

바이오 디젤 연료의 연소특성

윤승현* · 박성욱* · 권상일** · 이창식***

Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel

Seung-Hyun Yoon*, Sung-Wook Park*, Sang-Il Kwon**, Chang Sik Lee***

ABSTRACT

The characteristics of combustion and emission of biodiesel fuel were investigated in a single cylinder DI diesel engine equipped with a common rail injection system. For investigating the effect of bio diesels, the experiments were conducted at various mixing ratio and engine operation conditions. Experimental results show that combustion pressure increased with the increase of mixing ratio and injection pressure. The HC and CO emissions are decreased and NO_x emission is increased as the mixing ratio of biodiesels increases at 100MPa injection pressure. However the results of the emissions are shown the contrary to the results at 50MPa of injection pressure due to larger droplets of biodiesel sprays.

Key Words : Biodiesel fuel, Unpolished rice oil, Soybean oil, Mixing ratio, Combustion characteristics, Kinematic viscosity, Surface tension

1. 서 론

최근 화석연료에 대한 대체연료 개발과 환경문제에 대응기술에 관한 연구가 많은 연구자들에 의하여 연구되고 있다. 특히 자동차배출물에 의한 환경오염의 저감은 매우 중요한 과제가 되고 있다. 디젤엔진에서 유해 배출물을 저감시키기 위한 노력의 일환으로 기존의 디젤연료에 비해 유황 성분이 적고 함산소 연료인 바이오 디젤 연료가 주목을 받고 있다. 바이오 디젤 연료는 동물이나 식물의 기름에서 생산이 가능한 재생성 에너지이고, 성분중 발암성 공해물질인 방향족 고분자나 황을 포함하고 있지 않을 뿐 아니라, 연료로 전환되는 경우 11~15%의 산소를 포함하기 때문에 연소 중 완전연소를 도와 디젤엔진의 효율적인 대체 연료로 사용될 것으로 기대되고

있다. 따라서 청정연료인 바이오디젤은 환경보존과 대체에너지 개발의 두 목적을 동시에 충족되는 차원에서 연구개발이 이루어지고 있다. 바이오 디젤 연료의 연소와 배출물에 대한 연구로서 Ramahas[1]등은 디젤엔진에 바이오 디젤을 사용, 연소실험을 통해 대체 연료로의 가능성을 입증하였고, 서[2]등은 코먼 레일식 분사 시스템을 이용하여 바이오 디젤 연료의 종류에 따른 분무 미립화 특성에 대해 연구하였다. Grimal와 Postrioti[3]는 코먼레일 분사시스템과 기존 분사 시스템에 바이오 디젤을 적용하여 분무 특성과 거동에 대하여 발표하였다. Goering[4]등은 식물성 연료 11개에 대한 연소 실험에서 디젤 연료의 대체 연료로의 가능성을 입증하였다.

본 연구에서는 디젤기관에 바이오디젤연료를 적용하였을 경우 엔진의 연소특성, 출력성능과 배출물 중의 질소산화물, 탄화수소, 일산화탄소의 배출 농도를 실험적으로 구하여 디젤엔진의 성능 및 배출물 특성을 비교하여 바이오디젤연료의 적용특성을 규명한 것이다.

* 한양대학교 대학원

† 연락처자, cslee@hanyang.ac.kr

** 국립환경연구원

*** 한양대학교 기계공학부

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 기관

본 실험에는 배기량이 373.6cc이고 최고 분사 압력은 135MPa인 코먼레일 시스템이 적용된, DOHC 4밸브식의 단기통 디젤엔진을 이용하여 실험을 수행하였다. Table 1은 실험용 엔진의 주요 제원을 나타낸 것이다.

Table 1 Specifications of test engine

Description	Specification
Stroke(mm)	83.5
Bore(mm)	75.5
Swept volume(cc)	373.6
Compression ratio	20.85
Valve	DOHC 4
Spray angle(°)	156
Injector hole number	6
Fuel injection system	Bosch CR

2.2 실험 장치

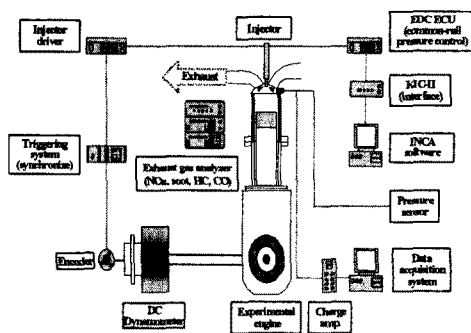


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

실험장치는 코먼레일 디젤 엔진, ECU, 연료 공급 제어 장치, 연소 및 배기 분석을 위한 장치로 구성하였으며, Fig. 1은 실험 장치 개략도를 나타낸 것으로 기관은 DC 동력계(45kW)로 구동하였다. 실험에 공급되는 연료의 압력을 일정하게 유지하기 위하여 인터페이스 장치인 KIC-II

를 통해 소프트웨어(ETAS, INCA ver. 4.0)를 사용, EDC ECU(Bosch)에 프로그램을 입력하여 사용하였다. 인젝터의 동기화 및 분사시기 제어를 위해 크랭크 위치 센서(엔코더: 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 연소 해석 장치로 실린더 내 압력 및 열 발생률을 측정하기 위해 피에조 압전 소자 방식의 압력 센서(6052B1, Kistler)를 설치하였으며, 압력센서의 데이터를 취득하기 위하여 DAQ보드(NI, PCI-MIO-16E-1)와 소프트웨어(LabVIEW)를 사용하여 실시간으로 데이터를 취득하였다. 또한, 배기가스 분석을 위해 매연 측정기(DBC-1000), NOx 측정기(BCL-511, Yanaco), HC 및 CO 분석기(Horiba, MEXA-554JK)등을 사용하였다.

2.3 실험 조건

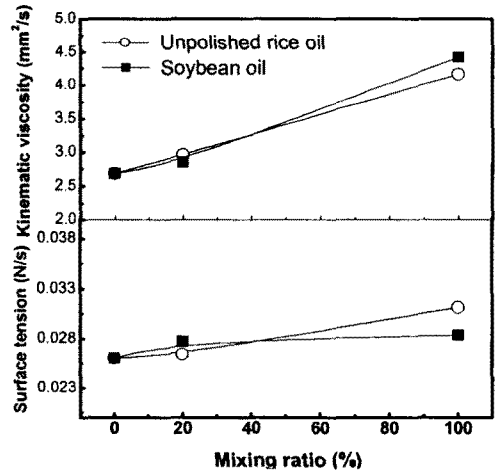


Fig. 2 Kinematic viscosity and surface tension of test fuels

실험에 사용된 연료는 3가지 종류로서 순수디젤 연료와 바이오 디젤 연료의 연소특성과 배기 특성을 비교하기 위하여 혼합비를 변화해 가며 실험을 수행하였다. Fig. 2는 바이오 디젤 연료의 동점성과 표면장력 값을 나타낸 것으로 혼합비 증가에 따라 동점성과 표면장력이 증가하는 연료의 특성을 볼 수 있다.

본 연구에서 바이오 디젤과 일반 디젤과의 혼합은 체적비를 기준으로 하였으며, 현미유 20%인 경우 일반 디젤 80%와 현미에서 추출한 오일 20%를 체적 기준으로 혼합한 연료를 나타낸다. 본 실험에 사용한 연료를 Table 2에 나타내었고,

구체적인 실험 조건은 Table 3에 표시하였다.

Table 2 Test fuels

Fuel composition	Ref.
Neat diesel	D100
Unpolished rice oil 10%+diesel 90%	BD10a
Unpolished rice oil 20%+diesel 80%	BD20a
Unpolished rice oil 40%+diesel 60%	BD30a
Soybean oil 10%+diesel 90%	BD10b
Soybean oil 20%+diesel 80%	BD20b
Soybean oil 40%+diesel 60%	BD30b

Table 3 Experimental conditions

Item	Test condition
Oil temperature(°C)	70
Coolant temperature(°C)	70
Engine speed(rpm)	1000
Injection pressure(MPa)	50, 100
Mass of injection fuel (mg/str)	8
Injection timing (deg BTDC)	0, 2, 4, 6, 8, 10°

3. 결과 및 고찰

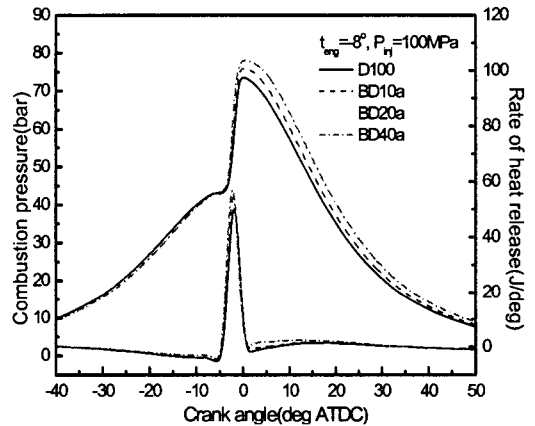
3.1 연소 특성

Fig. 3은 바이오디젤의 종류와 혼합비 그리고 분사압력 50MPa, 100MPa로 변화시키고 분사시기를 BTDC 8°로 일정하게 유지하였을 때의 실험결과인 연소압력과 열발생율을 나타낸 것이다.

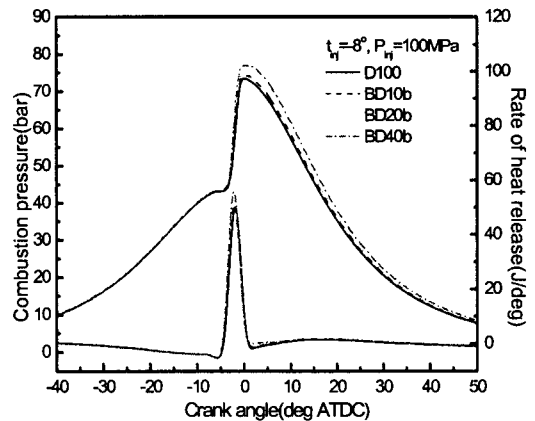
Fig. 3 (a)는 분사시기를 BTDC 8°로 하고 분사압력을 100MPa로 일정하게 분사하였을 경우 순수디젤보다 바이오디젤(현미유)의 최고연소압력이 약 5bar정도 증가함을 보였다. 또한, 바이오디젤(현미유)의 혼합율을 증가시켰을 경우 혼합율을 20%와 40%의 연소압력이나 열발생율은 거의 동일하였으나 순수디젤의 경우보다 연소압력이 증가함을 보였으며, TDC이후의 연소압력의 증가로 인하여 출력이 증가함을 알 수 있다. Fig. 3 (b)의 바이오디젤(대두유)인 경우 동일한 분사시기와 분사압력으로 실험하였으며, 바이오디젤(현미유)과 비슷한 결과를 보였다. 이는 바이오디젤이 순수디젤보다 발열량이 낮음에도 불구하고 연료 자체의 함산소량이 보다 높으므로 인하여 연

소효율의 향상을 얻었다고 판단된다.

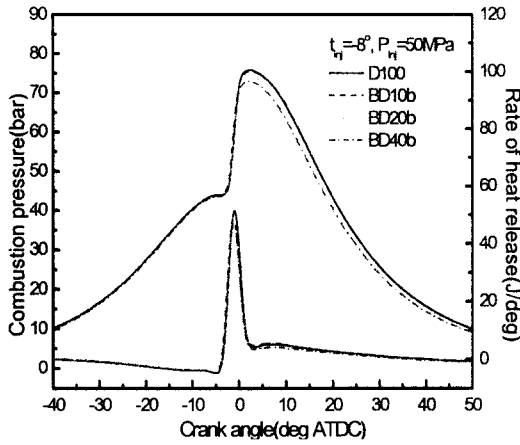
그러나 분사압력이 50MPa로 감소하였을 경우는 Fig. 3 (c)에서 보는 바와 같이 순수디젤연료의 경우 연소압력은 큰 변화가 없으나 바이오디젤(대두유)의 혼합율이 증가 할수록 최고연소압력뿐만 아니라 팽창행정 과정인 TDC 이후에서의 압력이 낮아 엔진 출력 측면에서의 손실이 순수디젤연료의 연소 경우보다 커짐을 알 수 있다. 이런 원인으로서는 바이오 디젤연료의 동점도와 표면장력이 순수디젤연료에 비하여 높으므로 분사압력이 낮을 경우 연료미립화를 저감시켜 연소가 잘 이루어지지 않는 것으로 판단된다. 이런 결과로 바이오디젤연료를 적용할 때 연료미립화에 대한 대책이 필요하며 고압분사가 가능한 코먼레일의 적용이 좋은 대안이라고 판단한다.



(a) Unpolished rice oil ($P_{inj}=100\text{MPa}$)



(b) Soybean oil ($P_{inj}=100\text{MPa}$)



(c) Soybean oil ($P_{inj}=50\text{MPa}$)

Fig. 3 Effect of mixing ratio of biodiesels on combustion characteristics ($t_{inj}=-8^\circ$, 1000rpm)

3.2 출력 특성

Fig. 4는 순수디젤과 현미유, 대두유의 혼합비에 따른 IMEP 및 연소변동율(COV)을 나타낸 그래프이다. 연소변동율을 살펴보면 순수 디젤과 바이오디젤의 혼합비 증가에 관계없이 일정함을 보이므로 안정적인 연소가 이루어 지는 것을 알 수 있다.

IMEP를 보면 순수디젤연료가 약 6bar 정도 나타나고 있으며, 대두유와 현미유인 경우 혼합비가 증가함에 따라 소폭의 증감은 있지만 큰 차이점을 보이지 않았다. IMEP와 연소변동율의 결과로 미루어 볼 때 바이오 디젤의 혼합비가 연소성에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 판단된다.

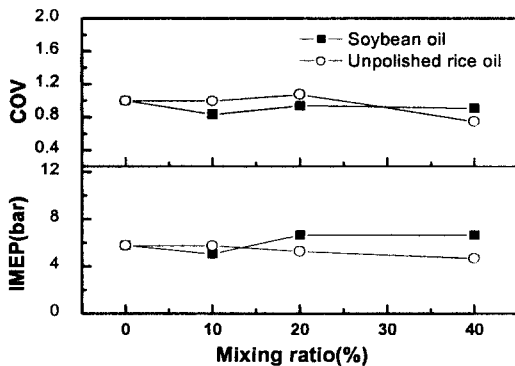


Fig. 4 Comparison of IMEP and COV for difference of mixing ratio ($P_{inj}=50\text{MPa}$, $t_{inj}=-8^\circ$, 1000rpm)

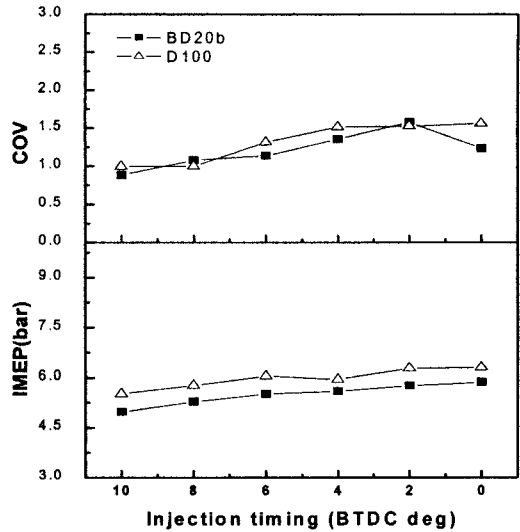


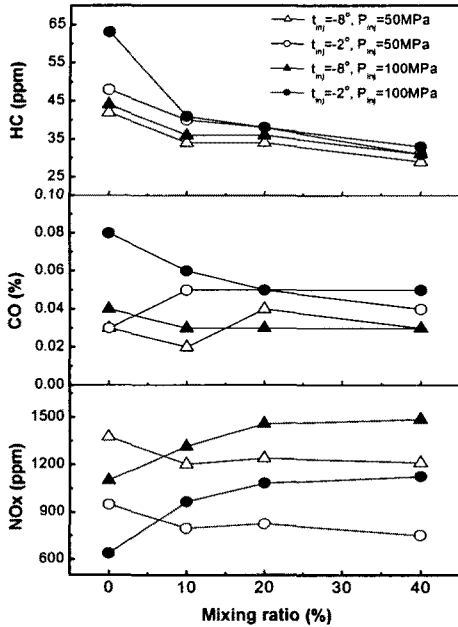
Fig. 5 Comparison of IMEP and COV for difference of injection timing ($P_{inj}=50\text{MPa}$, 1000 rpm)

Fig. 5는 분사시기를 BTDC 10°에서 TDC까지 2°간격으로 분사하고 순수디젤과 대두유20%의 IMEP 및 연소변동율(COV)을 나타낸 것이다. 연소의 안정성은 분사시기에 많은 영향을 받지 않는 것을 연소변동율로서 알 수 있다. 분사시기에 따른 IMEP를 순수디젤과 대두유20%를 비교하였을 경우 두 경우 모두 분사시기를 지각 시킴에 따라 다소 증가하는 경향을 보였다. 이는 압축행정 말기에 연료가 연소실 내부로 공급되므로 출력에 영향을 주는 연소압력의 증가로 인하여 상승된 것으로 판단된다. 대두유 20%인 경우 순수디젤보다 약 0.5bar 정도 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 Fig. 3(c)에서 나타났듯이 분사압력이 낮아지면 연료의 미립화가 잘 이루어지지 않은 결과로 판단된다.

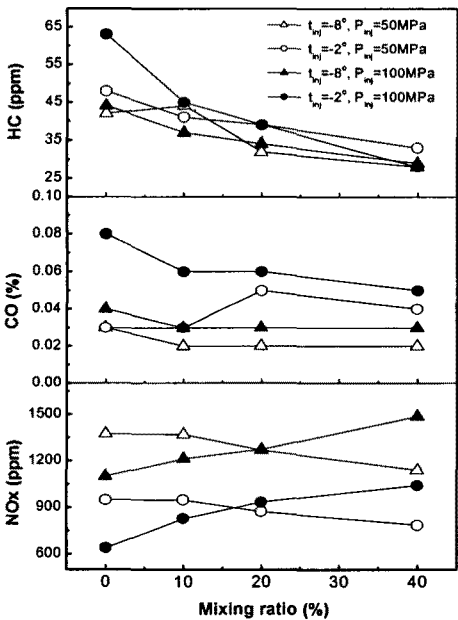
3.3 배기 특성

Fig. 6은 50MPa, 100MPa의 분사압력과 BTDC 8°와 2°에서 바이오 디젤연료의 혼합비에 따른 배출물의 특성을 나타낸 것이다. 이 선도에서 현미유와 대두유 사이에는 비교적 차이가 작은 것을 알 수 있다. 특히 HC의 경우에는 분사압력과 분사시기의 차이에도 불구하고 모두 감소하는 것을 볼 수 있으며, 분사압력 100MPa에서는 바이오디젤연료의 혼합비가 증가함에 따라 CO배출물의 양은 감소하며 NO_x는 증가함을 알 수 있는데, 이는 바이오디젤연료에 포함된 황산소량의 증가로 인해 완전연소가 촉진되어지고,

이로 인한 높은 연소압력과 온도로 인한 것으로 판단된다.



(a) Unpolished rice oil



(b) Soybean oil

Fig. 6 Emission characteristics of biodiesel blended fuels (1000rpm)

분사압력 50MPa에서는 CO배출물의 양은 혼합율과 관계없이 동일하거나 다소 증가함을 보이며, NO_x는 바이오 연료의 혼합율이 증가함에 따라 감소함을 보인다. 이런 현상은 분사압력의 감소와 바이오디젤유의 혼합증가에 따른 연료의 동점성과 표면장력의 증가로 인해 연소실내 연료의 미립화가 감소되어 연소압력과 연소온도의 저하 때문으로 판단된다. 이러한 배기특성은 Fig. 3의 연소특성에서 볼 수 있는 바와 같은 경향을 나타내며, NO_x 배출물은 분사시기 BTDC 8°보다 지각된 BTDC 2°인 경우 감소하는 것을 알 수 있으며 BTDC 8°의 분사시기가 높은 연소압력으로 인하여 NO_x가 증가하는 것을 알 수 있다.

바이오디젤연료의 혼합율이 증가함에 따라 연료내 함산소량이 증가하고, 완전연소를 촉진시켜 이에 따른 배기배출물의 저감을 확인할 수 있었다. NO_x를 감소시키기 위해서는 고압분사와 다단분사, EGR(Exhaust Gas Recirculation)이 좋은 해결책이 될 것이며, HC와 NO_x의 동시 저감을 위해서는 EGR을 적용한 바이오디젤 연소가 효과적일 것이다.

4. 결론

바이오 디젤연료의 혼합율에 따른 디젤연료를 소형 단기통 코먼레일 디젤엔진에 적용하여 연소 및 배기특성에 미치는 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 100MPa의 고압으로 연료를 분사할 경우 바이오디젤의 연소압력이 순수디젤연료의 연소압력보다 높게 나타났으며, 이는 바이오디젤연료에 포함된 함산소량의 증가로 인하여 연소현상이 촉진된 것을 나타낸다.
- 2) 연소변동율과 IMEP는 바이오디젤연료의 혼합율의 증가에도 안정적으로 나타났다.
- 3) 연소배출물의 경우 바이오디젤연료의 혼합율이 증가할수록 감소하는 경향을 보였으며, 특히 HC의 경우 바이오연료의 혼합율에 따라 최고 55% 감소함을 보였다. NO_x 배출량은 바이오디젤연료의 분사압력이 50MPa의 경우가 작게 나타났다으며, 순수디젤에 비해 NO_x는 증가 하였는데 이러한 현상은 연소압력과 온도의 증가에 인한 것으로 판단된다.
- 4) 바이오디젤연료의 연소특성과 순수디젤연소특성은 큰 차이점을 보이지 않으며 고압분사가 가능한 코먼레일 디젤엔진의 대체연료로서 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

바이오디젤연료의 혼합율 증가에 따른 점성 및 표면장력을 고려한 미립화 촉진대책이 요구되며,

NO_x를 감소시키기 위해서 고압분사, EGR, 차단 분사와 같은 대책이 요구된다.

참고문헌

- [1] A. S. Ramadhas, S. Jayaraj, C. Muraleedharan, "Characterization and effect of using rubberseed oil as fuel in the compression ignition engines," *Renewable Energy*, (2004)1-9.
- [2] 서현규, 박성욱, 권상일, 이창식, "바이오 디젤 연료의 분무 거동 및 미립화 특성," 자동차 공학회 논문집, 제12권, 제6호, 2004.
- [3] C. Grimaldi, L. Postrioti, "Experimental Comparison Between Conventional and Bio-derived Fuels Sprays from a Common Rail Injection System," *SAE Paper*, 2004-01-1252.
- [4] C. E. Goering, A. Schwab. M. Dougherty, M. Pryde, A. Heakin, "Fuel Properties of Eleven Vegetable oils," *Transactions of the ASAE*, Vol.25, pp.1472-1483, 1982.
- [5] Cristopher A. Sharp, Steve A. Howell, Joe Jobe, "The Effect of Biodiesel Fuels on Transient Emissions from Modern Diesel Engines, Part I Regulated Emissions and Performance," *SAE Paper*, 2000-01-1967.
- [6] Chang, Y. Z. David, Van Gerpen, Jon H, "Fuel Properties and Engine Performance for Biodiesel Prepared from Modified Feedstock," *SAE Paper*, 971684.
- [7] 김명윤, 이두진, 노현구, 이제형, 이창식, "분사 조건의 변화가 소형 커먼레일 디젤 엔진의 연소 및 화염 특성에 미치는 영향," 자동차공학회, 2003추계학술대회논문집, pp. 397-404.
- [8] 유경현, 윤용진, 오영택, "간접분사식 디젤기관에서 바이오디젤연료의 연소 특성," 자동차 공학회 논문집, 제11권, 제1호, 2003.