

액화수소 저장탱크의 수평요동이 증발 특성에 미치는 영향에 대한 연구

오승준 · 권준영 · 윤정환[†]

동아대학교 고기능성밸브 기술지원센터

A Study on the Effect of Evaporation of Liquid Hydrogen Tank Related to Horizontal Sinewave

SEUNG JUN OH, JUN YEONG KWON, JEONG HWAN YOON[†]

Technical Center for High-Performance Valves, Dong-A University, 37 Nakdong-daero 550beon-gil, Saha-gu, Busan 49315, Korea

[†]Corresponding author :

yoenjeonghwan@dau.ac.kr

Received 3 February, 2023

Revised 28 February, 2023

Accepted 23 March, 2023

Abstract >> Recently, a study on alternative and renewable energy is being conducted due to energy depletion and environmental problems. In particular, a hydrogen has the advantage of converting and storing the remaining energy into water-electrolyzed hydrogen through renewable energy generation. In general, due to reasons such as insulation problems, a study on high-pressure hydrogen storage tanks and related parts has recently been conducted. However, in the case of liquid hydrogen, the volume can be reduced by about 800 times or more compared to high-pressure hydrogen gas, so the study on this is needed as a technology that can increase energy density. In this study, the evaporation characteristics were analyzed under fixed heat flux conditions for liquid hydrogen storage tanks and the change in thermal stratification according to sloshing was analyzed. The heat flux condition was fixed at 250 W/m^2 and the horizontal resonance frequency of the primary mode was applied to the storage tank. As a result, it was confirmed that the thermal stratification phenomenon decreased compared to the case where the sloshing was not present due to forced convection when the sloshing was present.

Key words : Hydrogen(수소), Storage tank(저장탱크), Sloshing(슬로싱), Evaporation(증발), Numerical analysis(수치해석)

1. 서론

슬로싱(sloshing)은 작동 유체가 탱크 내부에 부분 충전되어 있는 경우에서 내/외부 외력(지진파, 운송

수단의 움직임 등)에 의해 유체가 좌우 및 상하로 움직이는 현상을 나타낸다. 이러한 현상은 집중 압력을 발생시켜 탱크 자체의 안전성 문제를 일으키며 액화 가스의 대류 현상에도 영향을 미쳐 액화가스의 증발

특성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 극저온 관련 유체에 대한 슬로싱 연구가 많이 보고되고 있다.

Faltinsen¹⁾은 2차원 사각 용기에서 수평 방향으로의 요동에 의한 선형 해석해(linear analytical solution)를 보고하였으며 본 결과는 수치해석 연구와 실험 연구에 대한 검증 기법으로 적용되고 있다. Faltinsen과 Timokha²⁾는 다중모드해석 방법(multimodal analysis)으로 유한 수심으로 유지되는 사각용기에 대한 비선형 슬로싱에 관한 연구를 수행하였다. Hill³⁾은 직사각형 탱크에서 2차원 약한 비선형 분석 결과를 제시하였는데, 파동은 파동수 벡터의 정렬된 축을 따라 주기적인 진동에 의해 공명되고 진폭 응답 다이어그램은 이전 실험 조사와 잘 일치함을 보고하였다. 그러나 임계 깊이 근처와 얇은 깊이에서는 유효하지 않으며, 이러한 경우에 적합한 결과를 얻기 위해서는 별도의 분석이 제시된다. Verhagen과 van Wijngaarden⁴⁾은 직사각형 용기에서 유체의 강제 진동에 대해 연구하였고 이러한 진동을 지배하는 방정식의 선형화된 근사치로부터 진동의 진폭이 무한해지는 공진 주파수를 적용하였다. 해당 연구에서는 낮은 공진 주파수에서 실험적으로 측정되었으며 그 결과는 이론값과 잘 일치한다고 보고되었다. Okamoto와 Kawahara⁵⁾는 2차원 슬로싱 분석을 라그랑지안 유한 요소 방법(Lagrangian finite element method)으로 수행하였다. 해당 연구에서는 실험 데이터를 적절하게 모사하였고 이를 통해 용기 내의 슬로싱 웨이브는 본 방법으로 분석 가능하다고 보고하였다. Park과 Kim⁶⁾은 슬로싱 문제에 대해 1유체 방법과 2유체 방법을 각각 적용하여 수평 선형 요동과 수평축 회전 유동에 대해 연구하였다. 2유체 방법은 격자 크기와 시간 간격에 결과가 민감하게 반응하지만 수렴된 결과는 유체 체적법(volume of fluid, VOF)의 수렴된 결과보다 좀 더 실험에 일치하는 결과를 보여주었다. Hosain 등⁷⁾은 수치 연구에서 슬로싱을 조사하기 위해 축소된 2D 기하학 형상을 적용하였으며 슬로싱의 흐름 구조를 이해하고 유사도 척도 법칙을 기반으로 다운스케일링 접근법을 검증했다. VOF 방법과 smoothed particle hydrodynamics (SPH) 방법을 사용하여 레이놀

즈 평균 나비에-스토크스 방정식(RANS)을 기반으로 하여 해석을 진행하였다. SPH 모델은 슬로싱 현상을 효율적으로 모사할 수 있고 SPH가 central processing unit (CPU) 시간 측면에서 비용이 많이 드는 RANS-VOF 접근 방식과 비교하여 슬로싱 현상을 모델링하는데 효율적이라고 보고하였다. 슬로싱의 수치해석 기법으로는 marker and cell 방법과 VOF 방법, level set 방법, coupled level set and volume of fluid 방법, SPH 방법, finite element method 방법 등 다양한 기법으로 연구되어 왔다⁶⁾. 하지만 sloshing 현상과 열전달 현상 규명에 대한 연구는 미미하다.

본 논문에서는 타 연구 결과를 참조하여 VOF 방법을 적용하여 액화수소 저장탱크의 sloshing 특성을 분석하고 열전달에 따른 증발 특성 거동 연구를 진행하여 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1 지배방정식

액화 수소 연료탱크의 증발 특성을 분석하기 위해 ANSYS Fluent 프로그램을 적용하였으며 액상과 기상의 경계면에서의 증발-응축 모사를 위해 VOF⁸⁾를 적용하였다. 액체-증기에 대한 열전달 및 상변화 분석을 위해 적용된 지배방정식은 다음과 같다^{9,10)}.

-The mass conservation equation (2D axisymmetric geometries)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l + \rho_v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho_l u_l + r\rho_v u_v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_l u_l + \rho_v u_v) = \dot{m} \quad (1)$$

-The momentum conservation equation-radial direction (2D axisymmetric geometries)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_l u_l + \rho_v u_v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_l u_l^2 + r \rho_v u_v^2) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_l u_l v_l + \rho_v u_v v_v) = - \frac{\partial p}{\partial r} \\ & + \nabla \cdot \left[(\mu_l + \mu_v) \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(u_l + u_v)] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} (u_l + u_v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(u_{lt} + u_{vt})] \\ & + \frac{\partial}{\partial r} (u_{lt} + u_{vt}) \end{aligned} \right\} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

-The momentum conservation equation-axial direction (2D axisymmetric geometries)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_l u_l + \rho_v u_v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_l u_l v_l + r \rho_v u_v v_v) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_l v_l^2 + \rho_v v_v^2) = - \frac{\partial p}{\partial z} \\ & + \nabla \cdot \left[(\mu_l + \mu_v) \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(v_l + v_v)] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} (v_l + v_v) + \\ & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(v_{lt} + v_{vt})] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} (v_{lt} + v_{vt}) \end{aligned} \right\} \right] + (\rho_l + \rho_v)g \end{aligned} \quad (3)$$

-The energy conservation equation (2D axisymmetric geometries)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_l h_l + \rho_v h_v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \alpha u_l (\rho_l h_l + p) \\ & + r(1 - \alpha) u_v (\rho_v h_v + p)] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} [\alpha v_l (\rho_l h_l + p) + (1 - \alpha) v_v (\rho_v h_v + p)] \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} (k_{eff} T) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 ρ 는 밀도이고, 하첨자 l 은 liquid, v 는 vapor를 나타낸다. u, v 는 각각 원통좌표계의 축 방향 및 반경 방향 속도를 나타낸다. P 는 압력, Q 는 열유량이다.

2.2 해석 모델

액화수소 저장탱크의 수평요동에 의한 증발 특성을 분석하기 위해서는 본 연구에 앞서 해석 기법 등

의 검증이 필요하다. 따라서 선행연구의 결과와 비교 및 검증을 하기 위해 동일 모델 및 동일 경계 조건을 적용하였다. 검증에 적용된 선행연구는 2가지로 액화수소 증발 논문^{11,12)}과 수평요동 실험 논문¹³⁾을 참고하였다. Fig. 1은 본 연구에 적용된 액화수소 저장탱크를 나타내며, 선행연구의 모델과 동일하게 생성하였다. 저장탱크는 직경 0.5 m, 높이 1 m인 원통 탱크로 설정하였으며 그림과 같이 초기 탱크 부피의 1/2에 해당하는 영역에는 액화수소, 나머지 1/2에는 증기로 설정하였다. 가진의 종류는 수평요동으로 선행연구 실험 데이터를 활용하여 수치해석 기법을 검증하였다. Fig. 2는 수평요동 실험에 적용된 사각 탱크 단면을 나타내며, 그림과 같이 가로 0.57 m, 세로 0.3 m의 2차원 사각 탱크에 물이 초기에는 0.15 m로 존재한다.

2.3 경계 조건

액화수소 저장탱크의 증발 특성 해석을 위해 초기 액상의 상태는 온도의 경우, 대기압 조건(101.32 kPa)에서 준포화 상태(20.268 K)로 설정하였고, 기상의 경우 역시 액상과 동일하게 대기압 조건 및 포화온도로 설정하였다.

액화수소 저장탱크의 바닥면과 상부면은 각각 단열조건으로 설정하였다. 또한 액화수소가 접하는 벽면인 sidewalls II에서 저장탱크 내부로 열유입이 되며 그 외의 sidewalls I에서는 단열 조건 및 no slip 조건을 설정하였다. 벽면을 통한 열유속(heat flux)은

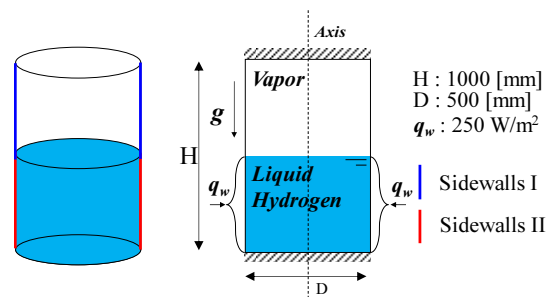


Fig. 1. Geometry of liquid hydrogen storage tank

선행연구의 조건 중 250 W/m^2 로 설정하였다. 압력-속도 연계에 적용된 알고리즘은 semi-implicit method for pressure linked equations consistent를 적용하였고 난류 모델의 경우 $k-\epsilon$ 모델을 적용하였다. Standard wall functions는 near-wall region을 위해 사용되었고 다상 유동을 위해 volume fraction parameter를 implicit으로 설정하였다. 액화수소 저장탱크의 수평요동에 의한 증발 특성을 분석하기 본 해석에 앞서 해석 기법 등의 검증에 대해 선행연구의 결과와 비교 및 검증 과정에서 액화수소 저장탱크의 sloshing 검증에 대한 경계 조건으로 수평요동에서는 VOF으로 설정하였고 내부 순환유동에 수치 모사가 적합한 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 또한 near-wall treatment는 enhanced wall treatment로 설정하였다. 수평요동은 모드 공진을 탱크에 인가하기 위해 선형 근사 공진주파수로 1차 모드 공진의 공진주파수 $\omega_1 = 6.0578 \text{ rad/s}$ 로 설정하였고 선형 변위는 $x_e = -A \sin(\omega t)$ 이고 선형속도는 $v_e = -A \omega \cos(\omega t)$ 이다. 따라서

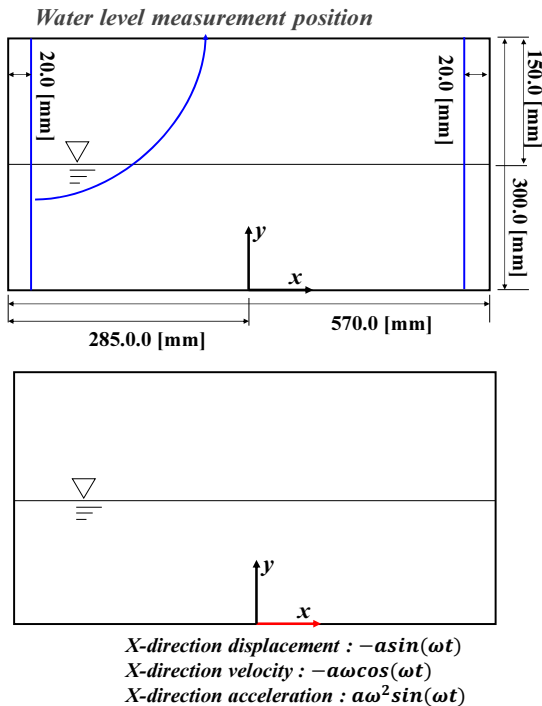


Fig. 2. Schematic diagram of horizontal sinewave

user-defined function을 사용하여 탱크에 인가되는 수평변동에 의한 속도를 입력하였다. $y+<1$ 로 유지하기 위해 초기 증발 특성 해석에서 압력 속도 연계는 PISO, 대류항은 2차 QUICK을 적용하였다. 또한 본 해석에 적용된 수소 물성치는 미국 국립표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology)에서 제시하고 있는 데이터¹⁴⁾를 활용하였다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{n\pi g}{L} \tanh\left(\frac{n\pi g}{L}\right)} \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 검증

증발 모델인 Lee model은 적응계수값을 도출하는 것이 중요한 문제이다. 하지만 선행연구들에서 제시된 적응계수를 확보하기 어려우며, 선행연구들에서도 일반적으로 trial and error 과정을 거쳐 도출하였다고 보고되고 있다. 따라서 본 논문에서는 선행연구에서 제시된 연구 결과를 바탕으로 동일 모델, 해석 경계 조건 등을 적용하여 적응계수값을 도출하였고, 열유속 변화 및 진공도에 따른 액화수소 저장탱크의 증발 특성 연구에 선행연구와 비교 및 검증된 계수값을 적용하였다. Fig. 3은 선행연구 결과와 본 연구의 결과를 나타낸다. 그래프에서 x축은 시간 경과를

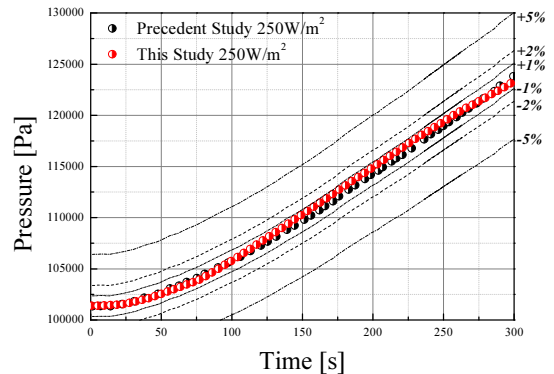


Fig. 3. Average pressure in liquid hydrogen storage tank by verifying in this study

나타내고, y축은 액체수소 저장탱크 내에 존재하는 액체수소가 증발하여 상변화에 따른 부피 증가에 의한 압력 변화를 나타낸다.

그래프와 같이 본 연구에서 도출된 적응계수를 선행연구 데이터와 비교하였을 때 오차율 1% 내에서 적절하게 모사 가능한 것을 확인할 수 있다. 수평요동에 의한 해석 기법 검증에 위해 선행된 연구의 설정과 동일하게 하여 sloshing 해석을 진행하였다. 해석 데이터는 수평요동의 경우 Fig. 2와 같이 좌측 벽면에서 20 mm 지점에서 각각 측정하였다. Fig. 4는 측정 위치에서의 수면 높이를 나타낸다. 그림과 같이 공진주파수로 진동하는 조건에 따라 해석 시간이 경과될수록 내부 작동유체의 요동이 심해지는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 4에서 우측 그래프는 최고 높이, 최저 높이에 대한 데이터를 실험 데이터와 해석 데이터로 나타낸 결과이다. 점선으로 표시된 5% 오차율 이내에서 선행연구의 실험 데이터를 적절하게 잘 모사하는 것을 확인할 수 있다.

3.2 수평요동에 따른 액화수소 증발 특성

앞서 연구된 액화수소 저장탱크 증발 연구 및 수평요동에 의한 sloshing 해석 기법을 바탕으로 액화

수소 저장탱크에서 수평요동과 외부 열유속이 있을 경우에 대해 연구를 진행하였다. 단순 열유속이 있는 경우와 열유속과 수평요동이 있는 경우에 대해 수치 해석을 진행하였다. 수평요동의 경우는 1차 모드 공진주파수를 동일하게 적용하였으며 액화수소가 접하는 벽면에서 250 W/m^2 열유속 조건을 적용하였다. 총 해석 시간은 70 s로 고정하였으며 내부 압력 비교를 통해 실제 수평요동이 있을 경우와 없을 경우 액화수소 증발 특성의 변화를 내부 압력 증가로 비교 분석하였다. Fig. 5는 수치해석 결과 이미지로 온도 분포 등고선을 나타낸다. 그림과 같이 수치해석 후 시간 경과에 따라 sloshing이 없을 경우 열성층화 현상이 나타나지만, sloshing이 있을 경우 이와 반대로 열성층화 현상이 없는 것을 확인할 수 있다. 열성층화는 온도 변화에 따라 유체의 밀도가 변화하여 고온 및 저온의 에너지가 층을 이루는 현상을 나타낸다. 따라서 액체수소 저장탱크 내부에 자연 대류에 의한 상대적으로 미미한 유체 흐름이 존재하는, sloshing이 없는 조건에서 열성층화 현상이 심화되는 것을 확인할 수 있다. Sloshing에 의한 강제 대류가 존재하는 조건에서 열성층화 현상은 나타나지 않는다. 이러한 경향은 동일 시간대 10-70 s 해석 시간에서 제시된 해석 결과 이미지를 보면 sloshing이 없는

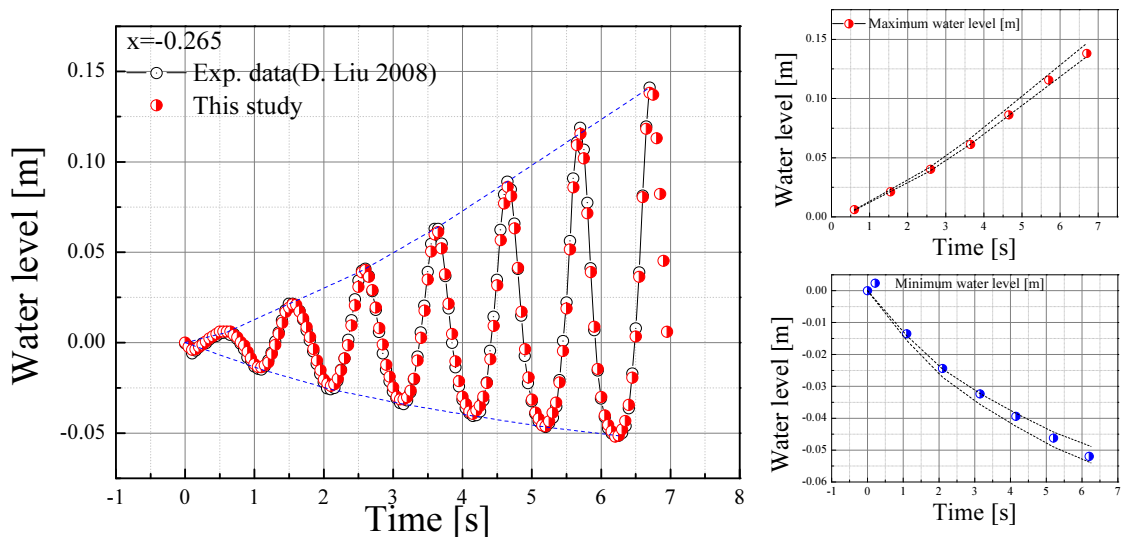


Fig. 4. Comparisons of surface elevation among present numerical results and experimental data

경우 온도 등고선을 보면 비교 가능하다. Fig. 6은 내부 Fig. 3과 동일하게 내부 압력 변화를 시간에 따라 나타내었다. 해석 결과 이미지와 같이 non-sloshing의 경우 sloshing이 있는 경우보다 높은 압력 변화를 예측할 수 있다. 해석 결과 이미지와 같이 non-sloshing의 경우 sloshing이 있는 경우보다 높은 압력 변화를 예측할 수 있다. 이러한 결과는 일반적으로 보고되고 있는 선행연구¹⁵⁾ 결과인 슬로싱에 따른 boil-off-gas (BOG) 증가와 반대되는 경향이 있다. 그 이유는 본 해석에서는 초기 액체수소와 접하는 벽면에 대해 열유속을 국부적으로 고정 설정하여 sloshing에 따른 접촉 벽면 증가가 고려되지 않았기 때문이다. 따라서 추후 슬로싱에 따른 벽면 접촉 면적 증가가 미치는 영향을 분석하기 위해서는 외부 벽면 열유속 설정을 sloshing에 따른 접촉 면적 증가를 고려하여 보완할 필요가 있으며, 본 연구는 비교 데이터로 활용 가능할 것이라 판단된다.

4. 결론

본 연구는 액화수소 저장탱크의 외부 열침투 조건에서 sloshing 현상에 따른 내부 증발 특성을 수치해

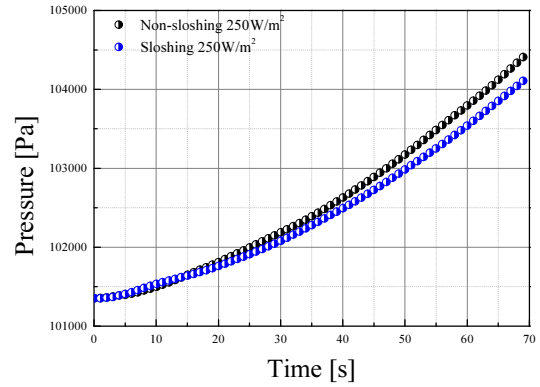


Fig. 6. Average pressure in liquid hydrogen storage tank in condition of sloshing and non-sloshing

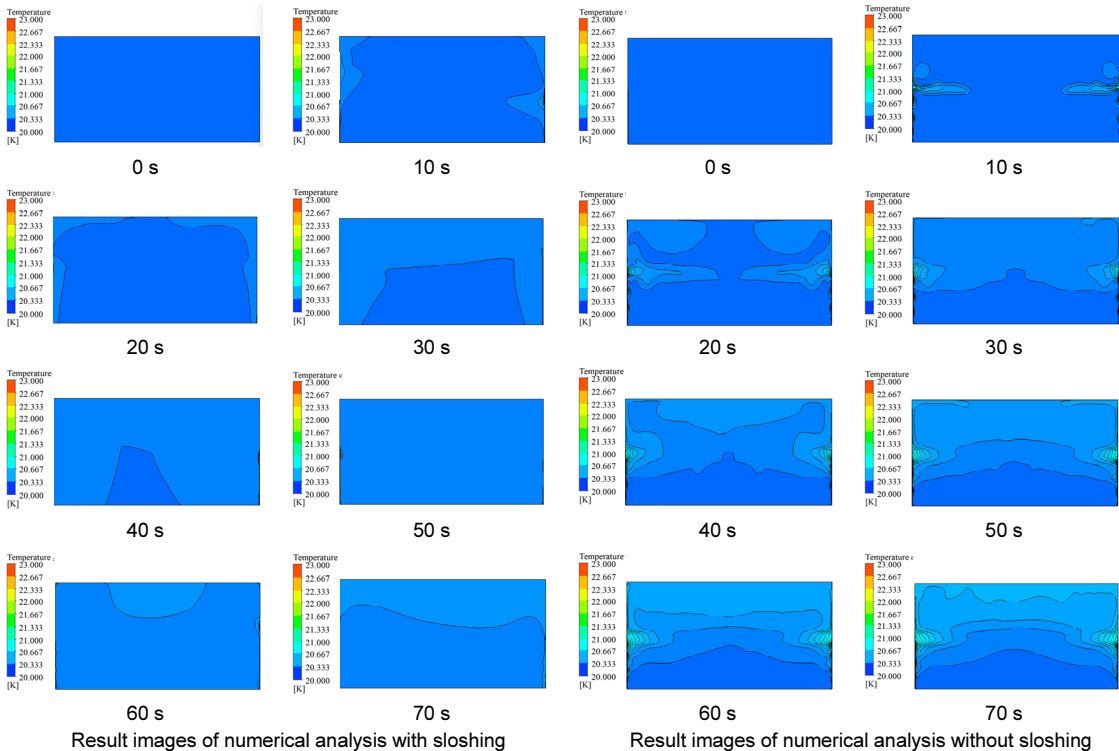


Fig. 5. Results images of temperature distribution in liquid hydrogen storage tank

석적으로 분석하였으며, 액화수소 저장탱크의 증발 특성의 수치해석 기법과 sloshing 현상에 대한 선행 연구 결과와 비교하여 검증하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) 액화수소 증발 수치해석에 적합한 Lee model의 적응계수를 도출하기 위해 trial and error 방법으로 0.0035 (1/s)를 도출하였으며 이를 적용하였을 경우 선행연구 결과를 적절하게 모사할 수 있는 것을 확인하였다. 추후 연구에 본 계수를 적용하여 추가 연구를 진행할 수 있을 것이라 판단된다.

2) Sloshing이 포함될 열침투 조건에서 열성층화 현상은 강제 대류로 인해 상대적으로 sloshing이 없는 경우보다 낮았다.

3) Sloshing에 따른 외부 벽면에서의 열침투 조건을 접촉면 변화에 따라 설정하였을 경우, 열성층화 현상이 강제 대류에 의해 나타나지 않는 sloshing 조건에서 높은 압력 변화를 예측할 수 있을 거라 판단된다.

후 기

본 논문은 2022년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2022730000005A).

References

- O. M. Faltinsen, "A numerical nonlinear method of sloshing in tanks with two-dimensional flow", *Journal of Ship Research*, Vol. 22, No. 3, 1978, pp. 193-202, doi: <https://doi.org/10.5957/jsr.1978.22.3.193>.
- O. M. Faltinsen and A. N. Timokha, "An adaptive multi-modal approach to nonlinear sloshing in a rectangular tank", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 432, 2001, pp. 167-200, doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112000003311>.
- D. F. Hill, "Transient and steady-state amplitudes of forced waves in rectangular basins", *Physics of Fluids*, Vol. 15, No. 6, 2003, pp. 1576-1587, doi: <https://doi.org/10.1063/1.1569917>.
- J. H. G. Verhagen and L. van Wijngaarden, "Non-linear oscillations of fluid in a container", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 22, No. 4, 2006, pp. 737-751, doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112065001118>.
- T. Okamoto and M. Kawahara, "Two-dimensional sloshing analysis by Lagrangian finite element method", *International Journal for Numerical Methods in Fluid*, Vol. 11, No. 5, 1990, pp. 453-477, doi: <https://doi.org/10.1002/flid.1650110502>.
- S. H. Park and B. J. Kim, "Comparative study of two-fluid and VOF methods for sloshing flows", *Trans Korean Soc Mech Eng B*, Vol. 44, No. 12, 2020, pp. 711-716, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2020.44.12.711>.
- M. L. Hosain, U. Sand, and R. B. Fdhila, "Numerical investigation of liquid sloshing in carrier ship fuel tanks", *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, No. 2, 2018, pp. 583-588, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.03.098>.
- ANSYS, "2020 ANSYS FLUENT solver theory", ANSYS, 2020. Retrieved from https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/flu_th/flu_th.html?q=ansys%20fluent%20theory%20guide.
- H. Versteeg and W. Malalasekera, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics", 2nd ed, Pearson Education, UK, 2007.
- S. V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere; McGraw-Hill, USA, 1980.
- B. Sundén and J. Fu, "Heat Transfer in Aerospace Applications", Elsevier, Netherlands, 2017.
- J. Fu, B. Sunden, and X. Chen, "Analysis of self-pressurization phenomenon in a cryogenic fluid storage tank with VOF method", *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Vol. 1: Advances in Aerodynamics, 2013, doi: <https://doi.org/10.1115/IMECE2013-63209>.
- D. Liu and P. Lin, "A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks", *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, No. 8, 2008, pp. 3921-3939, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.12.006>.
- National Institute of Standards and Technology (NIST), "NIST Chemistry WebBook, SRD 69", NIST, 2022. Retrieved from <https://webbook.nist.gov/>.
- S. E. Roh and G. Son, "Numerical investigation of heat transfer in the LNG storage tank with a sloshing condition", *Conference of Korean Society for Computational Fluids Engineering*, 2012, pp. 10-15. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01873765>.