



# 전주기 배출 및 선박 운송 효율 개선을 고려한 해양 수송 기반 온실가스 집약도 (MGI)의 개발

김정민·전윤주·신흥경·임영섭<sup>†</sup>  
서울대학교 조선해양공학과

## Development of Marine Transportation Greenhouse Gas Intensity (MGI) Considering Well-to-Wake Emissions and Maritime Transport Efficiency

Jungmin Kim·Yunju Jeon·Hongkyoung Shin·Youngsub Lim<sup>†</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University

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.

Although international regulations aim to reduce greenhouse gas (GHG) emissions in the maritime sector, existing metrics such as the EEDI, Carbon Intensity Indicator (CII), FuelEU Maritime (FEM), and GFI are limited in capturing both lifecycle emissions and operational performance. This study proposes a new index, Marine Transportation Greenhouse Gas Intensity (MGI), which evaluates well-to-wake GHG emissions per unit of transport work while accounting for ship efficiency and operating conditions. Case studies were conducted to examine fuel transition effects between marine diesel oil and gray/green methanol, as well as technical efficiency improvements across different vessel generations. The results show that EEDI and CII do not account for upstream (well-to-tank) emissions and consider only CO<sub>2</sub> emissions in the tank-to-wake phase, whereas MGI incorporates full lifecycle emissions and includes non-CO<sub>2</sub> gases such as CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O, leading to different fuel evaluation outcomes. In addition, under reduced operating conditions (50% MCR), EEDI, based on a fixed design condition (75% MCR), fails to reflect emission reductions associated with lower engine load and speed, while MGI captures these changes. Furthermore, unlike GFI and FEM, which remain nearly constant for the same fuel, MGI reflects technological improvements across vessels. These findings demonstrate that MGI provides a more realistic and comprehensive framework for evaluating maritime decarbonization strategies.

**Keywords** : Marine Transportation Greenhouse Gas Intensity(해상운송 온실가스 집약도), MGI(해상운송 온실가스 집약도), Well-to-Wake emissions(전과정 온실가스 배출), Maritime Decarbonization(해운 탈탄소화), Greenhouse gas(온실가스), Maritime GHG emissions(해운 온실가스 배출)

## 1. 서론

기후 위기에 대응하기 위해 국제적으로 온실가스 감축 노력이 강화되는 가운데, 해운 부문은 IMO(International Maritime Organization)를 중심으로 구체적인 감축 목표와 규제 정책을 수립 해오고 있다. 지구 온난화는 인류가 직면한 가장 심각한 환경 문제 중 하나로, IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 그 심각성과 위험성을 지속적으로 경고해왔다(Pachauri and Reisinger, 2007). 주요 원인으로 산업화 이후 급격히 증가한 온실 가스(GHG, GreenHouse Gas) 배출이 지목되며, 2015년 파리협정

(COP21)을 비롯한 국제적 노력을 통해 전 세계적으로 온실가스 감축이 강화되고 있다(Joung et al., 2020). 운송 부문은 전 세계 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출의 약 20%를 차지하고 있으며(Kumar et al., 2022), 이 중 해상 운송은 국제 무역의 대부분을 담당하는 동시에 온실가스 배출에도 상당히 기여하고 있다. 2018년 기준 해운 부문에서 배출된 이산화탄소는 약10.6억 톤(Gt)으로, 이는 인위적 CO<sub>2</sub> 배출량의 약 2.89%에 해당하며(IMO, 2020), 지속적인 무역 확대에 따라 온실가스 배출량도 증가하는 추세에 있다(Hulme, 2021). 이러한 상황에서 IMO와 각국은 해운 부문의 온실가스 배출을 관리하기 위해, 총 온실가스 배출량(gCO<sub>2</sub>eq)을 수송 작업량(t-nm) 또는 에너지 사용량(MJ)과 같은 기능 단위로 나누어 단위당 배출량으로

표현한 온실가스 집약도를 기준으로 배출을 규제하는 정책을 도입하고 있다.

온실가스 감축을 위해 IMO는 EEDI(Energy Efficiency Design Index), EEXI(Energy Efficiency Existing Ship Index), CII(Carbon Intensity Indicator)를 도입하여 이산화탄소 배출을 규제하고 있으나, 이들은 연료 생산단계의 온실가스 배출을 고려하지 못하고, CO<sub>2</sub> 이외의 온실가스 배출 및 연료 슬립, 그리고 다양한 탄소 저감 기술 등을 반영하지 못하는 구조적 한계가 존재한다. EEDI와 EEXI는 선박의 설계 단계에서 신조선 및 기존선의 단위 운송 작업량당 CO<sub>2</sub> 배출량을 규제하며, CII는 운항 단계의 실제 데이터를 기반으로 단위 운송 작업량당 CO<sub>2</sub> 배출량을 규제한다(IMO, 2011; IMO, 2022e; IMO, 2022d; IMO, 2021; IMO, 2022a; IMO, 2022f; IMO, 2022b). 그러나 EEDI, EEXI는 설계 단계에서 기준 출력과 선속을 기반으로 산정되기 때문에, 운항 상태의 온실가스 집약도를 평가하는 데 한계를 가진다. 또한 EEDI, EEXI, CII는 선박의 연료의 연소 단계(TtW, Tank-to-Wake)에서 발생하는 CO<sub>2</sub>만을 고려할 뿐, 연료의 생산 및 공급 단계(WtT, Well-to-Tank)에서 발생하는 온실가스 배출은 반영하지 못하는 근본적 한계를 가진다(Comer and Sathiamoorthy, 2022). 이로 인해 화석연료 기반의 화석 암모니아, 화석 수소, 화석 메탄올 등과 같이 WtT 배출이 높은 연료는 실제보다 온실가스 배출이 적게 평가되어, 왜곡된 결과를 도출할 수 있다(Zhou et al., 2021; Zamboni et al., 2024). 또한 이들은 CO<sub>2</sub> 배출만을 고려하며, 메탄(CH<sub>4</sub>)과 아산화질소(N<sub>2</sub>O) 등 지구 온난화 지수(GWP, Global Warming Potential)가 높아, 소량 배출만으로도 지구 온난화에 유의미한 영향을 미치는 온실가스를 반영하지 못한다(Lim, 2025). 아울러, 실제 엔진에서는 연료가 미연소 상태로 누출되는 슬립(slip)이 존재할 수 있지만, 이를 평가에 고려하지 못해 실제 배출량을 과소평가할 위험이 존재한다(Park and Choi, 2021). 특히 이중연료(Dual-Fuel) 엔진의 경우 엔진 기술에 따라 편차가 존재하며, 저압 4행정 엔진에서는 약 3.5% 수준까지 메탄슬립이 발생할 수 있다고 보고되었다(Pavlenko et al., 2020; IMO, 2020).

이런 한계를 극복하고자 EU는 FuelEU Maritime을 통해 연료의 전주기(WtW, Well-to-Wake) 기반 온실가스 규제를 도입하였고, IMO 역시 WtW 기반 GFI(GHG Fuel Intensity) 도입을 논의하고 있으나, 이들은 연료의 발열량만을 기준으로 산정되어 실제 연료 활용 효율을 반영하지 못하는 한계가 존재한다. EU는 2030년까지 온실가스 배출을 1990년 대비 55% 감축하기 위해 “Fit for 55” 패키지를 도입하였으며, 이 중 해운 부문에서 핵심적인 규제인 FuelEU Maritime을 도입하고 선박 연료의 단위 에너지당 WtW 기준 온실가스 배출 집약도(GHG intensity)를 정의하여 선박 연료의 온실가스 배출을 규제하고 있다(European Council, 2020; European Union, 2023). IMO는 2023년 개정된 GHG 전략에서 WtW 기반 평가 체계를 채택하고 2024년에는 LCA(Life Cycle Assessment) 가이드라인을 제정하여 구체적인 평가 방법을 마련한데 이어, 2025년 MEPC 83차 회의에서 선박에서 사용된 모든 연료의 단위 에너지(MJ)당 WtW 기준 온실가스 배출량

(gCO<sub>2</sub>eq)을 평가하는 GFI 지표를 제안하였다(IMO, 2024; IMO, 2025). 그러나 GFI와 FEM(FuelEU Maritime의 GHG Intensity)은 연료의 이론적 발열량과 배출 계수를 기반으로 산정되기 때문에, 엔진 효율, 추진계통 손실, 선형 설계, 프로펠러 성능, 운항 조건 등 선박의 운항 성능 변화를 반영하지 못하는 한계를 지니고 있다(IMO, 2025; European Union, 2023; Ghaemi and Zeraatgar, 2021). 그 결과 동일한 연료를 사용하더라도 고효율 설계를 적용한 신조선과 비효율적인 노후 선박이 동일한 배출 지표를 받게 되는 문제점을 가진다. 이러한 구조적 한계는 선사들이 폐열 회수 시스템, 공기 유향 시스템 같은 에너지 절감 장치나 고효율 추진 시스템에 투자할 유인을 약화시킬 수 있다(Sardar et al., 2025; Park et al., 2023).

본 연구는 기존 지표들의 한계를 보완하고 선박의 기술적 특성과 운항 효율성을 반영하기 위해 새로운 전주기 온실가스 배출 평가 지표인 MGI(Marine transportation Greenhouse gas Intensity)를 제안한다. 나아가 실제 선박 데이터를 기반으로 MGI와 기존 지표와의 정량적 비교 분석을 통해 그 실효성을 검증하였다.

## 2. 배경

### 2.1 EEDI (Energy Efficiency Design Index)

EEDI는 선박이 단위 화물량(t)을 단위 거리(nm, nautical mile) 운송할 때 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량, 즉 수송 작업 대비 온실가스 집약도(gCO<sub>2</sub>/(t·nm))를 평가하는 지표로, 선박의 설계 단계에서부터 CO<sub>2</sub> 배출을 저감하고 운영 효율성을 향상시키기 위해 도입되었다. EEDI 획득값(Attained EEDI)은 선박의 설계 조건을 기반으로, 주요 추진 및 전력 생산 장비에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량을 선박의 적재용량(Capacity)과 기준 선속(V<sub>ref</sub>)으로 나누어 계산되며, 식 (1)과 같이 계산된다(MEPC, 2022c).

$$\text{Attained EEDI} = \frac{\left( \prod_{j=1}^n f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME} \cdot C_{FME} \cdot \text{SFC}_{ME} \right) + \left( P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot \text{SFC}_{AE} \right)}{\left( \prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)} \right) C_{FAE} \cdot \text{SFC}_{AE}} - \left( \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff} \cdot P_{eff} \cdot C_{FME} \cdot \text{SFC}_{ME} \right) / (f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot \text{Capacity} \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m) \quad (1)$$

식 (1)에서 분자는 설계 출력 조건에서의 연료 소비율(SFC)과 탄소계수(CF)를 기반으로 산정된 CO<sub>2</sub> 배출량을 나타내며, 분모는 선박의 적재용량과 기준 속도를 곱한 운송 작업량을 의미한다. 이에 따라 EEDI는 설계 단계에서의 단위 운송 작업량당 CO<sub>2</sub> 배출 수준을 정량화하는 구조를 가진다.

### 2.2 CII (Carbon Intensity Indicator)

CII는 선박의 설계 단계를 넘어 실제 운항 조건에서의 온실가

스 배출 집약도를 평가하기 위해 도입되었으며, 운항 단계에서 단위 운송 작업량당 이산화탄소 배출량( $gCO_2/(t \cdot nm)$ )을 평가하는 지표이다. CII는 연간 운항 과정에서 발생한 총  $CO_2$  배출량을 총 운송 작업량으로 나누어 산출되며, CII 획득값(Attained CII)은 식 (2)와 같이 계산된다(IMO, 2022a).

$$\text{Attained CII}_{\text{ship}} = M_{CO_2} / W \quad (2)$$

식에서  $M_{CO_2}$ 는 연간 총  $CO_2$  배출량을 의미하며, 이는 식 (3)과 같이 선박에서 소비된 각 연료  $i$ 의 질량( $FC_i$ )과 해당 연료의 탄소 배출계수( $C_{F,i}$ )를 곱한 값의 합으로 산정된다. 분모의  $W$ 는 선박의 연간 총 운송 작업량을 의미하며, 식 (4)와 같이 선박의 적재용량(Capacity)과 총 항해거리( $D$ )의 곱으로 정의된다.

$$M_{CO_2} = \sum_i FC_i \cdot C_{F,i} \quad (3)$$

$$W = \text{Capacity} \cdot D \quad (4)$$

이에 따라 CII는 실제 운항 데이터를 기반으로 단위 운송 작업량당  $CO_2$  배출 수준을 정량화하는 구조를 가지며, 선박의 연간 운영 효율성과 함께 이산화탄소 배출을 평가한다.

### 2.3 FEM (GHG intensity of FuelEU Maritime)

FuelEU Maritime은 EU 해상 운송 부문의 탈탄소화를 촉진하기 위해 도입된 규제, 선박에서 사용되는 모든 연료의 에너지당 전주기 온실가스 집약도(GHG intensity)를 평가한다. 여기서 집약도(GHG intensity)는 단위 에너지당 발생하는 온실가스 배출량( $gCO_2eq/MJ$ )으로 정의되며, WtT와 TtW 배출 집약도를 합산하여 식 (5)와 같이 산정된다(European Union, 2023).

$$\text{GHG intensity} = f_{\text{wind}} \cdot (\text{WtT} + \text{TtW}) \quad (5)$$

WtT는 식 (6)과 같이 연료의 원료 공급망 전 과정에서 발생하는 배출을 반영하여 계산되며, TtW는 식 (7)과 같이 연료 연소 및 추진 과정에서의 직접 배출과 연료 슬립을 포함하여 계산된다.

$$\text{WtT} = \frac{\sum_i M_i \cdot CO_{2eq,WtT,i} \cdot LCV_i + \sum_k E_k \cdot CO_{2eq,elec,k}}{\sum_i^{n_{\text{fuel}}} M_i \cdot LCV_i \cdot RWD_i + \sum_k E_k} \quad (6)$$

$$\text{TtW} = \sum_i^{n_{\text{fuel engine}}} \sum_j M_{i,j} \left[ \left( 1 - \frac{C_{\text{slip},j}}{100} \right) \cdot CO_{2eq,TtW,i,j} + \frac{C_{\text{slip},j}}{100} \cdot CO_{2eq,TtW,slip,i,j} \right] / \left( \sum_i^{n_{\text{fuel}}} M_i \cdot LCV_i \cdot RWD_i + \sum_k E_k \right) \quad (7)$$

$CO_{2eq,TtW,i,j}$ 와  $CO_{2eq,TtW,slip,i,j}$ 는 연료 연소 및 누출에 따른  $CO_2 \cdot CH_4 \cdot N_2O$  배출량과 GWP를 기반으로 식 (8), 식 (9)와 같이 계산된다.

$$CO_{2eq,TtW,i,j} = \left( C_{fCO_2,j} \cdot GWP_{CO_2} + C_{fCH_4,j} \cdot GWP_{CH_4} + C_{fN_2O,j} \cdot GWP_{N_2O} \right)_i \quad (8)$$

$$CO_{2eq,TtW,slip,i,j} = \left( C_{sfCO_2,j} \cdot GWP_{CO_2} + C_{sfCH_4,j} \cdot GWP_{CH_4} + C_{sfN_2O,j} \cdot GWP_{N_2O} \right)_i \quad (9)$$

### 2.4 GFI (GHG Fuel Intensity)

GFI는 선박이 사용한 모든 연료의 WtW 배출을 반영하여, 에너지 대비 온실가스 배출 집약도( $gCO_2eq/MJ$ )를 산정한다. GFI 달성값( $GFI_{\text{attained}}$ )은 식 (10)과 같이, 선박 운항 과정에서 사용된 모든 연료의 에너지 소비량과 해당 연료의 WtW 온실가스 집약도를 기반으로 계산된다(IMO, 2025).

$$GFI_{\text{attained}} = \frac{\sum_{i=1}^I (EI_i \cdot \text{Energy}_i)}{\text{Energy}_{\text{total}}} \quad (10)$$

여기서  $\text{Energy}_i$ 는 해당 연료의 연간 소비 에너지량(MJ),  $\text{Energy}_{\text{total}}$ 은 모든 연료의 에너지량의 총합을 의미한다.  $EI_i$ 는 연료 유형  $i$ 의 WtW 기준 온실가스 배출 집약도( $gCO_2eq/MJ$ )로, 식 (11)과 같이 WtT 배출집약도( $GHG_{WtT}$ )와 TtW배출 집약도( $GHG_{TtW}$ )의 합으로 계산된다(IMO, 2024).

$$EI_i = GHG_{WtT} + GHG_{TtW} \quad (11)$$

$GHG_{WtT}$ 은 식 (12)와 같이 연료의 원료 획득부터 선박 탑재까지 전 공급망에서 발생하는 모든 온실가스 배출을 포함하여 계산된다.

$$GHG_{WtT} = e_{f_{\text{ecu}}} + e_1 + e_p + e_{\text{td}} - e_{\text{sca}} - e_{\text{ccs}} \quad (12)$$

$GHG_{TtW}$ 은 식 (13)과 같이 연료 연소로 인한 직접 배출, 에너지 장치 및 이송 과정에서의 연료 누출, 연료 생산 단계에서 인정되는 탄소 크레딧, 선상 탄소 포집 및 저장(OCCS, Onboard carbon capture and storage) 시스템 등 연소 단계의 모든 탄소 흐름을 반영하여 계산된다.

$$GHG_{TtW} = \frac{1}{LCV} \left[ \left( 1 - \frac{1}{100} (C_{\text{slip,ship}} + C_{\text{fug}}) \right) \left( C_{fCO_2} \cdot GWP_{CO_2} + C_{fCH_4} \cdot GWP_{CH_4} + C_{fN_2O} \cdot GWP_{N_2O} \right) + \left( \frac{1}{100} (C_{\text{slip,ship}} + C_{\text{fug}}) \cdot C_{\text{fix}} \cdot GWP_{\text{fuelx}} \right) - S_{Fc} e_c - S_{Fecu} e_{\text{ecu}} - e_{\text{OCCS}} \right] \quad (13)$$

### 2.5 기존 온실가스 지표의 구조적 한계

EEDI와 CII는 연소 단계(TtW)의 CO<sub>2</sub> 배출과 운송 작업량(t·nm)을 기반으로 온실가스 집약도를 평가하는 지표이지만, 연료의 전주기 온실가스 배출 특성을 충분히 반영하지 못한다는 구조적 한계를 가진다. 식 (1) 및 식 (2)~(4)에서 나타나듯이, 두 지표는 연료 소비량과 탄소계수를 기반으로 산정된 CO<sub>2</sub> 배출량을 운송 작업량으로 나누는 방식으로 정의되며, 이 과정에서 연료의 공급망 단계(WtT)에서 발생하는 배출은 산정 범위에 포함되지 않는다. 또한 대상 온실가스가 CO<sub>2</sub>로 한정되어 있어 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O와 같은 온실가스 배출을 반영하지 못하며, LNG 연료 사용시 발생할 수 있는 메탄 슬립과 연료의 비연소 배출 역시 고려되지 않는다.

또한 EEDI는 설계 단계에서 결정되는 지표로, 실제 운항 조건을 반영할 수 없다는 한계를 가진다. EEDI의 계산은 선박의 설계 데이터를 바탕으로 메인엔진 출력을 MCR(Maximum Continuous Rating)의 75%로 설정하고, 이때의 선속 및 연료 소모량을 기반으로 수행된다. 그러나 이러한 가정은 실제 선박의 운항 조건과 일치하지 않을 수 있으며, 따라서 EEDI는 실제 운항에서의 온실가스 집약도를 대표하는 데 한계를 가진다.

반면 FEM과 GFI는 전주기(WtW) 온실가스 배출을 반영하지만, 연료 자체의 이론적 발열량(LCV)과 배출 특성에 기반하여 계산되기 때문에, 실제 선박에서 에너지로 전환되어 수행되는 수송 작업의 온실가스 배출을 반영하지 못한다. FEM은 식 (3)~(4)에서 연료별 WtT와 TtW 배출을 연료의 질량과 발열량의 곱으로 나누어 단위 에너지당 배출을 계산하며, GFI 역시 식 (7)~(10)에서 연료 자체의 에너지당 온실가스 배출을 기중평균하여 계산한다. 이러한 구조는 연료 자체의 온실가스 특성을 비교하는 데는 적합하지만, 각 연료가 선박에서 활용할 수 있는 에너지로 전환되고 이를 통해 수송 작업이 발생하는 과정은 반영하지 못한다. 따라서 FEM과 GFI는 연료의 비교에는 유용하나, 실제 운항 성능을 포함한 선박의 온실가스 배출 평가에는 한계가 있다.

## 3. 연구방법론

### 3.1 Marine transportation GHG Intensity (MGI)

Table 1 Comparison of EEDI, CII and FEM/GFI Indicators

지표	EEDI	CII	FEM/GFI
Emission Basis	Per transport work	Per transport work	Per unit energy
Unit	gCO <sub>2</sub> /(t·nm)	gCO <sub>2</sub> /(t·nm)	gCO <sub>2</sub> eq/MJ
Scope	Tank-to-Wake	Tank-to-Wake	Well-to-Wake
Limitations	Ignores WtT, non-CO <sub>2</sub> GHGs, fuel slip, and actual operating conditions	Ignores WtT, non-CO <sub>2</sub> GHGs, and fuel slip	Ignores actual energy conversion and ship performance

본 연구에서 제안하는 MGI (Marine Transportation Greenhouse Gas Intensity)는 선박이 수행한 수송 작업 대비 발생하는 전주기 (WtW) 온실가스 배출 집약도를 나타내는 지표로, 선박이 단위 화물·단위 거리당 배출하는 온실가스를 gCO<sub>2</sub>eq/(t·nm) 단위로 정량화한다. MGI는 연료 생산 및 공급 단계에서 발생하는 Well-to-Tank (WtT) 배출과 선박 운항 중 발생하는 Tank-to-Wake (TtW) 배출을 모두 포함하는 Well-to-Wake (WtW) 범위의 총 온실가스 배출량을 기준으로 하며, 선박의 적재능력과 운항 속도를 함께 고려하여 운송 작업량을 기반으로 배출 집약도를 산정한다. 또한 CO<sub>2</sub>뿐만 아니라 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 등의 온실가스를 CO<sub>2</sub> 등가 배출량으로 환산하여 총 온실가스 배출량을 산정하며, 연료 연소 과정에서 발생하는 미연소 배출 또한 온실가스 배출 항목에 포함한다.

MGI는 식 (14)와 같이 정의되며, 단위 시간당 선박에서 배출되는 전주기 온실가스 배출량  $\dot{m}^{WtW}$  (gCO<sub>2</sub>eq/h)을 운항 선속  $V_{op}$  (knot)과 적재용량 Capacity (tonne)으로 나누어 산출한다.

$$MGI = \frac{\dot{m}^{WtW}}{V_{op} \cdot Capacity} \quad (14)$$

$\dot{m}^{WtW}$ 는 식 (15)와 같이 WtT 배출량  $\dot{m}^{WtT}$  (gCO<sub>2</sub>eq/h)과, TtW 배출량  $\dot{m}^{TtW}$  (gCO<sub>2</sub>eq/h)의 합으로 구성된다.

$$\dot{m}^{WtW} = \dot{m}^{WtT} + \dot{m}^{TtW} \quad (15)$$

$\dot{m}^{WtT}$ 은 연료를 사용하기 전 공급망 단계에서 발생하는 온실가스 배출량으로, 연료  $i$ 에 대해 연료 사용량  $FC_i$  (gFuel/h)과 온실가스 배출계수  $EI_i^{WtT}$  (gCO<sub>2</sub>eq/MJ), 저위 발열량  $LCV_i$  (MJ/gFuel)의 곱으로 식 (16)과 같이 계산된다.

$$\dot{m}^{WtT} = \sum_i^n (FC_i \cdot EI_i^{WtT} \cdot LCV_i) \quad (16)$$

$\dot{m}^{TtW}$ 은 식 (17)의 형태로 연료의 완전 연소 시 배출과 연료의 미연소 배출 비율  $C_{ub,i,j}$  (%)을 모두 고려하여 계산된다.

$$\dot{m}^{TtW} = \sum_i^n \sum_j^m \left( FC_{i,j} \left[ \left( 1 - \frac{C_{ub,i,j}}{100} \right) (EF_{i,j}^{TtW}) + \frac{C_{ub,i,j}}{100} (EF_{ub,i,j}^{TtW}) \right] \right) \quad (17)$$

$C_{ub,i,j}$ 는 연료의 슬립 비율  $C_{slip,i,j}$  (%)과 누출 비율  $C_{fug,i,j}$  (%)을 고려하여 식 (18)과 같이 정의된다.

$$C_{ub,i,j} = C_{slip,i,j} \left( 1 - \frac{C_{fug,i,j}}{100} \right) + C_{fug,i,j} \quad (18)$$

연료의 완전 연소 배출계수  $EF_{i,j}^{TtW}$  (gCO<sub>2</sub>eq/gFuel)와 미연소 배출계수  $EF_{i,j}^{TtW,ub}$  (gCO<sub>2</sub>eq/gFuel)는 각각 연소 과정에서 배출되는 온실가스량  $C_{f(k),i,j}$  (gGHG/gFuel)과 미연소로 인해 방출되는 온실가스량  $C_{sf(k),i,j}$  (gGHG/gFuel)을 기반으로 산정되며, 이에

따른 계산식은 각각 식 (19)과 식 (20)에 제시된다.

$$EF_{i,j}^{TtW} = \sum_k^n (C_{f(k),i,j} \cdot GWP_k) \quad (19)$$

$$EF_{ub,i,j}^{TtW} = \sum_k^n (C_{sf(k),i,j} \cdot GWP_k) \quad (20)$$

### 3.2 계산 프레임워크 및 가정

본 연구에서는 EEDI, FEM, GFI, MGI 지표 간의 특성을 일관된 조건에서 비교하기 위해 실제 선박 데이터를 기반으로 한 통합 계산 프레임워크를 구축하였다. 각 지표는 서로 다른 정의와 계산 구조를 가지므로, 지표 간 비교 가능성을 확보하기 위해 선박 운항 조건, 기관 출력, 연료 소비량 산정 방식, 온실가스 환산 기준 등을 동일한 기준으로 정규화하였다. 이를 위해 선박의 기준 속도, 기관 출력, 연료 소비량 계산 방식, 온실가스 배출계수 및 지구온난화지수(GWP) 등을 공통 조건으로 설정하였으며, 이러한 기준에 따라 각 지표의 계산 절차와 주요 가정을 다음과 같이 정의하였다.

선박의 운항 조건은 메인엔진 출력 기준으로 저부하 운전(low load operation) 조건과 통상 운항(conventional operating) 조건의 두가지 시나리오를 사용하였다. 저부하 운전 조건에서는 메인엔진 출력(을) 정격출력(MCR)의 50%로 설정하였으며, 통상 운항 조건에서는 MCR의 75%로 설정하였다. 보조엔진 출력의 경우 운항 조건에 관계 없이 EEDI 가이드라인을 기준으로 출력을 가정하였다(IMO, 2022c). 선박의 운항 속도는 메인엔진 출력 조건에 따라 결정하였으며, 모든 선박은 설정된 메인엔진 출력 조건에서 씨마진(Sea margin, SM) 0% 상태로 운항한다고 가정하였다.

MGI는 식 (14)–(20)을 통해 계산하였으며, 적재용량(Capacity)은 탱커·벌커·가스선 등에서는 재화중량톤수(DWT, Deadweight)를 적용하였고, 컨테이너선의 경우 DWT의 70%를 사용하였다. 선박의 운항 선속( $v_{op}$ )은 각 선박 제원에 제시된 설계 조건과 본 연구에서 기정한 운항 조건 간의 차이를 보정하기 위해 식 (21)과 식 (22)의 출력-속도 관계식을 적용하여 산정하였다(International Towing Tank Conference (ITTC), 1978, MAN Energy Solutions, 2018).

$$P_A = MCR \cdot R_{MCR,A} \cdot \frac{100}{100 + SM_A} \quad (21)$$

$$V_{op} = \left( V_A^3 \cdot \frac{P_{ME}}{P_A} \right)^{1/3} \quad (22)$$

여기서 아래 첨자 A는 선박 제원에 제시된 설계 운항 조건을 의미하며,  $V_A$ 는 선박 데이터에 제시된 설계 서비스 속력(Design service speed)으로, 제시된 엔진 부하율( $R_{MCR,A}$ )과 씨마진( $SM_A$ ) 조건에서의 선속을 나타낸다.  $P_A$ 는 해당 설계 속도  $V_A$ 를 SM 0%의 조건에서 유지하는데 필요한 유효 출력이며,  $P_{ME}$ 는 운항 상태에서의 메인엔진 출력이다. 이를 기반으로 산출한  $V_{op}$

Table 2 Fuel properties and GHG emission factors

Fuel Type (i)	LFO	MDO	Gray Methanol	Bio Methanol (waste wood methanol in free-standing plant)
LCV <sub>i</sub> [MJ/gFuel]	0.0412	0.0427	0.0199	0.0199*
EI <sub>i</sub> <sup>WtT</sup> [gCO <sub>2</sub> eq/MJ]	13.2	14.4	31.3	13.5
C <sub>f(CO<sub>2</sub>),i,j</sub> [gGHG/gFuel]	3.151	3.206	1.375	1.375
C <sub>f(CH<sub>4</sub>),i,j</sub> [gGHG/gFuel]	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
C <sub>f(N<sub>2</sub>O),i,j</sub> [gGHG/gFuel]	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018

\* Bio Methanol의 EI<sub>i</sub><sup>WtT</sup> 값은 (European Union, 2018)을 적용하였으며, 그 외의 값은 (European Union 2023)의 값을 적용하였다.

Table 3 GWP100 values from IPCC AR6

GHG	GWP 100 (Armour et al., 2021)
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub> (fossil-base)	29.8
N <sub>2</sub> O	273

는 설정된 메인엔진 출력 조건과 SM 0% 조건에서의 선박 운항 속도를 나타낸다. 기관별 연료 소모량( $FC_{i,j}$ )은 각 기관의 연료 소비율 SFC<sub>i,j</sub> [gFuel/kWh]과 출력 P<sub>j</sub> [kW]의 곱으로 산정하였다. 본 연구에서는 메인엔진과 보조엔진만을 기관으로 고려하였으며, 각 기관의 연료 소비율(SFC, Specific Fuel Consumption)은 각 엔진의 데이터를 기반으로 설정하였다. Wt 배출량( $\dot{m}^{WtT}$ ) 산정에 필요한 연료별 EI<sub>i</sub><sup>WtT</sup> 및 LCV<sub>i</sub> 값은 Table 2의 데이터를 사용하였다. TtW 배출량( $\dot{m}^{TtW}$ ) 산정 시 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O의 배출을 고려하였으며, C<sub>f(k),i,j</sub> 값 역시 Table 2의 값을 적용하였다. 본 연구에서 사용되는 모든 연료에 대해 미연소 배출은 발생하지 않으며, C<sub>ub,i,j</sub>는 0으로 설정하였다. GWP 값은 Table 3의 IPCC AR6의 100년 기준 GWP100 값을 사용하였다(Armour et al., 2021).

EEDI는 식 (1)을 사용하여 계산하였으며, 메인엔진 출력( $P_{ME}$ )은 EEDI 계산 규정에 따라 정격출력(MCR)의 75%로 고정하여 적용하였다(IMO, 2022c). 설계 속도( $v_{ref}$ )는 해당 메인엔진 출력 조건에 부합하도록 식 (21)과 식 (22)의 출력-속도 보정식을 통해 산정하였다. 그 외의 적재 용량(Capacity), 보조엔진 출력( $P_{AE}$ ), 엔진의 연료 소비율(SFC)은 MGI 산정 시 적용한 조건과 동일하게 설정하였다. 계산에 필요한 연료당 CO<sub>2</sub> 배출량 환산계수(C<sub>F</sub>)의 경우 Table 2에 제시된 C<sub>f(CO<sub>2</sub>),i,j</sub> 값을 적용하였다. 발전기( $P_{PTO}$ ), 축 모터( $P_{PTI}$ ), 혁신적 에너지 효율 기술( $P_{eff}$ ,  $P_{AEff}$ )은 본 연구에서 고려하지 않기 때문에 모두 0으로 설정하였고, 각종 보정계수 ( $f_j, f_i, f_c, f_l, f_w, f_m$ )는 모두 1로 가정하였다.

CI는 식 (2)를 기반으로 계산하였으며, 해당 식에서 연간 CO<sub>2</sub> 배출량( $M_{CO_2}$ )과 연간 총 운송 작업량( $W$ )은 다른 지표들과의 비교를 위해 각각 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량과 시간당 운송 작업량으로 환산하여 적용하였다. 시간 당 CO<sub>2</sub> 배출량( $M_{CO_2}$ ) 산정을 위한 연료 소비량( $FC_i$ )은 MGI 계산과 동일한 방식으로 각 기관의 연료 소비율(SFC)과 출력의 곱을 통해 산정하였으며, CO<sub>2</sub> 배출계수( $C_{F,i}$ )는 EEDI와 동일하게 표 1에 제시된  $C_{f(CO_2),i,j}$  값을 적용하였다. 한편, 시간 당 운송 작업량( $W$ )은 선박의 운항 속도( $V_{op}$ )와 적재용량(Capacity)의 곱으로 산정하였으며, 이때 와 는 MGI 산정 시 적용한 조건과 동일하게 설정하였다.

FEM의 계산은 식 (2)를 기반으로 수행하였고, 이때  $f_{wind}$  는 1로 가정하였다. 본 연구에서는  $M_{i,j}$ 를 단위 시간당 연료 소비량으로 정의하였으며, 이는 MGI에서의  $FC_{i,j}$ 와 동일한 개념으로 동일한 값을 적용하였다.  $M_i$  역시 동일하게  $FC_i$  값을 사용하였다. 연료별 WtT 온실가스 배출계수  $CO_{2eq,WtT,i}$ 는 Table 2의  $E_i^{WtT}$  값을 사용하였고, TtW 온실가스 배출계수  $CO_{2eq,TtW,i,j}$ 의 계산은 식 (5)를 통해 계산하였다. 여기서 각 온실가스 배출계수  $C_{fCO_2,j}$ ,  $C_{fCH_4,j}$ ,  $C_{fN_2O,j}$ 는 Table 2의 값을 적용하였다.  $C_{slip,j}$ 은 모든 연료에 대해 0으로 설정하였으며, 계산에 사용된 GWP 값은 모두 IPCC AR6의 GWP100 기준을 적용하였다.  $RWD_k$ 의 경우 모든 연료에 대해 1로 설정하였으며,  $E_k$ 는 본 연구의 범위에서 고려하지 않아 0으로 설정하였다.

GFI 계산은 식 (7)를 기반으로 수행하였으며, 주요 변수는 다음과 같이 설정하였다. 본 연구에서  $Energy_i$ 는 단위 시간 당 에너지 소비량으로 정의하여  $FC_i$ 와  $LCV_i$ 의 곱으로 산정하였으며,  $Energy_{total}$ 은 각 연료의  $Energy_i$ 를 합산하여 계산하였다.  $E_i$ 의 연산에서  $GHG_{WtT}$ 는 Table 2의  $E_i^{WtT}$  값을 사용하였고,  $GHG_{TtW}$ 는 식 (10)을 통해 산출되었다. 배출계수  $C_{fCO_2}$ ,  $C_{fCH_4}$ ,  $C_{fN_2O}$ 는 Table 2의 값을 적용하였고,  $C_{slip,ship}$ 은 0으로 고려하였으며, 모든 온실가스의 GWP는 IPCC AR6의 GWP100 기준을 적용하였다.  $e_c$ ,  $e_{ccu}$ ,  $e_{occs}$  항은 모두 본 연구의 범위에 포함되지 않아 0으로 가정하였다.

### 3.3 선박 및 엔진 데이터 선정

본 연구의 온실가스 지표 비교 분석에 사용된 선박의 주요 제원과 설계 운항 조건 데이터는 Royal Institution of Naval Architects에서

발간한 Significant Ships 보고서의 공인된 데이터를 기반으로 수집하였다. 해당 자료에서는 선박의 인도 연도(Delivered year), 재회중량톤수(DWT), 주기관 모델, 최대연속출력(MCR)과 함께 설계 서비스 속도(design service speed)이 제시되며, 일부 선박의 경우 설계 서비스 속력이 특정 기관 부하율(MCR%)과 씨마진 조건을 함께 포함하는 형태로 제공된다. 한편 일부 선박의 경우 설계 서비스 속도만 제시되고 기관 부하율이나 씨마진 조건이 함께 제공되지 않는데, 이러한 경우에는 해당 설계 서비스 속력이 75% MCR 및 씨마진 0의 조건에서 달성되는 속력으로 가정하여 분석에 적용하였다.

메인엔진의 연료 소비 특성(SFOC)은 선박 제원에 명시된 엔진 모델명을 기준으로 엔진 제조사가 제공하는 기술 문서를 활용하여 설정하였으며, 보조엔진의 경우 모든 선박에 대해 동일한 엔진 모델을 가정하여 SFOC를 적용하였다. 본 연구에서 고려된 메인엔진 모델은 MAN 6G50ME-C9.6-LGIM, 6S70MC, 6S70ME-C8.1, 그리고 6G70ME-C10.5-HPSCR이며, 각 엔진의 SFOC 데이터는 MAN Energy Solutions에서 발간한 Marine Engine Programme에서 제공하는 성능 정보를 활용하여 수집하였다. 각 엔진의 SFOC는 두 가지 운항 조건, 즉 메인엔진 출력이 정격출력(MCR)의 50% 및 75%인 경우에 부합하는 값을 적용하였다. 6G50ME-C9.6-LGIM의 경우 MDO 연료 사용 조건에서는 L1 fuel oil mode 의 SFOC를, 메탄올 연료 사용 조건에서는 L1 dual fuel mode 의 SFOC를 적용하였다(MAN Energy Solutions, 2023). 6S70MC의 경우 엔진 부하율에 따른 SFOC가 제공되지 않아 제공된 값 중 최소값에 해당하는 L2 조건의 SFOC 값을 적용하였다(MAN Diesel, 2009). 6S70ME-C8.1은 EGB operation의 L1-L3 line part-load 조건에서 제시된 SFOC 값을 적용하였으며, 6G70ME-C10.5-HPSCR의 경우 Tier II 운전 모드에서 제시된 SFOC 값을 적용하였다(MAN Diesel and Turbo, 2013, MAN Energy Solutions, 2023).

### 3.4 Case study

제한한 MGI 지표의 유효성을 검증하고 기존 환경 지표인 EEDI, FEM, GFI 대비 차별화된 분석 능력을 평가하기 위하여, 본 연구에서는 연료 종류와 선박 건조 연도를 핵심 변수로 설정한 두 개의 상위 케이스를 바탕으로 총 여섯 개의 하위 분석 시나리오를 구성하였다. 이러한 케이스 설정은 기존 지표들이 선박의 실제 운항조건, 특정 연료의 특성, 선박의 기술적 노후도를 정밀

Table 4 Principal particulars and design operating conditions of the investigated ships

Case	Ship name	Delievered Year	Dead Weight [tonne]	Design service speed [knot]	$R_{MCR}$ [%]	Sea Margin [%]
1-A	LAURA MAERSK - LNG (RINA, 2023)	2023	32600	17.4	75	0
1-B	LAURA MAERSK - Grey Methanol (RINA, 2023)	2023	32600	17.4	75	0
1-C	LAURA MAERSK - Bio Methanol (RINA, 2023)	2023	32600	17.4	75	0
2-A	NORDIC STAVANGER (RINA, 2003)	2003	147500	14.7	90	15
2-B	ELKA LEBLON (RINA, 2012)	2012	154844	15.5	75	0
2-C	SONANGOL KULUMBIMBI (RINA, 2023)	2023	157663	14.5	75	0

Table 5 Main and auxiliary engine specifications and fuel consumption characteristics

Case	Ship name	MCR of Main Engine [kW]	Auxiliary Engine	Main Engine Fuel Type	Auxiliary Engine Fuel Type	SFOC* of Main Engine [gFuel/kWh]	SFOC* of Auxiliary Engine [gFuel/kWh]
1-A	MAN-6G50ME-C9.6-LGIM (MAN Energy Solutions, 2023)	10320	Wärtsilä 6L20 (Wärtsilä, 2025)	MDO	LFO	164 (75% MCR) 165.5 (50% MCR)	189.6
1-B	MAN-6G50ME-C9.6-LGIM (MAN Energy Solutions, 2023)	10320	Wärtsilä 6L20 (Wärtsilä, 2025)	Methanol (Pilot: MDO)	LFO	329.7+10.2** (75% MCR) 326.3+13.3** (50% MCR)	189.6
1-C	MAN-6G50ME-C9.6-LGIM (MAN Energy Solutions, 2023)	10320	Wärtsilä 6L20 (Wärtsilä, 2025)	Methanol (Pilot: MDO)	LFO	329.7+10.2** (75% MCR) 326.3+13.3** (50% MCR)	189.6
2-A	MAN-6S70MC (MAN Diesel, 2009)	16680	Wärtsilä 6L20 (Wärtsilä, 2025)	MDO	LFO	169 (75% MCR)	189.6
2-B	MAN-6S70ME-C8.1 (MAN Diesel and Turbo, 2013)	17525	Wärtsilä 6L20 (Wärtsilä, 2025)	MDO	LFO	163.5 (75% MCR)	189.6
2-C	MAN-6G70ME-C10.5-HPSCR (MAN Energy Solutions, 2023)	14500	Wärtsilä 6L20 (Wärtsilä, 2025)	MDO	LFO	158 (75% MCR)	189.6

\*SFOC(Specific Fuel Oil Consumption), \*\*SPOC(Specific Pilot Oil Consumption)

하게 반영하지 못하는 한계를 확인하고, MGI가 실질적인 환경 부하 변화를 얼마나 민감하게 식별할 수 있는지 평가하는 데 목적이 있다. 분석의 기초가 되는 선박의 주요 제원, 기관 구성 및 연료 조건은 Table 3과 Table 4에 기술된 바와 같다.

Case 1은 설계 출력 이하의 운항 조건에서의 지표 산출 결과와 연료 조건에 따른 결과를 동시에 비교할 수 있도록 설정하였으며, 이를 위해 메인엔진 출력이 MCR의 50%인 저부하 운전 조건, 즉 설계 운항 조건보다 낮은 출력 영역에서의 운항을 가정하였다. 이러한 조건에서 동일한 컨테이너선에 대해 주 연료를 MDO로 사용하는 경우(Case 1-A), 회색 메탄올을 사용하는 경우(Case 1-B), 그리고 그린 메탄올을 사용하는 경우(Case 1-C)를 각각 구성하였으며, 동일한 선박 및 기관 조건을 유지한 상태에서 연료 전환에 따른 지표 간 차이를 비교하였다.

Case 2는 선박의 건조 시점에 따른 지표 산출 결과를 비교할 수 있도록 설정하였으며, 메인엔진 출력이 MCR의 75%인 통상 운항 조건을 가정하였다. 이러한 조건에서 동일 연료(MDO)를 사용하는 약 150,000±10,000 DWT 규모의 원유 운반선 세 척을 대상으로, 건조 시점이 상이한 선박을 각각 Case 2-A, Case 2-B, Case 2-C로 구성하였으며, 선박의 설계 및 에너지 효율 수준 차이에 따른 지표 간 변화를 비교하였다.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 연료 종류에 따른 결과 비교

Fig. 1은 Case 1의 결과를 나타낸 것으로, 동일한 컨테이너 선박을 대상으로 저속 운항 조건(50% MCR)에서 연료 종류에 따른 EEDI, CII 및 MGI 지표의 평가 결과를 비교한 것이다.

우선, EEDI와 CII는 TtW 배출만을 기반으로 집약도를 산정한 반면 MGI는 WtW 배출과 TtW 배출을 모두 포함하여 온실가스 집

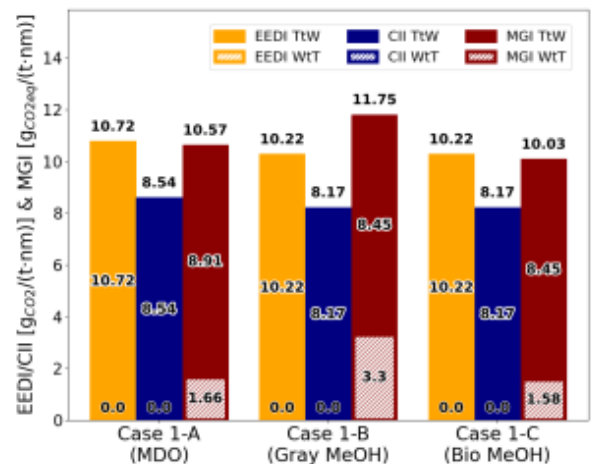


Fig. 1 Comparison of EEDI, CII, and MGI for a container vessel (Laura Maersk, 32,600 DWT) under reduced operating conditions (50% MCR) across different fuel options

약도를 산정하며, 연료 종류에 따른 집약도 평가 결과는 지표 간 상이하게 나타났다. 연료별 온실가스 집약도 결과를 비교해 보면, EEDI 기준에서는 MDO를 메인 연료로 사용하는 경우의 집약도가 10.72gCO<sub>2</sub>/(t·nm)로 평가되었으며, 회색 메탄올과 바이오 메탄올은 모두 10.22gCO<sub>2</sub>/(t·nm)로 동일하게 평가되어 MDO에 비해 낮은 집약도를 나타냈다. CII에서도 동일한 경향이 나타나, MDO는 8.54gCO<sub>2</sub>/(t·nm), 회색 및 바이오 메탄올은 모두 8.17 gCO<sub>2</sub>/(t·nm)로 산정되어 두 메탄올 연료가 MDO보다 낮은 집약도를 보였으며, 서로 동일한 값으로 평가되었다. 반면, MGI 기준에서는 회색 메탄올의 온실가스 집약도가 11.754gCO<sub>2</sub>eq/(t·nm)로 나타나, 10.57gCO<sub>2</sub>eq/(t·nm)의 MDO보다 높게 나타났으며, 바이오 메탄올은 10.03gCO<sub>2</sub>eq/(t·nm)로 더 낮게 평가되어 연료 간 평가 경향이 EEDI, CII와 다르게 나타났다.

연료별 온실가스 집약도 평가에서 지표 간 상이한 결과가 나타

난 것은, EEDI와 CII는 연소 단계(TtW) 배출만을 고려하는 반면 MGI는 연료 생산 및 공급 단계(WtT)를 포함한 전과정 온실가스 배출을 반영하기 때문이다. 메탄올은 MDO에 비해 TtW 단계의 온실가스 배출량이 낮기 때문에, 해당 배출만을 반영하는 EEDI와 CII에서는 MDO의 온실가스 집약도가 화석 메탄올보다 높게 평가된다. 그러나 화석 메탄올은 생산 공정(WtT)에서의 온실가스 집약도가 높아, WtT 단계를 포함한 전과정 기준으로 산정되는 MGI에서는 화석 메탄올의 온실가스 집약도가 MDO보다 높게 나타난다. 이러한 차이는 화석 메탄올과 바이오 메탄올 간 비교에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. 두 연료는 TtW 단계의 배출 특성은 유사하지만, 생산 단계에서의 온실가스 배출량에는 차이가 존재한다. EEDI와 CII는 이러한 차이를 반영하지 못해 두 연료를 동일한 집약도로 평가하는 반면, MGI는 WtT 배출을 포함하여 평가함으로써 바이오 메탄올이 화석 메탄올보다 낮은 온실가스 집약도를 가지는 것으로 나타난다. 이러한 결과는 전과정 배출을 고려한 평가가 연료 전환에 따른 실제 온실가스 배출 특성을 보다 정확하게 반영할 수 있음을 보여준다.

TtW 온실가스 배출만을 기준으로 비교할 경우, MGI의 온실가스 집약도는 CII보다 조금 높은 값을 보였으며, EEDI는 MGI에 비해 더 높은 집약도를 나타냈다. 구체적으로, MDO의 경우 CII의 TtW 온실가스 집약도는  $8.54\text{gCO}_2/(\text{t}\cdot\text{nm})$ 인 반면, MGI는  $8.91\text{gCO}_2\text{eq}/(\text{t}\cdot\text{nm})$ 로 더 높게 나타났으며, EEDI는  $10.72\text{gCO}_2/(\text{t}\cdot\text{nm})$ 로 가장 높은 값을 보였다. 화석 메탄올과 바이오 메탄올에서도 동일한 결과가 나타났으며, 두 연료 모두 WtT 온실가스 집약도가 CII는  $8.17\text{gCO}_2/(\text{t}\cdot\text{nm})$ , MGI는  $8.45\text{gCO}_2\text{eq}/(\text{t}\cdot\text{nm})$ , EEDI는  $10.22\text{gCO}_2/(\text{t}\cdot\text{nm})$ 로 산정되어 모든 연료에서 동일한 경향이 확인되었다.

MGI의 TtW 온실가스 집약도가 CII보다 높게 나타난 것은, EEDI와 CII는 TtW 과정에서  $\text{CO}_2$ 의 배출만을 고려하는 반면 MGI는  $\text{CO}_2$  뿐만 아니라  $\text{CH}_4$ 와  $\text{N}_2\text{O}$ 의 배출을 포함하여 온실가스 집약도를 산정하기 때문이다. 연료의 연소 과정에서는  $\text{CO}_2$  외에도  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ 와 같은 온실가스가 함께 배출되며, 이들 기체는 각각 29.8과 273의 높은 지구온난화지수(GWP)를 가지므로 온실가스 배출 평가에서 고려되어야 한다. 또한 LNG와 같은 연료를 사용하는 경우에는 메탄 슬립과 같은 미연소 배출이 발생할 수 있으며, EEDI와 CII는 이러한 배출을 포함하지 않는다. 반면 MGI는  $\text{CH}_4$ 와  $\text{N}_2\text{O}$ 와 같은 비 $\text{CO}_2$  온실가스의 배출과 연료의 미연소 배출을 포함하여 TtW 배출을 보다 포괄적으로 반영할 수 있다.

MGI가 EEDI에 비해 더 넓은 범위의 온실가스 배출을 고려함에도 EEDI의 TtW 기준 온실가스 집약도가 MGI에 비해 높게 나타나는 것은, EEDI가 설계 조건을 기반으로 일정한 출력(75% MCR)을 가정하여 집약도를 산정하는 반면, MGI는 실제 운항 조건에서의 출력과 선속을 기준으로 집약도를 산출하기 때문이다. 본 연구의 Case 1에서는 저속 운항 조건(50% MCR)을 가정하였으며, 이로 인해 75% MCR 대비 선박 출력과 선속이 감소한다. 하지만 표 6의 결과를 보면, 선속의 감소폭에 비해 시간당 온실가스 배출량의 감소 폭이 크게 나타나, 동일 화물을 동일 거리 운송할 때 저속 운항을 통해 실제 온실가스 배출량을 낮출 수 있음을 보여준다. EEDI는 이러한 운항 조건 변화를 반영하지 않고,

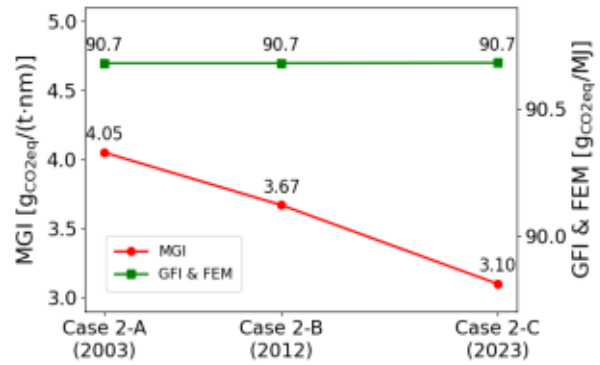


Fig. 2 Comparison of MGI and GFI/FuelEU across crude oil tankers built in different years ( $\approx 150,000$  DWT, MDO-fueled)

항상 설계 기준 75% MCR의 출력과 선속을 적용하여 계산되므로 선박을 설계 관점에서 평가하는 지표로는 유용하지만, 실제 운항 상태에서의 온실가스 집약도를 정확히 평가하기 어렵다. 반면, MGI는 운항 시 출력과 선속을 직접 반영하여 계산할 수 있어, 선박의 설계뿐 아니라 실제 운항 과정까지 포함한 온실가스 집약도를 정확하고 유연하게 평가할 수 있다.

#### 4.2 선박 운송 성능 개선에 따른 결과 비교

Fig. 2는 Case 2의 결과를 나타낸 것으로 통상 운항 조건(75% MCR)에서 건조 시점이 상이한 선박 간 추진 성능 및 수송 효율 차이가 MGI와 GFI/FEM에 어떻게 반영되는지를 비교한 것이다.

MGI와 GFI/FEM은 모두 연료 생산부터 사용까지의 전과정(Well-to-Wake) 배출을 반영한 지표임에도 불구하고, MGI는 건조 연도가 증가할수록 점진적으로 감소한 반면 GFI/FEM은 거의 일정한 수준을 유지하였다. 구체적으로, Case 2-A(2003), Case 2-B(2012), Case 2-C(2023) 선박의 MGI는 각각 4.19, 3.80, 3.21  $\text{gCO}_2\text{eq}/(\text{t}\cdot\text{nm})$ 로, 신형 선박일수록 단위 수송 당 온실가스 배출 집약도가 낮게 평가되었다. 반면, GFI/FEM은 약 93.8  $\text{gCO}_2\text{eq}/\text{MJ}$  수준으로 선박 간 차이가 거의 나타나지 않았다.

이러한 차이는 GFI/FEM이 연료 자체의 탄소 배출 특성에 기반한 에너지 기준 집약도인 반면, MGI는 수송 작업량( $\text{t}\cdot\text{nm}$ )을 기준으로 산정되는 수송 작업 기준 집약도이기 때문에 발생한다. GFI/FEM과 MGI는 모두 전과정(Well-to-Wake) 배출을 반영하나 GFI/FEM은 연료의 발열량과 배출계수를 중심으로 집약도를 평가하기 때문에, 동일한 연료를 사용하는 경우 선박의 특성과 관계 없이 유사한 값을 나타낸다. 반면, MGI는 단위 수송 작업당 온실가스 배출을 평가하기 때문에, 엔진 효율 향상, 추진 시스템 개선, 선형 최적화 등 건조 시점에 따른 기술적 발전이 수송 효율을 통해 지표 값에 직접적으로 반영된다. 예를 들어, 신형 엔진 적용으로 SFOC가 낮아지고 연료 소모량이 줄어들면, 동일 운송 작업에서 발생하는 온실가스 배출량도 감소한다. 또한, 선박 저항 감소와 추진 효율 향상으로 같은 운송 작업 수행에 필요한 에너지 양이 줄어들면, 필요한 연료량이 감소하고, 따라서 온실가스 배

출량 역시 줄어든다. 이처럼 MGI는 연료 특성뿐만 아니라 실제 운항 효율을 포함하여 집약도를 평가할 수 있기 때문에, 시간적·기술적 변화까지 고려할 수 있다는 장점을 가진다.

## 5. 결론

본 연구는 연료 생산·공급(WtT)과 연소(TtW) 배출을 모두 고려하는 동시에, 선박의 설계 효율, 엔진 성능, 운항 조건 등 기술적·운항적 요인을 반영한 선박 온실가스 배출 집약도 지표인 MGI를 제시하고, 기존 EEDI, CII, GFI, FEM과의 비교 분석을 통해 그 유용성을 검증하였다. 분석 결과, EEDI와 CII는 연소 단계(TtW) 배출만을 고려함으로써 연료 생산 및 공급(WtT) 과정에서 발생하는 온실가스 배출을 반영하지 못하는 근본적 한계를 보였다. 사례 분석(Case 1)에서 EEDI 및 CII 기준으로는 화석 메탄올이 MDO보다 낮은 집약도를 나타낸 반면, WtT 배출을 포함하는 MGI 기준에서는 생산 단계 배출의 영향으로 화석 메탄올의 집약도가 더 높게 평가되어 연료 간 평가 결과가 상반되게 나타났다. 또한 EEDI와 CII는 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O와 같은 비 CO<sub>2</sub> 온실가스 배출을 반영하지 못하는 반면, MGI는 이러한 배출을 함께 고려하여 연소 과정에서 발생하는 온실가스 배출을 보다 포괄적으로 반영함을 확인하였다. 이러한 결과는 MGI가 연료 생산부터 연소에 이르는 전 과정 배출과 CO<sub>2</sub> 외의 온실가스 배출을 통합적으로 고려함으로써, 연료의 실제 배출 특성을 보다 정확하게 평가할 수 있음을 보여준다. 또한, EEDI는 설계 기준(75% MCR)의 출력과 선속을 기반으로 산정되므로 실제 운항 조건을 반영하지 못하며, 특히 본 연구에서 가정한 50% MCR의 저속 운항 조건에서는 이러한 차이가 더욱 두드러져 TtW 집약도가 MGI보다 높게 평가되는 경향이 나타났다. 반면, MGI는 운항 시 출력과 선속을 직접 반영함으로써 선박의 실제 운항을 기반으로 한 온실가스 집약도를 보다 현실적으로 평가할 수 있음을 확인하였다. 한편, GFI 및 FEM은 단위 에너지(MJ) 기준의 연료 중심 집약도로서 연료 특성 비교에는 유용하나, 동일 연료 사용 시 선박의 엔진 효율 향상이나 추진 성능 개선과 같은 기술적 발전을 충분히 반영하지 못하는 제약을 드러냈다. 사례 분석(Case 2)에서 MGI는 신형 선박일수록 점진적으로 감소하는 경향을 보인 반면, GFI/FEM은 선박 기술 발전과 무관하게 거의 일정한 값을 유지하였다. 이는 GFI/FEM이 연료 특성 중심 지표인 반면, MGI는 수송 작업량을 기반으로 선박의 운항 및 기술적 요인을 함께 반영하기 때문이다. 종합적으로 이러한 결과는 MGI가 연료 전환에 따른 전주기 배출 특성뿐 아니라, 선박의 설계 및 실제 운항 조건, 그리고 기술적 발전에 따른 수송 효율 변화를 동시에 반영할 수 있는 지표임을 확인하였다. 따라서 MGI는 국제 해운 탈탄소화 과정에서 연료 선택과 기술 발전의 효과를 보다 현실적으로 평가할 수 있는 수송 작업량 기준 성능 지표로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

This research was partly supported by the Korea Environment Industry & Technology Institute (KEITI) (RS-2025-02213131) and the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) (RS-2025-16063339), funded by the Korean Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE), and by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government (MOTIE) (RS-2023-KI002688, HRD Program for Industrial Innovation), and was also conducted as part of the project titled "Fostering Talent in Advanced Ship Blue Tech" (RS-2025-02221147), funded by the Ministry of Oceans and Fisheries of the Republic of Korea.

## Nomenclature

$i$	연료의 종류
$j$	연료 소비 장치의 종류
$k$	온실가스의 종류 (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O)
MGI	단위 화물·거리 당 전주기 온실가스 배출 집약도 [gCO <sub>2</sub> eq/(t·nm)]
$\dot{m}^{WtW}$	단위 시간당 배출되는 전주기 온실가스 배출량 [gCO <sub>2</sub> eq/h]
$\dot{m}^{WtT}$	단위 시간당 Tank-to-Wake 온실가스 배출량 [gCO <sub>2</sub> eq/h]
$V_{ref}$	기준 선속 [knot]
Capacity	적재 용량 [tonne]
FC <sub><math>i</math></sub>	시간당 소비되는 연료 $i$ 의 질량 유량 [gFuel/h]
LCV <sub><math>i</math></sub>	연료 $i$ 의 저위 발열량 [MJ/gFuel]
EL <sub><math>i</math></sub> <sup>WtT</sup>	연료 $i$ 의 단위 에너지당 WtT 배출계수 [gCO <sub>2</sub> eq/MJ]
$C_{ub,i,j}$	선박에 공급된 연료 중 누출되는 연료 비율 [%]
$C_{slip,i,j}$	에너지 변환 장치에 공급된 연료 중 누출 연료 비율 [%]
$C_{fug,i,j}$	연료 공급과정에서 손실되는 연료 비율 [%]
EF <sub><math>i,j</math></sub> <sup>TtW</sup>	연료 소비 장치 $j$ 에서 연료 $i$ 가 완전 연소될 때 배출되는 CO <sub>2</sub> 배출계수 [gCO <sub>2</sub> eq/gFuel]
$C_{f(k),i,j}$	연료 소비 장치 $j$ 에서 연료 $i$ 가 연소될 때 배출되는 온실가스 $k$ 의 질량 [gGHG/gFuel]
EF <sub><math>ub,i,j</math></sub> <sup>TtW</sup>	연소되지 않고 누출된 연료 $i$ 의 온실가스 배출계수 [gCO <sub>2</sub> eq/gFuel]
$C_{sf(k),i,j}$	연소되지 않고 누출된 연료 $i$ 로 인해 배출되는 온실가스 $k$ 의 질량 [gGHG/gFuel]
GWP <sub><math>k</math></sub>	온실가스 $k$ 의 100년 기준 지구 온난화 지수

## References

- Armour, K., Forster, P., Storelvmo, T., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D., Mauritsen, T., Palmer, M. and Watanabe, M. *The Earths energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity*. 2021. U13B-07.
- Comer, B. and Sathiamoorthy, B. 2022. *How updating IMO regulations can promote lower greenhouse gas emissions from ships*. International Council on Clean Transportation.
- European Council 2020. *Fit for 55: The EU's plan for a green transition*. Council of the European Union Brussels, Belgium.
- European Union 2018. DIRECTIVE (EU) 2018/2001 of the european parliament and of the council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. *Official Journal of the European Union*, pp.82-209.
- European Union 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. *Official Journal of the European Union*, 50, pp.48-100.
- Ghaemi, M.H. and Zeraatgar, H. 2021. Analysis of hull, propeller and engine interactions in regular waves by a combination of experiment and simulation. *Journal of Marine Science and Technology*, 26, pp.257-272.
- Hulme, P.E. 2021. Unwelcome Exchange: International trade as a direct and indirect driver of biological invasions worldwide. *One Earth*, 4, pp.666-679.
- IMO 2011. Resolution MEPC. 203 (62).
- IMO 2020. Fourth IMO GHG study 2020.
- IMO 2021. Resolution MEPC. 338 (76): 2021 Guidelines on the operational carbon intensity reduction factors relative to reference Lines (CII Reduction Factors Guidelines, G3).
- IMO 2022a. Resolution MEPC.352(78): 2022 Guidelines on Operation Carbon Intensity Indicators and the Calculation Methods (CII Guidelines, G1).
- IMO 2022b. Resolution MEPC.354(78): 2022 Guidelines on the Operational Carbon Intensity Rating of Ships (CII Rating Guidelines, G4).
- IMO 2022c. Resolution MEPC.364(79): 2022 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Ship Index (EEDI) for new ships.
- IMO 2022d. Resolution MEPC. 334(76): 2021 Guidelines on Survey and Certification of the Attained Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI).
- IMO 2022e. Resolution MEPC. 350 (78): Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI).
- IMO 2022f. Resolution MEPC. 353 (78): 2022 Guidelines on the Reference Lines for Use with Operational Carbon Intensity Indicators (CII Reference Lines Guidelines, G2).
- IMO 2024. Resolution MEPC.391(81): 2024 Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels (2024 LCA Guidelines). IMO Resolution MEPC.391(81).
- IMO 2025. Draft Amendments to Marpol Annex VI. Regulations for the Prevention of Air Pollution From Ships (Revised MARPOL Annex VI).
- International Towing Tank Conference (ITTC) 1978. ITTC Performance Prediction Method. ITTC - Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02-03-01.4.
- Joung, T.-H., Kang, S.-G., Lee, J.-K. and Ahn, J. 2020. The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 4, pp.1-7.
- Kumar, A., Singh, P., Raizada, P. and Hussain, C.M. 2022. Impact of COVID-19 on greenhouse gases emissions: A critical review. *Science of the Total Environment*, 806, 150349.
- Lim, Y. 2025. Alternative Fuels for Environmentally-Friendly Ships: Hydrogen, Ammonia, Bio-fuels and E-fuels, Springer Nature.
- MAN Diesel 2009. Marine Engine IMO Tier II Programme 2nd edition 2009.
- MAN Diesel and Turbo 2013. Marine Engine IMO Tier II Programme 2013.
- MAN Energy Solutions 2018. Basic principles of ship propulsion. MAN Energy Solutions.
- MAN Energy Solutions 2023. Marine Engine Programme 2023.
- Pachauri, R.K. and Reisinger, A. 2007. Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Ipcc.
- Park, E. and Choi, J. 2021. Greenhouse gas emission analysis by LNG fuel tank size through life cycle. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 35, pp.393-402.
- Park, J., Jung, J. and Seo, Y. 2023. Investigation of applying technical measures for improving energy efficiency design index (EEDI) for KCS and KVLCC2. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 37, pp.58-67.
- Pavlenko, N., Comer, B., Zhou, Y., Clark, N. and Rutherford, D. 2020. *The climate implications of using LNG as a marine fuel*. Swedish Environmental Protection Agency: Stockholm, Sweden.

Royal Institution of Naval Architects (RINA) 2003. Significant Ships of 2003, 8–9 Northumberland Street, London WC2N 5DA RINA.

Royal Institution of Naval Architects (RINA) 2012. Significant Ships of 2012, 8–9 Northumberland Street, London WC2N 5DA RINA.

Royal Institution of Naval Architects (RINA) 2023. Significant Ships of 2023, 8–9 Northumberland Street, London WC2N 5DA RINA.

Sardar, A., Islam, R., Anantharaman, M. and Garaniya, V. 2025. Advancements and obstacles in improving the energy efficiency of maritime vessels: A systematic review. *Marine Pollution Bulletin*, 214, 117688.

Wärtsilä. 2025. Online engine configurator – Find the right ship engine for you [accessed 2025 October 20]. Available at <https://www.wartsila.com/marine/engine-configurator>.

Zamboni, G., Scamardella, F., Gualeni, P. and Canepa, E. 2024. Comparative analysis among different alternative fuels for ship propulsion in a well-to-wake perspective. *Heliyon*, 10.

Zhou, Y., Swidler, D., Searle, S. and Baldino, C. 2021. Life-cycle greenhouse gas emissions of biomethane and hydrogen pathways in the European Union.

## Authorship Contribution Statement

**Jungmin Kim:** Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Validation, Visualization, Writing – original draft; **Yunju Jeon:** Conceptualization, Methodology, Validation, Writing – review & editing; **Hongkyoung Shin:** Conceptualization, Methodology, Validation; **Youngsub Lim:** Conceptualization, Funding acquisition, Project administration, Supervision, Writing – review & editing.

