

극저온 유체내에서 운행하는 물체 주위의 공동현상 해석에 관한 연구

이세영* · 유정민** · 이창진***

Numerical Study of Cavitating flow around Axysymmetric and 2D Body in Cryogenic Fluid

Seyoung Lee* · Jungmin Yu** · Changjin Lee***

ABSTRACT

The cryogenic fluid is the propellant for the liquid rocket engine. The design of space launcher vehicle is guided by minimum size and weight criteria, so the turbo pump solicits high impeller speed. Such high speed results in a zone of pressure drop below vapor pressure causing cavitation around inducer blades. The cryogenic fluid has different characters from isothermal fluid like water. The cryogenic fluid has very sensible thermodynamic properties and the phase change undergoes evaporative cooling. So, the developed code has to be modified cavitation modeling and it is added the energy equation for temperature sensitivity.

초 록

액체 로켓의 추진제로 이용되는 극저온 유체는 발사체의 경량화를 위한 터보 펌프의 고속화로 인해 공동현상이 발생하게 된다. 그러나 극저온 유체는 등온 유체인 물과는 달리 낮은 액상/증기 밀도 비율을 가지며 온도에 민감한 잠열변화율을 갖게 된다. 이에 따라 극저온 유체에서 공동 현상이 발생하게 되면, 증발 냉각 현상이 발생하게 되어 공동 내부와 주 유체 사이의 온도 차이가 발생하게 된다. 따라서 이러한 극저온 유체의 특징을 반영해 주기 위해 기존의 경험적 공동 현상 모델을 수정하여 새로운 모델을 적용하였다. 또한 온도 변화에 따른 효과를 반영해 주기 에너지 방정식을 첨가 하였다.

Key Words: Cavitation(공동 현상), Cryogenic Fluid(극저온 유체), Pressure-based Algorithm(압력기반 알고리즘)

1. 서 론

액체 로켓에 사용되는 터보 펌프는 고압의 연소실에 추진제를 공급하는 역할을 하며 인듀서 등은 이러한 터보 펌프의 효율을 높여주는 역할을 하게 된다. 터보 펌프 등을 사용한 우주 발사체 등은 크기와 무게의 경량화가 필수적이다. 따

*,** 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

*** 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

연락처, E-mail: cjlee@konkuk.ac.kr

라서 이러한 설계조건을 만족하기 위해 터보 펌프의 회전수를 높여 속도를 높이게 되면 경량화를 이룰 수 있다. 그러나 높아진 회전수는 공동 현상(cavitation)을 유발하게 된다. 이러한 공동 현상이 발생하게 되면 소음 및 진동에 의한 영향을 받을 수 있으며 장시간 운행시 부식의 위험에 노출된다. 또한 추진제를 공급하는 오리피스 내부 등에서 발생하는 공동 현상은 추진제 공급의 효율을 떨어뜨리게 되는 단점으로 작용된다.

대부분의 액체 로켓에서는 극저온(cryogenic)의 액체 산소나 액체 수소 등을 추진제로 사용하는데 이러한 유체 내에서 발생하는 공동 현상은 물 등의 등온 유체(isothermal flow)에서 발생하는 공동 현상과는 다른 특성을 지닌다[1]. 극저온의 유체는 액상과 증기의 밀도 비율이 등온의 유체가 갖는 그것보다 매우 작아서 같은 크기의 공동을 유지하려면 더 큰 질량 전달(mass transfer)을 발생시키게 된다. 또한 극저온 유체는 온도에 따른 잠열의 변화가 매우 민감하며 공동을 둘러싸고 있는 주 유체에선 증발 냉각이 발생하게 된다. 따라서 극저온 유체에서 공동 현상이 발생하게 되면 증발 냉각 현상으로 인해 공동 내부의 증기 온도와 자유류의 온도 차이가 발생하게 된다. 또한 극저온 유체는 낮은 열전도율을 갖으며 온도 변화에 따른 포화 증기압의 변화가 민감하다. 이렇게 물 등의 등온 유체와는 다른 성질을 갖는 극저온 유체에서 발생하는 공동 현상은 온도 변화에 민감하기 때문에 수치적 해석에 이를 반영해줄 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 등온 유체인 물에 적합하게 개발된 코드를 이용하여 극저온 유체의 기존의 공동 현상 모델을 수정하였고 이렇게 수정된 코드를 검증하기 위해 축대칭 형상의 물체 주변의 정상상태해석을 실시하였다.

2. 지배 방정식 및 공동 현상 모델링

2.1 지배 방정식 및 난류 모델

물체 주위의 유체 흐름과 공동 현상의 해석을

위하여 연속 방정식, 운동량 방정식으로 지배 방정식을 구성하였고, 온도 변화에 따른 공동 현상 해석을 위해 에너지 방정식을 풀어주었다. 또한 공동 현상의 수치적 모사를 위해 상 수송 방정식(phase transport equation)을 이용하였다.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho_m u_j)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \mu_t) (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij})] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [\rho_m (h + f_v L)] + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho_m u_j (h + f_v L)] \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} [(\frac{\mu}{Pr_L} + \frac{\mu_t}{Pr_t}) \frac{\partial h}{\partial x_j}] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_l u_j)}{\partial x_j} = \dot{m}^- + \dot{m}^+ \quad (4)$$

여기서, f_v 는 질량비(mass fraction)를 나타내며 h 는 엔탈피를, ρ_m 은 혼합 밀도를 나타내며 그 표현은 다음과 같다.

$$f_v = \frac{\rho_v (1 - \alpha_l)}{\rho_m}, \quad h = C_p T, \quad \rho_m = \rho_l \alpha_l + \rho_v (1 - \alpha_l)$$

아래 첨자 l 은 액체, v 는 증기, t 는 난류 항을 그리고 m 은 혼합물을 나타내며, C_p 는 정압 비열, T 는 온도를 나타낸다.

본 연구에서는 난류 해석을 위해 일반적으로 널리 사용되고 있는 k-ε 모델을 사용하였으며 해석에 사용된 상수는 다음과 같다.

표 1. Turbulent Model Constant

	C_{μ}	C_1	C_2	σ_k	σ_ϵ	σ_h	σ_i
표준 k-ε	0.09	1.4	1.92	1.0	1.3	0.9	0.9

2.2 공동 현상 모델의 수정

기존의 공동 현상 모델들[1,2]은 상과 상사이의 경계면

(interface)의 속도가 무시된 채, 경험적 상수에 의해 그 값을 결정해주었다. 이러한 점을 개선하기 위해 본 모델은 공동 내부를 혼합영역으로 가정하여 액상과 공동 내부사이의 상변화를 표현하였다. 이를 통해 실험에서 관찰된 극저온 유체의 공동 현상을 보다 가깝게 표현하려 하였다. 수정된 공동 현상 모델은 다음과 같다[1].

$$\dot{m}^- = \frac{\rho_l \text{MIN}[0, p - p_v] \alpha_l}{\rho_- (U_{m,n} - U_{l,n})^2 (\rho_l - \rho_v) t_\infty} \quad (8)$$

$$\dot{m}^+ = \frac{\rho_l \text{MAX}[0, p - p_v] (1 - \alpha_l)}{\rho_+ (U_{m,n} - U_{l,n})^2 (\rho_l - \rho_v) t_\infty}$$

단, $\frac{\rho_l}{\rho_-} = \frac{\rho_l}{\rho_v} + (1.0 - \frac{\rho_l}{\rho_v}) \exp^{-0.1 - \alpha_l / \beta}$

$$\frac{\rho_l}{\rho_+} = \frac{\rho_l}{\rho_m}$$

여기서, $U_{m,n}$ 은 혼합영역의 법선(normal) 방향 속도를 나타내며, $U_{l,n}$ 은 경계면에서의 법선 방향 속도를 나타낸다. 이에 대한 자세한 식은 참고 문헌[3]과 [4]를 이용하였다.

3. 수치해석 방법

본 연구에서 지배방정식의 수치해석은 유동현상에 쉽게 적용할 수 있는 유한 체적법(finite volume method)을 이용하였다. 속도 성분과 종속 변수들의 배열을 위한 격자계는 비 엇갈림 격자계(collocated grid)를 사용하였다. 계산의 알고리즘은 SIMPLE를 이용하였으며, 격자 면에서의 대류 항은 상류 도식(upwind scheme)을 사용하여 차분화 하였다. 자세한 내용은 참고문헌 [5]를 이용하였다.

4. 해석 결과

극저온 유체에서 발생하는 공동 현상의 실험적 관찰에서 공동 내부의 걸쭉한(mushy)현상이

중중 발견되곤 한다. 이러한 물리적 현상을 수치적 해석에 반영하기 위해 Utturkar와 Shyy가 제안한 Mushy IDM모델로 공동 현상 모델을 수정하였다. 실험에서 관찰되는 극저온 유체에서의 수정된 코드를 검증하기 위해 Hord[6]의 실험 결과와 해석결과를 비교하였다. 해석대상은 직경이 0.357inch인 Ogive형상을 이용하였고 격자 및 경계조건은 그림 1과 같다. 해석 조건은 실험 조건을 그대로 이용하여 주 유체는 83K의 액체 질소를 사용하였고 입구에서의 속도는 23m/s이다. 또한 입구에서의 압력은 2.87E5Pa이며 캐비테이션 수는 약 0.46이다.

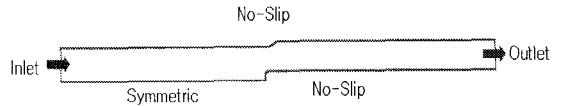


Fig 1. Grid and Boundary Condition

다음은 Ogive 주위의 정상상태의 공동 현상을 해석한 결과이다. 압력 분포는 대략적으로 실험 결과와 타 연구자들의 결과와 대략적으로 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 주 유체의 압력이 증기압보다 낮은 부분, 즉 공동이 발생하는 지점이라 볼 수 있는 x 가 0.5이하인 지점에서의 온도가 주 유체의 온도인 83K보다 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 잠열로 인한 상변화로 인해 공동 내부의 온도가 주 유체의 온도보다 낮아진 것을 반영하는 것이다.

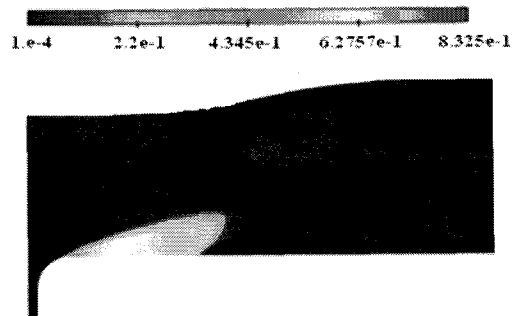


Fig 2. Vapor volume fraction contour

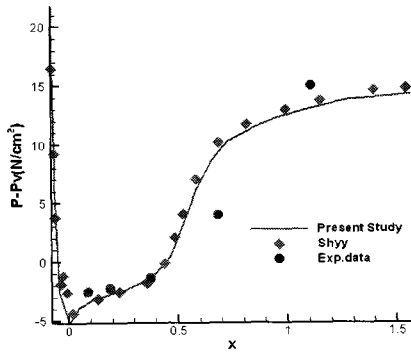


Fig 3. Calculation Result : Pressure

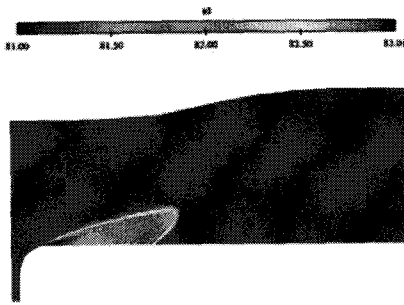


Fig 4. Temperature Contour

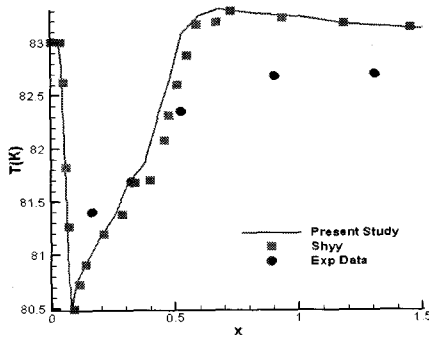


Fig 5. Calculation Result : Temperature

5. 결 론

공동 현상을 수치적으로 모사하기 위해 개발된 코드를 이용하여 기존의 공동 현상모델을 수정하여 온도변화에 민감한 극저온 유체의 공동

현상 해석을 실시하였다. 축대칭 형상의 Ogive 주위의 정상 상태 해석을 통해 압력 분포 및 온도 분포가 참고 문헌의 해석 결과에 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 향후 2차원 오리피스 내부의 공동 현상 해석을 통해 극저온 유체에서 발생하는 공동 현상의 주기적 특성도 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서 사용된 코드를 3차원으로 확장하여 상업용 터보 펌프의 인듀서 주위에서 발생하는 공동 현상을 해석하려고 한다.

참고 문헌

1. C. L. Merkle, J. Feng, Blueow PEO, "Computational Modeling of dynamics of sheet cavitation", Proceedings of the 3rd international symposium on cavitation, Grenoble, France
2. R. F. Kunz, D. A. Boger, D. R. Stinebring, T. S. Chyczewski and H. J. Gibeling, 1999, "A Preconditioned Navier-Stokes Method for Two-Phase Flows with Application to Cavitation Prediction," AIAA-99-3329.
3. Y. Utturkar, "Computational Modeling of Thermodynamic effects in cryogenic cavitation", PhD dissertation, University of Florida, 2005
4. I. Senoack, W Shyy, " Interfacial dynamics based modeling of turbulence cavitating flows, part 1 : model development and steady-state computations", Journal of Numerical Method in Fluids 44:997-1016,2004
5. 장선용, 이창진, "Pressure-based 알고리즘을 이용한 cavitation 현상의 수치적 연구", 2004 항공 우주 무기 체계 발전 세미나 학술 대회 논문집, 2004년, pp.440-444
6. J. Hord, "Cavitation in liquid cryogenes, III-Ogives", NASA CR-2242,1973