

〈논 문〉 SAE NO. 97370001

배기 가스 유량 제어를 이용한 버너방식 디젤 입자상물질 제거 장치의 재생

Regeneration of Burner Type Diesel Particulate Trap System Through Active Exhaust Gas Feeding

김 재 업*, 박 동 선*, 이 만 복*, 김 응 서**
J. U. Kim, D. S. Park, M. B. See, E. S. Kim

ABSTRACT

The key point that guarantees the durability of the ceramic monolith filter is to lower peak temperature and temperature gradient inside filter during regeneration. The control of the exhaust gas flow rate into the filter, by the bypass technique of the exhaust gas, enables the gas temperature in filter to be constant for regeneration. A couple of methods, which are the ON/OFF and PID control of the bypass valve, were used for feedback control of the gas temperature. These techniques showed that the ceramic filter was regenerated perfectly under the peak temperature and peak temperature gradient limitations for durability.

주요기술용어 : Particulate Matter Trap System(입자상물질 제거장치), ON/OFF control(온/오프 제어), Closing Clearance Angle(닫힘 여유각), PID Control(비례·적분·미분제어), Temperature Characteristics(온도 특성)

1. 서 론

디젤기관에서 배출되는 입자상물질은 시각적으로 불쾌감을 줄 뿐만아니라 인체에 치명적인 유해 물질이며, 최근에는 차량의 증가와 교통 혼잡으로 인하여 그 배출량이 크게 증가하고 있다.

선진국에서는 이미 디젤 차량에서 배출되는 입

자상물질의 배출 허용 기준을 설정하여 시행하고 있으며, 매년 그 규제값을 강화하고 있다.^{1,2)} 국내에서도 입자상물질에 대한 규제가 강화되고 있으며, 이에 대비하여 많은 연구 기관에서 집중적인 연구가 이루어지고 있다.

입자상물질의 후처리에는 다양한 필터 재료와 재생 방식이 연구되고 있다.^{3,4)} 재생 방식으로는 버너 또는 전기 히터를 사용하여 열량을 공급한 후 입자상물질을 재생시키는 능동재생과, 연료에 첨가제를 넣거나 필터에 산화 촉매를 피복하여

* 정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 서울대학교 기계공학과

입자상물질의 재생 온도를 강화시켜 필터를 통과 하는 입자상물질을 자연적으로 배기 가스의 온도 만으로 연소되도록 하는 수동 재생이 있다. 또한 자연 재생 효율을 높이는 방식도 연구되고 있다. 이러한 재생방식과 더불어 필터 제조사를 중심으로 재질을 개선 하려는 노력도 기울어지고 있다.⁵⁾

본 연구에서는 엔진 실험을 통하여 자체 제작 한 버너 방식 입자상물질 제거 장치^{6,7)}의 안정된 재생제어 방법을 도출하였으며, 엔진의 운전 상태는 산소 농도가 높아 입자상물질의 급격한 연 소가 예상⁸⁾되는 공회전 상태로 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험에 사용한 필터는 세라믹 모노리스(ceramic monolith) 필터로, 그 제원을 Table 1에 나타 내었다. 본 필터에 대해 제조사인 코닝에서는 권 장 허용 최대 여과량을 15g으로 추천하고 있으 며, 적용 엔진이나 재생 시스템의 상태에 따라 달라질 수 있다고 언급하고 있다. Tuteja 등⁹⁾은 많은 실험을 통하여 단위 여과면적당 입자상물질 의 여과량을 7.7/m²으로 제시하고 있다. 이를 여 과 면적이 1.664m²인 EX-80세라믹 필터의 경 우로 환산해 보면, 적정 여과량은 12.8g이 된다. 이러한 기존의 연구를 토대로 본 연구에서는 적정 여과량을 13g으로 정하고 실험을 진행하였다.

세라믹 필터의 녹는점은 1400°C로 알려져 있 다. 하지만 필터의 내구성을 확보하기 위해서는 이 온도보다 상당히 낮은 영역에서 재생이 이루

어져야 한다. Tuteja 등⁹⁾은 자신들의 연구 결과 를 토대로 300,000mile 내구성을 만족시킬 수 있는 필터 내부의 허용 온도값으로 최고 온도는 900~1000°C, 그리고 축방향 및 반경 방향 최고 온도는 $\pm 35^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 이내로 제한되어야 함을 주장 하였다.

Fig.1은 본 연구에서 사용한 실험 장치의 개략 도이다. 제어용 컴퓨터는 인터페이스 유닛을 통 하여 연료 펌프, 점화 트랜스, 바이패스 밸브 각 도 신호를 입력으로 제공받는다. 가스 온도는 별 도의 증폭 회로를 통하여 증폭된 다음, 미리 입 력된 온도 변환식에 의해 온도 데이터로 변환되 게 된다. 입력 신호는 바이패스 밸브의 개도를 제어하여 연소 가스 온도를 피드백 제어하는 데 에 사용된다.

측정용 컴퓨터는 A/D 보드를 이용하여 필터 전면과 필터 내에 설치된 열전대로부터 측정점의

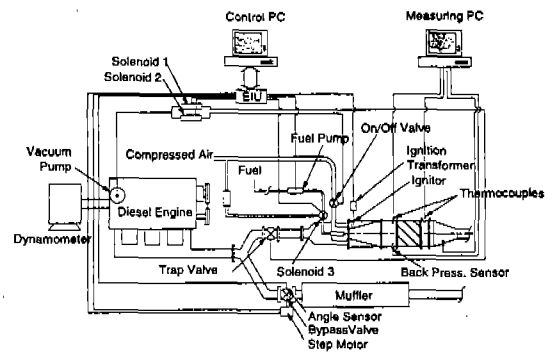


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus for regeneration control

Table 1 Specifications of the ceramic monolith filter

Manufacturer	Corning Inc.(USA)
Model	EX-80
Size	$\phi 144\text{mm} \times 152\text{mm} (\phi 5.66 \times 6\text{in})$
Cell density	100/in ²
Wall thickness	0.44mm(0.017in)
Filtration surface	1.664m ²
Filtration efficiency	90%

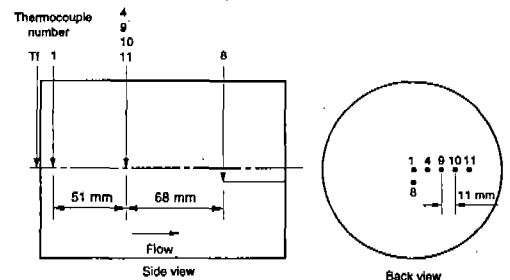


Fig.2 Temperature measuring points inside filter

온도를 측정하게 되고, 필터 전후의 차압, 즉 배압도 측정한다. 온도 측정 위치를 Fig.2에 나타낸 것과 같이 측정방향과 반경 방향의 온도 분포와 온도 구배를 알 수 있도록 선정하였다.

2.2 실험 방법

배기 밸브를 통과한 배기 가스는 트랩 전면에 설치되어 있는 트랩 밸브와 머플러 앞에 있는 바이패스 밸브의 개폐에 의해 유량이 결정된다. 트랩 밸브는 전공으로 구동되는 ON/OFF 밸브이고, 바이패스 밸브는 스텝 모터로 구동되는 밸브이다. 재생시에는 트랩 밸브를 지나가는 배기 가스는 버너에서 공급되는 연소 가스와 섞여 필터로 유입되는데, 트랩으로 유입되는 배기 가스의 유량을 조절하여 필터로 유입되는 가스의 온도를 일정하게 유지한다. 즉, 트랩 밸브는 전개시켜 놓은 상태에서, 필터 전면의 연소 가스 온도가 설정 온도보다 높아지게 되면 바이패스 밸브를 닫아 필터로 유입되는 배기 가스량을 증가시키고, 설정 온도보다 떨어지게 되면 바이패스 밸브를 열어 필터로 유입되는 배기 가스량을 감소시킨다. 바이패스 밸브의 개도를 제어하는 방법으로 본 실험에서는 ON/OFF 제어 방법과 PID (Proportional Integral Derivative) 제어 방식을 이용하였다.

ON/OFF 제어 방식에서는 설정 연소 가스 온도를 700°C, 725°C, 750°C의 세가지로 정하였고, 또한 바이패스 밸브의 닫힘 여유각, θ_c 를 변화시키며 실험을 수행하였다. 바이패스 밸브를 열 때는 완전히 열고, 닫을 때는 완전히 닫는 경우, 5°까지만 닫는 경우, 그리고 10°까지 닫는 경우로 나누었고, 이를 각각 닫힘 여유각 0°, 5°, 10°로 명하였다. Fig.3에 닫힘 여유각의 차이를 그림으로 나타냈다. 닫힘 여유각에 따라 필터로 공급되는 배기 가스의 공급 패턴이 변화하게 되고, 다양한 재생 패턴을 보이게 된다.

설정 연소 가스의 온도가 달라지게 되면 필터로 공급되는 배기 가스량이 달라지게 된다. 700°C로 가스의 온도를 유지하기 위해서는 750°C로 유지하는 경우보다 50°C만큼 더 냉각을 시키기 위해 배기 가스를 상대적으로 더 많이 공급해야 된다.

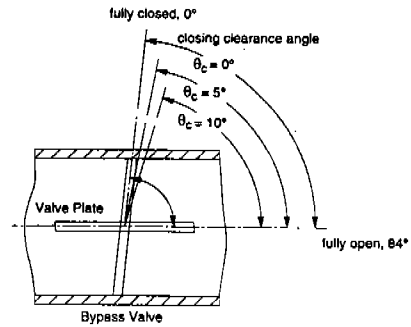


Fig.3 Bypass valve closing clearance angle for ON/OFF control

결국 설정 온도를 낮게 할수록 필터를 지나게 되는 배기 가스 유량은 증가하게 된다.

바이패스 밸브의 닫힘 여유각이 달라지게 되면 필터로 공급되는 배기 가스의 공급 패턴이 달라지게 된다. Fig.4(a)는 닫힘 여유각이 0°인 경우와 10°인 경우에 필터로 유입되는 배기 가스의 유량을 도식적으로 그려본 것이고, Fig.4(b)는 실제로 가스 온도가 제어되는 것을 보여주고 있다. 닫힘 여유각이 0°일 경우에는 10°인 경우에 비해 필터로 공급되는 배기 가스량이 많기 때문에 설정 온도를 초과한 연소 가스의 온도가 더 빨리 하강하여 밸브가 닫혀 있는 기간이 더 짧게 된다. 설정 온도 이하로 연소 가스 온도가 내려가게 되면 바이패스 밸브가 열리게 되는데, 바이패스 밸브가 열리고 닫히는 주기가 Fig.4(b)에서와 같이 달라지게 된다.

Fig.5는 재생 제어 중 필터 전면에 도달하는 가스 온도 T_f 의 변화와 τ_{max} 의 정의를 그림으로 나타낸 것이다. 일단 점화가 이루어지면 바이패스 밸브를 완전히 닫아 가스의 온도를 400°C 정도로 유지하게 된다. 이 구간을 '화염 안정화 단계'라 명하였다. 가스의 온도를 400°C로 유지하는 이유는 화염을 안정적으로 유지하기 위한 시간을 두는 동시에, 급격하게 필터의 온도가 상승하는 것을 방지하고, 또한 급격한 온도 상승으로 인하여 필터 내부의 온도 구배가 상승하는 것을 막기 위해서이다.

화염 안정화 단계를 지나면, 설정한 온도로 연

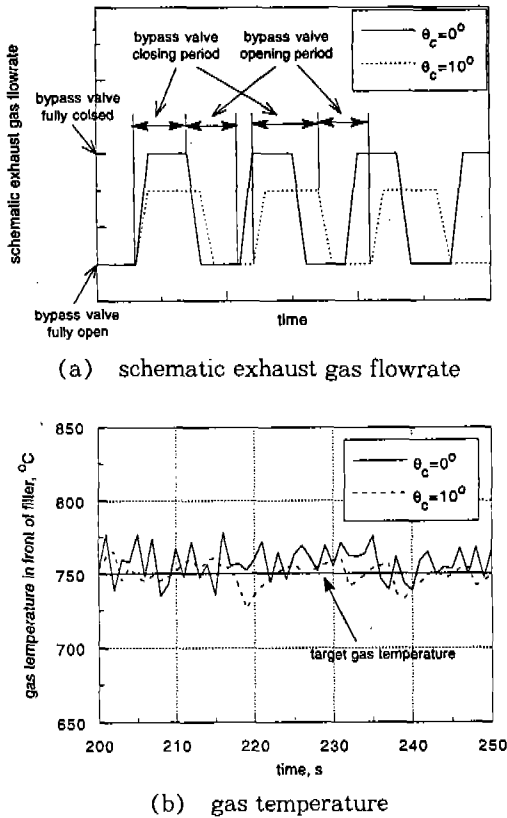


Fig.4 Schematic exhaust gas flowrate and gas temperature in front of the filter with the ON/OFF control of the bypass valve

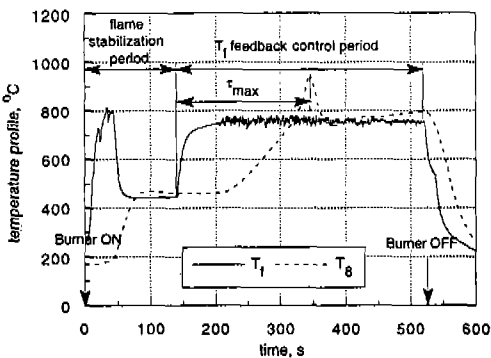


Fig.5 Gas temperature control scheme for regeneration and definition of τ_{max}

소 가스의 온도를 피드백 컨트롤 하는 ‘ T_f 피드백 컨트롤 단계’에 들어서게 되며, 입자상물질의 재생은 이 구간에서 이루어지게 된다. 온도의 피드백 컨트롤을 시작하는 시점에서 필터의 후부인 T_g 이 최고 온도에 도달할 때까지의 시간을 τ_{max} 라 정의하였으며, 이는 실제 재생 시간은 아니지만 재생 시간을 비교하는 상대적인 지표로서 의미가 있다.

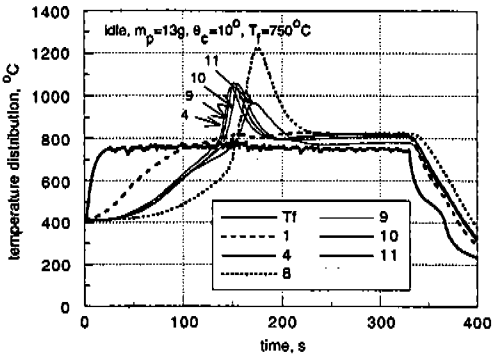
PID 제어 방식은 바이패스 밸브 개도의 상한과 하한만을 왕복하는 ON/OFF 제어와 달리, 연속적으로 바이패스 밸브의 개도를 조절하는 방식이다. 이 방법은 오차에 대한 비례 요소 뿐만 아니라 정상 상태 오차를 없애주는 적분 요소, 그리고 시스템의 응답 속도를 개선하는 미분 요소를 포함하고 있다. 편차는 실제 연소 가스 온도와 설정 가스 온도의 차이이고, 조작량은 바이패스 밸브의 개도를 조절하는 스텝 모터의 각도가 된다. 설정 가스 온도는 800$^\circ\text{C}$와 750$^\circ\text{C}$로 하였다.

모든 재생 실험은 엔진을 공회전 상태로 운전 하면서 입자상물질의 여과량 13g에 대해서 수행 하였다.

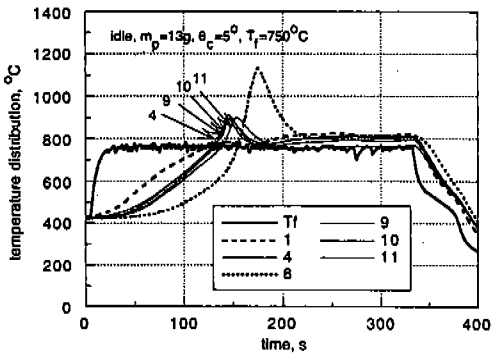
3. 결과 및 검토

3.1 바이패스 밸브의 ON/OFF 제어

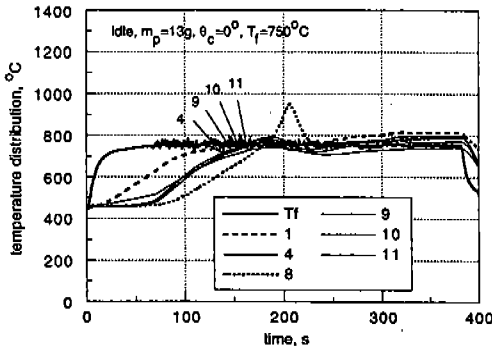
Fig.6은 설정 가스 온도를 750$^\circ\text{C}$, 바이패스 밸브의 닫힘 여유각을 각각 10°, 5°, 0°로 하여 ON/OFF 제어하며 입자상물질을 재생했을 때, 필터에 도달하는 가스의 온도와 필터 내부의 온도 분포를 시간에 따라 나타낸 것이다. 필터의 중심축에 설치된 1, 4, 8번 열전대의 온도를 비교해 보면, 전면에 설치된 1번에서 먼저 연소가 일어나고 중심 부분에 있는 4번과 끝부분에 위치한 8번이 차례로 연소되어 입자상물질의 연소가 필터의 전면에서 후면으로 진행되고 있음을 알 수 있다. 각 위치에서 최고 온도는 후면으로 갈수록 높아지는데 이는 필터 앞쪽에서 연소로 인해 발생한 열량이 뒤쪽으로 전달되기 때문이다. 필터 전면으로부터 같은 거리에서 반경 방향으로 위치한 4, 9, 10, 11번 열전대의 온도는 중심에서 반경 방향으로 순차적으로 상승하고 있는



(a) $\theta_c = 10^\circ$



(b) $\theta_c = 5^\circ$



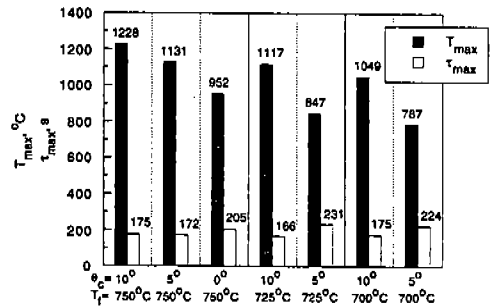
(c) $\theta_c = 0^\circ$

Fig.6 Temperature distribution inside filter with ON/OFF control of the bypass valve (idle, $m_p = 13g$, $T_r = 750^\circ C$)

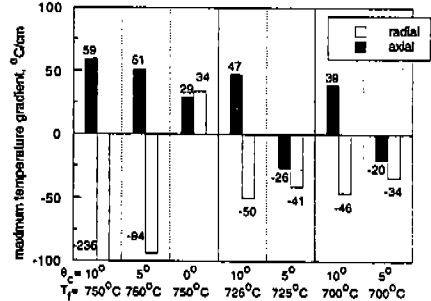
데, 닫힘 여유각이 작아질수록 온도 곡선사이의 간격이 좁아지는데 이는 반경방향으로의 온도 구배가 작아지는 결과를 가져온다. 이상으로부터 입자상물질의 연소는 전면에서 후면으로, 중심에서 바깥 방향으로 이루어지고 있음을 유추할 수

있다.

또한, (a), (b), (c)에서 닫힘 여유각이 작아짐에 따라, 최고 온도가 각각 $1228^\circ C$, $1131^\circ C$, $952^\circ C$ 로 낮아지고 있다. 여기서 (a)와 (b)의 결과는 필터의 내구성을 보장하기에는 너무 높은 온도라고 판단된다. 닫힘 여유각이 작으면 바이패스 밸브의 개폐 주기가 짧아지고, 닫힘 여유각이 큰 경우에 비해 증가된 배기 가스가 공급되는 시간이 Fig.4(a)에서 보인 것과 같이 짧아지게 된다. 반대로 닫힘 여유각이 클 경우에는 트랩으로 배기 가스가 공급되는 시간이 길어지게 되고, 상대적으로 입자상물질의 연소는 연속적으로 급격하게 이루어지게 된다. 이로 인해 최고 온도는 상승하게 되고, 반면에 최고 온도가 나타나는 시간인 τ_{max} 는 짧아지게 된다. 닫힘 여유각이 10° 에서 5° 로 변할 때 보다는 5° 에서 0° 로 변할 때, 그 결과가 더욱 명확하게 나타나고 있다. 결국 필터 내부의 최고 온도를 낮추기 위해서는 입자상물질의 연소에 필요한 배기 가스의 공급 시



(a) maximum temperature and τ_{max}



(b) maximum temperature gradients

Fig.7 Temperature characteristics with various ON/OFF control (idle, $m_p = 13g$)

간을 제어하여 완전한 연소가 이루어지도록 해야 함을 알 수 있다

Fig.7은 Fig.6의 결과와 가스 온도를 725°C, 700°C로 하고 닫힘 여유각을 10°, 5°로 변화시켰을 때의 결과를 나타낸 것이다. 먼저 Fig.7(a)를 보면, 앞에서의 결과와 마찬가지로 닫힘 여유각이 작아짐에 따라 최고 온도는 낮아지고 재생 시간의 지표인 τ_{max} 는 길어진다. 또한 설정 가스 온도를 낮게 하면 역시 최고 온도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히, 설정 가스 온도를 700°C, 닫힘 여유각을 5°로 했을 경우에, 재생 시간은 다소 길어졌지만 재생 최고 온도가 800°C를 넘지 않고 안정적으로 재생이 이루어졌다. Fig.7에 나타낸 모든 실험 조건에서는 재생이 100% 이루어졌다.

설정 가스 온도를 725°C, 700°C로 했을 때 닫힘 여유각을 0°로 설정하면, 재생 최고 온도는 닫힘 여유각이 5°, 10°인 경우에 비해 더 낮아지지만, 필터 전면에서는 재생이 완벽하게 이루어지지 않았다. 이는 본 버너 방식의 제어 방식에서 그 원인을 찾을 수 있다. 본 버너 방식이 풀-플로우(full-flow)버너 방식과 다른 점은 연료량을 일정하게 공급한다는 것이다. 이 때문에 트랩으로 유입되는 배기 가스량이 증가하면 필터로 유입되는 혼합 가스의 온도는 감소하고, 배기 가스량이 감소하면 혼합 가스의 온도는 상승하게 된다. 트랩으로 유입되는 배기 가스량은 바이패스 밸브의 개도에 의해 제어된다. 설정 가스 온도가 700°C라면, 시간적인 평균 가스 온도는 700°C이지만 실제로 필터로 공급되는 가스의 온도는 유입되는 배기 가스량에 따라 이보다 높거나 낮게 된다. 본 실험에서는 응답성이 느린 열전대를 사용하였기 때문에 결과 그림에서 그 양상을 제대로 나타낼 수가 없었지만, 유입 배기 가스량이 증가하면 혼합 가스의 온도가 순간적으로 하강하게 되고 이 저온의 혼합 가스의 직접적인 접촉으로 인해 가스 온도의 하강폭이 전면에서와 같이 크지 않고 둔화되어 재생이 지속된다. 전면의 냉각 효과는 유입 배기 가스량이 상대적으로 많을 것으로 예상되는 닫힘 여유각 0°의 경우가 크게 나타나, 재생이 완료된 후에도 필터

전면에 연소된 입자상물질을 발견할 수 있었다.

Fig.7(b)에는 각 실험 조건에서 재생 도중 나타난 축방향과 반경 방향으로 최고 온도 구배를 나타내었다. 최고 온도와 마찬가지로 설정 가스 온도와 닫힘 여유각을 작게 할수록 축방향과 반경방향으로의 온도 구배는 작아지는 것을 알 수 있다. 본 실험에서 사용한 필터의 경우 온도 구배에 취약한 특성을 갖고 있으므로, 온도 구배를 낮추는 것을 무엇보다도 필터의 내구성을 보장하는데 중요한 제어 인자이다. 여기에서도 설정 가스 온도를 700°C, 닫힘 여유각을 5°로 했을 경우에, 온도 구배가 $\pm 35^\circ\text{C}$ 를 넘지 않고 안정적으로 이루어졌다.

3.2 바이패스 밸브의 PID 제어

Fig.8은 설정 가스 온도를 750°C로 하여 바이패스 밸브를 PID 제어 방식으로 구동했을 경우의 결과이다. 이 결과를 설정 가스 온도가 동일하고, 닫힘 여유각이 0°인 Fig.6(c)의 ON/OFF 제어 결과와 비교하면, 유사한 온도 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. PID제어의 조작량(바이패스 밸브의 이동 각도)은 제어 상수값을 얼마로 하는가에 따라 크게 달라지게 된다. 두 결과의 최고 온도 패턴이 유사한 이유는 본 실험에서 사용된 제어 상수값에 대해서, 바이패스 밸브가 완전히 닫힌 상태에서 완전히 열린 상태까지 빠르게 움직임으로써 마치 닫힘 여유각이 0°인

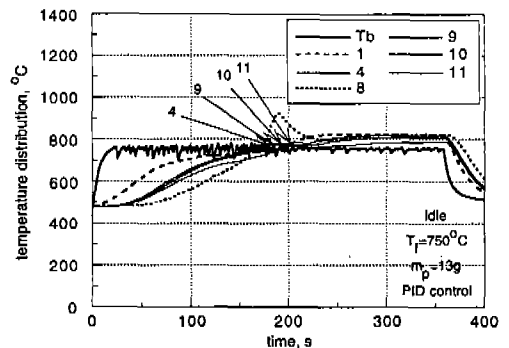


Fig.8 Temperature distribution inside filter with PID control of the bypass valve (idle, $m_p=13\text{g}$, $T_1=750^\circ\text{C}$)

ON/OFF 제어의 바이패스 밸브 개폐 방식과 유사하게 작동하였기 때문이다. 비례 계수, 적분 계수, 미분 계수의 값에 따라 바이패스 밸브의 각도 변위의 조절이 용이하기 때문에, PID 제어는 넓은 의미에서 ON/OFF 제어를 포함하고 있다고 볼 수 있다.

제어 패턴의 다양성이라는 PID 제어의 특성은 차량의 운전 상황에 대응하여 바이패스 밸브의 개도를 최적의 상태로 제어할 수 있다는 가능성을 준다. PID 제어 방식은 실험을 통한 최적 제어 상수값 결정이라는 문제가 남아있기는 하지만, 밸브 개도를 연속적으로 제어 할 수 있기 때문에 고회전 고부하로 운전되는 차량에서의 재생시, 급격하게 작동하는 ON/OFF 제어에 비하여 엔진의 작동이 미치는 영향이 적을 것으로 생각된다.

4. 결 론

자체 제작한 입자상물질 제거 장치를 이용하여 바이패스 밸브의 ON/OFF 제어와 PID 제어를 통하여 재생 실험을 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 필터내의 연소는 전면에서 후면으로, 중심에서 바깥방향으로 진행되며, 최고 온도점은 필터 후면에 나타난다.
- (2) 바이패스 밸브의 ON/OFF 제어서 설정 가스 온도와 담힘 여유각을 작게 할수록 재생 최고 온도 및 축방향과 반경 방향 온도 구배는 작아지며, 재생시간은 다소 길어진다.
- (3) 설정 연소 가스 온도를 700°C, 담힘 여유각을 5°로 했을 경우에, 최고 온도는 800°C 이내 그리고 축방향 및 반경 방향 온도 구배는 $\pm 35^\circ\text{C}$ 이내로 유지되며 안정된 재생이 이루어졌다.
- (4) 바이패스 밸브의 PID 제어는 넓은 의미에서 ON/OFF 제어를 포함하고 있다. 또한 밸브 개도를 단계적으로 제어할 수 있기 때문에, 급격하게 작동하는 ON/OFF 제어에 비하여 고회전·고부하로 운전되는

차량에서의 재생시 엔진의 작동에 미치는 영향이 적을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Michael Walsh, "Global Trends in Diesel Particulate Control-A 1995 Update", SAE Paper 950149, 1995.
2. John H. Johnson, Susan T. Bagley, Linda D. Gratz, and David G. Leddy, "A Review of Diesel Particulate Control Technology and Emissions Effect", SAE Paper 940233, 1994.
3. 김상환, "디젤 자동차의 배기 가스 저감 기술", 한국자동차공학회지 Vol. 15 No. 3, pp. 19~31, 1993.
4. 박정규, 정인승, "디젤 입자상 물질 필터 트랩 시스템의 기술 동향", 한국자동차공학회지 Vol. 17 No. 3, pp. 1~10, 1995.
5. A. Itoh, K. Shimato, T. Komori, H. Okazoe, T. Yamada, K. Niimura, and Y. Wata-nabe, "Study of SiC Application to Diesel Particulate Filter(Part 1)", SAE Paper 930360, 1993.
6. 박동선, 김재업, 이만복, 김용서, "디젤 기관으로부터 배출되는 입자상물질 제거장치의 개발에 관한 기초 연구-버너방식", 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp. 347~352, 1995.
7. 김재업, 박동선, 이만복, 김용서, "디젤 입자상물질 제거 장치의 재생 제어 방식", 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp. 71~76, 1995.
8. C. P. Garner and J. C. Dent, "A Thermal Regeneration Model for Monolithic and Fibrous Diesel Particulate Traps", SAE Paper 880007, 1988.
9. 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 920142, 1992.
10. J. Scott MacDonald and Gerald M. Simon, “Development of a Particulate Trap System for a Heavy-Duty Diesel Engine”, SAE Paper 880006, 1988.
11. Hans Houben, Rolf Miebach, “The Optimized Deutz Service Diesel Particulate Filter System DPFS II”, SAE Paper 942264, 1994.