



극저온 LNG 저장탱크에서 벽면 거칠기가 열성층화 및 자가 가압 현상에 미치는 영향에 대한 수치해석

김성욱·김유일[†]
인하대학교 조선해양공학과

Numerical Analysis of the Effect of Wall Roughness on Thermal Stratification and Self-Pressurization in Cryogenic LNG Storage Tank

Seonguk Kim · Yooil Kim[†]
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, INHA University

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.

This study numerically investigates the influence of wall roughness on thermal stratification and self-pressurization phenomena in cryogenic LNG storage tanks. A multiphase CFD model incorporating phase change and natural convection was developed based on a cylindrical Type C tank. Various surface roughness heights ($K_s = 0.01$ m and 0.05 m) were applied to the tank wall, and their effects on internal flow, thermal stratification, and pressure rise were analyzed. Results show that natural convection induces thermal stratification, which enhances evaporation at the free surface, consequently accelerating internal pressure increase. Wall roughness significantly suppressed the wall-side buoyant flow by increasing shear stress, which delayed stratification development and reduced free surface temperature. Despite identical total heat input, the final pressure rise was 43.1% lower than the smooth wall case, indicating that wall roughness can serve as a practical design variable for enhancing structural stability and reducing fuel loss in cryogenic storage systems.

Keywords : Numerical simulation(수치해석), Cryogenic liquid storage tank(극저온 액체 화물 탱크), Wall roughness(벽면 거칠기), Thermal stratification(열성층화), Self-pressurization(자가 가압), Heat flow(열 유동), Natural convection(자연대류)

1. 서론

최근 탄소중립 목표 달성을 위한 국제적 환경 규제가 전방위적으로 강화됨에 따라, LNG(Liquefied Natural Gas)는 대표적인 친환경 에너지원으로 주목받고 있다. LNG는 주성분인 메탄을 비롯하여 소량의 에탄, 프로판, 부탄 및 미량의 질소로 구성된 연료로, 기존 화석연료 대비 온실가스 배출량이 상대적으로 낮고 전 세계적으로 풍부한 매장량을 보유하고 있어 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 전 세계 LNG 생산량은 2028년까지 40% 증가하여 연간 약 6억 7천만 톤에 이를 것으로 전망되며, 이에 따라 LNG 운반선의 수는 기존 1,000척을 초과하고, 초대형 원유 운반선(VLCC)의 보유 척수를 상회할 것으로 예측되고 있다 (Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA), 2024). 천연가스는 일부 지역에 국한되어 생산되고 있으며, 파이프라인 기반 운송 방식은 거리 및 지리적 제약으로 인해 국제 공급망 형

성에 한계가 존재한다. 이러한 공급 제약을 해소하기 위해, 천연가스를 액화 상태로 저장한 후 해상 운송되는 방식이 채택되고 있다. LNG는 대기압에서 약 -160°C 로 유지될 경우, 기체 상태 대비 부피가 약 1/600로 감소하며, 이에 따라 저장 밀도 및 단위 부피당 운송 효율이 대폭 향상된다. 이러한 물리적 특성에 기반하여, 국제 천연가스 교역에서는 LNG 운반선과 저장 시설이 핵심 인프라로 활용되고 있으며, 해상 운송 및 육상 터미널을 포함하는 전 지구적 공급망이 구축되어 왔다.

LNG 저장 및 운송 시스템의 설계에서 가장 중요한 기술적 요소 중 하나는 저장탱크의 단열 성능이다. LNG는 대기압 기준 약 -160°C 이하의 극저온 환경에서만 액화 상태를 유지하므로, 외부 열유입을 최소화하는 것이 필수적이다. 그러나 고성능 단열 구조가 적용되더라도 열유입을 완전히 차단할 수 없으며, 저장된 LNG의 일부가 증발된다. 일반적으로 LNG 운반선에서는 총 적재량 대비 하루 약 0.10-0.15% 내외의 Boil-off Rate(BOR)이 보고

되고 있으며 (Miana et al., 2016), 발생한 Boil-off Gas(BOG)는 저장탱크 내부의 압력 상승을 유발하여 구조적 안정성을 저해하거나, 선박 운항 시 화물 손실로 인한 경제적 부담을 초래할 수 있다. 특히, BOG의 주성분인 메탄은 이산화탄소 대비 약 28배의 온실효과를 갖는 기체로, 적절히 처리되지 않을 경우 환경적 문제를 야기할 수 있다.

BOG의 주요 발생 원인 중 하나는 저장탱크 내부에서 형성되는 열성층화 현상이다. 외부 열유입은 탱크 벽면 근처에서의 온도 구배를 발생시키고, 밀도 차이에 의한 자연대류를 유발한다. 이때 자연대류는 내부 순환이 미미하므로 상대적으로 온도가 상승한 액체는 상부로 이동하고, 밀도가 높은 차가운 액체는 하부로 이동하면서 탱크 내부에는 뚜렷한 열성층 구조가 형성된다. 이와 같은 열성층 구조는 액체 상부층의 온도를 점진적으로 상승시키고, 궁극적으로는 BOG의 발생을 증가시키는 원인으로 작용한다. 따라서 저장탱크 내 열성층화 현상을 효과적으로 제어하는 것은 BOG 발생량을 저감할 수 있을 뿐만 아니라, 저장 시스템의 열적 안정성 및 운용 경제성 향상을 위한 핵심적인 기술적 과제라 간주된다.

BOG로 인한 저장탱크 내부 압력 상승을 제어하는 일반적인 방법은 증기 배출 방식이나, 이 방법은 직접적인 연료 손실을 초래한다는 점에서 경제성 측면의 한계를 가진다. 재액화 시스템 또는 BOG를 추진 연료로 활용하는 시스템 등이 적용될 수 있으나, 이러한 시스템들은 높은 설치 및 운용 비용을 요구하므로, 근본적으로 BOG의 발생 자체를 저감하는 접근이 더욱 중요하게 인식되고 있다. 이에 따라 최근 연구에서는 저장탱크 내부 벽면에 특정 구조물을 설치함으로써 자연대류 흐름을 변화시키고, 이를 통해 열성층화를 완화하여 탱크 내부 압력 상승 및 BOG 발생을 억제하는 대안적 방법이 제안되고 있다. Bhavnani and Bergles (1990)는 횡방향 거칠기 요소를 적용한 자연대류 실험을 통해, 거칠기 요소 간의 간격 대비 높이 비율에 따라 열전달 성능이 달라지며, 적절한 형상 및 크기를 가진 거칠기 요소가 열성층화 완화에 효과적임을 보고하였다. Polidori and Padet (2003)는 구조물이 부착된 벽면에서 형성되는 와류가 유체 혼합을 촉진하고, 결과적으로 온도 구배 감소 및 성층화 완화에 기여함을 실험적으로 확인하였다. Fohanno and Polidori (2005)는 3차원 사각 실린더 형상의 장애물 주변에서 자연대류 유동 특성과 열전달 성능을 수치적으로 분석하였으며, 장애물 간격(G)이 좁을수록 열전달이 향상되고, G/D 비가 0.15 이상일 경우에는 열전달에 미치는 영향이 미미함을 밝혔다. Khurana et al. (2006)는 밀폐형 수소 저장탱크 내 구조물 적용 시 저장 탱크의 전체 열전달 계수가 감소하는 경향을 보이며, 성층화 억제 효과가 있음을 보고하였다. Gursu et al. (1993)는 자유 표면 인근에서의 부력 주도 흐름에 의해 따뜻한 상층이 형성되며, 이로 인해 열성층화가 발생함을 규명하였다. 또한, Shakerin et al. (1988)는 실험 및 수치해석을 통해 거칠기 요소의 영향이 주로 상하 두 개의 거칠기 높이 범위 내에 국한된다는 점을 관찰하였다.

기존 연구들은 주로 단일상 유체시스템을 대상으로 벽면 구조물이 자연대류 및 국소 열전달 특성에 미치는 영향을 분석해 왔

다. 그러나 LNG 저장 시스템의 경우 액상과 기상 간의 자유 표면 거동, 증발 및 응축 등의 복합 현상이 동반되는 다상 유동 환경이 형성되며, 이는 단일상 모델만으로는 충분히 묘사되기 어렵다. 또한, 다수의 연구에서는 외부 열유입 조건을 등온 또는 일정한 열유속 조건으로 단순화하거나, 단일 시스템의 열전달 특성을 배제함으로써, 현실적인 외부 환경을 반영하는 데 한계가 있었다. 이러한 이상화된 조건은 단열재를 통한 열유입과 온도 구배가 내부 유체의 열성층화 형성 및 BOG 발생에 미치는 영향을 과소평가하는 결과로 이어질 가능성이 있다. 나아가 동일한 열유입 조건에서도 저장탱크 내부의 열유동 메커니즘의 변화에 따라 자유 표면에서의 증발 양상이 달라질 수 있으며, 이에 따라 BOG 발생량에도 유의한 차이가 발생할 수 있다. 따라서, 열성층화와 이에 수반되는 자가 가압 현상을 통합적으로 분석하는 접근은 극저온 저장탱크의 구조적 안정성 평가에 있어 핵심적으로 고려되어야 한다.

본 연구에서는 극저온 LNG 저장 시스템 내 열성층화 및 자가 가압 현상을 정량적으로 규명하기 위해 상변화를 고려한 다상 유동 CFD 해석을 수행하였다. 소형 Type C 탱크 모델을 대상으로 탱크 측벽에 서로 다른 높이의 표면 거칠기 요소를 적용하고, 이에 따른 내부 열 유동 메커니즘, 열성층화 및 자가 가압 특성 변화를 분석하였다. 본 연구 결과는 LNG 저장 시스템의 구조적 안정성 확보와 BOG 저감에 기여하며, 향후 저장탱크 설계의 성능 최적화를 위한 기술적 근거를 제공한다.

2. 수치해석

2.1 해석 모델 및 물성치

본 연구에서는 선행 연구 Ferrín and Pérez (2020)에서 제시된 LNG 저장탱크 해석 모델을 기반으로, 동일한 물성, 초기 조건 및 경계 조건을 적용하여 수치해석 기법의 정확성을 검증하였다. 해석 모델은 축 대칭 조건을 가정한 총 부피 0.5m³의 원통형 Type C 저장탱크이며, 내조의 높이는 1.5m, 반지름은 0.3315m이다. 탱크 내부는 초기 시점에 충전율 80%인 경우를 가정하였으며, 해당 모델의 형상은 Fig. 1에 주요 구조와 치수가 제시되어 있다. 초기 온도는 포화 조건 하의 113K로 설정하였고, 이에 상응하는 초기 압력은 1.13bar로 설정하였다. 탱크 외부 열유입에 의해 자연대류 및 증발 현상이 유발된다는 전제 하에, 초기 유동은 정지 상태로 가정되었다. 고체 벽 구조는 진공 단열재인 펄라이트 층과 두 개의 304 스테인리스강 내조와 외조로 구성되며, 각 강재 층의 두께는 3mm이고, 단열재 두께는 11mm이다. 펄라이트는 낮은 열전도도와 불연성으로 우수한 단열 성능을 가지며, 304 스테인리스강은 극저온에서도 구조적 안정성을 유지할 수 있는 특징을 가진다. 이와 같은 다층 단열 구조의 상세도는 Fig. 2에 제시되어 있다.

LNG 저장탱크 내 유체는 다수의 선행 연구 (Ferrín and Pérez, 2020; Roh et al., 2013; Saleem et al., 2018)를 참고하

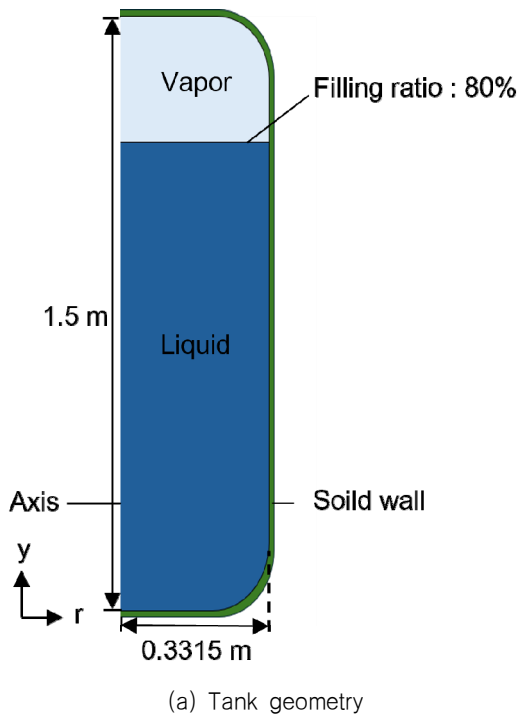


Fig. 1 Computational domain and mesh

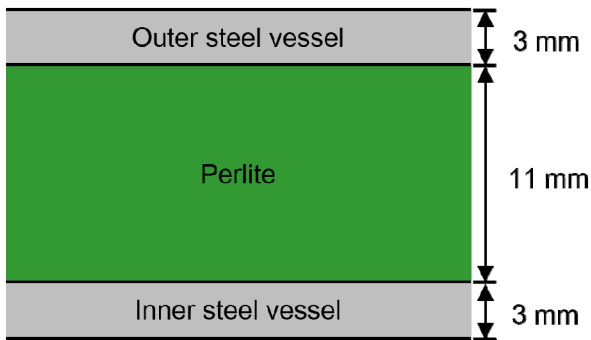


Fig. 2 Cross section of the solid wall

여 메탄 단일 조성으로 단순화하였다. 이는 LNG의 주성분이 메탄(90% 이상)임을 고려하였으며, 이러한 가정은 내부 유동 및 열성층화 거동의 거시적 구조에는 큰 영향을 미치지 않으나, 혼합 조성에 따라 발생할 수 있는 롤오버 현상이나 증발 특성의 세부 차이 등은 모사되지 않는다는 한계가 존재한다 (Kulitsa and Wood, 2018). 액체상은 온도 차가 크지 않아 물성 변화가 미미하므로 밀도, 열전도도, 비열, 점성 계수를 Table 1 같이 일정한 값으로 가정하였다.

액체의 비압축성을 유지하면서도 자연대류를 묘사하기 위해 밀도 변화를 부력 항에서만 반영하는 부시네스크 근사를 적용하였다. 액체의 체적력은 식 (1)에 제시된 관계식을 따른다.

$$b_i = \rho_l [1 - \beta(T - T_{ref})] \vec{g} \quad (1)$$

Table 1 Properties for liquid and vapor phase

	Liquid phase	Vapor phase
$\rho [kg/m^3]$	420.40	-
$k [W/(m \cdot K)]$	1.82×10^{-1}	$k_v(T)$
$c_p [J/(kg \cdot K)]$	3490	2230
$\mu [Pa \cdot s]$	1.13×10^{-4}	$\mu_v(T)$

여기서 열팽창 계수 $\beta = 3.54 \times 10^{-3} K^{-1}$, 기준온도 T_{ref} 는 초기 온도인 113K로 설정하였다.

기체는 큰 온도 구배가 발생하므로, 식 (2), (3)에서 점성 계수 μ_v 와 열전도도 k_v 는 Lemmon et al. (2025)의 데이터를 기반으로 온도의 선형 함수로 표현하였다.

$$\mu_v(T) = 3.610 \times 10^{-8} T + 5.639 \times 10^{-7} \quad (2)$$

$$k_v(T) = 1.208 \times 10^{-4} T - 1.775 \times 10^{-3} \quad (3)$$

여기서 T 는 기체의 절대 온도(K)이다.

기체의 밀도는 상변화 과정에서 발생하는 자가 가압 현상을 정밀하게 반영하기 위해 압력과 온도의 함수로 정의하였으며, 이를 위해 Peng-Robinson 상태방정식을 적용하였다. 해당 방정식은 이상 기체 상태 방정식에 비해 극저온 조건에서 나타나는 비이상적 열역학 거동을 보다 정확하게 묘사할 수 있어, LNG 저장탱크 내부의 압력-온도 관계 예측에 유리하다. 해당 방정식은 식 (4)-(8)에 제시하였다.

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{V_m^2 - 2bV_m - b^2} \quad (4)$$

$$a = 0.45724R^2 T_c^2 \quad (5)$$

$$b = \frac{0.7780RT_c}{p_c} \quad (6)$$

$$\alpha = \left(1 + Z \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^{0.5} \right) \right)^2 \quad (7)$$

$$Z = 0.37464 + 1.5422\omega_{ac} - 0.26992\omega_{ac}^2 \quad (8)$$

V_m 은 몰부피 (m^3/mol), R 은 기체 상수이며, 계수 a, b, α, Z 는 임계온도 (T_c), 임계압력(p_c) 및 이심 인자 ($\omega_{ac} = 0.0114$)에 기반하여 정의된다.

증발 잠열과 포화 온도는 상평형 조건에서 열역학적 특성이 압력 변화에 따라 변동하므로 각각 압력의 함수로 표현된다. 식 (9), (10)은 Lemmon et al. (2025)의 데이터를 기반으로 한다.

$$T_{sat}(p) = 65.3180 + 2.3371p^{0.2592} \quad (9)$$

$$H_{vap}(p) = 5.4465 \times 10^5 - 36.5741p^{0.5919} \quad (10)$$

펄라이트는 온도에 따라 열전도 특성이 크게 변화하므로, 저장 탱크 고체벽 내부의 열전달을 정밀하게 모사하기 위해 온도의 함수로 고려된다. 해당 열전도도는 Hofmann (2006)의 실험 결과를 기반으로 회귀된 경험식으로 표현된다.

$$k_p(T) = 1.911 \times 10^{-4} + 3.476 \times 10^{-12} T^{3.6783} \quad (11)$$

외조는 외부 대기 온도(293K), 내조는 저장 유체와 열적으로 접촉된 상태(113K)이다. 이에 따라 각 강재에는 해당 온도 조건에서의 정적 열 물성치가 부여되었으며, 물성값은 NIST Cryogenics Technology Group (1995)에서 제시한 데이터에 기반하여 Table 2에 정리하였다.

2.2 지배 방정식

극저온 LNG 저장탱크 내부의 유동장은 Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes(URANS) 방정식을 기반으로 수치적으로 해석되었으며, 다상 유동을 해석을 위해 Volume of Fluid (VOF) 기법을 적용하였다. VOF 기법은 비혼합성 유체 사이의 상 경계를 고정된 오일러 격자 상에서 추적하는 기법으로 각 유체의

Table 2 Properties for solid materials

	Perlite	Inner vessel	Outer vessel
$\rho [kg/m^3]$	50	8030	8030
$k [W/(m \cdot K)]$	$k_p(T)$	9.8	15.1
$c_p [J/(kg \cdot K)]$	837	304.7	470.5

체적 분율을 계산 셀 내에 정의함으로써 상경계를 추적한다. 각 제어 체적 내에서는 모든 상의 체적 분율의 합이 항상 1이 되도록 한다. 이를 통해 계면을 정밀하게 추적할 수 있다.

질량 보존 방정식:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (12)$$

운동량 보존 방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = & -\nabla p \\ & - (\rho_l \alpha_l (1 - \beta(T - T_{ref})) \rho_v (1 - \alpha_l) \vec{g} \\ & + \nabla \cdot \left(\mu \left[\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^t - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{V}) I \right] - \frac{2}{3} \rho KI \right) \end{aligned} \quad (13)$$

에너지 보존 방정식 :

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S \quad (14)$$

여기서 k_{eff} 는 유효 열전도도이며, S 는 상변화로 인한 소스 항이다.

상 간 경계의 추적은 각 상의 체적 분율 변화에 대한 연속 방정식을 통해 수행된다. 본 연구에서는 액상의 체적 분율에 대해 다음과 같은 이송방정식이 적용되었다.

$$\frac{\partial (\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{V}) = -\dot{m}_{lv} \quad (15)$$

여기서 하첨자 l 은 액상을 나타내며 \dot{m}_{lv} 는 액상과 기상 사이의 상변화에 의한 질량 전달 항으로 정의된다. 기상의 체적 분율 α_v 는 $\alpha_l + \alpha_v = 1$ 의 조건을 만족하므로 별도의 수송 방정식은 고려하지 않는다.

상변화에 의한 증발 질량 전달을 모델링하기 위해 Lee 모델 (Ansys Inc, 2021b)을 적용하였으며, 해당 모델은 사용자 정의 함수(user-defined functions, UDF)를 통해 수치적으로 구현하였다.

$$\dot{m}_{lv} = \begin{cases} \gamma \alpha_l \rho_l \frac{T - T_{sat}(p)}{T_{sat}(p)}, & \text{if } T > T_{sat} \\ \gamma \alpha_v \rho_v \frac{T - T_{sat}(p)}{T_{sat}(p)}, & \text{if } T \leq T_{sat} \end{cases} \quad (16)$$

여기서 γ 는 완화 계수(s^{-1})이다. 해석 모델의 경우 탱크 내부로의 열유입으로 인한 액체의 온도 상승이 미미하여 비등을 유도하기

에 부족하므로 액체-기체 경계면에서의 증발 과정만을 고려하였다. 선행 연구에서 $\gamma = 0.1, 1, 100$ 의 세 가지 값에 대해 민감도 분석이 수행되었으며, 그 결과 장기적으로 BOR 차이는 16% 이내로 수렴하고 기체 압력 상승은 유사하게 나타났다. 이에 본 연구에서는 $\gamma = 0.1$ 을 적용하였다.

액체는 증발하는 과정에서 증발 잠열을 흡수하므로 이에 대한 소스 항을 에너지 보존 방정식에서 고려하였다.

$$S = -H_{vap}(p)\dot{m}_{lv} \quad (17)$$

여기서 H_{vap} 는 증발 잠열이다.

고체 영역에서는 다음과 같은 열전달 방정식을 통해 온도 분포를 계산하였다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (18)$$

여기서 밀도, 비열, 열전도도 값들은 고체 재료의 물성치에 해당한다.

2.3 경계 조건 및 초기 조건

해석 영역은 외벽-외기 경계, 내벽-유체 경계, 중심축 대칭 경계로 구성되며, 각 경계의 물리적 특성에 따라 적절한 조건을 적용하였다. 외벽은 대류 열전달 경계 조건을 따르며, 외기온도는 293K, 대류 열전달 계수는 $7W/m^2 \cdot K$ 로 설정하였다. 고체 벽면을 통한 열전달을 모사하기 위해 다음과 같은 열전달 관계식을 적용하였다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{ext}) \quad (19)$$

내벽과 유체가 접하는 경계에는 no-slip 조건을 적용하였으며, 탱크 중심축에 해당하는 경계에는 축 대칭 조건을 부여하였다.

초기 유체 영역에서는 액상과 기상이 모두 정지한 상태를 가정하였으며, 초기 온도는 113K, 초기 압력은 1.13bar로 설정되었다. 초기 내부 액체의 충전율은 80%이며, 난류 변수 $K = 0 m^2/s^2$, $\omega = 1s^{-1}$ 로 부여하였다. 단일 시스템에 해당하는 고체 영역의 초기 온도 분포는 외기 열 경계 조건과 유체 초기 온도인 113K를 내벽 온도로 설정하여 정상 상태 해석을 수행한 뒤, 그 결과를 초기 조건으로 적용하였다.

2.4 수치해석 기법

본 연구의 수치해석은 Ansys Fluent 2021 R1을 기반으로 수행되었다. 압력-속도 결합 알고리즘으로 SIMPLEC(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation Consistent)를 적용하였다. 운동량 방정식에서의 압력 보간을 위해 PRESTO! 스킴을 적용하였다. 대류항과 확산항의 이산화에는 각각 QUICK 스킴과

Least Squares Cell-Based 스킴을 적용하여 수치 확산을 최소화하고 고차 정확도를 확보하였다. 시간 이산화는 first-order implicit 스킴을 적용하였으며, 액체-기체 경계면의 포착은 Geo-Reconstruct 방법을 적용하여 경계면에서의 수치 확산을 억제하였다. 본 해석 조건에서 산정된 Grashof 수는 2.67×10^{10} , Rayleigh 수는 5.79×10^{10} 이다. Enayati et al. (2016)은 Rayleigh 수 $\approx 5 \times 10^9$ 을 고난류의 시작 기준으로 제시한 바 있으며, 본 연구 조건은 이를 상회한다. 따라서 난류 해석에는 $k-\omega$ SST RANS 모델을 적용하였다. 이 모델은 자유 유동 영역에서는 $k-\epsilon$ 모델을 사용하고 경계층 근처에서는 $k-\omega$ 모델을 조합하여 사용하므로 $k-\omega$ 모델이 벽면 근처에서 우수한 성능을 발휘하는 장점을 유지할 수 있다. 초기 단계에서는 시간 간격 0.001s로 20단계를 수행하여 수치적 안정성을 확보하였으며, 이후 전 시간 구간에서는 시간 간격 0.01s로 해석을 진행하여 계산 효율성과 해석의 수렴성을 동시에 확보하도록 하였다.

2.5 수치해석 검증

액체-기체 경계면에서는 온도 및 속도의 급격한 구배가 형성되므로, Fig. 1에 제시된 바와 같이 해당 영역에 대해 고밀도 격자 배치하여 상변화 및 유동 특성을 정밀하게 해석할 수 있도록 하였다. 또한, 벽 근처 유동을 보다 정확히 모사하기 위해 벽 인접 첫 번째 셀 중심이 점성저층 내에 위치하도록 구성하였으며, y^+ 는 1 미만으로 유지하였다.

본 연구에 적용된 격자 수는 총 42,110개로, 이는 선행 연구 (Ferrin and Pérez, 2020)에서 사용된 격자 수와 유사하며, 격자 민감도 분석을 통해 수치적 신뢰성이 확보된 수준이다.

수치해석 검증은 액체 80% 충전 조건에서 증발로 인한 내부 압력 상승을 선행 연구 결과와 비교하였다. Fig. 3에 도시된 결과에서 확인되듯, 본 연구의 해석 결과는 4000s 동안 선행 연구에서 보고된 압력 상승 거동과 매우 유사하며, 최대 오차는 2% 이내로 나타났다. 이는 본 연구에서 사용된 지배방정식, 격자 구

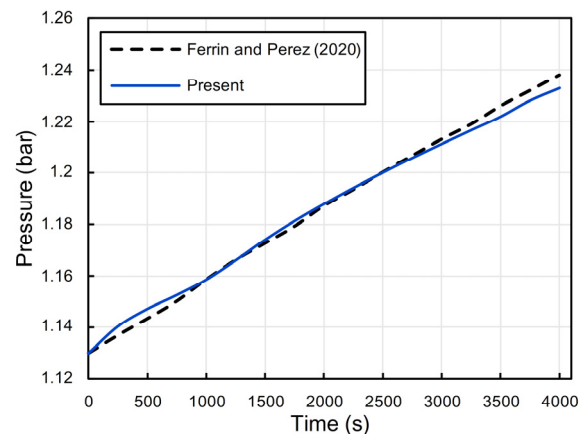


Fig. 3 Comparison of pressure rise with previous study for validation

성 및 물성치가 선행 해석 결과를 안정적으로 재현함을 입증하며, 수치해석 기법의 타당성과 재현성이 충분히 확보되었음을 나타낸다.

2.6 표면 거칠기 모델

CFD 기반 해석에서 표면 거칠기의 영향을 반영하기 위해, 난류 벽 함수 영역에서 벽면 근처 속도 분포에 대한 보정을 수행하는 방법이 일반적으로 사용된다. 본 연구에서는 Ansys Fluent 2021 R1에서 제공하는 Standard Law-of-the-Wall Modified for Roughness 모델 (Ansys Inc., 2021a)을 적용하였다. 해당 모델은 난류 유동의 로그 속도 분포에서 같은 기울기를 가지는 절편 감소를 통해 거칠기 효과를 반영하며, 벽 법칙의 형태는 다음과 같다.

$$\frac{u_p u^*}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{\rho u^* y_p}{\mu} \right) - \Delta B \quad (20)$$

여기서 $u^* = C_\mu^{1/4} k^{1/2}$ 는 난류 마찰 속도, κ 는 폰 카르만 상수, E 는 실험적 상수이며, ΔB 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln f_r \quad (21)$$

여기서 f_r 은 거칠기 효과로 인해 절편이 이동하는 정도를 정량적으로 나타내는 거칠기 함수이다. ΔB 는 Cebeci and Bradshaw (1977)가 제안한 경험식을 바탕으로 무차원 거칠기 높이 $K^+ = \rho K_s u^* / \mu$ 와 거칠기 상수 C_s 에 따라 결정되며, 이는

다음과 같은 세 가지 유동 영역으로 구분된다.

Hydrodynamically smooth regime

$$\Delta B = 0 \quad (K^+ \leq 2.25) \quad (22)$$

Transitional regime

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln \left[\frac{K_s^+ - 2.25}{87.75} + C_s K_s^+ \right] \times \sin \{ 0.4258 (\ln K_s^+ - 0.811) \} \quad (23)$$

(2.25 < $K^+ \leq 90$)

Fully rough regime

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln (1 + C_s K_s^+) \quad (K^+ > 90) \quad (24)$$

여기서 C_s 는 거칠기 형상에 따라 상이하게 결정되며 일반적으로 0.5에서 1 사이의 값을 가진다. 본 연구에서는 거칠기 높이에 따른 차이를 비교하기 위해 모든 조건에서 일정한 값인 1을 적용하였다. 거칠기 높이 K_s 는 0.01m 및 0.05m의 두 조건으로 설정하였다. 해당 값은 물리적으로 실제 탱크 내벽에 부착이 가능하며, 구조적으로 실현 가능한 범위를 고려하여 선정되었다. 각 조건은 서로 다른 거칠기 수준에서의 유동 저항 변화를 비교 분석할 수 있을 만큼 충분한 차이를 가지며, 해석 결과에 유의미한 영향을 미칠 수 있도록 설계되었다. 아울러, 거칠기 조건 모두 $y^+ > 30$ 을 만족하여 난류 벽 함수가 적용 가능한 영역에 해당하며, 해당 조건 하에 Standard Law-of-the-Wall Modified for Roughness 모델을 통해 표면 거칠기 효과가 안정적으로 반영되도록 하였다.

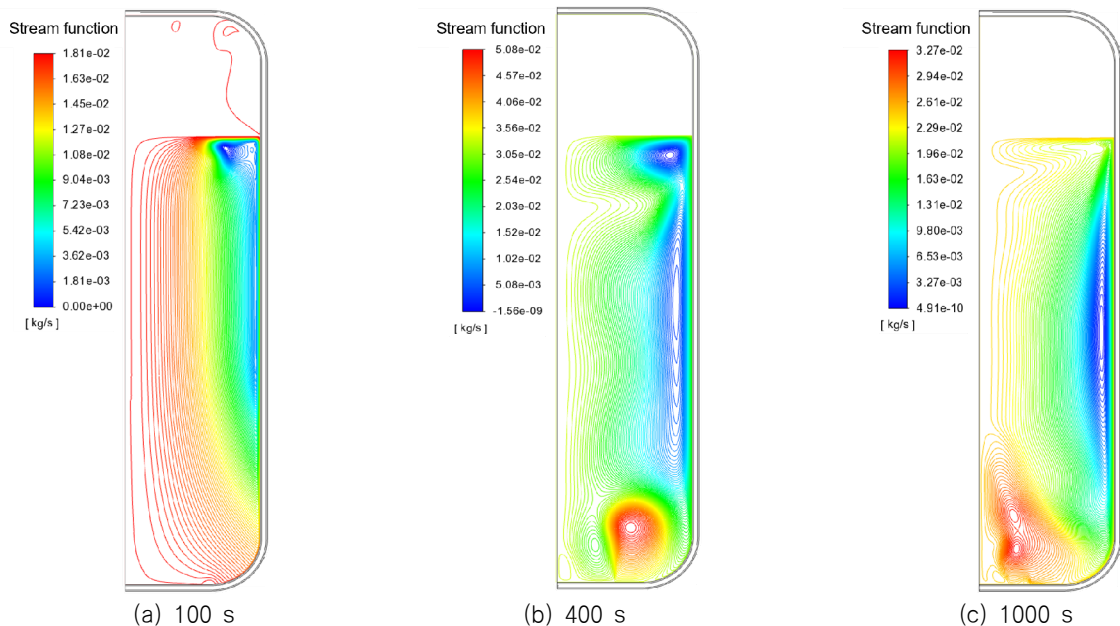
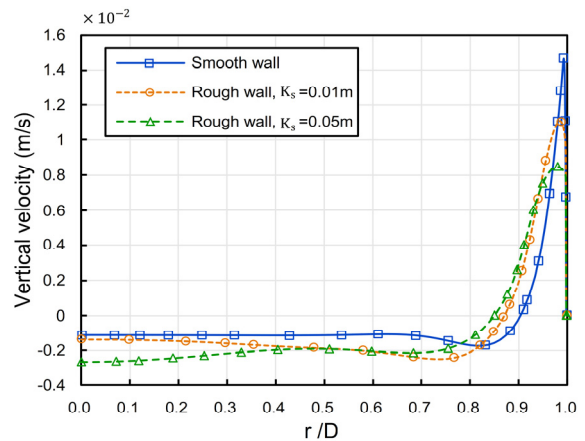


Fig. 4 Stream function contours of the liquid phase for a smooth wall

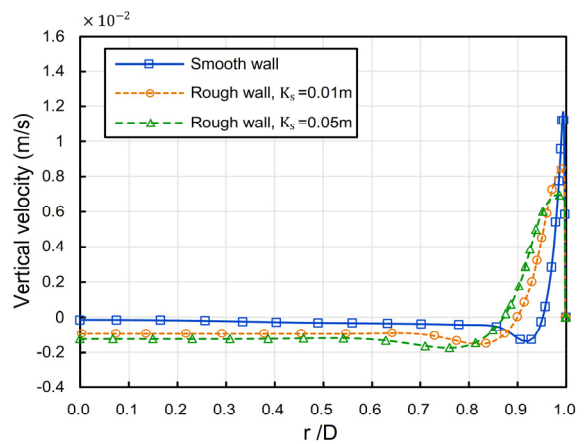
3. 결과

3.1 자연대류 유동 및 열성층화

저장탱크 벽면을 통한 열유입은 내부 유체의 온도 구배로 인한 밀도 차이를 유발하여 부력에 의해 자연대류 순환 유동을 형성한다. 이러한 유동은 벽면을 따라 상승하고 중심부를 따라 하강하는 전형적인 순환 구조를 보인다. Fig. 4에 제시된 매끄러운 벽 조건의 유동 함수 분포를 보면, 초기 100s 시점에서는 벽면에서 가열된 유체가 부력에 의해 상승하여 자유수면 근처에서 탱크 축 방향으로 흐르고, 이 과정에서 증발로 열을 손실하여 온도가 낮아지고 밀도가 증가한 유체가 탱크 축을 따라 하강하는 단일 순환이 관찰된다. 시간이 경과함에 따라 단일 순환 구조는 유지되면서 자유수면 인근에서 이차 순환이 형성되는데, 이는 벽면 열 경계층과 벌크 유체간의 상호 작용 및 역류 흡입층의 결합에 기인한다. 이와 같은 유동 구조는 Fu et al. (2014)에서도 관찰된 바 있으며 시간이 지남에 따라 그 구조가 더욱 뚜렷해지고 전체 유동은 점차 안정화된다. 이러한 자연대류 순환은 밀도가 높은 저온 유체는 하부로 가라앉고 상대적으로 밀도가 낮은 고온 유체는 상부에 분포하는 열성층화를 유도한다. Fig. 5에서 확인되듯, 초기 단계에서는 벽면 인근과 자유수면 부근에서 국부적인 온도 구배가 형성된다. 자연대류가 지속되는 과정에서 상·하부 간 온도 구배가 확대되고, 1000s 시점에서는 상부 고온층과 하부 저온층이 명확히 분리된 열성층화 구조가 확립된다. 이와 같이 발달한 열성층화는 자유수면 인근에서의 증발을 촉진하고, 그 결과 극저온 액체화물 탱크에서의 BOG 발생과 자가 가압을 증가시키는 요인으로 작용한다.

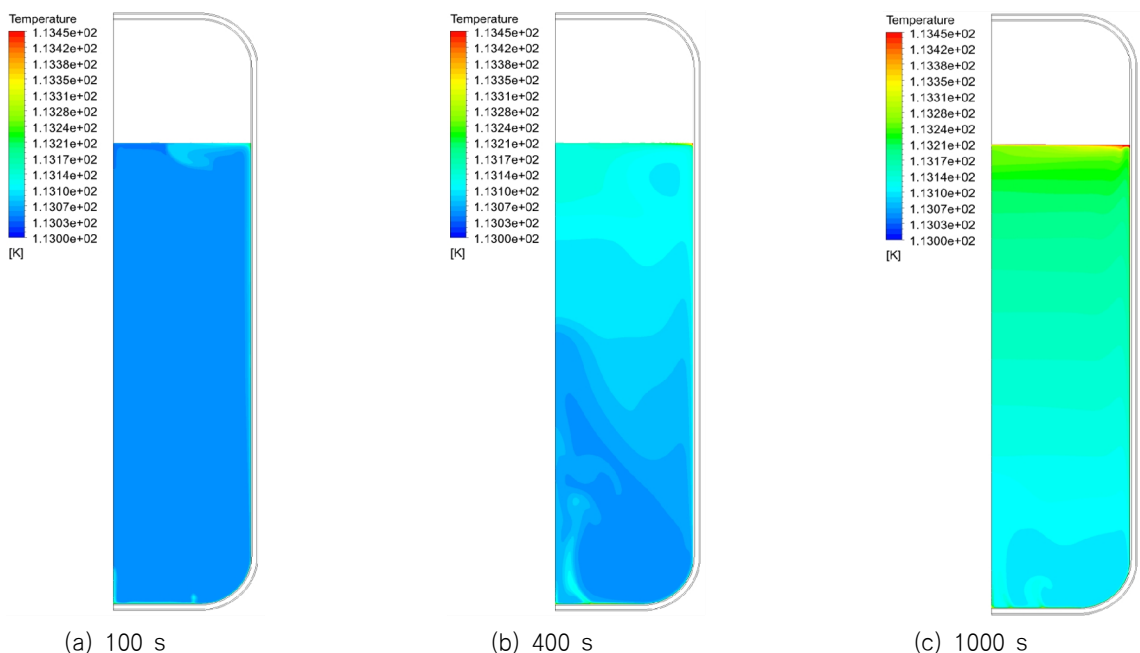


(a) 1000 s



(b) 4000 s

Fig. 6 Vertical velocity distribution along the r-direction in the liquid phase ($y = 0.7m$)



(a) 100 s

(b) 400 s

(c) 1000 s

Fig. 5 Temperature contours of the liquid phase for a smooth wall

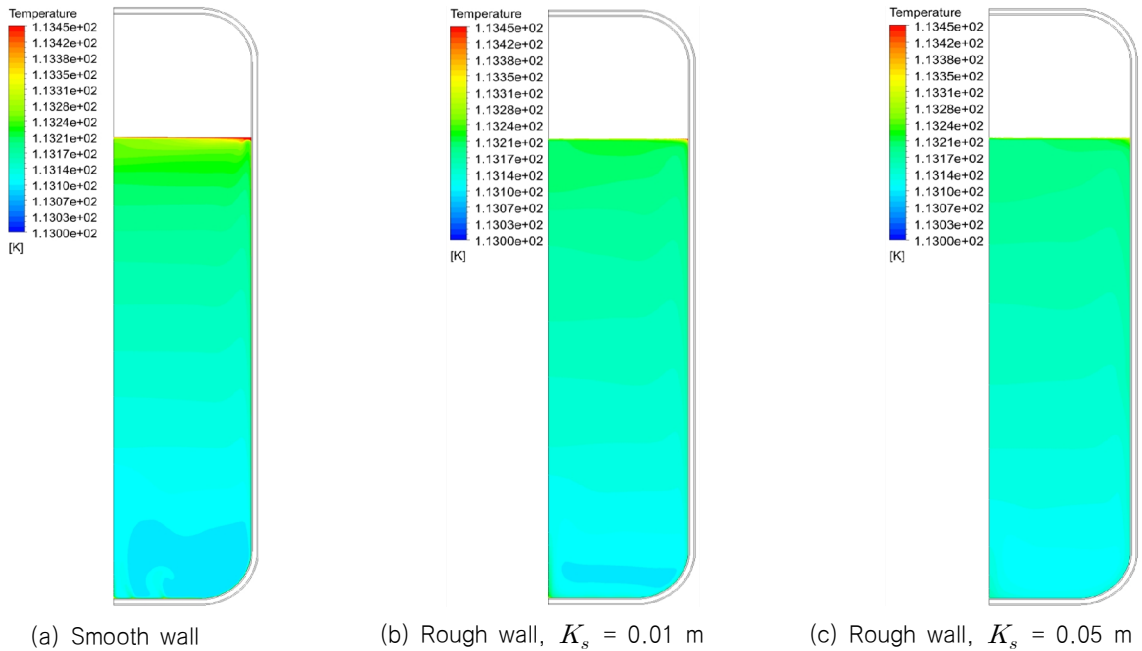


Fig. 7 Temperature contours at $t = 1000$ s for smooth and rough wall conditions

3.2 거칠기에 의한 속도 분포

Fig. 6은 저장탱크 높이 $y = 0.7$ m에서 반지름 방향 r 에 따른 수직 속도 분포를 나타내며, 벽면 거칠기가 자연대류 유동 특성에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 매끄러운 벽과 거칠기 높이 0.01m, 0.05m의 세 조건에 대해, 1000s, 4000s 시점에서의 유속 분포를 비교하였다. 모든 조건에서 벽면 근처($r/D \approx 1$)에서 최대 유속이 관찰되었으며, 이는 탱크 외벽을 통한 열유입이 해당 위치에서 가장 큰 온도 구배를 형성하고, 이에 따른 부력 효과가 지배적으로 작용했기 때문이다. 반면, 중심축 방향으로 멀어질수록 온도 구배와 부력이 감소하여 유속이 저하되는 양상을 보

인다. 1000s 시점에서 벽면 인근 최대 유속은 매끄러운 벽 조건에서 약 1.47×10^{-2} m/s, $K_s = 0.01$ m 조건에서 1.11×10^{-2} m/s, $K_s = 0.05$ m 조건에서 0.84×10^{-2} m/s로 나타났으며, 거칠기 높이가 증가함에 따라 최대 유속은 매끄러운 벽 대비 각각 24.3%, 42.2% 감소하였다. 이러한 감소는 거칠기 요소가 벽면 전단 응력을 증가시켜 벽면 인근 유동 저항이 커지고, 자연대류에 의해 유도되는 상향 흐름을 효과적으로 억제한 결과이다. 4000s 시점에서는 탱크 내부 온도 구배가 완화되면서 부력 기반 자연대류의 구동력이 약화되어 전체 유속이 모든 조건에서 감소하였다. 거칠기에 의한 벽면 근처 고온 유체의 상승 유속 저하는 유지되었으며, 이는 열성층화의 형성을 지연시키고 자유수면으로의 열 전달

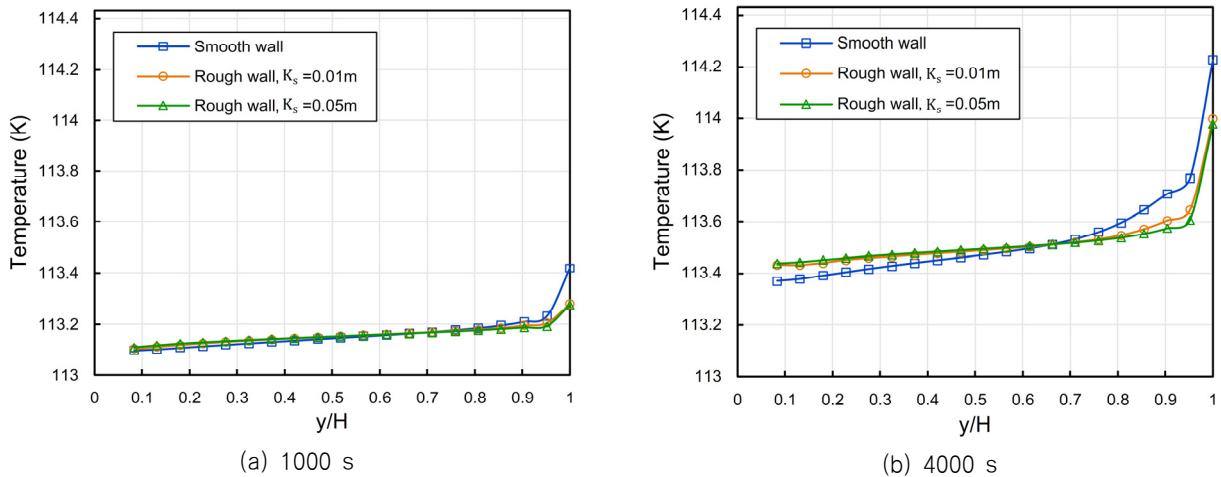


Fig. 8 Vertical temperature distribution in the liquid phase at $r = 0.15$ m for smooth and rough wall conditions (H : filling ratio 80%)

을 억제하여 열성층화의 심화를 효과적으로 완화하는 메커니즘으로 작용한다.

3.3 거칠기에 따른 열성층화 억제 효과

Fig. 7은 1000s 시점에서 매끄러운 벽과 거칠기 조건에 따른 저장탱크 내부 액체의 온도 분포를 나타낸다. 모든 조건에서 상부 고온층과 하부 저온층으로 구분되는 열성층화가 형성되었으나, 거칠기 조건에서는 벽면 근처 상승 유속 저하의 영향으로 상부 온도가 낮고 고온층 발달이 억제되는 양상이 나타났다. 특히 거칠기 높이가 증가할수록 이러한 억제 효과가 강화되어 열성층화 강도가 완화되었다.

Fig. 8은 액체상의 $r = 0.15m$ 위치에서의 수직 온도 분포를 통해 이러한 거동을 정량적으로 뒷받침한다. 1000s 시점에서 자유수면 온도는 매끄러운 벽 조건에서 113.42K로 가장 높았으며, $K_s = 0.01m$ 및 $K_s = 0.05m$ 조건은 각각 113.28K, 113.25K로 나타나, 거칠기 높이가 증가에 따라 액체 상부 온도가 점진적으로 감소함을 보여준다. 4000s 시점에서는 상·하부 간 온도 구배 증가와 액체 상부 온도 상승으로 열성층화가 심화되었다. 그러나 거칠기 조건에서는 상부 온도가 매끄러운 벽 대비 여전히 낮게 유지되어, 거칠기가 열성층화를 억제하는 메커니즘이 장기적으로 지속됨을 확인할 수 있다.

3.4 액체상 탱크 측벽 입열

Fig. 9는 시간에 따른 액체상의 벽면 평균 열유속 변화를 도시한 것이다. 모든 조건에서 평균 열유속은 초기 과도 구간 이후 약 $23.5 W/m^2$ 로 수렴하였으며, 조건 간 편차는 $\pm 1\%$ 이내로 매우 작았다. 이는 벽면 거칠기 적용 여부와 관계없이 벽면을 통한 액체상에서의 입열은 동일하게 유지됨을 의미한다.

벽면 거칠기는 입열에는 직접적인 영향을 미치지 않으나, 탱크 내부의 대류 구조를 변화시켜 자유수면 온도를 낮추는 효과를 유

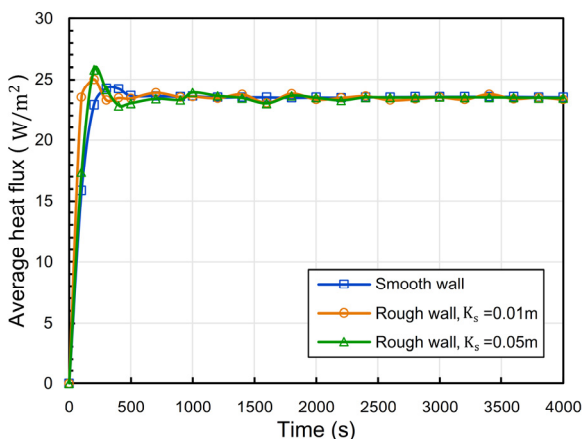


Fig. 9 Average heat flux at the liquid phase side wall for smooth and rough wall conditions

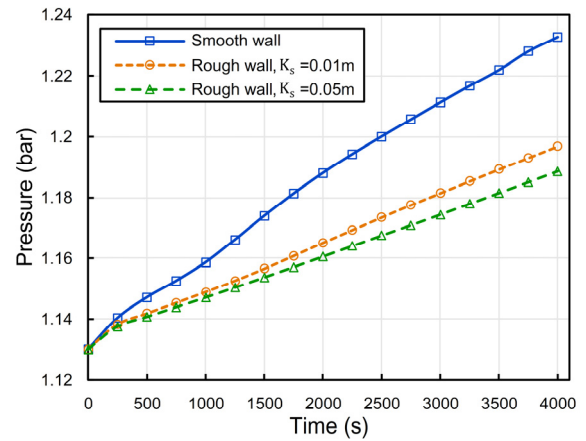


Fig. 10 Pressure rise in the tank for smooth and rough wall

발한다. 이와 같은 온도 저하는 액체 증발 거동에 차이를 유발하는 요인으로 작용하며, 동일한 입열 조건에서도 증발 거동이 달라질 수 있음을 시사한다.

3.5 탱크 내부 압력 상승 비교

극저온 저장탱크에서는 벽면을 통한 열 유입이 제한적이므로, 내부 압력 상승은 비등보다는 기체-액체 경계면에서의 증발이 주된 원인으로 작용한다. 앞선 결과에서 확인된 바와 같이, 거칠기 조건에서는 열성층화의 완화를 통해 자유수면 온도가 매끄러운 벽 조건에 비해 지속적으로 낮게 유지되었으며, 이는 자유수면에서의 증발량 감소로 이어져 탱크 내부 압력 상승을 억제하였다.

Fig. 10의 결과에 따르면, 500s 이전 구간에서는 세 조건 간 압력 상승의 차이가 두드러지지 않았다. 이는 초기 구간에서 열성층화가 충분히 형성되지 않아, 거칠기의 영향이 자유수면 온도 및 증발량 변화에 유의미하게 작용하지 않았기 때문이다. 그러나 1000s 이후 열성층화가 발달하면서 조건별 압력 상승률의 차이가 점차 확대되었다. 매끄러운 벽 조건에서는 상부 고온층의 온도가 상대적으로 높게 유지되고, 이에 따른 증발량 증가로 높은 압력 상승을 보였다. 반면, 거칠기 조건에서는 열성층화가 완화되면서 압력 상승 속도가 상대적으로 낮게 유지되었다.

4000s에서 매끄러운 벽 조건은 1.232bar로 가장 높은 압력을 기록한 반면, $K_s = 0.01m$ 와 $K_s = 0.05m$ 조건에서는 각각 1.197 bar 및 1.188bar로 더 낮은 압력을 나타냈다. 이 값은 매끄러운 벽 대비 압력 상승률이 34.3%, 43.1% 낮은 수준으로, 거칠기 높이가 클수록 내부 압력 상승 억제 효과가 뚜렷해짐을 보여준다.

3.6 Boil-off gas 증기량 비교

Fig. 11은 시간에 따른 BOG 증기량 변화를 나타내며, 벽면 거칠기가 탱크 내 증발 거동에 미치는 영향을 비교한 결과이다. 모

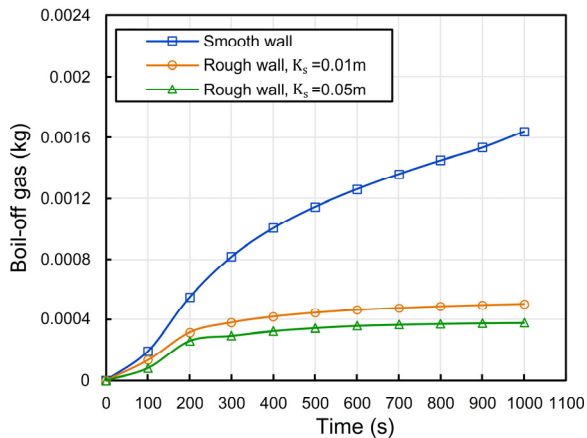


Fig. 11 Boil-off gas generation in the tank for smooth and rough wall conditions

든 조건에서 초기 200s 구간에는 탱크 내벽과 액체 사이의 큰 온도 구배로 인해 BOG가 급격히 증가하는 양상을 보였다. 시간이 경과함에 따라 매끄러운 벽 조건에서는 액체의 증발이 뚜렷하게 발생하였으나, 거칠기 조건에서는 열성층화 억제에 따라 BOG 발생량이 매끄러운 벽 대비 현저히 낮게 나타났다. 1000s 시점에서 매끄러운 벽 조건의 BOG 질량은 약 0.0016kg, $K_s = 0.01m$ 조건은 약 0.0005kg, $K_s = 0.05m$ 조건은 약 0.00037kg으로 나타났다. 이는 각각 매끄러운 벽 대비 69%, 77% 감소한 수준으로, 거칠기 증가에 따라 증발 억제 효과가 뚜렷하게 향상됨을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 앞선 결과에서 확인된 열성층화 완화 및 액체 상부 온도 저하에 기인하며, 벽면 거칠기가 LNG 저장탱크 내 증발 및 자가 가압을 효과적으로 저감할 수 있음을 보여준다.

4. 결론

본 연구는 다상 유동 기반 CFD 해석을 통해 벽면 거칠기가 LNG 저장탱크 내부 열유동 및 자가 가압 거동에 미치는 영향을 정량적으로 규명하였다. 해석 결과, 벽면 거칠기는 내부 유동 메커니즘을 변화시켜 열성층화를 효과적으로 완화하고, 이에 따라 압력 상승과 BOG 발생을 유의하게 저감할 수 있음이 확인되었다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 자연대류에 의해 유도되는 내부 순환은 저장탱크 내 상부 고온층과 하부 저온층이 분리되는 열성층화의 형성을 주도한다. 발달한 열성층화는 자유수면의 온도를 높여 증발을 촉진하는 주요 원인으로 작용한다.
- 벽면 거칠기($K_s = 0.01m, 0.05m$)는 벽면 전단 응력 증가에 따른 유동 저항으로 인해 벽면 인근 고온 유체의 상승 속도를 최대 42.2% 감소시켰다. 이로 인해 열성층화의 형성 및 자유수면으로의 열전달이 지연되고, 열성층화가 효과적으로 완화되었다.

- 벽면 거칠기는 탱크 내부로의 총 입열량에는 큰 영향을 미치지 않았으나, 내부 유동 구조에 변화를 유도하여 자유수면 온도를 낮추는 효과를 보였다. 그 결과 동일한 입열 조건에서도 자유수면에서의 증발이 억제되었으며, 최종 압력 상승량은 매끄러운 벽 대비 최대 43.1% 낮은 수준으로 유지되어 내부 압력 상승이 유의미하게 저감되었다. BOG 발생량 또한 매끄러운 벽 대비 각각 69%, 77% 감소하여, 벽면 거칠기가 증발 및 자가 가압을 효과적으로 저감시키는 주요 인자로 작용함을 확인하였다.
- 본 연구에서는 거칠기의 효과를 난류 벽 함수 모델을 통해 유동 저항 관점에서 고려하였다. 그러나 실제 거칠기 부착 시 내부 유체와의 접촉 면적 증가 및 거칠기 재질의 열전도율에 따라 벽면을 통한 열전달이 강화될 것으로 예상된다. 향후 연구에서는 실제 거칠기 형상 및 재질에 따른 고체-액체 간 열전도 특성을 고려한 열-유동 연성 해석 모델을 구축함으로써, LNG 저장탱크의 구조적 안정성과 BOG 저감 성능을 고려한 설계 기준을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다(RS-2023-KI002688, 2025년 산업혁신인재성장지원사업).

References

- ANSYS Inc., 2021a. *ANSYS Fluent User's Guide, Release 2021 R1*. Canonsburg, PA: ANSYS Inc.
- ANSYS Inc., 2021b. *ANSYS Fluent Theory Guide, Release 2021 R2*. Canonsburg, PA: ANSYS Inc.
- Bhavani, S.H. and Bergles, A.E., 1990. Effect of surface geometry and orientation on laminar natural convection heat transfer from a vertical flat plate with transverse roughness elements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 33, pp.965-981.
- Cebeci, T. and Bradshaw, P., 1977. *Momentum Transfer in Boundary Layers*. Washington, D.C.: Hemisphere Publishing Corporation; New York: McGraw-Hill, p.407.
- Enayati, H., Chandy, A.J. and Braun, M.J., 2016. Numerical simulations of transitional and turbulent natural convection in laterally heated cylindrical enclosures for crystal growth. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 70(11), pp.1195-1212.
- Ferrín, J.L. and Pérez-Pérez, L.J., 2020. Numerical simulation of natural convection and boil-off in a small size pressurized LNG storage tank. *Computers & Chemical*

- Engineering*, 138, 106840.
- Fohanno, S. and Polidori, G., 2005. Effect of the gap size in the start-up free convective flow around a square prism near a wall. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 26, pp.25-33.
- Fu, J., Sunden, B. and Chen, X., 2014. Influence of wall ribs on the thermal stratification and self-pressurization in a cryogenic liquid tank. *Applied Thermal Engineering*, 73, pp.1421-1431.
- Gursu, S., Sherif, S., Veziroglu, T. and Sheffield, J., 1993. Analysis and optimization of thermal stratification and self-pressurization effects in liquid hydrogen storage systems – part 1: model development. *Journal of Energy Resources Technology*, 115, pp.221-227.
- Hofmann, A., 2006. The thermal conductivity of cryogenic insulation materials and its temperature dependence. *Cryogenics*, 46(11), pp.815-824.
- Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA), 2024. *Global LNG Outlook 2024-2028*. London: Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA)
- Khurana, T.K., Prasad, B.V.S.S.S., Ramamurthi, K. and Murthy, S.S., 2006. Thermal stratification in ribbed liquid hydrogen storage tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(15), pp.2299-2309.
- Kulitsa, M. and Wood, D.A., 2018. LNG rollover challenges and their mitigation on floating storage and regasification units: new perspectives in assessing rollover consequences. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 54, pp.352-372.
- Lemmon, E.W, McLinden, M.O. and Friend, D.G., 2025. NIST standard reference database No. 69: *Thermophysical properties of fluid systems* – NIST chemistry webbook [Online]. National Institute of Standards and Technology. Available at : <https://doi.org/10.18434/T4D303> [Accessed 18 March 2025].
- NIST Cryogenics Technology Group, 1995. *304 Stainless Steel Material Properties* [Online]. Available at: https://trc.nist.gov/cryogenics/materials/304Stainless/304Stainless_rev.htm [Accessed 23 March 2025].
- Miana, M., Legorburo, R., Díez, D. and Hwang, Y.H., 2016. Calculation of boil-off rate of liquefied natural gas in Mark III tanks of ship carriers by numerical analysis. *Applied Thermal Engineering*, 93, pp.279-296.
- Polidori, G. and Padet, J., 2003. Transient free convection flow on a vertical surface with an array of large-scale roughness elements. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 27, pp.251-260.
- Roh, S., Son, G., Song, G. and Bae, J., 2013. Numerical study of transient natural convection in a pressurized LNG storage tank. *Applied Thermal Engineering*, 52(1), pp.209-220.
- Saleem, A., Farooq, S., Karimi, I.A. and Banerjee, R., 2018. A CFD simulation study of boiling mechanism and BOG generation in a full-scale LNG storage tank. *Computers & Chemical Engineering*, 115, pp.112-120.
- Shakerin, S., Bohn, M. and Loehrke, R.I., 1988. Natural convection in an enclosure with discrete roughness element on a vertical heated wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 31, pp.1423-1430.



김성욱

김유일