

<논 문> SAE NO. 96370121

버너방식 DPF 시스템의 재생과정 중 발생하는 내부 온도분포 및 온도구배에 관한 고찰

Considerations on the Temperature Distributions and Gradients in the Filter During Regeneration in Burner Type Diesel Particulate Trap System

박 동 선, 김 재 업*, 김 용 서**
D. S. Park, J. U. Kim, E. S. Kim

ABSTRACT

In order to eliminate TPM(Total Particulate Matter) from a diesel engine, we designed and developed a particulate trap system using a burner, which was named as AEFR(Active Exhaust Feeding Regeneration) system. We have considered the temperature distributions and gradients in the filter being regenerated according to regeneration control schemes I, II and III. Scheme III has shown the most desirable peak temperature and temperature gradients in AEFER system. Finally, it was concluded that much lower peak temperature and temperature gradients in the filter could be obtained than that of other advanced research results by our AEFR system.

주요기술용어 : TPM(입자상물질), AEFER system(능동 배기가스 유량제어 재생시스템), temperature distribution(온도분포), temperature gradient(온도구배), particulate trap system(입자상물질 제거장치)

1. 서 론

디젤엔진으로부터 배출되는 입자상물질(TPM; Total Particulate matter)의 저감을 위한 방법은 국내 및 국외에서 다양하게 진행되어 왔으며 현재도 매우 활발하게 진행되고 있다. 연구의 방향은, 입자상물질을 여과한 후 필터를 재생할 때 자연적으로 필터를 재생시키고자 하는 방법(nat-

ural regeneration)과 강제적으로 재생시키고자 하는 방법(forced regeneration)으로 나누어 볼 수 있다.^{1)~7)}

연료에 촉매역할이 가능한 첨가제를 넣어 자연 재생을 시도하는 방법은 최근 10여년간 매우 활발하게 국내 및 국외에서 연구되었으나, 첨가제가 연소되고 대기로 배출되었을 때 환경과 인체에 미치는 영향에 대해 정확한 평가가 내려지고 있지 않으며, 이에 대해서 외국에서는 매우 많은 논란이 지속되고 있으며 사용이 유보되고 있다.⁸⁾

~10) 필터에 촉매를 피복하여 입자상물질을 산화

* 정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과
** 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

시키고자 하는 시도도 매우 활발하게 연구되고 있으나, 모든 차량 운전조건에서 고체상태의 입자상물질을 산화시키는 효율이 좋은 촉매는 등장하고 있지 않으며 산화촉매에 의해 배기가스 중의 아황산가스(SO₂)가 황산염(sulfate)으로 변환되는 문제가 발생한다.^{7),11)}

강제재생방법은 위의 자연재생방법이 가지고 있는 부정적인 측면이 없는 대신 장치가 상대적으로 복잡해지고 장치 및 설치 비용이 부담이 된다. 뿐만 아니라 이 방법 또한 완전히 상용화될 만큼 완벽에 가까운 제품은 개발되어 있지 않다. 강제재생방법은 원하는 시점에 비교적 정확히 필터의 재생을 시도할 수 있다는 장점이 있으며 자연재생에 비해 재생의 성공여부가 비교적 긍정적인 측면을 지니고 있다.^{9),7)}

본 연구에서는 강제재생 방법 중 버너를 이용한 재생방법을 연구하였다. 특히 재생중에 발생하는 필터 내부의 온도분포와 온도구배에 관한 심도깊은 실험과 해석을 수행하였다. 재생중에 필터내부는 공급되는 버너의 연소가스보다 훨씬 더 높은 온도분포를 가진다. 이는 필터에 여과되어 축적된 입자상물질이 연소되어 발생시키는 열발산에 의한 것이며 이로 인한 온도구배가 필터의 균열에 큰 영향을 미친다는 결과는 일반적으로 받아들여지고 있는 결과이다.⁶⁾

재생중에 발생하는 필터 내부의 최고온도와 온도구배는 필터의 수명에 매우 큰 영향을 미친다. 세라믹 코디어라이트 계열의 필터는 내열온도가 1200°C 정도이며 제작사인 미국의 코닝(Corning)사는 재생중에 발생하는 최고온도가 1000°C가 넘지 않기를 권장하고 있다. 그러나 실제로 실험적으로는, 가능하면 최고온도가 900°C 이하로 유지되어야 수명이 보장됨은 기존의 연구로부터 알 수가 있다.⁶⁾

GM(General Motors)은 100,000 마일의 필터 수명을 보장하기 위한 온도구배의 권장한계로서 $\pm 35^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 를 주장한 바 있다. 이는 재생중에 발생하는 필터내부의 온도구배가 매우 중요함을 의미한다. 그러나 GM은 연구결과로서 제시한 자료에서, 축방향으로의 온도구배는 $\pm 35^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 를 만족하고 있지만 반경방향으로의 온도구배는 \pm

$35^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 를 전혀 만족하지 못하였으며 이에 대한 정확한 원인과 해결책을 제시하지 못하였다.⁶⁾

본 연구에서는 버너방식 디젤입자상물질 제거 장치의 수차례에 걸친 자체 설계와 제작을 통하여, 능동 배기가스 유량제어 재생시스템(AEFR system; Active Exhaust Feeding Regeneration System)을 현재 제작하여 연구중에 있다. 유사한 시스템인 GM의 Exhaust Fed Orifice Metered System과는 재생과정 중 필터 내부의 온도분포를 제어하는 과정이 상이하다.^{6),12)-14)}

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용중인 AEFER 시스템의 구조와 작동원리에 대해서는 참고문헌^{13),14)}에 자세히 설명되어 있다. 개략도만 Fig.1에 다시 제시하였다. 실험장치와 방법은 참고문헌¹⁴⁾의 경우와 동일하다.

필터 내부 온도분포 측정-Fig.2는 필터 내부의 온도측정을 위하여 열전대가 삽입된 위치를 보여주고 있다.

AEFR 시스템의 온도제어 시스템의 제어방법에 대해서 간단히 설명하면 다음과 같다. Fig.1에서, 바이패스 컨트롤 밸브(O)는 재생중에 필터내부에 발생하는 온도분포를 제어하기 위하여 작동한다. 여과과정 중에는 이 밸브는 완전히 차단되어 있다. 재생이 시작되면 바이패스 컨트롤 밸브(O)는 필터내부의 온도분포를 제어하기 위하여 동작한다. 필터내부의 온도분포를 제어하기 위하여 필터 전면에 설치된 열전대의 온도값과 필터내부에 위치한 열전대의 온도값을 참고한다. 그러나 실차에 장착하는 시스템에서는 필터내부에는 열전대가 장치되지 않기 때문에, 최종적으로는 필터내부의 온도제어를 위하여 필터 전면에 장치된 열전대로부터의 값만이 이용된다. 실차에 AEFER 시스템이 장착되기 위해서는 적용 엔진과 주행모드에 대한 충분한 실험을 통하여 필터 전면의 온도값으로부터 필터내부의 온도를 추정할 수 있는 자료를 축적하여야 한다. 이 자료를 바탕으로 실차에서는 정해진 과정을 그대로 수행하는 개방 시스템 제어(open system control)를

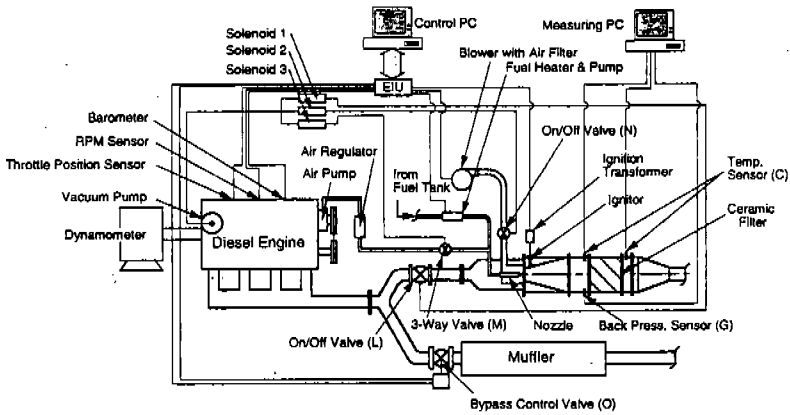


Fig.1 Schematic diagram of Active Exhaust Feeding Regeneration system

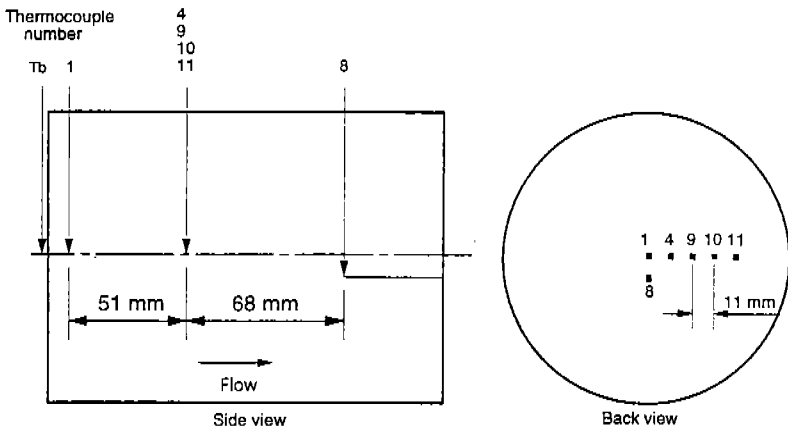


Fig.2 Temperature measuring positions

수행한다.

필터내부의 온도제어를 위한 바이패스 컨트롤 밸브(O)의 작동 과정에 대해서는, 본 논문에서는 크게 세가지 대표적인 제어과정, 과정 1, 2 및 3(scheme I, II and III)으로 분류하여 해석하였다. 과정 1, 2, 3에 따른 T_b 의 온도변화는 Fig.3에 나타나 있다. T_b 는 필터 전면의 중앙부에 도달하는 버너 연소가스의 온도이다.

여과과정 중에 완전히 닫혀있는 바이패스 컨트롤 밸브(O)는 재생중에는 열리게 되며, 이 때 밸브의 개도를 제어하여 소음기로 통과하는 엔진 배기가스의 바이패스 유량을 제어하면 필터 전면에 도달하는 버너 연소가스의 온도를 제어할 수

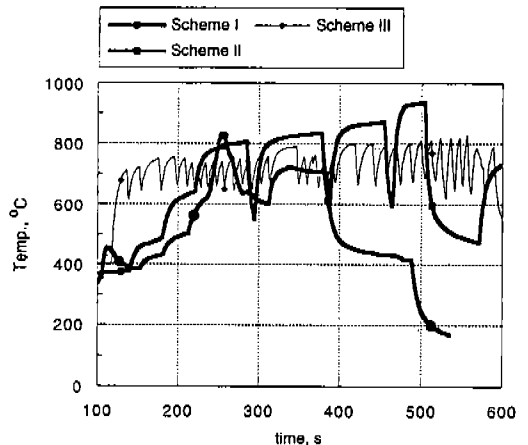


Fig.3 Temperature profiles in front of the filter according to several schemes

있다. 버너가 작동중에 엔진 배기가스가 머물러 바이패스되지 않고 트랩시스템으로 유입되면, 입자상물질의 재생온도인 550~650°C에 도달하게 되는데 이는 낮은 온도의 엔진 배기가스가 상대적으로 높은 버너 연소가스와 혼합하여 전체적으로 가스의 온도를 냉각시키기 때문이다. 따라서 버너 연소가스를 냉각시키는 엔진 배기가스 유량을 제어함으로써 필터 전면에 도달하는 연소가스의 온도를 제어할 수 있다.

과정 1에서는 바이패스 유량을 단계적으로 증가시켜 T_b 의 온도를 점차적으로 상승시킨 것이다. 밸브의 개도를 약 90°까지 증가시켜 필터 전면에 도달하는 연소가스를 약 830°C까지 상승시킨 후 온도제어 과정에 들어갔다.

과정 2는 과정 1과 같이 바이패스시키는 유량을 연속적으로 계속 상승시킨 것이 아니라, 4회에 걸친 바이패스 유량의 급격한 감소기간을 둔 제어과정이다.

과정 3은 과정 1, 2보다 더욱 빈번히 바이패스량의 증감을 반복한 제어과정이다.

입자상물질의 여과 및 재생 - 각 과정에 따른 재생에 들어가기 전에 엔진 회전수 1,000rpm, 토크 220Nm의 부하 상태에서 필터에 입자상물질을 13g 여과하였다. 필터와 필터에 여과된 입자상물질의 중량을 측정함에 있어서 필터를 감싸고 있는 3M Interam mat의 에로전의 의한 중량감소 효과를 제거하기 위하여, 필터는 캐닝 후 실험에 사용하기 전에 800~900°C 정도의 고온 환경에 몇시간 노출시켜 더 이상 중량의 변화가 없음을 확인하고 사용하였으므로 매트와 에로전에 의한 오차는 매우 적을 것으로 판단된다.

필터내부에 발생하는 온도분포와 온도구배를 고찰하기 위하여 재생을 수행하였으며 재생과정 동안 엔진은 무부하, 회전수 860rpm이 유지되었다. 본 연구에서는 자체 제작한 AEFR 시스템을 이용하여 재생과정을 수행했을 때 기본적인 시스템의 기능이 설계의도와 부합하여 정상적으로 실행되는 것을 판단하고 이 때 발생하는 필터 내부의 온도분포와 온도구배의 해석에 관심이 있으며, 따라서 현상의 측정과 해석이 명확한 무부하, 저회전수 영역에서의 현상을 이용하여 해석

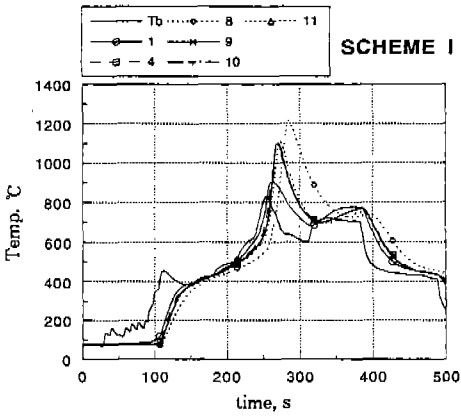
을 수행하였다. 무부하, 저회전수 영역에서는 엔진의 작동 공연비가 크고 엔진 배기가스에 포함된 산소농도가 충분하므로, 엔진 배기가스를 이용한 필터 내부의 온도제어의 실현여부를 명확하게 파악할 수 있다.

3. 결과 및 검토

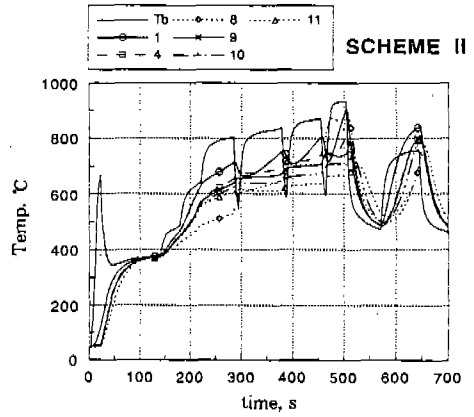
결과의 검토에 앞서, 본 연구에서는 축방향 온도구배는 필터의 내부에서 51mm와 68mm 떨어진 지점에서 온도를 측정하여 구한 값이므로 국소적인 온도구배라고 보기가 매우 어려우며 오히려 평균 온도구배라고 봄이 타당할 것이다. 국소적인 온도구배는 평균온도구배보다 커질 가능성이 있으나 단언할 수는 없다.

Fig.4(a)는 과정 1(scheme I)에 따른 필터 전면(T_b)과 내부의 온도변화이다. T_b 를 830°C까지 가열하였다. 이에 따라 필터 내부에 위치한 1번 열전대의 온도값도 동일한 패턴으로 지속적으로 상승하고 있다. 필터 내부에 축적된 입자상물질의 연소에 의하여 각 위치에서의 열전대에 전해진 가스의 온도는 T_b 보다 훨씬 더 높은 온도까지 상승하였음을 보여주며, 특히 축방향으로 맨 마지막에 위치한 열전대의 온도는 1200°C까지 상승하였다. 이러한 내부 온도상승에 의하여 필터의 내구성은 지켜질 수 없다. 필터에 축적된 입자상물질의 연소는 1번 열전대의 온도가 600°C 이상에 도달하는 지점부터 연소가 시작된 것으로 판단된다. 축방향과 반경방향 온도구배는 Fig.4(b)와 Fig.4(c)에 나타나 있다. 온도구배 역시 GM이 주장한 $\pm 35^\circ\text{C}$ 의 값을 초과하고 있다.

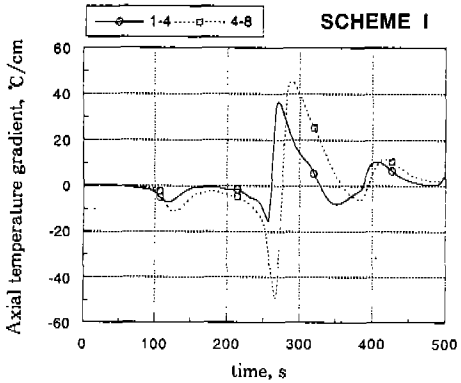
Fig.5(a)는 과정 2(scheme II)에 따른 필터 전면과 내부의 온도변화이다. T_b 를 850°C까지 상승시켰다. 그러나 과정 1과 같이 지속적으로 상승시킨 것이 아니라 중간에 4회에 걸친 온도강하 구간을 두었다. 필터내부에 위치한 열전대의 온도값은 과정 1과는 상이한 패턴을 보여주고 있다. 과정 2에서는 내부온도가 급격히 상승하지 않고, 매우 완만하게 상승하였으며 최고온도도 900°C이하로 유지되고 있다. 과정 1과 달리 바람직한 온도제어가 이루어진 것으로 판단된



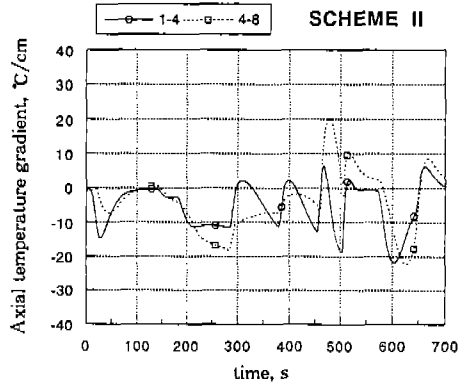
(a) Temperature profiles according to Scheme I



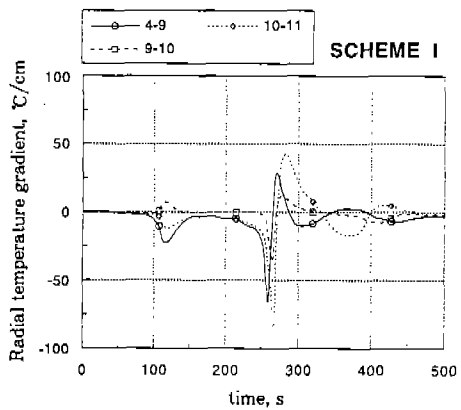
(a) Temperature profiles according to Scheme II



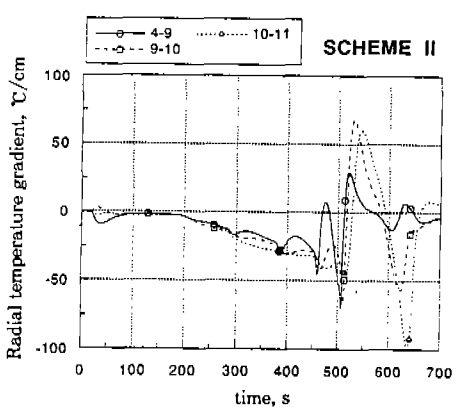
(b) Axial temperature gradients according to Scheme I



(b) Axial temperature gradients according to Scheme II



(c) Radial temperature gradients according to Scheme I



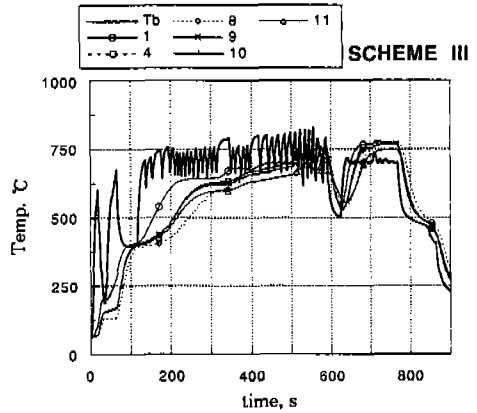
(c) Radial temperature gradients according to Scheme II

Fig.4

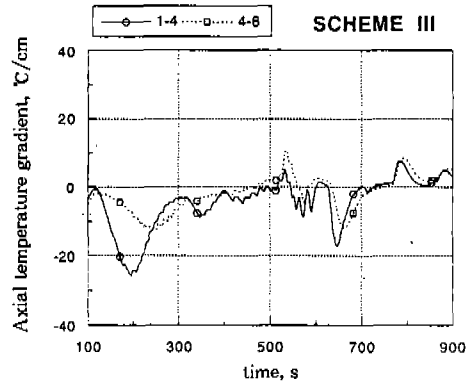
Fig.5

다. 이 경우에도 필터에 축적된 입자상 물질의 연소는 1번 열전대의 온도가 600°C 이상에 도달하는 지점부터 연소가 시작된 것으로 판단된다. 과정 2에 의한 필터 내부의 온도구배는 Fig.5(b)와 Fig.5(c)에 나타나 있다. 축방향 온도구배는 최고값이 약 22°C/cm 정도이며, 이 값은 과정 1의 값보다 50% 정도 감소하였다. 반경방향 온도구배는 최고값이 100°C/cm 정도이며 이 값은 과정 1보다 오히려 약 33% 정도 증가하였다. 따라서 과정 2에 의한 제어결과는 과정 1과 비교하여 최고온도와 축방향 온도구배 값에서는 바람직한 결과를 가져왔지만 반경방향 온도구배는 악화된 결과를 가져왔다.

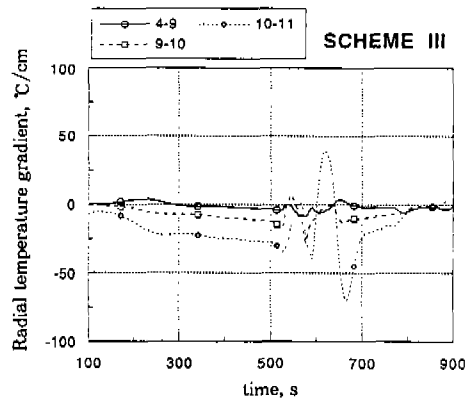
Fig.6(a)는 과정 3(scheme III)에 다른 필터 전면과 내부의 온도변화이다. 과정 2와 같이 T_b 의 온도상승 구간에 급격한 온도강하 구간을 두었으며 그 반복 정도는 매우 빈번하다. 이에 따른 결과로서 필터내부의 온도증가는 과정 2에서 보다 더욱 완만하게 증가하였으며 필터내부의 최고온도는 800°C 이하로 유지되고 있는 특이한 현상을 보이고 있다. 과정 1에서 필터내부의 최고온도 1200°C, 가정 2에서 필터내부의 최고온도는 900°C까지 상승한 것과는 대조적으로 과정 3에서는 800°C 이하의 낮은 온도를 유지하고 있다. 과정 3에서는 필터내부의 온도만으로는 필터의 완전 재생여부를 판단하기 어렵다. 뿐만 아니라 연소가 시작되는 1번 열전대의 온도는 더욱 더 판단하기 어렵다. 그러나 각 과정의 종료후에 필터를 시스템으로부터 분리하여 25°C, 상대습도 55%의 조건에서 무게를 측정된 결과 필터는 완전히 재생되었음을 확인하였다. 과정 3에 따른 온도구배는 Fig.6(b)와 Fig.6(c)에 나타나 있다. 축방향으로의 온도구배의 최고값은 약 25°C/cm 정도이며 과정 2보다 6% 정도 상승하였다. 반경방향 온도구배의 최고값은 약 70°C/cm 정도이며 과정 2와 비교하여 25% 정도의 감소를 가져왔다. 참고로 유사한 연구 결과인 GM의 결과에서는 축방향의 온도구배는 약 30°C/cm, 반경방향 온도구배는 최고 120°C/cm 정도를 보여주고 있다. 따라서 과정 3에서의 결과는 GM의 결과보다 낮은 온도구배를 발생시켰다.



(a) Temperature profiles according to Scheme III



(b) Axial temperature gradients according to Scheme III



(c) Radial temperature gradients according to Scheme III

Fig.6

AFER 시스템의 온도제어 과정을 통한 이상의 결과로부터 과정 1보다는 과정 2가, 과정 2보다는 과정 3이 더욱 바람직한 결과를 보여주고 있음을 알수가 있다.

4. 결 론

본 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 자체 설계 및 제작한 AEFER 시스템은 설계한 의도와 부합하여, 재생과정중에 필터로 유입되는 엔진 배기가스의 유량 제어를 통한 필터 내부의 온도제어가 가능하다.
- 2) 과정 3의 제어과정을 통하여, 재생중에 발생하는 필터 내부의 최고온도는 800°C 까지 낮출 수 있었으며, 축방향 온도구배는 25°C/cm 이하, 반경방향 온도구배는 70°C/cm 이하가 유지되었다.
- 3) AFER 시스템의 제어과정의 최적화를 통하여 외국의 연구결과보다 우수한 내구성을 갖는 디젤 입자상물질 제거장치의 개발이 가능하다.

참 고 문 헌

1. 김상환, "디젤 자동차의 배기 가스 저감 기술", 한국자동차공학회지 Vol.15, No.3, pp. 19~31, 1993.
2. 위인혁, 윤보승, 정인승, "Darcy의 법칙을 이용한 Diesel Particulate Trap System의 Ceramic Filter의 재생조건 결정방법", 한국자동차 공학회 94년도 추계학술대회 논문집, pp. 74~90, SAE Paper 943887, 1994.
3. 조강래, 엄명도, 유정호, "첨가제-스로틀링 재생에 의한 디젤 입자상물질 여과장치 성능 평가에 관한 연구", 한국자동차 공학회 94년도 추계학술대회 논문집, pp. 159~165, SAE Paper 943897, 1994.
4. 배기송, 장명원, "디젤 산화 촉매 장착시 최적화 방법에 관한 고찰", 한국자동차 공학회 '94년도 추계학술대회 논문집, pp. 404~409, SAE Paper 943929, 1994.
5. 한영출, 강호인, 최문석, "디젤기관에서 스로틀링 방식의 세라믹 필터 트랩에 의한 입자상물질 저감에 관한 실험적 연구", 한국자동차 공학회 '94년도 추계학술대회 논문집, pp. 417~424, SAE Paper 943931, 1994.
6. A. D. Tuteja et al., "Selection and Development of a Particulate Trap System for a Light-Duty Diesel Engine", SAE Paper 920142, 1992.
7. J. H. Johnson et al., "A Review of Diesel Particulate Control Technology and Emission Effects", SAE Paper 940233, 1994.
8. U. S. Environmental Protection Agency, "Standard for Emission of Particulate Regulation for Diesel-Fueled Light Duty Vehicles and Light Duty Trucks", Federal Register, Vol. 45, No. 45, 1980.
9. Clean Air Act, 42 U. S. C., 7401~7626, 1990.
10. "Maßnahmen gegen Partikelemissionen", MTZ Motortechnische Zeitschrift, ISSN 0024-8525 pp. 692~693, Dezember 1994.
11. P. Zelenka et al., "Ways Toward the Clean Heavy-Duty Diesel", SAE Paper 900602, 1990.
12. 박동선, 김재업, 이만복, 김용서, "디젤기관으로부터 배출되는 입자상물질 제거장치 개발에 관한 기초연구-버너방식", 한국자동차 공학회 '95년도 춘계학술대회 논문집, pp. 347~352, SAE Paper 953848, 1995.
13. 김재업, 박동선, 이만복, 김용서, "디젤 입자상물질 제거장치의 재생제어방식", 한국자동차 공학회 95년도 추계학술대회 논문집, Vol. II, pp. 71~76, 1995.
14. 박동선, 김재업, 이만복, 김용서, "버너를 이용한 입자상물질 제거장치의 설계 개념 및 기초 실험", 한국자동차 공학회 논문집, 제4권, 제3호, pp. 50~60, SAE Paper 96370049, 1996.