

쌍롤식 연속주조에서 냉각 및 압연특성에 관한 연구

金 萬 守

The Study on Cooling and Rolling Characteristics in Strip Casting
by Twin-Roll Technique

Kim Man-soo

Summary

In this paper the solidification phenomena at the molten pool has been modeled and simulated the one dimensional unsteady-state heat transfer of the solid and molten phase and the pressure distribution in the solid phase for the twin-roll continuous casting of Sn-15% Pb.

The roll spacing and angular velocity of the rolls are considered to be main variables operating process.

Results of the experiment using Sn-15% Pb are compared with model predictions.

기호설명

A, B : 재료상수	$q\alpha(t)$: 로울러 표면에서의 열유속	α : 열확산율
C_p : 비열	$qf(t)$: 응고계면에서의 열유속	ϕ : 응고전방에 수직인 반경방향 사이의 각
H : 롤러간격의 절반	Ro : 롤로반경	δ : 응고층 두께
h : 당면에서 롤러중심선까지의 거리	r : 반경좌표	ρ : 밀도
hf : 응고계면에서의 열전달 계수	T : 온도	
ho : 로울러 표면의 열전달계수	Tf : 응고온도	
q : 유동율	Tl : 액상온도	

理工大學副教授

序 論

최근 용강으로부터 직접 박판을 제조하는 박판연속주조법에 있어서 제조공정을 생략하여 최종제품에 가까운 형상의 제작에 의한 원가절감, 가공이 곤란한 재질의 박대 및 세션의 가공, 급냉에 의하여 고용도의 확대, 조직의 미세화, 편석과 입자 석출의 감소, 석출물의 균일 분포등의 잇점 때문에 연속주조에 있어서의 강의 박판 제작이 활발히 연구되고 있다.

박판제조법의 실현을 위해서는 용탕의 응고과정의 전열해석 및 냉각속도와 응고조직의 변화, 응고 후의 압연 특성등에 관한 연구가 필요하다.

Clvne-Carcia(1981), Pimitkar(1984) 등은 쌍롤식 연속주조에 있어서 해석적 방법에 의해서 응고셀의 프로파일을 계산했고,

Miyazawa-Szekely(1981) 등은 액상과 고상의 유동을 고려하여 응고셀의 프로파일과 용탕의 흐름을 해석하였다. 쌍롤식 연속주조에 있어서 냉각속도와 조직의 연구는 竹本(1985) 등에 의하여 시험되었다. 또, Mivaza, Choh and Inoue(1982) 등은 쌍롤법에 있어서 한두께 방향이 냉각속도의 분포와 그것을 수반하는 응고 조직의 변화에 관하여 보고하였다.

따라서 본연구에는 쌍롤식 연속주조에 대한 실험장치를 설계제작하여 박판 연속주조시의 냉각특성 및 압연 특성에 관하여 연구하고자 한다.

1. 응고 해석

쌍롤법에 있어서 용탕의 응고상태를 전열해석을 통하여 계산하고 그때 주변의 표면온도를 로울러의 표면온도로 정했다. 로울러의 내면에는 강제냉각, 표면에는 용탕이 흐름에 의한 열전달이 존재한다.(Fig.1)

이때 반경방향의 일차원 비정상 상태 열전도를 전제로 해서 계산했다.

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

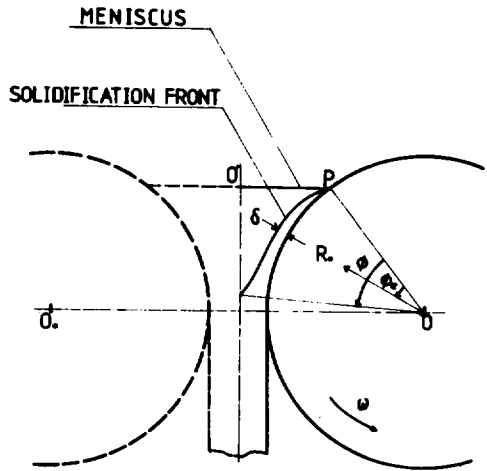


Fig. 1 Schematic model and coordinate system for twin-roll continuous casting

초기조건 및 경계조건들은 다음과 같다.

$$t = 0, \delta = 0, T = T_0 \quad (2)$$

이때 로울러 냉각면에 대한 열수지식은

$$r = R_0, T = T_{su}(t) \quad (3)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial r} = q_0(t) \quad (4)$$

$$q_0(t) = hu(T_{su}(t) - T_w) \quad (5)$$

이다.

로울러와 용강간의 열수지식은

$$r = R_0 + \delta, T = T_f \quad (6)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial r} = q_f(t) + \rho L \frac{d\delta}{dt} \quad (7)$$

$$q_f(t) = hf(T_l(t) - T_f) \quad (8)$$

이다.

응고셀에 관한 온도 프로파일을 다음과 같이 가정한다.

$$T = A_0 + A_1 \left(\frac{r - R_0}{\delta} \right) + A_2 \left(\frac{r - R_0}{\delta} \right)^2, \quad (9)$$

$$0 \leq r - R_0 \leq \delta$$

경계조건 식(3) - (6) 으로부터 다음식이 얻어진다.

$$T = T_{su}(t) + \frac{q_0(t)}{k} (r - R_0) + (T_f - T_{su}(t) - \frac{q_0(t)}{k} \delta) \left(\frac{r - R_0}{\delta} \right)^2 \quad (10)$$

여기서 식(10)을 식(7)로 대입하면

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{1}{\rho L} \left(\frac{2k}{\delta} (T_f - T_{su}(t)) - q(t) - q(t) \right) \quad (11)$$

이 얻어진다.

경계조건을 고려하면

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\alpha}{k} \left[q_0(t) - \left(1 + \frac{\delta}{R_0} \right) q(t) \right] + \left(\frac{2}{3} \delta + \frac{\delta}{2R_0} \right)$$

$$\frac{dT_{su}}{dt} \left[\frac{1}{k} \left(\frac{\delta^3}{6} + \frac{\delta^3}{12R_0} \right) \right] \frac{dq_0(t)}{dt} / \left[\frac{\alpha}{k} \left(1 + \frac{\alpha}{R_0} \right) (L - A_4) \right] \quad (12)$$

이때

$$A_4 = \left(1 + \frac{\delta}{R_0} \right) (T_{su}(t) - T_f) + \frac{q_0(t)}{k} \left(\frac{2}{3} \delta + \frac{3}{4} \frac{\delta^2}{R_0} \right) + (T_f - T_{su}(t) - \frac{q_0(t)}{k} \delta) \left(\frac{1}{3} + \frac{\delta}{2R_0} \right) \quad (13)$$

$dq_0(t)/dt$ 를 알대 식(11)과 식(12)는 미지수들과 T_{su} 의 연립방정식이다. 식(1)을 r 로 미분하고 R_0 에서 $R_0 + \delta$ 까지 적분하면 다음의 식을 얻는다.

$$\frac{dT_{su}}{dt} + \frac{1}{k} (q(t) + \rho L \frac{d\delta}{dt}) \frac{d\delta}{dt} = - \frac{\alpha}{k(R_0 + \delta)} (q(t) + \rho L \frac{d\delta}{dt} + \frac{\alpha}{R_0} \frac{-q_0(t)}{k}) \quad (14)$$

그리고 당유안의 열평형식으로부터 h_f 를 계산한다. 난류흐름에 대한 용융금속의 열전달 계수관계는

$$Nu = 3.27 + 0.019 Pe^{0.8} \quad (15)$$

이때

$$Nu = \frac{h_f De}{k}, \quad Pe = Re \cdot Pr$$

$$Re = \frac{V De}{\nu}, \quad Pr = \frac{Ce\mu}{KI}$$

$$De = 2a \quad (16)$$

수치해석방법에는 Rung-Kutta-Gill법을 적용했다. 계산에 사용된 물성치들은 Table 1과 같다.

Table 1. Physical constants and properties of Sn-15%Pb used in calculations.

thermal conductivity in solid zone	Ks	cal/cm·sec°C	0.12
thermal conductivity in liquid zone	Kl	cal/cm·sec°C	0.05
specific heat in liquid zone	Cl	cal/g°C	0.055
density on solid zone		g/cm ³	7.2
solid line temperature	Ts	°C	183
liquid line temperature	Tl	°C	208

2. 당류안의 로울러 표면에 대한 압력분포 계산

용고한 주조재료의 고온 비단성 구성관계에서 변형률속도는 온도와 응력, 내부조직 변화 등에 의존한다. 따라서 항복조건등의 개념없이 일차원 응력 상태하의 변형률속도는 다음 식과 같다. (Fig. 2참조), 영역 II에서

$$\epsilon = A \sigma^m \quad (17)$$

위 식에서 재료상수를 구하고 다음 식으로 압력분포를 계산했다.

$$dP_s/dx = 1/BH((m+2)/H)^{1/m} \cdot U_x - q/2H \cdot (U_x - q/2H) \quad (18)$$

$$\text{이때 } B = 3^{(1+1/m)^2} \cdot A^{1/m},$$

$$C = Q' / 12\rho HW \text{ 이다. 또,}$$

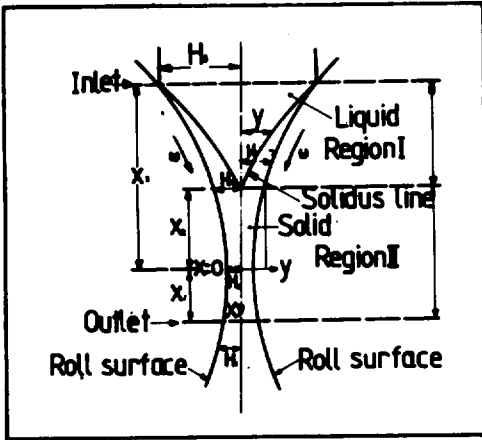


Fig. 2 Schematic representation of the twin-technique.

$$H = H_0 + R - (R^2 - x^2)^{1/2} \quad (19)$$

$$U_x = \beta(\pi R \omega_0 / 30) \cdot (R^2 - x^2)^{1/2} / R \quad (20)$$

이다. 로울러 압하력은 P_s 의 시료목을 알면

$$F_s = \int_{-x_2}^{x_1} W(P_s - P_{s0}) dx \quad (21)$$

로부터 계산된다. 수치해석 방법에는 Runge-Rutta법을 적용했다. 이때 주조 재료 Sn-15%Pb에 대하여 재료상수 $m = 4.34$, $A = 2.7 \times 10^{-7}$ 을 적용하여 계산했다.(6)

實驗裝置 및 方法

쌍롤식 연속 주조 과정에서의 기본적인 현상을 관찰하기 위하여 실험장치를 설계 제작하여 실험을 행했다. Fig. 3은 실험 장치를 나타냈다. Sn-15%Pb 용량이 210°C로 런디쉬에서 채워져 있다가 밸브가 개폐될 때 노즐을 통하여 유출하여 회전하는 로울러 표면 상에 떨어져서 당류를 만들고 그 때 로울러 표면에서부터 응고하여 계속적인 얇은 스트림이 되어 나온다. 두개의 로울러 사이에 응고셀에 대한 압연력이 작용되며 이것을 로드셀에 의해서 측정했다. 실험장치의 주요사양은 Table 2와 같다.

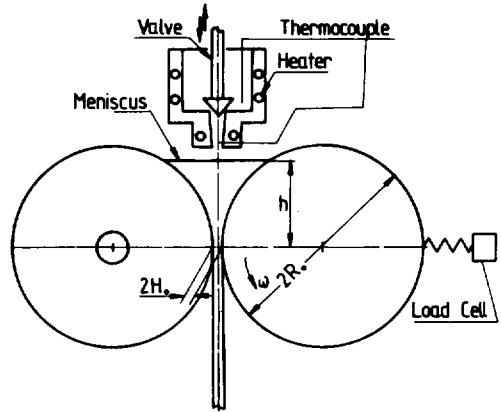


Fig. 3 The schematic view of the equipment.

Table 2. Specifications of equipment for continuous casting.

item	specification
roll diameter	$\phi 21mm$
cooling type	water cooling of inner surface in roll
number of roll rotation	0~79ppm
injection type of molter	valve
roll gap	0~10. 0mm
weir	teflon sheet
load cell	500kg

본 실험에서 적용한 실험조건은 Table 3에 표시했다.

Table 3. Experimental conditions.

Operating factor	conditions
initial roll gap	0.5~3.0mm
angular velocity of roll	0.5~4.5rad/sec
melt flow rate	39 g/sec
amount of cooling water	7.5 l/min
melt temperature in tundish	210°C
height of meniscus from the center in roll	50mm

結果 및 考察

쌍롤식 박판 연속 주조 방법에서 두개의 로울러 표면에서 급냉 응고한 셀로부터 연속적인 박판의 제품을 얻었으며, 측정장치를 이용하여 실험결과와 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 해석결과를 얻었다.

Fig. 4는 단위폭당의 압하력 F_y 의 측정결과를 보였다. 여기서 시간경과에 따라서 기록된 측정치의 평균치로서 F_y 를 구했다. 정상상태에서는 용융금속의 탱류레벨이 일정하게 조절되므로 압하력은 일정했다.

Fig. 5,6은 압하력과 스트립 두께, 로울러의 회전 속도와와의 관계를 나타냈다. 압하력의 계산치와 측정치는 근사적인 일치를 보였다. 여기서 압하력은 로울러의 각속도와 스트립 두께의 증가에 따라 감소하였다.

Fig. 7,8은 박판제조 의 주조가능영역과 표면의 형태별 성질을 나타내었다. 주편표면을 형태별로 나누면 표면양호, 길이방향의 크랙, 브레이크아웃, 피플마크, 과대압하력 등의 상태로 나누어졌다.

Fig. 9는 응고해석에서 얻어진 주편의 표면온도분포를 나타내었다. 여기서 응고완료점의 위치는 주조의 가능여부 또는 주편표면의 상태 및 성질에 영향을 미치므로 표면온도의 분포는 응고완료점의 위치를 계산 또는 제어하는데 필요하다.

본 실험에서는 노즐 출구경과 푸울 깊이, 턴디쉬내의 용체온도 등이 일정하고 밴브의 개폐로 용체유량을 일정하도록 조절하며, 중요한 조작변수로서 로울러의 초기 설정간격과 회전속도를 변화시켰다. 노즐을 통과한 용탕은 두개의 로울러사이의 간격이 매우 좁을 때 로울러사이에서 당류를 만들고 응고셀 근방의 용탕 온도는 용점부근까지 떨어져 응고완료점이 위로 올라가며 시료의 두께와 폭이 커져서 탱류안을 확장하는 경향이 있음을 알았다. 이 조건에서 응고셀은 더 이상 균일하게 성장하지 못한다. 회전속도가 증가하면 접촉개시위치로부터 응고개시위치까지의 거리가 길어지며(K. Miyazawa와 J. Szekely 1981)가 마찬가지로 용탕이 과열되면 접촉개시위치로부터 응고개시위치까지의 거리가 길어질 것으로 생각된다.

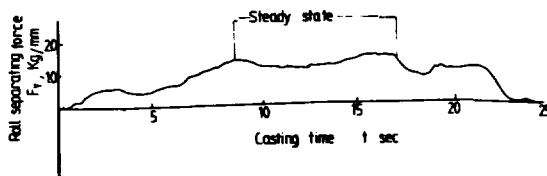


Fig. 4 Relation of roll separating force vs. casting time.

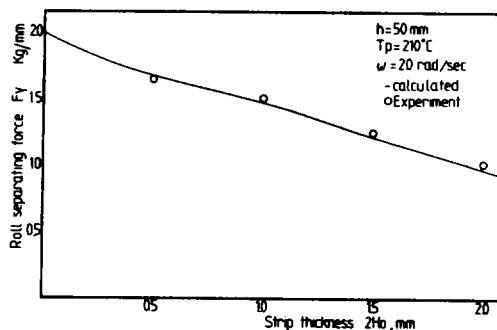


Fig. 5 Effects of strip thickness on roll separating force

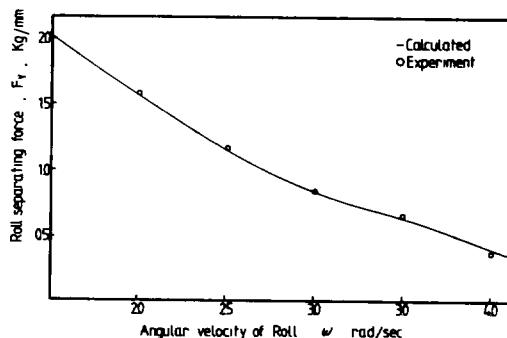


Fig. 6 Effects of angular velocity fo roll on roll separating force.

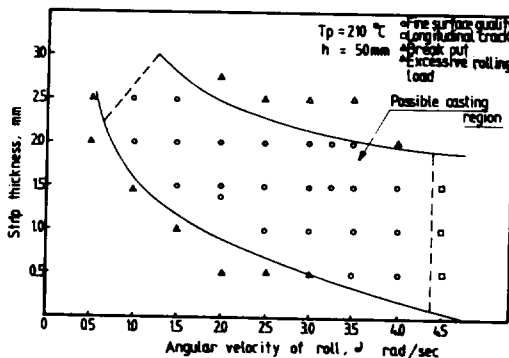


Fig. 7 The representation of the casting condition.

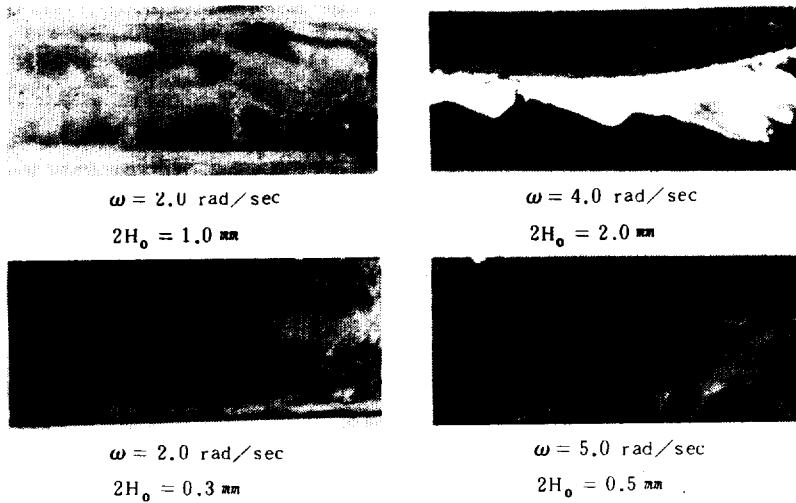


Fig. 8 Surface quality of cast material, Sn-15%Pb.

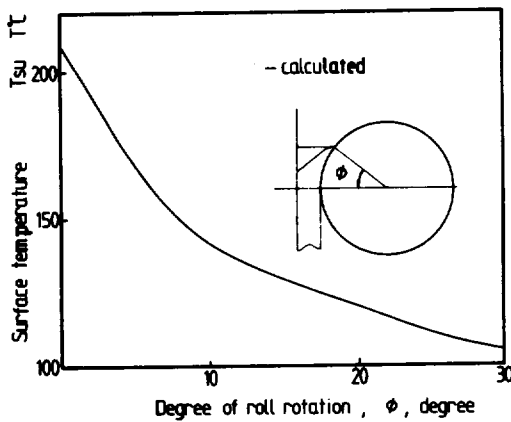


Fig. 9 Variation of surface temperature vs. a degree of roll rotation.

과도한 냉각은 과도한 압하력의 발생으로 로울러에 대한 기계적 변형을 야기하여, 응고점이 상류쪽으로 크게 이동하여 유동성이 악화되고 응고금속의 압하율이 증가하므로 제품두께에도 압하력이 커져서 로울러 설정간격보다 두꺼운 두께를 가지는 제품이 된다.

Miyazawa-Szekely(1981)에 의하면 로울러의 열전달계수가 클수록 용탕의 분출속도와 로울러의 회전속도는 증가되어도 좋다고 하였다. 이는 로울러의 냉각특성은 로울러의 회전수와 용탕의 분출속도 또

는 초기 로울러 설정간격 등임을 말해 주고 있다. 따라서 용탕의 푸울 깊이, 과열도 및 용탕쪽의 열전달계수에 의해 지배되는 열공급율은 수냉각을 통한 열 제거율과 균형을 이루어야 한다. 열 제거율은 셀두께의 스프레이 폭의 열전달계수에 의해 영향을 받는다. 냉각매체로서 스테인레스강을 사용했을때 용융금속 Sn에 대한 냉각속도 및 열전달 계수는 각각 $1.7 \times 10^5 \sim 6.4 \times 10^5$ C/s, $0.28 \sim 0.7 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ 이며, Cu는 Al, Pb, Sn-Pb 등의 용융금속에 대하여 각각 $6.9 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^6$ C/s, $4.4 \sim 5.0 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ 정도이다. (T. Suzuki 1987) 본 연구에서는 평균냉각속도 및 열전달 계수는 각각 $50 \sim 200$ C/s, $0.3 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ 이다. 그리고 계산된 열전달계수 hf값은 0.03~0.05범위였다. 吉出千里 등(1987)의 연구에 의하면 동합금재 로울러를 사용한 경우에는 스테인레스강 연속주조에서 중심부에서 덴드라이트가 발생했지만, 스테인레스강 로울러를 사용한 때는 중심부에 동축점이 생성되며, 이는 로울러 재질의 차에 의하여 응고완료 위치가 다른 것이 영향인 것으로 보고하고 있다. 또 회전속도의 증대에 따라서 응고완료 위치는 로울러간격의 하류쪽으로 내려가므로 응고금속의 압하율이 감소한다. 그리고 여기서 로울러의 용탕쪽으로부터의 열수수에 의하여 로울러의 과도한 열팽창이 초래된다. 따라서 초기 로울러 설정 간격의 효과는 설정 로울러간격이

증가하면 응고완료위치가 로울러간격의 하류쪽에 크게 이동하기 때문에 압연시의 로울러간 거리의 증가에도 불구하고, 응고완료위치에 있어서의 시료의 두께가 감소할 것이 예견되다.

쌍롤식 연속 주조에서의 압연특성은 로울러의 회전수와 초기 로울러 설정간격에 의하여 달라지는 것을 알았다. 노즐에서 분출되는 유량의 크기(K. Miyazawa 1981)에도 크게 달라진다. 이는 냉각속도를 변화시키며 그로 인하여 시료의 압하율에 영향을 미침으로서 제품의 질과 치수에 영향을 미친다. 본 연구에서는 유량의 크기는 일정하게 하여 로울러 회전수와 초기 로울러 설정간격의 효과만을 검토하였다. 본 연구에서 로울러 두께 방향에 있어서 로울러의 열팽창 및 압하력이 급냉시료의 두께 변화에 큰 영향

을 주는 것으로 사료된다.

摘 要

용강으로부터 박판을 직접 제조하는 쌍롤식 박판 제조 공정에 있어서 로울러의 회전수 및 로울러간의 간격이 미치는 영향을 실험적으로 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 로울러 회전수 및 로울러 간격의 적정화에 의해서 표면 상태가 양호한 연속적인 박판을 얻었다.
- 2) 로울러 두께 방향에 있어서 열팽창 및 압하력이 급냉 시료의 두께 변화에 큰 영향을 주었다.

引用 文 獻

- Carfonara, K. S., Clauer, A. H., Mecall, J. L., Pimitkar, S. M. and Rayment, J. J 1984; Comparison of Single Roller and Double Roller Processes for casting Low Carbon Steel, Proc. 5th Int. Rapidly Quenched Metals. Conf., p. 95.
- Charreyron, D. A., Flemings, M. C. and pinsky, D. A. Compression of Semisolid Dendritic Sn-Pb Alloys at Low Strain Rates, Met. Trans. 15 13 : 171-173.
- Choh, T., Inoue, M. and Miyazawa, K 1982 ; Cooling Characteristics fo the Twin-Roll Rapid Solidification process, J. Jim, 46(11) ; 1102-1108.
- Clyne, T. W. and Garcia, A. 1981 ; Application of a New Solidification at Flow Model to Splat Cooling, J. of Materials Science 16 ; 1643-1653.
- Mivata, Y., Ohte, M., Sakata, H. and Suzuki, T. 1987 ; Measurement of Heat Taansfer Coefficient Between Melt and Chill, Tetsu to Hagane. 289-296.
- Miyazawa, K. and Szekely, J. 1981 ; A Mathemaical Medel of the Plat Cooling Processes Using the Twin Roll Technique, Met. Trans. 12A ; 1047-1057.
- 竹本弘郷 外 1986스스로롤식 連續鑄機による薄板鑄片의引抜き實驗(스스로롤식 連續鑄造의開發) 鐵と鋼, 72-4. p·s142.
- 吉田千里 外 1987, Sus 304의凝固組織 12及 호스롤 材質の影響(스스로롤식 스트립캐스트의開發-(1), 鐵と鋼) p·s142.