

포화상태에 놓인 C-Type 액체수소 탱크의 슬로싱이 열 유속과 BOG에 미치는 변화의 수치적 분석

이진호¹·황세윤²·이성제³·이장현^{4†}

¹인하대학교 조선해양공학과 석사과정, ²인하대학교 조선해양공학과 연구교수,
³인하대학교 조선해양공학과 박사과정, ⁴인하대학교 조선해양공학과 교수

Numerical Study of Heat Flux and BOG in C-Type Liquefied Hydrogen Tank under Sloshing Excitation at the Saturated State

Jin-Ho Lee¹, Se-Yun Hwang², Sung-Je Lee³ and Jang Hyun Lee^{4†}

¹Graduate Student, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

²Research Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

³Graduate Student, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

⁴Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

Abstract

This study was conducted to predict the tendency for heat exchange and boil-off gas (BOG) in a liquefied hydrogen tank under sloshing excitation. First, the fluid domain excited by sloshing was modeled using a multiphase-thermal flow domain in which liquid hydrogen and hydrogen gas are in the saturated state. Both the the volume of fluid (VOF) and Eulerian-based multi-phase flow methods were applied to validate the accuracy of the pressure prediction. Second, it was indirectly shown that the fluid velocity prediction could be accurate by comparing the free surface and impact pressure from the computational fluid dynamics with those from the experimental results. Thereafter, the heat ingress from the external convective heat flux was reflected on the outer surfaces of the hydrogen tank. Eulerian-based multiphase-heat flow analysis was performed for a two-dimensional Type-C cylindrical hydrogen tank under rotational sloshing motion, and an inflation technique was applied to transform the fluid domain into a computational grid model. The heat exchange and heat flux in the hydrogen liquid-gas mixture were calculated throughout the analysis, whereas the mass transfer and vaporization models were excluded to account for the pure heat exchange between the liquid and gas in the saturated state. In addition, forced convective heat transfer by sloshing on the inner wall of the tank was not reflected so that the heat exchange in the multiphase flow of liquid and gas could only be considered. Finally, the effect of sloshing on the amount of heat exchange between liquid and gas hydrogen was discussed. Considering the heat ingress into liquid hydrogen according to the presence/absence of a sloshing excitation, the amount of heat flux and BOG were discussed for each filling ratio.

Keywords : liquid hydrogen, sloshing, multiphase-thermal flow, heat flux, filling ratio (F/R), BOG (boil-off gas)

1. 서론

선박의 탄소화합물 배출을 줄이기 위한 방안의 하나로 수소 활용 선박의 필요성이 커지고 있다(Han *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2018; Mao *et al.*, 2021). 액체 수소는 기체 부피를 800배로 압축할 수 있는 장점이 있으나, 액체 수소의 열용량이 작기 때문에 외부 열 유속에 의해 BOG 손실과 탱크 내 압력 상승의 문제를 안고 있다(Adom *et al.*, 2010; Baker and Shaner, 1978; Jeon

et al., 2021; Syed *et al.*, 1998). 특히, 단열성능 뿐만 아니라 슬로싱 유동과 적재율이 BOG 발생에 미치는 영향도 화물창 설계의 성능 지표이다. BOG 예측을 위해서는 열전도(열확산) FEA 해석, 상변화를 포함한 열유동 CFD 해석, 그리고 상태 방정식 및 열 평형 기반의 해석적 방법이 적용될 수 있다. 열확산 방법은 탱크 외부에 열 유속(Heat flux) 경계 조건을 부여하는 전도 해석법이다. Hwang과 Lee(2016)는 다양한 복합 단열재 적용을 가진 NO96 LNG 화물창을 전도 열전달로 단순화하고

†Corresponding author:

Tel: +82-32-860-7345; E-mail: jh_lee@inha.ac.kr
Received June 28 2022; Revised September 16 2022;
Accepted September 30 2022

© 2022 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

열 유속 조건을 가정하여 화물창 내 온도구배 및 BOG 변화를 제시하였다. 이는 Nusselt Number를 이용하여 탱크 벽면에서 대류 열전달 계수를 계산하되 유동은 고려하지 않은 방법이다 (Alkhaledi *et al.*, 2021; Lin *et al.*, 2018). Alkhaledi 등(2021)은 Polyurethane foam과 알루미늄으로 이루어진 C-Type 액체 수소 탱크를 대상으로 슬로싱 유동을 대류 열전달 계수로 반영한 열전도 해석을 수행하여 열 유속을 예측하였다. 그리고 화물창 내 기체-액체 경계면 변화에 VOF 모델을 적용하고, 상태 방정식으로 상 변화 중 증발 현상을 고려한 CFD 해석 연구도 제시되었다(Saleem *et al.*, 2018; Zakaria *et al.*, 2013). 이는 CFD 해석으로부터 열 유입량을 구하고 에너지 평형 방정식과 질량 전달식을 이용하여 BOR을 추정하는 방법이다. Liu 등(2020)은 슬로싱에 놓인 소형 실린더형 액체산소 챔버를 대상으로 다상 열유동 CFD 해석을 수행하였다. 외부 대류 열전달 계수를 반영하고 액체-기체 경계면은 VOF 기법을, 입력-속도 연성은 PISO(Pressure implicit with splitting of operator) scheme, 그리고 부피를 변화는 PRESTO(Pressure staggering option) scheme으로 모사하였다. 해석결과로 액체-기체의 열 교환 및 BOG 발생량을 제시하였다. Wu과 Ju(2021)도 실린더형 Type-C 독립형 LNG 탱크에서 슬로싱에 의한 강제대류 현상을 반영하였으며, 증발 모델을 가진 CFD 해석을 통해 BOG을 평가하였다. 그러나, 다상 열유동 CFD 기법을 이용하여 화물창 내 유동과 BOG의 발생을 동시에 예측하기 위해서는 높은 전산 성능을 요구하므로 수시간 이상의 현상을 해석하는 것은 현실적으로 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Smith 등(2022)은 열역학적 평형을 이용해 장기간 발생하는 BOG 양을 예측하였다. 열전도 모델과 상변화를 고려하여 Self-pressurization 현상을 예측한 연구 (Scheufler and Gerstmann, 2022; Vishnu and Kuzhiveli, 2022)도 현실적인 방안으로 제시되었다. 이러한 열역학적 평형 모델은 포화 상태의 액체 및 기체를 집중 질량으로 가정하고 열 유속 유입에 따른 상 변화, 온도 변화를 예측하는 방법이다. 하지만 열역학적 평형을 이용한 BOG 예측 방법은 슬로싱에 의한 열 유입의 변화를 직접 계산하는 것이 아니라 경계 조건으로 열 유입량을 필요로 한다.

따라서 본 연구는 CFD 해석을 통해 C-Type 액화수소탱크에서 슬로싱 현상에 의한 열 유속 변화와 BOG 경향을 예측하고, 장기 BOG 예측을 위한 열 유입량을 파악하는 목적을 가지고 있다. 즉, 슬로싱 현상을 고려한 액체수소의 충전율(Filling ratio)별 유입 열 유속을 계산하고, BOG 발생 경향을 살펴보고자 한다.

2. 본 론

2.1 유동 및 열확산 반영방법

슬로싱 운동에 놓인 액화수소 탱크의 증발을 유발하는 열원

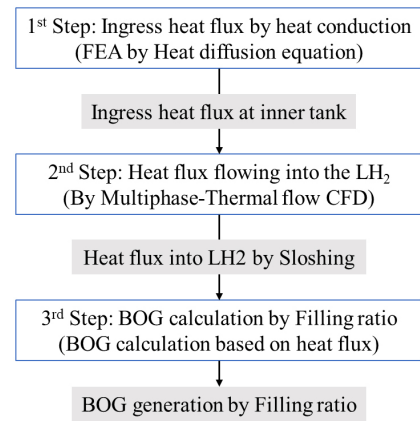


Fig. 1 Schematic procedure of computations

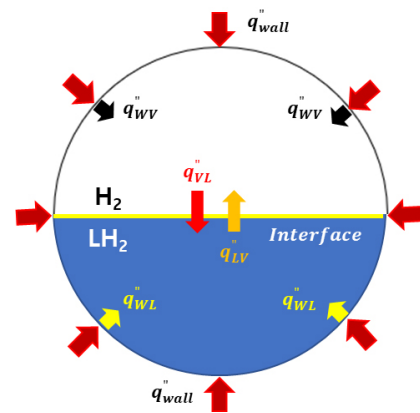


Fig. 2 Overview of Heat Flux in a LH₂ Tank

은 외부 대류 열 유속과 내부 대류에 의한 열 유속으로 나눌 수 있으며, 이는 기화의 주요 열원이다. 다만, 본 연구는 액체와 기체의 혼합 유동에 의한 열확산만을 평가하기 위하여 응축에 의한 열전달은 배제하고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 액체 수소와 기체 수소를 모두 포화 상태의 온도로 가정하였다. 즉, 기체 및 액체의 경계면 변화와 난류 운동이 야기하는 혼합에 의한 열 확산만을 고려하여 슬로싱에 의한 효과만을 분리시키고자 하였다. 전체 계산 과정을 Fig. 1에 간략하게 제시하였다. 1단계는 열전도 FEA 해석을 적용하여 열 유입 경계 조건 적용을 위한 탱크 내부로 유입되는 평균 열 유속을 파악하는 과정이다. 2단계는 1단계에서 계산된 평균 열 유속을 경계 조건으로 적용하여 다상 열유동 해석을 수행하여 액화수소로 유입되는 열 유속을 구하는 과정이다. 본 단계에서 열 유속은 액체수소와 기체수소의 경계와 침투에 유입되는 값이다. 그리고 마지막은 열 유속 기반의 집중 질량식을 통해 BOG 발생 경향을 예측하는 과정이다.

즉, 액체수소탱크에서 열 환경은 Fig. 2와 같이 열유속 경계 조건과 기체와 액체 간의 열교환으로 표현할 수 있다. q''_{wall} 은 탱크 외면에서 유입되는 열 유속을 의미한다. 그리고 열 유속

$\ddot{q}_{WZ}, \ddot{q}_{WV}$ 는 벽면 내부에서 강제 대류에 의한 열 유속을 의미한다. 기체와 액체 사이는 기화 및 응축 열 교환은 $\ddot{q}_{VL}, \ddot{q}_{LV}$ 로 단순화할 수 있다. 본 논문은 포화상태 액체수소를 가정하였으므로 \ddot{q}_{VL} 과 \ddot{q}_{wall} 만을 고려하였다. 또한, 내부 벽면의 강제 대류도 배제하였다.

2.2 수치해석 방법

2단계 절차에서 CFD 해석은 VOF 또는 Eulerian 모델 기반의 다상 유동으로 가정할 수 있다. Eulerian 모델은 각 상의 거동을 독립하여 계산하므로 각 상(Phase)별로 열 전달 및 질량 전달 계산이 가능한 방법이다. 다만, 각 상의 속도장을 해석해야 하므로 계산 시간이 많은 단점을 가지고 있다. VOF 모델은 고정된 격자 계에 대해 표면 추적 기법을 사용하며, 모든 상을 하나의 운동 방정식으로 표현하되 각 상별로 체적분율과 에너지 보존 방정식을 사용함에 따라 계산 속도가 빠른 장점이 있으나 상 간의 상호 작용에는 효율적이지 않다. 따라서, 다상 유동 모델의 정확도 검증단계에서 Eulerian 모델과의 정확도를 비교할 목적으로 VOF도 적용하였다. 해석에는 FLUENT를 사용하였다.

2.2.1 VOF 방법

VOF 방법을 통한 수치 해석은 상대 좌표계에서 수행되며, 연속방정식과 운동량방정식은 각각 다음의 식 (1), (2)와 같다 (Bae et al., 2007).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) \\ = -\nabla p + \rho g + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T)] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, ρ, \vec{u}, p, g, μ 는 각각 밀도, 유속벡터, 압력, 중력가속도, 점성계수이다. 그리고 위 식에서의 밀도와 점성계수는 각각 식 (3), (4)와 같이 주어진다.

$$\rho = \alpha_g \rho_g + \alpha_l \rho_l \quad (3)$$

$$\mu = \alpha_g \mu_g + \alpha_l \mu_l \quad (4)$$

여기서, α 는 상 분율(Volume fraction)을 나타내며, 하첨자 g 와 l 은 각각 기체상과 액체상을 의미한다.

2.2.2 Eulerian 방법

Eulerian 방법에서의 연속방정식과 운동량방정식은 적용되는 상별로 각각 주어지며 다음의 식 (5), (6)과 같다(Park and Kim, 2020).

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho_{rq}} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q) \right) \\ = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) \\ = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} \\ + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) \\ + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wl,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q}) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, ρ_{rq} 는 각 상별 Reference density를 의미하며, \dot{m}_{pq} 와 \dot{m}_{qp} 는 각 상 간의 질량교환을 의미한다. 그리고, $\bar{\tau}$ 는 q^{th} 상의 전단응력 tensor, μ_q 는 정의된 유체 상의 계면 마찰, λ_q 는 체적 점성, \vec{F}_q 는 외부 체적력, $\vec{F}_{lift,q}$ 는 유체의 회전에 의해 발생하는 양력, $\vec{F}_{wl,q}$ 는 Wall lubrication 하중, $\vec{F}_{vm,q}$ 는 가상 질량에 의해 발생하는 하중이며, $\vec{F}_{td,q}$ 는 난류에서 Turbulent dispersion force이다. 본 논문은 질량 변화를 야기하는 열 교환만을 고려하기 위하여 질량교환은 적용하지 않았다. 열 유속 및 슬로싱 운동에 적용한 에너지 방정식은 각각 다음의 식과 같다(Ansys Inc., 2020).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) \\ = \nabla \cdot (k_{eff} \cdot \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + \bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (8)$$

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v} \cdot H) \\ = \nabla \cdot (K_{eff} \nabla T + (\bar{\tau} \cdot \vec{v})) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, k_{eff} 는 Effective conductivity, \vec{J}_j 는 각 상의 확산 속도를 의미하며, 식 (7)의 오른쪽항에서 세 항목들은 각각 Energy

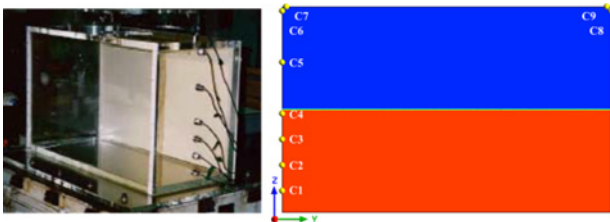


Fig. 3 Apparatus of Sloshing test (Kang and Lee, 2005)

transfer due to conduction, species diffusion, viscous dissipation 을 의미한다. 본 논문에서는 각 상간 질량 전달 및 화학 반응은 고려하지 않았기 때문에 heat of chemical reaction항은 포함시키지 않았다. 또한, FLUENT의 Reference frame 기능을 통해 슬로싱 현상을 모사하였으므로, 최종적으로 식 (10)과 같이 정리될 수 있다. 식 (10)에서의 E는 유입 에너지를 의미하며, 식 (8)과 같이 정의된다. 그리고 H는 총 엔탈피, $\bar{\tau}$ 는 Viscous stress 를 의미한다.

3. 슬로싱 압력 해석 검증

탱크 내 대류 열전달은 주로 유동 속도에 따라 결정된다. 대류 열전달 계수(h)는 $N \cdot k_f / L$ 로 정의된다. k_f 는 작동 유체의 열전도 계수이며 L 은 특성 길이를 의미한다. Nusselt 수(Nu)는 Reynold 수와 Prandtl 수의 곱에 비례하므로, 압력 예측이 정확하다면 대류 예측도 정확하다고 가정할 수 있다(Chandran *et al.*, 2017). 제안된 압력예측 방법은 참고연구에서 검토된 슬로싱 압력계측 실험과 압력 이력 비교를 통해 정확도를 검토하였다(Kang and Lee, 2005).

3.1 슬로싱 실험 조건

본 연구는 직육면체 모형 탱크를 사용한 슬로싱 실험 결과를 검증 대상으로 활용하였다(Kang and Lee, 2005). 모형 탱크의 크기는 가로 800mm, 세로 350mm, 높이 500mm이며, 슬로싱 발생을 위해 좌우 동요 진폭 20mm, 가진 주파수 5.39 rad/s로 조화 운동이 부여되었다. C1~C9까지 총 9개의 센서로부터 압력을 계측하였다. 슬로싱 실험 모형과 각 센서의 위치는 Fig. 3과 같다.

3.2 다상 유동 모델의 개요

상용 CFD 코드인 FLUENT에서 Euler-Euler 접근법의 다상 유동 해석 모델은 크게 VOF 방법과 Eulerian 방법이 있다. VOF 모델은 각 상을 하나의 운동량 방정식으로 각 유체의 체적율을 계산하고 상간의 상호침투가 허용되지 않으며, Eulerian

Table 1 Numerical scheme of CFD model

Scheme category	VOF Model	Eulerian Model
Multi-phase model	Volume of fluid	Eulerian
Volume fraction	Implicit formulation	Implicit formulation
Turbulence model	SST k-omega	SST k-omega
P-V Coupling	PISO Scheme	Phase Coupled SIMPLE
Pressure	PRESTO	PRESTO
Momentum	2 nd order upwind	2 nd order upwind
Turbulent	2 nd order upwind	2 nd order upwind

모델은 상간의 상호침투를 허용하므로 각 상의 보존법칙이 성립되는 차이가 있다(Bae *et al.*, 2007). 두 모델을 모두 적용하여 계면 및 압력 예측 정확성을 비교하였다. Eulerian 및 VOF 기법의 각 해석 조건을 Table 1에 정리하였다. 특히 난류는 SST k-omega, 압력-속도 연성은 PISO(Pressure implicit with split operator)와 Phase Coupled SIMPLE 방법을 사용하였다. 유체는 각각 물과 공기이며 Hwang과 Lee(2021)가 제시한 재료 특성을 사용하였으며, 액체의 충전율은 실험과 동일한 50%로 반영하였다. 시뮬레이션 시간은 0.5msec 간격으로 10초 동안을 해석하였으며, 총 79,000개의 격자와 79,596개의 절점으로 영역을 구성하였다.

3.3 압력 비교 결과

VOF 및 Eulerian 모델이 예측한 자유수면 형상은 모두 실험과 유사함을 확인하였으나, Fig. 4와 같이 Eulerian 모델이 상간 침투를 좀 더 잘 반영하는 것을 확인하였다. 결과적으로, Eulerian 모델이 예측한 압력은 대체로 실험결과와 일치함을 확인하였으나, VOF 모델은 실험과 비교하였을 때 계면 형상 및 압력에서 차이가 있음을 확인하였으며, Eulerian 모델은 구조 응답 예측에 활용할 수 있는 정도의 압력을 예측할 수 있음을 확인하였다(Fig. 5).

4. Type-C 액화수소 탱크의 열 유속 예측

본 장에서는 독립형 Type-C 액화수소 탱크를 대상으로 슬로싱 유동 및 열 유속 해석과정을 정리하였다. 특히, 슬로싱 유/무 및 F/R(Filling ratio)별로 액체수소에 유입되는 열 유속을 비교하였다. BOG에 영향을 미치는 열 유속은 2.3장에서 언급한 바와 같이, (1) 탱크 외부의 대류 열 유입, (2) 액체와 기체 계면 간에 전달되는 열 유속, (3) 슬로싱 발생으로 인해 탱크 내부 액체-기체 혼합에 의한 전도 열전달로 나눌 수 있다. 첫번째 열 유입은 경계조건으로 반영할 수 있었고, 두번째와 세번째 조건은 Eulerian 방법을 통해 계산하였다. 다만, 탱크 내부 벽면에서 유체 속도 변화에 따른 강제 대류 계수의 변화는 배제하

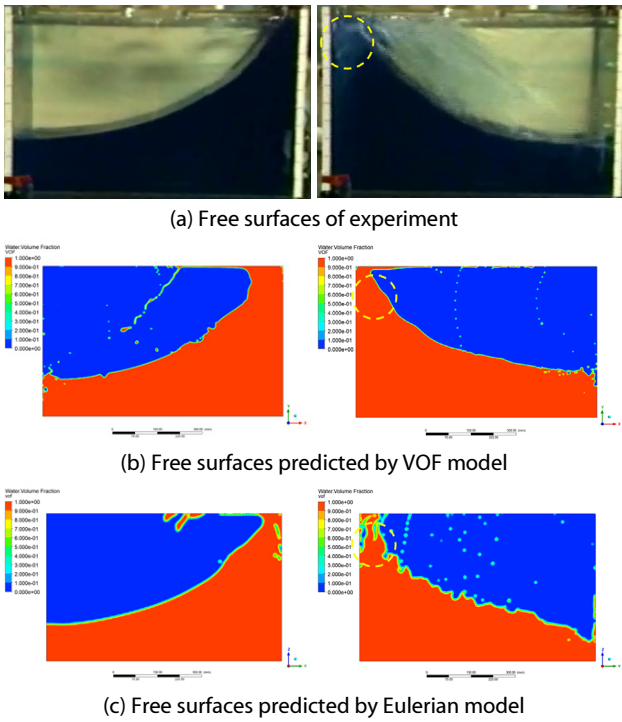


Fig. 4 Comparisons of the free surfaces results

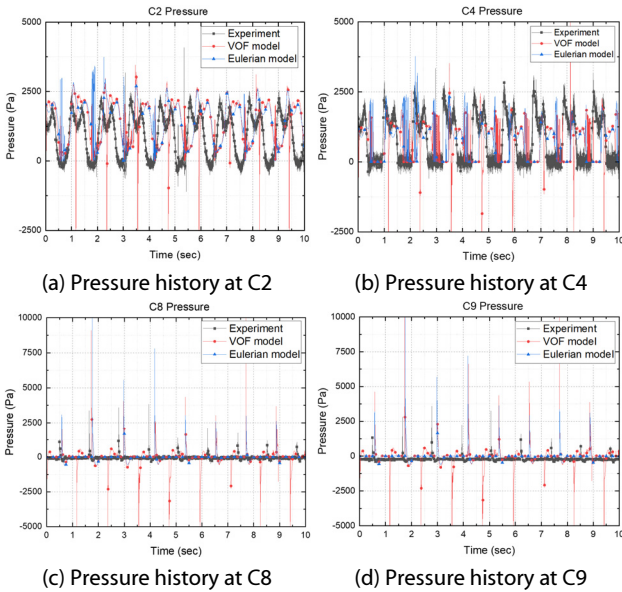


Fig. 5 Pressure profiles and histories on the inner wall

였다. 복합 열전달(Conjugate Heat Transfer, CHT) 해석을 통해 내부 벽면의 대류 효과를 고려하는 방법도 있지만(Ferrin and Perez-Perez, 2020; Saleem *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2016), 본 연구에서는 액체-기체의 혼합에 따른 효과만을 분리하여 검토하였다.

4.1 대상 모델 및 격자

탱크는 Wu와 Ju(2021)가 제시한 형상을 참고하였으며, 2차

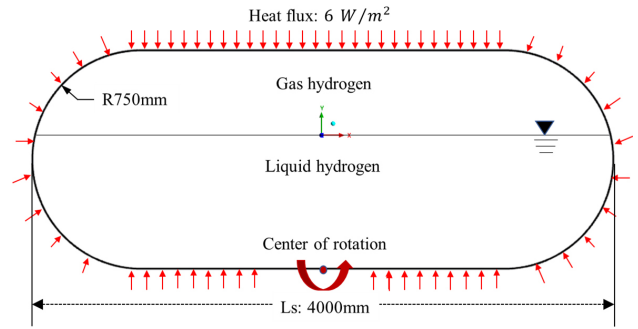


Fig. 6 Diagram of the Type-C Cylindrical LH₂ Tank model

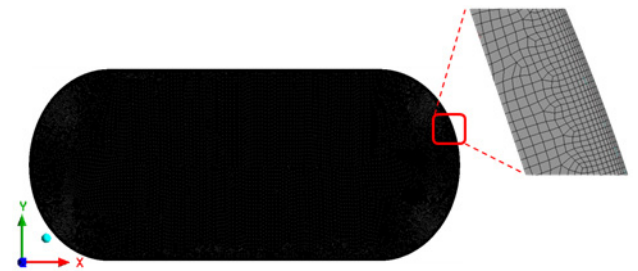


Fig. 7 Computational grid on cylindrical fluid domain

Table 2 Material properties of the hydrogen (FLUENT DATABASE)

Material property	Vapor hydrogen	Liquid hydrogen
Density (kg/m ³)	0.082	70.85
Specific heat capacity (J/kg·K)	14,304	9772.2
Thermal conductivity(W/m·K)	0.1672	0.1038
Dynamic viscosity(kg/m·s)	8.4×10^{-6}	1.3×10^{-5}
Latent heat of vaporization (J/kg)	-	446,592

원 액화수소 탱크 내부의 유체 영역만 모델링하였다. 액화수소 탱크의 형상은 실린더 형태이며 Fig. 6과 같이 총 길이(L_s)는 4000mm, 구형 형상부의 반지름(R)은 750mm이다. 탱크 내부 벽면은 슬로싱 및 대류현상에 의한 열 유입이 일어나는 구역이므로 3장에서 설명한 해석 모델과 유사한 크기인 2mm 격자로 모델링하였다(Fig. 7). 격자 생성에는 ANSYS MESH의 Inflation 기법을 적용하였으며, 탱크 내부영역은 평균 4mm 크기의 격자로 모델링하였다. 모든 격자는 Quadrilateral shape로 구성하였으며, 총 395,729개의 격자와 397,798개의 절점을 생성하였다. 슬로싱 발생시 액체수소로 유입되는 열 유속을 예측하기 위한 다상 열유동 해석모델은 앞장에서 검증된 Eulerian 다상 유동 모델에 열 방정식을 추가하여 열 확산을 고려하였다. 액체수소와 기체수소의 물성은 FLUENT의 DATABASE에서 제공하는 값을 적용하였으며(Table 2), 탱크 내부의 초기 온도는 Fig. 8과 같이 각각 20K, 180K로 안정화된 포화 상태로 가정하였다. Tani 등(2021)은 액체 수소 탱크 내 기체 수소의 온도를 예측하였고, 위치별로 약 50K~200K로 달라짐을 확인

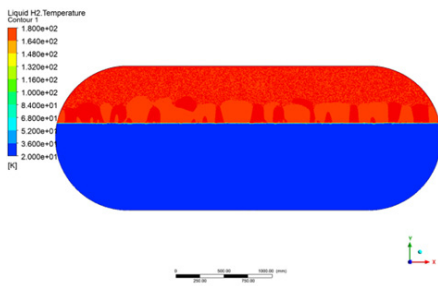
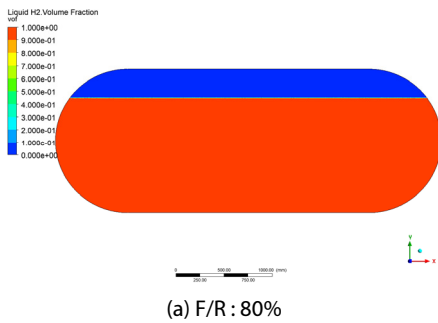
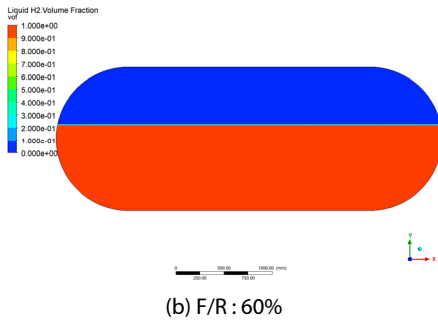


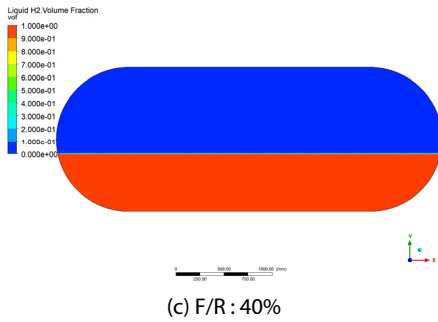
Fig. 8 Temperature contour of fluid domain in initial condition



(a) F/R : 80%



(b) F/R : 60%



(c) F/R : 40%

Fig. 9 Volume fraction of hydrogen at F/R

하였다. 기체 수소 온도는 입열과 압력 등에 달라지므로, 본 연구는 기체 수소는 180K로 가정하였다. 탱크는 5기압까지 견딜 수 있다고 가정하였으며, 유체 영역 내부의 초기 압력은 0.5MPa로 설정하였다. 탱크 외부로부터 유입되는 열 유속은 Fig. 6과 같이 유체 영역의 경계 조건에서 6 W/m^2 를 가정하였다. 또한, 유체 영역에서 슬로싱 현상을 구현하기 위해 FLUENT의 Frame motion을 적용하고 주기적인 회전 각속도를 가하여 슬로싱 운동을 모사하였으며, 회전 중심점은 Fig. 9와 같이 탱

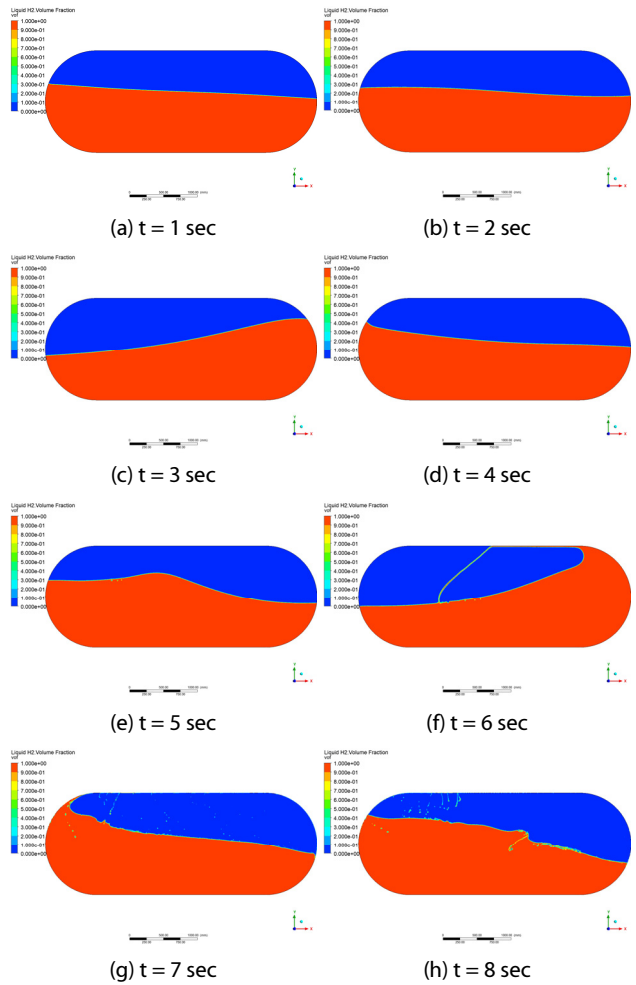


Fig. 10 Free surface profiles with sloshing condition

크 중앙에 적용하였다. 적용된 회전 각속도는 식 (2)와 같다. 여기서, f 는 가진 주파수, θ_A 는 가진 폭이며, $\omega_m(t)$ 는 회전 각속도를 의미하며 식 (11)과 같다. 본 논문은 Wu와 Ju(2021)가 사용한 y 방향 회전 주파수 f 와 진폭 θ_A 중에서 가장 격한 슬로싱 운동을 유발하는 값을 선택하였으며, 주파수와 진폭으로 각각 0.5Hz와 3°를 선택하였다.

$$\omega_m(t) = 2\pi f \theta_A \cos(2\pi ft) \quad (11)$$

4.2 슬로싱에 따른 내부 벽면의 대류 열 유속 변화

먼저, 액화수소의 충전율이 60%인 경우에서의 유동을 총 8초 동안 예측하였다. Fig. 10은 슬로싱 발생시 시간에 따른 자유 표면의 형상과 액체 수소의 체적분율(Volume fraction)을 동시에 표현한 결과이다. 이를 통해 충분한 슬로싱 유동이 발생함을 확인하였으며, 동일 조건에서 슬로싱이 없는 경우의 수치 해석을 수행하였다. Fig. 11에 슬로싱 유무에 따라 8초간

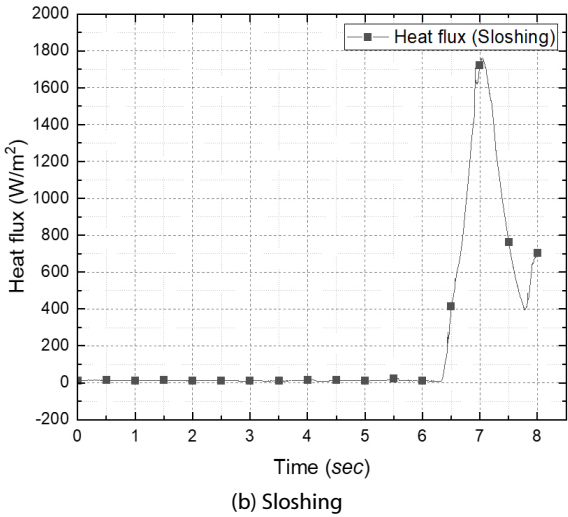
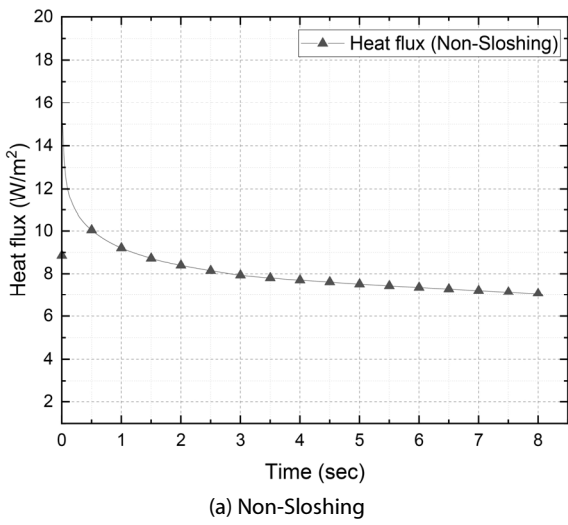


Fig. 11 Time history of heat flux according to the Sloshing condition

액화수소의 벽면 내부 대류에 의한 열 유속 이력을 정리하였다. 슬로싱이 없는 경우 8초 동안의 평균 열 유속은 7.71W/m^2 이며, 열 유량(Heat flow rate)은 탱크 내벽의 면적인 18.79m^2 을 기준으로 144.87W 로 예측되었다. 동일한 방법으로 슬로싱이 발생하는 경우에는 평균 열 유속과 열 유량은 각각 11.95W/m^2 와 224.54W 로 예측되었다. 다만, 탱크 외부에서 유입되는 6.0W/m^2 를 제외한 값이 유체-기체 계면 및 혼합에 의한 열 유속으로 볼 수 있을 것이다. 결과적으로 슬로싱 현상이 액화수소로 유입되는 열 유속을 상당량 증가시킨다는 것을 확인할 수 있다. 슬로싱이 크게 발생하는 5-8초 구간에서 열 유속을 온도 및 속도 분포 이력과 관련시켜 검토하였다. Fig. 12와 Fig. 13은 각각 슬로싱 현상의 유무에 따른 유체 영역의 온도 이력이며, Fig. 14는 슬로싱 발생시 탱크 내부 유체의 속도 벡터 이력이다. 7-8초에서 액체수소 입자들이 기체수소 영역으로 확산되고, 두 상간의 온도구배 및 접촉 면적 증가로 인하여 열교환이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 액체-기

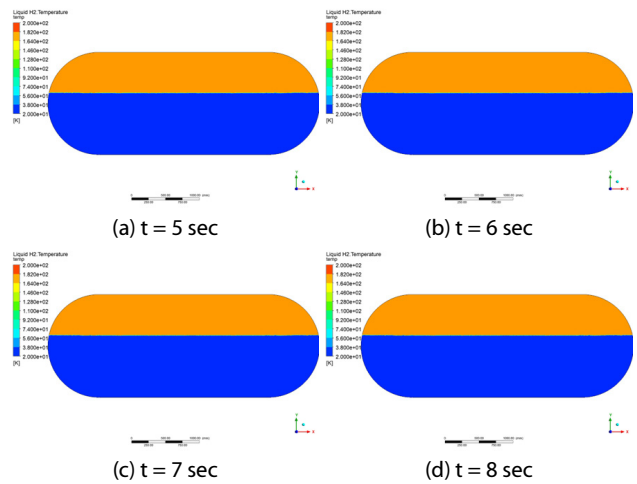


Fig. 12 Temperature profiles with Non-sloshing condition

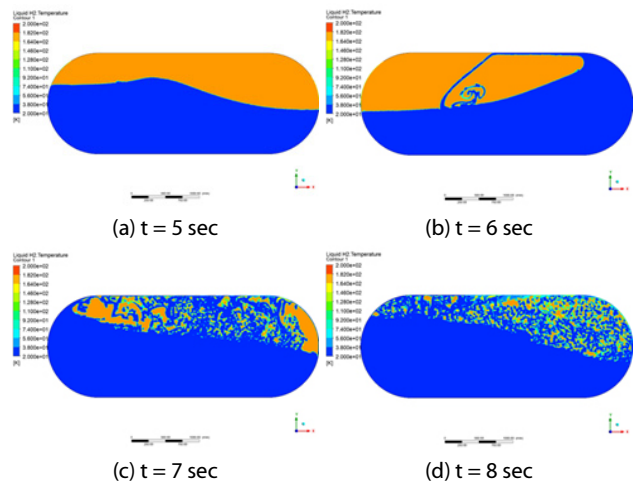


Fig. 13 Temperature profiles with Sloshing condition

체 혼합이 열 교환에 미치는 영향이 크다는 점을 확인할 수 있으며, 온도 180K 의 기체수소와 20K 의 액체 수소가 포화 조건이지만, 액체수소에 열 교환 및 열전달이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. BOG 발생량의 경향만을 살펴보기 위하여 집중 질량법을 이용한 간이식을 적용하였다. 식 (12)와 식(13)은 유입 열량과 Latent heat만을 고려하는 집중 질량 기반의 간이 BOG/BOR 예측식이다(Hwang and Lee, 2016; Lin, *et al.*, 2018). BOG는 1일 증발 질량을 의미하며, BOR은 기화된 질량의 비율을 의미한다. 본 예측식을 통해 슬로싱 유무 시 계산된 열 유속의 평균 유입 열과 BOG 증가량은 Table 3과 같다.

$$BOG = \left(\frac{Q_T}{L_{LH2}} \right) \times 24 \times 3600 \text{ (kg/day)} \quad (12)$$

$$BOR = \left(\frac{Q_T}{\rho \cdot V_{FR} \cdot L_{LH2}} \right) \times 24 \times 3600 \times 100\% \text{ (%) } \quad (13)$$

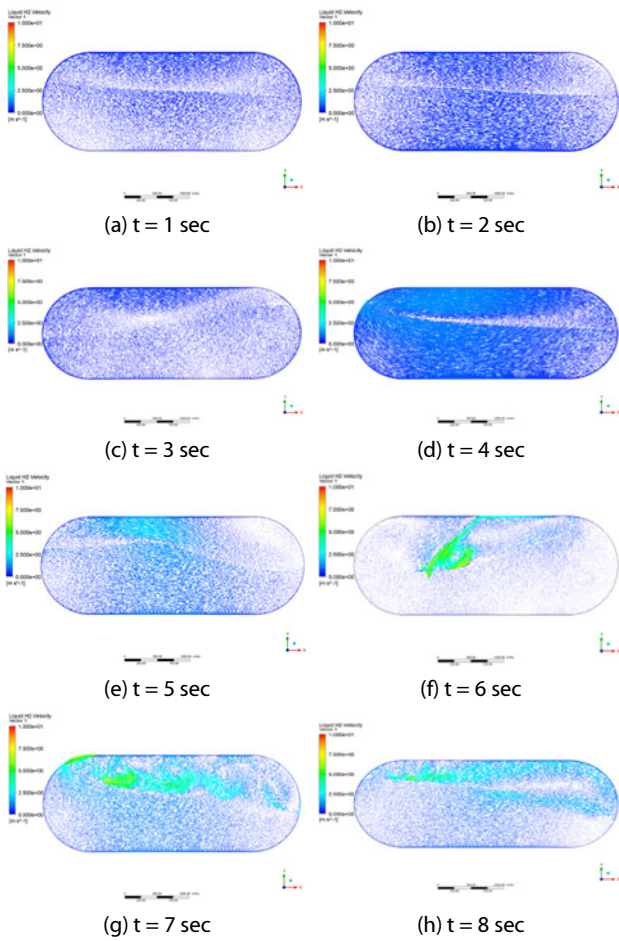


Fig. 14 Velocity profiles with sloshing condition

여기서, Q_T 는 액체수소로 유입되는 열 유량(W), L_{LH2} 는 액체수소의 증발 잠열(Evaporative latent heat), ρ 는 액체수소의 밀도, V_{FR} 는 액체수소의 부피를 의미한다.

4.3 Filling Ratio에 따른 열 유속 예측 결과

본 장에서는 F/R별 열 유입 정도를 정리하였다. F/R 조건은 80%, 60%, 40%로 세 가지이며, Fig. 9는 각 초기 체적 분율 (Volume fraction)을 나타낸다. Table 4에 Case별 액체수소의 부피를 정리하였다. 다만, LH2의 체적은 같은 형상의 3차원 탱크에서 F/R별로 계산된 액체수소의 부피를 의미한다. 해석 결과 각 Case별 시간에 따라 액체수소로 유입되는 열 유속은 Fig. 15과 같으며, 평균 열 유속은 각각 14.54W/m², 11.95W/m², 9.71W/m²으로 예측되었다. 예측된 열 유속의 평균값을 기반으로 각 F/R별 열 유량과 BOG/BOR을 Table 5와 Fig. 16에 정리하였다. 2.3장에서 설명한 바와 같이, 본 논문은 외부 열 유입 및 내부 유체 영역에서 기체-액체의 혼합에 의한 열 교환만을 고려하였다. 앞선 Fig. 2에서의 \ddot{q}_{wall} 은 탱크의 내벽으로부터

Table 3 Comparison between Non and Sloshing condition

Numerical Results	Non-Sloshing	Sloshing	Increment
Average heat flux (W/m ²)	7.71	11.95	55%
Average heat flow rate (W)	144.87	224.54	55%
BOG generation (kg/day)	28.03	43.44	55%

Table 4 Volume of liquid hydrogen at each F/R

Case	Filling ratio (%)	Volume of LH ₂ (m ³)
Case [1]	80	5.3722
Case [2]	60	3.9126
Case [3]	40	2.6861

Table 5 Estimated magnitude of BOG/BOR at each F/R

F/R	\ddot{q}	\ddot{q}_{VL} (Ratio)	q (W)	BOG (kg/day)	BOR (%)
80%	14.54	8.54 (58.7%)	273.21	52.86	13.89
60%	11.95	5.95 (49.8%)	224.54	43.44	15.67
40%	9.71	3.71 (38.2%)	182.45	35.29	21.92

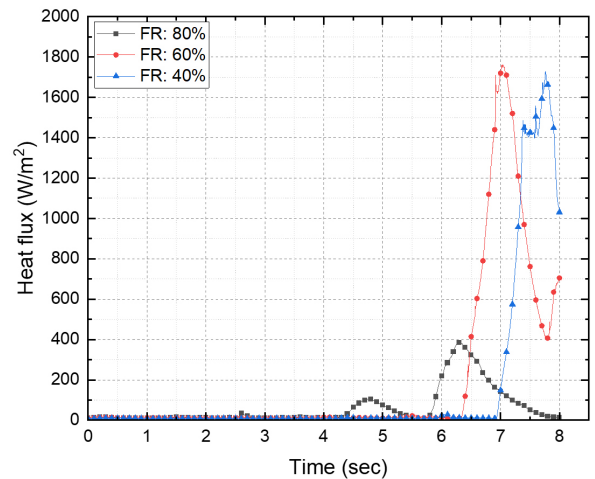


Fig. 15 Heat flux profiles by filling ratio (Ingress to LH₂ only)

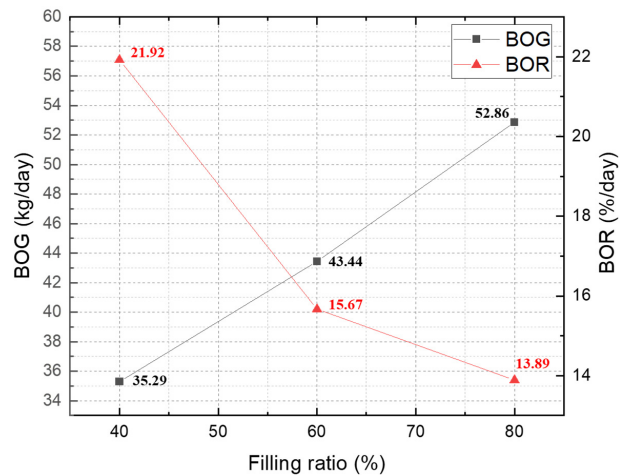


Fig. 16 Predicted BOG/BOR results by filling ratio (Heat flux based)

기체 및 액체에 유입되는 열 유속을 의미하며, 본 연구는 6.0 W/m²으로 가정하였다. 따라서 다상 열유동 해석을 통해 얻은 액체수소로 유입되는 평균 열 유속에서 외부 열 유속 값을 제외하면, 각 상의 혼합에 의한 열 유속 q_{VZ}'' 을 파악할 수 있었다. Table 5에는 액체수소로 유입되는 전체 열 유속의 평균값에서 q_{VZ}'' 이 차지하는 비율을 정리하였다. 내부 벽면에서 강제 대류 효과를 배제한 상황에서도 슬로싱 운동에 의한 혼합이 야기하는 열 유속이 매우 크다는 점을 확인하였다.

5. 결론

본 논문은 Type-C 실린더형 액화수소탱크에 대하여 슬로싱 유무 및 액체수소의 충전율 조건에 따라 액화수소로 유입되는 열 유속 및 각 상의 혼합으로 인해 발생하는 열 교환을 분석하기 위해 수행되었다. 슬로싱 유동의 자유 표면 형상과 압력 분포를 대상으로 수치해석과 기존 연구의 실험 결과를 비교하였다. 이를 통하여 슬로싱 유동 압력 예측의 타당성을 확인하였으며, 해석의 정도가 높은 다상 열유동 해석 모델을 선택하였다. 이를 통하여 Eulerian 모델 기반의 다상 열유동 모델을 적용한 대류 열 유속을 계산하고, 극저온 액체수소탱크의 내부가 포화상태일 때, 각 상간의 열전달이 BOG 발생량에 미치는 영향을 평가하였다. 해석을 통하여 다음과 같은 점을 확인할 수 있었다.

- 1) 슬로싱 현상을 포함할 경우, 기체수소에서 액체수소로의 열전달로 인하여 BOG 발생량이 급격하게 증가함을 수치적으로 확인하였다.
- 2) 본 연구가 가정한 슬로싱 조건에서는 약 55%의 열 유속 증가를 확인할 수 있었으며, 슬로싱 조건에 따라 BOG/BOR 이 매우 크게 증가할 수 있음을 확인하였다.
- 3) 액체수소의 충전율에 따라 열 유속을 계산한 결과, BOG/BOR 값도 충전율에 비례함을 확인하였다.

본 연구는 한정된 슬로싱 조건과 포화 상태를 고려하여 열 유속 및 BOG/BOR의 변화 경향을 수치적으로 평가하였다. 이후에는 열 유입에 따른 압력 상승과 단열 구조의 응력 등이 추가할 필요가 있다. 또한, 열 유입을 고려한 장기간의 BOG/BOR 평가 절차가 병행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 산업통상자원부 조선해양산업핵심기술개발 사업 선박용 액체수소 탱크의 열손실 최소화 핵심기술 개발

(20013102)'의 지원으로 수행한 연구이며, 본 논문의 참여학생은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0001968, 친환경·스마트 선박 R&D 전문인력양성사업)을 받았습니다.

References

- Adom, E., Islam, S.Z., Ji, X.** (2010) Modelling of Boil-off Gas in LNG Tanks: A Case Study, *Int. J. Eng. & Technol.*, 2, pp.292~296.
- Alkhaledi, A.N., Sampath, S., Pilidis, P.** (2021) A Hydrogen Fuelled LH2 Tanker Ship Design, *Ships & Offshore Struct.*, pp.1~10.
- Ansys Inc.** (2020) Fluent Theory Guide *Release 2020*, Ansys. Inc.
- Bae, S.W., Jeong, J.J., Chang, S.K., Cho, H.K.** (2007) *Two Phase Flow Models and Numerical Methods of the Commercial CFD Codes*, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea, pp.16~36.
- Baker, C.R., Shaner, R.L.** (1978) A Study of the Efficiency of Hydrogen Liquefaction, *Int. J. Hydrog. Energy*, 3(3), pp. 321334.
- Chandran, P., Venugopal, G., Jaleel, H.A., Rajkumar, M.R.** (2017) Laminar Forced Convection from a Rotating Horizontal Cylinder in Cross Flow, *J. Therm. Sci.*, 26(2), pp.153~159.
- Ferrin, J.L., Perez-Perez, L.J.** (2020) Numerical Simulation of Natural Convection and Boil-off in a Small Size Pressurized LNG Storage Tank, *Comput. & Chem. Eng.*, 138, 106840.
- Han, W.H., Choi, J.S., Choi, J.H.** (2010) The Trends of Hydrogen Energy Technology Development and Application to Ship, *J. Korean Soc. Mar. Environ. & Safety*, 16, pp.313~320.
- Hwang, S.Y., Lee, J.H.** (2016) Comparative Study on the Thermal Insulation of Membrane LNG CCS by Heat Transfer Analysis, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 29(1), pp.53~60.
- Hwang, S.Y., Lee, J.H.** (2021) The Numerical Investigation of Structural Strength Assessment of LNG CCS by Sloshing Impacts Based on Multiphase Fluid Model, *Appl. Sci.*, 11(16), 7414.
- Jeon, G.M., Park, J.C., Choi, S.** (2021) Multiphase-Thermal Simulation on BOG/BOR Estimation due to Phase Change in Cryogenic Liquid Storage Tanks, *Appl. Therm. Eng.*, 184, 116264.
- Kang, D.H., Lee, Y.B.** (2005) *Summary Report of Sloshing Model Test for Rectangular Model No.001*, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Company, Korea, pp.2~7.

- Li, F., Yuan, Y., Yan, X., Malekian, R., Li, Z.** (2018) A Study on a Numerical Simulation of the Leakage and Diffusion of Hydrogen in a Fuel Cell Ship, *Renew. & Sustain. Energy Rev.*, 97, pp.177~185.
- Lin, Y., Ye, C., Yu, Y.Y., Bi, S.W.** (2018) An Approach to Estimating the Boil-off Rate of LNG in Type C Independent Tank for Floating Storage and Regasification Unit under Different Filling Ratio, *Appl. Therm. Eng.*, 135, pp.463~471.
- Liu, Z., Feng, Y., Yan, J., Li, Y., Chen, L.** (2020) Dynamic Variation of Interface Shape in a Liquid Oxygen Tank under a Sinusoidal Sloshing Excitation, *Ocean Eng.*, 213, 107637.
- Mao, X., Ying, R., Yuan, Y., Li, F., Shen, B.** (2021) Simulation and Analysis of Hydrogen Leakage and Explosion behaviors in Various Compartments on a Hydrogen Fuel Cell Ship, *Int. J. Hydrog. Energy*, 46, pp.6857~6872.
- Park, S.H., Kim, B.J.** (2020) Comparative Study of Two-Fluid and VOF Methods for Sloshing Flows, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.*, 44(12), pp.711~716.
- Saleem, A., Farooq, S., Karimi, I.A., Banerjee, R.** (2018) A CFD Simulation Study of Boiling Mechanism and BOG Generation in a Full-Scale LNG Storage Tank, *Comput. & Chem. Eng.*, 115, pp.112~120.
- Scheufler, H., Gerstmann, J.** (2022) Heat and Mass Transfer in a Cryogenic Tank in Case of Active-Pressurization, *Cryog.*, 121, 103391.
- Smith, J.R., Gkantonas, S., Mastorakos, E.** (2022) Modelling of Boil-off and Sloshing Relevant to Future Liquid Hydrogen Carriers, *Energies*, 15(6), 2046.
- Syed, M.T., Sherif, S.A., Veziroglu, T.N., Sheffield, J.W.** (1998) An Economic Analysis of three Hydrogen Liquefaction Systems, *Int. J. Hydrog. Energy*, 23(7), pp.565~576.
- Tani, K., Himeno, T., Watanabe, T., Kobayashi, H., Toge, T., Unno, S., Kamiya, S., Muragishi, O., Kanbe, K.** (2021) CFD Simulation of Pressure Reduction inside Large-Scale Liquefied Hydrogen Tank, *Int. Conf. Hydrogen Safety*.
- Vishnu, S.B., Kuzhiveli, B.T.** (2022) Mathematical Modeling of Thermal Stratification in a Double Wall Cryogenic Propellant Tank With Different Insulations using One-Dimensional Flow over Vertical Plate Approximation, *Cryogenics*, 121, 103393.
- Wu, S., Ju, Y.** (2021). Numerical Study of the Boil-off Gas(BOG) Generation Characteristics in a Type C Independent Liquefied Natural Gas (LNG) Tank under Sloshing Excitation, *Energy*, 223, 120001.
- Yu, K., Ge, Z., Korpus, R.** (2016) CFD Predictions of FLNG BOG Including the Influence of Filling, Offloading, and Vessel Motion, *In Offshore Technology Conference*.
- Zakaria, M.S., Osman, K., Saadun, M.N.A., Manaf, M.Z.A., Mohd Hanafi, M.H.** (2013) Computational Simulation of Boil-off Gas Formation inside Liquefied Natural Gas Tank using Evaporation Model in Ansys Fluent, *Appl. Mech. & Mater.*, 393, pp.839~844.

요 지

본 논문은 슬로싱 상태에 놓인 포화 상태 액체수소탱크에서 열 유속 및 BOG(Boil-off gas)의 경향을 다루고 있다. 특히, 액체-기체 간의 침투 및 혼합에 의한 열 교환에 관심을 두었다. 먼저, VOF(Volume of fluid)와 Eulerian 기반의 다상 유동모델로 모형 슬로싱 실험을 모사하여 압력을 예측하고 계측된 값과 비교하였다. 자유 수면 및 충격 압력 실험 결과와 해석 결과를 비교하였으며, 유체의 속도 예측에서 정확할 수 있음을 간접적으로 증명하였다. 그리고 2차원의 Type-C 원통형 수소탱크를 대상으로 다상열유동해석을 수행하였다. 이때 포화상태에 놓인 액체 및 기체수소를 가정하고, 해석을 통해 각 상간의 혼합에 의한 열 교환의 수준을 확인하고자 하였다. 단, 상간의 열 교환만을 관심으로 두고 있었으므로 질량전달 및 기화모델은 해석에서 제외하였다. 최종적으로 상의 혼합으로 인해 액체수소로 유입되는 열 유속의 기여도에 대하여 정리하였다. 또한 액체수소로 유입되는 열 유속과 집중 질량 기반의 간이식을 통해 BOG 발생량 및 경향을 예측하고 분석하였다.

핵심용어 : 액체수소, 슬로싱, 다상 열유동, 열 유속, 충전율, 증발량