KRISO 선박해양플랜트연구소
KOREA RESEARCH INSTITUTE OF SHIPS & OCEAN ENGINEERING

IMO 기술동향 편집



International Maritime
Organization Technology
trend information

United Nations



IMO
기술동향
정 보

KRISO

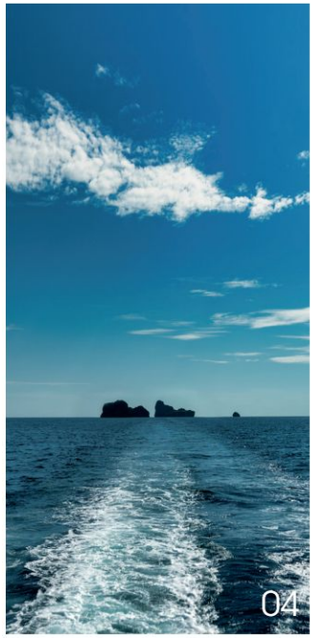
IMO
기술동향
정 보

Contents

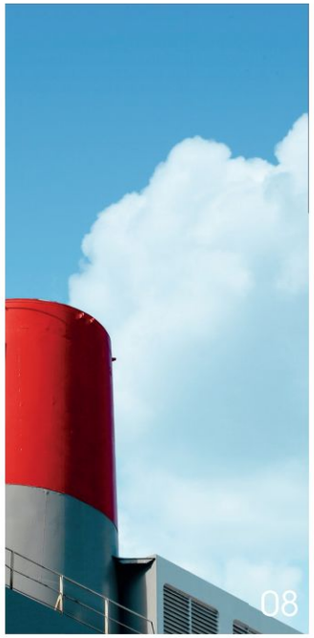
International Maritime Organization
Technology trend information

본 IMO 기술동향정보집은 KRISO 주요사업(국제규제·표준개발 선도를 위한 글로벌협력 및 기술기반 의제개발 연구, PES4110) 외부 연구용역으로 제작되었으며, 유럽조선해양전문가협회(Europe–Korea Marine and Ocean Engineers Association, EKMOA) 여러 전문가들의 수고로 작성되었습니다.

IMO 기술동향정보

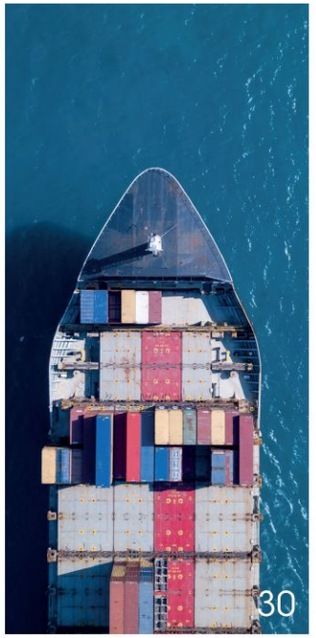


1 서론 04



2 무탄소 선박 연료 추진 기술개발 동향 08

제1절 암모니아
제2절 수소
제3절 선박용 액체수소 저장 기술 및 소재
제4절 수소연료 내연기관 개발 동향
제5절 수소 연료전지 개발 동향



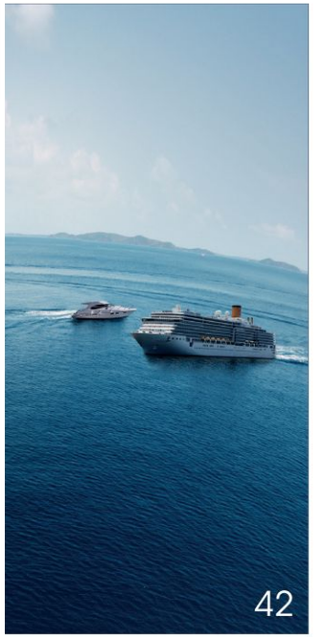
3 무탄소 선박 연료 추진기술 관련 유럽 주요국 국제기구 활동 30

제1절 ISO 표준 개발 현황
제2절 IMO 의제 개발 현황



4 이산화탄소 포집기술 개발동향 및 프로젝트 38

제1절 이산화탄소 포집 기술 개발동향
제2절 이산화탄소 포집 기술 관련 프로젝트
제3절 ISO 표준 개발 현황
제4절 IMO 의제 활동 현황



5 그린 수소/그린 암모니아 생산 계획 및 유럽 주요국 프로젝트 42

제1절 수소, 암모니아 생산계획 및 프로젝트 관련

제1장



introduction

서론

경제, 산업, 기술 등의 발전 이면에는 지구온난화와 같은 많은 문제점 또한 증가한 것이 사실이다. 지구온난화로 인한 평균 온도의 상승 및 그로 인한 다양한 자연재해, 지속적인 해수면 상승 등의 기후변화에 대한 심각성은 이제 더 이상은 미룰 수 없는 인류의 핵심 사안이 되었다.

인류는 과거부터 지속적인 발전을 이룩하여 왔고, 그 혜택으로 과거보다 편안한 삶을 영위하고 있다. 하지만 이러한 경제, 산업, 기술 등의 발전 이면에는 지구온난화와 같은 많은 문제점 또한 증가한 것이 사실이다. 지구온난화로 인한 평균 온도의 상승 및 그로 인한 다양한 자연재해, 지속적인 해수면 상승 등의 기후변화에 대한 심각성은 이제 더이상은 미룰 수 없는 인류의 핵심 사안이 되었다. 이러한 기후변화를 억제하기 위해 지속적으로 온실가스 규제를 강화하고 있으며, 이것의 일환으로 2015년 제21차 당사국총회(COP21, 파리)에서는 산업화 이전 대비 지구 평균 온도 상승을 2℃ 이하로 유지하고, 더 나아가 1.5℃ 상승으로 억제하기 위해 노력해야 한다는 내용을 포함한 파리 협정 (Paris Agreement)을 채택하였다.

국제해사기구 (International Maritime Organization, 이하 IMO) 또한 이러한 환경 보호의 일환으로 해양에서의 환경 규제를 지속적으로 강화하고 있다. 2020년도 부터 모든 선박에서는 연료유황함유량을 0.5% (m/m) 이하로 사용하여야 하며, 2050년까지 해운 온실가스 총 배출량을 2008년 대비 50%로 감축하는 것을 목표로 하고 있다 (Perčić, Vladimir et al, 2020). 이러한 목표 달성을 위해서는 기존 연료 대비 약 20%의 온실가스 저감 효과만을 가지는 LNG 연료의 사용만으로는 한계가 있으며, 궁극적으로 온실가스 배출을 획기적으로 감소시킬 수 있는 암모니아, 수소와 같은 무탄소 연료가 선박에 반드시 적용되어야 한다.

이뿐만 아니라 IMO 규제에 따라 다음과 같은 시장 기여 효과들이 있었으며, 차후 수소와 같은 친환경 연료가 도입됨에 따라 발생 할 수 있는 경제 효과를 선점하기 위해서 관련 정책 및 기술의 연구 개발에 박차를 가해야 하겠다.

에너지원 전환의 환경적 배경

일반적으로 선박은 HFO(Heavy Fuel Oil)와 MDO (Marine Diesel Oil), MGO (Marine Gas Oil)을 사용하여 운항한다. 이들 연료를 사용 시 황산화물 (SO_x), 질소산화물 (NO_x), 이산화탄소 (CO_2)등의

배출이 발생하며, IMO에 따르면 전 세계 황산화물 (SO_x) 발생량의 약 15%, 질소산화물 (NO_x) 발생량의 약 13%, 이산화탄소 (CO_2) 발생량의 약 3%가 선박에 의해 발생한다(International Maritime Organization (IMO) 2014, International Maritime Organization (IMO) 2020).

항만 인근의 주 오염원은 선박으로 컨테이너선 1척이 트럭 약 50만 대분의 환경오염물질 배출하며 (CE Delft 2018), 선박 운항에 따른 대기오염 배출은 연안 400km 이내에서 이루어진다는 점을 감안하면 선박으로 인한 항만 도시의 환경적 피해가 심각한 수준임을 알 수 있다. 이를 해결하기 위한 가장 효율적인 방안은 미세먼지 저감을 위해 저탄소 및 무탄소 연료의 친환경 선박과 클린항만 인프라를 구축하는 것이다.

2018년 IMO 초기전략 채택 이후, 신조선의 EEDI 규정 강화에 대한 논의를 진행하는 한편, 2030년까지 2008년 대비 국제해운의 탄소 집약도(Carbon Intensity)의 40% 감축 수준을 달성하기 위해 MEPC 75차 회의('20년 11월)에서 새로운 현존선 규제 도입을 위한 MAPROL 협약 개정을 승인하였다. 현존선에 대한 기술적인 조치로 EEDI와 유사한 현존선 에너지 효율지수(Energy Efficiency Existing Ship Index, 이하 EEXI)와 운항 중 배출 감소를 위한 탄소 집약도 지수(Carbon Intensity Indicator, 이하 CII)가 도입되었다. EEDI규제를 충족하기 위해 선박의 대형화, 선형 및 추진장치 효율화 등의 기술적 수단이 적용되고 있으며 이외에도 저속운항, 운항 최적화 등의 운항적 조치를 통해 이산화탄소의 배출을 저감할 수 있다.

하지만 이러한 수단만으로는 지속적으로 강화되고 있는 IMO 온실가스 배출 저감 목표달성이 불가능할 것으로 예상됨에 따라 저탄소 또는 무탄소 연료 사용이 주목받고 있다. 다음 장에서 무탄소 선박 연료의 추진 기술개발 동향을 알아보고 이와 관련된 유럽 주요국 국제기구 활동에 대해 논하고자 한다.

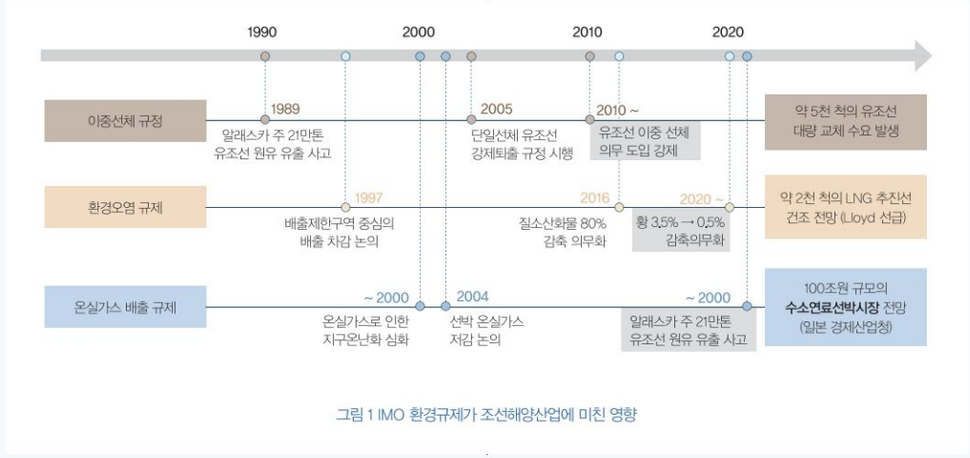
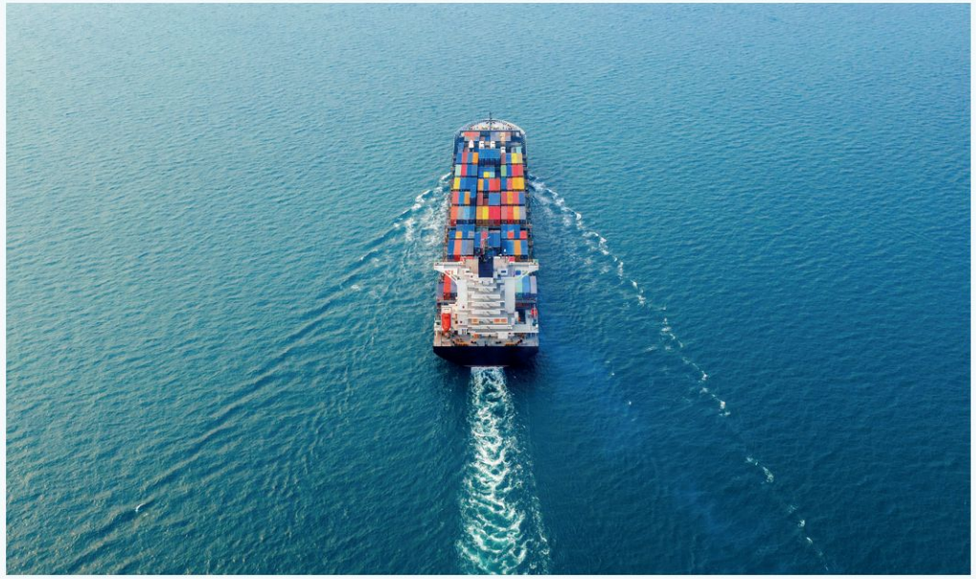


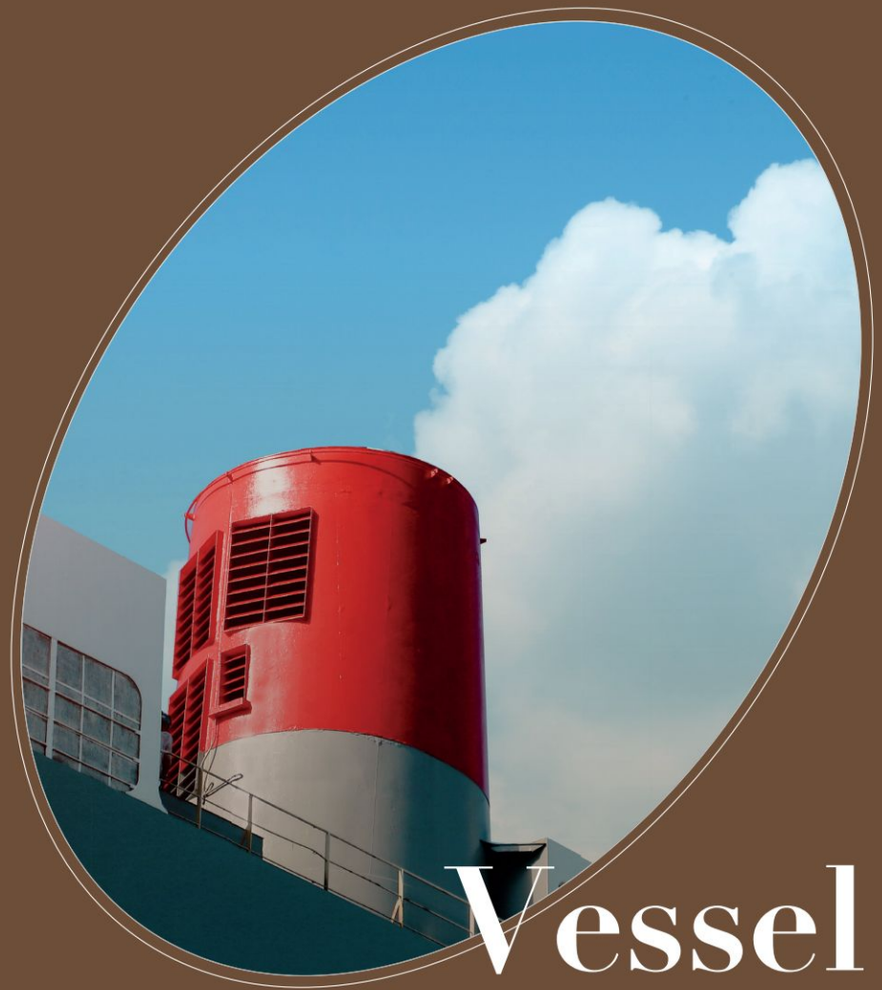
그림 1 IMO 환경규제가 조선해양산업에 미친 영향



이를 해결하기 위한 가장 효율적인 방안은 미세먼지 저감을 위해
저탄소 및 무탄소 연료의 친환경 선박과 클린항만 인프라를 구축하는 것이다.



제2장



Vessel

무탄소 선박 연료 추진 기술개발 동향

최근 암모니아는 선박의 무공해 연료의 공급원으로서 폭넓은 관심을 불러 일으키고 있는 가운데, 선박 및 기타 산업에서 암모니아 사용에 대한 현주소를 분석하여, 선박 연료로 사용시에 필요한 주요 고려 사항과 난제들이 어떤 것들이 있는지를 알아보는 것은 상당히 중요한 일로 자리잡고 있다.

제1절 암모니아

암모니아는 수소보다 저장하기 쉽다는 주요 이점이 있고, 주변 조건이 동일한 경우, 저압에서 LPG와 거의 동일한 형태로 저장이 가능하다. 따라서, 에너지 단위당 저장 비용은 수소, 배터리의 전기 또는 LNG 보다 훨씬 저렴하기 때문에 선박 연료로써 큰 장점을 가질 수 있다. 또한, 암모니아는 일반적으로는 산업 공정에서 천연 가스를 통해 생산이 되기는 하지만, 연료자체에 탄소를 함유하지 않아 친환경 연료로 각광을 받고 있으며, 또한 신재생 에너지를 통해 암모니아를 생산하는 경우, 보다 큰 환경 이점을 얻을 수 있을 것으로 기대되고 있다 (DNV 2020). 그러나 독성 및 저인화점을 갖는 연료로서의 선박 연료 사용에 대한 경험 부재 및 에너지 밀도가 상대적으로 낮음 등의 단점 등도 함께 가지고 있어서 추가적인 분석이 필요하다.

따라서, 암모니아 생산 및 활용, 엔진 및 탱크 기술, 독성을 포함한 안전 고려사항, 환경 성능, 경제적 타당성을 포함하여 선박 연료로서의 암모니아에 대한 전반적인 이해가 중요하다.

제1항 암모니아 추진 기술 개발 동향

암모니아가 최초로 이동 수단의 추진 연료로 사용된 것은 1872년경으로 거슬러 올라가야 한다. 미국의 뉴올리언스 (New Orleans) 에서 육상의 암모니아 추진 전차에 대한 실증 테스트를 거치면서, 그 연구 결과가 미국 특허 105,581로 제출되었다. 최초 암모니아 추진 시스템은 내연 기관에 저압의 암모니아가 주입되어 추진력을 얻고, 배기 가스는 수용액에 흡수되어 가스 손실을 방지하도록 하면서 암모니아가 중앙 설비를 통해 재생이 되는 구조로 설계 되었다 (Lamm 1872).

암모니아 연료가 내연 기관에 실제로 적용된 사례는 1935년에 Ammonia Casale의 프랑스 특허 799,610 및 802,905를 통해 제시되어 있다. 본 아이디어는 당시 주요 이동 수단이었던 기관차에 초기 적용되어 '불없는 기관차 (Fireless locomotive)'를 개발 하였다. 암모니아 기관차는 미국과 프랑스 등에서 잠시 인기를 누렸지만, 곧 전기 기관차 및 디젤 엔진의 발명으로 인해 인기를 잃게 되었다. 반면에, Rudolf Diesel 역시 1890년대에 유사한 암모니아 스팀

엔진 개발을 위한 노력을 기울였다. 그러나, 압축 실린더를 테스트하던 도중에 발생한 연료 폭발에 의하여 심각한 부상을 당한 후에, 디젤 엔진의 발명으로 연구/개발 방향을 전환하였다 (Talented-WORLD 2020).

(a) 과거 암모니아 추진 시스템 개발

2차 세계 대전 기간 중에는 연료 부족을 해결하기 위해서 벨기에서는 1940년대 초반 100대의 차량과 8대의 버스에 암모니아와 압축 석탄 가스(주로 H2와 CO로 구성됨)를 이용한 혼합 추진연료를 성공적으로 사용하였다. 압축 석탄 가스를 단독으로 사용하기에는 출력이 너무 부족했고, 암모니아의 경우 에너지함량은 낮지만 가솔린 및 수소와 달리 연소 중에 이산화탄소가 형성되지 않고, 팽창률이 좋아서 엔진 내에 소기(공기) 소모량을 줄일 수 있는 장점이 있었다. 또한, 옥탄가는 130으로 압축률이 높아서, 효율성은 수정 전의 디젤 엔진과 상당히 동등한 것으로 나타났다 (Koch 1945).

1960년대에는 미 해군에서도 암모니아가 수소 및 과산화수소 대비 추진 연료로써 큰 잠재력을 가지고 있다는 점을 확인하였으나, 함대를 암모니아 추진 선으로 전환하는 것은 극도로 비용이 많이 들고 비실용적이라는 점에서 상업화가 되지는 못하였다. 특히, 암모니아는 자연 발화 온도(630℃)가 높은 반면, 화염 속도가 낮고, 가연성 한계 범위가 (15-28%) 좁고 기화열이 높은 등의 한계가 있어, 암모니아를 추진 연료로 사용하기 위해서는 당시 스파크 점화 엔진의 적용이 필요했었다. 이때문에 미 해군에서는 암모니아 외에 수소나 탄화수소를 사용하여 엔진의 성능을 향상시키는데 집중하게 되었다 (Garabedian and Johnson 1966).

반면, 최근 들어서, 일부 암모니아를 연료로 사용하는 시험 차량이 성공적으로 제작되고 있다. 2007년 미국에서는 암모니아의 높은 옥탄가를 이용하여, 암모니아-가솔린 혼합 연료를 통하여, 노킹 없이 높은 압축비의 형성이 가능한 자동차 엔진을 개발하였으며, 실제 자동차에 탑재되어 미국 횡단 테스트 주행을 통해 그 효과가 검증되었다. 특히, 암모니아는 디젤에 비해 화학량적으로 공연비가 낮고 동일한 공기량 대비 더 많은 암모니아를 연소할 수 있어서, 낮은 에너지 함량을 충분히 보상하여, 높은 출력을 가진 엔진을 제작할 수 있게 되었다(NH3car.com 2021).

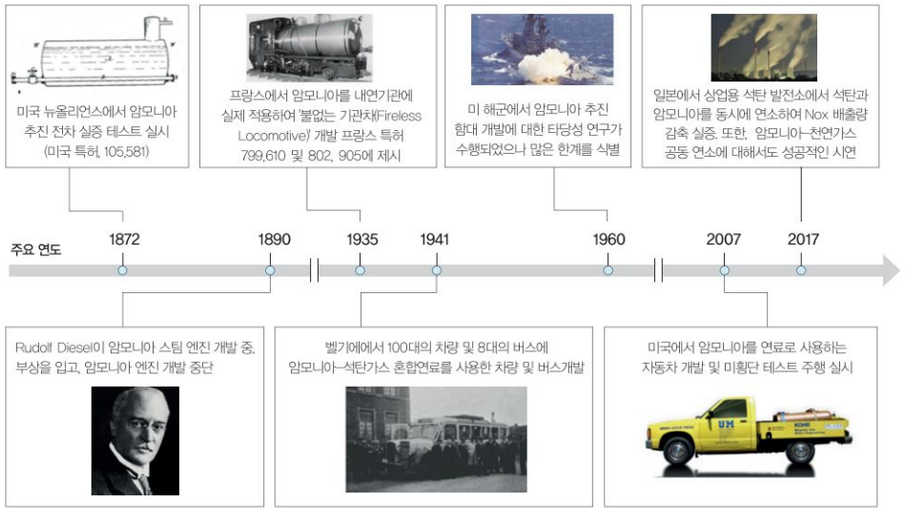


그림 2 암모니아 추진 시스템의 주요 발전사 (출처: 상기 출처를 종합하여 작성자가 직접 디자인함).

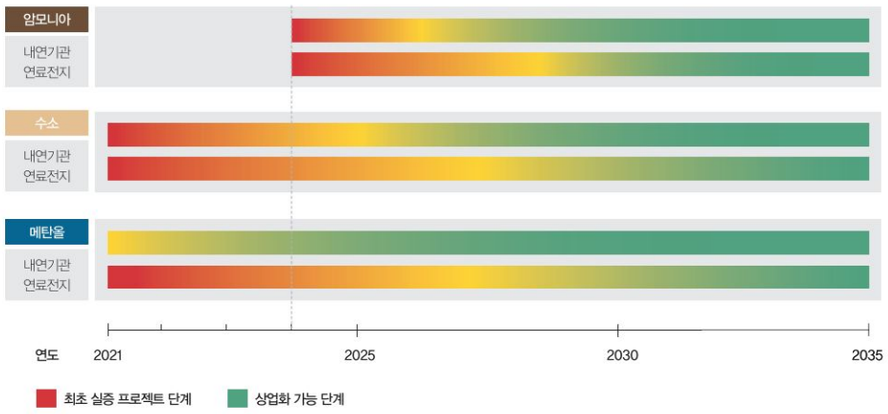


그림 3 선박용 대체 연료의 상용화 가능 타임라인 (DNV 2020의 자료를 바탕으로 작성자에 의해 수정됨).

마지막으로, 2017년 일본에서는 상업용 석탄 발전소에서 석탄과 암모니아 (1% 에너지 점유율)를 동시에 사용한 결과 NO_x 배출량 증가와 암모니아 슬립 없이도 연소될 수 있다는 것을 실증하였다. 천연가스-암모니아 공동 연소에 대해서도 성공적인 시연이 이루어졌으며, 에너지 기준으로 천연 가스의 최대 20%의 암모니아가 가스터빈에서 혼합 연료로 연소되었다 (Ito, Uchida et al. 2018). 이는, 향후 암모니아를 추진 엔진의 연료로 사용하는 것에 대한 좋은 선행 연구가 될 것으로 평가된다.

(b) 현재 선박용 암모니아 추진 시스템 개발 현황

현재 암모니아 추진 시스템의 기술준비수준 (Technology Readiness Level, TRL)은 내연기관 및 연료 전지 모두의 경우, 대략적으로 TRA 5-6 정도로 추정이 된다. 그림 3 에서 보는 바와 같이, 암모니아의 경우, 2024년이 되어야 최초 실증 프로젝트 단계에 돌입할 것으로 예상되며, 내연기관의 경우, 2030년 이전에 상용화가 가능할 것으로 전망되지만, 연료전지의 경우에는 2030년 이후에나 되어서 완전한 상용화가 이루어질 수 있을 것으로 전망된다. 암모니아의 내연기관의 경우에는, 개발 시작 시점이 수소 내연기관보다 훨씬 뒤쳐졌음에도 불구하고, 상용화 시기는 앞설 것으로 예상이 된다. 반면, 연료 전지의 경우, 암모니아, 수소 및 메탄올의 경우, 모두 동일하게 2030년 이후에 100% 상용화가 가능할 것으로 전망되고 있다. 특히, 현재 진행 중인 EU 프로젝트 ShipFC에서는 기존 Offshore supply 선인 M/V Viking Energy를 개조하여 2024년까지 2MW 암모니아 구동 SOFC 시스템의 시연이 계획되어 있다. 이러한 파일럿 프로젝트는 기술 성숙 속도를 크게 향상시킬 것으로 예상된다. 또한, 다양한 국제 선사들이 RoPax, 탱커 및 벌크선과 같은 선종에 대한 암모니아 연료의 사용 계획을 발표함에 따라, 일부 화물선등에서 적용이 가시화 될것으로 예상된다. Getting to Zero Coalition (Getting to Zero Coalition, 2021)에 따르면, 2020년 이전에 5,000 DWT 이상의 선박용 암모니아 프로젝트가 4개 정도 시작되었지만, 2020년 이후 10개의 신규 프로젝트가 시작되었다. 이는 암모니아 추진 선박에 대한 관심이 꾸준히 증가하고 있음을 잘 반영해준다.

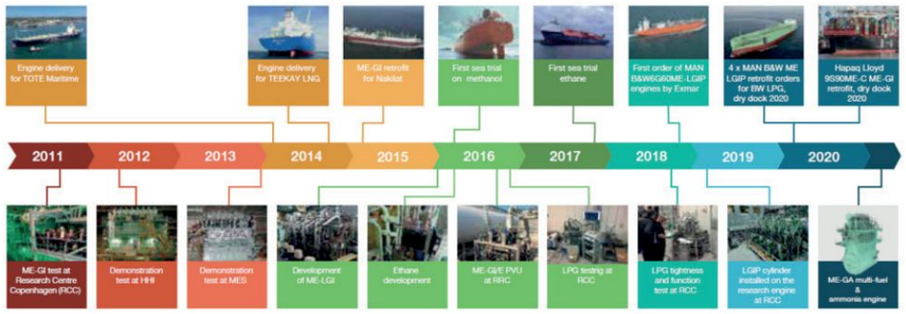


그림 4 MAN ES사의 2행정 이중 연료 엔진의 개발 타임라인 (MAN ES 2020)

(c) 암모니아 연료전지 개발 동향

연료 전지는 연료와 산소 또는 다른 산화제의 전기 화학 반응을 통해 연료의 화학 에너지를 전기로 변환하는 전기 화학 전지로써, 암모니아를 연료로 사용하기 위해서는 여러 가지 변환 공정이 필요하다. 암모니아 연료전지를 선박용 추진 시스템에 적용하는 것과 관련하여, 다양한 타당성 연구가 진행이 되었으며(특히, DNV-GL (T. Tronstad 2017)), 그 결과 암모니아 선박용 연료전지로는 고분자 전해질형 연료전지 (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC)와 고체산화물 연료전지 (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC)가 가장 유망할 것으로 전망되었으며, 알칼라인 연료전지 (Alkaline Fuel Cells, AFC) 역시 PEMFC와 SOFC의 중간 솔루션으로 평가되었다.

고분자 전해질형 연료전지 (PEMFC)

PEMFC는 여러 제조업체에서 상업적으로 이용가능하며 자동차, 버스, 경전철 및 잠수함과 같은 여러 유형의 운송 수단에 적용되어왔다. PEMFC는 순수한 수소만을 연료로 사용할 수 있으므로 암모니아를 연료로 사용할 시에는 암모니아의 분해 및 정제 작업이 반드시 필요하다. 최근, CSIRO 사는 암모니아가 먼저 분해기를 거친 다음 멤브레인에서 정제되어 PEMFC 등급 수소가 생성되는 파일럿 플랜트를 실현하였고 (Dolan 2018), 타 경쟁사들도 유사한 기술 개발을 통해 암모니아 연료전지를 상용화하는데 박차를 가하고 있다 (RenCat 2018).

알칼라인 연료전지 (Alkaline Fuel Cells, AFC)

PEMFC와 마찬가지로 AFC에서도 암모니아를 수소로 분해해야 하지만, PEMFC에서 요구하는 만큼의 높은 순도의 수소를 요구하지는 않는다. 따라서, AFC의 경우에는 암모니아의 정제 없이 분해만으로도 AFC에 수소를 공급하기에 충분하다고 볼 수 있다. GenCell사는 암모니아를 연료로 사용할 수 있는 크래커가 있는 AFC를 개발하였으며, 해당 시스템을 2018년에 상용화하는데 성공하였다 (GenCell 2018). ZBT(Zentrum für BrennstoffzellenTechnik)사도 ALKAMMONIA 프로젝트에서 비 전기 타입의 크래커(none electrical cracker type)와 AFC를 사용하여 암모니아 연료 시스템을 성공적으로 개발하고 테스트하였다 (Steffen 2018).

고체산화물 연료전지 (SOFC)

PEMFC 및 AFC와 달리 SOFC는 암모니아를 직접 사용할 수 있어 암모니아의 분해 및 정제 작업이 불필요한 장점이 있다. 다만, 현재까지 암모니아용 SOFC는 실험실내의 실험용으로만 사용되고 있으며, 상용화 단계까지는 보다 많은 시간이 필요할 것으로 전망된다. Università degli Studi di Perugia에서 수행한 연구에 따르면 NOx 형성 없이 고효율로 성공적인 운영을 달성할 수 있다고 발표되었다 (Cinti, Discepoli et al. 2016). 또한, 2017년 교토 대학에서는 암모니아 연료를 사용하는 SOFC의 연속 작동 시간 1,000시간을 달성했다고 발표하였다 (Okanishi, Okura et al. 2017).

유럽연합에서는 ShipFC 프로젝트를 통해 노르웨이 연안 선박 Viking Energy의 발전기 중 한 대를 100kW 고체 산화물 연료 전지 (SOFC) 로 전환하여 암모니아 연료를 통해 연간 3,000시간을 가동할 계획을 갖고 있다. 100kW SOFC는 먼저 육상에서 테스트된 다음 2023년 말에 선박에 설치될 예정이고, 프로젝트의 예산은 대략 2억 3천만 NOK (2천 5백만 USD)으로 파악되었다 (Maritime cleantech 2021)

(d) 암모니아 연료 내연기관 개발 동향

앞서 살펴본 바와 같이, 암모니아를 연료로 사용하는 내연 기관은 현재 개발이 진행 중이며 2030년 이전에 상용화가 될 것으로 전망된다. 특히, 비용, 출력 밀도, 부하 응답 및 견고성 때문에 가까운 장래에 연료 전지보다 더 나은 선박추진시스템으로 고려될 것으로 예상된다 (De Vries 2019).

MAN사 2행정 엔진

2행정 엔진의 경우, MAN ES사에서는 이중 연료 엔진 시리즈 ME-GI 및 ME-LGI를 개발하여, LNG, 메탄올, LPG 및 에탄올을 비롯한 다양한 대체 연료의 사용이 현재 가능한 상태이다. 반면, 암모니아는 앞서 언급된 바와 같이, 발화점이 높기 때문에, 디젤과 같은 파일럿 연료가 필요할 것으로 예상된다. MAN ES는 암모니아용 2행정 엔진이 LPG에 사용되는 ME-LGI 엔진을 기반으로 최근에 본격적으로 개발하기 시작되어, 2024년에 시장에 소개될 것으로 전망된다. 특히, 2행정 엔진은 대형 선박에 선호되는 주요 추진 시스템으로, 대형 연소실과 2행정 저속 엔진으로 이전 시험에서 사용된 소형 엔진에 비해 훨씬 더 큰 이점을 나타낼 수 있을 것으로 기대된다.

그림 4 에서 볼 수 있듯이 MAN ES사의 2행정 엔진 시리즈를 대표하는 특성 중 하나는 다양한 연료의 적용 가능성이다. MAN ES사 2행정 엔진의 개발은 처음부터 다양한 연료 유형을 연소하도록 설계가 되었으며, 오늘날에는 기존 디젤을 비롯하여, LNG, LPG, 메탄올 등의 이중연료 사용이 가능하다. 2019년부터 본격적으로 암모니아로 작동하는 2행정 엔진 개발에 박차를 가하기 시작하였다. MAN ES사는 2019년에 암모니아 연료 공급 및 분사 개념에 대한 사전 연구를 시작하고, 선급 협회, 선주, 조선소 및 시스템 공급업체와 함께 위험도 식별 (Hard identification, HAZID) 연구를 필두로 하여, 2020년에 본격적인 암모니아 프로젝트를 시작하였다.

2019	2020	2021	2022	2023	2024
사전 연구 단계	**암모니아 프로젝트 시작**	**1차 엔진 시험**	**배기 가스 저감 및 후처리 시스템 개발**	**실증 테스트 (100% scale)**	**본선 탑재**
암모니아의 연소 특성 연구	암모니아 엔진개발을 위하여, 4TME-X 시험 엔진 플랫폼 완성 HAZID 워크샵을 통해 암모니아 위험도 식별	코펜하겐 연구센터에서 1차 암모니아 엔진 시험 수행 엔진 기본 개념 및 보조 시스템 설계 완료	배기 가스 저감을 위한 후처리 장치의 개발 및 시험	코펜하겐 연구 센터에서 실증 테스트 수행 예정	최초 암모니아 엔진이 선박 탑재 예정

그림 5 MAN ES사의 선박용 암모니아 엔진개발 타임라인 (출처: (MAN ES 2020)기반으로 작성자가 재구성함).

최초 엔진 시험 운전은 2021년 코펜하겐 연구 센터에서 수행되었고, 연료 분사 시스템의 개발 개념과 엔진 설계 전반에 대한 검증 작업을 진행되었다. 2021년에 암모니아 엔진의 개발 과정을 마무리 짓고, 2022년에는 암모니아 엔진의 후처리 장치에 대한 개발/검증 과정을 마친 후, 2023년 상업 설계 검증을 예정하고 있다. 엔진 설계가 공개되면 첫번째 엔진을 테스트베드로 준비할 수 있게 되고, 2024년 상반기에 선박에 최초의 암모니아 엔진이 탑재될 예정이다.

그림 6은 암모니아 엔진 및 이중 연료 운전을 위한 연료 공급 시스템의 주요 구성 및 작동 원리를 보여준다. 크게 암모니아 저장 탱크 내의 암모니아를 엔진 내로 공급하기 위한 연료 공급 시스템 (Fuel supply system, FSS), 연료의 공급/제어/차단을 위해 다양한 밸브로 구성된 연료 밸브 트레인 (Fuel valve train, FVT), 그리고, 엔진에 연료를 지속/안정적으로 공급하기 위한 연료의 재순환 시스템 (Recirculation system)으로 구성된다.

연료공급시스템 (FSS)

연료 공급시스템에는 암모니아 연료가 필요한 온도, 압력 및 품질로 엔진에 전달되도록 하는데 필요한 장비가 포함되어 있다. 대부분의 경우 FSS에는 암모니아 연료 압력과 온도를 유지하기 위한 고압 펌프, 히터, 필터, 밸브 및 제어 시스템이 있다.

재순환 시스템

암모니아 모드로 운전시, 특정 이상 운전조건을 피하기 위해 특정 양의 암모니아 연료가 전용 재순환 라인으로 재순환이 된다. 이중 연료 운전이 중지 될 때에도 동일한 재순환 시스템을 통해 공급 시스템 및 엔진 내에 잔재하는 암모니아가 회수 된다. 또한, 재순환 라인은 암모니아 연료 내에 잔재할 수 있는 질소를 분리하고 배출하여 연료의 순도를 높이는 역할을 한다.

연료 밸브 트레인 (FVT)

연료 밸브 트레인 (FVT)은 엔진과 보조 시스템 사이의 연결 역할을 하며, 엔진의 시동, 정지 및 정비 중에 엔진을 안전하게 격리하고 질소 퍼지 기능 등을 제공하는 역할을 한다.

WINDGD 사 엔진 개발

스위스의 엔진 제조사인 WinGD는 암모니아를 메탄올과 함께 차세대 친환경 선박 추진 엔진의 연료로 개발하는데 집중을 하고 있으며, 특히, 관련 엔진 개발을 위한 연구/개발 프로젝트에 3천만 유로를 투자하고 있다.

일반적으로 엔진 개발을 시작할 때, 연소 과정이 엔진 설계의 핵심적인 부분이기 때문에, 사전 연구 단계로써, 연소 과정을 연구하는 것에서 출발을 한다. WinGD 사의 암모니아 엔진의 경우 2022년 3분기에 해당 연구가 진행될 예정이고, 1분기 앞서 메탄올에 대한 시험이 진행 될 것으로 계획되었다.

사전 연구 이후, 연료의 유동 및 분사 시뮬레이션이 2023년 2분기 (암모니아) 및 2022년 4분기 (메탄올)이 각각 수행될 예정이다. 다음 단계로 연료 시스템의 구성, 요소 테스트 및 시험 검증 단계가 2023년 4분기 (암모니아) 및 2023년 2분기 (메탄올)이 계획 되었다. 각 연료의 연소 검증을 마친 후, 최초 엔진 운전이 암모니아의 경우, 2025년 2분기에 이루어 질 계획이며, 메탄올의 경우, 1년 앞선 2024년에 수행될 예정이다.

아래 표는 WinGD 사의 X 엔진 타입과 X-DF 엔진 타입의 다양한 연료 사용 가능성을 비교하였다. 암모니아 엔진의 경우, 두가지 타입 모두 적용이 가능하도록 설계가 되고 있으나, X 엔진 타입의 경우, 암모니아 엔진을 사용하기 위해서는 기존 엔진 형식에 추가 개조가 필요할 것으로 보인다.

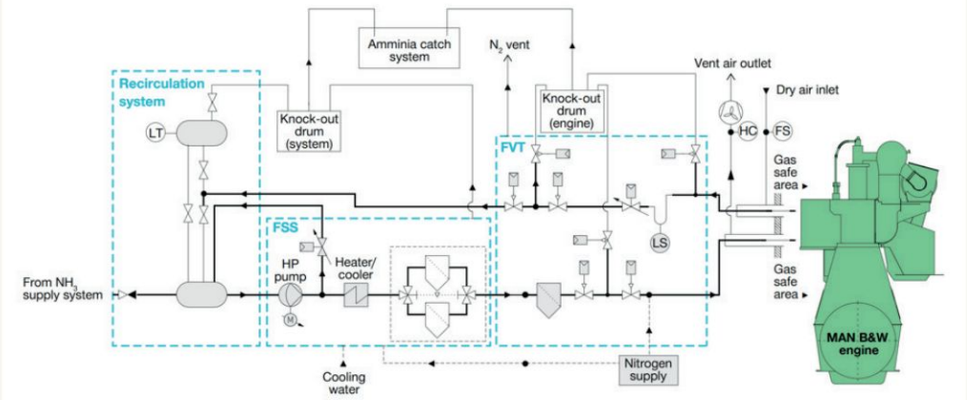


그림 6 MAN ES사의 선박용 암모니아 공급 시스템 개념도 (MAN ES 2020)



연료 종류	X 엔진 타입	X-DF 엔진 타입
0 – 0.5%S VLSFO	사용가능	사용가능
HFO	사용가능	사용가능
Bio-diesel	사용가능	사용가능
LNG	개조 필요	사용가능
Bio LNG	개조 필요	사용가능
Synthetic LNG	개조 필요	사용가능
Ammonia	개발중	개발중
Methanol / Ethanol	개발중	개발중
Lignin-derived biofuel	사용가능	사용가능

제2항 암모니아 연료 안전 기준 및 누출 위험도 분석 연구 동향

(a) 암모니아 연료 안전 기준

현재 암모니아 연료 설치에 대한 기국 승인은 IGF 코드의 대체 설계 접근 방식을 기반으로 한다. 기국에서 수락하는 경우 클래스 규칙을 사용하여 이러한 접근 방식을 완화할 수 있도록 되어 있다.

암모니아의 특성

암모니아(NH3)는 무색 기체로서, 공기보다 밀도가 낮아 누출시, 대기 중으로 분산된다. 끓는점은 −33.3℃ 이고, 20℃ 기준에 8.6 bar 이상의 압력을 가하는 경우, 밀도가 0.61 t/m3인 액체 상태로 변한다. 암모니아의 저위 발열량은 대략 18.6 MJ/kg 이어서, MGO에 비해 에너지 함량은 액체 상태에서 질량 기준으로 절반 미만이고, 부피 기준으로는 약 30% 정도가 된다.

암모니아를 Type C 압력 탱크에 액체상태로 저장하는 것을 기준으로, 해당 체적 에너지 밀도등을 다른 선박 연료들과 비교하여 아래의 비교표 (표1)로 정리 하였다.

암모니아는 톤당 에너지의 함량이 수소에 비해 훨씬 낮음에도 불구하고, 동일한 에너지 당 연료의 밀도는 수소 대비 (압축/액화 수소의 경우 모두) 훨씬 높아 저장시 요구되는 부피가 수소보다 더 작다. 반면, MGO 및 LPG에 비해 에너지당 밀도가 MGO 또는 LPG 보다 작아서 MGO 대비 3배, LPG 대비 대략 2배 정도의 추가 저장 공간이 필요한 단점이 있다.

암모니아의 위험성

암모니아는 유독하고, 질식을 유발할 수 있는 염기성 화합물의 일종으로, 인체에 미치는 영향의 심각성은 노출 경로, 용량 및 노출 기간에 따라 다르며, 공기 중 고농도의 암모니아에 노출되면 눈, 코, 목 및 호흡기가 즉시 화상을 입을 수 있으며 실명, 폐 손상 또는 사망을 초래할 수 있다. 2,500~4,500ppm의 암모니아 농도에서 약 30분 가량 노출이 되는 경우, 인체에 위험할 수 있으며, 5,000ppm 이상의 농도에서는 바로 호흡 정지등의 위험이 유발될 수 있다. 또한, 10,000ppm 이상의 농도에서는 피부에 접촉시 바로 화상을 입을 수 있다.

반면, 표준 대기 조건에서 암모니아의 가연성 한계 범위는 14.8% (가연성 하한, LFL) 및 33.5% (가연성 상한, UFL) 이다. 낮은 압력에서는 다소 가연성 한계가 더 낮아지는 경향이 있으며, 온도가 증가함에 따라 LFL이 감소 한다. 또한, 점화시의 에너지량, 연소 속도 등에 따라 화재/폭발 영향성이 달라지기 때문에, 암모니아 연소 특성이 선박과 선원에 미치는 영향 제대로 파악하기 위해서는 관련 안전 연구들이 더욱 많이 수행되어야 한다.

더군다나, 암모니아는 선박의 화물로써 운송이 되거나, 냉동 플랜트의 냉매로 사용이 되기는 하였으나, 현재까지 선박 연료로 적용된 사례는 없다. 암모니아의 독성 및 가연성 등으로 인해 선박 연료로 적용이 되는 경우, 벙커링, 저장, 공급 및 소비와 관련된 다양한 안전 문제/위험이 발생 할 것으로 전망이 된다. 사용 가능한 에너지 변환기를 3 – 4년 후 정도로 전망이 되는 가운데, 해당 선박연료의 사용에 대한 안전성 확보는 상당히 시급한 사안으로 볼 수 있다.

표 1 연료별 특성 비교표

연료 특성	MGO (Marine Gas oil)	LPG	고압 수소 (350 bar)	액화 수소	암모니아
밀도 (t/m3)	0.835	0.49	0.023	0.071	0.61
저위 발열량 (GJ/t)	42.7	46	120	120	18.6
GJ/m3	35.7	22.6	2.80	8.52	11.4
부피 (m3/GJ)	1	1.58	12.75	4.18	3.14



다시 말해, 암모니아를 선박의 연료로 사용하는 경우, 독성을 비롯하여, 가연/폭발 위험성이 함께 고려가 되어야 하며, 이를 바탕으로 선박의 안전 규정이 도입되어야 한다. 현재까지 암모니아 추진 선박에 대한 국제 규정은 IGF Code를 기준을 만족해야 하며, 암모니아 추진 선박에 대한 세부 안전 가이드라인은 현재까지 미개발 된 상태이다. 따라서, 본 장에서는 암모니아 추진 선박에 대한 안전 가이드라인 개발시 고려해야 할 사항에 대해서 집중하고자 한다.

암모니아 연료 안전 기준 고려 사항

저장 및 운송

선박을 통해 암모니아를 운송하는 경우, 허용되는 탱크는 독립 탱크 유형인 Type A, B 및 C와 멤브레인 탱크 (Membrane Tank)로, IGC 코드에 정의되어 있다. 하지만, 실제로는 효율 및 경제성 등의 이유로 A형과 C형만 해운에 현재까지 적용이 되고 있다.

반면에, 추진 연료로 사용하기 위한 목적으로 암모니아를 선박내에 저장하기 위해서는 주로 가압이 가능한 Type C 탱크가 많이 사용될 것으로 전망된다. 암모니아를 저온 액화 생태로 저장 가능한 Type A 또는 멤브레인 탱크 역시 고려대상이 될 수 있지만, 이러한 탱크 설계/배치/시공 등이 충분히 신뢰성을 갖기 위해서는, 탱크 내의 온도를 지속적으로 저온상태로 유지할 수 있는 백업 시스템이 필요하다. 이를 고려했을 때, 가압을 통한 Type C 탱크가 보다 안정적이고 간단한 해결책으로 고려가 되고 있다.

암모니아 저장 탱크와 연료 운송 파이프의 설치 및 배치에 대한 규정은 LPG 연료에 대한 IMO 또는 선급 규정들과 유사할 것으로 예상 된다 (DNV, 2020). 특히, 선박의 충돌 및 접촉 시나리오에서 탱크 손상에 대한 위험을 최소화하기 위하여, 선박의 측면과 바닥으로부터의 최소 거리가 확보되어야 한다. 또한, 저장 탱크의 위치는 기관실 및 기타 화재 위험성이 높은 구역으로 부터 떨어져 있어야 하며, 크레인의 오작동 또는 기타 기계 손상 등의 위험으로부터 보호가 되어야 한다.

암모니아는 공기보다 밀도가 낮으나 (공기밀도의 60%) 압축된 액화 암모니아가 증발하여 대기 중의 수분과 접촉하게 되면 공기보다 무거운 저온의 수증기로 변한다. 이 때문에 암모니아는 바닥에 가라앉게 되고, 암모니아 가스가 공기중으로 분산되는 것을 막기 때문에, 이를 고려한 누출 감지 시스템과 환기 시스템이 갖추어져야 한다.

암모니아는 인화점이 낮은 연료로 최소 점화 에너지는 8 mJ 이다. 반면, 메탄(LNG)의 경우 0.3 mJ, 수소의 경우 0.017 mJ, 프로판(LPG)의 경우 0.26 mJ 으로 다른 저인화점의 대체 선박용 에너지들보다는 상대적으로 높은 편이다. 암모니아의 자연 발화 온도는 630℃ 로써, LNG(580℃) 및 LPG(490℃) 보다 폭발 방지를 위한 전기 장비를 비롯하여, 주변의 저온 안전 요구 사항등은 타 대체연료

대비 경감 될 수 있을 것으로 전망된다.

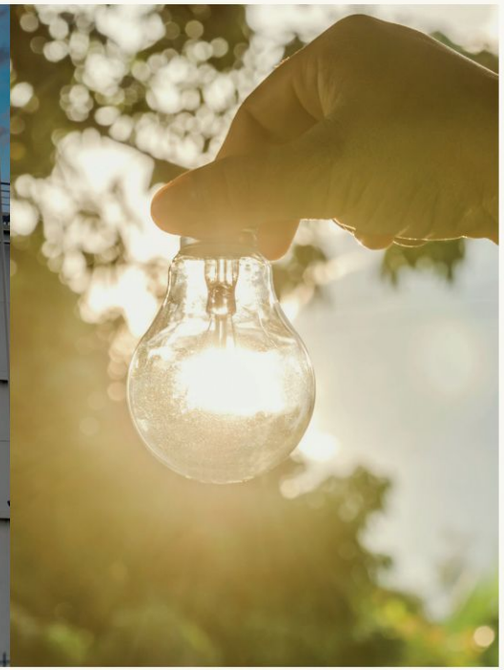
한편, 암모니아는 극저온 상태로 저장되지 않고, 폭발 한계가 상대적으로 높은 편이지만, 다른 한편으로는 다른 연료들과 다르게 유독성을 갖기 때문에, 추가 안전 과제들이 많을 것으로 보인다.

암모니아의 독성 문제 때문에, 다른 가스 연료와 비교하여, 대기 중으로 방출되는 가스를 처리하기 위한 방식 또는 규정을 새롭게 마련해야 할 것으로 보인다. 암모니아의 독성에 대한 위험도를 평가하기 위하여 DNV GL에서는 엔진 제조업체, 선주 및 연료 공급 시스템 제조업체등과 협력하여 HAZID (Hazard Identification) 연구를 수행하였다 (EMSA, 2017). 본 HAZID의 대상은 암모니아 추진선박을 기준으로 수행 하였으며, 연구 범위는 암모니아 화물에서 저장 탱크로 암모니아를 이송하는 작업, 저장 탱크에서 엔진으로 공급하는 작업, 엔진 작동 및 기관실과 갑판에서 암모니아를 안전하게 처리하는 작업을 주요 대상에 포함이 되었다.

DNV GL의 HAZID 연구 결과, 선박 및 시스템의 운전 중에 암모니아가 누출되는 위험이 상대적으로 높은 것으로 나타났으며, 이를 사전에 방지할 수 있는 연료 공급 시스템의 설계/적용이 제안되었다. 또한, 벤트라인을 통한 암모니아 회수 시스템에 대한 위험성 역시 무시할 수 없을 것으로 파악되었다. 마찬가지로, 암모니아 배관의 파열, 유지 보수 또는 엔진의 비상 정지시의 암모니아의 누출 및 누출된 암모니아 제어 실패 (예: 안전 밸브의 오작동에 의한)등으로 인한 다양한 위험요소가 식별 되었다. 다만, 암모니아 연료의 위험도 수준은 선종, 선박/시스템의 배치 및 작업의 종류에 따라 다르게 나타날 것으로 평가되었다. 이 때문에 IGF 코드에서 요구하는 선박별 위험도 평가를 수행하고 개별 선박에 대한 충분한 위험도 감소 조치를 구현해야 한다.

특히나, 여객선의 경우, **암모니아 누출 위험과** 관련하여, 인명 구조 장비의 위치, 소집 장소 **배치, 대피 시간 및 향구로**의 안전 귀환 등과 같은 추가 안전 사항들이 **충분히 고려 되어야** 한다.





수소는 청정 에너지원으로,
화석연료와 달리 사용 시
환경유해물질이 전혀 발생되지 않는다.

제2절 수소

수소는 청정 에너지원으로, 화석연료와 달리 사용 시 환경유해물질이 전혀 발생되지 않는다. 따라서, 기후 변화 문제에 따른 청정 에너지원의 활용이 활발히 논의 및 연구되고 있는 현 실정에 맞춰 가장 부각되고 있는 에너지원이다.

이 과정에서 각국은 수소를 에너지원으로 사용하며 기존의 연료인 석탄, 가솔린 등을 대체하는 것을 의미하는 수소경제를 화두로 세우고 있으며, 이 배경에는 다음과 같은 에너지 시장의 변화 추이 및 예상이 중요한 역할을 하고 있다.

에너지 시장

- 1900년대 말 오일 등 액체연료의 **시장 점유율이 독보적**
- 2000년대 가스가 다수의 시장 점유율 **기록**
- 2100년 경 수소가 주요 에너지원으로 **시장 장악 예상**

특히 수소를 선박에서 연료로 사용할 경우 기존 연료 대비 다음과 같은 배출 감소를 기대할 수 있다. (표1)

수소를 에너지원으로 사용하는 것은 과거부터 오랜 기간 논쟁의 대상이었다. 수소의 장점은 물과 에너지만으로 생산할 수 있고 에너지로 전환되는 시점에서 물만 발생한다는 점이다. 단점으로는 생산에 상당한 양의 에너지가 필요하므로 상당한 에너지 손실이 발생한다는 것이다. 뿐만 아니라, 수소의 안전성에 대한 우려가 있으며 저장에 대한 문제도 해결해야하는 과제이다.

현재 수소의 생산 비용이 상대적으로 높기 때문에 주요 에너지원으로 사용되는데 한계가 있으나, 세계적으로 탈탄소화 정책에 추진되고 있고 많은 투자가 진행됨에 따라 점차 생산 비용이 낮아 질 것으로 예상된다. 따라서 점차 수소는 에너지 밀도가 낮고 생산, 유지 비용이 높은 배터리를 대체 할 수 있는 에너지원으로 부상될 것으로 전망된다 (Eriksen, Engel et al, 2021).

표 1 선박 연료 별 배출 가스 비교

연료 / 유해가스	CO_2	NO_x	SO_x
디젤	100 %	100 %	100 %
LPG	68 %	75 ~ 80 %	3 ~ 10 %
LNG	77 %	20 %	1 %
수소	0 %	0 %	0 %

(a) 수소 생산 방법에 따른 구분

수소는 다음과 같이 크게 세가지로 구분할 수 있다 (Oliveira, Beswick et al. 2021) (Eriksen, Engel et al. 2021).

① 그레이 수소 (Gray hydrogen)

- 석유, 석탄, 천연가스를 이용해 생성되는 수소. 현재 생산되는 수소의 대부분을 차지하며, 낮은 가스 가격으로 인해 비교적 저렴하고 화학 산업에서 비료를 만들고 기름을 정제하는 데 일반적으로 사용된다. 그레이 수소는 탄화수소의 분자 구조를 재배열하는데 사용되는 처리 기술인 증기 메탄 개질 (Steam methane reforming, SMR)을 통해 생산된다. 이 과정에서 메탄은 고온의 증기와 혼합되어 촉매 화학반응을 통해 수소와 이산화탄소를 생성한다. 일반적으로 그레이 수소 1톤을 생산하기 위해 10톤의 이산화탄소(CO_2)가 배출된다.

② 블루 수소 (Blue hydrogen)

- 그레이 수소와 동일한 방법으로 생산되나 이산화탄소 포집 기술 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 을 접목하여 생산되는 수소. 그린 수소에 비해 무공해 수소라고 할 수는 없지만, 대량 생산이 가능한 그레이 수소의 이산화탄소 배출을 방지하고 온실가스를 감축할 수 있는 이산화탄소 포집 기술 (CCUS) 을 통해 그린 수소에 대해 가격적으로, 그레이 수소에 비해 환경적으로 이점이 있는 수소이다.

③ 그린 수소 (Green hydrogen)

- 전기를 사용하여 물을 수소와 산소로 전기분해하여 생산되는 수소. 여기서 사용되는 전기는 일반적으로 기존 연료나 원자력 발전을 통해 생산된 것이 아닌 태양광, 풍력 등 재생에너지를 통해 생산된 전기를 말한다. 아직까지 그린 수소는 생산 비용이 높고 대량 생산이 용이하지 않지만, 기반시설을 마련하고 장기적으로 저렴한 전기의 가용성 증가를 통해 그린 수소 생산은 더욱 경쟁력 있는 수소 생산방식이 될 것이다. 궁극적으로 그린 수소만이 친환경 수소로 평가될 것으로 예상된다.

(b) 수소 연료 사용의 한계

액화 수소 취급에 대한 많은 경험이 없는 현 상황에서 선박에 충분한 액화 수소를 공급하기 위해서는 완전히 새로운 연료 기반 육상시설을 구축해야만 한다. 이러한 액화수소를 취급하는 항만 시설의 개발은 액화수소가 전 세계적으로 선박의 연료로 사용되기 전에 반드시 해결되어야 하는 중요한 과제이다.

현재 선박에서 사용되고 있는 연료 중 가장 수소와 특성이 비슷하다고 할 수 있는 것이 LNG이다. 수소보다는 액화온도가 약 90℃ 정도 높지만, LNG 또한 극저온에서 액화시킨 후 저장하는 형태로 사용되고 있다. 하지만 에너지밀도 측면에서 수소가 약 2배 더 낮기 때문에 동일한 항해를 위해 더 많은 액체 수소를 저장하여야 하며, 항해 중 각 탱크 내부의 액체 수소의 움직임인 슬로싱으로 인해 선박의 안정성에 문제를 일으킬 수 있다 (Krata 2013).

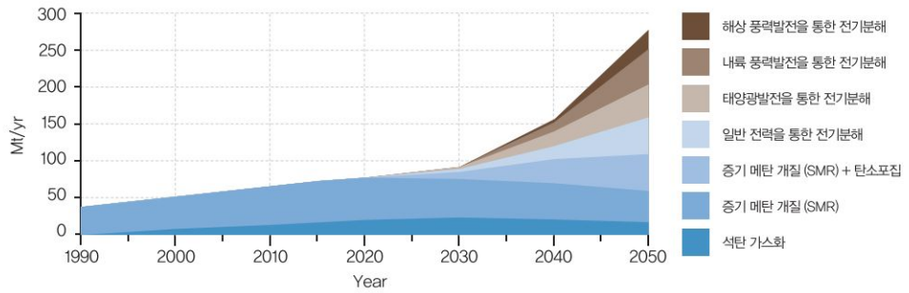


그림 7 에너지원 별 수소 생산량

제3절 선박용 액체수소 저장 기술 및 소재

선박용 수소연료 저장시스템은 고압기체 저장 방식과 저압액체 저장 방식으로 나눌 수 있다.

고압기체 저장 방식

- 30 MPa ~ 70 MPa의 압력으로 기체 상태의 수소를 저장
- 수소를 액화시키는 비용, 액화수소의 기화 설비 비용 등을 절감 할 수 있으며, 액화수소를 극저온으로 유지할 수 있는 저장 탱크가 필요하지 않아 건조비용 절감
- 많은 양의 수소를 저장 할 수 없어 단거리를 운항하고 소규모 선박에 적합

저압액체 저장 방식

- −253 ℃ 이하로 수소를 액화시켜 저장
- 고가의 건조비용이 발생
- 극저온 저장탱크 제작을 위해 저장용기 내외벽 구조설계, 보강재 및 저장용기 지지구조 설계, 고압 환경 하 용접부 허용구조강도 확보, 복합재료 (EFRP, GFRP, Graphene) 라이너 개발 등의 상당한 기술 개발이 요구됨
- 동일 부피 및 동일 무게 대비 많은 수소를 저장할 수 있으므로 장거리, 중대형 선박에 적합

선박용 수소 연료 및 수소 화물의 경우 현재 명확한 규정이 없으므로 IMO의 IGC code[1]와 IGF code[2]를 근거로 저장 탱크의 구조 및 설비를 정한다. 현재 절대온도 77 K 이하의 극저온 액화 수소에 대한 정확한 규정이 없지만 액체수소 저장 설비와 저장 소재는 IGC code 제6장의 Table 6.1, 6.2, 6.3 및 IGF code 제7장의 Table 7.1, 7.2, 7.3의 최소 요건은 만족되어야 한다.

제1항 액체수소 저장 기술

수소의 질량당 에너지는 대부분의 다른 연료보다 훨씬 크지만(수소: 120 MJ/kg, 가솔린: 44 MJ/kg), 에너지 밀도는 다른 연료보다 낮다 (액체 수소: 8 MJ/L, 가솔린: 32 MJ/L). 즉, 동일한 무게의 수소를 적재하고 있는 경우에는 가장 장거리 운항이 가능하지만 동일한 거리를 운항하기 위해서 수소는 다른 연료에 비해 큰 연료 적재 공간이 요구된다.

최초의 성공적인 수소 액화 시도는 1898년 Sir James Dewar에 의해 수행되었으며, 이 실험 이후 액체 수소의 생산 공정이 발전했으며 여러 냉각 경로가 액체 수소를 생성하는 데 성공적인 것으로 입증되었다(Aasadnia and Mehrpooya 2018). 하지만, 생산된

1. IGC code (International Code of the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk)는 액체 가스를 bulk 형태로 운송하는 선박의 구조 및 설비에 관한 사항을 규정하는 국제 기준. 액체수소 운송에 관한 안전 규정 잠정 지침 (Interim Recommendations for Carriage of Liquefied Hydrogen in Bulk, MSC.420)
2. IGF code (International Code of the Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels)는 가스연료 추진선을 위한 안전 규정으로 저인화점 연료를 사용하는 선박을 포함한다.

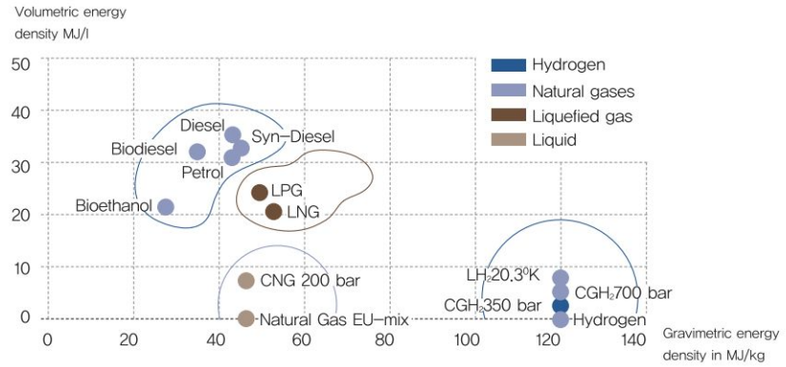


그림 8. 단위무게 및 단위체적 당 에너지원 별 에너지 효율 (DNV-GL, 2018)

액체수소를 가능한 소형 용기에 신뢰성있고, 안전하며 비용적 측면에서 효율적으로 저장하는 것은 수소 연료 응용 분야의 광범위한 상업화에 대한 핵심 과제이다.

극저온 용기는 일반적으로 산업용 및 의료용 가스의 저장 및 운송을 위해 40년 이상 사용되었다. 1리터의 액체는 약 800리터의 가스와 동일한 저장 효과를 낼 수 있으므로 고압 가스 저장을 위해 두꺼운 벽 또는 무거운 용기가 필요한 고압기체 저장 방식과 비교할 때 저압액체 저장 방식은 분명한 이점이 있다. 하지만 기체가 액체 형태가 되기 위해 –253℃ 이하의 매우 낮은 온도로 냉각되어야 한다는 단점이 있다. 이러한 극저온에서 수소를 저장하기 위해서는 온도를 낮추는 작업 및 고효율의 진공 단열 용기가 사용되어야 한다. 이 과정에서 고려해야 할 점은 액화하는 과정과 액화수소를 지속적으로 극저온 상태의 액체 상태로 유지하기 위해 추가적인 비용이 소요되며, 구성이 복잡해진다는 점이다 (Raucci, Calleya et al. 2015).

수소는 분자가 매우 작기 때문에 저장용기를 투과하거나 소재 내로 침투하여 손상을 야기 할 수 있다. 따라서 수소 손상에 대한 저항성, 수소 침투성 및 누출에 대한 분석이 수소 저장을 위해 반드시 수행되어야 한다. 뿐만아니라 액체수소를 저장하기 위해서는 –253℃의 극저온 온도를 유지해야하므로 열전달 3요소 (열전도, 열대류, 열복사)를 억제하고 최소화 할 수 있는 이중 진공구조의 저장용기가 필수적이다.

액화를 위해 저온이 필요한 가스에 사용되는 극저온 용기는 일반적으로 진공 단열되며 내부 압력 용기와 외부 보호 재킷으로 구성된다. 내부 용기와 외부 재킷 사이 공간의 열전도율을 줄이기 위해 펄라이트 (분말 구조) 또는 초단열재 (알루미늄 필름 층으로 포장)가 사용된다. 펄라이트는 비용과 단열 특성을 적절히 고려하여 무기 비정질 흑요석 (화산 유리)를 사용하며, 단열재는 일반적으로 두꺼운 폴리우레탄층으로 구성된다.

실제로 플로리다의 NASA Kennedy Space Center (KSC)에 위치한 세계 최대의 고정용 액화 수소 (LH2) 저장 탱크는 3,218 m3의 액화수소 저장 공간을 가진 3,800 m3 크기의 원형 (내경 18.75 m, 외경 21.34 m) 이중벽 진공 펄라이트 (두께 1.3 m) 단열 저장 용기이다.



제1항 액체수소 저장 소재

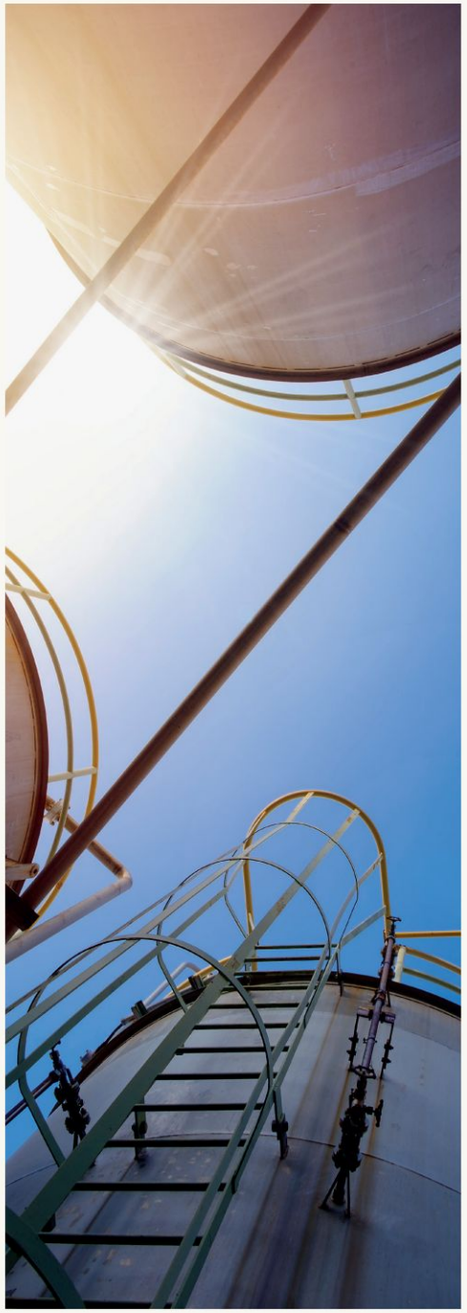
–253 ℃의 매우 낮은 온도로 냉각 후 보관해야 하는 액체수소의 특성으로 인해 저장 용기의 소재 선택 시 극저온으로 인한 기계적 특성, 팽창 및 수축 현상, 다양한 재료의 열전도 변화와 같은 것들이 특히 고려되어야 한다. 일반적으로 금속 재료의 경우 온도가 낮아지면 연성 (신장 또는 수축하는 성질) 또는 인성 (충격 강도, 균열 증가 억제와 같은 성질)이 감소한다 (Cease, Alvarez et al. 2014, Liu, Shang et al. 2017). 이때 소재가 수축하는 기하학적 현상이 발생할 수 있고, 이러한 열수축 현상은 극저온 시스템에서 상당한 영향을 미칠 수 있다. 이 중 가장 중요하게 확인되어야 하는 것은 극저온에서 장비의 특정 금속 항목에 영향을 줄 수 있는 취성이다. 온도가 무연성 온도 아래로 떨어지면 특정 온도에서 재료가 연성에서 취성으로 바뀌는 연성–취성 천이온도 (Ductile–Brittle Transition Temperature, DBTT)가 나타날 수 있으며, 이 온도는 고정된 값은 아니지만 사전 열처리 또는 기계적 처리, 합금 조성 및 불순물에 따라 달라질 수 있다. 이러한 연성–취성 천이로 인해 구조물의 갑작스런 변형 및 파손이 발생 할 수 있고, 이 현상은 극저온 저장 용기 관련 사고의 대부분을 차지한다. 따라서 액체수소 저장을 위해 재료를 선정하는 과정에서 온도 뿐만 아니라 수소에 의한 취화 발생 여부도 필수적으로 확인 되어야 한다.

세계 주요 연구기관의 가이드라인과 국제표준화기구 표준에 따르면, 액체수소 저장을 위한 소재 선정 시 다음과 같은 세가지 고려사항을 제시하고 있다.

- 수소취화에 대한 저항성: 수소에 민감하지 않은 재료여야 한다.
- 저온에서도 연성 확보: 연성–취성 천이온도가 운영 온도 이하인 재료여야 한다.
- 상기 두가지 조건을 동시에 만족하는 재료여야 한다.

상기 고려사항을 감안하여 소재를 선정하면, 구리 합금, 니켈 합금, 알루미늄 합금, 오스테나이트계 스테인리스 강과 같은 금속이다. 이러한 금속은 저온에서 연성을 가지며, 파괴에 대해 안전 여유를 제공하므로 극저온에 적용 가능한 소재이다. 반면에 철계 합금이나 탄소강, 10% 이하 Ni과 같은 금속은 저온에서 연성–취성 천이가 일어나므로 극저온에 적용 가능하지 않은 소재이다 (Timmerhaus and Flynn 2013, Duthil 2015).

기존 연구에 따르면, 316 L 스테인리스강의 경우 높은 수소 농도를 함유하고 있지만 수소 농도에 따른 수소 손상의 차이가 거의 없어 수소가 침투하지 않은 조건과 유사함이 확인되었다. 하지만 Inconel 625의 경우 수소 장입량이 증가함에 따라 연신율과 인장강도의 감소가 두드러짐을 확인 할 수 있다 .



니켈 합금

현재 선박용 LNG 화물 및 연료 격납설비에 사용되고 있는 소재로, 9% 니켈강은 열처리를 통해 연성-취성 천이온도를 -200 ℃ 이하로 저하시켰다. 즉, 니켈 기반 합금은 건식 산화 및 화학적 부식 환경에 우수한 특성을 가지지만, LNG가 아닌 수소에 대한 저항성은 뛰어나지 못하다.

스테인레스강

10% 이상의 크롬을 함유하고 있는 강재이며, 뛰어난 내식성을 가진다. 오스테나이트계 스테인레스강은 수소 취성에 덜 민감하고 초저온 환경에서도 적용이 가능해서 액체수소 환경에 적용하는 것이 추천된다.

알루미늄 합금

저온 영역에서 우수한 기계적 성질과 내식성을 가지고 있다. 재활용이 용이하며, 다른 금속 대비 가볍고 강도 대비 중량비가 매우 높다. 6061 알루미늄 합금의 경우 실리콘을 첨가하여 내식성을 강화하였으며 이로인해 고압 수소가스 저장 용기에 사용이 가능하다 (Kim, Choi et al. 2015). 알루미늄 합금의 경우 용접 작업 시 발생하는 열응력에 주의하여야 하며, 열변형을 최소화 하기 위한 용접 작업조건이 요구된다.

수소에 영향을 적게 받으며 무게가 가볍기 때문에 저장용기 경량화를 위해 지속적으로 사용되고 있다.

생산된 액체수소를 가능한 소형 용기에 신뢰성있고, 안전하며 비용적 측면에서 효율적으로 저장하는 것은 수소 연료 응용 분야의 광범위한 상업화에 대한 핵심 과제이다.

제4절 수소 연료 내연기관 개발 동향

수소는 직접 엔진에 연료로써 사용 될 수 있다. 하지만, 수소는 자동 점화 온도가 높기 때문에 탄화수소 연료에 비해 엔진의 실린더 내부에서 적절한 시기에 효율적으로 연소되는 것이 어렵다는 문제점이 있다 (Verhelst, Verstraeten et al. 2007, Aleiferis and Rosati 2012). 따라서 수소를 다른 연료와 함께 이중 연료로 사용하는 선박에서는 압축 엔진을 사용 할 수 있으나, 수소를 단일 연료로 사용하는 선박에서는 스파크 점화 엔진 (spark-ignition engine)이 적절한 타입의 엔진이다.

제5절 수소 연료전지 개발 동향

연료전지란, 연료와 산화제를 전기화학적으로 반응시켜 전기에너지를 발생시키는 장치로, 일반적으로 수소가 연료로 사용되며 산소가 산화제 역할을 하여 수소와 산소의 전기화학적 반응을 통해 연속적으로 전기와 열을 동시에 생산하는 장치이다. 화학 반응은 촉매층 내에서 촉매에 의해 이루어지며 일반적으로 연료가 계속적으로 공급되는 한 지속적으로 전력 발전이 가능하다 (Muratori 2014). 연료전지의 원리를 최초로 발견한 사람이 누군지에 대한 의견은 과거 부터 논쟁이 되어왔다. 미국 에너지부는 독일의 화학자 Christian Friedrich Schonbein 이 1838년 처음 연료전지 연구를 하였으며 이 것을 1839년에 Philosophical Magazine 1월호에 발표했다고 주장하지만, 또 다른 주장으로는 1839년에 영국의 William Robert Grove 경이 최초로 수소 연료전지 개념을 소개하였다고 한다.

Grove는 황산 용액에 백금을 넣고 그 시험관 안에 산소하고 수소를 따로 넣어 거기서 발생하는 전기를 가지고 다시 물을 전기분해해 산소와 수소가 생긴다는 것을 보여주었다. 이것을 가스 배터리 (Gaseous voltaic battery) 이자 최초의 연료전지로 보고 있다. Grove와 Schonbein의 과학적 경쟁이 지속되는 동안 많은 발견들이 있었으며, 그 뒤로 30년 뒤에 연료전지라는 이름으로 불리기 시작하였다. 1893년, Friedrich Wilhelm Ostwald는 물리화학적인 실험을 통해 연료전지의 다양한 구성요소 (전극, 전해질, 산화제, 환원제, 음이온 및 양이온)들의 상호연관성을 실험적으로 측정하였으며, 1896년 William W. Jacques는 최초로 연료전지를 실제적으로 응용하여 실용화 제품을 개발하였고, 1900년에 Walther Nernst는 최초로 고체 전해질인 지르코늄을 연료전지에 적용하였다.

연료전지를 연구한 Mond, Langer 및 Oswald 등은 20세기에는 석탄과 같이 수소가 주 연료가 될 것이고, 연료전지가 열역학적 엔진을 대체할 것으로 예측하였으나 21세기가 된 오늘까지도 아직 연료전지의 보급은 미미한 실정이다.

이러한 연료전지의 연구는 1900년대에 들어와서 더욱 활발하게 수행되었으며, 다음 그림에서 보는 바와 같이 다양한 연구를 통해 현재 개발 된 연료전지의 효율이 더욱 향상되게 되었다.

연료전지를 통한 발전시스템은 전기효율이 60% 이상으로 매우 고효율 발전시스템이며 가동율이 95% 이상이다. 또한 설치 및 운용이

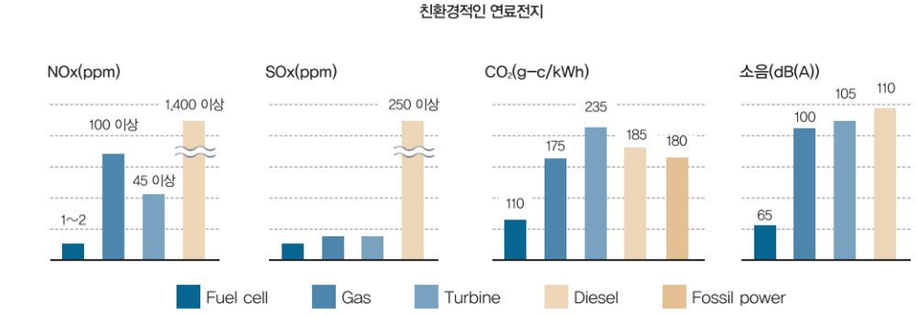


그림 9. 연료전지와 타기관과 친환경성 비교

용이하기 때문에 송전시설이 구축이 어려운 곳에 전기 공급 시스템 또는 비상전원 공급 시스템으로 활용 할 수 있으며, CO_2, NO_x, SO_x와 같은 배출물이 매우 적고, 전기 생산 시 소음 또한 발생하지 않아 설치 위치에 제약을 받지 않는 친환경적인 에너지원이라고 할 수 있다. 따라서 발전용 연료전지는 도심에 위치하는 분산전원에서 대규모 전원으로도 활용이 가능하기 때문에 저공해, 고효율 측면에서 활용도가 높아질 것으로 기대된다. 뿐만 아니라, 연료전지에서 전기 생산 시 발생하는 다량의 열을 배열회수 시스템을 통한 열병합발전 또는 온수/냉난방에 사용하여 더욱 효율적으로 이용이 가능하다.

선박에 적용되는 연료전지는 작동온도 및 사용용도에 따라 PEMFC (고분자전해질형), MCFC(용융탄산염), SOFC(고체산화물)로 구분되며 소형 선박에는 소형화가 가능하고 저온에서 작동하여 열관리가 용이한 PEMFC를, 대형선박에는 고온형 연료전지 중 LNG 또한 연료로 사용이 가능한 SOFC 방식이 적합하다.

고분자 전해질 연료전지 (PEMFC)

PEMFC는가장 많이 사용되는 연료 전지 중 하나로, 1990년대에 기술이 개발되어 가정용, 자동차용 이동용 전원으로 많이 이용되고 있으며, 전 세계 연료전지 시장에서 60% 이상의 점유율을 차지하고 있다. 양극에서 수소가 산화하여 수소이온 및 전자를 생성하고, 생성된 수소이온은 전해질을 통해 음극에 전달되어 산소와 결합하여 물을 생성하는 방식으로 전기가 생성되며, 효율면에서 순수 발전 효율은 60% 이하이지만 열병합발전을 통해 80~90 %의 효율을 얻을 수 있다. 시스템의 소형화가 가능하고 재료 선택, 셀 제작과 유지 및 보수 측면에서 장점을 가지고 있으나, 단점으로는 매우 순수한 수소가 필요하기 때문에 사용이 제한적일 수 있으며, ppm 수준의 의해 연료전지의 성능과 내구성이 손상 될 수 있다 (Wee 2007, Lan and Tao 2014). 따라서 암모니아, 메탄올, 포름산 (formic acid), 암모니아 보란 (ammonia borane)과 같은 저장 방법을 사용 할 시 수소를 개질하는 과정에서 광범위한 정제가 필요하다. 높은 온도에서 연료 전지는 일산화탄소에 대한 내성이 더 강해지며, 이것이 용융탄산염 연료전지 (MCFC), 고체 산화물 연료전지 (SOFC)와 같은 연료 전지에 대한 연구가 진행되는 이유이다 (Sasaki, Susuki et al. 2006). 또한 내성이 더 강한 막을 사용하여 PEMFC를 제작하여 고온에 더 잘 견디도록 하는 연구도 수행되고 있다 (Verma and Scott 2010).

실제로 PEMFC는 대부분 DuPont 사에서 만든 Nafion 멤브레인을 사용하는데, 생산 공정이 비교적 복잡하고 가격이 저렴하지 않았다. 생산 비용을 줄이고 화학적 및 기계적 안정성을 개선하기 위해 다양한 연구가 있었으며, Ballard 사에서 최근 Nafion 멤브레인과 성능은 유사하지만 생산 공정이 간단하고 비용이 저렴한 퍼플루오로술폰산 막(perfluorosulfonic acid membrane, PFSA)을 개발했다. 또한 PEMFC의 효율을 향상시키기 위해 높은 열 및 화학적 안정성과 높은 양성자 전도도 특성을 가진 멤브레인 '설폰화된 폴리 페닐렌 벤조 페논 멤브레인 (sulfonated poly phenylene benzo phenone membrane, SPPBP)' 등이 개발되었다 (Sutradhar, Rahman et al. 2019). 이 외에도 PEMFC 제조 방법을 최적화하기 위해 다양한 박막 코팅 방법 등도 연구 중에 있다.

표 2. 연료전지 종류별 특성 [선박용 수소연료전지]

종류	전해질	촉매	출력 (용도)	작동 온도
고분자 전해질 연료전지 (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)	고분자막 (이온교환막)	백금	MW (자동차, 선박)	80–100 ℃
고체 산화물 연료전지 (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)	세라믹	니켈	MW (발전용, 선박)	600–1000 ℃
용융탄산염 연료전지 (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)	탄산염	니켈	MW (발전용, 선박)	650 ℃
인산형 연료전지 (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)	인산	백금	MW 이하 (소규모 발전용)	180–210 ℃
알칼라인 연료전지 (Alkaline Fuel Cell, AFC)	수산화칼륨	백금	~ 200 kW	60–220 ℃

수소연료전지를 활용한 선박 추진 활용 실증연구에 적용되어 연구가 진행되고 있다.



PEMFC는 이러한 각종 기술 개발을 통해 가격 및 에너지 효율 관점에서 많은 향상이 있었고, 소형화가 가능하고 저온의 온도환경에서 운영할 수 있어 열관리가 수월하며, 낮은 온도에서 작동하므로 1분 이내의 빠른 작동 시간으로 동작이 가능한 장점을 바탕으로 수소연료전지를 활용한 선박 추진 활용 실증연구에 적용되어 연구가 진행되고 있다.

고체 산화물 연료전지 (SOFC)

1980년대에 본격적으로 기술이 개발 된 연료전지로써, MCFC와 비슷한 목적으로 사용되지만 MCFC보다 효율이 우수하다. 최근 여러 선진국에서 가정용 및 자동차용 연료전지로 연구를 진행하고 있다.

양극에서 산소와 전자가 반응하여 산소이온을 생성하고, 생성된 산소이온은 전해질을 통해 음극에 전달되어 수소와 결합하여 전자 및 물을 생성한다. 순수 발전효율은 약 35~45 % 이지만 열병합발전을 통해 90 % 이상의 효율을 얻을 수 있다.

600 ℃ 이상의 고온에서 작동하기 때문에 해당 온도에서 분해 될 수 있는 천연가스, 메탄올, 에탄올, 바이오가스, 암모니아와 같은 다양한 연료가 사용 될 수 있고, 고가의 촉매가 불필요하며 일산화탄소 (CO) 함유율에 대한 영향이 없다는 장점이 있다. 하지만 동작하는데 걸리는 시간이 길며, 연료 전지의 고온으로 인해 NO_x가 발생되는 단점이 있고 (Chuahy and Kokjohn 2019), 가스 누출을 방지할 수 있는 세라믹 재료 기술 개발이 필요하다.

최근 중대형 상선의 보조 전원의 전력을 공급하기 위해 LNG를 연료로 사용이 가능한 SOFC를 소규모 컨테이너 박스로 만드는 연구도 진행되고 있다.

용융탄산염 연료전지 (MCFC)

1980년대에 기술이 개발된 연료전지로, 보통 대형 발전소나 아파트 단지, 대형 건물의 분산형 전원으로 이용이 되고 있으며, 미국, 일본에서 기술 개발을 완료하고 성능 평가가 진행되고 있다.

양극에서 수소 및 일산화탄소가 탄산이온과 반응하여 물, 탄산가스 및 전자를 생성하고, 생성된 탄산가스는 전해질을 통해 음극에 전달되어 산소와 결합하여 탄산이온을 생성한다. 순수 발전효율은 50% 이하이지만 열병합발전을 통해 80% 이상의 효율을 얻을 수 있다.

고체산화물연료전지(SOFC)와마찬가지로천연가스, 메탄올, 에탄올, 바이오가스, 암모니아와 같은 다양한 연료가 사용 될 수 있고, 고가의 촉매가 불필요하며 일산화탄소 (CO) 함유율에 대한 영향이 없다. 하지만 MCFC 또한 고온에서 작동하기 때문에 NO_x 발생에 대한 우려가 있으며, 반응이 느리고 부식성이 높다는 단점이 존재한다.

인산형 연료전지 (PAFC)

1970년대 민간차원에서 처음으로 기술 개발 된 연료전지로, 현재 많은 기술 개발이 이루어졌으며 미국, 일본에서 실용화 단계에 있는 연료전지이다. 양극에서 수소가 산화하여 수소이온을 생성하고, 생성된 수소이온은 전해질을 통해 음극에 전달되어 산소와 결합하여 물을 생성한다. 순수 발전효율은 40% 이하지만 열병합발전을 통해 85% 이상의 효율을 얻을 수 있다.

수소 외에 메탄올도 연료로 사용 할 수 있으며, 안정적이고 성숙한

기술로 평가되고 있지만 인산 증기가 발생 할 수 있다는 단점이 있다.

알칼라인 연료전지 (AFC)

1960년대 군사용으로 개발되어 현재 수전해 기술 중 가장 많은 상용화가 진행되어 있는 기술로, 귀금속 촉매를 사용하지 않아 비용이 저렴하고 높은 내구성이 장점인 연료전지이다.

전기 생산 방식은 양극에서 수소와 OH이온이 반응하여 물과 전자를 생성하고, 생성된 물은 전해질을 통해 음극으로 전달된 후 산소와 반응하여 OH이온을 생성한다. AFC의 순수 발전효율은 약 60% 이며, 열병합발전을 통해 80% 이상의 효율을 얻을 수 있다. 수소 외에 암모니아를 연료로 사용 할 수 있으며, 1분 이내의 빠른 시동이 가능하지만, 상대적으로 연료전지의 크기가 크다는 단점이 있다.

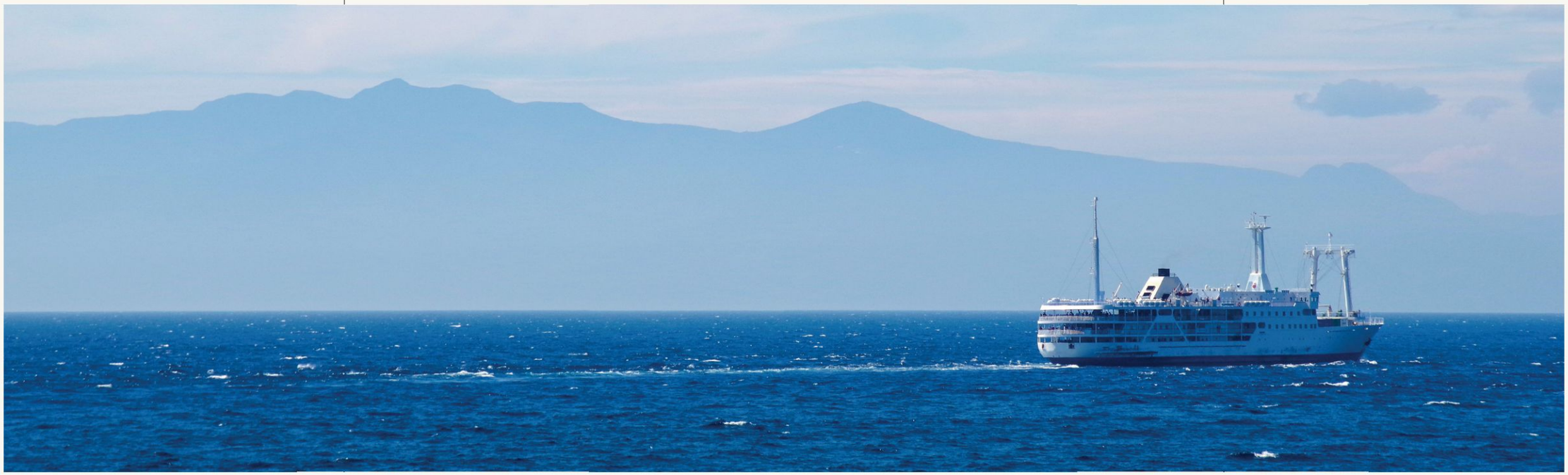
제1항 연료전지 동향

세계 연료전지 시장은 점차 확대되고 있으며, 다음 표와 같이 지속적으로 성장 할 것으로 전망된다.

세계 연료전지 시장 규모는 2009년 5,056억원에서 연평균 35.6%의 높은 성장률을 보일 것으로 전망되며, 2025년에는 66조 1,781억원으로 확대될 것으로 기대된다.

최근 주요국의 수송 부문 환경 규제가 강화됨에 따라 수소 인프라 보급 및 정책적 지원이 활발할 것으로 전망되며, 이에따라 수송용 연료전지의 확대가 다른 목적의 연료전지에 비해 클 것으로 예상된다. 수소 연료전기차 시장은 2015년 725대에서 연평균 150.6 %의 높은 성장률을 보이며 2020년에는 71,583대로 확대 될 것이라 예상되며, 수소 연료 전기차 이외에도 백업 전원용 장치 등 순수한 수소를 사용하는 연료전지의 상용화 보급이 수송용 연료 전지 확대 전망의 주요 요인으로 꼽힌다. 수송용 연료전지 분야에서 99 % 이상의 점유율을 보이는 PEMFC가 이로인해 지속적으로 보급 확대가 예상되며, 대형 발전용 및 건물용 등의 사용 확대로 인해 SOFC 및 MCFC 또한 점차 사용이 늘어날 것으로 예측된다.

단위: 억원	2009년	2010년	2013년	2015년	2020년	2025년
건물용	2103	6809	13719	15350	35075	107625
가정용	1803	1966	4594	18050	84900	166688
수송용	274	694	2869	6608	70850	313751
휴대용	11	30	1394	4125	23125	39813
기타	844	1177	1316	1191	10550	33906
합계	5056	10676	23892	45324	224500	661781



제3장



Carbon neutral

무탄소 선박 연료 추진기술 관련 유럽 주요국 국제기구 활동

제1절 ISO 표준 개발 현황

(a) 수소

현재 ISO/TC 197에서 수소 기술에 대한 표준 문서 개발에 대해 다루고 있다. ISO/TC 197의 범위는 수소의 생산, 저장, 운송, 측정 및 사용을 위한 시스템 및 장치 분야의 표준화이다. 이러한 표준은 해양 산업에 널리 이용되지 않았으나 최근에 착수된 수소 연료 차량용 기체 수소 연료 수급 프로토콜(ISO 19885 시리즈)의 기본 원칙은 해상 선박의 벙커링에 사용할 수 있고 특히 선박 적용을 위해서는 ISO 19885 시리즈 내에서 별도의 표준을 개발해야 한다. 또한 액체 수소 벙커링 작업을 다루는 액체 수소 연료 공급 프로토콜(ISO 19886)은 향후 새로운 작업 항목으로 포함되어 있다. 선박에서 수소 연료 적용 시 활용가능한 ISO 표준은 다음과 같다.

ISO TR 15916 수소 시스템의 안전을 위한 기본 고려 사항

ISO TR 15916은 수소에 대한 안전 관련 특성 및 관련 고려 사항에 대한 개요를 제공한다. 또한 수소 취성을 고려하는 방법을 포함하여 적절한 재료 선택 기준을 제안하고 있으며 동문서 부속서 C는 수소의 저온으로 인한 재료에 미치는 영향을 포함한다.

ISO/TC 220 극저온 용기

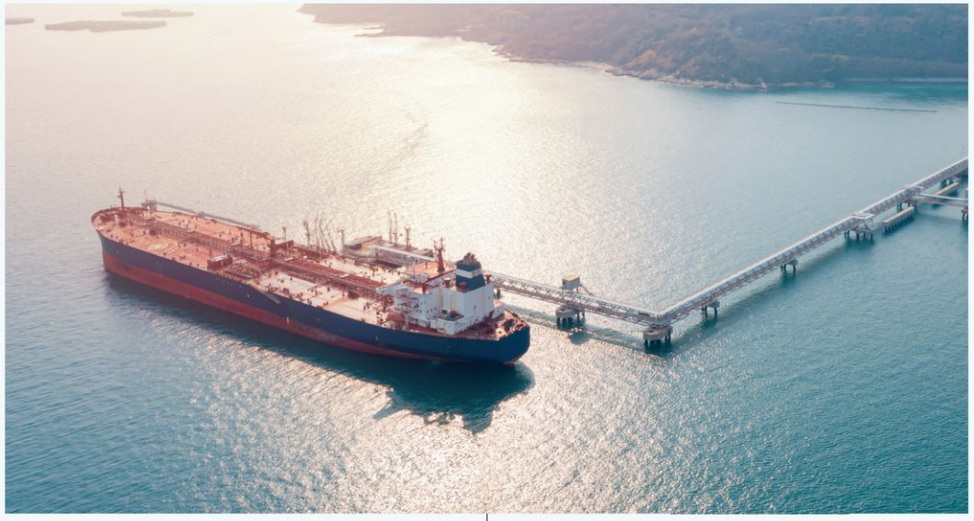
냉장 액화 가스(refrigerated liquefied gases)의 저장 및 운송을 위한 극저온 육상 기반 단열 저장 용기(진공 또는 비진공)에 대한 표준이다. 또한 용기의 설계 및 안전, 가스/재료 호환성, 절연 성능 및 장비의 작동 요구 사항과 관련된 내용을 다루고 있다.

ISO 19880–3:2018 기체 수소 – 연료충전소

이 표준의 부분들은 다른 가압 기체 수소 시스템에도 유용하게 활용될 수 있다. 특히 파트 1 일반 요구 사항, 파트 3 밸브 및 파트 6 부착품이 여기에 해당한다.

감지장치 ISO 26142:2010 수소 감지 장치 (고정식)

이 표준은 수소 농도를 측정하고 모니터링하는 고정식 수소 감지 장치에 대한 성능 요구 사항 및 테스트 방법을 정의한다. 이 표준은 질소



Standards	내용
ISO 5771:2008	무수 암모니아 이송을 위한 고무 호스 및 호스 어셈블리 – 사양
ISO 7103:1982	공업용 무수 액화 암모니아 – 샘플링 – 실험실 샘플 채취
ISO 7105:1985	공업용 무수 액화 암모니아 – 수분 함량 측정 – Karl Fischer 방법
ISO 7106:1985	산업용 액화 무수 암모니아 – 오일 함량 측정 – 중량 및 적외선 분광법
ANSI/CGA G–2.1–2014	무수 암모니아의 저장 및 취급에 대한 요구 사항
ASHRAE Standard 15–2019	냉동 시스템에 대한 안전 표준

퍼지, 환기 또는 수소 농도에 해당하는 시스템 차단과 같은 안전 운전을 위한 수소 감지 장치를 다루고 있으며 이는 인증 목적으로 개발되었다.

ISO 15649:2001 수소배관망

석유 및 천연 가스 산업 배관에 대한 표준 ISO 15649:2001은 수소 기술에 대한 지침으로도 사용된다. 이 표준은 운송 파이프라인 및 관련 플랜트를 제외하고 시설 내의 배관 및 포장된 장비에 적용된다.

압력 완화 장치

ISO 19882:2018 기체 수소 – 압축 수소 차량 연료 용기용 온도감응식 압력 안전장치

(b) 암모니아

국가규정및ISO를포함한산업표준은주로냉매로사용되는암모니아 및 암모니아가 포함된 냉동 시스템에 대해 개발되었으며, 암모니아와 관련된 ISO 표준은 일반적으로 화학산업의 표준화를 다루는 ISO/TC 47에서 개발되었다. 아래의 표준들은 선박에 암모니아 연료를 적용하는데 유용한 정보를 제공할 수 있다.

3. IGF 코드에서의 저인화점연료는 SOLAS II-2/4.2.1.1항에서 허용하는 온도보다 인화점이 낮은 연료를 말하며, 이는 인화점이 섭씨 60도 미만인 가스 또는 액체 연료를 의미함
4. IGF 코드 (The International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels) : 가스 또는 저인화점 연료를 사용하는 선박에 대한 국제 코드
5. IGC 코드 (The International Code for Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk): 액화가스 산적운반선의 건조 및 설비에 대한 국제 코드

제2절 IMO 의제 개발 현황

수소, 암모니아와 같은 무탄소 연료가 국제해운에 도입이 되기 위해서는 관련된 기술개발과 더불어 선박과 선원의 안전을 위한 IMO 안전 규정 개발이 선행되어야 한다. 무탄소 연료의 대부분은 인화점 60도 이하의 저인화점 연료[3]이기 때문에 이러한 연료를 사용하는 선박은 IGF 코드[4]를 적용 받을 것으로 예상된다. IGF 코드는 기본적으로 IGC 코드[5]를 적용 받는 선박을 제외한, 가스 또는 저인화점 연료를 주추진 연료로 사용하는 선박에 대한 안전 규정을 제공하기 위하여 개발되었다. 천연가스를 포함한 다른 가스연료 및 저인화점 연료에 대한 규정 개발 경과는 다음 그림과 같다.



그림 10 IGF 코드 개발 경과

(a) IGF 코드 채택 과정

노르웨이는 자국 내 천연가스 추진 선박의 승인 및 운영 경험을 바탕으로 2004년 MSC 78차 회의에서 천연가스 추진 선박 관련 국제규정을 개발할 것을 제안하였다. 이후 IMO 전문위원회인 BLG를 중심으로 안전규정 개발에 착수하였다.

2006년 BLG 10차에서는 규정 개발 단계가 초기인 점과 여객선을 포함한 다른 선종에도 추가로 적용해야 하는지에 대한 범위 결정 등의 정책적인 현안도 있는 점을 고려하여, IGF 코드 개발 보다는 잠정지침서를 먼저 개발하는 것에 합의하였다. 이에 따라, 2009년에 MSC 86차에서 "천연가스 연료 선박의 안전에 대한 잠정지침서(Interim Guidelines for Safety of Natural Gas Fuelling Engine Installation in Ships)"인 결의서 MSC 285(86)를 채택하였다. 본 잠정 지침서는 2010년에 발효되었으며, 내연기관용 CNG, LNG 등 천연가스를 연료로 사용하는 국제 운항을 하는 선박에 적용되었으며, IGF 코드 개발을 위한 기초가 되었다. 2009년 2월 BLG 13차에서는 잠정지침서(결의서 MSC.285(86)) 개발 완료와 동시에 천연가스를 연료로 하는 IGF 코드 개발 작업을 시작하였다. 2015년 6월 MSC 95차에서 마침내 IGF 코드가 채택되었으며, 2017년 1월 1일부터 발효가 되어, 국제항해에 종사하는 500톤 이상의 모든 저인화점 연료를 추진에 사용하는 선박이 본 코드를 적용받게 되었다.

(b) IGF 코드 개발 현황

현재 개발된 IGF 코드는 내연기관, 보일러 및 가스 터빈 등을 통해 사용되는 천연가스(LNG 또는 CNG 형태)의 안전 요건에 대한 세부 요구 사항(Part A-1, B-1, C-1)만 포함되어 있다. 향후 다른 연료에 대한 요건은 IGF 코드 내 별도 Part(예, Part A-2, B-2, C-2)로 포함될 것으로 예상된다. 천연가스의 규정 개발과정과 마찬가지로 새로운 연료에 대한 안전규정은 IGF 코드에 포함되기 앞서 잠정지침서가 먼저 개발되는 추세에 있다. 이는 잠정지침서의 선박에 적용을 통해 경험을 축적한 후 검증된 규정을 IGF 코드에 포함시키기 위함이다.

한편 IMO 선박 온실가스 감축을 위한 초기전략에 포함된 의욕 수준을 만족하기 위해서는 이산화탄소 배출량이 적은 저탄소 및 무탄소 대체 연료의 도입은 필수적이다. 이에 따라 MSC 및 산하 전문위원회 CCC에서는 추가적인 가스연료 및 저인화점 연료에 대한 국제 규정을 제시하기 위하여 현재 지속적인 노력을 기울이고 있으며 잠정지침서 개발을 포함한 주요 작업 사항은 다음과 같다.

메틸/에틸 알코올을 연료로 사용하는 선박의 안전을 위한 잠정지침

2013년 BLG 17차에서 스웨덴은 천연가스에 추가하여, 메틸/에틸 알코올을 연료(methyl/ethyl alcohol)로 하는 선박에 대한 안전 규정 개발할 것을 제안하였으나 천연가스 연료 관련 규정 개발 작업의 시급성을 고려하여, 작업 우선순위에서 배제되었다. 2015년 CCC 2차부터 연료전지와 더불어 메틸/에틸 알코올 연료 선박에 대한 잠정지침 개발을 위하여 본격적인 논의에 착수하였다. 2019년 CCC 6차에서 지침 개발을 완료하였으며, 2020년 MSC 102차에서 잠정 지침[6]을 승인하였다.

액화 석유 가스(LPG) 연료를 사용하는 선박의 안전 규정에 관한 잠정지침 개발

2019년 CCC 6차에서 대한민국의 제안으로 LPG 연료를 사용하는 선박의 안전 규정을 다루는 잠정지침서 개발을 위해 논의 중에 있다.

연료전지를 사용하는 선박의 안전을 위한 잠정지침

2014년 CCC 1차에 CESA(유럽조선공업협회)에서 연료전지에 대한 규정을 IGF Code내에서 개발할 것을 제안하였다. 초기에는 IGF 코드 내 관련 규정을 포함시킬려고 하였으나 2018년 CCC 5차에서 선박 내 연료전지의 적용이 초기 단계인 점을 고려하여 기술에 대한 경험이 축적되는 동안 코드 개정보다는 연료전지에 대한 잠정지침을 개발하기로 하였다. 2021년 CCC 7차에서 개발된 잠정지침을 승인하였고 2022년 MSC 105차에서 최종 승인 될 예정이다.

수소, 암모니아와 같은 무탄소 연료가
국제해운에 도입이 되기 위해서는
관련된 기술개발과 더불어
선박과 선원의 안전을 위한
IMO 안전 규정 개발이
선행되어야 한다.



6. MSC.1/Circ.1621 Interim guidelines for the safety of ships using methyl/ethyl alcohol as fuel



(c) 수소 및 암모니아 연료 사용에 관한 규정 개발

암모니아

암모니아는 독성 화학 물질이며 암모니아를 선박 연료로 사용하기 전에 추가적인 안전 문제를 해결하는 것이 중요하다. 가스 운반선에 암모니아를 운송하고 냉각을 위한 냉매로 암모니아를 사용한 경험이 있으나 선박의 연료로서 암모니아를 도입하면 선박과 선원의 안전과 관련된 불확실성을 가지고 있다. 2021년 CCC 7차에서 유럽 주요국에서는 암모니아 연료 추진 선박에 관한 규정 개발작업을 CCC 작업 계획에 포함하는 것을 제안[7]하였으며, 2022년 CCC 8차부터 논의될 것으로 예상된다. 암모니아 연료 사용에 대한 상세 규정이 개발되기 전까지는 SOLAS Reg. II-1/55에 따라 대체 설계 접근 방법[8]이 적용되어야 한다.

암모니아는 현재 IGC 코드 적용을 받는 암모니아 운반선을 통해 대량으로 운송될 수는 있지만 동 코드 16.19.2항에 따라 독성 화물인 암모니아는 선박 연료로서 사용이 허용되지 않는다. 가스 운반선에서 암모니아의 연료 사용을 하기 위해서는 IGC 코드 개정이 필요하다. 2020년 MSC 102차에서 마샬 아일랜드, IACS 등은 IGC 코드 자체에 대한 개정 및 최신화를 위한 검토 작업을 제안[9]하였으며, 암모니아 연료의 사용을 허용하기 위한 개정작업도 함께 다루어 질 것으로 예상된다. 2022년 CCC 8차부터 IGC 코드 재개정작업에 대해 논의할 예정이다.

수소

앞서 언급한 연료전지와 관련된 잠정지침은 연료전지 설치와 관련된 안전 요건에 국한되며, 연료 저장 및 연료 공급 시스템에 대한 세부사항은 다루지 않고 있다. 이에 따라, 연료 저장 및 연료 공급 시스템에 대해서는 SOLAS Reg. II-1/55에 따라 대체 설계 접근 방법이 적용되어야 한다. 예를 들어, IMO에서는 연료전지 설치에 대한 잠정지침은 최종 승인 예정 (2022년 MSC 105차 승인)에 있지만 수소 연료의 저장, 벙커링 및 연료 공급 시스템 등에 대해서는 별도 규정이 개발되기 전까지는 대체 설계 승인과정을 거쳐야 한다. 2021년 CCC 7차에서 유럽 주요국에서는 수소 연료선박의 안전을 위한 규정 개발 작업을 착수할 것을 제안[10]하였으며, 2022년 CCC 8차부터 논의될 것으로 예상된다.

수소 운송 규정과 관련해서 2014년 MSC 94차에서 일본과 호주는 "액화수소 산적운송을 위한 안전성 요건 개발"을 CCC 작업 프로그램에 포함시킬 것을 제안하였으며, 액화 수소 산적운송을 위한 잠정지침 개발의 필요성에 대한 공감대가 형성되었다. CCC 2차 및 3차에서 논의를 거쳐 2016년 MSC 97차에서 액화수소 산적운송에 관한 안전 규정에 관한 잠정권고사항을 결의서MSC.420(97)로 채택하였다. 안전 규정의 적용은 액화수소를 산적운송하는 호주-일본 간 시험 선박(Pilot Ship)에만 적용하기 위한 규정으로 제한하고, 시험 선박을 제외한 선박에 적용하는 경우 추가 규정을 개발하기로 하였다. 2021년 MSC 105차에서 일본과 호주는 시험선박의 경험을 바탕으로 액화수소 산적운송에 관한 안전규정에 관한 잠정 권고 사항을 개정할 것을 제안[11]하였으며 향후 CCC에서 논의될 것으로 예상된다.

(d) 대체 설계 승인

IGF 코드 내 별도 요건이 포함되지 않은 다른 저인화점 연료를 선박에 사용하는 경우, 코드의 Part A 에서 규정하고 있는 '대체 설계' 접근 방식으로 승인되어야 한다. 즉, IGF 코드 상에는 LNG 외의 다른 연료에 대한 상세요건이 포함되어 있지는 않지만, 기존 연료를 사용하는 선박과 안전 수준이 동등하다는 것이 입증되어야 선박에서 사용이 가능하다는 의미이다. 예를 들어, IMO에서는 연료전지 설치에 대한 잠정지침은 최종 승인 예정(2022년 MSC125차 승인)에 있지만 현재 수소연료전지를 선박에 적용하려면 대체 설계 프로세스를 따라야 한다. 아래 그림은 SOLAS Reg. II-1/55에서 위험도 기반의 동등성을 입증하는 승인절차(MSC.1/Circ 14551)를 나타낸 것이다.

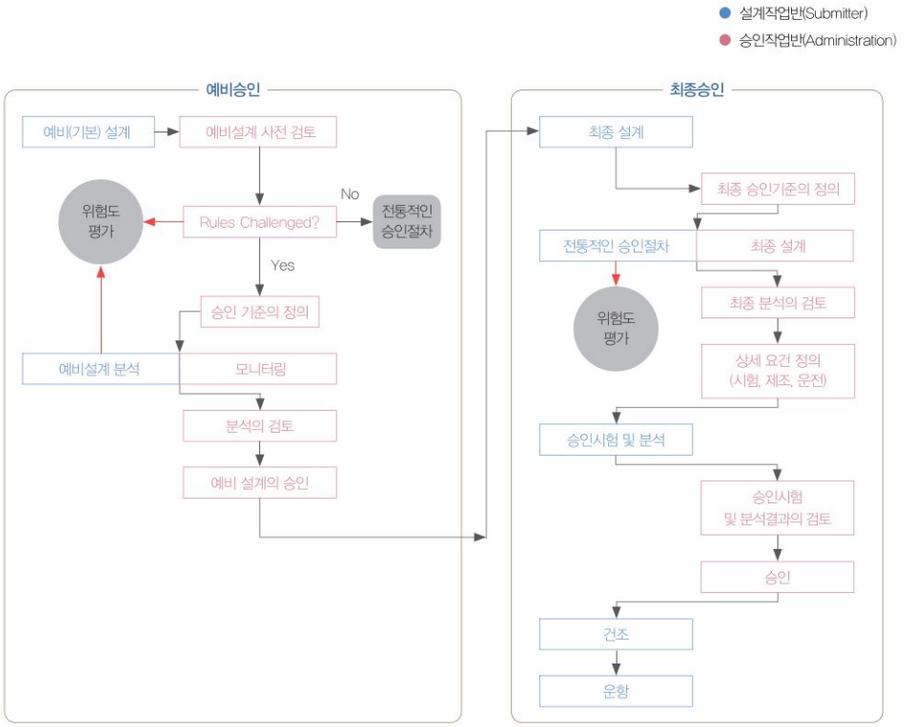
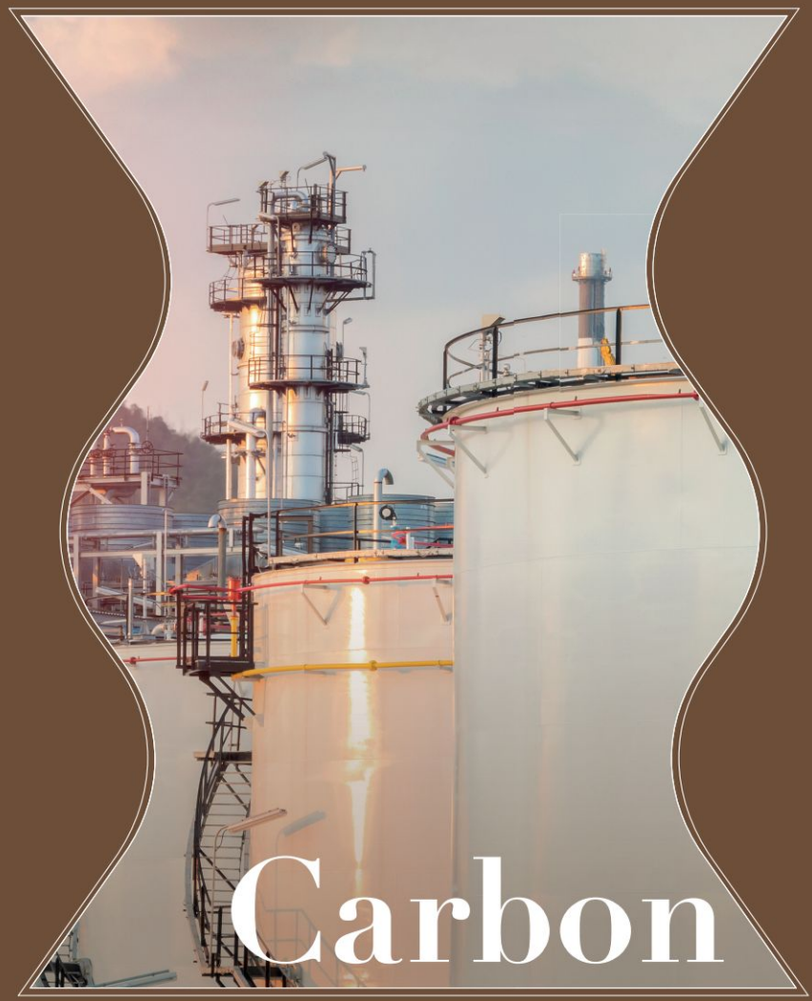


그림 11 MSC.1/Circ 1455에 따른 대체 설계 및 승인 프로세스

7. CCC 7/3/9 Comments on CCC 7/3/Rev.1 Report from the Correspondence Group and proposal for developing guidelines for the use of ammonia and hydrogen as a fuel
8. MSC.1/Circ.1455 Guidelines for the approval of alternatives and equivalents as provided for in various IMO instruments
9. MSC 102/21/1 Proposal for a new output to conduct a focused review of the International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquified Gases in Bulk (IGC Code) (Marshall Islands, IACS and SIGTTO)
10. CCC 7/3/9 Comments on CCC 7/3/Rev.1 Report from the Correspondence Group and proposal for developing guidelines for the use of ammonia and hydrogen as a fuel
11. MSC 104/15/11 Revision of the interim recommendations for carriage of liquefied hydrogen in bulk
12. MSC.1/Circ.1455 Guidelines for the approval of alternatives and equivalents as provided for in various IMO instruments

제4장



Carbon dioxide

이산화탄소 포집기술 개발 동향 및 프로젝트

제1절 이산화탄소 포집 기술 개발동향

해양 활동으로 인한 CO_2 배출량 감소라는 IMO 목표는 에너지 효율 개선방법(EEDI, EEOI 및 SEEMP)을 통해 이루어지고 있는 중이지만, 이산화탄소 포집기술 (CCS)는 여전히 기후 변화를 완화하는 합리적이고 실행 가능한 방법으로서 선박에 CCS를 적용하는 것은 다른 저탄소 운송 기술과 함께 CO_2 배출량을 완화하는 효과적인 방법으로 알려져 왔다.

CCS 적용의 궁극적 목적은 배출량을 제어하기 위한 실현 가능하고 적절한 방법과 감소를 향상시키는 선택적 방법을 제공하는 것이다. 하지만, 현재 CCS를 개발하고 활용하는 분야는 해운보다 육상 발전소 및 산업 프로세스에서 상대적으로 더 활발하게 이루어지고 있으며 문헌 검토에 따르면 현재 CCS 기술은 선박에 적용되기 위한 많은 장애물을 넘어야 가능한 것으로 알려져 있다 (Zhou and Wang 2014).

CCS를 선박에 적용시키기 위한 대표적인 접근 방식은 아민 흡수, 압력 스윙 흡수, 열 통합 증류 및 막 공정이 있다. 산업용 및 발전소를 위한 이러한 방법들은 배출물에서 CO_2를 포집한 다음 적절하고 수익성 있는 위치에 수송 및 저장하는 것을 목표로 CO_2를 깊은 바다나 지하의 식염수 대수층에 CO_2를 가두는 것이 일반적인 방법이다.

이런 CO_2를 수송하기 위해서는 기체 상태 또는 고밀도 액체 상태로 만드는 방법이 있다. 기체 상태에서 CO_2가 차지하는 부피가 상당하기 때문에 CO_2를 고밀도 상태로 전환하는 것은 육상 운송뿐만 아니라 선박 응용 분야에서도 쉽게 찾아볼 수 있다 (Rubin and De Coninck 2005). 이러한 이산화탄소 포집 방법은 육상에서는 편리하고 효율적인 운송 및 저장을 위해 압축 프로세스를 적용한다.

그러나 선상에 CCS를 설치하는 경우 추가적인 전력 소모, 저장 공간 요구 사항 및 액체 화물 운송에 따른 안전 문제와 같은 심각한 문제가 발생한다. 또한, CO_2의 액화 또는 압축에는 상당한 에너지가 필요하므로 높은 에너지 수요가 발생한다. 이는 기체에서 고밀도 액체상태로 변화하면서 압축에 많은 전력이 필요하기 때문이다.

더 넓은 공간이 요구되는 것 또한 CCS 기술이 넘어야 할 장애물이다. CCS는 기본적으로 새로운 장비 및 저장 탱크의 설치로 인해 선박에 새로운 공간이 추가로 요구된다. 선상 공간이 제한되어 있으므로 CCS를 위한 이러한 공간은 화물 적재 공간에 미치는 영향이 없도록 이상적으로 작아야 한다. 그렇지 않으면, 선박의 CO_2저장이 선박의 화물운송 성능에 심각한 영향을 미칠 것이다.

CO_2 압축의 또 다른 문제는 CO_2의 온도나 압력의 약간의 변화로 인해 밀도와 부피 변화를 일으키고 심지어 상태 변화를 일으킬 수 있다는 것이다(Barthelemy, Bourdeaud'huy et al. 2010). 액체 CO_2가 기체로 변하는 동안 고압의 누출 또는 폭발의 위험이 있다. 액화 CO_2의 저장 조건이 매우 까다롭기 때문에 저장 탱크 재료에 대한 요구 사항도 높다. 선박이 운항됨에 따라 포집된 CO_2는 탱크에 액체상태로 저장하게 되고 부분적으로 채워진 저장 탱크에서 슬로싱 효과를 유발할 수 있다. 이는 선박의 안정성에 상당한 영향을 미칠 것으로 보여진다. 따라서, 이산화탄소 포집기술이 이러한 장애물들을 극복하면서 선박에 적용되기 위해서는 아직 많은 시행착오들을 겪어야 할 것으로 보여진다.

제2절 이산화탄소 포집 기술 관련 프로젝트

유럽에서 진행 중인 프로젝트 중 하나는 Process Systems Enterprise (PSE)와 선급 협회 DNV사이의 협력으로, 해양 온실 가스 배출을 줄이고 규정을 충족하기 위해 선상 이산화탄소 포집기술 시스템에 대해 개념설계 연구를 수행하였다. 2013년에 종료된 이 프로젝트는 개념 설계를 성공적으로 완료했으며 결과적으로 이 개념이 기술적으로 실현 가능하고 선박에 CCS를 적용하면 선박 운항 시 CO_2 배출량을 65%까지 줄일 수 있기 때문에 더 많은 연구와 개발이 해양 CCS의 발전에 크게 도움이 될 것으로 보여지고 있다 (PSE 2013).

또 다른 이산화탄소 포집 기술 프로젝트로는 노르웨이의 Teco 2030과 미국의 Chart Industries는 대표적인 선박용 CCS 개발 프로젝트이다. 프로젝트는 순수한 액체 CO_2를 선박의 배기가스에서 분리시켜 극저온 저장 탱크에 비축한 뒤, 항구에 도착하면 지하에 영구적으로 저장하거나 농업, 에너지 또는 식품 및 음료 부문과 같은 탄소 소비 산업에 활용하는데 쓰일 예정이다. 이 방법을 통해 선박 배기 가스에서 배출되는 CO_2의 90% 이상 포집 가능하며 선박의 에너지 현존선 에너지 효율지수 (EEXI)와 탄소 집약도 지수(CII)에 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 기대한다 (technology 2021).

13. MEPC 76/7/44 Comments on document MEPC 76/7/5 suggesting to remove onboard CO_2 capture from individual ships CII calculation



제3절 ISO 표준 개발 현황

ISO TC265에서 이산화탄소 포집, 운송, 지질학적 저장방법 등에 관련된 활동, 검증, 감시, 계량, 위험관리, 환경계획, 공사, 설계에 대한 표준을 개발하고 있다. 현재까지 선상에서의 이산화탄소 포집기술과 관련된 ISO 표준은 전무하지만 육상에서의 이산화탄소포집 및 저장 기술과 관련된 ISO 표준과 기술문서는 다음과 같다.

ISO 27913 파이프라인 운송 표준

CO_2 포집 현장에서 CO_2가 저장 또는 다른 목적으로 사용되는 저장 시설까지 CO_2 흐름 수송에 대한 표준을 다루고 있고 기존 파이프라인 표준에서 다루지 않는 추가 요구 사항 및 권장 사항을 다루고 있다.

ISO 27914 지질 저장 표준

CO_2 스트림의 지질학적 저장에 대한 요구 사항 및 권장 사항을 다룬다. 환경, 천연 자원 및 인간 건강에 대한 위험을 최소화하는 방식으로 CO_2의 안전하고 장기적인 보관를 위해 개발되었다.

ISO 27196 CO_2-EOR을 사용한 저장

EOR(enhanced oil recovery) 프로젝트와 관련하여 장기간 안전한 저장을 위해 CO_2의 정량화가 요구되는 석유 및 기타 탄화수소의 EOR 작업에 주입되는 CO_2에 적용된다

ISO 27917 어휘, 교차(Crosscutting) 용어

EOR(Enhanced Oil Recovery) 작업과 관련된 저장을 포함하여 이산화탄소 포집, 운송 및 지질학적 지하 저장 분야에서 일반적으로 사용되는 포괄적 용어 목록을 정의한다.

ISO 27919 발전소와 통합된 후연소 CO_2 포집

보일러나 가스터빈에서 CO_2를 생성하는 석탄, 석유, 천연 가스 및 바이오매스 파생 연료와 같은 탄소질 연료(carbonaceous fuel)를 연소하는 화력 발전소와 CO_2 포집이 통합된 경우를 다룬다

ISO/TR 27912 포집 시스템

CO_2 포집 시스템을 명확히 하는데 필요한 원칙과 정보를 설명하고 이해 관계자에게 CO_2 포집 표준개발에 필요한 지침과 지식을 제공한다.

ISO/TR 27915 정량화 및 검증

프로젝트 단계에서 GHG 배출량 및 감소량을 정량화하고 검증하기 위한 "우수 사례"와 관련된 이슈를 식별한 문헌을 검토하였다. 그 범위는 CCS 체인의 모든 구성요소(예: 포집, 운송, 저장)를 포함하며 프로젝트 건설 및 운영에서 폐쇄 후 활동에 이르기까지 프로젝트 단계별 배출량 및 배출량 감소를 추정하기 위한 전과정 평가 접근 방식을 포함하고 있다.

ISO/TR 27918 통합된 CCS 프로젝트에 대한 전과정(Lifecycle) 위험 관리

CCS 프로젝트에 대한 전반적인 위험 관리를 위한 표준으로서 특히, 이 문서는 포집, 운송 및 저장 전반에 걸쳐 위험과 함께 포괄적인 다단계 CCS 프로젝트(multiple-stage CCS project)에 영향을 미치는 위험에 대해 집중적으로 다루고 있다.

ISO/TR 27921 CO_2 스트림 구성

주로 일반적인 정정(purification) 옵션을 고려하여 포집 장치 하류의 CO_2 스트림의 주요 구성 성분의 특성을 다룬다.

CCS 적용의 궁극적 목적은
배출량을 제어하기 위한 실현 가능하고 적절한 방법과
감소를 향상시키는 선택적 방법을 제공하는 것이다.

제4절 IMO 의제 활동 현황

선박에 이산화탄소포집기술이 적용되는 경우 현재 IMO 에너지 효율 프레임워크인 EEDI, EEXI 또는 CII 수식에서는 포집으로 인한 이산화탄소 감축량을 다루지 않고 있다. 이러한 측면에서 2021년 MEPC 76차에서 선상 이산화탄소 포집 시스템에 의한 이산화탄소 감축량 반영을 위한 탄소집약도(CII) 계산식 개정안을 제안[13]되었으나 포집기술이 CII 프레임워크의 현 단계에서 통합될 만큼 충분히 성숙되지 않았다는 유럽국가들의 의견을 반영하여 선상 이산화탄소포집 시스템에 관한 요소가 탄소집약도 개정안에 반영되지 못했다.

제5장



Europe

그린 수소/그린 암모니아 생산 계획 및 유럽 주요국 프로젝트

제1절 수소, 암모니아 생산계획 및 프로젝트 관련

제1항 유럽의 수소, 암모니아 생산계획

수소와 암모니아의 생산 및 인프라는 유럽과 전 세계에서 빠르게 성장하고 있다. 이는 공급원료, 연료 또는 에너지 운반체 및 저장 장치로 사용될 수 있으며 산업, 운송, 전력 및 건물 분야 전반에 걸쳐 많은 응용 가능성이 있기 때문이다. 가장 중요한 것은 CO_2를 배출하지 않으며 대기 오염이 거의 없다는 장점이 있다 (Union 2014).

2050년까지 탄소 중립에 도달하겠다는 EU의 약속과 파리 협정의 목표를 이행하는데 수소의 역할은 필수적이다. 하지만 수소가 기후 중립에 기여하려면 지금보다도 훨씬 더 큰 규모로 생산이 가능하여야 하며 생산과정은 완전히 탈탄소화되어야 한다는 조건이 남아있다. 오늘날, 재생 에너지의 급격한 비용 감소, 기술 발전 및 온실 가스 배출을 획기적으로 줄여야 하는 시급성으로 인해 수소 및 암모니아에 대한 개발 가능성은 무궁무진하다.

수소는 배터리 및 운송과 함께 재생 에너지 저장을 위한 매개체로서 이러한 격차를 메울 수 있는 강력한 잠재력을 가지고 있으며, 계절적 변화로 발생할 수 있는 수요 변동량에 대한 수요를 만족시킬 수 있고 지역적으로 멀리 위치한 생산지로부터도 공급이 가능하다. 이러한 상황을 그림[12]은 잘 보여주고 있으며 2018년 11월에 발간된 기후 중립적 EU를 위한 계획에 따르면, 유럽의 에너지 믹스에서 수소의 비중이 현재 2–4 %미만이었지만 2050년에는 13–14%까지 증가할 것으로 예상된다.

빠른 속도로 청정 수소를 대규모로 개발하는 것은 EU가 더 높은 기후 목표를 달성하고 비용 효율적인 방식으로 온실 가스 배출량을 최소 50%, 2030년까지 55%로 줄이는 핵심이다. 더욱이 유럽은 청정 수소 기술 제조 분야에서 매우 경쟁력이 있으며 에너지 운반체로서 청정 수소의 글로벌 개발로부터 혜택을 받을 수 있는 좋은 위치에 있다. 유럽의 재생 가능한 수소에 대한 누적 투자는 2050년까지 최대 1,800억~4,700억 유로, 저탄소 화석 기반 수소의 경우 3~180억 유로에 이를 것으로 예상되며, 재생 에너지 기술에 대한 EU의 리더십과

결합하여 다양한 산업 부문 및 기타 최종 용도에 서비스를 제공하는 수소 가치 사슬의 출현은 직간접적으로 최대 100만 명을 고용할 수 있다고 내다보고 있다. 분석가들은 청정 수소가 2050년까지 세계 에너지 수요의 24%를 충족하고 연간 매출이 6,300억 유로에 이를 것으로 추정하고 있다. 그러나 오늘날 재생 가능한 저탄소 수소는 아직 화석 기반 수소에 비해 비용 경쟁력이 없기 때문에, 수소와 관련된 모든 기회를 활용하기 위해 유럽 연합은 전략적 접근 방식이 필요한 상황이다. 따라서 EU 산업은 2030년까지 전해조의 2x40GW에 도달한다는 야심 찬 계획을 수립하여 개발에 착수하고 있다.

수소나 암모니아는 특히 선박용 연료 전지 개발과 관련된 프로젝트가 주를 이룬다. 처음 연료 전지를 발전기로 사용하는 것은 1842년 William Grove에 의해 발명되었다(Andújar and Segura 2009). 내연기관은 선박에서 성공적으로 사용되고 있었기 때문에 연료전지는 우주탐사와 같은 특수한 목적에만 적용되어 왔다. 하지만 환경에 대한 인식이 증가하면서 선박에서 발생되는 환경 오염 물질을 줄이기 위한 여러 대안의 일환으로 수소 연료에 대한 관심이 높아지면서 수소를 연료로 이용할 수 있는 수소 연료 전지 추진 개발에 박차를 가하게 되었다 (Tronstad, Åstrand et al. 2017).

지금까지 여러 데모 시스템이 개발되어 선박에서 테스트되었으며 지난 50년 동안 끊임없이 진화해왔다. 현재는 대형 상선, 군용 잠수함 및 유람선에 응용하기 위한 여러 가지 배기 가스 감소, 효율성 증가, 단순한 작동 및 설계 방식 그 가능성이 무궁무진한 기술로 요트에서 페리, 자동차 운반선에서 잠수함에 이르기까지 다양한 연료 전지 기술을 선박에 활용하며 개발될 예정에 있다 (McConnell 2010).

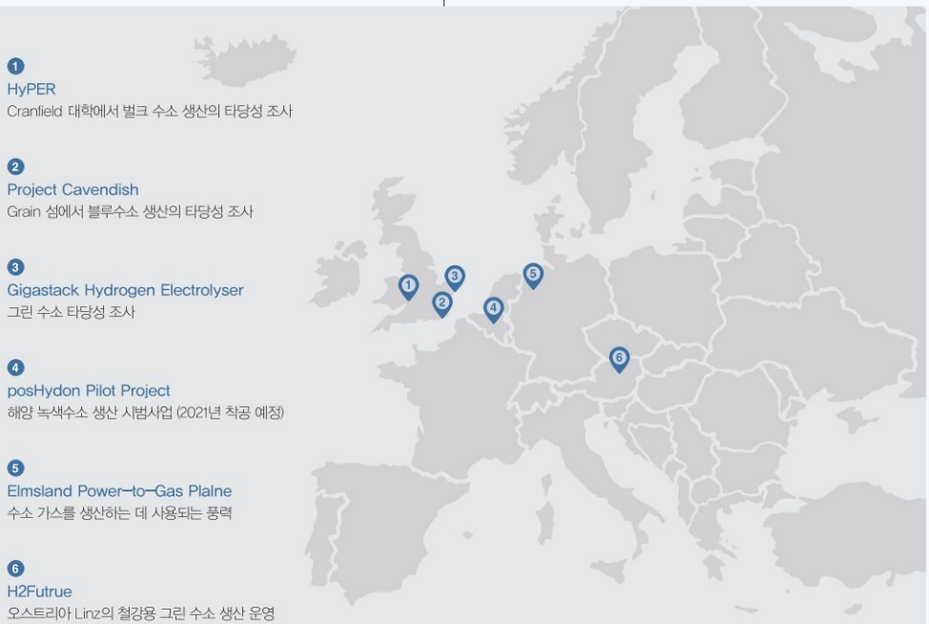


그림 12 유럽의 대표적인 수소 생산 관련 지형도 (Government 2020).

프로젝트	기간	연료 전지 종류	연료	적용대상	프로젝트 파트너
Class 212	1980–1998	PEMFC	수소	Submarine AIP	Howaldtswerke–Deutsche Werft
SSFC	1997–2003	MCFC/PEMFC	디젤	Naval Ship	Office of naval research
DESIRE	2001–2004	PEMFC	디젤	Naval Ship	Energy research centre Nld
FCSHIP	2002–2004	MCFC	디젤	–	Norwegian Shipowners' Ass.
FellowSHIP	2003–2013	MCFC	LNG	Offshore supply	DNV research and innovation
FELICITAS	2005–2008	SOFC, PEMFC	디젤, LPG, CNG	Mega yacht	Fraudnhofer institute
MC-WAP	2005–2011	MCFC	디젤	RoPax, RoRo	CETENA
ZEMSHIP	2006–2010	PEMFC	수소	Passenger	Alster Touristik GmbH
METHAPU	2006–2009	SOFC	MeOH	Car carrier	Wartsila corporation
Nemo H2	2008–2011	PEMFC	수소	Passenger	Fuel Cell Boat BV
SchIBZ	2009–2016	SOFC	디젤	Multipurpose	ThyssenKrupp marine systems
PaXell	2009–2016	HT-PEMFC	MeOH	Cruise ship	Meyer Werft

표 3 대표적인 해양 연료 전지 응용 연구 프로젝트 (Van Biert, Godjevac et al. 2016).

표 3은 해양 부문에서 대표적인 연료 전지 응용 연구 프로젝트들을 보여주고 있다. 프로젝트는 연료 전지 사용 가능성 평가, 규칙 개발 및 타당성 연구, 개념 설계부터 다양한 선박의 연료 전지 테스트에 이르기까지 다양하다. 다음은 각 프로젝트들의 설명을 추가하였다.

Class 212 submarines

잠수함용 PEMFC 기반 AIP 시스템에 대한 첫 번째 예비 연구는 1970년대에 시작되었다. 그 결과 1980년대 초에 개발이 완료되어 1998년에 HDW (Howaldtswerke–Deutsche Werft)에서 클래스 212 잠수함이 생산되었다(Sattler 2000). Siemens 연료 전지 시스템은 2개의 120kW PEMFC 모듈로 구성되며 수소는 금속 수소화물에 저장되고 액체 산소는 진공 단열 탱크에 저장된다.

SSFC

1997년에 시작된 선박 서비스 연료 전지(SSFC) 프로젝트는 해군 함정 및 기타 선박용 디젤 추진 연료 전지 시스템 개발을 통해 연료 소비, 소음, 열 신호, 유지 관리 비용 및 배기가스를 줄이는 것이 목표다. 또한 선박 전체에 발전기를 배치하여 2.5MW MCFC 및 PEMFC 시스템에 대한 개념 설계가 개발되었으며 테스트되었다. 하지만 시스템이 복잡할 뿐만 아니라 구동에 걸리는 시간이 길고 합리적이지 못한 가격이 문제로 남아있다 (Allen, Ashey et al. 1998, Bourne, Nietsch et al. 2001, Privette, Flynn et al. 2009).

DESIRE

연료 전지를 사용한 디젤 개질(DESIRE) 프로젝트는 2001년에 시작되어 해군용으로 사용되는 PEMFC용 디젤 연료 프로세서의 25kW 기술을 개발했다. 소형 연료 전지 시스템과 연료 공급 시스템에 성공적으로 연결되었다. 하지만 황 제거, 과도한 부하와 관련된 문제가 여전히 남아있다 (Krummrich, Tuinstra et al. 2006).

FCSHIP

선박용 연료 전지 기술(FCSHIP) 프로젝트에서 유럽 파트너의 대규모 컨소시엄은 해상 연료 전지 응용 분야에 대한 향후 연구 및 개발을 위한 로드맵을 제공하기 위해 협력했으며 운영 및 안전 요구 사항을 조사하고 개념 설계를 개발했다. 또한 이 프로젝트는 MCFC 시스템의 수명 주기 영향을 평가하고 기존의 디젤 엔진 발전기 세트와 비교했다 (Alkaner and Zhou 2006).



FellowSHIP

FellowSHIP 프로젝트의 해상 공급선 '바이킹 레이디 (Viking lady)' 호에 330kW LNG 연료 MCFC를 탑재했다. 연료 전지 시스템은 18,500시간 동안 성공적으로 작동되었으며 NO_x, SO_x 및 PM 배출이 감지되지 않고 44.4%의 순 전기 효율을 보였다 (Van Biert, Godjevac et al. 2016).

FELICITAS

연료 전지 파워 트레인 및 대형 운송 클러스터링(FELICITAS) 프로젝트는 메가 요트용 SOFC 보조 동력 장치를 포함한 여러 대형 파워 트레인을 연구했다. 플라이휠과의 혼성화뿐만 아니라 조사된 SOFC 기술의 다양한 해양화와 SOFC 시스템과 가스터빈, 난방 환기 및 공조 시스템의 결합을 조사했다 (Tse, Wilkins et al. 2011).

MC-WAP

2005년 해상용 MC-WAP을 위한 용융 탄산염 연료 전지 프로젝트의 목적은 RoPax, RoRo 및 유람선에서 선박용 테스트를 위한 0.5MW MCFC 보조 발전기를 개발하고 테스트하는 것이었다. 결과적으로, 기존 MCFC 연구 공장에 대한 테스트가 수행되었고 다양한 개념 설계가 개발되었다 (Specchia, Saracco et al. 2008, Bensaid, Specchia et al. 2009).

ZEMSHIP

여객선 FCS Alsterwasser는 ZEM SHIP (Zero Emission Ship) 프로젝트에서 수소 연료 PEMFC 시스템을 장착했으며 두 시즌 동안 성공적으로 운영되었다. 선박은 시험 주행 중 납산 배터리의 과열로 인한 화재로 크게 손상되었음에도 불구하고, 연료전지 시스템과 수소 저장고가 손상되지 않았기 때문에 이번 사고는 적용된 수소 안전 개념의 적합성을 입증했다 (Van Biert, Godjevac et al. 2016).

Nemo H2

Fuel Cell Boat BV는 암스테르담 운하 크루즈를 위한 여객선 Nemo H2를 개발했다. 55kW 납산 배터리 팩과 하이브리드화된 60-70kW PEMFC 시스템으로 추진된다(McConnell 2010). 이 선박은 2011년에 인도되었지만 영구적인 수소 충전소가 없기 때문에 현재까지 운용에 들어가지는 않았다.

수소 연료에 대한 관심이 높아지면서 수소를 연료로 이용할 수 있는 수소 연료 전지 추진 개발에 박차를 가하게 되었다.

SchIBZ

선박일체형 연료전지 (SchIBZ) 프로젝트는 2009년에 시작되어 현재까지 진행 중이다. 프로젝트의 목표는 'MS Forester' 선박에 0.5MW 디젤-개질기 통합 SOFC 시스템을 설치하고 평가하는 것이다. 설계 계산에 따르면 최대 55%의 LHV 효율을 얻을 수 있다. 지금까지 27kW 시스템은 1000시간 이상 동안 저유황 디젤에서 50% 이상의 전기 효율을 보여주었다. 해상에서 50kW 시스템을 사용한 테스트는 2016년에 계획되어 있다 (Van Biert, Godjevac et al. 2016).

Pa-X-el

Pa-X-ell 프로젝트는 SchIBZ 프로젝트와 동일한 프로그램의 일부이다. Pa-X-II 프로젝트는 유람선의 MeOH 연료 HT-PEMFC 시스템의 통합 및 안전 측면에 중점을 둔다. 조사에는 다양한 화재 구역에 연료 전지 배치, 저인화점 연료의 안전한 공급, 연료 전지의 열 및 전기 통합이 포함되며 장기 시험을 위해 120kW 연료 전지 컨테이너가 개발되었다 (Van Biert, Godjevac et al. 2016).



References

References

- Cinti, G., Discepoli, G., Sisani, E., Desideri, U.J.I.J.o.H.E., 2016. SOFC operating with ammonia: stack test and system analysis. 41 (31), 13583-13590.
- De Vries, N., 2019. Safe and effective application of ammonia as a marine fuel.
- DNV, 2020. Ammonia as a Marine Fuel, in: Brinks, H. (Ed.). DNV, Norway.
- Dolan, M., 2018. Pilot-Scale NH3-to-H2 System for FCEV Refuelling. NH3event 2018
- Rotterdam.
- Garabedian, C.G., Johnson, J.H., 1966. The theory of operation of an ammonia burning internal combustion engine. ARMY TANK-AUTOMOTIVE CENTER WARREN MI.
- GenCell, 2018. GENCELL A5.
- Ito, S., Uchida, M., Onishi, S., Fujimor, T., Kobayashi, T., 2018. Performance of Ammonia–Natural Gas Co-fired Gas Turbine for Power Generation, Proceedings of the 15th Annual NH3 Fuel Conference.
- Koch, E., 1945. Ammonia--a fuel for motor buses. J. Inst. Pet 31, 213.
- Lamm, E., 1872. Improvement in supplying steam to traveling-engines. Google Patents.
- MAN ES, 2020. MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia.
- Maritime cleantech, 2021. https://maritimecleantech.no/project/shipfc-green-ammonia-energy-system/.
- NH3car.com, 2021. Welcome to NH3 car.
- Okanishi, T., Okura, K., Srifa, A., Muroyama, H., Matsui, T., Kishimoto, M., Saito, M., Iwai, H., Yoshida, H., Saito, M.J.F.C., 2017. Comparative Study of Ammonia–fueled Solid Oxide Fuel Cell Systems. 17 (3), 383-390.
- RenCat, 2018. RenCat developements (Co-funded H2020). NH3event 2018, Rotterdam.
- Steffen, M., 2018. Non-Electrically Heated Ammonia Cracker Module for Fuel Cell Systems. NH3event 2018, Rotterdam.
- T. Tronstad, H.Å., G. Haugom, L. Langfeldt, 2017. STUDY ON THE USE OF FUEL CELLS IN
- SHIPPING. DNVGL, Hamburg.
- TalentedWORLD, 2020. Rudolf Diesel.

Reference

- Aasadnia, M. and M. Mehrpooya (2018). "Large-scale liquid hydrogen production methods and approaches: A review." Applied Energy 212: 57-83.
- Aleiferis, P. G. and M. F. Rosati (2012). "Controlled autoignition of hydrogen in a direct-injection optical engine." Combustion and Flame 159(7): 2500-2515.
- CE Delft (2018). The basic facts: How do the emissions of ships and cars really compare?
- Cease, H., et al. (2014). Cryogenic coefficient of thermal expansion measurements of type 440 and 630 stainless steel. AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics.
- Chuahy, F. D. and S. L. Kokjohn (2019). "Solid oxide fuel cell and advanced combustion engine combined cycle: A pathway to 70% electrical efficiency." Applied Energy 235: 391-408.
- Duthil, P. (2015). "Material properties at low temperature." arXiv preprint arXiv:1501.07100.
- Eriksen, R., et al. (2021). "Energy Transition Outlook 2021: Technology Progress Report: A review of 10 technologies setting the pace of the energy transition over the next five years."
- International Maritime Organization (IMO) (2014). Third IMO GHG Study, International Maritime Organization.
- International Maritime Organization (IMO) (2020). Fourth IMO GHG Study, International Maritime Organization.
- Kim, J.-H., et al. (2015). "Charpy impact properties of stainless steel weldment in liquefied natural gas pipelines: Effect of low temperatures." Materials & Design (1980-2015) 65: 914-922.
- Krata, P. (2013). "The impact of sloshing liquids on ship stability for various dimensions of partly filled tanks." TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation 7(4).
- Lan, R. and S. Tao (2014). "Ammonia as a suitable fuel for fuel cells." Frontiers in energy research 2: 35.
- Liu, Z.-K., et al. (2017). "Fundamentals of thermal expansion and thermal contraction." Materials 10(4): 410.
- Muratori, M. (2014). Dynamic management of integrated residential energy systems, The Ohio State University.
- Oliveira, A. M., et al. (2021). "A green hydrogen economy for a renewable energy society." Current Opinion in Chemical Engineering 33: 100701.
- Perčić, M., et al. (2020). "Life-cycle cost assessment of alternative marine fuels to reduce the carbon footprint in short-sea shipping: A case study of Croatia." Applied Energy 279: 115848.
- Raucci, C., et al. (2015). Hydrogen on board ship: A first analysis of Key Parameters and Implications, University of Strathclyde.
- Sasaki, K., et al. (2006). "H2S poisoning of solid oxide fuel cells." Journal of the Electrochemical Society 153(11): A2023.
- Timmerhaus, K. D. and T. M. Flynn (2013). Cryogenic process engineering, Springer Science & Business Media.
- Verhelst, S., et al. (2007). "A comprehensive overview of hydrogen engine design features." Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part D: Journal of automobile engineering 221(8): 911-920.
- Verma, A. and K. Scott (2010). "Development of high-temperature PEMFC based on heteropolyacids and polybenzimidazole." Journal of Solid State Electrochemistry 14(2): 213-219.
- Wee, J.-H. (2007). "Applications of proton exchange membrane fuel cell systems." Renewable and Sustainable Energy Reviews 11(8): 1720-1738.

References

- Aasadnia, M. and M. Mehrpooya (2018). "Large-scale liquid hydrogen production methods and approaches: A review." Applied Energy 212: 57-83.
- Aleiferis, P. G. and M. F. Rosati (2012). "Controlled autoignition of hydrogen in a direct-injection optical engine." Combustion and Flame 159(7): 2500-2515.
- Alkaner, S. and P. Zhou (2006). "A comparative study on life cycle analysis of molten carbon fuel cells and diesel engines for marine application." Journal of Power Sources 158(1): 188-199.
- Allen, S., et al. (1998). "Marine Applications of Fuel Cells: A Multi-Agency Research Program." Naval Engineers Journal 110(1): 93-106.
- Andújar, J. M. and F. Segura (2009). "Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries." Renewable and sustainable energy reviews 13(9): 2309-2322.
- Barthelemy, H., et al. (2010). "Safe handling of liquid carbon dioxide containers that have lost pressure." Globally harmonised document, IGC Doc 164(10).
- Bensaid, S., et al. (2009). "MCFC-based marine APU: Comparison between conventional ATR and cracking coupled with SR integrated inside the stack pressurized vessel." International Journal of Hydrogen Energy 34(4): 2026-2042.
- Bourne, C., et al. (2001). "Application of fuel cells in surface ships."
- CE Delft (2018). The basic facts: How do the emissions of ships and cars really compare?
- Cease, H., et al. (2014). Cryogenic coefficient of thermal expansion measurements of type 440 and 630 stainless steel. AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics.
- Chuahy, F. D. and S. L. Kokjohn (2019). "Solid oxide fuel cell and advanced combustion engine combined cycle: A pathway to 70% electrical efficiency." Applied Energy 235:

391-408.
- Cinti, G., et al. (2016). “SOFC operating with ammonia: stack test and system analysis.” 41(31): 13583-13590.
- De Vries, N. (2019). “Safe and effective application of ammonia as a marine fuel.”i
- DNV (2020). Ammonia as a Marine Fuel. H. Brinks. Norway, DNV.
- Dolan, M. (2018). Pilot-Scale NH3-to-H2 System for FCEV Refuelling. Rotterdam, NH3event 2018
- Duthil, P. (2015). “Material properties at low temperature.” arXiv preprint arXiv:1501.07100.
- Eriksen, R., et al. (2021). “Energy Transition Outlook 2021: Technology Progress Report: A review of 10 technologies setting the pace of the energy transition over the next five years.”
- Garabedian, C. G. and J. H. Johnson (1966). The theory of operation of an ammonia burning internal combustion engine, ARMY TANK-AUTOMOTIVE CENTER WARREN MI.
- GenCell (2018). “GENCELL A5.” Retrieved 1st November, 2021, from https://www.gencellenergy.com/ourproducts/.
- Government, S. (2020). “Scottish Hydrogen Assessment.”
- International Maritime Organization (IMO) (2014). Third IMO GHG Study, International Maritime Organization.
- International Maritime Organization (IMO) (2020). Fourth IMO GHG Study, International Maritime Organization.
- Ito, S., et al. (2018). Performance of Ammonia–Natural Gas Co-fired Gas Turbine for Power Generation. Proceedings of the 15th Annual NH3 Fuel Conference.
- Kim, J.-H., et al. (2015). “Charpy impact properties of stainless steel weldment in liquefied natural gas pipelines: Effect of low temperatures.” Materials & Design (1980-2015) 65: 914-922.
- Koch, E. (1945). “Ammonia--a fuel for motor buses.” J. Inst. Pet 31: 213.
- Krata, P. (2013). “The impact of sloshing liquids on ship stability for various dimensions of partly filled tanks.” TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation 7(4).
- Krummrich, S., et al. (2006). “Diesel fuel processing for fuel cells—DESIRE.” Journal of Power Sources 160(1): 500-504.
- Lamm, E. (1872). Improvement in supplying steam to traveling-engines, Google Patents.
- Lan, R. and S. Tao (2014). “Ammonia as a suitable fuel for fuel cells.” Frontiers in energy research 2: 35.
- Liu, Z.-K., et al. (2017). “Fundamentals of thermal expansion and thermal contraction.” Materials 10(4): 410.
- MAN ES (2020). MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia.
- Maritime cleantech (2021). “https://maritimecleantech.no/project/shipfc-green-ammonia-energy-system/.” Retrieved 1st November, 2021, from https://www.waterborne.eu/projects/energy-efficiency-and-zero-emissions/shipfc.
- McConnell, V. P. (2010). “Now, voyager? The increasing marine use of fuel cells.” Fuel cells bulletin 2010(5): 12-17.
- Muratori, M. (2014). Dynamic management of integrated residential energy systems, The Ohio State University.
- NH3car.com (2021). “Welcome to NH3 car.” Retrieved 1 November, 2021, from http://www.nh3car.com/index.htm.
- Okanishi, T., et al. (2017). “Comparative Study of Ammonia-fueled Solid Oxide Fuel Cell Systems.” 17(3): 383-390.
- Oliveira, A. M., et al. (2021). “A green hydrogen economy for a renewable energy society.” Current Opinion in Chemical Engineering 33: 100701.
- Perčić, M., et al. (2020). “Life-cycle cost assessment of alternative marine fuels to reduce the carbon footprint in short-sea shipping: A case study of Croatia.” Applied Energy 279: 115848.
- Privette, R., et al. (2009). 2.5 MW PEM fuel cell system for navy ship service power, Retrieved.
- PSE, D. a. (2013). “DNV and PSE report on ship carbon capture & storage.”
- Raucci, C., et al. (2015). Hydrogen on board ship: A first analysis of Key Parameters and Implications, University of Strathclyde.
- RenCat (2018). RenCat developements (Co-funded H2020). Rotterdam, NH3event 2018.
- Rubin, E. and H. De Coninck (2005). “IPCC special report on carbon dioxide capture and storage.” UK: Cambridge University Press. TNO (2004): Cost Curves for CO_2 Storage, Part 2: 14.
- Sasaki, K., et al. (2006). “H2S poisoning of solid oxide fuel cells.” Journal of the Electrochemical Society 153(11): A2023.
- Sattler, G. (2000). “Fuel cells going on-board.” Journal of Power Sources 86(1-2): 61-67.
- Specchia, S., et al. (2008). “Modeling of an APU system based on MCFC.” International Journal of Hydrogen Energy 33(13): 3393-3401.
- Steffen, M. (2018). Non-Electrically Heated Ammonia Cracker Module for Fuel Cell Systems. Rotterdam, NH3event 2018.
- Sutradhar, S. C., et al. (2019). “Thermally and chemically stable poly (phenylenebenzophenone) membranes for proton exchange membrane fuel cells by Ni (0) catalyst.” Journal of Industrial and Engineering Chemistry 76: 233-239.
- T. Tronstad, H. Å., G. Haugom, L. Langfeldt (2017). STUDY ON THE USE OF FUEL CELLS IN
- SHIPPING. Hamburg, DNVGL.
- TalentedWORLD (2020). “Rudolf Diesel.” from https://thetalentedworld.net/rudolf-diesel/.
- technology, S. (2021). “Teco 2030 and Chart to develop carbon capture technologies for ships.”
- Timmerhaus, K. D. and T. M. Flynn (2013). Cryogenic process engineering, Springer Science & Business Media.
- Tronstad, T., et al. (2017). “Study on the use of fuel cells in shipping.” European Maritime Safety Agency.
- Tse, L. K. C., et al. (2011). “Solid oxide fuel cell/gas turbine trigeneration system for marine applications.” Journal of Power Sources 196(6): 3149-3162.
- Union, I. (2014). “Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.” A new skills agenda for europe. Brussels.
- Van Biert, L., et al. (2016). “A review of fuel cell systems for maritime applications.” Journal of Power Sources 327: 345-364.
- Verhelst, S., et al. (2007). “A comprehensive overview of hydrogen engine design features.” Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part D: Journal of automobile engineering 221(8): 911-920.
- Verma, A. and K. Scott (2010). “Development of high-temperature PEMFC based on heteropolyacids and polybenzimidazole.” Journal of Solid State Electrochemistry 14(2): 213-219.
- Wee, J.-H. (2007). “Applications of proton exchange membrane fuel cell systems.” Renewable and Sustainable Energy Reviews 11(8): 1720-1738.
- Zhou, P. and H. Wang (2014). “Carbon capture and storage—Solidification and storage of carbon dioxide captured on ships.” Ocean Engineering 91: 172-180.

IMO 기술동향정보

International Maritime Organization
Technology trend information

발행일

2021년 12월

제작·디자인

(주)홍커뮤니케이션즈
www.hongcomm.com