

# 전산해석과 실험의 비교검증을 통한 원통형 수중운동체 주위의 캐비테이션 유동현상 연구

박형만,<sup>1</sup> 박원규,<sup>\*1</sup> 정철민<sup>2</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 기계공학부, <sup>2</sup>국방과학연구소, 제6기술연구본부

## COMPARISON OF CFD SIMULATION AND EXPERIMENT OF CAVITATING FLOW PAST AXISYMMETRIC CYLINDER

H.M. Park,<sup>1</sup> W.G. Park<sup>\*1</sup> and C.M. Jung<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Mechanical Engineering,, Pusan Nat'l Univ.

<sup>2</sup>Naval System Development, Agency for Defense Development

*Cavitation causes a great deal of noise, damage to components, vibrations, and a loss of efficiency in devices, such as propellers, pump impellers, nozzles, injectors, torpedoes, etc., Thus, cavitating flow simulation is of practical importance for many engineering systems. In this study, a two-phase flow solver based on the homogeneous mixture model has been developed. The flow characteristics around an axisymmetric cylinder were calculated and then validated by comparing with the experimental results in the cavitation water tunnel at the Korea Ocean Research & Development Institute. The results show that this solver is highly suitable for simulating the cavitating flows. After the code validation, the cavity length with changes of water depth, angle of attack and velocity were obtained.. Cavitation inception was also calculated for various operational conditions.*

**Key Words** : 공동현상(Cavitation), 균일혼상류모델(Homogeneous Mixture Model), 예조건화(Pre-conditioning), Navier-Stokes 방정식(Navier-Stokes Equation), 초생 캐비테이션(Cavitation inception), 공동길이(Cavity length)

### 1. 서 론

고속으로 운항하는 수중 운동체 주위에서 압력의 급격한 강하에 의해 캐비테이션이 발생하는 지점이 발생하게 되며, 운동체 표면을 따라 캐비테이션이 생성과 소멸을 반복하면서 필연적으로 수중에 방사되는 소음을 증가시킨다. 특히 수중 운동체의 선수부에서는 형상 특성에 따라 캐비테이션이 다량 발생하게 되며, 여기서 발생하는 높은 준위의 소음은 수중 운동체 선수부에 위치한 음향탐지부 센서의 자체 소음으로 작용하게 되어 음향탐지부의 탐지 성능을 저하시키며, 특히 수

상함의 항적을 탐지하는 항적 센서를 덮게 되면 센서의 기능을 상실할 수 있다. 이러한 캐비테이션 현상을 예측하기 위해 최근 Navier-Stokes 방정식을 이용한 다양한 전산모델링이 수행되고 있는데, 이 연구는 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째 방법은 단상(single phase) 연속방정식을 이용하는 것으로 캐비테이션이 일어나는 국부적 지점의 압력을 증기압과 같다고 가정하며 전산해석은 오직 응축기체에 대해서만 행해지는 방법이다[1,2]. 2상 유동에서 액상과 기상 사이의 경계면은 위 가정에 따라 계산되며, 계산이 수행됨에 따라 캐비테이션이 일어나는 지점에 맞게 격자가 계속해서 새롭게 생성되어야한다. 그러나 이 방법은 복잡한 3차원 경계면을 포함하기 어렵기 때문에 간단한 문제로 제한되며, 다상 유동에서 응축기(condensable vapor)와 비응축기(non-condensable vapor)를 구별할 수 없는 단점이 있다[3]. 두 번째 방법은 액상과 기상의 경계면 상태가 열과 동적으로 평형 상태에 있다고 가정하여 액상과 기상의 연속방정식은 분리하여 해석하고 질량 유량은 소스항으로 추가하며 운동량 방정식과 에너지 방정식

Received: February 3, 2012, Revised: March 16, 2012,

Accepted: March 20, 2012.

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

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2012.17.1.078>

© KSCFE 2012

에 대해서는 혼상(mixture)류의 방정식을 사용하는 방법으로 균일 혼상류(homogeneous mixture) 모델이라 일컫는다[4,5,6, 7,8]. 마지막 세 번째 방법은 액상과 기상에 대하여 각각의 연속방정식, 운동량 방정식과 에너지 방정식을 이용하는 방법이다[9,10].

균일 혼상류 모델은 현재 국외의 여러 연구팀들에 의해 개발 및 사용 중에 있는데, 본 연구에서는 기존 캐비테이션모델의 단점을 보완하여 최근 Merkle등[11]이 개발하고 Ha등[5,12]이 실제 유동장에 적용해 전산해석 응용성을 높인 새로운 캐비테이션 모델을 사용하였다. Merkle등[11]이 개발한 새로운 모델은 캐비테이션이 생성되기 시작하는 시점에서 상변화가 보다 안정적이고 부드럽게(smooth) 될 수 있도록 형상화하였으며, 기존 캐비테이션 모델이 모델 상수에 대한 의존도가 높은 점을 보완하여 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 캐비테이션 모델이다.

실린더 형상에 대한 캐비테이션 실험은 세계 각국에서 활발히 수행되어지고 있는 것으로 알려져 있으나, 기초연구분야를 제외하고는 대외적인 논문발표나 자료의 공개가 이루어지고 있지 않기 때문에 실린더 형상의 캐비테이션 유동해석 결과는 연구자들 대부분이 Rouse & McNowan[13]의 실험결과에 의존하여 전산해석 결과를 비교검증하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 한국해양연구원의 중형 캐비테이션 터널에서 수행된 원통형 수중운동체 주위에 발생하는 캐비테이션 실험결과와 본 해석코드를 이용한 해석 결과를 비교함으로써 캐비테이션 전산해석 코드를 검증하였다. 또한 검증된 코드를 사용하여 캐비테이션의 거동 및 특성을 예측하기 위해 다양한 속도, 수심, 받음각 조건을 적용하여 전산해석을 수행하였으며, 캐비테이션이 발생하기 시작하는 초생점에 대한 해석을 수행하였다.

## 2. 지배방정식

본 연구의 지배방정식은 균일 혼상류 모델을 적용하여 액상과 기상에 대해서 각각의 연속방정식을 풀고 있으며, 운동량 방정식은 혼상류에 대해 풀게 된다. 또한 예조건화(pre-conditioning)를 위해 Merkle등[11]과 Owis등[4]의 기법을 이용하고 있다.

$$\left(\frac{1}{\rho_m \beta^2}\right) \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v}\right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \left(\frac{\alpha_l}{\rho_m \beta^2}\right) \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial \alpha_l}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_l u_j) \\ = (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \left(\frac{1}{\rho_l}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_m u_i u_j) \\ = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{m,t} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

식 (1)-(3)에서  $p, u, \rho, \alpha, \mu$ 는 각각 압력, 속도, 밀도, 체적분율(volume fraction) 및 점성계수를 의미하며  $t, \tau$ 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), 하첨자  $t$ 는 난류를 의미한다. 연속방정식의 우변에 나타나는  $\dot{m}^+$ 는 상변화에 의해 기상이 응축되는 질량변화량(소스항)을 의미하며  $\dot{m}^-$ 는 반대로 액상이 기화하는 증발량을 의미한다. 혼상류에서의 밀도인 혼상 밀도( $\rho_m$ )와 혼상 점성( $\mu_m$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_m = \rho_l \alpha_l + \rho_v \alpha_v \quad (4)$$

$$\mu_m = \mu_l \alpha_l + \mu_v \alpha_v \quad (5)$$

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

$$\begin{aligned} \Gamma_e \frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \Gamma_v \frac{\partial \hat{Q}}{\partial \tau} + \frac{\partial (\hat{E} - \hat{E}^v)}{\partial \xi} \\ + \frac{\partial (\hat{F} - \hat{F}^v)}{\partial \eta} + \frac{\partial (\hat{G} - \hat{G}^v)}{\partial \zeta} = \hat{S} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\hat{E}, \hat{F}, \hat{G}$ 와  $\hat{E}^v, \hat{F}^v, \hat{G}^v$ 는 각각의 변환된 대류항(convective flux term)과 변환된 점성항(viscous flux vector)이며,  $\hat{Q}$ 는 유동벡터,  $\hat{S}$ 는 소스항으로써 식 (7)과 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{Q} = \frac{Q}{J} = \frac{1}{J} [p, u, v, w, \alpha_l]^T \quad (7)$$

$$\hat{S} = \frac{1}{J} \left\{ (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \left( \frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v} \right), 0, 0, 0, (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \frac{1}{\rho_l} \right\}^T \quad (8)$$

그리고 행렬  $\Gamma_e$ 와  $\Gamma_v$ 는 다음의 식 (9)와 식 (10)으로 정의되며, 행렬  $\Gamma$ 가 예조건화 행렬이 된다.

$$\Gamma_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_m & 0 & 0 & u \Delta \rho \\ 0 & 0 & \rho_m & 0 & v \Delta \rho \\ 0 & 0 & 0 & \rho_m & w \Delta \rho \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \left(\frac{1}{\rho_m \beta^2}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_m & 0 & 0 & u \Delta \rho \\ 0 & 0 & \rho_m & 0 & v \Delta \rho \\ 0 & 0 & 0 & \rho_m & w \Delta \rho \\ \left(\frac{\alpha_l}{\rho_m \beta^2}\right) & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

식 (9),(10)에서  $\Delta \rho \equiv \rho_l - \rho_v$ 로 정의되며  $\beta (=1)$ 는 예조건화 상수이다[6]. 예조건화를 하는 이유는 기상과 액상의 음속이 매우 다르고, 특히 기상과 액상이 50%씩 혼재하는 혼상류에서는 음속이 10m/s 정도에 불과하여 아주 저속에서도 초음속이 될 수 있으므로 기상과 액상의 상변화를 반복하는 캐비테이션 유동을 해석하기 위해서는 비압축성 유동에서 초음속 압축성 유동까지 동시에 처리할 수 있는 수치해석 기법이 필요하고, 각 상(phase)에서 음속의 극심한 차이에 의해 발생하는 수치 해석적 경직성(stiffness) 문제로 인해 수렴성이 떨어지거나 발산하는 문제를 방지하기 위해 지배방정식에 예조건화를 취하게 된다.

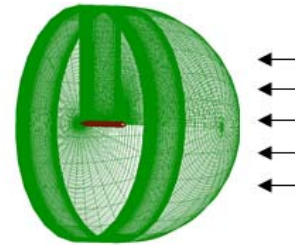
### 3. 캐비테이션 모델

캐비테이션 모델은 균일 혼상류 모델을 바탕으로 액상에서 기상으로의 진행과정인  $\dot{m}^-$  (evaporation rate)과 기상에서 액상으로의 진행과정인  $\dot{m}^+$  (condensation rate)를 도입하여 상변화 과정의 물질전달(mass transfer)을 수학적으로 모델링하게 되는데,  $\dot{m}^+$ 과  $\dot{m}^-$ 는 압력과 액상/기상 체적 분율에 대한 식으로써 식 (11)과 식 (12)로 나타내어진다. 이 두 함수는 기존 캐비테이션 모델에서 액상과 기상이 모델 상수에 종속적인 단점을 개선해 Merkle등[11]이 개발한 것으로, 최근 Ha[5,12]등이 실제 유동장에 적용해 응용력을 높였다.

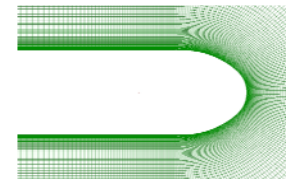
$$\dot{m}^- = -k_v \frac{\rho_v \alpha_l}{t_\infty} \min \left\{ 1, \max \left( \frac{(p_v - p)}{k_p p_v}, 0 \right) \right\} \quad (11)$$

$$\dot{m}^+ = k_l \frac{\rho_v \alpha_v}{t_\infty} \min \left\{ 1, \max \left( \frac{(p - p_v)}{k_p p_v}, 0 \right) \right\} \quad (12)$$

식 (11)-(12)에서  $t_\infty$ 는 특성유동시간(characteristic flow time)이고,  $k_v$ 는 증발계수(evaporation coefficient)이며,  $k_l$ 는 응축계수(condensation coefficient)이다.  $k_p$ 는 수치적 안정성을 지배하는 요소로서 공동모델에 미치는 영향을 무시할 수 있는 정도의 작은 값을 취하였다. 본 연구에서는 기준값으로  $k_v = 100.0$



(a) far field grid



(b) near field grid

Fig. 1 Grid system

과  $k_v/k_l = 10.0$ 을 사용하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 코드 검증

한국해양연구원의 캐비테이션 터널에서 수행되었던 실험결과를 동일한 형상과 조건에 대해 해석하고 비교분석하였다. 수중 운동체의 형상은 유체역학적으로 안정적이고 항력뿐만 아니라 캐비테이션 관점에서 우수할 것이라 생각되는 형상으로 모델링한 것이다.

해석에서는 Fig. 1과 같이 실험과 동일한 형상으로 모델링한 238×100×28로 구성된 격자계를 사용하였으며, 실린더의 표면으로 격자를 집중시켜 보다 정확한 결과를 얻을 수 있도록 하였다. 해석은 레이놀즈 수,  $Re = 7.2 \times 10^6$ 과 캐비테이션 수,  $\sigma = 0.4, 0.46, 0.48$  일 때에 대해 수행되었다.

실험은 수조의 정압이  $p_\infty = 0.2\text{bar}, 0.22\text{bar}, 0.23\text{bar}$  일 때의 세 가지 경우에 대해서 수행되었으며, 이때 유체의 증기압  $p_v = 3570\text{Pa}$ , 유체의 밀도  $\rho = 997.2\text{kg/m}^3$ , 유체 속도  $V_\infty = 17.5\text{knots}$ 와 같은 조건으로 실험이 수행되었다.

Fig. 2 b)는 실험 모형 주위에 발생한 캐비테이션을 고속카메라로 500fps로 촬영한 실험결과로서 충분한 캐비테이션이 발생하는 캐비테이션 수,  $\sigma = 0.46$  ( $p = 0.22\text{bar}, V_\infty = 17.5\text{knots}$ )에서 관찰을 수행하였다. 캐비테이션 시작선은 작은 변동만을 보이며 일정하게 나타난 반면 종료선은 깨어져 나가는 bubble에 의해 일정하게 나타나지 않고 변동을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

캐비테이션 실험결과와 비교하기 위해 실험과 동일한 형상

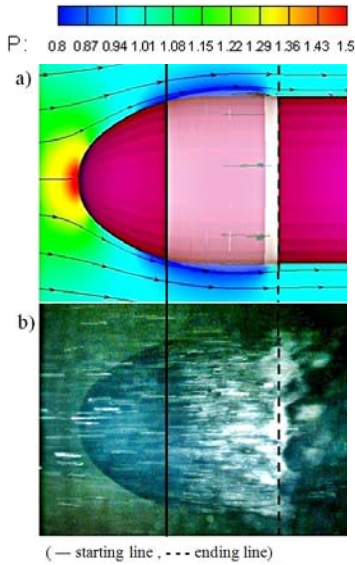


Fig. 2 Vapor volume fraction and flow field over a cylinder at  $\sigma=0.46$ , a) present analysis, b) experiment (isosurface at a value of 0.99)

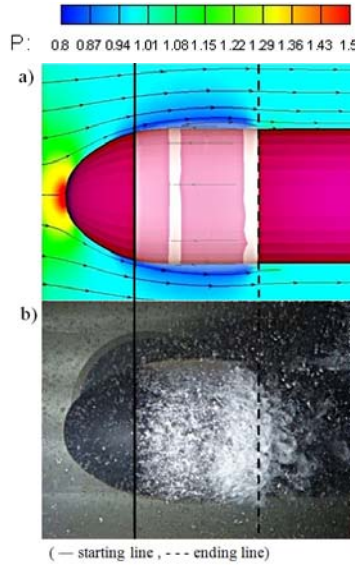


Fig. 3 Vapor volume fraction and flow field over a cylinder at  $\sigma=0.4$ , a) present analysis, b) experiment (isosurface at a value of 0.99)

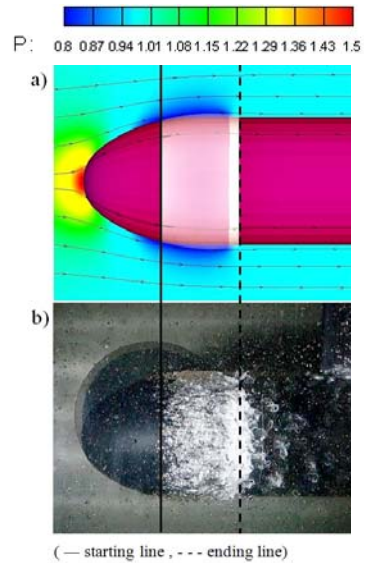


Fig. 4 Vapor volume fraction and flow field over a cylinder at  $\sigma=0.48$ , a) present analysis, b) experiment (isosurface at a value of 0.99)

과 조건에 대해 캐비테이션 유동해석을 수행하였고, 결과를 Fig. 2 a)와 같이 vapor volume fraction과 pressure contour로 나타내었다. Fig. 2 a)와 Fig. 2 b)를 starting line과 ending line을 통해 비교함으로써 유동 해석코드가 실험결과를 잘 예측하고 있는 것을 보여주고 있으며, Table 1에 캐비테이션 시작선과 종료선, 그리고 길이의 정확한 수치를 실험결과와 함께 나타내어 계산 결과가 잘 일치하고 있는 것을 보여주고 있다.

Fig. 3 b)와 Fig. 4 b)는 각각  $\sigma=0.4$ 와  $0.48$  일 때의 캐비테이션 실험을 일반카메라로 촬영한 자료이다. 실험 결과를 살펴보면  $\sigma=0.4$ 의 경우에  $\sigma=0.46$  일 때보다 캐비테이션의 길이가 길게,  $\sigma=0.48$ 의 경우에는  $\sigma=0.46$  일 때보다 캐비테이션의 길이가 짧게 나타나는 것을 확인하였다.

Fig. 3 a)와 Fig. 4 a)는 실험과 동일한 형상과 조건에 대해 해석한 vapor volume fraction과 pressure contour이며, Fig. 2의 비교 결과와 같이 해석결과가 실험의 캐비테이션을 비교적 잘 예측하고 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3 a)의 캐비테이션이 발생한 부분에서 띠처럼 나타나는 부분은 발생한 캐비테이션이 re-entrant jet에 의해 안으로 말려 들어가면서 생기는 공간에 의해 나타나는 것이다.

Fig. 5는 각각의 캐비테이션 수에 대한 원통형 수중 운동체의 표면 압력분포를 나타낸 것이다.  $-C_p$ 값이  $\sigma$  이하로 내려가는 지점에서 캐비테이션이 발생하고, 다시 올라가는 지점에서 캐비테이션이 소멸되므로 표면 압력분포를 통해 캐비테이션이 발생하고 소멸하는 위치를 알 수 있으며, 캐비테이션

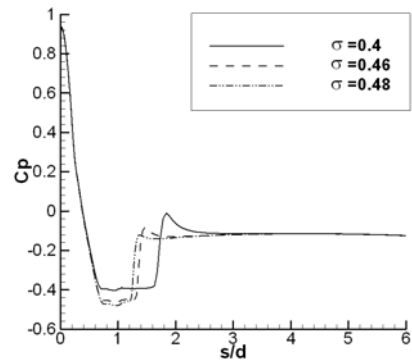


Fig. 5 Surface pressure distribution

Table 1 Cavity length (L/D)

Cavitation number		Start of L/D	End of L/D	Length of L/D
$\sigma=0.4$ (0.2bar)	Experiment	0.56 ~0.682	1.54 ~1.611	0.858 ~1.051
	Present analysis	0.546	1.499	0.954
$\sigma=0.46$ (0.22bar)	Experiment	0.565 ~0.661	1.266 ~1.286	0.605 ~0.721
	Present analysis	0.561	1.153	0.592
$\sigma=0.48$ (0.23bar)	Experiment	0.578 ~0.656	1.206 ~1.265	0.55 ~0.687
	Present analysis	0.573	1.108	0.535

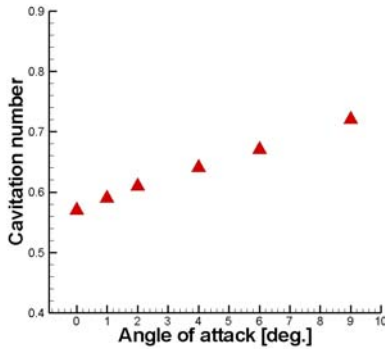


Fig. 6 Cavitation number at cavitation inception

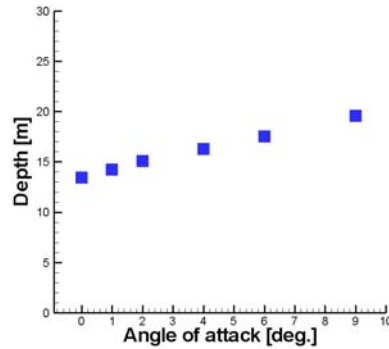


Fig. 7 Depth at cavitation inception

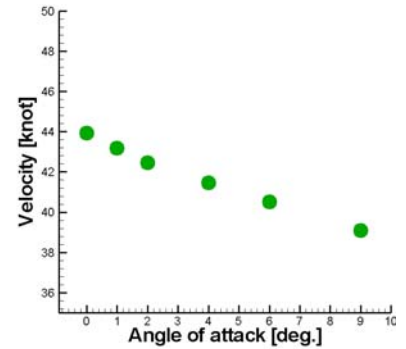


Fig. 8 Velocity at cavitation inception

수가 낮아질수록 캐비테이션의 길이가 길게 나타나고, 캐비테이션 수가 높아질수록 캐비테이션의 길이가 짧아지는 것을 확인할 수 있다.

Table 1은 캐비테이션 시작선과 종료선, 그리고 길이의 수치를 해석결과와 실험결과를 비교하여 함께 나타낸 것이며, 해석 결과와 실험결과가 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다.

Table 1의 캐비테이션 발생 위치를 살펴보면 해석결과가 실험결과보다 미세하게 앞에 위치하는 것을 볼 수 있는데, 이는 압력이 증기압보다 낮아지는 순간 이론상으로는 캐비테이션이 곧바로 발생해야하지만 실제 현상에서는 기화되는데 걸리는 시간 차이에 의한 것으로 사료된다[14].

### 4.2 캐비테이션 초생점(Cavitation inception)

캐비테이션이 생성되고, 소멸하기 시작하는 조건을 초생점이라고하며, 본 연구에서는 검증된 코드를 이용하여 받음각에 대해 캐비테이션 수, 속도, 수심의 초생점을 찾는 해석을 수행하였다. Fig. 6은 각 받음각별로 캐비테이션 수의 초생점에 대해 해석을 수행한 것이며, 받음각이 증가함에 따라 캐비테이션이 발생하는 캐비테이션 수가 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7은 수심의 초생점에 대한 결과이며, 받음각이 커질수록 더 높은 수심에서도 캐비테이션이 발생하는 것을 확인할 수 있고, Fig. 8은 속도에 대한 초생점을 해석한 것으로써 받음각이 커질수록 더 낮은 속도에서 초생점이 나타나는 것을 볼 수 있다.

### 4.3 운항 조건별 해석

실험 결과와의 비교를 통해 검증된 해석 코드를 사용하여 다양한 속도, 수심, 받음각에 대해 캐비테이션 유동해석을 수행하였다.

Fig. 9는 수심의 변화에 따라 다르게 발생하는 캐비테이션

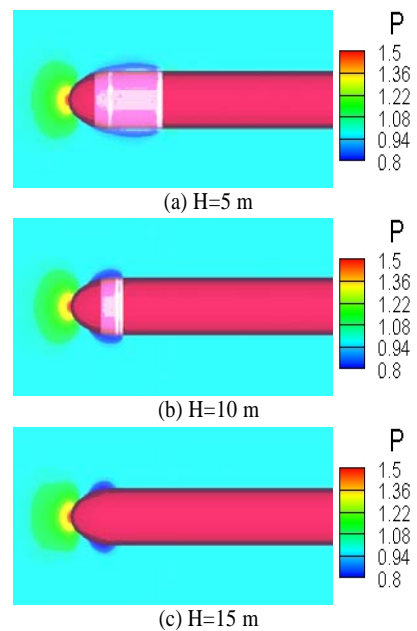


Fig. 9 Cavity length variation at various depths (Fixed  $\alpha=0^\circ$ ,  $V_\infty=55$  knots)

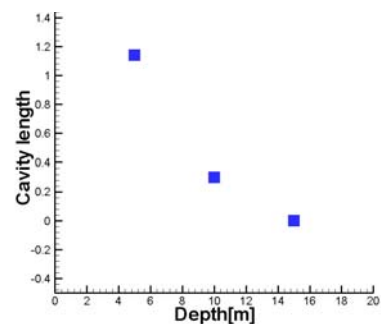


Fig. 10 Cavity length with change of depths (Fixed  $\alpha=0^\circ$ ,  $V_\infty=55$  knots)

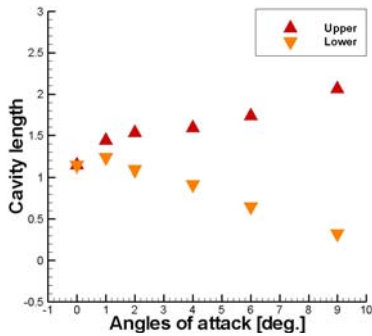


Fig. 11 Cavity length with change of angles of attack (Fixed  $V_{\infty}=55\text{knots}$ ,  $H=5\text{m}$ )

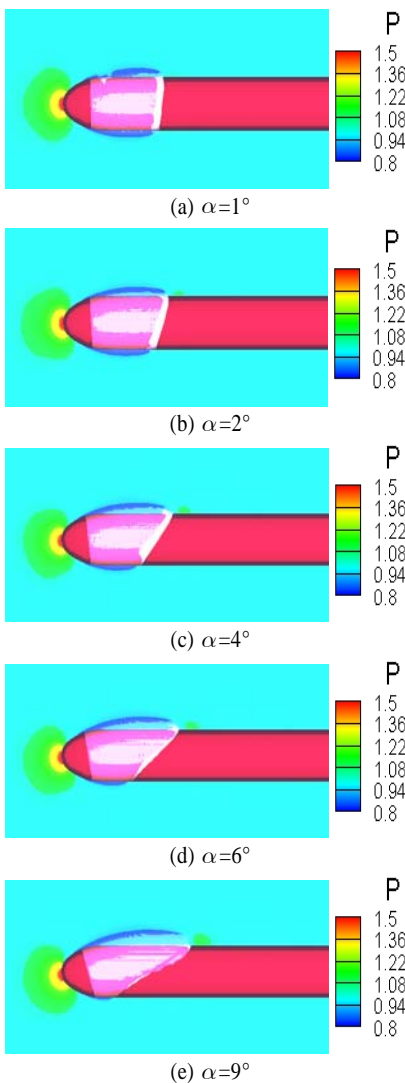


Fig. 12 Cavity length variation at various angle of attacks (Fixed  $V_{\infty}=55\text{knots}$ ,  $H=5\text{ m}$ ,  $\sigma=0.36$ )

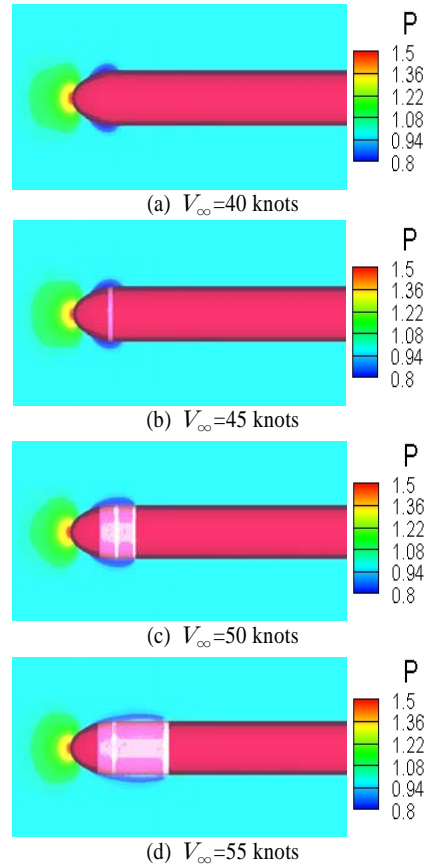


Fig. 13 Cavity length variation at various velocities (Fixed  $\alpha=0^\circ$ ,  $H=5\text{ m}$ )

을 고려하기 위해 다양한 수심 5m, 10m, 15m에 대해 해석한 vapor volume fraction과 pressure contour 이며, 속도와 받음각은 각각 55knots와 0°로 고정하여 계산되었다. 수심이 점차 깊어져 압력이 높아짐에 따라 캐비테이션 수가 증가하여 캐비테이션의 발생량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 수심의 변화에 따른 캐비테이션의 길이를 나타낸 그래프이며, Fig. 10의 결과와 같이 수심이 깊어질수록 캐비테이션의 길이가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11은 원통형 수중운동체가 갑작스런 해류의 영향이나 타 운동체의 후류유동의 영향을 받는 경우를 고려하여 다양한 받음각 1°~ 9°에 대해 해석을 수행한 캐비테이션의 길이를 나타낸 그래프이며, 상부와 하부의 길이를 따로 나타내어 캐비테이션의 치우침을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 받음각의 변화에 따른 vapor volume fraction과 pressure contour 이며, 받음각이 커질수록 치우친 방향의 캐비테이션이 하부의 캐비테이션 길이보다 길어지는 것을 볼 수 있다. 이때 속도와 수심은 각각 55knots와 5m로 고정하여 계



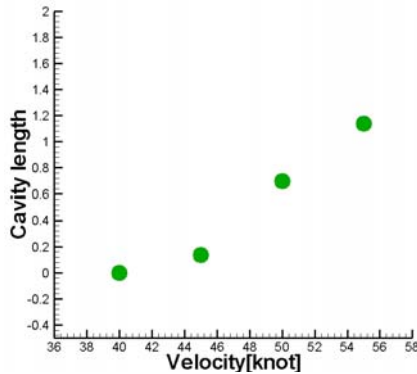


Fig. 14 Cavity length with change of velocities  
(Fixed  $\alpha=0^\circ$ ,  $H=5m$ )

산되었다.

Fig. 13은 속도의 변화에 따른 캐비테이션의 거동을 예측하기 위해 다양한 속도 40knots, 45knots, 50knots, 55knots에 대하여 해석한 vapor volume fraction과 pressure contour 이며, 수심과 받음각은 각각 5m와  $0^\circ$ 로 고정하여 계산되었다. Fig. 14는 받음각의 변화에 따른 캐비테이션의 길이를 나타낸 그래프이며, 속도가 증가함에 따라 캐비테이션 수가 감소하게 되고, 이에 따라 캐비테이션의 길이가 증가하는 것을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구는 원통형 수중운동체 주위에 발생하는 캐비테이션 유동을 해석하기 위한 기본 전산코드 개발과 검증은 목적으로 하였다. 3차원 내비어스톡스 방정식을 이용한 균일 혼상류 모델을 적용하여 해석하였으며, Merkle등[11]에 의해 개발된 새로운 캐비테이션 모델을 사용하였다. 해석코드의 검증을 위해 한국해양연구원에서 수행한 캐비테이션 실험과 동일한 조건인  $\sigma=0.4, 0.46, 0.48$ 과  $Re=7.2 \times 10^6$ 에 대해 해석을 수행하여 얻은 결과를 실험결과와 비교하였고, 캐비테이션의 시작선과 종료선 그리고 길이에 대해 잘 일치하는 것을 확인함으로써 본 유동해석 코드가 원통형 수중운동체 주위의 캐비테이션 거동 및 특성을 잘 예측할 수 있다는 것을 검증하였다. 또한, 검증된 코드를 이용하여 캐비테이션이 발생하고, 소멸하기 시작하는 초생점을 해석하였고, 다양한 조건(속도, 수심, 받음각)에서의 캐비테이션 유동 해석을 수행함으로써 조건에 따른 원통형 수중 운동체 주위의 캐비테이션 유동에 대해 예측하였다.

본 연구에서 개발하고 검증한 해석프로그램을 사용하여 향후 수중 운동체 주위의 캐비테이션 유동을 예측할 수 있을

것으로 기대되며, 초생점 해석과 다양한 조건에 대한 해석을 수행함으로써 원통형 수중운동체 설계 시에 캐비테이션의 발생을 예측하고, 다양한 조건에서의 캐비테이션 영향을 고려하는데 대한 기초 자료로서 활용 할 수 있을 것이다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- [1] 1994, Reboud, J.L. and Delannoy, Y., "Two Phase Flow Modeling of Unsteady Cavitation," *Proceeding 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] 2001, Kunz, R.F., Lindau J.W., Billet M.L. and Stinebring D.R., "Multiphase CFD Modeling of developed and supercavitating flows," Applied Reserch Lab. Rept.
- [4] 2004, Owis, F.M. and Nayfeh, A.H., "Numerical Simulation of 3-D Incompressible, Multi-phase Flows over Cavitating Projectiles," *European Journal of Mechanics B/Fluids*, pp.339-351.
- [5] 2009, Ha, C.T., Park, W.G. and Merkle, C.L., "Multiphase Flow Analysis of Cylinder Using A New Cavitation Model," *Proceedings of the 7rd International Symposium on Cavitation*, Michigan, USA.
- [6] 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*, Vol29, pp.849-875.
- [7] 2010, Huang, B., Wang, G.Y., Yuan, H.T., "A Cavitation Model for Cavitating Flow Simulations," *9th International Conference on Hydrodynamics*, Shanghai, China, pp.798-804.
- [8] 2011, 김승윤, 박원규, 정철민, "서로 다른 캐비테이션 모델을 이용한 실린더 주위의 캐비테이션 유동현상 전산해석," *한국전산유체공학회지*, 제16권, 제1호, pp.60-66.
- [9] 1998, Grogger, H.A. and Alajbegovic, A., "Calculation of

- The Cavitating Flow in Venture Geometries Using Two Fluid Model," Washington, D.C., USA, *ASME Paper FEDSM 98-5295*.
- [10] 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.
- [11] 2006, Merkle, C. Li, D. Sankaran, V. "Multi-Disciplinary Computational Analysis in Propulsion," Sacramento, USA, *AIAA 2006-4575*.
- [12] 2010, Ha C.T. and Park W.G., "Application of Strongly Implicit Procedure Solver to Solve Partial- and Super-Cavitating Flows," *ICCES MM'10*, Busan, Korea, ICML20100714039.
- [13] 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.
- [14] 1969, Christopher Brennen, "A numerical solution of axisymmetric cavity flows," , *J.Fluid.Mech.*, Vol.37, part4, pp.671-688.