



선박 에너지 전주기 평가를 통한 정박 중 온실가스 배출량 분석에 관한 연구

이정학¹⁾ · 오 철²⁾ · 이재훈^{3)*}

A Study on the Analysis of GHG Emissions During In-Port through Life Cycle Assessment of the Ship's Energy

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

Received 21 April 2026 Revised 18 May 2026 Accepted 22 May 2026 Published online 23 June 2026

ABSTRACT This study quantified Well-to-Wake (WtW) GHG emissions from ship energy sources during in-port operations, in accordance with the IMO 2024 LCA Guidelines. Using 3-year field measurements from a training ship, daily WtW emissions were 4,673.4 kgCO₂eq for Bunker-A and 4,642.7 kgCO₂eq for Diesel Oil. Shore power achieved a 73.4% reduction in CO₂eq emissions (1,243 kgCO₂eq/day) compared with Bunker-A, validating its effectiveness for maritime de-carbonization. Analysis of the 1 kg emission intensity revealed that the emission intensity of Diesel Oil (4.005 kgCO₂eq) was higher than that of Bunker-A (3.969 kgCO₂eq) because of its superior energy density. These results establish a quantitative baseline for a GHG Fuel Intensity (GFI) framework and emphasize the necessity of integrating renewable energy into port grids.

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

Nomenclature

LCV : lower calorific value, MJ/kg
GHG_{WtT} : well-to-tank ghg emissions, kgCO₂eq
GHG_{TtW} : tank-to-wake ghg emissions, kgCO₂eq
GHG_{WtW} : well-to-wake ghg emissions, kgCO₂eq
C_{FCO2} : CO₂ emission factor, gCO₂/gfuel

C_{ICH4} : CH₄ emission factor, gCH₄/gfuel

C_{IN2O} : N₂O emission factor, gN₂O/gfuel

Subscript

IMO : international maritime organization

GHG : greenhouse gas

LCA : life cycle assessment

MEPC : marine environment protection committee

GESAMP : joint group of experts on the scientific aspects
marine environmental protection

GWP 100 : global warming potential 100

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

IPCC : international panel on climate change

GIR : greenhouse gas inventory & research Center of Korea

ICE : internal combustion engine

HFO : heavy fuel oil

1. 서론

전 세계적으로 기후위기 대응을 위한 탄소중립(Net-Zero) 달성이 에너지 패러다임의 핵심 과제로 부상하고 있으며, 해운 산업 역시 이러한 거대한 흐름에서 예외가 아니다. IMO(국제해사기구)의 Fourth GHG Study(2020)에 따르면, 국제 온실가스 배출량 중 해운 산업이 차지하는 비중은 2012년 2.76%에서 2018년 2.89%로 상승하며 그 영향력이 점진적으로 확대되고 있다.^[1]

이에 대응하여 IMO는 2018년 4월 MEPC(해양환경보호위원회) 72차 회의에서 결의안 MEPC.304(72)「선박 온실가스 배출 감축 초기 IMO 전략」을 채택하며 국제 해운의 탈탄소화 전략을 본격화하였다.^[2] 초기 전략은 2050년까지 2008년 대비 최소 50%의 온실가스 감축을 목표로 설정하였으나, 기후 변화의 가속화에 따라 더욱 강력한 정책적 동력이 요구되었다.

이에 2023년 MEPC 80차 회의에서는 Res.MEPC.377(80)을 통해「2023 IMO 선박 온실가스 배출 감축 전략」을 채택하며, 목표를 2050년경 또는 그 근처(by or around 2050)의 온실가스 순 배출 제로(Net-Zero) 달성으로 대폭 상향하였다.^[3] 특히 2030년까지 온실가스 배출량을 최소 20%(최대 30% 노력) 감축하고, 사용하는 에너지 총량 중 5~10%를 제로 또는 근제로 온실가스 기술 및 연료로 전환한다는 구체적인 체크포인트를 제시하였다.

이러한 전략 변화의 핵심은 기존의 TtW(연소 과정) 중심

규제에서 WtW(연료의 전과정) 평가 체계로의 전환이다. 기존의 IMO 협약들은 등을 통해 선박의 운항 효율과 연소 시 배출되는 이산화탄소 규제에 초점을 맞추어 적용하였다. 그러나 바이오 연료, e-fuel, 수소 및 암모니아 등 차세대 에너지원은 생산 경로에 따라 전주기 탄소 집약도가 크게 달라질 수 있다는 한계가 있다.

이러한 배경에서 IMO는 MEPC 80에서 최초의「해양 연료 생애주기 GHG 집약도 지침(Res.MEPC.376(80), LCA 지침)」을 채택하였으며, 2024년 MEPC 81에서는 이를 보완한「2024 LCA Guidelines(Res.MEPC.391(81))」을 승인하여 실무 적용성을 강화하였다(Table 1).^[4,5]

본 지침은 연료의 1차 생산부터 버킹킹까지의 WtT 단계와 선박 내 사용 단계인 TtW 단계를 표준화된 공식으로 계산하도록 규정하고 있으며,

이산화탄소(CO₂)뿐만 아니라 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)를 포함한 종합적인 온실가스 등가량(CO₂eq) 산출을 요구한다.^[5] 또한 GESAMP-LCA 작업반(WG 46)을 통해 배출 계수 검토 방법론과 탄소 출처, 흡수원 플로우차트 개발 등 지침의 과학적 정교화 작업이 지속되고 있으며, 이는 2027년까지 최종 완료될 예정이다.^[6]

이러한 변화의 실질적인 이행 기제는 2025년 MEPC 83에서 승인된 연료 온실가스 집약도(GFI)로 구체화되고 있다. GFI는 선박이 사용하는 연료의 단위 에너지당 온실가스 배출량을 제한하는 목표 기반 표준(Goal-based Fuel Standard)으로, LCA 방법론을 통해서만 그 적합성을 평가받을 수 있는 구조를 지닌다.^[7] 즉, GFI 규제하에서 선박은 연소 단계뿐 아니라 원료 추출부터 공급까지 포함한 전주기 집약도 값을 규제치 이내로 유지해야 한다. 이는 저탄소 연료가 가진 WtT 단계의 감축 이점을 규제 이행 실적으로 인정받기 위한 필수 전제 조건이다. 따라서 LCA 지침은 GFI 규제를 작동시키는 기술적 표준으로서 탄소 중립성을 검증하고 규제 준수 여부를 판별하는 유일한 도구다.

Table 1. Node for Methodology (source: IMO)

Node	Description
MEPC.304(72)	INITIAL IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS
MEPC.376(80)	GUIDELINES ON LIFE CYCLE GHG INTENSITY OF MARINE FUELS(LCA GUIDELINES)
MEPC.377(80)	2023 IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS
MEPC.391(81)	2024 GUIDELINES ON LIFE CYCLE INTENSITY OF MARINE FUELS(2024 LCA GUIDELINES)

이와 더불어, 항만 지역의 온실가스 및 대기오염 저감을 위해 도입된 육상전원공급장치(AMP)의 확산은 전주기적 분석 필요성을 더욱 증폭시키고 있다. 선박에서 전기를 사용하기 위해 정박 중 자체 발전기를 가동하는 대신 육상 전력을 사용하는 방식은 항만 대기질 개선에는 즉각적인 효과를 제공한다. 육상전원 사용으로 인한 실질적인 온실가스 감축량은 선박에 공급되는 전력이 생산되는 과정, 즉 국가 전력망의 에너지 믹스 비율과 탄소 집약도에 의해 결정된다.

따라서 본 연구는 이러한 국제적 흐름에 부응하여 실습선 S호의 3개년 데이터를 바탕으로 정박 중 에너지 소비 패턴과 온실가스 배출 특성을 분석하였다. 실습선은 일반 상선과 달리 상대적으로 긴 정박 기간을 가지며, 특히 모항(Mother Port) 정박 시 육상전원을 우선 수전하여 발전기 가동을 최소화하는 운영 특징을 가진다. 본 연구는 정형화된 데이터를 활용하여 2024년 개정된 IMO LCA 지침 기반의 WtW 배출량을 비교 분석함으로써, 국가 전력 믹스 기반의 육상전원공급이 선박 탈탄소화에 기여하는 실효성을 검증하고 향후 해운 산업의 에너지 전환을 위한 실무적인 기초 정보를 제공하고자 한다.

2. 연구 방법

$$g_{CO_2eq} = (GWP_{CO_2} \times g_{CO_2}) + (GWP_{CH_4} \times g_{CH_4}) + (GWP_{N_2O} \times g_{N_2O}) \quad (1)$$

$$g_{CO_2eq} = (1 \times g_{CO_2}) + (28 \times g_{CH_4}) + (265 \times g_{N_2O}) \quad (2)$$

$$GHG_{WtT} = e_{fetu} + e_l + e_p + e_{td} - e_{sca} - e_{ccs} [gCO_{2eq}/MJ] \quad (3)$$

$$GHG_{TW} = \frac{1}{LCV} \left(\left(1 - \frac{C_{slipship} + C_{fug}}{100} \right) \times (C_{fCO_2} \times GWP_{CO_2} + C_{fCH_4} \times GWP_{CH_4} + C_{N_2O} \times GWP_{N_2O}) \right. \\ \left. + \left(\frac{C_{slipship} + C_{fug}}{100} \right) \times C_{sfx} \times GWP_{fuelx} \right) - S_{FC} \times e_c - S_{Fecu} \times e_{ccu} - e_{occs} [gCO_{2eq}/MJ] \quad (4)$$

$$GHG_{WtW} = GHG_{WtT} + GHG_{TW} [gCO_{2eq}/MJ] \quad (5)$$

$$GHG_{WtW} = e_{fetu} + e_l + e_p + e_{td} - e_{sca} - e_{ccs} + \frac{1}{LCV} \left(\left(1 - \frac{C_{slipship} + C_{fug}}{100} \right) \times (C_{fCO_2} \times GWP_{CO_2} + C_{fCH_4} \times GWP_{CH_4} + C_{N_2O} \times GWP_{N_2O}) \right. \\ \left. + \left(\frac{C_{slipship} + C_{fug}}{100} \right) \times C_{sfx} \times GWP_{fuelx} \right) - S_{FC} \times e_c - S_{Fecu} \times e_{ccu} - e_{occs} [gCO_{2eq}/MJ] \quad (6)$$

2.1.1 IMO

본 연구에서는 선박 정박 중의 전주기 평가를 분석하기 위하여 IMO에서 제공한 방법론을 적용하였다. IMO에서 제시한 전주기 평가 방법론은 Fig. 1처럼 「ISO 14040(Life cycle assessment - Principles and framework, ISO(2006a)」, 「ISO 14044(Life cycle assessment - Requirements and guidelines, ISO(2006b)」의 기준에 따라 LCA의 기본 틀을 구성하였다.^[8,9] 이에 따라 원료의 조달부터 선박에서의 연소까지 선박 연료를 다루고 전주기 온실가스 집약도를 평가한다(Fig. 2). 본 방법론의 접근 방식은 온실가스 배출량 정량화의 범위 내에서 적용되며, 배출이 발생하는 모든 지역에 적용 가능하고 전체 연료/에너지/에너지 공급망을 포괄하여 온실가스 집약도를 선박 운송에 적용하여 정량할 수 있다.

또한, 원료 추출/재배/회수, 원료의 연료 제품으로 변환, 운송, 분배/병커링, 선박 내 연료 사용에 이르는 전체 연료 전과정(특정 경계 내)을 포괄하고 있다. 선박연료의 지속가

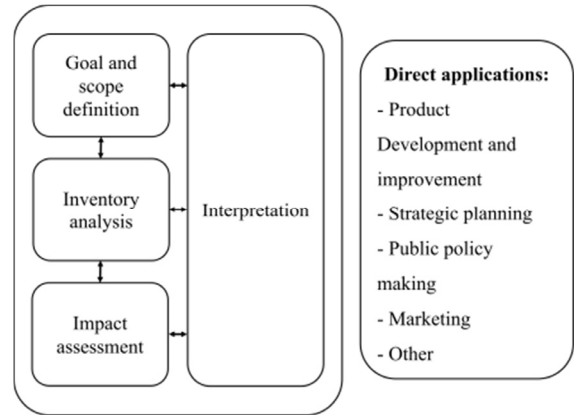


Fig. 1. Phases of an ISO 14040(source: ISO)

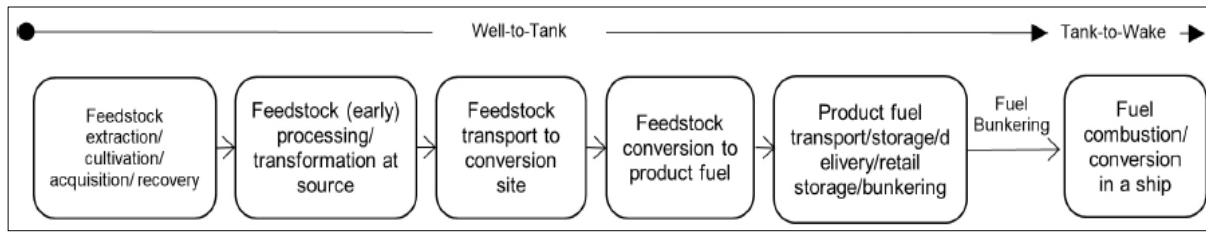


Fig. 2. Phases of an LCA (source: IMO)

능성 주제/측면을 명시하고 연료 유형, 공급 원료(원료 유형 및 원료 특성/탄소원), 변환/생산 공정(공정 유형 및 공정에 사용된 에너지), 온실가스 배출계수 등을 정의한다.^[5]

Table 2와 같이 IMO에서는 선박에서 쓰이는 연료나 에너지에서 발생하는 온실가스를 CO₂, CH₄, N₂O로 제한하고 있다. 온실가스 배출량은 이산화탄소 등가 배출량(CO₂eq)으로 계산하고 있으며, IPCC 5차에서 제시한 GWP 100을 기준으로 환산(식 (1), 식 (2))하여 온실가스 집약도를 정량화한다(Table 2 참조).

또한, Table 3에서 보는 바와 같이, 지침에서의 온실가스를 배출량을 3가지로 구분하고 있다. Well to Tank(WtT) 배출량은 병커링을 포함하여 원료를 재배, 추출하여 연료를 생산하고, 선박까지 운송하는 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 의미한다.

식 (3)과 같이 WtT의 배출량에서 $e_{f_{\text{fcu}}}$ 는 원료 추출, e_i 는 직접토지 이용변화, e_p 는 연료 변환, e_{td} 는 연료/원료 운송, e_{sca} 는 농업관리 개선, e_{ccs} 는 탄소포집을 의미한다. 그러나

e_i 와 e_{sca} 는 추가적인 개발이 진행되기까지 0으로 설정하고 있으며, 바이오 연료에만 적용하고 있다.

반면에, Tank to Wake(TtW) 배출량은 선박에서의 연료 사용을 포함하여 잠재적 누설로 인해 발생하는 온실가스 배출량으로 정의하고 있다.

식 (4)처럼 $C_{\text{slip_ship}}$ 는 에너지 변환기에서 연소되지 않고 빠져나가는 연료(선박에 공급된 총 연료량)의 계수, C_{slip} 는 에너지 변환기에서 연소되지 않고 빠져나가는 연료(에너지 변환기에서 소모된 총 연료량)의 계수, C_{fug} 는 탱크에서 에너지 변환까지 빠져나가는 연료의 산정된 계수(개발 전까지 0으로 설정), C_{sfx} 는 연료 성분에서 온실가스가 차지하는 비중을 나타내는 계수, C_{fCO_2} 는 CO₂ 배출 변환 계수, C_{fCH_4} 는 CH₄ 배출 변환 계수, $C_{\text{fN}_2\text{O}}$ 는 N₂O 배출 변환 계수, GWP_{CH_4} 는 28, $\text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}$ 는 265, $\text{GWP}_{\text{fuelx}}$ 는 연료 성분에 포함된 온실가스의 GWP100, S_{Fc} 는 바이오매스, e_c 는 바이오매스 성장 배출 크레딧, e_{ccu} 는 포집 계수(개발 전까지 0으로 설정), S_{Fccu} 는 포집 설정 탄소원 계수(개발 전까지 0으로 설정), e_{oocs} 는 선상 포집 및 저장 크레딧(개발 전까지 0으로 설정), c_{sc} 는 포집 및 저장 크레딧, e_{cc} 는 선상 포집, e_t 는 장기 보관 장소로의 운송, e_{st} 는 포집 저장, e_x 는 포집의 추가 배출량, LCV는 저위발열량을 의미한다.

Well to Wake(WtW)는 WtT와 TtW 배출량의 합을 나타낸다. 선상 에너지 변환기(주기판, 보조기관 등)에서 사용

Table 2. CO₂-equivalent using GWP 100

CONTENTS	VALUE
CO ₂	1
CH ₄	28
N ₂ O	265

Table 3. Node for methodology (source: IMO)

Node	Description
Well to Tank	GHG emissions resulting from growing or extracting raw materials, producing and transporting the fuel up to the point of use, including bunkering
Tank to Wake	represent GHG emissions resulting from fuel utilization onboard (e.g. combustion), including potential leaks (fugitive emissions and slip), when relevant for the GHG assessment
Well to Wake	the sum of the WtT and TtW emissions and quantify the full life cycle GHG emissions for a given fuel and fuel pathway, used in a given energy converter on board

Table 4. The greenhouse gas protocol (source: GHG Protocol Scope 2 Guidance)

Node	Description
1	Multiply activity data from each operation by the emission factor for that activity for each applicable GHG. Some electricity emission factor sets may include emission rates for CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O
2	Multiply GWP values by the GHG emissions totals to calculate total emissions in CO ₂ equivalent (CO ₂ e).
3	Report final scope 2 by each method in metric tons of each GHG (where available) and in metric tons of CO ₂ e.

Table 5. GHG emission factors for electricity (source: GIR)

CONTENTS	VALUE
CO ₂ eq Emission Factor	0.4330 [tCO ₂ eq/MWh]
CO ₂ Emission Factor	0.4307 [tCO ₂ /MWh]
CH ₄ Emission Factor	0.0057 [kgCH ₄ /MWh]
N ₂ O Emission Factor	0.0082 [kgN ₂ O/MWh]

된 연료 및 연료 경로에 대한 전체 전과정 온실가스 배출량을 정량화한 값을 의미하며 식 (5), 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$C = (EF_{grid} \times Q) \div 1,000,000$$

$$E_{CO_2} = C \times 1,000 \quad (7)$$

2.1.2 The Greenhouse Gas Protocol^[10]

IMO Guideline에서의 육상 전력의 사용은 국가 전력의 온실가스 집약도와 동일하게 계산하라고 명시되어 있다. 또한, The Greenhouse Gas Protocol와 GHG Protocol Scope 2 Guidance에서의 Scope2(간접배출)는 “기업이 소비하는 구매 전력, 증기, 열, 냉각의 생산으로부터 발생하는 온실가스 배출을 산정한다.”라고 정의하고 있다.^[11] 그러므로, 전력 배출에 대한 산정은 지역과 시장을 병행 적용하여 Table 4와 같이 3단계로 구분할 수 있으며 식 (7)과 같이 표현한다.

따라서, 대한민국의 온실가스종합정보센터(GIR)에서는 IPCC 2006 가이드라인과 KEPCO의 연료별 실제 배출량 가중 평균하여 국내 전력망 특성에 반영한 전력 배출계수를 산정하였다. Table 5와 같이 전기(소비)의 경우, 0.4330 tCO₂-eq/MWh의 계수를 적용하고 있다. C는 탄소배출량 [tC/kWh], EF_{grid}는 전력망 배출계(0.4330)[tC/MWh], Q는 전력 소비량[kWh], E_{CO2}: 이산화탄소 배출량[tCO₂/kWh]을 의미한다.

2.2 선행 연구

천정민(2022)는 선박의 주요 대체 친환경 연료(LNG, 수소, 암모니아 등)의 온실가스 배출량을 평가 및 심층 분석하였다.^[12] 기존의 TtW 방식에서 벗어나, WtW 기반의 전주기 평가 계수 도출에 초점을 두었으며, 이를 위해 GREET 프로그램을 활용해 연료의 생산·수입·국내 운송 과정을 모두 정량화하였다. 실제 초대형 원유선, 제품유 운반선, 액화천연가스 운반선 등의 연간 연료 소비 및 화물량 데이터를 적용하였다. 기존 화석연료 기반 운항 시와 대체 연료 전환 시의 EEOI 및 온실가스 절감 효과를 비교 및 분석하였다. 또한 국내 액화천연가스는 수입·기화 과정에서 산지보다 LCA 계수가 높아지며, 선박 연료별 등 IMO 규제(CII, EEXI 등) 대응에도 영향을 준다고 평가하였다. 이러한 WtW 기반 분석은 향후 한국 선박 온실가스 규제 설계와 대체연료 인프라 투자 우선순위 설정에 중요한 정량적 근거를 제공하며, 국내 정책 수립의 핵심 사례로 활용될 수 있다.

선박 분야와 다른 분야에서의 선행 연구를 확인해보면, 김보람(2019)은 한국 태양광 사용 후의 PV 모듈의 전주기 평가 관점에서 재활용 단위비용을 분석하였다.^[13] 현장 조사와 문헌 고찰을 통한 LCA 경계 설정 내에서 철거 비용은 설치 유형별 가중치를 적용하였으며, 운송비용은 9개 지역 평균 거리 및 직·간접 수거 방식을 계산하였다. 또한, 처리비용은 시설 수명(10~30년)과 할인율(3.5~6%)에 대한 민감도 분석으로 불확실성을 평가하였다. 그 결과 가정용 규모의 단위 재활용 비용은 2,528~3,555원/kg, 상업용은 1,032~1,308원/kg으로 산출되었다. 철거 비용의 경우에는 전체 비용의 53~87%를 차지하고 가정용 부하가 상업용의 약 2배에 이르는 것으로 나타났다.

또한, 이호원(2025)은 목질계 바이오매스 기반 셀룰로오스 필터 제조를 전주기 평가를 진행하였다.^[14] ISO 14040·14044의 기준을 적용하였으며, 1 ton 일회용 마스크 기준

으로 제조·운송·폐기 단계를 평가하였다. LCA의 데이터는 Ecoinvent 3.8과 USLCI를 적용하였고, PP 필터 마스크와 비교 분석하였다. 평가 결과 PP 기반 마스크의 총 온실가스 배출량은 7.18 tonCO₂-eq(제조 5.35, 운송 0.18, 폐기 1.65)로 나타났다. 반면 셀룰로오스 70%, PP 30% 필터 마스크는 6.06 CO₂-eq로 15.6% 저감하였다. 특히, 제조단 17.8%(4.40 ton), 폐기단 14.5%(1.41 ton)에서 큰 효과를 보였다. 이 연구는 전주기 평가에서 소프트웨어(SimaPro), 방법론(IMPACT 2002+), 데이터 베이스(Ecoinvent, USLCI)를 단계별 GWP 비교를 제시하였으며, 바이오매스 소재의 GHG 저감 잠재력을 정량화한 방법론적 모범을 보여준다.

3. 연구 시나리오

3.1 연구 시나리오

실습선 S호의 3개년도(2023~2025년도) 데이터를 기반으로 하여 정박 중의 실습선의 발전기 사용 시나리오와 육상전원공급장치 사용할 때를 구분하였다. 실습선에서 사용 중인 Bunker-A, Diesel Oil를 연료로 적용하였으며, 육상전원은 CT/PT 보정 값과 전력적산계를 이용하여 사용량을 추적하였다.

3.1.1 연료유

IMO에서 제시하고 있는 전주기 평가의 계수 사용하여 WtW의 온실 계수를 적용하였다. Bunker-A의 경우 HFO와 Diesel Oil이 혼합된 연료로 MEPC.1/Circ.905(Interim guidance on the use of biofuels under regulations 26, 27 and 28 of MARPOL Annex VI(DCS and CII))에서 제시한 방식으로 계산하였다.

Table 6에서 보는 바와 같이, Bunker A의 경우에는 Bunker-C 30%, Diesel Oil 30%를 혼합한 연료임을 확인

Table 6. Component for Bunker-A (source: GS Caltex)^[15,16]

물질명	CAS No.	함유량(%)
Residue Oil	68334-30-5	30
Diesel	64741-45-3	70

Table 7. Default emission factors for HFO and diesel oil

Fuel type	LCV (MJ/g)	Wt GHG intensity (gCO _{2eq} /MJ)	TiW GHG intensity (gCO _{2eq} /MJ)	WtW GHG intensity (gCO _{2eq} /MJ)
HFO	0.0402	16.8	78.6	95.4
Diesel Oil	0.0427	17.7	76.1	93.8
Bunker-A*	0.0420	17.4	77.1	94.5

*Bunker A = HFO 30%, Diesel Oil 70% Blended

할 수 있다.^[14] 따라서 Bunker-A의 연료 특성값은 식 (8), 식 (9)를 이용하여 가중평균을 적용하면 Table 7과 같이 나타낼 수 있다. Diesel Oil의 경우에도 마찬가지로 IMO의 계수를 사용하였다(Table 8).

$$C_{f,blend} = \frac{(LCV_A \times Cons_A \times C_{f,A})}{Energy_A + Energy_B} + \frac{(LCV_B \times Cons_B \times C_{f,B})}{Energy_A + Energy_B} \quad (8)$$

$$C_{f,blend} = \frac{Energy_A \times C_{f,A} + Energy_B \times C_{f,B}}{Energy_A + Energy_B} \quad (9)$$

3.1.2 연료 소모량

본 연구에서는 유량계 누적 계측값을 이용하여 3개년 정박 기간 동안의 총 연료 사용량과 일일 평균 사용량을 산정하였다.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (10)$$

Table 8. Initial default emission factors per fuel pathway code (source: IMO)^[5]

Fuel type	Wt GHG intensity (gCO _{2eq} /MJ)	LCV (MJ/g)	Energy Converter	CfCO ₂ (gCO ₂ /g fuel)	CfCH ₄ (gCH ₄ /g fuel)	CfN 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	

정박 중 발전기 연료 소모량은 유량계를 통해 계측하였다. 발전기는 정격출력 600 kW, 정격전압 450 V, 3상 60 Hz 조건의 발전기로, 제원은 Table 9 및 Fig. 3과 같다.

Table 10에서 확인할 수 있듯이, 유량계는 정격 유량 2,000 L/h, 사용 온도 180°C, 점도 1~20 mPa·s의 범위에서 정확한 계측을 보장한다. 또한, 발전기 연료유 라인에 위치하여 정박 중 사용 연료량을 연속 계측하도록 설치되어 있다 (Fig. 4 참조). 또한, 유량계의 체적 단위를 질량 단위로 변환하기 위해 식 (10)과 Table 11의 BDN에서의 밀도값을 참조하였다.

3.1.3 전기 소모량

육상전원 사용량은 전력 적산계를 통해 계측하였다. 적산전력계는 정격전압 110 V, 5 A, 60 Hz 조건에서 동작하

Table 9. Specification for generator

CONTENTS	VALUE
Rated Output / Revolution	600 kW / 720 min ⁻¹
Rated Voltage / Current	450 V / 692.3 A
No. of Phase / Frequency	Ø3 / 60 Hz
Power Factor	0.8
Insulation	Class F
Enclosure / Cooling	Drip-Proof / Self-Ventilation
Type of Bearing / Lubrication	Single / Self-Lubrication
Coupling of Eng. And Gen.	Rigid
Manufacture	HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO., LTD.



(a)



(b)

Fig. 3. Overview for diesel generator

며, CT 비율 800/5, PT 비율 460/115를 적용하는 구조로, 제원은 Table 12에 정리하였다.

계측 시스템 구성 및 설치 위치는 Fig. 5에 나타난 바와 같이, 육상전원 입력부에 전류·전압 변성기를 거쳐 적산전력계로 신호를 인입하는 방식이다. 본 연구에서는 적산전력계의 누적 kWh 값을 CT/PT 비율로 환산하여 3개월 정박 기간 동안의 총 전력 사용량과 일일 평균 전력 사용량을 도출하였다.

Table 10. Specification for flow-meter

CONTENTS	VALUE
Q _{min}	30[l/h]
Q _{max}	3,000[l/h]
Q _n	2,000[l/h]
t _{max}	180[°C]
D _N	25[mm]
P _N	25[bar]
V _C	100[cm ³]
n	1~20[mPa·s]



(a)



(b)

Fig. 4. Flow-meter for Diesel Generator

Table 12. Specification for watt-meter

CONTENTS	VALUE
Voltage	110[V]
Ampere	5[A]
Frequency	60[Hz]
Meter Constant	2,400[rev/kWh]
CT ratio	800/5[A]
PT ratio	460/115[V]

Table 11. Bunker delivery note for bunker A, diesel oil

	Density (kg/L)	Sulphur (mass%)	Water Content (vol%)	Pour Point (°C)	Ash (mass%)	Flash Point (°C)
Bunker-A	0.8551	0.04	0.05	-8.0	0.001	71.0
Diesel Oil	0.8418	0.046	0.0	-22.0	0.001	64.0

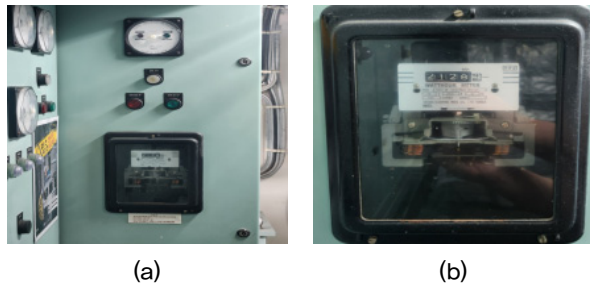


Fig. 5. Overview for watt-meter of shore connect

4. 결과 및 고찰

본 장에서는 IMO LCA 지침 및 GIR 전력 배출계수를 적용하여 실습선 S호의 최근 3개년도의 정박 기간 중 발생한 전력 사용 특성과 온실가스 배출량을 정량적으로 분석하였다.

4.1 사용량 분석

해당 기간 발전기 가동일수는 총 59.3일이며, 유량계를 통해 계측된 총 연료 소모량은 81,640 L이며, 일일 평균 소모량은 1,376.7 L/day로 산정되었다. 동일 기간 육상전원은 총 866일 동안 사용되었으며, 전력적산계 원시값에 CT/PT 보정계수를 적용한 실제 소비량은 2,485,504 kWh에 달한다. 일일 평균 전력 소비량은 2,870.1 kWh/day로 환산되었다.

이는 에너지 등가 관점에서 발전기 가동 시보다 약 5.7 배 높은 수치이다. 이러한 결과는 실습선 운영 시 정박 기간 대부분 전력 공급원을 육상전원으로 우선 가동하고 있음을 정량적으로 보여준다.

4.2 온실가스 배출 비교

식 (10)을 통해 질량 단위로 변환하여 발전기 연료별 일일 WtW 배출량은 Bunker-A가 4,673.4CO₂eq/day, Diesel Oil이 4,642.7 kgCO₂eq/day로 산정되었다. 두 연료 모두 전체 배출량의 80% 이상이 연소 과정에서 발생하며, 일일 배출량 기준으로는 Bunker-A가 Diesel Oil보다 약 0.7% 높은 배출 특성을 보였다. 이는 동일 부피 사용 시 Bunker-A의 상대적으로 높은 밀도로 인해 실제 소비된 연료의 질량이 더 많았기 때문으로 분석된다.

반면, 연료 단위 질량당 전주기 온실가스 배출량을 분석한 결과로는 Diesel Oil(4.005 kgCO₂eq/kg)이 Bunker-A(3.969 kgCO₂eq/kg)보다 약 0.9% 높게 나타났다. 이는 Diesel Oil의 저위발열량(LCV)이 더 높아 단위 중량당 포함된 에너지가 많고, 이에 따른 전주기 탄소 집약도가 반영된 결과에 반영되었다. 이러한 결과는 화석연료 기반의 정박 중 에너지 공급 체계에서 선내 연소 과정의 직접적인 배출 제어가 온실가스 감축의 가장 효과적이고 중요한 과제임을 시사한다.

국가 인벤토리 계수를 적용한 육상전원의 일일 WtW 배출량은 1,243 kgCO₂eq/day로 산출되었다. 이는 Bunker-A 발전기 가동 대비 약 73.4%의 저감 효과를 달성한 것으로, 육상전원 공급이 항만 지역 탈탄소화를 가속화하는 실효적인 수단임을 보여주고 있다. 특히, 향후 국가 에너지 믹스의 탈탄소화가 가속화될수록 선박의 직접적인 설비 개조 없이도 정박 중 온실가스 배출량을 추가로 감축할 수 있는 유연한 대응 수단이 될 것으로 기대된다.

Table 13. Usage for flow-meter & watt-meter

	2023년도	2024년도	2025년도	Note
Flow-meter	14,260 L	27,500 L	39,880 L	Using Generator Day: 59.3Day Using Shore-Power Day: 866Day
Watt-meter	1345.2 kWh	1355.9 kWh	1182.5 kWh	

Table 14. Comparison of GHG emissions of berth using bunker-A, diesel oil & shore power

	Total Consumption	Daily Consumption	Total WtW Emission	Daily WtW Emissions
Bunker-A	69,810.3 kg	1,177.2 kg/day	277.1 tonCO ₂ eq	4,673.4 kgCO ₂ eq
Diesel Oil	68,724.5 kg	1,158.9 kg/day	275.4 tonCO ₂ eq	4,642.7 kgCO ₂ eq
Shore Power	2,486,000 kWh	2,870 kWh/day	1,076 tonCO ₂ eq	1,243 kgCO ₂ eq

5. 결론

본 연구는 IMO의 2024 LCA 지침을 적용하여 실습선 S호의 3개년 실측 데이터를 바탕으로 정박 중 에너지원별 WtW 온실가스 배출량을 정량적으로 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결과와 시사점은 다음과 같다.

- (1) IMO 2024 LCA 지침과 GIR 전력 배출계수를 적용하여 실습선 S호의 정박 중 발전기(Bunker-A, Diesel Oil)와 육상전원의 WtW 온실가스 배출을 3개년 실측 데이터(81,640L, 2,486,000 kWh)로 비교 분석하였다.
- (2) 정박 중 발전기 연료로 사용되는 Bunker-A와 Diesel Oil의 일일 WtW 온실가스 배출량은 각각 4,673.4 kgCO₂eq와 4,642.7 kgCO₂eq로 나타났다. 두 연료 모두 전체 배출량의 80% 이상이 TtW에서 발생하는 구조적 특성을 보였으며, 이는 정박 중 선박 자체 발전기 가동이 온실가스 배출의 지배적인 원인임을 시사한다. 반면, 육상전원 사용 시의 배출량은 1,243 kgCO₂eq/day로 산출되어, Bunker-A 대비 약 73.4%의 괄목할 만한 저감 효과를 확인하였다.
- (3) 본 연구는 IMO의 차세대 환경 규제 대응에 있어 LCA 방법론의 실무적 적용성과 유효성을 입증하였다. 분석된 WtW 기반 온실가스 배출 데이터는 향후 시행될 GFI 규제 이행 로드맵 수립을 위한 정량적 벤치마크로 활용될 수 있다. 이는 연료 및 에너지원별 생산 경로에 따른 탄소 집약도 차이를 규명함으로써, 저탄소 에너지원의 환경적 기여도를 객관적으로 정량화했다는 데 그 의의가 있다.
- (4) 정책적으로 AMP와 국가 신·재생에너지 그리드의 통합적 연계가 필요하다. 분석 결과에서 확인된 육상전원의 높은 저감 효율은 대한민국의 전력 배출계수에 종속된다. 따라서 향후 항만 탄소중립을 가속화하기 위해서는 AMP 전력 공급원에 태양광, 풍력 등 신·재생 에너지를 직접 연계하거나, 녹색 프리미엄 제도를 적극 활용하여 육상전원의 전주기 탄소 집약도를 낮추는 에너지 믹스 고도화 전략이 병행되어야 한다.
- (5) 마지막으로, 선박의 탈탄소화는 개별 선박의 기술적 개선을 넘어 에너지 생산부터 소비에 이르는 전주기적 관리와 국가 에너지 정책의 조화 속에 달성될 수 있다. 본

연구는 특정 선박의 사례 연구라는 한계가 있으나 실측 데이터를 통해 IMO LCA 지침의 실무적 적용성을 검증했다는 점에서 의미를 갖는다. 향후 연구에서는 운항 단계의 전체 과정과 메탄올, 암모니아 등 차세대 신재생 연료의 전주기 평가를 포함하여 보다 포괄적인 해양 온실가스 저감 모델을 제시할 필요가 있다.

References

- [1] IMO, 2020, “Fourth IMO greenhouse gas study”, <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf>.
- [2] IMO, 2018, “Initial IMO Strategy on reduction of GHG emission from ships”, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304\(72\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304(72).pdf).
- [3] IMO, 2023, “2023 IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships”, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.377\(80\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.377(80).pdf).
- [4] IMO, 2023, “Guidelines on life cycle GHG intensity of marine fuels (LCA Guidelines)”, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.376\(80\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.376(80).pdf).
- [5] 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>.
- [6] GESAMP, 2025, “Working Group on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels (GESAMP-LCA WG)”, Accessed 2 April 2026, <https://www.gesamp.org/work/groups/gesamp-working-group-on-life-cycle-ghg-intensity-of-marine-fuels>.
- [7] IMO, 2025, “Report of The Marine Environment Protection Committee on it's Eighty-Third Session”, <https://www.imokorea.org/upfiles/board/107.%20MEPC%2083%C2%F7%20%B0%E1%B0%FA%BA%B8%B0%ED%BC%AD%28%BF%B5%B9%AE%29.pdf>.

- [8] International Organization for Standardization, 2006, “ISO 14040:2006 (Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework”, <https://www.iso.org/standard/37456.html>.
- [9] International Organization for Standardization, 2006, “ISO 14044:2006 (Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines”, <https://www.iso.org/standard/38498.html>.
- [10] WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2015, “GHG Protocol Scope 2 Guidance”.
- [11] WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2021, “A Corporate Accounting and Reporting Standard REVISED EDITION”.
- [12] Chun, J.M., 2022, “A study on the evaluation of Greenhouse gas from ship’s alternative fuel considering the life cycle assessment”, Ph.D thesis, Pukyong National University, Busan.
- [13] Kim, B.R., Kang, J.Y., Park, S.N., Jang, J.M., and Hong, J.H., 2019, “Study of Unit Cost Estimation for the Appropriate Treatment of End-of-life Photovoltaic (PV) Modules”, *New. Renew. Energy*, **15**(1), 36-46.
- [14] Lee, H.W., Choi, K.H., Jang, Y.C., Cho, H.I., Baek, C.R., Shella, A.H., Lee, S.W., Lee, J.H., Park, I.K., and Jeong, G.S., 2025, “Study on Filter Manufacturing Using Lignocellulosic Biomass and Greenhouse Gas Reduction Assessment”, *New. Renew. Energy*, **21**(1), 46-55.
- [15] GS Caltex, 2021, “MSDS(0.3% Sulfur B-A)”.
- [16] GS Caltex, 2021, “MSDS(Marine Gas Oil)”.