

# EMBR이 적용된 연속주조 몰드 내부에서의 유동장 해석

하 만 영<sup>\*1</sup>, 이 현 구<sup>\*2</sup>

## A Numerical Study on the Flow Fields in the Continuous Casting Mold with Electromagnetic Brake

M. Y. Ha and H. G. Lee

We developed a computer program to simulate the flow field in the presence of electro-magnetic fields. The steady, two-dimensional conservation equations for mass and momentum were solved simultaneously with Maxwell equations for electro-magnetic fields. Using this program, a numerical analysis was carried out to analyze the fluid flow in the continuous casting mold with electromagnetic brake. The effects of magnetic fields size, nozzle angle and EMBR yoke position on the flow fields in the continuous casting were investigated in the present study. The flow fields with EMBR were compared with those without EMBR. We also investigated the distribution of tracer concentration as a function of time in order to calculate their residence time in the mold with EMBR. By controlling the flow fields properly using EMBR, we can prevent the direct flow impaction on the wall which can give a damage on the mold surface and reduce surface defects of stainless steel sheet products.

**Key Words:** 유체유동(Fluid Flow), 연속주조(Continuous Casting), 수치해석(Numerical Analysis), 난류모델(Turbulence Model), 전자기장 (Electromagnetic Field), 전자기 브레이크(Electromagnetic Brake)

### 1. 서론

연속주조는 제철기술에 있어서 현재 가장 널리 채택되고 있는 공정중의 하나이다. 이 공정은 쇳물(molten steel)을 래들(ladle)에서 텡디쉬(tundish)를 통하여 응고가 일어나는 몰드(mold)로 부어 연속 슬라브(slab)나 빌렛(billet)을 형성한다. 이러한 연속주조 공정의 몰드 내부에서 일어나는 심각한 문제들 중에 중요한 것은 최종제품의 질을 좌우하는 불순물

(inclusion)의 존재와 몰드의 부식이다. 연속주조 공정에서 몰드는 쇳물의 고체화에 의하여 최종 형상이 결정되는 곳 일 뿐만 아니라 제품의 품질을 저하시키는 불순물을 최종적으로 제거할 수 있는 곳이다. 따라서 몰드에서 쇳물의 유동 패턴은 최종 제품의 품질과 생산성에 아주 중요한 영향을 미친다.

최근에 고품질의 철강재를 생산하기 위하여 연속주조 몰드에서 용융된 쇳물을 제어하기 위한 기술로써 전자기브레이크(EMBR)에 대한 연구가 많은 관심을 가지고 이루어지고 있다. 그러나 용융된 고온의 쇳물을 제어해야 하며, 동시에 전자기장을 제어해야 하는 어려움 때문에 실험은 극히 제한적이다. 이와 같은 실험상의 어

<sup>\*1</sup> 정회원, 부산대학교 기계공학부

<sup>\*2</sup> 학생회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

려움 때문에 대부분의 연구는 수치해석적인 기법을 도입하여 수행되어 지고 있다.

Takatani 등[1]은 노즐의 각도 변화와 주조 속도의 변화가 EMBR이 적용된 몰드 내부의 유동장과 온도장에 미치는 영향을 수치 해석하였으며, Tozawa 등[2]은 EMBR이 몰드 내의 불순물과 가스 기포의 거동에 미치는 영향을 비교·분석했다. 또한 Ho 등[3]은 몰드 내부에서의 주조 속도, 노즐의 각도, 노즐의 침지 깊이, 입자의 크기에 따른 입자 거동의 변화 등을 수치 해석하였으며, 계산 격자의 수가 결과에 미치는 영향을 검토하였다. Honeyands 및 Herbertson[4]은 쇠물 대신 수모델에서 몰드 내부의 유동장에 대한 실험과 계산을 병행하여, SEN의 형상 변화와 Jet oscillation에 대한 연구를 수행하였다. Huang 등[5]은 몰드 내부의 유동장, 온도장, 고상화된 셀의 내부 열전달 등을 3차원 수치해석하였다. 더불어 실험 결과를 2차원 계산 결과와 비교·검증하였다.

본 연구에서는 연속주조 시스템에서 유동장을 제어하기 위해 사용되는 EMBR (Electro-magnetic Brake)의 영향을 파악하기 위한 수치적 연구를 수행하였다. 주어진 여러 가지 제약 조건에 대하여 최적의 몰드를 설계하

기 위해서는 몰드 내부의 유동장에 대한 완전한 이해가 요구된다. 따라서 전자기장과 유동장을 동시에 해석하는 컴퓨터 프로그램을 개발하여 EMBR이 존재 및 존재하지 않는 경우 몰드 내부 쇠물의 유동 패턴 변화를 서로 비교·검토하였다.

### 2. 계산 모델

EMBR이 존재하는 몰드 내부의 유동 현상을 규명하기 위하여 몰드 내부의 유체에 대하여 정상 상태, 비압축성 2차원 질량, 운동량 및 난류 에너지 보존방정식을 일반화 변수  $\phi$ 를 사용하여 나타내면 다음과 같다[6].

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi) - \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) = S_{\phi} \quad (1)$$

여기서 등호 왼쪽의 첫 번째와 두 번째 항은 대류항이며 세 번째와 네 번째 항은 확산 항이다. 그리고, 등호의 오른쪽에 있는 항은 소스 항이다. 식 (1)에서 사용된 변수  $\phi$ 는 보존량을

Table 1. Conservation equations for analysis of flow fields.

	$\phi$	$\Gamma_{\phi}$	$S_{\phi}$
질량 보존	1	0	0
x-운동량 에너지	$u$	$\mu_l + \mu_t$	$F_x - \frac{\partial p}{\partial x}$
y-운동량 에너지	$v$	$\mu_l + \mu_t$	$F_y - \frac{\partial p}{\partial y}$
난류 운동 에너지	$k$	$\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G - \rho \epsilon - \rho D_k$
난류 운동 소산	$\epsilon$	$\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}}$	$c_1 f_1 \frac{\epsilon}{k} G - c_2 f_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} + E_{\epsilon}$

$$\mu_t = \rho c_{\mu} f_{\mu} \frac{k^2}{\epsilon}, \quad G = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$c_{\mu} = 0.09, \quad c_1 = 1.44, \quad c_2 = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_{\epsilon} = 0.9$$

$$f_{\mu} = \exp\left[-\frac{3.4}{(1 + R_t/50)^2}\right], \quad f_1 = 1.0, \quad f_2 = 1 - 0.3 \exp(-R_t^2), \quad D_k = 2\mu_l \frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_i} \frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_i}$$

$$E_{\epsilon} = \frac{2\mu\mu_t}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_k} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_k}, \quad R_t = \frac{\rho k^2}{\mu \epsilon}$$

나타내며  $\Gamma_\phi$ ,  $S_\phi$ 는 각각  $\phi$ 의 확산계수와 소스율을 나타내며 이들을 Table 1에 나타내었다. 몰드 내부 유동장은 정상 상태의 2차원 난류 유동이라 가정하였다. 난류 유동을 해석하기 위하여 저-레이놀즈,  $k-\epsilon$ , 2-방정식 난류 모델을 사용하였다. 따라서 유동장 계산에 필요한 지배 방정식은 Table 1에 보여준 질량, 운동량, 난류 운동 에너지, 난류 운동 소산 방정식이다.

Table 1에서  $F_x$  및  $F_y$ 는 각각 전자기장에 의한 소스 항이며 EMBR이 존재하지 않는 경우는 각각 영이며, EMBR이 존재하는 경우에는 유동의 속도와 전자기장에 의해 계산되어진다. 운동중인 쇳물과 같은 전도 유체에 정자기장 (Static Magnetic Field)을 가해주면, 유체의 단위 체적당 발생하는 Lorentz 힘[7]은 다음의 식에 의해 계산되어진다.

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (2)$$

여기서,  $\vec{j}$ 는 전류밀도이고  $\vec{B}$ 는 자기장이다. 그러므로 주어진 자기장에 대하여 전류밀도를 알게되면 힘을 계산할 수 있다. 전류밀도는 아래 방정식들의 해로부터 구하게 된다.

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0 \quad (3)$$

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (4)$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (5)$$

$\phi$ 는 전위 (Electrical Potential)이고,  $\vec{E}$ 는 전기장이다. 위의 식 (4)와 (5)를 식 (3)에 대입하여 정리하면 다음의 전위  $\phi$ 에 대한 프와송 (Poisson) 방정식을 얻게 된다.

$$\nabla(\sigma \nabla \phi) = \nabla \cdot [\sigma(\vec{V} \times \vec{B})] \quad (6)$$

여기서,  $\sigma$ 는 전기전도도 (Electrical Conductivity)를 나타내며,  $\vec{V}$ 는 속도벡터로서 Table 1의 속도  $u$  및  $v$ 를 나타낸다. 그리고, 식 (6)의  $\vec{V} \times \vec{B}$  항은 유체의 유동에 의해 유도되어지는 전자기장의 효과를 고려한

것이다.

그러므로 먼저 식 (6)에 대하여 주어진 경계 조건을 사용하여 전위  $\phi$ 를 구하고, 식 (5)를 사용하여 전자기장  $\vec{E}$ 를 구한 다음 식 (4)를 이용하여 전류밀도  $\vec{j}$ 를 구한다. 전체 계산영역에서 구해진 전류밀도를 식 (2)에 대입하여 유동장 해석에 필요한 Table 1의 소스 항  $F_x$  및  $F_y$ 를 구할 수 있다.

SEN (Submerged Entry Nozzle) 입구에서 시작하여 몰드 출구로 나갈 때까지 쇳물의 체류시간을 구하기 위하여 추적자의 농도장 계산을 하였다. 이 농도장 계산에 필요한 이동 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_e \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_e \frac{\partial C}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $C$ 는 추적자의 농도이고,  $D_e$ 는 농도에 대한 확산계수이다. SEN 입구에서 들어온 추적자가 시간에 따라 어떻게 변하는지 조사하기 위하여 식 (7)에서 시간에 따른 변화 항을 고려하였고 유동장은 정상 상태를 유지하고 있다고 가정하였다.

유동장 해석에 대한 경계조건으로는 모든 벽면에서 no-slip 조건을 사용하여 속도성분을 영으로 한다. SEN 입구에서는 주조속도에서 계산된 일정 크기의 속도로 고정시키고, 몰드 출구에서는 입구에서 들어온 유량과 동일 량의 쇳물이 빠져나간다는 조건을 사용하였다. 전자기장을 계산하기 위한 경계조건으로는 벽과 자유표면에서는 전류밀도의 수직성분은 영이 되고, SEN 입구와 몰드 출구에서는 전류밀도의 수직성분의 기울기가 영이라는 조건을 사용한다. 수치해석은 각각의 보존방정식을 일반화 좌표계로 변환하여 계산하였으며, 식의 이산화는 유한체적법에 기초하여 수행하였다. 각 변수를 격자점에서 계산하는 비 엇갈림 격자(non-staggered grid)를 사용하였고, 압력항의 처리는 연속방정식을 운동량 방정식과 결합하여 해석하는 SIMPLE 해

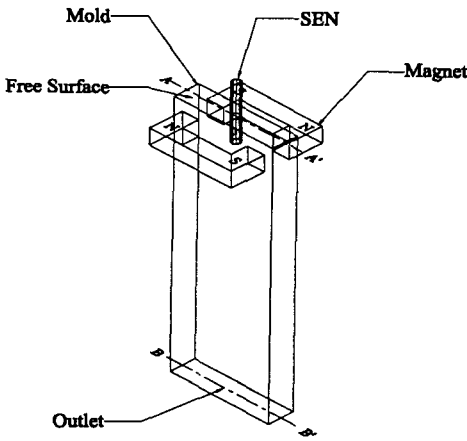
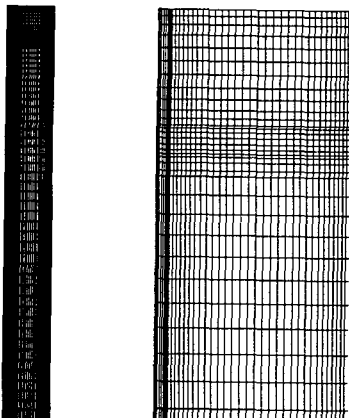


Fig. 1 Schematic diagram of the continuous casting mold

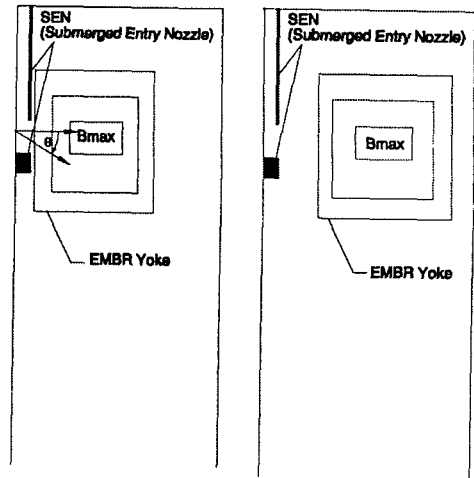
법을 사용하였다.

Fig. 1은 EMBR이 적용된 연속주조 몰드의 형상을 보여주고 있다. 여기서 단면 A-A'-B-B'의 2차원 영역을 본 연구의 계산 영역으로 선택하였다. 단면 A-A'-B-B'은 노즐 축을 중심으로 대칭을 이루고 있으므로 대칭조건을 사용하여 계산 영역을 절반으로 줄일 수 있다.

Fig. 2는 대칭조건을 적용하여 계산에 사용되어진 격자를 나타내고 있다. 계산에 사용되어진 격자수는 x- 및 y-방향으로 각각 82 및 42개로서 총 3444개이며 노즐 주위에 격자를 집중시켰다. [8, 9]



(a) Full view (b) Enlarged view  
Fig. 2 Computational grid



(a) Position 1 (b) Position 2  
Fig. 3 Position of EMBR Yoke and SEN configurations

Fig. 3은 자기장이 가해지는 EMBR Yoke의 위치와 쇳물이 들어와서 몰드 내부로 퍼지게 하는 SEN(Submerged Entry Nozzle)의 형상을 보여주고 있다. 여기서  $\theta$ 는 SEN의 분출각도를 나타내며  $B_{max}$ 는 자기장의 최대치를 나타낸다. 그러므로 Yoke는  $B_{max}$ 의 영역에서 최대의 자기장이 가해지며 주위로 가면서 선형적으로 점점 약해지는 자기장이 가해지는 것으로 가정하였다.  $B_{max}$ 의 크기가 유동장에 미치는 영향을 조사하기 위하여  $B_{max}$ 가 0 (전자기장이 존재하지 않는 경우), 0.15 및 0.3T의 경우에 대한 계산을 수행하였다. 여기서 T는 Tesla로서 전자기장 B의 세기를 나타내는 단위이다. 아울러 Yoke의 위치가 몰드 내부에서의 쇳물의 유동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Fig. 3에 보는 것처럼 Yoke를 서로 다른 위치에 설치하였다. 위치 1의 경우에는 Yoke가 SEN의 출구 측에 가까운 반면, 위치 2의 경우에는 상대적으로 SEN 입구에서 먼 곳에 위치하게 하였다. Fig. 3은 SEN의 출구 각이  $0^\circ$ 인 경우를 보여주고 있다. 아울러 본 계산에서는 SEN의 분출각도  $\theta$ 를 각각  $-20^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ 의 5가지 경우로 변화시켜 가면서 전자기장이 존재 및 존재하지 않는 경우에 유동의 변화를 비교하였다. 유체 (쇳물)의 밀도, 점성 및 전기 전도도는 각각  $7100 \text{ kg/m}^3$ ,  $0.006 \text{ kg/ms}$  및  $7.14 \times 10^5 \text{ 1/}\Omega\text{m}$ 로 일정

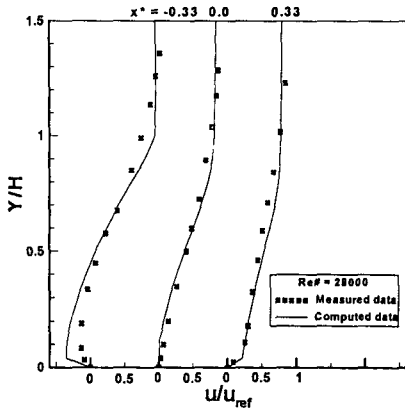


Fig. 4 Comparison of the present calculation with experimental data for the flow of backward-facing step

하다고 가정하였다.

### 3. 결과 및 토의

본 수치해석에서 적용한 난류 모델의 타당성을 검증하기 위하여 Vogel 및 Eaton[10]의 실험에 사용된 형상인 backward facing step에 대한 계산을 수행하였다.

Fig. 4는 계단의 후류 영역에서 현재의 난류 모델을 사용한 유동 계산 결과와 실험 결과의 비교를 보여 주고 있다. 여기서  $x^*$ 는  $(x - x_R)/x_R$ 을 나타내며,  $x$  및  $x_R$ 은 각각 계

단으로부터 흐름 방향의 거리 및 재 부착 지점까지의 거리를 나타낸다. 저 레이놀즈수 난류 모델을 사용한 현재의 계산 결과는 전체적으로 Vogel 및 Eaton[10]의 실험 결과를 잘 나타내고 있다.

Fig. 5는 EMBR을 가하지 않은 경우 ( $B_{max} = 0.0$ )의 몰드 내부의 유동장을 나타낸다. 여기서 좌측의 Fig. 5(a)는 계산 영역 전체를 나타내며 우측의 Fig. 5(b)는 입구 부분을 확대하였다. 이때 레이놀즈 수는 42600이다. SEN 출구를 통하여 분사된 유동은 면적의 확대에 의하여 서서히 감속되면서 벽면까지 이동한다. 이때 SEN의

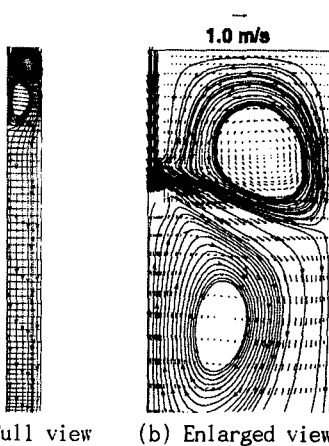


Fig. 5 Flow field at the continuous casting mold without EMBR :  $Re = 42600$ ,  $\theta = 0^\circ$

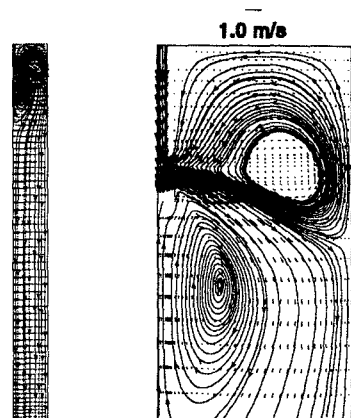


Fig. 6 Flow field at the continuous casting mold with EMBR :  $B_{max} = 0.15 T$ ,  $Re = 42600$ ,  $\theta = 0^\circ$

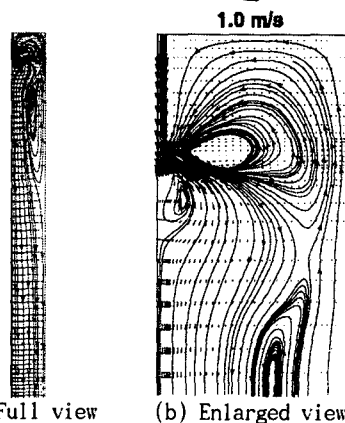


Fig. 7 Flow field at the continuous casting mold with EMBR :  $B_{max} = 0.3 T$ ,  $Re = 42600$ ,  $\theta = 0^\circ$

분출각도가  $0^\circ$  일지라도 분출된 유동은 전체적으로 몰드 출구를 향하고 있다. 벽면에 부딪힌 유동은 상하로 분지 되어 이동을 한다. 이로 인해 SEN출구를 중심으로 상하부에 순환하는 유동이 형성된다. 이처럼 쇳물이 몰드의 벽면에 부딪치면, 벽면의 부식 및 슬라브의 파열을 가져올 수 있다. 아울러 하부에 형성되는 큰 와류영역은 불순물이 자유표면으로 떠올라 쇳물에 포함되어 있는 불순물들을 제거할 수 있는 기회를 상실하게 만든다. 그러므로 최종 제품의 품질에 나쁜 영향을 미치게 된다. 이러한 문제점을 보완하기 위한 하나의 방법으로 EMBR이 사용되어질 수 있다.

Fig. 6 및 7은 42600의 동일한 레이놀즈 수에 대하여  $B_{max}$ 의 크기가 각각 0.15 및 0.3T의 정 자기장을 적용한 경우에 몰드 내부의 유동장을 보여주고 있다. 여기서 자기장은 Fig. 3의 1의 위치에서 가해지고 있다. EMBR이 존재하면 전도성 유체인 쇳물은 유속에 따라 전기의 성질을 가지게 되며 식 (2)에 주어진 것처럼 자기장에 의하여 유동 방향과 자기장에 수직된 방향으로 힘이 발생하게 된다. 따라서 SEN 출구를 통해 몰드 내부로 분출된 쇳물은 SEN 출구 측에 위치한 Yoke에 의해 발생하는 전자기장에 의한 힘에 의하여 유동에 브레이크가 걸리게 된다. 따라서 SEN 출구로부터 분출된 유체는 벽면까지 이동하지 못하고 SEN 출구와 벽면의 중간에서 상하로

분지 되어 이동하게 된다. Fig. 6에 보여준 것처럼  $B_{max} = 0.15T$ 인 경우에는 자기장의 세기가 유동 흐름의 방향을 바꿀 수 있을 만큼 크지 않아 유동은 전체적으로 EMBR이 존재하지 않는 경우와 유사하게 몰드 벽면에 부딪쳐 상하로 분지 되어 진다. 그러나 벽면에 충돌하는 속도는 EMBR이 존재하는 경우 존재하지 않는 경우에 비하여 감소하게 된다. 그러나  $B_{max}$ 를 0.3T로 증가시킨 경우 EMBR의 효과가 증가하여 쇳물의 유동에 브레이크가 걸려서 쇳물이 몰드의 벽면에

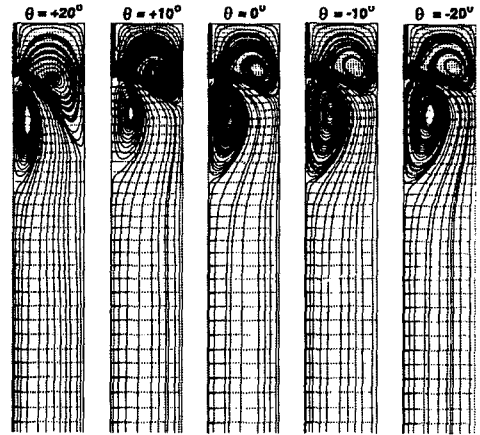


Fig. 9 Effect of nozzle angle on flow fields at the continuous casting mold with EMBR :  $B_{max} = 0.15 T$ ,  $Re = 42600$

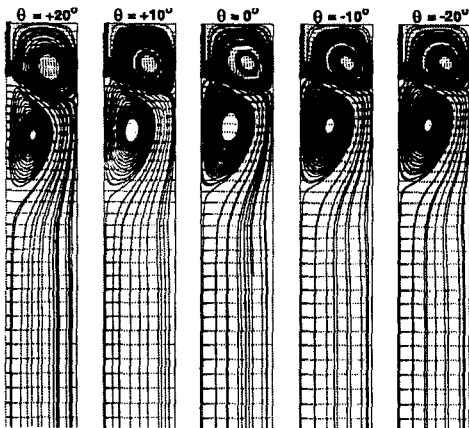


Fig. 8 Effect of nozzle angle on flow fields at the continuous casting mold without EMBR :  $Re = 42600$

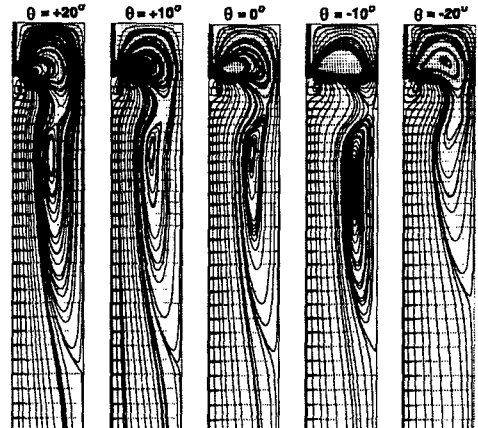


Fig. 10 Effect of nozzle angle on flow fields at the continuous casting mold with EMBR :  $B_{max} = 0.3 T$ ,  $Re = 42600$

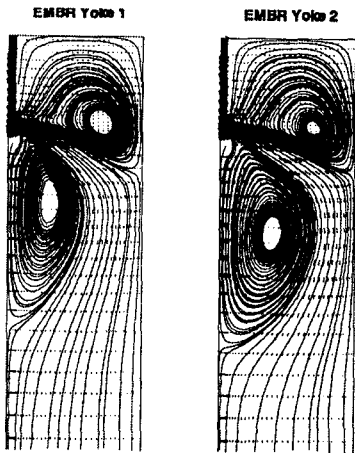
부딪히는 현상과 SEN 출구 부의 상하로 발생하는 큰 와류 영역이 대부분 사라짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 레이놀즈 수가 42600이고, EMBR이 존재하지 않는 경우에 노즐 각도의 변화에 따른 몰드 내부 유동장의 변화를 보여주고 있다. 노즐의 각도는 노즐 출구가 위쪽의 자유표면을 향하는 경우에는 음 그리고 몰드 출구를 향하는 경우에는 양의 각도를 가지는 것으로 가정하였다. EMBR이 존재하지 않는 경우 노즐의 각도가  $-20^\circ$ 에서  $+20^\circ$ 로 변함에 따라서 전체적인 유동의 형태는 유사한 패턴을 보인다. 그러나 뚜렷하게 보이는 차이는 노즐의 각도가 몰드 출구 방향 (양의 방향)으로 향함에 따라서 SEN 출구 상부에 형성되는 반 시계 방향의 와류의 크기는 증가하고 하부에 형성되는 시계 방향의 와류의 크기는 감소하게 된다.

Fig. 9 및 10은 노즐(SEN) 출구 각도의 변화가 몰드 내부의 유동장에 미치는 영향을 비교하였다. 각각의 그림에서 자기장은 위치 1에서 가하였다. Fig. 9는  $B_{max}$ 를 0.15T로 증가시킨 경우의 몰드 내부의 유동장을 보여주고 있다. 자기장을 가하였을 때 작용하는 전자기력은 전체적으로 몰드의 출구 쪽을 향하고 있다. 그러므로 노즐의 각도가 음인 경우 즉 자유 표면으로 향하는 경우 이 방향은 전자기력이 작용하는 방

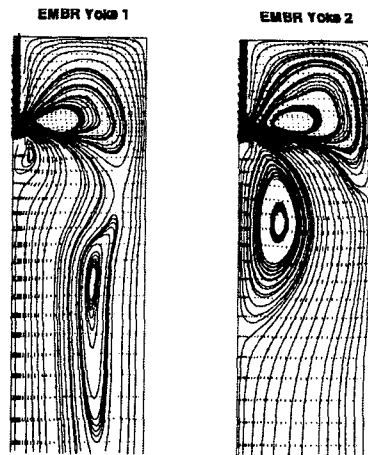
향과 반대가 되므로, EMBR이 존재하지 않는 경우와 비교하여 SEN 출구 하부에 형성되는 시계 방향의 와류의 크기는 약간 감소하나 그 효과는 그리 크게 나타나지 않는다. 그러나 노즐 각도가 양의 값으로서 몰드 출구 측을 향하면 이 방향이 전자기력의 방향과 동일하므로, EMBR의 효과가 잘 나타나 EMBR이 존재하지 않는 경우와 비하여 SEN 출구 상부에 형성되는 반 시계 및 시계 방향의 와류의 크기는 증가하고 하부에 형성되는 시계 방향의 와류의 크기는 감소하게 된다.  $B_{max}$ 를 0.3T로 증가시킬 경우 몰드 출구 방향으로 향하는 전자기력의 크기가 증가하여 Fig. 10에 보여준 것처럼 전체적으로 EMBR에 의한 브레이크가 몰드 내부의 유동에 잘 작용하여 SEN 출구 하부에 형성되는 시계 방향의 와류는 거의 사라지고 상부에 형성되는 반 시계 방향의 와류의 크기가 증가하여 SEN의 하부까지 확장하여 존재하게 된다. 이렇게 상부의 반시계 방향의 와류의 크기가 증가하다가 노즐 각도가 더 증가 하면 이 와류는 두 개로 나누어져 반시계 방향의 큰 와류안에 반시계 및 시계방향의 두 와류가 존재하게 된다.

Fig. 11은 레이놀즈 수가 42600, 노즐 분출 각이  $0^\circ$  그리고  $B_{max} = 0.15T$ 인 경우에 EMBR이 가해지는 Yoke의 위치 변화에 따른 몰드 내부 유동장의 변화를 보여주고 있다. 위치 1의 경우



(a) Position 1 (b) Position 2

Fig. 11 Effect of position of EMBR Yoke on flow fields at the continuous casting mold with EMBR :  $B_{max} = 0.15 T$ ,  $Re = 42600$ ,  $\theta = 0^\circ$



(a) Position 1 (b) Position 2

Fig. 12 Effect of position of EMBR Yoke on flow fields at the continuous casting mold with EMBR :  $B_{max} = 0.3 T$ ,  $Re = 42600$ ,  $\theta = 0^\circ$

에 위치 2의 경우와 비교하여 Yoke가 SEN 출구에 가깝게 위치하므로 EMBR에 의한 브레이크가 SEN 출구에서 바로 작용하게 된다. 그러므로 Yoke가 위치 1에 위치한 경우의 SEN 출구 하부에 형성되는 시계 방향의 와류의 크기는 Yoke가 위치 2에 위치한 경우에 비하여 감소하게 된다. 그러나  $B_{max} = 0.15T$ 인 경우에 전자기력의 세기가 상대적으로 그리 크지 않으므로, EMBR에 의한 브레이크 영향이 두 경우에 크지 않다. 그러나 동일한 조건하에서  $B_{max}$ 를 0.3T로 증가시킨 경우에 Fig. 12에서 보여준 것처럼 Yoke의 위치에 따라 몰드 내부의 유동은 전혀 다른 형태를 보여주고 있다. Yoke가 위치 1의 SEN 출구 근처에 위치한 경우 EMBR에 의한 브레이크가 크게 걸려서 앞에서 설명한 것처럼 SEN 출구 하부의 시계 방향의 와류의 크기는 거의 사라지고 상부의 반 시계 방향의 와류의 크기가 아주 발달하여 SEN 하부까지 확장을 하게된다. 그러나 Yoke의 위치가 SEN 출구에서 떨어져 몰드 우측의 위치 2에 있을 때는 EMBR이 SEN 출구 유동에 바로 브레이크를 걸지 않으므로  $B_{max}$ 가 0.15T인 경우와 유사한 유동을 보여주고 있다. 그러나 자기장의 크기가 증가하였으므로 Yoke가 위치 2에 존재할 때  $B_{max} = 0.3T$ 인 경우의 SEN 출구 하부

의 시계 방향의 와류의 크기는  $B_{max} = 0.15T$ 의 그것에 비하여 감소하게 된다.

Fig. 13~15는 레이놀즈 수가 42600이고 노즐 분출 각이  $0^\circ$ 일 때  $B_{max}$ 의 변화에 따른 추적자 농도장의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 여기서  $B_{max} = 0$ 인 경우는 EMBR이 존재하지 않는 경우이다. Fig. 13에서 보여준 것처럼

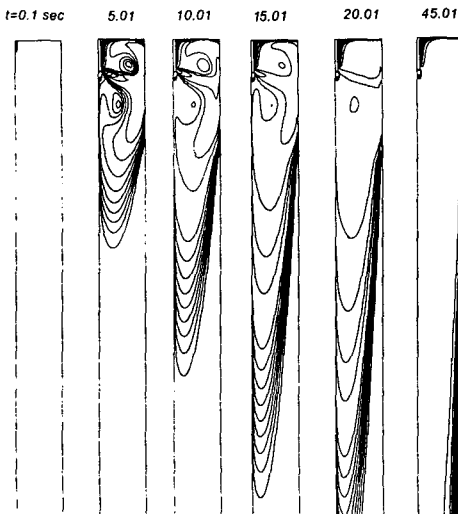


Fig. 13 Tracer concentration distribution as a function of time without EMBR :  $Re = 42600, \theta = 0^\circ$

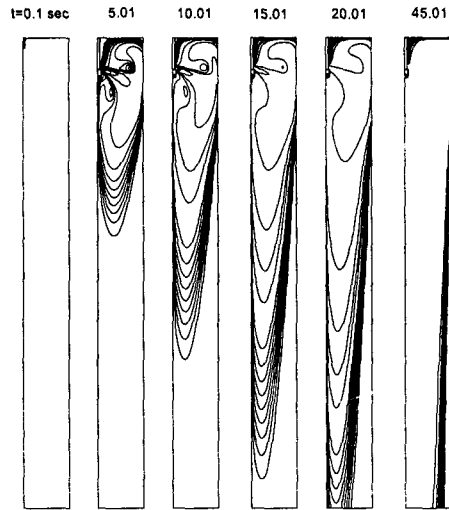


Fig. 14 Tracer concentration distribution as a function of time with EMBR :  $B_{max} = 0.15 T, Re = 42600, \theta = 0^\circ$

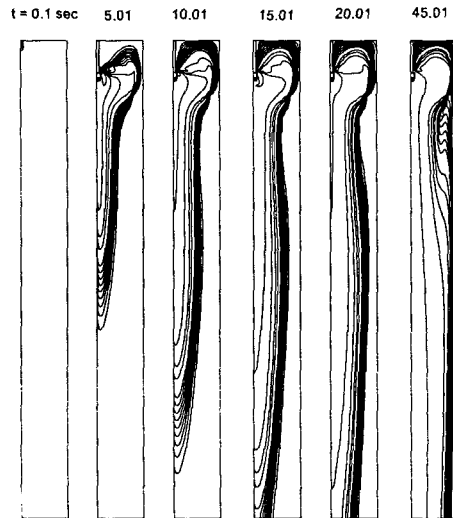


Fig. 15 Tracer concentration distribution as a function of time with EMBR :  $B_{max} = 0.3 T, Re = 42600, \theta = 0^\circ$



EMBR이 존재하지 않는 경우, 앞에서 설명한 것처럼 노즐을 빠져나간 쇳물이 몰드의 벽면에 부딪히며, SEN 출구 상 하부에서 시계 및 반시계 방향의 와류를 형성하고 있는 것을 잘 보여주고 있다. EMBR이 존재하지 않을 경우 45초 정도의 시간이 경과한 후에 노즐 입구를 통하여 들어온 추적자의 대부분이 몰드 출구를 통하여 빠져나가고 있다.  $B_{max} = 0.15T$ 의 EMBR를 가한 경우 추적자 농도장의 시간에 따른 변화는 Fig. 14에 보여준 것처럼 EMBR이 존재하지 않는 경우와 거의 유사한 패턴을 보여주고 있으며, 몰드 내부에서의 체류 시간도 거의 유사한 값을 보여주고 있다. 그러나  $B_{max}$ 가 0.3T로 증가한 경우에 Fig. 15에 보여준 것처럼 추적자 농도장은 상당히 다른 패턴을 보여주고 있다. 노즐을 빠져나온 추적자들은 EMBR에 의한 브레이크에 의하여 몰드 벽면에 부딪히지 않고 몰드 출구를 향해 빠져나가고 있으며, 45초가 지난 후에도 상당한 양의 추적자가 몰드 내부에 존재하면서 계속하여 출구로 이동하고 있음을 알 수 있다. 이것은  $B_{max}$ 가 0.3T로 증가한 경우에 상대적으로 추적자가 몰드를 빠져나가는 데 소요되는 시간이 길어짐을 의미하며, 이러한 결과는 쇳물에 포함되어 있는 불순물이 부유되어 제거 될 수 있는 시간적인 여유를 확보할 수 있다는 점에서 매우 긍정적이다.

#### 4. 결론

- 연속주조 공정 중 EMBR이 몰드 내부의 유동장에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 전자기장을 고려한 2차원 난류유동을 해석하는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

- EMBR이 존재하지 않을 때 노즐 출구를 빠져나온 유동은 몰드 벽면에 부딪쳐 상하로 분지 되어 SEN 상하부에 반 시계 및 시계 방향의 와류를 생성한다. 그러나 전자기장에 의한 EMBR을 적용하면 SEN 출구를 빠져나온 유동에 브레이크가 걸려 몰드 벽면에 부딪치는 유동의 세기가 감소한다. 자기장의 세기가 증가함에 따라서 SEN 하부 시계 방향의 와류의 크기는 감소하여 소멸하고, SEN 상부 반 시계 방향의 와류의 크

기는 점점 증가하여 몰드 출구 측으로 확장한다.

- 몰드의 쇳물에 가해지는 전자기력의 방향은 전체적으로 몰드 출구 측을 향하고 있다. 그러므로 노즐 출구 각과 EMBR를 가하는 효과가 결합하는 정도는 EMBR를 가하지 않은 경우와 비교할 때 노즐 출구 각이 몰드 출구 측을 향할 때 효과가 크게 나타난다. 전자기장의 세기가 증가하고 노즐 출구 각이 몰드 출구 측을 향함에 따라서 SEN 하부 시계 방향의 와류의 크기는 감소하여 소멸하고, SEN 상부 반 시계 방향의 와류의 크기는 점점 증가하여 몰드 출구 측으로 확장한다.

- 몰드 내부의 유동장은 EMBR이 가해지는 위치에 영향을 받는다. 전체적으로 EMBR이 노즐 출구 측에 가깝게 위치하는 것이 몰드 벽의 침식 방지 및 불순물 체류 시간의 증가 측면에서 멀리 위치하는 것보다 이점을 가진다.

- 추적자의 농도장은 쇳물의 유동에 의해 영향을 받는다. 그러므로 전자기장의 세기가 증가할수록 이들 추적자의 몰드 내부에서의 체류 시간이 증가하고 이로 인하여 쇳물 속에 포함되어 있는 불순물의 부유 시간을 확보하여 이들 불순물을 제거할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 1998년도 교육부 과학기술기초 중점연구(신소재:1998-017-E00091) 연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- [1] Takatani, K., Nakai, K., Kasai, N., Watanaba, T. and Nakajima, H., "Analysis of heat transfer and fluid flow in the continuous casting mold with electromagnetic brake", Proc. of The Sixth Int. Iron and Steel Congress(1990), p.430
- [2] Tozawa, H., Kitaoka, H., Sorimachi, K., Ishizuka, H., Ohnishi, M. and

- Kakahara, S., "Flow control of molten steel in continuous casting mold by electromagnetic brake", Proceedings of The Sixth Int. Iron and Steel Congress(1990), p.438
- [3] Ho, Y.H., Chen, C.H. and Hwang, W.S., "Analysis of Molten Steel Flow in Slab Continuous Caster Mold", ISIJ Int.(1994), 34-3, p.255
- [4] Honeyands, T. and Herbertson, J., "Flow dynamics in thin slab caster moulds", Steel research 66(1995), No. 7, p.287
- [5] Huang, X, Thomas, B.G. and Najjar, F.M., "Modeling Superheat Removal during Continuous Casting of Steel Slabs", Metallurgical Transactions B(1992), Vol. 23B, June, p.339~356
- [6] 荒川忠一 著, 明賢國 譯, "數值流體工學", 圖書出版 한미(1995)
- [7] Kondrashov, D. and Keefer, D., "A Maxwell's Equation Solver for 3-D MHD Calculations", IEEE Transactions on Magnetics(1997), Vol. 33, No. 1, January, p.254~259
- [8] Fletcher, C.A.J., "Computational Techniques for Fluid Dynamics 2", Springer-Verlag(1991), p.49~55
- [9] Thomson, J.F., Warsi, Z.U.A. and Mastin, C.W., "Numerical Grid Generation", North-Holland(1985), p.122~128
- [10] Vogel, J.C. and Eaton, J.K., "Combined heat transfer and fluid Dynamics measurements downstream of a backward-facing step", ASME J. of Heat Transfer(1985), Vol. 107, p.922-929
- [11] Takatani, K., Shirota, Y., Higuchi, Y. and Tanizawa, Y., "Fluid flow, heat transfer and inclusion behavior in continuous casting tundishes", Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.(1993), p.265~274