

CR-DPF와 Cooled-EGR 적용한 대형디젤기관 성능에 관한 연구

문 병 철^{*1)} · 오 용 석²⁾ · 오 상 기³⁾ · 강 금 원⁴⁾ · 안 균 재⁴⁾

한국폴리텍 I 서울정수대학 자동차과¹⁾ · 한국폴리텍 II 인천대학 자동차과²⁾ · 경기공업대학 자동차과³⁾ · 국민대학교 대학원⁴⁾

A Study on Heavy-Duty Diesel Engine Performance with a CR-DPF and Cooled-EGR

Byungchul Moon^{*1)} · Yongsuk Oh²⁾ · Sangki Oh³⁾ · Kumwon Kang⁴⁾ · KyunJae Ahn⁴⁾

¹⁾Department of Automotive, Seoul Jungsu College of Korea Polytechnic I, Seoul 140-823, Korea

²⁾Department of Automotive, Incheon College of Korea Polytechnic II, Incheon 403-719, Korea

³⁾Department of Automotive, Kyanggi Institute of Technology, Gyeonggi 429-792, Korea

⁴⁾Graduate School, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 12 September 2005 / Accepted 7 December 2005)

Abstract : Since air pollution has become a globally critical issue and exhaust emissions from automobiles cause a major source of air pollution, many countries including advanced countries have stipulated stringent emission regulations. Particularly in diesel vehicles, NOx and particulate matters exhaust in significant amounts even though diesel vehicles provide merits in aspects of higher thermal efficiency and lower CO₂. To reduce particulate matters and NOx, after-treatment technology such as filter trap, oxidation catalysts and EGR has been applied. This test was conducted on the effect of continuous regeneration diesel particulate filter and cooled-EGR, and 15ppm low sulfur diesel was used as a test fuel. Exhaust emissions, PM, NOx, CO, HC and Soots were measured and compared under D-13 and D-3 modes.

Key words : Particulate matters(입자상물질), NOx(질소산화물), Filter trap(필터트랩), Continuously regeneration(연속재생), Low sulfur diesel(저유황경유)

1. 서론

자동차 배출가스가 대기오염의 주원인으로 밝혀지면서 심각한 환경오염문제가 전 세계적인 문제로 대두됨으로서 선진국을 중심으로 우리나라도 2004년도 배출가스 규제를 이미 선진국 수준으로 강화하고 있다.¹⁾ 국내 대도시의 대기오염 발생량 중에서 대형디젤자동차에서 발생하는 배출량이 NOx 48.9% 및 PM 51.1%를 차지하고 있기 때문에 이에 대한 배출가스저감기술의 연구개발이 시급한 실정이다. 특히 트럭이나 버스 등에 사용하는 대형디젤

기관은 고부하운전 빈도가 높기 때문에 이 영역에서 NOx의 저감을 위해 효율적인 EGR시스템의 적용이 절대적으로 필요하며, Trap시스템은 PM여과 효율이 80~90%이상으로 매연(Soot)을 거의 제거할 수 있는 장치로서 Trap재생시 온도가 높아 내구성이 저하되기 쉽고 재생을 위한 보조장치의 필요성 및 신뢰성의 확보가 어렵다는 단점이 있으나 EURO IV, V를 만족시키기 위해서는 이의 적용이 불가피하다.²⁾

따라서 본 연구에서는 대형디젤기관의 PM 및 NOx 저감기술 중, 현재 국내보유기술과 적용가능

*Corresponding author. E-mail: bcmoon@kopo.ac.kr

성이 높은 연속재생방식 필터트랩(CR-DPF)과 전자 제어식 Cooled-EGR시스템을 8000cc급의 대형디젤 기관에 동시 적용하여 실험한 연구이다.

2. CR-DPF와 Cooled-EGR

2.1 CR-DPF

연속재생방식 DPF(Diesel Particulate Filter)의 대표적인 기술은 Engelhard의 DPX와 Johnson Matthey의 CRT가 유력한 기술로 평가되고 있다. Fig. 1은 CRT의 도식적인 그림으로서 전단의 DOC(Diesel Oxidation Catalyst)와 후단의 DPF로 구성되어 있다. DOC의 백금산화촉매(Platinum-based oxidation catalyst)에서는 NO를 NO₂로 산화시킬 뿐만 아니라 CO, HC와 PM 중 SOF를 저감시킨다. DPF에서는 가스상 물질은 통과하고 Soot가 포집되어 전단에서 생성된 NO₂를 이용해 산화시킨다.

Fig. 2는 O₂ 보다 NO₂가 산화되는 온도가 낮다는 것을 보여준다. 따라서 DPF의 필터에 포집된 PM은 배기가스 온도 250°C 이상에서 연속적으로 재생될 수 있다. 그러나 촉매의 PM 재생능력에는 한계가 있기 때문에 기관에서 배출되는 PM과 NO_x의 비율(NO_x/PM)이 8 이상이고, 배출가스가 275°C 이상이

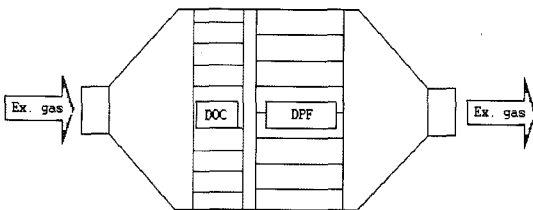


Fig. 1 Schematic diagram of CR-DPF

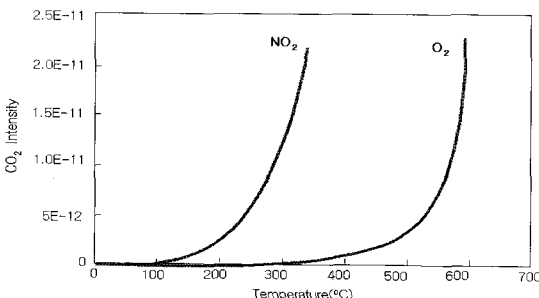


Fig. 2 Comparison of the onset temperatures for the combustion of soot using NO₂ and O₂

어야 작동이 확실하다. 또한 연료 중 황성분이 증가하면 여과장치에 의해 생성되는 황산염이 증가하며 NO의 NO₂로의 촉매 산화효율이 저감되어 CRT의 재생능력이 떨어진다. 따라서 촉매의 정상적인 작동을 위해서는 디젤유의 황성분이 10ppm이하가 요구되기 때문에 CRT의 상용화에 장애가 되고 있다.³⁾

2.2 Cooled-EGR

현재 터보차저와 인터쿨러를 장착한 대형디젤기관에서는 저압루트방식과 고압루트방식이 고안되고 있다. 저압루트(Low pressure route)방식은 터빈 출구에서 컴프레서입구로 배기가스를 공급하며 입구와 출구의 압력차가 크기 때문에 폭넓은 기관작동 범위에서 EGR을 제어가 가능하다. 그러나 배기가스가 컴프레서와 인터쿨러를 통과하므로 이들의 내구성 및 신뢰성에 문제가 발생한다. 또한, 고온의 배기가스로 인해 급기온도가 컴프레서 설계온도를 초과하게 되고 인터쿨러를 오염시켜 압력손실의 증가를 초래한다.⁴⁾

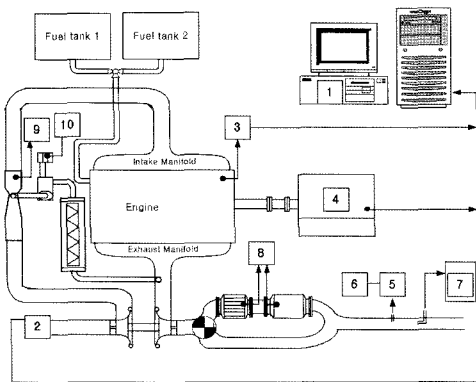
고압루트(High pressure route)방식은 터빈입구에서 컴프레서출구로 배기가스를 도입하는 것으로서 재순환 배기가스는 컴프레서나 인터쿨러를 통과하지 않으므로 저압루트에서와 같은 문제점은 없다. 그러나 고부하 작동시에는 부스트압력이 배기매니폴드 압력보다 높아지므로 저부하 영역에서의 EGR 사용이 제한된다. 따라서 고부하 영역에서 운전빈도가 높은 대형트럭과 버스용 터보차저와 인터쿨러를 장착한 대형디젤기관에 EGR을 적용했을 경우의 부적절한 압력차 문제를 해결하기 위해서 강제적으로 EGR 가스를 공급할 수 있는 부수장치가 필요하다. EGR가스를 터빈입구에서 인터쿨러출구로 도입하기 위한 압력차를 얻기 위해서는 벤츄리를 통해 재순환하는 방법,⁵⁾ 블로워 펌프나 터보의 컴프레서로 구동되는 소형 공기터빈을 이용하여 EGR가스를 부스트압력까지 가압하는 방법, 가변용량 과급기(Variable geometry turbo-charger)를 이용하는 방법 및 터빈출구에 스로틀 밸브를 설치하여 배압을 증대시키는 방법 등의 몇 가지 방법이 제시되고 있다. 밸브형식에 있어서는 밸브를 어떤 방법으로 개폐하는가에 따라서 흡기다기관 부압을 이용하는

방법, 슬레노이드를 직접 이용하는 방법, 압축공기 등의 매개체를 이용하는 방법 및 스텝모터를 이용하는 방법 등이 사용되고 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

실험에 사용된 연료는 황성분이 15ppm이하인 초저유황연료(ULSD)를 사용하였으며, 기관은 국산 8000cc 터보차저 대형디젤기관이며, 동력계는 250kW, EC형 기관동력계와 배출가스 측정장치로 CO는 비분산적외선분석법(NDIR : Nondispersive infrared), HC는 가열식 불꽃이온화검출기법(HFID : Heated flame ionization detector), NOx는 화학발광법(CLD: Chemiluminescence detector), 또한 PM의 측정에는 미니희석터널(MDT)를 사용하여 배기가스의 일부를 채취하고 외부공기로 희석시킨 후 PM을 테프론이 코팅된 유리섬유 여과지($\psi 70$)에 포집하는 장치를 사용한다. 여과지에 포집된 PM의 무게를 측정하기 위해서는 $1\mu\text{g}$ 까지 측정 가능한 마이크로 밸런스를 사용하여 채집 전, 후의 질량차이를 측정해서 배기가스 중 채집된 가스비율을 고려하여 계산하는 형식이다.



- 1. Dynamometer control desk
- 2. Intake air consumption meter
- 3. Throttle actuator
- 4. Engine dynamometer
- 5. Exhaust gas analyzer
- 6. Pen recorder
- 7. Mini dilution tunnel
- 8. CR-DPF
- 9. Venturi
- 10. EGR valve

Fig. 3 Schematic diagram of experimental measuring apparatus

3.1.1 전자제어식 Cooled-EGR 장치

본 연구에 사용한 EGR시스템은 고압루트방식의 Cooled-EGR 방식으로 벤츄리관과 EGR 밸브, EGR 밸브를 제어하기 위한 컨트롤 보드 등으로 구성하였다. 실제 실험에서 고압루트 방식을 사용할 때 컴프레서 출구쪽의 압력이 대부분의 운전조건에서 높기 때문에 자연적인 순환이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 압력차이를 개선하기 위하여 벤츄리관을 사용해서 전 운전영역에서 항상 배기매니폴드의 압력이 높은 상태를 유지하도록 개선하였다. 또한, EGR 밸브는 히노자동차(Hino Co. Japan)의 대형디젤기관용으로서 압축공기를 단속하여 EGR 밸브 상부의 압축공기 회로를 갖는 피스톤을 구동시키고 압축공기의 통로를 제어하여 밸브의 개폐 단면적을 3단계로 조정되는 형식이며, 측정된 부하와 회전수는 PCI 6024E(NI co.) 보드를 사용하여 전압형태로 받아들이며, PC에서는 LabView 프로그램을 이용하여 제어한다.

3.1.2 CR-DPF 장치

본 실험에 사용한 DOC는 백금촉매에 Ti-Si로 워시코트된 제품을 사용하며, DPF는 벌집형모노리스 타입으로 되어 있다.

Table 1 Specifications of DOC

| Item | Specification |
|------------|----------------------|
| Dimension | 229×152 mm |
| Catalyst | Pt |
| Pt loading | 480 g/m ³ |
| Washcoat | Ti-Si |

Table 2 Specifications of DPF

| Item | Specification |
|--------------------|--------------------|
| Type | Honeycomb monolith |
| Form | Candle |
| Quality | Ceramic fiber |
| Standard | 275×294 mm |
| Collector quantity | 66 g |

본 실험에 사용된 DOC와 DPF의 제원을 각각 Table 1과 2에 나타내었으며, Fig. 4는 연속재생방식 DPF의 사진으로써 전단부는 DOC이고 후단부는 DPF로 구성한다.

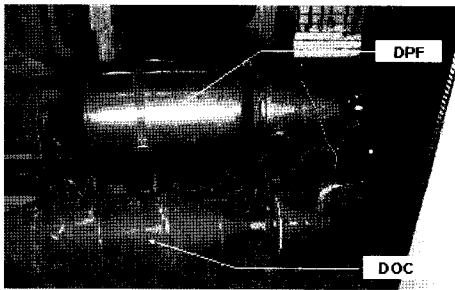


Fig. 4 View of DOC and DPF installed for test

3.2 실험방법

기관성능실험은 먼저 연속재생방식 DPF와 Cooled-EGR 장치를 장착하기 전의 베이스상태에서 일반디젤유와 ULSD연료를 사용하여 기관부하율을 100%에 맞추고 1,000rpm부터 2,200rpm까지 400rpm씩 변화시키면서 운전조건별로 기관출력과 토크, 연료소비량, 배기가스온도 및 흡기온도 등을 3분 동안 안정시킨 상태에서 60초 동안 안정된 데이터를 수집·산술평균 한다. 그 후에 ULSD연료를 사용하여 연속재생방식 DPF 및 Cooled-EGR 장치를 장착한 후에도 동일한 방법으로 기관성능을 측정·분석한다. Cooled-EGR은 제어스위치를 통해 EGR 밸브의 스텝을 1단계, 3단계로 조정하여 EGR율을 10%와 20%로 설정되게 하며, 신기와 배기가스가 혼합된 후 실린더로 유입되는 혼합기의 온도는 부하에 관계없이 30~52°C로 유지한다. 또한 배출가스 성능실험에서는 일반디젤유와 ULSD연료를 사용하여 연속재생방식 DPF 및 Cooled-EGR 시스템을 각각 장착하기 전·후에 우리나라 중량디젤자동차의 배출가스 규제모드인 D-13모드를 이용하여 CO, THC, NOx 및 PM을 측정하며, Soot는 D-3모드를 선정하여 최소 3회 이상 측정하여 산출값을 산술평균 한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 기관성능결과

Fig. 5는 연속재생방식 DPF와 Cooled-EGR 장착 전 기관출력, 토크 및 연료소비량을 기관회전수별 전부하조건에서 측정한 결과이다. 실험결과, 기관의 최대토크는 1,000~1,400rpm에서 약 680N·m 정도로 나타나며 최고출력은 2,200rpm에서 126kW

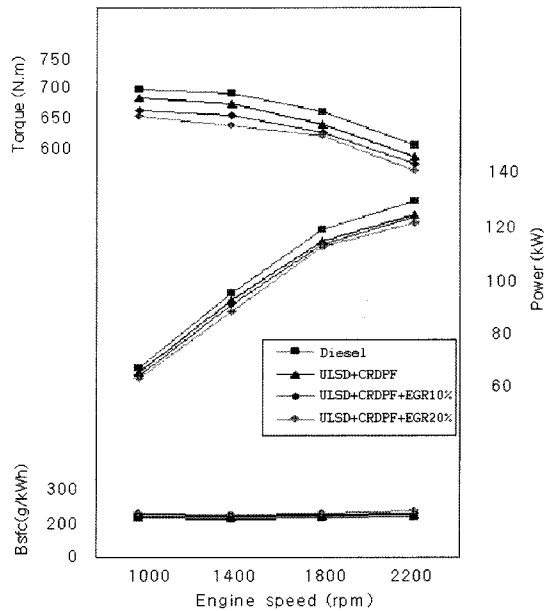


Fig. 5 Engine performance test results of the each engine rpm at 100% load

로서 제원상의 정격출력보다 다소 낮게 측정된다. 이것은 실험기관에 인터쿨러가 장착되지 않은 결과로 판단된다.

연속재생방식 DPF와 Cooled-EGR 장착 전·후의 영향을 알아보기 위해서 100%부하조건에서 기관회전수를 1,000rpm에서 2,200rpm까지 400rpm씩 변화시킨 경우의 기관출력과 토크 및 연료소비량의 변화를 측정하고 EGR은 EGR 솔레노이드 밸브의 한정된 작동영역과 기관 내구성 문제로 인해 EGR율은 10%와 20%로 제한한다. 각 데이터를 베이스상태와 비교하였을 때 기관회전력과 기관출력 및 연료소비량은 연속재생방식 DPF와 Cooled-EGR장치의 장착전·후를 비교했을 때 약 1~4%의 변화를 보여준다. 이는 후처리장치를 장착함으로써 배기시스템의 배압상승에 따른 원인과 함께 EGR 적용에 따른 연소환경 불량으로 인한 결과로 보이지만, 감소폭이 적어서 연속재생방식 DPF와 Cooled-EGR의 장착이 기관성능에 미치는 영향이 미소함을 확인할 수 있다.

4.2 배출가스결과

4.2.1 질소산화물

Fig. 6은 연속재생방식 DPF와 Cooled-EGR 장착 전·후에 D-13모드 운전조건에서의 NOx 배출특성을 데이터의 객관성을 유지하기 위해 4회 측정된 결과값을 나타낸 것으로서 장치장착 및 구성에 따라 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 연속재생방식 DPF만을 장착한 실험에서는 장치 전단부에 설치된 DOC가 기관에서 배출된 NO를 NO₂로 전환시켜 필터재생온도를 낮추는 역할만 할 뿐 전체적인 NOx 감소에는 큰 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있으며, Cooled-EGR에 의해 배기가스가 재순환되어 EGR율이 증가함에 따라 NOx가 30~60%까지 감소되는 것으로 보아 EGR시스템이 NOx를 저감하는데 매우 효과적임을 확인할 수 있다.

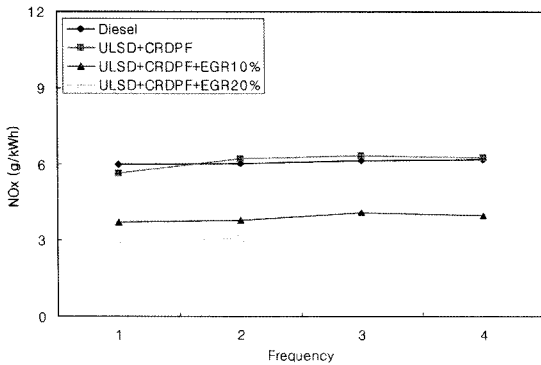


Fig. 6 The effect of CR-DPF and Cooled-EGR on NOx emission characteristics of each D-13mode

4.2.2 입자상물질

PM에 대해 연속재생방식 DPF와 Cooled -EGR 적용에 따른 배출특성을 D-13모드로 측정된 결과 Fig. 7과 같이 일반디젤유를 사용했을 때의 PM배출량과 ULSD사용과 연속재생방식 DPF장착에 따른 PM배출량은 평균적으로 82% 정도 저감된다. 이는 여과장치 전단의 DOC에 의해 산소보다 낮은 온도에서 산화시킬 수 있는 물질인 NO₂을 생성하고 NO₂가 필터를 재생시켜 포집된 PM이 연속적으로 제거되는 것을 알 수 있다. 일반적으로 EGR적용에 따른 PM의 배출특성은 동일 기관회전수에서 EGR율이 증가할수록 증가하며 특히 고부하인 100%부하에서 급격한 증가를 나타낸다. 이것은 PM 생성과 상관관계가 있는 배기가스중의 산소농도가 낮아지고 연소가

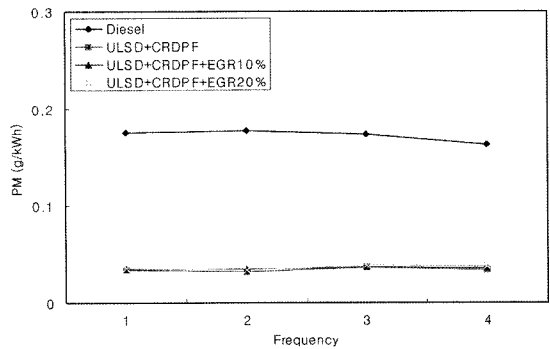


Fig. 7 The effect of CR-DPF and Cooled-EGR on PM emission characteristics of each D-13 mode

스의 열용량이 증가하여 연소온도가 낮아짐에 따른 결과로 생각한다. 그러나 본 연구에서는 연속재생방식 DPF를 장착함으로써 EGR율이 증가해도 PM이 DPF에 의해 효과적으로 여과되므로 EGR적용시 PM이 증가하는 문제점이 해결될 수 있음을 확인하였다.

4.2.3 일산화탄소

Fig. 8은 연속재생방식 DPF와 Cooled-EGR 장착 전·후의 CO배출량 변화를 나타낸 것으로 실험의 객관성을 유지하기 위해 D-13모드로 4회 측정된 결과를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 Cooled-EGR 시스템에 의해 EGR율이 증가하여도 CO의 배출량은 미소하게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이것은 연속재생방식 DPF의 전단에 장착되어 있는 DOC의 산화반응에 의해 CO의 저감에 큰 효과가 발생한 것으로 생각한다.

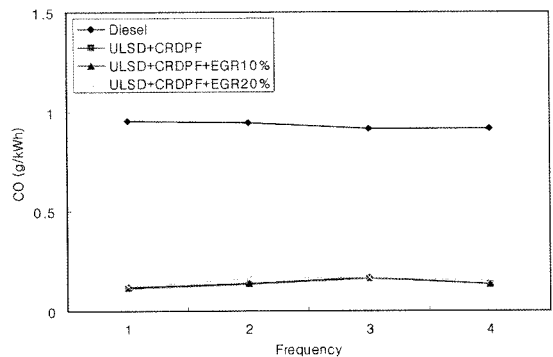


Fig. 8 The effect of CR-DPF and Cooled-EGR on CO emission characteristics of each D-13mode

4.2.4 탄화수소

Fig. 9는 대형디젤기관의 규제모드인 D-13모드에서 4회 측정했을 때의 HC배출특성을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 연속재생방식 DPF와 Cooled-EGR을 장착하여 실험한 결과 HC는 일반디젤유 대비 60~83%내에서 감소하는 결과를 나타낸다. 이는 연속재생방식 DPF의 전단에 설치된 DOC가 HC의 산화에 효과적인 작용을 함으로서 HC배출량이 크게 저감되고 있음을 알 수 있다.

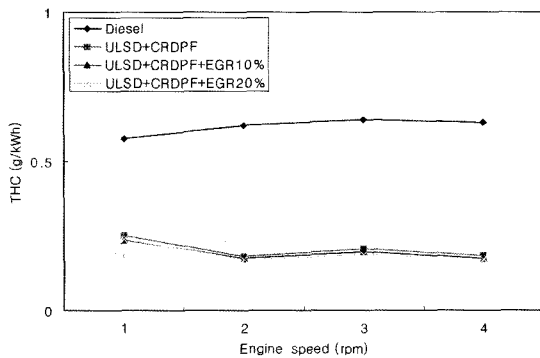


Fig. 9 The effect of CR-DPF and Cooled-EGR on THC emission characteristics of each D-13mode

5. 결론

대형디젤기관에서의 연속재생방식 DPF와 전자제어식 Cooled-EGR 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연속재생방식 DPF와 전자제어식 Cooled-EGR 적용에 따른 기관성능과 연료소비율의 영향은 약 5% 정도의 적은 범위로 나타남으로서 연속재생방식 DPF와 전자제어식 Cooled-EGR의 동시적용이 가능함을 확인하였다.
- 2) NOx의 배출량은 연속재생방식 DPF만 적용하였

을 경우 별다른 변화가 나타나지 않았으나 전자제어식 Cooled-EGR 장착 후 EGR율의 증가에 따라 고부하에서 최대 약 60% 정도까지 감소함을 알 수 있었다.

- 3) 15ppm 황연료 사용시 PM의 배출량은 연속재생방식 DPF적용에 따라 급격히 저감되었으나 전자제어식 Cooled-EGR의 적용시에는 EGR율의 변화에도 배출량의 변화에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

References

- 1) S. K. Oh, D. S. Baik, B. C. Moon, Y. C. Han and J. S. Lee, "Study on Performance and Exhaust Emissions for a Heavy-Duty Diesel Engine with a CR-DPF," JSAE Annual Congress, No.28-04, pp.5-10, 2004.
- 2) Y. K. Gwon, "Trends of Automotive Catalysts Technologies for Low Emission Vehicle," Journal of KSAE, Vol.24, No.1, p.28, 2002.
- 3) S. Chatterjee, "NOx and PM Control from Heavy Duty Diesel Engines Using a Combination of Low Pressure EGR and Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter," SAE 2003-01-0048, 2003.
- 4) G. Graf, G. Hrauda and P. Bartsch, "Layout of a High Load EGR System for LD, MD and HD Truck Engines by Means of Simulation," SAE 2000-01-0225, 2000.
- 5) U. Lundqvist, G. Smedler and P. Stålhammar, "A Comparison between Different EGR Systems for HD Diesel Engines and Their Effect on Performance, Fuel Consumption and Emissions," SAE 2000-01-0226, 2000.