

연속 촉매 재생 방식의 경유차 매연 제거 장치

SK 대덕기술원 수석연구원 오전근

1. 경유차 매연제거 장치(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.

그림 1. 디젤엔진과 스파크점화엔진의 연비 비교

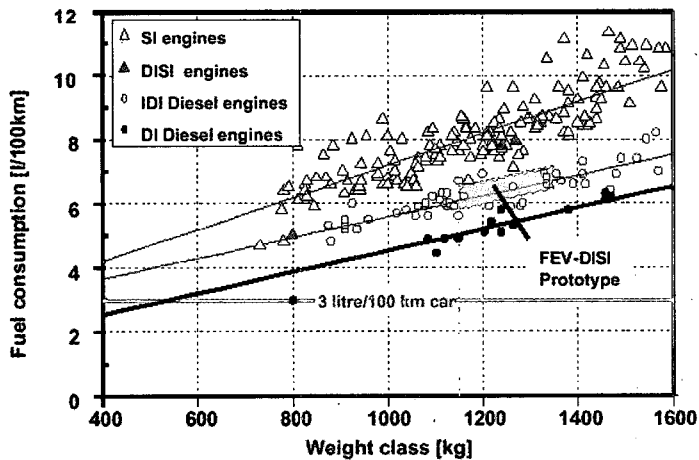


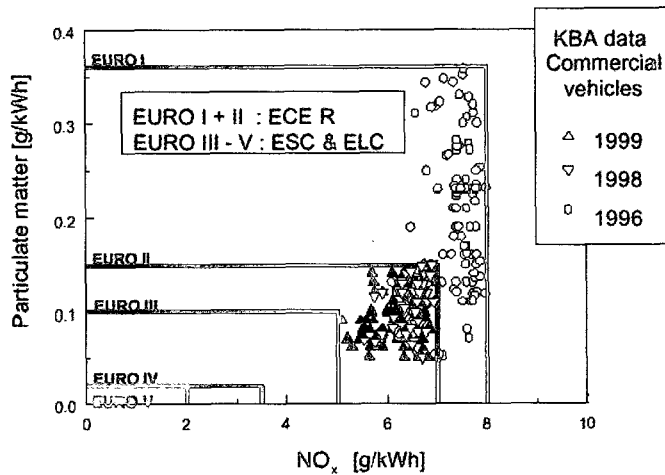
표 1. 경유차와 가솔린차의 비교 (환경부 경유 승용차 토론회 자료)

차 종	연 료	배 기 량	CO	HC	NOx	PM	CO ₂	(g/km)
								연 비
아반떼 XD	경 유	2.0	0.129	0.016	0.326	0.033	170.0	15.5
	가 솔 린	2.0	0.24	0.03	0.04	-	223.0	10.5
라비타	경 유	1.5	0.16	0.011	0.417	0.036	163.4	16.4
	가 솔 린	1.5	0.92	0.03	0.07	-	213.7	10.9

표1은 국내에서 개발된 동급 차량에 대한 휘발유 차량과 경유 차량의 성능비교 테이블이다. 이 비교에서는 경유 차량은 50%정도 연비의 우위를 나타내고 있으며 이산화 탄소는 30%정도 적게 배출되는 것으로 나타나고 있다. 그러나 경유 차량은 매연으로 통칭되는 미세먼지(PM)와 NOx를 상대적으로 많이 배출하는 문제점을 지니고 있다.

특히 경유차에서 발생하는 검은 먼지는 심각한 도시 환경 오염 문제를 유발하고 있으며 호흡기 질환을 유발할 수 있는 것으로 알려지고 있어 선진국에서는 매연 발생량을 축소하기 위한 규제 강화가 이루어지고 있다. 그림 2는 자동차 배출 규격을 대표하고 있는 유럽의 규제 수준을 나타낸 것이다.

그림2. 유럽의 경유차 배출 기준의 강화



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

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

2. DPF의 종류와 발달 과정

1) 강제 재생 방식의 DPF

90년대에 개발된 DPF시스템은 필터에 포집된 매연을 강제적으로 태워주는 방식으로 개발되었다. 매연을 태워 주는 조건을 형성하기 위해서는 500도 이상의 고온을 유지해 주어야 하는데 매연의 연소 온도까지 배기 가스 전체의 온도를 올려 주기 곤란하여 배기 가스를 차단하고 온도를 올려 주는 방식을 채택하고 있다. 배기 가스를 차단하기 위해서는 두개의 필터를 장착하여 필터가 재생되는 동안 다른 하나의 필터는 계속 매연을 포집할 수 있도록 구성되어 있다. 온도를 상승시키기 위해서 전기 히터를 이용하거나 버너를 이용하는 방식이 있다. 이러한 교대로 사용하는

● ENVEX2002 국제환경기술세미나 시리즈

Alternate방식의 DPF는 많은 필요한 부품으로 인하여 기계적 결함이 자주 발생하게 되며 배기 가스를 차단하고 재생하기 때문에 종종 필터의 온도가 1000도 이상 상승하여 필터가 파손되는 문제점이 결정적인 결함이 있다. 이로 인하여 필드 테스트에서 성공적인 결과를 얻지 못하고 대부분 상업적인 성공을 거두지 못하였다. 또한 재생에 필요한 전기와 공기를 별도로 주입하기 위해서 Generator의 추가 설치가 필요하고 Air사용에 따른 차량 안전성의 저해 문제도 강제 재생 방식의 DPF적용을 어렵게 만드는 요인이다.

최근에는 Cordierite필터 대신에 내구성이 뛰어난 SiC필터를 적용하여 종래의 문제점을 상당히 개선하고

Alternate방식을 적용하는 대신 차고지에서 전기를 공급하여 태우는 Off-Line재생 방식을 적용하여 시스템을 단순화시킨 제품이 상업화 되고 있다. 그러나 Off-Line재생 방식은 차량 운행 거리의 제약과 관리상의 불편함 등으로 인하여 상업적 적용에 한계가 있다.

2) 촉매 재생 방식의 DPF

촉매를 이용하는 경우 자연 상태의 배기 가스 온도에서 필터에 포집된 매연이 연소될 수 있다. 촉매형 DPF는 두 가지 방식으로 구분되는데 하나는 필터 전단에 NO산화 촉매를 설치하여 NO₂를 생성시키는데 NO₂의 300도 부근에서의 강력한 산화 반응에 의해 필터에 포집된 매연을 태워주는 방식이다. 해당 기술은 Johnson-Matty사에서 개발하여 상업적 적용이 이루어 지고 있다. 다른 하나의 방식은 필터 자체에 촉매를 Coating하여 촉매 연소가 이루어 지도록 하는 방식이다. 이 기술은 Engelhard 등에서 개발하여 상업화가 이루어 지고 있다.

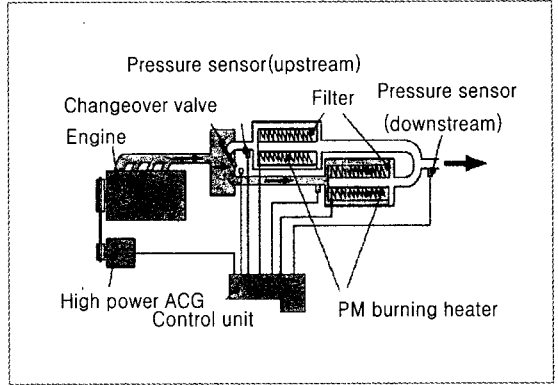
촉매 재생 방식은 연속적으로 배기 가스가 통과하면서 포집된 매연이 연속적으로 제거되기 때문에 필터의 온도가 높게 올라가지 않아서 장치의 내구성이 높으며 장치가 간단하여 기존의 소음기를 떼어내고 부착할 수 있어 운행차 Retrofit이 용이한 장점이 있다. 또한 추가적인 에너지 사용이 없어서 에너지 효율상의 손실이 없는 점도 장점이다.

연속 재생이 이루어 지기 위하여 촉매가 필요로 하는 온도는 대개 300도 부근에서 형성되므로 차량의 운행 과정 중 일정 부분은 온도가 300도 이상으로 상승되어야 한다. 대형 차량은 배기 가스 온도가 높아 300도 이상 조건이 형성되어 촉매형 DPF적용이 용이하나 소형차의 경우는 대개는 배기 가스 온도가 낮아 이를 재생하기 위해서는 고속 주행을 하거나 Post Injection 등을 통한 배기 가스 온도 상승이 필요하여 소형차 DPF시스템은 다소 복잡화 한다.

그러나 촉매 재생 방식은 배기 가스 중에 함유된 SO₂를 SO₄의 Sulfate로 전환시켜 미세 먼지를 발생시키게 된다. 이에 따라서 연속 재생이 이루어 지는 촉매 방식의 DPF를 사용하기 위해서는 기존 경유 중의 유황성분을 90% 이상 낮춘 경유 소위 ULSD(Ultra Low Sulfur Diesel)를 사용해야 한다. ULSD의 유황 함량 규격은 유럽, 일본같이 50ppm을 적용하는 나라와 미국같이 15ppm을 적용하는 나라가 있는데 EURO IV수준의 규격을 달성하기 위해서는 최대 유황 함량이 30ppm이하가 되어야 한다.

ULSD자체만으로도 차량 엔진에서 발생하는 미세 먼지량을 20%이상 감축 시킨다. 연속 재생 방식의 촉매형 DPF는 매연이 많이 발생하는 구형 디젤엔진에는 적용하기 곤란하다. 왜냐하면 매연을 태우는 속도보다 포집되는

그림3. Alternate형 강제 재생 방식의 DPF

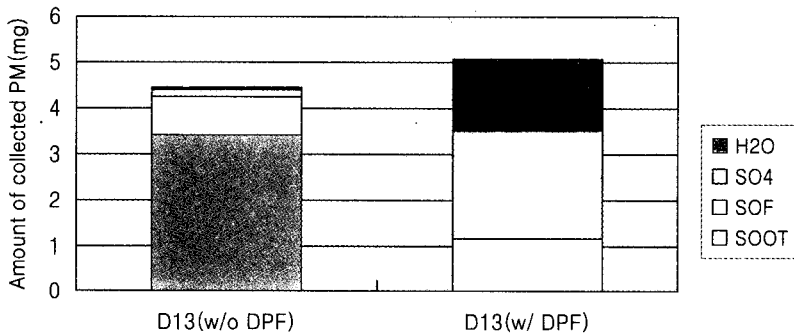


량이 많아지면 궁극적으로는 필터가 막혀 운행에 지장을 주기 때문이다. 따라서 ULSD를 사용하면 매연 발생량이 줄어 DPF에 대한 부담을 줄여주는 효과도 있다.

또한 DPF에 사용된 귀금속 촉매는 Sulfur에 의한 피독 현상이 발생되어 Sulfur함량이 높을수록 DPF촉매의 수명을 단축시키는 결과를 초래한다 이러한 이유로 인하여 촉매형 DPF는 ULSD사용이 필수적으로 요구되고 있으며 이러한 사항을 고려하여 유럽, 일본, 미국은 2005년 ~ 2006년 ULSD로의 경유 규격 강화를 결정하고 있다.

그림 4는 유황이 많은 경유 사용차에서 발생하는 미세먼지의 조성구 촉매형 DPF를 통과한 후의 조성을 나타낸 것이다. 소위 매연이라고 부르는 검은 Soot는 100%가까이 제거되나 SO₄의 생성과 수분과의 결합으로 형성된 Soot에 의하여 오히려 PM이 증가된 것을 나타내고 있다.

그림 4. 촉매형 DPF 통과 전후의 PM의 양과 조성

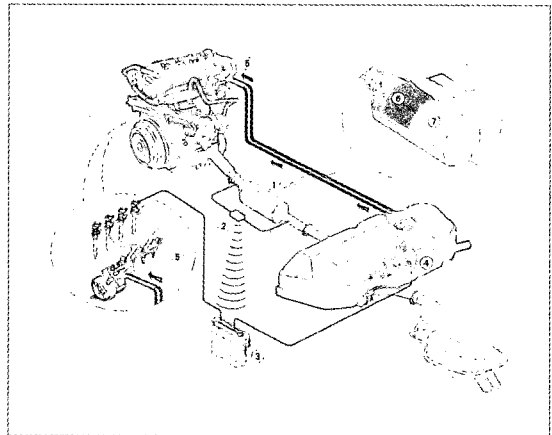


3) 첨가제 방식의 DPF

촉매 재생 방식과 비슷한 원리로 필터를 재생하는 방식이지만 촉매 대신에 연료에 첨가제를 넣어서 첨가제의 촉매 작용에 의해서 재생하는 방식이다. 사용되는 첨가제는 Ce, Fe 또는 Cu계열이 사용되고 있다. 첨가제 방식은 연속 재생 방식이면서도 특별하게 ULSD를 필요로 하지 않는 점이 장점이다. 그러나 첨가제에 의한 금속 성분의 배출에 따른 2차 오염의 문제와 필터에 축적되는 Ash성분의 증가에 따른 주기적인 Ash 제거 작업의 문제가 단점으로 지적되고 있다.

그림5의 푸조에 적용된 시스템은 첨가제를 사용하면서도 승용차의 배출 가스 온도가 첨가제에 의한 재생 온도보다 낮아 Post Injection과 연소 촉매를 이용한 강제적인 온도 상승이 결합되어 설계된 것이다.

그림5. 푸조 DPF 시스템



4) 기타 DPF 시스템

Plasma방식의 DPF시스템도 수년간 개발되어지고 있으나 아직 상업화 단계로 진행된 기술은 없다. 최근에는 저주파 방식의 Plasma를 이용하여 NO₂를 생성하여 필터를 재생시키는 기술이 개발되고 있다. 그러나 플라즈마 방식

● ENVEX2002 국제환경기술세미나 시리즈

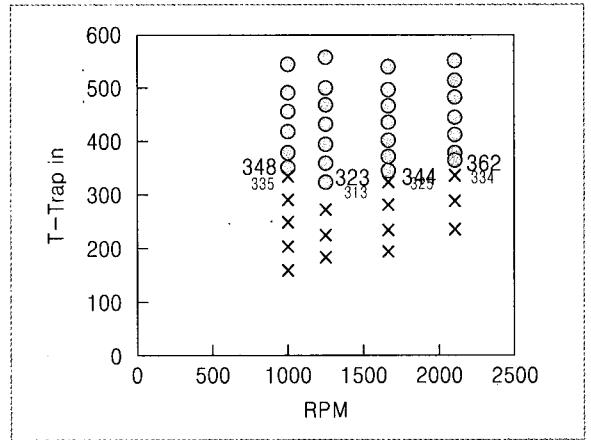
의 한계는 5%정도 수준의 Fuel Penalty의 문제와 오존의 생성 문제, 그리고 매연에 의한 플라즈마 발생 장치의 오염 등의 문제에 대한 해결 과제를 안고 있다. 플라즈마 방식은 NOx의 동시 제거 등의 가능성도 있기 때문에 주목을 받고 있다.

3. 개발된 촉매형 DPF

과거 SK(주)에서 개발한 YUGREEN DPF시스템은 두개의 Fiter Set를 설치하여 한쪽은 매연을 포집하고 한쪽은 전기 히터를 이용하여 필터를 재생하는 구조로 이루어져 있다. YUGREEN DPF는 500ppm Sulfur의 저유황 경유를 사용하고 1.0g/KWh이상의 많은 매연이 발생하는 경유 자동차를 대상으로 개발되었으며 전자 제어 장치 및 히터 재생 장치 등의 시스템이 복잡하여 잦은 고장을 일으키는 문제가 있었다.

SK(주)가 개발한 촉매 필터는 필터 자체에 촉매가 Coating되어 있는 Catalyzed Fiter방식이다. 개발된 DPF는 과거 Yugreen DPF와 달리 매우 단순한 구조로 되어 있다. 특히 촉매 성능이 우수하여 300도 부근의 상대적으로 낮은 온도에서 재생이 이루어지는 것이 특징이다. 그림6은 촉매 재생이 일어나는 영역을 나타낸 것이다.

그림6. 촉매 필터 재생 운전 영역



촉매형DPF는 매연 발생량이 1g/KWH이하로 적으며 ULSD(Ultra Low Sulfur Diesel)를 사용하는 신형 경유차에 적합한 시스템이다. 본 신형 DPF시스템은 ECU나 히터 등이 없으며 강제 재생시 발생하는 고온 등의 문제가 없어 시스템이 안정적인 것이 장점이다. 2000년 이후 국내 경유차의 규격은 0.2g/KWH로 신형 DPF사용에 전혀 문제가 없다.

4. 신형 DPF의 성능

그림7에서 예시한 것은 대형 경유차에 있어서 저유황 경유, ULSD, 그리고 신형 DPF를 부착한 경우에 있어서 PM발생을 비교한 것이다. DPF를 부착하지 않고 ULSD만 사용하는 경우에는 PM제거율이 15%수준이나 DPF를 사용하는 경우에는 90%정도 PM이 제거된다.

ULSD와 DPF를 사용하는 경우 PM제거율은 Sulfur함량에 따라서 차이가 있다. PM제거율은 50ppm ULSD의 경우 71%, 10ppm의 경우 92%수준을 나타내고 있다. 이러한 차이의 원인은 전술한 바와 같이 Sulfur가 촉매 반응에 의하여 Sulfate로 전환되기 때문이다. 본 장치의 차량 및 DPF조건에서 Euro IV & V규격을 만족시키기 위해서는 최대 30ppm이하의 경유가 사용되어야 한다.

촉매형 DPF는 PM제거 뿐만 아니라 탄화수소, 일산화 탄소, NOx를 저감하는 효과가 있다. 일산화탄소와 탄화수소의 경우 거의 90%수준을 제거하는 효과를 나타내고 있다. NOx의 경우 ULSD와 DPF를 적용하는 경우 20%의 수준의 저감율을 나타내고 있다. 그러나 NOx는 엔진의 종류에 따라서 다소 차이가 나타나고 있다.



그림 7. PM 발생량 비교

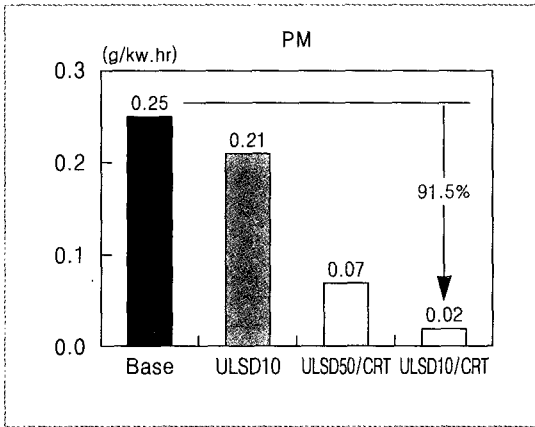
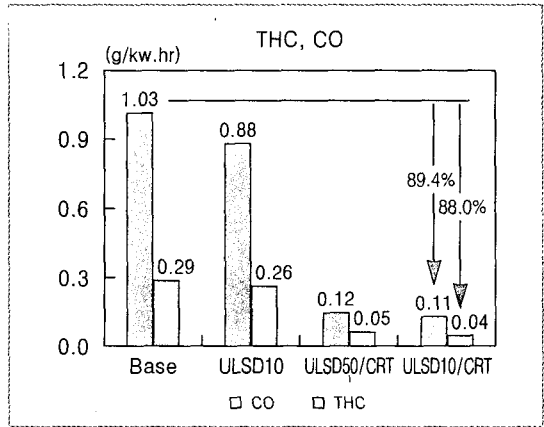


그림 8. 촉매형 DPF에 의한 일산화 탄소와 탄화 수소의 제거

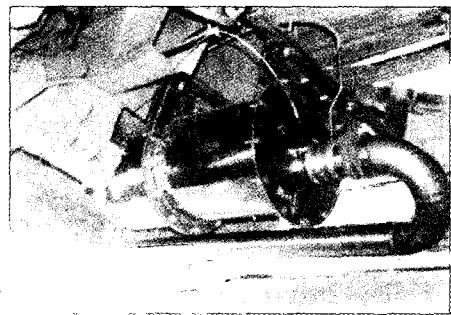


5. 신형 DPF의 실차 테스트

개발된 촉매식 DPF를 사용하여 다양한 실차 테스트를 실시하였는데 종래의 강제 재생식의 DPF에 비하여 매우 시스템이 안정적이고 문제가 거의 발생하지 않아 만족할 만한 성공적인 실증 시험 결과를 얻었다.

특히 월드컵 기간 중 수도권에 ULSD가 2개월간 공급되는 시기를 이용하여 서울, 인천, 수원의 시내버스 20대에 새로 개발된 촉매형 DPF를 장착하여 시험 운행하였고 한대의 장치도 문제를 발생시키지 않고 성공적으로 운행되었다.

그림 9. 서울 시내 버스에 시험 운행된 DPF시스템



DPF는 소음기를 떼어내고 부착하여 소음기 역할을 수행하도록 설계되어 있어 별도의 공간을 차지하지 않고 별도의 추가 장치 없이 간단하게 운행차에 적용될 수 있는 것도 개발된 촉매형 DPF의 장점이다.

본 DPF를 부착하여 운행된 총 누적 마일리지는 30만km를 넘어서고 있으며 그 동안 Trouble이 전혀 발생하지 않고 있으며 장거리를 운행하는 소형차에도 적용하여 제대로 기능이 되는 등 향후 소형 제작차에도 해당 DPF를 부착할 수 있을 것으로 전망된다. 그리고 금년 중으로 개별 차량별로 10만km의 내구성 시험을 완료하여 내년부터 일본 동경 시장 및 국내의 시험 사업에 본격적으로 참여할 예정이다. 이에 따라 국내에서도 환경 오염이 거의 없는 저공해 경유차 시대의 도래가 점점 현실화 되고 있는 것이다.

※보다 자세한 사항은 SK(주) 대덕기술연구원(☎ 042-866-7520)으로 문의하시기 바랍니다.