

연속 주편의 응고와 벌징해석에 관한 연구

하종수* · 조종래** · 이부윤*** · 하만영****

Study for Solidification and Bulging of the Continuous Casting Slab

J.S. Ha, J.R. Cho, B.Y. Lee and M.Y. Ha

Abstract

In this paper, we analyzed bulging condition which affect the quality of continuous casting steel by using the numerical analytic method. First, solidification analyses are performed for each cooling zones. Solidification analysis are carried out by one-dimensional finite difference method. The bulging deformation of cast slab has been calculated with a two-dimensional elasto-plastic and creep finite element model. The adequacy of the model has been checked against the experimental results. From this study the effects of the process variables such as casting speed, cooling condition, roll pitch are examined. The results from these analyses would be able to apply to the design of continuous casting process.

Key Words : Continuous Casting, Bulging, Process Variables, Creep, Design

1. 서 론

연속주조는 기존의 제철공정에 비해 제품원가가 절감되고, 생산공정을 대폭 줄여 생산성을 향상시킬 수 있으며, 열효율도 높일 수 있기 때문에 비약적으로 연구, 발전해 왔다. 연속주조에 의해 생산된 강의 품질은 주조 속도, 냉각 조건, 롤배치 등의 영향을 많이 받는다. 이들 공정변수의 영향을 평가하고 문제점을 개선함으로써 생산 강재의 품질을 향상시킬 수 있고 이러한 노력은 실험적 방법과 수치해석적 방법으로 진행되고 있다. 수치해

석적 방법은 모든 지점에 대한 자료를 얻을 수 있고 측정이 불가능한 변수들의 영향도 파악할 수 있다는 장점이 있다. 연속주조 설비를 설계하는데 있어 몰드 아래쪽의 응고열의 응고해석, 벌징해석과 열응력해석, 물의 구속해석, 2차 냉각대에 관한 해석이 필수적으로 수행되어야 한다. 특히 폭 방향으로 작용하는 철정압에 의한 롤 사이 주편의 부풀림 현상인 벌징(bulging)은 연주 주편의 품질에 미치는 영향이 매우 크다. 이러한 배경하에서 본 연구는 연속주조 공정의 최적화 과정에서 반드시 요구되는 2차 냉각 구간에서의 응고 및 응력 해석을 위

* 한국해양대학교 기계공학과 대학원
** 한국해양대학교 기계정보화학부
*** 계명대학교 자동차공학부
**** 부산대학교 기계공학부

한 수치해석적 접근법을 다루었다. 주형에서의 1차 냉각과 주형 이후의 물접촉, 물분사 (spray), 복사에 의한 2차 냉각을 고려하여 응고해석을 하였고, 연주 주편의 온도 분포 및 응고층 두께 등의 데이터를 이용하여 유한요소해석 프로그램으로 주편의 벌징해석을 수행하였다.

본 연구를 통하여 연속주조설비에서 생산되는 제품의 품질에 영향을 미치는 여러 공정 변수의 영향을 파악함으로써 실제 설비설계 적용시 주편 품질을 향상시킬 수 있는 최적의 공정변수를 예측하는데 그 목적이 있다.

2. 응고해석

2.1 기본방정식

연속주조로 생산되는 주편은 여러 냉각 구간을 거치는 동안 표면 부분이 900~1000℃ 정도의 높은 온도로 유지된다. 이러한 주편의 거동을 해석하기 위해서는 고온에서의 강의 물성치를 필요로 하기 때문에 정확한 응고해석이 필수적으로 요구된다. 본 연구의 응고해석에 사용한 주편 크기 및 설비의 주요 사양은 Table 1과 같고 사용한 강재는 0.08%C 탄소강이다. 주편의 폭 대 두께의 비가 3:1 이상인 경우의 응고해석에서는 1차원 해석으로도 비교적 정확하게 주편의 온도 분포와 응고층의 두께를 파악할 수 있기 때문에⁽¹⁾ 1차원의 비정상상태 열전도 방정식을 적용하였다.

Table 1 Numerical data used for solidification of slab

Parameters	Values	Units
Half Slab Thickness	125	mm
Slab Width	1650	mm
Mold Length from Meniscus	800	mm
Casting Speed	1.4, 2.0	m/min
Length of Roll Contact	5	mm
Emissivity of Slab Surface	0.9	
Cooling Water Temperature	30	℃
Specific cooling water	0.45, 0.73	ℓ/kg

2.2 냉각구간에서의 열전달 경계조건

1차 냉각으로 물드부분에서의 냉각은 다음 실험식의 열전달계수값을 이용하였다⁽²⁾.

$$h_m(t) = ae^{-t} + be^{-t/n} + c \quad (1)$$

2차 냉각부분은 Fig.1과 같이 세 영역으로 구분하여 각각의 영역에 따라 다음의 열전달계수 관계식을 적용하였다.

분사냉각구간

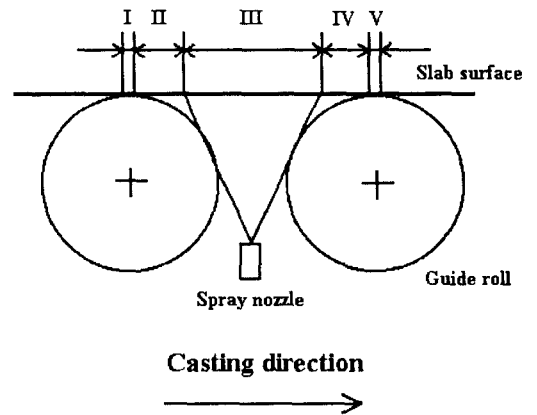
분사에 의한 냉각은 물분사와 물과 공기에 의한 냉각방식이 있다. 본 연구에서는 물과 공기에 의한 냉각을 적용하였으며 실험식은 다음과 같다⁽³⁾.

$$h_a = 10^{1.48} T_s^{-0.1358} \dot{W}^{0.6293} V_a^{0.2734} \quad (2)$$

복사냉각구간

$$-k \frac{dT}{dx} = h_r(T_s - T_a) \quad (3)$$

여기서, h_r 은 등가의 열전달계수이고 T_a 는 주변온도이다.



- I, V : Contact with roll
- II, IV : Radiation
- III : Spray cooling

Fig. 1 Classification of secondary cooling zones

물접촉 냉각구간

물과 주편의 접촉 길이는 물직경에 관계없이 5mm로 하여 계산하였고 열전달계수값은 다음의 값을 사용하였다⁽⁴⁾.

$$h_{roll} = 2500 \text{ (J/m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{K)}$$

2.3 열전달해석결과

Fig. 2은 주속이 1.4, 2.0 m/min 일 때, 주변표면온도와 중심에서의 온도 분포를 나타내고 Fig. 3는 응고셀 생성양상을 나타낸다. 주속이 1.4 m/min에서 주변의 응고는 Meniscus로부터 35.6 m인 지점에서 완전히 끝났으며 장냉조건인 경우 이보다 앞서 33.5 m인 지점에서 응고가 끝났다.

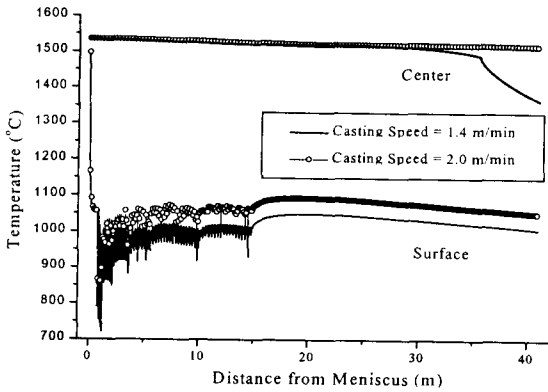


Fig. 2 Temperature distribution of slab

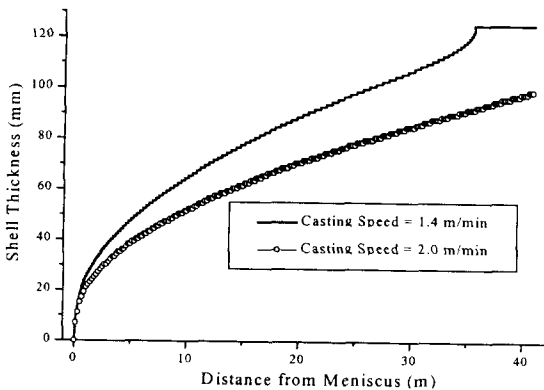


Fig. 3 Variation of solidified shell thickness

3. 별징해석

주변의 역학적 거동에 있어 별징 현상은 주변 파단과 주변 균열 발생등 주변 품질에 직접적으로 영향을 미치

기 때문에 매우 중요하다. 본 연구에서의 가로 대 세로의 비가 큰 제품의 경우 최대 변형이 주변의 단면 구석에 의해 구속을 받지 않는다고 보아도 무방하기⁽⁵⁾ 때문에 2차원 모델을 도입하여 최대 변형량을 예측하였다. 주변의 움직임은 고려하지 않았고 각 구간의 주변 온도 분포 및 응고층 두께는 응고 해석에서 계산된 값을 이용하였다. 각 구간에서의 응고셀과 지지물의 유한요소망은 Fig. 4와 같다. 주변의 양 끝단은 x 방향 변위를 구속하고 롤은 완전 고정의 구속조건을 적용하였고 주변의 폭 방향으로 변형은 없는 것으로 하여 평면변형률 조건을 부가하여 계산하였다. 본 연구에서의 해석 모델은 탄소성과 크리프변형을 모두 고려한 모델을 사용하였으며 탄성계수, 항복응력 등의 물성치는 Table 2에 나타낸 것과 같다.

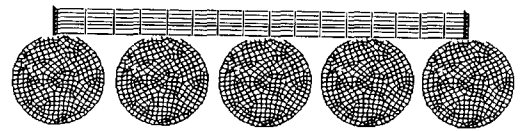


Fig. 4 A finite element model of the slab and rollers

Table 2 Material properties at high temperature⁽⁶⁾

Young's Modulus [MPa]	$E = 1.96 \times 10^4 - 18.375(T-1000)$ for $1000^\circ\text{C} < T < 1400^\circ\text{C}$
	$E = 1.225 \times 10^4 (1475-T)/75$ for $1400^\circ\text{C} < T < 1475^\circ\text{C}$
	$E = 0$ for $T > 1475^\circ\text{C}$ in $1 \times 10^{-4} \leq \epsilon \leq 3 \times 10^{-1}$
Yield Stress [MPa]	$\sigma_y = 66.15 - 4.655 \times 10^{-2}T$ for $1000^\circ\text{C} < T < 1200^\circ\text{C}$
	$\sigma_y = 54.39 - 3.675 \times 10^{-2}T$ for $1200^\circ\text{C} < T < 1480^\circ\text{C}$
	$\sigma_y = 0$ for $T > 1480^\circ\text{C}$
Poisson's Ratio	0.33

3.1 크리프특성식의 결정

문헌들^(5,7,8)에서 제시된 여러 가지의 크리프 특성식들을 사용하여 별징 해석을 수행하고 크리프 측정치⁽⁹⁾와 비교하여 별징 해석시에 적용할 크리프 특성식을 결정하

였다. 여러 특성식의 해석결과와 실험결과를 비교하여 Fig. 5에 나타내었으며 그 결과 문헌(7)의 크리프식이 가장 타당한 것으로 나타났다.

3.2 주조 속도의 영향

3.2.1 주조 속도의 영향

직선(straightener)구간에서의 주속 1.4와 2.0 m/min 일 때의 최대 벌징량은 주속 1.4 m/min인 경우 0.22mm였고, 주속 2.0 m/min인 경우 0.7mm였다. 주조 방향의 변형을 분포 양상은 주편의 응고계면의 경우, 지지물이 있는 지점에서는 인장 변형이 발생하고 물 사이에서는 압축 변형이 발생함을 알 수 있으며 표면은 이와 반대의 양상을 나타내는 것을 알 수 있다.

3.2.2 롤 피치의 영향

연속주조에 있어 롤의 배치는 매우 중요하며 여기서는 실제 연주기의 롤 피치와 롤사이 간격을 150%와 200%를 각각 증가시켰을 때의 결과를 비교하였다. Fig. 6은 각 경우의 벌징량 분포를 나타내며 그 최대값은 각각 0.22, 5.6, 42.3mm였다. Fig. 7은 각 경우의 주조방향변형을 나타내며 그 양상은 앞서 설명한 것과 같다.

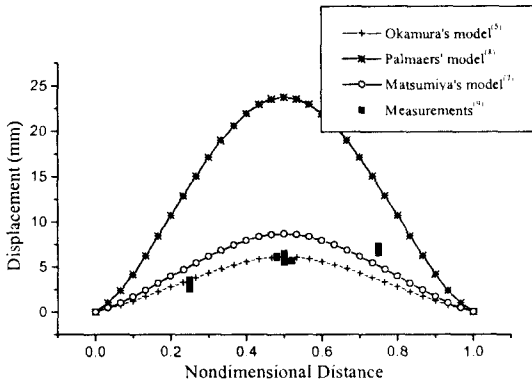


Fig. 5 Measured and calculated displacement from analyses using various creep formulas [Ferro_pressure=0.274MPa, Surf_temp=1300℃, Cast_speed=0.85m/min, Shell thickness=79mm, Roll pitch=860mm]

3.2.3 냉각 조건의 영향

냉각 조건이 다른 두 경우에 대한 해석결과 강냉인 경

우 최대벌징량이 0.18mm로 더 작은 값을 얻을 수 있었고 변형을 또한 더 작게 나왔다.

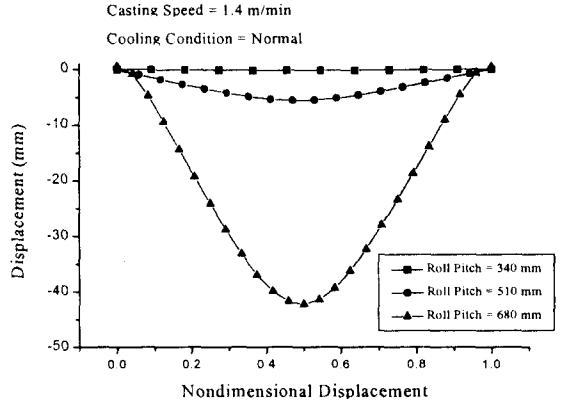


Fig. 6 Deformation of slabs in the straightener roll zone with different roll pitches

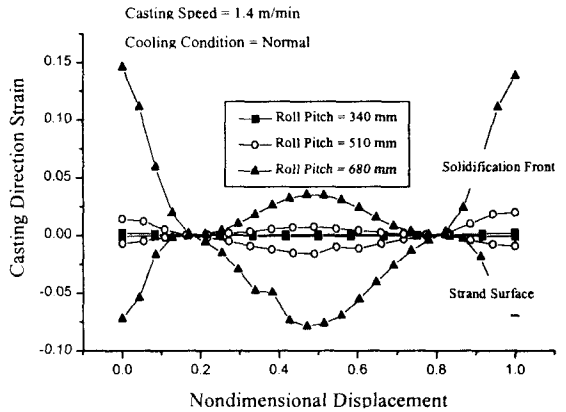


Fig. 7 Strain in the straightener roll zone with different roll pitches

4. 결론

본 연구에서는 연속주조에 있어 주편의 내부 결함의 주요 원인이 되는 벌징 현상을 탄소성과 크리프 변형을 모두 고려하여 유한요소법으로 수치적 해석을 수행하였으며 본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 주편의 응고해석과 벌징해석을 위한 고온 물성치와 경계조건 등의 해석 모델을 확정하였으며 그 모델의 타당성을 확인하였다.

- (2) 주조 속도의 증가에 따라 응고셀 두께가 감소하고 주편의 온도가 상승하는 등의 영향으로 주편의 벌징량과 변형률은 현저히 증가한다.
- (3) 주편의 벌징량 및 주조 방향으로의 변형률은 물 퍼치 변화에 따라 큰 폭으로 변화한다.
- (4) 냉각 조건에 따라 응고 셀과 주편 온도의 변화가 주편 벌징량 및 변형률에 미치는 영향은 무시할 수 없다.
- (5) 주편의 롤 사이 중심 부분이나 지지 롤과 접하고 있는 부분에서 변형률의 절대치는 주편의 표면 부분보다 응고 계면에서 그 값이 더 크다. 이것은 응고 계면에서의 온도가 더 높고 철정압을 직접적으로 받기 때문으로 판단된다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) M. El-Bealy, N. Leskinen and H. Fredriksson, 1995, "Simulation of cooling conditions in secondary cooling zones in continuous casting process," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 22, No. 3, pp.246~255.
- (2) G. Alvarez de Toledo, J. Lainez and J.C. Cirion, 1993, "Model optimization of continuous casting steel secondary cooling," Elsevier Sequoia, pp.287~291.
- (3) 川崎守夫, 渡部忠男, 浜名孝年, 中島敬治, 高島啓行, 播木道春, 1983, "미스트 냉각의 열 전달 특성과 연속鑄片的拔熱舉動," *鐵と鋼*, Vol. 69, S168.
- (4) B. Barber, B. A. Lewis and B. M. Leckenby, 1985. "Finite-element analysis of strand deformation and strain distribution in solidifying shell during continuous slab casting," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 12, No. 4, pp.171~175.
- (5) K. Okamura and H. Kawashima, 1989, "Three dimensional Elasto-Plastic and Creep Analysis of Bulging in Continuously Cast Slabs," *ISIJ International*, Vol.29, No.8, pp.666~672.
- (6) M. Uehara, I. V. Samarasekera and J. K. Brimacombe, 1986. "Mathematical modeling of

unbending of continuously cast steel slabs," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol.13, No. 3, pp.138~153.

- (7) 松宮徹, 梶岡傳幸, 中村泰, 1982, "連續鑄片バル징の數學的解析," *製鉄研究*, No. 310, pp.14951~14957.
- (8) A.Palmaers, 1979, CRM, No.53, p.23.
- (9) K. Wünnenberg and Duisburg-Huckingen, 1978, "Strand bulging between supporting rollers during continuous slab casting," *Stahl u. Eisen*, Vol. 98, No. 6, pp.254~259.