

디젤엔진용 미세입자상물질 배출저감시스템

임 인 권 | (주)씨에이테크 대표이사
 명지대학교 기계공학과 교수
 E-Mail : iglim@catech.co.kr

1. 머리말

디젤엔진 및 차량에서 배출되는 미세입자상물질 (PM : Particulate Matter)은 입자 크기가 매우 작기 때문에 대기 중에서 장시간 체류하여 도심의 시정악화 뿐만 아니라, 인체에 흡수되는 경우에 기관지 및 폐에 침투하여 각종 질환을 일으킨다. PM의 유해성 때문에 이미 국외의 여러 기관들에서는 발암물질로 규정하고 있으며 또한 최근에는 흡수된 PM 입자들이 폐에서 혈관으로 이동하여 심장병의 원인이 된다는 사실도 알려지고 있다.

2001년 기준, 서울 등 대도시의 대기오염 측정치가 연평균 PM 농도 (PM10 기준)가 약 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이라는 것을 고려할 때, 이미 심각한 상태를 넘어 위험한 수준이라는 사회적 인식이 널리 확산되고 있다. PM 농도가 국내 도시들에 비하여 상대적으로 낮은 일본 동경도 및 주변 8도시현은 디젤 차량으로부터의 PM 배출 감소를 위한 새로운 배출가스 규제에 관한 법령을 마련하여 시행하고 있는 상황이다.

국내에서도 약 15년 이상 디젤 차량으로부터의 PM 배출 감소를 위한 여러 기술적인 방안들이 시도되었고, 현재도 진행되고 있다. 그렇지만 90년대 후반에 진행되었던 서울시 청소차량 매연저감장치 장착 프로젝트가 실패하였다는 사실과 대기업들을

포함한 약 30개 이상의 업체가 수많은 인력과 비용을 투입하였지만, 아직까지 국내에는 상용화가 가능한 제품들이 없다는 사실 때문에 디젤 차량의 PM 배출저감장치 분야의 연구에 대한 많은 불신이 존재하고, 그 개발자체가 매우 어렵다는 인식이 널리 존재하고 있는 것이 사실이다.

본 고에서는 디젤 차량 및 엔진에서의 PM 배출저감에 대한 간단한 기술적인 사항과 (주)씨에이테크에서 개발된 디젤차량/엔진용 미세입자상물질 배출저감 시스템에 대한 소개를 다룬다.

2. 본 론

2.1 디젤엔진에서 배출되는 미세입자상물질

디젤엔진은 가솔린엔진에 비하여 약 20~30% 이상 효율이 높기 때문에 이산화탄소(CO₂) 배출량 규제에 대응한 가장 효율적인 엔진이다. 자동차에서 연료인 기름과 산화제인 공기가 미리 혼합된 상태에서 엔진 연소실로 공급되어 연소되는 가솔린엔진에 비하여, 디젤엔진은 엔진 연소실 내에서 흡입된 공기를 먼저 고압으로 압축하고 공기가 압축가열된 상태에서 고압의 연료노즐에서 연료를 분사 및 미립화시켜 연소시키는 방식을 가지고 있다.

따라서 고속으로 작동하는 디젤엔진은 연료와 공기가 충분히 혼합되지 못하고 또한 충분히 연소 시간을 가지지 못하는 경우가 발생하기 때문에 불

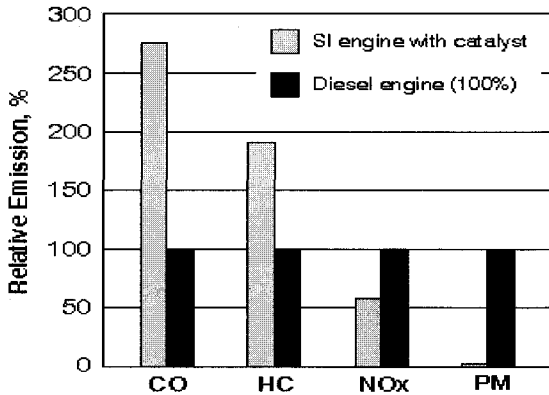


그림 3. 가솔린 및 디젤엔진 배출물 비교

완전 연소 상태가 발생하고 다량의 불완전 연소된 탄소미연입자가 엔진으로부터 배출된다. 또한 연소실 내에서 연료와 공기가 만나서 연소되는 국부적인 부분은 부분적으로 고온 확산화염이기 때문에 많은 양의 질소산화물(NOx)이 생성되기도 한다.

그림 1은 가솔린 엔진과 디젤엔진과의 배출물에 대한 비교를 보여주고 있다. 디젤엔진은 가솔린엔진에 비하여 상대적으로 일산화탄소(CO)와 탄화수소(HC)의 배출은 매우 낮지만, NOx와 PM의 배출 수준은 높다는 것으로 보여주고 있다.

이밖에도 엔진오일과 오일첨가제의 연소, 연료 중의 황성분 및 연료 첨가제 등의 비 탄화수소계 연료 원소의 연소에 의한 배출물과 PM에 부착되어 발견되는 PAH, soluble organic fraction(SOF), 알데하이드, SO₂, N₂O, 다이옥신, 아연 등의 금속산화물 등이 있다.

2.2 PM 조성, 입자분포 및 특성

표 1과 그림 2는 디젤엔진에서 배출되는 PM 조성에 대한 것이다. 조성의 대부분은 엔진에서의 연료의 불완전 연소에 기인하는 고체 성분(SOL), 오일 등의 연소시에 배출되는 기체성분(SOF)이며,

연료 중에 함유된 황성분에 의한 것이 약 14% 정도 차지한다는 것을 알 수 있다.

표 1. PM 구분

구분	구성	구성비
Solid fraction (SOL)	- carbon 및 ash	~54%
Soluble organic fraction(SOF)	- 오일/연료 중의 organic material	~32%
Sulfate particulate(SO ₄)	- sulfuric acid 및 water	~14%

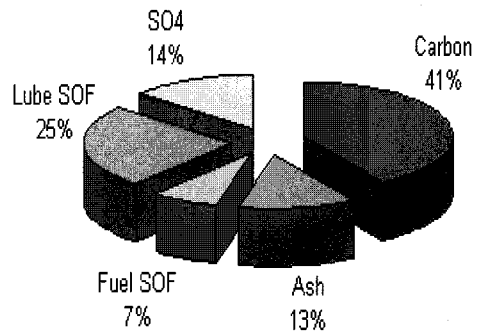


그림 2. 디젤 PM의 조성비

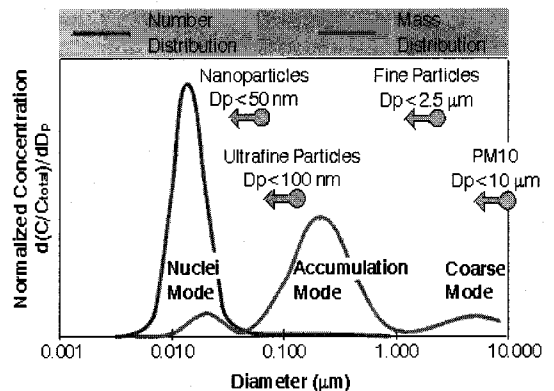


그림 3. 디젤 PM의 크기분포

그림 3은 디젤엔진에서 배출되는 PM 입자의 분포를 보여주고 있다. 대부분의 디젤엔진에서 배출되는 PM은 1.0 μm 이하에서 존재한다는 것을 알 수 있으며, 입자수 분포에서도 거의 대부분의 입자가 nuclei 모드에 존재하여 나노 사이즈급 크기의 입자가 대부분이라는 것을 보여주고 있다.

그림 4는 기존 구형 디젤엔진에 대하여 초고압 분사방식 등의 엔진개선을 하였을 때, 엔진에서 배출되는 PM 입자분포의 변화를 보여주고 있다. 전체적으로 배출되는 PM 중량의 감소에 영향을 끼치는 입자 영역은 감소하지만, 디젤엔진에서 배출되는 나노 사이즈급 입자의 개수가 크게 증대된다는 특성을 알 수 있다.

즉 신형 디젤엔진의 경우는 현재 시행되고 있는 디젤 배출물의 규제 기준이 되는 중량규제에 의한 측정 방식을 따른 경우는 친환경적인 디젤 엔진이겠지만, 인체에 더욱 쉽게 흡수될 수 있는 유해한 나노입자의 배출을 훨씬 증대시키는 문제를 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

2.2 PM 저감방안

현재까지 알려진 디젤엔진에서 배출되는 PM 배출을 저감시키는 방안은 엔진개선, 연료질 개선 및 후처리 시스템의 적용과 같이 3가지 요소로 크게

표 2. 디젤 PM 저감을 위한 3가지 요소

엔진개선	- 전자제어엔진 - 연료분사 시스템(Common-Rail) - Turbo charge
연료	- 초저유황경유(ULSD) - 바이오디젤
후처리장치	- 디젤산화촉매(DOC) - 매연여과장치(DPF) - 플라즈마 처리장치

구분될 수 있다. 국내외적으로 디젤엔진 PM에 대한 규제가 계속 강화됨에 따라서 언급된 3가지 요소가 같이 진행되고 적용되어야만 효율적인 PM저감이 된다는 것으로 인식되고 있다.

본 고에서는 위의 여러 방안 중에서 후처리장치 중 매연 및 입자상물질 배출을 저감시키기 위한 장치 또는 시스템, 일명 매연여과장치(DPF : Diesel Particulate Filter)에 대한 것에만 한한다.

2.3 DPF 장치 및 특성

일반적으로 DPF 시스템은 디젤엔진에서 배출되는 PM의 포집을 위한 배출저감장치(또는 포집장치), 포집된 PM을 산화(연소)시켜 기체로 변환하여 배출하는 방법 (또는 재생장치), 그리고 포집장

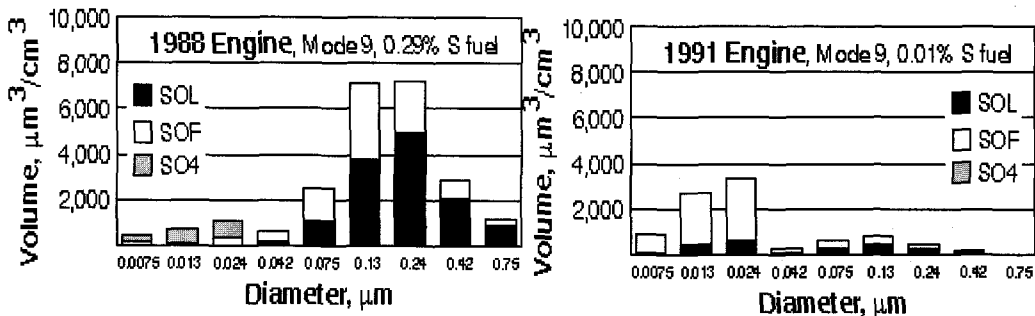


그림 4. 구형엔진과 신형엔진에 대한 입자 분포 변화

표 3. 재생방식에 따른 DPF 방식 분류

구 분	방 식 설 명	상 용 품
필터 + 귀금속 촉매	포집된 PM을 귀금속 촉매를 이용하여 연속적으로 산화시키는 방식	CRT, DPX
필터 + 첨가제 + 연료 강제분사	포집된 PM 연소를 위하여 연료 첨가제 및 엔진에서 주기적으로 배기 온도를 증가시키는 방식	뿌조승용차 적용 방식
필터 + 전기히터	차량 전원 또는 외부 전원을 이용하여 포집된 PM을 연소시키는 방식	
필터 + 버너연소식	버너에서 공급하는 열을 이용하여 포집된 PM을 연소시키는 방식	(주)씨에이테크
플라즈마	플라즈마를 이용하여 PM을 연소시키는 방식	

치와 재생장치를 제어하는 컨트롤러로 구성된다.

여기서 포집장치에 포집된 PM을 기체로 변화시켜 필터를 원래의 초기 상태로 되돌리기 위해서 열을 가하거나, 화학반응을 유도하는 일련의 과정을 재생(Regeneration)이라고 한다.

시스템 적용이 가능한 대상 엔진 및 차량, 사용이 가능한 경유연료, 사용하는 필터종류, 재생하는 방식 및 여러 조건 등에 따라 여러 DPF 시스템이 존재하고, 또 여러 방식이 조합된 DPF 들로 구별될 수 있다.

현재 상용화 적용이 가장 유력시되고 있는 방식 중에서 재생 방식에 따른 DPF 분류는 표 3에 나타나 있으며, 표 4는 기존 및 현재 개발 상용화되고 있는 DPF 장치들의 장점 및 단점에 대한 것이다.

일반적인 여과방식 및 촉매 방식 DPF의 경우는 포집에 사용하는 필터 자체의 가격이 상당한 고가이고, 잦은 필터의 교환과 필터 자체의 내구성 문제 및 경제성 때문에 인하여 상용화의 걸림돌이 되고 있다.

현재 국내외적으로 DPF 중에서 가장 PM 저감

효율이 좋은 기계적인 여과방식을 벗어나, 귀금속 촉매를 사용하는 연속재생 방식으로 개발 및 상용화가 진행되고 있다.

이것은 포집효율이 높은 세라믹 여과형 필터의 내구성 문제는 주기적인 PM 연소시에 발생하기 때문에, 필터의 열충격 방지를 위해서는 상당한 시간 동안 완만한 가열 및 유로 전환 밸브가 필수적이라는 단점이 있기 때문에 주기적인 재생보다는 촉매를 이용한 연속재생이 내구성 및 차량 운행 및 실장 적용성에 좋다는 판단 때문이다.

그렇지만 촉매를 이용한 연속재생방식을 사용하기 위해서는 촉매의 피독 방지를 위해 초저유황경유(ULSD)를 필수적으로 사용하고, Common Rail 엔진 등이 장착되어 엔진자체에서 PM의 발생이 적고 촉매 작용의 활성화를 위해서는 약 300°C 이상의 고온 배기가스 필요하기 때문에 장착위치가 제약된다.

물론 PM 포집과 동시에 연속적으로 재생되기 때문에, 운전자 편의 측면 및 운행에 유리한 점과 장착 등에 대해서는 매우 좋은 특성도 가지고 있다.

표 4. 기존 및 현재 적용되고 있는 방식들의 장단점

방 식	상용화 문제점	설 명
Ceramic Filter를 이용한 여과방식	내구성 배압 증가	1) PM 포집효율이 약 80 % 이상으로 매우 높음 2) 재생시 가열범위가 제한적이고 불균일할 경우, 열응력 및 필터에 균열 발생 3) 열적/기계적 충격에 취약하기 때문에 균열 생성되고 전과되기 쉬움 4) 재생시간을 길게하여 완전히 재생하는 알고리즘 및 제어장치가 필요 5) 경우에 따라서는 배기 라인에 재생전용 유로전환밸브 사용시 내구성 확보 필요 6) Surface filtration 방식 및 고효율 포집에 따른 급속한 배압 증가
촉매 방식	내구성 실차 적용성	1) 장치 구성이 간단하고 및 차량 장착 용이 2) 연속재생이 가능 3) 촉매 성능을 유지하기 위한 고온 배기온도(300℃ 이상) 가 필요 4) 촉매 피독 방지를 위한 10~50ppm 이하의 초저유황경유(ULSD) 필요 5) 엔진자체의 낮은 PM 배출이 필수
플라즈마 방식	실차 적용성	1) 장치구성 간단 2) 높은 전력투입에 비하여 낮은 PM 저감효율 3) 전자파 발생 가능성 4) 사용가능 전력 대비 플라즈마 발생장치 전원 실용화 문제

2.3 비구조체 세라믹 입자필터 방식의 DPF

(주)씨에이테크에서 개발하여 상용화 단계에 있는 DPF 시스템은 기존 DPF 개발에 적용된 구조체형(Structured) PM 포집용 세라믹 여과필터를 이용하는 방식에서 벗어나, 세라믹 입자들을 이용한 비구조체형(Unstructured) 다층필터 방식을 택하고 있다. 그림 5(a)와 그림 5(b)는 두 가지 필터에 대한 개념도이다.

구조체형 포집필터의 경우, 보통 1mm 이하의 얇은 벽면을 통하여 PM을 포함하는 배기가스가 흐르면서, PM이 벽면에서 포집되고 축적되는 표면여과(Surface filtration) 방식으로 포집이 진행됨에 따라 포집효율이 더욱 증가하고, 압력 또한 급격하게

증가하는 특징이 있다. 따라서 이러한 필터를 사용하는 DPF 시스템의 경우, 잦은 재생이 필요하다는 단점과 더욱이 필터 재질이 세라믹이기 때문에 재생에 많은 시간이 소요되며, 재생과정동안에도 필터 온도 및 온도 구배 조정 등에 주의하여야 한다.

이에 반하여 세라믹 입자들을 이용한 비구조체형 필터의 경우는 체적필터링(Volume filtration 또는 Depth filtration) 방식으로 입자로 구성된 전체 필터공간에서 PM 포집이 진행되는 방식으로서 필터 구조상 압력 증가가 서서히 진행된다는 특징을 가지고 있다.

일반적으로 PM 필터의 효율은 Interception에 의한 효율과 Diffusion에 의한 여과효율의 합으로

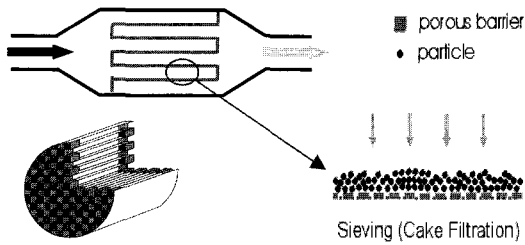


그림 5(a) 구조체형 PM 포집필터

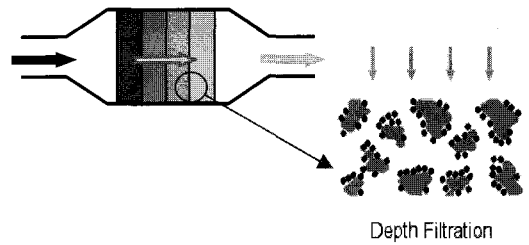


그림 5(b) 비구조체형 PM 포집필터

간단히 표현될 수 있다.

표면여과 방식 필터의 경우는 주로 Interception에 의한 방식으로 PM이 포집되는 것이 대부분임에 반하여, 체적필터링 방식의 경우는 효율은 필터를 구성하고 있는 입자층 두께에 비례하고, 입자들 크기에 반비례하는 관계를 가지고 있다.

일정한 입자 크기로 구성된 필터에 대하여 PM 입자가 큰 경우는 Interception에 의한, 그리고 PM 입자의 크기가 작은 경우는 Diffusion 현상에 의해서 포집되는 방식이라고도 할 수 있다.

비구조체 세라믹 입자형 포집필터는 기존 구조체

형 필터의 가장 큰 단점인 재생시에 열충격에 매우 약하다는 단점을 없애기 위하여 시도된 새로운 필터 개념으로서 필터링 방식의 변경에 따른 급속한 재생도입 가능 등의 여러 가지 이점들을 가능하게 한 새로운 디젤 PM 여과방식이다. 표 5는 그 특징들을 정리한 것이다.

2.5 개발 과정 및 단계

약 3년 이상의 연구개발 과정을 거쳐서 개발된 DPF 시스템들은 세라믹입자를 적용한 비구조체형 다층필터, 재생장치(버너, 전기히터 및 열풍방식)와 이들을 제어하는 컨트롤러로 구성된다.

그림 6은 버너재생방식의 DPF 시스템이 실제 중형 트럭에 장착된 것을 보여주고 있다. 현재 일본 차량에 적용하여 시험을 진행 중인차량이다.

그림 7은 차량에 장착된 DPF 시스템의 전체 구성을 보여준다. 장치 상태를 측정하기 위한 여러 센서들과 센서에게 계측된 값들을 이용하여 판단하고 재생장치에 속하는 구동장치를 제어하는 제어장치들로 구성되어 있다.

개발 기간동안 국내 및 국외에서 실시한 공식성능평가 시험결과들에 따르면, PM 저감효율은 약 85% 이상, 무부하 및 부하상태에서 매연저감효율은 100%, 장치 장착에 따른 다른 배기 배출물들의 변화는 상당히 미미하며, 또한 연비 감소 또한 약

표 5. 비구조체 세라믹입자형 필터의 특징

구조적인 특징	<ul style="list-style-type: none"> - 세라믹 입자를 이용한 비구조체의 다층필터 - 구조체형 필터대비, 월등한 기계적, 열적 내구성 - 급속 재생 가능 - 효율 및 형상의 자유로운 설계 및 제조 가능
운용상 특징	<ul style="list-style-type: none"> - 사용 연료, 제한 없음 (일반경유 사용가능) - 적용 가능 차량, 제한 없음 (PM 과다 배출차량 적용가능) - 장착 위치, 제한 없음
기타 특징	<ul style="list-style-type: none"> - 배기소음 감소 특성, 머플러 기능 수행 - 구조체형 필터대비 높은 경제성

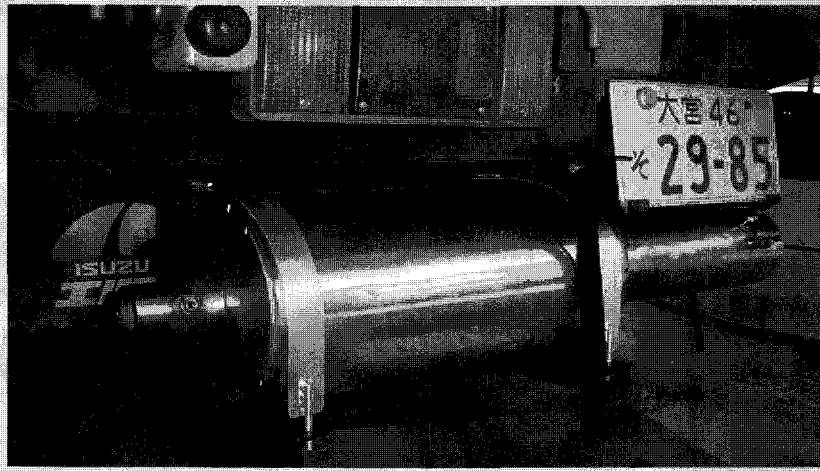


그림 6. 트럭에 장착하여 운행되고 있는 DPF 시스템

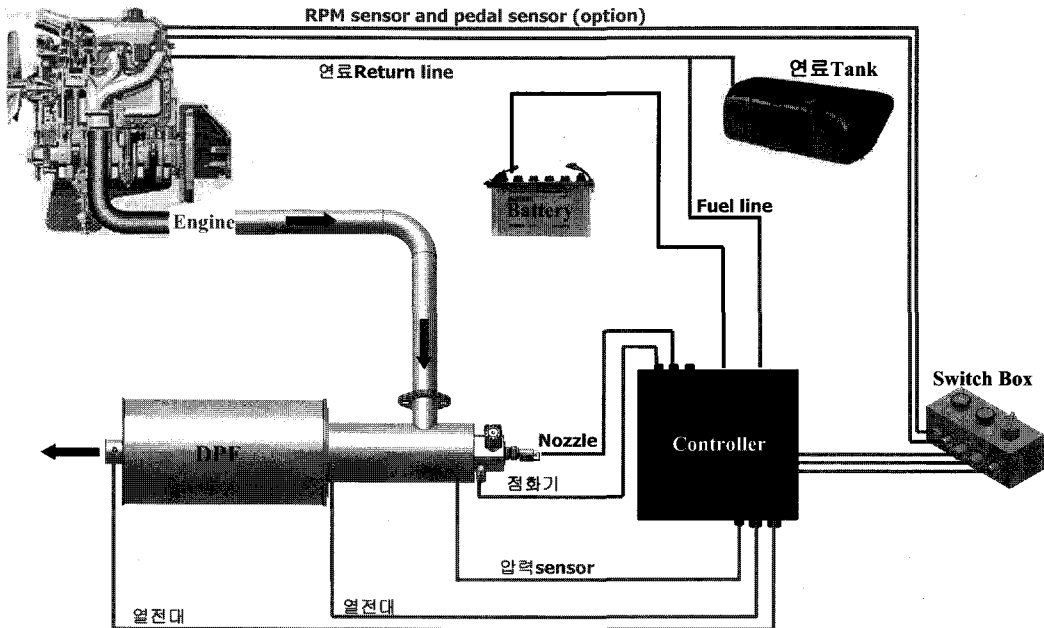


그림 7. 차량 및 DPF 시스템 구성

3% 미만이라는 우수한 특성을 보여주고 있다. 기준에 개발 시도되었던 다른 버너재생방식의

DPF 시스템과 다른 것은 비구조체형 세라믹 입자형 필터 방식을 사용하기 때문에 400 ~1,000 Km

의 차량운행 후에 약 10분 미만의 연소를 통한 급속한 가열 재생이 가능하다는 것과, 재생시에 외부 공기 등의 공급이 필요하지 않고 배기가스 중에 포함된 산소를 이용하여 연소를 유지시킨다는 점이다. 따라서 기존 버너재생방식에 비하여 간단한 구조를 가지고 있다.

주로 도로에서 운행되는 차량 적용을 목적으로 하는 버너재생방식 DPF 시스템에 대하여 실내나 밀폐된 공간 내에서 작업하는 차량 또는 디젤발전기 엔진의 경우에는 일정 작업시간 후에 전기히터를 이용하여 필터에 포집된 PM을 재생하는 전기히터 재생방식의 DPF 시스템을 사용하는 것이 적당하다.

3. 맺음말

디젤차량에서 배출되는 PM에 따른 환경문제, 해

마다 증가되는 사회적 비용문제 등은 국내에서는 많은 시간동안 논의가 되어왔고, 이에 대한 해결방안들이 조금씩 제시되고 있지만, 이런 방안들이 경제적인 비용문제와 맞물려 효율적이고 본격적인 적용에는 다소 시간이 소요되리라 사려된다.

그렇지만 상대적으로 우리보다 공기질이 좋은 일본에서조차 약 10년 동안의 오랜 준비기간을 거쳐 디젤차량으로부터 배출되는 PM 저감을 최우선 목표로 설정하여 막대한 비용을 투입하고 있는 사실을 여러 국내의 관계자들은 즉시하고, 이와 비슷한 대책을 시급히 세우는 것이 바람직하다고 생각된다.

중소도시를 막론하고 전 국토에서 하루종일 존재하는 스모그, 외부 공기에 비하여 2배 이상의 PM이 존재하는 지하공간인 지하철 역사 등에서 선택할 수 없는 공기를 마실 수밖에 없는 많은 사람들이 있다는 것 때문이다.