

전기히터방식 매연여과장치의 PM 산화 특성에 관한 연구

함운영¹⁾ · 김대하²⁾ · 김경운²⁾

우석대학교 자동차공학과¹⁾ · (주)블루 플래닛²⁾

A Study on the PM Oxidation Characteristics of Electrical Heater DPF System

Yunyoung Ham^{*1)} · Daeha Kim²⁾ · Kyungwoon Kim²⁾

¹⁾Department of Automotive Engineering, Woosuk University, Jeonbuk 565-701, Korea

²⁾Blue Planet Co., Ltd., 202 O-Building, 80-9 Yeonhi3-dong, Seodaemoon-gu, Seoul 120-829, Korea

(Received 25 August 2005 / Accepted 29 September 2005)

Abstract : For continuously regenerative PM collecting system which adopted thermally stable SiC DPF and electrical heater which was placed upstream of the filter and driven by well constructed control logic, PM oxidation characteristics were investigated varying air flow rate, amounts of PM accumulated on the DPF and filter inlet temperature in order to get optimized PM regeneration performance. This study showed that the operating condition of air flow rate 70 lpm, high PM loading around 30g and filter inlet temperature 700°C with heat insulation was effective in achieving high regeneration efficiency. Also, in this condition, we could decrease the electric energy consumption by reducing the regeneration time.

Key words : Diesel particulate filter(매연여과장치), Regeneration(재생), Regeneration efficiency(재생율), Electrical heater(전기히터), Electric energy(전기에너지), Air flow rate(공기유량), Trapped PM mass(매연포집량), Filter inlet temperature(필터입구온도)

1. 서론

최근 날로 심각해지고 있는 대기오염에 있어 자동차로부터의 대기오염이 배출원 가운데 가장 큰 비중을 차지하고 있으며 특히 경유 자동차에서 배출되는 매연은 대기 및 시야를 탁하게 만들뿐만 아니라 호흡기에 흡착하여 심각한 호흡기 질환을 유발한다.

매연여과장치(Diesel Particulate Filter, DPF)는 경유 자동차에서 배출되는 매연을 가장 효과적으로 저감할 수 있는 방법 중의 하나로 포집된 매연은 가

능한 빠른 시간 내에 태워서 필터가 다시 매연을 포집할 수 있도록 하는 재생과정을 거쳐야 한다.¹⁻⁷⁾ 현재 자동차에서 배출되는 PM을 후처리하는 기술로는 플라즈마방식, 촉매방식, 첨가제방식 등의 다양한 방식들이 있으나, 자동차 검사소나 유사 유해 사업장에 적용하기에는 장비 자체가 복잡하고 고가이기 때문에 보다 간단하면서도 효율적인 방식이 요구된다.

본 연구에서는 전기히터를 이용하여 PM 연소온도 이상으로 가스를 가열함으로써 디젤필터에 포집된 PM을 연속적으로 제거하고자 SiC 필터, 전기히터, 제어장치로 구성되는 전기히터방식 매연여과장치를 제작하였다. 재생에 영향을 미치는 공기유량,

*To whom correspondence should be addressed.
yyham@woosuk.ac.kr

매연포집량, 필터입구온도 등의 제어인자들을 변화시키면서 필터내의 온도 및 CO₂ 농도를 측정하여 PM 산화 특성을 파악하고, 이를 통해 재생율과 소비전력량이 최적화되는 작동조건을 구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

전기히터방식 매연여과장치는 기본적으로 SiC 필터, 재생장치(Heater, Blower), 제어장치의 3부분으로 구성되며 개략도는 Fig. 1과 같다. DPF에 포집된 매연을 연소시키기 위해서는 DPF전단을 약 600°C 이상 유지시켜야 하는데, 본 시스템에서는 DPF 전단에 전기히터를 사용하는 강제재생방식을 사용하였다. 시스템의 입구에 Blower를 설치하여 재생에 필요한 산소를 공급하고, 실험이 진행되는 동안 데이터취득장치를 통해 DPF 전후단과 내부의 온도, DPF 후단에 CO₂ 센서의 신호를 실시간으로 측정하였다.

2.1.1 SiC 필터

매연포집기에 사용한 SiC 필터는 25cps, 평균기공크기 25 μ m이며 기본치수 120(L) \times 120(W) \times 100(H) mm, 필터체적 1.44L로 Cordierite 필터에 비해 열적 내구성이 우수하다.

2.1.2 전기히터

전기히터는 세라믹 나선형튜브위에 히팅엘리먼트인 칸탈(Kanthal) wire을 감아 제작하였으며, 총 3개를 병렬 연결하였다. 칸탈 열선은 내산성이 좋아 기존의 열선보다 30%이상 긴 수명을 갖으며, 최고 1400°C까지 사용할 수 있다. 본 연구에서는 220V 단상으로 하여 25A 이하에서 사용하였으며 공기유량 50lpm으로 필터입구온도를 800°C까지 유지할 수 있다.

2.1.3 제어시스템

본 시스템의 제어장치는 제어기, 입력부, 출력부로 구성된다. 제어기는 PC기반에서 제어 로직을 수행하도록 하였고, Labview 프로그램을 사용하였다. 입력부와 출력부는 NI 6023E A/D 컨버터를 이용하였다. 입력신호는 AD595 Thermocouple 증폭기를 통과한 10개의 K-type Thermocouple 신호와 PM 재생

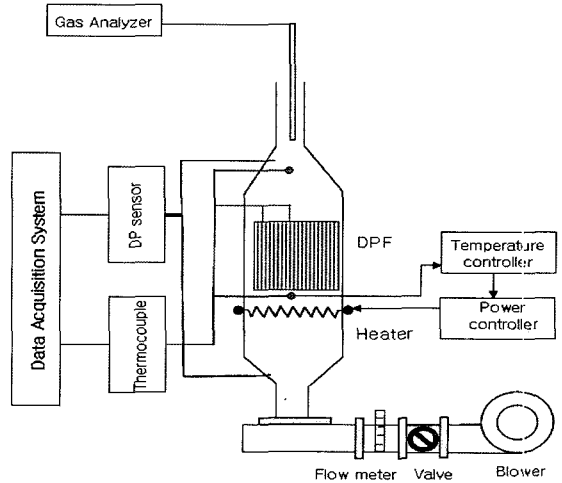


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

시 반응한 연소가스의 CO₂ 농도신호이다. 출력신호는 A/D에서 나오는 5V 디지털 신호로 SSR 릴레이를 통해 히터 및 블로어를 단속한다. 온도조절기는 필터입구온도를 측정하고, 측정값이 설정온도값을 유지하도록 전력조절기를 PID 전류제어하는 역할을 한다.

2.2 실험방법

재생실험에 사용된 매연은 자동차검사소에서 포집된 것을 사용하였다. 불순물을 제거한 후 전자저울로 질량을 측정하여 각각 10g, 20g, 30g을 인위적으로 필터에 균일하게 loading하였다. 재생을 위한 산화제로서 필요한 공기는 블로어를 통해 30lpm, 50lpm, 70lpm으로 공급하고, 히터와 필터사이에 위치한 히터제어용 필터입구온도센서의 온도를 500, 600, 700, 800°C로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 또한 필터케이스 외부에 세라믹화이버 단열재를 사용하여 단열효과를 살펴보았다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 DPF 재생시 주요 인자의 영향

전기히터방식 매연여과장치의 제어시스템 개발을 위하여 DPF 재생에 영향을 미치는 주요인자의 거동 및 상호관계를 살펴보았다. Fig. 2는 필터에 장착한 온도센서 및 CO₂ 측정프로브의 장착위치를 나

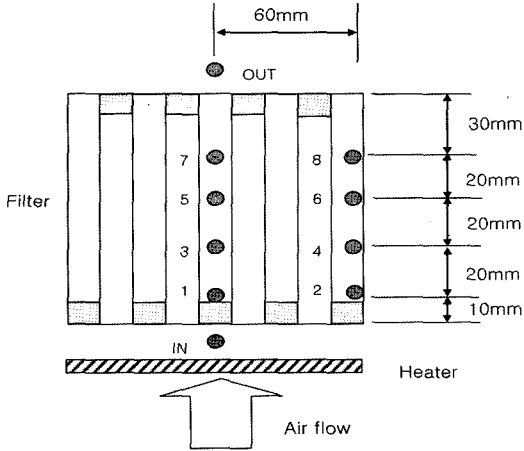


Fig. 2 Location of thermocouples in DPF

타낸 것이다. 온도센서는 필터입구와 출구에 각각 1개씩, 중앙부에 깊이방향으로 20mm 간격으로 4개, 중앙부에서 60mm 거리의 외곽부에 깊이방향으로 20mm 간격으로 4개가 장착되었다. CO₂ 측정프로브는 필터출구의 중앙부에 위치하였다.

3.1.1 필터입구온도 변화

먼저 히터 용량에 의한 영향을 살펴보기 위하여 PM포집량과 공기유량을 각각 30g과 50lpm으로 일정하게 유지시키고 히터로 인가되는 전원을 변화시켜 필터입구온도를 500, 600, 700, 800°C로 변경하면서 재생특성을 살펴보았다. Fig. 3~4는 필터입구온도 600°C와 800°C 조건에서 히터 가열 후 시간에 따른 온도 및 CO₂의 변화를 나타낸 것이다. 800°C의 경우 약 20분 경과 후 온도의 급격한 상승을 보이며 CO₂ 발생도 최고 6.5%에 도달하여 매연의 연소가 활발하게 진행되는 것을 나타낸다. 이에 비해 600°C의 경우 이와 같은 온도의 급격한 증가현상은 보이지 않으며 CO₂ 발생도 최대 1% 미만으로 제대로 재생이 이루어지지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 각 위치별 최대온도를 나타낸 것이다. 필터입구온도가 높을수록 필터내부의 온도가 전체적으로 증가함을 알 수 있다. 즉 히터에 인가되는 전력이 많을수록 재생이 더 활발하게 진행되므로 성능적인 측면에서 충분한 히터용량의 확보가 중요하다. 필터 내부의 위치별로 보면 중앙부의 입구에서 가까운 온도(T1, T3)가 가장 높았으며, 히터로부터 동일한 위치에서 필터 중심부와 외곽부에서의 온도차이가 크기는

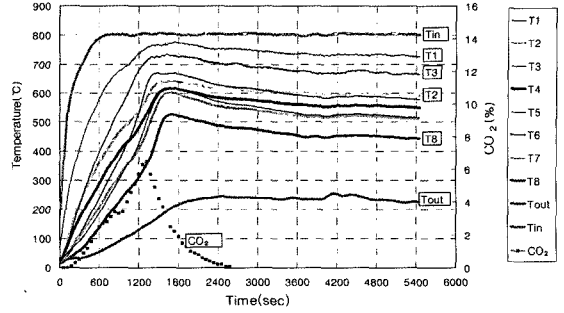


Fig. 3 Temperatures and CO₂ concentration at filter inlet temperature 800°C condition (PM 30g, 50 lpm)

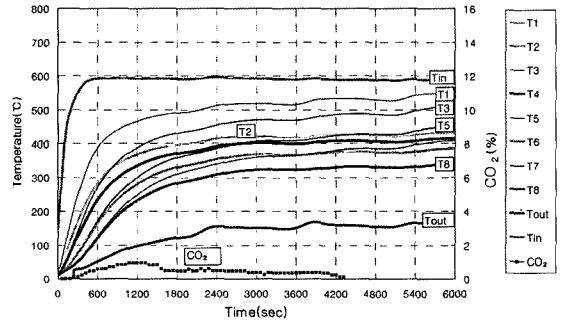


Fig. 4 Temperatures and CO₂ concentration at filter inlet temperature 600°C condition (PM 30g, 50 lpm)

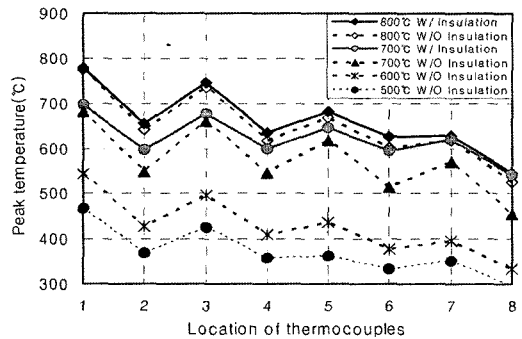


Fig. 5 Peak temperature at each location in the filter for various filter inlet temperature conditions

100°C 이상 발생되고 있다. 이처럼 필터 중심부의 온도가 외곽부보다 높게 나타난 이유는 외곽부에서 열손실이 많고 중심부에서는 공기유량이 많아 DPF로의 열전달이 높고 PM연소에 의한 열방출이 주로 중앙부에서 이루어지기 때문이다. 만약 외곽부의 온도를 높여 재생범위를 확대시킨다면 재생효율은 향상될 것으로 기대되며 이는 DPF 외곽부에 단열재를 설치하거나 DPF 입구면에 균일유동장치

를 설치하여 외곽부로 보다 많은 히터에서 가열된 유입공기가 흐를 수 있도록 함으로써 구현할 수 있다. 필터주변의 단열만으로 외곽부의 온도를 약 80°C 정도 증가시킬 수 있었다.

CO₂ 농도의 측정으로 재생시작과 완료시기를 확인할 수 있는데 CO₂는 히터 작동 3분 후부터 발생하기 시작하여 서서히 증가하다가 20분 경과 시 최대값을 보인 후 800°C의 경우 약 40분, 700°C의 경우 약 1시간이 지나면 더 이상 CO₂는 발생하지 않고 재생이 완료되는 것을 알 수 있다. 온도가 500, 600°C로 낮은 경우 CO₂의 발생은 미미하여 재생이 제대로 이루어지지 않는 것을 알 수 있다. 이로부터 재생율을 높이면서 빠른 시간 내에 태우기 위해서는 히터가열온도가 높을수록 유리함을 알 수 있다. 실험 결과에서 보듯이 DPF내 전 영역에서 PM재생온도인 550°C이상 나타나고 CO₂ 발생이 명확한 조건은 DPF 입구온도가 700, 800°C로 유지되는 조건이므로, 적절한 재생율을 얻기 위해서는 필터입구온도가 최소 700°C이상 유지될 수 있도록 히터용량이 설계되어야 한다.

3.1.2 공기 유량 변화

Fig. 6~7은 PM포집량 및 필터입구온도를 각각 30g과 700°C로 일정하게 유지시키고 단열한 조건에서 공기유량을 30lpm, 70lpm으로 실험한 결과이다. 공기유량이 변하면 필터입구온도를 일정하게 유지시키기 위하여 히터에 공급되는 전력은 공기유량이 증가함에 따라 증가하게 된다. 공기유량이 증가하면 히터에 가열된 유입공기에 의해 열전달이 활발하게 진행되어 DPF내부의 온도 상승이 빠르게 되며 최대 온도값을 나타내는 시점도 일찍 발생한다. 이로 인해 재생시간이 단축되는데 CO₂ 발생 결과로부터 재생시간은 유량 30, 50, 70lpm에서 각각 75분, 53분, 38분으로 감소되며 히터용량이 충분할 경우에는 공기유량을 증가시킴으로써 재생율을 향상시킬 수 있다. 그러나 유량이 많을수록 동일한 필터입구온도를 유지시키기 위해서는 히터측으로 더 많은 전력을 공급해야 하며, 만약 히터에 공급되는 전력을 일정하게 유지시킨다면 공기유량이 증가함에 따라 냉각 효과에 의하여 필터입구온도가 하락하게 되어 재생효율이 감소하므로 히터용량과 공기유량

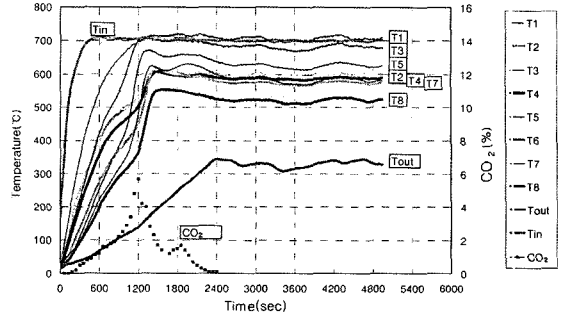


Fig. 6 Temperatures and CO₂ concentration at air flow rate 70 lpm condition (PM 30g, filter inlet temperature 700°C)

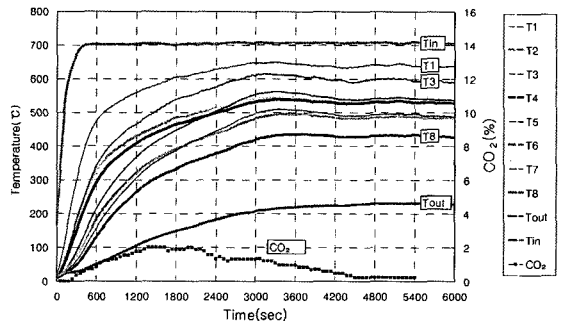


Fig. 7 Temperatures and CO₂ concentration at air flow rate 30 lpm condition (PM 30g, filter inlet temperature 700°C)

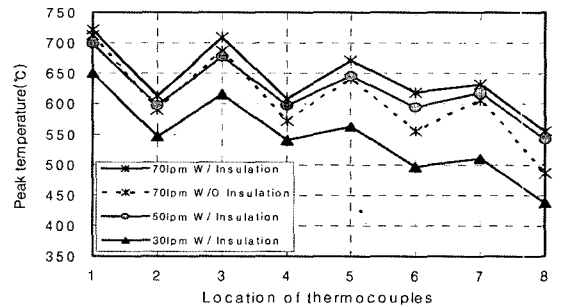


Fig. 8 Peak temperature at each location in the filter for various air flow rate conditions

선정시 재생율과 소비전력을 고려하여 최적의 유량을 구하여야 한다. Fig. 8은 필터내 각 지점에서 최대 온도를 나타낸 것이다. 필터내 전 영역에서 550°C 이상 나타나는 조건은 공기유량이 50, 70lpm으로 유지되면서 단열한 조건이며, 30lpm의 경우 단열을 하더라도 필터 후단부에서 재생온도에 이르지 못함을 알 수 있다.

3.1.3 PM포집량 변화

Fig. 9~10은 공기유량 및 필터입구온도를 각각 50lpm과 700°C로 유지시킨 조건에서 PM포집량이 10g, 30g일 때의 결과이다. PM포집량이 10g인 경우 필터내 각 위치의 온도는 완만하게 증가하여 30~40분 후에 일정 온도에 도달하며, CO₂ 농도는 미미한 수준으로 거의 재생이 이루어지지 않음을 알 수 있다. 그러나 포집량이 30g인 경우는 주로 필터중심부에서 온도의 급격한 상승을 보이며 CO₂ 농도도 약 1시간동안 최대 2%로 발생한다. Wall-Flow 방식의 필터에 포집되는 PM은 필터출구부터 주로 쌓이게 되므로 필터에 매연이 충분히 포집되지 않은 상태에서는 히터의 용량이 충분하지 않을 경우 매연의 점화온도에 미치지 못하게 된다. 따라서 히터의 소비에너지를 고려하여 효과적인 재생을 하기 위해서는 매연의 포집이 충분한 상태가 되어야 할 것이다. Fig. 11은 필터내 각 지점에서 최대온도를 나타낸 것이다. 필터내 전 영역의 온도가 재생온도인 550°C이상 나타나는 조건은 PM포집량이 가장 높은 30g으로 유지하고 단열한 조건이다.

SiC 필터는 높은 열전도성과 열용량으로 인해 고온에 강한 장점이 있으나 열충격에는 약해 가능한 최대온도구배가 100°C/cm 이하가 되도록 매연포집량을 제한할 필요가 있다.³⁾ 본 연구에서는 Fig. 12와 같이 최대온도구배가 최고 87°C/cm 이하로서 열적 안전성이 있는 것으로 판단되며 실험결과 균열의 흔적은 확인되지 않았다.

3.2 재생을 및 소요에너지 평가

Fig. 13은 필터입구온도 변화에 따른 재생율을 나타낸 것이다. 필터입구온도가 증가하게 되면 필터 내부온도 또한 증가하게 되어 재생율은 향상되며 필터입구온도가 700, 800°C조건에서 단열한 경우 90% 이상의 재생율을 보인다. 따라서 필터입구온도가 최소 700°C를 유지하도록 히터용량을 선정하는 것이 중요하다.

Fig. 14는 필터입구온도를 700°C로 유지할 경우 공기유량변화에 따른 재생율을 나타낸다. 유량이 증가할수록 열유속 증가에 따라 필터 내부온도가 빨리 상승하여 재생율을 증가시킨다. 단열을 한 경우 약 6~18% 재생율 증가효과를 보인다. 그러나 동

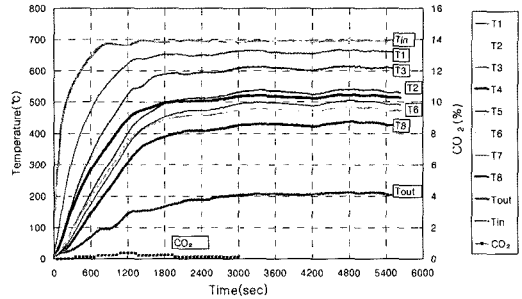


Fig. 9 Temperatures and CO₂ concentration at trapped PM mass 10 g condition (50 lpm, filter inlet temperature 700°C)

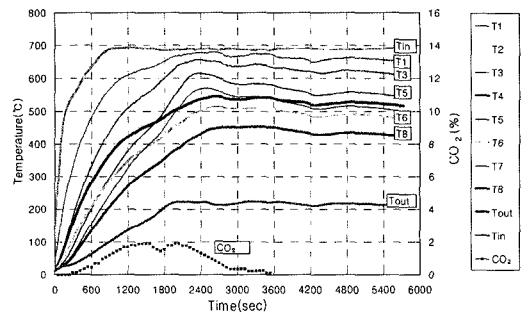


Fig. 10 Temperatures and CO₂ concentration at trapped PM mass 30 g condition (50 lpm, filter inlet temperature 700°C)

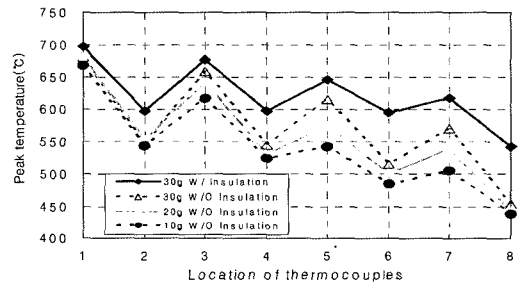


Fig. 11 Peak temperature at each location in the filter for various trapped PM mass conditions

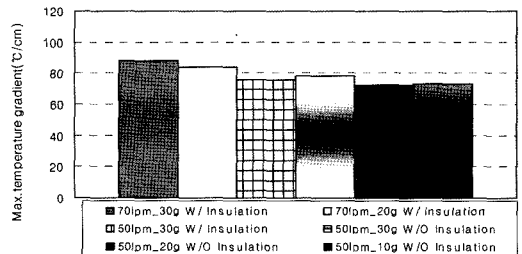


Fig. 12 Maximum temperature gradient for various test conditions

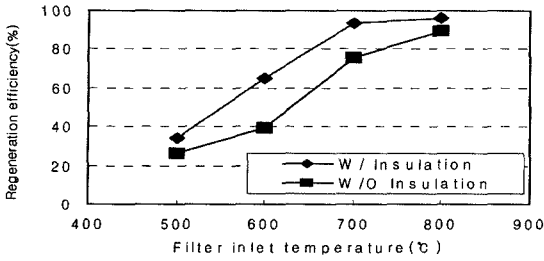


Fig. 13 Regeneration efficiency vs. filter inlet temperature

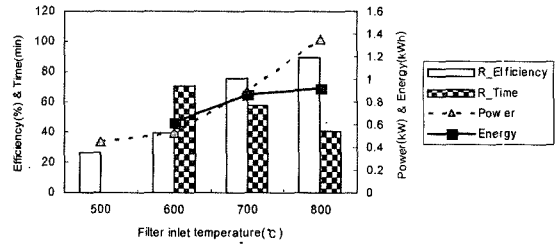


Fig. 17 Regeneration efficiency, regeneration time, electric power, electric energy vs. filter inlet temperature

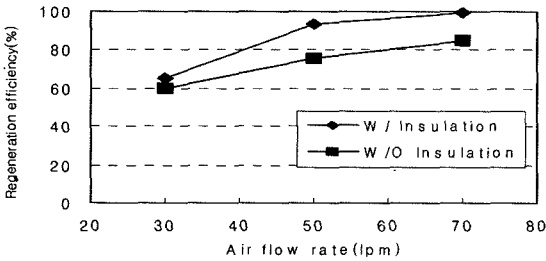


Fig. 14 Regeneration efficiency vs. air flow rate

는데 이는 DPF 단위체적당 발열량이 높아 국부적인 온도상승폭이 크고 이로 인해 주변부 PM의 온도 및 반응속도가 상승하기 때문이다. 한편 과다한 PM 포집은 국부적인 온도상승이 DPF의 열적 내구성 한계를 초과할 수 있으므로 실험조건에 맞춰 적정한 수준으로 유지해야 할 것이다.

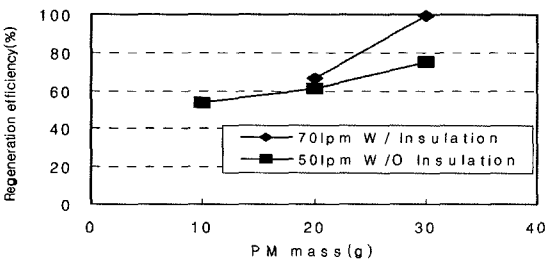


Fig. 15 Regeneration efficiency vs. trapped PM mass

Fig. 16은 공기유량변화에 따른 재생율, 재생시간, 소비전력, 소비전력량의 관계를 나타낸 것이다. 소비전력량은 재생시간동안의 소비에너지를 의미한다. 필터입구온도가 700°C로 동일한 조건에서 유량이 증가할수록 소비전력은 증가하나 열유속의 증가로 재생속도가 빨라져 재생시간은 감소한다. 단축된 재생시간으로 인해 소비전력량은 오히려 유량이 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 즉, 70lpm으로 유량이 많은 경우가 재생시간동안만 전력을 공급하면 0.76kWh로 가장 전력량이 적게 소모되는 것을 알 수 있다.

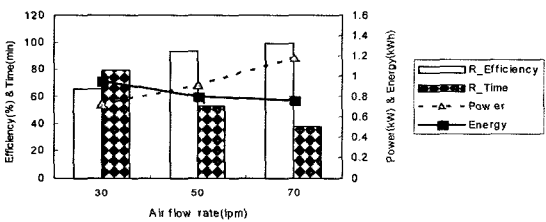


Fig. 16 Regeneration efficiency, regeneration time, electric power, electric energy vs. air flow rate (w/ heat insulation)

Fig. 17은 필터입구온도 변화에 따른 재생율, 재생시간, 소비전력, 소비전력량의 관계를 나타낸 것이다. 필터입구온도가 증가할수록 소비전력은 증가하며 재생시간은 단축되는 것을 알 수 있다. 양자를 고려한 전력량을 살펴보면 재생시간 단축효과에 비해 전력증가의 영향이 커서 소비전력량도 필터입구 온도에 따라 증가함을 알 수 있다.

일한 전력조건에서 공기유량을 증가시킬 경우에는 필터입구온도가 하락하여 재생율이 감소할 수 있으므로 적절한 공기유량의 선정이 중요하다.

Fig. 18은 재생율이 90% 이상인 조건들에 대해 재생시간, 소비전력 및 소비전력량을 나타낸 것이다. 모두 단열한 조건들이며 유량 50lpm, 필터입구온도 700°C 조건이 소비전력이 가장 적다. 그러나 유량이 70lpm이고 필터입구온도는 700°C인 경우 소비전력은 크지만 재생시간이 단축됨으로 인해 재생시간동안의 소비전력량은 가장 적어 이 조건이 최대의 재

Fig. 15는 PM포집량 변화에 따른 재생율을 나타낸다. 포집량이 많을수록 재생율이 증가함을 보이

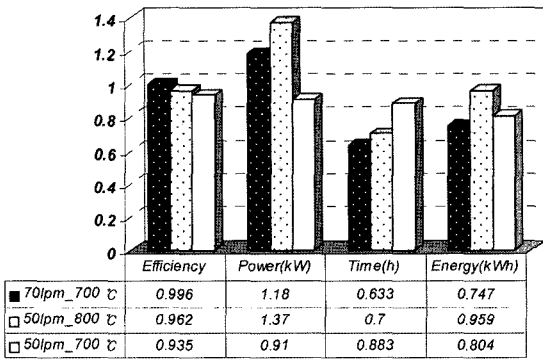


Fig. 18 Optimized condition for high regeneration efficiency and low electric energy

생율과 최소의 소비에너지를 갖는 최적화조건임을 알 수 있다.

본 실험결과를 토대로 공기유량, 필터입구온도, 매연포집량을 최적화된 조건으로 고정하고 미리 구한 재생시간동안만 히터를 작동하는 단순한 제어로 적으로써 최적의 성능을 갖는 매연여과장치의 제어 시스템을 구현할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차검사소 등에 사용할 수 있는 전기히터방식의 매연여과장치에 대해 재생에 영향을 미치는 공기유량, 매연포집량, 필터입구온도 등의 제어인자들을 변화시키면서 필터내의 온도 및 CO₂ 농도를 측정하여 PM 산화 특성을 파악하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 매연의 포집량이 30g으로 충분하고, 공기유량이 50~70lpm정도로 적당하면서, 필터입구온도가 700°C이상 유지할 때 필터 내에서 온도의 급격한 상승을 동반한 매연의 연소가 효과적으로 진행되는 것을 알 수 있다.
- 2) 공기의 유량이 많으면 동일한 필터입구온도를 유지하는데 많은 전기에너지가 필요하며, 반대로 공기유량이 적으면 전기에너지의 소비는 작지만 재생효과는 감소하게 된다. 따라서 재생율을 높이기 위해서는 최적의 공기유량을 공급하는 것이 중요하다.
- 3) 매연의 포집량이 적은 상태에서는 매연이 히터로부터 멀리 있게 되므로 재생에 필요한 온도가

도달되지 않아 재생이 거의 이루어지지 않는다. 따라서, 매연의 포집이 충분한 상태에서 재생이 이루어져야 함을 알 수 있다.

- 4) 본 실험에서 공기유량 70lpm, 매연포집량 30g, 필터입구온도 700°C의 경우가 재생율이 가장 높으며 재생시간동안의 전력량 또한 가장 적어 최적화 조건인 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 환경부와 한국환경기술진흥원 “차세대 핵심환경기술개발사업”의 지원 아래 수행되었으며, 이에 관계기관에 감사의 뜻을 포함합니다.

References

- 1) J. Kitagawa, T. Hijikata and S. Yamada, “Electric Heating Regeneration of Large Wall-Flow Type DPF,” SAE 910136, 1991.
- 2) K. Ohno, N. Taoka, T. Ninomiya, S. T. Hong, M. Kojima and T. Komori, “SiC Diesel Particulate Filter Application to Electric Heater System,” SAE 1999-01-0464, 1999.
- 3) K. Ohno, K. Shimato, N. Taoka, S. T. Hong, T. Ninomiya and T. Komori, “Characterization of SiC-DPF for Passenger Car,” SAE 2000-01-0185, 2000.
- 4) H. S. Kim, S. H. Han, G. B. Cho, Y. G. Jeong, B. G. Kang and I. H. Im, “The Study on the Intake Throttling for Improvement of Regeneration Performance in an Electrical Heated DPF System,” Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.193-198, 2004.
- 5) P. Richards, B. Terry, M. W. Vincent and S. L. Cook, “Assessment of the Performance of Diesel Particulate Filter Systems with Fuel Additives for Enhanced Regeneration Characteristics,” SAE 1999-01-0112, 1999.
- 6) O. Salvat, P. Marez and G. Belot, “Passenger Car Serial Application of a Particulate Filter System on a Common Rail Direct Injection Diesel Engine,” SAE 2000-01-0473, 2000.
- 7) R. Allansson, P. G. Blakeman, B. J. Cooper, H. Hess, P. J. Silcock and A. P. Walker, “Opti-

mising the Low Temperature Performance and
Regeneration Efficiency of the Continuously

Regenerating Diesel Particulate Filter(CR-DPF)
System, SAE 2002-01-0428, 2002.