

수치해석을 이용한 연속 주편의 역학적 거동 해석

하종수* , 조종래** , 이부윤*** , 하만영****

A Study for the Mechanical Behavior of the Continuous Casting Slab Using Numerical Analysis

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

ABSTRACT

In this paper, a bulging condition which affect the quality of continuous casting steel was analyzed by using the numerical analytic method. First, solidification analyses were performed for each cooling zone 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 and roll pitch were examined. The results from these analyses would be able to apply to the design of continuous casting process.

Key Words : Continuous Casting(연속주조), Solidification(응고), Bulging(벌징), Process Variables(공정변수), Elasto-plastic(탄소성), Creep(크리프)

1. 서론

연속주조는 기존의 제강공정중 잉곳(ingot)제조에 비해 제품원가가 절감되고, 생산공정을 대폭 줄여 생산성을 향상시킬 수 있으며, 열효율도 높일 수 있기 때문에 비약적으로 연구, 발전해 왔다. 최근 들어 연속주조법이 지닌 이러한 장점을 극대화하기 위해 슬라브의 경우, 주조되는 슬라브의 폭이 더욱 더 넓어져 왔고 더 나아가 빔 블랭크, 박슬라브 등의 연속주조법이 개발되었다. 연속주조에 의해 생산된 강도의 품질은 주조 속도, 냉각조건, 롤배치등의 영향을 많이 받는다. 이들 공정변수의 영향을 평가하고 문제점을 개선함으로써 생산 강재의 품질을 향상시키는데 이러한 노력은

실험적 방법과 수치해석적 방법으로 진행되고 있다. 수치해석 방법은 모든 지점에 대한 자료를 얻을 수 있고 측정이 불가능한 변수들의 영향도 파악할 수 있다는 장점이 있다. 연속주조 설비를 설계하는데 있어 몰드 아래쪽의 응고철편의 응고해석, 벌징해석과 열응력해석, 롤의 구속해석, 2차 냉각대의 해석이 필수적으로 수행되어야 한다. 특히 폭방향으로 작용하는 철정압에 의한 롤 사이 주편의 부풀림 현상인 벌징(bulging)은 연속 주편의 품질에 미치는 영향이 매우 크다. 이러한 배경 하에서 본 연구는 연속주조 공정의 최적화 과정에서 반드시 요구되는 2차 냉각 구간에서의 응고 및 응력 해석을 위한 수치해석적 접근법을 다루었다. 주형에서의 1차 냉각과 주형 이후의 롤접촉, 물분

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

사(spray), 복사에 의한 2차 냉각을 고려하여 응고 해석을 하였고, 연주 주변의 온도 분포 및 응고층 두께 등의 데이터를 이용하여 유한요소해석 프로그램으로 주변의 별징해석을 수행하였다.

본 연구를 통하여 연속주조설비에서 생산되는 제품의 품질에 영향을 미치는 여러 공정 변수의 영향을 파악함으로써 실제 설비설계 적용시 주변 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 같다. 사용한 강재는 0.08%탄소강으로 화학조성 및 고온에서의 물성치는 Table 2에 나타난 것과 같다.

주편의 폭 대 두께의 비가 3:1 이상인 경우의 응고해석에서는 1차원 해석으로도 비교적 정확하게 주편의 온도 분포와 응고층의 두께를 파악할 수 있기 때문에⁽¹⁾ 다음과 같이 1차원의 비정상상태 열전도 방정식을 적용하였다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 T, x, t, α는 각각 온도, 중심에서의 거리, 시간, 열확산계수를 나타낸다.

2.2 냉각구간에서의 열전달 경계조건

1차 냉각으로 몰드부분에서의 냉각은 다음 실험식의 열전달계수값을 이용하였다⁽⁴⁾.

$$h_m(t) = ae^{-t} + be^{-t/n} + c \quad (2)$$

여기서 h_m (kJ/m²·sec·K)은 열전달계수값이고, t는 주편이 몰드부분을 이동하는 시간이며

Table 1 Numerical data used for solidification of slab⁽²⁾

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

Table 2 Chemical compositions and thermophysical properties of steel⁽³⁾

Chemical Comp.	0.08%C, 0.25%Si, 1.55%Mn, 0.0%P, 0.0%S						
Liquid Temp.	T _L = 1520.3℃						
Solid Temp.	T _S = 1489.1℃						
Density	7.8 g/cm ³						
Heat Capacity	Temp. [℃]	800	1200	1489	1489.1	1520.3	1520.4
	cal/g·℃	0.23	0.16	0.16	1.54	1.54	0.16
Thermal Cond.	Temp. [℃]	800	1200	1489	1520	1600	
	cal/cm ² ·sec·℃	0.068	0.071	0.071	0.071	0.071	

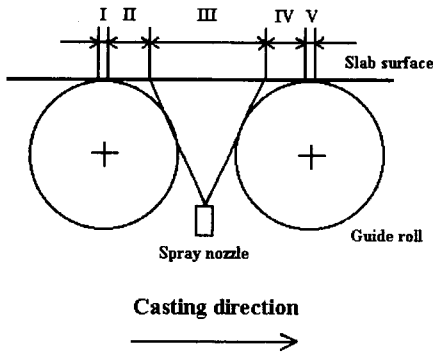
a = 0.07128, b = 2.328, c = 0.698, n = 9.5 이다. 2차 냉각부분은 Fig. 1과 같이 세 영역으로 구분하여 각각의 영역에 따라 다음의 열전달계수 관계식을 적용하였다.

분사냉각구간

분사에 의한 냉각은 물분사와 물과 공기에 의한 냉각방식이 있다. 본 연구에서는 물과 공기에 의한 냉각을 적용하였으며 실험식은 다음과 같다⁽⁵⁾.

$$h_a = 10^{1.48} T_s^{-0.1358} \dot{W}^{0.6293} V_a^{0.2734} \quad (3)$$

여기서 h_a (kJ/m²·hr·℃)는 열전달계수이고,



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

Fig. 1 Classification of secondary cooling zones

Table 3 Water flow rate for two cooling conditions (ℓ /min)

Zone	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Condition (1)	450	320	292	458	100
Condition (2)	744	597	557	750	100

T_s 는 주편의 표면온도, $\dot{W}(\ell / m^2 \cdot \text{min})$ 는 수량 밀도, $V_a(\text{m/s})$ 는 기류충돌속도이다. 본 연구에서는 Table 3과 같이 조업현장에서 적용하는 두 가지 경우의 냉각조건을 이용하여 주편의 온도를 구하였고 Table 3에 나타난 각 영역 Z1-5는 Fig. 2에 대략적으로 나타내었다.

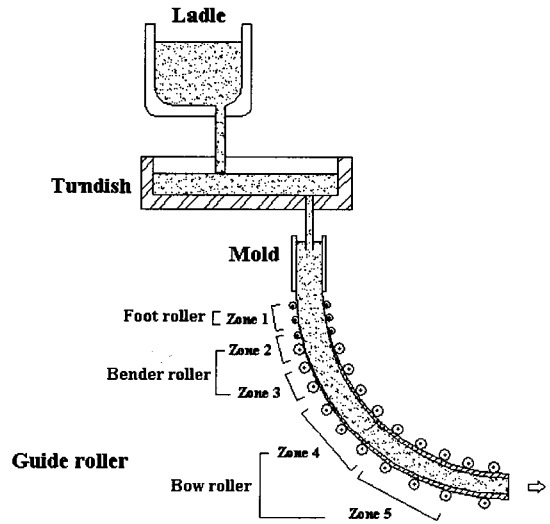


Fig. 2 A typical continuous caster

복사냉각구간

$$-k \frac{dT}{dx} = h_r(T_s - T_a) \tag{4}$$

여기서 h_r 는 등가의 열전달계수이고 T_a 는 주변온도이다.

롤접촉 냉각구간

롤과 주편의 접촉 길이는 롤직경에 관계없이 5 mm로 하여 계산하였고 열전달계수값은 다음의 값을 사용하였다⁽⁶⁾.

$$h_{\text{roll}} = 2500 \text{ (J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K)} \tag{5}$$

2.3 열전달해석시 적용조건

- 1) 주조방향과 주편 폭방향의 열전달은 무시하였다.
- 2) 용강의 대류에 의한 영향은 유효 열전도도를 사용하여 적용하였고 몰드부분에서만 그 영향을 고려하였으며 그 값은 용강 열전도도의 약 7배 정도값을 사용하였다⁽⁷⁾.
- 3) 고상과 액상 사이의 응고 구간에서는 응고 잠열이 존재한다. 이것은 등가비열법을 이용하여 처리하였다⁽¹⁾.

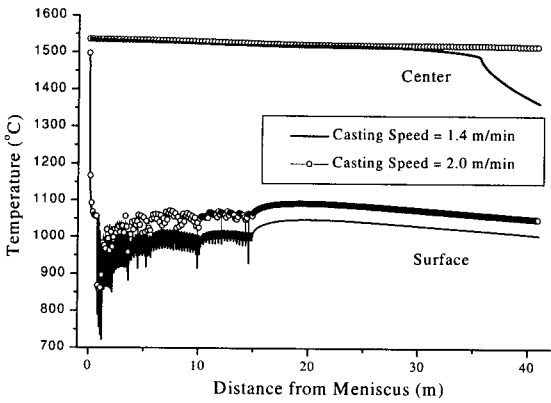


Fig. 3 Temperature distribution of slab

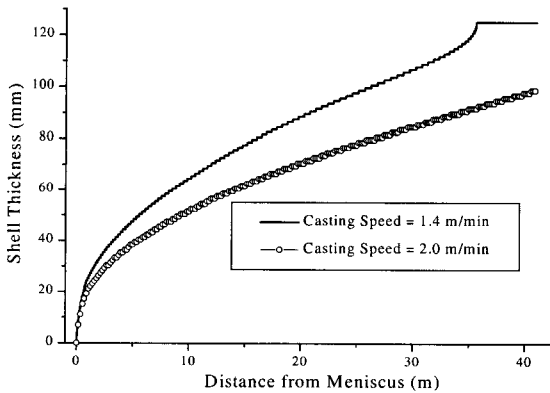


Fig. 4 Variations of solidified shell thickness

2.4 열전달해석결과

Fig. 3은 주속이 1.4, 2.0 m/min 일 때, 주변표면 온도와 중심에서의 온도 분포를 나타낸다. Fig. 4는 응고셀 생성 양상이며 주속이 1.4 m/min에서 주변의 응고는 Meniscus로부터 35.6 m인 지점에서 완전히 끝났으며 냉각조건 (2)인 경우 이보다 앞서 33.5 m인 지점에서 응고가 끝났다. 이는 Fig. 5에 나타내었다.

3. 벌징해석

주편의 역학적 거동에 있어 벌징 현상은 주편 파단과 주편 균열 발생등 주편 품질에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 매우 중요하다. 또한, 지지롤에 전달되는 하중을 증가시켜 롤의 마멸 손실을 늘리고 미소 편석 유도 등의 문제점을 일으키는

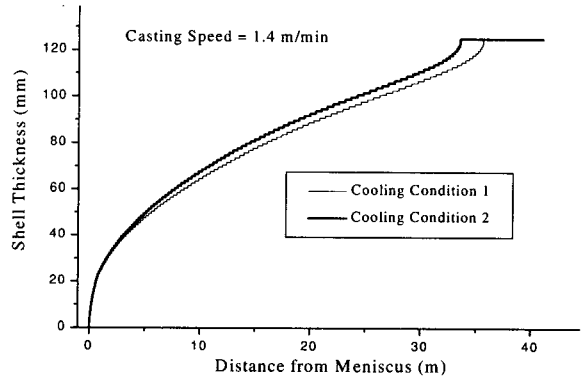


Fig. 5 Variations of the solidified shell thickness with different cooling conditions

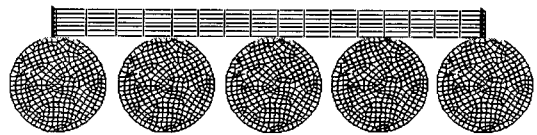


Fig. 6 A finite element model of the slab and rollers

요인이 된다. 본 연구에서의 가로 대 세로의 비가 큰 제품의 경우 최대 변형이 주편의 단변 구석에 의해 구속을 받지 않는다고 보아도 무방하다⁽⁸⁾. 그러므로, 2차원 모델을 도입하여 주편 장변 중심 부분을 해석하여도 최대 변형량을 예측하기에 충분하다. 주편의 움직임은 고려하지 않았고 각 구간에서의 주편 온도 분포 및 응고층 두께는 응고 해석에서 계산된 값을 이용하였다.

각 구간에서의 응고셀과 지지롤의 유한요소망은 Fig. 6과 같고 4절점 요소인 ANSYS의 PLANE42 요소를 사용하여 구성하였다. 지지롤과 주편의 접촉부분은 ANSYS의 CONTACT48 요소를 사용하여 모델링하였고 주편의 이동을 고려하지 않았기 때문에 마찰은 무시하였다. 주편의 양 끝단은 x 방향 변위를 구속하고 롤은 완전 고정 구속조건을 적용하였으며 주편 폭 방향으로 변형은 없는 것으로

Table 4 Material properties at high temperature⁽⁹⁾

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 $1 \times 10^{-4} \leq \dot{\epsilon} \leq 3 \times 10^{-1}$
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.

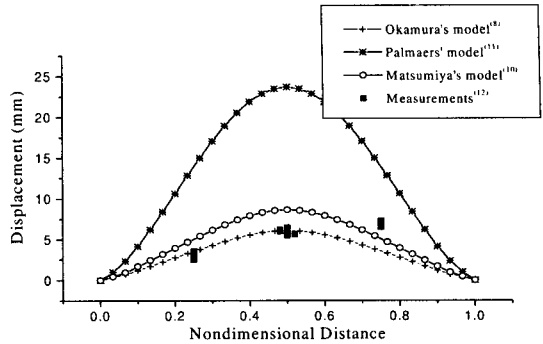


Fig. 7 Measured and calculated displacement from analysis using various creep formulas
[Ferro_pressure=0.274MPa, Surf_temp=1300°C, Cast_speed=0.85m/min, Shell thickness=79mm, Roll pitch=860mm]

하여 평면변형률 조건을 부가하여 계산하였다.

본 연구에서의 해석 모델은 탄소성과 크리프 변형을 모두 고려한 모델을 사용하였으며 탄성계수, 항복응력 등의 물성치는 Table 4에 나타낸 것과 같다.

3.1 크리프 특성식의 결정

문헌들^(8,10,11)에서 제시된 여러 가지의 크리프 특성식들을 사용하여 벌징 해석을 수행하고 크리프 측정치⁽¹²⁾와 비교하여 벌징 해석시에 적용할 크리프 특성식을 결정하였다. 여러 특성식의 해석결과와 실험결과를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 최대 벌징량이 실험의 측정값과 가장 잘 일치하는 Matsumiya가 제안한 크리프 특성식이 가장 타당한 것으로 사료되며 그 식은 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon} = \alpha \cdot \{ \sigma (kg/cm^2) \}^{3.15} \quad (6)$$

여기서 $\alpha = 0.0806 \exp\{-28392/(T+273)\}$ 이다.

크리프 특성을 고려한 해석에 있어서 크리프 시간 또한 중요한 변수가 되며 그 값은 다음의 식으로 구하였다⁽⁸⁾.

$$t_{\alpha} = \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{V} \quad (7)$$

여기서 t_{α} (sec)는 크리프 변형 시간이고 L 은 롤간 거리, V 는 주조 속도이다. 이상에서 설명한

Table 5 Parameters used for calculating static bulging

Process Variables	Status	Shell Thickness	Creep Time
		[mm]	[sec]
Casting Speed [m/min]	1.4	76.92	7.34
	2.0	60.9	5.14
Roll Pitch [mm]	340	76.92	7.34
	510	76.92 - 80.13	11.01
	680	76.92 - 80.13	14.67
Cooling Condition	(1)	76.92	7.34
	(2)	80.13	

물성치 자료와 크리프 특성식을 적용하여 벌징 해석을 수행하였고 사용된 인자들은 Table 5에 나타낸 것과 같다.

3.2 주조 속도의 영향

3.2.1 주조 속도의 영향

직선(Straightener)구간에서의 주속 1.4 m/min와 2.0 m/min 일때의 최대 벌징량은 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 주속 1.4 m/min인 경우 0.22 mm였고, 주속 2.0 m/min인 경우 0.7 mm였다. 주조 방향의 변형률 분포 양상은 주편의 응고계면의 경우, 지지롤이 있는 지점에서는 인장 변형이 발생하고 롤 사이에서는 압축 변형이 발생함을 알 수 있으며 표면은 이와 반대의 양상을 나타내는 것을 알 수 있다.

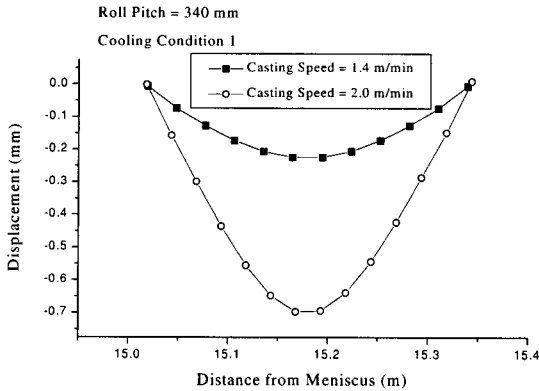


Fig. 8 Deformations of slabs in the straightener roll zone with different casting speeds

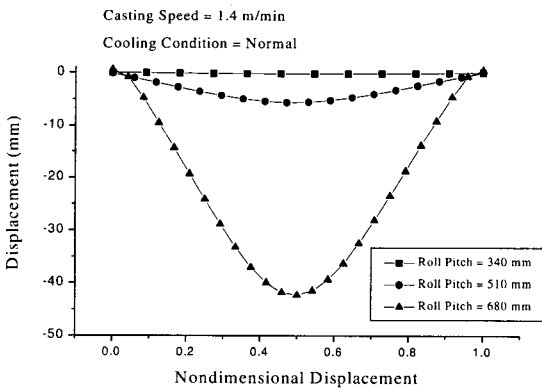


Fig. 9 Deformations of slabs in the straightener roll zone with different roll pitches

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. 9는 각 경우의 벌징량 분포를 나타내며 그 최대값은 각각 0.22, 5.6, 42.3 mm였다. Fig. 10은 각 경우의 주조방향변형률을 나타내며 그 양상은 앞서 설명한 것과 같다.

3.2.3 냉각 조건의 영향

냉각 조건이 다른 두 경우에 대한 해석결과 강냉인 경우 Fig. 11에 나타낸 것과 같이 최대벌징량이 0.18 mm로 더 작은 값을 얻을 수 있었다.

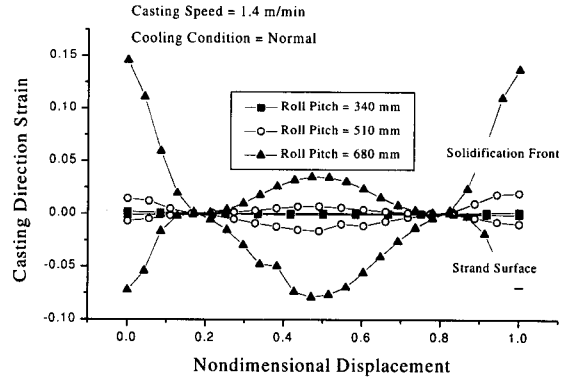


Fig. 10 Strains in the straightener roll zone with different roll pitches

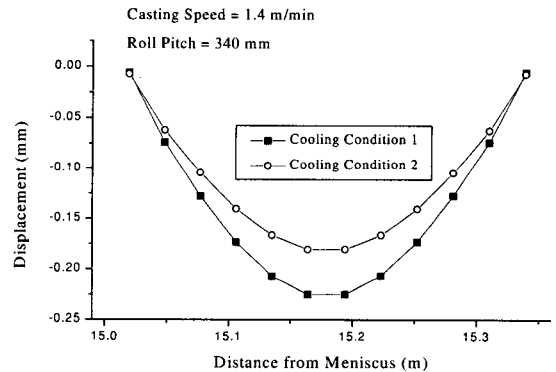


Fig. 11 Deformations of slabs in the straightener roll zone with different cooling conditions

4. 결론

본 연구에서는 연속주조에 있어 주편의 내부 결함의 주요 원인이 되는 벌징 현상을 탄소성과 크리프 변형을 모두 고려하여 유한요소법으로 수치적 해석을 수행하였다. 그 결과 연속주조에 있어서의 중요한 공정 변수인 주조 속도, 롤 직경에 따른 롤 피치, 냉각 조건 등의 영향을 살펴보고 연주기의 적절한 설계에 필요한 최적의 공정 변수를 결정하는데 도움이 될 것으로 사료된다. 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 롤 피치 변화에 따라 큰 폭으로 변화한다.
4. 해석된 냉각 조건에서는 응고 셀과 주편 온도의 변화가 주편 벌징량 및 변형률에 미치는 영향은 작다.
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.

후기

본 연구는 1998년도 교육부 과학기술기초 중점 연구(신소재:1998-017-E00091) 연구비의 지원에 의해서 연구되었음.

참고문헌

1. M. El-Bealy, N. Leskinen and H. Fredriksson, "Simulation of cooling conditions in secondary cooling zones in continuous casting process," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 22, No. 3, pp. 246-255, 1995.
2. Private Communication with POSCO
3. 大中逸雄, "컴퓨터가 열전달·凝固解析入門," 丸善株式會社, 1984.
4. G. Alvarez de Toledo, J. Lainez and J.C. Cirion, "Model optimization of continuous casting steel secondary cooling," Elsevier Sequoia, pp. 287-291, 1993.
5. 川崎守夫, 渡部忠男, 浜名孝年, 中島敬治, 高島啓行, 播木道春, "미스트 냉각의 열전달 특성과 연속 주조 슬라브의 열거동," *鐵と鋼*, Vol. 69, S168, 1983.
6. B. Barber, B. A. Lewis and B. M. Leckenby, "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, 1985.
7. E. A. Mizikar, "Mathematical heat transfer model for solidification profiles of slab in Circular-arc Type continuous casting machine," *鐵と鋼*, Vol. 60, pp. 1007-1012, 1974.
8. K. Okamura and H. Kawashima, "Three dimensional elasto-plastic and creep analysis of bulging in continuously cast slabs," *ISIJ International*, Vol. 29, No. 8, pp. 666-672, 1989.
9. M. Uehara, I. V. Samarasekera and J. K. Brimacombe, "Mathematical modeling of unbending of continuously cast steel slabs," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 13, No. 3, pp. 138-153, 1986.
10. 松宮徹, 梶岡傳幸, 中村泰, "連續鑄片バル징의數學的解析," *製鉄研究*, No. 310, pp. 14951 - 14957, 1982.
11. A. Palmaers, *CRM*, No. 53, pp. 23, 1979.
12. K. Wünnenberg and Duisburg-Huckingen, "Strand bulging between supporting rollers during continuous slab casting," *Stahl u. Eisen*, Vol. 98, No. 6, pp. 254-259, 1978.