

EMBR 을 이용한 연속주조공정에서 난류 유동, 상변화 및 매크로 편석에 대한 연구

강관구[†] · 유흥선* · 허남건**

Coupled Turbulent Flow, Heat and Solute Transport in Continuous Casting Processes with EMBR

Kwan-Gu Kang, Hong-Sun Ryou and Nahm-keon Hur

Key Words : Continuous Casting (연속주조), Electromagnetic Brake (전자기 브레이크), Macroseggregation (매크로 편석), Solidification (응고)

Abstract

A fully coupled fluid flow, heat, and solute transport model was developed to investigate turbulent flow, solidification, and macrosegregation in a continuous casting process of steel slab with EMBR. Transport equations of mass, momentum, energy, and species for a binary iron-carbon alloy system were solved using a continuum model. The electromagnetic field was described by the Maxwell equations. A finite-volume method was employed to solve the conservation equations associated with appropriate boundary conditions. The effects of intensity of magnetic field and carbon segregation were investigated. The electromagnetic field reduces the velocity of molten flow in the mold and an increase in the percentage of C in steel results in a decrease of carbon segregation ratio.

기호설명

| | |
|----------------------|------------------|
| B | : 자기장 벡터 |
| F | : 로렌쯔힘 |
| f_i | : 액상분율 |
| ΔH_f | : 상변화 잠열 |
| J | : 전류 밀도 |
| K | : 다공성 매질의 투과율 |
| T_i | : 난류 강도 |
| U_i | : 노즐 입구에서의 용강 속도 |
| u_s | : 주조 속도 |
| ϕ | : 전위 |
| σ_{el} | : 전기전도도 |

1. 서론

연속주조 시 미세 편석과 거시 편석 모두 일어 난다고 알려져 있다. 미세 편석은 풀림 과정을 통해서 저감시킬 수 있으나, 거시 편석은 열처리 과정을 통해서 저감시킬 수 없기 때문에 그 중 거시 편석이 미세 편석에 비해서 더 많이 금속의 성질은 저하시킨다. 또한 연주 공정에서, 몰드에서의 난류 유동, 난류 확산, 수지상과 벌크 유동과의 관계는 용질과 불순물의 분포에 중요한 역할을 한다. 실험 연구들을 통해서 연주 공정에서 축방향 중심 편석은 강의 열적 물성치, 성분비, 작업 조건 등에 영향을 받는다는 사실이 규명되었다^(1,2). 따라서 제품의 품질을 향상시키기 위해서는 주조 조건을 정확하게 제어할 수 있어야 한다.

한편 전자기 브레이크(EMBR)는 주형에서의 용강 유동을 자기장을 이용하여 제어할 수 있는 장치이다. EMBR 이 용강 유동에 미치는 주 영향은 침지 노즐을 통해서 나오는 용강의 제트 유동에

[†] 중앙대학교 대학원

E-mail: kkk1120@hotmail.com

TEL: (02)813-3669 FAX: (02)813-3669

* 중앙대학교 기계공학부

** 서강대학교 기계공학과

의한 재회전 유동을 감소시키는데 있다. 이러한 재회전 유동의 억제에는 주형 분말의 유입, 주물의 크랙, 재용융 등을 제거하거나 감소시킨다. 따라서, 주형 내에서 용강의 유동 제어는 용강 유동과 관련된 결점을 제거하는데 필수적이고, 최종 생산품의 품질 향상에 큰 기여를 할 수 있다.

컴퓨터의 발달과 복잡한 해석 코드의 발전으로 주형 내의 용강의 유동과 열전달을 매우 사실적으로 수치 계산한 연구들이 최근 발표되고 있다. Aboutalebi⁽³⁾은 저 레이놀즈 난류 모델과 연속체 모델을 사용하여 정상 상태의 연주 공정을 수치해석하였다. 정재동 등은⁽⁴⁾ 용강 거동과 열전달 그리고 용질 재분배에 따른 편석 거동을 수치해석적으로 해석하였다. 위의 연구들은 연주 공정을 매우 사실적으로 해석하였으나, 최근 용강 유동을 제어하기 위해 많이 쓰이는 전자기력을 고려하지 않고 있다. 한편, 김덕수와 김우승^(5,6)은 자기장의 변화가 유동장 및 응고 현상에 미치는 영향을 연구하였다. 위의 연구는 EMBR의 적용으로 액상 영역 유동의 감쇄 효과를 유발하여, 액상 영역에서의 불순물과 가스 기포의 거동을 제어함으로써 고상 영역에서 내부 청정 효과를 거둘 수 있다고 해석하였다. 하지만 수학적 모델에서 용질의 수송을 고려하지 못하여, 실제적인 품질과 큰 관련 있는 편석에 대한 연구는 수행하지 못하였다. 따라서 EMBR 효과와 편석의 분포를 모두 해석할 수 있는 수학적 모델의 개발이 매우 필수적이고 이에 본 연구는 합금의 응고 현상, EMBR 효과 및 편석의 영향을 모두 해석할 수 있는 수학적 모델을 제

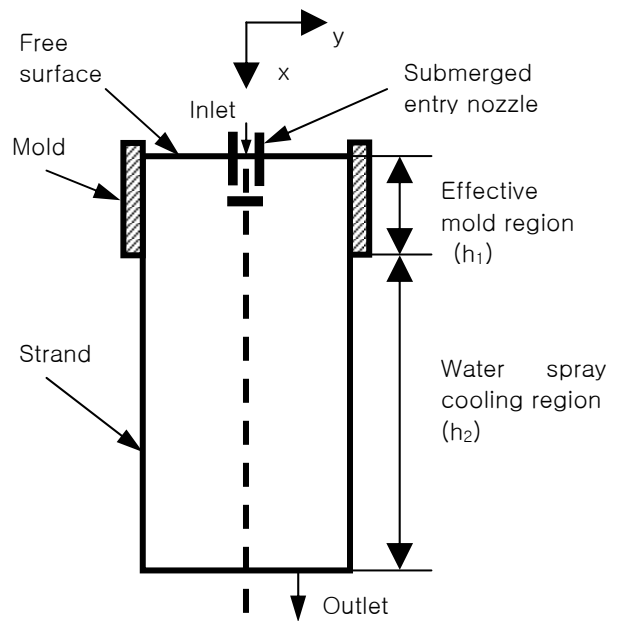


Fig. 1 Schematics of continuous casting

시하고 연속주공정에서 EMBR의 영향과 편석의 분포에 대해서 고찰하고자 한다.

2. 수학적 모델

2.1 해석 영역 및 지배방정식

본 연구에서 해석할 연주공정의 개략도는 Fig. 1과 같다. 본 연구에서는 침지 노즐(SEN)로 주입된

Table 1 Governing Equations

| | |
|------------|--|
| Mass | $\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$ |
| Momentum | $\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu_{eff} \nabla \mathbf{u} \right) - \frac{\mu_l}{K} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s) + F_m$ |
| Energy | $\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (\Gamma_{eff} \nabla T) + \nabla \cdot (\rho f_i V \Delta H_f)$ |
| Solute | $\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} c) = \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu_l}{Sc} + \frac{\mu_s}{Sc_i} \right) \nabla c \right] + \nabla \cdot \left[f_1 \left(\frac{\mu_l}{Sc} + \frac{\mu_s}{Sc_i} \right) \nabla \cdot (c_i - c) \right]$ |
| k | $\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \epsilon + S_k$ |
| ϵ | $\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \epsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \right) \nabla \epsilon \right] + C_1 f_1 G_k \rho \frac{\epsilon}{k} - C_2 f_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon$ |
| Maxwell | $\nabla^2 \phi = \nabla \cdot (\mathbf{u} \times \mathbf{B})$ |

용강이 주형을 지나 2 차 냉각대를 거칠 때까지, 슬랩의 넓은 면에 걸쳐 평행하게 2 차원적으로 해석 영역을 선정하였다.

상변화를 묘사하기 위해서 지배방정식은 연속체 모델⁽⁷⁾에 의해서 유도되었으며, Table 1 에 정리되어 있다.

속도장 계산시 Mushy zone 에서의 유동 감속 효과를 고려하기 위해서 Darcy's law 에서 유도된 투과율⁽⁸⁾은 식(1)과 같고 운동량 방정식에 적용된다.

$$K = -\frac{f_l^3}{D_l(1-f_l)^2} \quad (1)$$

지배방정식을 완전히 풀기 위해서는 액상 분율과 액상과 고상에서 용질 분율에 대한 보조 상관식이 필요하다. Fe-C 이종합금은 상대적으로 큰 역확산으로 인하여 지렛대 법칙(lever rule)을 적용하는 게 타당하다. 국부적으로 열역학적 평형을 이루고 고상선과 액상선이 직선을 이룬다는 가정하에 상평형도로부터 다음과 같은 식을 적용할 수 있다.

$$f_l = 1 - \frac{1}{1-k_p} \frac{T-T_{liq}}{T-T_m} \quad (2)$$

$$c_l = \frac{c}{1+f_s(k_p-1)} \quad (3)$$

$$c_s = \frac{k_p c}{1+f_s(k_p-1)} \quad (4)$$

$$T_{liq} = T_m + (T_e - T_m) \frac{c}{c_e} \quad (5)$$

2.2 전자기장

유동장의 유체가 전기 전도성을 가지고 있을 경우 전자기장을 걸어줌으로써 발생하는 로렌츠힘을 유체 유동의 제어에 이용할 수 있다는 가능성이 여러 연구자에 의해 고려되었다. 예를 들면 전자기력이 유동의 안정성을 증가시키고, 난류로의 천이를 지연시킬 수 있다는 것이다. 양도체인 움직이는 용강(molten steel)에 정자기장을 가하면 전류가 유도된다. 유동하는 용강에 정자기장이 가해지면 운동의 속도와 자장의 세기에 비례하는 크기의 전류가 유도되고, 이 전류는 인가 자장과 작용하여 유동 방향과 반대되는 방향으로 로렌츠력을 발생시킨다. 로렌츠력을 사용하여 주형 상부 부근의 유동을 억제하여, 용강 내의 유동을 균일화 시키고 함유물과 기포가 쉽게 부상하도록 한다. 유체의 단위 체적당 발생하는 로렌츠력은 다음과 같은 관계식에 의해 계산되고 모멘텀 방정식의 생성항이 된다.

$$F = J \times B \quad (6)$$

여기서 는 전류 밀도 벡터이고 는 자기장 벡터이다. 따라서, 주어진 자기장에 대하여 전류 밀도를 알면 로렌츠힘을 계산할 수 있게 된다. 전류 밀도는 다음과 같은 Maxwell 방정식을 사용하여 구한다.

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (7)$$

$$J = \sigma_{el}(E + u \times B) \quad (8)$$

$$E = -\nabla\phi \quad (9)$$

위의 식을 정리하면 다음과 같은 전위 에 대한

Table 2 Boundary Condition

| | |
|--------------|---|
| Nozzle Inlet | $U = U_m, V = W = 0, T = T_m, k = 0.01U_m^2, \varepsilon = C_m k 1.5/0.05D, \frac{\partial J_x}{\partial z} = 0$ and $c = c_{in}$ |
| Free Surface | $\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial x} = 0; u = J_x = 0$ |
| Outlet | $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial J_x}{\partial x} = 0$ |
| Moving Wall | $u = uc, v = k = \varepsilon = J_x = J_y = 0, -k \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(T_s - T_o), \frac{\partial c}{\partial y} = 0$ |

Poisson 방정식을 Table 1 과 같이 얻을 수 있다.

3. 수치해석

지배방정식을 수치 해석적으로 풀기 위한 변수들에 대한 경계조건은 Table. 2 에 표시하였다.

수치해석은 질량, 운동량, 및 스칼라량의 보존형 미분 방정식을 유한체적법을 이용하여 이산화하였으며, 계산 영역에서의 종속변수의 배치는 벡터와 스칼라량의 같은 격자에서 계산하는 비엇갈림 격자(non-staggered grid)를 사용하였다. 운동량 방정식에서의 압력항의 처리는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 대수 방정식의 해를 구하는 방법으로는 SIP 이 적용되었으며, 대류항에 대해서는 상류도식을 사용하였다. 계산에 사용된 격자는 고체벽 근방에 조밀하게 분포시킨 비균일 격자를 격자 시험을 거친 후, 격자를 사용하였다. 수렴 조건은 이산화 방정식의 모든 계산점에서의 잔류 오차의 합과 관찰점의 종속변수 값의 변화가 0.001 이하가 되면 수렴된 것으로 판단하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 EMBR 을 적용한 연주 공정에서의 유체 유동, 상변화를 포함하는 열전달, 용질의 거동에 대해서 수치해석 하였다. 수치해석에 적용된 구조 조건은 Table 3 에 강의 물성치는 Table 4 에 나타내었다.

Figure 2 는 자기장의 세기의 변화에 따른 유동장 변화를 나타낸다. Figure 2 (a)는 EMBR 이 없는 경우의 유동 형태이다. 침지 노즐을 통해서 유입되는 용강의 제트 유동은 주형의 좁은 면에 강하게 충돌하여 서로 반대 방향으로 갈라지며, 주형 영역의 상부와 하부에 강한 재순환 유동장을 형성시킨다. Figure 2 (a)에서 메니스커스 영역의 강한 재순환 유동은 자유 표면을 매우 불안정하게 만들고 또한, 주형 분말 함입의 주원인이 된다. 한편, 노즐 하부의 강한 순환 유동은 비금속 함유물과 기포의 자유 표면으로의 상승을 억제하고 주형의 하부로 운반한다. 반면 Fig. 2 (b)와 (c)를 보면 재회전 유동이 상부와 하부에서 자기장에 세기에 비례해서 모두 줄어들 수 있다. 이는 유도 전류와 정자기장과의 상호작용에 의해 유동의 방향과 반대되는 방향으로 로렌츠 힘이 작용해서 이다. 이러한 경향은 Fig. 3 에 더욱 잘 나타나 있다. 따라서 EMBR 은 주형 부근의 재회전 유동을 억제하여 자유 표면을 안정시키고 따라서 주형 분말 등의 불순물 함입을 저감시킨다.

Table 3 Casting condition for simulation

| Parameter | Low Carbon (0.1 Pct C) | High Carbon (0.96 Pct C) |
|---|------------------------|--------------------------|
| Cast Size (m) | 1.32×0.2 | 1.32×0.2 |
| Casting speed (m/s) | 0.015 | 0.015 |
| Heat transfer coefficient in the mold ($W/m^2\text{C}$) | 1500 | 1500 |
| Spray heat transfer coefficient ($W/m^2\text{C}$) | 750 | 750 |
| Effective mold length (m) | 0.7 | 0.7 |
| Equilibrium partition coefficient | 0.2 | 0.48 |
| Solidus temperature ($^{\circ}\text{C}$) | 1490.0 | 1400.0 |
| Liquidus temperature ($^{\circ}\text{C}$) | 1530.0 | 1460.0 |
| Melt superheat ($^{\circ}\text{C}$) | 20.0 | 20.0 |

Table 4 Thermophysical Properties of Steel Used in the computation

| Parameter | Value |
|---|-----------------------|
| Density (kg/m^3) | 7400.0 |
| Viscosity ($kg/m\ s$) | 6.2×10^{-3} |
| Thermal conductivity ($W/m\text{C}$) | 34.3 |
| Specific heat ($J/kg\text{C}$) | 680 |
| Latent heat of fusion (J/kg) | 270,000.0 |
| Permeability coefficient | 5.5×10^{-11} |
| Diffusion coefficient of carbon (m^2/s) | 1.0×10^{-8} |

연속주조공정의 상부에서의 유동은 난류로 난류가 수송 과정에 중요한 역할을 한다. Figure 4 은 정자기장의 세기 변화에 따른 난류에너지의 변화를 보여준다. Figure 4 (a)는 EMBR 이 없는 경우이다. 노즐에서 들어오는 용강으로 인하여 난류

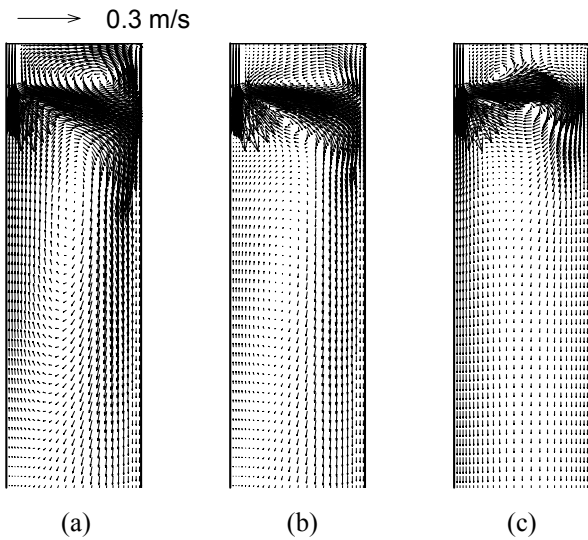


Fig. 2 Velocity vectors with the variation of magnetic flux density (a) $B_z = 0.0$ T (b) $B_z = 0.17$ T (c) $B_z = 0.35$ T

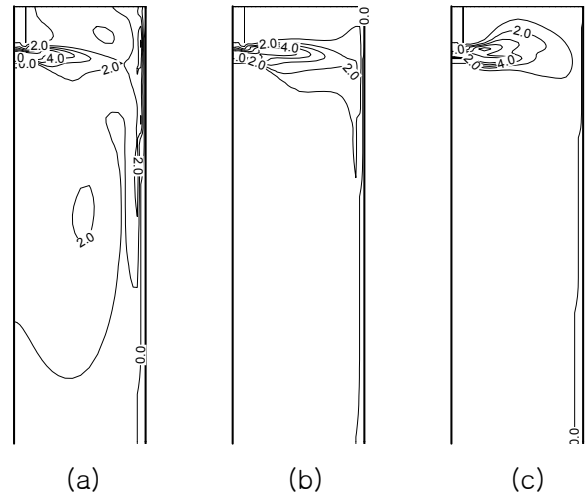


Fig. 4 Turbulent kinetic energy contour ($k/T_i U_i^2$) with the variation of magnetic flux density (a) $B_z = 0.0$ T (b) $B_z = 0.17$ T (c) $B_z = 0.35$ T

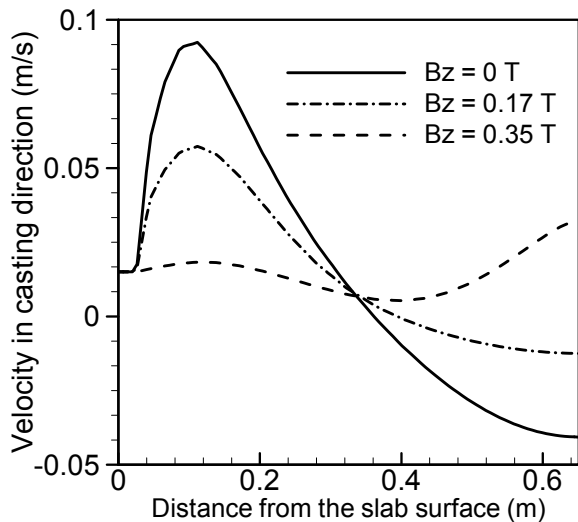


Fig. 3 Velocity Profile at $x = 1.0$ m with the variation of magnetic flux density

의 생성과 소산이 주형 부근에서 최대값을 갖는 것을 보여준다. Figure 5 와 마찬가지로 정자기장의 세기가 커질수록 난류에너지가 감소하는 것을 보여준다. Figure 5 는 $x = 1$ m 인 지점에서의 난류 강도를 보여준다. 슬랩 표면에서부터의 거리가 0.05m 지점에서 정자기장의 세기가 0 T 인 경우와 0.17 T 인 경우 피크 값을 갖는다. 이는 머시영역과 액상 영역간의 큰 속도 차에 기인한다. 반면 $B_z=0.35$ T 인 경우는 Fig. 3 에서처럼 $x=1$ m 지점에서 액상과 머시영역간에 속도차가 거의 없기 때문에 이러한 피크 값이 나타나지 않는다.

Figure 6(a), (b)는 각각 초기에 0.1 pct C 와

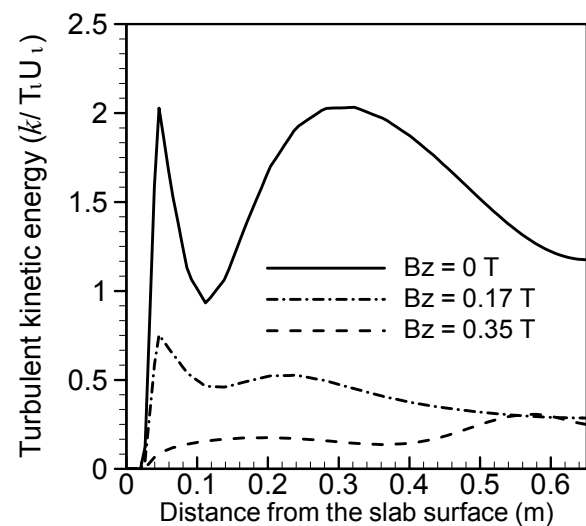
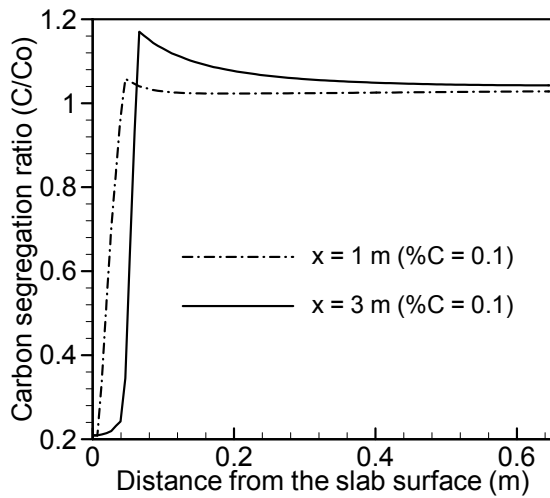
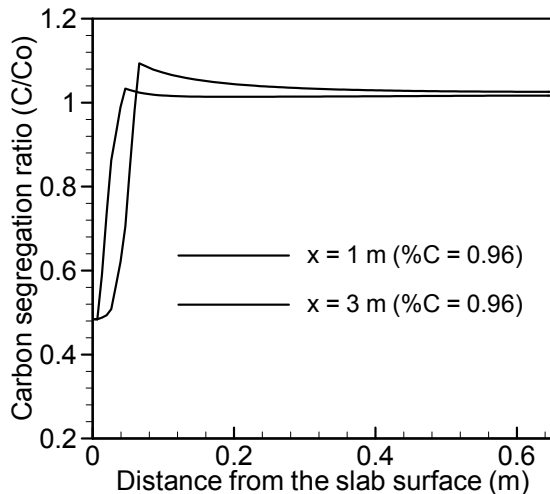


Fig. 5 Turbulent kinetic energy ($k/T_i U_i^2$) profile at $x = 1.0$ m with the variation of magnetic flux density (a) $B_z = 0.0$ T (b) $B_z = 0.17$ T (c) $B_z = 0.35$ T

0.96 pct C 의 분율을 가지는 경우에 $x=1$ m, 3m 일 때의 탄소 편석 비율을 나타낸다. 각각의 경우 고상의 영역에서 평형 분배 계수에 근접하는 매우 낮은 값을 가지다가 머시영역에서 급하게 상승하여 1 을 넘는 분포를 보여준다. 이후 액상 영역에서 1 정도의 값을 갖도록 감소한다. 머시영역과 액상의 경계에서 최고 값을 갖는데, 양 경우 모두 응고가 진행될수록 피크 값은 커지고, 피크의 위치도 슬랩의 중앙으로 이동하는 모습을 보여준다. 이러한 경향은 중심 편석의 원인이 되는 것을 유추할 수 있다. 또한 피크 값은 pct C 값이 큰



(a)



(b)

Fig. 6 Profiles of the carbon segregation ratio across the slab at different axial positions (a) 0.1 pct C (b) 0.96 pct C

0.96의 경우 0.1 경우에 비해서 약간은 작은 값을 보여주는데, 0.96의 경우가 평형 분배 계수값이 더 커서 이러한 분포를 가져온다.

5. 결론

본 연구에서는 연속체 모델을 사용하여 EMBR을 적용한 강 슬랩 연주 공정에서의 난류 유동, 상변화, 편석의 분포를 수치해석하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) EMBR의 적용은 주형 내의 재회전 유동을 억

제하여 자유 표면을 안정시키고, 따라서 주형 분말 등의 불순물 유입을 억제하여 보다 청정한 최종 생산품을 얻을 수 있다.

(2) EMBR의 적용은 연주 공정 상부의 난류 운동 에너지를 저감시킨다. 또한 난류 운동 에너지는 머시와 액상간의 경계면에서 급격한 속도 차에 의한 피크 값을 가지는데, EMBR은 이러한 경향을 줄일 수 있다.

(3) 유입되는 용강에서 pct C의 증가는 평형 분배 계수의 증가를 가져오고, 이에 따른 중심 편석의 감소를 유도한다. 또한 탄소 분율은 고상에서 낮은 값을 가지고, 머시 영역에서 급격히 증가하여 머시-액상 경계면에서 최고치를 갖는다. 이러한 피크 값은 주조가 진행될수록 커지고, 슬랩 중심부로 이동한다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 공학용 해석 소프트웨어 기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고 문헌

- (1) Moore J.J., 1983, Continuous Casting, ISS-AIME, New York, NY, Vol. 2, pp. 185-193
- (2) Lait J.E. and Brimacombe J.K., Continuous Casting, ISS-AIME, New York, NY, 1983, Vol. 2, pp.171-183
- (3) Aboutalebi M. R., Hasan M. and Gurthie R.I.L. 1995, "Coupled Turbulent Flow, Heat and Solute Transport in Continuous Casting Process," Metall. Master. Trans. B, Vol.4, pp. 731-744
- (4) 정재동, 유효선, 이준식, 1997, "열농도대류를 고려한 연속주조공정의 수치해석," 대한기계학회논문집(B), 제 21 권, 제 3 호, pp. 445-456.
- (5) 김덕수, 김우승 1999, "EMBR을 이용한 연주 공정에서의 난류 유동 및 응고해석," 대한기계학회논문집(B), 제 23 권, 제 3 호, pp. 374-387
- (6) 김덕수, 김우승 1999, "전자기 브레이크를 적용한 연속주조공정에서의 난류 유동 및 응고의 3차원 해석," 대한기계학회논문집(B), 제 23 권, 제 10 호, pp. 1254-1264
- (7) Bennon W.D. and Incopera F.P. 1988. "Numerical Analysis of Binary solid-liquid phase change using a continuum model." Numerical Heat Transfer, Vol.13, pp.277-296
- (8) Voller V.R. and Prakash C. 1987, "A Fixed Grid Numerical Modelling Methodology for Convection-Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 8, pp. 1709-1719