

CFD-ACE+에서의 캐비테이션 해석

전통적인 CFD 코드는 유동 및 열 해석의 범위에 국한되어, 복합적인 물리적 현상이 고려된 문제 해석에는 한계가 있어 왔다. 근래 이러한 요구를 반영하여 물리적 현상들을 조합하여 문제를 모델링하고 시뮬레이션하는 진보적인 개념의 'Multiphysics solver'가 등장하기 시작하고 있다. 그 중 대표적인 코드 CFD-ACE+는 기본 유동 해석을 뛰어넘어 캐비테이션 고려가 가능하다. 현재 우주항공, 자동차 응용 분야에서 펌프 설계 시 캐비테이션을 예측하여 이를 반영하고 있다. 이 글에서는 CFD-ACE+의 캐비테이션 모델과 그 검증, 응용분야 등에 대해 소개한다.

공동현상(cavitation)은 액체의 압력이 포화증기압보다 낮아진 영역에서 증기가 발생하는 현상으로, 상변화와 그에 따른 매우 크고 급격한 밀도변화를 수반한다. 공동현상은 유체기계와 상당한 성능저하를 야기하는 바람직하지 못한 현상으로, 유량감소와 펌프의 국부적 저압영역을 증가시키게 된다. 또한 발생한 기포는 압력이 높은 영역에 이르면 급격히 부서져 소음이나 진동, 부하 불균형의 원인이 되며, 포화증기압보다 높은 영역에서 액화되어 기상의 부피가 급격히 축소됨에 따라 그 부분의 국부압력이 매우 커져 유체기계를

침식시키는 원인이 되기도 한다.

CFDRC(CFD Research Corp)는 이러한 공동현상을 해석하기 위해 이에 대한 CFD 모델을 개발하였으며, 다양한 적용 사례들을 통해 그 모델이 공학적으로 상당한 신뢰성이 있음을 입증하였다. 여기서는 그 모델과 개발 단계에서의 검증 내용 그리고 응용 사례들을 간단히 살펴보도록 한다.

Full Cavitation 모델

Full Cavitation 모델¹⁾은 공동현상에서 기포의 생성과 수송, 압력과 속도에 의한 난류변동 효과,

응축되지 않고 액체상에 포함되어 있는 기체상 등이 복합적으로 고려된 모델이다. 기본적으로 $k-\epsilon$ 모델과 같은 전통적 난류모델과 밀도변화가 증기밀도 비(vapor mass fraction : f)의 함수가 고려된 Navier-Stokes 방정식을 사용하며, 증기밀도 비 f 에 대한 수송방정식을 질량보존 방정식, 운동량보존방정식과 함께 풀게 된다. 이 증기밀도 비 f 에 대한 수송 방정식의 생성항은 다음과 같은 사항이 고려되어 증발 상변화율과 응축 상변화율로 표현된다.

기포 동역학적 고려는 식 (1)과 같이 기포 표면에서의 힘의 평형

에 관한 Rayleigh-Plesset 방정식²⁾으로부터 유도된다.(그림 1 참조)

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 = \left(\frac{P_B - P}{\rho_l} \right) - \frac{4V_L}{R_B} \frac{dR_B}{dt} - \frac{2S}{\rho_c R_B} \quad (1)$$

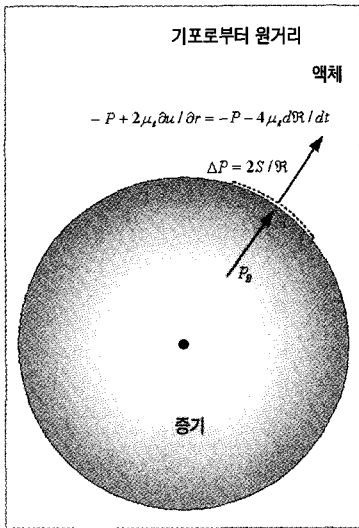


그림 1 기포 표면

이와 함께 증기, 액체 상에 대한 연속방정식 (2)~(4)이 고려되면 증기상에 대한 생성항이 포함된 수송방정식 (5)가 얻어진다.

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1-\alpha)\rho_l] + \nabla \cdot ((1-\alpha)\rho_l \vec{v}) = -R \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha\rho_v) + \nabla \cdot (\alpha\rho_v \vec{v}) = R \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho f) + \nabla \cdot (\rho f \vec{v}) = (4\pi)^{1/3} (3\alpha)^{2/3} \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \left[\frac{2(P_B - P)}{\rho_l} \right]^{1/2} \quad (5)$$

식 (6)이 첫 식은 기포의 반경이 공기 역학적 항력과 표면장력 사이의 관계에 의해 결정되는 식

이고, 식 (6)의 두 번째 식은 증기 상 변화율이 기포의 상대 속도의 제곱에 비례하고 표면장력에 반비례 관계에 있음을 나타낸다. 식 (7)은 기포 유동 영역에서 기포의 상대속도는 액체 상의 속도 5~10%에 해당하는 특성속도에 비례하고 이는 난류운동에너지 k의 제곱근 크기에 해당되는 것을 표현한다. 두 식 (6), (7)을 이용하면 단위 체적당 증발상 변화율, 응축 상 변화율은 식 (8), (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$R_B = \frac{0.061We\sigma}{\rho_l V_{rel}^2}, \quad R_c \propto \frac{V_{rel}^2}{\sigma} \quad (6)$$

$$V_{rel}^2 \propto V_{ch} \quad (\text{i.e. } 5 \sim 10\% \text{ of } V_{liquid}) \propto \sqrt{k} \quad (7)$$

$$R_e = C_e \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \left[\frac{2P_v - P}{\rho_l} \right]^{1/2} (1-f) \quad (8)$$

$$R_c = C_c \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_l \left[\frac{2P - P_v}{\rho_l} \right]^{1/2} f \quad (9)$$

난류의 압력변동 효과를 고려하기 위해서는 시간에 따른 압력 변화를 확률밀도 함수를 이용해서 시간 평균화된 상변화율을 계산해야 하는데, 이를 위해 매시간마다의 순간적 상변화율의 분포를 적분하여, 시간 평균화된 상변화율을 고려하는 것이 아니라 상변화율에서 증기 압력(Pv)를 식 (10), (11)로 치환하여 간단하게 얻게 된다.

$$P'_{urb} = 0.39 \rho k \quad (10)$$

$$P_v = P_{sat} + P'_{urb} / 2 \quad (11)$$

이외에 작동유체는 누설이나 폭기(曝氣 ; aeration) 등에 의해

용해되지 않은 상태의 가스를 포함하게 되며, 이 가스가 국부적으로 낮은 압력 영역에서의 가스 팽창을 유발하게 된다. 이러한 비응축 가스(NCG : Non-Condensable Gas) 효과와 먼저 언급된 사항들이 함께 고려된 상변화율은 식 (12)~(17)과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{1}{\rho} \equiv \frac{f_v}{\rho_v} + \frac{f_g}{\rho_g} + \frac{1-f_v-f_g}{\rho_l} \quad (12)$$

$$\rho_g = \frac{WP}{RT} \quad (13)$$

$$\alpha_g = f_g \frac{\rho}{\rho_g} \quad (14)$$

$$\alpha_l = 1 - \alpha_v - \alpha_g \quad (15)$$

$$R_c = C_c \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_l \left[\frac{2P_v - P}{\rho_l} \right]^{1/2} (1-f_v-f_g), \quad C_c = 0.02 \quad (16)$$

$$R_e = C_e \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_l \left[\frac{2P - P_v}{\rho_l} \right]^{1/2} f_v, \quad C_e = 0.01 \quad (17)$$

Full Cavitation 모델의 검증

수중에 잠긴 다양한 형상의 물체 주위 유동에 대한 검증(1)을 바탕으로 식 (16), (17)의 경험적 상수 Ce, Cc가 결정되었으며, 이 검증에서 사용된 물체에 대한 물성이 CFD-ACE+의 Cavitation Module 내 정 값(default setting)으로 사용되게 되었다(액체밀도 1,000kg/m³, 증기밀도 0.02558kg/m³, 포화압력 3540Pa, 표면장력 0.0717 N/m, 물 @300K). 시뮬레이션 조건으로 확산 플럭스에 대한 이산화에 2차 정확도의 상류차분

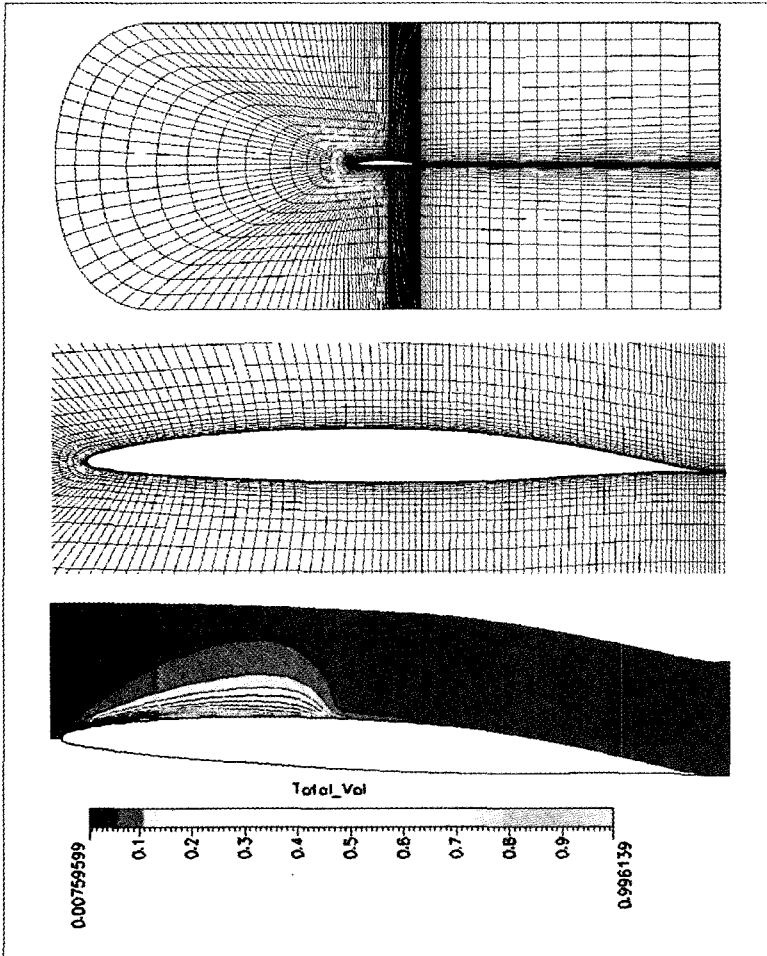


그림 2 반음각이 4°인 수중의 주위 계산 영역과 격자 및 격자분포

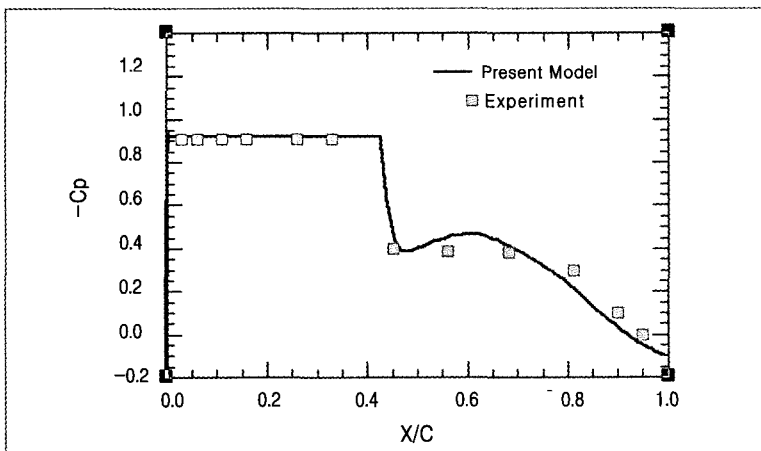


그림 3 수중의 흡입면 위에서의 압력변화 ; $\Sigma=0.91$

도 식 (2nd order upwind scheme)이 사용되었고 표준 k-ε 모델이 사용되었다. 여기서는 수중의 주위 유동에 대한 검증 결과만을 소개한다.

그림 2에서 이 검증에서 사용된 NACA66(MOD) 주위 격자 (30×130)를 볼 수 있다. 시뮬레이션은 $Re=2 \times 10^6$ 인 조건으로 입구영역에서 속도, 난류, NCG가 정량화 되었고, 출구영역에서는 $\Sigma=(P_{\infty}-P_v)/(0.5\rho U_{\infty}^2)$ 가 1.76, 1.0, 0.91, 0.84의 값을 갖도록 출구 압력을 변화시키면서 각 경우에 대한 시뮬레이션이 진행되었다.

그림 3은 측정값과 비교된 압력계수에 대한 그래프이며, 그림 4는 수중의 주위의 증기 체적분율 분포를 나타낸 것이다. 이 분포에서 흡입면 위 선단 쪽에서 증기 체적분율이 높게 나타난 것을 볼 수 있으며, 이는 압력계수 값이 일정한 값을 갖는 영역과 일치한다.

응용 예

작동 유체가 액체 상태에 있는 무수한 공학적 장치들에 대해 공동현상은 일반적인 문제이다. 그 응용 예들은 로켓추진 시스템의 터보 펌프, 산업용 터보기계, 수중의 잠수 프로펠러, 연료 분사 장치, 유체정역학적 베어링, 충격 흡수장치, 인공심장 밸브와 같은 생의학 장치 등을 망라한다.

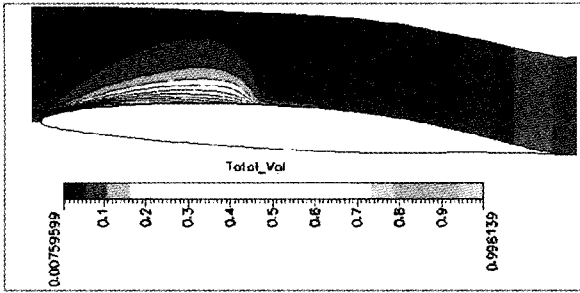


그림 4 계산된 증기 체적분율 분포; $\Sigma=0.91$

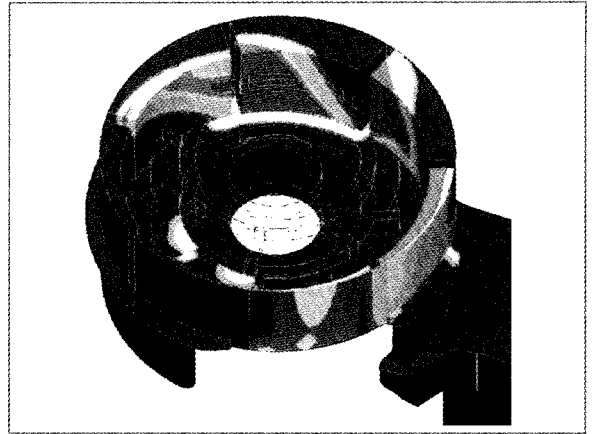


그림 6 펌프 포켓 내의 캐비테이션(4,000 RPM)

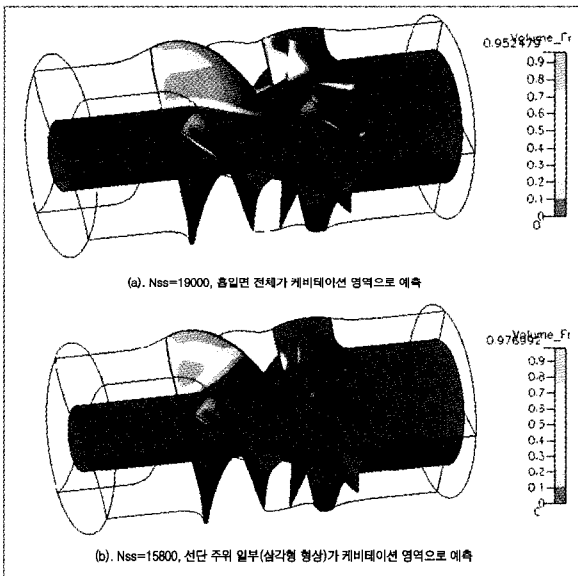


그림 5 두가지 다른 흡입비속도(Nss)에 대하여 캐비테이션 범위를 나타내는 고체표면 주위의 증기 체적비

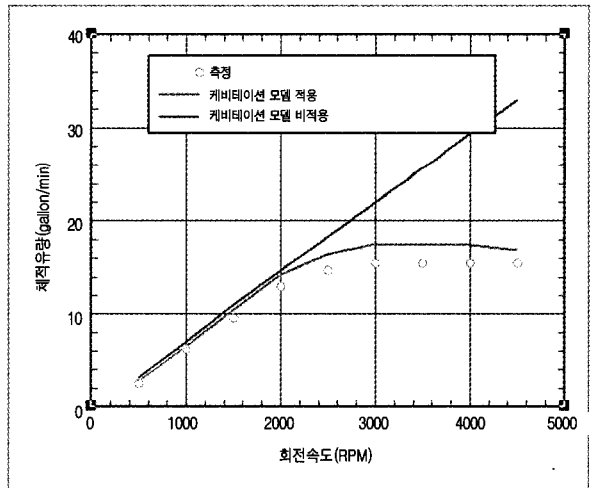


그림 7 캐비테이션에 의한 체적 유량 변화

그림 5는 축류 펌프 적용 예로 작동 유체가 290K의 물이며, 액체와 증기의 밀도비가 약 70,000에 이른다. 그림에 나타난 분포는 날개 주위에서 증기 체적분율이다. 그림 4(b)보다 (a)에서 공동현상 영역이 안내 날개의 흡입면 전체로 확대된 것을 볼 수 있다. 고속 회전일수록 공동현상의 발생 가능성이 클 것이라는 일반적인 예상과 일치하는

결과이다.

그림 6·7은 베인 펌프에 대한 시뮬레이션 결과로 실험으로 직관할 수 없는 공동현상의 발생을 예측하고 있으며, 일반적으로 펌프 로터의 RPM이 증가함에 따라 공동현상의 발생으로 펌프 유량이 감소하게 된다는 공학적 통설이 시뮬레이션을 통해 확인된 셈이다.

그림 8은 제로터형 펌프(ger-

otor형 pump)에 대해 실험과 시뮬레이션을 통해 공동현상의 발생을 직관적으로 확인하여 비교한 결과⁵⁾이다. 이는 시뮬레이션이 공동현상을 잘 예측하기 때문에 실험으로 확인하기 곤란한 공학적 문제들에 상당히 기여할 수 있음을 확인시켜주는 예이다.

1) Singhal, A. K., Li, H. Y., Athavale, M. M., and Jiang,

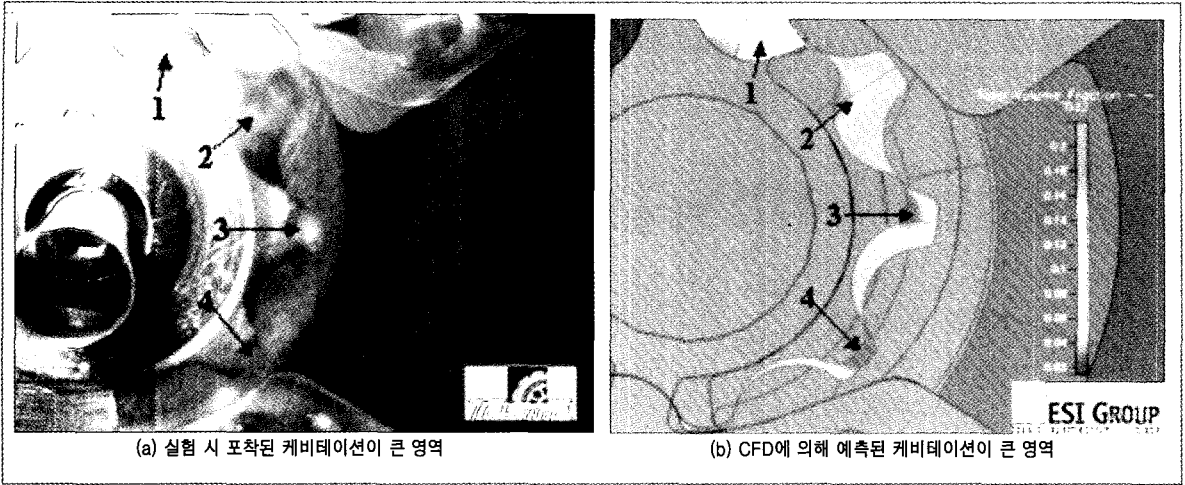


그림 8 캐비테이션 영역의 정성적 비교

Y., "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model." ASME FEDSM2001-18015.

2) Christopher E. Brennen, Cavitation and Bubble Dynamics, pp. 34~37, Oxford University Press, 1995.

3) Athavale, M. M., Jiang, Y. and Singhal, A. K., "Application of The Full Cavitation Model to Pumps and Inducers.", CFDRC Report.

4) Athavale, M. M. and Singhal, A. K., 2001, "Numerical Analysis of Cavi-

tating Flows in Rocket Turbopump Elements." AIAA-2001-3400.

5) Santosh K., Nick M. and Richard T., 2004, "Numerical Simulation of Cover Plate Deflection in the Gerotor Pump," SAE paper 05AE-185.

기계용어해설

측정 테이블(Measurement Table)

모멘텀형 위성 구동기들의 힘 및 토크를 측정하기 위해 힘 센서를 조합하여 만든 힘 및 토크 계측 장치

지능복합재(Smart Composites)

복합재료 구조물에 지능재료 센서/작동기를 삽입 또는 부착하여 구조물의 거동을 제어할 수 있도록 한 구조물

압전제어(Piezoelectric Control)

압전재료의 직접효과와 역전효과를 센서와 작동기로서 이용한 제어 기법

회전축(Rotating Shaft)

회전운동을 전달하는 기계요소로서 일반적으로 보로 모델링함

극저사이클 피로(Extremely Low Cycle Fatigue)

항복점 이상의 응력을 받아 대변형을 수반하면서 1,000회 이내의 응력사이클에서 파단하는 피로파괴의 한 분류