Transactions of KSAE, Vol. 18, No. 5, pp.124-129 (2010)

Copyright Ⓒ 2010 KSAE
1225-6382/2010/107-18

후처리 시스템을 장착한 디젤엔진의 EGR 밸브 작동에 따른 성능 분석

박 철 웅[*1)] · 최 영[1)] · 임 기 훈[2)]

한국기계연구원[1)] · 과학기술연합대학원대학교 청정환경시스템공학과[2)]

Analysis of Performance Characteristics on Diesel Engine with Aftertreatment and EGR System

Cheolwoong Park[*1)] • Young Choi[1)] • Gihun Lim[2)]

[1)]*Korea Institue of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea*
[2)]*Department of Environmental System Engineering, University of Science and Technology, Daejeon 305-333, Korea*
(Received 13 January 2010 / Accepted 5 April 2010)

Abstract : The direct injection (DI) diesel engine has become a prime candidate for future transportation needs because of its high thermal efficiency. However, nitrogen oxides (NOx) increase in the local high temperature regions and particulate matter (PM) increases in the diffusion flame region within diesel combustion. Therefore, the demand for developing hybrid system consist of exhaust gas recirculation (EGR) and aftertreatment system as well as diesel particulate filter (DPF) or lean NOx trap (LNT) should be applied. The variation of EGR rate due to the malfunction of EGR valve can affect not only the combustion stability of engine but also the performance of aftertreatment system. In this research, 2.0 liter 4-cylinder turbocharged diesel engine was used to investigate the combustion and emission characteristics for various operating conditions with EGR. While the fuel consumption was increased with increase of EGR rate, NOx emission was improved by maximum 90% at low speed, low load operating condition. To achieve combustion stability and reliability of aftertrearment system with minimum penalty in fuel consumption and emissions, the fault diagnosis of EGR malfunction must be employed.

Key words : Diesel engine(디젤엔진), Aftertreatment system(후처리장치), Disel particulate filter(매연정화장치), Lean NOx Trap(NOx 흡장촉매), Exhaust gas recirculation(배기가스재순환), EGR valve(EGR 밸브), Regeneration (재생)

Nomenclature

BMEP : brake mean effective pressure, bar
BSFC : brake specific fuel consumption, g/kWh

Subscripts

IN : intake
ATM : atmosphere
EX : exhaust

*Corresponding author, E-mail: cwpark@kimm.re.kr

1. 서 론

디젤 차량은 가솔린 및 LPG 차량에 비해 연비와 지구온난화의 주범인 CO_2 배출 측면에서 우수하지만 PM으로 인해 대기질 오염의 주원인으로 인식되어 왔다. 최근에는 커먼레일을 이용한 연료고압분사 기술로 연료를 160MPa 이상의 고압으로 미립화시켜 연소실내에 분사하고 고성능 엔진제어컴퓨터로 연료분사시기와 분사량을 운전조건에 맞게 정밀하게 제어함으로써 PM을 비롯한 유해한 배출가스를 획기적으로 감소시킨 디젤 엔진을 장착한 승용

차와 승합차등이 판매되고 있다. 특히 매연정화장치(DPF, Diesel particulate filter)를 디젤산화촉매(DOC, Diesel oxidation catalyst)와 함께 사용하면 디젤 자동차에서 배출되는 매연을 가장 최신의 가솔린 자동차수준으로 낮출 수 있기 때문에 DPF의 장착이 필수적으로 판단하고 있다. 질소산화물에 대해서는 각국의 사회적 환경이나 경제 상황에 따라 여러 가지의 기술이 검토되고 있으나 유럽은 선택적환원촉매(SCR, Selective catalytic reduction), 미국은 NOx 흡장촉매(LNT, Lean NOx trap)을 선호하고 있는 실정이다.[1-4)]

상기의 배기후처리 장치를 사용한 배출물 저감기술은 엔진 연소과정을 통해 배출되는 배출물을 배기계에서 별도의 장치로 저감하는데, 매연정화장치와 NOx 흡장촉매는 각각 Soot와 NOx성분의 필터링에 있어 대단히 우수한 성능을 보여주고 있다. 그러나 실제 엔진적용을 위해서는 필터 전후단의 상태를 모니터링 하면서 재생(Regeneration)이라는 과정을 통하여 축적된 Soot 또는 SOx를 제거해 주어야 한다.[5-7)]

디젤엔진의 매연 및 입자상물질은 통상적으로 550°C 이상에서 완전연소 되며, 첨가제 방식은 적어도 배기가스 온도가 450°C 이상 요구되므로 재생과정을 통해 DPF 내에 포집된 매연을 태우기 위해서는 연료의 후분사 등을 통하여 엔진의 배기온도를 450°C 이상 상승 및 유지시킬 필요가 있다. LNT의 경우 SCR에 비해 효율이 낮으나 연료를 환원제로 공급하므로 따로 환원제 공급시스템을 구축할 필요가 없어 유리하지만, 황에 의해 피독되는 단점이 있다. 연료 중에 미량 포함된 황성분이 엔진 배기가스 내에서 SOx로 전환된 후, NOx 흡착저장에 긴요한 바륨산화물 등의 알칼리 금속 산화물등과 반응하여 바륨 설페이트 등으로 전환되는데, 이는 nitrate 화합물 보다 안정하여 고온의 환원성 분위기에서도 쉽게 탈착되지 않는 것으로 알려져 있다. 보통 탈황을 위한 재생과정은 700°C 이상의 고온을 필요로 하며, 이 조건에서는 첨가된 알칼리가 증발하거나 활성담지체인 알루미나 또는 SOx와 반응이 쉽게 진행되어 흡장 물질이 활성을 잃게 된다.[8-10)]

EGR(Exhaust Gas Recirculation)은 NOx 저감을 위해 디젤엔진에서 사용되는 대표적인 기술이라고 할 수 있으며, 이미 대부분의 디젤엔진에는 터빈 전단의 배기가스를 흡기 매니폴드로 보내는 경로를 사용하여 적용이 되고 있다. 강화되는 배출가스규제를 만족하기 위해서 정밀제어와 제어속도 면에서 유리한 전자제어식 EGR 밸브가 보급되어 있으나, 엔진연소에 기인한 배기가스 온도, 촉매 상태를 고려한 후분사량의 최적화 및 모드전환이 요구되는 재생과정에서 EGR 밸브의 오작동으로 인한 흡배기 성분 및 유량의 변화는 엔진의 연소안정성은 물론 배출물의 발생에 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서는 승용 디젤엔진에 EGR을 적용하였을 때의 연료소비율과 배기가스 배출특성을 확인하고자 하였다. 아울러 높은 배기가스 온도가 요구되는 재생과정 중 밸브 오작동으로 인한 EGR 시스템의 누설에 의한 영향을 파악하여 허용 누설량과 진단에 활용할 수 있는 자료를 확보하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

승용 디젤엔진에서 운전조건, EGR 변화에 따른 연소 및 배출물 특성 비교 분석을 위하여 동력계 상에서 엔진 실험장치를 구성하여 실험을 진행하였다.

2.1 실험장치

동력계 상에서의 실험장치 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험엔진은 2.0L급 승용디젤엔진으로서 CRDi 분사방식의 SOHC(Single overhead camshaft) 밸브시스템을 택하고 있다. 또한, WGT(Waste gate type) 터보차져를 장착하고 있고 냉각수에 의해 냉각되는 EGR Cooler와 솔레노이드에 의해 구동되는 EGR Valve가 장착되어 있다. Table 1에 본 연구에 사용된 엔진의 구체적인 사양을 나타내었다.

엔진 모니터링을 위하여 압력은 흡배기 매니폴드, 터보차저 전후단, 인터쿨러 전후단 등 12개의 위치에서 측정하였다. 온도의 경우, 연료 1차 펌프 전단, 흡배기 매니폴드, 등 6개의 위치에서 측정하였다. 배출물 분석을 위하여 배기가스분석기(Horiba MEXA-7000)를 사용하였고, 연료량과 공기량 및 공연비는 각각 체적식 연료유량계(Schank, LK4), 층류

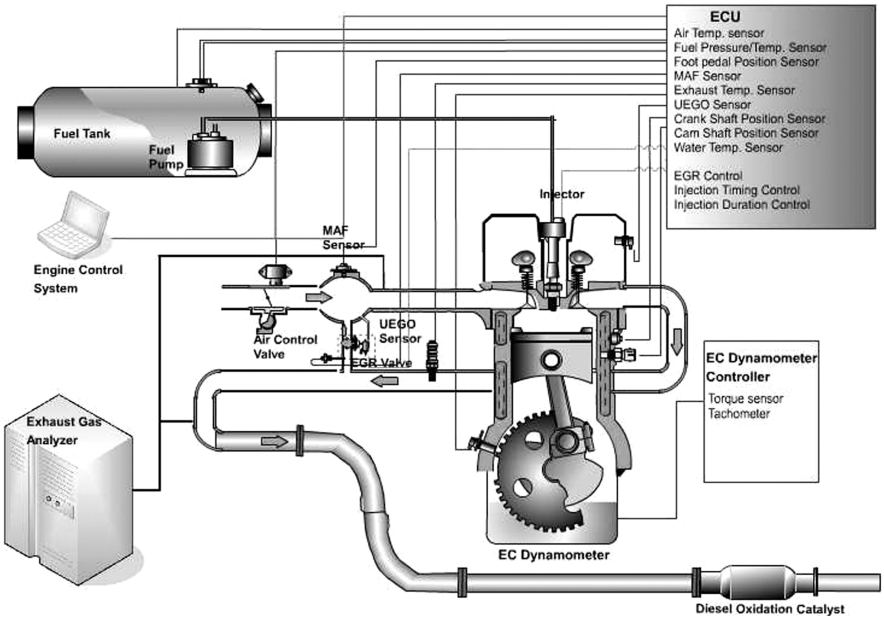

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Test engine specifications

Item	Specifications
Bore	83 mm
Stroke	92 mm
Displacement volume	1,996 cc
Compression ratio	17.7
Idle speed	750 ± 20 rpm
Valve system	SOHC 4 valves
Fuel supply system	Common rail direct injection

유량계(Meriam Inst. Co.)와 광대역 공연비 센서(LA4, Etas)를 이용하여 측정하였다.

2.2 실험방법

시험 시 운전조건은 승용 디젤차량에서 주로 운전되는 영역인 엔진회전속도 1,500 rpm과 2,500 rpm의 속도조건에서 대표적인 저부하 조건인 BMEP (Brake Mean Effective Pressure) 0.4 MPa에서 EGR율을 변화시키며 제어하였다. 엔진이 충분히 예열된 상태에서 냉각수 온도는 82.5 ± 2.5°C를 유지하도록 하였다. 각각의 실험 조건에 대해 토크변화를 기준으로 한 연소안정성이 3%이하로 유지되는 조건에서 해당부하 조건을 만족하는 최대 EGR율을 찾았으며, 연료의 후분사 및 공기량 제어를 통하여 DPF 또는 LNT 재생 시의 배기가스 온도 및 공기과잉율 조건을 모사하였다.

DPF가 장착된 차량이 일정 주행거리에 도달하거나 DPF 전후의 차압이 기준이상이 되면, 재생모드로 운전되어 필터내의 매연을 태우게 되며 이때 필터 내에는 타고 남은 재(Ash)가 축적되는데 본 실험에 사용된 엔진은 후분사를 이용하였다. LNT의 탈황 재생을 위해서는 보다 높은 배기가스 온도 유지 및 공연비 조건형성을 위해 흡입공기량을 제어하는 방법을 이용하였다.

엔진의 운전조건과 독립적인 EGR율의 제어를 위해 전용 컨트롤러를 사용하여 전자제어식 EGR 밸브의 개도를 제어하여 목표 EGR율을 결정하였으며, EGR율의 측정은 가스분석기를 사용하여 측정한 CO_2 값을 이용하여 식 (1)로부터 산출하였다.

$$EGR\,rate\,(\%) = \frac{[CO_2]_{IN} - [CO_2]_{ATM}}{[CO_2]_{EX} - [CO_2]_{ATM}} \quad (1)$$

여기서, $[CO_2]_{IN}$: 흡입공기 중의 CO_2 농도
$[CO_2]_{ATM}$: 대기 중의 CO_2 농도
$[CO_2]_{EX}$: 배기가스 중의 CO_2 농도

3. 실험결과 및 고찰

3.1 EGR율의 변화에 따른 특성

일반적으로 디젤엔진에서 EGR을 적용할 경우, EGR율이 증가함에 따라 NOx는 대폭 감소되나, 연료소비율은 다소 증가되며, Soot는 다량 증가되는 것으로 알려져 있다.[11] 점점 강화되는 NOx 배출규제를 만족시키기 위하여 이미 대부분의 디젤엔진에는 EGR이 적용되어 있으며, 연소안정성이 확보되는 범위 내에서 최대의 EGR율을 적용하여 NOx 배출을 저감하고 있다.

Fig. 2와 Fig. 3은 EGR율의 변화에 따른 각 운전조건에서의 연료소비율과 NOx 배출을 나타낸 것으로서 EGR이 적용된 디젤엔진의 일반적인 경향을 보이고 있다. EGR이 적용되면, EGR 가스의 유입으로 인한 희석효과가 작용하여 연소실내 산소농도를 감소시키게 된다. 이렇게 되면 연소온도의 증가가 억제되며 따라서 NOx의 배출이 감소되지만 점화지연기간이 크게 연장되며, 연소효율이 감소되어 출력저하와 함께 Fig. 4와 같이 배기가스 온도의 증가를 야기한다.

1,500 rpm BMEP 0.4 MPa의 운전조건과 같은 저속 저부하 조건은 차량운전 시 자주 운전되는 영역으로서, EGR을 적용하여 NOx 저감을 기대할 수 있다. EGR 밸브의 오작동으로 인해 EGR밸브의 양정이 감소하여 EGR율이 감소되면, NOx 배출이 급격히 증가할 가능성이 있다. 반대로 EGR 밸브의 양정이 임의로 증가하여 해당 운전조건에서 적용 가능한 최대 EGR율 이상으로 과도한 EGR이 적용되면 연료소비율 및 PM 배출의 증가 외에도 연소안정성을 악화시키기 때문에, 안정적인 연소 및 운전을 위한 on-board diagnostics (OBD) 기능이 요구된다.

상대적으로 고회전수에 해당하는 2,500 rpm BMEP 0.4 MPa의 운전조건은 기본적으로는 EGR의 적용이 고려되지 않는 영역에 해당하나, 밸브 오작동으로 인한 누설의 영향을 살펴보기 위해 EGR율을 변화시키며 EGR을 적용하였다. 배기가스 유량이 많기 때문에 약간의 누설만으로도 급격한 EGR율의 변화를 보였으며, 연소안정성의 악화로 인해 16% 이상의 EGR율의 적용은 불가능하였다.

Fig. 5는 EGR율의 변화에 따른 공기과잉율의 변

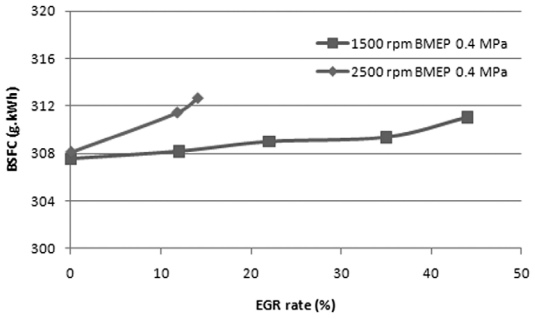

Fig. 2 Effect of EGR rate on specific fuel consumption

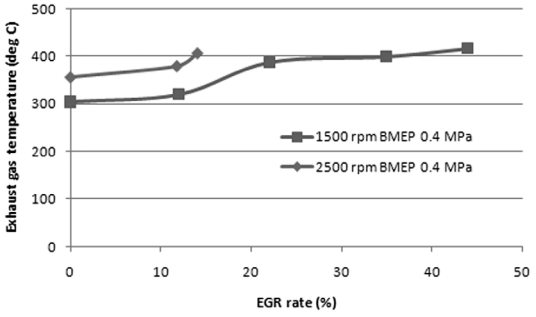

Fig. 4 Effect of EGR rate on exhaust gas temperature

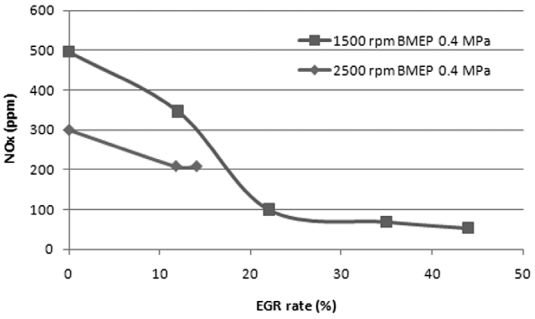

Fig. 3 Effect of EGR rate on NOx emissions

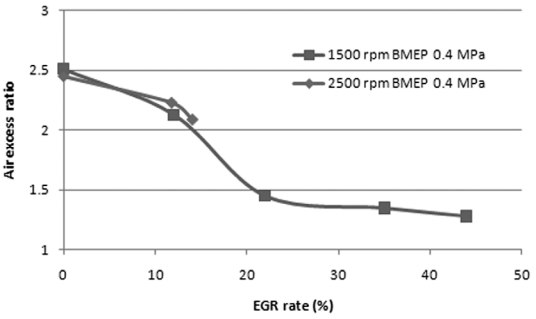

Fig. 5 Effect of EGR rate on air excess ratio

화를 나타낸 그래프이다. EGR의 이용으로 배기가스 압력이 낮아지고 터보차저의 터빈출력이 감소되면, 연소실내로 유입되는 흡입공기의 유량이 크게 감소하게 된다. 동시에 EGR에 의한 희석효과로 인한 공기이용율의 저하로 연료소비율이 증가하기 때문에, EGR의 적용만으로는 NOx 저감 효과의 장점이 크게 부각되기 어려운 결과를 보이고 있다.

3.2 재생조건에서 밸브 누설의 영향

DPF 재생 또는 LNT의 탈황재생과정을 위해서는 필터의 촉매가 반응하기 위한 충분한 온도 조건을 형성해야 하며, 일반적으로 최소 600°C이상의 온도가 요구된다. 이때 주로 연료의 후분사 등을 통하여 온도의 상승 및 공연비를 높이는 방법을 사용하는 것은 동일하다. 그러나 DPF의 재생은 필터내의 매연을 태우는 것을 목적으로 하기 때문에 연소를 위한 산소가 요구되는 반면, LNT의 탈황재생 시에 공급된 환원제가 흡장물질 내의 바륨 설페이트와 반응하기 위해서는 잉여공기의 유입을 막아야한다.

Fig. 6에 각각의 후처리장치 재생 조건에서 EGR 누설에 의한 연료소비율 및 배기가스 온도의 변화를 나타내었다. DPF재생의 경우 2,500 rpm / BMEP 0.4 MPa 조건에서 실험을 수행하였다. 그러나 상기의 운전조건에서 LNT 탈황재생을 위해 throttling을 적용할 경우 안정적인 배기가스 온도 및 출력의 유지가 불가능하여 보다 높은 부하조건인 BMEP 0.8 MPa 부하조건으로 실험을 수행하였다. 배기가스 내의 공기량을 제어하여 DPF 재생 시 λ=1.5, LNT 탈황재생 시 λ=1로 유지하였다. 재생모드에서 적용되는 후분사에 의한 영향으로 급격한 연료소비율의 증가가 나타났으며, 재생 시 요구되는 온도까지 배기가스 온도가 상승하였다.

EGR 밸브의 경우 오작동을 일으켰다 하더라도 일반적으로 개도 50% 수준에 가까운 개변이 일어났다고 보기는 어렵기 때문에, 미량의 누설을 모사하기 위해 제어가 가능한 범위 내에서 최소한의 개변 상태를 설정하였으며, 이때의 밸브의 양정은 1.0 mm이며 각 운전조건에서의 EGR율은 11%, 13%로 측정되었다. EGR 누설에 의하여 EGR이 적용되면 터보차저를 지나는 배기가스의 유량이 감소되기 때문에 압축되는 공기량이 감소하여 Fig. 7에 보이는 것과 같이 흡입공기량이 감소하게 되고, 연소 효율 악화로 인한 출력저하 회복을 위해 연료분사량이 증가한다.

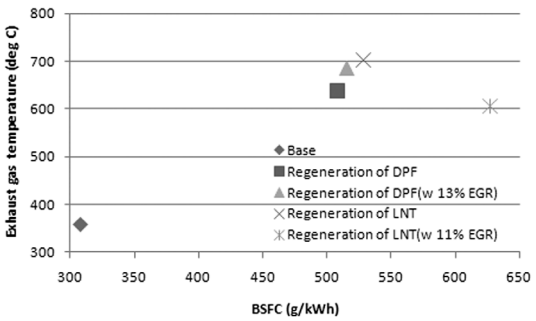

Fig. 6 Effect of EGR leakage on specific fuel consumption under regeneration mode of aftertreatment system

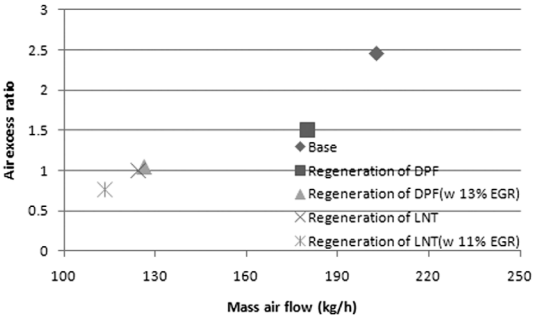

Fig. 7 Effect of EGR leakage on air excess ratio under regeneration mode of aftertreatment system

DPF 재생 조건은 매연의 연소를 위해 배기가스 중에 잉여 공기가 존재하는 조건이기 때문에, EGR 밸브가 오작동 하더라도 LNT 재생조건과 같은 급격한 연료소비율의 증가는 나타나지 않는다. 그러나 공기과잉율의 감소는 재생을 위한 잉여 공기가 공급되지 않는 것을 의미하고, 후분사에 의해 발생되는 다량의 PM이 촉매에서 연소되지 않고 추가로 축적되게 된다. 이렇게 되면 배기압력이 증가하여 재생모드가 아닌 일반 운전조건에서의 연소에 영향을 미칠 수 있다.

LNT 재생조건에서 EGR 가스의 유입은 연소실내 혼합기를 농후하게 하여, 기존 운전조건에서의 연료소비율 대비 18% 이상의 연비악화의 원인으로 작용하였다. 연료의 기화잠열에 의하여 배기가스온도가 오히려 감소되었고, 이 같은 현상은 촉매의 흡장

효율을 저하시킬 수 있다.

이상과 같이 EGR 누설은 연소안전성, 연료소모율, 그리고 후처리장치의 성능을 크게 악화시기키 때문에 어떤 형태로든 EGR 밸브의 오작동을 방지하여야 하며 재생조건에서의 누설을 감지할 수 있는 기능을 확보할 필요가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 승용디젤엔진을 대상으로 EGR을 적용 시 운전조건 별로 EGR 공급조건을 변화시킨 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 저속, 저부하 조건에서 연소안정성이 확보되는 범위 내에서 EGR을 적용하여 약간의 연료소비율 증가만으로큰 NOx 저감 효과를 기대할 수 있다.
2) EGR이 적용되면 배기가스 압력이 낮아지고 터빈 출력이 감소하여, 연소실내로 유입되는 흡입공기의 유량이 감소하게 된다. 따라서 고속 조건에서의 EGR 적용은 배기배출물과 함께 연료소비율의 증가가 고려되어야 한다.
3) DPF 재생 조건에서 EGR 가스가 누설되면 공기과잉율이 감소되어 다량의 PM이 촉매에서 연소되지 못하고 축적되고 배기압력을 증가시킬 수 있다.
4) LNT 재생조건에서 EGR 가스의 유입은 연소실내 혼합기를 농후하게 하여 급격한 연료소비율 증가의 원인으로 작용하였다.

References

1) A. Shoji, S. Kamamoshita, T. Watanabe and T. Tanaka, “Development of a Simultaneous Reduction System of NOx and Particulate Matter for Light-Duty Truck,” SAE 2004-01-0579, 2004.
2) P. Eastwood, Critical Topics in Exhaust Gas Aftertreatment, Research Studies Press Ltd., 2000.
3) J. M. Storey, Hydrocarbon Species in the Exhaust of Diesel Engines Equipped with Advanced Emissions Control Devices, Coordinating Research Council, Inc. CRC Project No. AVFL-10b-2.
4) G. W. Nam, J. W. Park and J. H. Lee, “A study of NOx Reduction System with NOx Storage Catalyst,” Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.258-263, 2007.
5) C. H. Lee, K. C. Oh, D. J. Kim, J. I. Lee and C. B. Lee, “Development of Urea-SCR System on Heavy Duty Diesel Engine to Meet EURO-5 Emission Regulation,” Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.341-346, 2008.
6) C. H. Lee, C. B. Lee, S. J. Kim, D. K. Seo, Y. M. Yoo, D. I. Lee and H. S. Han, “Development of Diesel After-treatment System Design and Optimizing Technologies for EURO-IV Regulation,” Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.223-228, 2006.
7) J. McDonald and B. Bunker, “Testing of the Toyota Avensis DPNR at U.S. EPA-NVFEL,” SAE 2002-01-2877, 2002.
8) H. S. Kim, H. H. Choi, G. B. Cho, Y. I. Jeong, S. H. Cho and J. S. Park, “Development of a Catalytic Combustor for DPF Regeneration of In-use Light Duty Diesel Vehicles,” Transactions of KSAE, Vol.16, No.6, pp.168-175, 2008.
9) N. S. Park, J. H. Lee and G. K. Yeo, “3D CFD Simulation of DPF, Loading and Regeneration in a HSDI Diesel Engine,” Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.217-222, 2004.
10) I. Hachisuka, T. Yoshida, H. Ueno, N. Takahashi, A. Suda and M. Sugiura, “Improvement of NOx Storage-Reduction Catalyst,” SAE 2002-01-0732, 2002.
11) M. Durnholz, G. Eifler and H. Endres, “Exhaust- Gas Recirculation-A Measure to Reduce Exhaust Emissions of DI Diesel Engines,” SAE 920725, 1992.