

## 주조유동의 정확도 개선을 위한 수치기법 연구<sup>§</sup>

최영심<sup>\*†</sup> · 홍준호<sup>\*</sup> · 황호영<sup>\*</sup>

\* 한국생산기술연구원

### Numerical Method for Improving the Accuracy of Molten Metal Flow

Young Sim Choi<sup>\*†</sup>, Jun Ho Hong<sup>\*</sup> and Ho Young Hwang<sup>\*</sup>

\* Korea Institute of Industrial Technology

(Received April 18, 2011; Revised January 2, 2012; Accepted January 9, 2012)

**Key Words:** Cartesian Grids System(직교격자계), Body-Fitted Coordinate System(형상고정격자계), Cut Cell, Momentum Loss(운동량 손실), Molten Metal Flow(주조유동)

**초록:** 주조 유동 해석 분야에서 형상 고정 격자계(body-fitted coordinate; BFC)의 적용은 양질의 해석결과를 얻을 수 있음에도 불구하고 격자 생성의 어려움과 효율성으로 인해 많이 사용되지 않고 있다. 반면에 직교 격자계(Cartesian coordinate)는 상대적으로 격자 생성이 쉽고 빠르기 때문에 주조 공정에서 주로 사용되어 왔으나 이 역시 형상을 제대로 표현하지 못함으로써 발생하는 문제들로 인해 올바른 해석 결과를 얻을 수가 없다. 본 연구에서는 PCT(Partial Cell Treatment)를 기반으로 하는 Cut Cell 방법을 직교 격자계에 적용함으로써 이 격자계의 장점은 유지하면서도 정확한 유동 해석 결과를 얻을 수 있었다. Cut Cell 방법으로 간단한 형상의 테스트와 실제 주조 제품에 대한 적용을 해보았다.

**Abstract:** The Cartesian grid system has generally been used in casting simulations, even though it does not represent sloped and curved surfaces very well. These distorted boundaries cause several problems, and special treatment is necessary to resolve them. A cut cell method on a Cartesian grid has been developed for the simulation of three-dimensional mold filling. Cut cells at a cast/mold interface are generated on Cartesian grids, and the governing equations are computed using the volume and areas of the cast at the cut cells. In this paper, we propose a new method based on the partial cell treatment (PCT) that can consider the cutting cells which are cut by the cast and the mold. This method provides a better representation of the surface geometry, and will be used in the computation of velocities that are defined on the cell boundaries in the Cartesian grid system. Various test examples for several casting process are computed and validated.

## 1. 서 론

### 1.1 연구배경

전산 유체 역학(computational fluid dynamics; CFD)에서 수치 해석을 하기 위한 가장 처음 단계는 해석 영역에 격자를 생성하는 것이다. 유동장의 정확한 해를 얻기 위해서는 해석하려는 형상에 맞는 적절한 격자를 생성하는 것이 매우 중요하다.<sup>(1)</sup> 이를 위해서 형상 고정 격자계(body-fitted

coordinate; BFC) 가 사용되어 왔다. 이 격자계는 해석하려는 형상의 표면을 정확하게 나타낼 수 있으며 이 격자계를 사용하여 양질의 해를 얻을 수 있다. 그러나 형상에 맞도록 격자를 생성하는 방식의 이 격자계는 상당한 노력을 요구한다.<sup>(2)</sup> 올바른 격자를 생성하기 위한 숙련된 기술이 필요하며 격자 생성 단계에서의 시간이 오래 걸려, 때때로 격자 생성에 필요한 시간이 유동장 해석 시간을 초과하는 경우가 생긴다. 주조 공정은 제품의 개발에서 완료까지 매우 신속히 이루어지므로 주조 유동 해석에서 해석의 정확도 못지않게 계산 시간은 중요한 요소이다. 게다가 대다수의 주조 제품들은 많은 경사면과 곡면이 있는 복잡한 형상이기 때문에 주조 유동 해석에서 BFC 방법을 적용하는 것은 상당히 어렵다.<sup>(3,4)</sup> 이러한 이유로 주조 유동

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2011. 4. 14.-15., SETEC) 발표논문임

† Corresponding Author, raycute@kitech.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

해석 분야에서는 Cartesian 격자계가 주로 사용되어 왔다. 이 격자계는 형상의 외관에 상관없이 직교방향으로 격자를 생성하기 때문에 특별한 기술 없이도 격자 생성이 쉬우며 격자 생성 시간도 오래 걸리지 않는다. 격자에 주물과 주형 부분이 함께 존재하면 격자에서 차지하는 주물의 부피비에 따라 주물 또는 주형 부분 격자로 결정된다. 경사면이나 곡면을 가지는 제품의 격자를 생성하면 계단 형상으로 격자가 생성되는데, 이러한 방식 때문에 Cartesian 격자계는 원래의 형상과는 일치하지 않는다(Fig. 1 참조). 형상과 일치하지 않는 계단 격자는 유동해석 결과에 안 좋은 영향을 미친다. 예를 들어 모멘텀의 손실, 그로 인한 속도 저하 및 올바르지 않은 충전 거동 등이 있다.<sup>(5)</sup> 이런 문제들을 해결하기 위한 방법으로 Cartesian 격자계를 사용할 때에는 해석하려는 형상이 최소한 올바르게 표현될 수 있도록 격자수의 생성을 늘려왔다. 격자수의 증가는 형상의 변형으로 생기는 최소한의 문제를 해결할 수 있으나 원래의 형상이 지니는 곡면이나 사선 부분이 계단형상으로 변경되어 발생하는 근본적인 문제들을 해결할 수 없다. 이런 문제점들을 해결하기 위해서 Cartesian 격자계에서 움직이는 물체 주위를 흐르는 유체를 해석하기 위해 사용되어온 PCT(Partial Cell Treatment)<sup>(6)</sup>를 기반으로 하는 Cut Cell 방법을 주로 유동 해석에 적용하였다. 주로 유동 해석은 Cartesian 격자계에 의해 잘려진 형상부분에 용탕이 흐르는 유동으로 Cut Cell 방법은 잘려진 형상이 차지하는 부분을 비율로써 지배방정식에 고려하여 형상고정격자계(BFC)를 쓰는 것과 유사한 효과를 얻는다. 이 방법은 Cartesian 격자계의 장점(격자 생성의 편리 및 신속함)은 유지하면서도 정확한 유동 해석 결과를 얻을 수 있다. 개발한 Cut Cell 방법으로 간단한 형상의 테스트와 실제 주조 제품에 대한 적용을 해보았다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 Cut Cell 방법

Fig. 2는 Cartesian 격자계에서 원의 형상을 가진 모델의 격자를 생성한 것을 나타낸 것이다. 음영이 진 부분은 주물 부분 격자이며, 이 외는 주형 부분 격자이다. 여기서 주물과 주형이 함께 포함되어 있는 격자를 cut cell 이라고 정의한다.

Cut cell 에서 주물의 부피와 면적에 대해 정의된 함수  $\theta$ 를 사용한다.  $\theta=0$  일 때 주형 부분 격

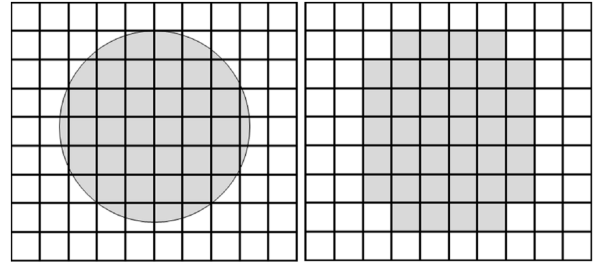


Fig. 1 Original shape and the generated meshes

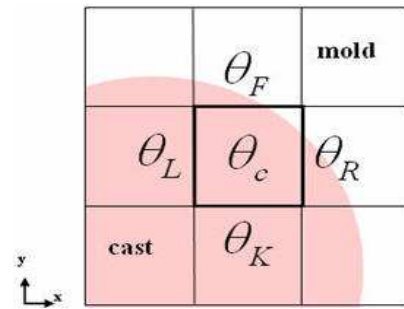


Fig. 2 Cut cells on the surface of cylinder

자를 나타내며,  $\theta=1$  일 때는 주물 부분의 격자를,  $0 < \theta < 1$  일 때는 주물과 주형의 경계가 존재하는 cut cell 을 나타낸다. 이와 같은 정의는 Volume of Fluid(VOF) 함수가 용탕의 자유경계면을 표시하는 방법과 매우 유사하다. 그러나 Cut Cell 방법에서 함수  $\theta$ 는 격자 중심에서뿐 아니라, 격자 경계면에서 주물의 열려 있는 정도를 정의하는 것에도 사용된다는 것이 차이점이다. 직교격자계에서 격자는 주물과 주형, 즉 유동 계산영역과 비계산영역으로 나뉘어지는데 Cut Cell 방법에서  $\theta$ 를 이용하여 이전에 비계산영역으로 취급하던 격자를 해석하게 된다. Fig. 2의 굵은 선으로 표시된 격자를 살펴보면,  $\theta_c$ 는 격자 중심에서 주물의 부피비를 나타내며 연속 방정식과 VOF 방정식에 사용된다. x 축의  $\theta_R$ 과  $\theta_L$ , y 축의  $\theta_F$ 와  $\theta_K$ 는 각각의 격자면에서의 주물의 열림 정도를 나타낸다. 3 차원의 경우에는 z 축 방향의  $\theta_T$ 와  $\theta_B$ 가 추가된다. 이와 같은 값은 격자에서 형상의 위치를 나타낸다.  $\theta$ 를 이용하여 격자에서 실제 주물이 차지하는 양만큼 질량보존 계산을 하고 VOF 계산을 통해 유체의 흐름을 계산한다.

Cut Cell 방법에서  $\theta$ 는 계단형상이 나타나는 계산 격자에서 원래의 형상이 가지는 기하학적인 표

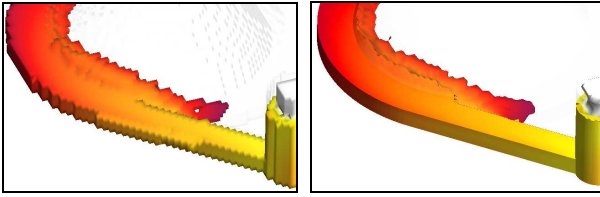


Fig. 3 Actual shape mapping

면 형상정보를 나타내는 변수이며 이 값을 이용하여 변형된 형상으로 인해 발생하는 운동량의 손실을 보존하거나 또는 압력의 과부하 등을 수정하게 된다.  $\theta$ 의 값은 자체 개발한 격자 생성기를 통해 구해지며, 이를 이용하여 해석에 사용하였다.

2.2 Actual shape mapping

직교격자계에서 격자를 나눈 형상은 Fig. 3(좌)와 같이 곡면인 부분에서 계단형상이 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 전처리(격자생성)를 통하여 cut cell 값을 추출하고 이 cut cell 값을 이용하여 형상 고정 격자계를 사용한 것 같은 유동해석 효과를 나타낸다. 또한 Marching cubes algorithm<sup>(7)</sup>을 사용하여 Cell 단위 충전값을 이용한 Iso-surface 를 추출한 후 특정 Body face 추출, Clipping 을 수행하여 격자와 형상의 표면이 만나는 면을 새롭게 구성하는 그래픽 후처리(Actual shape mapping 명명)를 통해 계단형상의 결과가 아닌 실제 형상과 같은 가시적 효과를 확인할 수 있다.(Fig. 3(우) 참조)

2.3 지배방정식

3 차원 비압축 점성 Navier-Stokes 식을 지배방정식으로 사용한다. 아래에 연속방정식과 모멘텀 방정식, Volume of Fluid(VOF) 방정식에 함수  $\theta$ 를 결합하여 나타내었다.

Continuity Equation:  

$$\nabla \cdot (\theta \vec{u}) = 0 \tag{1}$$

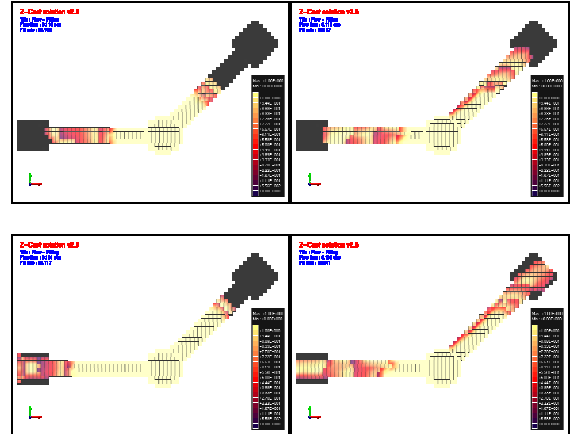
Momentum Equation:  

$$\frac{\partial(\theta \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta \vec{u} \vec{u}) = -\frac{\theta}{\rho} \nabla p + \nu \theta \nabla^2 \vec{u} + \theta \vec{g} \tag{2}$$

Volume of Fluid Equation:  

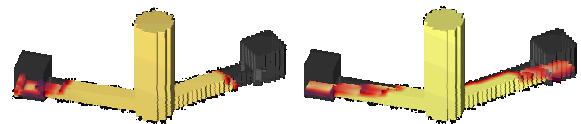
$$\frac{\partial(\theta f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta f \vec{u}) = 0 \tag{3}$$

여기서,  $\vec{u}$ 는 속도 벡터이며  $\vec{g}$ 는 중력가속도,



(a) The traditional method (b) The Cut Cell method

Fig. 4 Filling patterns in a section of z direction, 60 % (above) and 66 % (below)



(a) The traditional method (b) The Cut Cell method

Fig. 5 Simulation results at 66% filled in 3 dimensions

는  $\nu$  동점성계수,  $\rho$ 는 용탕의 밀도,  $p$ 는 압력이며  $f$ 는 격자에서 용탕이 차지하는 부피비를 나타낸다.

식 (1), (3)을 엇갈린 격자망(staggered grid system)에서 다음과 같이 차분화한다.

$$\frac{u_{i+1/2,j,k} \theta_R - u_{i-1/2,j,k} \theta_L}{\Delta x} + \frac{v_{i,j+1/2,k} \theta_F - u_{i,j-1/2,k} \theta_K}{\Delta y} + \frac{u_{i,j,k+1/2} \theta_T - u_{i,j,k-1/2} \theta_B}{\Delta z} = 0 \tag{4}$$

$$f_{i,j,k}^{n+1} \theta_C = f_{i,j,k}^n \theta_C + \frac{\Delta t}{\Delta x} [f u_{i-1/2,j,k} \theta_L - u_{i+1/2,j,k} \theta_R] + \frac{\Delta t}{\Delta y} [f v_{i,j-1/2,k} \theta_K - f v_{i,j+1/2,k} \theta_F] + \frac{\Delta t}{\Delta z} [f w_{i,j,k-1/2} \theta_B - f w_{i,j,k+1/2} \theta_T] \tag{5}$$

식 (2)의 운동량방정식에서  $\theta$ 는 지워지며 대류항의 차분에 있어서는 수치계산의 정확성을 높이기 위하여 hybrid scheme 을 사용하였다. 즉, 엇갈

린 격자망에서 보존형의 대류항을 중심차분(central differencing)과 풍상차분(upwind differencing)의 복합형으로 차분한 다음 풍상차분계수로 조절하는 hybrid 차분(hybrid differencing) 형태로 유도하여 사용하였다.

지배방정식에 Cut Cell 방법을 적용할 때, 함수의  $\theta$  값이 일정 값 이하 보다 작아지면 수치 불안정성이 증가하는 경우가 발생하므로 적정값 이하의 값은 0 으로 처리하여 해석하는 것이 좋다.

유동장 수치해석을 위해서 SOLA(a Solution Algorithm for Transient Fluid Flow) 방법<sup>(8)</sup>을 사용하였고, 용탕의 자유경계면을 추적하기 위하여 VOF 방법을 사용하였다.

### 3. 수치해석 결과

#### 3.1 Test case 1

개발한 코드의 검증을 위하여 먼저 간단한 형상을 해석해 보았다. 2 개의 runner 가 120° 의 각도로 놓여져 있는 제품으로 sprue 를 통해 들어오는 용탕이 runner 를 거쳐 제품으로 들어간다. 격자 간격은 1mm 로 하였다. 용탕의 재질은 A356(AC4CH), 주형의 재질은 H13(SKD61) 이며 용탕 주입속도는 30 cms-1 로 하였다. Fig. 4 는 z-단면에서 본 60 %, 66 %에서의 용탕 충전율을 나타낸 것이고, Fig. 5 는 66 % 용탕 충전율에서의 해석 결과를 3 차원으로 나타낸 것이다. 기존의 아무 처리를 하지 않은 방법을 사용하였을 경우 (a), 좌표축에 기울어진 runner 에서의 용탕 전진 속도가 좌표축과 수직하게 놓인 runner 에서의 속도보다 느리다. 반면에 Cut Cell 방법을 사용하였을 경우 (b), 두 runner 에서의 용탕 전진 속도가 같음을 알 수 있다. 좌표축에 경사진 runner 의 격자는 원래 형상과 일치하지 않는다. 이것은 계단 형태의 격자로 나타나는데, 주물과 주형의 경계가 포함되는 cut cell 에서 함수  $\theta$  를 이용한 모멘텀 보존을 하지 않을 경우, 모멘텀 손실이 발생한다. 이것은 속도 저하를 일으키고 runner 에서의 속도 차이가 발생하는 원인이 된다.

#### 3.2 Test case 2

반구의 형태를 가지고 있는 주조 제품을 사형 주조 공정으로 해석하였다. 용탕의 재질은 A356 (AC4CH) 이며, 주형의 재질은 FURAN 이다. 탕구에서의 용탕 주입속도는 100 cms-1 로 하였다. Fig. 6 은 34 %, 54 %, 90 %에서의 용탕 충전율을 나타낸 것으로 Actual Shape mapping 을 적용한 해석 결과이다.

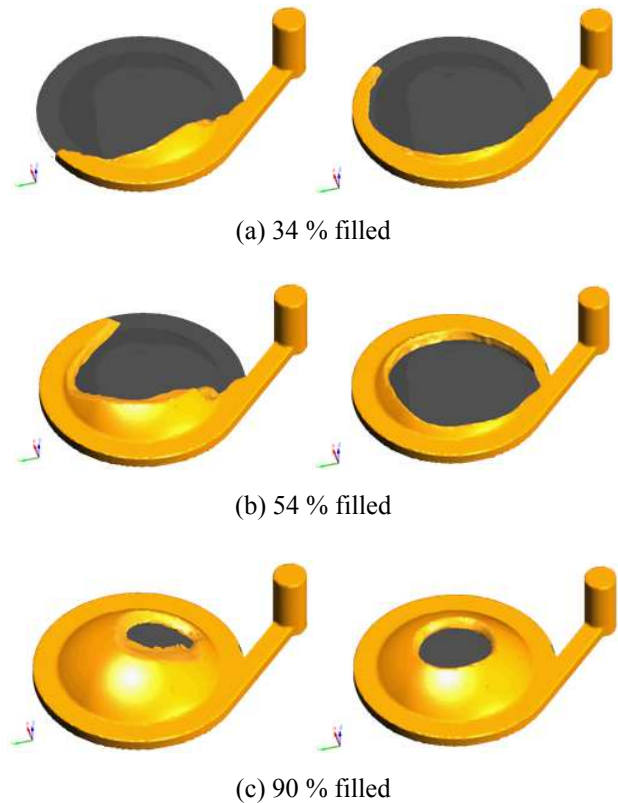


Fig. 6 Results of the traditional method (left) and Cut Cell method (right)

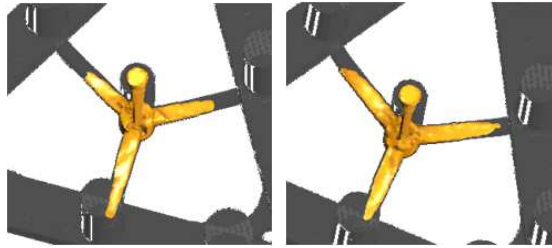
Fig. 6(좌)는 기존 방법의 해석 결과이며 Fig. 6(우)는 Cut Cell 방법의 결과이다. 두 개의 결과를 비교해 보면, 많은 차이점을 발견할 수 있다. 용탕 충전 거동이 상이하며, 기포 결함을 일으킬 수 있는 용탕의 충돌 부위 및 최종 충전 부위가 다를 수 있다. 매끄러운 원의 형상이 직교 격자계에 의해 계단 형상으로 생성되고 곡면을 따라 흘러 들어가야 할 용탕이 계산 격자의 계단에서 장애물을 만나 용탕이 원을 따라 흐르지 않고 반구를 뒤덮으며 충전된다. 같은 격자계를 사용하지만 실제 주물이 격자에서 차지하는 비율만큼 모멘텀의 보정을 통해 물성치를 구하는 Cut Cell 방법의 경우, 계단 형상의 격자와 상관없이 원을 따라 용탕이 충전되는 것을 확인할 수 있다.

#### 3.3 Application 1

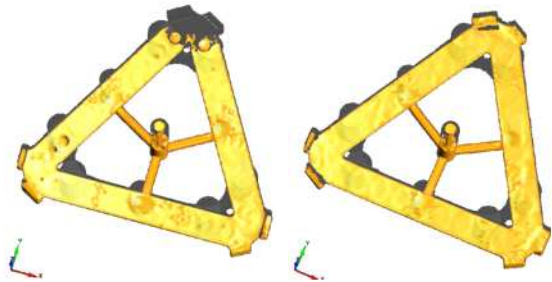
이번에는 실제 주조 제품을 금형 중력 주조 공정으로 해석한 것을 아래 Fig. 7 에 나타내었다. 용탕의 재질은 A356(AC4CH) 이며, 주형의 재질은 H13(SKD61) 이다. 탕구에서의 용탕 주입속도는 30 cms-1 로 하였다.

Sprue 를 통과한 용탕이 3 개의 runner 를 통해서





(a) 2 % filled



(b) 13 % filled

**Fig. 7** Results of the traditional method (left) and Cut Cell method (right)

제품에 주입되는 것으로 각 runner 는 동일한 각도로 놓여 있다. 3 개의 runner 중 1 개의 runner 만을 좌표축에 수직하게 놓고 격자를 생성하였다. 그 외, 2 개의 runner 는 좌표축에 경사져 있으므로 그곳에서의 모멘텀 손실로 인한 속도 저하를 예상할 수 있다.

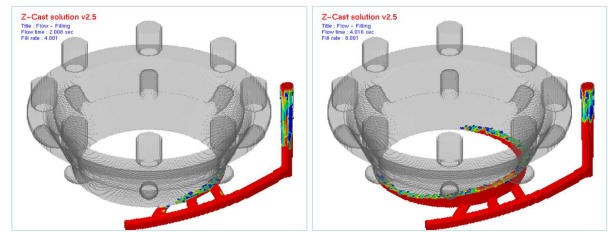
Fig. 7 은 기존의 방법과 Cut Cell 방법을 사용하여 해석한 것으로 용탕 충전율 2 %와 13 %에서의 결과를 Actual Shape mapping 을 적용하여 나타낸 것이다. 먼저 (a)를 살펴 보면, 좌표축에 경사진 runner 에서 용탕의 속도가 느린 것을 알 수 있다. 13 %가 채워졌을 때, 좌표축에 기울어진 runner 사이의 제품의 모서리는 다른 두 곳과 달리 용탕이 충전되지 않았음을 확인할 수 있다. 반면에 Cut Cell 방법을 사용한 결과 Fig. 6(b 우)를 보면, 3 개의 runner 에서 용탕이 균일하게 충전되고 있다.

**3.4 Application 2**

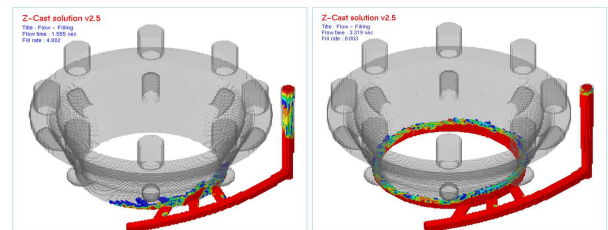
마지막으로 해석한 것은 하우징에 해당하는 실주조제품으로 사형 중력 주조 공정으로 해석한 것이다. 용탕의 재질은 SCH2 이며, 주형의 재질은 FURAN 이다. 용탕주입속도는 50cms-1 로 하였다. 건전한 주물품을 얻기 위해서는 인게이트를 통한 용탕의 주입이 동시에 이루어지는 것이 좋다. 이 제품은 곡면의 runner 와 직교좌표계에 기울어지는 게이트의 형상을 하고 있어 격자 생성 후의 형상

**Table 1** Computational time

|               | Cut Cell method |
|---------------|-----------------|
| Simple test 1 | 2.53 times      |
| Simple test 2 | 2.03 times      |
| Application 1 | 2.35 times      |
| Application 2 | 1.17 times      |



(a) Results of the traditional method



(b) Results of Cut Cell method

**Fig. 8** 4%(left) and 8 % (right) filled

일그러짐이 나타난다.

Fig. 8 은 용탕충전율 4 % 와 8 %에서의 결과를 나타낸 것이다. Cut Cell 방법을 사용하지 않고 직교격자계에서 유동 해석을 할 경우, 실제 runner 의 형상과 달리 계단형상으로 인해 용탕이 매끄럽게 흘러들어가지 못하고 정체현상이 나타난다. runner 에서 과부하된 압력으로 인해 속도는 소실되고 용탕이 인게이트의 순서대로 제품에 먼저 흘러가게 된다. 기존 방법의 해석결과인 Fig. 8(a)에서 용탕 충전율 4 %에서의 결과를 보면, 용탕이 게이트와 가까이 있는 인게이트를 통해 먼저 흘러들어가는 것을 알 수 있다. 반면에 Cut Cell 방법을 사용한 해석 결과를 살펴보면, 3 개의 인게이트에서 용탕이 캐비티로 동시에 주입되는 것을 알 수 있다. 8% 용탕 충전율에서 기존 방법의 경우 용탕 충전 시간은 4.016 초 걸리는데 비해, Cut Cell 방법은 3.319 초 걸렸다. runner 에서의 계단 형상으로 인한 압력 과부하는 속도 소실을 가져와 용탕 충전이 더 오래 걸리게 된다.

### 3.5 계산 효율성

계산 속도 비교를 통해 효율성을 확인하였다. Table 1은 지금까지 해석한 4개의 제품을 기존 방법의 계산 시간에 대비하여 Cut Cell 방법을 사용하였을 때의 계산 시간으로 나타낸 것이다. Table 1에 나타난 바와 같이 Cut Cell 방법을 사용하였을 때의 계산 속도는 기존 방법에 비해서 대략 1.2배에서 2.5배까지 전반적으로 오래 걸리는 것을 확인할 수 있다. 이것은 Cut cell에서의 모넨텀 보존을 위한 반복계산 시간이 기존보다 오래 걸리기 때문이다. 간단한 형상의 경우(Test 1), 최고 2.5배 이상의 차이를 보이는데 격자수 9만 개로 기존 해석의 계산시간은 3.7s, Cut Cell 방법은 9.36s로 초 단위의 시간이 소요되었다. 반면에 적용문제의 경우(Application 2), 1.17배로 격자수 200만 개이며 기존 해석 시간 6시간과 Cut Cell 방법은 7시간이 소요되었다.

이 결과만을 놓고 보면 Cut Cell 방법의 계산 효율이 떨어진다고 생각할 수 있다. 일반적으로 직교 격자계에서는 Cut Cell 방법을 사용하지 않을 경우, 형상의 일그러짐을 최소화 하기 위해 즉, 계산 결과의 정확도를 높이기 위해 더 많은 수의 격자 생성이 필요하다. 형상이 복잡할 경우, 보통 1천만 개에서 2천만 개의 격자수를 생성하여 해석한다. 이러한 일들로 인해 현재보다 계산 시간이 더 오래 걸린다.

## 4. 결론

주조 유동 해석 분야에서 Body-fitted 격자계의 적용은 양질의 해석결과를 얻을 수 있음에도 불구하고 격자 생성의 어려움과 효율성으로 인해 사용에 어려움이 있다. 반면에 Cartesian 격자계는 상대적으로 격자 생성이 쉽고 빠르기 때문에 주조 공정에서 주로 사용되어 왔으나 이 역시 형상을 제대로 표현하지 못함으로써 발생하는 문제들로 인해 올바른 해석 결과를 얻을 수가 없다. Cartesian 격자계에서 기존에 사용해왔던 방법과 Cut Cell 방법을 사용하여 비교 해석 하였다. Cut Cell 방법을 사용함으로써 직교 격자에서 형상의 일그러짐에 의해 생기는 모넨텀 손실과 그로 인한 경사면에서의 속도 저하가 감소하는 것을 확인하였다. 주조 현장에서 사용하는 제품을 해석하여 Cut Cell 방법

이 실제 제품에서도 잘 작동하며 기존의 방법과 차이를 나타낼 수 있다. 주조 유동 해석에서는 충전 거동에 따라 용탕의 충돌 부위 및 최종 충전 부위를 예측함으로써 결함 제어를 하므로 유동 해석의 정확한 충전 거동이 중요하다. 일반적으로 직교 격자에서 해석하려는 모델의 형상을 잘 표현하기 위해 많은 수의 격자를 생성하는데 이것은 계단 격자로 인한 문제를 근본적으로 해결할 수가 없으며 증가한 격자수로 인한 계산 성능의 저하를 야기한다. 반면에 Cut Cell 방법을 사용하면 적은 수의 격자로도 더 좋은 해석 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

## 참고문헌

- (1) Delanaye, M., Patel, A., Leonard, B. and Hirsch, C., 2001, "A Preview Approach to Force Control of Robot Manipulators," *ECCOMAS CFD 2001, Institution of Mathematics and its application, Southern-on-Sea, UK*.
- (2) Ingram, D. M., Causon, D. M. and Mingham, C. G., 2003, "Developments in Cartesian Cut Cell Methods," *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 61, pp.561~572.
- (3) Hong, C. P., Lee, S. Y. and Song, K., 2001, "Development of a New Simulation Method of Mold Filling Based on a Body-Fitted Coordinate System," *ISIJ International*, Vol. 41, No.9, pp.999~1005.
- (4) Lee, S. Y., Nam, N. H., Roh, D. H., Kim, S. B. and Hong, C. P., 2006, "Mold Filling Simulation Based on the Body Fitted Coordinate System in an Unstructured Grid System," *11th Int. Conf. on Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes, 2006, Opio, France*, pp. 95~102.
- (5) Tucker, P. G. and Pan, Z., 2000, "A Cartesian Cut Cell Method for Incompressible Viscous Flow," *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 24, pp.591~606.
- (6) Lin, P., 2007, "A Fixed-Grid Model for Simulation of a Moving Body in Free Surface Flows," *Computers & Fluids*, Vol. 36, pp.549~561.
- (7) Lorenzen, W.E. and Clien, H.E., 1987, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm", *Int. Conf. Computer Graphics & Interactive Technique*, pp.163-169.
- (8) Nicholas, B.D., Hirt, C.W. and Hotchkiss, R.S., 1980, "SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries," LANL Tech. Report.