

액체 연료 탱크 내 슬로싱 현상에서의 액적 형성 분석

박성우* · 황진율†

Analysis of droplet formation under sloshing phenomena in liquid fuel tank

Sungwoo Park* and Jinyul Hwang†

Abstract With the global shift from a carbon-based economy to a hydrogen-based economy, understanding the sloshing phenomenon and its impact on boil-off rate (BOR) in liquid hydrogen (LH2) tank trailers is crucial. Here, we analyze the primary breakup process under sloshing phenomena in a liquid fuel tank. We observe the growth of multiple holes on the sheet-like structures and the formation of ligament structures reminiscent of jet atomization. Through the extraction of three-dimensional liquid regions, we analyze the geometrical characteristics of these regions, enabling the classification of sheets, ligaments, and droplets. The present findings could contribute to understanding the breakup mechanism and hold potential for the development of strategies aimed at minimizing BOR.

Key Words : Liquid Fuel (액체 연료), Sloshing (슬로싱), Primary Breakup (1차 분열)

1. Introduction

석탄이나 석유와 같은 화석연료에서 발생하는 온실가스에 의해 지구 온난화 및 기후변화가 가속화됨에 따라 전 세계적으로 온실가스 배출에서 자유로운 친환경 및 신재생 에너지원로의 전환이 진행 중이다. 특히 주요 친환경 에너지원으로 주목받고 있는 것은 수소로 우주 물질의 70% 이상을 차지하기에 고갈될 우려가 없으며 부산물은 물이기에 탈 탄소화가 가능하다. 따라서

2050 탄소중립 달성을 위해서는 수소를 중요 에너지원으로 한 경제 및 산업 구조의 재편이 필수적이다⁽¹⁾.

이에 따라 화석연료 중심의 탄소경제사회에서 수소중심의 수소경제 사회로의 전환이 진행중에 있다. 대한민국에서 발표한 수소경제 로드맵에 따르면 2018년 13만톤 수준이었던 액화수소 공급을 2040년까지 점차 증가시켜 520만톤까지 생산할 계획이다. 수소경제의 전환 및 달성에 따라 예상되는 경제적 가치는 2040년까지 누적된 시장금액으로 약 1조원 정도로 추정된다⁽²⁾.

수소경제로의 전환을 위해서는 수소의 생산, 운송, 저장과 관련된 기술 개발을 통한 산업 생태계 구축이 필수적이다. 2023년을 기준으로 국내에서는 울산, 창원, 인천에 액체수소 플랜트를 구축하여 연간 최대 4만톤의 액화수소가 생산할 예정이며, 전국적으로 액체수소 충전소도 구축

† School of Mechanical Engineering,
Pusan National University, Republic of Korea
Assistant Professor
E-mail: jhwang@pusan.ac.kr

* School of Mechanical Engineering,
Pusan National University, Republic of Korea
Graduate Student

중에 있다. 2040년 기준 연간 수소 공급량은 약 500만톤 이상이 공급되어야 한다.⁽³⁾ 수소의 대용량 생산 후 안정적인 공급을 위해서는 파이프라인, 트레일러, 탱크로리와 같은 수소 운송 수단 기술 개발이 필요하다.

파이프라인의 경우 설치비용과 부대비용 및 유지보수 등 경제적인 부분을 고려하였을 때 상당한 비용이 요구된다. 안정적인 수소 공급을 위해서는 국내의 잘 갖추어진 육상 운송로를 활용해야 한다. 육상을 통한 수소운송은 기체수소와 액체수소 두 가지 방식이 있다. 기체수소식 운송의 경우 기체상태의 수소를 약 800bar로 압축한 뒤 튜브에 나누어 선적하여 튜브 트레일러 형태로 운송하는 방식이다. 이 방식의 장점으로는 높은 수소밀도를 유지하면서 상온저장이 가능하다는 점이다. 액체수소식의 경우 1기압 영하 250도에서 수소를 액화시켜 운송하는 방식이다. 기체식이 충전과 운송방식 측면에서 간단하고 편리하지만 고압으로 인한 내압용기의 안전성 문제가 발생한다. 액화수소 운송의 경우 기체수소 운송 대비 동일한 부피의 경우 훨씬 많은 양을 적해하고 운송할 수 있으므로 비용측면에서 매우 효율적이다.⁽⁴⁾ 따라서, 액화수소를 운송할 수 있는 탱크 트레일러와 같은 운송수단 개발이 필요하다. 그러나 액화수소식은 증발에 의한 상변화를 방지함과 동시에 액화상태로 온전히 운송하기 위하여 고도의 단열시스템이 요구된다. 운송 과정에서 극저온 상태를 유지되지 못한다면 액체상태의 수소가 증발할 수 있다. 따라서 증발률(boil-off rate; BOR)을 최소화하는 기술이 필요하다. 이 때 단열기술뿐만 아니라 주요한 고려사항으로는 탱크 내부 슬로싱(sloshing) 문제이다. 운전 환경에 의해 탱크 내부에서 슬로싱 현상이 발생하면 액체영역의 불규칙한 거동으로 인해 액적(droplet)이 생성되어 증발률이 증가할 수 있기 때문이다.

슬로싱은 저장탱크 내부에 있는 유체가 외력에 의해 급격하게 요동치는 현상으로, 선박, 로켓 연료, 자동차 연료탱크 등에서 흔히 발생한다. 유체의 거동으로 탱크 벽면에 과도한 압력이 발생하고, 이는 탱크 구조에 손상을 초래할 수 있기에

저장 용기 설계 시 슬로싱 현상에 대한 이해가 필수적이다.⁽⁵⁻⁸⁾ 이러한 벽에 걸리는 과도한 압력 문제뿐만 아니라, 극저온 연료탱크에서 발생하는 슬로싱의 경우 액적이 생성되는 현상을 최소화하는 것이 필요하다. 용기 내부 액체 연료가 급격하게 움직이면서 액체 연료와 벽, 액체와 액체간 충돌이 발생한다. 이 과정에서 액적이 생성되며, 더 작은 액적으로 분해되거나 다시 결합될 수도 있다. 이러한 현상은 노즐에서 액체 분사 시 작은 액적이 생성되는 무화(atomization)과정과 유사하다. 일반적으로 무화를 통한 액적 생성 과정은 primary breakup과 secondary breakup 두 가지로 구분된다. Primary breakup은 유체가 노즐에서 분사되어 코어 영역으로부터 국소적으로 얇은 막(film)이 형성되고, 이로부터 길게 늘어진 ligament가 생성되며 이어서 액적이 형성되는 과정을 의미한다. Secondary breakup은 primary breakup을 통해 생성된 액적이 더 작은 지름을 가진 액적으로 붕괴되는 현상을 말한다. 본 연구에서는 슬로싱 시 관측되는 primary breakup 과정을 분석하였다.

기존 문헌들에 따르면 ligament 형상은 유동의 특성에 따라 다양한 형태로 발생한다. Shao⁽⁹⁾ 및 Shinjo 등⁽¹⁰⁾의 연구에선 노즐로부터 분사되는 유체의 제트 유동을 전산 해석하여 버섯 모양의 제트 끝부분에서 떨어져 나오는 ligament 형상과 방향을 분석하여 ligament 형성 과정을 분류하였다. 또한 주변 와류 구조를 동시에 분석하여 ligament 형성 과정에서 이들 구조가 어떠한 역할을 하는지 분석하였다. 탱크 내부 슬로싱에서도 이와 같은 ligament 형성 과정이 발생할 수 있으며 이를 위해서는 순간 유동장상에 존재하는 개별 액체 영역을 검출하고 이들의 발달 과정을 시공간적으로 추적하는 분석이 필요하다.

따라서 본 연구의 목적은 액체수소 탱크 내부 슬로싱에 의해 발생하는 액적 분열 과정을 개별 유체 영역 검출을 통해 정량적으로 분석하는 것이다. 이를 위해 탱크 내부에서 발생하는 액체수소의 슬로싱 현상을 수치 모사하였다. 3차원 순간 유동장에 존재하는 개별 액체 영역들을 검출하고, 이러한 구조들의 부피 및 기하학적 정보를 추출하여 형상을 분류하였다. 액적 생성과정동안

발생할 수 있는 다양한 형태의 액체 영역 구조를 분석할 수 있는 방법을 제시할 것이다.

2. Numerical details

2.1 Geometry and mesh

본 연구에서는 C type 탱크를 사용하였다. C type 탱크는 중심에 원통형의 실린더 형상을 갖추고 있으며, 양쪽 끝단은 라운드의 형태를 띄거나 타원형이나 반구 형태를 가진다. 본 연구에서는 원형의 끝단을 갖는 탱크를 사용하였으며, 이는 기존 전산해석을 수행한 문헌^(11,12)에서 보고된 탱크와 유사하다. Fig. 1은 전체적인 탱크 형상과 중심 단면의 mesh 형상을 보여준다. 탱크의 너비와 높이는 0.24 m이며 전체 길이는 0.88 m이다.

3차원 탱크 형상의 mesh는 Ansys Fluent mesh를 사용하였다. 전체 mesh 수는 약 550만개이며 minimum orthogonal quality는 0.23을 유지하였으며 skewness는 0.15이다. Mesh size는 10^{-3} m을 가지도록 하였는데 이는 탱크 내부에서 슬로싱에 의하여 발생하는 액적의 size를 constant surface tension을 통하여 지름을 계산하고 이것을 resolve할 수 있을 정도의 mesh size로 기준을 설정하였다. Surfaces mesh는 volume mesh와 같은 size로 설정하였으며 표면의 격자 형상은 Fig. 1(b)에 나타나 있다.

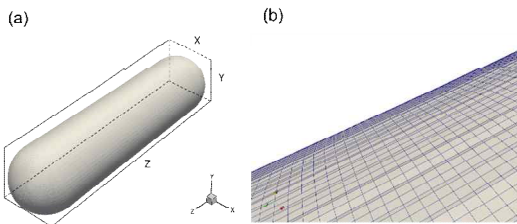


Fig. 1. (a) Geometry of C-type tank: Height and radius are 0.24 m, with a length of 0.88 m. (b) Illustration of surface mesh.

2.2 Governing equation

전산해석을 위한 가정 및 조건과 지배방정식은 다음과 같다. 액체 및 기체 두 상에 대하여

incompressible, Newtonian fluid를 가정하였다⁽¹³⁾. 액체수소의 물성치는 1기압 20.4K 상태일 때의 값을 사용하였다. 점성계수 $\mu = 1.4956 \times 10^{-5}$ Pa·s, 밀도 $\rho = 70.84$ kg/m³, 표면장력 $\sigma = 0.0021$ mN/m이다. 초기조건은 충진을 50 %로 설정하였으며 경계조건으로는 no slip condition을 가정하였다. 본 연구에서는 다상유동 해석을 위해 VOF (volume of fluid) 방법을 적용하였다. VOF방법은 두 종류 이상의 섞이지 않는 유체를 하나의 운동량 방정식을 통해 해석 영역에서의 각 유체의 분율을 계산하는 방법이다.

VOF방법에서는 시뮬레이션에서 각 위치의 상에 대한 정보를 나타내는데 이를 α 로 정의하였다. 이 매개변수는 특정 위치에서 각 상의 부피비율을 나타내는 값으로 0부터 1까지의 범위를 갖는다. 단일 상의 경우 이 값은 1로 설정되며 다상 유체의 경우 각각의 상에 해당하는 분율값을 할당하여 표현한다. 이를 표현하면 아래의 3가지로 분류된다.

$$\begin{cases} \alpha_q = 0 & \text{if cell is empty of the fluid } q \\ 0 < \alpha_q < 1 & \text{mixture interface} \\ \alpha_q = 1 & \text{if cell is full with the fluid } q \end{cases}$$

본 연구에서는 q상을 액상, p상을 기상으로 정의하였으며 이는 각각 액화수소와 기체수소를 의미한다. 또한 모든 computational domain 격자의 각 control volume에 대하여 모든 상에 대한 분율값의 합은 1로 정의한다. VOF를 풀기 위한 지배방정식은 다음과 같다.

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

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

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (3)$$

$$\rho = \alpha_p \rho_p + (1 - \alpha_p) \rho_q \quad (4)$$

$$\mu = \alpha_p \mu_p + (1 - \alpha_p) \mu_q \quad (5)$$

식 (1)과 (2)은 연속방정식과 운동량 방정식이며 식 (3)의 volume fraction equation과 함께 풀게 된다. 식(3)의 우변의 첫번째 항 S_{α_q} 는 source term을 나타내는데 각 상에 대한 mass source를 추가할 수 있다. 두 번째 항은 mass transfer 항의 합을 나타내는데 열전달이나 반응모델 과 같은 해석을 진행할 경우 상변화에 의하여 유체가 증발이나 응축의 과정을 겪게 되는데 이를 해석에 적용시키기 위한 항을 나타낸다. 여기서 하첨자 pq는 p에서 q상으로의 mass transfer, qp는 q상에서 p상으로의 mass transfer를 나타내는데 각각 증발과 응축을 예로 들 수 있다. 본 연구에서는 상변화 모델은 고려하지 않았으므로 이에 대한 energy equation을 추가로 풀지 않았다. 둘 이상의 상이 존재하는 경우는 일반적으로 밀도와 점성계수는 식 (4)와 식 (5)으로 나타낼 수 있다.

또한 실제 도로주행 환경에 맞추어 탱크 트레일러 차량이 60 km/h에서 4초 동안 급정거하는 상황을 가정하였다. 이 조건은 운동량 방정식인 식 (2)의 우변에 마지막 항인 external force 항에 추가된다. VOF방법은 surface tension을 고려하여 계면을 정확하게 추적할 수 있는데 이는 microchannel flow, jet atomization등의 dominant한 force이기도 하다. 따라서 표면장력의 영향을 고려하기 위해 다음과 같은 CSF(continuum surface force) model을 고려하기 위한 항이 추가된다⁽¹⁴⁾.

$$\overline{F_{CSF}} = \sigma \kappa \frac{\rho \nabla \alpha_q}{\frac{1}{2}(\rho_q + \rho_p)} \quad (6)$$

식 (6)은 오직 두 상이 cell에 존재할 경우의 식을 나타내었다. 여기서 σ 는 액상과 기상에 대한 표면장력을, κ 는 유체간 상을 이룰 때의 곡률을 의미한다. 이를 식(7)로 나타내었다.

$$\kappa = \nabla \cdot \hat{n} \quad (7)$$

여기서 \hat{n} 은 계면에서의 법선벡터를 나타낸다. 계면형상의 경우 geo reconstruction scheme을 사용하여 interpolation하였다. 점성모델은 LES (large eddy simulation)를 사용하였으며 subgrid model로서 Smagorinsky 모델을 사용하였다. 본 연구는 상용 유동해석 프로그램인 Ansys fluent 21.2 R2 버전을 사용하여 전산해석을 진행하였다. 속도와 압력 연성을 위하여 pressure correction에 기반한 알고리즘으로 SIMPLE를 사용하였다. 압력 이산화 기법에는 RPESTO scheme을 사용하였다. 계산 시 적용한 수렴조건은 연속방정식과 지배방정식에 대하여 10^{-5} 을 사용하였다.

3. Results

3.1 Overall structures

Fig. 2는 액체수소의 움직임을 보여주는 순간 유동장으로, 전체적인 breakup 과정을 나타낸다. Fig. 2(a)는 0.9초일 때 감속 조건에 의해 액체가 진행방향 (z 방향) 으로 물려간 후 반대 방향으로 유체가 이동하는 순간이며 $\alpha_q = 0.1$ 의 isosurface를 보여주는 그림이다. 컨투어 색상은 α_q 의 크기를 나타낸다. α_q 는 셀 안에 얼마만큼의 액체가 차 있는지 분율을 0부터 1 사이의 값으로 나타내는데 α_q 값이 더 클수록 액체영역이 더 많은 비율을 차지하고 있음을 나타낸다. Fig. 2(b)는 0.58초부터 0.82초까지 탱크 뒷부분에서 발생하는 액체수소의 움직임을 보여주는 그림이다. 액체 영역들이 이동하면서 breakup이 발생하게 되는데, 0.58초에서 유체영역들이 성장하면서 breakup 과정이 시작된다. 이 과정에서 jet 노즐에서 발생하는 atomization에 의한 primary breakup과정과 유사하게 film, ligament, droplet 형성이 관측되며 Fig. 2(c)에서 이러한 3가지 특징에 대하여 시간순서에 따라 자세하게 그림으로 나타내었다. 그림의 왼쪽부터 차례로 0.64초, 0.70초, 0.76초에서의 순간유동장을 나타낸다. 왼쪽의 유동장은 0.64초인 순간으로, 이는 얇은 막(film) 형태의 액체 수소 영

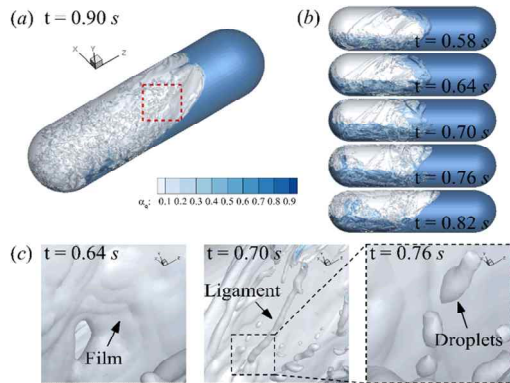


Fig. 2. (a) Isosurface of LH2 ($\alpha_q = 0.1$) inside the tank at $t = 0.9$ s. Here, light to dark shading indicates an increase in α_q (where larger values of α_q correspond to a large portion of LH2). (b) Time series of side view depicting the occurrence of breakup, spanning from top ($t = 0.58$ s) to bottom ($t = 0.82$ s) with a time increment of 0.06 s. (c) 3 key features of breakup process at $t = 0.64$ s, $t = 0.70$ s, $t = 0.76$ s.

역이 관찰되는 부분을 확대한 것이다. 액체 수소 영역이 점점 얇아져 얇은 막이 형성되며 동시에 표면파에 의하여 구불구불한 면이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 시간이 지나면서 막이 더욱 얇아져 국소적으로 hole이 생기며 가장자리 부분은 떨어져 나가게 된다. 중앙의 그림은 0.70초의 순간을 나타내는데 이는 액체 수소 film이 찢어져 나가면서 생성되는 ligament 형상을 보여준다. 오른쪽 그림은 0.76초인 순간을 나타내며 이는 길게 늘어난 ligament가 표면장력에 의해 끊어지면서 여러 개의 작은 droplet으로 분열되는 것을 확인할 수 있다.

3.2 Primary breakup

앞서 관측된 primary breakup 과정을 더 자세히 분석하기 위해 film 형성 후 다발성 구멍이 생기는 과정을 확대하여 분석해보았다. Negeed 등⁽¹⁵⁾은 평평한 liquid sheet이 끝단에서 발생하는 파동에 의해 구불구불한 sheet (wavy sheet)형태가 되면서 ligament가 formation 된 과정을 보고하였다. 본 연구에서는 이와 유사하게 0.9초 이후 breakup 된 유체영역들이 공중에 떠 있는 유체영역들에

한하여 표면에서 국소적인 wave 형상이 나타나는 것을 확인하였다. 또한 Fig. 2(b)의 두 번째 그림에서는 액체가 왼쪽방향(-z방향)으로 진행되는 부분에서 중심을 기점으로 좌우로 유체들이 분리되는 현상을 관찰할 수 있다. 이 과정에서 중심부 표면에는 sheet형태의 구조를 관찰되며 구불구불한 wave sheet 형태이다. 그러나 이후에 발생하는 ligament는 관측하지 못하였다. 이는 탱크 내부의 유체들이 노즐에서 분출되어 사방으로 퍼지는 형태가 아니라 특정 축방향을 따라 왕복하는 유동이기 때문에 wavy sheet로부터 ligament가 연속적으로 형성되는 과정을 관찰하기 어려웠다.

또한 Daskiran 등⁽¹⁶⁾의 연구에서 보여졌던 atomization시 liquid core로부터 발생하는 ligament와 droplet formation의 특징들이 국소적으로 나타남을 확인하였는데 대표적으로 breakup 된 액적들이 다시 주변의 ligament-liked structure와 합쳐지는 현상이나 elongated 된 유체영역에서 액적들이 떨어져 나가는 현상들이다.

탱크의 중심영역에서 나타나는 탱크 내부의 유동 Fig. 3은 Fig. 2(a)에서 박스로 표시된 영역을 확대한 그림으로 0.625초에서부터 0.7초까지의 순간을 보여준다. Fig. 3(a)에서 탱크 위쪽 벽을 따라 얇게 퍼진 액체들이 점점 얇아지면서 구멍이 생기는 과정을 관찰할 수 있다. 이때 구멍은 국소적으로 하나만 생성되거나 소멸하는 것이 아니라 다수의 구멍이 동시에 형성되는 것을 볼 수 있다. 또한 구멍은 단순한 원형 형태뿐만 아니라 타원형이나 일자 형태로 생성되는 것이 관찰되었다.

Fig. 3(b)에서는 여러 개의 구멍이 형성된 것을 관찰할 수 있으며 (붉은색 화살표) 이들이 점점 커지고 합쳐지면서 film이 갈라지는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 3c, d). Fig. 3(c)에서는 구멍의 가장자리 영역이자 액체 film 끝 부분에서 절단된 부분들이 발생된다 (노란색 화살표). 그 결과 액체 film이 길게 늘어진 상태로 떨어져 나가려는 모습이 관찰되며 시간이 지남에 따라 이러한 액체 영역들은 ligament 형상이 되는 것을 확인하였다.

Fig. 3(d)에서는 최종적으로 film 끝단으로부터

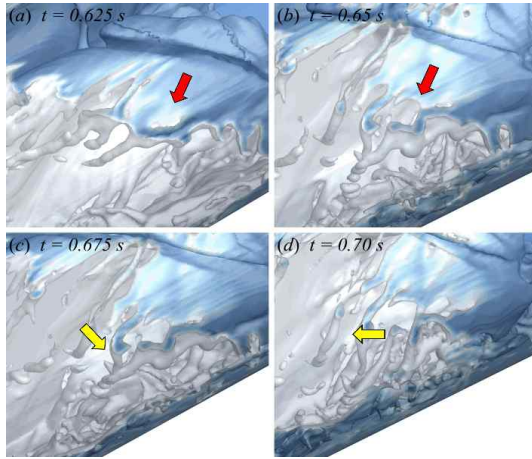


Fig. 3. (a-d) Time series of a magnified view denoted by the dotted box in (e); from 0.625 s to 0.70 s with a time increment of 0.025 s. The red arrows indicate the hole extension and yellow arrows indicate the direction of ligament growth.

떨어져 나온 여러 개의 ligament를 보여준다. Fig. 3(c)의 노란색 화살표는 횡방향으로 성장하며 떨어져 나오는 ligament를 나타내며 Fig. 3(d)의 화살표의 경우 음의 z 방향으로 성장하는 ligament를 나타낸다. 이를 통해 film에서부터 떨어져 나오는 ligament들은 탱크의 횡방향으로 떨어져 나오는 ligament와 film 진행방향(음의 z 방향)과 평행한 방향으로 떨어져 나오는 ligament 두가지로 구분됨을 알 수 있다.

3.3 Fluid region detection

앞서 관측된 ligament와 같은 액체영역을 정량적으로 분석하기 위해 순간유동장내 존재하는 특정 영역을 검출하는 알고리즘을 적용시켰다⁽¹⁷⁾. 이를 통해 개별구조의 형상학적 정보를 얻을 수 있으며 시간에 따른 모든 순간유동장에서 검출된 개별 구조의 개수와 부피를 분석할 수 있다.

Fig. 4는 액체영역 검출방법을 통해 얻어진 개별 유체영역들을 나타낸다. 각각의 검출된 액체 영역을 둘러싸고 있는 최소 부피의 상자의 크기로 부터 개별 구조의 길이(l), 폭(w), 높이(h)를 정의하였다. 이러한 크기 정보를 통해 검출된 구조의 유동장에서 검출된 대표적인 영역들을 나타내었

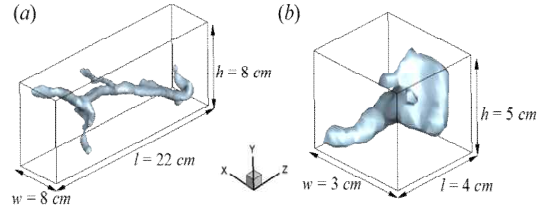


Fig. 4. Three-dimensional LH2 structures identified in instantaneous flow fields. The characteristic sizes of the structures are defined based on the sizes of the bounding box.

는데 Fig. 4(a)는 탱크 중심을 기준으로 진행방향의 반대방향에 존재하게 되는데 유체 중심으로부터 발생하는 영역을 확인하였다. Fig. 4(a)는 z축 방향으로 비교적 길이가 긴 형상이 나타났는데 이는 유체의 코어영역에서부터 직접적으로 떨어져 나온 것이 아니라 중력방향으로 떨어지는 유체가 바닥면의 유체들과 충돌한 뒤 충돌지점 근방의 모든 방향에 대하여 유체영역이 breakup되어 수면으로부터 2차로 유체영역들이 생성된다. 이 때 생성된 모양들은 진행방향으로 길게 늘어지거나 비교적 얇은 유체 형상들이 나타난다. 이 유체영역중 대표적으로 부피가 가장 크고 진행하는 방향에 대하여 길이가 긴 영역을 확인하여 보았을 때 Fig. 4(a)와 같은 형상이 된다.

Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)가 존재하는 위치 근처의 벽면에서 존재하는 유체영역이다. 유체가 반대방향으로 이동하면서 바닥의 벽면과 부딪히게 되는데 탱크의 반경방향을 따라서 breakup되면서 나타난다. 이는 중심영역에서 발생하는 Fig. 4(a)와는 반대로 벽근처에서 나타나는 형상임을 알 수 있다. 대표적으로 부피가 큰 영역을 나타내었는데 이 영역의 형상적 특징은 높이가 상대적으로 높고 길이방향으로 가느다란 다리와 같은 유체영역이 연장되어 발달한 것을 볼 수 있는데 바닥과 부딪혀 생성된 유체영역이 벽과 2차로 충돌하거나 유체간 충돌로 인하여 breakup 되는 것을 확인하였다. 이 때 벽과 충돌하면서 벽면을 따라 중력 반대방향으로 유체가 퍼지면서 높이가 높아지고 동시에 유체 진행방향으로 관성에 의하여 두꺼운 말단영역이 성장하면서 하나의 다리 형상을 형성하는 것을 확인하였다. 0.9초에서는

벽면에 나타나는 형상들은 대부분 Fig. 4(b)와 같은 형상들이 지배적이고 중심 영역에서 나타나는 유체영역은 주로 Fig. 4(a)와 같은 형상이 주로 발생하였다. 또한 Fig. 4(a,b) 뿐만 아니라 한 방향에 국한되지 않은 다양하게 성장하는 유체영역이 발생하여 검출되는 것을 관찰하였다.

Fig. 5(a)는 검출된 유체 영역의 시간에 따른 전체 개수를 보여준다. 초기 0.4초까지는 액체영역이 검출되지 않았다. 이는 아직 **breakup**이 발생하지 않고 유체가 진행방향으로 쏠리는 과정 중에 있기 때문이다. 그러나 0.4초 이후로 검출되는 구조의 개수가 급격하게 증가하며, 0.9초 부근에서 가장 많은 구조가 관측된다. 이는 유체가 탱크 앞부분에 쏠린 후 반대 방향으로 급격하게 움직이면서 벽면 및 유체들간 충돌로 인해 개별 액체 영역들이 생성되기 때문이다. 0.9초 이후로는 검출되는 구조의 개수가 급격하게 감소한다. 또한 1.4초이후 다시 증가하는 구간이 발생하는데, 이는 유체가 진행방향과 반대 방향으로 진동하면서 다시 **breakup**을 발생시키기 때문이다. Fig. 5(b)는 0.9초에서의 검출된 액체 구조 부피분포로 부피가 0.1 cm^3 보다 작은 액체 영역이 다수 발생함을 알 수 있다.

Fig. 6는 순간유동장에서 검출된 액체영역들의 형상을 분류하기 위해 나타낸 aspect ration에 따른 scatter plot이다. 세로축은 w/h 를 가로축은 l/h 를 나타낸다. Fig. 6(a)와 (b)는 각각 0.7초 및 0.9초의 순간유동장에서의 결과이다. Fig. 6(a)에서 크게 2가지지를 알 수 있다.

첫째로 0.7초에서 발생할 수 있는 액체영역은 상대적으로 높이가 긴 영역들이 많이 나타난다는 것이다. 이는 scatter plot 상의 l/h 가 1이고 w/h 가 1보다 큰 점들을 관찰하였을 때 높이(h)와 길이(l)가 같은데 반해 너비(w)가 상대적으로 높은 유체영역들을 말한다. 이러한 영역들은 횡방향으로 길게 늘어난 형상을 의미한다. Fig. 3(d)의 순간유동장에서 보이듯이 액체영역이 벽을 따라 아래로 흐르거나 중심 영역에서 떨어져 나온 액체영역 혹은 sheet 구멍으로부터 발생하여 횡방향으로 길게 늘어진 형태를 형성하는 것을 알 수 있다. 이러한 형상들은 대부분 탱크 상단에 분포

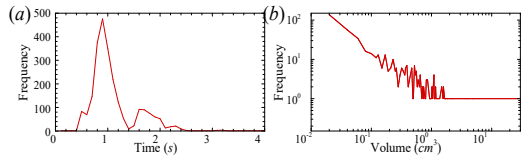


Fig. 5. (a) Time history of the number of the detected liquid regions. Two peaks are observed, occurring at $t = 0.9$ and 1.7 s . (b) Number of the detected liquid regions with respect to their volume at $t = 0.9 \text{ s}$.

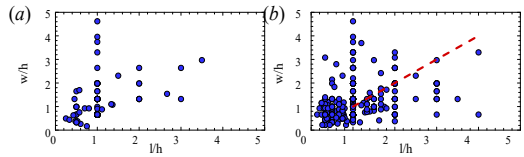


Fig. 6. Scatter plot with respect to the aspect ratios (l/h and w/h) at (a) $t = 0.7 \text{ s}$, and (b) at $t = 0.9 \text{ s}$.

하는 것을 확인하였다.

둘째로 $l/h = w/h = 1$ 인 구간 아래에 존재하는 영역들이다. 여기서 모든 중횡비가 같다면 구형에 가까운 액체영역을 의미한다. 이를 기준으로 영역 아래에 있는 점들의 분포는 구형에 가깝지만 스케일이 매우 작은 액체영역을 나타내고 이는 hole에서 ligament 형상이 생성되고 이로부터 떨어져 나온 액적 형태들을 의미한다. 이 과정에서 횡방향과 중력방향으로 길이가 긴 유체 형상들이 나타난다. 이는 탱크 상단 영역에 얽힌 액체들을 따라 말단에서 발생하는 액체영역과 다발적인 hole에서 떨어져 나온 유체영역이 주로 발생하는 것과 관련이 있다.

Fig. 6(b)의 경우 액체 영역이 가장 많이 관측된 0.9초에서의 scatter plot을 나타낸다. 전반적으로 Fig. 6(a)와 비슷한 양상을 보이지만 차이가 있다. 횡방향으로 길게 늘어진 형상들이 일관되게 나타나는데, 이는 **breakup**에 의하여 중심 영역 주변에서 여전히 횡방향으로 긴 형상이 존재함을 의미한다. 하지만 구형에 가까운 중횡비가 크게 차이가 나지 않는 지점($l/h = 1, w/h = 1$)에서 많은 분포가 관측이 된다. 이는 0.7초에서 생성된 ligament 구조와 큰 스케일의 액체 영역이 **breakup**에 의하여 구형 가까운 형상으로 변형되었기 때문이다.

또한 0.9초의 경우 $l/h > 1$ 과 $w/h < 1$ 에 분포하

는 액체영역의 수가 0.7초 대비 증가한 것으로 나타났는데 이는 너비가 비교적 작으면서 진행 방향으로 길이가 긴 형상들이 다수 발생한 것을 의미한다. 이는 Fig. 2(a)의 순간유동장에서 관측되는 너비가 작은 액체 형상들을 나타낸다.

4. Limitations

본 연구의 한계점은 다음과 같다. (1) 본 연구에서 수행한 해석의 타당성을 검증하기 위한 액체 수소환경에서의 슬로싱 실험연구가 없다는 점이다. (2) breakup 과정에서 발생하는 액체 영역 형상을 적절히 모사하기 위한 격자 해상도에 대한 기준의 부족하다는 점이다. Gorokhovski 등⁽¹⁸⁾의 연구에서는 atomization으로 인해 발생하는 매우 작은 액체영역들을 모사하기 위해서는 더욱 조밀한 격자가 필요하다고 언급하고 있다. 격자 해상도가 충분치 않을 경우 액체영역 계면의 형상과 관련하여 수치적 오류가 발생할 수 있다. 이 경우 인공적인 유체영역들이 발생하게 된다. 부족한 격자 해상도에 의해 발생할 수 있는 매우 작은 액체영역은 제외시키기 위하여 특정 부피 이하의 액체영역들을 분석에서 제외하여야 한다. 본 연구에 사용된 mesh는 탱크 내부에서 발생할 수 있는 droplet의 지름과 surface tension을 고려하여 이를 해상할 수 있는 격자를 적용하였다. 또한 연구장비와 계산시간을 고려하여 550만개의 mesh를 사용하였다. (3) 액체 영역을 정의하기 위한 threshold 값으로 volume fraction = 0.1을 사용하였다는 점이다. 본 연구에서 얻어진 유동장을 분석한 결과 threshold 값을 0.1로 설정하였을 때 film에서 ligament가 떨어져 나가는 현상과 hole의 성장을 충분히 포착할 수 있었다. 하지만 surface tension 영향에 의하여 유체가 pinch off 되는 현상이나 breakup 되는 유체를 분류하기 위해서는 threshold 값을 명확하게 정의할 필요가 있을 것으로 예상된다.

5. Conclusions

액체수소 탱크 트레일러 내부의 슬로싱 현상

을 전산해석을 통하여 분석해 보았다. 차량의 급감속 조건을 고려하여 해석을 수행하였으며, 이를 통해 유동장에서 jet atomization 현상에 의한 primary breakup이 관찰되었다. 탱크 내부에서 슬로싱이 발생할 때 액체 영역은 진행방향과 반대로 급격하게 전개되며, 중심 영역과 그 주변에서 형태 변화와 breakup이 발생한다. 특히 얇은 sheet 형태의 형상이 생성되고 표면의 불안정성으로 인해 다수의 구멍이 형성되는 것을 관찰하였다. 이러한 구멍이 성장하며 액체 영역이 끊어지고 ligament가 형성됨을 확인할 수 있었다. Breakup 과정동안 생성된 3차원 액체영역들을 검출하고 분류하기 위해 이들 구조의 길이 스케일 및 부피와 같은 형상학적 정보를 측정하였다. 추후 연구에선 이를 기반으로 개별 액적들의 발생 과정을 시공간적으로 추적하여 탱크 내부에서 발생하는 breakup mechanism을 정량적으로 분석할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 BOR에 영향을 미치는 요인을 식별하고 BOR을 최소화하는 방안을 고안할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

This work was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government (MOTIE) (no. 20223030040120 and no. 2021400000140).

REFERENCE

- 1) 산업통상자원부. 2018, "수소경제 활성화 로드맵," 정책동향보고서, Vol., pp.1-68.
- 2) 김재경, 오은주, 정진영, 박진남, 김윤성; 임현지. 2019, "친환경 CO₂-free 수소생산 활성화를 위한 정책연구," 에너지경제연구원 수시연구보고서, Vol., pp.1-97.
- 3) 이원석, 김영민, 신영재, 왕지훈, 문상호, 박희준, 장성진; 권오광. 2021, "국가 수소공급 인프라 구축을 위한 블루수소의 역할," Vol.
- 4) 이동주. 2022, "수소사회로 가는 길목, 액화수소 저장과 운송을 위한 진공기술," 진공이야기

- 기, Vol. 9(2), pp.19-27.
- 5) Lee, S.J., Kim, M., Lee, D., Kim, J.; Kim, Y., 2007, "The effects of LNG-tank sloshing on the global motions of LNG carriers," *Ocean Engineering*, Vol. 34(1), pp.10-20.
 - 6) Ibrahim, R.A., 2020, "Assessment of breaking waves and liquid sloshing impact," *Nonlinear Dynamics*, Vol. 100, pp.1837-1925.
 - 7) 박준상. 2020, "사각용기의 강한 비선형 슬로싱 문제에서 발생하는 페러데이파와 슬로싱파의 상호작용," *한국가시화정보학회지*, Vol. 18(3), pp.14-22.
 - 8) 박준상. 2019, "사각용기에서 발생하는 고점성 유체의 슬로싱 유동," *한국가시화정보학회지*, Vol. 17(3), pp.39-45.
 - 9) Shao, C., Luo, K., Chai, M.; Fan, J., 2018, "Sheet, ligament and droplet formation in swirling primary atomization," *AIP Advances*, Vol. 8(4), p.045211.
 - 10) Shinjo, J.; Umemura, A., 2010, "Simulation of liquid jet primary breakup: Dynamics of ligament and droplet formation," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 36(7), pp.513-532.
 - 11) 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*, Vol. 223, p.120001.
 - 12) Grotle, E.L.; Æsøy, V. Experimental and numerical investigation of sloshing in marine LNG fuel tanks. In *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2017; p. V001T001A046.
 - 13) Liu, Z., Feng, Y., Lei, G.; Li, Y., 2019, "Hydrodynamic performance in a sloshing liquid oxygen tank under different initial liquid filling levels," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 85, pp.544-555.
 - 14) Brackbill, J.U., Kothe, D.B.; Zemach, C., 1992, "A continuum method for modeling surface tension," *Journal of computational physics*, Vol. 100(2), pp.335-354.
 - 15) Negeed, E.-S.R., Hidaka, S., Kohno, M.; Takata, Y., 2011, "Experimental and analytical investigation of liquid sheet breakup characteristics," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32(1), pp.95-106.
 - 16) Daskiran, C., Xue, X., Cui, F., Katz, J.; Boufadel, M.C., 2021, "Large eddy simulation and experiment of shear breakup in liquid-liquid jet: formation of ligaments and droplets," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 89, p.108810.
 - 17) Hwang, J.; Sung, H.J., 2018, "Wall-attached structures of velocity fluctuations in a turbulent boundary layer," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 856, pp.958-983.
 - 18) Gorokhovski, M.; Herrmann, M., 2008, "Modeling primary atomization," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 40, pp.343-366.