

# HSDI 디젤엔진의 배출가스 후처리기술

## Exhaust Aftertreatment Technologies of HSDI Diesel Engine

김 병 수 · 자동차부품연구원 동력시스템실 실장/책임연구원  
Kim Byoung Soo · Korea Automotive Technology Institute

나 병 철 · 자동차부품연구원 동력시스템실 선임연구원  
Na Byoung Chul · Korea Automotive Technology Institute

### 1. 배경

디젤 자동차로부터 배출되는 유해가스에 의한 대기오염 문제가 심각해지고 있는 상황에서 세계 각국은 자동차의 배출규제를 대폭 강화하고 있는 것은 이미 주지의 사실이다. 미국의 경우 현재 시행중인 연방규제를 2004년 이후 대폭 강화될 예정이며 유럽연합도 2000년 Euro III, 2005년 Euro IV 규제를 적용, 예정하고 있고 Euro V는 Euro IV의 50%수준으로 PM과 NOx규제를 강화할 것으로 알려져 있으며 국내의 경우에도 디젤 차량에 대한 규제가 대폭 강화될 것으로 예상된다.

또한 최근에는 지구온난화에 대한 우려가 전 세계적으로 높아지면서 온실효과의 주요 원인으로 지목되고 있는 이산화탄소의 배출량을 줄이기 위한 노력의 일환으로 저연비차량에 대한 연구개발이 요구됨에 따라 이산화탄소 저감 등을 위한 연비저감기술과 점차 엄격해지는 배기가스규제 대응기술을 중심으로 현재 많은 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히, 차세대 디젤엔진을 장착한 승용차가 유럽전체 승용시장 1,400만대중 29%를 차지하고 있고 스페인, 프랑스 등에서는 50%이상을 차지할 정도로 보편화 되어있는 유럽의 경우에

는 가솔린에 비해 연소효율이 좋아 연비측면에서 유리한 디젤엔진을 대상으로 이들 규제를 만족시키기 위해 적극적으로 이에 대비하고 있다. 국내의 경우에도 향후 유럽 및 미국 등 세계시장으로의 시장확장을 원활히 하기 위해서는 연비저감 및 배기가스규제대응 등에 대한 기술개발 능력의 확보가 필수적이므로 이러한 HSDI(High Speed Direct Injection)디젤엔진에 많은 관심을 갖고 연구개발을 진행 중에 있다.

이들 디젤자동차의 유해배출가스 저감에 있어서 대응기술은 크게 고압연료시스템 등의 연료분사계, TCI 등의 흡기계 및 EGR 등을 적용한 엔진기술과 촉매개발 등의 후처리기술로 대별할 수 있다.

특히, 서유럽을 중심으로 개발되고 있는 HSDI 엔진의 경우 전자제어식 고압인젝터로 연료를 분사하여 상대적으로 균일한 혼합기의 형성을 도모하고 있으나 확산연소 특성상 NOx 및 PM배출에 있어서 여전히 문제점을 갖고 있는 것으로 지적되고 있다. 따라서 환경문제로 인하여 한층 강화되어지고 있는 배출규제치를 만족하기 위해서는 엔진기술만으로는 대응하기 어려운 점이 있으므로 저배기관련 엔진기술개발과 더불어 후처리기술에도 많은 연구개발이 이루어져야만 할 상황이다.

여기서는 국내외에 발표된 연구보고서, 자료 등을 참고로 하여 디젤자동차의 배출가스 후처리기술의 개요 및 현황들에 대하여 간략하게 요약, 정리하였다.

## 2. 디젤 후처리기술 개요

디젤엔진은 가솔린엔진에 비해 연료효율이 더 높아 경제적이고 산소가 과잉인 희박조건이기 때문에 CO, HC는 가솔린에 비해 상대적으로 적게 배출되는 장점이 있지만 반면에 알데히드, 황산화물, NOx와 PM(Particulate Matter)은 많이 배출되고 악취 및 분진이 심하다는 단점을 가지고 있다. 이들 유해배출가스 중에서 CO는 혈중의 헤모글로빈과 결합하여 산소공급 저해, 두통 및 현기증을 유발한다. HC는 미연소 상태에서 배출되거나 연소에 의해 크래킹을 일으킬 때 주로 발생되는데 이는 NO<sub>2</sub>와 혼합될 경우에는 강렬한 햇빛에 의하여 광화학스모그를 생성하는 원인이 된다.

특히, 디젤자동차의 유해배출물 중에서 가장 문제가 되는 것은 NOx와 PM으로서 NOx는 광화학스모그와 산성비를 내리게 하는 주요 요인이다. 또, PM은 그 입자가 미세하고 많은 화학물질을 함유하고 있어 호흡기질환이나 폐암발생 등과 같은 피해를 유발하는 것으로 알려져 있으며 일반적으로 가용 유기성분인 SOF(Soluble Organic Fraction), 탄소덩어리인 Carbon Soot 및 황화

합물인 Sulfate(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 로 구성되어 있다.

이러한 디젤엔진의 배출물을 정화하기 위해서 지금까지 개발된 후처리 장치들은 가스상의 HC, CO 및 입자상의 PM성분중 SOF를 산화시켜 정화하는 DOC(Diesel Oxidation Catalyst), 매연을 물리적으로 정화하는 DPF(Diesel Particulate Filter), 과잉산소분위기에서 NOx를 분해 또는 환원하는 De-NOx촉매, 그 외에 HC, CO, NOx 및 PM의 성분 중 SOF를 정화시키기 위하여 디젤산화촉매에 De-NOx기능 등을 더한 4Way촉매 등이 있다. 이들 촉매들의 일반적인 정화특성을 요약하면 <표 1>과 같다

이중에서 기존의 상업용 DOC는 유럽을 중심으로 양산되고 있는 대부분의 소·중형 디젤차종에 적용되고 있으나 HC, CO, PM 성분중 SOF만을 저감할 수 있는 한계가 있고 이들에 대한 정화효율도 아직 미흡한 상태로 많은 개선이 진행되고 있는 촉매기술이며 DPF 및 De-NOx촉매는 아직 상업화된 차량에는 적용된 실적이 거의 없는 연구단계의 기술로서 필요성은 높으나 기술수준이 미흡한 상태에 있다. 그리고 4Way촉매는 최근에 많이 연구가 진행되고 있는 추세이다.

### (1) DOC (Diesel Oxidation Catalyst)

디젤산화촉매는 입자상물질(PM)의 정화율이 DPF에 비하여 상당히 낮지만 탄화수소, 일산화탄소는 물론 알데히드, PAH(Polycyclic Aromatic

<표 1> 디젤 후처리 기술의 정화기능

[Legend] : 정화기능

	HC	CO	NOx	SOF	PM
DOC	정화	정화	정화	정화	정화
DPF	정화	정화	정화	정화	정화
De-NOx	정화	정화	정화	정화	정화
4Way	정화	정화	정화	정화	정화

## 특집 디젤엔진

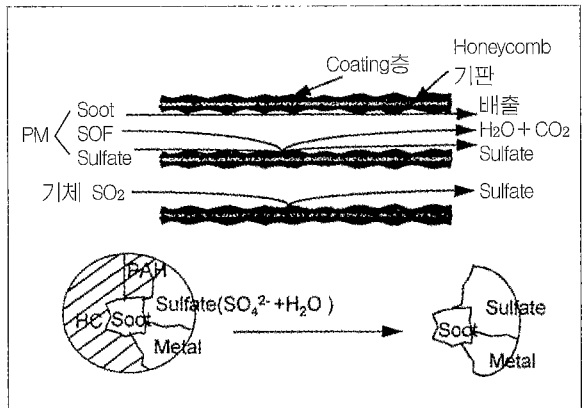
Hydrocarbons), 냄새 등의 미 규제 유해물질들을 제거할 수 있다. 또한 장치의 구조 및 장치가 간단하여 신뢰성이 높고 가격이 저렴하며 연료소모율이 상대적으로 낮은 장점으로 인하여 1989년경 유럽의 자동차시장에 첫선을 보인 후 일부 국가에서는 이미 장착 운행 중에 있다.

근래에 이러한 디젤산화촉매에 제올라이트 등의 물질질을 포함시켜 NOx 등을 동시에 정화하는 기술까지 개발되고 있으며 미국의 경우에는 1991년 디젤엔진시험에서 산화촉매를 적용하여 HC, CO, NOx 규제치를 만족하였으나 금후 더욱 엄격해질 NOx규제 등에 대비하여 최근에는 좀 더 효율적인 NOx정화능력을 가진 산화촉매가 연구되고 있는 상황이다.

이러한 DOC는 촉매입구 가스온도가 낮을 때 PM을 흡착하고 있다가 가스온도가 높아짐에 따라 산화정화반응을 일으키므로 산화촉매의 정화율을 높이기 위해서는 저온 산화 활성을 높이는 것과 저온에서의 적당한 흡착성을 확보하는 것이 필요하다. 한편 연료중의 황(Sulphur)성분의 연소에 의한 SO<sub>2</sub>가 존재하는데 촉매입구온도가 300~350℃이상이 되면 황산염이 생성되어 PM을 증가시키는 요인이 된다.

즉, PM의 정화율은 촉매에서 SO<sub>2</sub>의 산화로 인하여 발생하는 황산염 생성과 밀접한 관계를 갖는데 황산염 생성을 억제하기 위하여 SO<sub>2</sub>의 생성을 억제할 경우 저온 활성증대와 DOC사용의 장점인 미 규제 유해배출물질의 저감효과가 감소된다는 단점이 있다.

아래 식과 <그림 1>은 디젤산화촉매의 정화메커니즘을 나타낸 것이다. 산화촉매가 활성온도에 도



<그림 1> Purification Mechanism of DOC

달하여 표면에서의 산화반응에서 ① ② ③반응이 촉진되어야 하며, ④반응에서 황산염 생성을 억제할 수 있도록 산화촉매가 개발되어야 한다.

### (2) DOC (Diesel Particulate Filter)

디젤가스로부터 PM을 제거하기 위하여 세라믹 트랩, 유리세라믹트랩, 실리콘 카바이드트랩, 소결 금속트랩 등의 많은 필터재료가 개발되고 있으며 이는 필터트랩에 포집된 PM을 효과적으로 제거하는 재생기술(Regeneration Technologies)과의 기술접목을 위하여 많은 연구가 진행 중에 있다.

이러한 재생기술들은 연료첨가제를 이용한 Throttling방식 트랩, 촉매특성물질을 코팅한 필터, NO<sub>2</sub> 트랩 등의 Passive시스템과 경유버너, 전기히터 등에 의해 PM을 태워버리는 Active시스템으로 구분할 수 있으며 이들의 특징은 <표 2>와 같다. 최근의 연구동향을 살펴보면 유럽, 미국의 경우에는 주로 세라믹 담체 또는 금속지지체를 이용한 물질들로 PM을 Trapping하는 연구가 되고 있으며 필터표면에 축적된 PM의 연속적인 재처리 공정과 재생시 열충격에 의한 트랩파손 등이 문제점으로 지적되고 있다.

일본의 경우필터에 축적된 PM을 압축공기 등을 이용하여 포집 용기에 담아내어 재생하는 Reverse Air Regeneration 방식과 같은 새로운

- ①  $HC + O_2 \rightarrow H_2 + CO_2$
- ②  $CO + O_2 \rightarrow CO_2$
- ③  $SOF \rightarrow H_2O + CO_2$
- ④  $SO_2 + O_2 \rightarrow SO_3 \rightarrow SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$

〈표 2〉 Categories of Regeneration Methods

Fuel Additives	>350°C	simple in function, no further requirements than a trap	fuel must be blended, necessary ash depositions in the trap
Coated Trap	>375°C	simple in function, trap must be coated once, no depositions in trap	deactivation of coated trap surface by soot layer or aging effects
NO <sub>2</sub> Trap	200~450°C	no depositions, wide operation range	need of very low S fuel, useful for engines with balanced C/NO ratio
Diesel Fuel Burner	at Idle /Low Speed	controlled system for very low exhaust gas temperatures	high requirements regarding fail safe operation and safety, high technical expenditures
Electrical Heater	/Space Velocities		high technical expenditures, high electrical energy consumption for vehicle application
Catalyst Injection	>350°C	low/no depositions in the trap, no aging effects to the catalytically medium	uncompleted soot combustion/inhomogeneous medium distribution

재생방식 및 새로운 필터재질에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 필터내에 균일한 공기유동 분포가 되도록 분사되어야 실효를 거둘 수 있는 기술적 문제를 안고 있다.

### (3) De-NOx 촉매

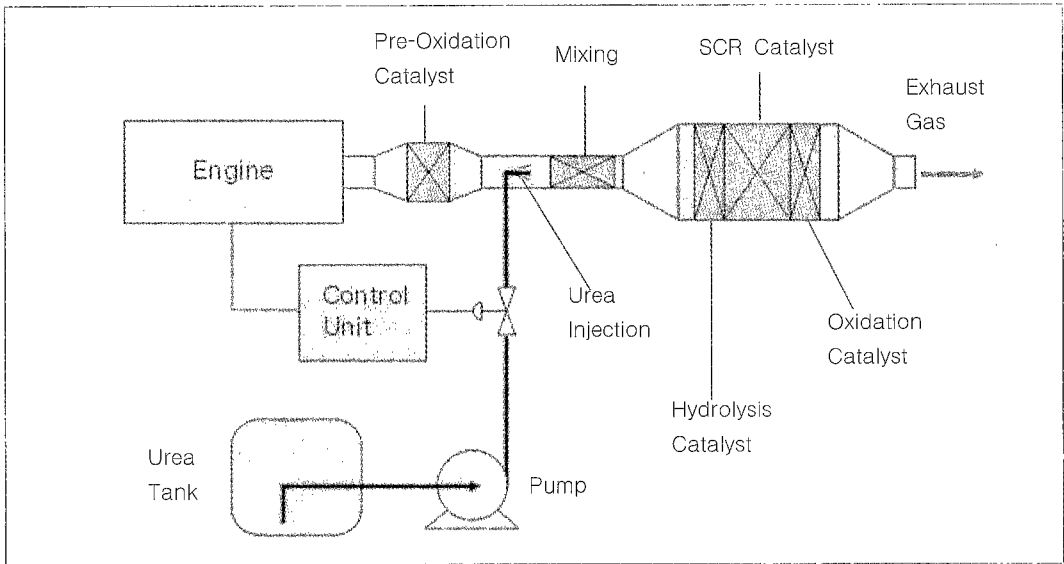
De-NOx 기술은 Passive 및 Active Lean NOx 기술, SCR(Selective Catalytic Reduction) 기술, NOx Adsorber Catalyst 기술, Plasma 기술 등으로 크게 구분할 수 있다. Passive Type Lean NOx 시스템에서는 배출가스 내에 존재하는 HC를 사용하여야 하나, 디젤엔진의 배기가스에 존재하는 HC 농도는 대단히 작아 원하는 만큼의 NOx 최대 전환을 얻기가 어렵다.

따라서 Post Injection 방법 등에 의해 HC를 추가로 공급하는 Active Type NOx 시스템을 사용함으로써 NOx의 전환율을 15~30% 정도 향상시킬 수 있다.

Urea(CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) 및 Ammonia(NH<sub>3</sub>)를 환원제로 이용한 SCR 기술은 주로 고정원 동력시스템에 15년 넘게 사용되어온 기술로서 자동차와 같이 촉매활성조건이 계속 변화되는 이동원에는 적용하는 것이 대단히 어려운 것으로 알려져 왔다.

그러나 최근에 이러한 SCR 기술을 선박이나 트럭 등과 같은 이동원에서의 적용확대를 위한 노력이 이루어지고 있으며 이동원에서의 적용을 위하여 환원제로는 배기 흐름에서 암모니아를 생성하기 위하여 빠르게 가수분해될 수 있는 Urea를 주로 사용하고 있는데 1995년 수용성 Urea/물 용액을 바탕으로 한 SCR 시스템이 처음으로 차량에 적용되어 New European Driving Cycle에서 65% 이상, US FTP Cycle에서 75% 이상의 NOx 전환율을 얻은 것으로 보고되고 있다.

디젤엔진은 가솔린엔진에 비해 비교적 낮은 온도영역에서 작동되므로 활성영역이 저온인 것을 고려하여 촉매의 활성영역을 넓힐 수 있는 촉매개



〈그림 2〉 디젤엔진의 개방형 Urea SCR 시스템

발 및 적절한 Urea양을 Injection 할 수 있는 Control System 등의 개발이 병행 되어져야만 이러한 Urea SCR 시스템의 NOx 저감효율을 높일 수 있을 것으로 예상된다. 현재 발표된 시스템중의 하나로 Siemens사의 SiNOx System이 있으며 이 시스템은 V Type 6실린더, 12 l 대형엔진을 사용하여 Cold/Hot US Trasient Mode에서 각각 70.5%, 85.6%, 도심, 산악지형, 고속도로에서 63%의 NOx 정화율을 얻었으나 Urea소모량이 많은 것으로 알려졌다. 그리고 SCR 담체로는 TiO<sub>2</sub>를 주로 사용하는데 이는 TiO<sub>2</sub>가 황에 대한 내구성이 크고 TiO<sub>2</sub> 표면에서의 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>가 다른 산화물보다 산화 활성에 유리하여 우수한 산포도(Dispersion)를 얻을 수 있기 때문이다.

TiO<sub>2</sub>/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 촉매에 조촉매로 WO<sub>3</sub>를 추가하면 De-NOx 활성증가와 암모니아 산화감소 및 알칼리나 비소산화물에 대한 내피독성을 향상시키는 것으로 알려져 있다. 그 외에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 등 여러 담체에 대한 연구도 진행되었으나 TiO<sub>2</sub>/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 촉매가 다른 담체를 이용한 촉매보다 활성효율 및 물과 SO<sub>2</sub>에 대한 내피독성이 우

수하여 상업촉매로 많이 이용되고 있으며 이 촉매를 이용한 SCR반응 메커니즘도 폭 넓게 연구되고 있다. 〈그림 2〉는 디젤엔진의 개방형 Urea SCR 시스템구성도를 나타낸 것이다.

그러나 암모니아를 이용한 SCR은 고정원의 NOx를 제거하기 위한 촉매가 상업화 되었으나 암모니아를 사용함에 따른 장치부식성과 장치비 과다와 암모니아 누출에 따른 환경오염문제가 단점으로 지적되고 있어 한편으론 최근에 탄화수소를 이용한 SCR촉매가 연구개발중에 있다.

이러한 탄화수소 SCR의 장점은 장치부식성과 장치비가 절감되고 환경문제의 부담감이 적으며 고정원의 경우는 LPG, 천연가스 등의 석유유분을 환원제로 활용할 수 있으며 자동차 배기가스처리에는 연료중의 일부 또는 배출가스중의 탄화수소를 환원할수 있는 장점이 있다. 이에 따라 탄화수소를 환원제로 하는 SCR이 검토되고 있으며 현재 Zeolite 및 Perovskite계열 등의 촉매를 사용하여 자동차용 배출가스 정화용으로 연구가 수행되고 있다

희박연소계에서 NOx의 화학적 흡상에 기인하는

〈표 3〉 De-NOx Technologies

Lean NOx	Passive	HC	15%	Light/Medium Weight Vehicle
	Active	HC Supplement	30%	Light/Medium Weight Vehicle
SCR		Urea/Ammonia	65%	Light/Heavy Weight Vehicle
NOx Adsorber Catalysts		HC/CO/H <sub>2</sub>	54%	Light/Heavy Weight Vehicle with Flexible
Plasma Technologies		-/Ammonia	10/50%	to be Determined

NOx Adsorber기술은 현재 Lean Burn 가솔린 엔진에서의 후처리 기술로 많이 활용하고 있는 기술이지만 디젤엔진에 적용하는데 있어서는 연료중의 황성분에 의한 피독과 산화조건에서의 촉매재생에 문제점을 안고 있는 것으로 알려져 있어 연료중의 유황성분을 낮추고 연소실내 유힬유 유입을 적극 차단하여야 하는 점이 우선 해결되어야 과제로 알려져 있다.

그리고 고전압의 전기적인 Discharge로 전자에 에너지를 가하여 열게되는 Non-Thermal Plasma를 이용하는 Plasma 후처리기술은 한동안 NOx 저감기술로 주로 이용되어 왔으나 최근 들어 디젤자동차의 PM저감을 위한 연구에도 그 활용성이 재고되어지고 있다. 필터방식만큼의 PM저감효과를 달성하기에는 어려운 점이 많지만 PM과 NOx를 동시에 저감할 수 있는 기술로 발전될 가능성도 있을 것으로 기대된다. 〈표 3〉은 De-NOx기술을 요약한 것을 나타내었다.

### 3. 국내외 기술현황 및 향후 동향

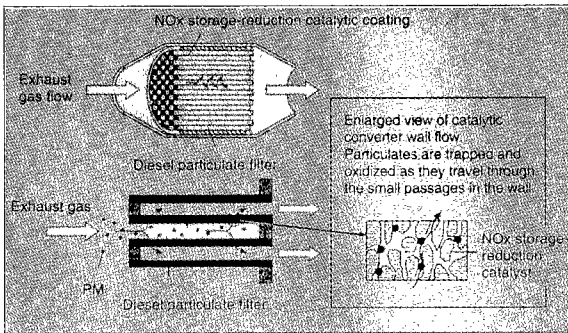
현재 승용디젤자동차부문의 가장 큰 시장을 형성하고 있는 유럽의 경우, 독일의 Degussa와 Finland의 Kemira 등의 촉매관련 회사들을 중심으로 Euro III 및 IV에 대응한 디젤엔진의 촉매에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이들 촉매로는 디젤산화촉매+NOx Adsorber, MCC(Manifold Catalytic Converter)+4Way촉매, Urea SCR 촉매 등이 있다.

Degussa에서 개발한 4Way 촉매를 Steady State Active Model Gas Test를 통하여 평가한 NOx 정화율은 65%수준이며 Engine Bench상에서 MCC 와 4Way를 결합한 촉매시스템의 Active상태에서 NOx 정화율은 50%, PM 정화율은 50%수준 보다 향상된 기술이 이미 개발된 것으로 알려져 있다.

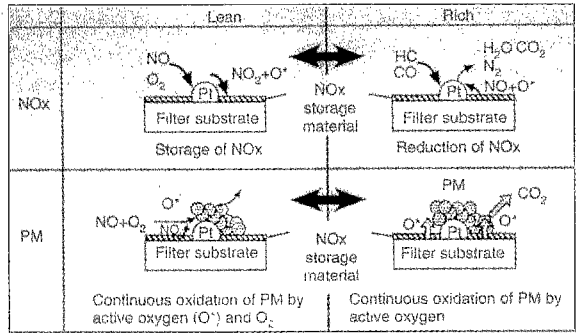
미국의 경우에는 유럽이나 일본에 비하여 승용 디젤자동차에 대한 개발요구가 그동안 상대적으로 낮았고 디젤촉매장치에 대한 생산도 그다지 활발하지 못하였다. 그러나 향후 배기규제에 대응할 디젤촉매의 중요성을 인식하고 Engelhard, Johnson Matthey 등의 촉매회사에서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 Euro III 정도의 배기규제수준은 이미 여러 회사에서 개발이 완료된 것으로 알려져 있다.

일본의 경우에는 일본촉매사가 독일의 Degussa와 컨소시엄을 형성하여 창설한 ICT(International Catalyst Technology)를 통해 디젤 De-NOx촉매에 대한 집중적인 연구개발을 함으로써 디젤촉매에 대한 관련 기초기술을 충분히 확보한 것으로 보인다.

국내의 경우에는 국내에서 시판되는 디젤자동차에는 디젤촉매가 장착된 차량은 전무한 상태이며 수출차량에 일부 장착되어 수출되고 있으나 이는 대부분 유럽이나 미국의 촉매회사에서 개발된 것으로서 촉매회사가 개발한 촉매들 중에서 개발차량의 Emission Level과 차량제원에 근접한 것을 선택해서 어느 정도의 Emission을 정화 하는지를



(a) Enlarged Cross Section of Catalytic Converter



(b) NOx and PM Purification Mechanism

〈그림 3〉 TOYOTA사의 PM-NOx저감 촉매시스템

확인하는 수준에 머물러 있어 독자 기반기술을 확보하는 것이 시급한 실정이다.

환경오염문제로 인하여 디젤 후처리장치에 대한 기술의 필요성이 대체적으로 현재의 기술수준을 앞서가는 양상을 보이고 있으며 국내외의 배기규제가 2000년을 고비로 매우 엄격해지고 있는 상황이고 앞으로는 디젤차량 대부분에 이들 촉매장치가 장착될 것으로 예상됨에 따라 촉매의 선도적인 기술을 적시에 적용할 수 있는 대비가 필요할 것으로 보인다.

이에 따라 국내의 경우도 지난 11월 현대자동차에서 Common Rail System을 적용한 HSDI엔진을 산타페 등에 우선 장착되어 발표 되었으나 이러한 디젤승용차의 수요확대 및 보편화하기 위해서는 엔진기술개발과 병행하여 디젤엔진의 NOx 및 PM 정화성능을 더욱 향상시킬수 있는 후처리장치가 개발되어야 할 것으로 판단된다.

최근에 〈그림 3〉(a),(b)에서 보는바와 같이 일본의 TOYOTA사에서는 2003년경에 양산 적용을 목표로 NOx와 PM을 동시에 저감하는 시스템기술을 활발하게 연구개발하고 있으며 향후 디젤자동차의 후처리 기술은 기존 각 촉매들의 단독체용보다는 이들 촉매의 장점을 결합한 촉매복합시스템의 형태로 개발될 것으로 사료된다.

〈참고자료〉

- [1] J. Leyrer의 "Advanced Studies on Diesel Aftertreatment Catalysts For Passenger Cars" SAE Paper 960133
- [2] G7차세대자동차기술개발사업 단계보고서" 승용차용 HSDI디젤엔진개발" 1999년
- [3] H.Luders, R.Backes의, "An Urea Lean NOx Catalyst System for Light Duty Diesel Vehicles" SAE Paper 952493
- [4] R.H.Hammerle의 "Emissions from Diesel Vehicles with and without Lean NOx and Oxidation Catalysts and Particulate Traps" SAE Paper 952391
- [5] Yoshinori Takahashi의 "A Study of the Durability of Diesel Oxidation Catalysts" SAE Paper 952650
- [6] B.H.Engler의 "Catalytic Reduction of NOx with Hydrocarbons Under Lean Diesel Exhaust Gas Conditions" SAE Paper 930735
- [7] 청정생산기술사업 보고서 "소형승용디젤자동차용 NOx정화장치개발" 2000년

〈김병수 책임연구원 : bskim@katech.re.kr〉