

직접압연 공정에서 품질계측을 위한 공정변수의 선정

Determination of the Process Variables for Quality Monitoring in Direct Rolling Processes

° 배 세 철, 박 영 준, 조 형 석

한국과학기술원 기계공학과 (Tel: 042-869-3213; Fax: 042-869-3210; E-mail: hscho@lca.kaist.ac.kr)

Abstracts Recently, direct rolling process, called as strip casting process, has been interested in to save production cost by reducing forming processes. In direct rolling process, since a steel strip of thickness 1-5(mm) can be produced directly from molten metal, it can eliminate secondary hot rolling process. On the other hand, since many process variables are existed in this process and relation of these variables is very complex, it is difficult to realize the process design and the quality control. In this paper, as first step to overcome above difficulties, the quantitative relationship of the process variables affected to quality of the strip has been carried out through the numerical analysis. Also, we determined the process variable to monitor the quality in the direct rolling process. As a result, we show that the solidification final point, called as Nip point, was related directly to quality of the strip.

Keywords Direct Rolling, Strip Casting, Twin Roll, Height of molten pool, Casting speed, Solidification shell, Nip point

1. 서론

일반 기계 제조업의 기본 자재로 뿐만 아니라 일반 산업 현장에서의 응용 범위가 넓은 강판은 산업의 점진적인 발전에 힘입어 그 수요가 더욱 늘어나고 있다. 따라서 강판의 제조에 있어서 생산성의 향상은 한 국가의 산업 경쟁력을 좌우할 만큼 중요한 일이 되므로 이의 제조 방법들이 지속적으로 연구되어 왔다. 강판의 생산은 초기에는 용탕으로부터 주조된 잉고트(ingot)를 열간과 냉간 압연 공정을 여러 차례에 걸쳐 이루어졌으나, 최근에는 용탕으로부터 연속적으로 얇은 슬래브(slab)를 직접 주조하여 열간 압연과 냉간 압연 공정을 대폭 감소시킨 박슬라브 주조 기술(thin slab casting)을 개발함에 따라 강판의 제조에의 설비의 간소화 및 가공 시간을 단축시킬 수 있어 생산성은 비약적인 향상을 보였다.

최근에는 생산에 관련된 주변 요소기술의 비약적인 발전에 힘입어 용탕에서 직접 박판을 생산 하는 경형연속 주조법(near-net-shape continuous casting method)이 연구되고 있으며, 공정의 감소에 따른 설비의 간소화, 에너지의 절감 및 재질 개선 등의 잇점 때문에 많은 연구자들이 관심을 기울이고 있다. 이러한 연구 노력으로 직접 압연공정(direct rolling process)에 대한 연구가 많은 진척을 이루고 있다. 이것은 그림 1에서 보는 바와 같이 초기에 용탕으로부터 최종 제품인 1.5(mm)의 강판을 직접 성형할 수 있는 획기적인 신주조 기술(strip casting, 박판주조)로써 압연 공정 거의 전체를 생략할 수 있어 투자비는 물론 생산 원가를 대폭 절감시킬 수 있다.

이러한 박판주조공정은 위에 서술한 바와 같은 장점에도 불구하고 냉각물의 급냉 효과로 편석 및 석출이 감소해 균일한 조직을 갖는 판재 성형이 가능하므로 판재의 기계적 성질을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 난가공성 재료의 가공이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 여러가지 실용상의 문제점 즉, 공정인자 사이의 관계가 정량적으로 규명되지 않아 품질의 제어가 어렵고, 냉각물의 재질이나 냉각방식에 대한 결정의 어려움 등으로 인하여 강판의 제조에 실제적인 적용은 어려운 상태에 있다.

직접 압연공정은 1846년 H.Bessemer가 유리와 금속판재를 성형하기 위하여 개발하기 시작한 후 많은 연구자들에 의해 강판제조에 적용하는 연구가 계속 수행되어졌다. 그러나, 개발 초기에는 앞에서 열거한 문제점으로 인하여 실용화에는 성공하지

못했다. 1970년대에 계측 및 제어기술의 발달로 용탕으로부터 박판을 직접제조하는 연구가 활발히 진행되고 있지만, 아직 실용화에는 이르지 못하고 있다. 이러한 연구는 주로 일본 및 유럽에서 활발히 연구되고 있으며, 현재까지는 주로 해석적인 방법으로 공정의 특성을 분석하여 이를 공정의 설계기술로써 활용하고자 하는 연구가 이루어졌다. 즉, 대부분의 연구는 주로 응고해석, 판재의 기계적 성질의 조사 및 유동 해석등에 대해 이루어졌으며, 공정 변수의 선정이나, 제어에 관한 연구는 거의 없었다. 특히, 직접 압연공정에서의 공정변수들은 서로 다른 변수의 영향이 크므로 이들의 복잡한 상관관계를 정량적으로 밝혀내기에는 어려움이 있었다.

따라서, 본 연구에서는 박판 주조 공정에서 박판의 두께와 두께 변화량에 영향을 미치는 여러가지 변수들 사이의 관계를 수학적 해석을 통하여 정량적으로 밝히고, 이들 공정변수 사이의 관계를 이용하여 제품의 질을 결정하는 중요한 공정 변수를 선정함으로써, 향후 공정의 제어를 위한 연구의 기본 작업을 진행하고자 한다.

2. 박판주조공정(strip casting process)

박판주조공정은 박슬라브주조공정(Thin slab casting)보다 진일보한 개념으로, 슬라브를 만들지 않고 용탕에서 직접 박판을 제조하는 기술로서 열간압연 공정 거의 전체를 생략할 수 있어 투자비는 물론 생산 원가를 대폭 절감시킬 수 있는 획기적인 신주조 기술이다. 이러한 박판주조공정은 크게 single-roll 법과 twin-roll 법으로 나누어 진다. 이중 single-roll 법으로 생산되어지는 박판은 두개의 다른 표면을 가지게 되므로(roll-side surface와 free surface), 이방법에서는 free surface의 품질을 제어하는 것이 중요하다. 반면에 twin-roll 법은 두개의 물에 의해 양면이 냉각되므로 single-roll 법보다 열 방출 능력이 더 크며, 박판의 양 표면의 품질은 같아지게 된다. 그러나 물간의 gap과 rolling force의 제어는 어려워진다. 따라서 single-roll 법보다 더 복잡한 제어를 요구하게 된다. 본 연구에서는 이중 twin-roll에 의한 박판주조공정을 대상으로 하였다.

이러한 twin-roll에 의한 박판주조공정은 그림 1에 나타낸 바와 같이 냉각수에 의해 냉각되는 두개의 동일한 반경을 가지는 롤사이에 용탕을 연속적으로 공급하여 회전하는 롤위에 응고될

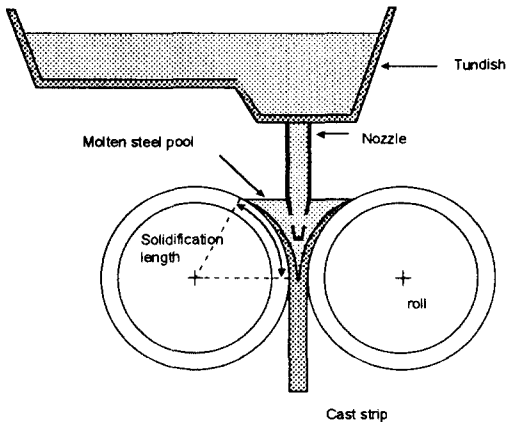


그림 1 직접압연공정의 개요
Fig. 1 Schematic diagram of the direct rolling process

을 형성해서 연속적으로 박판을 형성하게 된다. 이때 박판의 품질을 결정하는데 영향을 주는 형태를 도시하여 살펴보면 그림 2와 같다. 여기서, 그림 2-(a)는 응고가 너무 빨리 형성되어 물이 과도한 반발력을 받고 있는 모습을 나타내고 있으며, 이 때 롤이 과도한 반발력을 받아 영구 변형을 일으켜 박판의 품질에 악영향을 미칠 뿐만 아니라, 조업 자체의 안정성을 위협할 수도 있다. 그림 2-(c)의 경우는 응고가 너무 늦게 형성되어 박판의 외부는 고체이지만 내부는 액체인 상태로 물의 출구를 빠져 나가고 있는 모습을 나타내고 있다. 이 경우는 박판의 내부가 액체인 상태로 물을 빠져 나가므로, 내부가 외부보다 응고가 늦게 진행되어 내부의 기공이나 표면의 결함을 유도 한다. 마지막으로 그림 2-(b)는 적절한 운전 조건하에서 양호한 박판을 형성하고 있는 모습을 나타내고 있다. 따라서 공정의 조건은 항상 그림 2-(b)의 상태가 유지될 수 있도록 하는 것이 중요하다.

3. 공정의 해석

박판주조공정(strip casting)에서 제품의 품질에 영향을 미치는 변수가 어떠한 것이 있으며, 어느정도의 영향을 미치는지 정량적으로 알기 위해서는 용탕내부의 유동과 온도분포가 어떠한지 알아야 하며, 만약 재료가 물의 출구를 빠져나가기 전에 고체가 되면 압연과정을 거치게 되는데, 이때 발생하는 RSF(Roll Separating Force)를 알기 위해서는 물 내부의 압력 분포를 알아야 한다. 이를 위해서 다음과 같은 순서로 해석을 진행하였다.

3.1 속도장의 해석

박판주조공정(strip casting)에서는 용융점 이상의 재료가 직접 압연롤의 표면에 유입되어 지므로, 재료의 유동은 유체로 가정할 수 있다. 따라서, 아래와 같은 가정하에서 속도분포를 결정할 수 있다. 여기서 사용된 좌표계에 대한 설명은 그림 3과 같다. 재료를 점성 유체이고 비 압축성 재료이며 물과 재료 사이에는 미끄럼이 발생하지 않는다고 가정하면, x 축 방향의 속도 u 는 다음과 같은 속도 분포를 가진다고 가정할 수 있다.

$$u = \frac{b}{(h-y+a)^2} \quad (h = h_0 + r - \sqrt{r^2 - x^2}) \quad (1)$$

여기서, 물과 접촉하는 부분에서 재료의 속도는 물과 같은 속

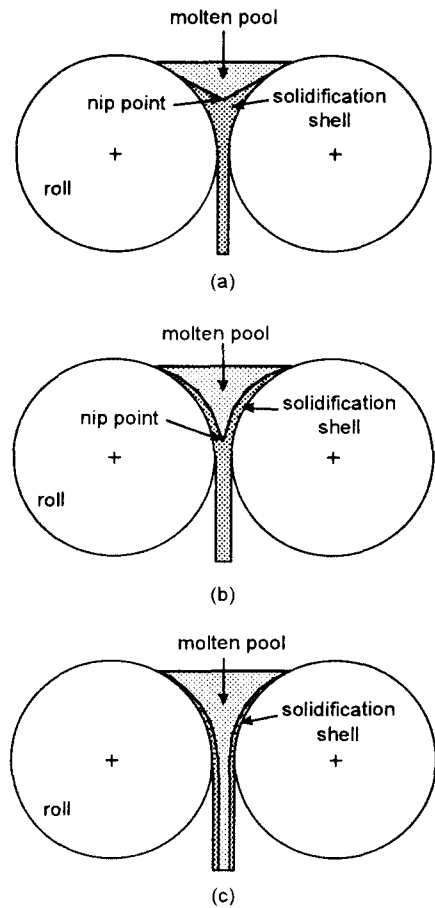


그림 2 공정의 여러가지 상태
Fig. 2. The classification of strip qualities

도를 가진다는 것과, 물의 출구에서 재료는 두께 방향에 상관없이 롤과 같은 속도를 가진다는 경계조건을 적용하면 계수 a, b는 다음과 같이 결정된다.

$$a = \frac{h_0 h}{h\sqrt{r^2 - x^2} + r - h_0} \quad (2)$$

$$b = a^2 w \sqrt{r^2 - x^2}$$

이제 두 롤사이의 대칭면에서 y 방향의 속도는 0 이라고 가정하면 연속방정식으로부터 다음과 같은 y 방향의 속도를 구할 수 있다.

$$v = \int -\frac{\partial u}{\partial x} dy$$

$$= b \left(\frac{dh}{dx} + \frac{da}{dx} \right) \left(\frac{1}{(h-y+a)^2} - \frac{1}{(h+a)^2} \right) - \frac{dh}{dx} \left(\frac{1}{h-y+a} - \frac{1}{h+a} \right) \quad (3)$$

여기서 구한 속도장의 분포는 그림 3과 같다.

3.2 온도장의 해석

용탕 내부의 열전달은 대류와 전도에 의해 일어난다고 가정할 수 있으며, 용탕의 유동에 의한 대류를 고려한 비정상 상태의 열전도 지배 방정식은 다음과 같다.

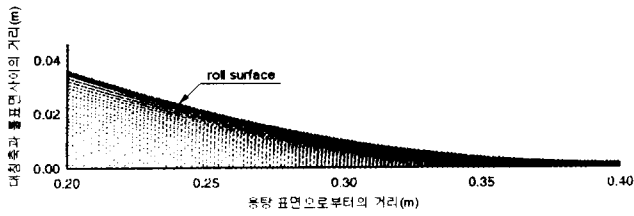


그림 3 속도장의 분포

Fig. 3. Velocity field of the pool region

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

여기서 x축 방향의 속도와 y축 방향의 속도는 앞 절에서 구한 속도 분포를 이용하였다. 용탕은 4개의 경계면을 가지며, 용탕의 표면에서는 용탕의 주입 온도가 항상 일정하게 유지되는 것으로 하였으며, 대칭면에서는 단일 경계조건을 사용하였고, 물과의 접촉면에서는 용탕의 열 방출량과 냉각수에 의한 열 흡입량이 같다는 조건을 사용하였으며, 출구에서는 온도의 변화율이 일정하다는 조건을 사용하였다.

그리고 본 연구에서처럼 해석 영역의 경계면이 일반 직교 좌표계와 다른 경우의 문제를 해석하기 위해서는 직교 좌표계상에서 유도된 방정식을 문제에 맞도록 좌표 변환하여야 한다. 이러한 좌표변환은 물리적 영역(x, y)과 수치적 영역(ξ, η)사이의 관계를 나타내는 자료비안에 의해 이루어지며, 이의 관계식을 이용하여 앞의 지배 방정식을 수치 해석적 영역으로 나타내면 다음과 같다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\rho c_p}{J_a} \left(u \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial T}{\partial \xi} - \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) + v \left(\frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial T}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \right) = \frac{k}{J_a^2} \left(a \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} \right) - 2b \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial T}{\partial \eta} \right) + c \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial T}{\partial \eta} \right) + d \frac{\partial T}{\partial \eta} + e \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \quad (5)$$

순수재료(pure metal, eutectic alloy)는 액상에서 고상으로 변할때, 액상온도와 고상온도가 일치 하지만, 대부분의 재료들은 합금이므로, 액상온도와 고상온도가 일치 하지 않으며, 액상과 고상의 공존 영역이 생긴다. 이때, 재료는 잠열을 방출하게 되며, 잠열방출에 따른 보상을 해 주어야 한다. 위의 식에서 사용된 변수의 값은 기존의 연구에서 발표된 값을 사용하였다. Ref.[8].

3.3 물의 압연력(Roll Separating Force; RSF) 해석

박판주조공정에서 물의 출구를 지나기 전에 재료가 고체가 되면 재료는 압연공정을 거치게 된다. 이때 과도한 압연력이 작용하게 되면 물의 수명을 단축시키고, 제품의 품질에 좋지 않은 영향을 미칠 뿐 아니라, 조업의 안전성을 위협할 수도 있다. 따라서, RSF를 일정하게 유지 하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 압연력을 구하기 위해 열간압연 공정에서 사용되는 해석적인 방법을 적용하였다.

먼저, 열간 압연시의 압력분포 계산을 위해 roll 과 strip 사이의 접촉을 부차 마찰(sticking friction)이라고 가정후, 미소요소에 관한 힘의 평형 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$d(\gamma\sigma) = 2\rho(\sin\theta \mp \mu\cos\theta)Rd\theta \quad (6)$$

여기서, ρ는 물에 의해 가해지는 수직압력이고, θ는 물의 중

심에서 각 요소에 대한 해당 각도이며, μ는 마찰계수이다. 그리고 σ는 수평 방향에 대한 각 요소의 응력을 나타낸다. 여기서 마찰력은 입구측에서는 판재의 속도가 물의 속도보다 작으므로, 마찰력은 판재를 밀어 넣는 구동력이 되며, 출구측에서는 물의 속도가 판재의 속도보다 작으므로, 마찰력은 판재의 진행을 방해하는 방향으로 작용한다. 그러므로 식(6)의 미소요소에서의 힘의 평형 방정식을 마찰력의 방향이 바뀌는 것을 고려하여, 두 영역으로 나누어서 적분을 하면 다음과 같다. 즉, 출구 측에서부터 마찰력의 바뀌는 점인 θ_n까지는

$$S^+ / k = \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4} \ln \frac{y}{h_2} + \sqrt{\frac{R}{h_2}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{R}{h_2}} \theta \right) \quad (7)$$

와 같이 되고, θ_n에서 입구측까지는

$$S^- / k = \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4} \ln \frac{y}{h_1} + \sqrt{\frac{R}{h_2}} \left(\tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{R}{h_2}} \alpha \right) - \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{R}{h_2}} \theta \right) \right) \quad (8)$$

와 같이 된다. 여기서 S는 압연압력을 나타내며, k는 workpiece의 flow stress이다. 또한 출구에서 수평방향 힘은 영(0)이다. 이제 마찰력이 바뀌는 점인 중립각 θ_n은 S⁺ = S⁻이 될때의 각이므로 위의 식들을 이용하여 구할 수 있다.

이제 최종적으로 strip casting 시의 RSF는 응고 완료점 이후부터의 압연에 의해 대부분의 영향을 받는다. 그러므로, 위의 식(7)과 식(8)을 적분하여 열간 압연이 일어나는 부분의 압력분포를 구해 RSF를 구할 수 있다.

4. 공정특성 해석 및 공정변수의 선정

4.1 공정의 특성해석

박판주조공정에서의 공정변수들은 용탕의 높이, 물의 회전 속도, 물의 간격, 용탕의 초기온도, 최종 응고점, RSF이다. 이들의 관계를 정상상태에서의 시뮬레이션을 통하여 알아보고, 이들 중 박판주조공정에서 제품의 품질에 가장 큰 영향을 미치는 공정변수를 선정하고자 한다. 시뮬레이션에 사용된 재료는 SUS 304이다.

그림 4는 물의 회전속도, 물의 초기간격, 용탕의 초기온도를 일정하게 유지한 상태에서 용탕의 높이를 변화 시켰을 때 응고 완료점 사이의 관계를 보여준다. 그림에서 보여지는 것과 같이 용탕의 높이가 증가 할수록, 재료가 물과 접촉하는 시간이 길어져 응고셀이 두텁게 형성되어지므로 응고완료점의 위치가 높아지게 된다.

그림 5는 용탕의 높이, 물의 초기간격, 용탕의 초기온도를 일정하게 유지한 상태에서 물의 회전속도와 응고완료점 사이의 관계를 보여준다. 그림에서 보여지는 것과 같이 물의 회전속도가 감소 할수록 앞의 경우와 마찬가지로 물과 접촉하는 시간이 길어져 응고완료점의 위치가 높아지게 된다.

그림 6은 응고완료점과 RSF와의 관계를 보여준다. 그림에서와 같이 응고완료점의 높이가 증가함에 따라 RSF 값은 지수함수적으로 증가함을 알 수 있다. 이때, RSF 값이 일정치를 넘으면, 물의 영구변형을 가져오게된다. 만약, 우리가 RSF 값이 일정치 이상 증가하는 것을 원치 않을 경우, 물의 간격을 증가시켜 RSF 값이 증가하는 것을 막을 수 있다. 그러나, 이 경우 박판의 길이 방향으로의 두께 변동이 생기게 되어, 제품의 품질에 악영향을 미친다.

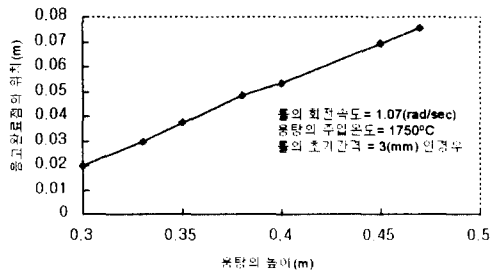


그림 4 용탕의 높이와 응고완료점 사이의 관계

Fig. 4. The relation between Nip point and high of molten pool

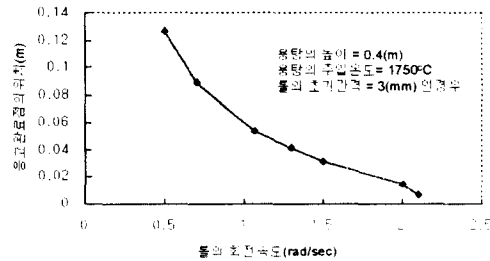


그림 5 용탕의 회전속도와 응고완료점 사이의 관계

Fig. 5. The relation between Nip point and casting speed

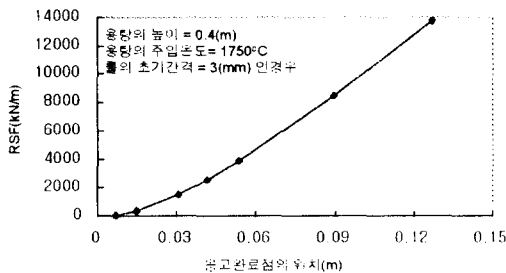


그림 6 응고완료점과 용탕의 압연력(RSF) 사이의 관계

Fig. 6. The relation between Nip point and RSF

3.2 공정변수 선정

앞의 시뮬레이션 결과를 다시 살펴보면 용탕의 높이가 증가함에 따라, 용탕의 회전속도가 감소함에 따라, 용탕의 초기간격이 줄어들어, 용탕의 초기온도가 낮아짐에 따라 응고최종점의 위치가 높아지며, 응고최종점의 위치가 높아짐에 따라, RSF 값은 지수함수적으로 증가함을 시뮬레이션 결과로부터 알 수 있다. RSF 값이 증가함에 따라 용은 과도한 하중을 받게 되어 용은 영구변형을 일으키게 되며, 이것은 제품의 품질뿐 아니라 조업의 안전성에도 악영향을 미치게 된다. 이러한 영구변형을 피하기 위하여, 용탕의 간격을 증가시키면 박판의 길이 방향으로의 두께에 변동이 생기게 된다. 이러한 관계에서 제품의 품질에 직접적인 영향을 미치는 것은 응고완료점의 위치라는 결과를 도출해 낼 수 있다. 그러나, 실제 실험에서는 응고완료점의 위치를 측정할 수 없으므로, 다른 공정 변수를 선정하여, 응고완료점의 위치를 제어 하여야 한다.

5. 결론

본 논문에서 연구된 박판 주조 공정은 용탕으로부터 직접 강판을 제조함으로써 압연공정 자체를 거의 없애 생산성을 향상시킨 획기적인 신주조 기술이다. 그러나 이러한 장점에도 불

구하고, 공정에 영향을 미치는 많은 공정변수들이 있어 설계 및 제어기술의 확립이 어려워 생산에 실용화하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위한 한 방안으로 공정에 영향을 미치는 여러 공정변수들 간의 관계를 해석을 통하여 정량적으로 도출하였고, 이들 공정변수 사이의 관계를 이용하여 제품의 질을 결정하는 중요한 공정 변수를 선정함으로써, 향후 공정의 제어를 위한 연구의 기본 작업을 진행하였다.

이러한 연구를 바탕으로 향후에는 제품의 질을 대변할 수 있는 공정변수 즉, 응고완료점의 위치를 예측하기 위한 연구가 진행되어져야만 할 것이다.

참고문헌

- William L. Roberts, " Hot rolling of steel ", New York : M. Dekker, pp. 649-898, 1983
- 이문도, 박현철, " 트윈롤 연속주조 공정에서의 용의 온도 분포 및 응력해석 ", 대한기계학회논문집, 제 16 권, 제 2 호, pp. 400-408, 1992
- Miyazawa, J. Szekely, " A mathematical model of the splat cooling process using the twin-roll technique ", Metallurgical Transactions A, Vol. 12A, June, 1981
- Saitoh, H. Hojo, H. Yaguchi, C.G. Kang, " Two-dimensional model for twin-roll continuous casting ", Metallurgical Transactions B, Vol. 20B, June, 1989
- Reichelt, W. Kapellner, " Near-net-shape casting of flat products ", Metallurgical Plant and Technology 2, pp.18-35, 1988
- Kiyoshi Shibuya, Michiharu Ozawa, " Strip casting techniques for steel ", ISIJ international, Vol. 31, No. 7, pp. 661-668, 1991
- Shigeru Miyake, Hirishi Yamane, Masao Yukumoto, Michiharu Ozawa, " Strip quality of highly alloyed metals by twin roll casting ", ISIJ international, Vol. 31, No. 7, pp. 689-695, 1991
- Hirohiko Takuda, Natsuo Hatta, Masayuki Teramura, Jun-ichi Kokado, " Simple model for thermal calculation in twin-roll strip casting process ", Steel research 61, No.7, 1990
- Toshiaki Mizoguchi, Ken-ichi Miyazawa, " Formation of solidification structure in twin roll casting process of 18Cr-8Ni stainless steel ", ISIJ international, Vol. 35, No. 6, pp. 771-777, 1995
- Hwang, H.J.Lin, W.S.Hwang, 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
- 김영도, " 용탕직접압연에 관한 실험적 연구 및 FDM/FEM에 의한 공정해석 ", 부산대 공학박사 학위논문
- 이진욱, 박석호, " 쌍롤 스트립주조법에서의 열전달 해석에 관한 수치연구 ", 대한기계학회 '91년도 추계학술대회 논문집, pp.612-615
- Chakrabarty J., " Theory of plasticity ", McGraw-Hill, pp.574-587, 1987
- Fiedler, M. Jurisch, P.Preiss, R. Gobel, G. Sickert, H. Zimmermann, W. Neumann, R. Sellger, " Thin strip casting by a twin roller pilot plant ", Materials Science and Engineering, A133, pp. 671-675, 1991
- M.Yukumoto, H. Yamane, " Thin strip casting of Ni base alloys by twin roll process ", ISIJ international, Vol. 35, No. 6, pp. 778-783, 1995
- H. Yasumaka, K. Taniguchi, M. Kokita, T. Inoue, " Surface quality of stainless steel type 304 cast by twin-roll type strip caster ", ISIJ international, Vol. 35, No. 6, pp. 784-789, 1995