

직접압연공정의 특성해석 및 공정변수 선정

Characteristic Analysis and Selection of Process Parameters in Direct Rolling Processes

*박영준(삼성중공업), 조형석(한국과학기술원), 배세철(LG 사), 이원호(포항제철), 강태욱(포항제철)
Y.J.Park (Samsung Heavy Industry), H.S.Cho (KAIST), S.C.Bae (LG Co.), W.H.Lee (POSCO), T.W.Kang (POSCO)

ABSTRACT

Recently, direct rolling process has been drawing increasing interests because production cost can be greatly reduced by eliminating subsequent hot rolling processes. Such a process has been characterized to produce thin steel strip (thickness 1~5 mm) directly from molten metal and to skip over the conventional hot rolling processes. However, since there are several process parameters, which affect the quality of product, and their relationship between the parameters are very complex, it is therefore very difficult to realize the process design and the quality control. To overcome these difficulties, quantitative relationship between the parameters are investigated through a numerical analysis. From these results, it is found that solidification final point is the most important parameter which is critical to quality of the strip. Also, the multiple regression model is obtained to determine their relationship from the solidification final point and roll separating force which can be easily estimated.

Key Words : Direct Rolling Process (Strip Casting Process), Solidification Final Point, Height of Molten Pool, Casting Speed, Roll Gap, Roll Separating Force, Multiple Regression Model

I 서론

일반 기계 제조업의 기본 자재로 뿐만 아니라, 응용 범위가 넓은 박판은 산업의 점진적인 발전에 힘입어 그 수요가 더욱 늘어나고 있다. 따라서 박판의 제조에 있어서 생산성의 향상은 한 국가의 산업 경쟁력을 좌우할 만큼 중요한 일이 되므로, 이의 제조 방법들이 지속적으로 연구되어 왔다.

최근에는 용탕으로부터 직접 최종 제품인 1~5 (mm)의 강판을 성형하는 직접압연공정에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이는 종래의 열간 및 냉간 압연 공정을 생략하여 제품의 생산 원가 절감 및 생산성을 향상시킬 수 있는 신주조 기술이다[1]. 이외에도 판재의 기계적 성질 향상뿐만 아니라, 난가공성 재료 및 신소재 판재의 성형도 가능하다. 이러한 잇점 때문에 최근 많은 연구가 이루어지고 있지만, 제조기술의 확립에 어려움이 있어 실제 적용은 이루어지지 못하고 있다[2, 3]. 이러한 문제점들 중 가장 중요한 것은 공정의 상태에 직접 또는 간접적으로 영향을 미치는 공정인

자의 수가 많으며, 이들 인자 사이의 관계가 정량적으로 규명되지 않아 제어가 어렵다는 것과 물의 수명을 향상 시키기 위한 최적냉각 방식 및 물의 재질 문제가 해결되지 못하고 있다는 것 등이다.

이러한 직접압연공정은 주로 일본 및 유럽에서 활발히 연구되고 있으며, 현재는 두께 5(mm) 이하, 폭은 200~400(mm) 정도의 스테인리스강과 규소강에 대한 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구의 대부분은 주로 응고 해석, 판재의 기계적 성질의 조사 및 유동 해석 등에 치우쳐 있고[4, 5], 공정 변수의 선정이나, 제어에 관한 연구는 거의 없었다[6].

따라서, 본 연구에서는 직접압연공정에서 박판의 두께에 영향을 미치는 여러 가지 변수들 사이의 관계를 수학적 해석을 통하여 정량적으로 밝히고, 이들 공정 변수 사이의 관계를 다중 회귀 모델을 이용하여 분석함으로써 향후 공정의 제어를 위한 제어기 설계시 공정의 특성을 분석하는 유용한 도구로 사용하고자 한다.

II. 직접압연공정 특성해석

그림 1은 쌍롤식 박판주조공정(twin roll strip casting process)의 기본원리를 보여준다. 그림에서와 같이 용광로에서 녹여진 용탕은 래들(ladle)을 통해 1차로 터니스쉬에 공급되며, 다시 노즐을 통해 두 롤 사이에 유입된다. 유입된 용탕이 롤과 맞닿은 부분에서 냉각이 이루어지면 롤의 표면에서는 얇은 응고셸이 형성된다. 이러한 응고셸의 형성은 롤이 회전함에 따라 점차 두터워지며, 서로 만나 응고 완료점을 형성한다. 이렇게 응고 완료점을 형성시켜 용융 상태의 금속을 고체로 만든 후 물을 빠져 나가도록 하여 박판을 형성시킨다.

이상의 설명에서 박판의 형성과정에 많은 공정 변수가 서로 연관을 가지고 있음을 알 수 있다. 박판 주조공정에서 각 공정변수의 영향을 정량적으로 알기 위해서는 용탕 내부의 온도 분포와 유동을 구해 공정의 상태를 검토하고, 이때 발생하는 RSF를 알아야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 유한차분법을 이용하여 속도장 및 온도장을 해석하였고[9-12], 이 결과를 이용하여 RSF(Roll Separating Force)의 값을 구하였다[13-15]. 이러한 해석을 위하여 다음과 같은 기본적인 가정을 하였다.

- 1) 온도장과 속도장은 롤사이의 중심선에 대하여 대칭이며, 따라서 한쪽 영역만 해석하였다.
- 2) 노즐이 위치한 곳에서는 주입 방향에 수직인 방향의 속도 성분이 없다.
- 3) 롤사이의 간극과 박판의 두께는 같다. 즉, 탄성 회복으로 인한 박판 두께의 증가는 없다.
- 4) 중력은 롤사이의 대칭선과 같은 방향을 가진다.

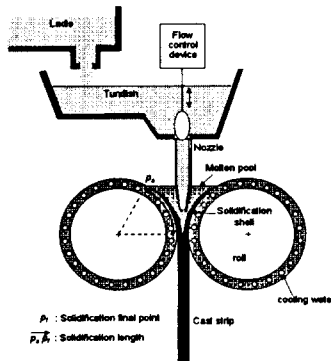


Fig.1 The principle of the strip casting process

속도장 및 온도장의 해석

용탕내부의 속도장과 온도장을 구하기 위해서는 상변화가 있는 물체내에서의 해석기법을 이용해야 하는데[9,10], 본 연구에서는 유한차분법인 enthalpy porosity method를 이용하여 해석하였고[9], 해석 도구로써 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하였다[12]. Enthalpy porosity method는 질량 보존, 운동량, 그리고 에너지 방정식을 연성하여 해석하는 것이다. 여기서 사용된 지배 방정식은 다음과 같다.

1) Conservation of mass ;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

여기서 ρ 는 밀도, 그리고 u 와 v 는 각각 x 와 y 방향의 속도 성분이다.

2) Conservation of momentum

x-component ;

$$\frac{\rho}{f_1} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\rho}{f_1^2} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu}{f_1} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu}{f_1} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \frac{(1-f_1)^2}{(f_1^3 + \epsilon)} A_{mush} u \quad (2)$$

y-component ;

$$\frac{\rho}{f_1} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\rho}{f_1^2} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu}{f_1} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu}{f_1} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \frac{(1-f_1)^2}{(f_1^3 + \epsilon)} A_{mush} v \quad (3)$$

여기서 f_1 은 유체분할상수, μ 는 점성, P 는 압력, g_x 와 g_y 는 각각 x 와 y 방향의 중력 성분, 그리고 A_{mush} 는 mushy 영역의 상수이다.

(3) Energy equation

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho \frac{\partial H}{\partial T} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$H(T) = \int_0^T c_p d\tau + L \cdot f_L(T) \quad (5)$$

여기서 k 는 열전달계수, c_p 는 비열, L 은 잠열, 그리고 H 는 엔탈피이다.

이제 위의 지배방정식에 따라 그림 2에서와 같은 영역에 대한 해석을 수행하며, 이때 해석영역은 4개의 경계면을 갖는다. 각 경계면에 대한 경계조건은 용탕의 표면에서는 용탕의 주입 속도와 주입 온도가 항상 일정하게 유지되는 것으로 하였으며,

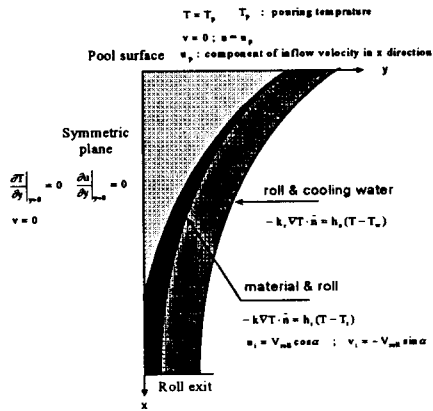


Fig. 2 Boundary conditions for analysis

대칭면에서는 모든 변수의 normal gradient 와 normal velocity 가 영(0)이라는 조건을 사용하였다. 물과의 접촉면에서는 용탕의 열 방출량과 냉각수에 의해 냉각되는 물의 열 흡입량이 같다는 조건을 사용하였고, 출구에서는 압력을 제외한 모든 flow variable 의 diffusion flux 가 영(0)이라는 조건을 사용하였다.

RSF 해석

본 연구에서는 RSF 를 구하기 위해서 열간 압연 공정에서 사용되는 해석적인 방법을 사용하였다 [15]. 열간 압연시의 압력 분포 계산을 위한 과정은 다음과 같다.

웅고 완료점에서 높은 온도로 웅고된 웅고철은 물의 냉각 효과에 의해 약 1000°C 정도까지 냉각되어 물의 출구를 통하여 방출되며 압연이 이루어진다. 따라서 박판 주조공정의 압연 모델은 재결정 온도 이상의 영역에서 압연이 이루어진다는 점에서 열간 압연으로 다룰 수 있지만[13], 압연도중

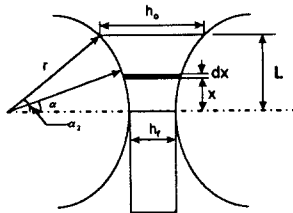


Fig. 3 The diagram of the force equilibrium state

급격한 냉각이 이루어지기 때문에 일반 열간 압연 공정과는 차이가 있다[13,14]. 이러한 온도 변화를 고려하기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다.

그림 3 은 압연 공정의 개요도로서, 압연중의 물 사이의 물체가 변형하고 있는 상황을 나타낸 것이다. 물의 출구로부터 x 만큼 떨어져 있으며, 양 물 사이의 두께 dx 이고 높이가 delta 인 미소 요소를 생각하자. 이 미소 물체에 작용하는 힘의 평형 조건으로부터 다음의 평형 방정식이 구하여 진다.

$$\sigma_x d\delta + d\sigma_x \delta = 2pr(\sin\alpha \pm \mu\cos\alpha)da \quad (6)$$

또한 기하학적인 관계와 Von Mises 항복 조건식으로부터 얻어지는 각 변수간의 관계를 식 (6)에 대입하여 정리하면, 다음의 미분 방정식을 얻는다.

$$dp = \frac{2}{\sqrt{3}} d\bar{\sigma}_o + \frac{2r}{\delta} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}_o \sin\alpha \pm \mu p \cos\alpha \right) da \quad (7)$$

이 식을 차분 방정식으로 전환한 후 수치적으로 적분하면 물표면과 박판사이에 작용하는 압력 분포를 구할수 있고, 구하여진 압력 분포를 접촉 면적에 대하여 적분하면 RSF 를 구할 수 있다.

해석 결과 및 토의

앞에서 선정한 박판 주조공정에서의 공정 변수들은 용탕의 높이와 주입 온도, 물의 회전 속도와 초기 간격, 웅고 완료점, RSF 이다. 이제 이들의 관계를 정상상태에서의 시뮬레이션을 통하여 알아보 고자 한다. 시뮬레이션에 사용된 재료는 SUS304 이고, 시스템의 사양은 표 1 에 나타나 있다.

그림 4 는 주조속도가 2.0(m/s), 용탕의 높이가 0.4(m), 물의 간격이 0.0034(m), 용탕의 주입 온도가 1800(°K)인 경우에 대해 고상선과 액상선사이의 속도 변화를 보여준다. 이때, 해석의 결과로 나온 웅고 완료점의 위치는 물의 출구로부터 4.63(mm) 위에 위치 한다. 이 그림에서 보여지는 바와 같이 고체와 액체의 공존영역에서 정지점이 존재하게

Table 1 Standard values of the casting parameters

Roll radius r [mm]	600
Height of molten pool x_{\max} [mm]	400
Casting speed u_0 [mm / sec]	642
Pouring temperature T_p [°C]	1475
Temperature of cooling water θ_w [°C]	30

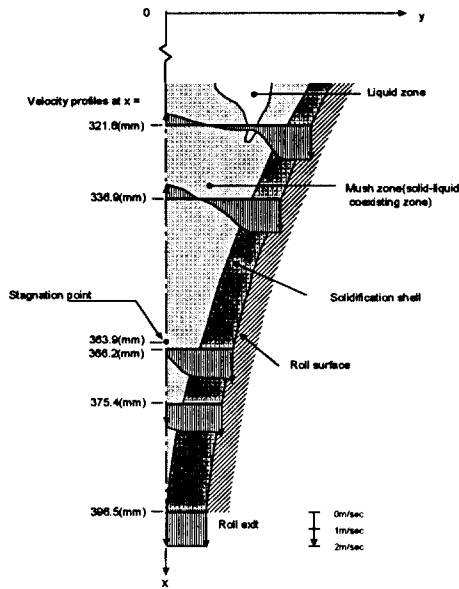


Fig. 4 Velocity field near roll exit

된다. 정지점은 대칭축에서 속도 벡터의 방향이 바뀌는 점으로 열간 압연이 시작되는 점이다.

III. 다중 회귀모델을 이용한 공정의 특성 해석

앞에서 구해진 각 공정 변수에 대한 응고 완료점의 높이와 RSF를 회귀 분석 모델을 이용해 상호 관련성을 보이고자 한다. 본 연구에서는 회귀자로서 기본적인 공정 변수라 할 수 있는 물의 회전속도, 물의 간격, 용탕의 주입 온도, 용탕의 높이의 다항식과 변수들의 곱들로 선정 하였다.

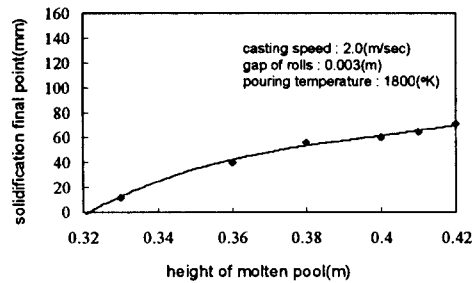
먼저, 여러 회귀자 집합에 대하여 시험하여 가장 적합한 회귀 모델을 구하였고, 그 결과 3 차식의 다항식을 사용할때 가장 정확한 관계를 나타낼 수 있었다. 분석 결과는 그림 5 에 나타내었다. 그림 5는 물의 회전속도, 물의 초기간격, 용탕의 주입 온도를 일정하게 유지한 상태에서 용탕의 높이가 응고 완료점과 RSF에 미치는 영향을 보여주는 것이다. 그림에서 (a)와 (b)는 각 응고 완료점과 RSF 값의 관계를 보여준다.

그림에서 보는 바와 같이 구성된 회귀 모델에 의한 각 공정 변수의 변화에 대한 응고 완료점의

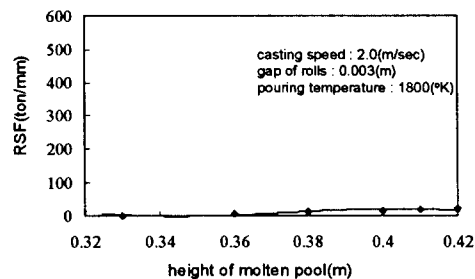
Table 2 Orders of regressors in the regression model

Order	regressors in the regression model	No. of regressor
1	L, V, δ_r, T_p	4
2	$L, L^2, V, V^2, \delta_r, \delta_r^2, T_p, T_p^2$	8
3	$L, L^2, L^3, V, V^2, V^3, \delta_r, \delta_r^2, \delta_r^3, T_p, T_p^2, T_p^3$	12
4	$L, V, \delta_r, T_p, LV, \delta_r V, \delta_r L, T_p L, T_p V, T_p \delta_r$	10
5	$L, L^2, V, V^2, \delta_r, \delta_r^2, T_p, T_p^2, LV, \delta_r V, \delta_r L, T_p L, T_p V, T_p \delta_r$	14
6	$L, L^2, L^3, V, V^2, V^3, \delta_r, \delta_r^2, \delta_r^3, T_p, T_p^2, T_p^3, LV, \delta_r V, \delta_r L, T_p L, T_p V, T_p \delta_r$	18

위치와 RSF 값은 비교적 정확한 값으로 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 다만, 그림에서 회귀 모델에 의한 예측 곡선이 약간의 오차를 갖게 됨을 볼 수 있는데, 이는 회귀모델이 공정의 비선형적인 특성을 모두 표현하기에는 어려움이 있기 때문이라 생각된다. 따라서 공정의 품질 제어를 위해 예측기를 구성할 때에는 이러한 예측을 보다 정확히 하기 위해 각 공정 변수의 비선형적인 영향을 보다 정확히 표현해 줄 수 있는 방안에 대해 추가의



(a) solidification final point v.s. height of molten pool



(b) RSF v.s. height of molten pool

Fig. 5 The regression result (height of molten pool) 연구가 필요할 것이다.

IV. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 직접압연공정에 대한 해석 모델을 구축하여 공정의 특성을 파악하였다. 먼저 온도장과 속도장을 구한 후, 이의 결과를 이용하여 RSF를 해석하였다. 이제 공정의 특성을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 제품의 품질이나 공정의 상태를 일목요연하게 보여주는 공정 변수는 응고 완료점의 위치가 됨을 알 수 있었다. 따라서 이러한 응고 완료점의 위치를 일정하게 유지하도록 공정을 제어해 줌으로써 공정의 품질을 개선시킬 수 있으리라 생각된다.
- 2) 용탕의 높이가 증가 하거나, 롤의 회전속도가 감소하거나, 롤의 간격이 줄어들거나, 용탕의 주입 온도가 낮아 짐에 따라 응고 완료점의 위치가 높아지고, 그에 따라 RSF가 커지는 것을 볼 수 있다. 이때 응고 완료점의 위치와 RSF에 가장 많은 영향을 미치는 공정 변수는 롤의 초기 간격임을 알 수 있다.
- 3) 회귀 모델을 이용하여 각 공정 변수들의 변화에 따른 응고 완료점과 RSF의 변화 관계를 정량적으로 유도하였으며, 구축된 회귀 모델을 이용하여 응고 완료점의 위치를 비교적 정확한 값으로 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 포항제철(주)의 지원으로 수행된 과제로서, 연구의 수행을 위해 물심양면으로 도와주신 포항제철(주) 관계자 여러분께 감사드립니다. 특히, 연구기간동안 많은 조언과 도움을 주신 강태욱 박사과 이원호씨께 깊은 감사를 드립니다.

References

- [1] M. Yukumoto and H. Yamane, "Thin strip casting of Ni base alloys by twin roll process", ISIJ international, Vol. 35, No. 6, pp. 778-783, 1995.
- [2] 김영도, "용탕직접압연에 관한 실험적 연구 및 FDM/FEM에 의한 공정해석", 부산대 공학박

사 학위논문, 1994.

- [3] K. Shibuya and M. Ozawa, "Strip casting techniques for steel", ISIJ international, Vol. 31, No. 7, pp. 661-668, 1991.
- [4] T. Saitoh, H. Hojo, H. Yaguchi and C.G. Kang, "Two-dimensional model for twin-roll continuous casting", Metallurgical Transactions B, Vol. 20B, June, 1989.
- [5] 이진욱, 박석호, "쌍롤 스트립주조법에서의 열전달 해석에 관한 수치연구", 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp.612-615, 1991.
- [6] 조형석, 박영준, 배세철, "직접압연공정의 수치해석을 통한 공정의 특성분석", 1996년도 포항제철 석좌교수 기금운영연구보고서, 한국과학기술원, 1996.
- [7] A.R. Buchner and J.W. Schmitz, "Thin-strip casting of steel with a twin-roll caster - discussion of product defects of 1mm-Fe6%Si-strips", Steel Research 63, No.1, 1992.
- [8] S.Miyake, H.Yamane, M.Yukumoto and M. Ozawa, "Strip quality of highly alloyed metals by twin roll casting", ISIJ international, Vol. 31, No. 7, pp. 689-695, 1991.
- [9] J.D. Hwang, H.J. Lin, W.S. Hwang and C.T. Hu, "Numerical simulation of metal flow and heat transfer during twin roll strip casting", ISIJ international, Vol. 35, No. 2, pp. 170-177, 1995.
- [10] V.R. Voller and C. Prakash, "A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 8, pp. 1709-1719, 1987.
- [11] Y.H.Kang, "Analysis of flow and heat transfer in twin roll strip casting process by finite element method", M.S. thesis, POSTECH, 1992.
- [12] FLUENT User's Guide, Version 4.3, Fluent Incorporation, 1995.
- [13] W.L. Roberts, "Hot rolling of steel", New York : M. Dekker, pp. 649-898, 1983.
- [14] 이문도, 박현철, "트윈롤 연속주조 공정에서의 롤의 온도분포 및 응력해석", 대한기계학회논문집, 제 16권, 제 2호, pp. 400-408, 1992.
- [15] 심현보, "슬랩법을 이용한 쌍롤식 박판주조공정의 열간 압연해석", 한국소성가공학회지, Vol.3, No.1, pp.63-83, 1994.