

# 액체수소 저장 탱크의 중력 방향 및 수소 충전율이 BOG에 미치는 영향에 관한 수치적 연구

서영민 · 노현우 · 하동우 · 구태형 · 고락길<sup>†</sup>

한국전기연구원 전기모빌리티연구단 수소전기연구팀

## Numerical Study on the Effects of Gravity Direction and Hydrogen Filling Rate on BOG in the Liquefied Hydrogen Storage Tank

YOUNG MIN SEO, HYUN WOO NOH, DONG WOO HA, TAE HYUNG KOO, ROCK KIL KO<sup>†</sup>

Hydrogen Electric Research Team, Electric Mobility Research Division, Korea Electrotechnology Research Institute, 12 Jeongjui-gil, Seongsan-gu, Changwon 51543, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
rkko@keri.re.kr

Received 7 July, 2023  
Revised 3 August, 2023  
Accepted 7 August, 2023

**Abstract >>** In this study, a numerical simulations were conducted to analyze the phase change behavior of a liquid hydrogen storage container. The effects of gravity direction and hydrogen filling rate on boil-off gas (BOG) in the storage container were investigated. The study employed the volume of fluid, which is the phase change analysis model provided by ANSYS Fluent (ANSYS, Canonsburg, PA, USA), to investigate the sloshing phenomenon inside the liquefied hydrogen fuel tank. Considering the transient analysis time, two-dimensional simulation were carried out to examine the characteristics of the flow and thermal fields. The results indicated that the thermal flow characteristics and BOG phenomena inside the two-dimensional liquefied hydrogen storage container were significantly influenced by changes in gravity direction and hydrogen filling rate.

**Key words :** Numerical simulation(수치해석), Multi-phase flow(다상유동), Liquid hydrogen(액체수소), Gravity direction(중력 방향), Hydrogen filling rate(수소 충전율)

## 1. 서론

최근 수소 전기차 및 수소 연료전지 등에 활용되는 수소 에너지에 대한 관심이 증가하고 있다. 생산된 수소를 바탕으로 수소 경제의 실용화를 위해서는 수소의 안전하고 효율적인 운송과 저장, 충전소 등을

통한 공급 등이 필요하다. 이러한 실용화 기술 중 수소 저장 기술은 운송뿐만 아니라 충전과도 밀접하게 연계되어 있다. 수소는 에너지 밀도가 매우 작아 단위 무게당 에너지 비율이 크다. 따라서 연료로 사용되기 위해 대량의 수소가 필요하므로 수소 저장에 대한 기술적 어려움을 극복하기 위하여 많은 연구가

진행되었다<sup>1-7)</sup>.

수소에너지 활용의 증가와 함께 액체수소의 이용 범위도 넓어지고 있다. 액체수소는 대표적인 적용 분야로 잘 알려진 로켓의 연료뿐만 아니라 선박 연료, 드론, 친환경 항공기, 수소 연료전지차 등 많은 분야에서 활용이 가능하다. 따라서 높은 밀도와 빠른 충전 시간, 높은 안정성을 나타내는 액체수소를 연료전지차 및 트레일러 등에 적용하기 위해 수송 효율을 높일 수 있는 액체수소 탱크 연구가 최근까지 활발히 진행되고 있다<sup>8-12)</sup>.

극저온 상태에서 보관되는 액체수소는 기체수소보다 저장 밀도가 높으나 초저온 환경으로 인하여 증발가스(boil-off gas, BOG)의 발생 및 가압 등을 방지할 수 있는 액체수소 저장 탱크의 제작이 필요하다. BOG에 기여하는 요인으로는 외부 열전달, 슬로싱으로 인한 국부 압력 변화, 선적 및 하역 등에 따른 상태 변화, 출입구 영역에서의 열전달, 저장 탱크 외부의 압력 및 온도 환경 변화 등이 있다. 특히 외부 열로 인한 극저온 저장 탱크의 BOG 배출은 잠재적인 경제적 손실로 이어지며, 효율적인 초저온 저장 탱크의 설계를 위해서는 액체수소의 정확한 BOG 값을 예측하는 것이 매우 중요하다<sup>13-16)</sup>.

Wei와 Zhang<sup>17)</sup>은 슬로싱 모델과 상변화 모델을 결합하여 액체수소 저장 탱크의 슬로싱 조건에 따른 충전 과정을 수치적으로 모사 및 분석하였고, 시뮬레이션 결과 슬로싱이 임계값을 초과하면 저장 탱크의 내부 압력 곡선이 크게 증가하였으며, 충전 과정에서 다양한 영향을 끼침을 보고하였다. Kang 등<sup>18)</sup>은 상온 및 대기압 조건에서 차량용 액체 수소 탱크의 초기 충전 과정을 수치적으로 조사하였다. 체적, 압력, 질량 유량 및 온도의 변화를 분석하기 위해 상변화 모델을 사용한 과도 열유체 시뮬레이션이 수행되었으며, 각 단계에 따라 저장 용기 내부에서 생성되는 액체수소의 복잡한 벽면 와류, 정체, 불균일한 냉각 등을 고찰하였다.

Lee 등<sup>19)</sup>은 슬로싱 가진 상태의 액체수소 탱크 내 열교환 및 BOG 경향을 예측하기 위한 수치 해석을 수행하였다. 액체수소와 기체수소가 포화 상태인 다

상 열유동 영역과 슬로싱 가진 유무에 따른 액체수소로의 열유입을 고려하여 충전율별 열유속량과 BOG를 논의하였다. Jeon 등<sup>20)</sup>은 초저온 액체수소 탱크에서 단일 시스템의 열전달 및 다상 열유동의 위상 변화에 대한 다중 물리 computational fluid dynamics (CFD) 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 시뮬레이션에서 상변화 모델을 사용한 고충실도 CFD 계산이 극저온 액체의 기화를 정확하게 예측하고 실제 BOG 양을 기반으로 정확한 boil-off rate 값을 계산할 수 있다는 결론을 도출하였다.

최근 컴퓨터의 발달로 전산 해석 시뮬레이션을 통한 수소 저장 시스템의 내부에서 발생하는 다양한 현상에 관한 연구들도 발표되고 있다. 기존 연구에 따르면, 액체수소의 용도(선박이나 차량) 및 운전 방식에 따라 적절한 하중을 추가적으로 고려해야 하며, 잦은 재충전이나 내부 유체 파동에 의한 피로 유발 하중, 온도 차이 유발 열적 하중 등이 복합적으로 함께 고려되어야 한다. 하지만 액체수소 저장 탱크의 중력 방향 및 수소 충전율이 BOG에 미치는 영향에 관한 수치적 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 중력 방향 및 수소 충전율이 포화 상태로 존재하는 액체수소 저장 탱크 내부의 BOG에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

## 2. 수치 해석 기법

액체수소 저장 탱크의 냉각에 의한 자체적인 가압 과정과 감압 과정은 비정상 과정이므로 CFD 시뮬레이션에서 과도 방법(transient method)을 채택해야 한다. 본 연구에서 사용된 지배 방정식인 연속 방정식, 운동량 방정식 및 에너지 보존 방정식은 2차원으로 가정하였으며, 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) \\ = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{eff} (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)) + \vec{\rho} g + \vec{F}_{vol} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (3)$$

여기서  $S_h (= S_m h_{lg})$ 는 에너지 소스 항이며,  $S_m$ 은 질량 소스 항,  $h_{lg}$ 는 증발 잠열이다.

기체는 압축성 유체로 취급하고, 이상기체 모델을 기체 상태 방정식에 적용한다. 액체는 비압축성 유체로 간주되며, 밀도는 온도의 함수이다. 밀도와 온도 사이의 관계는 Boussinesq 근사의 선형 방정식을 충족한다.  $\beta$ 는  $T_o$ 에서의 열팽창 계수를 의미한다.

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_o)] \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (5)$$

Volume of fluid (VOF)는 다상 흐름에 대한 인터페이스 추적 방법으로, 위상 분율을 사용하여 유한한 부피에서 모든 위상의 비율을 나타낸다. 모든 메시에 대해 각 위상의 위상 분율의 합은 1과 같아야 한다. CFD의 과도 알고리즘에서 다음 시간 단계의 위상 분율 필드를 먼저 계산한 다음 계산된 위상 분율을 사용하여 미리 설정된 값을 충족할 때까지 반복하여 운동량 예측 방정식과 압력-포아송 방정식을 업데이트한다. 위상 분율 필드는 식 (6)에 의해 결정된다.

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}) \right] = S_m \quad (6)$$

여기서  $\alpha_q$ 는 1차 위상의 위상 비율이며,  $S_m$ 은 각 단계에 대해 상수 또는 사용자 정의 질량 소스 항을 의미하고, 그 값은 0이다.

위상 분율 개념을 기반으로 특정 메시의 물리적 특성은 식 (7)에 의해 결정된다.

$$\phi = \alpha_g \phi_g + \alpha_l \phi_l \quad (7)$$

여기서  $\phi$ 는 밀도, 점도, 열전도도 등과 같은 유체의 물리적 특성을 나타낸다. 아래 첨자  $g$  및  $l$ 은 각각 기체상 및 액체상을 나타낸다.

위상 인터페이스의 표면 장력은 연속 표면력(con-

tinuum surface force, CSF) 모델로 설명되며, 다음과 같이 표현되어 운동량 방정식의 체적 힘에 추가된다. 여기서  $k$ 는 인터페이스의 곡률을 의미한다.

$$\vec{F}_{vol} = \alpha_{lv} \frac{\rho_l \alpha_l k_g \nabla \alpha_g + \rho_g \alpha_g k_l \nabla \alpha_l}{(\rho_l + \rho_g)/2}, \quad k = \nabla \cdot \left( \frac{\nabla \alpha_l}{|\nabla \alpha_l|} \right) \quad (8)$$

위상 분율 및 압력-속도 방정식을 풀기 위해서는 질량 소스 항과 관련된 상변화 모델이 필요하다. 본 연구에서는 극저온 상변화 공정에 적합한 것으로 알려져 있는 Lee 모델을 선택하였다. Lee 모델은 식 (9)와 같이 고려된다.

$$\begin{cases} \dot{m}_e = \beta_e \alpha_l \rho_l (T - T_{sat}) / T_{sat}, & T > T_{sat} \\ \dot{m}_c = \beta_c \alpha_g \rho_g (T_{sat} - T) / T_{sat}, & T \leq T_{sat} \end{cases} \quad (9)$$

여기서  $\beta_e$ 와  $\beta_c$ 는 식 (10)에 의해 계산되는 완화 계수를 의미하며, 아래 첨자  $e$ 와  $c$ 는 각각 증발 및 응축 과정을 나타낸다.  $\gamma_e$ 와  $\gamma_c$ 는 증발 및 응축 계수이고,  $D_{sm}$ 은 Sauter 평균 직경을 의미한다.

$$\begin{cases} \beta_c = \frac{6}{D_{sm}} \frac{2\gamma_c}{2-\gamma_c} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_{sat}}} \frac{h_{lg} \rho_l}{\rho_l - \rho_g} \\ \beta_e = \frac{6}{D_{sm}} \frac{2\gamma_e}{2-\gamma_e} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_{sat}}} \frac{h_{lg} \rho_g}{\rho_l - \rho_g} \end{cases} \quad (10)$$

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 계산 영역 및 격자를 보여 준다. 저장 용기의 길이는 6,000 mm이며, 용기의 원형 반경은 1,000 mm이다. 본 연구에서는 기체 수소와 액체수소가 함께 공존하는 포화 상태로 가정하였으며, 수직 중심선을 따라 회전시켜 중력 방향의 변화를 고려하였다. 액체수소 저장 탱크 벽면의 속도 경계 조건은 점착 조건이며, 온도 경계 조건은 단열 조건으로 설정하였다. 중력 가속도는  $y$ 축의 아래 방향(90°)으로 고려하였다. 본 연구에서 고려한 주요 파라미터는 중력 방향과 수소 충전율이다. 중력 방향 (gravity direction, GD)은 85°, 80°, 및 75°로 고려하였으며, 수소 충전율(filling rate, FR)은 25%, 50% 및 75%로 각각 고려하였다.

본 연구에서는 약 20 mm의 균일한 사이즈의 격자

를 활용하였으며, 해당 사각 격자는 격자 의존성 테스트를 활용하여 도출되었다. 또한 벽면에서 발생하는 온도 및 속도 구배 계산의 정확성을 높이기 위해 저장 탱크 주위에 격자를 조밀하게 배치하였다.

본 연구에서 사용된 수치 해석 기법의 타당성을 검증하기 위하여 Grotle과 Aesoy<sup>21)</sup>가 연구한 액화 천연가스 연료 탱크의 슬로싱 유체 실험 결과와 비교 분석하였다. 실험 결과와 수치 시뮬레이션 간의 비교는 측정된 압력을 기반으로 이루어졌다. Fig. 2와 같이 시간이 지나면서 슬로싱 현상에 따라 탱크 압력이 감소하는 것을 알 수 있으며, 압력 강하량이 오차 범위 내에서 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 본

연구에서 고려한 슬로싱 액화 수소의 열역학적 성능에 대해 합리적인 정확도로 해석이 가능하다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 체적 분율 및 속도장 비교

Fig. 3은 GD가 75°이고 FR이 50%인 경우 액체수소 체적 분율 분포의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 수평 계면의 초기 조건에서 시간이 증가함에 따라 GD에 의해 슬로싱 현상이 발생하며, 기체 및 액체 사이의 계면이 일정한 각도를 형성하는 것을 알 수 있다. 또한 약 6초 이후 액체수소 저장 탱크 왼쪽 하단부에서 BOG가 발생하기 시작하여 전반적으로 저장 탱크 양쪽 부분에서 생성되는 것을 알 수 있다. 이는 GD에 의해 내부 압력 및 속도 분포가 영향을 받아 시간에 따른 BOG 생성에 영향을 끼치기 때문이다.

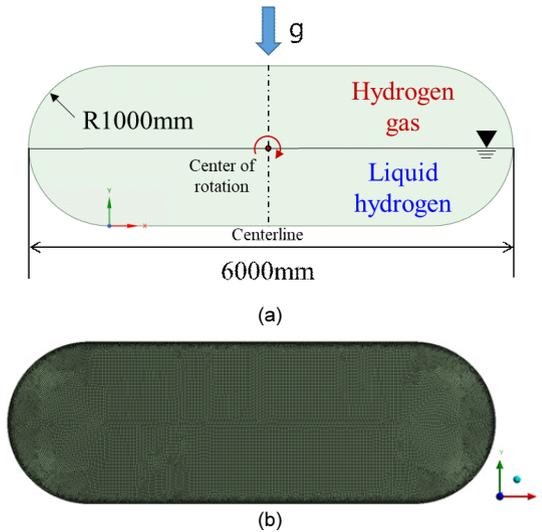


Fig. 1. (a) Computational domain and (b) meshed model

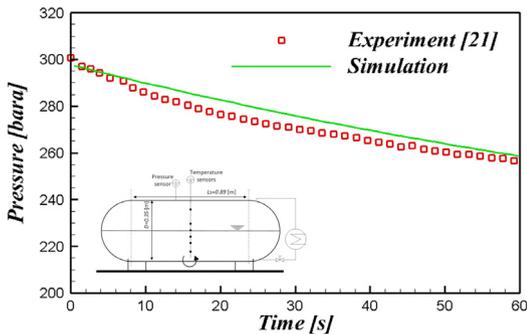


Fig. 2. Model experimental validation

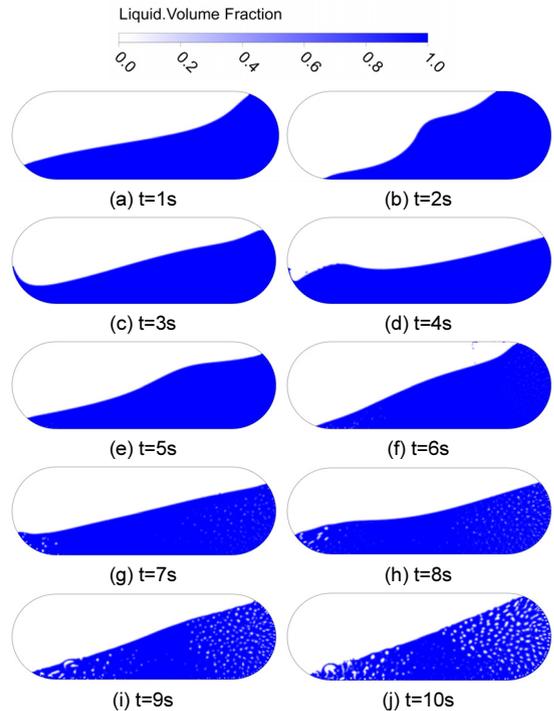


Fig. 3. Time evolution of volume fraction distribution of the liquefied hydrogen storage tank at GD=75° and FR=50%

Fig. 4는 GD가 75°이고 FR이 50%인 경우 속도 분포의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 이를 보면 시간이 증가함에 따라 GD에 의해 내부 와류의 생성이 영향을 받게 되는 것을 알 수 있다. 또한 시간이 증가함에 따라 상대적으로 빠른 기체의 유속이 감소하며, 계면의 변화에 따른 유동 분포의 영향이 BOG 생성에 영향을 끼치게 된다. 그리고 6-7초에서 액체수소 입자들이 기체수소 영역으로 확산되어 열교환이 증가함을 알 수 있다. 이와 같이 시간에 따른 액체수소 탱크 내부 BOG 생성 결과에 따라 GD 및 FR에 따른 영향을 분석하였다.

### 3.2 중력 방향 및 충전율 효과 비교

Fig. 5는 다양한 GD 및 FR에 대한 저장 탱크 내부의 액체수소 체적 분율 분포를 나타내며, 이를 보면 GD와 FR에 따라 BOG 발생의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 전체적으로 GD의 각도가 감소할수록

BOG의 발생량은 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 GD에 따른 슬로싱 현상이 액체수소로 유입되는 열유속을 증가시키며, 이러한 현상에 따라 열교환이 크게 발생하여 BOG 발생에 큰 영향을 끼치기 때문이다. 또한 액체수소의 FR이 50%일 때 BOG가 가장 많이 발생하는데, 이는 FR의 양이 BOG 발생에 큰 영향을 끼침을 의미한다. 이러한 특징은 Fig. 6의 속도 분포에서도 알 수 있는데, GD 및 FR에 따라 내부 와류의 생성 및 유동 분포가 큰 영향을 받게 되는 것을 알 수 있다. 따라서 액체수소 저장 탱크 설계 시 중력 가속도 방향과 충전율에 대한 영향을 고려해야 될 것으로 판단된다.

### 3.3 압력 분포 및 BOG 체적 분율 비교

Fig. 7은 FR 및 GD에 대한 액체수소 저장 탱크 수직 중심선을 따라 발생하는 압력 분포를 보여 준다.

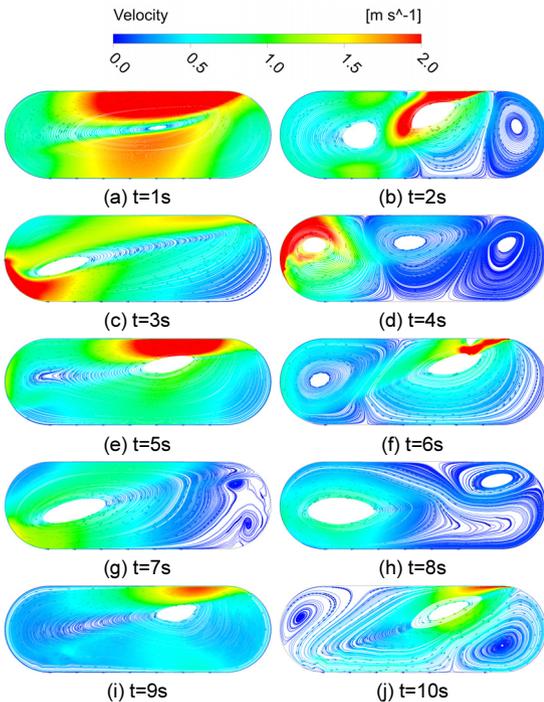


Fig. 4. Time evolution of velocity distribution of the liquefied hydrogen storage tank at GD=75° and FR=50%

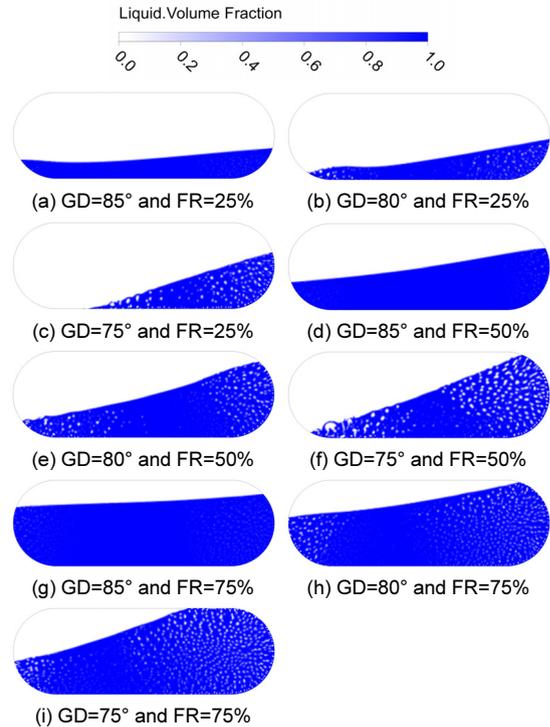


Fig. 5. Volume fraction distribution of the liquefied hydrogen storage tank at different GD and FR

수소는 끓는점이 낮고 체적당 증발 잠열이 작기 때문에 증발하기 매우 쉽다. 이러한 이유로 GD의 각도가 감소할수록 내부 압력이 증가하며, FR에 따라 최솟값의 위치가 달라지는 것을 알 수 있다. 가장 큰 압력 강하량은 BOG 발생량이 가장 많은 조건인 FR=50%에서 나타난다. 압력은 높이가 증가할수록 액체수소가 존재하는 하단부에서 계면까지 감소하며, 계면부터 기체수소가 존재하는 상단부까지 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 GD 및 FR이 BOG 발생에 큰 영향을 끼치며, BOG 발생에 따라 액체수소 저장 탱크 내부 압력 분포 및 압력 강하량이 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

Fig. 8은 다양한 GD 및 FR에 따른 액체수소 저장 용기 탱크 내부의 BOG에 대한 액체수소 체적 분율 및 변화량을 보여 준다. 이는 기존 초기 조건의 FR에 대비하여 액체수소 체적 분율이 작을수록 BOG 발생량이 증가함을 의미한다. 전체적으로 액체수소 저장 탱크의 FR에 따라 액체수소 체적 분율은 증가하며,

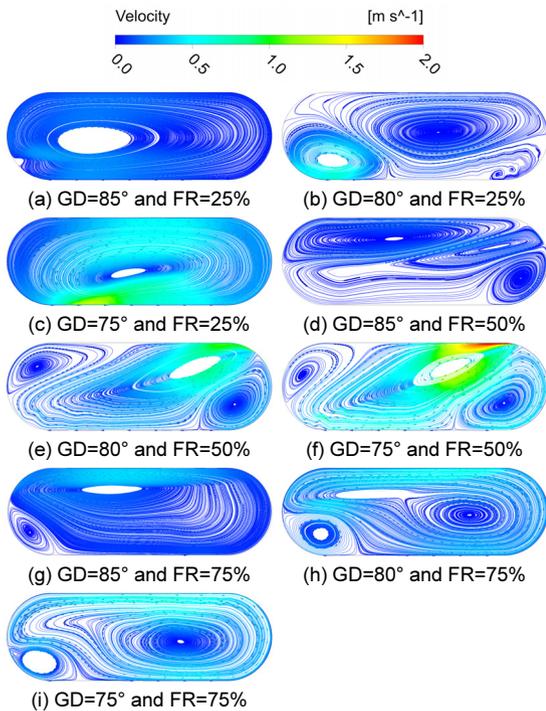


Fig. 6. Velocity distribution of the liquefied hydrogen storage tank at different GD and FR

GD의 각도가 감소할수록 액체수소 체적 분율은 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 액체수소 체적 변화량에서도 나타난다. GD의 각도가 감소할수록 액체수소 체적 분율 변화량이 감소하며, BOG 발생량이 증가한다. 또한 각 GD에서의 FR에 따라 액체수소 체적 분율 변화량의 경향이 달라짐을 알 수 있다. 결과적으로, 액체수소 저장 탱크의 GD 및 FR

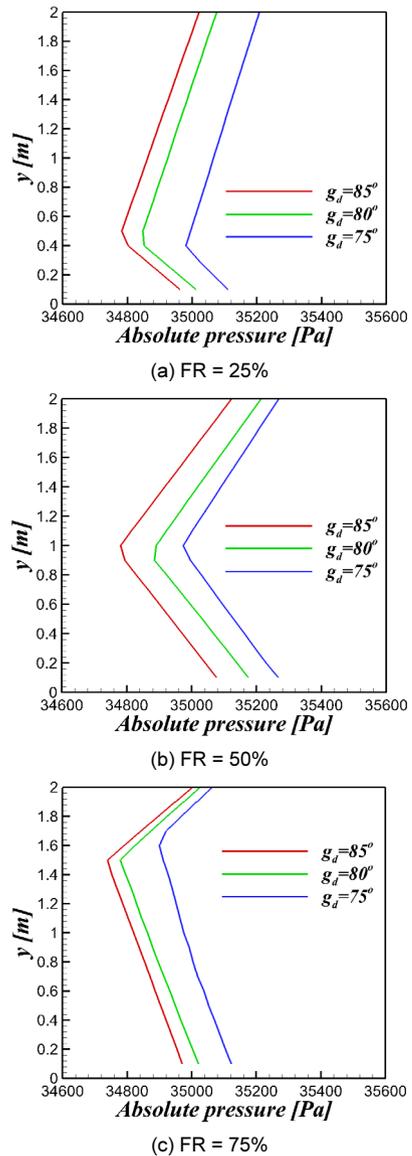


Fig. 7. Absolute pressure distribution at centerline of the liquefied hydrogen storage tank

에 따라 BOG 발생량이 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 액체수소 저장 탱크 설계 시 중력 가속도 방향과 충전율에 대한 영향을 고려하는 것이 중요하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 액체수소 저장 탱크의 상변화 거동을 분석하기 위하여 CFD 해석을 수행하였다. 액체수소 저장 용기의 BOG에 대한 중력 방향과 수소 충전율의 영향을 분석하였다. 본 연구에서는 액체수소 연료 탱크 내부의 슬로싱 현상을 조사하기 위해 ANSYS Fluent (ANSYS, Canonsburg, PA, USA)에서 제공하는 상변화 해석 모델인 VOF 모델을 적용하였고, 과도 해석 시간을 고려하여 저장 용기 내부 열유동장 특성을 분석하기 위해 2차원 시뮬레이션을 수행하였다. 결과적으로, 액체수소 저장 탱크 내부의 열유동

특성과 BOG 현상은 GD와 수소 FR의 변화에 크게 영향을 받았다. 특히 GD의 각도가 감소할수록 액체수소 체적 분율 변화량이 감소하며, BOG 발생량이 증가하였다. 또한 각 GD에서 FR에 따라 액체수소 체적 분율 변화량의 경향이 달라짐을 알 수 있었다. 따라서 액체수소 저장 탱크 설계 시 중력 가속도 방향과 충전율 등에 대한 영향을 고려하는 것이 매우 중요하다.

#### 후 기

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(23A02081, 액체수소 운송을 위한 3,000 kg 용량 탱크 트레일러 개발 및 실증). 이 연구는 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본 사업임(No. 23A01043).

#### References

1. L. Zhao, Q. Zhao, J. Zhang, S. Zhang, G. He, M. Zhang, T. Su, X. Liang, C. Huang, and W. Yan, "Review on studies of the emptying process of compressed hydrogen tanks", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46, No. 43, 2021, pp. 22554-22573, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.101>.
2. M. He, C. Lv, L. Gong, J. Wu, W. Zhu, Y. Zhang, M. Zhang, W. Sun, and L. Sha, "The design and optimization of a cryogenic compressed hydrogen refueling process", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46, No. 57, 2021, pp. 29391-29399, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.061>.
3. F. Liu, Z. Sun, H. Bian, M. Ding, and X. Meng, "Identification and classification of the flow pattern of hydrogen-air-steam mixture gas under steam condensation", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 183, 2023, pp. 107854, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107854>.
4. J. Liu, S. Zheng, Z. Zhang, J. Zheng, and Y. Zhao, "Numerical study on the fast filling of on-bus gaseous hydrogen storage cylinder", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 45, No. 15, 2020, pp. 9241-9251, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.033>.

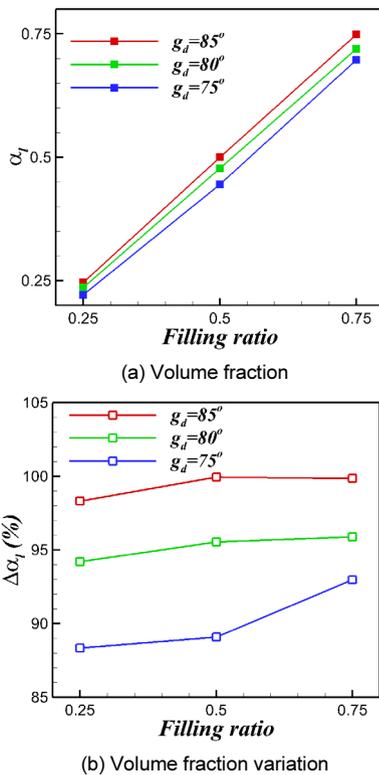


Fig. 8. Volume fraction and its variation for boil-off gas of the liquefied hydrogen storage tank at different GD and FR

5. S. J. Oh, J. H. Yoon, K. S. Jeon, and J. Choi “A numerical study on characteristics of heat transfer in hydrogen filling storage vessel by charging conditions”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 61, 2022, pp. 25679-25695, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.306>.
6. F. Ustolin, G. E. Scarponi, T. Iannaccone, V. Cozzani, and N. Paltrinieri, “Cryogenic hydrogen storage tanks exposed to fires: a CFD study”, *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 90, 2022, pp. 535-540, doi: <https://doi.org/10.3303/CET2290090>.
7. S. J. Oh, J. H. Yoon, K. S. Jeon, J. K. Kim, J. H. Park, and J. Choi, “A study on the characteristics of temperature distribution related to geometry of tube in hydrogen storage vessel”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 32, No. 4, 2021, pp. 205-211, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.4.205>.
8. P. Wang, L. Ji, J. Yuan, Z. An, K. Yan, and J. Zhang, “The influence of inner material with different average thermal conductivity on the performance of whole insulation system for liquid hydrogen on orbit storage”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 18, 2021, pp. 101931-10923, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.166>.
9. S. Z. S. Al Ghafri, A. Swanger, V. Jusko, A. Siahvashi, F. Perez, M. L. Johns, and E. F. May, “Modelling of liquid hydrogen boil-off”, *Energies*, Vol. 15, No. 3, 2022, pp. 1149, doi: <https://doi.org/10.3390/en15031149>.
10. Z. Liu, H. Pan, Y. Liu, and Y. Li, “Thermodynamic performance on the pressurized discharge process from a cryogenic fuel storage tank”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 24, 2022, pp. 12107-12118, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.237>.
11. H. Jung, D. Han, W. Yang, and Y. Baek, “A simulation study on the hydrogen liquefaction through compact GM refrigerator”, *Hydrogen and New Energy*, Vol. 33, No. 5, 2022, pp. 534-540, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.5.534>.
12. S. J. Oh, J. Y. Kwon, and J. H. Yoon, “A Study on the effect of evaporation of liquid hydrogen tank related to horizontal sinewave”, *Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 155-161, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.155>.
13. Z. Liu, Y. Feng, G. Lei, and Y. Li, “Fluid thermal stratification in a non-isothermal liquid hydrogen tank under sloshing excitation”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 50, 2018, pp. 22622-22635, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.113>.
14. Z. Liu, Y. Feng, G. Lei, and Y. Li, “Fluid sloshing dynamic performance in a liquid hydrogen tank”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 26, 2019, pp. 13885-13894, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.014>.
15. C. Wan, S. Zhu, C. Shi, S. Bao, X. Zhi, L. Qiu, and K. Wang, “Numerical simulation on pressure evolution process of liquid hydrogen storage tank with active cryogenic cooling”, *International Journal of Refrigeration 2023* (epub ahead of print), doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.01.012>.
16. Y. Jiang, Y. Yu, Z. Wang, S. Zhang, and J. Cao, “CFD simulation of heat transfer and phase change characteristics of the cryogenic liquid hydrogen tank under microgravity conditions”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, No. 19, 2023, pp. 7026-7037, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.006>.
17. G. Wei and J. Zhang, “Numerical study of the filling process of a liquid hydrogen storage tank under different sloshing conditions”, *Processes*, Vol. 8, No. 9, 2020, pp. 1020, doi: <https://doi.org/10.3390/pr8091020>.
18. D. Kang, S. Yun, B. Kim, J. Kim, G. Kim, H. Lee, and S. Choi, “Numerical investigation of the initial charging process of the liquid hydrogen tank for vehicles”, *Energies*, Vol. 16, No. 1, 2023, pp. 38, doi: <https://doi.org/10.3390/en16010038>.
19. J. H. Lee, S. Y. Hwang, S. J. Lee, and J. H. Lee, “Numerical study of heat flux and BOG in C-type liquefied hydrogen tank under sloshing excitation at the saturated state”, *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 35, No. 5, 2022, pp. 299-308, doi: <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2022.35.5.299>.
20. G. M. Jeon, J. C. Park, and S. Choi, “Multiphase-thermal simulation on BOG/BOR estimation due to phase change in cryogenic liquid storage tanks”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 184, 2021, pp. 116264, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116264>.
21. E. L. Grotle and V. Æsøy, “Dynamic modelling of the thermal response enhanced by sloshing in marine LNG fuel tanks”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 135, 2018, pp. 512-520, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.02.086>.