

〈논 문〉 SAE NO. 97370077

버너방식 DPF 시스템에서 가스온도 제어를 통한 입자상물질 연소율제어의 실험적 검증

An Experimental Study on the Control of the Combustion Rate by Temperature Control of Gas Entrained into the Filter in Burner-Type Particulate Trap

박 동 선*, 김 재 업*, 조 훈**, 김 응 서***
D. S. Park, J. U. Kim, H. Cho, E. S. Kim

ABSTRACT

Work on the reduction of particulate matter(PM) from a diesel vehicle has led to a new trap system and a control method to control the combustion rate of the PM filtrated in the trap, which was named as 'Active Exhaust Feeding Regeneration(AEFR) System' by its operation mechanism. Ceramic cordierite filter is a major component of the trap and susceptible to thermal shock. Therefore the system should be designed to reduce the peak temperature and temperature gradients in the trap ; these have been considered to be the main factors causing thermal shock of the filter during the regeneration. It uses the engine's exhaust gas partially for the regeneration of the ceramic filter. It controlled bypass flow rate of the engine's exhaust gas precisely to control the temperature of the gas entrained into the filter. Gas temperatures were measured inside filter, and the oxygen concentration at the outlet of the filter was also monitored during the regeneration to analyze the combustion process of the PM. The temperature distributions and temperature gradients in the filter during the regeneration varied widely according to the regeneration control schemes. Finally, this system shows relatively low peak temperature and temperature gradients in the filter during its regeneration. It is considered that this system uses a new method to control the combustion rate of the PM, which is different from the methods used in the previous studies.

주요기술용어 : Particulate Matter(입자상물질), Thermal Shock(열충격), Trap(입자상물질 제거장치), AEFR System(능동 배기가스 유량제어 재생시스템), Temperature Distribution(온도분포), Gradient(온도분포)

* 정희원, 서울대학교 대학원 기계공학과

** 서울대학교 대학원 기계공학과

*** 서울대학교 공과대학 기계공학과

1. 서 론

본 연구에서는 디젤 입자상물질 제거장치에서, 필터에 여과된 입자상물질을 연소시켜 필터를 안정적으로 재생하기 위한 새로운 재생방법의 적용에 따른 결과와 방법의 타당성을 실험적으로 검증하였다.

디젤엔진으로부터 배출되는 입자상물질이 인체에 해롭다는 결과는 이의 저감을 위한 많은 노력을 유발시켰다.^{1~18)} 디젤엔진으로부터 배출되는 입자상물질을 제거하기 위한 노력은, 실린더 내부에서 저감하고자 하는 노력과 실린더 외부에서 후처리장치를 이용하여 저감하고자 하는 노력으로 나누어 볼 수 있다. 본 연구는 실린더 외부에서, 버너를 사용하는 DPF(Diesel particulate filter) 시스템을 이용하여 엔진으로부터 배출되는 입자상물질을 저감하고자 하는 분야에 속한다.^{1~2)}

입자상물질은 산소가 충분할 경우, 약 550~600℃에서 연소가 가능하며 이 때의 온도를 재생온도(Regeneration temperature)라 한다. 촉매 또는 연료첨가제를 이용할 경우 이 재생온도는 약 350~400℃까지 낮출 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 촉매의 사용은 재생중, 또는 고온의 배기가스에서 연료의 연소에 의하여 배출되는 이산화황 가스를 황산염의 형태로 대기로 배출하는 부정적인 면을 갖고 있다. 연료첨가제의 사용은 연료첨가제가 연소된 후 대기중으로 배출되었을 때 환경과 인체에 미치는 영향에 대한 충분한 검토가 이루어지지 않아 사용이 유보되고 있다. 버너나 히터를 사용하는 강제재생방법(Forced regeneration method)은 위의 자연재생방법(Natural regeneration method)의 경우와 같은 부정적인 측면이 없는 대신, 시스템이 복잡해지고 이에 따른 시스템의 가격이 고가가 되는 단점이 있다. 뿐만 아니라 역시 자연재생방법에서와 같이 아직 필터의 내구성을 충분히 보장하는 시스템은 개발되지 않은 것으로 판단된다.^{1~3)}

필터의 수명이라는 관점에서, 필터의 재료물성적인 취약점을 고찰하기 보다는 기계공학

적인 관점으로 고찰할 때, 이미 발표된 다른 많은 연구결과로부터 필터의 재생시 발생하는 최고온도와 온도구배는 필터의 수명에 직접적으로 영향을 미치는 인자로서 매우 중요하다고 볼 수 있다.⁴⁾

필터의 재생시 발생하는 최고온도와 온도구배를 낮추기 위한 연구를 통하여 버너방식 디젤 입자상물질 제거장치를 제작하였으며, 새로운 제어방법을 연구하였다. Fig.1에는 본 연구를 통하여 자체 설계하고 제작한 시스템의 개략도가 나타나 있으며 시스템의 명칭은 미국 제너럴 모터스(General motors)사의 EFOM(Exhaust fed orifice metered) 시스템과는 시스템의 구성과 제어측면에서 매우 다르며 그 특성을 고려하여 AEFR(Active exhaust feeding regeneration : 능동배기가스 유량제어 재생)시스템으로 명명하였다. 제너럴 모터사의 EFOM 시스템은 필터를 재생할 때 여과된 입자상물질의 연소율을 제어하지 않았으며 이 때 발생하는 최고온도와 온도구배가 비교적 높은 특성을 보여주고 있다.⁷⁾ 본 연구에서 고안한 AEFR 시스템은 여과된 입자상물질의 급격한 연소를 방지하기 위하여, 연소율에 영향을 미치는 인자를 고려하여 연소율의 제어가 가능하도록 설계되었다. AEFR 시스템은 재생시 트랩으로 유입되는 엔진 배기가스의 유량을 제어하여 연소율의 제어가 가능하도록 설계되었다.^{8~10)}

2. 재생시 발생하는 온도특성에 대한 고찰

2.1 필터의 내구성

앞선 다른 연구에서, 필터의 재생시 발생하는 온도와 필터의 내구성을 관련짓기 위한 많은 노력이 있었다.^{4~7,10~14)} 이러한 노력에 의해, 재생 과정을 적절히 제어하여 재생시 발생하는 트랩 내부의 최고온도가 900~1000℃를 넘지 않을 경우 트랩의 파괴는 방지될 수 있는 것으로 알려져 있다. MacDonald와 Simon⁴⁾은 입자상물질의 재생을 위해 매우 일정하게, 균일한 점화가 초기에 이루어져야 한다는 의견을 제시하고 있으며, 이를 위하여 재생 시작 직전의 여과량의 증

량이 가능하면 적어야 하고, 대류열전달의 제고를 위하여 재생시 필터를 통과하는 가스의 유량이 커야하며, 매우 균일한 에너지의 공급이 이루어져야 한다는 주장을 하고 있다.⁴⁾ 그들의 관심은 필터의 균열에 영향을 미치는 인자와 현상에 집중되어 있으며, 결론으로서 축방향 및 반경방향 온도구배가 필터의 불균일한 팽창과 장력을 발생시키며 필터의 수명을 300,000 마일 이상 보장하기 위하여 이 값이 35°C/cm 이하로 유지되어야 함을 도출하고 있다. 그들의 결론은 Thermal fatigue projection과 Fracture-stress equations으로부터 도출되었다.⁵⁻⁶⁾ 이러한 주장은, 현재로서는 필터의 물성으로부터 필터의 수명에 이르는 연구를 통하여 제시한 가장 엄격한 제안이다. 물론 그들의 제안이 특정회사의 필터를 대상으로 실시한 연구이지만 이러한 엄격한 제안을 따르는 것은 다른 대안의 결과가 없는 상황에서는 필요한 것으로 판단된다. 이러한 결과를 바탕으로 본 논문에서는 재생시 필터의 최고온도를 900°C 이하로, 축방향 및 반경방향 온도구배를 35°C/cm 이하로 유지할 수 있는 재생 제어 방법에 대한 연구를 수행하였다.

2.2 재생시의 최고온도와 온도구배

입자상물질의 제거장치에서 핵심 구성품인 세라믹 필터의 내부에서 일어나는 재생과정에 대한 많은 이론적인 연구결과가 있다. 이 중에서 Patta는 여과와 재생에 관한 초기의 모델을 설정하였다.¹²⁾ 이 모델에서 필터의 재생과정은 공간시간(Space-time : Space velocity의 역수)과 산화반응시간에 의존함을 보여주고 있다. Garner와 Dent는 다공성 벽에서 발생하는 산화과정에 대한 보다 일반적인 모델을 제시하고 모노리스 필터와 화이버 필터에 적용하였다. 이들은 여러 가지 변수에 대한 연구를 통하여, 배기가스 중의 산소농도, 배기가스 유량 및 초기 입자상물질 여과량(재생직전의 여과량)이 재생시간과 최고온도에 직접적인 영향을 미침을 보였다.¹³⁾

세라믹 필터의 열전도성은 순수 알루미늄의 약 1/300, 스텐레스 스틸의 약 1/20~1/30 정도

이며 테프론의 1~2배 정도이다. 거의 단열체에 가까우며 전도에 의한 열전달은 짧은 시간에 일어나는 현상에서는 거의 기대할 수 없음을 알 수가 있다. 이로부터 필터에서의 열전달은 다공성 벽을 통과하는 가스와의 열교환, 즉 대류열전달에 의한 열전달이 결정적임을 알 수가 있다. 따라서 이러한 열전달 관점에서는 필터를 통과하는 가스의 유량과 온도가 매우 중요한 인자임을 쉽게 유추할 수가 있다.

덧붙여, 입자상물질 최종층에서 발생하는 화학반응의 관점에서는 벽을 통과하는 가스의 산소 농도와 온도가 중요함을 식 (1)로부터 알 수가 있다.¹²⁾

$$r = -A \cdot \left(\frac{1}{e^{E/RT}} \right) \cdot |O_2| \cdot C \quad (1)$$

where,

- r : Reaction rate
- A : The frequency factor
- E : Activation energy
- R : The gas constant
- T : The exhaust gas temperature
- $|O_2|$: The oxygen concentration in the exhaust gas
- C : Particulate concentration in the exhaust gas

최종적으로 정리해보면, 재생직전의 입자상물질 여과량, 필터를 통과하는 가스유량(공간속도), 가스의 온도 및 가스중의 산소농도가 재생을 지배하는 가장 중요한 인자로 인식된다.

초기 여과량과 가스의 공간속도가 재생시의 최고온도와 온도구배에 미치는 영향에 대해서는 이미 많은 결과가 나와 있다.^{1~14)} 필터 벽을 통과하는 가스의 산소농도를 제어하는 것은 실차 시험에서 Patta가 처음으로 시도하여 좋은 결과를 얻었다.¹⁴⁾ Patta는 입자상물질의 연소를 제어하기 위하여, 많은 양의 배기가스를 재순환(EGR)하여 엔진으로부터 배출되는 배기가스

의 산소농도를 제어하였다. 그러나 이 방법은 엔진의 변화에 따라 재생환 배기가스의 유량을 제어함으로써 엔진에 부정적인 영향을 주는 단점이 있다.

재생시 트랩으로 유입되는 가스의 온도를 제어하여 재생과정의 입자상물질 연소율을 제어하고자 하는 시도는 최근에 본 연구의 이전결과로서 국내에서 처음으로 이루어졌으나, 이에 대한 실험적인 검증은 충분히 이루어지지 않았다.⁸⁾ 본 연구에서는 트랩으로 유입되는 가스의 온도를 제어하여 입자상물질의 연소율을 제어하고자 하며 그 결과를 제시한다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 여과과정

Fig.1은 본 연구에서 설계 및 제작한 시스템의 개략도를, Fig.2는 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 여과과정중에는 엔진으로부터의 배기가스는 트랩의 세라믹 필터를 통과하고 바이패스 밸브는 통과하지 못한다. 이 때, 밸브(B), (G)는 열려있으며, 밸브(A), (C), (F)는 닫혀있다. 신기가 버너의 노즐오염방지를 위해 밸브(B)를 통하여 공급된다.

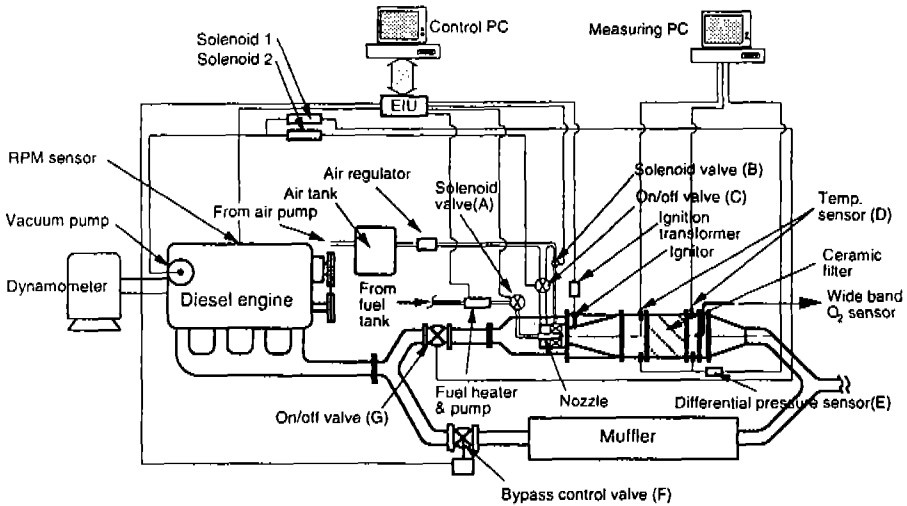


Fig.1 Bumer-type Diesel Particulate Trap System-Active Exhaust Feeding Regeneration System

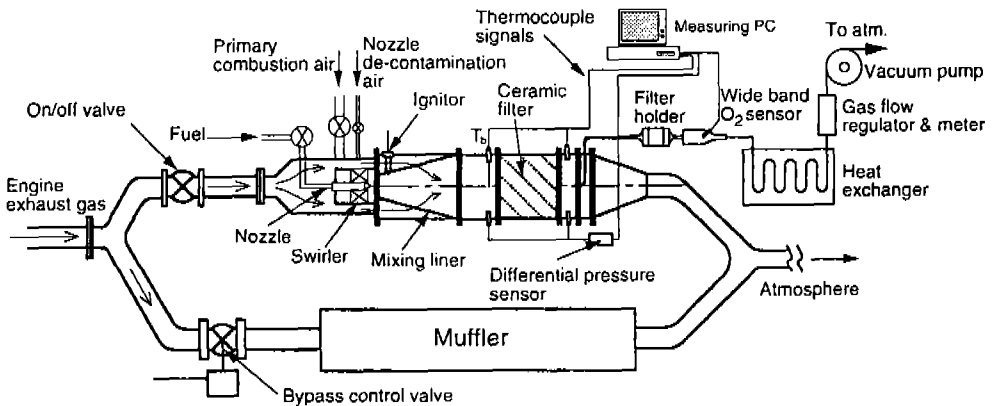


Fig.2 Schematic of Experimental Apparatus

3.2 재생과정

세라믹 필터에 입자상물질이 여과되어 엔진의 배압(필터 전후의 차압)이 증가하여 일정한 값에 도달하면, 제어컴퓨터는 바이패스 밸브(F)를 열게되며 이 때는 엔진으로부터의 배기가스가 필터와 소음기 양쪽을 분할하여 통과하게 된다. 제어컴퓨터는 연료펌프를 구동시키고 점화봉에 고주파 방전을 시작하며, 버너 내부의 스윙러를 통과하여 신기가 공급되며 동시에 노즐에 연료가 공급되어 버너에 점화된다. 버너의 전방에 설치된 열전대로부터 버너에 점화가 이루어졌음을 알 수 있는 신호가 제어컴퓨터로 입력되며 제어컴퓨터는 바이패스 밸브를 제어하여 재생을 시작한다. 바이패스 밸브는 1도 각도로 움직이며, 이 밸브의 제어를 통하여 필터 전면에 도달하는 가스의 온도를 제어하게 된다. 엔진으로부터의 배기기는 모든 엔진 운전 조건에서 버너 연소가스의 온도보다 낮은 온도이며, 대략적으로 버너 연소가스는 약 950~1000℃ 정도이며, 배기가스의 온도는 150~400℃ 정도이다. 따라서 바이패스되는 엔진의 배기가스 유량을 제어하여 필터 전면에 도달하는 가스의 온도를 제어하는 것은 어려운 일이 아니다. 정해진 제어과정에 따라 재생이 종료되면 제어컴퓨터는 재생과정을 여과과정으로 전환하게 된다.

재생시점의 판정은 엔진의 회전수, 가스의 온도 및 필터 전후의 차압으로 판단한다. 예로서, 본 연구에서는 엔진의 속도가 1000rpm, 부하가 100%일 때 세라믹 필터에 약 12그램의 입자상물질이 여과되어 있다고 판정하는 필터 전후의 차압은 약 10~12kPa 정도이다. 이러한 값은 매우 큰 배압이며 본 연구에서는 재생을 빈번히 시험하기 위하여 엔진의 배기량에 비하여 비교적 작은 크기의 필터를 사용하였기 때문에 매우 큰 배압이 걸리게 된다.

과다한 여과량은 이미 언급하였듯이 동일한 재생제어과정을 적용할 때 매우 다른 재생특성을 보여주므로, 여과량의 추정은 매우 정확히 이루어져야 한다. 본 연구에서는 많은 실험을 통하여 경험적으로 여과량을 추정하고 있다.

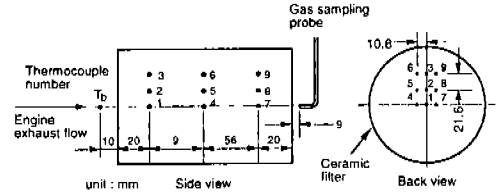


Fig.3 Temperature and Oxygen Concentration Measuring Positions

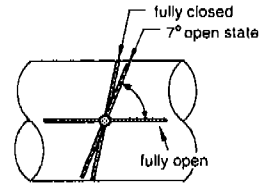


Fig.4 Schematic of Bypass Valve Operation in Scheme III

3,455cc의 직접분사식, 자연급기식 디젤엔진, 직경 144mm, 길이 152.4mm의 코닝사의 EX-80 세라믹 필터를 사용하였다. 또한 차압센서와 평균 80도 분무각을 갖는 중공노즐, 24V DC 모터 및 24V DC 연료펌프가 사용되었다. 연료의 분사량은 3.4cc/sec이고, 분사압은 0.7 MPa이다. 분사되는 연료의 연소를 위하여 공급되는 신기의 유량은 0.30m³/min이다.

Fig.3은 필터 전면과 필터 내부에서 온도를 측정하는 지점을 보여주고 있으며 k-타입 열전대가 사용되었다.

3.3 제어방법

본 논문에서는 제어과정의 대표적인 결과로서 엔진이 무부하 상태일 때 제어하는 방법과 결과를 제시한다. 덧붙여 50% 엔진부하가 걸렸을 때 1000, 2000, 및 3000rpm에서 동일한 제어방법을 적용하였을 때의 결과를 제시한다. 비정상상태의 엔진조건에서 제어하는 방법과 결과를 향후 연구과제로 남겨두고자 한다.

본 연구에서 여과된 입자상물질의 연소율을 제어하는 방법은 다음과 같다. 제어과정의 이

해를 위하여 Fig.5에 제시된, 필터 전면의 온도 T_b 를 참고하여야 한다. Fig.5에는 세가지 제어 방법에 따른 필터 전면의 온도변화와, 각 실험

에서 필터 채널 출구로부터 9mm 떨어진 지점에서 가스를 샘플링하여 측정된 산소농도도 함께 나타나 있다. 이때 사용한 필터는 입자상물질이 여과되어 있지 않은 깨끗한 필터이다. 따라서 버너에 점화하여 필터에 높은 온도의 가스를 공급하고 있지만 필터 내부에서는 입자상물질의 연소가 없다고 보아도 무방할 것이다.

재생시간은 10분 정도이며 재생기간은 네가지의 구간으로 나누어진다. 첫 번째 구간은 예열기간(Pre-heating period)이며 주재생기간(Main regeneration period), 잔류량 완전연소기간(Residual sweeping period) 및 냉각기간(Cooling period)이 이어진다. 재생의 대부분은 주재생기간중에 달성하고자 했으며, 이 기간에서 예상한 재생율은 약 70~80%이며 잔류량 완전연소기간 중에 약 20~30%의 재생율을 얻고자 의도했다.

Fig.5(a)에서 Scheme I은 주재생기간중에 필터 전면의 온도를 약 700℃로 7분 정도 지속적으로 유지하고 있으며, 이 때 필터 출구에서 빠져나오는 가스중에 포함된 산소농도를 보여주고 있다. 버너의 가스온도는 이보다 훨씬 높은 온도이므로 이 때 엔진으로부터의 배기가스가 트랩으로 부분적으로 유입되어 버너 연소가스와 혼합된 후 필터에 유입되게 된다. 트랩으로 유입되는 배기가스의 유량은 바이패스 밸브를 이용하여 제어하고 있다. 잔류량 완전연소기간에서는 필터전방의 온도를 약 780~800℃로 상승시켰으며, 주재생기간중에 연소되지 않은 입자상물질들을 좀 더 고온에서 완전연소시키고자 하였다. 이 기간 직전에 산소농도가 증가하는 이유는 필터 전방의 온도를 낮추기 위하여 배기가스를 필터로 더 많이 유입시켰기 때문이다. 엔진으로부터 배출되는 배기가스에는 산소농도가 약 19%(엔진 공회전 조건) 정도이지만 버너로부터 배출되는 연소가스는 이보다 훨씬 낮은 산소농도를 가지기 때문이다. 버너는 당량비 1.1 근방에서 작동된다. 따라서 엔진 배기가스가 많이 바이패스되어 트랩으로 유입되는 유량이 감소하면 필터 전방에 도달하는 혼합가스의 산소농도는 낮아지게 된다.

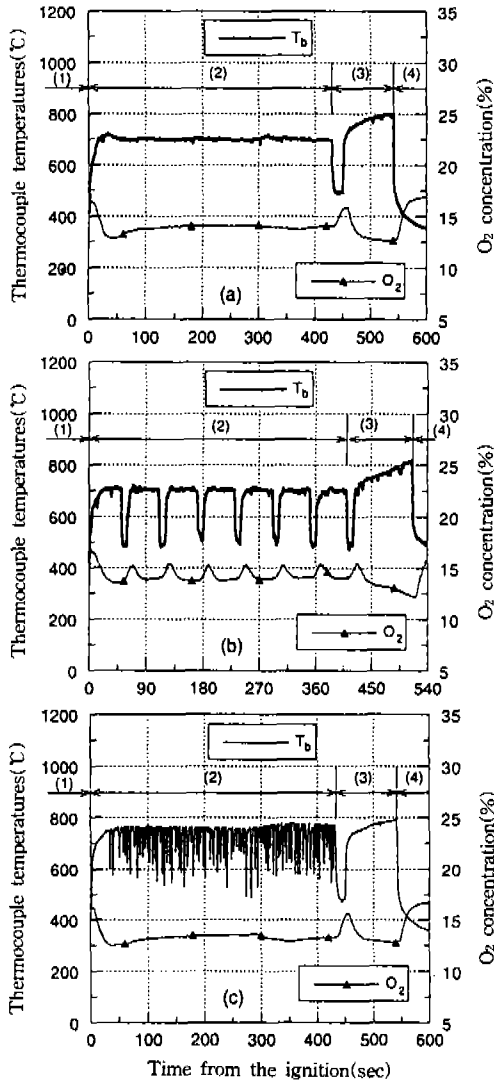


Fig.5 Gas Temperature in Front of the Filter and Oxygen Concentration at the Outlet of the Filter for the Various Control Schemes Using Clean Filter, Engine Idle Operation ; (a) scheme I, (b) scheme II and (c) scheme III ; (1) pre-heating period, (2) main regeneration period, (3) residual sweeping period and (4) cooling period

Fig.5 (b)에는 Scheme II를 제시하였다. Scheme II는 필터 전방에 도달하는 가스의 온도를 700°C로 약 50초간 가열하다가 500°C로 10초간 냉각하는 과정을 주재생기간중에 반복하고 있다. 잔류량 완전연소기간중에는 Scheme I과 동일한 제어를 한다.

Scheme I과 III는 평균 가스 온도를 비슷하게 설정하였기 때문에 유입되는 배기 유량은 평균적으로 동일하다고 가정할 수 있다. 다만 Scheme II의 경우 온도가 낮아지는 구간에서는 상대적으로 공간속도가 커지기 때문에 다른 제어 방법에 비해 평균적으로 공간 속도가 약간 크게 설정되게 된다.

깨끗한 필터를 사용하여, Fig.5에 제시된 세 가지 제어방법으로 제어했을 때 함께 측정된 산소 농도를 편의상 '기준레벨(Reference level)'이라 명명하였다. 이와 비교하기 위한, 12g의 입자상물질을 여과한 필터를 사용하여 세가지 제어방법으로 제어했을 때 측정된 Fig.6 (a), Fig.7 (a) 및 Fig.8 (a)의 산소농도를 '재생레벨(Regeneration level)'이라고 명명하였다.

4. 결과 및 토론

Fig.3에는 필터 전방에서 가스온도(T_b)를 측정 한 위치와 필터 내부의 온도를 측정한 열전대의 위치, 필터 출구에서 산소농도 측정을 위하여 가스를 샘플링한 위치가 나타나 있다.

12g의 입자상물질을 여과한 후 세가지 제어방법으로 필터 전방의 온도를 제어하였을 때의 결과가 Fig.6~8에 제시되어 있다. Fig.6에는 Scheme I을 적용하였을 때, 입자상물질의 연소에 의한 온도분포와 이때 발생하는 평균온도구배가 나타나 있다. 이때 주목할 것은 산소농도의 변화이다. Fig.5 (a)의 결과(깨끗한 필터를 사용한 실험의 결과)와 비교한 Fig.6(d)를 통하여, 필터에 축적된 입자상물질이 주재생기간중 약 1분 30초 정도의 시간에 연소하였음을 알 수가 있다. 이는 충분한 산소를 포함한 700°C의 고온의 가스가 필터에 유입되어 입자상물질의 급격한 연소가 이루어졌음을 의미한다.

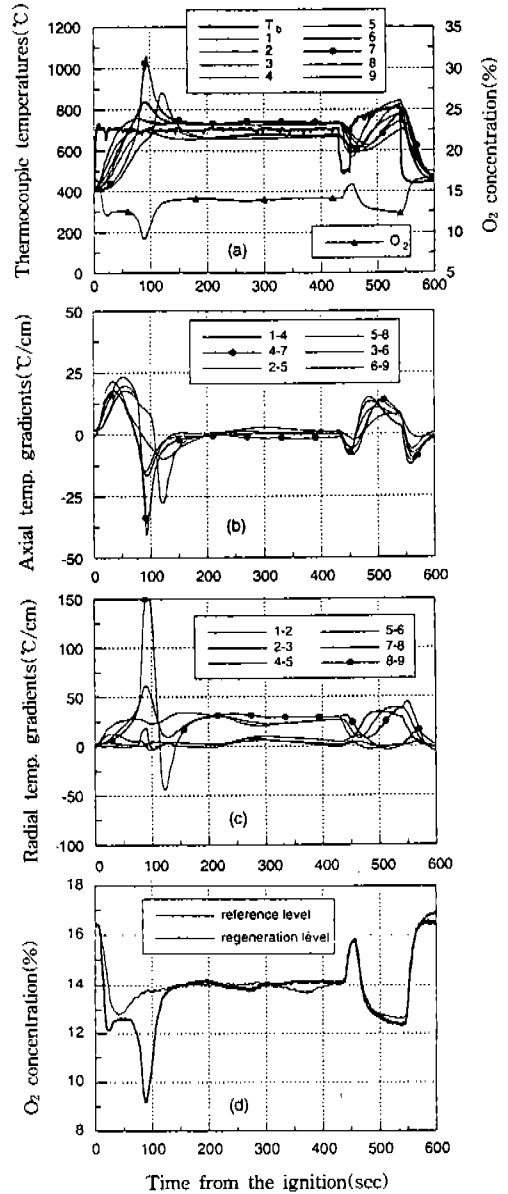


Fig.6 Sequence of Events During Regeneration Using 12g of PM Loading Filter, Engine Idle Operation and Controlled by Scheme I ; (a) thermocouple temperatures in the filter and oxygen concentration at the outlet of the filter, (b) axial temperature gradients, (c) radial temperature gradients and (d) comparison of the oxygen concentration between reference level(see Fig.5 (a)) and regeneration level(see Fig.6 (a)) by scheme I

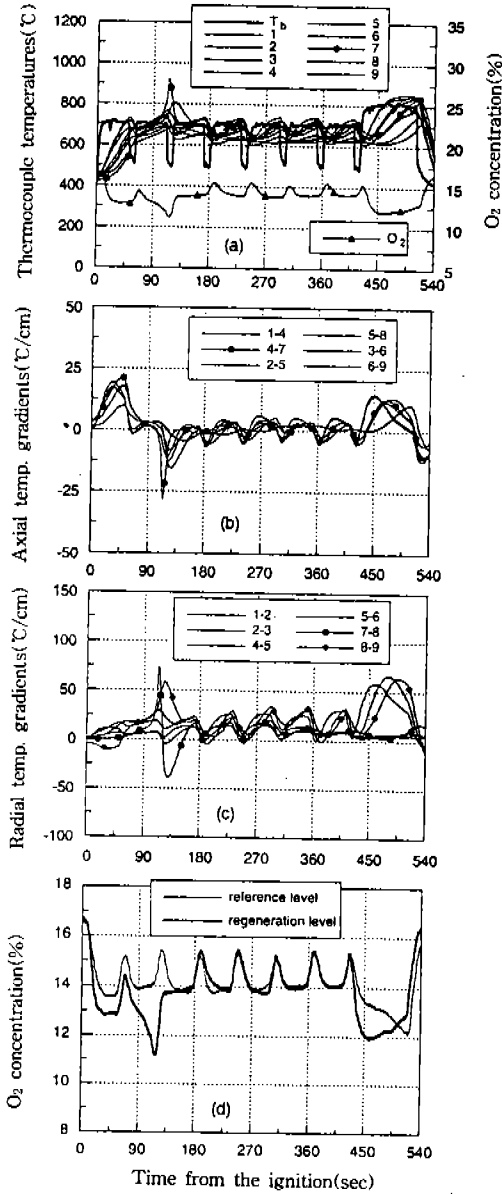


Fig.7 Sequence of Events During Regeneration Using 12g of PM Loading Filter, Engine Idle Operation and Controlled by Scheme II : (a) thermocouple temperatures in the filter and oxygen concentration at the outlet of the filter, (b) axial temperature gradients, (c) radial temperature gradients and (d) comparison of the oxygen concentration between reference level(see Fig.5 (b)) and regeneration level(see Fig.7 (a)) by scheme II

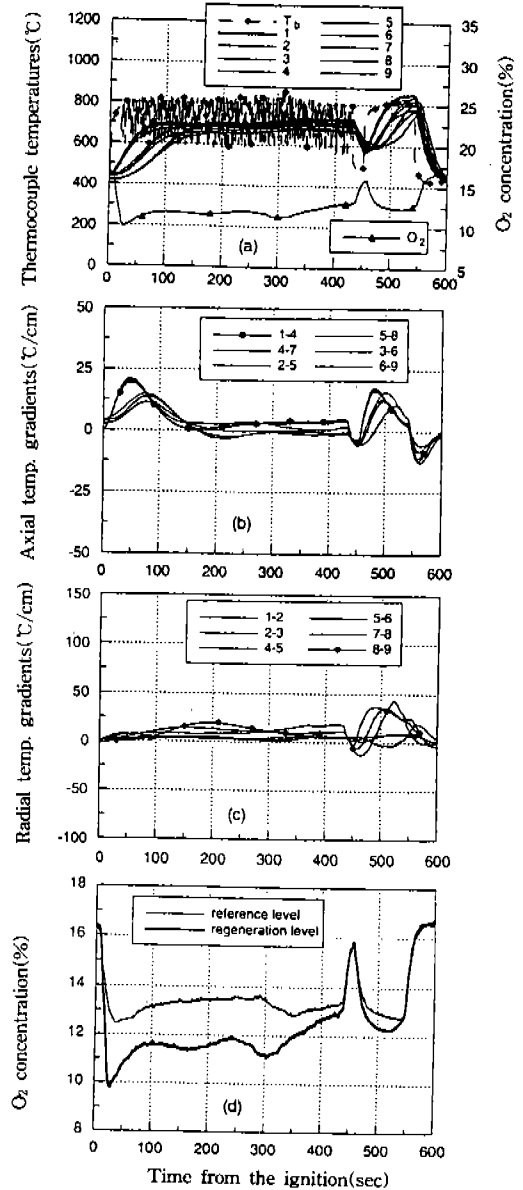


Fig.8 Sequence of Events During Regeneration Using 12g of PM Loading Filter, Engine Idle Operation, and Controlled by Scheme III : (a) thermocouple temperatures in the filter and oxygen concentration at the outlet of the filter, (b) axial temperature gradients, (c) radial temperature gradients and (d) comparison of the oxygen concentration between reference level(see Fig.5 (c)) and regeneration level(see Fig.8 (a)) by scheme III

Scheme I에 의하여 필터 내부의 최고온도는 1000°C이상으로 상승하였으며 반경방향 온도구배는 약 180°C/cm가 발생하였다.

Fig.7에는 Scheme II를 적용하였을 때 12g의 입자상물질이 여과된 필터 내부에서 발생하는 온도분포와 필터 출구의 가스중의 산소농도의 변화가 나타나 있다. 이 제어패턴에 의하여 발생한 최고온도는 약 900°C 정도이며 최고온도구배는 역시 반경방향 온도구배로서 약 75°C/cm 정도이다. 최고온도와 온도구배는 Scheme I의 결과보다 훨씬 낮아졌다. Fig.7(d)의 산소농도의 비교를 통하여 연소시간이 주재생기간 중에 약 3분 정도 소요되었음을 알 수 있다. Scheme I에서의 연소시간보다 약간 길어진 것으로 판단된다.

Fig.8은 Scheme III을 적용한 결과이다. 이 결과에서 피크(Peak)를 보여주는 온도상승은 나타나지 않았다. 필터 내부의 최고온도는 800°C 이하로 유지되고 있으며, 최고온도구배는 반경방향으로 약 30°C/cm가 발생하였다. Fig.8(d)의 산소농도 비교를 통하여 주재생기간 내 연소가 매우 완만히 지속되었음을 알 수가 있다.

위의 결과로부터, 필터 전방에 도달하는 가스온도의 제어를 통하여 재생기간중 입자상물질의 연소를 제어가 가능한 것으로 판단된다. Scheme II에서 주재생기간중의 몇번의 냉각기간은 입자상물질의 연소를 일시적으로 중단시켰거나 완만한 연소가 이루어지도록 하는 역할을 한 것으로 생각되며, 뿐만 아니라 필터 전방은 냉각의 영향을 직접적으로 받았으며, 필터 후방에서는 냉각의 영향을 적게 받아 연소가 지속적으로 이루어진 것으로 판단된다. 따라서 후방의 7번 지점의 열전대에서 가장 먼저 온도의 급격한 상승을 보여주며 역시 이 지점에서 최고온도에 도달한다. 결과적으로 Scheme III에 와서는 이러한 단속적인 연소가 우리가 원하는 낮은 온도와 온도구배를 얻는데 매우 바람직한 방법이 될 수 있음을 보여주고 있다.

엔진의 동력 손실을 야기하는 주원인은 입자상물질의 여과에 따른 배압의 상승이므로 평균

온도가 유사하게 설정된 각 제어 방법에 따른 동력 손실의 정도는 유사하다. 다만, Scheme III의 경우, 급격한 바이패스 밸브의 제어에 의해 발생할 수 있는 압력파가 엔진의 배기계에 무리를 줄 가능성이 있다고 생각된다.

Scheme III의 온도특성이 매우 좋지만 재생 후 필터의 중량을 측정된 결과 100%에 가까운 재생이 이루어지지 않았음을 알게 되었다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 주재생기간을 30초 정도 줄이고 잔류량 완전연소기간 직전의 냉각을 위한 제어를 생략하였다. Fig.9의 수정된 Scheme III를 통하여 거의 100%에 가까운 재생효율을 얻을 수 있었으며 최고온도는 800°C이하로, 최고온도구배는 35°C/cm이하로 유지할 수 있었다.

Fig.10은 50% 부하의 엔진 작동조건에서 수정된 Scheme III을 적용하였을 때의 결과이다. 50% 정도의 부하가 걸린 조건에서는 공회전 조건에서 재생한 결과와 큰 차이가 없음을 알 수가 있다. 뿐만 아니라 모든 엔진 속도에서 본 연구에서 시도한 제어방법이 적용 가능함을 알 수가 있다.

Fig.11은 본 논문에서 사용된 엔진의 배기가스 중의 산소농도를 엔진 회전 속도와 부하에 따라 나타낸 것이다. 배기 중의 산소농도는 엔진 회전 속도와는 거의 무관하며, 부하가 증가함에 따라 감소한다. 무부하의 경우에는 17~18% 정도의 산소 농도를 나타내고 있으며, 고부하시에는 6~8%까지 산소 농도가 저하되고 있다. 높은 산소 농도는 입자상물질의 급격한 연소를 야기하기 때문에, 고부하시보다는 산소 농도가 높은 저부하시에 연소를 제어의 필요성이 더욱 부각된다.

Fig.12는 수정된 Scheme III을 적용하였을 때, 무부하, 50% 부하 및 75% 부하가 걸렸을 때의 재생효율을 측정된 결과이다. 재생효율은 재생이 종료된 후 전자저울로 필터 캐니스터의 무게를 측정하여 구하였다. 필터 내부의 온도가 150°C 일 때 필터를 트랩으로부터 분리하여 25°C, 상대습도 50% 정도의 조건에서 필터의 무게를 측정하였다. 무게를 측정하는 실험을

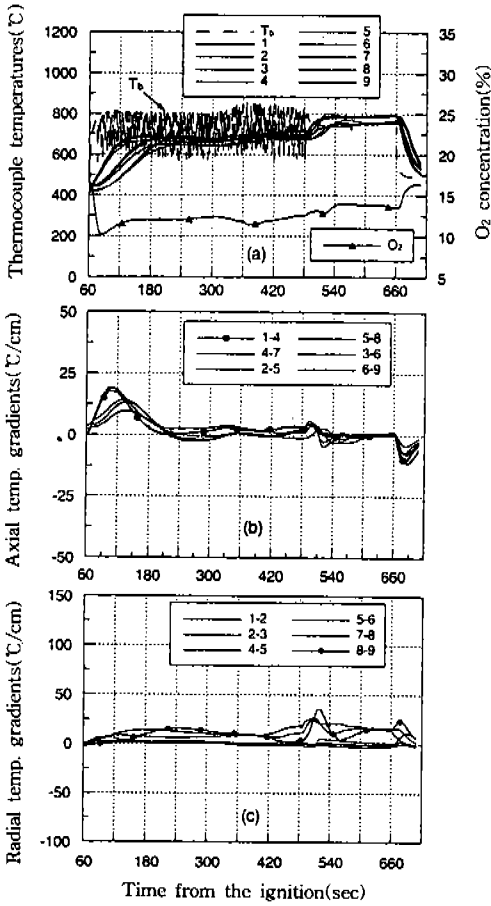


Fig.9 Sequence of Events During Regeneration Using 12g of PM Loading Filter, Engine Idle Operation, and Controlled by Modified Scheme III ; (a) thermocouple temperatures in the filter and oxygen concentration at the outlet of the filter, (b) axial temperature gradients and (c) radial temperature gradients

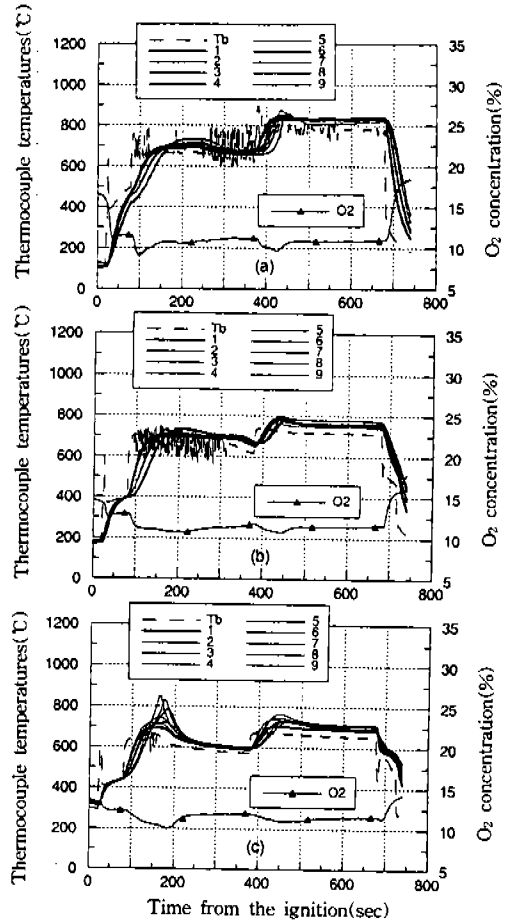


Fig.10 Temperature and Oxygen Concentration Characteristics During Regeneration Using 12g of PM Loading Filter, 50% Load Engine Condition, and Controlled by Modified Scheme III ; Engine Speed (a) 1000rpm, (b) 2000rpm and (c) 3000rpm

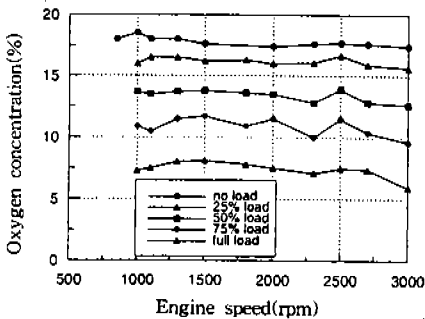


Fig.11 Oxygen Concentration in the Engine's Exhaust Gas

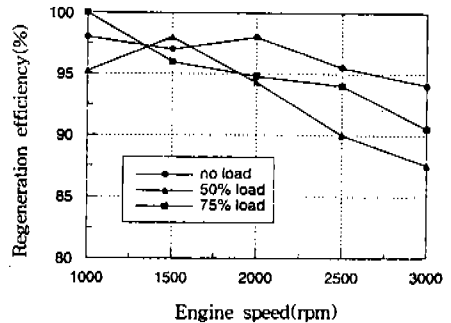


Fig.12 Regeneration Efficiency by Modified Scheme III

매우 여러번 반복하여 시행하였으며 재현성 있는 결과로 판단되어 본 결과에 제시하였다. 모든 엔진 회전수 조건에서 7% 이하의 부하가 걸렸을 때는 재생효율이 약 90% 이상을 보여 주었으며, 85~90% 이상의 부하가 걸리면 재생효율에 부정적인 영향을 주는 것으로 예상된다. 왜냐하면 본 연구에서 사용한 시스템은 여과된 입자상물질의 연소를 위하여 엔진으로부터 트랩으로 유입되는 배기가스를 사용하기 때문이다.

5. 결 론

입자상물질 제거장치의 중요 구성부품인 세라믹 필터의 내구성을 보장하기 위한 새로운 DPF 시스템을 제작하고, 동시에 새로운 제어방법의 적용을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 필터로 유입되는 가스온도의 제어를 통한 여과된 입자상물질의 연소를 제어는 매우 효과적인 것으로 판단된다.
- 2) 입자상물질의 연소를 통하여 재생 중에 필터 내부에서 발생하는 최고온도와 최고평균온도구배를 800°C 및 35°C/cm 이하로 유지할 수 있었다.

이전의 연구결과에서 재생과정을 지배하는 인자로 알려진 공간속도(Space velocity), 산소농도, 재생직전의 초기 여과량(Initial particulate loading) 이외에 필터로 유입되는 가스의 온도가 재생과정중의 연소를 제어를 가능케하는 중요한 인자임을 알 수가 있다.

참 고 문 헌

1. J. H. Johnson, S. T. Bagley, L. D. Gratz and D. G. Leddy, "A Review of Diesel Particulate Control Technology and Emission Effects", SAE Paper No. 940233, 1994.
2. P. Zelenka, W. Kriegler, P. L. Herzog and W. P. Cartellieri, "Ways Toward the

Clean Heavy-Duty Diesel", SAE Paper No. 900602, 1990.

3. 국립환경연구원, "자동차 배출가스 저감기술", 환경부 선도기술개발사업 3차년도 연구보고서, 1995.
4. J. S. MacDonald and G. M. Simon, "Development of a Particulate Trap system for a Heavy-Duty diesel engine", SAE Paper No. 880006, 1988.
5. S. T. Gulati and J. D. Helfinstine, "High Temperature Fatigue in Ceramic Wall-Flow Diesel Filters", SAE Trans. Vol. 94, No. 1, pp. 70~76, 1985.
6. S. T. Gulati, "Thermal Stresses in Ceramic Wall-Flow Diesel Filters", SAE Trans. Vol. 92, No. 1, pp. 212~223, 1983.
7. A. D. Tuteja, M. B. Hoffman, J. M. Lopez-Crevillen, S. Singh, R. R. Stomber and G. C. Wallace, "Selection and Development of a Particulate Trap System for a Light-Duty Diesel Engine", SAE Paper No. 920142, 1992.
8. 김재업, 박동선, 이만복, 김응서, "디젤 입자상물질 제거 장치의 재생 제어 방식", 한국자동차공학회 '95년도 추계학술대회 논문집 Vol. II, pp. 71~76, 1995.
9. 박동선, 김재업, 이만복, 김응서, "디젤 입자상물질 제거장치에 적용되는 버너의 설계 개념 및 기초 실험", 한국자동차 공학회 논문집 제4권 제3호, pp. 50~60, SAE Paper No. 96370049, 1996.
10. D. S. Park, J. U. Kim, B. Y. Hyeon and E. S. Kim, "Considerations on the Temperature Distribution and Gradient in the Filter During the Regeneration Process in Burner Type Particulate Trap System", SAE Paper No. 961978, 1996.
11. K. N. Pattas, "Ceramic Trap Regeneration Rate Control through Bypass Techniques", SAE Paper No. 880004, 1988.
12. K. N. Pattas, N. A. Kyriakis and Z. C.

- Samaras, "A New Approach to the Oxidizing Behavior of a Porous Ceramic Diesel Particulate Trap", SAE Paper No. 850012, 1985.
13. C. P. Garner and J. C. Dent, "A Thermal Regeneration Model for Monolithic and Fibrous Diesel Particulate Traps", SAE Paper No. 880007, 1988.
 14. K. N. Pattas, A. M. Stamatelos, K. N. Kougianos, G. C. Koltsakis and P. K. Pistikopoulos, "Trap Protection by Limiting A/F Ratio During Regeneration", SAE Paper 950366, 1995.
 15. 김상환, "디젤 자동차의 배기가스 저감 기술", 한국자동차공학회 Vol. 15, No. 3, pp. 19~31, 1993.
 16. 위인혁, 윤보승, 정인승, "Darcy의 법칙을 인요한 Diesel Particulate Trap System의 Ceramic Filter의 재생조건 결정방법", 한국자동차 공학회 94년도 추계학술대회 논문집, pp. 74~90, 1994.
 17. 조강래, 엄명도, 유정호, "첨가제-스로틀링 재생에 의한 디젤 입자상물질 여과장치 성능평가에 관한 연구", 한국자동차 공학회 '94년도 추계학술대회 논문집, pp. 159~165, 1994.
 18. 한영출, 강호인, 최문석, "디젤기관에서 스로틀링 방식의 세라믹 필터 트랩에 의한 입자상물질 저감에 관한 실험적 연구", 한국자동차 공학회 '94년도 추계학술대회 논문집, pp. 417~424, 1994.