

ENGINEERING

# Performance characteristics of a single-cylinder power tiller engine with biodiesel produced from mixed waste cooking oil

Hwon Choi<sup>1</sup>, Duk Gam Woo<sup>2\*</sup>, Tae Han Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Bio-industrial Machinery Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

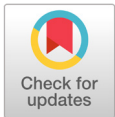
<sup>2</sup>Research faculty of agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060-8589, Japan

\*Corresponding authors: dgwoo@bpe.agr.hokudai.ac.jp, thakim@knu.ac.kr

## Abstract

Biodiesel is a clean energy resource that can replace diesel as fuel, which can be used without any structural changes to the engine. Vegetable oil accounts for 95 percent of the raw materials used to produce biodiesel. Thus, many problems can arise, such as rising prices of food resources and an imbalance between supply and demand. Most of the previous studies using waste cooking oil used waste cooking oil from a single material. However, the waste cooking oil that is actually collected is a mixture of various types of waste cooking oil. Therefore, in this study, biodiesel produced with mixed waste cooking oil was supplied to an agricultural single-cylinder diesel engine to assess its potential as an alternative fuel. Based on the results, the brake specific fuel consumption (BSFC) increased compared to diesel, and the axis power decreased to between 70 and 99% compared to the diesel. For emissions, NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> were increased, but CO and HC were decreased by up to 1 to 7% and 16 to 48%, respectively, compared to diesel. The emission characteristics of the mixed waste cooking oil biodiesel used in this study were shown to be similar to those of conventional vegetable biodiesel, confirming its potential as a fuel for mixed waste cooking oil biodiesel.

**Keywords:** biodiesel, engine performance, transesterification, wasted cooking oil



## OPEN ACCESS

**Citation:** Choi H, Woo DG, Kim TH. 2020. Performance characteristics of a single-cylinder power tiller engine with biodiesel produced from mixed waste cooking oil. Korean Journal of Agricultural Science 47:29-41. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20190085>

**Received:** July 25, 2019

**Revised:** November 14, 2019

**Accepted:** December 10, 2019

**Copyright:** © 2020 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## Introduction

산업혁명 이후 석유 연료 사용으로 인류문명은 급속도로 발전되었다. 화석연료로부터 얻어진 물질은 다양한 분야(의약, 산업, 전자 등)에 응용되고 있으며, 자동차용 연료로 대량소비가 이루어지고 있다(Chandel, 1986; Kim et al., 2005). 현재 전 세계 주요에너지의 27%가 수송용으로 사용되고 있으며, 수송 연료의 대부분은 석유 연료가 차지하고 있다. 그러나 석유 연료는 재생 불가능한 자원으로 그 매장량도 한정되어 있어 이를 대체할 수 있는 에너지자원이 요구되고 있다. 환경오염을 줄이는 동시에 석유 연료를 대신할 수 있는 청정에너지원으로는 태양광, 태양열, 풍력, 바이오디젤, 수소에너지 등이 있다. 그 중 기존 장치 구조의 변경없이 비교적 쉽게 상용화할 수 있는 대체 에너지원이 바

이오디젤이다(Alptekin and Canakci, 2008; Qi et al., 2009; Chauhan et al., 2011; Mccarthy et al., 2011; Adaileh and Alqah, 2012; Banković-Ilić et al., 2014). 바이오디젤은 식물성 오일이나 동물성 지방, 폐식용유 등을 이용하여 생산되는 대체연료이다. 바이오디젤은 생 분해가 가능하고 유독성 배출물이 적게 배출되어 친환경적 자원으로 인식되고 있다(Graboski and McCormik, 1998; Ryu and Oh, 2004; Mudge and Pereira, 2009). 그러나 바이오디젤의 원료로 식물성 오일이 사용될 경우 식량 자원과 상충되는 문제로 인해 대량생산에 어려움이 있다(Tomasevic and Marinkovic, 2003; Zhang et al., 2003; Kim et al., 2012; Woo and Kim, 2019). 이러한 이유로 최근 비 식용 유지를 바이오디젤의 원료로 이용하는 연구가 진행되고 있다. 그 중 폐식용유는 다양한 지방산으로 구성되어 높은 탄소를 함유한 자원으로 식물 오일과 특성이 비슷하여 바이오디젤의 원료로서 사용될 수 있으며, 바이오디젤 생산비를 절감할 수 있을 뿐만 아니라 하수로 버려지는 폐식용유를 활용하여 수질오염 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다(Song et al., 2009; Kim et al., 2019).

Yesilyurt (2018)는 폐식용유 바이오디젤을 단기통 기관에 공급하여 1일 8시간, 330일 동안의 실험을 통해 배출되는 CO<sub>2</sub>를 측정하였다. 측정된 CO<sub>2</sub> 결과를 이용하여 폐식용유 바이오디젤의 환경 경제학적 영향에 대해 분석하였다. 그 결과 폐식용유 바이오디젤 100%가 기존 상용 디젤에 비해 환경적, 경제적 효과가 우수한 것으로 보고하고 있다. 또한, Yu et al. (2002)은 폐식용유 바이오디젤을 단기통 기관에 공급하고 전기 동력계를 이용하여 엔진 브레이크 부하를 측정하였으며, 가스분석기를 이용하여 CO, NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>2</sub>를 측정 분석하였다. 또한, 연소 특성과 연료 적합성을 조사하여, 성능 및 배출 특성 분석을 수행하였다. 그 결과 폐식용유 바이오디젤은 경유와 비슷한 연소 특성을 가지고 있고, 점화 지연이 짧아 연소단계에서는 경유보다 좋은 효과를 낼 수 있다고 보고하였다. 일반적으로 가정에서 사용되는 폐식용유는 전체 식용유 연간 소비량의 26%인 2,860 톤이 폐기되거나 하수로 버려진다(Min et al., 2016; Nho et al., 2016). 버려진 폐식용유의 정화 비용은 전체 폐수 처리비용의 약 25%로 추산되어 연간 처리비용이 45억원에 이른다(Tsoutsos et al., 2016; ME, 2018; Qureshi et al., 2018). 또한, 버려진 폐식용유는 하수관에 기름때를 형성하여 하수관을 오염시키고 오염된 배수관으로 인해 하천 오염 문제와 같이 환경문제도 발생된다. 이에 폐식용유를 바이오디젤의 원료 유지로 사용함에 따라 폐자원 활용에 따른 경제적 이익과 함께 환경오염 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단한다(Lee, 2013; Attia and Hassaneen, 2016; Hawi et al., 2019). Gui et al. (2008)은 오일의 조성, 수확량, 경제성, 경작 요구사항, 토지 가용성 및 자원 가용성에 따라 비식용 유지, 식용 유지, 폐식용유의 바이오디젤 원료유지로서의 가능성을 평가하였다. 그 결과 대두유의 가격은 2013년기준 2.47 \$/L, 폐식용유 1.21 \$/L로 두배의 가격 차이를 보이며, 각국에서 발생하는 폐식용유의 경우 최대 천만톤이상의 폐식용유가 발생함으로 폐식용유가 바이오 디젤의 주요 공급원이 되어야 한다고 하였다. 또한 비식용유지는 폐식용유의 부족분을 보충하는데 사용하는 것이 이상적이라고 보고하였다. Phan and Phan (2008)은 폐식용유를 이용하여 바이오디젤을 제조하고 경유와 물리적 특성을 비교하였다. 그 결과 바이오디젤과 디젤을 혼합하면 휘발성이 향상되어 BD20 (바이오디젤 20 vol%, 경유 80 vol% 혼합연료)을 엔진에 사용시 큰 문제가 없다고 보고하였다. Ulusoy et al. (2018)은 폐식용유를 이용한 디젤엔진의 배기 배출물 특성에 관한 연구를 진행하였고, BD10가 에너지 효율성 측면에서 가장 우수하다고 보고하였다. 위의 폐식용유를 이용한 기존의 연구들은 단일 원료의 폐식용유를 이용한 것이 대부분이다. 그러나, 실제 수거되는 폐식용유는 여러 종류의 폐식용유가 혼합되어 있다. 이에 본 연구에서는 국내에서 가장 소비가 많은 폐대두유와 폐카놀라유를 혼합한 바이오디젤을 실제 농업용 단기통 디젤기관에 사용할 경우의 기관 출력, 연료소비율 및 배기배출물 특성을 평가하고자 한다.

## Materials and Methods

### 공시재료

식물성유지의 선정은 가정에 판매되는 식용유의 국내 매출액을 기준(FIS, 2019)으로 가장 많이 소비되는 식용유인 카놀라유와 대두유를 선정하였으며, 실험에 사용된 재료는 2종의 폐식용유인 폐대두유와 폐카놀라유를 혼합하여 생산한 바이오디젤을 사용하였다. 사용된 혼합 폐식용유 바이오디젤은 폐카놀라유 60 wt%, 폐대두유 40 wt%를 혼합한 폐식용유로 수산화 칼륨(sodium hydroxide, KOH) 1.3 wt%를 촉매로 메탄올/유지 몰비 7 mol의 조건에서 생산되었다. 생산한 혼합 폐식용유 바이오디젤의 FAME (fatty acid methyl ester)함량 98.04%, LAME (linolenic fatty acid ester)함량은 4.9%이다. Table 1은 연구에서 사용한 재료의 혼합비를 나타낸 것이다. 기관성능시험에 사용된 연료는 경유와 바이오디젤을 체적비로 혼합한 연료로 BD10, BD20, BD50, BD100을 사용하였다. BD10은 폐식용유 바이오디젤 10 vol%, 경유 90 vol%를 의미한다. 실험에 사용한 혼합 폐식용유 바이오디젤의 물리화학적 특성을 한국석유관리원에 의뢰하여 분석하였고 결과는 Table 2와 같다. 분석 결과 모든 항목에서 연료로서의 품질을 만족하였다.

**Table 1.** Blend ratio of biodiesel materials used in experiment.

Blend oils	Soybean contents (%)
Waste soybean oil : waste canola oil	40 (40 : 60 g)

**Table 2.** Fuel properties of diesel and biodiesels.

Test item	Test method	Limit	SOCA	Diesel
Cetane number	ASTM D4530	-	56	48
Calorific value (MJ/Kg)	ASTM D240	-	41.8	45
Carbon residue (m/m %)	ASTM D4530	< 0.1	0.008	0.12
Flash point (°C)	ASTM D93	120 <	133	60
Sulfur (mg/kg)	ASTM D482	< 10	2	11.7
Kinematic viscosity at 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	ASTM D445	1.9 - 5.0	3.8	2.35
Cold filter plugging point (°C)	ASTM D6371	-	- 4	- 33
Density 15°C (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM D4052	860 - 900	890.5	820

SOCA, waste soybean oil : waste canola oil.

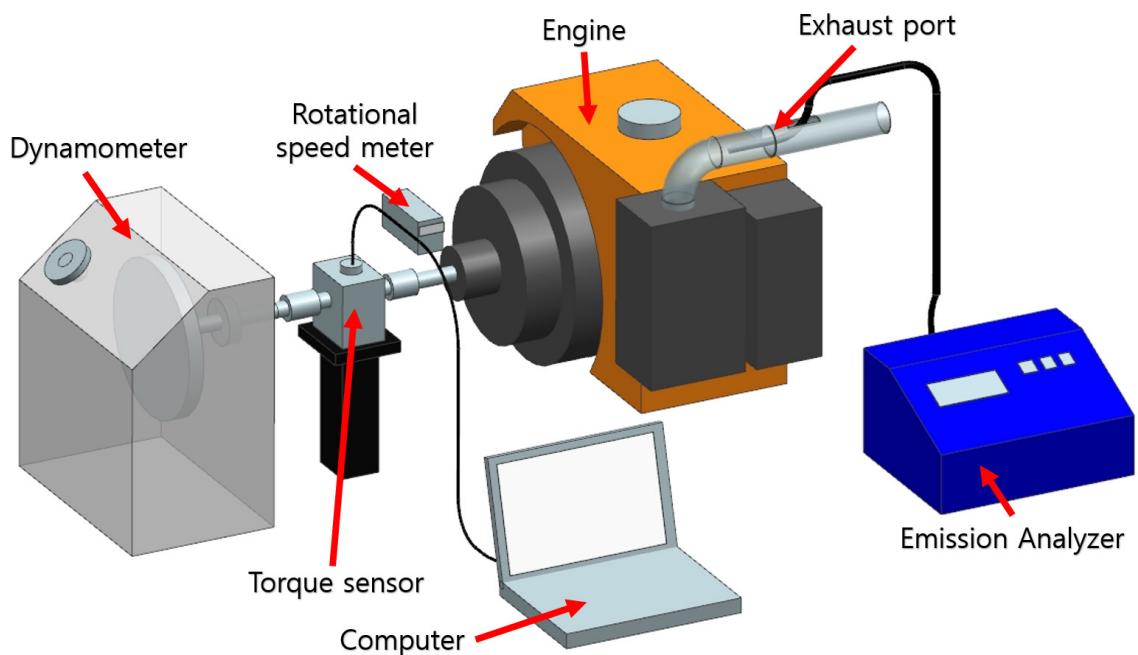
### 실험장치

바이오디젤의 출력 성능을 측정을 위해 사용된 기관은 농업용 단기통 디젤기관(ND10DE, Daedong, Daegu, Korea)으로 주요 제원은 Table 3과 같다. Fig. 1은 기관 성능 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 기관의 출력은 토크센서(YDL-704s, Setech, Daegu, Korea)를 사용하여 토크를 측정하여 산출하였다. 또한, 연료의 온도를 일정하게 유지하기 위해 온도 조절기를 사용하였고 공기량의 계측은 공기유량계(MF-5712, Siargo Ltd., Santa Clara, USA)를 사용하였다. 배기 배출물 측정은 배기 가스 분석기(HG-550, Airrex, Langenhagen, Germany)를 사용하였다(Mohammadi et al., 2015; Chaichan and Abaas, 2017; Niaki et al., 2019).

**Table 3.** Specification of engine used in experiment.

Description (unit)	Specification
Engine type	4 stroke single cylinder
Number of cylinder	1
Max. power (PS/rpm)	13/2,400
Peak torque (N·m/rpm)	42/2,000
Displacement volume (cc)	673
Compression ratio	18 : 1
Combustion type	Direct injection

PS, pferdestärke.

**Fig. 1.** Schematic of the engine performance test device.

### 실험방법

실험에 사용된 연료는 폐식용유 혼합 바이오디젤과 경유를 혼합한 연료를 사용하였다. 바이오디젤, 경유 혼합연료 300 mL를 사용하였고 전부하시험으로 토크와 배기배출물을 측정하였다. 이때 기관의 회전속도는 1,100 - 2,300 rpm에서 300 rpm간격으로 실시하였으며, 사용한 각 연료의 출력과 배기배출물은 연구에 사용된 기관의 상용 회전속도인 2,000 rpm에서의 기관성능을 비교하여 분석하였다(RDA, 2012). 연료소비량(fuel consumption)은 스톱워치를 이용하여 일정량(300 mL)의 연료를 소비하는데 소모된 시간을 5회 반복 측정하여 산출하였다. 토크 측정 후 식(1)을 이용하여 제동출력(brake power)을 계산하였고, 식(2)를 이용하여 제동 연료 소비율(brake specific fuel consumption)을 산출하였다. 배기가스 분석은 배기관에 연통을 연결하고 배기관으로부터 400 mm 지점에 배기가스 분석기를 설치하여 배기배출물을 측정하였다.

$$BP = \frac{2\pi NT}{60,000} \quad (1)$$

BP: 제동출력(kW), N: 엔진 회전수(rpm), T: 토크(N·m)

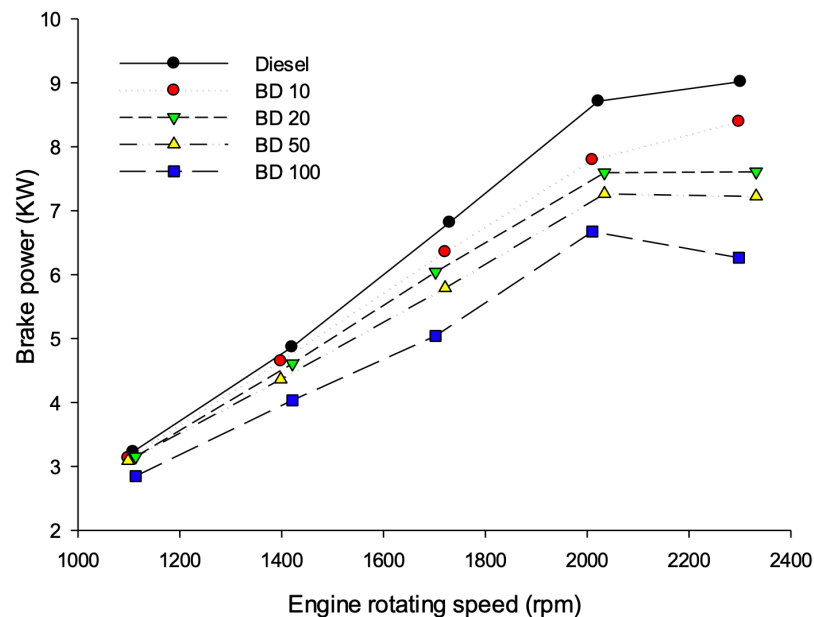
$$BSFC = \frac{V \cdot \rho}{t \cdot N_e} \times 3600 \quad (2)$$

BSFC: 제동연료 소비율(g/kWh), V: 소비된 연료의 체적(cm<sup>3</sup>), ρ: 연료의 밀도(g/cm<sup>3</sup>), t: 연료소비 시간(s), N<sub>e</sub>: 제동출력(kW)

## Results and Discussion

### 기관출력평가

Fig. 2는 경유와 폐식용유 바이오디젤-경유 혼합연료의 제동출력을 나타낸 것이다. 폐식용유 바이오디젤 혼합연료의 축 출력은 경유 대비 3 - 29% 감소하는 것으로 나타났다. 기관 상용회전속도 2,000 rpm에서의 경유 대비 제동출력은 BD10 - BD100 범위에서 10 - 23%로 감소한 것으로 나타나 바이오디젤의 혼합비율이 증가할수록 축 출력이 감소하는 것으로 나타났다. 일반적으로 바이오디젤은 10 - 15%의 산소를 함유하고 있다(Ryu and Oh, 2007). 함유된 산소만큼 적은 탄소 비율로 인해 경유에 비해 낮은 발열량을 가지게 되고 이로 인해 출력의 감소가 발생한다(Lee et al., 2013; Chen et al., 2014). 기존 연구에서도 폐식용유 바이오디젤은 경유 대비 축 출력이 15 - 40% 감소되는 것으로 보고되어 본 연구와 유사한 경향으로 나타났다(Choi et al., 2002). 식물성 유지인 대두유 바이오디젤의 경우에도 대두유 바이오디젤의 혼합비율이 증가함에 따라 경유 대비 출력이 3.1 - 6.7% 감소하는 것으로 보고되었다(Özener et al., 2014). 이와 같이 출력의 감소는 바이오디젤의 동점도를 감소시켜 분무 액적의 미립화를 통한 연소품질 향상을 통해 증가시킬 수 있다고 판단된다(Suh and Lee, 2016).



**Fig. 2.** Effect of blended biodiesel (BD) on the brake power for the change of rotating speed of power tiller engine.

## 연료소비율

Fig. 3은 기관회전속도에 따른 바이오디젤의 연료 소비율을 나타낸 그래프이다. 혼합폐식용유 바이오디젤의 혼합 비율이 증가함에 따라 연료소비율도 경유 대비 7 - 74%증가하였다. 상용회전속도인 2,000 rpm에서는 경유에 비해 연료소비율이 17 - 58% 증가하였다. 이는 혼합 폐식용유 바이오디젤의 경우 경유에 비해 세탄가가 약 16% 높아 높은 세탄가의 영향으로 인한 착화시기 변화에 따라 연료소비율이 증가하는 것으로 판단된다(Monyem and Gerpen, 2001). 또한, 폐식용유 바이오디젤의 경우 동점도가 높아 연료분사 시 연료 미립화가 저해되고(Aydin and Bayindir, 2010; Tesfa et al., 2013), 경유에 바이오디젤 혼합량이 증가됨에 따라 발열량이 낮아져 착화 후 연소지연이 발생하여 단위 출력당 연료소비량이 증가 된 것으로 판단된다(Cho et al., 2016; Yamin and Abu Mushref, 2019).

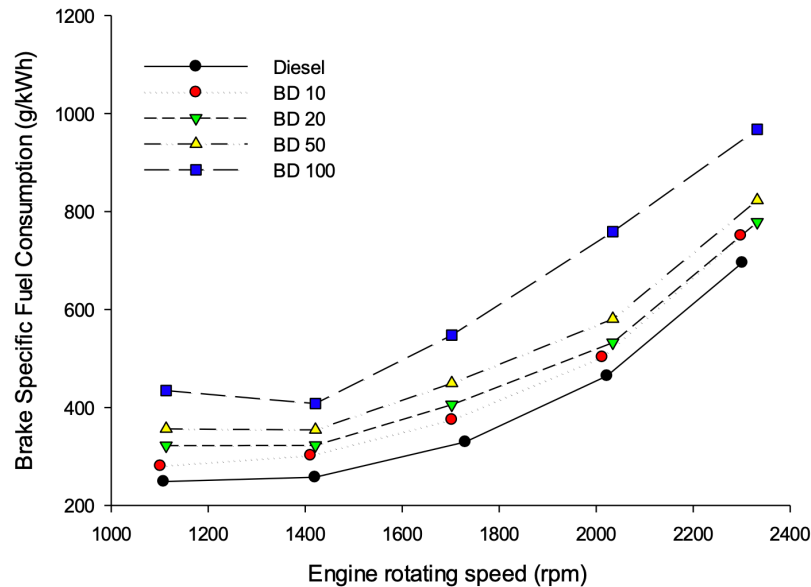


Fig. 3. Brake specific fuel consumption (BSFC) according to diesel and biodiesel (BD).

## 질소산화물

Fig. 4는 폐식용유 바이오디젤의 질소산화물(nitrogen oxide,  $\text{NO}_x$ ) 배출량을 나타내는 그래프로 경유에 비해  $\text{NO}_x$  배출량이 32 - 127% 증가되는 것으로 나타났다. 상용회전속도에서  $\text{NO}_x$ 는 경유에 비하여 배출량이 32 - 125% 증가되었다. 이는 바이오디젤의 산소 함유량의 영향으로 연소 시 발생하는 고온의 연소 온도로 인한 것으로 판단된다(Radhakrishnan et al., 2017; Joy et al., 2018; Prabhu and Venkata Ramanan, 2018). 또한, 고속 구간에서 발생하는 연소 온도가 저속 구간에 비해 더욱 높음에 따라  $\text{NO}_x$  배출이 더욱 증가하는 것으로 판단된다. Can et al. (2017)은 카놀라 바이오디젤을 이용한 연구에서  $\text{NO}_x$ 의 발생량은 모든 부하에서 증가하는 것으로 나타나 본 연구와 비슷한 경향으로 나타났다. 그러나, 배출량이 증가한  $\text{NO}_x$ 는 배기 배출물 저감 장치가 없는 농용 기관에 SCR (selective catalytic reactor) 또는 EGR (exhaust-gas recirculation)과 같은  $\text{NO}_x$  저감장치 부착을 통해 해결할 수 있을 것이라 판단한다.

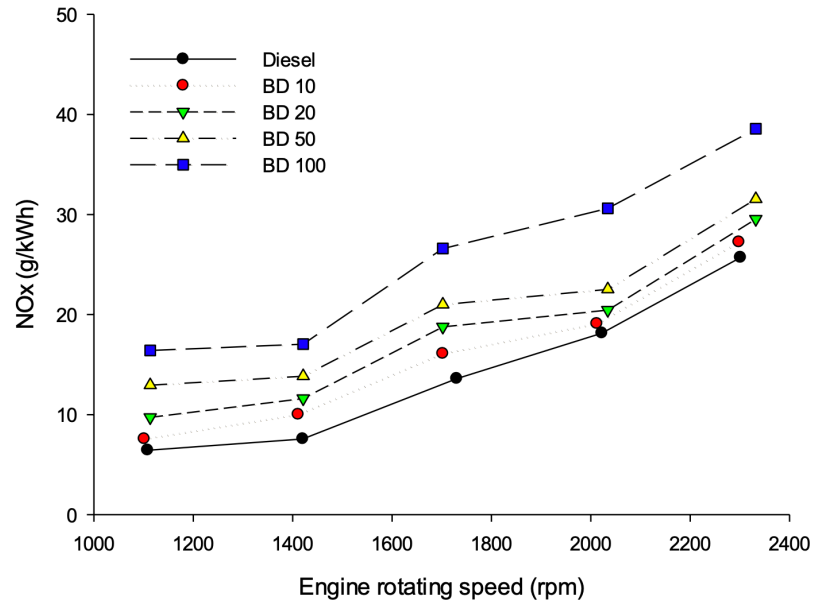


Fig. 4. Nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) emission characteristics on biodiesel (BD).

### 이산화탄소

Fig. 5는 폐식용유 바이오디젤의 이산화탄소(carbon dioxide, CO<sub>2</sub>) 배출물 측정 결과를 나타낸 것으로 경유 대비 11 - 27% 증가하는 것으로 나타났다. 상용회전속도(2,000 rpm)에서의 이산화탄소 배출량은 경유에 비하여 12 - 26% 증가 하였다. 이는 바이오디젤의 산소함유량으로 인한 완전연소의 결과로 CO<sub>2</sub> 배출량이 증가한 것으로 판단된다. Pereira et al. (2007)에 따르면 대두유 바이오디젤을 기관에 적용 시 CO<sub>2</sub> 배출량이 경유 대비 최대 20.7% 증가하는 것으로 나타나 본 연구와 비슷한 경향을 보였다. 또한, 바이오디젤 비율이 증가할수록 바이오디젤에 함유되어 있는 산소량도 증가하게 되는데 이에 따라 CO<sub>2</sub> 배출량이 더욱 더 증가하는 것으로 판단된다. 저속구간에 비해 고속구간으로 갈수록 CO<sub>2</sub> 배출량이 증가하는 것은 연료소비율의 급격한 증가에 따른 것으로 판단된다. 하지만 바이오디젤의 경우 탄소중립연료(Jo and Cha, 2010)로 자연 순환에 의해 경유 대비 CO<sub>2</sub> 배출량이 50 - 80% 감소된다는 연구결과를 볼 때 바이오디젤의 혼합 비율이 높아짐에 따라 증가된 CO<sub>2</sub> 배출량은 문제가 되지 않는다고 판단된다(Labeckas and Slavinskas, 2006).

### 일산화탄소

Fig. 6은 폐식용유 바이오디젤의 일산화탄소(carbon monoxide, CO) 배출 결과로 상용회전속도인 2,000 rpm 에서 경유의 CO 배출량에 비해 7 - 14% 감소하는 것으로 나타났다. 일반적으로 연소 시 산소농도가 희박할 경우 불완전 연소가 발생하여 CO 배출량이 증가된다(Anbarasu and Karthikeyan, 2016; Devarajan et al., 2017; Kishore Pandian et al., 2017). 이와 같은 경향은 Utlu and Kocak (2008)의 폐식용유 바이오디젤을 기관에 적용한 연구에서도 나타나는데 폐식용유 바이오디젤을 기관에 적용 시 배출되는 CO는 기존 경유에 비해 약 17% 감소한다고 보고하였다. 바이오디젤은 산소함유 연료로 바이오디젤의 혼합 비율이 증가함에 따라 연료 내 산소의 함량도 증가되므로 연소 시 완전연소가 이루어져 CO 배출량이 감소하는 것으로 판단된다(Usta et al., 2005; Canakci, 2007; Tree and Svensson, 2007; Ozsezen and Canakci, 2008; Gürü et al., 2010).

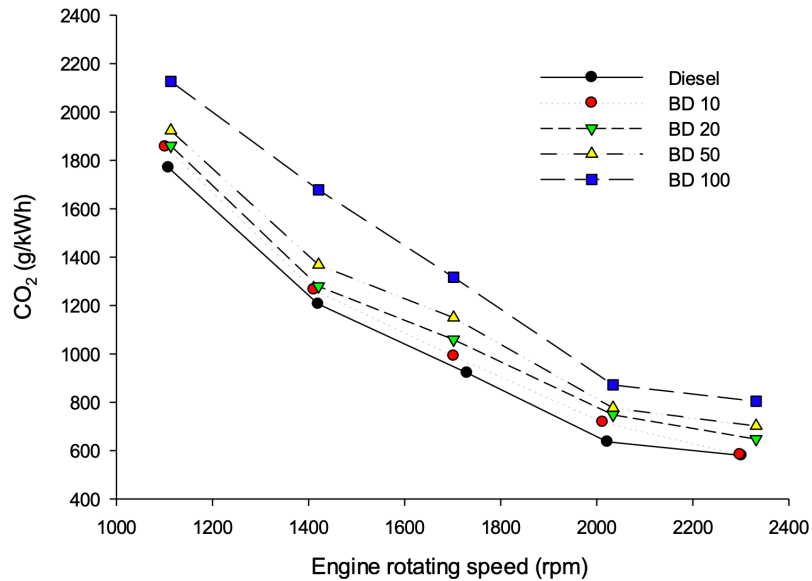


Fig. 5. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emission characteristics on biodiesel (BD).

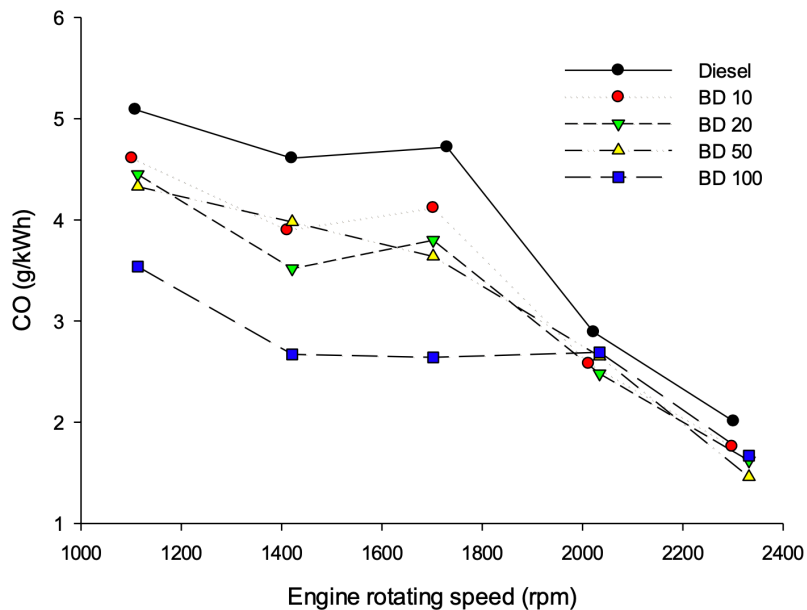


Fig. 6. Carbon monoxide (CO) emission characteristics on biodiesel (BD).

### 탄화수소

폐식용유 바이오디젤의 탄화수소(hydrocarbon, HC) 배출량은 바이오디젤의 혼합 비율이 증가함에 따라 감소하였고 경유의 탄화수소 배출량에 비해 Fig. 7과 같이 16 - 48% 감소하는 것으로 나타났다. 바이오디젤의 혼합량 증가됨에 따라 완전연소가 촉진되고 바이오디젤의 낮은 탄소 함량의 영향으로 탄화수소 배출량이 감소된 것으로 판단된다(Lin et al, 2009; Liaquat et al, 2013).



본 연구에서는 입자성 물질(particulate matter, PM)의 배출량은 측정하지 않았으나 Lapuerta et al. (2008b)의 연구에 따르면 폐식용유를 이용한 바이오디젤의 혼합량이 증가될수록 PM의 배출량이 감소한다고 보고하였다. 또한, 바이오디젤 사용에 따라 PM배출량이 경유 대비 최대 50% 감소한다는 연구결과도 있다(Ulusoy et al., 2004; Puhan et al., 2005; Lapuerta et al., 2008a; Ozsezen et al., 2009; Sahoo et al., 2009; Buyukky, 2010; Lin et al., 2011). PM배출은 불완전연소로 인한 탄화수소의 영향을 받는데 본 연구에서 탄화수소의 배출량은 바이오디젤의 혼합량이 증가함에 따라 함께 감소되는 것으로 나타나 PM 배출량도 감소할 것으로 판단된다.

이상의 연구 결과 혼합 폐식용유 바이오디젤은 식물유로 제조한 바이오디젤과 같이 경유에 폐식용유 바이오디젤을 혼합할수록 출력이 감소하는 경향이 나타났으며, 혼합 폐식용유 바이오디젤을 경유로 대체하여 사용할 경우 연소 품질 향상 및 연료 소비율 향상을 위해서는 연료 분사계의 최적화가 요구되는 것으로 판단된다. 또한, 배기배출물의 경우 폐식용유의 혼합량이 증가할수록 HC와 CO의 배출을 감소시키고 NO<sub>x</sub>의 배출을 증가시켰다. 농용 기관에 EGR 시스템을 사용하게 된다면 NO<sub>x</sub> 배출도 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

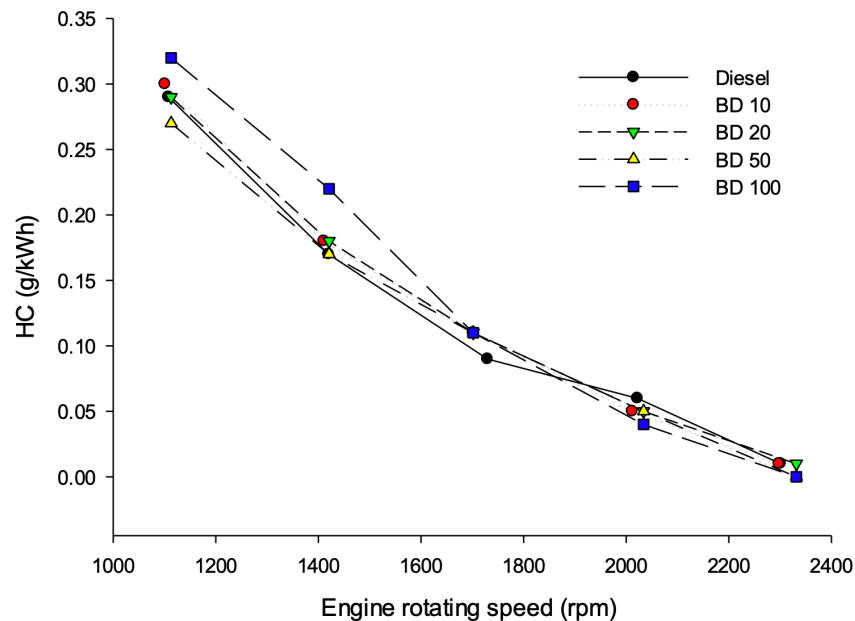


Fig. 7. Hydrocarbon (HC) emission characteristics on biodiesel (BD).

## Conclusion

혼합 폐식용유 바이오디젤을 이용하여 농용 기관의 성능을 평가한 결과 혼합 폐식용유 바이오디젤의 혼합량이 증가 할수록 낮은 발열량으로 인해 출력이 경유에 비해 감소하였고 연료 소비율은 증가되는 것으로 나타났다. 하지만 상용회전속도인 2,000 rpm에서 현재 상용화된 바이오디젤 비율인 BD10과 BD20의 경우 경유와 비교해 출력의 감소가 크지 않았으며, 완전 연소의 결과로 경유에 비해 CO, HC 배출량이 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 혼합 폐식용유 바이오디젤과 기존 식물성 오일 바이오디젤의 기관 적용시 성능(출력, 배기배출물)은 유사한 경향으로 나타나 혼합 폐식용유를 기존 바이오디젤의 주원료인 식물성 오일을 대체할 수 있는 원료로 활용될 수 있음을 확인하였다. 이에 따라 바이오디젤 단가상승문제를 해결하고 오수로 버려지는 폐식용유를 활용함에 따른 환경적 이익도 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## Acknowledgements

본 결과물은 농림축산식품부의 지원으로 농림수산식품 기술기획평가원의 농림축산식품연구센터지원사업의 지원을 받아 연구되었습니다(716001-7).

## Authors Information

Hwon Choi, <https://orcid.org/0000-0001-7413-2119>

Duk Gam Woo, <https://orcid.org/0000-0003-0281-4342>

Tae Han Kim, <https://orcid.org/0000-0001-8881-8429>

## References

- Adaileh WM, Alqdah KS. 2012. Performance of diesel engine fuelled by a biodiesel extracted from a waste cooking oil. *Energy Procedia* 18:1317-1334.
- Alptekin E, Canakci M. 2008. Determination of the density and the viscosities of biodiesel–diesel fuel blends. *Renewable Energy* 33:2623-2630.
- Anbarasu A, Karthikeyan A. 2016. Performance and emission characteristics of a diesel engine using cerium oxide nanoparticle blended biodiesel emulsion fuel. *Journal of Energy Engineering* 142:04015009.
- Attia AMA, Hassaneen AE. 2016. Influence of diesel fuel blended with biodiesel produced from waste cooking oil on diesel engine performance. *Fuel* 167:316-328.
- Aydin H, Bayindir H. 2010. Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine. *Renewable Energy* 35:588-592.
- Banković-Ilić IB, Stojković IJ, Stamenković OS, Veljković VB, Hung YT. 2014. Waste animal fats as feedstocks for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32:238-254.
- Buyukkya E. 2010. Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. *Fuel* 89:3099-3105.
- Canakci M. 2007. Combustion characteristics of a turbocharged DI compression ignition engine fueled with petroleum diesel fuels and biodiesel. *Bioresource technology* 98:1167-1175.
- Can O, Oztürk E, Yucesu HS. 2017. Combustion and exhaust emissions of canola biodiesel blends in a single cylinder DI diesel engine. *Renewable Energy* 109:73-82.
- Chaichan MT, Abaas KI. 2017. Experimental study of the effect of fuel type on the emitted emissions from SIE at idle period. *Al-Khwarizmi Engineering Journal* 13:1-12.
- Chandel RS. 1986. Effect of welding parameters and groove angle on the soundness of root beads deposited by the SAW process. In *proceedings of an International Conference on Trends in Welding Research*. pp. 379-385. Gatlinburg, Tennessee, USA.
- Chauhan BS, Kumar N, Cho HM. 2011. A study on the performance and emission of a diesel engine fueled with *Jatropha* biodiesel oil and its blends. *Energy* 37:616-622.
- Chen L, Cheng YK, Kim JD, Song KK. 2014. A study on biodiesel fuel of engine performance and emission characteristics in diesel engine. *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers* 22:59-65. [in Korean]
- Choi BC, Lee CH, Park HJ. 2002. Power and emission characteristics of DI diesel engine with a soybean bio-diesel fuel. *Journal of the Korea Society for Power System Engineering* 6:11-16. [in Korean]
- Cho JK, Park SJ, Song SH. 2016. A effects of natural gas-diesel/hi-sene dual fuel operation on performance of a heavy-duty diesel engine for power generation. *Journal of Energy Engineering* 25:122-130. [in Korean]
- Devarajan Y, Munuswamy DB, Mahalingam A, Nagappan B. 2017. Performance, combustion, and emission analysis of

- neat palm oil biodiesel and higher alcohol blends in a diesel engine. *Energy & Fuels* 31:13796-13801.
- FIS (Food Information Statistics System). 2019. Segment. Accessed in <http://www.atfis.or.kr> on 1 September 2019. [in Korean]
- Graboski MS, McCormick RL. 1998. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 24:125-164.
- Gui MM, Lee KT, Bhatia S. 2008. Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. *Energy* 33:1646-1653.
- Gürü M, Koca A, Can Ö, Çınar C, Şahin F. 2010. Biodiesel production from waste chicken fat based sources and evaluation with Mg based additive in a diesel engine. *Renewable Energy* 35:637-643.
- Hawi M, Elwardany A, Ismail M, Ahmed M. 2019. Experimental investigation on performance of a compression ignition engine fueled with waste cooking oil biodiesel–diesel blend enhanced with iron-doped cerium oxide nanoparticles. *Energies* 12:798.
- Jo BH, Cha HJ. 2010. Biodiesel production using microalgal marine biomass. *The Korean Society for Biotechnology and Bioengineering* 25:109-115. [In Korean]
- Joy N, Devarajan Y, Nagappan B, Anderson A. 2018. Exhaust emission study on neat biodiesel and alcohol blends fueled diesel engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 40:115-119.
- Kim CS, Hong KS, Kim MK. 2005. Nonlinear robust control of a hydraulic elevator, *Control Engineering Practice*. *Control Engineering Practice* 13:789-803. [In Korean]
- Kim SM, Kim DK, Lee JS, Park SC, Rhee YW. 2012. Esterification reaction of animal fat for bio-diesel production. *Clean Technology* 18:102-110. [in Korean]
- Kim TG, Lee WS, Gang SH, Kim JS, Chung CW. 2019. Production of poly (3-hydroxybutyrate) using waste frying oil. *Journal of Life Science* 29:76-83. [in Korean]
- Kishore Pandian A, Munuswamy DB, Radhakrishana S, Bathey Ramakrishnan RB, Nagappan B. 2017. Influence of an oxygenated additive on emission of an engine fueled with neat biodiesel. *Petroleum Science* 14:791-979.
- Labeckas G, Slavinskas S. 2006. The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. *Energy Conversion and Management* 47:1954-1967.
- Lapuerta M, Herreros JM, Lyons LL, García-Contreras R, Brice Y. 2008a. Effect of the alcohol type used in the production of waste cooking oil biodiesel on diesel performance and emissions. *Fuel* 87:3161-3169.
- Lapuerta M, Rodríguez-Fernández J, Agudelo JR. 2008b. Diesel particulate emissions from used cooking oil biodiesel. *Bioresource Technology* 99:731-740.
- Lee JD. 2013. Biodiesel production from waste oil using candida antarctica lipase. *Journal of Korea Society of Waste Management* 30:319-324. [in Korean]
- Lee SW, Lim GH, Park CW, Choi Y, Kim CG. 2013. Effect of low calorific natural gas on performance and emission characteristics of engine. *The Korean Society of Mechanical Engineers* 37:1129-1135. [in Korean]
- Liaquat AM, Masjuki HH, Kalam MA, Rizwanul Fattah IM, Hazrat MA, Varman M, Mofijur M, Shahabuddin M. 2013. Effect of coconut biodiesel blended fuels on engine performance and emission characteristics. *Procedia Engineering* 56:583-590.
- Lin BF, Huang JH, Huang DY. 2009. Experimental study of the effects of vegetable oil methyl ester on DI diesel engine performance characteristics and pollutant emissions. *Fuel* 88:1779-1785.
- Lin YC, Hsu KH, Chen CB. 2011. Experimental investigation of the performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel/ultra-low sulfur diesel blends. *Energy* 36:241-248.
- Mccarthy P, Rasul MG, Moazzem S. 2011. Analysis and comparison of performance and emissions of an internal combustion engine fuelled with petroleum diesel and different biodiesels. *Fuel* 90:2147-2157.
- ME (Ministry of Environment). 2018. Statics of waterworks. p. 25. ME, Sejong, Korea. [in Korean]
- Min KI, Park CK, Kim J, Na BK. 2016. Study on potential feedstock amount analysis of biodiesel in Korea. *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society* 27:447-461. [in Korean]
- Mohammadi S, Rabani H, Honarmand SJ. 2015. The effect of bioethanol on pollutants and engine fuel consumption. *Research Journal of Fisheries and Hydrobiology* 10:234-244.

- Monyem A, Van Gerpen JH. 2001. The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions. *Biomass and Bioenergy* 20:317-325.
- Mudge SM, Pereira G. 2009. Stimulating the biodegradation of crude oil with biodiesel preliminary results. *Spill Science & Technology Bulletin* 5:535-555.
- Nho NS, Cho SM, SO JY, Kim KH, Kim YM, Kim HG, Kang YH. 2016. Analysis on the internal waste energy potential. *New & Renewable Energy* 10:59-64. [in Korean]
- Niaki SRA, Zadeh FG, Niaki SBA, Mouallem J, Mahdavi S. 2019. Experimental investigation of effects of magnetic field on performance, combustion, and emission characteristics of a spark ignition engine. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 2019:e13317.
- Özener O, Yüksek L, Ergenç AT, Özkan M. 2014. Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. *Fuel* 115:875-883.
- Ozsezen AN, Canakci M, Turkcan A, Sayin C. 2009. Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters. *Fuel* 88:629-636.
- Ozsezen AN, Canakci M. 2008. An investigation of the effect of methyl ester produced from waste frying oil on the performance and emissions of an IDI diesel engine. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 23:395-404.
- Pereira RG, Oliveira CD, Oliveira JL, Oliveira PCP, Fellows CE, Piamba OE. 2007. Exhaust emissions and electric energy generation in a stationary engine using blends of diesel and soybean biodiesel. *Renewable Energy* 32:2453-2460.
- Phan AN, Phan TM. 2008. Biodiesel production from waste cooking oils. *Fuel* 87:3490-3496.
- Prabhu A, Venkata Ramanan M. 2018. Emission and performance analysis of pentanol-diesel blends in unmodified diesel engine. *International Journal of Ambient Energy* 2018:1-4.
- Puhan S, Vedaraman N, Ram BVB, Sankarnarayanan G, Jeychandran K. 2005. Mahua oil (Madhuca Indica seed oil) methyl ester as biodiesel-preparation and emission characteristics. *Biomass and Bioenergy* 28:87-93.
- Qi DH, Geng LM, Chen H, Bian YZH, Liu J, Ren XCH. 2009. Combustion and performance evaluation of a diesel engine fueled with biodiesel produced from soybean crude oil. *Renewable Energy* 34:2706-2713.
- Qureshi MWG, Khan ZM, Hussain M, Ahmad F, Shoaib M, Qasim M. 2018. Experimental evaluation of a diesel engine for combustion, performance and exhaust emissions with fuel blends derived from a mixture of fish waste oil and waste cooking oil biodiesel. *Polish Journal of Environmental Studies* 28:2793-2803.
- Radhakrishnan S, Devarajan Y, Mahalingam A, Nagappan B. 2017. Emissions analysis on diesel engine fueled with palm oil biodiesel and pentanol blends. *Journal of Oil Palm Research* 29:380-386.
- RDA (Rural Development Administration). 2012. A study on safety device and criterion for agricultural machinery. RDA, Jeonju, Korea. [in Korean]
- Ryu KH, Oh YT. 2004. Combustion characteristics of an agricultural diesel engine using biodiesel fuel. *Journal of Mechanical Science and Technology* 18:709-717. [in Korean]
- Ryu KH, Oh YT. 2007. Combustion characteristics and durability of diesel engines burning BDF 20. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers* 15:18-28. [in Korean]
- Sahoo PK, Das LM, Babu MKG, Arora P, Singh VP, Kumar NR, Varyani TS. 2009. Comparative evaluation of performance and emission characteristics of jatropha, karanja and polanga based biodiesel as fuel in a tractor engine. *Fuel* 88:1698-1707.
- Song YH, Shin BW, Ha DM, Chung KS. 2009. Combustion property of biodiesel fuel. *Fire Science and Engineering* 23:19-24.
- Suh HK, Lee CS. 2016. A review on atomization and exhaust emissions of a biodiesel-fueled compression ignition engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58:1601-1620.
- Tesfa B, Mishra R, Zhang C, Gu F, Ball AD. 2013. Combustion and performance characteristics of CI (compression ignition) engine running with biodiesel. *Energy* 51:101-115.
- Tomasevic AV, Marinkovic SS. 2003. Methanolysis of used frying oil. *Fuel Processing Technology* 81:1-6.
- Tree DR, Svensson KI. 2007. Soot processes in compression ignition engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 33:272-309.

- Tsoutsos TD, Tournaki S, Paraíba O, Kaminaris SD. 2016. The used cooking oil-to-biodiesel chain in Europe assessment of best practices and environmental performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54:74-83.
- Ulusoy Y, Arslan R, Tekin Y, Sürmen A, Bolat A, Sahin R. 2018. Investigation of performance and emission characteristics of waste cooking oil as biodiesel in a diesel engine. *Petroleum Science* 15:396-404.
- Ulusoy Y, Tekin Y, Cetinkaya M, Kapaosmanoğlu F. 2004. The engine tests of biodiesel from used frying oil. *Energy Sources Part A* 26:927-932.
- Usta N, Öztürk E, Can Ö, Conkur ES, Nas S, Çon AH, Topcu M. 2005. Combustion of biodiesel fuel produced from hazelnut soapstock/waste sunflower oil mixture in a diesel engine. *Energy Conversion and Management* 46:741-755.
- Utlü Z, Kocak MS. 2008. The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. *Renewable Energy* 33:1936-1941.
- Woo DG, Kim TH. 2019. Fuel properties of biodiesel produced from beef-tallow and corn oil blends based on the variation in the fatty acid methyl ester composition. *Korean Journal of Agricultural Science* 46:941-953. [in Korean]
- Yamin J, Abu Mushref AJ. 2019. Performance and mapping of direct injection diesel engine using waste cooking oil biodiesel fuel. *Advances in Mechanical Engineering* 11:1687814019851679.
- Yesilyurt MK. 2018. The evaluation of a direct injection diesel engine operating with waste cooking oil biodiesel in point of the environmental and enviroeconomic aspects. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 40:654-661.
- Yu CW, Bari S, Ameen AA. 2002. A comparison of combustion characteristics of waste cooking oil with diesel as fuel in a direct injection diesel engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 216:237-243.
- Zhang Y, Dubé MA, McLean DD, Kates M. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource Technology* 89:1-16.