

# 바이오디젤 혼합 연료에 커먼레일 디젤기관에서 예비 분사시기가 연소 및 배기 특성에 미치는 영향

윤삼기<sup>1</sup>, 최낙정<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국지엠, <sup>2</sup>전북대학교 기계설계공학부

## Effects of pilot injection timing on the Combustion and Emission Characteristics in a Common Rail Diesel Engine with Bio-diesel blended fuel

Sam-Ki Yoon<sup>1</sup> and Nag-Jung Choi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>GM korea Company

<sup>2</sup>Division of Mechanical Design Engineering, Chonbuk National University

**요약** 본 연구는 4실린더 커먼레일 디젤 기관에서 바이오 디젤 혼합 연료를 사용하여 예비 분사시기와 EGR율을 변화시켰을 때 연소 압력과 배기 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 실험을 수행하였다.

예비 분사 시기와 EGR율은 디젤 기관의 연소 및 배기 배출 특성에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용하고 있는 기관 회전 속도 2,000rpm에서 바이오 디젤 혼합율 20%의 연료를 사용하여 예비 분사 시기와 EGR율에 다양하게 변화를 주어 실험을 하였다. 실험결과, 도시 평균 유효 압력은 예비 분사 시기가 상사점전 BTDC 10°에서 가장 높았으며, 연소 압력과 열 발생율은 동일 예비 분사 시기에서 EGR율에 비례하여 감소하였다. NOx 배출량은 예비 분사시기에 관계없이 EGR율이 증가할수록 큰 폭으로 감소하였으며, 매연(Soot)은 예비 분사 시기 BTDC 20°에서 가장 적게 배출되었다.

**Abstract** An experimental study was performed to investigate the characteristics of combustion pressure and exhaust emissions when the pilot injection timing and EGR rate were changed in a CRDI 4-cylinder diesel engine using bio-diesel blended fuel. The pilot injection timing and EGR rate have a significant impact on the combustion and emission characteristics of diesel engine. In this study, the pilot injection timing and EGR rate variation were conducted to 2000rpm of engine speed with fuel of bio-diesel blended rate 20%. In these experimental results, IMEP was shown maximum pressure at pilot injection timing BTDC10°, combustion pressure and heat release rate were decreased in proportion to increase of EGR rate under the same pilot injection timing conditions. The NOx emission was decreased with increasing the EGR rate without influence on pilot injection timing. However, soot emission was reduced to a minimum at pilot injection timing BTDC20°

**Key Words** : Bio-diesel blended fuel, Combustion pressure, EGR, Exhaust emission, Heat release rate

### 1. 서론

최근 세계적으로 화석 연료 사용 증가로 인하여 대기 중 온실가스 농도가 급격히 증가 되어 온실 효과로 인한 지구 온난화 현상이 초래 되고 있다.

온실 가스에 의한 지구 온난화 현상으로 홍수, 폭우, 폭염, 태풍을 포함한 기후 이상 변화 현상이 나타나고 있으며, 이러한 기후 변화에 대응하기 위하여 세계 각국은 온난화 현상의 원인으로 알려진 화석 연료를 대체할 신재생 에너지 및 수송 부문 연료에 대하여 많은 관심과 연

\*Corresponding Author : Nag-Jung Choi(Chonbuk National Univ.)

Tel: +82-63-270-4765 email: njchoi@jbnu.ac.kr

Received January 8, 2014

Revised (1st February 3, 2014, 2nd February 7, 2014)

Accepted May 8, 2014

구를 수행 하고 있다.

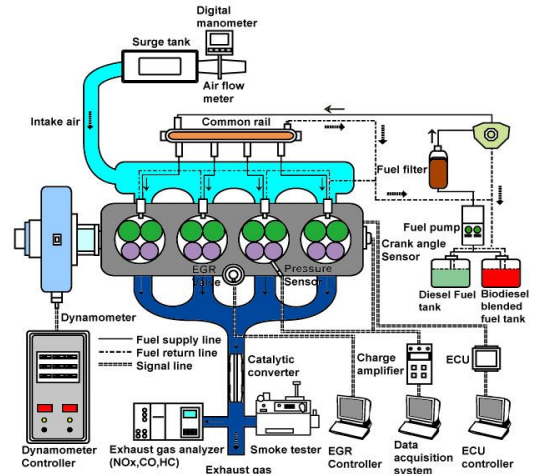
이에 따라 세계 각국의 지원 아래 온실 가스의 주범인 이산화탄소를 저감하고, 화석 연료 사용량을 줄이기 위하여 하이브리드 자동차, 연료 전지 자동차, 전기 자동차 등 친환경 자동차의 개발 및 생산에 심혈을 기울이고 있다. 그러나 이러한 친환경 자동차 들은 화석 연료의 사용량을 큰 폭으로 줄일 수 있지만 높은 출력을 얻는 데는 한계가 있다. 따라서 최근에는 기관의 출력은 더욱 증대되면서 배기량은 작아지는 다운사이징 기관을 사용하는 자동차가 주목을 받고 있다. 이러한 다운사이징 기관으로서 소음 및 진동부분의 단점에도 불구하고 기존의 높은 열효율과 고출력 및 내구성 등에서 우수한 성능을 가진 디젤 기관이 주목을 받고 있으며, 이에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 그러나 디젤 기관은 가솔린 기관에 비하여 배기 배출물 중 입자상 물질과 질소 산화물 배출량이 상대적으로 많이 배출되는 단점이 있다[1-3]. 따라서 입자상 물질과 배기 배출 물을 저감하기 위한 여러 가지 방법 등이 모색되고 있으며[4], 그 방법의 하나로 식물성 바이오 연료와 기존의 디젤 연료를 혼합하여 사용하는 방법이 고려될 수 있다. 바이오 디젤유는 디젤 연료와 물성치가 비슷하면서,독성이 없고, 생 분해도가 높으며, 저유황 경유에 비하여 세탄가가 높은 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라, 분자 구조 내에 산소를 포함하고 있어 배기 배출량을 저감 할 수 있다고 알려져 있다[5].

특히, 연료를 고압으로 압축하여 인젝터에서 분사하는 커먼레일 디젤 기관에서는 연료의 분사시기와 EGR등이 연소 및 배기 특성에 크게 영향을 미치고 있다고 보고되고 있다[6]. 따라서 본 연구에서는 커먼레일 4행정 사이클 4실린더 디젤 기관에서 바이오 디젤 혼합 연료를 사용하여 예비 분사 시기 및 EGR율을 변화 시켰을 때 연소 및 배기 오염 물질 배출 특성을 실험적으로 규명하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

### 2.1 실험 장치

본 연구에서는 4실린더 커먼레일 디젤 기관에서 예비 분사시기 및 EGR율에 변화를 주었을 때 연소 및 배출가스 특성을 알아보기 위해 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구성 하였다.



[Fig. 1] Schematic diagram of experimental apparatus

실험 장치는 터보차저가 장착된 4실린더 전자 제어식 커먼레일 디젤기관과 220V 전원에 의해서 구동되는 연료 펌프를 장착한 연료 공급 장치, 배기가스 성분 분석을 위한 배기가스 분석 시스템, 기관 동력의 제어를 위한 와전류 타입의 EC 동력계(DY-230KW)등으로 구성하였다. 실험용 기관의 연소 압력은 예열 플러그가 장착된 자리에 압전 소자 방식의 압력 센서(Kistler, 6056a)를 장착하여 데이터를 DAQ보드(NI,PCI 6040E)모델을 사용하여 취득하였으며, 실린더 내 연소 압력은 연소 해석 장치를 사용하여 분석 하였다. EGR은 배기가스가 수냉식 냉각기를 통하여흡기로 들어가도록 하였으며, 재순환되는 가스 유량은 EGR제어 밸브를 컴퓨터로 듀티 제어 하였다.

또한 배기가스 성분 분석을 위해서 그린라인(MK2)의 배기가스 측정 장비를 설치하였으며, 매연 검출을 위하여 부분 유량 채취 방식인 광투과 방식 매연 측정기(OPA-102)를 사용하여 측정 하였다.

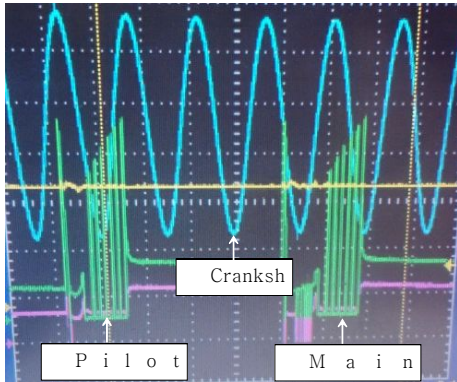
본 실험에 사용된 4실린더 커먼레일 디젤 기관의 주요 제원은 Table 1과 같다.

그리고 기관의 ECU내에 예비 분사 시기 변화를 주었을 때 실시간으로 변화되는 분사 시기는 파형 분석기(Tektronix TDS2024B)를 사용하여 확인 하였다.

[Table 1] Specification of test engine

Item	Specification
Engine type	4-Cylinder turbo DI
Bore×Stroke(mm)	81×96
Displacement(cc)	1979

Combustion type	Direct Injection
Injection Procedure	1-3-4-2
Compression Ratio	17.7 : 1
Max.Power(kw/rpm)	82/4000
Max.Torque(Nm/rpm)	260/2000
Max.Speed(rpm)	4500
Fuel injection timing	ECU Control
Fuel Pressure(MPa)	145



[Fig. 2] Injector voltage scope of pilot injection timing

Fig. 2는 예비 분사 시기에 변화를 주었을 때 파형분석기에 의한 인젝터의 전압 파형을 나타낸다.

## 2.2 실험 방법

본 실험에서 식물성 바이오 연료인 카놀라(Canola)유와 디젤 연료를 혼합하여 사용하였을 때 연소 및 배기 배출에 미치는 영향을 알아보기 위하여 EGR율을 제어할 수 있는 EGR 제어 장치를 설치하였다. 본 실험에 적용된 기관 회전 속도는 일반적으로 사용 빈도가 높은 중속 구간인 2000rpm(부하30Nm)을 선정 하였으며, 실험의 신뢰도를 확보하기 위해서 기관 냉각수 온도는 353±3K, 흡입 공기 온도는 293±3K로 유지 하면서 실험을 수행 하였다. EGR율의 변화는 EGR프로그램을 제어하는 EGR제어용 컴퓨터에서 주어졌으며, EGR율은 0, 10, 20, 30%로 10%씩 변화를 주었다. EGR율 변화는 배기가스 분석기를 통하여 NOx 배출 값으로 실시간 확인 하였다. 예비 분사 시기의 변화는 ECU 프로그램을 제어하는 ECU 제어용 컴퓨터에서 주어졌으며, 변화된 예비 분사 시기를 확인하기 위하여 파형 분석기를 사용하여 실시간으로 예비 분사시기, 크랭크 축 위치, 를 확인 하면서 실험을 실시 하였다. 연소 특성인 연소 압력과 열 발생율은 연소 해석

장치를 통하여 취득하였으며, 배기 배출물 특성은 배기가스 분석기를 통하여 NOx 배출 값을 실시간 확인 하였다. 또한 매연은 부분유량 채취 방식인 광투과식 매연 측정기(OPA-102)를 사용하여 측정하였다. Table 2는 본 연구를 수행하는데 사용된 경유와 바이오 디젤의 물리적 특성을 비교한 것이고, Table 3은 실험에 대한 상세 내용을 나타내었다.

[Table 2] Property of diesel and bio-diesel fuel

Characteristic	Diesel fules	Biodiesel
Flash point(°C)	69~88	182
Kinetic viscosity(mm <sup>2</sup> /s@40°C)	2.8517	4.29
Pour point(°C)	-23	-19
Sulfur(%)	0.005	0.001
Specific gravity(15°C)	0.8269	0.88
Calorific value(MJ/Kg)	43.96	39.17
Oxygen(wt%)	0	11.02

[Table 3] Experimental and operating conditions

Engine speed(rpm)		2000
Torque(Nm)		30
Injection timing(deg)	pilot	variable
	main(TDC)	0°
Cooling water temp(K)		353±3
Intake air temp(K)		293±3
EGR rate(%)		0, 10, 20, 30
BD20	Diesel(%)	80
	Bio-diesel(%)	20

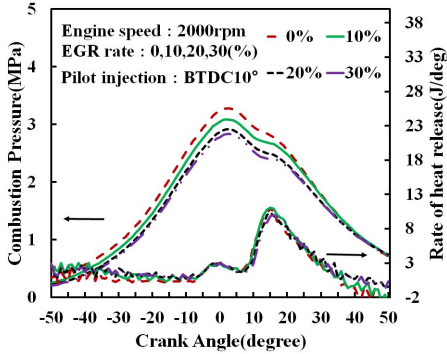
## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 예비 분사 시기에 따른 연소 특성

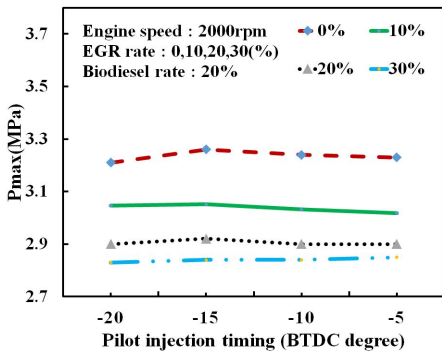
Fig. 3은 바이오 디젤 혼합물 BD20에서 파일럿 분사시기와 EGR율을 변화 시켰을 때 연소 압력과 열 발생율을 나타낸 그래프이다.

그림에서 보는 바와 같이 연소 압력은 EGR율이 증가할수록 평균 10%의 감소율을 보이며, 열 발생율은 5.02%의 감소율을 보이고 있다. 이와 같은 실험 결과로 보아 혼합유 자체 내에 산소 성분을 함유하고 있다 하더라도 연소 되어진 배기 가스를 다시 연소실에 보내어 새로운 혼합 가스와 같이 혼합하여 연소를 하게 되면 재순환되

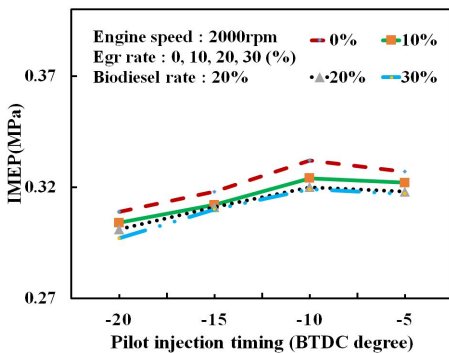
는 가스가 연소 활성화를 저해하는 요인으로 작용하여 연소 확산 촉진을 방해하기 때문에 감소한 것으로 보인다.



[Fig. 3] Effect of pilot injection timing BTDC10° and EGR rate on combustion characteristics



(a) Peak combustion pressure



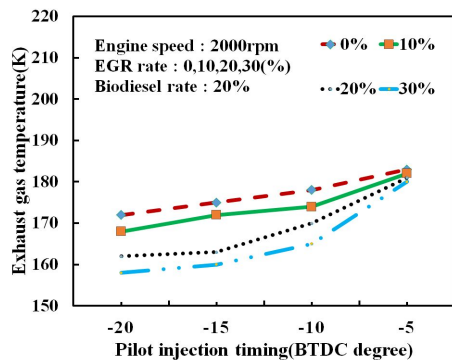
(b) Indicated mean effective pressure

[Fig. 4] Effect of various pilot injection timing and EGR rate on combustion characteristics (a) peak combustion pressure, (b) indicated mean effective pressure

Fig. 4는 바이오 디젤 혼합을 BD20에서 예비 분사시기와 EGR율을 변화 시켰을 때 엔진 회전수 2000rpm에서 연소 최고 압력과 도시 평균 유효 압력을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)에서 보면 동일 분사 시기에서 EGR율이 증가 할수록 EGR율 0% 대비 BTDC5°에서는 평균 9.57%, BTDC10°에서 9.7%, BTDC20°에서는 8.87% 감소율을 보였으며, 주분사를 상사점 0°에 고정하고 예비 분사시기를 진각 시켰을 때 감소율은 BTDC15°에서 제일 큰 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 4(b)는 도시 평균 유효 압력을 나타낸 것으로 그래프에서 보는 바와 같이 동일 분사시기에서 EGR율이 증가 할수록 EGR율 0%대비 BTDC5°에서는 4.3%, BTDC10°에서는 4.37%, BTDC15°에서는 4.5%, BTDC20°에서는 4.7% 감소하였으며, 예비 분사시기에 따른 감소폭은 4~5%로 거의 일정 하였다.

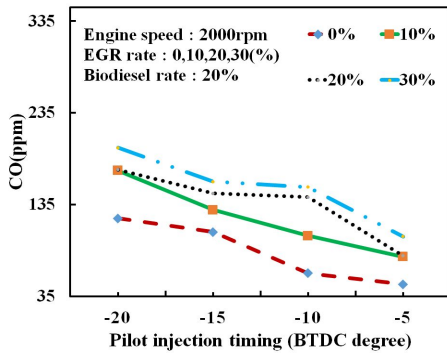
### 3.2 예비 분사 시기에 따른 배기 특성

Fig. 5는 바이오 디젤 혼합을 BD20을 사용하는 기관 회전속도 2000rpm에서 EGR율과 예비 분사 시기에 변화를 주었을 때 배기가스 온도 특성을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 예비 분사시기를 진각 시키고 동일 분사 시기에서 EGR율을 증가 시키면 배출가스 온도는 낮아지는 경향을 보여 주고 있다. 이것은 예비분사와 주 분사 사이의 간격이 일정 범위 이상으로 커지면 연소의 활성화 촉진이 저하되고 EGR율을 증가 시키면 연소실 내부에 연소된 배기가스가 혼합하여 연소하기 때문에 연소 활성화 촉진을 저하시켜 배출 온도가 낮아진 것으로 판단된다.

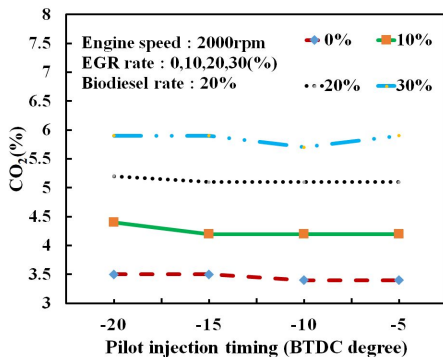


[Fig. 5] Effect of various pilot injection timing and EGR rate on exhaust gas temperature

Fig. 6(a)는 일산화탄소의 배출가스 특성을 나타낸 그래프로서 예비 분사시기를 진각 할수록, EGR율이 커질수록 배출량이 큰 폭으로 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 이는 주 분사를 상사점 0°로 일정하게 유지하고 예비 분사시기를 진각 할수록 예비 분사와 주 분사 사이의 간격이 멀어져 연소 활성화가 되지 않고 불완전 연소 함으로서 일산화탄소 배출량이 많아진 것으로 판단된다. Fig. 6(b)는 이산화탄소 배출가스 특성을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 예비 분사시기를 진각 할수록 이산화탄소 배출량의 변화는 큰 차이가 없었으며, 동일 분사 시기에서 EGR율이 증가 할수록 이산화탄소 배출량은 증가하는 경향을 보였다. 이와 같이 EGR율이 증가 할수록 이산화탄소 배출량이 증가하는 이유는 재순환되는 배기가스 중에 미연소된 일산화탄소 함유량이 EGR율의 증가에 비례하여 많아지고, 새로 흡입되는 일산화탄소가 공기 중의 산소 및 바이오 디젤유 연료 자체 내에 포함되어있는 산소와 결합하기 때문인 것으로 보인다.



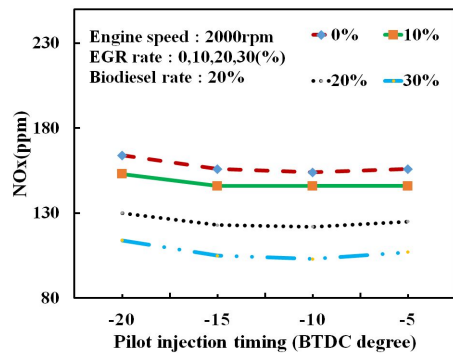
(a) CO Emission



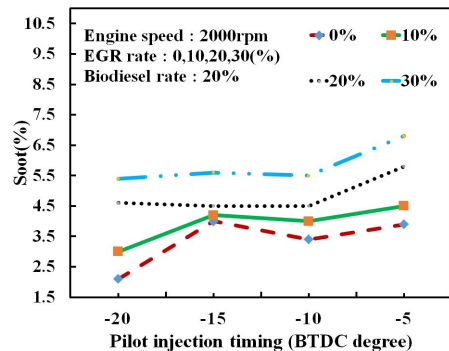
(b) CO<sub>2</sub> Emission

[Fig. 6] Effect of various pilot injection timing with EGR rate on CO and CO<sub>2</sub> Emissions

Fig. 7(a)는 NOx의 배출가스 특성을 나타낸 그래프로서 EGR율이 증가 할수록 배출량은 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 예비 분사시기를 진각 할수록 동일 EGR을 상태에서 다소 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 이것은 배기가스를 연소실에 재순환 시키면, 재순환된 가스가 새로운 혼합가스의 연소 활성화를 저해하는 요인으로 작용하기 때문인 것으로 보인다. Fig. 7(b)는 Soot의 배출가스 특성을 보여 주고 있다. 그래프에서 보는 바와 같이 Soot의 배출량은 예비 분사시기를 진각 할수록 감소하는 경향을 보이고, 동일 분사 시기에서 EGR율에 비례하여 증가하는 경향을 보여주고 있다. 주분사를 상사점 0°에 고정하고 예비분사를 진각 시켜 주면 Soot을 형성하는 시간을 줄여주고 연소실 내부에서 산화를 시켜 줄 수 있는 충분한 시간을 갖기 때문에 Soot의 배출량이 줄어든 것으로 판단된다.



(a) NO<sub>x</sub> Emission



(b) Soot Emission

[Fig. 7] Effect of various pilot injection timing with EGR rate on NO<sub>x</sub> and Soot Emissions

#### 4. 결론

본 연구는 4행정 사이클 4실린더 커먼레일식 디젤 기관에서 바이오 디젤 혼합 연료에 예비분사 시기 및 EGR 율의 변화가 기관의 연소 특성 및 배기 배출량에 미치는 영향을 조사하기 위하여 실험을 수행 하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 연소 압력은 EGR 율이 증가 할수록 평균 10%의 감소율을 보이며 열 발생율은 5.02%의 감소율을 보였다.
- 2) 연소 최고압력은 동일 분사시기에서 EGR 율이 증가 할수록 EGR 율 0%대비 감소하였으며, 도시 평균 유효 압력은 예비 분사시기 BTDC10°에서 가장 높게 나타났다.
- 3) 일산화탄소 배출 특성은 예비 분사시기를 진각 할수록 EGR 율이 커질수록 배출량이 큰 폭으로 증가 하는 경향을 보였고, 질소산화물 배출 특성은 EGR 율이 증가 할수록 배출량이 감소하였으며, 예비 분사시기를 증가 할수록 동일 EGR 율 상태에서 다소 증가하는 경향을 보였다.
- 4) 매연은 예비 분사시기를 진각할수록 감소하는 경향을 보이고, 동일 분사 시기에서 EGR 율에 비례하여 증가하는 경향을 보였다.
- 6) 이상의 실험 결과로부터 바이오 디젤 혼합 연료의 예비분사 시기를 BTDC10° 그리고 EGR 율을 10%로 최적화 하여 커먼레일 디젤 기관에 적용하면 출력 성능에는 큰 영향을 받지 않으면서 NOx, Soot 등의 유해 배출가스를 줄일 수 있음을 확인하였으며, 향후 바이오디젤 혼합 연료를 사용하여 실험을 실시할 때 연료 소비율의 관계를 확인할 필요가 있을 것으로 사료된다.

#### References

[1] M.S. Graboski, R.L. McCormick, "Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines", Prog. Energy combust. Sci 24, 125-164, 1998.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1285\(97\)00034-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1285(97)00034-8)

[2] R.L. McCormick, C.J Tennant, R.R. Hayes, S.Black, Sharp, "Regulated Emissions from Biodiesel Tested in Heavy Duty Engines Meeting 2004 Emission Standards" SAE 2005-01-2200, 2005.

[3] S.H. Yoon, S.H. Park, C.S. Lee, "Experimental investigation on the fuel properties of biodiesel and its blends at various temperatures" Energy and Fuels 22, 653-656, 2008.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ef7002156>

[4] S.C. Kim, "A Study on the Characteristics of Fuel Consumption and Emissions of Diesel Vehicles Using Engine Coolant Flow Rate On/Off Control", KAIS Vol. 14, No. 5 pp. 2069-2074, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.5.2069>

[5] D.Y. Chang, J.H. Van Gerpen, "Determination of particulate and unburned hydrocarbon emissions from diesel engines fueled with biodiesel" SAE paper, 982527, 1998.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/982527>

[6] S.K Yoon and N.J Choi, "The effects of partially premixed pilot injection timing on the combustion and emission characteristics in a common rail diesel engine", KSPSE Vol. 17 No. 6, pp. 18~24, 2013.

#### 윤삼기(Sam-Ki Yoon)

[정회원]



- 2005년 8월 : 군산대학교 기계공학과(공학석사)
- 1997년 2월 ~ 현재 : 한국지엠

<관심분야>

자동차 내연기관 성능 개발 및 대체연료

#### 최낙정(Nag-Jung Choi)

[정회원]



- 1995년 8월 : 한양대학교 기계공학과(공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 기계설계공학부

<관심분야>

자동차 내연기관 성능 개발 및 대체연료