

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.2.69

축대칭 실린더형상 주위 부분공동 유동의 전산해석

김봉수* · 이병우** · 박원규† · 정철민***

(2008년 3월 20일 접수, 2008년 12월 15일 수정, 2009년 1월 7일 심사완료)

Numerical Analysis of Partial Cavitaing Flow Past Axisymmetric Cylinders

Bong-Su Kim, Byung-Woo Lee, Warn-Gyu Park and Chul-Min Jung

Key Words: Homogeneous Equilibrium Flow Model(균일평형유동모델), Navier-Stokes Equation(내비어-스톡스 방정식), Partial Cavitation(부분공동), Pre-Conditioning(예조건화), Axisymmetric Cylinder(축대칭 실린더형상), Re-Entrant Jet(재유입제트유동)

Abstract

Cavitating flow simulation is of practical importance for many hydraulic engineering systems, such as pump, turbine, nozzle, injector, etc. In the present work, a solver for cavitating flow has been developed and applied to simulate the flows past axisymmetric cylinders. Governing equations are the two-phase Navier-Stokes equations, comprised of continuity equation of liquid and vapor phase. The momentum equation is in the mixture phase. The solver employed an implicit, dual time, preconditioned algorithm in curvilinear coordinates. Computations were carried out for three axisymmetric cylinders: hemispherical, ogive, and caliber-0 forebody shape. Then, the present calculations were compared with experiments and other numerical results to validate the present solver. Also, the code has shown its capability to accurately simulate the re-entrant jet phenomena and ventilated cavitation. Hence, it has been found that the present numerical code has successfully accounted for cavitating flows past axisymmetric cylinders.

1. 서 론

공동(cavitation) 현상은 액체 유동에서 국부적으로 압력 강하가 발생하여 액체의 압력이 증기압보다 떨어져 그곳에서 액체가 증기로 상변화가 발생하는 현상이다. 이 현상은 펌프, 노즐, 프로펠러, 터빈, 인젝트 등 다양한 수력학적 시스템에서 발생하는데 이러한 공동현상은 심각한 소음, 진동, 부식 등을 야기한다.

공동 현상은 물리적으로 복잡한 현상으로 나타나기 때문에 전산유체 해석기법으로 해석하는 과정에서 완전한 모델링이 쉽지 않아 상당한 어려움을 겪고 있지만 많은 연구자들이 공동 현상에 대하여 공학적으로 만족할 만한 해석결과를 발표해 오고 있다.

다상(multi-phase) 유동을 전산유체 해석방법으로 풀기 위해 크게 3가지 범주로 나눌 수가 있는데, 첫 번째 방법은 단상(single phase) 연속방정식을 이용하는 것으로 공동내부의 압력을 유체의 증기압으로 놓고 해석하는 방법이다.^(1,2) 하지만, 이 방법은 응축 증기(condensable vapor)와 비응축 증기(non-condensable vapor)를 구별할 수 없는 단점이 있다.⁽³⁾ 두 번째 방법은 액상과 기상에 대해서 연속방정식을 분리하여 해석하는 방법인데 액상과 기상 사이에 질량전달 소스항을 추가하는

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : wgpark@pusan.ac.kr

TEL: (051)510-2457 FAX: (051)512-5236

*,** 회원, 부산대학교 대학원 기계공학부

*** 국방과학연구소 제 2체계 특수합정 체계부

방법⁽³⁻⁷⁾으로 보통 homogeneous mixture 모델이라고 일컫는다. 이 방법은 액상과 기상의 경계면의 상태가 열과 동적으로 평형을 이루고 있다고 가정하므로 운동량 방정식과 에너지 방정식은 혼상류(mixture flow)에 대한 방정식을 이용한다. 마지막 방법은 액상과 기상에 대하여 각각의 연속방정식, 운동량 방정식과 에너지 방정식을 해석하는 방법으로 원자력분야의 비등해석에서 많이 활용되는 방법이다.^(8,9)

수력학분야에서 많이 활용되고 있는 homogeneous mixture 모델의 경우, 액상과 기상 영역에서 서로의 음속이 현저히 다르므로 이들을 동시에 해석하는데 많은 어려움이 따른다. 이를 해결하기 위해 대부분의 연구자들이 예조건화(pre-conditioning)기법을 적용하여 왔다.⁽³⁻⁷⁾ Kunz 등^(3,5)은 예조건화 방법을 이용한 다상유동장 해석에서 응축가스 외에 비응축가스를 추가하면서 3상 유동모델을 개발하였으나 액상과 기상이 혼합된 부분에서 압축성 효과를 반영하지 못하였다. Ahuja 등⁽⁶⁾은 압축성 효과를 포함하여 예조건화 기법을 이용하였지만 온도의 효과를 무시하였으며 최근에 Lindau 등⁽¹⁰⁾과 Owis 등⁽¹¹⁾은 혼상유동 영역에서 압축성 효과와 온도효과를 모두 고려한 모델을 개발하였다.

Senocak 등⁽¹²⁾은 비정상 상태 캐비테이션 유동에서 난류 모델에 많은 영향을 받는다고 발표하였으며 특히, vapor fraction과 속도에서 많은 영향이 나타난다고 하였다. 따라서 액상과 기상의 혼상류에서 압축성 효과에 과대하게 미치는 난류의 영향을 감소시키기 위해서 난류모델을 단순화하여 계산하기도 하였다.

본 연구에서는 부분공동 및 초월공동의 전산 유동해석 코드개발을 위한 1단계 연구로써 homogeneous mixture 모델을 이용하며 기상과 액상의 변환과정이 등온이라는 가정 하에서 부분공동유동의 전산 유동해석을 위한 기본코드를 개발하고자 한다.

이 전산 유동해석 코드는 최종 목표로 하고 있는 초월공동 어뢰의 다상유동장 해석을 위한 코드개발의 1단계 연구로써 이 분야에 대한 응용이 가장 광범위되고 있는 Merkle과 Kunz의 연구그룹^(3-5,10)이 개발한 예조건화 방법과 캐비테이션 모델을 답습하고 있다. 현재의 1단계에서는 비록 수치알고리즘에 대한 독창성은 없으나, 향후 독

자적이고 독창적인 연구를 위한 매우 신뢰할 수 있는 기본코드를 자체적으로 개발했다는 데 대해서 공학적 의의가 있다고 할 것이다.

2. 지배방정식 및 수치해석 방법

지배방정식은 기상과 액상에 관한 연속방정식과 혼상류에 대한 운동량 방정식으로 다음과 같으며⁽³⁾ 여기서 기상은 비응축 증기를 고려하지 않은 것이다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \left(\frac{\alpha_l}{\rho_m \beta^2} \right) \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial \alpha_l}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_l u_j) \\ & = (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \left(\frac{1}{\rho_l} \right) \\ & \left(\frac{1}{\rho_m \beta^2} \right) \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v} \right) \quad (1) \\ & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_m u_i u_j) = \\ & - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{m,t} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \end{aligned}$$

여기서, p , u , ρ , α , μ 는 각각 압력, 속도, 밀도, 체적분율(volume fraction) 및 점성계수를 의미하며 t , τ 는 물리적 시간과 의사 시간(pseudo-time)을 의미한다. 그리고 하첨자 l 과 v 는 액상과 기상을 의미하며 하첨자 m 은 기상과 액상의 혼합된 혼상상태(mixture)를 의미한다. 그리고 두 번째 하첨자 i 는 난류를 의미한다.

식 (1)의 첫 번째 식은 캐비테이션 현상이 발생하는 가운데 액상과 기상이 상변화를 일으키면서 질량을 서로 주고 받고 있는 상태의 연속방정식으로써 액상에 대해 적용한 연속방정식이며, 두 번째 식은 액상과 기상에 대한 각자의 연속방정식을 서로 더하였을 때의 연속방정식이다. 세 번째 식은 혼상상태의 운동량 방정식이다. 이들 방정식에서 의사시간 τ 에 대한 미분항은 비정상상태의 계산을 효율적으로 처리하기 위한 부가항이다. 그리고 연속방정식의 우변에 나타나는 \dot{m}^+ 는 상변화에 의해 기상이 응축되는 질량변화량(소스

항)을 의미하며 \dot{m}^- 는 반대로 액상이 기화하는 증발량을 의미한다. 이들에 대한 자세한 모델링은 3절에서 다루기로 한다.

혼상류에서의 밀도인 ρ_m 과 점성계수 μ_m , 와점성계수인 μ_t 는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_m = \rho_l \alpha_l + \rho_v \alpha_v \quad (2)$$

$$\mu_m = \mu_l \alpha_l + \mu_v \alpha_v \quad (3)$$

$$\mu_t = c_\mu \rho_m \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

여기서 k 와 ϵ 은 난류운동에너지와 난류소산율이며 c_μ 는 난류모델 상수이다. 이들 k 와 ϵ 은 저레이놀즈수 $k-\epsilon$ 난류모델⁽¹³⁾에 의해 구해진다.

식 (1)을 무차원화 하여 일반화된 곡선좌표계로 나타내면 다음으로 표현할 수 있다.

$$\Gamma_e \frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \Gamma \frac{\partial \hat{Q}}{\partial \tau} + \frac{\partial \hat{E}_j}{\partial \xi_j} - \frac{\partial \hat{E}_j^v}{\partial \xi_j} = \hat{S} \quad (5)$$

여기서, \hat{Q} 은 유동벡터, \hat{E}_j 는 대류항, \hat{E}_j^v 는 점성항, 그리고 \hat{S} 은 소스항을 의미한다. 그리고, 행렬 Γ_e 와 Γ 는 다음의 식 (7)과 식 (8)로 정의되며 행렬 Γ 가 예조건화 행렬이 된다.⁽⁴⁾

$$\hat{Q} = 1/J(p, u_i, \alpha_i)^T$$

$$\hat{E}_j = 1/J(U_j, \rho_m u_i U_j + \xi_{j,i} p, \alpha_i U_j)^T$$

$$\hat{E}_j^v = 1/J \left(0, \mu_{m,t} (\nabla \xi_j \cdot \nabla \xi_j) \frac{\partial u_i}{\partial \xi_j} + \xi_{j,i} \frac{\partial u_k}{\partial \xi_j} \xi_{j,k}, 0 \right)^T$$

$$\hat{S} = 1/J \left((\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v} \right), 0, (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \frac{1}{\rho_l} \right)^T \quad (6)$$

$$\Gamma_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_m & 0 & 0 & u \Delta \rho \\ 0 & 0 & \rho_m & 0 & v \Delta \rho \\ 0 & 0 & 0 & \rho_m & w \Delta \rho \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\rho_m \beta^2} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_m & 0 & 0 & u \Delta \rho \\ 0 & 0 & \rho_m & 0 & v \Delta \rho \\ 0 & 0 & 0 & \rho_m & w \Delta \rho \\ \left(\frac{\alpha_l}{\rho_m \beta^2} \right) & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 $\Delta \rho \equiv \rho_l - \rho_v$ 로 정의되며 β 는 예조건화 상수이다. 본 연구에서 사용된 수치해석 방법은 의사시간 항은 1차 정도의 후방차분을 적용하였으며, 물리적 시간 항은 2차 정도의 후방차분을 이용하였다. 그리고 대류항과 점성항은 2차 정도의 중앙차분을 이용하였다.

3. 캐비테이션 모델

캐비테이션 모델은 Lindau 등⁽⁴⁾이 제시한 모델을 사용하였으며, 증발 항(\dot{m}^-)과 응축 항(\dot{m}^+)은 다음과 같이 정해진다.

$$\dot{m}^- = \frac{C_{dest} \rho_l \text{Min}(P - P_v, 0) \alpha_l}{(0.5 \rho_l U_\infty^2) \rho_v t_\infty} \quad (9)$$

$$\dot{m}^+ = \frac{C_{prod} \rho_v \text{Max}(P - P_v, 0) \alpha_v}{(0.5 \rho_l U_\infty^2) t_\infty}$$

여기서 t_∞ 는 기준(reference) 유동시간(= L_∞ / U_∞)이며, 모델상수항인 C_{dest} 와 C_{prod} 는 각각 1과 80으로 주어졌다.

4. 결과 및 고찰

본 코드를 이용하여 반구형 전두부(Hemispherical forebody), 오자이브형 전두부(Ogive forebody), 그리고 캘리버 제로형 전두부(caliber-0 forebody)의 세가지 축대칭 실린더 형상에 대해 계산을 수행하였다. 격자계는 Fig. 1과 같으며 반구형 전두부는 120×132×37의 격자점으로 구성되어 있으며, 오자이브형 전두부의 경우에는 120×110×37개의 격자점으로 구성되어 있다. 그리고 캘리버 제로형 전두부의 경우에는 120×110×37

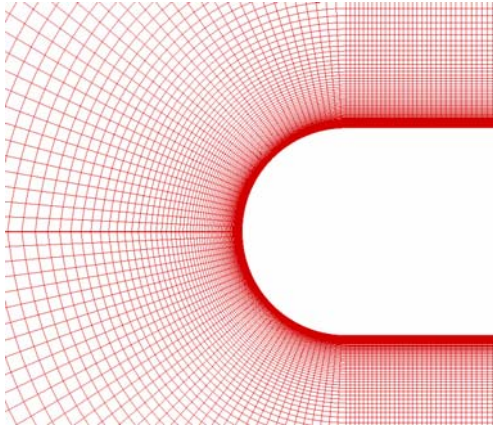


Fig. 1 Grid system of hemispherical forebody cylinder

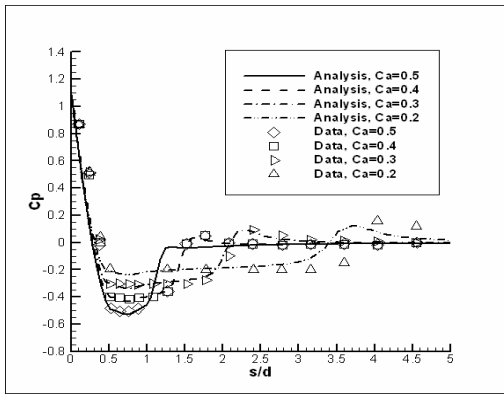
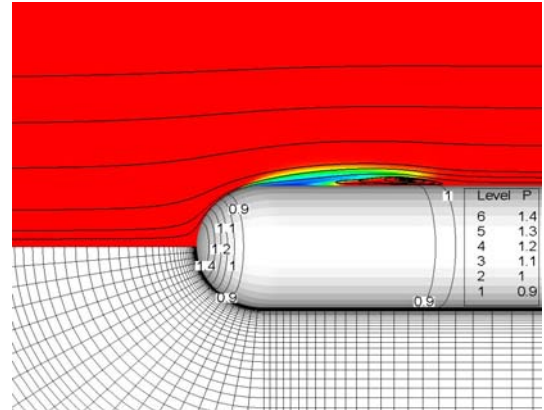
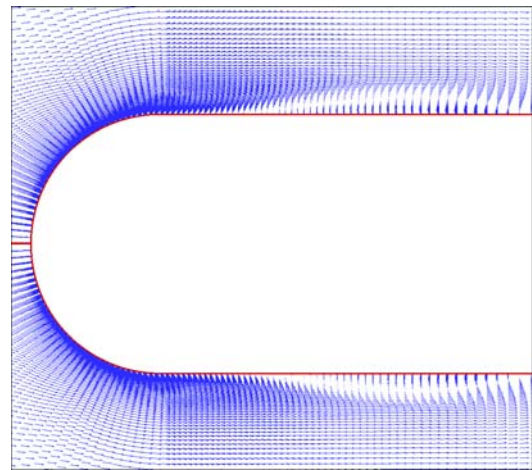


Fig. 2 Comparison of surface pressure of hemispherical forebody cylinder at various cavitation numbers

개의 격자점으로 구성되어 있다. 본 연구의 세 가지의 실린더 형상에서 벽면 첫 번째 격자선의 거리는 실린더 형상과 유동조건, 격자점 위치에 따라 차이가 있으나 약 $y_1^+ = 20 - 50$ 정도가 된다. 본 연구에서 인용된 실험값은 Rouse & McNown⁽¹⁴⁾에 의한 실험결과이며 반구형 전두부 형상과 오자이브형 전두부 형상에서 사용된 레이놀즈 수 (Reynolds number)는 1.36×10^5 이며 캘리버 체로형 전두부의 경우에는 $Re = 1.46 \times 10^5$ 이다. 캐비테이션 수(cavitation number)는 아래의 식 (10)와 같이 정의되며, 반구형 전두부 형상에서는 $Ca = 0.2$ 에서부터 0.5까지 0.1 간격으로 계산을 수행하였으며, 오자이브형 전두부 형상에서는 $Ca = 0.24, 0.32, 0.40, 0.46$ 에서 계산하였으며, 마지막으로 캘리버 체로형 전두부 형상에서는 $Ca = 0.3$ 와 0.5에 대해 계산을 수행하여 실험값과 비교하였다.



(a) Liquid volume fraction



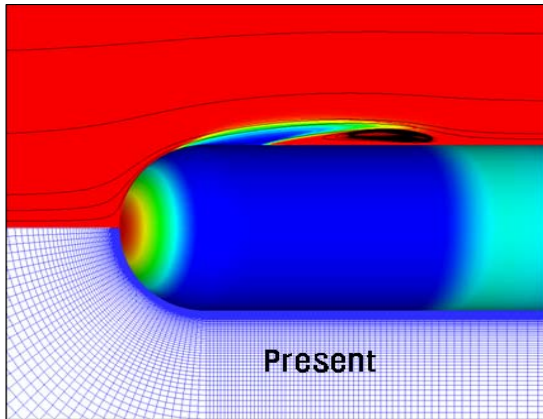
(b) Velocity vectors

Fig. 3 Liquid volume fraction and velocity vectors of hemispherical cylinder at $Ca = 0.3$

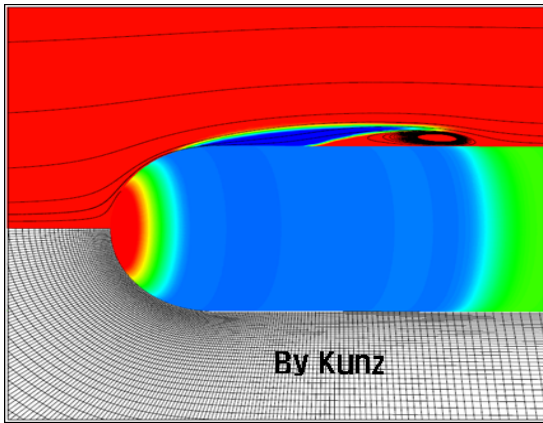
$$Ca = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_{Ref}^2} \quad (10)$$

여기서 p_v 는 액체의 증기압을 의미한다.

Fig. 2는 반구형 전두부 형상에서 $Ca = 0.2 - 0.5$ 에 대한 표면압력계수를 그린 그림으로 전반적으로 실험값과 잘 일치함을 볼 수 있으며 캐비테이션 수가 작아질수록 부분공동의 길이가 점차 길어짐을 알 수 있다. $Ca = 0.2$ 에서는 캐비테이션 버블(cavitation bubble)의 닫히는 영역(closure region) 근처에서 실험값에 비해 공동의 길이가 작게 예측되고 있음을 볼 수 있는데, 이것은 낮은 캐비테이션 수에서 긴 거리에 걸쳐지는 공동의 닫히는 영역에서 큰 재유입 제트(re-entrant jet)에 대한 영향과 이 영역에서의 난류모델의 한계, 격자의 조밀성 문제 등에 기인하는 것으로 여겨진다. Fig. 3은 $Ca = 0.3$



(a) By the present calculation



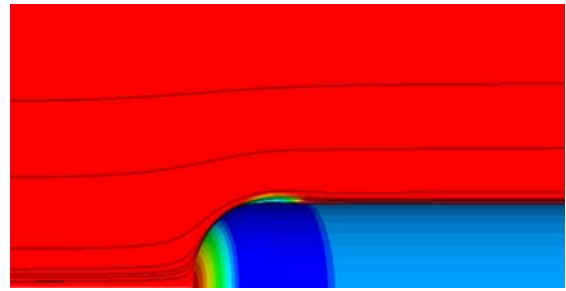
(b) By Kunz et al.'s result⁽³⁾

Fig. 4 Comparison of cavity and streamlines of hemispherical forebody cylinder at $Ca=0.3$

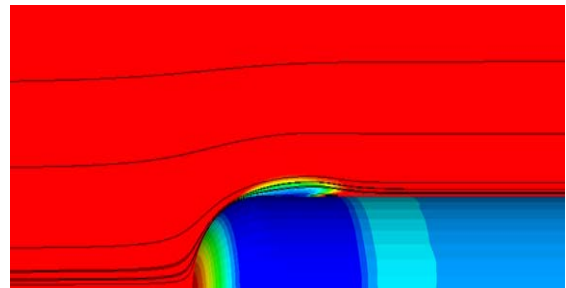
일 때 등액상체적분율, 표면 등압분포선, 그리고 속도벡터를 그린것인데 Fig. 3(b)에서 보면, 공동 하부에 역류현상의 재유입 제트 (re-entrant jet) 현상을 볼 수 있으며 이들은 다시 Fig. 3(a)와 Fig. 4의 자세한 유선에 의해 확인할 수 있다. Fig. 4은 본 연구에 의한 계산결과와 Kunz 등⁽³⁾에 의한 계산결과를 비교한 그림으로 비교적 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 5는 각 캐비테이션 수에서 액상체적분율을 그린 것으로서 전술하였다시피, 캐비테이션 수가 작아질수록 공동의 길이가 길어짐을 확인할 수 있다.

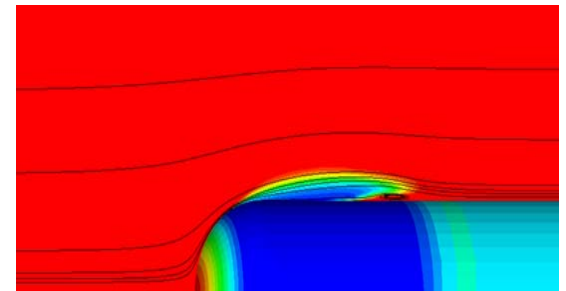
Fig. 6은 격자의 조밀도에 의한 수치해의 수렴성의 조사하기 위하여 3가지 경우의 격자계를 이용하여 $Ca=0.3$ 일 때 계산한 결과와 실험치를 비교한 것이다. 본 계산에서 조밀한(fine) 격자계는



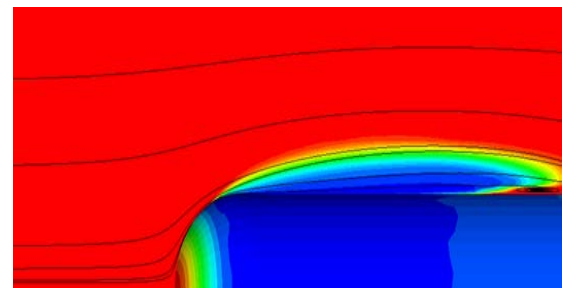
(a) at $Ca=0.5$



(b) At $Ca=0.4$



(c) At $Ca=0.3$



(d) At $Ca=0.2$

Fig. 5 Liquid volume fraction and streamlines of hemispherical forebody cylinder with variation of cavitation number

$120 \times 132 \times 37$ 로 구성되는 격자계이며, 중간 (medium) 격자계는 $60 \times 66 \times 19$ 으로 구성되어 있으며, 성긴(coarse) 격자계는 $40 \times 44 \times 13$ 으로 구성되어져 있다. 이 그림에서 보듯이 격자계가조밀해 질수록 수치해는 실험치에 근접해 감을 알 수 있다.

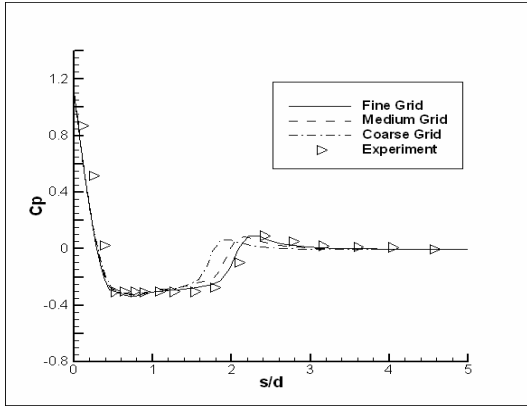


Fig. 6 Grid independence test on fine, medium, and coarse grid of hemispherical cylinder

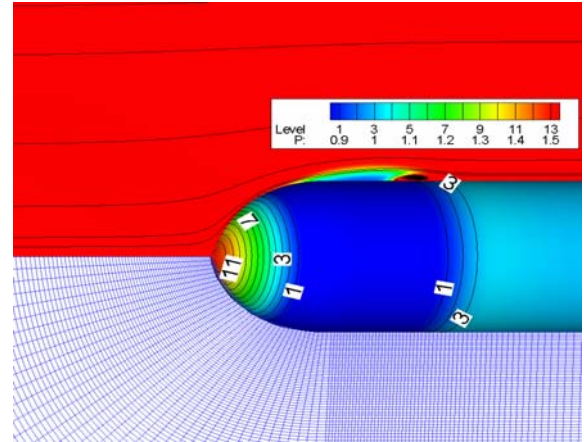


Fig. 8 Liquid volume fraction and surface pressure contours, and streamlines of the ogive forebody cylinder at $Ca=0.32$

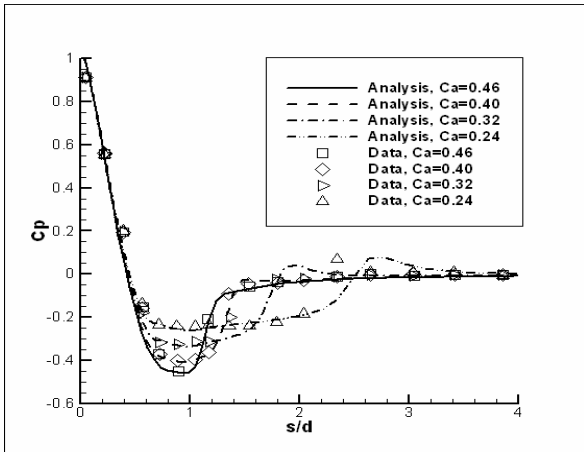


Fig. 7 Comparison of surface pressure of the ogive forebody cylinder at several cavitation numbers

Fig. 7과 8는 오자이브형 전두부 형상에 대한 결과이다. Fig. 7에 의하면 본 연구의 계산결과에 의한 표면압력이 실험치와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 7과 반구형 전두부 형상의 결과인 Fig. 2와 비교해 보면 표면압력 분포 형상이 서로 대동소이한 현상을 볼 수 있으나 Fig. 7의 오자이브형 전두부의 부분공동의 길이가 반구형 전두부의 공동길이보다 작음을 알 수 있으며 이것은 오자이브형 전두부의 곡률반경이 반구형 전두부의 곡률반경보다 작으므로 유동의 가속이 작고 따라서 압력강하가 작기 때문이다.

이 설명은 Fig. 2와 Fig. 7의 최저 압력값(suction peak)을 비교해 봄으로써 확인할 수 있다. Fig. 8은 $Ca=0.32$ 일 때 액상체적분율과 표면 등압력분포를 보여 주고 있다.

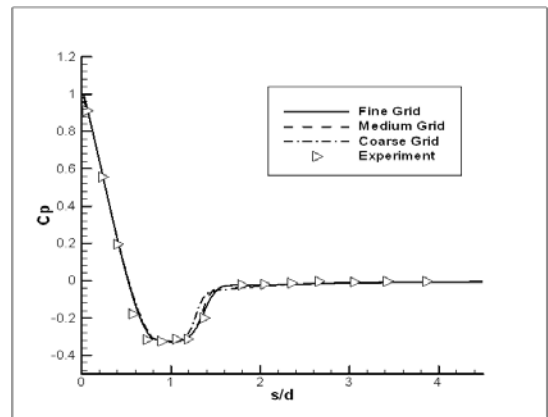


Fig. 9 Grid independence test of ogive cylinder

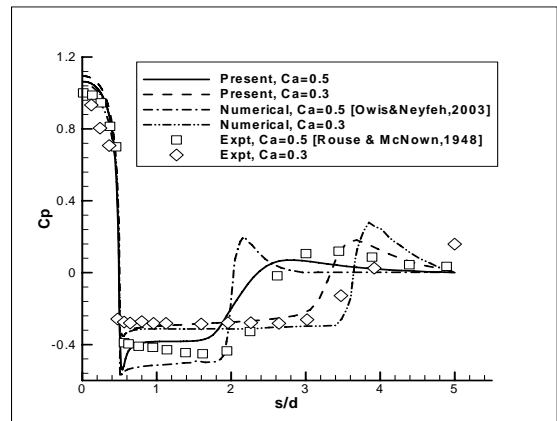


Fig. 10 Comparison of surface pressure of the caliber-0 forebody cylinder at $Ca=0.5$ and $Ca=0.3$

Fig. 9는 오자이브형 전두부 형상의 계산에 대한 격자계 독립성에 대한 연구로써 조밀한 격자계는

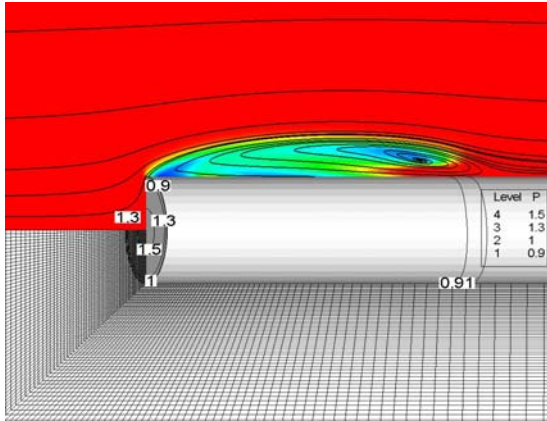
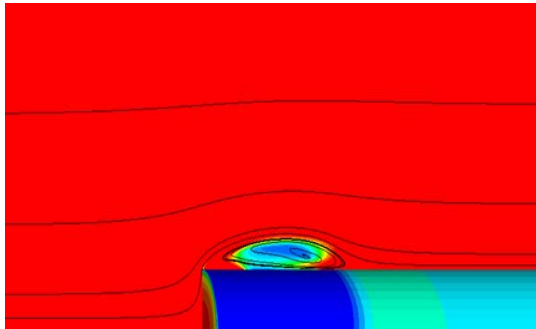
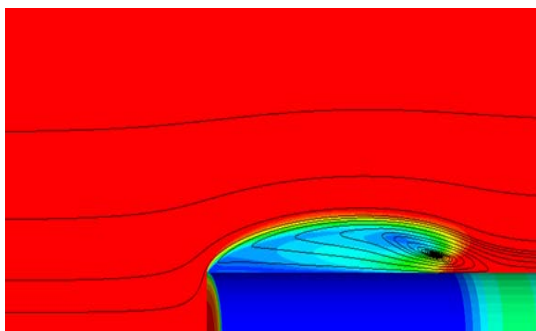


Fig. 11 Surface pressure contours and streamlines of caliber-0 forebody cylinder at $Ca=0.3$



(a) at $Ca=0.5$



(b) at $Ca=0.3$

Fig. 12 Liquid volume fraction of caliber-0 forebody cylinder

120×110×37으로 구성되는 격자계이며, 중간 격자계는 90×80×27으로 구성되어 있으며, 성긴 격자계는 60×50×19로 구성되어 있다. 이 그림 역시, 오자이브형 전두부 형상의 계산에서도 격자계의 조밀도에 대한 독립성을 얻을 수 있었다.

마지막으로 Fig. 10-13는 캘리버 제로형 전두부 형상에서 $Ca=0.3$ 과 0.5에 대한 계산결과이다. Fig.

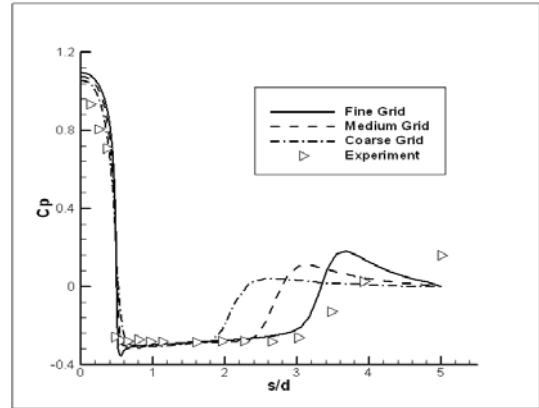


Fig. 13 Grid independence test of caliber-0 cylinder at $Ca=0.3$ on the grid system of 60×50×19, 90×80×27, and 120×110×37

10에서는 표면압력계수를 실험과 아울러 Owis & Nayfeh⁽¹¹⁾의 계산 결과값도 본 연구결과와 비교하였는데, 이 경우에 대해서도 대체적으로 실험결과와 비교적 잘 일치함을 보여주고 있으며 본 계산결과가 Owis & Nayfeh의 계산결과보다 더 실험치에 근접함을 볼 수 있었다.

Fig. 11은 표면 등압력선과 유선을 보여 주고 있으며 Fig. 12에서는 캐비테이션 수의 변화에 대한 공동의 크기변화를 볼 수 있다. Fig. 13은 격자계 독립성에 대한 계산결과이며 격자계가 조밀해 질수록 수치해는 실험치에 근접해 감을 알 수 있다.

Fig. 14는 캘리버 제로 전두부 형상의 실린더에서 재유입 제트(re-entrant jet)유동의 주기적 현상을 보여 주고 있으며 이러한 유동현상에 의해 심한 비정상 상태의 유동현상이 발생하며 Fig. 15와 같은 극심한 항력의 변화를 발생시키게 된다. 이 그림에 의하면 재유입제트 유동은 약 2.0초(무차원 시간)의 주기를 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 16은 $Ca=0.3$ 에서 반구형 전두부 형상의 전두부가 끝나고 균일직경의 실린더가 시작하는 지점에 $p_j = p_\infty$, $v_j = v_\infty$ 로 제트를 이용한 ventilation을 하는 경우의 공동현상을 시험적으로 해석해 보았다. 그림에서 보듯이, ventilation을 한 경우 공동의 길이가 획기적으로 늘어남을 볼 수 있고 본 연구의 시험계산의 조건에 따르면 공동의 길이가 약 8배로 늘어났음을 확인할 수 있었다. Ventilation 공동해석에 대한 본 연구는 현재 개발된 전산코드가 ventilation cavitation해석을 수행할 수 있는가에 대한 가능성 시도에 불과하며 Fig. 2와 같은 실험

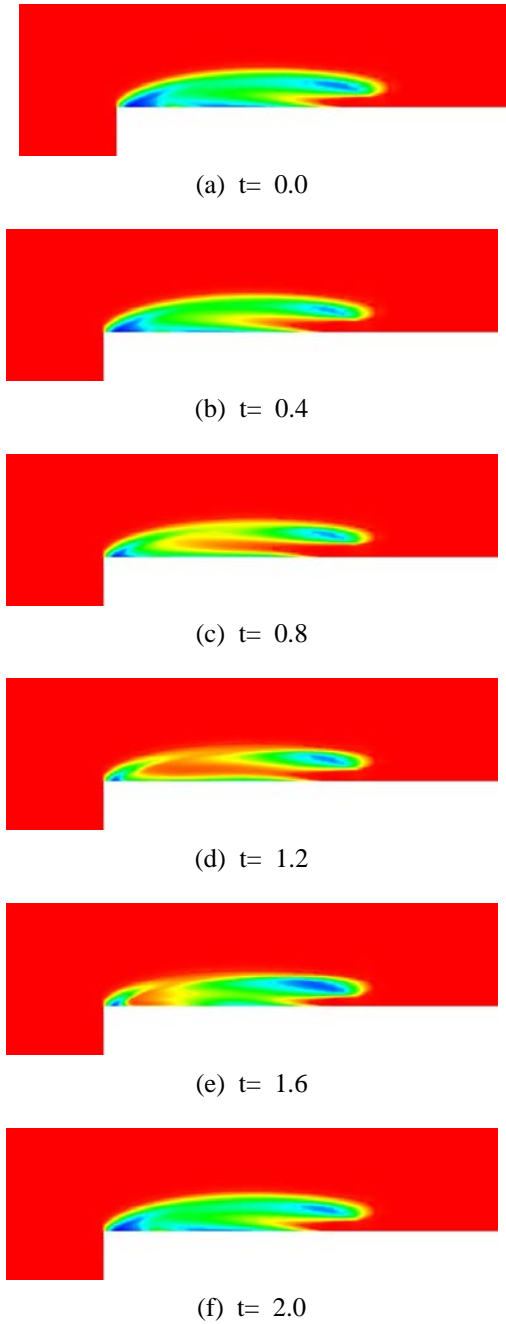


Fig. 14 Time sequence of re-entrant jet of caliber-0 cylinder at $Ca=0.3$

테이터나 타 연구자의 계산결과가 발표된 적이 없어 비교검증이 불가능하였다. 그러나 본 개발코드가 ventilation cavitation문제에도 적용가능함의 가능성을 제시해 주었다고 할 수 있다. 최근에 ventilation을 이용한 공동의 확장을 항력저감기술에 응용하는 연구가 몇몇 나라에서 진행되고 있는데, 이들 연구의 실 예로는 초월공동어뢰에 해당하는 것으로 러시아의 Shkval(일명 Squall)어뢰,

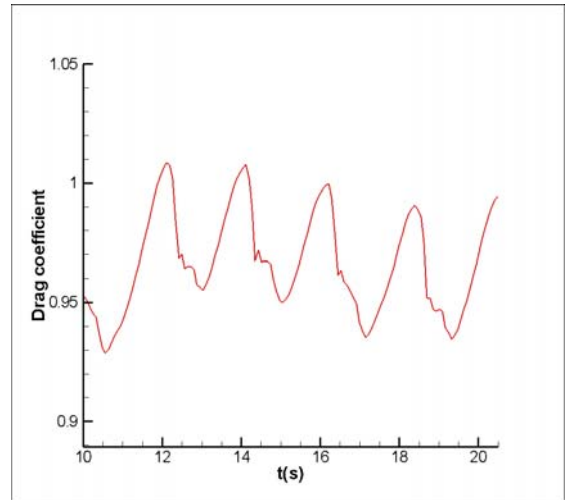


Fig. 15 Drag variation due to the re-entrant jet

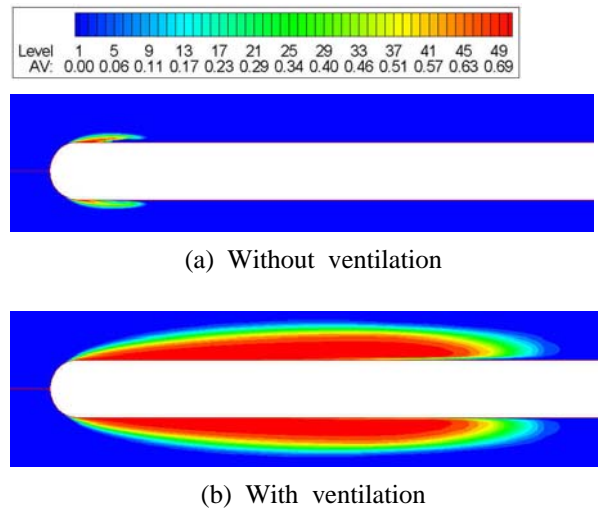


Fig. 16 Ventilated cavitation of spherical forebody cylinder at $Ca=0.3$

독일의 Barracuda어뢰 등이 있는데, 이들 어뢰는 최대속도가 350 km/h를 상회하는 것으로 알려져 있으며 Shkvall-II와 Barracuda 어뢰는 최대속도가 750-800 km/h이라는 속설도 있다. 미국에서는 최근 시속 180 km/h 정도의 유인잠수정, 일명 underwater express의 개발에 착수한 것으로 알려져 있다.

5. 결 론

축대칭 실린더에서 발생하는 부분공동 해석을 위한 기본 전산코드를 개발하였다. 본 연구에서는

공동해석모델을 위해 homogeneous mixture 모델을 사용하였으며 기상과 액상이 동시에 존재하는 영역의 효율적 계산을 위해 예조건화 방법을 사용하였다.

전산해석은 반구형 전두부, 오자이브형 전두부, 그리고 캘리버 제로형 전두부를 가지는 3가지 축대칭 실린더에 대해서 수행하였으며 각각의 실린더에 대해 여러 가지 캐비테이션 수의 변화를 주면서 계산을 수행하였다. 이들 계산결과는 실험값과 다른 연구자의 계산결과 값과 비교를 하였으며 모든 형상에 대해 비교적 서로 잘 일치함을 얻을 수 있었다. 액상체적분을 그림에서 캐비테이션 수가 작아질수록 공동의 길이가 늘어남을 확인할 수 있었으며 공동이 닫히는 영역 부근에서는 재유입류 제트를 역시 확인할 수 있었으며 이에 의한 극심한 항력의 변화가 발생함을 알 수 있었다. 또한, 본 연구에서는 개발 전산코드가 ventilation 공동해석을 수행할 수 있는가에 대한 가능성 연구를 동시에 수행하였는데 그에 대한 가능성을 확보할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 기본코드는 검증보완의 절차를 거쳐 좀 더 엄밀한 부분공동해석 코드로의 발전을 도모하며 초월공동 해석 코드로의 확장을 계획하고 있다. 아울러 현재의 등온과정의 가정을 탈피하여 압축성 영향을 포함할 수 있는 코드의 개발도 준비 중에 있다.

후 기

본 논문은 부산대학교 해외장기파견 연구지원과 수중운동체 특화연구센터(UVRC)의 연구지원으로 이루어 졌습니다.

참고문헌

(1) Reboud, J. L., Delannoy, Y., 1994, "Two-Phase Flow Modeling of Unsteady Cavitation," *Proceedings of 2nd International Symposium on Cavitation*, Tokyo, Japan, pp. 39~44.

(2) Song, C., He, J., 1998, "Numerical Simulation of Cavitating Flows by Single-Phase Flow Approach," *Proceedings of 3rd International Symposium on Cavitation*, Grenoble, France, pp. 295~300.

(3) Kunz R.F., Lindau J.W., Billet M.L., Stinebring D.R., 2001, "Multiphase CFD Modeling of Developed and Supercavitating Flows," *Applied Research Lab. Rept*

(4) Lindau, J. W., Kunz, R. F., Boger, D. A., Stinebring, D. R., Gibeling, H. J., 2002, "High Reynolds Number, Unsteady, Multiphase CFD Modeling of Cavitating Flows," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 124, pp. 607~616

(5) Kunz, R. F., Boger, D. A., Stinebring, D. R., Chyczewski, T. S., Lindau, J. W., Gibeling H. J., Venkateswaran, S, Govindan, T. R., 2000, "A Preconditioned Navier - Stokes Method for Two-Phase Flows with Application to Cavitation Prediction," *Computers and Fluids*, Vol. 29, pp. 849~875.

(6) Ahuja, V., Hosangadi, A., Arunajatesan, S., 2001, "Simulation of Cavitating Flow Using Hybrid Unstructured Meshes," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 123, pp. 331~340.

(7) Shin, B. R., Itohagi, T., 1998, "A Numerical Study of Unsteady Cavitaing Flows," *Proceedings of the 3rd International Symposium on Cavitation*, Grenoble, France, pp. 301~306.

(8) Grogger, H. A., Alajbegovic, A., 1998, "Calculation of the Cavitating Flow In Venture Geometries Using Two Fluid Model," *ASME Paper FEDSM 98-5295*.

(9) Staedkte, H., Deconinck, H., and Romenski, E., 2005, "Advanced Three-Dimensional Two-Phase Flow Simulation Tools for Application Reactor Safety(ASTAR)," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 235, pp. 379~400.

(10) Lindau, J. W., Venkateswaran, S, Kunz, R. F., Merkle, C. L., 2003, "Computation of Compressible Multiphase Flows," *AIAA 2003-1285*, 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.

(11) Owis F. M., Nayfeh A. H., 2003, "Computational of Compressible Multiphase Flow Over the Cavitating High-Speed Torpedo," *Journal of Fluids Engineering*, Vol 125, pp. 459~468.

(12) Senocak I, Shyy W., 2004, "Interfacial Dynamics-Based Modeling of Turbulent Cavitating Flows, Part-2: Time-Dependent Computations," *International Journal for Numerical Methods in*

- Fluids*, Vol. 44, pp. 997~1016.
- (13) Chien, K.Y., 1982, "Prediction of Change and Boundary Layer Flows with a Low-Reynolds-Number Turbulence Model," *AIAA Journal*, Vol. 22, pp. 33~38.
- (14) Rouse, H., McNown, J.S., 1948, "Cavitation and Pressure Distribution," *Head Forms at Zero Angle of Yaw*, *Stud. Engrg.*, Vol. 32, State University of Iowa.