

# IMO 온실가스 감축 조치 대응을 위한 선상 이산화탄소 포집기술의 필요성과 개발 방향에 대한 고찰

이성엽<sup>1</sup> · 조맹익<sup>2</sup> · 강성길<sup>3</sup> · 허 철<sup>4\*</sup><sup>1</sup>선박해양플랜트연구소 국제해사기술센터 선임연구원<sup>2</sup>선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업지원센터 선임연구원<sup>3</sup>선박해양플랜트연구소 국제해사기술센터 책임연구원<sup>4</sup>한국해양대학교 해양과학기술융합학과 교수

## Necessity and Research Challenges of Onboard Carbon Capture Technology in Achieving the IMO's Goal of Reducing GHG

Seong-yeob Lee<sup>1</sup>, Meangik Cho<sup>2</sup>, Seong-Gil Kang<sup>3</sup>, and Cheol Huh<sup>4\*</sup><sup>1</sup>Senior Researcher, International Maritime Research Center,

Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), Daejeon 34103, Korea

<sup>2</sup>Senior Researcher, Offshore Industries R&BD Center,

Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), Geoje 53201, Korea

<sup>3</sup>Principal Researcher, International Maritime Research Center,

Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), Daejeon 34103, Korea

<sup>4</sup>Professor, Department of Convergence Study on Ocean Science and Technology,  
Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

### 요 약

국제해사기구(IMO)를 중심으로 선박 온실가스 감축 규제 논의가 활성화됨에 따라 국제 해사 분야의 녹색 대전환이 예상된다. IMO는 2023년 해양환경보호위원회(MEPC) 80차 회의에서 2050년경까지 국제해운 탄소중립(Net Zero)을 선언하는 선박 온실가스 감축 개정 전략을 채택하였다. 상향된 IMO 온실가스 감축 목표를 이행하기 위해서는 그린 메탄올, 그린 암모니아 등의 탄소중립연료 활용이 불가피하다. 하지만 전과정평가(Life Cycle Assessment)가 고려된 무탄소 연료는 현재 도입이 어려운 상황이며, 대량 생산 및 공급체계를 구축하기까지 상당한 시간이 소요될 것으로 예상된다. 본 논문에서는 무탄소 및 탄소중립 연료의 가용성과 선박 추진기술 성숙도를 분석함으로써 선상 이산화탄소 포집기술 도입 필요성을 설명한다. 또한 현재 단계에서 대체 연료와 연계한 선상 이산화탄소 포집 기술 연구 개발 방향을 흡수제 선정, 열통합 기술, 탈수-액화-저장 기술, 경제성 확보, 선박 운동 영향도 분석, 선종별 배치 최적화 등으로 구분하여 제시하였다.

**Abstract** – The International Maritime Organization (IMO) is currently discussing regulations to reduce greenhouse gas (GHG) emissions from ships, which is expected to result in a significant shift towards more environmentally-friendly practices in the maritime sector. In its 80<sup>th</sup> session of the Marine Environment Protection Committee (MEPC) in 2023, the IMO adopted the revised strategy on reduction of GHG emissions from ships, declaring net zero of international shipping by or around, i.e., close to, 2050. In order to achieve the raised IMO GHG reduction target, the use of zero-carbon or carbon-neutral fuels such as green methanol and green ammonia is inevitable. However, carbon-free fuels from the perspective of the life cycle assessment (Well to Wake) are difficult to introduce at present, and a significant amount of time is expected to establish a mass production and supply system. The authors argue for the necessity of introducing onboard carbon capture technology by analyzing the availability of carbon-free and carbon-neutral fuels and the maturity of ship propulsion technology. In addition, the research and development directions of onboard carbon capture technology related to alternative fuels at the current stage is presented, divided into solvent selection, heat integration, dehydration/liquefaction/storage, economic feasibility, influence of ship motion, and optimal deployment by ship type.

**Keywords:** IMO(국제해사기구), Greenhouse gas(온실가스), Alternative fuels(대체연료), Onboard carbon capture systems(선상 이산화탄소 포집시스템), Bridge Technology(징검다리 기술)

\*Corresponding author: cheolhuh@kmou.ac.kr



## 1. 서 론

국제해사기구(IMO)를 중심으로 선박 온실가스 감축 규제 논의가 활성화됨에 따라 국제 해사 분야의 녹색 대전환이 예상된다. IMO는 2018년 4월 해양환경보호위원회(MEPC) 72차 회의에서 선박 온실가스 배출 총량을 2008년 대비 2050년까지 최소 50% 감축하겠다는 초기전략을 발표하였다(Resolution MEPC.304(72)). IMO 선박 온실가스 감축 목표는 최근 MEPC 80차 회의(2023년 7월)에서 2050년경까지 국제해운 탄소중립(Net Zero)을 실현하는 것으로 상향되었다(Resolution MEPC.377(80)). 다수의 선진국 및 군소도 서국들이 온실가스 감축 목표 상향에 동의하였으며, 우리나라도 2050년경까지 해운분야 탈탄소화를 지지하는 대표적인 국가이다(IMO Secretariat[2023a], IMO Secretariat[2023d]). 유럽은 한발 앞서서 2024년 배출권거래제(EU-ETS) 해운 부문 확장 시행을 계획하고 있으며, 2025년 친환경 연료 사용을 의무화하기 위한 해상 연료 기준(FuelEU Maritime) 도입을 추진함으로써 선박 온실가스 감축을 주도하고 있다.

상향된 IMO 온실가스 감축목표 달성을 위해서는 무탄소·탄소중립 연료 도입이 필수적이나, 선박 대체연료들은 생산 용량, 연료별 추진기술 성숙도 등에서 한계점이 현재 존재한다. 본 논문에서는 LNG, 메탄올, 암모니아를 중심으로 선박 대체연료의 가용성과 선박 추진기술 현황을 분석하고 선상 이산화탄소 포집 기술 도입의 필요성을 설명한다. 또한 배기가스 조성의 다양성, 제한된 선상 공간, 열원 확보 등 선상 이산화탄소 포집 시스템의 기술 이슈를 해결하기 위한 연구 방향을 흡수제 선정, 열통합 기술, 탈수·액화·저장

기술, 경제성 확보, 선박 운동 영향도 분석, 선종별 배치 최적화 등으로 세분화하여 제시한다.

## 2. 선박 온실가스 감축을 위한 IMO 주요 조치 및 논의 동향

IMO의 온실가스 감축 규제는 Fig. 1과 같이 크게 기술적 조치, 운항적 조치, 경제적 조치(시장기반 조치)로 구분할 수 있다. 각 조치는 국제 해운 산업에서의 온실가스 배출량을 2050년경까지 100% (Net Zero) 감축시키기 위한 수단으로써 서로 연결되어 있다. 점선으로 표현된 조치는 MEPC에서 현재 논의되고 있는 주요 후보군으로 아직까지 확정되지 않았음을 의미한다.

### 2.1 기술적 조치

선박은 기술적 조치를 통해 설계단계부터 CO<sub>2</sub> 배출량을 관리받는다. MEPC 62차 회의(2011년 7월)에서 해양오염 방지협약(MARPOL)을 개정하여 신조선 에너지효율설계지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI)를 채택하였으며, 2013년 이후 건조되는 총 톤수 400 톤 이상의 신조 선박은 설계단계에서 EEDI 기준값을 만족시켜야 한다. EEDI는 1톤의 화물을 1해리(Nautical mile) 운송할 때 배출할 것으로 예상되는 이산화탄소 양으로 정의되며, 허용값 내에서 설계되어야 한다(Resolution MEPC.203(62)). EEDI 계산 시 실제 화물 운송량을 알 수 없으므로 일반적으로 재화중량톤수(DWT)를 사용한다. EEDI 규제는 2013년 이후에 건조되는 선박부터 2008년에 건조된 선박 대비 0~30%의 에너지 효율

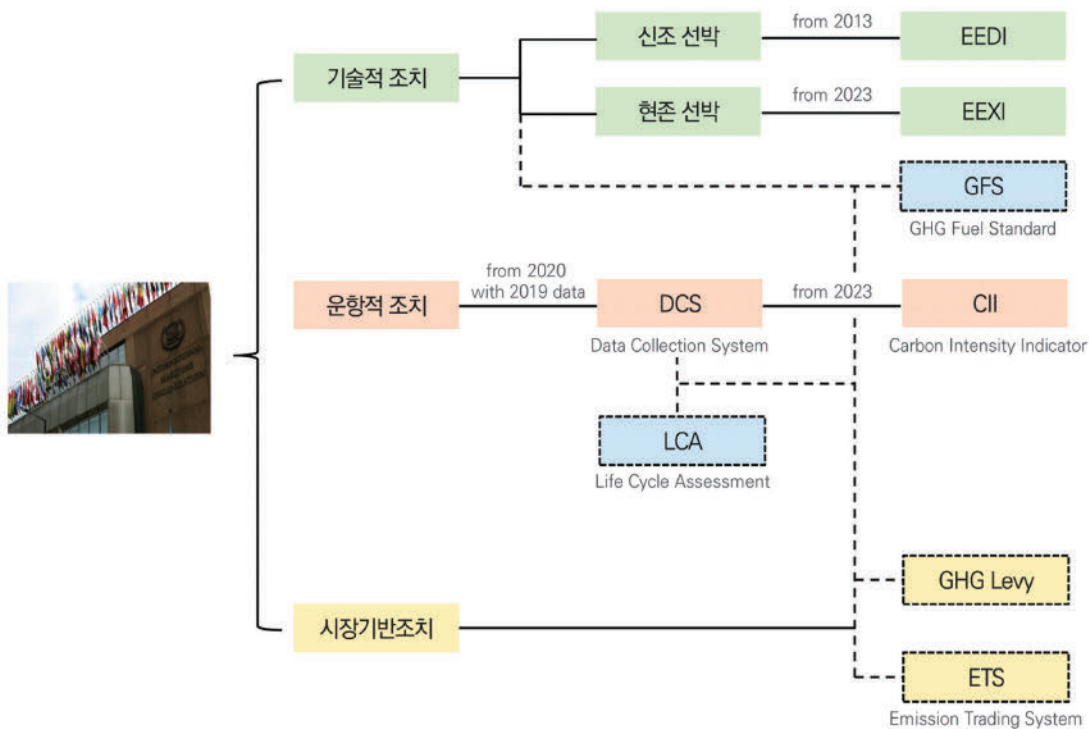


Fig. 1. Key IMO measures for GHG reduction.



이 개선되도록 목표가 설정되었다. 2013년부터 2015년까지 0단계, 2015년부터 2020년까지 1단계(10% 감축), 2020년부터 2025년까지 2단계(20% 감축), 2025년부터 3단계(30% 감축)에 걸쳐 적용될 예정이다. 단, MEPC 75차 논의에서 EEDI 3단계의 경우 선종 및 톤급별 감축률을 상향하고, 적용 시점을 2022년으로 앞당기는 등 기존 EEDI를 더욱 강화하였다. 컨테이너선은 3단계 적용개시를 2022년으로 앞당겼으며, 선박의 규모(DWT)별로 감축률을 15% ~ 50%까지로 차별화하였다. 일반화물선(General Cargo Ship), LNG 운반선, 크루즈 여객선, 15,000 DWT 이상 가스운반선(LPG 운반선)도 적용개시를 2022년으로 앞당겼으나 감축률은 30%를 유지할 예정이다(IMO Secretariat[2020b]).

$$EEDI\left(\frac{gCO_2}{ton \cdot nm}\right) = \frac{CO_2 \text{ 배출계수} \times \text{연료소비율} \times \text{기관출력}}{\text{선박운송능력(화물량)} \times \text{선박 속도}} \quad (1)$$

2013년 EEDI 도입 이전에 건조되어 운항되고 있는 현존 선박에도 기술적 조치를 적용하기 위해 현존선에너지효율지수(Energy Efficiency eXisting ship Index, EEXI)가 도입되었다. EEXI 요구 값 및 달성값에 대한 새로운 규정들은 EEDI 적용대상 선박(여객선 제외, 400톤 이상)과 동일한 선종에게 적용되며, 개별 선박은 2023년 1월 1일 이후 첫 번째 연차, 중간 또는 정기검사 중 가장 먼저 도래하는 검사 이전에 EEXI 달성값 최초 검증을 완료해야 한다(IMO Secretariat[2021]; Resolution MEPC.333(76); Resolution MEPC.334(76); Resolution MEPC.335(76)). 선종 및 크기에 따른 감축률은 원칙상 EEDI 감축률 2단계(20%)에 기반하지만, 유조선 및 벌크선에 대해서는 대형선박 범위(20,000 DWT 이상)를 추가하여, 해당 선박들에 대하여 기존 규제보다 각 5%씩 완화된 EEXI 감축률을 적용하였고, 소형 컨테이너 선박 및 Ro-Ro 선박들에 대해서는 EEXI 감축률을 하향 조정하였다. 단계적 감축률이 제시된 EEDI와 달리 1회성 감축률을 적용하며, 관련 규제에서 요구하는 EEXI 기준값을 만족하는 선박에 국제 에너지효율증서(IEEC)가 부여된다.

중기조치로 현재 논의되고 있는 기술적 조치로는 연료유 온실가스 표준제도(GHG Fuel Standard, GFS)가 있다. 선박 연료유 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)와 연계되어 선박의 연간 연료유 사용을 기준으로 전 과정 온실가스 배출 집약도(GHG Emission Intensity, MJ/gCO<sub>2</sub>eq)를 제한하는 형태이다. 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 기본으로 하고 온실가스 인벤토리에 메탄(CH<sub>4</sub>)과 아산화질소(N<sub>2</sub>O)가 포함되게 되며, 선박연료 생산, 운송, 사용 등 전 과정에 대해 온실가스 배출 집약도를 산정하여 단계적으로 허용량 기준을 강화할 것으로 예상된다.

## 2.2 운항적 조치

현존선의 에너지 효율을 위한 기술적 규제인 EEXI와 동시에 운항적 규제인 선박 탄소집약도 지수(Carbon Intensity Indicator, CII)에 대한 논의가 이루어졌다. CII는 총톤수 5,000톤 이상 국제해해선박에 적용되며, 회기간 온실가스 작업반(ISWG-GHG) 6차(2019년 11월) 및

7차 회의(2020년 3월), ISWG-GHG 8차를 거쳐 MEPC 76차 회의(2021년 6월)에서 CII 요건의 이행을 지원하기 위한 지침서 4종이 채택되었다. 개별선박 CII 감축률은 2019년 대비 2026년까지 총 11%로, 2020년부터 2022년까지 연간 1%, 2023년부터 2026년까지 연간 2%, 2027년부터 2030년까지의 개선율은 IMO 단기조치(CII 및 EEXI)의 효과적 이행이 검토되는 2026년 이후 논의하여 결정하기로 하였으나, 해당 논의 결과에 대해 높은 감축률을 주장하는 국가들의 강력한 반발로 2027년부터 적용될 감축률은 지금보다 강화할 것이라는 내용이 결의서(MEPC.337(76))에 명시되어 있다. 선주는 MARPOL 부속서 6장, 21A 규칙(연료소모량 데이터에 관한 수집 및 보고)에 따라 제출된 IMO 선박 연료소모량 수집시스템(IMO Data Collection System, DCS) 데이터를 활용하여 매년 12월 31일까지의 연간운항 CII 확보값을 계산하고 주관청에 제출해야 한다. 주관청은 연간 운항에 대한 CII 확보값을 검증한 후 A부터 E까지의 등급을 결정하여 적합확인서(Statement of Compliance, SoC)를 발급한다. 이에 따라, 3년 연속 D 등급 또는 단년도 E 등급을 받은 선박은 시정조치(Corrective actions) 수립을 요구받게 된다(IMO Secretariat[2021]; Resolution MEPC.336(76); Resolution MEPC.337(76); Resolution MEPC.338(76); Resolution MEPC.339(76)).

## 2.3 시장기반 조치

회원국들은 IMO 온실가스 감축 목표 달성을 위해 필요한 중기 조치를 식별하는 노력을 지속하고 있다. GFS 제도와 함께 무탄소 연료 도입을 강제화하기 위해서는 연구개발 사업 지원, 개도국 및 군소도서국 지원 등을 목적으로 하는 기금이 필요하게 된다. 따라서 기술적 조치(GFS)와 탄소부담금(GHG Levy) 또는 배출권거래제(Emission Cap-and-Trade System)와 같은 경제적 조치를 결합하는 형태(Basket of Measures)로 의견이 개진되었으며 ISWG-GHG와 MEPC에서 관련 논의가 진행되고 있다. 탄소부담금은 IMO 선박 연료소모량 수집시스템(IMO DCS)를 활용하여 온실가스 배출량 당 부담금을 부과하고 기금을 운용하는 제도이다. 배출권거래제는 배출 할당량을 정하여 IMO 온실가스 감축 목표 달성을 보장하고, 배출권 판매를 통한 수익창출 형태로 선도자(First Mover)에게 인센티브를 제공할 수 있는 제도이다. MEPC 80차 회의에서는 연료유표준제(Goal based Fuel Standard)와 온실가스 배출량에 가격을 부과하는 제도(Maritime GHG emission pricing mechanism)를 결합하여 도입하는 방향으로 다수 회원국들의 동의가 있었으나, 구체적인 경제적 조치는 결정되지 않았다. 중기조치는 2027년 5월 시행을 목표로 하여 종합영향평가 수행과 함께 2025년 봄(MEPC 83)에 승인될 예정이다.

## 2.4 선박유 전과정 평가(Life Cycle Assessment) 지침서

대체연료 도입 촉진을 위한 선박연료 GHG 집약도 전과정 지침서(LCA Guideline) 개발이 IMO 초기전략 후보조치로 포함되어 있으며, MEPC 78차(2022년 6월)에서 LCA 지침서 개발을 위한 회기간 실무작업반(Correspondence Group) 위임사항을 승인하였다. 국



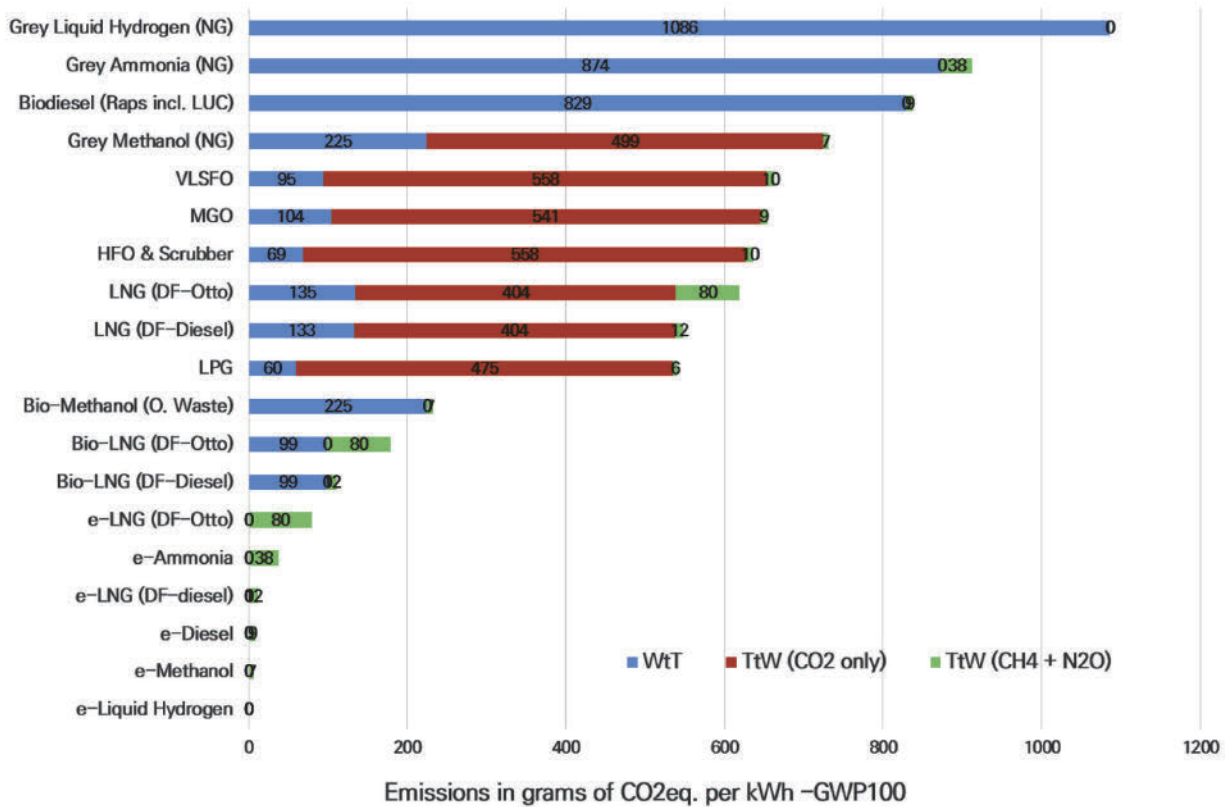


Fig. 2. GHG emissions from Well to Wake perspective by ship alternative fuels.

제해운시장에서 배출되는 이산화탄소는 전체 배출량의 약 2.9% 수준으로 선박연료를 무리하게 전환하기 위해 생산, 운송 단계에서의 배출량이 증가되면 안 된다는 의미로 생각된다. LCA 지침서에는 연료의 생산과정부터 사용 단계까지의 전 과정(Well to Wake) 온실가스 배출량이 포함되어 있으며, 온실가스 인벤토리에 메탄(CH<sub>4</sub>)과 아산화질소(N<sub>2</sub>O)가 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 함께 포함되어 있다. 메탄과 아산화질소의 온실가스 효과는 GWP 100 기준으로 CO<sub>2</sub> 대비 약 21배, 310배 수준이다. LCA 지침서 초안은 2023년 7월 MEPC 80차 회의에서 채택되었으며(Resolution MEPC.376(80)), 지침서 보완 작업을 위한 실무작업반이 연장되었다. 또한, IMO 사무국에서는 ISWG-GHG 16차 회의 전 전문가 워크숍을 개최할 예정이다.

Fig. 2는 주요 선박 연료의 전 과정 온실가스 배출량을 보여준다 (INTERTANKO[2022]; Lindstad *et al.*[2021]). 천연가스 개질을 통해 생산되는 그레이 수소, 그레이 암모니아, 그레이 메탄올은 기존 MGO(Marine Gasoil) 보다도 온실가스 배출량이 많을 것으로 예상된다. IMO 규제보다 상위에 있는 파리기후협약 이행을 위해서는 LCA 관점에서의 탄소중립연료 선택이 필수적이다.

### 3. 친환경 연료 추진 선박 기술 현황

해운업계는 선박으로부터 배출되는 온실가스를 저감하기 위해서 감속 운항, 선박에너지효율 개선장비 등 다양한 기술적 조치로 대응하고 있다. 대표 국제선사인 머스크라인(MAERSK LINE)은 연

진 부하를 10% 수준 감소시킴으로써 연료비 및 이산화탄소 배출량의 10%~30%를 감축한 바 있다. 그러나 선박의 감속 운항은 궁극적인 대안이 될 수 없으며, 화석연료 추진 선박의 운항 효율 개선만으로는 한계에 봉착했다. IMO GHG 4차 연구보고서에도 온실가스 감축 목표를 달성하기 위해서는 이산화탄소 배출량이 적은 저탄소 및 무탄소 대체연료의 도입이 필수적이라고 강조하고 있다 (IMO Secretariat[2020a]). 나아가 MEPC 80차 회의에서 채택된 IMO 선박 온실가스 개정전략(2023 IMO GHG Strategy)에는 2030년까지 무탄소 연료(Zero or Near-zero)를 최소 5% 사용(10%까지 노력)하는 것이 의욕수준(Levels of Ambition)에 포함되어 있다 (Resolution MEPC.377(80)). 향후 IMO에서는 해당 의욕수준을 달성하기 위해 무탄소 연료로의 전환을 촉진하는 형태로 중기조치를 채택할 가능성이 농후하다(IMO Secretariat[2023d]).

최근 국제적으로 관심 받고 있는 선박 대체연료의 주요 특성을 Table 1과 같이 정리하였다(KOREAN REGISTER[2021]; IRENA [2021]; Lindstad *et al.*[2021]). 아래 표에서 소개한 연료 외에도 다양한 탄소중립연료가 연구되고 있으며, 각 연료의 장단점이 상이하므로 주요 특성을 비교 분석하여 활용해야 한다. 특히 연료 생산 및 공급 관점에서의 가용성과 선박에서의 추진기술 성숙도를 지속적으로 모니터링할 필요가 있다.

#### 3.1 저탄소 연료 및 추진기술 현황

먼저 전통 화석연료 중에 탄소함량이 제일 적은 천연가스의 경



Table 1. Evaluation of eco-friendly alternative fuels (Liquid)

구분	화석연료			탄소 중립 연료/무탄소 연료			
	MGO	LNG	Bio gas	Bio diesel	E-Methanol	E-Ammonia	E-Liquid Hydrogen
LHV [GJ/ton]	42.8	48.6	-	-	19.9	18.6	120
Volumetric energy density [GJ/m <sup>3</sup> ]	36.6	20.8	-	-	15.8	11.5	8.5
Storage condition	상압, 상온	-163℃	-163℃	상압, 상온	상압, 상온	-34℃	-253℃
Fuel tank size	1 (Ref.)	2.3	2.3	1	2.3	4.1	7.6
Relative CAPEX	1 (Ref.)	~1.3	~1.3	1	~1.15	~1.2	매우비쌈
Availability	전통 유전, 비전통 유전에 매장량이 풍부	원료 공급 문제로 대량생산 어려움	수급 불안정, 식량 안보 이슈	높은 이산화탄소 포집 비용 (공기 중 포집 시)	탄소중립연료 중 비교적 저렴	연료 생산비용은 합리적, 운송 및 저장 비용 과다	합리
Fuel cost [\$/GJ]	12	9	7~49	20~66	31~74	22~41	22~42

우, 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG) 형태로 선박에서 활용되고 있다. LNG 연료는 2020년 시작된 황 규제(Sulfur Cap) 대응이 가능하고, 미세먼지 및 이산화탄소 저감이 가능하여 차세대 청정 선박 연료로써 주목받아 왔다. 기존에는 LNG 운반선에서 발생하는 Boil-Off Gas (BOG)를 선박 연료로써 활용하였으나, LNG의 친환경성이 부각 됨에 따라 일반 상선에도 LNG를 연료로 도입하였다.

상압에서 약 -163도인 LNG는 저장 시 단열시스템이 필요하고, 단위 부피당 에너지 밀도(GJ/m<sup>3</sup>)가 MGO 대비 절반 수준이기 때문에, 연료탱크 크기가 약 2.3배가 된다. 연료탱크 크기가 커지는 것에 더하여 극저온 유체인 LNG를 기화시켜서 사용해야 하기 때문에 연료저장 및 공급시스템의 초기투자비용(CAPEX)이 MGO 대비 약 1.3배이다. 그러나 선박 엔진기술이 상용화되었고 전통-비전통 유전에 매장량이 풍부하다는 점에서 매력적인 연료이며, 이미 상용화되어 수백 척의 LNG 추진선박이 운항 중에 있다.

연료유 생산과정부터 사용단계까지(Well to Wake)를 고려했을 때, 기존 중유계열의 선박연료(Heavy Fuel Oil, HFO) 대비 LNG의 온실가스 감축효과는 약 16%~25%로 추정된다. LNG 생산 단계에서 배출되는 CO<sub>2</sub>를 보다 체계적으로 관리할 경우, 온실가스 감축효과는 33%까지 증대될 수 있으나(Australia[2020]), IMO 온실가스 감축 목표를 달성하기 위해서는 무탄소 또는 탄소중립연료의 도입이 필연적이다.

LNG 연료의 단점으로서, 메탄슬립 이슈가 IMO에서 논의 되고 있다. 현재 이산화탄소와 함께 메탄(CH<sub>4</sub>)과 아산화질소(N<sub>2</sub>O)를 온실가스로 취급하여 규제화하고자 논의가 시도되고 있으며, LNG의 주성분인 메탄의 온실효과는 이산화탄소 대비 약 28배로 알려져 있다(IPCC[2014]). WinGD 社의 X-DF 엔진(Otto Cycle) 대신 MAN ES 社의 ME-GI 엔진(Diesel Cycle)을 사용할 경우, 메탄슬립 이슈를 상당부분 극복할 수 있겠으나, 엔진에 고압 가스(약 300 bar)를 공급하기 위해 왕복동식 펌프와 고압 기화기가 포함된 장치(Pressure Vaporizer Unit)가 별도 제작되어 엔진 앞에 탑재되어야 한다. 고압 엔진기술 외에도 산화 촉매장치 등의 후처리시스템 등도 함께 개발되고 있다.

LNG와 더불어 주목받고 있는 저탄소 연료 중 하나는 메탄올이

다. 메탄올은 상온 상압에서 저장이 가능하고 엔진이 이미 개발되어 선박 발주가 이뤄지고 있다. 실제로 세계 최대 해운사인 덴마크 머스크社는 2021년 8월을 시작으로 지금까지 19척의 메탄올 추진 초대형 컨테이너 선박을 한국조선해양에 발주하고 있다. 메탄올 연료는 선박 활용 단계(Tank to Wake)에서 CO<sub>2</sub> 배출만을 고려했을 때 MGO 대비 약 7.8% 온실가스 배출량을 감축할 수 있다. 하지만 천연가스를 기반으로 만들어지는 그레이 메탄올의 경우 연료 생산 단계를 고려하면 MGO 대비 약 12% 온실가스 배출량이 증가될 것으로 예상된다(INTERTANKO[2022]).

바이오 가스, 바이오 디젤 등의 바이오연료는 현재 선박엔진 및 병커링 인프라를 바로 활용할 수 있다는 점에서 매력적이다(Drop-in Fuel). IMO에서도 30% 이하 비율로 혼합된 바이오연료 사용을 위한 통일해석이 MEPC 76차에서 승인되었고, 합성연료(Synthetic Fuels) 역시 바이오 연료와 같은 사용조건이 적용됨이 MEPC 79차에서 승인되었다(IMO Secretariat[2021]; IMO Secretariat[2023c]). 하지만 곡물 등을 활용한 1세대 바이오연료는 직·간접 토지이용변화(Land Use Change)를 고려했을 때 온실가스 감축을 인정받기 어려우며, 식량 안보 이슈로 인하여 대량 생산에 큰 어려움이 있을 것으로 예상된다. 폐식용유 등을 활용한 바이오연료가 우선적으로 검토되고 있으나, 원료(Feedstock) 수급 가용성에 따라 바이오 가스는 약 7~49 \$/GJ, 바이오 디젤은 약 20~66 \$/GJ 정도로 연료 가격이 예상되고 있다(IRENA[2021]).

### 3.2 무탄소·탄소중립 연료 및 추진기술 현황

최근 IMO에서는 연료유 전과정(Well to Wake) 관점에서의 온실가스 감축이 논의되고 있으며, 현재 다양한 무탄소·탄소중립 연료가 조선해운 산업에서 검토되고 있다. 온실가스 배출량과 함께 선박 추진기술, 연료 생산 및 병커링 가용성 등이 종합적으로 고려되어 현재 그린 암모니아와 그린 메탄올이 가장 유력한 후보로 관심을 받고 있다.

암모니아는 메탄올, 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas, LPG)와 물성이 유사하여 저인화점(Low Flash Point) 연료로 분류된다. 엔진 및 연료공급 시스템을 개발할 때 LPG 시스템과 상당 부분을 공유할 수 있으며, 현재 내연기관, 연료공급장치, 연료탱크



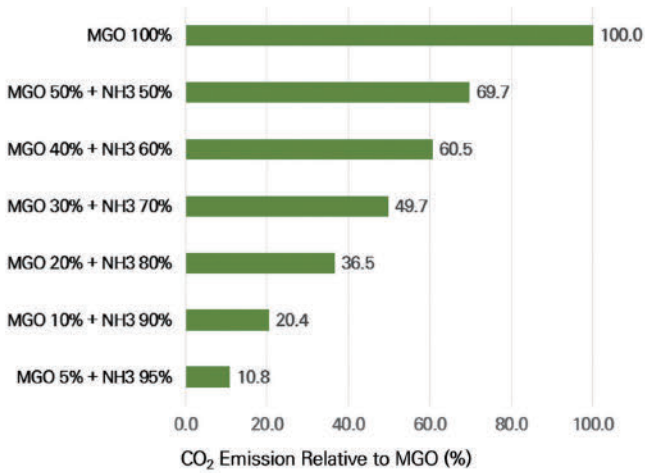


Fig. 3. CO<sub>2</sub> emissions of Ammonia fuel according to MGO blend ratio.

등에 대한 기술성숙도가 수소 연료보다 높다. 암모니아 연료는 생산 및 운송 저장이 타 탄소중립 연료 대비 저렴할 것으로 예상되며, 대용량 합성 기술(하버-보슈법)이 이미 성숙하여 공급 또한 타 무탄소 연료 대비 비교적 안정적인 것으로 기대하고 있다. 암모니아는 이미 수십 년간 냉동설비의 냉매로서, 배기가스 정화장치(SCR)의 촉매 환원제로서 사용되어 왔으나, 연료로 취급될 때 유독성에 문제가 없는지 검토가 필요하다. 또한, Well to Wake 관점에서의 그린 암모니아 공급 안정성과 병커링 인프라에 대한 타당성 검토와 함께 선박 연료로서의 암모니아에 대한 전반적인 이해가 매우 중요할 것이다.

젖은 펄프라고 표현되는 암모니아의 연소 특성 때문에 현재 기술로는 상당량의 MGO를 파일럿 연료(Pilot Fuel)로 사용해야 한다. Fig. 3는 MGO와 암모니아 혼소 비율에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량을 보여준다. MGO의 발열량(LHV)은 42.8 GJ/ton이고, 암모니아의 발열량은 18.6 GJ/ton 수준이다. 선박엔진의 효율이 동일하다고 가정했을 때 100 ton의 MGO를 사용하여 낼 수 있는 선박 추진 에너지를 얻으려면 약 230 ton의 암모니아가 필요하게 된다. 현재 기술 수준으로는 MGO 30%와 암모니아 70%를 혼소하는 것으로 평가되고 있으며, 이때의 온실가스 감축 여력은 약 50% 수준이다. 즉, 암모니아 전소엔진이 개발되지 않는다면 암모니아 연료는 Tank to Wake 관점에서도 무탄소 연료가 될 수 없다. 천연가스를 개질하여 생산된 그레이 암모니아는 생산과정에서 상당량의 CO<sub>2</sub>가 발생된다. Tank to Wake 단계에서 배출량을 0으로 가정하여도, Well to Wake CO<sub>2</sub> 배출 총량은 MGO 대비 약 36% 증가한다.

DNV는 암모니아용 내연기관의 첫 실증이 2025년 전후부터 이루어질 것으로 예상하고 있다(DNV[2021]). 2025년경 암모니아 엔진 기술개발이 완료되어도, 독성 이슈에 대한 안전기준이 마련되고 그린 암모니아 생산 및 병커링 인프라가 구축되는데 상당한 시간이 소요될 것으로 예상된다. 현재 전 세계 암모니아 총 생산량은 약 1억 8,500만 톤이나, 대부분의 국가들이 자체 생산하여 비료로 활용하고 있고 국제적으로 거래되는 양은 약 1,800만톤 수준이다. 암

Table 2. Expected CII reduction rates from 2020 to 2040

연도	당해년도 추가 감축률	누적 CII 감축 목표 (2019년 대비)	IMO CII 감축 목표 예상 (2008년 대비)
2020	1.0%	1%	30.0%
2021	1.0%	2%	31.0%
2022	1.0%	3%	32.0%
2023	2.0%	5%	34.0%
2024	2.0%	7%	36.0%
2025	2.0%	9%	38.0%
2026	2.0%	11%	40.0%
2027	2.5%	14%	42.5%
2028	2.5%	16%	45.0%
2029	2.5%	19%	47.5%
2030	2.5%	21%	50.0%
2031	2.5%	24%	52.5%
2032	2.5%	26%	55.0%
2033	2.5%	29%	57.5%
2034	2.5%	31%	60.0%
2035	2.5%	34%	62.5%
2036	2.5%	36%	65.0%
2037	2.5%	39%	67.5%
2038	2.5%	41%	70.0%
2039	2.5%	44%	72.5%
2040	2.5%	46%	75.0%

모니아를 선박 연료로 활용하기 위해서는 연료의 공급망과 병커링 인프라 구축에 대해 심도 있는 검토가 필요한 상황이며, IMO 사무국은 병커링 인프라까지 갖춰져 상용화되는 시점을 대략 2035년 정도로 예상하였다(IMO Secretariat[2023b]).

메탄올의 경우에는 신재생 에너지 기반 수전해를 통해 얻은 그린수소와 대기에서 직접 포집된(Direct Air Capture, DAC) 이산화탄소를 활용하여 얻은 e-메탄올이 상용화 되어야 온실가스 감축 규제에 대응이 가능할 것으로 예상된다. 그러나 그린수소 생산, DAC, 연료 합성 과정에서 소요되는 에너지를 고려하면 기존 선박유 보다는 값이 비쌀 것이며, 2050년경 생산 과정이 최적화 되어도 30~74 \$/GJ 수준일 것으로 예상되고 있다(IRENA[2021]; Lindstad *et al.*[2021]). 최근 IMO는 자체적으로 친환경선박 대체연료의 가용성을 분석하는 FFT Project(Future Fuels and Technology Project)를 수행하였으며, 국제해운 시장에서 e-메탄올 상용화 시점을 2038년 경으로 예상했다(IMO Secretariat[2023b]).

수소는 Tank to Wake 관점에서 청정 에너지원으로 사용할 때 환경 유해 물질이 전혀 발생 되지 않는다. 수소는 IMO 온실가스 감축 이슈를 다룰 때 반드시 고려되어야 하는 친환경 연료이나, 극복하기 어려운 기술 이슈가 상당히 많다. 수소의 질량 에너지 밀도(142 kJ/g)는 우수하나, 체적 에너지 밀도는 액체수소(8.5 GJ/m<sup>3</sup>, Liquid)여도 매우 낮다. 액체 수소의 경우 -253도로 저장 온도가 매우 낮아서 단열시스템이 비대해지는 문제도 발생한다. 한국선급 보고서에 따르면, 액체수소 연료저장시스템은 단열재 두께까지 고려했을 때 기존 HFO 연료저장시스템 대비 약 7.6배로 커지며, 이는 대형 상선의 화물



적재량에 지대한 영향을 줄 수 있다(KOREAN REGISTER[2021]). IMO는 수소를 연료로 하는 대형 2행정 내연기관(2-Stroke) 개발은 매우 어려울 것으로 전망했으며, 연료전지 상용화 시점은 2037년 경으로 예상했다(IMO Secretariat[2023b]). 고체산화물형 연료전지(SOFC)의 경우 연료 공급 온도를 500℃ 이상 높여야 하기 때문에 연료공급시스템 구성 또한 매우 복잡해진다(Park and Kim[2011]). 수소 연료의 특성을 종합적으로 고려했을 때, 단기간 내에 대형 상선에 적용되기는 어려워 보이며, 연안 선박을 중심으로 활용될 가능성이 높아 보인다. Well to Wake 관점에서 위에 언급한 e-암모니아, e-메탄올의 원료로서의 수소는 반드시 필요하며 추진선 시장보다는 운반선 시장이 먼저 도래할 것으로 기대한다. 그린수소 생산 단가는 현재 40 \$/GJ 수준으로 파악되나, 신재생에너지 발전 기반 확대 및 수소 생산기술 고도화를 통해 2050년경에는 9~28 \$/GJ로 전망되고 있다(IRENA[2021]).

#### 4. 선상 이산화탄소 포집 기술의 필요성과 연구개발 방향

##### 4.1 선상 이산화탄소 포집 기술 도입의 필요성

2021년 6월에 개최된 MEPC 76차 회의에서 탄소집약도 감축을 위한 운항적조치(Carbon Intensity Indicator, CII) 이행을 위한 가이드라인 4건이 채택되었다. 탄소집약도 감축 목표는 2008년 대비 2030년까지 최소 40%, 2050년까지 최소 70%이며, 2019년 기준으로 29%의 감축을 인정하였다. 2020년 이후 목표 감축률에 대해서는 회원국 간 의견 차이가 매우 컸으며, 의장 중재안으로 2020부터 2022까지(Phase 1)는 연간 1%, 2023부터 2026까지(Phase 2)는 연간 2%를 감축하여 목표값 40%를 우선 달성하기로 했다. 2027

부터 2030까지는 2026년 Review 이후 결정하는 것으로 결정되었으나, 유럽 국가를 중심으로 2.5% 이상의 연간 감축률이 주장되고 있다(IMO Secretariat[2021]). 본 논문에서는 2027년부터 2040년까지 CII 감축률을 2.5%로 가정하고, 그레이 메탄올, LNG 연료를 사용했을 때 필요한 선상 CO<sub>2</sub> 포집율을 Figs. 4-5에 표현하였다. 이때 그레이 메탄올과 LNG의 온실가스 감축 여력은 Tank to Wake 관점에서 CO<sub>2</sub>만을 고려하여 계산하였으며, 이 경우 그레이 메탄올과 LNG의 온실가스 감축 여력은 각각 7.8%, 25.3%이다(INTERTANKO [2022]; Lindstad *et al.*[2021]).

암모니아의 경우 Tank to Wake 관점에서의 CO<sub>2</sub> 배출량은 0이나, 아직 암모니아 100% 전소엔진이 개발되지 않은 점을 고려하여 파일럿 연료 사용 비율에 따라 온실가스 감축 여력을 다르게 가정하였다. 파일럿 연료 사용 비율 20%, 30%, 40%일 경우, 암모니아 연료의 온실가스 감축 여력은 각각 약 63.5%, 50.3%, 39.5%이다. MGO 사용 비율에 따라 필요한 선상 CO<sub>2</sub> 포집율을 Figs. 6-8에 표현하였다.

개정된 IMO 선박 온실가스 감축 전략에는 2030년까지 무탄소 연료(Zero or Near-zero)를 최소 5% 사용(10%까지 노력)하는 것이 의욕수준(Levels of Ambition)에 포함되어 있다. 2030년까지는 제한된 양의 대체 연료가 도입될 예정이며, 선상 이산화탄소 포집 시스템은 그린 암모니아, 그린 메탄올이 본격적으로 도입되는 2040년경까지 IMO 온실가스 감축 목표 이행을 위해 필수적으로 사용되어야 하는 징검다리 기술로 생각된다. 또한 향후 e-Fuel 등의 생산량이 충분히 확보되지 못할 경우, 블루 메탄올, 블루 암모니아와 함께 선상 이산화탄소 포집시스템(Carbon Capture System) 기술이 활용되어야지만 강화된 IMO 온실가스 감축 규제에 대응할 수 있을 것이다.

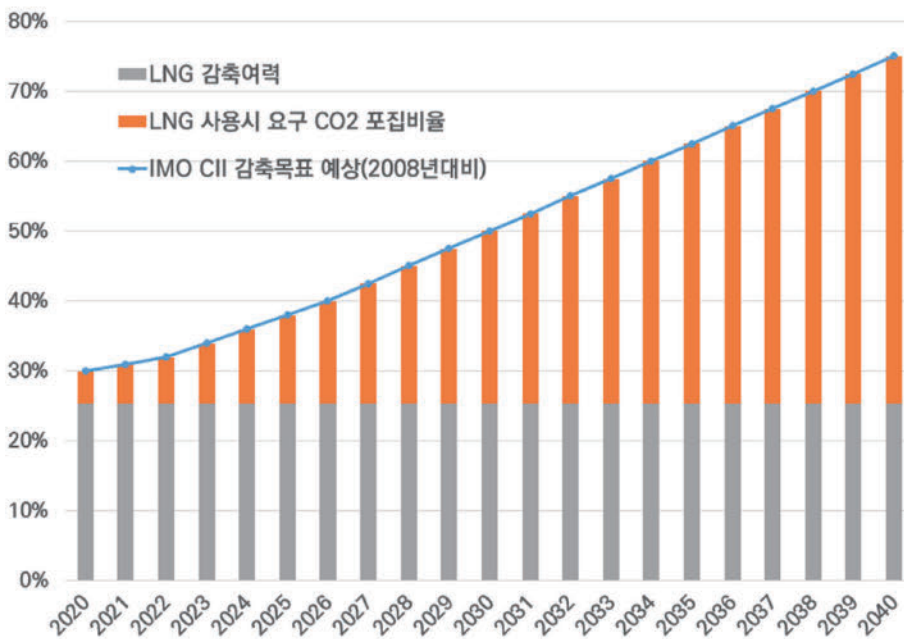


Fig. 4. CO<sub>2</sub> capture rate required for increasing CII reduction rates when using LNG.

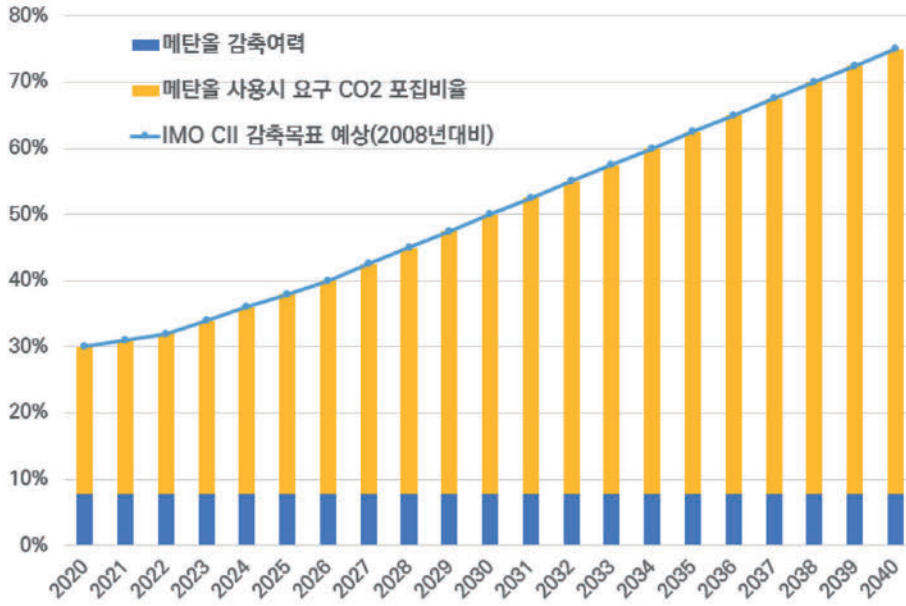


Fig. 5. CO<sub>2</sub> capture rate required for increasing CII reduction rates when using grey methanol.

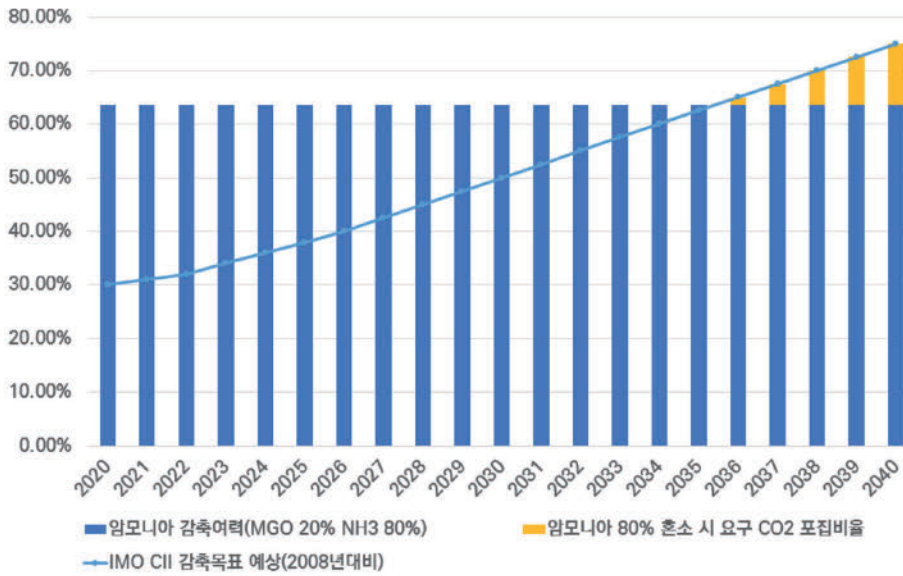


Fig. 6. Required CO<sub>2</sub> capture rate for increasing CII reduction rates when using ammonia (MGO 20%, NH<sub>3</sub> 80%).

4.2 연료에 따른 선상 이산화탄소 포집 기술의 주요 이슈 및 연구개발 방향

Fig 9는 선상 이산화탄소 포집시스템(Carbon Capture Systems)의 개략도를 보여준다. 선상 CCS는 CO<sub>2</sub> 포집기술과 CO<sub>2</sub> 선상 저장 기술로 구분할 수 있다. 선상에서 이산화탄소를 포집하는 대표적 방식으로는 흡수(Absorption), 분리막(Membrane), 극저온(Cryogenic), 흡착(Adsorption) 등이 있으나, 본 연구에서는 배기가스 가압이 필요 없는 흡수식 포집을 선택적으로 다룬다. 흡수 방식은 CO<sub>2</sub>와 물리·화학적 상호작용이 강한 액체 물질을 이용하여 CO<sub>2</sub>를 포집한다. 지금까지 다양한 물리적, 화학적 흡수제들이 개발 완료되어 상용화 되었으며, 오랜 기간에 걸쳐 검증이 완료된 기술이다. 하지만 흡수

탑, 재생탑 등을 포함하는 포집 설비의 규모가 크며, 중량이 무거워 선박 조건에 맞춰 최적 설계가 필요하다. 전통적인 아민계열 흡수제를 사용할 경우 상대적으로 큰 에너지가 필요(약 3~4 GJ/ton CO<sub>2</sub>)하며, 대부분의 에너지는 가열하여 CO<sub>2</sub>와 흡수제를 분리하는 재생탑 재비등기(Reboiler) 열량으로 소모된다.

육상 탄소 포집 설비와 다르게 선박에서는 포집된 CO<sub>2</sub>를 선상에서 효과적으로 임시 저장할 수 있어야 한다. 현재 고압 기체 CO<sub>2</sub> 저장 방식, 중압 액체 CO<sub>2</sub> 저장 방식, 고체 CO<sub>2</sub> 저장 방식(드라이아이스), 전환 반응을 통한 액체 생성물(메탄올 등), 전환 반응을 통한 고체 생성물(탄산칼슘, 하이드레이트 등) 형태로 저장하는 방식이 검토되고 있다. 저장시스템의 공간효율성 및 경제성, 송출 용이



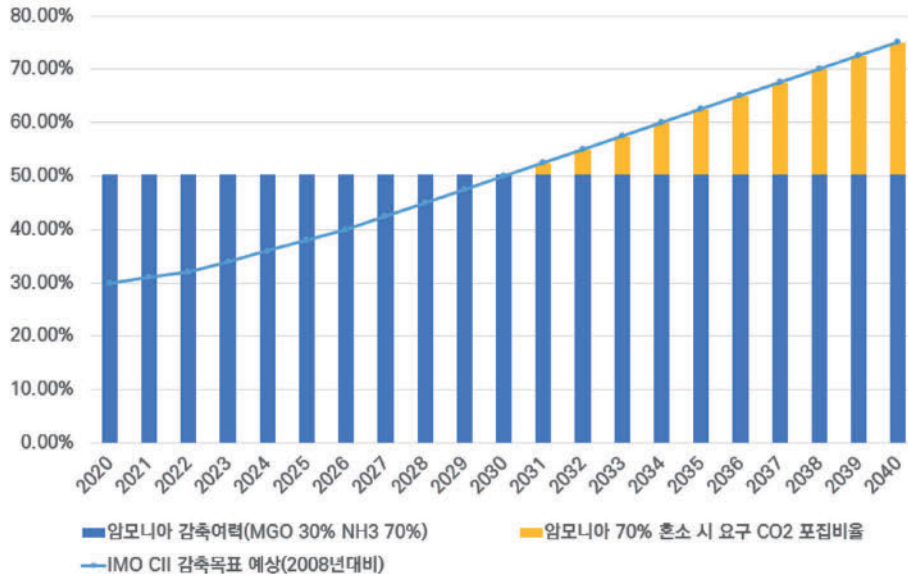


Fig. 7. Required CO<sub>2</sub> capture rate for increasing CII reduction rates when using ammonia (MGO 30%, NH<sub>3</sub> 70%).

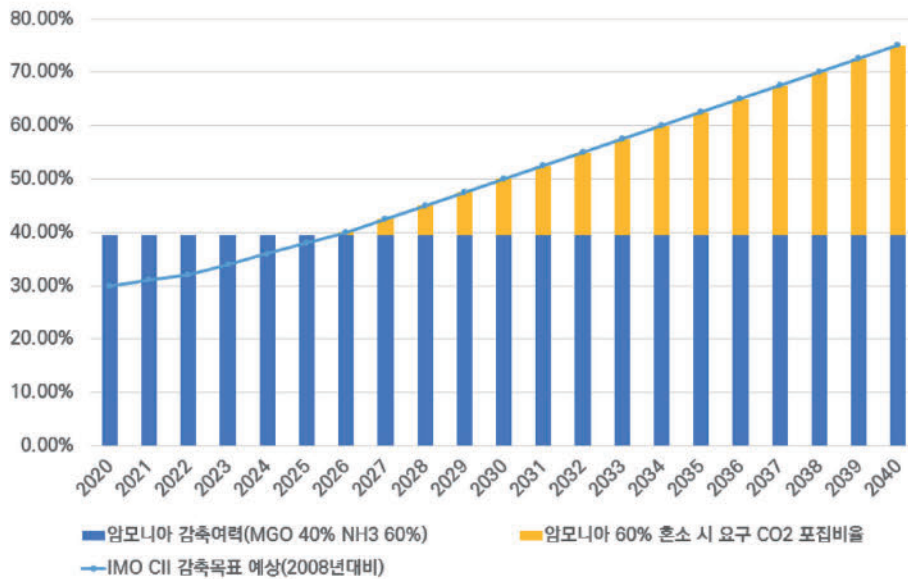


Fig. 8. Required CO<sub>2</sub> capture rate for increasing CII reduction rates when using ammonia (MGO 40%, NH<sub>3</sub> 60%).

성 등을 종합적으로 판단하였을 때, 중압 액체 CO<sub>2</sub> 저장 방식이 가장 타당할 것으로 예상된다. 중압 액체 저장 방식은 선상에서 포집된 이산화탄소를 액화시켜 약 7~15 barg의 압력용기에 저장하는 방식이다.

최근 IMO FFT(Future Fuels and Technology) 보고서에 따르면, 선상 이산화탄소 포집 기술은 2030년경 운영 가능한 형태로 개발될 전망이다, 운용 안정성 및 경제성이 확보된 상용화 시점은 불투명하다고 기술되어 있다. 그러나 동 보고서에서 선상 이산화탄소 포집 기술은 2050년 탄소중립 실현을 위해 반드시 활용되어야 할 기술로 설명하고 있으며, 기술성숙도를 높이기 위한 연구개발 및 실증이 매우 중요한 시점이다(IMO Secretariat[2023b]).

흡수식 이산화탄소 포집 시스템은 이미 육상용으로 개발되어 대

용량 발전설비에서 상용화가 완료된 기술이다. 그럼에도 불구하고 배기가스 조성의 다양성, 제한된 선상 공간, 열원 확보 등 선박에서는 다양한 기술 이슈들이 존재한다. 본 연구에서는 선상 이산화탄소 포집 시스템이 가지는 기술적, 제도적 이슈를 해결하기 위한 8가지 연구 방향을 제시한다.

#### 4.2.1 흡수제 선정

CO<sub>2</sub>와 흡수제를 분리하기 위한 에너지가 상대적으로 적게 소모되는 신 흡수제의 경우, 이를 개발한 회사에 라이선스 비용을 지불해야 한다. 성분이 공개된 아민계열 흡수제를 사용할 경우, 라이선스 비용을 절약할 수 있으나 포집 및 분리에 상대적으로 높은 에너지가 들어가게 된다. 포집설비의 크기, 중량, 경제성 등을 종합적으



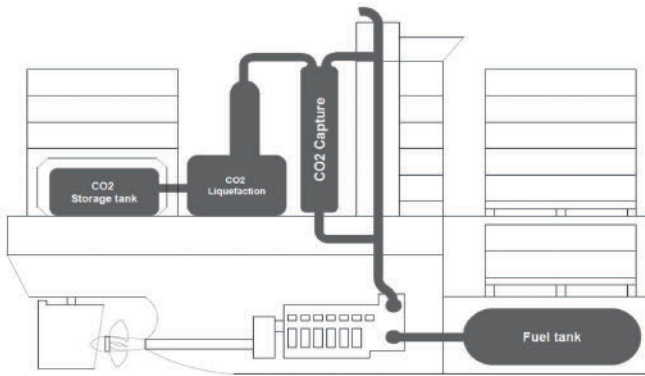


Fig. 9. Concept diagram of onboard CCS (Lee[2021]).

로 고려하여 흡수제 혼합 조성을 선택해야 할 것이다.

육상에서의 CCS 기술은 석탄화력 발전소, 시멘트 공장 등을 대상으로 활용되었으며, 대부분 배기가스 중 CO<sub>2</sub> 농도가 12~15 mol% 수준이다. 선박에서 LNG를 연료로 활용했을 때 가스 엔진의 배기가스 중 CO<sub>2</sub> 농도는 4~7 mol% 수준으로, 선박 엔진 조건에 잘 맞는 흡수제 검토가 반드시 필요하다(Ji *et al.*[2021]; van de Haar *et al.*[2017]). CO<sub>2</sub> 농도가 낮은 배기가스에서의 포집을 위해 MEA (Monoethanolamine)가 우선적으로 검토되었고, 주요내용을 Table 3에 정리하였다. Luo and Wang[2017]은 17 MW급 35,000 GT 일산화물선을 대상으로 35 wt% MEA 흡수제를 사용하였으며, CO<sub>2</sub> 농도 5.69 mol%의 배기가스를 대상으로 73% 포집율을 달성하였다. 이때 톤 CO<sub>2</sub>를 포집하는데 필요한 SRD(Specific Reboiler Duty)는 3.77 GJ/ton 이었다. Ros *et al.*[2022]은 네덜란드 DerisCO<sub>2</sub> 프로젝트의 타겟 선박인 LNG fuelled heavy lift ship을 대상으로 30 wt% MEA 흡수제를 적용하여 CO<sub>2</sub> capture process를 설계하였다. 66%~84% capture level을 달성하기 위한 SRD는 5.28 GJ/ton ~ 7.05 GJ/ton로 계산되었다.

CO<sub>2</sub> 포집율을 높이면서 SRD를 낮추기 위해 2개 이상의 흡수제를 혼합한 연구도 있었다. Feenstra *et al.*[2019]은 8,000 DWT 일산화물선을 대상으로 30 wt% MEA 흡수제 및 30 wt% PZ(Piperazine) 흡수제를 적용한 선상 탄소포집 시스템 개념설계를 수행하였다. 디젤 및 LNG 2가지 연료를 검토하였으며, 4.8 mol% CO<sub>2</sub> 농도를 가진 배기가스에서의 90% 포집율을 달성하였다. Lee *et al.*[2021]은 3,840 TEU급 피더선(Feeder Container Ship)을 대상으로 8 wt% PZ와 22 wt% MDEA(Methyldiethanolamine)를 혼합한 흡수제를 활용하여 선상 탄소포집 시스템을 설계하였으며, 62.8% 흡수율 달성을 위한

SRD는 3.3 GJ/ton이었다. Ji *et al.*[2021]은 디젤을 사용하는 LNG 운반선을 대상으로 선상 탄소포집 시스템 모델을 구축하고 MEA, DIPA(Diisopropanolamine), MDEA/PZ 등 다양한 혼합 흡수제를 비교하였다. DIPA를 사용했을 때 가장 높은 에너지 효율 성능을 보였으며, 이때 SRD가 3.22 GJ/ton로 계산되었다.

향후 IMO 온실가스 감축 규제 대응을 위해 LNG 메탄올, 암모니아 등 다양한 선박 연료가 활용될 예정이며, 연료에 따라 배기가스 조성이 달라질 것이다. LNG와 메탄올이 이론공연비로 연소되었을 때 배기가스 내 CO<sub>2</sub> 몰 분율은 약 9.5 mol%, 11.5 mol%이지만, 실제연소에서는 과잉공기량, 불완전 연소, 열손실 등으로 인해 CO<sub>2</sub> 농도가 5 mol% 이하로 예상된다. 암모니아의 경우 향후 엔진 기술이 고도화될수록 과일릿 연료 사용량이 줄어들면서 배기가스 내 CO<sub>2</sub> 농도가 점점 더 떨어질 것으로 예상된다. 이는 CO<sub>2</sub>가 상대적으로 희박한 배기가스를 대상으로 흡수제를 선정하고 포집 시스템을 설계해야 하는 기술적 난제를 내포한다. 이와 같이 사용되는 연료에 따라 최적의 흡수제 선정이 검토되어야 하며, CO<sub>2</sub> 흡수 성능만을 고려하여 흡수제를 선정했을 경우 재생탑 SRD가 과도하게 증가될 수 있다. 선박에서는 Steam 생산이 매우 제한적인 점을 고려하여, 1 ton의 CO<sub>2</sub>를 포집할 때 소모되는 SRD가 3 GJ 이하가 되도록 설계하는 것이 중요한 개발 포인트가 될 것이다. 또한, 흡수탑(Absorber Column)에서의 포집효율을 높이기 위한 배기가스 냉각-습도조절 등 전처리 공정에 대해서도 사용 연료 및 배기가스 조건에 맞춰 최적화되어야 할 것이다.

#### 4.2.2 열통합 기술 고도화

대형선박의 경우, 아민 계열의 흡수제를 활용한 흡수식 포집법이 가장 현실적인 대안이 될 것으로 예상된다. 흡수제는 CO<sub>2</sub>와 친화적인 물질이기 때문에, 흡수제와 CO<sub>2</sub>를 분리하는 과정에서 요구되는 에너지가 상당히 높다. 다시 말하면, 재생탑(Stripper Column)의 재비동기(Reboiler)에서 상당량의 스팀이 요구된다. 육상 발전소와 다르게 선박에서는 스팀을 확보하기 위한 별도장치가 필요하고, 이는 중량 증가 및 적재 가능한 화물량 감소로 이어질 수 있기 때문에 선박에 탑재되는 시스템 간 내부 열통합(Heat Integration) 기술이 고도화 되어야 한다. 선박의 배기가스 폐열을 최대한 회수하여 스팀을 생산할 수 있는 시스템(Economizer 등) 개선도 함께 필요하다. 기존 연구에서도 재비동기에 활용할 스팀을 생성하기 위해 배기가스 폐열을 활용하였으며, 다수의 문헌에서 배기가스 온도를 325도~430도 수준으로 높게 가정하였다(Luo and Wang[2017]; Feenstra *et al.*[2019]; Guler and Ergin[2021]; Ros *et al.*[2022]).

Table 3. Studies on solvents and SRD for onboard CCS

저자	Solvent	Target Ship	배기가스 CO <sub>2</sub> 농도	SRD [GJ/ton CO <sub>2</sub> ]
Luo & Wang	35 wt% MEA	35,000 GT Cargo Ship	5.66 ~ 5.69 mol%	3.77 ~ 3.85
Ros <i>et al.</i>	30 wt% MEA	LNG fuelled heavy lift ship	4.5 mol%	5.28 ~ 7.05
Feenstra <i>et al.</i>	30 wt% MEA, 30 wt% PZ	8,000 DWT Cargo Ship	4.8 mol%	4.37 ~ 5.89
Lee <i>et al.</i>	8 wt% PZ, 22 wt% MDEA	3,840 TEU container feeder	4.3 wt%	3.3
Ji <i>et al.</i>	MEA, DIPA, MDEA/PZ	LNG carrier	4 ~ 7 mol%	3.22



하지만 최근에는 엔진 효율이 개선됨에 따라 배기가스 온도가 200도 전후로 낮아졌기 때문에, 스팀 열원 확보 및 효율 개선을 위한 내부 열통합 기술이 더욱 고도화되어야 할 것이다.

#### 4.2.3 탈수, 액화, 저장 기술

선상에서 포집된 CO<sub>2</sub>에서 수분 등의 불순물을 제거하여 부식 없이 액화 저장하는 기술 개발도 반드시 필요하다. 선상에서 CO<sub>2</sub>를 저장하는 가장 효과적인 형태는 중압 액체로 예상된다. LNG연료는 이미 상용화되었고, 온실가스 감축효과가 20% 정도 되기 때문에, 동시에 고려하면 CO<sub>2</sub> 포집설비의 규모를 줄일 수 있다. LNG 추진선박에 적용 시, 기화기(Forcing Vaporizer)와 연계하여 Boil-Off Gas (BOG) 기화 냉열(약 -163도)을 CO<sub>2</sub> 액화에 활용하는 것을 생각해볼 수 있다(Lee *et al.*[2021]). LNG 외에도 메탄올(상온)과 암모니아(약 -34도) 연료가 저탄소 연료로 함께 고려될 수 있으나, 연료의 온실가스 감축 여력, 연료 저장 온도, 배가스 온도에 따라 냉열 활용 여부 및 열통합 방식이 달라질 것이다. 각 경우에 대해 냉열 활용을 통한 이득(Benefit)과 열교환 설비 증설로 발생하는 비용(Cost) 및 화물 적재량 손실을 종합적으로 고려하여, 선종별, 연료별 비용편익분석을 수행하여 시스템 추가 여부를 결정해야 한다.

CO<sub>2</sub>의 삼중점은 약 5.1 bar로, 액체 상태로 저장되기 위해서는 압력 용기가 필요하다. 선상 공간이 상대적으로 여유로운 원유운반선의 경우, 실린더 또는 Bi-Lobe 형태(IMO Type-C 탱크)로 설계가 가능하겠으나, 컨테이너선 등의 경우에는 공간 효율과 선상 배치 유연성이 고려된 각형 압력용기 개발이 필요할 것이다.

#### 4.2.4 선상 CCS 기술의 경제성

열통합 기술 고도화를 통해 1 ton의 CO<sub>2</sub>를 포집하는데 소요되는 비용을 최소화해야 할 것이다. 선상 이산화탄소 포집시스템의 경제성은 IMO에서 논의되고 있는 시장기반조치와 무탄소 연료 가격에 따라 변하게 된다. IMO에서는 아직까지 구체적인 탄소부담금(GHG Levy) 액수가 논의되고 있지 않기 때문에, 무탄소 연료를 대표하는 암모니아와 기존 연료(MGO, LNG) 가격 차이를 활용하여 선상 CO<sub>2</sub> 포집·액화·저장 비용의 상한선을 예측해보았다. MGO와 LNG를 활용하여 1GJ의 에너지를 얻는데 발생하는 CO<sub>2</sub> 양은 0.0748 ton, 0.0570 ton이다. 그린 수소 생산시장이 충분히 안정화된 2050년경 그린 암모니아 가격은 22-40 \$/GJ, LNG 가격은 약 9 \$/GJ, MGO는 약 12 \$/GJ 수준으로 예상되고 있다(Lindstad *et al.*[2021]; Lagemann *et al.*[2023]; IRENA[2021]). 전통 화석연료(MGO, LNG)와 그린 암모니아와의 가격은 10-30 \$/GJ 정도 차이날 것으로 예상되며, 선상 CO<sub>2</sub> 포집 비용 상한선을 Fig. 10과 같이 계산하였다.

그린 암모니아 가격이 가장 낮을 경우 기존 연료와의 가격 차이가 10 \$/GJ 수준이며, 이때 MGO 및 LNG를 연료로 활용하는 선박의 CO<sub>2</sub> 포집·액화·저장 비용의 상한선은 134 \$/ton CO<sub>2</sub>과 175 \$/ton CO<sub>2</sub> 수준이 될 것이다. 그린 암모니아 가격이 40 \$/GJ 수준으로 형성될 때는 MGO 및 LNG를 연료로 활용하는 선박에서 401 \$/ton CO<sub>2</sub>과 526 \$/ton CO<sub>2</sub>까지 선상 CCS 기술이 경제성을 확보할 수 있을 것이다.

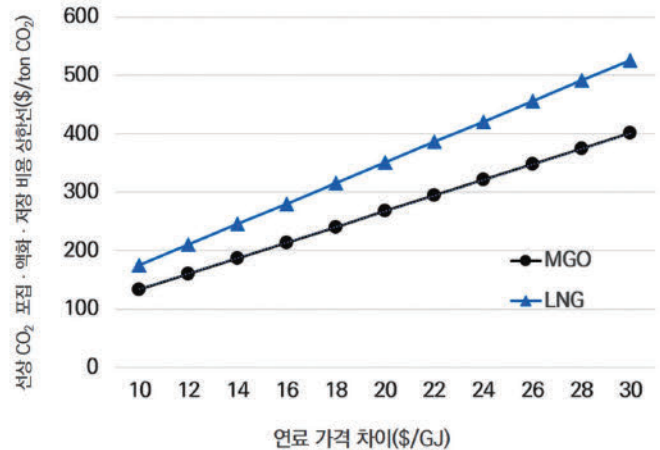


Fig. 10. Upper limit of cost for onboard CO<sub>2</sub> capture, liquefaction, and storage.

#### 4.2.5 선박운동 영향도 분석 및 배치최적화

현재 이산화탄소 포집기술은 고정되어 있는 육상 설비에 최적화되어 있다. 바다 위의 선박은 6자유도 운동(Surge, Sway, Heave, Pitch, Roll, Yaw)을 하며, 특히 설계단계에서 기울임(Tilting)이 포집설비에 미치는 영향이 검토되어야 할 것이다. 또한, 해상 상황이 좋지 않을 때를 대비할 수 있는 대응기술 및 운영 기준(Operation Philosophy)에 대한 검토가 필요할 것으로 생각된다. 나아가 선박 6자유도 운동과 함께 이산화탄소 포집 및 액화 저장 시스템의 규모, 중량 등을 종합적으로 고려하여 선상에 적절히 배치할 수 있는 설계최적화 연구가 선종별로 수행되어야 할 것이다.

#### 4.2.6 선종별 최적화

IMO가 선박 온실가스를 줄이기 위해 설계적 조치로서 활용하는 선박에너지효율설계지수(EEDI)와 현존선 에너지효율지수(EEXI)는 선종과 선박규모에 따라 목표 감축률이 다르게 적용된다. 감속 운항(Slow Steaming), 에너지효율개선편(ESD), 저탄소 연료(LNG, 메탄올 등) 등을 통해 달성 가능한 감축량과 목표 감축률의 간극을 선종별로 분석하여 CO<sub>2</sub> 포집시스템 필요 여부와 용량을 결정해야 한다. 만약 탄소포집 설비의 장착이 필요하다면, 비용편익 분석을 통해 목표 포집량을 설정해야 한다.

또한 탱크 길이 데크 활용이 상대적으로 용이한 선종이 있는 반면, 벌크선, 컨테이너선처럼 데크 사용이 매우 제한적인 선종이 있다. 이럴 경우 대체연료 추진시스템(연료탱크, 연료공급시스템)과 선상 이산화탄소 포집 시스템을 추가 설치함에 따른 화물 선적 공간 감소를 고려하여 최적의 시스템 용량이 결정되어야 할 것이다.

#### 4.2.7 항구 인프라 구축

선상에서 포집된 이산화탄소는 임시 저장 탱크에 중압 액체 형태로 보관되지만, 선박이 항구에 접안했을 때 하역되어야 한다. 그리고 실질적인 온실가스 감축으로 이어지려면 육상 CCS 가치사슬(Value Chain)과 연결되어야 한다. 액체 CO<sub>2</sub>는 Purity에 따라 최소



6~7 barg 이상으로 저장되어야 하기 때문에 항구에서 액체 CO<sub>2</sub>를 대용량으로 저장하고 발생하는 BOG를 관리할 수 있는 인프라에 대한 연구가 필요하다. 필요시 육상 CCS 가치사슬에 연결할 수 있는 순도(CO<sub>2</sub> 99.7 mol% 이상, 수분 30 ppm 이하 등)를 관리하는 기능을 갖춰야 할 것이다.

#### 4.2.8 국제해사기구(IMO) 규제 대응활동

선상 이산화탄소 포집 기술개발 및 실증연구와 동시에 해당 기술의 온실가스 감축 효과가 IMO 규제 프레임워크에 반영되도록 하는 의제 활동이 기술 상용화 및 보급확산에 매우 중요하다. 단기적으로는 EEDI/EEXI/CII 산식에 선상 이산화탄소 포집기술의 효과가 반영될 수 있도록 대응 활동이 필요하고, 장기적으로는 선박 유 전과정평가 지침서(LCA Guideline)에 선상 이산화탄소 포집기술의 효과가 잘 반영될 수 있도록 실무작업반 활동을 지속해야 한다. 대한민국은 MEPC 76차부터 선상 이산화탄소 포집시스템의 온실가스 감축 효과를 EEDI/EEXI/CII 산식에 반영하고자 노력하고 있으며, 그 결과 ISWG-GHG 16차부터 관련 논의가 시작될 예정이다(IMO Secretariat[2023d]).

## 5. 결 론

국제해사기구(IMO)는 제80차 해양환경보호위원회(MEPC)에서 2050년경까지 해운분야 탄소중립(Net-Zero)을 선언하는 개정 전략(2023 IMO GHG Strategy)을 채택하였다. 상향된 IMO 규제에 대응하기 위해 무탄소·탄소중립 선박연료 도입이 불가피하나 현재 연료의 가용성과 대체연료 생산 가용성과 선박 추진기술의 성숙도가 높지 않다. 이에 공기 윤활장치(Air Lubrication), 로터세일(Rotor Sail), 항로 최적화, 에너지 통합관제 등 선박 에너지 효율을 극대화할 수 있는 다양한 징검다리 기술이 함께 연구되고 있으며, 그 중에서도 선상 이산화탄소 포집 기술이 많은 관심을 받고 있다.

추후 지속적으로 사용될 선박 연료는 LNG, 메탄올, 암모니아로 예상되며, 현재 대체연료 추진 기술 성숙도와 IMO 온실가스 규제 논의 동향을 분석했을 때 선상 이산화탄소 포집시스템 도입이 시급하다고 생각된다.

① LNG의 TtW 관점에서 CO<sub>2</sub>만을 온실가스로 고려했을 때 온실가스 감축 여력이 약 25% 수준으로 평가된다. 무탄소 연료 도입 전 2040년까지 온실가스 감축 경로를 달성하기 위해서는 LNG와 함께 선상 이산화탄소 포집 기술이 활용되어야 할 것이다.

② 메탄올의 경우 동일 조건에서 온실가스 감축 여력이 약 7.8% 수준이며, e-메탄올의 경우 그린수소와 함께 대기 중에서 포집된 CO<sub>2</sub>를 원료로 사용해야 하기 때문에 생산량과 경제성이 제한될 가능성이 높다. 결국 상당량을 블루 메탄올을 통해 극복할 것으로 예상되며, 상향된 IMO 온실가스 감축 목표(Net Zero) 달성을 위해서는 블루 연료와 함께 선상 이산화탄소 포집 기술 활용이 필요하다고 판단하였다.

③ 암모니아의 경우 주 엔진이 개발되고 있으나, 암모니아 연료

의 연소특성 때문에 일부의 파일럿 연료 활용은 불가피하다고 생각한다. Tank to Wake 관점에서 CO<sub>2</sub>만을 온실가스로 고려했을 때 감축 여력은 MGO 혼소 비율에 따라 약 40%~60%로 예상된다. 이때 발생하는 CO<sub>2</sub>를 추가로 포집하는 설비가 필요할 것이다.

선상 이산화탄소 포집 기술은 IMO 규제 단계 및 사용하는 연료의 온실가스 감축 여력에 맞춰 포집량을 조절할 수 있는 장점이 있다. 반면 공간 활용, 경제성, 선박 운동 조건에서의 효율 등 극복해야 할 이슈들이 존재한다. 본 연구에서는 대체연료 추진기술의 기술성숙도와 가용성을 분석하여 선상 이산화탄소 포집시스템 도입의 필요성을 강조하였고 흡수제 선정, 열 통합 기술 고도화, 공간 제한성, 경제성, 선박 운동에 따른 영향 등 주요 기술이슈를 분석하여 개발 방향을 제시하였다.

## 후 기

본 논문은 해양수산부 재원으로 선박해양플랜트연구소의 기본사업인 “대형선박 이산화탄소 포집 시스템 설계기술 개발 및 파일럿 실증”에 의해 수행되었습니다(1525014867).

## References

- [1] Australia, 2020, Information on GHG lifecycle analyses and benefits of LNG as a transitional fuel. ISWG-GHG 7/5/4.
- [2] DNV, 2021, Maritime Forecast to 2050.
- [3] Feenstra, M., Monteiro, J., van den Akker, J.T., Abu-Zahra, M.R.M., Gilling, E. and Goetheer, E., 2019, Ship-based carbon capture onboard of diesel or LNG-fuelled ships, Intl. J. of Greenhouse Gas Control, 85, 1-10.
- [4] Guler, E. and Ergin, S., 2021, An investigation on the solvent based carbon capture and storage system by process modeling and comparisons with another carbon control methods for different ships, Intl. J. of Greenhouse Gas Control, 110, 103438.
- [5] IMO Secretariat, 2020a, Results of the 4th IMO GHG Study, MEPC 75/7/15.
- [6] IMO Secretariat, 2020b, REPORT OF THE MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE ON ITS SEVENTY-FIFTH SESSION, MEPC 75/18.
- [7] IMO Secretariat, 2021, REPORT OF THE MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE ON ITS SEVENTY-SIXTH SESSION. MEPC 76/15.
- [8] IMO Secretariat, 2023a, Draft report of the fourteenth meeting of the Intersessional Working Group on Reduction of GHG Emissions from Ships, ISWG-GHG 14/WP.1/Rev.1.
- [9] 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.
- [10] IMO Secretariat, 2023c, REPORT OF THE MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE ON ITS SEVENTY-NINTH SESSION. MEPC 79/15.



- [11] IMO Secretariat, 2023d, REPORT OF THE MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE ON ITS EIGHTIETH SESSION. MEPC 80/17.
- [12] INTERTANKO, 2022, Analysis of fuel options to meet the levels of ambition in the Initial IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships. MEPC 79/7/3.
- [13] IPCC, 2014, Climate Change 2014: Synthesis Report.
- [14] IRENA, 2021, A path way to DECARBONISE THE SHIPPING SECTOR By 2050.
- [15] Ji, C., Yuan, S., Huffman, M., El-Halwagi, M.M. and Wang, Q., 2021, Post-combustion carbon capture for tank to propeller via process modeling and simulation. *J. of CO<sub>2</sub> Utilization*, 51, 101655.
- [16] KOREAN REGISTER, 2021, Prospects on Eco-Friendly Ship Fuels – Ammonia as Ship Fuel.
- [17] 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.
- [18] Lee, S., Yoo, S., Park, H., Ahn, J. and Chang, D., 2021, Novel methodology for EEDI calculation considering onboard carbon capture and storage system. *Intl. J. of Greenhouse Gas Control*, 105, 103241.
- [19] Lee, S.H., 2021, Methodology for EEDI calculation and life cycle carbon intensity of ship fuel considering onboard carbon capture system, Ph.D. dissertation, Dept. Mech. Eng., KAIST, Republic of Korea.
- [20] 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.
- [21] Luo, X. and Wang, M., 2017, Study of solvent-based carbon capture for cargo ships through process modelling and simulation, *Applied energy*, 195, 402-413.
- [22] Park, S.K. and Kim, M.E., 2011, A Study on Thermal Management of Stack Supply Gas of Solid Oxide Fuel Cell System for Ship Applications, *J. of the Korean Society of Marine Engineering*, 35(6), 765-772.
- [23] RESOLUTION MEPC.203(62), 2011, Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships.
- [24] RESOLUTION MEPC.304(72), 2018, Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships.
- [25] RESOLUTION MEPC.333(76), 2021, 2021 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY EXISTING SHIP INDEX (EEXI).
- [26] RESOLUTION MEPC.334(76), 2021, 2021 GUIDELINES ON SURVEY AND CERTIFICATION OF THE ENERGY EFFICIENCY EXISTING SHIP INDEX (EEXI).
- [27] RESOLUTION MEPC.335(76), 2021, 2021 GUIDELINES ON THE SHAFT/ENGINE POWER LIMITATION SYSTEM TO COMPLY WITH THE EEXI REQUIREMENTS AND USE OF A POWER RESERVE.
- [28] RESOLUTION MEPC.336(76), 2021, 2021 GUIDELINES ON OPERATIONAL CARBON INTENSITY INDICATORS AND THE CALCULATION METHODS (CII GUIDELINES, G1).
- [29] RESOLUTION MEPC.337(76), 2021, 2021 GUIDELINES ON THE REFERENCE LINES FOR USE WITH OPERATIONAL CARBON INTENSITY INDICATORS (CII REFERENCE LINES GUIDELINES, G2).
- [30] RESOLUTION MEPC.338(76), 2021, 2021 GUIDELINES ON THE OPERATIONAL CARBON INTENSITY REDUCTION FACTORS RELATIVE TO REFERENCE LINES (CII REDUCTION FACTOR GUIDELINES, G3).
- [31] RESOLUTION MEPC.339(76), 2021, 2021 GUIDELINES ON THE OPERATIONAL CARBON INTENSITY RATING OF SHIPS (CII RATING GUIDELINES, G4).
- [32] RESOLUTION MEPC.376(80) - GUIDELINES ON LIFE CYCLE GHG INTENSITY OF MARINE FUELS (LCA GUIDELINES).
- [33] RESOLUTION MEPC.377(80) - 2023 IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS.
- [34] Ros, J.A., Skylogianni, E., Doedee, V., van den Akker, J.T., Vredeveldt, A.W., Linders, M.J.G., Goetheer, E.L.V. and Monteiro, J.G.M.-S., 2022, Advancements in ship-based carbon capture technology on board of LNG-fuelled ships. *Intl. J. of Greenhouse Gas Control*, 114, 103575.
- [35] van de Haar, A., Trapp, C., Wellner, K., de Kler, R., Schmitz, G. and Colonna, P., 2017, Dynamics of postcombustion CO<sub>2</sub> capture plants: modeling, validation, and case study, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 56, 1810-1822.

---

Received 18 May 2023

1st Revised 12 September 2023, 2nd Revised 17 October 2023

Accepted 18 October 2023