

선박디젤기관에서 바이오디젤 폐식용유의 연소특성에 대한 실험적 연구

조상곤[†]

(Received February 24, 2015 ; Revised March 16, 2015 ; Accepted April 28, 2015)

Experimental Study on Combustion Characteristics of Biodiesel Waste Cooking Oil in Marine Diesel Engine

Sang-Gon Cho[†]

요약: 최근에 환경오염 문제와 대체에너지 문제에 많은 관심을 가지고 있다. 디젤기관은 세계적으로 연료의 경제성 때문에 사용이 증가할 것이다. 그러므로 선박용기관의 대기오염 문제도 여러 분야에서 큰 관심이 되고 있다. 화석연료로부터 배출되는 유해 배기가스를 줄이기 위하여 대체연료기술이 개발되고 있다. 이러한 신재생에너지의 바이오디젤연료는 기존 디젤 연료를 대체할 친환경 에너지로 각광을 받고 있으며, 일정한 비율로 디젤연료와 혼합하면 기존 디젤기관에 개조 없이 사용 가능하다. 본 연구에서 바이오디젤연료가 선박디젤기관의 연소특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 폐식용유로부터 제조된 바이오디젤유를 엔진에 적용하여 실험을 수행하였다. 폐식용 성분에는 세탄가와 점도가 높은 성분이 있고, 탄소함유량이 적으면서 산소함유량이 잔존하고 있다. 연구 결과 연료소비율은 증가하고, 압력, 압력상승률 및 열발생율은 감소하였다.

주제어: 바이오디젤연료, 제동연료소비율, 압력, 압력상승률, 열발생율

Abstract: Environmental pollution and alternative energy has attracted increasing interest. The use of diesel engines is expected to increase in the world owing to their fuel economy. The problem of air pollution emissions from marine engines is causing a major concern in many areas. An alternative fuel was introduced as an environmentally friendly fuel to reduce the toxic emissions from conventional fossil fuels. Biodiesel fuel, which is a renewable energy is highlighted as environmentally friendly energy. This energy can be operated in regular diesel engines when it is blended with invariable ratios without making changes. In this study, a bio-diesel fuel was produced from waste cooking oil and applied to a marine diesel engine to examine the effects on the characteristics of combustion. Waste cooking oil contains a high cetane number and viscosity component, a low carbon and oxygen content. As a result, the brake specific fuel consumption was increased, and the cylinder pressure, rate pressure rise and rate of heat release were decreased.

Keywords: Biodiesel blend cooking oil Biodiesel blend cooking oil, Specific fuel oil consumption, Cylinder pressure, Rate of pressure rise, Rate of heat release

1. 서론

최근에 화석연료의 소비가 확대되면서 환경오염문제를 발생시키고, 자원의 급속한 감소세로 세계는 에너지확보에 심혈을 기울이고 있다. 이에 새로운 에너지 개발을 강력히 추진하고 있으며, 자원고갈과 기후변화의 환경위기에서 새로운 저탄소 녹색성장을 핵심전략으로 각국에서는 연구에 몰두하고 있다. 하지만 디젤기관은 열효율이 좋고, 큰 마력을 이용하기 편리하지만 대기오염을 일으키므로 인하여 많은 규제를 하고 있다. 또한 육상기관[1] 및 선박기관[2]에서도 규제를 점차적으로 강화하고 있다. 이는 선박 대기오염물질 규제의 필요성을 언급한 국제해사기구(International Maritime Organization,

IMO)의 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee, MEPC)에서 시작하였다. 따라서 NOx의 3차 규제(Tier III)가 확정되었다. 친환경적인 에너지를 생산하기 위한 연구는 자연으로부터 재배하여 얻을 수 있으며, 이런 재생 가능한 바이오연료 에너지에 관심을 갖게 되었다. 자연에서 재배하는 식물인 유채유[3], 대두유[4], 팜[5] 등이 있는데, 이런 바이오연료는 배출가스를 저감하는데 효과적이면서 또한 재배하는 과정에서 CO₂를 흡수하기 때문에 온실가스를 저감하는데 효과적이다. 그리고 바이오연료는 디젤기관을 변형하지 않아도 된다는 연구가 있고[6][7], 연료의 성분도 물성치가 비슷하여 독성이 없고 세탄가가 높은 장점을 가지고 있을 뿐만

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1937-8674>): Division of Ships operating center, Kunsan National University, 558, Daehak-ro, Kunsan, Jeonbuk 573-701, Korea, E-mail: haerimho@kunsan.ac.kr, Tel:063-469-1727

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

아니라 연료에 산소를 포함하고 있어 배출가스를 저감 할 수 있다고 알려져 있다[8]. 하지만 생산과 판매하는 시스템이 시장가격에 의한 곡물가격 변동성이 커지면서 시장경제의 문제가 발생 할 수도 있다.

그래서 폐식용유[9]를 재활용하는 방안으로 산업생산과정과 일반가정 및 유명한 프랜차이즈 가게에서 버려지는 폐식용유를 재활용하면 에너지 재활용면에서 큰 이익이 발생하고, 생산비용을 대폭 절감 할 수 있다. 이런 폐식용유를 이용하여 자원 재생 가능한 자원으로 경제적 이익과 환경적인 오염을 감소 할 수 있는 폐식용유를 회수하여 직접 정제과정을 거쳐 바이오연료를 생산하여 그 가능성을 연구하고자 한다.

이러한 친환경 재생바이오연료를 어선에서 사용되었던 기관에 직접 적용하여 지속가능성을 연구하고[10] 또한 바이오연료의 특성인 연료의 고점도, 고세탄가, 연료의 산소 함유량 및 발열량에 미치는 영향에 따라 연소특성에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 폐식용유 바이오연료 제조 과정

2.1 폐식용유 바이오연료 제조

최근 학교 식당이나 음식점 등에서 많이 배출하는 업소를 선정하여 그 중에 자주 많이 폐식용유를 배출하는 통닭집을 선정하여 회수를 하였다. 요즘 유명한 프랜차이즈 업소에서 사용하는 식용유의 종류도 다양하여 그 중 유채유를 사용하는 것을 선정하여 20통(360리터) 수집하였다.

먼저 침전상태로 방치하여 아래 침전물을 제거하고, 그 다음 부유물을 여과망으로 필터링을 하여 1차 여과망에 응고된 부유물을 정제하였고, 2차로 부직포 필터에 통과시켜서 잔존하는 이물질 제거하였다.

이런 폐식용유는 촉매를 사용하는 방법으로 제조하였다. 폐식용유 대 알코올 혼합비율로 하여 교반기 60리터에 약 36리터 폐식용유를 넣고 메탄올 7.2리터, 가성소다 324g을 섞은 후 교반통에 넣어 약 65℃ 조건하에서 가열하였다.

그리고 24시간 동안 교반 제조하였다. 그리고 반응 후 24시간 정도 상온에 방치하여 글리세린 층을 바이오연료 층과 분리하기 위하여, 아래 글리세린 층을 따로 배출하였다. 상부 바이오연료 층을 다시 가열하여 약 150℃ 이전까지는 미반응 메탄올을 제거하였고, 바이오연료 층인 340~420℃ 구간에서 증류하였다. 그리고 폐식용유에 글리세린이 남아 있을 경우에는 한 번 더 반응조에서 증류하였으며, 증류된 바이오연료는 중화과정 없이 실험에 사용하였고 디젤경유와 비교한 그의 물성치는 Table 1과 같다.

-분석법-

글리세린 분석은 ASTM 1615-60법을 사용하였고, 다음 식에 의하여 유지의 전환율이 계산되었다.

$$\text{전환율(\%)} = \frac{\text{실제 생성된 글리세린 양}}{\text{이론적인 생성 글리세린 양}} \times 100$$

Table 1: Properties of test fuels

(한국석유관리원)

Item	Test fuels	
	Diesel fuel	BDCO100
Oxygen(Wt,%)	0	9.6
Kinetic viscosity (cSt@40°C)	2.517	3.754
Sulfur(%)	0.04	0.01
Specific Gravity(15°C)	0.8269	0.8752
Cetane Index	51.4	57.5
Calorific value(MJ/kg)	42.8	36.85
Flash point(°C)	78	129

3. 실험

3.1 실험장치

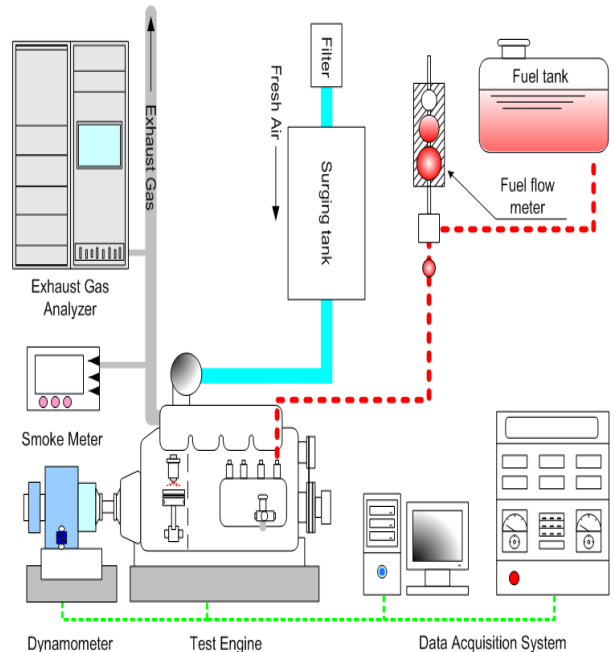


Figure 1: Schematic diagram of experimental apparatus

본 실험기관은 선박용 디젤기관으로 주요 제원은 Table 2에 나타내었고, 실험장치도는 Figure 1에 구성하였다. 기관의 출력은 와류형 전기동력계를 사용하여 측정하였고, 연소실의 압력측정은 첫 번째 실린더에 압전식(Piezo-electric type) 압력변환기를 설치하였다.

그리고 연소온도는 각 실린더의 연소실내에 열전대(R-type)를 설치하여 측정하였으며, 연료소비율은 용적식 유량계 및 고정도 연료소비량계(FM-257)를 사용하였다. 연료온도를 일정하게 유지하기 위하여 연료온도 조절기를(FTCH-0906) 사용하였으며, 흡입공기량의 계측은 오리피스식 공기유량계와 유량계(50MC-4F)를 사용하였다. 그리고 기관의 흡기측에 서지탱크(Surge tank)를 설치하여 흡기의 흐름이 균일하여 지도록 하였다. 또한 배기배출물은 분석

기(Signal emirak rag 4873)와 Test 350, 매연은 광투과식 (Mexa-130S)를 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Table 2: Specification of test engine

Item	Specification
Number of cylinder	6
Type of engine	Water-cooled, supercharged
Cycle	4
Type of fuel injection	Direct injection
Bore× stroke (mm)	102 × 110
Piston displacement (cc)	5,393
Max. output	60kW/1,200 rpm
Compression ratio	17.5 : 1
Fuel injection timing	BTDC 22°CA
Firing order	1-5-3-6-2-4

3.2 실험방법

본 연구에서는 기관회전속도 1,800rpm의 경우에 대하여 기관부하를 0%에서 100%까지 25% 간격으로 유지하면서 바이오연료 혼합비율 체적으로 0%~50%까지 10% 간격으로 변화시키면서 실험하였다.

3개의 파라미터 중 2개를 고정하고 하나만을 변화시키면서 실험하였다. 동일한 조건하에서 기관회전속도의 변동율은 ± 0.5%이었고, 기관부하의 변동율은 ± 1.5% 이하 이었다.

실험을 하는 동안 수냉식 열교환기를 사용하여 기관의 냉각수와 윤활유 온도를 일정하게 유지하였고 기관의 작동 및 연소 상태를 파악하기 위하여 지압선도, 각 부취(배기관 입출구, 냉각수 입출구, 윤활유, 흡입공기)의 온도를 측정하였다.

또 배기가스 분석기와 매연측정기를 “0” 점 조정하고, 표준가스(측정범위 80%인 보정용 가스)농도와 일치하도록 보정실험을 한 후에 각종 배기배출물을 측정하였으며, 동력계는 표준중량(5kg)의 추를 사용하여 압축 인장의 보정실험을 하여 정확한 토오크 값을 확인한 후 동력을 측정하였다.

그리고 연료온도 조절기(FTCH-0906)를 사용하여 연료온도를 15℃로 일정하게 하였다. 기존 연료시스템 장치는 연료공급필터 전의 온도가 연료탱크의 온도보다 디젤경유 및 바이오연료 모두 약 3℃ 정도 상승하고 있고, 필터 후에서의 온도는 필터 전에서의 온도 보다 상승하고 있었다. 이것은 연료펌프의 압력으로 인하여 연료온도가 상승하고, 또한 순환되는 연료온도는 공급연료보다 3℃정도 높게 나타나고 있어서 온도변화에 대한 편차 없이 실험을 하였다.

4.1 연료소비율

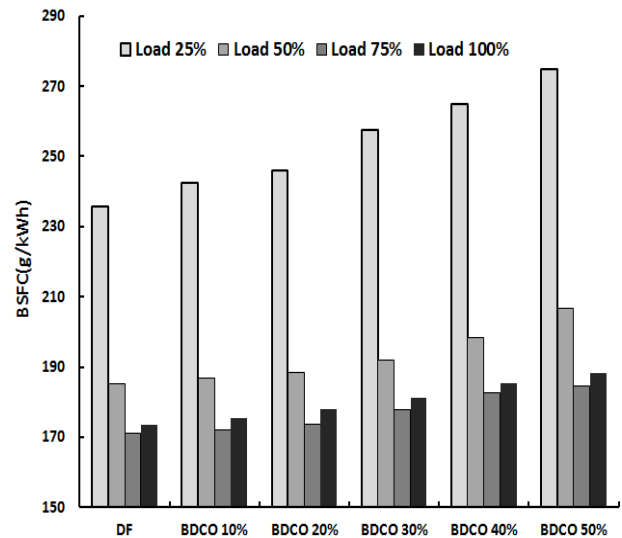


Figure 2: Brake specific fuel consumption on various bio-diesel blend cooking oil at 1800rpm

Figure 2는 기관회전수 1,800rpm에서 부하의 변화에 따른 바이오연료 연료소비율을 나타낸 그래프이다.

연료소비율은 부하가 증가함에 따라 약간씩 감소하는 경향이고, 바이오연료 첨가비율이 증가함에 따라서 증가하는 경향이다. 디젤경유에 비해서 바이오연료 10% 일 때 부하 25%에서 2.95% 증가, 부하 100%에서 1.15% 증가, 20% 일 때 부하 25%에서 4.36% 증가, 부하 100%에서 2.62% 증가, 30% 일 때 부하 25%에서 9.31% 증가, 부하 100%에서 4.38% 증가, 40% 일 때 부하 25%에서 12.48% 증가, 부하 100%에서 6.84% 증가, 바이오연료 50% 일 때 부하 25%에서 16.73% 증가, 부하 100%에서 8.52%로 증가하였다. 그리고 바이오연료를 첨가하였을 경우 평균 증가율은 25%에서 9.17% 증가, 50%에서 4.95% 증가, 75%에서 4.14% 증가, 100%에서 4.70%로 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 최저 증가율은 부하 75%에서 나타났었다. 그 이유는 디젤 경유에 비해서 발열량이 14% 정도 바이오연료가 적어서 연료소비량이 증가하였고, 바이오연료가 가지고 있는 탄소량성분에 따라 일치하게 증가하였다. 또한 산소량이 9.6% 함유하여 연소가 활성화 하여 양호한 연소가 형성된 것으로 생각된다[11]. 바이오연료의 발열량에 비하여 연료소비율이 많이 증가하지 않았는데 그 원인은 연소상태에서 바이오연료가 가지고 있는 세탄가와 산소함유량에 기인된 것으로 보인다.

4.2 압력

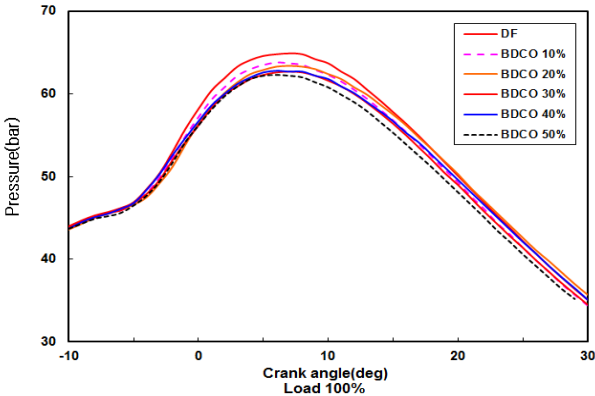


Figure 3: Pressure on various biodiesel blend cooking oil at 1800rpm and load 100%

Figure 3은 압력을 나타내는 그래프이며, 바이오연료의 첨가 비율이 증가 할수록 감소하는 경향이다. 디젤경유에 비해서 바이오연료 부하 100%의 경우 10%에서 -1.69% 감소, 20%는 -2.31% 감소, 30%는 -2.46% 감소, 40%는 -3.24% 감소, 50%에서 -3.39%로 감소하였다. 또한 평균 감소율은 -2.62%로 감소하여 바이오연료를 첨가하였을 경우에 실린더 압력은 약간 씩 낮아지는 경향을 알 수 있었다.

그 이유는 디젤경유에 비하여 바이오연료의 발열량이 작은 관계로 조금씩 작아졌으나, 바이오연료 성분인 산소 함유량이 9.6%가 함유하고 있어 연소상태가 양호하게 촉진되었다[12]. 그것은 연소과정에서 산소와 고온반응하여 크게 증가하였기 때문으로 생각된다. 또한 저부하시보다 고부하시에는 연소의 온도가 상승하므로 고부하영역에서 그 영향이 더욱더 기인하여 많이 발생한다. 그것은 실린더내의 부하에 따라 압력이 상승하여 증가하므로 고온반응의 조건이 이루어져 고부하영역에서 고온이 형성되기 때문으로 생각된다.

4.3 압력상승율

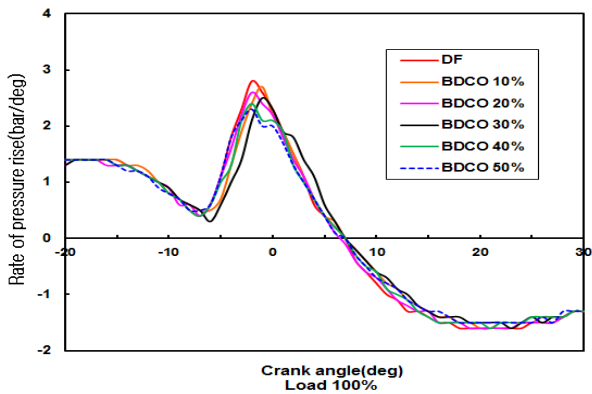


Figure 4: Rate of pressure rise on various biodiesel blend cooking oil at 1800rpm and 100%

Figure 4는 압력상승율을 나타내는 그래프이며, 바이오연료 첨가비율이 증가 할수록 감소하는 경향이다. 디젤경유에 비해서 바이오연료 부하 100%에서 10% 경우는 -3.57% 감소, 20%는 -3.70% 감소, 30%는 -3.85% 감소, 40%는 -4.0% 감소, 50%에서 -4.17%로 감소하였다. 또한 평균 감소율은 -3.86%로 감소하였다. 그것은 발열량이 적어서 압력이 감소하는 경향으로 압력상승율도 감소하는 경향으로 나타났다. BDCO 40%와 BDCO 50%에서는 디젤경유에 비하여 바이오연료가 약간씩 착화시기가 빨라진 것은 산소의 양에 영향을 받기 때문인 것으로 고려된다. 그 이유는 산소의 양이 많을수록 착화가 빨리 이루어지기 때문이며, 연료에 포함 산소량이 바이오연료 첨가비율이 많은 부분에서 착화점이 빠르게 나타난 것으로 생각된다[13]. 하지만 실험 결과 모든 부분에서 그런 경향을 보이지 않았다. 바이오연료에 포함되어 있는 성분이 세탄가와 점도, 발열량과 산소 함유량 등이 연료의 미립화 및 분무특성 조건에 따라 영향을 미친다는 연구가 있고, 이 부분에는 앞으로 더 연구가 되리라 생각된다.

4.4 열발생을

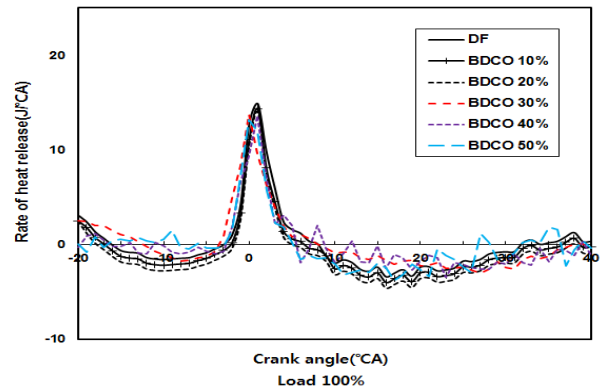


Figure 5: Rate of heat release on various biodiesel blend cooking oil at 1800rpm and 100%

Figure 5는 열발생율 그래프이며, 바이오연료 비율이 증가함에 따라 약간 감소하였다. 디젤경유에 비해서 바이오연료 부하 100%의 경우 10%에서 -3.69% 감소, 20%는 -5.91% 감소, 30%는 -7.26% 감소, 40%는 -8.60% 감소, 50%에서 -11.30%로 감소하였다. 또한 평균 감소율은 -7.35%로 감소하였다.

Ahn *et al.* [14]은 동일한 분사압력 조건에서 디젤경유와 바이오연료를 비교 하였을 때 바이오연료의 분무도달 거리는 전체 진행기간에서 길게 형성되는 경향을 보였으며, 이는 높은 점도로 인해 분열빈도가 작아지고 입자의 크기가 디젤경유보다 커질 뿐 아니라 밀도가 높은 바이오연료의 운동에너지가 커지기 때문이라 하였다. 또한 이는 연료점도가 높아서 증발속도 차이라고 한다.

Park *et al.* [15]은 피스톤이 상승하면서 실린더압력이 상

사점 근처에서 증가율이 급격히 감소된다. 이점이 연료분사시점이며 분사된 연료가 증발되면서 증발잠열에 의하여 연소실온도가 저감되고 압력이 낮아진 결과이다. 이후 급격한 압력상승이 시작되는데 이점이 착화시점이라고 하였다. 이것은 바이오연료가 산소를 함유하고 있어 양호한 연소가 가능하지만 디젤경유에 비하여 바이오연료는 발열량이 낮아 혼합율의 증가와 함께 실린더 압력 상승량이 저감되어 열발생율도 저감되었다고 생각된다.

4.6 매연

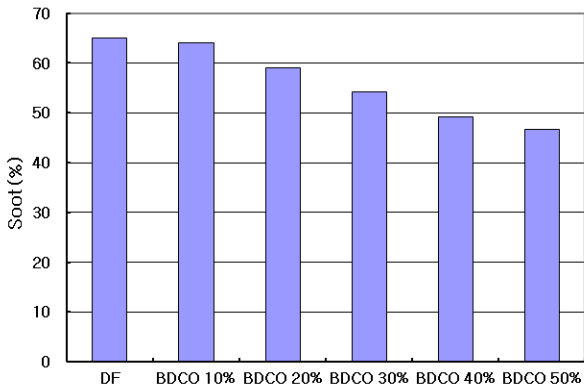


Figure 6: Soot emission characteristics on various biodiesel blend cooking oil at 1800rpm and load 100%

Figure 6은 매연배출물 그래프이며, 바이오연료 비율이 증가함에 따라 감소하였다.

디젤경유에 비해서 바이오연료 부하 100% 경우 10%에서 -1.54% 감소, 20%는 -9.37% 감소, 30%는 -16.74% 감소, 40%는 -24.42% 감소, 50%에서 -28.42%로 감소하였다. 매연배출물은 불완전한 연소로 배출되는 원인인데 바이오연료 첨가는 탄소량의 감소와 흡산소량이 증가하여 연료입자가 산소와 접촉면이 활성화 되어 양호한 연소가 형성하여 기인하기 때문이다. 본 실험의 결과도 바이오연료 10% 첨가했을 경우보다 감소율이 50%에서 가장 많이 감소하였다. 그것은 바이오연료에 포함되어 있는 산소함유량이 부족한 과농한 영역의 연소를 활성화하였기 때문으로 생각된다[16].

5. 결 론

디젤기관에서 배출하는 배기가스가 환경오염의 주원인으로서 이에 대체에너지에 관심이 증가되고 있는데, 선박기관에서도 대체에너지를 이용하여 환경오염을 저감하는데 연구하고자 한다. 바이오디젤연료는 친환경 재생에너지로 기존 디젤기관의 개조 없이 사용이 가능하다. 본 연구에서 바이오디젤연료가 연소특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 폐식용유를 이용하여 제조하여, 실용기관에 가능성을 연구하여 가능성을 확인하였다. 그 실험적 분석·고찰한 결과는 다음과 같다.

1. 연료소비율은 부하가 증가함에 따라 약간씩 감소하는 경향이고, 바이오연료 첨가비율이 증감함에 따라서 약간씩 증가하였다. 디젤경유에 비해서 바이오연료 10% 일 때 부하 100%에서 1.15% 증가, 20% 일 때 부하 100%에서 2.62% 증가, 30% 일 때 부하 100%에서 4.38% 증가, 40% 일 때 부하 100%에서 6.84% 증가, 바이오연료 50% 일 때 부하 100%에서 9.67%로 증가하였다. 그리고 최저 증가율은 부하 75%에서 나타났었다.
2. 실린더 압력은 바이오연료 첨가비율이 증가 할수록 감소하는 경향이다. 디젤경유에 비해서 바이오연료 부하 100%의 경우 10%에서 -1.69% 감소, 20%는 -2.31% 감소, 30%는 -2.46% 감소, 40%는 -3.24% 감소, 50%에서 -3.39%로 감소하였다. 또한 평균 감소율은 -2.62%로 감소하여 바이오연료를 첨가하였을 경우에 실린더 압력은 약간씩 낮아지는 경향을 알 수 있었다.
3. 실린더 압력상승율은 바이오연료 체적비율이 증가하였을 경우에 바이오연료 첨가비율이 증가 할수록 감소하는 경향이다. 디젤경유에 비해서 바이오연료 부하 100%에서 10% 경우는 -3.57% 감소, 20%는 -3.70% 감소, 30%는 -3.85% 감소, 40%는 -4.0% 감소, 50%에서 -4.17%로 감소하였다. 또한 평균 감소율은 -3.86%로 감소하였다. 그것은 발열량이 적어서 압력이 감소하는 경향으로 압력상승율도 감소하는 경향으로 나타났다. BDCO 40%와 BDCO 50%에서 디젤경유에 비하여 바이오연료가 약간 착화시기가 빨라진 것은 산소의 양에 영향을 받기 때문인 것으로 고려된다.
4. 열발생율은 바이오연료 비율이 증가함에 따라 약간 감소하였다. 디젤경유에 비해서 바이오연료 부하 100%의 경우 10%에서 -3.69% 감소, 20%는 -5.91% 감소, 30%는 -7.26% 감소, 40%는 -8.60% 감소, 50%에서 -11.30%로 감소하였다. 또한 평균 감소율은 -7.35%로 감소하였다. 이것은 바이오연료가 산소를 함유하고 있어 양호한 연소가 가능하지만 디젤경유에 비하여 바이오연료는 발열량이 낮아 혼합율의 증가와 함께 실린더 압력 상승량이 저감되어 열발생율도 저감되었다고 생각된다.
5. 매연배출물은 바이오연료 체적비율이 증가하였을 경우에 비율의 따라 감소하였다. 디젤경유에 비해서 바이오연료 부하 100% 경우 10%에서 -1.54% 감소, 20%는 -9.37% 감소, 30%는 -16.74% 감소, 40%는 -24.42% 감소, 50%에서 -28.42%로 감소하였다. 매연배출물은 불완전한 연소로 배출되는 원인인데 바이오연료 첨가는 탄소량이 감소와 흡산소량이 증가하여 연료입자가 산소와 접촉면이 활성화 되어 양호한 연소가 형성하여 기인하기 때문이다. 본 실험의 결과도 바이오연료 10% 첨가했을 경우보다 감소율이 50%에서 가장 많이 감소하였다.

References

- [1] V. Pradeep and R. P. Sharma, "Use of HOT EGR for NO_x control in a compression ignition engine fuelled with bio-diesel from Jatropa oil," *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 1136-1154, 2007.
- [2] IMO, "Comments to the approval at MEPC 65 of amendments to the effective date of the No_x tier III standards," MEPC 66 Report, vol 66, no. 1, pp. 1-21, 2013.
- [3] J. K. Lim and S. G. Cho, "Effects of biodiesel fuel on characteristics of specific fuel consumption and exhaust emissions in DI diesel engine," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, vol. 14, no. 1, pp. 83-87, 2008 (in Korean).
- [4] J. K. Yeom, "Basic experimental study on the application of biofuel to a diesel engine," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, vol. 35, no. 11, pp. 1163-1168, 2011 (in Korean).
- [5] J. K. Yeom and H. S. Ha, "Basic study on spray behavior for application of biofuel to diesel engines (Palm Oil-Considering Viscosity)," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, vol. 36, no. 7, pp. 745-752, 2012 (in Korean).
- [6] S. H. Jang, "The characteristics on the engine performance for variation of fuel injection timing in DI diesel engine using biodiesel(II)," *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, vol. 17, no. 6, pp. 25-32, 2013 (in Korean).
- [7] O. T. Oh, K. J. Cheong, and T. Murayama, "A study on alternative fuel as fuel substitutes in diesel engine (II)," *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 10, no. 6, pp. 48-53, 1988 (in Korean).
- [8] J. D. Kim, G. Ainull, K. K. Song, J. Y. Jung, and H. G. Kim, "An experimental study on spray characteristics of diesel and bio-diesel fuel," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 35, no. 1, pp. 53-59, 2011 (in Korean).
- [9] O. T. Oh, "A study on usability of used vegetable oil as a diesel substitute in diesel engine," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 481-488, 1998 (in Korean).
- [10] J. K. Kim, E. S. Yim, and C. S. Jung, "Study on review sustainability criteria and key approaches for biofuel," *New & Renewable Energy*, vol 3, no. 9, pp. 33-43, 2013 (in Korean).
- [11] K. Y. Ryu and Y. T. Oh, "Combustion characteristics and durability of diesel engines burning BDF 20," *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 15, no. 3, pp. 18-28, 2007 (in Korean).
- [12] S. K. Yoon, M. S. Kim, and N. J. Choi, "Characteristics of canola biodiesel fuel blended with diesel on the combustion and exhaust gas emissions in a compression ignition diesel engine," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 38, no. 9, pp. 1081-1086, 2014 (in Korean).
- [13] K. S. Jeong, D. G. Lee, H. G. Roh, and C. S. Lee, "Effect of pilot injection on combustion and exhaust emissions characteristics in a biodiesel fueled diesel engine," *Journal of the Korean Society of Combustion*, vol. 16, no. 4, pp. 1-7, 2011 (in Korean).
- [14] S. Y. Ahn, W. I. Kim, and C. S. Lee, "A study on spray characteristics of biodiesel derived from waste cooking oil," *Journal of Ilass-Korea*, vol. 18, no. 4, pp. 182-187, 2013 (in Korean).
- [15] K. H. Park, J. Y. Kim, C. J. Kim, J. H. Ko, and H. I. Park, "The effect of bio-diesel fuel on industrial diesel engine," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 72-77, 2012 (in Korean).
- [16] J. R. Needham, M. P. May, D. M. Doyle, S. A. Faulkner, and H. Ishiwata, "Injection timing and rate control a solution for low emissions," *Society of Automotive Engineers 900854*, pp. 8-10, 1990.