



## 자유표면이 상승기포의 파괴에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구

윤익로,<sup>\*1</sup> 신승원<sup>2</sup>

## A NUMERICAL STUDY OF THE FREE SURFACE EFFECT ON RISING BUBBLE

Ikroh Yoon<sup>\*1</sup> and Seungwon Shin<sup>2</sup>

*Bubble rising phenomenon is widely founded in many industrial applications such as a steam generator in power plant. Many experimental and numerical researches have been already performed to predict dynamic behavior of the bubble rising process. Recently numerical approaches are getting popular since it can offer much detailed information which is almost impossible to obtain from the experiments. Rising bubble could penetrate through the top free surface which makes the problem much more complicate in addition to the phase changing effect even with latest numerical techniques. In this paper, the top free surface effect on rising bubble has been investigated. The gas-liquid interface was explicitly tracked using high-order Level Contour Reconstruction Method(LCRM) which is a hybridization of Front-Tracking and Level-Set method. Break-up behavior of rising bubble at free surface showed different characteristics with initial diameter of bubble.*

**Key Words :** 전산유체역학(CFD), 다상유동(Multiphase Flow), 기포 상승(Bubble Rising), 자유표면(Free Surface), Level Contour Reconstruction Method

## 1. 서 론

최근 전 세계적으로 화석연료의 고갈 및 기후변화협약 등으로 인해 에너지 문제가 크게 대두됨에 따라, 대체에너지의 개발뿐만 아니라 기존 시스템의 효율 향상이 중요한 이슈로 부각되고 있다. 이와 함께 열병합 발전 및 원자력 발전과 같은 고효율 방식의 에너지 변환 시스템에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있으며, 시스템을 구성하는 각 기능부품의 효율 향상에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

스팀 드럼(Steam drum)은 열병합 발전, 원자력 발전 시스템 등에서 증기를 발생시키는 중요한 구성요소로, 내부에서의 기포 거동 특성, 특히 자유표면에서 기포가 파괴되어 액적이 순증기에 포함되는 문제는 시스템 전체의 성능 특성에 매우 많은 영향을 미친다. 그러나 그 중요성에도 불구하고 다상유동

의 복잡성 및 스케일의 문제 등으로 인해 증발관에서의 기포 거동을 파악하는 것은 현재까지도 많은 난제를 안고 있으며, 대부분 실험적인 연구에 의존해 왔으나[1] 최근 증발관 내 기포의 거동을 국소적인 관점에서 보다 자세히 파악하기 위해 수치적인 연구가 활발히 진행되고 있다. Lyskin등은 비정렬격자계를 사용하여 정상상태에서 기포의 상승속도를 정량적으로 파악하였고[2,3,4], Tryggvason등은 Front Tracking 방법을 사용하여 대기포 유동의 특성을 수치적으로 연구하였다[5,6]. Davidson등은 개선된 VOF방법을 사용하여 기포상승 과정에서의 열전달 현상을 파악하였으며[7], Son등은 Level Set 방법을 사용하여 테일러 기포의 유동 특성을 연구하는 등[8] 최근까지 다양한 수치적 연구가 진행되었으나 대부분 기포의 종단 속도 및 형상에 연구의 초점이 집중되어 있고 자유표면에서의 기포 파괴 현상은 고려되어 있지 않다.

따라서 본 연구에서는, 증발관 내 상승 기포가 자유표면에서 파괴되는 현상이 순증기의 유동 특성뿐만 아니라 시스템 전체의 성능에 지배적인 영향을 미치는 것에 주목하여, 기포의 직경에 따라 자유표면에서 파괴되는 기포의 형상 및 파괴 특성을 수치적으로 파악하고자 한다.

1 정희원, 홍익대학교 대학원 기계공학과

2 정희원, 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

\* TEL : 02) 335-1633

\* Corresponding author, E-mail: yoonikroh@gmail.com

## 2. 수치 해석 방법

본 연구에 사용된 지배방정식은 다음과 같이 각 상에 동일하게 적용될 수 있는 형태로 표현할 수 있다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) + \mathbf{F} \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{u}$ 는 속도,  $p$ 는 압력,  $\mathbf{g}$ 는 중력을 나타낸다. 식(2)의  $\mathbf{F}$ 는 표면장력 항을 나타내며, 다음 식 (3)과 같이 유한한 두께를 갖는 델타 함수를 사용하여 표현할 수 있다.

$$\mathbf{F} = \int_{\Gamma(t)} \sigma \kappa_H \mathbf{n}_f \delta_f(\mathbf{x} - \mathbf{x}_f) ds \quad (3)$$

위 식 (3)에서  $\mathbf{x}_f$ 는 상 계면의 위치이며,  $\sigma$ 는 표면장력계수,  $\kappa_H$ 는 표면곡률,  $\mathbf{n}$ 은 수직단위벡터를 나타낸다. 이 때 표면곡률의 계산에는 하이브리드 방법이 사용되었다.[9]

본 연구에서는 이동하는 상의 경계를 직접 추적하고, 상 계면의 융합 및 분리를 효과적으로 다루기 위해 Front Tracking 방법[10]과 Level Set 방법[11]의 하이브리드 형태인 High-order Level Contour Reconstuction Method(LCRM)을 사용하였다.[12,13,14] LCRM 방법에서는 Front Tracking 방법과 같이 이동격자계를 사용하여 시간에 따라 이동하는 상 계면을 직접 추적하면서도, 거리함수를 사용하여 고정격자계에 형성된 contour level을 통해 계면이 주기적으로 재형성 된다. 따라서 이동격자계 요소간의 구조적인 연결성이 제거되어 상 계면의 융합 및 분리가 자동적으로 처리되는 방법으로, 보다 자세한 내용은 [12,13,14]에서 찾아볼 수 있다.

각 상의 물성치는 거리함수로부터 형성되어 0부터 1까지 부드럽게 변화하는 헤비사이드 형태의 지시함수  $I$ 를 사용하여 다음 식(4)와 같이 정의하였으며, 거리함수 및 지시함수  $I$ 를 구하는 자세한 방법은 [15]에 구체적으로 기술되어 있다.

$$b(\mathbf{x}, t) = b_1 + (b_2 - b_1)I(\mathbf{x}, t) \quad (4)$$

Navier-Stokes 방정식은 Chorin의 projection method를 사용하여 시간에 따라 적분하였으며, 이때 대류항의 계산에는 2차 ENO 방법, 점성항의 계산에는 Crank-Nicholson 방법을 사용하였다. 압력장은 BICGSTAB(Bi-conjugate gradient stabilized)을 사용하여 계산하였고, 지배방정식 계산에 대한 자세한 내용은 [12,13]에서 찾아볼 수 있다.

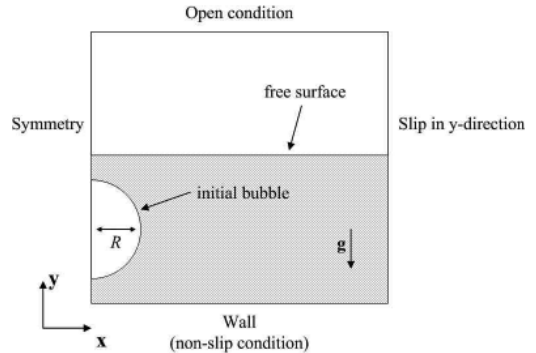


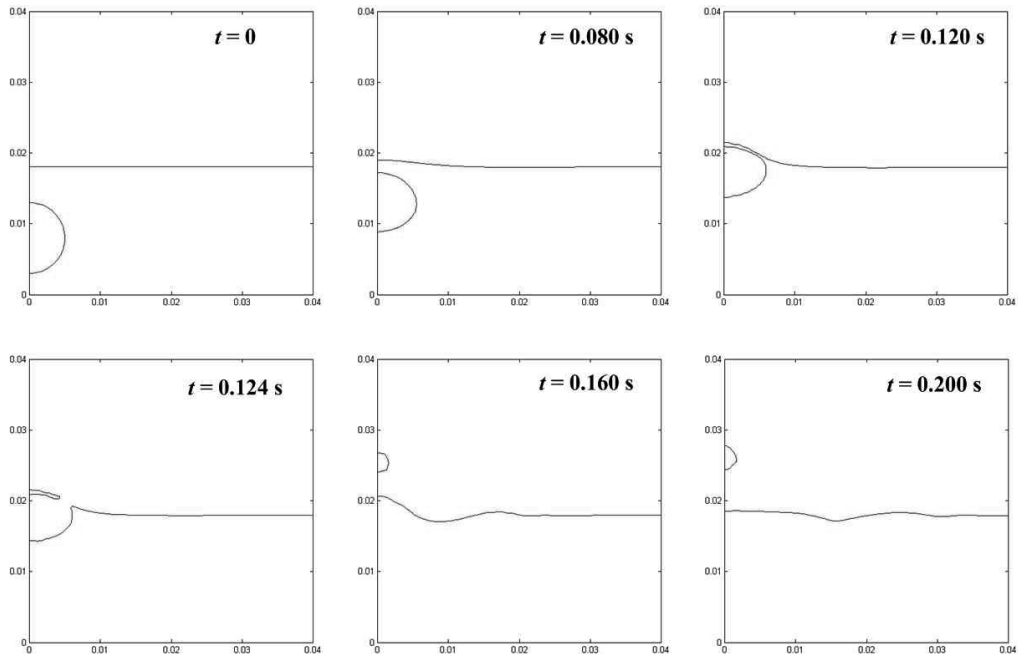
Fig. 1 Simulation geometry for rising bubble with free surface

## 3. 결과 및 토의

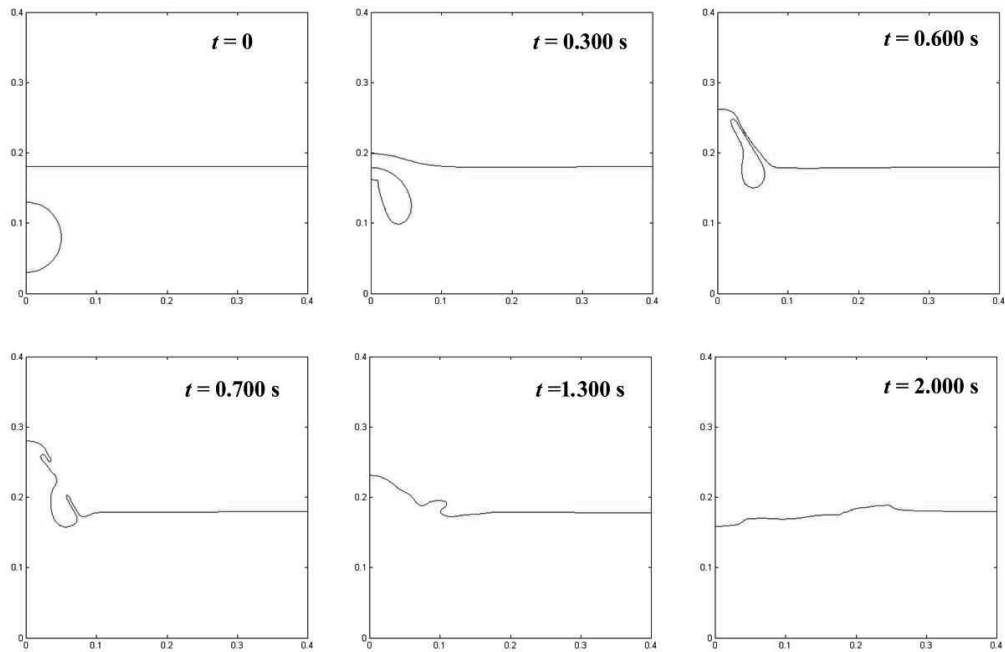
본 연구에 사용된 계산 영역은 Fig. 1에 도시되어 있다. 계산영역 크기의 0.2배 지점에 초기 반경이 R인 기포가 위치하고, 0.45배 지점에 자유표면이 형성되었다. 계산 영역의 크기는 x, y방향 모두 초기기포 반경의 8배로 하였으며, 중력은 -y 방향으로 작용한다. 왼쪽 경계에는 축대칭 조건, 아래쪽 경계에는 벽면 점착 조건, 오른쪽 경계에는 슬립 조건이 부여되었으며, 위쪽 경계에는 출구조건이 적용되었다. Fig. 2는 100<sup>2</sup>의 격자를 사용하여 초기 기포의 지름이 1cm인 경우(a)와 10cm인 경우(b)에 대해 자유표면에서 기포가 파괴되는 현상을 나타낸 그림이다. (a)에서 보이는 바와 같이 기포의 직경이 작아 표면장력의 영향이 상대적으로 큰 경우는, 기포가 전반적으로 구형에 가까운 형상을 유지하다가 파괴되며 기포파괴로 인해 위성 액적이 분리되는 현상이 관찰되었다. 한편 (b)와 같이 기포의 직경이 큰 경우는 상대적으로 표면장력의 영향이 작아 상승 및 파괴 과정에서 기포가 보다 심하게 변형된 후 파괴되었다. 위성 액적이 분리되는 현상은 관찰되지 않았으며 기포 직경이 작은 경우보다 기포가 파괴되기까지 필요한 시간이 크게 관찰되었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 스템드림의 증발관 내에서 발생하는 기포가 자유표면에서 파괴되는 현상을 LCRM 방법을 사용하여 수치적으로 파악하였다. 상승 기포가 자유표면에서 파괴되는 현상은 기포의 직경에 따라 뚜렷한 형상 및 위성 액적 유무에 차이를 보였으며 기포파괴에 도달하기까지의 시간에서도 많은 차이를 나타내었다. 한편 기포의 파괴가 순증기 유동에 미치는 영향을 보다 자세히 파악하기 위해 상 계면의 융합 거리 등에 대한 연구가 요구되며, 현재 진행 중에 있다.



(a)



(b)

Fig. 2 Interface evolution of rising bubble with free surface. (a) 1cm initial bubble diameter. (b) 10cm initial bubble diameter



## 참고문헌

- [1] 1995, Duineveld, P.C., "The rise velocity and shape of bubbles in pure water at high reynolds number," *J. Fluid Mech.*, Vol.292, pp.325-332.
- [2] 1984, Ryskin, G.R. and Leal, L.G., "Numerical solution of free- boundary problems in fluid mechanics. Part 1. the finite difference technique," *J. Fluid Mech.*, vol.148, pp.1-17.
- [3] 1984, Ryskin, G.R. and Leal, L.G., "Numerical solution of free- boundary problems in fluid mechanics. Part 2. Buoyancy- driven motion of a gas bubble through a quiescent liquid," *J. Fluid Mech.*, vol.148, pp.19-35.
- [4] 1984, Ryskin, G.R. and Leal, L.G., "Numerical solution of free- boundary problems in fluid mechanics. Part 3. Bubble deformation in an axisymmetric straining flow," *J. Fluid Mech.*, vol.148, pp.37-35.
- [5] 2002, Bunner, B. and Tryggvason, G., "Dynamics of homogeneous bubbly flows. Part 1. Rise velocity and microstructure of the bubbles," *J. Fluid Mech.*, vol.466, pp.17-52.
- [6] 2002, Bunner, B. and Tryggvason, G., "Dynamics of homogeneous bubbly flows. Part 2. Velocity fluctuations," *J. Fluid Mech.*, vol.466, pp.53-84.
- [7] 2002, Davidson, M.R. and Rudman, M., "Volume-of-fluid calculation of heat or mass transfer across deforming interfaces in two-fluid flow," *Numerical Heat Transfer, Part B.*, Vol.41, pp.291-308.
- [8] 2001, Son, G., "A numerical method for incompressible two-phase flows with open or periodic boundaries," *Numerical Heat Transfer, Part B.*, Vol.39, pp.45-60.
- [9] 2007, Shin, S., "Computation of curvature field in numerical simulation of multiphase flow," *J. Comput. Phys.*, Vol.222, pp.872-878.
- [10] 2001, Tryggvason, G. et al., "A front tracking method for the computations of multiphase flow," *J. Comput. Phys.*, Vol.169, pp.708-759.
- [11] 2001, Osher, S. and Fedkiw, R.P., "Level set methods: An overview and some recent results," *J. Comput. Phys.*, Vol.169, pp.463-502.
- [12] 2002, Shin, S. and Juric, D., "Modeling three-dimensional multiphase flow using a level contour reconstruction method for front tracking without connectivity," *J. Comput. Phys.*, Vol.180, pp.427-470.
- [13] 2005, Shin, S. et al., "Accurate representaion of surface tension using the level contour reconstruction method," *J. Comput. Phys.*, Vol.203, pp.493-516.
- [14] 2007, Shin, S. and Juric, D., "High order level contour reconstruction method," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.21, pp.311-326.
- [15] 2009, Shin, S. and Juric, D., "A hybrid interface method of three-dimensional multiphase flows based on front tracking and level set techniques," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol.60, pp.753-778.