

Bloom type 연주기의 냉각패턴 평가를 위한 응고해석

정영진*·김영모***·조기현****·강충길**

Solidification Analysis for Evaluation of Cooling Pattern in Bloom Type Continuous Caster

Y.J. Jung, Y.M. Kim, K.H. Cho, and C.G. Kang

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 shows the characteristic of heat transfer mechanism in mold are calculated for more exact analysis with temperatures measured in bloom mold using optimal algorithm, and finally the validity of cooling conditions at secondary cooling zone which is 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 good agreements with that of previously studies by other authors and optimized cooling conditions for 0.187%C are presented.

Key Words : Bloom, Continuous caster, Solidification analysis, Cooling pattern, 0.187% carbon Steel

1. 서론

연주기의 설계 및 제작 기술은 주로 일본, 유럽 등에서 1973년 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 연속주조법을 그 바탕으로 두고 있으며 연속주조법에 관해서는 이미 많은 연구논문들이 발표되어 있기 때문에 설비를 설계하는 기본 계획 및 방향은 설정할

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계공학부

*** RIST 제련공정연구팀

**** RIST 환경·에너지부 에너지연구팀

수 있으나, 실제조업 데이터의 뒷받침 없는 이론적인 해석만으로는 생산품의 품질 안정 및 수익성 증대를 위한 조업조건 확립을 위한 신뢰성 확보에는 어려울 것으로 사료된다.

수익성 증대를 위해서는 생산량 증대를 위한 고속화가 불가피하며, 고속주조시 야기될 수 있는 Break out이나 생산품의 품질 악화, 조업 불안정화 등을 방지하기 위해서는 1, 2차 냉각조건의 적정화가 필수적이다.

2. 1차 냉각대의 전산거동해석

2.1 1차원 온도해석

연속 주조에 있어서 주편과 몰드 사이의 전열현상은 주편의 표면 결함, 주편터짐 등과 밀접한 관계가 있는 품질 및 조업상의 중요한 인자이다. 따라서 Bloom의 연속주조시 몰드내에서 발생되어지는 열전달 현상을 정확히 예측하는 것이 아주 중요하다.

몰드내 열전달 현상을 모사하기 위해서 본 연구에서 30톤 연주기 몰드내에 직접 열전대를 꽂아 몰드내 온도를 측정하였으며, 최적화 알고리즘을 사용하여 측정온도로부터 Bloom과 몰드 사이의 대류 열전달 계수를 구하였다. 몰드내의 1차원 전열해석을 위해서 유한차분법을 이용하였다. 1차원 온도해석을 위한 정상상태 지배 방정식은 다음과 같다.

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

여기서, T : 온도(°C), q_m : Mold 영역의 열량벡터

1차원 온도해석을 위한 개략적인 mesh분할은 Fig.1에 나타내었으며 계산을 위한 조건은 Table.1에 나타내었다.

2.2 대류열전달 계수 계산

Bloom과 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 몰드내에서의 열전달은 용탕과 냉각수와의 온도 차로 인하여 주조방향보다는 두께 방향의 열전달이 우세하다. 따라서 두께방향의 열전달만을 고려하여 1차원으로 계산하였다.

이상의 가정을 바탕으로 최적화 알고리즘을 사용하여 대류열전달계수(h_m)을 구하기 위해서 열전대를 사용하여 몰드의 온도(T_m)를 측정하였으며, 측정을 위한 위치는 Fig.2에 나타내었다. 이렇게 측정되어진 데이터와 1차원

FDM으로 계산되어진 온도와의 차의 제곱합을 최소화 알고리즘의 목적함수(F)로 표현하였다.

$$F = (\text{몰드의 측정온도}(T_m) - 1\text{차원FDM온도해석})^2 \quad (2)$$

식(2)의 목적함수를 최소화하기 위해서 D.F.P (DAVIDON-FLETCHER-POWELL METHOD)를 사용하였다.

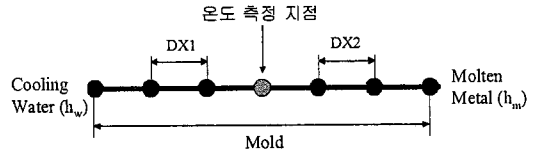


Fig. 1 Schematic illustration of mesh and position of temperature measured by thermocouples for 1D FDM analysis

Table 1 Conditions for 1D heat transfer analysis

Conditions	0.187% Carbon steel
1. Casting velocity(m/min)	0.5
2. Mold length(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^2K)	22500 ⁽¹⁾
7. Water temperature(°C)	20

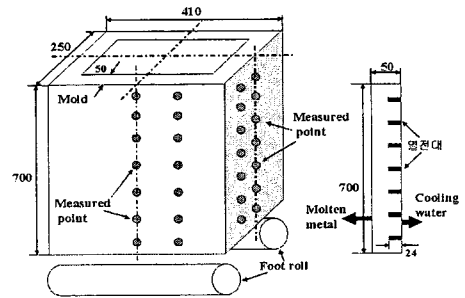


Fig. 2 Schematic illustration for measuring temperature of mold with thermal couples

Fig.3는 기존 문헌에서 연구되어진 주속에 따른 몰드 위치 별 열유속량을 나타낸 것이다. 주속이 고속일 경우는 상부에서 대부분의 열량이 몰드로 흡수되어지고 몰드 하부로 내려갈수록 열유속량이 급속히 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 주속이 저속일 경우, 분포 형상은 고속과 비슷하지만 몰드에 흡수되어지는 열유속량이 전반적으로 고르게 되고, 고속의 열유속 형태와는 달리 몰드 하부에서 열 유속량이 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 주속이 0.5 m/min로 저속인 경우에

대해서 몰드의 온도를 측정하였다. 본 연구에서 측정한 측정 결과(Fig.4)와 기존 문헌의 저속 데이터(Fig3)와 비교하면 비슷한 양상을 띄는 것을 알 수 있다.

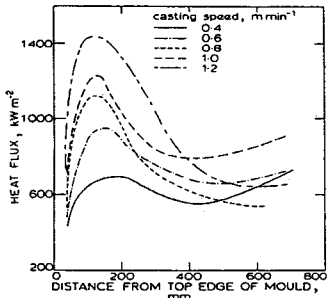


Fig. 3 Mold heat flux as function of distance from top of mold for different casting speeds

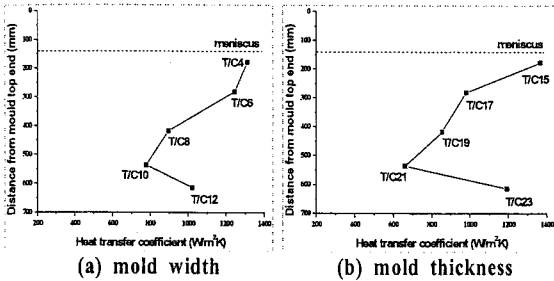


Fig. 4 Convective heat transfer coefficient profile of 0.187% carbon steel at the center of width and thickness mold faces

3. Bloom의 2차원 응고해석

3.1 지배 방정식

2차원 온도해석을 위한 비정상상태 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, C_b : Bloom의 비열 (J/kg°C), ρ_b : Bloom의 밀도 (kg/m³), T : 온도 (°C), t : 시간(sec), K_b : Bloom의 열전도율(W/mK), q_b : Bloom 영역의 열량벡터

연주시 응고층내 미응고 용강 및 Mushy zone에서의 열전달은 침지 노즐을 통해 주형으로 주입되는 주입용강류에 의한 난류혼합의 영향과 용강온도구배에 의한 자연대류의 영향으로 매우 복잡하다. 이와 같이 복잡한 전열현상을 단순화하기 위해 용강의 대류에 의한 전열량을 보상하고자 유효 열전도도(K_e)⁽²⁾의 개념을 도입하였다.

$$K_e = K_b(1 + 6f_L^2) \quad (4)$$

여기서, f_L 는 용강의 액상분률, K_b 는 Bloom의 고상에서의 열전도도

3.2 경계 조건

몰드로부터 2차 냉각대를 걸쳐 Bloom이 지날 때 외부 냉각에 의해 응고가 진행된다. 이와 같은 냉각을 경계조건을 식(4)에서 고려하여야 한다. 몰드 및 2차 냉각대에서 의 냉각조건을 분류하면 다음과 같다.

(1) 몰드

$$q = h_m(T_m - T_s) \quad (5)$$

여기서, T_s : Bloom의 표면온도, T_m : 몰드 온도

(2) 2차 냉각대

① 복사 냉각대

$$q = \alpha \epsilon (T^4 - T_{sur}^4) \quad (6)$$

② Water spray cooling

Water spray cooling에 있어서 열전달계수 h_w 는 POSCO에서 제안한 수정된 三塚⁽³⁾의 식(7)을 사용하여 계산하였다.

$$h_w = 1.57 W^{0.33} (1 - 0.0075 T_w) \quad (7)$$

여기서, W : 냉각수 밀도 (ℓ/m²min)

(3) 총 냉각수량 결정

2차 냉각대의 cooling system 별 냉각수량 (ℓ/min)을 결정하기 위해서는 총 냉각수량을 결정하여야만 한다. 총 냉각수량을 결정하기 위해서는 2차 냉각대에 공급되어지는 비수량(ℓ/kg)을 알아야 한다. 본 연구에서 0.187%C강에 사용한 비수량은 0.48 ℓ/kg로 설정하였으며 이 비수량으로부터 도출된 총 냉각수량은 193(ℓ/min)이다. 2차 냉각대의 각 cooling system영역별 분배되어지는 물량은 현장 조업조건을 바탕으로 배분하였다.

3.3 계산 결과

2차 냉각대에서의 냉각패턴이 응고 현상에 미치는 영향을 알아보기 위해서 Table.3의 zone별 냉각수량을 사용하여 온도해석을 수행하였다. Fig.5는 온도해석을 위한 1/4모델의 mesh를 나타낸 것이다.

Fig.6은 주속이 0.5, 0.6, 0.7 m/min일 때, 각 주속에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. 주속이 증가함에 따라서 전반적인 온도 분포가 상승하는 것을 알 수 있으나, 1~2.3m 부근에서 탄소강의 취성영역인 700~900°C를 지나는 것을 알 수 있다. 또한 Pinch roll#1 부근(4.38~4.78m)에서의 주속이 0.5, 0.6, 0.7m/min으로 변할 때 복열은 126.7, 125.9, 124.7°C로 감소하는 것을 알 수 있다. 주변의 온도가 취성영역을 통과하는 것을 방지하고 pinch roll #1 부근에서의 복열량을 줄이기 위해서는 Cooling zone 2에서 완냉을 유지하고 설비의 추가 설치

가 가능하다면 pinch roll #1부분에 노즐을 추가하여 복열량을 줄일 필요가 있다.

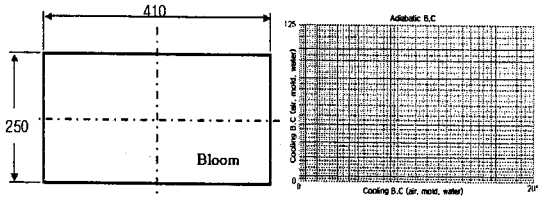


Fig. 5 Model and mesh for heat transfer analysis

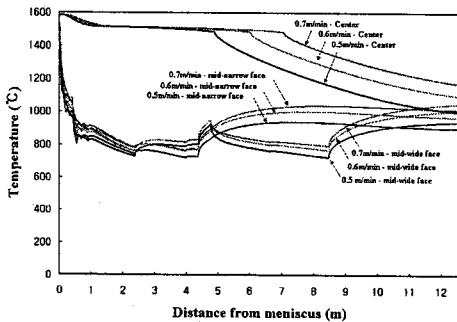


Fig. 6 Temperature profiles along the center line and mid face surface of bloom at the velocity of 0.5, 0.6, 0.7 m/min for 0.187% C

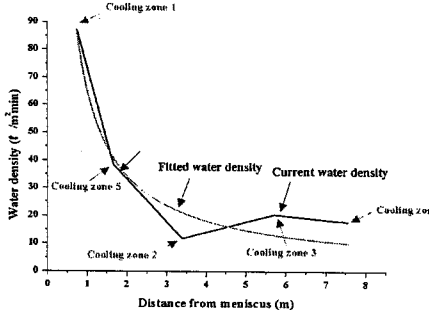


Fig. 7 Difference between target water density and current water density along distance from meniscus

일반적으로 연주 설계시 물량은 다음 식과 같은 형태를 가지도록 설계한다⁽⁴⁾.

$$W = aX^b \quad (8)$$

식 (8)은 상수 $a(=65)$ 와 $b(=-0.92)$ 를 결정하기 위해서 각 cooling zone의 냉각수 밀도값에 fitting 시켰다. Fitting 되어진 곡선은 Fig. 7에 냉각수 밀도 그래프와 함께 나타내었다. Fitting 되어진 곡선에서 알 수 있듯이 냉각 초기에는 강냉이로 충분한 응고열을 생성하도록 하였으며 뒤쪽에는 약냉이로 냉각을 완료하는 것을 알 수 있다. 이렇게 fitting된 곡선과 현재 사용중인 냉각수 밀도 그래프와 비교해보면, cooling zone 1과 5에서는 거의 차이가 없으므로 이 부분의 물량은 어느정도 타당성을 가진다고 볼 수 있다. 그러나 cooling zone 2부분에서는

fitting 곡선보다 낮은 값을 가진 것을 알 수 있다. Cooling zone 2에서 적절한 냉각 패턴을 유지하기 위해서는 이 부분에 물량을 증가시켜줘야 하지만 이 부분의 물량을 증가시키면 pinch roll #1 부분의 복열량이 증가하므로 오히려 bloom의 표면이나 내부에 크랙을 유발시킬 수 있다. 따라서 현재 연주의 pinch roll #1 부분에서의 추가적인 노즐 설치가 없다면 cooling zone 2에서 현재보다 낮은 물량을 유지시켜 복열량을 좀더 낮추는 것이 바람직할 것으로 사료된다. Cooling zone 3, 4에서는 cooling zone 2와는 달리 물량이 과도하게 공급되고 있는 것을 알 수 있다.

4. 결론

Bloom 연주를 대상으로 1, 2차 냉각대에서의 응고 거동을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 몰드의 열전달 계수를 측정 결과, 저속일 때의 기준 문헌의 결과와 비슷한 경향을 나타내었다.
- (2) 0.187% C의 2차 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 #1부분의 복열량 문제 때문으로, 향후 품질 개선 및 보다 신속적인 냉각조건 선택을 위해서 이 부분에 추가적인 냉각대의 설치가 필요할 것으로 사료된다.
- (3) 연주의 냉각대의 길이 8.5m를 고려할 때, 계산된 고탄강(≥ 0.17)의 응고완료점은 5m로 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.

참고 문헌

- (1) Samarasekera, I. V., 1979, "The Thermal Field in Continuous Casting Moulds", Canadian Metall. Quarterly, Vol. 18, pp.251
- (2) Saucedo, I., Beech, J., Davies, G. J., 1982, "Heat transfer and solidification kinetics in meniscus zone during casting", Metals Tech., Vol.9, pp.282
- (3) 三塚, 1968, "連続スラブの凝固過程にどよぼす2次スプレ-冷却の影響", 鐵と鋼, Vol.54, No.14, pp.1457
- (4) Private communication with POSCO