

디젤 입자상물질 후처리 장치에서 입자상물질의 연소에 미치는 재생 인자의 영향

Effects of Regeneration Parameters on Oxidation of Particulate in a Diesel Particulate Trap System

김재업*, 조훈**, 김형욱**, 박동선*, 유천**, 김용서***
J. U. Kim, H. Cho, H. U. Kim, D. S. Park, C. You, E. S. Kim

ABSTRACT

The effects of the regeneration parameters such as inlet gas temperature, space velocity, oxygen concentration of the exhaust gas, and initial particulate loading on the oxidation of the particulate inside ceramic cordierite filter have been investigated through an engine experiment. As the inlet gas temperature increases, the remarkable filter temperature occurs owing to the rapid combustion rate. Though the higher space velocity affirms the safe regeneration, it also requires much fuel consumption of the burner. For that reason, the space velocity should be compromised considering the fuel economy. The excessive accumulation of the particulate may cause undesirable regeneration temperatures inside filter even under the optimized regeneration condition.

The inlet gas temperature should be selected to overcome the variation of the oxygen concentration which is inherent feature of the diesel engine. It is the most important factor in the regeneration control techniques.

주요기술용어 : Diesel Particulate Trap System(디젤 입자상물질 후처리 장치), Inlet Gas Temperature(유입 가스 온도), Space Velocity(공간 속도), Oxygen Concentration(산소 농도), Initial Particulate Loading(여과량)

1. 서 론

디젤 입자상물질 후처리 장치에서 입자상물질

포집용 매체로 사용되는 세라믹 필터의 녹는점은 약 1,400℃로 알려져 있으나,¹⁾ 실제 차량에 적용할 수 있도록 내구성을 만족하기 위해서는 이보다 훨씬 낮은 온도로 재생이 이루어져야 한다. MacDonald 등은 세라믹 필터의 300,000mile 내구성을 보장하기 위해서는 재생시 필터의 허

* 정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

** 서울대학교 대학원 기계공학과

*** 정회원, 서울대학교 기계공학과

용 최고 온도는 900~1000°C 미만으로, 허용 최고 온도 구배는 $\pm 35^\circ\text{C}/\text{cm}$ 이내로 제한되어야 한다고 제시하고 있다.²⁾

재생시 입자상물질의 연소에 의해 발생하는 필터의 온도를 제어하기 위해서는 먼저 재생과 관련된 다양한 재생 인자들이 재생에 미치는 영향이 규명되어야 한다. 필터의 재생에 관한 연구는 그동안 주로 수치해석을 통하여 이루어져 왔다. Bissett은 세라믹 월-플로우 모노리스 필터에서의 열적 재생 과정을 묘사하는 편미분 형태의 지배방정식을 구성하였으며, 입자상물질의 여과량 및 전체 여과 면적의 영향을 고찰하였다.^{3),4)} 국내에서도 Bissett의 지배 방정식을 이용하여 다공성벽면의 두께, 입구 온도의 상승 속도, 여과량, 산소 농도, 공기 유량이 재생에 미치는 영향을 연구한 결과가 발표된 예가 있다.⁵⁾ Garner 등은 다공성 담체에서의 물질의 산화 과정에 대한 1차원 지배방정식을 구성하였고, 세라믹 모노리스 필터와 섬유 메쉬 필터에 대하여 산소 농도, 입자상물질의 여과량, 배기 유량에 따른 연

소 특성을 연구하였다.⁶⁾ 하지만 현상의 복잡함으로 인하여 다차원 모델링에 의한 수치해석은 이루어지지 않고 있으며, 실험을 통하여 재생 인자의 영향을 규명한 논문은 제시되지 않고 있다.

입자상물질의 연소에 관계되는 인자로는 필터 유입 가스 온도, 공간 속도, 배기 가스 중의 산소 농도, 그리고 입자상물질의 여과량 등을 들 수 있다. 입자상물질은 일반적으로 500~600°C에서 연소한다고 알려져 있으므로, 필터 유입 가스 온도는 이러한 산화 개시 온도 이상으로 설정되어야 하지만 급격한 연소를 억제하기 위해서는 적절히 제한되어야 한다. 공간 속도는 필터를 지나는 표준 상태의 가스 유량을 필터의 체적으로 나눈 것으로, 단위 시간에 표준 상태에서 필터 체적 만큼의 가스가 필터를 지나는 경우의 공간 속도는 1.0s^{-1} 이 된다. 배기 가스 중의 산소 농도는 엔진의 운전 조건에 따라 6~18%로 변화하기 때문에 이러한 산소 농도의 변화에 따른 연소 특성의 규명이 이루어져야 한다. 입자상물질의 적정 여과량은 버너의 연료 경제와 배압

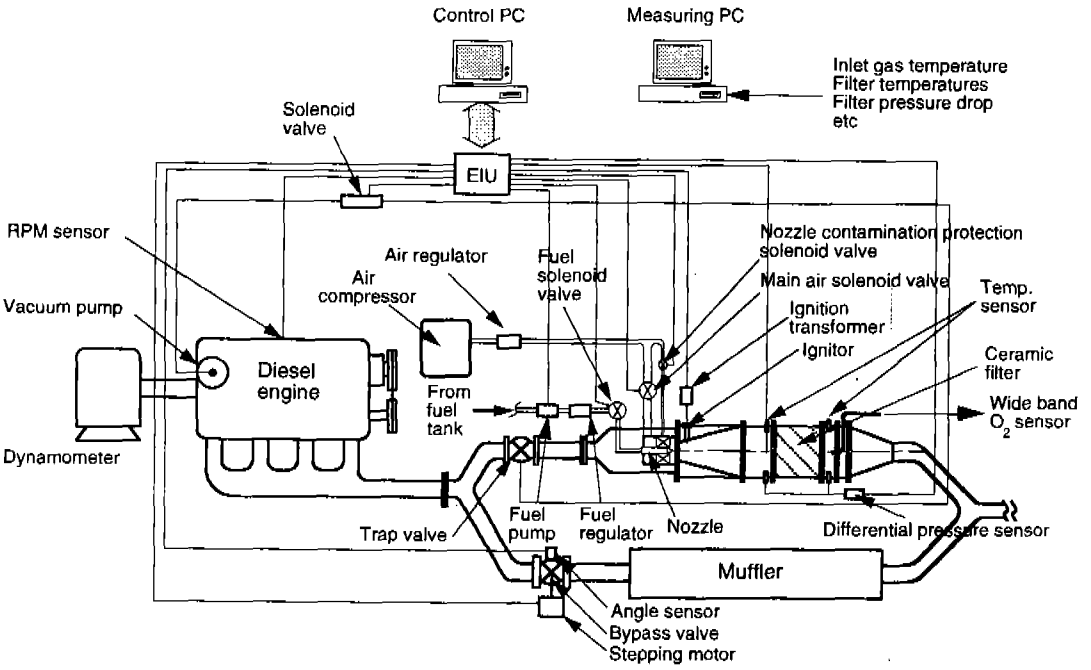


Fig.1 A burner type diesel particulate trap system

상승에 따른 엔진 출력 손실을 고려하여 적절히 선정되어야 한다. 본 논문에서는 이러한 재생 인자들의 변화에 따른 입자상물질의 연소 특성을 실험적으로 규명하고, 재생 제어 방식을 확립하는데 참고가 될 수 있는 유용한 데이터를 제공하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

실험에 사용된 버너 방식 입자상물질 후처리 장치는 Fig.1에 나타낸 바와 같이 크게 여과를 위한 필터, 배기 가스 유로를 제어 위한 바이패스 밸브, 재생시 입자상물질을 점화시키기 위한 버너, 그리고 각 구성품의 동작을 제어하는 PC로 구성되어 있다.⁷⁾ 본 방식은 재생 중에 배기 가스를 부분적으로 이용하는 부분-바이패스 시스템 방식을 채택하고 있다. 실험에 사용한 코닝사의 EX-80 계열 세라믹 코디어라이트 필터는 지름이 144mm, 길이가 152mm로, 상세한 사양은 Table 1에 자세히 나타내었다.

본 연구에 사용한 디젤 엔진은 4기통 3,455cc의 직접 분사식 엔진으로 사양은 Table 2에 나

타내었다. 엔진에 연결된 엔진 동력계는 와류 방식이며 흡수 마력은 160PS, 흡수 토크는 35kg·m, 최대 회전수는 9,000rpm이다.

재생 실험은 일정한 여과량만큼 입자상물질을 여과시킨 후, 재생 조건을 바꾸어가며 수행되었다. 모든 입자상물질의 여과는 1,000rpm의 엔진 회전 속도, 713kPa의 제동 평균 유효 압력에서 이루어졌다. 재생 실험의 조건은 산소 농도를 변화시키는 실험에 대하여만 부하를 변화시키기 위하여 1,000rpm의 엔진 회전 속도에서 진행하였으며, 나머지 경우는 엔진 공회전 상태에서 수행하였다.

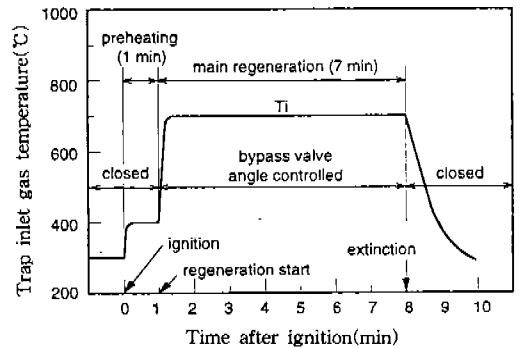


Fig.2 The inlet gas temperature as a function of time during the regeneration experiment

Table 1 Specifications of the wall-flow type ceramic monolith filter

ITEM	SPECIFICATION
Manufacturer	Corning Inc. (USA)
Model	EX-80
Diameter	144 mm (5.66 in)
Length	152 mm (6 in)
Filter volume	2.5 Liter
Filtration area	1.360 m ²
Mean pore size	12.5 μm
Cell density	16/cm ² (100/in ²)
Cell pitch	2.54 mm (0.1 in)
Channel width	2.10 mm (0.083 in)
Wall thickness	0.44 mm (0.017 in)
Porosity	48%
Frontal area	1.623×10 ⁻² m ²
Open frontal area	0.478×10 ⁻² m ²

Table 2 Specifications of the diesel engine

ITEM	SPECIFICATION
Engine type	inline, 4 cylinder
Combustion chamber	DI, swirl chamber
Displacement volume	3,455 cc
Bore×Stroke	100×110 mm
Compression ratio	18 : 1
Max. power	94 PS / 3000 rpm
Max. torque	220 Nm / 2200 rpm
Fuel consumption rate	160 g/PS·h
Engine idle speed	620~700 rpm
Weight	270 kg

Fig.2는 재생 실험에 적용된 필터 유입 가스 온도의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다. 버너 화염을 안정화시키고, 필터의 급격한 온도 상승을 막기 위하여 점화 후 1분간은 바이패스 밸브를 닫은 채 배기 가스를 전방 필터로 유입시키는 예열 구간을 두었다. 예열 기간이 끝나면 이후 7분간 재생을 하게 된다. 이 기간 중 필터 유입 가스 온도는 일정한 온도로 유지하게 되는데, 이러한 제어는 필터 전면의 온도를 입력으로 하고 바이패스 밸브의 개도 조절을 출력으로 하는 피드백 제어를 통하여 이루어진다. 피드백 제어는 PID 제어 방식을 적용하였다. 즉, 유입 가스의 온도가 떨어지면 바이패스 밸브는 개도를 크게 하여 바이패스 되는 배기 가스 유량을 증가시키고, 반대로 필터 유입 가스 온도가 상승하게 되면 바이패스 밸브를 닫아 필터로 유입되는 배기 가스의 유량을 증가시키게 된다.

Fig.3은 필터 전·후, 그리고 내부의 온도 측정 위치를 나타낸 그림이다. 필터 내의 재생중의 온도를 측정하기 위하여 전반부, 중반부, 후반부에 각각 반경 방향으로 3군데씩 모두 9군데에 열전대를 설치하였으며, 필터 바로 앞에 설치된 열전대는 유입 가스 온도 측정을 위한 것으로 재생시 가스 온도의 제어에 이용하게 된다. 실험에 사용한 열전대는 K-타입으로 측정 온도 범위는 $-270 \sim 1372^{\circ}\text{C}$ 이며, 지름 1.5mm의 봉형상으로 제작하여 필터의 후방쪽에서 채널 안으로 삽입할 수 있도록 하였다. 열전대의 시정수는 약 0.3초로 본 실험의 데이터 습득에는 충분한 것으로 생각된다.

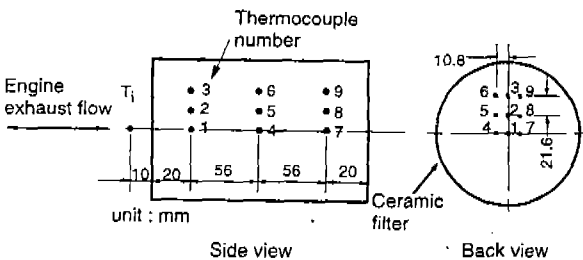


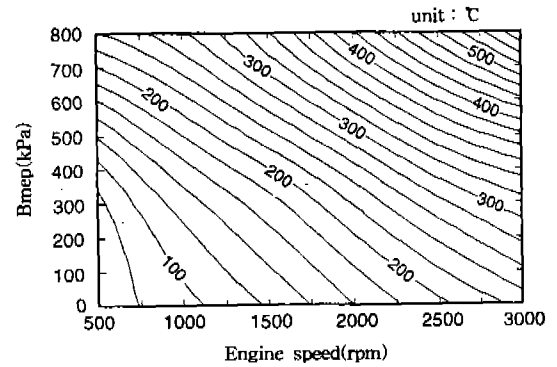
Fig.3 The thermocouple positions of the inlet gas and filter temperatures

3. 결과 및 검토

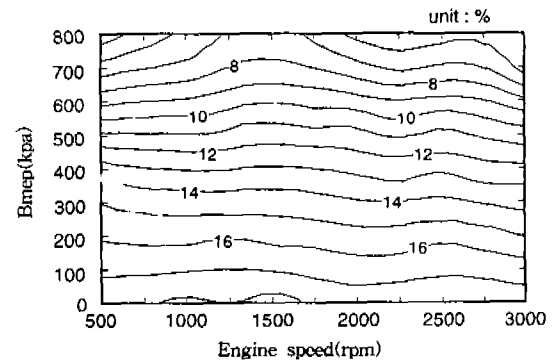
3.1 엔진 작동 특성

일반적으로 디젤 입자상물질의 점화 온도는 $500 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 로 알려져 있다. 그러나 실제 엔진에서는 이러한 고온의 환경을 지속적으로 유지할 수는 없다. 본 연구에 사용된 엔진의 경우, Fig. 4(a)에 나타낸 것과 같이 고속 및 고부하의 일부 영역에서는 배기 가스의 온도가 500°C 이상이지만, 일반적으로 재생 구간 동안 이러한 온도를 지속적으로 유지해 줄 수는 없기 때문에 부가적인 열원이 필요하게 된다.

입자상물질의 점화나 재생에는 필터에 유입되는 가스의 온도뿐만 아니라 가스의 산소 농도도



(a) The exhaust gas temperature



(b) The oxygen concentration

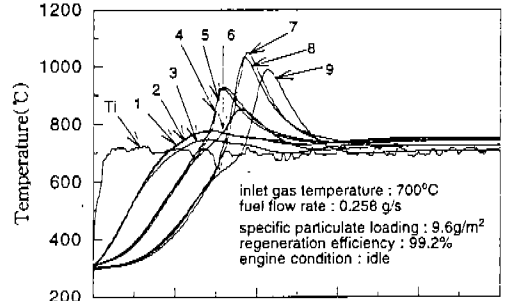
Fig.4 The exhaust gas temperature and the oxygen concentration as a function of the engine speed and the load

관여하게 된다. Fig.4(b)는 엔진 회전 속도와 부하에 따른 배기 가스중의 산소 농도를 나타낸 것이다. 무부하일 때 산소 농도는 약 18% 정도이고 전부하 조건에서는 7~8% 정도로 부하에 따라 큰 폭으로 변화하며, 반면에 엔진 회전 속도에 따라서는 크게 변하지 않는다는 것을 알 수 있다.

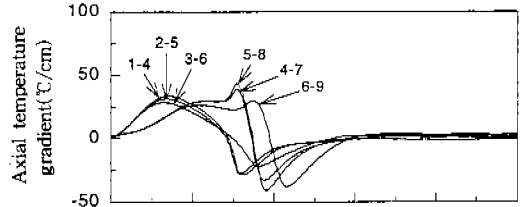
배기 가스 온도와 산소 농도가 엔진 속도와 부하에 따라 변화하는 실제 엔진 상황에 적용할 수 있는 재생 제어 방법을 도출하기 위해서는 각 재생 인자들에 따른 입자상물질의 연소 특성을 파악하는 것이 선행되어야 한다는 것을 알 수 있다.

3.2 일반적인 재생 특성

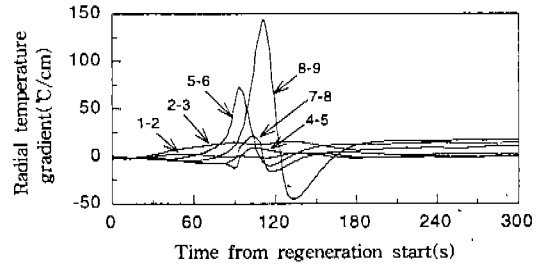
Fig.5는 재생 과정 동안의 전형적인 필터의 온도 및 온도 구배를 보여주고 있다. 유입 가스 온도는 700℃로 유지하였으며, 버너 연료량은 0.258g/s, 입자상물질의 여과량은 9.6g/m², 그리고 엔진은 공회전으로 운전하였다. 여기서 온도 구배는 두 온도 측정 위치 사이의 온도 차이를 거리로 나눈 값이다. 입자상물질은 필터 전면에서부터 산화하기 시작하여 필터의 후면 쪽으로 산화가 진행된다. Fig.5(a)에서 후면의 필터 온도는 전면의 온도보다 높게 나타나고 있는데, 이는 전면에서 입자상물질의 산화에 의해 발생한 열이 후면으로 전달되어 후면에서는 더 높은 가스 온도에서 연소가 이루어지기 때문이다. 가스의 온도가 높은 상태에서는 연소율이 급격하게 증가하기 때문에 높은 재생 온도를 보이게 된다. 축방향 온도 구배는 Fig.5(b)에 나타난 바와 같이 전반적으로 같은 크기를 보이며 그 값이 그리 크지 않다. 반면에, Fig.5(c)에 나타난 반경 방향 온도 구배를 보면, 필터 후면의 가장자리인 8-9번의 온도 구배가 150℃/cm 정도로 가장 크게 나타나고 있다. 일반적으로 필터 바깥쪽에서는 주위 대기와의 열전달 때문에 중심축보다 재생이 더디게 진행되고 이러한 재생 시점의 차이는 중심축과 바깥쪽의 온도 차이의 원인이 되는데, 후면으로 갈수록 그 차이는 더욱 심화된다. 이러한 이유로 필터 후면에서 온도 구배가



(a) Filter temperature profiles



(b) Axial temperature gradient profiles



(c) Radial temperature gradient profiles

Fig.5 Typical filter temperature characteristics during the regeneration

가장 크게 나타나며, 필터의 길이가 길어질수록 온도 구배는 더욱 커질 것으로 생각된다. 재생 중의 큰 온도 구배는 필터에 발생하게 되는 열 용력을 크게 하여 필터가 균열에 이르게 하는 원인이 된다.⁸⁾

재생 중의 필터의 등온선 분포를 Fig.6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 최고 온도점은 시간에 따라 전면에서 후면으로, 다시 후면의 가장자리 쪽으로 이동하면서 재생이 완료된다.

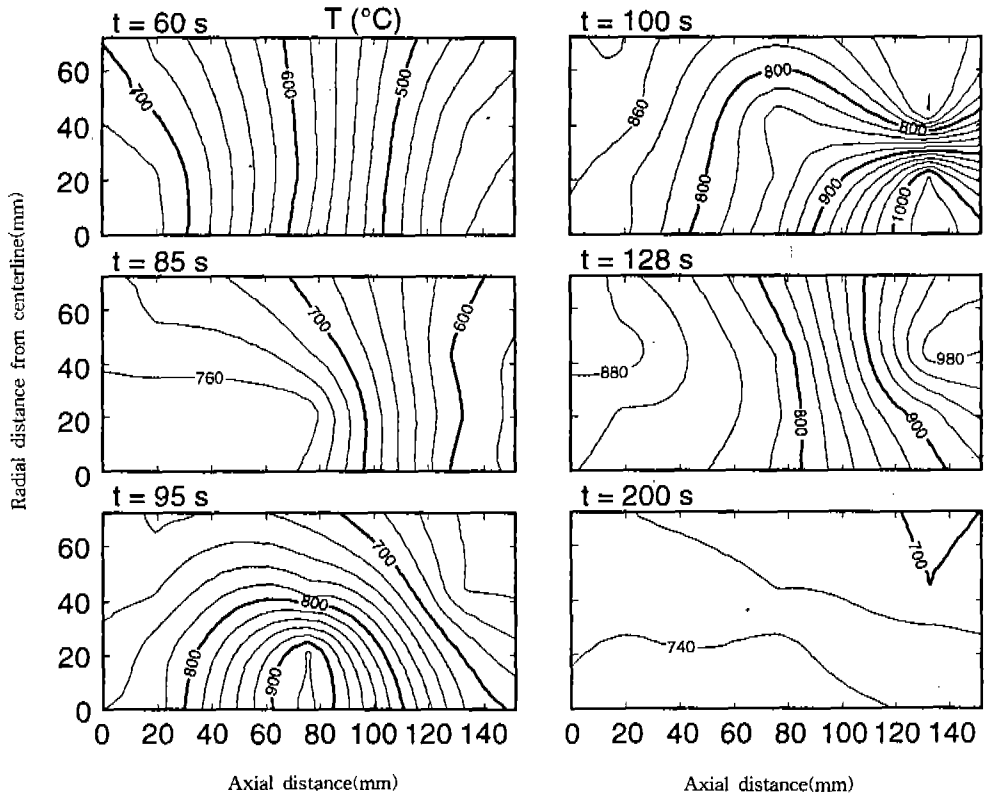


Fig.6 The isothermal lines at a cross sectional view of the filter with time

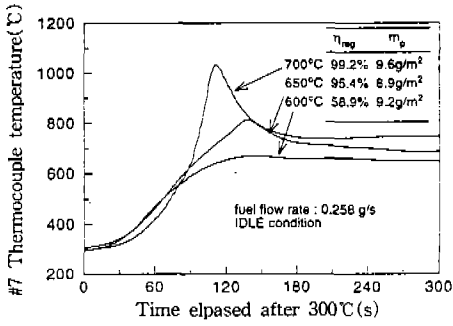
3.3 필터 유입 가스 온도의 영향

필터 전면의 유입 가스 온도를 각각 600℃, 650℃, 그리고 700℃로 변화시켜 가며 재생 특성을 관찰하였다. 버너 연료량은 0.258g/s, 여과량은 8.9~9.6g/m², 그리고 엔진은 공회전으로 운전되었다. 결과로서 Fig.7(a)에는 측정 위치 중에서 최고 온도를 보이는 7번 열전대의 시간에 따른 온도 변화를 나타내었고, Fig.7(b)에는 측정점에서 발생한 최고 온도와 최고 온도 구배를 나타내었다.

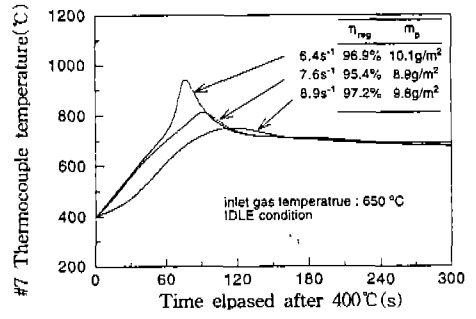
Fig.7(a)에서 필터 유입 가스 온도가 700℃인 경우 최고 온도가 1,000℃를 넘게 나타났다. 재생 효율은 99.2%로 매우 양호하지만 최고 온도가 지나치게 높아 이러한 상태로 계속 재생이 이루어진다면 필터에 심각한 손상이 야기될 수

있다. 유입 가스 온도가 600℃인 경우에는 최고 온도가 700℃ 미만으로 매우 안정적이지만, 재생 효율은 58.9%로 매우 낮게 나타나고 있다. 유입 가스 온도가 650℃로 유지된 경우에는, 최고 온도뿐만 아니라 재생 효율에서도 양호한 결과를 나타내고 있다. 결국 실제 엔진에서 효율적이고 안정적인 재생을 위해서는 본 필터의 경우 유입 가스 온도는 650℃ 정도로 타당하다는 것을 알 수 있다.

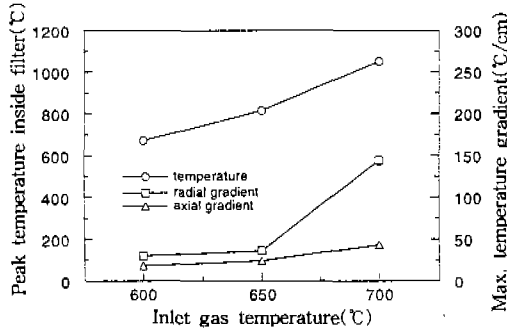
필터 유입 가스 온도가 증가할수록 최고 온도와 최고 온도 구배는 모두 증가하며 재생 시간은 급격한 연소로 인해 짧아지게 된다. 최고 온도와 구배는 급격한 연소가 진행되는 부분에서 발생하기 때문에 급격한 온도 상승은 필연적으로 큰 온도 구배를 일으키는 것을 알 수 있다. 축방향 온도 구배는 반경 방향 온도 구배에 비해



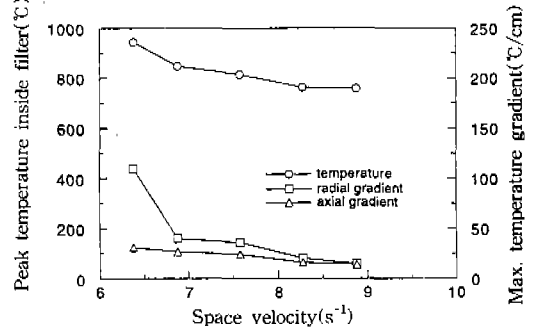
(a) The No. 7 thermocouple temperature profile



(a) The No. 7 thermocouple temperature profile



(b) The maximum temperature gradient



(b) The maximum temperature gradient

Fig.7 The regeneration characteristics with different inlet gas temperatures

Fig.8 The regeneration characteristics as a function of the space velocity

서 상대적으로 작게 나타난다.

재생 온도는 최고 온도나 최고 온도 구배에 직접적인 영향을 미치며, 재생 온도를 650°C 정도로 유지하는 것이 안정적인 재생과 재생 효율 측면에서 바람직하다고 생각된다.

3.4 공간 속도의 영향

공간 속도의 영향을 살펴보기 위하여 본 실험에서는 연료의 공급압을 바꿔주었다. 연료량이 많아지게 되면, 더 많은 배기 가스가 유입되어야 일정한 재생 온도를 유지할 수가 있고, 반대의 경우 유입 배기 가스량이 줄어들게 되어 공간 속도가 변화하게 된다. 여과량은 9.8~10.1g/m², 유입 가스 온도는 650°C로 설정되었으며, 엔진은 공회전으로 운전되었다.

Fig.8은 그 결과를 나타낸 것으로, Fig.8(a)에

나타난 바와 같이 공간 속도가 작을수록 필터의 온도는 급격하게 상승하고 있다. 일반적으로 가스와 필터 사이의 대류 열전달은 가스의 질량 유량률에 의해 지배된다. 가스 유량이 증가할수록 대류 열전달은 촉진되며 입자상물질의 발열 에너지를 필터 밖으로 배출하게 되어 최고 온도를 낮추게 된다.

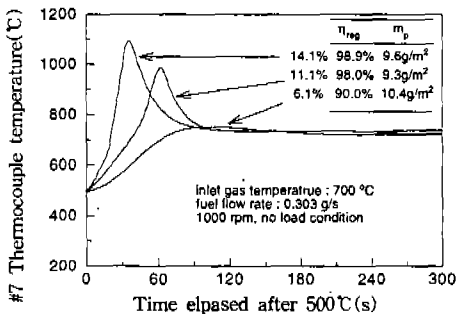
모든 경우의 재생 효율은 95% 이상으로 양호하게 나타나고 있어, 설정 유입 가스 온도가 적정함을 알 수 있다. 공간 속도를 증가시킬수록 필터의 최고 온도 및 최고 온도 구배는 작아지게 되므로, 연료 경제 측면을 고려하지 않는다면 필터의 안정된 재생을 위해 공간 속도는 크게 할수록 바람직하다는 것을 알 수 있다.

3.5 산소 농도의 영향

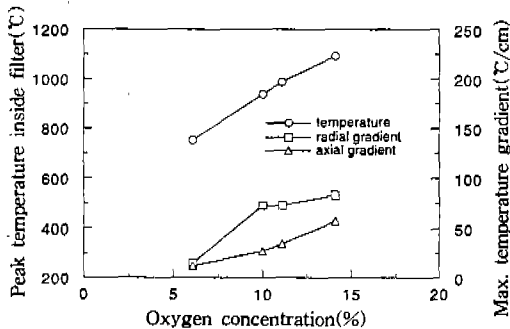
디젤 엔진은 본래의 회박 연소라는 특성으로 인하여 배기 가스 중에는 Fig.4(b)와 같이 엔진 회전 속도와 무관하게 부하에 따라 6~18%의 여분의 산소가 존재하게 된다.

Fig.9는 산소 농도 변화에 따른 재생 특성을 나타낸 것으로, 엔진을 1,000rpm으로 운전하면서 부하를 바꾸어 배기 가스 중의 산소 농도를 변화시켰다. 부하에 따른 계동 평균 유효 압력은 각각 0, 357, 713kPa이며, 이때의 산소 농도는 각각 14.1, 11.1, 6.1%이다. 버너 연소 공기의 혼합에 의해 배기 가스 중의 산소 농도 보다 약간 작은 값을 나타내고 있다. 버너 연료량은 0.303g/s, 그리고 흡입 가스 온도는 700℃로 유지하였다.

산소 농도가 높을수록 높은 재생 온도를 보이



(a) The No. 7 thermocouple temperature profile



(b) The maximum temperature gradient

Fig.9 The regeneration characteristics according to the oxygen concentration

며 재생 시간은 짧아지는 것을 알 수 있다. 산소 농도에 따라 최고 온도를 보이는 시간은 다른 재생 인자들의 변화에 비해 그 차이가 매우 크게 나타나는데, 이는 배기 가스 중의 산소 농도가 입자상물질의 산화에 가장 큰 영향을 미치고 있다는 사실을 유추하게 해준다. 이러한 결과로부터 산소 농도를 제어하는 것이 입자상물질의 산화율을 제어할 수 있는 가장 확실한 방법임을 알 수 있다. 실제로 Pattas 등은 배기 가스 재순환을 통하여 산소 농도를 제어함으로써 필터의 과열을 방지할 수 있는 가능성을 제시하였다.⁹⁾ 또한 6.1%의 산소 농도에서도 재생 효율이 90%로 나타났는데, 이는 유입 가스 온도가 700℃로 높게 설정되었기 때문이다.

산소 농도를 낮추어 주면 연소가 억제되어 최고 온도, 최고 온도 구배를 낮출 수 있지만, 일반적으로 넓은 공연비에서 운전되는 디젤 엔진의 특성상 배기 가스 중의 산소 농도를 임의로 제어하여 낮게 유지하는 것은 용이하지가 않다.

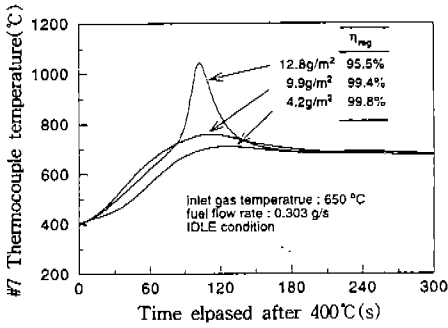
3.6 여과량의 영향

입자상물질의 여과량에 따른 재생 특성을 알아보기 위하여 여과량을 각각 4.2~12.8g/m²까지 변화시켜 보았다. 유입 가스 온도는 650℃로 설정하였고, 버너 연료량은 0.303g/s, 그리고 엔진은 공회전으로 운전되었다.

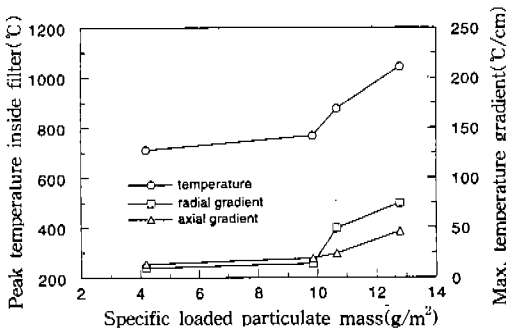
Fig.10에서 알 수 있듯이 초기 여과량이 증가하면, 부가적인 열에너지의 발생으로 인하여 최고 온도는 상승한다. 초기 여과량을 작게 할수록 최고 온도 및 온도 구배는 작게 할 수 있지만, 빈번한 재생으로 인하여 연료를 많이 사용하게 되고, 필터의 내구성도 악화될 수 있다. 또한 최고 온도를 보이는 시점이 비슷한 것으로 보아 여과량은 전체 재생 시간에는 별로 영향을 미치지 않는 것으로 생각할 수 있다.

본 실험에서 사용한 필터인 EX-80의 제작사인 코닝사는 허용 최대 여과량을 약 15g으로 추천하고 있다. 물론 이 값은 어디까지나 권장값일 뿐, 적용엔진이나 재생 시스템의 상태에 따라 달라질 수 있다.

Tuteja 등은 많은 실험을 통하여 단위 여과



(a) The No. 7 thermocouple temperature profile



(b) The maximum temperature gradient

Fig. 10 The regeneration characteristics due to the specific initial particulate loading

면적당 입자상물질의 여과량을 7.7g/m^2 으로 제시하고 있다.¹⁰⁾ 본 실험에서 사용하는 EX-80 세라믹 필터의 여과 면적은 1.360m^2 이므로, 제시된 값을 이용하여 환산하면 본 필터의 적정 여과량은 10.5g 이 된다. 이러한 연구 결과들과 본 논문의 실험 결과를 바탕으로 여과량은 10.0g/m^2 이내로 제한 되어야 한다고 생각된다.

주행중인 차량에서 입자상물질의 여과량을 추정하기는 용이하지가 않다. 주로 엔진 회전 속도와 부하에서의 필터의 배압을 이용하는 방법이 제시되고는 있지만, 과도 상태에서의 신뢰성은 만족스럽지 못하다. 이러한 이유로 우수한 재생 제어 방식은 여과량의 변화에도 어느 정도 대처할 수 있어야 한다.

3.7 안정된 재생을 위한 재생 인자의 설정

서론에서 언급하였듯이 MacDonald 등은 세

라믹 필터의 300,000mile 내구성을 보장하기 위해서는 재생시 필터의 허용 최고 온도는 $900\sim 1,000^\circ\text{C}$ 미만으로, 허용 최고 온도 구배는 $\pm 35^\circ\text{C}/\text{cm}$ 이내로 제한되어야 한다고 제시하고 있다.²⁾ Fig. 7, 8, 10의 결과로부터 MacDonald 등의 온도 및 온도 구배 허용 조건을 만족하기 위해서는 유입 가스 온도는 650°C 이하, 공간 속도는 7s^{-1} 이상, 그리고 입자상물질 여과량은 10.0g/m^2 이내로 설정하여야 함을 알 수 있다. Fig. 9는 유입 가스 온도를 700°C 로 설정한 결과이므로, 산소 농도가 10% 이상에서 최고 온도와 온도 구배가 매우 높게 나타나고 있다. 하지만, 유입 가스 온도를 650°C 로 낮추게 되면 안정된 재생을 할 수 있다는 사실을 다른 결과로부터 유추할 수 있다.

4. 결론

디젤 엔진으로부터 배출되는 입자상물질을 저감하기 위한 디젤 입자상물질 후처리 장치에서, 유입 가스 온도, 공간 속도, 산소 농도, 그리고 입자상물질 여과량과 같은 재생 인자들이 재생에 미치는 영향에 대하여 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유입 가스 온도가 높아질수록 급격한 연소로 인하여 필터의 최고 온도는 상승한다. 본 실험에서 사용한 필터의 경우, 고산소 농도에서의 안정적인 재생과 저산소 농도에서의 효율적인 재생이라는 측면에서 재생 온도를 650°C 정도로 유지하는 것이 타당하였다.
- 2) 공간 속도를 증가시키으로써 필터 재생 온도를 낮출 수 있지만, 버너 연료 사용을 증가시키게 되므로 연료 경제성을 고려하여 선정하여야 한다. 안정된 재생을 위하여 공간 속도는 7s^{-1} 이상으로 설정되어야 한다.
- 3) 산소 농도가 낮은 고부하 영역에서는 저부하 영역에 비하여 연소가 느리게 진행되며, 산소 농도가 전체 재생 시간에 가장 큰 영향을 미친다.

- 4) 안정적인 재생을 위해서는 입자상물질의 여과량은 $10.0\text{g}/\text{m}^2$ 이내로 제한되어야 한다.

참 고 문 헌

1. P. Stobbe, H. G. Petersen, J. W. Høj, and S. C. Sorenson, "SiC as A Substrate for Diesel Particulate Filters", SAE Paper 932495, 1993.
2. J. S. MacDonald and G. M. Simon, "Development of A Particulate Trap System for a Heavy-Duty Diesel Engine", SAE Paper 880006, 1988.
3. E. J. Bissett and F. Shadman, "Thermal Regeneration of Diesel-Particulate Monolithic Filters", *AIChE Journal* Vol. 31, No.5, 1985.
4. E. J. Bissett, "Mathematical Model of the Thermal Regeneration of A Wall-Flow Monolith Diesel Particulate Filter", *Chemical Engineering Science* Vol.39, Nos.7/8, pp.1233~1244, 1984.
5. 김광현, 박정규, "벽-유동 모노리스 디젤 입자상물질 필터 트랩의 재생모델에 의한 수치 시뮬레이션", 한국자동차공학회논문집 제3권 제6호, pp.41~54, 1995.
6. C. P. Garner and J. C. Dent, "A Thermal Regeneration Model for Monolithic and Fibrous Diesel Particulate Traps", SAE Paper 880007, 1988.
7. 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 961978, 1996.
8. S. T. Gulati, D. W. Lambert, M. B. Hoffman, and A. D. Tuteja, "Thermal Durability of a Ceramic Wall-Flow Diesel Filter for Light Duty Vehicles", SAE Paper 920143, 1992.
9. K. N. Pattas, A. M. Stamatelos, K. N. Kougiannos, G. C. Koltsakis, and P. K. Pistikopoulos, "Trap Protection by Limiting A/F Ratio during Regeneration", SAE Paper 950366, 1995.
10. 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.