

### 1. 서론

온실가스 배출 저감을 목표로 미래 친환경 연료인 수소의 선박 연료 적용이 점차 가시화되고 있으며, 해외 기술선진국 기업 또는 기관들의 세계 최초 수소연료선박 기술개발 소식을 전하는 뉴스들 또한 어렵지 않게 접할 수 있게 되었다. 우리 역시 정부주도의 수소경제 구축 정책과 관련 기술 로드맵 발표로 이러한 세계적 추세에 합류하는 모습이나, 이미 일정 수준 간극이 발생한 세계적 기술 경쟁에서 살아남기 위해서는 각계의 노력이 뒷받침되어야 할 것으로 생각된다.

선박 연료로 수소를 활용하기 위한 주요 기술 분야의 하나로 극저온 액화수소의 저장·공급시스템을 들 수 있다. 영하 253도의 극저온 영역에서 기체상태 대비 1/800로 부피가 감소된 액화수소를 활용하는 것은 이미 액화천연가스(LNG)의 사례에서 확인하였듯 가스 연료의 선박 적용을 위한 필수 기술요소라 할 수 있으며, 국가 간 수소 에너지의 대량 교역에도 큰 활용성을 지니리라 판단된다. 그러나 LNG 대비 약 100℃가 낮은 극저온에서의 액화수소 연료의 저장·공급은 더욱 높은 수준의 유관 기술 확보가 요구될 것으로 전망된다.

이에 본 특집기사에서는 수소의 선박 연료 적용을 위한 기술 분야로서 액화수소 저장·공급 기술을 소개하고자 한다. 이를 위해 액화수소의 특성 및 극저온 단열기술에 대해 살펴보고, 액화수소 저장시스템, 연료 공급시스템으로 구분하여 이들의 기술적 분석을 수행한다. 마지막으로 액화수소의 안전성 관련 유사 연구사례의 고찰을 통해 액화수소의 선박 적용 시 수반되는 안전성 문제를 논의한다.

### 2. 본론

#### 2.1 액화수소

수소는 상온, 상압에서 화학적으로 안정된 분자량이 가장 작은 기체로서, 다른 기체들과 비교하여 확산속도, 열전도율, 비열이 크며, 점도는 작은 특성을 가지고 있다. 아래 표 1의 메탄과의 물성 비교에서 액화온도는 100℃정도 낮고, 액체중량은 1/6정도로 매우 가벼운 기체임을 확인할 수 있다.

표 1 수소 및 메탄의 물성 비교

| 물성                     | 수소(H <sub>2</sub> ) | 메탄(CH <sub>4</sub> ) |
|------------------------|---------------------|----------------------|
| 분자량                    | 2.016               | 16.04                |
| 비중(kg/m <sup>3</sup> ) | 0.09                | 0.715                |
| 공기에 대한 비중              | 0.0695              | 0.544                |
| 끓는점(액화온도, °C)          | -252.79             | -161.4               |
| 끓는점 임계온도(°C)           | -239.9              | -82.5                |
| 임계압력(MPa)              | 1.25                | 4.49                 |
| 액체비중(g/L)              | 70.779              | 422.62               |
| 액체 팽창비 (20°C, 1기압)     | 1:845               | 1:649                |

또한, 수소는 에너지밀도가 가장 높은 에너지원으로서 메탄 대비 단위 질량당 발열량이 2.4배에 달하며 (저위발열량 수소 = 119,708 kJ/kg, 메탄 = 49,987 kJ/kg) 연소 시 물과 열만을 생성하기 때문에 화석연료와는 달리 황산화물, 탄화수소류 등과 같은 환경오염물질, 이산화탄소 등의 지구온난화 가스의 발생이 없다. 수소를 공기에 의해 연소시킬 경우, 공기 중의 질소에서 기인하는 질소산화물이 발생함에도 불구하고 수소는 친환경 연료 대안으로 인식되고 있으며, 선박연료를 포함한 사회 전반에서 그 활용이 증가할 것으로 예측된다.

그럼에도 불구하고 수소 연료 사용에 있어 가장 문제로 지적받는 부분은 공간적인 연료저장 효율이 낮다는 것이다. 수소의 단위 부피당 발열량은 10,768 kJ/Nm<sup>3</sup>으로 메탄의 30% 수준에 머무르며 (메탄 = 35,825 kJ/Nm<sup>3</sup>) 한정된 제원에서 높은 공간효율이 요구되는 선박에의 적용을 위해서는 경제적인 수소 저장방법의 구현이 요구된다.

연료로서 수소의 저장방법은 압축, 화합물 형태로의 저장 등이 있으나 선박과 같은 장거리 이송·대량 저장이 목적일 경우 액화수소로 저장하는 것이 가장 현실적인 방안으로 평가 받고 있다 (그림 1). 액화수소는 영하 253도 이하의 극저온 온도에서 수소가 액체 상태로 존재하는 것을 나타내며, 기체상태 대비 부피가 1/800로 감소하는 것으로 알려져 있다. 200

기압 금속용기에 저장된 고압 수소기체는 액화수소 저장용기에 비해 2.5배나 무겁고 63% 이하의 수소 밖에는 저장하지 못하다는 사실을 상기해 본다면, 수소 액화 공정을 위한 전력 또는 비용 투입이 크다는 단점에도 불구하고 저장 측면만 놓고 봤을 때 가장 효과적인 대안임을 부인할 수는 없을 것이다.

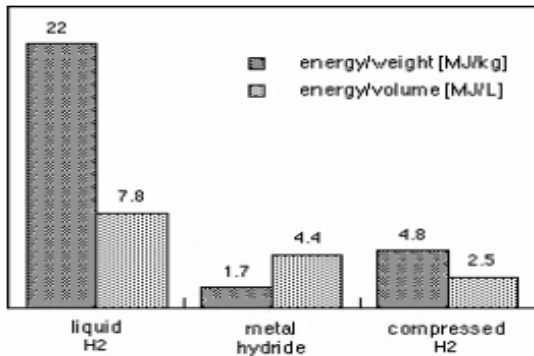


그림 1 수소저장시스템별 효율 비교

그러나 액화수소의 저장은 영하 253도의 극저온이 유지된 상태로 이루어지기 때문에 저장 공간 외부로부터의 열유입에 의한 액화수소 기화가 일어나며, 이의 배출 또는 재액화에 따르는 손실을 최소화하기 위해서는 열유입을 차단하는 단열기술의 개발이 요구된다. 영하 163도의 온도에서 저장되는 LNG의 저장온도보다 100°C 가량 낮기 때문에 LNG 저장용기에 해당하는 것 이상의 단열능능이 요구되며, 진공단열 등 향상된 단열시스템 확보가 필요할 것으로 판단된다.

## 2.2 극저온 단열기술

### 2.2.1 극저온 액화가스 저장을 위한 단열기술

전술한 바와 같이 액화수소의 효율적인 저장을 위해서는 외부 열유입에 의한 기화손실을 최소화 할 수 있는 극저온 단열기술의 확보가 요구된다. 액화수소의 저장뿐만 아니라, 액화수소의 이송, 수소의 액화공정에서도 단열시스템의 중요성이 크기 때문에 액화수소의 선박 연료 활용을 위한 주요 기술 문제로 극저온 단열기술을 인식할 수 있을 것이다.

현재 멤브레인타입 LNG 운반선 화물창 단열시스템의 기화손실률은 하루 0.085 % 수준으로 알려져 있으나 (170,000 입방미터급 GTT Mark III 기준) 진공층을 포함하는 액화수소 운반선 화물창 단열시스템의 경우 기화손실률이 하루 0.1~0.2 % (가와사키중공업에서 개발 중인 160,000 입방미터급 액화

수소 운반선의 목표치)에 달하며, 상대적으로 저장 탱크의 크기가 작은 액화수소 연료탱크의 경우 기화손실률이 더욱 커질 것으로 예상된다. 액화수소 저장용기의 단열을 위해서 진공단열, 다층단열재 (MLI, multi-layer insulation), 증기냉각 복사실드 (vapor-cooled radiation shield) 등 여러 가지 방법들이 복합적으로 사용될 수 있으며, 이러한 방법들을 통하여 공기에 의한 열의 전도, 대류, 복사 등을 일정수준 효과적으로 차단할 수 있는 것으로 알려져 있다.

#### (1) Vacuum insulation

진공 단열은 극저온 액체를 저장하는 내벽과 상온에 노출된 외벽사이를 일정 정도 이격시키고 그 사이 공간을 진공상태로 만들어 외부로부터의 열유입을 차단하는 기술이다. 이중용기(탱크) 구조이며 Dewar 용기가 대표적인 진공 단열 용기이다. 육상에서 액체헬륨과 같은 극저온 액화가스들을 저장하는 수직형 실린더 탱크, 구형 탱크들은 진공단열 방식을 다수 채용하며, 이때의 진공도는 통상  $10^{-4}$  Torr 이하이다.

#### (2) Multi-layer insulation

다층단열재 기술은 mylar 또는 kapton 필름 같은 polymer sheet 위에 열복사율 값이 작은 알루미늄 등의 금속을 코팅 처리한 박막을 활용하여 복사에 의한 열유입을 차단하는 기술이다. 그림 2에 보인 바와 같이 코팅된 박막을 저장용기 표면에 여러 겹 겹쳐서 장착하고, 각 겹 사이를 진공처리 하여 사용한다. 이의 단열능능을 열전도도로 환산하면 10 mm 두께당 20 ~ 30겹 박막 장착을 기준으로 30 ~ 60  $\mu$  W/m·K 수준인 것으로 알려져 있다.

#### (3) Vapor-cooled radiation shield

증기냉각 복사실드 기술은 외부 열유입에 의해 기화되는 액화가스의 냉열을 활용하는 것으로 기화가스의 배출 시 저장용기 내벽 표면을 냉각하고 배출될 수 있도록 한 방식이다 (그림 3). 이와 유사하게 탱크 내벽과 외벽사이에 일정량의 액화질소를 두어 이의 냉열로 전도 및 복사에 의한 외부 열유입을 최소화 하는 기술도 사용되고 있다. 그러나 선박의 경우 제한된 선체 연료저장 구획에서 공간효율을 높이는 방식으로 기술개발이 이루어져야하기 때문에 선박 적용 관점에서 그 효용성이 상대적으로 적다고 볼 수 있으나, 기화된 가스를 선박 추진기관 (연료전지시스템 등) 에 공급하여 추진연료로 활용할 경우 본 단열방식 활용을 시도해볼 여지는 있는 것으로 사료된다.



그림 2 MLI (multi-layer insulation)가 장착된 극저온 액화가스 저장탱크

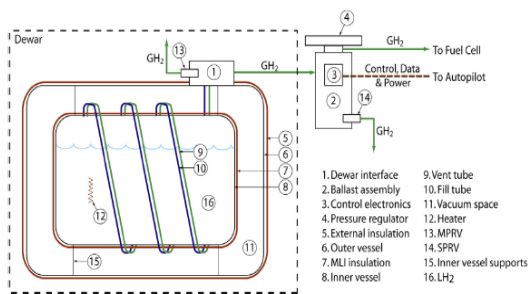


그림 3 증기방각 복사시드 기술이 적용된 극저온 액화수소 저장탱크 모식도

### 2.2.2 액화수소의 선박 연료 적용을 위한 극저온 단열기술

미국 항공우주국 (NASA, National Aeronautics and Space Administration)은 장거리 원격 무인 항공기용 수소연료시스템 개발 프로젝트에서 액화수소 저장을 위한 단열방식 간의 비교 연구를 수행한 바 있다. 해당 연구에서 스프레이 폼 단열 (SOFI, spray on foam insulation), 진공단열 (vacuum jacketed insulation), 고·저밀도 에어로겔 (high·low density aerogel) 단열 각 방법들을 대상으로 14일 동안 임무를 수행하기 위해 필요한 시스템 (탱크+단열층)과 추진연료 등의 총 중량을 조사하여 비교 연구를 수행하였다. 각 단열방식들의 단열두께 또한 고려하여 연구가 수행되었다.

표 2는 해당 연구에 사용된 각 단열방식별 물성 데이터를 나타낸다. 해당 물성을 활용해 단열방식별 열유입량 및 액화수소 기화량을 산출하였으며, 단열두께에 따른 단열층 중량 역시 해당 물성을 참고하여 산출되었다. 해당 연구의 결과로 진공 단열방식이 임무 수행에 요구되는 시스템, 추진연료 총 중량이 가장 적은 것을 확인하였으며, 상대적으로 단열층의 두께 측면에서도 역시 타 단열방식에 비해 유리한 것으로 나타났다. 아래 그림 4는 단열두께별 임무수행에 요구되는 시스템, 추진연료 총 중량을 비교한 결과로 단열방식별 중량차이

는 단열시스템의 중량 차이, 그리고 액화수소연료의 기화로 인해 추가 탑재되는 연료의 중량에 기인한다.

표 2 액화수소 연료탱크 단열방식별 물성 데이터

| 단열방식              | 밀도 (kg/m <sup>3</sup> ) | 열전도율 (W/m·K) |
|-------------------|-------------------------|--------------|
| 고밀도 에어로겔 (공기층 충전) | 450                     | 0.035        |
| 고밀도 에어로겔 (진공 충전)  | 450                     | 0.0175       |
| 저밀도 에어로겔 (공기층 충전) | 100                     | 0.016        |
| 저밀도 에어로겔 (진공층 충전) | 100                     | 0.008        |
| 스프레이 폼            | 62.5                    | 0.0242       |
| 진공단열 (MLI 포함)     | 24                      | 0.00035      |

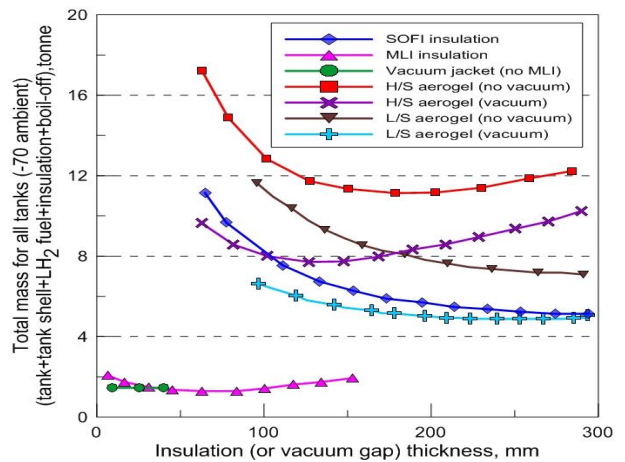


그림 4 원격 무인 항공기의 임무 수행을 위해 소요되는 액화수소 연료탱크, 단열시스템, 추진연료 총 중량의 단열방식별 비교

아래 그림 5는 MLI가 진공층 내부에 포함된 진공단열 방식과 저밀도 에어로겔이 진공층 내부에 충전된 진공단열 방식의 기화손실에 의한 추가 연료 소요량을 비교한 결과이다. 해당 결과에서 200 mm 두께의 저밀도 에어로겔의 충전 시 기화손실에 의해 2,500 kg 이상의 추가 연료탑재가 필요한 것으로 나타나며 이는 결과적으로 대량의 연료탑재 후 장기간 운행하는 선박에 있어 진공단열 방식 대비 경쟁력이 떨어지는 것으로 사료된다. 그러나 동일 연구에서, 5시간 임무 수행을 가정

한 비교 결과는 두 단열방식간 소요 중량 차이가 크지 않은 것으로 나타났으며, 이를 고려한다면 단열층 설치 및 진공 유지를 위한 비용 등에 있어 약점이 있는 진공단열 방식을 대신하여, 비교적 짧은 운항시간을 가지는 소형선박에 에어로겔 충전 방식 또한 유효한 단열방안으로 고려 가능한 것으로 사료된다.

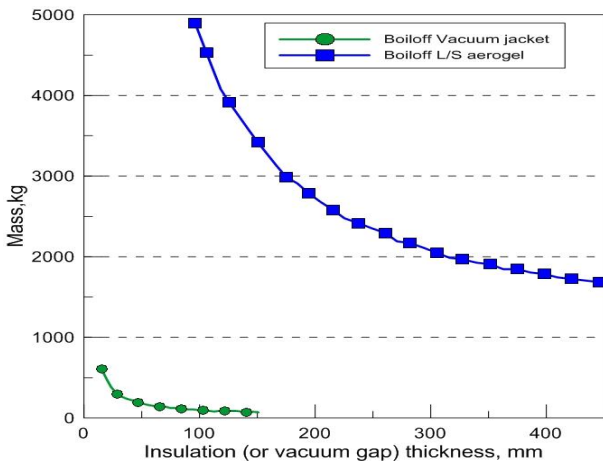


그림 5 진공단열 (MLI 포함) 및 저밀도 에어로겔 충전 진공단열방식의 기화가스손실에 따른 추가 연료 소요량 비교

액화수소의 선박연료 적용은 연료탱크의 단열뿐만 아니라 탱크 지지대를 통한 열유입 및 연료 주입 시의 기화손실 등이 함께 고려되어야 하며, 우수한 극저온 단열기술의 개발 및 이를 통한 경제적인 액화수소의 저장은 액화수소의 선박 연료 적용을 앞당기는데 일조할 수 있으리라 판단된다.

## 2.3 액화수소 저장·공급 기술

### 2.3.1 액화수소 저장 기술 분석

표 3은 액화수소 저장탱크와 LNG 저장탱크에 적용되는 소재 및 단열 방법을 비교한 내용으로, 극저온 액화가스를 선박에 저장하기 위한 탱크로서 전체적으로 유사한 구조를 가지고 있으나, 액화수소의 경우 더욱 낮은 저장온도, 수소에 의한 금속 취화를 고려하여 소재 및 구조가 달라짐을 확인할 수 있다. 가령, LNG 탱크의 구조용 강재로서 주목받고 있는 니켈 합금강의 경우 니켈이 다량 함유된 금속은 극저온 영역에서 우수한 기계적 강도를 보임에도 불구하고 수소취화에 민감하기 때문에 액화수소 저장 탱크용 구조 강재로 고려되지 않고 내수소취성이 뛰어난 스테인리스강이나 강도 대비 가벼운 알루미늄 합금강이 사용되리라 판단된다.

또한 LNG 대비 기화가스손실이 증가할 것으로 예상되는 바

표 3 액화수소 및 액화천연가스 저장탱크 요소별 소재 및 구조 비교

|            |           | 액화수소 저장탱크   | 액화천연가스 저장탱크  |
|------------|-----------|---|--|
| Storage    | 저장 온도     | 영하 253도   | 영하 163도  |
|            | 탱크 소재     | 스테인리스강 (SUS316L 등)<br>알루미늄합금강   | 스테인리스강 (SUS304L 등)<br>알루미늄합금강<br>9% 니켈강<br>Invar강 (36% 니켈강)                |
|            | 탱크 형상     | 독립형 Type-C (소형선박용)<br>독립형 Type-B (중대형선박용)<br>멤브레인형 (대형선박용)  | 독립형 Type-C (압력용기)<br>독립형 Type-B (MOSS, IHI-SPB)<br>멤브레인형 (Mark-III, NO-96) |
| Insulation | 단열 소재(방식) | 진공단열<br>다층단열재 기술 (MLI)<br>에어로겔 등  | 폴리우레탄 폼 (블록, 스프레이 타입)<br>펄라이트 (또는 글라스울) 충전 단열박스<br>발포 폴리스티렌 (EPS) 폼        |
|            | 기화율       | 0.1 ~ 0.2%/day  | 0.085%/day   |
| Support    | 소재        | Teflon (강도/열전도도 비 13.6)<br>Nylon (48.4) Mylar (286.6)<br>Darcon fiber (630.7)<br>Kel F oriented fibers (542.8)<br>Glass fiber (183.6) 외 | 저온용 탄소강 (EH 36 등)  |
|            | 형상        | 결합부 형상 변경 등을 통한 열유입 최소화   | Saddle structure (목재-금속)   |

비용 및 작업성, 내구성, 강도 측면에서 LNG 저장탱크 적용이 잘 이루어지지 않는 진공 단열방식이 액화수소 저장탱크에는 다수 적용될 것으로 예측되고 있다. 액화수소의 경우 액화 가스의 밀도가 LNG의 1/6 수준으로 (표 1) 슬로싱에 의한 단열층 파손 위험이 상대적으로 감소하리라는 판단 역시 단열방식의 변화 이유로서 작용한다고 볼 수 있다. 마지막으로 저장탱크의 지지구조 (support) 역시 기존의 목재-금속 support 구조에서 상대적으로 강도/열전도도 비가 우수한 복합소재가 채용될 것으로 예상되며, 형상적으로도 열유입 단면적을 최소화 하는 방향으로 기술 개발이 이루어지리라 사료된다.

액화수소 저장탱크 개발과 관련하여 현재, 독립형 Type-C 저장탱크가 실질적인 제작 단계에 있으며 나머지 Type-B 및 멤브레인형 탱크에 대해서는 아직 연구단계에 있다. 선박에 탑재가 가능한 형태의 액화수소 저장탱크에 대한 연구는 대표적으로 가와사키중공업(Kawasaki Heavy Industries)에서 진행하고 있으며, 90년대 중반 일본 경제무역산업성이 주관한 WE-NET(World Energy Network System) 프로젝트를 통해 액화수소의 해상 수송에 대한 연구를 시작하였다. 1998년 수행된 액화수소의 해상 수송에 대한 연구에서는 선박의 형태, 탱크 형상, 단열 및 지지 방법에 대해 제한한바 있으며, 해당 연구에는 액화수소의 낮은 밀도를 고려하여 쌍동선도 연구 대상에 포함되었고, 기존 LNG 화물창에 적용되는 폴리우레탄 폼의 두께를 1 m 까지 증가시키는 방안도 다루고 있다. 2000년에 수행된 50,000 입방미터의 대규모 액화수소 지하 저장 시설의 개념 설계에 필요한 단열 성능 평가 시험에서는 단열 방법에 대해 더욱 구체화 하였다.

이를 바탕으로 가와사키 중공업은 2016년 이와타니, Shell Japan, J-Power와 협력해 HySTRA를 조직하였으며 호주 빅토리아 주정부로부터 갈탄에서 추출한 액화수소를 공급받기 위해 2020년 여름 파일럿 액화수소 운반선 시운전을 목표로

기술개발 및 실증과정을 수행하고 있다. 해당 선박은 2척 건조 예정으로 1,250 입방미터 규모의 Type-C 탱크 2기가 탑재되어 총 2,500 입방미터의 액화수소를 수송할 수 있는 능력을 갖추게 된다 (그림 6).

해당 선박을 통한 해상 액화수소 운반에 대한 실증시험 이후, 2030년까지 16만 입방미터의 Moss type 액화수소 운반선 2척을 추가적으로 건조할 계획에 있다. 파일럿 선박에 탑재되는 액화수소 화물창은 현존하는 IGC code를 만족하도록 설계되었으며 2014년 ClassNK로부터 기본승인을 획득한 바 있다. 파일럿 선박에 탑재되는 액화수소 화물창은 스테인레스강을 활용한 이중진공 단열구조이며, 진공 상태를 유지하고 저장탱크의 목부를 통한 열전달을 최소화시키기 위한 돔 구조물을 설치하였고 단열성능이 뛰어난 유리섬유강화 플라스틱(GFRP, Glass Fiber Reinforced Plastic) 소재를 지지대에 적용해 자연 기화율(Boil-off rate) 0.2%/day 혹은 그 이하를 목표로 하고 있다.

일본 우주항공연구개발기구에서 제작한 540 입방미터의 육상용 액화수소 저장 탱크의 경우 기화율이 0.18%/day인데, 열 유입량이 일정하더라도 탱크의 크기가 증가할수록 비표면적이 작아져 기화량이 감소한다는 것을 고려하였을 때, 액화수소 화물창의 기화율은 다소 높다고 할 수 있다. 그림 7에 나타난 바와 같이 기존 액화수소 저장탱크가 주로 소형이며 육상 환경에 설치하기 때문에 탱크 내조(inner tank)를 지지하는 지지대의 단면적을 최소화시켜 입열량을 감소시키지만, 대형 해상 액화수소 탱크의 경우 관성력과 유체력으로 인해 상당한 강도를 갖으면서도 단열 성능이 뛰어난 소재를 사용하여 지지대를 구성해야한다. 가와사키 중공업에서는 이를 해결하기 위해 실린더형의 유리섬유강화 플라스틱을 지지대에 적용하였다.

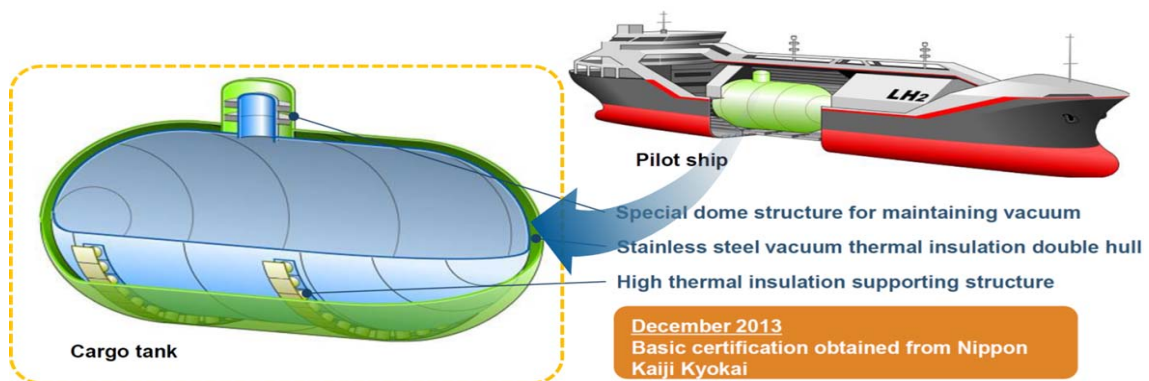


그림 6 호주-일본 운항 파일럿 액화수소 운송선박 저장탱크 구조 (가와사키중공업)

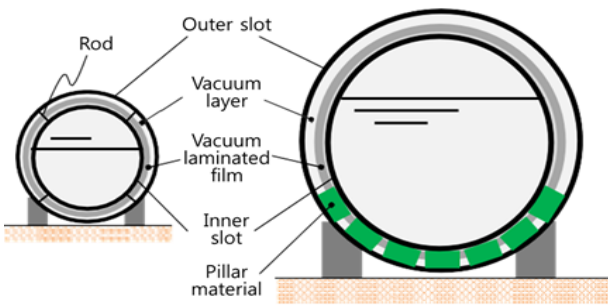


그림 7 소형 및 대형 액화수소 저장탱크 구조 비교



그림 8 실린더형 유리섬유강화 플라스틱 지지대가 적용된 목업(Mock-up) 액화수소 저장탱크

그림 8은 유리섬유강화 플라스틱으로 이루어진 지지대가 새들(Saddle) 위에 설치된 목업 탱크를 나타낸다. 실린더형 지지대는 17개가 설치되며, 초기형 액화수소 운반선에 적용되는 크기의 1/3로 제작되었으며 주요 제원은 표 4에 나타났다. 본 시험에서 액화수소 대신 물을 채우는 충수 시험을 통해 지지대의 안전성 평가를 수행하였다. 지지대에 가해지는 하중은 내조 85톤을 포함하여 총 473톤의 하중을 가하였으며, 이는 액화수소 충전 조건보다 3배 이상의 하중이 가해지는 것이다. 유리섬유강화 플라스틱의 허용 압축 변형률이  $-8,000\mu\epsilon$  으로 해당 조건에서 측정된 최대 압축 변형률보다 3배 정도의 여유가 있어 이중진공 단열구조의 저장탱크를 지지하는 재료로서 강도 측면에서는 문제가 없는 것으로 나타났다.

이중진공 단열구조는 304L 스테인레스강을 적용하였으며  $10^{-3}$  Pa 이하의 고진공 상태를 유지하며 단열재간의 전도열전달 및 복사열전달의 차폐를 위해 MLI 단열방식을 적용하였다. 2016년 1,000 입방미터 규모의 액화수소 저장탱크 모형시험에 적용된 다중적층단열재는 알루미늄으로 양면 증착한 PET 필름(polyethylene terephthalate film)과 적층 필름간 열전도를 방지하기 위한 부직포로 구성된다. 다중적층단열재의 총 두께는 10mm 이하로 40개 층으로 구성되었으며 단열성능 측정 결과, 40개층 이상으로 적층하더라도 단열성능의 개선은

기대하기 어려운 것으로 나타났다. 이를 3,000 입방미터 액화 저장 탱크에 적용하는 경우 예측되는 액화수소 기화율이 하루 0.07%에 이른 것으로 확인되었다.

현 액화수소 저장시스템에서는 기화되는 수소를 시스템 밖으로 배출시키는 것이 아닌 PBU(Pressure build-up unit)를 이용하여 연료전지에서 사용하는 것으로 알려져 있다. 추후 개발될 16만 입방미터 액화수소 선박의 경우 연료전지 추진시스템을 갖추어 기화가스를 선박 추진 연료로 사용할 계획이며, 이때 액화수소의 자연 기화율이 0.2 - 0.4%/day 수준까지는 문제가 없는 것으로 알려져 있다.

표 4 목업 액화수소 저장탱크 주요 제원

|                      |         |
|----------------------|---------|
| 길이 (m)               | 17      |
| 직경 (m)               | 11      |
| 무게 (ton)             | 200     |
| 부피 (m <sup>3</sup> ) | 1,000   |
| 내벽 소재                | 스테인레스강  |
| 두께 (mm)              | 15 ~ 30 |

### 2.3.2 액화수소 연료공급 기술 분석

선박용 액화수소 연료공급시스템은 연료를 저장하고 있는 연료탱크로부터 액화수소를 추진시스템 주기관(연료전지시스템)에 공급하기 위한 일련의 시스템을 지칭한다. 수소 저장효율을 높이기 위해 영하 253도의 극저온 온도에서 액화시킨 상태로 저장된 수소를 연료전지의 수소 공급 조건(통상 10 bar 이하, 상온)에 부합하도록 이송하는 물리적 공정을 거쳐야 하므로 이를 위한 펌프, 기화기, 밸브, 파이프들로 시스템이 구성되며, 열교환을 위한 냉각수 순환설비, 기화된 수소를 활용 또는 배출시키기 위한 설비 역시 본 연료공급시스템에 포함된다(그림 9). 이는 선박용 LNG 연료공급시스템의 시스템 기능적 구성과 유사하나, 액화연료의 온도가 영하 253도로 더욱 낮아지고, 수소취화 등의 문제발생 가능성이 있기 때문에 액화수소 연료공급시스템 및 구성 기자재의 개발 시 이러한 특성이 고려되어야 한다.

지난 2018년 12월 액화가스 저장 및 공급 시스템 기업 만 크라이오(MAN Cryo)는 선사인 피요르드(Fjord), 선박 설계 기업인 멀티 마리타임(Multi Maritime)과 공동 프로젝트를 통해 선박용 액화수소 연료공급시스템(70 입방미터 용량의 MLI 적용 탱크 포함)을 개발하고 세계 최초로 연료 공급시스템의 노르웨이-독일 선급(DNV-GL) 기본승인(AIP, Approval in Principle)을 획득하였다. 해당 시스템은 선체 갑판의 상부, 하

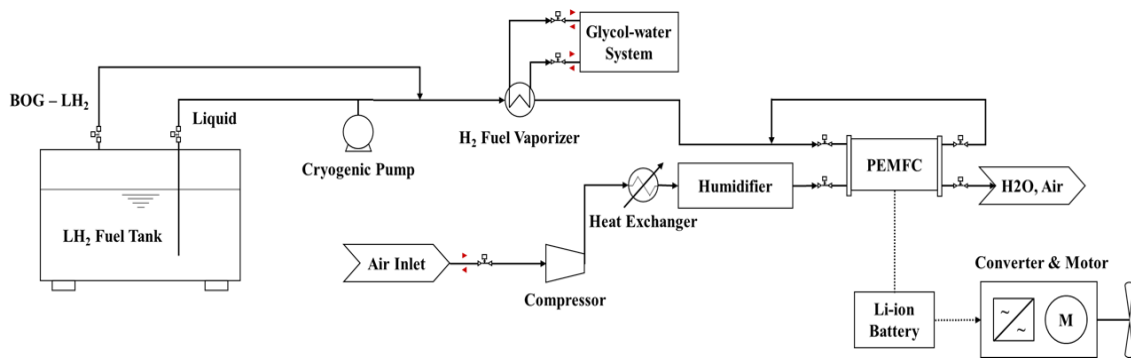


그림 9 액화수소 연료공급시스템 공정 흐름도 (주기관 : 수소연료전지)

부 모두 적용이 가능하도록 설계 되었으며, 시스템 사이즈, 용량의 비례적 확장이 가능하여 선박 선종을 포함한 선박 크기, 수소 공급 유형에 따라 유동적으로 적용 가능한 것이 특징으로 알려졌다. 언론매체를 통해 공개된 해당 시스템은 외관상 그림 10과 같이 기존의 LNG 연료공급시스템과 유사하게 연료 탱크와 인접한 위치에 공급시스템이 박스 형태로 패키징 되어 있는 것을 확인할 수 있다.

현재까지 유일한 MAN Cryo社의 선박용 액화수소 연료공급시스템의 상세 구성에 대한 정보를 얻기는 불가능하나, 시스템적으로는 그림 11의 공정흐름과 유사할 것으로 판단된다.



그림 10 연료탱크 패키지 형태의 MAN Cryo社 액화수소 연료공급시스템(위) 및 LNG 연료공급시스템(아래, 현대중공업)

## 2.4 액화수소 안전성

선박에 액화수소 관련 주요 시스템을 적용하기 위해서는 안전성에 대한 문제가 우선적으로 해결되어야 한다. 지금까지 수소는 주로 연료나 공업의 원료로 사용되어 왔고, 이에 따른 재해경험이 상당히 축적되어 있다. 수소의 화재 폭발은 누출이나 충격에 의해 발화하여 폭발하게 되고, 다른 재해와 비교하여 위험성이 높다는 특성을 알 수 있다.

아래의 표 5와 같이 수소의 연소특성을 다른 연료와 비교하여 살펴보면, 수소는 메탄이나 프로판에 비해 단위질량 당 발열량이 상당히 높고 연소에 필요한 이론공기량은 메탄에 비해 1/4, 프로판에 비해 1/10 수준으로 상당히 적다. 이외에도 메탄과 프로판에 비해 연소속도가 약 8배인 점, 착화에너지가 약 1/15인 점에 따라 수소는 상당히 높은 수준의 연소특성을 갖는다는 것을 알 수 있고, 그에 따라 연소한계 범위 역시 4~75 %로 상대적으로 넓다.

표 5 수소, 메탄, 프로판의 연소특성 비교

| 연소특성   | 수소     | 메탄    | 프로판   |
|--|--------|-------|-------|
| 저위발열량(MJ/kg)                                   | 119.93 | 50.01 | 46.35 |
| 이론공기량 (Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup> -fuel) | 2.38   | 9.55  | 23.87 |
| 연소하한한계(vol%)                                   | 4.0    | 5.0   | 2.1   |
| 연소상한한계(vol%)                                   | 75.0   | 15.0  | 9.5   |
| 연소속도(cm/s)                                     | 291    | 37    | 43    |
| 착화에너지(10 <sup>-5</sup> J)                      | 2      | 33    | 30    |

이와 같은 수소의 연소특성은 제트화재, 폭발, 폭굉 등의 원인이 된다. 결론적으로 수소의 폭굉 범위는 메탄, 프로판과 비교하여 상당히 광범위하고, 그에 반해 착화 에너지는 상당히 작음에 따라 액화수소의 폭발은 폭굉에 도달할 가능성이 상당하며 그만큼 위험하다는 것을 알 수 있다.

이러한 특성과 함께 지금까지도 액화수소를 저장하기 위한 저장탱크를 탑재한 차량이나 구조물에 대하여 충돌에 의한 폭발이 큰 사고로 이어지지 않을까 하는 걱정의 눈초리를 끊임 없이 받고 있다. 이에 대응하기 위하여 국내외에서는 범국가적으로 액화 수소 저장 및 설비에 대한 안전성 평가 기술 개발을 위한 시도를 다양하고 광범위하게 수행해왔다. 세계적으로도 아직 개발단계인 수소연료전지 선박에 적용하기 위한 대용량의 저장 및 공급시스템에 대한 평가 실적은 전무한 상황이지만, 수소 자동차의 저장 시스템에 대한 안전성 평가에 대해서는 이미 다수의 연구가 수행되었고, 양질의 연구결과가 도출되었다. 본 절에서는 이 중 액화수소 연료선박의 안전성과 연계시킬 수 있는 대표적인 안전성 평가 기술에 대해 국내, 외로 나누어 아래에 간략히 소개·고찰한다.

### 2.4.1 해외 액화수소 안전성 연구 사례 고찰

국외에서도 가장 대표적인 독일 자동차 산업계에서는 BMW社를 필두로 액화수소를 연료로 하는 (내연기관) 수소 자동차 실용화 프로젝트를 수행한 바 있으며, 다임러-크라이슬러社는 액화수소 탱크 탑재형 연료전지 자동차 개발을 진행하고 있다. 아래에서는 해당 액화수소 연료 자동차 개발과 관련하여 수행된 안전성 시험에 대해 살펴보고자 한다.

안전성 시험은 그림 11에 도시된 시험항목들을 바탕으로 수행되었다. 가속시험, 진동시험, 진공 증 파괴에 의한 압력 파괴시험, 충돌 변형 시험, 탱크 관통시험, 화재 폭로시험으로 구성된 시험과정을 통해 폭발로 인한 급격한 에너지 방출에 대해 조사하는 등 안전성 검토를 수행하였다. 해당 연구에서 안전밸브의 정상작동으로 탱크 내부의 액체수소가 기화하여 서서히 외부로 방출됨을 확인하였다. 또한, 안전밸브가 폐쇄되어 탱크가 파손됨으로써 결함이 발생한 경우, 관통 시험에 의해 탱크에 구멍이 뚫리는 등의 극심한 경우에 대해서도 탱크 외부에서 폭발을 일으키지 않고 수소가 완전히 배출될 때까지 연소될 뿐이라고 보고하고 있다.

이외에도 액화수소를 탑재한 수소 자동차의 터널내부 주행 도중의 사고를 가정하여, 터널 주행 시의 안전성 검토 또한 수행하였다. 해당 안전성 평가에서는 수소의 방출속도, 착화 위치, 연소의 거동, 화재 전이속도, 발생압력과 분포, 화재온

도 분포 등에 대해 시뮬레이션 및 실험을 진행하였으며, 휘발 유와의 비교를 통해 수소가 화재 및 이로 인한 피해 측면에서 휘발유보다 상대적으로 안전하다고 보고하고 있다.

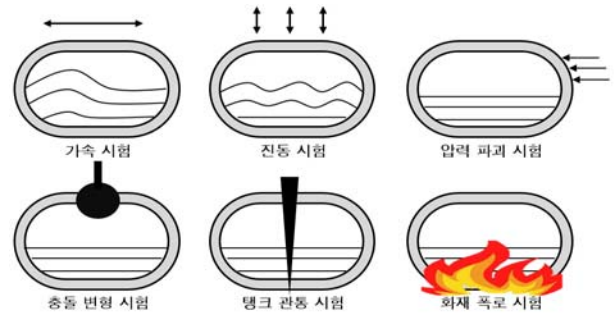


그림 11 차량탑재용 액화수소 저장탱크의 안전성 검토에 필요한 패턴의 개요

### 2.4.2 국내 액화수소 안전성 연구 사례 고찰

국내에서는 수소차량에 대한 안전성 평가기술 개발을 위해 교통안전공단, 현대자동차 등 5개 기관이 공동 참여하여 총 사업비 244억 원을 투입, ‘수소 연료전지 자동차 안전성 평가기술 개발’을 수행한 바 있다.

해당 사업에서 개발된 주요 평가기술 프로세스에 따르면, 먼저 아래 그림 12와 같이 연료공급시스템에 대한 고정성 시험을 수행하는데, 이는 연료탱크의 고정상태, 연료누출 상태 등을 확인하기 위함이며, 시험 전·후 30분 이상의 압력 변화량을 체크하여 수소의 유출여부 확인, 연료저장 및 공급장치 고정부 파단 등의 파손유무 확인을 순차적으로 수행한다.

다음으로, 수소 자동차의 충돌에 대한 안전성을 평가하기 위하여 그림 13의 실제 운행되는 차량을 대상으로 액체헬륨 (1차), 액화수소 (2차)가 각각 충전된 (30 bar) 탱크를 탑재한 후 전면부·후면부 충돌 테스트를 수행하였다. 해당 테스트의 결과로 충돌 후 액화수소 탱크 내부 압력이 충돌 전과 동일하며, 차량에 장착된 센서에서도 수소 누출이 감지되지 않는 등 액화수소 탱크의 충돌 안전성을 확인하였다.

이외에도, 액화수소 저장탱크 사용압력 (700 bar) 상태에서 화재 시 발생할 수 있는 위험 상황을 고려한 시험 결과, 시스템 및 탱크에서 국부화재가 발생했음에도 불구하고 탱크가 파열되지 않고 작동이 정상적으로 되는 것을 확인하였으며, 차량 기반시설 (충전소)에 대해 수소 누설 시의 안전성 평가, 실차 화재시험 등을 수행하였다. 전술한 시험 과정들은 수소 안전성 평가의 기본 토대로서 차량뿐만 아니라 일부 선박 안전성 평가에도 활용될 수 있을 것으로 사료된다.





그림 12 연료공급시스템 고정성 시험



그림 13 수소 연료전지 자동차 충돌시험 - 70% 부분 후방추돌 시험(위) 및 40% 부분 정면충돌 시험(아래)

## 5. 결론

본 특집기사에서는 수소 연료를 선박에 적용하기 위해 필요한 기술을 액화수소 저장 및 공급의 관점에서 서술하였다. 액화수소를 저장하기 위해 필요한 단열 기술에 대해 정의하고 선박 탑재 액화수소 저장·공급 기술의 해외 프로젝트 사례를 기술적으로 분석하였으며 자동차에 탑재되는 액화수소 저장 탱크의 안전성 성능평가 절차에 대해 소개하였다.

기술적 분석에서 확인하였듯이 액화수소 저장·공급 기술은 별개의 독립적인 기술이 아니라 LNG 저장·공급 기술과 상당한 연계성을 갖고 있기 때문에 LNG 운반선, 추진선에 대한 세계적인 기술력을 보유한 우리나라가 빠른 시일로 충분한 경쟁력을 확보할 수 있는 분야이다. 선박에 적용하는 대형 액화수소 저장 기술의 경우 아직 완성품도 없을뿐더러 전 세계적으로 합의된 기술이 없기 때문에 현재 해외 선진국은 수소 선박 분야의 연구 개발에 대한 아낌없는 투자와 지원을 진행하고 있다. 해당 분야를 기술적으로 선점한다면 향후 온실가스 저감을 위한 규제가 강제된 후 기술을 선도하고 관련 시장에서의 국내 조선산업의 경쟁력 제고에 기여 가능하다. 나아가 선박용 액화수소 저장 및 공급 시장은 물론 장기적으로 수소 경제 구축과 관련된 에너지 산업에의 파급효과 또한 기대할 수 있으리라 판단된다.

## 참고 문헌

- 한국과학기술연구원 (2016) 기술융합형 액화물질 저장용기 기술개발 최종보고서, 미래창조과학부 신기술융합형성장동력 사업 (과제번호 : 2014M3C1A8048823)
- Petitpas, G., Aceves, S. M. (2018) Liquid hydrogen pump performance and durability testing through repeated cryogenic vessel filling to 700 bar, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (39), 18403 -18420.
- Stroman, R. O., Schuette, M. W., Swider-Lyons, K., Rodgers, J. A., Edwards, D. J. (2014) Liquid hydrogen fuel system design and demonstration in small long endurance air vehicle, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (21), 11279 -11290.
- Sullivan, R. M., Palko, J. L., Tornabene, R. T., Bednarczyk, B. A., Powers, L. M., Mital, S. K., Smith, L. M., Wang, X-Y. J., Hunter, J. E. (2006). Engineering analysis studies for preliminary design of lightweight cryogenic hydrogen tanks in UAV applications, *NASA/TP-2006-214094*.
- Godula-Jopek, A., Jehle, W. and Wellnitz, J., 2012. Hydrogen storage technologies: new materials, transport, and infrastructure. John Wiley & Sons.
- Abe, A.N.I.T., Nakamura, M., Sato, I., Uetani, H. and Fujitani, T., 1998. Studies of the large-scale sea transportation of liquid hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(2), pp.115-121.

Kamiya, S., Onishi, K., Konshima, N., & Nishigaki, K. (2000). Thermal test of the insulation structure for LH2 tank by using the large experimental apparatus, *Cryogenics*, 40(11), 737–748.

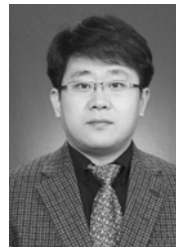
Yamashita, S., Shingo, M., Unno, S., Imai, T., Sugawa, S., (2016) Development of Hydrogen Liquefaction and Storage System, *Journal of Japan Society of Energy and Resources*, 37(4), 1–8.

이십일세기 프론티어 수소에너지 기술개발 사업단 (2005) 수소에너지, 도서출판 아진

Pehr, K. (1996) Experimental examinations on the worst case behaviour of LH2/LNG tanks for passenger cars, *Proceeding of the 11th World Hydrogen Conference*, Stuttgart, Germany, 23–28 June, 2169–2186.

Swain, M. R. (2000) Fuel Leak Simulation, *Proceedings of 2000 DOE H2 Program*.

김광일, 용기중, 김용원 (2013) Review of Rule-making Activities on Hydrogen Fuel Cell Vehicle, *한국자동차공학회 오토저널*, 35(4), 24–31.



**이 제 명**

- 1969년생
- 1999년 동경대학 선박해양공학과 박사졸업
- 현 재 : 부산대학교 조선해양공학과 교수
- 관심분야 : 연속체 손상역학, 선박구조역학, 구조건전성 평가, 극저온소재 기술
- 연락처 : 051-510-2342
- E-mail : jaemlee@pusan.ac.kr



**김 슬 기**

- 1986년생
- 2016년 부산대학교 조선해양공학과 박사졸업
- 현 재 : 부산대학교 극저온소재연구소 연구교수
- 관심분야 : 구조건전성 평가, 극저온소재 기술
- 연락처 : 051-510-3986
- E-mail : kfreek@pusan.ac.kr



**김 정 현**

- 1986년생
- 2016년 부산대학교 조선해양공학과 박사졸업
- 현 재 : 부산대학교 BK21+사업단 연구교수
- 관심분야 : 구조건전성 평가, 극저온소재 기술
- 연락처 : 051-510-3986
- E-mail : honeybee@pusan.ac.kr



**김 명 성**

- 1988년생
- 2016년 부산대학교 조선해양공학과 석사졸업
- 현 재 : 부산대학교 조선해양공학과 박사과정
- 관심분야 : 구조건전성 평가, 극저온소재 기술
- 연락처 : 051-510-7746
- E-mail : dover@pusan.ac.kr



**김 태 욱**

- 1992년생
- 2019년 부산대학교 조선해양공학과 박사졸업
- 현 재 : 부산대학교 BK21+사업단 연구원
- 관심분야 : 구조건전성 평가, 극저온소재 기술
- 연락처 : 051-510-7746
- E-mail : kty2345@pusan.ac.kr