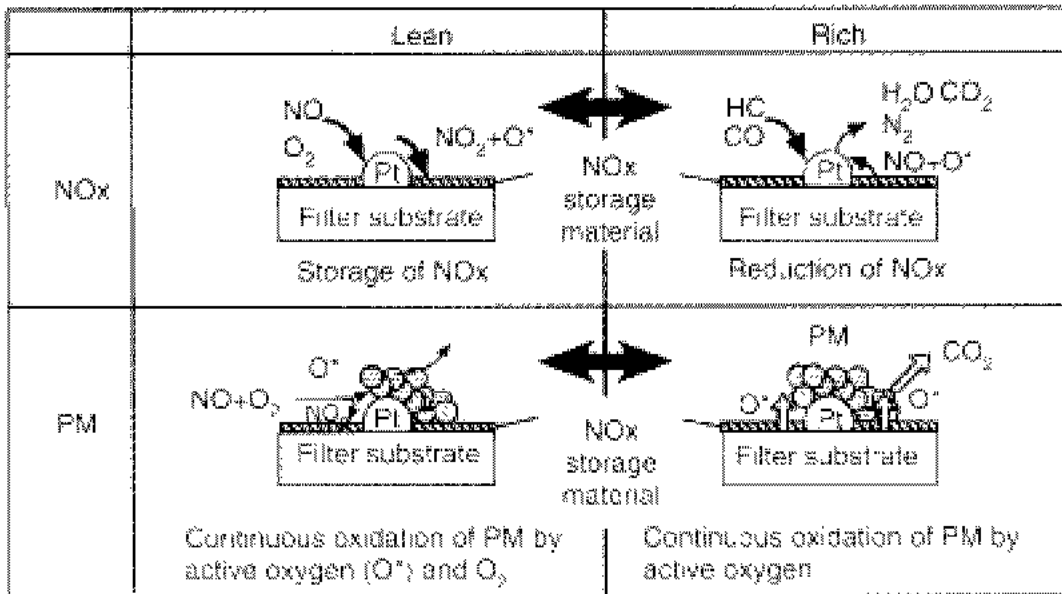


그림 7 산화온도를 낮추기 위한 제어기구



NOx and PM purification mechanism.

그림 8 Toyota사 DPNR 시스템의 촉매 반응 원리도

서울시 혼잡지역 실차 시험결과 재생 성능 및 신뢰성이 우수한 것으로 판명되었으며, 엔진 동력계 시험 결과, 특별한 연비 및 출력저하 없이 우수한 PM 제거 성능(D 13모드에서 PM 88% 이상, J 13모드에서 96% 이상 제거)과 THC 및 CO의 산화 성능을 갖고 있으며, 질소산화물(NOx)도 15% 이상 저감하는 것으로 나타났다.

BPT(Balance Point Temperature) 측면에서 보면 310~350℃로 고르게 분포하고 있으며 존슨메터 및 앵겔하드사 제품보다 우수한 것으로 평가되고 있다.

본 촉매장치는 서울/인천/수원 시내버스 20여대에 Fleet Test 준비중이며, 디젤 트럭, 건설용 차량등 여타 장비에 사용 가능할 것으로 보인다.

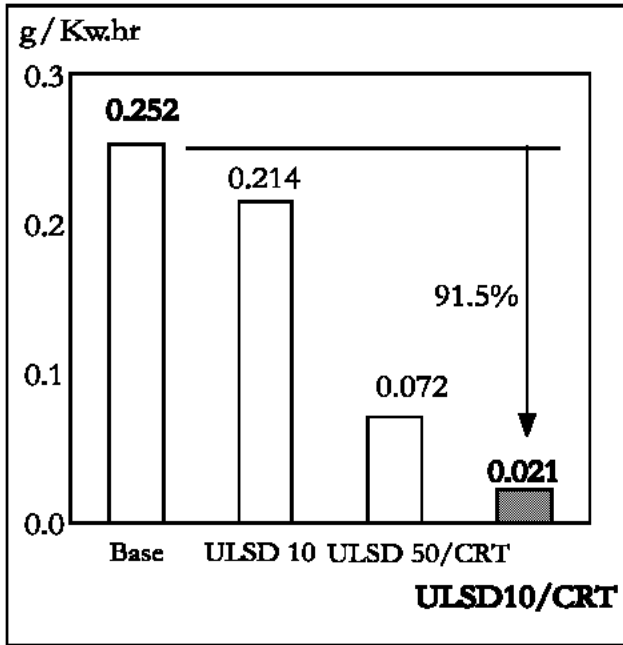


그림 9 PA 저감 특성

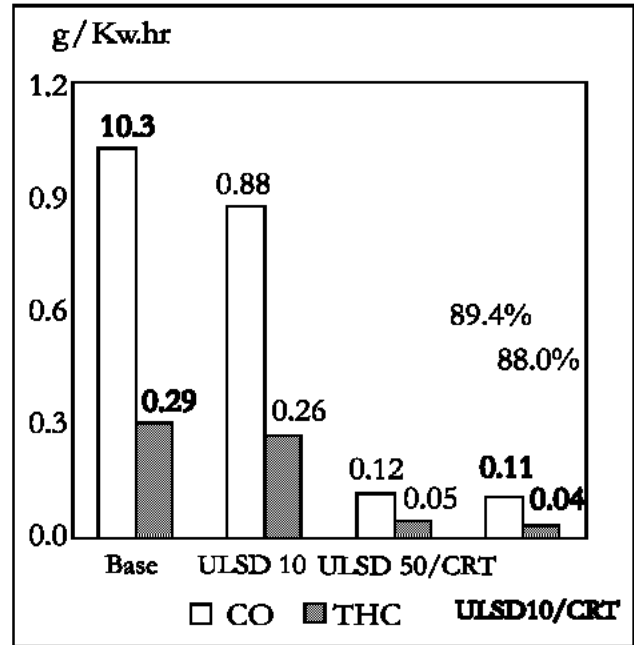


그림 11 CO, THC 저감 특성

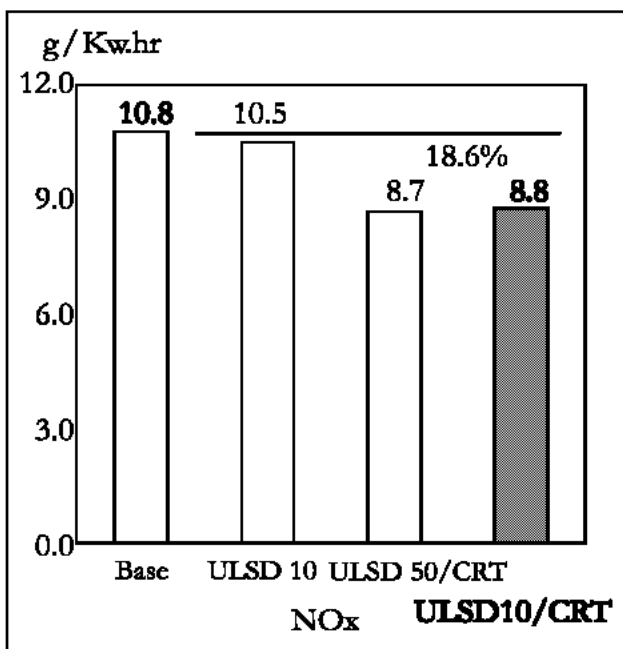


그림 10 Balance Point Temperature

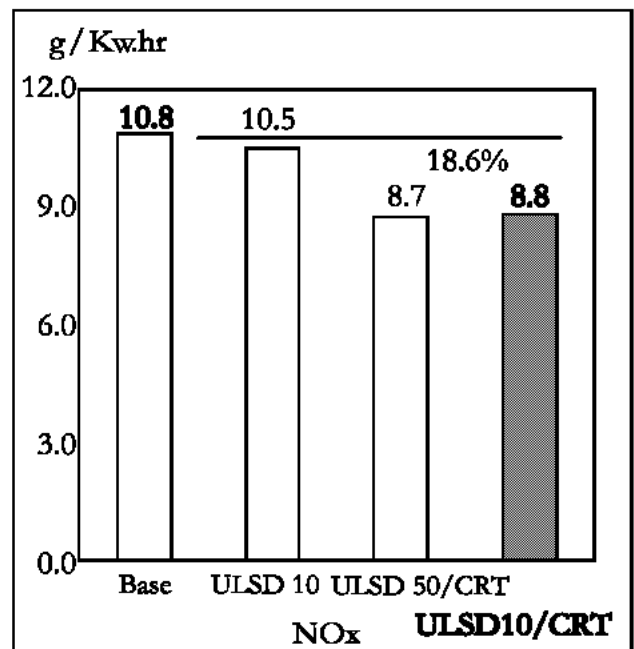


그림 12 NOx 저감특성

## 5. 향후의 기술 발전 전망

디젤 후처리 기술은 21세기의 자동차 산업 분야에서 부가가치 창출규모가 무엇보다 큰 차세대 전략 기술로서, 적용 가능한 제품기술을 보유하고 있는 기업만도 3M, HJS 등을 포함하여 현재 50여개 이상의 기업이 난립하고 있는 상황이다. 선진업체에서는 각종 DPF, CRT, NOx Trap, SCR 촉매, Plasma 장치 등 핵심기술 및 다양한 복합시스템을 개발 중에 있으며 존스메터(영), 앵겔하드(미), 푸조 자동차(프) 등에서는 가격 및 내구성 측면에서 실용성이 우수한 디젤 매연 저감장치를 양산 중에 있다.

이미 스위스 등에서는 자동차뿐만 아니라 호수를 운행하는 선박, 터널 등 지하 굴착장비, 건설용 장비 등에서 매연 저감 필터를 적용하고 있는 실정이다. 따라서 가솔린 엔진의 3원 촉매장치와 같이, 인체 유해성으로 인한 사회적 요구에 의해 시장이 형성될 것으로 예측되는 디젤엔진 장비의 마지막 남은 고부가가치 부품이라고 할 수 있다.

디젤 유해 배기 물질 중에서, 1차적으로 2005년까지는 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 작동 조건을 저 PM·고 NOx로 운전하고 SCR을 사용하여 질소 산화물을 저감시키는 방향으로 기술이 적용될 것으로 예측된다.

현재 우리나라의 디젤 기술 및 후처리 기술은 선진국에 비해 많이 뒤진 상태이고, 핵심부품 및 소요기술을 전량 수입하고 있는 상황이나 향후 5~6년 후에는 가솔린 후처리 시장과 대등한 규모로 발전할 것으로 예측되어 보다 산업정책적 육성이 필요한 분야이다.

## 참고 문헌 및 관련 사이트

1. SAE, SP 1581, SP 1703 : Diesel Exhaust Emission Control
2. 조광래, 엄명도, 류정호, 임철수, "Performance Evaluation of the Diesel Particulate Treap System and Development of Regeneration Technologies", 1995
3. P. O. Witze, "Diagnostics for the Measurement of Particulate Matter Emissions from Reciprocating Engines", Combustion Research Facility, Sandia National Laboratories Liverre, California, July, 2001
4. M. Okada, "Recent Trend of Automotive Emission Control Technologies", NTSEL, 2001
5. R. O. McLean, "Corning Incorporated Diesel Emission Control Systems Technology Trends", 2001
6. SAE SP 1698, "In Cylinder Diesel Particulate and NOx Control", 20027
7. [www.dieselnat.com](http://www.dieselnat.com)
8. [www.corning.com](http://www.corning.com)
9. [www.epa.gov](http://www.epa.gov)