

선박 에너지 경계 정의에 따른 탄소집약도 지표 분석

황대중¹⁾ · 오철²⁾*

Analysis of Ship Carbon Intensity Metrics Based on Energy Boundary Definitions

Dae-jung Hwang¹⁾ · Cheol Oh²⁾*

Received 21 April 2026 Revised 14 May 2026 Accepted 2 June 2026 Published online 18 June 2026

ABSTRACT Using revised International Maritime Organization (IMO) Data Collection System data and the analytical framework of Greenhouse Gas Fuel Intensity, this study evaluates alternative emission-based carbon intensity metrics and energy-intensity supporting metrics. A total of three emission-based Carbon Intensity Indicator (CII) alternative metrics and three energy-intensity supporting metrics are defined by combining operational states (under way and not-under-way) with emission and energy boundary assumptions and assessed through simulations based on annual operational data of a representative bulk carrier. The emission-based metrics are primarily governed by boundary definitions rather than onshore power supply (OPS) credits, with not-under-way fuel consumption identified as the dominant driver. Although the OPS effect increases linearly with its energy share, its impact remains limited under our baseline conditions. The energy-intensity supporting metrics vary depending on the inclusion of OPS energy, thus indicating that boundary definitions directly affect energy-based evaluation outcomes. Accordingly, future revisions of ship operational performance indicators should distinguish emission-based carbon intensity from energy-based supporting metrics and apply consistent, data-driven boundary definitions.

Key words International maritime organization(국제해사기구), Data collection system(데이터수집시스템), Carbon intensity indicator(탄소집약도지수), Greenhouse gas fuel intensity(온실가스 연료 집약도), Onshore power supply(육상전력공급)

1. 서론

전 세계적인 탈탄소 흐름과 함께 에너지 시스템은 연료 중심 구조에서 전력, 재생에너지 및 다양한 대체에너지를 포함하는 통합적 형태로 빠르게 전환되고 있다. 이러한 변화는 해운 분야에서도 나타나고 있으며, 기존의 연료 기반 에너지 소비 구조는 육상전력공급(Onshore Power Supply,

이하 OPS), 풍력 보조 추진, 전기 기반 에너지 등 다양한 비연료 에너지원이 결합된 형태로 확장되고 있다.

이에 따라 선박의 에너지 소비와 온실가스 배출을 평가하는 방식 또한 단순 연료 소비 중심에서 복합적인 에너지 시스템 관점으로 재정립될 필요성이 제기되고 있다.

이러한 탈탄소 흐름에 따라 국제항행에 종사하는 선박의 안전 및 해양오염 방지에 대한 국제협약의 제·개정을 담당하는 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization, 이하 IMO)는 2023년 7월 제80차 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee, 이하 MEPC)에서 2050년까지 선박 온실가스 순 배출량 Zero 목적이 포함된 개정된 온실가스 전략을 채택하였다.^[1]

1) Researcher, Korea Maritime Safety Cooperation Center

2) Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University

*Corresponding author: ohcheol@kmou.ac.kr

Tel: +82-51-410-4268

Fax: +82-51-410-4268

동 전략에 따른 조치로서 현재 해운 부문에서 대표적으로 적용되는 제도로 탄소집약도지수(Carbon Intensity Indicator, 이하 CII)는 연간 이산화탄소 배출량을 운송업무량으로 나누어 산정하는 지표로, 운항 효율성을 기반으로 온실가스 감축을 유도하기 위해 도입되었다.^[2,3]

그러나 CII 지표는 다양한 에너지원이 혼재된 실제 운항 환경을 충분히 반영하지 못하며, 특히 에너지 사용 범위(system boundary)의 정의에 따라 결과가 크게 달라질 수 있다는 한계를 가진다. 예를 들어 항만 대기, 기상 조건, OPS 사용과 같은 요소들은 총에너지 소비 구조에 영향을 미치지만, 현행 지표에서는 제한적으로만 반영된다.^[4~7]

이와 같은 한계를 보완하기 위해 IMO는 데이터수집시스템(Data Collection System, 이하 DCS) 보고 체계를 개정하여 선박의 연간 연료 사용량을 운항 상태(under way / not under way)별로 구분하고, 세부 운항데이터를 포함하도록 하였다.^[8] 또한 연료의 전과정 배출 특성을 반영하기 위한 온실가스 연료집약도(Greenhouse Gas Fuel Intensity, 이하 GFI) 개념에 따라, 연료뿐만 아니라 비연료 에너지를 포함한 통합적 에너지 평가 가능성이 확대되고 있다.^[9]

이러한 데이터 구조의 확장은 에너지 사용 경계 설정에 따라 다양한 형태의 탄소 및 에너지 지표를 설계할 수 있는 기반을 제공한다.

기존에 선박탄소집약도 관련 연구들은 주로 대체연료 적용이나 운항 조건 변화가 CII 결과에 미치는 영향을 분석하는 데 집중해 왔다.^[10~15] 그러나 지표의 구조적 요소, 특히 에너지 포함 범위와 같은 경계 정의가 결과에 미치는 영향에 대한 분석은 제한적이다. 실제로 동일한 운항 조건에서도 어떤 에너지를 포함하거나 제외하는지에 따라 선박의 CII 값이 달라질 수 있으며, 이는 평가 결과의 일관성과 해석에 중대한 영향을 미친다.

이에 본 연구에서는 개정된 DCS 및 GFI 데이터 구조를 기반으로, 에너지 사용 경계 정의에 따른 탄소집약도 지표의 변동 특성을 분석하고자 한다. 이를 위해 실제 선박 운항데이터를 활용하여 운항 상태 및 에너지 포함 범위를 조합한 여섯 가지 지표를 정의하고, 동일 조건에서 그 차이를 비교·분석하였다. 본 연구는 선박 에너지 시스템 관점에서 지표 구조를 재해석함으로써, 향후 보다 일관되고 합리적인 탄소집약도 평가 체계 설계에 기초 자료를 제공하는 데 목적이 있다.

2. 연구 방법

2.1 DCS 및 GFI 데이터 구조

CII 산출의 근간이 되는 IMO DCS 수집 항목은 2024년 3월 개정안이 채택되고 2026년 1월부터 적용되었다. Table 1은 개정된 DCS 및 GFI 데이터 항목을 비교하여 보여준다.

개정 DCS의 가장 큰 특징은 연료 사용량을 항행(under way)과 비항행(not under way) 상태로 구분한 점이다. 이를 통해 항해 중 사용 연료량 그리고 항만 대기, 접안, 조종(manoeuvring) 등 비항행 연료량을 구별할 수 있게 되었으며, 이는 기존 체계에서 지속 제기되어 온 항만 대기시간에 따른 CII 등급 산정 불합리성 문제를 해소할 수 있는 데이터 기반을 제공한다.

한편, 본 연구에서 활용한 GFI 데이터 구조는 IMO 온실가스 중기조치 논의에서 제시된 온실가스 연료집약도 개념

Table 1. Comparison of DCS and GFI data structure

Framework	Reporting item	
DCS Data	Fuel oil consumption	Main Engine
		Auxiliary Engine
		Fired Boiler
		Others
	Total distance travelled [nautical miles]	
	Hours under way [hours]	
GFI Data	Power capacity of other energy conversion systems	Fuel cell
		Electric battery
		Wind assisted propulsion
		Photovoltaic power generation
		Other
	EI _j , GHG intensity	
	Energy _j , amount of energy used by fuel	
Energy _{total} , total amount of energy		
Common Data	< Ship particular > - IMO number, Year of delivery, Ship type - Gross tonnage, Net tonnage, Deadweight tonnage - Power output of M/E & A/E - Total amount of onshore power (kWh)	
	< Total fuel oil consumption > - Main Engine - Auxiliary Engine - Fired Boiler - Others	

을 분석 목적으로 구조화한 것이다. 이 구조는 연료별 온실 가스 집약도, 에너지원별 사용량 및 비연료 기반 대체에너지 활용 정보를 통합적으로 고려함으로써, 선박의 에너지 믹스와 전 과정 배출 특성을 비교·평가할 수 있는 분석 기반을 제공한다.

나아가 DCS와 GFI 데이터 체계를 결합하면, 기존 CII 산식으로는 구현할 수 없었던 지표 설계가 가능해진다. 즉, 운항 상태별 에너지 포함 범위, 배출량 또는 에너지 기준의 선택, 그리고 OPS 등 외부 에너지 처리 방식에 따라 상이한 CII 지표가 구조적으로 도출된다.

본 연구에서는 DCS 자료와 GFI 분석 프레임의 조합 방식에 따라 총 여섯 가지 지표 옵션을 정의하고, 동일한 운항 조건에서 옵션별 특성을 분석하였다.

2.2 현행 CII 지표

2023년부터 시행하고 있는 CII는 선박의 연간 이산화탄소(CO₂) 배출량을 운송업무량(Transport work)으로 나눈 계산식으로 식 (1)과 같다.

$$CII_{ship} = \frac{M_{CO_2}}{TW} = \frac{\sum_{j=1}^J (FLSUB_j C \times CF_j)}{D \times W} \quad (1)$$

- M_{CO_2} : 연간 CO₂ 배출량 [g]
- TW : 연간 운송업무량 [ton·nm]
- FC_j : 연료 종류 j의 연간 사용량 [ton]
- CF_j : 연료 종류 j의 배출계수 [gCO_{2e}/gfuel]

- D : 항해 거리 [nautical mile]
- W : 적재 중량 [ton]
- j : 연료 종류

현행 CII 산식은 연간 총 연료 사용량을 기준으로 배출량을 산정하기 때문에, 항해 효율과 무관한 항만 혼잡 등으로 대기시간이 증가할 경우 발전기 가동에 따른 연료 소비가 반영되어, 운항 효율성이 높은 선박이라도 CII 등급이 과소 평가될 수 있다.

2.3 대안적 CII 지표

Table 2는 개정 DCS 및 GFI 데이터를 활용한 여섯 가지 옵션을 보여준다. CII는 기본적으로 운항 효율을 나타냄으로 분모는 기존과 같이 운송업무량으로 유지하고, 분자

Table 2. Definition of alternative emission-based CII and energy-intensity metric options

No.	Metric	unit
1	$\frac{(1+2) \times 6 \times 7}{D \times W}$	$\frac{gCO_{2eq}}{ton \cdot mile}$
2	$\frac{1 \times 6 \times 7}{D \times W}$	
3	$\frac{(4 \times 7) - (3 \times 8)}{D \times W}$	
4	$\frac{4}{D \times W}$	$\frac{MJ}{ton \cdot mile}$
5	$\frac{5}{D \times W}$	
6	$\frac{4-3}{D \times W}$	

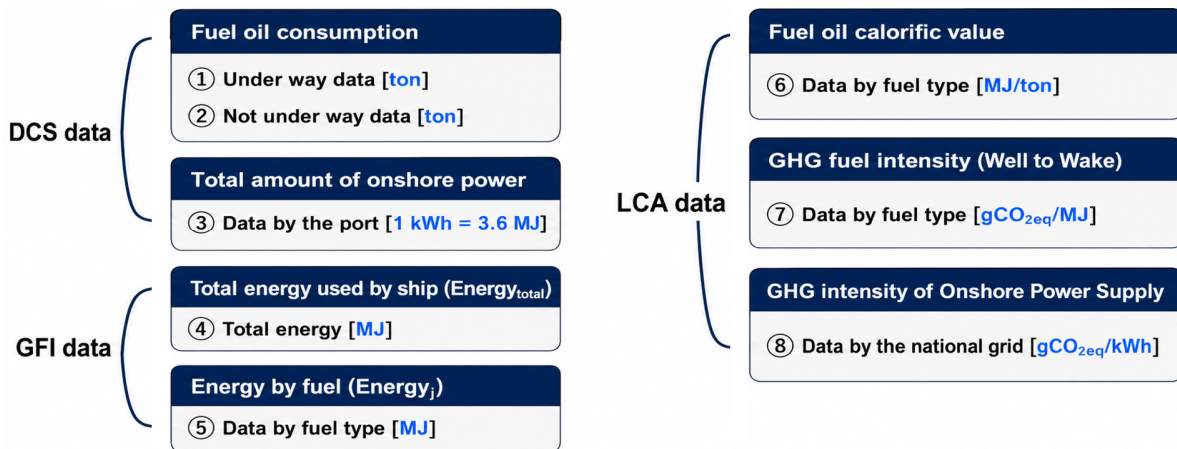


Fig. 1. Data components for alternative emission- and energy-intensity metrics based on DCS and GFI data

구성 방식에 따른 지표의 차이를 비교할 수 있도록 설계하였다. 분자에 나타난 번호는 Fig. 1의 데이터 항목을 의미한다. Table 2의 산식은 옵션별 경계 차이를 비교하기 위한 개념이며, 복수 연료 또는 복수 에너지원이 사용되는 경우에는 각 연료 또는 에너지원별 값을 합산하여 적용할 수 있다.

2.3.1 배출량 기반의 CII

옵션 1은 Under way와 Not Under way 연료 사용량을 모두 포함하며, 연료별 발열량과 온실가스 집약도 계수를 적용하여 WtW 기준 배출량을 산정한다. 그러나 Not Under way 구간의 연료 사용을 포함함에 따라, 항만 대기과 같은 기존 CII 체계의 한계를 해소하기는 어렵다. 다만, 기존 TtW 방식과 달리 전 과정 배출 특성을 반영한다는 점에서 차별성이 있다.

옵션 2는 Under way 연료 사용량만을 고려하여 옵션 1을 단순화한 형태로, Not Under way 상태를 제외함으로써 실제 추진 상태에서의 운항 효율을 평가한다. 즉, 항만 대기(S/by) 및 조종(manoeuvring) 구간을 배제한다. 다만, 운송업무량의 정의 측면에서 추가적인 검토가 필요하다. 운송업무량은 화물을 적재한 상태에서의 이동 거리를 기준으로 산정되나, 항만 수역 내 이동 역시 운송 활동으로 해석될 수 있어 이를 일괄적으로 제외하는 것의 타당성은 재검토가 요구된다.

옵션 3은 총에너지 사용량을 기반으로 산정한 배출량에서 OPS 사용으로 인해 대체된 선내 발전기 배출 상당량을 차감하는 배출량 기반 CII 대안 지표이다. 본 연구에서 OPS

처리 방식은 OPS를 선내 배출에서 단순히 제외하는 방식이 아니라, 전체 에너지 사용에 따른 배출량을 먼저 산정한 후, OPS 공급 전력량에 전력망 배출계수를 곱한 값을 감축 인정분, 즉 credit으로 차감하는 방식으로 정의하였다.

이는 OPS가 항만 정박 중 선박 보조기관의 전력 생산을 대체한다는 가정에 따른 것으로, OPS 사용에 따른 배출 저감 효과를 지표상에 반영하기 위한 분석적 설정이다. Fig. 2는 이러한 에너지 경계 구조를 개념적으로 나타낸다.

2.3.2 에너지 기반의 CII

옵션 4, 5, 6은 분자에 온실가스 배출량이 아닌 에너지 사용량을 둔다는 점에서, 에너지 기반의 접근이다. 이 중 옵션 4는 분자에 선박 총에너지 사용량(④)을 직접 반영하는 방식이다.

옵션 5는 연료별 산정된 에너지 사용량(⑤)을 적용하는 방식이다. 옵션 4와의 차이점은, ⑤가 DCS 기반의 연료 사용량을 에너지 단위로 환산한 값이므로 연료유(fuel) 에너지 사용만을 포함하며, 풍력·배터리·연료전지 등 비연료 기반 대체에너지는 분자에 직접 반영되지 않는다는 점이다. 다만 이러한 대체에너지의 사용은 연료유 소비량의 감소로 이어져 결과적으로 옵션 5 값이 개선되는 간접효과가 나타난다.

옵션 6은 총에너지 사용량(④)에서 항만에서 공급받은 육상전력(OPS) 사용량(③)을 차감한 값을 운송업무량으로 나누어 산정하는 방식이다. 참고로 현시점에서 항만별 national grid에 대한 데이터를 정확히 파악하기는 어려운 실정이다.

2.4 시뮬레이션 설계 및 데이터 처리

본 연구에서는 여섯 가지 CII 지표 옵션을 비교하기 위해 분석 대상 선박으로 벌크선을 선정하고, 해당 선박의 연간 운항 및 연료 사용 실적을 기준 조건(baseline)으로 설정하였다. Table 3과 Table 4는 대상 선박의 주요 제원과 운항 조건을 제시한다. Table 4의 OPS 사용량은 1회 정박 또는 일일 사용량이 아니라, 기준 조건에서 설정한 연간 OPS 공급 전력량을 의미한다.

Fig. 3은 본 연구의 분석 체계를 도식화한 것으로, 시뮬레이션은 기준 선박의 운항 및 에너지 데이터를 입력한 후 이를 운항 상태로 구분하고, 연료 사용량을 에너지 단위

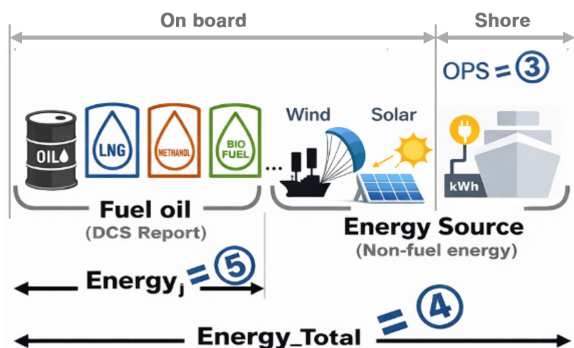


Fig. 2. Conceptual framework of energy boundaries based on DCS and GFI data

Table 3. Principal technical characteristics of the reference bulk carrier used in the simulation

Item	value
Ship type	Bulk carrier
Gross tonnage (GT)	33,308 ton
Deadweight (DWT)	57,336 ton
Main engine power	9,480 kW
Auxiliary engine power	1,980 kW
Annual distance travelled	53,657 nm
Annual hours under way	4,047 h
Year of delivery	2011

Table 4. Annual operational and energy profile under baseline conditions

Item	value
Fuel consumption profile	
Fuel consumption (Under way)	3,842 ton
Fuel consumption (Not under way)	1,508 ton
Total fuel consumption	5,350 ton
NUW fuel share (NUW / Total)	0.281
Non-fuel energy inputs	
Baseline OPS usage	890 MWh/year
Wind-assisted propulsion energy	150,000 kWh

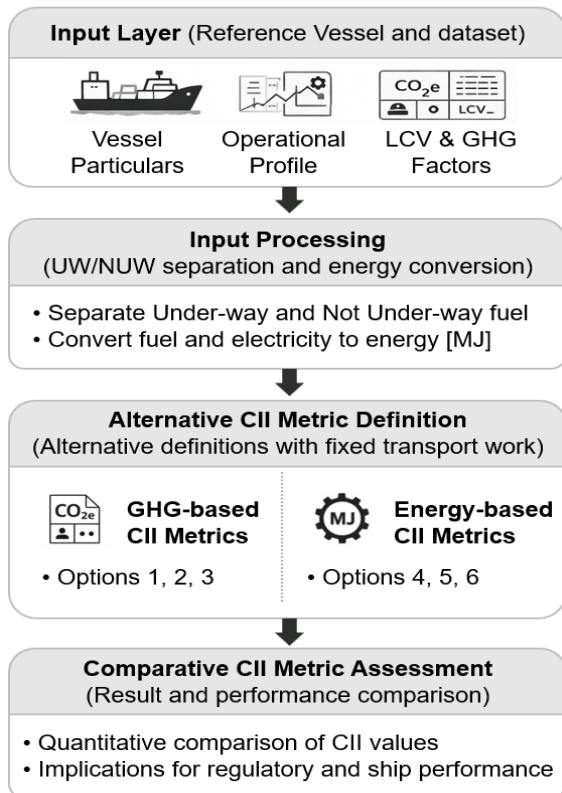


Fig. 3. Data processing and metric definition framework for alternative CII analysis

로 환산하여 구조화하는 과정을 따른다. 이후 동일한 운송 업무량 조건에서 분자 정의만을 달리한 여섯 가지 옵션을 적용하여 그 결과를 비교·분석하였다.

본 연구에서는 OPS 공급 전력량 890 MWh/year를 정박 중 보조기관 전력 생산을 대체하는 연간 전력량으로 가정하였다. 이 값은 이후 OPS credit 및 ΔCII 산정에 동일하게 적용하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.1 기준 조건에서의 옵션별 CII 비교

Fig. 4는 기준 조건에서 산출된 여섯 가지 대안 CII 지표를 비교한 결과이다. 배출 기반 지표(옵션 1-3)와 에너지 기반 지표(옵션 4-6)는 단위가 상이하므로, 각각 좌측 축($gCO_2e/ton \cdot nm$)과 우측 축($MJ/ton \cdot nm$)에 구분하여 제시하였다.

옵션 1은 $6.471 gCO_2e/ton \cdot nm$ 으로 산출되었으며, 옵션 2는 Not Under way 연료 사용을 제외함에 따라 $4.611 gCO_2e/ton \cdot nm$ 으로 감소하였다. 옵션 3은 OPS credit을 반영한 방식이나, 기준 조건에서 OPS 비중이 제한적이므로 옵션 1과의 차이는 크지 않다. 본 연구에서는 동일한 OPS 사용량, 전력망 배출계수 및 운송업무량을 적용하여 OPS 효과를 산정하였다.

본 연구에서 적용한 OPS 전력의 배출계수는 $400 gCO_2e/kWh$ 로, 이는 국제적으로 보고된 전력망 평균 배출

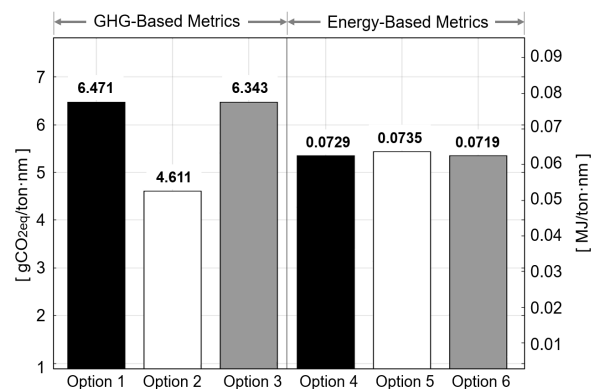


Fig. 4. Comparison of emission-based and energy-based CII metrics under baseline condition

강도 범위(약 300-500 gCO₂e/kWh)에 해당하는 보수적 값이다.^[16] 그러나 전체 배출량에서 연료 연소가 차지하는 비중이 압도적으로 크기 때문에, OPS 전력 사용에 따른 배출 기여도는 상대적으로 제한적이다. 그 결과 OPS 효과는 그 규모가 충분히 크지 않은 한 지표에 미치는 영향이 제한적임을 확인할 수 있다.

에너지 기반 지표(옵션 4-6)는 0.0719-0.0735 MJ/ton·nm 범위로 산출되었으며, 연료 에너지 사용만을 반영한 옵션 5가 가장 높은 값을, OPS 전력을 차감한 옵션 6이 가장 낮은 값을 나타냈다. 이 결과는 운송업무량이 동일하고 총에너지 사용량의 변동이 제한적인 조건에서, 에너지 기반 지표가 비율 구조상 값의 변화 폭이 제한됨을 보여준다. 즉, 총에너지 규모의 변화가 작을수록 에너지 기반 지표는 배출 기반 지표에 비해 상대적으로 낮은 민감도를 가진다.

3.2 배출 기반 지표의 차이 요인

Fig. 5는 배출 기반 지표(옵션 1-3)의 차이를 구성 요소 별로 분해한 결과를 나타낸다. Fig. 5(a)에 따르면, 옵션 1의 배출량 중 Under way가 71.2%, Not Under way가 28.8%를 차지하며, 이는 기준 조건에서 약 30%의 배출이 비운항 상태에서 발생함을 보여준다.

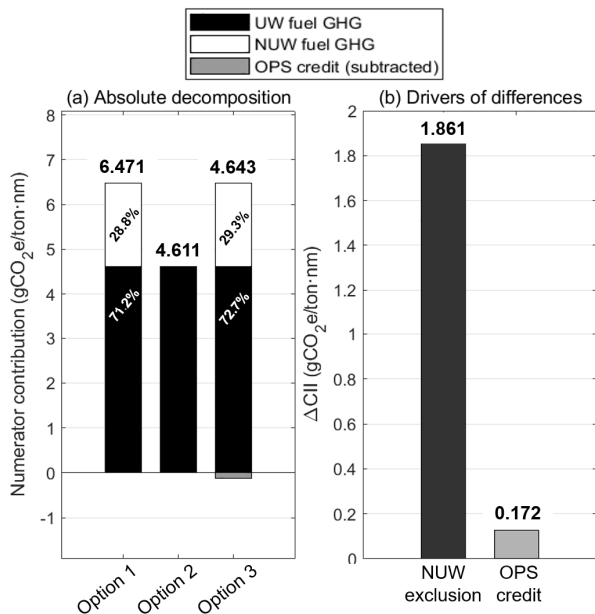


Fig. 5. Structural decomposition of emission-based CII numerator and marginal drivers across alternative metrics

옵션 2는 Not Under way 연료를 제외함에 따라 총값이 6,471에서 4,611 gCO₂e/ton·nm으로 감소하였다. 반면, 옵션 3은 OPS 배출 credit을 포함하나, 그 효과는 재산정된 ΔCII 값으로 통일하여 제시하였다.

Fig. 5(b)는 이러한 차이를 요인별로 정량화한 결과로, 옵션 1과 2의 차이(1,861 gCO₂e/ton·nm)는 전적으로 Not Under way 포함 여부에서 발생하는 반면, 옵션 1과 3의 차이(0,172 gCO₂e/ton·nm)는 OPS 차감 효과에 해당한다.

이러한 결과는 배출 기반 CII 지표의 변동이 OPS와 같은 보조적 감축 수단보다 운항 상태에 따른 경계 정의에 의해 결정됨을 보여준다. 즉, 분자 경계 설정이 지표 결과에 구조적으로 더 큰 영향을 미치며, OPS 효과는 그 비중이 충분히 확대되지 않는 한 제한적으로 나타난다. 이는 CII 지표 설계에서 지표상의 변화와 실제 배출 감축 효과를 구분하여 해석할 필요가 있음을 의미한다.

3.3 OPS 차감 효과의 구조적 민감도 분석

Fig. 6은 3.2절에서 도출된 OPS 차감 효과의 구조적 특성을 일반화하기 위해 수행한 민감도 분석 결과를 나타낸다. 3.2절에서는 OPS 효과가 Not Under way 포함 여부에 비해 상대적으로 제한적임을 확인하였으나, 이는 특정 기준 조건에 의존한 결과일 수 있다. 이에 따라 OPS 규모가 증가

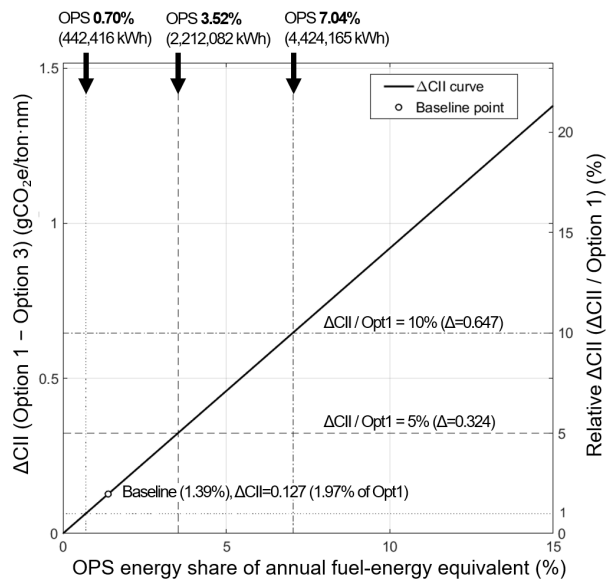


Fig. 6. Structural sensitivity of ΔCII (Option 1 vs Option 3) to OPS energy penetration

하는 경우에도 동일한 경향이 유지되는지를 검토하였다.

본 연구에서 OPS 비중은 보조기관 대체율이나 정박시간 비율이 아니라, 연간 총 에너지 사용량 대비 OPS 공급 전력량의 에너지 환산 비율로 정의하였다. 즉, OPS 비중은 선박의 연간 총 에너지 사용량 중 OPS가 차지하는 에너지 비중을 의미하며, 식 (2)와 같이 산정하였다.

$$OPS\ share(\%) = \frac{ELSUB\ OPS}{E_{total}} \times 100 \quad (2)$$

여기서 E_{OPS} 는 연간 OPS 공급 전력량을 에너지 단위로 환산한 값[MJ]이며, E_{total} 은 연료 및 비연료 에너지를 포함한 연간 총에너지 사용량[MJ]을 의미한다.

배출 기반 지표에서 옵션 3은 OPS를 선내 배출에서 단순 제외하는 방식이 아니라, 전체 배출량 산정 후 OPS credit을 차감하는 방식으로 정의된다. 따라서 옵션 3과 ΔCII 는 식 (3) 및 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Option3 = Option1 - \frac{OPSLSUBkWh \times OPS_{EF}}{D \times W} \quad (3)$$

$$\Delta CII = Option1 - Option3 \quad (4)$$

OPS_{kWh} : 연간 육상전력 사용량 [kWh]

OPS_{EF} : 전력망 배출계수 [gCO₂e/kwh]

$D \times W$: 연간 운송업무량 [ton·nm]

여기서 OPS_{kWh} 는 연간 육상전력 사용량[kWh], OPS_{EF} 는 전력망 배출계수[gCO₂eq/kWh], $D \times W$ 는 연간 운송 업무량[ton·nm]을 의미한다.

식 (3)과 식 (4)에 따르면, ΔCII 는 OPS credit으로 차감되는 배출 상당량을 운송업무량으로 나눈 값이다. 전력망 배출계수와 운송업무량이 일정할 경우, ΔCII 는 OPS 사용량에 선형적으로 비례한다. 또한 OPS 비중은 식 (2)에 따라 연간 총 에너지 사용량 대비 OPS 에너지 비율로 정의되므로, Fig. 6의 직선 형태는 OPS 비중 증가에 따른 ΔCII 의 선형적 변화를 나타낸다.

기준 조건에서 OPS 비중은 약 1.39%로 나타났다. 이에 대응하는 ΔCII 는 동일한 OPS 사용량, 전력망 배출계수 및 운송

업무량을 기준으로 산정하였다. 민감도 분석 결과, ΔCII 가 옵션 1의 5% 및 10% 수준에 도달하기 위해서는 각각 약 3.5% 및 7% 이상의 OPS 비중이 요구된다. 이는 OPS 비중이 일정 수준 이상 확보되지 않는 한, 지표 변화가 제한됨을 의미한다.

3.4 에너지 기반 CII 지표의 차이

앞선 절에서는 배출 기반 CII 지표의 차이를 분석하였으며, 본 절에서는 에너지 기준에서의 경계 설정이 지표에 미치는 영향을 분석한다.

에너지 기반 CII는 다음과 같이 정의된다.

$$CII_{Option5} = \frac{E_{Fuel}}{D \times W} \quad (5)$$

$$CII_{Option6} = \frac{E_{Fuel} - E_{Wind}}{D \times W} \quad (6)$$

$$CII_{Option4} = \frac{E_{Fuel} + E_{OPS} - E_{Wind}}{D \times W} \quad (7)$$

E_{Fuel} : 연간 연료 소비에 해당하는 에너지 [MJ]

E_{Wind} : 연간 풍력 보조 추진에 의한 에너지 [MJ]

E_{OPS} : 연간 OPS에 의해 투입된 에너지 [MJ]

$D \times W$: 연간 운송업무량 [ton·nm]

여기서 E_{Fuel} 은 연간 연료 소비에 해당하는 에너지[MJ]를 의미한다. E_{Wind} 는 외부에서 추가로 공급된 에너지가 아니라, 풍력 보조 추진으로 인해 주기관 연료 사용을 대체한 등가 에너지 절감량[MJ]으로 정의하였다. 즉, 동일한 운송 업무량을 수행하는 조건에서 풍력 보조 추진이 기여한 만큼 연료 에너지 사용이 감소한 것으로 간주하였다. E_{OPS} 는 연간 OPS 공급 전력량을 에너지 단위로 환산한 값[MJ]이다.

식 (5)는 연료 소비에 해당하는 에너지만을 고려한 경우이며, 식 (6)은 풍력 보조 추진에 따른 등가 에너지 절감량을 반영한 경우이다. 식 (7)은 연료 에너지와 OPS 에너지를 함께 고려하되, 풍력 보조 추진에 따른 등가 에너지 절감량을 차감한 경우이다. 따라서 옵션 4, 5 및 6의 차이는 연료 에너지, OPS 에너지 및 풍력 보조 추진의 반영 여부에 따라 발생한다.

위 식으로부터 옵션 4와 6의 차이는 다음과 같이 정리된다.

$$\Delta CII_{Option\ 4-6} = \frac{E_{OPS}}{D \times W} \quad (8)$$

옵션 4와 옵션 6의 차이는 OPS 에너지 포함 여부에 의해 결정된다. Fig. 7은 이러한 차이를 시각화한 것으로, 연료만 고려한 경우(옵션 5), 풍력 차감을 포함한 경우(옵션 6), 그리고 OPS까지 포함한 경우(옵션 4)를 비교한다. 중심값은 각 옵션의 계산 결과이며, 오차 범위는 에너지 변동 가능성을 반영한다.

결과적으로 옵션 간 절대적 차이는 $\Delta CII \approx 0.00102$ 수준으로 제한적이나, 그러나 이 결과는 에너지집약도 기반 보조지표가 OPS, 풍력 보조 추진 등 비연료 에너지의 포함 범위, 즉 에너지 경계 정의에 따라 값이 달라지는 구조를 가진다는 점을 보여준다. 따라서 동일한 선박이라도 에너지 경계 설정 방식에 따라 서로 다른 평가 결과가 도출될 수 있으며, 에너지 기반 지표를 활용할 경우 비연료 에너지의 처리 원칙을 명확히 정의할 필요가 있다.

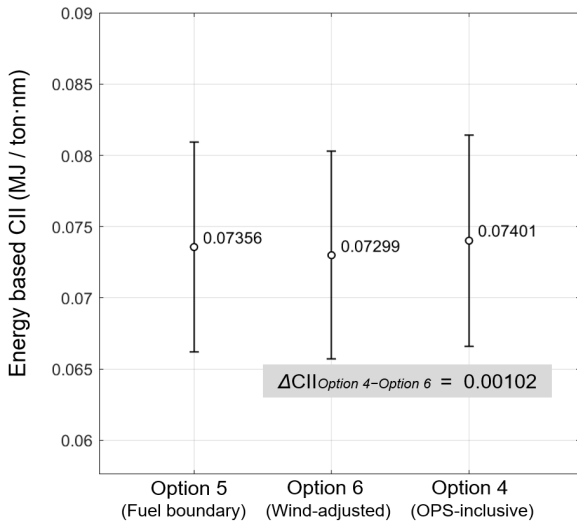


Fig. 7. Impact of boundary on energy-based CII values

4. 결론

본 연구는 개정된 DCS 자료와 GFI 분석 프레임워크를 기반으로, 벌크선 1척의 연간 운항자료를 활용하여 배출량 기반

CII 대안 지표와 에너지집약도 기반 보조지표를 비교·분석하였다. 본 연구의 기준 선박, 운항 조건, OPS 사용량, 전력망 배출계수 및 풍력 보조 추진 가정의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) CII 지표의 변동은 OPS와 같은 기술적 요소보다 운항 구간의 포함 범위, 즉 경계 정의에 의해 더 크게 좌우된다. 이는 선박의 실제 운항 성과와 무관하게, 적용된 계산 기준에 따라 평가 결과가 달라질 수 있음을 의미하며, CII의 한계가 기술이 아닌 지표 설계 방식에 기인함을 보여준다.
- (2) Not Under way 포함 여부는 1,861 gCO₂e/ton·nm의 변화를 유발하는 반면, OPS 효과는 동일 입력조건에 따라 재산정한 ΔCII 값으로 통일하였으며, Not Under way 포함 여부에 따른 영향보다 제한적으로 나타났다.
- (3) 에너지집약도 기반 보조지표는 OPS, 풍력 보조 추진 및 연료 에너지의 포함 범위에 따라 서로 다른 결과를 보였다. 이는 에너지 기반 지표를 보조지표로 활용할 경우, 에너지 경계와 비연료 에너지 처리 원칙을 사전에 명확히 정의할 필요가 있음을 의미한다.

References

- [1] International Maritime Organization (IMO), 2023, “2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships”, Resolution MEPC.377(80), IMO, <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2015.pdf>.
- [2] International Maritime Organization (IMO), 2021, “Amendments to MARPOL Annex VI (Regulations on Carbon Intensity Indicator (CII))”, Resolution MEPC.328(76), IMO, <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.328%2876%29.pdf>.
- [3] International Maritime Organization (IMO), 2021, “2021 Guidelines on Operational Carbon Intensity Indicators and the Calculation Methods (CII Guidelines, G1)”, Resolution MEPC.336(76), IMO, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.336\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.336(76).pdf).

- [4] Kim, B.R., and Cheon, J., 2025, “Impact of reducing waiting time at port berths on CII rating: Case study of Korean-flagged container ships calling at Busan New Port”, *J. Mar. Sci. Eng.*, **13**(9), 1634.
- [5] Chartomatzidis, S., 2024, “An insight into the new EEXI/CII regulations under a critical evaluation of their current/future limitations followed by the development of a practical model for CII monitoring”, M.S. thesis, University of Piraeus, Piraeus, Greece.
- [6] Yuan, Q., Wang, S., and Peng, J., 2023, “Operational efficiency optimization method for ship fleet to comply with the Carbon Intensity Indicator (CII) regulation”, *Ocean Eng.*, **286**, 115487.
- [7] Kim, M., Lee, J.Y., An, S., and Hwang, D.J., 2024, “Proposals on effective implementation of the carbon intensity indication of ships”, *J. Mar. Sci. Eng.*, **12**(11), 1906.
- [8] International Maritime Organization (IMO), 2024, “Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as Modified by the Protocol of 1978 Relating Thereto (Amendments to MARPOL Annex VI)”, Resolution MEPC.385(81), IMO, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.385\(81\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.385(81).pdf).
- [9] Bayraktar, M., Bayramoglu, K., and Yuksel, O., 2026, “Evaluating the greenhouse gas fuel intensity of marine fuels under the maritime net-zero framework”, *Sustainability*, **18**(1), 184.
- [10] Zhang, J., Zhang, Z., and Liu, D., 2024, “Comparative study of different alternative fuel options for shipowners based on Carbon Intensity Index model under the background of green shipping development”, *J. Mar. Sci. Eng.*, **12**(11), 2044.
- [11] Kim, H., Yeo, S., Lee, J., and Lee, W.J., 2023, “Proposal and analysis for effective implementation of new measures to reduce the operational carbon intensity of ships”, *Ocean Eng.*, **280**, 114827.
- [12] Fan, L., Zhang, X., Wang, Y., and Wu, L., 2025, “Improving Carbon Intensity Indicator performance for sustainable shipping compliance”, *Marit. Policy Manag.*, 1-19, <https://doi.org/10.1080/03088839.2025.2588319>.
- [13] Li, L., Wang, Y., Liu, J., Chen, J., and Yang, W., 2025, “Evaluating the fairness and effectiveness of the IMO Carbon Intensity Indicator for container ships”, *Marit. Policy Manag.*, 1-19, <https://doi.org/10.1080/03088839.2025.2556721>.
- [14] Rauca, L., Popa, C., Atodiresei, D., and Nedelcu, A.T., 2025, “Port performance and its influence on vessel operating costs and emissions”, *Logistics*, **9**(3), 122.
- [15] Georgiev, P., Garbatov, Y., and Yalamov, D., 2025, “Impact of CII regulations on vehicle carriers”, *Innovations in Sustainable Maritime Technology: IMAM 2025*, pp. 87-101, https://doi.org/10.1007/978-3-032-01620-1_7.
- [16] International Energy Agency (IEA), 2025, “Electricity 2025: Emissions”, Accessed 14 May 2026, <https://www.iea.org/reports/electricity-2025/emissions>.