

# 경유자동차 PM 및 NOx 대책 기술 동향

정 용 일 박사 · 한국기계연구원 엔진환경그룹

## 1. 규제동향

EU에서는 2008년부터 자동차의 CO<sub>2</sub> 배출량을 140g/km으로 낮추고 2012년까지 120g/km으로 강화하는 새로운 자동차 이산화탄소 배출기준을 설정하였으며 우리나라도 2009년부터 이 협약에 가입하기로 서명함으로써 국내 자동차업체에 비상이 걸려있는 상태이다.

현재까지 알려져 있는 CO<sub>2</sub> 대책으로는 연료 사용을 대폭 절감할 수 있는 저연비자동차를 개발하는 것이 가장 현실적인 대안으로 제시되어 있어 계속 강화되고 있는 배출가스기준을 만족하면서 동시에 저연비기술을 개발하여야 하는 저공해저연비기술이 향후 자동차 개발의 핵심방향이 되고 있다.

현재 자동차용 엔진의 주종인

가솔린엔진과 디젤엔진에서 연소효율이 높은 디젤엔진이 가솔린엔진에 비해 연비가 20~30% 유리하며 따라서 CO<sub>2</sub> 배출량도 20%이상 적게 배출된다.

미국과 유럽 등 자동차 선진국에서는 CO<sub>2</sub> 저감을 위한 저연비기술이 자동차 기술경쟁에서 가장 중요한 것으로 분석하고, 현재 연비의 1/3 수준인 3리터당 100km를 주행(3L Car)할 수 있는 초저연비자동차를 2005년 이전에 개발을 목표로 정부 차원의 초저연비자동차기술개발 사업을 진행하고 있다.

미국의 PNGV에서는 4밸브직접분사식 소형고속디젤엔진과 축전지를 사용하는 하이브리드 자동차가 가장 유망한 것으로 분석하여 개발하고 있으며, 2000년 초반에 proto 차량의 발표를

계획하고 있다.

유럽에서는 중량 800kg이하의 소형차량을 대상으로 차량 경량화, CVT 사용과 함께 직접분사식 고속디젤엔진을 사용하여 초저연비자동차 실현을 계획하고 있으며, VW에서는 이미 3L Car를 개발하여 판매하고 있다.

이와 같이 디젤엔진이 초저연비자동차를 실현할 수 있는 유리한 위치에 있음에도 불구하고, 가솔린엔진에 비해 다량 배출되는 질소산화물(NOx)과 입자상물질(PM : particulate matters) 문제를 해결하지 못하면 이와 같은 유리한 여건을 제대로 살리기가 어렵다.

특히 PM이 기관지 등에 침투하여 장기간 잠재함으로써 폐암의 원인이 된다는 연구결과가 최근에 발표됨으로서 PM의 인체 위해성에 대한 논란이 가중되고

있어 PM의 획기적인 저감방법이 없으면 경유자동차의 사용 자체가 어려울 수도 있는 상황에 예상된다.

특히 최근 EU에서는 2005년의 EURO4 기준에서 대형경유차의 PM 규제를 0.1g/kwh에서 0.02g/kwh으로 대폭 강화하였으며, EURO5(2008년)에서는 NOx를 3.5g/kwh에서 2.0g/kwh로 강화하였다. 또한 미국도 2007년에 PM을 0.1g/bhph에서 0.01g/bhph으로 강화할 계획으로 있어 매연여과장치나 NOx 촉매와 같은 후처리장치 사용이 불가피하게 되었다.

## 2. 매연여과장치

입자상물질을 저감하기 위한 방안들이 오랫동안 연구되어 왔으며, 현재 가장 효율적인 기술로는 대규모의 fleet test를 시행하고 있는 매연여과장치(DPF: diesel particulate filter trap)로서 실용화에 거의 도달된 것으로 분석하고 있다. 이 장치는 디젤엔진에서 배출되는 PM을 필터로 포집한 후 태우고(재생) 다시 PM을 포집하여 계속적으로 사용하는 기술이다.

재생과정은 light-off 온도, 공급되는 산소농도와 산소유량,

PM의 포집량에 따라 적절하게 조절하여야 하며 크게 두 가지 방법으로 나누어진다.

첫째는 포집된 PM을 soot 점화온도인 550-600℃ 까지 외부 열원을 가열하는 방법으로 전기 히터, 버너, 트로틀링 등이 사용된다.

둘째는 촉매를 이용하여 soot 점화온도를 낮추어 엔진배출가스로 점화시키는 방법으로, 필터 트랩의 촉매코팅, 연료에 첨가제 공급, 트랩 전방에서 분사시키는 방법 등이 사용된다.

DPF는 매연을 80%이상 저감할 수 있어 성능 면에서는 아주 우수하나 내구성과 경제성이 실용화의 장애요인으로 남아 있다. 또한 필터에 PM이 포집됨에 따라 엔진에 배압이 걸리며 이것에 의하여 출력과 연료소비가 다소 희생되며 이를 최소화하는 기술의 보완도 필요하다.

### ■ CRT 방식

유럽에서는 Johnson Matthey에서 개발한 CRT (continuous regeneration trap) 매연여과장치가 가장 유력한 기술로 평가되고 있으며 현재 스웨덴에서 1800대가 시험 운행되는 등 유럽 전역에서 5000대 이상이 운행되고 있다.

최근에 독일도 1000대의 버스에 시험운행을 시작했으며 미

국에도 도입을 준비하고 있다.

CRT의 캐니스터 내부에는 필터가 2개 설치되어 있으며, 전단의 백금산화촉매 (platinum-based oxidation catalyst)에서는 산화반응으로 NO를 NO<sub>2</sub>로 변환시키며 CO와 HC도 저감시킨다. NO<sub>2</sub>는 탄소입자가 250℃에서 산화할 수 있도록 작용하며 따라서 후단에 설치된 필터 (cordierite wall flow particulate filter)에 포집된 PM은 배기가스 온도가 250℃ 이상이면 연속 재생된다.

성능은 PM과 CO, HC를 90%수준으로 저감시키며, NOx는 3~8%정도 감소한다. 특히 PM중 10nm-250nm 크기의 nanoparticle 수량도 현저하게 감소하는 것으로 발표되고 있다. 그러나 촉매의 성능유지를 위해서 경유의 황(sulphur)성분을 10ppm이하로 요구하기 때문에 상용화에 가장 큰 장애가 되며 전세계적으로 보급되기에는 상당한 시일이 소요될 것으로 예상된다. 참고로 현재 국내 경유의 유황 규제는 500ppm이며 2005년에 유럽에서 50ppm으로 강화할 계획으로 있다.

### ■ PSA 첨가제 방식

또한 프랑스의 Peugeot사에서는 2.2리터 고급 경유승용차인 Model 605에 2000년부터

첨가제방식 매연여과장치를 장착하여 판매할 계획으로 있다.

장치의 특징으로는 porous silicon carbide substrate 필터를 사용하여 가격을 저감시켰고, Rhodia에서 생산한 cerium-based Eolys 첨가제를 사용하며 450℃ 이하에서 재생이 가능하다.

또한 첨가제만으로는 다양한 운전여건에 만족하기가 곤란할 것으로 판단하여 보조 재생 방식을 추가적으로 사용하여 400-500km 주기마다 강제로 재생시킨다. 강제재생을 위해서는 산화촉매를 전방에 부착하여 미연 탄화수소 연소로 발열을 시키며, commonrail 연료장치에서 multiple post-injection으로 배출가스 온도를 상승시킨다.

필터내에 쌓인 재(ash)는 80,000km마다 불로서 세척한다.

첨가제방식과 촉매방식은 필터 내에서 연속재생이 일어나므로 필터에서 엔진의 배압을 낮은 수준으로 유지함으로써 타장치에 비해 연비악화와 엔진성능의 저하 요인이 적은 장점이 있다.

#### ■ 플라즈마 방식

고전압의 전기적인 방전(discharge)으로 전자에 에너지를 가하여 활성화시킴으로서 얻게되는 non-thermal plasma

(저온플라즈마)를 주로 이용하는 자동차용 후처리장치 개발 연구도 최근들어 활발하다. 플라즈마는 NOx 저감기술로 주로 응용되어 왔지만 자동차에서는 PM 저감을 위한 연구가 더 활발하다.

플라즈마방식은 필터를 사용하는 기존의 매연여과장치의 원리와는 상이하기 때문에 필터방식 수준의 PM 저감을 달성은 용이하지 않지만 PM과 함께 NOx를 동시에 저감할 수 있는 기술로 발전할 수 있을 것으로 기대된다.

영국의 AEA, 미국의 SwRI나 Noxtech, 이태리, 한국 등지에서 연구가 진행되고 있으며 상당한 수준까지 발전한 것으로 발표되고 있다. 특히 99년 독일 프랑크푸르트 모터쇼에서 미국 굴지의 자동차 부품회사인 델파이에서 non-thermal plasma (NTP) reactor를 발표하여 큰 관심을 끌고 있으며, 영국의 AEA에서는 소형 승용차에 시험운행을 시작하는 등 이 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

### 3. NOx 저감용 후처리장치

#### ■ DeNOx 촉매

현재 가솔린엔진에 사용되고 있는 삼원촉매는 공연비가 농후

한 영역에서 작동하는 반면, 높은 배기온도에서 작동하기 때문에 희박한 공연비 영역에서 작동하는 가솔린 lean burn엔진이나 디젤엔진에서는 사용이 불가능하다.

현재 연구되고 있는 DeNOx 촉매로는 산소가 과다한 영역에서는 엔진에서 배출되는 HC를 사용하여 NOx를 N<sub>2</sub>로 변환시키는 Lean NOx Catalyst (LNC) 방식과, 희박영역에서 NOx를 포집하였다가 농후영역에서 배출(release)하고 촉매에 의해 질소와 이산화탄소로 변환시키는 NOx Trap 방식이 있다.

LNC의 경우 충분한 공연비가 요구되기 때문에 가솔린엔진보다는 디젤엔진 사용 쪽에 관심이 두어지고 있으나 이 경우 효율이 15~40% 수준으로 한용성이 미흡하다.

NOx Trap은 고온내구성이 우수한 장점이 있으나 연료 중의 황성분에 피독되는 문제점을 안고 있다. 따라서 연료중 유황성분을 30ppm 이하로 낮추도록 요구하고 있다. 디젤엔진의 경우 가솔린엔진과 달리 농후 공연비를 위한 rich spike를 일으키기가 곤란하기 때문에 NOx trap을 적용하기가 용이하지 않다.

최근 일본 미쓰비시자동차의 lean burn 가솔린 엔진에 사용

된 NOx trap은 30~40%의 NOx 제거율을 보이고 있지만 80% 이상의 고효율 촉매개발은 상당한 기간이 필요할 것으로 예상된다.

■ 대형 경유차용 촉매

대형 경유자동차용으로 De NOx 촉매와 함께 SCR 촉매 적용이 연구되고 있다.

SCR(Selective Catalytic Reduction) 촉매는 암모니아나 urea를 사용하여 NOx를 N<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 환원하는 장치이다. 배출가스 상류에 urea를 분무하여 주면 NOx 성분과 선택적으로 반응하며 배출가스 중의 NOx 농도에 적절한 양의 urea를 공급하여야 한다.

NOx 저감율은 90%이상으로 아주 우수하나 이 기술은 지금까지 주로 공장에서 사용되어 왔기 때문에 자동차에 실용화하기 위해서는 장치규모 축소와 별도의 urea 공급장치 등의 기술 개발이 필요하다.

#### 4. 유럽의 경유자동차 후처리 대책기술

■ 경유승용차 후처리기술

경유승용차의 EURO3 대책 기술로 common rail 방식의 전자제어식 고압연료분사장치로서 입자상물질을 대폭 저감시키며,

연비도 상당히 개선된다. 후처리 장치로는 산화촉매(DOC)를 사용하여 SOF를 줄임으로써 PM을 10-20% 정도 저감시키며, EGR 시스템을 사용함으로써 NOx를 저감하고 있다.

앞에서도 언급하였듯이 프랑스 PSA사에서는 첨가제방식 매연연과장치를 사용하는 고급 경유승용차를 2000년부터 양산하며 이 경우 가솔린 자동차보다도 우수한 배출가스 수준을 보일 것으로 기대되며, EURO4 기준에 대비한 기술로 평가된다.

경유 승용차용 DeNOx 촉매 개발도 활발하며, 현재 passive HC-DeNOx는 개발되어 있으나 NOx 저감효율이 15% 수준으로 실용화에 미치지 못하고 있다. 저감효율을 높이기 위한 active HC-DeNOx 촉매 개발 연구가 지속되고 있다. 다만 DeNOx 촉매사용을 위해서는 초저유황 연료를 필요로 한다.

■ 대형 경유자동차 후처리기술  
EURO4에 대응한 대형(중량)

경유자동차 후처리장치로는 매연연과장치 사용이 유력한 것으로 예상된다. 그러나 제작사에서는 active HC-DeNOx 촉매, SCR 촉매 등의 NOx 후처리장치를 선호하고 있으며, 이는 엔진에서 PM을 저감하고 후처리 장치로 NOx를 저감할 경우 자

동차 연비를 향상시킬 수 있는 장점이 있기 때문이다.

그러나 SCR 촉매장치는 구조가 복잡하고 가격이 상대적으로 고가인 문제점이 있으며 따라서 후처리장치의 개발 속도와 경제성, 달성 기준치 등의 관계에 따라 NOx 촉매와 DPF 장치 중 하나가 선택될 것으로 보인다.

또한 만약 현재 관심의 대상이 되고 있는 PM의 수량규제에 대한 방침이 결정되면 DPF 장치의 사용이 불가피할 것으로 예상된다.

엔진 연소에서 PM과 NOx의 저감은 Trade-off 관계에 있기 때문에, 일반적으로 엔진에서 한 성분을 줄이고 후처리 장치로 다른 성분을 줄이는 방식으로 접근하고 있다. 그러나 기준이 계속 강화되는 2008년의 EURO5에는 PM과 NOx를 동시에 저감하는 4원촉매 사용이 불가피할 것으로 예상된다.

#### 5. 국내 현황 및 대책

이상에서 알 수 있듯이 향후 CO<sub>2</sub> 규제에 대비하여 디젤자동차 증가는 확실하나 PM 문제의 근본적 해결 없이는 디젤엔진의 지속적 발전을 보장하기 어려우며, DPF 기술은 경유자동차의 장래와 직결되는 매우 중요한 위치에 있어 멀지 않은 장래에 이

기술은 완성될 수 있을 것으로 전문가들은 예상하고 있다.

유럽에서는 2005년 이전에 경유중량자동차 뿐만 아니라 경유 승용차에도 매연여과장치가 실용화 될 것으로 예상되며, 국내에도 2007년경으로 예상되는 장기 배출가스허용기준 설정시에는 매연여과장치 부착이 고려 될 것으로 추측된다.

국내에서는 90년대 초기부터 PM 저감을 위한 DPF 기술개발 연구가 진행되어 왔으며, 96년에 서울시 청소차 1,400대에 부착하여 운행되고 있고 계속하여 시내버스에 보급을 추진하고 있

다. 또한 지금까지 개발하여온 국내 기술은 선진국에 뒤지지 않는 수준이며 기술도 차별화 되고 있음을 알 수 있다.

예를 들면 금호에서 개발한 첨가제방식 매연여과장치는 새로운 종류의 금속분말필터와 첨가제 개발 등 경제성 확보와 성능 향상연구를 계속하고 있다. 선도전기가 개발한 플라즈마방식 매연여과장치(DSR)는 현재 약 40% 수준의 PM 저감성능을 나타냄으로서 선진국보다 우수한 성능으로 평가되고 있으며, 계속하여 PM 저감성능 향상과 NOx 동시 저감을 위한 연구가 진행되

고 있다.

지금까지 개발되어온 국내 매연여과장치 기술이 국내의 상용 자동차에 사용되고 나아가 외국에 수출도 할 수 있도록 보다 실질적인 개발 및 보급사업을 새롭게 추진하여야 할 시점이라고 생각된다.

특히 최근에 중요한 이슈로 제기되고 있는 경유 승용차 국내 보급문제도 매연여과장치기술을 적용함으로써 매연과 공해에 대한 인식을 우선적으로 개선함으로써 원활하게 추진할 수 있을 것으로 생각된다.

<정몽일박사: yjeong@mailgw.kimri.ac.kr>