< 기술 논문 >

DPF내 포집된 입자상 물질의 산화율 산출을 위한 실험적 연구

심 범 주^{1,3)} · 박 경 석^{*2)} · 조 규 회¹⁾ · 이 형 준¹⁾ · 민 병 두³⁾

경희대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 경희대학교 기계공학과²⁾ · 쌍용자동차 기술연구소³⁾

Experimental Study on Estimation of Oxidation Rate of PM inside of Diesel Particulate Filter

Beomjoo Shim^{1,3)} · Kyoungsuk Park^{*2)} · Kyuhee Jo¹⁾ · Hyeongjun Lee¹⁾ · Byeongdu Min³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kyunghee University, Gyeonggi 446-701, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Gyeonggi 446-701, Korea

³⁾R&D Center, Ssangyong Motor Company, Chilgoi-dong, Pyeongtaek-si, Gyeonggi 459-711, Korea

(Received 25 April 2012 / Revised 15 August 2012 / Accepted 21 August 2012)

Abstract : Conventional method to estimate mass of particulate matter accumulated in diesel particulate filter is to use pressure difference between upstream and downstream of the filter. Then measured pressure difference should be compared that of clean condition which is no particulate matter accumulated in DPF. During regeneration soot oxidation is also estimated by same method. This methodology, however, has demerit on accuracy because of pressure difference deviation of clean DPFs and pressure difference caused by non-carbon based PM which is different from that of caused by carbon based PM. This study suggests new methodology to estimate accumulated soot oxidation rate through exhaust gas characteristics during regeneration. Results, more high accuracy of soot oxidation was obtained by analysis of relationship between fuel mass and concentration of carbon dioxide and oxygen.

Key words : Diesel particulate filter(매연 포집 필터), Particulate matter(입자상 물질), Soot oxidation(매연의 산화), Carbon based PM(탄소계 입자상 물질)

1. 서 론

디젤 기관은 가솔린 기관보다 높은 압축비에서 운전되고 출력 제어를 위한 흡기 쓰로틀이 없으며 연소 중 노킹으로 인한 연소 제어의 제한이 적고 희박 공연비 조건의 운전이 가능하기 때문에 높은 열효율과 연료 소비율이 우수하다. 이러한 장점으로 인하여 기후 변화 협약 및 온실 가스 배출 규제에 일한 이산화탄소(CO₂) 배출량 규제에 대응할 유력한 대안으로 인식되고 있으며 디젤 차량의 보급 또한 급격히 증가하는 추세에 있다.¹⁾

그러나 디젤 기관은 가솔린 기관에 비하여 질소

산화물(NO_x)과 입자상 물질(PM) 발생량이 매우 높고, 이중 NO_x는 배기 가스중에 산소(O₂)의 함량이 높기 때문에 가솔린 기관과 같이 삼원촉매를 이용하여 저감할 수 없으며 PM은 성분중의 용해성 유기 화합물(SOF)만을 산화촉매를 이용하여 제한된 저감이 가능하기 때문에 효과적인 저감을 위하여 물리적으로 포집하였다가 주기적으로 재생 시키는 매연 포집 필터(DPF, diesel particulate filter)를 적용하고 있다.²⁾

DPF에 포집되는 PM은 연료의 연소에 의하여 발생하는 탄소 계열의 입자상 물질인 soot 외에 기관을 구성하는 금속 성분이 엔진 마모에 의해 발생되어 윤활유에 섞여 연소실로 유입되었다가 배기관으로

*Corresponding author, E-mail: ks2507@khu.ac.kr

Fig. 1 Composition of diesel particulate matter^{4,5)}

Fig. 2 Composition of metallic ash from diesel particulate matter⁶⁾

배출되는 철(Fe), 구리(Cu), 크롬(Cr), 알루미늄(Al) 등의 산화물과 윤활유에 첨가되는 중화제, 산화방지제, 부식방지제, 내마모제 등의 첨가물질의 산화에 의하여 칼슘(Ca), 아연(Zn), 망간(Mg) 산화물 그리고 연료 내의 황(S)이 산화되어 발생하는 황산화물(Sulfate)과 같은 비탄소 계열의 입자상 물질로 구성된다.³⁾ Fig. 1과 2는 PM을 구성하는 입자상 물질의 종류와 금속성 재(ash)의 구성을 나타낸다.

포집되는 PM중에 탄소 계열의 입자상 물질만 재생 과정을 통하여 제거가 가능하기 때문에 비탄소 계열의 입자상 물질은 계속 퇴적되어 필터 전후단의 차압 증대 요인으로 작용하게 된다. 재생 과정 중에 soot의 산화 여부도 필터 전후단의 차압을 이용하여 산출되기 때문에 상기의 비탄소 계열에 의한 차압 증가분이 정확히 인식되지 않으면 재생 중 soot의 산화율 산출에도 많은 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 재생 중 soot의 산화율을 비탄소 계열의 입자상 물질 퇴적량에 무관한 필터 전후단의 배기 가스 성상을 이용하여 soot의 산화율을 산출하기 위한 연구를 시도하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

커먼 레일 연료 분사 장치가 적용되고 연료 분사 관련 제어 인자, 과급 압력 및 배기 가스 재순환(EGR)등을 포함한 기관 운전 변수의 전자 제어가 가능한 2L급 디젤 기관을 사용하였다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 기관의 개략도를 나타낸다.

후처리 장치로는 1.2L의 디젤 산화 촉매(DOC)와 3.9L 용량의 SiC 타입의 DPF를 사용하였다. Table 1에 본 연구에서 사용한 기관과 후처리 장치의 상세 사양을 나타내었다. 재생 과정 중 DOC의 전후단과 DPF의 후단에서 CO, CO₂ 와 O₂의 농도 측정을 위하여 위하여 H사(社)의 가스 분석기를 사용하였다. Table 2에 가스 분석기의 상세 사양을 나타내었다.

Fig. 3 Specific diagram of test engine

Table 1 Specification of test engine & aftertreatment

Engine	Displacement / Cyl. No	2,000 cc / 4 cyl.
	Valve No.	4 valves / cyl
	Fuel injection system	Common rail
	Emission capability	EU-5
DOC & DPF	DOC volume [L]	1.2
	DPF volume [L]	3.9
	DPF material	SiC
	Soot capacity [g/L]	8

2.2 실험 방법

우선 DPF내에 입자상 물질이 전혀 퇴적되지 않

Table 2 Specification of gas analyzer

Items	Specification	
Model	MEXA-554JKNR (HORIBA)	
Target gas	CO/HC/CO ₂ /O ₂ /NO _x /λ	
Range	CO	0.00 ~ 10.00% vol
	HC	0 ~ 10,000 ppm
	CO ₂	0.00 ~ 20.00% vol
	O ₂	0.000 ~ 25.00% vol
	NO _x	0 ~ 5,000 ppm
	λ	0.50 ~ 2.50

은 크린(clean) 상태에서 기관을 DPF 재생 모드로 작동시키면서 DOC의 전후단과 DPF의 후단에서 배기 가스를 측정하였다. 이후 DPF에 soot을 강제로 퇴적시키고 이에 따른 DPF 전후단의 차압을 측정하기 위하여 별도의 기관 운전 조건을 설정하였다. Soot의 강제 퇴적을 위해서는 인테이크 스로틀 밸브를 이용한 흡기 교축, 배기 가스 재순환을 증대, 과급 압력 저하등을 적용하여 공기과잉률을 매우 낮은 조건(최하 1.2[-] 수준)으로 설정하였고 여기에 연료 분사 압력 저하, 주분사 시기 지각, 예분사 연료량 및 분사 시기 등을 조정하여 연소시 soot의 생성을 증대시켰다. 또한 엔진의 회전수를 공회전(800rpm)에서 2000rpm으로 급격히 상승시켰다가 다시 공회전으로 복귀 하도록하여 과도 운전 조건을 모사하였다. 상기한 soot 퇴적을 위한 운전 모드(soot feeding mode)는 5초로 구성하였으며 총 40회를 반복한 후 150°C 이상의 온도에서 정밀 저울을 이용하여 무게를 실측한 결과 0.15g의 soot의 퇴적됨을 확인하였다. 퇴적된 soot의 산화를 방지하기 위하여 배기 가스의 온도는 300°C를 넘지 않도록 하였다.

Soot의 퇴적에 따른 DPF의 차압 측정을 위하여 별도의 기관 운전 조건을 설정하였다. 우선 기관의 회전수는 공회전에서 3500rpm으로 서서히 상승시켜 저,고 배기 유량에서 차압을 측정할 수 있도록 하였으며 공회전, 2000, 3500rpm에서 기관 회전 속도를 유지하여 정상상태에서 차압을 측정할 수 있도록 하였다. 차압 측정 운전 모드 동안에 기관에서 생성된 soot으로 인하여 차압 측정시 오차가 발생할 수 있기 때문에 기관 운전 변수를 조정하여 공기과잉률을 평균 8[-] 수준으로 증대하였다. Fig. 4는 상기한 soot 퇴적과 DPF의 차압 측정을 위한 기관 운

Fig. 4 Engine operation mode for soot feeding and pressure drop measurement

전 조건을 나타낸다.

상기한 방법으로 DPF에 25g의 soot을 퇴적시킨 뒤 재생시키면서 DPF 후단에서의 배출 가스를 측정하여 DPF내에 soot의 퇴적 여부에 따른 배출 가스의 변화를 분석하였다.

DPF 재생을 위한 운전 모드는 기관의 회전 속도를 1800rpm을 유지하였으며, 배기 가스의 온도를 DOC의 활성화 온도 이상으로 가열하기 위하여 흡기 교축, 주분사 시기 지각(retard), 과급 압력 저하, 제 1 후분사 등을 통하여 약 100초간 배기 가스 온도를 가열하였다. 이후에는 배기 밸브가 열리는 시점 직전에 제 2 후분사를 적용함으로써 기상의 탄화수소를 DOC에 공급하여 촉매에서의 산화열을 이용하여 배기 가스의 온도를 soot의 산화 온도 이상으로 유지하였다. DPF 재생시에 DOC 후단에서의 배기 가스 온도는 soot의 급격한 산화 반응을 억제하고 재생 기간을 길게 하여 soot이 퇴적 되지 않은 경우와의 분별을 용이하게 하기 위하여 일반적인 재생 목표 온도 보다는 다소 낮은 500°C로 설정하였고, DPF 내에 포집된 soot의 산화에 의한 일산화 탄소(CO)의 생성을 억제하여 CO₂를 이용한 산화물 산출을 용이하게 하기 위하여 재생시 공연비는 일반적인 목표 수준 대비 다소 높은 31 : 1 수준으로 설정하였다.

3. 실험 결과

우선 DPF내에 soot이 전혀 퇴적되지 않은 크린

Fig. 5 Pressure difference of DPF according to accumulated soot mass

Fig. 7 CO, CO₂, O₂ Concentration before DOC & after DPF under different Soot Mass

Fig. 6 Fuel injection quantity & exhaust gas temperature

(clean) 조건에서 상기한 차압 측정 운전 모드로 배기 가스의 체적 유량에 따른 DPF 전후단의 차압을 측정하였으며, 이후 기관에서 강제로 25g의 soot을 퇴적시킨 후에 동일한 방법으로 차압을 측정하였다. Fig. 5는 크린 상태와 25g의 soot이 퇴적된 조건에서의 DPF 전후단의 차압을 나타낸다.

Fig. 6은 정상 운전 조건, DOC 가열 운전 조건 그리고 DPF 재생 운전 조건에서 행정당 연료 분사량과 DPF 전단에서 배기 가스의 온도를 나타낸다. 보이는 바와 같이 25g의 soot이 퇴적된 조건에서 소폭으로 연료 분사량이 높은 것으로 확인되었으며 배기 가스의 온도도 재생 모드 초기에 soot 퇴적 조건이 50°C 정도 높은 것으로 관찰되었다. 이는 soot 퇴적량에 따른 연료 분사량의 증가와 soot 퇴적에 따

른 배압의 증가가 원인으로 판단된다.

Soot 25g 퇴적 조건과 soot이 퇴적되지 않은 조건에서 DPF를 재생 시키면서 DPF의 후단과 DOC 전단에서 CO, CO₂, O₂의 농도를 측정된 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

우선 O₂의 농도는 DOC의 산화 작용으로 DOC 전단의 O₂ 농도가 DPF 후단 대비하여 약 2% 수준으로 높은 것으로 관찰되었고, soot 25g 퇴적 조건의 O₂ 농도는 배기 가스의 온도가 400°C에 도달하는 120초 시점에서 500°C에 도달하는 400초 시점까지 낮게 관찰되었다. 이는 포집된 soot이 약 400°C부터 산화가 이뤄지기 시작하여 soot이 없는 조건의 O₂ 배출 농도와 동일해지는 400초 시점까지 산화가 진행되는 것으로 판단된다.

CO₂의 농도 변화는 O₂와는 반대의 경향으로 퇴적된 soot의 산화가 이뤄지는 구간에서 soot이 퇴적되지 않은 조건 보다 높게 관찰되었다. 또한 재생 모드로 인한 제2 후분사 연료가 분사되는 120초 시점 이후에도 DOC 전단에서의 CO₂ 농도의 변화가 없는 것은 분사된 연료가 연소실 내에서 연소에 가담하지 않고 탄화수소의 형태로 배출되기 때문인 것으로 판단된다.

CO의 거동은 DOC 가열 기간과 재생 기간 동안에 DOC 전단에서 0.16% 수준으로 매우 낮은 수준으로 관찰되었고, DPF 후단에서는 soot 0g, 25g 퇴적 조건에서 모두 DOC가 활성화되기 이전에 최대 0.12% 수준을 보이다 이후의 재생 기간에는 검출되지 않

을 정도의 매우 낮은 배출 특성을 보이는 것으로 확인 되었다.

상기한 CO_2 와 O_2 의 체적 농도는 배기 가스 체적 유량과 연료 분사량 및 배기 가스의 온도의 미소한 차이에 의해 그 농도가 변화할 수 있기 때문에 이러한 오차 요인을 배제하기 위하여 본 연구에서는 CO_2 와 O_2 의 배출량을 기체 방정식을 이용하여 배출 질량으로 변경하고 이를 분사된 연료 질량과의 비를 산출하여 비교하였다.

Fig. 8은 상기 조건에서 CO_2 와 연료 분사량과의 비를 나타낸다. 보이는 바와 같이 배기 가스 온도가 400°C 에 도달하는 120초 시점에서 soot이 퇴적 되지 않은 조건인 2.5[-]보다 높아지기 시작하여 400초 시점에서 다시 동일해 지는 현상이 관찰되었다. 이는 이 구간 동안에 분사된 연료의 연소에 의해서 발생된 CO_2 외에 포집된 soot의 산화에 의한 CO_2 배출이 원인으로 판단된다.

Fig. 9는 동일한 방법으로 산출한 O_2 와 연료 분사량과의 비를 나타낸다. 배기 가스 온도가 400°C 에 도달하는 시점부터 soot이 없는 조건 대비하여 다소 낮게 관찰되었으나 CO_2 의 경우 보다는 그 차이가 적게 관찰되었다. 이는 포집된 soot이 산화되는 과정에서 NO_2 와 같은 산화 물질이 관여한 결과로 사료된다.⁷⁾

Fig. 10은 상기한 CO_2 /연료 질량비를 이용하여 산출한 soot의 산화율을 나타낸다. 재생 초기에 급격한 산화가 진행되어 최대 0.23g/s의 산화율을 보였

Fig. 8 CO_2 / Fuel Mass Ratio before DOC & after DPF under different Soot Mass

Fig. 9 O_2 / Fuel Mass Ratio before DOC & after DPF under different Soot Mass

Fig. 10 Estimated soot oxidation rate by CO_2 /Fuel Mass Ratio

으며 이후에는 서서히 감소하여 400초 시점에서 산화가 종료되는 것으로 확인되었다.

Fig. 11은 25g의 soot을 포집한 경우와 soot이 포집되지 않은 경우에 재생시의 배기 가스의 체적 유량과 DPF에서의 차압 거동을 나타낸다. 배기 가스의 체적 유량은 상기한 바와 같이 soot 퇴적 조건에서 높은 연료 분사량과 이에 따른 높은 배기 가스의 온도로 인하여 soot 퇴적 조건에서 높은 것으로 관찰되었고, 이후 50[l/s] 수준으로 동일해 지는 경향을 보였다. DPF의 차압은 soot 퇴적 조건이 soot이 없는 조건 보다 높은 값을 보이다 약 600초 시점에서 soot이 없는 조건과 동일해 지는 현상이 관찰되었다. 이는 DPF 후단에서 분사된 연료의 양과 CO_2 및 O_2 배출량의 비를 이용하여 포집된 soot의 산화 종료 시점을 산출한 방법보다 약 200초 긴 수준으로 soot이

Fig. 11 Pressure drop of DPF according to accumulated Soot Mass during regeneration

퇴적된 경우가 DPF내의 온도가 높기 때문에 이로 인하여 배기 가스의 점성이 증가한 원인으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 DPF내 포집된 soot의 산화 여부를 종래의 DPF 차압을 이용하여 산출하는 방식과는 달리 배출 가스 성분을 분석하여 산출하는 연구를 시도한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) DPF 후단에서의 CO_2 와 O_2 의 농도는 soot의 산화 반응으로 인하여 CO_2 는 증가하고 O_2 는 감소하는 현상이 뚜렷하기 때문에 이를 이용하여 포집된 soot의 산화 여부 판단 및 산화율 산출이 가능할 것으로 판단된다.
- 2) 연료 분사량의 차이로 인한 오차 요인을 줄이기 위하여 연료와 배기 가스의 질량비를 이용하여 포집된 soot의 산화 여부를 산출한 결과 CO_2 /연료 질량비는 soot의 산화에 따른 매우 뚜렷한 검출도가 있음이 확인되었으며, 이를 이용하여 실시간 soot의 산화율 검출이 가능한 것으로 확인되었다.
- 3) O_2 /연료 질량비를 이용하여 soot의 산화 여부 및 산화율을 산출하는 경우는 검출도가 매우 낮은 것으로 확인되었으며, 이는 배기 가스중에 NO_2 와 같은 산화물이 soot의 산화에 관여했기 때문인 것으로 판단된다. 이에 관한 추가 연구가 필요할 것으로 사료 된다.
- 4) DPF 전후단의 차압을 이용하여 포집된 soot의 산화 여부 및 산화율을 산출하는 경우는 배출 가스

를 분석하여 soot의 산화를 산출하는 경우보다 긴 산화 기간을 보이는 것으로 확인되었다.

후 기

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2011년도 산학연공동기술개발사업의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

- 1) H. Choi, J. Lee and N. Sung, "Measurement of Permeability and Forchheimer Coefficient of a Metallic Foam DPF," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.467-472, 2005.
- 2) J. W. Kang, M. Y. Kim and G. J. Youn, "A Study on the Combustion Optimization of a Common Rail Direct Injection Diesel Engine for Regeneration of the Diesel Particulate Filter," Transactions of KSAE, Vol.13, No.4, pp.167-173, 2005.
- 3) Y. S. Park, "Performance and Technology Overview of Catalyzed Aftertreatment Device for Domestic Diesel Vehicles," Auto Journal, KSAE, Vol.30, No.1, pp.62-74, 2008.
- 4) R. B. Walters, B. J. Nordenstam and R. F. Phalen, "A Generator for the Production of Sulfuric Acid Coated Diesel Soot Aerosols," Atmospheric Environment, Vol.22, No.1, pp.17-23, 1988.
- 5) K. Ko, H. Choi and Y. Lim, "Ash Learning Logic Development and Vehicle Validation for Accurate Detection of Accumulated Ash in Diesel Particulate Filter," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.426-432, 2011.
- 6) Y. Kim, T. Kim, M. Kim, G. Shin, K. Kim and Y. Oh, "Exhaust Gas System of High-voltage Discharge/oxidation Catalyst Filter Indiesel Engine," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.279-284, 2005.
- 7) H. Kim, Y. Park, S. Choi and G. Lee, "Emission Characteristics of NO_2 with the Contents of Precious Metal Coated in Diesel Oxidation Catalyst," KSAE11-G007, pp.24-28, 2011.