대 한 조 선 학 회 논 문 집
제39권 제1호 2002년 2월

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 39, No. 1, pp.16-27, February 2002

자유표면을 가지는 점성 유동장내의 기포거동에 관한 기초해석

박일룡*, 전호환**

Basic Analysis of Bubble Behavior in the Viscous Flow Domain with the Free Interface

I. R. Park* and H. H. Chun**

요 약

이유체 비압축성 점성 유동장내에서의 이차원 기포의 운동과 변형을 레벨셋 방법을 도입하여 해석하였다. 지배방정식은 유한체적법을 사용하여 해석하였다. 본 방법의 수치계산결과는 발표된 실험결과와 계산결과의 비교를 통해 검증하였다. 수치계산에서는 초기상태에 유동장 내에 두 유체의 비교란 자유표면이 존재할 때 단일 및 다수의 기포의 운동과 변형을 해석하였다. 해석을 통해 표면장력의 변화와 밀도비의 변화에 따른 기포거동의 변화를 살펴볼 수 있었다. 자유표면은 기포가 자유표면으로 상승할 때 기포의 거동에 큰 영향을 끼친다. 레벨셋법을 사용하여 계산된 본 연구의 결과들을 통해서 기포거동의 특성을 살펴볼 수 있었다.

※Keywords :Level Set Method(레벨셋 방법), Bubble Behaviour(기포거동), FVM(유한체적법), Surface Tension(표면장력), Density(밀도) , Bond number(본드 수), Morton Number(모턴 수)

Abstract

A level-set method is used for analyzing the behaviors of gas bubbles in two fluids incompressible viscous flow domain. The governing equations are solved by using a finite volume method. The numerical results are verified by comparing with the experimental and other computational results. Computations for the deformations and motions of one or multi-bubbles in the flow domain with the initial undisturbed free interface are conducted. It can be seen that numerical results for different surface tension and density ratio arise very different behaviors of bubbles. When bubbles rise near the free interface, the free interface gives some great influence on the behaviors of bubbles. The present results computed by a level-set method give useful information about the properties of bubble motions and deformations.

접수일자: 2001년 7월 11일, 승인일자: 2002년 2월 8일
* 정회원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 (E-mail: irpark@kriso.re.kr)
** 종신회원, 부산대학교 조선해양공학과과(기계기술연구소)(E-mail: chunahh@pnu.ac.kr)

1. 서론

여러 유체가 공존하는 경우, 특히 밀도가 큰 액체 가운데 있는 기포의 거동의 이해는 연소, 가솔린 정제, 원유 속의 기포거동, 클리닝 등의 화학공학분야에 있어 중요한 연구과제 중의 하나이다. 최근에는 환경분야에서 기포거동의 특성에 대한 해석과 지식을 이용하여 환경문제에 응용하고 있다. 한 예로서 유해한 가스를 심해 속에 분사하여 기포상태로 상승시키면서 바다 속에서 분해되도록 하는 연구가 있다(정노택 등 2000). 또한 선박유체분야에서는 기포를 이용한 선박의 저항감소를 위한 연구의 예가 있다(고석천/김효철 1999, 김승남/이영길 2000, 김호은/이영길 2000, 안일준 등 2000, 장진호 등 2000). 이는 기포거동에 대한 연구들이 여러 공학분야에서 유용하게 응용되고 있음을 보여주고 있다.

기포거동해석을 위한 수치해석법에는 두 가지 이상의 유체가 공존할 경우 생기는 경계면의 움직임을 해석할 수 있는 많은 기법들을 이용할 수 있다. 이들 가운데 레벨셋(level-set)법에 대한 연구들(Sussman 등 1994, Peng 등 1999)이 있으며, 선박유체분야에 적용된 예는 강국진(1996), Vogt(1998), Dommermuth 등(1998), Bet 등(1998) 그리고 박일룡/전호환(1999), Chun 등(2000) 등의 문헌이 있다.

본 논문에서는 자유표면을 가지는 점성유동장 내에서의 기포거동 해석에 대한 기초연구로서 2차원 기포거동에 대한 연구를 수행하였다. 지배방정식은 유한체적법으로 이산화 하여 해석하였으며 이유체 경계면의 움직임과 변형을 해석하기 위해 국부레벨셋(local level-set)법을 도입하였다.

본 계산결과의 검증을 위해서 기포상승에 대한 계산결과를 Ginzburg/Wittum(2001)의 2차원 수치결과와 비교하였다. Ginzburg/Wittum(2001)은 기포상승문제에 대한 2차원 수치해석 계산결과를 Collins(1965), Hnat/Buckmaster(1976) 그리고 Bhaga/Weber (1981)의 실험결과 들과 Sussman/ Smereka(1997)의 축대칭 해석결과와 비교하였다.

Ginzburg/Wittum(2001)의 체계적인 2차원 기포거동 해석결과들은 실험과 타 계산결과와 물리적으로 근사하게 잘 일치하는 결과를 보여주고 있어 기포거동에 대한 2차원 해석의 유용성을 보여주었다.

본 연구에서는 자유표면이 없는 경우 앞서 언급한 기포문제의 수치계산결과에 대한 검증을 수행한 후, 기포거동에 영향을 미치는 주요 변수인 표면장력과 밀도비 변화를 통해서 자유표면의 영향을 포함한 하나의 기포와 다수의 기포거동해석을 수행하여 결과들을 분석하고 토의하였다.

2. 문제의 정식화

2.1 레벨셋 형태의 지배방정식

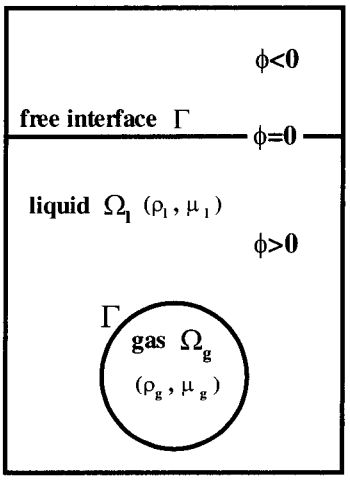

Fig.1 Definition of the physical domain

비압축성 점성 유동장에 대한 개략적인 설명을 Fig.1에서 보인 것과 같이 두 유체의 밀도와 점도를 각각 (ρ_l, ρ_g), (μ_l, μ_g)로 구분하여 나타내었으며, 여기서 아래 첨자 l, g는 액체와 기체를 의미한다. 두 유체의 영역과 만나는 경계면에 대해서 레벨셋 함수 $\phi(\boldsymbol{x}, t)$를 사용하여서 개념적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\phi(\boldsymbol{x},t) &> 0, \text{ if } \boldsymbol{x}\in\Omega_l\\ \phi(\boldsymbol{x},t) &< 0, \text{ if } \boldsymbol{x}\in\Omega_g\\ \phi(\boldsymbol{x},t) &= 0, \text{ if } \boldsymbol{x}\in\Gamma\end{aligned} \tag{1}$$

여기서 레벨셋 함수는 경계로부터 계산된 거리의 함수를 사용하였다.

표면장력 $\boldsymbol{F}_s$를 포함한 레벨셋 형태의 비압축성 점성유동의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\rho(\phi)\frac{D\boldsymbol{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla\cdot[2\mu(\phi)\Theta] + \boldsymbol{F}_s + \rho(\phi)\boldsymbol{g} \tag{2}$$

여기서 $\boldsymbol{u}(u_1, u_2)$는 속도벡터이고, p는 압력, Θ는 변형율 텐서 그리고 $\boldsymbol{g}$는 중력가속도를 나타낸다.

레벨셋 함수를 사용하여 법선벡타 $\boldsymbol{n}$과 곡률 κ는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$|\nabla\phi| = 1 \tag{3}$$

$$\boldsymbol{n} = \frac{\nabla\phi}{|\nabla\phi|} = \nabla\phi \tag{4}$$

$$\kappa = \nabla\cdot\boldsymbol{n} = \frac{\phi_y^2\phi_{xx} - 2\phi_x\phi_y\phi_{xy} + \phi_x^2\phi_{yy}}{(\phi_x^2+\phi_y^2)^{3/2}} \tag{5}$$

이와 같이 정의된 법선벡타와 곡률을 사용하여 식(2)의 표면장력 $\boldsymbol{F}_s$는 특이점을 분포한 형태로서 델타함수 $\delta(\phi)$를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{F}_s = \sigma\kappa(\phi)\boldsymbol{n}\delta(\phi) = \sigma\,\kappa(\phi)\nabla\phi\delta(\phi) \tag{6}$$

여기서 σ는 표면장력계수이다.

2.2 국부 레벨셋법 (Local level-set method)

경계면 근방의 유한한 영역에서만 레벨셋법을 이용하여 두 유체가 만나는 경계의 움직임과 변형을 계산하면 계산의 시간을 절감할 수 있다. 본 연구에서는 Peng(1999)이 제시한 방법을 도입하였으며 간략히 설명하면 다음과 같다.

임의의 상수 β, γ가 $0<\beta<\gamma$일 때 경계면의 주위로 $T_o=\{\boldsymbol{x}\in\Omega: |\phi(\boldsymbol{x},t)|<\gamma\}$의 영역을 정의할 수 있다. T_o영역 안에서 경계의 움직임과 변형은 다음의 방정식을 풀어서 계산한다.

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + c(\phi)\nabla\phi\cdot\boldsymbol{u} = 0 \tag{7}$$

여기서

$$c(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & \text{if } |\phi|<\beta \\ \dfrac{(|\phi|-\gamma)^2(2|\phi|+\gamma-3\beta)}{(\gamma-\beta)^3} & \text{if } \beta<|\phi|<\gamma \\ 0 & \text{if } |\phi|>\gamma \end{pmatrix}$$

식(7)에서 구해진 레벨셋 함수의 해를 $\hat{\phi}$라 할 때 새로운 영역 $T_1=\{\boldsymbol{x}\in\Omega: |\hat{\phi}|<\gamma\}$을 얻을 수 있다. 이 영역에서 앞서 구해진 해 $\hat{\phi}$를 다음의 비선형 쌍곡선 방정식의 초기조건으로 하고 계산하여 정확한 거리의 함수를 유지하도록 한 해, $\hat{\phi}^d$를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\hat{\phi}_o^{\,d}(\boldsymbol{x},0) &= \hat{\phi}(\boldsymbol{x},t)\\ \frac{\partial\hat{\phi}^d}{\partial t} + sign(\hat{\phi}_o^{\,d})(|\hat{\phi}^d|-1) &= 0\end{aligned} \tag{8}$$

최종 얻어진 새로운 해 ϕ_{new}는 다음과 같다.

$$\phi^{new} = \begin{pmatrix} -\gamma & \text{if } \hat{\phi}^d<-\gamma \\ \hat{\phi}^d & \text{if } |\hat{\phi}^d|\le\gamma \\ \gamma & \text{if } \hat{\phi}^d>\gamma \end{pmatrix} \tag{9}$$

식(7)과 (8)에서 시간과 공간의 이산화는 explicit Euler법과 2차 정도의 ENO(Harten 등 1987)을 각각 사용하였다. Peng(1999)의 연구내용에 따라 본 논문에서는 격자간격 Δh에 대해서 $\beta=2\Delta h$, $\gamma=2\beta$를 사용하였다.

level-set 값에 따라 밀도와 점성계수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\left.\begin{aligned}\rho(\phi) &= \rho_g + (\rho_l-\rho_g)H(\phi)\\ \mu(\phi) &= \mu_g + (\mu_l-\mu_g)H(\phi)\end{aligned}\right] \tag{10}$$

여기서 $H(\phi)$는 Heaviside 함수로서 $H(\phi>0)=1$, $H(\phi<0)=0$, $H(\phi=0)=0.5$이다.

이유체 경계면을 물리량이 연속적으로 변하는 일정한 두께를 가지는 경계면으로 가정하면 큰 밀도차와 같은 불연속성에 의해서 발생하는 경계면에서의 수치불안정을 없앨 수 있다. 이와 같이 가정된 이유체 경계면의 두께의 영향은 다음과 같이 변환된 Heaviside함수에 의해 고려될 수 있다.

$$H_\varepsilon = \begin{cases} 0, & \text{if } \phi < -\varepsilon \\ 0.5[1. + \phi/\varepsilon + \sin(\pi\phi/\varepsilon)/\pi], & \text{if } |\phi| \le \varepsilon \\ 1, & \text{if } \phi > \varepsilon \end{cases} \quad (11)$$

여기서, ε은 이유체 경계면의 두께를 나타내고, 본 계산에서는 $\varepsilon = 2.5\triangle h$ 사용하였다.

식(11)에 의해서 델타함수 $\delta(\phi)$를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\delta_\varepsilon(\phi) = \frac{dH_\varepsilon(\phi)}{d\phi} \quad (12)$$

3. 수치계산 과정

지배방정식은 Ferziger/Perić(1996)에 자세한 소개내용과 같이 비엇갈림 격자계 내에서 유한체적법을 사용하여 이산화하여 해석하였다. 공간 이산화에서는 2차 정도를 가지는 선형내삽법을 사용하고 지배방정식의 대류항은 1차 정도의 풍상차분법과 2차 정도의 중심차분법을 혼합하여 사용하는 하이브리드(hybrid)법으로 이산화 하였다. 시간적분은 implicit Euler법을 사용하고, 압력과 속도장의 연성은 SIMPLEC법을 사용하여 만족시켰다. 비정상 문제를 해석하기 때문에 매 시간 지배방정식에 대한 선형연립방정식의 해를 구하기 위한 계산속도를 증가시키기 위해서 Conjugate gradient법을 이용하였다.

4. 계산결과 및 토의

2차원 기포 거동에 관한 해석은 Fig.1에서 나타낸 개념도와 같이 초기에 교란이 없는 액체와 기체의 경계면인 자유표면을 포함하는 유동장내에서 이루어진다. 유동장의 모든 경계는 닫혀있는 강체벽으로 가정하였다. 기포거동의 주요한 물리적 매개변수들은 다음과 같다.

밀도비: ρ_l/ρ_g

점도비: μ_l/μ_g

Reynolds 수: $R_N = \rho_l \sqrt{gR_o} R_o/\mu_l$

Bond 수: $B_o = \rho_l g R_o^2/\sigma$

Morton 수: $M_o = B_o^3/R_N^4$

Eötvös 수: $E_o = g\rho_l (2R_o)^2/\sigma$

여기서 R_o는 기포의 반경을 나타낸다. Bond 수는 기포에 작용하는 부력과 표면장력의 영향을 나타내고, Morton수는 유체의 점도의 크기의 영향을 받는 매개변수이다.

우선 계산의 검증을 위해서 ρ_l/ρ_g=909.1, μ_l/μ_g=117.65, M_o=0.065, E_o=39.3의 계산조건에서 Ginzburg/Wittum(2001)의 결과와 비교하였다. 반경 R_o=1/6 cm의 기포가 1×2 cm의 닫힌 영역의 (0.5 cm, 0.75 cm)의 위치에서 상승할 때 상승속도와 기포변형 모습을 비교하였다. 사용된 격자수는 $64\times128 CVs$(control volumes)이다.

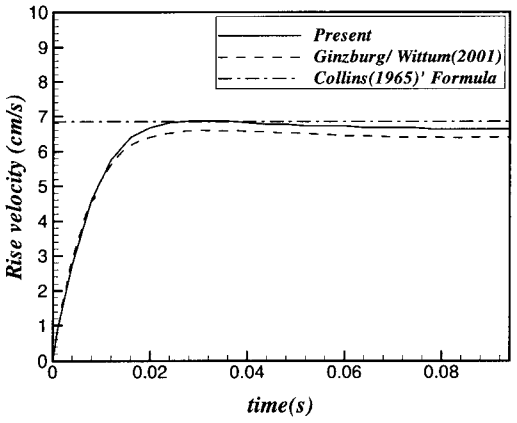

Fig.2 Comparison of rise velocity of bubble

Fig.2는 상승하는 기포가 정상상태에 도달한 때의 일정한 상승속도에 대해 Collins(1976)가 유도한 2차원 실험식의 값과 시간에 따른 기포의 상승속도 변화를 Ginzburg/Wittum(2001)의 계산결과와 비교한 그림을 보여주고 있다. 그림에서 본 계산결과가 실험식의 값에 가까운 모습을 보여주고 있다.

Fig.3은 시간에 따른 기포의 변형 모습을 보여주고 있다. Ginzburg/Wittum(2001)논문의

Table 1 Conditions of the computational cases

	ρ_l/ρ_g	μ_l/μ_g	R_N	B_o	M_o
I. Single bubble rise					
case-1	1000	100	200	25	9.77×10e-6
case-2	1000	100	200	5	7.82×10e-8
case-3	100	100	20	25	9.77×10e-2
II. Multi-bubble rise					
case-1	1000	100	200	25	9.77×10e-6
case-2	1000	100	200	5	7.82×10e-8

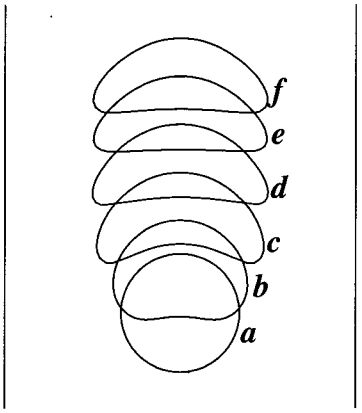

Fig.3 Sequential behaviors of a rising bubble: ρ_l/ρ_g=909.1, μ_l/μ_g=117.65, M_o =0.065, E_o= 39.3(a:0.0s, b:0.02s, c:0.04s, d:0.06s, e:0.08s, f:0.095s)

Fig.11의 결과보다 본 방법으로 계산된 Fig.3에 보인 결과가 Hnat/Buckmaster(1976)의 Fig.1과 Sussman/Smereka(1997)의 Fig.4에 조금 더 근접한 모습을 보이고 있다.

다음의 계산은 하나의 기포가 정지 상태에서 두 유체의 교란되지 않은 자유표면으로 오르는 경우와 다수의 서로 다른 크기의 기포들이 떠오르는 경우에 대해 Table 1의 계산조건들을 사용하여 수행하였다. 계산조건들은 크게 표면장력의 크기와 밀도비의 변화에 따른 점도의 기포거동에 미치는 영향을 살펴보는 것으로 하였다.

단일 기포상승문제

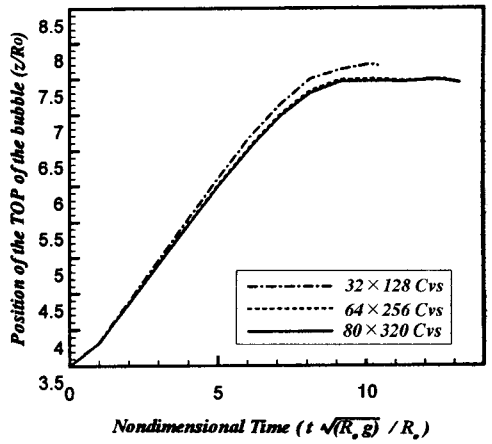

Fig.4 Effect of grid size on bubble rise position (case-1)

Fig.4는 기포가 Table 1에서 case-1의 계산조건에서 자유표면 아래로 반경의 4배의 깊이에서 정지한 상태에서 떠오를 때 기포의 맨 위쪽 표면의 위치를 무차원 시간($t\sqrt{R_o g}/R_o$)에 대해 기록한 그래프이다. 기포가 상승을 계속하다가 수평

으로 유지하는 부분은 자유표면에 근접하여 기포가 자유표면의 영향을 받으며 기포 자신을 유지하는 과정들이고 최종 끊어진 점은 기포가 붕괴되어 사라진 것을 나타낸다. 우선 본 논문에서는 격자의 수에 대한 수렴도 조사를 위해서 32×128, 64×256 그리고 $84\times320 CVs$의 각각 세 가지 격자를 사용하였으며 계산영역은 $0.6\times2.6\ cm$이다. $32\times128 CVs$를 제외한 두 가지의 결과가 거의 같은 모습을 보여주고 있으며, 본 논문에서는 모든 계산에서 $84\times320 CVs$를 사용하였다.

Fig.5는 계산조건 case-1과 case-2의 결과를 서로 비교한 그림으로서 Bond 수의 차이, 즉 표면장력 크기가 기포거동에 미치는 영향을 살펴볼 수 있다. Bond 수가 작은 case-2의 조건이 표면장력이 큰 경우이다.

무차원 시간에 따른 기포의 위치만을 가지고 자세한 기포의 거동을 알 수는 없다. 그러나 개략적인 특성을 알 수 있다. case-1의 결과에서는 기포가 자유표면으로 상승하여 근접한 후에도 기포는 한동안 붕괴되지 않고 형태를 계속해서 유지하고 있음을 알 수 있다. 이와는 달리 표면장력이 큰 case-2의 결과에서는 기포가 상승하여 자유표면에 근접하는 짧은 순간동안 자유표면과 빠르게 반응하여 오래 견디지 못하고 붕괴하였음을 알 수 있다. case-2의 결과에서와 같이 표면장력이 클 경우는 경계면들 사이에 끌어들이는 작용이 크며 서로 빠르게 병합되는 것을 볼 수 있다.

Fig.6을 살펴보면 case-1과 case-3의 조건에서 계산된 기포 위치의 결과를 서로 비교하여 나타내었다. 여기서 표면장력과 점도비는 같으며 밀도비가 case-1보다 case-3의 조건이 더 작다. Table 1에서 볼 수 있듯이 두 경우 Morton 수의 값의 차이를 보여 주고 있으며 case-3의 경우가 점성의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 비교된 결과를 살펴보면 case-3에서 기포의 상승속도가 case-1보다 조금 느린 것을 보여준다. 이는 밀도비의 차이로 인한 점성의 영향 때문인 것으로 보인다. 그리고 case-3은 기포가 자유표면으로 상승한 후 case-1보다도 더 오랜 시간 유지하면서 상하 진동하는 형태를 보여주고 있다. 표면장력의 크기는 서로 같은 조건을 사용하였으므로 자유표면의 영향으로 기포의 움직임은 차이가 있으나 case-2와는 달리 두 경우 자유표면의 경계면과의 반응은 크지 않다.

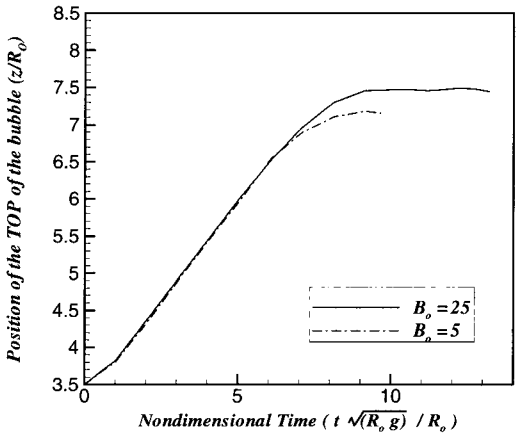

Fig.5 Comparison of bubble rise positions for $B_o=25$ and $B_o=5$ at $R_N=200$ (case-1 & case-2)

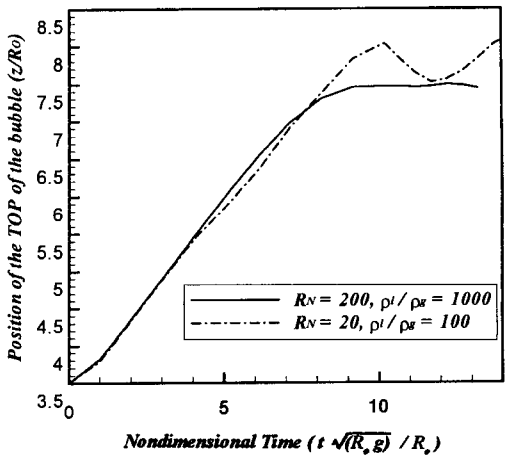

Fig.6 Comparison of bubble rise positions for $R_N=200$ and $R_N=20$ with $B_o=25$ (case-1 & case-3)

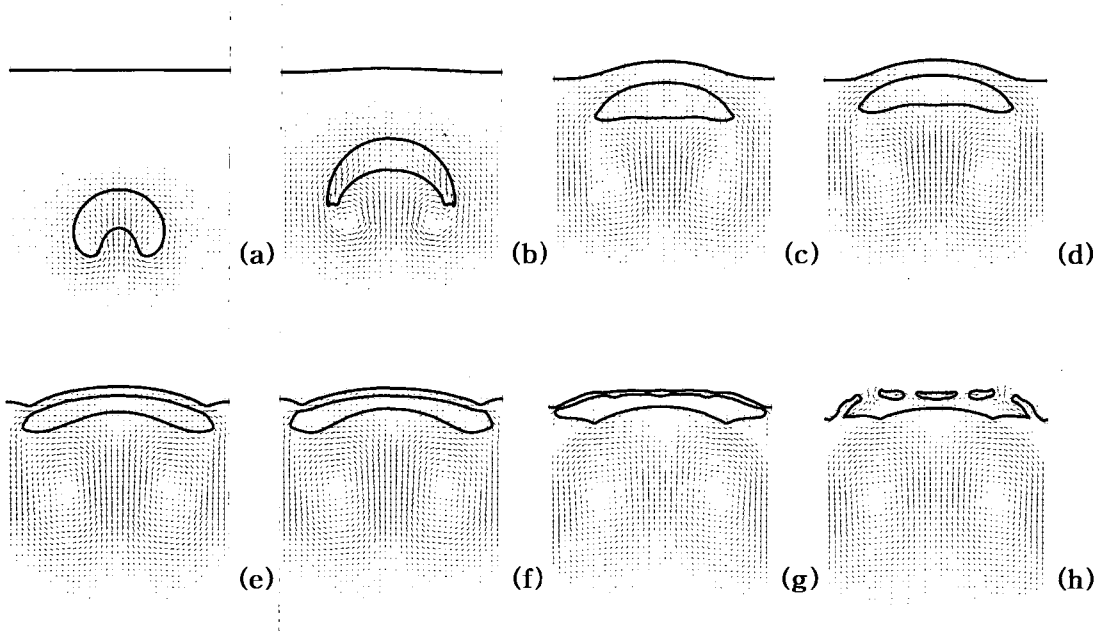

Fig.7 Sequential behaviors of a rising bubble with the velocity vectors in the domain(case-1: $B_o=25$, $R_N=200$)

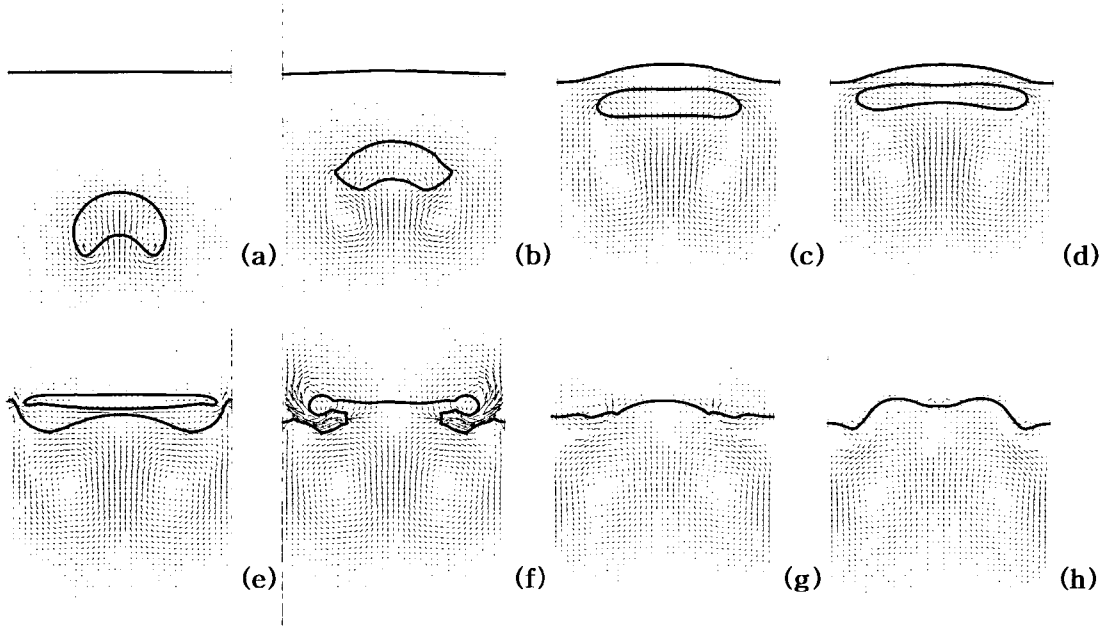

Fig.8 Sequential behaviors of a rising bubble with the velocity vectors in the domain(case-2: $B_o=5$, $R_N=200$)

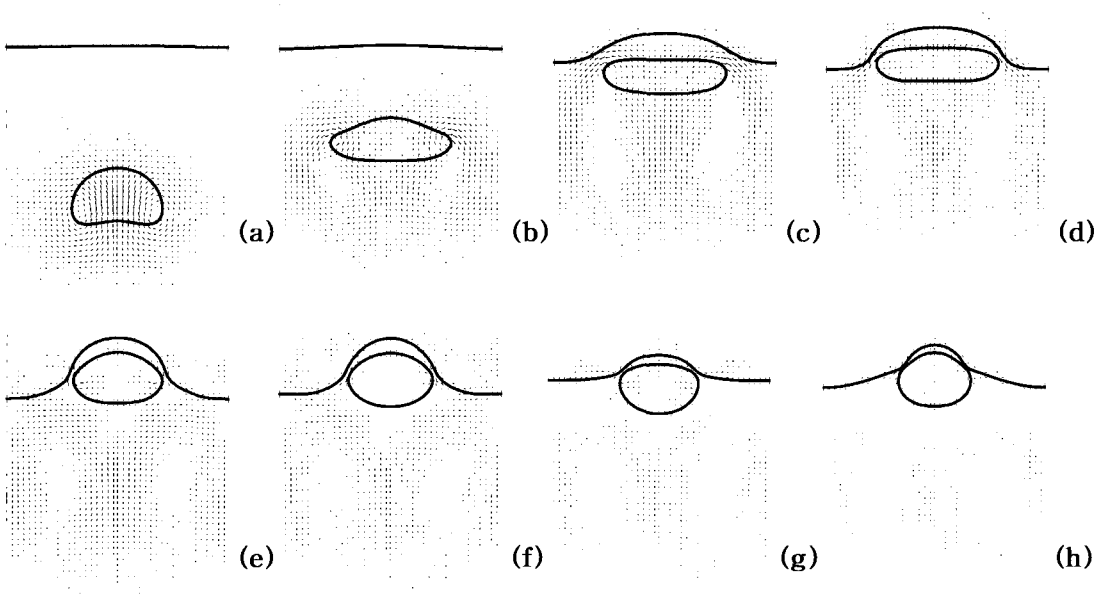

Fig.9 Sequential behaviors of a rising bubble with the velocity vectors in the domain(case-3: $B_o=25$, $R_N=20$)

Fig.7,8,9에서는 계산된 기포주위 유동장의 속도벡터와 함께 기포의 움직임과 변형들을 같은 8개의 시점에서 나타낸 그림이다. 앞서 기포의 위치변화에 대한 결과와 함께 본 그림은 세 가지 조건에서 각각 계산된 결과들을 좀 더 구체적이고 상세한 기포의 거동을 비교해 볼 수 있다. 모든 결과들은 case-1의 결과를 기준으로 표면장력의 영향(case-2) 그리고 밀도비에 따른 점성의 영향(case-3)을 비교하여 살펴볼 수 있다.

자유표면 아래에서 정지해 있던 기포들은 부력으로 인해서 상승하는데 기포의 아래에 액체의 혀(liquid tongue)라 불리는 형태의 제트가 기포를 밀어 올리면서 가속시키고 있다. 또한 기포표면 주위로 보오텍스가 점차 발생하고 있는 것을 관찰할 수 있다. Fig.7,8,9의 (a)의 시간에서 case-2와 case-3은 case-1보다 기포가 주위의 이러한 외력에 대해 변형이 적고 case-3이 가장 변형이 적다. 일반적으로 부력으로 상승하면서 받는 외력에 대해 견디는 힘들은 표면장력(case-2)과 밀도차(case-3)가 주요 역할을 한다.

Fig.7,8,9의 (b)의 시간에서 보면 기포주위 외력에 대해 case-1은 길게 기포가 좌우로 펼쳐지면서 표면장력과 자신의 복원력으로 견디고 있는 것을 볼 수 있으며 case-2와 3은 case-1과는 달리 빠르게 기포의 안쪽으로 형상을 복원하고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig.7,8,9의 (c), (d)시간에서 기포가 자유표면으로 가까이 상승하면서 case-1은 위쪽이 원형이고 아래 면은 평평한 모습의 모자형태의 모습을 가지는 반면 case-2와 3은 타원형태를 이루고 있다. 기포가 자유표면의 영향이 현저하게 작용하는 영역으로 들어서면서 자유표면의 영향이 기포의 운동과 형상의 변화에 크게 영향을 미치고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig.7,8,9 (e)와 (f)의 시점에서는 자유표면을 만나면서 기포는 자유표면을 따라 길게 좌우로 펼쳐지는 것을 볼 수 있으나 밀도비가 작은 case-3의 경우는 일순간 펼쳐지는 듯 하지만 원형으로 뭉치는 앞의 두 결과와는 다른 모습을 나타내고 있다. 한편으로 case-2는 좌우로 기포가 펼쳐지

지만 표면장력의 영향으로 case-1과 3과는 달리 자유표면과 빠르게 병합하여 기포가 붕괴되고 있는 모습을 보이고 있다.

Fig.7,8,9의 (g),(h)까지 계속해서 살펴보면 case-1은 기포가 빨리 붕괴되지 않고 자유표면과 함께 좌우로 길게 펼쳐져 상당히 오랫동안 유지하면서 자유표면과 얇은 필름 형태를 유지하고 있다. 그러면서 최종 기포와 자유표면이 형성하는 이 필름 막이 더욱 얇아지면서 붕괴하는 것을 보여 주고 있다. case-3은 기포가 붕괴되지 않고 더욱 원형에 가까워지고 있고 자유표면이 받는 중력과 표면장력의 작용 하에 위 아래로 진동하는 모습을 보여주고 있다.

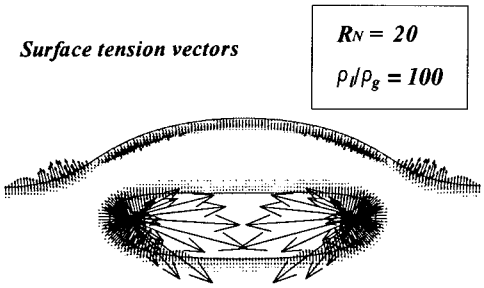

Fig.10 Surface tension distributions along the interfaces

Fig.10은 기포와 자유표면의 표면에서 작용하는 표면장력의 계산된 분포를 보여주고 있다. 본 방법은 Eulerian법이므로 정확한 경계에서 경계조건을 부여하지 않고 경계근방의 일정한 미소 두께 내에서 경계에서 경계조건이 성립하도록 외력을 분포한다. 그림에서 경계의 곡률변화에 따른 표면장력의 크기를 잘 보여주고 있다.

다수 기포상승문제

Fig.11과 12는 다수의 기포의 거동을 해석한 결과이다. 계산은 표면장력의 크기에 따른 영향만을 고려하여 Table 1에 나타낸 내용과 같이 두 가지 조건에서 계산을 수행하였다. 앞서 계산된 주어진 물리적 매개변수와 계산조건에서 하나의 기포거동을 자세하게 살펴보았는데 다수의 기포거동 계산에서는 기포들 사이의 복잡한 상호작용을 관찰할 수 있다.

Fig.11과 12의 case-1과 case-2의 결과에서는 앞서 표면장력의 크기가 다른 조건에서 하나의 기포거동과 마찬가지로 Bond 수가 큰, 즉 표면장력이 작은 case-1의 기포운동들이 활발하고 변형되는 정도가 대체로 큰 것을 알 수 있다. 다수의 기포들의 운동이 가속되면서 기포들 사이의 활발한 상호작용을 볼 수 있다. 특히 아래쪽에 위치한 기포들은 위쪽의 기포 후류의 영향을 상당히 크게 받기 때문에 운동의 가속이 큰 것을 관찰할 수 있다. 기포의 운동들이 빨라지면서 기포 주위로 보오텍스들이 복잡하게 생성되면서 기포들이 활발한 회전운동을 보이고 있으며 case-1의 결과에서는 상당히 빠른 회전운동을 매시간에 걸쳐서 보여주고 있다.

아래쪽의 기포들이 두 개 또는 세 개의 기포로 나누어지는 현상을 관찰할 수 있는데 case-1이 그 정도가 크고 기포들간의 병합은 둔하여 자유표면으로 상승하여 기포가 붕괴되기 직전까지도 나누어진 크고 작은 여러 개의 기포가 공존하고 있다. 반면, case-2의 결과에서는 case-1의 결과와 달리 기포가 두 개 이상으로 나누어지는 빈도가 낮으며 표면장력의 영향으로 서로 병합되는 현상은 현저하다. case-1의 결과에서는 나누어진 기포들이 자유표면 근방에서 활발한 회전운동을 하면서 거의 개별적으로 붕괴되고 있지만 case-2의 결과에서는 병합된 큰 덩치의 기포가 자유표면에 오르면서 큰 붕괴의 현상을 보이고 있다. 자유표면 근처에서는 case-1의 경우 하나의 기포의 거동에서는 얇은 필름을 형성하면서 유지되는 시간이 길었지만 다수의 기포거동해석의 결과에서는 주위 기포들의 운동의 영향으로 짧은 시간에 붕괴되고 있다. 기포들이 붕괴해가면서 사라진 기포들로 인해서 유동장의 교란이 작아지면서 붕괴되지 않고 남은 기포들의 거동 또한 작아지고 있는 것을 알 수 있다.

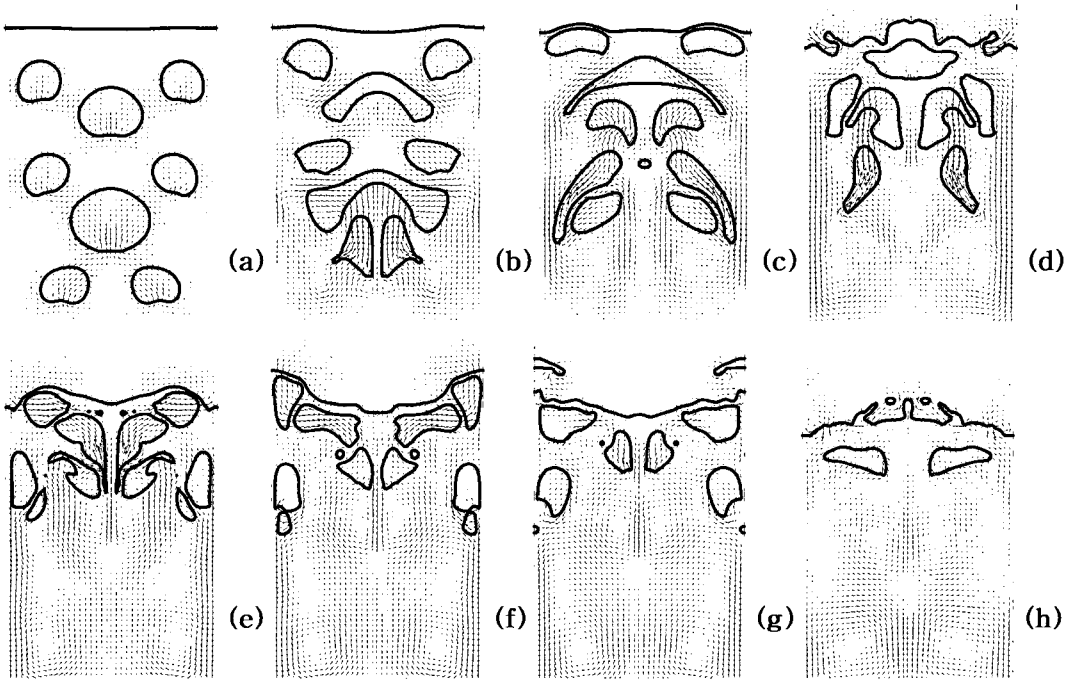

Fig.11 Sequential behaviors of rising multi-bubbles with the velocity vectors in the domain(case-1: $B_o=25$, $R_N=200$)

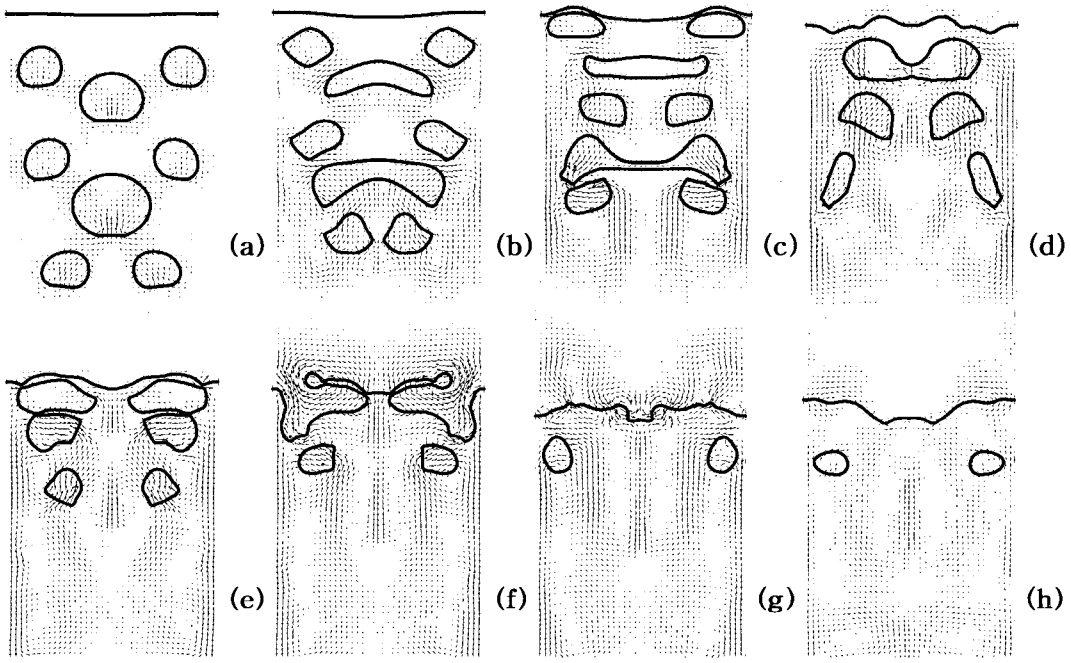

Fig.12 Sequential behaviors of a rising bubble with the velocity vectors in the domain(case-2: $B_o=5$, $R_N=200$)

5. 결 론

한 개 또는 다수의 기포거동을 레벨셋 방법을 도입하여 해석하였다. 본 연구의 2차원 단일 기포 상승문제의 계산결과는 실험과 타 계산자료와의 비교를 통해 볼 때 물리적으로 근사하게 일치하는 결과를 보여 주었다.

수치계산 결과분석을 통해서 기포거동을 이해하는 데 있어 주요 물리적 매개변수들이 기포의 운동과 변형에 미치는 영향들을 조사할 수 있었다. 또한 이러한 인자들의 변화에 따라 매우 다른 기포의 거동을 일으키는 것을 살펴볼 수 있다.

다수의 기포거동의 해석에서는 기포 자신이 가지는 거동특성과 주위 기포들의 거동의 복잡한 상호작용을 주어진 물리적 매개변수의 변화에 따른 결과를 서로 비교해 볼 수 있었다.

결론적으로 기포의 거동들은 물리적 매개변수의 변화와 다수의 기포가 존재할 때 그리고 주위 환경의 변화에 따라 상당히 다른 거동들을 보이게 된다는 것을 알 수 있었다. 본 연구는 다수 기포거동 연구의 초기 연구이며, 앞으로 목표인 실제의 3차원 기포거동해석을 위한 연구로 확장하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 강국진 2000 "Zero-level-set 방법을 사용한 자유표면파 계산," 대한조선학회 1996년도 추계학술대회 논문집, pp. 237-240
- 고석천, 김효철 1999 "선저부 공기공동을 이용한 실선선형의 저항성능 개선을 위한 선저형상 개량연구," 대한조선학회 논문집, 36권 3호, pp. 1-7
- 김승남, 이영길 2000 "균일 유동장에서의 기포의 거동에 대한 수치시뮬레이션," 대한조선학회 2000년도 추계학술대회 논문집, pp.133-136
- 김호은, 이영길 2000 "선체주위 기포거동에 관한 기초적 연구," 대한조선학회 논문집, 37권 4호, pp. 48-55
- 박일룡, 전호환 1999 "유한체적법에 의한 자유수면 유동해석에서 Level-set기법에 대한 연구," 대한조선학회 논문집, 36권 2호 pp. 40-49
- 안일준, 장진호, 김효철 2000 "발수성 표면에의 공기 윤활법 적용과 저항 감소 효과에 대한 연구," 대한조선학회 2000년도 추계학술대회 논문집, pp. 151-154
- 장진호, 안일준, 김효철 2000 "공기 윤활이 기하학적 상사 모형선의 저항 특성에 미치는 영향," 대한조선학회 2000년도 추계학술대회 논문집, pp. 146-150
- 정노택, Sato, T., and Abe, S. 2000 "밀도 함수법을 이용한 액적의 물질이동 수치 시뮬레이션," 대한조선학회 2000년도 추계학술대회 논문집, pp. 113-117
- Bet, F., Hanel, D. and Sharma, S., 1998 "Numerical Simulation of Ship Flow by a Method of Artificial Compressibility," Proceedings of the Twenty-Second Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, pp.173-182
- Bhaga, D. and Weber, M.E., 1981 "Bubbles in Viscous Liquids: Shapes, Wakes, and Velocities," Journal of Fluid Mechanics, Vol.105, pp. 61-85
- Chun, H.H, Park, I.R., and Lee, S.K., 2000 "Analysis of Turbulence Free Surface Flow around Hulls in Shallow Water Channel by a Level-set Method," Twenty-third symposium on naval hydrodynamics, France,
- Collins, R., 1965 "A Simple Model of the Plane Gas Bubble in Liquid," Journal of Fluid Mechanics, Vol.22
- Dommermuth, D., Innis, G., Luth, T., Novikov, E., Schlageter, E. and Talcott, J., 1998 "Numerical Simulation of Bow Waves," Twenty-second symposium on naval hydrodynamics, Washington, D.C., pp.159-172
- Ferziger, J. H., and Perić, M., 1996 Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer-Verlag, Berlin
- Ginzburg, I., and Wittum, G., 2001 "Two-Phase Flows on Interface Refined

Grids Modeled with VOF, Staggered Finite Volumes, and Spline Interpolations," Journal of Computational Physics, Vol.166, pp. 302-335

- Hnat, J. G., and Buckmaster, J. D., 1996 "Spherical Cap Bubbles and Skirt Formation," Phys. Fluids, Vol.19
- Harten, A., and Engquist, B., Osher, S., and Chakravarthy, S., 1987 "Uniformly High-Order Accurate Essentially Nonoscillatory Schemes, III," Journal of Computational Physics, Vol.71, pp.231-303
- Peng, D.P., Osher, S., Zhao, H.K. and Kang M.G., 1999 "A PDE-Based Fast Local Level Set Method," Journal of Computational Physics, Vol.155, pp. 410-438
- Sussman, M., Fatemi, E., Smereka, P., and Osher, S., 1997 "An Improved Level Set Method for Incompressible Two-Phase Flows," Computers and Fluids, Vol.27, No.5-6, pp.663-680
- Sussman, M., and Smereka, P., 1997 "Axisymmetry Free Boundary Problems," Journal of Fluid Mechanics, Vol.341, pp. 269-264
- Vogt, M., 1998 "A Numerical Investigation of the Level-set method for Computing Free Surface Waves," Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chalmers University of Technology, Report CHA/NAV/R -98/0054