

소형 디젤기관에서 Waste Cooking Oil 바이오디젤 혼합유가 기관성능 특성에 대한 실험적 분석 Experimental Analysis on the Characteristics of Engine Performance by Blend of Waste Cooking Oil in Small Diesel Engine

조상곤*†
Sang-Gon Cho*†

(Received 15 September 2022, Revision received 09 December 2022, Accepted 12 December 2022)

Abstract : The purpose of this study is to evaluate the feasibility of used waste cooking oil as an alternative fuel in diesel engines. In this work, biodiesel was produced from lipase-catalyzed hydrolysis of waste cooking oil (WCO) followed by esterification of the hydrolyzed WCO. The hydrolysis of acylglycerin was carried out at 30°C in sodium and the esterification of WCO was carried out at 40°C with methanol in a solvent hydroxide medium. In this study, waste cooking oil was prepared to waste cooking oil generated from the franchise chicken stores, and applied to a diesel engine to confirm the possibility and cost-effectiveness of biodiesel waste cooking oil. The results showed that WCO is a promising feedstock for use in the production of biodiesel. As a result, biofuels of used waste cooking oil showed slightly higher of specific fuel consumption, and NOx. As carbon monoxide and soot were decreased, also decreased pressure was decreased but the rate of pressure rose.

Key Words : Waste Cooking Oil (WCO), Brake Specific Fuel Consumption, NOx, CO, Soot

1. 서 론

디젤기관에서 배출되는 대기오염물질이 대기환경 오염의 주요 원인으로 인식이 되었다. 그러므로 지구촌 전체가 규제를 강화하기 위한 법령을 더욱더 엄격히 하고 있다. 이에 대한 규제가 한층 강화되면서 동시에 새로운 대체에너지로 수소¹⁾ 및 전기 에너지에²⁾ 관한 연구가 활발하게 진행되

고 또한 새로운 경제발전 혁신 정책으로 국가 간 경쟁이 치열하게 진행되고 있다. 현재 새로운 재생에너지로 태양광,³⁾ 풍력,⁴⁾ 조력⁵⁾ 등이 다양하게 연구되고 있으며, 그 효율성을 높이기 위해서 개발 중에 있다. 하지만 현재 사용되고 있는 디젤기관에는 유해 배기배출물 규제에 저감과 기후변화 협약 대응 노력의 일환으로 기존의 디젤연료에 비해 함산소 연료인 바이오디젤이⁶⁻⁹⁾ 선박과 산업

*† 조상곤(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1937-8674) :
교수, 군산대학교 해양산업·운송과학기술학부 마린엔지니어링전공
E-mail: haerimho@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1845

*† Sang-Gon Cho(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1937-8674)
: Professor, Marine Engineering Major, Division of Marine Industry Transportation Science and Technology Marine Production System, Kunsan National University.
E-mail : haerimho@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1845

용 기계 및 디젤자동차의 저공해 대체연료로서 주목을 받고 있다. 또한 바이오디젤은 동물성 지방,¹⁰⁾ 식물성 기름,¹¹⁾ 폐식용유¹²⁾ 등 재생 가능한 자원으로 생산하는 재생산 에너지이기도 하다. 따라서 바이오디젤은 환경 친화적이며 재생 가능하다는 두 가치를 충족시키는 측면에서 많은 각광을 받고 있다. 이러한 장점에 기인하여 바이오디젤의 재생 및 대체연료로서의 가능성을 입증하고자 연소특성 및 배출가스 평가를 실시하였다. 또한 각기 다른 혼합율의 바이오디젤과 기존 일반 경유와 비교·분석하여 배출가스 특성 및 연소특성을 실험적으로 연구하고 바이오디젤의 연료특성과 디젤기관 적용특성을 분석하여 대기 저감 대책에 있어 새로운 가능성을 제시하고자 한다. 기존의 보편적인 측정방법과는 다른 점으로 추운 기온에서 점도 및 유동성 문제로 필터 막힘현상 등 예방하고 지속적인 정적연소기와 배기가스 분석기를 통해 연료의 특성을 비교 분석하여 다양한 기술 자료를 제공하고 디젤기관의 배출가스 저감대책에 따른 대기환경 개선에 기여하고자 한다. 따라서 수송부문에서 저탄소연료 바이오디젤의 국내 시장 확대와 국제 경쟁력 강화를 위해서는 보급 활성화가 요구되며, 이에 따른 관련 기반, 기술 및 정책 등의 개발이 시급한 실정이다. 또한 저탄소연료의 압축착화엔진에 적용할 경우, 연료의 물성치(세탄가, 발열량, 밀도, 점도, 표면장력 등)이 기관성능 및 배출가스에 미치는 연구가 필요하다. 이에 폐식용유 바이오디젤 연료를 온도변화에 대한 단점을 보완하기 위한 온도조절 장치를 구성하여 저온에 대한 지속 가능한 운전결과를 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1 바이오연료의 제조

본 폐식용은 식당에서 사용하고 폐유처리 과정에서 수집하였으며, 직접 연구실에서 1차 여과망에 응고된 부유물을 여과망으로 정제하여 제거하였고, 2차로 부직포 필터에 통과시켜서 촉매 진행과정의 원활한 시스템 유지를 위해서 잔존하는

이물질을 제거하였다.

이런 폐식용유는 촉매 방법으로 제조하였다.

1) 폐식용유 원료 제조

① 폐식용유 36 ℓ, 메탄올 7.2 ℓ, 가성소다(수산화나트륨) 324 g

② 제조기의 뚜껑을 열고 여과 장치를 거친 후 여과 망위에 여과지 한 장을 깔아놓는다.

③ 준비된 폐식용유를 여과 장치 안에 천천히 부어 넣는다. 이때 폐식용유에 포함된 200~300미크론 이상의 찌꺼기는 여과지에 걸러지고 1차로 걸러진 폐식용유만 교반 통에 투입한다.

④ 첨가제 메탄올을 가성소다용액을 섞은 후 교반 통에 투입한다.

2) 바이오디젤 제조 공정순서

① 1번 공정으로 원료의 순환을 위해서 교반 통에 순환호스를 연결하여 60분 동안 교반작동을 한 후에 글리세린 분리는 3시간 뒤에 이루어진다.

② 2번 공정으로 식용유에서 분리되어진 교반 통 하부에 침전된 글리세린을 배출하는 공정에 글리세린 순환 호스를 글리세린 용기에 연결하여 약 4ℓ 글리세린을 추출한다.

③ 3번 건조공정으로 교반 통을 1시간 동안 가열한 후에 순환하여 기체를 배출하고, 1시간 정도 순환하여 반복하여 건조과정을 마친다. 그리고 폐식용유에 글리세린이 남아 있을 경우에는 한 번 더 반응 조에서 증류하였으며, 증류된 바이오연료는 중화 과정을 한 번 더 하여 필터 막힘이 없도록 실험에 사용하였다.

2.2 실험장치

본 연구에서 실험장치는 선박용 동기발전기로 Fig. 1과 같이 구성하였다. 실험기관은 디젤기관으로 주요 제원은 Table 1와 같이 나타내었다. 동력장치 시스템은 부하에 대한 출력으로 와류형 전기동력계를 사용하여 부하를 측정하였고, 실시간 모니터링 장치를 구성하여 실린더 내의 압력측정은 첫 번째 실린더에 압전식(Piezo-electric type) 압력센서를 설치하여 증폭기를 통해서 실시간으로 모니터링하면서 운전하도록 변환기를 설치하였다. 그리고 연료소비율은 용적식 유량계를 사용하였다.

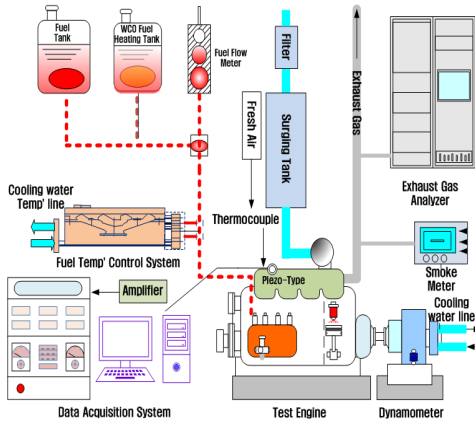


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Number of cylinder	6
Type of engine	Water-cooled
Cycle	4
Type of fuel injection	Direct injection
Bore × stroke (mm)	102 × 110
Piston displacement (cc)	5393
Max. output	60 kw/1,200 rpm
Compression ratio	17.5 : 1
Fuel injection timing	BTDC 22°CA
Firing order	1-5-3-6-2-4

기관을 운전하는 동안 지속적인 연료 순환으로 연료온도를 일정하게 유지하기 위하여 연료온도 조절기를 Table 2에, 기관의 흡입공기량은 기관의 입구에 오리피스식 공기유량계를 사용하였다. 그리고 기관의 흡기량을 원활하게 유지되도록 서지탱크(Surge tank)를 설치하여 흡기의 흐름이 균일하도록 하였다. 또한 배기배출물은 매연은 광투과식(Mexa-130S)를 사용하였다.

2.3 실험방법

본 실험장치의 동기회전기 1,800 rpm의 경우에 대하여 기관부하를 0%에서 100%까지 25% 간격으로 연료온도를 15℃로 일정하게 유지하면서 폐식용유 연료 혼합비를 체적으로 0~30%까지 10%

Table 2 Engine fuel control system

Engine fuel temp' control system	
Supply fuel pressure	0 ~ 0.5 bar
Water amount	1 ~ 2 Kg/cm ² , 30/min, 25℃
Control temp.	± 1℃
Max. supply	7 ℓ/min
Setting temp.	30~60℃
Cooling amount	9 Kw(7,500 Kcal/h)
Heating amount	6 Kw(5,000 Kcal/h)
Max. pressure	5 bar
Max. water temp.	25℃
Max. pressure	5 bar
Required pressure	2 bar
Water circulation pump	25 ℓ/min
Max. pressure build	0.4 bar
Capacity AT back pressure	
Max. pressure	0.5 bar
Max. water temp	110℃

간격으로 변화시키면서 실험하였다.

본 실험장치에 대한 3개의 파라미터 중 2개를 고정하고 하나만을 변화시키면서 오차범위를 최대한 줄이도록 실험하였다. 기관운전의 동일한 조건하에서 기관회전수 변동율은 ±0.5%이었고, 기관부하의 변동율은 ±1.5% 이하이었다.

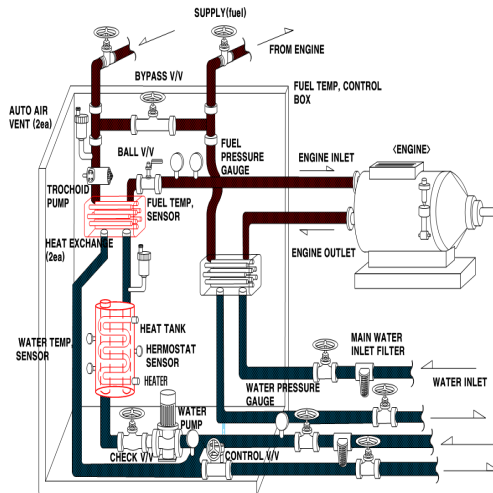


Fig. 2 Schematic diagram of fuel temperature control system apparatus

실험장치의 냉각수는 수냉식 열교환기를 사용하여 기관의 냉각수 입, 출구를 조절하였고, 윤활유 온도를 자동으로 일정하게 유지하여 기관의 운전 및 연소 상태를 파악하기 위하여 실시간으로 지압선도, 각 취부(배기관 입출구, 냉각수 입출구, 윤활유, 흡입공기)의 온도를 계측하였다.

본 연구의 배출가스 분석기와 매연측정기를 “0” 점 조정하고, 표준가스(측정범위 80%인 보정용 가스)농도와 일치하도록 보정실험을 한 후에 각종 배기배출물을 측정하였으며, 부하에 대한 정확한 동력을 계측하기 위하여 표준중량(5 kg) 추를 사용하여 압축보정을 한 후에 다시 역 순서로 보정실험을 하여 정확한 토오크 값을 확인한 후 동력을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료소비율

Fig. 3은 기관 부하의 변화에 따라서 기관회전수 1,800 rpm에서 폐식용유 연료소비율을 나타낸 그래프이다. 연료소비율은 부하가 증가함에 따라 점점 증가하는 경향이고, 폐식용유 바이오 혼합연료 첨가율이 증감함에 따라서 약간씩 증가했으며, 그 값은 WCO 10% 1.18%, WCO 20% 2.15%, WCO

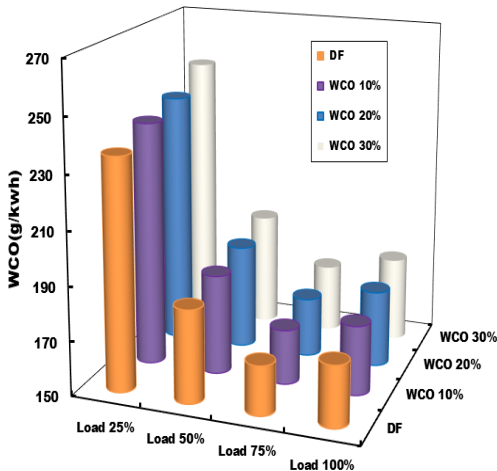


Fig. 3 Brake specific fuel consumption on various waste cooking oil at 1,800 rpm

30% 4.07%이며, 평균값은 2.47%로 최소로 증가하였다. 부하상태는 WCO 10%일 때 저부하에서 2.08%, 고부하에서 1.74%, WCO 20%일 때 저부하에서 3.35%, 고부하에서 3.20%, WCO 30%일 때 저부하에서 6.54%, 고부하에서 5.0% 증가하였다. 일반적인 디젤경유와 폐식용유 바이오연료에 비하여 약간씩 연료에 포함되어 있는 발열량에서 확인할 수 있다. 그 이유는 디젤경유에 비해서 발열량이 폐식용유 바이오연료가 작으므로 연료소비량이 증가하였으며, 기관의 부하 증가도 일정하게 증가하였다. 이것은 폐식용의 혼합유가 가지고 있는 탄소량 따라 일치하게 증가하였다. 그리고 연료소비율이 많이 소비되지 않은 이유는 폐식용유연료에 산소량 함유되어 있어서 연소실 내에서 완전연소에 활성화하여 연료소비율이 증가하는 양을 감소시키는데 영향을 미쳤다고 생각된다.¹³⁾

3.2 질소산화물(NOx)

Fig. 4는 질소산화물 배출물을 나타내는 그래프이며, 폐식용유 바이오연료 비율이 증가할수록 약간씩 증가하는 경향이다. 디젤경유에 비해서 폐식용유 바이오연료 부하 100%의 경우는 WCO 10%에서 1.36%, WCO 20%는 2.23%, WCO 30%는

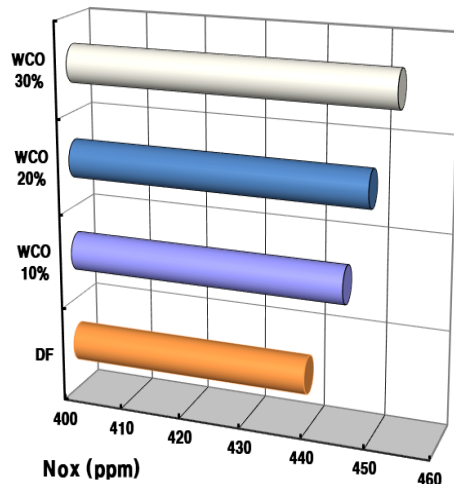


Fig. 4 NOx emission characteristics on various waste cooking oil at 1,800 rpm and load 100%

3.16%, 평균 증가율은 WCO 1.57% 약간 증가하였다. 그 이유는 폐식용유 바이오 혼합연료의 성분인 산소함량이 9.6% 함유하고 있어서 연소상태가 양호하게 촉진되었고, 그러므로 연소하는 과정에서 산소와 고온 반응하여 연소실 연소온도가 크게 증가하였다. Fig. 4는 고부하시에는 연소의 온도가 상승하므로 인하여 고부하영역에서 질소산화물은 많이 발생하였다. 그것은 연소실에 분사된 연료는 부하에 따라 증가하면서 발생된다는 여러 연구보고서와 비슷하였으며, 고부하영역에서 많이 형성되어 배출된다고 사료된다.^{6,9)}

3.3 일산화탄소(CO)

Fig. 5는 일산화탄소 배출물 그래프이며, 폐식용유 바이오연료 비율이 증가함에 따라 약간 감소하였다. 디젤경유에 비해서 폐식용유 바이오 혼합연료 부하 100%의 경우는 WCO 10%에서 -1.59%, WCO 20%는 -2.04%, WCO 30%는 -0.736%, 평균 감소율은 WCO -1.57% 약간 감소하였다. 일산화탄소 배출물은 저부하 시 연소불안으로 증가하다가 점점 감소하는 경향에서 전부하영역에서 연소 불안정으로 크게 증가한다. Fig. 5는 전부하영역에서는 연료의 농도가 많아져 불완전 연소로 배출되기 때문이다. 하지만 폐식용유

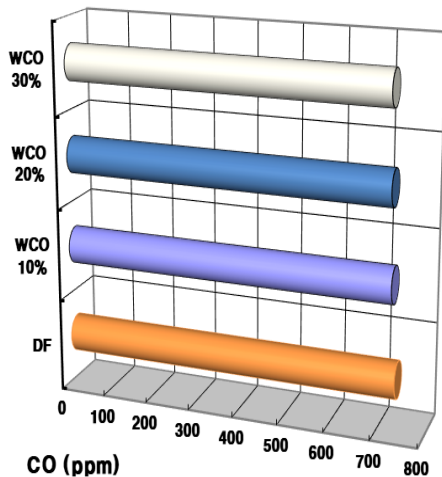


Fig. 5 CO emission characteristics on various waste cooking oil at 1,800 rpm and load 100%

바이오연료 첨가로 인하여 약간 감소하는 원인은 바이오연료에 포함된 산소함유량에 의해 연소를 양호하게 촉진하기 때문으로 사료된다.¹²⁾

3.4 매연

Fig. 6은 매연배출물 그래프이며, 폐식용유 바이오 혼합연료 비율이 증가함에 따라 감소하였다. 디젤경유에 비해서 폐식용유 바이오 혼합연료 부하 100%의 경우는 WCO 10%에서 -5.43%, WCO 20%는 -9.78%, WCO 30%는 -8.05%, 평균 감소율은 WCO -7.75% 약간 감소하였다. 매연배출물은 불완전한 연소로 배출되는 원인으로 바이오연료 첨가로 인하여 연료 탄소량이 줄어들고, 바이오연료에 함유되어 있는 산소함량이 증가하여 연료의 미립자가 연소 형성에 산소와 접촉면이 활성화되어 양호한 연소가 형성되었기 때문으로 생각된다.⁶⁾ 본 실험의 결과도 폐식용유 바이오 혼합연료 10% 첨가했을 경우보다 감소율이 바이오연료 30%에서 많이 증가하였다.

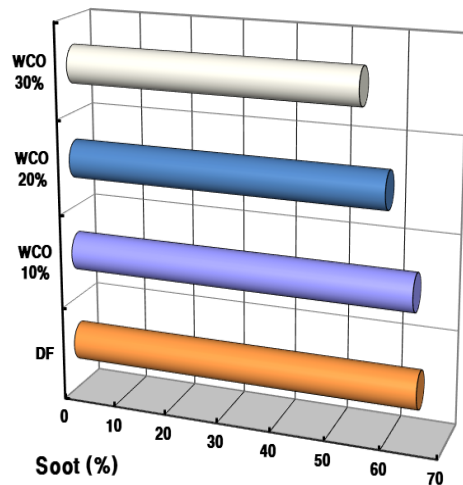


Fig. 6 Soot emission characteristics on various waste cooking oil at 1,800 rpm and load 100%

3.5 실린더 압력

Fig. 7은 크랭크 각도에 대한 실린더 압력을 나타낸 선도이다.

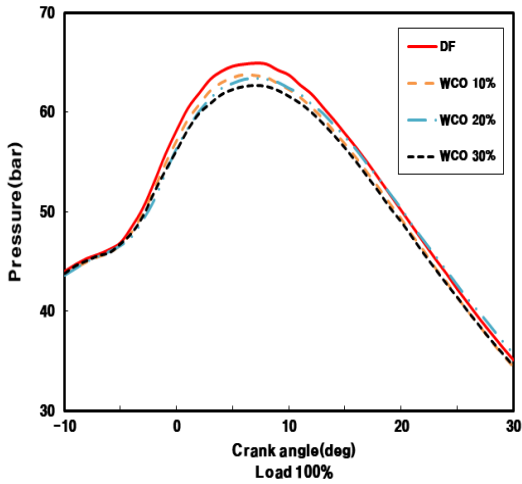


Fig. 7 Cylinder pressure characteristics on various waste cooking oil at 1,800 rpm

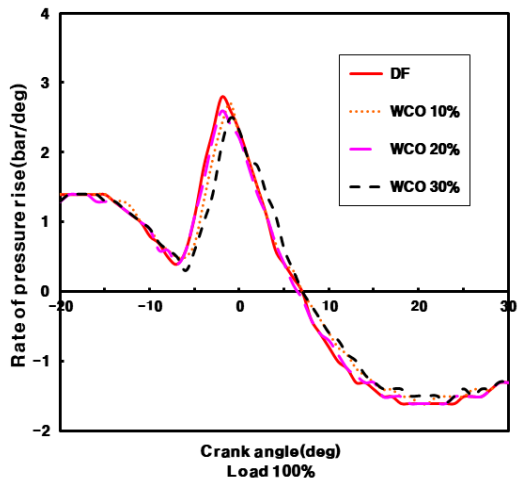


Fig. 8 Rate of heat release characteristics on various waste cooking oil at 1,800 rpm

폐식용유 바이오 혼합연료의 첨가 비율이 증가할수록 감소하는 경향이다. 디젤경유에 비해서 폐식용유 바이오 혼합연료 부하 100%의 경우, 10%에서 -2.62% 감소, 20%는 -3.40% 감소, 30%는 -3.86% 감소하였다. 또한 평균 감소율은 -3.30%로 감소하여 바이오연료가 증가하였을 경우에 실린더 압력은 약간씩 낮아지는 경향이 나타내었다. 연료에 포함되어 있는 발열량이 디젤경유에 비하여 폐식용유 바이오 혼합연료의 발열량이 적은 관계로 조금씩 낮아졌으나, 폐식용유 바이오 혼합연료 성분인 산소함유량이 있어 연소실의 연소상태가 양호하게 촉진되어 미친 영향으로 사료된다.¹¹⁾ 그것은 실험기관의 부하에 의하여 증가하면서 일정하게 점점 증가하는데, 분사된 연료의 연소 활성화에 산소와 고온반응하여 크게 증가하였기 때문으로 생각된다. 또한 고부하 시에는 실린더 연소의 온도가 상승하므로 고부하영역에서 그 영향이 더욱더 많이 촉진되었다.

3.6 압력 상승률

Fig. 8은 압력상승율을 나타내는 그래프이며, 폐식용유 바이오 혼합연료 첨가비율이 증가할수록 감소하는 경향이다. 디젤경유에 비해서 폐식용유 바이오 혼합연료 부하 100%에서 10% 경우는

-4.24% 감소, 20%는 -6.36% 감소, 30%는 -8.48% 감소하였다. 또한 평균 감소율은 -6.36%로 감소하였다. 그것은 발열량이 적어서 압력이 감소하는 경향으로 압력상승율도 감소하는 경향으로 나타났다. WCO 20%와 WCO 30%에서는 디젤경유에 비하여 폐식용유 바이오 혼합연료가 약간씩 착화시기가 빨라진 것은 산소의 양에 영향을 받기 때문인 것으로 생각되며,¹¹⁾ 그 이유는 산소의 양이 많을수록 착화가 빨리 이루어지기 때문이고 연료에 포함 산소량이 폐식용유 바이오 혼합연료 첨가 비율이 착화점을 빠르게 나타난 것으로 생각된다.

4. 결론

바이오디젤의 재생 및 대체연료로서의 가능성을 입증하고자 연소특성 및 배출가스 평가를 실시하였다. 폐식용유 바이오디젤의 연료특성과 디젤기관 적용특성을 분석하여 대기저감 대책에 있어서 새로운 가능성을 제시하고자 한다. 이에 폐식용유 바이오디젤 연료를 온도변화에 대한 단점을 보완하기 위한 온도조절 장치를 구성하여 저온에 대한 지속 가능한 운전 연구결과를 분석·제고하고자 한다.

- 1) 연료소비율은 폐식용유 바이오연료 소비율

값은 WCO 10% 1.18%, WCO 20% 2.15%, WCO 30% 4.07%이며, 평균값은 2.47%로 최소로 증가하였다. 부하상태는 WCO 10%일 때 저부하에서 2.08%, 고부하에서 1.74%, WCO 20%일 때 저부하에서 3.35%, 고부하에서 3.20%, WCO 30%일 때 저부하에서 6.54%, 고부하에서 5.0% 증가하였다.

2) 질소산화물은 폐식용유 바이오연료 부하 100%의 경우는 WCO 10%에서 1.36%, WCO 20%는 2.23%, WCO 30%는 3.16%, 평균 증가율은 WCO 1.57% 약간 증가하였다.

3) 일산화탄소는 폐식용유 바이오연료 부하 100%의 경우는 WCO 10%에서 -1.59%, WCO 20%는 -2.04%, WCO 30%는 -0.736%, 평균 감소율은 WCO -1.57% 약간 감소하였다.

4) 매연배출물은 폐식용유 바이오연료 부하 100%의 경우는 WCO 10%에서 -5.43%, WCO 20%는 -9.78%, WCO 30%는 -8.05%, 평균 감소율은 WCO -7.75% 약간 감소하였다.

5) 실린더 압력은 폐식용유 바이오연료 부하 100%의 경우, 10%에서 -2.62% 감소, 20%는 -3.40% 감소, 30%는 -3.86% 감소하였다. 또한 평균 감소율은 -3.30%로 감소하여 바이오연료를 첨가하였을 경우에 실린더 압력은 약간씩 낮아지는 경향을 알 수 있었다.

6) 압력상승율은 폐식용유 바이오연료 부하 100%에서 10% 경우는 -4.24% 감소, 20%는 -6.36% 감소, 30%는 -8.48% 감소하였다. 또한 평균 감소율은 -6.36%로 감소하였다. 그것은 폐식용유 발열량이 적어서 압력이 감소하는 경향으로 압력상승율도 감소하는 경향으로 나타났다.

Reference

1. D. H. Youn, S. G. Lee and C. H. Park, 2022, "Legal Issues on Hydrogen Bunkering Through Domestic Law", The Hydrogen and New Energy Society, Vol. 33, No. 2, pp. 142-147. (<https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.2.142>)
2. K. M. Song, 2022, "Electrical Safety and Carbon Neutrality", The Korea Institute of Electrical Engineers, Vol. 71, No. 2, pp. 17-23.
3. K. S. Kim, J. S. Choi, Y. B. Yoon and S. J. Park, 2022, "A Study on Determinants of Photovoltaic Energy Growth: Panel Data Regression with Autoregressive Disturbance", Vol. 10, No. 1, pp. 6-15. (<https://doi.org/10.21218/CPR.2022.10.1.006>)
4. T. H. Cha, W. J. Chung and H. J. Lee, 2022, "Structural Safety in Installation System for Monopile Basic Construction of Offshore Wind Power Generators", Journal of the Korea Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 21, No. 2, pp. 31-38. (<https://doi.org/10.14775/ksmpe.2022.21.02.031>)
5. S. H. Jeong and N. J. Kwon, 2020, "Analysis of Experience Locations and Curriculum for the Development of Elementary Science Experience Learning Programs Using the Sihwa Tidal Power Plant", Korea Open Access Journals, Vol. 33, No. 3, pp. 278-288. (<http://doi.org/10.17965/kjee.2020.33.3.278>)
6. J. K. Yeom and J. H. Yoon, 2015, "Statistical Analysis of Experimental Results on Emission Characteristics of Biodiesel Blended Fuel", The Korea Society of Mechanical Engineers A, Vol. 39, No. 12, pp. 1199-1206. (<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.12.1199>)
7. J. K. Yeom and H. S. Ha, 2013, "An Experimental Study on Application of Biofuel to Diesel Engine", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 29-37. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2013.17.2.029>)
8. J. K. Yeom, 2015, "The Study of Emission Characteristics of Biodiesel Fuel in Diesel Engines", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 56-63. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2015.19.1.056>)
9. J. P. G. Shou, M. Obounou, R. E. Tchame, M.

- H. Babikir and T. C. Kofane, 2021, "Combustion Characteristics and NO Formation Characteristics Modeling in a Compression Ignition Engine Fuelled with Diesel Fuel and Biofuel", *Hindawi Journal of Combustion*, 7111040, p. 13.
(<https://doi.org/10.1155/2021/7111040>)
10. R. Yahyaee, B. Ghobadian and G. Najafi, 2012, "Waste Fish Oil Biodiesel as a Source of Renewable Fuel in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, pp. 312-319.
(<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.025>)
11. M. Gumus, 2010, "A Comprehensive Experimental Investigation of Combustion and Heat Release Characteristics of a Biodiesel(hazelnut kernel oil methyl ester) Fueled Direct Injection Compression Ignition Engine", *Fuel* 89, pp. 2802-2814.
(<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.01.035>)
12. M. Mohamed, C. k. Tan, A. Fouda, M. S. Gad, 8. A. E. Osayed and A. F. Hashem, 2020, "Diesel Engine Performance, Emissions and Combustion Characteristics of Biodiesel and Its Blends Derived from Catalytic Pyrolysis of Waste Cooking Oil", *Energies*, 13, 5708.
(<https://doi.org/10.3390/en13215708>)
13. A. Afzal, M. E. M. Soudagar, A. Belhocine, M. Kareemullah, N. Hossain, S. Alshahrani, A. Saleel C, R. Subbiah, F. Qureshi and M. A. Mujtaba, 2021, "Thermal Performance of Compression Ignition Engine Using Higher Content Biodiesels: A Comparative Study with Diesel Fuel", *Sustainability*, 13, 7688.
(<https://doi.org/10.3390/su13147688>)