

수소선박 IMO CCC회의 동향 및 규제 검토 보고서

홍익대학교 산학협력단

2025. 04. 04.

목 차

제1장. 배경 및 목적	1
제2장. 국내외 수소선박 개발 현황 및 시장 동향	8
제3장. 수소선박 IMO 회의 동향 및 규제 검토	22
제4장. 결론	87

제1장 배경 및 목적

1. 배경 및 목적

1.1 연구 배경 및 필요성

▣ 기후 변화와 환경 규제 대응

- 국제사회는 기후변화 문제의 심각성을 인식하고 이를 해결하기 위해 선진국에 의무를 부여하는 ‘교토의정서’ 채택(1997년)에 이어, 선진국과 개도국이 모두 참여하는 ‘파리협정’을 2015년 채택했고, 국제사회의 적극적인 노력으로 2016년 11월 4일 협정 발효
- 산업화 이전 대비 지구 평균온도 상승을 2℃ 보다 훨씬 아래(well below)로 유지하고, 나아가 1.5℃로 억제하기 위해 노력하는 것이 파리협정의 목표이며, 이를 위해서는 2050년까지 탄소 순 배출량이 0(zero)이 되는 탄소중립 사회로의 전환이 필요
- IPCC는 2018년 10월 우리나라 인천 송도에서 개최된 제48차 IPCC 총회에서 치열한 논의 끝에 「지구온난화 1.5℃ 특별보고서」를 승인하고 파리협정 채택 시 합의된 1.5℃ 목표의 과학적 근거를 마련
- IMO(국제해사기구)는 2050년 국제해운 탄소중립 실현을 목표로 2023 온실가스 감축 전략을 채택하고, 이에 따른 단기, 중기조치 등을 개발하는 등 탈탄소화에 대한 의지를 굳건히 하고 있음
- IMO를 비롯한 타 국제기구, 각국 정부, 지역사회, 그리고 다양한 산업계는 탄소 감축목표를 상향 조정하고, 온실가스 배출에 대한 경제적 페널티 부과를 검토하는 등 보다 강력한 규제 방안을 모색하고 있음
- 수소 연료공급시스템의 경우 수소 충전소에 대한 현행 기준을 조사·분석하고 안전성 평가 수행 현황을 분석함으로써 안전관리 방안에 대한 개선대책을 마련할 수 있음

▣ 수소에너지의 수요증가

- 탄소중립 연료는 연료생산과 소비과정에서 탄소 포집, 저장 기술 등을 이용하여 탄소를 제거하거나, 무탄소 연료를 사용함으로써 탄소의 배출량이 ‘0’이 되는 연료를 의미하며 대표적으로 수소, 메탄올, 암모니아 등이 있음

- 2020년부터 전 세계 대양은 IMO 황산화물(Sulfur Oxides, SOX)의 배출 규제를 받으며, 2015년부터 설정된 배출가스해역(Emission Control Area, EAC)은 0.1%의 강력한 규제를 적용받고 있으며, 그 적용 범위는 해마다 증가하는 추세임

■ 액체수소 글로벌 기술선점을 위한 정부 정책

- 수소경제활성화로드맵 (2019.01.)
 - 수소차와 연료전지 등 수소 활용산업에서 창출되는 수소수요는 연간 13만 톤 정도이나, 수소 활용산업 성장에 따라, 2022년에는 연간 47만 톤, 2030년에는 194만 톤에서 2040년에는 526만 톤까지 수소수요를 확대하는 계획 수립
 - 또한, 제한적인 친환경 수소 생산여력을 감안하여 2030년부터는 해외 재생에너지, 갈탄 등을 활용하여 생산된 수소를 수입, 부족분을 보충하며, 이를 위한 대량·장거리 수소 운송을 위한 기술 확보에 투자할 것을 명시

		2018년	2022년	2030년	2040년
공 급 · 가 격	공급량 (=수요량)	13만 톤/年	47만 톤/年	194만 톤/年	526만 톤/年 이상
	공급방식	① 부 생 수 소 (1%) ② 추 출 수 소 (99%)	①부생수소 ②추출수소 ③수전해	①부생수소 ②추출수소 ③수전해 ④해외생산 ※ ①+③+④ : 50% ② : 50%	①부생수소 ②추출수소 ③수전해 ④해외생산 ※ ①+③+④ : 70% ② : 30%
	수소가격	- (정책가격)	6,000원/kg (시장화 초기가격)	4,000원/kg	3,000원/kg

<수소경제 활성화 로드맵에서의 수소 공급 계획>

- 제1차 수소경제 이행 기본계획 (2021.11.)
 - 「수소경제 육성 및 수소안전관리에 관한 법률 제5조(기본계획의 수립)」에 따라 수소경제 이행을 효과적으로 추진하기 위한 기본계획을 수립함
 - 수소 수급계획, 제도운영, 자원조달, 기반조성에 대한 방안을 포괄적으로 수립하였으며, 단계별 목표를 명확히 하고, 목표 달성을 위한 추진전략, 이행과제, 이해관계자별 역할을 구체화하였음

- 그린수소 중심으로 수소 공급체계를 전환하고, 해외 수소 도입 방안을 마련, 액체수소 등 효율적인 저장·운송 수단을 상용화할 계획
- 한국 주도의 수소협력 이니셔티브를 구축하고, 국내외 기업간 협력을 통해 수소 생태계를 공동 구축함



<해외 청정수소 개발 개념도 (H2 STAR 프로젝트)>

- 수소산업 소부장 육성 전략 (2023.12.)
 - 제5차 수소경제위원회에서 심의·의결한 「세계 1등 수소산업 육성 전략」을 뒷받침하는 세부 이행계획을 수립하기 위해 제6차 수소경제위원회에서 안건으로 채택됨
 - 세계 1등 수소산업 육성을 위해 10대 분야 40대 핵심 품목을 중심으로 국내 소재·부품·장비 산업 생태계를 구축하고자 함
 - 2030년까지 10대 전략분야 소부장 국산화율 80% 달성 및 글로벌 수소 소부장 기업 20개사 육성을 목표로 함

■ 기술적·산업적 필요성

- 액체수소 화물창에 액체수소 공급을 위해서는 안전하고 안정적으로 액체수소를 이송해 줄 수 있는 배관류가 가장 기본적인 기자재로 볼 수 있음
- 밸브류를 통해 운영 환경에서 발생할 수 있는 수소 가스 누출 등의 다양한 문제를 조절해야 하므로 액체수소 운송선에 적용되는 다양한 기자재 중 이송용 배관류 및 밸브가 핵심 기자재로 분류 될 수 있음
- 액체수소 운송선의 주요 장비를 구성하기 위해서는 -253℃의 극저온 상태

인 선박에서 안전하게 저장 및 활용하기 위해 필요한 배관류에 대한 요소 부품 기술, 극저온 소재 기술, 시험 검증 기술이 필요함

- 해외에서 대량의 수소 유통을 위한 수단인 액체수소 운송선의 경우 향후 폭발적인 수요에 따른 핵심기자재 시장 확대가 예상되며, 이를 선점하기 위해 육상 및 해상 시험을 통한 기자재의 성능시험, 데이터 확보 및 인증 획득 확보가 필요함
- 수소가 강재 내부로 침투하여 급격한 성능저하 및 연신율 감소로 연결되는 수소취성을 고려한 강재 선정 및 화물창 설계가 진행되어야 하나, 현재 액체수소 환경에 가장 적합한 강재 선정된 사례 없음
- 저장탱크는 극저온에서 충분한 구조적 안전성을 가지기 위한 극저온 특수강재 구성, 안전설계가 요구되며, 선체 공간 활용도를 고려하여 최적 단열소재 및 단열시스템을 확보하는 연구개발이 요구됨
- 제품의 상용화를 위해서는 액체수소 화물창 운항환경을 고려하여 소재와 기자재의 단품 테스트뿐만 아니라 이들이 탑재된 Mock-up을 액체수소 직접 이용 환경에서 평가하는 것이 무엇보다도 중요함

■ 경제적 필요성

- 액체수소 환경에서의 수소를 안정적으로 이송할 수 있는 독자기술 미확보 시 해외기술 종속에 의한 장기간 국익 저해 상황이 예견되며, 이에 대비한 기술 국산화 달성 필요
- 유사 액화가스 산업인 LNG 운송선 산업에서는 화물창 설계, 소재부품 분야 원천기술 미확보로 선가의 약 5% (척당 100억 원) 누적 3조 원에 이르는 기술료를 지급했고, 이는 여전히 큰 문제점으로 지적되고 있음
- 액체수소는 선박 연료로써 상용화가 예견되고 있으며, 대규모 해상운송 혹은 선박연료 활용을 위해 선진국은 기술선점을 위해 개발을 착수하였음
- 친환경 미래 연료로 주목을 받고 있는 액체수소 운송선에 적용하는 것을 기점으로, 액체수소를 채용하는 육상 모빌리티, 우주항공용 등으로 확대 적용이 가능함

1.2 분석 목적 및 내용

▣ 수소선박 핵심 기술의 국내외 트렌드 분석

- 수소선박 핵심 기술 국내외 연구 현황 분석
- 수소선박 핵심 기술 국내외 시장 현황 분석

▣ 수소선박 관련 국내외 기관 회의 동향 및 규제 검토

- 수소선박 관련 국제기관 회의 동향 및 규제 검토(IMO, IMO CCC 등)
- 친환경 선박 관련 글로벌 규제 및 정책 검토
- 수소선박 관련 IMO CCC 규제 초안 상세 검토

제2장 국내외 수소선박 개발 현황 및 시장 동향

1. 수소선박 핵심 기술 국내외 연구 현황 분석

1.1 수소 저장 기술

- 액체수소 저장 기술 : 액화수소 저장 기술은 수소를 액화시켜 저장시키는 방식으로써 낮은 압력으로도 수소가스 저장방식보다 더 많은 양의 수소를 저장할 수 있는 장점이 있음. 다만, 액화수소를 안정적으로 보관하기 위해서는 단열성능이 좋고 열 변형이 적으며 수소와의 반응성이 적은 용기의 개발이 필요
- 액화수소 저장은 수소를 비점인 -253°C 이하로 냉각시켜 저장하는 방식으로 수소가스 저장에 비해 낮은 압력에서도 수소가스 저장보다 많은 양의 수소를 저장할 수 있는 장점이 있음
- 다만, ① 액화 시키는데 많은 에너지 비용이 필요하며 ② 상온에서 -253°C 까지의 온도 변화 및 ③ 수소에 내성이 있는 재료와 ④ 액화수소의 기화를 최대한 낮출 수 있는 단열재 사용이 필요함
- 일반적으로 사용되는 용기는 용기 외측면과 내측면 사이가 진공구조로 된 이중탱크 구조로 외측면을 에어로젤 블랑켓 및 다층 박막단열재 등의 단열재로 둘러싸고 극저온의 수소와 접촉하는 내측면은 SUS 304, SUS 316, 6061-T6와 같은 합금을 사용하여 제작함



〈하이리움에서 개발한 액화수소탱크 개발 사례〉

- 화학적 수소저장 : 화학적 수소저장 기술은 가수분해 반응이나 수소화/탈수소화 반응을 이용하여 수소를 저장성이 좋은 수소화물로 저장하는 방식으로 높은 에너지밀도와 저장성이 장점이나 수소를 추출하기 위해서는 추가적인 열원이 요구됨

 - 화학적 수소저장은 주로 가수분해를 사용하여 화학적 수소화물을 물과 반응시켜 수소를 발생시키는 방식을 이용한 것이며, 가수분해 이외에도 수소화/탈수소화 반응을 이용하여 수소를 저장함
 - 높은 에너지밀도와 저장성이 좋아지는 장점이 있으나 수소화물에서 수소를 추출하는 과정에서 흡열반응이 일어나므로 외부 열원이 추가로 필요함
- 단열재 기술 : 일반적으로 다층 박막단열재는 중진공 이하(10⁻³ Torr)의 환경에서 단열성능이 급격히 저하되고 다루기가 어렵고 고진공 환경을 유지하는데 많은 에너지가 소비되어 본 기획에서는 선박에도 적용 가능성이 있는 중진공 이하의 환경에 적용이 가능한 극저온용 단열재의 가능성에 대해 고찰하였음

 - Kamiya, Onishi, Konshima 와 Nishigaki(2000)는 일본 내에 50,000m³의 용량을 갖는 액체수소 저장 시스템 연구 개발 프로젝트(World Energy Network, WE-NET)의 일환으로 액체수소의 증발손실 기체 질량 유량을 이용하여 다층 박막단열재와 고품 단열재 (Microtherm®)의 단열성능을 연구함
 - Fesmire(2006)는 우주 개발용으로 에어로젤(Aerogel) 기반 단열재의 단열성능을 연구하였음. 특히, 외부에 장시간 노출되는 우주 발사체에 적용할 단열재로서 소수성이며 나노 다공성 구조를 갖는 에어로젤 기반 단열재에 대한 가능성을 제시함
 - Fesmire와 Sass(2008)는 우주 발사체의 주요 부분에 적용할 단열재로서 에어로젤 기반 대량 충전용 단열재를 고찰하였음. 특히, 우주 발사체의 플랜지 조인트, 브라켓 지지대 등의 기계적 움직임이 제한될 수 있는 주요 이음새 부분에 적용이 가능한 에어로젤 기반 대량 충전용 단열재를 연구함
 - Coffman(2010) 등은 극저온용 단열재로서 에어로젤 기반의 단열재인 에어로겔 블랭킷 (aerogel blanket)의 단열성능을 연구하였음. 에어로겔 블랭킷은 기존의 에어로젤 분말 혹은 비즈(beads)를 섬유와 섞어 만든 단열재로서 나노 다공성 구조로 구성되어 있어서 진공도가 증가할수록 유효 열전도도도 측정값이 감소하는 경향을 보였음

- Fesmire, Coffman, Meneghelli 와 Heckle(2012)은 우주왕복선의 우주 발사체에 사용되는 스프레이형 단열재(spray-on form insulation, SOFI)의 단열성능을 연구하였음. 특히, 풍화 및 환경적 노출 기간에 따른 스프레이형 단열재의 유효 열전도도를 분석함
- Fesmire(2016)는 대기압 상태에 장시간 노출되는 우주 발사체를 포함한 대용량 극저온 탱크를 위한 적층형 복합 단열재에 대하여 고찰하였음. 적층형 복합 단열재는 대기 중에 바로 노출되므로 소수성을 갖는 에어로젤 블랑켓과 복사 에너지를 차단할 수 있는 적층부 그리고 전체를 감싸는 층으로 구성되어 연구를 진행함

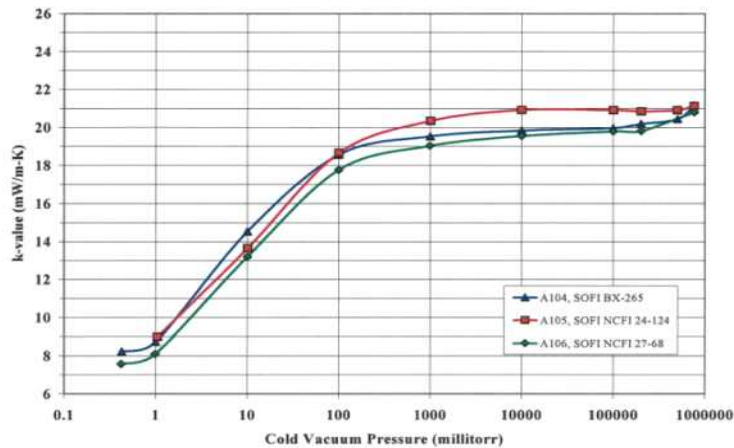
▣ 액체수소 단열소재 성능 평가기술 - 美NASA

- NASA는 항공우주산업에서 우주선 추진연료로써 액화수소를 활용하기 위해서 육상 및 우주 환경에서의 열전도도 평가를 위해서 단열소재의 재료단위 성능 평가 수행함
- 단열성능 평가 - 상온·상압 : 단열소재간 기저 단열 성능 및 비교를 위한 DB구축, ASTM C518 기준 aging에 따른 성능변화 평가 - Netzsch Lambda 2300F Heat flux meter 사용



<상온·상압 단열성능 평가 장비(Netzsch Lambda 2300F)>

- SOFI 물리적 특성 시험 : open-cell 비율, 표면적, 기공크기 측정. ASTM D-6226에 따라서 Quantachrome Instruments UltraFoam™ pycnometer를 사용한 open-cell 비율측정
- LN2-진공환경 열전도도 평가 : SOFI 소재에 대한 조성비 및 aging 효과에 따른 열전도도 평가를 통한 단열성능평가



〈극저온 환경-진공도에 따른 재료단위 단열성능변화〉

1.2 액체수소 운송 기술

■ 수소 운송기술은 제조기술이나 저장기술에 따라 운송방식을 결정하게 되며, 액화수소의 운송 뿐만 아니라 수소를 화학적으로 결합한 뒤 운송하는 기술도 개발되고 있음

– 액체수소의 운송 기술은 액화 수소 운송과 액상 수소 운송으로 나뉨

〈수소 상태에 따른 운송 방식〉

수소 운송 상태		운송 방식	적합한 운송 조건
액체 운송	액화	탱크로리	<ul style="list-style-type: none"> - 액화 제조 및 저장 시설과 연계될 경우 - 중·대규모, 중·장거리에 공급할 경우 - 액화 시 소요되는 전력에 의한 온실가스 배출량 증가에 대한 고려가 필요
	액상	탱크로리	<ul style="list-style-type: none"> - 액상 물질(암모니아, 액체유기금속 등) 제조 시설과 연계될 경우 - 중·대규모, 중·장거리에 공급할 경우

출처 : 고등기술연구원, 수소의 저장, 운송 및 충전, 2019

– 액화수소 운송방식은 -253°C 로 냉각한 1~2 bar의 액체수소를 운송하는 방식으로 해외에서는 상용화 단계의 운송방법이며 액화에 따른 단점을 극복하기 위한 액상 화합물 형태의 수소 운송방법도 개발되고 있음

- 액상수소 운송방식의 경우 국내에서는 원천기술을 개발 중이며, 해외에서는 실증 단계의 기술로, 일본에서는 톨루엔-MCH사이클을 이용하여 톨루엔에 수소를 첨가하여 MCH로 전환한 후 수요처에서 MCH를 톨루엔으로 다시 전환하여 수소를 얻는 방식을 개발하고 있음
- 액화가스 이송방식을 채택한 대표적인 물질로 암모니아가 있으며 이미 저장 및 이송 인프라가 구축되어 있으므로 인프라를 추가하는 비용이 적게 든다는 장점이 있어 해외에서는 상업화되었음

■ 국내 대형 이중진공배관 기술

- 국내에 존재하는 진공 단열배관의 경우 직관 구간이 길어지게 될 시에 루프를 적용하여, 배관의 수축을 제어하고 있으나, 대형 관의 경우 이러한 루프의 제작이 소형 관에 비해 난이도가 높아지게 되므로 이러한 부분을 쉽게 적용하거나 대체할 수 있는 기술적 해결이 필요
- 액체수소의 온도가 극저온이므로 외기온도와 액체수소 온도 차에 의해 저장 용기로 입열이 발생하며, 이러한 입열로 인해 액체수소의 지속적인 기화가 발생함. 이러한 현상을 기화율(BOR-Boil Off Rate)이라고 하며 이는 액체수소 이송시스템의 성능지표로서 매우 중요하게 판단됨
- 최근의 연구들은 액체수소 이송 시에 발생하는 BOR(Boil Off Rate)을 최소화하는 방향으로 연구가 진행되고 있으며, 단열배관은 액체수소 플랜트, 충전소 및 액체수소를 연료로 사용하는 기기들에 필수적인 기술이 될 것으로 판단됨
- 현재 액체수소의 저장 외에 이송에 대한 연구는 트럭이나 선박을 활용한 액체수소 장거리 운송에 집중되고 있으며, 플랜트 및 충전소에서의 공정 간 이송에 대한 연구는 이루어지지 않고 있음
- 일반적으로 사용되는 배관에 단열재는 우레탄 폼 단열재가 사용되지만, 액체수소는 LNG에 비해 저온이기 때문에, 동일한 시스템에서 BOR의 발생이 LNG 대비 10배에 이를 수 있어, 같은 단열재를 사용하기 어려움
- 진공 단열배관의 경우 우레탄 폼 대비 10배의 단열 성능을 가지고 있으며, 이를 사용하면 현재 LNG 시스템과 동일한 방식으로 액체수소 이송이 가능할 것으로 보임

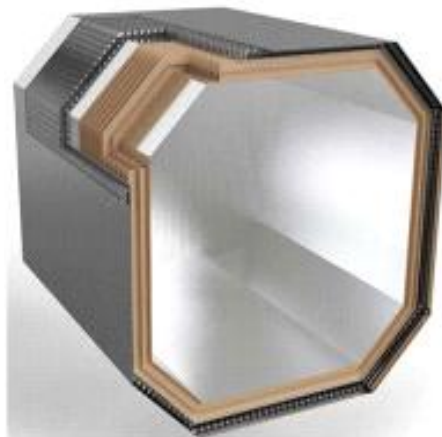
1.3 수소 충전 기술

■ 최근 액화수소를 이용한 충전소도 개발되고 있음

- 수소 충전소는 수소승용차 및 수소버스에 연료를 공급하기 위한 시설로서
① 수소를 저장하는 수소 저장 용기와 ② 수소의 압력을 높이는 압축기,
③ 압축된 수소를 차에 충전하기 위한 디스펜서로 구성되어 있으며, 대부분의
부품을 해외에 의존하고 있음
- 액화상태로 공급·저장된 수소를 충전이 필요할 시 고압수소로 변환하여
수소승용차 및 수소버스에 공급하는 기술이 개발되고 있음
- 액체수소 운송은 크게 두 가지로 액화 운송과 액상 운송으로 나뉨

1.4 액체수소 선박 기술

- 글로벌 액체수소 시장은 린데(영)가 50% 점유하고 있으며, 그 외 에어리
퀴드(프),에어프로덕츠(미) 등 글로벌 가스 기업들이 원천기술 보유
- 린데는 독일 Leuna 공장(5톤/일) 등 전세계에서 다수의 액체수소 설비를 구
축·운영 중임
 - (노르웨이) IC Technology 사에서 ‘LH2 멤브레인 탱크 설계’에 대한 기본
인증(Approval In Principle, AIP)을 획득



〈LH2 멤브레인 탱크 설계〉

< Advances in LH2 Containment(2021.06) >

탱크 종류		Membrane
탱크 특징	secondary barrier	- Stainless steel × 2개 - Vacuum insulation layer × 2개(기존 두께 대비 10배)
	Primary barrier	- Helium gas (cooling) - 특허 기술 기반
AIP 인증		- New liquid hydrogen membrane containment system (DNV, '21.06)
<ul style="list-style-type: none"> - 진공 단열 시스템 : 탱크 내 효율적인 단열 제공 - 수소 누출 감지 설비 장착 - 지지구조 : 2차 단열 공간으로의 공기 누출 감지 		

- (프랑스) GTT사에서 ‘LH2 멤브레인 탱크 설계’ 및 ‘LH2 운송선 컨셉 설계’에 대한 기본 인증(AIP)을 획득



< LH2 멤브레인 탱크 설계 + LH2 운송선 (Concept 모델) >

< Membrane LH2 Tank for Mid-size LH2 Carrier + LH2 Carrier(2022.07) >

탱크 종류	Membrane
탱크 설계	- Shell 사 : 탱크 재질 / 기술설계 - GTT 사 : 액화가스 저장 및 운송에 적용되는 극저온 격납 시스템 설계 기술 보유 >(Shell+GTT) Agreement('22.02) > 수소 공급 체인망 구축을 통한 액화수소 시장 선점 고
AIP 인증	- Design of a membrane type containment system for liquefied hydrogen(DNV, '22.07) - Preliminary concept design of a LH2 carrier(DNV, '22.07)
- GTT 사 : IMO에서 수소 운송 및 화물에 대한 요구 사항을 개발 중으로 현재 규제 요구 사항을 충족하고 향후 개발이 예상되는 LH2 화물창 시스템 설계 및 개발	

■ 일본 액체수소 운반선 기술

- (일본) 일본 가와사키 중공업은 1,250m³ 규모 액체수소 저장 CCS설계 시스템을 일본선급 (Nippon Kaiji Kyokai) 기본 승인(AIP) 획득(2014) 및 세계 최초의 액체수소 운송선에 해상 운송용 액체수소 저장탱크 설치완료 하였으며 (2020.03.09.) 2030년대까지 160m³ 액체수소운반선 2척을 추가로 건조 후 상용화를 목표로 하고 있음
- 새로운 CCS 개념설계는 기존 IGC코드 및 일본선급 규정을 거쳐 승인되었으며, 가와사키의 독점 설계 및 건설기술을 사용하여 개발
- 다층단열재(MLI)와 진공단열재를 결합하여 대류, 복사 전도 열전달에 대한 열손실을 최소화 하였고 기존선박에서 사용하는 compressed wood에 의한 열전도 전달이 심각하기 때문에 이에 대한 대안으로 GFRP Support를 개발하여 적용
- 2022년 1월 호주 남부 빅토리아주 헤이스팅스항에 기항 한 후 액체수소를 선적하여 일본 고베공항섬 액체수소 터미널에 도착하며, 2022년 1차 실증 테스트를 종료하고 2차 실증 테스트에 돌입함



〈일본 가와사키중공업 액체수소 운송선〉

□ 국내 대형 조선3사를 중심으로 액화수소운송선에 대한 연구는 진행중에 있음

- (삼성중공업) '멤브레인형 액화수소 저장탱크 및 16만m³ 액화수소운반선 개념설계'에 대한 기본 인증(AIP)을 획득

< 멤브레인형 액화수소 저장탱크 및 액화수소운반선 개념설계 (2021.10) >

탱크 종류	Membrane
탱크 특징	<ul style="list-style-type: none"> - 선체 내부 단열공간 만들어 -253℃ 액화수소 저장 - 공간 활용도 고 > 독립형 화물창보다 가격이 저렴하고, 대형화에 유리
AIP 인증	<ul style="list-style-type: none"> - 멤브레인형 액화수소 저장탱크 및 160,000m³ 액화수소운반선 개념설계(Lloyd, '21.10)
- 삼성중공업 : 멤브레인 화물창, 순수 독자 기술로 개발	

- (현대중공업그룹) 한국조선해양과 현대미포조선은 현대글로비스와 공동개발한 2만m³급 상업용 액화수소운반선에 대해 한국선급과 선박 등록기관인 라이베리아 기국의 기본 인증(AIP)을 획득하였고 한국조선해양은 2023년 소형 수소추진선을 상용화하고, 2027년 대형 수소운반선의 실증 하는 계획 추진

< Conceptual Engineering Design for LH2 Tank Storage & Scalability (2023.06) >

탱크 종류	Membrane
탱크 설계	<ul style="list-style-type: none"> - HD KSOE / HYD / GBD > LH2 멤브레인 화물창 기술 개발 - 180 m³ 화물창 실증 제작 > 시험 평가 실시 예정
AIP 인증	<ul style="list-style-type: none"> - IACS 가입된 선급사 > CCS Concept 관련 AIP 획득 예정
- LH2CRAFT : 200,000 m ³ 대형 액화수소 화물창 기반의 운송 선박 기술 개발	

- (대우조선해양) 포스코와 함께 LNG 저장탱크 소재로 고망간강 개발/사용하고 있으며 LNG보다 액화온도가 더 낮은 액체수소 저장탱크용 고망간강 신소재를 개발 하고 이를 바탕으로 신소재 탱크(화물창) 개발 추진

2. 수소선박 핵심 기술 관련 국내외 시장 현황 분석

2.1 국내 시장 현황

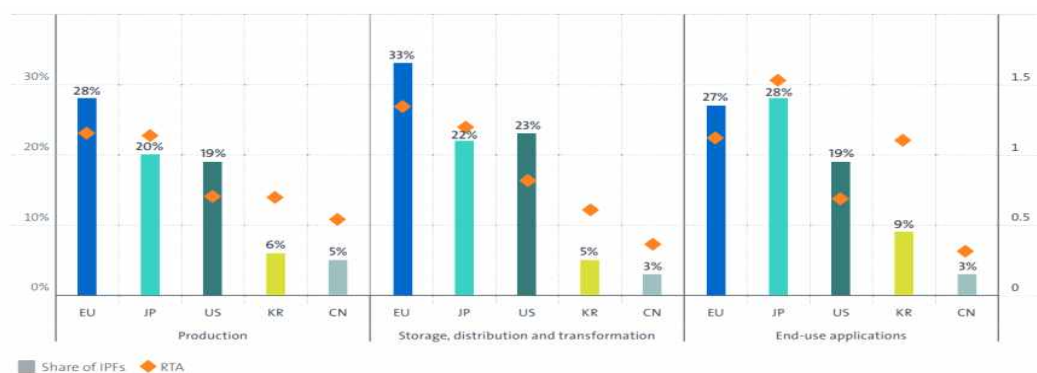
▣ 액체수소 운반선 관련 시장

- 국내 대형 조선 3사는 전 세계 탄소 규제에 수소 선박 개발에 집중하고 있으며 탄소 배출 벌금 부과로 인한 친환경 선박의 개발이 필수사항이 될 것으로 전망됨
- (HD한국조선) HD현대의 조선 지주사인 HD한국조선해양은 최근 호주 최대 에너지 기업인 우드사이드에너지(Woodside Energy), 현대글로벌비스, 일본의 글로벌 선사 MOL(Mitsui O.S.K. Lines)과 액체수소 운송 밸류체인 개발 협력에 대한 양해각서를 체결하였음
 - 대형액체수소운반선(조감도) 독자 기술을 확보함
 - 호주 에너지기업 우드사이드에너지, 현대글로벌비스, 일본 선사 MOL과 액체수소 운송 공급 개발 MOU 체결
 - 협약에 따라 4개 사는 2030년까지 수소를 운송할 수 있는 화물창, 엔진 시스템 등을 개발할 계획임
 - 2030년까지 기술적, 상업적으로 운용 가능한 대형 액체수소운반선 개발을 담당하였음
- 국내 수소 수요는 '22년 47만 톤에서 '40년 526만 톤까지 증가할 것으로 전망
- 수소 시장이 빠르게 발전하면서 저장 및 운송이 용이한 액체수소 시장 역시 확대될 것으로 예상
 - 미국과 일본의 경우 수소 충전소의 액체수소 공급비율은 각각 87%, 63% 수준으로, 고압 수소 대비 액체수소 공급비율이 높음
- 국내 수소생산량은 국내 생산 171만톤과 외부 조달 24만톤으로 총 195만톤으로 산정되고 있으며 30년 390만톤, 50년 2,700만톤까지 확대예정이고 청정수소 비율을 30년 50%, 50년 100%로 높여 수소 생태계를 구축 예정

<국내 수소시장 규모>

구분	'18	'19	'20	'21	'22	'23	'24	CAGR
국내시장 (억원, %)	1,940	2,110	2,296	2,499	2,718	2,958	3,218	8.8

- 수소 활용(모빌리티) 분야는 일부 대기업의 적극적인 사업 전개로 글로벌 리더 그룹에 속하는 편이나, 생산·저장·운송 등 분야는 상대적으로 진척이 미흡
- 수소 활용 외 분야의 생태계 조성을 위한 수소생산 기술 연구개발투자, 액체 수소 생산시설 투자, 수소 저장 탱크 또는 핵심부품 제작 등에 정부 지원 확대 필요
- 수소 시장의 글로벌 특허 출원은 유럽, 일본, 미국이 주도하고 한국의 수소 특허 점유율은 7%로 상대적으로 경쟁력이 약한 수준임, 현재 단일 국가로는 수소 특허와 기술력 분야에서 선두는 일본으로, 일본은 전 세계 특허의 24%를 차지하고 RTA(집중도) 지수 또한 모든 분야에서 높아, 향후 기술적 우위에 있음
- 한국의 특허 출원 건수는 10년간 12.2%의 연평균 증가율로 지속적으로 증가하고 있지만 저장·운송 분야 특허 출원 비중은 5%로, 생산 분야(6%)와 활용 분야(9%)에 비해 가장 낮으며, 특히 국내 저장·운송 분야는 일본, 미국 등과 격차가 큼



〈수소 밸류체인별 점유율 및 RTA 지수 현황〉

2.2 국외 시장 현황

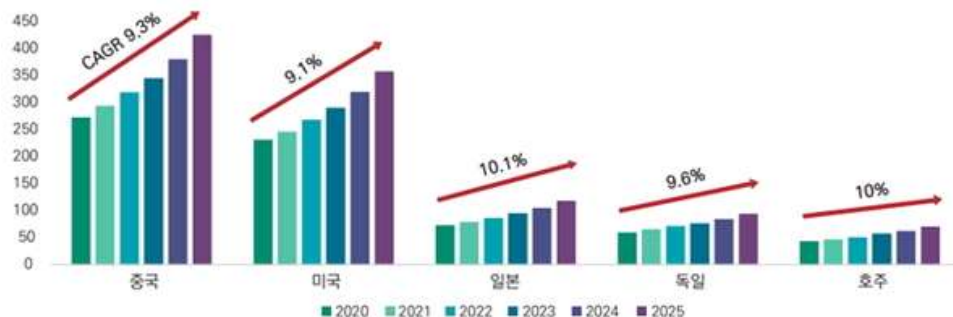
■ 액체수소 운반선 관련 시장

- 액체수소 운반선 시장은 현재 국내외 구분 없이 시장 선점 우위를 위하여 기개발에 집중하고 있으며, 가장 중요한 수소 운송을 위해 전 세계적으로 생산, 사용, 운송, 인프라 구축을 진행 중



<전세계 수소 프로젝트 진행 현황>

- 세계 수소 소비량은 '30년 1.5억 톤, '50년 4.3억 톤까지 성장이 예상되며, 세계 수소 생산시장 규모는 2020년 1,296억 달러에서 연평균 9.2% 성장해 2025년에는 약 2,014억 달러로 저장시장 규모도 '24년 182억 달러에 달할 전망
- 수소 생산 관련 산업규모는 '22년 1,600억 달러에서 '27년 2,635억 달러로 연평균 10% 이상 증가할 전망이며, 수소 생산량이 증가함에 따라 수소 운송에 대한 중요성도 커질 것으로 예상

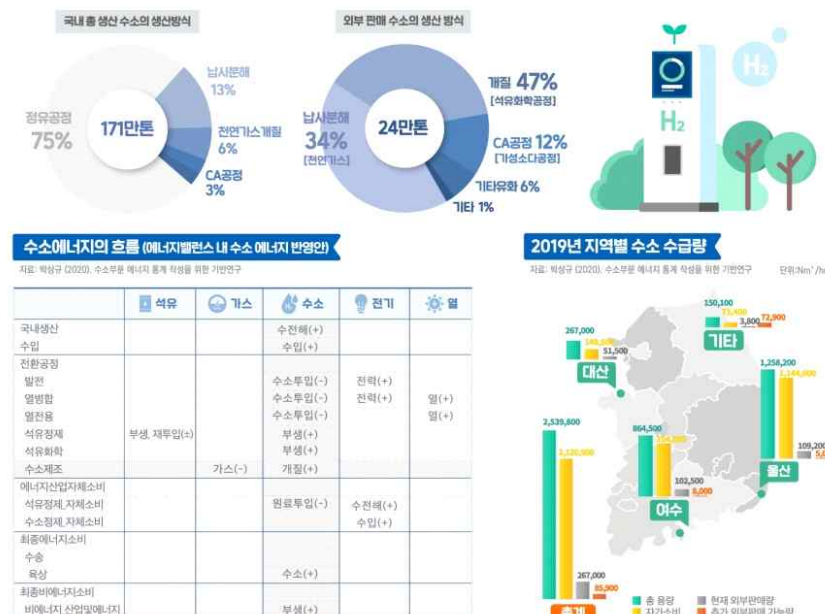


<주요국 수소 생산시장 추이>

- 수소 생산 시장은 2050년까지 최대 4,190억 달러 규모로 유통 시장은 6,130억 달러로 활용 시장은 9,970억 달러로 성장할 것으로 예상되어 총 2조 달러에 달할 것으로 전망
- 가장 큰 비중을 차지하는 영역은 차량, 선박 등 수송수단 부문으로 연간 약 7,000억 달러 규모의 시장이 형성될 것으로 전망

I 국내 수소 유통 현황

자료: 한국에너지공단 (2019), 『신재생에너지저장』 p. 207~219, 저자제공



<국내 수소 유통 현황>

- 수소 경제 인프라 구축에 따라 국가 간 활발한 수소 거래와 수송 프로젝트가 진행 중
 - 이미 국가가 수소 거래 프로젝트가 진행 중이며, 예상 수출국인 호주, 중동, 국가에서 수입국인 유럽, 동아시아 국가 간의 거래 프로젝트가 진행 중
 - 운송방법은 액체수소와 암모니아가 주를 이루고 있으나, 액체수소는 더 많은 수소를 운반할 수 있는 잠재력 덕분에 장거리 수송 인프라(선박 등)가 갖춰지면 운송량이 증가할 것으로 예상됨. 이에 따라 수소 생산국과 공급망 및 기술개발을 위해 주요 개발국들은 협력을 강화하고 있음
 - 전 세계 액체수소 시장은 2030년 까지 217억 달러 규모 및 연평균 성장률은 9% 정도의 가파른 성장세를 보일 것으로 예상되며, 향후 액체수소 운송시장이 2050년 5,660억 달러 규모로 비약적으로 성장할 것으로 전망

〈국가 간 수소 거래 프로젝트〉

프로젝트	수출국	수입국	규모(tpa)	운송방법	예상 시기
Hydrogen Energy Supply Chain	호주	일본	225,540	액체수소	2030
Stanwell - Iwatani Gladstone project	호주	일본	280,000	액체수소	2026
Helios Green Fuels	사우디	TBD	650	암모니아	2025
ADNOC - TA' ZIZ industrial hub	UAE	TBD	175,000	암모니아	2025
Asian Renewable Energy Hub	호주	일본/한국	TBD	액체수소	2028
Murchison	호주	TBD	TBD	TBD	TBD
Crystal Brook Energy Park	호주	TBD	25	TBD	TBD
Pacific Solar Hydrogen	호주	TBD	200,000	TBD	TBD
Origin Energy - Kawasaki Heavy Industries Townsville project	호주	일본	36,000	액체수소	2025
KBR SE Asia feasibility study	동남아	TBD	TBD	TBD	TBD
Eyre Gateway	호주	일본/아시아	7,000	암모니아	TBD
Project Geri	호주	TBD	175,000	암모니아	TBD
Green Mega Fuels Project	오만	TBD	175,000	암모니아	2032
Western Green Energy Hub	호주	TBD	34,000	암모니아	TBD

제3장 수소선박 IMO 회의 동향 및 규제 검토

1. 친환경 선박 관련 IMO 회의 동향

1.1 IMO*의 탈탄소화 규제 동향

(*국제해사기구, International Maritime Organization)

■ IMO 온실가스 감축 단기조치

- 「2023 IMO 온실가스 감축전략(이하 “2023 전략”)」에 의하면, 단기조치는 초기전략이 수립된 2018년부터 2023년까지 해양환경보호위원회(MEPC)에 의해 확정되고 합의된 조치로 정의되며, 현존선에너지효율지수(EEXI)와 선박탄소집약도지수(CII)가 여기에 해당
- 현존선 에너지효율지수(Energy Efficiency Existing Ship Index, EEXI)는 1톤의 화물을 1해리 운송할 때, 즉 단위 운송작업당 CO₂ 배출량을 선박 제원을 활용해 사전적으로 계산하여 지수화한 값이며, 선박의 선종과 규모별로 정해놓은 기준값을 충족해야 국제에너지효율증서(IEEC)를 발급받아 운항이 가능함
(* EEXI는 총톤수 400톤 이상의 선박을 대상으로 하며, 2023년 이후 첫 선박검사일부터 적용)
- 선박탄소집약도지수는 단위 운송작업당 CO₂ 배출량을 연료사용량, 운항거리 md 실제 운항정보를 활용하여 사후적으로 계산하고 지수화한 값
(* CII 규제는 총톤수 5,000톤 이상 선박을 대상으로 하며, 재화중량톤수(DWT)와 연간 운항거리를 분모로 하고, 연간 운항거리를 분모로 하고, 연간 CO₂ 배출량을 분자로 하여 산출한 연간효율성지표(AER)를 계산하고, 이 값에 따라 각 선박에 A-E 등 총 5단계의 CII등급을 부여함)
- 단기조치의 목표는 2023 온실가스 감축 전략에 명시된 ‘2030년까지 국제해운의 탄소집약도를 2008년 대비 최소 40% 감축’ 하는 것이며, 2024년 10월 개최된 82차 해양환경보호위원회(MEPC) 회의에서는 동 목표 달성을 위해 보완, 개선 및 수정 검토가 필요한 CII 규제의 주요 현안 21가지를 식별하였고, 주요내용 10가지는 아래의 표에 정리함

< CII 규제의 주요 현안 >

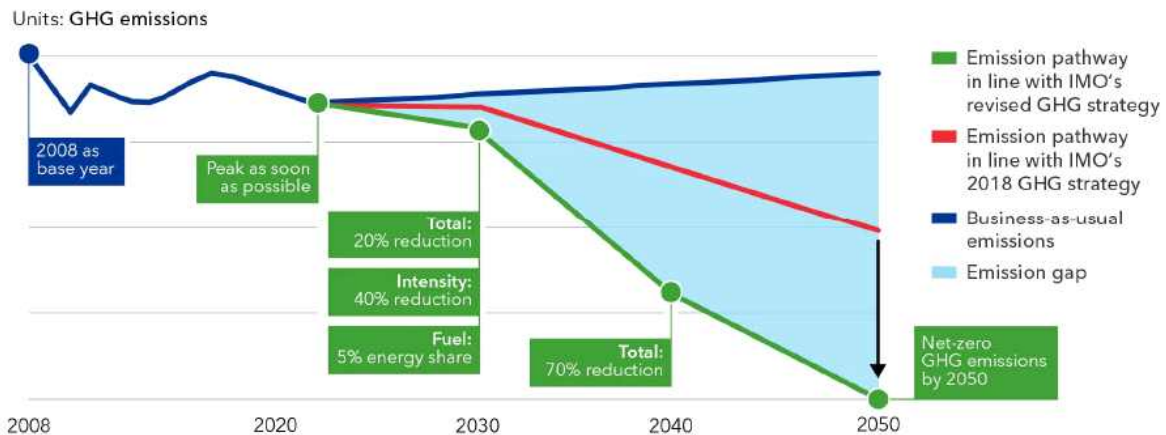
번호	현안
1	개별 선박의 운항 에너지효율을 적절하게 나타내지 못함.
2	2027-2030년 기간 탄소집약도 감축 목표가 정해지지 않음.
3	항만 대기시간, 단거리 항차, 특수선박, 기상 영향 등이 CII 계산에 부정적 영향을 줌.
4	CII 등급 개선 및 규제 이행에 충분한 인센티브 등 규제 메커니즘이 부족함.
5	항만 정시도착(JIT) 등과 같은 효율성 향상 노력에 충분한 인센티브가 제공되지 않음.
6	CII 및 DCS 데이터에 대한 접근 권한이 제한되어 있음.
7	소형 LNG 선박 등 일부 선종 및 규모에 대한 CII 기준선이 적절하지 않음.
8	온실가스 중기조치와 중복되는 규제 효과가 우려되며 명확한 상관관계가 파악되지 않음.
9	현행의 CII 규제는 전주기 측면의 연료 배출계수를 적용하지 않음.
10	풀링(Pooling)과 같은 선대 단위 수준의 규제 이행을 허용하지 않음.

- IMO는 탈탄소화 규제 이행을 위하여 선사가 연료사용량 데이터를 수집 및 보고할 수 있도록 지난 2019년부터 데이터 수집 시스템(DCS)을 운영하고 있으며, 82차 MEPC 회의에서는 국제해운에서 배출되는 온실가스의 양을 정확하게 파악하고, 효과적인 감축전략을 세울 수 있도록 보다 세분화되고 업데이트된 DCS 보고 양식에 관한 지침서를 개정함

■ IMO 온실가스 감축 중기조치

- 2023년 7월 열린 80차 MEPC 회의에서 채택한 「2023 IMO 전략」은 2050년 경 온실가스 배출량 넷제로(Net-zero)와 더불어 2030년까지 제로 또는 제로에 가까운 온실가스 배출 기술·연료·에너지원 활용률 최소 5%(10% 노력)를 목표로 설정함

(* 연간 국제해운 온실가스 총배출량을 2030년까지 2008년 대비 20%(30% 노력), 2040년까지 70%(80% 노력) 감축한다는 중간점검지표를 제시함)



「2023 IMO 전략」에 따른 국제해운 온실가스 감축목표(출처:DNV, 2023)

- 80차 MEPC에서는 온실가스 감축 목표 실현을 위한 중기조치 도입에 대해서도 큰 틀에서 합의를 이루었으며, 「2023 IMO 전략」에 명시된 중기조치 관련 내용을 아래에 정리함
 - 2025년까지 MEPC에서 확정되고 합의되어야 함
 - 기술적 요소와 경제적 요소를 포함한 결합조치로 개발되어야 함
 - 국가에 미치는 영향평가 및 선박연료 전과정 온실가스 배출을 고려해야 함
- 기술적 요소는 목표기반 연료표준제(GFS)를 도입한다는 것인데, 선박연료의 온실가스 집약도 기준(GFI)을 점차 강화하여 단계적으로 화석연료를 퇴출하고 친환경 대체연료로의 전환을 촉진할 것으로 기대됨
- 경제적 요소는 온실가스 배출 가격 메커니즘에 기반하여 도입하고자 하는 규제수단으로서 탄소세, 배출권거래제(ETS), 무탄소 선박 인센티브제(ZESIS) 등이 검토되고 있음
- 80차 MEPC에서 합의한 도입일정을 보면, 2024년 봄에 81차 MEPC에서 중기결합조치 형태를 확정하고, 2025년 봄(83차 MEPC)에 승인, 가을에 채택절차를 거쳐 2027년에 중기조치를 발효·시행할 예정이었으나 IMO는 81차와 82차 MEPC에서 중기결합조치 형태에 대해 합의를 도출하지 못함
(* 전과정 배출, GFI 달성값, 선대준수방식 인정, 대상선박 규모 및 경제적 조치의 도입 여부 등에 대해 회원국 간의 여전히 추가적인 논의와 협의가 필요함)
- 81차 MEPC에서 해양오염방지협약(MARPOL) 부속서 6에 제5장 ‘IMO Net-zero Framework’을 신설하여 기술적 요소와 경제적 요소의 구체적인 내용을 협약화한다는 데는 합의를 도출함
- 2025년 4월, MEPC 83에서 중기조치를 승인한다는 기존 합의일정을 맞추겠다는 의지를 가지고, MEPC 83 이전에 2월과 3월 두차례의 작업반 회의를 통해 중기결합조치의 형태를 확정하고, 신설되는 5장의 문구까지 정리한다는 계획을 가지고 있음

1.2 IMO 선박연료 온실가스 전과정평가 지침

■ 선박연료 온실가스 전과정평가 개요

- 전과정평가(Lifecycle Assessment)는 특정 제품 또는 서비스를 대상으로, 원료 채취, 가공, 조립, 수송, 사용, 폐기의 모든 과정에 걸쳐 에너지와 자원의 사용으로 인해 대기, 수계 및 토양으로 배출되는 물질의 환경영향을 정량화하는 기법이며, 탈탄소화 측면에서 어떠한 제품 또는 서비스가 일부 단계나 특정 측면이 아니라 전과정 측면에서 정말 친환경적인지 여부를 총체적으로 분석·평가하는 방안을 의미함

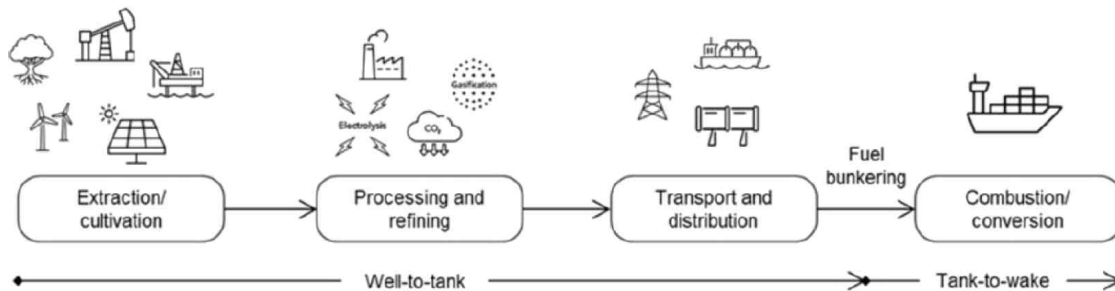


< 전과정평가 일반 개요 >

- 전과정평가는 기본적으로 국제표준화기구(ISO)에서 제정한 환경경영시스템에 대한 규격(ISO 1400 시리즈)에 따라, LCA의 목표 및 범위설정, 전과정 인벤토리 분석, 전과정 영향 평가, 결과해석의 4단계를 통해 이루어짐
- IMO LCA 지침에서는 1단계로 선박연료의 온실가스 집약도 평가를 목표로 수립하고, 연료의 생산, 가공, 운송, 변환, 유통, 병커링, 사용단계에서 발생하는 온실가스 중 CO₂, CH₄, N₂O 등 세 가지 기체를 평가대상범위로 설정함 (* 연료의 생산부터 병커링까지를 Well to Tank(WtT), 연료가 선박에서 연소되어 에너지로 사용되는 과정을 Tank to Wake(TtW) 로 구분)

- 2단계 전과정 인벤토리에서는 전과정에서 발생하는 온실가스 배출량 데이터를 수집하며, 3단계에서는 지구온난화지수(GWP 100)를 환경영향 범주로 설정하여 각 연료별 온실가스 배출계수를 도출하고, 마지막 4단계에서는 도출된 연료와 생산경로별 온실가스 집약도를 통해 정량적 환경영향을 분석함

Well-to-wake = well-to-tank + tank-to-wake



Source: IMO

< 선박연료 전과정(Well-to-Wake) 개요 >

- 선박연료에 대한 전과정평가 도입은 미래 선박연료 선택에 중대한 영향을 미치며, 지금까지는 연소과정에서 발생하는 이산화탄소만을 고려하여 연료의 환경적 영향을 평가하였으나 LCA 지침이 규제에 적용되기 시작하면 동일한 연료라도 에너지원과 생산과정에 따라 친환경성이 달라질 수 있음
- 석탄과 천연가스에서 생산된 수소는 전과정 관점에서 기존 화석 연료보다 더 많은 온실가스를 배출함
- 바이오매스 기반 연료는 생산과정에서 광합성을 통해 대기 중 이산화탄소를 흡수한 작물 등을 원료로 사용하기 때문에, 전과정 관점에서 비교적 적은 온실가스 배출량을 보임
- 재생가능한 에너지를 이용하여 생산된 합성연료(e-연료)는 생산과정에서 화석연료를 사용하지 않으므로, 온실가스 배출량이 매우 적어서 전과정 관점에서 유리한 연료로 평가될 수 있음
- IMO가 현재까지 개발한 LCA 지침은 128개의 연료 생산경로에 대해 식별하였으나 배출계수에 관한 정보는 많이 제공하고 있지 않으며, 아래 표에 제시된 바와 같이 EU의 'FuelEU Maritime' 규정에서 다루는 연료별 온실가스 전과정 배출량을 참고하고자 한다. 향후 IMO에서 적용되는 연료별 온실가스 배출량은 개정된 지침에 따라 이와는 달리 적용될 수 있음

〈 CII 규제의 주요 현안 〉

연료 종류		엔진유형 /원료	LCV	Well to Tank (gCO _{2e} /MJ)	Tank to Wake (gCO _{2e} /MJ)	Total GHG (gCO _{2e} /MJ)
화석 연료	HFO	-	0.0405	13.5	78.1	91.6
	MDO/MGO	-	0.041	13.2	77.43	90.63
	LNG	중속/Otto	0.05	18.5	72.53	91.03
		저속/Otto		18.5	65.33	83.83
		Diesel		18.5	57.63	76.13
	메탄올	NG(Natural Gas)	0.02	31.3	70.6	101.9
	암모니아	NG	0.0186	121	0	121
바이오 연료	바이오디젤	폐식용유	0.037	-61.69	77.01	15.32
		동물성지방		-55.79	77.01	21.22
	바이오LNG	중속/Otto	0.05	-41	71.22	30.22
		저속/Otto		-41	64.16	23.16
		Diesel		-41	56.59	15.59
	바이오메탄올	-	0.02	-58.35	69.61	11.26
	수소	NG	0.12	132	0	132
RFNBO*	e-디젤	-	0.0427	-47.6	76.23	28.63
	e-메탄올	-	0.02	-67.1	69.96	2.86
	e-LNG	중속/Otto	0.05	-26.6	72.53	45.93
		저속/Otto		-26.6	65.33	38.73
		Diesel		-26.6	57.63	31.03
	e-수소	연료전지	0.12	3.6	0	3.6
	e-암모니아	-	0.0186	0	5.27	5.27

* Renewable Fuels of Non-Biological Origin : 비생물학적 기원이며 재생가능한 에너지원(태양광, 풍력 등)에서 생산된 연료

■ 선박연료 온실가스 전과정평가 회의 동향

- IMO에서 선박연료의 전과정평가 지침 필요성에 대한 논의는 2017년 IMO 초기전략의 초안을 마련하면서 시작되었으며, ISWG-GHG 2차와 ISWG-GHG 3차는 초기전략 초안과 함께 단기·중기·장기 후보조치에 대해 논의하였고 주요 회원국들은 저탄소 및 무탄소 대체 연료의 효과적인 사용을 위한 이행 프로그램 마련 필요성을 제기함
- 2018년 개최된 MEPC 72차는 IMO 초기전략을 확정하면서 단기 후보조치로 “저·무탄소 대체 연료 등에 관한 전과정 온실가스 및 탄소집약도 지침 개발”을 포함하였음
- MEPC 74차는 LCA 지침 개발을 ISWG-GHG의 위임사항으로 결정하였으며, ISWG-GHG 6차는 노르웨이 및 대한민국이 제출한 문서에 따라 대체연료의 TtW 배출계수 개발을 우선하기로 하되, 육상 배출량과 국제해운 배출량의 이중산정 이슈를 고려하고, WtT 배출량은 대체연료의 지속가능성 측면에서 검토하기로 결정함
- ISWG-GHG 9차(2021. 9.)에서 유럽연합(EU)은 FuelEU Maritime 이니셔티브를 기반으로 WtW 방법론, WtT 기본값 및 메탄슬립 적용방안 등을 포함함

의제문서(ISWG-GHG 9/2)를 제출하였고, 호주, 일본, 노르웨이 등은 탄소원계수(SF), 연료유 전과정 라벨 등을 고려한 선박연료 GHG/탄소집약도 전과정 지침 초안 문서(ISWG-GHG 9/2/3)를 제출하였음

- 회의는 제출된 문서를 기반으로 개발절차, 작업범위 및 규제 적용을 중심으로 논의하였으며, 지침의 형태와 구성을 갖춘 호주, 일본, 노르웨이의 문서를 기반으로 EU 문서의 세부 요소를 반영하기로 하였음
- ISWG-GHG 11차(2022. 3.)에서는 9차 회의에서 통합된 지침 초안을 기반으로 육상 배출량 중복산정 방지, 배출계수 인증체계 기준, 지속가능성 기준 등의 쟁점에 대한 논의가 이어졌으며, 신속한 논의 진행을 위해 회기간 실무작업반(Correspondence Group, 이하 CG) 개설이 제안되었음
- 2022년 6월 개최된 MEPC 78차는 LCA 지침 마련을 위한 CG 설립과 위임사항을 승인하였으며, MEPC 79차에 중간보고서를 제출하고 MEPC 80차에 최종보고서를 제출하도록 지시하였음
- 그러나 MEPC 80차(2023. 7.)에 제출된 LCA 지침은 방법론적 세부사항 개선이 필요하고, 다양한 연료생산경로를 보완해야 하며, 연료별 온실가스 배출계수에 대한 지속적인 과학적 검토가 필요함에 따라 MEPC 80차는 LCA 지침을 승인하였으나 지침의 추가 개발을 위해 CG를 재개설하기로 결정하였음
- MEPC 81차(2024. 3.)는 방법론적으로 개선된 “2024 LCA 지침”을 승인하였으며, 신기술 발전과 과학적 지식을 지침에 지속적으로 반영하기 위해 “선박연료의 전과정 온실가스 집약도에 대한 GESAMP-LCA 작업반(GESAMP Working Group on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels)”을 설립하기로 합의함
- 또한 선박연료의 기타 사회·경제적 지속가능성 측면을 추가적으로 검토하고 지침에 포함 여부를 고려하기 위해 CG를 재개설하였으며, 선상탄소포집저장(Onboard Carbon Capture and Storage, OCCS)에 대한 이슈가 지속적으로 제기되는 점을 고려하여 “Non-CO2 온실가스 배출 및 선상탄소포집 측정 및 검증에 대한 CG”도 별도로 개설함
- 각 작업반의 위임사항은 아래와 같다.

＜ LCA 관련 작업반의 위임사항 ＞

구분	위임사항(TOR)
GESAMP-LCA	<ol style="list-style-type: none"> 제공되는 모든 정보의 신뢰성을 보장하기 위해, LCA 지침의 배출량 정량화 방법론 개선 <ol style="list-style-type: none"> LCA 방법론의 과학적 검토 연료 생산경로 및 기술의 WtT GHG 기본 배출계수에 대한 과학적 검토 연료 생산경로 및 기술의 TtW GHG 기본 배출계수에 대한 과학적 검토 LCA 계산방법(예시)을 수행하고 결과를 기존 연료 전과정 라벨(FLL)1)에 반영 지속가능성 측면 <ol style="list-style-type: none"> LCA 지침에서 지속가능성에 대한 지표 및 산정법을 정교화하고 추가 연구 간접 토지이용 변화(ILUC)2) 위험분류 방법 LCA 지침의 인증과 관련된 방법론적 요건 <ol style="list-style-type: none"> WtT 및 TtW 실제값을 포함하여 연료 생산경로 인증을 위한 가능한 요건을 개발 및 식별하기 위해 외부 경험 및 추가 정보 제공
CG-LCA(지속가능성 이슈)	<ol style="list-style-type: none"> 2024 LCA 지침 내, 7.1항에 언급된 “선박연료의 기타 사회 및 경제적 지속가능성 측면”을 추가적으로 검토하여 지침에 포함 여부를 고려 MEPC 83차(2025. 4.)에 결과보고서를 제출
CG- Non CO2 & OCCS	<ol style="list-style-type: none"> 메탄(CH4) 및 아산화질소(N2O)의 TtW 배출 <ol style="list-style-type: none"> 에너지 변환기에서 발생하는 메탄(CH4) 및 아산화질소(N2O)의 TtW 실제값 및 슬립값을 측정 및 검증하는 프레임워크 개발 방법 LCA 지침 적용을 지원하기 위해 관련 인증 문제에 대한 방법론적 프레임워크 개발 방법 기존 협약의 관련 격차를 식별하고 필요한 규제 또는 권고 협약의 개발 제안 선상탄소포집저장 <ol style="list-style-type: none"> 선상탄소포집저장 문제를 추가적으로 고려하고 규제 프레임워크 개발 작업계획 수립 MEPC 83차(2025. 4.)에 결과보고서 제출

- 업데이트된 LCA 지침은 2025년 4월에 개최되는 MEPC 83차에 제출될 것이며, 2027년에 발효될 예정인 증기결합조치에서 활용하기 위해 방법론, 배출 계수 등의 추가 개발이 예상됨

2. 친환경 선박 관련 글로벌 규제 및 정책 동향

2.1 유럽연합(EU)의 탈탄소화 규제 및 정책

- 유럽연합(EU)은 온실가스 감축 및 탈탄소화를 선도하고 있으며 파리협정 이후 신기후체제에 따라 2019년에 EU 그린딜(European Green Deal)을 시행하여 2050년까지 유럽을 탄소 중립적 대륙으로 만들고자 하는 목표함
- 유럽 그린딜의 목표는 2050년까지 넷제로를 달성하는 것이며, 이를 위해 2030년까지 온실가스 배출을 1990년 대비 최소 55% 감축하고자 하는 ‘중간목표’를 설정하였음
- 구체적으로 아래 그림은 EU 그린딜 정책을 바탕으로 해운 부문에서 시행되고 있는 주요 환경규제를 나타내며 2019년에 발표된 ‘European Green Deal’은 EU 환경 정책의 초석을 마련했고, 2021년에는 법적 구속력을 지닌 ‘European Climate Law’가 도입되어 구체적인 목표가 설정됨
- 2023년에는 ‘Fit for 55’ 패키지가 발표되었는데, 이는 2030년까지 온실가스 배출량을 1990년 대비 55% 줄이기 위한 구체적인 방안을 포함하고 있으며 이 패키지의 일환으로, 2025년에는 ‘FuelEU Maritime’ 규제가 시행될 예정임

European Green Deal (2019)

유럽 환경보호와 산업경제 진흥을 동시에

→ European Climate Law (2021)

그린딜 정책의 법제화 (구속력 강화)

→ Fit for 55 (2023) : 2030 Target

2050 목표의 중간 지표, EU ETS 제도에 해운산업 포함

→ FuelEU Maritime (2025)

선박 친환경 대체연료 전환 촉진

< EU 지역 국제해운 환경 규제 주요 정책 >

- EU 배출권거래제의 해운부문 확대 적용
 - EU 배출권거래제(Emission Trading System, 이하 ETS)의 경우, 2005년 유럽의 육상산업 분야에 최초 도입되어 여러 차례 개정된 후, 2024년부터 ‘Fit

for 55’ 패키지에 따라 해운 부문으로 확대 적용되고 있으며 이에 따라 5,000 GT 이상 선박은 EU 역내 운항 100%, 역외 운항 50%의 온실가스 배출량에 대한 배출권(EUA)을 구매해야 함

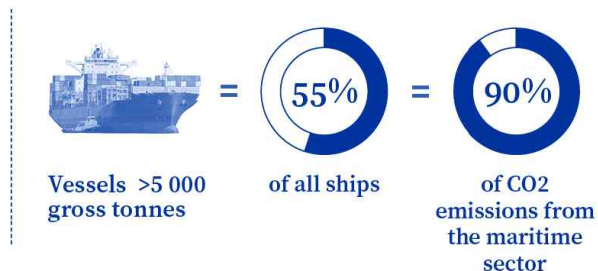
■ FuelEU Maritime

- FuelEU Maritime은 Fit for 55 패키지의 일환으로 도입되었으며, 해운부문의 탈탄소화를 목표로 유럽 내 항만을 운항하는 선박을 대상으로 재생가능 연료 또는 저탄소 연료(Renewable and Low-carbon Fuels, 이하 RLF) 사용 촉진 및 기술 혁신 등을 장려하고 있으며, 이를 통해 해운부문에서의 탄소 배출을 효과적으로 감소시키고, 지속가능한 해상운송체계를 구축하고자 함
- EU는 2050년까지 유럽 내 항만에 기항하는 선박의 온실가스 집약도 기준을 강화하였다. 2020년 EU MRV 데이터에 기반한 평균 온실가스 집약도를 기준으로, 2025년 온실가스 집약도를 2% 감축하고 2050년까지 최대 80% 감축 목표를 설정함

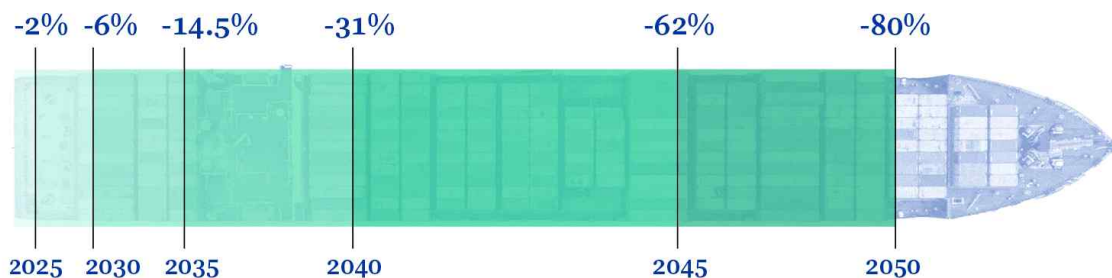


The FuelEU maritime regulation will oblige vessels above 5 000 gross tonnes calling at European ports
(with exceptions such as fishing ships):

→ to reduce the greenhouse gas intensity of the energy used on board as follows



Annual average carbon intensity reduction compared to the average in 2020



< FuelEU Maritime 온실가스 집약도 저감계획(출처: EU Council) >

- 상향 조정된 기준은 선박 운항 중 배출되는 온실가스(Tank-to-Wake, TtW) 뿐만 아니라, 연료의 생산 및 공급 과정에서 발생하는 배출량(Well-to-Tank,

WtT)까지 모두 포함하는 연료의 전과정 배출량(Well-to-Wake, WtW)을 기준으로 하여 단위 에너지(MJ)당 온실가스 배출량을 규제하며, 2030년부터 EU 관할 내 주요 항만에 정박하는 여객선과 컨테이너선은 육상공급전력(OPS)을 사용해야 함

- EU는 온실가스 집약도 기준을 강화하여 RLF 사용을 장려하고자 하는데, 특히 e-연료, 그린수소 등 비(非)바이오 유래 재생에너지 연료(Renewable fuels of non-biological origin, 이하RFNBO)를 사용할 경우, 2033년 말까지 한시적으로 온실가스 감축효과를 2배로 인정하는 등의 인센티브를 제공하고 있으며, 풀링(pooling) 제도의 경우, 초과 달성 및 미달성 선박이 하나의 그룹으로 평가받아 평균 집약도로 규제를 달성할 수 있음

< LCA 관련 작업반의 위임사항 >

구분	적용 기간	대상	규제 내용	준수 옵션
EU ETS (해운부문)	2024년~	5,000 GT 이상 선박, EU 역내운항 100%, 역외운항 50%의 온실가스 배출량	온실가스 배출량에 대한 배출권(EUA) 구매	배출권 구매, EUA 가격은 2025년 100\$, 2050년에는 400\$로 증가할 것으로 예상
FuelEU Maritime	2025년~	5,000 GT 이상 선박, 선박연료 단위 에너지당 온실가스 집약도	화석연료 전과정 배출량 (91.16gCO ₂ e/MJ) 기준, 2025년 2%부터 2050년 80%까지 감축	연료 변경, 풍력 추진 활용, 벌금 납부 등 (풀링 제도 활용)

2.2 미국의 탈탄소화 규제 및 정책

■ 인플레이션 감소법(Inflation Reduction Act)

- 2022년 8월 16일 조 바이든 대통령은 인플레이션 감소법(Inflation Reduction Act, IRA)에 서명하여 미국 내 인플레이션을 낮추고 경제 성장을 촉진하며 환경 지속가능성을 강화하기 위한 포괄적인 법률을 도입하였으며, 이 법안은 기후변화 대응, 의료비 절감, 적자 감소, 그리고 세금 개혁 등을 목표로 하고 있음
- IRA 조문은 기획재정위원회(Title I), 에너지·천연자원위원회(Title V), 환경·공공사업위원회(Title VI) 등 8개의 타이틀 아래에 여러 Subtitle과 Part로 구성되며, 그 중 기후변화 관련 규제는 주로 Title I, Subtitle D(에너지 안보) 아래 규정됨

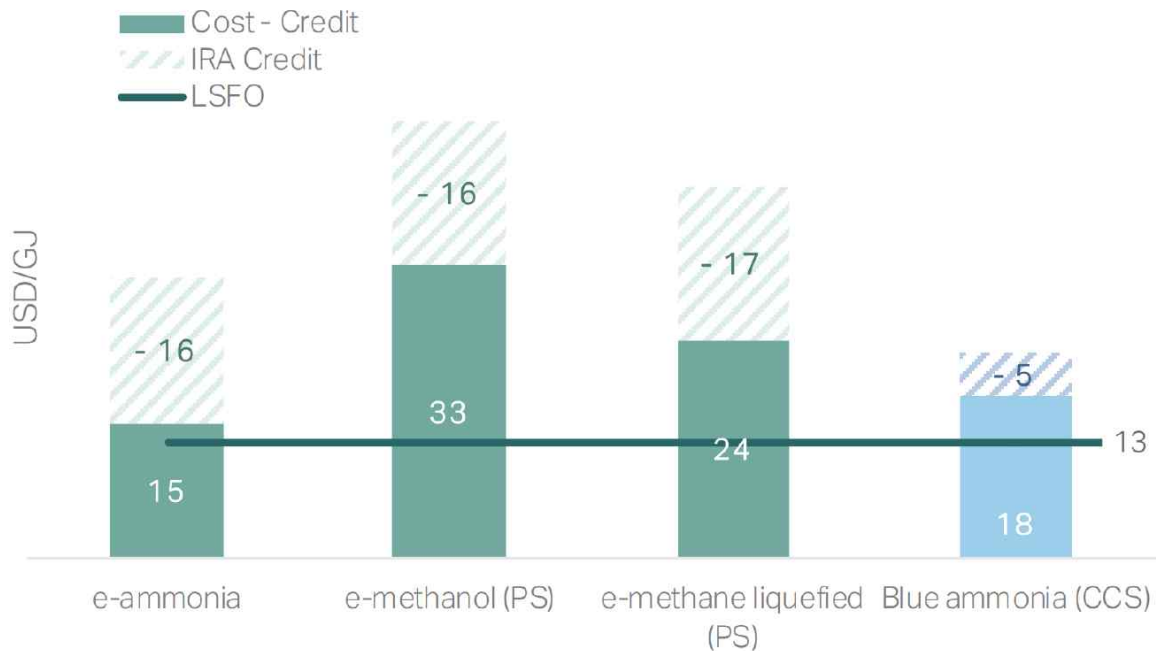
- 기후변화와 관련된 주요 정책은 청정에너지 투자와 세액 공제가 있다. 약 3,690억 달러 규모의 재원을 통해 풍력, 태양광, 배터리 저장기술, 전기차 인프라 등 재생가능 에너지 및 청정기술에 인센티브를 제공하며, 이를 통해 2030년까지 온실가스 배출을 약 40% 저감하고자 함
- 세액 공제는 태양광 패널 설치, 전기차 구매 등에 인센티브를 제공하여 기업들이 청정에너지 솔루션을 채택하도록 장려함
- 해운부문과 관련된 혜택으로는 청정수소의 전과정(Well-to-Wake) 배출량에 따라 세액을 공제하는 생산세액공제(PTCs)와 탄소 영구저장에 대한 크레딧이 있음
- 청정수소(45V) 조항의 경우 e-암모니아, e-메탄올, e-LNG 등에 적용되며, 크레딧은 탄소 배출량에 따라 달라지지만 최대 크레딧은 수소 kg당 3\$이고, 2023년부터 2032년까지 청정수소를 생산하는 프로젝트에 적용되며, 전과정 GHG 배출량 기준에 따라 크레딧 비율이 적용되는데 기준과 각 연료별 크레딧 가격은 표와 같다.

< 청정수소(45V) 조항에 따른 혜택 >

세금 혜택 (IRS code)	최대 크레딧	적용 기간	전과정 GHG 배출량 자격기준		선박연료 별 크레딧		
			gCO ₂ e/kgH ₂	크레딧 비율(%)	선박연료	크레딧 허용 연료양	연료 크레딧
청정수소 (45V)	3\$/수소kg	2023~ 2032년	<0.45	100%	e-암모니아	9.6kg H ₂ /GJ	29\$/GJ
			0.45~1.5	33%	e-메탄올	9.6kg H ₂ /GJ	29\$/GJ
			1.5~2.5	25%	e-LNG	10.0kg H ₂ /GJ	30\$/GJ
			2.5~4.0	20%	-	-	-

- 탄소 영구저장에 대한 크레딧은 45Q 조항으로 CCS 기술의 적용을 확대하여 산업부문의 탄소배출 저감에 기여하고자 하며, 특히 포집된 CO₂를 지질학적 저장소에 영구적으로 저장될 경우 톤당최대 85\$의 세액공제를 받을 수 있으며, 직접공기포집(DAC) 프로젝트의 경우 영구저장된 CO₂ 톤당 180\$, 직접공기포집된 CO₂를 산업적 용도로 사용할 때 톤당 130\$의 세액공제를 받을 수 있음

- 이처럼 미국에서 청정에너지 생산 보조금 지원이 제공되면, 대체연료 공급이 확대될 것으로 예상되며 [그림 5]는 2030년 생산을 시작하는 시설의 대체연료 생산비용에 대한 IRA 크레딧의 영향을 보여줌
- e-암모니아는 45V 세액 공제로 생산비용을 50% 이상 절감할 수 있고, 블루암모니아는 45Q 혜택으로 5\$/GJ의 절감이 가능함



* 막대 전체 높이는 2030년 예상 연료비용, 줄무늬 막대는 IRA 크레딧의 영향, 실선막대는 보조금을 받은 연료비용

< 2030년 IRA 크레딧이 대체품 생산비용에 미치는 영향 >

■ 재생연료표준(Renewable Fuel Standard)

- 미국 환경보호청(EPA)은 차량 부문에서 재생연료 사용량을 확대하기 위해 2005년 재생연료 표준1(Renewable Fuel Standard, RFS1)을 도입하여 연간 총 바이오연료 의무혼합량과 재생 연료에 대한 광범위한 정의를 확립함
- RFS1은 휘발유에는 바이오연료로 옥수수 기반 바이오 에탄올을 혼합하도록 규제하며, 2012년까지 75억 갤런의 바이오연료 혼합목표를 수립함
- 2010년 EPA는 기존 RFS1을 개정하여 RFS2를 시행하였으며, 바이오연료를 원료 성분에 따라 4개 카테고리(재생가능 바이오연료, 차세대 바이오연료, 목질계 바이오연료, 바이오매스 기반 경유)로 분류함
- 각 바이오연료는 화석연료 대비 약 20~60%의 온실가스 감축 최소치 기준을 준수해야 하며, 온실가스 감축 효과가 보다 우수하다고 평가되는 바이오연

료에 대해 별도의 의무혼합량과 비율을 두어 연료 활용을 촉진하고 있고, 또한 RFS2는 바이오연료 혼합목표를 2022년까지 360억 갤런으로 상향함

< 미국 RFS2의 바이오연료 분류 >

신재생 연료	원료	온실가스 감축 최소기준
재생가능 바이오연료 (Renewable fuel)	옥수수 전분 에탄올 등을 포함하는 모든 수송용 재생연료	20%
차세대 바이오연료 (Advanced biofuel)	셀룰로오스 바이오연료, 바이오매스 디젤, 비옥수수 기반 바이오연료 등을 포괄	50%
목질계 바이오연료 (Cellulosic biofuel)	셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌	60%
바이오매스 기반 경유 (Biomass-based diesel)	폐동물성유, 슬러지, 생활 고형폐기물 등 폐자원이나 조류(Algae)와 같은 원료로 생산된 바이오 디젤	50%

* 재생가능 바이오연료에 차세대 바이오연료가 포함되며, 차세대 바이오연료에 목질계 바이오연료와 바이오매스 기반 경우가 포함됨

- RFS2에 따라 바이오연료 적격성은 에너지 독립 및 안보법(EISA)에 명시된 재생연료의 정의와 미국 환경보호청(EPA)이 평가한 각 연료경로의 전주기 GHG 배출량을 기반으로 평가되며, 전주기 GHG 배출량은 “직접 배출량과 토지사용변화로 인한 간접배출량을 포함한 GHG의 배출 총량” 으로 정의함
- 2023년 6월 21일, 미국 환경보호청(EPA)은 2023년부터 2025년까지 셀룰로오스 바이오연료, 바이오매스 기반 디젤(BBD), 고급 바이오연료 및 총 재생가능 연료에 대한 바이오연료 부피 요구사항 및 관련 백분을 표준을 설정하는 RFS 최종 규칙(Final Renewable Fuel Standards Rule for 2023, 2024, and 2025)을 발표했으며, 이 규칙은 또한 2023년에 2억 5천만 갤런의 재생가능 연료에 대한 추가 부피 요구 사항을 설정하여 최종목표를 설정함

< RFS 최종 규칙에 따른 재생가능 연료별 부피 요구 사항 >

구 분	2023	2024	2025
셀룰로오스 바이오연료	0.85	1.09	1.38
바이오매스 기반 디젤(BBD)	2.82	3.04	3.35
첨단 바이오연료	5.94	6.54	7.33
재생가능 연료	20.94	21.54	22.33
보충 기준	0.25	해당 없음	해당 없음

2.3 중국의 탈탄소화 규제 및 정책

- 중국은 2021년 3월, 「국가 경제 및 사회 발전을 위한 제14차 5개년 계획 (China's 14th Five-Year Plans, 이하 FYP)」을 발표하면서, 5대 핵심 정책분야를 강화할 것임을 밝힘
- FYP는 2021~2025년 기간 동안 중국 경제 발전을 위한 연구 혁신, 시장 개혁, 녹색 성장, 인적 자원, 균형 잡힌 사회 발전 등 5대 분야에 중점을 두며, 특히 FYP는 녹색 성장을 위해 비화석 에너지 자원 개발 가속화, 2030년 탄소배출량 정점 도달을 위한 실행계획 개발, 정책 및 조치 채택을 통해 2060년까지 탄소중립 달성 노력 등의 목표를 설정함

< FYP 녹색 성장 주요 지표 >

정책분야	지표		목표치
오염저감 및 탄소배출	1	- 2020년 대비 차량으로 일정기간 운송되는 화물 또는 여행거리 당 CO2 배출량 감축률(%)	5
	2	- 2020년 대비 선박으로 일정기간 운송되는 화물 또는 여행거리 당 CO2 배출량 감축률(%)	3.5
	3	- 2020년 대비 선박으로 일정기간 운송되는 화물 또는 여행거리 당 NOx 배출량 감축률(%)	7
에너지 소비 구조	4	- 중국 도시의 대중교통, 택시(온라인 호출 포함), 신에너지 차량을 이용한 물류 배송비율(%)	72, 35, 20
	5	- 국제 컨테이너 허브 항만*에서의 신에너지 및 청정에너지 컨테이너 트럭 비율(%) * 상하이, 다롄, 톈진, 칭다오, 댜오저우, 닝보저우산, 샤먼, 선전, 광저우, 베이징, 양푸(11개)	60
교통·물 류 구조	6	- 2020년 대비 양쯔강 경제벨트 항만 및 수상서비스 지역의 해안 전력소비 증가율(%)	100
	7	- 연간 평균 복합 철도-수상 컨테이너 운송량 증가율	15
	8	- 인구 1백만 명 이상 도시 중 그린 이동수단* 비율이 70% 이상인 도시 * 대중교통, 자전거, 도보 등	60

- FYP는 목표를 달성하기 위한 주요 전략으로 “혁신주도 개발, 산업 현대화, 국내 시장 및 수요 강화, 농촌 활성화, 국민복지 향상, 지속가능한 환경 발전, 국제협력 강화, 국가안보시스템 지원”을 식별 및 제시함
- “지속가능한 환경 발전”은 산업체계 및 에너지시스템 현대화(핵·수력 등의 비화석 에너지)와 관련된 목표·지침을 포함하고 있으며, 녹색 성장 촉진에 중점을 두고, 특히 해운 부문에서는 블루 경제에 대한 국제협력 강화, 국제 해양 거버넌스 메커니즘 관련 규칙 수립 및 이행, 민감한 국제 이슈인 국제수역, 원양어업 등을 포함함

- 이와 함께 중국은 COP26을 앞두고 2021년 10월 28일 UNFCCC에 업데이트된 국가온실가스 감축목표(NDC, Nationally Determined Contributions)를 발표함

〈 중국의 국가온실가스감축목표(NDC)(2021년 10월 기준) 〉

구 분	내 용
국가 온실가스 감축목표 (NDC)	<ul style="list-style-type: none"> - 2030년 이전(before) CO2 배출량 정점 도달 및 2060년 이전 탄소중립 달성 - 2005년 수준 대비 2030년까지 탄소집약도 65% 이상 감축 - 2030년까지 1차 에너지 사용 시 비화석 연료 비중 25% 증가 - 2005년 수준 대비 2030년까지 산림축적량을 약 60억 m³까지 확장 - 2030년까지 풍력 및 태양광 발전설비 용량을 1,200GW 이상으로 확장 - 2030년까지 절대 배출량을 13.9 GtCO₂e으로 설정(2010년 대비 26% 증가)

- 2022년, 중국 정부는 7개 부처 공동으로 운송의 시너지와 효율성을 촉진하기 위해 「오염 및 탄소 저감 시너지 효율성 제고를 위한 이행계획」을 발표하였으며, 동 계획의 일환으로서 “도로에서 철도로, 도로에서 해상으로” 정책 추진을 가속화하여 철도와 해상운송의 비중을 높이는 데 중점을 두었음
- 특히 해상운송의 경우, 노후 선박을 폐선하고 신에너지 및 청정에너지 추진 선박을 권고하며, 항만 육상전원공급설비를 설치하고, 선박이 항만에 정박할 때 육상전력 사용을 촉진함
- 2022년 11월, 중국 교통부 해사국은 선박 에너지 소비 데이터를 수집·보고하고 탄소집약도 관리를 강화하는 조치를 발표하였고, 2022년 12월부터 이를 시행함
- 동 조치는 총톤수 400톤 이상의 중국 선박과 중국 항만에 출입하는 400톤 이상의 외국적 선박에 적용되나, 군용선, 어선, 스포츠용 선박에는 적용되지 않으며, 중국 항만에 출입하는 외국적 선박은 선박 에너지 효율 관리 계획 요구에 따라 선박 항해일지 또는 기타 문서에 선박 에너지 소비 데이터를 기록해야 하고, 이전 항해의 에너지 소비 데이터를 보고해야 함

2.4 일본의 탈탄소화 규제 및 정책

- 일본은 온실가스 배출량을 2013년 대비 2030년까지 46% 감축하고, 2050년에 탄소중립 달성을 목표로 하는 “2050 탄소중립 달성”을 선언하였으며, 이에 따라 아래 그림과 같이 다양한 탈탄소화 정책을 추진 중



< 일본의 탈탄소화 정책 요약 >

- 「Green Transformation(GX) 추진전략」은 2021년 발표된 「제6차 에너지 기본계획」, 「지구온난화대책계획」 등 기존 정책을 총망라하는 전략이다. 목표는 안정적인 에너지 확보, 성장지향형 탄소가격제 도입, 국제협력 강화, 사회 전반에 걸친 GX 추진이며, 공급측면에서는 재생에너지, 원자력, 수소·암모니아, 탄소재활용·CCS, 전력·가스 시장 정비, 자원외교를 중점으로 하고, 수요측면에서는 에너지 효율화와 제조업의 구조 전환, 주택·건축물, 운송, 이차전지, 탈탄소 목적의 디지털 투자를 다룸
- 「GX 추진전략」은 해운 부문의 목표로 2050년 탄소중립을 포함하며, 배출량이 제로인 내·외항선 보급을 지원하고, 국제규제를 주도할 계획을 수립하였으며, 특히 자동차, 항공기 등을 포함한 운송 부문에서 차세대 연료에 대한 목표와 규제를 설정하여 미래연료 수요를 유도하고, 재생에너지와 원자력 에너지에 대한 정량적 목표를 수립하여 수소 및 암모니아, 탄소 재활용 연료(SAF, 합성연료) 부문을 중심으로 미래 연료 확보를 위한 기반을 마련할 계획임

< 일본의 해운 탈탄소화 관련 분야별 주요 내용 >

분 야	주요 목표	주요 내용
재생에너지	-2030년까지 재생에너지 비율을 36~38%까지 증가	-[단기] 태양광 도입 확대, 육·해상 풍력 경쟁력 강화 -[장기] 전력계통 및 해저 직류 송전시설 정비, 2030년 정치용 축전지 도입, 페로브스카이트8) 도입, 부유식 해상풍력 도입
원자력	-2030년까지 원자력 비율 20~22% 달성	-안전 메커니즘을 통합한 차세대 혁신 원자로 구축 -국제 제후를 통한 연구개발 추진, 견고한 공급망 구축
수소·암모니아	-	-수소기본전략 개정을 통한 산업전략 구체화 -기존연료 수준의 가격경쟁력 확보를 위한 국내외 수소 생산·공급 체계 구축 지원
자원외교	-	-LNG 확보 지원, 국제 상호협력체계 구축 -메탄 하이드레이트 기술개발 지원
운송	-[항공기] 2030년대까지 SAF 생산기술 개발·실증, 운항 개선 등 -[해운] 2050년 탄소중립 실현	-[자동차] 「에너지 절약법」 탐러너 제도9) 집행 강화, 연료전지 자동차, 전기자동차 도입 목표 설정 등 -[항공기] SAF 기술개발, [해운] 무배출 내·외항선 보급 지원 제도, 국제규제 주도 등 -[철도] 철도자산 재생에너지 보급 확대에 활용 -[물류] 화물산업에서의 차세대 자동차 보급 촉진 등
인프라	-	-다양한 인프라를 활용한 재생에너지 도입 촉진 등
탄소 재활용·CCS	-2030년까지 CCS 사업 개시	-탄소 재활용 연료(SAF, 합성연료), 바이오 제품 제조, CO2 감축 콘크리트, CCS 사업 및 지원정책 실시

3. 수소 선박 관련 IMO CCC 회의 동향 및 규제 검토

3.1 IMO CCC의 회의 동향 및 지침 검토

■ 수소선박에 대한 국제 안전 규약(IGF코드) 및 액화 가스를 대량으로 운반하는 선박의 국제 코드(IGC코드) 등을 검토함

- 명 칭 : 화물·컨테이너 운송 전문위원회(Carriage of Cargoes & Containers)
- 의 장 : Ms. MaryAnne Adams (Marshall Islands)
- 회 의 : 2024.09.16. ~ 2024.09.20.(10차)
- 주요활동 :
 - 화물 및 컨테이너 운송 전문위원회(CCC)는 포장된 위험물, 고체 벌크 화물, 벌크 가스 화물 및 컨테이너의 운송을 다루며 국제해상고체벌크코드(IMSBC Code) 및 국제해상위험물(IMDG) 코드를 지속적으로 업데이트함
 - 또한 가스 또는 기타 저인화점 연료를 사용하는 선박에 대한 국제 안전 규약(IGF 코드) 및 액화가스를 대량으로 운반하는 선박의 건설 및 장비에 대한 국제 코드(IGC 코드)를 포함한 다른 코드를 검토하며 상품의 복합 운송을 다루는 다른 유엔 기구와 긴밀히 협력하고 있음

■ 수소를 연료로 사용하는 선박에 대한 임시지침

- 2024년 9월 9일부터 13일까지 대체연료를 사용하는 선박의 안전을 위한 기술 조항개발에 관한 간이 작업반(ISWG-AF1)이 개최되었음
- 대체연료 사용 선박의 안전에 관한 기술 조항 개발에 관한 간이 작업 그룹의 보고서와 작업반 의장인 크리스티안 알게이어(독일)가 구두로 제공한 추가 정보를 고려함
- 액화 수소 병커링 시스템 및 절차에 대한 정보와 안전 고려사항을 제공하는 CCC 10/INF.16, 수소를 연료로 사용하는 선박의 안전을 위한 임시지침 초안 개발을 지원함
- 수소를 연료로 사용하는 선박의 안전에 관한 임시지침 초안(CCC 10/WP.5, 26~35항 및 부속서1)을 개발하는 작업 그룹의 진행 상황에 주목하였으며, 이번 회의에 제출된 다음 문서들이 이미 작업 그룹에 의해 검토되었음을 확인함

- CCC 10/3/Rev.1 (독일), 암모니아, 수소 및 저인화점 오일 연료를 사용하는 선박의 안전을 위한 기술 규정 개발을 위한 서신 그룹 보고서를 제공하며, 특히 수소를 연료로 사용하는 선박을 위한 임시지침 초안을 포함하고 있음
 - CCC 10/3/16 (일본), 수소를 연료로 사용하는 선박을 위한 임시 지침 초안의 9장에 있는 소비자에게 연료공급에 대한 요구 사항에 대해 CCC 10/3/Rev.1 문서에 대한 의견을 제공함
 - CCC 10/3/17 (일본), 수소를 연료로 사용하는 선박의 안전을 위한 임시지침 초안에서 소비자에게 연료공급에 대한 요구 사항에 대해 CCC 10/3/Rev.1 문서에 대한 의견을 제공함
 - CCC 10/INF.16 (일본 등), 액화 수소 병커링 시스템 및 절차에 대한 정보와 안전 고려 사항을 제공하며, 수소를 연료로 사용하는 선박의 안전을 위한 임시 지침 초안 개발을 지원할 의도를 가짐
 - CCC 10/INF.27 (대한민국), 고압 수소 가스 저장 탱크에서 발생하는 침투로 인해 선박 운영 중 발생할 수 있는 잠재적 위험요소를 관리하는 것의 중요성에 대한 정보를 제공함
- 이어진 논의에서 서브위원회는 임시지침에 훈련 및 인원 보호에 관한 새로운 섹션을 포함해야 한다는 의견을 표명함
 - 이와 관련하여 서브위원회는 대체연료를 사용하는 선박의 안전을 위한 기술 규정 개발 작업 그룹에 대해 문서 CCC 10/WP.5의 부록 1을 기반으로 수소를 연료로 사용하는 선박을 위한 임시지침 초안을 완성 방향으로 추가 개발할 것을 지시하였으며, 이를 위해 문서 CCC 9/3, CCC 9/3/11, CCC 9/3/12, CCC 9/3/15, CCC 9/WP.3, CCC 10/3 및 Rev.1, CCC 10/3/16, CCC 10/3/17, CCC 9/INF.17, CCC 9/INF.18, CCC 10/INF.16, CCC 10/INF.27을 고려할 것을 명시함
- 대체 연료를 사용하는 선박의 안전을 위한 기술 규정 개발 작업 그룹 설립
- 서브위원회는 대체연료를 사용하는 선박의 안전을 위한 기술 규정 개발 작업 그룹을 설립하기로 합의하고, 본회의에서 제기된 의견과 결정 사항을 반영하여 다음과 같이 지시함
 - 문서 CCC 10/WP.5의 부록 1을 기반으로 문서 CCC 9/3, CCC 9/3/11, CCC 9/3/12, CCC 9/3/15, CCC 9/WP.3, CCC 10/3 및 Rev.1, CCC 10/3/16, CCC 10/3/17, CCC 9/INF.17, CCC 9/INF.18, CCC 10/INF.16, CCC 10/INF.27을 고려하

여 수소를 연료로 사용하는 선박을 위한 임시지침 초안을 추가로 개발하여 최종적으로 완성할 계획임

- 문서 CCC 9/14의 부록 1을 기반으로 문서 CCC 10/3/1, CCC 10/3/2, CCC 10/3/3, CCC 10/3/4, CCC 10/3/6, CCC 10/3/7, CCC 10/3/10 및 CCC 10/INF.28을 고려하여 IGF 코드 및 대체 연료에 대한 안전 규정 개발을 위한 작업 계획을 업데이트함
- 해당 그룹을 재설립할 필요성이 있는지 검토하고, 필요한 경우 본회의에서 심의를 위한 기준 조건을 마련함

■ 수소를 연료로 사용하는 선박의 안전을 위한 임시 지침 초안 발표

- 서브위원회는 수소를 연료로 사용하는 선박의 안전에 대한 임시지침 초안을 개발하는 작업 그룹의 진행 상황에 주목함(CCC 10/WP.6, 47항 및 48항, 부속서 2)

3.2 IMO CCC의 수소선박 규제 검토

■ 수소선박에 대한 안전규정 개발 - 목적과 기능요건

- 본 임시지침의 목적은 안전하고 환경 친화적인 선박의 설계, 건조 및 운전에 대하여 규정하고, 특히 연료로서 액화수소 또는 고압기체 수소연료를 사용하는 추진기관, 보조발전기관 또는 기타 목적의 기관장치의 설치에 대하여 규정함
- 기능 요건
 - 장치의 안전성, 신뢰성 및 신인성(dependability)은 새롭고 비교할 만한 전통적인 기름 연료를 사용하는 주기관과 보조기관으로부터 얻어진 것과 동등하여야 함
 - 연료와 관련된 위해요소의 가능성과 결과는 통풍, 탐지 및 안전조치 등의 배치 및 시스템 설계를 통해 최소화되어야 하며 가스 누설 또는 위험 저감 수단의 고장이 발생하는 경우, 필요한 안전조치가 수행되어야 함
 - 설계는 가스연료장치에 대한 위험 저감수단과 안전조치가 허용할 수 없는 동력의 손실로 이어지지 않도록 하는 것을 기본 개념으로 함
 - 위험구역은 선박, 선내인원 및 장비에 대한 안전에 영향을 미칠 수 있는 잠재적 위험도를 최소화 하도록 가능한 한 제한되어야 함
 - 연료를 요구되는 상태에서 누설 없이 공급하여 저장할 수 있도록 안전하고

적절한 연료공급장치, 연료저장장치 및 병커링장치를 배치하여야 하며 안전을 위하여 필수적인 경우가 아니라면, 공회전을 포함한 모든 정상작동 상태에서 벤트를 방지하도록 설계하여야 함

- 가스 누설원이 설치된 연료격납설비와 기관구역은 화재나 폭발로 인하여 허용할 수 없는 동력손실이 발생하거나 다른 구역에 있는 장비가 작동불능이 되지 않도록 배치되어야 함
- 연료장치 및 가스사용기관의 시운전(commissioning), 해상시운전(sea trial) 및 유지보수는 안전, 가용성 및 신뢰성을 만족시키도록 해야 함
- 장치 및 그 구성품이 사용된 규칙, 지침, 설계표준 및 안전, 가용성, 유지보수성 및 신뢰성과 관련된 원칙에 적합함을 기술문서를 통해 평가할 수 있어야 함

■ 수소선박에 대한 안전규정 개발 - 일반요건

- 이 장은 선내 인원, 환경 또는 선박에 미치는 나쁜 영향을 제거 또는 감소시키는 데 필요한 위험도 평가가 수행되었는지 확인하는 것을 목적으로 함
- 위험도 평가
 - 저인화점 연료의 사용으로 인하여 발생하는 위험성이 선내 인원, 환경, 선박의 구조적 강도 또는 보존성에 미치는 영향을 다루었는지 확인하기 위하여 전반적인 위험도 평가가 수행되어야 하며 합리적으로 예측 가능한 고장에 따른 물리적 배치, 운전 및 유지보수와 연관된 위해요소에 대해 고려하여야 함
 - 전반적인 위험도 평가에서는 다음과 같은 특정 수소 관련 위험 및 주제를 특별히 고려해야 하지만 다음과 같은 목록에 국한되지는 않음
(* 누출; 기능 상실; 부품 손상; 화재; 폭발; 극저온 및/또는 고압과 관련된 재료 특성; 병커링 스테이션 및 운영; 수소 배관 및/또는 장비가 있는 밀폐된 공간(수소량 축적 및 난류 증가와 관련된 구조물 및 장애물 영향성) 가스 및 화재 감지; 소화; 발화원; 제어, 경보 및 안전 시스템; 벤트장치 설계; 환기율(공기로 인한 위험성 및 누출 감지 포함); 공기 응축(액체 수소);
 - 위험도는 수용할 수 있는 공인된 위험도 해석기법을 사용하여 해석하여야 하며, 해석에 있어서 적어도 기능의 손실, 구성품의 손상, 화재, 폭발 및 전기 충격을 고려하여야 하며 위험도를 가능한 어디에서든지 제거하도록 해석을 수행하여야 하나 제거할 수 없는 위험도는 필요한 수준까지 최소화하여야 함

- 폭발 범위의 제한

- 사고가 발생한 구역을 제외한 다른 모든 구역에 설치된 장비 및 장치의 기능을 방해하거나 손상을 주어서는 안 됨.
- 선박에는 주압판 하부의 침수 또는 점진적 침수가 발생할 정도의 손상을 주어서는 안 됨
- 작업장소 및 거주구에는 정상작동 상태에서 그러한 장소에 머무르는 사람이 부상당할 수 있는 정도의 손상을 주어서는 안 됨
- 폭발로 손상된 구역의 외부에 설치된 소화장치의 기능을 방해해서는 안 됨
- 구명설비로의 접근을 막거나 탈출로를 방해해서는 안 됨

■ 수소선박에 대한 안전규정 개발 - 선박 설계 및 배치

- 이 장에서는 발전장비, 수소 연료저장장치, 수소 연료공급장치 및 급유장치의 안전한 위치 공간 배치 및 기계적 보호를 제공하는 것을 목표로 함
- 기능 요건 : 3.2.1부터 3.2.3까지, 3.2.5, 3.2.6, 3.2.8, 3.2.12부터 3.2.15까지 및 3.2.17의 기능요건과 관련이 있으며, 다음과 같은 사항이 적용됨
 - 선박의 안전한 운전 및 선박과 관련된 기타 위험요소를 고려하여 연료탱크는 충돌 또는 좌초로 인하여 탱크가 손상될 확률을 최소화할 수 있도록 배치해야 함
 - 연료격납설비, 연료배관 및 기타의 방출원은 방출된 수소를 개방구역의 안전한 위치로 배출할 수 있도록 배치해야 함
 - 방출된 수소가 있는 구역의 출입구 또는 그 밖의 개구는 가연성, 질식성 또는 유독성(toxic) 가스에 대비한 설계가 이루어지지 않은 구역에 그러한 가스가 유입되지 않도록 배치해야 함
 - 연료배관은 기계적 손상이 발생하지 않도록 보호되어야 함
 - 추진 및 수소 연료공급장치는 수소 가스누설에 대한 안전조치가 허용할 수 없는 동력손실을 발생시키지 않도록 설계해야 함
 - 수소 가스 또는 저인화점연료기관이 설치된 기관구역은 수소 가스폭발이 일어날 가능성을 최소화해야 함

– 일반규정

- 다른규정이 제시되지않는 한 IGF 코드 파트 A-1 5장의 요구 사항이 적용됨
- IGF 코드 5.2(Functional requirements)에 명시된 요구사항 외에 수소 연료탱크를 설치할 경우 아래 권고사항을 고려해야 함
- 수소 연료탱크는 이격 거리 확보 및 구조 보강 등을 통해 충돌, 접지, 기계적 충격 등으로부터 보호되어야 하며, 수소 연료탱크 위치는 연료탱크를 화재 위험 지역으로부터 보호할 수 있어야 하며, 벤트 마스트(vent mast)에서의 증기와 화재 시 복사열의 영향 또한 고려해야 함. 수소 연료탱크는 선체중심선에 가깝게 배치하는 것을 권장하며, 선박의 측면과 하단까지의 최소 안전거리는 어떠한 경우에도 IGF 코드 5.3.3의 결정론적 접근 방식보다 작아서는 안 됨

– 비상차단으로 보호되는 기관구역

- 기관구역은 최소 IGF 코드 5.4(Machinery space concepts)에 주어진 요구 사항을 충족해야 함
(* 기관구역은 IGF 코드 5.3.4.1.2와 5.6(Regulations for ESD-protected machinery spaces) ESD 보호와 관련된 요구사항을 제외하고 최소한 IGF 코드 5.3.4의 요구사항을 충족해야 하며, 수소 연료 장비와 관련해서는 ESD 보호 개념이 적용되어서는 안 됨)
- IGF 코드 5.6의 요건은 수소를 연료로 사용하는 선박에는 적용되지 않음
(* 비상차단으로 보호되는 기관구역은 SOLAS II-1/55 요건을 충족하는 경우 허용될 수 있음)

– 선박 배치 원칙

- [수소 소비 공간] 연료전지는 연료전지 발전 설비를 사용하는 선박의 안전을 위한 임시 지침(MSC.1/Circ.1647)에 따라 배치되어야 한다.
- [수소 소비 공간]은 연료전지 발전 설비에만 적용되어야 한다.

– 연료 배관의 위치 및 보호에 관한 규정

- 연료 배관은 선측으로부터 800mm 이상 떨어져서는 안 됨
- 연료배관은 SOLAS 협약에 정의된 거주구역, 업무구역, 전기설비구역 또는 제어구역을 직접 통과하여서는 안 됨
- 로로구역(ro-ro spaces), 특수분류구역 및 개방갑판을 통과하는 연료관은 기

계적 손상으로부터 보호되어야 함

- 액체수소 배관의 극저온 외부 표면은 질소 또는 산소로부터의 응축을 방지하기 위해 공기에 노출되지 않도록 보호되어야 함

– 연료준비실

- 연료준비실은 본 장에서 특별히 언급되지 않는 한, IGF 코드 5.8(Regulations for fuel preparation room design)의 요구 사항을 최소한 충족해야 함
- 연료준비실은 액화가스연료장치 내의 증발로 인한 압력 상승에도 견딜 수 있도록 압력도출장치를 갖추어야 하며 압력도출장치는 요구되는 가장 낮은 온도 온도 범위에 적합한 재료로 구성되어야 함

– 빌지(bilge)장치에 대한 규정

- 이 기준이 적용되는 수소 연료가 존재할 수 있는 장소에 설치된 빌지장치는 수소 연료가 존재할 수 없는 구역의 빌지장치와 분리해야 함
- 수소 연료를 2차 방벽이 필요한 연료격납설비로 운송하는 경우 인접한 선체 구조를 통해 저장창(hold) 또는 단열(insulation) 구역에 유입되는 누설을 처리할 수 있는 적절한 배수 배치(drainage arrangement)가 제공되어야 하고, 빌지장치는 안전 구역(safe space)의 배관과 독립되어야 하며, 누설탐지장치를 설치해야 함
- 액체수소용 독립형탱크 형식 A의 저장창이나 방벽간 구역은 연료탱크에서 누설이나 파열이 발생한 경우 액체수소 연료를 처리할 수 있는 적절한 배수장치(drainage system)를 설치해야 함
- 위험하지 않은 것으로 간주되나, 불활성 대기로 배치된 연료 구역의 빌지장치는 다른 구역의 빌지장치와 분리해야 함

– 누액받이(drip tray)에 대한 규정

- 선체구조를 손상시킬 수 있는 누설이 발생할 수 있거나 누설의 영향을 받는 구역(area)을 제한할 필요가 있는 장소에는 누액받이를 설치해야 함
- 누액받이는 적합한 재료로 제작되어야 함
- 누액받이는 액체연료가 누설되는 경우 주변 선체 또는 갑판구조가 허용할 수 없는 냉각에 노출되지 않도록 선박구조와 단열되어야 함

- 누액받이마다 드레인(drain) 밸브를 설치하여 빗물이 선측으로 배수되도록 해야 함
 - 각각의 누액받이는 위험평가에 따른 최대 유출(spill)량을 확실히 처리할 수 있도록 충분한 용량을 가져야 함
- 밀폐구역의 출입구 및 그 밖의 개구의 배치에 관한 규정
- 위험구역에서 비위험구역으로 직접적인 출입구는 원칙적으로 허용되지 않는다. 운전상의 이유로 그러한 개구가 필요한 경우 5.12에 적합한 에어로크 (airlock)를 설치해야 함
 - 연료준비실이 갑판하부에 배치된 경우 그 구역은 가능한 한 개방갑판으로부터 직접 접근이 가능하도록 독립적인 출입구가 있어야 하며, 갑판으로부터 직접 접근이 불가능한 경우에는 5.12에 적합한 에어로크를 설치해야 함
 - 탱크연결부 구역(space)에 대한 접근이 독립적이고 개방갑판으로부터 직접적이지 않으면 볼트(bolt)로 체결되는 덮개(hatch)를 설치해야 하며, 그러한 덮개가 있는 구역은 위험공간(hazardous space)이 됨
 - 선내의 다른 밀폐구역에서 비상차단으로 보호되는 기관구역으로 연결된 출입구에는 5.12에 적합한 에어로크를 설치해야 함
 - 불활성화 구역의 출입구는 사람들이 함부로 출입할 수 없도록 설치해야 한다. 개방갑판에서 이러한 구역으로 출입하는 것이 아니라면 불활성가스가 인접구역으로 누설되는 것을 방지할 수 있도록 밀봉장치(sealing arrangement)를 설치해야 함
- 에어로크에 대한 규정
- 에어로크는 2개의 확실한 가스밀 문이 설치된 가스밀 격벽으로 밀폐된 구역이며 이 문은 1.5m 이상 2.5m 이하의 간격으로 떨어져 배치되어야 함
(* 「만재흡수선에 관한 국제협약」의 규정을 적용받지 않는 경우 문턱의 높이는 300mm 이상이어야 하며, 문은 자동폐쇄식이어야 하며 어떠한 개방고정용 장치를 설치해서는 안 됨)
 - 에어로크는 인접한 위험구역 또는 공간보다 높은 압력으로 기계식 통풍이 되어야 함
 - 에어로크는 에어로크로 격리된 가스위험구역(gas dangerous area)에서 가장 중대한 사고가 발생했을 경우에도 가스가 안전공간으로 방출되지 않도록 설계해야 하며, 사고는 4.2에 따른 위험분석으로 평가해야 함

- 에어로크의 형상은 단순해야 하고, 자유롭고 쉽게 통행할 수 있어야 하고 바닥면 적은 최소 1.5m²가 되어야 하며, 에어로크를 창고 등 다른 용도로 사용해선 안 됨
 - 한 개 이상의 문이 닫힘 상태에서 벗어나는 경우 에어로크의 양쪽으로 경고를 보낼 수 있는 듣고 볼 수 있는 경보장치를 설치해야 함
 - 에어로크로 보호되는 갑판하부의 위험구역에서 접근할 수 있는 비위험구역의 경우, 위험구역에서 저압 손상시 통풍이 복구될 때까지 구역으로의 접근이 제한되어야 하며, 압력손실과 압력 손실 시 에어로크 문의 열림을 표시하기 위해 사람이 상주하는 장소에 듣고 볼 수 있는 경보(audible and visual alarm)가 제공되어야 함
 - 안전에 필요한 필수설비는 계속 전력이 공급되어야 하며, 이 장치는 승인된 안전형이어야 하고, 이러한 필수설비에는 조명(lighting)장치, 화재탐지장치, 선내 방송장치, 일반 경보장치 등이 포함됨
- 압축 수소 배치
- 압축 수소는 공기 중 개방갑판에만 저장될 수 있고, 수소 가스 정체로 인해 심각한 폭발이 발생할 수 있으므로, 어떠한 경우에도 갑판 위 장비에 잠재적 수소 가스 누출이 축적되어서는 안 됨
 - 압축수소탱크를 개방갑판의 반밀폐구역에 설치하는 것을 고려하는 경우, 배관 및 잠재적 누출원에는 불활성가스로 채워진 2차 방벽이 제공되어야 하며, 예상치 못한 누출에 따른 압력을 처리할 수 있도록 설계되어야 함
 - 선박 내 수소 화물창의 위치는 수소 설치 및 연료 공급 능력에 영향을 미칠 수 있는 외부 위험을 고려해야 하며, 또한, 수소 설비에서 발생할 수 있는 화재 및 폭발 조건과 관련하여 평가되어야 하며 사고가 발생한 구역 이외의 다른 구역에 영향을 주어서는 안 됨

■ 수소선박에 대한 안전규정 개발 - 연료격납설비

- 이 장의 목표는 인명, 선박 및 환경에 위험을 최소화하여 전통적인 기름 연료 선박과 같은 수준 이상으로 적합하게 수소 가스를 저장할 수 있도록 하기 위함임
- 기능요건 : 이 장은 3.2.1, 3.2.2, 3.2.5 및 3.2.8부터 3.2.17까지의 기능적 요건에 관한 사항으로 다음에 따름
 - 연료격납설비는 탱크나 탱크연결부로부터의 누설이 선박, 인명 또는 환경에 위험을 초래하지 않도록 설계되어야 하며, 또한, 다음의 잠재적 위험(danger)

을 피하도록 해야 함

- 1) 얼음이나 결빙 또는 액화 공기의 형성을 방지하도록 설계
 - 2) 허용한계 이하의 온도에 대한 선체 재료 노출
 - 3) 발화원이 있는 장소의 가연성 연료 확산
 - 4) 연료 및 불활성가스로 인한 산소 결핍 위험
 - 5) 발화원이 있는 장소로 퍼지는 가연성 연료
 - 6) 비상소집장소, 탈출경로 및 구명설비로의 접근 제한
 - 7) 구명설비 유용성의 저하
- 연료탱크의 압력 및 온도는 연료의 이송요건 및 격납설비의 설계한계 내로 유지할 수 있어야 함
 - 임의의 가스 누설 후 취해진 보호조치로 인해 허용할 수 없는 동력손실이 발생하지 않도록 연료격납배치(fuel containment arrangement)가 설계되어야 함
 - 연료저장을 위하여 이동식 탱크가 사용되는 경우 이 장에 명시된 것과 같이 영구 설치된 탱크와 같은 수준 이상이 되도록 탱크를 설계해야 함
- 연료격납설비에 관한 일반규정
- 압축 및 액체수소와 관련한 규정
 - 1) 수소 적용을 위한 연료격납설비는 주관청에 의해 승인되고 인증되어야 함
 - 액체수소와 관련한 규정
 - 1) 손상으로 단열 성능이 저하될 가능성이 있는 경우, 열화를 고려하여 적절한 안전조치를 취해야 하며, 진공단열 연료격납설비의 경우, 압력 릴리프 밸브 (PRV) 용량 및 배관 사이즈는 단열 손실과 열 부하 손실을 고려해야 함
 - 2) 연료격납설비에 진공 단열재를 사용하는 경우, 필요에 따라 실험을 통해 주관청이 승인할 수 있도록 단열 성능을 평가해야 함
 - 3) 연료격납설비의 모든 용접 이음은 면내(in-plane) 맞대기 용접 완전 용입 형이어야 하며, Dome-to-shell 연결의 경우에만 용접 절차 승인 시 수행된 테스트 결과에 따라 완전 용입 유형의 티(tee) 용접을 사용할 수 있음
 - 4) 헬륨 또는 5% 수소와 95% 질소의 혼합물이 연료 탱크 및 연료 배관의 밀

폐 시험 시, 대체 시험물질로 사용되어야 함

- 5) 증발 가스 취급 시, 사용 수단에 대해 충분히 고려해야 함
- 6) 예열(warm-up), 불활성 가스 충전, 가스 주입, 수소 주입 및 냉각(pre-cooling)에 대한 적절한 절차를 수립해야 하며, 절차에는 다음과 같음
 - a. 온도 범위에 맞는 불활성 가스 선정
 - b. 가스 농도 측정
 - c. 온도 측정
 - d. 가스 공급율 측정
 - e. 작업의 시작, 중단, 재개 및 종료 조건
 - f. 반환 가스(return gas) 처리
 - g. 배출 가스
- 7) 오르토(ortho-) 수소에서 파라(para-) 수소로의 전환에 의한 과도한 가열을 피하기 위해 거의 순수한 파라 수소(즉, 95% 이상)만 적재해야 한다.
- 8) 기준 온도에서 98%를 초과하는 충전 한계는 허용되지 않아야 한다.
- 9) 액화 가스 연료 저장 탱크가 개방 갑판에 있는 경우 선박 강재는 탱크 연결부 및 기타 누출원으로부터의 잠재적 누출 가능성으로부터 보호되어야 한다.

(* 재료는 대기압에서 운반되는 연료의 온도에 해당하는 설계 온도를 가져야 한다. 선박의 강철 구조물을 보호하기 위해 탱크의 정상 작동 압력이 고려되어야 함)

- 연료격납시스템의 설계 및 배치

- 연료와 접촉하는 탱크의 재료는 저장된 연료와 호환되어야 하며, 수소 취성은 수소 저장시스템의 수명에서 고려되어야 함
- 연료 탱크를 갑판에 고정해야 한다. 탱크를 지지하고 고정하기 위한 배치는 선박의 특성과 탱크의 위치를 고려하여 최대 예상 정적 및 동적 경사뿐만 아니라 최대 예상 가속도 값을 위해 설계되어야 하며, 탱크 지지대는 탱크의 움직임을 방지해야 함

- 연료 탱크와 선박의 연료 배관의 연결 파이프는 충분한 유연한 보상이 있어야 함
 - 연결부가 의도치 않게 분리되거나 파열될 경우 유출되는 연료의 양을 제한할 수 있는 장치를 제공해야 함
 - 연료 탱크 및 연료 공급 시스템은 가스 누출 후의 안전 조치가 허용할 수 없는 전력 손실로 이어지지 않도록 설계되어야 함
(* IGF 코트 6.4 (Regulations for liquefied gas fuel containment) 또는 참조와 대체)
- 휴대용 액화수소 저장탱크에 관한 규정
- 탱크의 설계는 6.4.15.3에 적합하여야 하며, 탱크 지지대(컨테이너 프레임 또는 트럭 새시)는 의도된 목적에 맞게 설계되어야 함
 - 휴대용 연료 탱크는 다음과 같은 전용 구역에 위치해야 함:
 - 1) 위치 및 화물 운영에 따른 탱크의 보호
 - 2) 개방 데크 구역에 위치한 경우: 냉각을 위한 유출 방지 및 물 분무 시스템; 그리고
 - 3) 밀폐구역에 위치한 경우: 설치된 공간을 탱크 연결 공간으로 간주해야 함
 - 휴대용 연료 탱크는 선박 시스템에 연결된 상태에서 갑판에 고정되어야 하며, 탱크를 지지하고 고정하기 위한 배치는 선박의 특성과 탱크의 위치를 고려하여 최대 정적 및 동적 기울기와 최대 가속도 값을 고려하여 설계되어야 함
 - 휴대용 연료탱크의 강도와 선박의 복원성에 미치는 영향을 고려해야 함
 - 선박의 연료 배관 시스템에 대한 연결은 연성 호스 또는 충분한 유연성을 가지고 있는 기타 적절한 수단을 사용하여야 함
 - 연결부의 부주의한 분리 또는 파열이 발생하여 유출되는 경우, 연료의 양을 제한하기 위한 조치가 있어야 함
 - 휴대용 탱크의 압력 완화 시스템은 고정식 벤팅 시스템에 연결되어야 함
 - 휴대용 연료 탱크의 제어 및 모니터링 시스템은 선박의 제어 및 모니터링 시스템에 통합되어야 하며, 휴대용 연료 탱크의 안전 시스템은 선박의 안전 시스템(예: 탱크 밸브의 차단 시스템, 누출/가스 감지 시스템)에 통합되어야 함
 - 검사 및 유지보수를 위해 탱크 연결부에 안전하게 접근할 수 있어야 함

- 선박의 연료 배관 시스템이 연결된 후,
 - 1) 6.5.6의 압력배출밸브(pressure relief valve)를 제외하고 각각의 휴대용 탱크는 언제든지 격리될 수 있어야 함
 - 2) 하나의 탱크가 격리되더라도 나머지 휴대용 탱크의 가용성이 손상되어서는 안 됨
 - 3) 탱크 충전율은 6.8에 주어진 충전 한계를 초과해서는 안 됨
- 고압 수소탱크 배기 시스템
 - 연료 탱크 안전 장치의 배출구는 선박의 가스 연료 배기 시스템과 연결되어야 하며 배기 시스템의 배출구는 다음의 사항을 만족하여야 함
 - 1) 배출이 방해지 않고 배출 시 수직 상방으로 향해야 함
 - 2) 물 또는 눈이 배출장치로 유입될 가능성을 최소화 하도록 배치되어야 함
 - 3) 화염방지장치(flame arrester)가 구비되어야 함
 - 4) 배기 출구의 높이는 노천 갑판 보다는 위에 그리고 작동 구역 및 통로의 6m 상부에 위치하며 B/3 또는 6m, 둘 중 큰 것 보다 낮지 않도록 배치되어야 함
 - 5) 가장 가까운 거주구역, 업무구역 및 제어장소로 통하는 개구, 공기 배출구 또는 공기 흡입구와 기관장치의 배기가스 배출구로부터 최소 10m 떨어진 곳에 배치되어야 함
 - 연료 가스 배기장치는 거주구역, 업무구역 및 제어장소 또는 기타 비위험구역과는 상호 관련성이 없이 독립적이어야 함
 - 모든 벤트관장치는 노출될 수 있는 온도 변화, 유체 흐름 또는 선박의 운동에 의한 힘에 의해 손상이 일어나지 않도록 설계하고 배치하여야 함
- 액화수소 탱크의 적재 한도에 관한 규정
 - 액화수소 저장탱크는 기준온도에서 98% 이상 채워서는 안 됨
- 연료 저장 상태 유지를 위한 조항
 - 액화 가스 연료 탱크는 IGF 코드 6.9(Regulations for the maintaining of fuel storage condition)에 따라 설계되어야 함

- 연료 격납 시스템 내의 대기 제어에 대한 규정
 - IGF 코드 6.10(Regulations on atmospheric control within the fuel containment system)의 규정이 적용되어야 함
- 독립형 탱크 Type C형 주변 공간의 환경 제어에 관한 규정
 - 수소탱크를 둘러싼 공간은 적절한 건조 공기로 채워야 하며, 적절한 공기 건조 장비가 제공하는 건조 공기로 이 상태를 유지해야 하며, 이는 차가운 표면으로 인한 응축 및 결빙에 문제가 되는 액화수소 탱크에만 적용됨
- 불활성화(불활성 가스)에 관한 규정
 - 연료증기가 불활성가스장치로 역류(back-flow)하는 것을 방지하기 위하여 다음과 같은 설비를 갖추어야 함
 - 가연성 기체가 비위험구역으로 역류하는 것을 방지하기 위해 불활성가스 공급 라인에는 2개의 차단밸브(shutoff valve)를 직렬로 연결하고, 이중 블록(block) 및 블리드(bleed) 밸브 사이에 통풍밸브를 설치해야 하며, 또한 이중 블록(block) 및 블리드 장치와 연료장치 사이에는 잠글 수 있는 역류방지밸브(non-return valve)를 설치해야 함. 이들 밸브는 비위험구역 밖에 위치해야 함
 - 연료배관장치의 연결이 영구적이지 않은 경우 6.13.2에서 요구하는 밸브는 2개의 역류방지밸브로 대체할 수 있음
 - 불활성화되는 각 구역은 분리될 수 있도록 배치되어야 하며, 이들 구역의 압력을 제어하기 위한 제어장치와 도출밸브 등을 설치해야 함
 - 누설탐지장치의 일부로 단열구역에 불활성가스가 계속 공급되는 경우, 각 구역에 공급되는 가스의 양을 감시할 수 있는 수단을 갖추어야 함
- 선내에서의 불활성가스의 생산 및 저장에 관한 규정
 - 설비는 산소농도 5%(부피비)를 넘지 않는 불활성가스를 생산할 수 있어야 하며, 설비에서 공급되는 불활성가스를 측정하는 연속계측 산소농도장치(continuous reading oxygen content meter)를 설치하고, 산소농도가 부피 기준 최대 5%로 설정된 경보기(alarm set)를 갖추어야 함
 - 불활성가스설비에는 연료격납설비에 적합한 압력 제어 및 감시장치가 있어야 함

- 질소생성장치 또는 질소저장장치가 기관실 외부의 별도 구획에 설치되는 경우, 이러한 구획에는 시간당 최소 6회의 통풍이 가능한 독립된 기계식 배기 (extraction)통풍장치를 설치해야 하며, 저산소 경보기도 설치해야 함
- 질소 배관은 통풍이 완벽하게 되는 구역으로만 연결되어야 하며, 밀폐구역의 질소 배관은 다음을 만족해야 함
 - 1) 전체적으로 용접구조이어야 함
 - 2) 밸브를 설치하는데 필요한 최소한의 플랜지 연결부만 있어야 함
 - 3) 가능한 한 길이는 짧게 함

■ 수소선박에 대한 안전규정 개발 - 재료 및 일반 배관 설계

- 기능요건

- 본 조항은 3.2.1, 3.2.5, 3.2.6, 3.2.8, 3.2.9 및 3.2.10의 기능 요구사항과 관련이 있다. 특히 다음의 조항이 적용됨
 - 1) 연료 배관은 극한 온도에 의한 높은 수준의 응력을 발생시키지 않으며 열팽창 및 수축을 흡수해야 함
 - 2) 연료 탱크 및 열 구조의 움직임 및 열 이동에 의한 과다 응력으로 부터 배관, 배관 시스템 및 부속품, 연료 탱크를 보호하기 위한 대책이 마련되어야 함
 - 3) 연료 가스가 시스템에서 응축할 수도 있는 무거운 구성 성분을 포함하고 있다면 해당 액체를 안전하게 제거하기 위한 방안이 마련되어야 함
 - 4) 저온 배관은 인접한 선체 구조로부터 단열되어야하며 필요한 경우, 선체 온도가 소재의 설계온도이하로 떨어지는 것을 방지하여야 함

- 일반 사항

- 수소 시스템에 사용되는 재료는 시스템에 적용되는 매질 및 용도에 적합해야 한다. 이는 적용되는 매질 및 용도에 적합하다고 규정하고 있는 인정 규격인 3.2부터 3.5에 따라 소재를 선택하거나 적절한 적합성 평가를 통해 선택하여야 하며 아래를 참고하여야 한다.
- 소재 적합성 평가 범위는 주관청의 동의가 필요하다. 평가를 통한 금속 소재

승인은 통상 다음을 검토하여야 한다.

- 1) 수소 노출 시 온도와 압력이 증가하면 심해질 것으로 예상되는 수소 노출에 따른 소재 특성의 열화
 - 2) 극저온 온도 노출 시 온도가 감소하면 심해질 것으로 예상되는 극저온 온도 노출에 따른 소재 특성의 열화
 - 3) 위 두 가지의 복합 영향. AIAA, 즉 수소 및 수소 시스템 안전을 위한 수소 및 수소 시스템 가이드 안전 표준 내 테이블 A5.8에 있는 10,000psi, 화씨 72도 (섭씨 약 22도)에서 재료들의 수소 취화 민감도 데이터가 좋은 참고자료가 될 수 있음
- 고려되어야 하는 대표적인 소재 특성은 항복강도, 인장강도, 연성, 파괴인성, 피로특성, 수소취성, 수소투과율, 내식성(관련있는 경우) 및 열팽창계수임
 - 소재가 성형 또는 용접 등 추가적으로 가공/제작되는 경우라면 이러한 가공이 소재 특성에 미치는 영향 또한 고려되어야 함
 - 금속소재 제조자들은 주관청 또는 인정기관에 승인을 받아야 하며 표 3-5에 주어진 적용 용도에 따른 소재를 표기하여야 함
 - 수소와 접촉하고 있는 모든 부품에 사용되는 소재는 수소취성, 수소투과 및 수소침범에 저항성을 가져야함
 - 수소 실린더에 사용되는 소재는 ISO 11114 및 ISO 19881에 부합하여야 함
 - 연료 파이프는 무계목 강관이어야 하며 오스테나이트 스테인레스강으로 제작되어야 한다. 설계압이 20MPa 이상인 파이프에 사용되는 소재는 S31603 또는 S31608 스테인레스강 이어야 함
- 금속소재
- 아래표는 수소 용도로 적합한 대표적인 금속 소재이며, 용접의 경우는 7.7.3을 참고

〈 수소 용도로 적합한 금속 소재 〉

소재	환경		특이사항
	기체수소	액화수소e	
알루미늄 및 그 합금c			
5086-O [4]	√	√	고용강화합금
2219-T851 d, 2195, 2029	√	√	석출경화합금 수소환경취화 민감도는 무시할만한 수준b
오스테나이트계스테인레스강			
316L (용체화 어닐링)	√	√	Ni ≥12.5% 권고[6]
탄소강 및 저합금강			
일부 탄소, 탄소-망간강 및 저합금강	√	X	인정표준 f) 또는 실험을 통해 기체수소에 적합함이 입증된([1.1.1]참고) 탄소, 탄소-망간 및 저합금강
구리 및 그 합금			
청동, 황동 및 구리-니켈합금	√	√	1. 통상 밸브용으로 사용되며 청동은 스테인레스강보다 낮은 수소투과율을 보임 2. 다른 금속소재보다 훨씬 높은 열전도도로 인해 탱크 구조물로는 적합하지 않을 수 있음. 3. 수소취성 민감도는 무시할만한 수준 b.
니켈기 및 니켈합금			
인코넬 및 모넬	X	√	수소취성에 민감함
타이타늄 및 그 합금			
타이타늄 및 그 합금	√	√	

Note :

- a. “√”는 사용 적합, “X”는 사용 부적합을 나타냄.
- b. Chandler, W. T. and R. J. Walter. “Testing to Determine the Effect of High-Pressure Hydrogen Environments on the Mechanical Properties of Metals,” in Hydrogen Embrittlement Testing, ASTM
- c. 알루미늄 합금은 비교적 높은 열전도도와 열팽창율로 인해 액화수소탱크 내벽과 외벽 사이의 강관으로 사용될 수 없음 [7]
- d. 액화수소탱크 제작에 2219가 사용된 예시들 [8]:
 - a) 신세대 발사체 탱크의 구조재료소재
 - b) cz-5 발사체로 사용된 액화수소탱크 구조재료
 - c) 나사와 보잉이 함께 개발한 우주선 발사시스템에 적용할 목적으로 액화수소연료탱크 소재로 사용되었으며 액화수소로켓용으로 채택되었고, 최종 목표는 인류는 화성으로 보내는 것임

- 수소탱크제작을 위한 클래드 소재의 모재는 액화수소 용도로 적합해야 하며, 압력 설계에 사용되는 두께는 클래드 또는 라이닝의 두께는 포함하지 않음
 - 허용응력은 설계온도에서 모재를 고려해야 한다[2][3][4].
- 비금속 소재
- 아래 표는 수소 용도로 적합한 대표적인 비금속 소재임
 - 표에 있는 비금속 소재는 대표적으로는 탄성중합체와 플라스틱, 탱크 몸체 제작에 사용될 수 없으며, 가스켓, 패킹 또는 스페이서와 같은 실링용 부품으로 사용하기 위해서는 내화특성이 중요한 기준이 될 수 있음 [3][4]. 일반적으로 복합재료는 상호 다른 열팽창계수와 수소 투과율이라는 이슈가 있음 [7]

〈 수소 용도 비금속 소재의 적합성 〉

소재	환경		특이사항
	기체수소	액화수소c	
Chloroprene rubber (Polychloroprene b)	✓	X	극저온 용도로는 너무 취약함
Polyester fibre (Dacron)	✓	X	극저온 용도로는 너무 취약함
Fluorocarbon rubber (Viton b)	✓	X	극저온 용도로는 너무 취약함
Polyester film (Mylar b)	✓	X	극저온 용도로는 너무 취약함
Nitrile (Buna-N b)	✓	X	극저온 용도로는 너무 취약함
Polyamides (Nylon)	✓	X	극저온 용도로는 너무 취약함
Polychlorotrifluoroethylene (Kel-F b)	✓		✓
Polytetrafluoroethylene (PTFE b)	✓		✓

Notes:

- “✓”는 적합, “X”는 부적합을 나타냄.
- Polytetrafluoroethylene (PTFE), Polychloroprene, Dacron, Mylar, Viton, Buna-N and Kel-F are examples of suitable products available commercially. This information is given for the convenience of users of this Technical Report and does not constitute an endorsement by ISO of these product(s). [3]
- 액화수소탱크가 빈 경우 상부 온도가 올라갈 수 있으므로 주의가 요구됨. 이 경우, 액화수소 대신 기체수소 컬럼이 적용됨[2,4]

– 부적합 소재

- 아래표는 수소 용도로 적용되어서는 안되는 대표적인 부적합한 소재를 보여줌

〈 수소 용도로 부적합한 대표적인 소재 〉

소재	환경		특이사항
	기체수소	액화수소	
다음 조건 중 하나를 가진 오스테나이트계 스테인레스강: - 냉간 가공, - 준안정 (예를 들어, 니켈 함량이 12.5% 미만, 예: 304), 또는, - 민감화	X	X	저온에서 항복강도 이상으로 응력을 받는 경우 결정립내 혹은 결정립계 파괴를 야기하며 소재의 연성을 감소시킴 (변형유기마르텐사이트변태로 인해 수소 취화파괴가 일어나기 쉬움).
Gray, ductile, or cast iron	X	X	수소 용도로 허용되지 않음
Nickel steels (e.g. 2.25%, 3.5%, 5%, and 9% Ni)	X	X	1. LH2 and SLH2 온도에서 연성 감소. 2. 9%Ni강에서 큰 폭의 샤르피 충격인성값 감소가 나타나며 이것은 LH2 용도로 적합하지 않음을 나타냄. 3. 수소유기크랙에 민감함
Asbestos impregnated with Polytetrafluoroethylene (PTFE)	X	X	석면의 발암성 문제로 가능하면 사용하지 말 것.

Notes:

- a. “√”는 적합, “X”는 부적합을 나타냄.

– 대표적인 용도

- 아래표는 특정 운용 조건, 예를 들어 수소 용도로 적합한 가스켓 소재와 같이, 대표적인 용도들에 대해 어떤 소재를 선택하면 되는지 안내함

〈 수소 용도로 적합한 대표적인 소재 〉

용도	환경	
	기체수소	액화수소
내부탱크	표 1-1 참고	오스테나이트계 스테인레스강 또는 알루미늄 합금, 표 1-1 [8] 참고.
밸브	적합한 산업제품 b	316L 또는 황동: 확장 보닛 및 다른 재료가 내부에 있는, 단조, 기계가공, 및 주조로 제작된 밸브 몸체
피팅	적합한 산업제품 b	316L: 진공 재킷용도의 바요넷 타입
오링	적합한 산업제품 b	스테인레스강 C, Kel-F or Teflon
가스켓	적합한 산업제품 b	툽니 모양의 플랜지, Kel-F, Teflon, 가스가 채워진 Teflon 사이의 연질 알루미늄, 납 또는 어닐링된 구리
신축호스	테플론 라이닝이 되어있는 스테인레스강	나선형의 316 또는 31 스테인레스강 진공 재킷
파열판 어셈블리	304, 304L, 316, 또는 316L 스테인레스강	304, 304L, 316, 또는 316L 스테인레스강
강관류	316L 또는 탄소강 d	316L e

Notes:

- Adapted from Table 6.1. Recommended Materials for Hydrogen Systems, in “Hydrogen Propellant”, Chapter 6 in Lewis Safety Manual, NASA Technical Memorandum 104438, Nov. (1992): pp. 6-70.
- 다양한 소재들에 대해 폭 넓은 범위의 온도와 압력에서 다수의 산업 제품들이 적용 가능함.
- 부드러운 표면에 사용되고 연질 소재로 코팅하는 경우 금속 오링도 만족스러운 것으로 증명됨. 테플론 또는 은으로 코팅된 321 스테인레스강은 스테인레스 볼트 체결을 통한 스테인레스강 플랜지로 사용되어야 함. 테플론이 코팅된 알루미늄은 알루미늄 볼트 체결을 통한 알루미늄 플랜지로 사용되어야 함. 이중 금속의 서로 다른 열수축에 의한 누출 가능성을 피하기 위해 동종 소재를 사용하는 것이 좋음 (Lewis Hydrogen Safety Manual, Dec. 10 (1959). Pp.3-18)
- Carbon steel meeting ANSI/ASME B31.3 may be used for GH2 service above 244 K (-30° C) (Lewis Safety Manual, Chapter 6 “Hydrogen Propellant”, NASA Technical Memorandum 104438, Nov. (1992): pp. 6-35.)
- 내벽 및 외벽 액화수소 탱크 사이에 사용되는 파이프/튜브 연결부에서의 열전도에 의해 내부 탱크로 열이 직접적으로 유입되기 때문. 낮은 열전도도로 인해 스테인레스강 파이프/튜브가 대표적으로 선택되며, 차가운 끝단의 진공 밀봉 트랜지션 조인트가 있는 탱크 내벽에 연결됨. 알루미늄 합금 파이프/튜브는 비교적 높은 열전도도와 열팽창률 때문에 일반적으로 적합하지 않음 [11].

- 소재 제작 및 열처리 조건

- 일반 사항 : 오스테나이트계 스테인레스강은 열처리 조건으로 수행되어야 함
- 후판재 : 열처리 조건, 알루미늄 합금 등급별 템퍼링 조건을 포함한 소재 제작 조건은 선급 검토가 필요하다.
- 관 및 튜브 : 이음새가 없는 관 및 튜브는 수소 환경에 적합하며, 오스테나이트계 스테인레스강으로 제작된 냉간 마무리 또는 용접되는 관 및 튜브는 열처리된 후 공급되어야 함. 어닐링되지 않은 용접되는 관의 용착부 및 용접 열영향부에서 수소 취성 크랙 진전(용접 결함에서 시작된)에 민감하므로 적합하지 않으며 따라서 고압 수소 용도로 권고하지 않음[9]
- 피팅 : 수소 환경 용도의 오스테나이트계 스테인레스강으로 제작된 가공 또는 용접 파이프 피팅은 열처리된 후 공급되어야 함

- 제작 및 시험

- 일반 사항 : 인정기관에서 요구하는 조건에 추가하여 다음의 조건이 적용됨
- 가공 : 수소 용도의 소재는 냉간 및 열간 가공이 소재 특성에 미치는 영향 및 극저온 또는 수소 민감성에 미치는 영향이 고려되어야 하며, 냉간 가공은 수소 취화 저항성을 낮출 수 있는 반면 열간 가공은 수소 취화 저항성을 향상시킴[10]

1) 냉간 가공

- a. 준안정 오스테나이트계 스테인레스강은 (즉, Ni이 12.5% 미만인 경우), 예를 들자면 18Cr-8Ni (NV304L, DIN 1.4310 또는 AISI304), 그러지 않아도 된다고 인정되는 경우가 아니면 사용하여서는 안되고, 냉간 가공된 소재의 강도는 저온에서 일반적으로 증가하지만 상온 및 쿨다운, 율업 단계에서 소재의 안전성 때문에 사용에 제한이 될 수 있음[11]
- b. 준안정 Cr-Ni 오스테나이트계 스테인레스강은 비교적 낮은 니켈 함량 때문에 냉간 가공 시 상당한 양의 변형유기 α' -마르텐사이트가 형성될 수도 있는 반면, 18Cr-12.5Ni강은 안정하며 상온에서 변형 시 매우 적은양의 마르텐사이트 변태를 보이며[12], 준안정 18Cr-8Ni (DIN 1.4301 또는 AISI304) 등급은 고압수소 환경에서, 주로 변형유기 마르텐사이트 형성으로 인해 취화되는 경향에 있어서 광범위하게 적용되지는 않고 있음[12]

2) 열간 가공

- a. 열간 가공은 탄소, 탄소 망간 및 저합금강의 경우 상변화 온도 범위 이상의 온도, 어떤 경우에는 소재 및 적용 용도와 부합하는 온도 범위 이내에서 진행되어야 함[10]
- b. 탄소, 탄소 망간 및 저합금강에 대한 종래의 열간 가공 방법은 오스테나이트계 스테인레스강의 열간 가공에서 적용되어서는 안됨

- 용접

- 1) 오스테나이트계 스테인레스강의 용접

- a. 산업계에서 통상적으로 사용되는 용접 방법들은 오스테나이트계 스테인레스강의 용접에도 적합하며, 특히 TIG 및 MIG 용접법이 주로 사용됨
- b. 그렇지 않아도 된다고 인정된 경우가 아니라면 용접재료는 용접되는 모재와 강도 수준이 맞아야 하며, 용접재료는 선급의 승인을 받아야 하며, 다음의 제한을 따라야 함

- 2) 알루미늄 합금의 용접

- a. 산업계에서 통상적으로 사용되는 용접 방법들은 2219합금의 용접에도 적합함[8]
- b. 2A14 용접의 경우, 용접부의 연신을 분리 및 심각한 크랙 발생 경향이 있으며, 반면 집약된 에너지 밀도로 용접재료 없이 용접하는 용접하는 방법은 적절하지 않음[8]

- 3) 클래드 금속의 용접

- a. 클래드 부품들의 용접은 인정기관의 개별적 승인이 필요함

- 검사 및 시험

- 1) 용접하는 동안 발생하는 크랙(예를 들어 결정화 크랙, 액화 크랙, 저장 크랙 및 냉간 크랙)은 허용되지 않음
- 2) 불가피한 용접 잔류 응력은 피로강도의 저하를 야기하여 파괴에 민감해지게 만드므로 탱크 제작 중 용접에 의해 발생하는 과도한 잔류 응력 문제를 경감시키는게 중요함[8]
- 3) 모든 수소 환경에서 용착부 또한 수소 취화에 민감하며[2][3][4], 용

접 열영향부는 종종 경화부, 잔류응력 및 취성을 야기하는 미세조직을 만들어냄. 선호하는 미세조직으로 회복되기 위해서 용접 후 어닐링 열처리가 필요할 수도 있음.

- 오스테나이트계 스테인레스강에서 델타 페라이트 영향

- 1) 오스테나이트계 스테인레스강의 용접 시, 인정기관에서 그러지 않아도 된다고 승인하는 경우가 아니라면 용접부에서 델타 페라이트 함량이 측정되어야 하며 3%를 초과해서는 안됨. 1%를 초과하는 경우 중요 온도 및 압력에서 수소 환경하 수소 취화 및 피로 특성에 미치는 용접부 저항성 영향과 관련하여 델타 페라이트의 영향이 평가되고 적합성이 입증되어야 함.
- 2) 수소 가스를 보호가스로 사용하여 변형된 오스테나이트계 스테인레스강을 용접하는 것은 허용되지 않음.
- 3) 크랙 발생의 위험이 크므로 페라이트, 마르텐사이트 혹은 이상조직 스테인레스강의 용접 시 보호가스로 수소가스가 사용되어서는 안됨.
- 4) 의도적으로 3~10 중량%의 델타 페라이트(δ -ferrite)를 만들어내는 용접재료가 오스테나이트계 스테인레스강의 용접 동안 고온 크랙을 방지할 수 있다는 것이 경험적으로 입증됨(수소 용도로 의도한 결과는 아님). 그러나 델타 페라이트는 극저온에서 취성을 나타낸다. 델타 페라이트의 함량을 증가시키는 것은 극저온에서 수소 취화에 대한 용접부의 저항성에 영향을 미치며 피로균열진전속도에 영향을 줌으로써 피로강도에 큰 영향을 미칠 수도 있음[15]

이러한 취화의 원인이 크랙이 델타 페라이트 혹은 델타/오스테나이트 계면 (특히 벌레 모양, 델타 페라이트의 형상 중 하나이며 벽개파괴 및 다른 여러 문제들을 야기함)을 따라 선택적으로 진전하는 경향성과 관련이 있고, 추가하여, 용착부가 응고하면서 최종 응고부에 불순물이 집적되고 다층 용접 시 재가열로 인해 탄화물이 석출함. 용접 아크에 열원을 제공하고 침투성을 개선하기 위해 보호가스로 소량의 수소를 사용하면(일반적으로 수동용접의 경우 최대 5%로 제한) 용접부에서 델타 페라이트 증가를 촉진하고 깊이/폭비에 영향을 줌[14]. 그러나 수소 환경에서 델타 페라이트는 피로균열진전속도와 피로균열선단 근처의 슬립 억제를 증가시키며 이에 더하여, 연구 결과들은 exhaustion break 발달 가속에 추가하

여 break tip 부위에서의 ' -마르텐사이트 변화를 보여줌[15]

- 5) 헬륨은 높은 이온화도를 지니는데, 이는 더 쎄 아크와 더 효율적인 용접을 가능하게 해주며, 순수한 아르곤, 헬륨 또는 이 둘의 혼합물이 TIG 용접방법을 위한 보호 가스로 사용되어야 함
- 6) 질소 가스도 사용될 수 있지만 용접부에 질소를 흡수할 위험이 있으며, 그렇게 되면 완전히 오스테나이트화 되어 고온 균열의 민감성이 커지긴 하지만 수소 취성 저항성을 개선하는데는 도움이 될 수도 있음
- 7) 산소 및 페라이트 함량을 증가하면 극저온 (-196도까지)에서 인성을 감소시킬 수도 있음[13]

■ 수소선박에 대한 안전규정 개발 - 연료소모장치로의 연료공급

- 본 장은 연료를 연료소모장치에 안전하고 신뢰성 있게 공급하는 것을 목적으로 함
- 기능 요건
 - 본 장은 (IGF Code) 기능 요건(Functional Requirements) 3.2.1에서 3.2.6, 3.2.8에서 3.2.11, 그리고 3.2.13에서 3.2.17까지의 내용을 다루며, 특히 다음이 요구 됨:
 - 1) 연료 공급 시스템은 연료가 어떠한 형태로 누출이 되어도 그 피해를 최소화하는 동시에 작동 및 점검을 위한 안전한 접근을 제공하도록 배치되어야 함
 - 2) 연료소모장치로의 연료 이송을 위한 파이프 시스템은 하나의 방벽이 파손되더라도 파이프 시스템에서 주변으로 누출이 발생하여 선박에 탑승한 사람, 환경 또는 선박에 위험을 초래하지 않도록 설계되어야 함
 - 3) 기관구역 외부의 연료 라인은 누출 시 인명과 선박의 손상을 최소화하도록 설치되고 보호되어야 함
- 배관 시스템 설계 원칙
 - 연료 배관 시스템은 최소한 IGF 코드 7.1, 7.2 및 7.3에서 제시된 조건들을 충족하여야 함
 - (*Note: ESD(비상차단) 원칙에 대한 결정에 따라 해당 문구 삭제)
 - 연료 시스템의 배관 및 밸브의 재료 선택은 본 지침의 6장에 따름

- 개방 갑판, 반 밀폐구역 및 갑판 아래 구역(밀폐구역)의 연료 소모원과 병커링 라인의 액화수소 및 가압수소(Compressed hydrogen) 배관은 이중 배관(pipe-in-pipe)를 사용하는 것이 권고되며, 이는 액화/가압수소 병커링 스테이션/병커링 커플링에서부터 탱크 연결부를 포함한 연료 저장 시스템, 연료준비실 및 수소소모장치(연료전지 및 내연기관 등 모두 포함)에 적용됨
- 수소의 질량 흐름 및 그에 따른 의도하지 않은 방출의 결과를 최소화하기 위하여 가능한 낮은 작동 압력과 고압 배관에 대한 최대 유량을 제한할 것을 권고함
- 배관 세크먼트(pipe segment)는 가능한 짧아야 함
- 액체 및 가스 수소 배관은 아래의 경우를 제외하고 거주구역, 업무구역, 전기장비실, 제어구역 또는 이중 바닥 내부를 통과하여서는 안 됨
 - 1) 해당 구역이 최저폭발한계(LFL)의 30% 이하에서 경보가 울리고, 60% 이하에서 격리밸브를 작동하여야 함
 - 2) 해당 구역이 적절히 환기되어야 함, 또는
 - 3) 해당 구역이 불활성 상태로 유지되어야 함
- 이 요건은 진공도가 감시되는 진공 단열재를 사용하는 화물 격납 시스템의 일부를 구성하는 구역에는 적용되지 않음
- 병커링 라인을 포함한 연료 시스템의 배관은 가능한 한 선박의 중심선에 배치되어야 하며, 충돌/접지 및 연료 저장 시스템의 손상 위험을 설계 단계 초기에 평가할 것이 권고됨. 예를 들어 수소 배관 시스템에 대한 충돌 또는 기타 외부 위험(예를 들어 낙하물)이 화재 및 폭발을 발생시킬 확률이 높은 점(거의 100%)을 고려하여야 함
- 액체수소 및 차가운 수소 증기가 포함된 연료 배관의 경우 노출된 표면이 -183°C에 도달하지 않도록 하여야 하며, 병커링 매니폴드와 같이 저온에 대한 예방조치가 충분히 효과적이지 않은 장소의 경우, 예방조치 대신 고농축 산소 형성을 방지하는 환기 및 액체 공기를 회수하는 트레이(tray) 설치와 같은 다른 조치를 허용할 수 있음. 공기에 노출되는 액체 수소 배관 시스템의 단열재는 불연재여야 하며 단열재 내에서 공기의 응축과 그에 따른 산소 농축을 방지하기 위하여 외부 덮개에 씰(seal)이 있도록 설계되어야 함
- 저온 환경을 위한 배관 시스템 설계는 열팽창 및 수축에 의해 발생하는 응력을 고려하여야 하며, 따라서 연료 배관은 상당한 응력을 발생시키지 않고 연

료의 극한 온도로 인한 열팽창 또는 수축을 흡수할 수 있어야 함. 적절한 설계로 다양한 재료의 열팽창을 고려하여야 함

- 환경부하, 탱크 및 선체 구조물의 움직임으로 인한 과도한 응력으로부터 배관, 배관 시스템 및 구성품, 연료탱크를 보호할 수 있어야 함
 - 연료 배관의 배치 및 설치의 피로 가능성을 고려하여 실제 환경 상황에서 배관 시스템의 안전성을 유지하는데 필요한 정보를 제공해야 하며, 피로 하중은 HSLC에 수소 배관을 설치할 때 특히 고려되어야 함
 - 배관 시스템의 작동 온도 및 설계조건에 관계없이 배관 무게로 인한 모든 응력을 고려하여 ASME B31.3의 원칙에 따라 완전한 배관 응력 해석을 수행해야 하며, 응력은 가속 응력(중요한 경우), 내부 압력, 열 수축, 호깅(hog) 및 새깅(sag)을 고려하여야 함
 - 근본적으로 안전한 배관 시스템을 배치해야 하며, 단일 파이프 누출 및 파이프 연결구 누출은 허용 불가능한 시나리오로 이어질 수 있음
 - 완전한 배관 파열은 누설 사례로 간주되어야 하며, 수소 폭발은 물리적 경계에 의해 크게 영향받으므로 수소 파이프 주위의 물리적 경계는 폭발 시물레이션에 포함되어야 함
 - 가스만을 연료로 사용하는 엔진의 경우 연료 공급 시스템은 이중화 및 분리하여 배치되어야 하며, 다음의 필수 안전 조치를 수반하는 연료 공급 시스템에서의 누출은 허용 불가능한 전원 상실로 이어지지 않아야 함
 - FMEA를 수행해야 하며, 작동 중인 구성품 또는 시스템에서 단일 고장을 포함해야 함
- 극저온 액체를 포함하는 연료 배관 시스템
- 액화수소 공급 및 병커링 라인은 설계압력이 20 bar 이상이어야 하며, LH2 가스 공급 라인의 설계압력은 10 bar 이상이어야 함. 이는 개방 갑판 및 갑판 아래(밀폐구역)에 위치한 연료 배관 모두에 적용됨 (설계압력 추가 협의 예정)
 - 밸브, 플랜지 및 씰(seal)과 같이 수소가 누출할 수 있는 장소에는 누출 방지를 보장하는 2차 밀폐장치가 적용되어야 하며, 용접 연결이 가능한 경우에는 볼트 조임식 플랜지 연결을 피해야 함
 - 2차 밀폐장치는 잠재적인 누출 온도를 견딜 수 있는 재질로 제작되어야 함

- 2차 밀폐장치는 진공 절연 또는 불활성 가스 시스템이 적용되어야 함
 - 액화수소 배관 시스템을 위한 탱크 연결부는 독립형 탱크 C 내의 최고 액체 높이(액위)보다 높은 곳에 배치되는 것이 바람직함
 - 저온 배관 및 구성품(특히 액체 수소 및 차가운 기체 수소)은 필요한 경우 인접한 선체 구조물로부터 열적으로 단열되어 선체의 온도가 선체 재료의 설계 온도 이하로 떨어지는 것을 방지해야 함
- 가스 연료를 포함하는 연료 배관 시스템
- 밸브, 플랜지 및 씰과 같이 수소가 누출할 수 있는 장소에는 누출 방지를 보장하는 2차 밀폐장치가 적용되어야 한다. 용접 연결이 가능한 경우에는 볼트 조임식 플랜지 연결을 피해야 한다.
 - 배관은 기계적으로 보호되어야 한다.
 - 저압 밀폐장치는 불활성 가스 시스템과 함께 적용되거나, 또는 CFD분석 결과에 따라 충분한 용량의 예비 기계식 환기 시스템이 장착되어야 한다.
 - 기체수소의 고압 가스 배관 시스템은 충분한 구조 및 피로 강도를 가지고 있어야 한다. 이는 응력 및 피로 해석에 의해 확인될 수 있으며 아래의 사항을 고려하여야 한다.
 - 1) 파이프 시스템의 중량에 의한 응력
 - 2) 파이프 내부 압력의 20% 이상에 해당하는 가속도에 의한 응력
 - 3) 내압 및 선박의 호강 및 새깅에 의한 부하
 - 필터
 - 1) 연료 배관 시스템 내의 저온에서 응축된 불순물을 제거하기 위한 적절한 수단(예: 필터링)이 제공되어야 함
 - 2) 필터는 특히 산소를 포함할 수 있는 고체 입자의 오염과 관련된 위험을 줄이는 것에 유용하지만, 흐름에 장애물이 되기도 하며, 필터의 주 목적은 수소 시스템 내의 불순물을 거르는 것임
 - 3) 필터와 관련하여 아래의 사항들이 권고됨
 - a. 필터에 접근할 수 있어야 하며 세척을 위해 분리될 수 있어야 함

- b. 필터는 시스템에서 백플러싱(back-flushing)을 통해 세척 되어서는 안됨
- c. 필터는 정기적으로 또는, 필터에 의한 압력 강하가 지정된 값에 도달할 때 세척되고 교체되어야 함
- d. 필터의 수량과 위치는 시스템 내의 불순물을 최소화하기 위해 필요에 따라 결정되어야 함

- 밸브 배치

- 밸브는 누출되기 쉬우므로 수소 배관 시스템의 밸브는 최소화되어야 하나 최소한의 안전 기능을 제공할 수 있을 만큼 충분하여야 함
- 병커링 스테이션부터 연료 소모원까지 연료 배관 시스템의 밸브는 일반적으로 인체 노출을 최소화하기 위하여 자동 및 원격으로 운영되어야 하며, 밸브는 점검 및 유지보수를 위하여 언제든지 접근 가능해야 함. 정상 운영에서 작동하지 않는 닫힌 밸브에 대해서는 본 권고는 적용되지 않음
- 탱크 밸브는 [13.1 항]에 명시된 안전 원칙에 따라 자동으로 작동되어야 함 (*IGF Code에서 해당 항목을 요구하지 않기에 CG에서 다룰 예정)
- 점화 제어와 관련하여 근본적으로 안전한 설계를 제공하기 위하여 수소배관 시스템의 모든 밸브는 공압 제어가 권장됨
- 각 가스 소모장치(gas consumer) 또는 가스소모장치들(set of consumers)로의 연료 공급 라인은 원격으로 작동되는 정지 밸브와 자동으로 동작하는 마스터 가스 연료 밸브를 직렬로 장착해야 하고, 밸브는 가스 소모원이 위치한 기관실의 외부의 배관에 위치하여야 하며, 장착된 경우 가스 가열을 위한 설비에 가능한 한 가깝게 배치하여야 함. 마스터 가스 연료 밸브는 13.1 항에 명시된 안전 시스템에 의해 작동되었을 때 가스 공급을 자동으로 차단해야 함
- 사용처로의 가스 공급 라인에는 이중차단 및 배출 밸브가 장착되어야 하며, 이러한 밸브는 13.1 항에 제시된 자동 정지와 연료전지 또는 엔진의 정상적인 정지를 위해 배치되어야 함. 마스터 가스 연료 밸브는 이러한 기능을 수행할 수 있으며, 밸브의 고장 작동에 대한 정보가 제공되어야 함. 이 상황에서 차단 밸브가 열리고 배출 밸브가 닫히는 것은 경고 상태이며, 비슷하게, 연료 소모원이 정지하고 차단 밸브가 열리는 것은 경고 상태임. 각 가스 사용처로의 가스 공급 라인에는 원격으로 동작하는 정지 밸브가 있어야 하며, 이중차단 및 배출 밸브의 상류에 위치하여 연료전지 모듈의 유지보수 중에 안전한

격리를 보장하여야 함

- 신축 벨로즈(Expansion bellows)

- 신축 벨로즈의 사용은 기국의 승인 대상이며, 설치되는 경우에는 선급기관의 인증을 받아야 함

- 연료 탱크 및 배관 시스템의 과압 방지

- 설계 원칙

- 1) 수소 과압 보호 및 환기 시스템은 가스 환기 시스템 설계에 대한 경험이 있는 사람에 의해 수행되어야 함

- 2) 환기 시스템 및 벤트 마스터에 사용되는 설계 하중 및 온도 영향은 배관 응력 해석에서 문서화 되어야 하며, 부록 A를 참조함

- 3) 벤트 마스터의 설계 압력은 20 bar를 넘어서는 안 됨

(*액화수소에 적용하기 위한 내용으로, 설계압력 추가 협의 예정)

- 4) 압력 도출 장치는 물이나 얼음의 생성에 의한 막힘을 방지할 수 있도록 적절히 설계되고 제작되어야 함

- 압력 도출 밸브 (PRVs)

- 1) 도출 밸브의 용량은 가장 심각한 시나리오에 대하여 선정되어야 하고, 이 시나리오가 화재 또는 전체 단열시스템의 진공 소실로 인해 발생하는지를 평가해야 하며, 각 경우에서 격납 시스템으로의 열 유속 결과값이 고려되어야 함

- 2) 수소 운용을 위한 압력 도출 밸브는 크기 및 설계 조건과 무관하게 인증 받은 것이어야 함

- 3) 압력 도출 밸브의 설계는 추적 가능한 특정의 표시 번호에 따라 수소에 적용할 수 있는 가장 극한의 조건(설계 압력, 설계 온도, 추가 하중)을 고려하여 수행되어야 하며, 설계는 압력 도출 밸브의 작동 특성에 따라 예상되는 최대 유량을 준수하여 설계되어야 함

- 4) 수소 사용을 목적으로 하는 각 압력 도출 밸브 유형에 대하여 지정된 운전 및 디자인 조건을 모두 포함하는 데이터 시트가 관련 TAG 번호에 따라 제공되어야 함

- 5) 수소 시스템에 설치 예정인 압력 도출 밸브는 Pipe Class I / Pressure Vessel Class I로 분류되어야 하며, 수소 운영을 위한 압력 도출 밸브의 설계는 국제적으로 공인된 표준에 따라 수행되어야 함
- 6) 수소 연료 시스템에 설치하기 위한 압력 도출 밸브의 용량 선정은 IGC 코드 8.4 항에 따라 수행되어야 하며, 수소의 경우 분자 질량, 잠열, 방출 조건에서의 비열 등과 같은 물리적, 화학적, 그리고 열 역학적 특성들이 고려되어야 함

- 벤트 마스트

(*이 부분은 IGF 코드에 따라 다른 섹션으로 이동될 수 있음)

- 1) 벤트 마스트는 거주구역, 업무구역 및 제어구역의 공기 유입구, 배출구 또는 개구에서 떨어져 있어야 하며 방출을 지정된 비위험 구역으로 유도해야 하며, 벤트 마스트의 적절한 사이즈와 위치를 결정하기 위하여 가스 분산 해석 및 시뮬레이션이 필요함.
(* 벤트 마스트의 높이는 인체 및 구조물에 대한 열 복사 영향을 방지할 수 있도록 충분히 높아야 함)
- 2) 차가운 증기가 발생하는 모든 수소 벤트 마스트는 응축수 배수관이 설치되어야 하며, 액체 공기 생성으로 인한 취성 파괴를 방지하기 위하여 저온 재료로 만들어진 드립 트레이가 허용될 수 있음
- 3) 고농축 산소 형성과 관련된 위험을 충분히 고려해야 함
- 4) 충분한 길이의 벤트 마스트 내의 가연성 농도에서는 DDT(폭연에서 폭발로의 전환)가 발생할 수 있으며, 이를 방지할 수 있도록 지름/길이 비(ratio)가 설계되어야 함
- 5) 또한 벤트 마스트는 수소가 흐르지 않을 때 공기를 퍼징(purging)할 수 있도록 불활성 시스템과 함께 배치되는 것이 권장되며, 벤트 마스트 출구에서 공기의 유입을 방지하기 위하여 Molecular seal을 고려할 수 있음
- 6) 벤트 마스트는 정전기 발생을 방지하기 위하여 접지되어야 함
- 7) 공기의 습기로 형성된 얼음의 축적으로 인하여 벤트가 박히지 않도록 적절한 조치가 제공되어야 함
- 8) 벤트 시스템은 액체 수소가 환기되지 않도록 설계되어야 함

- 플레어링 및 벤트마스트 점화 고려 사항
 - 1) 선박에 탑재된 수소 연료 시스템 환기를 위해 가스를 연소시키지 않는 것이 권고며, 수소의 높은 반응성과 넓은 연소성으로 인해 수소를 선박 연료로 사용할 때의 이득보다 큰 위험을 초래함
 - 2) 벤트 마스트의 가연성 가스 점화 및 연소는 설계에 의해 방지되어야 함
- 액화수소 시스템을 위한 압력 도출 및 벤트 시스템
 - 1) 압력 도출 시스템의 용량 산정을 위해 압력 도출 밸브 및 벤트 시스템은 극한의 시나리오를 고려하여 용량을 산정해야 하며, 예를 들어 진공 소실로 인하여 탱크 주위에 화재가 발생할 수 있다는 점을 고려하여야 함
 - 2) 안전 도출 밸브, 벤트 배관 및 벤트 마스트는 대기 응축으로 인한 수분 축적 및 얼음 생성을 최소화하도록 설계 및 설치되어야 함
 - 3) 2차 밀폐장치를 보호하기 위해 파열판(rupture disks)을 사용하는 경우, 고장 안전형(fail-safe) 압력 도출 밸브를 병렬로 사용하거나, 후속 공기의 유입이 허용되지 않는 경우에는 직렬(상류)로 사용해야 함
- CH2 시스템을 위한 압력 도출 및 벤트 시스템
 - 1) 화재 노출로 인한 연료탱크 파열을 방지하기 위한 수단이 제공되어야 하며, 이를 위하여 자동 압력 도출 시스템이 사용될 수 있음. 화재 노출 시에 설치된 과압 보호장치는 안전 성능에 신뢰할 수 있어야 하며 노출된 장비를 파열 응력 이하로 유지할 수 있어야 함
 - 2) 제어할 수 없는 고압 수소 누출은 설계에 의해 방지되어야 하며, 단일 누출로 인한 수소 연료 설비의 안전에 문제가 생기지 않도록 함
 - 3) 가스를 안전한 장소로 블로우 다운 시키는 것은 가스의 안전한 폐기를 보장하고 누출 지속시간을 줄이기 위한 안전조치가 될 수 있으며, 블로우 다운 시스템을 사용하는 경우 최소한 AIP Std 521 Pressure-relieving and Depressuring Systems에 제시된 권고사항에 따라 설계해야 함
 - 4) 여러 개의 탱크가 설치되는 경우, 안전 시스템의 입력값에 근거하여 어떤 연료 탱크가 누출되는지 확인할 수 있어야 하며, 탱크 안전에 발생하는 누출 원인을 방지하기 위하여 원격조종으로 누출되

는 탱크를 안전하게 비울 수 있어야 함

- 5) 더 낮은 압력 상태의 압력 도출 밸브가 고압 방출로 인해 생성되는 배압이 해당 밸브의 설계 안전기준에 미치는 영향을 고려해야 함
- 6) 고압 압축 수소 연료의 벤트 및 폐기를 위한 전용 벤트 마스트를 배치해야 함

– 불활성 및 진공 시스템

• 일반사항

- 1) 불활성 가스 설비가 존재하는 구역은 본 조에 명시되지 않은 한 최소한 인증 기관에서 제시하는 요건을 준수해야 함
- 2) 연료 병커링 라인 및 수소 배관 시스템을 퍼징하기 위한 설비가 제공되어야 함
- 3) 시스템의 구성요소를 포함하여 가연성 혼합물을 방지하기 위한 수소 파이프의 적절한 퍼징을 보장하기 위해서는 배관 및 구성품이 충분히 퍼징 되는 최소 유속 및 퍼징 속도를 평가하는 것이 권고됨
- 4) 안전을 위해 불활성 가스의 온도 및 비등점을 충분히 고려해야 하며, 퍼징 속도, 지속시간 또는 혼합 범위가 낮은 경우에는 잔류 수소 또는 퍼지 가스 포켓이 발생할 수 있음. 따라서, 적절한 퍼징을 위해 시스템 내 여러 위치에서 신뢰할 수 있는 가스 농도 측정 수단이 확보되어야 하며, 온도 또한 여러 위치에서 측정되어야 함. 산화제는 수소를 포함하는 장비 내에 존재할 수 있으며, 특히 질소로 희석된 공기를 포함하는 콜드 박스 또는 콜드 박스 내 배관에서 특정한 상황(응축되는 고농축 산소)일 때 고려해야 함
(* 콜드 박스에 대해 논의 예정)
- 5) 예를 들어 화물 배관 또는 공정 장비에 수소를 주입하기 전에 질소 퍼징을 통해 공기를 제거해야 하는 등 위험성을 완화하기 위해 실시해야 하는 특별조치가 있으며, 이후 공정에서 질소가 응고될 수 있으므로, 질소는 수소 퍼징을 통해 제거해야 함
- 6) 수소 파이프라인 및 구성품은 수소를 사용하기 전과 후에 불활성 가스로 퍼징되어야 하며, 배관 내에 수소를 주입하기 전에 습기 및 공기를 제거하기 위해 불활성 가스를 사용해야 함. 또한 수소

는 시스템을 개방하여 유지보수하기 전에 불활성 가스를 사용하여 배관 시스템에서 제거되어야 함

- 7) 누출 감지 시스템의 일부로써 불활성가스가 연속적으로 공급되는 단열 구역의 경우, 개별 구역에 공급되는 가스의 양을 모니터링하는 방법이 제공되어야 함
- 8) 불활성 가스 시스템은 불활성화되는 각 구역이 격리될 수 있도록 설계되어야 하며 이러한 구역의 압력제어를 위해 필요한 설비가 제공되어야 함
- 9) 압축 가스 용기 또는 액체 수소 저장에 사용되는 화물창 구역은 누출시 폭발을 방지하기 위하여 지속적으로 불활성화 되어야 함
- 10) 불활성 가스 시스템은 수소에 의한 오염으로부터 보호되어야 함
- 11) 액화수소 및 고압수소 시스템의 H₂(기체) 파이프라인의 2차 방벽은 질소 불활성 가스 시스템과 함께 배치되는 것이 권고되며, 가스 H₂(기체) 파이프라인의 2차 방벽이 기계적으로 환기되는 경우 10조에 제시된 권장 사항을 고려해야 함

- 액화수소 불활성 시스템

- 1) 액체 헬륨은 낮은 비등점으로 인하여 병커링 라인 및 구성품의 퍼징 및 pre-cooling을 위한 불활성 가스로 사용될 수 있음
- 2) 연료 병커링 라인 및 공급 라인의 액화수소 용 2차 방벽은 헬륨 또는 진공으로 단열 되어야 함
- 3) 주 가스 공급 라인 및 구성품은 질소 불활성 가스 퍼징을 할 수 있도록 배치되어야 함

- 고압수소 불활성 시스템

- 1) 고압 압축수소 파이프라인에서는 질소 불활성 가스로 퍼징할 수 있도록 공급 라인 및 구성품을 배치해야 하며, 또한 2차 방벽에는 질소 불활성 가스가 공급되어야 함

- 선상 불활성 가스 생산 및 저장

- 1) 불활성 가스 발생기가 제공되는 경우, 질소는 부피 기준으로 산소 함유량이 3% 이하(NFPA 22, Annex L, L.2.2.3.2, 2020 Ed.)인 불활

성 가스를 생성할 수 있어야 하고, 연속 측정 산소 농도계는 장비의 불활성 가스 공급 장치에 장착되어야 하며 부피 기준으로 최대 5%의 산소 함량으로 설정된 경보를 장착해야 함

– 연료 병커링 배관 시스템

- 일반사항

- 1) 연료 병커링 시스템은 본 조에서 명시되지 않은 한 최소한 IGF 코드 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5 항에서 제시하는 요건을 준수해야 함
- 2) 일반적으로, 연료 병커링 시스템은 연료 탱크를 채우는 동안 어떠한 기체나 액체가 대기 중으로 방출되지 않도록 배치되어야 함
- 3) 병커링 운영 절차는 작성되고, 선상에 보관되어야 함

- 고정된 액화수소 시스템에서의 연료 병커링

- 1) 액화수소 누출시 인접한 선체 구조에 극저온 누출로 인해, 육상 연결부 아래의 선체는 저온에 적합한 재료를 사용해야 함
- 2) 물 분배 시스템은 육상 연결부 아래에 있는 선체에 설치되지 않는 것이 권고됨
(* CG에서 설명할 수 있는 그림 추가 고려)

- 고정된 CH₂ 시스템에서의 연료 병커링

- 1) 병커링 매니폴드의 연료공급라인 내에서의 안전한 작동 압력이 유지되어야 함
- 2) 예비의 감압 밸브가 압축된 수소 가스가 저압으로 감압되는 병커링 매니폴드 바로 다음에 설치되어야 함

- 컨테이너형 교체 가능한 압축수소

- 1) 컨테이너형 교체 가능한 압축수소 시스템은 7.8.1항에 명시된 고정된 공급시스템과 동등한 수준의 안전성과 인정 및 승인을 받아야 함
- 2) 가스 공급 라인에서 안전한 작동 압력을 제공하기 위하여 각 용기의 공급 라인 헤더에 탱크의 ESD 밸브에 가능한 가깝도록 예비 감압 밸브를 장착해야 하며, 커플링(coupling)이 있는 플렉시블 호스(flexible hoses)를 병커링 매니폴드와 컨테이너 사이에 가스 공

급 라인으로 사용하는 경우, 사용할 대상(medium and service)에 대하여 형식승인 되어야 하며 불활성 가스로 자동 퍼징되도록 배치되어야 함. 이러한 호스에는 질소로 불활성화된 secondary enclosure가 제공되어야 함

■ 수소선박에 대한 안전규정 개발 - 추진 및 기타 연료 소비를 포함한 전력 발전

- 목표

- 이 장의 목표는 기계적, 전기적 또는 열적 에너지의 안전하고 신뢰할 수 있는 전달을 제공함에 있음
- 이 section의 목표는 안전하고 안정적으로 기계, 전기 혹은 열 에너지를 전달함에 있음

- 기능 요건

- 이 장은 3.2.1, 3.2.11, 3.2.13, 3.2.16 및 3.2.17의 기능 요건과 관련되며, 특히 다음을 적용함:

- 1) 배기 장치는 미연소 가스 연료가 축적되지 않도록 구성되어야 함;
- 2) 누설 가스의 점화로 인해 발생할 수 있는 최악의 과압(worst case over pressure)을 견딜 수 있는 강도로 설계되지 않는 한 발화성 가스와 공기 혼합기체를 포함하거나 포함할 가능성이 있는 기관 부품 또는 장치에는 적절한 압력 도출장치를 설치해야 하며, 기관에 따라서 이러한 부품 및 장치는 공기흡입(air inlet) 매니폴드와 소기 구역(scavenge space)을 포함할 수 있음
- 3) 폭발 통풍(venting)는 선원이 통상적으로 있는 구역으로부터 떨어져서 배치해야 함; 그리고
- 4) 모든 가스 소모장치는 독립된 배기장치를 갖추어야 함

- 피스톤형 내연기관에 관한 규정

• 일반사항

- 1) 배기장치에는 하나의 실린더에서 점화 실패로 인해 장치 내에 생성된 미연소 가스가 발화할 때 발생할 수 있는 과도한 폭발 압력을 방지할 수 있도록 충분한 용량의 폭발도출장치를 설치해야 함
 - a. 누설 가스의 점화로 인해 발생할 수 있는 최악의 과압을 수용할 수 있

도록 설계되거나 기관 안전 개념으로 정당화되지 않는 한 배기장치에 폭발도출장치를 설치해야 하며, 배기장치에서 미연소 가스가 발생할 가능성에 대한 자세한 평가는 실린더에서 개방부까지 전체 장치를 포괄하여 수행되어야 함. 이러한 상세 평가는 기관의 안전 개념에 반영되어야 함

- 2) 피스톤 하부공간이 크랭크케이스와 직접 연결 기관의 경우 크랭크 케이스 내의 연료가스축적의 잠재적 위험에 대해 상세한 평가를 수행하여 기관의 안전 개념에 반영해야 함
- 3) 2행정 크로스헤드 디젤기관이 아닌 각각의 기관은 크랭크케이스와 셴프(sump)에 다른 기관과 독립된 통풍장치를 설치해야 함
- 4) 가스가 보조장치 매체(medium, 윤활유, 냉각수)로 직접 누설될 가능성이 있는 경우, 가스 확산을 방지하기 위해서 기관의 출구 바로 다음에 가스를 배출하는 적절한 장치를 설치해야 하며, 보조장치 매체에서 추출된 가스는 개방구역의 안전한 곳으로 배출되어야 함
- 5) 기관에 점화장치가 있는 경우 가스연료가 주입되기 전에 각각의 장치의 점화장치가 올바르게 작동하는지 확인해야 함
- 6) 착화 실패 또는 불완전연소를 감시하고 탐지하는 장치를 설치해야 하며, 착화실패 또는 불완전연소가 탐지되는 경우 해당 실린더로의 가스 공급은 차단되고, 한 개의 실린더가 운전을 중단하더라도 기관의 운전이 비틀림 진동의 측면에서 허용 가능하다면 가스 운전을 허용할 수 있음
- 7) 본 규정이 적용되는 연료로 시동하는 기관은 연료공급 밸브를 개방된 후에 기관에 따라 정해진 시간 내에 기관 감시장치에서 연소가 감지되지 않으면 연료공급밸브가 자동으로 차단되어야 하며, 연소되지 않은 연료혼합물을 배기장치로부터 제거할 수 있는 수단이 제공되어야 함

• 이중 연료 기관에 관한 규정

- 1) 가스연료 공급의 차단 시, 기관은 기름연료(oil fuel)만으로 지속적인 운전이 가능하여야 함
- 2) 기관 출력변동을 최소화하면서 가스연료 운전에서 기름연료 운전

으로, 또한 그 반대로 전환할 수 있는 자동장치를 설치해야 하며, 시험을 통해서 신뢰도가 수용 가능한 수준인지를 증명해야 함. 가스 점화 시 기관이 불안정하게 작동하는 경우 자동으로 기름연료 모드로 전환되어야 하며, 또한 가스장치는 언제든지 수동으로 정지할 수 있어야 함

3) 정상정지 또는 비상차단 시, 가스연료 공급은 점화원보다 먼저 차단되어야 하며, 각각의 실린더 또는 기관 전체에 대한 가스공급을 가장 먼저 또는 동시에 차단하지 않은 상태에서 점화원 차단이 가능해서는 안 됨

- 가스 전용 기관에 관한 규정

1) 정상정지 또는 비상차단 시, 가스연료 공급은 점화원보다 먼저 차단되어야 하며, 각각의 실린더 또는 기관 전체에 대한 가스공급을 가장 먼저 또는 동시에 차단하지 않은 상태에서 점화원 차단이 가능해서는 안 됨

- 다중 연료 기관에 관한 규정

1) 하나의 연료 공급이 차단된 경우, 기관은 기관 출력의 변동을 최소화하면서 대체 연료를 사용하여 계속 운전이 가능해야 함

2) 기관의 출력변동을 최소한으로 유지하면서 하나의 연료 운전에서 대체 연료 운전으로 자동 전환할 수 있는 장치를 설치해야 하고 시험을 통해서 신뢰도가 수용 가능한 수준인지 증명해야 함. 특정 연료를 사용할 때 기관의 운전이 불안정한 경우, 기관은 자동으로 대체 연료 모드로 전환되어야 하며, 대체 연료 모드로의 수동 전환이 항상 가능해야 함

■ 수소선박에 대한 안전규정 개발 - 화재 안전

- 이 장의 목표는 천연가스를 선박 연료로 저장, 상태유지, 이동 및 사용하는 것과 관련한 모든 장치의 구성요소에 대한 방화, 탐지 및 소화를 제공하는 것임

- 기능요건

- 이 장은 3.2.2, 3.2.4, 3.2.5, 3.2.7, 3.2.12, 3.2.14, 3.2.15 및 3.2.17의 기능요건과 관련이 있음

- 화재 예방

- 수소 연료 탱크:

- 1) 개방갑판의 연료탱크와 접하는 거주구역, 업무구역, 제어구역, 탈출로 및 기관구역의 경계는 A-60급(class) 구획(division)으로 방열해야 하며, A60급 구획은 항해선교 갑판의 하부까지 연장해야 함

- 2) 연료격납설비가 설치된 구역은 A류 기관구역 또는 높은 화재위험이 있는 구역과 분리되어야 하며, 분리는 A-60급 방열(insulation)과 함께 적어도 900밀리미터의 코퍼댐으로 함.

- (* 연료격납설비 사이의 경계는 최소 900mm의 코퍼댐 또는 A-60급 구획이어야 함)

- 벙커링 스테이션:

- 1) A류 기관구역, 거주구역, 제어장소 및 고화재위험구역의 경계는 A-60급 방열로 하되, 액체 탱크, 공소(void), 화재위험이 거의 없거나 혹은 전혀 없는 보기실, 화장실 및 이와 유사한 구역은 A-0급으로 낮출 수 있음

- 소화

- 수소 사용 공간, 연료격납설비 및 연료 준비실에는 화재 안전 시스템에 대한 국제 규정(FSS Code)에서 요구하는 적절한 고정식 소화 장치(FFES)를 설치해야 하며, 고정식 소화 장치는 이에 관련된 화재 부하를 충분하게 고려해야 함

- 수소가 1차 연료로 사용되는 경우, 8.2.1에서 언급한 구역에서 사용되는 소화매체는 드라이케미컬 분말(dry power) 또는 이산화탄소여야 함

- 수소 연료공급장소에는 누설이 될 수 있는 모든 지점을 보호하기 위하여 고정식 드라이케미컬 분말소화장치를 설치해야 하며, 용량은 적어도 3.5 kg/s로 45초 이상 방출할 수 있어야 함. 장치는 보호되는 구역 외부의 안전한 위치에서 수동으로 쉽게 작동시키도록 배치해야 함

- 화재 감지 및 화재 경보 시스템

- 연료저장창 구역 (데크 아래에 위치한 환기 덕트 포함), 연료전지 구역 및 가연성 가스가 발생할 수 있는 기타 구역은 FSS코드에 적합한 고정식 소화장치를 갖추어야 함

- 수소가 사용되는 곳에는 연기탐지기 및 열감지기가 설치되어야 하며, 다른 가스 개질 연료의 누출을 신속하게 감지할 수 있어야 함

- 고정식 화재탐지 및 화재 경보장치가 각 장치별로 원격 식별할 수 없는 경우, 각 장치는 분리된 전기회로로부터 공급되어야 함

■ 수소선박에 대한 안전규정 개발 - 폭발 방지

- 본 장의 목적은 폭발을 방지하고 폭발로 인한 영향을 제한하는 것임
- 기능 요건
 - 본 장은 기능 요건 3.2.2 ~ 3.2.5, 3.2.7, 3.2.8, 3.2.12 ~ 3.2.14, 3.2.17과 관련되어 있고, 또한 다음이 요구됨:
(* 아래 사항을 통해 폭발 가능성을 최소한으로 줄여야 함)

1) 점화원 수 감소; 그리고

2) 인화성 혼합물의 형성 가능성 감소.

- 일반

- [Marhysafe 핸드북], 특히 [8.3.1]에 설명된 폭발 위험을 고려해야 함
(* 본문에 위험에 관한 내용을 MS 핸드북 인용 없이 작성)
- 폭발 위험을 상세하게 평가하기 위해서는 폭발 위험 분석(ERA)이 필요하다. ERA는 설계 단계 초기에 수행해야 하며, 연구 결과 또는 사례별 안전 철학(case-by-case safety philosophy)에 따라 다수의 완화 장벽(mitigating barriers)이 적용될 수 있음. 특수 제작된 가볍고 빠르게 작동하는 폭발방산구(explosion panel)와 잠재적 산화제 농도의 추가 저감 및 폭발 억제 방법 등이 포함될 수 있음
(* ERA에 적용할 수 있는 현존 산업 표준 파악)

■ 수소선박에 대한 안전규정 개발 - 통풍

- 본 장의 목적은 수소연료 기계류 및 의장품의 안전한 운용을 위해 요구되는 통풍 방법을 제시하는 것임
- 기능 요건
 - 본 장은 기능 요건 3.2.2, 3.2.5, 3.2.8, 3.2.10, 3.2.12 ~ 3.2.14, 3.2.17과 관련되어 있음
- 일반 조항
 - 밀폐된 비위험구역의 공기흡입구는 모든 위험구역 경계로부터 최소 1.5m 떨어진 비위험구역에 설치해야 하며, 비위험구역 공기흡입구는 또한 위험구역 경계

로부터 최소 1.5m 떨어진 안전한 구역에 설치해야 함. 공기흡입 덕트가 위험구역을 통과하는 경우 덕트는 기계적 완전성 및 기밀성으로 인해 가스가 구역으로 침투하지 못하도록 하는 것을 제외하고 이 구역에 대해 과압을 가져야 함

- 모터가 수소 인증을 받지 않은 경우 선풍기 모터를 기계 구역의 환기 덕트에 설치해서는 안됨

(* ‘기계 구역’의 의미와 본 문단의 의도에 대해 CG에서 논의)

- 통풍장치는 통풍구역 외부에서 제어할 수 있어야 하며, 그 구역은 인원이 들어가거나 장비를 작동하기 전에 환기될 수 있도록 배치되어야 함. 출입 전에 환기 시스템을 구동하도록 작업자에게 경고하는 표지판을 구역 외부에 배치해야 하며, 통풍구역은 가연성 가스 모니터링이 필요함
- 위험구역의 통풍구역에는 13mm 정사각형 메쉬(mesh) 이하의 적절한 보호 스크린을 설치해야 함
- 비위험구역의 공기 배출구는 위험구역 외부에 위치하여야 함
- 가스 위험구역의 공기 배출구는 개방된 구역에 설치되어야 하며 만일 그럴 수 없는 경우, 환기되는 구역보다 덜 위험한 구역 혹은 이에 준하는 구역이어야 함
- 환기 설비의 요구 용량은 일반적으로 방의 총 부피를 기준으로 하며, 복잡한 형태의 방의 경우 요구되는 환기 용량의 증가가 필요할 수 있음
- 환기 시스템에 따라 위험 수준이 있는 구역은 아래 항목을 준수해야 함

1) 초기 시동 동안 또는 과압 환기가 손실된 후, 그리고 여압이 없는 상태에서 구역에 대해 안전하다고 인증되지 않은 전기 설비에 전원을 공급하는 경우에는 퍼지(최소 5회의 공기 교환[5회 교환이 충분한지/교환시간에 제한을 두지]에 대해 CG 검토))를 진행하거나 내부가 위험하지 않음을 계측해 확인해야 하며, 콘솔 근처에 경고등을 게시해야 함

2) 과압 통풍장치의 작동을 감시하여야 함

3) 환기 시스템의 고장 시:

a. 소리 및 시각적 알람으로 고지해야 함

b. 통풍은 즉시 복구되어야 함

- 탱크 연결부 구역(Fuel tank connection spaces)(6장으로 이동하는 것에 대해

CG에서 검토)

- 탱크 연결부 구역에는 환기능력이 시간당 최소 30회 이상인 부압식의 기계식 통풍장치가 설치되어야 함
 - 통풍 팬의 개수 및 출력은 주배전반 또는 비상배전반으로부터 분리된 회로를 갖는 한 개의 통풍기 또는 주배전반 또는 비상배전반으로부터 공통 회로를 갖는 한 개의 통풍기 그룹이 작동되지 않을 경우에도 전체 통풍 능력의 50 % 이상을 유지하여야 함
 - 탱크 연결부가 연료 탱크 구역에 있는 경우, 7.2.1 및 7.2.2의 요건에도 적합하여야 함
- 연료준비실(Fuel preparation rooms)
- 연료준비실에는 시간당 최소 30회 이상의 환기능력을 갖는 부압식의 효과적인 기계식 통풍장치가 설치되어야 함
 - 통풍 팬의 개수 및 출력은 주배전반 또는 비상배전반으로부터 분리된 회로를 갖는 한 개의 통풍기 또는 주배전반 또는 비상배전반으로부터 공통 회로를 갖는 한 개의 통풍기 그룹이 작동되지 않을 경우에도 전체 통풍 능력의 50 % 이상을 유지하여야 함
 - 펌프 또는 기타 연료 처리 장비가 운용중인 경우 연료 준비실 및 기타 연료 취급 구역의 환기 장치는 작동되어야 함
- 벙커링 스테이션(Bunkering stations)
- 밀폐된 구역에 위치한 연료 보급소에는 시간당 최소 30회의 공기 순환을 보장하는 효율적인 기계 환기 장치가 제공되어야 함
 - 반밀폐 구역에 위치한 연료 보급소에는 5.1.1항에서 요구하는 위험 평가 결론에 근거한 기계식 환기 장치가 제공되어야 함
- 수소선박에 대한 안전규정 개발 - 전기장비 설치
- 본 장의 목적은 인화성 대기가 존재하는 경우 점화의 위험을 최소화하기 위한 전기장비 설치 방법을 제시하는 것임
- 기능 요건
- 본 장은 기능 요건 3.2.1, 3.2.2, 3.2.4, 3.2.7, 3.2.8, 3.2.11, 3.2.13, 3.2.16, 3.2.18 과 관련되어 있으며, 또한 다음이 요구된다:

- 발전 및 배전시스템과 관련 통제 시스템(control system)은 하나의 문제로 연료탱크 압력 유지 기능과 일반 운항 제한요건 내로 선체구조 온도를 유지하는 기능을 상실하지 않도록 설계되어야 함
- 일반요건
- 전기 장비 및 배선은 위험 지역에 설치하지 않아야 하며, 이를 지키기 불가능한 경우 본 장의 요건에 따름
 - 전자기기가 위험 지역에 설치되는 경우, 해당 지역 분류에 적합한 안전 인증이 필요함
(* CG의 HazAreas를 위해 IEC 60079-10-1이 인용될 수 있음)
 - 장비 그룹 및 온도 등급은 위험 지역에서 발생 및 축적될 수 있는 가연성 가스의 범주에 따라 다음과 같이 결정함
 - 1) 수소, IIC, T1 이상;
 - 위험구역에 설치하는 장비는 방폭인증기관에서 발행하는 방폭인증을 받아야 하고, 가스탐지 및 자동 격리 수단으로 인증되지 않은 안전용 전자기기를 사용해서는 안 됨
- 위험구역 분류(Hazardous area classification)
- 적절한 전기 장치의 선택과 적절한 전기 설비의 설계를 용이하게 하기 위해 위험구역은 6.2.3에 따라 구역 0, 1 및 2로 분류되며, 6.2.3의 규정이 특정 상황에 적용되지 않는 것으로 간주되는 경우 관계부처에서는 위험구역 분류를 위해 IEC 60079-10의 사용을 승인할 수 있음
 - 통풍덕트지역의 분류는 통풍구역의 분류와 같아야 함
 - 위험 지역 분류는 아래와 같음
 - 1) 위험 지역 구역 0
 - : 이 구역에는 연료 탱크 및 개질기 내부에 국한되지 않고 연료 탱크, 파이프 및 연료가 들어 있는 장비의 압력 방출 또는 기타 배기 시스템을 위한 모든 배관이 포함된다.
 - 2) 위험 지역 구역 1
 - : 여기에는 다음이 포함되지만 반드시 이에 국한되는 것은 아님

- a. 탱크연결구역, 연료저장창고구역 및 방벽간 구역;
- b. 연료전지구역;
- c. 연료준비실
- d. 연료 탱크 배출구, 가스 또는 증기 배출구, 병커 매니폴드 밸브, 기타 연료 밸브, 연료 파이프 플랜지 및 기타 개조된 연료 방출원, 연료준비실 환기구, 구역 1 환기구 및 열 변화로 인한 소량의 가스 또는 증기 혼합물의 흐름을 허용하기 위해 제공되는 압력 방출용 연료 탱크 개구부로부터 3m 이내의 개방갑판 또는 갑판의 반밀폐구역 ;
- e. 연료전지구역 입구, 연료전지구역 환기구, 연료준비실 입구, 연료준비실 환기구 및 구역 1 로 통하는 기타 개구로부터 1.5m 이내의 개방갑판 또는 갑판의 반밀폐구역;
- f. 병커 매니폴드 밸브용 드립 트레이 내 개방갑판 지역 및 그 위로 3m, 드립 트레이 기준 위로 2.4m 까지;
- g. 연료를 포함하는 파이프가 위치한 밀폐 또는 반밀폐구역, 예. 연료 파이프 주변의 이중벽 파이프, 반밀폐 병커링 스테이션;
- h. 에어록으로 보호되는 구역은 정상 작동 중에는 비위험 구역으로 간주되지만 구역 1에 적합한 것으로 인증된 보호 구역과 위험 지역 사이의 차압 손실에 따라 작동하는 데 필요한 장비가 요구됨
- i. 압축된 수소 실린더 탱크를 제외하고, 날씨에 노출되는 연료 격납 시스템의 외부 표면으로부터 2.4 m 이내의 영역

3) 위험 지역 구역 2

: 여기에는 다음이 포함되지만 반드시 이에 국한되는 것은 아님

- a. 구역 1의 개방 또는 반밀폐 구역을 둘러싼 1.5 m 이내의 구역
- b. 탱크연결부 구역에 볼트로 고정된 해치를 포함하는 구역

■ 수소선박에 대한 안전규정 개발 - 제어, 감시 및 안전 시스템

- 본 장의 목적은 본 코드의 다른 장에서 다뤄지고 있는 가스 추진 설비의 효율적이고 안전한 운영을 위한 제어, 감시 및 안전 시스템의 배치방법을 제시하는 것임
- 기능 요건

- 본 장은 기능 요건 3.2.1, 3.2.2, 3.2.11, 3.2.13~3.2.15, 3.2.17, 3.2.18과 관련되어 있으며, 또한 다음이 요구됨:

- 1) 수소설비에 대한 제어, 감시 및 안전 시스템은 단일 실패(single failure) 상황에서 남아있는 추진과 발전을 위한 잔여 출력이 9.3.1을 준수할 수 있도록 배치되어야 함
- 2) 수소 안전 시스템은 가스 공급 시스템을 표1과 수동으로 대응하기에 너무 빠르게 진행되는 다른 문제 상황에서 자동으로 차단될 수 있도록 배치되어야 함;
- 3) 정전기방전(ESD) 보호 기계 구성의 경우 안전 시스템은 수소 누출 시 가스 공급을 차단하고 기계 공간에 있는 모든 비인증 안전 유형 전기 장비를 분리해야 함;
- 4) 안전 기능은 가스 제어 시스템과 독립된 전용 수소 안전 시스템에 배치하여 일반적인 원인 고장을 방지해야 하며, 여기에는 전원 공급 장치와 입력 및 출력 신호가 포함됨;
- 5) 현장 계측을 포함한 안전 시스템은 가스 감지기 결함 또는 센서 루프의 전선 단선 등으로 인한 가짜 셧다운을 방지하도록 배치되어야 함; 그리고
- 6) 규정 준수를 위해 두 개 이상의 수소 공급 시스템이 요구되는 경우, 각 시스템은 독립적인 수소 제어 및 수소 안전 시스템을 가지고 있어야 함

- 일반 배치

- 수소 설비의 안전하고 신뢰할 수 있는 운영을 제공하는 데 필요한 제어, 감시 및 안전 시스템은 LNG 가스 연료 설비에 적용된 설계 원칙을 기반으로 해야 하며, 하지만 수소 가스 사용과 관련된 추가 위험을 다루기 위해 일부 기능은 차이가 있음
- 가스 연료를 사용하는 설비의 경우 고장안전기능(fail-safe)으로 인해 가스를 동력으로 하는 기능을 상실하게 하는 등 여러 안전 시나리오에 따라 가스 공급이 중단되거나 점화원이 격리될 수 있으며, 따라서 가스 연료로만 구동되는 기계 장치는 장치 중 하나를 차단하는 고장이나 안전 조치 후에도 추진 기능이 유지되거나 쉽게 복원될 수 있도록 복제 및 분리와 함께 배치해야 함. 이

일반 설계 철학은 제어, 감시 및 안전 시스템에도 적용되어야 하며, 이중화된 수소 공급 시스템 각각에 대한 제어, 감시 및 안전 시스템의 전체적인 배치는 아래 요소를 고려해야 함

- 1) 수소 플랜트의 정상적인 제어 및 감시를 수행하는 전용 시스템
 - 2) 수소 설비의 안전을 위한 시스템의 이중화
- 잘 구축된 설계 원칙은 안전 시스템이 제어 및 감시 시스템과 독립적이어야 하며, 따라서 독립적인 장비와 내결함성을 구성하여 장애 또는 프로세스 혼란이 위험으로 발전하는 것을 방지하는 것임. 이중화된 수소공급시스템에 대한 안전 설비 및 시스템은 안전설비에 고장이 발생해 가스 공급이 중지되더라도 가스 공급 라인에 대한 가스 감지 및 알람기능을 유지할 수 있도록 여유를 가지고 각 시스템에 구성해야 함
 - 연료전지 혹은 내연기관의 직접 연소와 같이 다양한 시스템 구성을 통해 수소를 사용할 수 있고, ‘최종 사용 방법’에 따라 위에서 설명한 제어, 감시 및 안전 시스템의 배열은 연료전지 구획 및 내연기관 구획과 결합될 수 있음
 - 이중 연료 배치의 경우, 예를 들어 수소가 필수 선박 시스템의 유일한 에너지원이 아닌 경우 이중 연료 LNG 설치와 동일한 원칙이 적용되어야 하며, 일반적으로 가스 연료 공급이 실패하거나 중단되는 경우 다른 연료로 전환하고 계속 작동하면 추진 시스템에 필요한 가용성을 보장할 수 있다고 가정함. 그러나 수소 연료 배치의 경우 연료 전환의 원인이 가스 누출 및 후속 폭발 위험과 관련된 경우 대체 연료로 계속 작동하는 것이 안전한지 평가해야 함
 - 병커링을 포함한 전체 연료 가스 장비의 안전한 관리를 보장하기 위해 필수 항목을 현장 및 원격으로 확인할 수 있도록 적절한 계측 장치를 설치해야 함
 - 안전장치는 제어 및 감시장치와 독립적이어야 함
- 가스와 화재탐지(Gas and fire detection)
- 수소 가스는 그 고유한 특성과 이로 인해 발생하는 위험 요소들로 인해 가스 유출 및 화재 발생 감지, 안전 설비(예: 환기)의 성능 저하 혹은 기능 손실 발생의 정확한 조기감지를 위해 지속적인 감시와 적절한 안전 조치의 활성화(종료, 점화원의 격리)가 필요함
 - 다양한 구역에서 폭넓은 누출 시나리오에 적절히 대응할 수 있도록 다양한 감지 기법을 조합의 형태로서 사용해야 하며, 이 적절한 예시로 하나의 포인

트 혹은 라인 형태의 감지 시스템의 효과적인 대체 방안으로 음향 감지기를 사용하는 방안이 있음. 수소 가스 농도에 대한 LFL(하한 가연성 한계)은 매우 낮기 때문에 매우 낮은 농도 수준에서부터 조기에 경보를 고지하는 감지 철학을 가져야 하며(8장 및 7.1항 참고), 초기 감지와 오류에 의한 설비 정지의 위험성인 두가지 요소에 대한 적절한 균형을 고려하는 것이 필요함

(* CG는 해양 작전 환경 등에서 활용하는 ‘음향감지’ 방법을 고려.

* 참고 : 고압유출은 초음파 소음을 발생시키는 특성이 있어 다른 저주파수를 필터링해 확인할 수 있음)

- 화재탐지도 근본적으로 같은 기준이 적용되며, 화재(연소, 연무, 화염)의 초기 감지와 잠재적인 대체 방식을 제공하기 위해 다양한 탐지 방법을 활용해야 함
- 가스나 화재에 노출될 수 있는 구역, 구역의 물리적 배치는 적절한 분석을 통해 정확한 탐지 운영이 될 수 있도록 다양한 탐지 원리에 기반한 탐지 장비를 설치해야 함
- 수소 누출시 폭발성 혼합물의 형성을 방지하기 위해 다음의 적절한 안전 조치를 충분히 고려되어야 함
 - 1) 지상에서의 저온 수소 가스의 감지 및 상온(warm) 수소 가스가 포집되는 구역 내 높은 위치의 수소 감지기 설치
 - 2) “Cryogenics Safety Manual -Fourth Edition (1998)” 과 같은 적절한 지침을 고려하여 육상 기반 액체 수소 저장에 대한 “best practice” 의 적용
- 가스 누출 또는 환기 성능 저하 및 기능 손실을 감지하는 경우 즉각적인 수소 공급 차단과 영향권 내 점화원을 차단해야 하며, 정지 후에도 다른 추진 라인 및 관련 수소 공급시스템을 계속 작동할 수 있도록 수소 가스가 작동 중인 기관구역으로 전파될 수 있는 잠재적인 구역을 적절히 감시 해야 함
- LNG 연료 공급 배치의 경우 화재 감지가 자동 안전조치를 실행시키지 않으며, 화재 경보가 울리고 필요한 조치를 결정하는 것은 작업자에 따름(예: 점화원의 수동 차단 및 격리, 가능한 화재 진압 조치 시작). 수소 연관 설비의 경우 수소 가스 누출과 관련된 위험 요소가 감지 시 자동으로 대응 조치가 발동되어야 하며, 수소에 노출된 구역에 대한 화재 감지는 선박의 일반적인 화재 감지 시스템의 일부여야 함. 그러나, 수소 누출은 상당히 위험하기 때문에 일부 감지 시스템의 기능 손실에도 감지에 문제가 없고 후속 안전조치 및 경보를 포함한

화재 감지 기능에 문제가 없도록 화재 감지 시스템은 충분히 설치해야 함

- 수소 화재 탐지용 화재 감지기는 수소 화재의 특성을 고려하여 충분히 검토한 후 선정하여야 하며, 이는 관계 부처의 승인이 필요하고, 수소로 인한 화염은 가시적으로 관찰하기 어렵다는 것을 충분히 고려해야 함
 - 가스 및 화재 감지 알람은 선박의 선교(bridge), 기관 제어실 및 연관된 구역 모두에 연결되어 있어야 함
 - 선교 및 기관 제어실 및 병커링 스테이션과 같은 곳에 수동 차단 버튼이 제공되어야 함
- 연료공급시스템 감시(Fuel supply system monitoring)
- 연료 공급 장치에는 과압 시 가청 및 시각 경보를 발하는 과압 보호 장치가 설치되어야 함
 - 가스 농도에 민감한 연료전지의 경우 개질 연료 가스의 순도는 감시되어야 하며 한계를 초과할 경우 가청 및 시각 경보를 제공해야 함
 - 연료 공급 장치와 관련된 장비에 대해 다음 항목을 감시해야 하며 한계를 초과하는 경우 가청 및 시각 경보를 제공해야 함
 - 1) 연료 열교환기의 출구에서 고압;
 - 2) 연료 압축기 출구의 고압;
 - 3) 연료 압축기 입구의 저압;
 - 4) 연료 압축기 입구의 고압 및 저압;
 - 5) 압축기 오일의 저압 및 고온; 그리고
 - 6) 주 연료 밸브의 비정상적 차단.
- 액체연료 감시(Liquid fuel monitoring)
- 액체연료의 누출이 발생할 수 있는 구역에는 액체연료용 신속탐지기를 설치해야 함
- 환기 감시(Ventilation monitoring)
- 모든 환기 기능 저하에 대해 가청 및 시각적 알람을 선교 또는 상시 인원이 배치되는 중앙제어장소 또는 안전센터에 제공해야 함

제4장 결 론

- 정부의 ‘수소경제 활성화 로드맵’에 따라 수소산업 전반에 걸친 개발이 활발히 이루어지고 있으나 수소 저장시설 및 연료공급시스템에 대한 세부 기준이 규정되어 있지 않아 기준 개발에 대한 연구가 필요함
- 국제해운이 2050년경 순배출량 제로 목표를 채택함에 따라 제로에 가까운 배출량을 가진 그린수소, e-암모니아 및 일부 고급 바이오연료는 장기적으로 사용할 수 있는 연료로 판단되며, 2030년까지 온실가스 총배출량을 2008년 대비 20%, 2040년까지 70% 감축한다는 2023 IMO 전략의 중간점검 지표를 고려할 때 화석연료 대비 최소 70% 이상의 감축률을 보유한 바이오연료와 e-연료는 중장기적으로 사용가능한 연료로 예상됨
- 액체 수소선박 관련 기술은 대표적으로 저장, 수송, 충전 등이 있으며, 구조적 기술과 운용적 기술로 분류할 수 있음
 - 액체수소는 주로 극저온 액화상태로 저장하므로 수소를 저장하는 방법에 따라 용도에 적합한 저장용기 연구가 활발히 이루어지고 있음
 - 수소가 강재 내부로 침투하여 급격한 성능저하 및 연신을 감소로 연결되는 수소취성을 고려한 강재 선정 및 화물창 설계가 진행되어야 하나, 현재 액체 수소 환경에 가장 적합한 강재 선정된 사례가 없음
 - 액체수소 환경에서의 수소를 안정적으로 이송할 수 있는 독자기술 미확보 시 해외기술 종속에 의한 장기간 국익 저해 상황이 예견되며, 이에 대비한 기술 국산화 달성이 시급함
 - 액체수소 운송방식의 경우 국내에서는 원천기술을 개발 중이며, 해외에서는 실증 단계의 기술로 국가적 협업을 통한 연구에 대한 점진적 노력으로 기술 격차를 줄이고 향후 앞서갈 수 있도록 전방위적 도움 역시 절실함
- 해외에서 대량의 수소 유통을 위한 수단인 액체수소 운송선의 미래 발생 수요에 따른 핵심 기자재 시장 확대가 예상되며, 이를 선점하기 위해 육상 및 해상 시험을 통한 기자재의 성능시험, 데이터 확보 및 인증 획득 방안이 필요함
 - 글로벌 액체수소 시장은 린데가 50%를 점유하고 있으며, 그 외 에어리퀴드, 에어프로덕츠 등 글로벌 가스 기업들이 원천기술을 보유하고 있음

- 일본 가와사키 중공업은 1,250m³ 규모 액체수소 저장 CCS설계 시스템을 일본선급(Nippon Kaiji Kyokai) 기본 승인(AIP) 획득(2014) 및 세계 최초의 액체수소 운송선에 해상 운송용 액체수소 저장탱크 설치완료 하였으며(2020.03.09.) 2030년대까지 160m³ 액체수소운반선 2척을 추가로 건조 후 상용화를 목표로 하고 있음
- 국내 대형 조선3사를 중심으로 액화수소운송선에 대한 연구는 진행중에 있음
 - (삼성중공업) '멤브레인형 액화수소 저장탱크 및 16만m³ 액화수소운반선 개념설계'에 대한 기본 인증(Approval In Principle, AIP)을 획득
 - (현대중공업그룹) 한국조선해양과 현대미포조선은 현대글로벌비스와 공동개발한 2만m³급 상업용 액화수소운반선에 대해 한국선급과 선박 등록기관인 라이베리아 기국의 기본 인증(AIP)를 획득하였고 한국조선해양은 2023년 소형 수소추진선을 상용화하고, 2027년 대형 수소운반선의 실증 계획
 - (대우조선해양) 포스코와 함께 LNG 저장탱크 소재로 고망간강 개발/사용하고 있으며 LNG보다 액화온도가 더 낮은 액체수소 저장탱크용 고망간강 신소재를 개발 하고 이를 바탕으로 신소재 탱크(화물창) 개발 추진
- 국제해사기구(이하 IMO)는 국제해운의 온실가스 감축을 위하여 그간 선박 연료의 연소 과정에서 발생하는 이산화탄소 감축에 초점을 맞춘 규제를 시행해왔으며, 조만간 메탄, 아산화질소까지 규제 대상을 확대해 나갈 예정이다. 한편 기존 규제의 적용 범위는 연소 과정에 국한되어 있어, 연료의 생산과정에서의 이산화탄소 배출을 간과할 수 있으며, 이에 따라 지속가능한 선박연료의 도입을 위하여 연료의 생산부터 연소까지의 전 과정을 포괄적으로 분석하여 온실가스 배출을 평가하는 전과정평가 (Lifecycle Assessment) 필요성이 대두됨
- IMO는 2018년 4월 개최된 MEPC 72차 회의에서 「선박 기인 온실가스 감축을 위한 IMO 초기 전략(이하 초기전략)」을 채택하였고, 초기전략에는 2018년부터 2023년까지 달성 또는 이행해야 하는 단기후보조치를 포함하고 있으며, 그 중에는 “저·무탄소 대체연료 등에 관한 전과정 온실가스 및 탄소 집약도 지침 개발” 작업이 포함되어 있었음
- 초기전략에 따라 MEPC는 선박연료의 전과정 지침 개발에 착수하였으며, 2023년 7월 개최된 MEPC 80차에서 “선박연료 온실가스 전과정평가 지침(이하 LCA 지침)”이 승인되었음. IMO가 시행 중인 단기조치는 선박연료의 연소

과정(Tank to Wake)의 이산화탄소 배출량을 규제하고 있으나, LCA 지침의 개발로 생산·운송과정(Well to Tank)을 포함한 연료 전과정(Well to Wake)에서 배출되는 온실가스를 규제할 수 있는 기술적인 도구를 마련함

- 최근 IMO는 2027년 발효를 목표로 온실가스 감축을 위한 중기결합조치를 개발하고 있으며, 이 조치는 경제적 조치는 물론 기존 단기조치의 규제 범위를 확장하여 연료의 전과정 온실가스 배출을 규제할 것으로 예상되며, 이를 이행하기 위한 선박연료 온실가스 배출계수를 포함한 IMO LCA 프레임워크가 LCA 지침에 포함되어 있음. LCA 지침은 아직 모든 선박연료에 대한 전과정 온실가스 배출계수 등 LCA 프레임워크의 추가 작업이 아직 필요한 상황이며, 온실가스 회기간 작업반(ISWG-GHG) 및 GESAMP-LCA 작업반을 통해 지침을 보완해 나가고 있음

■ 수소 화물·컨테이너 운송의 안전기준과 관련하여 수소선박 관련 기술에 대한 국내외 안전기준을 분석하여 현행 기술기준의 운영 현황과 미비한 부분을 조사·분석함으로써 수소선박 실증 사업에 대한 관계법령 및 기술 기준 개발의 필요성을 확인함.

- 수소 추진 및 운송선의 안전에 관한 국제 기술 지침 및 규정은 주로 국제해사기구 IMO의 CCC에서 작업하고 있으므로 향후 후에도 지속적인 follow-up을 통한 지침 현황 업데이트가 필수적임
- 액체 수소 관련 육상 차량에 대한 저장 용기 및 시스템 안전 기준이 있으나 선박과 관련된 액체 수소용 저장 용기 및 시스템에 대한 기술 지침을 개발하여 실증 기반을 마련하는 것이 시급함
- 수소 관련 기술들의 안전성 시험이나 시스템 단위의 시험들이 규격화 되거나 개발 중에 있으나 기자재 단위의 규격은 미비한 실정임
- 액체헬륨 환경에서의 시험 규격들이 일부 존재하나 액체 수소환경 실증에 적용하기 위한 기존 규격의 개정안 또는 추가적인 액체수소 환경에서의 시험 규격 개발이 필요함
- 수소 선박 개발을 위한 IGF Code 개정 및 대체연료 지침 개발이 진행 중에 있으며, 일부 내용이 개정된 초안이 제출됨
- 선박에 설치된 4형식 가압수소용기에서 발생하는 수소 투과 안정성에 대한 잠재 위험의 관리 중요성에 관한 정보 제공에 대한 ISWG 및 WG1에서 임시 안전지침 개발에 고려됨

■ 수소 연료선박 임시 안전지침 개발 (TOR 1)

- 수소를 연료로 사용하는 선박에 대해서는 “비상차단으로 보호되는 기관구역” 개념을 적용하지 않기로 함
- 연료격납설비 : 압축 수소의 배출 시스템에 대해 논의하였으며, 압축 수소의 배출은 긴급 상황에서만 허용함
- 연료소모장치로의 연료 공급 및 소화 시스템 : 연료소모장치(제9장), 전력 생성 및 추진을 포함한 기타 연료소모장치(제10장), 화재 보호(제11장)에 대한 초안을 검토하였으며, 전반적으로 목표와 기능 요건에 동의함
- 수소 폭발 방지 : 수소 폭발 방지에 대한 규정은 IGF 코드 제12장의 목표 및 기능요건에 동의하였으며, 폭발 결과 완화에 대한 규정이 포함되어야 한다는 의견이 있음
- 수소 폭발 위험 분석 방법 : 수소 폭발 위험 분석에 대한 특정한 방법이 없다는 점을 인식하였으며, 일부 대표단은 정량적 위험성 평가(QRA) 접근 방식을 제안함
(* 이 방식은 누출 및 폭발 시나리오 평가, 점화원 식별, 가연성 물질 목록 작성, 확산 및 폭발 시뮬레이션 등을 포함함)
- 전기 설비 관련 규정 : 전기 설비에 대한 목표와 기능적 요구사항에 대해 전반적으로 동의하였으나, 내용이 기존 IGF 코드와는 상이하여 해당 장에 대해서는 IGF 코드의 규정을 참조하지 않기로 결정함. 아울러, 이와 관련하여 액화가스 연료에 대해 IGF 코드 14.4.3에 명시된 개방 갑판에서의 규정된 위험 구역 거리가 수소 연료에 적용하는 것이 부적합할 수 있다는 우려가 있음
- 수소연료추진 선박에 대한 안전 지침 초안을 작성하여, ISWG 및 CCC 10차 작업 그룹에서 추가 논의 될 수 있도록 함
- 선박의 탈탄소화를 위한 대체 연료 안전 규정이 신속하게 마련되어야 할 시급성을 고려하여, 수소를 연료로 사용하는 선박의 안전에 대한 잠정 지침서 개발에 아국 전문가 및 산업계 의견을 반영하여 적극 대응 필요
- ‘수소를 연료로 사용하는 선박의 안전에 대한 임시안전지침 개발’을 위해 회기간 작업그룹과 회기중 작업그룹을 개설하여 관련 의제문서 검토 및 향후 작업계획 수립
- 기존 IGF 코드를 바탕으로 임시 안전지침 각 장의 목표와 기능 요건을 개발

- 상세 조항 개발은 액체수소와 기체수소의 특성이 다를 것을 고려하여 이를 분리하여 개발하기로 합의하고, 수소 연료소모장치로의 연료 공급 부분의 개발하였으나, 다만 시간 제약으로 인해 차기 CG 및 ISWG 개선을 통해 기술적·구체적 협의한 후 2026년 승인을 목표로 임시 안전지침 개발을 완료키로 작업 계획을 수정함

■ CCC 10/3/16, CCC 10/3 Annex 1에 대한 코멘트 (수소) [일본]

- 회기 전 작업 그룹에서 논의 될 내용에 대해 일본의 입장을 제안한 문서로 기술적 부분에 있어 아국 산업계 의견을 안전지침서 반영 필요함
- 9.3.15항에서 완전한 배관 파열 확률이 낮고 발생한 사례가 없다는 일본 주장에 대해 일부 동의하지만, 사례가 없어 고려할 필요가 없다는 접근은 신중할 필요가 있음
- 9.4.1항 및 안전지침서 초안 전체에 있어 아국 산업계는 수소 혼합 산소 농도 허용치 3% 선호. 안전지침서 초안은 5%, 3%, 그리고 1% 중 하나로 협의 예정이며, 최대 허용치는 수소 특성 고려된 4.3%임
- 안전지침서 초안 전체에 있어 Enclosure와 barrier가 혼재되어 정의를 명확히 할 필요가 있음

■ CCC 10/INF.27 선박에 설치된 4형식 가압수소용기에서 발생하는 수소 투과 안전성

- 자동차와 달리, 선박에서는 4형식 용기 사용에 대해서 충분한 현장 실적이 확보되지 않은 점, 그리고 선박은 자동차와 달리 24시간 지속적인 진동 등 스트레스가 가해지는 점에 따라 투과 현상의 안전성에 관한 우려의 의견이 제기됨
- 「선박수소연료전지설비 잠정기준」에서는 선박에서 4형식 가압수소용기를 사용하는 경우에 수소 투과에 대한 위험구역 관련 사항을 특별히 고려하라는 내용으로 제정됨