



## 가압제 주입 및 가속도 변화에 따른 극저온 탱크 내부 유동의 고정밀 다상유동 해석

HIGH-FIDELITY MULTIPHASE COMPUTATIONS INSIDE CRYOGENIC TANK WITH THE INJECTION OF PRESSURANT AND VARYING ACCELERATION

---

|                    |   |
|--------------------|---|
| 저자<br>(Authors)    | 성원석, 김현지, 김종암<br>W.S. Sung, H.J. Kim, C.A. Kim  |
| 출처<br>(Source)     | <a href="#">한국전산유체공학회 학술대회논문집</a> , 2016.11, 50-51 (2 pages)  |
| 발행처<br>(Publisher) | <a href="#">한국전산유체공학회</a><br>Korean Society of Computational Fluids Engineering                       |
| URL                | <a href="http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07065948">http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07065948</a> |
| APA Style          | 성원석, 김현지, 김종암 (2016). 가압제 주입 및 가속도 변화에 따른 극저온 탱크 내부 유동의 고정밀 다상유동 해석. 한국전산유체공학회 학술대회논문집, 50-51.        |
| 이용정보<br>(Accessed) | 서울대학교<br>147.46.118.***<br>2017/04/28 11:51 (KST)   |

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독 계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.



# 가압제 주입 및 가속도 변화에 따른 극저온 탱크 내부 유동의 고정밀 다상유동 해석

성 원 석<sup>1</sup>, 김 현 지<sup>1</sup>, 김 종 암<sup>2,3\*</sup>

## HIGH-FIDELITY MULTIPHASE COMPUTATIONS INSIDE CRYOGENIC TANK WITH THE INJECTION OF PRESSURANT AND VARYING ACCELERATION

W.S. Sung, H.J. Kim and C.A. Kim

### 1. 서 론

액체로켓, 특히 상단 로켓에 사용되는 극저온 추진제는 로켓의 발사부터 궤도에서의 점화까지 다양한 온도, 압력 및 가속도의 변화를 겪는다. 연료탱크 내부 추진제의 상 경계면은 지상에서 평평하지만 가속도 변화 및 가압제 주입으로 복잡하게 변형되고, 그 과정에서 연료의 액체상 및 기체상 사이의 상변화와 혼합 현상이 활발해지며 압력 변화가 수반된다. 상단 로켓의 점화 전까지 탱크 내부에서 발생하는 다양한 다상 현상을 이해하는 것은 연료 잔량 예측 및 안정적인 운용에 매우 중요하다. 본 연구에서는 가압제 주입 및 가속도의 영향으로 발생하는 연료탱크 내부 유동에 대하여 고정밀 수치해석을 실시하고, 이를 바탕으로 연료 잔량을 예측하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 지배방정식

##### 2.1.1 균질 혼합류 가정

본 연구는 상태변화가 복잡하게 발생하며 열역학적 고려가 필수적인 극저온 연료탱크 내부 유동을 정확히 계산하는 것이 목표이다. 따라서 압축성 다상 유동을 효율적으로 해석할 수 있도록 식 (1)과 같이 나비에-스토크스 방정식에 균질 혼합류 가정을 적용하였다. 사용한 수치기법은 아래와 같다.

- Flux for all-speed flows: AUSMPW+\_N, RoeM\_N [1]
- High-order reconstruction: MLP5 [2]

- Time integration: TVD-RK3

- 난류 모델: k-w SST

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = \frac{\partial F_v}{\partial x} + \frac{\partial G_v}{\partial y} + S_{source} \quad (1)$$

$$Q = [\rho_m \ \rho_m u \ \rho_m v \ \rho_m E_t \ \rho_m Y_l \ \rho_m Y_g]^T$$

$$F = [\rho_m u \ \rho_m u^2 + p \ \rho_m uv \ \rho_m uH \ \rho_m u Y_l \ \rho_m u Y_g]^T$$

$$G = [\rho_m v \ \rho_m uv \ \rho_m v^2 + p \ \rho_m vH \ \rho_m v Y_l \ \rho_m v Y_g]^T$$

#### 2.1.2 소스항 적용

##### 2.1.2.1 상태변화 소스항

상태변화를 모사하는 다양한 비평형 상변화 모델 중, Merkle [3] 모델을 아래와 같이 사용하였다.

$$S_p = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dot{m}_v - \dot{m}_c \ 0]^T$$

$$\dot{m}_c = \frac{C_p \rho_v \alpha_v (P - P_{sat})}{0.5 \rho_\infty V_\infty^2}, \quad \dot{m}_v = \frac{C_e \rho_l \alpha_l (P_{sat} - P)}{0.5 \rho_\infty V_\infty^2} \quad (2)$$

##### 2.1.2.2 가속도 소스항

가속도에 의해 추가되는 소스항은 다음과 같이 적용하였다.

$$S_a = [0 \ \rho_m a_x \ \rho_m a_y \ \rho_m (a_x u + a_y v) \ 0 \ 0]^T \quad (3)$$

#### 2.1.3 상태방정식

극저온 탱크 내부는 넓은 범위의 온도 분포가 나타나므로 실매질의 물성치를 반영한 상태 방정식을 적용해야 한다. 특히 일반화된 식이 존재하지 않는 극저온 유체는 National Institute of Standards and Technology(NIST) [4]에서 제공하는 실제 물성치를 사용하였다.

### 2.2 연료탱크 내부 유동 해석

#### 2.2.1 가압제 주입 (active pressurization)

가압제 주입에 따른 active pressurization 현상의 벤치마크 문제로 NASA John C. Stennis Space Center의 E-1 산소 탱크 내부 유동을 해석하였다. 이 문제는 90%는 액체 산소가 채워

1 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부 우주항공공학전공

2 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 우주항공공학전공

3 정회원, 서울대학교 항공우주신기술 연구소

\* TEL : 02) 880-1915

\* Corresponding author E-mail: chongam@snu.ac.kr

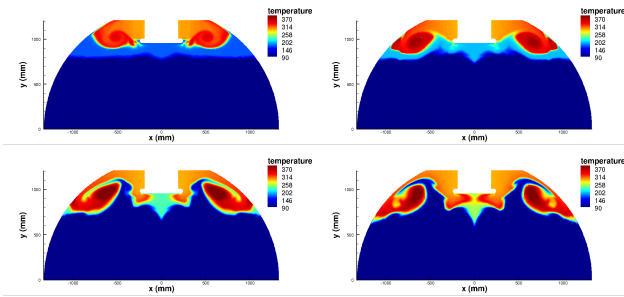


Fig. 1 Temperature contour at t = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 sec (left-up, right-up, left-down, right-down)

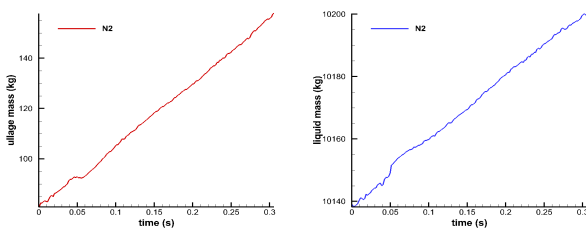


Fig. 2 Change of liquid and ullage mass

진 탱크에 고온의 질소가 주입되는 문제이다.

Fig. 1은 가압제가 들어오에 따라 탱크 내부의 온도 분포를 시간에 따라 나타내었다. 가압제와 기존의 ullage 사이에 혼합현상이 활발하게 생기면서 와류가 발생한다. 이때 중력이 없는 상황에서는 와류를 따라 주변의 액체 연료가 상승하면서 상 경계면이 완전히 무너지게 된다. Fig. 2는 E-1 탱크 내부의 질량 변화를 나타낸 그래프로, 가압제 주입으로 인해 ullage 질량이 증가함과 동시에 탱크 내부 압력 증가로 응축이 일어나 액체상의 질량 역시 증가함을 알 수 있다.

### 2.2.2 가속도 변화 (sloshing)

가속도 변화에 따른 sloshing 현상은 B. Godderidge [5] 연구팀이 해석한 탱크 문제를 통해 검증하였다. 이 문제는 60%의 액체가 채워진 탱크에 공진 주파수 근처의 진동수를 가진 가속도가 지속적으로 가해지는 문제이다.

Fig. 3은 부피분율의 변화를 나타낸 그림으로 외부 가진에 따른 sloshing을 잘 묘사하는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 질량 중심의 변화와 운동량의 변화를 B. Godderidge 연구팀의 결과와 비교한 것으로 역시 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

## 3. 결론

본 연구에서는 균질혼합류 가정을 적용한 압축성 다상유동 해석 프로그램으로 2차원/축대칭2차원 연료 탱크 내부 유동을 해석하였다. 가속도 변화 및 가압제 주입으로 탱크 내부에 나타나는 sloshing 및 상태 변화를 고정밀로 계산하였고

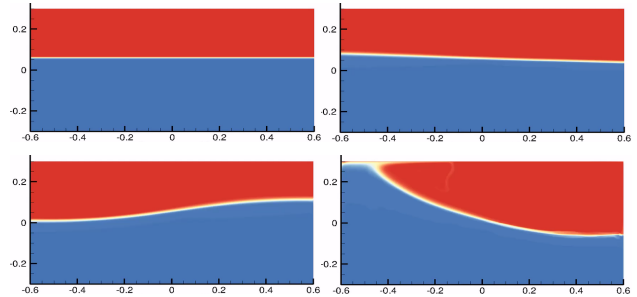


Fig. 3 Volume fraction contour at t = 0, 2, 4, 5 sec (left-up, right-up, left-down, right-down)

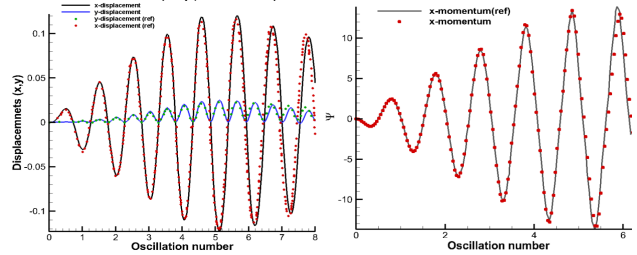


Fig. 4 Change of displacement and momentum

그 결과를 분석하였다. 향후 탱크 벽에서의 heat flux를 고려하여 보다 복잡한 극저온 탱크 내부 유동을 연구할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부의 우주핵심기술개발사업 (NRF-2014M1A3A3A02034856)의 지원을 받아 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 2014, Kim, Hyeongjun, Daeho Min, and Chongam Kim. "Computations of cryogenic cavitating flow around turbopump inducer." Proceedings of ICCFD8, Chengdu, China.
- [2] 2005, Kim, Kyu Hong, and Chongam Kim. "Accurate, efficient and monotonic numerical methods for multi-dimensional compressible flows: Part I: Spatial discretization." Journal of computational physics 208.2, 527-569.
- [3] 1998, Merkle, Charles L., J. Feng, and Phillip EO Buelow. "Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation." 3rd International symposium on cavitation, Grenoble, France, Vol.2.
- [4] 2010, REFPROP, NIST. "Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties—REFPROP, "NIST Standard Reference Database 23.
- [5] 2009, Godderidge, Bernhard, et al. "An investigation of multiphase CFD modelling of a lateral sloshing tank." Computers & Fluids 38.2, 183-193.