

이슈보고서

산업경제팀

VOL.2023-해양-8 (2023.09.19)

해상탄소중립을 위한 선박 대안 연료 현황과 시사점 - LNG, 메탄올, 암모니아를 중심으로



CONTENTS

- I. 서론
- II. IMO와 EU의 해상탄소중립 정책 현황
- III. 단기적 대안 연료
- IV. 선박 발주 현황
- V. 대안연료의 전망과 시사점

작성

수석연구원 양종서 (02-6252-3586)



<요 약>

해상탄소중립 요구가 강해지고 있으나 대안 연료의 불확실성이 높아 선사들이 혼란을 겪음

- IMO의 중기전략은 2050년 순배출량을 0으로 설정하여 초기전략 대비 크게 강화됨
- EU는 '24년부터 EU ETS, '25년부터 Fuel EU Maritime을 시행하며 해상환경규제를 강화함
- 이러한 시점에서 단기적인 선박의 대안 연료로서 LNG, 메탄올, 암모니아 등이 주목받고 있으나 모든 연료가 공급, 경제성 등 여러 심각한 문제를 가지고 있어 불확실성이 높은 상황

LNG는 현재까지 대안 연료로서 가장 많은 선박이 건조, 운항되고 있고 경제성 측면에서도 향후 기대감이 높으나 메탄슬립의 문제 등으로 반대 여론이 높음

- LNG는 대안 연료추진 선박 중 가장 큰 비중을 차지하고 있고 벙커링 인프라도 잘 갖추고 있음
- 그러나 CO₂ 대비 약 28배에 이르는 메탄을 배출하는 메탄슬립의 문제가 해결되지 않고 있어 많은 반대에 부딪치고 있음
- 향후 탄소저감률이 높은 바이오LNG 또는 e-LNG 등으로의 전환을 시도하고 있으며 바이오 LNG의 경우 많은 연구에서 높은 경제성이 인정되고 있는 만큼 해운사들의 기대 또한 높음
- 메탄슬립 문제 해소 등 향후 변수들이 남아있으나 많은 선박이 건조된 만큼 향후 대안 연료로서 일정 부분을 차지할 것으로 예상

메탄올은 향후 공급능력과 경제성이 가장 큰 문제이나 확실한 온실가스 감축 효과와 환경에 미치는 낮은 유해성으로 대한 기대감이 높으며 컨테이너선 위주로 선박 발주가 증가하고 있음

- 선박의 대안연료로 사용될 그린메탄올은 바이오원료에서 추출하거나 혹은 재생에너지 수전해로 생산한 청정수소에 공기중 혹은 바이오원료에서 얻은 CO₂를 합성하여야 함
- 기존 메탄올 생산설비를 확대해야 하는 투자와 많은 재생에너지 투자가 필요하여 세계적인 공급능력에 불확실성이 있음
- 장기적으로 그린메탄올의 높은 경제성을 예측하는 연구도 존재하나 대부분 연구에서 타 연료 대비 높은 비용이 예상됨
- 2022년 Maersk의 글로벌 그린메탄올 생산 및 공급을 위한 전략적 노력 이후 컨테이너선 업계가 이에 반응하고 있으며 많은 메탄올 연료추진 컨테이너선이 발주되고 있음
- 경제성과 공급에 대한 불확실성에도 불구하고 상온에서 액체상태를 유지하며 비교적 안전하게 다루어지면서도 온실가스 감축효과가 높다는 장점 때문에 미래 대안 연료로서 지지를 받고 있으며 일정 수준 해운시장에서 역할을 할 것으로 기대



암모니아는 약 2년 내 상용화가 기대되고 탄소를 함유하지 않은 연료 특성상 시장에서 기대감이 있으나 독성 등 해결할 과제가 남아 있음

- 암모니아는 탄소를 함유하고 있지 않아 이산화탄소 배출이 없고 수소를 활용하므로 내연기관과 연료전지로서 모두 활용될 수 있음
- 내연기관에서 5~10%의 파일럿 화석연료와 함께 사용하여야 하고 온실효과가 CO₂ 대비 273배에 이르는 아산화질소를 발생시키거나 아산화질소 문제는 해결가능할 전망
- 가장 심각한 문제는 독성으로, 피해를 최소화하거나 회피하기 위한 다양한 연구가 진행 중이며 관련 규정도 정비 중임
- LNG에서 탄소포집을 병행하여 분리한 수소를 사용하는 블루암모니아는 경제성이 기대되며 그린암모니아는 생산 설비에 대한 막대한 투자문제 등으로 공급에 대한 불확실성이 있음
- 여러 문제에도 불구하고 내연기관은 2025년경 상용화될 것으로 예상되고 이에 따라 선박의 실증선 구축 등 상용화를 위한 노력이 세계 곳곳에서 추진되고 있음
- 암모니아에 대한 기대와 우려가 공존하고 있으며 문제 해결을 위한 노력이 더 필요할 전망

신조선 발주에 있어서 대안 연료 채택 선박의 비중은 증가하고 있으며 최근 들어 메탄올연료추진 선박의 발주가 크게 증가함

- 대안 연료를 채택한 선박의 비중은 2019년 15%(톤수 기준)에서 '23년 36%까지 증가
- Maersk의 글로벌 메탄올 확보 노력 등으로 메탄올 연료를 채택한 선박의 발주량 비중은 '21년 2%에서 컨테이너선을 중심으로 수요가 확대되며 '23년 14%까지 크게 증가함

본고에서 중점적으로 다룬 3개의 대안 연료에는 경제성과 공급능력 등의 불확실성이 높으며 이 때문에 많은 연구에서 미래에 다양한 연료가 공존할 것으로 전망

- 향후 해운 연료시장에는 연료의 가용성, 생산비용과 가격, 메탄슬립 해소 정도, 선상 탄소포집의 온실가스 감축 인정 여부, 규제의 방향, 바이오매스 공급 능력 등 많은 변수가 영향을 미칠 것으로 예상되며 이러한 변수들로 인하여 불확실성이 높음
- 각 연료가 장단점을 가지고 있고 선박과 선사 특성도 모두 다르므로 지배적인 비중을 차지하는 특정 연료 없이 많은 저탄소 또는 무탄소 연료가 공존할 것으로 예상

현재의 혼란은 해운업만의 문제가 아니며 국가적인 지원이 필요함

- 조선업, 해운업의 개별적 경쟁력 유지를 위한 지원도 필요하나 보다 많은 문제의 종합적 해결이 필요한 사안임
- 국가적으로 해결해야 할 많은 문제점을 도출하고 이를 지원할 필요가 있으며 이러한 노력을 통해 불확실성을 제거해 나가는 것이 바람직함



I. 서론

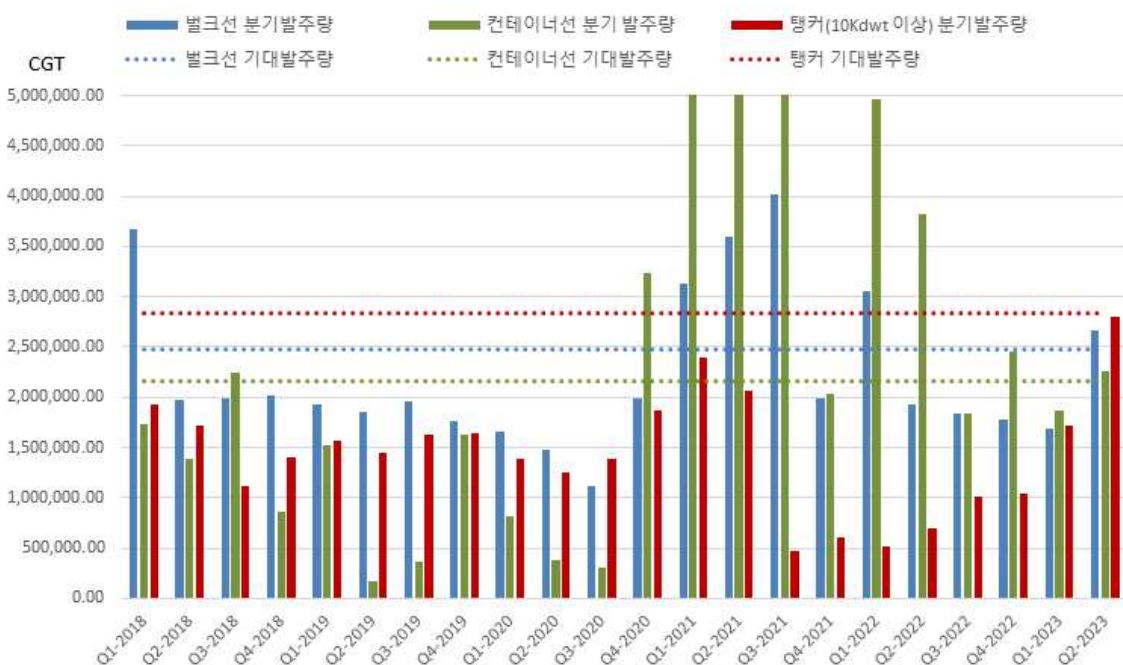
세계적인 해상탄소중립 요구가 강해지고 있으나 선박 시장에서는 아직까지 혼란스러운 상황이 지속되고 있음

- 지구온난화 방지를 위한 세계 각국의 노력이 진행되고 있는 가운데 해상에서도 탄소중립을 위한 요구가 더욱 강하게 제기되고 있음
- 해운, 조선, 조선기자재, 항만 등 해사산업을 구성하는 각 업계와 기관들은 해상탄소중립 실현을 위한 노력에 총력을 기울이고 있으나 아직까지 뚜렷한 대안은 제시되지 못하고 있음
- 장기투자 자산인 선박을 운영하는 선주들은 매우 혼란스러운 상황으로, 온실가스 저감에 대한 요구가 높고 관련 규제가 시행되고 있는 현 시점에서도 투자 방향을 설정하지 못하고 있음

선주들의 이러한 혼란으로 신조선 투자가 당분간 보류되는 관망세가 여전히 지속되고 있음

- IMO와 EU의 강력한 규제 시행(예정)으로 선주들은 노후선에 대한 교체투자가 시급한 시점이나 탄소중립 대안 연료가 마땅치 않을 뿐아니라 고금리로 금융비용까지 상승하여 신조선 발주를 미루고 상황을 관망하는 경향이 지속됨
- 2021년 이후 컨테이너선과 LNG선의 호조로 신조선 시황이 크게 호전되었으나 탱커와 벌크선의 발주량은 교체수요 본격화 시의 기대 발주량에 미치지 못하고 있음

교체수요 본격화 시 주요 선종의 분기 평균 기대 발주량 및 실제 발주량



자료 : Clarkson, 기대 발주량은 해외경제연구소 자체 계산치



최근 단기적 대안 연료로서 LNG 외에 메탄올이 빠르게 부상하고 있으며 암모니아도 수년 내 상용화 기대감이 높아지며 선사들의 관심이 집중되고 있음

- 수년 전까지 무탄소연료인 수소가 탄소중립 연료로서 자리 잡을 때까지 LNG가 단기적인 중간 대안 연료로 사용될 것으로 전망되었음
- 그러나 LNG의 주성분인 메탄이 발생시키는 온실효과가 강할 뿐 아니라 화석연료로서 온실가스 저감에 한계가 있어 국제적인 감축 요구를 충족하기에 부족한 것으로 평가됨
- 또한, 러시아-우크라이나 전쟁 이후 국제 LNG 가격이 높은 변동성을 보이며 단기적 중간 연료로서의 대안에도 불안감이 발생함
- 최근, 메탄올이 LNG를 대체할 중간연료로서 부상하고 있으며 이에 대한 장단점 역시 시장에서 논란이 있음
- 또 다른 대안으로서 암모니아 연료추진 엔진이 1~2년 내 개발 완료될 것으로 예상되고 있어 이 역시 선주들의 기대를 모으고 있음
- 향후 선박연료로서 수소와 연료전지의 상용화가 실패할 경우 이들 중간 대안 연료는 영구적인 해상탄소중립 연료로서 자리매김할 가능성도 있음

본고에서는 단기적 대안 연료로서 혹은 수소 사용 이전까지의 중간연료로서 이들 연료와 관련된 논점을 정리하고 탄소중립 대안 연료로서의 가능성을 짚어보고자 함

- 이들 3가지 연료는 무탄소 연료인 수소가 연료전지 형태로 사용되기 이전까지 해상에서 최대한의 탄소저감을 실현할 연료로 꼽히고 있음
- 그러나 이들 연료 역시 해운업에서의 완전한 상용화에는 여러 문제점들을 내포하고 있으며 이 때문에 선주들이 완전한 신뢰를 기반으로 채택하지 못하고 있음
- 본고에서는 세계 각국에서 진행되고 있는 이들 연료에 대한 검토와 연구 현황 등을 통해 대안 연료로서 가능성과 기대감, 과제 등을 정리하고 시사점을 도출함



II. IMO와 EU의 해상탄소중립 정책 현황

1. IMO

IMO는 2023년 EEXI와 CII 규제를 예정대로 시행함

- 400GT 이상의 국제항행 선박들에 대하여 2023년 1월 1일부터 EEXI(energy efficiency existing ship index)의 규제가 시행되었으며 기준치 이상의 온실가스 배출 선박들은 대부분 엔진출력 제한장치인 EPL(engine power limitation)을 장착하고 운항속도를 감속함
- 또한, 5,000GT 이상의 국제항행 선박들에 대해 한 해 동안의 실제 온실가스 배출량을 기준으로 등급을 부여받아 하위 2개 등급에 개선 의무를 부과하는 CII(carbon intensity indicator) 역시 2023년부터 시행에 들어감
- 최근 이들 규제의 페널티 조항이 약화되는 등 실효성에 대한 비판이 제기되기도 하나 IMO의 조치들은 향후 탄소중립 목표가 강화되며 규제의 강도가 높아질 것으로 예상됨

IMO는 최근 해상온실가스 감축 중기전략을 채택하여 초기전략에 비해 강화된 목표를 제시함

- IMO는 2018년 해상탄소중립에 대한 초기전략을 다음과 같이 채택한 바 있음
 - 2050년까지 선박의 총 해상 배출량을 2008년 수준 대비 50% 이상 감축
 - 2030년까지 선박의 탄소집약도¹⁾를 2008년 대비 40% 저감
 - 2050년까지 선박의 탄소집약도를 2008년 대비 70% 저감
- 2023년 7월에 개최된 80차 MEPC 회의에서는 파리협정의 온실가스 저감 경로에 해상에서의 활동 역시 일치시키기 위하여 지난 5년간 유지된 초기전략을 보다 의욕적인 중기전략으로 수정하기 위한 논의가 진행되었으며 다음과 같이 채택함
 - 2050년 무렵 국제 해운 온실가스 배출량 순배출량 제로 달성
 - 2030년까지 국제 해운 온실가스 배출량 2008년 대비 최소 20% 감축(30%까지 감축 노력)
 - 2040년까지 국제 해운 온실가스 배출량 2008년 대비 최소 70% 감축(80%까지 감축 노력)
 - 이러한 합의에는 회원국간 견해 차이가 컸던 것으로 알려졌으며 순배출량 제로(Net zero)의 기준이나 의미도 명확히 규정되지 않았음
 - 일부에서는 중기전략을 선언적 의미로 해석하는 견해도 존재하나 중간지표 등을 감안하여도 초기전략에 비해 대폭 강화된 수준임을 알 수 있으며 향후 해상환경규제 등 다양한 조치의 강화가 뒤따를 것으로 예상됨

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



IMO의 중기전략 주요 내용

비전	정의롭고 공평한 전환을 촉진하면서 가능한 한 빠르게 국제 해운의 온실가스 배출량을 단계적으로 퇴출하는 것을 목적으로 온실가스 배출량 저감에 노력할 것
의욕 수준 (Levels of ambition)	① 신조선의 에너지효율 설계요건을 강화하여 각 선박의 탄소집약도 감소 ② 국제해운 전반의 운송작업당 평균 CO ₂ 배출량을 2030년까지 2008년 대비 최소 40% 감축 ③ 2030년까지 국제해운이 소비하는 에너지 비중에서 최소 5%를 제로 또는 제로 배출량에 가까운 기술, 연료 및/또는 에너지를 활용하며, 10% 달성을 위해 노력 ④ 온실가스 배출량을 단계적으로 퇴출하기 위한 노력을 추구하면서 국가별 상황을 고려하여, 가능한 한 빨리 국제해운의 온실가스 배출을 최소화하고 2050년 무렵(by or around, i.e., close to 2050) 온실가스 배출량 넷제로를 달성
중간점검지표	① 2008년 대비 2030년까지 연간 국제해운 온실가스 배출량을 최소 20% 감축(30% 달성 노력) ② 2008년 대비 2040년까지 연간 국제해운 온실가스 배출량을 최소 70% 감축(80% 달성 노력)

자료 : 한국해사협력센터(2023), "IMO 소식 & 국제해사동향", 제 23-28호에서 인용

MEPC 80차 회의에서는 온실가스 추가 저감을 위한 중기조치에 대한 논의도 진행

- 후보 중기조치들은 세금이나 배출권 거래 등 비용부과와 우수 선박에 대한 인센티브, 해운사에 대한 과도한 부담 방지, 개도국 등에 대한 부정적 영향 등 다방면의 요인들을 고려하며 논의가 진행 중임
- 이들 대안에 대한 논의는 '23년 3월 개최된 ISWG-GHG²⁾ 14차 회의와 6월 개최된 15차 회의, 그리고 7월 개최된 MEPC 80차 회의에서 재논의됨
- MEPC 80차 회의에서는 기술적 요소로서 well-to-wake³⁾ 기반의 온실가스 집약도 관련 연료 기술과 경제적 요소로서 온실가스 배출량을 기준으로 하는 세금부과 체계를 결합하는 결합조치에 대해 의견 일치를 본 것으로 알려짐
- 이 중 기술적 요소로서 제안된 후보 중 연료표준제도(GHG Fuel Standard)의 채택에 회원국들이 동의하였으나 경제적 요소는 추가 논의하기로 합의함
- MEPC 80차 회의에서는 후보 중기조치의 개발과 종합영향 평가를 거쳐 시행에 이르는 일정표를 개발하기로 합의하고 중기조치 발효 시기를 2027년 5월 1일로 결정하여 현재의 환경규제와 함께 해상온실가스 감축을 위한 추가적 실질 조치가 임박하였음을 제시함
- 제안된 후보 중기조치들에 대하여 한국선급이 평가한 장단점은 다음의 표와 같음

2) The Intersessional Working Group on Reduction of GHG Emissions from Ships

3) well-to-wake는 연료의 원자재 채굴부터 생산, 운송, 보관, 선박 병커링, 선박의 연료추진 등에 이르기까지 전 과정에서 배출된 온실가스의 총합을 고려하는 전주기적 의미임



제안된 중기 조치 후보들의 개념과 장단점

제안	개념	장점	단점
연료표준제도 (GHG Fuel Standard)	선박의 연간 연료유 사용 기준 평균 선박별 Well to Wake GHG 배출집약도(GHG intensity, MJ/gCO2eq)을 제한하며, 단계적 강화	온실가스 감축목표 달성여부 확인 가능, 저/무탄소 연료의 명확한 공급 및 비용의 예측 가능	기금조치가 아니므로 개도국 지원 및 무탄소 기술개발 등의 자금 확보가 어려우며, First Mover의 인센티브가 없음
배출권거래제 ETS(Emission Cap and Trade)	IMO가 선박별 배출권을 할당하며, 할당량 초과 시 탄소배출권 시장에서 구매	총량 규제를 통해 명확한 감축 목표 달성여부 확인 가능. First Mover 인센티브와 경매 등의 기금 활용 가능	탄소가격이 시장에서 결정되므로 가격 예측이 어려우며, 불안정한 가격으로 인하여 투자(신조 및 기술개발) 불확실, 행정상 부담 발생
탄소 부담금 (GHG Levy)	온실가스 배출량 당 일정 금액(탄소 가격)을 부과하고, 이를 통하여 마련된 기금을 운용하는 제도	배출권거래제 대비 규제 이행이 쉽고 탄소가격에 따라 상당한 양의 기금 창출이 가능하고, 저·무탄소연료의 시장경쟁력 강화로 전환이 촉진되며, 일정하고 예측가능한 탄소가격으로 인해 업계의 투자 확대가 가능함	감축목표 달성여부 확인 어려우며 (해운으로부터의 온실가스 저감에 직접적 상관관계 없음), IMO가 정책 및 정치적 논의를 통하여 탄소가격을 결정하므로 가격에 대한 합의가 어려울 수 있음
ZEV 인센티브 (Zero Emission Vessel incentive)	선박에게 배출량 당 일정 금액(탄소 가격)을 부과하고 마련된 기금 중 일부를 무탄소 연료 구매 선사에게 제공(리베이트)하여 직접적 인센티브 제공	탄소부담금 보다 낮은 탄소가격으로 연료가격 차이 보상 가능. 탄소가 격이 낮기때문에 업계의 투자(신조·연구개발) 활성화 가능	ZEV(무탄소선박)에 대한 정의가 마련되어야 하며, 온실가스 감축목표 달성 여부 확인이 어려움
국제해사지속 가능성 기여금 및 보상금 (IMSR)	C에 등급제를 활용하여 D, E등급 선박으로부터 부과금을 징수하고, A, B 등급 선박에게 인센티브 지급. 온실가스 저감조치 측면에서 부정적인 영향을 받는 개도국에 입/출항하는 선박은 5% 인센티브 부여	D, E등급 선박에게 기여금을 부과함으로써 운항여부에 대한 불확실성을 줄일 수 있으며, 탄소집약도(CII) 제도를 중장기적으로 활용 가능	규정의 적용이 탄소집약도 요건의 적용대상으로 한정되며, 연료전환이 아닌 저속운항 등으로도 운항효율을 개선할 수 있으므로 무탄소선박의 도입을 지연시킬 수 있음
기술/시장기 반 조치의 결합 Measures)	각 조치들의 단점을 보완하기 위해 기술적 조치(GFS)와 시장 기반 조치(GHG Levy 또는 ETS)를 함께 도입	목표달성 여부 확인이 어려운 탄소 부담금의 단점을 GFS를 통해 보완할 수 있음. 배출권 거래제 대비 행정부담이 적음	탄소가격이 불안정하여 투자가 어려운 배출권거래제의 단점을 보완할 수 없음. 탄소부담금 대비 행정부담 발생
국제해사연구 이사회 (IMRB)	선박은 연료유 톤당 2달러를 부과하고, 이를 통하여 마련된 기금은 무탄소선박, 연료, 인프라 관련 기술개발에 활용	지속적인 논의와 개선으로 제도의 이행측면에서 완성도가 높으며, 기금을 운영하는 프로세스 가능	단독 조치로서 채택 될 가능성은 낮으며 시장기반조치(배출권거래제·탄소부담금)의 기금 사용 방안으로 고려될 가능성이 높음

자료 : 한국선급(2023), "IMO News Final - MEPC 79"에서 인용

2. EU

EU는 2021년 발표한 Fit for 55에 해운분야를 포함시킴으로써 해상에서의 온실가스 저감을 위한 정책을 강화하고 이를 실행하기 위한 입법을 추진 중임

- EU 집행위원회는 2019년 12월 탄소중립을 위한 로드맵으로서 유럽 그린딜(European Green Deal)을 발표하고 2030년까지 1990년 대비 온실가스 배출을 50~55% 감축하는 목표를 제시한 바 있음
- 이어 2021년 7월에 이에 대한 정책추진을 뒷받침하기 위한 입법 패키지로서 Fit for 55를 발표하며 여기에 해운분야의 정책을 포함시킴



- Fit for 55의 목표는 2030년까지 1990년 대비 온실가스 배출을 55% 감축함
- Fit for 55에 해운 관련 조치로는 온실가스 배출권거래제(EU ETS)와 연료에 대한 규제책인 Fuel EU Maritime 등 2가지임

해운의 온실가스 배출권거래제(EU ETS)는 2024년부터 시행될 것으로 예상됨

- EU ETS는 발표 당시 2023년 시행을 목표로 하였으나 회원국간 조정에 시간이 다소 소요됨
- 2022년 5월 EU 의회와 이사회가 보고서를 채택하였고 2022년 12월에 회원국 조정자간 암묵적 합의에 이르렀으며 동 합의가 공식화되면 2024년 시행한다고 EU 집행위원회가 밝힘
- EU 역내 항에 출·도착하는 5천CGT 이상의 모든 국적 선박에 적용되며 2024년부터 2026년까지 단계적으로 배출권 구매의무 비율을 상향하여 2026년에는 온실가스 배출량의 100%까지 확대 한다는 계획임
- 단계별 확대 경과조치를 두는 대신 기본 허용치를 배제함
- 2024년에는 규제대상 배출량⁴⁾의 40%, 2025년에는 70%, 2026년에는 100%에 해당하는 탄소 배출권을 선사별로 정산하여 다음 해에 구입하여야 함

Fuel EU Maritime은 유럽 역내에서 선박이 사용하는 에너지에 대해 연평균 온실가스 집약도를 규제하는 조치로서 현재 입법화 과정 중에 있으며 2025년 시행 예정임

- Fuel EU Maritime은 5,000GT 이상 선박이 EU 역내 항만간 또는 항만 내에서 사용하는 연료의 에너지단위 당 배출 온실가스의 양을 규제하는 조치로, 에너지 단위인 메가줄 당 이산화탄소 등가질량으로 표시되는 온실가스집약도(gCO₂/MJ)를 토대로 규제함
- 계산을 위한 적용은 EU 역내 항만간 운항에 사용된 연료 100%, 항만내 사용량 100%, 역외 항의 출도착 운항의 50%로 EU ETS와 동일한 원칙 적용
- 동 규제는 2020년을 기준연도로 설정하여 기준연도 대비 시기별로 집약도 저감 의무가 강화되는 구조이며 연도별 기준치는 다음과 같음

EU Fuel Maritime의 연도별 온실가스집약도 저감 기준치 비율

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

- 이를 충족시키지 못할 경우 계산치에 따른 페널티를 부과함
- 동 규제는 연료의 생산부터 저장, 운송, 사용에 이르는 전 과정에서 발생하는 온실가스의 양을 계산하는 well-to-wake를 원칙으로 함
- 동 규제는 연료 사용을 절감할 수 있는 연료효율의 문제가 아니며 연료의 사용으로 발생하는 에너지 단위당 배출하는 온실가스의 문제로, 이는 연료 고유의 특성이 좌우하므로 화석연료가 아닌 온실가스 배출이 없거나 적은 연료로 전환을 촉진하기 위한 조치로 볼 수 있음

4) 규제대상 배출량은 EU 외 지역항에서 출발하여 EU 역내 항에 도착하거나 EU 역내 항에서 출발하여 역외 항에 도착하는 운항의 경우 50%, EU 역내 운항의 경우 100% 적용.



- '21년 Fit for 55에 제시된 이후 EU 이사회가 '22년 7월 보고서를 채택하였고 같은 해 10월에는 EU 의회가 채택하여 의회 내 교통관광위원회가 입법화를 주도하고 있음
- EU 의회는 '23년 3월 협상을 거쳐 합의에 도달하였다고 발표하였으며 현재 공식화를 위한 입법화 과정에 있어 2025년 시행은 무리없이 진행될 전망

3. 시사점

아직까지 해상탄소중립을 실현할 뚜렷한 대안 연료가 제시되지 못하는 가운데 국제사회의 해상탄소중립을 위한 요구는 더욱 강해지고 있음

- IMO는 2018년에 합의한 초기전략 조차 실현할 대안이 뚜렷하지 않고 CII 규제의 선박 퇴출 조치까지 보류한 상황에서 2050년 배출량 "0"을 요구하는 중기전략을 채택함
- EU는 IMO의 정책을 지지한다는 기본 입장을 견지하고 있으나 IMO의 조치가 자신들이 설정한 목표를 실현하기에 부족하다면 더욱 강화된 독자적 조치까지도 검토 중인 것으로 알려지고 있음
- 이처럼 해상탄소중립을 둘러싼 요구는 선박시장에서 현실적인 기술적 대안의 발전속도보다 빠르게 강화되고 있어 해운업계의 혼란과 조선업계의 책임이 더욱 가중되고 있음

이러한 상황에서 단기적 무탄소 또는 저탄소 대안 연료의 중요성은 더욱 커지고 있으며 향후 국제 해운의 온실가스 감축 전략의 성패가 될 수 있음

- 각 연료의 문제점을 극복하고 상용화를 이루어내는 것이 무엇보다 시급한 시점임



Ⅲ. 단기적 대안 연료

세계적인 해상탄소중립의 요구에 대응하여 주요 규제대상인 중형 이상급 선박시장에서 단기적 대안으로 LNG, 메탄올, 암모니아 등이 거론되거나 채택되고 있음⁵⁾

- 대부분의 시장 관계자들이 장기적으로는 수소와 연료전지 등을 무탄소 연료로서 기대하고 있으나 기술적 개선 필요성이 높아 장기간의 개발기간이 소요될 것으로 예상되며 선사들은 그동안 중간 단계로서 사용할 대안 연료를 모색하고 있음
- 2019년 이후 LNG가 중간단계 연료로서 높은 기대를 받아 많은 신조선 계약시 2중 연료로 채택되었으며 최근에는 컨테이너선을 중심으로 메탄올이 대안 연료로서 부각되고 있음
- 암모니아는 현재까지 연료로서 확정된 신조선 계약이 거의 없으나 약 1~2년 후 엔진 개발이 완료될 것으로 예상되어 실증을 거친 후 약 2026년을 전후하여 신조선에 적용될 것으로 기대됨
- 이러한 선택지에도 불구하고 아직까지 국제적인 탄소중립 요구와 규제를 충족시키며 원활한 선박 운항을 가능하게 할 확실한 대안 연료는 제시되지 못하고 있으며 모든 대안 연료는 선박 연료로서 각각의 문제점을 가지고 있어 선주들의 연료 선택에 어려움을 주고 있음
- 본 장에서는 이들 3가지 대안 연료의 가능성과 관련 연구 현황 등을 다음과 같은 관점에서 정리하고 기술함
 - 연료의 개요 : 특성, 저감효과 등 포함
 - 문제점 및 비판과 논란
 - 경제성
 - 전망 및 기대

1. LNG

LNG는 석유를 제외한 선박의 대안 연료 중 가장 많은 사용 경험과 벙커링 인프라가 구축된 연료로 최근 수년간 이중 연료로서 신조선에서 가장 많이 채택됨

- LNG는 석유계 연료에 비해 탄소함유량이 적어 이산화탄소 배출이 크게 저감되나 주성분인 메탄이 공기중으로 소량 배출되는 메탄슬립으로 인하여 온실가스 배출 저감률은 23% 수준으로 평가됨⁶⁾
- 그 외에도 황산화물(SOx) 95~98% 저감, 질소산화물(NOx)은 엔진에 따라 20~80% 저감

5) LPG 역시 중간단계 연료로서 사용되고 있으나 대부분 LPG선에 채택되고 물량이 많지 않아 본고에서는 다루지 않음

6) Well-to Wake 기준이며 DNV 자료 등을 인용



- 석유 이외의 대안연료를 사용하는 현존선 중 척수 기준으로 59.8%, 톤수 기준으로 86.1%의 선박이 LNG를 채택하여 절대적인 비중을 차지하고 있음⁷⁾
- 6월 기준 발주잔량에서도 대안연료 채택 선박 중 척수 기준 61.4%, 톤수기준 78.6%의 선박이 LNG를 이중연료로 추진함
- '23년 6월 기준 LNG연료추진선박은 전 세계에 932척이 등록되어 있고 866척이 건조 중인 잔량으로 기록되어 있음
- 이처럼 대안연료 추진선박 중 가장 많은 운항실적을 보유하고 있으며, 초저온 탱크 등 까다로운 설비를 필요로 함에도 불구하고 실용성이 입증된 연료로 평가되고 있음
- 이미 2010년대에 선박연료로서의 LNG에 대한 논의가 깊이있게 진행되었고 많은 국가들이 벙커링에 투자하여 세계적으로 가장 풍부한 벙커링 인프라를 보유한 대안 연료임

세계 LNG 벙커링 가능 항만



자료 : DNV(2022), "Alternative Fuels for Containerships"

LNG는 무탄소 수소연료추진의 상용화까지 가장 각광받는 중간연료가 될 것으로 기대되었으나 화석연료라는 한계와 메탄슬립 등의 문제로 인하여 많은 비판과 논란이 제기됨

- 메탄은 20년간의 온실효과를 나타내는 GWP20(20 year global warming potential)이 이산화탄소 대비 84배에 이르며 공기 중 노출 후 분해가 빨라 GWP100은 28배⁸⁾로 감소
- 현재 상용화된 연료 중 가장 온실가스 저감률이 높고 선상 탄소포집과 결합할 경우 단기적인 국제적 요구를 충족시킬 수도 있으므로 LNG는 장기적으로 수소와 연료전지가 무탄소 선박연료로서 상용화될 때까지 중간적 역할을 하는 가장 확실한 대안 연료로 손꼽혀 왔음

7) Clarkson의 World Fleet Register 6월 통계 인용

8) IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 2013년 36배로 평가



- 다만, 선상 탄소포집(on-board CCS)은 국제적인 탄소 저감책으로 인정받지 못하고 있고 LNG가 근본적으로 화석연료의 일종이라는 점과 온실가스 효과가 매우 높은 메탄올 공기중으로 배출한다는 점 때문에 대안 연료로서 반대하는 논란이 일어나고 있음
- 캠페인을 위한 환경운동가들의 연합조직으로 보이는 "Say No to LNG"는 지난 4월 선박의 저탄소 대안연료로서의 LNG를 반대하는 캠페인 전개를 시작한다고 발표함
- 동 조직은 LNG는 근본적으로 화석연료이며 청정연료라는 인식은 잘못된 신화(myth)에 불과하다고 주장함
- 이들은 LNG의 사용이 석유대비 배출 저감된 이산화탄소를 온실효과가 높은 메탄올로 대체할 뿐이며 세계 해사업계가 메탄올 배출 결과를 숨기고 있다고까지 주장하였고 선박에서의 LNG연료 사용을 적극적으로 반대함
- 반면, 국제적인 해상 LNG연료산업 연합체인 Sea LNG는 LNG 연료를 적극 옹호하며 이들 단체의 주장에 대해 2000년대 초 LNG연료 도입 이후 현재까지 메탄올슬립을 1/4로 감소시켰으며 과학적인 증거가 있다고 주장함

저탄소 LNG에 대한 부정적 견해로서, World Bank는 2021년 발간한 보고서를 통해 해상 온실가스 감축에 있어서 LNG는 경쟁력이 없을 것으로 예상하며 LNG연료추진을 위해 투자할 자금의 리스크에 대해 관리할 필요가 있다고 결론 지음

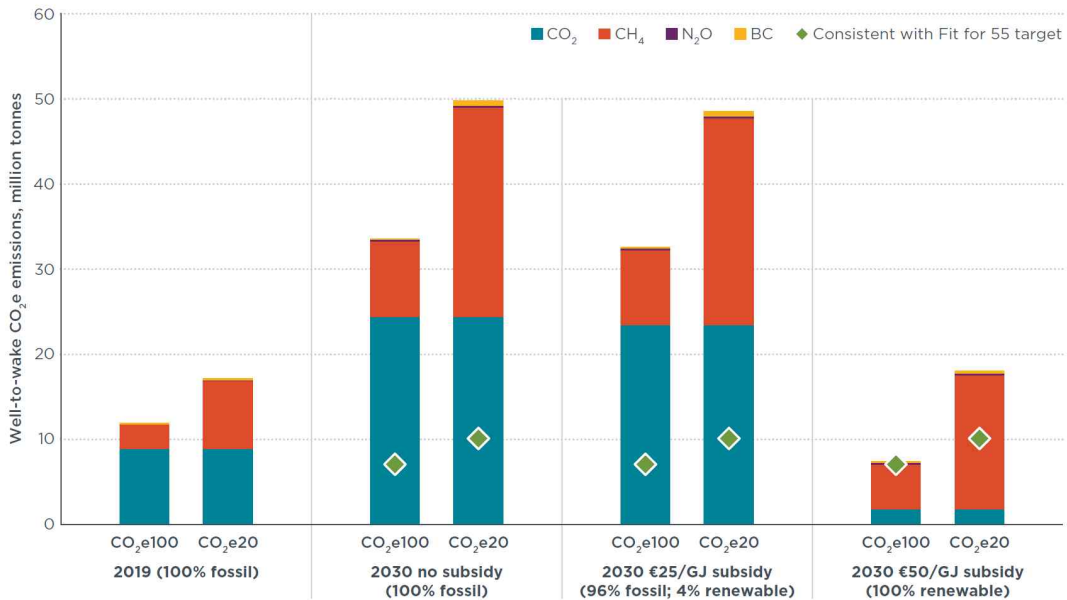
- World Bank는 2021년 4월 "The Role of LNG in the Transition Toward Low and Zero Carbon Shipping" 보고서를 발간하고 정책입안자와 산업계에 미치는 영향을 파악하기 위해 문헌과 각종 분석 및 비판 등의 종합적 검토를 통해 IMO의 기후목표 달성을 위한 LNG의 역할을 연구함
- 동 보고서는 LNG가 석유 대비 CO₂ 배출량은 감소시키나 근본적으로 화석연료이며 CO₂ 대비 수십배의 온실효과를 발생시키는 메탄올 공중으로 배출시켜 전반적인 온실가스 감축에 한계가 있다고 지적함
- 보고서는 미래의 무탄소 선박연료로서 수소와 암모니아가 가장 적합하다고 주장하고 바이오 LNG와 e-LNG에 해당하는 LBM과 LSM⁹⁾의 비용이 수소와 암모니아 생산비보다 높아 이들 연료 대비 경쟁력을 가질 수 없을 것으로 판단함
- 이에 따라 해상에서 중간적 또는 일시적 연료로서의 한계를 가진 LNG의 사용을 위해 선박의 건조와 육상 설비에 2050년까지 세계적으로 최대 1,860억 달러가 추가 투자될 가능성이 있으며 이러한 투자 리스크에 대해 경고함
- 특히, 선박 소유주와 연료 공급업체, 금융기관, 관련 기업 주주 등의 위험에 대한 노출을 관리할 필요가 있다고 주장함

9) 보고서에서는 바이오LNG를 liquefied bio methane(LBM), 청정수소를 활용한 합성 e-LNG를 liquefied synthetic methane(LSM)으로 표기



또 다른 LNG에 대한 부정적 견해로서, ICCT는 2022년 보고서를 통해 선박 연료로서 e-LNG의 사용을 촉진하기 위해서는 막대한 국가보조금이 필요할 것으로 예상되나 온실가스 저감 효과는 메탄의 배출로 인하여 크지 않다고 결론 지음

ICCT의 e-LNG 수요 시나리오별 온실가스 배출 예상치



자료 : ICCT

- 미국의 비영리 단체인 ICCT(International Council on Clean Transportation)는 2022년 9월 발간한 보고서¹⁰⁾를 통해 2030년 e-LNG¹¹⁾의 가격이 기존 화석LNG 대비 최소한 7배 이상 높을 것으로 예상하고 EU 지역에서 선박이 이를 활용하기 위해서는 국가 보조금이 필요할 것으로 전제함
- 보고서는 2019년 대비 2030년 선박의 LNG연료 수요가 3배에 이를 것으로 예상하고 ① 보조금이 없는 경우, ② GJ당 25유로의 보조금, ③ GJ당 50유로의 보조금 등 3가지 시나리오를 설정하여 e-LNG의 수요와 배출 온실가스 예상 총량 등을 비교함
- 보조금이 없는 경우 이산화탄소 배출이 크게 저감된 e-LNG의 사용 비율은 0%로 예상하여 2030년 선박의 LNG연료 사용에 의한 온실가스 총량은 2019년 대비 수요 총량 증가비율과 같은 3배 수준에 이를 것으로 전망
- GJ당 25유로 보조금 시나리오의 경우 e-LNG의 사용 비율은 4%에 불과할 것으로 예상되며 이에 따라 2030년 선박의 LNG연료 사용에 의한 온실가스 총량은 2019년 대비 소폭 감소에 그칠 것으로 예상
- GJ당 50유로 보조금 시나리오의 경우는 보조금 효과로 인하여 e-LNG의 사용 비율은 100%에 이를 것으로 예상되어 큰 폭의 CO₂의 저감은 가능할 것이나 강력한 온실효과를 가진 메탄 배출이 3배에 이르러 2030년의 전체적인 온실가스 배출량은 기대보다 크지 않음

10) Commer, B. 외 3인(2022), "Comparing the Future Demand for, Supply of, and Life-Cycle Emissions from Bio, Synthetic, and Fossil LNG Marine Fuels in the European Union", ICCT

11) 보고서에서는 renewable LNG로 표기

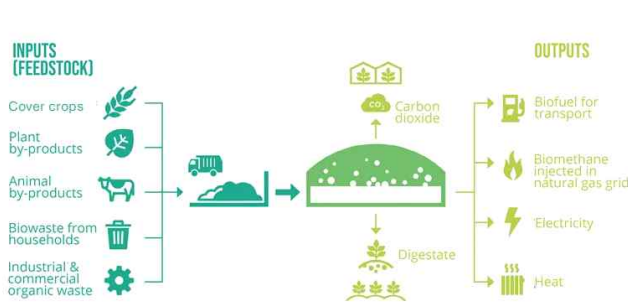


- 이산화탄소 증가로 계산한 2030년 온실가스 배출량은 2019년 대비 GWP100은 38% 감소할 것으로 예상되나 GWP20은 오히려 6% 증가함
- 이러한 결과를 얻기 위하여 지급되어야 하는 국가 보조금은 2030년 178억유로에 이를 것으로 예상하여 지출비용 대비 효과가 크지 않은 것으로 판단함
- 동 보고서는 바이오디젤이나 그린 메탄올이 메탄배출 문제가 없으면서도 상온 저장이 가능하여 LNG보다 다루기 쉽다는 이유 등으로 미래 선박 연료는 비메탄 연료에 초점을 맞출 필요가 있다고 결론을 내림

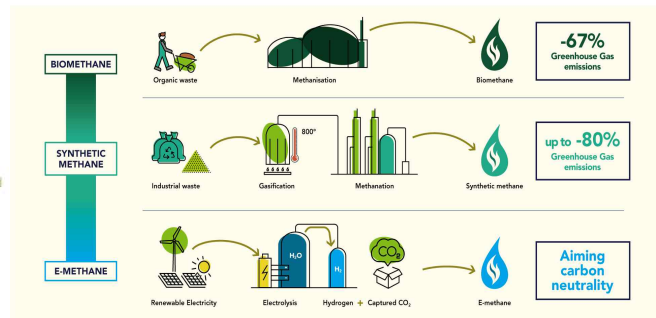
이러한 논란에도 불구하고 선박의 LNG 연료는 향후 바이오LNG와 합성LNG, e-LNG¹²⁾ 등 저탄소 연료로 대체되며 탄소중립 실현 가능성이 제기되고 있음

- 바이오LNG는 농업부산물이나 폐기물, 동물 배설물 등 유기물에서 미생물 활용 공정을 통해 메탄을 발생시키고 이를 포집 후 영하 163°C 이하로 냉각하여 제조한 액화가스를 의미
- 합성LNG는 공장 배출가스에서 포집한 탄소를 수소와 합성하거나 산업폐기물을 가스화하여 메탄을 추출하는 방법, 석탄에서 추출하는 방법 등 다양한 인공적 공정으로 얻은 메탄을 냉각하여 제조한 액화가스임
- e-LNG는 재생에너지로 수전해한 수소와 바이오매스 혹은 공기중 포집을 통해 얻은 탄소를 합성하여 얻은 메탄을 냉각한 액화가스임
- 탄소를 발생시키지 않거나 공기중으로 배출될 탄소를 포집하여 인공적으로 합성한 이들 액화메탄가스는 화석연료인 LNG와 성상이 동일하여 저장, 운송, 벙커링 등에 이미 구축된 LNG 인프라를 그대로 활용할 수 있어 추가 투자가 최소화된다는 장점이 있음
- 또한, 선박 역시 LNG연료추진 경험이 축적되어 있고, 새로운 엔진이나 연료공급장치의 개발 없이 기존 LNG연료추진선을 그대로 활용할 수 있어 선주들에게 매력적인 이점이 있음

바이오LNG와 합성LNG, e-LNG 개념



자료 : 유럽바이오가스협회



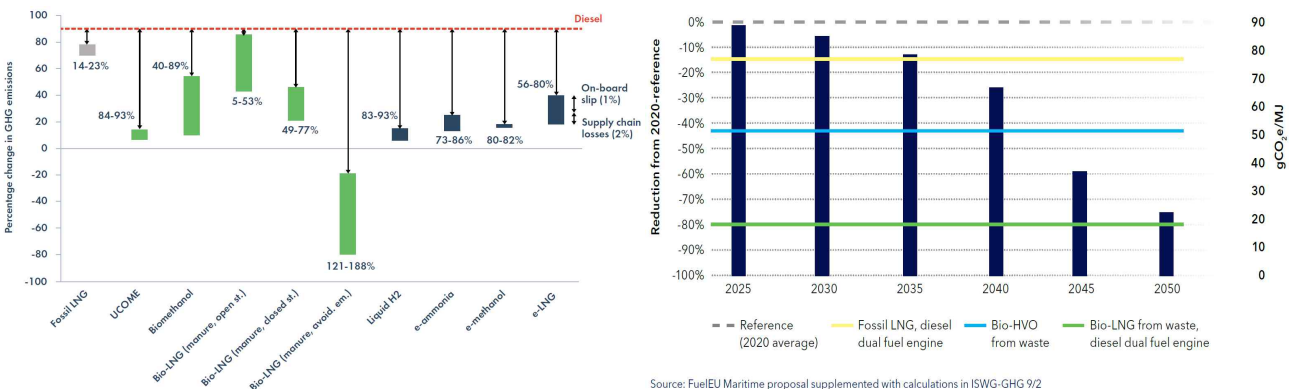
자료 : CMA CGM

12) 천연가스를 액화시킨 LNG가 아닌 인공적으로 만든 메탄을 액화시킨 액화가스의 경우 공정이나 원료에 따라 LBM, LSM, Synthetic LNG, e-methane, renewable LNG 등 기관별로 통일되지 않은 많은 표기가 사용되고 있으나 본 고에서는 제조 과정에 따라 “바이오LNG”, “합성LNG”, “e-LNG로” 표기하기로 함



- Sea LNG는 2019년 네덜란드의 기후환경 비영리 조직인 CE Delft와 싱가포르 난양공대가 공동으로 수행한 연구결과를 토대로 “바이오LNG는 메탄 슬립과 누출의 문제를 최소화한다면 디젤 대비 GHG의 80% 저감이 가능하며 특정 공정은 마이너스 배출도 가능하다.”고 제시
- 동물 배설물의 혐기성 소화(anaerobic digestion of manure)에서 생성된 바이오LNG의 경우, 회피된 배출물을 고려하며 해양 디젤연료와 비교하여 121%에서 188% 범위의 GHG 감축 즉, zero emission에 더해 21~88%의 온실가스 배출 감소를 추가 달성할 수 있다고 제시함
- 세계 3위의 컨테이너선사인 CMA CGM 역시 바이오LNG의 경우 디젤연료 대비 67%, 산업 폐기물을 활용한 합성LNG는 80%의 온실가스 배출을 저감할 수 있으며 e-LNG는 완전한 탄소중립을 실현할 수 있다고 제시함
- 노르웨이 선급 DNV 역시 화석LNG, 수소첨가 식물성바이오유(HVO), 바이오LNG 등 3가지 연료의 비교를 통해 이들 중 바이오LNG만 80%의 온실가스 저감률로 2020년 대비 75%의 온실가스집약도 감소를 요구한 2050년 Fuel EU Maritime의 규제를 충족할 수 있다고 제시함

연료별 온실가스 저감률



자료 : Sea LNG

자료 : DNV

유럽 해사산업계를 중심으로 이러한 저탄소 LNG에 대한 생산과 활용 사례가 증가하고 있음

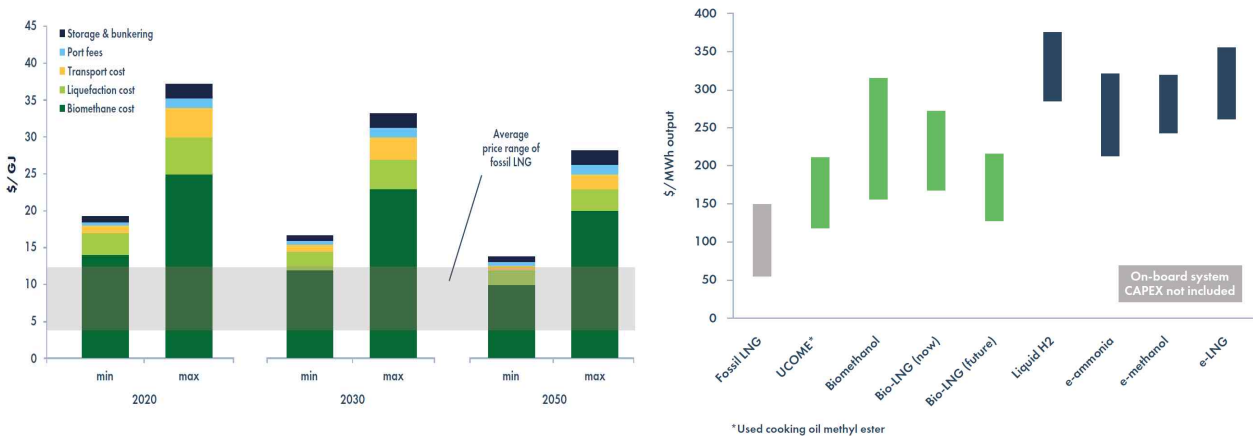
- 유럽 바이오가스 협회는 바이오가스와 바이오메탄을 합쳐 연간 184억CuM(약 1,340만톤)를 생산하고 있고 2030년까지 350~450, 2050년까지 1,670억CuM(1억 2,190만톤)을 생산할 것으로 예측
- 2050년 생산량은 2021년 기준 유럽 가스소비량의 40%를 충족할 수 있는 물량이며 유럽의 가스소비 감소추세를 감안하면 2050년 유럽 소비량의 61%를 충족할 것으로 예상
- 유럽의 농업강국인 네덜란드에서는 최초의 바이오LNG 공장이 2021년 11월 가동에 들어감
- 네덜란드 Nordsol사는 유기물에서 추출한 바이오가스를 재처리해 바이오LNG로 만드는 프로세스를 개발하고 자국내 260개 바이오가스회사와 협력하여 연간 13,400톤의 바이오LNG를 생산하며 4년 내 생산량을 10배로 증산한다는 계획임



- 순수한 바이오LNG를 사용하기보다 목적에 따라 이를 혼합한 LNG를 사용하기도 하며 CMA CGM의 대형 컨테이너선의 경우 2020년부터 13%의 바이오LNG를 함유한 LNG연료를 로테르담항에서 제공받고 있음
- MSC의 자회사인 MSC Cruises는 북유럽 에너지사인 Gasum으로부터 2026년부터 매년 수천 톤의 합성LNG를 선박연료로 공급받을 예정이라고 밝힘¹³⁾
- 독일에서는 이미 2021년에 Power to X를 통해 생산한 합성LNG를 1,036TEU급 컨테이너선에 병커링한 바 있음¹⁴⁾
- Power to X는 태양광, 풍력 등 재생에너지 생산이 시간별로 일정하지 않은 단점을 보완하기 위해 많은 전력이 생산되는 시간에 잉여전력을 이용하여 수전해로 수소를 얻고 이를 탄소와 합성하여 액체연료를 생산하여 이를 전력생산이나 수송 연료 등으로 사용하는 기술
- 현재 Power to X는 수전해와 탄소 합성공정을 통합하여 단순화함으로써 효율성을 제고하고 타 에너지 시스템과 결합시켜 시너지를 얻는 연구, 경제성 확보 등이 세계적으로 연구되고 있음
- LNG연료의 발전적 변화를 추구하는 이러한 사례들은 일부 예시에 불과하며 보다 폭넓은 노력이 진행되고 있는 것으로 추정됨

바이오LNG의 경우 경제성 측면에서 기대를 얻고 있음

Sea LNG의 바이오LNG 예상 가격(좌)과 타연료와의 비교(우)



자료 : Sea LNG

- Sea LNG는 앞서 기술한 바와 같이 CE Delft와 난양공대의 공동연구 결과에 기반하여 바이오LNG의 병커링 가격이 2030년 평균 GJ당 30달러에서 2050년 대량 생산 효과로 20달러 수준까지 하락할 것으로 전망
- Sea LNG에서 추정하는 현재 화석LNG의 병커링 연료가격은 GJ당 평균 8달러¹⁵⁾ 내외

13) Ship & Bunker(2023년 6월 15일자), "MSC Cruises to Take on Synthetic LNG from Gasum"

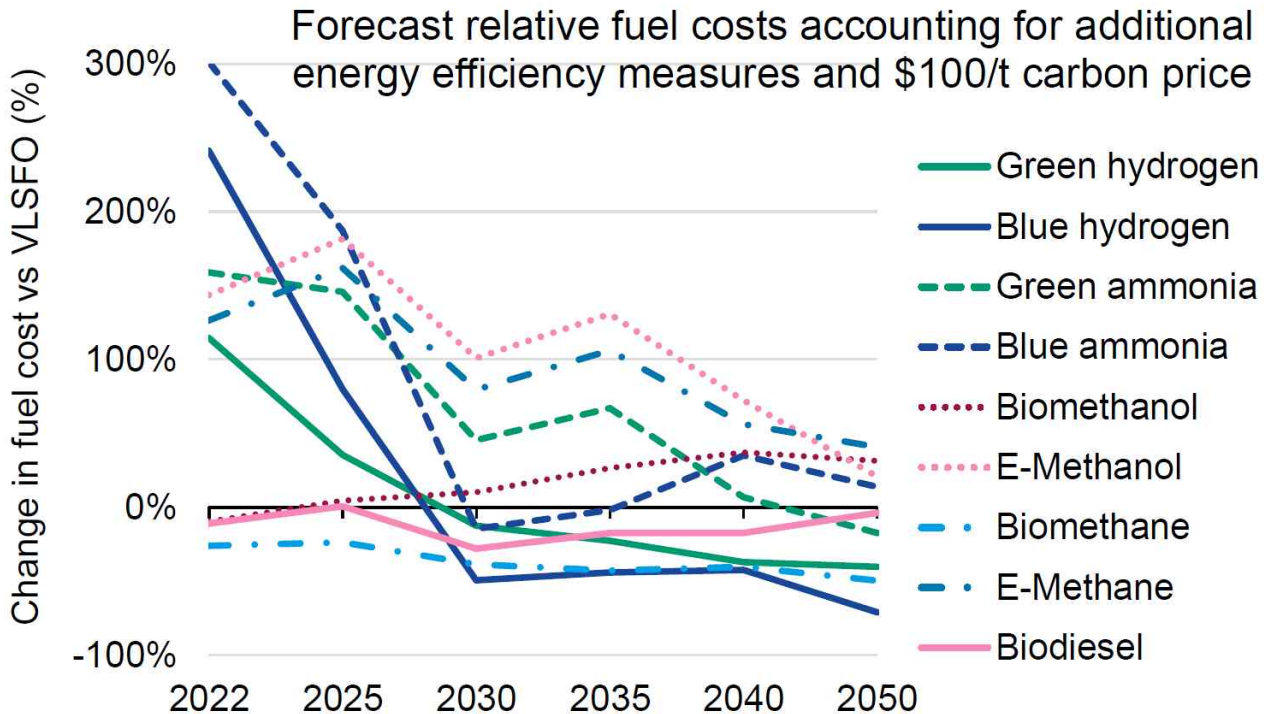
14) 가스신문(2021년 10월 20일자), "독일, 탄소중립 합성 LNG 세계 최초로 병커링 시도"

15) 현재 화석LNG의 병커링 가격은 최근 LNG의 높은 변동성으로 인해 제시하기 어려운 점이 있음. Clarkson이 제공하는 북서유럽 병커링 추정 가격은 2020. 1~2023. 6월까지 평균 톤당 1,010.1달러로 GJ당 환산하면 18.4달러임.



- 앞서 ICCT가 가격이 화석LNG의 7개에 달하여 GJ당 25~50유로의 보조금을 지급한다는 시나리오를 설정한 e-LNG의 경제성과는 큰 차이가 있음
- Sea LNG는 또한 다른 바이오연료나 e-연료들과 비교하여도 단위 출력당 비용에 있어 가장 경제성이 높다는 결과를 제시함

IMO FFT 보고서의 연료별 비용 변화 예상



자료 : IMO

- '23년 3월 발표된 IMO의 FFT(future fuels & technology) 프로젝트 업데이트 보고서¹⁶⁾에서도 바이오LNG는 높은 경제성을 나타내고 있음
- FFT 프로젝트는 IMO가 저탄소·무탄소 선박기술 및 연료의 가용성과 준비상황을 평가하여 이를 IMO의 정책이나 전략에 반영하기 위한 연구프로젝트로, 컨설팅사인 Ricardo와 노르웨이 선급 DNV가 참여함
- 보고서에는 에너지효율성에 대한 추가조치(규제)와 톤당 100달러의 탄소비용을 가정하고 이를 고려한 검토대상 대안 연료들의 연료비용을 VLSFO(초저유황유)의 연료비용 대비 상대 수치로 표기한 내용이 포함됨
- 보고서에 제시된 그래프에 바이오LNG(보고서에는 Biomethane으로 표기)는 단기적으로 가장 비용이 저감되는 연료로 2030년을 전후하여 블루수소의 비용이 유사한 수준까지 하락한 후 2040년부터 차이가 벌어지고 있으나 바이오LNG는 여전히 경쟁력 있는 수준을 보임

다만, 이 수치는 코로나 기간 동안 수백%의 일시적 상승이 수차례 있었던 불안한 변동성이 반영되어 평균치가 높게 산정되었음. 코로나 이전 국제 LNG가격이 안정화되며 연료로서의 효용성에 기대감이 높았던 2019년 기준으로 일본 수입가격은 mmBTU당 7.6달러 수준이었으며 병커링 관련 각종 비용을 감안한 병커링 가격은 톤당 약 570달러 수준으로 추정됨. 이 가격은 GJ당 10.4달러임

16) Air Pollution and Energy Efficiency Team of IMO Secretariat(2023), "Update on the IMO Future Fuels& Technology Project(FFT Project)"



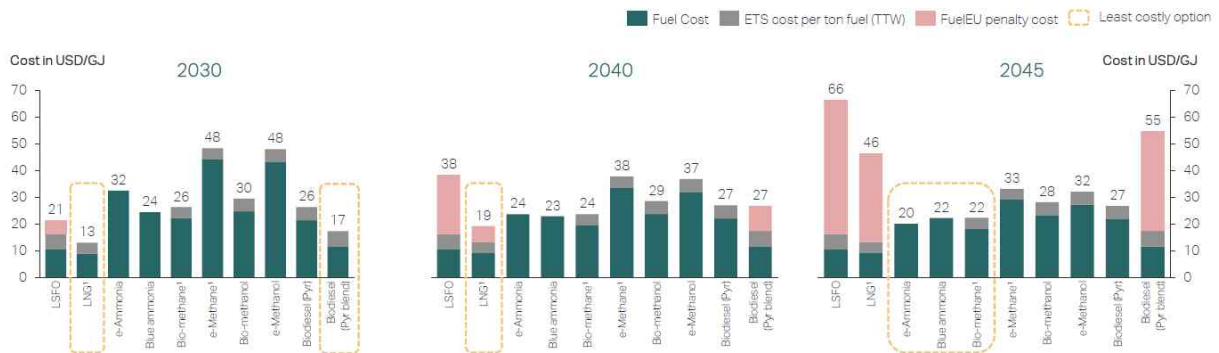
- 2040년 이후에는 그린수소도 바이오LNG와 유사한 수준을 기록
- e-LNG(보고서에는 E-Methane으로 표기)는 상대적으로 비용이 높은 것으로 나타남
- 다만, 동 보고서의 내용은 각 연료의 경제성을 보여주기 위한 것이 아니라, 어떠한 연료도 확고한 수요의 신호가 있다면 가격(비용)이 빠르게 하락하며 활용에 장애가 되지 않을 것이며 연료의 장벽은 오히려 현재의 수요에 대한 불확실성임을 제시함

Maersk Mc-Kinney Moller는 유럽의 규제 하에서 최저 비용을 추구한다면 선주들이 LNG연료로 몰릴 가능성이 높다고 지적함

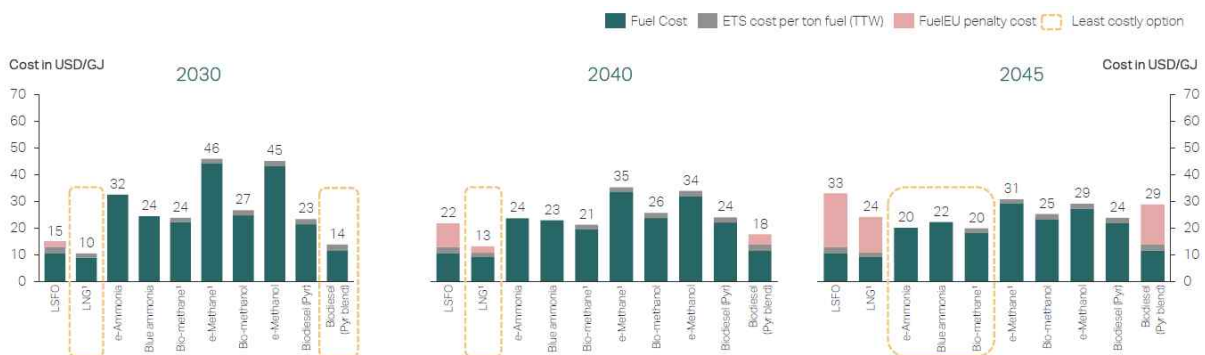
- 덴마크의 비영리 독립연구기관인 Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping (이하 "MMMCZCS")는 2022년 발간한 한 보고서¹⁷⁾에서 유럽 지역의 규제 하에서 최저 비용을 추구하는 선주들의 선택이 LNG로 몰릴 가능성이 높다고 진단함
- MMCZCS는 선박에 투자되는 Capex는 논외로 하고 EU ETS와 Fuel EU Maritime 등 유럽지역 내의 규제비용을 포함한 연료비용을 산정하였을 때 단기 및 중장기적으로 LNG는 최저비용이 소요되는 연료로 나타남

MMMCZCS의 연료별 유럽 운항 연료비용

< EU 역내 운항 연료비용 >



< EU 역외-역내 운항 연료비용 >



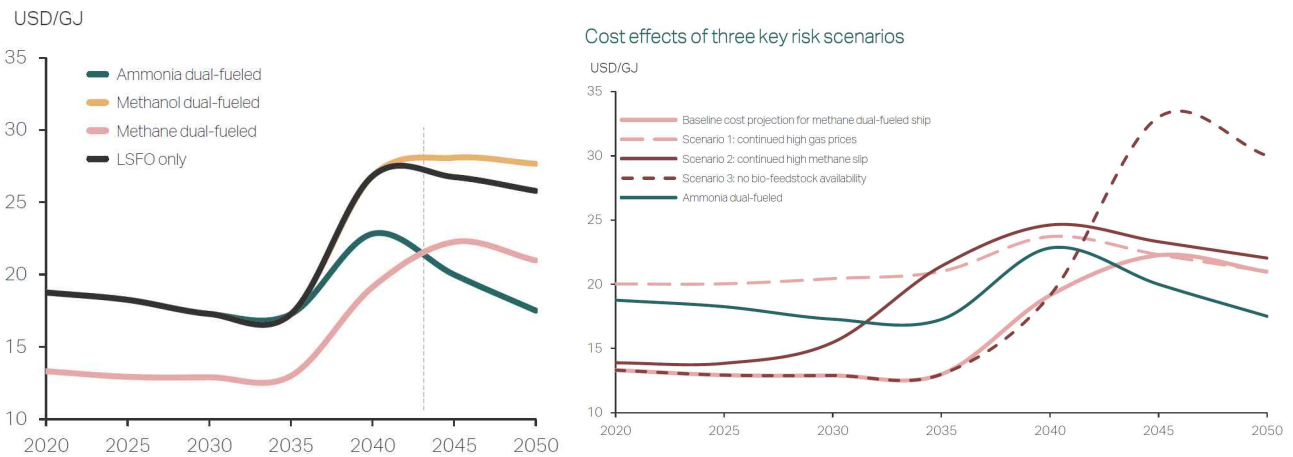
자료 : Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping

17) Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping(2022), " We show the world it is possible - What can the industry learn and adopt from regional regulations?"



- 배출량 100%가 규제대상 비용으로 산정되는 유럽 역내 항간 운항 연료비용의 경우 2030년과 2040년의 LNG연료비용은 GJ당 13달러와 19달러로 가장 낮고 2045년 바이오메탄으로 전환할 경우 e-암모니아 대비 약 10% 높은 수준이나 가장 경쟁력 있는 연료 중 하나임
- 배출량의 50%가 규제대상 비용으로 산정되는 유럽 역외 항-역내 항간 운항 연료비용의 경우 역시 2030, 2040 시점에서 GJ당 10달러와 13달러로 후보 연료들 중 가장 낮은 수준이며 2045년에도 바이오메탄으로 전환하여 e-암모니아와 함께 가장 낮은 수준을 나타냄
- 이에 따라 EU의 규제하에서 최적의 비용효율을 추구한다면 LNG를 연료로 채택하고 2040년에서 2045년 사이 화석LNG를 바이오LNG로 전환하는 것만으로 타 연료 대비 높은 경쟁력을 가질 수 있으므로 많은 선주들의 선택이 LNG로 몰릴 수 있다고 예상함
- e-암모니아가 바이오LNG와 경쟁력이 역전되는 것은 2045년 이후로 예상함
- 그러나 보고서는 LNG의 국제 가격이 예상보다 높아지는 경우, 높은 수준의 메탄슬립이 지속되는 경우, 육상 교통 등 다른 부문과의 경쟁으로 바이오LNG의 공급이 충분하지 못한 경우 등 3가지 시나리오는 암모니아보다 비용을 높일 수 있는 위험요인이라 제시함
- 다만, 본 보고서의 주제는 LNG의 경제성에 관한 것이 아니라 최저 비용만을 추구하여 화석LNG를 오랜 기간 사용하며 실질적인 온실가스 배출이 증가할 가능성과 이를 막지 못하는 EU 규제의 허점을 비판하기 위한 것임
- 그러나 선주들의 관점에서는 LNG의 비용 효율성을 확인할 수 있는 보고서임

연료별 이중연료의 연료비용 비교(좌)와 LNG의 시나리오별 비용 변화(우)



자료 : Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping

선박의 대안연료로서 LNG는 많은 비판과 기대 속에 바이오LNG와 e-LNG로의 전환을 시도하고 있으며 세계적인 노력이 지속될 것으로 예상됨

- 앞서 기술한 바와 같이 선박연료로서의 LNG는 바이오와 e-LNG를 포함하여 부정적 연구결과와 희망적 예상이 교차하고 있어 향후 전망에 불확실성이 높음
- 그러나 객관적 연구에서도 바이오LNG의 경제성이 확인되고 있고 세계적으로 화석LNG를



저탄소LNG로 전환하려는 노력들이 해상뿐 아니라 육상에서도 전개되고 있어 선박 연료로서의 활용이 확산될 가능성도 있음

- 앞선 내용은 주로 유럽지역의 연구결과와 노력 등을 기술하였으나 세계 LNG 소비량 2위의 일본 역시 최근 개정된 수소기본전략에서 "도시가스 인프라를 활용한 합성 메탄(e-methane)의 이용 및 활용을 촉진한다"는 내용이 포함됨
- 세계적으로 가장 중요한 LNG 수요국 중 하나인 일본에서 LNG의 주 수요처인 도시가스를 저탄소 LNG로 전환한다는 계획으로 해석되어, 생산된 합성LNG가 선박 연료로서 활용될 가능성도 높아질 것으로 추정됨
- 현재까지 미인도 선박 잔량 중 가장 많이 채택된 대안연료인 만큼 LNG의 중장기적 활용 가능성은 의심할 여지가 없을 것으로 보이나, 타 연료의 상용화 정도, LNG 및 타 대안연료의 생산비용, 추가 규제 방향, 메탄슬립 방지기술 개발 성과 등 향후 많은 변수들이 남아있음

2. 메탄올

메탄올은 상온에서 액화상태를 유지하여 비교적 다루기 쉬운 연료로 평가되나 연료탱크의 크기 등에서 불리한 점도 존재함

- 메탄올은 대기압 하에서 $-93\sim+65^{\circ}\text{C}$ 의 폭넓은 범위에서 액화상태를 유지하여 LNG와 달리 초저온 연료탱크가 필요하지 않으므로 선박연료로서 상대적으로 활용이 용이한 장점이 있음
- 이러한 장점으로 인하여 일반 석유연료추진 선박을 메탄올추진선박으로 개조할 경우 개조 비용이 LNG연료추진선박으로의 개조에 비해 약 1/3 수준¹⁸⁾으로, 향후 대안연료로서 자리잡을 경우 기존 재래식 선박의 전환 대안이 될 수도 있음
- 그러나 부피당 에너지 밀도가 낮은 특성이 있어 동일한 에너지를 얻기 위한 연료탱크의 크기가 석유연료의 2.5배, LNG의 1.3배 수준이 되어야 함

현재 세계적으로 사용되고 있는 메탄올은 석유 대비 온실가스 저감률이 높지 않아 저탄소 연료로서 그린메탄올 또는 블루메탄올 범주의 연료가 사용되어야 함

- 메탄올은 연료로 추진시 석유대비 약 10%의 온실가스 저감효과가 있으나 생산과 운송, 저장 등 전주기적 관점에서 온실가스 저감은 약 5%에 불과함
- 이에 따라 저탄소 대안연료로는 그린메탄올이나 블루메탄올이 사용되어야 함
- 그린메탄올은 펄프나 농업폐기물 등 바이오원료에서 추출한 바이오메탄올, 재생에너지로 수전해한 그린수소에 바이오원료 혹은 공기중 포집을 통해 얻은 이산화탄소를 합성하여 생산한 e-메탄올 등임

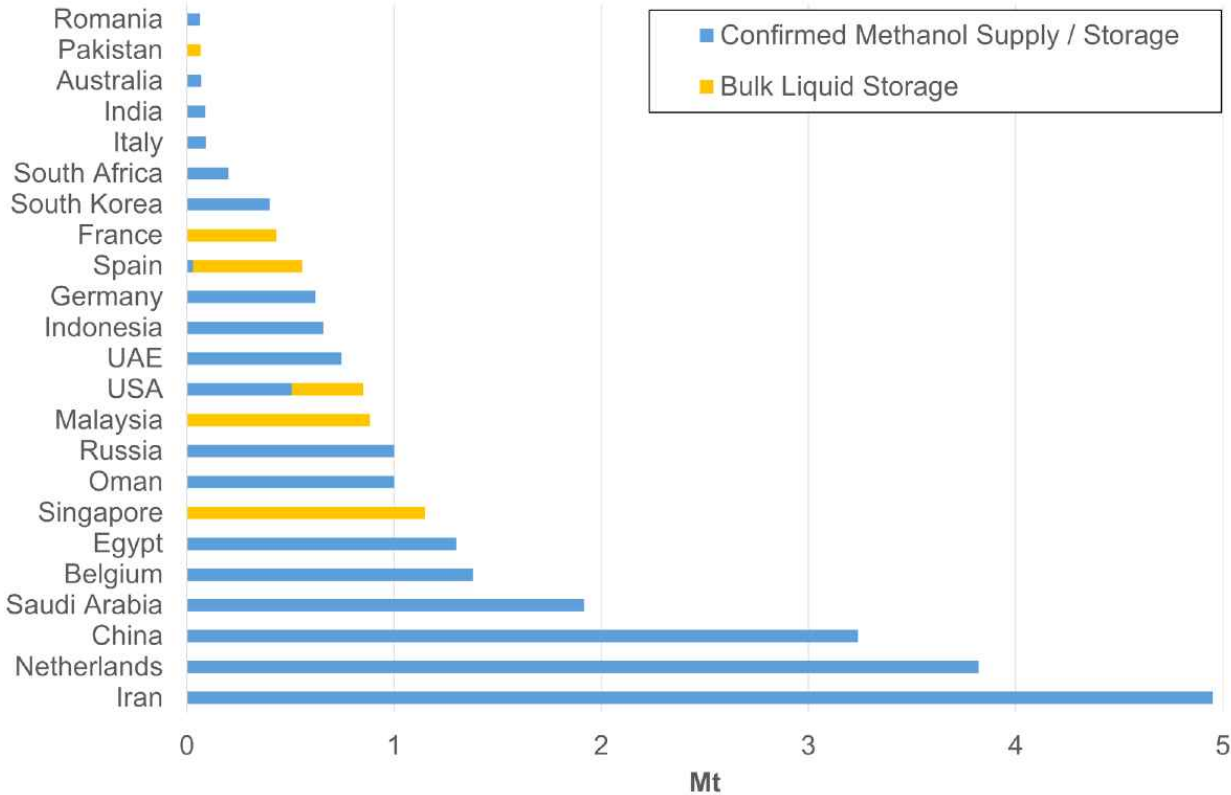
18) DNV(2022), "Alternative Fuels for Containerships"에서 인용



- 블루메탄올은 천연가스의 개질과 탄소의 포집을 통하여 생산한 블루수소에 바이오원료 혹은 공기중 포집을 통해 얻은 이산화탄소를 합성하여 생산한 메탄올임
- 이러한 메탄올은 유기물로부터 불가피하게 발생하거나 공기 중에 이미 배출된 이산화탄소를 포집하여 마이너스 탄소배출을 기록한 후 연소를 통하여 다시 배출하며 탄소발자국을 상쇄함으로써 온실가스 감축이 이루어짐

독일의 한 연구는 그린메탄올이 파격적인 온실가스 저감효과 뿐 아니라 독성과 환경오염 측면에서도 장점이 있어 해운분야에서 그린메탄올을 사용하도록 정책을 펼칠 필요가 있다고 주장함

세계 각국 항만의 메탄올 저장 설비 현황 (2020년 기준)



자료 : Öko-Institute E.V.

- 독일의 환경생태 전문연구기관인 Öko-Institute E.V.는 2023년 3월 한 보고서¹⁹⁾에서 선박 연료로서의 메탄올을 집중 연구하고 장단점을 지적하며 정책적인 직접 규제를 통해 해운업에서 그린메탄올과 같은 재생연료의 채택률을 높일 필요가 있다고 주장함
- 보고서는 메탄올이 흡입이나 섭취, 피부를 통해 사람이 중독될 경우 치명적 독성이 있으나 연료로서 사용과정에서 이러한 사고가 일어날 가능성은 거의 없으며 누출시에도 높은 용해도로 빠르게 분산되어 수중 생물에 축적될 가능성이 전혀 없어 위험성이 매우 낮다고 지적함

19) Wissner, N. 외 3인(2023), "Methanol as a marine fuel - Advantages and limitations", Öko-Institute E.V.



- 또한, 세계 곳곳의 항만에 메탄올 저장 능력이 존재하고 수요가 충분할 경우 선박연료용 저장시설의 증설이 이루어질 것으로 기대하여 벙커링의 인프라는 어려움이 없을 전망
- 현재의 화석에너지 추출 메탄올은 온실가스 저감효과가 미미하나 재생에너지 등으로 온실가스 발생 없이 생산한 그린수소와 공기중 직접 포집하거나 바이오매스에서 추출한 이산화탄소를 결합한 그린 메탄올은 공정과정에서 제거한 온실가스와의 상쇄를 통해 배출이 사실상 "0"에 가깝다고 분석함
- 제조공정의 높은 비용으로 단기적으로 화석연료뿐 아니라 장기적으로 e-암모니아보다 연료 경제성이 낮을 우려가 있으나 상온에서 액체상태를 유지하는 특성상 다루기 용이하고 선박의 개조비용이 낮으며 독성에 대한 장점 등이 이를 보완할 것이라 주장함
- 다만, 포름알데히드의 배출 저감 등의 과제가 남아 있으나 충분히 해결 가능할 것으로 전망
- 보고서는 향후 그린메탄올의 높은 비용이 탄소배출권 가격 상승으로 일부 상쇄될 가능성이 있으며 EU의 Fuel EU Maritime의 규제 강화 등 정책적 조치를 통해 이러한 재생연료의 사용을 촉진하도록 하여야 한다고 결론 지음

향후 대안 연료로서의 메탄올은 충분한 공급물량과 경제성이 과제가 될 것임

- 메탄올의 생산공장은 전 세계적으로 고르게 분포하고 있으며 연간 약 1억1천만톤의 생산능력을 갖추고 있고 2020년 기준으로 약 9,800만톤의 수요가 있음
- 생산된 대부분의 메탄올은 건축재료, 플라스틱, 페인트 등 일상 생활재료의 제조에 사용되고 있으며 연료로 사용되는 부분은 극히 미미하나 기존 공장시설의 증설 등을 통한 생산능력 확보는 가능한 것으로 알려짐
- 메탄올은 세계적인 교역 제품으로 벙커링 설비는 기존 교역항의 증설이나 전환을 통해서도 가능할 것으로 보이며 기존 석유연료 벙커링 시설을 전환하는 것도 가능하여 벙커링 설비와 투자의 문제는 심각하지 않은 것으로 알려짐
- 그러나 바이오원료의 확보에 한계가 있고 수전해를 통한 그린수소 역시 충분하지 못할 뿐 아니라 고비용으로 경제성이 아직 확보되지 못하는 등 그린수소와 블루수소를 공급하는 데 어려움이 있을 것으로 예상되며 충분한 물량의 확보가 과제가 될 것으로 예상됨

세계 2위의 컨테이너선사인 Maersk는 대안 연료로서 그린메탄올에 큰 비중을 두는 전략으로 그린메탄올 개발투자 및 세계 여러 지역의 생산설비 건설, 생산된 물량의 구매 등의 전략적 파트너십을 구축하는 적극적 행보를 보임

- Maersk는 2022년 중 총 9개 기업과 그린메탄올 개발투자를 포함한 생산설비 건설 및 생산 물량 구매 등의 파트너십을 체결하고 자사 메탄올추진선박에 그린메탄올을 공급하기 위한 적극적인 활동을 보임
- 2022년 중 구축한 파트너십은 중국과 북미 및 중남미 등 자사선이 운항하는 비유럽 지역의 그린메탄올 생산설비와 공급망 구축이 목적으로 보임



- 2024년말까지 연간 33만톤 규모의 생산이 시작된 후 2025년 내 60~75만톤이 추가 생산개시될 예정이며 2026년 이후 추가 증설이나 생산개시될 물량이 99만톤에 달하여 2026년 이후 최대 연간 207만톤의 물량을 확보하게 될 것으로 예상
- 그 외에도 2023년 1월 베를린에 기반을 둔 그린메탄올 전문스타트업 기업인 C1 Green Chemicals AG에 투자
- 또한, '23년 3월에는 상하이항 메탄올 벙커링을 위해 중국 SIPG와 전략적 MOU를 체결하는 등 그린메탄올 연료공급에 총력을 기울이는 모습을 보임

Maersk의 그린메탄올 전략적 파트너십 체결 현황

	업체명	국적	연료종류	생산계획(톤/연)			생산설비 위치
				2024년내 생산개시	2025년내 생산개시	'26년이후 생산개시	
1	CIMC ENRIC	중국	bio-methanol	50,000		200,000	중국
2	European Energy	덴마크	e-methanol		200,000 ~300,000		미국, 남미
3	GTB	중국	bio-methanol	50,000		300,000	중국
4	Orsted	덴마크	e-methanol		300,000		미국
5	Proman	스위스	bio& e-methanol		100,000 ~150,000		북미
6	WasteFuel	미국	bio-methano	30,000			남미
7	Debo	중국	bio-methano	200,000			중국
8	Carbon Sink LLC.	미국	e-methanol			100,000	미국
9	Sun Gas Renewables	미국	bio& e-methanol			390,000	미국
	합계			330,000	600,000 ~750,000	990,000	

자료 : Maersk 홈페이지 및 신문기사 정리

메탄올추진선박은 아직 소수이나 Maersk의 전략적 파트너십 이후 컨테이너선을 중심으로 빠르게 증가하는 양상을 보임

- '23년 6월말 현재 등록 선박 중 메탄올추진선박은 총 24척에 불과하며 이들 중 여객선 1척을 제외한 나머지 선박은 메탄올을 운송할 수 있는 화학제품선 등 탱커임
- 그러나 발주잔량은 119척으로 증가하여 전체 발주잔량 중 2.4%를 차지하고 있으며 GT단위 톤수로는 1,062만톤으로 5.5%를 차지하여 주로 대형 위주로 발주가 이루어진 것으로 나타남
- 발주잔량 119척 중 컨테이너선이 87척에 달하여 압도적인 비중을 차지하고 있으며 이는 Maersk의 전략적 그린메탄올 파트너십이 영향을 미친 것으로 추정됨
- 적극적인 전략을 취하고 있는 Maersk 외에도 프랑스의 CMA CGM, 중국 COSCO, 홍콩 OOCL, 우리나라의 HMM 등이 지난해 하반기 이후 메탄올 추진 대형 컨테이너선을 발주함
- 시장에서는 Maersk가 자사 공급 외에도 중장기적으로 컨테이너 주요 항에서 그린메탄올 벙커링 사업을 영위할 것으로 예상



메탄올 가격은 단기적으로 매우 높은 수준이며 장기적으로도 불확실성이 높은 것으로 추정

그린메탄올의 생산 비용

Fuel type		Price (USD/GJ)	Price (EUR/GJ)
Fossil methanol		10.1-20.1	9.0-18.1
Bio-methanol (current)	< USD 6/GJ feedstock cost	16.4-38.4	14.8-34.6
	USD 6-15/GJ feedstock cost	22.9-50.9	20.6-45.8
Bio-methanol (mature process 2030-2050) cost	< USD 6/GJ feedstock cost	11.4-27.8	10.3-25.0
	USD 6-15/GJ feedstock cost	17.8-42.4	16.1-38.2
E-methanol (current) cost	From combined renewable source	41.2-81.4	37.1-73.3
	From DAC only	67.8-119.6	61.1-107.6
E-methanol (mature process 2030-2050) cost	From combined renewable source	12.6-31.7	11.3-28.5
	From DAC only	14.5-31.7	13.0-28.5

자료 : IRENA(2021) & Methanol Institute

- 지속가능에너지의 정부간 협력 기구인 IRENA(international renewable energy agency)와 메탄올 무역협회 성격의 Methanol Institute가 2021년 공동으로 작성한 재생에너지로서의 메탄올 전망 보고서²⁰⁾에서 그린메탄올의 생산비용 예측을 다룸
- 그린메탄올 생산비용은 대량 구축에 따른 재생에너지 비용 인하 정도와 이에 따른 그린수소 생산 비용의 변화, 바이오매스 원료 가격의 변화, Carbon credit에 의한 생산비용 보상 수준, DAC 기술²¹⁾ 발전 정도, 바이오매스로부터의 추출 기술발전과 대량 생산에 따른 비용 변화 등 다양한 요인이 영향을 미칠 것으로 예상됨
- IRENA의 보고서에 따르면 단기적으로 바이오 재료에서 추출하는 바이오메탄올의 경우 GJ당 생산 비용은 약 16~51달러, e-메탄올은 41~81달러(DAC만으로 이산화탄소를 생산할 경우 최대 약 120달러) 수준으로 추정됨
 - 이는 유통, 저장, 판매비용 등을 제외한 생산비용으로, 코로나19 이전 선박의 화석연료 가격이 GJ당 10달러 내외인 점과 판매까지의 제반비용 등을 감안하면 약 3~10배까지 높은 가격이 될 것으로 추정됨
- 이러한 비용은 기술 발전과 공정의 대량화, carbon credit의 보상 등으로 2050년의 성숙된 생산체제에서 바이오메탄올의 경우 GJ당 11~42달러, e-메탄올의 경우 12~32달러까지 낮아질 전망
- 생산비용이 감소하는 것은 고무적이나 각 요인의 불확실성이 높아 가격의 범위가 현재 화석연료 대비 약 1.5~6배 수준까지 상승할 것으로 보임

20) IRENA(2021), "Innovation Outlook - Renewable Methanol", International Renewable Energy Agency & Methanol Institute

21) DAC : direct air capture, 이산화탄소의 공기중 직접 포집



- 최저가 시나리오가 실현될 경우 경제적 타당성이 확보될 것으로 보이나 최고 6배까지 상승할 경우 경제성이 뒷받침 될 것인지 불확실한 수준임
- 보고서는 현재 약 1억톤 내외의 메탄올 수요가 2050년까지 5억톤 수준으로 증가할 전망이며 이 중 2.5억톤의 e-메탄올, 1.35억톤의 바이오메탄올이 포함될 것으로 예상

이러한 경제성에 대한 불확실성 속에서도 EU의 규제 하에서 장기적으로 가장 경제성이 높은 대안연료는 저탄소 메탄올이라는 결론을 제시한 연구도 존재함

- Longspur research는 영국의 클린에너지 전문 투자기업 Longspur capital의 리서치 부문으로, '23년 3월 한 보고서²²⁾에서 EU지역에서 연료가격뿐 아니라 각종 규제와 세금까지 고려한 각 연료별 비용을 시기별로 비교한 연구결과를 제시함
- 본 연구에서는 Fuel EU Maritime의 페널티와 EU ETS 비용, 연료별 세금, 그리고 연료구입 비용을 합산하여 총 연료비용을 비교함
- 비교연구 결과 2039년 이전까지 EU의 규제비용을 포함하여 가장 작은 비용으로 운항할 수 있는 연료는 화석LNG로²³⁾ 나타남
- 2040년 이후 Fuel EU Maritime의 규제치 등이 추가적으로 높아지면서 이산화탄소와 메탄 배출량이 높은 화석LNG의 비용은 급격히 상승하고 저탄소 연료의 비용이 경쟁력을 가지기 시작하며 이 중에서도 메탄올이 가장 작은 비용을 나타냄²⁴⁾

Longspur research의 연료비용 비교연구 결과

단위 : EUR/MWh	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<Grey fuels>						
VLSFO	130	230	580	1,030	1,679	2,079
LNG	92	92	133	583	1,232	1,632
Hydrogen	1,356	1,455	1,805	2,255	2,904	3,304
Ammonia	1,045	1,145	1,495	1,944	2,594	2,994
Methanol	387	487	837	1,286	1,936	2,336
<Low carbon fuels>						
LNG	285	285	285	285	285	285
Hydrogen	492	492	492	492	492	492
Ammonia	262	262	262	262	262	262
Methanol	244	244	244	244	244	244

자료 : Longspur Research, "Attention All Shipping – Methanol Gains Momentum"

22) Forsyth, A.(2023), "Attention All Shipping Methanol Gains Momentum", Longspur Research
 23) 결과표에는 grey fuel 연료에 포함되어 있으나 보고서 내의 설명으로 grey연료 범주에 수소, 메탄올, 암모니아만 규정하고 있어 LNG는 화석LNG를 그대로 사용한 것으로 보임
 24) 저탄소 연료는 바이오LNG, 그린수소, 바이오 또는 e-메탄올, 그린암모니아 등임



- Fuel EU Maritime의 페널티를 회피하기 위한 그린연료의 블렌딩 비율에서도 메탄올이 필요 그린연료의 비율이 가장 작을 것으로 추정한 반면, 2040년 이후 LNG의 그린연료 블렌딩 비율은 100%이거나 이에 근접한 수준이 될 것으로 예상

Fuel EU 페널티 회피를 위한 그린연료 블렌딩 비율

Green fuel blending levels to avoid FuelEU penalties

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
LNG	0%	0%	8%	97%	100%	100%
Hydrogen	32%	35%	45%	57%	75%	86%
Ammonia	27%	30%	41%	55%	75%	87%
Methanol	12%	16%	29%	47%	72%	88%

자료 : Longspur Research, "Attention All Shipping – Methanol Gains Momentum"

- 페널티 회피용으로 그레이연료와 최소한의 그린연료 비율로 블렌딩한 각 연료의 비용은 다음의 표와 같으며 역시 메탄올 비용이 최소로 나타남
- LNG는 메탄슬립에 의한 배출이 불리하게 작용하며 다음의 표는 메탄에 대한 제재까지 고려한 비용임²⁵⁾

Fuel EU 페널티 회피 가능 블렌딩연료의 연료비용

Blended fuel costs to avoid FuelEU penalties including CH4 slip

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
VLSFO	130	230	580	1030	1679	2079
LNG	107	126	194	281	284	284
Hydrogen	289	297	326	363	417	450
Ammonia	203	206	215	226	241	251
Methanol	106	112	133	161	201	225

자료 : Longspur Research, "Attention All Shipping – Methanol Gains Momentum"

25) 현재 Fuel EU Maritime 등 EU의 규제는 이산화탄소만 규제 대상이며 메탄올을 포함한 타 온실가스는 검토 중인 것으로 알려짐



메탄올은 연료의 공급과 경제성이 큰 과제로 남아있으나 많은 장점으로 미래의 선박 연료로서 일정 비중을 차지할 것으로 기대

- 선박 연료로서의 메탄올은 연료탱크의 크기가 커져야 하는 부담이 있으나 상온 액체상태를 유지하고 독성이 약하며 이미 선박이 상용화되었을뿐 아니라 개조비용도 낮다는 장점이 있음
- 그럼에도 불구하고 연료의 공급이 충분할 것인지는 불확실함
- DNV는 자사 홈페이지에 게시한 기사²⁶⁾에서 단기적으로 그린메탄올은 많은 양을 사용할 수 없으며 투자에 관심을 가진 업체들이 존재하나 먼저 확실한 수요를 확인하기를 위하여 대량 생산 구축에 시간이 걸릴 것으로 전망
- 경제성에 있어서도 앞서 소개한 Longspur Research의 연구는 장기적으로 메탄올이 대안 연료 중 가장 낮은 연료비용이 소요될 것으로 예상하기도 하였으나 앞서 소개한 다른 연구들과는 결론이 배치되기도 함
- Longspur의 결과는 비교적 중립적 입장에서 분석을 진행한 IMO의 FFT 보고서의 결과와도 상이하며 MMMCZCS 역시 LNG 연료를 옹호하는 입장이 아님에도 LNG와 e-암모니아의 경제성이 가장 높을 것으로 예상하여 비교하고 있음
- 또한, 그린메탄올을 옹호하는 입장인 Öko-Institute E.V.의 연구 역시 장기적으로 그린메탄올의 경제성은 e-암모니아보다 낮을 것으로 인정함
- 이러한 불확실성과 경제성에 대한 비교적 낮은 기대감에도 불구하고 여러 가지 장점이 있는 그린메탄올은 미래 선박 연료로서 기대감이 높으며 일정 수준 비중을 차지할 것으로 예상됨
- DNV는 자사 홈페이지 내 기사에서 그린메탄올이 LNG보다 좋지도 나쁘지도 않으나 특성이 다르므로 특정 선박 유형에 매력적이라는 의견을 제시함
- 특히, Maersk의 전략적 메탄올 확보 노력에 이어 세계 최상위권 컨테이너선사들이 잇따라 메탄올 추진선을 발주함에 따라 주요 컨테이너선 항로 내에 벙커링 설비가 구축되고 비교적 높은 비중을 차지하게 될 것이라는 기대감도 존재함

3. 암모니아

암모니아는 미래연료로서 해운업계의 기대가 매우 높으나 해결해야 할 과제도 많은 연료임

- 암모니아(NH₃)는 탄소를 함유하고 있지 않아 연소시 이산화탄소를 배출하지 않는 무탄소 연료로서 획기적인 탄소저감이 가능한 대안 연료로 주목받고 있음
- 암모니아에 함유된 수소를 에너지원으로 사용하는 연료이므로 내연기관뿐 아니라 연료전지로도 적용이 가능함
- 다만, 연료전지추진 선박의 상용화는 장기적 연구개발이 소요될 것으로 보여 우선 내연기관 적용이 먼저 추진되고 있음

26) Chryssakis, C.(2023), "Methanol as fuel heads for the mainstream in shipping", DNV



- 암모니아는 부피당 에너지밀도 15.8 GJ/m³ 로 석유계인 MGO(36.6) 대비 약 1/3 수준에 불과하여 저온설비 등을 포함하면 기존 석유연료 대비 약 4배 크기의 연료탱크를 필요로 하며 화물탑재 공간에 손실을 미칠 우려가 있음
- 그러나 부피당 에너지밀도가 액화수소(8.5)의 약 2배 수준이고 액화에 필요한 온도가 -34°C로 액화수소 -253°C 대비 매우 높은 수준이므로 수소보다 선박연료로서 운송과 저장이 용이하다는 장점이 있음
- 연료로서 가장 심각한 문제점은 심각한 누출사고 시 선원들을 사망에 이르게 할 수도 있는 정도의 독성을 가지고 있다는 점
 - 다만, 냄새가 강하여 치명적 농도에 이르기 전에 피난이 가능하므로 극단적 인명사고 가능성은 높지 않다는 주장도 제기되고 있으나 여전히 독성 문제는 심각하게 다루어지고 있음
- 또한, 내연기관 연소 시 이산화탄소 대비 100년간 273배의 온실효과를 내는 아산화질소(N₂O)를 발생시켜 이에 대한 제거 역시 과제로 대두되고 있음
- 암모니아의 자연발화 온도는 651°C로 매우 높은 편이므로 화재와 폭발의 위험은 작으나 내연기관에서 사용하기 위해서는 기존 화석연료를 파일럿 연료로 일부 혼합 사용하여야 하며 이에 따라 완전한 무탄소화에는 기술적 어려움이 있음
 - 현재 주요 엔진메이커들은 파일럿 연료 혼합비율을 5~10%까지 낮춘 것으로 알려지고 있으며 0%까지 줄이는 것을 목표로 기술개발 중

높은 온실효과를 내는 아산화질소(N₂O) 문제는 연구개발이 진행되고 있으며 문제 해결 가능성은 비교적 낙관적인 것으로 전망되나 아직 구체적 데이터는 부족한 상황

- 암모니아의 내연기관 연소 시 아산화질소와 질소산화물(NO_x)이 함께 배출되며 아산화질소 배출을 줄이는 대신 NO_x 배출을 늘리는 분사 및 연소온도 등의 운전조건을 설정하고 NO_x 저감장치인 SCR로 NO_x를 제거하는 연구 등이 진행 중인 것으로 알려짐²⁷⁾
- 엔진의 테스트 결과에 따라 적절한 촉매와 SCR 설계를 통한 N₂O와 NO_x의 저감이 가능하며 덴마크의 화학기업인 Topsoe에 따르면 N₂O와 NO_x를 함께 제거할 수 있는 촉매제들이 이미 상용화되었다고 밝힘²⁸⁾
- 다만, 아직까지 암모니아 내연기관은 개발이 완료되지 않았고 이들 공해물질 배출에 대한 데이터가 부족하여 문제의 해소에는 시간이 더 소요될 것으로 전망
- 연료탱크로부터의 자연기화, 불완전 연소 등에 의한 암모니아 누출(slip) 문제 역시 이들 질소계 공해물질과 함께 위험 방지 및 제거에 대한 연구가 다양한 방법론으로 연구되고 있으며 이 역시 아직 엔진과 선박의 미 상용화로 데이터 확보에 한계가 있어 시간이 걸릴 전망²⁹⁾

27) Comes, M. 외 2인(2021), "Ammonia as a marine fuel - Risks and Perspectives"
 28) Alfa Laval 외(2020), "Ammonfuel - an Industrial View of Ammonia as a Marine Fuel"
 29) MMMCZCS(2023), "Managing Emissions from Ammonia-Fueled Vessels" 참조

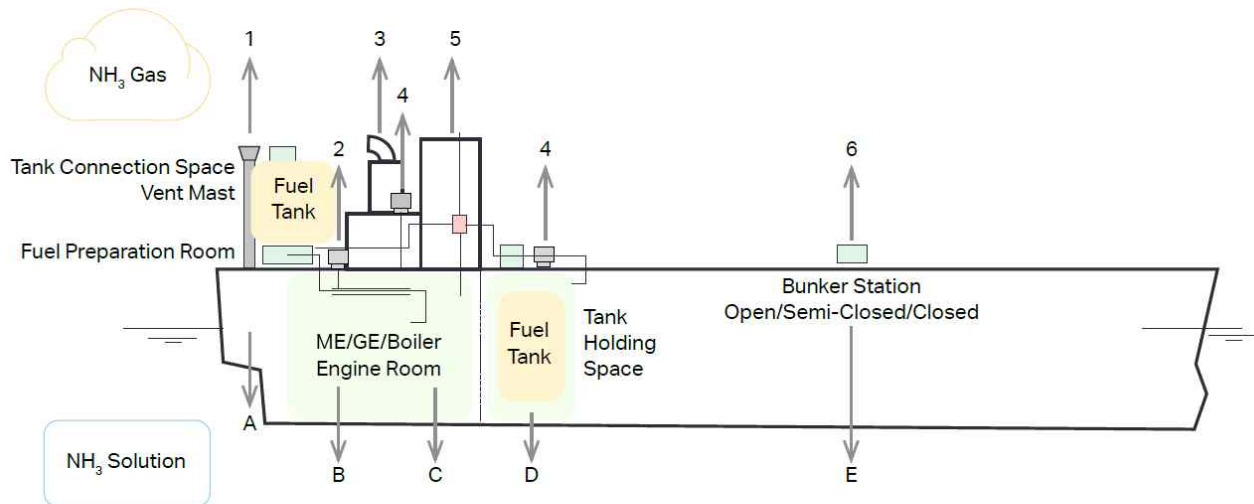


암모니아의 독성 문제는 연료로서의 암모니아 사용에 있어 가장 심각한 문제 중 하나이며 많은 기관들이 이에 대한 연구와 대응을 준비하고 있음

- 암모니아의 독성은 연료로서 활용하기에 가장 부담스러운 문제 중 하나이며 상용화 이전까지 완전한 해소 수준은 아니더라도 최소화하고 안전에 문제가 없다는 해법이 제시되어야 하므로 각 기관에서 많은 연구를 수행 중인 것으로 파악됨
- 암모니아는 연료의 연소과정에서의 배출뿐 아니라 연료로 저장, 공급되는 과정에서의 누출까지 다양한 독성노출 위험이 있는 것으로 파악됨
- Mærsk Mc-Kinney Møller Centers는 그림과 같이 배출 및 누출원을 파악하고 제시함

암모니아의 독성 노출 위험 배출 및 누출원

No	Emission from	Source
1	Gas vent mast	Tank & line safety valve, catch & detox system
2	Ventilation of double wall pipe system	NH ₃ fuel liquid and gas piping in engine room, piping from bunker station to engine room
3	NH ₃ slip from various consumers	Main engine (ME), generator engine (GE), aux boiler, GCU, reliq. plant, compressor
4	Ventilation of enclosed space	Machinery/fuel handling system in that space or from surrounding space
5	Instrument	Gas detector, calorific meter, calibration gas
6	Bunker station	Hose connection/disconnection, quick coupler, emergency release system



No	Discharge from	Source
A	Deck water spray system	Leakages from piping system and storage tank on exposed deck
B	NH ₃ catcher and detox system	Main engine, generator engine, aux boiler, GCU, if equipped, compressor
C	Heat exchange fluid	Heat exchanger (tube/plate)
D	Enclosed space bilge system	Leakages from independent tank, piping, stub piece, valve, plug etc. If equipped, local water sprinkler for NH ₃
E	Water curtain / spill tank system	Leakages from bunker hose, quick coupler, emergency release system

자료 : MMMCZCS(2023), "Managing Emissions from Ammonia-Fueled Vessels"에서 인용

- 이러한 노출 위험에 대해 암모니아의 독성이 인체에 미치는 농도별 영향은 이미 파악되어 있으며 해상 화물 취급에 관하여 IMO의 IGC(International Gas Carrier) code 규정하에 교역이 이루어지고 있어 향후 암모니아 연료 활용 시 적용이 가능할 것이라는 주장이 지배적임



- 선박의 건조와 운항에 있어서 가장 중요한 해사관련 기관 중 하나인 각국의 주요 선급은 이미 암모니아 누출수 허용 농도와 알람시스템, 안전시스템 등에 관한 가이드라인과 지침을 설정함

주요 선급의 암모니아 관련 가이드라인

Classification Society	ppm limits for release, alarm, and safety systems activation	Source
ABS	10 ppm as release/exhaust limit, gas alarms at 25 ppm and safety systems activated at 150 ppm	ABS, "Guide for Ammonia Fueled Vessels", September 2021
BV	30 ppm exposure limit, triggering shut down and other safety measures	Bureau Veritas, "AMMONIA-FUELED SHIPS TENTATIVE RULES - NR671 - JULY 2022", 2022
Class NK	25 ppm as release/exhaust limit, same safety and alarm provisions as Korean Registry	ClassNK, "Guidelines for Ships Using Alternative Fuels (Edition 2.0) - Methy/Ethyl Alcohol/LPG/Ammonia, June 2022
DNV	30 ppm as release/exhaust limit, gas alarms at 150 ppm and safety systems activated at 350 ppm	DNV, RULES FOR CLASSIFICATION, Ships, "Part 6 Additional class notations, Chapter 2 Propulsion, power generation and auxiliary systems", July 2022
Korean Register	Safety systems activated at 300 ppm. Alarm sounds at 25 ppm	Korean Register, "Guidelines for ships using Ammonia as fuels (2021.26)", 2021
Lloyd's Register	Prevent venting in normal and abnormal conditions. Safety systems activated at 220 ppm and alarm sounds at 25 ppm.	Lloyd's Register, Notice No. 1, Rules and Regulations for the Classification of ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels, December 2022

자료 : MMMCZCS(2023), "Managing Emissions from Ammonia-Fueled Vessels"에서 인용

- 독성관련 연구의 한 사례로, DNV와 노르웨이 여객선사인 Color Line AS 등이 참여한 오슬로 여객 터미널에서의 Pilot project는 수행된 암모니아의 벙커링에 대한 제 3자(오슬로 시민 등)에 대한 안전성 연구를 통하여 일부 방법론은 수용 가능한 것으로 결론³⁰⁾
 - 동 프로젝트는 총 24개 기업과 기관이 참여하여 이루어졌으며 특히 여객선사의 협조가 큰 기여를 한 것으로 평가됨
 - 벙커링에 대한 제 3자 안전성 평가는 오슬로 시내와 매우 인접한 Color Line 여객터미널에서 암모니아의 벙커링이 이루어질 때 가스의 누출 등에 의해 독성이 어느 정도 영향을 미치는지 평가함
 - 평가 방법론은 잠재적 벙커링 방식에 대하여 DNV가 일종의 기술적 시뮬레이션 방법론인 QRA(quantitative risk assessment)를 수행하여 이루어짐
 - 1안은 부두의 가압식 저장탱크로부터 여객선에 벙커링을 공급하는 방식이며 암모니아는 매일 두 대의 가압식 탱크 트럭으로부터 공급받는 안(1-A)과 저온탱크를 가진 벙커링선으로부터 4일에 한번 공급받는 안(1-B) 등을 고려함
 - 2안은 저온탱크를 가진 벙커링선으로부터 여객선에 ship-to-ship 방식으로 공급받는 안
 - 결과는 1안의 경우 외부 날씨와 기압의 변화에 의해 가압식 탱크에서 암모니아가 팽창하며 누출될 가능성과 벙커링을 위한 외부 연결장치 등에서의 누출 등으로 A, B안 모두 수용하기 어려운 수준의 위험도로 평가됨
 - 2안은 수용가능한 수준으로 평가되나 추가 안전조치를 최대한 수용하여야 한다는 결론임

30) 자세한 내용은 Green Shipping Program(2021), "Report for pilot Ammonia as Fuel" 참조

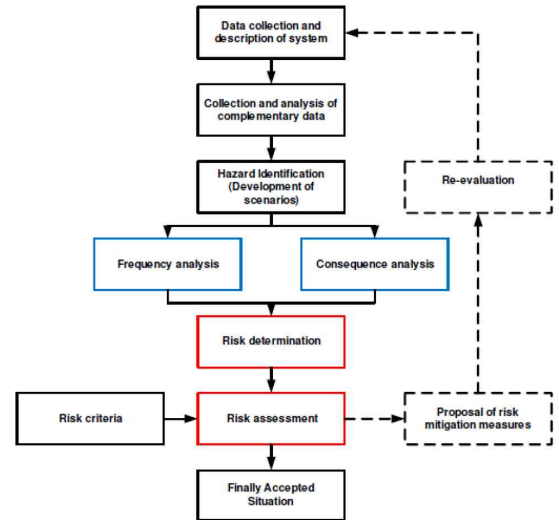


Green Shipping Program의 암모니아 벙커링 위험도 테스트 관련

< Color Line 터미널 >



< QRA 방법론 >



자료 : Green Shipping Program(2021), "Report for pilot Ammonia as Fuel"

- 또 하나의 연구 사례로서 로이드선급과 비영리 연구기관인 Mærsk Mc-Kinney Møller의 공동연구도 많은 데이터의 QRA를 통한 분석 결과를 집적하여 암모니아연료 취급시 최선의 저감 방법론을 적용하여 위험도를 수용 가능 이내로 줄일 수 있다고 결론 지음³¹⁾
- 2023년 6월 발간된 보고서에 의하면 앞선 DNV의 분석과 동일하게 암모니아 저온저장이 위험 감소에 도움이 된다는 결론을 얻음
- 또한, 누출 가능 장비와 연료 준비실을 공간적으로 분리하고 일반 작업자가 활동하는 공간과의 분리 필요성 등의 결론을 제시함
- 이러한 위험 저감책을 실현할 수 있는 기술적 방안을 권고하고 선원의 전문적 훈련과 보호 장구 등도 강조함
- 스웨덴의 세계적인 열유체 장비업체인 Alfa Laval 등도 2020년 작성한 기술페이퍼³²⁾를 통해 암모니아 연료의 독성과 선상 저장 및 벙커링은 주의를 기울여야 하지만 충분히 대응 가능한 방안이 존재하는 것으로 기술함
- 현재 해양산업 전반에서 암모니아연료선에 대한 설계 기준과 위험평가, 잔류위험 등에 대한 연구가 진행되고 있음
- 또한, 암모니아는 이미 화물로 운송된 오랜 경험이 축적되어 IGC코드 14.4장에 규정된 바와 같이 탑승자 전원에게 대한 눈과 호흡기의 보호장치, 가스가 차단되는 방호복 등이 지급되어야 하고 오염제거용 비상용 샤워기가 설치되어야 하는 등이 이미 규정되어 있음
- 안전시스템은 가스감지 장치와 결합하여 자동 작동되는 시스템이 표준이 될 것으로 예상

31) 자세한 내용은 Lloyd's Register & MMMCZCS(2023), "Recommendations for Design and Operation of Ammonia-Fuelled Vessels Based on Multi-disciplinary Risk Analysis" 참조

32) Alfa Laval·Hafnia·Haldor Topsoe·Vestas·Siemens Gamesa(2020), "Ammonfuel - an Industrial View of Ammonia as a Marine Fuel"



- LNG연료 등의 경험이 결합되면 암모니아 연료의 안전에 관한 구체적인 지침개발에 도움이 될 것으로 전망함
- 암모니아 연료의 병커링과 선상 저장 문제는 2,000CuM 이하 C타입 가압탱크를 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 예상하여 심각한 수준의 문제는 아닐 것으로 평가함
- 조선사들 역시 IGC 코드와 각 선급의 안전기준을 준용하고 자체 연구를 거쳐 독성에 관한 대응 기술을 개발하고 있음
- 한국조선해양은 2022년 6월 코마린 컨퍼런스에서 개발현황을 발표³³⁾한 바 있으며, 기술적 문제보다 경제성과 안전설계가 핵심이슈이며 중요도 순으로 독성>부식성>폭발성을 제시함

한국조선해양 암모니아연료추진선 가스시스템 특징

핵심 현안	적용 방안
NOx 처리 + 암모니아 탱크 압력 제어	<ul style="list-style-type: none"> • 암모니아 증발가스(BOG)의 SCR 환원제 활용방안 <ul style="list-style-type: none"> - 증발가스의 30~50%가 환원제로 사용될 것으로 추정 - 암모니아 엔진의 실제 NOx 발생량 정보는 공개되지 않음 - 탱크 압력 제어, 재액화시스템/우레아 비용에 영향
암모니아 배출가스 안전	<ul style="list-style-type: none"> • 엔진 Normal Stop/Shutdown시 퍼징가스와 함께 배출되는 고농도(10~40%) 암모니아 가스 배출 안전 시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 벤트 마스트 Outlet 배출 허용 농도를 30ppm 제한 움직임 - 성능 목표 25ppm 이하 암모니아 가스 배출 안전시스템 개발

자료 : 박상민(2022), “암모니아 연료추진선박 및 운반선 개발 현황”에서 인용

- 독성 문제는 해운사가 가장 우려하는 심각한 문제 중 하나로, 화물로 다루어진 경험을 기반으로 대응책을 준비하고 있으며 낙관적 시각이 우세한 것으로 보이나 여전히 병커링과 선상 안전에 대한 연구가 진행 중임
- 독성에 대한 문제는 암모니아연료추진선의 상용화 이후까지도 실선 운항 경험을 기반으로 한 연구와 개선이 거듭되며 안정화된 솔루션이 도출될 때까지는 시간이 소요될 것으로 예상

연료로서의 암모니아의 운송과 저장, 병커링 등에 관한 문제는 심각한 수준이 아니며 병커링은 구체적인 준비가 진행되고 있음

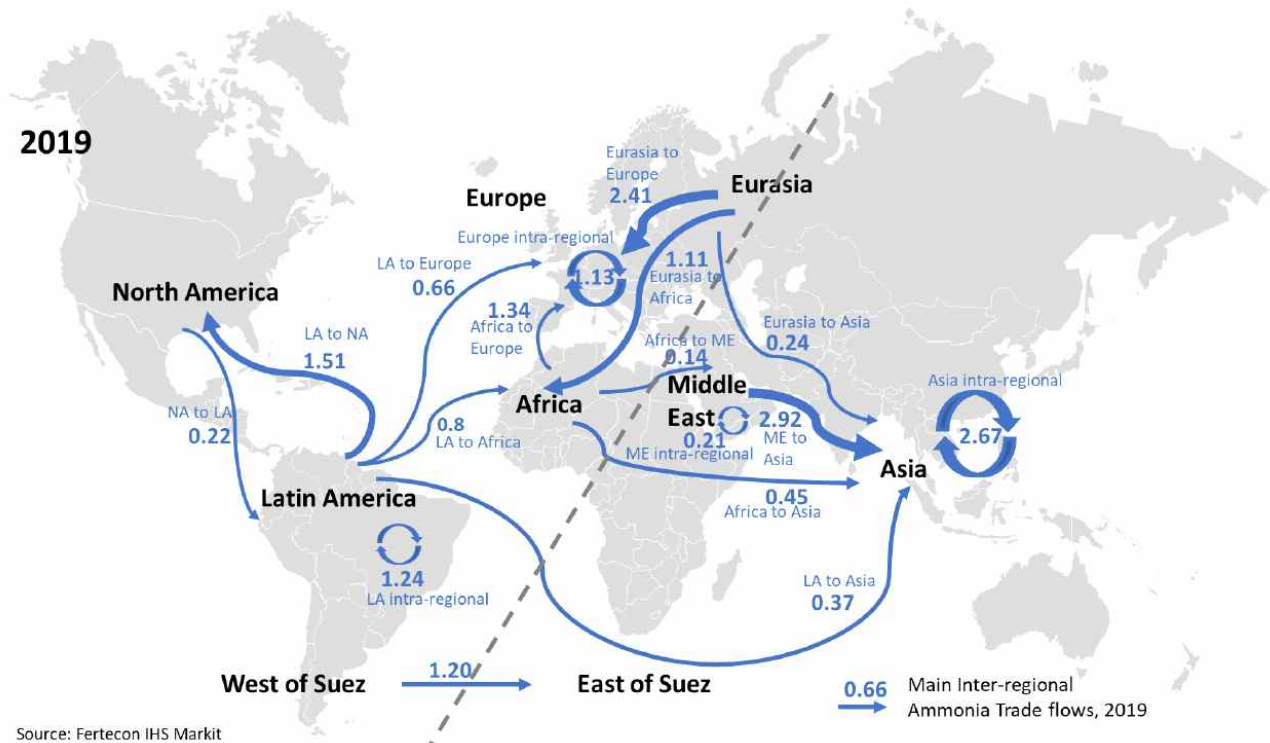
- 암모니아는 대기압에서 -33°C의 저온을 유지하거나 또는 25°C에서 10bar로 가압하면 액체 상태를 유지하여 연료로서 또는 화물로서 활용과 운송이 가능함

33) 박상민(2022), “암모니아 연료추진선박 및 운반선 개발 현황”



- 이러한 특성으로 2019년에 71척의 중소형 LPG선이 1,750만톤의 암모니아를 운송하였으며 이미 많은 물량의 세계 교역이 이루어지고 있어 연료로서의 운송과 교역에도 문제가 없을 것으로 예상
- Alfa Laval 외(2020)에 의하면 2019년 기준 전 세계에 38개의 암모니아 수출항과 88개의 수입항이 존재하고 이들 항만의 시설 중 상당수는 암모니아 플랜트의 일부로서 활용됨
- 이처럼 암모니아 플랜트와 수출입 설비는 세계 곳곳의 항만에 위치하고 있어 이들 설비를 확장할 경우 선박의 벙커링은 어렵지 않을 것으로 전망함

암모니아의 주요 교역로 현황(2019년 기준)



자료 : Alfa Laval 외(2020), "Ammonfuel - an Industrial View of Ammonia as a Marine Fuel"

- 2021년 싱가포르에 설립된 비영리단체 GCMD(Global Center for Maritime Decarbonisation)와 DNV는 2023년 4월 싱가포르항에서 ship-to-ship 방식의 암모니아 벙커링에 대한 안전성 연구를 완료하고 지침을 완성했다고 DNV 홈페이지를 통해 발표함
- 본 연구에서 400개 이상의 위험을 식별하였고 22개 연구파트너들과 협의하였으며 130개 이상의 산업체 및 컨설팅 기관으로부터 피드백, 2022년 1월 시운전을 거쳐 연구를 완성한 것으로 밝힘
- 세계 최대의 벙커링 항이며 가장 복잡한 조건을 갖춘 싱가포르항에서의 지침을 확보함에 따라 세계 다른 항만에서도 적용할 수 있을 것으로 기대하며 현재 암모니아 연료를 다룰 전문인력에 대한 교육 프로그램도 운영 중임



선박연료로서의 암모니아는 생산공법이 이미 성숙화되어 제조상의 문제는 없을 것으로 보이나 향후 탄소중립을 위한 그린 암모니아 등의 공급은 어려운 과제가 될 수 있음

- 암모니아는 이미 1900년대 이후 “하버-보슈법(Haber-Bosch Process)”이라는 수소와 질소의 고온-고압 조건에서의 합성을 통한 대량 생산공정이 안정화되어 추가 투자만 이루어진다면 대량 생산에 대한 문제는 없을 것으로 예상
- 그러나 전주기적 온실가스배출에 대한 선사의 책임문제로 향후 선박의 연료는 현재 생산되고 있는 브라운암모니아 혹은 그레이암모니아가 아닌 그린암모니아 또는 블루암모니아를 선박 연료로서 사용하여야 하는데 이를 충분히 생산하고 공급할 수 있을지 여부는 불확실함
 - 석탄으로부터 얻는 수소를 사용하는 브라운암모니아는 제조, 운송 등 전과정에서 발생하는 탄소발자국(carbon footprint)이 암모니아 1톤당 최대 3톤에 이를 수 있음 [Alfa Laval 외(2020)]
 - 천연가스를 개질하여 수소를 얻는 그레이암모니아의 경우는 공장의 효율 등에 따라 달라질 수 있으며 암모니아 1톤당 1.6~2톤의 이산화탄소 배출 추정 [Alfa Laval 외(2020)]
 - 그린암모니아는 재생에너지를 사용하여 수전해로 얻어진 수소에 공기 중에서 분리한 질소를 합성한 암모니아이며 블루암모니아는 탄소 포집 및 매립과 함께 천연가스를 개질하여 생산한 수소와 공기중 질소를 합성한 암모니아임
- 현재 세계 암모니아 생산은 연간 1.85억톤 수준으로 이중 약 80%가 농업비료용으로 사용되며 그 외에 공업용 등으로 대부분 수요가 있어 청정연료로써 활용하고자 하는 생산물량은 새로운 생산설비 투자가 요구되고 상당한 투자가 뒷받침되어야 할 것으로 추정됨
- 국제재생에너지기구 IRENA의 2022년 자료³⁴⁾에 의하면 2050년까지 선박연료로서 암모니아의 수요는 연간 1.97억톤으로 전망되어 현재의 전 세계 생산량을 능가하며 그 외에 수소 운반체로서의 암모니아 수요도 2050년까지 연간 1.27억톤에 이를 것으로 예상
 - 다만, 이는 동 기구의 1.5°C 시나리오에 기반한 추정임
 - 반면, 2030년까지 그린암모니아³⁵⁾ 생산계획으로 발표된 생산용량은 15백만톤에 불과하고 2040년까지 생산 검토 중인 프로젝트는 총 71백만톤으로 여전히 부족한 수준을 나타내고 있으며 그나마도 투자결정이 계속 보류되고 있는 프로젝트가 대부분임 [IRENA(2022)]
 - IRENA의 1.5°C 시나리오는 2050년까지 5.66억톤의 생산능력을 필요로 한다고 제시함
 - 2023년 2월에 발표된 SGMF³⁶⁾의 한 보고서³⁷⁾에 의하면 현재까지 발표된 블루암모니아 프로젝트는 연간 생산능력 16백만톤 규모이며 2030년까지 그린암모니아 프로젝트는 연산 34백만톤에 이른다고 밝힘
 - 현재 진행중인 프로젝트는 2030년까지의 생산능력을 연산 1억톤 수준까지 확대시킬 가능성이 있다는 점도 밝혀 IRENA의 2022년 자료 대비 생산량 전망이 다소 증가한 수준을 보임

34) IRENA(2022), “Innovation Outlook - Renewable Ammonia”

35) 본 수치 역시 IRENA(2022), “Innovation Outlook - Renewable Ammonia”에서 인용한 수치인데 본문에서는 그린암모니아 대신 renewable ammonia로 표기하고 있으며 본고에서는 계속 그린암모니아로 표기하겠음

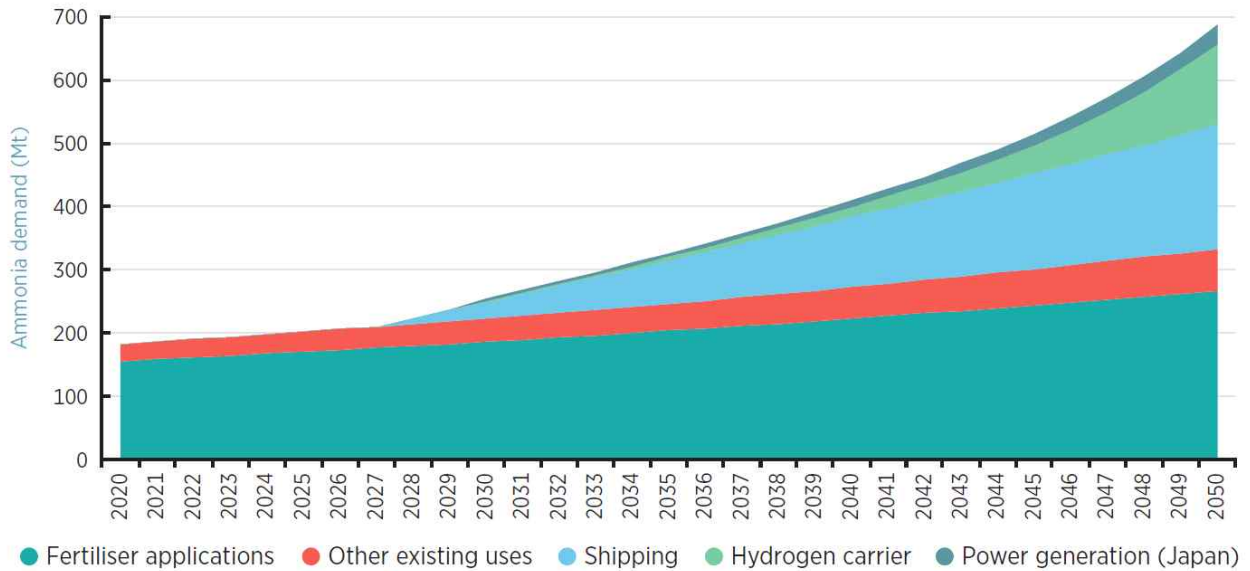
36) Societ for Gas as a Marine Fuel

37) SGMF(2023), “Ammonia as a Marine Fuel - an Introduction”



- 다만, 동 자료에 의하면 2022년까지 680개의 대규모 수소 프로젝트가 제안되었으며 약 2,400억달러 수준의 투자가 이루어질 것으로 예상했는데, 이중 최종투자결정에 이른 것은 약 10% 수준임
- 그린암모니아 또는 블루암모니아는 향후 20여 년간 농업 등 기존 수요처를 제외하면 선박 연료의 수요가 절대적인 비중을 차지할 것으로 예상되며, 적극적인 투자검토가 이루어지고 있으나 수요대비 충분한 공급이 이루어질 수 있을 것인지는 여전히 미지수임

IRENA 1.5°C 시나리오의 암모니아 수요 예상



자료 : IRENA(2022), "Innovation Outlook – Renewable Ammonia"

블루암모니아는 타 무탄소 연료 대비 현재도 가격 경쟁력을 가지고 있으며 그린암모니아의 가격 경쟁력 확보에 시간이 소요될 것으로 추정됨

- IRENA(2022) 보고서는 현재 LNG로부터 탄소포집(CCS)을 통해 추출한 수소를 이용하는 블루 암모니아의 가격이 LNG 가격 변동에 따라 달라질 것이나 GJ당 약 9~25달러 수준으로 추정
- 이러한 수준은 GJ당 약 10달러 내외로 추정되는 기존 화석연료 대비 경쟁력이 없으나 탄소세 등 규제비용에 의해 단기적으로도 타 연료 대비 경쟁력을 확보할 가능성이 높음
- 동 보고서는 현재 그린암모니아의 가격을 GJ당 39~75달러 수준으로 추정하여 가격경쟁력을 가질 수 없는 수준이나 재생에너지의 비용 저하와 공정효율 증가 등으로 2050년까지 17~33달러 수준까지 하락할 것으로 전망
- 또한, 향후 강화되는 규제비용 등으로 2030년 이후 점차 경쟁력을 확보할 것으로 전망
- Alfa Laval 외(2020) 보고서는 재생에너지 전력단가에 대한 가정을 통해 2040~2050년 그린 암모니아의 가격이 현재의 화석연료인 VLSFO 대비 약 18~61% 높은 수준으로 추정함
- 동 보고서에서 블루암모니아의 가격은 GJ당 18.8~21.5달러로 현재의 화석연료 대비 약 43~50% 높은 수준이 유지될 것으로 전망



- 그린암모니아의 경우 현재의 화석연료 대비 2025~2030년까지 72~205% 높은 21.5~45.7달러로 추정하고 있으나 재생에너지 전력단가 하락에 따라 2040~2050년에는 14.8~24.1달러까지 하락할 것으로 예상
- 기존 전통 발전원에서 얻은 수소와 재생에너지를 통한 수소를 혼용하는 하이브리드 그린암모니아 가격은 현재의 화석연료 가격수준까지 낮출 수 있을 것으로 예상하며 규제비용을 고려한 총 비용 면에서 그린암모니아 대비 경제성을 확보할 가능성도 제시함

Alfa Laval의 암모니아 가격 추정

연도	2025~2030	2040~2050
재생에너지 전력단가 가정	30유로/MWh	30유로/MWh
VLSFO 가격 (USD/GJ)	12.5~15	12.5~15
전통 암모니아 가격 (USD/GJ)	13.5	13.5
블루암모니아 가격 (USD/GJ)	18.8~21.5	18.8~21.5
그린암모니아 가격 (USD/GJ)	21.5~45.7	14.8~24.1
하이브리드 그린암모니아 가격 (USD/GJ)	16.1~21.5	13.5

자료 : Alfa Laval·Hafnia·Haldor Topsoe·Vestas·Siemens Gamesa(2020), "Ammonfuel - an Industrial View of Ammonia as a Marine Fuel"

- 전반적으로 향후 블루 또는 그린 암모니아의 가격경쟁력은 재생에너지 전력 단가 움직임 등에 따라 변동성이 높은 상황이나 탄소중립을 위한 규제가 강하게 영향을 미칠 경우 타 연료 대비 경제성을 확보할 가능성이 있을 것으로 추정됨
- 다만, 이러한 경제성 예측은 재생에너지의 수전해 비용 등 생산비용을 고려한 예측이 대부분이며 생산 및 공급량이 선박연료의 수요에 미치지 못할 경우 형성될 가격까지는 예상하지 못하여 수급 여건에 따른 가격수준은 미지수임

여러 문제점과 불확실성에도 불구하고 암모니아연료추진선의 상용화는 빠르게 진행되고 있으며 이르면 2025년부터 선박 발주가 이루어질 것으로 예상됨

- 암모니아 연료의 내연기관 엔진이 아직 개발되지 않았고 2024~2025년경 상용화될 것으로 기대됨
- MAN, Wartsilla, Win-GD 등 세계적인 엔진전문 메이커들이 대부분 암모니아 엔진 개발에 착수하여 '24년 말~'25년 초의 상업용 엔진 출시 계획을 밝히고 있음
- 세계적인 조선사와 해운사, 설계전문 엔지니어링사 등은 2021년경부터 각 선종, 선형별 다양한 암모니아연료추진선의 기본설계안을 개발하고 DNV, LR, ABS, KR, BV, ClassNK 등 유명 선급의 AiP(approval in principle) 인증을 획득함
- 관련 기자재를 포함하여 현재까지 개발과 선급 인증이 진행 중임
- 암모니아연료추진 실증선 건조와 시험도 추진되고 있으며 NoGAPS(Nordic green ammonia powered ships) 프로젝트는 암모니아 연료 내연기관 장착 선박으로 빠른 진도를 보이고 있음
- 동 프로젝트는 2020년 출범하여 노르웨이 혁신기금의 지원을 받는 프로젝트로, 22KCuM급 중형 가스운반선을 암모니아 내연기관 연료추진선으로 건조, 시험하는 프로젝트임



- 비영리연구소인 Maersk Mc-Kinney Moller Center와 엔진업체 Man, 노르웨이 선급 DNV, 노르웨이 암모니아 공급업체인 Yara, 설계회사인 Breeze 등이 참여
- 동 프로젝트는 '23년까지 설계를 완성하고 '24년부터 건조에 들어가 '26년부터 시험운항을 수행할 계획임
- 지난 6월 노르웨이 오슬로에서 개최된 Nor-Shipping 2023에서는 프로젝트의 설계 안을 공개하기도 함

NoGAPS 프로젝트 가스선 설계 개념도

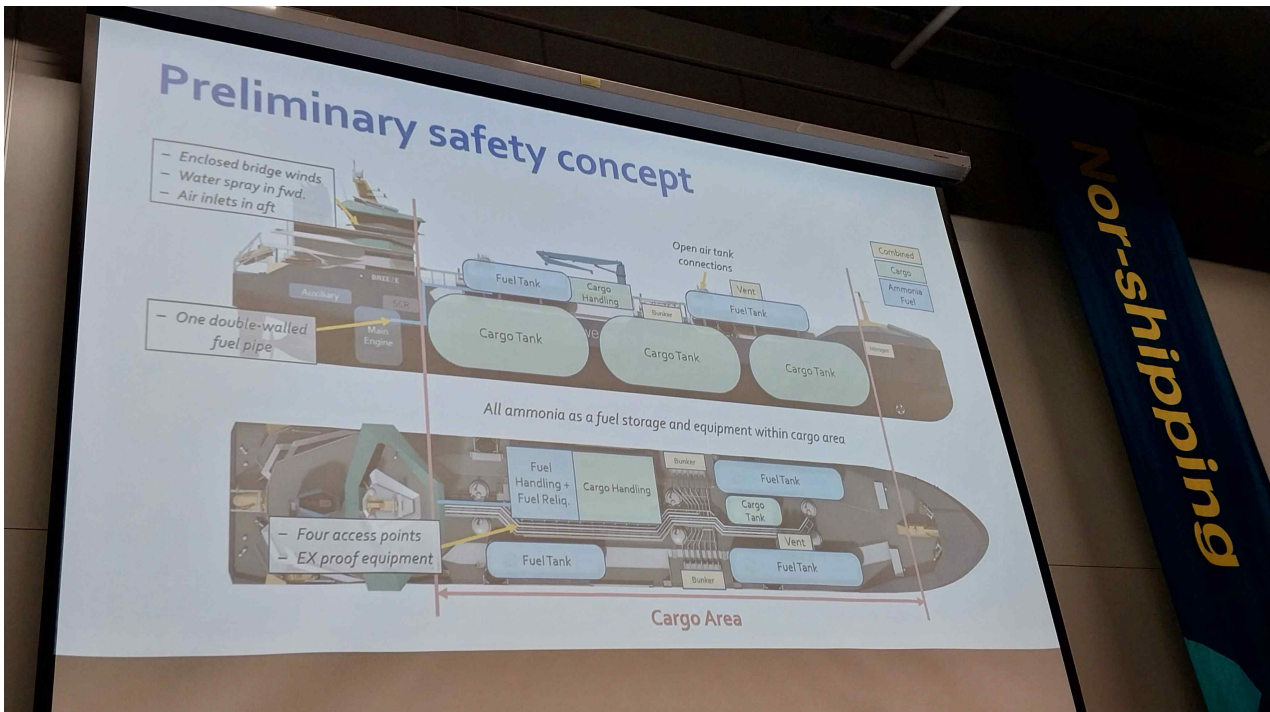


사진 : Nor-Shipping 2023 발표 행사장 현지 촬영

- 삼성중공업이 참여하는 The Castor Initiative는 2025년까지 암모니아연료추진 유조선의 개발과 건조, 시험운항을 목표로 하고 있음
- 영국 로이드선급(LR), 엔진개발업체 MAN Energy Solutions, 말레이시아 선사 MISC Berhad, 한국 조선사인 삼성중공업 등 4개사는 2020년 The Castor Initiative를 결성하고 2025년까지 암모니아 연료추진 유조선을 개발, 건조 및 시험 운항하는 프로젝트를 추진 중임³⁸⁾
- 동 프로젝트에는 이후 노르웨이 암모니아 공급사 Yara International ASA, 싱가포르 해양항만청 (MPA), 싱가포르 주룽항(Jurong Port), 프랑스 에너지사 Total 등이 추가로 합류하여 협력하고 있음³⁹⁾
- 일본 기업들은 암모니아연료추진 LPG선과 부유식 암모니아 저장 및 재기화 바지 등의 개발을 목표로 공동 R&D를 추진하고 있음

38) <https://www.lr.org/en/about-us/press-room/press-release/industry-leaders-join-forces-on-ammonia-fuelled-tanker-project/>
 39) <https://www.lr.org/en/about-us/press-room/press-release/global-energy-major-joins-castor-initiative/>



- 일본의 세계적 선사인 NYK, 일본 대형 조선사인 JMU, 일본선급 ClassNK 등은 지난 2020년 암모니아와 LPG 운송이 가능한 가스선(AFAGC)과 해상 암모니아 저장 및 재기화 바지선(A-FSRB) 등의 개발을 위한 공공 R&D 계약을 체결함
- 이후 동 프로젝트에 저속엔진 전문메이커인 J-ENG와 엔진업체인 IHI Power Systems 등이 공동 R&D에 합류함
- ClassNK는 2022년 9월 가스선(AFAGC)에 대한 AiP인증을 발표하였으며 실선은 2026년 인도되어 시험 운항 예정인 것으로 알려짐⁴⁰⁾
- 암모니아 저장 및 재기화 바지선(A-FSRB)은 일본전력이 운영하는 발전소에 혼소용 연료를 공급할 목적으로도 개발⁴¹⁾

NYK 암모니아 저장 및 재기화 바지선(A-FSRB) 개념도



자료 : NYK, Offshore Energy 기사에서 재인용

- 국내에서는 경남도가 암모니아 혼소 연료추진시스템 선박규제 자유특구를 조성하여 실증 선박과 핵심기자재를 국산화하는 사업이 추진되고 있음
- '23년 4월 경남도가 본 사업의 추진을 발표하며 기자재업체와 한화오션 등 15개 기업이 참여하고 총 316억원(국비 163억원, 도비 109억원 등)이 투입된다고 밝힘
- 해상실증을 위한 특례 해역을 활용하여 연료공급시스템 운영 기술개발, 암모니아 엔진 및 배기 가스 처리시스템 개발, 500t급 암모니아 연료추진 실증 선박 건조 및 해상 실증 등이 추진됨
- 내연기관 외에도 암모니아 기반 연료전지추진선의 실증 연구도 세계적으로 활발함
- MIT 출신의 한국인 청년 과학자들이 창업한 스타트업 AMOGY는 대규모 투자를 받고 뉴욕에서 예인선 한척을 암모니아기반 연료전지추진선으로 개조 중이며 1MW급 연료전지를

40) https://www.classnk.or.jp/hp/en/hp_news.aspx?id=8542&type=press_release&layout=1

41) <https://www.offshore-energy.biz/nyk-jmu-and-classnk-ink-rd-deal-to-accelerate-use-of-ammonia-as-marine-fuel/>



장착하고 '23년 말경부터 시험운항 예정

- ShipFC 프로젝트는 Wartsilla, Yara, Equinor 등 다양한 성격의 14개 기업과 기관이 참여하고 있으며, EU의 지원을 받아 해양지원선 Viking Energy호를 암모니아 기반 2MW급 연료전지 추진선으로 개조하여 2023년말 경 인도받아 시험에 들어갈 예정임

청정 선박연료로서의 암모니아에 대한 기대와 우려가 공존하고 있으며 상당 기간의 문제해결을 위한 노력 필요 전망

- 암모니아는 탄소를 함유하지 않은 연료로서 궁극적 대안으로 일컬어지는 수소를 대체할 연료로까지 평가되기도 하며 해운업계에서도 큰 기대감을 가지고 있음
- 에너지 밀도가 낮고 액화상태의 유지를 위해서는 초저온 또는 초고압이 요구되어 운송, 보관이 어려운 수소에 비해 선박 연료로서의 적합성은 높은 수준
- 그러나 아직 내연기관의 상용화도 이루어지지 못한 상황에서 독성, 금속부식 등 해결해야 할 기술적 과제도 남아있을 뿐 아니라, 연료업계의 대규모 투자를 통한 충분한 공급도 확신할 수 없음
- R&D를 통한 기술개발뿐 아니라 엔진 상용화 이후 선사들의 발주규모와 청정 연료생산을 위한 설비투자가 어떻게 전개될 것인지 등도 지켜보아야 하는 등 암모니아가 선박 연료로서 해운, 조선, 연료업계의 공감대가 이루어지기까지는 시간이 걸릴 전망



4. 대안 연료 비교

지금까지 살펴본 3가지 대안 연료는 모두 가능성과 문제점을 동시에 안고 있으며 다음의 표와 같이 요약됨

대안 연료 비교

항목	LNG	메탄올	암모니아
미래 연료	바이오LNG, e-LNG	그린메탄올	그린암모니아, 블루암모니아
온실가스 저감률	약 80% 예상	100%	90~95%(파일럿 연료 감안시)
장점	-LNG연료 운영경험 풍부 -기존 LNG인프라 활용	-상온 액화로 다루기 쉬움 -기존 선박 개조비용 합리적 -독성 낮음	-탄소 미함유 연료 -수소 활용, 연료전지적용 가능 -수소대비 보관, 운송 용이
문제점 및 논란	-메탄 누출 -바이오LNG 생산연료 한계	-충분한 공급 어려움 예상 -높은 생산비용	-강한 독성 -그린연료 가용성 -미상용화
문제점 대응 현황	메탄슬립 방지기술 개발	전략적 투자와 생산협력 네트워크 구성	-강도 높은 독성 대응 연구 -생산설비 투자 검토 중 -'25년초 엔진 상용화 예상
경제성	바이오LNG의 경제성 높음	3개 연료 중 가장 낮음	블루암모니아는 비교적 경제성 높을 전망
업계 대응 현황	CMA CGM, MSC 등 유럽계 선사, 바이오, e_LNG 혼합 사용 중	대형 컨테이너선 업계를 중심으로 선박 발주와 기대감 확산	-조선사 설계인증 진행중 -다수의 실증 프로젝트 진행 중 -선사의 기대감은 높음

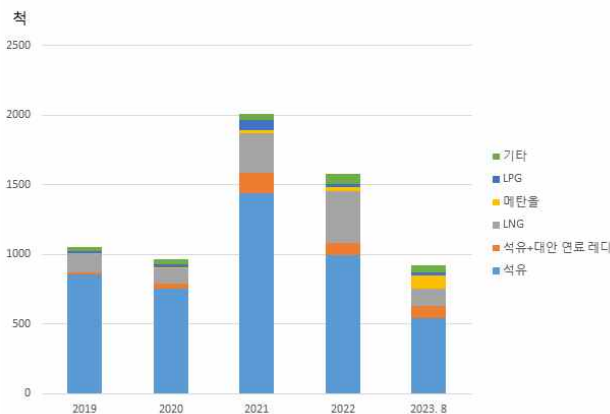


IV. 선박 발주 현황

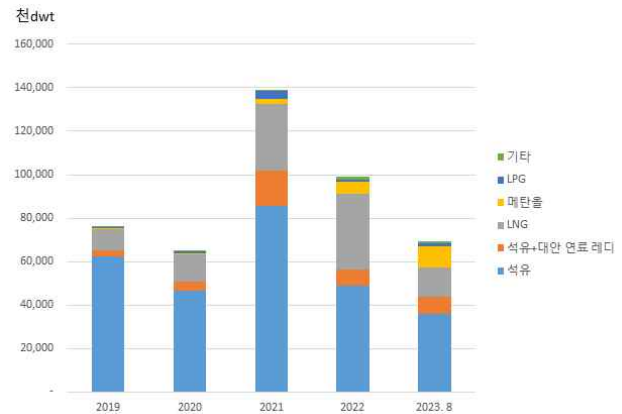
여전히 50% 이상의 선박이 전통적인 석유계 연료만을 채택하고 있으나 최근 들어 저탄소 대안 연료를 채택하는 선박의 비중이 증가하고 있음

최근 5년간 연료별 신조선 발주량 및 비중

< 척수 기준 >



< 톤수(DWT) 기준 >



척수 기준	석유	석유+레디	LNG	메탄올	LPG	기타	톤수 기준	석유	석유+레디	LNG	메탄올	LPG	기타
2019	82%	1%	13%	0%	1%	3%	2019	81%	4%	13%	0%	1%	1%
2020	78%	3%	12%	1%	2%	4%	2020	71%	6%	20%	1%	1%	1%
2021	72%	7%	14%	1%	3%	2%	2021	62%	12%	22%	2%	3%	0%
2022	63%	6%	24%	2%	1%	5%	2022	49%	8%	35%	5%	1%	1%
2023	59%	9%	14%	10%	3%	5%	2023	52%	12%	19%	14%	2%	1%

자료 : Clarkson 기록을 토대로 해외경제연구소 작성

- 소형선을 제외하고 주요 규제 대상인 5,000GT 이상급 선박의 2019년부터 2023년 8월까지 5년간 발주 기록을 추진 연료별로 분류, 집계한 결과는 위의 그래프와 같이 나타남
- 2019년 LNG 등 대안연료를 이중연료로 채택하거나 하이브리드, 배터리 등 저탄소 추진시스템을 채택하여 발주한 선박의 비중은 전체 발주 척수의 17%, dwt기준으로는 15%에 불과하였음
- 당해연도에 전통적 연료인 석유를 채택하였으나 향후 타 연료로의 개조를 위해 레디(ready) 타입을 선택한 선박의 비중도 척수 기준 1%, 톤수 기준 4%에 불과하였음
- 저탄소 연료 또는 추진시스템을 채택한 선박의 비중은 점차 증가하여 2023년에는 척수 기준 32%, 톤수 기준 36%까지 증가함
- 레디 타입을 선택한 석유연료추진 선박의 비중도 척수 기준 9%, 톤수 기준 12%까지 증가



- 주목할만한 점은 IMO의 주요 규제가 시행되기 시작한 2023년에도 아무런 저탄소 연료나 추진시스템을 채택하지 않은 선박의 비중이 절반을 넘는다는 점이며 이러한 선박은 대형보다 중형선이 많은 비중을 차지함
- 배터리 등 주로 소형선에 채택되는 추진시스템이 주를 이루는 “기타” 항목과 LPG운반선이 대부분을 차지하는 LPG연료 채택 선박을 제외하고 석유만을 채택한 선박과 LNG와 메탄올을 이중연료로 채택한 선박들의 평균 dwt를 구하면 다음의 표와 같음

최근 5년간 연료별 발주선박의 평균 DWT

(단위 : 천DWT)

연도	석유	LNG	메탄올
2019	74	73	50
2020	64	115	50
2021	60	108	115
2022	50	92	189
2023. 8	67	106	110

자료 : Clarkson 기록을 토대로 해외경제연구소 작성

- 석유만을 연료로 채택한 선박의 평균 톤수는 50~75Kdwt 수준으로 중형급 선박이 주를 이루고 있으며 대형 벌크선, 탱커, 컨테이너선과 소형선 등도 다수 포함되어 있음
- 또한, 석유연료 채택 선박은 해가 갈수록 평균 톤수가 감소하고 있어 중소형보다 대형 선박이 대안 연료 채택에 적극적인 것으로 나타남
- LNG 이중연료 선박이 발주되기 시작한 초기에는 우선 소수의 작은 규모의 선박부터 시험적으로 채택하여 2019년까지 중형급 규모의 평균치를 보였으나 2020년 이후 평균 100Kdwt급을 넘어서며 대형화되기 시작함
- 메탄올 연료는 2020년까지 주로 메탄올을 운반하는 중형 탱커가 소수 채택하였으나 2021년부터 대형 컨테이너선의 채택이 증가하며 대형화되기 시작함
- 전반적으로 2020년 이후 중소형보다는 대형 선박들이 온실가스 감축을 위한 노력에 더 적극적인 것으로 보이며 이는 복합적인 요인이 작용하는 것으로 추정됨
- 우선 대형선을 보유한 대형 선사가 중소형 선사보다 대안 연료에 대한 연구에 투자할 여력이 상대적으로 높아 전략적 투자 결정에 유리한 점이 작용하였을 가능성이 높음
- 또한, 최근 신조선 시장에서 비중이 급증한 대형 LNG선이 대부분 LNG 이중연료를 채택하고 있고, 규제가 강한 유럽지역을 운항하는 선박 중 대형 컨테이너선의 비중이 높으므로 이들 선박이 평균 톤수를 상승시키는 효과로 작용
- 중소형 선사들의 경우 IMO와 EU의 규제 정책에 대한 대응 부족으로 해상탄소중립 국면에서의 혼란이 높아 노후화가 심한 시급한 교체 선박만을 기존 전통연료 선박으로 교체하는 투자가 많이 이루어지는 것으로 추정됨



최근 대안 연료의 채택 추이 중 특이한 점은 메탄올의 비중이 점차 증가하고 있으며 특히, 2023년들어 급증하였다는 점임

- 2019년과 2020년 메탄올을 이중연료로 채택, 발주한 선박은 각각 4척과 8척에 불과함
- 이후, 2021년 21척, '22년 28척이 발주된 데 이어 '23년 8월까지 89척이 발주되어 '23년 중 급증하는 경향을 보였으며 전체 발주량에 차지하는 톤수 비중도 '21년 2%, '22년 5%에서 '23년(8월까지 누적)에는 14%로 급증함
- 동 시기 LNG를 이중연료로 채택한 선박은 '20년과 '21년 각각 20%와 22%에서 '22년 35% 까지 급증한 후 '23년 19%로 감소함
- '22년과 '23년 LNG연료 채택 선박 중 절반 이상이 대형 LNG운반선으로 이들을 제외한 상선 시장에서의 채택률은 더욱 낮아지고 있어 메탄올연료추진선과 대비를 나타냄
- '22년의 신조선 시장에서 35%로 비중이 증가한 점 역시 카타르발 대규모 LNG선 발주로 LNG선 수요가 급증한 점이 영향을 미쳐 '22년 이후 LNG연료를 채택하는 신조선 물량은 정체되거나 감소하는 경향을 보임
- 다만, 메탄올 연료의 채택 비중이 톤수 기준으로도 전체 신조선 시장에서 14%에 불과하고 주로 컨테이너선에 편중되어 있는 경향을 보여 전체 선박 시장에서 저탄소 대안 연료의 대세로 자리잡을 것인지 판단하기에는 이른 것으로 사료됨
- 메탄올 이중연료 채택 선박이 본격적으로 증가하기 시작한 '21년에는 중형 탱커 2척을 제외한 19척 전부, '22년에는 발주 선박 28척 전부가 Maersk 등이 발주한 컨테이너선임
- '23년에는 벌크선과 자동차운반선 등 선종이 다양화되었으나 총 85척 중 68척이 컨테이너선으로 메탄올은 컨테이너선을 위주로 이중연료 채택이 증가하는 경향이 뚜렷함
- 이러한 경향은 Maersk의 전략적인 글로벌 그린메탄올의 공급협력 노력과 관련이 있는 것으로 보이며 향후 컨테이너선 시장에서 메탄올이 중요한 비중을 차지할 것이라는 예측의 근거가 될 수는 있으나 전반적인 선박의 연료로서 대세로 자리매김할 것으로 보기에 아직 이룸
- LNG의 이중연료 채택 비중이 감소하였으나 LNG운반선을 포함하면 여전히 메탄올 대비 많은 비중이 선박이 발주되고 있어 향후 추이를 지켜볼 필요가 있음
- 또한, 암모니아 엔진의 상용화 이후 선사들의 반응도 지켜볼 필요가 있음

향후 해운시장의 변화에 따라 개조를 염두에 둔 레디(ready) 타입 선박들도 증가하는 추세이므로 개조 시장의 활성화가 이루어질 것인지도 지켜볼 필요가 있음

- 전통적인 석유연료 선박으로 발주하며 향후 LNG, 암모니아, 메탄올 선박으로의 개조를 위한 레디타입 선박의 주문이 크게 증가하고 있으며 '23년 중 발주 물량의 9%(척수 기준)에 이룸
- 최근 5년간 이러한 석유연료추진선의 레디타입 선박 발주량은 총 367척(5,000GT 이상 기준)에 이르고 있으며 대안 연료의 불확실성이 높은 만큼 향후 더 증가할 것으로 예상됨



- '21년 이후에는 이들 레디타임 선박 중 LNG와 암모니아, LNG와 메탄올, 메탄올과 암모니아 등 3개 연료 중 2가지의 복합적인 레디타임 선박 발주도 늘어나고 있어 설계가 보다 복잡해지는 양상이 일어나는 것으로 추정됨
- 다만, 현재까지 발주 척수는 5년간 총 70척 수준으로 그 숫자는 많지 않음
- 심지어 LNG 이중연료를 채택하면서도 암모니아 레디, 혹은 암모니아+메탄올 레디로 주문하는 선박도 최근 약 100척에 이르고 있음
- 이들 레디타임 선박에 대하여 실제로 경제성 있는 개조가 이루어질 수 있는지 의문이 제기되기도 하고 향후 대안 연료추진 기술의 진보로 의미가 없을 것이라는 주장도 일부 있음
- 그러나 향후 규제가 강화되고 기존 연료의 경쟁력이 심각하게 저하된 경우 고가의 자산인 선박을 폐기하기보다는 개조를 통해 사업을 영위하는 것이 유리하여 미래의 개조시장에 영향을 미칠 가능성도 있음

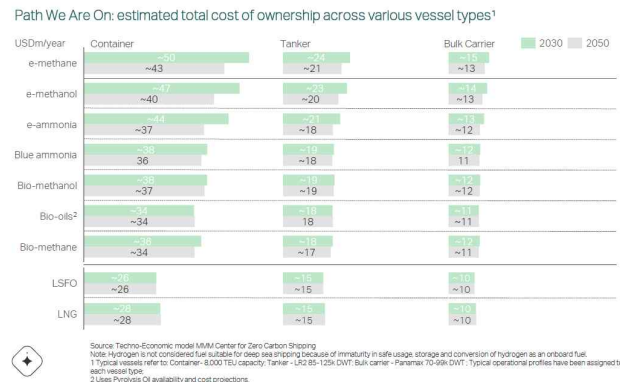
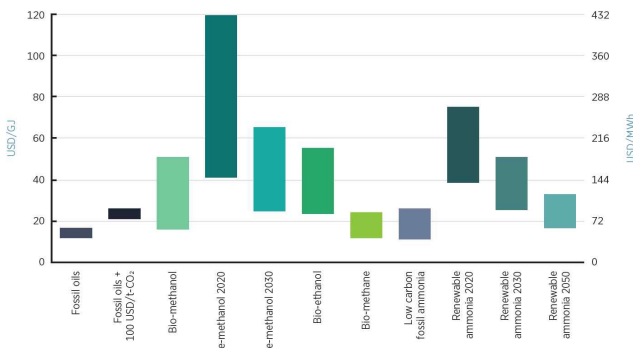


V. 대안 연료의 전망과 시사점

앞서 기술한 바와 같이 3가지의 단기적 대안 연료에는 경제성과 공급능력 등 여러 측면에서 높은 불확실성이 존재함

- 여러 경제성 연구마다 예측시의 가정에 따라 결론이 상이하나 대체로 경제성은 다음과 같이 도출되는 경향이 있음
- 바이오LNG(메탄) > 바이오메탄올 > 블루암모니아 > e-암모니아 > e-메탄올

연료별 경제성 연구결과 사례



자료 : IREANA(2022)

자료 : MMMCZCS(2021)

- 다만, 바이오LNG의 경우 세계적으로 연구개발 중인 메탄슬립 문제의 해결 정도에 따라 경쟁력에 영향을 받을 것으로 보임
- 일부 연구에서는 현재의 유럽 규제 계획으로는 메탄을 배출하는 바이오LNG가 규제 비용을 지출하면서도 경제성이 높아 이의 사용을 막을 방법이 없어 이러한 연료가 경쟁력을 가지지 못할 수준으로 규제를 강화해야 한다고 주장하기도 함⁴²⁾
- 실제로 이러한 주장이 유럽 내에서 받아들여지며 규제의 개정에 반영될 경우 동 연료는 아시아 지역 등 일부 지역에 국한되어 사용될 가능성도 있음
- 바이오메탄과 바이오메탄올 등 바이오 연료는 세계적으로 공급이 제한된 바이오원료에서 추출하여야 하며 또한, 바이오 연료 외에 별다른 대안이 없는 항공업계에 주로 공급될 것으로 예상되어 해운업계의 가용성은 제한적일 전망
- 각국 정부가 세계적으로 합의한 수준으로 온실가스를 감축하기 위해 육상에서도 저탄소 또는 무탄소 연료를 운송, 발전, 산업용 등으로 사용하여야 하는 만큼 바이오 연료 외 나머지 연료들도 해운업계가 이들 부문과 확보 경쟁을 벌여야 하므로 가용성은 불확실함

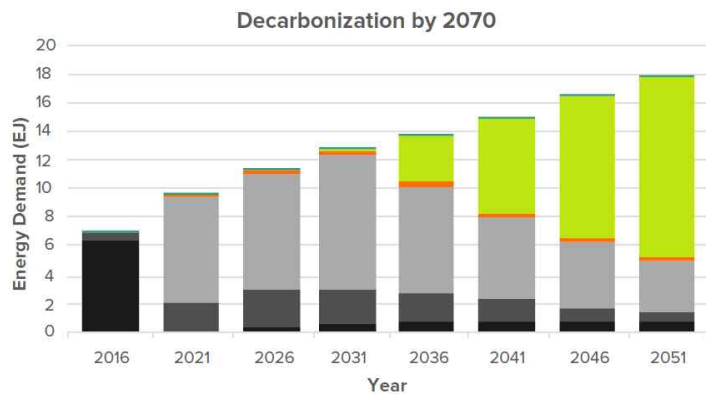
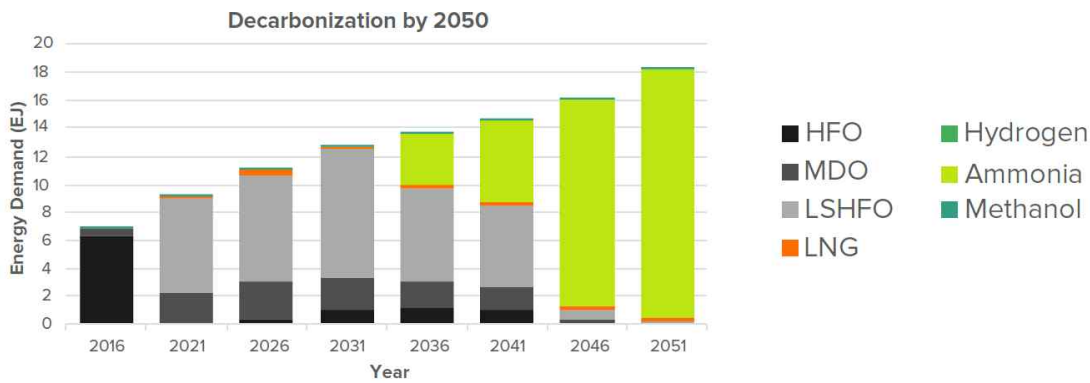
42) MMMCZCS(2022), "We show the world it is possible - What can the industry learn and adopt from regional regulations?"



이러한 불확실성과 확고한 대안의 부재로 인하여 대부분의 미래 연료 관련 연구는 다양한 선박 연료가 공존할 것으로 전망

- LNG연료에 부정적 견해를 제시했던 World Bank의 보고서⁴³⁾는 UMAS의 연구결과를 인용하여 장기적으로 암모니아가 압도적 비중을 차지할 것으로 예상함
- 동 보고서는 해운에서 2050년까지 완전한 온실가스 감축이 이루어지는 경우와 2050년까지 50%의 감축률 그리고 2070년까지 완전한 온실가스 감축이 이루어지는 경우 등 2가지 시나리오에 대해 향후 연료별 수요량을 예측하였으며 아래의 그래프와 같음

World Bank의 중장기적 선박연료 전망



Source: UMAS (2020) LNG uptake "Baseline" case (based on Future 3: "A limited role for LNG")

자료 : The World Bank(2021), "The Role of LNG in the Transition Toward Low and Zero Carbon Shipping"

- LNG를 옹호하는 Sea LNG, 메탄올을 지지하는 Methanol Institute 등도 이해관계에 따라 LNG와 메탄올의 경쟁력 우위를 전망하기도 하지만 대부분의 중립적 연구는 2030년 이후 장기적으로 다양한 선박연료가 공존할 것으로 전망함
- DNV는 2022년 보고서 "Maritime Forecast to 2050"에서 IMO의 정책 강도, 바이오 원료의 가격과 생산량, 재생에너지를 통한 수전해 비용, 탄소포집(CCS)을 통한 화석연료의 활용 비용, 특정 연료의 가격 변동 등을 변수로 24가지 시나리오를 개발하여 이에 따른 연료수요를 전망함

43) The World Bank(2021), "The Role of LNG in the Transition Toward Low and Zero Carbon Shipping"

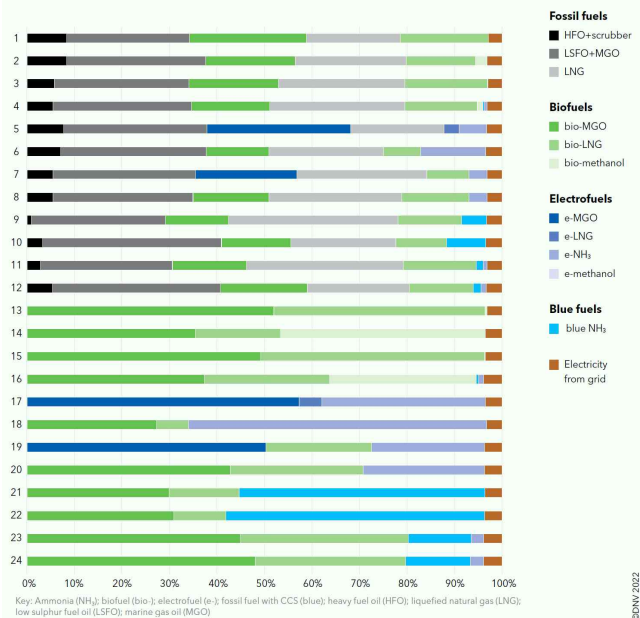


DNV의 2050 선박 연료별 시나리오 및 수요 비중 전망

List of scenarios explored in this study

Decarbonization Pathway	Fuel family variation	Specific fuel cost variation	Scenario No.
IMO ambitions	Very Low bio		1
	Very Low bio	+ 20% bio-MGO and bio-LNG	2
	Low bio		3
	Low bio	+20% bio-MGO and bio-LNG	4
	Very Low electro		5
	Very Low electro	+150% to 200% e-MGO, e-LNG, e-methanol	6
	Low electro		7
	Low electro	+150% to 200% e-MGO, e-LNG, e-methanol	8
	Very Low fossil and blue		9
	Very Low fossil and blue	+20% LNG	10
	Low fossil and blue		11
	Low fossil and blue	+20% LNG	12
Decarbonization by 2050	Very Low bio		13
	Very Low bio	+20% bio-MGO and bio-LNG	14
	Low bio		15
	Low bio	+20% bio-MGO and bio-LNG	16
	Very Low electro		17
	Very Low electro	+150% to 200% e-MGO, e-LNG, e-methanol	18
	Low electro		19
	Low electro	+150% to 200% e-MGO, e-LNG, e-methanol	20
	Very Low fossil and blue		21
	Very Low fossil and blue	+20% LNG	22
	Low fossil and blue		23
	Low fossil and blue	+20% LNG	24

Energy mix in 2050, share of energy use per fuel type, all 24 scenarios



자료 : DNV(2022)

- DNV의 전망 시나리오 24개 중 1~12번의 IMO ambitions는 2050년까지 모든 선박의 배출량을 2008년 대비 50% 저감한다는 초기전략을 의미하는 것으로, 최근 2050년까지 탄소배출량 0의 완전한 탈탄소를 이루는 중기전략으로 수정되어 현재는 13~24번 시나리오만 유효함
- 동사의 2023년 "Maritime Forecast to 2050"에서는 2022년 전망 결과를 토대로 향후 탄소중립 연료의 수요 계산 등에 중점이 맞추어져 본 시나리오와 전망의 변화는 크지 않았음
- 전망은 시나리오별로 다양한 연료의 사용과 비중의 변화를 보여주고 있으며 재생에너지 수전해 비용이나 탄소포집을 통한 화석연료 이용 비용이 낮지 않은 대부분의 경우 바이오연료의 비중이 높게 나타나는 특성을 볼 수 있음
- 또한, IMO의 초기전략 하에서는 2050년까지도 화석연료가 작지 않은 비중을 보였으나 중기전략 하의 시나리오인 13~24번의 경우 2050년 화석연료는 완전히 퇴출되는 것으로 전망함

선사에 대한 조사에서도 다양한 연료군을 함께 사용할 것이라는 응답이 높은 비중을 차지한 연구 결과도 존재함

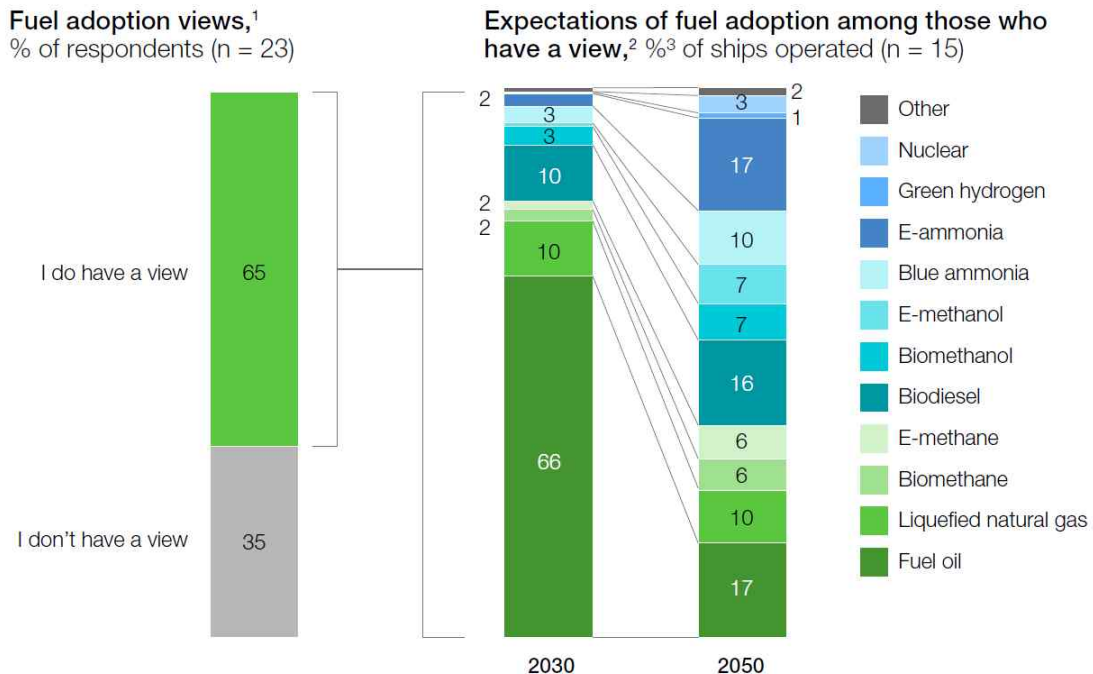
- Mærsk Mc-Kinney Møller Center는 2023년 해운사들을 대상으로 한 조사보고서⁴⁴⁾를 발간하고 해운업계의 미래 연료에 대한 계획과 전망을 제시함
- 보고서는 2022년 10~11월 중 63개 해운업체에 대해 서베이를 요청하였고 이 중 응답한 29개사의 결과를 정리함

44) MMMCZCS(2023), "The shipping industry's fuel choices on the path to net zero"



- 응답한 29개사는 컨테이너선, 탱커, 벌크선, 가스선, 자동차운반선, 크루즈, 예인선, 해양지원선 등 다양한 선종을 운영하는 선사로 구성되어 있으며 세계 선대의 20%를 운영하는 대형사들이라 밝힘
- 첫 번째 조사결과로, 46%의 선사가 1개 이상의 저탄소 연료에 대한 시험운항을 실시하고 구축계획을 수립하였으며 8%의 선사가 시험운항을 하였으나 아직까지 수용하지 않았다고 응답한 반면, 35%의 선사가 시험계획을 포함 아무런 계획이 없다고 응답함
- 무대응 선사의 비중은 앞장에서의 전통적 석유연료 채택선박의 비중이 50~60%에 이르는 점을 감안하면 높은 수준이 아니나, 대형선사에 대한 조사 계획에서도 35%나 되는 선사가 무대응을 응답한 점은 주목할만 함
- 두 번째 조사결과로서, 연료채택에 대한 견해가 있느냐는 질문에 23개사 중 65%가 그렇다고 응답하였고 이들 65%의 선사에 대해 미래 연료에 대한 기대를 묻는 질문에는 매우 다양한 연료가 제시되었음
- 응답선사들의 보유 선박의 가중치로서 응답을 정리한 결과로는 2030년까지 석유계 연료유와 화석 LNG가 76%의 비중을 차지하다가 2050년 27%로 감소할 것으로 기대됨
- 2050 연료로서 바이오메탄올과 e-메탄 등 LNG 동일성분 연료가 12%, 바이오디젤 16%, 바이오메탄올과 e-메탄올 14%, 블루암모니아와 e-암모니아가 27% 등으로 조사되어 암모니아의 비중이 다소 높게 나타났으나 절대적 비중의 연료 없이 선사들은 고른 기대감을 나타내고 있음

조사대상 선사의 미래 연료 관련 기대



¹Question: Do you have a view on what types of fuel your fleets will run on in 2030 and 2050?

²Question: What is your expectation of your fleet's adoption of the following fuels?

³Weighted by fleet size.

Source: Survey of shipping companies conducted October–November 2022.

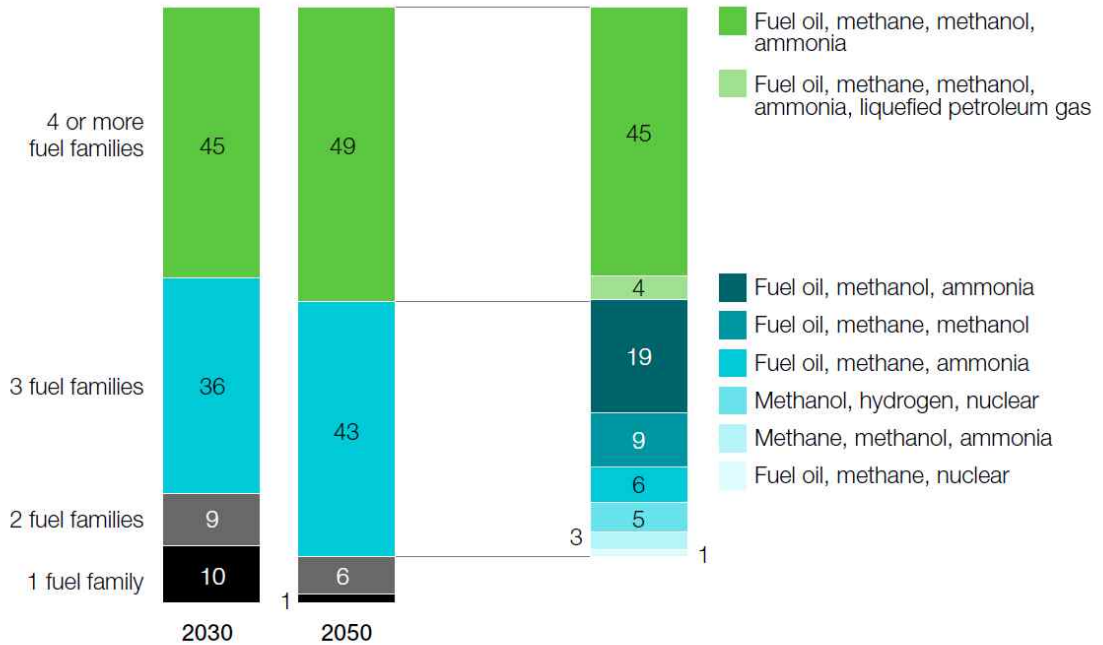
자료 : MMMCZCS(2023), "The shipping industry's fuel choices on the path to net zero"



- 대부분의 선사는 미래에 다양한 연료를 운영할 것으로 기대하고 있으며 2050년에는 92%의 선대가 3개 이상의 연료군으로 운영될 것으로 답변함
- 49%의 선대는 4개 이상의 연료군으로 선대를 운영할 것으로 기대함

조사대상 선사의 미래 연료운영군 관련 기대

Expectations of fuel families,¹ by fleet,² %³ of ships operated (n = 15)



¹Fuel families are combinations of interchangeable fuels, such as heavy fuel oil, marine gas oil, marine diesel oil, and biodiesel; liquefied natural gas, biomethane, and synthetic/e-methane; biomethanol and synthetic/e-methanol; green and blue ammonia; green and blue hydrogen; nuclear; liquefied petroleum gas.
²Question: What is your expectation of your fleet's adoption of the following fuels?
³Weighted by fleet size.
 Source: Survey of shipping companies conducted October–November 2022

자료 : MMMCZCS(2023), "The shipping industry's fuel choices on the path to net zero"

- 탄소중립 연료로의 전환을 가속화하기 위한 요인을 조사한 결과 80% 이상의 응답자들이 다음의 4가지 요인을 꼽음
- 대안 연료의 풍부한 가용성
- 대안 연료의 비용 하락
- 그린연료의 프리미엄에 대한 고객들의 지불 의지
- 규제의 변화

지금까지 살펴본 바와 같이 해상탄소중립을 위한 연료의 변화에는 불확실성이 매우 높고 선사들은 혼란스러운 상황임

- 앞서 기술한 Mærsk Mc-Kinney Møller Center의 조사연구에서 선사들이 응답한 바와 같이 대안 연료의 가용성과 비용은 심각한 문제로 평가됨



- IMO의 중기전략 강화와 EU의 환경규제는 이미 시행일정이 확정되어 있고 규제비용은 단기적으로도 증가할 것으로 보이나 저탄소 또는 무탄소 대안 연료의 생산 투자는 아직까지 크게 부족하고 공급 계획 역시 불확실한 상황임
- 이러한 상황에서 선사들이 계획과 전략을 수립하기에는 무리가 있음
- 연료 공급부족이 예견되는 상황에서 경제성에 대한 우려는 매우 심각하며 선사들이 이를 감내할 수준이 될 것인지 예견하기 어려움
- 상당수의 연구들이 2050년까지 재생에너지 대량 보급 등으로 청정연료의 비용이 현재 연료비용 대비 200% 이내로 하락할 것으로 예측하고 있음
- 그러나 과도기인 2040년대까지 규제비용을 포함한 연료비용은 현재 수준의 약 3배 내외가 되거나 높게는 6배 수준까지 예측되는 연료도 존재함
- 또한, 이는 생산 비용 하락에 근거한 예측이며 선박의 건조량에 따른 수급 불안이 있거나 연료의 생산설비 투자 지연으로 공급부족이 발생할 경우 가격의 변동은 예상하기조차 어려움
- 이러한 수급에 의한 가격 변동이 없더라도 많은 연구의 결과는 '30~'40년대 해상운송비용이 현재 수준의 2~3배 수준으로 상승할 가능성이 있음을 암시함
- 이처럼 연료가격의 상승이 지나칠 경우, 페널티 비용을 부과하고도 경제성을 갖출 수 있는 화석연료로의 회귀를 막기 위해 규제가 강화될 가능성도 있어 선사들의 비용압박은 더욱 심각해질 우려가 있음
- 실제 유럽의 일부 연구에서는 화석연료가 경쟁력을 가지지 못하도록 Fuel EU Maritime이나 세금 제도 등을 강화할 필요가 있다는 주장이 수치와 함께 제시되기도 함
- 이러한 비용이 운임에 전가되어 선사들이 해운업을 정상적으로 영위할 수 있을 것인지 역시 불확실하여 선사들의 혼란은 가중되고 있음
- 그 외에도 선박기술의 발전 방향, 선상 탄소포집(on board CCS)의 온실가스 감축 인정 여부, 규제의 강화 방향, 농업 생산기술과 바이오매스 공급능력 변화 등 선박연료의 경쟁력에 영향을 미칠 요인이 많아 미래 해운시장에서의 불확실성은 매우 높은 상황임
- 이에 따라 국내 해운산업의 경쟁력 유지 또는 강화를 위해서는 다음의 문제들을 관련 업계 간 협력과 공공-민간 협력 등을 통하여 함께 심도있게 검토하고 해운업 전략을 모색할 필요가 있음
- 세계적인 대안 연료의 투자 추이와 예상
- 국내 대안 연료 생산설비 투자 필요성과 공급 계획
- 청정수소의 수입, 바이오 매스 필요량 예측 등 원료공급 관련 문제
- 국내 선사들의 주요 취항 지역에서의 규제 강도와 연료 가용성
- 그 외 해운사의 경쟁력 관련 기회 및 위협요인 도출과 대안 등



해운업 외적으로도 파급될 문제에 대하여 연구하고 제도에 반영할 필요도 있음

- 세계적인 수출입 물류비용의 급상승은 각종 비용 상승과 물가 상승을 초래할 가능성이 크며 이러한 시나리오가 현실화될 경우에 대한 연구와 대안 마련이 필요할 수 있음
- 지금까지 인류가 해상운송에 사용한 화석연료는 가장 낮은 비용의 연료로, 청정연료로의 전환 자체만으로도 수출입에 필요한 해상운송 비용의 급상승은 불가피할 전망
- 이러한 비용의 상승은 과잉선복량과 해운업의 저성장 등으로 과도기 초기에 운임에 전가되지 못하고 규제비용 등이 고스란히 해운사의 부담으로 돌아와 경쟁력이 낮은 선사들이 대량 퇴출될 가능성이 있음
- 이후, 시장에서 조정된 선복량으로 선사들은 본격적인 운임 상승을 추진하며 세계적인 수출입 물류비용의 급등을 가져올 가능성이 높음
- 이러한 해상운송 비용의 상승은 물가상승으로 이어지고 경제에 충격을 미칠 가능성이 있음
- 이러한 해상운송비용의 증가가 큰 폭으로 이루어질 경우 수출입에 의존하는 우리의 경제와 산업구조는 지속가능할 것인지에 대한 고민도 필요한 것으로 보임
- 우리나라는 제조업 비중과 수출의존도가 높은 구조를 가지고 있으며 해상운송 비용의 급증은 전체적인 국가 경쟁력에 악영향을 미칠 가능성도 있음
- 특히, 부존자원의 부족으로 원자재와 기자재, 에너지, 식량까지 수입에 의존하는 구조로 수입 시 높은 비용을 부담하고 이를 가공한 후 수출 시까지 이중의 해상운송 고비용을 감수하여야 함
- 이러한 구조적 기회를 활용하여 일부 선진국이나 자원부국들은 디지털 기술을 활용한 인건비 비중 감소와 효율적 물류시스템의 구축을 통하여 제조업을 되살릴 기회를 맞을 수도 있음
- 이러한 경우 제조업 수출 의존도가 높은 우리 경제와 산업이 이대로 지속가능할 것인지, 대안은 무엇인지 등의 문제도 고민하고 연구할 필요가 있음
- 또한, 현재 세계적으로 많은 의지와 노력이 경주되고 있는 탄소중립 이슈와 관련하여 전 세계가 이로 인해 발생하는 높은 비용을 받아들일 준비가 되어있는지, 앞으로의 세계 경제 체제는 어떠한 모습으로 변할 것인지 등을 국제적 협력을 통해 공동연구하고 그 전개를 예측하여 우리 경제의 변화를 위한 제도적 지원에 반영할 필요도 있음

현재의 혼란과 불확실성의 문제는 단순히 해운업만의 문제가 아니며 국가가 종합적인 대응 능력을 갖추어야 할 필요성이 있고 이를 위한 총체적인 연구와 지원이 필요할 것임

- 앞서 기술한 바와 같이 현재 벌어지고 있는 해상탄소중립의 문제는 해운업계 또는 조선업계만의 단순한 문제가 아닌 보다 종합적인 문제로 접근할 필요가 있음
- 상반기 중 Maersk의 대형 컨테이너선에 대한 중국 발주는 조선업 경쟁력에 연료공급 능력 등 국가적 역량이 영향을 미칠 수 있는 사례로 시사하는 바가 크며, 점차 조선업계의 경쟁력만이 핵심이 아님을 암시함



- 상반기 중 Maersk가 5,000TEU 이상급 선박으로는 처음으로 9,000TEU급 대형 메탄올추진 컨테이너선을 중국 조선소에 시리즈로 발주하였으며 이는 그린 메탄올 공급과 관련하여 점차 협력을 강화하고 있는 중국과의 관계를 고려한 조치로 추정됨
- 해운업 역시 낮은 가격에 선박을 확보하여 저비용으로 정확한 운송서비스를 제공하는 것이 경쟁력의 핵심이었던 틀에서 벗어나, 보다 복잡한 경쟁력 체계를 갖추어야 함을 알 수 있음
- 해운업 역시 운항 지역의 규제 강도, 적절한 연료의 선택, 규제 및 연료비용 최소화, 연료의 공급선 확보 등 기존 비즈니스와 다른 역량이 요구되고 있는 만큼 연구와 역량 강화, 전략적 대응 능력을 확보하여야 하는 문제에 직면하고 있음
- 우리 해운업계에는 중건 이하급 선사의 비중이 높고 대응능력이 부족한 선사들이 많아 이러한 문제를 어떻게 해결하며 역량을 강화할 것인지를 문제는 최신 친환경 선박의 확보에 못지 않게 중요한 문제가 될 것임
- 이처럼 조선, 해운산업의 문제도 복잡해 보이나 이러한 문제는 개별 산업만의 솔루션을 찾기 보다 국가적인 탄소중립의 노력 속에서 경제, 산업, 에너지, 외교 등 총체적인 연구가 이루어지고 해사산업은 그 속의 중요한 일부로서 다루어지며 해결책을 찾는 것이 효율적일 수 있음
- 이러한 노력은 유럽의 접근방식으로, 국가적 탄소중립 노력 속에 해사사업의 경쟁력을 위한 자원을 할당받고 산업의 문제점을 국가적 틀 속에서 해결하려 노력하는 가운데 효율적 경쟁력 강화가 이루어질 가능성이 높음
- 여전히 미래의 대안 연료는 불확실하며 우리 해운업계도 혼란스러우나 국가는 해사산업의 문제 해결을 위한 연구에 투자 및 지원하고 불확실성을 제거해 나가는 노력이 필요함
- 현재 산업통상자원부의 조선산업 정책은 기술력 등의 초격차 확보에 주력하고 있으며 해양수산부의 해운산업 정책은 친환경 선박의 확보 지원에 초점을 맞추고 있음
- 그러나 조선업에서 기술력은 중요하지만 경쟁력에서의 비중이 축소될 수 있으며 초격차는 국가적 역량이 뒷받침 될 때 가능한 양상이 벌어지고 있음
- 또한, 해운업의 친환경선박 확보 역시 중요한 문제이나 어떤 연료를 채택해야 할지도 결정하기 어려운 시점에서 선박확보만을 지원하는 것은 실효성을 거두기 어려우며 보다 전략적 지원 노력이 필요함
- 현재 연구와 제도적 보완이 필요한 문제는 우리 선박 및 우리 항만에 기항하는 선박에 대한 연료공급 대안, 자체적으로 충분한 공급이 불가할 경우 국제적 협력 방안, 국내 선사들의 운항 지역의 규제 움직임과 탄소중립 정책에 따른 효율적 해운업 전략 도출, 육상에서의 국가적 탄소중립 노력 속에 타 부문과의 연료 확보 경쟁 문제, 현재의 불확실성 속에서 금융리스크 해소 문제, 우리 산업의 역량이 최대한 발휘될 수 있는 방향으로의 국제 해운정책 문제 등 수 없이 많은 과제가 있음
- 국가는 모든 역량을 동원하여 이러한 문제들을 도출하고 연구하는 활동을 지원할 필요가 있으며 이러한 노력을 통해 불확실성을 제거하는 노력이 절실함
- 탄소중립 문제는 인류가 한 번도 가보지 않은 불확실한 길을 개척하는 것으로 모든 나라가 직면한 매우 어려운 문제이며 우리나라 역시 총력을 기울여 대응해야 할 것임



※ 참고문헌

- 박상민(2022), “암모니아 연료추진선박 및 운반선 개발 현황”, Kormarine Conference 2022 발표자료, 한국조선해양
- 양종서(2023), “Nor-Shipping 2023에 나타난 선박 시장의 이슈”, 한국수출입은행 해외경제연구소
- 한국선급(2023a), “IMO News Final - MEPC 79”, 한국선급
- 한국선급(2023b), “IMO News Final - MEPC 80”, 한국선급
- 한국선급 연구본부(2019), “친환경 미래선박 연료전망 - 선박연료로써의 암모니아”, 한국선급
- 한국해사협력센터(2023), “IMO 소식 & 국제해사동향”, 제 23-28호, 해양수산부·한국해사협력센터
- Air Pollution and Energy Efficiency Team of IMO Secretariat(2023), “Update on the IMO Future Fuels& Technology Project(FFT Project)”, IMO
- Alfa Laval·Hafnia·Haldor Topsoe·Vestas·Siemens Gamesa(2020), “Ammonfuel - an Industrial View of Ammonia as a Marine Fuel”, Hafnia
- Cames, M. 외 2인(2021), “Ammonia as a marine fuel - Risks and Perspectives”, Öko-Institute E.V.
- Carlo, R. 외 5인(2020), "Aggregate Investment for the Decarbonisation for the Shipping Industry", UMAS
- Chryssakis, C.(2023), “Methanol as fuel heads for the mainstream in shipping”, DNV
- Chryssakis, C., Pewe, H.(2021), “LNG as Ship Fuel”, DNV (Webinar PT자료)
- Commer, B. 외 3인(2022), “Comparing the Future Demand for, Supply of, and Life-Cycle Emissions from Bio, Synthtic, and Fossil LNG Marine Fuels in the European Union”, ICCT
- DNV(2022a), “Alternative Fuels for Containerships”, DNV
- DNV(2022b), “Maritime Forecast to 2050 - Energy Transition Outlook 2022”, DNV
- DNV(2023), “Maritime Forecast to 2050 - Energy Transition Outlook 2023”, DNV
- EU Parliament(2023), “Sustainable Maritime Fuels 'Fit for 55' package: The Fuel EU Maritime Proposal”, Briefing EU Legislation in Progress
- Forsyth, A.(2023), "Attention All Shipping - Methanol Gains Momentum", Longspur Research
- Green Shipping Program(2021), “Report for pilot Ammonia as Fuel”, Green Shipping Program
- IRENA(2021), “Innovation Outlook - Renewable Methanol”, International Renewable Energy Agency & Methanol Institute
- IRENA(2022), “Innovation Outlook - Renewable Ammonia”, International Renewable Energy Agency & Ammonia Energy Association
- Lloyd's Register & MMHCZCS(2023),“Recommendations for Design and Operation of Ammonia-Fuelled Vessels Based on Multi-disciplinary Risk Analysis”, Lloyd's Register
- MMHCZCS(2021), "We show the world it is possible - Industry Transition Strategy", Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping
- MMHCZCS(2022), "We show the world it is possible - What can the industry learn and adopt from regional regulations?" , Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping
- MMHCZCS(2023a), "Managing Emissions from Ammonia-Fueled Vessels" , Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping
- MMHCZCS(2023b), "The shipping industry's fuel choices on the path to net zero" , Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping



Secretary-General of the 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", Council of the European Union

Sea LNG(2022a), "LNG - a Fuel in Transition", Sea LNG

Sea LNG(2022b), "The Role of bio-LNG in the Decarbonisation of Shipping", Sea LNG

SGMF(2023), "Ammonia as a Marine Fuel - an Introduction", the Society for Gas as a Marine Fuel

Späth, N.(2023), "GCMD completes study and readies stakeholders for first ship-to-ship pilot to transfer ammonia in Singapore", DNV

Wissner, N. 외 3인(2023), "Methanol as a marine fuel - Advantages and limitations", Öko-Institute E.V.

The World Bank(2021), "The Role of LNG in the Transition Toward Low and Zero Carbon Shipping", The World Bank

再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議(2023), "水素基本戦略(案)", 일본 정부

웹페이지

유럽 바이오가스협회(<https://www.europeanbiogas.eu/>)

덴마크공과대학 Power-to X 관련 페이지 (<https://baeredygtighed.dtu.dk/en/teknologi/power-to-x>)

CE Delft (<https://cedelft.eu/>)

ClassNK (<https://www.classnk.or.jp/>)

Climate Action of European Commission (<https://climate.ec.europa.eu/>)

CMA-CGM (<https://www.cmacgm-group.com/>)

DNV (<https://www.dnv.com/>)

Lloyd's Register (<https://www.lr.org/>)

Maersk (<https://www.maersk.com/>)

NoGAPS (<https://www.nordicinnovation.org/programs/nordic-green-ammonia-powered-ships-nogaps>)

Nordsol (<https://nordsol.com/>)

Say No to LNG (<https://saynotolng.org/>)

ShipFC (<https://shipfc.eu/>)

United States Environmental Protection Agency, EPA (<https://www.epa.gov/>)

신문기사

가스신문(2021. 10. 20), "독일, 탄소중립 합성 LNG 세계 최초로 병커링 시도"

가스신문(2021. 11. 4), "네덜란드 최초 바이오LNG공장 가동"

경남매일(2023. 4. 12), "경남 차세대 친환경 암모니아 선박 개발"

Offshore Energy (2020. 8. 12), "NYK, JMU and ClassNK Ink R&D Deal to Commercialise Ammonia-Fuelled Ships"

Offshore Energy (2023. 1. 13), "Maersk Growth invests in green methanol"

Offshore Energy (2023. 3. 27), "Maersk partners with SIPG on green methanol bunkering"

Ship & Bunker(2023. 6. 15), "MSC Cruises to Take on Synthetic LNG from Gasum"

Splash(2023. 4. 6), "Say No To LNG shipping campaign launches"