

# 직접분사식 디젤기관에서 바이오디젤 연료의 연소특성(2) Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel as an Alternative Fuel for a D.I. Diesel Engine(2)

장 세 호  
S. H. Jang

(접수일 : 2009년 11월 11일, 수정일 : 2009년 11월 18일, 채택확정 : 2009년 11월 24일)

**Key Words** : Biodiesel Fuel(바이오디젤유), D.I. Diesel Engine(직접분사식 디젤엔진), BSFC(제동연료소비율), Alternative Fuel(대체연료), Rate of Heat Release(열발생율)

**Abstract** : Recently, lots of researchers have been attracted to develop various alternative fuels in diesel engine. The use of biodiesel fuel(BDF) is an effective way of substituting diesel fuel in the long run. But biodiesel fuel can affect the performance and emissions in diesel engine because it has different chemical and physical properties from diesel fuel. In this study, to investigate the combustion characteristics of biodiesel fuel as an alternative fuel for D.I. diesel engine, experiments were carried out at the three-cylinder, four stroke D.I. diesel engine with T/C. As a result, shorter ignition delays were observed for the biodiesel blend cases relative to the diesel oil. The pick value of premixed combustion for the rate of heat release is increased with decreasing C.F.W. temperature.

## 1. 서 론

최근 계속되는 유가 상승과 지구온난화가 빠르게 진행되면서 전 세계적으로 각 국가의 에너지 수급 대책과 배출가스 규제에 대처하기 위한 대응 수단의 강화 및 바이오 연료에 관한 연구가 매우 활발히 이루어지고 있다. 바이오 연료(Bio Fuel)는 기존 디젤기관의 개조나 수정과정 없이 기존시스템에 적용 가능하다는 점과 공해물질이 적으며, 전 세계 어느 곳에서든 생산이 가능하다는 장점 때문에 다양한 연구가 시도되고 있다.

바이오 연료는 경유와 성상이 비슷하며, 경유에 비해 발열량이 낮고, 탄소 함유량이 적은 반면에 연료 자체에 산소를 함유하고 있는 특징이 있다. 그러나 바이오 연료의 점도가 경유보다 높기 때문에 일반적으로 경유와 바이오 연료를 혼합하여 사용하는 방법을 택하고 있으며, 국내에서도 바이오 연료와 경유를 혼합한 바이오디젤유(Biodiesel Fuel, BDF)를 시판하고 있다. 그리고 육상용 차량의 연비개선과 배기배출물 저감을 위해 적용되고 있는 커먼레일

방식의 디젤기관에서 바이오 디젤유를 연료로 사용하기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있다<sup>1-4)</sup>. 한편, 운전 환경이 열악하고 운전자의 생명을 위협할 수도 있는 농업용 기계와 선박에서는 여전히 엔진의 내구성과 신뢰성이 최우선이며, 따라서 오랫동안 내구성과 신뢰성이 확인된 기존의 기계식 분사방식 디젤엔진이 탑재되고 있다. 그리고 최근의 국제원유가의 상승은 농·어업 분야의 채산성 악화로 이어지고 있는 실정이며, 현재 국내에서 시판되고 있는 바이오디젤유는 경유와의 혼합비율이 너무 적으며, 연료의 가격도 비싼 편이다.

따라서 본 연구에서는 농업용 기계와 소형어선에 여전히 탑재되고 있는 기계식 연료분사 펌프방식의 직접분사식 디젤기관에 바이오디젤유의 혼합 비율을 100%까지 단계적으로 높일 경우의 각 혼합 비율과 운전 조건에 따른 연소특성을 조사하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

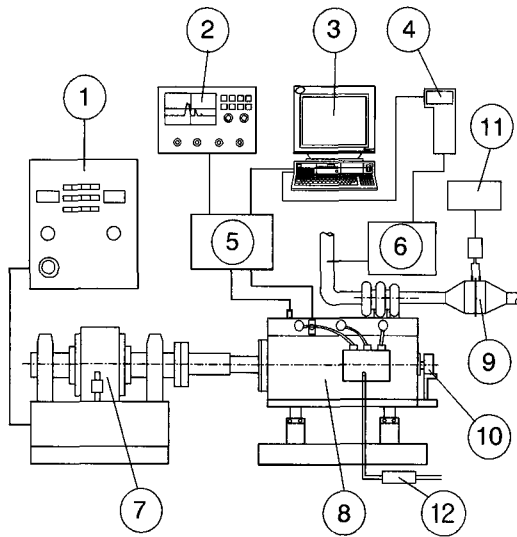
### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 전체 개략도를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 엔진은 3기통, 4행정, 직접분사식, 과급 디젤엔진으로 중간냉각기

장세호(책임저자) : 강원도립대학 해양경찰과  
E-mail : jangsh@gw.ac.kr, Tel : 033-660-8203

(intercooler)와 연료히터를 설치하였으며, 엔진 사양은 Table 1에 표시한 바와 같다.

론트 패널을 나타낸 것이다.



1. Dynamometer controller
2. Digital oscilloscope
3. Computer
4. Exhaust gas hand-held instrument
5. Pressure sensor amplifier
6. Exhaust gas analyser box
7. Dynamometer
8. Test engine
9. Laminar flowmeter
10. Rotary encoder
11. Digital manometer
12. Fuel oil heater

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

실험장비는 와전류식 동력계(eddy current type, absorption capacity: 132kW), 연료소비량 측정장치, 연소실 압력 측정장치, 배기분석기, 엔진에 공급되는 연료의 온도를 조절할 수 있는 연료 히터와 각종 온도 측정장치 등으로 구성되어 있으며, 연소실 압력은 피에조 압력 센서(quartz pressure sensor : KISTLER 6067B, 0~25 MPa)를 이용하여 크랭크 각도 0.5도마다 측정하였으며, 연료소비율 측정은 일정한 용량(300ml)의 연료가 소비되는데 걸리는 시간을 측정하는 체적방식을 사용하였다.

그리고 각종 데이터 수집은 LabVIEW 프로그램을 이용하여 엔진회전수와 1사이클의 연소실 압력, 10 cycle을 평균한 연소실 압력, 압력상승율, P-V선도, 분사압력, 열발생을 등을 데이터 파일로 저장하도록 하였으며, Fig. 2는 LabVIEW 프로그램의 프

Table 1 Specifications the test engine

Item	Specification
Type	3-cylinder 4-stroke direct injection diesel engine with exhaust T/C
Compression Ratio	18.4 : 1
Power	40KW at 2600rpm
Bore(mm)	100
Stroke(mm)	110
Piston speed(m/s)	9.53
Fuel injection time	BTDC 17±1°CA
Fuel injection pressure	19.61MPa

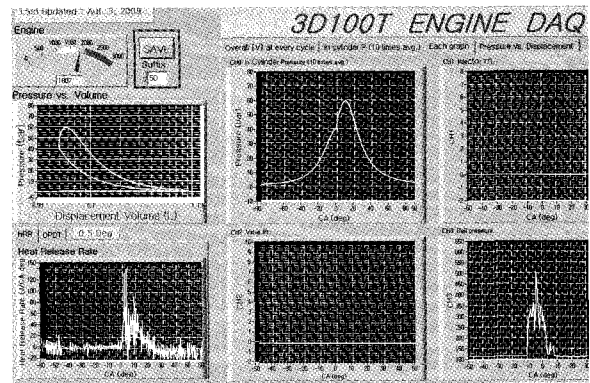


Fig. 2 LabVIEW panel for data acquisition

실험에 사용된 바이오디젤은 K사에서 대두유를 원료로 해서 생산한 것이며, Table 2에 실험에 사용된 연료의 특성을 나타내었다.

Table 2 Properties of test fuel<sup>3)</sup>

	Light oil	BDF
Calorific value[MJ/kg]	43.96	39.17
Cetane number	51.4	57.9
Sulfur(wt%)	0.05	0
Carbon(wt%)	85.83	76.22
Hydrogen(wt%)	13.82	12.38
Oxygen(wt%)	0	11.03
Gravity(15/4°C)	0.841	0.8875

## 2.2 실험방법

실험조건은 엔진 회전수를 1800rpm으로 고정하고, 부하를 20, 40, 60, 80%로 변화시켰으며, 실험에 사용한 BDF 연료는 경유에 BDF 원액을 체적 비율로 각각 20%, 40%, 60%로 혼합하고 교반기를 이용

해 30분 동안 교반시킨 것과 BDF 100% 원액을 실험에 사용하였다. 그리고 바이오디젤 혼합유의 엔진 시동성을 파악하기 위하여 엔진 냉각수의 온도를 20°C와 엔진이 충분히 워밍된 상태인 80°C로 조절하였다. 그리고 바이오디젤유의 점도가 경유보다 높기 때문에 바이오디젤 혼합 비율에 따른 점도 변화와 엔진에 공급되는 연료의 온도변화에 대한 연소 특성을 파악하기 위하여 연료의 온도를 20°C, 40°C, 60°C로 각각 가열하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3은 엔진회전수 1800rpm에서 경유와 BDF 20%, 40%, 60%를 각각 사용했을 때, 부하 변화에 따른 연료소비율을 나타낸 것이며, 부하가 증가하면 경유와 바이오디젤 혼합유 모두 연료소비율이 감소하는 동일한 경향을 나타내고 있다.

연료소비율을 서로 비교해보면, 바이오디젤 혼합 비율이 증가할수록 경유를 사용했을 때보다 점차적으로 연료소비율이 증가하고 있다. 이는 바이오디젤유의 발열량이 경유의 발열량보다 약 10.9% 적기 때문에 바이오디젤유를 혼합한 연료를 사용하면 연료소비율이 높게 나타나게 된다. 하지만 각 부하당 소비된 경유의 연료소비율과 동일한 열량을 낼 수 있는 이론적인 각각의 바이오디젤 혼합유의 양과 실제로 소비된 연료소비율과 비교한 결과, 단위 kWh당 연료의 열에너지 소비율은 경유보다 바이오디젤유가 오히려 최소 0.16%에서 최대 4.62% 작게 나타남을 확인하였다. 이러한 이유는 경유에는 포함되어 있지 않는 산소가 바이오디젤유에는 약 11% 함유되어 있기 때문에 이로 인해 연소가 더욱 향상된 것으로 생각된다.

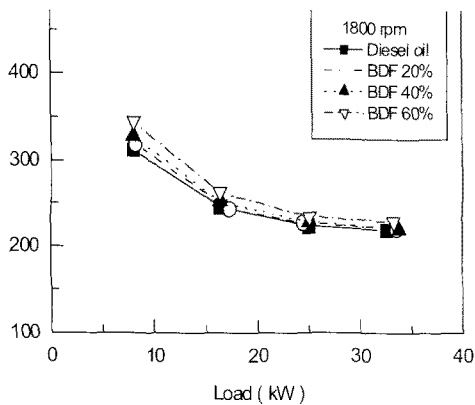
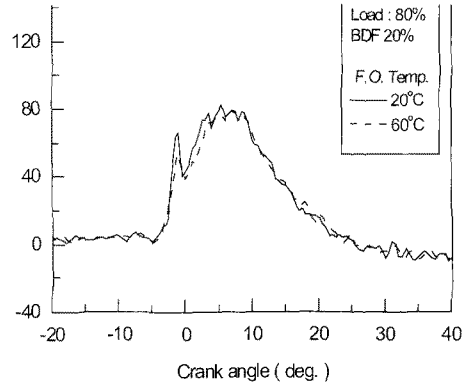
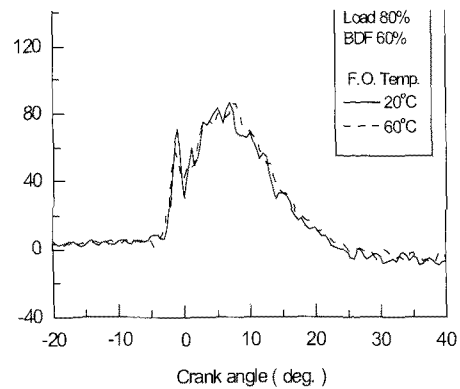


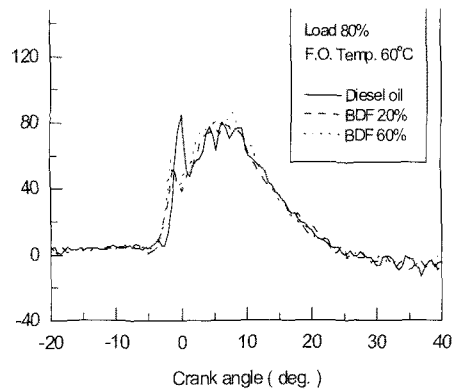
Fig. 3 Effect of engine load on the BSFC by various BDF at 1800rpm



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Effect of fuel temp. on the heat release rate

Fig. 4는 엔진회전수 1800rpm, 부하 80%일 때, 연료 히터를 이용하여 연료를 20°C와 60°C로 각각 가열하여 공급하고, 연료 온도 변화에 따른 열발생율을 BDF 20%, BDF 60% 그리고 경유로 운전했을 때에 각각 비교한 것이다. 그림 (a)는 BDF 20%에서 부하 80%로 운전될 때, 연료의 온도 변화에 대한 열발생율을 비교한 것으로서, 연료 온도를 높

이면 예혼합 연소율이 낮게 나타나는 것을 알 수 있으며, 그림 (b)에서는 바이오 디젤유의 혼합율을 높인 BDF 60%에서도 마찬가지로 연료온도를 높이면 예혼합 연소율이 작아지며 착화시기가 조금 빨라지는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 (c)는 경유와 바이오디젤 혼합유를 사용했을 때의 열발생율을 비교한 것으로서, 바이오디젤유를 혼합하면, 예혼합 연소의 피크값이 경유보다 현저히 낮은 것을 알 수 있다. 이는 점도가 경유보다 높은 바이오디젤유를 혼합함으로써 액적의 분열과 미립화가 나빠져 분사초기의 연료 증발율이 낮아지기 때문이라고 생각된다. 또한 동일한 연료에서 연료온도의 변화에 대한 착화시기 변화는 매우 적게 나타나는 반면에 BDF 60%를 사용했을 때의 착화시기는 경유보다 매우 빠르게 나타나고 있다. 이것은 합산소 연료인 바이오디젤유의 세탄가가 경유보다 높기 때문인 것으로 생각된다.

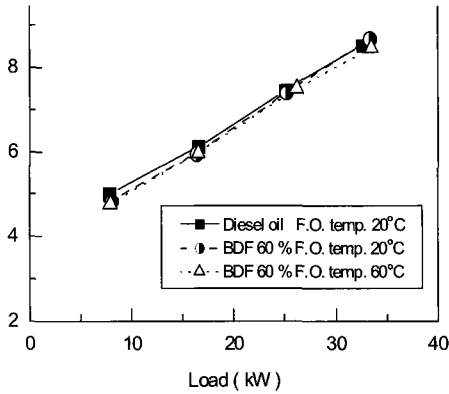


Fig. 5 Variation of Pmax according to engine load by various BDF at 1800rpm

Fig. 5와 Fig. 6은 경유와 바이오디젤 혼합유에서 연료 온도 변화에 따른 최고압력 변화와 최고압력 시점을 각각 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 바이오디젤 혼합유를 사용했을 때의 연소 최고압력은 경유보다 낮게 나타나고 있으며, BDF 60%에서 연료온도 변화에 따른 최고압력 변화는 별로 나타나지 않았다. 그리고 Fig. 6에서 저부하 영역에서 바이오디젤 혼합유를 사용하면 최고압력 시점이 경유보다 늦어지는 반면에 고부하 영역에서는 오히려 최고압력 시점이 조금 빨라지고 있다. 저부하 영역에서는 연소실의 온도가 낮기 때문에 바이오디젤 혼합유의 분무 미립화 불량 등으로 인해 연소속도가 늦어지는

반면에 고부하 영역에서는 연소실 온도의 상승으로 착화시기가 빨라지고, 바이오디젤유에 포함되어 있는 산소에 의해 연소속도가 더욱 촉진되기 때문에 최고압력 시점이 경유보다 빨라지는 것으로 생각된다.

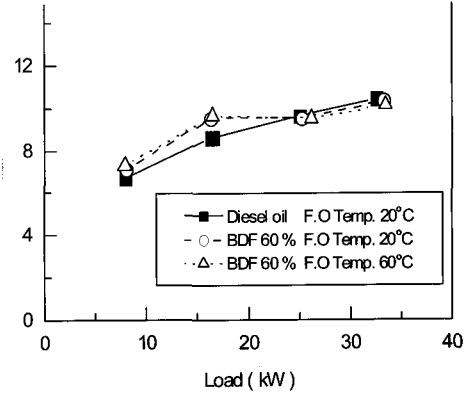
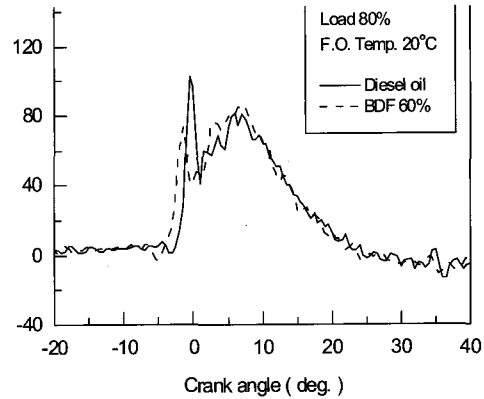
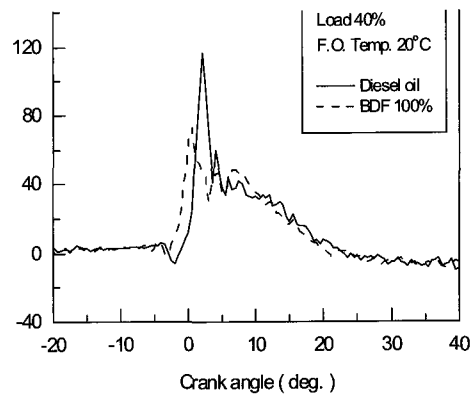


Fig. 6 Position of Pmax versus engine load at each fuel oil



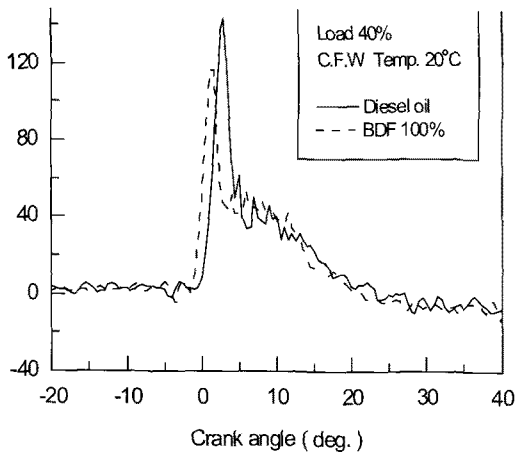
(a)



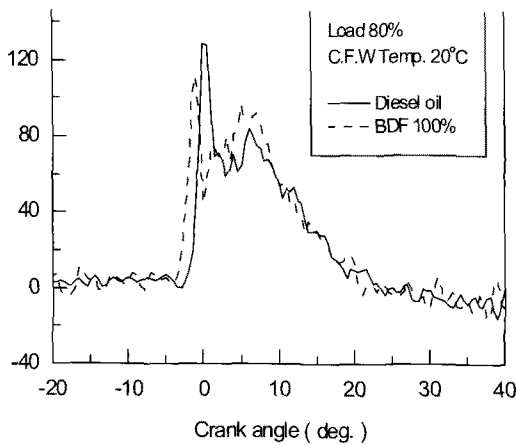
(b)

Fig. 7 Comparison of heat release rate by various BDF at F.O. Temp. 20°C

Fig. 7의 (a)와 (b)는 연료를 가열하지 않고, BDF 60%와 BDF 100% 그리고 경유로 각각 운전할 경우에 부하변동에 따른 열발생율을 각각 비교한 것이다. 먼저 착화시기를 살펴보면, BDF 60%와 BDF 100% 모두 경유보다 착화시기가 빠르게 나타나고 있다. 열발생율의 초기 피크치를 비교해보면, BDF 60%보다 BDF 100% 쪽이 경유와의 차이가 더 클 수 있다. 따라서 BDF 100%에서 경유보다 연소가 완만히 일어남을 알 수 있다. 그리고 엔진의 원활한 운전여부에 있어서는 BDF 60%에서는 예혼합 연소율이 경유보다 감소하였으나 부하를 80%까지 올려도 엔진은 비교적 원활하게 운전되었다. 반면에 BDF 100%에서는 40% 부하까지 예혼합 연소율이 급격히 감소하였으나 연속적인 운전은 가능하였다.

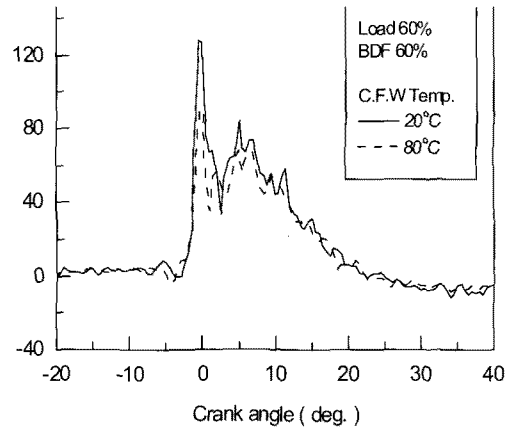


(a)

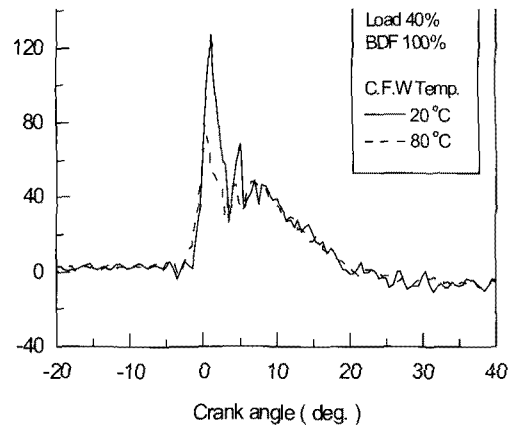


(b)

Fig. 8 Comparison of heat release rate by various load at C.F.W. temp. 20°C



(a)



(b)

Fig. 9 Effect of C.F.W. temp. on the heat release rate by various BDF

Fig. 8은 경유와 BDF 100%에서 엔진시동성을 확인하기 위하여 엔진 냉각수의 온도를 20°C로 유지하고 부하 변화에 따른 열발생율을 각각 비교한 것이다. 부하 40%와 80%에서 모두 BDF 100%를 사용한 경우에 경유보다 착화시기는 빨라지며 예혼합 연소율은 적지만, 엔진은 원활하게 운전됨을 확인하였다.

Fig. 9는 BDF 60%와 BDF 100%에서 엔진 냉각수 온도를 20°C와 80°C로 각각 운전했을 경우를 나타낸 것이다. BDF 60%에서 냉각수 온도를 80°C로 올려도 초기 열발생율 최고치가 80J/deg. 이상으로 나타나며 엔진이 원활하게 작동됨을 확인하였다.

한편, BDF 100%에서 엔진 냉각수 온도가 20°C일 때는 부하 40%에서도 원활하게 운전되었으나, 냉각수 온도가 80°C일 때는 부하 40%에서 원활한 운전이 되지 않았으며, 냉각수 온도에 변화에 따른 초기

열발생율의 변화가 매우 크게 나타남을 확인 하였다. BDF 100%에서 엔진 냉각수의 온도가 높아지면 착화시기가 빨라지고, 그로 인해 예혼합 연소율이 감소되는 것으로 생각되며, 엔진의 운전이 원활하게 되지 않는 것으로 생각된다. 따라서 바이오디젤유의 혼합을 더욱 늘려서 디젤엔진에 적용할 경우에는 바이오디젤유의 혼합으로 인해 빨라지는 착화시기의 재조정과 예혼합 연소율 변화 원인 파악 등 다각적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

#### 4. 결 론

3기통 직접분사식 과급디젤기관에서 경유와 바이오디젤유를 혼합한 BDF 20%, 40%, 60% 그리고 바이오디젤유 원액을 연료를 사용하고, 연료온도와 엔진 냉각수의 온도 변화에 대한 연소특성을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연료소비율은 경유보다 바이오디젤유를 혼합한 연료를 사용했을 때 더 높게 나타났으나, 열량을 고려하여 비교하면 오히려 바이오디젤 혼합유의 연료소비율이 낮게 나타났다.
2. 연료온도를 높이면 열발생율의 초기 피크치가 작아지며 예혼합 연소율이 작아졌다.
3. 연소실 최고압력은 바이오디젤 혼합유보다 경유가 높게 나타났으며, 최고압력 시점은 바이오디젤 혼합유가 저부하 영역에서는 늦게 나타나지만, 고부하 영역에서는 오히려 빨라졌다.
4. 바이오디젤 혼합유를 사용하면 경유보다 착화시기가 빨라지는 반면에 열발생율의 초기 피크치가 작아지며 예혼합 연소율이 작아졌다.
5. 엔진 냉각수의 온도가 낮을수록 바이오디젤 혼합유의 예혼합 연소율이 증가하였다.
6. 기존의 기계식 연료분사장치에 바이오디젤유의 혼합율을 더욱 높인 연료를 사용할 경우에는 착화시기의 재조정과 더불어 다각적인 연구가 필요하다.

#### 참고 문헌

1. Takaaki MORIMUNE, Hajime YAMAGUCHI and Keiji KONISHI, 2000, "Exhaust Emissions and Performance of Diesel Engine Operating on Waste Food-Oil", JSME, Vol 66, No. 641, pp.

- 294~299.
2. H. K. Suh et al., 2004, "Macroscopic Behavior and Atomization Characteristics of Bio-diesel Fuels", Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 6, pp. 23~29.
3. 최승훈, 오영택, 2006, "커먼레일 분사방식 디젤기관에서 바이오디젤유의 혼합율에 따른 성능 및 배기배출물 특성 연구", 한국동력기계공학회지, 제10권, 제2호, pp. 5~10.
4. C. H. Hong et al., 2003, "Characteristics of High Pressure Bio-diesel Fuel Spray", Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 2, pp. 56~62.
5. K. H. Ryu and Y. T. Oh, 2004, "Durability Test of a Direct Injection Diesel Engine Using Biodiesel Fuel", Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 1, pp. 32~38.
6. C. Y. Choi, G. R. Bower and R. D. Reitz, 1997, "Effects of Biodiesel Blended Fuels and Multiple Injections on D. I. Diesel Engines", SAE Paper 970218.
7. 김화남 외 4인, 2007, "상용 CPF를 장착한 CRDI 디젤엔진에서 바이오 혼합연료 사용에 따른 배출가스 특성 및 입자수 분포 특성", 한국동력기계공학회 2007 춘계학술대회 논문집, pp. 19~25.
8. 장세호, 서정주, 2008, "직접분사식 디젤기관에서 바이오디젤 연료의 연소특성", 한국동력기계공학회지, 제12권, 제2호, pp. 12~17.