

# 압축착화 엔진에서 가솔린 예혼합이 연소 및 배기 특성에 미치는 영향

차준표\* · 권석주\* · 허정운\* · 이창식\*\* · 박성욱\*\*\*

## Effect of Gasoline-premixing on Combustion and Exhaust Emissions Characteristics in Compression Ignition Engines

Junepyo Cha, Seokjoo Kwon, Jeong Yun Heo, Chang Sik Lee and Sung Wook Park

### ABSTRACT

The purpose of the present work is to investigate the effect of gasoline-premixing on a combustion and emissions characteristics in a compression ignition engine. For studying combustion characteristics, a combustion pressure and rate of heat release (ROHR) were measured using a single-cylinder DI compression ignition engine with a common-rail injection system and premixed fuel injection system. In addition, exhaust emissions characteristics were studied using emission analyzers and smoke meter. The experimental results showed that the case of gasoline-premixing had longer ignition delay and lower combustion pressure compared to the cases of diesel direct injection. Furthermore, premixed gasoline-air mixture reduced NOx emissions due to low peak of ROHR.

**Key Words** : Gasoline-premixing, CI engine, Combustion characteristic, Emission characteristic

### 1. 서론

최근 전 세계적으로 지구 온난화 현상을 비롯하여 이례적인 기후 변화가 나타남에 따라 선진국을 중심으로 모든 산업분야에 환경규제가 적용되고 있으며 자동차 산업에서의 규제는 특히 더욱 엄격해지고 있다. 이에 대응하기 위하여 압축착화기관(compression ignition engine)은 높은 압축비에 의하여 열효율이 높고 연료의 자착화(auto-ignition) 특성을 이용하기 때문에 희박한 영역에서 운전되어 CO<sub>2</sub>의 배출량이 현저히 낮은 장점을 갖고 있어 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만 입자상물질(Particulate matter, PM)과 질소산화물(NO<sub>x</sub>)의 배출이 큰 단점을 갖고 있다[1,2].

이를 극복하기 위하여 연소실 내 혼합기를 균일하게 하여 입자상물질의 생성영역으로 알려진 국부적으로 연료가 농후한 영역을 없애고 급격한 열발생을 줄이는 균일 예혼합 압축 착화(Homogeneous charge compression ignition, HCCI) 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만 연소제어의 어려움과 낮은 출력의 문제점을 갖고 있다. 이러한 HCCI 연

소의 단점을 극복하기 위하여 dual-fuel 방법이 최근 많이 연구 되고 있다[3,4].

dual-fuel은 예혼합에 의한 노킹을 억제하며 착화 지연시간을 길게 하여 착화시점을 TDC 근처에서 제어하기 위하여 옥탄가(Octane number)가 높은 연료를 흡기과정 중에 예혼합하여 연소실 내에 균일한 혼합기를 형성하고 높은 세탄가(Cetane number)를 가진 연료를 직접 분사하여 착화시킴으로써 미리 형성된 균일한 혼합기를 연소시키는 방법이다[5,6].

Naoki[7] 등은 옥탄가가 높은 연료와 세탄가가 높은 연료를 조기 분사하여 혼합기간에 따른 연소 및 배기 특성에 대하여 연구하였고, Gautam[8] 등은 고부하 영역에서 NO<sub>x</sub>와 PM을 줄이기 위하여 가솔린을 조기 분사하여 부분적으로 예혼합 압축착화하는 실험을 수행하여 배기 저감의 가능성을 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 옥탄가가 높은 가솔린을 이용하여 가솔린-예혼합(Gasoline-premixing)이 연소 및 배기 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 가솔린을 흡기과정 중에 분사하였으며 디젤은 연소실 내 직접 분사하였다. 또한 총 연료 분사량이 8 mg일 때 연소실 내 직접 분사하는 디젤의 분사량과 예혼합하는 가솔린의 분사량의 비를 7:3, 5:5로 하여 각각 실험한 결과를 디젤만을 연소실 내 직접 8 mg을 분사한 결과와 비교하였다.

\* 한양대학교 대학원

\*\* 한양대학교 기계공학과

† 연락처, parks@hanyang.ac.kr

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1. 실험 장치

연소 및 배기 특성을 실험하기 위하여 단기통 압축 착화 엔진의 구성하였으며 그 주요 제원과 연소실내 직접 분사하는 인젝터에 대하여 Table 1에 나타내었다.

압축비가 17.8:1이고 배기량이 373.3 cc인 커먼레일 시스템의 단기통 디젤엔진을 DC 동력계(55 kW)를 이용하여 엔진의 운전속도를 제어하였다. 분사 시스템에서는 병렬로 연결된 두 개의 고압펌프 (HSF-300, Haskel)를 이용하여 커먼레일(Common-rail, Bosch) 내 연료 분사압을 제어하였고, 타이밍 펄스 발생기(Timing pulse generator, Blue planet)와 인젝터 드라이버(TDA 3300, TEMS)를 이용하여 연소실 직접 분사의 분사량과 분사시기를 제어하였다. 연소해석을 위하여 엔진 헤드에 피에조 압전 소자 방식의 압력 센서(6052C, Kistler)를 설치하였고, DAQ보드 (PCI-MIO-16E-1, NI)와 Labview 소프트웨어를 사용하여 연소실 내 압력데이터를 실시간으로 취득하였다. 배기가스 분석을 위하여 Soot의 농도를 측정하는 매연측정기 (Smoke meter-415S, AVL)와 유해배출가스 농도를 측정하는 배기분석기(MEXA-554JK, Horiba)를 이용하였다[9].

또한 가솔린 예혼합에 따른 영향을 알아보기 위하여 Fig. 1과 같이 예혼합 분사장치를 구성하였다. 가솔린을 예혼합 연료 탱크에 주입한 후 3 MPa의 분사압력을 유지하기 위하여 질소가스로 가압하였으며, 예혼합 연료 인젝터 드라이버(TDA-3100, TEMS)를 이용하여 분사량을 제어하였다. 분사된 가솔린이 흡입된 공기와 균일한 혼합기를 이루게 하기 위하여

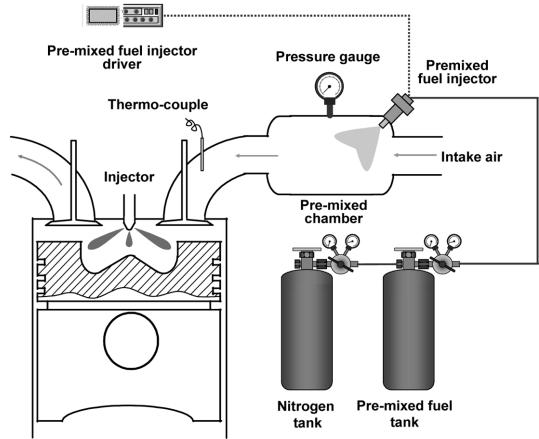


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

여 흡기 챔버(Intake chamber)를 설치하고 예혼합 연료 인젝터를 흡기 챔버에 Fig. 1과 같이 설치하였다.

### 2.2. 실험 방법

본 연구에서는 가솔린 예혼합에 따른 연소 및 배기 특성을 알아보기 위하여 디젤은 TDC에서 BTDC 30°까지 분사시기를 진각시키며 연소실 내 직접 분사(direct injection)하였고 가솔린은 예혼합을 위하여 흡기챔버에 분사하였다. 이러한 실험 조건을 Table 2에 나타내었다.

Case 1은 8 mg의 디젤만을 연소실내 직접 분사하는 방법이고, Case 2는 흡기챔버에 2.4 mg의 가솔린을 분사한 후 5.6 mg의 디젤을 직접 분사하는 방법이다. 또한 Case 3는 Case 2와 같이 4 mg의 가솔린과 4 mg의 디젤을 분사하는 방법이다. 이 경우에 가솔린은 3 MPa의 분사압력으로 분사되고 디젤은 100 MPa의 분사압력으로 분사되며 분사시기의 변화

Table 1. Specifications of the test engine

Description		Specification
Type		Single-cylinder DI engine
Bore×Stroke (mm)		75×84.5
Displacement volume (cc)		373.3
Compression ratio		17.8
Valve type		DOHC 4
Intake valve	Open	BTDC 8°
	Close	ABDC 52°
Exhaust valve	Open	BBDC 8°
	Close	ATDC 38°
Fuel injection system		Bosch common-rail
Number of injection hole		6
Nozzle hole diameter (mm)		0.128
Injection angle (°)		156

Table 2. Experimental conditions

Item		Experimental condition	
Engine speed (rpm)		1200	
Coolant temperature (°C)		70	
Oil temperature (°C)		70	
Intake air pressure		Naturally aspirated	
SOE of direct injection (°BTDC)		0, 9, 20, 30	
Injection pressure (MPa)	Direct injection (Diesel)	100	
	Port injection (Gasoline)	3	
Test fuel	Case 1	Direct injection (Diesel)	8 mg
		Port injection (Gasoline)	×
	Case 2	Direct injection (Diesel)	5.6 mg
		Port injection (Gasoline)	2.4 mg
	Case 3	Direct injection (Diesel)	4 mg
		Port injection (Gasoline)	4 mg

는 디젤에 의해서만 이루어졌다. 또한 분사시점은 인젝터 드라이버에서 인젝터로 전류가 인가되는 시작점(start of energizing, SOE)으로 정의하였다.

연소특성을 해석하기 위해서 열발생율(Rate of heat release, ROHR)은 연소실 내의 검사체적(control volume)이 폐쇄계이며 혼합기를 이상기체로 가정하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\kappa}{\kappa-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\kappa-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad [J/deg.] \quad (1)$$

배기특성을 해석하기 위하여 단위 출력 당 배기 배출량을 나타내는 IS-emission(Indicated specific-emission)단위를 사용하였으며 그 정의는 다음과 같다.

$$IS-emission = \frac{\dot{m}_{emission}}{Power} \quad [g/kWh] \quad (2)$$

$\dot{m}_{emission}$ 은 배기의 질량유량이고,  $Power$ 는 전체 사이클에서의 출력이다[10].

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 연소 특성

Fig. 2는 엔진 회전속도 1,200 rpm에서 디젤을 100 MPa로 직접 분사할 때 분사시기를 TDC에서 BTDC 30°까지 진각 시킴에 따른 평균 유효압력(Indicated mean effective pressure, IMEP)에 대한 특성이다. 전체적으로 모든 경우에서 분사시기를 진각 시킬수록 IMEP가 감소하는 특성이 나타났다. 이는 Table 1에서 나타나듯이 TDC 근처의 분사시기에 최적화되어 있는 피스톤 형상과 156°의 분사각(Spray angle)을 가진 인젝터를 사용하여 분사시기를 진각시키면 분사

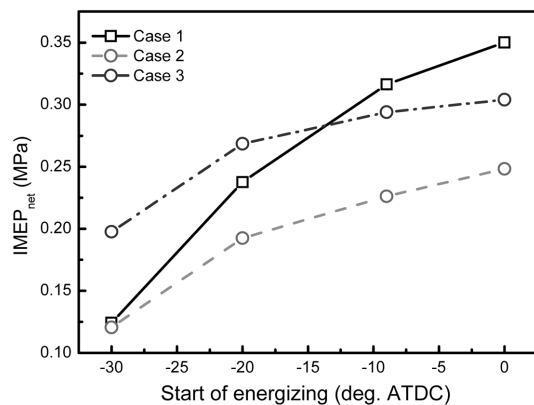
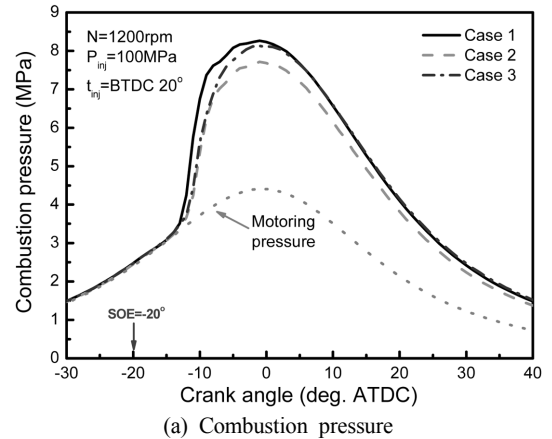


Fig. 2. Effect of gasoline-premixing on indicated mean effective pressure according to various start of energizing.

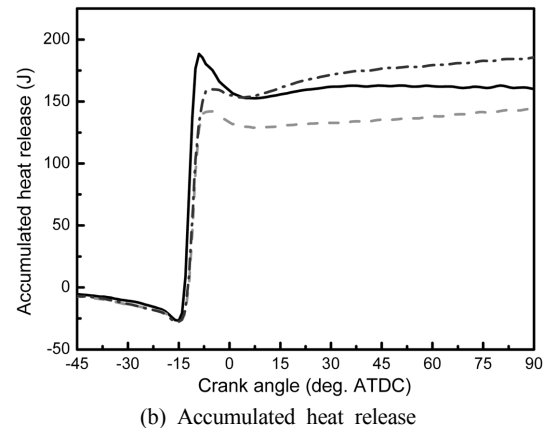
된 연료가 실린더 벽면에 묻는 현상(wall-wetting)과 틈새 체적(crevice volume) 내로 유입된 연료의 불안전 연소 현상 그리고 압축행정에 연소가 이루어져 음(-)의 일을 하게 되는 현상 등에 의한 것으로 판단된다. Case 3의 경우에서는 IMEP가 BTDC 20°까지 매우 완만하게 감소하는 경향이 나타난다.

앞서 기술한 Case 3의 특성을 해석하기 위해서 Fig. 3에 분사시기 BTDC 20°에서의 연소압력과 누적 열발생량을 나타내었다.

Fig. 3(a)에서 가솔린이 예혼합된 Case 2와 3의 경우에는 가솔린의 높은 옥탄가에 의하여 디젤만이 직접 분사된 Case 1보다 다소 착화지연기간(ignition delay)이 길어지고 연소압력의 기울기도 다소 완만해진 경향을 보였다. 특히 BTDC 20°에서 가장 IMEP가 높았던 Case 3의 최고 연소압력은 TDC 근처에서 Case 1의 최고 연소압력과 비슷한 수준까지 증가하며 IMEP에 크게 영향을 미치는 배기행정에서의 연소압력은 Case 1보다 다소 높은 특성을 보였다. 이를 종합하여 Case 3을 보면 음(-)의 일을 하는



(a) Combustion pressure



(b) Accumulated heat release

Fig. 3. Effect of gasoline-premixing on combustion pressure and accumulated heat release at BTDC 20°CA of SOE.

압축행정에서의 연소압력은 Case 1보다 낮고 TDC 근처에서는 Case 1의 최대 연소압력 수준까지 높아지며 IMEP에 영향이 큰 배기행정에서는 오히려 Case 1보다 다소 연소압력이 높기 때문에 IMEP가 가장 높은 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 3(b)에 나타난 누적 열발생량은 압력센서로부터 취득된 연소실 내 압력데이터를 앞서 정의된 식 (1)에 의해 계산된 열발생율을 누적한 값이다. Case 1의 경우에 누적 열발생량의 수렴값이 최대 누적 열발생량보다 감소한 경향을 보인다. 이는 조기분사에 의하여 연소가 음(-)의 일을 하는 압축행정의 이른 시기에서 시작되고 짧은 예혼합 연소구간(premixed combustion phase)이 압축행정에서 이루어지며 적은 분사량에 의하여 확산 연소구간(mixing-controlled combustion phase)이 거의 일어나지 않았기 때문으로 판단된다. 반면 가솔린이 예혼합된 경우에는 누적 열발생량의 감소가 적게 일어나며 특히 Case 3의 경우에는 거의 일어나지 않으며 배기행정에서 더욱 증가하여 수렴되는 경향을 보인다. 이는 짧은 예혼합 연소구간 이후에도 혼합기에 포함된 가솔린이 연소되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4는 Fig. 3(b)의 누적 열발생량을 계산한 동일한 운전 조건에서의 열발생율을 나타내었으며 예혼합된 가솔린의 영향을 보기 위하여 ROHR을 다음과 같이 정의하였다.

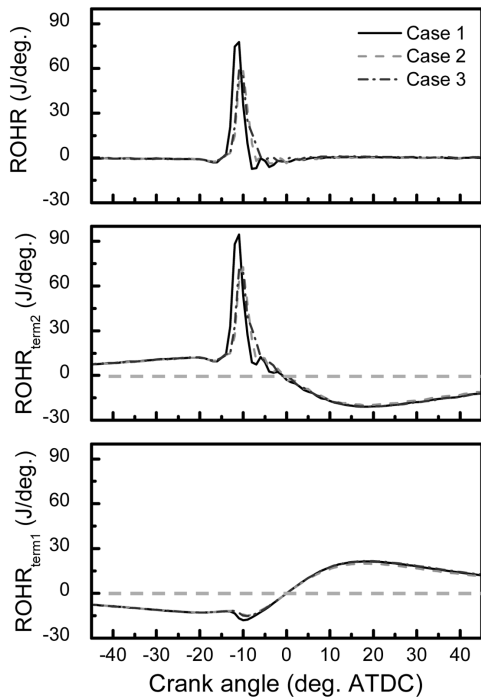


Fig. 4. Characteristics of ROHR according to gasoline-premixing at BTDC 20°CA of SOE.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\kappa}{\kappa-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\kappa-1} V \frac{dP}{d\theta} = ROHR_{t_{erm1}} + ROHR_{t_{erm2}} \quad (3)$$

Case 1의 경우에는 앞서 Fig. 3에서 기술한 바와 같이 압축행정에서의 높은 연소압력에 의하여 Case 2와 3의 ROHR<sub>term1</sub>과 비교하여 상대적으로 음(-)의 값이 매우 크며, 확산 연소구간이 거의 나타나지 않기 때문에 TDC 근처의 ROHR<sub>term2</sub>의 값이 적은 경향을 나타낸다. 이에 TDC 근처의 ROHR값은 음(-)의 값을 가지며 이에 누적 열발생량이 감소한 것으로 판단된다. 반면 예혼합된 가솔린의 양이 커질수록 TDC 근처의 ROHR<sub>term2</sub>의 값이 커지는 경향에서 혼합기에 가솔린 양이 증가할수록 예혼합 연소구간 이후에도 가솔린이 활발히 연소되는 것으로 판단할 수 있다.

### 3.2. 배기 특성

Fig. 5는 1,200 rpm으로 엔진 회전속도를 유지하고, 디젤을 TDC에서 BTDC 30°CA까지 분사시기를 진각시키며 100 MPa로 직접 분사하는 운전조건에서 배출되는 IS-NO<sub>x</sub>와 IS-soot의 특성을 나타낸 것이다. 대체적으로 혼합기의 가솔린 비율이 커질수록 IS-NO<sub>x</sub>와 IS-soot이 동시에 저감되는 특성을 보이며 IS-NO<sub>x</sub>의 경우에는 모든 분사시기에서 감소하는 경향을 보인다. 이는 예혼합 연소에 크게 영향을 미치는 디젤 분사량이 줄어들어 Fig. 4에서 나타난 것과 같이 감소한 최대 열발생율과 완만해진 열발생율의 기울기에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 위와 동일한 실험 운전조건에서의 IS-HC와 IS-CO의 특성을 나타낸 것이다. IS-HC의 경우에는 예혼합된 가솔린의 비율이 높아질수록 그 배출량이 크게 증가하였다. 이러한 경향에서 혼합기 내 가솔린의 상당량이 불완전연소 하는 것으로 판단할

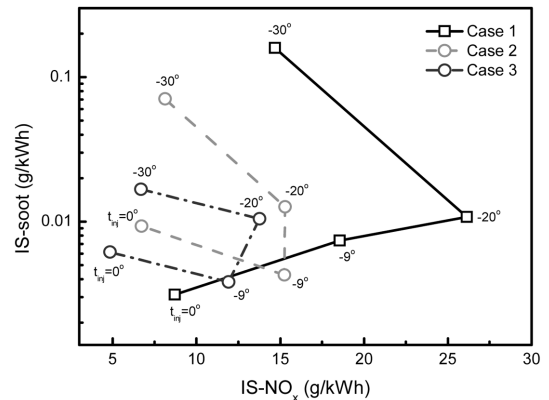


Fig. 5. IS-NO<sub>x</sub> and IS-soot characteristics of test cases according to injection timing.

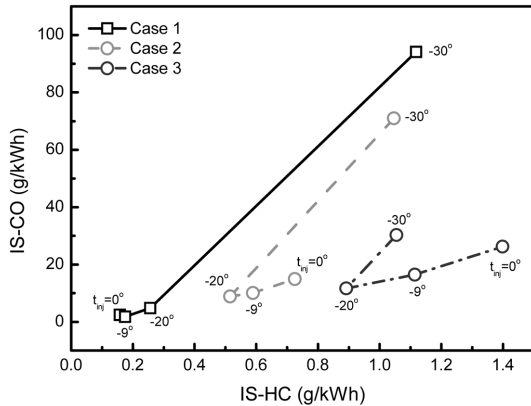


Fig. 6. IS-HC and IS-CO characteristics of test cases according to injection timing.

수 있다. IS-CO에서도 가솔린의 예혼합에 의해 그 배출량이 다소 높아지는 경향이 나타난다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 압축착화기관에 가솔린 예혼합이 연소 및 배기 특성에 미치는 영향에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모든 경우에서 분사시기를 TDC에서 BTDC 30°까지 진각 시킴에 따라 평균 유효압력은 감소하며 가솔린을 예혼합한 경우에는 다소 완만하게 감소하는 특성을 보였다.
- 2) 가솔린의 높은 옥탄가에 의하여 가솔린을 예혼합한 경우에는 착화지연기간이 다소 길어지며 예혼합 연소구간 이후에도 연소되는 특성을 보였다.
- 3) 예혼합된 가솔린의 영향으로 열발생율은 디젤만 직접 분사한 경우에 비하여 다소 감소하며 그 기울기도 완만한 경향을 보였다.
- 4) 혼합기 내 가솔린의 예혼합율이 증가함에 따라 IS-NOS는 디젤만 분사한 경우와 비교하여 분사시기 전 영역에서 감소하고 IS-soot는 분사시기에 따라 다소 감소하는 경향을 보였다.
- 5) 혼합기 내 가솔린의 불완전연소에 의하여 가솔린의 예혼합율이 증가할수록 IS-HC는 크게 증가하였으며 IS-CO는 다소 증가하였다.

#### 후기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. 2010-0010508).

#### 참고문헌

- [1] Dae Sik Kim, Myung Yoon Kim, Chang Sik Lee, "Combustion and emission characteristics of a partial homogeneous charge compression ignition engine when using two-stage injection", Combust. Sci. and Tech. Vol. 179, 2007, pp. 531-551
- [2] Chang Sik Lee, Young Hoon Yoon, Myung Yoon Kim, "Effect of cooled-EGR on the characteristics of performance and exhaust in a HCCI diesel engine", Transactions of KSAE, Vol. 13, No. 5, 2005, pp. 35-41
- [3] Rudolf H. Stanglmaier and Charles E. Roberts, "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Applications", SAE 1999-01-3682
- [4] Mingfa Yao, Zhaolei Zheng, and Haifeng Liu, "progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines", Progress in Energy and Combustion Science xxx, 2009 pp. 1-40
- [5] Patrick B. Dunbeck and Rolf D. Reitz, "An Experimental Study of Dual Fueling with Gasoline Port Injection in a Single-Cylinder, Air-Cooled HSDI Diesel Generator", SAE 2010-10-0869, 2010
- [6] Reed Hanson, Derek Splitter and Rolf Reitz, "Operating a Heavy-Duty Direct-Injection Compression-Ignition Engine with Gasoline for Low emissions", SAE 2009-01-1442
- [7] Naoki Shimazaki, Tadashi Tsurushima and Terukazu Nishimura, "Dual mode combustion concept with premixed diesel combustion by direct injection near top dead center", SAE 2003-01-0742
- [8] Gautam T. Kalghatgi, Per Risberg and Hans-Erik Ångström, "Partially Pre-mixed Auto-Ignition of Gasoline to Attain Low Smoke and Low NOx at High Load in a Compression Ignition Engine and Comparison with a Diesel Fuel", SAE 2007-01-0006
- [9] Junepyo Cha, Seung Hyun Yoon, Mun Soo Chon, Chang Sik Lee, "Combustion and nano-particulate emissions characteristics of a compression ignition engine fueled with oxygenated blending fuel", Transactions of KSAE, Vol. 17, No. 5, 2009, pp. 61-66
- [10] Heywood, J. B., "Internal combustion engine fundamentals", McGraw-Hill, New York, 1988.