

이상 유동장 수치해석을 통한 터보펌프 인듀서 성능 예측 연구

Performance Prediction Study of Turbopump Inducer Through The Two-phase Flow Computations

민대호^{1*}, 김형준¹, 김동환¹, 김종암¹
서울대학교¹

초 록

본 연구에서는 이상유동 해석을 통한 터보펌프 인듀서의 성능 예측 연구를 주로 다룬다. 터보펌프 인듀서의 작동유체를 물 뿐만 아니라 극저온 유체에도 적용하기 위해 온도효과를 모사할 수 있는 지배방정식 및 상태방정식을 사용하였다. 또한 공동영역 주변의 압축성 영역 및 액체상 영역의 비압축성 영역을 동시에 안정적이고 효과적으로 해석할 수 있는 수치기법들을 적용하였다. 이를 통해 매질을 물로 한 경우 터보펌프 인듀서의 가압성능을 예측하고 실험 결과와 비교하였다. 또한 극저온 유체를 매질로 한 경우 우와의 비교를 통해 극저온 공동현상의 특징을 살펴보았다.

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 and accurate equation of states. Also we used the stable and accurate numerical schemes for cavitating flows which incompressible and compressible regimes are co-exists. As a results, we simulated cavitating flows around turbopump inducer with cold water and cryogenic fluids, and examined the differences of flow characteristics depending on the working fluids.

Key Words : Cryogenic Cavitation(극저온 공동현상), Compressible/Incompressible Two-phase Flow(압축성/비압축성 이상유동), Turbopump Inducer Simulation(터보펌프 인듀서 시뮬레이션)

1. 서 론

극저온 유체에서 발생하는 공동현상이 발생하면 물과는 다르게 온도변화 및 이에 따른 물성치의 변화가 크게 나타나는 등 그 양상이 판이하게 다르다. 일반적으로 공동현상은 주로 액체로켓의 산화제와 연료를 가압하는 터보펌프 인듀서에서 자주 발생하게 되는데, 공동현상이 발생하면 터보펌프의 가압 성능을 저하시키거나 구조 진동을 유발하여 기기 손상을 입히는 등의 문제를 야기시킨다. 그러므로 공동현상을 정확하게 예측하고, 매질이 극저온 유체인 경우 나타나는 공동현상의 특징을 파악하는 것은 터보펌프의 성능을 향상시키는 데 있어 기초적인 단계라고 할 수 있다.

극저온 공동현상에 대한 수치적 연구는 다양한

연구 그룹들에 의해 광범위하게 수행되어 왔다. 대표적으로 Reboud 그룹⁽¹⁾은 비압축성 유체 solver인 Fine /turbo와 barotropic equation of state 을 통해 2차원 cascade 문제 및 3차원 터보펌프 인듀서를 해석하였다. Hosangadi 그룹⁽²⁾은 압축성/비압축성이 solver와 Merkle 그룹의 공동모델을 결합하여 다양한 문제를 해석하였다.

본 연구에서는 압축성/비압축성이 혼재된 공동이 형성된 유동 해석을 위해 예조건화를 도입하였고, 본 연구그룹에서 개발된 정확하고 강건한 이상유동 RoeM 수치기법을 사용하였다. 이를 바탕으로 3차원 터보펌프 인듀서에 대한 수치해석을 수행하고, 가압성능을 실험 결과와 비교함과 동시에 극저온 유체에서 나타나는 공동현상의 특

정을 살펴보았다.

2. 수치기법

2.1 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 Γ 에서는 시스템의 고유값들이 서로 유사한 차원의 값을 갖도록 pseudo-compressibility parameter를 정의하였다. 이에 대한 자세한 수식은 본 연구진에서 기존에 발표한 바 있는 참고문헌⁽³⁾에 소개되어 있다.

2.2 공간차분기법

공동현상이 존재하는 유동장은 액체상과 기체상 사이의 음속의 차가 크기 때문에 압축성 영역과 비압축성 영역이 혼재하게 된다. 그러므로 공간차분기법도 압축성/비압축성 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⁽³⁾에서 볼 수 있다.

$$E_{1/2} = \frac{1}{b_1^* - b_2^*} [b_1^* \times E_L - b_2^* \times E_R + b_1^* \times b_2^*]$$

$$\times \left(\Delta Q^* - \frac{g}{1 + |\hat{M}^*|} B \Delta Q^{**} \right) \quad (4)$$

$$Q^* = [\rho_m, \rho_m u, \rho_m v, \rho_m w, \rho_m H, \rho_m Y_1]^T \quad (5)$$

$$B \Delta Q^{**} = \left(\Delta \rho_m - f \frac{\Delta P}{\hat{D}^2} \right) \begin{pmatrix} 1 \\ \hat{u} \\ \hat{v} \\ \hat{w} \\ \hat{H} \\ \hat{Y}_1 \end{pmatrix} + \hat{\rho}_m \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta u - n_x \Delta U \\ \Delta v - n_y \Delta U \\ \Delta w - n_z \Delta U \\ \Delta H \\ \Delta Y_1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\hat{M}^* = \text{sign}(\hat{M}^*) \times \min(1, |\hat{M}^*|), \quad \hat{M}^* = \hat{U}' / \hat{D} \quad (7)$$

$$\text{여기서 } b_1^* = \max(\hat{U}' + \hat{D}, U_L' + \hat{D}, 0)$$

$$b_2^* = \min(\hat{U}' - \hat{D}, U_R' + \hat{D}, 0) \quad (8)$$

$$f = \begin{cases} 1 & , \hat{u}^2 + \hat{v}^2 = 0 \\ |\hat{M}|^h & , \hat{u}^2 + \hat{v}^2 \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$g = \begin{cases} 1 & , \hat{M} = 0 \\ |\hat{M}|^{1 - \Pi_{1/2}^*} & , \hat{M} \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$h = 1 - \min(\Pi_{L,1/2}^*, \Pi_{R,1/2}^*) \quad (11)$$

2.3 시간적분기법

LU-SGS는 Block diagonal solver가 필요 없는 내재적 시간 적분 기법으로, 효율성이 좋기 때문에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 예조건화 행렬을 포함하는 비정상 2차원 점성 문제에 대해, 비점성항과 점성항 모두를 내재적으로 처리한 LU-SGS를 사용하였고, 이에 대한 자세한 설명은 참고문헌⁽³⁾에서 볼 수 있다.

2.4 공동모델

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

$$S_{pc} = (0, 0, 0, 0, 0, \dot{m}_t), \quad \dot{m}_t = m_e - m_c \quad (15)$$

여기에서 m_e 는 액체상이 기화하는 변화량이고 m_c 는 기체상이 응축되는 변화량이다. 이 변화량들은 다양한 모델들에 의해 결정되며 본 연구에서는 Merkle's model⁽⁴⁾을 사용하였다.

3. 해석결과

본 연구에서 해석 대상으로 하고 있는 인두서

는 항공우주연구원에서 실험한 모델⁽⁵⁾로써 일반적인 터보펌프 인듀서에서 임펠러가 제거된 것이다. 이에 대한 모델링 및 격자계는 Figure 1과 같다.

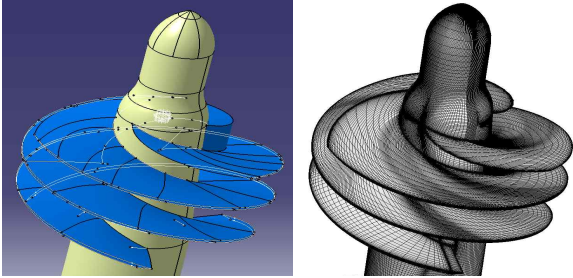


Fig. 1. Modeling and mesh of turbopump inducer

3.1 작동유체가 물인 경우

Figure 2는 작동유체가 물인 경우에 대한 수치 해석 및 실험에서 측정된 터보펌프 인듀서의 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 인듀서의 성능을 다소 낮게 예측할 수 있다. 또한 인듀서를 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.

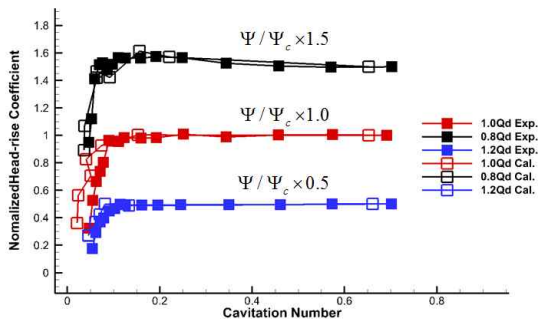


Fig. 2. Headrise coefficient comparison

그러나 전반적으로 head coefficient의 거동을 모사할 수 있고 공동에 의한 터보펌프 인듀서의 성능 저하점이 존재하는 범위를 예측할 수 있다는

점에서 수치해석 결과가 의미를 가질 수 있다. Figure 3은 입구 압력을 무차원화한 공동계수의 변화에 따른 압력 contour 및 기체상의 iso-surface로써 입구의 압력이 감소함에 따라 터보펌프 인듀서의 가압성능이 순차적으로 감소하고 있음을 확인할 수 있다.

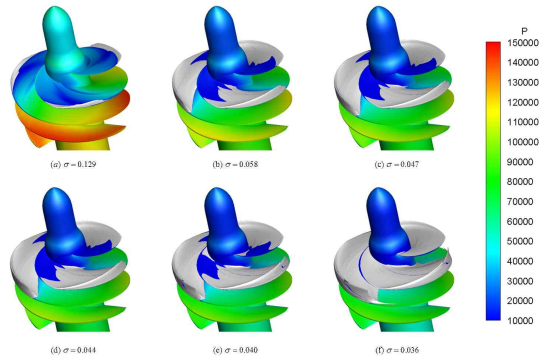


Fig. 3. Pressure distribution on inducer surface and VOF iso-surface in cold water

3.2 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 퍼지는 특징을 보이는데 이러한 점은 Figure 4에서 확연히 확인할 수 있다.

뿐만 아니라 극저온 유체는 물에 비해 잠열이 상대적으로 작아 공동 영역에서의 온도 변화가 상대적으로 크게 나타나며 이는 Figure 5의 온도 분포에서 확인할 수 있다. Figure 5는 blade의 leading edge 부근의 온도 분포로써 액체 수소의 온도 분포로써 공동 영역에서 온도 변화가 상대적으로 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 차이점을 통칭하여 온도효과라 한다. 이와 관련하여 Brennen⁽⁶⁾은 thermodynamic parameter를 정의하여 이를 정량화하기 위한 연구를 수행한 바 있다. 작동유체가 물인 경우와 극저온 유체인 경우 모두 이 thermodynamic parameter를 일치시켜 수치해석을 수행해도 Figure 6과 같이 극저온 유체의 경우가 상대적으로 인듀서의 성능이 향상된 것을 확인할 수 있다. 즉, 유동장의 열역학적 특성을 유사하게 일치시키더라도 작동유체의 온도효과

여부가 전체 시스템의 성능을 좌우할 수 있음을 알 수 있다.

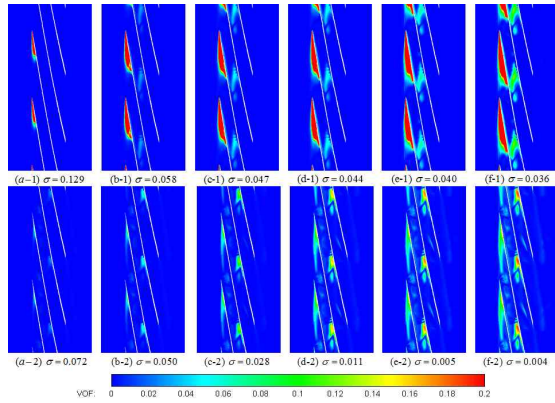


Fig. 4. VOF contour on cylindrical cut at blade tip for various cavitation number : upper(water), lower(liquid hydrogen)

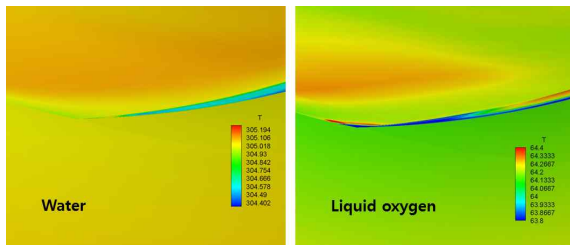


그림 5 Comparison of temperature variation near the tip in cold water and liquid oxygen

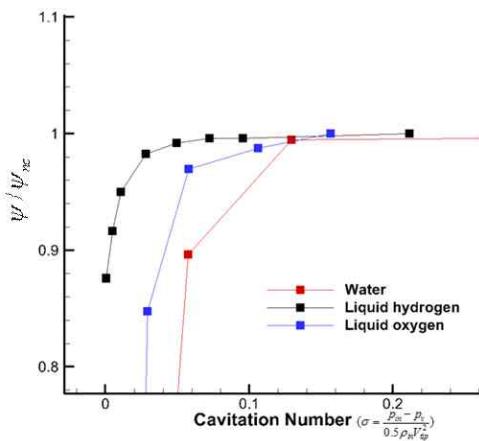


Fig. 6. Headrise coefficient near the head breakdown point

3. 결론

본 연구에서는 터보펌프 인듀서 주변 공동 유동장에 대한 수치해석을 다뤘다. 압축성 영역과 비압축성 영역이 혼재하는 공동 유동장을 해석하기 위해 지배방정식 및 공간차분기법의 예조건화

를 적용하였고, 공동의 생성 및 소멸을 위해 Merkle's cavitation model을 사용하였다. 이를 통해 작동유체가 물인 경우 수치해석을 수행하여 터보펌프 인듀서의 가압성능을 예측하고 실험값과 비교하였다. 뿐만 아니라 작동유체로 극저온 유체를 적용하여 수치해석을 수행하였다. 그 결과 극저온 공동현상의 대표적인 특징이라 할 수 있는 공동 영역내 온도 변화, 얇게 퍼지는 공동 분포 등을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab, No. 20120009099)의 지원을 받아 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) O.Coutier-Delgosha, P.Morel, R.Fortes-Patella, and JL.Reboud, 2005, "Numerical simulation of turbopump inducer cavitating behavior", *Int. J. Rotating Machinery.*, Vol 2, pp.135-142
- (2) Ashvin Hosangadi and Vineet Ahuja, 2005, "Numerical study of cavitation in cryogenic fluids", *Journal of fluids engineering*, Vol 127, pp.267-281
- (3) Ihm, S. and C. Kim, 2008, "Computations of homogeneous equilibrium two-phase flows with accurate and efficient shock-stable schemes", *AIAA journal* Vol 46, pp.3012 -3037
- (4) Merkle, C.L, Feng J.Z. and Buelow, P.E.O., 1998, "Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation", *Proc. Third Intern. Symp. On Cavitation*, Grenoble, France
- (5) Chang-Ho Choi, Jun-Gu Noh, Jin-Sun Kim, Soon-Sam Hong and Jinhan Kim, 2006, "Effects of a bearing strut on the performance of a Turbopump Inducer", *Journal of Propulsion and Power*, Vol.22, pp.1413-1417
- (6) Brennen, C. E., 1973, "The Dynamic Behavior and Compliance of a Stream of Cavitating Bubbles," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 95, pp. 533-542