

직접분사식 디젤기관에서 바이오디젤 연료의 연소특성 The Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel as an Alternative Fuel for D.I. Diesel Engine

장세호 · 서정주

S. H. Jang and J. J. Suh

Key Words : Biodiesel Fuel(바이오디젤유), D.I. Diesel Engine(직접분사식 디젤엔진), BSFC(제동연료소비율), Alternative Fuel(대체연료)

Abstract : Biodiesel fuel(BDF) which is easily produced from vegetable oils such as soybean oil and rice bran oil can be effectively used as an alternative fuel in diesel engine. But biodiesel fuel can affect the performance and emissions in diesel engine because it has different chemical and physical properties from diesel fuel. To investigate the combustion characteristics of biodiesel fuel as an alternative fuel for D.I. diesel engine, the experiments were carried out at the three-cylinder, four stroke D.I. diesel engine with T/C. Experimental parameters adopted a conventional diesel fuel and a blend of biodiesel fuel derived from soybean. As a result of experiments in a test engine, BSFC with blend of BDF resulted in higher than with diesel fuel. The ignition delay decreased with blend of BDF than with diesel fuel.

1. 서 론

화석연료의 고갈과 유가상승으로 인해 전세계적으로 각 국가의 에너지 수급대책으로서 석유계 에너지를 대체할 수 있는 대체에너지에 대한 연구가 매우 활발히 이루어지고 있다. 이러한 대체에너지 중 현재 실용가능한 것으로 여겨지는 것으로서 식물에서 추출한 바이오디젤유(Biodiesel Fuel, BDF)는 현재 사용되는 디젤연료와 물성이 유사하며, 기존 디젤기관의 개조나 수정과정 없이 기존시스템에 적용가능하다는 점과 공해물질이 적으며, 전 세계 어느 곳에서든지 생산이 가능하다는 장점 때문에 많은 관심과 연구가 진행되고 있다. 바이오 디젤유는 각국의 지역에서 생산되는 농산물의 종류에 따라 대두유, 유채씨 기름, 짚겨유, 코코넛유, 팜유 등에서 생산되며, 국내에서는 1990년대 중반부터 주요 농산물인 대두유를 주로 이용해 바이오 디젤유를 생산하고 있다.

바이오디젤유는 경유와 성상이 비슷하며, 경유에

비해 발열량이 낮고, 탄소 함유량이 적은 반면에 연료 자체에 산소를 함유하고 있어 고부하 및 고회전 영역에서 매연 저감효과가 있는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 그러나 연소 촉진으로 인한 연소온도의 상승으로 NOx 배출이 증가하고, 바이오디젤유의 점도가 경유보다 약간 높기 때문에 순수 바이오디젤유를 국내 겨울철과 같은 낮은 온도에서 사용하는 데에는 어려움이 있다. 따라서 이러한 문제점을 줄이기 위해 경유와 바이오디젤유를 혼합하여 사용하는 방법을 택하고 있으며, 최근의 연구동향은 육상 차량에 있어서 연비개선과 배기배출물 저감을 위해 적용되고 있는 커먼레일 방식의 디젤기관에서 연료로 사용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{2~4)}

한편, 최근의 유가동향을 살펴보면, 2001년 배럴당 25달러 내외에 불과 했던 국제유가는 2007년 10월 배럴당 90달러를 돌파하였다. 이러한 국제원유가의 초고속 상승은 농·어업 분야의 채산성 악화로 이어지고 있는 실정이며, 아직도 농기계와 소형어선에는 여전히 기계식 연료분사펌프가 적용된 직접분사식 디젤기관이 널리 탑재되어 있다. 그러나 아직 바이오디젤유가 이러한 농기계와 어선에서 연료로 사용되고 있지 않을 뿐 아니라 기계식 연료분사 펌프가 적용된 직접분사식 디젤기관에 있어서 바이오디젤유의 적용에 대한 연구가 충분히 이루어지지

접수일 : 2007년 12월 17일, 채택확정 : 2008년 3월 20일
장세호(책임저자) : 강원도립대학 해양경찰과
E-mail : jangsh@gw.ac.kr, Tel : 033-660-8203
서정주 : 전남대학교 수산해양대학 해양기술학부

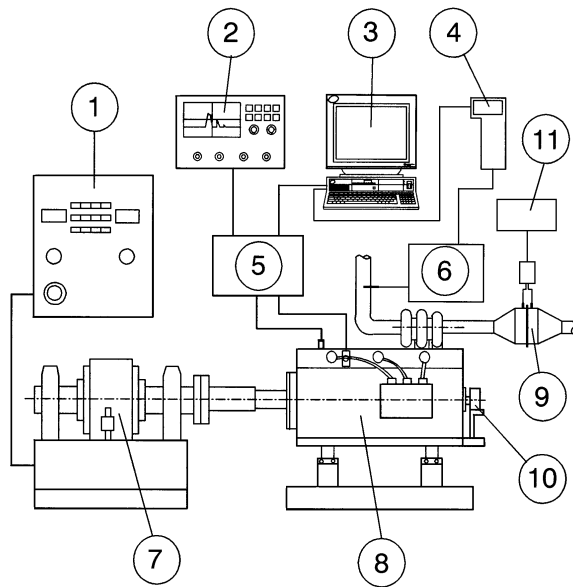
않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 보취식 연료분사펌프를 사용하는 직접분사식 디젤기관에 경유와 바이오디젤 유를 체적분율로 10%, 20%, 30%씩 각각 혼합한 연료를 사용하였을 때의 연소특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 연료

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 전체 개략도를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 엔진은 3기통, 4행정, 직접분사식, 과급 디젤엔진으로 엔진 사양은 Table 1에 표시한 바와 같고, 실험장비는 와전류식 동력계(Eddy current type, Absorption capacity: 132kW), 데이터 수집장치, 연료소비량 측정장치, 연소실 압력측정장치 그리고 각종온도 측정장치 등으로 구성되어 있다.



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 flow meter
10. Rotary encoder
11. Digital Manometer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2는 실험에 사용된 연료특성을 나타낸 것이다. 실험에 사용된 바이오디젤은 K사에서 대두유를 원료로 해서 생산한 것으로 바이오디젤과 경유의 성상을 비교해 보면 바이오디젤은 경유에 비해 탄소 함유량이 적어 발열량이 약 10% 정도 낮은 반면에 세탄가는 경유보다 높다. 또한 바이오디젤은 경유에는 포함되어 있지 않는 산소를 약 11% 함유하고 있으며, 유황 성분은 함유하고 있지 않는 특징이 있다.

Table 1 Specifications of 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

Table 2 Properties of test fuel³⁾

	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

2.2 실험방법

실험은 엔진운전 상태를 일정하게 유지하기 위하여 냉각수 온도를 80℃로 유지하였으며, 실험조건은 엔진 회전수를 1800, 2200, 2600rpm, 부하를 20, 40, 60, 80% 부하에서 각각의 연소특성을 비교하였다. 그리고 실험에 사용한 BDF 연료는 경유에 BDF 원액을 체적분율로 각각 10%, 20%, 30%로 혼합하고 교반기를 이용해 30분 동안 교반시키 후 실험에 사용하였다. 실험에 사용한 경유와 BDF의 비중을 Standard Hydrometer Set(KEIKI, JC-9200)를 이용하여 측정하였으며 그 값을 table 3에 나타내었다.

Table 3 Properties of test fuels

Item	Gravity(15/4°C)
Diesel oil	0.841
BDF 10%	0.846
BDF 20%	0.852
BDF 30%	0.857
BDF 원액	0.8875

실험에 사용된 각 연료의 비중을 경유와 비교해 보면, BDF 원액의 비중이 경유의 비중보다 높음을 알 수 있으며, BDF 10%의 경우는 경유와 비슷하고, BDF 30%는 경유에 비해 비중이 약간 높음을 알 수 있다.

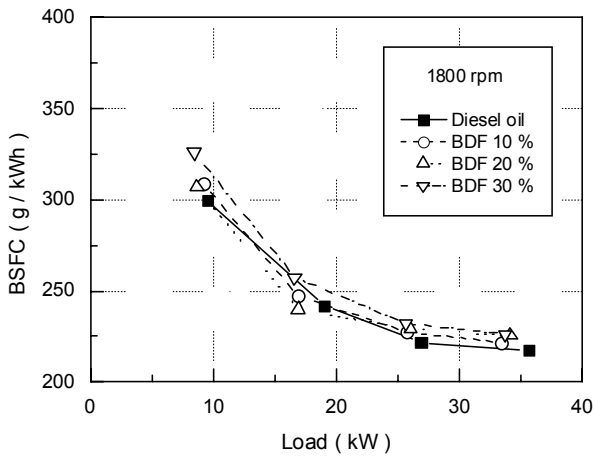


Fig. 2 Effect of engine load on the BSFC by various BDF(at 1800rpm)

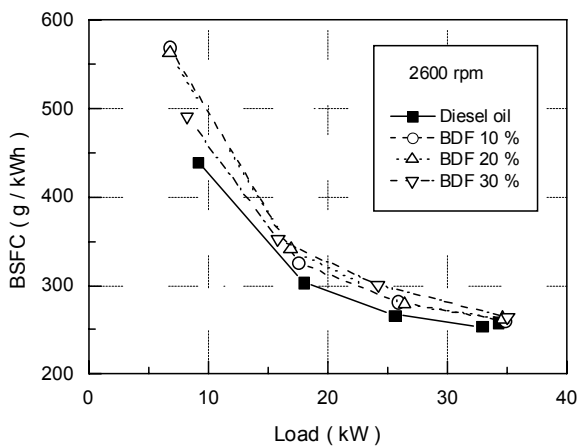


Fig. 3 Effect of engine load on the BSFC by various BDF(at 2600rpm)

연소실 압력은 Quartz Pressure Sensor(KISTLER

6067B, 0~25MPa)를 이용하여 측정하였다. 연소실 압력 데이터는 크랭크각도 0.5도마다 수집하였으며, 동일한 운전조건에서 각각 10회씩 데이터를 수집하였다. 연료소비율 측정은 일정한 용량(300ml)의 연료가 소비되는데 걸리는 시간을 측정하는 체적방식을 사용하였으며, 흡기 매니폴드 온도, 배기온도, 냉각수 온도 등을 각각 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2와 Fig. 3은 경유와 BDF 10%, 20%, 30%를 각각 사용했을 때, 엔진회전수와 부하 변화에 따른 연료소비율을 나타낸 것이다. 1800rpm과 2600rpm에서 모두 부하가 증가하면 경유와 BDF 혼합유 모두 연료소비율이 감소하는 동일한 경향을 나타내고 있다.

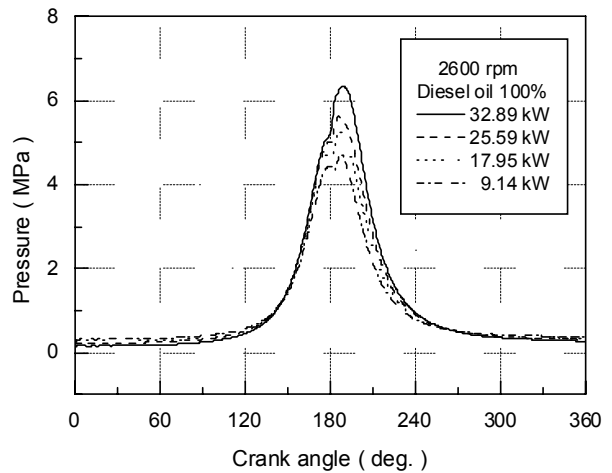


Fig. 4 Combustion chamber pressure curve

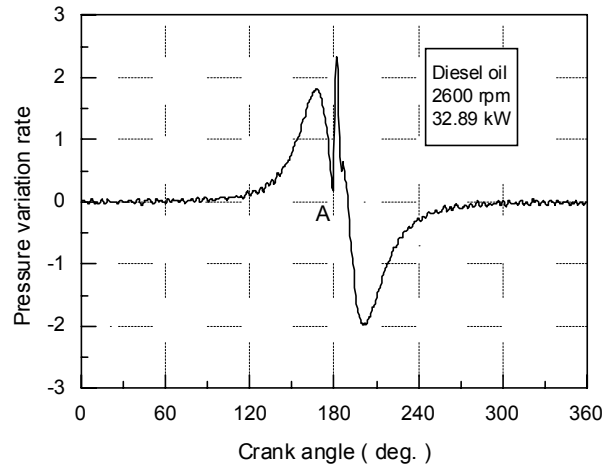


Fig. 5 Pressure variation rate curve

연료소비율을 서로 비교해보면, 엔진의 회전수 1800rpm과 2600rpm에서 BDF 혼합유인 BDF 10%, BDF 20%, BDF 30%를 사용하면 경유를 사용했을 때보다 모두 연료소비율이 높게 나타나고, BDF 30을 사용했을 경우에 연료소비율이 가장 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 Table 2에서 나타낸 바와 같이 BDF의 발열량이 경유의 발열량보다 적기 때문에 BDF를 혼합한 연료를 사용하면 연료소비율이 높게 나타나며, BDF의 혼합량이 많아질수록 연료소비율이 높게 나타난다고 생각된다.

Fig. 4는 경유를 연료로서 사용하고 엔진회전수 2600rpm일 때 부하 변화에 따른 연소실 압력선도를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 5는 연소실 압력의 압력변화율을 나타낸 것이다. 그림에서 변곡점 “A”는 연료의 착화로 인해 연소실 압력이 상승하는 변곡점을 나타내며, 이 “A” 지점을 착화점이라고 정의하였다.

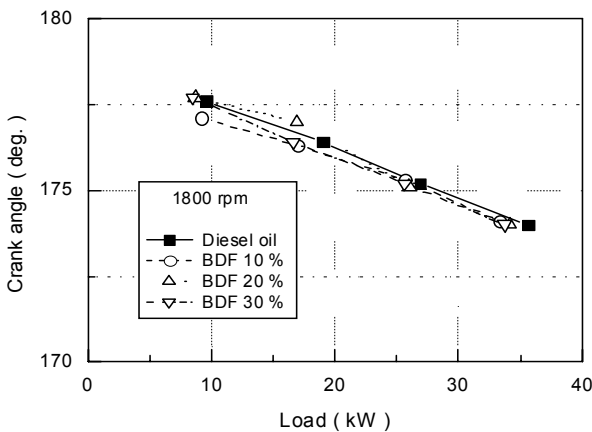


Fig. 6 Variation of ignition point according to engine load by various BDF(at 1800rpm)

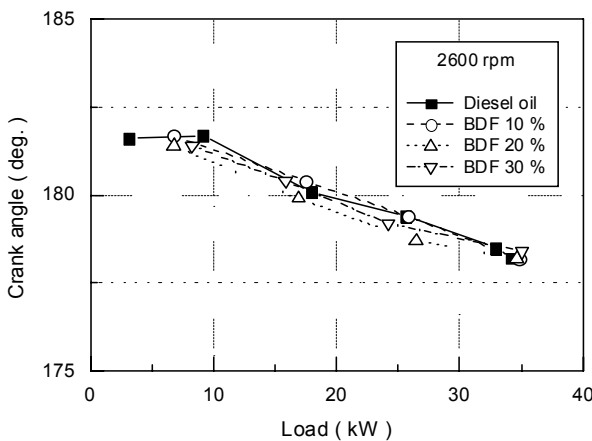


Fig. 7 Variation of ignition point according to engine load by various BDF(at 2600rpm)

Fig. 6과 Fig. 7은 경유와 BDF 혼합유를 사용하고, 각각 1800rpm과 2600rpm에서 부하 변화에 따른 착화점의 위치를 나타낸 것이다. 착화점의 위치는 동일한 운전조건에서 연소시마다 조금씩 변하므로 동일운전조건에서 10회분의 착화점을 평균하여 그 평균값을 그래프에 나타내었다. 엔진 회전수 1800rpm과 2600rpm에서 모두 사용 연료에 관계없이 부하가 증가할수록 착화시기가 빨라지고 있으며, 그 기울기가 경유와 BDF혼합유 모두 선형적으로 단축되고 있으며, 부하 20%에서 부하 80%로 증가함에 따른 착화시기 변화는 크랭크각도로 약 3도 정도 빨라졌다. 보쉬펌프의 구조상 분사개시 시점이 일정함에도 불구하고 착화점이 빨라지는 것은 부하가 증가할수록 연소실 온도의 상승으로 인해 착화시기가 빨라지는 것으로 판단된다. 그리고 사용연

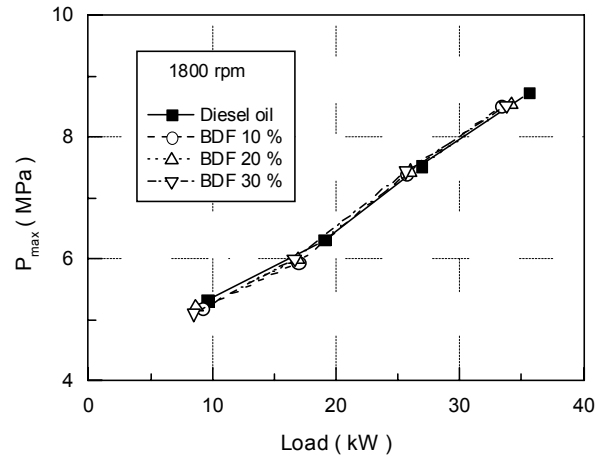


Fig. 8 Variation of Pmax according to engine load by various BDF(at 1800rpm)

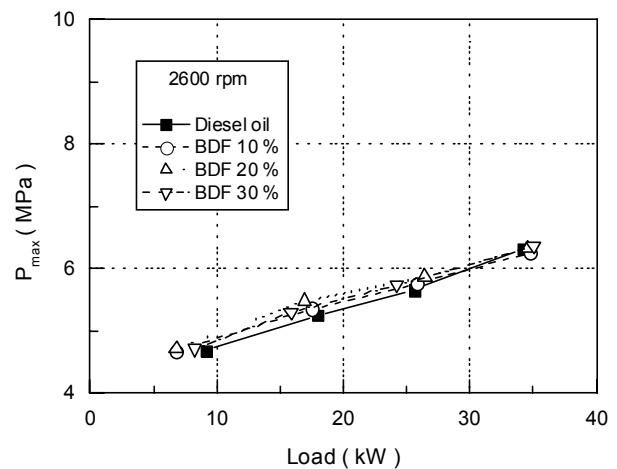
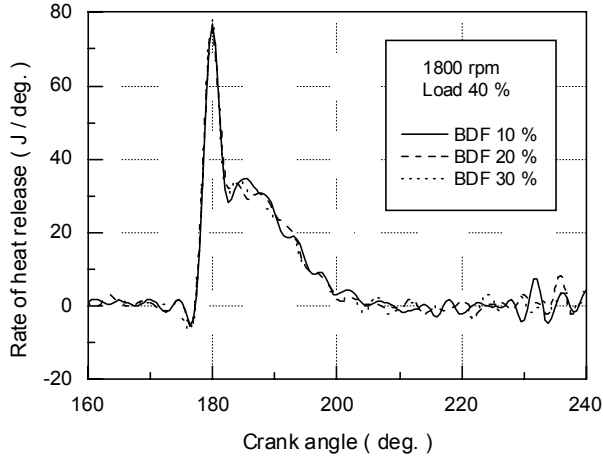
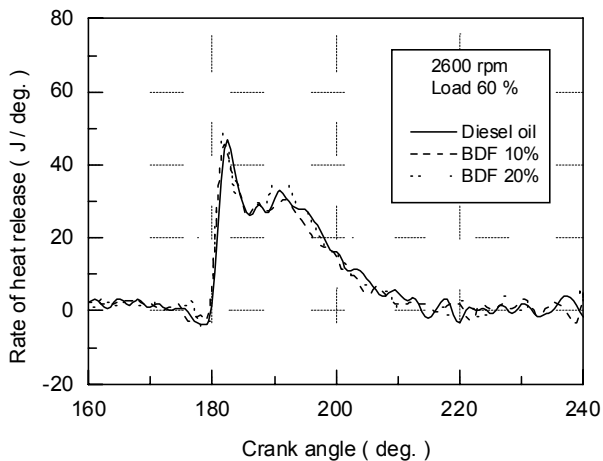


Fig. 9 Variation of Pmax according to engine load by various BDF(at 2600rpm)

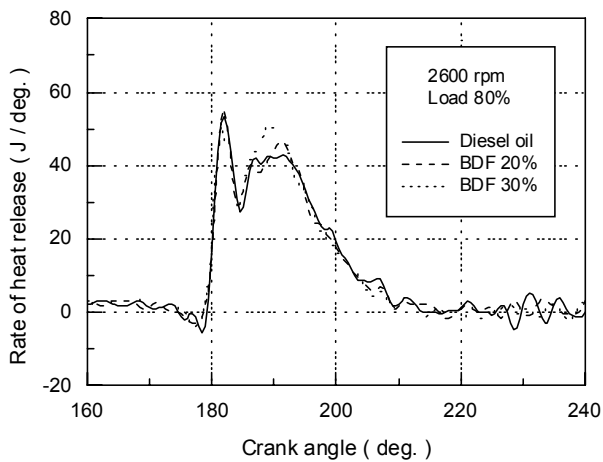
료에 따른 착화시기를 비교해보면, 엔진회전수 1800rpm과 2600rpm에서 BDF 혼합연료를 사용하면 경유를 사용했을 경우보다 착화시기가 약간 빨라지고 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 10 Comparison of heat release rate by various BDF at each engine speed and load

이러한 현상은 BDF의 세탄가가 경유의 세탄가보다 높기 때문에 BDF 혼합유를 사용하면 착화시기가 경유보다 더 빨라진다고 생각된다. 그리고 2600rpm에서 BDF 30% 경우에 착화시기가 BDF 20% 경우보다 오히려 조금 늦은 것은 BDF 30% 연료의 점도가 BDF 20%보다 높기 때문에 분무의 미립화와 증발등에 영향을 주어 착화지연이 길어진 때문이라 생각된다. 하지만 엔진 회전수와 부하에 관계없이 동일한 운전조건에서는 경유와 BDF 혼합연료를 사용했을 때의 착화시기 변화 폭이 매우 작음을 확인하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 연소실 최고압력을 10회 평균하여 나타낸 것이다. 1800rpm에서는 BDF의 혼합율과 관계없이 동일한 부하에서는 최고압력이 거의 동일하게 나타나고 있으며, 2600rpm에서는 경유와 BDF 혼합유를 사용했을 때의 연소실 최고압력 서로 비슷하지만 일부 영역에서 BDF 혼합유쪽의 연소실압력이 조금 높게 나타나고 있다. 이는 2600rpm에서의 연소실온도가 1800rpm일 때보다 더 높고, BDF에 함유된 산소량에 의해 연소가 촉진되어 연소실 최고압력이 더 높게 되는 것으로 생각된다.

Fig. 10은 엔진회전수와 사용연료에 따른 열발생을 곡선을 나타낸 것이다. 그림(a)에서 1800rpm, 부하 40%일 때 BDF 혼합연료에 따른 열발생을 곡선을 비교해보면 거의 차이가 없이 안정된 연소가 일어나고 있음을 알 수 있다. 그리고 그림(b)와 (c)의 2600rpm에서 경유와 BDF 혼합유와의 열발생을 곡선을 살펴보면 연소초기에 급격한 열발생이 일어나고 잠시 주춤한 후 다시 열발생율이 높아지는 것을 알 수 있다. 즉 연소초기의 예혼합연소와 이어지는 확산연소기를 구분할 수 있는데, 확산연소기에서 BDF 혼합연료를 사용했을 때의 열발생율이 더 높게 나타나고 있는데, 이는 BDF에 함유된 산소에 의해 연소가 촉진되기 때문이라 생각되며, 직접분사식 디젤엔진에 BDF 혼합유를 사용할 경우 열발생을 곡선상에서는 안정된 연소가 이루어지고 있음을 확인하였다.

4. 결 론

3기통 직접분사식 과급디젤기관에서 경유와 바이오디젤유를 혼합한 BDF 10%, 20%, 30% 연료를 사용한 경우의 연소특성을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연료소비율은 경유보다 BDF를 혼합한 연료를 사용했을 때 더 높게 나타났으며, BDF 혼합 비율이 높을수록 높게 나타났다.
2. BDF 혼합유는 경유와 마찬가지로 부하가 증가할수록 착화시기가 단축되었으며, 그 변화는 선형적으로 변화였다.
3. BDF 혼합유를 사용하면 착화시기가 경유를 사용했을 때보다 조금 빨라졌으나 그 변화폭이 매우 작았다.
4. 경유와 BDF 혼합유를 사용했을 때의 연소실 최고압력은 동일한 운전조건에서는 전반적으로 거의 동일하였다.
5. 열발생율곡선에 의하면 BDF를 혼합한 연료를 사용하면 함산소의 영향으로 확산연소기에서 경유보다 열발생율이 높게 나타났으며, 연소특성이 경유와 비슷하고 안정된 연소가 이루어짐을 확인하였다.

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.

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, S. W. Park, S. I. Kwon and C. S. Lee, 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”,