

저온 바이오디젤 연료의 연소특성에 관한 실험적 연구

이성욱^{*†} · 이정섭^{**} · 박영준^{**} · 김득상^{**} · 이영철^{**} · 조용석^{*}

An Experimental Study on Combustion Characteristics when applied Bio-Diesel Fuel at Low Temperature

Seang-Wock Lee, Jung-Sub Lee, Young-Joon Park, Duk-Sang Kim,
Young-Chul Lee and Yong-Seok Cho

Key Words: Bio Diesel(바이오디젤), Combustion(연소), Spray(분무), Constant Volume Chamber(정적연소기)

Abstract

In this research, combustion and spray characteristics were investigated experimentally in a constant volume chamber by applying bio-diesel fuel to a common-rail system in which precise control is available for utilizing environmentally friendly properties of bio-diesel fuel. The experiment was conducted at fuel temperatures 20°C and -20°C to investigate combustion characteristics of bio-diesel fuel provoking problems in fluidity specially in a low temperature. For the visualization, the experiment was carried out under various conditions of ambient pressure, injection pressure and fuel temperature. The test was made by three different types of diesel fuels, conventional diesel, BD20 and BD100. In summary, this research aims to investigate combustion characteristics in the application of bio-diesel fuels and compare the results with performance of conventional diesel fuel. This experimental data may provide fundamentals of spray and combustion of bio-diesel fuels at a low temperature and contribute to the development of bio-diesel engines in future.

1. 서 론

인류문명의 발달과 더불어 자동차의 고성능화와 사용 대수의 급증으로 인하여 자동차에서 배출하는 배출가스에 대한 심각성이 고조되고 있는 것이 현실이다. 한편, 세계 각국은 유해배출가스를 저감하기 위하여 배출가스 규제를 갈수록 강화하고 있으며 국내 규제치 또한 선진국 수준으로 크게 강화되고 있다⁽¹⁾. 또한 화석연료의 유한성으로 석유를 대체할 새로운 연료에 관한 연구의 모색도 깊이를 더해가고 있는 실정이다⁽²⁾.

특히 가솔린 자동차에 비해 디젤자동차의 배출가스가

국내는 물론 세계적으로 깊은 관심의 대상이 된지 오래이며, 이러한 배출가스 중에서도 질소산화물과 입자상 물질 저감기술이 절실히 요구되고 있다. 따라서 인류는 석유 대체에너지로써의 역할과 배출물의 감소 역할을 동시에 만족할 수 있는 바이오디젤에 관한 연구에 박차를 가하고 있다^(3,4).

그러나 바이오디젤의 경우 동절기에 외부온도가 낮아지면 연료의 응집에 의해 차량의 연료필터가 막히게 되어 차량의 시동이 꺼지고 운행이 불가능해지는 문제가 있다⁽⁵⁾.

따라서 본 연구에서는 바이오디젤의 친환경적인 요소를 고려하여 정밀제어가 가능한 커먼레일에 바이오디젤을 사용하여 바이오디젤의 분무 및 연소특성을 실험적으로 조사하였다. 특히 저온시 연료의 유동성에 문제가 있는 바이오디젤의 연소특성을 알아보기 위해 연료의 온도를 -20°C와 20°C에서 실험을 진행하였다.

(2008년 10월 23일 접수 ~ 2008년 12월 2일 심사완료)

^{*}국민대학교 공과대학 기계자동차공학부

^{**}국민대학교 자동차공학전문대학원

[†]책임저자, 회원, 국민대학교 기계자동차공학부

E-mail : energy@kookmin.ac.kr

TEL : (02)910-4819 FAX : (02)910-4839

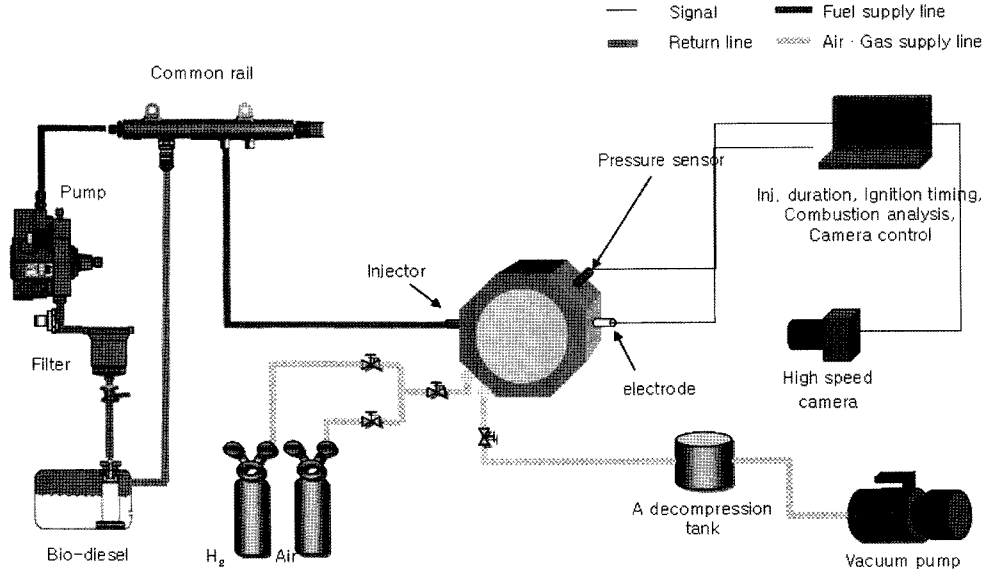


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

또한, 바이오디젤의 연소특성을 기존 디젤연료의 성능과 비교하여 바이오디젤의 적용특성을 규명하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

바이오디젤 기관의 분무 및 연소현상을 가시화하기 위하여 사용한 정적연소기를 Fig. 1에 나타내었다. 정적연소기는 실제 기관을 대상으로 하기 위해 대형기관에 유사한 조건에서 분무, 연소를 관찰하기 위하여 보어는 123 mm, 폭은 30~140 mm로 조절이 가능하도록 제작하였으며 그 주변에 레이저와 각종 광학기기를 설치하여 고속 카메라로 분무 및 연소가시화를 실시하였다. 또한, 정적연소기 주변장치로 흡기밸브, 배기밸브, 압력센서, 점화를 위한 전극 및 연료분사를 위한 인젝터를 장착하였고, 분무 및 연소가시화를 위해 양측에는 직경 153 mm, 두께 40 mm의 강화유리를 설치하였다.

연소기내의 잔류가스를 제거하기 위한 진공펌프를 설치하고, 중간에 감압탱크를 통해 잔류가스를 제거하였다. 정적 연소기의 구성은 실제 기관에서 불가능한 각종 실험 조건(점화 위치, 분사위치, 연소실 형상 등)을 자유로이 변경시킬 수 있도록 설계하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 분무가시화

바이오디젤의 분무는 매우 짧은 시간에 이루어지며 분사압력이 증가할수록 분사속도는 더욱 증가한다. 이러한 순간적인 분무현상을 고해상도의 영상으로 취득하기 위하여 지속광원과 초고속 카메라를 이용하여 암실 상태에서 분무가시화를 하였다. 바이오디젤의 온도는 -20°C와 20°C로 온도 조절 센서(Pt-100Ω)와 제어기(PID)를 이용하여 ±0.1°C 이내에서 온도를 유지하였다. 연료통 내부의 온도 변화가 ±0.05°C이하로 유지하기 위해 30분간 평형상태를 유지하였다. 인젝터의 노즐경 0.6 mm, 분위기압력(P_a)는 2.0 MPa, 분사압력(P_i)를 40 MPa와 100 MPa로 변화시켰고, 연소실내 온도는 상온 298K로 일정하게 하였다. 가시화에는 고속 디지털카메라를 사용하였으며 촬영속도는 3,000 fps로 설정하였다. 천연가스의 분사, 점화시기, 촬영시기 등의 신호는 CodeVision AVR C언어를 사용하여 제어하였다.

2.2.2 연소 가시화

예혼합 방식에 의한 연소가시화를 하기 위하여 수소를 정적연소기내로 흡입시키기 위한 배관을 구성하였다. 디젤기관 내에서의 고온고압의 조건을 만들어 주기 위해, 수소-공기화염을 사용하였다. 즉, 수소와 공기를 정적연소기 내에서 혼합, 스파크플러그에 의해 연소시킨 후 수소-공기 연소에 의해 고온 고압 조건이 형성 되었

Table 1. Experimental conditions

Fuel	Diesel, BD20, BD100
Ambient pressure (P_a , gauge) [MPa]	2
Injection pressure (P_j , gauge) [MPa]	40, 100
Nozzle diameter dN[mm]	0.2
Injection timing[ms]	1

을 때 바이오디젤을 분사하여 연소 과정을 가시화하였다. 연소 과정의 가시화 실험 조건으로는 Table 1과 같이 분위기 압력은 1 MPa, 분사 압력은 40 MPa과 100 MPa로 하여 실험을 수행하였다.

인젝터의 분사시간은 1 ms로 고정시켜 실험을 수행하였다. 이 때 피에조식 압력센서를 이용하여 연소실 내 압력변화를 측정하였다. 그 외 온도조건과 가시화 방법은 분무가시화와 동일하게 제어하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분무가시화 결과

3.1.1 분사압 및 연료온도에 따른 분무 도달 거리

분무 도달 거리는 실제 기관에 적용 할 때 연소실 크기를 결정하고 연소 현상을 예측하는데 중요한 분무 특성 중 하나이다. 각 연료를 분사하였을 때 연소기 하단까지 분무 도달 거리를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2는 연료 온도 20°C, 분사압력 40 MPa, 100 MPa일 경우, 바이오디젤 연료의 혼합비에 따른 분무 도달거

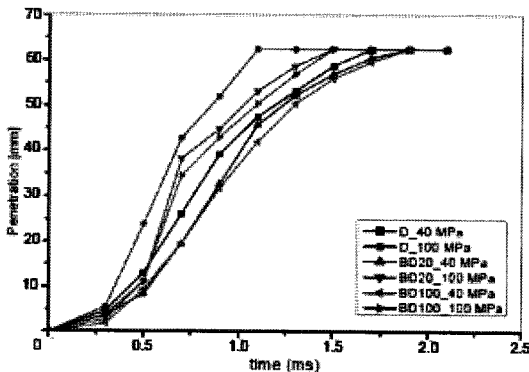


Fig. 2 Spray penetration between diesel and bio-diesel ($P_{amb}=2$ MPa, Temp.=20°C)

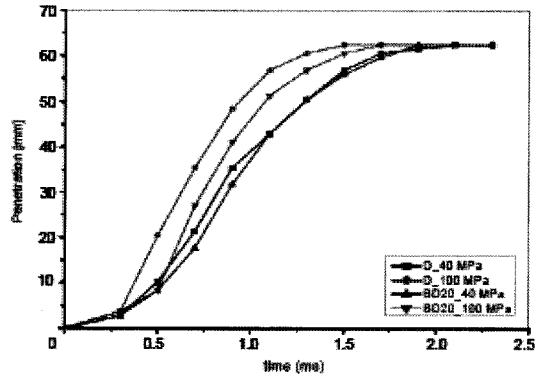


Fig. 3 Spray penetration between diesel and BD20 ($P_{amb}=2$ MPa, Temp.=-20°C)

리를 디젤 연료의 분무 도달 거리의 경우와 비교한 것이고, Fig. 3은 동일한 조건에서 연료 온도가 -20°C일 경우를 나타낸 그래프이다. 이는 가시화 실험결과로부터 얻은 분무 도달 거리를 분사 압력에 따라 나타낸 선도이다.

일정 분위기압 하에서 분사압을 증가시키면 바이오디젤의 분무 도달 거리는 연료의 혼합비에 관계없이 증가하는 경향을 보였으며, 분사 초기에는 도달 거리가 급격히 증가하지만 그 증가폭은 시간이 지날수록 감소함을 확인할 수 있었다.

또한, 일반 디젤과 BD20은 정적연소기 벽면까지의 도달 시간에서 큰 차이가 없는 것으로 측정 되었으나 BD100의 경우 일반 디젤과 BD20에 비해 높은 점도로 인해서 관통력이 다소 저하됨을 확인할 수 있었다. 또한, 분사압력이 동일한 경우, BD20은 일반 디젤과 분무 도달 거리의 차이가 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 기존 디젤 기관에 BD20을 사용할 경우 분무 및 연소 특성을 개선하면 디젤 연료와 같은 성능인자를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

연료 온도에 따른 분무특성을 계측한 결과, 연료 온도가 -20°C인 경우에 바이오디젤의 관통력이 저하되는 것을 확인하였는데, 이는 저온유동성의 악화로 인해 분무의 시작점과 발달과정에서 관통력이 약화된 것으로 판단된다. BD100은 -20°C의 조건에서 연료의 결빙으로 인하여 실험을 진행 할 수가 없었다.

3.1.2 분무 발달 과정

Figure 4와 Fig. 5는 연료 온도가 20°C와 -20°C일 때 바이오디젤의 혼합비에 따른 분무의 발달 과정을 분사 압력 40 MPa, 100 MPa일 때, 디젤과 바이오디젤의 분

무 발달 과정을 분사 시작 후의 시간에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 나타나는바와 같이 연료의 차이보다는

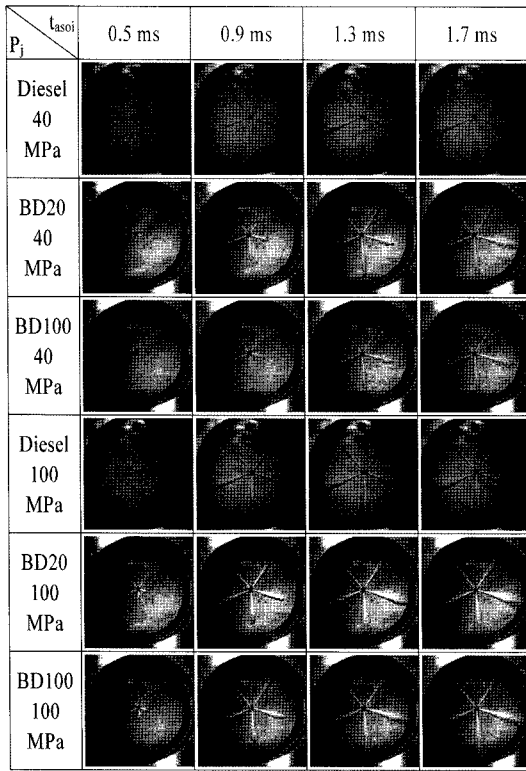


Fig. 4 Comparison of development process between diesel and bio-diesel ($P_{amb}=2$ MPa, Temp. $=20^{\circ}C$)

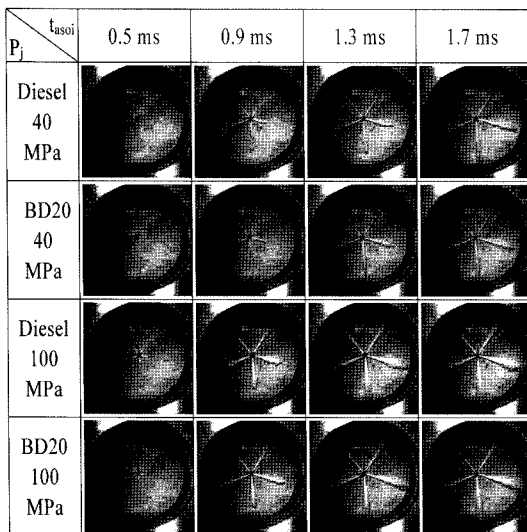


Fig. 5 Comparison of development process between diesel and bio-diesel ($P_{amb}=2$ MPa, Temp. $=-20^{\circ}C$)

분사압력 변화에 따라 분무 발달 과정의 변화가 더 큰 것을 알 수 있다. 40 MPa에서 100 MPa로 분사압력을 증가시켰을 때 각 연료의 분무 도달 거리는 증가하고 분무 속도가 빨라짐을 알 수 있다.

Figure 4에서 BD20의 분무 발달 과정은 시간 경과에 따라 디젤 연료와 큰 차이 없이 동일한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 Fig. 4와 Fig. 5에서 연료 온도가 $20^{\circ}C$ 와 $-20^{\circ}C$ 인 경우의 분무 발달 과정을 비교하였을 때 디젤에 비하여 BD20은 온도가 $-20^{\circ}C$ 가 되었을 때 분무 발달 과정과 분무 속도가 느려진 것을 확인할 수 있었다. 바이오디젤의 저온유동성의 악화로 인하여 $-20^{\circ}C$ 에서 분무 발달 과정이 느린 것으로 판단된다.

3.2 연소가시화 결과

전술한 분무 가시화 실험을 바탕으로 고온고압의 조건을 만들어 주기 위해, 수소를 예비 연소 연료로 사용하였다. 연소 후 정적 연소기 내 산소 농도가 20% 이상을 유지하도록 수소, 산소, 질소를 주입하였으며 이때

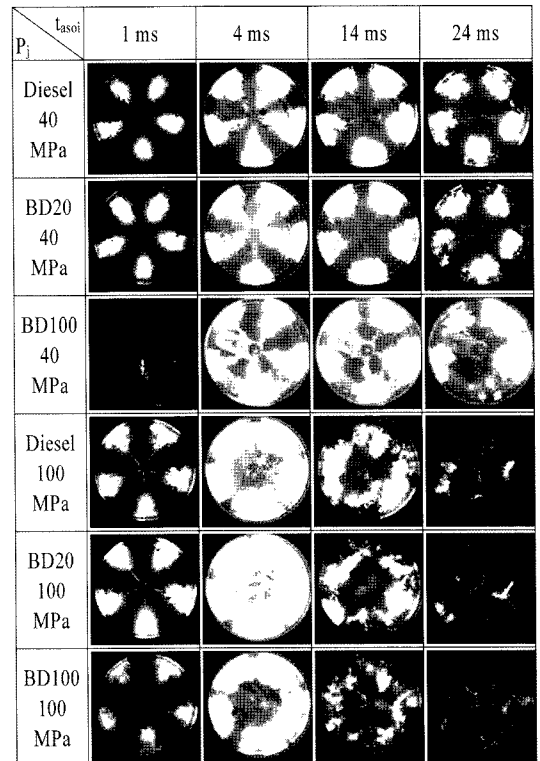


Fig. 6 Comparison of combustion process between diesel and bio-diesel ($P_{amb}=1$ MPa, Temp. $=20^{\circ}C$)

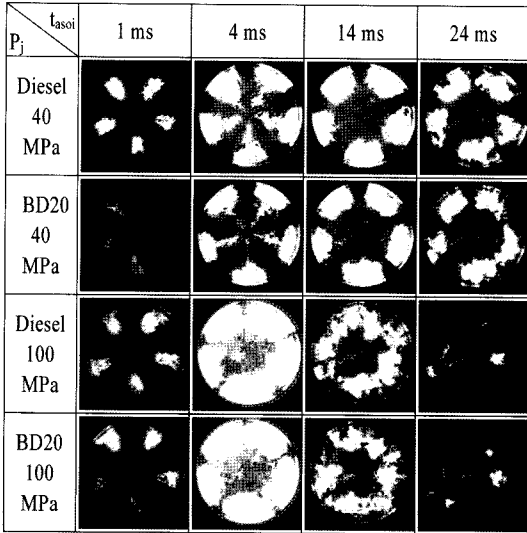


Fig. 7 Comparison of combustion process between diesel and bio-diesel ($P_{amb}=1$ MPa, $Temp.=-20^{\circ}C$)

디젤 및 바이오디젤 연소가시화를 진행하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 사용한 연료로는 디젤과 BD20, BD100, 정적연소기 안의 분위기 압은 1 MPa, 연료 온도를 $20^{\circ}C$ 와 $-20^{\circ}C$ 로 고정시키고, 인젝터의 분사시간을 1 ms로 일정하게 유지하였을 때 연소가시화 결과를 사진으로 나타낸 것이다.

각 조건에 따른 그림들은 화염면이 연소실 벽면에 완전히 도달하기까지 연료 및 압력별로 비교하여 나타내고 있다.

분무와 마찬가지로 연료의 차이보다는 분사압력 변화에 따라 연소 상태의 변화가 크게 변화하고 있음을 알 수 있었다. 즉, 100 MPa에서 연료의 미립화가 촉진되어 연소 속도가 빠른 것을 확인하였다. 디젤과 BD20은 동일한 조건에서 연소진행과정이 비슷한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

BD100은 연소시점이 기존 디젤 및 BD20보다 다소 늦게 착화하지만 연료가 보유하고 있는 함산소량이 많아 연소 종료 시기는 비슷함을 알 수 있었다. 이는 바이오디젤의 발열량이 디젤과 비교하여 약간 저하됨에도 불구하고 바이오디젤 내에 함유된 산소성분에 기인한 정적연소기 내 연소효율이 개선되었기 때문으로 생각된다.

즉, 산소농도가 증가하면 반응속도가 증가되므로 연소 범위는 넓어지게 되며, 특히, 과농한 영역에서 반응속도가 증가하고 연소를 안정화시켰기 때문으로 생각된다.

디젤과 BD20은 연료 분사 후 거의 비슷한 시기에 착

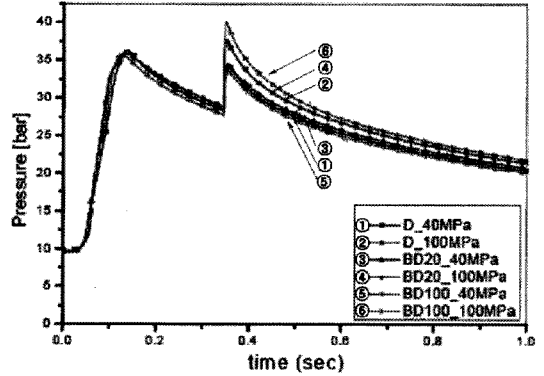


Fig. 8 Combustion pressure at various fuels and injection pressure ($P_{amb}=1$ MPa, $Temp.=-20^{\circ}C$)

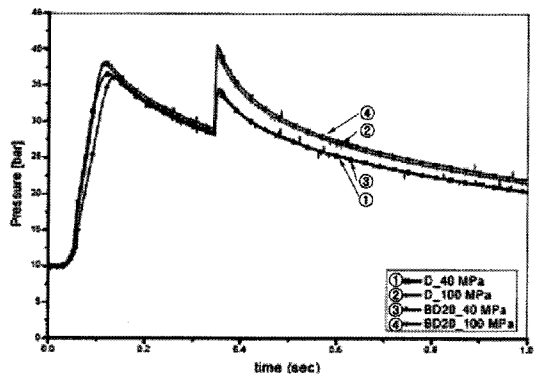


Fig. 9 Combustion pressure at various fuels and injection pressure ($P_{amb}=1$ MPa, $Temp.=-20^{\circ}C$)

화가 이루어졌으며, 약 14 ms가 지난 후정적연소기 벽면까지 화염전파가 이루어졌고, 42 ms 즈음하여 화염소멸이 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

Figure 8과 Fig. 9는 연료의 온도에 따른 각각의 연료 조건과 분사압력에 따른 연소실내 압력변화를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. Fig. 8에서 분사압력을 100 MPa로 일정하게 유지하였을 경우 디젤보다 BD100의 연소압력이 약 0.4 MPa 정도 증가함을 보였다. 이는 바이오디젤 연료가 커먼레일을 통한 고압분사로 인하여 연료의 미립화가 향상되었고, 바이오디젤의 세탄가가 디젤보다 더 높고, 연료 자체 함 산소량이 디젤보다 높아 연소를 활발하게 촉진시켰기 때문으로 분석된다.

분사 압력이 40 MPa로 일정하게 유지하였을 경우 디젤과 BD20은 비슷하거나 BD20이 좀 더 낮은 압력 선도를 보여준다. BD100은 디젤에 비해 압력이 낮게 나오는데, 동점도가 높아서, 분사압력이 낮은 경우에 미립화를 촉진시키지 못하여 연소가 잘 이루어지지 않는 것

으로 여겨진다. 따라서 연료온도의 차이가 최고 압력에 는 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

디젤기관의 대체연료로서 바이오디젤 연료를 정적연 소기에 적용하여, 바이오디젤의 연료온도에 따른 분무 및 연소 특성에 대해서 정적연소기와 커먼레일 시스템을 사용하여 연료의 온도와 분사 압력을 변화시키며, 분 무 및 연소의 가시화로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동일한 압력 조건과 동일한 온도 조건에서 디젤과 BD20의 분무 특성 및 연소 특성을 비교한 결과 큰 차 이를 나타내지 않았다. 출력의 변화가 적고 기관의 개조 가 필요 없으므로 기존 기관에 그대로 적용이 가능할 것으로 사료된다.

2. 저온에서 바이오디젤은 저온유동성의 악화로 분무 속도 및 연소시점이 다소 늦어지는 현상을 확인하였다.

3. 100 MPa 분사의 경우 BD100은 디젤과 비교하여 분무 및 연소시점은 느리지만 바이오디젤의 세탄가가 디젤보다 더 높고, 연료 속에 산소를 함유하고 있기 때 문에 연소를 활발하게 촉진시켜 연소 종료 시점은 거의 비슷하였다.

4. 100 MPa 분사의 경우 바이오디젤이 디젤보다 최 고 피크 압력이 다소 높게 나타났으며, 이는 바이오디젤 자체에 포함된 함 산소량의 영향으로 인해 연소속도가 향상된 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR project(무저공해 자동차 사업단) 및 산업자원부 에너지지원 기술개발 중 증소형 LPG 상용차 개발 사업의 지원으로 수행되었으며, 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 한영출, 김동진, "신편 내연기관", pp. 179~203, 문운 당, 1999.
- (2) K. W. Schol, S. C. Sorenson, "Combustion of Soybean Oil Methyl Ester in a Direct Injection Diesel Engine", SAE 930934, 1993.
- (3) Christopher A. Sharp, Steve A. Howell and Joe Jobe, "The Effect of bio-diesel Fuels on Transient Emissions from Modern Diesel Engines, Part 1 Regulated Emissions and Performance", SAE 2000-01-1967, 2000.
- (4) David Y. Chang, Jon H. Van Gerpen, "Determination of Particulate and Unburned Hydrocarbon Emissions from Diesel Engines Fueled with bio-diesel", SAE 982527, 1998.
- (5) Jorg Ullmann, "bio-diesel in Korea: Requirements placed by the Fuel Injection System on the Quality of bio-diesel Blends", 바이오디젤의 디젤차량 연료계 부품 적합성에 관한 세미나 및 토론회 자료집(한국자동차공학회 연료 및 윤활연구회), 2006.