

# 터보펌프 인듀서 주변 극저온 공동유동에 대한 수치적 연구

## Numerical investigation on cryogenic cavitating flows around turbopump inducer

민 대 호, 김 형 준, 김 현 지, 김 중 압  
Daeho Min, Hyeonjun Kim, Hyunji Kim, Chongam Kim

서울대학교 항공우주공학과  
Dept. of Aerospace Eng., Seoul National Univ.

**Abstract:** This research deals with performance prediction of turbopump inducer through the two-phase flow computations. To describe the thermal effects of cryogenic fluids and two-phase flows, we used the additional governing equation for one-phase mass conservation law. As a spatial discretization scheme, RoeM for multi-phase flows are extended to treat the general equation of states, and preconditioning techniques are applied for robust and efficient computations in low-mach number region. As a validation step for such progress, two-dimensional/axi-symmetric cryogenic cavitating flows around hydrofoil and ogive are computed with different working fluids and cavitation models. Finally, numerical simulations of three-dimensional KARI turbopump inducer are carried out under various flow conditions with water and cryogenic fluids, and the differences in inducer flow physics depending on the working fluids are examined.

**Key Words:** Cryogenic Cavitation, Compressible/Incompressible Two-phase Flow, Turbopump Inducer Simulation

### I. 서론

액체로켓의 산화제 및 연료를 가압하는 터보펌프 인듀서 주변에서는 고속으로 팽창하는 유동에 의해 공동현상이 쉽게 나타난다. 공동현상이란 국부 압력이 포화증기압보다 낮아 액체상이 기체상으로 기화하는 현상이다. 이러한 공동현상은 실제 액체로켓 작동시 다양한 문제를 야기시킨다. 예를 들어, 터보펌프 인듀서 주변에서 공동이 발생하는 영역에서는 정상적인 가압이 이뤄지지 않아 기기 성능이 저하시키기도 하고, 발생한 기체상이 다시 액체상으로 전환되면서 발생하는 압력진동으로 인해 기기 손상을 일으키기도 한다. 그러므로 터보펌프 인듀서 주변 공동현상을 정확하게 예측하는 것은 기기 성능 향상 및 안정성 측면에서 아주 중요하다고 할 수 있다.

액체로켓의 산화제로 사용하는 액체 산소 등의 극저온 유체에서 발생하는 공동현상은 강한 온도 효과와 이를 동반한 큰 물성치 변화를 수반하고 있어, 물에서의 공동현상과는 판이하게 다르다. 여기에서 극저온 공동현상의 온도효과는 다음과 같이 설명할 수 있다. 일반적으로 극저온 유체는 물에 비해 기체 밀도 대비 액체 밀도가 상대적으로 작다. 그러므로 극저온 유체는 공동을 발생시키는데 상대적으로 많은 양의 액체가 기화되어야 한다. 이 과정에서 흡열 반응이 더 두드러지게 나타나게 되고, 극저온 유체의 공동 내부에서는 온도가 상대적으로 더 많이 감소하게 된다. 그런데 유체의 포화 압력은 온도의 함수로써 국부적으로 나타나는 온도의 감소는 해당영역에서의 포화 압력 감소로 이어지게 된다. 이는 결국 공동현상의 발생을 억제하는 효과를 가지게 되는데 이를 극저온 공동현상의 온도효과라고 한다. 일반적으로 이런

온도효과에 의한 공동 억제현상은 일반적인 펌프보다 극저온 유체를 작동유체로 하는 펌프시스템에 있어 성능을 높여주는 역할을 하기도 하지만, 유동의 비정상성에 의한 온도상승은 다양한 공동 불안정성에 원인이 되기도 한다.

극저온 공동현상에 대한 수치적 연구는 다양한 연구 그룹들에 의해 광범위하게 수행되어 왔다. Reboud 그룹은 비압축성 유체 solver인 Fine/turbo와 barotropic equation of state을 통해 2차원 cascade 문제 및 3차원 터보펌프 인듀서를 해석하였다[1]. Merkle 그룹은 경험적인 상수를 포함한 공동모델을 개발하였고[2], Kunz 그룹도 유사한 형태의 공동모델을 개발하였으나 공동이 발생하는 과정을 Ginzburg-Landau potential로부터 유도했다는 점에서 차이가 있다[3]. Singhal 그룹은 Rayleigh-Plesset equation을 기반으로 한 공동모델을 개발하였으며[4], Shyy 그룹은 공동과 외부 사이의 interfacial dynamics를 기반으로 한 공동모델을 개발하였다[5]. Hosangadi 그룹은 압축성/비압축성이 solver와 Merkle 그룹의 공동모델을 결합하여 다양한 문제를 해석하였다[6].

본 연구에서는 압축성/비압축성이 혼재된 공동이 형성된 유동 해석을 위해 예조건화를 도입하였고, 본 연구그룹에서 개발된 정확하고 강건한 이상유동 RoeM 수치기법을 사용하였다. 또한 극저온 유체의 물성치를 정확하고 효율적으로 모사하기 위해 높은 정확도를 보장하는 MEOS에 대한 regression model을 상태방정식으로 사용하였다. 이를 바탕으로 다양한 2차원 형상에서의 공동현상을 해석하고 각 공동모델의 특징을 비교하였다. 마지막으로 3차원 터보펌프 인듀서에 대한 수치해석을 수행

하고, 가압성능을 실험 결과와 비교함과 동시에 극저온 유체에서 나타나는 공동현상의 특징을 살펴보았다.

### II. 수치기법

#### 1. 지배방정식

본 연구에서는 균질 혼합류 모델(Homogeneous Equilibrium Model)을 이용한 압축성/비압축성 이상유동 지배방정식을 사용했으며 이는 혼합류의 질량, 운동량, 에너지 보존식과 기체상의 질량보존식으로 구성된다. 각각의 상을 구분하는 함수로는 여러 가지 방법이 있지만 본 연구에서는 질량비율(mass fraction)을 이용하여 액체상과 기체상을 구분하였다. 예조건화된 2차원 이상유동 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \Gamma \frac{\partial Q_p}{\partial \tau} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = D_V + S_{pc} \quad (1)$$

보존량 벡터  $Q$ 와 원시변수벡터  $Q_p$ 는 다음과 같다.

$$Q = [\rho_m, \rho_m u, \rho_m v, \rho_m w, \rho_m E_m, \rho_m Y_1] \quad (2)$$

$$Q_p = [p, u, v, w, T, Y_1] \quad (3)$$

예조건화를 위한 행렬  $\Gamma$ 에서는 시스템의 고유값들이 서로 유사한 차원의 값을 갖도록 pseudo-compressibility parameter를 정의하였다. 이에 대한 자세한 수식은 본 연구진에서 기존에 발표한 바 있는 참고문헌[7]에 소개되어 있다.

#### 2. 상태방정식

극저온 유체는 잠열이 상온의 다른 유체에 비해 훨씬 작기 때문에 작은 온도변화에도 물성치들의 변화가 민감하게 나타난다. 또한 액체상으로 존재하기 위한 온도가 낮고, 이 경우 점성이 낮아지기 때문에 유동장이 난류로 천이하기 쉽다. 이러한 특성 때문에 극저온 유동장을 해석하는데 정확한 상태방정식을 사용해야 하며 기존의 극저온 유체의 상태방정식으로 Virial EOS, Beattie-Bridgeman EOS[8], BWR EOS[9], 다양한 형태의 cubic equation EOS[10-12], MEOS(Multiparameter EOS) [13-15] 등이 존재한다. 이 중 MEOS는 높은 정확도를 보장함과 동시에 넓은 온도 및 압력 적용범위를 가지고 있는 상태방정식으로써 미국 국립 표준 기술원에서 개발한 프로그램 REFPROP(Reference Fluid Thermo dynamic and Transport Properties)에서 사용하고 있다.

본 연구에서는 지배방정식을 예조건화하는 과정에서 보존변수 중 밀도를 압력으로 대체하였으나 위의 열거한 상태방정식들은 압력 밀도와 온도의 함수로 표현하는 형태로 되어 있다. 그러므로 유속을 계산하는 과정에서 밀도를 계산하기 위해 상태방정식에 대한 비선형해법을 필요로 한다. 그러나 이러한 과정은 수치해석 과정의 효율성을 크게 감소하는 원인으로 작용하기 때문에 본 연구에서는 MEOS를 통해 얻을 수 있는 상태방정식의 물성치값에 대해 regression analysis를 수행하여 상태방정식

으로 대체하였다.

#### 3. 공동모델

본 연구에서 공동 형성 과정은 해당 영역에서의 압력을 통해 상 변화 소스항을 계산하여 다음과 같이 모델링하였다.

$$S_{pc} = (0, 0, 0, \dot{m}_t(e_{vap} - e_{liq}), 0, \dot{m}_t),$$

$$\dot{m}_t = m_c - m_e \quad (4)$$

여기에서  $m_c$ 는 액체상이 기화하는 변화량이고  $m_e$ 는 기체상이 응축되는 변화량이다. 이 변화량들은 다양한 모델들에 의해 결정되며 본 연구에서는 Merkle's model, Kunz's model, Singhal's model, Mushy IDM를 적용하여 계산하고 비교하였다. 각 모델들은 표1과 같이 표현된다. Merkle's model과 Kunz's model은 공동의 생성 및 소멸항을 경험적인 상수를 통해 조절한다. Singhal's model은 경험적인 상수를 사용하지 않고 작동 유체의 물리적 특성을 반영하기 위해 표면 장력( $\sigma$ )를 사용한다. Mushy IDM은 경험적인 상수 대신에 공동과 외부의 경계면에서의 유동 속도를 사용한다.

표 1 각 공동모델별 공동 생성량 및 소멸항

Model	공동 생성량 및 소멸항
Merkle's model	$m_e = \frac{C_e \max(P_v - P, 0) \rho \alpha_l}{(0.5 \times \rho_\infty u_\infty^2) t_\infty}$ $m_c = \frac{C_l \max(P - P_v, 0) \rho_v \alpha_v}{(0.5 \times \rho_\infty u_\infty^2) t_\infty}$
Kunz's model	$m_e = \frac{C_e \max(P_v - P, 0) \rho \alpha_l}{(0.5 \times \rho_\infty u_\infty^2) t_\infty}$ $m_c = \frac{C_l \rho_v \alpha_l^2}{t_\infty}$
Singhal's model	$m_e = C_e \frac{u_\infty}{\sigma} \rho \rho_l (1 - Y_1) \times \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\max(P_v - P, 0)}{\rho_l}}$ $m_c = C_l \frac{u_\infty}{\sigma} \rho \rho_v Y_1 \times \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\max(P - P_v, 0)}{\rho_l}}$
Mushy IDM	$m_e = \left\{ \frac{\rho_l}{\rho_v} + \left( 1 - \frac{\rho_l}{\rho_v} \right) e^{-(1-\alpha_l)/\beta} \right\} \times \frac{\rho_v}{\rho_l} \left\{ \frac{\max(P_v - P, 0) \rho \rho_l}{(U_{m,n} - U_{l,n})^2 (\rho_l - \rho_v) t_\infty} \right\}$ $m_c = \frac{\rho_l}{\rho_m} \frac{\max(P - P_v, 0) \rho_l \alpha_v}{(U_{m,n} - U_{l,n})^2 (\rho_l - \rho_v) t_\infty}$

#### 4. 공간차분기법

공동현상이 존재하는 유동장은 액체상과 기체상 사이의 음속의 차가 크기 때문에 압축성 영역과 비압축성 영역이 혼재하게 된다. 그러므로 공간차분기법도 압축성/비

압축성 영역을 동시에 해석할 수 있어야 하는데 본 연구에서는 예조건화한 RoeM을 사용했다. RoeM 공간차분기법은 충격과 불안정성을 해결하기 위해 국부 압력과 마하수 분포를 기반으로 제어함수  $f$ 와  $g$ 를 정의한다. 또한 접촉 불연속면을 정확하게 포착하면서도 팽창영역의 불안정성을 제거하기 위해 signal velocity  $b_1$ 과  $b_2$ 를 사용하는데, 여기에서는 최종적인 수식만 소개하겠다. 이에 대한 자세한 설명은 참고문헌[7]에서 볼 수 있다.

$$F_{j+1/2} = \frac{b_1 \times F_j - b_2 \times F_{j+1}}{b_1 - b_2} + \frac{b_1 \times b_2}{b_1 - b_2} \Delta Q^* \quad (5)$$

$$- \frac{b_1 \times b_2}{b_1 - b_2} \frac{1}{1 + |\hat{M}|} B^* \Delta Q$$

$$Q^* = [\rho_m, \rho_m u, \rho_m v, \rho_m w, \rho_m H, \rho_m Y_1]^T$$

$$B \Delta Q^{**} = \left( \Delta \rho_m - f \frac{\Delta P}{c^2} \right) \begin{pmatrix} 1 \\ \hat{u} \\ \hat{v} \\ \hat{w} \\ \hat{H} \\ \hat{Y}_1 \end{pmatrix} + \hat{\rho}_m \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta u - n_x \Delta U \\ \Delta v - n_y \Delta U \\ \Delta w - n_z \Delta U \\ \Delta H \\ \Delta Y_1 \end{pmatrix}$$

$$\hat{M}^* = \text{sign}(\hat{M}^*) \times \min(1, |\hat{M}^*|), \quad \hat{M} = \hat{U} / \hat{D}$$

$$b_1^* = \max(\hat{U} + \hat{c}, U_{j+1} + \hat{c}, 0)$$

$$b_2^* = \min(\hat{U} - \hat{c}, U_j + \hat{c}, 0)$$

$$f = \begin{cases} 1 & , \hat{u}^2 + \hat{v}^2 = 0 \\ |\hat{M}|^h & , \hat{u}^2 + \hat{v}^2 \neq 0 \end{cases}$$

$$g = \begin{cases} 1 & , \hat{M} = 0 \\ |\hat{M}|^{1-\Pi_{i/2}} & , \hat{M} \neq 0 \end{cases}$$

$$h = 1 - \min(\Pi_{1/2}^*, \Pi_{L,1/2}^*)$$

$$\Pi_{L,-1/2}^*, \Pi_{R,1/2}^*, \Pi_{R,-1/2}^*$$

$$\Pi_{1/2}^* = \min\left(\frac{\bar{P}_L^*}{\bar{P}_R^*}, \frac{\bar{P}_R^*}{\bar{P}_L^*}\right)$$

$$\bar{P}_{L,R}^* = P_{L,R} + \min\left(\frac{1}{2} \rho_{1/2,m} c_{1/2,m}^2, \frac{1}{2} \rho_{L,m} c_{L,m}^2, \frac{1}{2} \rho_{R,m} c_{R,m}^2\right)$$

### III. 수치해석 결과

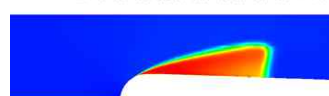
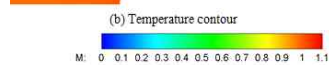
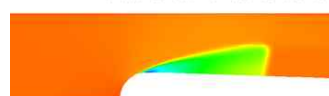
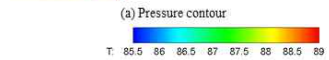
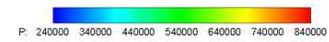
#### 1. Hord의 실험연구에 대한 수치해석

수치기법에 대한 검증으로써 1973년 Hord가 수행한 실험연구를 수치적으로 해석하였다. 이 문제는 액체 질소 및 액체 수소를 작동 유체로 하여 수행하였으며 실험 연구에 사용된 터널 및 수증익형의 형상은 참고문헌 [16,17]에 설명되어 있다. Hord는 이 수증익형 실험에서 다양한 유동조건을 적용하였으나 본 연구에서는 타 연구진에서도 검증한 바 있는 경우들에 대해 해석을 수행하였다. 이에 대한 조건은 표 3과 같다.

표 2 Hord의 실험연구 수치해석을 위한 유동조건

형상	매질	Case	T(K)	V(m/s)	공동상수
Hydrofoil	LN <sub>2</sub>	289C	88.64	23.5	1.55
	LH <sub>2</sub>	231C	20.63	51.4	1.34
Ogive	LN <sub>2</sub>	312D	83	23.5	0.46
	LH <sub>2</sub>	349B	21.33	63.9	0.38

그림 1은 해석 결과의 한 예로써 각각 압력, 온도, 마하수 분포를 표현한 것이다. 수증익형의 전면에서 정체점을 형성하며 고압을 형성하던 유동은 후부로 팽창하면서 국부적으로 압력이 포화증기압보다 낮은 영역이 존재하게 되고, 이 영역에서 공동현상이 일어난다. 매질이 물이라면 이 공동현상이 일어나는 영역에 온도 변화가 거의 나타나지 않으나, 극저온 유체의 경우 그림 1-(b)에서 볼 수 있듯이 공동내부의 온도 변화가 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다.



(a) Pressure contour

(b) Temperature contour

(c) Mach number contour

그림 1 Numerical results of Run 289C (Liquid nitrogen, Merkle's model)

그림 1-(c)는 마하수 분포로서 공동영역에서는 음속이 크게 감소하며 이로 인해 압축성 유동영역을 형성하고 있음을 볼 수 있다. Hord는 수증익형 표면에서의 압력 강하 분포와 온도 분포를 측정한 바 있으며 이에 대한 비교를 그림 2에 도시하였다. 여기에서 압력 강하 분포란 해당 위치에서의 국부 압력과 자유류 포화 압력의 차이  $(P - P_{V,\infty})$ 를 나타낸 것으로, 온도 효과가 거의 존재하지 않는 물의 경우 이 압력 강하량은 거의 0에 가깝게 된다. 그러나 극저온 유체는 공동영역에서의 온도 강하로 인해 국부 포화증기압이 감소하게 되고, 이로 인해

압력 강하량도 음수를 띄게 된다. 그림 2는 이러한 경향을 잘 보여주고 있으며 Hord의 실험결과 및 타 연구진의 계산결과와 비교해보아도 유사함을 알 수 있다.

또한 그림 2에서는 각 공동 모델별로 해석 결과를 비교하기도 했는데, 다른 공동모델과는 달리 Singhal's model만이 공동이 끝나는 영역에서의 압력 분포가 다른 공동모델에 비해 부드럽게 회복되는 것을 볼 수 있다. 이런 차이가 나타나는 것은 공동모델의 수치적 모델링에 의한 것으로서, Singhal's model은 다른 모델과는 달리 포화압력과 국부 압력간의 차이  $(P_v - P)$ 를 제공근항 양으로 표현했기 때문이다.

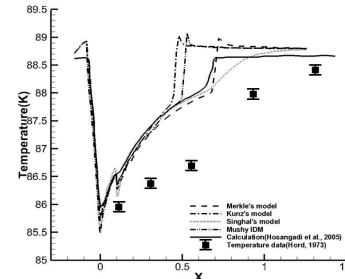
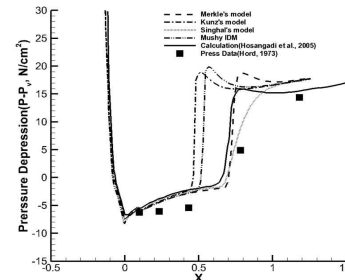


그림 2 Pressure depression(Upper) and temperature(Lower) distribution of Run 289C

#### 2. 항공우주연구원 터보펌프 인두서에 대한 수치해석

본 연구에서 해석 대상으로 하고 있는 인두서는 항공우주연구원에서 실험한 모델[18]로써 일반적인 터보펌프 인두서에서 임펠러가 제거한 것이다. 이에 대한 모델링 및 격자계는 그림 3과 같다.

#### 2.1. 작동유체가 물인 경우

그림 4는 수치해석을 통해 계산한 shroud 표면 압력 분포와 실험결과를 비교한 것으로서 수치해석 결과가 실험결과와 비교하여 그 경향을 잘 따라감을 알 수 있다.

그림 5는 수치해석 및 실험에서 측정된 터보펌프 인두

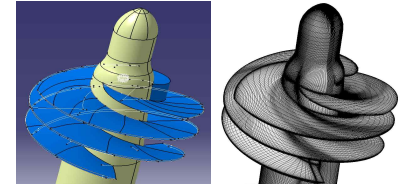


그림 3. Modeling and mesh of turbopump inducer

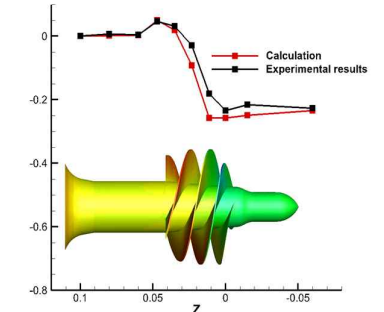


그림 4 Local pressure distribution comparison

서의 가압성능을 나타낸 것이다. 이를 비교하면 전반적으로 유사한 경향을 따라가고 있으나 수치해석 결과가 실험값에 비해 조금 우수한 것으로 예측하고 있다. 이러한 차이가 나타나는 원인은 크게 3가지로 요약할 수 있다. 먼저 실험에서 사용한 작동유체는 용존산소가 완전히 제거되어 있지 않은 단순한 수돗물이기 때문에 인두서의 성능을 다소 낮게 예측할 수 있다. 또한 인두서를 거쳐 흘러간 물은 순환식으로 설계된 실험장비에 의해 다시 유입되는데 이러한 과정이 반복되면서 물의 온도가 조금씩 상승하게 된 점이 결과의 차이점을 유발하게 된다. 마지막으로 실험에서 측정된 압력은 정확히 디퓨저의 출구가 아니라 후방의 volute에서 측정했으며 이러한 차이로 수치해석 결과와 다소 오차가 발생할 수 있다.

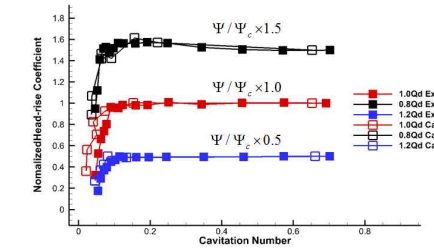


그림 5. Headrise coefficient comparison

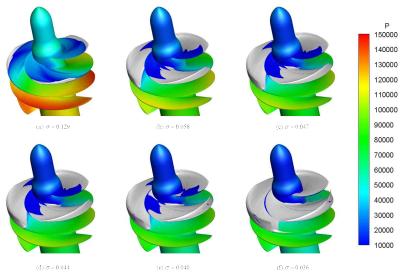


그림 6. Pressure distribution on inducer surface and VOF iso-surface in cold water

그러나 전반적으로 head coefficient의 거동을 모사할 수 있고 공동에 의한 터보펌프 인두서의 성능 저하점이 존재하는 범위를 예측할 수 있다는 점에서 수치해석 결과가 의미를 가질 수 있다. 그림 6은 입구 압력을 무차원화한 공동계수의 변화에 따른 압력 contour 및 기체상의 iso-surface로써 입구의 압력이 감소함에 따라 터보펌프 인두서의 가압성능이 순차적으로 감소하고 있음을 확인할 수 있다.

2.2. 작동유체가 극저온 유체인 경우

극저온 유체의 공동현상은 그 온도효과에 의해 매질이 물인 경우 나타나는 공동현상과는 그 특징이 판이하게 다르다. 우선 대표적인 차이점은 전반적인 공동의 분포이다. 극저온 유체는 액체상의 밀도가 물에 비해 상대적으로 작아 생성되는 공동의 분포도 상대적으로 얇게 퍼지게 된다. 그림 7은 터보펌프 인두서 블레이드의 끝단에서의 VOF contour이다. 물의 경우 기체상이 넓게 퍼지지 않고 극부적으로 집중되어 있는 반면 액체 수소의 경우 기체상의 발생이 적고 넓은 영역에 걸쳐 퍼져있음을 볼 수 있다. 그림 8은 그림 6과 마찬가지로 터보펌프 인두서 표면 압력 및 기체상의 분포를 나타낸 것으로 공동영역이 물에 비해 억제되어 있음을 확인할 수 있다.

뿐만 아니라 극저온 유체는 물에 비해 잠열이 상대적으로 작아 공동 영역에서의 온도 변화가 상대적으로 크게 나타나며 이는 그림 9의 온도 분포에서 확인할 수 있다. 그림 9는 블레이드의 leading edge 부근의 온도 분포로써 액체 수소의 온도 분포로써 공동 영역에서 온도 변화가 상대적으로 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이와 관련하여 Brennen[19]은 thermodynamic parameter를 정의하여 이를 정량화하기 위한 연구를 수행한 바 있다. 이를 참고하여 극저온 유체 중 하나인 액체 산소를 매질로 하여 thermodynamic parameter를 일치시킨 유동조건으로 수치 해석을 수행하였다. 그림 10은 공동현상에 의해 suction performance가 급격히 저하되는 영역을 확대한 것이다. 유동조건을 동일하게 맞춰도 온도 효과가 잘 나타나는 액체 산소는 흡입성능의 하락이 물에 비해 상대적으로 지연되고 있음을 볼 수 있다. 또한 thermodynamic parameter

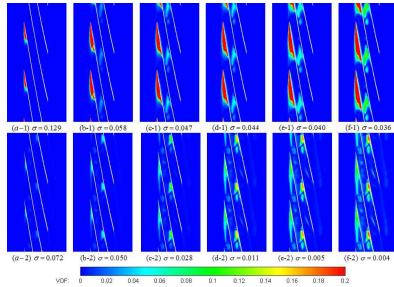


그림 7. VOF contour on cylindrical cut at blade tip for various cavitation number : Upper(water), Lower(liquid hydrogen)

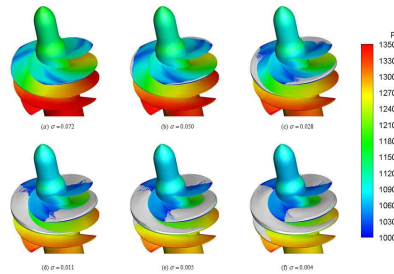


그림 8. Pressure distribution on inducer surface and VOF iso-surface in liquid nitrogen

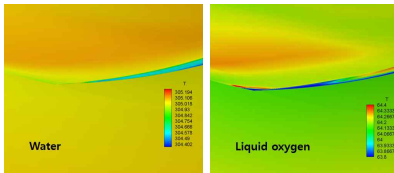


그림 9 Comparison of temperature variation near the tip in cold water and liquid oxygen

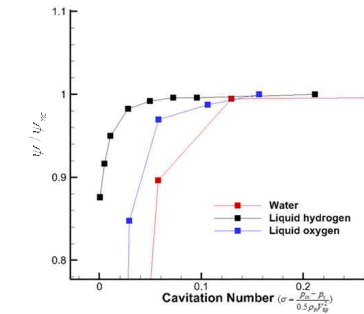


그림 10. Headrise coefficient near the head breakdown point

가 항상 타 유체에 비해 큰 액체 수소는 액체 산소보다 더 지연되고 있음을 볼 수 있다. 즉, 유동장의 열역학적 특성을 유사하게 일치시키더라도 작동유체의 온도효과와 여부가 전체 시스템의 성능을 좌우할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 극저온 공동현상을 해석하기 위해 2상 유동을 모사할 수 있는 형태의 지배방정식을 구성하고, 정확도 높은 극저온 유체 상태방정식을 근사하여 사용하였다. 비압축성에서 압축성에 이르는 넓은 범위의 마하수를 정확하고 안정적으로 해석하기 위해 지배방정식 및 공간차분기법에 예조건화를 적용하였고, 공동현상에 의한 상 변화 모델링을 적용하였다. 이를 종합하여 구성된 수치해석자는 Hord의 실험연구를 수치 해석함으로써 검증하였다. 이 과정에서 극저온 유체에서 발생하는 온도효과를 공동영역에서의 온도 분포 및 극부 압력강하량 분포를 통해 확인할 수 있었다. 또한 항공우주연구원에서 물을 이용해 실험한 터보펌프 인두서를 해석하여 시스템의 전체 성능을 검증하고, 매질을 극저온 유체로 한 경우와 비교하였다. 이 과정에서 극저온 공동현상에서 널리 알려진 온도효과를 터보펌프 인두서 주변 공동 분포 및 블레이드 leading edge 주변 온도 분포를 통해 다시 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab, NRF-2009-0091724)의 지원을 받아 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] O.Coutier-Delgosha, P.Morel, R.Fortes-Patell a, and J.L.Reboud, "Numerical simulation of turbopump inducer cavitating behavior", *Int. J. Rotating Machinery.*, Vol 2, 2005, pp.135-142
- [2] Merkle, C.L, Feng J.Z. and Buelow, P.E.O., "Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation", *Proc. Third Intern. Symp. On Cavitation*, Grenoble, France, 1998
- [3] Kunz, R.F., Boger, D.A., Stinebring, D.R., Chyczewski, T.S., Lindau, J.W., Gibeling, H.J., Venkateswaran, S. and Govindan, T.R., "A preconditioned Navier-Stokes method for two phase flows with application to cavitation prediction", *Computers and Fluids*, Vol 29, 2000, 849
- [4] Singhal, A.K. Li, N.H., Athavale, M., and Jiang, Y., "Mathematical basis and validation of the full cavitation model", *ASME Fluids engineering division summer meeting*, 2001, ASME paper FEDSM 2001-18015
- [5] Inanc Senocak and Wei Shyy, "Interfacial dynamics based modelling of turbulent cavitating flows, Part-I :

- Model development and steady-state computations", *Int. J. Numer. Math. Fluids*, Vol 44, 2004, pp.975-995
- [6] Ashvin Hosangadi and Vineet Ahuja, "Numerical study of cavitation in cryogenic fluids", *Journal of fluids engineering*, Vol 127, 2005, pp.267-281
- [7] Ihm, S. and C. Kim, "Computations of homogeneous equilibrium two-phase flows with accurate and efficient shock-stable schemes", *AIAA journal*, Vol 46, 2008, pp.3012-3037
- [8] James A. Beattie and Oscar C. Bridgeman "A new equation of state for fluids. II. Application to helium, neon, argon, hydrogen, nitrogen, oxygen, air and methane", *Journal of the American Chemical Society* VOL 50, 1998, pp. 3133 - 3138
- [9] Manson Benedict, George B. Webb, and Louis C. Rubin, "An empirical equation for thermodynamic properties of light hydrocarbons and their mixtures", *Journal of chemical physics*, Vol 10, 1942
- [10] van der Waals, J. D., "On the Continuity of the Gaseous and Liquid States", doctoral dissertation. 1873, Universiteit Leiden.
- [11] Peng, D.Y, and Robinson, D.B, "A New Two-Constant Equation of State". *Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals*, VOL15, 1976, pp 59-64
- [12] Murdock, James W. "Fundamental fluid mechanics for the practicing engineer", *CRC Press*, 1993, pp. 25-27
- [13] Roland Span, Eric W. Lemmon, Richard T Jacobsen, "A reference equation of state for the thermodynamic properties of nitrogen for temperature from 63.151 to 1000K and pressures to 2200Mpa", *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol 29, 2000
- [14] Richard B. Stewart, Richard T Jacobsen, W. Wagner, "Thermodynamic properties of oxygen from the triple point to 300K with pressures to 80Mpa", *J. Phys. Chem. Ref. Data* Vol 20, 1991
- [15] J. W. Leachman, R. T Jacobsen, S. G. Penoncello, E. W. Lemmon, "Fundamental equation of state for parahydrogen, normal hydrogen, and ortho hydrogen", *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol 38, 2009
- [16] J. Hord, and L.M.Anderson, "Cavitations in liquid cryogens : 2-hydrofoil", *NASA contraction report : NASA CR-2054*, 1973
- [17] J. Hord, and L.M.Anderson, "Cavitations in liquid cryogens : 3-golve", *NASA contraction report : NASA CR-2054*, 1973
- [18] Chang-Ho Choi, Jun-Gu Noh, Jin-Sun Kim, Soon-Sam Hong and Jinhan Kim, "Effects of a bearing strut on the performance of a Turbopump Inducer", *Journal of Propulsion and Power*, Vol.22, 2006, pp.1413-1417
- [19] Brennen, C. E., "The Dynamic Behavior and Compliance of a Stream of Cavitating Bubbles," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 95, 1973, pp. 533-542