

경유자동차 매연여과장치 기술동향

Trend of Diesel Particulate Filter Trap Technology



정 용 일
한국기계연구원
Young-il Jeong
Korea Institute of Machinery & Materials



윤 먼 근
한국기계연구원
Myeon-keun Yoon
Korea Institute of Machinery & Materials

1. 서론

자동차 CO₂ 배출가스 규제에 대비하기 위해서는 경유자동차가 가장 유리하며 특히 고속 직분식 경유엔진의 경우는 높은 열효율로 인하여 향후 자동차 시장에서의 급속한 증가를 예측하고 있다. 국내의 경우도 중·소형 디젤자동차에 대한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있으며 최근 들어 Commonrail Type의 직분식 디젤엔진이 장착된 자동차가 등장하면서 새로운 시장을 형성하기 시작하였다.

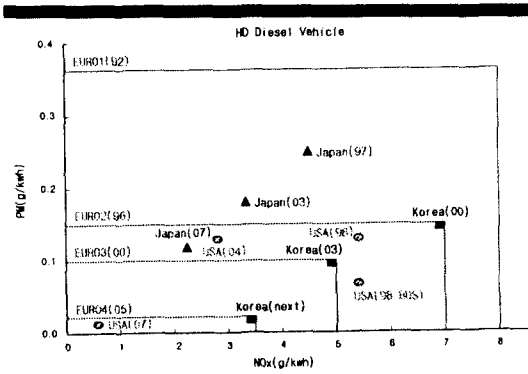
그러나 경유엔진에서는 휘발유엔진에 비하여 입자상물질(PM)과 질소산화물(NOx)이 다량 배출되기 때문에 이를 먼저 줄여야 하는 과제를 안고 있다.

최근 연구에 의하면 디젤 Soot가 폐암의 원인이 되며, 특히 Nanoparticle이 건강에 큰 위협이 되는 것으로 보고되고 있어 그 관심도가 날로 커지고 있는 실정이다. 따라서 미국 및 유럽에서는 경유자동차의 PM

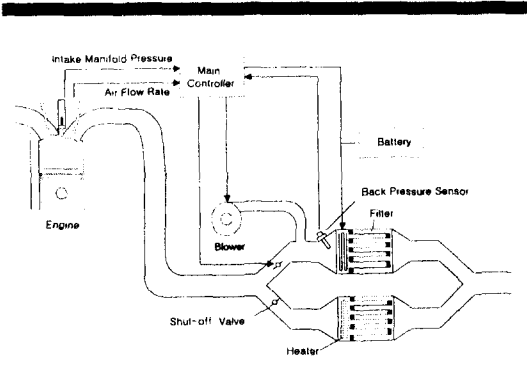
및 NOx의 배출수준을 휘발유자동차 수준으로 먼저 낮춘 후에 경유자동차를 적극적으로 보급하는 정책을 추진하고 있다.

그 예로 <그림 1>에서 보는 바와 같이 유럽 내의 HD(Heavy Duty) 디젤엔진 PM 규제가 매우 엄격하여지고 있다. 2005년 EURO4 규제에서 PM 0.1g/kwh에서 0.02g/kwh로 천연가스 자동차나 가솔린 자동차 수준과 동일한 수준으로 강화되고, NOx의 경우도 2008년 EURO5 규제에서 3.5g/kwh에서 2.0g/kwh로 규제 되어진다. 미국의 2007년 규제에서는 PM의 경우 0.1g/bhph에서 0.01g/bhph로 90%를 감소시켜야하고, NOx의 경우 4.0 g/bhph에서 0.2g/bhph로 95%정도를 감소시켜 더욱 강화되고 있다. 이와 같이 가혹해지는 환경규제에 대응하기 위해서는 DPF Trap 또는 NOx Trap과 같은 후처리 장치가 필수적으로 사용될 것으로 예상된다.

한국의 경우 2003년에 EURO3 규제가 시행되며, 차기 EURO4 기준을 검토 중에 있다.



〈그림 1〉 PM and NOx Standard for HD Diesel Vehicles



〈그림 2〉 Schematics of Electric Heater DPF System

2. DPF 기술 동향

매연여과장치(DPF) 기술은 현재 PM을 저감시키는 가장 효과적인 방법으로 인식되고 있다. 미국과 유럽에서는 운행차 Retrofit에 의한 대규모 보급이 이루어지고 있으며 제작차 적용도 시작되었다.

DPF의 원리는 PM을 필터로 포집한 후 이를 연소(재생: Regeneration)시키는 기술이다. 핵심기술로는 첫째 필터와 효과적인 PM 포집이며, 둘째 재생기술과 사용 열원, 셋째 시스템 제어기술이다.

세계 최초로 DPF 기술을 소개한 것은 1992년 Donaldson에 의해 뉴욕시의 버스 400대에 전기히터 방식의 DPF를 장착하여 Fleet Test한 것이다.

〈그림 2〉는 전기히터 방식의 DPF를 보여주는 것으로 산화재(공기)를 제어하여 필터에 포집된 입자상 물질을 제거하는 방식이다. 필터에 최적조건이 될 때까지 PM을 포집한후 히터로 점화시키고 Blower를 통해 공기를 적절하게 공급하여 재생하는 방식을 사용하였다. 두 개의 필터트랩이 사용되고 있으며 제어장치(Controller)에 의해 재생중인 필터의 입구는 차단하고 다른 쪽의 필터 입구를 열어 PM을 포집하는 구조로 되어 있다.

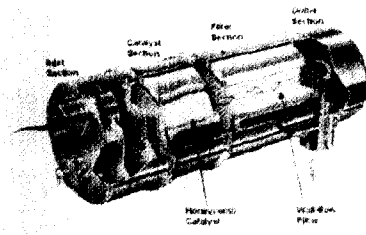
이외에도 연료 버너와 드로틀링 시스템이 사용되기도 하며, 이와 같은 시스템을 강제재생방식(Active

Regeneration System)이라고 부르고 1세대 DPF 기술로 볼 수 있다. 이 시스템은 구조가 복잡하여 고장이 빈번하고 필터의 압력 강하를 증가시킴으로 연료의 경제성이 떨어져 실용화가 이루어지지 못하였다.

이와같은 단점을 보완하는 2세대 DPF 시스템이 개발되고 있으며, 촉매나 첨가제를 사용하여 배기가스의 열원만으로 PM을 재생시키는 방법으로 자연재생방식(Passive Regeneration System)으로 불린다. 현재 가장 주목할만한 장치로는 Johnson Matthey의 CRT와 Engelhard의 DPX가 있다.

〈그림 3〉은 Johnson Matthey에서 제작한 CRT의 구조를 나타낸 것이다. 이 장치의 기본원리는 카본(Carbon)이 550℃ 이상에서 산화되지만 NO₂ 분위기에서는 250℃에서 연소되는 것을 이용한 것으로 배출가스의 NO를 NO₂로 변환시키는 촉매를 사용한다.

CRT™ Particulate Filter

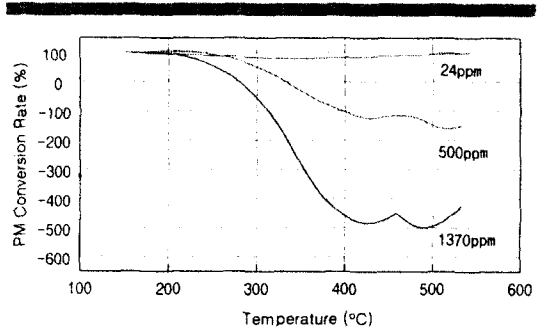


Charge-Activated Catalytic Filter System

〈그림 3〉 CRT System From JM

CRT는 두 개의 필터가 사용되며, 그림에서 보는 바와 같이 앞쪽에 산화촉매가 뒤쪽에 Ceramic Wall-Flow 필터가 설치되어 있다.

배기가스중의 NO가 전단의 산화촉매에서 반응하여 NO₂로 변환되며, 생성된 NO₂는 뒤쪽의 포집필터로 유입되어 Soot를 낮은 온도에서 재생시키는 역할을 한다. 그러나 CRT가 정상적으로 작동하기 위해서는 배기가스 온도가 275℃ 이상이며, 연료의 유황성분이 50ppm이하, NOx/PM의 비율이 20 이상을 요구하고 있어 아직은 적용이 제한적이다. 특히 CRT는 연료의 유황성분에 매우 민감하며 <그림 4>는 연료의 유황성분 차이에 따른 PM 저감 효과를 보여주고 있다.



<그림 4> Effect of Fuel Sulfur on PM Conversion in the CRT

연료 첨가제방식도 기본적으로는 촉매방식과 동일한 원리로 작동되며 탄소입자와 촉매가 보다 잘 접촉되는 이점을 갖고 있다. 첨가제로는 Fe/ferrocene, Fe/Sr, Ce, Pt와 Cu가 사용되며, 필터내의 Ash 퇴적물의 처리 등 해결해야할 문제점이 많은 실정이다.

PSA Peugeot Citroen은 2.2리터, 98kW, Commonrail, 승용 디젤자동차(모델 607)에 첨가제 방식 DPF 시스템을 장착하여 2000년부터 판매를 시작하였다. 이 시스템은 다공성 실리콘 카바이드(SiC) 필터를 사용하고 앞부분에 산화촉매를 설치한 구조를 하고 있다. Ce 첨가제를 사용하여 재생온도를 450℃로 낮추며 Commonrail Injection System에서 Post Injection으로 배출가스온도를 추가로 250℃ 높인다. 최근의 프랑스와 독일 환경청의 분석에 의하면 성능과 내구성이 우수하여 모든 경유승용차에 적극적으로 보

급할 계획을 수립하는 것으로 알려지고 있다.

3. 문제점과 대책

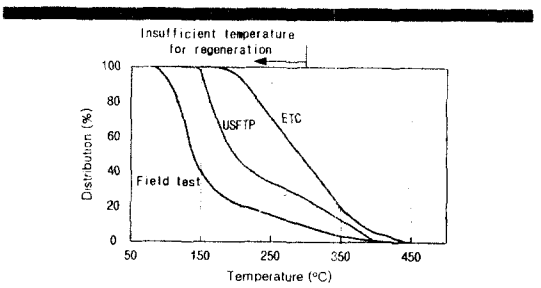
자연재생방식인 촉매 또는 연료첨가제 DPF 시스템은 구조가 간단하고 차량 설치가 용이하여 운행차를 중심으로 보급이 진행되고 있으나 기술적으로 해결해야할 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 특히 현재는 HD 디젤엔진을 중심으로 보급되고 있으나 LD 디젤엔진의 적용과 HD 디젤 엔진의 폭넓은 확대 적용을 위한 개선이 필요하다. <표 1>은 DPF의 재생 방식에 따른 분류이다.

<표 1> Regeneration Type

● Regeneration	
Active	Electric Heater Fuel Burner Throttling
Passive	Fuel Additive Catalyzed Trap
Passive-Active Combination	Engine Management Electric Heater

3.1 재생 온도

자연재생방식은 포집된 PM을 배기가스 온도만으로 태우기 때문에 엔진의 배출가스 온도는 장치의 성능을 좌우하는 매우 중요한 요소이다. LD 디젤 엔진은 재생온도가 HD에 비해 100℃ 정도 낮고, HD 디젤엔진의 배기가스 온도도 <그림 5>에서 보는 바와 같이 LD 보다는 높으나 지속적인 재생을 하기에는 충분하지 않다.



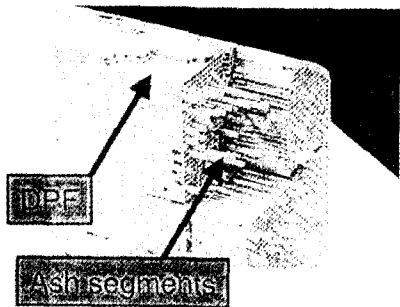
<그림 5> Exhaust Temperature Distribution in HD Diesel Engine

재생온도에 대한 대책은 두 가지 방법이 있다. 첫째는 PM이 150℃ 정도의 낮은 온도에서 재생되도록 촉매 또는 첨가제를 개발하는 것이며, 둘째는 전기히터나 버너 또는 엔진조절 등의 추가적인 보조열원을 사용하는 방법이다. 전자의 경우가 유리한 방법이지만 기술적인 한계가 있어 장기적인 관점에서 고려되어야 하며, 후자의 경우는 장치가 복잡해지는 단점은 있으나 현실적인 대책으로 여겨진다. EURO4 수준에 대응하기 위해서는 Passive-Active Combination DPF 시스템이 필요할 것으로 예상된다.

3.2 필터내 회분(Ash) 퇴적

첨가제는 필터내에 무기산화물, 염분의 형태 또는 복합된 형태로 퇴적된다. 촉매 필터의 경우라 할지라도 엔진오일로부터 생성되는 회분으로 축적되며 시간이 경과하면 그 양이 계속 증가되고 이는 배압을 증가시키는 원인이 된다. 퇴적된 회분은 매우 미세하고 표면적이 커서 필터의 Substrate와 쉽게 반응하며, 1000℃ 이상의 과도한 열에 노출되는 경우 회분은 소결되어 필터의 통로를 막고 필터를 균열시키고 용융시키는 원인이 된다. (그림 6)은 회분이 필터 통로에 퇴적되어 통로가 막힌 상태를 보여주는 그림이다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 고압의 물 또는 공기로 회분을 불어내어 필터 내부를 주기적으로 청소하거나 또는 필터재료가 내열성을 가지도록 하여야 한다.



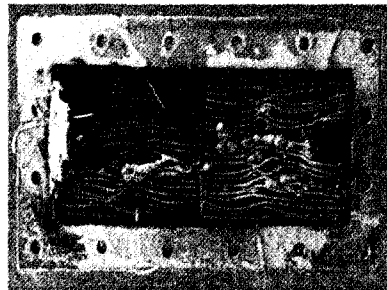
(그림 6) Ash Segment Sintered and Plugged in Monolith Filter

3.3 비제어 이상급속연소

이상적인 정상 재생은 필터내의 PM이 연속적으로 산화하는 것을 의미하며 이를 위해서는 배기가스의 온도가 재생에 필요한 최저온도를 계속 유지하여야 한다. 배출가스 온도가 너무 낮아 재생이 부진하면 필터내에 PM이 증가되며, 이로 인하여 배압이 증가되고 결국 필터가 막히게 된다. 이런 현상은 자연재생방식 DPF가 갖고 있는 일반적인 문제라 할 수 있다.

PM이 많이 축적된 상태에서 외부 요인에 의해 발화가 되면 급속한 연소가 진행되고 열발생이 급증한다. 이렇게 되면 필터내의 온도는 급상승하고 결국 필터는 균열 또는 용융 등의 손상을 입게된다. 이와 같은 비제어 이상급속연소 현상은 그 특성을 예측할 수 없을 뿐만 아니라 Random하게 일어나기 때문에 "Stochastic Regeneration"이라고도 부른다.

이것은 자연재생방식이 가지고 있는 기술적 취약점을 말하는 것이며, 재생시 연소제어 기술이 필요함을 알 수 있다. (그림 7)은 KIMM에서 금속분말필터를 실험한 경우로 비제어 이상급속연소 재생에 의하여 필터가 녹은 상태를 보여주는 그림이다.



(그림 7) Melted Sintered Metal Filter by Stochastic Regeneration

3.4 필터

필터의 재질이나 형상은 DPF 시스템의 성능을 결정하는데 가장 중요한 인자이다. 모노리스 타입이 가장 보편적인 형태이며 카트리지 형태, Knit 형태, Cross Flow 타입 등도 사용되고 있다. 필터 재질은 Cordierite가 가장 보편적이며, 실리콘 카바이드, 파

이버, 금속분말 등도 중요한 소재이다. 필터의 성능을 좌우하는 중요한 인자들로써 여과용량, 다공성, 압력강하, 열용량, 열내구성, 열팽창과 강도, 열충격 저항, 화학적 내구성, 용융점과 가격 등이 있다. <표 2>에 필터의 종류를 정리하였다.

4. DPF 시장의 전망

지금까지 경유자동차의 PM 저감을 위하여 개발되고 있는 DPF 기술동향과 문제점에 관하여 살펴본다. 미국과 유럽에서는 운행차의 DPF Retrofit 프로그램이 본격적으로 진행되어 이미 2만대 이상 보급되어 운행되고 있다. 최근에는 미국 캘리포니아에 90만대를 보급하는 프로그램이 장치 개발사와 협약되었다.

일본의 경우도 동경시내를 운행하는 모든 경유자동차에 2003년부터 2006년까지 DPF를 보급하는 의무적인 프로그램을 추진하고 있으며, 2006년 4월부터는 동경 시내에 트랩을 장착하지 않은 디젤자동차의 운행이 중지될 계획이다.

DPF 시스템의 보급에 큰 장애요인으로는 연료 유황이 50ppm 이하인 ULSD (Ultra Low Sulfur Diesel) 연료의 공급방안과 DPF 시스템의 가격을 낮추는 것이라 할 수 있다. 그러나 ULSD 연료는 이미 실용화 단계에 와 있으며 가격 차이 또한 1 Gallon당 10 Cents 미만일 것으로 기대되며 ULSD 연료의 공급은 대도시를 중심으로 단계적으로 보급될 것이다.

DPF의 가격 또한 점차 낮아져 2010년에는 대당 690달러 정도로 인하될 것으로 미국 EPA에서 예상하

<표 2> Filter type

● Filter
Ceramic Wall-flow Monolithic Cell (Honeycomb)
Sic Monolith
Fiber Wound Cartridge
Knitted Fiber
Sintered Metal
Ceramic Foam
Glass/Ceramic Fiber
Cross-flow Ceramic Fiber

고 있다.

HD 엔진의 2005년 EURO4 기준을 만족하기 위해서는 DPF의 장착은 필수적이라 할 수 있고, LD 엔진의 2008년 EURO5 수준에 도달하기 위해서도 DPF를 사용하여야 가능할 것으로 예상된다. 또한 DPF 시스템 기술로는 촉매나 첨가제 방식의 자연재생방식에 전기히터나 엔진제어를 보조재생으로 추가하는 Passive-Active Combination 방식이 가장 가능성이 높은 방식으로 예상된다.

(정용일 박사 : yjeong@kinn.re.kr)

참고문헌

1. www.dieselnet.com.
2. Particulate traps for heavy duty vehicles, Environmental documentation No. 130, SAEFL, 2000.
3. Application particulate trap systems for diesel engines, VERT TTM W04/4/98, 1998.