한국소성가공학회 2001년도 추계학술대회 논문집 pp.181~185

유한요소법을 이용한 연속주조공정의 연계해석

문창호* · 황상무**

Coupled Analysis of Continuous Casting by FEM

C. H. Moon and S. M. Hwang

Abstract

Three-dimensional finite-element-based numerical model of turbulent flow, heat transfer, macroscopic solidification and inclusion trajectory in a continuos steel slab caster was developed. Turbulence was incorporated using the Improved Low-Re turbulence model with positive preserving approach. The mushy region was modeled as the porous media with average effective viscosity. A series of simulations was carried out to investigate the effects of the casting speed, the slab size, the delivered superheat, the immersion depth of the SEN on the transport phenomena. In the absence of any known experimental data related to velocity profiles, the numerical predictions of the solidified profile on a caster was compared with breakouts data and a good agreement was found.

Key Words : Continuos Slab Casting, FEM, Improved Low-Re Turbulence Model, Average Effective Viscosity Model

1. 서 론

연속주조공정에서의 transport process는 steel making process의 quality 및 productivity에 중요한 역할을 하므로 이에 대한 많은 연구(physical model, mathematical model)가 이루어져 왔다. 특히 continuous slab casting process의 mathematical model은 PDE와 적절한 경계조건을 numerical technique에 적용하여 liquid-solid phase problem을 고려한 coupled turbulent fluid flow, heat transfer, solidification을 계산하므로 공정조건의 변화, process efficiency의 증가, equipment design 등의 particular industrial installation에 쉽게 적용할 수 있다. 이전의 연구들([1]~[2])은 FVM, FDM을 이용한 연구가 대부분이며, mushy영역 처리를 위해 variable viscosity model [1] 또는 D'arcy source model [2]을 사용하였다.

본 연구에서는 연속주조공정의 복잡한 전달현상을 이해하기 위해 positive preserving approach를 고려한 Improved Low-Re $k-\epsilon$ turbulence model(ILRN)과 mushy영역의 처리를 위한 average effective viscosity model 등을 가진 3차원 정상상태 finite-element-based mathematical model을 개발하였고, breakouts시편과의 응고층 두께 비교를 통해 이를 검증하였다. 또한, 공정조건변화에 대한 영향을 살펴보았다.

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과
** 포항공과대학교 기계공학과

2. Mathematical model

2.1 지배방정식

연속주조공정중 턴디쉬로부터 침지노즐을 통해 주입된 용강은 몰드와 롤 등을 거치면서 응고된다. 이때 노즐로부터 나오는 용강은 $10^5 \sim 10^6$의 높은 R_e를 가진 난류이며, 해석을 위해 사용된 지배방정식은 아래와 같다.

$$u_{i,i} = 0 \tag{2.1}$$

$$\rho u_{i,j} u_j = \sigma_{ij,j} + f_i \tag{2.2}$$

$$\rho C_p^* u_i T_{,i} = [K_e T_{,i}]_{,i} \tag{2.3}$$

여기서

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\mu_e \dot{\varepsilon}_{ij},\ C_p^* = \sqrt{h_{,i} h_{,i} / T_{,i} T_{,i}}$$

$$h = \int_{T_{ref}}^{T} C_p dT + L(1 - f_s),\ K_e = K_l + K_t(1 - f_s / f_s^{ZST})$$

2.2 난류모델

응고가 진행되는 공정에는 solid-liquid interface가 미리 알려져 있지 않고, 해의 일부로써 결정되므로 이를 위해 Cho[3]등에 의한 ILRN model을 사용하였다. 그러나, 난류모델의 반복계산도중 난류변수들은 항상 양(+)이여야 하므로 이를 위해 Ilinca[4]등에 의한 logarithmic form을 고려하였다.

$$\rho u_j K_{,j} e^K = [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) K_{,j} e^K]_{,j} - \rho^2 C_\mu f_\mu \frac{e^{2K}}{\mu_t} + \mu_t S(U) \tag{2.4}$$

$$\rho u_j E_{,j} e^E = [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_e}) E_{,j} e^E]_{,j} - \rho f_2 C_{\varepsilon_1} e^{2E-K} + \rho C_{\varepsilon_1} C_\mu f_\mu e^K S(U)$$

$$+ 1.44(1 - f_\mu) \frac{2\mu\mu_t}{\rho} U_{i,jk} U_{i,jk} + \frac{2.88}{4} \mu (1 - f_\mu) e^E K_{,j} K_{,j} \tag{2.5}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu e^{2K - E} \tag{2.6}$$

여기서 $K = \ln(k),\ E = \ln(\varepsilon)$

$$f_\mu = 1 - 0.95\exp(-5 \times 10^{-5} R_t^2),\ f_1 = 1$$

$$C_\mu = 0.09,\ C_{\varepsilon_1} = 1.44,\ C_{\varepsilon_2} = 1.92,\ \sigma_k = 1,\ \sigma_\varepsilon = 1.3$$

$$f_2 = 1 - 0.222\exp(-R_t^2/36),\ R_t^2 = k^2/\nu\varepsilon$$

$$S(U) = u_{i,j}(u_{i,j} + u_{j,i})$$

2.3 응고모델

머쉬영역 유동에 대한 연구는 Variable viscosity model[1]과 D'arcy source model[2] 등으로 진행되어 왔으며, variable viscosity model의 경우 머쉬영역의 점도에 대한 정보가 불확실하며, D'arcy source model의 경우 지배방정식내의 주속항으로 인해 주속이 계속 변하는 곡률등을 가진 복잡한 형상의 응고 및 응고셀의 소성변형이 일어날 경우 이를 고려하기가 매우 어려우며, variable viscosity model에 비해 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 Shin[5]등의 머쉬영역내 인장강도에 대한 실험결과에 근거하여 solid fraction에 따른 머쉬영역 평균점도를 가정한 Average effective viscosity model을 제시하였다.

$$\mu_e = \frac{\beta}{f_s}(\mu_s - \mu) + \mu + \mu_t(1 - \frac{f_s}{f_s^{ZST}}) \quad [0 \le f_s \le f_s^{ZST}] \tag{2.7}$$

$$\mu_e = \frac{\beta}{f_s}(\mu_s - \mu) + \mu \quad [f_s^{ZST} \le f_s \le 1] \tag{2.8}$$

여기서 f_s는 Clyne and Kurz식[6]을 사용하며,

$$\mu_s = \sigma_s / (3\ \dot{\bar{\varepsilon}}_s),\ \dot{\bar{\varepsilon}}_s = \frac{\sqrt{\beta}}{f_s} \dot{\bar{\varepsilon}},\ \sqrt{\beta} = \frac{g(f_s) F_K(f_s) \sqrt{(f_s)}}{g(1) F_K(1)}$$

$$g(f_s) = 1 - \exp[f_s^n \ln(1 - \alpha)],\ F_K = 0.5 + \frac{1}{\pi}\tan^{-1}[500(f_s - f_s^{ZST})]$$

$$n = -207.625 + 146.557\%C + 605.162/f_s^{ZST} - 271.369\%C/f_s^{ZST}$$
$$+ 58.064\%C^2 - 397.201(f_s^{ZST})^2$$

$$\alpha = -40.139 + 0.06037\%C + 131.8158/f_s^{ZST} - 3.06756\%C/f_s^{ZST}$$
$$+ 4.65\%C^2 - 105.17(f_s^{ZST})^2$$

2.4 연계해석

연속주조공정중 용강과 응고층의 속도 및 유동 응력은 주편의 온도 및 난류점도의 영향을 받으며, 난류점도 및 온도 또한 주편의 속도장의 영향을 받으므로 주편의 기계적 특성과 열적 특성의 밀접한 관계를 고려하기 위해 유동장, 난류점도분포와 온도장의 연계해석이 요구된다. 따라서 본 연구에서 개발한 유동해석프로그램 A, 난류점도해석프로그램 B, 온도해석프로그램 C 등의 세 개의 독립된 유한요소해석컴퓨터 시뮬레이션 프로그램들은 Fig.1 에서와 같이 반복계산을 통하여 주편의 속도, 난류점도, 온도 등을 해석할 수 있도록 재구성되었다.

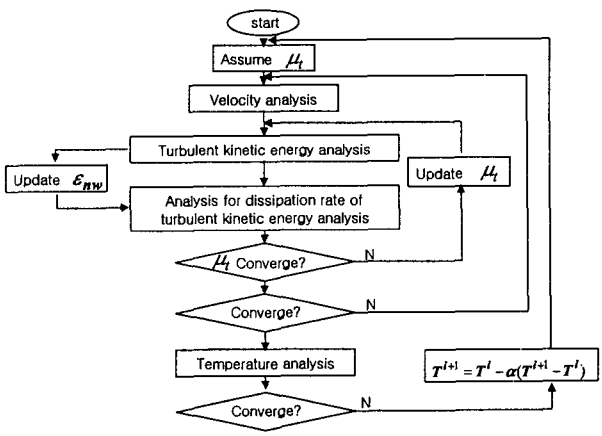

Fig. 1 Flowchart of coupled analysis

Table 1 Simulation Case of SEN and Slab

Case	Casting speed (m/min)	Slab width (mm)	Slab thickness (mm)	port angle (°)	Super heat (°C)	SEN depth (mm)
A	1.2	1250	250	-15	30	100
B	1.5	1250	250	-15	30	100
C	1.8	1250	250	-15	30	100
D	1.5	900	250	-15	30	100
E	1.5	1600	250	-15	30	100
F	1.5	1250	300	-15	30	100
G	1.5	1250	250	0	30	100
H	1.5	1250	250	15	30	100
I	1.5	1250	250	-15	36	100
J	1.5	1250	250	-15	30	150

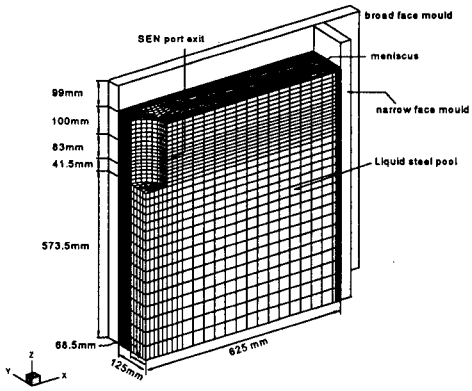

Fig. 4 Slab mesh and dimension

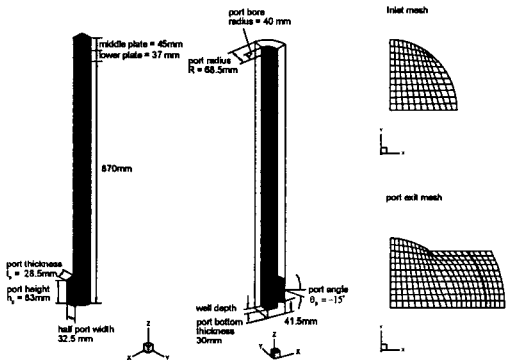

Fig. 2 SEN mesh and dimension

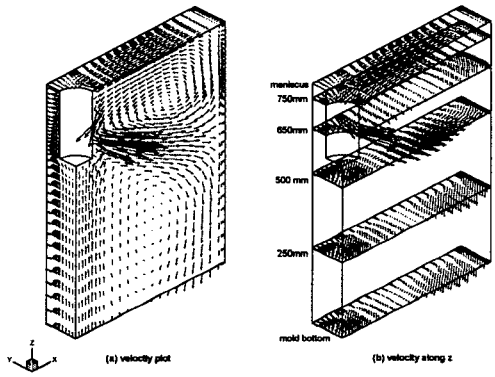

Fig. 5 Slab velocity plot

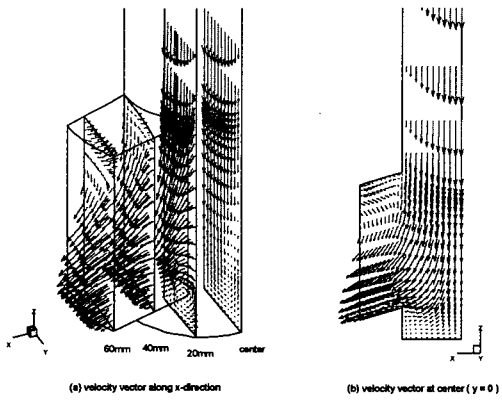

Fig. 3 Velocity plot of SEN

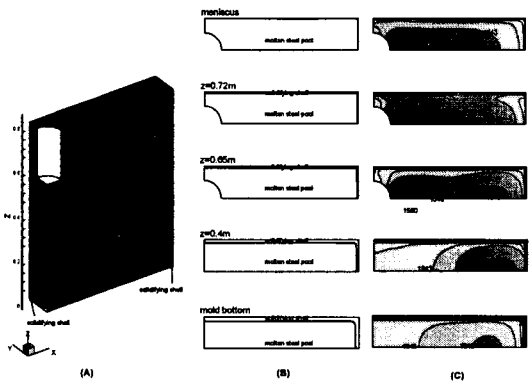

Fig. 6 Slab temperature distribution

3. 결과

3.1 침지노즐(Fig.2)의 유동해석

노즐의 primary function은 용강이 턴디쉬로부터 몰드로 이동하는 동안 reoxidation의 발생을 막는 것이며, 이를 위해 침지노즐이 연속주조공정에서 널리 이용되어진다. 연속주조공정의 공정조건변화에 따른 침지노즐의 유동변화를 보기 위해 주속차, slab크기, port 각도 등의 경우에 대해 해석을 수행하였다. (Table.1)

Fig.3에서 보듯이 노즐을 따라 내려온 용강은 노즐 bottom을 만나 swirling flow를 발생하고, 이러한 vortex의 크기는 x방향을 따라 점차 감소하며 축대칭으로 인해 전체노즐에서 4개의 와류가 생긴다. 또한 노즐출구근방에서의 단면형상변화로 인해 단에서의 박리가 발생하고, 이로 인해 노즐로 들어오는 역유동이 나타나며, 출측의 하부벽근방에서 최대속도를 가진다. 공정조건의 변화를 보기 위해 다음의 변수들을 이용해 비교하였다.

- Mean jet angle $\theta_j = \tan^{-1}\frac{\Sigma_{i=1}^{N}(u_z)_i V J_i}{\Sigma_{i=1}^{N}(u_x)_i V J_i}$

- Effective area fraction $\beta_s = 100\times\frac{\Sigma_{i=1}^{N} J_i}{\Sigma_{i=1}^{N_t} J_i}$

여기서 N, N_t는 노즐을 통해 몰드로 들어가는 요소수와 노즐출구에서의 총요소수이고, V_i 는 노즐출구요소 i의 surface center에서의 speed이다.(Table.2)

Table 2 Simulation Results of SEN and Slab

Case	θ_j	β_s	δ_n	δ_b	β_m
A	-27.53	73.30	15.40	20.73	9.18
B	-24.96	74.11	12.96	18.73	11.03
C	-23.33	74.97	12.37	15.90	12.41
D	-28.46	70.00	13.07	18.41	5.98
E	-22.87	74.97	12.98	18.95	14.01
F	-23.33	74.97	12.79	18.65	4.90
G	-17.84	72.19	12.96	18.71	8.37
H	-10.66	68.95	12.98	19.10	8.18
I	-24.96	74.11	12.81	18.61	10.81
J	-24.96	74.11	12.93	18.75	8.84

3.2 Slab의 연계해석

연속주조공정에서 몰드의 primary function은 용강으로부터 충분한 열을 빼앗아 몰드출구에서의 벌징이나, breaking없이 용강을 지지할 수 있을 정도로 충분히 두껍고 강한 응고층을 형성하는 것이다. 또한 연주기내의 유체유동에 따른 게재물의 flotation 및 온도분포는 steel cleanliness에 결정적인 영향을 미치므로 Fig.4와 같은 격자체계를 가정하여 공정조건변화에 따른 영향을 살펴보았다. (Table.1)

Fig.5에서 보듯이 노즐을 떠난 strong hot jet는 plume shape의 flow를 형성하며 단변부에 부딪힌다. 이때 단변부에 부딪힌 유동의 일부는 단변부몰드를 따라 탕면을 향해 진행하며 몰드로의 열전달에 의해 응고층을 형성하고, 주속으로 당겨지는 응고층에 의한 작은 circulation과 노즐벽을 향한 반시계방향 recirculation으로 나누어진다. 이러한 upper backward flow는 게재물 및 jet flow의 열을 탕면으로 가져가 몰드파우더를 녹이고, 자유계면요동을 발생시켜 몰드파우더의 용강으로의 침투를 일으키기도 한다. 단변부에 부딪힌 나머지 유동은 주조방향으로 진행하여 몰드로의 열전달에 의한 응고층을 형성하며 몰드를 빠져나간다. 이때 lower flow는 게재물을 용강 및 응고층내로 이동시켜 게재물의 제거를 어렵게 만든다. 또한 몰드 출구에서의 질량보존으로 인해 중심부분에서는 노즐로의 upward flow를 만들어 시계방향 recirculation을 일으킨다. 이러한 recirculation flow는 장변부몰드로의 열전달에 의한 응고층을 형성하고, 이로 인해 withdrawal shell근방에서 새로운 circulation을 생성한다. 탕면에서는 단변부로부터 진행되어온 유동이 노즐벽을 만나 이동하다, 노즐하부의 recirculation flow에 의해 올라온 유동과 노즐벽근방에서 만나 장변부몰드로 빠져나가는 유동이 생긴다. 이러한 결과는 Qinglin[7]등의 수모델 실험결과와 잘 일치한다. 이상과 같은 유동패턴으로 인해 hot jet의 impingement, center region의 low superheat feeding 등으로 인해 장변부 응고층이 단변부보다 두꺼우며, 중심온도가 단변부온도보다 낮다. 또한 corner에서는 양방향으로의 열전달로 인해 응고가 진행된다.(Fig. 6) Fig. 7은 본 연구의 수치모델검증을 위한 Case B의 공정조건하에서 단변부 중심에서의 몰드top에서의 거리에 따른 breakouts시편과 해석결과의 응고층두께비교이며, 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

연속주조공정중 nonmetallic inclusion은 용강보다 가벼우므로 particle에 작용하는 부력에 의해 떠오를 것이나, fluid와의 상대운동으로 인하여 fluid는 particle에 drag force를 작용한다. 해석을 위해 게재물은 구형이며, 용강유동에는 아무런 영향을 주지 않는 것으로 가정하였다. 또한 slab에서 주로 발견되는 게재물은 alumina이며 직경 50~150μm이므로 $D_p = 75\,\mu m$에 대해 해석하였다. 공정조건의 변화에 따른 영향을 살피기 위해 다음의 변수들을 이용해 비교하였다. (Table.2)

- 장변부, 단변부 중심 응고층두께 $\delta_b, \delta_n[mm]$

- Effective inclusion removal fraction $\beta_m = 100\frac{\Sigma_{j=1}^{N_m} V_j^m}{\Sigma_{j=1}^{N_t} V_j^t}$

여기서 N_n, N_m은 노즐 및 탕면에 잡히는 게재물 수이다.

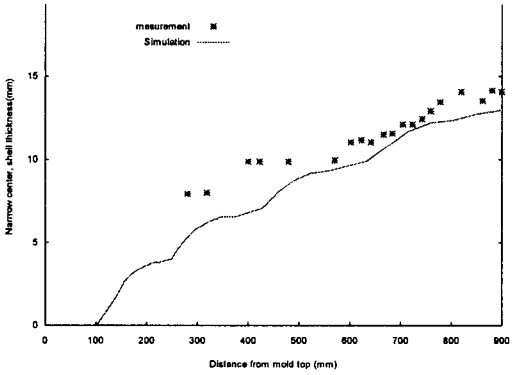

Fig. 7 Comparison of solidified shell between breakouts and Simulation at narrow face

4. 결 론

(1) 모든 경우에 대해 mean jet angle은 port angle보다 낮으며, 노즐출구에서의 recirculation은 노즐의 step 형상에 의해 발생하며 노즐 출구bottom 근방에서 최대 속도를 가진다.

(2) 동일한 유량에 대해 port angle이 증가함에 따라서 mean jet angle은 증가하나, 유효 단면적비는 감소한다.

(3) 동일한 angle에 대해 유량이 증가함에 따라서 노즐내부와류의 크기 증가 및 위치가 노즐벽으로 이동하여 출구top edge에서의 recirculation이 감소하고, 이로 인해 mean jet angle이 port angle에 가까워진다.

(4) 주속이 증가함에 따른 응고층두께변화가 가장 크다. 또한 단변부의 경우 주속, 주편두께, 과열도가 증가함에 따라 열전달이 증가하여 응고층두께는 감소하고,장변부의 경우 주속, 과열도 등이 증가하거나, 주편폭, port angle 등이 감소함에 따라 응고층이 감소한다.

(5) 주속, 주조폭이 증가하거나, 주조두께, 노즐깊이가 감소할수록 탕면에서의 게재물entrapment는 증가한다.

후 기

실제 조업중에는 아르곤가스를 주입하므로 이로 인한 유동pattern의 변화에 따라 결과들은 달라질 수 있다. 따라서 앞으로 아르곤가스를 포함한 해석이 필요할 것이다.

참 고 문 헌

(1) Asai. S, 1975, "Turbulent flow and its effects in continuous casting", Ironmaking and steelmaking, Vol. 3, pp. 205~213.

(2) Seyedein. S. H., 1997, "A 3-dimensional simulation of coupled turbulent flow and macroscopic solidification heat transfer for continuous slab casters", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, pp. 4405~4423.

(3) Cho. H. H., 1994, "An Improved low-Reynolds number $k-\varepsilon$ turbulence model for recirculating flows", Int. J. Heat transfer, Vol. 37., pp. 1495~1508.

(4) Ilinca. F., 1998, "Positivity preservation and adaptive solution for the $k-\varepsilon$ model of turbulence", AIAA J., Vol. 36.

(5) Shin. G., 1992, "Mechanical properties of carbon steels during solidification", ISIJ, pp 587~593.

(6) Clyne. T. W., 1981, "Solute redistribution during solidification with rapid solid state diffusion", Metal. Trans. A, Vol 12, pp965~971.

(7) Qinglin. H. E., 1993, "Observations of vortex formation in the mould of a coutinuous slab caster", ISIJ International, Vol. 33, pp 343~345