

2차원 및 축대칭 운동체 주위의 초공동 현상에 대한 수치해석

박 선 호,¹ 이 신 형^{*2}

NUMERICAL ANALYSIS OF SUPER-CAVITATING FLOW AROUND TWO-DIMENSIONAL AND AXISYMMETRIC BODIES

Sunho Park¹ and Shin Hyung Rhee^{*2}

Super-cavitating flows around under-water bodies are being studied for drag reduction and dramatic speed increase. In this paper, high speed super-cavitating flow around a two-dimensional symmetric wedge-shaped body were studied using an unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations solver based on a cell-centered finite volume method. To verify the computational method, flow over a hemispherical head-form body was simulated and validated against existing experimental data. Various computational conditions, such as different wedge angles and cavitation numbers, were considered for the super-cavitating flow around the wedge-shaped body. Super-cavity begins to form in the low pressure region and propagates along the wedge body. The computed cavity lengths and velocities on the cavity boundary with varying cavitation number were validated by comparing with analytic solution.

Key Words : 공동현상(Cavitation), 초공동현상(Super-cavitation), 공동모델(Cavitation Model), 전산유체역학(CFD)

1. 서 론

공동현상은 펌프, 터빈, 노즐, 추진기 등 많은 수중 운동체 주위에서 발생되고 있으며, 금속의 마모 및 침식을 유발하고 시스템의 진동과 소음을 초래하는 등 많은 단점을 초래한다. 반면 어뢰와 같이 고속의 운항조건을 필요로 하는 수중 운동체 주위에서는 저항 감소를 위해 공동을 고의적으로 발생시켜 이용하고 있다. 공동으로 인한 피해 방지 및 이용을 위해서는 공동에 대한 이해가 선행되어야 한다.

공동현상은 발생하는 정도에 따라 크게 세 단계로 구분된다. 선박의 추진기, 펌프, 터빈에서 주로 관찰되는 버블과 같은 공동현상으로 재료의 침식과 붕괴 시 소음을 유발하는 초기 공동현상(initial cavitation), 공동이 물체의 일부분을 뒤덮는 부분 공동현상(partial cavitation), 공동이 물체의 크기보다 크게 발달된 완전발달 공동현상(fully developed cavitation), 또는

초공동현상(Super-cavitation)으로 나누어진다. 초공동현상은 점성과 밀도가 매우 작은 증기와 공기로 물체를 둘러싸기 때문에 물체의 속도를 크게 증가시킬 수 있어 최근 군사적인 목적으로 관심이 증대되고 있다. 초공동 상태에서 물체는 200 knots 이상의 속도에 이른다.

공동현상의 수치적 해석을 위해서는 주로 포텐셜 유동 기반 패널법과 점성 유동을 고려한 해석이 이루어졌다. 김영기 등[1,2]은 패널법을 이용하여 2차원 수중익과 3차원 프로펠러에서 발생하는 공동에 대해 해석하였다. Varghese 등[3]은 패널법을 이용하여 캐비테이터의 형상 변화에 따른 초공동을 연구하였다. 안병권 등[4]은 패널법을 이용하여 3차원 프로펠러의 흡입면에서 발생하는 공동문제에 대해 수치계산하고 모형시험 결과와 비교하였고, 안병권 등[5]은 썰기 후류에서 발생하는 공동의 크기에 대해 포텐셜 해석과 모형시험을 하였다. Serebryakov[6]는 세장선 이론(Slender Body Theory)을 이용하여 초공동에 대한 수치해석적 연구를 하였다. Savchenko[7]는 초공동으로 인한 저항감소, 수치 방법, 소음감소에 대해 연구하였다.

상변화를 표현하는 공동 모델의 개발과 수치기법의 발달은 점성유동 해석의 기반을 제공하였다. 공동 모델은 크게 액체

접수일: 2010년 11월 23일, 수정일: 2011년 1월 14일,

계재확정일: 2011년 1월 21일.

1 정회원, 서울대학교 대학원 조선해양공학과

2 정회원, 서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소

* Corresponding author, E-mail: shr@snu.ac.kr

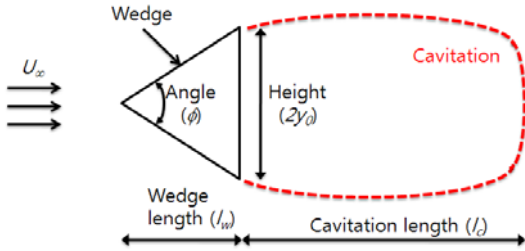


Fig. 1 Problem Description

상에 대해 연속방정식을 정의하고 공동의 발생을 압력과 밀도의 함수로 나타내는 Barotropic 모델[8]과 액체와 기체 두 상에 대해 연속방정식을 정의하고 두 상의 관계를 별도의 이송방정식으로 정의하는 이상 균질 모델[9,10,11]로 구분된다. Park and Rhee[12]는 이러한 공동 모델의 장단점 및 특성에 대해 정리하였다.

본 논문에서는 다양한 공동모델을 이용하여 축대칭 및 2차원 운동체에서 발생하는 초 공동에 대해 소스 공개코드인 OpenFOAM에 기반하여 개발된 SNUFOAM-Cavitation을 사용하여 수치해석 연구를 수행하였다.

2. 문제 정의

Fig. 1과 같은 2차원 쐐기 형상에 대해 쐐기 후류에서 발생하는 공동에 대해 해석하였다. 쐐기의 형상은 유입류와의 각도(φ), 쐐기의 길이(l), 그리고 높이(2y_c)로 정의된다. 쐐기의 각도는 15°, 45° 를 고려하였고, 쐐기의 길이를 고정시켜 각도에 의해 높이를 변화시켰다. 유입류의 속도(U_∞)는 1m/s, 쐐기의 길이는 1m로 쐐기의 길이 기준 레이놀즈 수 8.8x10⁵에서 계산영역의 압력을 변화시키면서 계산을 하였다. 계산 조건은 Table 1에 정리하였다.

쐐기의 뒷 부분에서 후방 계단 유동과 같이 압력이 낮아지고 증기압보다 낮아지면 Fig. 1과 같이 쐐기 뒷 부분에서 공동이 발달한다.

Table 1 Test conditions

Wedge Angle (deg.)	Wedge Height (y _c)	U _∞ (m/s)	Re (×10 ⁵)	P _{ref} (Pa)	σ
15	0.1316	1	8.8	2624.63	0.41
15	0.1316	1	8.8	2579.71	0.32
15	0.1316	1	8.8	2554.76	0.27
15	0.1316	1	8.8	2534.79	0.23
15	0.1316	1	8.8	2519.82	0.20
45	0.4142	1	8.8	2594.69	0.35

3. 계산방법

3.1 지배방정식

속도와 압력을 계산하기 위해 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식을 고려하였고, 난류를 고려하기 위해 질량 보존 방정식과 운동량 보존 방정식을 시간 평균하였고, 난류모델을 고려하였다.

질량보존 방정식과 운동량 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho_m \mathbf{v}_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}}) \tag{2}$$

여기서, ρ는 밀도, \mathbf{v} 는 속도벡터를 나타낸다. $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ 는 응력 텐서를 나타내고 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = \mu \left[(\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v}_m \mathbf{I} \right] \tag{3}$$

여기서, I는 단위 텐서를 나타낸다. 아래첨자 m은 혼합류를 의미하고 혼합류에서의 밀도와 점성계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_m = \alpha_v \rho_v + \alpha_l \rho_l \tag{4}$$

$$\mu_m = \alpha_v \mu_v + \alpha_l \mu_l \tag{5}$$

여기서, α는 체적분율을 나타내고, 아래첨자, l과 v는 액상과 기상을 의미한다.

운동량 보존 방정식을 시간평균하면 다음과 같이 Reynolds 응력항이 나타난다.

$$-\rho_m \overline{\mathbf{v}_m \mathbf{v}_m} = \mu_t \left[(\nabla \overline{\mathbf{v}_m} + \nabla \overline{\mathbf{v}_m}^T) - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t \nabla \cdot \overline{\mathbf{v}_m}) \mathbf{I} \right] \tag{6}$$

여기서, μ_t는 난류점성계수를 나타낸다. μ_t는 Boussinesq 가설에 기반을 둔 standard k-ε 난류 모델을 이용하여 계산하였다. 난류 운동 에너지 k와 난류 소산율 ε은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m k \mathbf{v}_m) \\ = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \epsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \epsilon \mathbf{v}_m) \\ &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{3\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, C_{μ} , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$, σ_k , σ_ϵ 는 0.09, 1.44, 1.92, 1.0, 1.3를 사용하였다. μ_t 는 $\rho_m C_{\mu} k^2 / \epsilon$ 로 계산되며, 벽면에는 벽함수를 적용하였다.

3.2 공동 모델

공동에 의한 상변화를 고려하기 위해 Barotropic 모델과 이상 균질 모델을 고려하였다.

Barotropic 모델로는 압력과 밀도의 관계에 대해 선형적인 관계를 가지는 linear Barotropic 모델과 Wallis Barotropic 모델 [8]을 고려하였으며, 각각의 Barotropic 방정식은 식 (9), (10)과 같다.

$$\left(\frac{P}{\rho} \right)_m = \alpha \left(\frac{P}{\rho} \right)_v + (1 - \alpha) \left(\frac{P}{\rho} \right)_l \quad (9)$$

$$\left(\frac{P}{\rho} \right)_m = (\alpha \rho_{v,sat} + (1 - \alpha) \rho_{l,sat}) \left(\alpha \left(\frac{P}{\rho} \right)_v + (1 - \alpha) \left(\frac{P}{\rho} \right)_l \right) \quad (10)$$

여기서, 아래첨자 sat은 포화증기압을 나타낸다.

또한, 이상 균질 모델로는 액체, 기체, 응축기체로 상을 정의한 Merkle et al.[9], Kunz et al.[10] 모델과 단위 체적에 nuclei를 분포시켜 공동을 해석하는 Schnerr and Sauer[11] 모델을 고려하였으며, 각각의 이송방정식은 식 (11), (12), (13)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \mathbf{v}_m) &= \frac{C_{dest} \rho_l MIN(P - P_v, 0) \alpha_l}{\rho_v \left(\frac{1}{2} \rho_l U_\infty^2 \right) \left(\frac{L_{ch}}{U_\infty} \right)} \\ &+ \frac{C_{prod} MAX(P - P_v, 0) (1 - \alpha_l)}{\rho_v \left(\frac{1}{2} \rho_l U_\infty^2 \right) \left(\frac{L_{ch}}{U_\infty} \right)} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \mathbf{v}_m) &= \frac{C_{dest} \rho_v MIN(P - P_v, 0) \alpha_l}{\rho_v \left(\frac{1}{2} \rho_l U_\infty^2 \right) \left(\frac{L_{ch}}{U_\infty} \right)} \\ &+ \frac{C_{prod} \alpha_l^2 (1 - \alpha_l)}{\rho_l \left(\frac{L_{ch}}{U_\infty} \right)} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \mathbf{v}_m) \\ &= C_{dest} \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_l (1 - \alpha_l) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{MIN(P - P_v, 0)}{\rho_l}} \\ &+ C_{prod} \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_l (1 - \alpha_l) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{MAX(P - P_v, 0)}{\rho_l}} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, L_{ch} 는 물체의 특성화된 길이, U_∞ 는 주유동의 속도를 나타낸다. 공동의 소멸과 생성에 관계되는 계수 C_{dest} , C_{prod} 는 Merkle et al.[9]은 100, 1, Kunz et al.[10]은 1000, 1000, Schnerr and Sauer[11]은 1, 1을 사용하였으며, R 은 기포의 반지름을 나타내며 다음 식과 같이 계산된다.

$$R = \left(\frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{n_o} \right)^{1/3} \quad (14)$$

여기서, n_o 는 단위 부피당 nuclei의 수를 나타낸다.

3.3 수치 모델링

질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 난류모델 방정식을 비압축성 기반 비정상 상태에서 계산하였다. 셀 중심 차분법을 사용하였으며, 속도와 압력의 연성은 PISO 알고리즘을 선택하였다. 대류항은 QUICK 도식으로 차분하였고, 확산항은 2차 중심차분을 사용하였다. 혼합류에 대해서는 상태방정식으로부터 밀도의 변화를 계산하였다. 계산 매트릭스의 수렴성을 증가시키기 위해 Algebraic Multi-Grid (AMG) 방법을 사용하였고, 계산 매트릭스는 Gauss-Seidel 반복 계산법을 이용하였다.

3.4 계산조건의 검증 및 축대칭 운동체의 계산

선택된 수치 방법, 격자, 경계조건의 타당성을 검증하기 위해 반구형 전두부 실린더(Hemispherical Head-form Body)에서 발생하는 공동에 대해 계산하였고, Rouse and McNown[13]의 실험결과와 비교하였다. Rouse and McNown[13]은 반구형 전두부 실린더에 대해 캐비테이션 수를 변화시키면서 실린더 표면에서의 압력을 계측하였다.

반구형 전두부 실린더 주위의 유동은 축대칭 문제로 계산하였다. Fig. 2는 경계조건 및 계산영역의 크기를 나타낸다. 경계조건으로 입구와 위 경계면에서는 속도를 Dirichlet 조건으로 적용하였고, 출구 경계면에는 캐비테이션 수에 해당하는 압력 값(P_0)을 식 (15)와 같이 Dirichlet 조건으로 적용하였고, 압력을 제외한 물성치에는 Neumann 조건을 적용하였다.

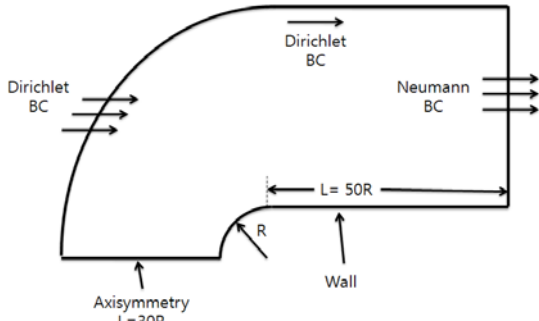


Fig. 2 Boundary condition and domain extent

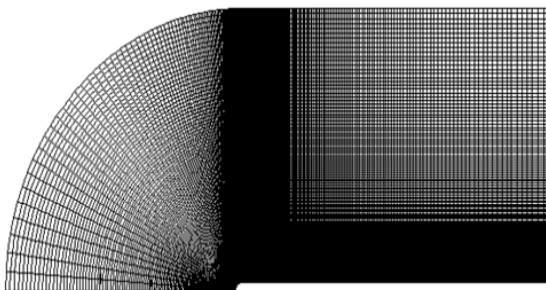


Fig. 3 Mesh of computational domain for hemispherical head form body

실린더 표면에는 no-slip 조건을 적용하였고, 실린더에서 입구까지는 축 대칭조건을 적용하였다. 계산영역의 크기는 실린더 반경(R)을 기준으로 실린더에서 입구까지 30R, 출구까지는 50R, 높이 방향으로 30R을 적용하였다.

$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2} \quad (15)$$

여기서, P_v 는 기포가 생성되는 증기압(vapor pressure)을 나타낸다.

Fig. 3은 계산에 사용된 격자를 나타낸다. 실린더에서 입구까지는 70개, 실린더 반경에는 70개, 실린더에는 100개, 높이 방향으로 70개를 적용하여 총 16,800개를 사용하였다.

레이놀즈 수 1.36×10^5 에서 공동 모델, 난류 모델의 영향을 검토하였다. Fig. 4는 캐비테이션 수 0.3, k-ε 난류 모델에서 공동 모델(linear와 Wallis Barotropic [8], Merkle et al.[9], Kunz et al.[10], Schnerr and Sauer[11])에 따른 반구형 전두부 실린더 표면에서의 압력결과를 나타낸다. 공동이 끝나는 위치에서

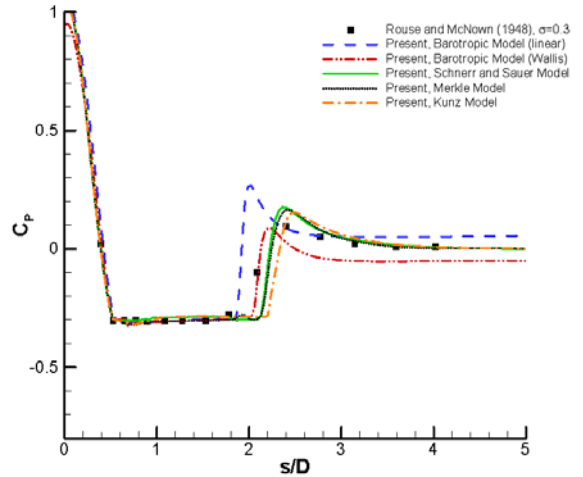


Fig. 4 Influence of cavitation model

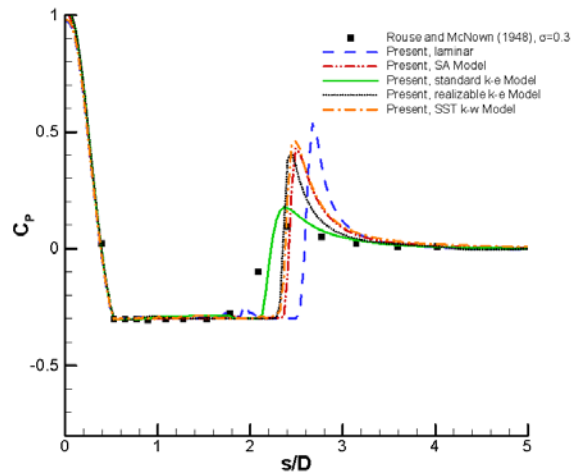


Fig. 5 Influence of turbulence model

는 실험보다 과장된 압력상승이 관찰되었다. Barotropic 모델이 다상 모델보다 압력 회복이 빨리 일어났으며, Wallis Barotropic 모델이 실험과 가장 유사하게 계산되었다. 그러나, Barotropic 모델은 공동이 소멸된 후 실린더 표면의 압력이 회복되지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 다상 모델은 압력이 실험과 동일하게 회복되었다. 다상모델에서는 공동이 소멸되는 부분에서 Schnerr and Sauer[11] 모델과 Merkle et al.[9] 모델이 Kunz et al.[10] 모델의 압력변화보다 실험과 가깝게 계산되었다. SNUFOAM-Cavitation의 계산 수렴성을 고려하여 Schnerr and Sauer[11] 모델을 본 계산의 공동 모델로 선정하였다.

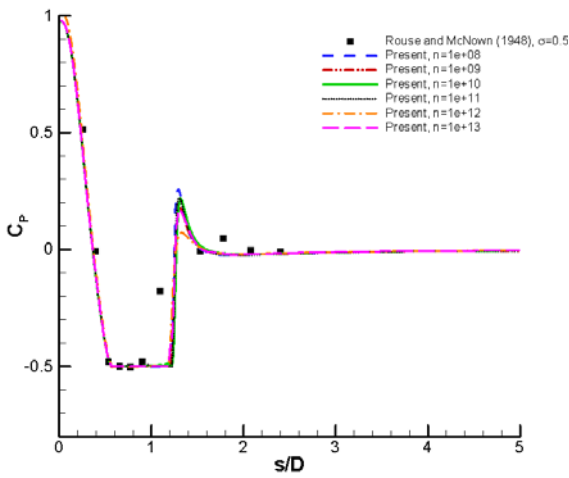


Fig. 6 Influence of nuclei size of Schnerr and Sauer's model [11]

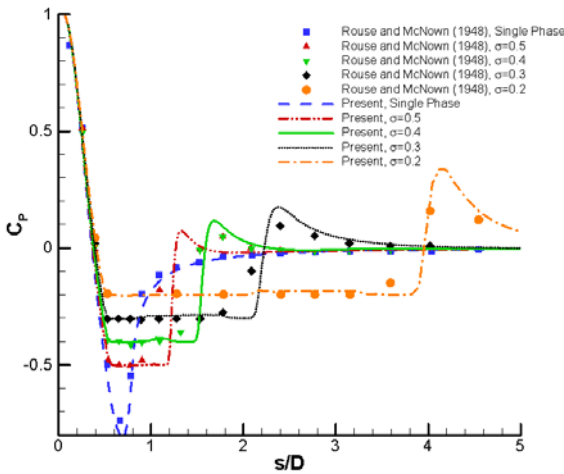


Fig. 7 Influence of cavitation number

Fig. 5는 선정된 Schnerr and Sauer[11] 모델에 대해 레이놀즈 수 1.36×10^5 , 캐비테이션 수 0.3에서 난류 모델의 영향을 검토하였다. 층류 계산은 공동이 소멸되는 위치가 지연되었으며, Spalart-Allmaras 모델, realizable k-ε 모델, SST k-ω 모델은 standard k-ε 모델보다 공동이 소멸되는 부분에서 압력상승을 과도하게 계산하였다. 개발된 SNUFOAM-Cavitation을 이용한 해석 결과로부터, 공동 소멸위치 및 소멸위치에서의 압력상승이 상대적으로 작게 계산되는 standard k-ε 모델을 난류모델로 선정하였다.

Fig. 6은 Schnerr and Sauer[11] 모델에서 단위 부피에 분포시키는 nuclei의 수에 따른 영향을 검토하였다. nuclei의 수에

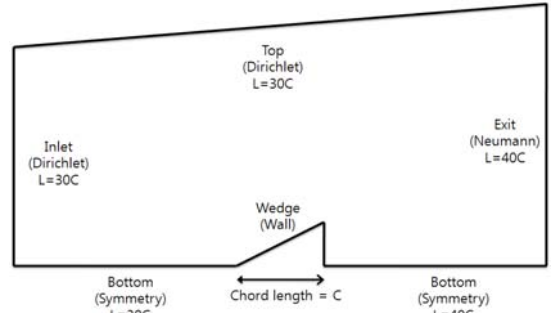


Fig. 8 Boundary condition and domain extent

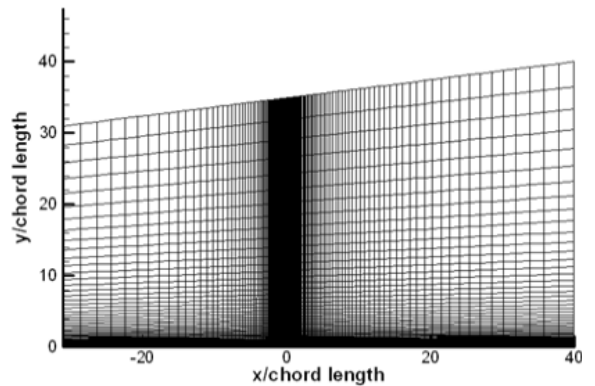


Fig. 9 Mesh and domain size

따른 영향은 크게 나타나지 않았으며, 단위 부피에 1012의 nuclei 수를 본 계산의 초기조건으로 선정하였다.

Fig. 7은 캐비테이션 수 변화에 따른 영향을 검토하였다. 앞에서 선정된 Schnerr and Sauer[11]의 공동 모델, standard k-ε 난류모델, 단위부피당 1012개의 nuclei 수 조건에서 계산하였다. 캐비테이션 수가 낮아 공동이 많이 발생할수록 공동 소멸 위치에서 과도한 압력상승이 관찰되었다. 캐비테이션 수 변화에 대해서도 계산결과가 실험결과와 잘 일치하였다.

4. 2차원 운동체의 계산

정립된 계산조건을 바탕으로 Fig. 1과 같은 2차원 췌기 형상에 대해 해석하였다. 경계조건 및 계산영역의 크기는 Fig. 8과 같다. 췌기 형상 및 현상이 대칭으로 발생하기 때문에 췌기의 절반만 고려하여 계산하였다. 췌기에는 no slip 벽 경계조건을 사용하였고, 바닥은 대칭 경계조건을 적용하였다. 입구와 위쪽 경계면에는 속도를 Dirichlet 경계조건으로 적용하였고, 출구 경계면에는 Neumann 경계조건을 적용하였다. 전체 계산영역의 크기는 췌기길이(C)를 기준으로 입구방향으로

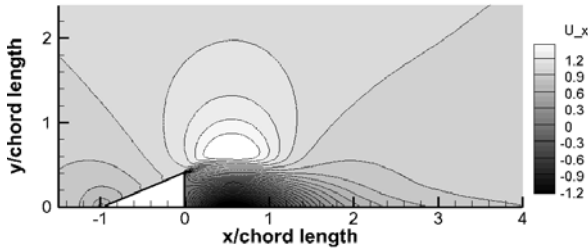


Fig. 10 Streamwise velocity component contours without cavitation

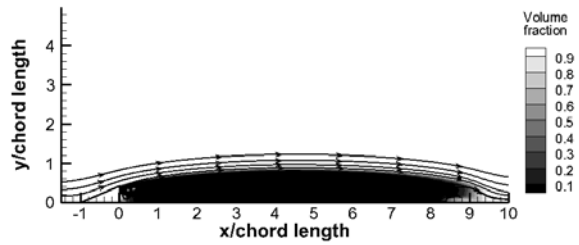


Fig. 13 Fully developed cavity and streamlines

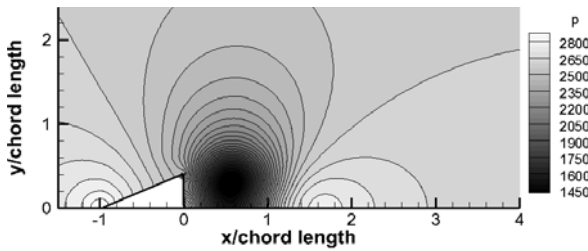


Fig. 11 Pressure contours without cavitation

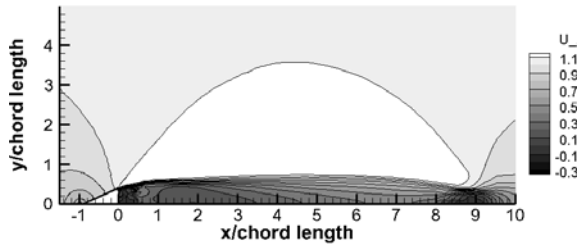


Fig. 14 Streamwise velocity component contours with cavitation

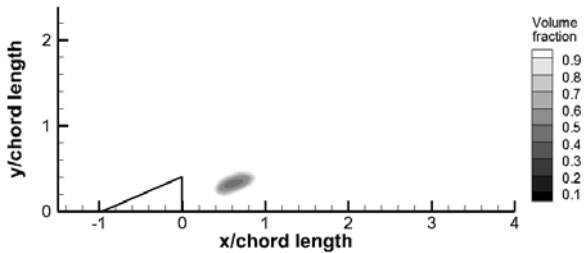


Fig. 12 Initial cavity

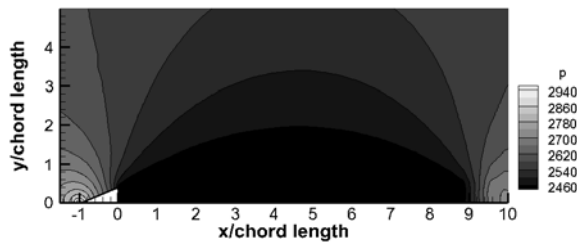


Fig. 15 Pressure contours with cavitation

30C, 출구방향으로 40C, 입구의 크기를 30C, 출구의 크기를 40C로 선정하였다.

계산에 사용된 격자계는 Fig. 9에 나와 있다. 정렬 격자계를 사용하였으며, 썸기의 빗면에는 70개, 썸기에서 입구까지는 70개, 썸기에서 출구까지는 100개, 썸기에서 윗면까지는 70개, 썸기의 후방 높이에는 40개를 적용하여 총 20,800개를 사용하였다.

공동 계산의 불안정성으로 인해 공동을 고려하지 않고 계산영역을 수렴시킨 후, 공동을 고려하여 유동장을 수렴시켰다. Fig. 10과 11은 캐비테이션 수 0.35, 썸기 각도 45° 형상에 대해 공동을 고려하지 않고 계산한 결과의 속도 및 압력 분포를 나타낸다. 속도분포를 보면 최대 속도가 썸기 빗면의 연결선상에서 발생하고 유입류 속도보다 약 50% 증가되었다. 압력분포를 보면 썸기 뒤 부분에서 압력이 가장 낮게 나타났

다. 최대 속도 위치와 최소 압력 위치가 다르게 나타났다.

Fig. 12는 공동이 처음으로 계산되었을 때의 형상을 나타낸다. Fig. 11의 최소 압력 위치와 같은 곳에서 공동이 처음으로 계산되었다. Fig. 13은 Fig. 12에서 시간을 경과시켜 공동이 완전히 발달된 형상과 유선을 나타낸다. Fig. 11의 압력이 낮은 위치와 공동의 형상이 전혀 다르게 나타났으며, 공동을 고려하지 않으면 처음으로 공동이 발생하는 위치는 추정할 수 있지만 완전히 발달된 형상은 추정할 수 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 14와 15는 공동이 완전히 발달된 상태에서의 속도와 압력분포를 나타낸다. 속도분포를 보면 최대 속도가 유입류보다 약 10% 증가되었고, 공동을 고려하지 않은 계산보다 약 40% 감소되었다. 공동 내부의 압력은 증기압으로 균일하게 분포되는 것을 알 수 있다. 속도 및 압력분포가 공동의 고려

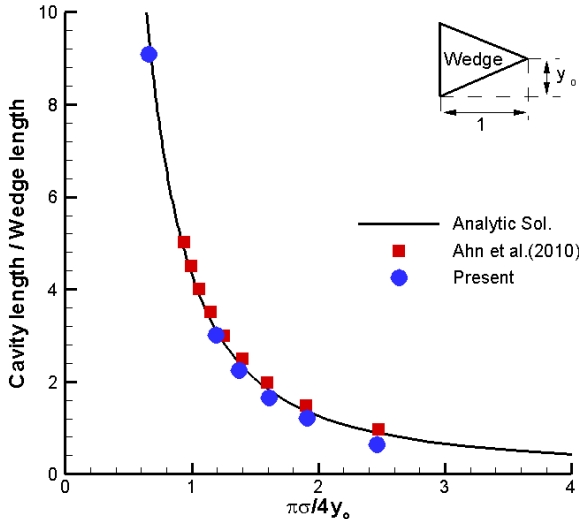


Fig. 16 Comparison of cavity lengths for analytic, potential computation and present computation

로 완전히 다르게 변화되었다.

썰기 계산의 검증을 위해 Newman의 해석해[14]와 Ahn et al.[5]의 포텐셜 계산 결과와 비교하였다. Newman의 해석해 [14]는 포텐셜 유동에 기반을 두어 유도되었으며, 캐비테이션 수(σ), 썰기 뒤에 발달되는 공동의 길이(l)와 썰기의 형상에 따른 높이(y_0)의 관계를 정립하였다. 식 (16)은 Newman의 해석해[14]를 나타낸다.

$$\frac{\pi}{4}\sigma l_c + \int_0^1 \left(\frac{l_c + 1}{t}\right)^{1/2} y'_0(t) dt = 0 \tag{16}$$

여기서, y_0 은 썰기의 빗면 기울기를 나타낸다.

Fig. 16은 썰기에서 발달되는 공동 길이에 대한 계산결과를 나타낸다. 가로 축은 썰기 형상 및 캐비테이션 수를 나타내고, 세로축은 썰기의 길이로 무차원화된 공동의 길이를 나타낸다. 공동의 길이는 공동이 충분히 발달한 후 기포의 체적분율이 0.1인 영역을 기준으로 계산하였다. 캐비테이션 수가 큰 영역에서는 포텐셜 계산결과는 해석해보다 조금 크게 계

Table 2 Velocity along the cavity surface

σ	U_x (m/s)	U_c (m/s)	Present	Error(%)
0.20	1	1.095	1.099	0.3
0.23	1	1.109	1.152	3.8
0.27	1	1.127	1.190	5.6
0.32	1	1.149	1.207	5.1
0.41	1	1.187	1.243	4.6

산되었고, 본 계산인 점성 계산결과는 조금 작게 계산되었다. 캐비테이션 수가 작은 영역에서는 계산결과가 해석해와 잘 일치하였다.

베르누이 방정식으로부터 공동 경계면에서의 동적 조건을 유도할 수 있으며, 공동 경계면에서의 속도(U_c)는 식 (17)과 같이 유도된다.

$$U_c = U_\infty \sqrt{1 + \sigma} \tag{17}$$

여기서, U_∞ 는 입구 경계면에서의 유입류 속도를 나타낸다.

Table 2는 공동 경계면에서의 동적속도에 대한 해석해와 본 계산 결과를 비교하였다. 해석해와 비교해 약 5% 정도 크게 계산되었다.

5. 결 론

최근 수중 운동체의 저항 감소를 위해 초공동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 축대칭 물체와 2차원 물체 주위에 발생하는 공동에 대해 수치 해석 하였다.

반구형 전두부 실린더의 표면에 발생하는 공동에 대해 공동 모델과 난류 모델의 영향에 대해 검토하였고, 실험결과와의 비교를 통해 계산방법을 정립하였다. 정립된 계산방법을 사용하여 캐비테이션 수 변화에 따른 표면에서의 압력분포에 대해 검토하였고 실험결과와 잘 일치하였다.

2차원 썰기 형상에 대해 공동의 고려에 따른 유동장 변화 및 형상과 캐비테이션 수에 따른 공동의 길이와 경계면에서의 속도에 대해 검토하였다. 계산결과는 해석해와 비교 검토 하였으며, 잘 일치하는 결과를 얻었다.

후 기

이 논문은 국방과학연구소의 “초공동 수중 운동체 통합연구(09-01-05-26)”, 지식경제부 산업원천기술개발사업의 “친환경 추진기 캐비테이션성능 제어기술 개발(10033662)”, 교육과학기술부의 “WCU사업(R32-2008-000-10161-0)”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 1991, Kim, Y.G., Lee, C.S. and Lee, J.T., "A Potential-Based Panel Method for the Analysis of a Two-dimensional Super-Cavitating Hydrofoil," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.8, No.2,

- pp.159-173.
- [2] 1993, Kim, Y.G., Lee, C.S., Lee, J.T. and Suh, J.C., "Prediction of Steady Performance of a Propeller by Using a Potential-Based Panel Method," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.30, No.1, pp.73-86.
- [3] 2005, Varghese, A.N., Uhlman, J.S. and Kirschner, I.N., "Numerical Analysis of High-Speed Bodies in Partially Cavitating Axisymmetric Flow," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.127, pp.41-54.
- [4] 2007, Ahn, B.K., Lee, C.S., Yu, Y.W. and Moon, I.S., "Prediction of the Propeller Face Cavity Inception and Experimental Verification," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.44, No.5, pp.467-473.
- [5] 2010, Ahn, B.K., Lee, C.S. and Kim, H.T., "Experimental and Numerical Studies on Super-cavitating Flow of Axisymmetric Cavitators," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol.2, pp.39-44.
- [6] 2001, Serebryakov, V.V., "Some Models of Prediction of Supercavitating Flows Based on Slender Body Approximation," 4th International Symposium on Cavitation, California, USA.
- [7] 2001, Savchenko, Y.N., "Supercavitation - Problems and Perspectives," 4th International Symposium on Cavitation, California, USA.
- [8] 1969, Wallis, G., "One Dimensional Two-Phase Flow," Mcgraw-Hill, TX, ISBN-10: 0070679428.
- [9] 1998, Merkle, C.L., Feng, J. and Buelow, P.E.O., "Computational Modeling of the Dynamics of Sheet Cavitation," 3rd International Symposium on Cavitation, Grenoble, France.
- [10] 1999, Kunz, R.F., Stinebring, D.R., Chyczewski, T.S., Boger, D.A., and Gibeling, H.J., "Multi-Phase CFD Analysis of Natural and Ventilated Cavitation about Submerged Bodies," Proceeding of 3rd ASME/JSME Joints Fluid Engineering Conference - ASME Paper FEDSM 99-7364.
- [11] 2001, Schnerr, G.H. and Sauer, J., "Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics," 4th International Conference on Multiphase Flow, New Orleans, USA.
- [12] 2010, Park, S.H. and Rhee, S.H., "Investigation for the Characteristics of Cavitation Modeling for Computational Fluid Dynamics," *Journal of the Society of Naval Architect of Korea*, Vol.47, No.5, pp.657-669.
- [13] 1948, Rouse, H. and McNown, J.S., "Cavitation and Pressure Distribution in Engineering," Bulletin 32 (State University of Iowa).
- [14] 1977, Newman, J.N., "Marine Hydrodynamics," The MIT Press, Cambridge, ISBN-10: 026214026.