저 커먼레일 압력에서 비에스테르화 바이오 디젤유의 연소특성

Combustion Characteristic of Non-esterified Bio-diesel Oil at Lower Common Rail Pressure

이상득* · 고대권** · 정석호***†

Sang-Deuk Lee*, Dae-Kwon Koh** and Suk-Ho Jung***†

(접수일 : 2013년 05월 27일, 수정일 : 2013년 09월 12일, 채택확정 : 2013년 09월 13일)

Abstract: Esterified bio-diesel oil is normally used as blend oil of 3% that and 97% diesel fuel in Korea. Since specifics of it is similar to that of diesel fuel, availability of non-esterified bio-diesel oil that has a lower expenses of manufacturing is worthy of attention. However, bio-diesel oil has a demerit which it emits typically more NO_x emission than diesel fuel. In this study, characteristic tests using blending oil with 95% gas oil and 5% bio-diesel oil were achieved at lower common rail pressure in order to improve this demerit. It was noticed that non-esterified bio-diesel oil has more similar characteristics to diesel fuel than esterified bio-diesel oil and it emits more NO emission by fuel NO mechanism.

Key Words : Esterified, Non-esterified, Lower Common Rail Pressure, Electric Control System, Diesel Engine

1. 서 론

기후변화협약에서는 온실가스 배출 저감 정책 도입을 시도하고 있으나 각 국의 이해관계가 풀리지 않아 법적 효용을 지니는 정책은 시행되지 않고 있다. 그러나 선박과 관련해서는 IMO에서 온실가스 배출을 줄이기 위해서 MEPC 62차 회의에서 신조선 에너지 효율 지수(EEDI)와 선박 에너지 효율 관리 계획(SEEMP)을 만들어 2013년 1월 1일부터 시행되었다¹⁾. 이처럼 탄소 배출에 관심이 증대되어감에 따라 열효율이 높은 디젤기관이 가솔린 기관에 비해 이산화탄소의 배출량이 적으므로 인

해 디젤기관이 점차 자동차의 영역까지 확대 진출하고 있다. 디젤기관에는 탄소 중립(carbon neutral)이라는 관점에서 이점을 가지는 바이오 디젤유에 관한 연구²⁻⁴⁾가 많이 진행되었으며 사용량 또한 증가되어 가고 있다. 특히 바이오 디젤유는 2009년 우리나라 전체 디젤유 사용량의 1.5%가 될 정도로 많이 사용되고 있고 중장기적으로는 경유(GO:gas oil)에 5%까지 혼합하여 사용할 계획이다⁵⁾. 현재 상용되는 바이오 디젤유는 식물유를 메탄올과 반응시켜 에스테르화한 TVO(transesterified vegetable oil)가 주류인데 이는 에스테르화 공정 때문에 제조 원가가 오르는 단점을 지니게 된다. 이에 비해

*** 정석호(교신저자) : 부경대학교 기계시스템공학과
E-mail : sukhjung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6198

* 이상득 : 한국해양대학교 운항훈련원

** 고대권 : 부경대학교 기계시스템공학과

†† Suk-Ho Jung(corresponding author) : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong University.
E-mail : sukhjung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6198

* Sang-Deuk Lee : Sea training center

** Dae-Kwon Koh : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong University.

폐식용유(WSO:waste soybean oil)를 단순히 정제 후 GO와 혼합하여 디젤기관에 사용해서 경제적 측면의 장점을 부각시킨 연구가 진행되었다⁶⁻⁸⁾. 그러나 이와 같은 비에스테르화 바이오 디젤유에 관한 연구들은 캠타입의 디젤 엔진에서 진행된 것으로 현재 대부분의 디젤엔진이 전자 제어 분사식을 채택하고 있기 때문에 전자 제어 분사식에서의 연구결과가 필요하다. 한편, 일반적으로 바이오 디젤유는 경유에 비해 질소산화물(NOx)이 많이 배출되는 단점을 가지고 있는데 낮은 분사압력에서는 경유와 비슷한 NOx를 배출하는 결과⁹⁾로부터 본 연구에서는 TVO를 비롯하여 비에스테르화 바이오 디젤유로 WSO와 대두유(SO: soybean oil)를 경유에 5%씩 혼합한 혼합유를 실시간 전자 제어 시스템을 구축한 디젤기관에 적용하여 저 커먼레일 압력에서의 연소 특성을 비교 검토하였다.

Fig. 1 Schematic diagram of experiment

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 연료

Fig. 1에 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 실험에 사용한 기관은 4기통 전자제어 분사식 과급 디젤기관으로, 현대자동차(주) 제작의 D4EA이며 Table 1에 기관사양에 대해서 상세하게 나타내었다. Fig. 2에 나타난 것처럼 MOTEC사의 M800이

Table 1 Engine specifications

Description	Specification
Model	HYUNDAI D4EA
Engine type	Water-cooled 4 stroke diesel engine
Number of cylinders	4
Piston displacement	1991 cc
Bore × Stroke	83mm × 92mm
Maximum power	84/4000 kW/rpm
Compression ratio	17.7

Fig. 2 Engine control unit

Table 2 Components of tested fuels

Components	GO	TVO5	SO5	WSO5
Carbon %wt.	84.73	84.52	85.24	84.43
Hydrogen %wt.	14.21	13.65	13.62	14.16
Nitrogen %wt.	0.46	1.20	0.68	0.77
Oxygen %wt.	0.59	0.63	0.46	0.64

Table 3 Ignition point and maximum combustion pressure

Load (kW)	8.8	17.5						26.3
T _{inj} (°BTDC)	10	5	10			15	10	
P _{cr} (MPa)	40		30	40	50	40		
GO	IP	1.0	5.2	0.8	0.2	-1.0	-4.5	-1.8
	MCP	50.7	47.1	49.6	54.8	58.2	65.9	65.5
TVO5	IP	0.6	4.9	1.0	0.0	-0.8	-4.6	-1.5
	MCP	49.9	44.5	47.3	54.7	56.3	65.4	63.8
SO5	IP	0.9	5.2	0.8	-0.2	-0.8	-4.2	-1.6
	MCP	49.2	44.4	47.6	53.9	55.9	64.7	63.5
WSO5	IP	0.3	5.0	0.6	-0.1	-1.2	-4.8	-2.0
	MCP	50.8	46.7	49.0	55.7	58.2	66.9	65.7

라는 ECU를 장착하여 컴퓨터의 제어 프로그램을 이용, 실시간으로 연료분사시기(Tinj) 및 커먼레일 압력(Pcr)을 제어하였다. 운전부하는 환웅(주) 제작의 와전류식 동력계 HE-130을 이용하여 조정하였다. 연소압력 측정은 키슬러사의 압력 센서 6052A를 사용하였고, 720p/r의 분해능을 가진 로터리 엔코더를 이용하여 크랭크 각 0.5° 간격으로 연소압력을 취득하였다. 배기 에미션은 Eurotron사 제작의 GreenLine MK2를 이용하여 3분간 측정된 데이터를 평균으로 나타내었다. 실험에 사용한 연료는 GO와 GO에 TVO, SO 및 WSO를 각각 5%의 체적비로 혼합한 TVO5, SO5, WSO5의 네 종류이다. Table 2에는 한국고분자연구소에 성분분석 의뢰한 결과를 나타내었다. 5%밖에 혼합되지 않았기 때문에 발열량에 영향을 미치는 탄소와 수소의 성분이 경유에 비해 큰 성분 변화는 없으나 GO와 WSO5, TVO5와 SO5가 서로 비슷한 수치를 나타내고 있다. 한편, TVO5에 포함된 질소의 비가 다른 연료에 비해 약간 많은 것이 특징이다.

2.2 실험방법

실험은 기관 회전수 2000rpm에서 각 연료를 이용하여 분사시기(Tinj), 커먼레일 압력(Pcr), 부하(load)를 변화시키며 실행하였다. 분사시기에 있어서는 TDC 전 15°에서 5°씩 두 번 지연시켜 15°, 10°, 5°BTDC로 하였고, 부하의 변동은 8.7, 17.5, 26.3kW로 주었다. 그리고 커먼레일 압력은 서론에서 설명한 바와 같이 저압영역인 30, 40, 50MPa로 하였다. 각 실험은 10분의 안정 기간을 가진 뒤 연소압력, 연료 소비량, 배기가스 데이터를 측정 후 저장하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분사시기에 따른 연소특성

분사시기를 5°, 10°, 15°BTDC로 조절하여 실험한 각 연료의 연소이력을 Fig. 3에 나타내었다. 그래프 내에서 위쪽의 선도가 연소압력(P)을, 아래쪽은 열발생률(HRR)을 나타내고 있다. 짧은 점선은

TVO5, 중간 길이의 점선은 WSO5, 긴 점선은 SO5, 실선은 GO를 각각 나타낸다. 압력 및 열발생을 곡선에 있어서 WSO5가 GO와 거의 비슷한 특성을 나타내는 반면 TVO5와 SO5는 최대연소압력이 약간 낮으면서 연소기간이 길어지는 형태를

(a) Tinj:5°BTDC

(b) Tinj:10°BTDC

(c) Tinj:15°BTDC

Fig. 3 Change in combustion history due to injection timing (load:17.5kW, Pcr:40MPa)

(a) Brake specific energy consumption

(b) CO

(c) NOx

Fig. 4 Change in fuel consumption, CO and NOx emissions due to injection timing (load:17.5kW, Pcr:40MPa)

나타내고 있다. 즉, 다른 연료(GO와 WSO5)에 비해 예혼합 연소량이 약간 적고 확산 연소량이 많아지는 형태를 나타내는데, 이는 바이오 디젤유는 원재료에 따라 연료의 밀도, 동점도 및 산화안정도에 영향을 미치는 지방산 메틸 에스테르의

(a) Pcr:30MPa

(b) Pcr:40MPa

(c) Pcr:50MPa

Fig. 5 Change in combustion history due to common rail pressure in CRDI diesel engine with diesel oils blended bio diesel oils (load:17.5kW, Tinj:10°BTDC)

성분 및 함량이 달라지기 때문¹⁰⁾이라고 사료된다. Table 3에 나타낸착화점(IP:ignition point)은 예혼합 연소기의 열발생률에 대한 점선과 세로축 0점과의 교점으로 정의하였고, MCP(maximum combustion

(a) Brake specific energy consumption

(b) CO

(c) NOx

Fig. 6 Change in fuel consumption, CO and NOx emissions due to common rail pressure in CRDI diesel engine with diesel oils blended bio diesel oils (load:17.5kW, T_{inj} :10°BTDC)

pressure) 는 최대연소압력을 나타낸다. 모든 연료의 착화점은 Table 3 에 나타난 것처럼 분사시기가 5°씩 빨라짐에 따라약 5°정도 빨라지고 있으며 연료의 종류에 상관없이 거의 일정하다. 최대연소

압력과 착화점 또한 WSO5와 GO, SO5와 TVO5가 거의 비슷한 거동을 나타내고 있다. Fig. 4에는 분사시기에 따른 정미 에너지 소비율(a), CO(b), NOx(c)의변화를 각각 나타내었다. 마름모의 짧은 점선이 TVO5, 사각형의 중간 점선이 SO5, 삼각형의 긴 점선이 WSO5, 원형의 직선이 GO를 각각 나타낸다. 분사시기를 빨리할수록 연료의 종류에 관계없이 정미 에너지 소비율과 CO는 감소하고 NOx는 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 정미 에너지 소비율과 CO에 있어서는 TVO5, SO5, WSO5, GO의 순으로 작고 NOx의 경우는 WSO5, GO, TVO5, SO5의 순으로 크다. 일반적으로 바이오 디젤유가 경유에 비해 NOx가 많이 배출되는 특징을 가지고 있으나 여기서는 40MPa의 저 커먼레일 압력 때문에 점도가 높은 바이오디젤유의 미립화가 늦어져 예혼합 연소량이 작아지기 때문에 연소실 내의 온도가 상대적으로 낮아지므로 NOx가 적게 배출되는 것으로 사료된다.

3.2 커먼레일 압력에 따른 연소특성

커먼레일 압력을 30, 40, 50MPa로 변화시킨 연소이력을 Fig. 5에 나타내었다. 세 연료 모두 커먼레일 압력이 커질수록 초기 분사량이 많아지고 무화가 빨리 진행되기 때문에 Table 3에 나타난 것처럼 착화시기가 약 1°씩 빨라지며 예혼합 연소량이 많아지는 특성을 나타내고 있다. 그리고 분사시기에서의 특성과 마찬가지로 WSO5와 GO는 거의 비슷하고, SO5와 TVO5는 WSO5와 GO에 비해 예혼합 연소량이 적고 확산 연소량이 많아지는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 6에는 커먼레일 압력 변화에 따른 정미 에너지 소비율, CO, NOx의 변화를 각각 나타내었다. 정미 에너지 소비율은 커먼레일 압력을 30 MPa에서 40MPa로 올렸을 때는 약간 감소하지만 40MPa에서 50MPa로 올렸을 때는 거의 차이가 없다. 또 SO5와 TVO5의 정미 에너지 소비율이 WSO5와 GO에 비해 0.5-0.2MJ/kWh 정도 높게 나타난다. CO의 경우도 WSO5와 GO가 SO5와 TVO5에 비해 30-50ppm 정도 낮게 나타나며 두 연료끼리는 거의 같은 특성을 나타내고 있다. NOx의 경우는 반대로 TVO5가 WSO5

와 GO에 비해 20-30ppm 낮고 SO5는 TVO5보다 40-60ppm 정도 더 낮게 나타나고 있다.

3.3 운전 부하에 따른 연소특성

네 연료의 운전 부하에 따른 연소이력을 Fig. 7

(a) load:8.7kW

(b) load:17.5kW

(c) load:26.3kW

Fig. 7 Change in combustion history due to engine load (Pcr:40MPa, Tinj:10°BTDC)

에 나타내었다. Fig. 8 (a)의 정미 에너지 소비율에서 알 수 있듯이 8.7kW의 부하에서는 네 연료가 거의 비슷하게 예혼합 연소만 나타나기 때문에 비슷한 값을 나타낸다. 그러나 부하가 증가할수록

(a) Brake specific energy consumption

(b) CO

(c) NOx

Fig. 8 Change in fuel consumption, CO and NOx emissions due to engine load (Pcr:40MPa, Tinj:10°BTDC)

SO5와 TVO5는 다른 연료에 비해 최고압력이 떨어지면서 확산 연소가 많아져 정미 에너지 소비율과 CO의 양이 많아지고 반대로 NOx의 양은 감소하는 추세를 나타낸다. 그런데 앞선 두 조건에서와 마찬가지로 TVO5가 SO5와 달리 WSO5와 GO의 NOx 값에 가까운 이유는 Table 2에서 나타난 연료 중의 질소성분이 원인인 것으로 고려된다. 환언하면 TVO5의 경우에는 FUEL NO가 원인으로 SO5에 비해 많은 NOx가 발생된다. 또한 모든 결과로부터 TVO5가 SO5와 WSO5에 비해 좋은 특성을 나타내지 않는다는 것을 알았다.

4. 결 론

에스테르화 바이오 디젤유 및 비에스테르화 바이오 디젤유를 GO에 5% 혼합하여 전자제어식 디젤기관에 적용하여 분사시기, 커먼레일 압력 및 부하 변화의 실험을 실행하였다. 그 결과를 나타내면 다음과 같다.

- (1) 8.7kW의 부하를 제외한 모든 영역에서 SO5와 TVO5는 WSO5와 GO에 비해 예혼합 연소량이 적고 확산 연소량이 많은 경향을 나타낸다.
- (2) 연소특성에 있어서 SO5와 TVO5, WSO5와 GO는 서로 비슷한 특성을 나타내었다.
- (3) TVO5가 SO5보다 NOx 배출량이 많은 이유는 FUEL NO에 기인한 것으로 고려된다.
- (4) 에스테르화 바이오 디젤유가 다른 비에스테르화 바이오 디젤유에 비해 기관 성능에 미치는 영향을 고려할 때 경제적인 측면뿐만 아니라 성능면에서도 이득이 없었다.

사 사

이 논문은 2012학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK(CD)-2012-0493)

참고문헌

1. IMO news magazine editors, 2011, "Fisrt-ever mandatory energy-efficiency measures for industry

- sector adopted", IMO NEWS, ISSUE 3, p. 7.
2. Y. T. Oh, 1998, "A Study on The Usability of Used Vegetable Oil as a Diesel Substitute in Diesel Engine", Transactions of the KSME B, Vol. 22, No. 4, pp. 481-488.
3. S. Jung et al., 2010, "Enhancement of NOx-PM Trade- off in a Diesel Engine Adopting Bio-ethanol and EGR", IJAT, Vol. 11, No. 5, pp. 611-616.
4. S. H. Choi and Y. T. Oh, 2005, "Experimental Study on Emission Characteristics and Analysis by Various Oxygenated Fuels in a D.I. Diesel Engine", IJAT, Vol. 6, No. 3, pp. 197-203.
5. G. Daiko industry research, 2011, Trend of Technology Market in Bio Fuel and Friendly Environmental Vehicle", BIB, Seoul, p. 85.
6. S. H. Jung et al., 2004, "Analysis of Combustion Characteristics of Bio Diesel Fuel in a DI Diesel Engine Using PXI and LabVIEW", KSPSE, Vol. 8, No. 24, pp. 18-23.
7. M. S. Kim et al., 2006, "A Study on Droplet Distribution of Bio Diesel Fuels Using Immersion Sampling Method", KSPSE, Vol. 10, No. 4, pp. 5-10.
8. Y. T. Oh et al., 2010, "The Application of Non-esterified Biodiesel in an Indirect Injection Diesel Engine", KSAE Annual Conference 2010, pp. 1015-1020.
9. J. D. Kim et al., 2011, "An Experimental Study on Spray Characteristics of Diesel and Bio-diesel Fuel", KSME, Vol. 35, No. 1, pp. 53-59.
10. Y. K. Lim et al., 2009, "Determination of Fuel Properties for Blended Biodiesel from Various Vegetable Oils", Korean Chem. Eng. Res., Vol. 47, No. 2, pp. 237-242.