

논문

직교 격자 계에서 주조 유동 시뮬레이션의 정확한 해석 방법

최영심[†] · 남정호 · 홍준호 · 황호영

한국생산기술연구원, 사이버설계지원 센터

Mold Filling Simulation with Cut Cell in the Cartesian Grid System

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

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

Abstract

Cartesian grid system has mainly been used in the casting simulation even though it does not nicely represent sloped and curved surfaces. These distorted boundaries cause several problems. A special treatment is necessary to clear these problems. In this paper, we propose a new method that can consider the cutting cells which are cut by casting and mold based on the partial cell treatment (PCT). This method provides a better representation of geometry surface 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 were computed and validated. The analysis results of more accurate fluid flow pattern and less momentum loss owing to the stepped boundaries in the Cartesian grid system were confirmed. By using the cut cell method, performance of computation gets better because of reducing the whole number of meshes.

Key words : Cartesian grid system, Computational fluid dynamics, Body-fitted coordinate system, Cut cell, Momentum loss.

(Received January 18, 2009 ; Accepted February 20, 2009)

1. 서 론

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. 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[1]. 올바른 격자를 생성하기 위한 숙련된 기술이 필요하며 격자 생성 단계에서의 시간이 오래 걸려, 때때로 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[3,4]. 이러한 이유로 주조 유동 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 부피비 크기에 따라 주물 또는 주형 부분 격자로 결정한다. 경사면이나 곡면을 가지는 제품의 격자를 생성하면 계단 형상으로 격자가 생성되는데, 이러한 방식 때문에 Cartesian 격자계는 원래의 형상과는 일치하지 않는다(Fig. 1). 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. 이런 문제점들을 해결하기 위해서 partial cell treatment (PCT) 를 기반으로 해서 격자에 주물이

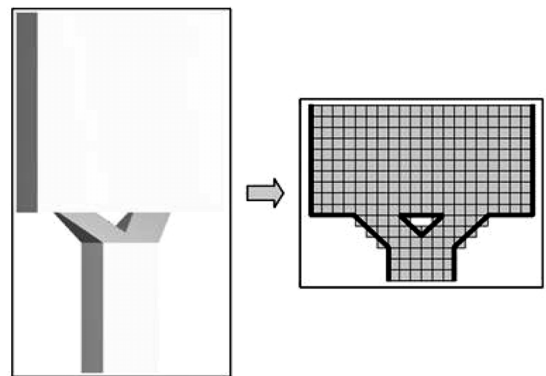


Fig. 1. 3D modeling and meshes.

[†]E-mail : raycute@kitech.re.kr

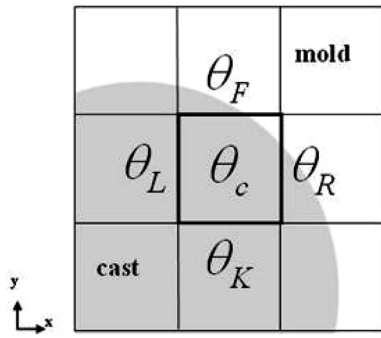


Fig. 2. Cut cells on the surface of a cylinder.

차지하는 양을 이용하는 Cut Cell을 이용하는 방법이 임의의 형상을 직교 격자계에서 해석하는 방법으로 사용되어 왔다[5,6]. 본 연구에서는 PCT 를 기반으로 하는 Cut Cell 방법을 주조 유동 해석에 적용하였다. 이 방법을 Cartesian 격자계에 적용함으로써 직교 격자계의 장점(격자 생성의 편리함)은 유지하면서도 정확한 유동 해석 결과를 얻을 수 있었다. 개발한 Cut Cell 방법으로 간단한 형상의 테스트와 실제 주조 제품에 대한 적용을 해보았다.

2. 수치 해석 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 cell이라고 정의 한다.

Cut cell 에서 주물의 부피와 면적에 대해 정의된 함수 θ 를 사용한다. $\theta=0$ 일 때 주형 부분 격자를 나타내며, $\theta=1$ 일 때는 주물 부분의 격자를, $0<\theta<1$ 일 때는 주물과 주형의 경계가 존재하는 cut cell을 나타낸다. 이와 같은 정의는 Volume of Fluid (VOF) 함수가 용탕의 자유경계면을 표시하는 방법과 매우 유사하다. 그러나 Cut Cell 방법에서 함수 θ 는 격자 중심에서뿐 아니라, 격자 경계면에서 주물의 열려 있는 정도를 정의하는 것에도 사용된다는 것이 차이점이다. Fig. 2의 굵은 선으로 표시된 격자를 살펴 보면, θ_c 는 격자 중심에서 주물의 부피비를 나타내며 연속 방정식과 VOF 방정식에 사용된다. x 축의 θ_R 과 θ_L , y 축의 θ_T 와 θ_K 는 각각의 격자면에서의 주물의 열림을 나타낸다. 3차원의 경우에는 z축의 방향의 θ_a 와 θ_b 가 추가된다. 이와 같은 값은 격자에서 형상의 위치를 나타내며 격자의 경계면에서 정의된 속도를 계산하는데 사용된다. 지배방정식에 결합된 함수 θ 를 이용하여 직교 격자계에서 발생하는 모멘텀의 손실을 보정해준다. θ 의 값은 자체 개발한 격자 생성기를 통해 구해지며, 이를 이용하여 해석에 사용하였다.

2.2 지배 방정식

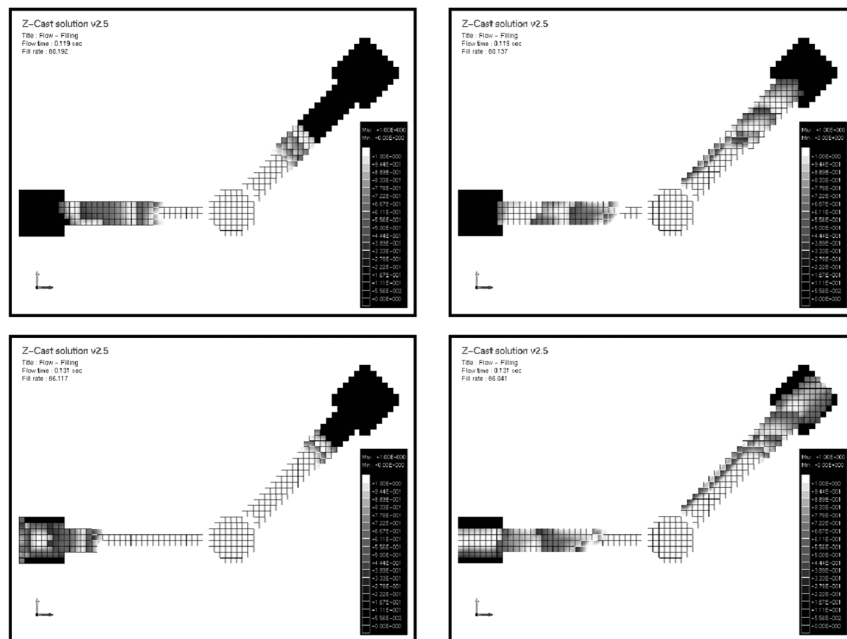
3차원 비압축 점성 Navier-Stokes 식을 지배방정식으로 사용한다. 아래에 연속방정식과 모멘텀 방정식, VOF 방정식에 함수 θ 를 결합하여 나타내었다.

Continuity Equation:

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

Momentum Equation:

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



(a) The traditional method (b) The cut cell method

Fig. 3. Filling patterns in a section of z direction, 60 % (above) and 66 % (below).

Volume of Fluid Equation:

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

여기서, \vec{u} 는 속도 벡터이며 \vec{g} 는 중력가속도, v 는 동점성 계수, ρ 는 용탕의 밀도, p 는 압력이며 f 는 격자에서 용탕이 차지하는 부피비를 나타낸다.

지배방정식에 Cut Cell 방법을 적용할 때, 함수 θ 의 값이 일정 값 이하 보다 작아지면 수치 불안정성이 증가하는 경우가 발생하므로 적정값 이하의 값은 0으로 처리하여 해석하는 것이 좋다. 유동장 해석을 위해서 SOLA (a Solution Algorithm for Transient Fluid Flow) 방법을 사용하였고, 용탕의 자유경계면을 추적하기 위하여 VOF 방법을 사용하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 Test case

개발한 코드의 검증을 위하여 먼저 간단한 형상을 해석해 보았다. 2개의 runner가 120°의 각도로 놓여져 있는 제품으로 sprue를 통해 들어오는 용탕이 runner를 거쳐 제품으로 들어간다. 격자 간격은 1 mm로 하였다. 용탕의 재질은 A356 (AC4CH), 주형의 재질은 H13 (SKD61) 이며 용탕 주입속도는 30 cms⁻¹로 하였다. Fig. 3은 z-단면에서 본 60%, 66%에서의 용탕 충전율을 나타낸 것이고, Fig. 4는 66% 용탕 충전율에서의 해석 결과를 3차원으로 나타낸 것이다.

기존의 아무 처리를 하지 않은 방법을 사용하였을 경우(a), 좌표축에 기울어진 runner에서의 용탕 전진 속도가 좌표축과 수직하게 놓인 runner에서의 속도보다 느리다. 반면에 Cut Cell 방법을 사용하였을 경우(b), 두 runner에서의 용탕 전진 속도가 같음을 알 수 있다. 좌표축에 경사진 runner의 격자는 원래 형상과 일치하지 않는다. 이것은 계단 형태의 격자로 나타나는데, 주물과 주형의 경계가 포함되는 cut cell에서 함수 θ 를 이용한 모델링 보존을 하지 않을 경우, 모델링 손실이 발생한다. 이것은 속도 저하를 일으키고 runner에서의 속도 차이가 발생하는 원인이 된다.

3.2 Application

Fig. 5는 좌표계에 45°의 경사진 주입구를 가지고 있는 주조 제품을 다이캐스팅 공정으로 해석한 결과를 나타낸 것이다. 용탕의 재질은 A356 (AC4CH) 이며, 주형의 재질은 H13 (SKD61) 이다. 용탕 주입 속도는 1000 cms⁻¹로 하였다. 격자

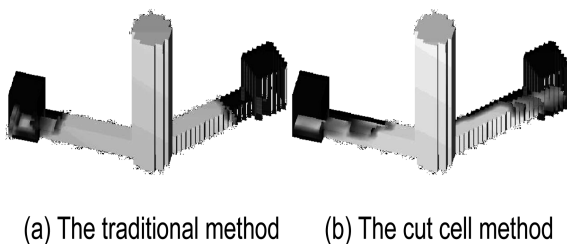


Fig. 4. Simulation results at 66 % filled in 3 dimensions.

수 24 × 8 × 38의 성긴 격자계와 120 × 40 × 190의 조밀한 격자계로 나누어 해석 결과를 비교하였다. 경사면인 주입구가 직교 격자계에서 계단 형상으로 나타나는데, Fig. 5의 (a)를 보면, 주입구를 통해 들어온 용탕이 좌표축에 수직으로 충전되며 이러한 현상을 개선하기 위해 125배 수의 격자를 생성하여 해석한 (b)의 결과는 적은 격자수의 해석 결과보다는 용탕이 기울어져 전진하지만 계단 형상 격자로 인해 생기는 문제점은 해결되지 않았다.

반면에 Cut Cell 방법을 사용한 Fig. 5의 (c) 결과를 보면, 성긴 격자를 사용했음에도 불구하고 주입구의 형상대로 45° 기울어진 방향으로 용탕이 제품에 주입된다. 직교 격자계에서 정확한 해석을 위한 격자수의 증가는 해석 시간의 증가만 가져올 뿐, 계단 형상으로 인해 발생하는 근본적인 모델링의 손실과 그로 인한 잘못된 유동 패턴을 개선할 수 없다는 것을 확인하였다.

반구의 형태를 가지고 있는 주조 제품을 사형 주조 공정으로 해석하였다. 용탕의 재질은 A356 (AC4CH) 이며, 주형의 재질은 FURAN 이다. 탕구에서의 용탕 주입속도는 100 cms⁻¹로 하였다. 격자수 60 × 80 × 22와 108 × 148 × 38의 크기가 다른 두 격자계에서 각각의 방법으로 해석하였다. Fig. 6은 성긴 격자에서의 해석결과를 나타낸 것이다. 35%, 45%, 98%에서의 용탕 충전율을 나타낸 것으로 (a)는 Cut Cell 방법의 결과이며 (b)는 기존 방법의 해석 결과이다. 두 개의 결과를 비교해 보면, 많은 차이점을 발견할 수 있다. 용탕 충전 거동이 상이하며, 기포 결함을 일으킬 수 있는 용탕의 충돌 부위 및

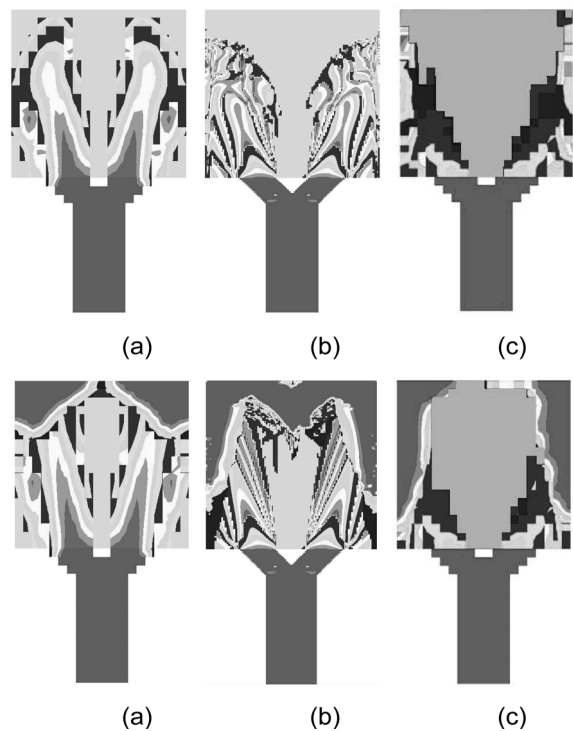


Fig. 5. Results of the two methods at 26 % (above) and 34 % (below): (a) the traditional method with coarse mesh, (b) the traditional method with fine mesh, and (c) the cut cell method with coarse mesh.

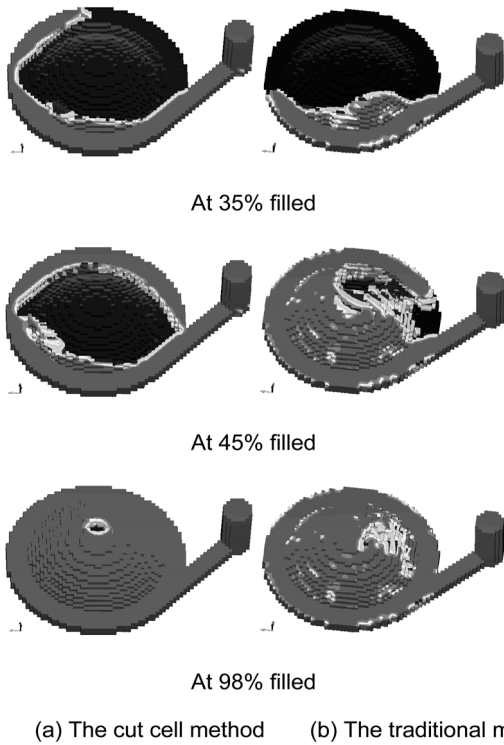


Fig. 6. Results of the two methods at 35 %, 45 %, and 98 % filled.

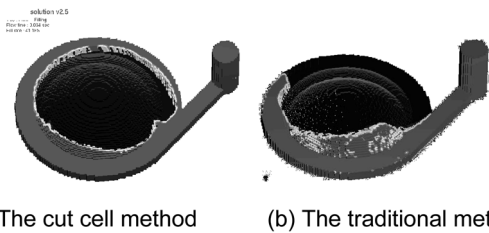


Fig. 7. Comparison of results in the fine mesh (at 42 % filled).

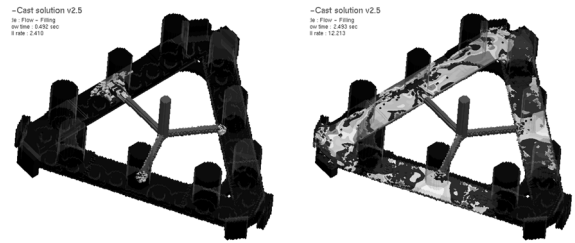
최종 충전 부위가 다를 수 있다. 매끄러운 원의 형상이 직교 격자계의 의해 계단 형상으로 생성되고 계단에서 막힌 용탕은 원을 따라 흐르지 않고 반구를 뒤덮으며 충전된다. 같은 격자계를 사용하지만 실제 주물이 격자에서 차지하는 비율 만큼 모멘텀의 보정을 통해 물성치를 구하는 Cut Cell 방법의 경우, 계단 형상의 격자와 상관없이 원을 따라 용탕이 충전되는 것을 확인할 수 있다.

이번에는 격자를 좀 더 조밀하게 생성하여(기존의 5배 수) 직교 격자로 인한 일그러진 형상을 원상태와 가깝게 생성하여 해석해보았다. Fig. 7의 (a)와 (b)는 조밀한 격자계에서 해석한 결과를 나타낸 것이다. 기존 방법으로 해석한 결과인 (b)를 보면, Cut Cell 방법의 결과(a)에 비해 용탕의 전진이 느리다. 성긴 격자에서 해석한 기존 방법의 결과와 비교하였을 때 보다는 용탕의 전진이 빠르지만 원 형상으로 인한 계단 격자에서의 지속적인 모멘텀 손실로 인해 속도 저하가 발생한다. 격자수의 증가가 직교 격자에서 발생할 수 있는 문제점을 완전히 개선할 수 없다는 것을 확인하였다.

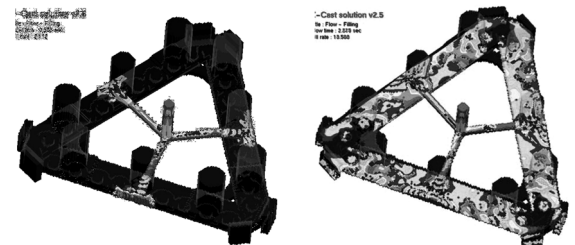
마지막으로 실제 주조 제품을 금형 중력 주조 공정으로 해

Table 1. Computational time.

	Cut cell method
Simple test	1.6 times
Application 1	2.75 times
Application 2	2.03 times
Application 3	2.35 times



(a)The traditional method



(b)The cut cell method

Fig. 8. Results of the two methods at 2 %, 13 % filled.

석한 것을 아래 Fig. 8에 나타내었다. 용탕의 재질은 A356 (AC4CH) 이며, 주형의 재질은 H13 (SKD61) 이다. 탕구에서의 용탕 주입속도는 30 cms⁻¹로 하였다. Sprue 를 통과한 용탕이 3개의 runner를 통해서 제품에 주입되는 것으로 각 runner는 동일한 각도로 놓여져 있다. 3개의 runner 중 1개의 runner 만을 좌표축에 수직하게 놓고 격자를 생성하였다. 그 외, 2개의 runner는 좌표축에 경사져 있으므로 그 곳에서의 모멘텀 손실로 인한 속도 저하를 예상할 수 있다.

Fig. 8의 (a)와 (b)는 기존의 방법과 Cut Cell 방법을 사용하여 해석한 것으로 용탕 충전율 2%와 13%에서의 결과를 나타낸 것이다. 먼저 기존 방법의 결과 (a)를 살펴 보면, 좌표축에 경사진 runner에서 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 (b)를 보면, 3개의 runner에서 용탕이 균일하게 충전되고 있다.

3.3 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 1.5배에서 2.5배가

지 전반적으로 오래 걸리는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 Cut Cell 에서의 모멘텀 보존을 위한 반복계산 시간이 기존보다 오래 걸리기 때문이다. 이 결과만을 놓고 보면 Cut Cell 방법의 계산 효율이 떨어진다고 생각 할 수 있겠으나, 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 필요하고 이러한 일들로 인해 현재보다 계산 시간이 오래 걸린다.

4. 결 론

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 모멘텀 손실과 그로 인한 경사면에서의 속도 저하가 감소하는 것을 확인하였다. 일반적으로 직교 격자에서 해석하려는 모델의 형상을 잘 표현하기 위해 많은 수의 격자를 생성하는데 이것은 계단 격자로 인한 문제를 근본적으로 해결할 수가 없으며 계산 성능의 저하를 야기한다. 반면에 Cut Cell 방법을 사용하면 적은 수의 격자라도 더 좋은 해석 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] M. Delanaye, A. Patel, B. Leonard, and C. Hirsch : 'ECCOMAS CFD 2001', Institution of Mathematics and its application, "Automatic unstructured hexahedral grid generation and flow solutions", Southern-on-Sea, UK, 2001.
- [2] D. M. Ingram, D. M. Causon, and C. G. Mingham : *Mathematics and Computers in Simulation*, "Developments in Cartesian cut cell methods", 61 (2003) 561-572.
- [3] C. P. Hong, S. Y. Lee, and K. Song : *ISIJ International*, "Development of a new simulation method of mold filling based on a body-fitted coordinate system", 41(9) (2001) 999-1005.
- [4] S. Y. Lee et al.: 11th Int. Conf. on 'Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes', "Mold filling simulation based on the body fitted coordinate system in an unstructured grid system", Opio, France, June 2006, Gandin and Bellet, 95-102.
- [5] Q. JJ : *Computers & Fluids*, "An alternative to unstructured grids for computing gas dynamics flows around arbitrarily complex two-dimensional bodies", 23(1) (1994) 125-142.
- [6] P. Lin : *Computers & Fluids*, "A fixed-grid model for simulation of a moving body in free surface flows", 36 (2007) 549-561.
- [7] P. G. Tucker and Z. Pan : *Applied Mathematical Modelling*, "A Cartesian cut cell method for incompressible viscous flow", 24 (2000) 591-606.