〈학술논문〉 DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.8.597

배기가스 온도 및 조성 변화에 따른 CDPF의 재생 특성에 관한 실험적 연구

조용석† · 이정섭* · 윤여빈* · 박영준* · 이성욱**

(2008년 3월 20일 접수, 2008년 7월 3일 수정, 2008년 7월 22일 심사완료)

An Experimental Study on Regeneration Characteristics of Catalyzed Diesel Particulate Filter with Variation of Exhaust Gas Temperature and Composition

Yong-Seok Cho, Jung-Sub Lee, Yu-Bin Yoon, Young-Joon Park and Seang-Wock Lee

Key Words: CDPF(촉매코팅 매연여과장치), Regeneration(재생), PM(입자상물질), Exhaust Gas Temperature(배기가스 온도), Exhaust Gas Composition(배기가스 조성), Oxygen(산소), NO_x(질소산화물), Reaction Intensity(반응지수)

Abstract

The catalyzed diesel particulate filter (CDPF) is widely used for collecting soot from the exhaust gas of diesel engine. However, the CDPF need being regenerated after the soot accumulation. It is important to know characteristics of regeneration for CDPF with variation of exhaust gas temperature and composition. This study presents characteristics of regeneration according to variable exhaust gas composition. Furthermore, the experiment were performed variable gas temperature of CDPF inlet gas at each exhaust gas composition. Test-rig is used to control at each in let gas temperature and composition during regeneration of CDPF. Reaction intensity(I_c) is used to compare with each result. Experimental results indicated that increased concentration of NO_x and O_2 lead to regenerate more greatly. Also, higher temperature of exhaust gas leads to make CDPF cleaner.

1. 서 론

디젤기관은 가솔린기관에 비해 우수한 연료 경제성으로 많은 관심을 받고 있는 추세이다. 그러나 질소산화물(NO_x)과 입자상물질(PM)이 가솔린 기관에 비해 다량 발생되며, 이 중 입자상 물질인 PM은 인체에 미치는 유해성에 대한 중요성이 강조되어 이에 대한 저감 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.[1]

현재 DPF(Diesel Particulate Filter)는 PM을 가장 효과적으로 저감할 수 있는 방법으로 알려져 있다. DPF의 재생방식은 촉매에 의한 자연재생방식과 전열기나 버너에 의한 강제재생방식으로 나뉘는데, 자연재생과 강제재생을 병합한 복합재생방식 또한 활발히 연구되어 적용되고 있다. 하지만 도시주행과 같은 저 부하 조건에서 낮은 배기가스 온도로 인하여 연속적인 재생이 일어나지 못하는 문제는 개선되어야 할 점으로 지적되고 있다. 이에 필터 내 축적된 PM을 후분사(post injection) 등을 통하여 강제적으로 연소시키는 기술과 함께 DPF 촉매의 성능 개선이 요구되고 있다.[2]

† 책임저자, 회원, 국민대학교 기계자동차공학부
E-mail : yscho@kookmin.ac.kr
TEL : (02)910-5027 FAX : (02)942-7721
* 국민대학교 자동차공학전문대학원
** 국민대학교 기계자동차공학부

Table 1 Specifications of CDPF

Property	Specifications
Material	100% Re-SiC
Catalyst coating (g/ℓ)	0.64
Cell density (cell/cm^2)	26
Cell size (mm×mm)	1.5 × 1.5
Wall thickness (mm)	0.4
Pore size (nm)	12 ~ 15
Porosity	45%

CDPF(Catalyzed Diesel Particulate Filter)는 필터 내부에 촉매를 코팅하여 보다 낮은 온도에서 재생하는 것이 가능하며, 추가적인 에너지 소비를 줄이는 효과를 가져 올 수 있다.[3]

이에 본 연구에서는 CDPF를 이용한 PM 포집량과 재생 조건 변화에 따른 연구를 수행하고자 테스트 리그를 제작하여 재생에 직접적인 영향을 미치는 O_2와 NO_x의 농도, 그리고 CDPF에 유입되는 배기가스의 온도를 변경하여 다양한 조건에서의 CDPF의 재생 특성을 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

CDPF의 재생 실험은 크게 두 단계의 실험을 진행하여 수행하였다. 우선 PM 포집장치를 제작하여 CDPF 내에 PM을 균일하게 분사하여 일정량을 포집할 수 있도록 하였으며, 재생 실험에서 동일한 양의 PM이 포집된 CDPF 시편을 이용하였다. 또한, 재생 실험 장치를 통해 배기가스의 온도 및 조성 조건을 제어하였다.

2.1 DPF 시편

실험에 사용된 CDPF 시편은 실제 크기의 CDPF를 15 ㎜ × 15 ㎜ × 254 ㎜로 가공하여 실험하였으며, DOC와 촉매 코팅량이 0.64 g/ℓ인 CDPF를 이용하여 실험하였다. Fig. 1은 가공한 CDPF 시편의 실제 형상을 나타내며, 실험에 사용된 CDPF의 제원은 Table 1과 같다.

Fig. 1 Configuration of modified CDPF for rig test

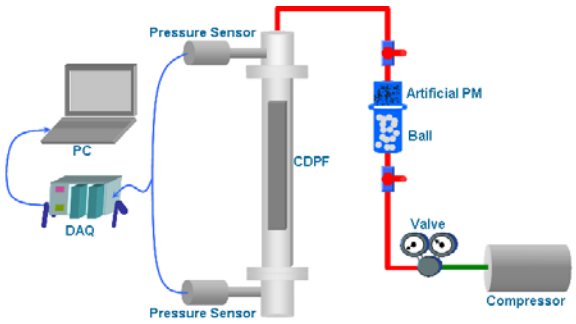

Fig. 2 Schematic diagram of PM generating rig

2.2 PM 포집장치

PM을 CDPF 내에 포집하기 위해 PM 포집장치를 제작하였으며, 실험에 사용된 PM은 실제 배기가스 내의 PM과 유사한 특성을 가지는 Deggusa AG의 Printex-U를 사용하였다.[4] 또한 압력센서를 장착하여 PM 포집 시 발생하는 CDPF 전 · 후단의 압력차를 기준으로 동일한 양의 PM을 CDPF 내에 포집하였다. 그리고 압축기와 CDPF 전단 사이의 가스 유동 구간에 수분분리기와 가열기를 장착하여 CDPF 내에 포집되는 PM에 수분이 함유되지 않도록 하였다. Fig. 2는 CDPF에 PM을 포집하기 위한 리그 장치의 개략도이다.

2.3 DPF 재생 실험장치

재생 실험 장치는 유량계를 통해 N_2, O_2, CO, HC, NO 등의 가스 성분을 실제 디젤기관에서 배출되는 배기가스의 조성 및 유량 조건과 동일하도록 제어하였다. 그리고 히터를 통해 CDPF로 유입되는 가스를 가열하여 배기가스의 온도 조건을 설정하였다. 그리고 CDPF 전 · 후단의 가스 온도를 측정하기 위해 열전대를 설치하였으며, 재생

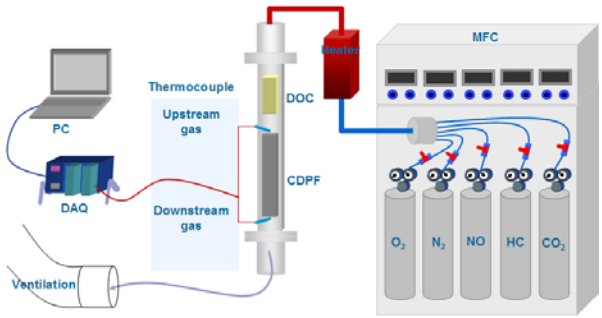

Fig. 3 Schematic diagram of test-rig for CDPF regeneration

시 CDPF 후단의 가스 온도 변화를 통해 CDPF의 재생 특성을 파악하고자 하였다. Fig. 3은 CDPF 재생 실험 장치의 개략도이다.

2.5 실험방법

우선 PM 포집장치를 이용하여 CDPF 내에 일정량의 PM을 포집한다. PM 포집량은 재생 시 CDPF의 내구성에 영향을 미치지 않는 최대 허용량인 6.5 g/ℓ로 설정하였다. 선행연구를 통해 CDPF 전·후단의 압력차가 1.6 kPa일 때 PM 포집량이 6.5 g/ℓ인 것을 확인한 바 있다.[5] 본 실험에서는 압력센서를 통해 측정된 배압이 1.6 kPa에 도달하였을 때 PM 포집을 종료하여 CDPF 내에 동일한 양의 PM을 포집할 수 있도록 제어하였다. 재생 실험은 일정량의 PM이 포집된 CDPF와 3.18 g/ℓ으로 코팅된 DOC를 테스트 리그에 장착하여 진행하였으며, 재생에 영향을 미치지 않는 CO_2와 N_2를 분사하여 배기가스의 온도를 유지하였다. 또한, 배기가스 및 CDPF의 온도를 일정하게 유지시킨 후 NO_x와 O_2의 농도를 조절하여 재생이 가능한 조건을 형성하였으며 이때 각 조건에서 CDPF 후단의 배기가스 온도 변화량을 측정하였다.

Table 2는 디젤기관의 중속, 중부하 조건에서 일반적으로 발생하는 배기가스의 조성이다.[6] 이는 실차실험으로 측정된 데이터를 바탕으로 설정된 값이다. 따라서 재생 실험은 이를 기준으로 NO_x 및 O_2의 농도와 CDPF 전단 배기가스 온도를 변경하여 각 조건에 따른 재생 특성을 파악하고자 하였다. Table 3은 재생 실험 시 CDPF 전단의 배기가스 농도 및 온도 조건을 나타낸 것이다.

Table 2 Standard composition of exhaust gas

Composition of exhaust gas	
N_2	71%
O_2	7%
CO_2	12%
NO_x	350 ppm
HC	50 ppm

Table3 Experimental condition of CDPF regeneration

Experimental condition			
Catalyst coating	Inlet gas composition		Inlet gas temperature
0.64 g/ℓ	NO_x	350 ppm 950 ppm 1550 ppm	300℃ 380℃ 450℃
	O_2	7% 12% 17%	

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 NO_x 농도 변화에 따른 재생 특성

Fig. 4 ~ 6는 NO_x 농도와 배기가스 온도에 따른 CDPF 후단의 재생 중 배기가스 온도 변화량을 나타내는 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 각각의 NO_x 농도에서 배기가스의 온도가 380℃일 경우, DPF 후단의 배기가스 온도 변화량이 가장 높은 것을 알 수 있다. 일반적으로 배기가스 온도가 300 ~ 350℃일 경우 DOC에 의한 NO의 NO_2 변환효율이 가장 높으며, 이로 인해 CDPF 내의 NO_2에 의한 PM의 산화반응이 가장 활발하게 일어나는 것으로 판단된다.[7] 배기가스 온도가 300℃인 조건에서는 NO_2의 양은 재생조건을 충족시키나, 낮은 배기가스 온도로 인해 CDPF 내의 PM의 산화량은 적게 나타났다.

또한, 각각의 그래프를 비교해보면 NO_x 농도가 350 ppm에서 1550 ppm으로 증가할수록 재생 시

CDPF 후단의 배기가스 온도 변화량이 더욱 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 CDPF에 코팅된 촉매의 산화반응이 NO_x 농도가 높을수록 더욱 활성화되어 PM의 산화를 촉진하기 때문이다.

Fig. 7은 NO_x의 산화반응이 가장 활발히 일어나는 온도 조건에서 NO_x의 농도에 따른 CDPF 후단의 배기가스 온도 변화량을 그래프로 나타낸 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 380℃의 동일한 배기가스 온도 조건에서 NO_x의 농도가 증가할수록 CDPF 후단의 배기가스 온도 변화량이 높아지는 것을 볼 수 있으며, 온도 변화량이 가장 큰 지점에 도달하는 시간도 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 NO_x의 농도가 높을수록 짧은 시간에 많은 양의 PM을 산화시키는 것을 의미 한다.[8]

3.2 O_2 농도 변화에 따른 재생 특성

Fig. 8과 9는 O_2 농도를 12%와 17%로 설정한 상태에서 동일 실험을 수행한 결과를 나타낸다.

각각의 그래프를 비교해보면 O_2 농도가 증가할수록 재생 시 CDPF 후단의 배기가스 온도 증가량이 상승하며 최고 온도 변화량까지 도달하는 시간도 짧아지는 것을 알 수 있다. 이는 CDPF 재생 시 배기가스 내 O_2 농도가 증가할수록, 그리고 CDPF 전단 배기가스의 온도가 높을수록 PM의 산화량이 증가하고 재생시간이 감소하는 것을 의미한다.[9] 반면에 Fig. 4를 O_2 농도 조건의 기준으로 보았을 때 O_2의 농도가 7%인 경우에서는 가스의 온도가 380℃인 조건이 450℃에 비해 다소 높은 것을 볼 수 있다. 이는 기본 조성 조건에

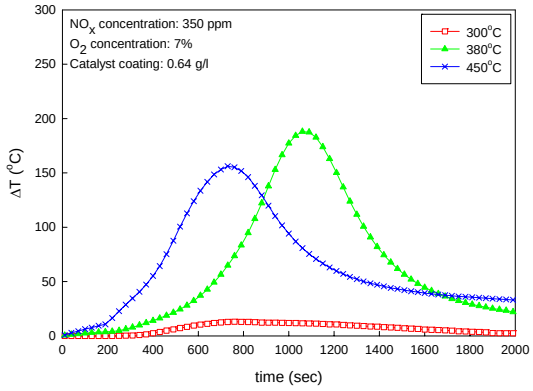

Fig. 4 Temperature deviation between upstream and downstream of the CDPF as function of time with various temperature in case of standard composition

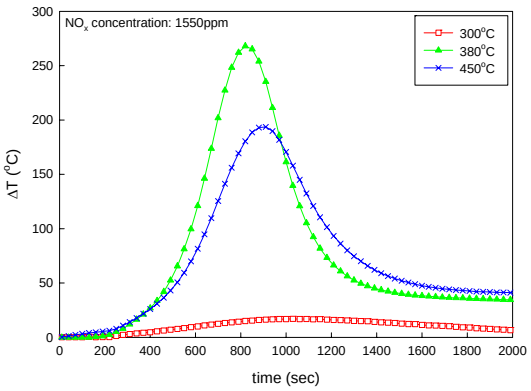

Fig. 6 Temperature deviation between upstream and downstream of the CDPF as function of time with various temperature in case of 1550 ppm NO_x concentration

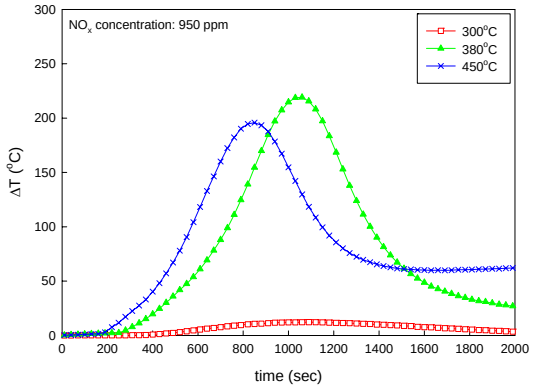

Fig. 5 Temperature deviation between upstream and downstream of the CDPF as function of time with various temperature in case of 950 ppm NO_x concentration

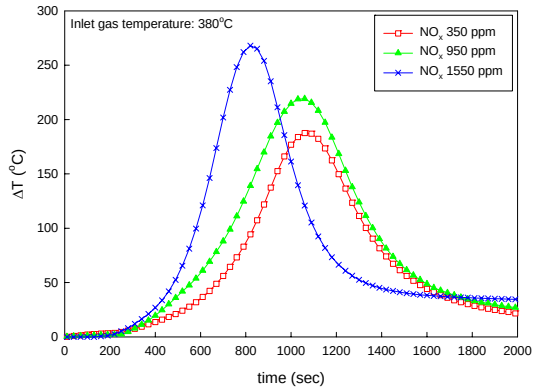

Fig. 7 Temperature deviation between upstream and downstream of the CDPF as function of time with various NO_x concentration in case of inlet gas 380℃

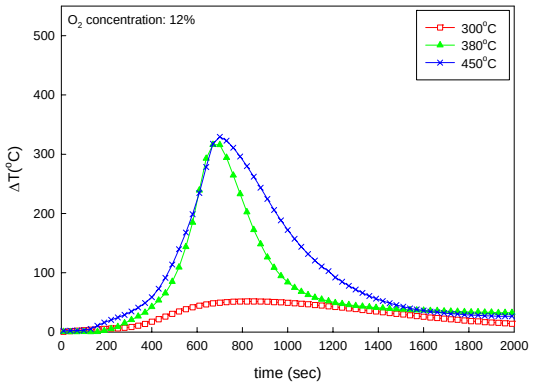

Fig. 8 Temperature deviation between upstream and downstream of the CDPF as function of time with various temperature in case of 12% O_2 concentration

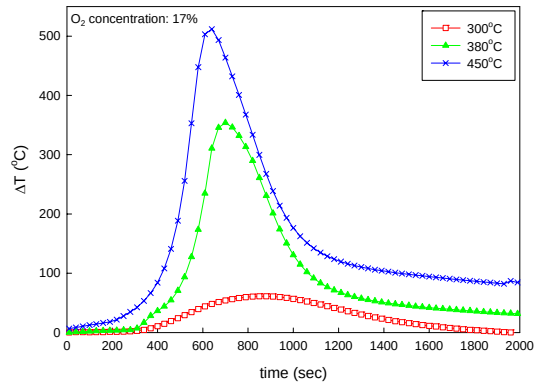

Fig. 9 Temperature deviation between upstream and downstream of the CDPF as function of time with various temperature in case of 17% O_2 concentration

서 O_2에 의한 산화반응보다 NO_2에 의한 산화반응이 CDPF 내에서 PM의 산화를 더욱 촉진하기 때문이다.

Fig. 10은 Fig. 8과 Fig. 9에 나타난 세 가지 온도에 따른 실험조건 중 O_2에 의한 산화반응이 가장 활발히 나타나는 배기가스 온도 450℃의 조건에서 O_2농도를 증가시켰을 때 CDPF 후단의 배기가스 온도 변화량을 나타낸다. 앞서 언급한 바와 같이 O_2의 농도가 증가할수록 CDPF 후단의 배기가스온도 변화량이 더욱 크고, 최고 온도 변화량에 도달하는 시간이 짧아지는 것을 확인할 수 있다.

3.3 반응지수 판단

배기가스의 온도 변화를 측정하여 재생 시간

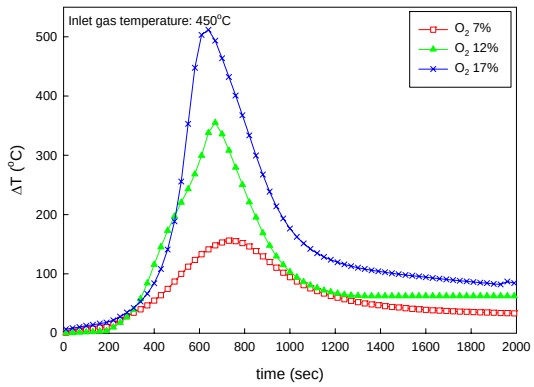

Fig. 10 Temperature deviation between upstream and downstream of the CDPF as function of time with various O_2 concentration in case of 450℃ inlet gas temperature

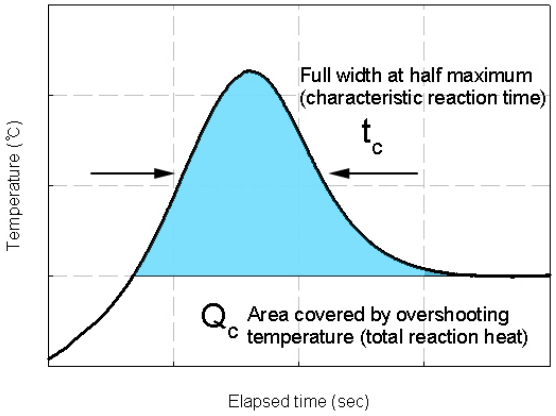

Fig. 11 Definition of reaction intensity

및 온도 상승률 및 최대 재생온도 등을 통하여 CDPF의 재생 특성을 파악할 수 있으나 이를 정량화 하는 것은 매우 어려운 일이다. Hanamura et al.[10]은 CDPF의 재생 특성을 비교하기 위하여 반응지수를 구하는 방법을 제시하였다. 이를 이용하여 본 연구에서는 식 (1)과 Fig. 11에 나타난 방법과 같이 CDPF의 재생으로 인한 온도 증가영역 중 안정화 된 온도보다 높은 온도 부분의 면적을 통해 실험 결과를 정량적으로 비교하기 위한 방법으로 수정하여 사용하였다.

$$I_c = \frac{Q_c}{t_c} \tag{1}$$

이 때, Q_c는 Fig. 11에서 표시된 부분과 같이 CDPF의 재생으로 인한 온도변화량의 면적을 나타내고, t_c는 Q_c로 표시된 면적 내에서 최대 온도 변화량의 절반 높이의 시간범위를 나타낸다.

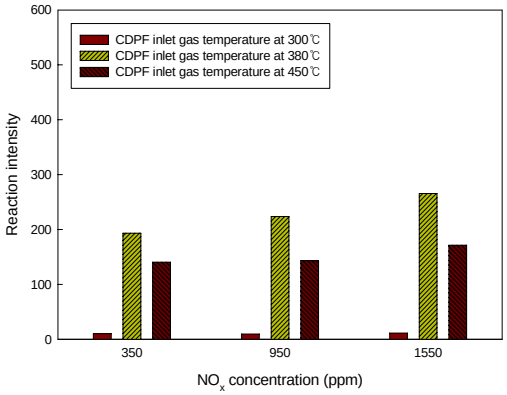

Fig. 12 Regeneration reaction intensity of the CDPF with various NO_x concentration in case of various CDPF inlet temperature

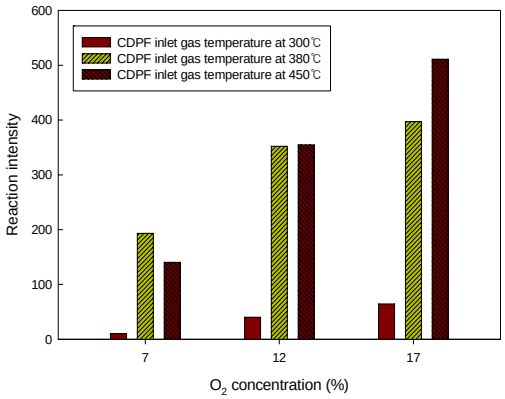

Fig. 13 Regeneration reaction intensity of the CDPF with various O_2 concentration in case of various CDPF inlet temperature

위 두 값의 관계식으로 나타내어지는 I_c는 반응지수로서 I_c의 증가는 더욱 원활한 재생이 이루어지고 있음을 의미한다. 따라서 재생지수를 이용하여 각각의 CDPF의 재생 특성을 정량화 하여 비교하고자 하였다.

Fig. 12는 위의 식을 이용하여 구한 반응지수(I_c)를 각각의 NO_x의 조건과 CDPF로 유입된 배기가스의 온도에 따라 나타낸 그래프이다.

NO_x의 농도가 증가함에 따라 CDPF에서의 PM의 산화량이 증가하여 재생지수가 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 온도가 CDPF 입구온도 450℃에서의 재생보다 380℃에서의 재생이 더욱 원활하게 일어났음을 확인 할 수 있다.

Fig. 13은 반응지수를 각각의 O_2의 농도 조건과 CDPF로 유입된 배기가스의 온도에 따라 나타낸 그래프이다.

O_2의 농도가 증가함에 따라 CDPF에서의 PM의 산화량이 증가하여 재생지수가 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 NO_x의 재생지수와는 다르게 온도가 높을수록 재생이 원활하게 일어났음을 확인 할 수 있다. 이로 인하여 450℃에서는 NO_x에 의한 재생이 O_2에 의한 재생보다 덜 원활하게 일어난 것을 확인할 수 있다.

따라서 위의 방법을 이용할 경우, 재생 반응지수를 통하여 각 조건에서의 재생 특성을 정량화 하여 나타낼 수 있다. 또한 각 조건 간의 객관적인 평가를 가능하게 함으로써 CDPF 재생특성을 비교 및 분석하는 데에 매우 유용한 방법으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 NO와 O_2의 농도에 따른 CDPF의 재생 특성 변화를 파악하기 위해 테스트리그를 제작하여 실험을 수행하였으며, 각각의 O_2와 NO의 농도에서 배기가스 온도 변화에 따른 재생 특성을 CDPF 후단의 가스 온도 변화량을 통해 비교하였다.

(1) 재생 시 NO 농도가 증가할수록 CDPF 후단의 배기가스 온도 변화량이 더욱 높아졌으며, 이는 DOC의 촉매반응으로 인해 NO_2의 농도가 증가하여 NO_2에 의한 PM의 산화반응이 더욱 활발하게 나타나기 때문이다.

(2) 동일한 NO 농도 조건에서 배기가스의 온도가 380℃일 경우, CDPF 후단의 배기가스 온도 변화량이 가장 높다. 이는 DOC에 의한 NO의 NO_2 변환효율이 450℃에 비해 380℃가 높은 온도 조건이기 때문에 NO_2에 의한 PM의 산화반응이 380℃에서 가장 활발히 일어나기 때문이다. 또한, 300℃의 경우, NO_2의 변환량은 재생 조건을 충족시키나 배기가스 온도가 낮기 때문에 실제 PM의 산화량이 적게 나타난 것이다.

(3) O_2 농도가 증가할수록 재생 시 CDPF 후단의 배기가스 온도 변화량이 상승하며 최고 온도 변화량까지 도달하는 시간도 짧아진다. 이는 배기가스의 온도가 높을수록 O_2에 의한 PM의 산화반응이 더욱 활발히 일어나기 때문이며, 결론적으로 O_2 농도가 높고, 배기가스의 온도가 높을수록 CDPF의 재생에 유리할 것으로 판단된다.

(4) 재생으로 인한 온도 변화 곡선에서 온도가 상승한 부분의 면적과 재생이 활발하게 일어난 구간의 시간으로 계산한 재생 반응지수(I_c)는 재생특성을 정량화하고 객관적으로 비교하기위한 좋은 평가방법이다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR project (무·저공해 자동차사업단) 및 2008년도 국민대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었으며, 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Cho, S. H., Park, S. S., Lee, Y. J., Ryi, S. G., Lee, C. B. and Choi, S. H., "The Application of Reforming Reaction of Diesel Fuel on Regeneration System for DPF," *KSAE fall Conference Proceeding*. pp. 416~421, 2005.

(2) Suresh, A., Yezerets, A., Currier, N. and Clerc, J., "Diesel Particulate Filter System-Effect of Critical Variables on the Regeneration Strategy Development and Optimization," *SAE Technical Paper*, 2008 -01-0329, 2008.

(3) Boger, T., Rose, D., Tilgner., I. C. and Heibe, A. C., "Regeneration Strategies for an Enhanced Thermal Management of Oxide Diesel Particulate Filters," *SAE Technical Paper*, 2008-01-0328, 2008.

(4) Locker, R. J., Gunasekaran, N. and Sawyer, C., "Diesel Particulate Filter Test Methods," *SAE Technical Paper*, 2002-01-1009, 2002.

(5) Yoo, S. H., Noh, Y. C., Park, Y. J., Kim, D. S. and Cho, Y. S., "An Experimental Study on Pressure Drop and Heat Transfer in Catalyzed Diesel Particulate Filter," *KSAE Spring Conference Proceeding*. pp. 371~376, 2006.

(6) Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamental," *McGRAW-HILL*, 1988.

(7) Triana, A. P., Johnson, J. H., Yang, S. L. and Baumgard, K. J., "An Experimental and Numerical Study of the Performance Characteristics of the Diesel Oxidation Catalyst in a Continuously Regenerating Particulate Filter," *SAE Technical Paper*, 2003-01-3176, 2003.

(8) Rumminger, M. D., Zhou, X., Balakrishnan, K., Edgar, B. L. and Ezekoye, O. A., "Regeneration Behavior and Transient Thermal Response of Diesel Particulate Filters," *SAE Technical Paper*, 2001-01-1342, 2001.

(9) Brewbaker, T. and Nieuwstadt, M. V., "Control of Oxygen for Thermal Management of Diesel Particulate Filters," *SAE Technical Paper*, 2002-01-0427, 2002.

(10) Hanamura, K., Suzuki, T., Tanaka, T. and Miyairi, Y., "Visualization of Combustion Phenomena in Regeneration of Diesel Particulate Filter," *SAE Technical Paper*, 2003-01-0836, 2003.