

## 받음각 변화에 대한 수중익형의 캐비테이션 해석

강 태 진,<sup>1</sup> 박 원 규,<sup>\*1</sup> 정 철 민<sup>2</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 기계공학부

<sup>2</sup>국방과학연구소 6기술연구본부 2부

### CAVITATION FLOW ANALYSIS OF HYDROFOIL WITH CHANGE OF ANGLE OF ATTACK

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

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

<sup>2</sup>Naval Systems R&D Institute Division 2, 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, the cavitating flow simulation is of practical importance for many engineering systems. In the present work, a two-phase flow solver based on the homogeneous mixture model has been developed. The solver employs an implicit preconditioning, dual time stepping algorithm in curvilinear coordinates. The flow characteristics around Clark-Y hydrofoil were calculated and then validated by comparing with the experimental data. The lift and drag coefficients with changes of angle of attack and cavitation number were obtained. The results show that cavity length and lift, drag coefficient increase with increasing angle of attack.*

**Key Words** : 캐비테이션 유동(Cavitation flow), 수중익형(Hydrofoil), 수력학적 계수(Hydrodynamic coefficient), 균일혼상류모델(Homogeneous mixture model), 공동길이(Cavity length)

### 1. 서 론

캐비테이션은 액체 유동의 어느 국부적 지점에서의 압력강화의 효과로 인해서 액체가 증기화되는 현상으로 펌프, 터빈, 프로펠러, 노즐, 인젝터(injector) 등과 같은 다양한 수력학적 시스템에서 발생한다. 이러한 캐비테이션은 고속의 수중운동체 등에서 초월공동(super-cavitation)을 이용하여 항력을 감소시켜 주는 이점을 제공하기도 하지만, 극히 예외적이며, 압력이 상승하면서 기화된 기포의 붕괴로 인해 구조물의 물리적 손상뿐만 아니라 동력의 손실, 소음의 발생과 같은 부정적인 영향을 준다. 특히 축류형 펌프와 같은 터보기계에서는 캐비테이션의 발생에 의해 추진력이 감소되고 효율을 저하 시키는 원인이 되며, 블레이드의 마모를 야기시켜 수명이 단축되게 된다.

이러한 캐비테이션은 산업 전반에 걸쳐 여러 가지 시스템에서 관찰되며 모든 시스템에서의 캐비테이션 유동은 난류이고 물과 공기사이에서의 복잡한 상호 작용을 가지고 있다. 이러한 복잡한 물리적 현상은 전산 유체 해석기법으로 해석하는 과정에서 완전한 모델링이 쉽지 않아 예전에는 실험에 의존하였다. 하지만 최근 전산처리 기술이 발달함에 따라 전산유체역학(computational fluid dynamic)이 많이 이용되고 있다.

본 연구에서는 수력 축류형 터보기계의 캐비테이션 해석을 위한 기초 연구로서 수중 익형에 대한 캐비테이션의 전산 해석을 수행하였다.

많은 연구자에 의해 수중 익형에 관한 캐비테이션 연구가 수행되었는데, Merkle and Li[1]와 Naoya et al.[2]은 균일혼상류모델(homogeneous mixture model)[3,4,5]을 이용하여 수중익형에 대해 non-cavitating과 캐비테이션 유동해석을 수행하였고, Gotfred et al.[6]은 수중익형의 캐비테이션 해석을 통해 공동길이(cavity length)에 대해 연구하였다. Wang et al.[7]은 수중익형의 비정상 캐비테이션 해석을 수행하였다. Angelo et al.[8]은 NACA0015에 대해 열 효과에 따른 캐비테이션 유동

Received: February 4, 2014, Revised: June 5, 2014,

Accepted: June 5, 2014.

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

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2014.19.2.017>

© KSCFE 2014

에 대해 실험을 하였고, Amromin et al.[9]은 NACA0015에 대한 캐비테이션 유동의 실험을 통해 항력감소(drag reduction) 익형에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 액상과 기상의 경계면의 상태가 열과 동적으로 평형상태에 있다고 가정하고 액상과 기상의 연속방정식을 따로 풀며 운동량 방정식에 대해서는 혼상(mixture)류의 방정식을 이용하는 균일혼상류모델을 사용한다. 그리고 수력 측류형 터보기계는 큰 폭의 깃각(blade angle)이 존재하기 때문에 수중익형에서는 다양한 받음각에 대해 캐비테이션의 전산 해석을 수행하였다.

## 2. 지배방정식 및 수치해석방법

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 지배방정식으로 3차원 내비어-스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 사용하고 있는데, 균일혼상류모델을 적용하였다. 연속방정식은 액상과 기상에 대해 각각 풀고 있으며 운동량 방정식은 혼상류(mixture flow)에 대해서 계산한다.

$$\frac{\partial \rho_v \alpha_v}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_v \alpha_v u_j)}{\partial x_j} = -(\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_l \alpha_l}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_l \alpha_l u_j)}{\partial x_j} = (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_m + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (3)$$

여기서 하첨자  $v, l, m$  은 각각 기상, 액상, 혼합류를 의미하고 하첨자  $t$  는 와점성계수(eddy viscosity)를 의미한다.  $p, u, \rho, \alpha, \mu$  는 각각 압력, 속도, 밀도, 체적 분율(volume fraction) 및 점성계수를 의미하며 상첨자  $t, \tau$  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. 혼합류에서의 밀도와 점성계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_m = \rho_l \alpha_l + \rho_v (1 - \alpha_l) \quad (4)$$

$$\mu_m = \mu_l \alpha_l + \mu_v (1 - \alpha_l) \quad (5)$$

위 방정식들을 무차원화 하여 벡터방정식으로 곡선좌표계

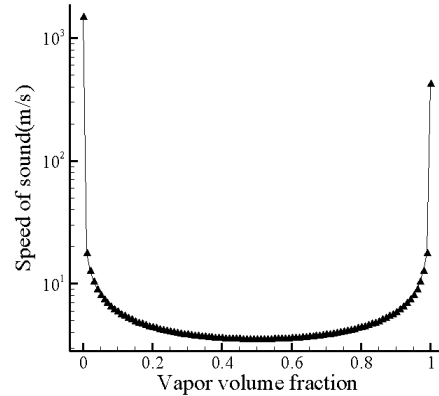


Fig. 1 Variation of sound of speed with change of vapor volume fraction

에 전개시키면 다음과 같다.

$$\Gamma_e \frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \Gamma \frac{\partial \hat{Q}}{\partial \tau} + \frac{\partial \hat{E}_j}{\partial \xi_j} - \frac{\partial \hat{E}_j^v}{\partial \xi_j} - \hat{H} = 0 \quad (6)$$

여기서  $\hat{Q} = \frac{1}{J} [p \ u \ v \ w \ \alpha_l]$  이며,  $\hat{E}_j$  는 대류항을,  $\hat{E}_j^v$  는 점성항,  $\hat{H} = \frac{1}{J} \left[ (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \left( \frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v} \right), 0, 0, 0, (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \frac{1}{\rho_l} \right]^T$  는 소스항을 의미한다.  $\Gamma_e$  는 Jacobian matrix으로써 다음과 같이 정의된다.

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

본 연구에서는 액상에 대해 비압축성 유동으로 해석되어져야 하고 기상에서는 음속이 수 m/s 에 불과하므로 매우 저속이라 하더라도 압축성 유동으로 취급하여야 한다. Fig. 1은 온도가 298.15k 일 때 기상체적분율에 따른 음속을 나타낸 그림으로 음속이 큰 차이가 나는 것을 알 수가 있다. 그러므로 이들 액상과 기상의 두 개의 유동이 혼재하는 캐비테이션 유동에서는 비압축성 유동과 압축성 유동을 동시에 계산할 수 있어야 하는데 액상과 기상의 현저한 음속의 차이로 인해 수치해석상 수렴에 많은 문제를 야기하게 된다. 이때, 예조건화 행렬(preconditioning matrix)  $\Gamma$  는 다상 유동장에서 식 (7)의 첫 번째 열을 수정하여 식 (8)과 같이 나타낸다.  $\Gamma$  는 예조건화 행렬으로써 다음과 같이 정의된다. 이러한 예조건화 행렬의 유무에 따라 수렴도의 차이는 상당히 큰 것으로 나타나고 있

다.[10]

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

여기서  $\Delta \rho \equiv \rho_l - \rho_v$ 로 정의하며  $\beta$ 는 예조건화 완화계수이다. 난류유동을 풀기 위해서는 저 레이놀즈수 k-ε Model[11]을 사용하였다.

2.2 수치해석 방법

본 연구에서는 대류항은 Roe's FDS 기법[12]으로 차분화하였고 MUSCL 기법[13]을 이용하여 고차의 정확도를 유지하였다. 점성항은 2차 정확도의 중앙 차분법을 이용하여 계산하였다. 의사 시간 항은 1차 정확도의 후방차분을 적용하였으며, 물리적 시간 항에는 2차 정확도의 후방 차분을 이용한 내재적 기법을 적용하였다. 원천항은 내재적 기법을 적용하였다. 시간항에 대한 반복계산은 AF-ADI법을 사용하였다.

원거리 경계에서는 균일류 유입조건을 사용하였으며, 벽면에서의 속도는 점착조건을 사용하였다. 유출영역에서는 구배가 영이라는 조건을 이용하였다.

2.3 캐비테이션 모델

균일 혼상류 모델을 바탕으로 하는 캐비테이션 모델은 액체에서 기체로의 진행과정인 기화율(evaporation rate)  $\dot{m}^-$ 과 기체에서 액체로의 진행과정인 응축율(condensation rate)  $\dot{m}^+$ 를 도입하여 기상과 액상간의 물질전달(mass transfer)을 수학적으로 모델링하게 되는데,  $\dot{m}^+$ 과  $\dot{m}^-$ 는 압력과 액상/기상 체적 분율(liquid/vapor volume fraction)에 대한 식으로써 식 (9)와 식 (10)으로 나타내어진다. 이 두 함수는 기존 캐비테이션 모델에서 액상과 기상이 경험 상수에 종속적인 단점을 개선해 Merkle et al.[14]이 최근에 개발한 것으로, 최근 Ha et al.[15]과 Ha and Park[16]이 실제 유동장에 적용해 응용력을 높였다.

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

$$\dot{m}^+ = k_l \frac{\rho_v \alpha_v}{t_\infty} \min \left\{ 1, \max \left( \frac{(p - p_v)}{k_p p_v}, 0 \right) \right\} \quad (10)$$

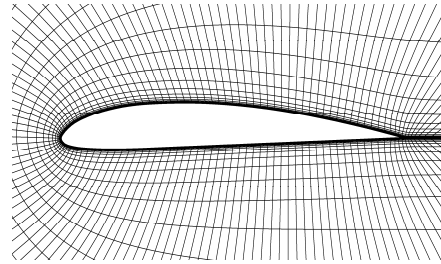


Fig. 2 Grid system of Clark-Y hydrofoil

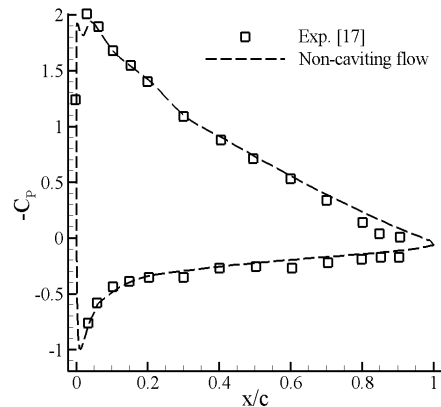


Fig. 3 Surface pressure distribution for Non-cavitating flow

여기서  $k_l = \frac{\tau_{ref}}{\tau_{relax}}$ 이며,  $\tau_{ref}$ 는 기준 시간(reference time)을 의미하여,  $\tau_{relax}$ 는 완화 시간(relaxation time)을 의미한다. 그리고  $k_p$ 는 조절(scaling) 상수를 의미한다.  $k_v, k_l$ 는 경험상수로써 본 연구에서는 각각 1000, 10을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 캐비테이션 유동해석을 위해 사용된 Clark-Y 11.7% hydrofoil 형상과 격자계이다. 격자는 339×61의 정렬 격자로 구성되어 있다. 전체 해석 영역은 코드(c)의 20배이고 형태는 C-type 이다.

캐비테이션 유동해석에 앞서 캐비테이션이 존재하지 않는 non-cavitating 유동에 대해 계산을 수행하였다. Fig. 3는 받음각(α)이 8°이고 레이놀즈 수가 6.7×10<sup>5</sup>일 때 실험결과[17]과 비교한 그림으로 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 다음으로 캐비테이션이 존재할 때 수중익형의 해석을 수행하였다. 사용된 레이놀즈 수는 실험조건[18]에 맞게 7.0×10<sup>5</sup>이며 받음각은 5°일 때 와 8°일 때 캐비테이션 수에 따라

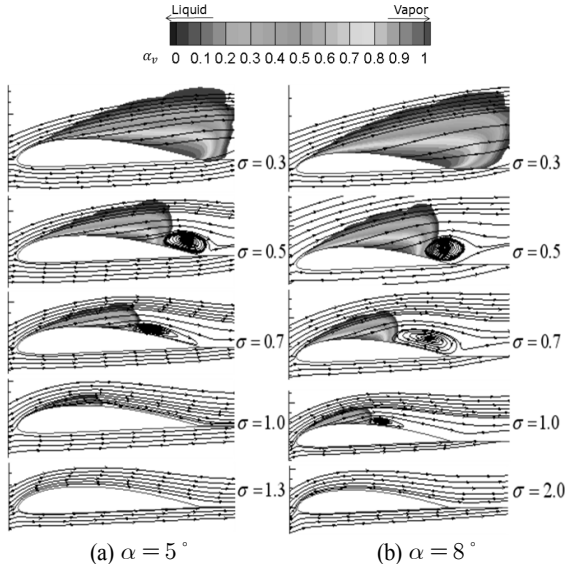


Fig. 4 Vapor volume fraction and streamlines at change of cavitation numbers

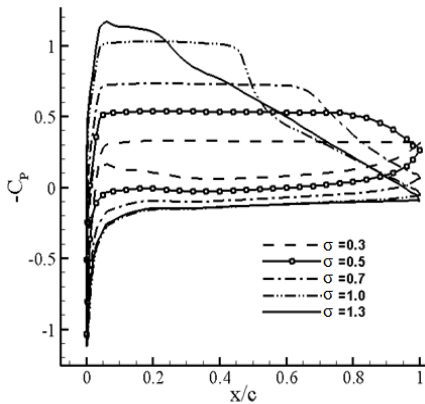
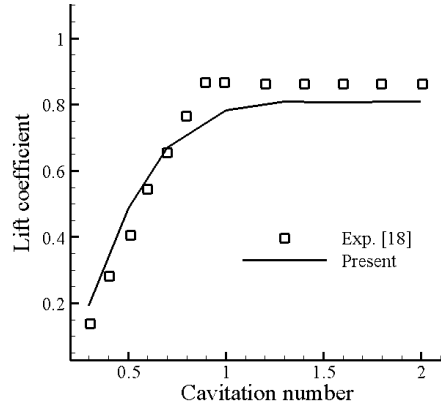
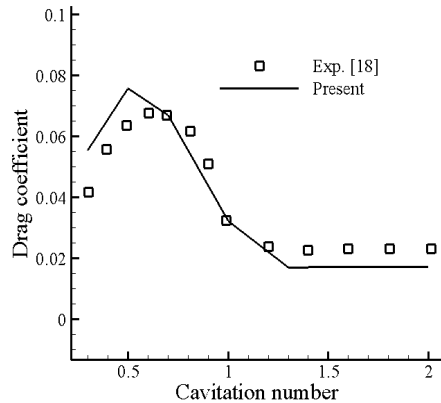


Fig. 5 Surface pressure distribution with change of cavitation numbers ( $\alpha = 5^\circ$ )

계산을 수행하였다. Fig. 4(a),(b)는 받음각이  $5^\circ$  일 때와  $8^\circ$  일 때 기상 체적분율을 나타낸다. Fig. 4(a)에 대해 캐비테이션 수( $\sigma$ )가 1.3일 때 압력이 포화압력보다 크면서 캐비테이션이 일어나지 않는 것을 알 수 있다. 캐비테이션 수가 점점 낮아지면서  $\sigma = 1.0$ 이 될 때 앞전(leading edge) 부근에 캐비테이션이 발생한다( $x/c=0.05$ ). 캐비테이션이 더욱 낮아지면서( $\sigma = 0.7, 0.5$ ) 공동길이(cavity length)는 점점 길어지며,  $\sigma = 0.3$ 일 될 때 익형 윗면의 압력이 포화압력보다 낮아지는 초월 공동 현상이 일어나는 것을 알 수 있다. 여기서 공동길이는 유동이 정상상태가 될 때 앞전에서 기상 체적 분율이 0.5가 되는 지점까지 최대



(a) Lift coefficient



(b) Drag coefficient

Fig. 6 Change of lift and drag coefficient with change of cavitation numbers ( $\alpha = 5^\circ$ )

직선거리로 정의하였다. Fig. 4(b)에 알 수 있듯이 받음각이  $8^\circ$ 에서는 공동이 생기지 않는 캐비테이션 수가  $\sigma = 2.0$ 로써 받음각이  $5^\circ$ 보다 더 큰 것을 알 수 있다. 그리고 같은 캐비테이션 수 일 때 받음각이  $8^\circ$ 에서의 공동이 익형의 위쪽방향으로 더 쏠려 있는 것을 유선을 통해 알 수 있다.

Fig. 5는 받음각이  $5^\circ$ 일 때 표면 압력계수를 캐비테이션 수에 따라 나타내었다. 캐비테이션 수가 낮아지면서 벽면에서 공동이 나타나는 영역이 길어지는 것을 알 수 있고,  $\sigma = 0.3$ 일 때 전 영역으로 공동이 나타나는 영역이 확대되는 것을 볼 수 있다. 여기서 공동이 나타나는 영역이 압력계수가 평행한 구간으로 알 수 있는데 이는 압력이 특정한 포화압력보다 떨어질 때 공동이 생기므로 공동이 나타나는 영역에서는 압력계수가 같기 때문이다.

Fig. 6는 캐비테이션 수에 따른 양·항력계수로써 Liu et al.[18]의 실험결과와 비교하였다. Fig. 6에서 실험 결과와 계

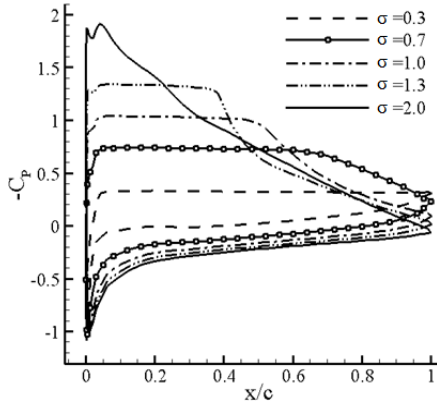


Fig. 7 Surface pressure distribution at several cavitation numbers( $\alpha = 8^\circ$ )

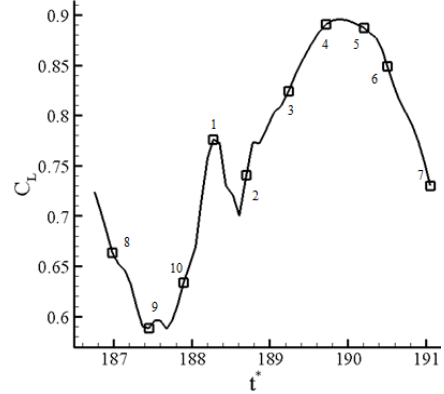
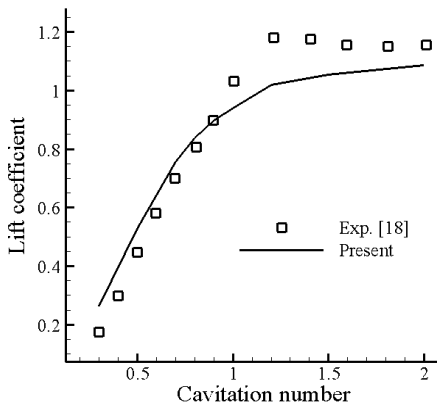
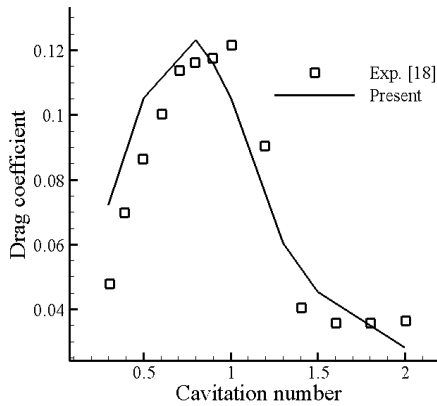


Fig. 9 Change of lift coefficient with change of non-dimensional time ( $\alpha = 8^\circ, \sigma = 0.8$ )



(a) Lift coefficient



(b) Drag coefficient

Fig. 8 Change of drag coefficient and lift coefficient with change of cavitation numbers ( $\alpha = 8^\circ$ )

및 해석 결과는 초월공동에서 non-cavitating flow까지 보여 주고 있다. 하지만 Cloud cavitation 형태가 나타나는 영역에서 최대 양·항력 계수의 위치와 크기의 차이가 존재하였다. 캐비테이션 수가 0.9가 될 때 가장 큰 차이를 보이는데 11% 정도의 실험 값과 차이를 보였다. 이것은 공동에 의해 생기는 유동의 재유입현상의 복잡성 때문으로 판단된다. 그리고 대략  $\sigma > 1.3$ 이 될 때 양·항력 계수가 일정해 지는 것을 알 수가 있는데 이는 캐비테이션이 생성되지 않으면서 단상(singlephase) 유동이 되고 동일한 수력학적 특성을 갖게 되기 때문이다.

Fig. 7, 8은 받음각이  $8^\circ$  일 때 압력 계수 및 양·항력 계수를 나타내 결과이다. 압력이 포화압력보다 클 때 즉 캐비테이션이 생성되지 않은 단상유동이 되는 캐비테이션 수는 대략  $\sigma > 2.0$  이상인 것을 알 수 있다. 실험결과[18]와 비교하면 단상이 되는 캐비테이션 수가 차이가 나는데 이는 받음각이 커짐에 따라 앞전에서의 압력강하가 더 크게 일어나고 유동의 복잡성이 증대되면서 cloud cavitation이 되는 캐비테이션 수의 영역을 다르게 예측하였기 때문으로 판단된다.

한편 Fig. 8에서는 받음각  $5^\circ$  와 같이 cloud cavitation영역에서 최대 양·항력 계수의 위치와 크기의 차이가 존재하였다. 캐비테이션 수가 1.0일 때 실험값과 최대 25%차이를 보이는데 이것은 cloud cavitation영역에서 re-entrant jet의 과도한 예측으로 판단된다. Fig. 9은 받음각이  $8^\circ$  이고 캐비테이션 수가 0.8일 때 1주기 동안 양·항력계수이다. Fig. 10은 Fig. 9과 같은 조건에서 1주기를 10분할하여 실험자료[18]와 비교하였다. Fig. 10(a),(b)에서 보듯이 시간이 지남에 따라 캐비테이션의 영역이 커진다. 시간이 더 지나면서 수중익형의 뒷전에서 발생하는 re-entrant jet이 커지는 것을 알 수 있다.

산 결과는 이와 같은 현상을 나타내고 있다. Fig. 6의 실험

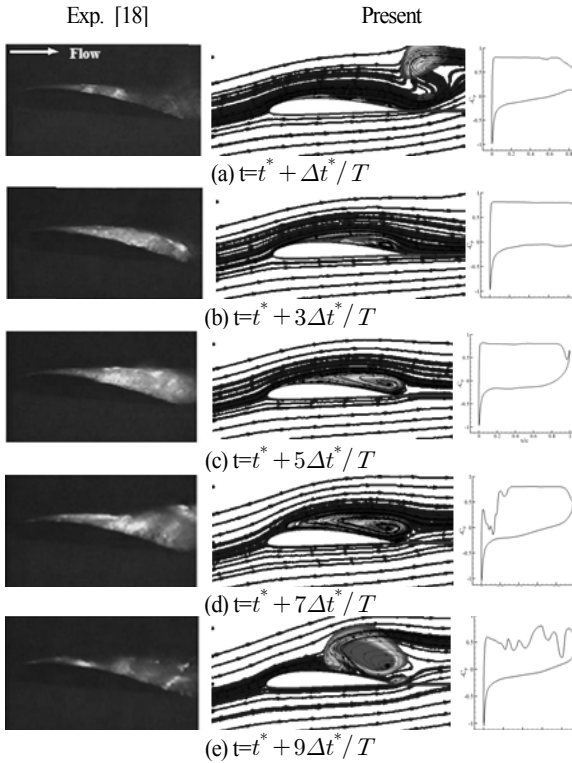


Fig. 10 Time variation of vapor volume fraction and pressure coefficient for 1-cycle ( $\alpha = 8^\circ, \sigma = 0.8$ )

계산 결과도 비슷한 경향을 보이지만, Fig. 10(d),(e)에서는 실험과는 다르게 앞전에서 캐비티가 유지되지 않고 사라지는 현상이 나타났다. 이것은 과도한 re-entrant jet이 수중익형의 앞전까지 생기고 앞전에서 캐비티가 소멸되는 현상이 일어났다. 받음각  $8^\circ$ 에서는 캐비테이션 수가 1.4까지 위와 같은 형상이 일어났다. cloud cavitation 형태를 지니는데 유동에서 유동의 복잡성을 인해 생기는 부정확한 예측이 오차의 원인으로 판단된다.

다음으로 받음각에 따른 수력학적 특성을 알아보기 위해  $2^\circ$  일 때와  $11^\circ$  일 때를 추가하여 계산을 수행하였다. Fig. 11은 받음각과 캐비테이션 수의 변화에 따라 양 항력계수를 나타낸 결과이다. 받음각에 따라 단상 유동이 되는 캐비테이션 수와 최대 양 항력계수도 커지는 것을 알 수가 있다. 양력계수는 캐비테이션 수가 작을 때 익형의 상당 부분이 캐비테이션 영역이 되면서 같은 압력값을 가지게 된다. 이것 때문에 캐비테이션 수가 작을 때는 양력 계수의 차이가 작지만 캐비테이션 수가 커지면서 받음각에 따라 양력 계수의 차이는 커지게 된다.

Fig. 12는 받음각과 캐비테이션 수에 따른 무차원 공동길이 ( $L_{cav}$ )를 나타낸 그림이다. 받음각이 커짐에 따라 공동길이

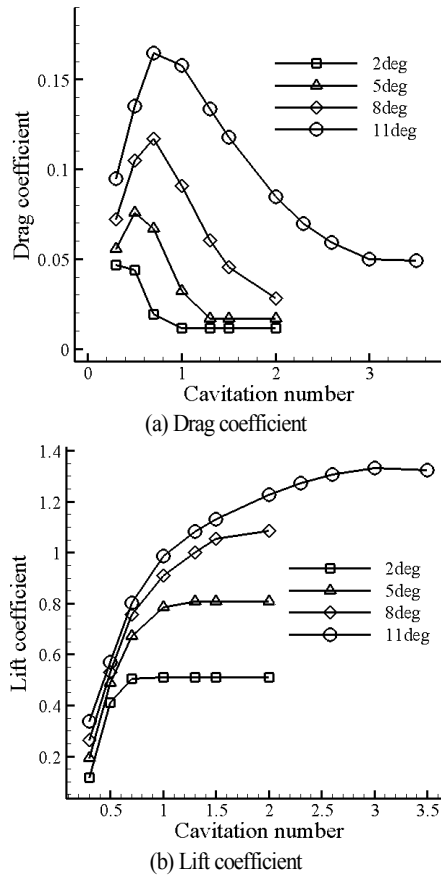


Fig. 11 Drag and Lift coefficient with change of angle of attacks

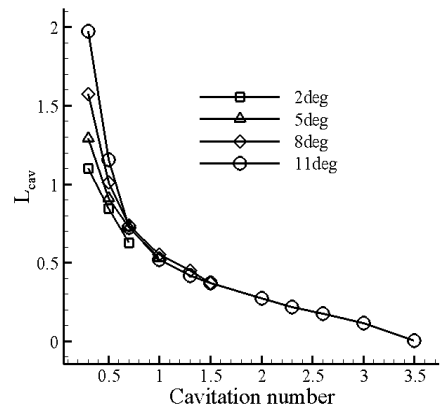


Fig. 12 Non-dimensional cavity length at several angle of attacks

가 존재하는 캐비테이션 수는 커지는 것을 알 수가 있다. 그리고 캐비테이션 수가 같을 때 받음각이 커짐에 따라 공동길이도 커지는 것을 알 수가 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 전산해석을 통해 터보기계의 캐비테이션 유동해석을 위한 기초연구로써 3 차원 비정상상태 내비어-스톡스 방정식을 균일혼상류모델과 함께 사용하여 수중익형 주위의 캐비테이션 유동해석을 수행하였다. 우선 단상 유동에서의 검증은 실시하였고, 캐비테이션 수에 따른 양·항력 계수를 실험 결과와 비교하였다. 받음각이  $5^\circ$  와  $8^\circ$  에서는 cloud cavitation 영역에서 re-entrant jet의 과도한 예측으로인해 비교적 큰 오차를 보였다. Cloud cavitation 영역에서는 추가적인 수치 기법의 연구가 필요할 것으로 생각된다. 그리고 받음각을 추가하여 캐비테이션 해석을 수행하였다. 받음각이 커짐에 따라 공동의 형태가 받음각 방향으로 더욱 기울어지는 것을 확인하였고, 캐비테이션의 형태도 달라졌다. 받음각이 커지면서 캐비테이션의 형태가 달라지고 그에 따라 공동길이와 양·항력 커지는 것을 확인 할 수 있었다.

#### 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년), 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20134030200290)

#### References

- [1] 2004, Merkle, C.L. and Li, D., "Liquid Flow around Non-cavitating and Cavitating NACA0015 Hydrofoil : Benchmark Problems for GEMS Code," *Mathematical and Numerical Aspects of Low Mach Number Flows : Numerical Workshop*, France.
- [2] 2010, Naoya, O., Yuka, I., Motohiko, N. and Toshiaki I., "Numerical Prediction of Cavitation Erosion Intensity in Cavitation Flows around a Clark Y 11.7% Hydrofoil," *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.5, pp.416-431.
- [3] 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.
- [4] 2001, Venkateswar, S., Lindau, J.W., Kunz, R.F. and Merkle, C.L., "Preconditioning algorithms for computation of multi-phase mixture flows," *AIAA Paper*, 2001-0279.
- [5] 2002, Lindau, J.W., Kunz, R.F., Boger, D.A., Steinbring, D.R. and Gibeling, H.J., "High Reynolds number, unsteady, multiphase CFD modeling of cavitation flow," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.124, pp.607-615.
- [6] 2001, Gotfred, S.B., Morten, K. and Roger, E.A., "Numerical Modeling of Sheet and Tip vortex Cavitation with Fluent5," *Cav2001*.
- [7] 2001, Wang, G., Senocak, I., Shyy, W., Ikohagi, T., Cao, S., "Dynamics of attached turbulent cavitation flows," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol.37, pp.551-581.
- [8] 2006, Angelo, C., Cristina, B., Emilio R. and Luca, d., "Thermal Cavitation Experiments on a NACA0015 Hydrofoil," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.128, pp.326-331.
- [9] 2006, Amromin, E., Kopriva, J., Arndt, R.E. and Wosnik, M., "Hydrofoil Drag Reduction by Partial Cavitation," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.128, pp.931-936.
- [10] 2012, Ha, C.T. and Park, W.G., "Application of preconditioning to compressible multiphase mixture flow computation," *ISFMFE2012*, Jeju, Korea.
- [11] 1982, Chien, K.Y., "Prediction of change and boundary layer flows with a low-Reynolds turbulence model," *AIAA Journal*, Vol.22, pp.33-38.
- [12] 1981, Roe P.L., "Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes," *Journal of Computational Physics*, Vol.43, pp.357-372.
- [13] 1979, van Leer, B., "Towards the ultimate conservative difference scheme V. A second order sequel to Godunov's method," *AIAA Journal*, Vol.32, pp.101-136.
- [14] 2006, Merkle, C.L., Li, D. and Venkateswaran, S., "Multi - Disciplinary computational analysis in propulsion," *Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA Paper 2006-4575*.
- [15] 2009, Ha, C.T., Park, W.G. and Merkle, C.L., "Multiphase flow analysis of cylinder using a new cavitation model," *CAV2009*, MI, USA.
- [16] 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.
- [17] 1966, Murai, H., Hirata, Y. and Mikashima, Y., "Research on Swept-back Blades Laid Between Parallel wall Report 1," *Institute of high speed mech Tohoku Univ.*, Vol.17, pp.185-231.
- [18] 1999, Liu, S., Higuchi, J. and Ikohagi, T., "Experimental study of cavity flow behavior on a 2-D hydrofoil," *JSME Int J Ser B*, 42(4), pp.641-648.