

선상 이산화탄소 포집 기술과 탄소중립 연료의 비교 분석: IMO 중기조치 전망과 비용 분석을 통한 경쟁우위 고찰

이성엽¹ · 조맹익² · 강성길³ · 허 철^{4,†}

¹선박해양플랜트연구소 국제해사기술센터 선임연구원

²선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업지원센터 책임연구원

³선박해양플랜트연구소 국제해사기술센터 책임연구원

⁴국립한국해양대학교 해양과학기술융합학과 교수

Comparative Analysis of Onboard Carbon Capture Technology and Carbon-Neutral Fuels: Insights into IMO Mid-term Measures and Cost Competitiveness

Seong-yeob Lee¹, Meangik Cho², Seong-Gil Kang³, and Cheol Huh^{4,†}

¹Senior Researcher, International Maritime Research Center,
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), Daejeon 34103, Korea

²Principal Researcher, Offshore Industries R&BD Center,
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), Geoje 53201, Korea

³Principal Researcher, International Maritime Research Center,
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), Daejeon 34103, Korea

⁴Professor, Department of Convergence Study on Ocean Science and Technology,
NATIONAL, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약

국제해사기구(IMO)는 2023년 제80차 해양환경보호위원회(MEPC)에서 2050년경까지 국제해운의 탄소중립(Net Zero) 달성을 목표로 하는 선박 GHG 감축 개정 전략을 채택하였다. 이러한 목표를 달성하기 위해, IMO는 선박 연료표준제, 대체 준수 방안, 그리고 탄소부담금 도입을 포함한 중기조치를 심도 있게 검토 중이다. 기술적 측면에서는 그린 메탄올, 그린 암모니아 등 다양한 탄소중립 연료의 도입과 함께, 선상 탄소 포집 및 저장(Onboard Carbon Capture and Storage, OCCS) 기술이 대두되고 있으며, 이 기술의 규제 프레임워크 수립을 위한 작업계획(Work Plan)도 논의되고 있다. 본 연구에서는 IMO MEPC에서 논의 중인 중기조치가 OCCS 기술에 미치는 영향을 15,000 TEU급 컨테이너선을 대상으로 한 사례 연구를 통해 심층적으로 분석하고, OCCS 기술의 경제성 확보 시점을 예측하였다. 또한, OCCS와 함께 국제해운 탄소중립 방안으로 주목 받고 있는 탄소중립 연료(그린 암모니아, 그린 메탄올)의 비용 예측 연구 결과를 종합적으로 검토하고, 이를 바탕으로 OCCS 기술이 탄소중립 연료에게 비용적 측면에서 경쟁우위를 가지는 경제성 기준을 도출하였다.

Abstract – In 2023, the International Maritime Organization (IMO) adopted the revised GHG reduction strategy at the 80th session of the Marine Environment Protection Committee (MEPC), targeting Net Zero in international shipping by or around, i.e. close to 2050. To achieve this ambitious goal, the IMO is currently deliberating mid-term measures, including the establishment of GFS(Goal-based Fuel Standard), FCM(Flexible Compliance Mechanism), and the introduction of a GHG levy. On the technological front, the focus has shifted towards the adoption of various carbon-neutral fuels, such as green methanol and green ammonia, alongside the emerging OCCS (Onboard Carbon Capture and Storage) technology. A work plan is being developed to establish a regulatory framework for OCCS, which is expected to significantly influence the commercialization and deployment of this technology in the coming years. This study conducts an in-depth analysis of the impact of mid-term measures under discussion at the IMO MEPC on OCCS technology, using a case study of a 15,000 TEU container ship. It also aims to

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

forecast the timeline for OCCS technology to achieve economic feasibility. Additionally, this research examines the projected costs of carbon-neutral fuels, such as green ammonia and green methanol, which are also being considered as key solutions for achieving carbon neutrality in international shipping. Based on this analysis, the study derives the relative economic criteria for OCCS, enabling it to compete effectively with these carbon-neutral fuels.

Keywords: IMO(국제해사기구), Onboard carbon capture and storage(선상 탄소포집 및 저장), Greenhouse gas(온실가스), Alternative fuels(대체연료), Cost analysis(비용 분석)

1. 서론

2023년 7월, 국제해사기구(IMO) 제80차 해양환경보호위원회(MEPC)에서는 2050년경까지 국제해운 탄소중립을 목표로 하는 2023 IMO GHG Strategy가 채택되었다(IMO Secretariat[2023a]; Resolution MEPC.377(80)). 이후 MEPC에서는 상향된 선박 온실가스 감축 목표를 이행하기 위해 필요한 중기조치(Mid-term Measures)를 선정하는 작업을 하고 있으며, 기술적 조치와 경제적 조치가 결합된 형태로 논의되고 있다. 기술적 조치로는 선박 연료의 온실가스 배출 잠재량을 규제하는 연료표준제(Goal-based Fuel Standard, GFS)와 함께 대체 준수 방안(Flexible Compliance Mechanism, FCM)이 EU를 중심으로 제안되었다. FCM은 GFS 준수 여부에 따라 대상 선박이 인센티브 또는 페널티를 받을 수 있는 제도이며, GFS와 함께 선박 대체연료의 전환을 가속화시킬 수 있는 조치로 예상된다. 또한 온실가스 배출을 비용으로 인식하도록 하여 감축을 유도하는 경제적 조치도 함께 논의되고 있으며 절대 배출량에 탄소부담금(GHG Levy)을 부과하는 형태가 대표적이다. 향후 GFS, GHG Levy 등의 중기조치가 도입되어 다변화될 대체 연료의 전과정(Well to Wake) 온실가스 배출량을 평가하기 위해 연료유 전과정 평가 지침서(Life Cycle Assessment Guideline, LCA Guideline)가 함께 개발되고 있으며, 선박 연료의 생산, 운송, 사용 전 과정에서 배출되는 온실가스(이산화탄소, 메탄, 아산화질소)양이 정량화되어 생산부터 사용까지의 경로별 배출계수가 산정되고 있다(IMO Secretariat[2024a]; IMO Secretariat[2024b]).

앞서 언급한 국제해운 2050 탄소중립을 실현하기 위해서는 현재 사용되고 있는 선박 연료의 대부분이 무탄소 또는 탄소중립(Carbon-neutral) 연료로 전환되어야 한다. 그러나 클락슨(Clarksons)의 최신 데이터에 따르면, 추진기술의 성숙도와 연료 공급 및 병커링 인프라 구축 현황을 고려할 때, 대체연료 기반의 선박 전환 속도는 여전히 제한적이다. 2023년 기준 클락슨의 Order book 데이터를 보면, LNG(Liquefied Natural Gas)와 메탄올 연료를 채택한 신규 발주 선박이 증가하고 있지만, 전체 선대에서 차지하는 비율은 전 세계 선대 선복량의 5% 수준으로 여전히 소수에 불과하다(Mandra[2023]; Gordon[2024]). 이러한 데이터는 해운분야 연료 전환이 아직 초기 단계에 있음을 시사한다. 이렇듯 탄소중립 연료의 공급이 단기간 내 확장되기 어려운 현실점에서 전통 화석연료 추진 선박에 탑재하여 이산화탄소를 감축할 수 있는 선상 이산화탄소 포집 및 저장(Onboard Carbon Capture and Storage, OCCS) 기술이 많은 관심 속에 개발되고 있으며, IMO 회원국들도 실무작업반(Correspondence Group,

CG)을 통해 OCCS 관련 IMO 규제 체계 개발을 위한 작업계획을 수립하고 있다(IMO Secretariat[2024a]; IMO Secretariat[2024c]). 이러한 흐름 가운데 Lee *et al.*[2023]은 탄소중립 연료의 기술성숙도와 가용성의 한계점을 언급하면서 IMO 온실가스 단기조치를 기반으로 OCCS 기술 도입 필요성을 강조한 바 있다. 또한, 해당 연구에서는 현재 단계에서 OCCS 기술의 연구 개발 방향을 흡수제 선정, 열통합 기술, 탈수·액화·저장 기술, 경제성 확보, 선박 운동 영향도 분석, 선종별 배치 최적화 등으로 구분하여 제시하였다.

본 연구는 국제해운의 탈탄소화를 위한 OCCS 기술의 역할과 향후 전망을 IMO 온실가스 중기조치를 기반으로 분석한다. 특히 IMO MEPC에서 현재 후보군으로 논의되고 있는 중기조치를 분석하고 OCCS 기술에 미치는 영향을 정량적으로 평가함으로써 OCCS 기술이 경제성을 확보할 수 있는 시점을 예상하였다. 또한, 최근 주목받고 있는 탄소중립 연료의 비용 예측 연구 결과를 종합적으로 분석함으로써, OCCS 기술이 탄소중립 연료에게 비용적 측면에서 경쟁우위를 가지는 경제성 기준을 도출하였다.

2. 선상 이산화탄소 포집 기술 관련 IMO MEPC 논의 동향

2.1 국제해운 탈탄소화를 위한 선상 이산화탄소 포집시스템의 역할과 전망

IMO 사무국(Secretariat)은 국제해운의 탈탄소화와 IMO 온실가스(GHG) 감축 개정전략 수립을 지원하기 위해 2022년 9월, RICARDO社와 DNV 선급을 통해 “저탄소 및 무탄소 해운을 위한 미래 연료 및 기술 프로젝트(Future Fuel and Technology Project)”를 수행하였다. 해당 프로젝트의 주요 연구 결과는 MEPC 80/INF.10 문서로 요약되어 제출되었으며, 이는 향후 IMO 선박 온실가스 감축 조치 논의에서 중요한 의사결정의 근거 자료로 활용될 가능성이 높다(IMO Secretariat[2023b]). 이 보고서에서는 선박 에너지 효율 개선 기술, 대체 연료 기반 추진 기술, 그리고 OCCS의 기술 성숙도(Technology Readiness Level, TRL)를 평가하였으며, 미래 연료의 가용성 또한 분석되었다. 추진 기술의 성숙도와 연료 공급망의 가용성을 종합적으로 분석한 결과, 2050년에도 상당량의 화석연료가 여전히 사용될 것으로 전망되었으며, 이에 따라 화석연료와 병행하여 OCCS 기술의 도입이 필수적이라는 결론이 도출되었다. Fig. 1은 2030년, 2040년, 2050년의 연도별 예상 연료 시나리오를 나타내고 있다. 분석 결과에 따르면, 화석연료 및 바이오연료와 함께 사용될 OCCS의 기여도는 2030년 약 14.7%, 2040년 약 42.1%, 2050

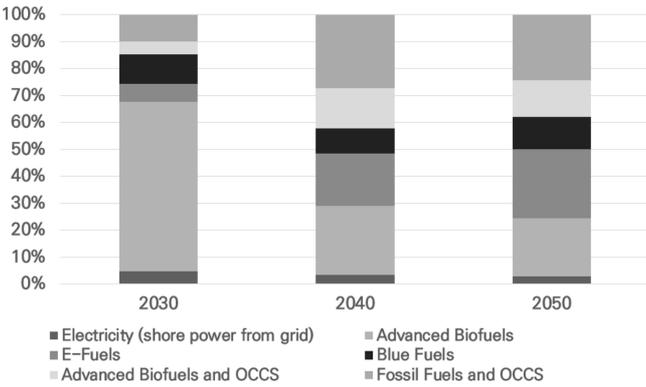


Fig. 1. Candidate fuel usage scenarios for ship decarbonization.

년 약 37.9%로 전망되었다. 이는 OCCS 기술이 향후 해운산업의 탈탄소화를 위한 핵심적인 기술로 작용할 수 있음을 시사한다.

또한, IMO는 선박 온실가스 감축전략 및 영향평가 절차서에 따라 후보 중기조치에 대한 종합영향평가를 수행하였다(IMO Secretariat[2023c]). 운영위원회는 32개국으로 구성(2023년 8월)되었으며 MEPC 부의장이 사퇴를 맡아 10개월 동안 1차(2023년 9월)~11차(2024년 7월)에 걸쳐 과업 수행기관들과 종합영향평가를 진행하였다. 총 5개의 과업 중 DNV 주도로 수행된 과업 2에서는 온실가스 감축 목표 달성 궤적에 따라 32개 시나리오를 개발하고 연료 및 대안 기술이 비용 측면에서 선대에 미치는 영향이 분석되었다. 과업 2 결과보고서에 따르면, OCCS가 탄소중립연료와 함께 2050 국제해운 탄소중립 실현을 위한 핵심 솔루션으로 평가되고 있다(IMO Secretariat[2024d]).

2.2 선상 이산화탄소 포집 관련 IMO MEPC 논의 동향

OCCS와 같은 신기술이 시장에 성공적으로 도입되기 위해서는 기술 자체의 개발뿐만 아니라, 해당 기술의 온실가스 감축 효과가 국제 규제 프레임워크에 명확히 반영되는 것이 필수적이다. 현재 IMO 해양환경보호위원회(MEPC)에서는 OCCS 기술의 온실가스 감축 효과를 객관적으로 입증하기 위한 다양한 방안이 심층적으로 검토되고 있다. OCCS 기술과 관련된 선박 온실가스 감축 조치(Measure)는 단기(Short term), 중기(Mid-term), 장기(Long-term)으로 구분할 수 있다. 현재 시행중에 있는 대표적인 단기조치는 신조선에 적용되는 에너지효율설계지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI), 현존선에 적용되는 에너지효율지수(Energy Efficiency eXisting Ship Index, EEXI), 그리고 운항 단계에서의 선박 탄소집약도 지수(Carbon Intensity Indicator, CII) 등이 있다. 특히, EEDI 및 EEXI 지수에 OCCS의 이산화탄소(CO₂) 저감 효과가 반영될 경우, 단기간 내에 OCCS를 탑재한 신조선 및 기존 선박의 개조(Retrofit) 수요가 증가하여 시장이 확대될 것으로 예상된다. 이는 국내 조선소 및 관련 기자재 업체들의 매출 증대와 수주 경쟁력 향상에 기여할 수 있는 실질적인 영향을 미칠 것으로 기대된다.

대한민국은 2021년 MEPC 76차 회의부터 신조선 및 현존선에

OCCS를 적용하여 감축 수단으로 인정받을 수 있도록, EEDI, EEXI, CII 산식 등 IMO 단기조치에 OCCS의 CO₂ 저감 효과를 반영하기 위해 지속적으로 노력해왔다(The Republic of Korea[2021a]; The Republic of Korea[2021b]; The Republic of Korea[2022a]; The Republic of Korea[2022b]; The Republic of Korea *et al.*[2023]). 일본, 중국, 노르웨이, 라이베리아와 같은 회원국들과 국제해운회의소(ICS), 국제선급협회(IACS) 등이 대한민국의 제안을 지지하고 있으나, 미국과 EU를 중심으로 한 반대 의견도 강하게 제기되고 있다. 반대 의견을 제시한 국가들은 OCCS 기술의 생애주기를 포함한 전 과정 평가가 필수적이라고 강조하며, 선상에서 포집된 CO₂가 영구저장 설비로 운송되어야만 해당 감축 효과를 인정할 수 있다는 입장이다. 또한, EEDI와 EEXI는 본래 선박의 에너지 효율성을 평가하기 위한 지표로서, OCCS 기술의 효과를 단기조치 산식에 직접 반영하는 것은 적절하지 않다고 주장하고 있다. 다만, 미국과 영국을 포함한 일부 국가들은 운항적 조치인 CII에 OCCS 효과를 반영하는 방안에는 긍정적인 입장을 보이고 있다(IMO Secretariat [2024a]; IMO Secretariat[2024c]). 이러한 논의는 OCCS 기술의 규제 수용성을 높이기 위한 중요한 과제로, 향후 기술의 실질적인 도입에 결정적인 영향을 미칠 것으로 전망되기에 대표단의 적극적인 대응활동이 요구된다.

최근 MEPC에서는 선박 연료 전환을 위한 중기조치에 대해 활발한 논의가 이루어지고 있으며, 해당 중기조치는 OCCS 기술 도입에 많은 영향을 줄 것으로 예상된다. 현재 주요하게 논의되고 있는 선박 온실가스 감축 중기조치 후보군으로는 연료표준제(Goal-based Fuel Standard, GFS), 대체 준수 방안(Flexible Compliance Mechanism, FCM), 그리고 탄소부담금(GHG Levy)이 포함되어 있다. GFS는 각 선박 연료가 1 MJ의 에너지를 생성할 때 발생하는 온실가스 배출 잠재량을 ton CO₂eq/MJ 단위로 정량화하고, 이 배출 기준을 단계적으로 강화하는 연료 규제이다. 이러한 중기조치의 연료 평가 체계는 IMO에서 개발 중인 연료유 전과정 평가(Life Cycle Assessment, LCA) 지침서를 근거로 하고 있으며, 현재 LCA 지침서의 산식에는 OCCS의 탄소 감축 효과가 반영되어 있다(RESOLUTION MEPC.391(81)). MGO(Marine Gasoil), LNG와 같은 화석연료를 지속적으로 사용하는 선박들은 향후 GFS 규제를 준수하기 어려워질 가능성이 높으며, Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 초과 준수 선박으로부터 SCU(Surplus Compliance Unit)를 구매하거나 관리처를 통해 RCU(Remedial Compliance Unit)를 구매해야 하는 상황이 발생할 수 있다. 현재 논의된 바에 따르면, 선상에서 포집된 CO₂가 영구저장 설비로 안전하게 운송될 경우, GFS 및 FCM 프레임워크에서 OCCS의 포집 효과를 인정받을 수 있다. 이를 통해 OCCS를 탑재한 선박은 SCU 판매 또는 RCU 구매 부담 경감을 통해 경제적 인센티브를 얻을 수 있을 것으로 전망된다(EU&Japan[2024]).

한편, GFS 체계와는 별개로 절대 온실가스 배출량을 기준으로 세금(\$/ton CO₂eq)을 부과하는 탄소부담금(Levy) 도입에 대한 논의도 병행되고 있으나, 선진국과 군소도서국 및 개발도상국 간 의견 차이가 여전히 좁혀지지 않고 있다. Levy가 도입될 경우에도 OCCS

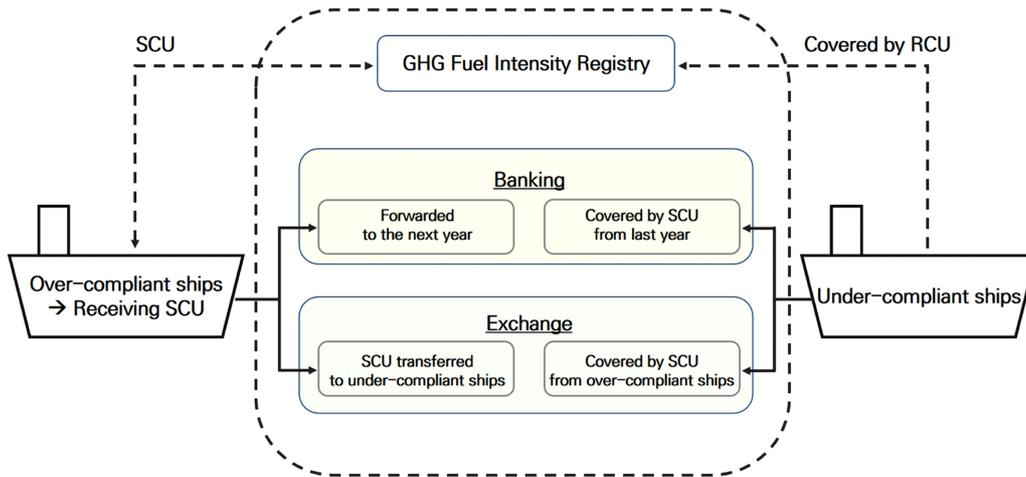


Fig. 2. Flexible Compliance Mechanism currently under discussion at IMO.

기술로 인한 CO₂ 저감 효과를 인정받을 가능성이 높으며, 이에 따라 포집된 CO₂의 양은 Levy 계산에서 제외될 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 경제적 인센티브와 규제 혜택은 OCCS 기술의 상용화와 적용 확대를 촉진할 수 있는 중요한 요인이 될 것이다.

Fig. 3은 선상에서 포집된 CO₂가 육상에서 처리되는 두 가지 주요 경로인 경로①과 경로②를 도식화한 것이다. 앞서 언급한 OCCS 기술과 관련된 CO₂ 크레딧은 포집된 CO₂가 영구저장 설비로 안전하게 운송 및 저장된다는 전제하에 인정된다(경로①). 반면, 포집된 CO₂가 e-Fuel과 같은 탄소중립 연료의 원료(Feedstock)로 사용되는 경우(경로②), CO₂의 직접적인 감축 크레딧은 OCCS를 탑재한 선박에 귀속되지 않을 가능성이 크다. 이 경우, 선박은 포집된 CO₂를 원료로 판매함으로써 경제적 수익을 창출할 수 있으며, 기존에 폐기물로 간주되었던 CO₂가 탄소중립 연료 생산에 활용될 때의 시장 가격이 결정적인 요소가 될 수 있다. 현재 논의되고 있는 체계에 따르면, 경로②에서 CO₂를 원료로 활용할 경우 해당 CO₂ 크레딧은

e-Fuel을 사용하는 선박에 할당될 것으로 보인다. 본 연구는 OCCS 탑재 선박이 CO₂ 크레딧을 획득할 수 있는 경로①에 한정하여 연구를 수행하였으며, 이에 따른 경제적 영향을 분석하였다.

3. 선상 이산화탄소 포집 기술의 경제성 기준

그린 메탄올, 그린 암모니아 등 차세대 친환경선박에 적용 가능한 탄소중립 연료 기술의 개발 현황과 향후 보급 전망을 고려했을 때, OCCS 기술은 강화된 IMO 온실가스 감축 규제에 대응하기 위한 필수 기술로 평가된다(IMO Secretariat[2023b], IMO Secretariat[2024d], Lee et al.[2023]). 본 장에서는 선박 온실가스 감축을 위한 IMO 중기조치 논의의 동향을 토대로 중기조치가 OCCS 기술의 적용과 상용화에 미치는 영향을 정량적으로 분석함으로써, OCCS 기술의 경제적 타당성을 체계적으로 평가하였다. 또한, OCCS와 함께 국제해운 탄소중립 방안으로 주목 받고 있는 그린 암모니아, 그린 메탄올의

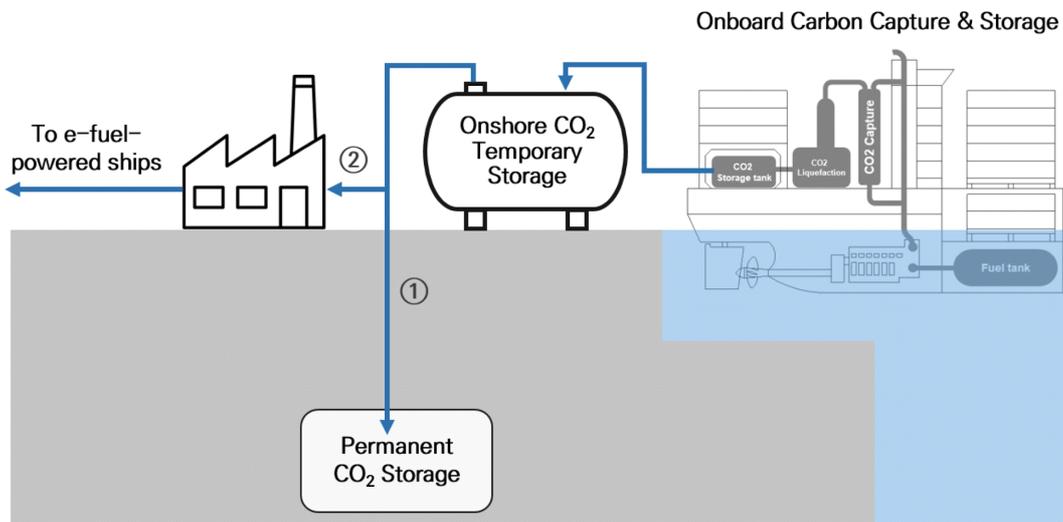


Fig. 3. CO₂ credit system for OCCS under discussion at IMO.

가격 전망을 분석하고, 이러한 분석을 바탕으로 OCCS 기술이 탄소중립 연료에게 비용적 측면에서 경쟁우위를 가지는 경제성 기준을 도출하였다.

3.1 IMO 중기조치를 고려한 탄소기반 기존 연료와 OCCS의 경제성 비교 분석

온실가스 집약도(GHG Fuel Intensity, GFI)는 선박 연료의 잠재적 온실가스 배출량을 정량화하는 지표로 현재 IMO에서 LCA 가이드라인 논의를 통해 개발되고 있다. 요구 온실가스 집약도(Required GFI)는 현재 논의 중에 있지만, '2023 IMO GHG Strategy'의 감축 목표를 달성하기 위한 필수 경로(2030년까지 GHG 배출량 최소 20% 감축, 2040년까지 GHG 배출량 최소 70% 감축)로 설정하는 방향으로 회원국 간의 공감대가 형성되고 있다(2023 IMO GHG 감축전략). Fig. 4는 EU 및 일본에서 제안한 요구 GFI를 기본 목표(Base)와 노력 목표(Strive)로 구분하여 시각적으로 보여준다(EU&Japan [2024]).

IMO MEPC에서는 요구 GFI를 준수하지 못하는 선박이 구매해야 하는 RCU와, 온실가스 절대 배출량을 기준으로 부과되는 GHG Levy 체계가 동시에 논의되고 있다. 특히, EU 국가들과 군소도서국들은 앞서 Fig. 2에 도시된 RCU 및 SCU를 포함한 GFS 대체 준수 방안(FCM)뿐만 아니라, 온실가스 절대 배출량에 대한 추가적인 탄소부담금(GHG Levy, \$/ton CO₂eq) 도입의 필요성을 지속적으로

Table 1. Assumptions of Price of Remedial Compliance Unit and GHG Levy

년도	Remedial Compliance Unit (\$/ton CO ₂ eq)	GHG Levy (\$/ton CO ₂ eq)
2027	350	150
2030	300	200
2040	250	250
2050	200	300

제기하고 있다. 본 연구에서는 FCM 체계의 RCU와 GHG Levy의 추정 가격을 바탕으로, 15,000 TEU급 컨테이너 선박이 화석연료를 사용하여 운항했을 때 발생할 수 있는 예상 패널티를 정량적으로 분석하였다. RCU의 가격은 적격 연료(Eligible Fuel)와 화석연료 간의 가격 차이에 따라 결정될 예정이며, 시간이 지남에 따라 그 차이가 축소되어 가격이 감소하는 것으로 가정하여 설정하였다(IMO Secretariat[2023d]; IMO Secretariat[2024d]). GHG Levy는 초기 단가를 톤당 \$150/ton CO₂eq로 설정하고, 2050년까지 톤당 \$300/ton CO₂eq로 점진적으로 증가하는 시나리오를 가정하였다. 해당 시나리오를 Table 1에 나타내었으며, 이는 중기조치 종합영향평가에서 고려된 여러 시나리오 중 하나이다. IMO MEPC에서는 아직 구체적인 규제 수준이 결정되지 않았고 현재 논의가 진행 중이다(IMO Secretariat[2023d]; IMO Secretariat[2024d]).

Fig. 5는 전통 화석연료를 대표하는 4가지 연료(HSHFO, VLSFO,

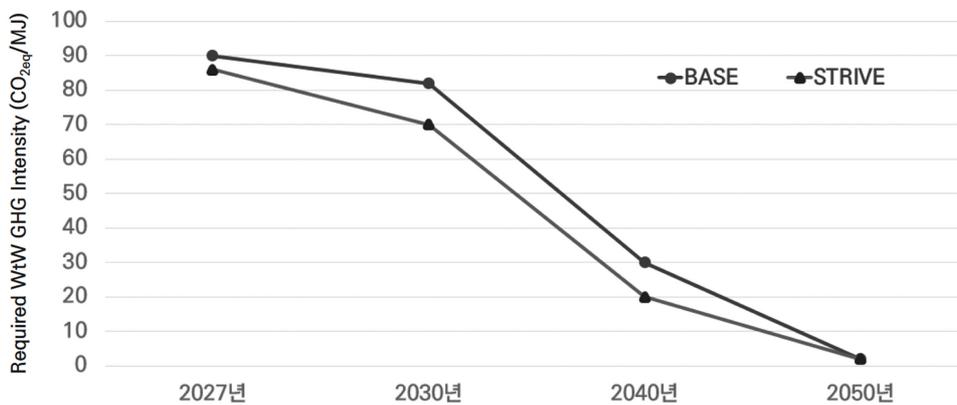


Fig. 4. Expected Required Well to Wake GHG Intensity.

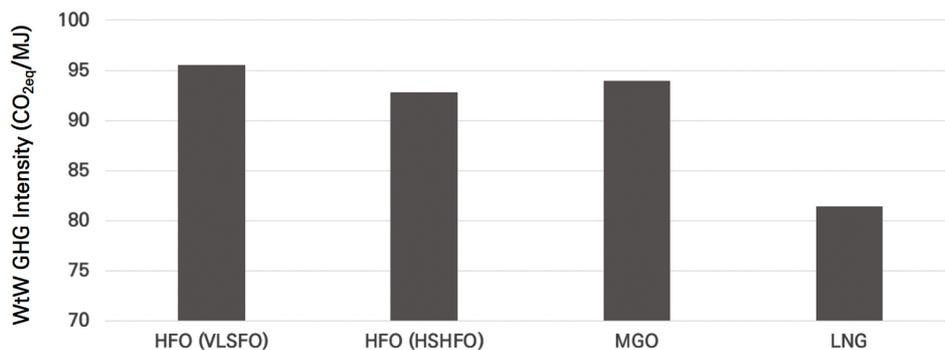


Fig. 5. Expected Well to Wake GHG Intensity for conventional fossil fuels.

MGO, LNG)의 Well to Wake 온실가스 집약도를 보여준다. HSHFO, VLSFO, MGO의 온실가스 집약도는 IMO LCA(Life Cycle Assessment) 가이드라인을 참고하였으나, 현재 IMO 차원에서 LCA 가이드라인은 아직 최종 확정되지 않았으며, 연료별 전과정(Well-to-Wake) 온실가스 배출 집약도와 관련한 검토 작업이 GESAMP (Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection) 그룹에 위임된 상태이고 2025년 4월 MEPC 83차 회의에 초안이 보고될 예정이다. 따라서 HSHFO, VLSFO, MGO의 온실가스 집약도는 IMO LCA 가이드라인을 참고하였고, 다만 LNG의 온실가스 배출 집약도 값 도출을 위해 EU의 관련 규제인 FuelEU Maritime를 참고하였다(RESOLUTION MEPC.391(81); Solutions for Our Climate[2024]).

Levy와 FCM의 영향을 정량적으로 평가하기 위해, 본 연구에서는 15,000 TEU급 컨테이너 선박을 대상으로 GFS 기준 미준수 시 예상되는 페널티(RCU)와 Levy 금액을 산출하였다. LNG를 연료로 사용하는 15,000 TEU급 컨테이너 선박은 약 4.3 ton/hr의 LNG 소비를 기준으로 하였다. VLSFO, HSHFO, MGO의 사용량은 각 연료의 발열량에 따라 Table 2와 같이 환산할 수 있다. 또한, 각 연료의 사용(Tank to Wake) 단계에서 발생하는 CO₂ 배출량은 IMO LCA 가이드라인에 명시된 배출계수를 적용하여 산출하였다(RESOLUTION MEPC.391(81)). 이 분석은 연료별 경제적 부담을 체계적으로 비교하고, 선박 온실가스 중기조치가 초래하는 비용적 영향을 평가하여 OCCS 기술의 경제적 타당성을 결정하는 데 기여하는 것을 목표로 하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 요구 GFI가 기본 목표(Base)와 노력 목표

(Strive) 시나리오(Fig. 4)를 따를 경우, 15,000 TEU급 컨테이너 선박이 VLSFO, HSHFO, MGO, LNG와 같은 전통 화석연료를 지속적으로 사용할 때 예상되는 RCU 구매 비용과 GHG Levy 지불 금액을 나타낸다. 탄소중립 연료의 시장 가격이 시간이 지남에 따라 안정화될 것으로 예상하여 RCU 가격이 점진적으로 감소하는 시나리오를 설정했음에도 불구하고(Table 1), 요구 GFI(온실가스 집약도) 목표와 화석연료의 온실가스 배출량 사이의 격차가 점차 확대됨에 따라, 선박이 규제를 준수하기 위해 추가로 구매해야 하는 RCU 부담은 오히려 증가할 것으로 분석되었다. 이는 탄소중립 연료의 가격 안정화로 인해 RCU 단위당 비용은 감소할 수 있지만, 시간이 지날수록 선박 연료 규제가 더욱 엄격해짐에 따라 요구 GFI를 충족하지 못한 화석연료 기반 선박이 필요한 RCU 수량이 많아지기 때문이다. 결과적으로, 화석연료 추진 선박이 부담해야 할 총 RCU 구매 비용이 증가하는 경향을 보일 것으로 예상된다. 2050년 기준으로 MGO를 사용한 경우, 연간 약 57.3 MUSD/yr의 비용(RCU 구매 비용: 22.6 MUSD/yr, GHG Levy: 34.7 MUSD/yr)을 부담해야 한다. 반면, 타 화석연료 대비 온실가스 배출량이 상대적으로 적은 LNG를 사용했을 때는 연간 약 49.7 MUSD/yr의 비용(RCU 구매 비용: 19.6 MUSD/yr, GHG Levy: 30.1 MUSD/yr)을 지불해야 하는 것으로 분석되었다. 요구 GFI가 Fig. 4의 노력 목표(Strive) 시나리오를 따르는 경우 최종 2050년도에 부담해야 하는 페널티는 동일하나, 기본 목표(Base)를 따르는 시나리오 대비 2030년도와 2040년도에 조금 더 공격적인 감축을 하기 때문에 과정에서 상대적으로 큰 RCU 구매 비용과 GHG Levy를 부담해야 한다(Fig. 7).

가정된 IMO 선박 온실가스 중기조치 시나리오(Table 1)에 따라

Table 2. Expected CO₂ emission for each fossil fuel

	단위	LNG (기준연료)	VLSFO	HSHFO	MGO
Fuel Gas Consumption	kg/hr	4,274	5,104	5,104	4,805
Carbon Factor (TtW)	g/g	2.750	3.114	3.114	3.206
CO ₂ 배출량	ton/yr	70,525	95,355	95,355	92,424

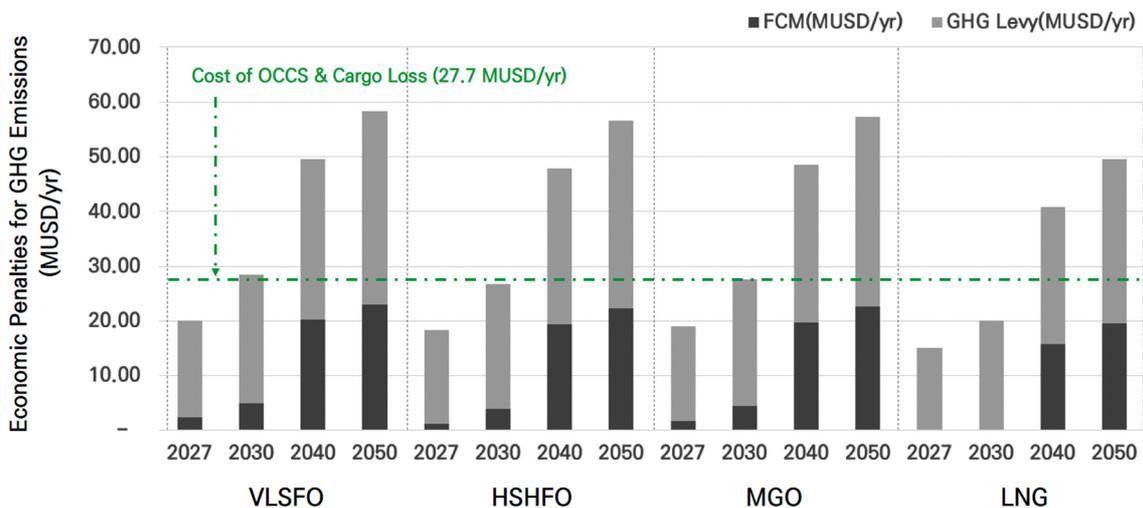


Fig. 6. A case study of economic penalties for GHG emissions from 15,000 TEU CNTR (Base 기준).

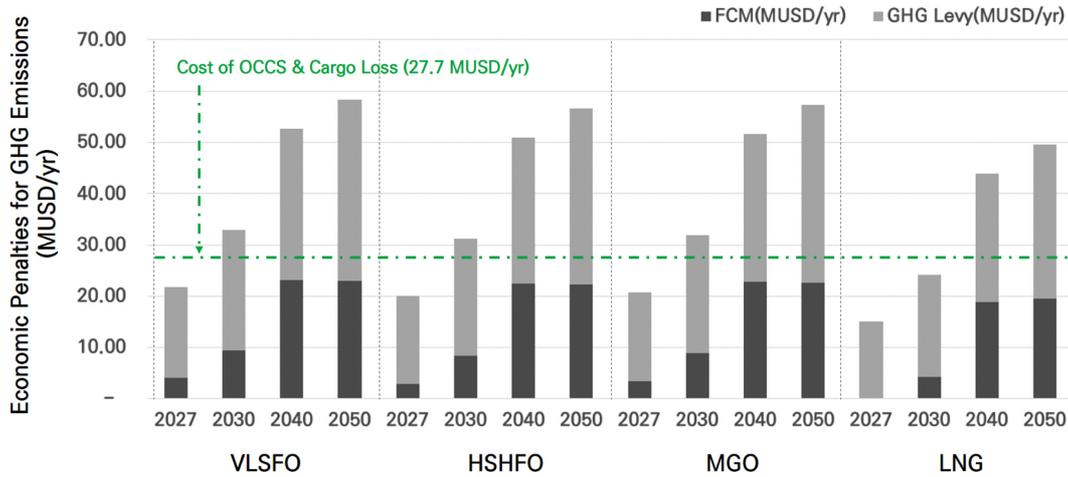


Fig. 7. A case study of economic penalties for GHG emissions from 15,000 TEU CNTR (Strive 기준).

15,000 TEU급 컨테이너 선박이 화석연료를 지속적으로 사용할 경우 예상되는 RCU 구매 비용과 GHG Levy 비용을 OCCS 장비를 탑재했을 때 선주가 부담해야 하는 비용과 비교하였다(Fig. 6, Fig. 7). OCCS 기술이 적용되었을 때의 주요 비용 항목으로는 선상 CO₂ 포집 및 액화 비용, 포집된 CO₂를 영구 저장 설비로 운송하는 비용, 그리고 폐유전 및 염수층에 CO₂를 영구 저장하는 비용이 포함된다. 선상에서 포집된 CO₂가 영구저장 설비로 운송되어야만 해당 감축 효과를 인정받을 수 있기 때문이다. 또한, OCCS 장비 설치로 인한 화물 적재 용량 손실이 매우 중요한 평가 요소이다. MMMCZCS(Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping)에 따르면, LNG를 연료로 사용하는 15,000 TEU급 컨테이너 선박에 273 ton/day(연간 52,640 ton)의 CO₂를 포집하는 OCCS 시스템을 탑재할 경우, 약 1,100 TEU의 화물 적재 용량 손실이 발생할 것으로 평가되었다(RINA[2023]; MMMCZCS[2022b]). 대상선박으로 지정한 15,000 TEU급 컨테이너선은 주로 장거리 노선(아시아-유럽, 아시아-북미)을 운항하며, 연간 약 5~7회 왕복 항차를 수행한다. 본 연구에서는 Cargo Loss를 보수적으로 추산하기 위해 왕복 7항차로 가정하여 손실액을 계산하였다. 왕복 항차 중 가는 노선은 만선으로 운항하고, 복귀 노선은 약 50%의 적재율 수준으로 운항한다는 점을 고려하여, OCCS 설치에 따른 Cargo Loss 발생 항차 수를 편도 항차 수(7항차)로 하였다. 컨테이너 운임은 글로벌 시장 상황, 계절에 따라 크게 변동되지만, 일반적인 장거리 노선(아시아-유럽, 아시아-북미)에서는 TEU 당 \$1,000 ~ \$3,000 수준을 보인다. 본 연구에서는 2024년 11월 8일 기준의 SCFI(Shanghai Containerized Freight Index)를 참고하여, 컨테이너 운임을 \$2331.6/TEU로 가정하였다(Shanghai Shipping Exchange[2024]). 앞 가정을 기반으로 1,100 TEU의 화물 적재 손실로 인한 연간 손실액은 약 18 MUSD/yr로 추정된다. 선상 CO₂ 포집에 소요되는 비용(약 \$140/ton CO₂)(Choi et al.[2023]), 포집된 CO₂를 영구 저장 설비로 운송하는 비용(약 \$30/ton CO₂), 그리고 CO₂를 영구 저장하는 비용(약 \$15/ton CO₂)을 종합적으로 고려할 때, 연간 52,640 ton의 CO₂를 포집 및 영구 저

장하는 총 비용은 약 9.7 MUSD/yr로 추정된다. 이 비용에 화물 적재 손실로 인한 손실액을 더하면 27.7 MUSD/yr가 된다. 이를 Fig. 6과 Fig. 7에 녹색선으로 표시하였다. OCCS 기술 도입에 따른 추가 비용과 화물 적재 손실로 인한 손실액을 상쇄하고, IMO 중기조치로 인한 패널티 절감액이 이를 초과하는 시점은 2030년에서 2040년 사이로 예상된다. 특히 Fig. 7의 노력 목표(Strive) 시나리오를 적용한 분석에 따르면, 감축 경로가 강화됨에 따라 선박에 부과되는 패널티가 증가하게 되어, 중유 및 MGO 연료 추진 선박에서의 OCCS 경제성이 2030년경부터 확보될 가능성이 높아질 것으로 평가되었다. 이는 더욱 엄격한 감축 목표에 따라 발생하는 추가적인 비용을 OCCS 기술을 통해 절감할 수 있음을 시사하며, 해당 기술이 경제적 관점에서 현실적인 대안이 될 수 있음을 보여준다.

본 논문에서 상세한 경제성 분석이 수행되지는 않았지만 규제 불확실성이 높은 현 시점에서 중기조치가 화석연료 추진 선박에 미치는 영향을 분석하고, 이를 바탕으로 OCCS 기술의 경제적 타당성을 평가하는 것은 의미가 있다고 생각한다. 향후 IMO 중기조치의 세부 기준이 확정될 때에는 상세 분석과 함께 선종과 선박 규모에 맞는 OCCS 시스템의 최적 용량을 신중히 결정해야 할 것이다.

3.2 탄소중립 연료와 OCCS 기술의 경제성 비교 분석

3.1절에서는 중기조치가 OCCS 기술의 적용과 상용화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고, OCCS 기술이 경제성을 확보하는 시점을 예측하였다. 3.2장에서는 OCCS와 함께 국제해운 탄소중립 방안으로 주목 받고 있는 탄소중립 연료(그린 암모니아, 그린 메탄올)의 가격 전망을 분석하고, 이러한 분석을 바탕으로 OCCS 기술이 탄소중립 연료에게 비용적 측면에서 경쟁우위를 가질 수 있는 경제성 기준을 도출하였다.

최근 LSFO와 LNG를 연료로 사용하는 15,000 TEU급 컨테이너 선박에 82%의 CO₂ 포집 효율을 가진 OCCS 시스템을 적용하여 경제성을 분석한 결과를 MMMCZCS에서 제시한 바 있다. 이 분석에서는 각각 486 ton/day 및 273 ton/day의 CO₂가 포집되는 시나리오를

Table 3. Evaluation of key alternative fuels (Lee *et al.*[2023])

구분	화석연료		탄소 중립 연료/무탄소 연료	
	MGO	LNG	E-Methanol	E-Ammonia
LHV [GJ/ton]	42.8	48.6	19.9	18.6
Volumetric energy density [GJ/m ³]	36.6	20.8	15.8	11.5
Storage condition	상압, 상온	-163 °C	상압, 상온	-34 °C
Fuel tank size	1 (Ref.)	2.3	2.3	4.1
Relative CAPEX	1 (Ref.)	~1.3	~1.15	~1.2
Availability	전통 유전, 비전통 유전에 매장량이 풍부		높은 이산화탄소 포집 비용 (공기 중 포집 시)	탄소중립연료 중 비교적 저렴
Fuel cost [\$/GJ]	12	9	31 ~ 74	22 ~ 41

가정하여 계산이 수행되었으며, 이로 인해 약 1,100 TEU~1,200 TEU의 화물 적재 손실이 발생하는 것으로 평가되었다(RINA[2023]; MMMCZCS[2022b]). 유사하게, 암모니아를 연료로 사용하는 선박 또한 화물 적재 용량 손실의 문제가 있다. 암모니아는 기존 화석 연료에 비해 에너지 밀도가 낮아 더 큰 저장 탱크가 요구되며(Table 3), 이는 결과적으로 화물 적재 공간에 영향을 미친다. 예를 들어, 15,000 TEU급 컨테이너 선박에서 OCCS 적용 선박과 유사한 수준의 온실가스 감축 효과를 달성하려면 약 20,000 m³ 용량의 암모니아 연료 저장 탱크가 필요하며, 이로 인해 약 1,100 TEU의 화물 적재 손실이 발생할 것으로 예상된다(MMMCZCS[2022a]). 이에 본 연구에서는 15,000 TEU급 컨테이너 선박을 기준으로, 화물 적재 용량 및 화물 손실 측면에서 암모니아 연료를 사용하는 선박과 OCCS 시스템이 적용된 선박이 유사한 조건을 갖췄다고 가정하였다. 이러한 가정을 바탕으로, 대체 연료의 가격 전망을 활용하여 OCCS 기술의 상대적 경제성 기준을 분석하였다.

최근 IMO에서는 연료 전과정(Well-to-Wake) 평가를 기반으로 한 온실가스 감축 방안에 대한 논의가 활발히 진행되고 있다. 이러한 논의 과정에서 다양한 무탄소 및 탄소중립 연료가 조선해운 산업의 주요 대안으로 검토되고 있으며, 이 과정에서는 온실가스 배출량뿐만 아니라 선박 추진 기술, 연료 생산 및 병커링 인프라의 가용성 등을 종합적으로 평가하고 있다. 현재 그린 암모니아와 그린 메탄올이 가장 유망한 후보로 주목받고 있다. 그린 암모니아의 경우, 그린 수소 생산 시장의 안정화를 전제로 2050년경 약 \$22/GJ ~ \$41/GJ의 가격대에 이를 것으로 전망된다(Lindstad *et al.*[2021]; Lagemann *et al.*[2023]; IRENA[2021]). 반면, e-메탄올은 신재생 에너지 기반 수전해로 생산된 그린 수소와 대기에서 직접 포집된 이산화탄소(Direct Air Capture, DAC)를 원료로 하여 상용화가 필요하다. 이러한 e-메탄올은 온실가스 감축 규제에 대응하기 위한 중요한 옵션이 될 수 있지만, 그린 수소 생산, DAC, 그리고 연료 합성 과정에서 발생하는 높은 에너지 수요를 고려할 때, 기존 선박용 대비 높은 가격을 형성할 것으로 예상된다. 생산 기술이 최적화된 2050년경에도 그린 메탄올의 가격은 약 \$31/GJ ~ \$74/GJ 수준일 것으로 전망된다(Lindstad *et al.*[2021]; Lagemann *et al.*[2023]; IRENA[2021]). 이에 비해 전통적 화석연료인 MGO와 LNG의 가격은 약 \$9/GJ ~ \$12/GJ 수준으로 예측되고 있어, 무탄소 및 탄소중립 연료와의 가격 차이

가 계속 존재할 것으로 예상되고 있다(Lindstad *et al.*[2021]).

탄소중립 연료 대비 OCCS의 상대적 경제성 기준을 설정하기 위해 먼저 식 (1)과 같이, 연료별 CO₂ 배출 계수(CF_{Fuel} , Table 2)를 발열량(LHV_{Fuel} , Table 1)으로 나누어 MGO와 LNG를 각각 연료로 사용하여 1 GJ의 에너지를 생산할 때 발생하는 CO₂ 배출량을 산출하였다. MGO의 경우 0.0749 ton CO₂/GJ, LNG의 경우 0.0566 ton CO₂/GJ로 계산된다.

$$E_{CO_2} \text{ (ton CO}_2\text{/GJ)} = \frac{CF_{Fuel}}{LHV_{Fuel}} \quad (1)$$

다음으로 전통적인 화석연료(MGO, LNG)와 탄소중립 연료(그린 암모니아, 그린 메탄올) 간의 가격 차이(\$/GJ)를 고려하여, OCCS 기술의 경제적 타당성 기준(OCCS 비용의 상한선)을 식(2)와 같이 계산하였다. 미래 연료와 화석연료 간 가격 차이를 1 GJ의 에너지를 생산하는데 발생하는 CO₂ 배출량(E_{CO_2})으로 나누면, 화석연료를 미래연료로 대체함으로써 1 ton의 CO₂를 감축하는 데 추가적으로 소모되는 연료 비용($Cost_{Add,Green, fuel}$)을 산출할 수 있게 된다. OCCS 기술을 통해 1 ton의 CO₂를 포집 및 저장하는데 들어가는 비용이 $Cost_{Add,Green, fuel}$ 이하가 되는 것으로 OCCS 기술의 상대적 경제성 기준(EC_{OCCS})을 설정하였다.

$$EC_{OCCS} \text{ (\$/ton CO}_2\text{)} \leq Cost_{Add,Green, fuel} = \frac{Cost_{Green, fuel} - Cost_{Fossil, fuel}}{E_{CO_2}} \quad (2)$$

먼저 그린 암모니아를 대상으로 OCCS 비용의 상한선을 도출한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Table 3을 활용하여 계산한 MGO와 그린 암모니아의 가격 차이는 \$10/GJ ~ \$29/GJ, LNG와의 가격 차이는 \$13/GJ ~ \$32/GJ 이다. 그린 암모니아 연료 가격이 가장 낮은 시나리오에서, MGO 및 LNG를 사용하는 선박의 CO₂ 포집·액화·저장·격리 비용의 상한선은 각각 \$134/ton CO₂ 및 \$228/ton CO₂로 추산된다. 반면, 그린 암모니아의 가격이 \$41/GJ 수준에 도달할 경우, MGO 및 LNG를 연료로 사용하는 선박에서 OCCS 기술이 각각 \$388/ton CO₂와 \$561/ton CO₂ 수준까지 비용 측면에서 경쟁우위를 확보할 수 있을 것으로 분석된다.

다음으로 그린 메탄올을 대상으로 OCCS 비용의 상한선을 도출한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. CO₂를 원료(Feedstock)로 사용하는 그린 메탄올의 가격은 그린 암모니아보다 높게 형성될 것으로 예상

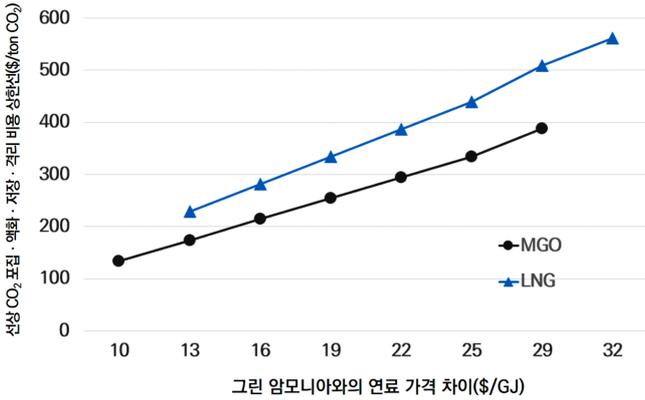


Fig. 8. Upper limit of cost for onboard CO₂ capture, liquefaction, storage, and sequestration compared with green ammonia.

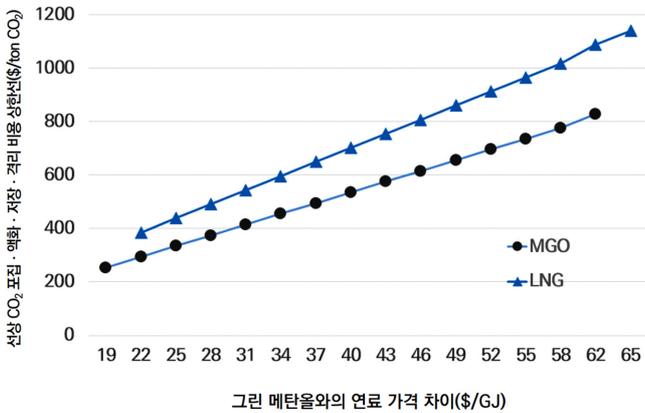


Fig. 9. Upper limit of cost for onboard CO₂ capture, liquefaction, storage, and sequestration compared with green methanol.

되며, MGO와 그린 메탄올의 가격 차이는 \$19/GJ ~ \$62/GJ, LNG와의 가격 차이는 \$22/GJ ~ \$65/GJ 범위에서 형성될 것으로 전망된다. 그린 메탄올 연료 가격이 가장 낮은 시나리오에서, MGO 및 LNG를 연료로 사용하는 선박의 CO₂ 포집·액화·저장·격리 비용 상한선은 각각 \$254/ton CO₂ 및 \$386/ton CO₂로 추산된다. 또한, 그린 메탄올 가격이 가장 비싼 시나리오의 경우, MGO 및 LNG를 사용하는 선박에서 OCCS 기술이 \$829/ton CO₂ 및 \$1,140/ton CO₂ 까지 비용 측면에서 경쟁우위를 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

현재 IMO 논의 상황을 고려했을 때, OCCS 기술의 CO₂ 포집 효과를 인정받기 위해서는 포집된 CO₂가 영구저장 설비로 운송되는 가치 사슬에 연결되어야 한다. 따라서 앞서 계산한 OCCS 기술의 경제성 기준은 선상에서 CO₂를 포집하는 비용부터 액화, 임시저장, 운반, 영구 저장하는 총 비용과 비교되어야 할 것이다. 다만, 향후 그린수소 생산 기술의 발전, 대규모 수전해 설비의 보급 확대, 그리고 육상 CO₂ 포집 및 활용 기술이 고도화됨에 따라, 탄소중립 연료의 원료 가격이 안정화될 것으로 전망된다. 이러한 시장 전망을 고려할 때, 2040년 이후 OCCS 기술이 탄소중립 연료 대비 비용 측면에서 경쟁우위를 확보할 수 있는 상한선이 지속적으로 하향 조정될 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 국제해운의 탈탄소화를 위한 OCCS 기술의 역할과 경제적 타당성 기준을 심층적으로 분석하고, IMO MEPC에서 논의 중인 중기조치가 OCCS 기술의 적용 및 상용화에 미치는 영향을 평가하였다. 2023 IMO GHG 전략의 목표를 달성하기 위해서는 무탄소 및 탄소중립 연료로의 전환이 필수적이지만, 대체연료의 생산 역량 및 공급망의 성숙도가 아직 제한적인 상황임을 감안할 때, OCCS 기술은 기존 화석연료와 함께 사용되어 온실가스 배출 저감을 달성할 수 있는 유망한 대안으로 평가된다.

IMO 선박 온실가스 감축 중기조치가 OCCS 기술의 경제성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 15,000 TEU급 컨테이너 선박을 대상으로 사례 연구를 수행하였다. 전통 화석연료를 지속적으로 사용할 때 예상되는 RCU 구매 비용과 GHG Levy 지불 금액을 화석연료의 잠재적 패널티로 추산하였으며, 2050년 기준으로 MGO를 사용한 경우 연간 약 57.3 MUSD/yr, LNG를 사용했을 때는 연간 약 49.7 MUSD/yr의 비용을 부담해야 할 것으로 분석되었다. 이러한 잠재적 패널티 금액은 선상에서 CO₂를 포집하고 이를 영구적으로 저장하기 위해 필요한 비용(약 9.7 MUSD/yr)과 OCCS 장비 탑재에 따른 화물 적재 용량 감소로 인한 손실액(약 18 MUSD/yr)의 합과 비교되었다. 그 결과, OCCS 기술 도입에 따른 추가 비용과 화물 적재 손실로 인한 손실액을 상쇄하고, IMO 중기조치로 인한 패널티 절감액이 이를 초과하는 시점은 2030년에서 2040년 사이로 예상되었다.

또한, OCCS와 함께 국제해운 탈탄소화 방안으로 주목 받고 있는 탄소중립 연료(그린 암모니아, 그린 메탄올)의 비용 예측 연구 결과를 종합적으로 검토하고, 이를 바탕으로 OCCS 기술이 탄소중립 연료에게 비용적 측면에서 경쟁우위를 가질 수 있는 경제성 기준을 도출하였다. 그린 암모니아의 가격이 낮은 시나리오에서는 MGO 및 LNG 연료 사용 선박의 OCCS 비용 상한선이 각각 \$134/ton CO₂ 및 \$228/ton CO₂ 수준으로 도출되었다. 반면, 그린 메탄올 가격이 가장 높은 시나리오에서는 각각 \$829/ton CO₂ 및 \$1,140/ton CO₂ 까지 OCCS 기술이 비용적 측면에서 경쟁우위를 가질 수 있다고 분석하였다.

본 연구에서는 가정된 IMO 중기조치 시나리오 기반으로 15,000 TEU급 컨테이너 선박을 중심으로 분석하였으나, 향후 IMO 중기조치의 세부 내용과 규제 수준이 명확히 확정되는 시점에서는 다양한 선종 및 선박 규모에 따라 OCCS 시스템의 최적 용량을 경제성 평가 기반으로 정밀하게 분석할 필요가 있다. 다만, 규제 불확실성이 높은 현 시점에서 합리적으로 가정된 중기조치가 화석연료 추진 선박에 미치는 영향을 분석하고, 이를 바탕으로 OCCS 기술의 적용 가능성을 평가하는 것은 의미가 있다.

후 기

본 논문은 해양수산부 재원으로 선박해양플랜트연구소의 기본사업인 “국제규제·표준개발 선도를 위한 글로벌협력 및 기술기반 의

제개발 연구(2520000295)”와 “대형선박 이산화탄소 포집 시스템 설계기술 개발 및 파일럿 실증((2520000280))”, 국가연구개발사업인 “친환경 선박 실용화를 위한 법제도 개선 및 IMO 의제 개발(2520000135)”에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Cho, M., Seo, Y., Park, E., Chang, D., and Han, S., 2023, Process design and energy assessment of an onboard carbon capture system with boilers or heat pumps for additional steam generation, *Ships and Offshore Structures*, 19(9), 1309-1322.
- [2] EU&Japan, 2024, Proposal on a combination of a GHG fuel standard and a universal GHG contribution. ISWG-GHG17/2/2.
- [3] IMO Secretariat, 2023a, REPORT OF THE MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE ON ITS EIGHTIETH SESSION. MEPC 80/17.
- [4] IMO Secretariat, 2023b, Report on the study on the readiness and availability of low- and zero-carbon ship technology and marine fuels. MEPC 80/INF.10.
- [5] IMO Secretariat, 2023c, REVISED PROCEDURE FOR ASSESSING IMPACTS ON STATES OF CANDIDATE MEASURES. MEPC.1/Circ.885/Rev.1
- [6] IMO Secretariat, 2023d, Update on the work by the Steering Committee on the Comprehensive Impact Assessment – Outcomes of the first and second meetings. MEPC 81/7.
- [7] IMO Secretariat, 2024a, REPORT OF THE MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE ON ITS EIGHTY-FIRST SESSION. MEPC 81/16.
- [8] IMO Secretariat, 2024b, DRAFT REPORT OF THE MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE ON ITS EIGHTY-SECOND SESSION. MEPC 82/WP.1/Rev.1.
- [9] IMO Secretariat, 2024c, Draft report of the Working Group on Air Pollution and Energy Efficiency. MEPC 81/WP.7.
- [10] IMO Secretariat, 2024d, Report of the Steering Committee on the comprehensive impact assessment of the basket of candidate GHG reduction mid-term measures Executive summary of the report on Task 2 (Impacts on the fleet). MEPC 82/7/4/Add.2.
- [11] IRENA, 2021, A path way to DECARBONISE THE SHIPPING SECTOR By 2050.
- [12] Jasmina Ovcina Mandra, Clarksons says alternative fuel ships account for 47 pct of orderbook, projects another 100 LNG carrier orders, <https://www.offshore-energy.biz/clarksons-says-alternative-fuel-ships-account-for-47-pct-of-orderbook-projects-another-100-lng-carrier-orders/>, 2023 (accessed 2024.10.23.)
- [13] Lagemann, B., Lagouvardou, S., Lindstad, E., Fagerholt, K., Psaraftis, H.N., and Erikstad, S.O., 2023, Optimal ship lifetime fuel and power system selection under uncertainty, *Transportation Research Part D*, 119, 103748.
- [14] Lee, S., Cho, M., Kang, S., and Huh, C., 2023, Necessity and Research Challenges of Onboard Carbon Capture Technology in Achieving the IMO's Goal of Reducing GHG. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 26(4), 336-348.
- [15] Lindstad, E., Lagemann, B., Riialand, A., Gamlem, G.M., and Valland, A., 2021, Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels, *Transportation Research Part D* 101 103075.
- [16] MMMCZCS, 2022a, Preparing Container Vessels for Conversion to Green Fuels.
- [17] MMMCZCS, 2022b, The role of onboard carbon capture in maritime decarbonization.
- [18] RESOLUTION MEPC.391(81) – 2024 GUIDELINES ON LIFE CYCLE GHG INTENSITY OF MARINE FUELS (2024 LCA GUIDELINES).
- [19] RESOLUTION MEPC.377(80) – 2023 IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS.
- [20] RINA, 2023, Onboard carbon capture. MEPC 80/INF.14.
- [21] Shanghai Shipping Exchange, <https://en.sse.net.cn/indices/scfinew.jsp>, 2024 (accessed 2024.11.14.)
- [22] Solutions for Our Climate, 2024, Environmental risks of intermediate alternative fuels in shipping and plans for utilization in Korea, China and Japan.
- [23] Stephen Gordon, Green Technology Tracker: 41% of tonnage ordered in 1H 2024 alternative fuelled, <https://insights.clarksons.net/green-technology-tracker-41-of-tonnage-ordered-in-1h-2024-alternative-fuelled/>, 2024 (accessed 2024.10.23.)
- [24] The Republic of Korea, 2021a, Proposal to reflect onboard CO₂ capture (CO₂ removal) in the EEDI and EEXI frameworks. MEPC 76/7/17.
- [25] The Republic of Korea, 2021b, Comments on document MEPC 76/7/5. MEPC 76/7/44.
- [26] The Republic of Korea, 2022a, Proposal to include onboard CO₂ capture system in the IMO GHG regulatory framework. MEPC 79/7/22.
- [27] The Republic of Korea, 2022b, Information on the development of onboard CO₂ capture system in the Republic of Korea. MEPC 79/INF.27.
- [28] The Republic of Korea et al., 2023, The use of onboard carbon capture systems within IMO's regulatory framework. MEPC 80/7/7.

Received 31 October 2024

Revised 13 November 2024

Accepted 26 November 2024