



안정화시키는 것을 목적으로 설립되어 선진국과 개도국 간의 이해관계에 입각하여 온실가스 배출 저감 정책 도입을 시도하고 있으나 각국의 이해관계가 풀리지 않아 법적 효력을 지니는 정책은 시행되지 않고 있다. 현재로서는 교토의정서에 채택되어 있는 교토 메카니즘이 가장 가능성 있는 조약으로 여겨지고 있다. 이 중의 하나가 탄소배출권 거래제인데 현재 우리나라에서도 이와 관련한 법적 근거로 녹색성장 기본 법안이 마련되어 시행될 가능성이 크다.

또한 선박과 관련해서는 IMO에서 GHG 배출을 줄이기 위해서 MEPC 62차 회의에서 신조선 에너지 효율 지수 (EEDI)와 선박 에너지 효율 관리 계획 (SEEMP)을 만들어 2013년 1월 1일부터 시행할 예정이다. 이러한 상황 속에서 바이오매스 (Bio-mass)는 탄소의 재사용이 가능한 탄소 중립 (Carbon neutral)이라는 관점에서 상당한 이점을 가지고 있어 바이오 연료에 대한 연구 (Oh, 1998; Jung et al., 2010; Choi and Oh, 2005)와 그 사용량이 점점 증가되어 가고 있다.

가솔린 기관에 비해 효율과 출력이 높아서 선박에는 거의 디젤기관이 사용되고 있다. 또한 디젤기관은 최근 이산화탄소 배출이 적은 장점 때문에 자동차에도 점점 사용량이 증가되고 있다. 데이코 산업 연구소 (2011)의 보고에 따르면 디젤기관에 사용되는 경유 (GO: Gas oil)의 대체 바이오 연료인 바이오 디젤유는 2009년 우리나라 전체 디젤유의 1.5%가 될 정도로 많이 사용되고 있고 장기적으로는 GO에 5% 혼합하여 사용할 계획을 세워 놓았다.

바이오 디젤유는 식물유 또는 폐식용유를 메탄올과 촉매로 반응시켜 에스테르화 한 것이 주류로 이 논문에서는 TVO (Transesterified Vegetable Oil)로 칭한다. 이 TVO는 에스테르화하는 공정과 교반 후에 생성되는 글리세린의 처분에 드는 비용으로 인해 경제적 단점을 지니고 있다. 이에 비해 폐식용유 (WSO: Waste Soybean Oil)를 단순히 필터링시키고 GO와 혼합하여 직

분식 디젤기관에 사용, 경제적 측면에서의 장점을 부각시킨 연구가 진행되었다 (Jung et al., 2004; Kim et al., 2006). 그러나 현재의 디젤 엔진은 대부분 전자 제어 분사식을 채택하고 있어서 여러 가지 파라메타를 제어하여 성능을 최적화하는 실험 연구가 필요하다. 앞서 언급한 것처럼 앞으로 바이오 디젤유를 GO에 5%까지 혼합하여 사용할 예정이기 때문에 본 연구에서는 TVO 및 WSO를 5% 혼합한 연료를 이용하여 전자 제어 분사식 디젤엔진에서의 연소 특성을 GO와 비교 분석하여 그 사용 가능성에 대하여 검토하였다.

## 장치 및 방법

### 실험장치

Fig. 1에 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 실험에 사용한 기관은 4기통 전자제어 분사식 과급디젤기관으로, 현대자동차(주) 제작의 D4EA이며 Table 1에 상세한 기관사양에 대해서 나타내었다. 성능 최적화에 제어될 인자로 연료분사시기 및 연료분사압력을 채택하였고, 이들은 MOTEC사의 M800이라는 ECU를 컴퓨터와 연결하여 실시간으로 제어되었다. 운전부하는 환웅 (주) 제작의 와전류식 동력계 HE-130을 이

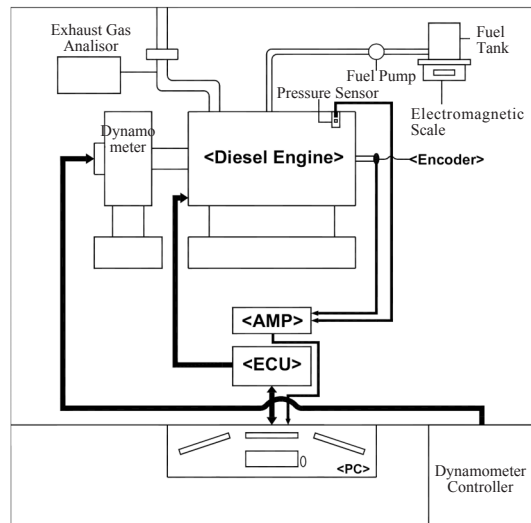


Fig. 1. Schematic diagram of experiment.

**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

용하여 조정하였다. 연소실 압력 측정은 키슬러사의 6052A를 사용하였고, 720p/r의 로터리 엔코더를 이용하여 연소실 압력을 크랭크 각 0.5° 간격으로 취득하였다. 배기 배출물은 Eurotron사의 GreenLine MK2를 사용하여 NOx와 CO를 계측하였다.

**실험방법**

실험에 사용한 연료는 GO와 GO에 TVO와 WSO를 각각 체적비로 5% 섞은 TVO5, WSO5의 세 종류이다. Table 2에는 참고문헌의 내용을 인용하여 각 연료에 대한 성상을 체적비로 산출하여 나타내었다. 각 연료에 포함되어 있는 화학성분에 대해서는 알 수 없으나 혼합된 양이 5%로 적기 때문에 GO에 비해 점도, 성상의 변화는 무시할 정도이다.

실험은 기관 회전수 2000rpm에서 각 연료를 이용하여 분사시기 (Tinj), 커먼레일 압력 (Pcr), 부하 (load)를 변화시키며 실행하였다. 분사시기는 15°, 10°, 5° BTDC로 하였고, 커먼레일 압력

**Table 2. Properties of tested fuels**

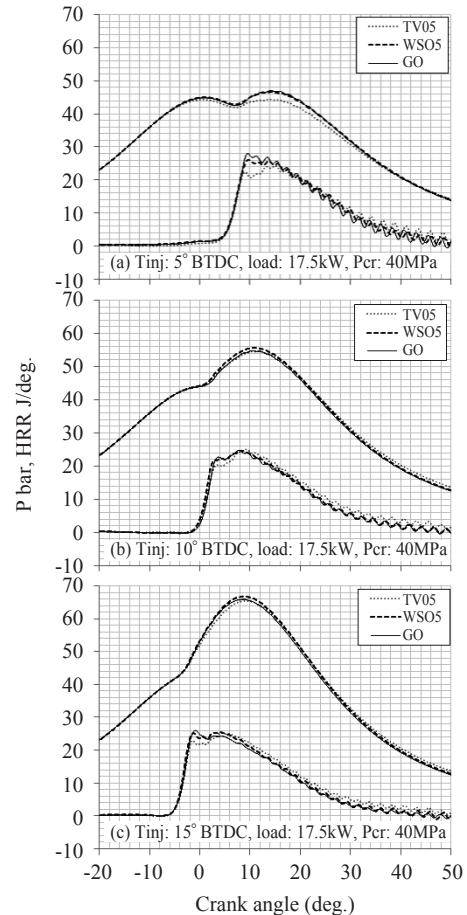
	GO	WSO	TVO	TVO5	WSO5
Specific gravity @20°C	0.832	0.930	0.863	0.837	0.834
Lower heating value MJ/kg	42.9	39.6	39.5	42.7	42.7
Carbon %wt.	86.8	76.5	77.3	86.2	86.3
Hydrogen %wt.	13.1	11.1	11.9	13.0	13.0
Oxygen %wt.	0.0	11.3	9.9	0.6	0.5

은 30, 40, 50MPa로 하였다. 그리고 부하의 변동은 8.7, 17.5, 26.3kW으로 주었다. 실험은 각 조건에서 10분의 안정 기간을 거친 후 연소실 압력, 연료 소비량, 배기가스의 데이터를 측정, 저장하였다.

**결과 및 고찰**

**분사시기에 따른 연소특성**

부하 17.5kW 및 커먼레일 압력 40MPa에서 분사시기를 15°, 10°, 5° BTDC로 조절하여 실험한 각 연료의 연소이력을 Fig. 2에 나타내었다. 그래프 내에서 위쪽이 연소실 압력을, 아래쪽이 열



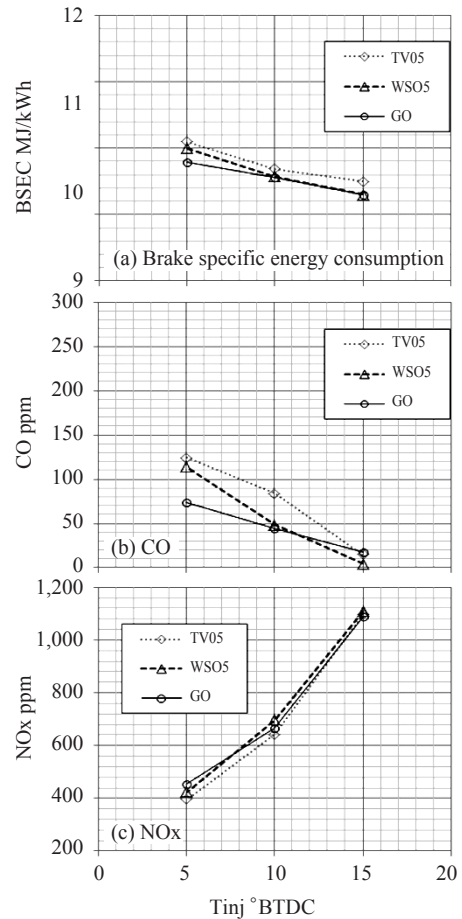
**Fig. 2. Change in combustion history due to injection timing in CRDI diesel engine with diesel oils blended bio diesel oils (load: 17.5kW, Pcr: 40MPa).**

**Table 3. Ignition point and maximum combustion pressure in CRDI diesel engine with diesel oils blended bio diesel oils**

Load (kW)	8.8			17.5			26.3		
Tinj (° BTDC)	10	5	10	15	10	5	10	15	10
Pcr (MPa)	40	30	40	50	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	

발생율을 나타내고 있다. 또 짧은 점선은 TVO5, 긴 점선은 WSO5, 실선은 GO를 각각 나타낸다. Table 3에 나타난 착화점 (IP: Ignition Point)은 연소 초기의 열발생율에 대한 점선과 세로축의 0 점과의 교점으로 정의하였고, MCP (Maximum Combustion Pressure)는 최대연소압력을, IT (Injection Timing)는 분사시기를 나타낸다. 세 연료의 착화점은 Table 3에 나타난 것처럼 분사시기가 5° 씩 빨라짐에 따라 약 5° 정도 빨라지고 있으며 연료의 종류에 상관없이 거의 일정하다. 압력 및 열발생율 곡선에 있어서 WSO5가 GO와 거의 비슷한 특성을 나타내는 반면 TVO5는 최대연소압력이 약간 낮으면서 연소기간이 길어지는 형태를 나타내고 있다. 즉, 다른 연료에 비해 연소 초기의 열발생율이 낮고 연소 후기의 열발생율이 높아지는 형태를 나타내는데, Lim et al (2009)에 따르면 이는 바이오 디젤유는 원재료에 따라 지방산 메틸 에스테르의 성분 및 함량이 달라지기 때문이라고 사료되며 이에 관해서는 추후 세 연료의 성분분석 및 분무특성을 비교해 봄으로써 그 원인을 밝힐 수 있을 것으로 본다.

Fig. 3에는 Fig. 2와 동일한 조건에서 분사시기에 따른 정미 에너지 소비율 (a), CO (b), NOx (c)의 변화를 각각 나타내었다. 마름모의 짧은 점선이 TVO, 삼각형의 긴 점선이 WSO5, 원형의 직선이 GO를 각각 나타낸다. 분사시기를 빨리할



**Fig. 3. Change in fuel consumption, CO and NOx emissions due to injection timing in CRDI diesel engine with diesel oils blended bio diesel oils (load: 17.5kW, Pcr: 40MPa).**

수록 연료의 종류에 관계없이 정미 에너지 소비율과 CO는 감소하고 NOx는 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 정미 에너지 소비율과 CO에 있어서는 TVO5, WSO5, GO의 순으로 작고 NOx의 경우는 WSO5, GO, TVO5의 순으로 크다.

#### 커먼레일 압력에 따른 연소특성

부하 17.5kW 및 분사시기 10° BTDC에서 커먼레일 압력을 30, 40, 50MPa로 변화시킨 연소이력을 Fig. 4에 나타내었다. 세 연료 모두 커먼레

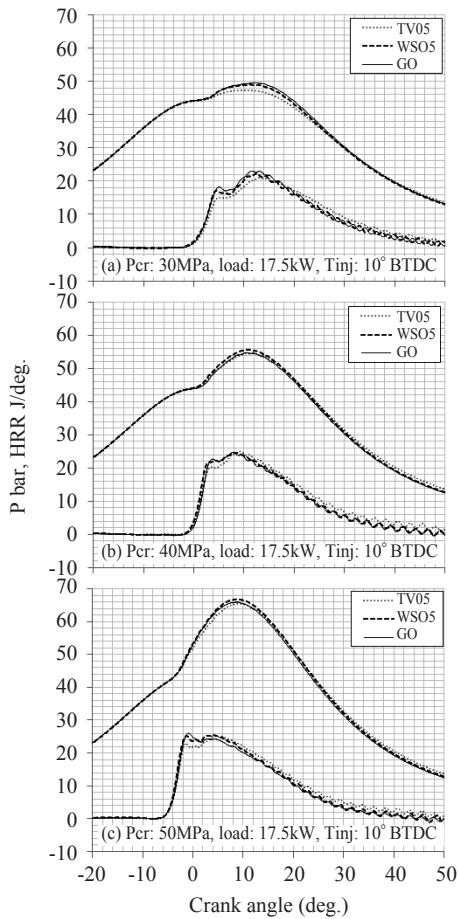


Fig. 4. Change in combustion history due to common rail pressure in CRDI diesel engine with diesel oils blended bio diesel oils (load: 17.5kW, Tinj: 10° BTDC).

일 압력이 커질수록 초기 분사량이 많아지고 무화가 빨리 진행되기 때문에 착화시기가 Table 3에 나타난 것처럼 약 1°씩 빨라지며 연소 초기의 열발생율이 높아지는 특성을 나타내고 있다. 분사시기에서와 마찬가지로 TVO5는 다른 연료에 비해 연소 초기의 열발생율이 낮고 연소 후기의 열발생율이 높아지는 형태를 나타내고 있다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 조건에서 커먼레일 압력 변화에 따른 정미 에너지 소비율, CO, NOx의 변화를 각각 나타내었다. 연소이력에서 알 수 있듯이 TVO5의 정미 에너지 소비율이 가장 높고, WSO5는 GO의 정미 에너지 소비율과 거의

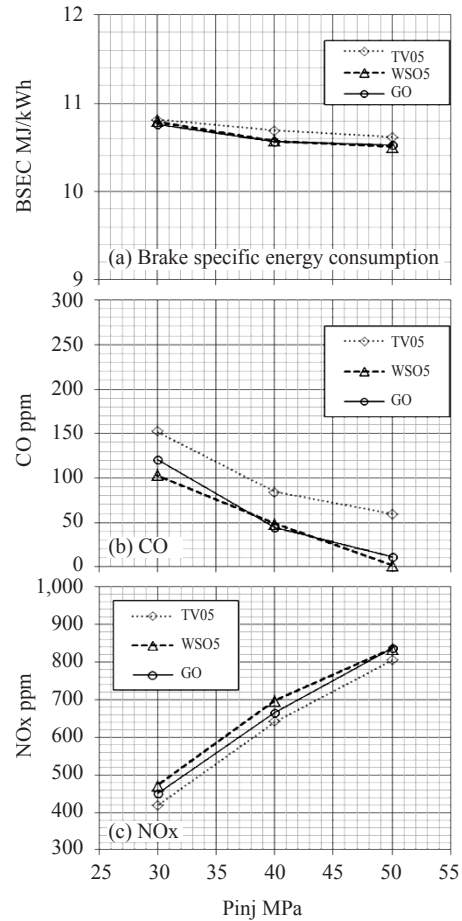


Fig. 5. Change in fuel consumption, CO and NOx emissions due to common rail pressure in CRDI diesel engine with diesel oils blended bio diesel oils (load: 17.5kW, Tinj: 10° BTDC).

일치하는 특성을 나타내고 있다. CO의 경우도 WSO5는 GO와 거의 같은 특성을 나타내고 TVO5는 커먼레일 압력에 관계없이 다른 연료에 비해 약 50ppm 정도 많은 특성을 나타내고 있다. NOx의 경우는 반대로 TVO5가 다른 연료에 비해 20~30ppm 정도 낮게 나타나고 있다.

#### 운전 부하에 따른 연소특성

커먼레일 압력 40MPa 및 분사시기 10° BTDC의 조건에서 세 가지 연료의 운전 부하에 따른 연소이력을 Fig. 6에 나타내었다. 저부하에서는

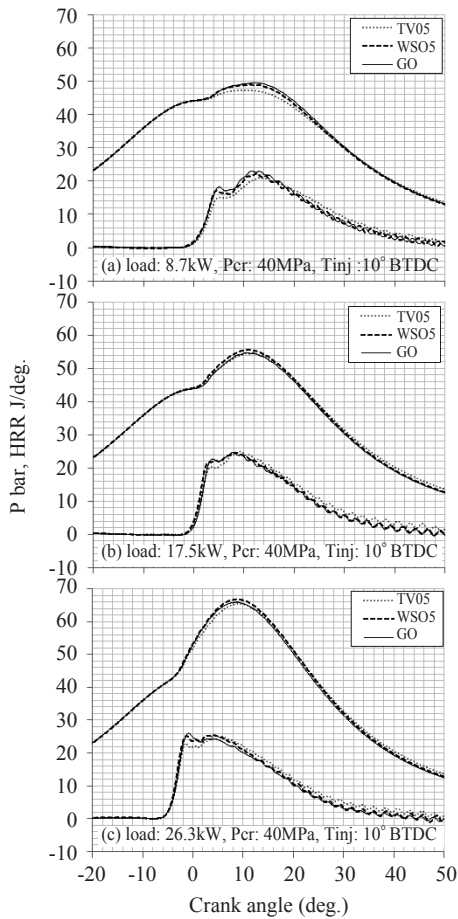


Fig. 6. Change in combustion history due to engine load in CRDI diesel engine with diesel oils blended bio diesel oils (Pcr: 40MPa, Tinj: 10° BTDC).

세 가지 연료의 초기 열발생율이 비슷하게 나타나고 이는 Fig. 7 (a)의 정미 에너지 소비율에서 세 연료가 거의 같은 것과 일치한다. 그러나 고부하로 갈수록 TVO5는 다른 연료에 비해 최고 압력이 떨어지면서 연소 후기의 열발생율이 다소 높게 되어 정미 에너지 소비율과 CO의 양이 많아지고 반대로 NOx의 양은 감소하는 추세를 나타낸다. 따라서 비에스테르화 연료인 WSO는 GO의 특성에 비슷한 반면 에스테르화된 TVO는 GO와 다른 연소 특성을 나타내는데, 이는 앞서 설명한 것처럼 연료의 성분이 영향을 끼치는 것으로 사료된다.

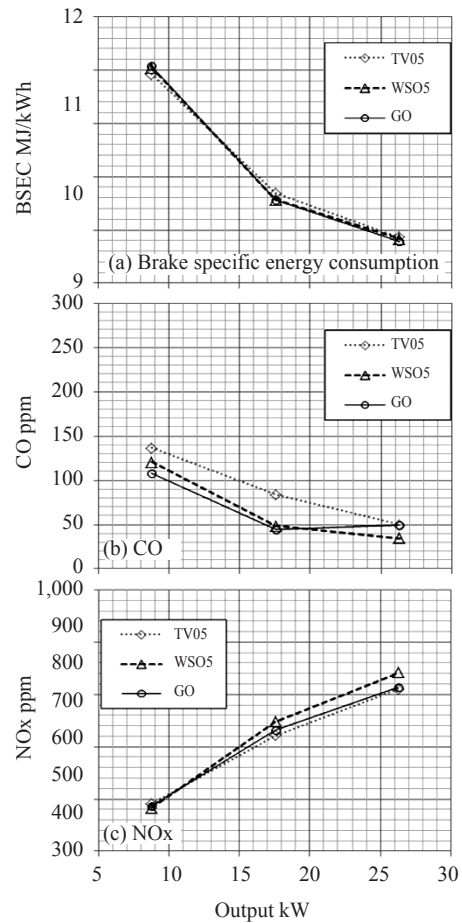


Fig. 7. Change in fuel consumption, CO and NOx emissions due to engine load in CRDI diesel engine with diesel oils blended bio diesel oils (Pcr: 40MPa, Tinj: 10° BTDC).

## 결론

본 연구에서는 에스테르화 바이오 디젤유와 경제적으로 장점을 지닌 비에스테르화 바이오 디젤유를 경유에 각각 5% 섞어 전자 제어 분사식 디젤기관에서 성능실험을 실행하였고 비에스테르화 바이오의 사용 가능성을 검토하였다. 그 결과 에스테르화한 바이오 디젤유에 비해 비에스테르화 바이오 디젤유가 착화시기, 최고압력, 정미 에너지 소비율 및 배기 특성에 있어서 GO의 연소특성과 매우 유사하다는 것을 밝혔다. 따라서 실험범위 내에서 비에스테르화 바이

오 디젤유를 5% 혼합한 디젤유의 사용이 가능하다고 판단되고, 앞으로 전 부하영역에서의 성능 실험과 내구성 실험 등을 실시하여 실용화의 가능성을 판단할 필요가 있을 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 부경대학교 공과대학의 2011학년도 신입교수 연구력 강화 지원 사업으로 수행되었으며 연구를 지원해 주신 것에 대해 감사드립니다.

## 참고문헌

- IMO news magazine editors. 2011. Fisrt-ever mandatory energy-efficiency measures for industry sector adopted. IMO NEWS, 3, 1-7.
- Kim MS, Doh HC, Koh DK and Ahn SK. 2006. A study on droplet distribution of bio diesel fuels using immersion sampling method. KSPSE 10, 5-10.
- Jung SH, Ishida M, Yamamoto S, Ueki H and Sakaguchi D. 2010. Enhancement of NO<sub>x</sub>-PM trade-off in a diesel engine adopting bio-ethanol and EGR. IJAT 11, 611-616.
- Choi SH and Oh YT. 2005. Experimental study on emission characteristics and analysis by various oxygenated fuels in a D.I. diesel engine. IJAT 6, 197-203.
- Jung SH, Kim MS, Jang SH, Koh DK and Ahn SK. 2004. Analysis of combustion characteristics of bio diesel fuel in a DI diesel engine using PXI and LabVIEW. KSPSE 8, 18-23.
- Lim YK, Jeon CH, Kim S, Yim ES, Song HO, Shin, SC and Kim DK. 2009. Determination of fuel properties for blended biodiesel from various vegetable oils. Korean Chem Eng Res 47, 237-242.
- Oh YT. 1998, A study on the usability of used vegetable oil as a diesel substitute in diesel engine. Transactions of the KSME B 22, 481-488.
- Daiko industry researches. 2011. Trends of technology market for biodiesel fuel and friendly environmental vehicle. BIR, Seoul, p. 85.

---

2012년 9월 27일 접수

2013년 1월 4일 1차 수정

2013년 1월 8일 수리