

폐식용유 바이오디젤 연료의 분무특성에 관한 연구

안상연* · 김웅일* · 이창식†

A Study on Spray Characteristics of Biodiesel Derived from Waste Cooking Oil

Sangyeon Ahn, Woong Il Kim and Chang Sik Lee

Key Words: Alternative fuel(대체연료), Biodiesel(바이오디젤), Waste cooking oil(폐식용유), Spray characteristics(분무특성), Spray tip penetration(분무도달거리)

Abstract

This study was performed to investigate the effect of biodiesel derived from waste cooking oil on the spray behavior and macroscopic spray characteristics. To analyze quantitative characteristics of test fuels, injection quantity was measured at various injection pressures and the spray images of injected fuels in the pressurized chamber were obtained by using a high speed camera and image analysis system. Based on the measured spray images, the spray tip penetration and spray cone angle were investigated at various energizing timings and injection pressures. In this work, the experimental results showed that the injection quantity of waste cooking biodiesel indicated the higher quantities than diesel at high injection pressure. As the injection pressure was increased, the spray tip penetrations of biodiesel were higher value than diesel. The difference of penetration between biodiesel and conventional diesel fuel was reduced in accordance with the increase of injection pressure. Also, the spray angles of diesel were larger than that of biodiesel because diesel fuel has lower viscosity than biodiesel. In addition, the spray evolution processes of biodiesel fuel at various injection pressures and the elapsed time after the injection were compared to the conventional diesel fuel.

기호설명

WCO biodiesel : 폐식용유 바이오디젤
Pinj : 연료분사압력
Pamb : 가시화 체임버 압력
teng : 인젝터 통전기간

1. 서 론

압축 착화기관은 열효율이 높고 기존 스파크 점화 기관에 비하여 연비가 향상되어 승용자동차를 비롯하여 대형자동차에 이르기까지 그 점유율이 점차 높아지고 있는 추세이다. 그러나 NOx와 PM 등 규제대상이 되는 배기 배출물이 많이 생성되어 이것이 공해유발요인이 되고 있으며, 최근 세계보건기구(WHO)가 디젤엔진 배기가스를 1군 발암요인으로 규정하여 배기질감에 대한 세계적인 관심과 연구역량이 집중되고 있다⁽¹⁾. 또한, 에너지수요 증가에 비하여 화석연료는 고갈되어가고 있어서 지속 가능한 대체에너지의 연구가 활발히 이루어지고 있다^(2,3).

바이오디젤은 함산소 연료로써 CO, HC, 입자상물질

(2013년 9월 23일 접수 ~ 2013년 11월 25일 심사완료, 2013년 12월 2일 게재확정)

*한양대학교 대학원

†책임저자, 이창식, 한양대학교 기계공학과

E-mail : cslee@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0427 FAX : (02)2281-5286

(PM) 등의 배출물을 저감하는데 효과적인 연료이며^(4,7) 원료가 되는 식물성자원 (대두유, 유채유, 팜유 등)은 생산과정에서 CO₂를 흡수하기 때문에 온실가스 저감의 효과가 있다^(8,9). 또한, 바이오디젤은 현재 디젤 자동차의 구조적인 변경 없이 적용이 가능하며 기존 디젤연료와 유사한 성능을 가지고 있기 때문에 지속 가능한 에너지원으로써 활용도가 빠르게 증가하고 있다. 그러나 생산원료가 되는 여러 가지 식물유, 폐식용유, 해조류 등 각각에 대한 생산방법이나 경제적인 효율성뿐만 아니라 물성 또한 차이가 있어서 실제 엔진에 안정적으로 적용하기 위해서는 각각 원료에 대한 연구가 종합적으로 이루어져야 할 것이다⁽¹⁰⁾.

최근, 산업생산과정과 일반가정에서 하수로 버려지는 폐식용유는 에너지 재활용면에서 상당히 큰 손실이며 심각한 환경문제가 되고 있다. 바이오디젤의 생산비용 중 약 70%를 차지하는 원료를 폐식용유로 사용할 경우 생산비용을 대폭 절감할 수 있으며, 또한 식용작물을 사용하지 않는 장점이 있다.

본 연구에서는 커먼레일 고압분사 시스템을 적용하는 디젤기관에서 디젤과 폐식용유 바이오디젤 연료를 적용하여 다양한 분사압력에서 분사량, 분무도달거리, 분무각 및 분무면적 등의 분무특성을 실험적으로 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

폐식용유 바이오디젤의 분무특성을 분석하기 위한 실험장치를 Fig. 1과 같이 구성하였으며 세부적인 제원은 Table 1에 나타내었다.

연료분사압력을 안정적으로 공급하기 위하여 두 개의 공기 압축식 고압펌프(HSF-300, Haskel)를 병렬로 하여 커먼레일에 연결하였으며 레귤레이터로 각 실험조건에 따른 일정한 연료의 압력을 유지하였다.

분무의 발달과정을 가시화하기 위한 실험장치는 두 개의 메탈-할라이드(metal-halide) 램프(Photron, HVC-SL)를 광원으로 사용하였으며 인젝터 드라이버에서 발생시키는 분사 신호와 고속카메라(Photron, Fast cam-APRX)의 촬영 신호를 동기화 하는 디지털 신호발생기(Berkeley Nucleonics Corp, Model 555)로 구성하였다. 또한, 4 MPa 이상의 압력까지 가압이 가능한 고압 체임버와 질소가스를 이용하여 분위기 압력을 조절하였으며 영상취득 및 저장장치가 장착된 컴퓨터를 설치하여 고

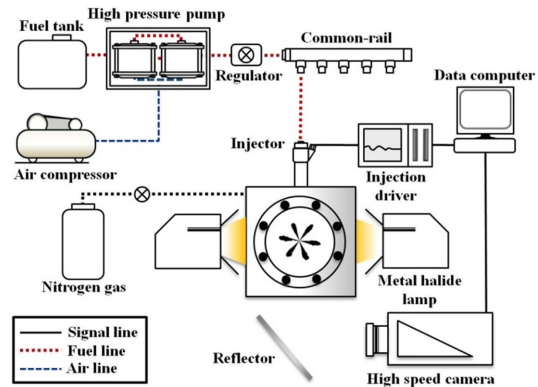


Fig. 1 Schematic diagram of the fuel spray visualization system

Table 1 Specification of visualization system and injector

High speed camera	
Frame rate	10,000 fps
Shutter speed	1/10,000 sec
Resolution	512 x 512
Light source	
Light source	Metal halide
Power	150W
Cooling method	Air-cooling
Injector	
Type	Solenoid
Number of hole	6
Nozzle hole diameter	0.128 mm
Spray angle	156°

속카메라로부터 얻어진 영상을 저장하여 분무특성을 분석하는데 이용하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 Table 2에 나타낸 물성을 가진 연료를 사용하였으며 Table 3의 조건으로 실험을 진행하였다. 폐식용유로부터 추출된 100% 바이오디젤과 디젤연료를 사용하여 30 MPa에서 120 MPa까지 분사압력을 변화시키며 분사량, 분무도달거리, 분무각, 분무면적을 비교 분석하였다.

분사량 실험은 측정의 신뢰도를 높이기 위하여 밀폐

Table 2 Properties of WCO biodiesel and diesel

Property	WCO Biodiesel	Diesel
Carbon content (wt%)	77	87
Hydrogen content (wt%)	12	13
Oxygen content (wt%)	11	0
Liquid density (15°C, kg/m ³)	882.1	826.2
Kinematic viscosity (15°C, mm ² /s)	4.2	2.359
Lower heating value (MJ/kg)	31.926	43.038
Cetane number	54	53.2
Flash point (K)	181	61

Table 3 Experimental conditions

Item	Experimental condition
Injection strategy	Single injection
Injection pressure (MPa)	30, 60, 90, 120
Ambient pressure (MPa)	3
Energizing duration (ms)	1
Test fuel	Diesel, WCO Biodiesel

된 용기 안에 실험조건마다 1000회 분사 후 분해능 0.001 g의 정밀저울을 사용하였으며 오차를 최소화 하기 위해 여러 회 반복 측정 후 평균값을 사용하였다.

분무영상 취득을 위한 가시화 실험에서 고압 체임버의 압력은 3 MPa로 유지하였으며 인젝터에 통전기간은 1 ms로 고정하여 연료 자체에 대한 기본특성을 파악하려고 하였다.

분무도달거리는 노즐 팁에서 분무 선단이 도달하는 최대거리로 정의하고 촬영된 분무이미지는 투영도달거리이기 때문에 인젝터의 제원상 분사각 (156°)를 고려하여 수정 계산하였다, 분무각은 분무도달거리를 노즐 팁으로부터 1/3로 나눈 지점에서 원호를 그려 분무 외곽선과 만나는 두 점과 노즐 팁을 이은 두 직선 사이의 각으로 정의하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분사량 측정결과

Fig. 2는 분사압력을 변화시켰을 때, 바이오디젤과 디

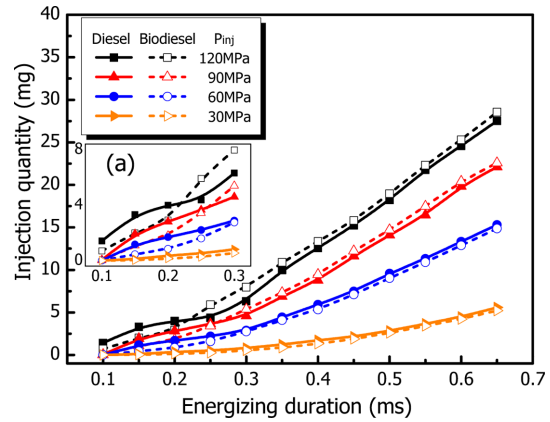


Fig. 2 Comparison of the injection quantity between diesel and WCO biodiesel at different injection pressure

젤의 인젝터 통전기간에 따른 분사량을 나타내었다. 통전기간이 0.2 ms 이전에는 모든 분사압력 조건에서 바이오디젤이 디젤보다 분사량이 낮게 측정되었다. 또한, 0.3 ms 이후 결과에서는 고압 조건인 90 MPa, 120 MPa에서 바이오디젤의 분사량이 높게 측정되었으며 저압조건인 30 MPa, 60 MPa에서는 반대로 낮게 측정되었다. 바이오디젤은 점도가 높기 때문에 통전기간이 짧거나 분사압력이 낮을 경우, 인젝터 홀과 연료 사이의 경계면에서 전단응력이 증가하게 되어 연료유동을 방해하게 된다. 반면에, 고압으로 분사될수록 점도의 영향보다는 밀도가 큰 바이오디젤의 운동량이 증가하여 분사량이 증가하는 것으로 판단된다. 또한, 실험 인젝터의 기준 전류는 0.354 ms까지 19~17A 그 이후에는 13~11A가 흐르기 때문에 디젤은 짧은 통전기간에서 분사량의 상승이 가파르게 나타나지만 바이오디젤은 앞에서 언급한 유동저하의 문제로 인해 완만한 상승곡선을 나타내었다. Fig. 2의 (a)는 통전기간 초기의 바이오디젤의 분사량 변화를 확대하여 나타낸 것이다.

3.2 분무 가시화 결과

Fig. 3은 30 MPa~120 MPa의 디젤과 바이오디젤의 분무 가시화 이미지다. 분사가 시작된 후 0.9 ms의 이미지를 선택하였으며 저압에서 바이오디젤의 분무가 얇고 분무도달거리가 긴 경향을 보였다. 이러한 경향은 바이오디젤은 디젤보다 점도가 크기 때문에 디젤에 비하여 분무가 충분히 확산되지 못하나 밀도가 상대적으로 크기 때문에 관성력의 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 반면에 고압으로 갈수록 디젤과 바이오디젤의 분무

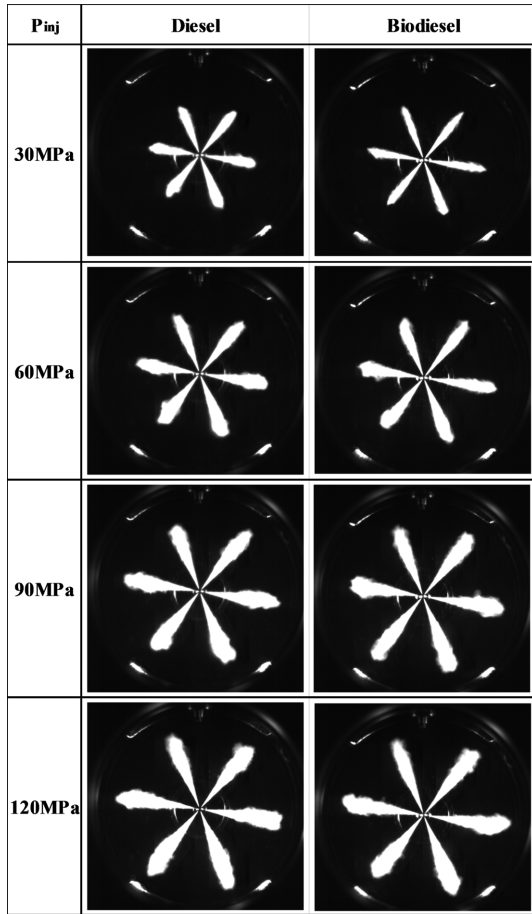


Fig. 3 Comparison of the spray images between diesel and WCO biodiesel at different injection pressure

형상이 유사해지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 분사압력이 높아질수록 전체적인 분무의 크기가 커지며 미립화 특성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

분무도달거리는 실제 엔진에서 너무 길어질 경우 연소가 시작되기 전에 분사된 연료분무가 실린더 벽에 도달하게 되고 너무 짧을 경우에는 공기와의 혼합이 충분하지 않게 되어 불완전 연소량을 증가시킬 수 있다.

가시화 이미지로부터 측정된 분사압력에 따른 디젤과 바이오디젤의 분무도달거리를 Fig. 4에 나타내었다. 바이오디젤과 디젤연료 모두 분사압력이 증가할 경우 분무도달거리가 증가하였으며 이는 분사압력이 높을 경우 인젝터에서 분출되는 연료분무의 관통력이 증가하기 때문으로 판단된다. 또한, 초기에 연료분무의 진행은 급격하게 이루어지지만 액상의 분열이 진행될수록 입자의 크기가 작아지기 때문에 분위기 가스의 저항을 많이 받

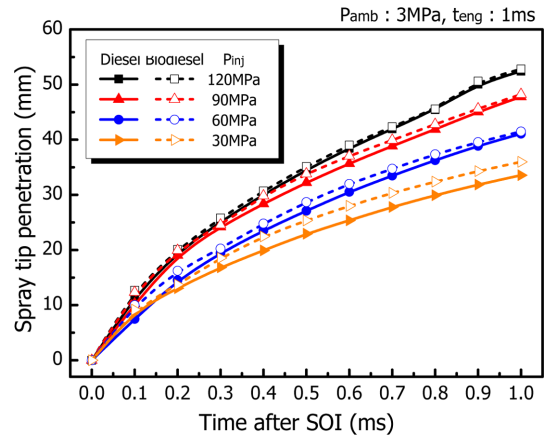


Fig. 4 Comparison of the spray tip penetration between diesel and WCO biodiesel at different injection pressure

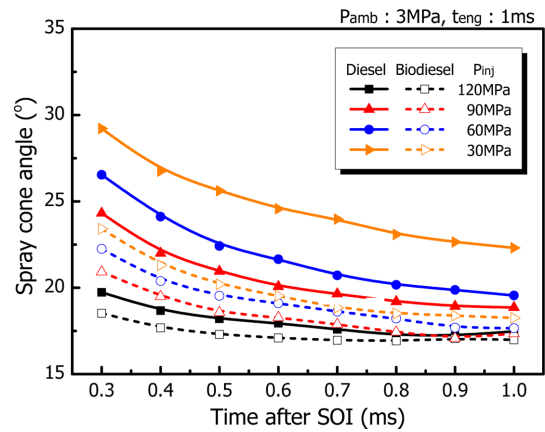


Fig. 5 Comparison of the spray cone angle between diesel and WCO biodiesel at different injection pressure

아서 완전한 곡선을 그리는 것은 디젤 분무와 유사한 결과를 나타내었다.

동일한 분사압력 조건에서 디젤과 바이오디젤을 비교하였을 때 바이오디젤의 분무도달거리는 전체 진행시간에서 길게 형성되는 경향을 보였으며 이는 높은 점도로 인해 분열빈도가 작아지고 입자의 크기가 디젤보다 커질 뿐 아니라 밀도가 높은 바이오디젤의 운동에너지가 커지기 때문인 것으로 생각된다⁽¹¹⁾. 또한, 분사압력이 120 MPa로 증가할수록 바이오디젤의 분무 미립화가 촉진되어 디젤과의 분무도달거리 차이가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 디젤과 바이오디젤의 분사압력에 따른 분무

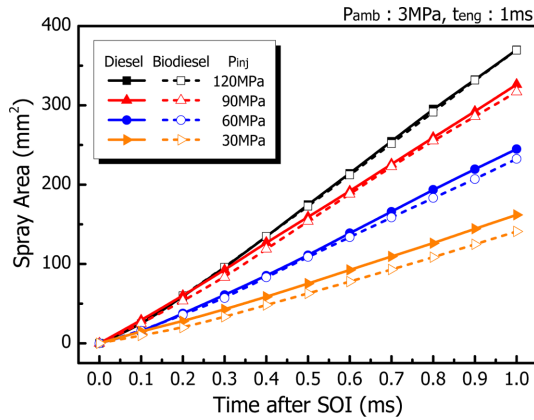


Fig. 6 Comparison of the spray area between diesel and WCO biodiesel at different injection pressure

각을 비교하였으며 디젤과 바이오디젤 모두 분사압력이 커질수록 분무각이 작아지는 경향을 나타내었다. 분사압력이 증가하게 되면 주위 기체와 상대속도가 증가하게 되어 연료와 분위기 가스와의 혼합이 활발하게 이루어져 분무각의 감소율이 커지기 때문이다⁽¹²⁾. 디젤과 바이오디젤을 비교하였을 때에는 분무도달거리 분석에서 언급한 바와 같이 미립화 특성이 좋지 않은 바이오디젤은 직진성이 증가하여 분무각이 작게 측정되었으며 분사압력이 높아질수록 그 차이는 감소하였다⁽¹³⁾.

Fig. 6은 가시화 이미지에 나타난 분무형상의 외곽선을 따라 그린 전체 면적을 픽셀수로 계산하여 나타낸 분무면적을 나타내었다⁽¹⁴⁾. 분무면적이 클수록 연료와 공기 사이의 혼합이 활발하게 이루어지고 있는 것이므로 연소특성 및 연료가 농후한 영역에서 발생하는 배기 배출물의 생성원인을 분석하기 위한 중요한 변수로 사용될 수 있다. 분무면적은 분사압력 증가에 따라 미립화와 기화 특성이 개선되어 증가되는 경향을 나타내었으며, 점도가 높은 바이오디젤이 전체 분사압력조건에서 작은 분무면적을 형성하였다. 가시화 이미지, 분무도달거리와 분무각 분석 결과에서와 마찬가지로 고압 영역으로 갈수록 미립화 특성이 개선되어 디젤과의 차이는 현저하게 줄어들었고, 120 MPa 분사압력에서는 디젤과 거의 일치하는 결과를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구는 폐식용유 바이오디젤과 디젤의 분무특성을

다양한 분사압력에서 비교, 분석하였으며 실험결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 동일한 통전시간을 주었을 경우, 바이오디젤은 점도가 높기 때문에 통전시간이 짧거나 분사압력이 낮을 때 연료의 유동이 방해되어 분사량이 낮아지며 통전시간이 길고 분사압력이 높을수록 점도의 영향보다 밀도가 높은 바이오디젤의 운동량 증가로 인해 분사량이 증가되는 결과를 확인하였다.

2) 분무의 발달은 분사초기에 급격히 이루어지며 연료분사압력이 증가할수록 미립화, 기화특성이 개선되기 때문에 분무면적, 분무도달거리가 증가하여 공기와의 혼합을 촉진시킨다.

3) 낮은 압력에서 바이오디젤이 점도가 높기 때문에 연료의 분열보다 직진성이 증가하게 되어 분무도달거리가 길고 분무각, 분무면적이 낮은 결과를 나타내었지만 분사 압력이 높아질수록 디젤과의 차이가 줄어드는 결과를 나타내었다.

후 기

본 연구는 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업의 지원(No. NRF-2012R1A1A22007015 및 NRF-2011-0025295)으로 수행한 연구결과이며, 연구를 지원하여 주신 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Roger O. McClellan, Thomas W. Hesterberg, John C. Wall, "Evaluation of carcinogenic hazard of diesel engine exhaust needs to consider revolutionary changes in diesel technology", *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, Vol. 63, No. 2, 2012, pp. 225~258.
- (2) S. H. Park and C. S. Lee, "Combustion performance and emission reduction characteristics of automotive DME engine system", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 39, 2013, pp. 147~168.
- (3) S. H. Park, J. P. Cha, H. J. Kim ad C. S. Lee, "Effect of early injection strategy on spray atomization and emission reduction characteristics in bioethanol blended fueled engine", *Energy*, Vol. 39, 2012, pp. 375~387.
- (4) S. H. Yoon, J. P. Cha, J. W. Hwang, N. W. Sung and C. S. Lee "Combustion and particulate emissions charac-

- teristics in a CI engine fueled with biodiesel-bioethanol blended fuel”, Transactions of KSAE, Vol. 17, No. 6, 2009, pp. 1~7.
- (5) Evangelos, G. Giakoumis “A statistical investigation of biodiesel effects on regulated exhaust emissions during transient cycles”, Applied Energy. Vol. 98, 2012, pp. 273~291.
- (6) Jinlin Xue, Tony E. Grift and Alan C. Hansen, “Effect of biodiesel on engine performance and emissions.” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, 2011, pp. 1098~1116.
- (7) Fujia Wu, Jianxin Wang, Wenmiao Chen, Shijin Shuai, “A study on emission performance of a diesel engine fueled with five typical methyl ester biodiesels”, Atmospheric Environment, Vol. 43, 2009, pp. 1481~1485.
- (8) J. Sheehan, V. Camobreco, J. Duffield, M. Graboski and H. Shapouri, “Life cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus”, NREL/SR-580-24089 UC Category 1503, 1998.
- (9) Eric D. Larson, “A review of life-cycle analysis studies on Liquid biofuel systems for the transport sector”, Energy for Sustainable Development, Vol. 10, No. 2, 2006, pp. 109~126.
- (10) P. McCarthy, M. G. Tasul and S. Moazzem, “Analysis and comparison of performance and emissions of an internal combustion engine fuelled with petroleum diesel and different bio-diesels”, Fuel, Vol. 90, 2011, pp. 2147~2157.
- (11) J. Deng, Chunwang Li, Zongjie Hu, Zhijun Wu, Liguang Li, “Spray characteristics of biodiesel and diesel fuels under high injection pressure with a common rail system”, SAE technical paper, SAE 2010-01-2268, 2010.
- (12) S. H. Park, H. K. Suh, H. J. Kim and C. S. Lee, “Spray characteristics of biodiesel fuel by blending other fuels in a common rail injection system”, KSAE08-S0075, 2008, pp. 456~461.
- (13) Luka Lesnik, Blaz Vajda, Zoran Zunic, Leopold Skerget, Breda Kegl, “The influence of biodiesel fuel on injection characteristics, diesel engine performance, and emission formation”, Applied Energy, Vol. 111, 2013, pp. 558~571.
- (13) S. H. Park, H. J. Kim and C. S. Lee, Study on the diemethyl ether spray characteristics according to the diesel blending ratio and the variations in the ambient pressure, energizing duration, and fuel temperature, Energy & Fuels, Vol. 25, 2011, pp. 1772~1780.