

측류유동을 고려한 실린더 주위의 캐비테이션 유동 현상 해석

이 병 우,¹ 박 원 규,^{*2} 이 건 철³

SIMULATION OF CAVITATING FLOW PAST CYLINDERS WITH STRONG SIDE-FLOW

B.W. Lee,¹ W.G. Park,^{*2} and K.C. Lee³

Cavitating flow simulation is of practical importance for many engineering systems, such as marine propellers, pump impellers, nozzles, injectors, torpedoes, etc. The present work has focused on the simulation of cavitating flow past cylinders with strong side flows. The governing equation is the Navier-Stokes equation based on the homogeneous mixture model. The momentum and energy equation is in the mixture phase while the continuity equation is solved liquid and vapor phase, separately. An implicit dual time and preconditioning method are employed for computational analysis. For the code validation, the results from the present solver have been compared with experiments and other numerical results. A fairly good agreement with the experimental data and other numerical results have been obtained. After the code validation, the strong side flow was applied to include the wake flow effects of the submarine or ocean tide.

Key Words : 공동유동(cavitating flow), 균일혼상모델(homogeneous mixture model), 내비어-스톡스 방정식(navier-stokes equation), 예조건화(preconditioning method), 측류영향(side flow effects) 축대칭 실린더(axi-symmetric cylinder)

1. 서 론

최근 전산처리 기술이 발달할수록, 실험에 의존 했던 유동 해석을 수치해석 기법을 이용하여 연구하는 사례가 늘어나고 있다. 특히, 공동(cavitation)현상은 물리적으로 복잡한 형상으로 나타나기 때문에 전산유체 해석기법으로 해석하는 과정에서 완전한 모델링이 쉽지 않아 상당한 어려움을 겪고 있지만 많은 연구자들이 공동현상에 대해서 공학적으로 만족할 만한 해석 결과를 발표해 오고 있다. 공동현상이란 액체 유동에서 국부적인 지점이 압력의 급격한 강화로 인해서 기화가 되는 현상으로 공동(cavitation)에 의해 기화된 기포는 다시 압력이 상승하면 기포의 붕괴로 인해 심한 소음과 진동이 발생하며 부식을 발생시키기도 한다. 그러나 공동(cavitation)이 항상 부

정적인 측면만 가지고 있는 것은 아니다. 수중운동체 거동시 초공동(super-cavitation)을 이용하여 항력을 감소시켜 운동체가 초고속으로 움직일 수 있게 하기도 한다.

다상(multi-phase) 유동을 전산유체 해석방법으로 풀기 위한 방법으로 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 증기와 비응축 증기를 구별할 수 없는 단점이 있다. 두 번째 방법은 균일 혼상류(homogeneous mixture)모델이라고 하며 액상과 기상 사이에 질량전달 소스 항을 추가하여 액상과 기상에 대해서 연속방정식을 분리하여 해석하는 방법이 주로 사용된다[3,4,5,6]. 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 이용하는 방법이다[7,8].

균일 혼상류 모델의 경우, 예조건화(pre-conditioning)기법을 적용하여 액상과 기상영역에서 서로 음속이 현저히 다르므로 해서 생기는 수치해석의 stiffness문제를 해결하고 있다. Kunz

접수일: 2009년 10월 8일, 수정일: 2009년 12월 18일,

계재확정일: 2009년 12월 24일.

1 학생회원, 부산대학교 기계공학부

2 정회원, 부산대학교 기계공학부

3 국방과학연구소 제 2체계 특수합정 체계부

* Corresponding author, E-mail: wgpark@pusan.ac.kr

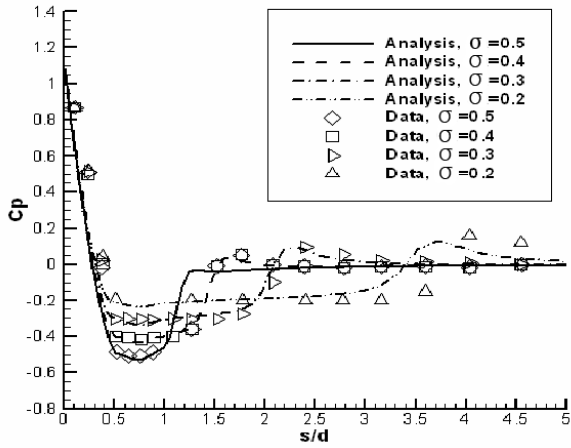


Fig. 1 Comparison of surface pressure of hemispherical forebody cylinder at various cavitation numbers

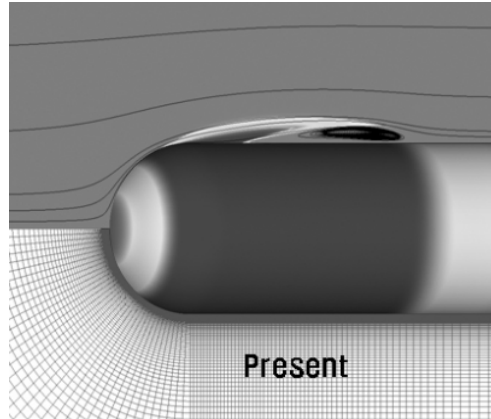
등[4]은 예조건화 방법을 이용한 다상유동장 해석에서 응축가스 외에 비응축가스를 추가하면서 3상 유동모델을 개발하였으나 액상과 기상이 혼합된 부분에서 압축성 효과를 반영하지 못하였다. Ahuja 등[5]은 압축성 효과를 포함하여 예조건화 기법을 이용하였지만 온도의 효과를 무시하였으며 최근에 Lindau 등[9]과 Owis 등[10]은 혼상유동 영역에서 압축성 효과와 온도효과를 모두 고려한 모델을 개발하였다.

본 연구에서는 균일혼상류 모델을 이용하여 기상과 액상의 변화과정이 등온이라는 가정 하에서 공동유동의 전산 유동해석을 위한 코드를 독자적으로 개발하여 in-house code로 계속 활용하며, 향후 압축성 영향과 비응축가스 영향, 그리고 연소 가스 영향 등을 단계적으로 포함시켜 초고속(high speed) 초공동 운송체(super-cavitation vehicle)의 유동해석을 위한 코드개발을 목적으로 하고 있다.

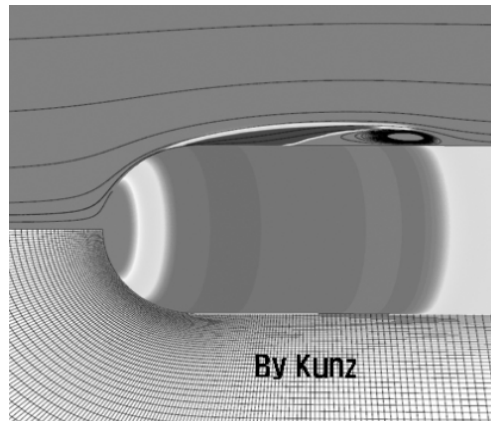
특히 본 연구에서는 개발된 캐비테이션 유동해석 기본코드를 이용하여 강한 측류가 붙어 닳는 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였는데, 이에 대한 연구는 아직 발표된 적이 없고 본 연구에 의해 처음 시도된 것으로 판단하고 있다. 캐비테이션의 측류에 의한 영향은 캐비테이션 고속운송체의 모함에 의한 후류영향이나 강한 조류에 의해 캐비테이션 거동이 어떻게 변하는 것인가에 대한 관찰을 위한 것이다.

2. 지배방정식 및 수치해석 방법

본 연구에서의 지배방정식은 균일 혼상류 모델을 적용하여 다음과 같이 액상과 기상에 대해서는 각각의 연속방정식을 풀고 있으며, 운동량 방정식은 혼상류에 대해 풀게 된다. 또



(a) by the present calculation



(b) by Kunz et al.'s result

Fig. 2 Comparison of cavity and streamlines of hemispherical forebody cylinder at $\sigma=0.3$

한 예조건화(pre-conditioning)를 위해 Merkle 등[11]과 Kunz 등[4]의 기법을 이용하고 있다.

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

여기서 하첨자 l , v 그리고 m 은 각각 액상, 기상 및 혼상(mixture)를 의미한다. p , u , ρ , α , μ 는 각각 압력, 속도, 밀도, 체적분율(volume fraction) 및 점성계수를 의미하며 t , τ 는 물리적 시간과 의사시간(pseudo-time)을 의미한다. \dot{m}^+ 는 상변화에 의해 기상이 응축되는 질량변화량(소스항)을 의미하며 \dot{m}^- 는 반대로 액상이 기화하는 증발량을 의미한다.

혼상류에서의 밀도인 ρ_m 과 액상과 기상의 체적분율(volume fraction)은 다음과 같이 정의된다.

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

$$\alpha_l + \alpha_v = 1 \quad (3)$$

또한 점성계수 μ_m 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_m = \mu_l \alpha_l + \mu_v \alpha_v \quad (4)$$

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

$$\Gamma_e \frac{\partial \hat{q}}{\partial t} + \Gamma \frac{\partial \hat{q}}{\partial \tau} + \frac{\partial(\hat{E} - \hat{E}_v)}{\partial \xi} + \frac{\partial(\hat{F} - \hat{F}_v)}{\partial \eta} + \frac{\partial(\hat{G} - \hat{G}_v)}{\partial \zeta} = \hat{S} \quad (5)$$

여기서 $\hat{q} = \mathcal{J} [p u v w \alpha_l]^\tau$ 이며 \hat{E} , \hat{F} , \hat{G} 은 대류항이고 \hat{E}_v , \hat{F}_v , \hat{G}_v 는 점성항이며 \hat{S} 와 행렬 Γ_e 는 다음의 식 (6)과 식 (7)로 정의된다.

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

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

여기서 $\Delta \rho \equiv \rho_l - \rho_v$ 이다. 예조건화 매트릭스 Γ 는 공동 유동장에서 기상과 액상의 음속이 심하게 차이가 남으로 해서 생기는 수치해석의 stiffness문제를 처리하기 위한 매트릭스로서 식(7)에서 첫 번째 열을 다음과 같이 수정하여 나타낸다. (Kunz 등[4])

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

여기서 β 는 예조건화 상수이다. 균일 혼상류모델을 바탕으로 하는 캐비테이션 모델은 액체에서 기체로의 진행과정인 \dot{m}^- (evaporation rate)와 기체에서 액체로의 진행과정인 \dot{m}^+ (condensation rate)을 도입하여 기상과 액상간의 물질전달(mass transfer)을 수학적으로 모델링하게 되는데, \dot{m}^- 은 압력과 액상체적분율(liquid volume fraction)에 대한 함수로서 식 (9)로 나타내어지며 Merkle 등[11]의 model을 기초로 두고 있다.

$$\dot{m}^- = \frac{C_{dest} \rho_v \alpha_l \min[0, p - p_v]}{(\rho_l U_\infty^2 / 2) t_\infty} \quad (9)$$

\dot{m}^+ 은 오직 액상체적분율에 대한 함수로서 Lindau 등[3]이 수정하여 식 (10)과 같이 나타내어진다.

$$\dot{m}^+ = \frac{C_{Prod} \rho_v \alpha_l^2 (1 - \alpha_l)}{t_\infty} \quad (10)$$

여기서, 여기서, p_v 는 기화압력이고, t_∞ 는 기준 유동시간이다. C_{dest} 와 C_{Prod} 는 모델상수항을 의미한다.

본 연구에서 사용된 수치해석 방법은 의사 시간 항은 1차 정도의 후방차분을 적용하였으며, 물리적 시간 항은 2차 정도의 후방차분을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 캐비테이션 유동 코드의 검증

본 연구의 목적인 측류유동영향을 관찰하기 전에 우선 코드의 검증을 위한 계산을 수행하였다. 코드 검증은 반구형 전두부(Hemispherical forebody) 형상에 대해 수행하였다. 격자계는 120×132×37의 격자점으로 구성하였다. 계산조건의 레이놀즈 수(Reynolds number)는 $Re = 1.36 \times 10^5$ 이며 캐비테이션 수(cavitation number)는 0.2에서 0.5까지 다양한 캐비테이션 수에

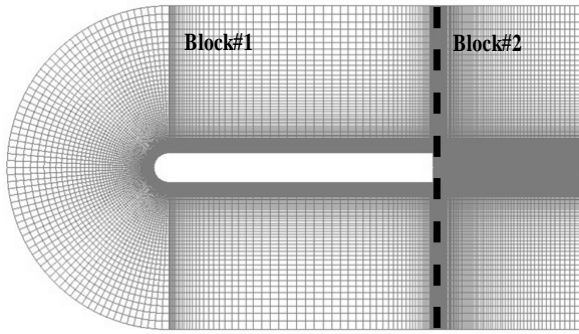
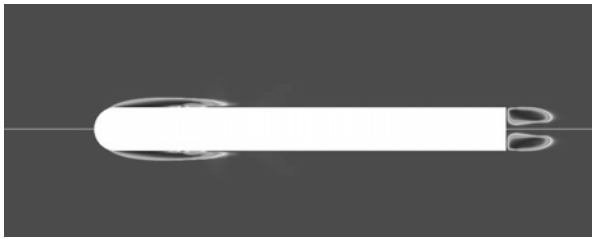


Fig. 3 Multiblock grid for the underwater vehicle



(a) at $\sigma=0.2$



(b) at $\sigma=0.3$

Fig. 4 Liquid volume fraction of hemispherical forebody cylinder at two different cavitation numbers

대해 계산을 수행하였으며 Rouse & McNown[12]의 실험값과 비교하였다. 캐비테이션 수는 아래와 같이 정의된다.

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_v}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2} \quad (11)$$

여기서 ρ_{∞} 와 U_{∞} 는 각각 유입류의 밀도와 속도를 의미한다.

Fig. 1은 다양한 캐비테이션 수(σ)에 대한 반구형 전두부 실린더의 표면에서의 표면압력분포를 나타내며 이를 실험값

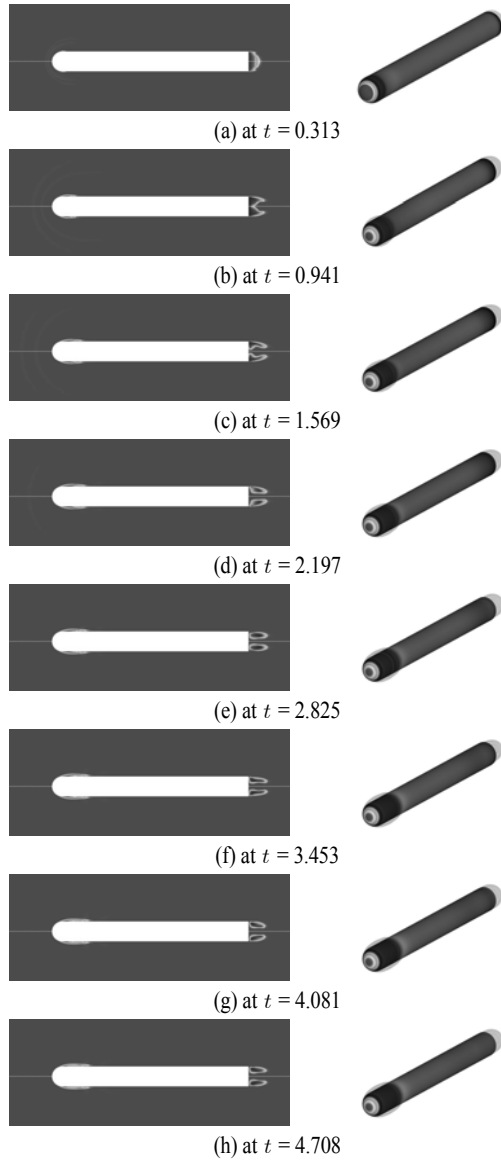


Fig. 5 Time sequence of liquid volume fraction and pressure contour of 1/2-caliber cylinder at $\sigma=0.3$

과 비교하였다. Fig. 1에 의하면 본 연구에 의한 해석 결과값이 실험치와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 2는 격자계 97×33×65의 격자점을 사용하고 있는 Kunz[13]의 연구결과와 본 연구의 결과를 비교한 것이다. 각각 캐비테이션 수가 0.3일 때, 액상체적분율(liquid volume fraction), 유선, 등 압력분포를 나타낸 것으로 결과가 서로 정성적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

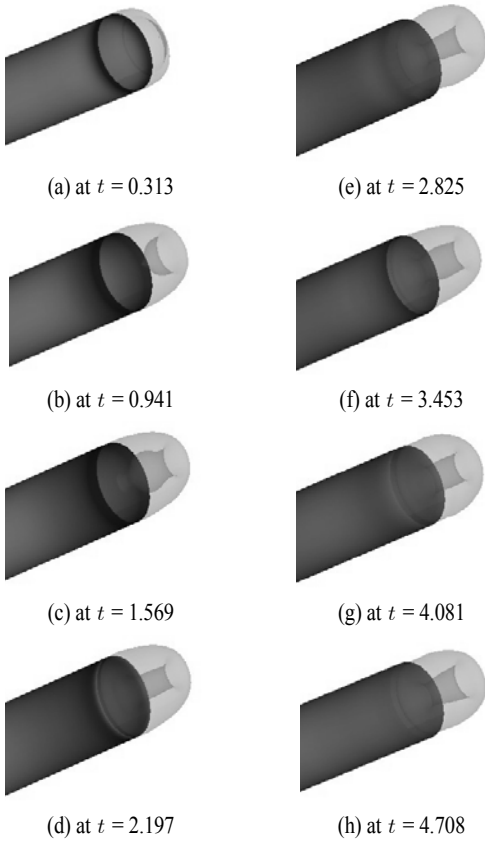


Fig. 6 Time sequence of 3-D Liquid volume fraction in the wake region at $\sigma=0.3$

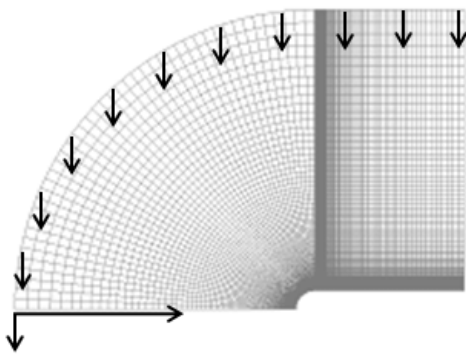


Fig. 7 Region of side flow effect

3.2 후미부의 캐비테이션 유동해석

수중운송체 후미부의 캐비테이션 유동을 해석하기 위해 Fig. 3과 같이 멀티블럭(multiblock) 격자기법을 도입하였다. 반구형 전두부 수중운송체를 위한 블록 1의 격자는 $100 \times 80 \times 27$

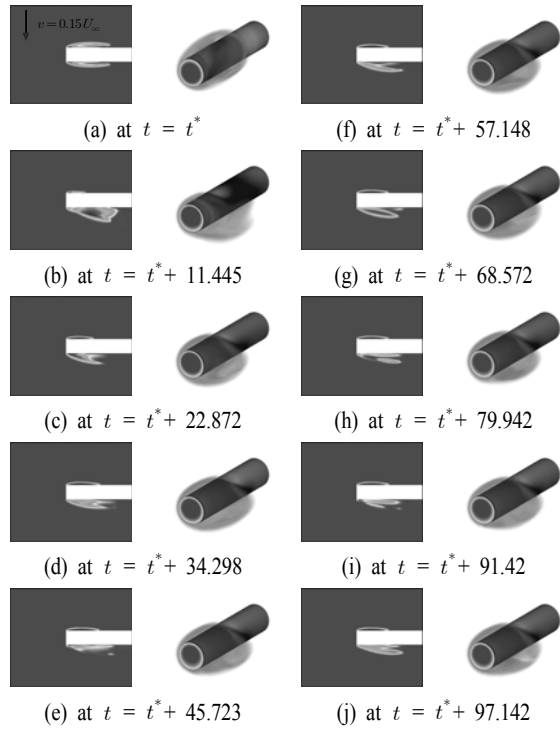


Fig. 8 Time sequence of liquid volume fraction and pressure contour with uniform side flow of 0-caliber cylinder at $\sigma=0.3$

으로 구성되어 있으며 블록 2는 $120 \times 80 \times 27$ 으로 구성되어져 있다. 유동조건의 레이놀즈 수는 1.36×10^5 일 때이다.

Fig. 4는 캐비테이션 수가 0.2와 0.3일 때의 후미부의 후류 영역의 캐비테이션까지 포함하는 전체 물체에 대한 캐비테이션 유동 결과를 보여 주고 있는데, 캐비테이션 수가 작을수록 예상한 바와 같이 전두부와 후미부 모두 공동길이가 길어짐을 알 수 있다.

Fig. 5는 캐비테이션 수가 0.3일 때, Fig. 4(b)의 시간에 따른 전두부와 후미부에서 발생되어 지는 캐비테이션 현상을 보여 주고 있다. Fig. 5에서 후미부에 발생되어 지는 캐비테이션현상에 대해 중점적으로 관찰하면 후미부에서 캐비테이션이 발생하면서 점차적으로 캐비테이션 공동 길이가 확장되면서 안정화 되어 나가는 것을 확인 할 수가 있었다. Fig. 6은 3차원 그림에서 후미부에 더욱 초점을 두고 관찰해본 결과이다.

3.3 측류유동에 의한 캐비테이션 거동

수중운송체가 갑작스런 해류의 영향이나 모함의 후류(wake)유동의 영향으로 인하여 강한 측류유동장 아래에 놓여 있을 때, 캐비테이션의 거동현상을 관찰하기 위하여 일정한 크기의(본 연구에서는 정면류 유속대비 15% 크기로 가정) 측류가 갑자기 불어올때와 사인파(sine wave) 형태로 측류유속

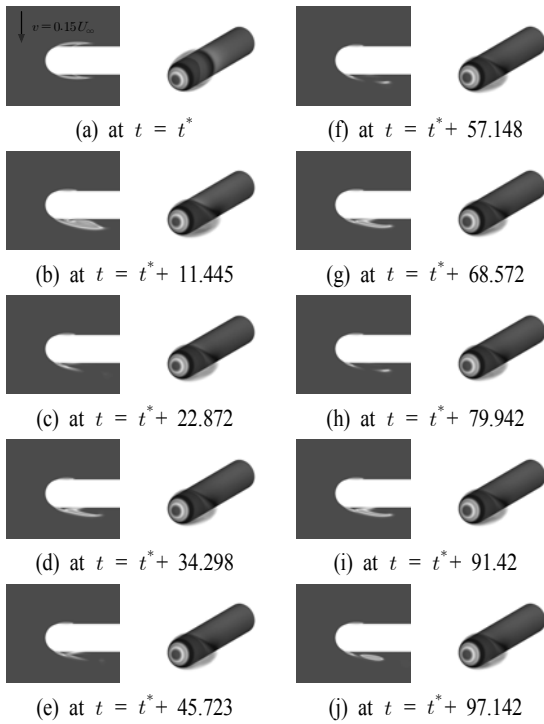


Fig. 9 Time sequence of liquid volume fraction and pressure contour with uniform side flow of 1/2-caliber(hemispherical) cylinder at $\sigma=0.3$

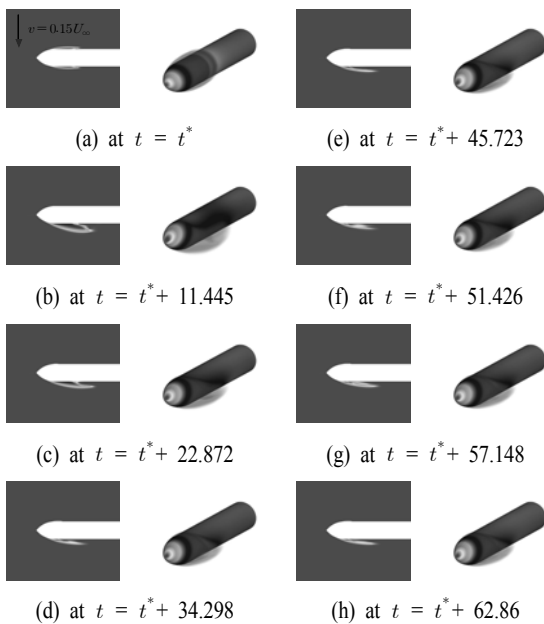


Fig. 10 Time sequence of liquid volume fraction and pressure contour with uniform side flow of 1-caliber cylinder at $\sigma=0.24$

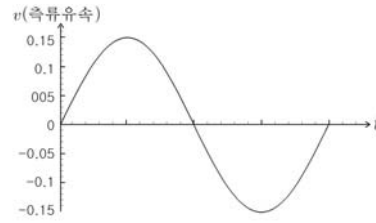


Fig. 11 Side flow profile of sine function

(최고 측류 유속=15%)을 가질 때의 두가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 측류가 적용되는 영역은 Fig. 7에 보인 바와 같이 전체 계산 영역이다. 이러한 측류유동 하의 캐비테이션 거동을 해석한 경우는, 저자들이 알고 있기는 최초의 유동해석 시도로 알고 있으며 Kunz 등[4]이 초공동 운송체 (supercavitation vehicle)에 대해 비슷한 유동해석을 한 적은 있으나, 본 연구와 유동상황 설정이 다르다고 할 수 있다.

3.3.1 일정한 유속의 측류 영향

갑자기 불어오는 일정한 크기(정면유속 대비 15% 크기)의 측류유동에 의한 캐비테이션 거동현상을 관찰해 보면 Fig. 8-10과 같다. 여기서 t^* 는 정면 유동에서 갑자기 측류유동이 불어 닥치기 시작하는 시점의 시각을 의미하며 각 시간은 정면류 유속과 물체 길이로 무차원화한 무차원 시간을 의미한다.

Fig. 8은 캘리버(caliber)=0 전두부 실린더인 경우, 캐비테이션 수가 0.3일 때의 해석결과인데, 등(equi-)액상 체적 분율과 표면 등압력 분포를 보여 주고 있다. Fig. 8(a)에서 보듯이, 정면류 유동에서 상하 대칭적이며 실제 3차원 그림에서는 축대칭적임을 확인 할 수 있다. 그러나 재유입 제트(re-entrant jet) 현상에 의해 캐비테이션 형상이 축대칭이 아니며 강한 비정상상태(unsteadiness)를 동반한다[14]. 캐비테이션 형상이 갑자기 측류유동이 불어 닥치면서 Fig. 8(b), (c), (d)를 거치면서 상하 (축)대칭적인 형상이 깨어지면서, 그리고 갑작스런 측류 유동의 충격량에 의해 캐비테이션이 심하게 상하로 급격히 출렁거리는 현상을 관찰할 수 있었으며 이러한 출렁거림은 Fig. 8(h), (i)를 거치면서 서서히 안정화 되면서 정상상태로 근접해 감을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 역시 캐비테이션 수=0.3일 때, 캘리버=1/2인 반구형 전두부 실린더의 해석결과인데, Fig. 8과 같은 유동현상을 파악할 수 있었으며 Fig. 10는 캘리버=1인 오자이브(ogive) 형상의 실린더에서 캐비테이션 수=0.24일 때의 캐비테이션 유동 해석결과이다. 오자이브(ogive) 형상의 실린더가 캘리버=0 전두부, 캘리버=1/2인 반구형 전두부 실린더와 비교하여 전두부 nose의 앞부분의 기울기가 다른 두형상의 기울기 보다 더 완

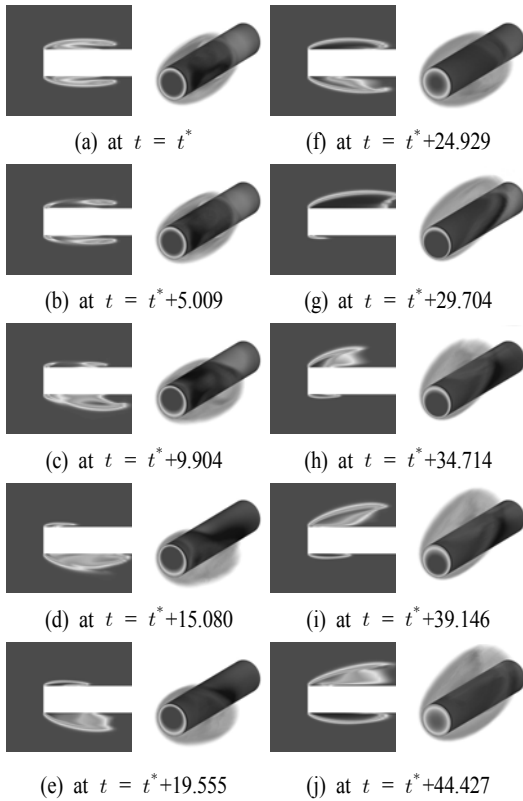


Fig. 12 Time sequence of liquid volume fraction and pressure contour with sinusoidal side flow of 0-caliber cylinder at $\sigma=0.3$

만하기 때문에 캐비테이션 크기가 작아짐으로 더 빠르게 안정적으로 정상상태에 도달하는 것을 볼 수가 있다. 또한 이 그림에서는 아래방향으로 흐르는 측류유동성분에 의해 받음각이 생김으로 해서 정체점 압력이 상대적으로 위로 치우지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 9의 캘리버=1/2인 반구형 전두부에서도 관찰할 수 있다.

3.3.2 사인파 유속의 측류 영향

다음으로 Fig. 11과 같이 시간에 대해 sine파 분포의 측류 유동에 대해 계산을 수행하였다. Fig. 12-13에서 각각의 (a), (b), (c)부터 (i), (j)에 측류유속이 적용되는 시점은 Fig. 11에 나타나 있다. sine파의 함수는 최대 측류 유속이 정면류 유속 대비 15%이며 다음 식 (12)와 같이 주어진다.

$$v = 0.15 \times \sin(\text{time}/2\pi) \tag{12}$$

Fig. 12은 캘리버=0 전두부 형상에 대한 계산 결과인데 sine파 측류유동 분포에 의해 한번은 위쪽에 공동(cavity)이 점

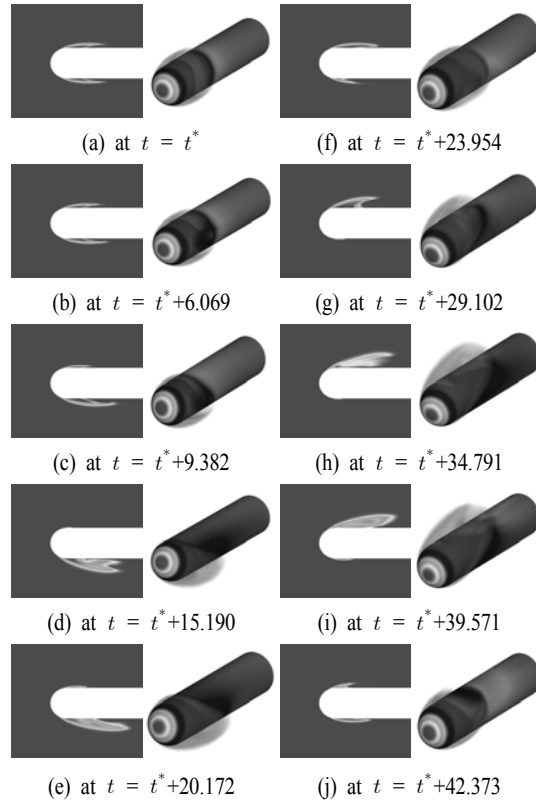


Fig. 13 Time sequence of liquid volume fraction and pressure contour with sinusoidal side flow of 1/2-caliber cylinder at $\sigma=0.3$

차적으로 증가하였다가 감소하며, 다시 sine파의 반대 방향의 측류성분에 의해 아래쪽에 공동이 점차 증가, 감소하는 현상을 주기적으로 관찰할 수 있다. 또한 공동은 Fig. 8-10의 급격한 측류영향과 달리 측류유속이 영으로부터 15% 유속까지 점차적으로 증가함으로 해서 Fig. 8-10에서 보았던 공동의 극심한 출렁거림 현상이 보이지 않는다. 일정한 크기의 측류가 적용되는 유동현상에서는 공동발생이 측류의 최고크기까지 증가하다가 점차 안정화 되는 현상을 관찰 할 수 있었으나 sine파 크기의 측류가 적용되는 유동현상에서는 공동 발생 현상이 측류의 최고크기까지 증가하여 발생되어 지다가 반대방향으로 다시 최고크기 만큼 공동현상이 증가하여 발생되어 짐을 확인 할 수가 있다.

Fig. 13는 캘리버=1/2인 반구형 전두부에 대한 연구결과이다. 측류유속의 식 (12)와 Fig. 11과 같이 캘리버=0와 마찬가지로 영향을 받으면 공동(cavity)이 점차적으로 증가하였다가 감소하며, 다시 sine파의 반대 방향의 측류성분에 의해 아래쪽에 공동이 점차 증가, 감소하는 현상을 주기적으로 관찰할 수 있다.

4. 결 론

고속 수중운동체의 캐비테이션 유동해석을 위한 전산해석 코드를 개발하였다. 본 코드는 3차원 Navier-Stokes 방정식을 균일 혼상류 모델을 사용하여 캐비테이션 유동을 해석 할 수 있게 하였으며 예조건화를 이용하여 수치해석상의 stiffness 문제를 해결하였다. 본 코드의 검증을 위해 여러 가지 캐비테이션 수에 해당하는 표면압력 분포를 실험치와 비교하였으며 서로 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 고속수중운동체의 모함의 후류나 조류 등에 의한 강한 측류에 의한 캐비테이션 현상을 관찰하기 위해 일정한 크기의 측류와 싸인파의 측류가 갑자기 불어 닳칠 경우에 대해 계산을 수행하였으며 이에 의한 캐비테이션의 거동을 고찰하였으며 이에 대한 캐비테이션 유동의 물리적 이해력을 증진시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 수중운동체 특화연구센터(UVRC)와 국방과학연구소(ADD)의 연구지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 1994, Reboud, J.L. and Delannoy, Y., "Two-phase flow modeling of unsteady cavitation," *Proceedings of 2nd International Symposium on Cavitation*, Tokyo, Japan, pp.39-44.

[2] 1998, Song, C. and He, J., "Numerical simulation of cavitating flows by single-phase flow approach," *Proceedings of 3rd International Symposium on Cavitation*, Grenoble, France, pp.295-300.

[3] 2002, Lindau, J.W., Kunz, R.F., Boger, D.A., Stinebring, D.R. and Gibeling, H.J., "High Reynolds Number, Unsteady, Multiphase CFD Modeling of Cavitating Flows," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.124, pp.607-616.

[4] 2000, 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, pp.849-875.

[5] 2001, Ahuja, V., Hosangadi, A. and Arunajatesan, S., "Simulation of Cavitating Flow Using Hybrid Unstructured Meshes," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.123, pp.331-340.

[6] 1998, Shin, B.R. and Itohagi, T., "A numerical study of unsteady cavitating flows," *Proceedings of the 3rd*

International Symposium on Cavitation, Grenoble, France, pp.301-306.

[7] 1998, Grogger, H.A. and Alajbegovic, A., "Calculation of the cavitating flow in venture geometries using two fluid model," *ASME Paper FEDSM 98-5295*.

[8] 2005, Staedkte, H., Deconinck, H. and Romenski, E., "Advanced three-dimensional two-phase flow simulation tools for application reactor safety(ASTAR)," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.235, pp.379-400.

[9] 2003, Lindau, J.W., Venkateswaran, S., Kunz, R.F. and Merkle, C.L., "Computation of Compressible Multiphase Flows," *AIAA 2003-1285, 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, USA.

[10] 2003, Owis, F.M. and Nayfeh, A.H., "Computational of Compressible Multiphase Flow Over the Cavitating High-Speed Torpedo," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.125, pp.459-468.

[11] 1998, Merkle, C.L., Feng, J.Z. and Buelow, P.E.O., "Computational Modeling of the Dynamics of Sheet Cavitation," *Proceedings of the 3rd International Symposium on Cavitation*, Grenoble, France.

[12] 1948, Rouse, H. and McNown, J.S., "Cavitation and Pressure Distribution," *Head Forms at Zero Angle of Yaw*, Stud. Engrg., Vol.32, State University of Iowa.

[13] 1999, Kunz, R.F., Boger, D.A., Chyczewski, T.S., Stinebring D.R., Gibeling, H.J. and Govindan, T.R., "Multi-phase CFD Analysis of Natural and Ventilated Cavitation about Submerged Bodies," *Proceedings of 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, ASME Paper FEDSM 99-7364*.

[14] 2008, 구태경, 박원규, 김동훈, 이건철, "실린더 주위의 캐비테이션에 의한 Re-Entrant Jet 전산해석," 한국해양 과학기술협회의 공동 학술대회, 대한조선학회.

[15] 2008, 김성환, 구태경, 박원규, 김동훈, "3차원 수중익형 주위의 캐비테이션 유동 전산해석," *유체기계저널*, 제11권, 제3호, pp.7-13.

[16] 2009, 김봉수, 이병우, 정철민, 박원규, "축대칭 실린더 형상 주위 부분 공동 유동의 전산 해석," *대한기계학회 논문집*, 제33권, 2호, pp.69-78.

[17] 2007, Ha, K.T., Park, W.G., Lee, J.C., Kim, S.H. and Kim, D.H., "Cavitation Flow Simulation of Cylinder Hydrofoil And Venturi," *The 9th Asian International Conference on Fluid Machinery*, Ramada Hotel of Korea, AICFM9.