

코먼레일 직접분사식 디젤 엔진의 조기 분사가 연소 및 배기특성에 미치는 영향

윤 승 현¹⁾ · 김 명 윤¹⁾ · 김 대 식²⁾ · 이 제 형³⁾ · 이 창 식⁴⁾

한양대학교 대학원¹⁾ · 한양대학교 기계기술연구소²⁾ · 현대 · 기아 연구개발본부³⁾ · 한양대학교 기계공학부⁴⁾

Effect of Early Injection Strategy on the Combustion and Emission Characteristics of the Common-rail DI Diesel Engine

Seung Hyun Yoon¹⁾ · Myung Yoon Kim¹⁾ · Dae Sik Kim²⁾ · Je Hyung Lee³⁾ · Chang Sik Lee⁴⁾

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

²⁾Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

³⁾Mechanical Engineering and Technology Research Institute, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

⁴⁾Research & Development for Hyundai Motor Company & Kia Motors Corporation, 772-1 Jangduck-dong, Hwahasung-si, Gyeonggi 445-706, Korea

(Received 21 September 2005 / Accepted 2 March 2006)

Abstract : An experimental investigation of an early injection strategy was conducted on a small single cylinder common-rail DI diesel engine to reduce the oxides of nitrogen(NO_x) emission. The main objectives of this study were to investigate the emissions, performance and combustion characteristics in a diesel engine with early and two-stage injections. The two-stage injection was conducted to reduce the wall-wetting of early injected fuels on the cylinder wall or to promote the ignition of premixed charge. The engine test was performed at conditions of 1500rpm, injection timing ranging from TDC to BTDC 80°. The experimental results show that NO_x emissions were decreased in both cases of early injection and two stage injection compared to the conventional diesel combustion by the near TDC injection. However, soot and products of incomplete products (i.e. HC and CO) are slightly increased. Also, the second injection near TDC promoted the ignition of premixed fuel, therefore, IMEP was increased.

Key words : Common-rail diesel engine(코먼레일 디젤 엔진), HCCI(균일 예혼합 압축 착화), Early injection(조기 분사), Two-stage injection(2단분사)

1. 서 론

디젤엔진은 우수한 열효율과 연비성능으로 인하여 각종 자동차의 동력원으로 많이 사용되고 있으며, 최근에는 연료분사장치의 고압화와 전자제어에 의하여 성능이 크게 개선되었다. 그러나 디젤엔진은 질소산화물(NO_x) 및 입자상물질(particulate matter, PM)의 배출량이 가솔린 엔진보다 높은 단점

이 있으므로 이를 극복하기 위하여 최근에는 새로운 청정연소방식의 적용과 후처리 장치에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 특히 디젤엔진의 가장 큰 문제인 NO_x 및 PM을 저감하는 방법의 하나로 연소실에 균일한 공기-연료 혼합기를 형성하여 저온에서 압축 착화하는 방식인 예혼합 압축착화(HCCI, homogeneous charge compression ignition)방식이 많이 연구되고 있다.¹⁻⁶⁾

본 실험에서는 코먼레일 디젤엔진에 연료를 조기

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

분사(early injection)하여 균일 예혼합기를 형성하고 압축 착화하는 방식으로 보다 균일한 혼합기를 연소시켜 배기 배출물을 저감시키기 위한 실험을 수행하였다. 또한 조기 분사를 하였을 경우에 나타나는 출력 및 연소압력의 저하현상을 해소하기 위하여 일정 비율의 연료를 1차 분사 이후에 다시 분사시키는 2단 분사(two-stage injection)의 개념을 도입하였으며, 분사시기와 분사압력 등에 따른 연소 및 배출물 특성을 기존디젤 연소의 경우와 비교하도록 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 실험 기관

본 실험에는 배기량이 373.3cc이며 최고 분사압력이 135MPa인 코먼레일 시스템을 갖춘, DOHC 4 밸브의 직접분사식 단기통 디젤엔진을 이용하여 실험을 수행하였다. Table 1은 실험용 엔진의 주요 제원을 나타낸 것이다.

Table 1 Specifications of test engine

Description		Specification
Type		DI diesel engine(NA)
Bore×Stroke(mm)		75.0×84.5
Swept volume(cc)		373.3
Valve type		DOHC 4
Compression ratio		17.8
Combustion chamber type		Reentrant
Intake valve	Open	BTDC 8°
	Close	ABDC 52°
Exhaust valve	Open	BBDC 8°
	Close	ATDC 38°
Fuel injection system		Bosch common-rail
Injection nozzle		6 holes
Nozzle diameter(mm)		0.128
Spray angle		156°

2.2 실험 장치

실험 장치는 단기통 디젤 엔진, ECU 제어장치, 연료 공급 제어장치, EGR 시스템, 연소 및 배기 분석을 위한 장치로 구성하였다. Fig. 1은 실험 장치 개략도를 나타낸 것이며 엔진은 DC 동력계(55kW)로 구동하였다. 실험에 공급되는 연료의 압력을 일정하

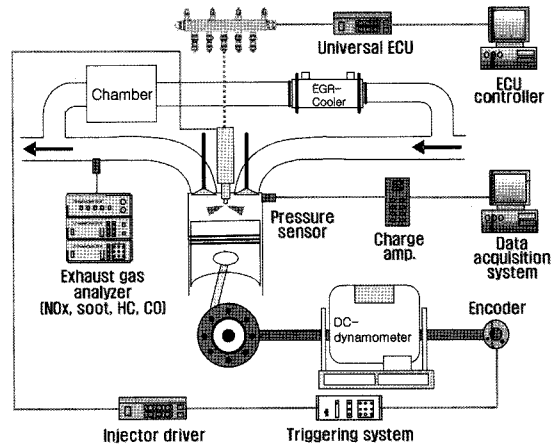


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

게 유지하기 위하여 인터페이스 장치인 KIC-II를 통해 소프트웨어(ETAS, INCA ver. 4.0)를 사용, EDC ECU(Bosch)에 프로그램을 입력하여 사용하였다.

인젝터의 동기화 및 분사시기 제어를 위해 크랭크 각 센서(1800 pulse/rev)와 캠축 위치 센서를 설치하였으며, 또한 코먼레일 인젝터는 별도의 인젝터 드라이버(TEMS, TDA 3200H)에 의하여 통전시간을 조절하여 원하는 분사량을 제어할 수 있도록 하였다. 그리고 EGR 쿨러와 EGR 조절밸브를 통하여 배기가스가 냉각된 후 유입될 수 있도록 하였다. 연소 해석 장치로 실린더 내 압력 및 열발생률을 측정하기 위해 피에조 압전 소자 방식의 압력센서(6052B1, Kistler)를 연소실에 설치하였으며, 압력센서의 데이터를 취득하기 위하여 DAQ보드(NI, PCI-MIO-16E-1)와 소프트웨어(LabVIEW)를 사용하여 실시간으로 데이터를 취득하였다. 또한, 연소시 발생하는 배출가스 측정을 위해 NO_x(BCL-511, YANACO), soot(CSM-2500, JASTEC), HC 및 CO(MEXA-554JK, HORIBA)등의 배출가스 분석 장치가 사용되었다.

2.3 실험 조건 및 방법

Table 2는 실험의 조건을 나타낸 것으로 기관의 회전속도는 1500rpm으로 일정하게 유지시켰으며 단일분사와 2단 분사의 경우 모두 총분사량은 8mg/cycle로 공급하였으며, 2단 분사의 경우 1단계 분사와 2단계 분사량의 비율은 6:2로 수행하였다.

Table 2 Experimental conditions

Item		Specification	
Oil temperature(°C)		70	
Cooling water temperature(°C)		70	
Engine speed(rpm)		1500	
Injection pressure(MPa)		50, 100	
EGR rate(%)		0, 30	
Single injection	Mass of injection fuel(mg/cycle)	8	
	Injection timing(deg BTDC)	80, 60, 40, 20, 0	
Two stage injection	Mass of injection fuel(mg/cycle)	m _{1st}	6
		m _{2nd}	2
	Injection timing(deg BTDC)	SOI _{1st}	60
		SOI _{2nd}	2, 10, 30, 50

또한, 연료의 분사압력 및 분사시기 등을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다.

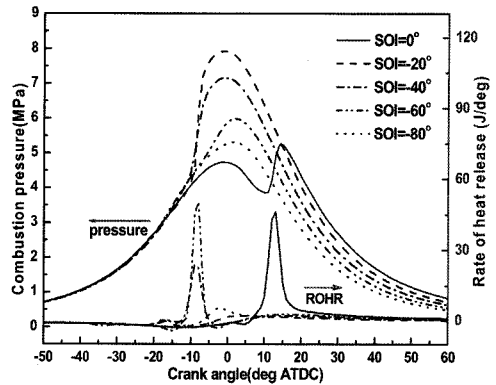
3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 단일 분사

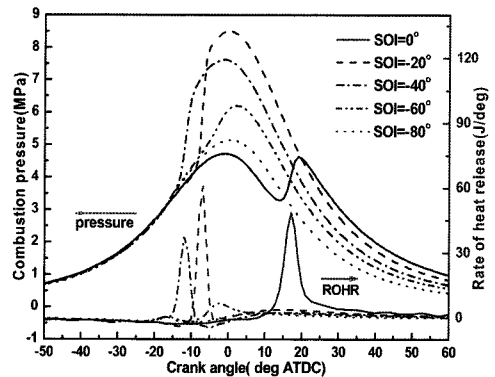
Fig. 2는 단일 분사의 경우에 분사시기가 연소 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 분사시기를 TDC에서부터 BTDC 80°까지 진각 시킨 경우의 실험 결과인 연소압력 및 열발생율을 나타낸 것이다.

분사압력이 50, 100MPa인 두 경우 동일한 연소특성을 보이고 있으며, 분사시기가 TDC인 경우와 BTDC 20°인 경우는 전형적인 디젤 엔진의 연소특성으로 열발생율이 높게 나타나고 있으나 분사시기가 BTDC 40°이전으로 앞당겨지게 되면 열발생율의 최고값과 최고연소압력이 급격하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 열발생을 곡선 또한 저온 반응 영역과 고온 반응 영역의 2단으로 연소되는 HCCI 연소의 특성을 보이고 있다.^{7,8)}

그러나 조기 분사의 경우에는 최고 연소 압력뿐만 아니라 팽창행정 과정인 TDC 이후에서의 압력도 낮아져서 엔진 출력의 손실이 일반적인 디젤 연소의 경우보다 커짐을 알 수 있으며, Fig. 3의 IMEP 값으로 확인할 수 있다. 이러한 원인은 조기 분사의 경우에는 상대적으로 연소실 내의 압력과 밀도가 낮은 상태에서 분무가 이루어지게 되어 과도한 분무도달거리에 의한 연소실 벽면에서의 벽면부착현상(wall-wetting)이 발생하여 연소압력이 급격히 떨어지는 것으로 판단된다.



(a) P_{inj} = 50MPa



(b) P_{inj} = 100MPa

Fig. 2 Effect of injection timing on combustion characteristics

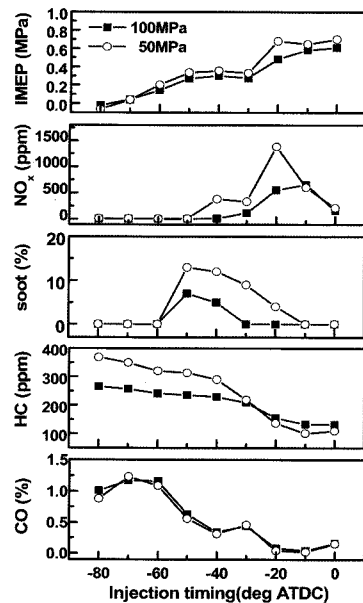


Fig. 3 Effect of injection timing on emission characteristics (P_{inj}=100MPa)

Fig. 3은 Fig. 2와 같은 단일 분사 조건에서 IMEP 및 배기특성을 분사시기의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 엔진의 출력을 비교할 수 있는 IMEP는 분사시기가 진각 됨에 따라 대체적으로 낮아지는 결과를 보이고 있다. TDC보다 분사시기가 빠른 경우에는 압축행정 중에 급격한 연소가 발생하여 NO_x의 발생이 증가하는 경향을 보이고 있으나, P_{inj}=50MPa인 경우는 BTDC 50°, P_{inj}=100MPa인 경우는 BTDC 40°보다 분사시기가 진각 되면 NO_x는 거의 발생되지 않는 것으로 측정되었다.

Soot의 발생은 BTDC 20° ~ BTDC 50°구간에서 발생하고 있으며, 분사압력이 낮은 경우에 많이 발생함을 알 수 있다. HC와 CO의 발생은 분사시기가 TDC ~ BTDC 20° 구간에서는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 이것은 이 구간에서 일반적인 디젤 엔진의 연소특성을 보이고 있음을 의미한다. 이보다 분사시기가 빨라지면 HCCI 연소의 특징으로 인하여 이들 불완전 연소 배출 가스는 대체적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

이상의 단일분사에 대한 연소 및 배기 특성으로 보아 조기분사는 NO_x의 배출 저감의 효과는 있으나

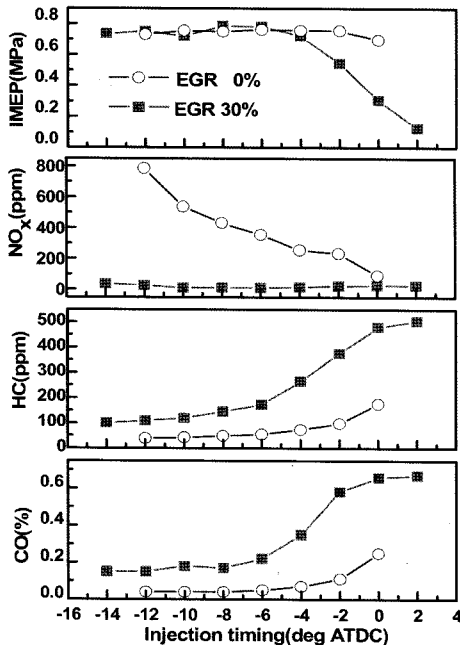


Fig. 4 Effect of injection timing on emission characteristics (P_{inj}=100MPa)

IMEP 감소에 따른 연비악화가 매우 큰 것으로 나타났다. 따라서 다단분사의 적용이나 인젝터 분무각 또는 노즐 형상의 변경 등을 도입하여 벽면 부착 현상을 감소시키고, 연소효율을 증대시킬 수 있는 방법이 필요한 것으로 보인다.

Fig. 4는 단일분사 조건에서 연료의 분사압력을 50MPa로 일정하게 하고 냉각 EGR을 적용하고 EGR율을 0%와 30%일 때의 분사시기에 따른 결과를 나타낸 것이다. IMEP는 EGR을 30%적용하였을 경우 BTDC 4° 이후에는 감소하나 이전에는 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. NO_x배출량은 EGR을 적용하지 않았을 경우에는 분사시기가 진각 됨에 따라 증가하나 EGR율을 30%로 적용하였을 경우는 NO_x의 양이 대폭 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 HC, CO배출물의 경우 TDC에 가까워 질수록 증가하며, 절대량에 있어서는 EGR을 적용하였을 경우 더 많이 배출되는 경향을 나타내고 있다.

3.2 2단 분사

단일 분사 실험 결과에서 나타난 바와 같이 1단 조기 분사의 경우에는 IMEP가 매우 낮아지는 결과를 보이고 있어, 조기 분사의 유해배출물이 적은 장점을 유지하면서 엔진의 출력을 높이기 위하여 2단 분사를 수행하였다. 분사압력은 100MPa로 일정하게 유지하였으며, Fig. 5에 연소압력과 열발생률을 나타내었다. 단일 분사는 BTDC 60°와 BTDC 2°로

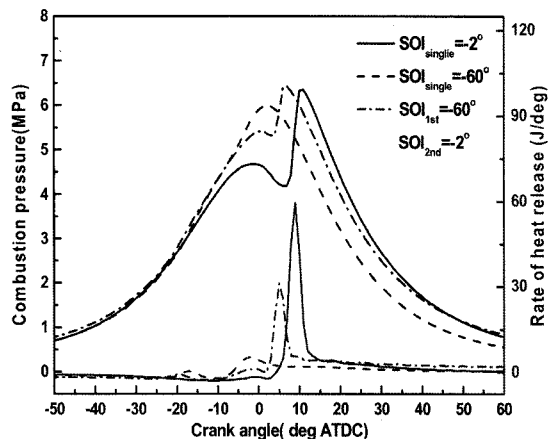


Fig. 5 Comparisons of combustion characteristics between single injection and two stage injection

분사한 경우를 나타내었으며, 2단 분사는 분사되는 연료의 총량을 6:2로 나누어 1단계 분사시기를 BTDC 60°로 하고, 2단계 분사시기를 BTDC 2°로 분사하였을 경우를 비교 분석하였다.

이 경우의 분사방법은 디젤 엔진에서 많이 쓰이고 있는 파일럿 분사(pilot injection) + 메인 분사(main injection)의 방식과 유사한 방식이나 기존의 방식보다 1단계 분사의 시기가 매우 빠르고, 분사량을 증가시켜 혼합기의 균일도를 증가시킨 경우이다.

BTDC 2°에 단일 분사한 경우는 전형적인 디젤 연소의 형태를 나타내지만 조기 분사를 시행한 두 경우에는 모두 HCCI 연소의 특징으로 볼 수 있는 저온 반응영역(cool flame)이 형성되는 것을 볼 수 있다. 또한, BTDC 60°에서 단일 분사한 경우 균일한 예혼합기의 형성만 이루어지고 착화원이 없어 예혼합 열발생이 작게 나타나고 연소가 잘 이루어지지 않는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 조건에서의 IMEP와 배기특성을 비교한 것이다. IMEP는 조기 분사만 하였을 경우 보다 2단 분사를 하였을 경우 약 0.4MPa 정도 높게 나타났으며, 기존의 디젤 연소형태인 BTDC 2° 분사 하였을 경우보다 0.15MPa 정도 낮게 나타남을 볼 수 있으며 2단계의 분사가 예혼합기의 착화에 많은 영향을 끼침을 알 수 있다.

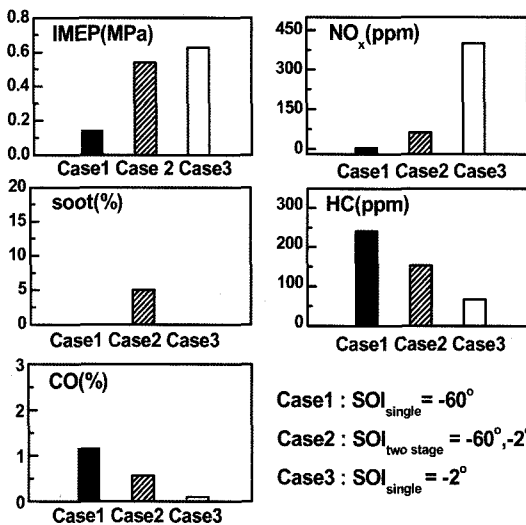


Fig. 6 Comparisons of exhaust emissions between single injection and two stage injection

NO_x배출량은 2단 분사일 경우 디젤 연소 조건인 BTDC 2° 분사의 경우의 배출량인 400ppm의 경우보다 약 85% 정도 감소한 61ppm으로 나타났다. 또한 1단 분사에서 나타난 과도한 HC, CO의 배출도 2단 분사로 저감시킬 수 있음을 알 수 있다.

3.2 2단 분사후기 분사 시기의 영향

1단계 분사시기를 BTDC 60°로 하고 2단계 분사시기를 변화시킨 경우의 연소압력과 열발생률을 Fig. 7에 나타내었다.

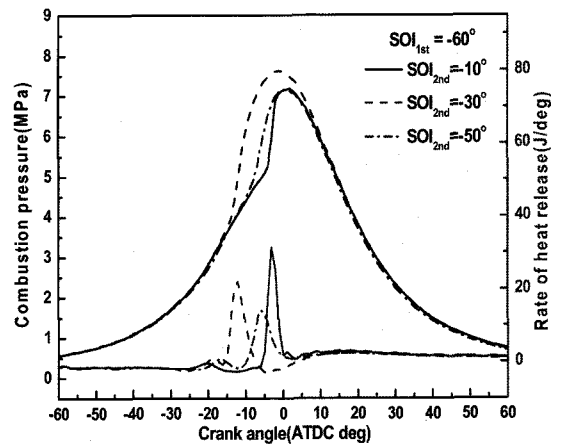


Fig. 7 Effect of second injection timing on combustion characteristics of two stage injection ($P_{inj} = 100\text{MPa}$, 1500rpm)

모든 경우에 있어 조기 분사된 연료가 예혼합이 이루어져 균일 예혼합 연소의 특징인 저온반응영역(cool flame)이 나타나고 있다. 그리고 조기분사 후 10°뒤에 후기분사를 하였을 경우(SOI_{1st}=BTDC 60°, SOI_{2nd}=BTDC 50°)의 경우는 조기분사 조건이지만 BTDC 60°에서 단일 분사한 경우의 최고 연소압력보다 1MPa 이상 증가한 결과를 보여주고 있다. 이것은 분사를 2단 분사를 수행하였기 때문에 분무도달 거리가 감소하여 연료의 벽면 부착 현상이 현저히 감소하였기 때문으로 판단된다.⁹⁾ 후기 분사를 BTDC 30°에 한 경우에는 예혼합된 연료가 저온 연소 반응이 이루어진 후 이어서 연소가 이루어지는 것을 볼 수 있다.

이것은 냉염으로 인해 실린더내의 온도가 상승되

어 착화될 수 있는 분위기가 형성되기 때문으로 해석할 수 있다. 이와 마찬가지로 후기분사시기를 BTDC 10°로 실험한 경우에는 실린더내의 분위기가 온도상승으로 인하여 2단계 분무의 착화지연기간이 짧아져서 분사 후 착화지연기간 없이 거의 바로 급격한 연소를 보이고 있다.

4. 결론

조기분사를 소형 코먼레일 디젤엔진에 적용하여 연소 및 배기특성에 미치는 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연료를 조기분사하면 균일한 예혼합기의 형성은 촉진되나 분사시기가 압축행정 초기로 진각됨에 따라 엔진의 연소성능은 낮아지는 결과를 보였다.
- 2) 2단 분사의 경우, 1단계 분사를 조기에 수행하고 2단계 분사를 TDC 부근에서 소량의 연료를 공급하면, 2단계 분사 연료에 의한 연소가 착화원으로 작용하여 단일 조기 분사한 경우보다 출력이 다소 증가하였다.
- 3) 2단 분사를 수행하게 되면 기존 디젤 연소와 비교하여 연소실 내의 혼합기 분포가 균일하게 되어 NO_x 배출이 크게 감소하였다.
- 4) 조기분사시기를 BTDC 60°로 하고 후기 분사시기를 변화시키면서 연소특성을 실험한 결과, 후기 연료 분사 시기는 연소 특성에 많은 영향을 미치는 결과를 나타냈으며, 이로서 2단 분사를 연소의 제어 인자로 사용할 수 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실지원사업 및 환경부 Eco-STAR project(무·저공해자동차사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) G. D. Neely, S. Ssaki and J. A. Leet, "Experimental Investigation of PCCI-DI

- Combustion on Emissions in a Light-Duty Diesel Engine," SAE 2004-01-0121, 2004.
- 2) D. J. Lee, M. Y. Kim, H. G. Roh, D. S. Kim, J. H. Lee and C. S. Lee, "Combustion and Exhaust Characteristics of a Common-rail Diesel Engine with Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.357-362, 2004.
- 3) C. S. Lee, M. Y. Kim, S. J. Hwang and D. S. Kim, "Effect of Operation on the Characteristics of Combustion and Exhaust Emission in a Gasoline Fueled HCCI Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.12, No.1, pp.48-54, 2004.
- 4) M. Christensen and B. Johansson, "Influence of Mixture Quality on Homogeneous Charge Compression Ignition," SAE 982454, 1998.
- 5) S. Simescu, S. B. Fiveland and L. G. Dodge, "An Experimental Investigation of PCCI-DI Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine," SAE 2003-01-0345, 2003.
- 6) S. J. Hwang, M. Y. Kim, D. S. Kim, K. H. Lee and C. S. Lee, "The Combustion and Exhaust Emission Characteristics of HCCI Diesel Engine with Premixing Property," Autumn Conference Proceedings, KSAE, pp.308-315, 2003.
- 7) A. A. Pelkalski, J. F. Zevenbergen, H. J. Pasman, S. M. Lemkowitz, A. E. Dahoe and B. Scarlett, "The Relation of Cool Flames and Auto Ignition Phenomena to Process Safety at Elevated Pressure and Temperature," Journal of Hazardous Materials, Vol.93, pp.93-105, 2003.
- 8) S. Tanaka, F. Ayala, J. C. Keck and J. B. Heywood, "Two-stage Ignition in HCCI Combustion and HCCI Control by Fuels and Additives," Combustion and Flame, Vol.132, pp.219-239, 2003.
- 9) S. W. Park, H. K. Suh and C. S. Lee, "Effects of Split Injection on Spray Characteristics for a Common-rail type Diesel Injection System," Int. J. Automotive Technology, Vol.6, No.4, pp.315-322, 2005.