

일본의 DPF 개발동향

이 대엽 박사 · 일본기계기술연구소 연소공학연구실

대기중의 PM(Particulate Matter)으로 인하여 도로 변에 사는 주민의 건강에 피해가 인정된다는 법원의 판결이 1998년부터 1999년에 걸쳐 일본에서 있었다. 이러한 판결에서는 PM의 유력한 발생원으로써 디젤차가 지적되었기 때문에 빠른 시일내에 PM을 저감시키는 것이 행정 당국 및 자동차 제조 메이커에 요구되고 있다.

도쿄都(이하 편의상 市)내에서도 대기중의 PM량은 환경 기준을 달성하지 못하고 있어 도쿄시가 '디젤차의 배출 가스 중의 미소입자상물질'(DPM: Diesel Particulate Matter) 삭감을 중점 시책으로 채용하여 공해 방지 조례를 개정하고, 기준에 따라 지정되는 차량에 대하여 DPF(Diesel particulate filter) 장착을 의무화하는 방향으로 가고 있다.

도쿄시 교통국이 시내에서 운행하는 노선 버스(총 1,787대)의 일부에 일본 메이커 4개 회사의 버스를 사용하여 1995년부터 수행하고 있는 DPF 실용 시험과 도쿄시 환경보전국의 주최로 2000년 3월에 개최된 DPF심포지움을 중심으로 일본에서의 DPF 개발 동향을 간략히 살펴본다.

도쿄시 시내 버스에 의한 DPF 실용시험 각사의 DPF의 특징을 <표 1>에 정리하였다. 4

개 회사의 방식에 있어서 공통점은 배기계에 DPF를 부착하고 세라믹스체의 필터에 포집된 수트 및 PM을 외부의 열원을 이용하여 소각, 기능을 재생하는 것이다. 필터에 포집된 수트와 PM은 DPF 전후의 압력차를 검출하여 일정치 이상으로 차압이 높아지면(필터가 막히면) 콘트롤러에 의하여 가열 장치가 작동하여 내부에서 소각이 일어나게 되고, 이 사이에 다른쪽의 DPF가 교대로 기능을 발휘하는 '간헐 재생식'을 채용하고 있다.

이스즈자동차의 DPF 시스템은 다른 시스템에 비교하여 메쉬가 크기 때문에 회로 저항이 작고 배압은 낮지만 미소입자에 대하여 여과 효율이 낮다고 지적되고 있다. DPF 내의 압력 변화를 DPF 전후의 압력 센서가 항상 감지하여 DPF에서 포집된 PM이 일정량이 되면 PM을 연소시켜 DPF를 재생한다.

압력이 규정치에 달하지 않아도 4시간이상 경과하면 재생(약 15분 정도)을 하도록 되어 있다. 수트 및 PM의 포집 메커니즘은 메쉬(10 μ m)보다 큰 입자가 표면에 퇴적됨에 따라 메쉬보다 작은 입자도 큰 입자의 표면에 포집된다고 설명되고 있으나, 포집 가능한 미소 입자의 지름이 어느 정도 인가는 밝혀져 있지 않다. DPF의 재생중에는 소

〈표 1〉 도쿄시 시내버스를 이용한 DPF 실용시험의 개요

차량명칭	이스즈	닛산디젤	히노	미쓰비시
시험차량 및 대수	KC-LV280L형 엔진 8PE1N형, 2대	U-UA44OHSN형 엔진 PF6형, 2대	U-HT2MLAA형 엔진 M10U형, 2대	U-MP218K형 엔진 6D22형, 3대
시스템 방식 (장착차)	세라믹세 필터에 수트 및 PM을 포집 1일 수회, 전기 가열로 소각처리	左同	左同	左同
필터 본체	SiC제 세라믹스 부직포를 蛇腹狀으로 접어 원통형으로 성형 조립	SiC제 세라믹스를 벌집상 단체구조로 성형	左同	左同
히터 구조	부직포 외면을 網狀전열선으로 덮어 씌	(1) 필터하부 호퍼내에 전열 히터를 배치 (2) 필터 앞부분에 연소 버너를 배치	필터하부 호퍼내에 전열 히터를 배치	필터 앞부분에 전열 히터를 배치
기술적 특징		(1) 수트, PM을 호퍼에 모 (2) 필터 표면에 퇴적된 수트, PM을 버너로 가온하여 공기로 가열 소각	수트, PM을 호퍼에 모아서 가열 소각	필터표면에 퇴적된 수트, PM을 히터로 가온하여 공기로 가열 소각
PM 처리 방식	부직포 표면에 수트, PM을 포집하여 그 태에서 가열 소각	아, 여기서 가열 소각 (2) 필터 표면에 퇴적된 수트, PM을 버너로 가온하여 공기로 가열 소각	수트, PM을 호퍼에 모아서 가열 소각	필터표면에 퇴적된 수트, PM을 히터로 가온하여 공기로 가열 소각
발생한 문제와 대책	알터네이터 용량 부족 → 교환 (110A→160A). 센서에 미세한 문제	센서 및 콘트롤러에 문제	당초, 1개월에 1회 정도로 DPF 교환 2000년 1월 산화촉매 식으로 교환 (1대) 가능적으로 바이패스 시켜 시험사용 중단중 (1대)	배터리문제 → 보조충전과 배터리 교환 단거리노선에서는 재생 사이클에 맞는 충전이 되지않아 투입노선을 변경
현장의 평가	필터 본체는 2년간 연속 사용중 (약 6만km경과) 스모크테스트에 의한 측정 10~15% (일반 차에서는 30~40%검출)	정비 빈도가 높고, 과제가 많다.	左同	左同
시험사용 기간	약 2년(1대) 약 1개월 (2대)	약 3년 6개월 (2대)	실질 시험사용 기간 불명	약 3년 6개월

비 전력이 크기 때문에 아이들링 스톱 시스템 부차의 차량에서도 아이들링 스톱은 하지 않는다.
닛산 디젤공업의 시스템은 배기관이 머플러 후

부에서 분기되어 한편에 DPF가 접속되어 있고 다른쪽은 바이패스 회로로 되어 있다. DPF는 필터부와 재생용 버너 부가 일체화되어 있어 재생시

에는 경유와 압축공기를 공급하여 버너를 가열하고 이 열로 포집된 수트 및 PM을 소각하는 방식을 채용하고 있다.

일반 차량에 이 시스템을 장착하기 위해서는 컴프레서, 얼터네이터 및 배터리의 용량 변경, 그리고 스텐레스 배기관등으로의 개량이 필요하다. 히노 자동차의 시스템은 '逆洗재생식'으로서 재생 시에는 통상의 배출 가스의 흐름과는 거꾸로 압축공기를 압송하여 수트 및 PM을 하부의 호퍼에 떨어뜨려 호퍼내에서 수트 및 PM을 전기 히터로 소각하는 방식이다. 소음기능이 있기 때문에 통상의 머물러는 생략되어 있고 재생 모드의 작동은 주행 2km이내에서 1회 정도의 빈도로 일어나도록 설계되어 있다고 한다.

미쓰비시자동차의 시스템은 배기계에 2기의 DPF를 병행 배열하여 여과와 재생을 교대로 전환하는 방식이다. 시험 사용중에서 수 km의 짧은 노선에서는 소각시에 필요한 전기의 용량으로 인한 배터리 문제가 발생하여 얼터네이터 출력을 증강하였고 더 긴 노선에서 시험을 하도록 하였다고 한다.

실용 시험에서는 다음과 같은 즉, 배출가스중의 PM 입자의 분포, 양 및 포집 성능, PM2.5에 대한 유효성, 내구 및 신뢰성, 시스템 가격과 장착 공사 비용, 그리고 기능 및 성능의 보증 기간등에 관한 점들이 더욱 규명되어야 할 것으로 지적되고 있다.

DPF 심포지움-미립자 제거 필터 개발의 최전선

참가 메이커는 이스즈 자동차, 이비덴, Engelhard(미국) 및 Johnson Matthey(영국) 등의 4사이고, 각사의 DPF의 특징을 <표 2>에 정리하였다. 4사의 시스템은 세라믹세 필터 엘레멘트를 채용하고 있는 것에서는 공통이지만, 구조와 작동원리에 따라 크게 2개로 나뉘어진다.

하나는 위에서 언급한 바와 같은 '간헐 전열 재

생식' 이고, 다른 하나는 화학적 촉매기능을 이용하여 배출 가스를 반응 시키고 이 때의 발생열과 생성물질을 이용하여 필터에서 포집한 PM 및 수트의 연소 반응을 촉진시키는 '촉매 이용 연속 재생식'이다.

이스즈의 DPF 시스템은 '섬유상의 세라믹스'로써, 내구성은 3년 또는 15만km를 목표로 하고 있다. 도쿄시와 이스즈자동차의 공동 개발은 DPF 장착차량(4톤차)을 이스즈가 제공하여 도쿄시의 환경과학연구소가 배출가스 분석 시험을 하고, 노상 주행시험은 도쿄시와 이스즈가 분담하여 수행하는 방식이다. 그 결과는 2000년 11월을 목표로 공표될 예정이라고 한다. 또한 이와 병행하여 도쿄시 트럭 협회에서는 도쿄시의 요청에 따라 회원 기업 6사에서 10대의 트럭 (10톤차 2대, 4톤차 4대, 2톤차 4대)에 같은 방식의 DPF를 부착하여 시험 운행중이라고 한다.

이비덴 SiC- DPF 시스템은 SiC(탄화규소) 소성 세라믹스제 제품으로써, 2000년 5월부터 프랑스에서 발매된 푸조 '607형 디젤'의 배기후처리 시스템에 이비덴이 필터 부분을 공급하고 있다. 이 푸조 시스템의 특징은 배출 가스 온도가 저하되는 저부하 저속 주행시에도 포집된 PM의 연소에 필요한 최저 450℃의 배출 가스온도를 얻기 위하여 연소 경유에 미소량의 특수첨가제(산화 세리움 베이스로써, 일종의 연소 촉진제)를 차량내에서 혼합 사용하는 것이다.

주행중에는 DPF 입구의 배출 가스온도를 각종 센서와 엔진 매니지먼트 콘트롤러 컴퓨터에 의해 최적제어하고 재생중에는 엔진의 출력 및 운전감에 이상이 없도록 각종의 배려가 포함되어 있다고 한다. 이 시스템은 복잡한 제어가 요구되는 방식으로 승용차용에서는 연속재생식 DPF의 양산제 1호로써 주목을 받고 있으나, 고부하 운전이 많은 대형 트럭 및 버스에 이러한 시스템의 적용이 가능한 지는 확실하지 않다고 한다.

〈표 2〉 각 사의 DPF 시스템의 비교

메이커(국명)	이스즈 자동차(일본)	이비덴(주) (일본)	Johnson Matthey (영국)	Engelhard(미국)
시스템 명칭	이스즈 DPF 시스템	SiC-DPF	CRT 연속 재생식 트랩	DPX 시스템
필터 엘레멘트	섬유상 세라믹스를 蛇腹狀으로 성형	하니콤상 다공질 SiC 세라믹스	촉매 코팅 하니콤상 코듀라이트+하니콤상 SiC 세라믹스	귀금속 촉매 코팅 하니콤상 코듀라이트(세라믹스)
구조	2실 절환식 (또는 2개 1조 절환식)	2개 1조 절환식	일체 2실식	1실식
특징 (자동차 용의 재생방식 경우)	전열 가열연소식 (교체 절환식)	압축 공기흡입/ 전열 가열 연소식	배출 가스 중의 NO를 산화시켜 생성된 NO ₂ 를 이용하여 PM을 연소 재생	촉매에 의한 반응 촉진 작용으로 연속 재생
제어방식	입출구 압력차이/ 정시간 병용 전자 제어	입출구 압력 차이/ 정시간 병용 전자제어	자기반응에 의하기 때 문에 제어장치 불필요	자기반응에 의하기 때 문에 제어 장치 불필요
관련장치	대용량 발전기 (얼터네이터)	대용량발전/컴프레서	1년 또는 1만 km에 1회 필터부 전후 방향 교환 필요	없음
실장 실적, 실용 시험 등	시가지 노선 버스 (도쿄 시내 버스 이외) 에서 실용시험중 (20-30대 규모) 트럭에서 실용 시험중 (시내 10대)	지게차등에 실적 (수백대 규모) 자동차용에서 실용 시험 중 (소형 버스, 트럭 등 수 대)	유럽을 중심으로 6,400 대 가동중 최장주행 60만km의 사례도 있음 미국 뉴욕시 버스에서 시험 운용 개시(2000년)	유럽에서 2000대 이상 가동중 아시아(대만, 홍콩), 남 아메리카등에서 1000대 이상 가동중
비고	도쿄시와 공동개발중	2000년 5월 발매의 프랑 스 푸조차에 엘레먼트 공급 개시	左同	대형차에서의 실적 다수

Johnson Matthey의 연속 재생식 시스템은 엔진으로부터 배출되어 포집된 수트 및 PM을 같은 배출 가스중의 NOx로 연소 시킨다는 점이다. 필터의 외관은 일체 구조이지만 내부는 2단 구조로써 코듀라이트계 세라믹스 필터 표면에 백금 촉매를 코팅한 산화 촉매가 앞 부분에 SiC계 세라믹스의 다공질 소성 필터가 뒤 부분에 배열되어 있다.

전단의 산화 컨버터 부분에서는 배출 가스중의

거의 전부의 탄화수소와 일산화탄소를 이산화탄소와 물로 바꿈과 동시에 NOx중의 일산화질소를 이산화질소로 효율 높게 변화시켜 일시적으로 NO₂ 농도를 높인다. 이 NO₂ 이용하여 후단에서 수트 및 PM을 연소 시킨다고 한다. 후단에서는 전단에서 반응하여 차단하지 못한 수트 및 PM이 필터에 포집되지만 이것을 전단에서 생성된 NO₂로 연소시켜 이산화탄소로 바꾸어 배출시킨다.

촉매 기능은 유황분의 함유량에 따라 영향을 받

기 쉽기 때문에 50ppm 정도까지 유황분 함유량을 저감시키지 않으면 이 시스템은 실용성이 없다고 한다. 따라서 현재의 일본의 연료 사정에서는 충분한 성능이 유지되지 않는다고 한다.

Engelhard DPX 시스템은 코디라이트제 다공질 하니콤포상 소성 필터의 표면에 귀금속 촉매를 코팅하여 수트와 DPM을 포집하여 연소처리시키는 '자기완결' 형의 '연속재생방식'이다.

연료중의 유황분에 의한 영향을 최소한으로 억제하는 촉매이기 때문에 현재의 일본의 500ppm

레벨의 유황분 함유 경유 (시판 경유에서는 350ppm 상당)에서도 안정된 기능이 발휘된다고 한다. 복잡한 전자 제어 시스템등이 불필요하여 후처리 장치에는 적합한 방식이라고 보인다. 홍콩 및 대만에서 1,000대 이상의 버스에 장착되어 주행 중이고 전 일본 트럭협회가 2000년 4월에 이 시스템을 20대의 트럭에 시험 장착하여 6월부터 실제 주행을 개시한다고 한다.

<이대엽 편집위원 : Lee@mgflame.mel.go.jp>