



선박용 중유 대체를 위한 바이오중유 혼합연료에 대한 실험적 연구: 배출가스 및 연료소모율

송호영^{1)*} · 박민석²⁾ · 오선경²⁾ · 공지석²⁾ · 정진아²⁾ · 전철환³⁾

An Experimental Study on Blended Bio-Fuel Oil as an Alternative to Marine Fuel Oil: Emissions and Fuel Consumption

Hoyoung Song^{1)*} · Min-seok Park²⁾ · Seon-gyeong Oh²⁾ · Jiseok Kong²⁾ · Jin-a Jeong²⁾ · Cheol-hwan Jeon³⁾

Received 1 August 2025 Revised 15 October 2025 Accepted 23 October 2025 Published online 11 December 2025

ABSTRACT This study evaluated the potential use of blended biofuel oil (BFO) as an alternative to low-sulfur fuel oil (LSFO) for marine applications, focusing primarily on its emissions and fuel consumption characteristics. Experiments were conducted using a medium-speed four-stroke marine diesel engine (Tier II) operating on LSFO and blends containing 15% and 30% BFO by volume. The results showed that PM emissions decreased with increasing BFO content due to the oxygen-rich nature of biofuels, which enhances combustion efficiency. However, NOx emissions increased slightly. This was probably due to the higher fuel density and oxygen content, which increased the combustion temperature and reduced the atomization quality. Increasing the BFO ratio increased the brake-specific fuel consumption because the heating value decreased. Overall, the blended BFOs showed favorable PM reduction performance compared to LSFO, which confirmed their potential as environmentally friendly marine fuels. However, the increases in NOx and fuel consumption highlight the need for further optimization and engine-specific evaluations.

Key words Bio-fuel oil(바이오중유), Marine fuel(선박연료), Emission characteristics(배출가스 특성), Fuel consumption(연료소모율), Blended fuel(혼합연료)

1. 서론

전 세계적으로 기후변화 대응을 위한 온실가스(GHG) 감축이 주요 과제로 부상하고 있으며, 해운 산업에서도 이에 대한 적극적인 대응이 요구된다. 국제해사기구(IMO)는 2050

년까지 국제 선박의 온실가스 배출을 순제로(Net-zero) 수준으로 감축한다는 목표를 설정했다. 이를 달성하기 위해서는 기존 화석연료의 사용을 점진적으로 줄이고, 친환경 대체연료로의 전환이 필수적이다.^[1]

식물성 기반의 바이오연료는 지속 가능한 친환경 대체연료로 각광받고 있으며, EU는 FuelEU Maritime 규제를 통해 바이오연료 사용을 법적으로 유도하고 있다.^[2] 바이오연료는 식물성 기름 또는 동물성 지방 등 재생 가능한 자원을 원료로 하며, 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment) 관점에서 이산화탄소(CO₂) 배출량을 유의미하게 저감시킬 수 있음이 보고되고 있다. 특히, 바이오연료는 광합성 작용을

1) Principal Researcher, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority

2) Researcher, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority

3) Team Leader, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority

*Corresponding author: offor@kpetro.or.kr

Tel: +82-43-240-7922

통해 생육과정에서 CO₂를 흡수하므로 탄소중립성(Carbon Neutrality)을 갖는 것이 특징이다.

바이오연료는 일반적으로 CO₂ 및 입자상물질(PM, Particulate Matter) 배출 저감에 효과적이나, 낮은 발열량과 높은 밀도 등 물리적 특성으로 인해 기존 선박 엔진에서의 연소 안정성 및 배출 특성에 영향을 미칠 수 있다. 이에 따라 엔진 성능 및 배출 특성에 대한 체계적인 실험 검증이 필요하나, 선박용 바이오중유에 대한 국내의 연구는 아직 부족한 실정이다.

바이오중유는 식물성 오일(SVO, Straight Vegetable Oil)과 물성이 유사하여 기존 선박 연료 시스템에 별도의 개조 없이 혼합 적용이 가능하며, 실질적인 온실가스 감축 수단으로 주목받고 있다. 그러나 기존 저유황유(LSFO, Low Sulfur Fuel Oil) 대비 밀도, 점도, 발열량 등 물성이 상이하므로, 바이오중유 혼합 시 연소 특성과 배출가스에 미치는 영향을 실험적으로 검증하는 것이 필수적이다.

본 연구는 바이오중유가 저유황유의 대체 연료로서 선박용 디젤 엔진에 적용 가능한지를 평가하기 위해 수행되었다. 특히 배출가스 특성과 연료소모율을 중심으로, 바이오중유 혼합비(15%, 30%)에 따른 연소 효율 및 배출 특성의 변화를 실험적으로 분석하였다.

국제해사기구(IMO)의 NO_x Technical Code에 따르면, 선박 연료에 바이오연료를 30% 이하 비율로 혼합하는 경우에는 질소산화물(NO_x) 배출 저감을 위한 별도의 추가 조치가 요구되지 않는다. 이러한 규정적 배경으로 인해 해운 업계에서는 규제 준수를 보장하면서도 운영상 부담을 최소화할 수 있는 30% 혼합 연료 사용을 선호하는 경향을 보인다. 따라서 본 연구에서는 최대 혼합비를 30%로 설정했으며, 혼합비율에 따른 연료 특성과 배출가스 거동의 변화를 비교·분석하기 위해 중간 수준인 15% 혼합 조건을 추가하여 실험을 수행하였다.

기존 연구들은 주로 경유 또는 중유에 바이오디젤(FAME, Fatty Acid Methyl Ester)을 혼합하여 엔진 연소 특성과 배출가스 거동을 분석한 데 초점을 맞추었으나, 본 연구는 선박용 저유황유에 식물성 오일과 유사한 바이오중유를 혼합하여 실제 중속 4행정 선박용 디젤엔진(Tier II)을 대상으로 실험을 수행했다는 점에서 차별성을 가진다.

또한, 연료 물성(밀도·점도·발열량)과 배출가스 성분(NO_x,

PM, CO, THC), 그리고 연료소모율(BSFC, Brake Specific Fuel Consumption)을 통합적으로 비교·분석함으로써, 바이오중유 혼합비 변화에 따른 연소 효율과 배출 특성의 상관관계를 정량적으로 제시하였다.

이는 기존 바이오디젤 중심 연구와 달리, 선박용 잔사유 계열 연료를 대상으로 한 실험적 데이터 확보와 통계적 검증(One-Way ANOVA)을 병행했다는 점에서 실질적인 산업 적용성을 높이는 새로운 접근이라 할 수 있다.

따라서 본 연구는 바이오중유를 선박용 연료 체계 내에서 실증적으로 검증한 국내 최초 수준의 연구로, 향후 선박용 대체연료의 상용화 및 품질기준 제정에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치 및 절차

본 연구에서는 선박용 중유를 사용하는 4행정 중속 선박용 디젤 엔진(6H21/32P, Tier II)을 사용하여 바이오중유 혼합비(15%, 30%)에 따른 배출가스 및 연료소모율 변화를 분석했다.

엔진 제어는 HORIBA 사의 水동력계(Dynamometer)를 사용하여 수행하였으며, ISO 8178 E3 시험 모드(Table 1)에 따라 각 운전 조건을 10분간 유지했다. 각 조건에서의 배출가스 측정은 안정화 구간을 거친 후 마지막 1분 동안 실시했으며, 연료별로 동일한 절차를 4회 반복하여 신뢰성을 확보했다. ISO 8178 E3 모드는 실험실의 온도 및 습도에 대한 별도의 규정을 두지 않으며, 본 연구에서 적용한 배출가스 유량 산정 방법인 카본밸런스법(Carbon Balance Method)에 해당 요인이 반영되므로, 추가적인 환경 조건 제어는 수행하지 않았다.

배출가스 측정에는 HORIBA社의 MEXA-ONE-EGR-RS 장비(Table 2)를 활용했으며, CO 및 CO₂는 NDIR 방식, THC는 HFID 방식, NO_x는 CLD 방식으로 측정했다. 입자상물질(PM)은 HORIBA社의 MDLT-ONE 장비를 이용해 여지 필터를 통한 중량법으로 분석했다. 배출가스 측정 장비는 측정의 정밀도와 재현성을 확보하기 위하여 실험에 앞서 표준가스를 사용해서 교정(Calibration)을 수행했다.

Table 1. E3 test mode

Mode number	1	2	3	4
Speed (%)	100	91	80	63
Power (load, %)	100	75	50	25
Weighting number	0.2	0.5	0.15	0.15

Table 2. Accuracy of emission devices

Items	Ranges	Accuracy
CO	0 ~ 1,000 ppm	±2,0% (reading)
THC	0 ~ 1,000 ppm	±2,0% (reading)
NOx	0 ~ 2,000 ppm	±2,0% (reading)
PM	20 ~ 80 L/min	±5,1% (full scale)

Table 3. Specification of a Test engine

Model	6H21/32P	
Combustion cycle	4 stroke	
Out-put an MCR	1,200 kW / 900 rpm	
Bore×stroke [mm×mm]	210×320	
Compression ratio	17 : 1	
Idle speed	450 rpm	
NOx emission	Tier II	
Mean Effective pressure	24,1 bar	
Max. Cylinder pressure	181 ± 5 bar	
Aspiration	Turbocharger	
Exhaust gas recirculation	without	
Intake valve	Open	bTDC 45 deg
	Close	bBDC 23 deg
Exhaust valve	Open	bBDC 65 deg
	Close	aTDC 45 deg

Table 4. Properties of test fuels

Items	LSFO	Blend (15%)	Blend (30%)	Bio-Fuel Oil	Test method	
Density (15°C, kg/m ³)	942,5	944,2	945,2	950,6	KS M ISO 12185	
Kinematic viscosity (50°C, mm ² /s)	126,6	102,7	88,61	49,07	KS M ISO 3104	
CCAI	816	820	823	836	-	
Flash point (°C)	103	117,0	117,5	186	KS M ISO 2719	
Sulfur content (wt%)	0,49	0,39	0,33	less than 0,03	KS M ISO 8754	
TAN (mg KOH/g)	1,47	0,25	0,45	0,65	ASTM D664	
Na (mg/kg)	1,4	3	6	25,8	ASTM D7111	
Si+Al+Fe (mg/kg)	12	4	5	less than 1		
V (mg/kg)	14	9	8	less than 1		
Net heating value (kcal/kg)	9,954	9,723	9,570	8,750	ASTM D240	
Elementary Analysis (wt%)	C	86,68	85,95	83,37	76,54	ASTM D5291
	H	12,26	11,76	11,84	11,74	
	O	0,29	2,17	4,18	11,50	Elemental Analyzer
	N	0,13	0,10	0,09	0,04	ASTM D5291
Bio-Carbon (%)	0,00	18,00	29,00	98,00	ASTM D6866-24(B)	



Fig. 1. Test engine

또한, 유량계를 포함한 모든 계측기는 공인 검교정 기관으로부터 검증을 받아 측정의 신뢰성과 추적성을 보장했다.

중속 디젤엔진의 주요 제원은 Table 3과 같으며 실험실에 설치된 엔진은 Fig. 1에 나타내었다. 엔진에는 터보차저가 장착되어 있고 EGR 시스템은 적용되지 않았다. 측정 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 장비를 2시간 이상 예열한 후, 시스템이 충분히 안정화된 시점에서 배출가스 측정 시험을 수행했다.

2.2 실험 연료 및 특성

Table 4는 실험에 사용된 연료를 분석한 결과이다. 선박용 연료에 대한 국제 품질기준(ISO 8217)에서 요구하는 밀도, 동점도 이외에도 원소분석, 바이오탄소 함량 등을 추가 분석했다. 탄소, 산소 등의 원소분석 결과는 카본발란스법

을 통한 배기가스 유량을 계산하는 데 사용된다.

저유황유는 원유 정제 과정에서 생성되는 분자 길이가 길고 무거운 잔사유(Residual Oil)와, 상대적으로 분자 길이가 짧고 가벼운 경유 분획(Distillate Fraction)을 혼합하여 제조된다. 이러한 제조 특성으로 인해, 식물성 오일을 기반으로 하는 바이오중유와 비교할 때 연료의 인화점 및 물리·화학적 특성에서 차이를 나타낸다.

바이오중유는 팜유, 폐식용유, 바이오디젤 생산과정에서 나오는 부산물 등 식물성 원료로 제조되며, 제조 또는 유통과정에서 다른 물질이 혼합될 수 있어 바이오탄소 함량 분석을 통해 바이오성분에 대한 정확한 함량을 분석했다. 그리고 저유황유와 바이오중유를 혼합한 연료의 바이오중유 함량을 정확히 알기 위해서 바이오탄소(C¹⁴) 함량도 분석하고 결과를 제시했다.

저유황유와 비교해서 바이오중유의 밀도는 높고 동점도는 낮았다. 그리고 순발열량은 바이오중유가 12.1% 낮았으며, 바이오중유 혼합유는 혼합비에 따라 각각 2.3%, 3.9% 낮았다.

입자상물질의 배출량에 영향을 미치는 황분(S), 규소+알루미늄+철(Si+Al+Fe), 바나듐(V) 등을 포함한 금속분은 원유에서 추출한 저유황유의 함량이 높았다. 반면에 나트륨(Na)과 같이 식물성 원료에 기인하는 금속분은 바이오중유와 그 혼합유에서 높게 나타났다.

바이오중유는 산소(O)함량이 높고 증가된 산소함량만큼 탄소(C)의 함량이 감소했다. 바이오중유의 바이오탄소 함량은 약 98%로 높은 순도를 보였다.

3. 실험 결과 및 고찰

연료별 배출가스와 연료소모율은 동일한 실험 조건에서 4회 반복 측정된 결과를 기반으로 분석했다. 각 조건의 평균값은 막대그래프(bar graph)로, 최댓값과 최솟값은 오차막대(error bar)로 나타내었으며, 저유황유 대비 상대적인 증감률은 백분율(%)로 표시했다.

실험 결과의 통계적 유의성을 검증하기 위해 일원분산분석법(One-Way ANOVA, Analysis of Variance)을 적용했다. 이때 독립변수(Independent Variable)는 연료 유형

으로 설정했으며, 종속변수(Dependent Variable)는 배출가스 성분 및 연료소모율로 두었다. 가설 검정은 양측 검정(Two-tailed Test)을 기반으로 했으며, 유의수준(p-value)은 0.05로 설정했다. 이를 통해 각 집단 간 평균 차이가 통계적으로 유의미한지를 평가했다.

일원분산분석 결과는 각 그래프 내 p-value로 표시했으며, 그 결과 일부 조건 간 평균 차이가 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의미하게 나타났다.

Fig. 2는 일산화탄소(CO, Carbon Monoxide) 배출량 결과이며, 바이오중유 혼합비 증가에 따라 CO 배출은 감소했다(-8.3%, -4.2%). 이는 바이오연료의 높은 산소 함량이 연소 효율을 증가시켜 CO 생성을 억제한 결과로 판단된다. 본 연구의 결과는 기존 연구에서도 유사하게 나타났으며, Yanhui Chen *et al.*^[3]은 바이오디젤의 높은 산소 함량이 연소 효율을 향상시키고 CO 생성을 억제했다고 보고했다. 다만, 통계적으로 유의미한 차이는 나타나지 않았다(p = 0.201).

Fig. 3은 총탄화수소(THC, Total Hydro Carbons) 배

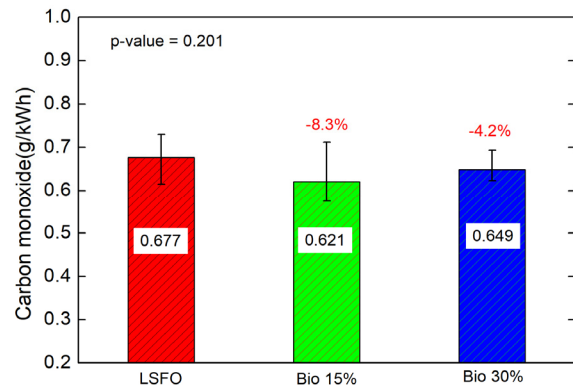


Fig. 2. Carbon monoxide (CO)

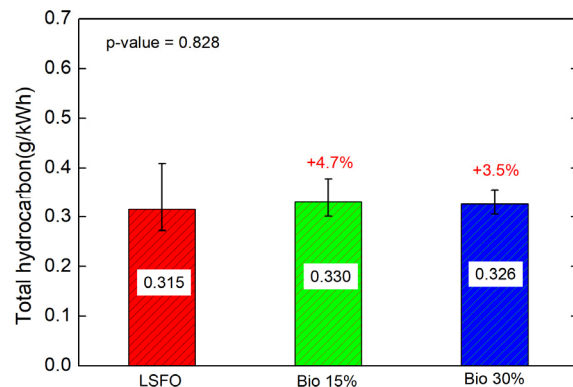


Fig. 3. Total Hydro Carbon (THC)

출량 결과이며, 바이오중유 혼합 시 THC 배출량은 소폭 증가했다. 이는 높은 밀도 때문에 연료가 충분히 미세 분무되지 않아 미연소된 탄화수소가 증가했기 때문으로 해석된다.^[4] 그러나 이 실험결과 역시 통계적으로 유의미하지 않았다($p = 0.828$).

Fig. 4는 질소산화물(NO_x, Nitrogen Oxides) 배출량 결과이며, 바이오중유 혼합비 증가에 따라 NO_x 배출량은 소폭 증가했다(+4.3%, +2.5%). 이러한 결과는 통계적으로도 유의미($p = 0.001$)했다.

NO_x의 증가는 연료 내 높은 산소 함량이 연소 시 더 높은 연소 온도를 유발하여 NO_x 형성을 촉진하기 때문으로 분석된다. 또한, 상대적으로 높은 세탄가로 인해 점화 지연이 짧아 진각효과로 NO_x 생성이 촉진되었을 수 있다.^[5] 연료 물성 중 높은 밀도는 연료의 미세 입자 분무화를 저하시키고, 이로 인해 국소적으로 불균일한 공기-연료 혼합을 유발하여 부분적인 고온 영역을 형성하고 NO_x 생성 증가를 촉진한다. 기존 연구에서도 이러한 물성과 배출가스 간의 상관성이 명확하게 보고되었으며, Senthil *et al.*^[6]은 경유와 Annona methyl ester(AME)를 혼합한 연료를 비교 실험한 결과, 경유가 모든 실험 연료 중에서 가장 낮은 NO_x 배출량을 보였다. 이는 바이오연료에 포함된 산소 함량이 실린더 내 고온 환경을 유도하여 NO_x 생성이 증가한 것으로 해석했다. Kshirsagar *et al.*^[7]은 Calophyllum inophyllum methyl ester(CIME)와 경유를 혼합한 연료를 단기통 엔진에서 실험했다. CIME 혼합 연료는 모든 실험조건에서 경유보다 높은 NO_x 배출을 보였고, 혼합비가 높아질수록 NO_x 배출도 증가했다.

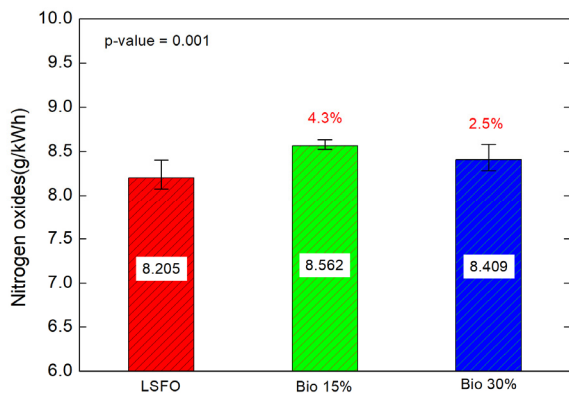


Fig. 4. Nitrogen oxides (NO_x)

이와 같은 여러 선행 연구들과의 비교 분석은 본 연구 결과의 신뢰성을 더욱 높이며, 연료 물성과 NO_x 배출 특성 간의 인과관계를 명확히 뒷받침한다.

Fig. 5는 입자상물질(PM) 배출량 결과이며, PM 배출량은 바이오중유 혼합 시 현저히 감소했다(-8.4%, -13.3%). 이는 바이오중유 내 방향족 성분과 황분을 포함한 금속 함량이 낮고 바이오연료의 높은 산소함량으로 혼합비가 농후한 영역에서도 상대적으로 원활한 연소가 이루어졌기 때문이다.^[8] 또한, 바이오중유 혼합으로 황분이 감소하여 연소 과정에서 생성되는 대표적인 PM 구성요소인 황산염(SO₄²⁻, Sulfate)이 줄어들었기 때문이다. PM의 감소는 통계적으로도 유의미($p = 0.038$)한 차이를 보였다.

Fig. 6은 연료소모율(BSFC) 결과이며, 바이오중유 혼합 연료의 낮은 발열량(-2.3%, -3.9%)으로 인해 연료소모율이 증가한 것으로 보인다. 특히, 30% 혼합유에서 연료 소모량 증가(3.6%)가 뚜렷했다. 이런 결과는 기존의 연구 결과^[9,10]와 일치했다.

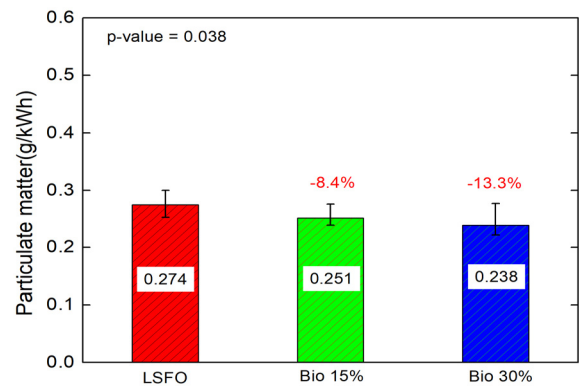


Fig. 5. Particulate Matter (PM)

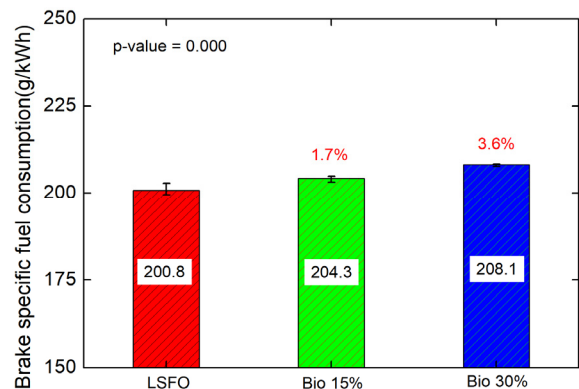


Fig. 6. Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)

4. 결론

기존 연구에서는 주로 중유 또는 경유에 바이오디젤을 혼합하여 연소 특성 및 배출가스 특성을 분석한 결과를 보고하고 있다. 이에 반해 본 연구는 선행 연구에서 다루어지지 않은 영역으로서, 선박용 중유에 식물성 오일과 유사한 특성을 갖는 바이오연료를 혼합하여 그 연소 특성과 배출가스 거동을 제시한다는 점에서 차별성을 가진다.

본 연구의 결과를 정리하며 다음과 같다.

연구에 사용된 바이오중유 혼합연료는 저유황유 대비 밀도가 높고 발열량이 낮은 특성을 나타냈다. 이러한 물성 변화는 엔진 내 연료 분사 및 연소 과정에 직접적인 영향을 미치며, 배출가스 특성과 연료소모율의 변화와 명확한 상관관계를 보였다.

특히, 높은 밀도는 연료의 미세 분무화(fuel atomization) 효율을 감소시켜 혼합 연료의 연소 특성을 변화시킨다. 이는 THC 배출이 증가한 결과와도 일치하는데, 분사 연료의 입자 크기가 커져 미연소된 탄화수소가 증가했기 때문이다.

반면, 높은 산소(O) 함량은 CO 및 PM 배출을 감소시키는 주요 원인으로 작용했다. 연료 내 산소가 연소 효율을 높여 CO와 PM 형성을 억제하며, 이는 기존 연구 결과들과도 잘 부합한다.

반면 낮은 발열량은 동일한 출력을 내기 위해 연료 소비를 증가시키며 연료소모율 상승을 유발했다. 또한, 연료 내 산소 함량 증가는 연소 온도를 높여 NO_x 배출을 소폭 증가시켰다. 이러한 현상은 선행 연구에서도 보고된 바 있으며, 연료의 물리적 특성과 화학적 특성이 엔진 배출물에 상호 연관된 영향을 준다는 것을 명확히 보여준다.

이와 같이 본 연구 결과는 연료 물성 변화가 선박 엔진의 배출가스 특성 및 연료소모율에 미치는 영향을 명확하게 입증하며, 향후 바이오중유 혼합 연료의 최적화 및 활용 방안 수립에 중요한 자료로 활용될 수 있다.

References

- [1] IMO, 2023, “2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships”, IMO.
- [2] EU, 2023, “The FuelEU Maritime Regulations”, EU.
- [3] Chen, Y., Zhang, J., Zhang, Z., Zhong, W., Zhao, Z., and Hu, J., 2023, “Utilization of renewable biodiesel blends with different proportions for the improvements of performance and emission characteristics of a diesel engine”, *Heliyon*, **9**(9), e19196.
- [4] Suh, H.K., and Lee, C.S., 2016, “A review on atomization and exhaust emissions of a biodiesel-fueled compression ignition engine”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **58**, 1601-1620.
- [5] Arroyo, J., Moreno, F., Munoz, M., and Monne, C., 2015, “Experimental study of ignition timing and supercharging effects on a gasoline engine fueled with synthetic gas extracted from biogas”, *Energy Convert. Manag.*, **97**, 196-211.
- [6] Senthil, R., and Silambarasan, R., 2015, “Annona: A new biodiesel for diesel engine : A comparative experimental investigation”, *J. Energy Inst.*, **88**(4), 459-469.
- [7] Kshirsagar, C.M., and Anand, R., 2017, “Artificial neural network applied forecast on a parametric study of Calophyllum inophyllum methyl ester-diesel engine out responses”, *Appl. Energy*, **189**, 555-567.
- [8] Lim, C., Lee, J., Hong, J., Song, C., Han, J., and Cha, J.-S., 2014, “Evaluation of regulated and unregulated emissions from a diesel powered vehicle fueled with diesel/biodiesel blends in Korea”, *Energy*, **77**, 533-541.
- [9] Wahlen, B.D., Morgan, M.R., McCurdy, A.T., Willis, R.M., Morgan, M.D., Dye, D.J., Bugbee, B.D., Wood, B.D., and Seefeldt, L.C., 2012, “Biodiesel from microalgae, yeast, and bacteria: Engine performance and exhaust emissions”, *Energy & Fuels*, **27**, 220-228.
- [10] Ekrem Buyukkaya, 2010, “Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics”, *Fuel*, **89**(10), 3099-3105.