

## 연속주조공정에서의 EMBR의 수치해석

### Numerical analysis of continuous casting process with electromagnetic brake

김 현 경\*, 유 흥 선\*\*, 유 수 열\*  
H. G. Kim, H. S. Ryou, S. Y. Ryou

**Key words:** Continuous casting(연속주조), Solidification(응고), Turbulent flow(난류유동), Molten steel(용강), Phase change(상변화), Electromagnetic brake(전자기브레이크), Mushy zone(머시영역), Shell thickness(응고층두께)

#### ABSTRACT

A numerical analysis has been performed solidification problem using the fixed grid-enthalpy method with enthalpy-porosity relation. A modified standard  $k-\epsilon$  model was applied to describe the influence of turbulent flow. Computational procedures are based on the finite volume method and the non-staggered grid system. Comparisons with the different three experimental results show that applying a modified standard  $k-\epsilon$  model in mushyzone is better than the previous computation results. This paper includes another EMBR's influences such as change of velocity field, Increasement of temperature and dispersion of flow out of nozzle into the flow field. These EMBR's influences are compared to case without EMBR.

#### 기 호 설 명

#### 1. 서 론

- $S_U$  : 유동장의 생성항
- $S_k$  :  $k$  방정식의 생성항
- $S_\epsilon$  :  $\epsilon$  방정식의 생성항
- $f_l$  : 액상분율
- $\Phi$  : 점성소산율
- $\vec{F}$  : Lorentz force
- $C_m, C_k, C_\epsilon$ : 생성항의 계수
- $\sigma_{el}$  : 전기전도도
- $\vec{B}$  : 자기장

주조부분은 금속분야에서 상변화와 열전달 및 응력에 국한된 해석들이 이루어져왔다. 하지만 연속주조의 현상은 유동과 열전달, 상변화와 난류현상, 전자기유체, 다상유동에 의해 지배되고 있어 이를 응용한 테마인 연속주조는 공조냉동공학에 포함될 수 있다. 연속주조공정은 생산성과 품질면에서 일반 조괴법(ingot casting)보다 유리한 장점을 가지고 있어서 강(steel)의 주조에서 대량 생산되는 방법으로 사용되는 중간 생산제품을 만드는 공정이다. 연속주조 공정의 몰드에서 용강의 상변화에 의하여 최종적인 형상이 결정되며, 용강유동의 패턴은 최종제품의 품질과 생산성에 영향을 미치게 되므로, 용강의 청정도를 높이고 고품질의 주편을 얻기 위해서는 용강의 유

\* 중앙대학교 대학원

\*\* 정회원, 중앙대학교 기계공학과

동에 관한 해석이 필요하다. 1960년대 이후 강의 응고에 관해서 대부분의 연구들이 진행되어서, 최적화를 위한 공정변수의 적용에 관한 연구가 진행되어 왔으며, 또한 최근의 연구를 통하여 연속주조에서 발생하는 중심편석, 표면균열, 내부균열, 기공등의 결함을 최소화시키는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 하지만 연속주조시 용강유동, 주형과 주변사이의 열전달, 응고층에 발생하는 응력, 응고과정중 머시영역에 난류, 용질재분배등의 서로에 대한 영향을 수치적으로 고려한 연구는 아직 없다. 이는 자연대류가 지배적인 일반조괴법의 유동과 다른 연속주조에서는 침지노즐을 통해 유입되는 강한 제트의 유동으로 주형상부에서의 난류유동과 연속주조시 상변화과정에서 수반되는 용강의 유동과 머시영역에 대한 처리가 아직까지 확립되어 있지 않기 때문이다. 대부분의 연구는 열전달만을 고려하여 용강의 유동을 무시하고 유효전도도를 도입하여 유동효과를 간접적으로 고려할뿐 난류유동을 고려하지는 않았다.<sup>(1-5)</sup> Szekely<sup>(6)</sup>는 빌렛의 연속주조에 난류의 k 모델 사용하여 2차원 계산을 하여 실험치와 비교 분석하였다. Flint<sup>(7,8)</sup>는 유동장과 열전달을 연결하였지만, 머시영역에서의 난류모델은 제시되어 있지 않다. Aboutalebi<sup>(9)</sup>는 유동장과 열전달을 엔탈피방법을 사용해 연결하였으며, 머시영역에는 레이놀즈수  $k-\epsilon$  모델을 적용해 실험치와 비교하였다. 정재동<sup>(10)</sup>은 난류방정식을 풀지않고 실험자료를 통해 결정된 유효확산계수를 사용하여 간접적으로 난류에 대한 영향을 고려하였다.

연속주조공정에서 몰드는 용강의 최종제품의 형상을 결정하며 제품의 품질을 저하시키는 불순물을 제거할 수 있는 곳이다. 따라서 몰드에서 용강의 유동패턴은 최종제품의 품질과 생산성에 중요한 영향을 미치게 되므로 연속주조공정에서 용강의 유동에 대한 해석은 필수적이다. 이러한 일련의 연구들은 전자기력을 사용하여<sup>(11-17)</sup> 유동을 제어하는 EMBR(electromagnetic brake)은 주형상부 영역에 자기장을 형성하여 유동을 제어하여 불순물의 부상을 촉진하여 보다 청정한 주편을 얻기 위해서 사용되는 자기장치이다. Tallback<sup>(18)</sup>은 응고 과정없이 노즐로부터 토출되는 유동 속도를 감속하는 자기력을 사용함으로써 품질을 향상 연구하였다. 반면 김덕수<sup>(19,20)</sup>는 응고과정을 포함하였지만 유동감쇄만을 고려하여 해석하였

다. Kouji<sup>(21)</sup>은 노즐각도와 주조속도의 변화에 따른 EMBR이 적용된 몰드내부의 유동장과 온도장에 미치는 영향을 해석하여 실험치와 비교하였고 Hirokazu<sup>(22)</sup>는 몰드내부의 불순물과 가스기포의 거동의 EMBR의 영향을 해석하였다. 하지만 실제적인 품질과 관련되어 있는 고상에서의 기공<sup>(22)</sup>과 중심편석<sup>(23)</sup>의 주변결함을 줄이는데 EMBR의 영향은 연구된 바가 없다. 본 연구는 EMBR의 영향과 중심편석의 발생을 연구하기 위한 선행적 연구로 연속주조공정에서 상변화와 난류에 관한 적절한 모사를 위해 난류효과를 직접-간접적으로 다른 기존의 연구들과 비교분석하였다. 주형상부에 EMBR Core를 설치해 유동을 제어하도록 하였고 EMBR이 유동장의 변화, 자유표면의 온도상승, 주형상부영역의 유동의 균일화, 노즐로부터 토출되는 유동의 분산효과를 예측하였다.

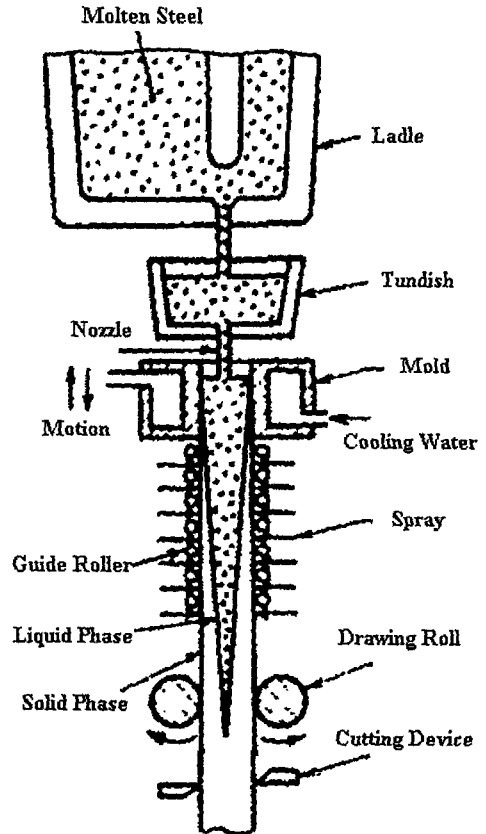


Fig. 1 Schematic representation of the slab continuous casting process.

2. 수치해석

2.1 모델링

연속주조공정의 용강은 래들에서 턴디시로 흘러 들고, 턴디시에서 수냉주형으로 쏟아진다. 용강이 턴디시에서 수냉주형으로 들어갈 때 불순물을 싸 들어가지 않도록 턴디시에 노즐을 달아서, 노즐 선단을 주형안의 용강에 담가서 주탕한다. 또 불활성가스로 용강윗면을 덮어 공기와의 접촉을 피한다. 주편은 주형에 따라 모양이 결정되며 연속적 응고과정을 거치면서 슬랩, 빌렛으로 Fig. 1과 같이 구조된다. 본 연구에서는 침지노즐(SEN)로 주입된 용강이 주형을 지나 3차냉각대를 거쳐 완전히 응고될때까지, 슬랩의 넓은 면에 걸쳐 평행하게 2차원대칭으로 해석영역을 선정하였다.

2.2 지배방정식

혼합물의 응고문제에 사용되는 연속체모델을 적용하였으며, 시간평균화된 지배방정식을 사용하였다.(Table. 1) 응고과정중의 고상영역, 액상영역 그리고 머시영역의 구분을 위해서 엔탈피방법을 사용하였고 Voller<sup>(23)</sup>가 제안한 enthalpy-porosity 관계식을 사용해서 주상수지상 응고를 가정하고 다공성매질에 대한 벽법칙을 근사화하였다. 따라서 머시영역의 액상분율은 온도에 따라 선형적으로 식(1)처럼 변화한다. 머시영역에 대해 다공성매질에 대한 Darcy's Law와 Korzeny-Carman's Law를 사용하여 액상분율의 함수로써 투과율을

계산한다. 그리고 운동량방정식에 생성항(식2)으로 추가되었고 유동감쇄효과를 나타내었다.<sup>(19,20)</sup>

$$f_i = \begin{cases} 1 & h > h_{liq} \\ \frac{h - h_{sol}}{h_{liq} - h_{sol}} & h_{sol} < h < h_{liq} \\ 0 & h < h_{sol} \end{cases} \quad (1)$$

$$S_u = -\frac{C_m(1-f_i)^2}{f_i^3} (U_i - U_{cast}) \quad (2)$$

$$S_{k(\epsilon)} = -\frac{C_{k(\epsilon)}(1-f_i)^2}{f_i^3} k(\epsilon) \quad (3)$$

2.3 난류모델

일반조괴법의 경우 자연대류가 지배적인 상변화 문제로서 층류로 가정되어왔다. 하지만 연속주조 공정에서는 침지노즐로부터 토출되는 제트유동으로 주형상부에 난류가 형성된다. 그래서 난류효과가 고정된 벽면이 아닌 머시영역에서 이루어지기 때문에, 적절하게 모사하기 위한 직-간접적인 방법들이 연구되었다. 본 연구에서는 Aboutaleb이 제안한 저레이놀즈수 k-ε 모델 대신에 고레이놀즈수 k-ε 모델을 적용하여(식3) 기존의 연구결과들과 비교분석하였다.

2.4 전자기장

유동장의 유체가 전기전도성을 가지고 있을 경우, 전자기장을 걸어줌으로써 발생하는 로렌쯔힘을 유체유동의 제어에 이용할 수 있다는 가능성

Table. 1 The governing equations

Mass	$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$
Momentum	$\frac{\partial(\rho U_j U_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right] + \Delta \rho g_i + S_{U_i} + F_i$
Energy	$\frac{\partial(\rho U_j h)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial(\rho U_j \Delta H)}{\partial x_j} + (\mu + \mu_t) \Phi$
k	$\frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon + S_k$
ε	$\frac{\partial(\rho U_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_1 \epsilon}{k} \mu_t \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{C_2 \epsilon^2}{k} + S_\epsilon$
φ	$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial(\epsilon_{ijk} U_j B_k)}{\partial x_i}$

이 연구자에 의해 고려되었다. 예를들면 전자기력이 유동의 안정성을 증가시키고, 난류로의 천이를 지연시킬 수 있다는 것이다. 양도체인 움직이는 용강에 직류자장을 가하면 전류가 유도된다. 유동하는 용강에 직류자장이 가해지면 운동의 속도와 자장의 세기에 비례하는 크기의 전류가 유도되고, 이 전류는 인가자장과 작용하여 유동방향과 반대되는 방향으로 로렌츠력을 발생시킨다. 이 로렌츠력을 사용하여 용강중 유동의 균일화와 주형상부 부근의 유동을 억제하여, 함유물(inclusion particles)과 기포(Bubbles)가 쉽게 부상하도록 한다. 용강의 청정도를 높이기 위한 EMBR은 연속주조공정에 쓰이는 기술이다. 감속력으로 사용되는 로렌츠력은 Maxwell 방정식을 사용하여 계산한다.(Table. 2)

Table. 2 The maxwell equations

Current continuity	$\nabla \cdot \vec{J} = 0$
Ohm's Law	$\vec{J} = \sigma_e(\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B})$
Electrical Field	$\vec{E} = -\nabla \phi$
Poisson Equation	$\nabla^2 \phi = \nabla \cdot (\vec{U} \times \vec{B})$
Lorentz Force	$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$

조건은 이산화방정식의 모든 계산점에서의 잔류오차의 합과 관찰점의 종속변수 값의 변화가 0.001이하가 되면 수렴된 것으로 판단하였다. 전산시간은 Pentium PC(133MHz)로 5~7시간이 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

2.5 수치해석 및 경계조건

지배방정식을 수치 해석적으로 풀기 위한 변수들에 대한 경계조건은 Table. 3 에 표시하였다. 본 연구에서는 기존의 연구들이 제시하는 실험식을 사용한다. 수치해석은 질량, 운동량, 및 스칼라량의 보존형 미분방정식을 유한 체적법을 이용해 이산화했으며, 계산영역에서의 종속변수들의 배치는 벡터와 스칼라량의 같은 격자에 계산하는 비엇갈림격자(Non-staggered grid)를 사용했다. 운동량 방정식에서의 압력항 처리는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 대수방정식의 해를 구하는 방법으로 SIP이 적용되었으며, 대류항에 대해서는 상류도식(UDS)을 사용하였다. 계산에 사용된 격자는 고체벽 근방에 조밀하게 분포시킨 비균일 격자를 세가지 경우에 대해서 격자시험을 거친후 160×55, 100×55, 100×90 격자를 사용하였다. 수렴

기존의 연속주조공정에 대한 실험결과가 수치해석적으로 재현하기에는 극히 제한되어 있다. 열전달량에 대한 경계조건을 대부분 실험에 의존한 자료와 식들을 사용한다. 기존 연구들에서 제시하는 세가지 경우의 실험치와 계산결과와 비교하였다. Fig. 2은 Atlas Steel Company에서 작동중인 1.1 m×0.127 m의 슬랩을 0.00165 m/s의 주조속도로 생산하는 경우의 응고층 두께를 나타낸 것이다. 구체적인 물성치와 기하학형상은 Lait<sup>(1)</sup>와 일치한다. 실험치에 근거한 유효확산계수를 사용한 정제동은 하향 예측하고 있으며, 직접적인 난류방정식을 푸는 Aboutalebi<sup>(9)</sup>와 본 연구의 방법이 보다 실험치에 근접함을 알 수 있다. Fig. 3은 직경 0.11 m의 로드를 0.0317 m/s의 주조속도로 생산하는 경우이다. 물성치와 다른 조건은 S.Asai & J.Szekely<sup>(6)</sup>와 일치한다.

Table. 3 The boundary conditions

Inlet nozzle	$U = U_{in}, V = 0, h = h_{in}, k = 0.01 U_{in}^2, \epsilon = \frac{k^{1.5}}{R_{noz}}, \frac{\partial J_x}{\partial x} = 0$
Symmetry	$\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = V = 0$
Free-surface	$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = U = J_x = 0$
Outlet	$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = \frac{\partial J_x}{\partial x} = 0$
Moving layer	$U = U_{cast}, V = k = \epsilon = J_y = 0, \frac{\partial h}{\partial y} = -\frac{C_p d}{K \Delta H} q_s$

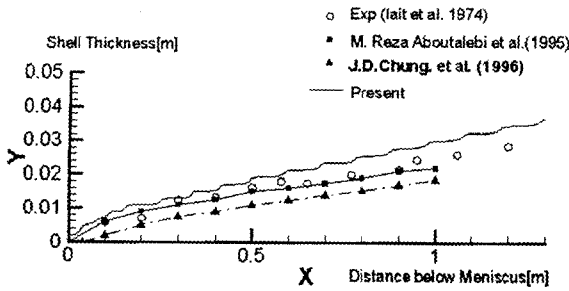


Fig. 2 Comparison of predicted solidified shell thickness. Case.1

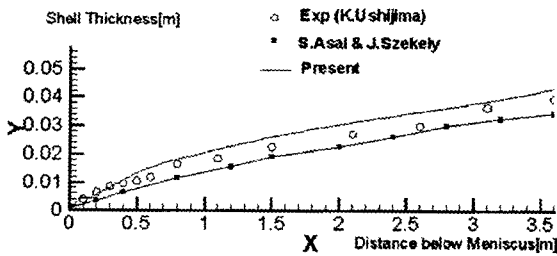


Fig. 3 Comparison of predicted solidified shell thickness. Case.2

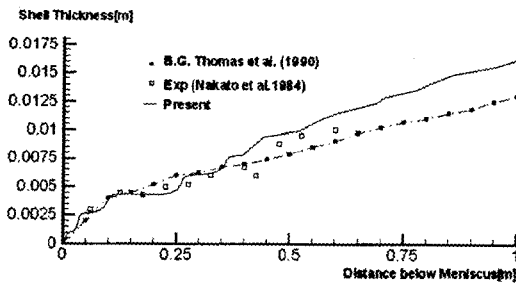


Fig. 4 Comparison of predicted solidified shell thickness. Case.3

난류효과를 모사하는 방법으로 k모델을 사용한 Asai<sup>(6)</sup>와 본 연구의 방법이 실험치에 근접함을 알 수 있다. Fig. 4은 1.32 m×0.22 m인 슬랩을 0.0167 m/s의 주조속도로 생산하는 경우이다. 구체적인 물성치와 기하학 형상은 Thomas<sup>(4)</sup>와 일치한다. 계산결과중 응고층의 두께를 비교했을 때, 실험치와 근접함을 알 수 있다. 상변화와 난류유동을 함께 수반하는 연속주조의 머시영역의 고상화가 된 부분을 알지 못한 상태에서는 벽법칙을 적용할 수 없다. 이를 해결하기 위한 기존

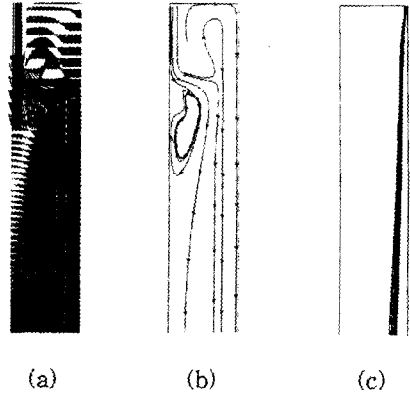


Fig. 5 Flow pattern and Profile in the mould (a) velocity (b) streamlines (c) liquid fraction

의 연구와 비교하였다. 간접적인 방법보다는 직접적 방법이 효과적이며, k모델과 k-ε 모델이 모두 실험치에 근사한다고 추론할 수 있다. 또한 머시영역에 생성항을 추가한 수정된 k-ε 모델을 사용한 Aboutalebi<sup>(9)</sup>와 본 연구의 적용도 응고층의 예측치가 전반적으로 실험치와 일치한다. 하지만 상변화와 난류현상을 겪는 머시영역에 대한 난류모델의 타당성과 검증은 뒷받침할만한 실험을 연속주조공정과 관련되어 볼 때 실측하기 힘들므로, 지금까지도 확립되어 있지 못한 이유로 본 연구는 응고층의 두께에 대한 정량적인 비교를 수행하였다. Fig. 5는 주형부근영역은 침지노즐로부터의 강제대류가 지배적인 유동형태를 보여주는데, 이는 본 연구에서 열부력만을 고려하였으므로  $Gr/Re^2 \approx 0.03$ 로서 자연대류의 영향이 주형상부영역에서 매우 적은 이유라 생각된다. 연속주조공정에서 유동패턴을 제어함으로써, 불순물을 제거하기 위한 수단으로 EMBR의 적용에 대한 연구가 진행되어 왔다. 하지만 대부분의 연구들은 EMBR의 적용으로 유동장의 변화는 함유물과 기포의 부상을 용이하게 한다고 추론하고 있다.<sup>(19,20)</sup> 이에 본 연구는 EMBR의 적용으로 인한 특징을 관찰하였다. Fig. 6은 노즐로부터 토출되는 용강이 EMBR로 인한 유동의 감속효과를 관찰할 수 있다. 하지만 노즐로부터 토출방향으로의 유속은 감속되었지만, 노즐출구의 위아랫 방향으로 유동이 분산됨이 관찰된다. 이런 분산된 유동은 노즐로부터 토출되는 운동량이 EMBR의 감속효과 때문에 자기장의 영역을 회피하려는

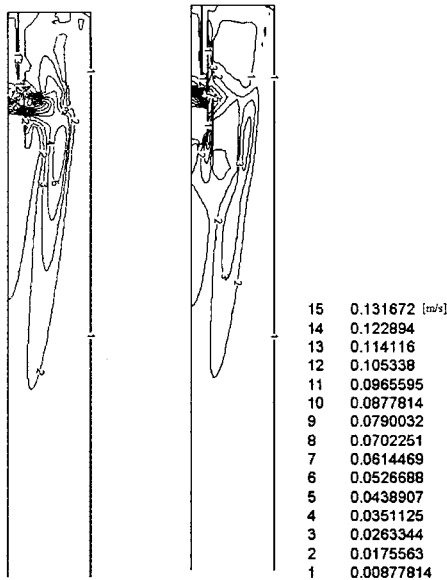


Fig. 6 Absolute velocity profile in the mould.  
(a)  $B_{z_{max}} = 0.0$  (b)  $B_{z_{max}} = 0.3 T$

성향을 가지기 때문이다. 이 현상은 Fig. 7의 노즐 출구위의 초기상부표면의 유속이 증감함에서도 나타난다. 자유표면과 하부쪽의 유동도 감소 효과를 보여주고 있다. Fig. 8은 EMBR의 적용으로 용탕의 상부표면의 온도의 증가를 보여준다. 이는 침지노즐로부터 주형아랫부분으로 유속이 감소되므로, 용강이 수송하는 고열이 많이 전달되지 않으므로, 주형내에 체류하는 시간이 많아지기 때문이다. 그래서 자유표면의 온도상승으로 온도구배가 냉각효과를 받는 수냉주형의 가까운 지역에만 존재하게 된다.<sup>(19)</sup> 또한 Fig. 9은 수냉주형 부근에서의 열전달량의 차이를 찾을 수 있고, 2차 냉각대에는 차이가 적음을 관찰하였다.

4. 결론

본 연구에서는 연속주조공정에서 상변화와 난류에 관한 적절한 모사를 위해 머리영역에 수정된 고레이놀즈수  $k-\epsilon$  모델과 엔탈피방법을 적용해서 기존의 연구들과 응고층 두께에 대한 정량적인

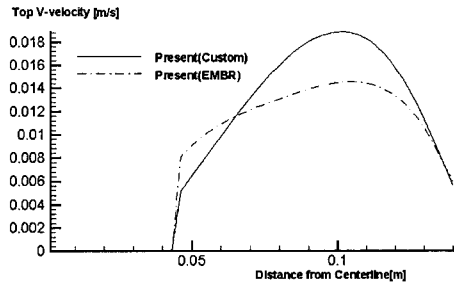


Fig. 7 Comparison of V-velocity in the Top face with EMBR

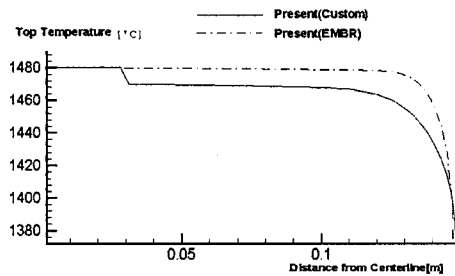


Fig. 8 Comparison of Temperature in the Top face with EMBR

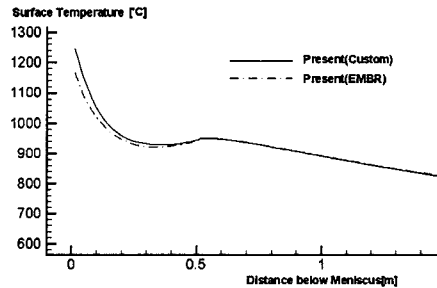


Fig. 9 Comparison of Temperature in the cooling face with EMBR

비교를 수행하였다. 또한 EMBR의 적용으로 인한 유동장에 대한 변화의 특징을 수치해석 하였다. 난류유동장에서 응고층두께를 실험치와 비교했을때, 실험자료를통해 결정된 유효확산계수를 사용하는 방법보다 난류방정식을 직접 푸는 방법이 효과적이며, 난류모델의  $k$  모델과  $k-\epsilon$  모델 모두 실험치에 근사하며, 또 생성항이 추가된 수정된  $k-\epsilon$  모델의 경우 Aboutalebi의 저레이놀즈수 모델과 본 연구의 고레이놀즈수 모델을 사용하였을때, 역시 실험치와 비교하여 비슷한 경향을 나

타낸다. EMBR의 적용은 하강류의 속도를 줄임으로써 함유물이 빨리 부상할 수 있도록 개재물이 운반되는 용강 아랫부분의 이동거리가 짧아지며, 유동을 따라 아래쪽으로 고열을 많이 전달하지 않게 되어서 자유표면의 온도를 상승시킨다. 그리고 용강의 감속효과로 인해서 유동의 균일화는 상부표면 개재물의 유입을 감소시킬 수 있어 보다 청정한 주편을 얻을 수 있게 된다.

### 참고문헌

- Lait, J.E., Brimacombe, J.K., and Weinverg, F., 1974, Mathematical modeling of heat flow in the continuous casting of steel, *Ironmaking Steelmaking*, No. 2, pp. 90-97.
- Mizikar, E.A., 1967, Continuous casting of steel, *Trans, AIME*, Vol. 239, pp. 1747-1753.
- Thomas, B.G., Mika, K.J., and Najjar, F.M., 1990, Simulation of fluid flow inside a continuous slab-casting machine, *Metal. Trans.* Vol. 21B, pp. 387-400.
- Thomas, B.G., Najjar, F.M., and Mika, L.J., 1990, Removal of superheat from continuous casting molds, *Conf. Metallurgists*.
- Huang, X., Thomas, B.G., and Najjar, F.M., 1992, Modelling of superheat removal during continuous casting of steel slabs, *Metall. Trans.* Vol. 23B, pp. 339-356.
- Asai, S., and Szekely, J., 1975, Turbulent flow and its effects in continuous casting, *Ironmaking Steelmaking*, No. 3, pp. 205-213.
- Flint, P.J., 1990, 3-dimensional finite difference model of heat transfer, fluid flow and solidification in the continuous slab caster, *Steelmaking Conf.* pp. 481-490.
- Flint, P.J., He, Q.L., Mahapatra, R.B., and Herberson, J., 1992, Heat transfer, fluid flow & solidification modelling of the continuous casting moulds, 10th Ptd Conf. pp. 279-290.
- Aboutalebi, M.R., Hasan, M., and Gurthie, R.I.L., 1995, Numerical study of coupled turbulent flow & solidification for steel slab casters, *num. heat. trans, PartA*, Vol. 28, pp.279-297.
- 정재동, 1996, 열농도대류를 고려한 연속주조 공정 수치해석, *대한기계학회 추계학술논문집 B*. pp. 439-444.
- Li, B.Q., 1998, Solidification processing of materials in magnetic fields *JOM-E*. Vol. 50. No. 2.
- Meyer, J.L., J.Szekely, El-kaddah, Vives, C., and Ricou, R., 1987, Electromagnetic & fluid flow phenomena in a mercury model system of the electromagnetic casting of Al, *Metallurgical Trans.*Vol 18B, pp. 539-548.
- Sakane, J., Li, B.Q., and Evans, J.W., 1988, Mathematical modeling of meniscus profile and melt flow in electromagnetic casters, *Metallurgical Trans.*Vol 19B, pp. 397-408.
- Meyer, J-L., Szekely, J., and El-Kaddah, 1987, Calculation of the electromagnetic force field for induction stirring in continuous casting, *trans. ISIJ*, Vol. 27, pp. 25-33.
- Dubke, M., Tacke, K-H., Spitzer, S., and Klaus Schwerdtfeger, K., 1988, Flow fields in electromagnetic stirring of rectangular strands with linear inductors, part1. *Metall Trans.* Vol 19B, pp. 581-593.
- Birat, J.P., and J.Chone, J., 1983, Electro magnetic stirring on billet, bloom, & slab continuous casters, *Ironmaking steelmaking*. Vol. 10, pp. 269-281.
- Spitzer, S., Dubke, M., and Schwerdtfeger, K., 1986, Rotational electromagnetic stirring in continuous casting of round strands, *Metall. Trans.* Vol 17B, pp. 119-131.
- Gote, T., Sten, K., and hackl, H., 1994, Simulations of EMBR influence on fluid flow in slabs, 17th advanced thechnology, *symp. electromagnetics*.
- 김덕수, 김우승, 1998, EMBR을 이용한 연주 공정의 난류유동 및 응고해석, *기계학회 춘계 학술대회논문집 B*, pp. 235-240.
- 이현구, 하만영, 1997, EMBR을 이용한 연속 주조 몰드내부의 유동장해석, *대한기계학회 추계학술대회논문집 B*, pp. 475-479.
- Takatani K., Ken, N., Kasai,N., Watanaba,

- T., and Nakajima, H., 1990, Analysis of heat transfer & fluid flow in casting mold with electromagnetic brake. *Proc.6 Iron & Steel Congress.* pp. 430-437.
22. Tozawa, H., Kitaoka, H., Kenichi S., Ishizuka, H., Ohnishi, M., and Kakihara, S., 1990, Flow control of molten steel in continuous casting mold by electromagnetic brake. *Proc.6 Iron & Steel.* pp. 438-445.
23. Swaminathan, C.R., Voller, V.R., 1993, On the enthalpy method, *int.j.meth.heat fluid flow*, Vol. 3, pp. 233-244.