

## 벽면부착에 의해 야기되는 다상유동에 관한 수치적 연구

명 현 국\*†

\* 국민대학교 기계시스템공학부

### Numerical Study on Multiphase Flows Induced by Wall Adhesion

Hyon Kook Myong\*†

\* School of Mechanical Systems Engineering, Kookmin Univ.

(Received December 21, 2011 ; Revised March 29, 2012 ; Accepted April 6, 2012)

**Key Words:** Wall Adhesion(벽면부착), Surface Tension(표면장력), Multiphase Flow(다상유동), Volume of Fluid(VOF), Numerical Study(수치적 연구), Free Surface(자유표면), Volume Capturing Method(체적포착법), Unstructured Grid System(비정렬격자계)

**초록:** 본 연구에서는 벽면부착에 의해 야기되는 다상유동에 대한 수치적 연구를 제시한다. 먼저 다상유동 해석을 위해 표면장력에 대한 CSF(Continuum Surface Force) 모델 및 벽면부착 경계조건 모델을 비정렬격자계에 적합하도록 수치해석방법을 정립시키고, Myong(2009)이 개발한 비정렬격자계와 VOF 방법으로 체적포착법(volume capturing method)을 사용한 수치해석방법(코드)에 삽입하였다. 또한 본 수치해석방법을 사용하여 증력을 포함하여 어떤 외력도 존재하지 않고 오직 벽면부착에 의해 야기되는 유동현상인 원통형 탱크의 바닥에 위치한 얇은 물풀(water pool)에 대해 물이 벽면을 적시는 경우와 적시지 않는 경우에 대해 수치해석 하였다. 연구결과, 본 수치해석방법은 벽면부착에 의해 야기되는 다상유동 문제에 대한 유용성이 입증되었다.

**Abstract:** The present paper presents a numerical study on multiphase flows induced by wall adhesion. The continuum surface force (CSF) model with the wall adhesion boundary condition model is used for calculating the surface tension force; this model is implemented in an in-house solution code (PowerCFD). The present method (code) employs an unstructured cell-centered method based on a conservative pressure-based finite-volume method with a volume capturing method (CICSAM) in a volume of fluid (VOF) scheme for phase interface capturing. The effects of wall adhesion are then numerically simulated by using the present method for a shallow pool of water located at the bottom of a cylindrical tank with no external forces such as gravity. Two different cases are computed, one in which the water wets the wall and one in which the water does not wet the wall. It is found that the present method efficiently simulates the surface tension-dominant multiphase flows induced by wall adhesion.

### 1. 서 론

벽면부착(wall adhesion)은 계면이 벽면과 만날 때 발생하는 현상으로 표면장력(surface tension)을 고려할 때 반드시 고려되어야 한다.<sup>(1)</sup> 잘 알려진 바와 같이 액체분자와 고체분자들 사이의 힘은 상호간에 부착력을 일으킨다. 만일 부착력이 액체분자들 사이의 응집력(cohesive force)보다 크면 액체분자는 벽면 쪽으로 몰려 접촉 면적이 증가하는 경향이 있어 결국 유체는 벽면을 적시게 된다. 반대의 경우도 또한 사실로, 계면과 벽 사이

의 평형 접촉각도(equilibrium contact angle)는 단순히 유체의 성질이 아니라 고체표면의 거칠기, 접촉되어 있는 물질의 특성, 벽면의 형상 등에 의존한다. 이러한 벽면부착에 의해 야기되는 유동현상은 특히 최근 관심이 높아지고 있는 마이크로미터 혹은 그 이하 수준에서의 유체유동을 다루는 microfluidics 분야에서 계면에서의 벽면부착력(또는 모세관력)을 유동의 추진력으로 사용할 경우 소형 펌프나 구동장치 없이도 유동을 발생시킬 수 있기 때문에 매우 중요하다. 또한 증력이 작용하지 않는 무중력상태에서는 표면장력이 지배적으로 이 경우 유동은 주로 벽면부착에 의해 야기된다.

† Corresponding Author, myong@kookmin.ac.kr

한편 계면에서 표면장력 효과에 대한 물리적 모델을 도입하는 방법은 아직 문제점으로 남아 있다. 현재 표면장력의 영향은 일반적으로 동등한 체적력으로 변환하는 Brackbill 등<sup>(1)</sup>이 제안한 CSF(Continuum Surface Force) 모델의 형태로 운동량방정식에 삽입된다. 그런데 이 모델을 사용하기 위해서는 계면의 국부곡률(local curvature)과 계면 수직벡터를 정확히 계산하여야 한다. 이를 위한 방법으로 셀(또는 검사체적)내에 액상 또는 기상의 체적비로 정의된 VOF(Volume Of Fluid) 값  $\alpha$ 를 사용하여 상의 계면을 추적하는 계면포착법(interface capturing method)인 VOF 방법<sup>(2)</sup>이 현재 대부분의 상용 CFD코드에 도입되어 널리 사용되고 있다. 이것은 이 방법이 각 상의 체적이 잘 보존되는 장점 때문에 다상유동의 물리적인 현상을 왜곡 없이 표현할 수 있는 대표적인 방법으로 인식되기 때문이다.

그런데 불연속적인 VOF 값들로 인해 계면의 곡률 및 수직벡터를 계산하는데 있어 통상적인 이산화 도식의 적용을 허용하지 않기 때문에, 일반적으로 VOF 값들에 대한 다양한 형태의 필터링 과정을 거친다.<sup>(1,3)</sup> 또한 표면장력의 부정확한 계산은 잘 알려진 바와 같이 기생흐름(parasite current) 현상<sup>(3)</sup>을 초래할 수 있어, 최근 기생흐름을 줄이기 위한 수치해석 방법을 시도한 많은 연구<sup>(3-7)</sup>가 보고되고 있다. 그러나 이들이 사용한 수치해석방법은 대부분 정렬격자계에서 유한차분법 또는 검사체적 내 자유표면의 위치와  $\alpha$  값을 직접적으로 추적하고 계산하는 체적추적법(volume tracking method)<sup>(2,8)</sup>을 채택한 VOF 방법으로 국한되어 있다. 그러나 이들 방법은  $\alpha$ 의 이류를 수치확산 없이 계산하기 위해 계산적으로 복잡한 상계면 재구성(reconstruction)과정을 거쳐야하며, 이때 사용되는 기하학적 재구성 도식은 비정렬격자계 및 3차원 문제인 경우 매우 복잡하게 된다. 또한 벽면부착 경계조건을 적용하는데 있어서도 상당한 어려움이 수반된다. 이에 반해  $\alpha$ 를 자유표면의 정확한 위치에 대한 정보가 필요 없는 함수형태로 표현하고 이를 이송하는 방정식을 HR도식(High Resolution differencing scheme)으로 풀어 경계면의 움직임을 포착하는 체적포착법(volume capturing method)<sup>(9-11)</sup>을 채택한 VOF 방법은 보다 적은 계산상의 노력으로 계면의 혼합 또는 분리와 같은 변화가 큰 문제를 해결할 수 있

을 뿐만 아니라, 비정렬격자계 및 3차원 문제로 확장도 용이한 장점을 가지고 있으며, 또한 벽면부착 경계조건을 용이하게 접목시킬 수 있다. 그러나 일반적으로 번짐(smearing)과 같은 계면의 비물리적인 변형 및 수치확산이 문제가 되기 때문에, 아직까지 체적포착법을 채택한 VOF 방법을 사용하여 벽면부착에 의해 야기되는 다상유동을 해석한 연구가 거의 보고되지 않고 있다.

본 연구에서는 비정렬격자계와 체적포착법을 채택한 VOF 방법을 사용하여 표면장력이 지배적인 다상유동 중 순수하게 벽면부착에 의해 야기되는 다상유동을 수치적으로 연구한다. 이를 위해 먼저 표면장력에 대한 CSF 모델 및 벽면부착 경계조건 모델을 비정렬격자계와 체적포착법에 적용할 수 있도록 수치해석 방법을 정립시키고 다상유동을 해석하는 본 연구실에서 개발한 수치해석방법<sup>(12)</sup>에 삽입한다. 또한 본 수치해석방법을 사용하여 중력을 포함하여 어떤 외력도 존재하지 않고 오직 벽면부착에 의해 야기되는 다상유동현상을 수치해석하고 벽면부착의 영향에 관한 결과 분석을 통해 본 해석방법의 유용성을 평가한다. 해석대상으로는 Brackbill 등<sup>(1)</sup>이 제시한 원통형 탱크의 바닥에 위치한 얇은 물풀(water pool)에서의 초기 경계치 문제로, 두 가지 극단적인 경우, 즉 물이 벽면을 적시는 경우(wetting case)와 적시지 않는 경우(non-wetting case)를 다룬다.

## 2. 수치해석방법

### 2.1 지배방정식

중력이 작용하지 않고 유동을 비압축성이라고 가정하면, 기상-액상 모든 영역에 적용되는 질량보존, 운동량보존 및 VOF 값  $\alpha$ 에 대한 지배방정식은 다음과 같이 적분형태로 표현할 수 있다.

$$\int_S \vec{v} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V (\rho \vec{v}) dV + \int_S [\rho \vec{v} \otimes \vec{v}] \cdot d\vec{S} = \int_S \vec{\tau} \cdot d\vec{S} - \int_S p d\vec{S} + \int_V \vec{f}_{SV} dV \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \alpha dV + \int_S \alpha \vec{v} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (3)$$

위 식에서  $\vec{v}$ 는 속도 벡터,  $t$ 는 시간,  $p$ 는 압력,

$\vec{f}_{SV}$ 는 표면장력에 의한 단위 체적당 힘,  $\vec{\tau}$ 는 점성응력 텐서를 각각 나타낸다. 그리고 국소 물성 값인 밀도  $\rho$ 와 점성계수  $\mu$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$\rho = \alpha\rho_1 + (1 - \alpha)\rho_2 \quad (4)$$

$$\mu = \alpha\mu_1 + (1 - \alpha)\mu_2 \quad (5)$$

여기서 아래첨자 1과 2는 다른 종류의 유체를 각각 나타내며,  $\alpha$ 는 0과 1 사이의 값을 가진다.

### 2.2 비정렬격자계에서의 CSF 모델의 표현

식 (2)에 나타난 표면장력에 의한 단위 체적당 힘  $\vec{f}_{SV}$ 는 표면장력계수  $\sigma$ 가 일정한 경우 다음과 같이 주어진다.

$$\vec{f}_{SV} = \sigma\kappa\vec{n} \quad (6)$$

위 식에서  $\kappa$ 는 경계면의 곡률, 그리고  $\vec{n}$ 은 경계면에 수직인 벡터를 나타낸다. 본 연구에서와 같이 VOF 모델을 사용하는 경우, Blackbill 등<sup>(1)</sup>의 CSF 모델은 계면에 수직인 벡터를 계산하기 위해 다음과 같이 VOF 값의 구배를 사용하며,

$$\vec{n} = \nabla\alpha \quad (7)$$

계면의 곡률은 다음과 같이 계면에 수직한 단위 벡터의 발산 항으로 표현한다.<sup>(1)</sup>

$$\kappa = -\nabla \cdot \left( \frac{\nabla\alpha}{|\nabla\alpha|} \right) \quad (8)$$

이상의 결과를 결합시키면 표면장력에 의한 단위 체적당 힘  $\vec{f}_{SV}$ 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\vec{f}_{SV} = -\sigma\nabla \cdot \left( \frac{\nabla\alpha}{|\nabla\alpha|} \right) \nabla\alpha \quad (9)$$

식 (9)을 계산하기 위한 기존의 수치해석방법<sup>(1~7)</sup>은 대부분 정렬격자계에서 유한차분법 또는 체적추적법을 채택한 VOF 방법으로 국한되어 있다. 따라서 비정렬격자계 및 복잡한 형상을 가진 3차원 문제에 적용하는 경우 식의 형태가 매우 복잡하게 되며, 또한 벽면부착 경계조건을 적용하는데 있어서도 상당한 어려움이 수반된다.

본 연구에서는 식 (9)을 비정렬격자계를 사용하

는 유한체적법에 도입하기 위해서 제어체적 중심에 위치한 격자점  $P$ 로 다음과 같이 근사시킨다.

$$\begin{aligned} \vec{f}_{SV} &\approx \sigma\kappa_P(\nabla\alpha)_P \\ &= -\sigma\left[\nabla \cdot \left( \frac{\nabla\alpha}{|\nabla\alpha|} \right)\right]_P(\nabla\alpha)_P \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 구배  $(\nabla\alpha)_P$ 는 비정렬격자계를 사용하는 수치해석방법에서 채택하고 있는 Gauss 정리로부터 다음과 같이 용이하게 구해질 수 있으며,

$$(\nabla\alpha)_P \approx \frac{1}{V_P} \sum_{f=1}^n A_f\alpha_f \quad (11)$$

곡률  $\kappa_P$ 는 유사한 방법으로 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \kappa_P &= -\left[\nabla \cdot \left( \frac{\nabla\alpha}{|\nabla\alpha|} \right)\right]_P \\ &\approx -\frac{1}{V_P} \sum_{f=1}^n A_f \cdot \left( \frac{(\nabla\alpha)_f}{|(\nabla\alpha)_f|} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

결과적으로 본 연구에서 제시한 식 (10)의 표면장력에 의한 단위 체적당 힘을 구하는 방법은 기존의 방법과 달리 계통적으로 일관성을 유지하고 있으면서도 계산영역내의 VOF 값으로부터 식 (11) 및 식 (12)을 사용하여 용이하게 계산되어질 수 있다.

한편, CSF 모델은 계면을 포함한 셀 및 인접 셀들에 대해 매끄러운 곡률 값을 요구하는데, 이산화된 격자계에서 VOF 값은 일반적으로 매끄러운 함수가 아니기 때문에 곡률계산을 위해서 이 값을 매끄럽게, 즉 필터링 할 필요가 있다.<sup>(13)</sup> 본 연구에서는 최근 Myong<sup>(12)</sup>이 Lafaurie 등<sup>(3)</sup>이 정규격자계에 대해서 제안한 것을 참고하여 비정렬격자계에 용이하게 적용할 수 있게 제안한 다음과 같은 필터링 방법을 사용한다.

$$\mathcal{J}(\alpha)_P = \frac{\sum_{f=1}^n \alpha_f |A_f|}{\sum_{f=1}^n |A_f|} \quad (13)$$

참고로 필터의 적용은 매끄러운 VOF 장  $\bar{\alpha} = \mathcal{J}^{(m)}(\alpha)$ 이 얻어지도록  $m$ 차례 반복되며, 본 연구에서는  $m = 2$ 를 사용한다.

한편, 최근 Myong<sup>(12)</sup>은 Blackbill 등<sup>(1)</sup>과 상용 CFD 코드<sup>(13)</sup>와 마찬가지로 식 (9)로 나타내는 원래의 CSF 모델에 밀도에 대한 수정을 하는 것이

밀도비가 높은 유동에서 성능이 개선되는 것을 확인하였기에 본 연구에서도 다음과 같은 밀도보정(density-scaled)한 CSF 모델을 최종적으로 사용하며,

$$\vec{f}_{SV} = -\frac{\rho}{\langle \rho \rangle} \sigma \nabla \cdot \left( \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \right) \nabla \alpha \quad (14)$$

위 식에서  $\langle \rho \rangle$ 는 두 밀도의 산술평균값이다.

### 2.3 벽면부착(wall adhesion) 경계조건

벽면부착은 유체가 벽면과 접촉하는 계면에 작용하는 표면장력이므로, 벽면부착 경계조건은 계면이 벽면과 접촉하는 접촉점에서의 계면에 수직한 단위벡터이다. Blackbill 등<sup>(1)</sup>은 벽면에서 계면에 수직한 단위벡터를 다음 식과 같이 표현하였다.

$$\hat{n} = \vec{n}_w \cos \theta_{eq} + \vec{n}_t \sin \theta_{eq} \quad (15)$$

위 식에서  $\theta_{eq}$ 는 유체와 벽사이의 평형 접촉각도,  $\vec{n}_w$ 는 벽을 향하는 벽면에 수직한 단위벡터,  $\vec{n}_t$ 는 액체를 향하고 계면과 벽사이의 접촉선(contact line)에 수직하고 벽면에 접하는 방향의 단위벡터를 각각 나타낸다. 일례로  $\theta_{eq} = 90^\circ$ 는 계면이 벽면에 수직한 것을,  $\theta_{eq} < 90^\circ$ 는 유체가 벽면을 적시는 것을 각각 의미한다.

식 (15)에서  $\vec{n}_w$ 는 벽면의 면적벡터에 수직한 단위벡터로 직접 구해지나,  $\vec{n}_t$ 는 벽면에 반영시킨 VOF 값과 함께 구해져야 한다. 본 연구에서는 벽면에서  $\alpha$ 에 대해 제로 구배(zero gradient)를 제안한 Blackbill 등<sup>(1)</sup>의 방법을 채용하였으므로 일관성을 위해 다음과 같이 벽면에 접한 셀 중심에 위치한 격자점  $P$ 에서의 값으로 단순하게 근사시킨다.

$$\vec{n}_t \simeq \frac{(\nabla \alpha)_P}{|(\nabla \alpha)_P|} \quad (16)$$

결과적으로 식 (12)로부터 벽면에 접한 셀의 계면곡률을 계산할 경우에, 벽면에서 계면에 수직한 단위벡터 값을 벽면부착 경계조건인 식 (15)를 사용하여 구해 표면장력에 의한 단위 체적당 힘에 벽면부착의 효과를 반영시키게 된다. 따라서 상계면 재구성과정과 같이 복잡한 처리가 요구되는 체적추적법 또는 유한차분법을 사용하는 기존

의 방법<sup>(1,13)</sup>과 달리, 비정렬격자계 및 체적포착법을 사용하는 본 연구에서 제시한 식 (10)의 표면장력에 의한 단위 체적당 힘을 구하는 방법은 계산영역 전체에 걸쳐 계통적으로 일관성을 유지하고 있으면서도 계산영역내의 VOF 값과 식 (15)로부터 식 (11) 및 식 (12)를 사용하여 용이하게 계산되어질 수 있다.

### 2.4 수치해석방법

벽면부착에 의해 야기되는 다상유동의 수치해석은 Myong and Kim<sup>(14)</sup> 및 Myong<sup>(15,16)</sup>이 개발한 비정렬격자계 및 체적포착법을 사용하는 수치해석방법(PowerCFD 코드)에 비정렬격자계에 적용할 수 있도록 제안된 식 (14) 형태의 표면장력에 대한 CSF 모델 및 식 (15)의 벽면부착 경계조건 모델을 삽입하여 수행한다. 참고로 PowerCFD 코드는 일반 상용 CFD 코드와 같이 비정렬 셀 중심 방법을 채용하고 압력수정방법에 기반을 둔 3차원 유동해석방법<sup>(17,18)</sup>에 체적포착법에서 크게 문제가 되는 번짐 현상과 같은 계면의 비물리적인 변형 및 수치확산 문제를 크게 개선한 것으로 알려진 HR도식인 CICSAM<sup>(10)</sup>(Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes)을 도입하고 있다. 이 CICSAM은 기본적으로 Donor-Acceptor 방법의 개념으로부터 출발하는 것으로, 해의 안정성은 보장하지만 수치확산 및 번짐현상이 심한 상류차분도식과 한정성은 유지하지 않으나 급격한 기울기를 가지는 경계면을 잘 보존해주는 특성을 가진 하류차분도식을 셀 면과 유동의 움직임 방향이 이루는 각을 활용하여 두 가지 도식을 혼합하여 나타낸 형태이다.

구체적인 수치해석 방법은 각 시간스텝마다 먼저 식 (3)을 풀어 VOF 장(field)의  $\alpha$  값들을 새롭게 구한다. 다음으로, 이  $\alpha$  값들을 사용하여 식 (4) 및 식 (5)로부터 밀도와 점성계수 값을 계산한다. 마지막으로 비정렬격자계에 적용할 수 있도록 제안된 식 (15)의 벽면부착 경계조건 모델과 함께 식 (14) 형태의 표면장력에 대한 CSF 모델을 사용하여 표면장력에 의한 단위 체적당 힘  $\vec{f}_{SV}$ 를 구한 후, 식 (1)과 식 (2)를 유동해석 코드를 사용하여 풀게 된다.

## 3. 계산결과 및 고찰

본 연구에서 제시한 수치해석방법을 사용하여

벽면부착에 의해 야기되는 다상유동현상을 수치 해석하고 벽면부착의 영향을 파악하였다. 해석대상은 Brackbill 등<sup>(1)</sup>이 제시한 원통형 탱크의 바닥에 위치한 얇은 물풀(water pool)에서 물 경계면이 초기의 탱크 벽면과의 접촉각인 90° (수평 경계면)와 달리 명기된 접촉각  $\theta_{eq}$ 에 도달할 때까지의 초기 경계치 문제이다. 본 연구에서는 벽면부착의 영향을 파악하기 위해 중력을 포함하여 어떤 외력도 존재하지 않는다고 가정하였으며, 두 가지 극단적인 경우, 즉 물이 벽면을 적시는 경우 ( $\theta_{eq} < 90^\circ$ )와 적시지 않는 경우( $\theta_{eq} > 90^\circ$ )의 초기 경계치 문제를 계산하였다. 벽면을 적시는 경우 초기에 물은 바닥면으로부터 0.4 H 높이에 위치하고, 접촉각  $\theta_{eq} = 5^\circ$ 이다. 반면 벽면을 적시지 않는 경우에는 초기에 물은 바닥면으로부터 0.2 H 높이에 위치하고, 접촉각  $\theta_{eq} = 175^\circ$ 이다.

이 문제는 2차원 축대칭 문제로 반경  $R = 0.05$  m이고 높이  $H = 0.1$  m인 원통에 대해 수치해석을 수행하였다. 격자계는 반경방향과 축방향으로 비정렬 등간격 격자계로 800(20×40) 개의 체어체를 사용하였다. 또한 본 연구에서는 배경 유체는 공기로 가정하고, 표면장력 계수  $\sigma$ 는  $73.0 \times 10^{-3}$  N/m을, 시간스텝  $\Delta t = 5 \times 10^{-4}$  s를 사용하였다.

수렴판정 조건은 각 시간스텝에서 해석장에서의 모든 셀에 대해 각 변수에 대한 이산화방정식 잔차의 절대값을 처음 10번 반복계산에서의 최대값으로 정규화시킨 값이  $10^{-5}$  이하로 감소되는 경우로 평가하였다. 또한 식 (3)의 VOF 값  $\alpha$ 에 대해서는 각 시간스텝에서 해석장에서의 모든 셀에 대해 잔차의 절대값을  $\alpha=1$ 인 처음의 물의 체적으로 정규화시킨 값이  $10^{-5}$  이하로 감소되는 경우로 평가하였다.

본 수치해석방법의 유효성을 확인하기 위해 두 가지 경우에 대해 전체 질량변화와 시간전개에 따른 다음 식으로 정의되는 계산영역 내 단위체적당 전체 운동에너지(total kinetic energy) TKE의 변화를 살펴보았다.

$$TKE = \frac{1}{V} \int_V \frac{1}{2} \rho \vec{v} \cdot \vec{v} dV \quad (17)$$

먼저, 비교적 성긴 격자를 사용하였음에도 불구하고 본 수치해석 결과는 시간이 지나도 초기의 경계가 퍼지거나 하는 현상이 거의 없으며,

약 10,000 시간 스텝이 지난 후에도 처음 질량에 대해  $7.0 \times 10^{-3}$  %(벽면을 적시는 경우)와  $2.0 \times 10^{-3}$  %(벽면을 적시지 않는 경우)의 매우 작은 오차를 가지면서 질량보존을 잘 만족시켜 주고 있어, 본 수치해석방법의 유효성을 입증해 주고 있다고 사료된다.

다음으로 지면관계상 그림으로는 나타내지 않았으나 전체 운동에너지는 벽면을 적시는 경우 ( $\theta_{eq}=5^\circ$ )에는 약 0.47s에서 최댓값을 가지고 이후부터는 약 1s를 주기로 하여 주기적으로 모세관 파에 의해 야기된 진동을 하면서 운동량방정식의 확산항의 존재로 점차 감쇄되어 감을 확인할 수 있었다. 또한 평형상태에 거의 도달하였을 때인 10,000 시간스텝이 지난 5s에서 운동에너지는 최댓값의 약 1.17%로 일정한 값을 유지하는데 이것은 본 수치해석방법에서 나타나는 기생흐름의 영향으로 사료된다. 이와는 달리 벽면을 적시지 않는 경우( $\theta_{eq}=175^\circ$ )에서는 평형상태에 거의 도달하였을 때인 5s에서 식 (17)로 계산된 전체 운동에너지는 최댓값의 약 7.8%로 벽면을 적시는 경우에 비해 상대적으로 큰 값을 가지며 명확한 주기성도 보이지 않는 것으로 나타났다. 이것은 뒤에서 살펴보는 바와 같이 벽면을 적시지 않는 경우에는 5s에 도달할 때까지 벽면을 적시는 경우와 같이 메니스커스(meniscus) 형태와 같은 자유표면을 형성하지 않고 끊임없이 형상이 변해가기 때문으로 사료된다.

Fig. 1은 두 가지 경우에 대한 초기상태에서 시간스텝이 1번 지난 후의 압력장을 나타낸다. 결과에서 보는 바와 같이 식 (15)의 벽면부착 경계조건에 의한 벽면 부착력(표면장력)으로 자유표

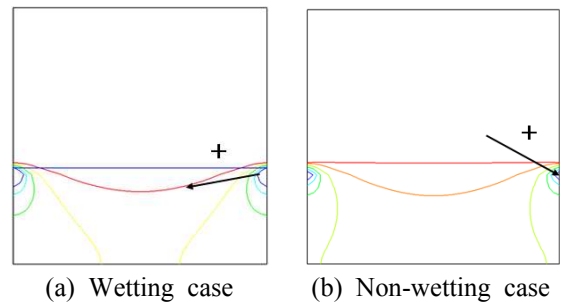
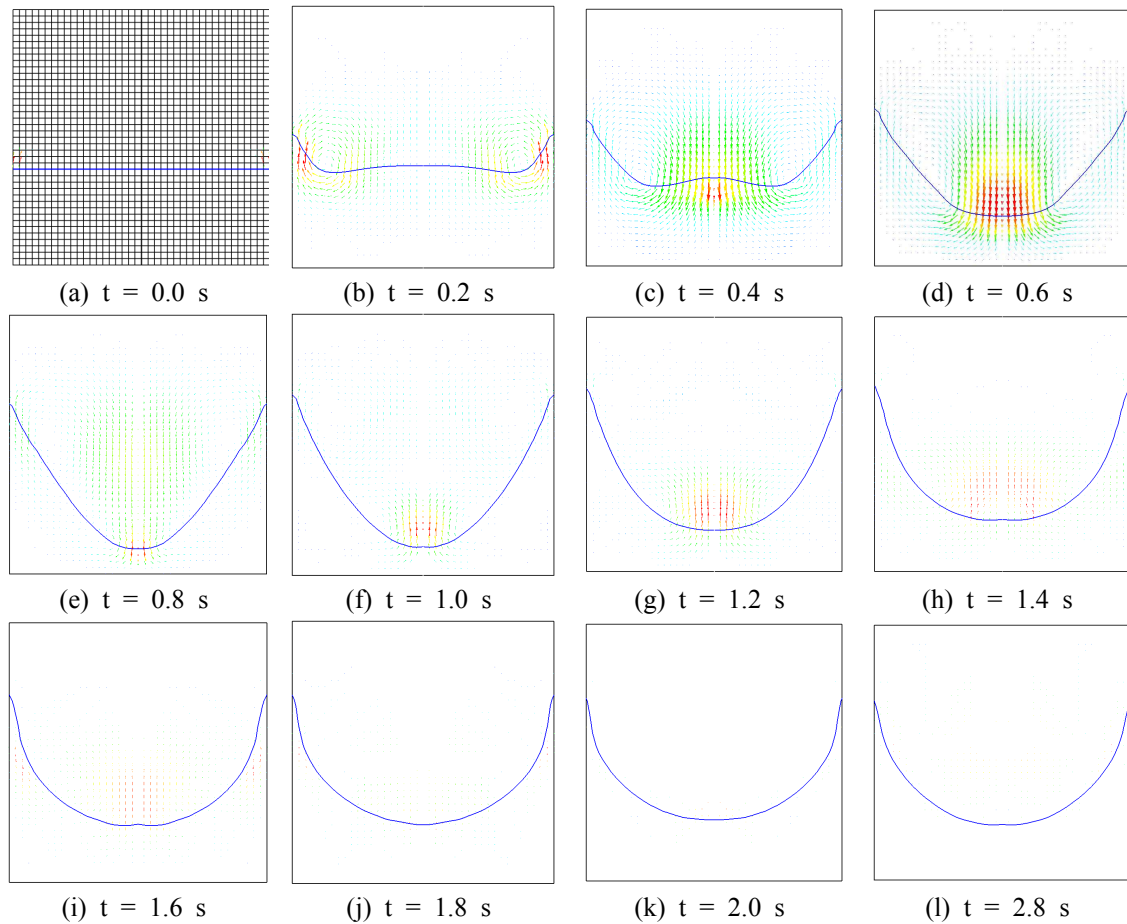


Fig. 1 Pressure contours after one computational cycle in a deep pool of water which has been given wall adhesion boundary conditions of (a)  $\theta_{eq} = 5^\circ$  and (b)  $\theta_{eq} = 175^\circ$  on the cylindrical tank walls



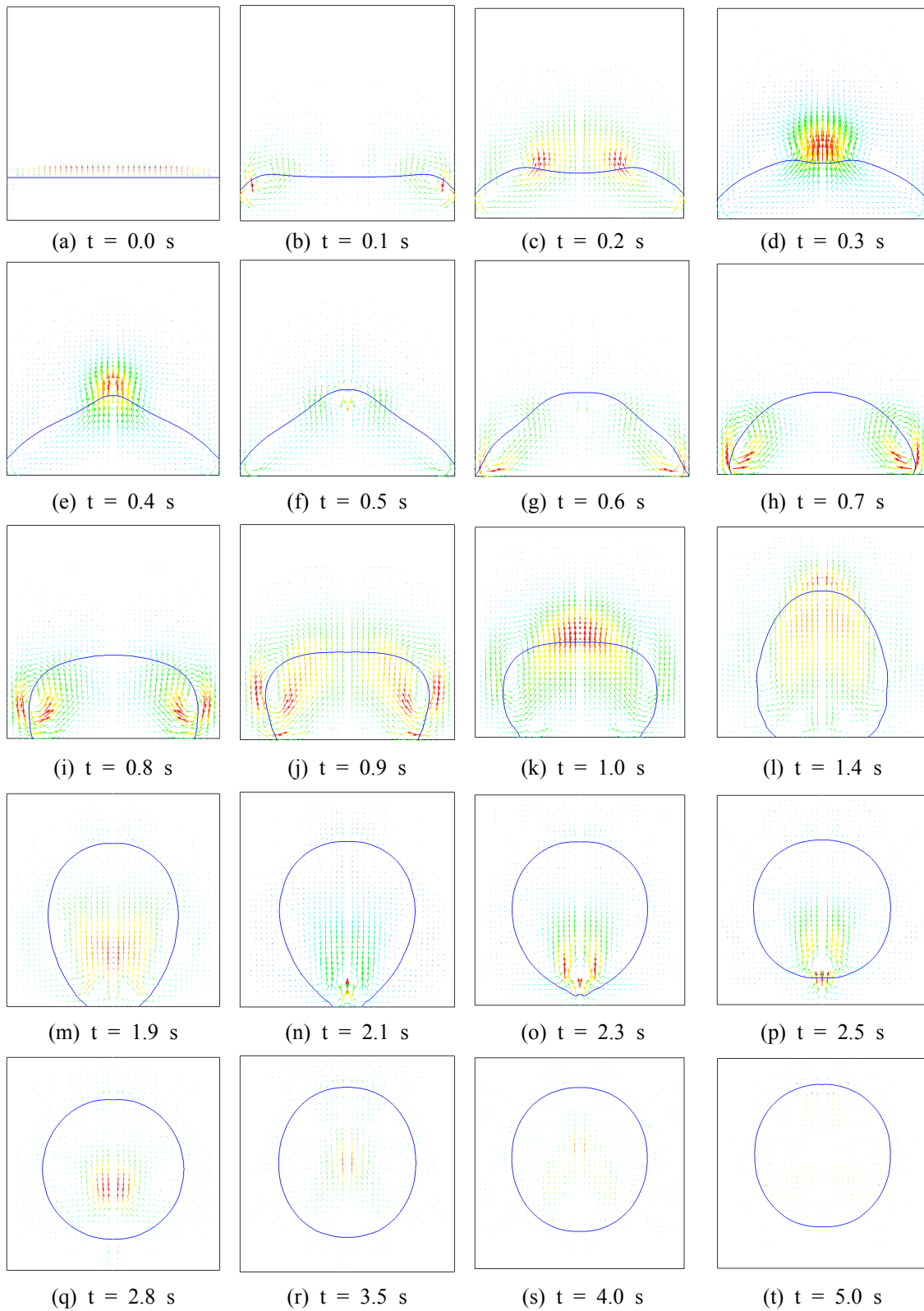
**Fig. 2** Time sequence of fluid flow vectors in a 4-cm deep pool of water which has been given a wall adhesion boundary condition of  $\theta_{eq} = 5^\circ$  on the cylindrical tank walls. Note that the velocity vectors shown in (a) are twenty times the size of the original vectors

면상에서 벽면에 매우 가까운 영역에 급격한 구배를 가지는 압력장이 생성되고 있으며, 이로 인해 유동이 발생됨을 예상할 수 있다. 즉, 벽면을 적시는 경우에는 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 벽면에서 가장 작은 압력이 생겨 이곳으로 유동이 들어오며 자유표면이 벽면을 타고 위쪽 방향으로 올라가게 되며, 벽면을 적시지 않는 경우에는 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 벽면에서 가장 높은 압력이 생겨 이곳으로부터 유동이 중심부 방향으로 나가게 되므로 벽면에서의 자유표면은 아래로 내려가게 되고, 유동도 하방으로 향하게 됨을 예상할 수 있다.

Fig. 2와 Fig. 3은 물이 벽면을 적시는 경우와 적시지 않는 경우의 시간전개에 따른 유체유동의 속도장과 자유표면에 해당하는 물 표면의 양상을 각각 보여주고 있다. 참고로 그림에서 속도는 20

배 확대된 스케일로 나타낸 Fig. 2(a)와 Fig. 3(a)을 제외하고는 모든 시간에 대해 동일한 크기로 스케일링되어 있다.

먼저 물이 벽면을 적시는 경우에는 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 처음에는 벽면 부착력에 기인하여 발생된 속도에 의해 탱크 벽면 부근의 계면(자유표면)이 위로 움직이면서 이로 인해 벽면 부근에 생기는 상대적으로 큰 계면 곡률에 의해 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 벽면 부근에서 상대적으로 큰 속도가 생기면서 벽면 부근에서의 속도장에 영향을 미치고, 계면이 탱크 벽면을 따라 움직이면서 유동장은 점차로 중심부 쪽으로 영향을 파급시켜간다. 시간이 경과함에 벽면 근방에서의 급격한 계면 곡률이 점차 완화되어가면서 원통 중심부에서의 계면 곡률이 상대적으로 커지게 되어 Fig. 2(c)에서 보는 바와 같이 중심



**Fig. 3** Time sequence of fluid flow vectors in a 2-cm deep pool of water which has been given a wall adhesion boundary condition of  $\theta_{eq} = 175^\circ$  on the cylindrical tank walls. Note that the velocity vectors shown in (a) are ten times the size of the original vectors

부에서 높은 속도가 발생되어 하방으로 흘러 Fig. 2(d)와 같은 과정을 거쳐 Fig. 2(e)와 같이 잘 알려진 메니스커스 형태의 자유표면을 형성하면서 식 (15)의 경계조건이 만족할 때까지 탱크 벽을 따라 위로 움직이는 것을 명확히 알 수 있다. 그러나 시간이 더욱 경과되면 Fig. 2(f) - 2(k)에서 보는 바와 같이 원통 중심부에서의 곡률을 완화시키기 위해 위아래로 진동하면서 궁극적으로 Fig. 2(l)와 같이 평형상태에서 나타나는 메니스커스 형태로 변화한다. 이것은 본 계산이 앞에서 살펴본 바와 같이 벽면에서 만족되는 식 (15)와 함께 초기화되지 않은 결과로 만들어지는 유동에서의 운동에너지 결과 때문이다. 참고로 이러한 사실은 Fig. 2에 동일한 스케일로 나타낸 유동장의 흐름 벡터로부터도 확인할 수 있다. 참고로, Fig. 2의 결과를 보면 벽면에서 상경계면이 준평형 상태의 접촉각인 5도보다 커 보이나, 이것은 비교적 성긴격자계와 결과를 그림으로 표현하기 위해 사용된 후처리기의 문제로 거시적인 관점에서서는 다음과 같은 이유로 문제가 없다고 사료된다. 즉, 첫째 본 연구에서의 관점은 원통형 탱크의 바닥에 위치한 얇은 물풀에서의 초기 경계치 문제를 본 해석방법이 시간 진행과 함께 동적인 거동을 적절하게 예측할 수 있는 능력이 있는지를 파악하는데 중점을 두고 있기 때문에 비교적 성긴 격자를 사용하고 있으며, 둘째 본 해석방법은 비정렬 셀 중심방법을 채용하고 또한 체적포착법을 채택한 VOF 방법을 사용하고 있기 때문에 벽면에 접한 셀 중심에서의  $\alpha$  값과 벽면 경계면 중심에서의  $\alpha$  값만을 사용하여 상경계면을 구하는 후처리기를 사용하였기에 접촉각이 정확하게 그림상에 표현되지 않고 있다. 그러나 내부의 상경계면 형상으로부터 외삽으로 구한다면 접촉각이 보다 정확하게 표현될 것으로, 향후 후처리기의 보완이 필요하다.

이와는 달리 벽면을 적시지 않는 경우에는 물은 수은과 같이 행동하므로 벽으로부터 그 자신을 떨어뜨리려고 하기 때문에, 물이 초기의 얇은 물풀부터 궁극적으로 공과 같은 형태로 생성되어져 가는 결과로 나타났다. 구체적으로 보면 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 처음에는 벽면에서 하방으로 작용하는 벽면 부착력에 기인하여 자유표면이 마치 강체와 같이 작용하여 원통중심부에서 상대적으로 강한 유동장이 생성되나, 곧 탱크 벽

면 부근의 계면(자유표면)이 아래로 움직이면서 이로 인해 벽면 부근에 생기는 상대적으로 큰 계면 곡률에 의해 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 벽면 부근에서 상대적으로 큰 속도가 생기면서 벽면 부근에서의 속도장에 영향을 미치고, 계면이 탱크 벽면을 따라 움직이면서 유동장은 점차로 중심부 쪽으로 영향을 파급시켜간다(Fig. 3(c)). 시간이 경과함에 벽면 근방에서의 급격한 계면 곡률이 점차 완화되어가면서 원통 중심부에서의 계면 곡률이 상대적으로 커지게 되어 Fig. 3(d)에서 보는 바와 같이 중심부에서 높은 속도가 발생되어 상방으로 흘러 Fig. 3(e)~(f)와 같이 중앙부분이 볼록한 형상을 가지며, 또한 벽면 부근에서는 계속 하방으로 움직이던 계면이 Fig. 3(g)과 같이 바닥 벽면을 타고 중심부 쪽으로 움직이며 이 영역에서의 상대적으로 강한 속도에 의해 반구 형태의 양상(Fig. 3(h))으로부터 Fig. 3(i)~(k)와 같은 과정을 거쳐 Fig. 3(l)~(m)과 같은 계란형 형태로 변화된다. 그런 다음에 Fig. 3(n)~(o)로부터 명확하듯이 순 상방향 운동량이 벽면 부착력에 의한 계란 모양의 물에 전달되어 결국에는 아래 바닥면으로부터 떠오른다. 바닥으로부터 떠오른 후에는 벽면부착력이 작용하지 않고 계면에 대한 표면장력만이 작용하므로, Fig. 3(p)~(s)에서 보는 바와 같이 운동량이 감쇄되어 점차 공 모양의 평형상태(Fig. 3(t))로 된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 비정렬격자계와 체적포착법을 채택한 VOF 방법을 사용하여 표면장력이 지배적인 다상유동 중 순수하게 벽면부착에 의해 야기되는 다상유동에 대해 수치적으로 연구하였다. 이를 위해 먼저 표면장력에 대한 CSF 모델 및 벽면부착 경계조건 모델을 비정렬격자계와 체적포착법에 적용할 수 있도록 수치해석 방법을 정립시키고 다상유동을 해석할 수 있는 수치해석방법<sup>(14-16)</sup>에 삽입하였다. 이 수치해석코드는 일반 상용 CFD 코드와 같이 비정렬 셀 중심방법을 채용하고 압력수정방법에 기반을 둔 3차원 유동해석방법<sup>(17,18)</sup>에 체적포착법에서 문제가 되는 번짐현상과 같은 경계면의 비물리적인 변형 및 수치확산 문제를 크게 개선한 것으로 알려진 HR도식인 CICSAM<sup>(10)</sup>을 도입하고, 시간차분에 대해 계산



의 안정성을 위해 음해법을 채택한 것이다.

또한 본 수치해석방법을 사용하여 중력을 포함하여 어떤 외력도 존재하지 않고 오직 벽면부착에 의해 야기되는 다상유동현상을 수치해석하고 벽면부착의 영향에 관한 결과분석을 통해 본 해석방법의 유용성을 평가하였다. 해석대상으로는 원통형 탱크의 바닥에 위치한 얇은 물풀에서의 초기 경계치 문제로, 두 가지 극단적인 경우, 즉 물이 벽면을 적시는 경우와 적시지 않는 경우를 다루었다.

연구결과, 표면장력이 지배적인 다상유동 중에서 벽면부착에 의해 야기되는 다상유동현상의 동적거동에 대해 본 수치해석방법의 유용성이 입증되었다.

### 후 기

본 연구는 2012년도 국민대학교 교내연구비를 지원받아 수행된 연구이다.

### 참고문헌

- (1) Blackbill, J. U., Kothe, C. and Zamach, C., 1992, "A Continuum Method for Modeling Surface Tension," *J. Comput. Phys.*, Vol. 100, pp. 335~354.
- (2) Hirt, C. W. and Nicholls, B. D., 1981, "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *J. Comput. Phys.*, Vol. 39, pp. 201~225.
- (3) Lafaurie, B., Nardone, R., Scardovelli, S., Zaleski, G. and Zanetti, G., 1994, "Modeling Merging and Fragmentation in Multiphase Flows with SURFER," *J. Comput. Phys.*, Vol. 113, pp. 134~147.
- (4) Francois, M. M., Cummins, S. J., Dendy, E. D., Kothe, D. B., Sicilian, J. M. and Williams, M. W., 2006, "A Balanced-Force Algorithm for Continuous and Sharp Interfacial Surface Tension Models within a Volume Tracking Framework," *J. Comput. Phys.*, Vol. 213, pp. 141~173.
- (5) Tong, A. Y. and Wang, Z., 2007, "A Numerical Method for Capillary-Dominant Free Surface Flows," *J. Comput. Phys.*, Vol. 221, pp. 506~523.
- (6) Seifollahi, M., Shirani, E. and Ashgriz, N., 2008, "An Improved Method for Calculation of Interface Pressure Force in PLIC-VOF Methods," *European J. of Mechanics B/Fluids*, Vol. 27, pp. 1~23.
- (7) Gerlach, D., Tomar, G., Biswas, G. and Durst, F., 2006, "Comparison of Volume-of-Fluid Methods for Surface Tension-Dominant Two-Phase Flows," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 740~754.
- (8) Rider, W. J. and Kothe, D. B., 1998, "Reconstruction Volume Tracking," *J. Comput. Phys.*, Vol.141, pp.112~152.
- (9) Muzafarjia, S. and Peric, M., 1999, "Computation of Free Surface Flows using Interface Tracking and Interface Capturing Methods," Chap. 2, in Mahrenholtz, O. and Markewicz, M., *Nonlinear Water Wave Interaction*, Comput. Mech. Publications.
- (10) Ubbink, O., 1997, "Numerical Prediction of Two Fluid Systems with Sharp Interface," PhD Thesis, University of London.
- (11) Zhao, Y., Tan, H. H. and Zhang, B., 2002, "A High-Resolution Characteristics-based Implicit Dual Time-Stepping VOF Method for Free Surface Flow Simulation on Unstructured Grids," *J. Comput. Phys.*, Vol. 183, pp. 233~273.
- (12) Myong, H. K., 2011, "Numerical Simulation of Surface Tension-Dominant Multiphase Flows with Volume Capturing Method and Unstructured Grid System" *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 35, No. 7, pp. 723~733.
- (13) *Fluent*, Fluent 6.2 User's Guide, 2006.
- (14) Myong, H. K. and Kim, J. E., 2006, "A Study on an Interface Capturing Method Applicable to Unstructured Meshes for the Analysis of Free Surface Flow," *KSCFE J. of Computational Fluids Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp.14~19.
- (15) Myong, H. K., 2009, "Numerical Simulation of Multiphase Flows with Material Interface due to Density Difference by Interface Capturing Method" *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 33, No. 6, pp. 443~453.
- (16) Myong, H. K., 2008, "Comparative Study on

- High Resolution Schemes in Interface Capturing Method Suitable for Unstructured Meshes" *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 32, No. 1, pp. 23~29.
- (17) Myong, H. K. and Kim, J., 2005, "Development of 3D Flow Analysis Code using Unstructured Grid System(1st Report, Numerical Method)," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 9, pp. 1049~1056.
- (18) Myong, H. K. and Kim, J., 2006, "Development of a Flow Analysis Code using an Unstructured Grid with the Cell-Centered Method," *J. of Mechanical Science and Technology (KSME Int. J.)*, Vol. 20, No.12, pp.2218~2229.