

폐식용유 바이오디젤을 이용한 압축착화엔진의 저부하 영역에서 연료의 분사 압력과 분사 시기가 연소 및 배기특성에 미치는 영향

황 준 식* · 정 용 진* · 배 충 식*

Effect of Fuel Injection Pressure and Timing on the Combustion and Emission Characteristics in a Compression Ignition Engine under Low Load Condition Fueled with Waste Cooking Oil Biodiesel

Joonsik Hwang*, Yongjin Jung*, Choongsik Bae*

ABSTRACT

In this study, the combustion and emission characteristics of waste cooking oil biodiesel was investigated. The fuel was injected from 5 CAD (Crank angle degree) ATDC (After top dead center) to -60 CAD ATDC by 5 CAD with 800 bar and 1600 bar injection pressure. Generally, the hydrocarbon, carbon monoxide and smoke emissions from biodiesel fuel were lower than the emission levels of diesel fuel. However, the emission characteristic of biodiesel got worse than diesel when the fuel was injected earlier than -30 CAD ATDC. NO_x emission from biodeisel was higher than diesel fuel in all experimental conditions.

Key Words : Waste cooking oil biodiesel, Oxygenated fuel, Atomization, Ignition delay

최근 석유자원의 고갈 및 지구 온난화 등의 환경 문제로 인하여 열효율이 높은 압축착화엔진에 대하여 관심이 높아지고 있다 [1]. 더불어 압축착화엔진에 적용할 수 있는 대체연료에 대해서도 많은 연구가 진행 중이다. 특히, 경유와 물성치가 매우 비슷한 바이오디젤이 압축착화엔진의 대체연료로써 큰 각광을 받고 있다 [2].

바이오디젤은 연료 내에 산소성분을 포함하고 있는 연료로써 불완전연소로 인하여 발생하는 배기 물질을 저감할 수 있는 장점이 있기 때문에 현재 여러 나라에서 대두유, 유채유, 팜유 등 다양한 원료로부터 바이오디젤을 만들어 경유와 섞어서 사용하고 있다 [3]. 하지만 바이오디젤 원료의 지속적인 원가 상승으로 인하여 경제적 부담이 높아지고 있는 실정이다. 따라서 최근에는 아파트 단지나 음식점, 학교 등의 기관에서 사용한 뒤에 대부분 버려지는 폐식용유를 회수 및 정제하여 바이오디젤로 생산하는 사업이 활성화 되고 있다.

기존의 선행연구들이 유채유나 대두유에 집중되어 있는 반면에 본 연구에서는 폐식용유를 원료로 한 바이오디젤을 이용하여 디젤연료의 대체연료로써의 가능성을 살펴보고 다양한 연료 분사압력과

분사시기가 연소 및 배기특성에 미치는 영향을 알아보았다.

본 실험에서는 배기량이 980cc이며 압축비가 17.4인 단기통 직접분사식 디젤엔진을 사용하였고 대상엔진의 아이들 엔진회전수(idle rpm)인 800rpm에서 실험이 진행되었다. 연료 분사장치는 커먼레일 시스템(Common-rail system, Bosch)을 사용하였다. 연료 분사기는 분사각 150°, 분사공이 8개인 인젝터를 사용하였다. 연료의 분사압력과 분사량, 그리고 분사 시기는 전용 분사기 제어장치(peak and hold driver, Zenobalti)와 분사 압력 조절장치(PCV driver, Zenobalti)를 사용하여 제어하였다. 대상 엔진의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Engine specifications

Item	Specification
No. of cylinder	Single
Injection type	Direct injection
Valve per cylinder	4
Bore X Stroke [mm]	100 X 125
Injection system	Common-rail
Compression ratio	17.4 : 1
Displacement [cc]	980

연소실 내의 압력은 압전 방식의 압력 센서(Type 6052C, Kistler)를 이용하여 0.2 CAD(Crank an

* 한국과학기술원 기계공학과
† 연락처, csbae@kaist.ac.kr
TEL : (042)350-3044
FAX : (042)350-5023

gle degree) 간격으로 취득하였고, 배기 배출물은 배기가스 분석 장치(Horiba, MEXA-1500d mode 1)와 스모크 미터(AVL, 415S model)를 사용하여 분석하였다.

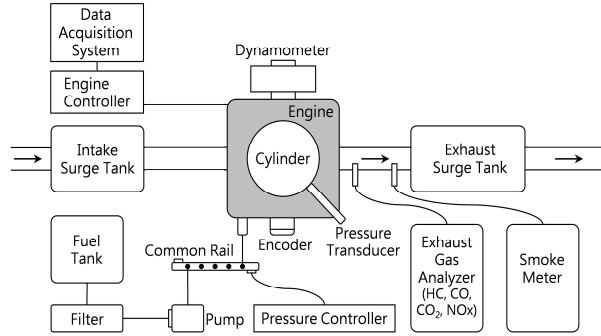


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

본 연구에서는 연료의 분사 압력을 800 bar와 1600 bar로 분사하여 분사 압력에 대한 연소 및 배기특성을 살펴보았다. 연료의 분사량은 디젤의 경우 20 mg/cycle를 분사하였고 사이클당 실린더내로 주입되는 저위 발열량을 동일하게 하기 위하여 바이오디젤은 22.1 mg/cycle를 분사하였다.

연료의 분사 시기는 5 CAD ATDC부터 -60 CAD ATDC까지 5 CAD단위로 변경하며 실험을 진행하였다. 실험 조건은 Table 2와 같고 실험에서 사용한 연료의 물성치는 Table 3과 같다.

Table 2 Experiment conditions

Condition	Diesel	Biodiesel
Engine speed	800 RPM	
Injection pressure	800, 1600 bar	
Injection timing	5-60 CAD ATDC	
Injection quantity [mg/cycle]	20	22.1
Fuel temperature	40 °C	
Coolant temperature	80 °C	

Table 3 Fuel Properties

Item	Diesel	Biodiesel
Cetane number	50.9	51.3
Density (15°C) [kg/m ³]	820	878
kinematic viscosity (40°C) [mm ² /s]	2.187	4.4
Flash point [°C]	55.5	190
LHV [MJ/kg]	42.98	38.85

실험 결과 중 대표적인 조건에 대하여 압력선도

와 열방출률 곡선을 살펴보면 Fig. 2와 같다.

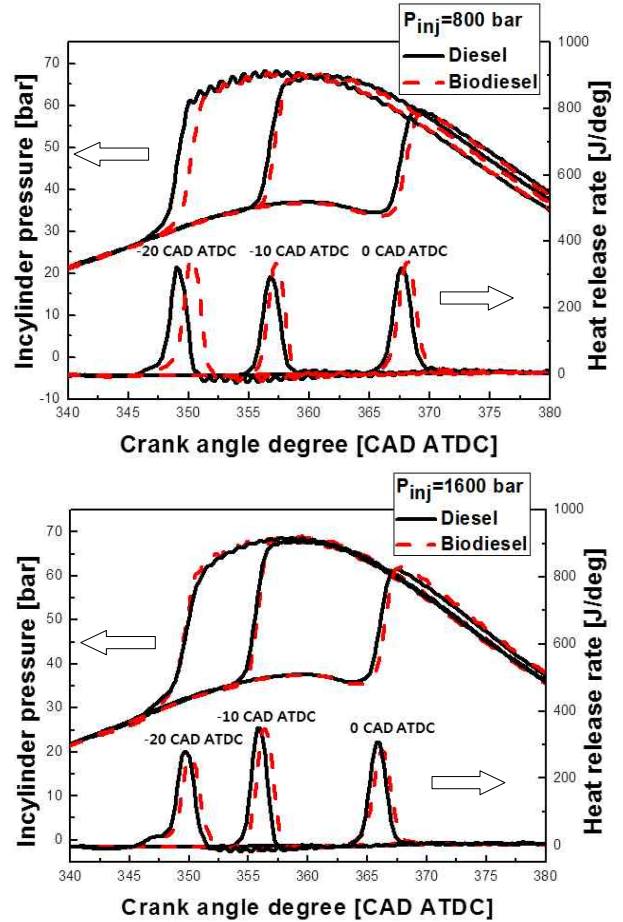


Fig. 2 In-cylinder pressure trace and heat release rate with different injection pressure and timing

분사압 800bar의 압력선도 결과를 보면 바이오디젤을 사용하였을 때, 연소의 시작이 디젤의 경우보다 늦은 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 연료가 분사된 후에 분무의 미립화(atomization)가 활발하게 일어나지 않으면 분사된 연료의 입자는 공기와 활발하게 혼합되지 못하고 착화지연(ignition delay)을 일으키게 된다. 바이오디젤이 디젤보다 높은 세탄가를 가짐에도 불구하고 이러한 결과가 나온 이유는 디젤연료 대비 높은 밀도와 점성을 가지고 있는 바이오디젤이 디젤연료보다 연료의 미립화 측면에서 불리하기 때문이라고 판단된다[4]. 1600bar의 압력선도 결과를 보면, 800bar의 경우보다 바이오디젤의 연소 시작이 진각된 것을 확인할 수 있는데 이는, 고압으로 연료를 분사한 경우 바이오디젤의 미립화 측면에서 보완이 되기 때문에 연료와 공기의 혼합이 활발하게 일어나 연소지연이 짧아졌기 때문에 나온 결과로 판단된다.

또한, 800bar 분사압력의 열방출률 곡선을 보면

바이오디젤의 경우가 디젤연료에 비해 peak가 약간 더 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 디젤연료보다 상대적으로 착화지연이 긴 바이오 디젤의 경우에서 연료와 공기의 혼합이 강화되고 이로 인하여 예혼합 연소(premixed combustion)의 비중이 커졌기 때문이라 판단된다.

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6은 실험 조건에 따른 배기 배출물 결과를 나타낸다.

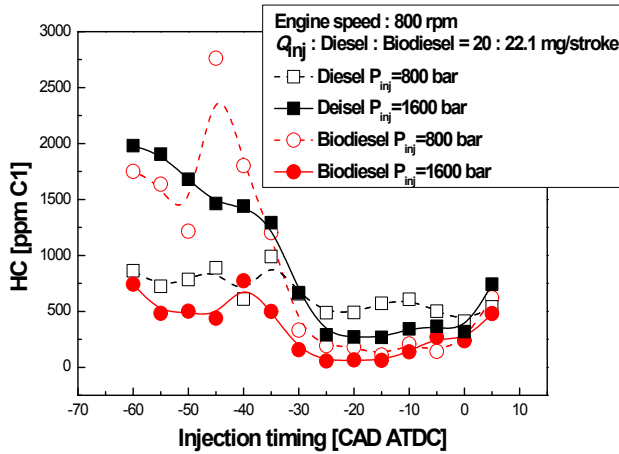


Fig. 3 Hydrocarbon(HC) emission result with different fuel injection pressure and timing.

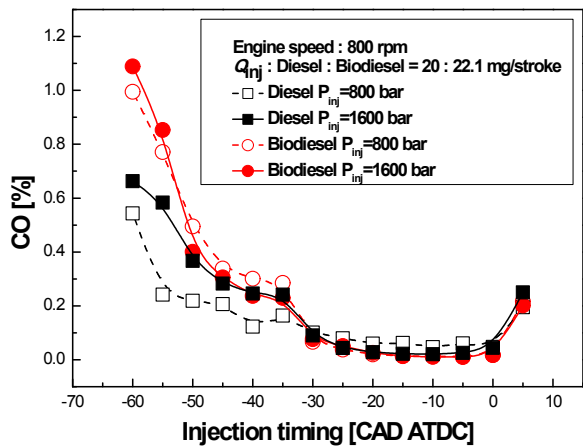


Fig. 4 Carbon monoxide(CO) emission result with different fuel injection pressure and timing.

바이오디젤의 경우, 탄화수소와 일산화탄소의 배출량은 연료의 분사 시기가 -30 CAD ATDC 보다 지각될수록 적음을 확인할 수 있다. 일반적으로 바이오디젤은 합산소 연료라는 특징 때문에 불완전 연소로 발생하는 미연 탄화수소나 일산화탄소의 산화를 촉진시키므로 배출이 줄어든다고 알려져 있는데 본 실험결과에서도 선행연구들과 비슷한 경향성을 확인할 수 있었다 [5]. 하지만 분사

시기가 진각 되면서 바이오디젤의 미연탄화 수소와 일산화탄소의 배출이 급격하게 증가 하였다. 이는 실린더 내의 분사 압력과 온도가 낮은 분위기에서 연료가 분사되면 분무의 미립화가 활발하게 일어나지 못하고 피스톤 보울이나 벽면에 묻으면서 불완전 연소가 촉진되게 되는데, 미립화 측면에서 불리한 바이오디젤의 경우에 적심현상이 더 크게 일어나 배출량이 증가되었다고 판단된다.

분사압력이 1600 bar인 결과를 살펴보면 미연 탄화수소의 경우 바이오디젤의 배출량이 디젤의 경우보다 더 적은 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바이오디젤의 합산소 연료라는 특징과 연료의 미립화 측면에서 보완이 되어 불완전 연소로 인해 발생하는 탄화수소와 일산화탄소의 배출이 줄어들었다고 판단된다.

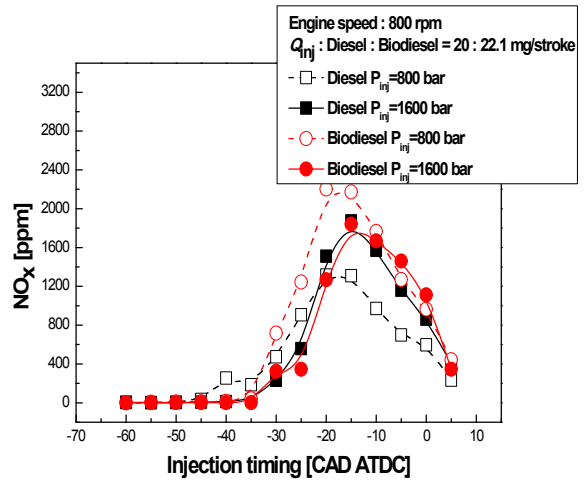


Fig. 5 Nitrogen oxides emission result with different fuel injection pressure and timing.

질소산화물의 결과를 보면 대부분의 조건에서 바이오디젤의 질소산화물 배출이 디젤연료의 경우보다 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 바이오디젤이 포함하고 있는 산소성분 때문에 연소과정 중에 질소와 결합할 수 있는 가능성이 크고 활발한 연소가 일어나 실린더 내부 온도가 높아져서 질소산화물 배출이 증가했다고 판단된다 [6].

배연의 배출특성 결과를 보면 앞서 설명한 탄화수소와 일산화탄소의 배출의 경향과 비슷함을 알 수 있다. 분사 시기가 -30 CAD ATDC 보다 지각된 경우에 바이오디젤의 입자상물질의 배출이 디젤의 경우보다 약간 낮은 것을 확인할 수 있다. 이것은 바이오디젤이 포함하고 있는 산소성분이 연료가 농후한 지점에서 산소농도를 증가시켜 입자상 물질의 배출을 낮추었기 때문이다[7]. 또한, 분사시기가 진각된 경우 앞서 언급하였듯이 낮은 실린더 내부 분위기 압력과 온도로 인하여 연료의

피스톤 보울이나 벽면의 적심현상이 일어나고 연료가 농후하게 분포하고 있는 지점이 생겨남으로 입자상물질의 배출량이 증가하였다고 판단된다.

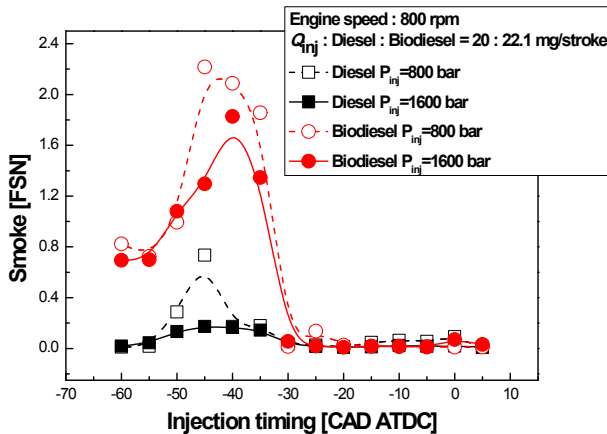


Fig. 6 Smoke result with different fuel injection pressure and timing.

본 연구에서는 폐식용유 바이오디젤을 이용하여 대형 압축착화 엔진에서 연소 및 배기특성을 살펴 보았다. 폐식용유 바이오디젤은 연소 측면에서 디젤과 거의 비슷한 결과를 보였으나 실험에서 사용한 바이오디젤과 디젤의 세탄가의 차이가 미미하였으므로 연료의 분무특성이 연소에 더 큰 영향을 끼쳐 바이오디젤의 연소의 시작이 디젤의 연소시작점보다 다소 지각된 특징을 나타냈다고 사료된다. 배기특성 결과에서는 바이오디젤에 포함되어 있는 산소성분 때문에 불완전 연소로 인해 발생하는 탄화수소와 일산화탄소 그리고 입자상 물질의 배출이 디젤의 경우보다 낮음을 확인하였으나 질소산화물의 경우 배출량이 더 컸다. 또한, 분사시기가 -30 CAD ATDC 이전으로 진각된 경우에는 바이오디젤 연료의 좋지 않은 분무 특성으로 인하여 배기배출물이 증가함을 확인하였으나 고압 분사를 통하여 진각된 분사시기에서도 디젤의 경우와 비슷한 수준으로 배기배출물 특성을 개선시킬 수 있는 가능성을 확인하였다.

후 기

연구는 지식경제부 지원 아래 산업원천기술개발사업의 하나로 수행되었으며, 연구를 위하여 물심양면으로 도움을 주신 (주)이맥바이오 임대제 대표이사님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

- [1] Tiegang Fang, Yuan-Chung Lin, Tien Mun Foong, Chia-fon Lee, "Biodiesel combustion in an optical HSDI diesel engine under low load premixed combustion conditions", Fuel 88 (2009) 2154-2162
- [2] S.Jaichandar, K.Annamalai, "The status of biodiesel as an alternative fuel for diesel engine-an overview", Journal of sustainable energy&environment 2 (2011)71-75
- [3] Daisuke Kawano, Hajume Ishii, Yuichi Goto, Akira Noda, Yuzo Aoyagi, "Application of biodiesel fuel to modern diesel engine", SAE Technical Paper 2006-01-0233
- [4] Xiangang Wang, Zuohua Huang, Olawole Abiola Kuti, Wu Zhang, Keiya Nishida, "Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure", International Journal of Heat and Fluid Flow 31 (2010) 659-666
- [5] S.S. Gill, A. Tsolakis, J.M. Herreros, A.P.E. York, "Diesel emissions improvements through the use of biodiesel or oxygenated blending components", Fuel 95 (2012) 578-586
- [6] Matthias K. Veltman, Prashanth K. Karra, Song-Charng Kong, "Effects of biodiesel blends on emissions in low temperature diesel combustion", SAE Technical Paper 2009-01-0485
- [7] Xusheng Zhang, Haibin Wang, Liguang Li, Zhijun Wu, Zongjie Hu, Hui Zhao, "Characteristics of output performances and emissions of diesel engine employed common rail fueled with biodiesel blends from wasted cookong oil", SAE Technical Paper 2008-01-1833