



GaBi를 이용한 탄소 기반 에너지 사용 선박의 환경영향평가에 관한 연구

이정학¹⁾ · 오 철²⁾ · 이재훈^{3)*}

A Study on the Environmental Impact Assessment of Carbon-Based Energy Powered Ships using GaBi

Jeonghak Lee¹⁾ · Cheol Oh²⁾ · Jaehoon Jee^{3)*}

Received 21 April 2026 Revised 20 May 2026 Accepted 22 May 2026 Published online 23 June 2026

ABSTRACT This study assessed the environmental impact of ship operations using a life-cycle assessment (LCA) based on the IMO 2024 LCA Guidelines and ISO 14040/14044 standards. The case study was a training vessel, and actual fuel consumption data from 2025 were analyzed. The well-to-wake emissions from Bunker-A and Diesel Oil were assessed using GaBi software and the CML-IA methodology. Global warming potential (GWP), acidification potential (AP), eutrophication potential (EP), and ozone depletion potential (ODP) were evaluated. Bunker-A and Diesel Oil contributed 2,065 and 580 tonCO₂eq, respectively, to greenhouse gas emissions, totaling 2,645 tonCO₂eq. The GWP was dominated by tank-to-wake emissions, whereas the well-to-tank processes contributed approximately 20% of the total. In contrast, the AP, EP, and ODP were predominantly associated with upstream fuel production. These findings demonstrate the applicability of the IMO LCA framework to real ship operations and the importance of considering upstream emissions in fuel selection and regulatory compliance.

Key words Life cycle assessment(전주기 평가), Greenhouse gas(온실가스), Ship(선박), International maritime organization(국제해사기구), GaBi(GaBi)

Nomenclature

kgCO₂eq: kilogram of carbon dioxide equivalent
kgSO₂eq: kilogram of sulfur dioxide equivalent
kgPO₄eq: kilogram of phosphate equivalent
kgR11eq: kilogram of r11 equivalent

Subscript

LCA : life cycle assessment
IMO : international maritime organization
ISO : international organization for standardization
GHG : greenhouse gas
GWP : global warming potential
AP : acidification potential
EP : eutrophication potential
ODP : ozone depletion potential
HFO : heavy fuel oil

1) Ph.D. Candidate, Mokpo National Maritime University

2) Professor, National Korea Maritime & Ocean University

3) Professor, Mokpo National Maritime University

*Corresponding author: jhjee@mmu.ac.kr

Tel: +82-061-240-7208

1. 서론

2024년 국제해사기구(IMO)는 MEPC 81차 회의에서 「2024 Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels」(MEPC.391(81))을 개정하여 기존 2018년 지침(MEPC.320(74))을 대폭 강화하였다.^[1] 이는 2023년 GHG Strategy 개정에 맞춰 Net-Zero Framework의 GHG 연료강도(GFI) 산정 기준으로 완성도를 높였으며, Fuel Lifecycle Label (FLL) 신설, 기본 배출값 업데이트, 메탄 슬립 보정 강화, e-fuel 배출계수 추가 등 실무 적용성을 획기적으로 개선·강화하였다.^[2] IMO가 시행 중인 단기조치는 선박연료의 연소과정(Tank to Wake)의 이산화탄소 배출량을 규제하고 있으나, LCA 지침의 개발로 생산·운송과정(Well-to-Tank)을 포함한 연료 전과정(Well to Wake)에서 배출되는 온실가스를 규제할 수 있는 기술적인 도구를 마련하였다.

최근 IMO는 2027년 채택 목표로 온실가스 감축을 위한 중기결합조치를 개발하고 있다. 이 조치는 경제적 조치는 물론 기존 단기조치의 규제 범위를 확장하여 연료의 전과정 온실가스 배출을 규제할 것으로 예상되며, 이를 이행하기 위한 선박연료 온실가스 배출계수를 포함한 IMO LCA 프레임워크가 LCA 지침에 포함되어 있다.

한편, 유럽 연합(EU)의 'Fit for 55' 패키지의 경우에는 2030년까지 온실가스 배출량을 1990년 수준 대비 55% 감

축하기 위한 입법안 패키지를 발의하였다.^[3] 이 중 국제 해운과 직접적으로 연관된 사항 중 하나로 FuelEU Maritime (FUELEU MARITIME(REGULATION (EU) 2023/1805 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC)이 제안되었다.

FuelEU Maritime은 EU/EEA(유럽 경제 지역) 항만에 기항하는 총톤수 5,000 GT 선박에 대해 기국과 관계없이 해상운송에서 재생 가능한 연료 및 저탄소 연료 사용 촉진을 위해 시작된 법안이다. EU/EEA 항만에 기항하는 선박 연료의 온실가스 집약도 제한치를 2050년까지 점차적으로 강화함으로써 친환경 연료 수요를 자극하고 항만 내에서의 육상전원공급 및 무배출기술(ZET) 사용 증진을 목표로 하며, 친환경 에너지 수요 및 온실가스 감축을 강제하는 제도적 장치로 작용하고 있다.^[4]

이와 같이, 해운산업 전반에서 탄소중립 달성이 핵심 과제로 부상함에 따라 단순 소비 단계의 배출을 줄이는 것을 넘어 에너지의 생산부터 공급·소비에 이르는 전 과정에서 환경 부하를 정량적으로 관리하고 신재생 에너지원의 도입 타당성을 검증하는 과정이 필수적인 시점이 되었다.

두 규정은 Well-to-Wake의 선박 연료에 대한 온실가스 발생량을 기준으로 온실가스를 산정하고 있으며, 연료

Table 1. Scope for life cycle assessment (source: IMO)

Node	Explanation
2.1	The scope of these Guidelines is to address well-to-tank (WtT), tank-to wake (TtW), and well-to-wake (WtW) GHG intensity and sustainability themes/aspects related to marine fuels/energy carriers (e.g. electricity for shore power) used for ship propulsion and power generation onboard. The relevant GHGs included are carbon dioxide (CO ₂), methane (CH ₄) and nitrous oxide (N ₂ O).
2.2	The system boundaries of the WtW GHG emission factors calculation, in the context of these guidelines span the life cycle of fuels from their sourcing to production, conversion, transport, distribution, and eventually their use on board ships based on an attributional approach.

Table 2. Article 15 monitoring and recording (source: FuelEU)

Node	Explanation
(a)	port of departure and port of arrival including the date and time of departure and arrival and time spent at berth;
(c)	the amount of each type of fuel consumed at berth and at sea;
(e)	for each type of fuel consumed at berth and at sea, the well-to-tank emission factor, the tank-to-wake emission factors of combusted fuel and the tank-to-wake emission factors of slipped fuel associated with the different fuel consumers on board, covering all relevant greenhouse gases;
(f)	the amount of each type of substitute source of energy consumed at berth and at sea;

의 전주기 평가의 사용 범위는 Table 1과 Table 2에서 확인할 수 있듯이, 정박과 항해에서 소비되는 각 유형의 선박 추진 및 선내 발전에 사용되는 해양 연료/에너지를 평가하고 있으며, 이와 관련된 온실가스 강도 및 지속 가능성 주제/측면을 다루고 있다.

이처럼 두 규정은 Well-to-Wake 기준의 온실가스 발생량 산정을 공통적인 원칙으로 채택하고 있으며, 정박 및 항해 시 소비되는 각 유형의 해양 연료와 에너지를 전주기 관점에서 평가하여 온실가스 강도 및 지속 가능성 측면을 다루고 있다. 두 지침 모두 온실가스를 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O)로 정의하고 GWP 100 지표를 적용하여 등가 배출량으로 환산함으로써, 연료별 비교가 가능한 표준화된 방법론을 지향한다.

이와 같이 일관된 산정 체계는 화석연료와 신재생 에너지 연료 간의 공통된 LCA 논리를 제공하여 저탄소 및 무탄소 연료로의 전환을 유도하는 정책적 유인책으로 작용한다. 결과적으로 2050년 탄소중립(Net-Zero)이라는 글로벌 해운 탈탄소화의 방향성을 공유하고 규제 표준화라는 동일한 목표를 수행한다.

특히 해운 산업의 탈탄소화 전략 이행에 있어 LCA는 방법론적 신뢰성을 가지는 지속가능한 정량적 평가 도구로 기능한다. 이는 해상 에너지 공급망 내 연료별 온실가스 배출량을 수치화하여 비교 가능한 지표를 제공하며, 향후 저탄소 대체 연료 전환에 따른 환경적 편익을 실증적인 데이터로 입증할 수 있게 하기 때문이다.

이러한 방법론적 유효성은 선박의 전 생애주기 중 가장 압도적인 배출 비중을 차지하는 운항 단계에서 더욱 극명하게 나타난다. 해당 단계에서 무탄소·저탄소 연료를 도입할 경우, 온실가스 배출량을 90% 이상 감축할 수 있으므로,^[5] 운항 단계에 대한 정량적 평가는 해운 탄소중립 로드맵 수립 및 국제 환경 규제 대응을 위한 최우선적 과제로 평가된다.

그러므로, 국제적 규제 준수와 실질적인 감축 성과 입증을 위해서는 선박의 연료 소모량 분석이 선행되어야 한다. 특히, 현재 사용되는 화석 연료의 온실가스 배출량 진단하는 것은 대체 연료의 실질적인 온실가스 감축 효과 및 온실가스 집약도를 산출하기 위한 정량적 평가의 기준값 설정을 의미한다. 따라서, 본 연구에서는 특정 선박의 2025년 연

료(Bunker-A, Diesel Oil) 사용량을 기반으로, IMO 2024 LCA 지침의 Well-to-Wake 범위를 준수하는 온실가스 배출량을 분석하였다. 또한, ISO 표준에 따라 GaBi 소프트웨어와 CML-IA 방법론을 활용하였으며, 산성화, 부영양화, 오존층 파괴의 다각적인 환경 영향 범주에 대한 정량적 분석하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 선박 운항 과정의 환경영향을 분석을 위해 Fig. 1과 같이 전주기 평가의 국제 표준인 「ISO 14040(2006a)」 및 「ISO 14044(2006b)」 지침을 적용하였다. ISO 표준에 따른 LCA는 목표 및 범위 정의, 목록분석, 영향평가, 전과정 해석의 4단계 절차로 수행된다.^[6,7]

1단계(Goal and Scope Definition)에서는 분석 대상 시스템 경계(Well-to-Wake)를 설정하고, 기능 단위 및 평가 대상 영향 범위(GWP100, AP, EP, ODP)를 구체화하였다.

본 연구의 핵심인 2단계 인벤토리 분석(Inventory Analysis) 및 환경영향 산정을 위해서는 글로벌 표준 LCA 모델링 프로그램인 GaBi를 활용하였다. GaBi 소프트웨어는 복잡한 산업 공정 및 공급망의 물질 에너지 흐름을 시각화하고, 투입물과 산출물간의 정량적 균형을 체계적으로 계산하는데 최적화된 도구이다.^[8] 특히, 선박 연료의 데이터 적용을 위해 GaBi에 내장된 GaBi Professional Database와 IMO LCA Guideline을 연계하였다. 이를 통해 선박 연료 유량

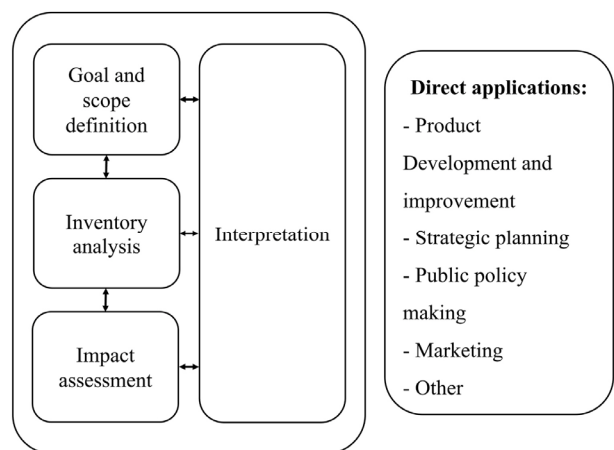


Fig. 1. Phases of an ISO 14040 (source: ISO)^[6]

계로부터 수집된 2025년도 실제 연료 소모량 데이터와 원유 추출, 정제, 수송 단계를 포함하는 글로벌 데이터를 유기적으로 결합하여 목록의 신뢰성과 객관성을 확보하였다.

3단계(Impact Assessment) 및 4단계(Interpretation)에서는 GaBi를 통해 연산된 LCI 결과를 CML-IA 방법론과 매칭하여 환경부하를 특성화하였으며, 이를 기반으로 탄소 기반 연료 간의 대기 및 수계 환경 영향을 정량적으로 평가하였다.

2.1.1 CML-IA

CML-IA(CML Impact Assessment)는 네덜란드 레이던 대학 환경과학센터(Centrum voor Milieukunde Leiden)에서 개발한 방법론이다. 국제 표준의 방법론 중 하나로 제 품, 공정이 환경에 미치는 영향을 분석하는 데 사용된다.^[9]

본 방법론은 환경 영향 범주를 설정한 후, 관련 배출물과 자원 사용량을 분류화(classification) 및 특성화(characterization)하는 과정을 포함한다. 분류화 단계에서는 LCI 데이터를 각 환경 영향 범주에 배정하고, 특성화 단계에서는 해당 범주 내 배출물의 상대적 환경 영향을 수치화한다.

또한, CML-IA는 GWP(온실가스 영향), AP(산성화), ODP(오존층 파괴), EP(부영양화) 등의 주요 환경 영향 범주를 포함한 10개 기본 범주와 추가 범주로 구성되어 있다. 특히 EcoInvent, GaBi 등 글로벌 데이터베이스와 연계하여 다양한 환경 영향을 정량 평가 및 분석할 수 있도록 설계되었다.

2.1.2 평가 항목(Table 3)

GWP는 특정 온실가스가 단위 질량당 CO₂ 대비 일정 시간 동안 대기 중에 흡수하는 복사 에너지의 총합을 상대적으로 평가한 지표이다(IPCC, 2023). GWP는 가스별 대기 수명과 복사강제력(Radiative Forcing)을 통합해 산정되며, 전주기 영향평가에서 온실가스 배출량을 CO₂로 환산하는 등가 계수로 활용된다.^[10]

AP는 특정 물질 배출이 토양·수역의 산성화를 유발하여 식물 및 생태계에 미치는 피해를 평가하는 지표이다.^[9,11] 주요 산성화 배출원인 NO_x, NH₃, SO₂의 대기 체류 특성과 생태계 반응을 종합적으로 고려하여, 환경영향평가에서 다양한 오염원의 산성화 영향을 비교·분석하는 데 필수적인 등가 계수로 활용된다.

EP는 특정 물질이 수생 환경에 유입되어 조류·부들잎 등 1차 생산자의 과도한 증식을 유발하는 능력을 상대적으로 평가한 지표이다.^[9,11] 방출된 질소(N)와 인(P)의 농도와 조류 생물량 전환 비율을 기반으로 하며, 지역별 수송·분해 과정을 반영한 운명 계수를 적용해 산정한다. 특히 유럽에서는 독성 물질 배출보다 EP를 더 심각하게 평가하여 주요 지표로 활용된다.

ODP의 경우, 특정 물질이 성층권의 오존층을 파괴하는 상대적 능력을 나타내는 지표로, 기준 물질인 CFC-11의 ODP를 1로 설정한다.^[12]

2.2 선행 연구

이정학(2025)은 국내에서 실제 해체 공정이 진행된 선박

Table 3. Methods for impact category (source: Leiden University)^[11]

Category	Explanation
GWP 100	The GWP thus represents the combined effect of the differing times these substances remain in the atmosphere and their effectiveness in causing radiative forcing. *emission = GWP100 × airborne emission[kg]
AP	Atmospheric emissions (in kg) are converted, using the AP, to sulfur dioxide emissions (in kg) resulting in equivalent acidification: *emission = AP × airborne emission[kg]
EP	Emissions to the atmosphere, water or soil (in kg) are converted, using the NP, to an equivalent phosphate emission (in kg) in terms of nutrification *emission = NP × airborne emission[kg]
ODP	The ozone depletion potential of a substance is a metric for determining the relative strength of that chemicals ability to destroy ozone. The ODP of a substance is defined as the ratio of the change in global ozone for a given mass emission of the substance to the change in global ozone for the same mass emission of CFC-11 (CFC13). *emission = ODP × airborne[kg]

을 연구 대상으로 선정하여 GaBi 소프트웨어와 CML-IA 방법론을 적용해 선박 재활용 단계의 환경영향을 평가하였다.^[13] 철 스크랩 회수율 95%(2,905 MT)와 폐기물 처리 5%(153 MT) 시나리오를 기반으로 LCA를 진행한 결과, GWP100, AP, EP, ODP 등 분석을 수행한 모든 영향 범주에서 환경 부하의 순감소 효과를 확인하였다. 비록 소각 및 매립 등 일부 폐기물 처리 과정에서 국소적인 환경 부하가 발생하였으나 전체 생애주기 관점에서는 신규 철강재 생산 대안 대비 매우 친환경적인 과정임을 입증하였으며, 향후 글로벌 재활용 협약 발효에 대응하기 위한 국내 정책적 근거를 제시하였다.

Jang *et al.* (2021)은 50,000DWT급 벌크선을 사례로 선박 내 핵심 기자재인 단열재 유형(올계, EPS, 폴리우레탄 폼)에 따른 LCA를 수행하였다.^[14] GaBi 프로그램과 CML 2001 방법론을 활용하여 GWP, AP, EP, ODP, HTP 범주를 다각적으로 평가한 결과, 폴리우레탄 폼이 WtW 기준 GWP 3.9×10^4 kgCO₂eq, HTP 3.4×10^3 kgDCBeq로 가장 높은 환경 부하를 보였다. 반면 올계(2.1×10^4 kgCO₂eq, 760.1 kgDCB-eq)와 EPS(동일 GWP, AP 23.3 kgSOeq, EP 2.7 kgPheq)의 환경 성과가 상대적으로 우수함을 실증하였다. 특히 해당 연구는 상위 공급망에 해당하는 원료 제조 단계가 전체 환경영향에 지배적인 비중을 차지함을 규명하고, 선박 설계 단계에서의 LCA 표준화 체계 구축을 제안하였다.

Hwang *et al.* (2020)은 국내 연안을 운항하는 12,000 GT급 페리선을 대상으로 화석 연료(MGO)와 대체 에너지원(천연가스, 수소) 도입 시의 전과정 환경영향평가를 수행하였다.^[15] 해당 연구는 ISO 14040 지침에 의거하여 GaBi 소프트웨어 및 데이터베이스를 구축하였으며, 시스템 경계를 Well-to-Wake로 설정하여 정량적으로 비교·검증하였다. 분석 결과, 연료 공급 단계의 GWP에서 MGO는 0.56×10^8 kgCO₂eq, 천연가스는 0.33×10^8 kg CO₂eq를 기록하였으며, 수소 연료는 부생가스 개질(SMR) 및 액화 공정을 거치며 약 10배에 달하는 2.79×10^8 kgCO₂eq의 온실가스를 배출함을 확인하였다. 이는 수소 연료가 선상 연소(TtW) 단계에서는 무배출을 달성하더라도, 상위 공급망(WtT)의 탄소 집약도가 전체 생애주기 오염을 지배함을 입증하였다.

3. 연구 시나리오

3.1 선박 제원

실습을 목적으로 하는 특수선을 대상으로 선정하였다. 전장 103 m, 폭 15.6 m, 깊이 9.9 m의 선박으로 총 208명의 인원을 승선할 수 있으며, 기타 선박 제원은 Table 4와 같다.

선박의 주추진기관으로 MAN B&W 社의 HYUNDAI MAN B&W 6S35MC가 탑재되어 있으며, 173 rpm에서 최대출력 4,440 kW를 낼 수 있다(Table 5, Fig. 2). Fig. 3, Table 6과 같이 발전기의 경우 YANMAR 社의 6N21(A)L-V의 모델을 사용하고 있으며, 600 kW의 전기를 생성할 수 있다.

Table 4. Ship's particular

CONTENTS	VALUE
Gross Tonnage	4,701 ton
L.O.A	103 m
Breadth	15.6 m
Depth	9.9 m
Speed	16.8 kn
Complement	208 persons

Table 5. Specification for main engine

CONTENTS		VALUE
Model		6S35MC (HYUNDAI-MAIN B&W)
MCR	Output	4,440 kW
	MEP	19.1 bar
	Pmax	140 bar
	Revolution	173 rpm
CSR	Output	3,787 kW
	MEP	17.1 bar
	Revolution	163.9 rpm



(a)



(b)

Fig. 2. Overview for main engine

보조 보일러는 1,200 kg/h의 증기를 생성할 수 있으며, 연료 소모량은 시간당 32~100.7 kg이다(Fig. 4, Table 7 참조).

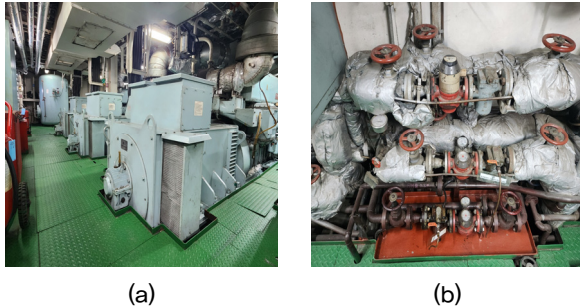


Fig. 3. Overview for Diesel Generator

Table 6. Specification for generator

CONTENTS	VALUE
Model	6N21(A)L-V (YANMAR)
Rated Output / Revolution	600 kW / 720 min ⁻¹
Rated Voltage / Current	450 V / 692.3A
No. of Phase / Frequency	Ø3 / 60 Hz

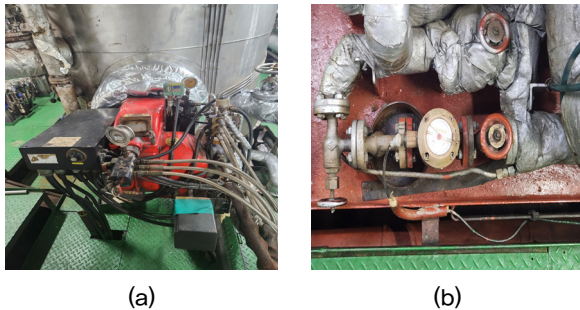


Fig. 4. Overview for Aux. Boiler

Table 7. Specification for Aux. Boiler

CONTENTS	VALUE
Model	MA02P01
Steam Production	1,300 kg/h
Thermal efficiency at full load	80%
Working Pressure	7.0 kg/cm ²
Max. Fuel Consumption	100.7 kg/h
Min. Fuel Consumption	32 kg/h

Table 8. Bunker Specification for Bunker-A & Diesel Oil

Fuel Oil	Density	Flash Point (°C)	Pour Point (°C)	Sulphur	Water Content	API Gravity
Bunker-A	0.8602	72	-19	0.215	0.05	32.9
Diesel Oil	0.8470	68	-	0.044	-	35.4

3.1.1 연료유 사양

Table 8과 같이 해당 선박에서 사용한 연료 사양을 확인할 수 있다. 2025년에 연료유 공급은 Bunker-A는 3건, Diesel Oil는 2건이 있었으며 평균값을 표로 나타낸 것이다. 실습선의 경우 Bunker-A와 Diesel Oil을 주 연료로 사용하고 있다. Bunker-A는 경유 유분 70%와 Bunker-C 30%의 혼합유이다.^[16]

3.1.2 연료 유량계 사양

각각의 기기로 들어가는 연료유의 양을 계측하기 위해 기기마다 연료유관에 연료유량계가 설치되어 있다. Table 9와 같이 메인엔진과 발전기의 경우 시간당 30~3,000L의 연료유를 측정할 수 있으며, 보일러는 10~600 l/h의 유량을 확인할 수 있다.

3.2 연구 범위

- 4,701톤의 특수선의 2025년의 실제 운항 데이터를 기반으로 두 연료의 WtW 환경영향평가를 비교하였다.
- 사용 연료는 Bunker-A와 Diesel Oil이며, Table 8의 성적서 평균값을 적용하였다.
- 연료 연소를 통한 배출 물질은 CO₂, CH₄, N₂O로 한정하였으며, GaBi를 통하여 모델링하였다.

Table 9. Specification for Flow-meter

CONTENTS	VALUE
Main Engine & Generator	
Qmin	30 [l/h]
Qmax	3,000 [l/h]
Qn	2,000 [l/h]
Aux. Boiler	
Qmin	10 [l/h]
Qmax	600 [l/h]
Qn	400 [l/h]

4. 결과 및 고찰

4.1 연료 소모량

Table 10에서 확인할 수 있듯이, 4,701톤의 실습선의 2025년도 연료 총 소모량은 Bunker-A는 604,425L이며, Diesel Oil은 171,085L로 집계되었다.

기기별 사용량은 주기관의 경우 444,360 L, 발전기는 157,340 L, 보조 보일러가 173,810 L의 연료 소모가 있었다. 실습선이라는 특수선의 목적에 맞게 항해보다는 정박 시간이 길기 때문에 보조 보일러의 연료 소모량이 많음을 확인할 수 있다. Table 10의 부피 단위의 사용량을 식 (1)의 밀도 공식을 통해 무게 단위로 변환하면, Bunker-A는 519.9 ton, Diesel Oil은 144.9 ton이다.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

4.2 GWP 100

해당 선박의 GWP 100 배출량은 Fig. 5와 같이 Bunker-A의 경우 2,065 tonCO₂eq, Diesel Oil 580 tonCO₂eq가 방출되었으며, 총합 2,645 tonCO₂eq의 온실가스가 배출되었다. Table 11과 같이 배출강도는 Bunker-A 1 kg으로 환

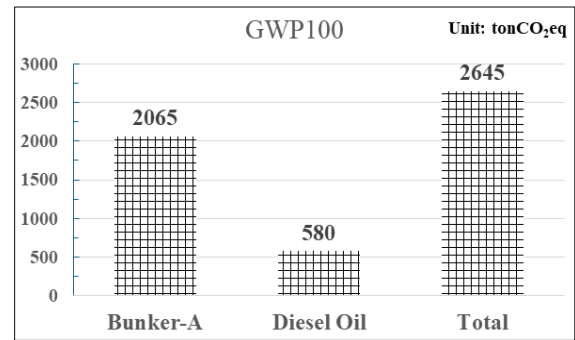


Fig. 5. Result of GWP 100

산 시 3,972 kgCO₂eq, Diesel Oil는 4,003 kgCO₂eq로 나타났다.

이는 Diesel Oil의 WtT GHG intensity가 Bunker-A보다 높고 LCV가 상대적으로 우위였기 때문이다(Table 12 참조). TtW 연소 배출이 전체 GWP의 80% 이상을 차지하지만, IMO 2024 지침과 같이 WtW 관점을 적용할 경우 WtT 단계의 연소 배출율(약 20%)를 함께 고려하는 것이 규제 대응 측면에서 중요하다.

4.3 AP

AP는 WtT 생산 과정에서만 발생하여 Bunker-A 784 kgSO₂eq, Diesel Oil 253 kgSO₂eq(총 1,037 kgSO₂eq)로

Table 10. Fuel consumption summary for equipments

	MAIN ENGINE	GENERATOR	AUX. BOILER	TOTAL
BUNKER-A	372,510 L	98,020 L	133,895 L	372,510 L
Diesel Oil	71,850 L	59,320 L	39,915 L	71,850 L
TOTAL	372,510	98,020	133,895	

Table 11. Environmental impact results per 1 kg fuel

	GWP 100	AP	EP	ODP
Bunker-A	3,972 kgCO ₂ eq	0.001508 kgSO ₂ eq	0.000556 kgPO ₄ eq	3.96×10^{-16} kgR11eq
Diesel Oil	4,003 kgCO ₂ eq	0.001746 kgSO ₂ eq	0.000910 kgPO ₄ eq	4.58×10^{-16} kgR11eq

Table 12. Initial default emission factors per fuel pathway code (source: IMO)^[1]

Fuel type	WtT GHG intensity (gCO ₂ eq/MJ)	LCV (MJ/g)	Energy Converter	C _i CO ₂ (gCO ₂ /g fuel)	C _i CH ₄ (gCH ₄ /g fuel)	C _i N ₂ O (gN ₂ O/g fuel)	Note
HFO (HSFO)	16.8	0.0402	ALL ICEs	3.114	0.00005	0.00018	Resolution MEPC.364(79) 4th IMO study
Diesel Oil	17.7	0.0427	ALL ICEs	3.206	0.00005	0.00018	
Bunker-A	17.4	0.0420	ALL ICEs	3.206	0.00005	0.00018	HFO 70%, Diesel Oil 30%

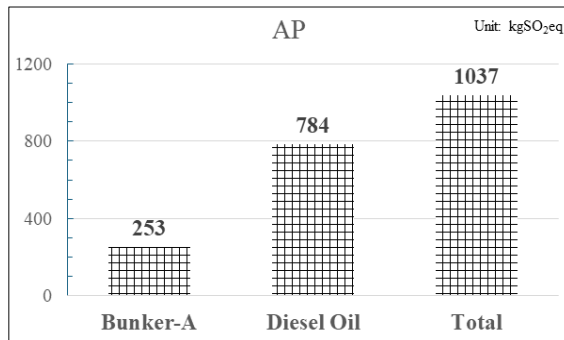


Fig. 6. Result of AP

평가되었다(Fig. 6).

TtW 연소 배출(SO_x 등)은 GaBi Database 기준 연소 과정의 모델링에서 산성화 범주로 분류되지 않아 0에 수렴하였다. 이는 황 함량의 차이에도 불구하고 생산 단계(정제·운송) 오염이 지배적임을 시사한다.

4.4 EP

Fig. 7처럼 EP는 Bunker-A에서 289.1 kgPO₄eq, Diesel Oil에서 131.93 kgPO₄eq로 총 421.03 kgPO₄eq가 발생하였다. 이는 연료 생산 과정에서 질소·인 화합물 유입이 주 원인으로 GaBi의 CML-IA 특성화에서 유럽 수계 기준으로 환산되었다.

TtW 연소 배출의 영양염 기여는 미미하나 정박 비중이 큰 실습선 운항 특성상 항만 수질에 미치는 영향이 상대적으로 커질 수 있다. 따라서 육상전원 사용은 EP 저감을 위한 유효한 대안으로 판단된다. 또한 이러한 결과는 EP 저감을 위해 연소 단계뿐 아니라 연료의 생산·공급 단계까지 함께 고려한 전과정적 관리가 필요함을 시사한다.

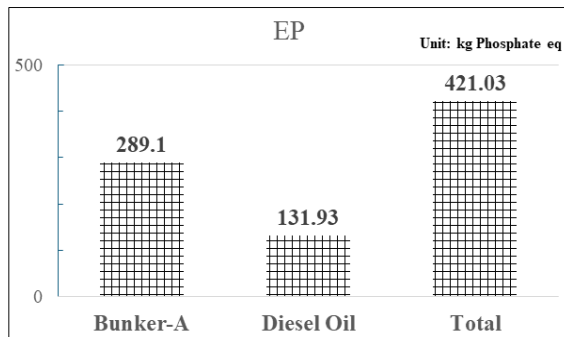


Fig. 7. Result of EP

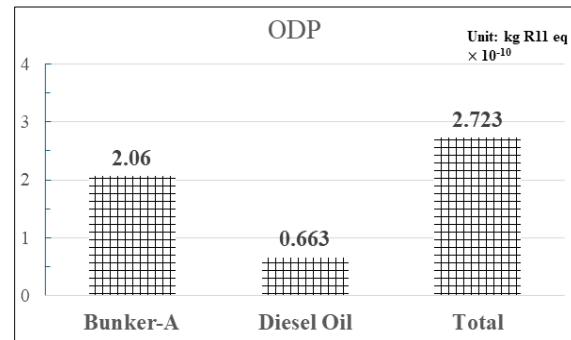


Fig. 8. Result of ODP

4.5 ODP

ODP는 Bunker-A 2.06×10^{-10} kgR11eq, Diesel Oil는 0.663×10^{-10} kgR11eq(총 2.723×10^{-10} kg R11-eq)로 WtT 정제 과정의 CFC 잔류가 지배적이었다(Fig. 8 참조). 연소 과정에서는 ODP 발생은 없으나, 연료 생산 과정에서 발생한 배출은 CML-IA 특성화 기준에 따라 성층권 오존층 파괴 잠재영향으로 산정되었다.

현재 IMO 및 EU의 해양 환경 규제에서 ODP 항목은 GHG 우선순위 대비 낮으나, e-fuel 전환 시 할로젠 화합물 배출 모니터링 필요성을 시사하며 장기 대기 영향 평가의 중요성을 확인했다.

5. 결론

본 연구에서는 IMO 2024 LCA 지침과 ISO 14040/44 표준을 기반으로, 특정 실습선을 대상으로 2025년 운항 단계에서의 환경영향을 GaBi 소프트웨어와 CML-IA 방법론을 활용하여 정량적으로 평가하였다. 분석 대상 연료는 Bunker-A와 Diesel Oil이며, 실제 연료 유량계 데이터를 기반으로 WtW 전 과정에서의 환경영향(GWP100, AP, EP, ODP)을 산정하였다.

(1) GWP100은 총 2,645 tonCO₂eq로 나타났으며, 이 중 Bunker-A가 2,065 tonCO₂eq, Diesel Oil이 580 tonCO₂eq를 차지하였다. 단위 질량당 배출강도는 두 연료 간 큰 차이는 없었으나, 전체 배출량은 연료 사용량에 크게 의존하는 것으로 나타났다. 특히 TtW의 연

소 배출이 전체 GWP의 대부분을 차지하고 있으며, WtT 단계 역시 약 20% 수준의 기여도를 보여 전과정 기반 평가의 중요성을 확인할 수 있었다.

- (2) AP, EP, ODP 영향의 경우 대부분 WtT 단계에서 발생하는 것으로 분석되었다. 이는 연료의 생산·정제·운송 과정에서 발생하는 환경부하가 주요 원인임을 의미하며, 기존의 TtW만으로는 전체 환경영향을 충분히 반영하기 어렵다는 점을 시사한다. 특히 실습선의 운항 특성상 정박 시간이 길어 보조 보일러 사용 비중이 높으며, 이로 인해 항만 지역에서의 환경영향(특히 EP)이 상대적으로 크게 나타나는 특징을 확인하였다.
- (3) 본 연구는 IMO 2024 LCA 지침을 실제 선박 운항 데이터에 적용하여 WtW 기반 환경영향을 정량적으로 평가하였다는 점에서 의의를 가진다. 또한 FuelEU Maritime와 같은 규제 체계에서 요구하는 전과정 온실가스 관리의 필요성을 실증적으로 뒷받침하며, 향후 선박 연료 선택 및 운항 전략 수립에 있어 WtT 단계까지 고려한 통합적 접근이 필요함을 제시한다.
- (4) 향후 연구에서는 다양한 선종 및 운항 패턴을 반영한 확장 연구와 함께, LNG, e-fuel, 바이오 연료 등 대체 연료를 포함한 비교 분석이 필요하다. 또한 GaBi 데이터베이스 및 영향평가 방법론의 불확실성에 대한 정량적 분석을 통해 결과의 신뢰성을 보다 강화할 필요가 있다.

References

- [1] IMO, 2024, “2024 Guidelines on life cycle GHG intensity of marine fuels (2024 LCA Guidelines)”, <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2081/Annex%2010.pdf>.
- [2] IMO KMC, 2024, “Explanatory Manual on IMO 「2024 Guidelines on Life Cycle GHG intensity of Marine Fuels」”, <https://www.imokorea.org/upfiles/guidebook/2024/IMO%20선박연료%20온실가스%20전과정평가%20지침%20해설서.pdf>.
- [3] EU, 2023, “Regulation (EU) 2023/1805 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC (Text with EEA relevance)”, <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1805/oj/eng>.
- [4] Korea Register, 2024, “FuelEU Maritime Guideline”, https://www.krs.co.kr/TECHNICAL_FILE/KR%20FuelEU%20Maritime%20Guidelines_Rev.2.pdf.
- [5] LR, 2024, “From the cradle to the grave: emissions from an LNGC’s life cycle”, <https://www.lr.org/en/knowledge/horizons/march-2024/from-the-cradle-to-the-grave-emissions-from-an-lngcs-life-cycle/>.
- [6] International Organization for Standardization, 2006, “ISO 14040:2006 (Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework)”, <https://www.iso.org/standard/37456.html>.
- [7] International Organization for Standardization, 2006, “ISO 14044:2006 (Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines)”, <https://www.iso.org/standard/38498.html>.
- [8] Sphera, 2022, “MODELING PRINCIPLES GaBi Databases 2022”, <https://www.scribd.com/document/809221342/MODELING-PRINCIPLES-GaBi-Databases-2022>.
- [9] Bruijn, H., Duin, R., Huijbregts, M.A.J., Guinee, J.B., Gorree, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A., and Oers, L., *et al.*, 2002, “Handbook on Life Cycle Assessment”, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, <https://doi.org/10.1007/0-306-48055-7>.
- [10] IPCC, 2023, “Climate Change 2023”, https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SP_M.pdf.
- [11] Leiden University, 2016, “CML-IA Characterisation Factors”, Accessed 1 April 2026, <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors#features>.
- [12] WMO, 2022, “Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022”, <https://ozone.unep.org/sites/default/files/2023-02/Scientific-Assessment-of-Ozone-Depletion-2022.pdf>.
- [13] Lee, J.H., Lee, M.S., Oh, C., and Jee, J.H., 2025, “A Study on the Life Cycle Assessment for Ship Recycling in Korea”, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, **31**(6), 929-938.
- [14] Jang, H.Y., Jang, Y.W., Jeong, B.U., and Cho, N.K.,

- 2021, “Comparative Life Cycle Assessment of Marine Insulation Materials”, J. Mar. Sci. Eng., **9**(10), 1099.
- [15] Hwang, S.S., Gil, S.J., Lee, G.N., Lee, J.W., Park, H., Jung, K.H., and Suh, S.B., 2020, “Life Cycle Assessment of Alternative Ship Fuels for Coastal Ferry Operating in Republic of Korea”, J. Mar. Sci. Eng., **8**(9), 660.
- [16] Park, J.K., Lim, S.H., Shin M.H., Lee D.I., and Oh, J.M., 2023, “A Study on a Comparison of Greenhouse Gas Emission Results According to Actual Measurement and Domestic Calculation Method for Medium-sized Diesel Engine of Vessel”, Transactions of KSAE, **31**(1), 11-18.