

바이오디젤 비율 변화에 따른 온실가스 배출량 개선에 관한 연구

차명훈¹ · 김민² · 김지윤² · 이상균³ · 김유택^{4,†}¹한국조선해양기자재연구원 선임연구원²한국조선해양기자재연구원 팀장 및 연구원³레보록스 대표⁴국립한국해양대학교 기관시스템공학부 교수A Study on the Improvement of Greenhouse Gas Emissions
According to the Changes of Biodiesel RatioMyung Hun Cha¹, Min Kim², Ji Yun Kim², Sang Gyun Lee³, and You Taek Kim^{4,†}¹Senior Researcher, Korea Marine Equipment Research Institute, Busan 46754, Korea²Team Leader and Researcher, Korea Marine Equipment Research Institute, Busan 46754, Korea³CEO, REVOROX, Hwaseong-si 18625, Korea⁴Professor, Division of Marine System Engineering, National Korea Maritime & Ocean University, Busan 49112, Korea

요약

탄소중립 정책으로 인해 친환경 연료 사용을 위한 기자재개발이 활발히 이루어지고 있다. 그러나 친환경기자재의 개발 및 상용화에는 오랜 시간이 소요될 것으로 예상된다. 바이오연료는 생물이 성장하면서 흡수되는 CO₂가 연소 시 배출되는 탄소중립의 연료로서 현재의 내연기관에 즉시 사용이 가능하다. 또한 30% 이하의 바이오디젤이 포함된 연료는 구조변경 및 NOx인증 없이 사용될 수 있는 연료이다. 본 연구에서는 바이오디젤+디젤유(바이오 혼합유)의 조성(탄소, 수소, 질소)을 원소성분분석기를 통해 측정하고 발열량 계산 후 EEDI, CII 등급의 개선 여부를 확인하였다. 그리고 바이오 혼합유를 사용하여 선박용 디젤엔진을 운전하여 가스성분분석기를 통해 배기가스를 측정된 후 실제 배출되는 온실가스의 감소량을 확인하였다.

Abstract – Due to carbon neutrality policies, the development of equipment for the use of eco-friendly fuels is actively underway. However, it is expected that the development and commercialization of such eco-friendly equipment will take a considerable amount of time. Biofuels, which are carbon-neutral fuels because the CO₂ absorbed during the growth of the biomass is released again during combustion, can be used immediately in existing internal combustion engines. In addition, fuels containing up to 30% biodiesel can be used without structural modifications or NOx certification. In this study, the composition (carbon, hydrogen, nitrogen) of biodiesel + diesel fuel (bio-blended fuel) was measured using an elemental analyzer, and the heating value was calculated to determine whether improvements in EEDI and CII ratings could be achieved. The bio-blended fuel was then used to operate a marine diesel engine, and exhaust gases were measured using a gas analyzer to verify the actual reduction in greenhouse gas emissions.

Keywords: Biodiesel(바이오디젤), Bio-blended fuel(바이오혼합유), Eco-friendly fuel(친환경 연료), Greenhouse gases(온실가스), EEDI(에너지효율 설계 지수), Carbon neutral(탄소중립), CII(선박탄소집약도지수)

1. 서론

화석연료의 사용으로 인해 천문학적 양의 온실가스 배출로 지구의 온도가 상승하여 지구온난화가 가속되고 있다. 이에 따른 온

실가스의 심각성을 인지하고, 국제사회에서는 온실가스 배출을 줄이기 위해 노력하고 있다. 제 80차 MEPC (Maritime Environment Protection Committee)(IMO [2023])에서 온실가스 감축 전략(2023 IMO strategy)을 채택하였다. Fig 1은 온실가스 감축 전략을 도식화하여 나타낸 것이다. 기존 초기 전략 대비 목표를 상향하여 2030년 최소 20%, 2040년 최소 70%, 2050년 Net-zero를 설정하였다.

[†]Corresponding author: kimyt@kmou.ac.kr

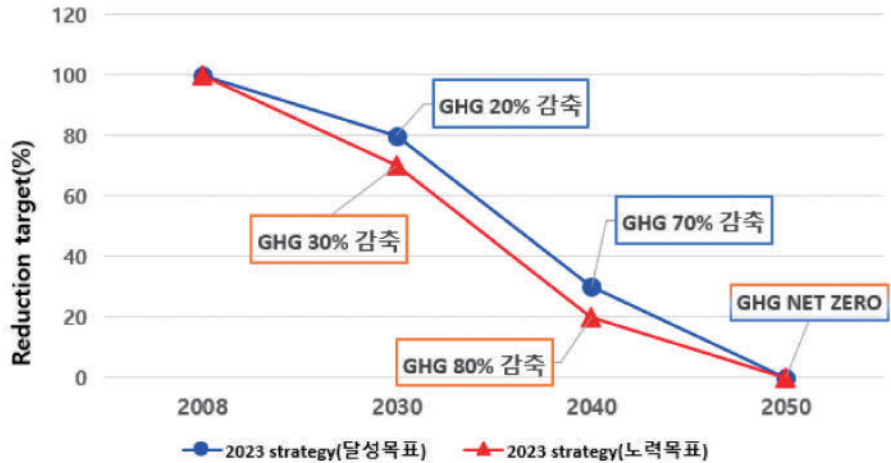


Fig. 1. 2023 IMO strategy goals and midpoint indicators (Ministry of Environment [2020]).

Table 1. Mandatory ratio of new and renewable energy supply by year

Year	2012	2013	2014	2016	2017
Supply ratio (%)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Year	2018	2019	2020	2021	2022
Supply ratio (%)	5.0	6.0	7.5	9.0	12.5
Year	2023	2024	2025	After 2030	
Supply ratio (%)	14.5	17.0	20.5	25.0	

중기 조치 개발은 기술적 요소(선박 연료의 GHG집약도를 단계적으로 감축하는 목표 기반 연료 기준)와 경제적 요소(온실가스배출량 가격메커니즘)의 결합 조치로 구성된다.

2012년부터 해양수산부의 신·재생에너지 공급의무화(RPS:Renewable Portfolio Standard)제도 시행으로 Table 1과 같이 친환경 연료에 대한 공급의무비율이 2030년까지 25% 상향될 예정이다(Ministry of Oceans and Fisheries [2024]).

바이오연료는 연소 시 배출되는 이산화탄소가 동물의 성장과 식물의 광합성 작용 등으로 인해 바이오매스로 다시 재흡수 되므로, 대기 중의 전체 이산화탄소 농도를 증가시키지 않고 순환되는 탄소중립의 친환경 연료이다. 따라서 온실가스 저감 정책과 신·재생에너지 공급의무화에 따라 친환경 연료인 바이오연료의 사용량도 증가할 것으로 생각된다.

바이오연료 중 메틸에스테르는 바이오디젤이라고 부른다. 식물성 유지 및 동물성 지방을 메탄올과 화학적인 방법으로 제조하면 지방산 메틸에스테르(바이오디젤)와 글리세롤이 생성된다. 이 중 메틸에스테르는 디젤유와 혼합하여 사용하기에 충분한 성능을 가진 석유대체연료이며, 친환경 연료이다(KFD, <https://k-biofuels.or.kr/front/kor/bio/biofuel>).

현재 Table 2와 같이 국내 바이오연료 보급 정책은 2015년 7월부터 수송부문에 시행 중인 신·재생에너지 연료 혼합의무화제도(RFS: Renewable Fuel Standard)에 의해 공급되는 디젤유에 의무적으로 바이오디젤이 혼합되어 보급되는 중이다. 또한 점진적으로 바이오디젤의 혼합비율을 상향하여 2030년 이후로는 5%를 의무적으로 혼합하여 보급하고, 2022년 10월 13일에 5%를 8%로 상향시키는 확대 방안이 발표되었다.

이처럼 다양한 친환경 규제 및 정책들로 인해 무탄소 연료 기자재에 대한 개발이 활발하게 진행되고 있으나, 낮은 에너지 밀도, 연료 공급인프라, 안정성 등(Reusser and Pérez Osses.[2021])의 기술 적용에는 많은 시간이 소요될 것으로 생각되며, 특히 소형 조선소 및 선사는 기술 적용에 더 많은 시간이 소요될 것으로 생각된다. 따라서 무탄소 연료 기자재 적용 전 브릿지 연료 역할을 할 수 있는 친환경 연료가 필요하며 바이오디젤이 충분히 그 역할을 할 수 있다.

MEPC 78차에서 30% 미만의 바이오혼합유를 사용할 수 있는 선박용 디젤기관에서는 선상 NOx 검증 없이 해당 연료의 사용을 허용하고 있으며(IMO[2022]), 엔진의 구조변경이 없이 바로 사용이 가능하다. 따라서 바이오연료의 수요와 생산은 점진적으로 증가할 것으로 생각되며, 실제 사용량에 따른 탄소배출 감소량 및 EEDI의

Table 2. Biodiesel mixing ratio by year

Year	2015 ~ 2017	2018 ~ 2021.06	2021.07 ~ 2023
Mandatory blending ratio (%)	2.5	3.0	3.5
Year	2024 ~ 2026	2027 ~ 2029	After 2030
Mandatory blending ratio (%)	4.0	4.5	5.0 → 8.0

개선여부를 확인할 필요성이 있어 연구를 진행하였다.

2. 시험 장비 및 시험방법

2.1 조성(탄소, 수소, 산소)시험장치 및 방법

연료의 조성인 탄소, 수소, 산소에 따라 배출되는 배기가스의 성분이 달라진다. 연소 중 탄소는 산소와 불완전연소 시 CO를 생성하고, 완전연소 시 CO₂를 생성하게 된다. 또한 수소는 산소와 수증기를 생성하게 되고, 연료가 연소하지 않게 되면 HC로 배출되게 된다. 따라서 선박용 디젤엔진 시험 시 발생하는 배출가스의 성분과 비교하기 위해 연료의 조성을 측정하였다.

연료의 조성은 ASTM D5291-21 Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Petroleum Products and Lubricants(ASTM[2016]) 규격을 통해 시험을 수행하였으며 시험은 Table 3의 장비를 사용하였다.

2.2 배기가스 시험장치 및 시험방법

바이오디젤과 디젤유를 유량계와 바이오블랜딩시스템을 통해 바이오혼합유를 제조하여 혼합탱크(mixing tank)에 저장한다. 저장된 바이오혼합유를 연료로 사용하여 선박용 디젤엔진을 운전하여 배

Table 3. Elemental Analyzer


Equipment photos	Item	Specification
	Elemental	C, H, N, S, O
	Measurement range	0.01% ~ 100%
	Accuracy	0.1 ~ 0.3%
	Sample quantity	max 200 mg
	Test standard	ASTM D5291-21

Table 4. Marine diesel engine



Equipment photos	Item	Specification
	Output	347 kW / 2,000 rpm
	Number of cylinders	6 cylinders
	Bore & Stroke	130×155 mm
	Intake method	Turbocharger
	Combustion method	Compression ignition method
	Compression ratio	17.2 : 1

Table 5. Multi component analyzer

Equipment photos	Item	Specification
	Linearity deviation	± 2%
	H ₂ O	0 ~ 30%
	O ₂	0 ~ 25%
	CO ₂	0 ~ 20%
	CO	0 ~ 3,000 ppm
	NOx	0 ~ 2,500 ppm

출되는 배기가스를 가스성분분석기를 통해 배기가스성분을 측정하였으며 개략도는 Fig. 2와 같다.

Table 4는 시험에 사용된 347kW급 선박용 디젤엔진이며 IMO Resolution MEPC. 177(58)(IMO[2008])의 규격을 인용하여 시험을 진행하였다.

배기가스 측정에 사용된 장비는 FTIR(Fourier Transform Infrared)방식의 분석기를 사용하였으며 사양은 Table 5와 같다.

FTIR방식은 광원을 광분리기(beam splitter)로 고정 거울(fixed Mirror) 및 이동 거울(moving mirror)로 광원을 이동시킨 다음 여

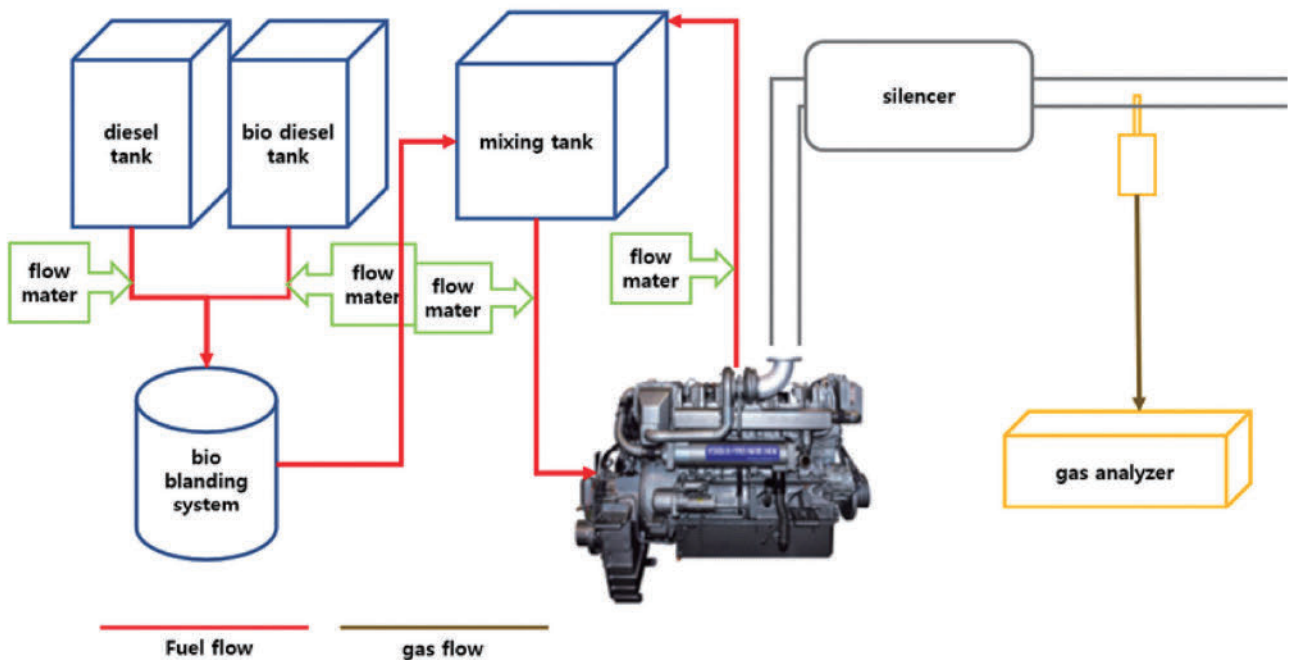


Fig. 2. Test Method.

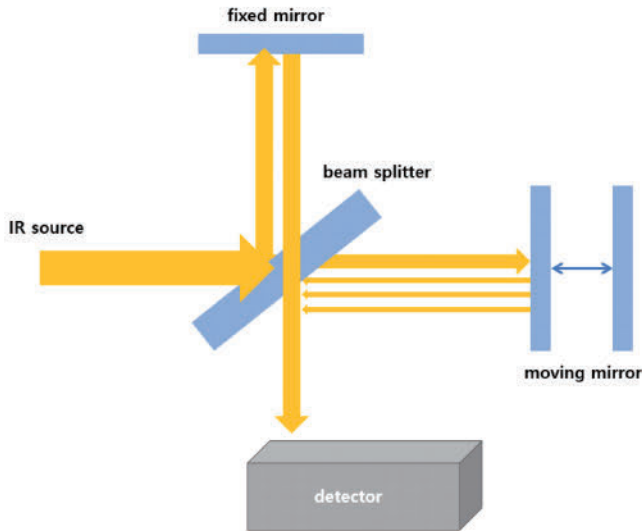


Fig. 3. FTIR measurement principle.

러 영역의 적외선과장을 분리시킨다. 그리고 광원을 이동 거울과 고정 거울로 채반사 시킨 후 시료와 만나 각 가스 성분의 흡수 스펙트럼에 따라 빛이 흡수되며 흡수 강도에 비례하여 각 성분의 농도를 디텍터(detector)에서 검출하게 된다. Fig. 3은 가스성분분석기 원리의 개략도이다.

3. 조성(탄소, 수소, 산소)시험 및 EEDI 계산 결과 및 고찰

3.1 조성(탄소, 수소, 산소) 시험 결과

Fig. 4는 바이오디젤 함유량에 따른 원소성분(탄소, 수소, 산소)의 측정 결과를 나타낸 것이다. 바이오 혼합유의 바이오디젤 함유량이 높아질수록 탄소는 BD0~BD40까지 84.78%에서 81.89%까지 감소하고, 수소는 13.69%에서 13.17%까지 감소하는 추세를 보인다. 산소는 1.53%에서 4.94%까지 증가하는 결과를 보인다. 100% 바이오디젤은 디젤유 대비 탄소, 수소의 비율이 낮고 산소의 비율이 높다(Imfactbook[2024]). 따라서 바이오디젤 비율이 증가함에 따라 탄소와 수소의 비율은 감소하고, 산소의 비율은 높아지는 것으로 판단된다. 연료 내 산소의 함량이 증가하면 연소실 내 온도가 상승하여 NOx 배출량이 상승하게 된다. NOx 배출량 상승은 바이오연료 사용에 의한 단점이지만 NOx저감설비(SCR, EGR), 연료분사시기 조정 등으로 완화가 가능하다(Haiwen Song et al.[2016]).

3.2 발열량 계산 결과

탄소, 수소, 산소는 연료의 발열량에 관여하는 성분이다. 액체 발열량은 통상 저위발열량이 기준이 되며, 이는 연료를 기화하여 수

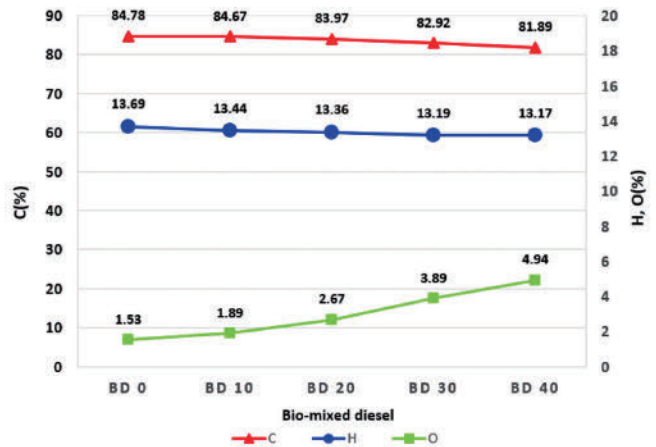


Fig. 4. Element measurement results.

증기를 증발시킨다. 여기서 액체에서 기체 변화를 위해서는 수분의 증발열이 필요하므로 수분의 증발열을 제외하고 연료의 발열량을 계산하게 된다. 저위 발열량은 고위 발열량을 계산 후 계산하는 것이 용이하다. 식 (1)은 고위발열량 계산식이다(Yoon[2002]).

$$H_h = \frac{(8100C + 34000(H - O/8) + 2400S) \cdot 4.184}{1000} \quad (1)$$

H_h : 고위 발열량(MJ/kg)

C : 연료 탄소 함량(%)

H : 연료 수소 함량(%)

O : 연료 산소 함량(%)

S : 연료 황 함량(%)

선박 디젤유 및 바이오디젤은 황 함유량이 0에 가까움으로 계산에서 제외하였다. 고위 발열량 계산 결과를 가지고 식 (2)을 사용하여 저위 발열량을 계산하였다(Yoon[2002]).

$$H_l = H_h - \frac{600(9H - W) \cdot 4.184}{1000} \quad (2)$$

H_h : 고위 발열량(MJ/kg)

H_l : 저위 발열량(MJ/kg)

H : 연료 수소 함량(%)

W : 연료 수분 함량(%)

저위 발열량에서 사용된 수분 측정값은 석유관리원에 의뢰하여 계산에 적용하였으며, 계산에 사용된 수분값은 Table 6과 같다. Table 7은 원소 성분 측정 결과를 바탕으로 계산된 발열량을 나타낸 것이다. 바이오디젤 함유량이 높아짐에 따라 발열량이 낮아짐을 알 수 있다.

Table 6. Amount of water according to biodiesel ratio

Item	BD0	BD10	BD20	BD30	BD40
Water ratio (%)	0.35	0.3	0.4	0.4	0.3

Table 7. High and low heating value

Item	High heating value (MJ/kg)	low heating value (MJ/kg)
BD0	47.94	45.72
BD10	47.48	45.20
BD20	46.99	44.97
BD30	46.17	44.20
BD40	45.61	43.39

발열량(MJ/kg)이 낮아지면 동일 부하의 연소실의 총 발열량을 유지하기 위해 노즐에서 연료의 분사량을 소량 증가시켜 전체 연료 사용량이 소량 증가할 것으로 판단된다.

3.3 탄소배출계수 및 EEDI, CII 등급 계산

탄소배출계수는 에너지효율설계지수(EEDI) 및 CII 등급을 산정 하는데 사용되는 수치로 온실가스의 배출정도를 확인하기 위해 탄소배출계수를 계산할 필요가 있다. 바이오연료 탄소계수를 계산하기 위해서는 바이오연료의 WtW(Well-to-Wake) GHG Intensity 값과 저위발열량의 확인이 필요하다. WtW GHG Intensity 값은 지속가능성 증명이 가능한 3자 인증기관으로부터 발행되어야 하고, 저위발열량은 바이오연료 100%의 LCV(Lower Heating Value)의 확인이 가능한 공신력이 있는 연구소로부터 발행된 시험 결과지가 필요하다(KR[2023]). 식 (3)을 사용하여 바이오연료 탄소 계수를 계산하였다. 바이오디젤 원료별 WtW GHG Intensity는 대두유(Soybean oil), 폐식용유(Imported UCO), 겨울 카멜리나유(Winter camelina oil)를 전과정 탄소배출량을 선정하여 계산하였으며 아래 Table 8은 각 원료별 전과정 탄소배출량을 나타내었다.

$$C_{BD} = WtW\ GHG\ intensity \times LCV_{BD} \tag{3}$$

- C_{BD} : 바이오 혼합유 탄소배출계수(gCO₂/g)
- WtW GHGintensity : 원료별 바이오디젤 탄소배출량[gCO₂eq/MJ (Table 8)]
- LCV_{BD} : 바이오디젤 저위발열량(MJ/kg)

Table 8. Life-Cycle GHG Emissions of Biodiesel by Feedstock (ANL [2024])

Item	Total LCA(gCO ₂ eq/MJ)
Soybean oil	20.2
Imported UCO	25.2
Winter camelina oil	41.2

Table 10. Bio-blended fuel carbon factor calculation conditions

Item	Rate (%)	C _f (gCO ₂ eq/g)	Fuel consumption (ton)	LCV (MJ/kg)	Energy (MJ)
Diesel	60 ~ 100	3.206	6,000 ~ 10,000	45.73	274,380,000 ~ 457,300,000
Bio diesel	0 ~ 40	Table 8	0 ~ 4,000	37.00	0 ~ 148,000,000

*diesel Cf = 선박대기오염물질관리시스템 MDO 탄소배출계수 적용
 *diesel LCV = BD0 발열량 계산 결과
 *bio 100% LCV = EU RED II Annex III상 bio 100% 값
 *Energy = 사용량×LCV

Table 9. Biodiesel carbon factor

Item	C _{BD} (gCO ₂ /g)
Soybean oil	0.7474
Imported UCO	0.9324
Winter camelina oil	1.5244

바이오연료 100%의 LCV값은 EU RED II Annex III(EU[2018])상 100% 바이오디젤 LCV값 37 MJ/kg을 적용하여 계산하였으며, 계산 결과는 Table 9와 같다.

계산된 탄소 배출계수와 Table 10의 계산 조건과 식 (4)을 사용하여 바이오 혼합유에 대한 탄소배출계수를 계산하였다(KR[2023]). 바이오 혼합유 총사용량은 10,000 ton으로 가정하고 비율에 따라 계산하였다.

$$C_f = \frac{LCV_D \times T_D \times C_{fD} + LCV_{BD} \times T_{BD} \times C_{fBD}}{Energy_D + Energy_{BD}} \tag{4}$$

- C_f : 바이오 혼합유 탄소배출계수(gCO₂/g)
- LCV_D : 디젤유 저위발열량(MJ/kg)
- T_D : 디젤유 연료사용량(kg)
- C_{fD} : 디젤유 탄소배출계수(gCO₂/g)
- LCV_{BD} : 바이오디젤 저위발열량(MJ/kg)
- T_{BD} : 바이오디젤 연료사용량(kg)
- C_{fBD} : 바이오디젤 탄소 배출계수(gCO₂/g)

계산된 탄소배출계수를 활용하여 계산될 EEDI는 선박의 에너지 효율을 지표화하기 위한 수식이다. 선박이 1톤의 화물을 1해리 운송 시 발생하는 CO₂의 배출량을 표시되며 수식 (5)을 통해 계산된다(KR[2012]). 계산에서는 선종, 엔진의 출력, 연료사용량, 재회중량, 선속을 가정하여 계산되어야 하며 계산에 사용된 조건은 Table 11과 같다. 계산에 적용된 산적화물선(Bulk carrier)는 세계 선박 수송능력 중 가장많은 비율(43%)(UBCRAD[2023])를 차지하므로 연구에 적용하여 계산을 수행하였다.

$$EEDI = \frac{P \cdot SFC \cdot C_f}{Capacity \cdot S} \tag{5}$$

- EEDI : 에너지효율설계지수(gCO₂/ton·nm)
- P : 엔진 출력(kW)
- SFC : 연료소모량(g/kWh)
- C_f : 탄소배출계수(gCO₂/g)
- Capacity : 재회중량(ton)
- S : 선박속도(nm/h)

Table 11. EEDI calculation conditions

Item	Ship type	Engine Power (kW)	SFC (g/kWh)	Capacity (DWT)	Speed (nm/h)
Conditions	Bulk carrier	7,500 (75% MCR)	155.5	63,000	14.5

Table 12. Carbon emission factor and EEDI calculation results

Item	Cf (gCO _{2eq} /g)			EEDI (gCO ₂ /ton·nm)		
	Soybean oil	Imported UCO	Winter camelina oil	Soybean oil	Imported UCO	Winter camelina oil
BD0		3.206			4.093	
BD10	3.003	3.018	3.067	3.833	3.853	3.916
BD20	2.792	2.823	2.923	3.564	3.604	3.732
BD30	2.573	2.621	2.773	3.285	3.346	3.540
BD40	2.345	2.409	2.617	2.994	3.076	3.341

Table 13. Constants for calculating reference values for each ship type (KR[2023])

Ship type	a	b	c
Bulk carrier	961.79		0.477
Gas carrier	1,120.00		0.456
Tanker	1,218.80		0.488
Container ship	174.22	Capacity (DWT)	0.201
General ship	107.48		0.216
Refrigerated cargo carrier	227.01		0.244
Combination carrier	1,219.00		0.488

계산된 탄소배출계수와 EEDI를 Table 12에 나타내었다. 계산 결과 탄소배출계수는 BD0 ~ BD40에서 원료별 바이오디젤 비율이 증가할수록 점차 감소하였으며, EEDI도 감소하는 결과를 확인하였다.

EEDI가 요건을 만족하는지를 판단하기 위해서는 기준선 값 (Reference line value)을 확정해야 하며 기준선 값 계산은 식(3.6)과 선종별 기준선 값 계산에 필요한 상수를 Table 13에 나타내었다. 계산조건은 EEDI계산과 동일하게 산적화물선(Bulk carrier)의 상수 및 63,000DWT를 기준으로 계산되었다(KR[2012]).

$$Reference\ line\ value = a \times b^c \tag{6}$$

EEDI의 허용값은 기준선 값 대비 2015년 10%, 2020년 20%, 2025년 30%를 감축해야한다. 따라서 식 (7)를 적용하여 EEDI허용값(Required EEDI)을 계산하였다(KR[2023]).

$$Required\ EEDI = (1-X/100) \cdot Reference\ value \tag{7}$$

Required EEDI : 에너지절계지수 허용값(gCO₂/ton·nm)
 X : 2015년, 2020년, 2025년 감축율

Table 14. Required EEDI calculation results

Item	Calculation results (gCO ₂ /ton·nm)
Reference EEDI	4.84
2015 Required EEDI	4.35
2020 Required EEDI	3.87
2025 Required EEDI	3.39

EEDI 허용값을 계산하여 Table 14로 나타내었다. 계산에 적용된 선적 화물선 기준으로 2025년에 EEDI 허용값이 3.39 gCO₂/ton·nm으로 나타났다. EEDI는 EEDI 허용값보다 작아야 한다. EEDI 계산 결과 대두유와 폐식용유를 원료로 사용한 바이오디젤은 BD30부터 EEDI 허용값보다 작아 선박의 인도 및 취항이 가능하며, 겨울 카멜리나유를 원료로 사용한 바이오디젤은 BD40부터 EEDI 허용값보다 작아 선박의 인도 및 취항이 가능할 것이 판단된다.

CII 등급 또한 탄소배출계수에 영향을 받는다. 따라서 바이오혼합유를 사용함에 따라 탄소배출계수가 감소하여 CII 등급도 감소할 것으로 생각된다. CII 등급의 계산은 연간 CO₂ 배출량을 선박 톤수와 운항 거리를 나눈 값으로 선박톤수 및 운항 거리, 연료 사

Table 15. Bio-blended fuel carbon coefficient calculation results

Item	Cf (gCO _{2eq} /g)			CII reduction rate (%)		
	Soybean oil	Imported UCO	Winter camelina oil	Soybean oil	Imported UCO	Winter camelina oil
BD0		4.093			-	
BD10	3.833	3.853	3.916	6.33	5.85	4.33
BD20	3.564	3.064	3.732	13.77	12.67	9.22
BD30	3.285	3.346	3.540	22.67	20.73	14.81
BD40	2.994	3.076	3.341	33.48	30.40	21.25

Table 16. Biodiesel blending ratio to achieve neutral carbon target

Item	Proposed target					Assumption target			
	Year	23	24	25	26	27	28	29	30
Reduction rate(%)	5	7	9	11	13.625	16.250	18.875	21.500	
Biodiesel(Soybean oil) blending ratio to maintain grade(%)	8	12	15	18	22	26	30	34	
Biodiesel(Imported UCO) blending ratio to maintain grade(%)	9	12	16	19	24	28	33	37	
Biodiesel(Winter camelina oil) blending ratio to maintain grade(%)	12	17	21	26	32	38	44	50	

용량이 동일하면 배출계수에 따라 CII 등급의 개선 여부를 확인할 수 있다. 계산된 탄소 배출계수를 활용하여 동일 질량당 탄소배출 저감률을 계산하여 Table 15에 나타내었다.

선급의 CII 규제 대응 지침서(KR[2023])에 따르면 2019년 대비 선종 및 크기에 상관없이 모든 선박에서 동일한 감축계수를 적용하며 적용 값은 Table 16과 같다.

바이오디젤 혼합량을 10%~40%까지 연도별로 상황에 맞추어 혼합하면 CII 등급을 개선할 수 있다. 그러나 연구에 사용된 WtW GHG Intensity 값은 바이오디젤 원료 중 일부를 확인 한 것임으로 선박에 사용될 바이오디젤 원료를 파악한 후 WtW GHG Intensity 값을 계산할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 바이오디젤 비율에 따른 연료의 성분변화를 측정하여 탄소배출계수 및 EEDI, CII 등급을 계산하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 논문에서 수행한 연료 성분변화에서 바이오디젤 비율이 증가함에 따라 탄소와 수소의 비율이 감소하고, 산소의 비율은 증가하였다. 따라서 발열량이 소량 감소하여 동일 출력에 대한 연료 사용량이 소량 증가할 것으로 사료된다. 또한 연료 내 높은 산소함량이 수분 발생으로 인한 부식을 유발함으로 장기간 연료 보관의 어려움이 있다.

(2) 탄소배출계수 및 CII 등급을 계산한 결과 동일한 선박이 동일한 조건으로 운항하였을 때 전과정 탄소배출량이 낮은 바이오 혼합유 40%를 사용하게 되면 2030년 목표인 30%까지 CII 등급을 개선할 수 있을 것으로 생각된다.

(3) EEDI를 계산한 결과 WtW GHG Intensity 25.2 gCO₂eq/g 이하의 원료를 사용한 BD30의 EEDI는 논문에서 선정한 산적화물 선의 2025년 EEDI 허용값인 3.39gCO₂/ton·nm이하로 선박 운영이 가능하게 된다. 따라서 혼합하게 될 바이오디젤 원료의 WtW GHG Intensity를 확인한 후 EEDI를 계산하여 허용치 내 바이오혼합유를 사용하여 선박을 운항하여야 할 것으로 생각된다.

(4) 현재 바이오디젤의 단가는 디젤유 대비 2배 정도의 가격이 형성되어 있다. 하지만 탄소세 도입 이후에는 탄소세를 포함한 디젤유의 가격과 바이오디젤의 가격을 비교하여 현장에서 BD0 ~ BD30까지 제조하여 가장 경제적인 혼합비율의 바이오 혼합유를 공급받아 운항하면 좋을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 차명훈의 석사학위논문(“바이오 디젤 혼합비율에 따른 연료성분 변화와 배기가스 연관성에 관한 연구”, 국립한국해양대학교 대학원)의 일부를 수정 보완한 것이다.

References

- [1] Argonne National Laboratory, 2024, Life Cycle Analysis of Greenhouse Gas Emissions of Clean Fuels with the R&D GREET 2024 Model, 7.
- [2] ASTM, 2016, ASTM D5291-21 Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Petroleum Products and Lubricants.
- [3] Cha, M.H, 2024, A study on the relationship between fuel composition changes and exhaust gas according to biodiesel blending ratio, National Korea Maritime & Ocean Univ., Pusan, Korea, 6-10, 23, 37-41.
- [4] EU, 2018, EU RED II Annex III-ENERGY CONTENT OF FUELS.
- [5] Hwang, GT, 2017, An analysis on the basic characteristics of fuel oil constituting the fuel quality of ships, Kwang Woon Univ., 5-10.
- [6] Haiwen Song *et al.*, 2016, Effects of Oxygen Content of Fuels on Combustion and Emissions of Diesel Engines, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, energies, 9-11.
- [7] Imfactbook, 2024, Bioplastics and biofuels, emerging as key environmental and decarbonization industries, market trends and business status by participating company, pp 451-455.
- [8] International Maritime Organization(IMO), 2008, IMO RESOLUTION MEPC. 177(58) - Amendments to the technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines (NOx Technical Code 2008).
- [9] International Maritime Organization (IMO), 2022, Unified interpretation of regulation 18.3 of MARPOL ANNEX VI.
- [10] International Maritime Organization (IMO), 2023, Resolution MEPC.377(80). 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships.
- [11] KBF, What is Biofuel? - Biodiesel, <https://k-biofuels.or.kr/front/kor/bio/bio-diesel>.
- [12] Kim, H.G, 2008, A Study on Characteristics of Air Pollutants

- Emissions by Biodiesel and DPF, INHA Univ, Incheon, Korea, 22-29.
- [13] Kim, M.G, 2018, A Study on the Cylinder Lubricating Problem by Using Ultra Low Sulfur Fuel Oil to Marine Diesel Engine, National Korea Maritime & Ocean Univ., Pusan, Korea, 24.
- [14] KR, 2012, Energy Efficiency Design Index (EEDI) Verification and International Energy Efficiency (IEE) Certificate Issuance.
- [15] KR, 2023, Decarbonization Magazine.
- [16] KR, 2023, Guidelines for the Use of Ship Biofuel.
- [17] Ministry of Environment, 2020, 2050 Carbon Neutrality Declaration.
- [18] Ministry of Oceans and Fisheries, 2024, Guidebook for the Use of Biofuels on Ships.
- [19] Park, H.S, 2013, The impact of biodiesel combustion on NOx emissions and NOx reduction technology, RESEAT, Korea, 2.
- [20] Reusser C.A. and Pérez Osses J.R., 2021, Challenges for Zero-Emissions Ship, Journal of Marine Science and Engineering, 1-17.
- [21] UN Trade and Development, 2023, Review of Maritime Transport.
- [22] Yoon, S.H, 2002, Modern External Combustion Engines, 109-110.

Received 18 August 2025

1st Revised 10 September 2025, 2nd Revised 30 September 2025

Accepted 2 October 2025