

직접분사식 커먼레일 단기통 디젤엔진에서 EGR율에 따른 연소 및 배기특성

허 정 윤¹⁾ · 차 준 표¹⁾ · 윤 승 현¹⁾ · 이 창 식^{*2)}

한양대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 한양대학교 기계공학부²⁾

Effect of EGR Rate on Combustion and Emission Characteristics in a Single-cylinder Direct Injection Diesel Engine with Common-rail

Jeong Yun Heo¹⁾ · Junepyo Cha¹⁾ · Seung Hyun Yoon¹⁾ · Chang Sik Lee^{*2)}

¹⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 21 January 2010 / Accepted 29 September 2010)

Abstract : The purpose of this work is an experimental investigation of combustion and emission characteristics in DI diesel engine applied high EGR rate as a method of low-temperature combustion. In order to analyze the effect of EGR rate variation, a single-cylinder DI diesel engine was operated under various EGR rate conditions. In addition, injection timing was variously controlled to investigate the effect of injection timing in DI diesel engine using the cooled-EGR system. The NO_x emissions were decreased in accordance with the increase of EGR rate. On the contrary, soot emissions were generally increased under applied EGR conditions. However, soot emissions were decreased in a few injection timings under high EGR rate conditions. The EGR results show that the ignition delay were increased by decreased oxygen concentrations in combustion chamber under the high EGR rate.

Key words : Combustion characteristics(연소 특성), Exhaust emission characteristics(배기 배출물 특성), Exhaust gas recirculation(배기 재순환), Low-temperature combustion(저온 연소)

1. 서 론

최근 지구 온난화가 심각한 환경문제로 대두됨에 따라 온실가스의 주원인인 CO₂ 절감이 매우 중요한 과제로 대두되고 있다. 디젤엔진은 높은 압축비로 설계되어 열효율을 상승시킬 수 있고 희박연소를 통해 연료 소비율 향상이 가능한 장점을 가지고 있어 연소 개선 및 배출물 저감 등에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

반면에 디젤엔진은 연소실 내 불균일한 혼합기 형성으로 인한 연소과정 중 국부적인 고온영역이

발생하는 연소특성을 가지고 있다. 이와 같은 특성은 유해배출물인 NO_x와 PM(Particulate Matter)이 다량으로 발생하는 문제점을 가지고 있다.¹⁾ 이러한 문제점을 극복하기 위해 최근의 디젤엔진은 DPF(Diesel Particulate Filter), SCR(Selective Catalytic Reduction)등의 후처리 기술의 적용으로 NO_x와 PM의 배출량을 현재의 배기규제에 만족시킬 수 있는 수준으로 저감할 수 있게 되었다.^{2,3)} 그러나 이들 후처리 기술만으로 앞으로 더욱 강화되는 배기규제를 만족시키기에는 비용 및 기술적 측면에 어려움이 있다. 따라서 엔진 연소 단계에서 NO_x와 PM 배출량의 동시 절감을 실현할 수 있는 신 연소 방법의 연구

*Corresponding author, E-mail: cslee@hanyang.ac.kr

가 여러 연구자들에 의해 활발히 진행되고 있다. 균일 예혼합 압축착화에 EGR을 적용할 경우 NO_x와 PM의 배출량을 저감할 수 있다고 알려져 있다.^{4,6)} 저온연소는 고 EGR율을 적용하여 착화지연기간의 연장을 통해 예혼합기를 형성함으로써 NO_x와 PM의 동시저감을 실현할 수 있다고 알려져 있다.^{7,8)} 그러나 아직 이러한 신 연소 방법의 연구들의 획기적인 적용은 이루어지지 못하고 있다.

따라서 디젤 엔진의 연소 연구에 많이 적용되고 있는 EGR(Exhaust Gas Recirculation)은 연소실 내부의 산소농도를 낮추어 연소실 내부에서 연소에 참여하지 않는 혼합기의 질량이 증가되는 효과를 주게 된다. 이는 연소실 내부의 열용량을 증대시켜 고온에서 생성되는 NO_x를 획기적으로 줄일 수 있는 장점이 있다.⁹⁾ 그러나 EGR의 사용에 따른 NO_x의 절감은 PM의 생성과 그 형성 메커니즘의 특성이 상반적인 관계가 있는 것으로 알려져 있어서 EGR율을 제한적으로 적용해 왔다.¹⁾ 이에 비해 저온연소법은 EGR율과 스윙비(swirl ratio)를 높게 적용하고 적절한 연료분사시기 조절을 함으로써 연소실 내부의 연소온도를 낮추고 혼합기 분포를 균일하게 하여 NO_x와 PM의 저감을 동시에 실현할 수 있는 방법으로 알려져 있다.^{7,8)}

본 연구에서는 저온연소실현의 일환으로 고 EGR율을 적용하였을 때 디젤엔진의 저온연소특성 및 배기특성을 실험적으로 규명하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 다양한 EGR율을 적용하였을 때 EGR율에 따른 연소 및 배기특성을 분석하고 연료분사시기의 변화에 따른 영향을 비교하기 위해 다양한 연료분사시기 조건에서의 실험결과를 비교 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험에 적용한 엔진은 배기량이 373.3cc인 커먼레일을 적용한 직접 분사식 단기통 압축착화 엔진이며 Table 1은 실험용 엔진의 주요 제원을 나타낸 것이다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 일정한 엔진속도(rpm) 조건을 유지

Table 1 Specification of test engine

Description	Specification
Type	DI diesel engine
Combustion chamber	Reentrant
Injection system	Common-rail
Nozzle hole diameter	0.128mm
Number of injector holes	6
Displacement volume	373.3cc
Number of cylinder	1
Bore×stroke	75mm×84.5mm
Compression ratio	17.8

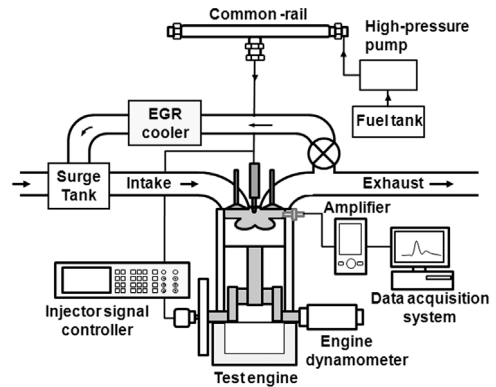


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

하기 위하여 DC 동력계를 이용하여 엔진속도를 제어하였으며, 엔진 크랭크축에 연결된 엔코더로부터 크랭크축의 신호를 받아 펄스 생성기(TPG-28MP, BLUE PLANET)와 인젝터 드라이버(TDA-3300, TEMS)를 이용하여 연료분사시기 및 분사기간을 제어하였다.

EGR이 가능하도록 실험용 엔진의 배기 유로를 수정하여 흡기 유로와 연결하고, 배기와 흡기가 혼합될 때 배기가스의 높은 온도가 흡기 온도에 주는 영향을 줄이기 위해 냉각수를 이용한 EGR 냉각기를 설치하여 배기가스의 온도를 냉각시켜 공급하여 실험 전 조건에서 EGR을 적용한 경우에도 흡기 온도가 일정하게 유지되도록 하였다. 또한 안정된 EGR율을 제공하기 위해 흡기관 입구에 솔레노이드식 유량제어밸브(GFC67, AALBORG)를 설치하여 흡입 공기의 유량을 조절함으로써 흡입 공기의 부족분을 배기가스에서 흡입하는 방식으로 제어하였다.

실험에 사용된 인젝터는 156°의 분사각을 가지는 6공 직접 분사식 솔레노이드 방식의 인젝터이다. 인젝터에서 분사되는 압력을 안정되게 유지하기 위해서 두 개의 고압펌프를 병렬로 연결, 설치하여 커먼 레일로 공급하였다. 연소특성을 분석하기 위하여 연소실 압력은 압력센서(6057A80, KISTLER)를 실린더 헤드에 부착하고 압력센서로부터 얻어진 전압 신호를 실시간으로 취득하고 연산 프로그램을 이용하여 분석하였다. 배기특성을 분석하기 위해서 배기측정기(MEXA-554JKNO_x, HORIBA)와 매연측정기(SMOKE METER 415S, AVL)를 이용하여 배기특성을 분석하였다.

2.2 실험 방법

Fig. 2와 같은 장치를 구성하여 EGR을 하지 않은 상태에서의 흡기유량에 대한 EGR을 적용하였을 때의 흡기유량의 감소율로 다음과 같이 EGR율을 정의하였다.

$$EGR\ rate = \frac{\dot{m}_{EGR}}{\dot{m}_{total}} = \frac{\dot{m}_{total} - \dot{m}_m}{\dot{m}_{total}}$$

\dot{m}_{total} 은 EGR을 적용하지 않았을 때의 흡기유량이 고, \dot{m}_m 은 EGR을 적용하였을 때의 흡기유량이다.

본 실험에서는 EGR율을 다양하게 적용하였을 때 연료분사시기에 따른 연소특성과 배기특성을 연구하기 위해 Table 2와 같이 운전조건을 구성하였다.

엔진의 회전속도는 1200rpm에서 부분부하상태에서 실험을 수행하기 위해 각 실험조건에서의 연료분사량은 8.76mg으로 동일하게 적용하였다.

EGR율에 의한 연소 및 배기특성을 연구하기 위해 EGR율 조건을 0%, 10%, 30%, 50%로 변화하여

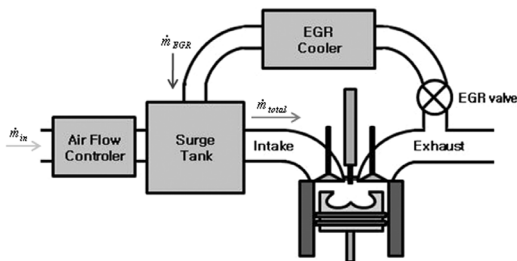


Fig. 2 Schematic diagram of EGR system

Table 2 Experimental conditions

Item	Operating condition
Test fuel	Diesel
Engine speed	1200 rpm
Intake	N/A (natural aspiration)
Cooling water temperature	70°C
Start of energizing	BTDC 0 - 20°
Injection quantity	8.76 mg ($\Phi=0.4$)
EGR (%)	min (L/min)
0	145.6
10	131.0
30	101.9
50	72.8

실험을 수행하였다.

또한 각 EGR율 조건에서 연료분사시기에 따른 영향을 알아보기 위해 실험에 이용된 분사 시작 시기(SOI, Start of Injection)를 인젝터 드라이버로부터 인젝터로 신호가 공급되는 시기인 통전시기(SOE, Start of Energizing)로 정의하고 인젝터의 통전시기를 BTDC 기준으로 0°에서 15°까지 3° 간격으로 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연소특성

Fig. 3은 인젝터 통전시기 BTDC 3°의 조건에서 0%, 30%, 50%의 EGR율을 적용한 경우의 연소특성을 나타낸 것이다. BTDC 3° 통전시기의 경우 EGR을 적용하지 않은 경우에도 5° 가량 지각되어 열발생이 시작되는 것을 볼 수 있는데 이는 압축착화방

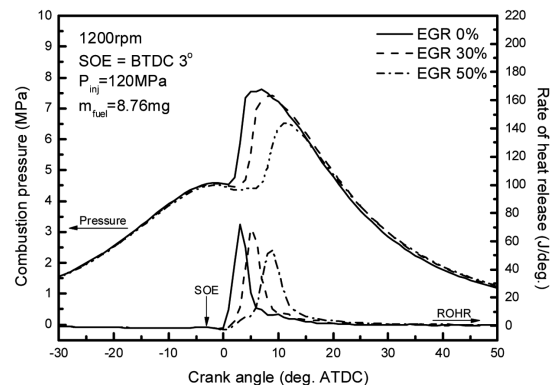


Fig. 3 Effect of EGR rate on combustion characteristics

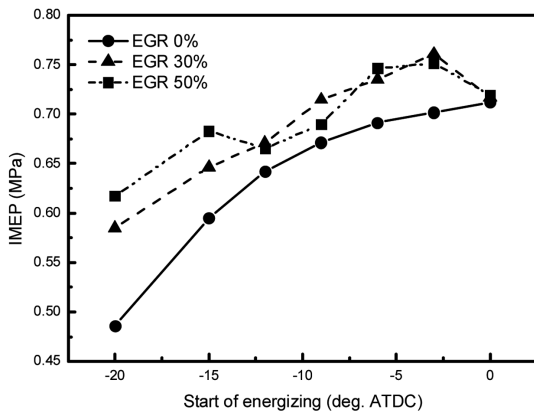


Fig. 4 Effect of EGR rate on IMEP

식 연소의 특징인 착화지연기간이 원인으로 판단된다. 또한 동일한 연료분사시기 조건에 EGR을 적용하여 비교하였을 때 EGR율을 증가시켜 적용함에 따라 착화시기가 지각되는 것을 확인할 수 있었으며, 길어진 착화지연의 효과로 피스톤이 하강하는 과정에서 연소가 일어나게 되어 동일한 연료 분사시기임에도 불구하고 EGR 적용에 따라서 최대 연소압력은 낮아지는 경향을 보인다.

Fig. 4는 0%, 30%, 50%의 EGR율을 적용한 경우에서 다양한 연료분사시기 조건에서의 IMEP를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 동일한 분사시기 조건에서 EGR율을 적용하지 않은 조건과 비교하였을 때 EGR율을 적용한 경우에 IMEP값이 높게 나타나는 경향을 볼 수 있는데 이는 EGR율을 적용함에 따라 길어진 착화지연기간과 재순환된 배기 배출물 중의 미연탄화수소등의 재연소를 통해서 최대 연소압력이 발생한 시점 이후에서의 연소압력이 높게 나타나는 것이 원인으로 판단된다.

3.2 배기특성

Fig. 5는 연료분사시기와 EGR율이 NO_x 배출량에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 실험에 적용된 모든 연료분사시기의 조건에서 EGR율의 증가에 따라 NO_x의 배출량이 감소하는 것을 볼 수 있으며 특히 30% 이상의 EGR율을 적용한 조건에서 NO_x 배출량은 현저하게 감소되는 경향을 보였다. 이는 재순환된 배기가스가 높은 비열을 가지고 연소과정 중에 연소되지 않는 질량으

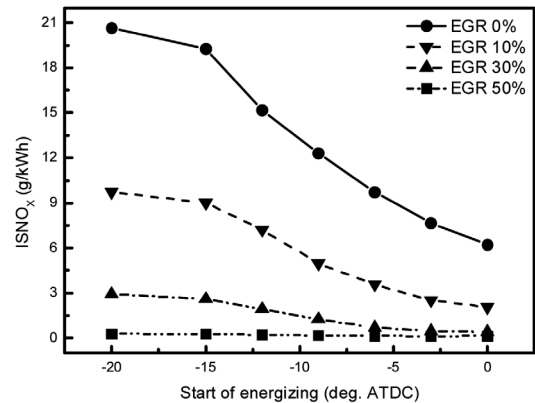


Fig. 5 Effect of EGR rate on NO_x emissions

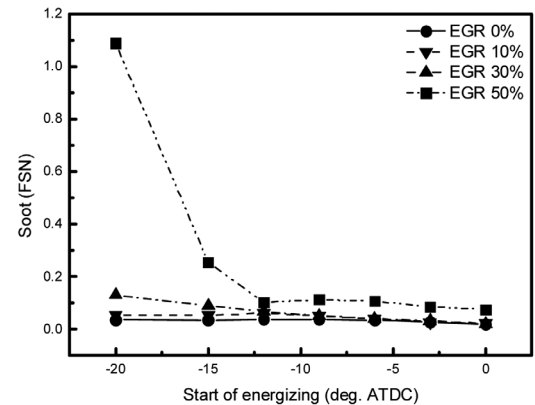


Fig. 6 Effect of EGR rate on soot emissions

로 작용하여 연소과정에서 발생된 열량을 흡수하게 되어 연소실 내의 전체적인 연소온도가 낮아짐으로써 고온에서 생성되는 NO_x의 배출량이 감소되는 것으로 판단된다.

인젝터 통전시기와 EGR율에 따른 soot의 발생량을 Fig. 6에 나타내었다. EGR율을 증가시키기에 따라 soot의 발생량이 전체적으로 증가하는 경향이 나타났다. 이는 EGR의 적용이 연소실 내의 전체적인 산소농도를 감소시키는 원인으로 작용되어 연소과정에서 국부적으로 농후한 영역이 증대되는 것이 그 원인으로 판단된다. 특히 50%의 EGR율을 적용한 경우 soot 배출량 결과는 BTDC 15°이상으로 진각한 분사시기에서 통전시기에서 EGR이 soot의 발생량에 더욱 크게 영향을 주는 것을 보여준다.

반면에 BTDC 9° 이후의 통전시기 조건에서는 EGR율을 높게 적용함에도 불구하고 soot 배출량의

증가가 적은 것을 볼 수 있다. 이는 높은 EGR율에서 TDC 근처의 인젝터 통전시기 조건을 적용할 경우 EGR로 인해 착화 지연기간이 길어지는 효과로 연료와 공기의 예혼합을 이룰 수 있는 시간의 확보를 통한 적절한 혼합기의 형성으로 국부적으로 농후한 영역이 줄어든 것이 원인으로 판단된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 EGR율을 증가시켰을 때 분사시기 조건에 따라 CO와 HC 배출량의 변화를 나타낸 것이다. 연료분사시기 조건 전 구간에 걸쳐 EGR율을 증가시키에 따라 CO와 HC의 발생량은 전체적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 EGR의 적용으로 연소실로 유입된 혼합기의 산소농도가 감소하고 EGR 적용으로 인해 연소온도가 낮아지는 효과를 가지게 되어 연소과정에서 불완전 연소가 이루어졌음으로 판단된다.

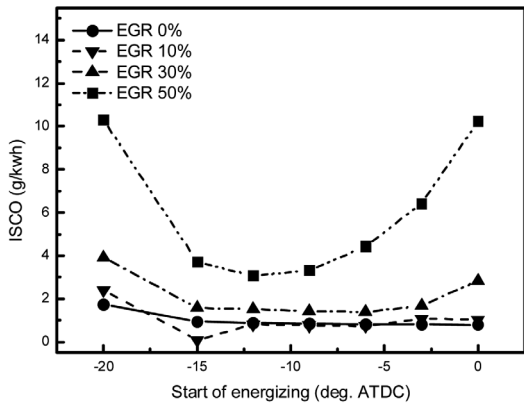


Fig. 7 Effect of EGR rate on CO emissions

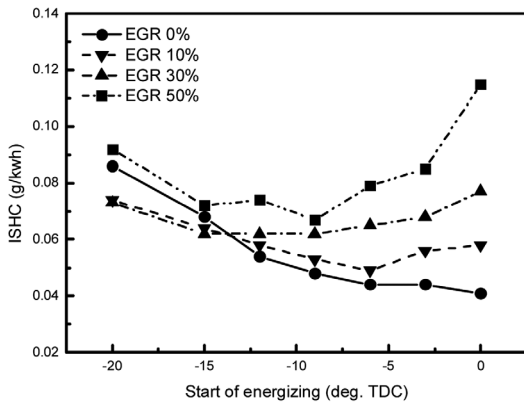


Fig. 8 Effect of EGR rate on HC emissions

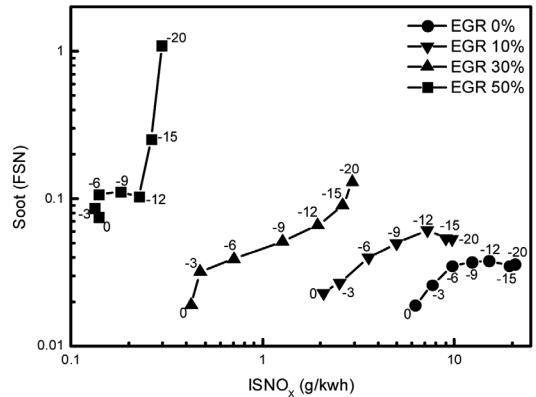


Fig. 9 Effect of EGR rate and injection timing on NO_x and soot emissions

Fig. 9는 실험에 적용된 EGR율 조건과 연료분사시기 조건에서 발생한 NO_x와 soot의 발생량을 도식적으로 나타낸 그림이다. EGR을 적용한 경우 NO_x의 발생량이 크게 감소하는 것을 확인하였고 특히 50%의 EGR율을 적용하였을 때 연료분사시기를 TDC 근처에서 적용한 조건에서는 NO_x 배출량의 현저한 감소에 비해서 soot 발생량은 크게 증가되지 않는 경향을 나타낸다. 이는 높은 EGR율에서 적절한 분사시기조건을 적용할 경우에 NO_x와 PM 배출량의 저감을 동시에 실현할 수 있음이 판단된다.

4. 결론

커먼레일 직접 분사식 단기통 디젤엔진에 EGR 시스템을 구성하여, 다양한 연료분사시기와 EGR율 조건이 연소 및 배기특성에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동일한 연료분사시기에서 EGR율을 적용한 결과 EGR율이 증가됨에 따라 연소실 내의 착화 지연기간이 길어지는 경향을 나타내었다.
- 2) 동일 분사시기에서 다양한 EGR율을 적용한 결과 EGR율이 증가됨에 따라 NO_x 발생량이 감소하는 경향을 나타내었고 특히 50%의 EGR율을 적용한 조건에서는 실험에 적용된 연료분사시기 전 구간에서 NO_x의 배출량이 현저하게 감소하는 경향을 나타내었다.
- 3) Soot 발생량은 BTDC 0°에서 9°까지의 분사시기에서는 EGR율의 변화에 뚜렷한 경향성을 나타내었다.

내지 않았으나 BTDC 15°의 분사시기 조건에서는 EGR율을 증가시키기에 따라 soot 발생량이 크게 증가하는 경향을 나타내었다.

- 4) EGR율을 증가시키기에 따라 CO와 HC의 발생량은 전체적으로 증가하는 경향을 나타내었다.
- 5) EGR율의 적용에 따른 NO_x와 soot의 분포를 살펴본 결과 EGR의 적용은 실험에 적용된 분사시기 조건의 전 구간에서 NO_x의 발생량을 현저하게 감소시키는 효과를 나타내었다. EGR을 적용하여 실험 한 결과 soot의 발생은 점차적으로 증가하는 경향을 보였으나, 50%의 EGR율을 적용하였을 때 BTDC 0°에서 9°의 연료분사시기를 적용하였을 때는 높은 EGR율을 적용했음에도 불구하고 soot의 발생량은 크게 증가되지 않는 결과를 보였다.

상기와 같은 결론을 통하여 볼 때 부분부하상태에서 고EGR율을 적용한 경우 연료분사시기를 TDC 부근에서 적용할 경우에는 soot의 발생량의 큰 증가 없이 NO_x의 배출량을 크게 저감할 수 있음이 판단된다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR project(무·저공해 자동차 사업단)와 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다. 또한 2단계 두뇌한국21 사업의 지원으로 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

References

- 1) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, 1988.
- 2) S. Brian, R. M. William, B. Bernd, D. Winfried

- and F. Stefan, "Recent DPF/SCR Results Targeting US2007 and EURO 4/5 HD Emissions," SAE2003-01-0774, 2003.
- 3) H. Yongsheng, B. B. David, L. Shuguang, J. P. Micheal and L. Jianwen, "Opportunities and Challenges for Clended 2-Way SCR/DPF After-treatment Technologies," SAE2009-01-0274, 2009.
- 4) C. S. Lee, K. H. Lee, D. S. Kim and S. K. Heo, "Combustion Characteristics of Premixed Charge Compression Ignition Diesel Engine with EGR System," Transactions of KSAE Vol.10, No.2, pp.66-72, 2003.
- 5) Y. H. Yoon, D. S. Kim and C. S. Lee, "Effects of Premixed Fuel and EGR on the Combustion and Emissions Characteristics of HCCI Diesel Engine," Trans. of the KSME (B) Vol.29, No.9, pp.1006-1012, 2005.
- 6) Rudolf H. Stanglariar and Charles E. Roberts, "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Applications," SAE1999-01-3682, 1999.
- 7) K. Shuji, A. Osamu, O. Hiroshi, M. Shigeo and E. Yoshiteru, "New Combustion Concept for Ultra-clean and High-efficiency Small DI Diesel Engines," SAE1999-01-3681, 1999.
- 8) K. Shuji, A. Osamu, K. Yasuhisa and A. Eiji, "Ultra-Clean Combustion Technology Combining a Low-Temperaute and Premixed Combustion Concept for Future Emission Standards," SAE2001-01-0200, 2001.
- 9) O. Hideyuki, M. Noboru, S. Hajime and K. Shingo, "Characteristics of Diesel Combustion in Low Oxygen Mixtures with Ultra-high EGR," SAE2006-01-1147, 2006.