 논문

주조유동 시뮬레이션에서 자유경계면 추적 기법 비교 연구

최영심[†] · 홍준호 · 황호영

한국생산기술연구원 사이버설계센터

A Comparative Study of Interface Reconstruction Algorithms in The Molten Metal Flow

Young-Sim Choi[†], Jun-Ho Hong, and Ho-Young Hwang

e-Design Center, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

Abstract

We applied two numerical schemes to improve accuracy of the solution in the flow simulation of molten metal. One method is Piecewise Linear Interface Calculation (PLIC) method and the other is Donor-Acceptor (D-A) method. In the present work, we have tested simple problems to verify the module of the interface reconstruction algorithms. After validations, accuracy and efficiency of these two methods have compared by simulating various real products. On the numerical simulation of free surface flow, it is possible for PLIC method to track very accurately the interface between phases. PLIC method, however, has the weak point where a lot of computational time hangs, though it shows the more accurate interface reconstruction. Donor-Acceptor method has enough effectiveness in the macro observation of mold filling sequence though it shows the inferior accuracy.

Key words : Accuracy, Volume of Fluid method, Interface reconstruction, Donor-Acceptor method, PLIC, Molten Metal flow.

(Received May 19, 2011 ; Accepted June 10, 2011)

1. 서 론

일반적으로 주조 산업분야에서 하나의 제품 개발 기간은 매우 짧으며 그래서 주조 시뮬레이션에서 해석 시간, 즉 계산 효율성은 매우 중요한 요소이다. 그런 관점에서, 주조 시뮬레이션에서 계산 효율성은 수치 해석의 정확도보다 더 중요하게 간주되기도 한다. 그러나 계산 효율성이 우수해도 신뢰성이 없는 수치해석 결과는 시뮬레이션 해석에서 의미가 없다. 주조 공정에서 유동해석은 이상유동장을 해석하는 것으로, 크게 유동장을 해석하는 것과 시간에 따라 캐비티 안으로 주입되는 용탕의 자유경계면을 추적하는 것으로 구성된다. 주조 공정 시뮬레이션에서 유동해석의 정확도를 개선하기 위한 방법으로는 첫째, 유동장을 해석하는 모듈의 정확도를 개선하는 것이며, 또 하나는 자유경계면을 추적하는 방법의 정확도를 개선하는 것이다.

본 논문에서는 주조 공정 유동 시뮬레이션의 정확도 개선을 위해 자유경계면 추적 방법에 대한 비교 연구를 하였다. 먼저 자유경계면을 포착하기 위한 방법을 살펴보면 크게 front capturing 방법과 front tracking 방법으로 나뉘어 진다[1]. Capturing 방법은 경계면을 밀도나 온도 등의 급격한 구배가 있는 zone으로 다룬다. 이 방법의 장점은 경계면의 위상변화를 모델링할 때, 구현이 쉬우며 추가적인 수치적 알고리즘이 필요없다. 그러나 물성치들의 불연속면인 경계면을 정확히 나타

낼 수 없어 경계면이 여러 계산 격자에 걸쳐 퍼져서 존재하는 단점이 있다[2]. Tracking 방법은 경계면을 날카로운 불연속면으로 다룬다. 그러므로 Capturing 방법보다 실제 이상유동과 가깝게 구현이 가능하지만 불연속면을 구현하기 위한 복잡한 수치적인 알고리즘이 필요하다. Tracking 방법 중의 하나인 Volume of Fluid (VOF) 방법은 오래된 다상 유동 해석 기법의 하나로, 경계면이 존재하는 제어체적에서 각 상이 차지하고 있는 부피의 비율을 이용한다. 이 방법에서 사용하는 부피비는 비압축성 유동장에서 질량과 같은 개념의 물성치로서 VOF 식을 보존형태로 나타낼 수 있으며 VOF 방법이 질량을 보존한다는 것을 의미한다. 이러한 이유로 주조 유동 해석에서 Volume of Fluid (VOF) 방법이 주로 사용되고 있으며 다수의 주조 상용 프로그램에서 VOF 기법을 자유경계면 추적 방법으로 사용하고 있다.

VOF 경계면 추적 방법은 경계면 재구성 알고리즘과 VOF 이동 알고리즘으로 구성되어 있다. 경계를 재구성하는 방법은 크게 piecewise constant 방법과 piecewise linear 방법이 있다. 전자의 대표적인 방법인 Noh와 Woodward의 SLIC[3] 뿐 아니라 불꽃 전파 모델[4], 난류 연소 모델[5,6]에 적용하기 위해 개선한 SLIC에 대한 연구 등이 있다. 또한 Hirt와 Nichols[7]의 Donor-Acceptor 방법이 있다. Piecewise linear 방법의 대표적인 것으로 Youngs의 PLIC[8]가 있으며 Youngs 이후로

[†]E-mail : raycute@kitech.re.kr

정확도를 개선한 FLAIR, LVIRA, ELVIRA 방법 등[9,10]이 많이 나오고 있다.

본 연구는 주조 공정의 이상유동을 해석하기 위한 자유경계면 추적 방법 중 경계면 재구성법인 Donor-Acceptor 방법과 PLIC 방법을 비교 연구하였다. Piecewise constant 방법 중 Donor-Acceptor 방법은 주조 유동 시뮬레이션에서 일반적으로 많이 사용되고 있으며[11,12], piecewise linear 방법 중에서 PLIC 보다 좀 더 정확한 기법은 많이 있지만 정확도 증가는 계산 효율성을 해칠 수 있으므로 본 연구의 주조 유동에는 PLIC 를 사용하였다.

2. 수치 해석 방법

2.1 자유경계면 추적 방법

1981년 C. W. Hirt와 B. D. Nichols가 제안한 VOF 기법은 가장 오래된 다상 유동 해석 기법의 하나로, 제어체적에서 각 상이 차지하고 있는 부피의 비율을 이용한다[7]. 따라서 VOF 기법에서 사용하는 volume fraction 함수는 각 상에서 0 또는 1의 값을 가지며, 경계면이 존재하는 영역에서는 0과 1 사이의 값을 갖는다. VOF 기법에서는 경계면이 존재하는 제어체적에서 경계면을 재구성하여 구해진 부피비를 토대로 주어진 속도장을 사용해 다음 시간에서의 부피비를 구할 수 있다.

VOF 이동식은 다음과 같다.

$$f_i + u f_x + v f_y + w f_z = 0 \quad (1)$$

여기서 f 는 각 제어체적에서 차지하는 한 물질의 부피비이다. 비압축성 유동장에서 속도 $\vec{u}$ 는 다음을 만족한다.

$$u_x + v_y + w_z = 0 \quad (2)$$

그러므로 다음과 같이 VOF 함수에 대한 보존법칙이 성립한다.

$$f_i + (u f)_x + (v f)_y + (w f)_z = 0 \quad (3)$$

식 (3)은 VOF 함수 f 의 보존식 형태로 나타낸 것으로 비압축성 유동에서 부피의 보존은 질량 보존과 같은 뜻이다. 다상 유동에서 경계면이 존재하는 곳은 물성치의 불연속 현상이 나타나므로 수치적으로 계산할 때 질량보존을 만족하기가 어렵다. 그러나 VOF 기법은 식 자체가 질량보존을 만족하므로 다상 유동 해석에 있어 큰 장점을 가진다.

각 상에 부여된 부피비는 유동장에서 계산된 속도를 따라 이동하는데, 이 때 각 계산격자에서 기하학적인 경계면의 형상에 따라 이동하는 부피비를 결정하게 된다. 물리적으로 타당한 부피비의 이동은 결국 상의 질량 플럭스를 계산하는 것과 같은 의미이기 때문에 각 상의 질량 보존 및 날카로운 경계면의 유지를 위해 경계면의 형상과 이동되는 부피비는 정확히 계산되어야 한다. VOF 경계면 추적 방법은 다음 두 부분으로 구성되어 있다. 각 계산격자에서 기준 물질의 부피비를 이용하여 대략적인 경계면을 결정하는 경계면 재구성 알고리즘과 이를 기반으로 운동방정식에서 구해진 속도를 이용하여 다음 시간대에 전진하는 유체의 부피를 결정하는 VOF 이동 알고리즘이다.

2.2 경계면 재구성 방법

식 (3)을 수치적으로 해석하기 위해서는 먼저 주어진 부피비를 이용하여 자유경계면을 구성하여야 한다. 계산격자에서 각 면으로 전달되는 부피플럭스는 기존의 계산격자가 가지고 있는 부피비가 아니라 실제 전달되는 양에서 차지하고 있는 물질의 부피비로 재구성되어야 한다. Fig.1은 Rudman의 translation test의 결과를 발췌한 것이다[13]. 별도의 생성향이 없이 균일한 속도만을 준 후, 초기의 경계면과 일정시간 이후의 경계면을 나타낸 것으로 경계면 재구성 방법에 따른 정확도를 나타낸다. Youngs의 PLIC방법이 초기치와 가장 근사한 것을 알 수 있다.

2.2.1 Donor-Acceptor 방법

Piecewise constant 방법은 상 간 경계면을 단순히 좌표축의 수평 또는 수직으로 재구성하는 방법으로 Donor-Acceptor (D-A)방법에서 구하는 부피플럭스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta F = \min[f_{AD} \cdot |V_x| + CF, f_D \cdot \Delta x_D] \quad (4)$$

$$CF = \max[(1-f_{AD}) \cdot |f| - (1-f_D) \cdot \Delta x_D, 0] \quad (5)$$

여기서 D는 유체를 주는 제어체적인 Donor cell을, A는 유체를 받는 Acceptor cell을 나타낸다. 또한 AD는 유체의 방향에 따라 결정되는 것으로 속도의 방향과 유체흐름의 방향이 수평일 경우 AD는 D로 대체되며, 수직일 경우는 AD는 A로 대체된다. 식(4)에 의하여 f 의 이동량이 결정되면 Donor cell에서는 이동량만큼 감소시키고, Acceptor cell에서 이동량만큼 증가시키므로써 시간 전진 후의 f 값을 계산한다. 식 (4)에서 min 값은 계산격자에서 한번에 받을 수 있는 최대 양과 전달할 수 있는 최대 부피플럭스를 나타내는데 이로써 경계면을 0차로 계산하는 오차를 줄일 수 있다.

2.2.2 Piecewise Linear Interface Calculation (PLIC) 방법

PLIC 방법은 경계면을 선형의 직선으로 재구성하는 방법이다. 경계를 재구성하기 위해 먼저 경계면의 수직벡터를 구한다. 경계면의 수직벡터는 각 제어체적의 부피비 구배로 구할 수 있다.

$$\vec{n} = \nabla f \quad (6)$$

구해진 수직벡터의 값으로 경계면의 기울기를 알 수 있고 그것과 계산격자의 부피비를 이용하여 경계면을 나타낼 수 있다. 2차원일 때, 총 16가지의 경계면 형상이 있으며 중복을

Fig. 1. Advection with unidirectional velocity fields (2,1).

Fig. 2. Interface reconstruction of 4 cases in the two dimensions.

제외한 4가지 경우의 경계면을 구성할 수 있다. Fig. 2는 기울기가 $(0, \pi/2)$ 일 때, 부피비에 따른 경계면의 위치를 나타낸 것이다.

3차원으로 확장한 PLIC 방법의 자유경계면 형상은 매우 복잡하여 이를 수치적으로 구현하기에는 많은 어려움이 있다. 3차원 PLIC 방법을 수치해석하기 위하여 손의 논문[14]을 참조하였다. 경계면이 포함되어 있는 계산 격자의 내부 노드에서 경계면까지의 수직거리를 이용하여 3차원에서 전달되어야 할 부피플럭스를 계산한다. 3차원에서 자유경계면을 재구성하였을 때 총 64 가지의 자유경계면이 존재하며 Fig. 3은 64 가지의 자유경계면 중 중복을 제외한 5가지 경우를 나타낸 것이다.

2.3 VOF 이동 방법

다음 단계는 식 (3)을 시간에 따라 부피비를 전진시킨다. 식 (3)을 다음과 같이 차분화하고 operator split 방법을 사용하였다.

$$f_{i,j,k}^{n+1} = f_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_{i-1/2,j,k} - F_{i+1/2,j,k}] + \frac{\Delta t}{\Delta y} [G_{i,j-1/2,k} - G_{i,j+1/2,k}] + \frac{\Delta t}{\Delta z} [H_{i,j,k-1/2} - H_{i,j,k+1/2}] \quad (7)$$

여기서 $F_{i-1/2,j,k} = (fu)_{i-1/2,j,k}$ 은 x축 방향으로 전달되는 부피플럭스를, y축 방향의 부피플럭스 $G_{i,j-1/2,k} = (fv)_{i,j-1/2,k}$ 와 z축 방향의 부피플럭스 $H_{i,j,k-1/2} = (fw)_{i,j,k-1/2}$ 를 나타낸 것이다.

$$f_{i,j,k}^{\sim} = f_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_{i-1/2,j,k} - F_{i+1/2,j,k}] \quad (8)$$

$$f_{i,j,k}^{\wedge} = f_{i,j,k}^{\sim} + \frac{\Delta t}{\Delta y} [\tilde{G}_{i,j-1/2,k} - \tilde{G}_{i,j+1/2,k}] \quad (9)$$

$$f_{i,j,k}^{n+1} = f_{i,j,k}^{\wedge} + \frac{\Delta t}{\Delta z} [\hat{H}_{i,j,k-1/2} - \hat{H}_{i,j,k+1/2}] \quad (10)$$

$f_{i,j,k}^{\sim}, f_{i,j,k}^{\wedge}$ 는 중간값이며 $\tilde{G}, \hat{H}$ 는 각각의 부피비 중간값에 의해 구한 값이다. Fig. 4는 2차원에서 x방향으로 전달되는 부피플럭스를 나타낸 것이다. x방향 속도 $u_{i+1/2,j}$ 가 양수일 때, 시간 Δt 동안 $i+1/2,j$ 경계면을 지나는 유체의 플럭스는 $u_{i+1/2,j}\Delta t$ 경계에서 오른쪽에 있는 유체의 양과 같다. VOF 이동식에 사용되는 것은 부피의 비율로서 각 제어체적에 존재하는 기존의 부피비는 면적 $u_{i+1/2,j}\Delta t\Delta y$ 기준으로 재구성되어야 한다. 즉, 부피비는 하나의 유체가 그 제어체적 내를 차지하는 비율로서 제어체적을 유출입하는 실제 부피플럭스는 경계면 재구성 알고리즘을 통해 새로이 구해진 부피비를 사용하여야 한다. sweep의 방향은 매 시간마다 바뀌므로써 플럭스를 구할 때 sweep으로 인한 수치오차를 줄일 수 있다.

2.4 지배 방정식

3차원 비압축 점성 Navier-Stokes 식을 지배방정식으로, Volume of Fluid 이동식을 용탕의 자유경계면을 추적하기 위한 방법으로 사용한다. 아래에 연속방정식과 운동량 방정식, VOF 방정식을 나타내었다.

Continuity Equation:

$$u_x + v_y + w_z = 0 \quad (11)$$

Momentum Equation:

$$\vec{u}_t + (u\vec{u})_x + (v\vec{u})_y + (w\vec{u})_z = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\vec{u} + \vec{g} \quad (12)$$

Volume of Fluid Equation:

$$f_t + (uf)_x + (vf)_y + (wf)_z = 0 \quad (13)$$

여기서, $\vec{u}$ 는 속도 벡터이며 $\vec{g}$ 는 중력가속도, ν 는 동점성계수, ρ 는 용탕의 밀도, p 는 압력이며 f 는 격자에서 용탕이 차

Fig. 3. Five possible interface configurations in three dimensions: The region surrounded by the thick solid lines represents the smaller between the liquid and gas volumes[14].

Fig. 4. The fraction of dark fluid to the right of the dotted line is advected into the neighboring cell on the right. In this example u is positive.

지하는 부피비를 나타낸다.

유동장 해석을 위해서 SOLA (a Solution Algorithm for Transient Fluid Flow) 방법[15]을 사용하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 검증 문제

자유경계면 재구성 방법을 비교하기 위하여 먼저 검증 문제를 해석하였다.

3.1.1 질량 보존 테스트

해석해를 구할 수 있는 2차원의 정사각 유동장에 용탕을 주입하여 유량 비교를 하였다. 유동장의 면적은 3.3 cm^2 , 주입구 길이는 0.6 cm , 주입속도는 15 cm/s 를 주었다. 유량 계산식(유량 = 단면적 $\times$ 주입속도; 2차원에서는 주입구 길이)을 사용하면 특정시간에서 주입된 용탕의 양을 구할 수 있다. 0.0716 s 에서의 용탕의 양은 전체 면적의 19.53% 이다. Fig. 5는 두 방법의 수치해석 결과를 충전율과 속도 벡터를 함께 나타낸 것이다. Table 1은 0.0716 s 에서 D-A 방법과 PLIC방법의 충전율과 질량 오차를 나타낸 것이다. D-A 방법이 PLIC 방법에 비해 3배 이상 질량 오차가 나타났다. D-A 방법의 경우 경계면을 좌표축에 평행하게 재구성함으로써 축방향으로 시간에 따라 전달되는 용탕을 계산한다. PLIC 방법은 경계면을 기울기를 가지는 직선으로 고려하므로 D-A 방법과 마찬가지로 질량오차가 발생할 수 있지만 D-A 방법에 비하면 크지 않다. 3차원으로 확장을 하게 될 경우, 계산되어지는 축방향 부피량이 하나 더 생기게 되므로 이러한 질량 오차는 더 증가하게 된다. 반면에 계산 시간은 PLIC 방법이 오래 걸리는 것을 알 수 있다.

3.1.2 Translation test

다음은 앞 장에서 설명한 volume advection 문제인 Rudman의 translation test[13]를 3차원으로 해석해보았다. 이 테스트는 경계면 재구성 기법의 정확도를 알아보기 위해 이용되고 있다[16]. 중력이나 표면장력에 의한 생성향이 전혀 없고 일정 속

Fig. 5. Numerical results of D-A and PLIC method.

Table 1. Mass conservation test.

	Analytic solution	D-A	PLIC
Filling rate (%)	19.53	21.171	20.004
Mass error (%)	-	8.4	2.4
Computational time (s)	-	53	65

도만이 존재할 때, 유동을 구분 지어주는 경계는 변화 없이 그대로 이동하여야 한다. 기법 별로 원래 형상의 일그러짐 정도로 해당 기법의 정확도를 알 수 있다. 일정한 크기의 3차원 구를 속도장 (1,1,1)로 주고 시간전진을 하여 해석하였다. 앞서 말했듯이, 아무런 외력이 존재하지 않으므로 이론적으로 구는 원래의 형상이 유지되어야 한다. Fig. 6은 초기조건의 구와 일정 시간이 지났을 경우 구의 형상을 한 영역에 부피비 f 로 나타낸 것이다. D-A방법의 결과는 시간이 지날수록 구의 형상이 일그러짐을 알 수 있다. PLIC의 경우는 초기의 구 형상을 유지한 채로 전진하는 것을 알 수 있다. 기울기를 구하지 않고 경계면을 재구성하는 D-A 방법의 경우, 계산해야하는 형상이 계산격자에 평행하게 놓여져 있는 경우보다 계산격자에 기울어져 있을 경우 질량 오차가 더 커지게 된다. Fig. 6의 구는 속도장 (1,1,1)로 45도 방향으로 구가 전진하므로 경계면의 번짐 현상(smearing)이 심한 것을 알 수 있다.

3.2 응용 문제

기법 별 정확도를 확인하기 위한 검증 문제를 해석한 후, 주조유동 해석에서 다양한 공정의 실 제품을 해석함으로써 두 기법을 비교하였다.

3.2.1 사형중력주조공정

스퍼기어(spur gear)의 한 종류를 사형 중력 주조 공정으로 해석하였다. 기어의 중심에 주입구가 있으며 5개의 탕도를 통해 용탕이 흘러가도록 주조방안을 설계하였다. 각 탕도는 정오각형의 형태로 놓여져 있다. 그 중 9시 방향의 탕도는 용탕 진행방향과 계산격자가 평행하고 나머지 4개의 탕도는 용탕 진행방향이 격자에 기울어져 있다. 용탕의 재질은 AC4CH (A356)를 사형의 재질은 FURAN을 사용하였으며 주입속도는 30 cm/s 로 주었다. Fig. 7은 용탕의 충전율 20%, 22%, 28%에서 두 기법의 해석결과를 z-단면에서 부피비로 나타낸 것이다. PLIC 방법의 경우, 5개의 탕도를 통해 비교적 균일하게 용탕이 충전되는 것을 알 수 있다. 반면에 D-A 방법은 용탕의 진행방향이 격자에 어떻게 놓여져 있느냐에 따라 용탕 충전 양상이 다르다. 충전율 28% 일 때, 축방향으로 놓여진 탕도를 통해 흘러 들어간 용탕이 더 많음을 알 수 있다. 유동 시뮬레이션에서 용탕의 충전 양상에 따라 산화막 발생 위치나 용탕 최종 충전 위치 등을 예측함으로써 주조 결함을 방지하는데 경계면 재구성방법에 따라서 전혀 다른 해석 결과를 예측할 수 있다.

Fig. 6. Numerical results about the 3-D translation test.

Fig. 7. D-A (above) and PLIC (below) results of the Spur gear at 20%, 22% and 28%.

Fig. 8. D-A (above) and PLIC (below) temperature results at 44%, 64% and 92%.

Fig. 9. D-A (above) and PLIC (below) temperature results of the Supply at 30%, 40% and 60%.

3.2.2 경동주조공정

다음 제품은 경동주조 공정으로 주조되는 공진기(resonator)를 해석하였다. 용탕의 재질은 AC4CH (A356)이며, 금형의 재질은 SKD61을 사용하였다. 제품 내부에 셀코어가 있다. Tilting 시간은 3초를 주었다. Fig. 8을 보면 정성적으로 D-A 방법과 PLIC 방법의 해석결과가 비슷한 것을 알 수 있다. D-A 방법과 PLIC 방법의 가장 큰 차이는 Piecewise constant와 Piecewise linear라는 것으로, 즉 경계면의 기울기를 고려하는 것인데 격자와 유동진행방향의 각도가 크지 않으면 경계면 재구성 방법으로 인한 결과차이가 크지 않게 된다. 계산 시간을 보면 동일한 컴퓨터 사양에서 D-A법의 경우 5.7 시간, PLIC는 6.8 시간으로 약 1.2배의 시간이 걸렸다. 수치해석에서 정확도를 향상시킬 경우 계산능력이 저하될 수 있으므로 이 제품의 경우, D-A 법으로 해석하는 것이 해석의 정확도와 효율

성의 측면에서 더 나은 결과를 얻을 수 있다.

3.2.3 금형중력주조공정

마지막으로 금형 중력 주조 공정을 사용하여 온수분배기를 해석하였다. 재질은 위의 공진기와 같은 것을 사용하였다. 제품 중앙에는 셀코어가 있다. 주입속도는 50 cm/s 로 주었다. Fig. 9는 두 기법의 온도 해석 결과를 충전율 30%, 40%, 그리고 60%에서 나타난 것이다. Piecewise constant 방법은 유동방향이 격자에 경사질 때 유동이 퍼지며 질량오차도 큰 것을 검증 문제에서 확인하였는데 이 제품에서 일직선의 게이트에서는 두 방법의 결과가 유사하나 경사진 탕도를 거치며 두 기법의 결과에 차이가 나타난다. 30% 충전율에서 D-A 결과를 보면 바닥에서 순차적으로 용탕이 충전되도록 설계한 방안과 달리 3개의 탕도에서 용탕이 주입되는 것을 알 수 있다. 이것은 유동의 경사면 진행 방향에서 질량이 증가하는 수치오차를 가지기 때문이다. 반면에 PLIC의 결과는 비교적 순차적으로 용탕이 탕도를 통해 주입되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

공기로 채워진 캐비티에 용탕이 충전되는 주조공정 유동해석은 이상유동장이다. 이상 유동을 해석하는 방법은 단일 상 유동장 해석을 하기 위한 Navier-Stokes 방정식과 공기 중에 용탕이 전진하는 것을 추적하는 자유경계면 추적 방정식으로 이루어진다. 주조 공정 유동해석에서 정확도를 개선하기 위해서 본 연구에서는 3차원 비압축 점성 유동을 SOLA 법을 이용하여 해석하였고 자유경계면 추적 방정식으로 VOF법을 사용하였다. VOF의 경계면 재구성법으로 주조유동에서 많이 사용되고 있는 Donor-Acceptor법과 1차의 기울기를 가지는 경계면으로 재구성하는 PLIC법을 사용하여 정확도 비교를 하였다. 질량 보존 문제와 Translation test를 통해서 PLIC방법이 D-A방법에 비해 정확도가 높다는 것을 확인하였다. 그러나 유동의 진행방향이 좌표축과 평행할 경우, 두 방법의 차이는 크지 않았다. 이는 D-A 방법이 좌표축과 평행하게 경계면을 재구성하기 때문이다. 반면에 유동이 대각선 방향으로 전진할 때 D-A 방법은 경계면의 기울기를 고려하는 PLIC 방법에 비해 유동의 경계면이 퍼지는 것을 알 수 있었다. 실제 주조제품을 적용하여 두 기법을 비교해보았다. 동일하게 놓여진 탕도를 지나가는 유동의 경우 유동이 좌표축에 평행한지에 따른 결과의 차이를 확인할 수 있었다. 반면에 두 기법의 차이가 가시적으로 크게 나타나지 않는 제품도 있었다. 수치해석에서 정확도를 개선할 경우 계산효율성이 떨어질 수도 있으므로 제품에 따라서 D-A법과 PLIC법을 적절히 선택하여 해석하는 것이 필요하다.

참고문헌

- [1] E. G. Puckett et al. : J. Comput. Phys., "A high-order projection method for tracking fluid interfaces in variable density incompressible flows", 130 (1997) 269-282
- [2] H. Haj-Hariri, Q. Shi, and A. Borhan : Phys. Fluids A, "Effect of local property smearing on global variables, implications for numerical simulation of multiphase flows", 6 (1994) 2555

- [3] W. F. Noh and P. R. Woodward : Lecture Notes in Physics, edited by A. I. van der Vooren and P. J. Zandbergen (Springer-Verlag, New York/Berlin), "SLIC (Simple Line Interface Calculation)", 59 (1976) 330
- [4] A. J. Chorin : J. Comput. Phys., "Flame advection and propagation algorithms", 35 (1980) 1
- [5] A. F. Ghoniem et al. : Phil. Trans. R. Soc. London A, "Numerical modeling of turbulent flow in a combustion tunnel", 304 (1982) 303
- [6] J. A. Sethian : J. Comput. Phys., "Turbulent combustion in open and closed vessels", 54 (1984) 425
- [7] C. W. Hirt and B.D. Nichols : J. Comput. Phys., "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", 39 (1981) 201-225
- [8] D.L. Youngs : Numerical Methods for Fluid Dynamics (edited by K.W. Morton and M.J. Baines, Academic Press, New York), "Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion", (1982) 273-285
- [9] W.J. Rider and D.B. Kothe : J. Comput. Phys., "Reconstructing volume tracking", 141 (1998) 112-152
- [10] J. A. Pilliod and E. G. Puckett : J. Comput. Phys., "Second-order accurate volume-of-fluid algorithm for tracking material interfaces", 199 (2004) 465-502
- [11] H. Liu, E. J. Lavernia, and R. H. Rangel : Atomization Sprays, "Numerical investigation of micropore formation during substrate impact of molten droplets in plasma spray processes", 4 (1994) 369
- [12] G. Trapaga et al. : Metall. Trans. B., "Fluid flow, heat transfer, and solidification of molten metal droplets impinging on substrates-Comparison of numerical and experimental results", 23(6) (1992) 701
- [13] M. Rudman : Int. J. Numer. Methods Fluids, "Volume-Tracking Method for Interfacial Flow Calculation", 24 (1997) 671
- [14] G.H. Son : Numerical Heat Transfer, "Efficient implementation of a coupled level-set and volume-of-fluid method for three-dimensional incompressible two-phase flows", 43 (Part B) (2003) 549-565
- [15] B.D. Nicholas, C.W. Hirt, and R.S. Hotchkiss : Tech. Report LA-8355, Los Alamos Scientific Laboratory, "SOLA-VOF: A solution algorithm for transient fluid flow with multiple free boundaries", (1980)
- [16] O. Ubbink and R. I. Issa : J. Comput. Phys., "A method for capturing sharp fluid interfaces on arbitrary meshes", 153 (1999) 26-50