



Level Contour Reconstruction 방법을 이용한 다상유동 수치해석

신 승 원*¹

NUMERICAL SIMULATION OF MULTIPHASE FLOW USING LEVEL CONTOUR RECONSTRUCTION METHOD

Seungwon Shin ^{*}1

Recently, there have been efforts to construct hybrids among the existing methodologies for multiphase flow such as VOF, Level Set, and Front Tracking with the intention of facilitating simulations of general three-dimensional problems. As one of the hybrid method, we have developed the Level Contour Reconstruction Method (LCRM) for general three-dimensional multiphase flows including phase change. The main idea was focused on simplicity and a robust algorithm especially for the three-dimensional case. It combines characteristics of both Front Tracking and Level Set methods. While retaining an explicitly tracked interface using interfacial elements, the calculation of a vector distance function plays a crucial role in the periodic reconstruction of the interface elements in the LCRM method to maintain excellent mass conservation and interface fidelity. In addition, compact curvature formulation is incorporated for the calculation of the surface tension force thereby reducing parasitic currents to a negligible level.

Key Words : 수치해석(Numerical Simulation), 다상유동(Multiphase Flow), 경계추적법(Front Tracking), Level Contour Reconstruction Method, 표면곡률(curvature), parasitic current

1. 서 론

많은 공학 문제가 둘 이상의 상이 존재하는 다상 유동과 깊은 연관이 있고, 그것이 가지는 독특한 특성 때문에 그 해석방법은 매우 중요한 문제로 여겨져 왔다. 그러나 그 중요성에도 불구하고, 표면장력을 수반한 기하학적 곡률과 계면에서 상변화 현상 등 복잡한 물리적 현상들을 동반하기 때문에 그 해석이 수월하지 않다. 특히 그러한 현상들이 매우 빠른 시간 동안에 그리고 아주 작은 특성길이를 통해서 이루어지 때문에 실험적으로 파악하는 것 역시 많은 난관을 가지고 있다.

이와 같은 다상유동의 해석을 위해 다양한 수치해석 기법들이 고안되었고 발전을 거듭해 왔다. 초기에 Navier-Stokes equation을 주어진 둘 이상의 상에 각각 적용하는 방법이 고려되었으나 이러한 경우 표면이 많이 일그러지면 그 적용이

불가능하였다. 따라서 최근에는 기존 유동장은 직교격자계를 그대로 유지하면서 추가적인 방법을 통해서 상표면을 추적하는 방법이 널리 활용되고 있다. 가장 일반적으로 사용되고 있는 Volume-of-Fluid(VOF)[1] 방법과 최근 들어 그 적용이 활발해진 Level Set[2], Phase Field[3], Front Tracking[4] 방법들이 그 대표적인 예이다. 이러한 방법들은 다양한 다상유동에 대해서 효과적으로 적용되었다. 그러나 아직까지 대부분이 2차원 유동장에 국한되었고 직접적인 3차원 유동에는 그 적용이 제한되어져 왔던 것이 현실이었다. 또한 각각의 방법들은 서로에 대해 상대적인 장점도 있지만 단점 역시 가지고 있다. VOF 방법의 경우 질량이 계산과정에서 정확히 보존된다는 장점이 있어 가장 보편적으로 사용되어지고 있다. 그러나 계면의 형태가 연속적이지 않아 상표면의 영향이 정확히 고려되기 힘들다. Level Set 방법은 계면의 융합/분리 과정이 자동적으로 해결되고 코드화가 지극히 간단하다는 장점이 있어 최근 그 사용이 비약적으로 증가했다. 그러나 계산과정 중 질량손실이 아주 크기 때문에, 질량의 보존을 위해 추가적인 모델링이 필요하다. Front Tracking은 계면이 추가적인 이동 격

1 정회원, 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

* E-mail: sshin@hongik.ac.kr

자계를 통해서 독립적으로 추적되는 기법으로 가장 정확한 표면의 표현이 가능하지만, 그 구성요소들이 구조적으로 연결되어 있어야 하기 때문에 그 처리가 매우 복잡해진다. 표면의 융합/분리가 있는 경우 특히 매우 복잡한 과정을 통해서 처리되어야 한다. 최근에는 위해 열거한 방법들을 융합하여 각 방법에서의 단점을 극복하려는 여러 가지 시도를 하고 있다.

본 논문에서는 다상유동해석 방법 중의 하나인 Front Tracking 방법의 기본적 특징 및 장·단점에 대해 파악해 보고, 이의 변형된 형태의 하나인 Level Contour Reconstruction Method (LCRM)의 경우 어떠한 방법을 통해서 Front Tracking의 단점을 보완했는지에 대해 설명하고자 한다. 간단한 benchmarking 결과를 통하여 LCRM의 정확성을 확인해 보았다.

2. 수치 해석 방법

2.1 Front Tracking method

Front Tracking 방법은 계면의 위치를 추가적인 Lagrangian 격자계를 이용하여 추적하기 때문에 (Fig.1) 수치확산에 의한 오차를 포함하고 있지 않으며, 격자의 크기가 충분히 크지 않더라도 경계면이 매우 복잡한 기하학적 형태를 매우 효과적으로 표현할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 계면의 경계조건을 매우 정확한 위치에서 삽입할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 Fig. 1에서 보이듯이 계면의 표현하기 위한 Lagrangian 격자계가 서로의 논리적인 위치를 항상 가지고 있어야 하기 때문에 이에 대한 계산 부담이 매우 커지게 된다 특히 기하학적인 변형을 통해 서로 다른 계면이 융합분리하는 경우 이에 대한 논리적인 알고리즘 구현은 큰 단점으로 작용한다.

Front Tracking 방법은 다른 Front capturing 방법 (VOF, Level Set)과 마찬가지로 다음과 같이 하나의 지배방정식을 사용하여 서로 다른 상에서의 유동을 표현한다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

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

$$\mathbf{F}_L = \int_A \sigma \kappa \mathbf{n} \delta(x - x_f) dA \tag{3}$$

여기서 각각 \mathbf{u} 는 속도 벡터, P 는 압력, \mathbf{g} 는 중력가속도, ρ 는 밀도, μ 는 점성계수를 나타낸다. 상계면의 경계조건은 식

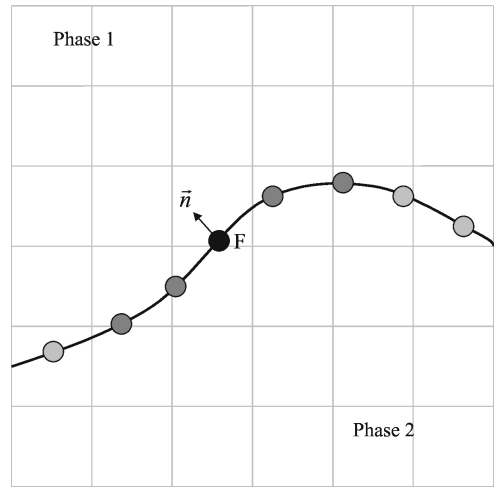


Fig. 1 Front Tracking Method (Lagrangian elements)

(3)과 같이 delta 함수를 이용한 소스항으로 표현된다. 식(3)의 \mathbf{n} 는 계면의 단위 수직 벡터, $\mathbf{x}_f = \mathbf{x}(\mathbf{x}, t)$ 는 계면의 위치이며, $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_f)$ 는 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_f$ 에서만 0이 아닌 값을 갖는 delta 함수이다.

물질의 상태량은 한 상에서는 0의 값을 갖고 다른 상에서는 1의 값을 갖는 Heaviside 함수 $I(x, t)$ 를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \rho(x) &= \rho_L + (\rho_G - \rho_L)I(x, t) \\ \mu(x) &= \mu_L + (\mu_G - \mu_L)I(x, t) \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 L과 G는 각각 액체와 기체를 나타낸다. Heaviside 함수는 다음과 같이 poisson 방정식을 통해서 구할 수 있다.

$$\nabla^2 I = \nabla \cdot \int_A \mathbf{n} \delta(x - x_f) dA \tag{5}$$

기존의 Front Tracking 방법에서는 모든 격자에 대해 다음 식 (6)과 같은 Poisson 방정식의 해를 계산함으로써 지시함수 (indicator function) I 를 구하게 된다.

$$\nabla^2 I = \nabla \cdot G \tag{6}$$

이 때 공간적인 분포를 나타내는 함수 G 는 다음 식 (7)을 이용하여 계산한다.

$$G = \int_{\Gamma(t)} \mathbf{n} \rho \delta_f(\mathbf{x} - \mathbf{x}_f) ds \tag{7}$$

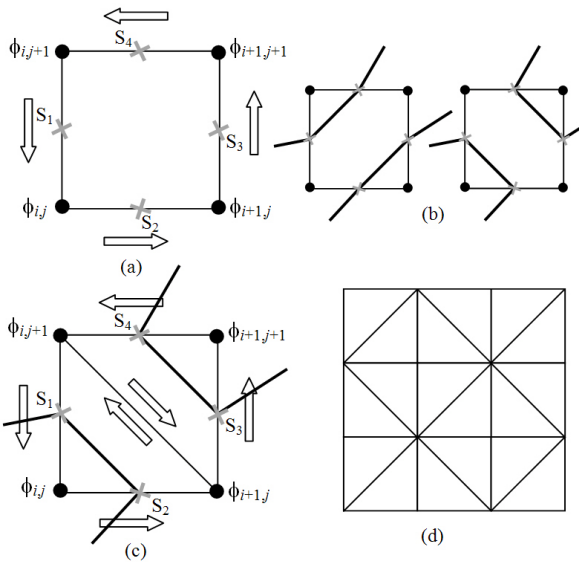


Fig. 2 Reconstruction process (a) regular LCRM (b) Tetra-marching procedure

계면의 위치는 다음 방정식과 같이 Lagrangian 방법으로 적분되어 추적된다.

$$\frac{d\mathbf{x}_f}{dt} = \mathbf{V}_f \tag{8}$$

여기서 \mathbf{V}_f 는 보통 적절한 보간방법을 이용해서 구해진 상계면의 속도이다.

2.2 Level Contour Reconstruction Method

최근 들어 기존에 사용되는 방법들의 문제점을 해결하기 위해서 한 가지 이상의 방법을 하이브리드 하는 것이 많이 사용되고 있다. Sussman과 Puckett[5]은 Level Set 방법과 Volume-of-Fluid를 융합하여 CLSVOF을 만들었다. 그 결과 Level Set 방법의 기하학적 용이성을 유지하면서, 그 단점이었던 질량손실을 없앨 수 있었다. Enright[6]등은 Level Set 방법에 계면 추적용 입자를 사용(particle level set)함으로 Level Set이 가지는 장점과 이동격자계의 정확성을 동시에 유지하려고 하였다. Aulisa[7] 등은 VOF 방법에 추적 입자를 포함하여 좀더 정확한 계면표면의 모사가 가능하게 했다.

본 연구에서는 소개할 Level Contour Reconstruction Method[8-10] 역시 하이브리드 형태의 하나로 Front Tracking 방법과 Level Set 방법의 융합된 형태이다. 즉, Level Contour Reconstruction Method (LCRM)는 단순화된 Front Tracking 기법의 하나로, 기본적으로 이동격자계의 성격을 가지지만, 격

자 구조가 심하게 변형되었을 때, 고정 격자계 위에 형성된 특정한 Level Set field를 통해 이동격자계가 다시 재구성된다 (Fig. 2(a)). 따라서 기존의 Front Tracking이 가지고 있는 논리적으로 연결된 계면 구조를 없앤 결과 상표면을 구성하고 있는 이동격자들은 암시적인 방법으로 연결되게 된다. 따라서 기존에 있던 복잡한 계면구조의 연결성에 필요한 알고리즘의 부담은 없어지고 이동격자계가 가지는 정확성은 그대로 유지할 수 있게 된다. 가장 중요한 장점은 계면의 융합분리 과정이 자연적이고 또한 자동으로 이루어진다는 것이다. 기본적으로 매우 간단한 구조를 가지고 있기 때문에, 3차원으로 확장이 매우 용이하다는 장점을 가지고 있다.

2.2.1 Tetra marching procedure

기존의 LCRM은 Fig. 2(a)에서와 같이 주어진 격자에서 둘레를 따라서 Indicator function 값(또는 거리함수값)이 특정한 값이 될 경우 끝점을 설정하여 이 점이 두 개가 되면 선으로 연결하게 된다. 그러나, Fig.2(b)에서와 같이 선을 연결하기 모호한 경우가 발생할 수 있다. 이러한 경우 Fig. 2(c)와 같은 삼각형 격자를 사용하면 contour line을 오직 한 개만 그릴 수 있게 되어 이러한 문제가 해결된다. 주변의 다른 격자들 간에 형성된 contour line의 연속성을 위해서 삼각형 격자 (Tetrahedral reconstruction cell)는 Fig. 2(d)와 같이 주기적으로 반복하여 배열해 준다.

2.2.2 Indicator function calculation

식 (5)를 통하여 지시함수를 얻는 방법은 Poisson 방정식의 해를 계산해야하는 부담이 심할뿐더러, 특히 계면이 벽면과 접할 경우 경계조건을 정확히 부여하는 것이 어렵다. 본 연구에서는 계면에서의 최소거리점을 찾아 거리함수를 계면으로부터 직접적으로 계산하는 방법을 사용하여 기존 방법에 비해 컴퓨터의 계산적인 부담을 줄이고 계면 주위에서의 곡률을 더욱 정확하게 계산하도록 하였다[10].

계면의 한 요소에서 주위를 둘러싼 충분한 격자를 정의할 때, 주어진 격자점으로부터 계면까지의 최소거리 및 계면 위 최소거리점의 위치를 정의할 수 있다. 이러한 과정을 모든 계면 요소에 대해 반복하여 적용하면 계면에서 적절한 거리에 위치한 격자점에서 계면으로의 거리함수를 생성할 수 있다. 이 방법은 각 계면 요소로부터 주위 격자까지의 거리함수를 직접 계산하므로 Poisson 방정식의 해를 계산하는 기존의 방법에 비해 매우 경제적으로 거리함수를 구할 수 있다.

계면의 요소들에 대한 주변 격자와의 최소거리점 및 최소거리가 구해지면, 거리함수의 정확한 부호(sign)를 계산하기 위해 각 격자의 부호함수장(sign function field)을 추가적으로 구하여야 한다. 계면의 요소는 특정한 방향을 가지고 있으며

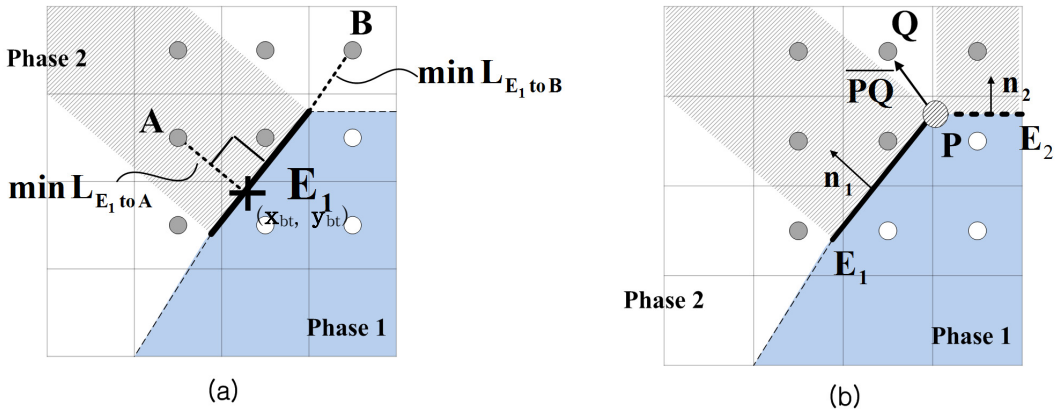


Fig. 3 Computing distance function from the existing 1D linear interface elements for 2D simulation: (a) the minimum distance point is located to inside the line segment. (b) the minimum distance point is located at the edge of the element

로 수직방향의 단위벡터 \mathbf{n} 을 사용하여 최소거리점이 Fig. 3(a)의 점 A와 같이 계면 요소 E_1 의 선 위에 위치하는 경우(빛금친 영역)는 부호를 결정하기가 간단하다. Fig. 3(a)의 점 B, 또는 Fig. 3(b)의 점 Q와 같이 최소거리점이 계면 요소의 선위를 벗어나 끝점에 위치하는 경우는 부호함수의 결정에 다수의 계면 요소가 영향을 줄 수 있으므로 식 (9)을 사용하여 부호를 결정한다.

$$S_o(Q) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^m PQ \cdot n_i \right) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (9)$$

여기서 m 은 주어진 격자점에 영향을 주는 모든 계면 요소의 수이고 초기 부호함수 S_0 는 +1 또는 -1의 값을 갖게 된다.

모든 계면 요소 주위의 격자 부호가 구해지면 계면을 둘러싼 초기 부호함수장을 생성할 수 있고, 식 (10)을 이용하여 전 격자에 대해 부호함수장을 확장할 수 있다.

$$\nabla^2 S(\mathbf{x}) = 0 \quad (10)$$

식 (10)의 해는 격자의 부호만 판단하면 되므로 완벽히 수렴할 필요 없이 몇 번의 반복 계산만으로도 경계면 주위의 부호함수장 S_0 를 모든 격자로 확장할 수 있다.

2.2.3 Hybrid curvature formulation

식 (2)의 소스항 즉 식 (3)으로 인하여 상 경계면의 곡률에 의한 표면장력의 영향을 가지게 된다. 식 (2)와 같이 하나의 방정식을 이용해서 두 가지 상의 운동을 표현하기 때문에 임의의 움직임을 가지는 상표면의 영향이 직교좌표계로 표현되는 속도장과 반드시 일치하게 되지 않게 된다. 이러한 결과로

상표면이 정지하여 움직이지 않는 경우 압력장과 표면장력장의 힘평형이 정확히 일치하지 못하여 비현실적인 유동 (parasitic current)을 발생시키게 된다. 이러한 현상은 특히 길 이 스케일이 작은 경우 유동장을 불안정하게 만들고 정확성을 해치게 된다. 이를 해결하기 위해서, 식(2)에 필요한 표면 곡률 κ 를 계산하기 위해 다음 식과 같은 하이브리드 방법이 사용되었다[9].

$$\kappa_H = \frac{F_L \cdot G}{\sigma G \cdot G} \quad (11)$$

이 때 κ_H 는 twice mean curvature이며, F_L 은 식(2)에서 사용된 소스항을, G 는 식 (7)을 이용해서 구할 수 있다. 이를 사용해서 parasitic current를 현저하게 낮출 수 있지만 compact curvature formulation을 추가적으로 적용하여 그 크기를 더욱 줄이는 것이 가능하다. 지지함수 I 를 구하는 과정에서 주변 격자와 가장 가까운 거리의 계면 요소를 이미 구하였고(Fig. 3(a)), 가장 가까운 계면요소 위의 점에서 보간된 곡률을 사용하여 다음 식 (12)과 같이 compact curvature field, κ_c 를 계산할 수 있다.

$$\kappa_C(i, j) = \kappa_H(x_{bt}, y_{bt}) \quad (12)$$

κ_H 는 계면요소 위의 가장 가까운 점 (x_{bt}, y_{bt}) 에서 보간된 곡률이고, 식 (12)로 계산된 곡률분포를 이용하여 주어진 경계면에서의 곡률을 구하게 된다. 이 곡률은 다시 다음 식으로 표면장력에 의한 소스항 계산에 이용된다

$$F_C = \sigma \kappa_C \nabla I \quad (13)$$

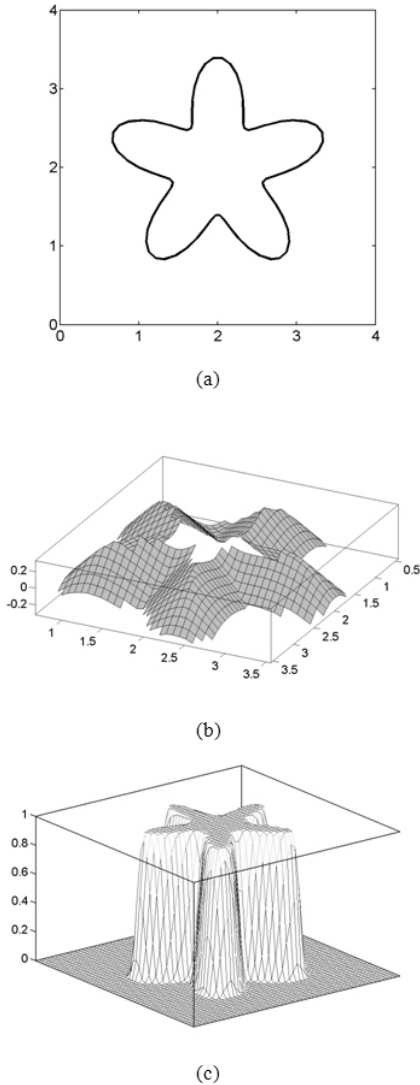


Fig. 4 Calculation of indicator function directly from given surface elements (a) initial interface distribution (b) computed distance function near the interface (c) final indicator function field

본 연구에 사용된 지배방정식의 계산법에 대한 보다 자세한 내용은 [8-10]에 기술되어있다.

3. 결과 및 토의

LCRM의 정확성을 확인하기 위해 몇 가지 간단한 benchmarking 실험들을 실시하였다. 우선 주어진 계면 격자로부터 정확한 Indicator function이 계산되었는지를 확인하기 위해서 Fig. 4(a)와 같은 별모양의 표면으로부터 구해지는 거리

함수를 확인해 보았다. 별모양은 다음 식으로 초기화시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= \cos(\theta) + 0.4\sin(\theta)\cos(\theta) \\ y &= \sin(\theta) + 0.4\sin(\theta)\sin(\theta) \end{aligned} \tag{14}$$

여기서 θ 는 0에서 2π 까지의 값을 가지며, 4×4 크기의 정사각형 공간에서 50×50 의 격자크기를 가지고 계산되었다. Fig 4(b)에 계면주위에서 계산된 거리함수 값들이 나타나있다 이 값을 식 (11)을 사용하여 주변까지 확장시킨 후 Fig. 4(c)와 같은 Indicator function 분포를 얻을 수 있다. 위의 결과를 바탕으로 주어진 복잡한 상 표면으로부터 식 (5)를 풀지 않고 직접적으로 정확한 거리함수를 구할 수 있다는 것이 파악되었다.

Tetra-marching을 통해 계면 추적의 정확성을 파악하기 위해서 16개의 와도에 의해서 원형표면의 변형과정을 추적하는 실험을 수행하였다[11]. 이는 표면의 형상이 매우 심하게 변형되는 경우로 그 정확한 해석이 지극히 어렵다고 알려져 있다. 한 변의 길이가 1인 정사각형 공간에서 중심이 (0.5, 0.5)에 위치한 반지름 0.15의 원이 다음 식으로 정의된 속도에 따라 변형되게 된다.

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} -\sin[4\pi(x+0.5)]\sin[4\pi(y+0.5)] \\ -\cos[4\pi(x+0.5)]\cos[4\pi(y+0.5)] \end{bmatrix} \tag{15}$$

이 속도는 주어진 공간 안에 16개의 와도(vorticity)를 생성하게 된다. 주어진 속도에 $\cos(\pi/T)$ 를 곱하여 주어진 주기, T가 지나게 되면 표면이 초기형상으로 되돌아오게 설정하였다. 본 실험에서 주기 T=2로 설정하였고 그 결과를 Fig. 5에 보였다. 모든 경우에서 한 주기당 200번의 reconstruction이 행하여졌다.

그림에서 확인 할 수 있 듯이 격자가 증가함에 따라 계면의 추적이 매우 정확히 이루어지는 것을 확인 할 수 있다. 256×256 격자를 사용할 경우 한 주기가 지난 후 거의 완벽하게 초기형상으로 되돌아오게 됨을 확인 할 수 있다. 계면이 매우 길게 늘어지는 현상도 매우 정확히 계산됨을 보인다. 격자가 줄어들면서 이러한 얇은 계면들을 정확히 모사할 수 없게 되는데, 이러한 현상은 충분한 격자가 없는 경우 indicator function (혹은 거리함수)가 정확히 계산되지 않기 때문이다. LCRM의 경우 계면격자가 많이 변형될 경우 indicator function의 정보를 이용하여 격자를 재생성하기 때문이다.

표면장력의 정확한 해석능력을 확인하기 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다. 정지한 유체에 원형액적이 존재하는 경우 이론적으로는 아무런 속도분포가 존재하지 않고 액적을 정지한 상태로 유지되어야 한다. 하지만 앞서 언급했듯이 속도장

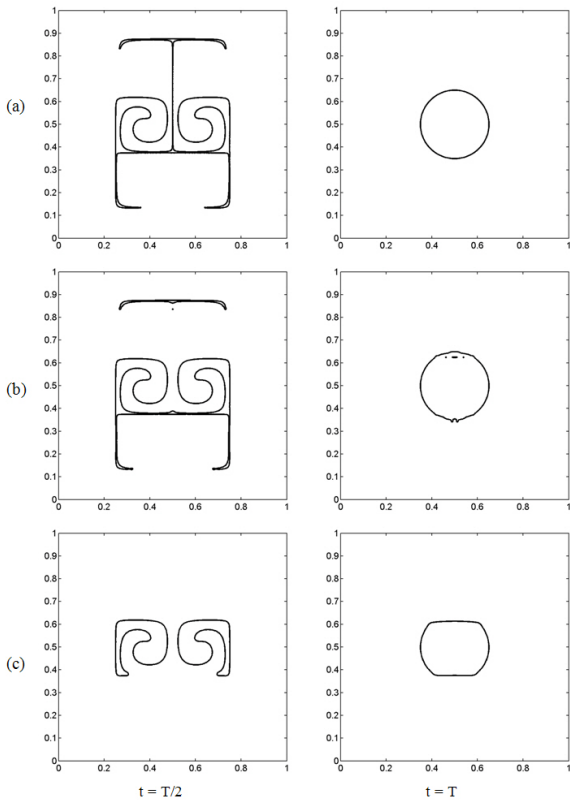


Fig. 5 Interface convolution test (a) 256×256 (b) 128×128 (c) 64×64 grid resolution

의 계산에 적용된 직교격자계에서 계산된 압력구배와 이와 무관하게 움직이게 되면 표면에서 계산된 표면장력에 의한 힘의 방향이 일치하지 않게 되어 비현실적인 유동장이 발생하게 된다. 이러한 유동장은 parasitic current 혹은 spurious current라고 알려져 있으며 정확한 2유체유동의 계산에 매우 큰 장애로 알려져 있다. 표면장력의 영향이 매우 작은 경우 이러한 현상은 그리 중요한 영향을 주지 않지만, 길이스케일이 매우 작은 경우 전체 계산의 정확성에 큰 영향을 주고 때론 계산의 안정성에 문제를 야기하게 된다 또한 기체와 액체의 물성치가 크게 차이가 날수록 그 영향은 더 커지게 된다. 따라서 작은 공기방울이 물속에서 이동하는 문제 같은 경우 해석의 정확성을 위해 반드시 해결해야하는 매우 중요한 문제가 된다.

본 연구에서는 식 (12)를 통해서 계산된 곡률을 이용함으로써 이와 같은 parasitic current의 생성을 최소화 할 수 있었다. 이 영향을 정량적으로 파악하기 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다. 반지름이 0.25인 액적을 단위길이를 가지는 정육면체 안에 배치하였다. 격자는 20×20×20을 사용하였고 액체의 물성치는 대기압, 20°C의 물의 물성치를 사용하였고 기체

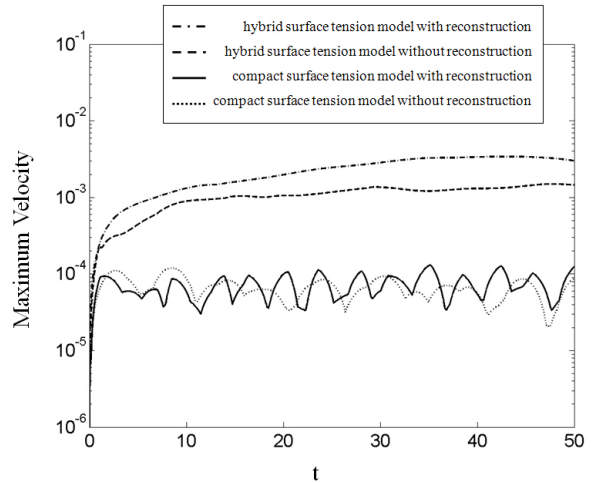


Fig. 6 Parasitic current test

는 같은 온도, 압력에서의 공기의 물성치를 사용하였다. 이러한 경우 Laplace number ($La = \rho D / \mu^2$)는 5×10^5 정도를 가지게 된다. 그 결과를 Fig. 6에서 확인 할 수 있다. Hybrid formulation을 통해서 충분히 작은 parasitic current를 만들 수 있고, 추가적으로 compact formulation을 적용하여 그 크기를 더 낮추는 것이 가능하였다. Compact form을 사용할 경우 이미 낮아진 hybrid 형태의 경우보다 한 오더 낮은 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 계면격자의 재생성은 10번의 time step마다 실시하였다. 이는 매우 빠른 주기로 실험한 것으로 격자의 재생성이 빈번한 경우 그 영향을 파악하기 위해서 실시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 격자의 재생성 주기는 parasitic current에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

LCRM의 단순한 계면 추적 성능뿐만이 아닌 유동장계산과 연관된 성능을 파악하기 위해서 기포상승과정을 수치해석 하였다. 반지름이 R인 구형기포를 초기에 4R×4R×12R의 계산영역 아랫부분에 배치하였다. 기체와 액체의 물성치는 밀도비가 100, 점도비가 10, Reynolds 수가 29.23, Weber 수가 1.95가 사용되었다. 이는 Esmaeli and Tryggvason[11]가 사용한 것과 동일한 값으로서 그들의 경우 Front Tracking 방법을 사용하여 무차원 기포상승속도가 20.5가 됨을 확인하였다. 본 연구의 경우 32×32×96의 격자를 사용하여 10^4 시간마다 격자를 재생성하여 계산을 수행하였다. 그 결과를 Fig. 7에 보였다. 기포상승속도는 20.5에 수렴하는 것을 확인하였고, Fig. 7(b)에서 확인 할 수 있듯이 compact curvature form의 경우 계산 전체 과정동안 질량보존을 매우 정확히 유지하고 있음을 확인 할 수 있다. Hybrid form의 경우 상승속도는 정확한 값을 보여주지만 parasitic current의 영향으로 질량이 조금씩 증가하고 있음을 확인 할 수 있다. 이 경우 격자의 크기를 증가시켜 그

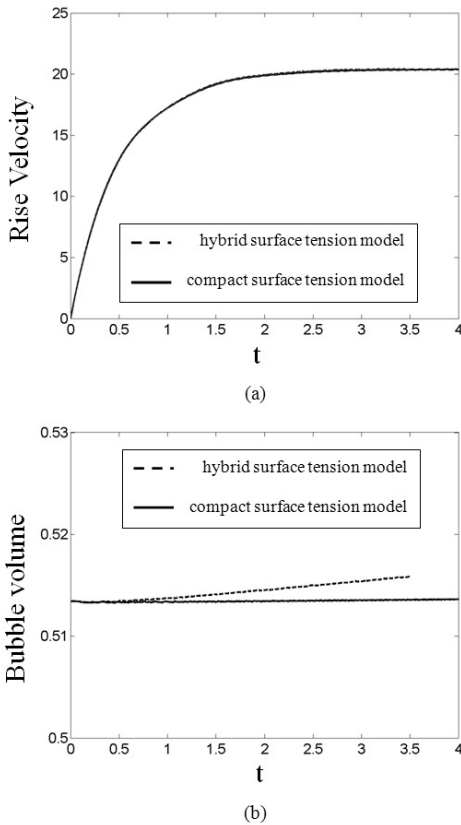


Fig. 7 Bubble rising experiment (a) rising velocity (b) mass conservation

영향을 줄일 수 있다. Fig. 8에 기포상승과정 중 계면의 형상과 속도장 및 압력장을 보였다. 정확한 속도분포 및 압력분포를 보이는 것을 확인 할 수 있고 상표면 역시 매우 정확하게 추적되고 있음을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 다상유동의 수치해석 기법 중 Front Tracking 방법과 Level Set 방법의 하이브리드 형태인 Level Contour Reconstruction Method의 특징에 대해서 알아보았다. LCRM은 Front Tracking의 장점인 Lagrangian 계면 구조를 그대로 유지하고 있으면서 그 형태가 심하게 변형되거나 융합 분리가 필요한 경우 Level Set 방법의 특징인 거리함수를 이용하여 특정한 거리함수 위치에 contour line을 형성함으로써 새로운 계면격자계를 재구성하는 방법이다. 결과에서 알 수 있듯이 Front Tracking 방법에 상당하는 매우 정확한 계면추적이 가능하며 계면격자구조가 유동장 및 압력장을 계산하는 직교격자계에서 형성된 거리함수에 의해서 자동으로 조절되

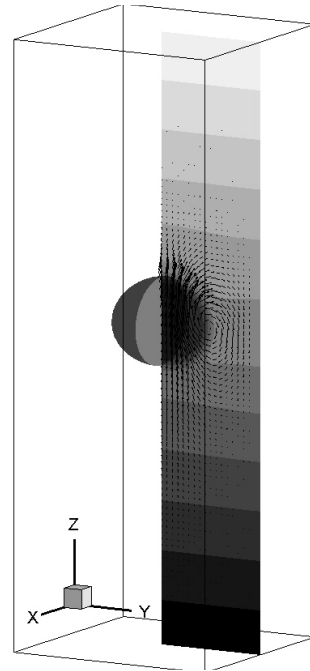


Fig. 8 Interface shape, velocity, and pressure distribution of bubble rising experiment

어 기존 Front Tracking 방법의 단점인 논리적 연결성을 유지할 필요가 없게 되었다. 거리함수 역시 주어진 계면정보를 이용해서 직접적으로 계산되어 좀 더 효율적인 확보가 가능해졌고, compact formulation을 이용해서 표면곡률을 계산한 결과 parasitic current의 크기를 매우 현저하게 감소할 수 있었다. 특히 LCRM은 3차원 계산을 주목적으로 디자인된 방법으로 매우 적은 격자계에서도 그 결과가 상당한 정확도를 가짐을 알 수 있다. 현재 좀 더 실제적인 문제への 적용을 위해 보다 효율적인 알고리즘 구현 및 병렬 계산법에 대한 연구가 진행 중이다.

참고문헌

- [1] 1994, Lafaurie, B., Nardone, C., Scardovelli, R., Zaleski, S. and Zanetti, G. "Modeling merging and fragmentation in multiphase flows with SURFER," *J. Comput. Phys.*, Vol.13, pp.134.
- [2] 2001, Osher, R.P. Fedkiw, "Level set methods: An overview and some recent results," *J. Comput. Phys.*, Vol.169, pp.463.
- [3] 2001, Jamet, D., Lebaigue, O., Coutris, N. and Delhay, J.M., "The second gradient method for the direct numerical simulation of liquid-vapor flows with phase-change," *J.*



- Comput. Phys.*, Vol.169, p.624.
- [4] 1992, Tryggvason, G., Bunner, B., Esmaeeli, A., Juric, D., Al-Rawahi, N., Tauber, W., Han, J., Nas, S. and Jan, Y.-J., "A front tracking method for the computations of multiphase flow," *J. Comp. Phys.*, Vol.169, p.708.
- [5] 2000, Sussman, M. and Puckett, E.G., "A coupled level set and volume-of-fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flows," *J. Comp. Phys.*, Vol.162, p.301.
- [6] 2002, Enright, D., Fedkiw, R., Ferziger, J. and Mitchell, I., "A hybrid particle level set method for improved interface capturing," *J. Comp. Phys.*, Vol.183, p.83.
- [7] 2003, Aulisa, E., Manservigi, S. and Scardovelli, R., "A mixed markers and volume-of-fluid method for the reconstruction and advection of interfaces in two-phase and free-boundary flows," *J. Comput. Phys.*, Vol.188, p.611.
- [8] 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.
- [9] 2005, Shin, S., Abdel-Khalik, S.I., Daru, V. and Juric, D., "Accurate representation of surface tension using level contour reconstruction method," *J. Comput. Phys.*, Vol.203, pp.493-516.
- [10] 2009, Shin, S. and Juric, D., "A hybrid interface method for three-dimensional multiphase flows based on front tracking and level set techniques," *International journal for numerical methods in fluids*, Vol.60, p753.
- [11] 1982, Smolarkiewicz, P.K., "The multi-dimensional crowley advection scheme," *Monthly Weather Rev.*, Vol.110, p.1968.