

EGR Cooler Fouling 저감을 위한 촉매 장착 EGR Cooler System 평가

홍 광 석¹⁾ · 박 정 수¹⁾ · 이 교 승²⁾

연세대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 경기과학기술대학교 자동차과²⁾

Evaluation of Catalyst Assisted EGR Cooler System for EGR Cooler Fouling Reduction

Kwang Seok Hong¹⁾ · Jungsoo Park¹⁾ · Kyo Seung Lee^{*2)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Gyeonggi College of Science and Technology, Gyeonggi 429-792, Korea

(Received 31 December 2010 / Accepted 1 April 2011)

Abstract : Exhaust gas recirculation is the well-known and widely used NOx reduction technology for diesel engines. More effective EGR cooler has been developed and applied to diesel engines to meet the reinforced emission regulation. However, the contaminated EGR cooler by diesel exhaust gas reduces the performance of the engine and NOx reduction rate. The buildup of deposits in EGR coolers cause significant degradation in heat transfer performance, often on the order of 20~30%. Deposits also increase pressure drop across coolers and thus may degrade engine efficiency under some operation conditions.

In this study, as a solution for this problem, DOC assisted EGR cooler is designed and then investigated to reduce fouling and its impact on cooler performance. A single channel EGR cooler fouling test apparatus and soot particle generator were developed to represent the real EGR cooler and exhaust gas of diesel engine.

EGR cooler effectiveness of the case with catalyst of pt 30g/ft3 decreased just up to 5%. This value was 45% less compared to the case without catalyst which decreased up to 9% after 10hours experiments.

Key words : Cooler fouling(열교환기 오염), DOC(Diesel Oxidation Catalyst, 디젤 산화 촉매), EGR cooler(EGR 쿨러), NOx(Nitrogen Oxides, 질소산화물), PM generator(PM 입자생성기), PM(Particulate Matter, 입자상 물질)

Nomenclature

- CO₂ : carbon dioxide
- EGR : exhaust gas recirculation
- LNT : lean NOx trap
- N₂ : nitrogen
- NOx : nitrogen oxides, NO + NO₂
- SCR : selective catalyst reduction
- SOF : soluble organic fraction

1. 서론

최근 이산화탄소(CO₂)배출에 의한 지구온난화 문제가 부각됨에 따라 가솔린 엔진에 비하여 이산화탄소 배출량이 적고 높은 열효율, 고출력 등의 장점을 지닌 디젤 엔진에 대한 관심이 커지고 있다. 그러나 디젤 차량에 대한 수요가 증가하면서 그에 따른 환경규제도 전 세계적으로 강화되고 있는 추세이며, 디젤 엔진에서 발생하는 환경오염물질인 NOx(질소산화물)와 PM저감기술 개발에 대한 요구가 증가해 왔다.¹⁻³⁾ 그 중 NOx의 경우는 디젤 엔진의 희박한 공연비 특성상 그 저감방법이 쉽지 않지만⁴⁾

*Corresponding author, E-mail: leeks@gtec.ac.kr

선처리기술인 EGR과 후처리 기술인 SCR, LNT 등의 저감기술이 개발되고 있다.

EGR은 디젤엔진의 NO_x 저감을 위한 유일한 선처리 기술로써 실린더 내부의 산소농도를 낮추고 혼합기의 열용량을 증가시키는 방법으로 NO_x의 발생을 억제시킨다.^{5,6)} 최근 저온연소기술의 발달과 엔진의 소형화 추세로 인하여 EGR 기술의 발달이 더욱 강조되고 있다.⁷⁾ 그러나 EGR 가스 내부의 PM이 cooler를 지나면서 퇴적되어 fouling 현상이 발생한다. 이는 cooler에서의 열전달을 방해하여 열교환기 효율이 떨어지고 따라서 EGR cooler 본연의 목적인 NO_x 저감효율이 떨어진다는 단점이 있다. 뿐만 아니라 압력강하에 의하여 엔진의 성능과 효율에도 악영향을 미친다고 알려져 있다.⁸⁾

이에 fouling에 의한 cooler 효율 저감을 방지하기 위한 방안에 대한 연구가 국내는 물론 전세계적으로 진행되어 왔으며 그 중 cooler 전단에 촉매를 달아 fouling을 저감시키는 연구 또한 진행되어왔다.

그러나 엔진과 동력계를 이용한 연구방법으로는 엔진의 운전 조건에 의해 입자의 성분, 크기 및 농도가 동시에 변하기 때문에 독립적인 조건을 변화시키는 데 어려운 점이 있다. 따라서 각 변수들을 독립적으로 제어함과 동시에 안정적인 실험을 진행하기

위하여 프로판(propane-C₃H₈)연료를 이용한 soot 발생기(soot generator)를 사용하여 lab-scale 실험을 수행하였다. 또한 EGR cooler를 모사하기 위하여 단일 채널 EGR cooler에 직접 제작한 촉매장치를 부착하여 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 EGR cooler fouling의 최소화 및 fouling 저감에 대한 촉매의 영향을 규명하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험 장치는 프로판(propane-C₃H₈) 연료를 이용한 soot 발생기, 촉매를 포함한 단일 채널 EGR cooler 장치, 냉각시스템, Data 취득 장치 등으로 나누어 볼 수 있다. Fig. 1은 실제 실험 장치의 전체 개략도이다.

2.1.1 Soot 발생기

엔진에서 나오는 배출가스를 직접 이용하는 기존의 EGR cooler fouling 실험은 엔진의 운전 조건에 의해 입자의 성분, 크기 및 농도가 변한다. 따라서 발생 입자사이즈와 농도, 질량, 배출 가스 온도, 유량 및 냉각수 온도 등의 변수를 독립적으로 제어하기

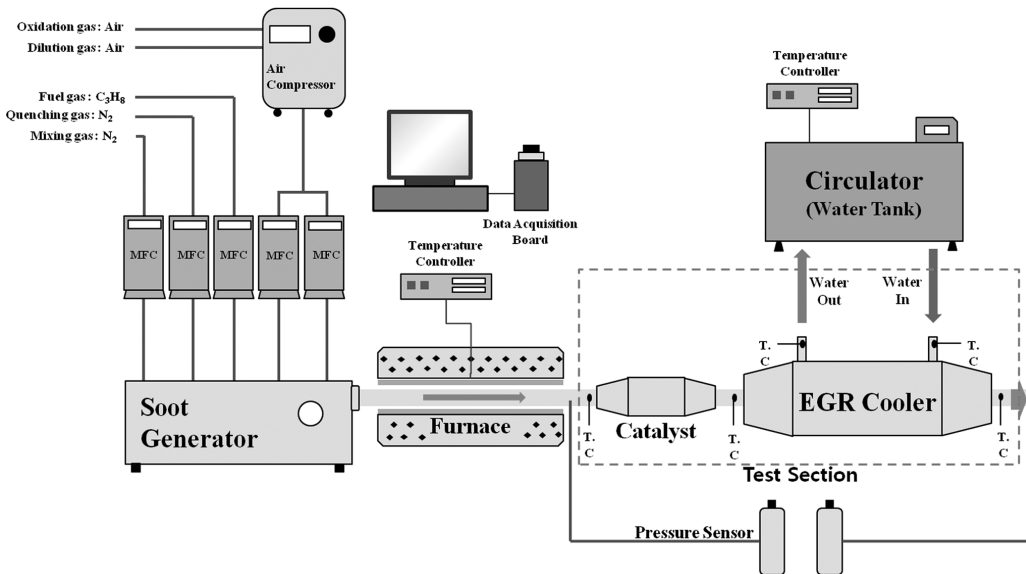




Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

위하여 프로판 연료를 이용한 상용 soot 발생기 (soot generator)를 사용하여 fouling 실험을 수행하였다. soot 발생기에 들어가는 각 모델 가스는 MFC(mass flow controller)를 이용하여 일정 유량으로 제어 하였다.

2.1.2 DOC 촉매

Pt 계열의 DOC 촉매를 사용하였으며 Pt 함량에 따른 PM의 성분 변화 및 fouling의 영향 평가를 위해 Pt 5g/ft³과 Pt 30g/ft³ 두 종류의 촉매를 사용하였다. 촉매가 충분히 높은 온도에서 반응한다는 점을 감안하여 촉매 전단을 단열 하여 EGR 가스의 온도가 적어도 380°C 이상을 유지할 수 있도록 하였다. 실험에서 사용되는 DOC 촉매의 SV의 선정기준은 다음과 같다. EGR 보통 차량에서 사용되는 DOC 촉매의 SV는 100,000/hr ~ 200,000/hr정도이나 lab-scale 실험임을 감안함과 동시에 fouling에 있어서의 DOC 촉매의 효과를 더 명확하게 보기 위해서 SV를 57,000/hr로 낮춰서 선정하였다. 이 SV값은 실제 차량에서 fouling이 일어나기 쉬운 조건인 저속구간에서의 쿨러 유량(30 sLPM), 유속(7 m/s)조건을 기반으로 한다. 실험에서 사용한 DOC 촉매에 대한 자세한 사항은 아래 Table 1과 같다.

Table 1 Catalyst (Pt) specification

촉매	Pt 5g/ft ³	Pt 30g/ft ³
사진		
촉매색상	brown, yellow	gray
단면지름	2.27cm	
길이	7cm	
SV	57,000/hr (유량 30 sLPM, 유속 7 m/s기준)	

2.1.3 모사 관 탈착장치

본 연구에서는 직관 형태의 모사 관을 사용함으로써 동일 조건에서 실험을 반복할 수 있도록 하였고, 실험 전후에 탈착이 가능하도록 구성하였으며, fouling 전후 질량 측정이 가능한 장치를 제작하였다. Fig. 2는 10시간 실험 전후 모사 관의 단면을 나타낸 사진이며 Table 2는 모사관의 제원을 나타내고 있다.



Fig. 2 Figures of the deposits on the cooler wall

Table 2 Specification of single channel EGR cooler

Length [mm]	350
Inner diameter [mm]	11.7
Outer diameter [mm]	12.7
Thickness [mm]	0.5
Spiral	Non spiral type
Material	ASTM 304

2.2 실험방법

Cooler의 열교환 효율과 차압변화를 측정하기 위한 실험시간은 기존의 데이터에서 일정한 값으로 수렴하는 특성을 관찰할 수 있는 시간의 범위에서 반복 실험이 가능하도록 10시간으로 설정하였다. 모사 EGR cooler의 효율을 측정하기 위한 EGR 가스 온도와 냉각수온도는 k-type 온도센서를 이용하여 측정하였으며 압력측정은 압력계(WIKA, S-10)를 이용하였다. 이 데이터는 데이터전달장치(data acquisition board - NATIONAL INSTRUMENT, cDAQ 9174)를 이용하여 컴퓨터에 연결하여 데이터를 취득하였다. 열교환기 효율측정과 압력측정에 관한 좀 더 자세한 사항은 다음과 같다.

2.2.1 EGR Cooler Effectiveness 측정

EGR cooler의 열 교환 효율을 나타내는 ε를 산출하는 식은 식 (1)과 같고 시간에 따른 fouling 정도를 측정하기 위하여 효율의 변화량을 계산하였다. 열교환기 효율의 계산방법은 촉매를 장착하기 전과 후에 따라 차이를 두었다. 촉매를 장착하기 전에는 cooler 전단의 가스온도를 기준으로 열효율을 구한 반면, 촉매를 장착하였을 경우에는 촉매를 포함한 EGR cooler를 시스템으로 고려하여 cooler의 전단이 아닌 촉매전단의 가스온도를 T_{gas, inlet}으로 하여 계산하였다.

$$\epsilon = \frac{T_{gas, inlet} - T_{gas, outlet}}{T_{gas, inlet} - T_{coolant, inlet}} \tag{1}$$

2.2.2 압력측정

Cooler 전단에 촉매가 장착됨에 따라 촉매로 인한 시스템 전체에 배압이 걸릴 우려가 있어 시스템 전단과 후단에 압력센서를 설치하고 각각의 압력을 측정·비교하였다. 정확한 차압을 측정하기 위하여 DOC 촉매 전단과 cooler 후단에 직경 1/4 inch 튜브를 연결하여 압력 센서에 각각 연결시켰다. 압력센서는 센서에 가해지는 압력에 따라 1~1.6bar 범위 내에서 4mA~20mA의 전류 신호를 data acquisition board에 전달한다. 이러한 전류신호를 프로그램에서 변환하여 압력값을 실시간으로 표시하고 차압값을 계산하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 DOC 촉매가 EGR 쿨러 effectiveness에 미치는 영향

DOC 촉매가 EGR cooler의 성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 서로 다른 Pt 함유량을 가진 DOC 촉매를 사용하여 실험을 진행하였다. 성능이 좋은 촉매로 Pt 30g/ft³을 성능이 좋지 않은 촉매로 Pt 5g/ft³을 사용하였으며 이에 대한 결과를 촉매를 사용하지 않았을 경우와 비교하였다. 촉매를 장착하기 위해서 canning 장치를 구성하였으며 촉매 실험의 대조군으로 실시한 촉매를 장착하지 않는 경우에도 canning 장치는 그대로 사용하였다.

실험 시 평균입자크기를 128nm, 냉각수 온도는 40°C로 고정하였으며 추가적으로 DOC 촉매가 온도에 영향을 받을 가능성을 고려하여 EGR 가스 온도는 380°C와 480°C의 두 가지 경우로 실험을 진행하였다.

Fig. 3 ~ 4의 결과에 따르면 Pt 함량이 높은 DOC 촉매 사용 시 EGR cooler의 성능저하가 적은 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 3에 따르면 촉매를 장착하지 않았을 경우 효율이 최대 9%까지 저하되었지만 담지량이 많은 촉매(Pt 30g/ft³)를 장착하였을 경우 효율저하가 5%정도로 장착하지 않은 경우와 비교 시 80%정도의 성능개선효과를 나타내었다. 그러나 Fig. 5 ~ 6의 결과에서 촉매의 성능이 좋을수록 전체 cooler system의 초기 effectiveness는 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 DOC 촉매를 연료를 포함한

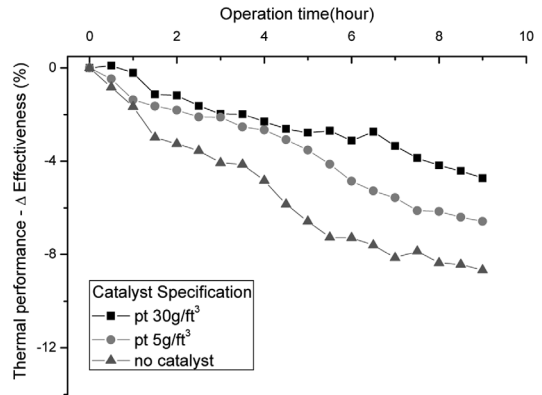


Fig. 3 Thermal performance degradation over time with respect to various condition of DOC catalyst with EGR gas temperature of 380°C. The other variables are mean particle size of 128nm, coolant temperature of 40°C, and the space velocity of 57,000/hr (flow rate : 30sLPM)

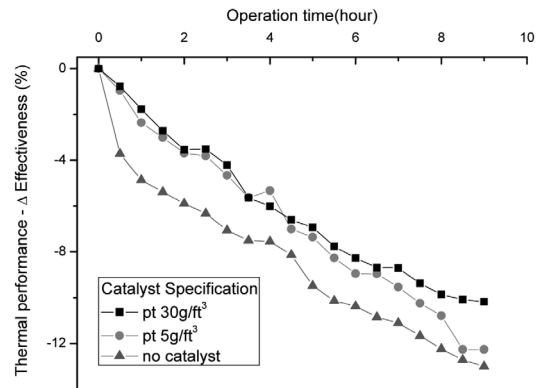


Fig. 4 Thermal performance degradation over time with respect to various condition of DOC catalyst with EGR gas temperature of 480°C. The other variables are mean particle size of 128nm, coolant temperature of 40°C, and the space velocity of 57,000/hr (flow rate : 30sLPM)

EGR 가스가 지나감으로써 촉매 담체 내부에서 발열반응을 일으켜 결과적으로 EGR cooler 출구 가스 온도를 높여줌으로써 산술적으로 cooler의 효율을 떨어뜨리는 것으로 파악된다.

즉 DOC 촉매를 사용하면 초기 effectiveness의 감소는 있지만 시간이 지남에 따라 발생하는 cooler의 effectiveness 감소에는 효과적임을 알 수 있다. 또한 380°C와 480°C의 실험결과를 비교하였을 때 EGR

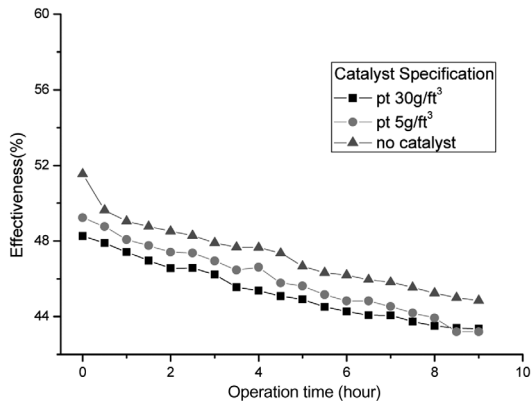


Fig. 5 Effectiveness variations over time with respect to various condition of DOC catalyst with EGR gas temperature of 380°C. The other conditions are mean particle size of 128nm, coolant temperature of 40°C and the space velocity of 57,000/hr (flow rate : 30sLPM)

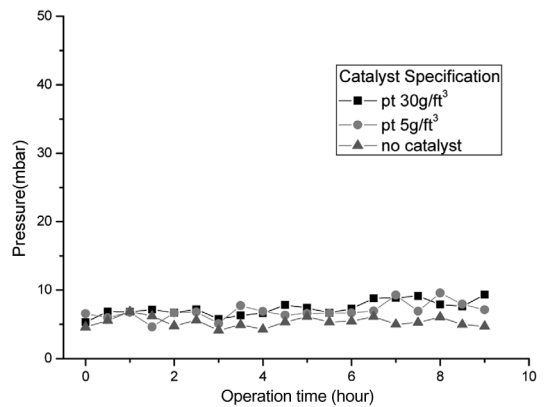


Fig. 7 Pressure-drop over time with respect to various condition of DOC catalyst with EGR gas temperature of 380°C. The other conditions are mean particle size of 128nm, coolant temperature of 40°C and the space velocity of 57,000/hr (flow rate : 30sLPM)

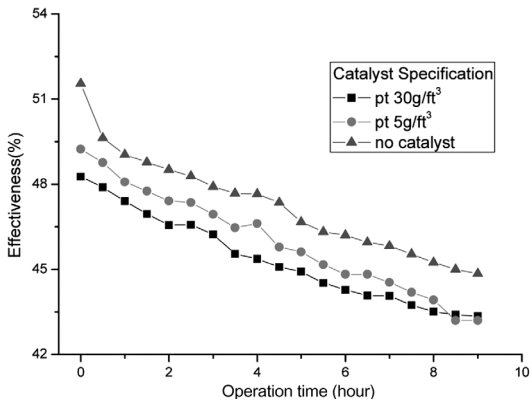


Fig. 6 Effectiveness variations over time with respect to various condition of DOC catalyst with EGR gas temperature of 480°C. The other conditions are mean particle size of 128nm, coolant temperature of 40°C and the space velocity of 57,000/hr (flow rate : 30sLPM)

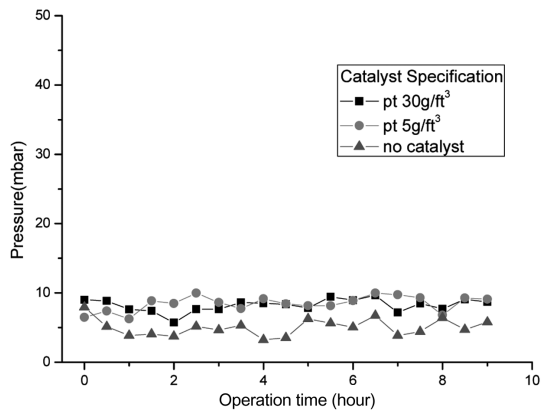


Fig. 8 Pressure-drop over time with respect to various condition of DOC catalyst with EGR gas temperature of 480°C. The other conditions are mean particle size of 128nm, coolant temperature of 40°C and the space velocity of 57,000/hr (flow rate : 30sLPM)

가스의 온도는 위 실험결과에 크게 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다. 이는 DOC 촉매가 300°C 이상에서 활발하게 반응하기 때문에 300°C 이상의 온도에서는 온도를 높여도 촉매의 성능에는 큰 영향이 없는 것으로 파악되었다.

3.2 DOC 촉매가 EGR Cooler 차압변화에 미치는 영향

DOC 촉매 장착에 따른 압력 저하현상을 파악하기 위해 촉매전단과 cooler 후단에 압력센서를 설치하였다.

Fig. 7~8은 각각 380°C와 480°C에서 촉매의 성능 차이에 따른 압력저하를 보여준다. 그래프에 나타난 바에 의하면 시스템 전단과 후단 사이의 차압은 거의 발생하지 않으며 그 차이의 최대치는 5mbar 이하이다. 이정도 차이는 실제 엔진 조건에서 cooler 및 시스템 성능에 거의 영향을 미치지 않을 정도의

값으로 판단된다. 촉매의 담지량 차이 즉, Pt함량 차이에 따라서는 차이가 존재하지 않는다. 즉, Pt 5g/ft³이나 Pt 30g/ft³ 중 어느 것이 더 차압이 크고 작은지 판단하기 어렵다. 다만 촉매를 사용하지 않은 경우, 아주 작은 차이기는 하지만 전체적으로 촉매가 있는 경우보다 약간 차압이 적은 것은 확인할 수 있다. 이러한 현상이 나타나게 된 이유는 촉매를 담고 있는 담체(substrate)가 있음으로써 EGR 가스가 흐르는데 배압이 걸리기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 차압의 경우에도 effectiveness와 마찬가지로 가스온도가 380°C인 경우와 480°C인 두 경우의 차이는 거의 존재하지 않는다.

4. 결론

본 연구는 EGR cooler fouling에 대한 기초 실험 연구로서 PM 입자 생성장치와 촉매장착이 가능한 EGR cooler fouling test rig을 구성하고 이를 바탕으로 하여 EGR cooler fouling의 최소화 및 fouling 저감하는데 있어 촉매의 영향에 대해 분석하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) DOC 촉매를 사용했을 경우 EGR cooler의 effectiveness 감소율을 줄이는 효과를 확인할 수 있었다. Pt 함량이 높은 촉매를 사용할수록 더 좋은 effectiveness drop rate를 줄이는 효과를 나타내었다. 하지만 DOC 촉매에서 발열반응이 일어나기 때문에 초기 cooler의 effectiveness는 촉매를 사용하지 않은 경우보다 줄어드는 단점을 확인할 수 있었다. 또한 380°C와 480°C에서 촉매가 같은 성능을 보인 것으로 촉매의 반응온도를 대략적으로 확인할 수 있었다.
- 2) DOC 촉매를 장착하여도 차압의 증가는 거의 발생치 않는 것을 확인할 수 있었다. 실험 결과에서 얻어진 전체 차압은 5mbar 정도로 거의 무시할 수 있는 수준이며 실제 시스템에 미치는 영향은 거의 미미할 것으로 파악된다. 이러한 결과는 300°C 이상에서 온도 변화에 영향이 없으며 촉매 성능에 따라서 달라지지도 않는다. 다만 촉매를 장착하지 않은 경우 약간 더 차압이 적게 나타

나는데 이는 촉매의 담체(substrate)에 배압이 걸려서 생기는 차압으로 파악된다.

후 기

본 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(KRF-2008-313-D00148).

References

- 1) B. C. Moon, Y. S. Oh, S. K. Oh, K. W. Kang and K. J. Ahn, "A Study on Heavy-duty Diesel Engine Performance with a CR-DPF and Cooled-EGR," Transactions of KSAE, Vol.14, No.3, pp.75-80, 2006.
- 2) M. P. Walsh, "Global Trends in Diesel Emissions Control," SAE 970179, 1997.
- 3) W. R. Wade, "Light-duty Diesel NOx-HC-Particulate Trade-off Studies," SAE 800335, 1980.
- 4) S. J. Maing, K. S. Lee, S. H. Song, K. M. Chun and B. K. Oh, "Simulation of the EGR Cooler Fouling Effect on NOx Emission of a Light Duty Diesel Engine," Fall Conference Proceedings, KSAE, Vol.1, KSAE07-F0035, pp.214-220, 2007.
- 5) N. Ladommatos, S. M. Abdelhalim, H. Zhao and Z. Hu, "Effects of EGR on Heat Release in Diesel Combustion," SAE 980184, 1998.
- 6) M. Zheng, G. T. Reader and J. G. Hawley, "Diesel Engine Exhaust Gas Recirculation - A Review on Advanced and Novel Concepts," Energy Conversion & Management Vol.45, pp.883-900, 2004.
- 7) M. Lance, S. Sluder and J. Storey, Microstructural Evolution of EGR Cooler Deposits, US DOE, 15th Direction in Engine-efficiency and Emissions Research(DEER) Conference, 2009.
- 8) J. Hoard, M. Abarham, D. Styles, J. M. Giuliano, C. S. Sluder and J. M. E. Storey, "Diesel EGR Cooler Fouling," SAE 2008-01-2475, 2008.