

플라즈마를 이용한 디젤 PM 저감 기술

이 대 원 | (주)블루플래닛
 기술2팀장, 선임연구원
 E-Mail : dwlee@blueplanet.co.kr

1. 머리말

디젤 엔진은 초회박 상태에서 운전되는 엔진으로 연비 및 효율이 가솔린 엔진에 비해 우수한데다가 CO₂ 배출량이 적어 1997년 도쿄 의정서와 같은 지구온난화 방지 프로그램의 발족 이후로 계속해서 수요가 증가되고 있다.

그러나 환경적인 측면에서 디젤엔진은 통칭 매연으로 불리는 PM(Particulate Matters)과 NO_x의 배출이 상대적으로 높은 단점이 있는데다가, 대기 오염에 대한 자동차 배출가스의 기여가 매우 높음이 밝혀지면서 유럽을 중심으로 디젤엔진 차량의 배출 허용기준이 날로 강화되고 있다.

유럽의 경우 2000년 EURO-3, 2005년 EURO-4, 2008년 EURO-5에 의해 디젤 배출가스 규제를 점차 강화해가는 계획을 수립한 바 있다.

2003년 현재 당면한 EURO-4의 경우 EURO-3 대비 PM 배출 80%, NO_x 배출 30% 저감을 규정하고 있으며 규제치는 EURO-5 이후로 계속해서 강화될 전망이다.

유럽 외에도 미국은 일찌감치 1990년부터 "Clean Air Act"에 의거, 인구 75만 이상 대도시의 대형버스를 대상으로 차량배출 개선(Retrofit) 프로그램을 진행 중이며, 일본의 경우도 "Tokyo Retrofit Program"을 중심으로 유사한 수준의 배출

저감 프로그램을 진행중인데, 2003년 현재 이미 프로그램을 시작하는 적극성을 보이고 있다.

우리나라에서도 EURO 규제에 준하는 배출규제 및 배출저감 정책을 진행 중인데, 2003년부터 2012년까지 10개년 계획으로 기존 운행차 250만대 저공해화와 저공해 자동차 300만대 보급을 목표로 하고 있다. 단기적으로는 2001~2003년 "경유자동차 후처리평가사업"을 진행하여 우수 후처리장치들을 선정하고 2004년 시범사업을 거쳐 2005년 보급사업을 진행할 예정에 있으며, 기존 운행차 저공해화에는 7,000억원에 이르는 국고지원이 이루어질 계획에 있다.

현재 이에 대한 전세계 자동차 업체들의 기술적 대응은 우선적으로 엔진 제어에 의존한 전처리 개념의 형태를 취하고 있으나 PM과 NO_x의 배출은 상호 트레이드 오프(trade-off) 관계이기 때문에 별도의 후처리 장치에 대한 필요성이 기정 사실화 되어 가고 있다.

특히 시급한 EURO-4 규제 대응을 위해서는 PM 배출에 대한 후처리 기술 보급이 절실히 되고 있는 실정이다.

이에 따라 가장 현실성 있는 후처리 장치의 개념은 DPF(Diesel Particulate Filter)를 이용하여 배출 PM을 포집하고 실시간 혹은 주기적으로 포집된 PM을 연소(혹은 DPF를 재생)시키는 것이다.

전술한 바 있는 선진국의 배출저감 프로그램들이나 국내에서 진행 중인 “경유자동차 후처리평가사업” 역시 DPF 적용 후처리장치를 중심으로 진행되고 있다. 현재 시판중인 DPF 적용 후처리장치로는 유럽의 PSA Peugeot Citroen에서 개발한 첨가제 방식의 DPF 후처리장치가 있으며 이는 자체 승용 디젤차량(Peugeot-607)에 부착되어 판매되고 있다. 이 방식은 첨가제 공급을 위한 인프라가 별도로 필요하고 재(Ash)의 생성 증가로 인해 정기적으로 DPF를 물로 세척해야 하는 문제점이 있으나 현재까지 상용화에 성공한 유일한 PM 후처리 시스템이라 할 수 있다.

이 외에도 버너나 전기히터를 이용한 강제 재생 방식의 DPF 후처리장치나, 촉매나 플라즈마를 이용한 PM 연소 방식을 사용하는 시스템들이 꾸준히 개발 중에 있다. 강제 재생방식은 DPF 적용 초기에 많은 개발들이 진행되어 왔으나, 에너지 사용 및 DPF 내구성 유지가 큰 문제점으로 지목된 바 있다. 촉매를 이용한 방식은 고산화능 촉매를 이용해 배기가스 내의 NO를 NO₂로 전환시켜 DPF에 포집된 PM을 제거하는 방식인데, 강제재생 방식과는 다르게 연속적인 실시간 개념의 재생방식이라는 측면에서 CRT(Continuous Regeneration Trap) 방식으로 명칭되고 있다.

이러한 방식은 Johnson & Matthey, Engelhard와 국내 (주)SK 등에 의해 상용화에 근접한 기술 개발을 추진하고 있으나 대상 시스템의 장착을 위해서는 차량 연료로 초저유황 경유(ULSD, Ultra Low Sulfur Diesel)를 반드시 사용해야 하는 문제점이 있어 이에 대한 해결책을 모색 중에 있다. 플라즈마를 이용한 PM 연소의 경우, CRT와 유사한 NO₂를 이용한 DPF 재생 방식이나 차량연료에 제한이 없다는 장점을 지니고 있어 GM과 Ford와 같은 선진국의 자동차 대기업들을 중심으로 많은

연구 개발들이 진행되고 있다. 또한 플라즈마 방식은 PM 후처리에 앞서 NOx 저감을 위해 연구개발된 기술이기 때문에 디젤 후처리장치로 PM과 NOx 동시저감이 가능한 유력한 대안중 하나로 많은 기대를 받고 있는 기술이다.

하지만 전기 에너지 사용에 따른 플라즈마 장치의 차량 구현 가능성 및 에너지 효율성, 엔진 배기가스 상에서의 플라즈마 장치의 내구성 등에 관한 기술적 문제로 인해 현재 상용화 시도가 늦어지고 있는 실정이다. 플라즈마 방식 PM 후처리 장치 개발업체로는 영국의 AEA사가 있으나 이는 DPF를 사용하는 것이 아니라 플라즈마 반응기 내부에서 직접적으로 PM을 산화시키는 시스템으로 에너지 효율 및 플라즈마에서 배출되는 2차 오염물질의 처리가 문제로 지적되고 있다.

이 원고의 내용은 국내에서 유일하게 플라즈마-DPF 시스템을 이용한 PM 후처리장치를 개발 중인 (주) 블루플래닛의 기술개발 내용을 중심으로 구성하였다.

이를 위해 플라즈마와 DPF의 기본적인 개념, 플라즈마를 이용한 PM 저감 메커니즘과 본사 개발장치의 엔진/실차 장착 실험결과, 그리고 자체평가 및 향후전망 등에 대해 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 플라즈마

플라즈마는 기체에 고전압을 인가하여 형성되는 일련의 기상 전기방전 현상을 말한다. 보다 자세하게는 기체상에 작용하는 전기장에 의해 전자들의 가속이 유도되고, 가속된 전자들과 기체 분자들간의 비탄성 충돌에 의해 기체 분자들이 해리되어 형성되는 전자, 양이온, 각종 라디칼들이 혼합된, 고에너지 상태의 기체 상태를 플라즈마라 일컫는다.

플라즈마는 자연과 일상에서 쉽게 접할 수 있는

데, 태양이나 번개, 오로라등이 자연에서 쉽게 발견되는 플라즈마 현상들이며 아크 용접, 형광등, 네온사인 등은 인위적으로 형성된 플라즈마의 대표적 사례들이라 할 수 있다.

일반적으로 플라즈마는 크게 열 플라즈마와 비열 플라즈마로 구분되는데, 열 플라즈마가 10,000 K 이상의 고온을 동반하는데 비해 비열 플라즈마는 기체온도를 수십 K정도만 상승시킨다.

이와 같은 플라즈마의 구분은 여러 가지 측면에서 정의가 가능하지만 쉽게는 방전을 통해 발생된 전류의 값에 의해서 구분될 수 있는데, 열 플라즈마가 비열 플라즈마에 비해 방전발생 전류가 월등히 크다고 할 수 있다.

열 플라즈마의 응용 사례로 토치나 아크 용접기 등을 들 수 있지만, 자동차와 같은 제한된 환경에 플라즈마를 적용하기 위해서는 소모 에너지, 구현 가능성 등의 공학적인 측면들에서 비열 플라즈마가 보다 현실적이라 할 수 있다.

실제로 대표적인 플라즈마 응용 공정들인 스퍼터링(Sputtering), PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), 플라즈마를 이용한 오존 발생기는 모두 비열 플라즈마를 작동원리로 하고 있다.

또한 코로나 방전과 같은 비열 플라즈마는 거의

대부분의 기체 분자들을 활성화 시킬 수 있기 때문에 플라즈마의 응용에 있어서는 비열 플라즈마를 우선적으로 적용하는 것이 상식으로 받아들여지고 있다.

플라즈마에 대한 보다 상세한 설명은 참고문헌 [1~3]을 참조하기 바란다.

2.2 DPF (Diesel Particulate Filter)

DPF는 디젤 자동차로부터 배출되는 PM 구성 성분 중 입자상 물질인 Soot을 강제포집하기 위한 필터이다. (본 원고에서는 편의상 PM으로 통칭하기로 한다.) DPF는 그림 1 (a)와 같이 하니컴의 셀(Cell)들을 교대로 막은 형상을 취하고 있다.

PM을 함유하고 있는 배기가스가 DPF의 열린 셀로 유입되면 가스성분은 벽면의 기공(pore)을 그대로 통과하지만 PM 입자들은 벽면을 통과하지 못하고 DPF 내부에 필터링된다 (그림 1(b)).

이와 같은 특징적인 필터링 메커니즘을 “Wall Flow Mechanism”이라고 부른다. 일반적인 코디어라이트 (Cordierite, $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$) DPF는 기공도(porosity)가 45~60% 정도이고 평균 13 μm 의 기공을 가지고 있기 때문에 대부분 100%에 근접한 PM 포집율을 보인다.

하지만 DPF는 근본적으로 포집할 수 있는 PM

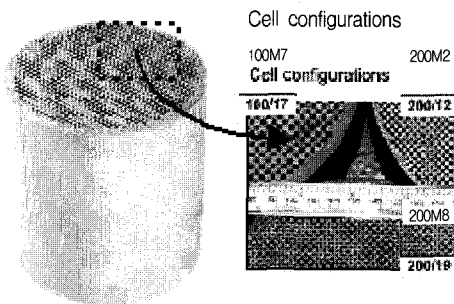
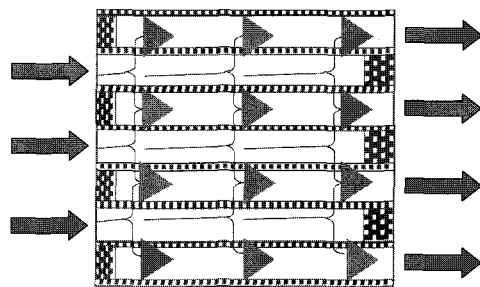


그림 1. (a) DPF의 형상



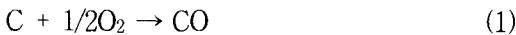
(b) DPF 필터링 메커니즘(Wall-Flow Mechanism)

양에 한계가 있기 때문에 필터링 단독 기능만으로는 자동차에 장착하여 사용될 수 없고, 포집된 PM을 주기적으로 혹은 연속적으로 제거할 수 있는 장치들이 추가로 필요하다. 즉, DPF를 사용한 디젤 자동차 PM 후처리 장치들의 핵심은 이러한 PM의 제거(혹은 DPF의 재생)를 위해 어떠한 장치들을 사용하는가에 있다. 본 원고의 대상인 “플라즈마 방식 디젤 PM 후처리장치” 역시 플라즈마를 이용해 포집된 PM을 제거함으로써 DPF의 실시간 재생을 구현하는 것을 주된 작동원리로 삼는다.

2.3 플라즈마에 의한 디젤 PM 저감 메커니즘

디젤엔진에서 배출되는 PM 입자(Soot)는 90% 이상 탄소로 구성되어 있다. 따라서 DPF에 포집되어 있는 PM 입자를 실시간으로 제거하는 방법으로는 탄소를 산화시켜 CO나 CO₂로 변환, 배출하는 방안이 가장 용이하다.

탄소를 산화시키기 위해서는 엔진 배기가스에 포함되어 있는 O₂를 이용할 수 있으나 O₂에 의한 다음과 같은 산화 반응은 그림 2에서 알 수 있듯이 약 450℃ 이상에서 진행된다.



하지만 디젤엔진의 배기온도는 대부분의 운전조건에서 100~400℃에 머무는 경우가 많기 때문에 별도의 열원이나 산화온도를 낮출수 있는 촉매성분이 DPF상에 존재하지 않는 한, O₂에 의한 PM 저감은 기대하기 힘들다.

게다가 충분한 산화속도를 확보하기 위해 500℃ 이상의 온도에서 PM을 산화시키면 격렬한 산화반응에 의한 발열로 DPF의 온도가 1,000℃ 이상으로 상승되어 온도제어가 불가능하게 되고, 코디어라이

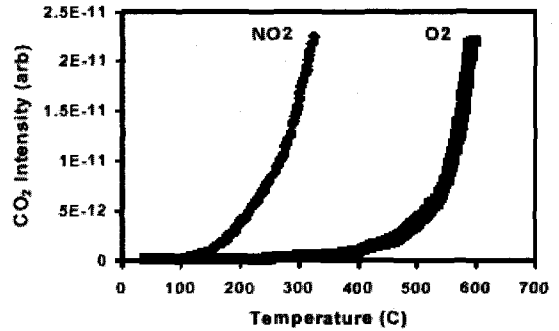
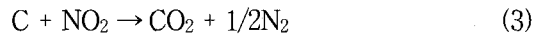


그림 2. O₂와 NO₂에 의한 탄소의 산화반응 속도비교[4]

트 재질의 DPF 경우 열화되어 파손되는 치명적인 문제점이 있다. (코디어라이트의 내열온도는 1,200℃ 정도이다)

하지만 이산화질소(NO₂)의 경우 그림 2와 같이 연소 반응이 보다 낮은 200℃ 이하부터 진행되기 때문에, 디젤엔진의 배기온도만으로도 충분히 산화속도를 확보할 수 있다.



이러한 NO₂를 공급하기 위해서는 엔진 배기가스에 포함되어 있는 NO_x 성분을 이용해야 하는데, 대부분의 디젤 엔진 배기가스에서 NO_x는 90% 이상이 NO로 구성되어 있어 NO를 NO₂로 전환시킬 수 있는 장치가 필요하다.

따라서 O₂나 NO₂에 의한 탄소 산화반응을 DPF 재생 반응에 이용하기 위해서는 두 경우 모두 별도의 장치가 추가되어야 한다.

하지만 NO₂를 이용할 경우, NO₂의 원천인 NO_x가 수백 ppm 정도로 O₂의 경우(5~10%)보다 배기가스 상의 농도가 100배 이상 적은 데다가, 반응 온도까지 낮아 O₂의 경우와 같은 급격한 온도상승에

의한 DPF 파손의 문제점이 없다는 확실한 장점이 있다.

또한 수백 ppm의 NO₂만으로도 포집된 PM을 제거하여 DPF를 재생시키기에 충분한 반응속도를 확보할 수 있음이 수많은 연구보고들을 통해 증명된 바 있다[4].

플라즈마 방식 디젤 PM 후처리장치는 플라즈마를 통해 NO_x의 대부분을 차지하고 있는 NO를 NO₂로 변환시켜 NO₂를 이용한 PM 산화반응을 유도함으로써, DPF의 재생을 진행시키는 것을 주요 원리로 한다.

이와 같은 플라즈마의 기능(NO의 NO₂로의 전환)은 산소 외에 추가적인 탄화수소의 공급이 필요한데 탄화수소의 공급은 NO의 NO₂로의 전환 외에도 머리말에서도 언급한 바 있는 NO_x 저감 기능에서도 중요한 역할을 수행한다.

이와 같은 탄화수소는 플라즈마에 의해 산소와의 반응이 촉진되어 알콕시 라디칼 (RO_x, R=alkyl, x=1~2)로 전환되고, 이 알콕시 라디칼과 NO가 반응하여 NO₂를 생성하는 것이 일반적으로 알려져 있는 메커니즘이다.

보다 구체적으로는 10개 이상의 단위 반응(ele-

mentary reaction)들이 연관되어 있으며 자세한 내용은 참조문헌 [5]를 참고하기 바란다.



위 반응식에서 부분산화된 탄화수소(C_iH_mO_n)는 전술한 바 있는 NO_x 제거반응에 유용하게 사용될 수 있다.

탄화수소는 기본적으로 3 이상의 탄소수를 가지는 것을 사용하는데, 실험실 규모에서는 프로필렌(C₃H₆)을 일반적으로 사용하나, 본 원고의 엔진 규모 실험에서는 저렴하고 공급원이 확실한 프로판(C₃H₈)이나 부탄(C₄H₁₀)을 사용하였다.

하지만 엔진 제어기술을 이용한 디젤유 후분사(Post Injection)를 통해 엔진 배기가스 상에 탄화수소의 농도를 인위적으로 높이는 것이 조만간 가능할 것이므로, 별도의 탄화수소 공급장치 없이도 플라즈마 후처리장치를 구동할 수 있을 것으로 기대된다.

2.4 플라즈마 반응기의 설계 및 성능

일반적으로 상압 비열 플라즈마인 코로나 방전을

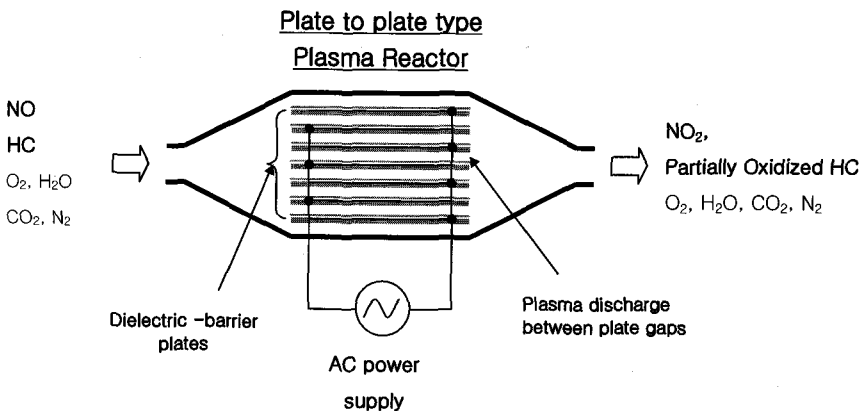


그림 3. 판대 판형 플라즈마 반응기의 개략도

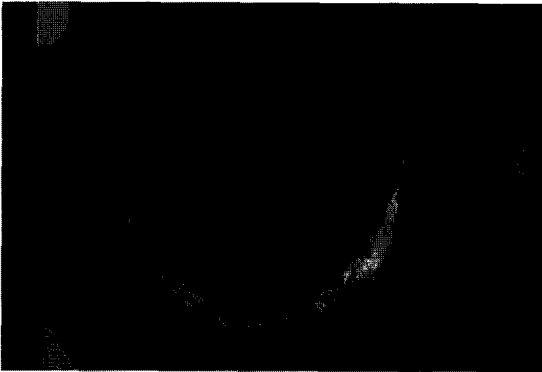


그림 4. 개발된 플라즈마 반응기의 균일한 방전 모습

발생시키기 위해서는 침대 판형(pin-to-plate), 선대 원통형(wire-to-cylinder), 판대 판형(plate-to-plate)의 전극구조를 가지는 플라즈마 반응기를 사용하는 것이 일반적이다.

본사에서 채택하고 있는 반응기는 판대 판형으로 그림 3과 같이 여러개의 판들을 적층시킨 형상을 취하고 있다.

판대 판형 반응기는 다른 형태의 반응기들과 비교할 때, 플라즈마의 발생공간이 넓고 방전분포가 균일하여 입력 에너지 대비 플라즈마 반응 효율이 매우 우수한 장점이 있다.

또한 이 반응기를 구성하는 각 판들은 세라믹판 표면에 금속전극을 코팅하여 제조한 전형적인 유전체 방전(DBD, Dielectric Bed Discharge) 전극으로, 코로나 방전의 아크 방전으로의 전이를 막아 플라즈마를 안정적으로 유지시키고 전원장치(Power Supply)를 보호한다.

그림 4는 개발된 플라즈마 반응기의 방전을 촬영한 사진인데, 전극 사이에 균일하게 플라즈마가 발생하였음을 확인할 수 있다.

일반적으로 플라즈마 반응기의 소모에너지 효율은 에너지 밀도(Energy Density)로 표현되며 식 (5)와

같이 소모 에너지를 배기 유량으로 나눈 값이다.

$$\text{Energy Density(J/L)} = \frac{\text{Input Energy(W)}}{\text{Flow Rate(L/sec)}} \quad (5)$$

자동차에 플라즈마 반응기를 장착할 경우, 전기 에너지를 사용해야 하기 때문에 엔진의 연료 소모율에 영향을 미칠 수 있다.

이와 같은 측면에서 자동차에 장착되는 플라즈마 반응기는 평균 10J/L 이하의 에너지 밀도로 구동되어야 하며, PM 저감을 위해서는 NO→NO₂ 전환율이 약 50% 수준에 도달되어야 하는 것으로 알려져 있다.

그림 5는 본사의 개발한 실험실 규모 플라즈마 반응기의 NO→NO₂ 전환율 성능을 보이고 있는데, 약 500 ppm의 NOx, 10% O₂에 C₃ 탄화수소를 C₁/N=6 비율로 첨가하여 실험을 수행한 것이다. 이 실험조건은 엔진의 중부하 이상의 영역에 해당하며 이 조건을 만족할 경우 거의 모든 엔진운전 영역에서 필요한 NO₂ 전환율을 얻기에는 무리가 없다.

그림 5의 실험 결과를 보면 에너지 밀도가 증가할수록 NO가 줄어들면서 NO₂가 비례하여 생성되는 것을 알 수 있다. 실험에 사용된 플라즈마 반응기

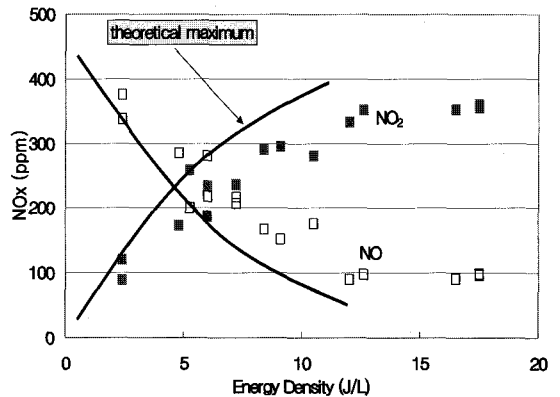


그림 5. 플라즈마 반응기의 NO→NO₂ 전환율 및 에너지 효율

표 1. 기존 연구 결과들과의 플라즈마 반응기 성능 비교 (실험실 규모 기준)

제작사	에너지 밀도	발표 자료
(주)블루플래닛	<13J/L	-
General Motors R&D center	15J/L	SAE 2001-01-3565
Ford Motor Company	40J/L	SAE 2001-01-3513
GIE PSA Peugeot Citroen	36J/L	SAE 2001-01-3508

는 10J/L의 에너지밀도를 인가하여 약 60%의 NO → NO₂ 전환율을 보이고 있다. 이것은 앞서 언급한 차량용 플라즈마 반응기의 에너지 효율 기준에 부합하는 것인 동시에, 표 1에 나타난 바와 같이 기준에 발표된 타 업체의 결과들보다 동등 내지 우수한 성능이다.

표 1의 성능은 최적의 반응 효율을 보이는 플라즈마 반응기의 세부설계(전극의 두께와 개수, 전극 간 거리 등) 및 그에 맞는 입력전원 조건(인가전압, 주파수 등)을 찾아가는 과정에서 도출되었으며, 에너지 효율을 높이기 위한 플라즈마 반응 시스템의 개선은 현재도 계속해서 진행되고 있다.

플라즈마 반응기의 차량 장착을 위해서는 이러한 에너지 효율뿐 아니라, 표 2과 같은 기계적 성능에 관한 요구조건들을 또한 만족해야 한다.

본사에서 개발된 플라즈마 반응기는 1,500℃ 이상 내열성을 지니는 세라믹으로 유전체 전극을 구성하고 코팅된 금속 전극은 900℃ 이상의 내열성을 지니는 소재를 사용하였다.

전극과 전원을 연결하는 리드선은 가스의 유로와 완전히 분리시켜 부식의 영향을 최대한 줄였으며, 장치의 내외부 금속 캐닝은 역시 1,200℃ 이상의 온도에 견디는 단열물질을 이용하여 유로로부터 격리 시킴으로써 차량 장착에 무리가 없도록 시스템을 설계하였다.

마지막으로 PM의 노출에 의한 전극 오염으로 플라즈마 반응기의 성능이 저하되는 것을 막아야 하는데, 본사의 장치는 전극 설계와 플라즈마 방전의 적절한 이용으로 이러한 문제를 해결할 수 있었으며, 이에 대한 국내의 특허 출원을 준비 중에 있다.

2.5 플라즈마 디젤 PM 저감 장치의 구성

본사에서 현재 개발 중인 후처리 장치인 PERS (Plasma Emission Reduction System)는 그림 6과 같이 구성되어 있다.

표 2. 플라즈마 반응기의 디젤엔진 적용조건 (10L급 대형 디젤엔진 기준)

항 목	동 작 조 건	요 구 조 건
온 도	100~600℃	耐열성
처리 가스	NOx, CO 등 산화성 높은 물질이 포함되어 있는 고온의 디젤 배기 가스	耐부식성
반응기 오염	PM에의 지속적인 노출	성능 안정성
인가 전압/전력	1~10kV / ~3kW	耐전압, 절연 안정성
처리 유량	~50,000 liter/min	低背壓

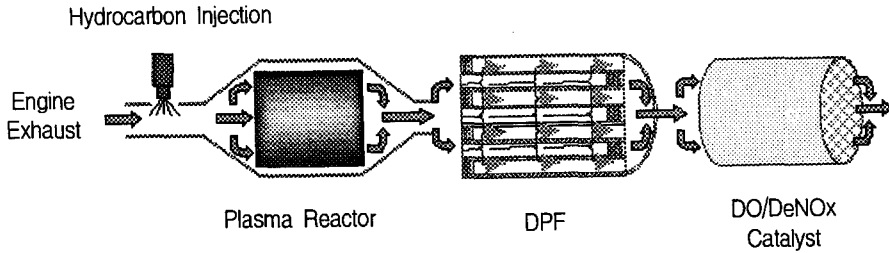


그림 6. (주) 블루플래닛 개발 PERS 개요도

엔진 배기가스에 탄화수소를 분사하여 혼합시킨 후 플라즈마 반응기에 유입하여 NO₂ 및 부분산화 탄화수소를 생성시키면, NO₂가 DPF에 포집된 PM을 연소시킨다.

입자상 물질이 필터링되고 배출되는 배기가스는 DPF 후단에 위치해 있는 DO(Diesel Oxidation) 촉매에 의해 탄화수소(엔진 상에서 미연배출된 연료성분 포함)와 일산화 탄소(CO)가 산화되어 제거되고 DeNOx 촉매에 의해 NOx를 N₂로 전환, 제거하게 된다.

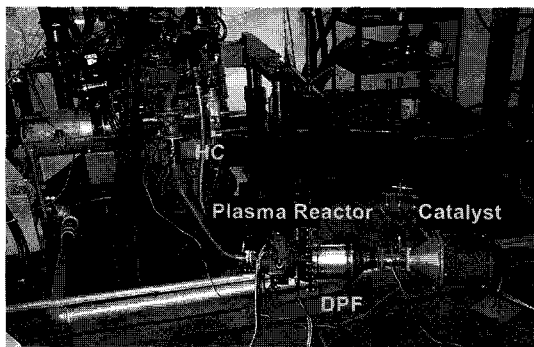
이러한 시스템 개념으로 다젤엔진 배출규제 오염물질들인 PM, CO, NOx 및 탄화수소 등을 동시에 제거할 수 있는 장치의 구성이 가능하다. 본 원고

에서는 이중 입자상 물질인 PM의 제거에 한정하여 엔진적용 실험결과들을 제시하고자 한다.

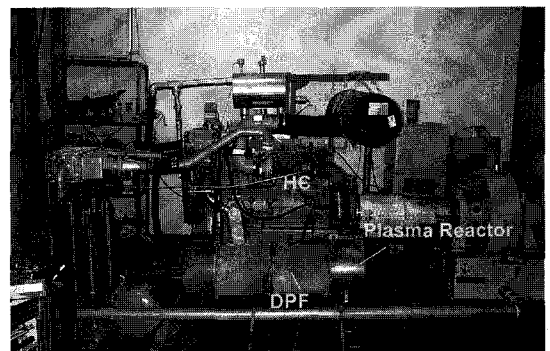
2.6 엔진적용 성능테스트

본사에서 개발된 매연 후처리장치를 그림 7과 같이 소형 및 대형 엔진에 장착하여 성능을 테스트하였다. 대상 엔진은 소형의 경우 2L급 D20 엔진(현대 트라제)이며 대형은 12L급 DE12TiS 엔진(대우 버스 BH116)이다.

그림 8은 D20 엔진상에서 플라즈마 반응기에 의한 NO의 NO₂로의 전환 특성 결과를 나타내었다. 엔진 운전은 1,500 rpm의 엔진회전 수에서 각각 9.7, 9.9 kg·m의 부하를 엔진에 작용하여 수행하였



SMALL DIESEL ENGINE(HD : D20)



HD DIESEL ENGINE(DW : DE12TiS)

그림 7. 엔진성능 테스트장치

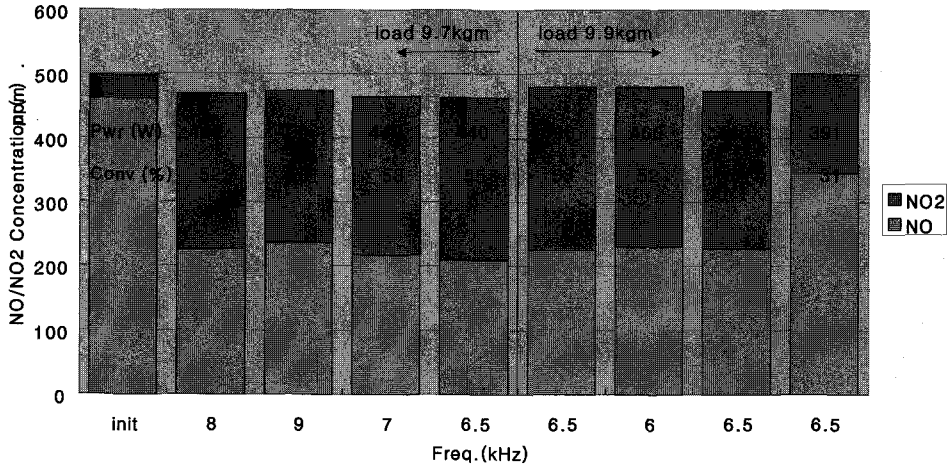


그림 8. 소형디젤 엔진(D20) 상에서 플라즈마에 의한 NO의 NO₂로의 산화 특성, 1500 rpm, C/N=6

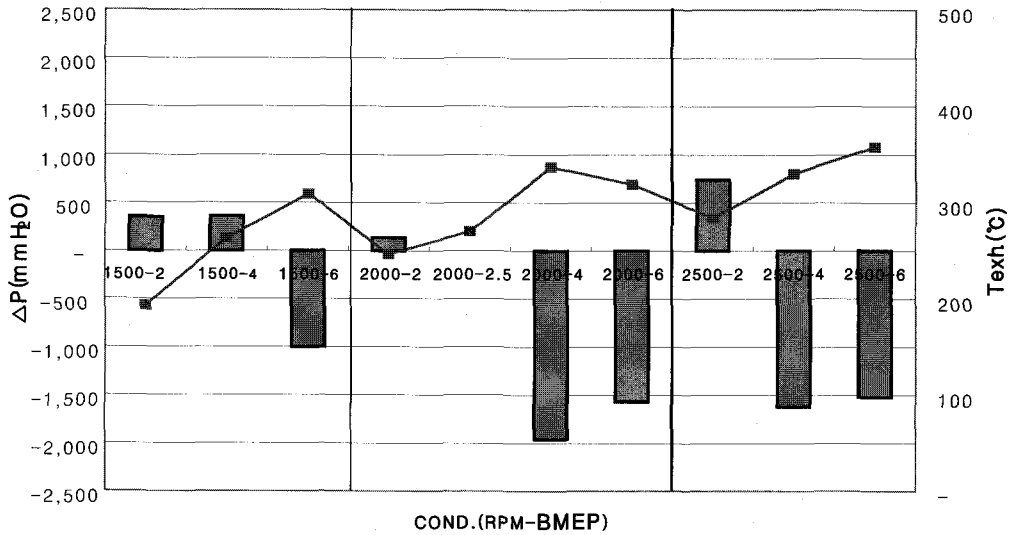


그림 9. 소형 디젤엔진(D20)에서 운전조건(X축)에 따른 배기온도(line)와 DPF 배압(bar)의 변화 추이

다. 플라즈마 AC 전원의 주파수를 변화시켜가며 실험을 수행했으나 실험한 6.5~8kHz 주파수 영역에서는 전환율에 큰 차이는 없었다.

초기 NO의 50% 이상을 NO₂로 전환할 수 있었으며 이때의 에너지 밀도는 약 10J/L로, 앞서 언급한 실험실 규모의 결과와 유사했다.

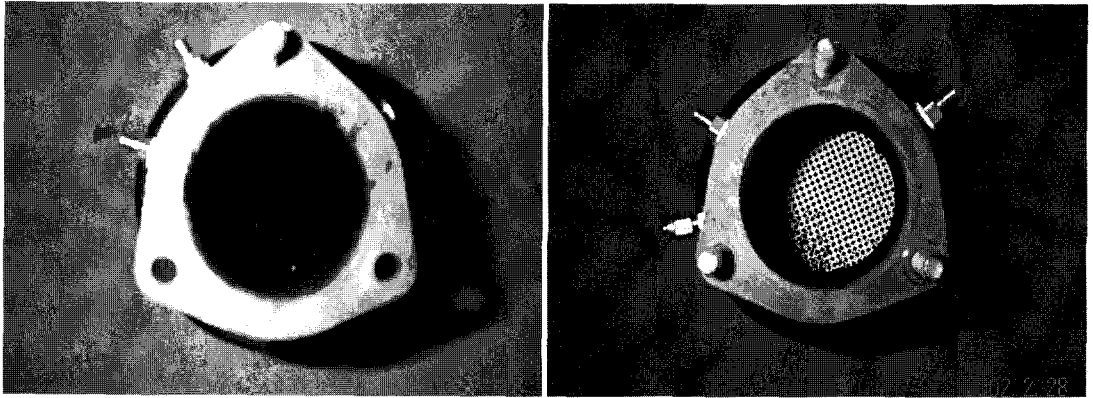


그림 10. 플라즈마에 의한 DPF 재생 결과

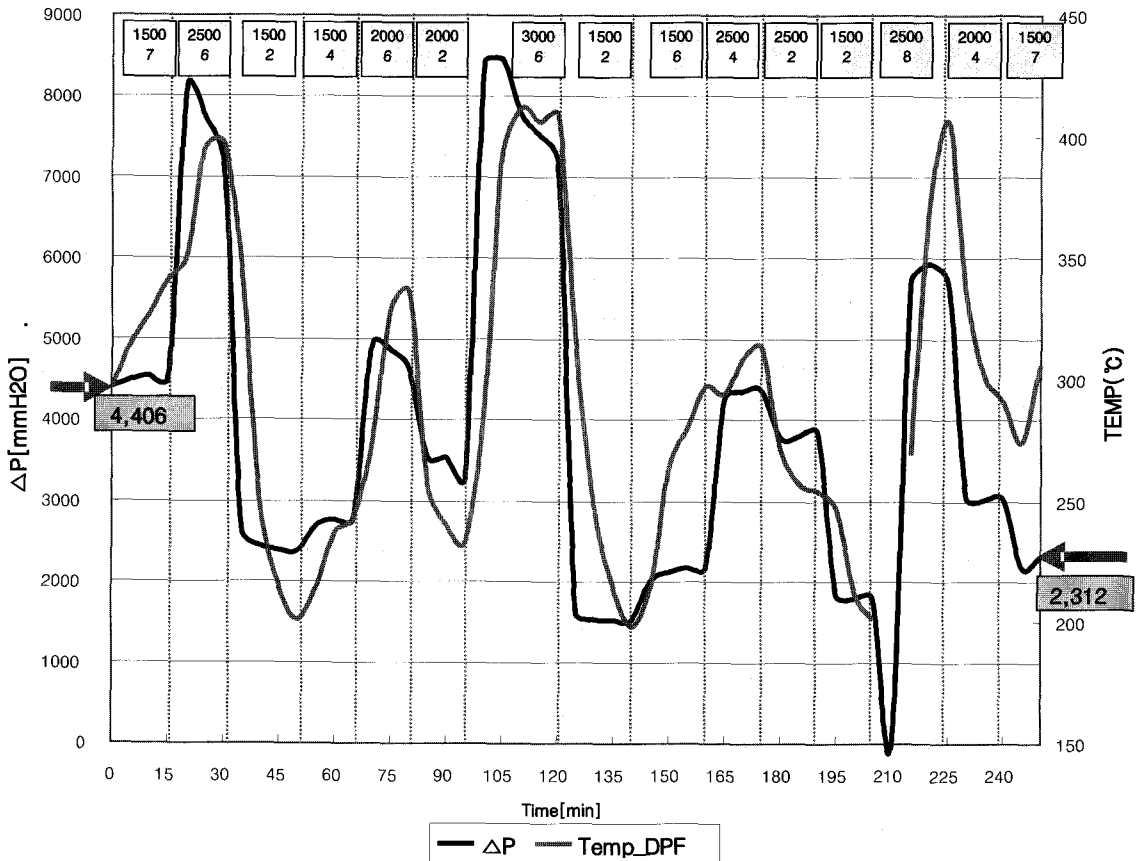


그림 11. 소형 디젤엔진(D20) 상에서 엔진 모드 주행 실험 결과

보통 DPF를 이용한 매연후처리 장치에 있어서 DPF 재생능을 나타내는 지표로는 BPT(Balance Point Temperature)를 사용한다.

이는 DPF 상에서의 PM 포집속도와 제거속도가 균형을 이루는 온도를 말하는데, 플라즈마를 이용한 DPF 재생장치의 경우, 포집의 형태, NO₂ 전환율 등에 따라서 다소 달라질 수 있으나 디젤엔진에서 배출되는 NO_x와 PM의 비율을 고려했을 때 약 270℃ 정도로 알려져 있다.

그림 9는 엔진의 운전조건의 변화를 통해 배기온도를 변화시키며 본 시스템의 BPT 측정을 시도한 결과이다.

PM의 포집 및 제거 정도는 DPF 전후단에 작용하는 압력 차이(배압)에 의해 쉽게 가능될 수 있는데, 배압이 상승할 경우(그림에서 bar가 양의 y축 방향으로 증가되는 경우) PM 포집속도가 제거속도보다 많음을 나타내며 배압이 감소할 경우(bar가 음의 y축으로 증가되는 경우) 반대로 제거속도가 포집속도보다 큼을 나타낸다.

그림의 결과에서 2,000rpm, 2bar의 운전조건에서 배기온도가 250℃일 때 배압의 변화량이 없는 것과 300℃ 이상일 경우 배압이 감소하는 것을 볼 때, 본 시스템의 BPT는 250~300℃ 사이임을 알 수 있다.

BPT 이상의 조건에서 지속적인 PM 제거반응을 통해 재생된 DPF를 그림 10과 같이 관찰하였다. PM이 오염된 DPF가 비교적 깨끗이 재생된 것을 육안으로 확인할 수 있다.

그림 11은 엔진 모드 실험 결과를 나타낸 것이다. 엔진 모드 실험이란, 실제 차량 운전상태를 엔진 상에서 구현하기 위한 것으로, 엔진운전 조건을 시간에 따라 특정한 패턴으로 변화시켜가며 엔진이나 후처리 장치의 성능을 관찰하는 실험을 말한다.

실험된 모드 조건은 1,500rpm의 2, 4, 6, 7bar,

2,000rpm의 2, 4, 6bar, 2,500rpm의 2, 4, 6bar, 그리고 3,000rpm의 6bar조건의 조합으로 이루어졌다. 각각의 모드 조건은 약 15분씩 유지되었다.

세부조건이 변경될 때마다 배압이 급격히 변화하는 것은 PM의 포집에 의한 것이 아니라 엔진 배기량의 급격한 변화에 기인하는 것이다.

각 조건이 15분간 유지될 때 배압변화를 살펴보면 해당 운전조건에서 PM의 포집과 제거작용을 확인할 수 있다.

엔진 모드실험을 수행한 결과, 초기 1,500rpm, 7bar 조건에서 DPF 양단의 초기 배압은 4,406 mmH₂O였으나, 250분간의 모드 실험 후 초기와 같은 엔진 조건에서 측정된 DPF 양단의 배압은 2,312 mmH₂O로 47.5% 정도 줄어들어 DPF가 효과적으로 재생되었음을 알 수 있다.

그림 12은 본 후처리장치 장착이 엔진 출력, 엔진 배기압 같은 엔진 성능에 미치는 영향을 관찰한 것이다.

DPF의 장착은 필연적으로 배압상승을 가져오며, 기본 배압은 DPF의 용량, 기공(pore) 크기, 기공도(porosity) 및 시스템의 유동설계 등에 따라 변화될 수 있다.

도시한 결과와 같이 본 시스템의 평균 배압은 장착전 대비 147% 증가하였으나 이에 따른 엔진 출력의 감소는 3%에 불과해서 엔진출력에 큰 영향을 주지는 않는 것으로 판단된다.

그러나 DPF에 포집되는 입상 물질 중에는 산화반응으로 태우기 힘든 재(Ash) 등도 존재하기 때문에 DPF를 반영구적으로 사용하는 것은 근본적으로 불가능하다.

따라서 DPF의 교체주기를 증대시키기 위해서는 시스템의 기본 배압을 낮추는 것이 필수적이므로, 적절한 DPF의 종류와 용량 선정 및 시스템 유동설계의 최적화를 통해 배압 저감을 위한 기술개발

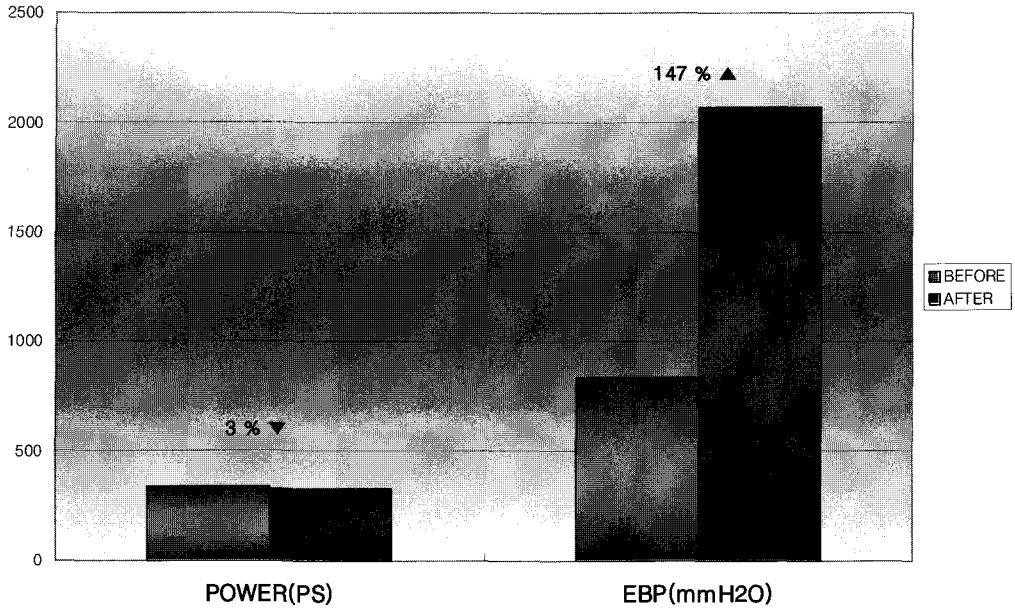


그림 12. 대형 디젤엔진 (DE12TiS)상에서 후처리장치 장착에 따른 엔진 출력 및 배기압의 변화.

을 지속적으로 수행 중에 있다.

2.7 실차적용 테스트

본사는 2002년부터 환경부에서 추진하고 있는 “경유자동차 후처리평가사업”에 참가하여 참가 17개 업체중 1차 스크린 평가를 거친 5개 업체에 선정되어 2차 평가인 실차성능 테스트를 수행 중에 있다. 이하 결과는 본사에서 개발한 디젤 PM 후처리장치인 PERS의 대형버스 실차적용 예비실험 결과들중 일부를 발췌한 것이다.

대상차량은 DE12TiS엔진이 장착된 대우 버스 BH116 모델(그림 13 (a))로서, 경기고속 1005-1번 고급 좌석버스이다.

해당 차량의 운행노선에는 경기도 죽전과 서울 광화문을 각각 기점으로 서울 시내의 상습 교통체

증 지역(양재-한남대교, 남산터널-광화문)과 시외 각 고속도로 구간(판교-양재)을 동시에 포함하고 있기 때문에 실차테스트 적용 차량으로 현실성 측면에서 훌륭한 조건을 구비하고 있다.

본사의 후처리 장치 PERS는 그림 13 (b)와 같이 차량에 장착되어 있는 머플러와 사이즈 및 중량이 유사하고, 장착 브래킷(brackett)으로 기존의 것을 공유함으로써 차량 장착에 따른 외형 및 중량 변화를 최소화하고자 하였다.

또한 플라즈마 반응기 구동을 위한 전력원은 배터리에 직접 사용하지 않고 배터리 충전을 위해 차량에 장착되어 있는 알터네이터(Alternator)에서만 사용하게 되어 있어, 하계 에어컨 작동과 같이 차량내 전기 소모가 많은 경우에도 차량 운행에 지장을 주지 않도록 설계되어 있다.

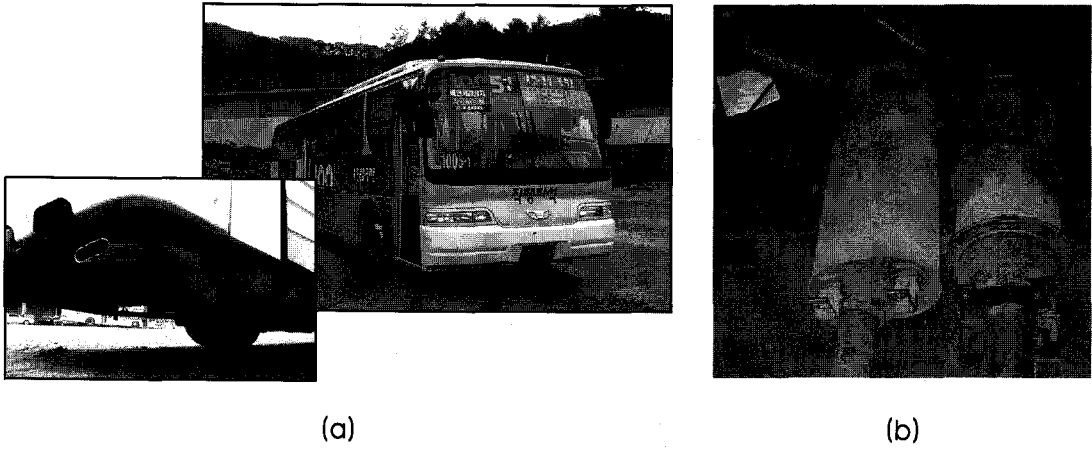


그림 13. (a) 적용 대상차량 및 PERS 설치 위치, (b) 머플러(좌)와 PERS(우)

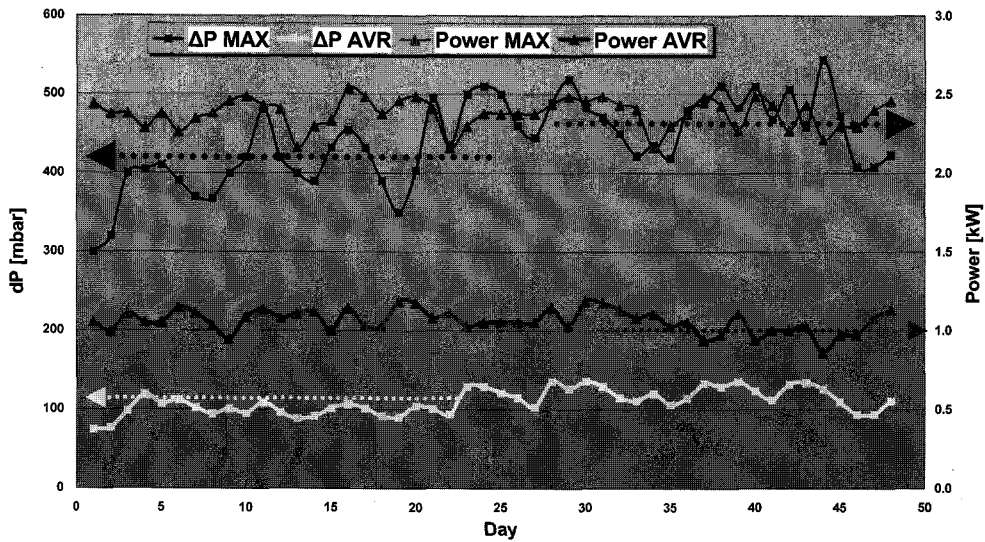


그림 14. 50일 실차테스트 실험결과 : 에너지 소모율 및 DPF 재생정도

또한 실차장착 상태에서 플라즈마는 운행중 항상 작동하는 것은 아니며, NO_2 가 PM을 제거할 수 없는 200°C 이하의 운전구간에서는 플라즈마 반응기를 작동시키지 않는다.

또한 에너지 소모의 최소화를 위해 엔진의 운전상

태에 따라 가용 에너지 및 엔진 실험상에서의 제거효율 등을 바탕으로 최적의 플라즈마 반응기 구동을 유도할 수 있도록 제어장치의 논리를 설계하였다.

그림 14는 실차장착후 실제 주행에 따른 전체적인 PM 제거성능과 에너지 효율을 도시한 것이다.

전체적으로 DPF의 평균 배압(ΔP AVR)은 100mbar 수준에서 유지되고 있어, 실차에서도 PM의 제거작용이 효과적으로 진행되고 있음을 알 수 있으며, 평균 사용에너지(Power AVR)는 1kW에서 유지되고 있어 차량운행에 큰 부하를 주지 않는 것을 알 수 있다. (차량에서 가용한 전력은 3~4kW 정도이다.)

현재 본사의 PERS는 동일 노선 버스 3기에 장착되어 상기한 후처리장치 평가사업의 평가실험을 진행 중에 있으며, 2003년 5월 현재 목표 마일리지 60,000 km의 30~50% 정도를 달성하고 있다.

이에 본사는 해당 시스템의 차량 적용성을 개선하기 위한 다방면의 기술개발을 시도 중에 있으며, 이와 동시에 추후 상용화에 따른 장치설계의 양산성 개선에도 노력을 기울이고 있다.

3. 맺음말

상술한 바와 같이 플라즈마를 이용한 PM 저감 장치는 CRT 방식 등과 아울러 실차 시스템화의 구현이 가능한 DPF 이용 기술 중 하나라 할 수 있다.

플라즈마를 이용한 PM 저감장치의 장점을 몇가지 기술하면 첫째, 촉매의 피독문제로 인해 엔진 연료로 저유황경유를 사용해야 하는 CRT 방식과는 달리 황이 함유되어 있는 일반 경유를 사용하여도 시스템에 아무런 영향을 주지 않는다는 것이다.

두 번째로는 CRT 방식이 NO \rightarrow NO₂ 전환에 있어 온도의 영향을 크게 받는 것에 비해 플라즈마 방식은 100 $^{\circ}$ C 이하의 낮은 온도에서도 NO₂ 생성이 가능하기 때문에 BPT를 현재 수준에서 낮추는 기술적 접근 측면에서 다소 유리하다는 것을 들 수 있다.

세 번째로는 플라즈마를 통해 생성된 부분산화 탄화수소를 이용하여 NO_x를 저감할 수 있는 기술적 접목이 가능하다는 것이다. 플라즈마 반응기를 통과한 탄화수소는 알데히드를 비롯해 많은 종류의

활성화 탄화수소종들로 전환되는데, SCR(Selective Catalytic Reduction) 촉매를 플라즈마 후단에 위치시켜 배기 온도 상에서 NO_x를 저감하는 연구들이 본사를 비롯하여 수많은 연구진들에 의해 진행되고 있다 [6-8].

하지만 플라즈마를 이용한 후처리 장치는 후분사 엔진이 대중화되지 않은 현 시점에서는 탄화수소의 별도 공급이 반드시 필요하고, 아직까지 장치 구조가 CRT 방식에 비해 복잡하고 제작단가가 비싸다는 단점이 있다.

향후 이러한 문제점들의 개선이 이루어지고 내구성 과 양산성이 확보되면서 NO_x 저감기술까지 접목될 수 있다면, 플라즈마를 이용한 후처리 장치는 디젤 자동차 배기가스 후처리에 대한 total solution으로 자리매김할 수 있을 것으로 기대된다.

-참고문헌-

- [1] 後藤憲一 (박덕규 역), “플라즈마의 세계: 제4의 물질 상태를 탐구한다,” 전파과학사, 서울 (1991).
- [2] 林泉 (이덕출, 황명환 공역), “고전압 플라즈마 공학,” 동일출판사, 서울 (1987).
- [3] “Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control,” (Ed. by B. M. Penetrante, S. E. Schultheis), Springer-Verlag, Berlin (1993).
- [4] A. P. Walker, R. Allansson, P. G. Blakeman, B. J. Cooper, H. Hess, “Optimizing the Low Temperature Performance and Regeneration Efficiency of the Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter (Cr-Dpf) System,” SAE Technical paper 2002-01-0428, (2002).
- [5] K. S. Park, D. I. Kim, H. S. Lee, K. M. Chun

- and B. H. Chun, "Effect of Various Hydrocarbons on the Plasma DeNOx Process," SAE Technical paper 2001-01-3515 (2001).
- [6] B. H. Chun, H. S. Lee, C. S. Nam, K. M. Chun, J. H. Ryu, and K. Y. Lee, "Plasma/Catalyst System for Reduction of NOx in Diesel Engine Exhaust," SAE Technical Paper, 2000-01-2897 (2000).
- [7] B. M. Penetrante, R. M. Brusasco, B. T. Merritt, W. J. Pitz, G. E. Vogtlin, M. C. Kung, H. H. Kung, C. Z. Wan and K. E. Voss, "Plasma-Assisted Catalytic Reduction of NOx," SAE Technical Paper, 982508 (1998).
- [8] P. W. Park, J. E. Rockwood, C. L. Boyer, C. Ragle, M. Lou Balmer-Millar, C. L. Aardahl, C. F. Habeger, K. G. Rapp and D. N. Tran, "Plasma/Lean-NOx Catalysis Over Alumina," SAE Technical Paper, 2001-01-3569 (2001)

투고 환영

계간 「공기청정기술」지는 클린룸 업계의 발전을 위하여 보다 많은 클린룸 관련 기술자 여러분의 투고를 기다리고 있습니다.

각종 기술자료를 보내주시면 엄선하여 본 연구조합 기술지에 게재하여 드리고 소정의 고료를 보내드리겠습니다. 또한 본 기술지는 95년도부터는 "업계동정"란을 신설하여 업계의 단신을 수시로 접수, 게재코저하오니 우리 모두의 업계를 가꾼다는 마음으로 사소한 소식이라도 송부하여 주시기 바랍니다.