

배기가스의 온도 및 HC와 O₂의 조성 변화에 따른 DOC-CDPF의 재생 특성에 관한 실험적 연구

조용석^{*1)} · 이성욱¹⁾ · 이정섭²⁾ · 윤여빈²⁾ · 박영준²⁾

국민대학교 기계자동차공학부¹⁾ · 국민대학교 자동차공학전문대학원²⁾

An Experimental Study on Regeneration Characteristics by Variation of Exhaust Gas Temperature, HC and O₂ Concentrations on DOC-CDPF System

Yong-Seok Cho^{*1)} · Seang-Wock Lee¹⁾ · Jung-Sub Lee²⁾ · Yu-Bin Yoon²⁾ · Young-Joon Park²⁾

¹⁾Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

²⁾Graduated School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 18 March 2008 / Accepted 14 July 2008)

Abstract : A catalyzed diesel particulate filter (CDPF) causes the progressive increase in back pressure of an exhaust system due to the loading of soot particles. To minimize pressure drop which is generated by CDPF, the filter should be regenerated when it collects a certain quantity of soot. It is important to know characteristics of regeneration of CDPF with various of exhaust gas temperatures and compositions. The oxidation of HC in DOC leads to increase gas temperature of DOC downstream. The increased gas temperature by DOC has an positive effect on CDPF regeneration. This study presents characteristics of regeneration of CDPF with DOC according to various gas composition, such as HC and O₂ concentration. The test-rig is used to control each gas composition and temperature during regeneration of CDPF. Experimental results indicate that the increased concentration of O₂ regenerates DPF more actively. With increasing HC concentration, the gas temperature of CDPF upstream increased due to more oxidation of HC. But excessive supply of HC leads to decrease of O₂ concentration in the CDPF, which makes it hard to regenerate CDPF.

Key words : CDPF(촉매코팅 매연여과장치), Regeneration(재생), PM(입자상물질), DOC(디젤산화촉매), Exhaust gas composition(배기가스 조성), Exhaust gas temperature(배기가스 온도), Oxygen(산소), Hydrocarbon(탄화수소)

1. 서론

최근 디젤기관의 고속화와 경량화가 가능하게 됨으로써 중·소형 디젤자동차에 대한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다. 디젤기관은 일반적으로 연료가 희박한 상태에서 연소하기 때문에 일산화탄소(CO)와 미연탄화수소(HC)의 배출은 그 양이 매우 작아 크게 문제되지 않는다. 그러나 질소산화물(NOx: Nitrogen Oxide) 및 입자상물질(PM: Particu-

late Matter)은 배출량이 매우 높기 때문에 환경오염의 주원인으로 부각되고 있다.¹⁾ 최근의 연구에 따르면 디젤기관에서 배출되는 PM은 폐암의 원인이 되며, 특히 크기가 작은 nanoparticle은 인체에 침투하기 쉬워 인체의 건강에 큰 위협이 되는 것으로 보고되고 있다. 이에 따라 각 국에서는 디젤 자동차에 대한 배출가스 규제를 엄격하게 실시하고 있으며 그 규제는 더욱 강화되고 있다. 이러한 규제에 발맞춰 후처리 장치에 대한 많은 연구 및 개발이 이루어지

*Corresponding author, E-mail: yscho@kookmin.ac.kr

고 있다.

디젤기관의 배기가스 내 PM을 제거하는 다양한 방법 중 DPF는 배출되는 PM을 가장 효과적으로 제거하는 후처리 장치로 알려져 있다. DPF는 PM 저감율이 70~90%로 PM 저감에 있어서 매우 효과적인 후처리장치로 평가받고 있다.²⁾ 최근에는 필터에 촉매를 코팅하여 낮은 온도의 배기가스에서도 촉매에 의해 재생이 일어날 수 있는 CDPF의 연구가 활발히 진행되고 있다.

이에 본 연구에서는 DOC-CDPF 시스템에서 후처리에 의한 재생 특성을 알아보기로 test-rig를 제작하여 실험을 수행하였다. 또한 DOC에서의 HC 산화열이 재생에 미치는 영향을 파악하고자 배기가스 내의 HC와 O₂의 농도 및 배기가스의 온도를 변경하며 배기가스 온도변화와 재생 간의 특성을 파악하여 정량적으로 비교해 보고자 하였다.

2. 실험장치 및 조건

CDPF의 재생 실험은 크게 두 단계로 나누어 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 실험장치를 통해 배기가스의 온도 및 조성 조건을 제어하였다.

2.1 CDPF 시편

실험에 사용된 CDPF 시편은 실제 크기의 CDPF를 15 mm × 15 mm × 254 mm로 가공하여 실험하였으며, 촉매 코팅량이 0.64 g/ℓ 인 CDPF를 이용하여 실험하였다. Photo. 1은 가공한 CDPF 시편의 실제 형상을 나타내며, 실험에 적용된 CDPF의 제원은 Table 1에 정리하였다.

2.2 DOC 시편

실험에 사용된 DOC 시편은 실제 크기의 DOC를 가공하여 실험하였으며, 촉매 코팅량이 3.18 g/ℓ 인 DOC를 이용하여 실험하였다. 재생실험 시 CDPF의 전단에 부착하여 실험을 진행하였다.

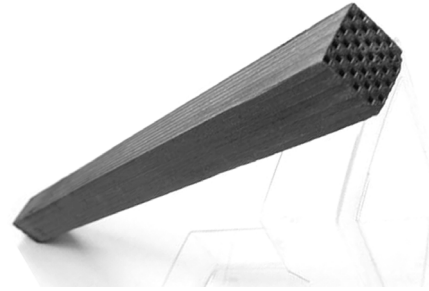


Photo. 1 Extracted CDPF sample for rig tests

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%

2.3 PM 포집장치

PM을 CDPF 내에 포집하기 위해 PM 포집장치를 제작하였으며, 실험에 사용된 PM은 실제 배기가스 내의 PM과 유사한 특성을 가지는 Degussa AG의 Printex-U를 사용하였다.³⁾ 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 축적되는 PM의 수분 함유를 방지하였다.

Fig. 1은 CDPF에 PM을 포집하기 위한 PM 포집장치의 개략도를 나타낸다.

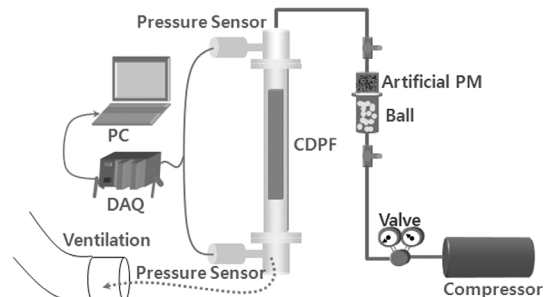


Fig. 1 Schematic diagram of PM generating rig

2.4 CDPF 재생 실험장치

재생 실험장치는 유량계를 통해 N₂, O₂, CO, HC, NO 등의 가스 성분을 Table 2와 같이 일반적인 디젤 기관에서 배출되는 배기가스의 조성 및 유량 조건과 동일하도록 설정하고 제어하였다.⁴⁾ 그리고 히터를 통해 CDPF로 유입되는 가스를 가열하여 배기가스의 온도 조건을 설정할 수 있도록 하였다. 그리고 DOC 전·후단 및 CDPF 후단의 가스 온도를 측정하기 위해 열전대를 설치하였으며, 재생 시 CDPF 후단의 가스 온도 변화를 통해 CDPF의 재생 특성을 파악하고자 하였다. Fig. 2는 CDPF 재생 실험 장치의 개략도를 나타낸다.

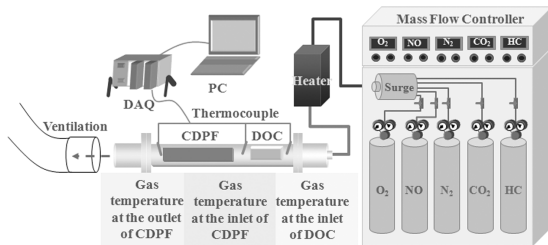


Fig. 2 Schematic diagram of test-rig for CDPF regeneration

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

2.5 실험 방법

우선 PM 포집장치를 이용하여 CDPF 내에 일정량의 PM을 포집한다. PM 포집량은 재생 시 DPF의 내구성에 영향을 미치지 않는 최대 허용량인 6.5 g/ℓ로 설정하였다. 선행연구를 통해 DPF 전·후단의 압력차가 1.6 kPa에 도달하였을 경우 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 하였다. 재생 실험은 일정량의 PM이 포집된 CDPF와 3.18 g/ℓ으로 코팅된 DOC를 test-rig에 장착하여 수행하였으며, 재생에 영향을 미

Table 3 Experimental condition of CDPF regeneration

Gas composition at the inlet of DOC			
HC	50 ppm	O ₂	7%
	5,000 ppm		12%
	10,000 ppm		17%

치지 않는 CO₂와 N₂를 분사하여 배기가스의 온도를 유지하였다. 또한, 배기가스 및 CDPF의 온도를 일정하게 유지시킨 후 HC와 O₂의 농도를 조정하여 재생이 가능한 조건으로 형성하였으며 이 때 DOC와 CDPF사이의 배기가스 온도 증가량과 CDPF 후단의 배기가스 온도 증가량을 측정하였다. 재생 실험에서는 Table 2를 기준으로 HC 및 O₂의 농도를 변경하여 각 조건에 따른 재생 특성을 파악하고자 하였다. Table 3은 재생 실험 시 DOC 전단의 배기가스 농도 조건을 표로 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 HC 농도 변화에 따른 DOC 후단의 배기가스 온도 변화

Fig. 3은 DOC 전단 입구온도가 300°C인 조건과 DOC 전단 입구온도가 400°C인 조건에서 각 조성별 DOC 후단의 온도증가량을 나타낸 그래프이다. 두 그래프 모두 배기가스 내 HC 농도가 증가함에 따라 DOC 후단에서 측정된 온도증가량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 배기가스 내 HC 농도가 50 ppm 일 때는 산화하는 HC 농도가 매우 미량이기 때문에

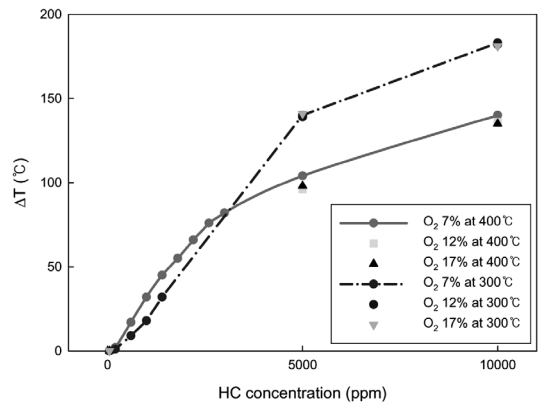


Fig. 3 Temperature deviation between upstream and downstream of DOC according to the HC concentration for two DOC inlet temperature 300°C and 400°C

온도 상승효과는 10°C 이내로 매우 작다. 배기가스 내 HC 농도가 50 ppm에서 5,000 ppm으로 증가할 때 온도증가량은 급격한 상승을 보이나, 5,000 ppm에서 10,000 ppm으로 증가할 때는 증가 추세가 감소한다. 일반적으로 DOC의 HC 산화율은 저온에서부터 증가하다 약 300°C 이상에서 거의 일정한 효율을 나타낸다. DOC 전단 입구온도가 300°C와 400°C인 경우 모두 DOC 전단 입구온도가 300°C 이상이기 때문에 DOC의 산화율은 비교적 일정하게 나타난 것으로 예상된다. 하지만 온도가 증가할수록 외부로의 열전달이 증가하여 HC 농도가 증가하여도 DOC 후단의 온도증가 추세가 감소하는 것으로 판단된다. 또한, 동일한 HC 농도조건에서 O₂ 농도의 변화에 따른 온도증가량은 거의 일정하게 나타나 O₂의 농도는 온도증가에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 이러한 HC 산화에 의한 배기가스 온도의 증가는 CDPF 전단의 배기가스 온도를 상승시키기 때문에 CDPF의 재생을 활성화시킬 것으로 판단된다.⁶⁾

3.2 O₂ 농도 변화에 따른 재생 특성

Fig. 4~6은 DOC 전단 입구온도가 300°C인 조건에서, Fig. 7~9는 DOC 전단 입구온도 400°C인 조건에서 각각 HC 농도가 동일할 때 O₂ 농도 변화에 따른 CDPF 후단의 온도변화를 나타내었다. 각각의 조건에서 O₂ 농도 증가에 따라 CDPF 후단의 최고온도

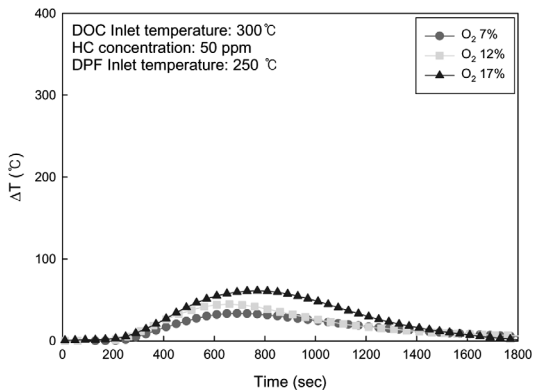


Fig. 4 Temperature deviation between upstream and downstream of the CDPF as function of time with various O₂ concentration in case of 50 ppm HC concentration and DOC inlet temperature 300°C

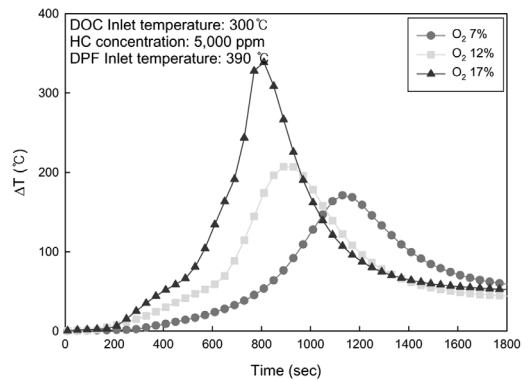


Fig. 5 Temperature deviation between upstream and downstream of the CDPF as function of time with various O₂ concentration in case of 5,000 ppm HC concentration and DOC inlet temperature 300°C

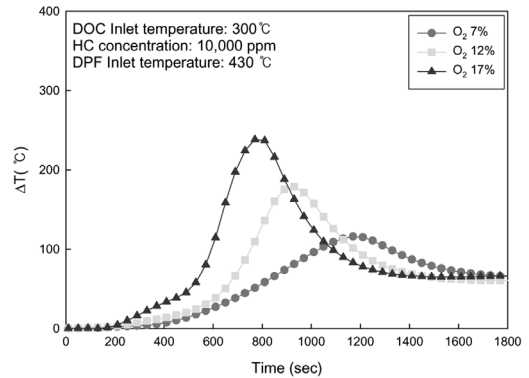


Fig. 6 Temperature deviation between upstream and downstream of the CDPF as function of time with various O₂ concentration in case of 10,000 ppm HC concentration and DOC inlet temperature 300°C

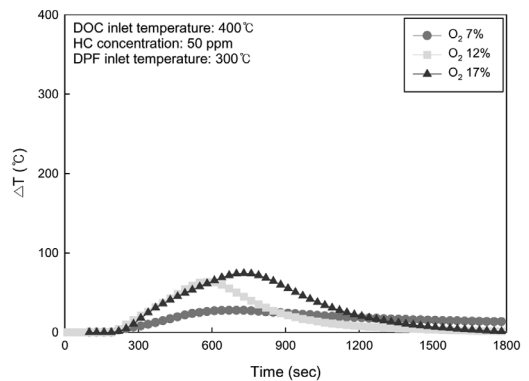


Fig. 7 Temperature deviation between upstream and downstream of the CDPF as function of time with various O₂ concentration in case of 50 ppm HC concentration and DOC inlet temperature 400°C

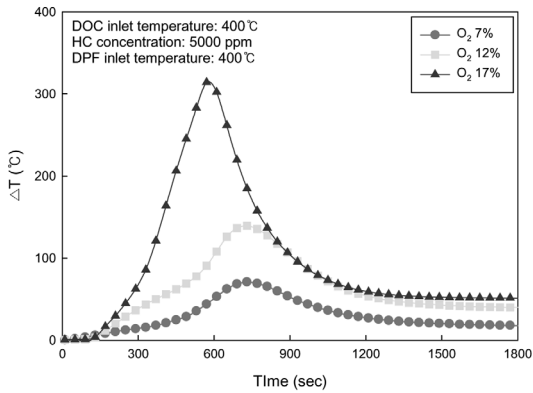


Fig. 8 Temperature deviation between upstream and downstream of the CDPF as function of time with various O₂ concentration in case of 5,000 ppm HC concentration and DOC inlet temperature 400°C

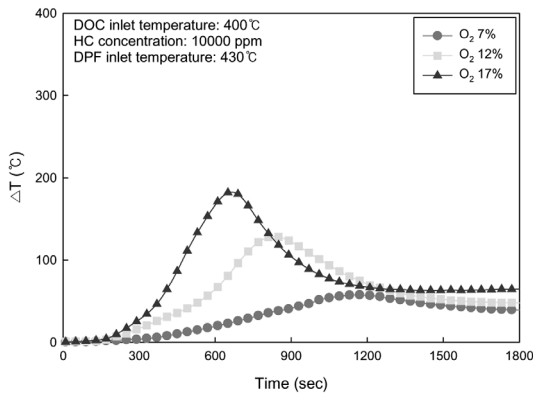


Fig. 9 Temperature deviation between upstream and downstream of the CDPF as function of time with various O₂ concentration in case of 10,000 ppm HC concentration and DOC inlet temperature 400°C

가 증가하고 최고온도 도달 시간이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 O₂ 농도 증가에 따라 재생이 활발하게 일어난 것으로 판단할 수 있으며, O₂ 농도 증가에 따라 DOC에서 산화되어 생성되는 NO₂의 양이 증가하고 반응하지 않고 배출되는 O₂의 양도 증가하기 때문에 CDPF의 재생을 활성화시킨 것으로 판단된다.⁷⁾

3.3 HC 농도 변화에 따른 재생 특성

HC 농도의 증가는 DOC에서 HC 산화량을 증가시켜 CDPF 전단의 배기가스온도를 상승시키고 상

승된 배기가스 온도가 재생 시 PM 산화를 활성화할 것으로 판단되었다.⁸⁾ HC 농도가 50 ppm일 때와 5,000 ppm의 두 경우를 비교해 보면 5,000 ppm인 경우에 더욱 높은 온도증가량을 보여, DOC 산화반응으로 인해 상승된 배기가스 온도가 CDPF 재생반응을 활성화시킨 것을 확인할 수 있다. 그러나 HC 농도가 5,000 ppm일 때와 10,000 ppm일 때를 비교하여 보면, HC 10,000 ppm 분사 시 DPF 전단의 배기가스 온도는 더욱 증가하지만 CDPF 후단의 온도증가량은 적게 나타난다. 일반적으로 배기가스 온도가 350~400°C일 경우 DOC에 의한 NO의 NO₂ 변환효율이 가장 높으며, 이로 인해 CDPF 내의 NO₂에 의한 PM의 산화반응이 가장 활발하게 일어나는 것으로 알려져 있다.⁹⁾ 따라서 10,000 ppm의 HC 농도의 경우, DOC에서 HC 산화에 많은 양의 O₂를 소비하게 되고 DOC 후단에서 NO₂와 O₂의 양이 감소하게 되어 CDPF 재생에 악영향을 미친 것으로 판단된다.

3.4 반응지수 판단

배기가스의 온도 변화를 측정하여 재생 시간 및 온도 상승률 및 최대 재생온도 등을 통하여 CDPF의 재생 특성을 파악할 수 있으나 이를 정량화 하는 것은 매우 어려운 일이다. Yukio Miyairi 외의 연구¹⁰⁾에 의하면 CDPF의 재생 특성을 비교하기 위하여 반응지수를 구하는 방법을 제시하였다. 그러나 기존 방법의 경우 재생 시간을 표현하기에는 부정확한 부분이 있다. 따라서 이를 이용하여 본 연구에서는 아래의 식과 Fig. 10에 나타난 방법과 같이 수정하여 실험 결과를 정량적으로 비교하기 위한 방법을 나타내었다.

$$\text{Characteristic Reaction Intensity: } I_c = \frac{Q_c}{t_c}$$

Q_c : total reaction heat estimated from the area covered by the overshooting temperature profile

t_c : characteristic reaction time defined as the full width at half maximum

I_c 는 반응지수로서 CDPF 재생으로 인한 온도 변화량의 면적을 나타내는 Q_c 와 최대 온도 변화량의 절반에서의 시간범위를 나타내는 t_c 와의 관계식으로 구하여진다. CDPF에서 재생이 일어날 때 낮은

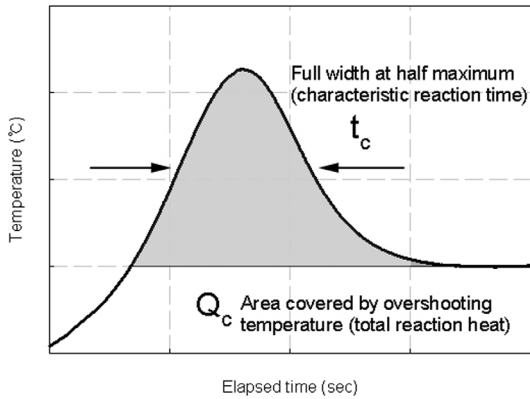


Fig. 10 Definition of reaction intensity

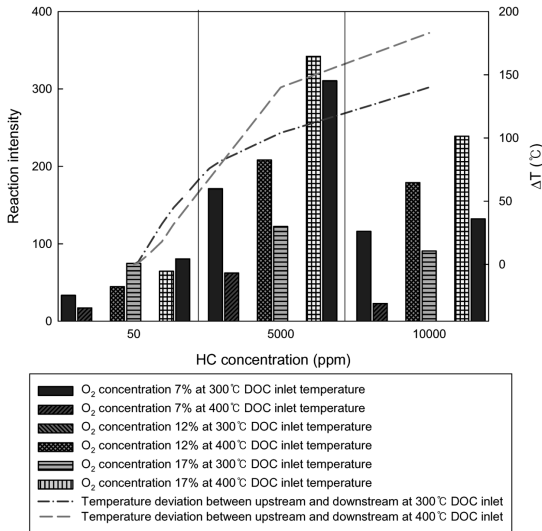


Fig. 11 Regeneration reaction intensity of the CDPF and temperature deviation between upstream and downstream of the DOC as function of time with various HC concentration in case of various DOC inlet temperature

온도로 오래 지속되는 경우와 높은 온도로 짧게 일어나는 경우 Q_c 로 비교할 경우 동일하게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 재생이 일어나는 동안의 시간특성을 고려하기 위하여 Q_c 를 t_c 로 나누어 시간에 따른 재생특성도 비교 할 수 있도록 하였다. 따라서 t_c 의 값이 클수록 더욱 원활한 재생이 이루어지고 있음을 의미한다.

Fig. 11은 DOC 입구온도가 300°C와 400°C일 때의 HC 농도별 재생 반응지수 t_c 와 DOC에 의한 온도

증가량을 나타내었다. 반응지수 t_c 는 각 조건별 그래프를 통하여 t_c 와 Q_c 의 값을 구한 뒤 위의 식을 통하여 나타내었다. 앞서 설명하였듯이 HC 증가에 따라 DOC 후단의 온도는 더욱 증가하며, 동일한 HC 농도 조건에서 O_2 농도 증가에 따라 재생반응이 활발히 일어나는 것을 확인할 수 있다. 또한 DOC에서 과다한 HC 산화로 인해 O_2 농도가 감소하여 5,000 ppm인 경우 보다 10,000 ppm일 때 재생 반응지수가 낮게 나타난다.

재생 반응지수 비교 결과 두 가지 DOC 입구온도 조건에서 재생특성을 객관적으로 잘 나타내고 있다.

그래프 분석 결과 재생 반응지수는 각 조건에서의 재생 특성을 정량화 하여 나타낼 수 있으며, 객관적인 평가를 가능하게 함으로써 CDPF 재생특성을 비교 및 분석하는 데 매우 적합한 방법으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 배기가스 온도 및 HC, O_2 농도에 따른 DOC-CDPF의 재생 특성 변화를 파악하기 위해 test-rig를 제작하여 실험을 수행하였으며, 각각의 조건에서 재생 특성을 CDPF 후단의 가스 온도 변화량을 통해 비교하였다.

- 1) HC 농도가 증가할수록 DOC 후단의 배기가스 온도가 상승하였다. 이는 HC 농도가 증가함에 따라 DOC에서 산화되는 HC의 양도 증가하여 산화시 발생하는 발열량이 높기 때문으로 판단된다. O_2 의 농도 변화는 온도 상승에 큰 영향을 미치지 않는다.
- 2) 재생 시 O_2 농도가 증가할수록 CDPF 후단의 최고온도는 더욱 높아지고 최고온도 도달시간은 짧아져 재생이 활발하게 일어난 것을 확인하였다. O_2 농도 증가에 따라 DOC 산화반응으로 인해 발생하는 NO_2 의 농도가 증가하고 반응되지 않은 O_2 의 양이 증가하여 PM의 산화반응이 더욱 활발하게 나타나는 것으로 보인다.
- 3) 동일한 온도 및 O_2 농도 조건에서 HC 농도가 50 ppm에서 5,000 ppm으로 증가한 경우, 재생반응은 활발하게 일어났다. 하지만 10,000 ppm의 경우 5,000 ppm 보다 낮은 반응지수를 나타냈다. 이

는 DOC에서 HC 산화에 의해 O₂의 양이 감소하게 됨에 따라 NO₂ 생성량 및 O₂의 양이 감소하여 재생에 악영향을 미치는 것으로 판단된다.

- 4) 재생으로 인한 온도 변화 곡선에서 온도가 상승한 부분의 면적과 재생이 활발하게 일어난 구간의 시간으로 계산한 재생 반응지수는 재생특성을 정량화하여 객관적으로 비교하기 위한 좋은 평가방법으로 판단된다.
- 5) 배기가스 내 HC농도의 증가는 DOC에서의 HC 산화량을 증가시켜 배기가스 온도를 상승시키지만, 과도한 경우 DOC에서 NO₂ 산화에 필요한 O₂ 농도와 CDPF 전단에서의 O₂ 농도를 감소시켜 재생반응에 악영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 디젤기관에서 후분사나 배기관내 연료분사 등의 방법으로 배기가스 중의 HC 농도를 증가시킬 경우 HC 농도의 적절한 제어가 필요하다.

후 기

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

References

- 1) P. Richards, B Terry, M. W. Vincent and J. Chadderton, "Combining Fuel Borne Catalyst, Catalytic Wash Coat and Diesel Particulate Filter," SAE 2001-01-0902, 2001.
- 2) M. Bouchez and J. B. Dementhon, "Strategies for the Control of Particulate Trap Regeneration," SAE 2000-01-0472, 2000.

- 3) R. J. Locker, N. Gunasekaran and C. Sawyer, "Diesel Particulate Filter Test Methods," SAE 2002-01-1009, 2002.
- 4) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamental, McGRAW-HILL, 1988.
- 5) S.-H. Yoo, Y.-C. Noh, Y.-J. Park, D.-S. Kim and, Y.-S. Cho, "An Experimental Study on Pressure Drop and Heat Transfer in Catalyzed Diesel Particulate Filter," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.371-376, 2006.
- 6) M. Heo, Y.-J. Park, Y.g-S. Cho and J.-G. Joo, "An Experimental Study on Regeneration Characteristics of Catalyzed Diesel Particulate Filter with Variation of Exhaust Gas Temperature and Composition," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.282-287, 2007.
- 7) K. Hanamura, T. Suzuki, T. Tanaka and Y. Miyairi, "Visualization of Combustion Phenomena in Regeneration of Diesel Particulate Filter," SAE 2003-01-0836, 2003.
- 8) K. Yamamoto, K. Takada, J. Kusaka, Y. Kanno and M. Nagata, "Influence of Diesel Post Injection Timing on HC Emissions and Catalytic Oxidation Performance," SAE 2006-01-3442, 2006.
- 9) C. K. Narula, C. S. Daw, J. W. Hoard and T. Hammer, "Materials Issues Related to Catalysts for Treatment of Diesel Exhaust," Int. J. Appl. Ceram. Technol., 2, pp.452-466, 2005.
- 10) K. Hanamura, T. Suzuki, T. Tanaka and Y. Miyairi, "Visualization of Combustion Phenomena in Regeneration of Diesel Particulate Filter," SAE 2003-01-0836, 2003.