

해상 탄소중립에 대한 국내 해사산업 대응 방안



CONTENTS

- I. 서론
- II. 해상환경규제 현황
- III. 선박 시장의 대응 현황
- IV. 국내 해사업계의 현황
- V. 경쟁력 강화를 위한 대응 방안
- VI. 결론

작성

선임연구원 양종서 (02-6252-3586)



<요 약>

해상 탄소중립을 위한 세계 각국의 노력이 추진되고 있으며 이러한 변화는 한국 해사산업계에 있어 기회인 동시에 위험요인이 될 수도 있음

- 본고에서는 해상환경규제와 대응현황을 살펴보고 우리나라 해사산업계의 경쟁력 강화를 위한 대응 방안을 제시하고자 함

I. 해상 환경규제 현황

(IMO) IMO는 2050년까지 해상 탄소중립 실현 목표하에 규제조치를 시행하고 추가적 조치를 논의하고 있음

- IMO는 2018년, 2050년까지 선박이 배출하는 온실가스의 총량을 2008년대비 50% 저감하는 탄소중립 실현 초기 전략과 계획을 채택함
- 이러한 전략의 일환으로 2023년 EEXI와 CII 등의 강경 조치로 저효율 노후선과 같은 온실가스 다량 배출 선박을 압박하고 퇴출을 유도
- 추가적인 시장기반조치도 논의 중이며 선박의 배출량에 따라 인센티브와 페널티를 부과

(EU) 최근 입법안 패키지인 “Fit for 55”를 발표하고 독자적인 해운 규제를 추진

- EU는 2023년 역내 항만 기항 선박에 대하여 온실가스배출권 거래를 의무화함
- 또한, 2050년까지 온실가스집약도를 2020년 대비 75%까지 저감하는 “EU Fuel Maritime” 조치를 연료 생산과정의 온실가스를 포함하는 well-to-wake 기준으로 시행

이들 조치는 선박 시장에 다종의 압력으로 작용하여 노후선 교체, 무탄소 연료 개발 등을 촉진할 것으로 기대

II. 선박 시장의 대응 현황

선사와 조선사들은 탄소중립을 위한 대안을 찾고 있으나 혼란스러운 상황

- 장기적으로 수소가 무탄소 연료로서 자리잡고 LNG가 가교역할을 할 것으로 기대되었으나 수소에 대한 많은 기술적 문제와 LNG의 화석연료로서의 한계 등으로 인하여 불확실성이 높음
- 다른 모든 대안들 역시 많은 문제점들을 내포하고 있어 뚜렷한 대안을 찾기 어려운 상황



(메탄올) 기술적 과제는 거의 없으나 그린 메탄올의 공급 가능성이 가장 큰 난제임

- 메탄올 추진선을 발주한 Maersk는 자체 투자를 통한 자체 연료 조달 계획

(암모니아) 무탄소 연료로서 상용화가 임박한 것으로 기대되나 아산화질소 배출, 연료의 독성, 그린 암모니아 경제성 개선 등의 과제가 남아있음

- 2024년을 전후하여 엔진개발 완료가 기대되나 암모니아 연료 단독 사용이 아닌 화석연료를 보조연료로 사용하는 혼소 엔진으로 예상되며 이에 따라 일정 수준 탄소 배출 예상
- 석유 연료탱크 대비 약 4배의 크기 필요, 독성으로 인한 벙커링 문제, 이산화탄소 대비 265배의 온실가스 효과를 가진 아산화질소 배출, 수조 달러에 이를 것으로 추정되는 막대한 그린 암모니아 생산설비 투자 등 아직까지 해결해야 할 과제가 많이 남아 있음

(탄소포집) 탄소포집과 저장은 향후 온실가스 저감책으로서 일정 비중의 역할을 할 것으로 기대되나 경제성과 충분한 저장장소 확보에 대한 불확실성이 있음

- 이미 육상에서 저감 대책으로 사용중인 탄소포집과 저장(CCS)은 선박에서도 신조선 및 현존선에 사용될 것으로 기대되며 이산화탄소 운반선이라는 새로운 신조선 수요 창출 기대
- 다만, 포집비용 등에 대한 경제성과 육상 및 해상 포집 탄소에 대한 충분한 저장장소 확보 등에 대한 논란이 있음

(수소) 수소는 장기적으로 무탄소 선박 연료로서의 궁극적 대안으로 기대되나 선박 적용 가능성에 대하여 가장 불확실성이 높은 연료이며 해결해야 할 난제가 많이 남아있음

- 수소는 영하 253°C의 초저온에서 저장 및 운송이 가능하고 에너지 밀도가 낮아 연료탱크의 크기가 기존 석유계 대비 7배 수준으로 확대되어야 하는 등 연료로서의 활용이 쉽지 않음
- 수소 연료는 내연기관보다 연료전지의 효율이 높으나 연료전지는 가격, 무게 및 부피, 짧은 수명에 따른 잦은 교체 등 난제들이 남아있으며 대형화에 따른 실증도 이루어지지 않았음
- 기술전문가들도 선박에 적용이 불가능하다는 비관적 의견부터 LNG나 암모니아로부터 분리한 수소를 사용하는 방식으로 약 15년 내에 상용화가 가능하다는 견해 등 엇갈린 전망을 제시함

(소형 원자로) 차세대 무탄소 연료에 대한 불확실성이 높아지며 원자력 추진이 하나의 대안으로 연구되고 있음

- 300MW급 소형 원자로 중 용융염 원자로를 선박에 적용하는 대안이 해외 및 국내에서 검토되고 있으며 기술 장벽은 높지 않은 것으로 알려짐
- 그러나 국제사회의 강한 거부감으로 상선에 대한 표준으로 자리잡을 수 있을 것인지 여부, 폐기물 처리에 대한 국제적 합의 등 어려운 문제들로 인한 불확실성이 높음



Ⅲ. 국내 해사업계 대응 방안

현재까지 개발 중인 해상 탄소중립의 모든 대안들이 높은 불확실성을 가진 상황에서 관련 업계의 대응 현황은 다음의 문제점들이 있음

- 해운업계는 오랜 불황으로 인한 재무적 한계에도 불구하고 노후선박의 교체투자가 이루어져야 하는 상황이나 탄소중립 대안들의 불확실성으로 전략 수립에도 어려움을 겪고 있음
- 조선업계는 재무적 여력 부족에도 다양한 모든 대안에 각 조선소들이 중복된 연구개발에 투자
- 조선업계와 해운업계는 상호 소통 없이 상대방 업계가 대안을 제시해줄 것으로 기대
- 기자재업계의 대응도 어려운 상황

해외 경쟁국들의 경우 국가가 주도하는 효율적 개발 체제로 대응

- 중국은 “중국제조 2025”와 “일대일로” 전략하에 조선업, 해운업을 통합하여 국가가 통제하며 막대한 지원이 이루어짐
- 일본은 국토교통성이 기자재사, 조선사, 해운사, 해사기관, 연구기관 등이 폭넓게 참여하는 해사클러스터를 조직하고 운영하며 통합적 전략수립 및 지원

국내 해사업계의 경쟁력을 위해서는 총체적 협력과 정부 지원 필요

- 일본 해사클러스터를 모델로 하는 한국형 “해사협력기구” 구성 필요
- 협력기구는 상설 조직으로 조선기자재사, 조선사, 국내 및 해외 해운사, 해외 에너지사, 연구기관, 해사기관 등 폭넓은 범위의 기업과 기관 참여가 필요하며 논의를 주도하고 협력을 위한 조정 역할 수행 필요
- 협력기구를 통한 논의와 협력으로 각 대안의 불확실성 조기 해소, 미래 전략 수립, 협력 연구를 통한 효율적 연구개발 방안 추진 등 필요
- 새로운 기술 적용 시 실증선 제작과 운영에 대한 범국가적 협력을 통한 방안 모색과 협력 연구사업에 한하여 실증선 제작 지원에 대한 예비타당성 조사 면제 등 특별조치 필요
- 실질적으로 탄소중립 연구를 주도하고 있는 대형 조선사에 대한 연구 지원 필요
- 협력기구를 통한 선박용 청정 연료 생산과 보급 방안도 모색 필요
- 기술 부문 외에 금융, 법률 및 제도, 비즈니스 모델, 안전 등 비공학 분야에 대한 연구투자 활성화도 필요



I. 서론

최근 기후변화를 방지하기 위한 노력으로 세계적인 합의가 도출·추진됨에 따라 해상에서도 탄소중립을 향한 다양한 조치들이 시행되고 있음

- 해상에서의 탄소중립 역시 2015년 파리협정을 준수하는 수준으로 강도 높게 진행되고 있으며 IMO가 이를 주도하고 EU는 독자적인 추가 규제를 시행하고 있음
- IMO와 EU는 다양한 조치들을 수립하여 시행하고 있으나 이러한 환경규제 조치들은 아직까지 조선업계가 기술적으로 완성하지 못한 수준의 온실가스 저감을 요구하고 있음

강도 높은 환경규제 등의 조치들로 인하여 선박 시장은 혼란을 겪고 있음

- 선사들이 체감하는 IMO와 EU의 탄소중립을 위한 규제들은 경제성이나 현재의 기술적 수준을 고려하지 않은 조치로 평가되며 이에 대한 대책이 시급한 상황임
- 약 100여년간 석유에 의존해온 선박시장으로서는 탄소중립을 위한 뚜렷한 대응책이 아직까지 마련되지 않은 상황임
- 현재 다양한 연료와 추진시스템이 검토 및 연구개발되고 있으나 각각의 문제점을 안고 있으며 선사들이 단기뿐 아니라 중장기 전략 수립에 큰 혼란을 겪고 있음

한국 조선산업은 기술력과 품질 면에서 세계 시장을 주도하고 있는 만큼 이러한 변화에 선도적으로 결과를 제시할 필요가 있음

- 현재까지 조선업계 역시 확고한 대안을 제시하지 못한 채 다양한 대안에 대하여 검토 및 연구개발을 수행하고 있으며 경쟁국들 역시 동일한 상황으로 추정됨
- 한국 조선업계에 있어 이러한 환경패러다임은 경쟁자와의 격차를 벌릴 기회이며 동시에 경쟁국의 결과보다 뒤처질 경우 주도권을 잃어버릴 수도 있는 위험요인이 될 수도 있음

본고에서는 시장 패러다임의 변화에 대응하기 위한 각 대안의 현황을 살펴보고 국내 조선업계가 주도권을 유지하고 해운업계 역시 경쟁력을 유지 및 발전시킬 방안을 제시하고자 함

- 현재의 상황은 조선업계, 해운업계 단독의 노력보다는 국가적으로 총체적인 노력이 필요한 상황으로 파악되며 이에 대한 방안을 제시하고자 함



II. 해상환경 규제 현황

1. IMO의 온실가스 저감을 위한 규제 현황

국제해사기구 IMO는 MARPOL 협약 부속서 VI에 근거하여 해상에서의 대기오염 방지를 위한 각종 조치를 시행하고 있음

- IMO(International Maritime Organization)는 유엔산하 전문기관으로 선박의 안전과 보안, 선박에 의한 해양 및 대기오염 방지 등을 관장하는 국제기구임
- IMO는 본래 해상 안전을 관할하는 기구로 출범하였으나 1954년 "석유에 의한 해양오염 방지를 위한 국제 협약(OILPOL협약)"의 주 관리기관으로 지정되어 1959년부터 정식 임무를 시작함
- 이후 1973년, 석유뿐 아니라 그 이외의 각종 오염물질 배출을 포괄적으로 규제하기 위한 국제협약인 "MARPOL(Marine Pollution Treaty)"을 채택함 (동 협약은 1978년 채택된 의정서에 의해 수정되어 협약은 "MARPOL 73/78"로 지칭)
- MARPOL 협약은 본문 조항 외에 6개의 부속서(Annex)로 구성되었는데 이 중 부속서 VI(Annex VI)이 "선박으로부터의 대기오염 방지를 위한 규칙(Regulation for the Prevention of Air Pollution from Ships)"으로, 1997년 채택되며 대기오염 방지 조치의 근거가 됨
- IMO의 전문위원회 중 하나인 MEPC(해양환경보호위원회 : The Marine Environment Protection Committee)의 합의와 결정에 따라 MARPOL 73/78 Annex VI의 개정을 통하여 온실가스 저감을 포함한 대기오염 방지를 위한 각종 조치가 이루어짐

IMO의 온실가스 저감 노력은 EEDI를 시작으로 전개됨

- EEDI(energy efficiency design index)는 선박의 화물 운송 톤마일당 배출되는 이산화탄소의 양을 g(gram)으로 나타낸 설계지수임
- IMO는 온실가스 초기 규제로서 보다 저공해의 고효율 엔진과 기자재 사용을 목적으로 2013년 1월부터 계약되는 400GT 이상의 신조선에 EEDI를 제한하는 기술적 조치를 시행함
- 초기 규제는 2000~2010년에 건조된 선박의 평균 효율로서 선종, 선형별 지수를 산정하여 이를 기준으로 시행하였으므로 강한 규제가 아니었음
- 2015년부터 동 규제치가 최초 규제치(phase 0) 대비 10% 하향하고(phase 1)¹⁾ 이후 매 5년 즉, 2020년(phase 2)과 2025년(phase 3) 각각 최초 규제치 대비 10%씩 추가 하향하며 규제를 강화하는 안으로 시행함

1) EEDI 기준지수가 매 10%씩 강화되어 새로운 규제치로 넘어가는 단계를 일반적으로 Phase x 로 칭함



IMO는 2018년 장기적인 온실가스 저감을 위한 초기 전략을 채택함

- IMO는 2018년 4월 개최된 MEPC 72차 회의에서 온실가스 배출 저감을 위한 초기 전략에 대한 결의안을 채택함
- 결의안의 최종 목표는 파리협정의 온도목표와 일치하는 수준의 선박 온실가스 배출 감축안을 설정하여 2050년까지 선박의 총 해상 배출량을 2008년 수준 대비 50% 이상 감축함으로써 탄소중립을 실현한다는 계획임
- 이에 따라 다음의 단계별 목표를 설정하고 이를 달성하기 위한 조치들을 시행해 나가기로 함
 - 2030년까지 선박의 탄소집약도²⁾를 2008년 대비 40% 저감
 - 2050년까지 선박의 탄소집약도를 2008년 대비 70% 저감

IMO는 시행 초기에 계획된 EEDI 규제의 수준이 초기전략의 실현에 미흡한 수준으로 판단하여 이를 강화하는 조치를 발표함

- IMO는 2020년 75차 MEPC 회의에서 이미 phase 2가 실행된 EEDI 규제가 계획된 수준으로는 IMO 초기전략 실현에 미흡하다는 판단하에 이를 강화하기 위한 MARPOL 73/78 Annex VI를 채택함으로써 기준을 강화하는 조치를 합의하여 발표함
- 개정된 부속서에는 탄소배출량이 많은 선종과 선형을 중심으로 phase 3의 시행일을 기존 2025년 1월에서 2022년 4월로 앞당겨 조기 시행하고 규제치도 최초 기준 대비 30% 하향에서 선종과 선형에 따라 50%까지 하향하도록 강화함
- 또한, IMO의 온실가스 감축률 목표 실현을 위하여 EEDI를 보다 강화하는 phase 4 검토에 착수함

IMO는 또한 2023년부터 기술적 조치로서 EEXI와 운항적 조치로서 CII 등을 시행하며 선박의 온실가스 배출 억제를 위한 규제를 강화함

- IMO는 온실가스 감축목표 달성을 위한 실질 조치를 위하여 2019년부터 5,000GT 이상의 국제항행 선박에 대한 연료사용, 온실가스배출량 등을 제출하도록 의무화하고 이를 수집, 분석하는 데이터수집 시스템(DCS)을 시행하여 데이터를 활용함
- EEXI(energy efficiency existing ship index)는 신조선뿐 아니라 현존선들도 해당 시점의 해당 선종 및 선형에 적용되는 동일한 EEDI를 충족할 것을 요구하는 조치로, 동 규제의 영향으로 현존선들의 운항속도 감속이 대거 이루어질 전망
- EEXI는 설계 등 선박에 적용된 기술적 변수들로부터 도출되는 효율성 지수로서 신조선에 적용되는 EEDI와 동일한 수치임

2) 탄소집약도는 선박이 단위무게의 화물을 단위거리 운송하는데 배출한 온실가스의 양 또는 단위 톤수의 선박이 운항하는데 배출하는 온실가스의 양을 의미



- EEXI 규제는 2023년부터 해당 시점에 신조선에 적용되는 EEDI와 동일한 수준의 이산화탄소 배출 효율을 현존선들도 충족시킬 것을 요구하며, 미충족 시 엔진출력을 저하, 즉 운항속도를 감속하여 해당 규제치를 충족하여야 함
- 미충족 시 연료의 변경, 개조 등의 방법도 있으나 경제성 등을 감안하면 운항속도 감속이 대부분 선박의 최적의 대안으로 알려지고 있음

각 선종 및 선형별 EEDI Phase 3 시행일 및 강화 기준

선종	크기	감축률 3 (2022.4.1)	감축률 3 (2025.1.1)
벌크선	20,000 DWT 이상		30
	10,000 - 20,000 DWT		0 - 30
가스 캐리어	15,000 DWT 이상	30	
	10,000 - 15,000 DWT		30
	2,000 - 10,000 DWT		0-30
탱커선	20,000 DWT 이상		30
	4,000 - 20,000 DWT		0 - 30
컨테이너선박	200,000 DWT 이상	50	
	120,000 - 200,000 DWT	45	
	80,000 - 120,000 DWT	40	
	40,000 - 80,000 DWT	35	
	15,000 - 40,000 DWT	30	
	10,000 - 15,000 DWT	15 - 30	
일반화물선	15,000 DWT 이상	30	
	3,000 - 15,000 DWT	0 - 30	
냉동화물선	5,000 DWT above		30
	3,000 - 5,000 DWT		0 - 30
겸용선	20,000 DWT 이상		30
	4,000 - 20,000 DWT		0 - 30
LNG 선	10,000 DWT 이상	30	
Ro-Ro 화물선 (vehicle)	10,000 DWT 이상		30
Ro-Ro 화물선	2,000 DWT 이상		30
	1,000 - 2,000 DWT		0 - 30
Ro-Ro 여객선	1,000 DWT 이상		30
	250 - 1,000 DWT		0 - 30
비전통 추진기관을 지닌 크루즈 여객선	85,000 GT 이상	30	
	25,000 - 85,000 DWT	0 - 30	

자료 : 해양수산부



- CII(carbon intensity indicator)는 선박이 실제 운항하며 배출한 온실가스의 양을 기준으로 A~E 까지 5단계 등급을 부여하여, D, E 등급 선박은 개선계획서를 제출하고 개선 결과에 따라서 운항을 지속할 수 없도록 하는 제재까지 가할 수 있는 규제임
- 제재 대상등급 선박은 연료효율 개선 계획에 따라 선박을 정비 후 운항할 수 있으며 개선이 미흡할 경우 해당 연도의 정상적 영업이 불가할 수 있음
- 또한, 등급 부여의 기준선을 2023년부터 2026년까지 매년 2%의 온실가스배출 저감이 가능한 수준으로 하향 조정하여 선사들의 부담을 가중시킬 것으로 예상됨

그 외에도 IMO는 시장기반조치를 논의하고 있으며 추가적 제안 등을 검토 중에 있음

- IMO 시장기반조치(MBM : market based measures)는 선박의 배출량에 따라 인센티브 또는 페널티를 가함으로써 선박의 효율과 성능 개선을 유도하는 조치로, 현재 각국에서 탄소배출권 거래제, 탄소세, 탄소펀드 등 다양한 안이 제출되어 논의 중임
- 그 외에도 온실가스 배출 저감을 위한 다양한 제안들을 검토, 논의하고 있어 앞서 기술된 조치들 외에도 추가적인 조치가 지속적으로 채택되고 시행될 것으로 예상됨
- IMO는 추가 조치로 환경규제 외에도 온실가스 저감을 위한 국제협력이나 각국의 행동계획 촉구 결의, 기술 개발 지원 등 다양한 안들을 검토하고 있음

2. EU의 독자적 규제 현황

EU는 IMO의 조치와 별도로 독자적인 해상환경규제 정책을 수립하고 시행 계획을 발표함

- 세계 온실가스 저감 정책에 가장 적극적인 EU는 해상 온실가스 저감을 통한 탄소 중립에도 역시 가장 적극적인 정책을 펼치고 있으며 독자적으로 IMO보다 더욱 강경한 조치들을 수립하고 있음
- EU 집행위원회는 2019년 12월에 2050년 탄소중립 목표 달성을 위한 로드맵인 유럽 그린딜(European Green Deal)을 발표하며 온실가스 감축 목표를 더욱 강화함
- 기존 유럽연합의 목표는 2030년까지 1990년 대비 40% 감축이었으며 그린딜을 통하여 목표 감축률을 50~55%로 상향함
- 이에 대한 정책 추진을 뒷받침하기 위하여 EU 집행위원회는 2021년 7월 탄소배출권 거래제(EU ETS), 감축 목표 설정, 관련 규정 강화 등을 위한 각종 입법안과 지원 대책으로서 사회기구기금 구성안 등을 포함하는 입법 패키지 "Fit for 55"를 발표함
- 유럽 그린딜의 후속 조치로서 동 정책의 목표는 2030년까지 1990년 대비 온실가스 배출량을 55% 감축하는 것으로 설정됨



- 또한, 회원국과의 이해관계에 따른 조율을 거치며 세부내용을 조정한 후 유럽 의회와 유럽연합 이사회의 논의를 거쳐 확정될 예정임

Fit for 55에는 선박의 해상운송 활동과 관련된 2가지의 주요 내용을 포함하고 있음

- 첫 번째는 EU ETS(온실가스배출권 거래제)가 해운부문으로 확대 적용됨
- 두 번째는 선박의 온실가스 집약도를 제한하는 Fuel EU Maritime 입법안임
- EU의 입법안은 선박을 운영하는 선사단위로 모니터링과 제재가 부과되는 조치임

EU ETS의 해운 부문 확대 적용은 향후 온실가스 배출량이 많은 선박과 선사들에 높은 비용 부담으로 작용할 전망

- ETS는 온실가스 배출자가 보다 경제성이 높은 감축 대안으로 배출을 저감하여 해당 배출권을 할당받은 기업 등으로부터 배출권을 구매하는 방식으로 전체 배출량 균형을 유지하고자 하는 제도임
- EU는 역내 항만에 기항하거나 항만에서 출항하는 모든 국적의 5,000GT 이상 선박에 대하여 2023년부터 의무를 부과하며 EU ETS를 해운부문으로 확대
- EU 역내 항간 운항 및 정박시 배출량의 100%, 역외 항 출도착 항해시 배출량의 50%가 배출권 정산 대상임
- 해운사들은 매년 검증된 배출량을 주관청에 제출하고 경매 또는 시장거래를 통하여 구매한 배출권을 확보하여야 함
- 2023년부터 검증된 배출량 대비 배출권 확보 의무 비율은 다음과 같이 경과 기간을 두어 2026년까지 100%에 이르도록 함

해운 부문 EU ETS의 연도별 확보 의무 비율

연도	2023	2024	2025	2026
의무비율	20%	45%	70%	100%

- 배출량 43% 범위 내에서 향후 무상 배출권 할당이 이루어질 가능성이 있으나 최근 무상 할당에 반대하는 의견이 높아 기대하기 어려움
- 선박의 경우 2023년부터 3년의 경과 기간을 두고 일정 수준 의무가 감소하도록 제도가 시행되어 추가적인 배출권 무상할당이 필요 없다는 의견이 강하게 제시되고 있음
- 이는 향후 EU 회원국 간의 조율을 거쳐 확정될 예정임
- EU ETS는 선박 1척당 연간 최대 수백만 달러 비용부담을 발생시킬 것으로 예상됨
- 무상할당이 "0"으로 결정되고 탄소배출권 가격을 70달러 수준으로 가정하여 14~15.5KTEU급 EU ETS 비용을 계산하면 2023년 평균 약 39만 달러에서 2026년 195만 달러까지 증가 추정



- 동일한 가정하에 연료소모량이 컨테이너선보다 적은 VLCC의 비용을 산정하면 2023년 평균 약 12만 달러에서 2026년 61만 달러까지 증가 예상

컨테이너선 및 탱커의 연평균 EU ETS 비용 추정

< 컨테이너선 >

단위 : 천 달러

선 형	ETS 가격	2023(20%)	2024(45%)	2025(70%)	2026(100%)
20KTEU 이상급	50 유로	444	999	1,554	2,220
	60 유로	533	1,199	1,865	2,664
	70 유로	622	1,398	2,175	3,108
14~15.5KTEU	50 유로	279	628	977	1,396
	60 유로	335	754	1,172	1,675
	70 유로	391	879	1,368	1,954
1~3KTEU 미만급	50 유로	116	260	405	578
	60 유로	139	312	486	694
	70 유로	162	364	567	809

< 탱커 >

단위 : 천 달러

선 형	ETS 가격	2023(20%)	2024(45%)	2025(70%)	2026(100%)
VLCC	50 유로	87	196	304	435
	60 유로	104	235	365	522
	70 유로	122	274	426	609
Suezmax	50 유로	83	188	292	417
	60 유로	100	225	350	500
	70 유로	117	263	409	584
MR	50 유로	62	139	216	308
	60 유로	74	167	259	370
	70 유로	86	194	302	432

자료 : 해외경제연구소 추정

주 : EU MRV 2019 report 데이터를 기반으로 각 선형의 평균치를 추정하였으며 무상할당량은 없는 것으로 가정

EU Fuel Maritime은 선박의 연료사용으로 발생하는 온실가스집약도를 제한함으로써 유럽 지역의 기후변화 방지 노력에 기여하기 위한 입법안임

- 대상은 EU 역내 항만간 운항 또는 항만 출도착 5,000GT 이상의 모든 선박
- 동 조치는 운항 선박들이 2020년 기준 대비 설정된 연도별 온실가스집약도 저감목표를 충족할 것을 요구함



- 온실가스집약도(GHG intensity)는 에너지 단위인 메가줄(MJ)당 배출한 이산화탄소 등가(equivalent) 질량(gCO₂eq/MJ)으로 표시되며, 이산화탄소 등가 질량은 메탄, 아산화질소 등 모든 온실가스를 이산화탄소 질량으로 환산한 질량을 의미함

EU Fuel Maritime의 연도별 온실가스집약도 저감 목표치 비율

연도	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
저감비율	기준치	2%	6%	13%	26%	59%	75%

- EU Fuel Maritime의 온실가스집약도 저감에 있어 운항중 배출한 온실가스 외에도 연료의 생산과 유통과정 중 발생량까지 포함하는 well-to-wake 기준의 저감을 요구함
- 대부분의 기존 규제들이 선박이 연료를 주입받아 배출하는 tank-to-wake를 기준으로 하였으나 동 규제는 연료의 생산부터 선박의 탱크 주입까지(well-to-tank) 발생하는 온실가스의 총량을 포함시켜 매우 높은 강도로 시행됨
- 규제치를 충족하지 못할 경우 2가지의 페널티를 부과함
- 첫 번째는 법안 20조에 규정된 공식에 의해 실제 배출한 온실가스집약도에 따라 페널티를 계산하여 부과함
- 두 번째는 규제치를 미충족한 모든 역내 기항에 대하여 선내 설치출력(MW)에 정박시간과 250유로를 곱한 금액을 페널티로 지불함

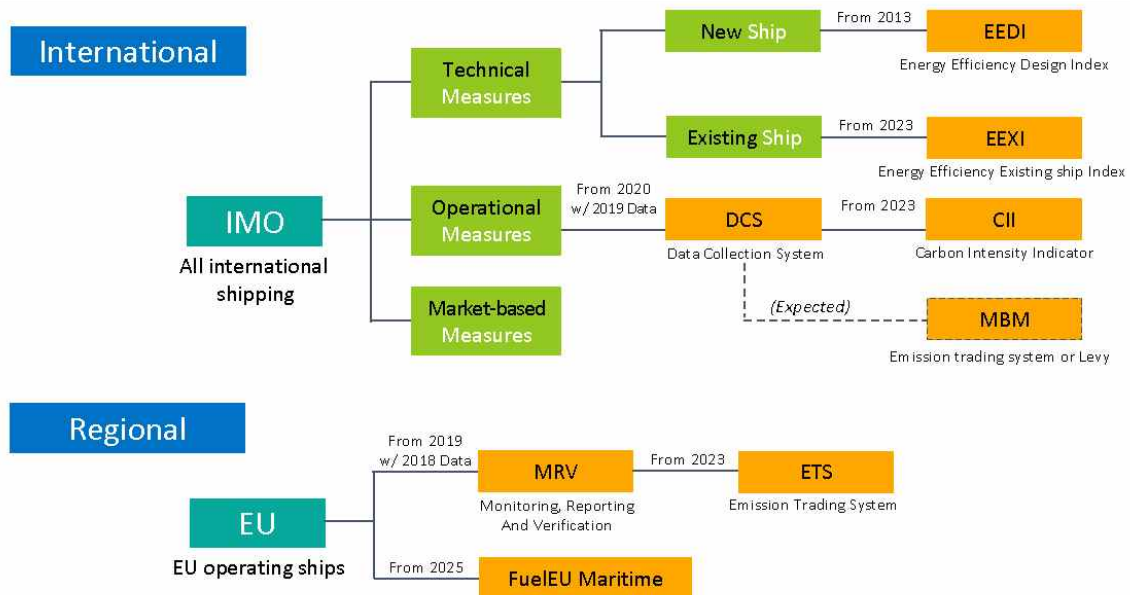
3. IMO와 EU 규제의 영향

IMO와 EU의 모든 규제들은 선사들에게 높은 비용을 요구하며 현재의 선박 시장 구조로는 대응이 쉽지 않아 단기적으로 큰 충격이 될 전망

- 불과 10여 년 전 호황기에 대량 건조된 선박들조차 에너지효율 개선이나 친환경 기술이 적용되지 않는 등 현재의 해운시장에서 활동하고 있는 선박의 구조상 해운업계가 감내할 수준의 낮은 비용으로 이들 규제에 대응하는 것은 매우 어려울 것으로 예상됨
- 일례로, EEXI가 시행될 2023년 현재의 운항속도를 유지할 수 없는 선박이 약 85% 이상으로 추정되며 노후선일수록 정상적 영업이 어려울 것으로 전망
- CII 역시 선박이 운항하며 배출하는 온실가스의 총량을 사실상 규제함으로써 저연비 노후선의 정상적 영업이 어려울 것으로 전망
- 여기에 EU의 독자적 제재들 역시 높은 비용을 수반할 것으로 예상되어 석유계 노후선 비중이 높은 선사들일수록 재무적 충격이 클 것으로 예상됨



IMO와 EU의 해상환경규제 현황



자료 : 김진형(2021), 한국선급

IMO와 EU의 환경규제는 선박 시장에 다중의 압력으로 작용하여 노후선 교체, 새로운 무탄소 연료와 추진방식 개발 등을 유도하고 있음

- 세계 해운 및 조선업계가 온실가스 저감 노력에 기술적으로 대처할 준비가 완전하지 않은 상태에서 강경한 조치들이 다중으로 시행되며 이에 대한 빠른 대응이 요구되고 있음
- 현재 시행이 확정되거나 입법안이 발표된 규제만으로도 비용 충격을 완화하기 위하여 선사들은 일정 비중 이상의 저탄소 또는 무탄소 선박을 운항하여야 하며 초기 제품의 불확실성에 대한 위험도 감수해야할 입장임
- 이러한 수요에 따라 조선소들 역시 빠른 속도의 혁신적 제품개발이 필요한 상황이며 조선소들은 새로운 수요가 창출되는 기회를 살리기 위하여 저탄소 및 무탄소 선박개발에 총력을 기울일 것으로 추정됨



Ⅲ. 선박 시장의 대응 현황

현재 국내외 선사들은 혼란에 빠져 있는 것으로 보이며 가장 중요한 원인은 강력한 규제의 등장에도 불구하고 뚜렷한 대응방안을 찾기 어렵다는 점임

- 선사들은 2023년부터 규제에 의하여 선박의 운항속도 감축(EEXI), 효율개선 비용(CII), 온실가스 배출권 구입 비용 등 막대한 비용이 소요될 위기에 처해있으며 2025년부터 규제되는 온실가스집약도 역시 EU가 요구하는 수준으로 개선해야 하는 부담을 지게 됨
- 강력한 규제에 대응하여 노후선을 교체하고 저탄소 추진 선단의 비중을 높여야 하는 필요성을 절감하고 있으나 뚜렷한 대안이 제시되지 않아 투자 전략에 혼란을 느끼는 상황에서 규제 시행일이 다가오는 절박한 시점에 처해 있음
- 이러한 혼란의 원인은 대안으로 제시되고 있는 대부분의 연료와 추진방식이 모두 기술적 혹은 연료공급의 문제점 등 아직까지 심각한 결함을 가지고 있기 때문임

이미 상용화된 LNG연료 외에도 10~20년 내 중단기적 대안으로서 다양한 연료가 검토되고 있고 추진 방식 또한 여러 방향으로 검토가 이루어지고 있으며 이들이 수소와 함께 장기적 대안이 될 수 있을지도 연구가 이루어지고 있음

- 단기적 대안 연료로서 LNG, LPG, 바이오연료, 메탄올, 에탄올, 암모니아 등이 검토되고 있고 이들 중 LNG, LPG, 메탄올, 에탄올 등은 이미 엔진이 개발되어 있어 상용화되었거나 상용화에 가까운 단계에 있음
- 이들 각각의 연료는 재생에너지 등을 활용하여 탄소가 배출되지 않는 전기분해로 생산한 수소에 이산화탄소, 질소 등을 합성하여 생산하는 e-fuel도 대안으로서 검토되고 있음
- 연료 뿐 아니라 연료전지, 배터리 전기추진, 원자력 등 내연기관 이외의 선박 추진방식에 대한 검토도 이루어지고 있음
- 대안 연료과 추진방식 외에도 이산화탄소 포집기술 역시 선박에 적용하며 해상온실가스 저감에 활용하는 방안이 검토되고 있음
- 이처럼 다양한 대안들이 연구 및 검토되고 있으나 아직까지 중요한 기술적 과제들이 남아 있어 선박시장에서의 탄소중립을 위한 대안은 뚜렷하게 제시되지 못하고 있음



1. LNG

장기적으로 수소가 무탄소 연료로서 자리잡기까지 약 20년간 LNG가 선박의 중간 연료로서 중요한 역할을 할 것으로 기대

- LNG는 황을 함유하고 있지 않아 황산화물 배출이 없고 질소산화물 배출도 크게 줄일 수 있으며 연료 효율 등을 감안하면 이산화탄소 배출량을 석유연료 대비 약 40%까지 감소시킬 수 있어 청정연료로까지 평가되기도 함
- 다만, 온난화지수³⁾ 28로 높은 온실효과가 있는 메탄이 벙커링과 연료탱크 저장시, 그리고 불완전 연소 등에 의해 공기로 누출되는 메탄슬립(methane slip) 문제로 전체적인 온실가스 저감 효과는 석유연료 대비 약 20% 내외로 평가됨
- 최근까지 상용화된 선박연료로서는 가장 높은 온실가스 저감효과를 나타내고 있어 선박의 이중 연료로서 채택이 증가하고 있으며 이러한 추세는 최소한 2030년까지, 장기적으로는 2040년까지도 이어질 것으로 기대한 바 있음
- 2020년 이후 발주된 VLCC의 31%와 12,000TEU 이상급 대형 컨테이너선의 24%가 이중연료로서 LNG를 채택하였고 향후 LNG연료추진선으로 개조 가능한 LNG ready 타입까지 고려하면 VLCC의 48%, 대형 컨테이너선의 37%가 채택함
- 또한, 아시아에서 한국, 중국, 일본, 싱가포르, 중동의 오만, 유럽의 프랑스, 네덜란드 등이 LNG 벙커링설비 확대 투자에 적극적인 정책을 발표하며 연료로서의 입지가 강화됨

그러나 코로나19 발생 이후 LNG가격이 높은 변동성을 보이며 지나친 수준까지 상승하여 경제성에 대한 리스크가 새롭게 인식되기 시작함

- 2014년 고유가 시기가 종식되고 후쿠시마 원전 사태 후유증까지 안정된 2016년 이후 LNG가격은 아시아지역에서도 mmBTU당 6~11달러 수준에서 변동하며 과거보다 하향 안정화 경향을 보임
- LNG 가격이 mmBTU당 6~8달러 수준에서는 저유황유 대비 우수한 경제성을 보이고 유가 수준에 따라 11달러대에서도 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 추정되어 선박 연료로서 큰 기대감을 가지게 하였음
- 그러나 코로나19 팬데믹 이후 급격한 수요 위축으로 아시아 지역에서도 mmBTU당 2달러대의 가격을 나타내며 공급측 투자를 위축시키기도 하였음
- 수요는 2020년 하반기 이후 회복되었고 2021년 1월에는 동북아 흑한기로 30달러를 상회한 바 있으며 2021년 중 산업생산 수요 증가, 혹서기의 냉방전력 수요, 흑한기 대비 수요 등이 급증하며 연중 30달러 내외의 가격을 나타내고 있어 가격 안정성은 완전히 파괴됨

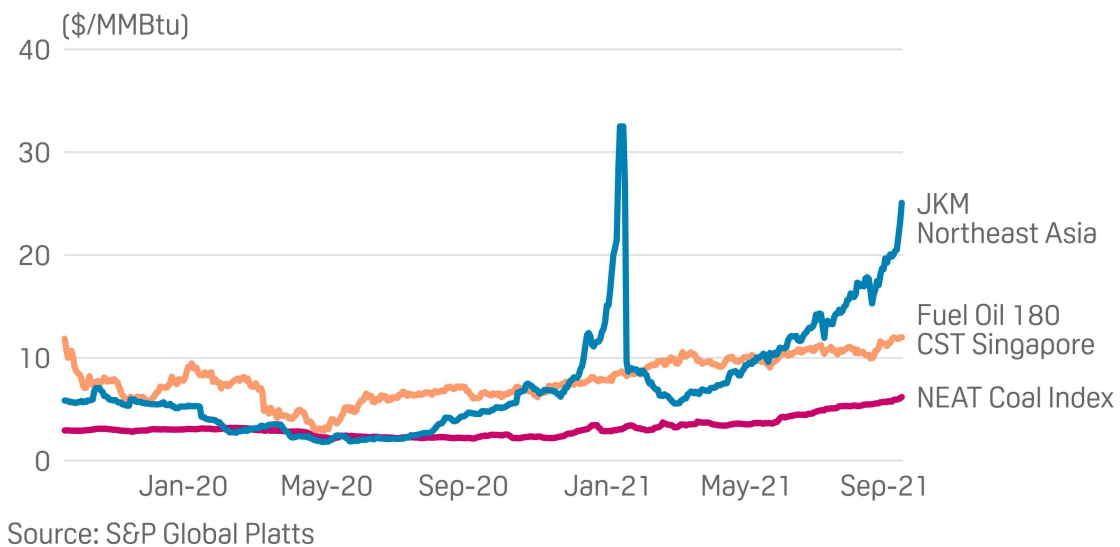
3) 온난화지수는 이산화탄소의 온실가스 효과를 1로 하여, 동일 질량의 가스가 이산화탄소 대비 몇 배의 열을 흡수하여 대기 중에 가둘 수 있는지의 특성을 기술하는 지수임



- 2021년 중 타 연료 대비 높은 가격 변동성을 겪으며 해운업계는 LNG 가격 변동성과 경제성의 리스크에 대한 새로운 인식을 가지게 되었으며 연료로서의 활용에 부정적 인식이 다소 높아진 것으로 추정됨

팬데믹 이후 아시아 지역 연료가격 추이

ASIA'S GENERATION FUEL PRICES SURGE PRE-WINTER



자료 : S&P Global Platts

LNG는 석유연료 대비 온실가스 저감효과에도 불구하고 화석연료로서의 한계도 인식됨

- 2021년 7월 유럽의 Fit for 55에서 유럽 지역의 규제가 well-to-wake(WTW) 기준으로 강화된다는 발표 역시 연료로서의 LNG에 다소 부정적 영향을 미친 것으로 추정됨
- LNG 역시 화석연료로서 이산화탄소를 배출하는 한계가 있고 생산-유통-보관 과정에서 발생하는 메탄까지 WTW 원칙에 의해 선사가 책임져야 한다는 부담으로 LNG에 대한 부정적 시각이 다소 확대됨

다만, 여전히 LNG는 단기적으로 강력한 대안 중 하나임

- 암모니아 등 신연료에 대한 기술적 타당성, 안전성 등에 대한 불확실성이 아직 높고, 현재까지 상용화된 연료 중 가장 온실가스 배출이 적다는 점, 황산화물 규제에서 자유로운 점 등으로 LNG는 현재 발주되고 있는 신조선에 있어서 가장 많이 채택되고 있는 대안임
- 여전히 LNG운반선에서는 사용이 용이하다는 점 때문에 이중연료로서 채택되고 있으며 LPG 운반선도 동일한 이유로 최근 LPG가 이중연료로 채택되고 있음



선박 대안 연료의 저장 특성

연료	질량 에너지 밀도, LHV(MJ/kg)	체적 에너지 밀도, LHV(GJ/m ³)	저장 압력 (bar)	저장 온도 (°C)	상대적 탱크 크기 (단열재 고려)
MGO	42.8	36.6	1	20	1
바이오 디젤	42.2	33.0	1	20	1
바이오 가스(액화 메탄)	55.6	25.0	1	-162	2.3
메탄올	19.9	15.8	1	20	2.3
액화 암모니아	18.6	12.7	1	-34	4.1
			10	20	
액화 수소	120.0	8.5	1	-253	7.6

자료 : 한국선급(2019), "친환경 미래 선박 연료 전망-선박연료로서의 암모니아"

2. 메탄올

최근 발주된 대형 컨테이너선의 연료로 채택된 메탄올의 경우 기술적 문제점은 거의 없으나 충분한 연료 공급 가능성의 문제가 제기됨

- 메탄올 추진선은 지난 8월 세계 최대 컨테이너선사인 머스크가 메탄올을 연료로 추진하는 대형 컨테이너선 8척을 세계 최초로 발주하며 차세대 저탄소 선박으로서의 가능성을 제시함
- 이미 메탄올 전용 탱커들이 화물을 연료로 사용하여 새로운 연료의 등장은 아니나 이들 탱커는 MR급의 중형선 규모로, 연료소모량이 많은 대형 컨테이너선이 환경규제가 강화되는 시점에서 채택한 점은 차세대 연료로서의 가능성을 보여준다는 점에 의미가 있음
- 메탄올은 기존 메탄올운반선의 건조와 운항을 통한 기술적 데이터가 축적되어 있고 연료가 상온에서 액체상태로 존재하며, 부식 등의 문제가 크지 않아 기존 연료탱크의 사용이 가능하고 엔진도 이미 개발되어 있어 상용화를 위한 기술적 문제가 크지 않은 장점이 있음
- 단위 부피당 에너지밀도가 기존 선박 연료(HFO)의 약 43%로 동일 화물량과 항속거리를 위하여 연료탱크가 2배 이상 커져야 한다는 문제가 있으나 선형 개발에 큰 문제는 없음
- 연료탱크의 크기를 줄이는 대신 보다 자주 연료 병커링을 받는 운항적 방안도 가능
- 또한, 현존선의 개조도 비교적 간단하여 저탄소 연료로서의 가능성이 확고하다면 향후 개조 수요도 증가할 수 있음
- 메탄올(CH_3OH)은 성분에 탄소를 포함하고 있어 연료로 사용 시 이산화탄소가 배출됨
- DNV-GL에 의하면 운항시 배출되는 이산화탄소의 양은 기존 석유계 선박연료 대비 약 10% 저감되는 수준이며, Well-to-Wake 개념으로 생산단계까지 고려하면 기존 연료와 거의 같거나 오히려 약 5% 증가하는 수준임



- 이산화탄소 저감이 미약한 수준임에도 불구하고 저탄소 연료로서 채택한 이유는 재생에너지를 이용하여 생산한 그린수소(H_2)와 연소시 포집한 이산화탄소를 결합하여 생산하는 그린 메탄올 (또는 e-메탄올)을 사용할 경우 이산화탄소 배출을 크게 감소시킬 수 있기 때문임
- Methanol Institute에 의하면 그린 메탄올을 사용할 경우 생산을 포함한 전체 과정에서 최대 95%까지 이산화탄소 저감이 가능함
- 그린 메탄올을 생산하기 위해서는 탄소배출이 없는 재생에너지를 이용한 그린 수소의 생산이 필수적이며 이러한 조건을 갖추고 생산이 가능한 지역은 주로 유럽에 집중되어 있고 아시아 지역의 생산은 거의 없는 수준임
- 또한, 현재 절반 이상의 메탄올은 석유화학 기초유분 생산이나 다양한 산업재 및 소비재 생산에 투입되고 있으며 선박연료로서 그린 메탄올의 충분한 공급을 기대하기는 어려움

그린 메탄올 및 바이오 메탄올 생산 지역 분포도



자료 : The Methanol Institute

대형 메탄올연료추진 컨테이너선을 발주한 머스크는 연료확보를 위하여 공급사와의 전략적 관계뿐 아니라 직접투자를 통하여 연료를 자체조달할 수 있는 역량까지 확보한다는 전략임

- 머스크는 지난 8월 덴마크 신재생에너지 기업 European Energy의 자회사인 REintegrate와 제휴하여 덴마크 내에 연 10,000톤의 e-메탄올을 생산할 설비를 구축하여 2023년 생산개시를 계획함
- 머스크는 또한 지난 9월 저비용 탄소중립 e-연료 개발에 집중하기 위하여 미국 스타트업 기업인 Prometheus Fuels에 직접 투자함
- 이처럼 머스크는 선박의 선도적 구매에 그치지 않고 연료의 개발, 생산까지 투자하며 연료의 공급망을 직접 구축하려는 계획을 실행하고 있음



일반 선사들의 경우 메탄올의 공급망까지 투자하며 이를 확보하기는 쉽지 않아 메탄올의 대안연료로서 확대 가능성은 제한적임

- 머스크를 제외한 어떠한 선사도 아직까지 그린 메탄올을 연료로 채택하려는 전략을 쉽게 결정하지 못하고 있으며 이는 연료공급과 경제성에 대한 불확실성이 매우 높기 때문으로 해운 업계에서는 메탄올 채택에 부정적 견해를 가지고 있음
- 그린 메탄올 연료는 기술적 장애요인이 매우 낮은 수준으로 차세대 탄소중립 연료로서의 잠재력을 충분히 가지고 있으나 생산 및 공급 능력의 한계로 단기적인 연료채택의 확대는 가능성이 낮을 것으로 전망되고 있음

3. 암모니아

조선 및 해운업계에서는 암모니아 연료의 상용화에 크게 기대하고 있으나 해결해야 할 과제들이 산적한 상황으로 역시 불확실성이 높은 수준임

- 암모니아(NH_3)는 탄소를 함유하고 있지 않아 이산화탄소의 배출이 전혀 없는 연료로 폭발 위험이 극히 낮고 저장과 운송조건이 10bar의 기압과 -34°C 수준이므로 -253°C 의 냉각을 요구하는 액화수소에 비해서는 용이한 장점이 있음
- 암모니아는 체적 에너지밀도가 낮아 석유계 연료대비 약 4배 크기의 연료탱크가 요구되는 단점이 있으나, 초저온 유지를 위하여 단열재 등의 부피가 커져 석유계 대비 7배 수준의 연료탱크 크기가 필요한 액화수소 보다는 연료탱크가 작은 장점이 있음
- 또한, 암모니아는 생산 공정이 잘 알려져 있고 아시아 지역에서도 많은 물량을 생산하고 있으며 비료용으로 많은 물량의 교역이 이루어지고 있으나, 선박에 연료로서 적용되어 상용화되기까지는 아직까지 많은 과제들이 남아있음
- 우선, 아직까지 암모니아 엔진이 개발되지 않았다는 점과 연료로서 암모니아 단독으로 사용되지 못하고 타 연료와 이중 분사하여 연소시키는 혼소 엔진이 될 것이라는 전망이 우세하여 완전한 무탄소연료로서 자리잡기까지는 시간이 걸릴 것으로 예상됨
- 암모니아는 궁극적으로 수소를 에너지원으로 이용하는 연료로서, 내연기관과 연료전지 추진이 모두 가능한 연료이나 연료전지의 선박 적용까지는 상당 기간이 소요될 것으로 예상되어 우선 내연기관이 개발되고 있음
- 세계적인 선박엔진 제조사인 MAN은 당초 2023년까지 암모니아 엔진개발을 완료할 것으로 계획, 발표하였으나 점차 개발이 지연되어 지난해 8월, 개발 완료 후 첫 제품출시 시점을 2024년으로 발표하였으며 일부 전문가들은 그보다 더 지연될 가능성도 제기하고 있음



- 또한, 내연기관에서의 수소 연소 효율 등의 문제로 암모니아 단독 연료로 사용되기는 현재로서는 어려울 것으로 보이며 석유 등이 보조연료로 사용되어 이중 분사되는 혼소시스템이 시험되고 있는 것으로 알려짐
- 기술부문 전문가들은 현재 암모니아가 약 70%를 차지하는 혼소시험까지 성공한 것으로 추정하고 있으며 약 30%는 보조연료로서 화석연료가 사용되어 일정 수준의 이산화탄소를 배출하는 한계를 나타낼 것으로 예상됨
- 암모니아 연료추진 선박은 이산화탄소 배출이 크게 저감되는 대신 이산화탄소 대비 265배의 온실가스 효과를 가진 아산화질소(N_2O)를 배출하며, 이를 기술적으로 저감할 수 있을 것으로 예상하나 엔진개발 이후 배출량을 확인하여야 하는 불확실성이 남아 있음
- 아산화질소는 질소산화물(NO_x) 저감장치인 SCR(Selective Catalyst Reduction) EGR(Exhaust Gas Recirculation) 등으로 제거 또는 저감이 가능할 것으로 예상되나 확실한 수준은 엔진개발 후 배출량을 확인하여야 하며 암모니아의 온실가스 저감 효과를 낮출 가능성은 여전히 존재함

암모니아 연료의 가장 큰 문제로 제기되는 점 중 하나는 독성이며 이 문제는 향후에도 상당한 논란을 일으킬 것으로 예상됨

- 암모니아는 심할 경우 사람을 사망에 이르게할 수 있을 정도의 심각한 독성을 가지고 있어 누출 사고 등에 대한 높은 우려가 있으며 선박연료로서 부적합하다는 주장까지 제기되고 있음
- 다만, 누출시 냄새가 매우 강하여 해상사고의 경우 등에도 농도가 심각한 독성에 이르기 전에 선원들이 방호복을 착용하거나 피난할 수 있는 충분한 여유가 있으므로 심각한 사고가 초래될 가능성은 낮을 것이라는 주장도 제기됨
- 독성에 대한 문제는 선박연료로서 활용되기 이전 안전성에 관한 국제적 논의와 연구가 뒷받침 될 것으로 예상됨
- 독성에 대한 문제는 암모니아 연료를 다루는 데 있어서 훈련된 선원과 벙커링 관련 인력을 요구할 것으로 보여 암모니아의 경제성을 낮추는 요인으로 작용할 전망

독성과 냄새 등의 문제로 일반 항만에서 암모니아 벙커링 설비를 신규 구축하기는 어려울 것으로 예상되며 기존 터미널 확장, 해상벙커링 등의 방안이 논의되고 있음

- 세계적으로 모든 대륙에 암모니아 터미널이 다수 위치하고 있으나 현재까지 교역량 대부분이 농업용 비료제조 수요로, 선박 벙커링용 여유시설은 기대하기 어려움
- 향후 선박 벙커링 기지로서 확장 가능성은 가지고 있으나 대형 선박의 접안이 가능할 정도의 확장이 가능할 것인지는 미지수임
- 이에 따라 터미널을 이용하기 어려운 경우 도시와 멀리 떨어진 해상에서의 선박에 의한 (ship-to-ship) 벙커링도 논의되고 있으나 이러한 경우 해상 조건에 따라 누출사고 등의 위험이 다소 높다는 우려도 제기됨



세계 암모니아 터미널 분포도



자료 : DNV-GL

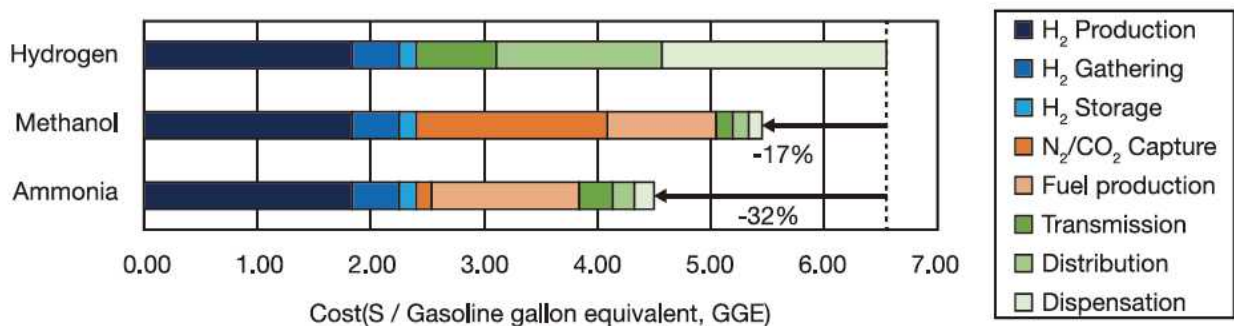
암모니아의 부식성 또한 큰 문제로 지적되고 있으나 기술부문 전문가들은 대체적으로 해결 가능하다는 견해를 보임

- 이미 암모니아 운반선이 건조되어 운항하고 있고, 국제적으로도 새로운 탱크 재료에 대한 연구개발이 활발하게 진행되고 있어 더욱 개선된 결과를 기대할 수 있을 전망

향후 그린 암모니아의 경제성과 생산설비를 위한 투자 비용도 해결해야 할 과제임

- 현재 생산되고 있는 천연가스 기반의 브라운 암모니아는 생산과정의 이산화탄소 발생으로 온실가스 저감 효과가 낮아 향후 선박연료로서 재생에너지를 활용하여 생산한 그린 수소를 기반으로 하는 그린 암모니아가 활용되어야 함

그린 수소, 그린 메탄올, 그린 암모니아 생산 및 유통 비용 비교



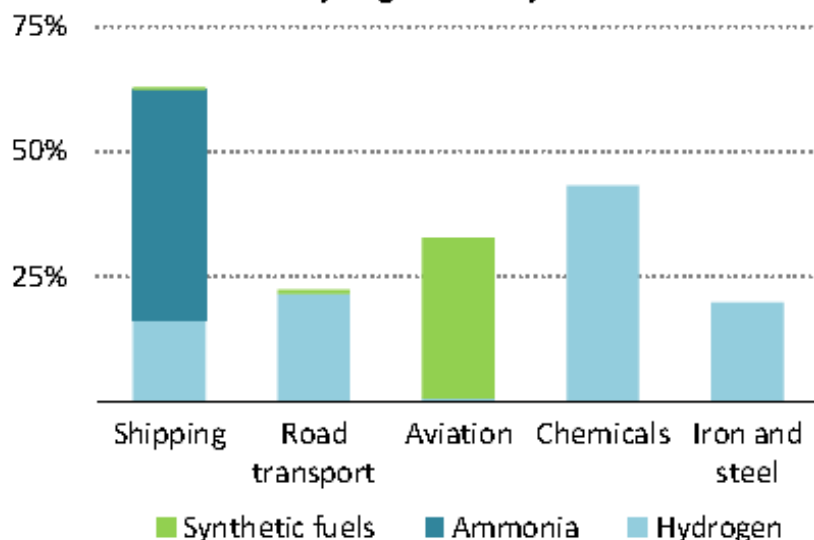
자료 : 한국선급(2019), "친환경 미래 선박 연료 전망-선박연료로서의 암모니아"



- 그린 암모니아 생산과 유통은 메탄올과 수소 등 타 그린 연료 대비 비용이 낮을 것으로 예상되나 그린 암모니아의 가격은 현재 생산되고 있는 브라운 암모니아 가격 대비 2~3배 높을 것으로 추정
- 그린 암모니아는 수소에 비하여 저장, 운송비용이 낮고 메탄올에 비하여 탄소포집 비용이 낮아 이들 연료대비 생산 및 유통가격이 낮은 특성이 있으며 그린 수소 대비 약 32%의 비용 절감 추정⁴⁾
- 상대적인 경제성에도 불구하고 그린 암모니아는 현재 생산중인 브라운 암모니아 대비 2~3배의 높은 가격이 예상되며, 현재 암모니아의 가격이 에너지밀도까지 고려하였을 때 저유황유와 유사한 수준으로 추정되어 그린 암모니아의 경제성은 현재로서는 매우 낮은 것으로 평가됨
- 이산화탄소 기반 생산 공정 중 탄소를 포집하는 블루 암모니아의 경우 이산화탄소 발생을 약 85~90% 저감할 수 있으며 그린 암모니아보다 경제성이 높을 것으로 예상되어 대안으로 서도 검토되고 있음
- 그린 암모니아의 생산을 위한 막대한 투자규모 역시 경제적 불확실성을 높이는 요인임
- DNV-GL은 향후 선박의 연료를 암모니아로 대체하기 위해서는 연간 6억5천만톤의 암모니아가 생산되어야 하며 이를 위해서는 재생에너지 발전설비에 3.2조달러, 암모니아 생산설비에 1.3조 달러가 투자되어야 한다고 제시함
- 2021년 5월 IEA가 발표한 “Net Zero by 2050-A Roadmap for the Global Energy Sector” 보고서에 따르면 2050년까지 선박 연료의 45%를 암모니아가 차지할 것으로 전망한 바 있으며 이러한 비율을 고려하더라도 2050년까지 총 2조 달러 이상의 설비투자가 필요할 전망

2050년 수소기반 연료의 사용 비중 전망

Share of hydrogen fuels by sector in 2050



자료 : IEA(2021), “Net Zero by 2050-A Roadmap for the Global Energy Sector”

4) 한국선급(2019), “친환경 미래 선박 연료 전망-선박연료로서의 암모니아”



암모니아는 상용화가 임박한 것으로 기대되나 아직까지 불확실성이 있음

- 암모니아는 아직까지 엔진 개발도 완료되지 않은 상황이나 해운 및 조선업계에서 가장 먼저 상용화될 것으로 기대하는 무탄소 연료임
- 그러나 아직까지 독성, 경제성 등 해결해야할 어려운 과제가 남아있으며 이러한 불확실성이 단기적으로 연료로서의 효용을 제한할 가능성도 있음

4. 탄소포집 및 저장

무탄소 연료와는 별개로 선상에서의 탄소포집이 하나의 대안으로 개발되고 있음

- 무탄소 또는 저탄소 연료 추진선박의 개발과는 별개로 이미 육상에서 시행하고 있는 탄소포집과 저장(CCS : carbon capture and storage, 이하 “탄소포집”) 기술의 선박적용을 위한 연구개발도 진행 중에 있음
- 탄소포집은 연소 전 또는 연소 후에 이산화탄소 등 온실가스를 별도로 처리, 분리하여 가압을 통해 액화하고 이를 파이프라인이나 선박을 통해 운송하여 지하 1.5~2Km 깊이 암석층 등에 저장하는 기술임
- 연소 전 처리는 천연가스에서 수소를 추출할 때 분리된 탄소를 포집하는 등의 과정을 의미하며 연소 후 처리는 연소된 연기로부터 화학적 방법 등을 통해 이산화탄소를 분리, 포집하는 것으로 내연기관 선박에서는 연소 후 처리가 적용됨
- 최근에는 포집된 이산화탄소를 산업이나 제품 제조, 서비스 등에 활용하는 CCUS(carbon capture, utilization, storage)의 개발도 세계적으로 활발하게 추진되고 있음

CCUS 프로세스

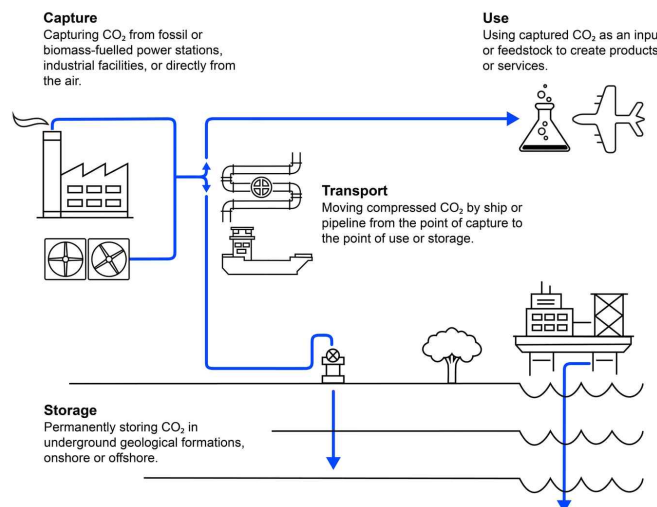


그림 출처 : IEA



탄소포집은 신조선 뿐 아니라 현존선의 규제 대응 대안으로서도 관심을 얻고 있음

- 무탄소 혹은 저탄소 연료로서의 대안이 불확실한 상황에서 선박에서의 탄소포집은 해상 환경규제의 강화 속에 이미 육상에서 실현된 기술을 적용하여 규제를 충족시키려는 선주들의 관심이 집중되고 있음
- 이는 신조선 뿐 아니라 현존선에서도 큰 규모의 개조 없이 포집과 액화장치, 저장장치 등을 선박에 장착하여 규제를 회피할 수 있는 대안으로 부상하고 있음
- 신조선 투자여력이 부족하고 어떠한 연료를 선택해야 할 것인지 전략이 확립되지 않은 선주들은 기존 보유 선대의 운영을 지속할 수단으로서 채택할 가능성이 높으며 실제로 조선사에 적용 가능 방안에 대한 문의가 증가하고 있음
- 컨테이너선 보다는 벌크선이나 탱커와 같은 부정기선 선박들의 좋은 대안으로 부상하고 있음
 - 특히, 대형 컨테이너선의 경우 연료소모량이 많고 출항 후 항차 기간이 길며 정기 항로를 운항해야 하는 특성 상 포집, 저장해야할 탄소의 양이 많고 선내에 장기간 보관해야 하는 문제가 있어 대안으로서 채택에 어려움이 있는 것으로 평가됨
 - 반면, 컨테이너선에 비해 연료소모가 적고 부정기 운항 특성이 있는 벌크선이나 탱커의 경우 적절한 시점에 보관된 탄소를 전용운반선에 전달하는 방식으로 운영이 가능할 것으로 보여 선사들이 많은 관심을 가지는 것으로 추정됨

아직까지 경제성 확보에는 불확실성이 있는 것으로 평가되고 있음

- 탄소 포집 및 저장 비용은 설비 여건, 운송용 파이프라인 구축, 저장소까지의 운송거리, 규모 등 여러 변수에 따라 크게 달라져 정확한 경제성을 논하기는 어려우나 여건이 좋지 않을 경우 현재 탄소배출권 비용보다도 높은 것으로 추정됨
- 선박의 경우 역시 항해 중 상당 기간을 저장, 보관해야 하고 해상에서 이를 전용 운반선에 인도하여 저장소까지 장거리 운송비용을 부담해야 하는 경우 등이 많아 현재까지 경제성에 대한 불확실성이 존재함

향후 저장 가능 장소에 대해서도 논란이 있음

- 이산화탄소는 앞서 기술한 바와 같이 지하 1.5Km 이상 깊이의 암반층에 저장하여야 하며 석유 채굴이 종료된 육상 및 해저 폐광 등이 후보지로 거론되고 있음
- 그러나 포집이 전 세계적으로 확산될 경우 충분한 저장 공간이 확보될 것인지 여부에 대하여 논란이 있음



탄소포집은 경제성 등 일부 불확실성 속에서도 기술개발이 진행되고 있으며 탄소중립을 위한 저감 노력 속에 해상에서도 일정 비중의 역할을 할 것으로 전망됨

- 육상 뿐 아니라 해상에서도 많은 선박을 단기간 내 탄소중립 선박으로 교체하기 어려운 여건상 상당 기간 탄소포집이 일정 부분 온실가스 저감의 역할을 할 것으로 예상됨
- IMO의 환경규제는 탄소포집을 저감으로 인정하지 않고 있으나 현재 회원국들의 제안으로 검토 중인 것으로 알려져 향후 인정 가능성은 높은 것으로 추정됨
- 유럽의 일부 환경단체 등은 탄소포집 및 저장 과정에 더 많은 에너지를 소비하여 오염을 증가시키는 효과가 있고, 지층 내에서의 유출로 인한 다른 종류의 오염에 대한 의견이 제시되는 등 부정적 여론도 있음
- 이러한 여론을 포함하여 탄소포집은 탄소중립의 궁극적 대안이 아니라는 공감대가 형성되어 있어 탄소포집이 영구적인 온실가스 저감 대안으로 사용되기는 어려울 것으로 보이나 무탄소 연료가 상용화되기까지 상당 기간, 일정 부분의 가교적 대안은 될 수 있을 것으로 전망됨

탄소포집은 해운 및 조선업계에 이산화탄소 운반선과 같은 새로운 수요를 창출할 것으로 전망됨

- 해상에서의 탄소포집이 국제해사기구로부터 저감으로 인정될 것인지 여부와 관계없이 이미 육상에서 적용되고 있고, 향후 국제협약 등의 영향에 의해 대규모로 확대될 전망이므로 액화, 저장 탄소를 해상으로 운반할 전용 운반선의 수요가 새롭게 창출되고 있으며 향후 확대 전망
- 국내외 조선사들은 대부분 전용 운반선에 대한 개발에 노력하고 있으며 상용화가 거의 이루어진 것으로 파악됨
- 이산화탄소 운반선은 향후 신조선 시장의 새로운 수요 선종으로 높은 비중을 차지할 가능성이 있어 조선산업 활성화에 기여할 것으로 전망됨

5. 수소

수소는 장기적으로 궁극적인 탄소중립 연료로 기대되나 기술적 난제가 많으며 부정적 전망이 제기되기도 함

- 수소(H₂)는 탄소배출과 공해가 없는 무탄소 연료로서 선박 운항에 있어서 궁극적 대안이 될 것이라는 전망이 지배적임
- 그러나 수소의 운반 및 저장이 쉽지 않고 연료전지 추진선박에 대한 기술적 난제들이 많이 남아 있음



- 이 때문에 수소기반 추진 시스템을 연구하는 기술 부문 전문가들조차 향후 선박 적용에 대한 부정적 전망을 언급할 정도로 불확실성이 높은 대안임

연료전지를 선박에 적용하는 기술은 많은 난제를 안고 있음

- 연료로서 수소를 활용한 추진방식은 내연기관과 연료전지를 활용한 전기추진 방식 등 2가지로 나눌 수 있으나 수소 내연기관은 연료효율이 낮아 연료전지 추진이 대세가 될 것이라는 점은 기술부문 전문가들의 일치된 의견임
- 수소가 내연기관으로 사용될 경우 연소 특성상 단독으로 사용되기는 어려우며 암모니아 엔진에서와 같이 다른 화석연료가 보조적으로 사용되는 혼소엔진이 될 가능성이 높으며 이에 따라 무탄소 연료로서의 가치는 감소할 가능성도 있음
- 선박에 적용이 가능할 것으로 검토 중인 연료전지로는 PEMFC(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)와 SOFC(Solid Oxide Fuel Cell) 등 2종류가 있음
 - 이중 PEMFC는 소형화 성공으로 이미 자동차를 중심으로 상용화되었으나 100°C 이하의 저온에서 작동하고 연료로 순수 수소를 사용하여야 하며 촉매로서 순도 높은 백금을 사용하여야 하는 특성상 대형 선박에 적용하는 것이 부적합하여 아직 많은 연구과제가 남아 있음
 - SOFC는 700~1,000°C의 고온에서 작동하고 효율이 높으며 순수 수소가 아닌 수소 함유 연료로도 작동이 가능하고 백금촉매를 필요로 하지 않아 선박 적용 가능성이 높아지고 있으나 무게와 부피가 선박에 적용하기에는 너무 커 아직까지 검토 단계임
- 연료전지는 이미 육상에서 자동차에 상용화되어 있으나 이를 선박용으로 대형화하는 데에는 많은 과제들이 남아 있음
- 과제들 중 하나는 가격이 너무 높다는 점이며 향후 개선 여지가 있으나 상용화를 위한 수준까지 낮추기에는 상당한 노력과 시간이 필요할 것으로 보임
 - 현재 선박에 적용가능한 연료전지의 가격은 kW당 2,000달러 수준으로 알려져 있으며 이는 현재 내연기관의 10배 이상의 비용이 소요됨을 의미함
 - 이를 보조엔진을 포함하여 약 35MW의 엔진이 장착되는 VLCC에 적용할 경우 7천만 달러, 75MW급인 23,000TEU급 초대형 컨테이너선의 경우는 약 1억 5천만달러의 비용이 소요되며 이는 전체 선박가액의 약 70~100%에 해당함
 - 상용화를 위해서는 탄소규제 비용 절감 등의 이익을 감안하더라도 약 70% 이상의 가격 인하가 필요할 것으로 추정됨
 - 그러나 연료전지 제작에 있어서 백금촉매의 사용 등 고비용 요인이 많아 상용화 가능 여부는 기술발전 추이를 지켜보아야 할 것임
- 연료전지와 연료공급장치의 부피와 무게 역시 연구개발이 필요한 과제이며, 35MW를 기준으로 310Kdwt급 VLCC유조선 적용을 가정하여 연료전지의 크기와 무게를 계산하면 SOFC의 경우 1,226GT, 1,849톤까지 이를 수 있음



표본 계산에 사용된 PEMFC 및 SOFC 사양 및 계산 결과

종 류	PEMFC	SOFC
제조업체	Horizon Fuel Cell Technology	Bloom Energy
스택 크기	0.149m x 0.240m x 0.191m	17ft 11in x 8ft 8in x 6ft 9in
스택 무게	8Kg	15.8 톤
출력	1kW	300kW
계산 방식	스택 35,000개를 병렬로 연결하여 35MW 출력 가정	스택 167개를 병렬로 연결하여 35MW 출력 가정
연료전지 총 부피	239M ³ (84GT)	3,472M ³ (1,226GT)
연료전지 총 무게	280톤	1,849톤

자료 : Horizon Fuel Cell Korea, Bloom Energy, 계산은 자체 수행

- PEMFC의 경우 31만dwt(약 16만CGT)의 VLCC에 적용하는데 있어 단위 스택의 부피와 무게가 작아 35MW급으로 화물의 운송에 지장을 줄 정도의 수준은 아닌 것으로 판단됨
- 반면, 아직까지 부피와 무게가 큰 SOFC의 경우 최근 소형화 개발된 스택을 적용하여도 부피와 무게가 PEMFC의 14.5배와 6.6배 큰 수준이므로 더 소형화하는 연구개발이 진행되어야 함
- 또한, 부피가 큰 액화수소를 사용하지 않고 LNG나 암모니아를 연료로 하더라도 이들 연료에서 수소를 분리하여 연료전지에 공급하는 장치와 LNG의 경우 탄소포집 설비까지 선내에 설치되어야 하므로 이들 장비 또는 설비에 대한 소형화 연구도 필요함
- 연료전지의 또 하나의 심각한 문제는 짧은 수명과 이에 따른 잦은 교체가 필요하다는 점임
- 연료전지의 수명은 항해시간이 긴 선박의 특성상 약 2~3년에 불과하며 이에 따라 2~3년마다 모든 스택을 교체하여야 하는 심각한 문제점이 있음
- 이러한 점 때문에 운행시간보다 주차시간이 더 긴 자동차와는 달리 원거리 항해를 주로 하는 선박에 연료전지를 적용하기는 어렵다는 견해도 제기됨

연료전지의 선박 적용에 있어서 또 하나의 불확실성은 자동차 등 이미 소형 발전으로 많은 운영실적이 있음에도 선박용 대형으로의 확대에 대한 실증이 이루어지지 않았다는 점임

- 연료전지는 이론상 단위 스택을 원하는 출력에 비례하여 해당 숫자만큼 병렬로 연결하여 에너지를 얻을 수 있음
- 그러나 선박 추진을 위한 대형으로의 확대와 운항시의 문제점을 파악하기 위해서는 모형 시험이 아닌 실제 대형 선박을 제작하고 실증하는 단계가 반드시 필요하다는 점이 기술부문 전문가들의 공통된 견해임
- 유럽 등 일부 국가들이 운하나 연안용 소형 연료전지선을 제작하여 운항한 실적은 있으나 아직까지 이를 대형화한 경험과 데이터는 없는 상태이므로 대형화에 따른 효율, 문제점 등은 알려진 바 없음



- 이 때문에 앞서 기술한 연료전지의 모든 기술적 문제가 해결된다고 하여도 실제 실증이 이루어지고 문제점을 개선하여 선박에 적용하기까지는 수년의 연구개발이 추가로 필요할 것으로 예상됨

수소의 특성이 연료로서 운반, 보관, 저장에 쉽지 않은 문제도 있으며 이를 해결하기 위하여 LNG, 암모니아로부터 분리하여 사용하는 방안도 연구되고 있음

- 수소의 특성상 영하 253℃의 초저온 냉각이 필요하여 운송과 보관에 많은 비용이 소요되며 체적당 에너지 밀도가 낮을 뿐 아니라 초저온 유지를 위한 냉각재 등의 부피로 인하여 연료 탱크가 기존 석유계 대비 7배까지 확대되어 선박에 이를 적용하기 쉽지 않음
- 큰 규모의 연료탱크를 고려한 선박을 설계하는 것은 비효율적이며 설계조차 쉽지 않을 것으로 예상됨
- 향후 생산과정에서 온실가스가 배출되지 않는 그린 수소를 사용하여야 하므로 이를 생산할 기반이 약한 아시아 지역의 경우 그린수소를 수입하여야 할 수 있으나 수소운반선이 대형화 될 가능성이 불확실하며 부피밀도가 낮아 매우 많은 물량을 수입하여야 하는 어려움이 있음
- 이러한 문제점들로 인하여 선박에서의 수소연료는 액화수소를 직접 사용하기보다 LNG를 개질하여 수소를 얻고 분리된 탄소를 포집하는 방안과 보관·저장이 용이한 그린 암모니아를 수입하여 이로부터 수소를 분리하여 사용하는 방안이 적극적으로 검토되고 있음

지금까지 기술된 연료전지에 대한 과제들은 단기간 내에 해결되기 어려운 난제들이며 이러한 문제들로 인하여 선박에서의 연료전지 활용은 최소 10년에서 길어질 경우 30년까지 소요될 것으로 전망됨

- 기술부문 전문가들은 선박에서의 수소 사용은 불가능할 것이라는 비관적 전망부터 LNG개질 등을 활용하여 10년 내에도 가능할 것이라는 낙관적 전망까지 다양한 의견을 제시함
- 대형화와 비용에 대한 부담으로 선박 추진 전면에 걸쳐 사용하기 보다는 온실가스 배출 저감을 위한 소형 보조 발전용부터 부분적으로 적용할 수 있다는 의견도 제시되고 있으며 탄소비용을 포함한 종합적인 경제성 평가가 이루어진 이후 구체적 논의가 가능할 전망
- 경제성 평가는 수소의 가격, 연료전지 가격, 기술 수준의 발전 등 앞으로 변화될 여지가 높으므로 현재 수준에서는 의미가 없을 것으로 보이며 기술발전에 따라 꾸준히 이루어져야 할 것임



6. 소형 원자로

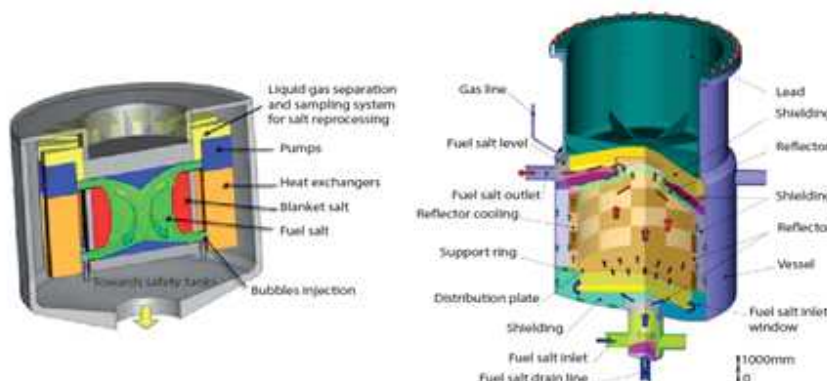
차세대 연료에 대한 불확실성이 높아지며 조선업계는 소형 원자로(SMR)를 이용한 원자력 추진선을 하나의 대안으로 검토하고 있음

- IAEA 기준에 의하면 300MW급 이하급 원자로를 소형 원자로(SMR : small modular reactor)로 분류
- 소형 원자로는 국내 기술력으로 90년대 후반부터 개발에 착수하여 사우디 등에 수출실적을 보유하고 있는 등 국내 자체 기술력만으로도 설계와 제작이 가능한 수준임
- 일반 중대형 원자로에 비하여 냉각제 배관파손으로 인한 방사능 유출 등 각종 사고의 위험이 낮고 제작 기간도 짧은 것으로 알려짐
- 상용화 시점이 임박한 암모니아를 비롯하여 장기적 대안인 수소까지 기술적 타당성, 경제성, 안전성 등에 대한 불확실성이 높아지고 탄소중립에 대한 대안의 제시가 어려워지며 무탄소 발전이 가능한 소형 원자로가 조선업계와 학계에서 대안으로 제시되고 있음
- 원자력 추진선은 한번 건조되면 선박의 수명이 다할 때까지 연료를 재충전할 필요가 없고 탄소 배출이 전혀 없다는 장점이 있음

소형 원자로의 선박 적용 경제성 확보 대안으로서 용융염 원자로가 연구되고 있음

- SMR은 초기 투자비가 지나치게 높아 경제성이 매우 낮다는 지적이 있으며 최근 이를 해결하기 위한 방안으로서 소형 원자로의 한 종류인 용융염 원자로(MSR: Molten Salt Reactor)가 선박에 적용할 대안으로 부상하고 있음
- MSR은 냉각재로 불소 혹은 염소 화합물의 용융염을 사용하며 핵연료 물질을 이들 용융염에 용해시켜 용융염을 핵연료와 냉각재로 동시에 활용하는 원자로를 의미함⁵⁾

용융염 원자로(MSR) 구조



자료 : 서울대 원자력 Wiki

5) 서울대 원자력 Wiki 인용



- MSR은 일반 소형 원자로에 비하여 경제성을 확보할 가능성이 높고 핵연료가 냉각재로 동시에 사용되어 냉각재 이상에 의한 사고의 위험성이 낮다는 장점이 있음
- 미국 기업인 Tera power가 미국 에너지부의 지원하에 선박 적용 연구개발을 수행하고 있고 영국 기업인 Core Power도 동일한 연구개발을 진행하는 등 국제적으로도 MSR에 대한 선박 적용 연구개발이 비교적 활발하게 추진되고 있음

국내에서도 각 조선사와 원자력연구원 등이 소형원자력을 활용한 원자력 추진선을 개발하고 있거나 검토 중인 것으로 파악됨

- 국내 한 대형 조선사는 원자력연구원과 제휴 협력하여 MSR탑재 선박을 공동 설계하는 협력을 추진함
- 정부의 탄소중립 정책에 있어서 원자력의 비중은 감소할 것으로 나타나고 있으나 2021년 9월 과학기술정보통신부와 산업부는 5800억원 규모의 혁신형 SMR 기술개발사업 예비타당성 조사를 신청하는 등 연구개발 지원 사업에서 소형 원자로를 배제하지 않음

활발한 연구에도 불구하고 원자력 추진이 상선에 적용될 수 있을지 여부는 불확실함

- 소형 원자로 추진 상선 표준을 국제기구에서 인정받아 상용화하는 데에는 많은 어려움이 예상되어 원자력 추진선이 해상 탄소중립의 대안으로 자리잡을 수 있을 것인지는 불확실성이 높음
- 현재 군용 선박으로는 많은 원자력 추진 함정들이 이미 오랜 시간 실전 배치되어 운용된 실적이 있으나 아직까지 상선에 적용한 사례는 없음
- 또한, 일반 원자로에 비하여 안전성이 높은 것으로 평가되고 있으나 세계 환경단체들은 여전히 소형 원자로에 대해서도 강한 반대의견을 나타내고 있음
- 위험성에 대한 높은 우려로 원자력 추진 상선의 자국 입항을 금지하는 국가들도 다수 있을 것으로 보이며 원자력에 강점이 없는 많은 IMO 회원국가들의 반대로 상선에 적용하여 국제 표준으로 인정될 것인지 여부도 불확실함
- 사용후 폐기 선박에 대한 처리에 있어서도 국가간의 이해충돌 문제, 보상문제, 폐기업체가 소재한 국가의 국민적 반발 등의 문제도 해결이 쉽지 않을 것으로 전망됨

이러한 문제점들에 대응하여 다양한 안들이 제시되고 있으며 소형 원자로의 활용은 국내외적으로 많은 논의가 이루어진 후에 접근이 가능할 전망

- 이러한 문제점을 인식하여 원양 항해용 대형 컨테이너선에만 적용하고 컨테이너 터미널을 각국 영해에서 벗어난 공해상에 위치시켜 대형 컨테이너선들이 공해상 허브 터미널을 순회 운항하고 지역항과 허브터미널 간 운송은 소형 일반 화물선이 담당하는 안이 제시되고 있음



- 또한, 앞서 기술한 문제들로 선박에 대한 적용이 어려울 경우, 국내에서 소형 원자료를 활용하여 탄소배출이 없는 그린 수소를 생산하는데 활용하자는 안도 제시되고 있음
- 후쿠시마 원전사고 이후 세계적인 반원전 여론이 높아지고 있어 소형 원자료를의 선박 적용은 기술적 장벽이 낮은 현실적 대안이 될 수 있음에도 불구하고 쉽게 결론 지을 수 없는 문제이며 국제적, 국내적으로 많은 논의가 이루어진 이후 접근이 가능할 것으로 전망됨

7. 기타

그 외 대안 연료들 역시 일부 부분에서 탄소중립 연료로서 사용이 가능할 전망

- 배터리를 활용한 전기추진은 연안 소형 선박에 제한적으로 활용될 것으로 예상되며 LNG 등 탄소 저감 연료와 함께 하이브리드 추진시스템으로도 사용될 전망
- 배터리 전기추진선은 아직까지 배터리의 에너지 밀도가 낮아 무게와 부피가 크고 이를 대형화 하기에 한계가 있으며 충전 설비 건설의 한계 등으로 일부 소형 연안선박에 국한되어 사용될 전망
- 해상에서의 안전성은 여전히 논란이 있음
- 배터리 단독 추진시스템도 연안 소형선에 적용이 가능할 것으로 예상되며 LNG 등 탄소저감 화석연료와의 하이브리드 추진시스템도 유럽 등지에서 연안 또는 근해선을 중심으로 활동하고 있어 향후 확대될 가능성이 높음
- 바이오 연료는 탄소를 기존 선박의 추진시스템에서 개조가 크게 필요하지 않은 장점이 있으나 생산량이 충분하지 않아 제한적 범위에서 사용될 전망
- 현재 일부 저유황유의 혼합물로도 사용되고 있으며 독자적인 연료로서 활용되기보다 탄소 배출을 낮추기 위하여 혼합연료의 일부 원료로 사용될 가능성이 높을 전망



IV. 국내 해사업계의 현황

지금까지 살펴본 바와 같이 해상에서의 탄소중립을 위한 대안은 단기적 대안 뿐 아니라 중장기적 대안까지 높은 불확실성을 나타내고 있으며 전망도 엇갈리고 있음

- 비교적 다양한 시도를 할 수 있는 육상의 여건에 비하여 선박에서는 적용할 수 있는 기술이 제한적이고 각종 제약이 많아 온실가스 배출저감 노력은 육상의 산업보다 더 큰 어려움을 가지고 있음
- 이러한 어려움에도 불구하고 IMO 등의 온실가스 저감 목표는 육상산업의 목표와 동일한 수준을 제시하고 있어 여러 불확실성을 높이는 요인이 되고 있음
- 본고의 작성을 위한 조사인터뷰에서 선급, 연구원, 조선사 등의 기술부문 전문가 20여 명은 가장 비관적인 전망부터 비교적 낙관적인 전망까지 다양한 의견을 제시함
- 해상에서는 국제사회가 제시하고 있는 온실가스배출 저감목표 달성에 궁극적으로 실패하고 육상 저감분에서 비롯된 탄소배출권 구입에 의존할 수밖에 없을 것이라는 전망이 가장 비관적 전망으로 제시되기도 함
- 반면, LNG와 같은 석유계 대비 탄소배출이 적은 연료를 탄소포집과 함께 적용하면 중간 단계의 배출저감 목표를 달성할 수 있고 약 15년 이내에 암모니아, LNG 등을 활용한 수소 연료전지 추진선박이 상용화될 수 있다는 비교적 낙관적 전망도 존재함
- 특히, 수소 연료전지 추진선은 기술부문 전문가들의 전망이 가장 엇갈리는 대안으로 10년 내 상용화가 가능하다는 의견부터 선박 적용은 소형선을 제외하고 불가능하다는 의견까지 다양하게 제시됨

해운업계는 노후 선박의 교체투자 수요에 대하여 재무적 한계와 미래 전략 수립의 어려움 등으로 이중고를 겪고 있음

- 해운업계는 2008년 금융위기 이후 운임이 낮은 상태의 침체가 10여 년간 지속되며 신규 투자 여력이 부족한 상황에서 노후 선박에 대한 높은 비용의 개조 또는 교체 투자를 단행해야 하는 상황임
- 약 10여년 전 호황기 중 높은 가격에 구매한 많은 선박들이 지금까지 낮은 운임과 용선료로 인하여 낮은 수익성을 유지하여 왔으며, 비교적 선령이 낮은 이들 선박조차 고효율 친환경 기술이 적용되지 않아 규제 대응이 어려움
- 최근 컨테이너선 해운사들이 운임 급등으로 수익이 크게 개선되어 세계적으로 많은 선박을 신규 발주하였으나 여전히 장기적 탄소중립 대안이 적용되지 못하였고 아직도 노후선의 숫자는 많아 중장기적 신규투자는 여전히 과제로 남아있음



- 금융을 통하여 재무적 문제가 해소된다 하여도 중장기적 관점에서 대안 연료와 추진 방식을 선택하는 것 역시 어려워 대부분의 선사가 미래 전략 수립에 깊은 고민이 있으며 이에 따라 필요한 신규 투자를 단행하지 못하고 있음

조선업계 역시 재무적 어려움 속에 연구개발 투자가 진행되고 있으며 투자의 비효율성도 상당하여 경쟁국에 비해 불리한 상황임

- 조선업계 역시 2016년까지 해양플랜트 사업실패에 의한 대규모 적자사태와 구조조정을 겪었고 2016년 이후 수주 불황으로 재무적 상황이 개선되지 못한 상태에서 다양한 연료와 추진방식에 모두 연구개발 투자를 추진해야 하는 어려움이 있음
- 중형 조선업계는 최근 M&A를 통하여 금융권의 경영관리에서 벗어났으나 수년간의 재무적 실적 악화와 인력의 이탈 등으로 변화에 대한 적절한 대응도 어려운 상황임
- 재무적으로 어려운 상황에서도 향후의 방향성을 결정하기도 어려워 각 대형 조선소는 모든 대안을 각사별로 검토 및 연구개발하고 있는 상황이며 이는 국가주도로 대응하고 있는 중국과 일본 등 경쟁국에 비하여 매우 비효율적이며 불리한 상황임

이러한 어려움과 혼란을 동시에 겪고 있는 상황에서 해운업계와 조선업계 간의 소통은 매우 부족한 것으로 파악됨

- 해운사들은 대안의 결정이 어려운 상황에서 시간이 지나면 조선사들이 기술적 완성도를 높이며 대안을 제시할 것으로 기대하고 있음
- 대세적인 대안이 제시될 때까지 탄소포집이나 소량의 노후선을 암모니아 추진 선박으로 교체하는 등의 임시 방편을 위한 투자 계획을 세우기도 함
- 반면, 조선사들은 모든 대안을 검토 및 연구개발 중에 있으나 해운사들이 원하는 대안을 제시하면 이를 집중적으로 투자한다는 생각이 강한 것으로 파악됨
- 해운사의 기술검토 부문과 조선사 기술부문 간 실무자 수준의 의견교환이나 문의 등은 이루어지고 있으나 불확실성의 제거를 위한 조직적 노력은 전혀 이루어지지 않고 있는 것으로 파악됨
- 이처럼 국내 전후방 업계간 소통이 부족하고 막연한 상호의존적 태도는 자체적으로 차세대 대안 연료를 결정하고 적극 투자에 나서고 있는 세계 1위 머스크의 사례나 정부가 해사업계 간 협의 기구를 이끌고 있는 일본의 사례와 대조되는 모습을 보임
- 국내 해사업계가 현재의 상황을 타개하기 위해서는 보다 조직적이고 적극적 협력 방안이 강구될 필요가 있음



국내 조선기자재 업계의 독자적 대응도 어려움이 있으며 보다 강화된 협력이 필요함

- 현재 검토되고 있는 연료와 추진시스템이 매우 다양하여 향후 선박의 다품종 소량 생산 가능성이 높으며 이 때문에 각 필요 기자재의 규모의 경제 달성에 어려움이 있음
- 이 때문에 기자재 업계가 각 대안 연료와 추진시스템에 신규로 소요되는 기자재 개발에 적극 투자하기 어려운 점이 있음
- 이러한 점은 규모가 큰 유럽 기자재업계에 유리한 상황으로 전개될 가능성이 있으며 초기 대안 선박 시장에서 기자재의 해외 의존도가 높아지고 국내 기자재업계가 위축될 우려가 있음
- 이러한 우려는 국내 조선업계에도 유리한 상황이 아니며 이를 최대한 방지하기 위한 조선-기자재업계간 협력도 강화될 필요가 있음

해운, 조선업계의 문제 뿐 아니라 연료시장이 해외에 종속될 우려마저 제기되고 있어 보다 적극적 투자가 필요함

- 앞서 언급한 바와 같이 해상환경규제는 선박이 운항시 배출하는 온실가스의 범위를 넘어 연료가 생산된 단계까지의 책임을 묻는 방향으로까지 강화될 움직임을 보이고 있어 청정 연료시장의 주도권 장악을 위한 경쟁도 향후 치열해질 전망이다
- 향후 청정연료의 생산에 있어서 관건은 탄소배출이 없는 과정의 수전해를 통해 생산된 그린 수소이며 현재 그린 수소를 생산할 수 있는 인프라는 대부분 유럽, 미국 등에 집중되어 있어 우리나라로서는 해외 의존도가 높아질 위험에 처해 있음
- 최근 발표된 정부의 “제 1차 수소경제 이행 계획”에는 이러한 문제점들이 인식되어 있으며 정부는 청정수소 생산설비 확대를 계획하고 있음
- 그러나 구체적 방안은 아직까지 상세하게 제시되어 있지 않으며 향후 전후방 산업계와의 협의 확대를 통하여 관련 에너지업계의 적극적 투자를 유도하여야 할 것으로 사료됨
- 청정 연료 수요 측면에서 해상 수요보다 육상 수요가 압도적으로 많을 것으로 보여 연료산업에 대한 해사업계의 영향력은 다소 떨어질 수 있으나 해운 수요 역시 중요한 수요처로서 향후 방향성을 설정하기 위한 연료업계와의 협력의 확대가 필요함



V. 경쟁력 강화를 위한 대응 방안

1. 경쟁국 대응 현황

해상 탄소중립을 위한 변화의 노력이 각국에서 진행되고 있으며 이들 중 조선업 경쟁국인 중국과 일본의 경우 국가가 주도하는 효율적 체계를 갖추고 있어 이를 주시할 필요가 있음

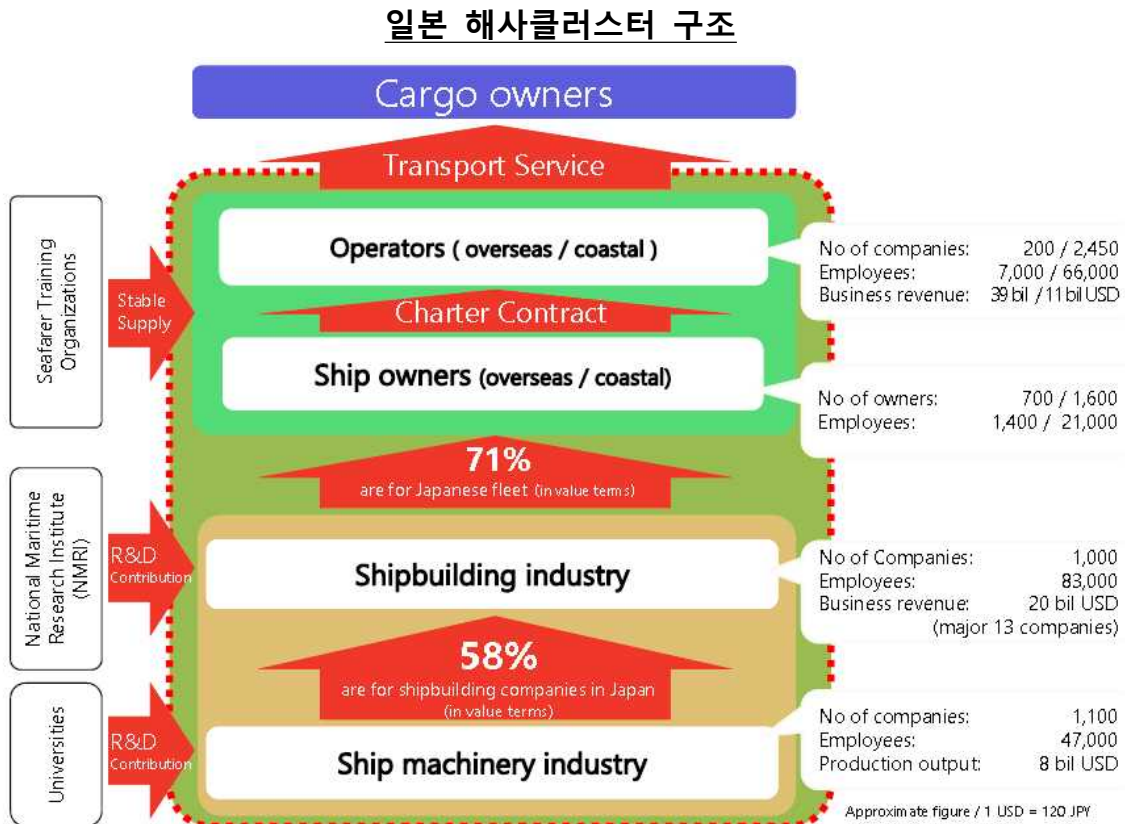
- 이들 경쟁국들은 조선산업에 있어 우리나라 대비 경쟁력이 약한 것으로 평가되고 있으나 보다 강한 해운산업을 기반으로 이러한 약점을 보완하고 있음
- 또한, 정부의 특성과 지원 형태가 다르나 해운-조선업계의 협력을 유도하고 일관된 연구개발 체계를 국가가 주도한다는 공통점이 있으며 대응 효율성에 있어서 한국보다 크게 유리한 점이 있음

중국을 “중국제조 2025”에 기반하여 국가가 주도하는 조선산업 경쟁력 강화를 추진하며 해운-조선업이 연계된 효율적 시스템으로 대응하고 있어 매우 위협적임

- 중국은 지난 2015년 수립된 “중국제조 2025” 국가 전략 중 조선산업을 미래전략을 이끌어 갈 10대 산업 중 하나로 채택하여 막대한 지원 계획을 공식화한 바 있음
- 국가가 설립 또는 지정한 연구개발 센터들이 국가 지원하에 연구개발을 주도하고 이를 전국의 산업체들이 공유하는 방식으로, 조선 3사가 각자 동일한 연구개발 항목에 투자하는 한국에 비하여 효율적인 시스템으로 운영되고 있음
- “중국제조 2025”의 큰 핵심은 친환경과 디지털화이며 선박 시장의 흐름과도 일치하여 적절한 국가 전략하에 지원이 이루어지고 있음
- 국가의 영향력이 강한 국영 해운사 등이 세계적인 선사들이며, “일대일로”라는 또 하나의 거대 국가전략에 기반하여 매년 많은 물량의 신조선을 자국 조선사에 발주하고 있어 해운과 조선산업이 국가의 통제하에 협업하는 구조를 가지고 있음
- 이러한 체제하에서는 새로운 기술이 적용된 실증선박을 건조하고 운영하며 데이터를 축적하는데 아무런 제약이 없으므로 우리 조선업계보다 앞서 나갈 기반을 확보하고 있음
- 현재까지의 조선 기술력에서 한국이 앞서 있는 것으로 평가되나 새로운 저탄소 또는 무탄소 선박의 건조는 해당 요소기술을 가진 해외 기업과도 협업이 가능하고 실증데이터의 확보가 용이하여 한국보다 단 시간내 앞서나갈 여건이 충분하며 매우 위협적임



일본은 중국과 다른 경제체제를 갖추고 있으나 국토교통성이 주도하는 해사클러스터를 통하여 범국가적 협력기반을 갖추고 있어 효율적인 연구개발과 대응 능력을 갖춘 것으로 평가됨



자료 : 일본 국토교통성

- 일본 조선산업은 1980년대 구조조정을 통하여 기술인력을 퇴출시키고 조선기술 개발 능력을 스스로 붕괴시켜 2000년대 이후의 변화에 크게 고전하고 있음
- 이러한 불리한 상황을 극복하고 세계적 수준의 자국 선사들의 능력을 활용하며 협력을 통한 변화에 대응하기 위한 체제로 일본 국토교통성은 해사클러스터를 조직하여 운영하고 있음
- 해사클러스터에는 조선기자재사, 조선사, 선주사, 해운사 등이 주축으로 참여하고 대학과 연구기관, 선급과 안전관련 기관 등 해사기관들이 총체적으로 참여하여 협의를 통하여 협력과 미래 전략을 이끌어내는 역할을 하고 있음
- 일본은 선사들과 조선사들 그리고 기자재사들 간의 자국기업 의존도가 높아 산업간 협력이 비교적 용이하게 이루어질 수 있는 특성이 있으며 이를 최대한 활용하고 있음
- 연구개발은 해사클러스터를 통하여 합의된 역할에 따라 각 기업이나 연구기관이 부분을 나누어 임무를 부여받고 추진하는 협력연구가 이루어지고 있어 사실상 국가 전체가 일원화된 연구개발 체계를 갖추고 있으며 이 역시 한국보다 매우 효율적임



- 일본은 해사클러스터 운영을 통하여 자국에 보다 유리한 EEXI 규제를 IMO에 제안하여 2023년부터 시행 확정을 이끌어낸 바 있고, 자율운항선박의 국가표준 플랫폼을 한국보다 먼저 완성하여 세계 표준화를 시도하고 있는 성공 사례가 이미 존재함
- 실증선 제작과 운영도 이러한 협력 시스템 기반하에 큰 난관 없이 가능할 것으로 예상되며 이러한 상황은 우리나라보다 친환경 선박 시장 대응에 있어서 크게 유리한 여건이라 할 수 있음
- 조선사들의 재무적 상황이 어려운 것으로 추정되나 일본재단(Nippon Foundation)과 같은 민간자금 형태의 지원자금 투입이 가능하여 통상문제도 교묘히 회피하는 등 변화에 대응할 체제가 이미 갖추어져 있음
- 일본 조선업은 최근 점유율이 급격히 하락하는 등 쇠락 양상을 보이고 있으나 일본 정부가 아직까지 조선산업을 포기하는 근거는 찾아볼 수 없으며 해사클러스터와 같은 노력이 성공할 경우 친환경 선박 시장에서 한국 조선산업의 경쟁력 우위 유지를 보장할 수 없음

2. 국내 해사산업 경쟁력을 위한 대응 방안

우리나라 해운 및 조선산업의 온실가스 대응의 성공을 위한 관건은 “협력”임

- 앞서 우리나라 해운 및 조선업계의 대응 문제점을 짚어보고 중국, 일본 사례를 살펴보면 우리 업계의 대응에 있어 근본적인 문제는 높은 불확실성 속에서도 이해관계가 있는 업계 간, 업계 내의 논의와 협력이 크게 부족하다는 점을 들 수 있음
- 이러한 협력 부족의 문제는 각 기업의 중복투자 문제를 발생시키고 이해관계집단 모두의 불확실성 해소가 지연되며 궁극적으로 경쟁력을 저하시키는 심각한 문제로 이어질 수 있어 시장의 변화 이후 시장 내 우리 기업들의 위상이 크게 추락할 우려까지 제기됨
- 이러한 불확실한 변화에 대응하기 위한 기업 간, 업계 간 협력은 필수적인 것으로 보이며 기업들도 이를 인식하고 있으나 국내 산업계에는 협력을 저해하는 뿌리 깊은 무형의 요인들이 존재함
- 조선사들의 경우 대형 조선사들이 태동한 70년대 이후 3사 간의 치열한 경쟁을 통해 세계적인 경쟁력을 갖추게 되었다는 의식이 있고 이를 통해 타사를 지나치게 경쟁자로만 인식하는 경향이 강함
- 또한, 이미 출발선상에서 친환경 선박의 개발 방향과 표준이 서로 달라 협력을 통한 연구개발에 한계가 있으므로 자사의 성과를 양보하여 국내 표준을 정하고 협력 개발을 추진하는 방안은 받아들이기 어렵다는 인식이 존재함
- 조선업계와 해운업계도 국내 조선업의 판매비중에 있어 국내 해운업계가 비교적 낮은 비중을 차지하고 있고 국내 해운업계도 자국기업을 소홀히 대하는 조선업계에 대한 반감이 있어 감정적으로 협력이 쉽지 않은 요소가 있음



- 이러한 요인들로 인하여 탄소중립을 위한 대응에 있어서 협력을 유도할 수 있는 별도의 조치가 마련되어야 할 것으로 사료됨

해상 탄소중립을 위한 국내 산업간의 협력을 이끌어내기 위해서는 일본 해사클러스터 모델과 같은 협력기구의 설립을 통한 정부의 특단의 노력이 필요함

- 해운, 조선, 기자재 등 해사산업의 협력을 유도하기 위해서는 일본의 해사클러스터 모델을 기반으로 하는 한국형 해사협력기구가 필요함
- 협력기구는 정부 산하에 해상 탄소중립 실현을 위한 기구로 설립하고 국내 조선사, 해운사, 기자재사, 연구기관, 선급 등 해사기관, 각 대안 연료의 안전기준을 담당하는 공공기관 등이 필수로 참여하고 화학 및 에너지사들도 참여하여 논의와 협력 활성화를 위하여 운영되어야 함
- 해운부문과 연료를 생산하는 화학 및 에너지 부문은 국내사들의 활동만으로는 제한이 있으므로 기구는 해외의 세계적인 해운사들과 에너지사들까지 참여시켜 논의와 협력을 진행하는 초국가적인 활동으로 운영될 필요성도 있음
- 해외 해운사와 에너지사들의 참여는 국내 해당 업종 기업들의 반발을 살 수 있으나 논의 과정을 통하여 해외기업들의 전략을 파악하고 앞선 부분을 수용하며 해외기업들과의 협력도 도출할 수 있어 궁극적으로 이익이 될 것으로 예상됨
- 기구는 참여기업과 기관들 간의 논의의 장으로 정기적 혹은 비정기적 포럼 등을 진행하고 의견을 교환하는데 그치는 수준이 되어서는 안되며 각 전문가들을 상임 직원으로 고용하여 논의된 의견 조정, 합의 이행 관리, 이해관계 조정 등의 업무를 상시적으로 수행하여야 함
- 이를 통하여 해상 탄소중립 대안에 대한 불확실성을 조기에 해소시키고 국가적 전략을 수립 하며 우리 해사산업계의 경쟁력을 높이는 역할을 하게 될 것임
- 참여기업들에 대해서는 국제 통상에서 허용되는 범위 내에서 탄소중립을 위한 연구개발비를 지원하고 투자에 대한 정책적 혜택 등으로 기업에 인센티브를 부여할 수 있음
- 기구에는 금융사, 법률회사 및 관련 부문 전문가들을 움저버로 참여시켜 해상 탄소중립 진행 상황을 추적하고 금융과 관련 법률 제정도 이에 속도를 맞춰 준비할 수 있도록 하는 방안도 검토하여야 할 것임

협력기구를 통한 논의를 거쳐 국내 조선사들의 효율적 연구개발 방안을 도출하여 추진하고 선사, 연구기관, 선급, 기자재사들을 포함한 국가적 협력연구가 이루어져야 함

- 협력기구를 통한 논의를 거쳐 선사들과의 경쟁력 강화를 위한 최선의 대안을 도출할 뿐 아니라 국내 조선사들의 공동연구 안도 모색하여 연구개발의 중복투자를 방지하는 방안이 우선 추진 되어야 할 것임
- 이러한 방안에는 조선사들 뿐 아니라 국내 연구기관, 기자재사들까지 포괄하여 범 국가적인 협력연구가 이루어질 필요가 있음



새로운 기술이 적용되는 경우 이를 상용화하기 위한 실증선의 건조 방안도 반드시 찾아야 하며 일정 수준 정부의 지원도 필요함

- 새로운 대안이 적용될 경우 선주는 반드시 실증 데이터를 요구하므로 실증선의 제작과 운영은 반드시 필요함
- 기술적으로도 대형 선박에 적용할 경우 성능과 문제점을 확인하여야 하는 측면에서 반드시 필요한 과정이며 향후 조선업의 경쟁력과도 직결될 수 있음
- 실증선 제작은 상용화된 기자재와 기존 공정이 확립되지 않은 상황이므로 건조비용이 매우 높아 한 기업에서 실증만을 위한 투자가 실행되기 쉽지 않은 문제가 있음
- 국내 관련 정부사업의 예비타당성 조사에서 실증선 제작을 포함하여 신청한 경우가 있었으나 실증선의 소유주체, 운영 방안, 정부재원 상환 주체 등이 명확히 정의되지 않아 번번이 삭감된 바 있음
- 현실적으로 리스크가 높은 실증선을 운영하려는 선사의 결정이 쉽지 않은 상황이므로 이러한 연구가 예비타당성 심사를 통과하기 어려워 정부의 지원을 기대하기 어려운 현실임
- 그러나 이는 해상 탄소중립을 실현하기 위한 해사업계가 반드시 거쳐야할 과정이므로 조선사와 선사 간의 협력 방안이 도출된 경우 해상 온실가스 저감 노력 차원에서 예비타당성 조사를 면제하는 등의 특별 조치가 필요할 것으로 사료됨
- 이를 통하여 국가적으로 해상 탄소중립에 투자되는 자금을 지원받을 수 있는 근거가 마련되고 실증선박의 시험 운항을 위한 법률적, 제도적 지원도 필요함

해상 탄소중립을 위한 연구는 실질적으로 대형 조선사들이 주도하고 있으며 온실가스 저감을 주도하기 위해서는 대기업에 대한 연구비 지원을 과감하게 실행할 필요도 있음

- 현재 국가 연구지원 정책상 대기업에 대한 지원은 극히 한정되어 있어 국내 대형 조선사들이 정부 지원으로 탄소저감 연구를 수행하는 것은 사실상 불가능한 실정임
- 이러한 상황은 해상 탄소중립 연구개발이 실질적으로 국가에 의해 주도되고 있는 중국, 일본 등 경쟁국들과 대비하여 매우 불리한 상황임
- 해상 탄소중립 연구를 위해서는 특별 조치로서 본 분야에 국한하여 대기업에 대한 지원 제한을 해제하고, 협력기구를 통한 구체적 협력 방안이 도출된 경우 국가적 지원과 협력을 통한 연구개발을 추진할 필요가 있음
- 이를 위하여 WTO 등 통상문제에 대한 면밀한 법률적 검토가 수행되어야 할 것이며, 국제 통상문제와 무관하게 탄소 중립을 위한 국가적 노력의 일부로서 지원이 가능한 부분을 우선 지원하는 방안 등을 검토할 필요가 있음



협력기구를 통한 논의와 협력에 기반하여 선박용 청정 연료의 생산과 보급 방안도 모색할 필요가 있음

- 우리 정부는 수소경제 이행 계획을 통하여 그린 및 블루 수소의 생산설비 투자 계획을 밝힌 바 있으며 이를 기반으로 선박의 청정연료 생산에도 노력을 기울일 필요가 있음
- 협력기구를 통하여 국내와 해외의 화학 및 에너지사들간의 논의를 활성화할 경우 구체적인 협력 방안과 투자계획을 이끌어낼 수 있을 것으로 기대됨

기술부문 외의 금융, 법률 및 제도, 비즈니스 모델, 안전 등 관련 연구에 더욱 투자하고 활성화할 필요가 있음

- 신기술이 적용되는 시장의 변화에 대응하여 금융사들도 리스크 등에 대한 연구 필요성이 있으며 새로운 연료의 생산과 저장, 유통 등 새로운 비즈니스 모델이 등장할 것으로 기대되므로 이 분야의 연구도 강화하여 금융과 신산업 측면에서 기회를 선점할 수 있도록 하여야 함
- 또한, 기술적으로 완성된 선박이 즉시 상용화될 수 있도록 관련 안전규정, 법률의 제개정 등이 빠르게 이루어질 필요가 있으며 이를 위해서는 기술개발 속도에 맞춰 관련된 비공학부문 연구도 신속하게 추진될 필요가 있음



VI. 결론

현재의 선박 시장의 변화는 연료와 추진시스템 관점에서 세 번째 변혁에 해당하며 매우 불확실성이 높은 변화가 추진되고 있음

- 조선과 해운이 산업으로 정착하게 된 계기인 대항해시대 이후, 현재의 변화는 역사상 세 번째로 일어나고 있는 3차 변혁에 해당함
 - 첫 번째는 19세기말을 전후하여 범선이 증기선으로 바뀐 변혁임
 - 두 번째는 세계 1, 2차 대전을 거치며 연료가 석유로 바뀌고 디젤엔진으로 추진하게 된 변혁임
 - 현재의 탄소저감을 위한 다양한 연료와 추진시스템으로의 변화는 세 번째 변혁이 될 것임
- 금번 변혁은 일반적으로 기술의 혁신이나 수요의 변화에 의해 일어나는 형태와 달리, 인류가 처한 위기에 대응하고자 하는 요구에 의한 것으로 기술적 수준과 경제성을 고려하지 않은 혁신의 요구로 인하여 불확실성이 매우 높을 수밖에 없음

이러한 변혁은 시장의 작은 변화가 아니며 시장에서의 경쟁력 저하를 방지하고 새로운 기회를 포착하기 위해서는 경쟁보다 협력을 통하여 대응하여야 할 것임

- 이번 변혁은 지금까지 기술한 바와 같이 많은 변화를 초래할 것으로 예상되며 불확실성이 매우 높음
- 이러한 변화에 대하여 개별 기업의 한정된 경험과 능력만으로 대응하는 것은 국가적으로 대응하고 있는 경쟁국의 성과에 미치지 못하고 시장에서의 입지가 추락할 우려도 배제할 수 없음
- 기존의 경쟁력과 대응 방식을 고집하기보다는 기업들 간의 정보와 역량을 공유하고 국가가 이를 지원하는 범국가적 협력이 절실히 요구되고 있음



< 참고문헌 >

- 김민주·김동구(2021), “EU ‘Fit for 55’ 패키지 초안의 주요 내용”, 에너지경제연구원
- 김수현·김창훈(2020), “유럽 그린딜의 동향과 시사점”, 수시연구보고서 20-01, 에너지경제연구원
- 김진형(2021), “Fit for 55-Maritime Sector”, 한국선급, 맥넷 2021 워킹그룹 세미나 발표자료
- 딜로이트인사이트 편집국(2021), “탄소 포집 활용 저장기술 동향과 선도기업들”, Deloitte Insights
- 산업통상자원부, “제 1차 수소경제 이행 기본계획”, 산업통상자원부 공고 제 2021-806호
- 양종서(2021), “해상환경규제 효과에 의한 신조선 발주 전망”, 한국수출입은행 해외경제연구소
- 양종서(2021), “EU ETS의 조선업 영향”, 한국수출입은행 해외경제연구소, 맥넷 2021 워킹그룹 세미나 발표자료
- 이제명 외 4인(2019), “수소연료전지 선박 개요 및 기술개발 동향 소개”, 대한조선학회지 제56권 제 1호
- 장영욱·오태현(2021), “EU 탄소감축 입법안(Fit for 55)의 주요 내용과 시사점”, 세계경제포커스 Vol 4, No 44, 대외경제정책연구원
- 한국선급(2019), “친환경 미래 선박 연료 전망-선박연료로써의 암모니아”, 한국선급
- 해양수산부(2020), “제75차 해양환경보호위원회 결과 설명회”, 해양수산부
- Brinks, H.(2020), “Ammonia as a marine fuel”, DNV-GL, DNV-GL Alternative Fuels Online Conference 발표자료(ppt양식)
- Chan, T.(2020), “Renewable Methanol: A Net Carbon-Neutral Fuel”, The Methanol Institute
- European Commission(2021), “ANNEXES to the Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC”, European Commission
- European Commission(2021), “Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC”, European Commission
- European Commission(2021), “Questions and Answers - Sustainable Transport, Infrastructure and Fuels”, European Commission
- IEA(2021), “Net Zero by 2050-A Roadmap for the Global Energy Sector”, IEA
- Takeguchi, T.(2019), “Japan's Policies on GHG reduction and Digitalization in Maritime Industry”, 일본 국토교통성(ppt 양식)
- Yalcin, A.(2020), “Experience with methanol as fuel”, Methanex, DNV-GL Alternative Fuels Online Conference 발표자료(ppt양식)



기상청 (<http://www.climate.go.kr>)
서울대 원자력 Wiki (<https://atomic.snu.ac.kr>)
호라이즌퓨얼셀코리아 (<https://www.horizonfuelcell.co.kr>)
Bloom Energy (<https://www.bloomenergy.com>)
Clarkson (<https://sin.clarksons.net>)
Core Power (<https://corepower.energy>)
DNV_GL (<https://www.dnv.com>)
IMO (<https://www.imo.org>)
Tera Power (<https://www.terapower.com>)
The Methanol Institute (<https://www.methanol.org>)
US Department of Energy (<https://www.energy.gov>)

신문기사

뉴시스 (2021. 10. 27자), “'탄소중립 R&D 전략'에 SMR 빠질 듯...원전 재조명 추세와 상반”
연합뉴스 (2021. 6. 15), “'SMR이 게임체인저 될까' 원자력연, 차세대 원자로 개발한다”
환경일보 (2021. 9. 27자), “탄소포집기술 CCS? 돈은 조상님이 내줍니까”
GE리포트 코리아 (2015. 12. 29자), “이산화탄소 포집기수른 지구 온난화의 해결책이 될 수 있을까”
Offshore Energy (2021. 8. 19자), “Maersk secures fuel supply for 1st green methanol-fueled ship”
Offshore Energy (2021. 9. 23자), “Maersk to speed up eFuel development with latest investment in US startup”