



## 측류유동을 고려한 실린더 주위의 캐비테이션 유동 현상 해석

이 병 우,<sup>1</sup> 박 원 규,<sup>\*2</sup> 이 건 철<sup>3</sup>

### SIMULATION OF CAVITATING FLOW PAST CYLINDERS WITH STRONG SIDE FLOW

B.W. Lee,<sup>1</sup> W.G. Park<sup>\*2</sup> and K.C. Lee<sup>3</sup>

*The 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 flow. The governing equation is the Navier-Stokes equation based on 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. The results from the present solver have been in a fairly good agreement with the experimental data and other numerical results. After the code validation the strong side flow was applied to include the wake flow effect of the submarine.*

**Key Words :** 공동유동(Cavitating Flow), 균일혼상모델(Homogeneous Mixture Model), 예조건화(Preconditioning Method)

#### 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 현상으로 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 기포가 다시 압력의 상승으로 인해 소음과 진동이 발생한다. 이 현상은 펌프, 노즐, 프로펠러, 터빈, 인젝트 등 다양한 수력학적 시스템에서 발생하는데 특히, 소음과 진동에 오랫동안 노출된 경우 수력학적 시스템은 파괴 및 부식과 같은 구조적인 손상을 일으킨다. 그러나 공동(cavitation)이 부정적인 측면만 가지고 있는 것은 아니다. 수중운동체 거동시 초공동(super-cavitation)을 이

용하여 cavity cloud가 형성되어 물체를 감싸므로 항력을 급격히 감소시켜 운동체가 초고속으로 움직일 수 있기 때문이다.

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 하지만, 이 방법은 응축 증기(condensable vapor)와 비응축 증기(non-condensable vapor)를 구별할 수 없는 단점이 있다 두 번째 방법은 액상과 기상에 대해서 연속방정식을 분리하여 해석하는 방법인데 액상과 기상 사이에 질량전달 소스항을 추가하는 방법으로 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 방법이다

homogeneous mixture 모델의 경우, 예조건화(pre-conditioning) 기법을 적용하여 액상과 기상영역에서 서로의 음속이 다른 어려움을 해결하고 있다. Kunz 등은 예조건화 방법을 이용한 다상유동장 해석에서 응축가스 외에 비응축가스를 추가하면서 3상 유동모델을 개발하였으나 액상과 기상이 혼합된 부분에서

1 학생회원, 부산대학교 기계공학부

2 정회원, 부산대학교 기계공학부

3 국방과학연구소 제 2체계 특수합정 체계부

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



압축성 효과를 반영하지 못하였다. Ahuja 등은 압축성 효과를 포함하여 예조건화 기법을 이용하였지만 온도의 효과를 무시하였으며 최근에 Lindau 등과 Owis 등은 혼상유동 영역에서 압축성 효과와 온도효과를 모두 고려한 모델을 개발하였다.

본 연구에서는 homogeneous mixture 모델을 이용하며 기상과 액상의 변환과정이 등온이라는 가정 하에서 부분공동유동의 전산 유동해석을 위한 코드를 개발하였다.

## 2. 지배방정식 및 수치해석 방법

본 연구에서의 지배방정식은 Homogeneous mixture 모델을 적용하여 액상과 기상에 대해서 각각 연속방정식을 적용하였고, 혼상류에 대해서 운동량 방정식을 적용하였다. 또한 Merkle et al.(1998)과 Kunz et al.(2000)이 사용한 예조건화(pre-conditioning) 기법을 포함하고 있다.

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

여기서 하첨자  $l, v$ , 그리고  $m$ 은 각각 액상, 기상 및 액상과 기상의 혼합된 혼합상태(mixture)를 의미한다.  $p, u, \rho, \alpha, \mu$ 는 각각 압력, 속도, 밀도, 체적분율(volume fraction) 및 점성계수를 의미하며  $t, \tau$ 는 물리적 시간과 의사 시간(pseudo-time)을 의미한다.

$\dot{m}^+$ 는 상변화에 의해 기상이 응축되는 질량변화량(소스항)을 의미하며  $\dot{m}^-$ 는 반대로 액상이 기화하는 증발량을 의미한다.

혼상류에서의 밀도인  $\rho_m$ 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  $\mu_m$ , Chien k- $\epsilon$  난류모델  $\mu_t$ 는 다음과 같이

정의된다.

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

$$\mu_t = \frac{\rho_m c_\mu f_\mu k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

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

$$\Gamma_e \frac{\partial \hat{q}}{\partial t} + \Gamma \frac{\partial \hat{q}}{\partial \tau} + \frac{\partial (\hat{E}^- \hat{E}_v)}{\partial \xi} + \frac{\partial (\hat{F}^- \hat{F}_v)}{\partial \eta} + \frac{\partial (\hat{G}^- \hat{G}_v)}{\partial \zeta} = \hat{S} \quad (6)$$

여기서,  $\hat{q} = \mathcal{J}[p \ u \ v \ w \ \alpha_l]^\tau$ ,  $\hat{E}, \hat{F}, \hat{G}$ 은 대류항,  $\hat{E}_v, \hat{F}_v, \hat{G}_v$ 는 점성항, 행렬  $\Gamma_e$ 와  $\hat{S}$ 는 다음의 식 (7)과 식 (8)로 정의된다.

$$\hat{S} = \mathcal{J} \left\{ (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \left( \frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v} \right), 0, 0, 0, (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \frac{1}{\rho_l} \right\}^\tau \quad (7)$$

$$\Gamma_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_m & 0 & 0 & u \Delta \rho \\ 0 & 0 & \rho_m & 0 & v \Delta \rho \\ 0 & 0 & 0 & \rho_m w \Delta \rho \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,  $\Delta \rho \equiv \rho_l - \rho_v$ 이다. preconditioned matrix  $\Gamma$ 는 식 (8)에서 첫 번째 열을 다음과 같이 수정하여 나타낸다(Kunz et al.(2000)).

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \left( \frac{1}{\rho_m \beta^2} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_m & 0 & 0 & u \Delta \rho \\ 0 & 0 & \rho_m & 0 & v \Delta \rho \\ 0 & 0 & 0 & \rho_m w \Delta \rho \\ \left( \frac{\alpha_l}{\rho_m \beta^2} \right) & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서  $\beta$ 는 예조건화 상수(usually, set to  $\beta^2 / U_\infty^2 \approx 10$ )이다. cavitation model은 액체에서 기체로의 진행과정인  $\dot{m}^-$ (evaporation rate)와 기체에서 액체로의 진행과정인  $\dot{m}^+$

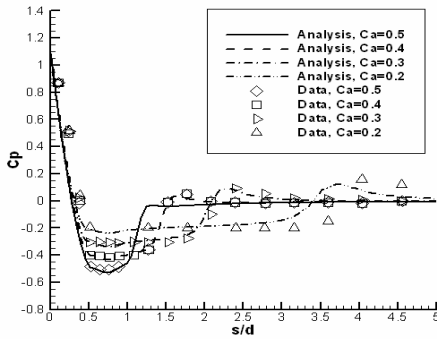


Fig. 1 Comparison of surface pressure of hemispherical forebody cylinder at various cavitation numbers

(condensation rate)을 사용한다.  $\dot{m}^-$ 은 압력과 액상체적분율(liquid volume fraction)에 대한 함수로서 식 (10)으로 나타내어지며 Merkle et al.(1998)의 model을 기초로 두고 있다.

$$\dot{m}^- = \frac{C_{dest} \rho_v \alpha \min[0, p - p_v]}{(\rho_l U_\infty^2 / 2) t_\infty} \quad (10)$$

$\dot{m}^+$ 은 오직 액상체적분율에 대한 함수로서 Lindau et al.(2002) model이 수정되어 식 (11)과 같이 나타내어진다.

$$\dot{m}^+ = \frac{C_{Prod} \rho_v \alpha_l^2 (1 - \alpha_l)}{t_\infty} \quad (11)$$

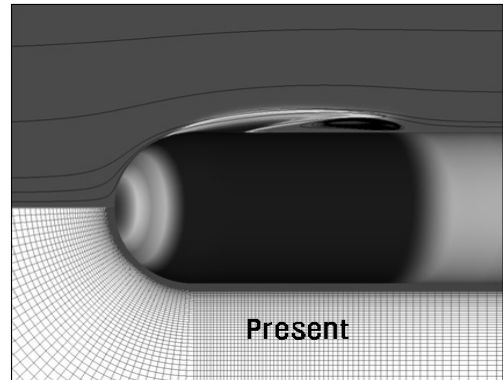
여기서,  $p_v$ 는 vaporous pressure이고,  $t_\infty$ 는 기준유동시간(=  $L_\infty / U_\infty$ )이다.  $C_{dest}$ 와  $C_{Prod}$ 는 모델상수항으로 각각 450과 15이다.

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

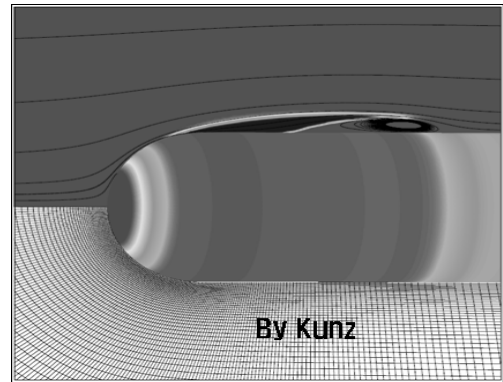
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 캐비테이션 코드 기초 검증

본 연구의 주 목적인 side flow effect를 관찰하기 전, 우선 코드의 기초검증을 위한 계산을 수행하였다. 코드 검증의 형상으로는 반구형 전두부(Hemispherical forebody)로 하였다. 격자계는 반구형 전두부는 120×132×37의 격자점으로 구성되어



(a) by the present calculation



(b) by Kunz et al.'s result[6]

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

있으며, 사용된 레이놀즈 수(Reynolds number)는  $Re=1.36 \times 10^5$ 이다. 캐비테이션 수(cavitation number)는 아래의 식 (12)와 같이 정의된다.

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_{Ref}^2} \quad (12)$$

반구형 전두부 형상에서는  $\sigma=0.2$ 에서 부터 0.5까지 0.1 간격으로 계산을 수행하였으며, 수치해석한 결과 값의 검증을 위해 실린더 표면에서의 수력학적 계수인  $C_p$ 를 사용하여 Rouse&McNown(1948)의 실험값과 비교하였다.

Fig. 1은 여러 가지의 캐비테이션 수( $\sigma$ )에 대한 hemispherical forebody cylinder 표면에서의  $C_p$ 를 나타낸다. 실험값에 대비해서 본 연구에 의한 해석 결과값이 잘 일치함을 알 수 있다.

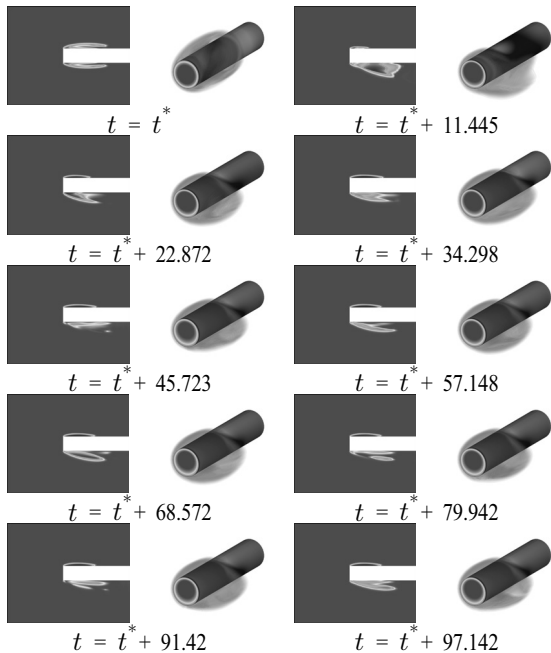


Fig. 3 Time sequence of liquid volume fraction and surface pressure contour with uniform side flow of 0-caliber blunt fore-body cylinder at  $\sigma=0.3$

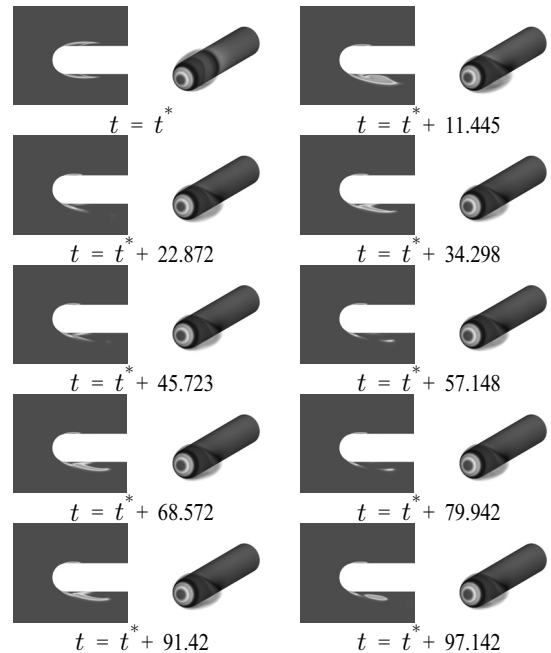


Fig. 4 Time sequence of liquid volume fraction and surface pressure contour with uniform side flow of 1/2-caliber hemispherical fore-body cylinder at  $\sigma=0.3$ .

Fig. 2는 cavitation number가 0.3일 때, liquid volume fraction, streamline, pressure contour on the surface를 나타낸 것으로 Kunz et al.(1999)[6]의 결과와 비교하여 서로 정성적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 일정한 크기 및 sine파 측류 영향 해석

먼저 일정한 크기의 측류유동 영향에 대해 관찰하기 위해서 위와 같은 캐비테이션 영향을 받는 실린더에 측류의 유동(정면대비 특성속도15%)을 적용하여 수치해석을 한 결과는 다음과 같다.

Fig. 3-5는 캘리버 제로형 전두부(0-caliber blunt forebody), 반구형 전두부(Hemispherical forebody), 오자이브형 전두부(1-caliber ogive forebody)에 대해서 일정한 크기의 측류를 적용한 결과 liquid volume fraction과 surface pressure contour를 보여준다.

해석결과를 관찰하면, 측류 방향인 windward 측에서는 캐비테이션의 변화가 거의 없이 비교적 일정하게 유지 되는 반면 leeward 방향에서는 압력이 상대적으로 낮아캐비테이션의 영역이 크게 나타난다. 또한 형상에 따라 그 변화량의 크기가 0-caliber, 1/2-caliber, 1-caliber 순임을 알 수 있었다.

다음으로 일정한 크기의 측류의 영향을 받는 것과 동일하게 실린더에 Fig. 3,4와 같이 sine파 측류 유동(정면대비 특성

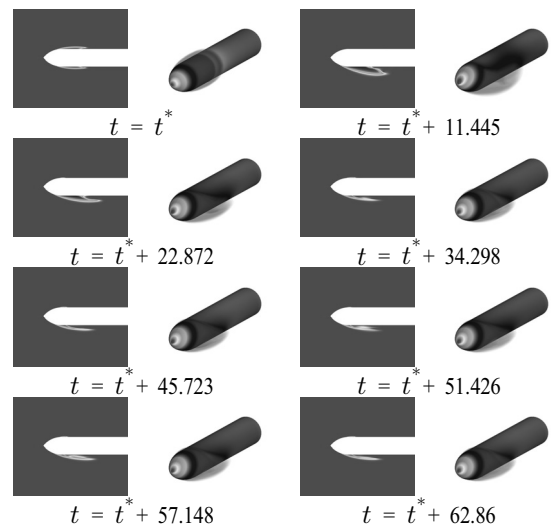


Fig. 5 Time sequence of liquid volume fraction and surface pressure contour with uniform side flow of 1-caliber ogive fore-body cylinder at  $\sigma=0.24$

속도15%)을 적용하여 수치해석을 한 결과 Fig. 7-9와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 7-9는 캘리버 제로형 전두부(0-caliber blunt forebody),

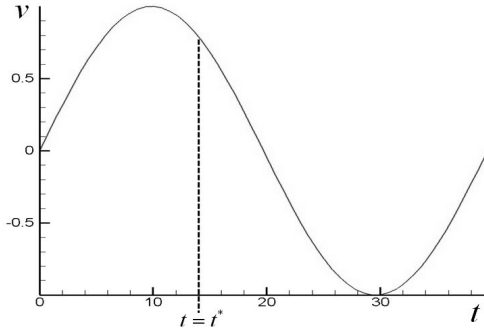


Fig. 6 Side velocity history having sine curve

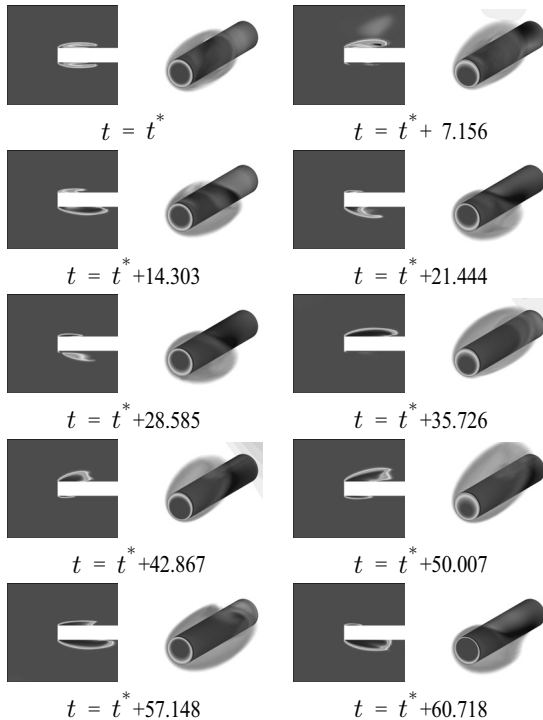


Fig. 7 Time sequence of liquid volume fraction and surface pressure contour with sinusoidal side flow of 0-caliber blunt fore-body cylinder at  $\sigma=0.3$

반구형 전두부(Hemispherical forebody), 오자이브형 전두부(1-caliber ogive forebody) 실린더에 sine파 측류를 적용하였을 때, liquid volume fraction과 surface pressure contour를 보여주며 Fig. 6에서 나타나 있듯이 최초 side flow effect를 받는 시점은  $t = t^*$ 가 된다.

해석결과를 관찰하면, sine파 주기로 형상에 측류가 적용됨을 확인 할 수가 있으며 일정한 크기로 측류를 적용한 것과 동일하게 측류 방향인 windward 측에서는 캐비테이션의 변화

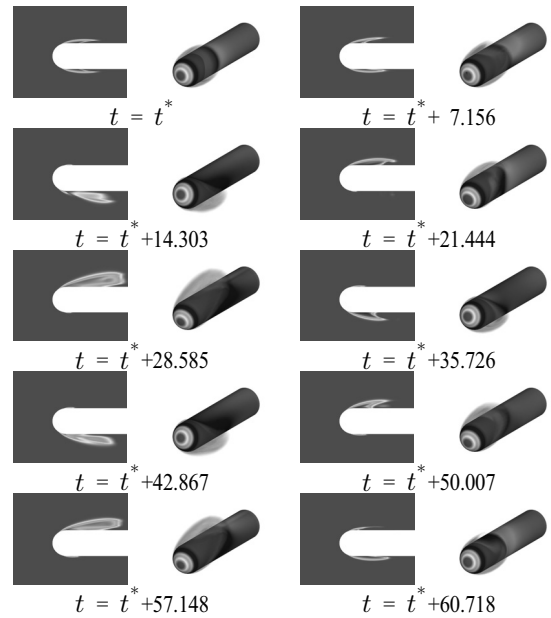


Fig. 8 Time sequence of liquid volume fraction and surface pressure contour with sinusoidal side flow of 1/2-caliber hemispherical fore-body cylinder at  $\sigma=0.3$ .

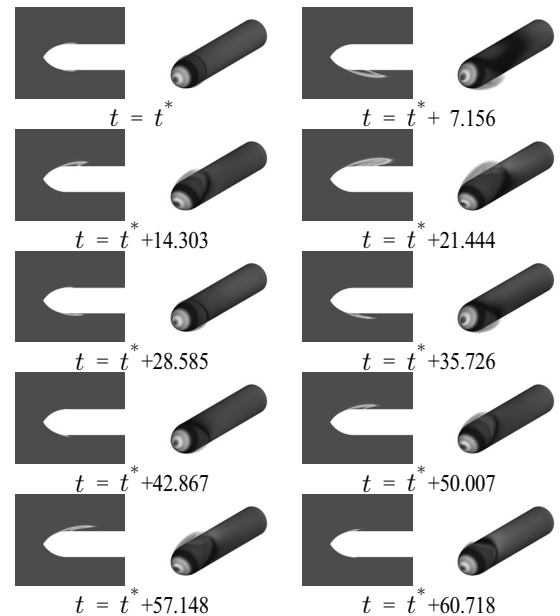


Fig. 9 Time sequence of liquid volume fraction and surface pressure contour with sinusoidal side flow of 1-caliber ogive fore-body cylinder at  $\sigma=0.32$

가 거의 없고 leeward 방향에서는 압력이 상대적으로 낮아 캐비테이션의 영역이 크게 나타난다. 또한 일정한 크기로 측류



를 적용한 것과 동일하게 형상에 따라 그 변화량의 크기가 0-caliber, 1/2-caliber, 1-caliber 순임을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

전산해석은 반구형 전두부, 오자이브형 전두부, 그리고 켈리버 제로형 전두부를 가지는 3가지 축대칭 실린더에 대해서 수행하였으며 각각의 실린더에 대해 여러 가지 캐비테이션 수의 변화를 주면서 계산을 수행하였다 이들 계산 결과는 실험값과 다른 연구자의 계산결과 값과 비교하였으며 모든 형상에 대해 비교적 잘 일치함을 얻을 수 있었다 코드의 검증 을 바탕으로 일정한 크기와 sine파의 측류 적용하여 공동의 발생현상을 얻을 수 있었다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- [1] 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.
- [2] 1990, Kays, W.M and Crawford, M.E., *Heat transfer*, Wiley, New York, pp.256-258.
- [3] 2006, Chapra, S.C. and Canale, R.P., *Numerical Methods for Engineers*, Fifth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.
- [4] 1982, Chien, K.Y., "Prediction of Change and Boundary Layer Flows with a Low-Reynolds-Number Turbulence Model," *AIAA Journal*, Vol.22, pp.33-38.
- [5] 2003, Coutier-Delgosha, O., Patella, R.F. and Reboud, J.L., "Evaluation of the Turbulence Model on the Numerical Simulations of Unsteady Cavitation," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.125, pp.38-45.
- [6] 2003, Coutier-Delgosha, O., Reboud, J.L. and Delannoy, Y., "Numerical Simulation of the Unsteady Behaviour of Cavitating Flows," *Int. J. Numer. Meth. Fluids Conference*, Vol.43, pp.527-548.
- [7] 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.*
- [8] 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 FEDSM99-7364.
- [9] 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.
- [10] 2001, Lindau, J.W., Kunz, R.F., Venkateswaran, S. and Boger, D.A., "Application of Preconditioned, Multiple -Species, Navier-Stokes Models to Cavitating Flows," *Proceedings of the 4th International Symposium on Cavitation(CAV2001)*, Pasadena, USA. CAV01 session B4-005.
- [11] 2002, Lindau, J.W., Kunz, R.F., Boger, D., Stinebring D. and Gibeling, H., "High Reynolds Number, Unsteady, Multiphase CFD modeling of Cavitating Flow," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.124, pp.607-615.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 2004, Nguyen, T.-D. and Park, W.-G., "A Numerical Navier-Stokes Solver for Turbulent Cavitating Flow," *2nd Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics*, Busan, Korea.
- [17] 2001, Venkateswar, S., Lindau, J.W., Kunz, R.F. and Merkle, C.L., "Preconditioning Algorithms for Computation of Multi-Phase Mixture Flows," *AIAA 39th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, AIAA Paper 2001-0125.