

EGR 제어를 통한 디젤 및 바이오디젤의 저온연소 특성 비교

이용규[†] · 장재훈* · 이선엽* · 오승묵*

Comparisons of Low Temperature Combustion Characteristics between Diesel and Biodiesel According to EGR control

Yonggyu Lee, Jaehoon Jang, Sunyoun Lee and Seungmook Oh

Key Words: Low temperature combustion(저온연소), Biodiesel(바이오디젤), Soybean Oil(대두유), Particulate matter(PM, 입자상물질), Nitrogen Oxides(NOx, 질소산화물), EGR rate(배기재순환율), O₂ Concentration(산소농도)

Abstract

Due to the oxygen contents in biodiesel, application of the fuel to compression ignition engines has significant advantages in terms of lowering PM formation in the combustion chamber. In recent days, considerable studies have been performed to extend the low temperature combustion regime in diesel engines by applying biodiesel fuel. In this work, low temperature combustion characteristics of biodiesel blends in dilution controlled regime were investigated at a fixed engine operating condition in a single cylinder diesel engine, and the comparisons of engine performances and emission characteristics between biodiesel and conventional diesel fuel were carried out. Results show that low temperature combustion can be achieved at O₂ concentration of around 7~8% for both biodiesel and diesel fuels. Especially, by use of biodiesel, noticeable reduction (maximum 50%) of smoke was observed at low and middle loads compared to conventional diesel fuel. In addition, THC(total hydrocarbon) and CO(Carbon monoxide) emissions decreased by substantial amounts for biodiesel fuel. Results also indicate that even though about 10% loss of engine power as well as 14% increase of fuel consumption rate was observed due to lower LHV(lower heating value) of biodiesel, thermal efficiencies for biodiesel fuel were slightly elevated because of power recovery phenomenon.

1. 서 론

바이오디젤은 화석연료의 고갈에 따른 유가 상승과 심각한 환경 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 디젤 대체 연료 중의 하나로서, 최근 이를 디젤 엔진의 연료로 사용하기 위한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 바이오디젤은 기존 디젤 연료에 비해 상대적

로 높은 세탄가와 낮은 발열량, 그리고 연료 안에 포함된 산소 성분 등을 그 특징으로 하는데, 이로 인해 엔진 내에서의 연소특성 역시 일반 디젤 연료와 차이를 보인다. 그 중에서도 특히 바이오디젤에 포함된 산소 성분으로 인한 smoke의 배출의 원천적 저감은 바이오디젤 연료의 가장 큰 장점 중에 하나로 주목받고 있으며 이로 인해 최근 바이오디젤을 저온연소기법에 적용함으로써 저온연소 운전 영역을 확장하고 출력을 향상하고자 하는 노력이 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 저온연소는 상대적으로 많은 양의 EGR(Exhaust gas recirculation) 가스를 이용하여 연소실 내의 불활성가스 비율을 높임으로서 저온산화 반응 영역을 활성화시키는 기법으로 입자상 물질(PM)과 질소

(2011년 7월 12일 접수 ~ 2011년 9월 22일 심사완료, 2011년 9월 29일 게재확정)

*한국기계연구원

[†]책임저자, 회원, 한국기계연구원

E-mail : ylee@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7381 FAX : (042)868-7305

산화물(NOx)의 동시저감이 가능하여 배기 후처리 장치의 경제적, 효율적 부담을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 이러한 대량의 EGR 적용은 엔진 출력을 저하시키고 운전영역을 제한하며 높은 미연 탄화수소(THC)와 일산화탄소(CO)의 배출을 증가시키기 때문에 이를 해결하기 위한 노력이 이루어지고 있다⁽¹⁻⁷⁾.

Northrop 등은 바이오디젤을 압축착화엔진에 적용할 경우, 일반 디젤보다 Smoke와 CO, THC의 발생량이 감소한다는 것을 발표하였고⁽²⁻⁷⁾ 이는 바이오디젤을 저온연소에 적용할 경우 배기성능 향상을 통한 운전영역 확장이 가능함을 의미한다. Petersen 등은 연료에 따른 THC와 CO의 배출특성을 연구하였고⁽³⁾, Mueller 등은 대두유기반 바이오디젤을 압축착화엔진에 적용하였을 경우 NOx 배출특성에 관한 연구를 수행하였다⁽⁴⁾. 또한 Zhang 등은 동일 엔진 회전 속도에서 분사량이 감소할수록 배기 배출물이 줄어드는 것을 보여 주었는데⁽⁵⁾, 특히 저부하 영역에서의 smoke 배출량이 상대적으로 적기 때문에 바이오디젤을 사용할 경우 운전영역 확장의 효과가 클 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 대두유 기반의 바이오디젤을 단기통 디젤 엔진에 적용하여 dilution controlled regime에서의 저온연소 운전 시 연료와 산소 농도에 따른 엔진의 성능 및 배기 특성에 미치는 영향을 살펴보았으며, 이를 통하여 바이오디젤의 사용으로 인한 저온연소 운

전영역의 확대 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 단기통 디젤 엔진은 (주)두산 인프라코어에서 개발한 DL06 엔진을 단기통화 한 엔진으로 다기통 엔진의 단기통화를 위해서 피스톤 및 해당 흡배기 밸브의 비활성화, 흡배기 매니폴드 개조, 플라이휠의 설계 및 장착, 냉각수 유로 개선 등을 수행하였다. 개조한 단기통 엔진의 제원은 Table 1에 나타났다.

개략적인 시험 및 평가 장비의 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 연소실의 연소 해석을 위하여 piezo방식의 압력 센서(6043 Asp, Kistler)를 설치하였으며 연소해석기(Indicom 2.0, AVL)를 통하여 연소해석을 수행하였다. 연료 분사 시스템은 기존의 기계식 압력 제한기와 유량

Table 1 Single cylinder engine specification

Engine Specification	
Displacement Vol.(cc)	998
Bore × Stroke(mm)	100 × 125
Compression Ratio	17.4

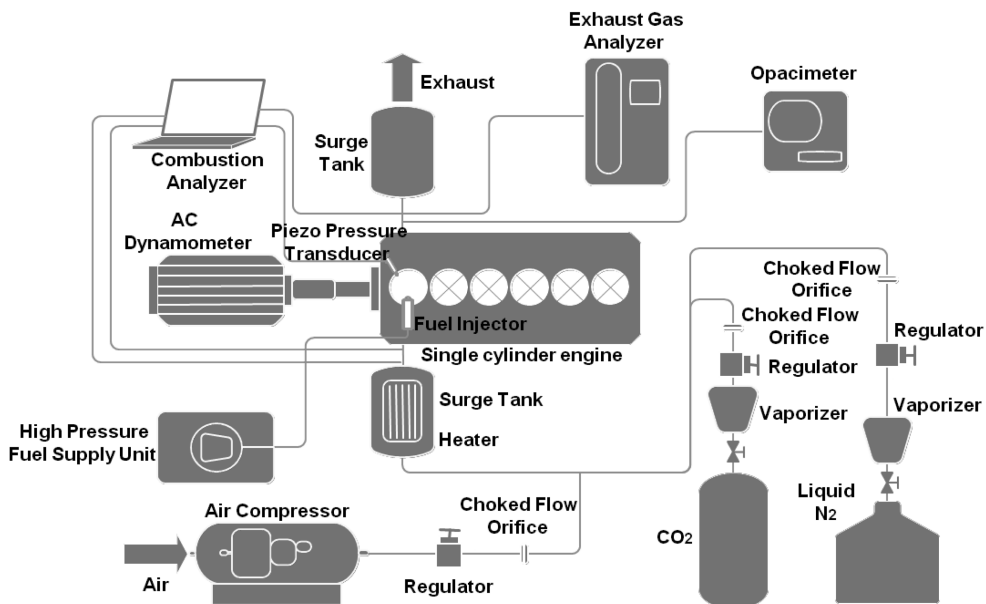


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

제어기가 부착되어 있는 커먼레일의 분사압 조절 방식에서 보다 제어가 용이한 PCV(Pressure control valve)방식의 커먼레일을 채택하였다. 커먼레일의 PCV를 제어하기 위하여 ZB-1100 Common rail driver(Zenobalti Co.)를 이용하였고, 분사시기 및 분사기간의 제어에는 Engine timing unit(ETU 427, AVL)과 Injection Driver(ZB-5000, Zenobalti Co.)를 사용하여 제어하였다.

연료온도에 대한 영향을 최소화하기 위해 연료탱크 내에 히터를 설치하는 동시에 커먼레일에서 온도가 올라간 연료를 냉각하기 위한 별도의 냉각기를 설치함으로써 연료의 온도를 40°C로 일정하게 유지하였다.

엔진에서 배출되는 배기 배출물의 측정을 위해서 배기 매니폴드에 sampling probe를 설치하여 배기가스 분석기(MEXA-8000, HORIBA)에 연결하여 측정 하였으며, smoke의 측정을 위해서는 opacimeter(4390G004, AVL)을 사용하였고 배기가스의 온도측정을 위하여 K-type 열전대를 설치하였다. 엔진에 공급되는 EGR 및 흡기 압력과 흡기 온도를 제어하기 위하여 이번 연구에서 개발한 choked flow 원리를 이용하는 simulated EGR 공급장치를 설계, 사용하여 엔진의 운전 상태와 관계없이 일정하게 유량을 공급할 수 있도록 하였다⁽⁴⁾. 또한 공급되는 EGR 및 흡기의 압력과 온도를 측정하기 위해 흡기 매니폴드에는 압력 센서와 열전대를 설치하였으며, 흡기 온도 조절을 위하여 흡기 매니폴드 전단에 있는 surge tank에 히터를 설치하고 흡기 매니폴드에 설치되어 있는 열전대를 이용하여 PID 제어를 하였다. 실험에 사용된 연료는 바이오디젤이 전혀 섞이지 않은 디젤(SK 에너지)과 대두유 기반의 바이오디젤(주엠에너지)을 사용하였으며 이에 대한 물성치는 Table 2와 같다.

2.2 실험 방법

바이오디젤이 저온 연소에 미치는 영향을 알아보기 위해서 실험 조건은 상용 디젤 연료를 적용한 경우와 분사시기를 제외하고 모두 같도록 설정하였다. 분사시기는 각 연료에 따라 분사시기를 변화시키며 실험을 수

Table 2 Fuel properties of diesel and biodiesel

	Diesel (ULSD)	Biodiesel (Soybean)
Cetane Number	52.6	57.48
LHV (kJ/kg)	45.78	39.37
Density (kg/m ³)	821.0	833.3

Table 3 Operating parameters

Specifications	Value
Engine speed (rpm)	1400
Injection pressure (bar)	1600
Injection quantity (g/s)	0.256 & 0.495
Injection timing (BTDC)	5~31 Single Inj.
Boost Pressure (bar)	2 (absolute pressure)
O ₂ fraction (%)	7~19
EGR rate (%)	24~80

행하여 MBT(Maximum brake torque) 조건을 결정하여 비교하였다. 산소농도 기준으로 7~19%이 되도록 EGR을 공급하였으며 실린더 내 혼합기의 산소 농도에 따른 EGR율은 Fig. 2에 나타내었다. 흡기온도는 각 조건 별로 폭발 TDC(Top dead center)에서의 실린더 온도가 같도록 조절, 공급하였으며⁽⁶⁾ 흡기압은 절대압 기준 2 bar로 고정하였다. 연료 분사 압력은 1600 bar로 고정하였으며 엔진 회전속도는 1400 rpm으로 고정하였다. 분사량은 엔진 사양 기준으로 약 25% 부하인 0.256 g/s와 약 50% 부하인 0.495 g/s로 결정하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 실험조건을 Table 3에 나타내었다.

3. 실험 결과

디젤과 바이오디젤 연료에 대하여 산소 농도, 즉 엔진 부하에 따른 MBT 분사 시기와 점화지연기간을 Fig. 3

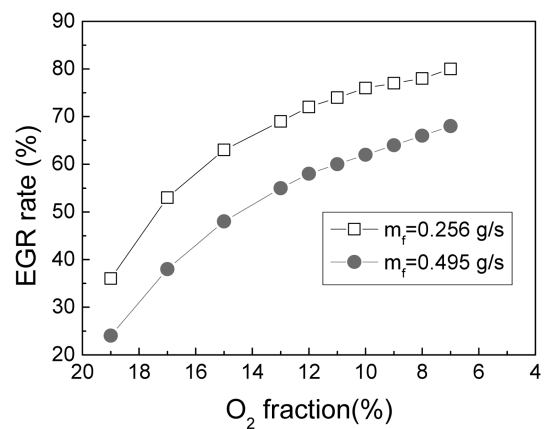


Fig. 2 EGR rate according to O₂ fractions

과 Fig. 4에 각각 나타내었다. 산소농도가 감소함에 따라 MBT 분사 시기가 진각되는데 이는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 산소 농도 감소에 따라 EGR 공급이 늘어남에 따라 반응에 참여하지 않는 불활성가스 역시 증가함으로써 점화지연이 발생하기 때문이다. 바이오디젤의 경우, 상대적으로 높은 세탄가에 의해 점화지연기간이 감소하기 때문에 상대적으로 디젤에 비하여 그 진각 정도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 엔진 부하가 낮은 $m_f=0.256$ g/s 조건에서는 저온연소 지점인 산소 농도 9% 이하 영역에서의 차이를 제외하고는 분사 시기의 진각 정도의 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다.

디젤과 바이오디젤 연료를 적용한 경우, 부하가 상대적으로 높은 조건($m_f=0.495$ g/s)에서 정상적인 연소가 발생하는 산소 농도 19% 조건과 저온 연소가 발생하는 산소 농도 8% 조건에서의 크랭크 각도에 따른 연소실 압력과 열발생율을 Fig. 5에 나타내었다. 정상적인 연소

형태와는 달리, 저온연소 조건에서의 열발생율 선도를 보면 두 연료의 경우 모두 점화시기의 진각에 의해 초기 cool flame이 형성되며 그 후 급격한 열발생율의 증가가 나타남을 확인할 수 있다. Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 것과 같이 바이오디젤의 경우, 상대적으로 높은 세탄가에 의해 점화지연 기간이 감소하여 분사시기가 디젤보다 지각되었음에도 불구하고 비슷한 열방출 특성을 보이고 있다. 그러나 낮은 발열량으로 인하여 연소실 최고 압력이 디젤의 경우보다 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다.

동일 분사량 조건에서 산소 농도에 따른 디젤과 바이오디젤의 IMEP(도시평균유효압력, Indicated mean effective pressure)를 Fig. 6에 나타내었다. 산소 농도 변화 전영역에서 바이오 디젤 연료의 경우 IMEP 값이 10~12% 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 바이오디젤

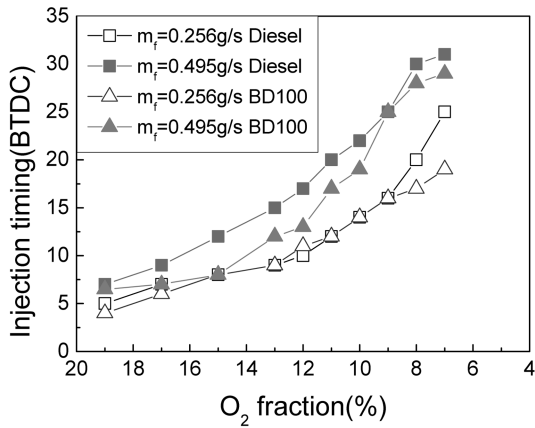


Fig. 3 MBT timing given as SOI for the O₂ fraction sweeps

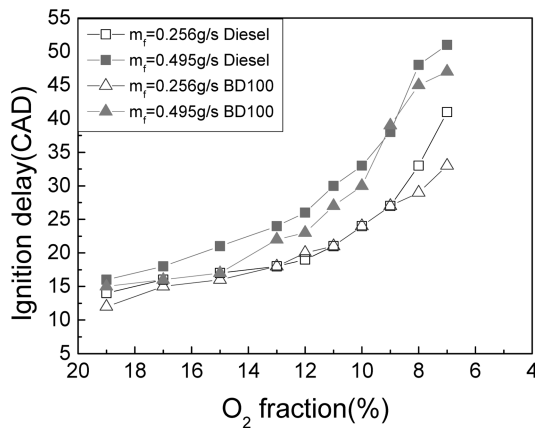


Fig. 4 Ignition delay according to the O₂ fractions and fuels

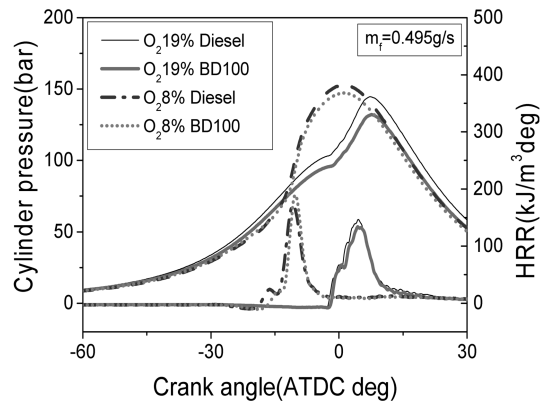


Fig. 5 Cylinder pressures and heat release rates with fuels and O₂ concentration

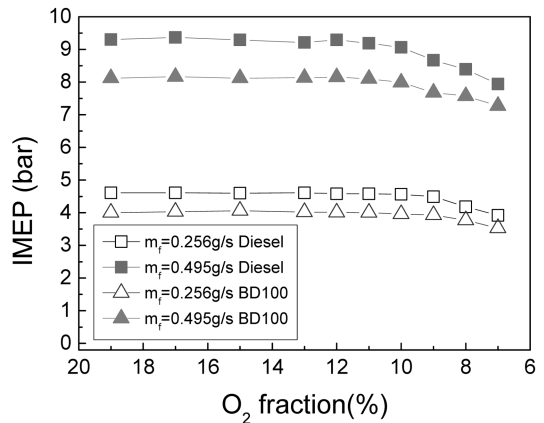


Fig. 6 IMEP variation at MBT timing for the O₂ fractions and fuels

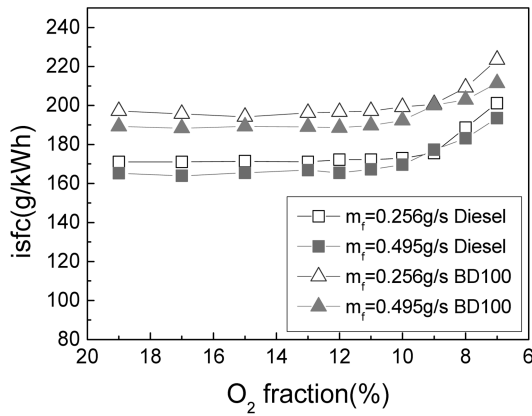


Fig. 7 isfc variations at MBT timing for the O₂ fractions and fuels

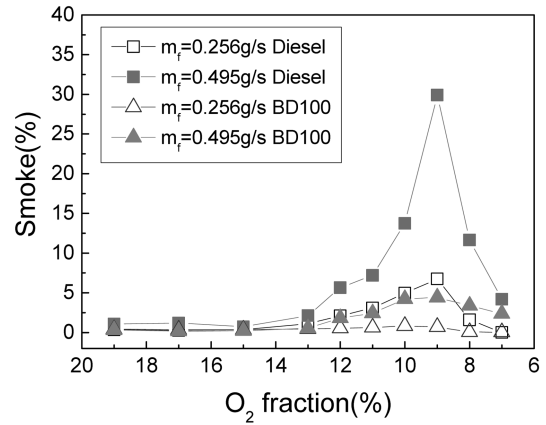


Fig. 9 Smoke emissions for the O₂ concentrations and fuels

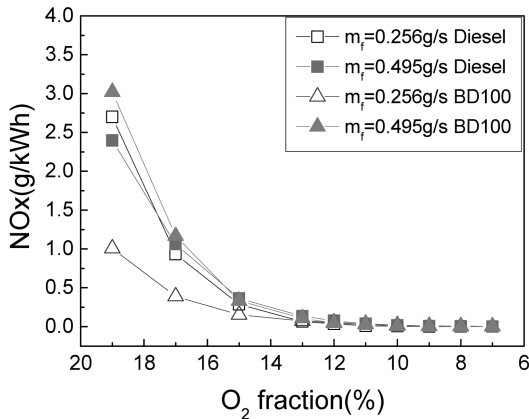


Fig. 8 NOx emissions for the O₂ concentrations and fuels

의 저위 발열량이 디젤에 비해 약 14% 정도 낮기 때문인 것으로 판단된다. 저위발열량에 비해 출력저하가 적게 나타나는 것은 바이오디젤 내의 산소성분에 의한 연소효율의 증가로 설명할 수 있다⁶⁾. Fig. 7에 나타난 산소 농도에 따른 isfc(도시연료소비율, indicated specific fuel consumption)의 경우, IMEP 값의 경우에 나타난 경향과 반대로 동일 산소 농도 조건에서 바이오디젤이 디젤에 비해 상대적으로 높게 나타나는데, 이것은 바이오디젤의 함산소 성분에 의한 연소 효율 향상을 간접적으로 증명하는 것이다.

산소농도와 연료에 따른 NOx 배출량을 Fig. 9에 나타내었다. 저연소 영역으로 천이되는 11%이하의 산소 농도에서는 연료에 관계없이 NOx가 거의 발생하지 않는 알 수 있다. 이것은 EGR이 증가함에 따라 연소실 최고 온도와 NOx 생성을 위한 가용 산소 농도가 낮아지

기 때문이다. 산소농도 15% 이상의 영역에서는 엔진의 부하에 따라 NOx의 배출 특성이 바이오디젤과 디젤이 서로 상이하게 나타난다. 이것은 부하가 낮은 조건(mf=0.256 g/s)에서는 상대적으로 연료의 발열량이 낮은 바이오디젤의 경우 연소실 최고 온도가 낮아짐으로 NOx 생성이 억제되기 때문이다. 이와 반대로 부하가 높은 조건(mf=0.495 g/s)에서는 연소실 온도보다는 가용 산소 농도에 의해 NOx 생성이 결정되기 때문에 산소 성분을 함유한 바이오디젤의 경우, NOx 배출량이 증가하게 된다.

연료와 산소 농도 변화에 따른 Smoke 배출 특성을 Fig. 9에 나타내었다. 두 연료 모두, 산소 농도가 감소함에 따라, 즉 EGR이 증가함에 따라 smoke 배출이 증가하다가 저연소 영역인 산소 농도 8% 이하의 영역에서 다시 그 배출량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 바이오디젤의 경우, smoke 배출량의 최고값이 5% 이하로 디젤보다 확연하게 그 배출량이 저감되는 것을 확인할 수 있으며, 특히, 부하가 낮은 조건(mf=0.256 g/s)에서는 전 구간에서 디젤의 저연소 구간의 smoke 배출량과 비슷한 수준을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8과 9에 나타난 NOx와 smoke의 배출 특성으로부터 바이오디젤을 연료로 사용할 경우 산소 농도를 12% 수준으로 제어하여도 디젤의 저연소 경우와 동등한 배출 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이것은 디젤 연료의 경우, 산소 농도 8% 이하의 높은 EGR 영역에서 저연소가 구현된다고 할 때, 바이오디젤을 사용함으로써 적용 EGR 한계, 즉 산소 농도의 제어 범위가 4~5% 확장될 수 있음을 의미한다.

산소 농도와 연료에 따른 THC와 CO 배출 특성을

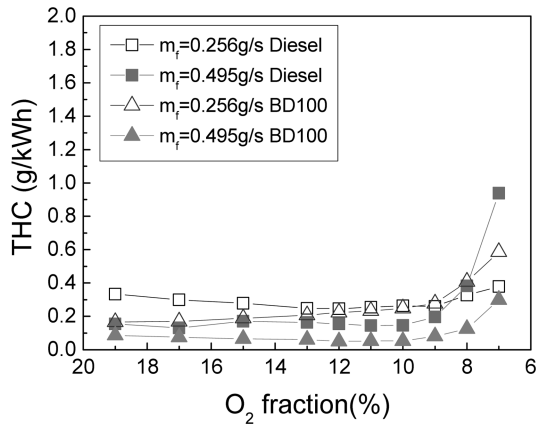
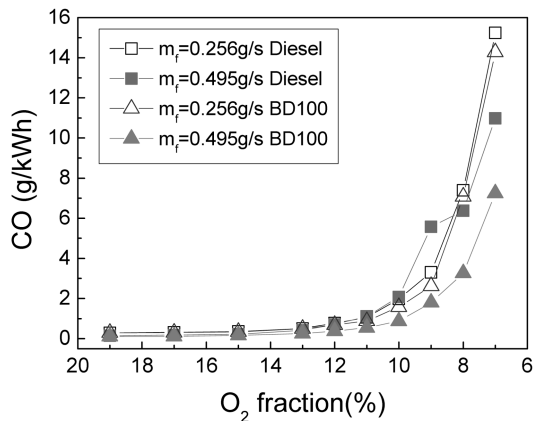
Fig. 10 THC emissions for the O₂ concentrations and fuelsFig. 11 CO emissions for the O₂ concentrations and fuels

Fig. 10와 11에 나타내었다. THC와 CO 모두 저온연소 영역에 근접함에 따라 그 배출량이 급격하게 증가하는 특성을 나타내고 있으며, 바이오디젤의 경우 디젤에 비해 상대적으로 그 배출량이 낮게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 저온연소영역으로 접근해 감에 따라 산소농도가 감소하고 불활성가스의 양이 늘어남에 따라 연소효율이 저감되기 때문이며, 바이오디젤의 경우, 상대적으로 높은 세탄가와 함산소 성분에 의한 가용 산소의 증가로 연소에 가용할 수 있는 산소량이 상대적으로 증가하여 THC와 CO의 배출이 감소된 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 대두유 기반의 바이오디젤을 단기통 디젤 엔진에 적용하여 산소 농도 변화에 따른 엔진의 성

능 및 배기 특성에 미치는 영향을 분석하고, 이를 통하여 바이오디젤의 적용을 통한 저온 연소 운전영역의 확대 가능성을 살펴보았다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

1) Simulated EGR gas를 이용하여 dilution-controlled regime의 디젤과 바이오 디젤의 저온연소를 구현하였으며 디젤의 경우 산소농도 7%, 바이오디젤의 경우 산소농도 8% 조건에서 저온연소가 구현됨을 확인하였다.

2) 바이오디젤의 경우, 디젤 대비 14% 낮은 저위발열량으로 인해 동일 연료량 분사 조건에서 10~12% 수준의 평균유효압력이 저감되며, 연료소비율도 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 바이오디젤의 함산소 성분에 의한 연소 효율의 향상으로 발열량 차이보다 낮은 평균유효압력의 저하를 나타내었다.

3) NOx 배출량의 경우, 디젤과 바이오디젤 모두 저온연소 영역으로 가면서 급격한 감소하는 형태를 나타내었으며 특히, 저부하조건($m_f=0.256$ g/s) 산소농도 18~19% 조건에서는 높은 공기과잉율로 인한 연소실내의 열손실의 증가로 바이오디젤의 낮은 발열량에 의한 효과가 지배적으로 나타나 NOx 배출량이 확연히 줄어드는 현상이 나타났다.

4) 디젤의 경우 산소농도 9% 조건에서, 바이오디젤은 산소농도 10%에서 smoke 배출량이 최대치를 나타내었는데, 바이오디젤의 경우, 저부하 조건에서 smoke 배출량이 디젤 저온 연소 시의 수준으로 나타나, 산소농도 기준으로 4~5% 정도의 저온연소 영역이 확대될 수 있음을 확인할 수 있었다.

5) THC와 CO의 경우 두 연료 모두 저온연소영역에 접근함에 따라 그 배출량이 급격히 증가하는 현상을 나타내었다. 그러나, 바이오디젤의 경우, 연료내의 함산소 성분에 의한 산화 작용의 증가로 디젤에 비해 낮은 수준으로 배출되는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 건설기 계용 저온연소 엔진 시스템 개발 과제에 지원으로 이루어 졌으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

(1) Will F. Colban and Paul C. Miles, Seungmook Oh,

- “Effect of Intake Pressure on Performance and Emissions in an Automotive Diesel Engine Operating in Low Temperature Combustion Regimes”, SAE paper 2007-01-4063 Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition, Oct. 29, Nov. 1 Rosemont, Illinois, 2007.
- (2) William F. Northrop, Stanislav V. Bohac and Dennis N. Assanis, “Premixed Low Temperature Combustion of Biodiesel and Blends in a High Speed Compression Ignition Engine,” SAE paper 2003-01-0133, 2009.
- (3) Ben R. Petersen, Isaac W. Ekoto and Paul C. Milse, “An Investigation into the Effects of Fuel Properties and Engine Load on UHC and CO Emissions from a Light-Duty Optical Diesel Engine Operating in a Partially Premixed Combustion Regime”, SAE paper 2010-01-1470, 2010.
- (4) Charles J. Muller, Andre L. Boehman and Glen C. Martin, “An Experimental Investigation of the Origin of Increased NO_x Emissions When Fueling a Heavy-Duty Compression-Ignition Engine with Soy Biodiesel,” SAE paper 2009-01-1792, 2009.
- (5) Xusheng Zhang and Guanghai Gao, Liguang Li, Zhijun Wu, Zongglie Hu and Jun Deng, “Characteristics of Combustion and Emissions in a DI Engine Fueled with Biodiesel Blends from Soybean Oil”, SAE paper 2008-01-1832, 2008 SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress, Shanghai, China Jun. 23-25, 2008.
- (6) Matthias K. Veltman, Prashanth K. Karra and Song-Chang Kong, “Effect of Biodiesel Blends on Emissions in Low Temperature Diesel Combustion”, SAE paper 2009-01-0485, 2009.
- (7) Sunyoun Lee, Jae Hoon Chang, Younggyu Lee, Seungmook Oh, “Effect of Intake Pressure on Performance and Emissions in Low Temperature Combustion Operation of a Diesel Engine”, KSAE Fall Conference, 2010, pp.255~260.
- (8) J. H. Jang, Sunyoun Lee, Yonggyu Lee, Seungmook Oh, “EGR Simulation Gas Supply System Using Orifice Flow Controller”, KSAE Spring Conference, 2010, pp.256~258.
- (9) Mohan K. Bobba, Caroline L. Genzale and Mark, P.B. Musculus”, Effect of Ignition Delay on In-Cylinder Soot Characteristics of a Heavy Duty Diesel Engine Operating at Low Temperature Conditions”, SAE paper 2009-01-0946, 2009
- (10) Y.-K. Lim, C.-H. Jeon, S. Kim, E. S. Yim, H.-O. Song, S.-C. Shin and D.K. Kim, “Determination of Fuel Properties for Blended Biodiesel from Various Vegetable Oils”, Korean Chem. Eng. Res., Vol.47, No.2, Apr. 2009, pp.237-242.