

자유표면 영향을 고려한 환기공동 전산유동해석

김 미 선, 김 호 윤, 하 콩 투, 박 원 규*

부산대학교 기계공학부

NUMERICAL ANALYSIS OF VENTILATED CAVITATION WITH FREE SURFACE EFFECTS

M.S. Jin, H.Y. Kim, C.T. Ha and W.G. Park*

Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.

Cavitating flow is usually formed on the surface of a high speed underwater object. When a object moves near a free surface at very high speed, the cavity signature becomes one of the major factors to be overcome by sensors of military satellite. The present work was to study the free surface effect on the ventilated cavitation. The governing equations were Navier-Stokes equations based on a homogeneous mixture model. The multiphase flow solver used an implicit preconditioning method in the curvilinear coordinate system. The cavitation model used here was the one first presented by Merkle et al.(2006) and redeveloped by Park & Ha(2009). Computations considered the free surface effects were carried out with a NACA0012 hydrofoil and the corresponding results were compared with the experimental data to have a good agreement. Calculations were then performed considering the ventilated cavitation, including the effect of non-condensable gas under the free surface effects.

Key Words: : 공동유동현상(Cavitating flow), 자유표면(Free surface), 균일 혼상류모델(Homogeneous mixture model), Navier-Stokes 방정식(Navier-Stokes Equation), 고속 수중 운동체 (High speed underwater object), 동역학적 조건(Dynamic condition), 운동학적 조건(Kinematic condition)

1. 서 론

캐비테이션(cavitation)은 비교적 복잡한 물리적 현상이고, 전산유체 해석기법으로 풀어나가는 과정에서 완전한 모델링이 쉽지 않지만, 현재까지 많은 연구자들에 의해 다양한 해석 기법과 결과들이 발표되고 있다.

캐비테이션 현상이란 액체 유동에서 국부적인 지점이 압력의 급격한 강하로 인해 기화가 되는 현상을 의미하는데, 캐비테이션에 의해 기화된 기포는 다시 압력이 상승하면서 기포의 붕괴로 이어져 소음과 진동, 기계의 부식 등 심각한 문제를 초래한다. 그러나 수중 운동체 거동시 초공동(super-cavitation)에 대한 적절한 응용은 물체 주위의 항력을 감소시켜 운동체가 수중에서 초고속으로 움직일 수 있도록 도와준다. 하지만 환기공동을 이용한 초공동 어뢰나 수중운동체가 자유표면 근

처에서 이동할 경우 수면에 항적을 남기게 되므로 군사적으로 이용 시 이에 그에 대한 정확한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 수중운동체가 환기공동(ventilated cavitation)을 이용하여 초고속으로 운항하는 경우에 대한 해석 방법으로서 액상과 기상에 대해서 연속방정식을 분리하여 해석하는 방법인데 액상과 기상 사이에 질량전달 소스항을 추가하는 방법으로 균일 혼상류(homogeneous mixture)모델이라고 보통 일컫는다[1-6]. 이 방법은 액상과 기상의 경계면의 상태가 열과 동적으로 평형을 이루고 있다고 가정하므로 운동량 방정식과 에너지 방정식은 혼상류(mixture flow)에 대한 방정식을 이용한다. 그리고 예조건화(pre-conditioning)기법[5]을 추가적으로 고려하여 액상과 기상영역에서 현저히 다른 음속으로 인해 발생하는 수치해석적 강성(stiffness)문제를 해결한다.

자유표면의 상승/하강(free-surface elevation)을 알아내기 위해서 자유표면에 대한 동역학적 조건(dynamic condition)과 운동학적 조건(kinematic condition)을 이용하였다[7]. 자유표면의 표면장력과 점성의 영향은 무시한다. 동역학적 조건에 의해 자유표면 상의 압력은 항상 대기압을 유지하고, 운동학적 조건에 의해 유체 입자가 자유표면 위에 있으면, 그 입자는 유

Received: April 25, 2012, Revised: February 27, 2013,
Accepted: February 28, 2013.

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

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.1.013>

© KSCFE 2013

체가 유동하면서 움직이더라도 자유표면 위에 계속 존재한다.

본 연구에서는 균일 혼상류 모델을 이용하여 기상과 액상의 변환과정이 등온이라는 가정 하에 비응축성 가스의 영향을 고려 할 수 있는 전산해석 코드를 개발하였고, 이 코드를 확장하여 자유표면의 영향이 고려된 환기공통 다상 유동장에 대한 전산해석을 수행하였다.

2. 지배방정식 및 수치해석 방법

2.1 지배방정식

지배방정식은 균일 혼상류 조건하에, 구체적으로 액상과 기상, 비응축성 가스에 대해서는 각각의 연속방정식을 적용하였고, 운동량 방정식은 혼상상태에 대해 적용하였다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{\beta^2}\right) \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} &= (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v}\right) \\ \frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \left(\frac{\alpha_l}{\beta^2}\right) \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial \alpha_l}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_l u_j) &= (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \left(\frac{1}{\rho_l}\right) \\ \frac{\partial \alpha_{ng}}{\partial t} + \left(\frac{\alpha_{ng}}{\beta^2}\right) \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial \alpha_{ng}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_{ng} u_j) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_m u_i u_j) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} [\mu_{m,t} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)] + \rho_m g_i \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 하첨자 l, v, ng, m 은 각각 액상, 기상, 비응축성 가스 및 혼상(mixture)을 의미한다. p, u, ρ, α, μ 는 각각 압력, 속도, 밀도, 체적 분율(volume fraction) 및 점성계수를 의미하며 t 는 물리적 시간을 의미한다. \dot{m}^+ 는 상변화에 의해 기상이 응축되는 질량변화량(소스항)을 의미하며 \dot{m}^- 는 반대로 액상이 기화하는 증발량을 의미한다.

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

$$\Gamma_e \frac{\partial}{\partial t} \hat{Q} + \Gamma \frac{\partial}{\partial \tau} \hat{Q} + \frac{\partial \hat{E}_j}{\partial \xi_j} - \frac{\partial \hat{E}_j^v}{\partial \xi_j} = \hat{S} \quad (2)$$

여기서 $\hat{Q} = \frac{1}{J} [p u v w \alpha_l \alpha_{ng}]^T$ 이며 \hat{S} 와 행렬 Γ_e 는 아래와 같이 식 (3)과 식 (4)로 정의된다.

$$\hat{S} = \frac{1}{J} \left\{ (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v}\right), 0, 0, 0, (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \frac{1}{\rho_l}, 0 \right\}^T \quad (3)$$

$$\Gamma_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_m & 0 & 0 & u \Delta \rho_1 & u \Delta \rho_2 \\ 0 & 0 & \rho_m & 0 & v \Delta \rho_1 & v \Delta \rho_2 \\ 0 & 0 & 0 & \rho_m & w \Delta \rho_1 & w \Delta \rho_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 $\Delta \rho_1 \equiv \rho_l - \rho_v, \Delta \rho_2 \equiv \rho_{ng} - \rho_v$ 이다.

액상, 기상, 비응축성 가스의 밀도와 점성계수는 일정하다고 가정하면, 혼상류에서의 밀도와 점성계수는 아래와 같이 정의된다.

$$\rho_m = \rho_l \alpha_l + \rho_v \alpha_v + \rho_{ng} \alpha_{ng} \quad (5)$$

$$\mu_m = \mu_l \alpha_l + \mu_v \alpha_v + \mu_{ng} \alpha_{ng} \quad (6)$$

이때, 예조건화 자코비안(Jacobian) 매트릭스 Γ 는 공동 유동장에서 기상과 액상의 음속이 심하게 차이가 남으로써 생기는 수치해석의 강성 문제를 처리하기 위한 것으로 아래와 같이 나타낸다[5].

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\beta^2}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_m & 0 & 0 & u \Delta \rho_1 & u \Delta \rho_2 \\ 0 & 0 & \rho_m & 0 & v \Delta \rho_1 & v \Delta \rho_2 \\ 0 & 0 & 0 & \rho_m & w \Delta \rho_1 & w \Delta \rho_2 \\ \left(\frac{\alpha_l}{\beta^2}\right) & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \left(\frac{\alpha_{ng}}{\beta^2}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 β 는 예조건화 상수이다.

2.2 캐비테이션 모델

균일 혼상류 모델을 바탕으로 하는 캐비테이션 모델은 액상에서 기상으로의 진행과정인 \dot{m}^- (evaporation rate)과 기상에서 액상으로의 진행과정인 \dot{m}^+ (condensation rate)를 도입하여 기상과 액상간의 상호 질량전달(mass transfer)을 수학적으로 모델링하였다. \dot{m}^+ 과 \dot{m}^- 는 압력과 액상/기상 체적 분율(liquid volume fraction)에 의존하고, 식 (8)과 (9)로 나타내어진다. 이 두 함수는 기존 캐비테이션 모델에서 액상과 기상 모델 상수에 의존하는 중속적인 단점을 개선해 Merkle et al.[8]이 최근에 개발한 것으로, 최근 Ha et al.[9]와 Ha and Park[10]이 수치모델의 결함을 보완하고 실제 유동장에 적용해 응용력을 높였다.

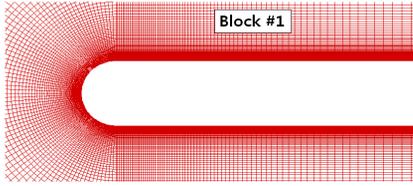


Fig. 1 Grid

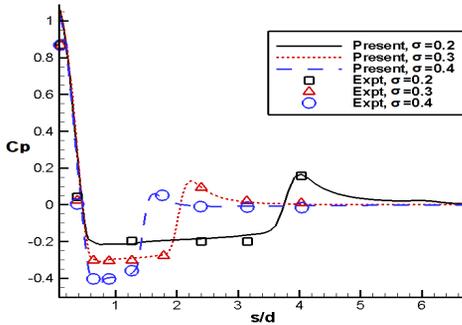


Fig. 2 Surface pressure of the hemispherical cylinder at $\sigma = 0.2, 0.3, 0.4$

$$\dot{m}^- = -k_v \frac{\rho_v \alpha_l}{t_\infty} \min \left\{ 1, \max \left(\frac{(p_v - p)}{k_p p_v}, 0 \right) \right\} \quad (8)$$

$$\dot{m}^+ = k_l \frac{\rho_v \alpha_v}{t_\infty} \min \left\{ 1, \max \left(\frac{(p - p_v)}{k_p p_v}, 0 \right) \right\} \quad (9)$$

여기서 $k_l = \tau_{ref} / \tau_{relax}$ 이며, τ_{ref} 는 기준 시간(reference time) 을 의미하여, τ_{relax} 는 완화 시간(relaxation time)을 의미한다. 그리고 k_p 는 조절(scaling) 상수를 의미하고 p_v 는 기화압력을, t_∞ 는 기준 유동시간을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 자연공동(natural cavitation) 유동장 해석을 위해 본 실험실에서 개발하여 보유하고 있는 코드[11,12]를 사용하여 검증은 하였고, 이를 바탕으로 비응축성 가스 영향이 고려된 다상 유동장 해석코드로 확장하였다. 그리고 자유표면 영향을 고려한 환기공동 유동장 해석 코드 개발 및 검증은 NACA0012 수중익형을 이용하여 비교 해석하였다.

3.1 캐비테이션 유동 코드 검증

먼저 반구형 실린더 주변의 자연공동 유동장 해석을 검증하였다. 계산 조건은 Rouse and McNown[13]이 제시한 조건으로 캐비테이션 수(Cavitation number)는 0.2, 0.3, 0.4이고, 레이

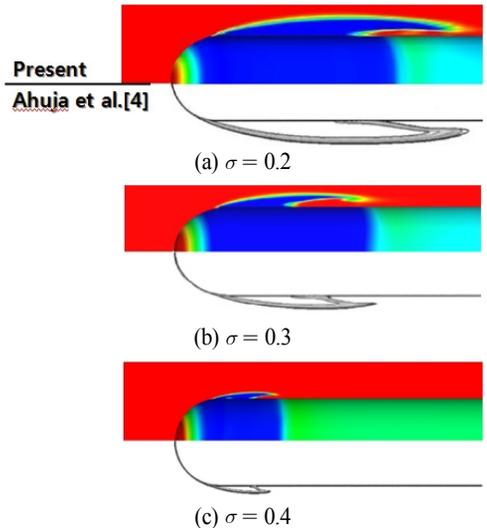


Fig. 3 Natural cavity and pressure contours of the hemispherical cylinder at $\sigma = 0.2, 0.3, 0.4$

놀즈 수(Reynolds number)는 1.36×10^5 이며, 상관식은 아래와 같다.

$$Re = \frac{\rho_\infty U_\infty D}{\mu_\infty} \quad (10)$$

Fig. 1은 반구형 실린더 주변의 자연공동 유동장 해석을 검증하기 위하여 사용한 격자로 1block으로 구성하였다. Fig. 2는 반구형 실린더 형상에서 정체점으로부터 무차원화 된 벽면에 따른 여러 가지 캐비테이션 수에 관한 표면 압력을 Rouse and McNown[13]의 실험값과 비교하여 보여주고 있다. 캐비테이션 수 0.2, 0.3, 0.4에 관하여 해석 결과, 실험값과 비교 하였을 때 실험값과 잘 일치되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 현재의 결과 값과 Ahuja et al.[4]의 부분공동, 표면압력을 비교하여 놓은 그림이다. 두 결과를 비교하여 보면 잘 일치하는 것을 알 수 있고, 캐비테이션 수가 작아질수록 공동의 길이가 길어짐을 확인할 수 있다.

Fig. 4은 NACA0012 수중익형이 받음각이 6° 일 때의 부분 공동을 나타낸 그림이다. (a)는 본 연구에 의한 계산결과와 (b)의 실험값[14] 및 Leroux et al.[14]의 계산결과와 비교하여 보면 캐비테이션이 발달하고 붕괴하는 경향이 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.2 환기공동 전산유동 해석

위의 코드 검증을 토대로 비응축성 가스(non-condensable gas)에 의한 환기공동이 포함된 수중운동체 주위의 다상 유동장

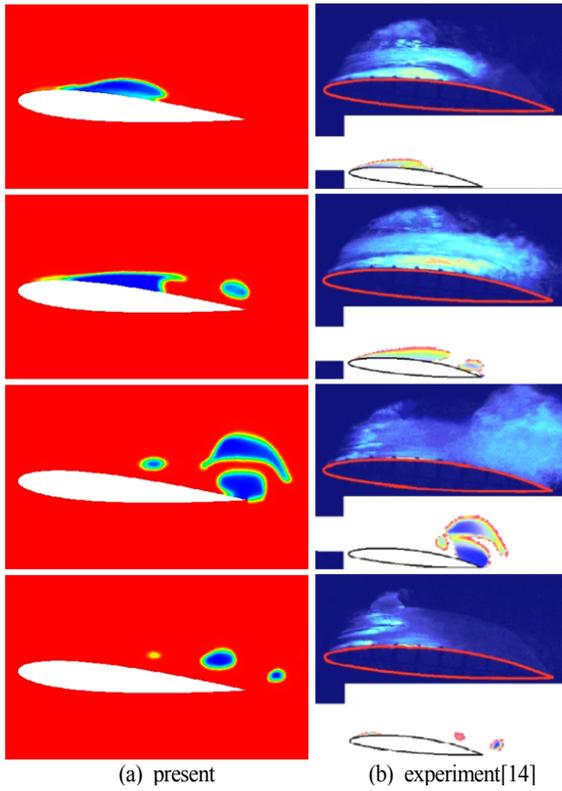


Fig. 4 Comparison of cavitation of NACA0012 hydrofoil

해석 코드를 개발하였다.

Fig. 5의 (a)는 본 연구에 사용된 격자로 수중 운동체 후미부 비음축성 가스의 유동 해석을 위하여 다중 격자를 이용하였다. 그리고 환기 공동을 위한 조건으로 Fig. 5의 (b)와 같이 반구형 실린더 앞부분의 하나의 격자점에서 비음축성 가스를 분사하여 주고 수중운동체 후미부는 포물선형 분포로 분사한다. 이 비음축성 가스는 액상, 기상과 함께 수중운동체 주위의 다상 유동장 중 한 부분으로 전산 해석이 수행된다.

본 연구에서 비음축성 가스가 특정 시점에서 분사되는 경우를 고려하였고, 분사되는 속도를 변화 시켜서 전산해석을 수행하였다. 여기서 t^* ($t^* = t \times U/L$)는 무차원시간(non-dimensional time)을 나타낸다.

Fig. 6은 비음축성 가스의 분사 시점이 $t^*=80$, 분사 속도는 U_∞ 일 때의 자연공동, 비음축성 가스를 나타낸 그림을 시간대 별로 나타낸 것이다. 여기서 Fig. 6(1)은 자연공동의 기화체적률(vapor volume fraction)이며, (2)는 비음축성 가스의 기화체적률을 나타낸 것이다. Fig. 6(a) $t^*=60$ 은 비음축성 가스가 분사되기 전으로 자연공동을 나타내고 있고, $t^*=80$ 이후인 (b), (c)는 비음축성 가스 분사가 있는 순수 환기공동과 액상

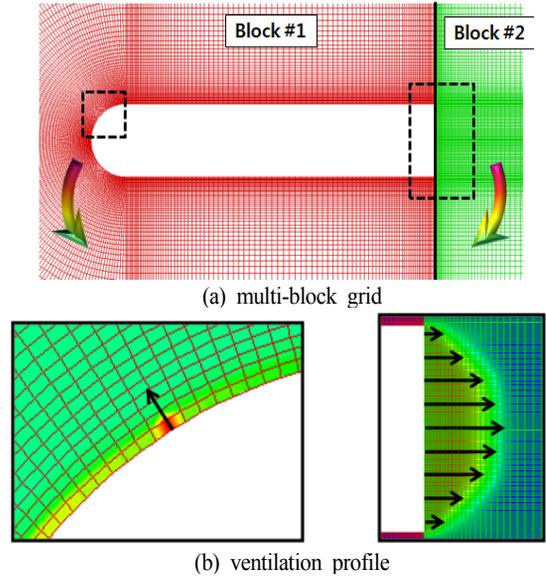


Fig. 5 Grid and boundary condition

의 분포를 나타내고 있다. 비음축성 가스의 분사가 있으면 환기공동으로 인하여 반구형 실린더 주변을 공동이 더욱 효과적으로 감싸는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 같은 조건에서의 분사되는 비음축성 가스의 속도를 $2U_\infty$ 일 때의 자연공동, 비음축성 가스를 나타낸 그림이다. Fig. 6의 비음축성 가스의 분사 속도가 $U_{jet} = U_\infty$ 일 때와 비교하여 보면, 비음축성 가스의 분사 속도가 $U_{jet} = 2U_\infty$ 일 때, 시간이 지남에 따라 공동의 변동(fluctuation)이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 공동의 변동은 분사 가스의 속도는 $2U_\infty$ 이고 수중운동체 주변의 속도는 U_∞ 로 속도의 차이로 인해 발생한다.

이와 같이 공동이 수중운동체 전체에 걸쳐 형성되면 항력이 급격하게 떨어지게 되며, 그 결과 수중 운동체가 물속에서 이동하는 것이 아닌 공동에서 이동 할 수 있다. 따라서 비음축성 가스를 사용한 환기공동은 수중운동체의 초공동을 위한 공동형성에 이점이 있다고 할 수 있다.

3.3 자유표면 영향 고려

지금까지 환기공동을 이용한 초공동에 대하여 두 가지 조건에 대해 해석을 수행 하였고, 이를 바탕으로 자유표면의 영향이 고려된 코드개발을 하였다.

자유표면의 상승/하강을 알아내기 위해서 자유표면에 대한 동역학적 조건과 운동학적 조건을 이용하였다. 동역학적 조건과 운동학적 조건을 고려하면 자유표면에서의 상승/하강은 다음과 같은 함수가 된다.

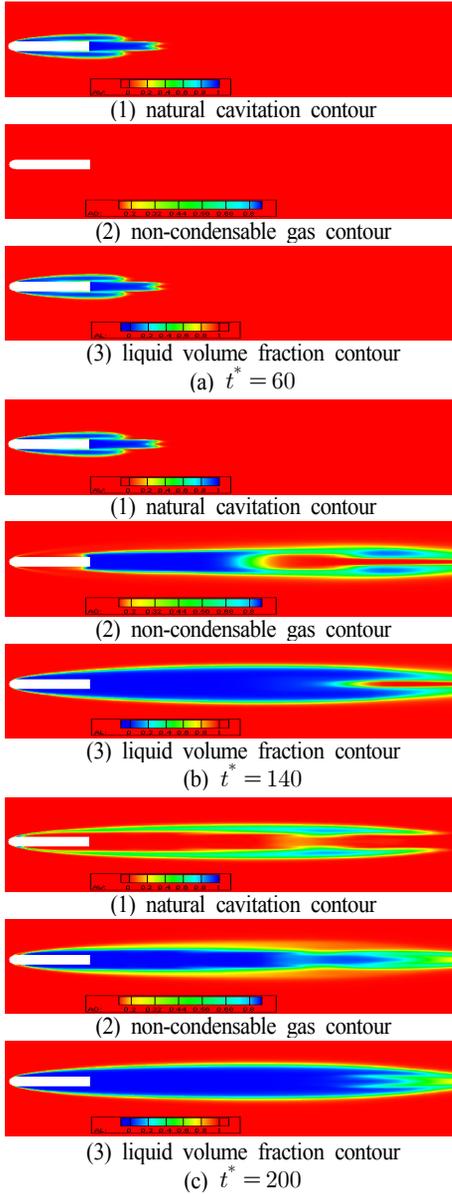


Fig. 6 Ventilated cavitation at $\sigma = 0.1$
(speed of non-condensable gas $t^* = 80, U_{jet} = U_{\infty}$)

$$y = \tilde{\eta}(x, z, t) \tag{11}$$

Free surface에 대한 경계조건 : 자유표면은 유동과 함께 움직여야만 하고

$$p = constant \tag{12}$$

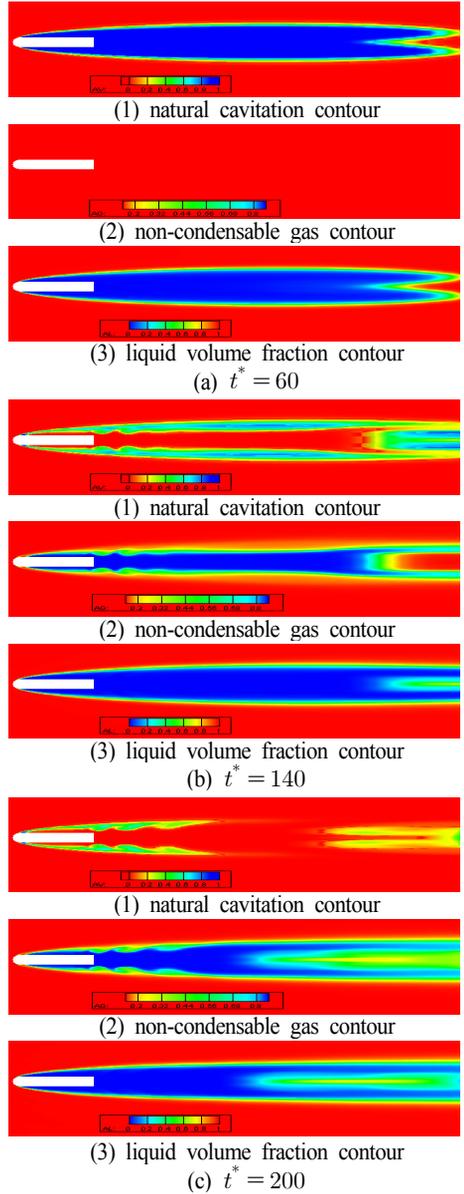


Fig. 7 Ventilated cavitation at $\sigma = 0.1$
(speed of non-condensable gas $t^* = 80, U_{jet} = 2U_{\infty}$)

$$\frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial t} + V \cdot \nabla \tilde{\eta} = v \tag{13}$$

여기서 $\tilde{\eta}$ 는 자유표면의 상승/하강을 나타낸다. 축의 관점인 normal-tangential 좌표계에서 식 (13)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

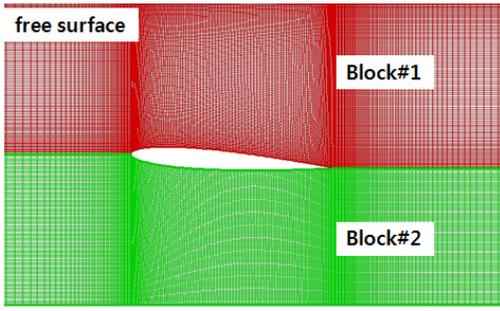


Fig. 8 Grid system

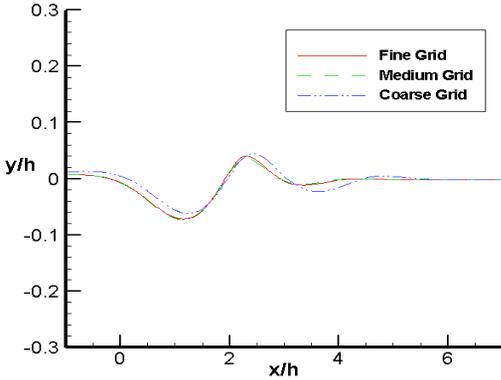


Fig. 9 Comparison of free surface profile in three set of grid system, coarse (178x70), medium (251x85), and fine (300x100)

$$\frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial t} + U_n \frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial x_n} + U_t \frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial x_t} = v \tag{14}$$

여기서 아래 첨자 n, t는 각각 normal한 방향과 tangential한 방향을 의미한다.

현재 발표된 자료들에서 자유표면을 고려한 반구형 실린더 형상이나 어뢰와 유사한 형상들에 대한 해석 결과 값이나 실험값은 찾아보기 힘들다. 따라서 많은 실험값과 해석 결과 값들이 있는 NACA0012 수중익형의 형상으로 코드 개발 및 검증 수행하였다.

Fig. 8은 해석을 수행하기 위한 격자 구조를 나타낸 그림으로 2block로 구성을 하였으며, 윗부분이 자유표면에 해당된다. 그리고 비응축성 가스의 분사 조건은 수중익형이 앞부분에서 분사 되도록 하였다.

먼저 전산해석 과정에서 계산의 수렴성을 검증하기 위해 세 가지 서로 다른 격자개수를 사용하였고, 각각 계산에 적용하여 격자개수가 자유표면에 미치는 영향을 비교하였으며, Fig. 9에서 보여주고 있다. 해석의 간편성을 위해 Fig. 8에서 보여

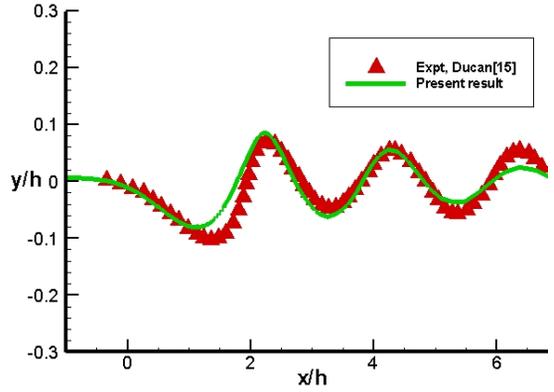
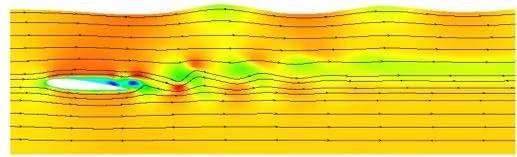
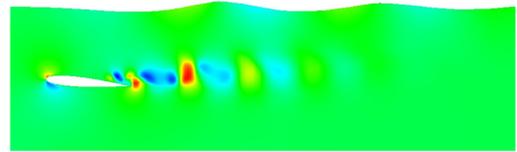


Fig. 10 Comparison of free surface profile



(a) iso-u velocity component



(b) iso-v velocity component

Fig. 11 Velocity contour for NACA0012 hydrofoil

주는 block-1과 block-2의 격자개수를 동일하게 사용하였고, 각각 178x70, 251x85, 300x100이다. Fig. 9에서 미세 격자(fine grid)와 중간 격자(medium grid)에 대한 자유표면의 변화는 상대적으로 거친 격자(coarse grid)에 대한 자유표면의 변화와 비교했을 때 비교적 일치하다고 볼 수 있다.

Fig. 10은 자유표면의 상승/하강 추세를 보여주고 있다. 자유유동 속도는 0.8m/s이고, 수중익형의 받음각은 5°이며, 몸체가 자유표면으로부터 0.193m 깊이(h)에 있을 때 계산을 진행하였다. 그림에서 알 수 있듯이 Duncan[15]의 실험값과 비교하였을 때 자유표면의 상승/하강 높이와 파장(wavelength)이 비교적 잘 일치하다.

Fig. 11은 x방향 속도 성분과 y방향 속도 성분을 나타내고 있다. 자유표면 근처의 속도의 변화에 따라 자유표면이 상승/하강을 하는 것을 볼 수 있다.

위의 검증을 바탕으로 환기공동 코드로 확장 하여 자유표

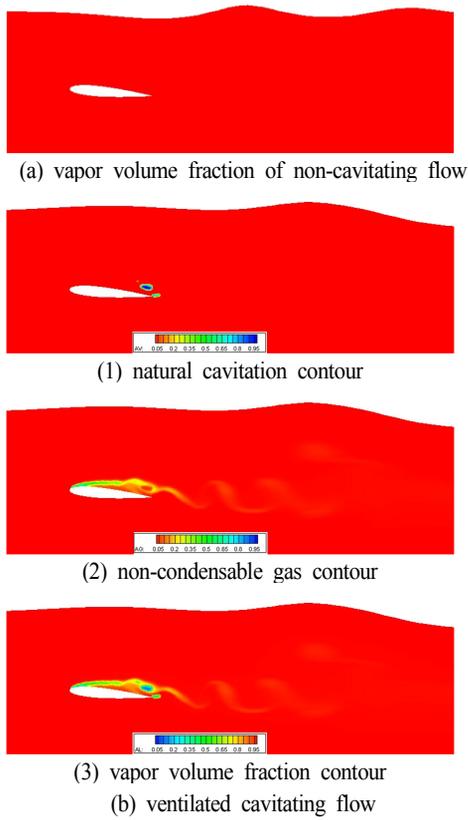


Fig. 12 Comparison of non-cavitating flow and ventilated cavitating flow with free surface effect for $U_{jet} = U_{\infty}$

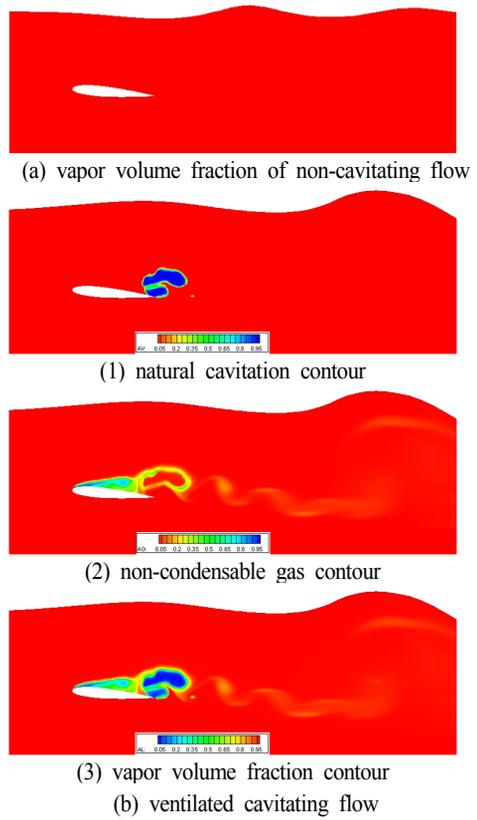


Fig. 13 Comparison of non-cavitating flow and ventilated cavitating flow with free surface effect for $U_{jet} = 2 U_{\infty}$

면을 고려한 전산해석을 수행 하였다. 환기공동을 위한 조건으로 수중익형 앞부분에 비응축성 가스를 분사 하도록 적용 하였다. 이때 수중익형의 받음각은 5° 이고, 캐비테이션 수는 0.5, 프루드 수(Froude number)는 6.47이다.

Fig. 12은 수중익형 주위에 공동이 없는 경우와 환기 공동이 있는 경우를 비교하여 놓은 그림이다. 이때 분사되는 비응축성 가스의 분사속도는 U_{∞} 이다. Fig. 12(a)는 공동이 없는 경우를 나타낸 그림으로 수중익형의 앞부분에서 자유표면이 하강하는 것을 알 수 있고, (b)는 환기공동이 있는 경우로 공동이 없는 경우와 달리 수중익형의 앞부분에서 자유표면이 상승을 한다. 이는 공동이 자유표면의 변화에 두드러진 영향을 가져오는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 Fig.12와 같은 조건에서의 비응축성 가스의 분사속도가 $2U_{\infty}$ 일 때 공동이 없는 경우와 비교하여 놓은 그림이다. Fig.12와 비교하여 보면 분사되는 비응축성 가스의 조건에 따라 자유표면의 상승높이가 다른 것을 알 수 있다.

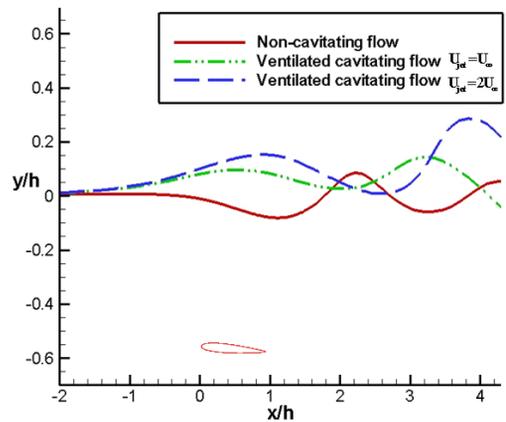


Fig. 14 Comparison of wave profiles

Fig. 14는 Fig. 12와 Fig. 13에 대응되는 각 조건별 파형을 비교해 놓은 그래프이다. 공동이 없는 경우에는 수중익형 윗

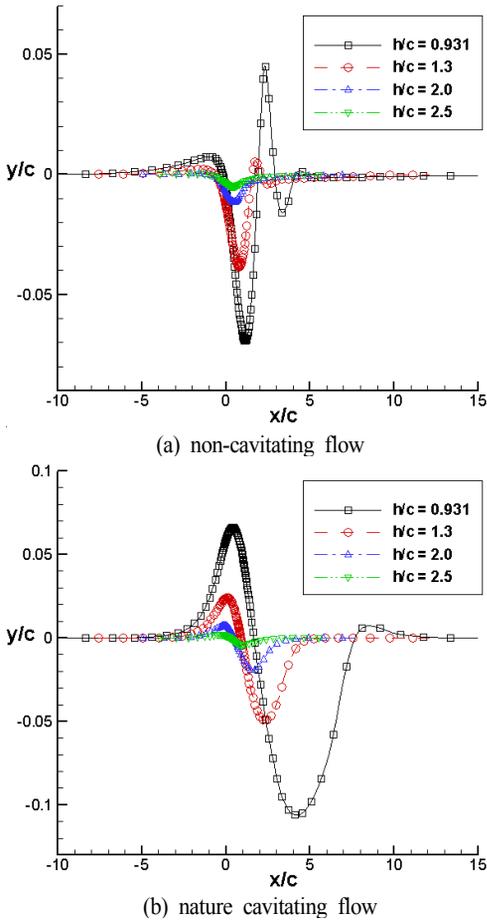


Fig. 15 Effect of submergence depth ratio(h/c) on free surface elevation

부분의 자유표면이 하강을 하고, 환기공동이 있는 경우에는 수중익형 윗부분의 자유표면이 상승한다. 또한 환기공동이 있는 경우에 자유표면의 상승높이가 공동이 없는 경우보다 더 높고, 분사되는 가스의 속도가 높을수록 자유표면이 더욱 많이 상승하는 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 공동이 없는 경우와 공동이 생성되는 조건에서 수중익형이 자유표면으로부터 잠수 된 깊이(h)가 자유표면에 미치는 영향을 알고자 하여, 익형의 길이(chord line)을 기준으로 잠수 된 깊이를 증가시키면서 자유표면의 변화를 고찰하였다. 그림에서 자유표면의 최대진폭은 상대적으로 비율이 증가하면서 감소하고, 공동이 생성되면서 증가하고 있으며, 수심의 비율이 2.5보다 크게 되면 공동은 성되지만 자유표면은 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

본 연구를 바탕으로 수중운동체가 은밀히 기동할 수 있는 추진 조건 및 수심 등을 비교적 정확히 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 반구형 실린더형상을 이용하여 비응축성 가스의 영향을 고려한 초공동현상에 대한 유동 해석을 수행하였고, 나아가 수중운동체가 자유표면 근처에서 이동을 할 경우 자유표면의 변화를 알아보기 위하여 자유표면 영향이 고려된 코드를 개발하였다. 지배 방정식으로 3차원 Navier-Stokes 방정식을 이용한 균일 혼상류 모델을 이용하여 기상과 액상의 변환과정이 등온이라는 가정 하에 비응축성 가스를 추가하여 해석 하였다. 해석 결과 환기공동이 고려되지 않은 경우 자연공동이 수중운동체 전체를 감싸는데 한계가 있었지만, 환기공동을 이용하여 보다 빠르고 안정적으로 수중운동체 전체를 감싸게 되는 초공동 현상을 확인 할 수 있었다. 또한 비응축성 가스의 분사 속도가 $2U_\infty$ 인 경우에는 불안정성이 두드러지게 나타나는 것을 확인하였다. 그리고 자유표면의 영향을 고려하기 위하여 동력학적 조건과 운동학적 조건을 이용하였으며, NACA0012 수중익형에 적용하여 Duncan[15]의 실험값과 비교 해보았을 때 실험값에 수렴하였고, 나아가 비응축성 가스의 분사 조건에 따라 자유표면의 변화를 관찰 하였다.

본 연구를 통하여 수중운동체가 은밀히 기동할 수 있는 추진 조건 및 수심등을 예측할 수 있을 것이며 또한 수중운동체의 운행이 수면과 수중운동체에 미칠 수 있는 영향을 고려하는데 적용할 수 있다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20113020020010).

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 2000, Kunz, R.F., Boger, D.A. and 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.
- [3] 2001, Kunz, R.F., Lindau, J.W., Billet, M.L. and Stinebring, D.R., "Multiphase CFD modeling of developed and supercavitating flows," Applied Research Lab. Rept.

- [4] 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.
- [5] 2004, Owis, F.M. and Nayfeh, A.H., "Numerical simulation of 3-D incompressible, multi-phase flows over cavitating projectiles," *European Journal of Mechanics Fluids*, Vol.23, pp.339-351.
- [6] 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*.
- [7] 1998, Park, W.G. and Kim, K.C., "Numerical study on the free surface flow induced by spinning shaft," *Computational Fluid Dynamics Journal*, Vol.6, No.4.
- [8] 2006, Merkle, C.L., Li, D. and Venkateswaran, S., "Multi-disciplinary computational analysis in propulsion," *Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA Paper 2006-4575*.
- [9] 2009, Ha, C.T., Park, W.G. and Merkle, C.L., "Multiphase flow analysis of cylinder using a new cavitation model," *CAV2009 7th International Symposium on Cavitation*, Paper No.99.
- [10] 2010, Ha, C.T. and Park, W.G., "Application of strongly implicit procedure solver to solve partial- and super-cavitating Flows," *ICCES MM'10*, p.38.
- [11] 2008, Park, W.G., Koo, T.K., Jung, C.M. and Lee, K.C., "Numerical simulation of cavitating flow past cylinders," *Proceedings of Korea-Japan CFD Workshop*, pp.327-333.
- [12] 2009, Kim, B.S., Lee, B.W., Park, W.G. and Jung, C.M., "Numerical analysis of partial cavitating flow past axisymmetric cylinders," *KSME-B.33.2.69-79*.
- [13] 1948, Rouse, H. and McNow, J.S., "Cavitation and pressure distribution head forms at aero angle of yaw," *State University of Iowa Studies in engineering*, Bulletin 32.
- [14] 2005, Leroux, J.B., Oliver, C.D. and Jacques, A.A., "A joint experimental and numerical study of mechanisms associated to instability of partial cavitation on two-dimensional hydrofoil," *Physics of Fluids*, Vol.17, pp.052101.
- [15] 1983, Duncan, J.H., "The breaking and non-breaking wave resistance of a two-dimensional hydrofoil," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.126, pp.507-520.