

Bloom 연주기의 최적 냉각조건 도출을 위한 응고 시뮬레이션

정영진* · 김영모** · 조기현*** · 강충길†

(2003년 10월 10일 접수, 2004년 9월 14일 심사완료)

Solidification Simulation for Optimal Cooling of Bloom Type Continuous Casting Machine

YoungJin Jung, YoungMo Kim, KeeHyeon Cho and ChungGil Kang

Key Words : Bloom(블룸), Heat Transfer(열전달), Optimal Algorithm(최적화 알고리즘), 0.187%C Carbon Steel(탄소강), Continuous Casting(연속주조)

Abstract

The continuous casting is primarily a heat-extraction process in which the heat transfer at various cooling zones profoundly influences quality of products. So development of numerical model is necessarily needed for more specific and clear investigations upon heat transfer mechanism at mold and secondary cooling zones. In this study, heat transfer coefficients which show the characteristic of heat transfer mechanism in mold are calculated for more exact analysis with temperature measured in bloom mold using optimal algorithm, and finally the validity of cooling conditions at secondary cooling zone actually used at field for 30 Ton bloom type continuous casting of 0.187%C is investigated. From the results of solidification analysis, the characteristic of bloom mold shows a similar tendency with that of previous studies, and optimized cooling conditions for 0.187%C are presented.

기호설명

T : 온도(°C)
 q_m, q_b : 각각 mold 와 Bloom 영역의 열량 벡터
 C_b : Bloom 의 비열(J/kg°C)
 ρ_b : Bloom 의 밀도(kg/m³)
 K_b : Bloom 의 열전도율(W/mK)
 t : 시간 (sec)
 f_L : 용강의 액상분률
 \dot{W} : 냉각수 밀도($l/m^2 \text{ min}$)
 h_m : 몰드와 용탕 사이의 대류열전달계수(W/m²K)

h_w : 냉각수와 몰드 사이의 대류열전달 계수(W/m²K)
 T_w : 냉각수의 온도
 ϵ : 복사율(0.9)
 σ : Stefan-Boltzmann 상수 (5.67×10^{-8})
 T_{sur} : 주위 온도(K)

1. 서론

연주기의 설계 및 제작 기술은 주로 일본, 유럽 등에서 1973 년 에너지 파동 이후 활발히 진행되어 왔다. 국내의 경우는 지금까지 연주기를 이용하여 Slab 및 Bloom 등을 제조하고 있지만 대부분 하드웨어 기술에 의존하고 있으며, 이에 관한 설계 기술은 극히 취약한 형편이다.

철강 생산설비의 설계에는 많은 노하우가 바탕이 되어야 하는데 이와 같은 노하우는 주로 실험적 연구 및 실제조업에서 측정된 데이터가 바탕이 되어야 한다. 연주공정은 기존의 연속 주조법을 그 바탕으로 두고 있으며 연속 주조법에 관해서는

* POSCO 기술연구소 후편연구그룹
E-mail : ddungyj@posco.co.kr
TEL : (054)220-6195, FAX : (054)220-6911

** RIST 제련공정연구팀

*** RIST 환경·에너지부 에너지연구팀

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소(ERC/NSDM)

이미 많은 연구 논문들이 발표되어 있기 때문에 설비를 설계하는 기본 계획 및 방향은 설정 할 수 있으나, 실제조업 데이터의 뒷받침없는 이론적인 해석만으로는 생산품의 품질 안정 및 수익성 증대와 조업조건 확립을 위한 신뢰성 확보에는 어려울 것으로 사료된다.

수익성 증대를 위해서는 생산량 증대를 위한 고속화가 불가피하며, 고속 주조 시 야기될 수 있는 Break out 이나 생산품의 품질 악화, 조업 불안정화 등을 방지하기 위해서는 1, 2 차 냉각조건의 적정화가 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 1 차적으로 몰드에 열전대 삽입을 통하여 몰드의 부위별 온도를 주조 중에 측정하였으며, 이 온도를 이용하여 몰드와 용탕 사이의 열전달 메커니즘을 1 차원 FDM (Finite Difference Method)법과 최적화 알고리즘을 사용하여 계산하였다. 또한 현재 조업중인 냉각 데이터를 이용하여 그 타당성을 이론적 해석으로 검증하였으며, Bloom 주조를 위한 적정화 된 2 차 냉각 패턴의 제안은 물론 주속 변화에 따른 Bloom 의 응고거동현상을 예측이 가능한 S/W 를 개발하였다.

2. 1 차 냉각대의 전산거동해석

2.1 1 차원 온도해석

연속 주조에 있어서 주편과 몰드 사이의 전열현상은 주편의 표면 결함, 주편터짐(Break out) 등과 밀접한 관계가 있는 품질 및 조업상의 중요한 인자이다. 따라서 Bloom 의 연속주조시 몰드 내에서 발생되어지는 열전달 현상을 정확히 예측하는 것이 아주 중요하다.

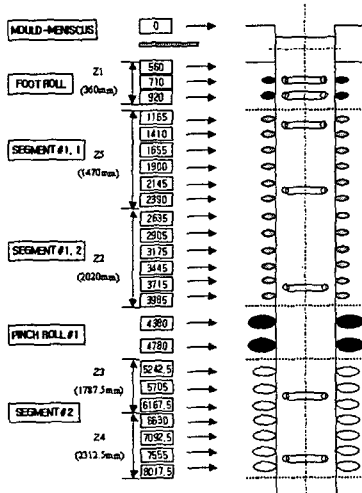


Fig. 1 Schematic illustration of vertical type continuous casting machine

몰드내 열전달 현상을 모사하기 위해서 본 연구에서 30 톤 연주기 몰드내에 직접 열전대를 꽂아 몰드내 온도를 측정하였으며, 최적화 알고리즘을 사용하여 측정온도로부터 Bloom 과 몰드 사이의 대류 열전달 계수를 구하였다. Fig. 1 은 수직형 Bloom 연속주조기의 냉각거동 해석을 위한 연주기 Pass line 의 개략도를 나타낸 것이다.

몰드 내의 1 차원 전열해석을 위해서 유한 차분법을 이용하였다. 1 차원 온도해석을 위한 정상상태 지배 방정식은 다음과 같다.

$$K_m \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + q_m = 0 \quad (1)$$

1 차원 온도해석을 위한 개략적인 mesh 분할은 Fig. 2 에 나타내었으며 계산을 위한 조건은 Table 1, 2 에 나타내었다.

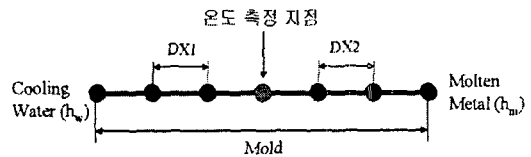


Fig. 2 Schematic illustration of mesh and position of temperature measured by thermo-couples for 1D FDM analysis

Table 1 Material properties of copper mold

Material property	Unit	Value
Heat capacity	J/kgK	400
Density	Kg/m ³	8920
Heat conductivity	W/mK	390

Table 2 Boundary conditions for heat transfer analysis

Conditions	0.187%C
1. Casting velocity (m/min)	0.5
2. Mold length from meniscus (mm)	560
3. Bloom width (mm)	410
4. Bloom thickness (mm)	250
5. Initial temperature of molten steel (°C)	1584
6. Heat transfer coefficient of mold/water interface (W/m ² K)	22500 ⁽¹⁾
7. Cooling water temperature (°C)	20

2.2 대류열전달 계수 계산

Bloom 과 몰드 사이의 대류 열전달 계수(h_m , W/m^2K)를 구하기 위해서 다음과 같이 가정하였다.

- (1) 몰드의 열물성치는 온도에 상관없이 일정하다.
- (2) 용탕의 온도는 용탕의 초기 온도로 가정하였다.
- (3) 몰드 내에서의 열전달은 용탕과 냉각수와의 온도 차로 인하여 주조방향보다는 두께 방향의 열전달이 우세하다. 따라서 두께 방향의 열전달만을 고려하여 1차원으로 계산하였다.

이상의 가정을 바탕으로 최적화 알고리즘을 사용하여 대류 열전달 계수(h_m)를 구하기 위해서 열전달을 사용하여 몰드의 온도(T_{mi})를 측정 하였으며, 측정을 위한 위치는 Fig. 3 에 나타내었다.

이렇게 측정 되어진 데이터와 1 차원 FDM 로 계산되어진 온도와의 차의 제곱합을 최적화 알고리즘의 목적함수로 표현하였다. 본 연구에서 설정한 목적함수(F)는 다음과 같다.

$$F = (\text{몰드의 측정온도}(T_{mi}) - \text{1차원FDM 해석온도})^2 \quad (2)$$

이 목적함수를 최소화하는 하기 위해서 D.F.P 법 (DAVIDON-FLETCHER-POWELL METHOD)을 사용 하였다.⁽²⁻⁵⁾ 자세한 최적화 Flow chart 는 Fig. 4 에 나타내었다.

Fig. 5 는 기존 문헌⁽⁶⁾에서 연구되어진 주속에 따른 몰드 위치 별 열유속 량을 나타낸 것이다. 주속이 고속일 경우는 상부에서 대부분의 열량이 몰드로 흡수되어지고 몰드 하부로 내려갈수록 열유속 량이 급속히 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 주속이 저속일 경우, 분포 형상은 고속과 비슷하지만 몰드 전반에 흡수되어지는 열유속량이 전반적으로 고르게 되고, 고속의 열유속 형태와는 달리 몰드 하부에서 열 유속량이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 주속이 0.5 m/min 로 저속인 경우에 대해서 몰드의 온도를 측정하였다. 본 연구에서 계산한 결과(Fig. 6)과 Fig. 5 의 기존 문헌의 저속 데이터와 비교하면 비슷한 양상을 띠는 것을 알 수 있다.

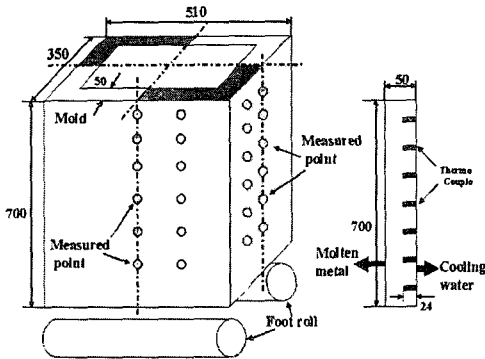


Fig. 3 Schematic illustration for measuring temperature of mold with thermal couples

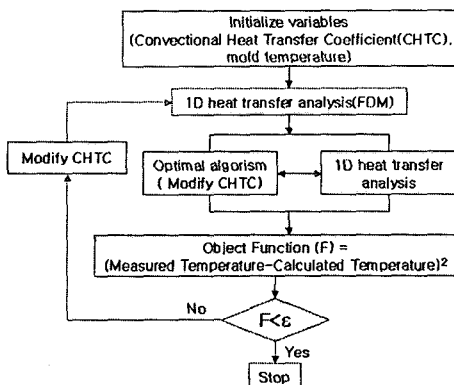


Fig. 4 Flow chart for optimal algorithm

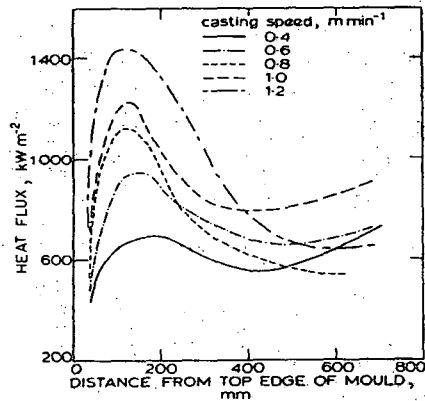


Fig. 5 Mold flux as function of distance from top of mold for different casting speeds

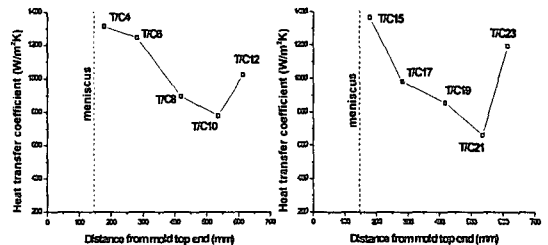


Fig. 6 Convective heat transfer coefficient profile of 0.187% carbon steel at the center of width and thickness mold faces

3. Bloom 의 2 차원 응고해석

복사 냉각은 식 (7)과 같이 표현된다.

3.1 지배 방정식

$$q = \sigma \varepsilon (T^4 - T_{sur}^4) \tag{7}$$

Slab 와 bloom 의 온도해석을 위한 비정상상태 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

식 (7)은 비선형이므로 선형화 시키기 위하여 Δt 전의 시간에서의 표면온도를 사용하여 다음과 같이 변환하였다.

$$\rho_b C_b \frac{\partial T}{\partial t} = K_b \nabla^2 T + q_b \tag{3}$$

$$q = h_{rad} (T - T_{sur})$$

$$h_{rad} = \alpha \varepsilon (T_i^2 + T_{sur}^2) (T_i + T_{sur}) \tag{8}$$

연주시 응고층내 미응고 용강 및 Mushy zone 에서의 열전달은 침지 노즐을 통해 주형으로 주입되는 주입용강류에 의한 난류혼합의 영향과 용강은 도구배에 의한 자연대류의 영향으로 매우 복잡하다. 이와 같이 복잡한 전열현상을 단순화하기 위해 용강의 대류에 의한 전열량을 보상하고자 유효 열전도도(Effective Thermal conductivity, K_e)의 개념을 아래와 같이 도입하였다⁽⁷⁾.

■ Water spray cooling

Water spray cooling 에 있어서 열전달 계수 h_w 는 三塚⁽⁸⁾가 제안한 식 (9)를 사용하여 계산하였다.

$$K_e = K_b (1 + 6f_L^2) \tag{4}$$

$$h_w = 1.57 \dot{W}^{0.33} (1 - 0.0075 T_w) \tag{9}$$

식 (3)을 차분하기 위하여 유한 차분법을 사용하였으며 상변태에 따른 응고 잠열항을 고려하기 위해서 등가 비열법을 사용하여 다시 표시하면 다음과 같다. 이때 고·액 공존영역에서의 고상열은 온도에 비례한다.

(3) 총 냉각 수량 결정

Bloom 연주시의 2 차 냉각대에서 Cooling system 별 냉각수량(ℓ/min)을 결정하기 위해서는 총 냉각수량을 결정 하여야만 한다. 총 냉각수량을 결정하기 위해서는 2 차 냉각대에 공급되어지는 비수량(ℓ/kg)을 알아야 한다. 현장 조업에서는 사용되어지는 비수량은 강종마다 그 양을 달리 하고 있으며, 0.187% 탄소강의 비수량은 $0.48 \ell/\text{kg}$ 을 사용하였다. 0.187% 탄소강의 화학 조성비는 Table 3 에 나타내었다.

$$\rho_b \left(C_p + \frac{L}{T_L - T_s} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = K_e \nabla^2 T + q_b \tag{5}$$

총 냉각수량을 결정하기 위해서 다음 식을 사용하였다.⁽⁹⁾

3.2 경계조건

$$\text{총냉각수량}(\ell/\text{min}) = \text{비수량}(\ell/\text{kg}) \times \text{주편폭}(m) \times \text{주편두께}(m) \times \text{밀도}(\text{Kg}/\text{m}^3) \times \text{주속}(m/\text{min}) \tag{10}$$

몰드로부터 2 차 냉각대를 걸쳐 주편(Bloom)이 지날 때 외부 냉각에 의해 응고가 진행된다. 이와 같은 냉각 경계조건을 식 (5)에서 고려하여야 한다. 몰드 및 2 차 냉각대에서의 냉각조건을 분류하면 다음과 같다.

식 (10)을 사용하여 구한 총 냉각수량은 $193 \ell/\text{min}$ 이다.

(1) 몰드

Table 3 Chemical compositions of Carbon steel (0.187%C)

냉각수 채널을 통해 냉각을 시키는 몰드에서 주편으로부터 열량을 빼앗아 냉각시키게 된다. 이때 경계조건은 대류경계로 처리하였으며 냉각식은 다음과 같다.

$$q = h_m (T - T_w) \tag{6}$$

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni
0.187	0.744	0.0017	0.014	0.27	0.0	0.0
Cr	Mo	V	Ti	Nb	Al	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

(2) 2 차 냉각대

■ 복사 냉각

Table 4 Amount of cooling water at each cooling zones

Material	0.187%C 193 ℓ/min
Zone.1 (20%)	38.6 ℓ/min
Zone.5 (40%)	77.2 ℓ/min
Zone.2 (22%)	42.5 ℓ/min
Zone.3 (10%)	19.3 ℓ/min
Zone.4 (8%)	15.44 ℓ/min

Table 5 Material properties for 2-D heat transfer analysis for bloom casting^(9,10)

Parameter	Symbols	0.187%C
Thermal conductivity	W/m-K	Ref. Fig. 7
Specific heat	J/kg-K	Ref. Fig. 8
Density	Kg/m ³	Ref. Fig. 9
Latent heat	J/kg	2.72×10 ⁵
Solid temperature	℃	1482.6
Liquid temperature	℃	1513.9
Pouring temperature	℃	1584

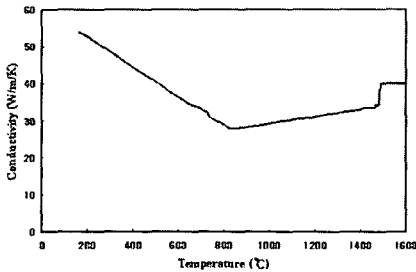


Fig. 7 Thermal conductivity as function of temperature for 0.178%C carbon steel

본 연구에서 2 차 냉각대의 각 Cooling system 영역별 분배되어지는 물량은 현장 조업조건을 바탕으로 배분하였다. 각 영역별 Cooling water 량은 Table 4 에 나타내었다.

3.3 계산 결과

2 차 냉각대에서의 냉각패턴이 응고 현상에 미치는 영향을 알아보기 위해서 Table 4 의 zone 별 냉각수량을 사용하여 온도해석을 수행하였다. 온도해석을 위한 각 주편의 재료 물성치는 Table 5 에 나타냈으며 탄소강의 경우 열전도도, 비열, 밀도는 Fig. 7~9 에서 온도의 함수로 나타내었다.

온도해석을 위한 1/4 모델(Fig. 10(a))의 Mesh 는 Fig. 10(b)에 나타낸 것이다. 이때 사용한 노드 수

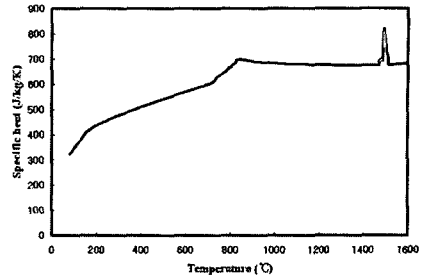


Fig. 8 Specific heat as function of temperature for 0.178%C carbon steel

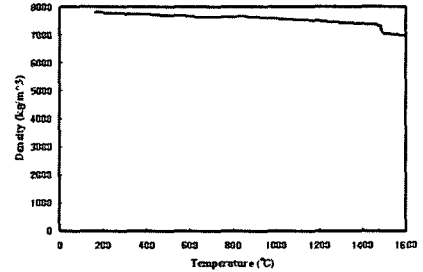


Fig. 9 Density as function of temperature for 0.178%C carbon steel

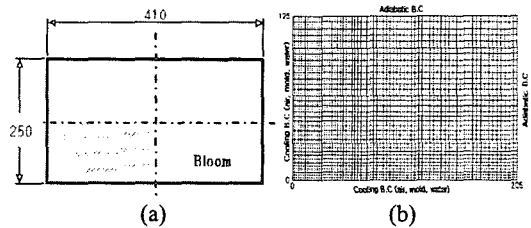


Fig. 10 (a) Model, (b) Mesh for heat transfer analysis

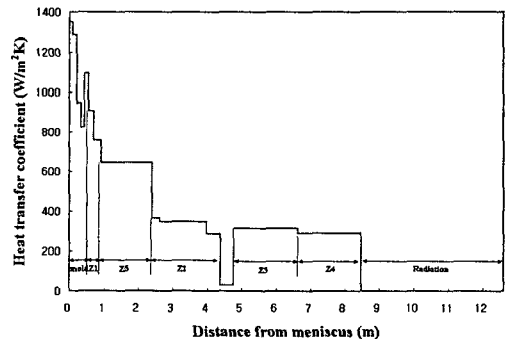


Fig. 11 Variation of heat transfer coefficient from meniscus at the conditions of $T_{pour}=1584^{\circ}C$ and $V=0.5$ m/min for 0.187%C carbon steel at left and right side

는 2450 개이며 온도 계산이 정밀하게 계산되어야 하는 부분에는 Mesh 간격을 줄여서 계산하였다.

Fig. 11 은 주속이 0.5m/min 일 때, 각 Cooling zone 영역에서 탄소강의 대류열전달 계수 변화를

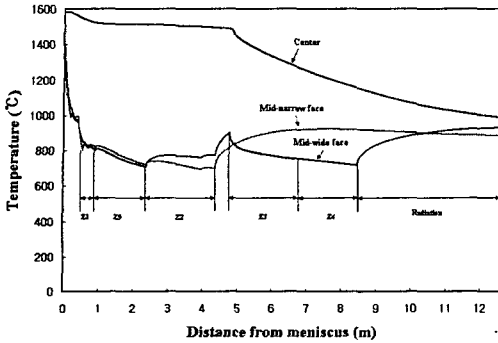


Fig. 12 Temperature profiles along the center line and mid face surface of left side bloom at the conditions of $T_{pour}=1584\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $V=0.5\text{ m/min}$ for 0.187%C carbon steel.

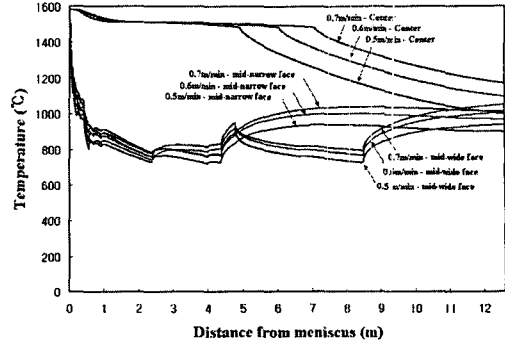


Fig. 14 Temperature profiles along the center line and mid face surface of left side bloom at the conditions of $T_{pour}=1584\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $V=0.5\text{ m/min}$ for 0.187%C carbon steel

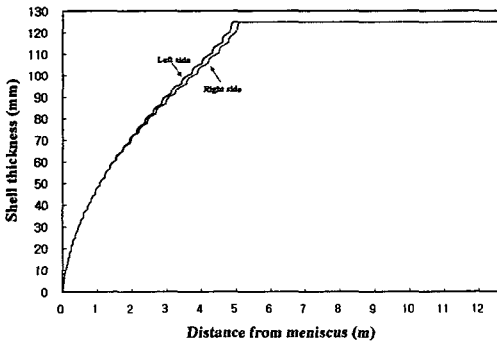


Fig. 13 The variation of bloom shell thickness of 0.187%C carbon steel at the velocity 0.5 m/min

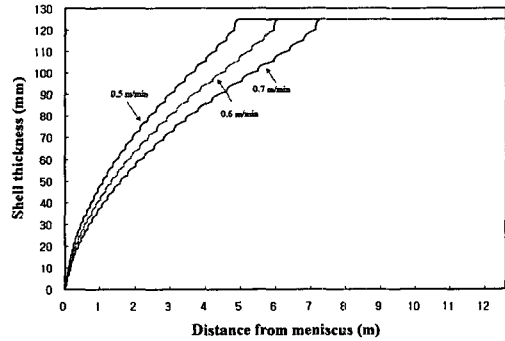


Fig. 15 The variations of bloom shell thickness of 0.187%C carbon steel at the velocity of 0.5, 0.6, 0.7 m/min

나타낸 것이다. Fig. 12 는 Fig. 11 의 대류 열전달 계수를 사용하여 0.187%C 탄소강의 온도 해석을 수행하였을 때의 Left side bloom 의 중심(Center)과 표면(Mid-narrow face, mid-wide face)의 온도 변화를 나타낸 것이다. 이때 탄소강의 응고 완료점은 5 m 에서 생성되었다. 그러나 연주기 전체 길이가 12.6m 인 것을 고려하면 5m 의 응고 완료점은 너무 짧은 것으로 사료되며, 이 원인은 2 차 냉각대의 초기 Cooling system 에서 강냉을 유지한 결과 때문이다.

Fig. 13 은 주속이 0.5m/min 일 때 Left side 와 Right side 쪽의 응고셀의 두께 변화를 나타낸 것이다. Right side 쪽의 응고셀이 약 0.2m 정도 늦게 응고가 되는 것을 알 수 있다. 이것은 Right side 쪽에 EMS(Electric Magnetic Stirring)가 설치되어 있어 스프레이가 Left side 쪽보다 작아 냉각능력이 떨어졌기 때문이다. 그리고 Right side 쪽의 응고 해석시 EMS 효과는 고려하지 않았다.

Fig. 14 는 주속이 0.5, 0.6, 0.7 m/min 일 때, 각 주속에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. 주속이 증가함에 따라서 전반적인 온도 분포가 상승하는

것을 알 수 있으나, 여전히 1~2.3m 부근에서 탄소강의 취성영역인 700~900°C 을 지나는 것을 알 수 있다. 또한 Pinch roll #1 부근(4.38~4.78m)에서의 주속이 0.5, 0.6, 0.7m/min 으로 변할 때 복열은 126.73, 125.9, 124.7°C 로 감소하는 것을 알 수 있다. 주변의 온도가 취성영역을 통과하는 것을 방지하고 Pinch roll #1 부근에서의 복열량을 줄이기 위해서는 Cooling zone 2 에서 완냉을 유지하고 설비의 추가 설치가 가능하다면 Pinch roll #1 부분에 노즐을 추가하여 복열량을 줄일 필요가 있다.

Fig. 15 는 탄소강의 주속이 0.5, 0.6, 0.7m/min 일 때 응고 셀 변화를 나타낸 것이다. 이때 각 주속에 따른 응고완료점을 각각 4.9, 6, 7.2 m 였다

Fig. 16 은 탄소강이 비수량 0.48 l/kg 으로 연주될 때 단위면적당 단위시간 당 주입되어지는 냉각수 밀도를 나타낸 것이다. 응고 초기에 충분한 응고셀을 생성시키기 위해서 Cooling zone 1 에서 가장 많은 물량으로 냉각하는 것을 알 수 있으며 점차 Cooling zone 5, 2 를 지나면서 냉각수

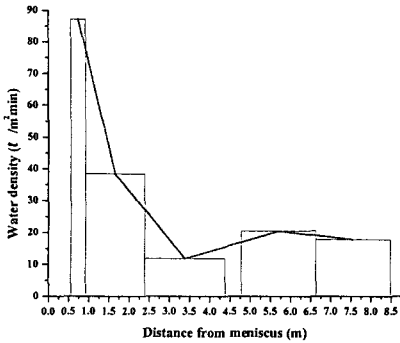


Fig. 16 Distributions of water density along distance from meniscus (m)

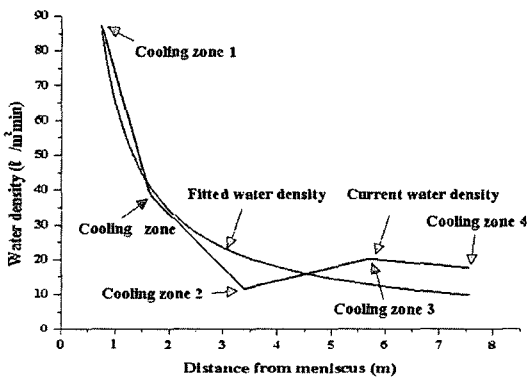


Fig. 17 Difference between target water density and current water density along distance from meniscus

밀도는 급격히 감소함을 알 수 있다. 이렇게 감소되어진 냉각수 밀도는 Cooling zone 3 을 지나면서 다시 상승하다 Cooling zone 4 에서 다시 감소하는 것을 알 수 있다.

일반적으로 연주 설계 시 물량은 다음 식과 같은 형태를 가지도록 설계한다.⁽⁹⁾

$$\dot{W} = aX^b \quad (11)$$

여기서, a = 64.97919, b = -0.92278

식 (11)의 상수 a 와 b 를 결정하기 위해서 Fig. 16 의 냉각수 밀도값에 Fitting 시켰다. Fitting 되어진 곡선(Fitted water density)은 Fig. 17 에 Fig. 16 의 냉각수 밀도 그래프(Current water density)와 함께 나타내었다. Fitting 되어진 곡선에서 알 수 있듯이 냉각 초기에는 강냉이로 충분한 응고셀을 생성하도록 하였으며 뒤쪽에는 약냉이로 냉각을 완료하는 것을 알 수 있다. 이렇게 Fitting 된 곡선과 현재 사용중인 냉각수 밀도 그래프와 비교해보면, Cooling zone 1 과 5 에서는 거의

차이가 없으므로 이 부분의 물량은 어느 정도 타당성을 가진다고 볼 수 있다. 그러나 Cooling zone 2 부분에서는 Fitting 곡선보다 낮은 값을 가진 것을 알 수 있다. Cooling zone 2 에서 적절한 냉각 패턴을 유지하기 위해서는 이 부분에 물량을 증가시켜줘야 하지만 이 부분의 물량을 증가하면 Pinch roll #1 부분의 복열량이 증가하므로 오히려 Bloom 의 표면이나 내부에 크랙을 유발 시킬 수 있다. 따라서 현재 연주기의 Pinch roll #1 부근에서의 추가적인 노즐 설치가 없다면 Cooling zone 2 에서 현재보다 낮은 물량을 유지시켜 복열량을 좀더 낮추는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

Cooling zone 3, 4 에서는 Cooling zone 2 와는 달리 물량이 과도하게 공급되고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 12 의 Bloom 의 표면 온도에서 보면 Bloom 이 복열 된 이후 Cooling zone 3 과 4 에서 급격하게 냉각되어지는 것을 알 수 있다. 또한 Bloom 의 side 면에서는 Cooling zone 2 이후로 추가 Cooling zone 이 존재하지 않으므로 인하여 복열이 과도(약 218°C)하게 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 Cooling zone 3, 4 의 물량을 줄이고 추가적으로 Bloom 의 Side 쪽에 새로운 Cooling zone 의 설치가 바람직할 것으로 사료된다.

4. 결론

Bloom 연주기를 대상으로 1, 2 차 냉각대에서의 응고거동을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 폴드의 열전달 계수를 측정 결과, 저속일 때의 기준 문헌의 결과와 비슷한 경향을 나타내었다.

(2) 0.187%C 의 2 차 냉각대의 냉각 패턴과 그 효과를 알아보기 위해서 응고해석을 수행하였다. 그 결과 일반적인 연주 냉각패턴과는 다른 형태를 유지하고 있음을 알 수 있었다. 이 이유는 Pinch roll #1 부분의 복열량 문제 때문으로, 향후 품질 개선 및 보다 신속적인 냉각조건 선택을 위해서 이 부분에 추가적인 냉각대의 설치가 필요할 것으로 사료된다.

(3) 연주기의 냉각대의 길이 8.5m 를 고려할 때, 계산된 고탄강(≥ 0.17)의 응고 완료점은 5m 로 응고가 빨리 진행되는 것을 알 수 있다. 이 원인은 초기 냉각대에서의 강냉이 기인하는 것으로 사료된다. 따라서 고탄강의 경우 과도한 냉각은 크랙 발생 여지를 높이는 원인이 될 수

있기 때문에 초기 냉각대의 냉각패턴 조정이 필요할 것으로 사료된다

(4) 본 연구에서 해석한 수직형 타입의 Bloom 연주기에서는 응고 완료점과 2 차 냉각대를 비교할 때 최대 0.7 m/min 까지는 무리없이 연속주조가 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Samarasekera, I. V., 1979, "The Thermal Field in Continuous Casting Moulds," *Canadian Metall. Quaterly*, Vol. 18, p. 251.
- (2) Ray C. Johnson, 1980, "Optimum Design of Mechanical Elements," *A Wiley-Interscience Publication*, pp. 69~85.
- (3) Garret N. Vanderplaats, 1984, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design," McGraw-Hill Book Company, pp. 140~147.
- (4) David G. Luenberger, 1984, "Linear and Nonlinear Programming," ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, pp. 256~279.
- (5) Son, B. J., Meang, J. S., Won, S. H., Choi, S. K. and Cho, K. H. 1988, "Design of Maximum Lift Airfoil in Viscous, Compressible Flow," *J. of KSME*, Vol. 12, pp. 106~115.
- (6) Samarasekera, I. V. and Brimacomb, J. K., 1984, "The Continuous Casting Mould," *Continuous Casting*, Vol. 2, pp. 33~44.
- (7) Saucedo, I., Beech, J. and Davies, G. J., 1982, *Metals Technology*, July, Vol. 9, pp. 282~290.
- (8) 三塚, 1968, "連続スラブの凝固過程にとよぼす 2次スプレ-冷却の影響", *鐵 と 鋼*, Vol. 54, No. 14, p. 1457.
- (9) Private communication with POSCO
- (10) 1991, *Metal Handbook Desk Edition*, American Society for Metals, pp. 1-66~1-67.