

## 3차원 수중익형 주위의 캐비테이션 유동 전산해석

김성환\* · 구태경\* · 박원규\*\* · 김동훈\*\*\*

### Numerical Analysis of Cavitation Flow Around Hydrofoils

S. H. Kim\*, T. K. Koo\*, W. G. Park\*\*, D. H. Kim\*\*\*

*Key Words* : Multi-phase flow(다상유동), Navier-Stokes Equation(Navier-Stokes 방정식), Hydrofoil(수중익형), Homogeneous equilibrium flow모델(Homogeneous equilibrium flow model)

#### ABSTRACT

The cavitating flow simulation is of practical importance for many engineering systems, such as pump, turbine, nozzle, injector, etc. In the present work, a solver for two-phase flows has been developed and applied to simulate the cavitating flows past hydrofoils. The governing equation is the two-phase Navier-Stokes equation, comprised of the continuity equation of liquid and vapor phase. The momentum and energy equation is in the mixture phase. The solver employs an implicit, dual time, preconditioned algorithm using finite difference scheme in curvilinear coordinates. An experimental data and other numerical data were compared with the present results to validate the present solver. It is concluded that the present numerical code has successfully accounted for two-phase Navier-Stokes model of cavitation flow.

#### 1. 서론

캐비테이션은 액체 유동의 어느 국부적 지점에서의 압력강화의 효과로 인해서 액체가 증기화되는 현상으로 펌프, 터빈, 프로펠러, 노즐, 인젝터(injector) 등 다양한 수력학적 시스템에서 발생한다. 모든 시스템에서의 캐비테이션 유동은 난류이며 물과 공기 사이에서의 복잡한 상호작용을 가지면서 생성과 소멸을 반복한다. 캐비테이션은 고속의 수중운동체 등에서 초월공동(super-cavity)을 이용하여 항력을 감소시켜 주는 이점을 제공하기도 하지만, 극히 예외적이며, 일반적으로는 구조물의 물리적 손상뿐만 아니라 동력의 손실과 소음의 발생

과 같은 부정적인 영향을 발하는 축류형 펌프와 같은 터보기계에서 상당한 캐비테이션의 발생을 볼 수 있는데, 이는 곧바로 추진력의 감소로 이어지고 터보기계의 효율을 저하시키는 원인이 되며, 블레이드의 마모를 야기시켜 수명이 단축되게 된다. 이러한 캐비테이션은 산업 전반에 걸쳐 여러 가지 시스템에서 관찰되며 많은 연구자들에 의해서 연구가 활발히 진행 중인데, 특히, 전산 유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 분야에서 유동해석을 위한 여러 가지 모델과 방안이 제시되고 있다. 본 연구에서는 축류형 터보기계의 더 나은 효율과 긴 수명, 그리고 운전환경을 개선하기 위하여, 캐비테이션 유동해석에 대한 기초연구로서 전산유체역학을 이용하여 캐비테이션에 대한 전산 해석을 수행하였다.

비정상 상태 유동에서 국부적으로 발생하는 캐비테이션 2상유동의 메커니즘은 매우 복잡하여 전산해석이 쉽지 않은데, 최근 Navier-Stokes Equation을 이용한 캐비테이션의 다양한 전산모델링이 수행되고 있다. 이 연구는 크게

\* 부산대학교 기계공학부 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부 (교신저자)

\*\*\* 국방과학연구소 해상/수중무기 개발본부

E-mail : wgpark@pusan.ac.kr

두 가지 카테고리 나눌 수 있는데 interface tracking method와 homogeneous equilibrium flow model이다. 먼저 interface tracking method는 캐비테이션이 일어나는 국부적 지역의 압력은 증기압과 같다고 가정하며 전산해석은 오직 액상(liquid phase)에 대해서만 행해지는 방법이다<sup>(1,2)</sup>. 액상과 기상(vapor phase) 사이의 경계면은 위 가정에 따라 계산이 되며 격자는 캐비테이션이 일어나는 지역에 맞게 계산이 수행됨에 따라 계속 다시 생성되어야 한다. 그러나 이 방법은 복잡한 3차원 경계면을 포함하기가 어렵기 때문에 간단한 문제로 제한되며 응축증기(condensable vapor)와 비응축증기(non-condensable vapor)를 구별할 수 없는 단점이 있다<sup>(3)</sup>. 두 번째 방법인 homogeneous equilibrium flow model은 액상과 기상의 경계면의 상태가 열과 동적으로 평형상태에 있다고 가정하므로 액상과 기상의 연속방정식을 따로 풀며 운동량방정식과 에너지방정식에 대해서는 혼상(mixture)류의 방정식을 사용한다<sup>(4-9)</sup>.

본 연구에서는 여러 가지 homogeneous equilibrium flow model중에서 Merkle et al.<sup>(4)</sup>과 Venkateswqrان et al.<sup>(8)</sup>, Lindau et al.<sup>(9)</sup>에 의해 제안된 모델을 이용하고 있는데, 이는 artificial compressibility method를 도입하여 비정상 상태를 해석하는데 캐비테이션 유동에서는 액상에서는 비압축성 유동이 해석되어야 하고 기상에서는 음속이 수 m/s에 불과하므로 매우 저속이라 하더라도 압축성 유동으로 취급하여야 한다. 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. 이를 해결하기 위해 연구자들은 preconditioning방법을 사용해 오고 있다<sup>(4, 7)</sup>. 지배 방정식은 좀더 빠른 유동해석의 결과를 얻기 위해 Roger, S. E., Kwak, D.<sup>(10)</sup>에 의해 제안된 implicit time steping 방법을 이용하였다. 특히, 위와 같은 방법들은 박금성<sup>(11)</sup>등과 송계조<sup>(12)</sup>등의 선행연구자들에 의하여 이미 검증되었으며, 본 연구 또한 위의 방법들로 3차원 수중 익형주위에서의 캐비테이션 2상 유동의 해석을 수행하였다.

## 2. 이론적 배경 및 해석 기법

### 2.1. 이론적 배경

액체의 증기화는 열 시스템에서 가열되는 경우와

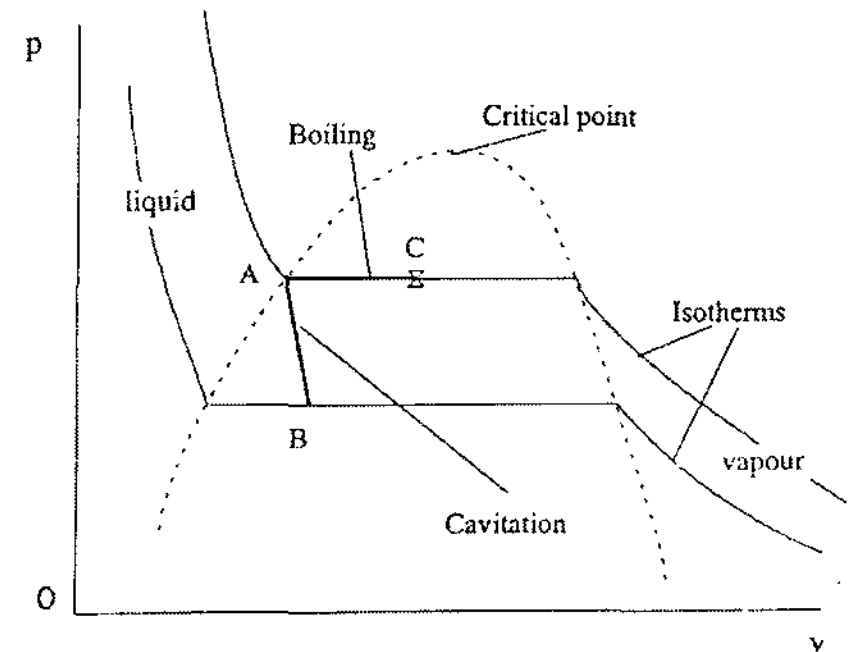


Fig. 1 A pressure distribution models of vaporization of a liquid

압력강하에 의해서 발생하는데, Fig. 1에서 AC선은 일정한 압력을 유지한 채로 열공급에 의해 액체가 기체로 변하는 것으로 물의 비등(boiling)현상이 여기에 해당한다. AB선은 열 공급이 없이 압력 강하에 의해 액상이 기상으로 변하는 것으로 캐비테이션현상이 여기에 속하게 된다.

수중익형 표면에서의 압력분포는 무차원 압력계수 (pressure coefficient, CP)로 나타내어 질 수 있으며 다음과 같이 정의된다.

$$C_p(s) = \frac{P(s) - P_{up}}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (1)$$

또한 캐비테이션 상수( $\sigma$ )는 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma = \frac{P_{up} - P_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (2)$$

Fig. 2는 익형주위에서의 캐비테이션 발달과정을 보여주고 있는데, 점 B에서 압력( $C_{P,min}$ )이 증기압보다 크거나 혹은 작거나 같을 때에 캐비테이션이 소멸 혹은 생성되는 과정을 반복하게 된다. 즉,  $\sigma + C_{P,min} = 0$ 이 되면 캐비테이션이 발생하기 시작하여  $\sigma + C_{P,min} < 0$ 이 될수록 더욱 발달하게 된다.

### 2.2 지배방정식

본 연구에서는 지배방정식으로 3차원 Navier-Stokes 방정식을 사용하고 있는데, homogeneous equilibrium flow model을 사용하고 있으므로 연속방정식은 액상과 기상에 대해 각각 풀고 있으며 운동량 방정식은 혼상류(mixture flow)에 대해서 푼다.

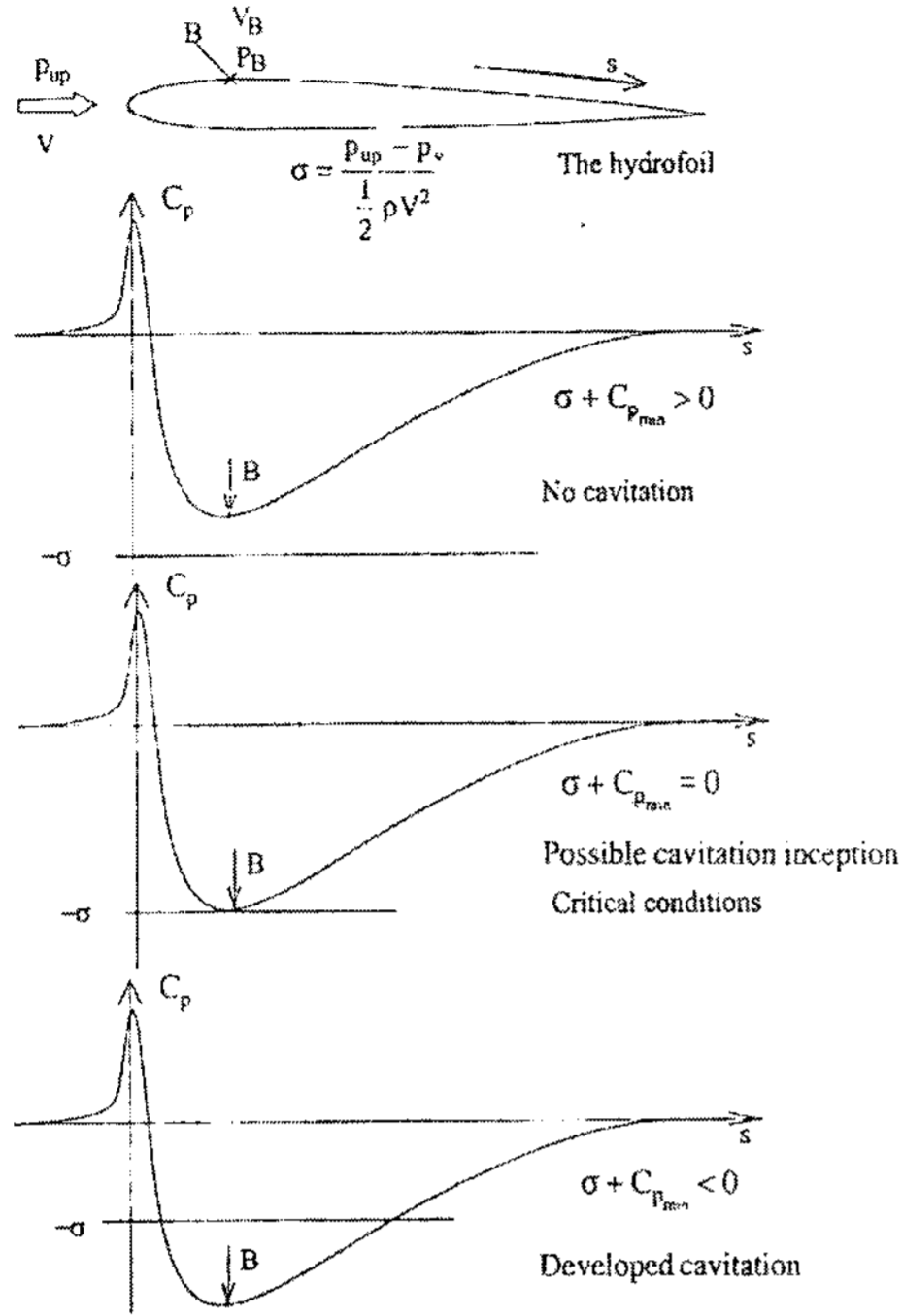


Fig. 2 A pressure distribution of cavitation on a hydrofoil

$$\frac{\partial \rho_v \alpha_v}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_v \alpha_v u_j)}{\partial x_j} = -(\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_l \alpha_l}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_l \alpha_l u_j)}{\partial x_j} = (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_m + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (5)$$

여기에서 하첨자  $v, l, m$ 은 각각 기상, 액상, 혼합류를 의미하며 혼합류에서의 밀도와 점성계수는 다음과 같이 정의된다. 점성계수의 하첨자  $t$ 는 와점성계수 (eddy viscosity)를 의미한다.

$$\rho_m = \rho_l \alpha_l + \rho_v (1 - \alpha_l) \quad (6)$$

$$\mu_m = \mu_l \alpha_l + \mu_v (1 - \alpha_l) \quad (7)$$

기상과 액상에 대한 연속방정식인 식(3)과 식(4)의  $\dot{m}^+$ 와  $\dot{m}^-$ 는 캐비테이션이 발생하면서 액상과 기상간의 질량전달항을 의미하며 2.3절에서 정의된다.

위 방정식들을 무차원화 하여 벡터방정식으로 곡선 좌표계에 전개시키면 다음과 같다.

$$\Gamma_e \frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \Gamma \frac{\partial \hat{Q}}{\partial \tau} + \frac{\partial \hat{E}_j}{\partial \xi_j} - \frac{\partial \hat{E}_j^v}{\partial \xi_j} - \hat{H} = 0 \quad (8)$$

여기서  $\hat{Q}$ 는 유동벡터,  $\hat{E}_j$ 는 대류항을,  $\hat{E}_j^v$ 는 점성항,  $\hat{H}$ 는 소스항을 의미한다.  $\Gamma_e$ 는 Jacobian matrix 행렬이며  $\Gamma$ 는 preconditioning 행렬으로서 다음과 같이 정의된다<sup>(3, 4)</sup>.

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

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

여기서  $\Delta \rho \equiv \rho_l - \rho_v$ 로 정의하며  $\beta$ 는 preconditioning 계수이다. 난류유동을 풀기 위해서는 저 레이놀즈수 k-ε Model<sup>(13)</sup>을 사용하였다.

### 2.3 캐비테이션 모델

캐비테이션은 상변화 과정의 열역학적, 동역학적 현상에 의해 발생하는데, 이러한 현상을 해석하기 위해 여러 가지 모델들이 제시되었다. 본 연구에서는 homogeneous equilibrium flow 모델 중에서 Merkle et al.<sup>(4)</sup>과 Venkateswqrn et al.<sup>(8)</sup>, Lindau et al.<sup>(9)</sup>에 의해 제안된 모델을 사용하였으며, 여기서 액상-기상간의 질량전달량은 evaporation term( $\dot{m}^-$ )과 condensation term( $\dot{m}^+$ )으로 각각 다음과 같이 나타내었다.

$$\dot{m}^- = \frac{C_{dest} \rho_l \text{Min}(P - P_v, 0) \alpha_l}{\rho_v (0.5 \rho_l U_\infty^2) t_\infty} \quad (10)$$

$$\dot{m}^+ = \frac{C_{prod} \rho_v \text{Max}(P - P_v, 0) (1 - \alpha_l)}{(0.5 \rho_l U_\infty^2) t_\infty} \quad (11)$$

여기서 evaporation term과 condensation term 모두 압력과 volume fraction의 함수이며,  $t_\infty$ 는 평균유동시

간( $=L_{\infty}/U_{\infty}$ )을 뜻한다. 그리고  $C_{dest}$ 와  $C_{prod}$ 는 실험상수를 의미하며, 본 연구에서는  $C_{dest} = 1.0$ ,  $C_{prod} = 8.0 \times 10^1$ 의 값을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 ALE15 수중익형의 캐비테이션 유동해석

Fig. 3과 Fig. 4와 같이 15°의 후퇴익(swept back)을 가지는 수중익형에 대해 계산하였으며 수중익형의 단면은 ALE15 형상이다. 격자는 191×51×36으로 총 350,676개의 격자점으로 구성되어졌다. 계산을 위한 초기조건은 원거리 경계에서는 균일류 유입조건을 사용하였으며, 유출영역에서는 외삽(Extrapolation)을 하였다. 벽면에서의 속도는 점착조건을 사용하였으며 압력은 압력구배가 영이라는 조건을 이용한 외삽을 이용하였다.

레이놀즈수는  $2.12 \times 10^6$ 이며 받음각은 5°이며 cavitation number( $\sigma$ )는 2.3일때에 대해 계산을 수행하였다. 계산의 검증은 위해 수중익형의 허브(hub)부분에서 15 mm와 45mm 떨어진 지점에서 압력분포와 속도 분포를 각각 계산하여 Dular et al.<sup>(14)</sup>의 실험 결과와 비교하였다.

Fig. 5은 허브부분에서  $z=15\text{mm}$ 만큼 떨어진 지점에서의 압력계수를 나타내고 있으며 실험값과 비교한 결과 계산결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 6는 허브부분에서  $z=45\text{mm}$ 만큼 떨어진 지점에서의 속도분포를 나타내고 있으며 역시 실험값과 잘 일치하는 것을 보여주고 있다.

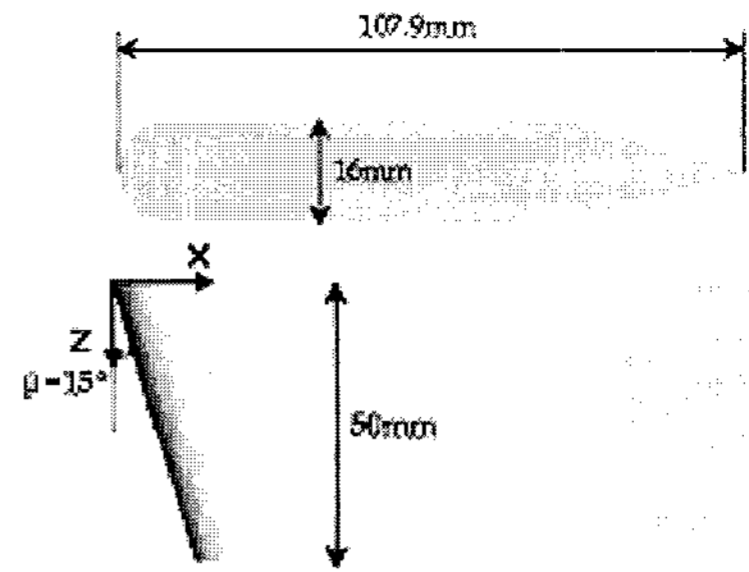


Fig. 3 ALE15 hydrofoil configuration

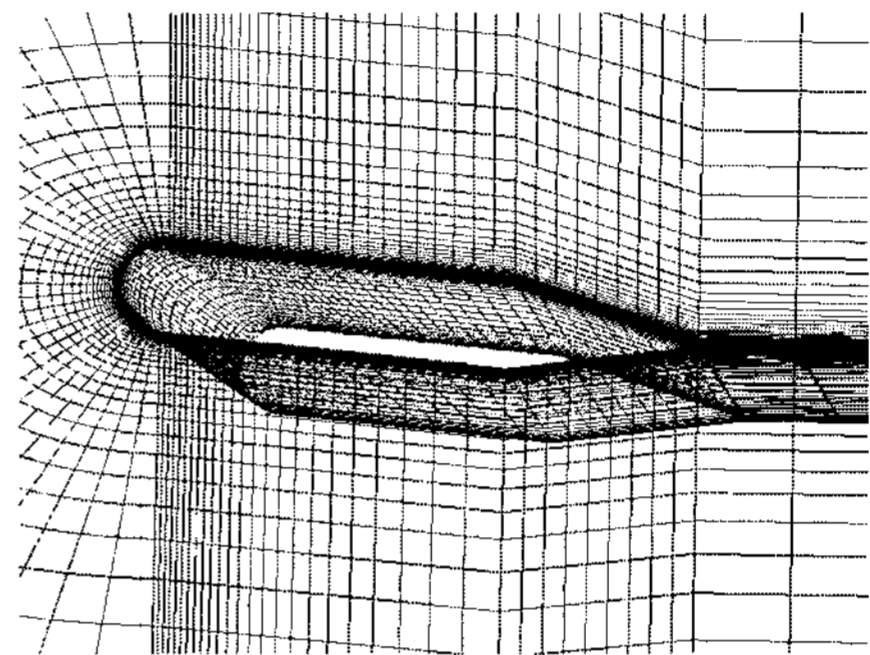


Fig. 4 ALE15 hydrofoil grid System

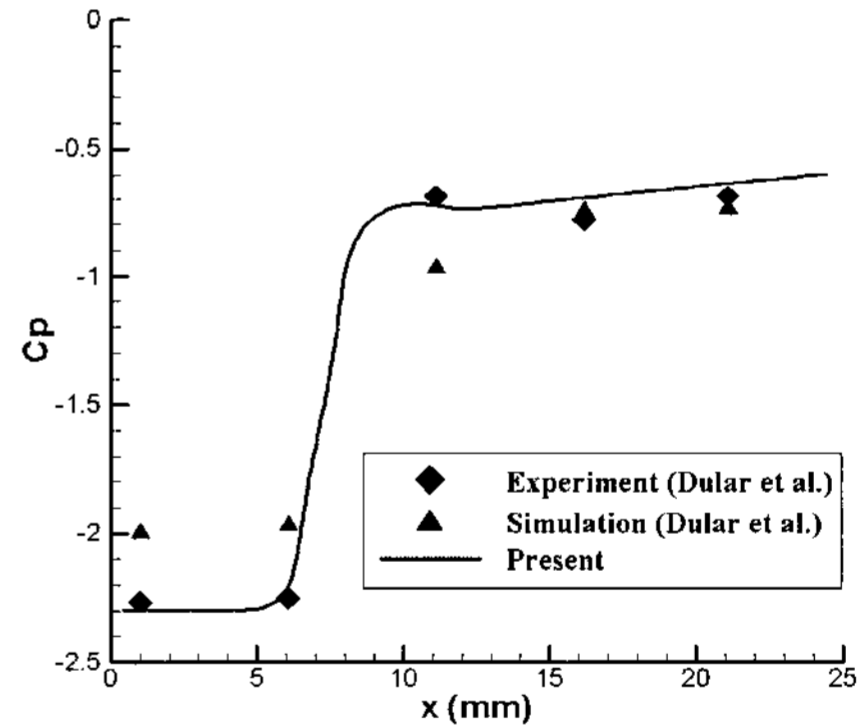


Fig. 5 Pressure coefficient at  $z=15\text{mm}$

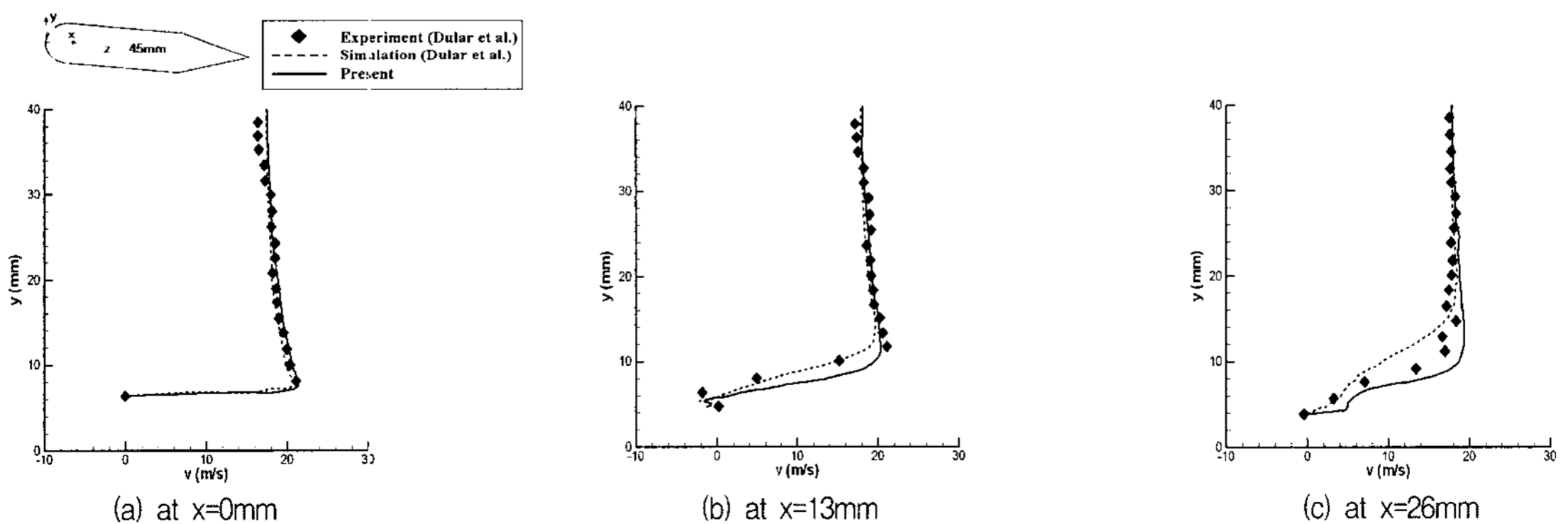


Fig. 6 Velocity profile at  $z=45\text{mm}$  over ALE15 hydrofoil

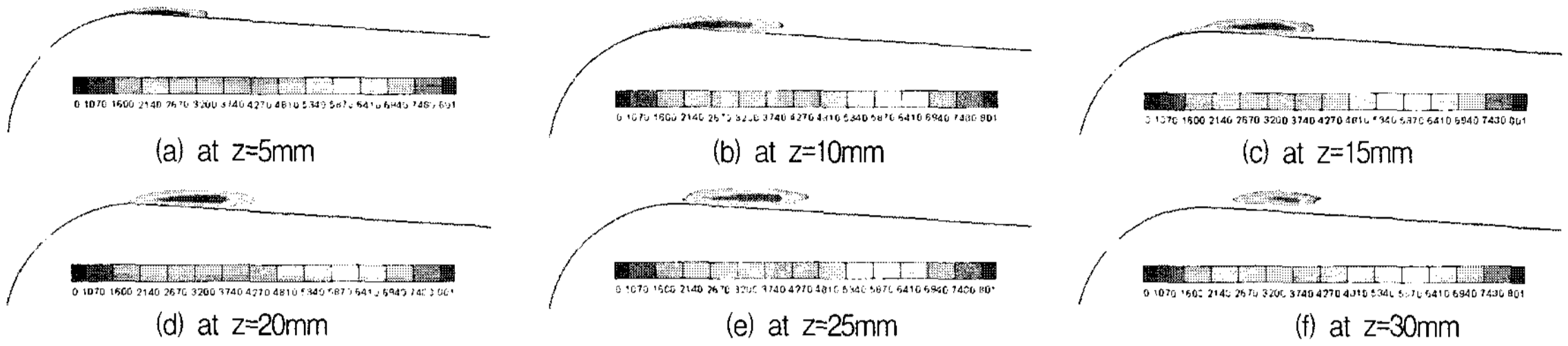


Fig. 7 Volume fraction at several spanwise locations

Fig. 7은 허브에서 5mm지점부터 5mm 간격으로 30mm 지점까지 6개의 단면에서의 캐비테이션 현상을 나타내었다. 캐비테이션은 separation point부터 re-attachment point 사이에서 발생되고 있으며 벽면가까이(z=5mm)에서부터 중앙(z=30mm)으로 이동할수록 캐비테이션 앞단은 분리되고 뒷단(closure영역) 하부에서는 캐비테이션 영역을 밀어 올리는 현상을 확인할 수 있다.

### 3.2 NACA66 modified hydrofoil의 캐비테이션 유동해석

격자계는 Fig. 8과 같으며, 수중 익형주위의 총 격자점의 수는 279×60×18으로 301,320개이다. NACA66 modified hydrofoil 주위의 캐비테이션 해석 결과 값을 Shen et al.(15)의 실험 결과와 비교하였다. 레이놀즈 수는 2×10<sup>6</sup>이이고 받음각은 4°이며 Cavitation number는 0.91과 1.0의 두 가지 경우에 대해 계산을 수행하였다.

Fig. 9는 각각의 경우 압력계수를 실험치와 비교한

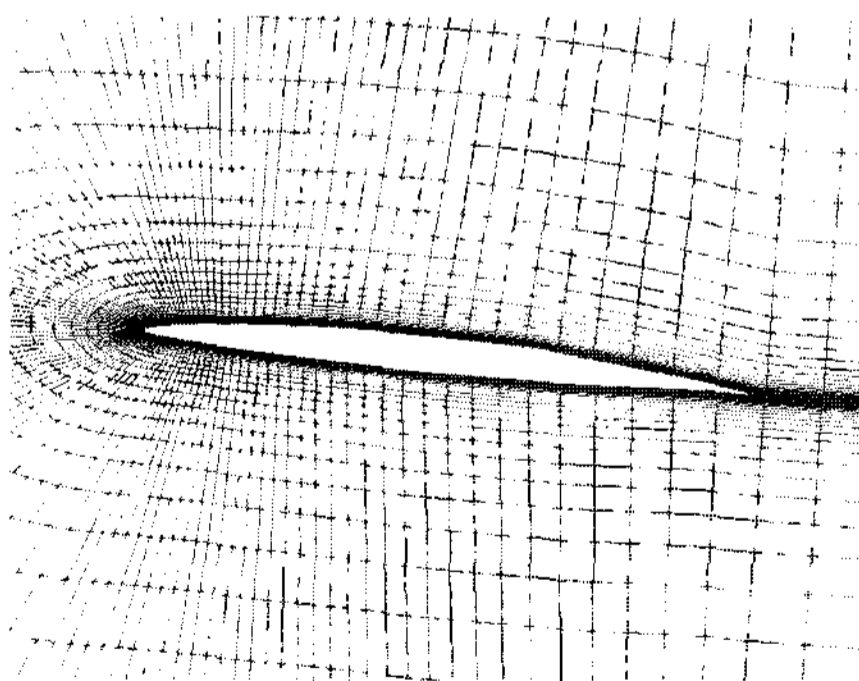
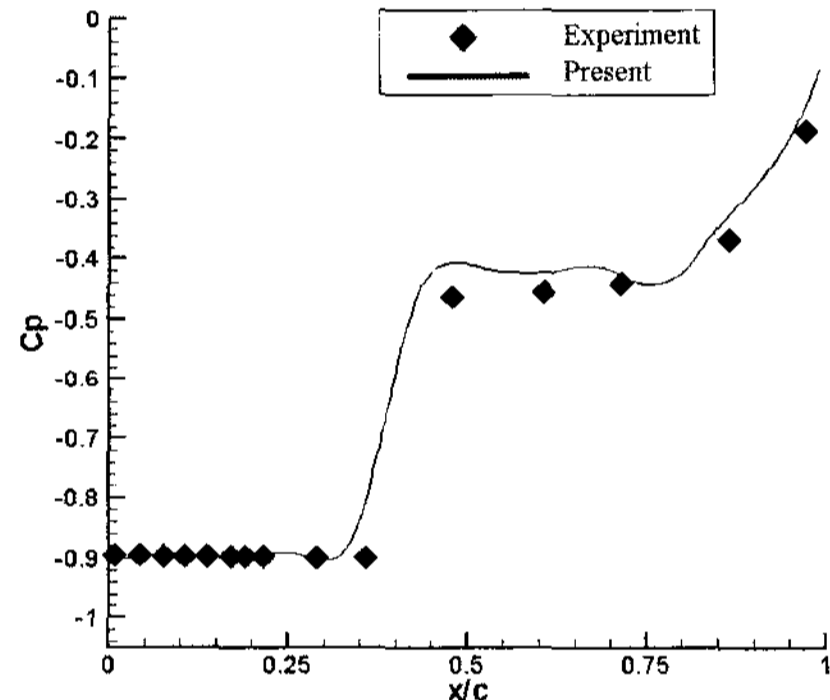
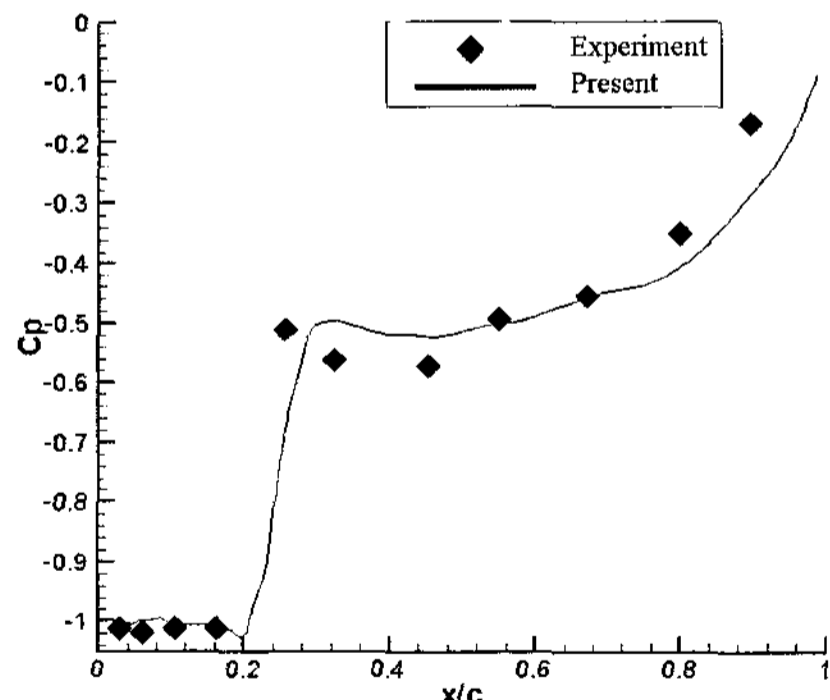


Fig. 8. Grid system of NACA66 modified hydrofoil

것으로서 비교적 서로 잘 일치하고 있으나 압력이 복구되는 지점부터는 약간 상이한 부분이 있으며 이는 두개의 상이 공존하는 부분에 대한 상 경계조건과 이에 대한 난류모델의 한계에 기인하는 것으로 생각된다.

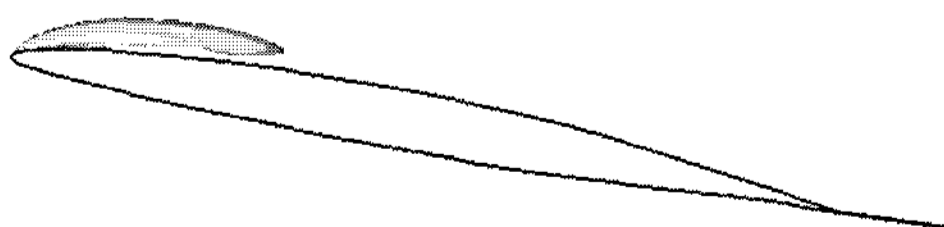


(a) Pressure coefficient at  $\sigma=0.91$

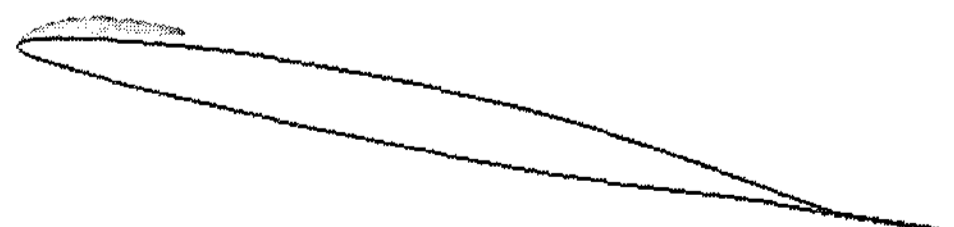


(b) Pressure coefficient at  $\sigma=1.0$ .

Fig. 9 Surface pressure Coefficients at  $\sigma=0.91$  and 1.0



(a) Void fraction at  $\sigma=0.91$



(b) Void fraction at  $\sigma=1.0$

Fig. 10 Volume fraction at  $\sigma=0.91$  and 1.0

Fig. 10은 각각의 경우에서 volume fraction을 나타낸 것인데, 예상대로 Cavitation number가 낮은  $\sigma = 0.91$ 의 경우가 캐비테이션이 잘 발달함을 알 수 있다.

### 3.3 NACA16012 modified hydrofoil의 캐비테이션 해석

격자계는 Fig. 11과 같으며, 총 격자점의 수는  $197 \times 60 \times 10$  으로 총 118,200개 이다. NACA 16012 modified hydrofoil 주위의 캐비테이션 유동해석 결과를 Kunz et al.(16)의 전산해석 결과와 비교하였다. Reynolds number는  $2 \times 10^5$ , 받음각은  $7^\circ$  이며 Cavitation number( $\sigma$ )는 0.4와 0.8 두 가지 경우에 대해 계산하였다.

Fig. 12는 각각의 경우의 시간평균된(time averaged) 표면압력계수값을 Kunz et al.의 해석 결과와 비교한 것으로 전체적으로 잘 일치하고 있음을 보인다. Fig. 13은 각각의 경우에서 특정시간(instantaneous time)대의

volume fraction값을 나타낸 것으로 역시 예상대로  $\sigma = 0.4$ 인 경우가  $\sigma = 0.8$ 인 경우에 비해서 기화점에 도달하기가 쉬우므로 캐비테이션이 더욱 많이 발달하였음을 알 수 있다.

마지막으로  $\sigma = 0.8$ 일 때의 시간에 따른 캐비테이션의 발달과정과 유선을 Fig. 14에 보였다. 수중익형 윗부분의 압력이 떨어져 기화점에 이르면 캐비테이션이 발생하고, 시간이 지날수록 더욱 발달하다면서 재유입 제트(re-entrant jet)형상에 의한 공동(cavity)의 붕괴, 그리고 재발달되는 과정을 명확하게 알 수 있으며 캐비테이션 뒷부분의 와류현상의 움직임도 볼 수 있다.

### 4. 결론

매우 빠른 시스템 특히, 축류형 터보기계 등은 언제나 캐비테이션 현상에 노출되어있다. 그러나 캐비테이션 분

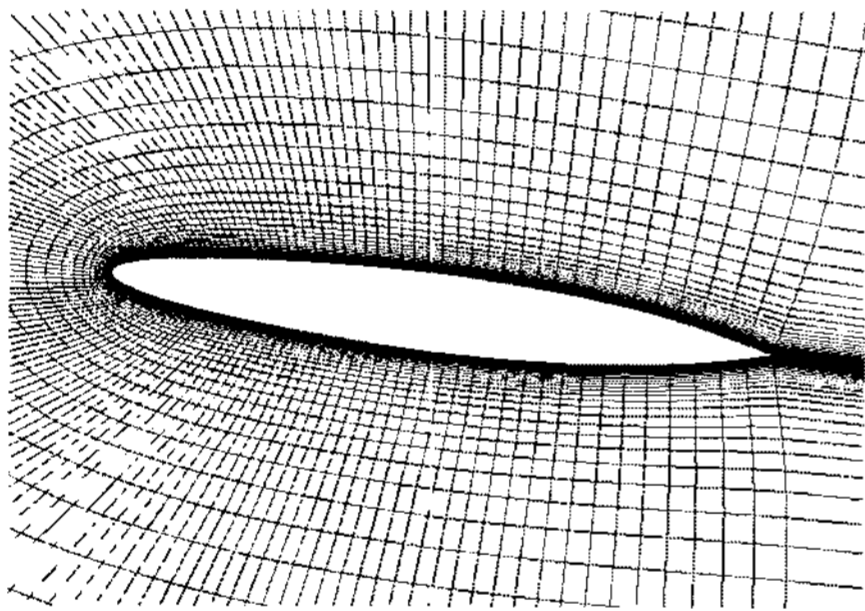


Fig. 11 NACA16012 modified hydrofoil grid system

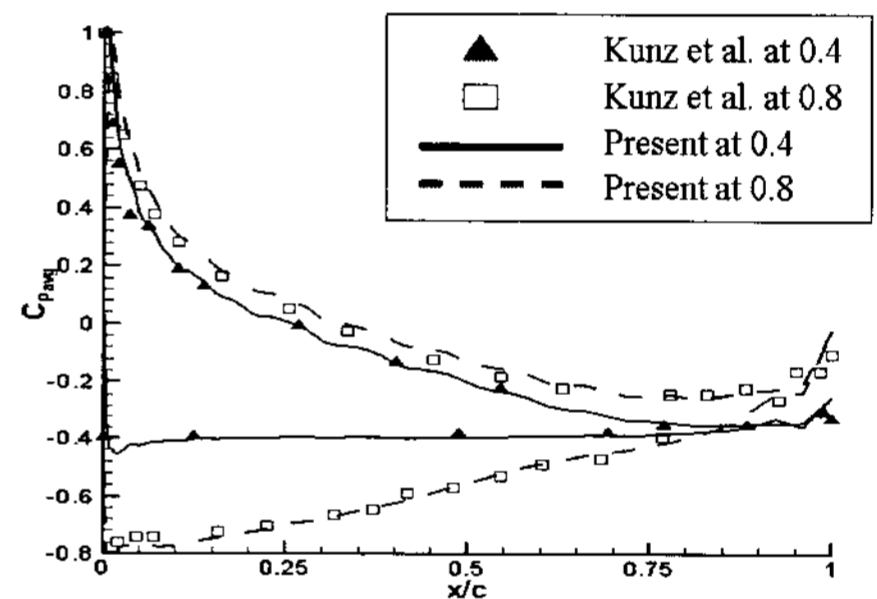


Fig. 12 Surface pressure coefficients at  $\sigma=0.4$  and  $0.8$

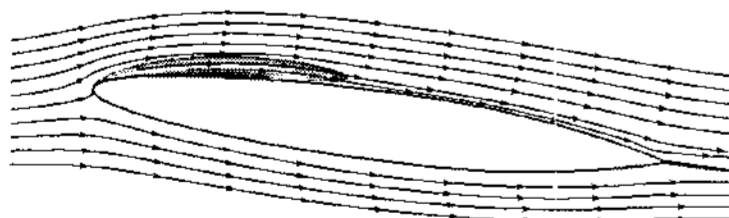


(a) At  $\sigma=0.4$



(b) At  $\sigma=0.8$

Fig. 13 Void of fraction at  $\sigma=0.4$  and  $0.8$



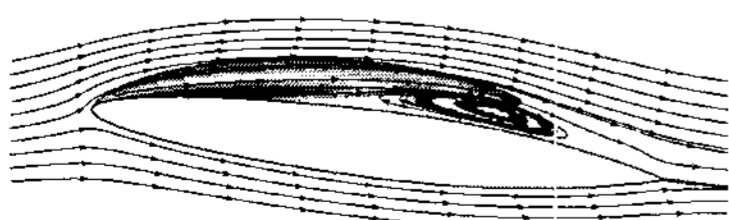
(a) Time = 4.08 (sec)



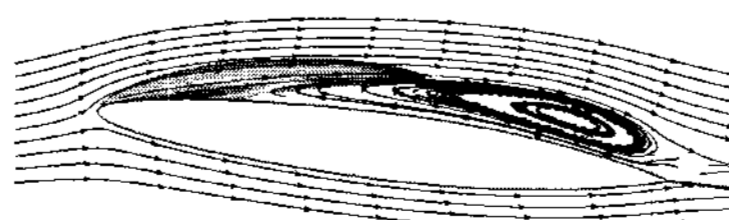
(b) Time = 6.12 (sec)



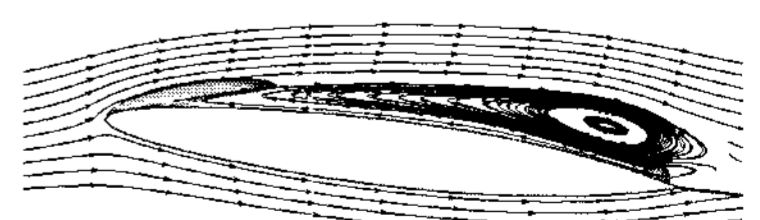
(c) Time = 8.16 (sec)



(d) Time = 10.20 (sec)



(e) Time = 12.24 (sec)



(f) Time = 14.28 (sec)

Fig. 14 Volume fraction and streamlines at some elapsed times

석의 어려움과 복잡성 때문에 대부분의 연구자들은 실험적으로 접근하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 전산해석을 통한 축류형 터보기계에서의 캐비테이션의 이상 유동해석의 기초연구로서 3차원 비정상상태 Navier-Stokes 방정식을 homogeneous equilibrium flow 캐비테이션 모델과 저 레이놀즈수  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하여 수중익형 주위의 캐비테이션 유동해석을 수행하였다. 전산해석을 통하여 얻어진 결과는 타 연구자의 실험 및 계산 결과와 비교하였으며, 비교적 잘 일치함을 보였으며 향후 각종 축류형 터보기계의 캐비테이션 유동해석에 기본 해석코드로써 적용할 예정이다.

## 후 기

본 논문은 부산대학교 자유 과제 학술연구비(2년)와 부산대학교 BK21 사업단의 연구 지원 사업에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Reboud, J. L., Delannoy, Y., 1994, "Two-phase flow modeling of unsteady cavitation, Proceedings of 2nd International Symposium on Cavitation," Tokyo, Japan, pp.39~44.
- (2) Song, C., He, J., 1998, "Numerical simulation of cavitating flows by single-phase flow approach, Proceedings of 3rd International Symposium on Cavitation," Grenoble, France, pp.295~300.
- (3) Kunz R.F., Lindau J.W., Billet M.L., Stinebring D.R., 2001, "Multiphase CFD Modeling of developed and supercavitating flows," Applied Research Lab. Rept.
- (4) Merkle, C. L., Feng, J. Z., Buelow, P. E. O., 1998, "Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation, Proceedings of the 3rd International Symposium on Cavitation," Grenoble, France, pp.307~311.
- (5) Kunz, R. F., Boger, D. A., Stinebring, D. R., Chyczewski, T. S., Lindau, J. W., Gibeling H. J., Venkateswaran, S., Govindan, T. R., 2000, "A preconditioned Navier - Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction," Computers and Fluids, Vol 29, pp.849~875.
- (6) Ahuja, V., Hosangadi, A., Arunajatesan, S., 2001, "Simulation of cavitating flow using hybrid unstructured meshes," Journal of Fluids Engineering, Vol 123, pp.331~340.
- (7) Shin, B. R., Itohagi, T., 1998, "A numerical study of unsteady cavitating flows, Proceedings of the 3rd International Symposium on Cavitation," Grenoble, France, pp.301~306.
- (8) Venkateswam, S., Lindau, J. W., Kunz, R. F., Merkle, C. L., 2001, "Preconditioning algorithms for computation of multi-phase mixture flows," AIAA Paper 2001-0279.
- (9) Lindau, J., Kunz, R., Boger, D., Stinebring, D., Gibeling, H., 2002, "High Reynolds number, unsteady, multiphase CFD modeling of cavitating flow," Journal of Fluids Eng., Vol. 124, pp.607~615.
- (10) Roger, S. E., Kwak, D., 1998, "An Upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations," AIAA Paper 88-2583.
- (11) 박금성, 구본국, 박원규, 전호환, 2004, "Smagorinsky Model을 이용한 실린더 및 익형 주위의 LES 난류유동해석," 대한조선학회, 제41권, 4호, pp.1~8.
- (12) 송계조, 유혜란, 김동훈, 김찬기, 박원규, 2005, "캐비테이션 모델 상수가 반구형 실린더 주위의 캐비테이션 유동에 미치는 영향," 한국전산유체공학회 춘계학술대회, pp.223~227.
- (13) Chien, K.Y., 1982, "Prediction of change and boundary layer flows with a low Reynolds number turbulence model," AIAA Journal, Vol. 22, pp.33~38.
- (14) Dular, M., Bachert, R., Stoffel, B., Širok, B., 2005, "Experimental evaluation of numerical simulation of cavitating flow around hydrofoil," European Journal of Mechanics B/Fluids, Vol. 24, pp.522~538.
- (15) Shen, Y. T., Dimotakis, P., 1989, "The influence of surface cavitation on hydrodynamic forces," 22nd American Towing Tank Conference, St Johns, NF.
- (16) Kunz, R. F., Lindau, J. W., Kaday, T. A, Peltier, L. J, 2003, "Unsteady RANS detached eddy simulations of cavitating flow of a hydrofoil," 5th International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan.