

롤갭 시뮬레이터의 개발과 패스스케줄 개선

안재환*, 이영호*, 이인우**

자동화연구팀, 기술연구소, 동부제강*

냉연 파트, 표면처리강판팀, 인천공장, 동부제강**

Development of Rollgap Simulator and Its Application to Draft Schedule Adjustment

Jaehwan Ahn, Youngho Lee and In-Woo Lee**

Automation R&D Team, Tech. Research Labs., Dongbu Steel*

Cold Rolling Part, Surface Treatment Team, Incheon Works, Dongbu Steel**

Abstract

A fast, accurate model for calculating roll gap variables are critical to the implementation of computer based automation systems for cold rolling mills. Based on the work of Fleck and Johnson, rollgap simulator with non-circular arc model was developed using the influence function. This developed model is capable of predicting values of force, torque and slip which can be applied over the wide range of rolling conditions including cold rolling/DR/temper mill with high execution speed. Friction coefficient was obtained as a function of operation conditions through analyzing measured data. After combination of rollgap simulator with production strategy, draft schedule for No.3 RCM (Reversible Cold Rolling Mill) in Incheon works of Dongbu Steel was developed. This draft schedule will be installed in the setup computer of No.3 RCM replacing old Hitachi model.

Key words : Rollgap Simulator, Draft Schedule

1. 서론

판 압연 공정은 타 생산 공정과 비교하여 원료 소재 및 생산 제품의 다양성과 수요가가 요구하는 품질 조건의 엄격화 때문에 첨단 자동제어 기술이 개발/적용 되어 왔다. 또한 전산, 제어 기술, 센서, 이론 해석 기술 등의 발달과 더불어 고 정도, 고속 압연 기술을 구현키 위한 노력이 지속적으로 추진되고 있다.

압연 타입에 따라 압연 조업 특성이 변하게 되는데 이와 같은 특성은 다음의 주요인자로 표시할 수 있다. 첫번째는 평균 두께 h 와 접촉 원호 길이 L 의 비율인 롤갭 Aspect Ratio (h/L)이고 두 번째는 접촉 원호 길이와 롤의 편평량(Flattening)의 비율인 Roll Flattening Ratio(β) 이다. 1990년대 중반까지 상업적으로 활용되는 수준의 정확성을 갖는 롤갭 모델의 값 범위는 1.5 이하였고 이후 Non-Circular Arc 모델의 개발에 힘입어 값이 크고 부가가치가 높은 0.3mm이하 석판의 조절압연이나 알루미늄 등의 포일(Foil) 압연에 대한 예측 정확도가 올라가게 되었다.

압연소재의 두께가 충분히 두꺼울 경우, 압연 중 롤갭에서 스트립은 롤 바이트(Roll Bite) 입측에서 출측까지 탄성 압축(Elastic Compression), 소성 변형 (Plastic Deformation), 탄성 회복(Elastic Recovery)의 변형 과정을 거치게 된다. 이때 롤에 발생하는 압력의 분포는 전형적인

마찰언덕을 가지는 삼각형의 형태를 갖고 삼각형의 꼭지점에 스트립의 속도와 롤의 원주 속도가 일치하는 중립점(Neutral Point)이 위치한다.

한편, 입측 압연소재의 두께가 충분히 작아지게 되면 롤/스트립 접촉면에서의 롤의 형상은 원호형이 아닌 계단형으로 변하게 되고 스트립은 입측 탄성압축영역, 입측 소성변형영역, No-slip 중립영역, 출측 소성변형영역, 출측 탄성회복영역을 거치게 된다. 즉, 입측 두께가 충분히 클 경우에는 중립점 전후방부의 대부분의 영역에서 스트립이 소성변형을 일으키지만, 입측 두께가 작을 경우 스트립의 소성변형은 중립영역 전후방부의 좁은 영역에서 일어나게 되므로 이러한 현상을 적절히 반영하는 모델이 필요하다.

본 연구에서는 스트립의 두께에 비해 롤의 탄성변형이 큰 경우에도 적용 가능한 Non-Circular Arc 모델을 개발하고 이를 이용하여 인천공장의 RCM의 설정제어모델을 개선하였다.

2. Non-Circular Arc Model 개발

Non-circular arc Rollgap 모델은 평면변형 압축 가정하에 다음과 같은 요소로 구성된다.

- 소성영역에서의 롤 압력 모델
- 탄성영역에서의 롤 압력 모델
- 롤 변형 모델
- 항복 응력 모델
- 온도 모델
- 초기화 및 수렴 알고리즘

롤 프로파일과 롤 압력은 서로 강한 상호작용을 가지므로 수렴해를 얻기 위해 반복계산이 필요하다. 해를 얻는 과정은 초기 롤 프로파일로부터 기인하는 롤 압력을 구하는 것으로 시작된다. 스트립이 소성변형을 겪는 영역에서의 롤 압력은 오로완에 의해 정의된 비균질 함수를 이용하여 수평방향 평형식을 적분하여 구할 수 있다.

2.1 소성영역에서의 롤 압력

Orowan의 해석에서는 circular arc를 가정하여 롤 표면 위 어떤 점에서 롤 표면이 수평 방향과 이루는 각이 롤 수직 중심선이 그 점과 이루는 각과 동일하다. 하지만 Non-circular 해석에서는 두 각이 동일하지 않으므로 수평방향 힘에 대한 미분 방정식은 두개의 각을 각각 θ 와 ϕ 로 달리 표현하여야 하는데, θ 는 롤의 수직 중심선부터의 각을, ϕ 는 롤 표면과 수평방향 사이의 각을 나타낸다. 수평방향 힘, $t_f(\theta)$ 에 대한 미분 방정식은 슬립이 있을 경우 다음과 같다.

$$\frac{dt_f(\theta)}{d\theta} = -2R(\theta)\cos(\theta)s(\theta)(\tan(\phi) \pm \mu) \quad (1)$$

스티킹이 있을 경우에는, ($2\mu \sigma > k$ 일 경우)

$$\frac{dt_f(\theta)}{d\theta} = -2R(\theta)\cos(\theta)[s(\theta)\tan(\phi) \pm k] \quad (2)$$

윗 식에서 R은 롤의 반경, μ 는 마찰계수, $\sigma(q)$ 는 다음과 같은 롤의 수직 압력을 나타낸다.

$$s(\theta) = \frac{\left(\frac{t_f(\theta)}{h(\theta)}\right) + kw}{\left[1 \pm \mu\left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\tan\phi}\right)\right]} \quad (3)$$

윗 식에서 k 와 w 는 각각 항복 강도와 비균일 함수이다.

2.2 탄성 영역에서의 롤 압력

입출측 영역에서의 롤 압력 분포에 대한 모델은 수평방향 힘의 평형 방정식으로부터 유도된다. 입출측 영역에서의 전단응력의 변화량, $\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}$ 를 무시하면 장력 $t_f(\theta)$ 와 수직 응력 $p(\theta)$ 에 대한 미분 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dt_f(\theta)}{d\theta} = -\frac{2(\tan(\theta) \mp \mu)p(\theta)}{1 \pm \mu \tan(\theta)} \quad (4)$$

$$\frac{dp(\theta)}{dx} = \left(\frac{E}{1-\nu^2}\right) \frac{d\varepsilon_y}{dx} - \frac{2\nu(\tan(\theta) \mp \mu)p(\theta)}{h(\theta)(1-\nu)(1+\mu \tan(\theta))} \quad (5)$$

위에 나타난 미분 방정식은 입출측 영역에서는 입출측 접촉점으로부터 재료의 항복이 일어날 때까지 수치적분 하여야 하고, 출측 영역에서는 출측 접촉점으로부터 스트립의 두께가 최소인 점까지 적분하여야 한다. 계산된 응력값과 항복조건에 의해 결정된 응력값의 차이는 부차 반복계산에서 최소 스트립 높이를 보정하는데 이용된다.

2.3 롤 변형 모델

롤 압력 프로파일이 얻어지면 이에 따라 업데이트 되는 롤프로파일은 Jortner의 영향함수를 이용하여 얻어진다. 롤의 반경반향 변형 $\Delta R(\theta)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta R(\theta) = \frac{R}{\pi E_R} \int_{\theta_{entry}}^{\theta_{exit}} u(\theta - \theta') s(\theta') d\theta' \quad (6)$$

영향함수 $u(\theta)$ ($|\theta| > \alpha$)는 다음과 같다.

$$u(\theta) = (1-\nu-2\nu^2) \frac{\pi}{2} \cos(\theta) \cdot \text{sgn}(\sin(\theta)) + (1-\nu^2) \sin(\theta) \cdot \log_e \left[\tan^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \right] \Bigg|_{\zeta=\theta-\alpha}^{\zeta=\theta+\alpha} \quad (7)$$

θ 는 균일 압력이 걸리는 부채꼴 영역의 중심선과 영향점간의 각이고, α 는 압력이 걸리는 영역이 갖는 각의 반이다.

만약 θ 가 α 보다 작게 되면 해석에서 특이점이 발생한다. 이 경우 영향함수는 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$u(\theta) = \bar{u}(\theta) \frac{1}{\pi} (1-\nu-2\nu^2) \quad (8)$$

롤 압력과 롤 프로파일 사이의 반복계산은 안정된 해가 없어질 때까지 시행한다. 이러한 반복 계산 중에 발생하는 불안정으로 인해 해가 얻어지지 않기도 하는데, 이는 쿨롱 마찰 법칙에 기반한 마찰력이 롤 압력의 영향에 의해 급격하게 증가할 때, 롤 프로파일이 편평화되어 나타난다. 이 경우 롤이 오목하게 변형된 것으로 예측될 수 있고 이에 따라 스트립 두께가 증가한다. 이때, 스트립은 탄성 회복을 일으키도록 가정되어야만 하는데 이에 따라 롤 프로파일이 떨어지고 롤 압력이 급격히 떨어진다. 이러한 상호작용 과정을 통해 반복 계산 중 롤 압력이 급격히 증가

했다가 급격히 감소하는 알고리즘의 불안정성이 나타나는 것이다.

Fleck과 Johnson에 의해 제안된 해법은 롤 겹에서 롤 프로파일이 편평하고 평행하게 유지되는 영역이 존재한다는 가정에 기반한다. 이 영역에서 더 이상의 압하는 일어나지 않고 롤과 스트립 사이의 전단응력 또는 마찰 응력의 값이 쿨롱의 마찰 법칙에 의한 값보다 낮다고 가정하였다. 그들은 롤 프로파일이 증가하는 경우와 감소하는 두가지 다른 시나리오에 대한 추론을 통해 이들이 각각 물리적 현상과 항복 조건을 위배한다는 결론을 통해 위와 같은 가정을 도출하였다. 또한 이 영역에서 롤의 편평화를 유지하는데 필요한 마찰력 값을 유도하였다.

이러한 가정의 결과로 구속된 소성 유동역(constrained plasticity flow region)에서의 소성 방정식으로 롤 압력을 예측하는 것이 불가능하게 되었고 롤 변형 영향함수에 의해 정의된 롤 압력 관계를 역변환하여 롤 압력을 예측하여야 한다.

이산화한 형태에서, i 번째 절점에서의 롤 변형은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta R(i) = \frac{R}{\pi E_R} \sum_{j=0}^{j=n} s(j) U_d(\text{abs}(i-j)+1), \quad U_d(|i-j|+1) = u(2 \times (|i-j|+1) \times \alpha) \quad (9)$$

$s(j)$ 는 j 번째 절점에서의 롤 압력이고, E_R 은 롤의 탄성 계수이다. 편평영역에 있는 k 번째 절점에서는,

$$\sum_{j=j_1}^{j=j_2} u^*(i,k) s(j) = \frac{\pi E_R}{R} (\Delta R(i) - \Delta R(k)) - \sum_{j=1}^{j=j_1-1} u^*(i,k) s(j) - \sum_{j=j_2+1}^{j=n} u^*(i,k) s(j) \quad (10)$$

$$u^*(i,k) = U_d(|i-j|+1) - U_d(|k-j|+1) \quad (11)$$

j_1 과 j_2 는 각각 편평화된 영역의 첫번째와 마지막 절점이다.

롤이 편평하다는 가정으로부터 $\Delta R_k, (k = j_1 \cdots j_2)$ 항이 결정될 수 있고, 위의 선형방정식들로부터 $s(k)$ 를 역산할 수 있다. 이렇게 롤 압력 프로파일 $s(\theta)$ 를 얻은 후, 마찰력이 수평방향 평형 방정식으로부터 바로 구해질 수 있다.

롤 편평화가 확연히 일어나는 경우에 구속 소성 유동 영역의 끝에 압력 스파이크(spike)가 나타난다. 이 스파이크는 통상적인 압연이론에서의 중립점에 해당한다.

개발한 모델의 중요한 특징은 반복계산은 변형되지 않은 롤 프로파일로부터 시작한다는 것이다. 각각의 절점에서 롤의 반경이 계산된 후, 롤 프로파일로부터 스트립두께의 국부 최소점 유무를 찾는다. 만약 입측부에서 최소점이 존재하면 구속 소성 유동이 그 점으로부터 시작한다고 간주한다. 이러한 접근법을 통해 구속 소성 유동역을 갖지 않는 고전 롤해석을 가능하게 되고 개발된 모델이 광범위한 압연 문제에 대한 예측을 가능하게 된다.

2.4 항복응력 모델

냉간 압연된 스트립의 평면변형 항복응력 $k(\epsilon, \dot{\epsilon}, \Theta)$ 은 전형적으로 냉간가공의 정도 ϵ 와 변형율 속도 $\dot{\epsilon}$ 와 온도 Θ 에 의존한다. 이러한 관계는 종종 분리된 요소의 합으로 표현된다.

$$k(\epsilon, \dot{\epsilon}, \Theta) = k(\epsilon, 0, \Theta_0) + \Delta k_{\dot{\epsilon}} + \Delta k_{\Theta} \quad (12)$$

우변의 두번째와 세번째 항은 각각 변형율과 온도의 효과를 나타내고 $k(\epsilon, 0, \Theta_0)$ 는 상온의 저 변형율 속도에서의 일축 압축 시험의 측정 결과이다. Gokyu에 의해 제안된 저탄소강에 대한 전형적인 항복응력 모델은 다음과 같다.

$$k(\varepsilon, 0, \Theta_0) = c_{y1} (c_{y2} + \varepsilon)^{c_{y3}} \quad (13)$$

$$\Delta k_\varepsilon(\dot{\varepsilon}) = c_{y4} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{c_{y5} c_{y6}^\varepsilon} \right)^{c_{y7}(\Theta+273)} \quad (14)$$

$$\Delta k_\Theta(\Theta) = c_{y8} \sqrt{\Theta} k(\varepsilon, 0, \Theta_0) \quad (15)$$

2.5 온도 모델

스트립 항복응력은 온도의 함수이므로 스트립의 온도해석이 중요하다. 스트립의 단위 체적당 열 유동은 세가지에 기인한다 ; 스트립을 통해 균일하게 분포한다고 가정된 변형에너지 E_r 과 롤과 스트립 계면에서의 상대적 움직임에 의한 마찰에너지 E_f , 스트립과 롤 사이 전도에 의한 전도에너지 E_c . 롤 갭을 통한 스트립 평균 온도 Θ 의 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\Theta(x^*) = \Theta(1) + \frac{E_s(x^*)}{\rho_s C_s} \quad (16)$$

여기서 x^* 는 출측부터 측정되는 무차원화된 위치이고 $E_s(x^*)$ 는 무차원화된 지점으로 표시된 스트립의 한 점에서의 축적된 에너지이며 ρ_s 와 C_s 는 각각 스트립의 밀도와 비열이다. 만약 E_s 를 롤갭 전길이에 있어서의 순수 스트립 에너지로 정의된다면

$$E_s = \beta_1 E_r + (1 - \beta_2) E_f - E_c \quad (17)$$

β_1 은 변형에너지가 열에너지로 변환되는 비율을 나타내고, β_2 는 마찰에너지가 롤로 전달되는 비율을 나타낸다. 에너지 수지(balance)에 의해 작업롤로 흐르는 에너지 E_{RW} 은

$$E_{RW} = E_c + \beta_2 E_f \quad (18)$$

균일 변형이 일어난다면 E_r 과 E_f 의 특성 에너지항은 다음과 같이 표현된다.

$$E_r = \int_h^H \frac{k(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \Theta)}{h'} dh', \quad E_f = \frac{2\mu}{Lh} \int_0^l \left| \frac{\Delta v(x')}{v} \right| s(x') dx' \quad (19)$$

여기서 $\Delta v(x)$ 는 스트립과 롤의 상대 속도 차이이며 v 는 스트립의 출측 속도이다.

전도항 E_c 의 계산은 무차원화한 두께 h^* , $\frac{h}{4\sqrt{\alpha_s \tau_g}}$ 의 값에 따라 다른 접근법이 필요하다. 위에서 α_s 는 스트립의 열확산계수이고 τ_g 는 스트립의 롤갭내 통과시간이다. 무차원 두께 h^* 가 1보다 확연히 크면, 스트립과 롤은 두개의 무한한 고체가 짧은 시간 τ_g 동안 접촉하는 문제로 근사할 수 있다. 이 경우 E_c 에 대한 근사해는 다음과 같다.

$$E_c = \frac{4\rho_s C_s \beta_2 (\bar{\Theta} - \Theta_R)}{h^* \sqrt{\pi}}, \quad \bar{\Theta} = \frac{1}{3} \Theta(1) + \frac{2}{3} \Theta(0), \quad \beta_2 = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_s C_s k_c}{\rho_R C_R k_R}}} \quad (20)$$

Θ_R 은 롤갭 입측 롤 표면의 초기온도이다. 표면 스케일층이나 윤활 필름의 효과가 추가될 수

있다.

전형적으로 h^* 가 1인 조건은 알루미늄 0.4mm와 스틸 0.2mm에 해당하는데, 이 경우 위와 같은 근사는 박판압연에 적합하지 않다. h^* 가 1보다 훨씬 작은 경우 스트립의 초기 온도는 거의 영향을 주지 못하고 롤의 표면 온도와 거의 같게 된다. 이러한 경우들에 있어 발생한 에너지 ($E_r + E_f$)의 대부분은 롤로 흘러가게 된다. 스트립과 롤은 단열된 무한체의 표면에 시간에 따라 달라지는 열유동이 가해지는 것으로 근사할 수 있다. 롤/스트립 계면의 온도에 대한 엄밀해는 다음과 같다.

$$\Theta(t) = \frac{E_{RW} h v}{k_R L} \sqrt{\frac{\alpha_R \tau_g}{\pi}} \quad (21)$$

윗 식을 에너지 수지와 결합하여 롤갭을 통한 스트립표면의 온도를 예측할 수 있다.

2.6 초기화와 수렴 알고리즘

수치해석 시간을 단축하기 위해 해석을 위한 절점 수를 가변하게 하였다. 롤갭 해석을 위한 절점수를 초기에는 적게 잡지만 롤이 편평화가 됨에 따라 소성변형이 일어나는 두 영역에서의 절점수를 최소로 유지하면서 전체 절점수를 증가시킨다. 일반적으로 소성 변형 영역을 60개의 절점으로 해석했을 때 발생하는 오차는 최대 5% 정도이다.

2.7 압연인자의 계산

단위 길이당 압하력은 수직방향 롤압력을 접축호에 걸쳐 적분함으로써 얻을 수 있다.

$$P = \int_{\theta_{entry}}^{\theta_{exit}} p(\theta) d\theta \quad (22)$$

선진율 f 는 균질 변형 가정하에 중립점에서의 물질 유동으로부터 계산 가능하다. 즉, 스트립 속도는 롤갭내 수직방향 위치에 무관하고 같은 속도를 갖는다는 뜻이다. 본 연구에서는 스트립과 작업롤의 속도 차이를 작업롤 속도로 나누어 백분율로 표시하고 이를 slip이라 정의하였다. (즉, $slip = 100(f-1)$)

롤 토크 계산을 위해 통상적인 운동량 적분법 대신 수치해석적으로 안정적이고 물리적으로 타당한 결과를 나타내는 에너지 수지에 기반한 접근법을 택하였다.

$$E_r + E_f = E_m + E_t \quad (23)$$

여기서,

- E_r : 스트립의 변형 에너지
- E_f : 스트립과 롤 표면 사이의 마찰 에너지
- E_m : 구동계의 기계적 에너지
- E_t : 스트립 장력에 의한 에너지

상하 작업롤에 작용하는 토크 T 는 다음과 같이 계산된다.

$$T = R h f (E_r + E_f - E_t) \quad (24)$$

3. 패스스케줄 작성 S/W 개발

열연 코일을 원하는 두께로 압연을 할 때 토탈 압하율이 클 경우 한 번의 압연으로 목표 두께까지 압연할 수가 없다. 따라서 여러 번의 압연을 통해 목표두께까지 압연을 하여야 하는데, 이 과정 중 개별 압연을 패스라고 하고 각각의 패스에서 어떤 두께까지 압연할 것인지를 알려주는 것이 패스스케줄이다. 이러한 패스스케줄은 조업자의 경험을 반영하여야 하고 최종제품의 품질을 저하하지 않는 범위에서 작업의 생산성을 최대한 올릴 수 있도록 설계되어야 한다. 따라서 설비의 특성과 조업의 특성 및 개별 압연현상에 대한 정량적 이해가 필수적이다.

3.1 패스스케줄 작성시 고려사항

패스스케줄러는 앞서 개발한 롤갭 시뮬레이터를 기반으로 조업경험을 고려한 생산전략을 일련의 논리를 통해 구현한 S/W이다. 압연에 있어서 압하 패스스케줄은 주로 각 패스별 압하율, 입출측 장력 및 압연속도, 초기압하 실린더 압력 등으로 구성되는데 생산성, 작업성 및 품질의 안정성에 영향을 미치기 때문에 적정 압연상태를 정하고 그 압연상태가 되도록 압연재료, 압연운할, 압연기 고유의 특성을 고려하여 효율성 있게 작성하여야 한다.

3.1.1 압하율 배분

압하율 배분 방식에는 이론적 압하배분방식과 치입성, heat scratch방지, 표면 형상 등 경험적인 사항을 고려하여 조정하는 경험적 압하율 배분 방식이 있다.

3.1.2 장력 배분

입출측 장력은 너무 높으면 판과단을 일으키고 너무 낮으면 스트립의 형상이 불량해지기 때문에 조업경험을 기초로 강종 및 압연조건 별 단위 설정장력을 관리해야 한다. 여기서 단위장력 U_t 는 다음과 같이 결정된다.

$$U_t = \text{tension} / (\text{width} * \text{thickness}) \quad (2-52)$$

3.2 입력 데이터

패스스케줄을 작성하기 위해 프로그램에 입력해야 할 데이터에는 작업롤의 직경, 스트립의 강종, 스트립의 폭, 열연 코일의 두께, 압연시 입측 스트립 두께, 목표두께 등으로 구성된다. 스트립의 강종은 성분 및 변형저항 특성을 고려 그룹으로 나누고 동일 그룹내에서는 동일 압하 패스 스케줄을 작성하도록 하여 향후 압연 실적 데이터를 이용 세분화하도록 하였다.

3.3 각 패스별 압하율의 결정

패스별 압하율은 평균 압하율을 근거로 전체적인 패스의 수 및 압연조건에 맞는 압하량이 결정될 수 있도록 하였다.

압하율의 분포는 조업조건, 강종 등에 따라 조업경험에 의해 결정되는데 특히 첫패스에서는 압연 해석후 slip 값을 검토하여 롤과 스트립간 과도한 슬립이 일어나지 않도록 하였다.

동일 강종인 경우에도 스트립 폭의 대소에 따라 압하력, 압연현상, 작업성이 달라지게 되므로 이에 대응하여 강종별 폭에 따라 압하율을 제어할 수 있어야 한다.

상기의 항을 고려하여 각 패스별 압하율이 결정되는데 압연 압하력이 설비 능력치를 증가하지 않도록 파라미터를 선정하여 압하율을 조정하여야 한다. 또한 가능한 정도까지 패스별 압하력이 비슷하도록 하였다.

3.4 장력의 결정

장력은 판과단, 압연판의 형상에 중요한 요인으로 조업의 경험적인 요인이 적절히 결정되도록 하였다.

4. 결과

4.1 롤갭 시뮬레이터의 적용성

본 연구를 통해 개발한 롤갭 시뮬레이터를 이용하여 압하율을 20%로 고정하고 투입두께를 0.1mm, 0.5mm, 2.0mm로 변화시킨 조건에 대한 해석을 행한 결과를 Fig.1 에 나타내었다. 이 결과로부터 개발한 시뮬레이터가 일반적인 냉간압연현상을 포함하여 조질압연 및 극박압연현상까지도 적절하게 모사함을 알 수가 있다.

4.2 마찰계수

압연시 압하력은 입출측 두께, 폭, 입출측 장력, 속도, 롤경, 마찰계수, 소재종류 등에 의해 영향을 받는다. 이중 마찰계수는 실측이 불가능한 반면 압하력에 미치는 영향은 가장 커서 마찰계수를 어떻게 평가하느냐에 따라 압하력 예측을 얼마나 정확하게 할 수 있는가가 결정된다고 할 수 있다.

Fig. 2 에 No.3 RCM의 실측 자료를 바탕으로 마찰계수를 역산한 결과를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 마찰계수 값은, 분석한 결과, 첫패스에서 0.12 정도의 값에서부터 마지막 패스시 0.04 정도까지 감소함을 알 수 있다. 마찰계수는 롤조도, 판조도, 윤활유, 압연속도 등에 의해 영향을 받는 것으로 설비특성 및 조업특성에 따라 다르다. 아산만 공장 TCM의 경우 마찰계수값은 0.02-0.03 정도의 범위로 RCM보다 낮은 값을 갖는다. TCM에서 조도 부여를 위해 마지막 롤을 덜롤(Dull Roll)로 작업할 경우 롤의 마찰계수는 대략 0.12 값으로, 이 값은 RCM의 경우 조도 0.06의 롤로 첫패스 작업시 갖는 값과 비슷하다.

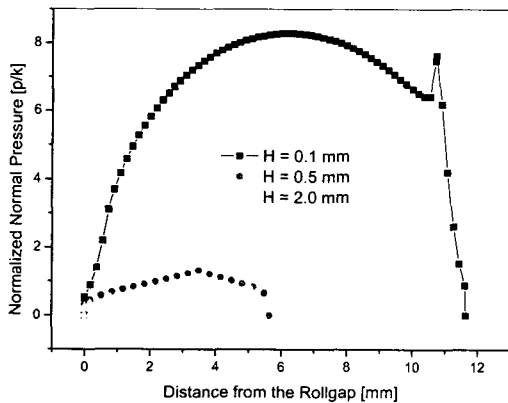


Fig.1 Roll Pressure profile of cold rolling

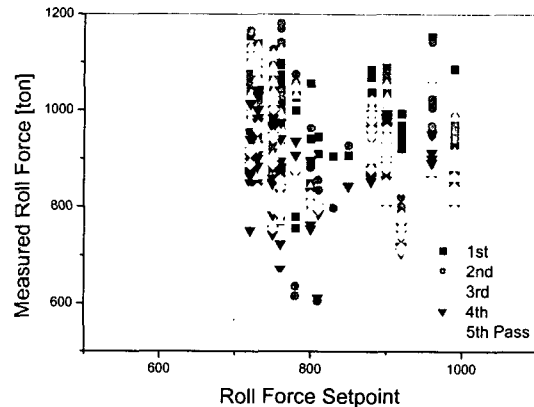


Fig.2 Accuracy of the old model for roll force prediction

4.3 패스스케줄 현황(2003)

Fig. 3 는 2003년도 8월달에 No.3 RCM에서 수집한 조업자료를 바탕으로 패스별 압하력 설정치의 정확성을 분석한 결과이다. 가로축을 압하력 설정치로 하고 세로축을 실측 압하력으로 하여 점으로 나타내었다. 2003년 8월 현재 채택되고 있는 패스스케줄은 폭과 투입두께 및 목표두께에 대한 정보를 바탕으로 기작성된 120여개의 패스스케줄 중 하나로 선택되는데, 강종 별 특성 및 메이커별 특성 등을 포함한 작업 조건을 적절히 반영하지 못하고 있는 실정이다.

4.4 패스별 마찰계수 분석

압연시 압하력은 입출측 두께, 폭, 입출측 장력, 속도, 롤경, 마찰계수, 소재종류 등에 의해 영향을 받는다. 이중 마찰계수는 실측이 불가능한 반면 압하력에 미치는 영향은 가장 커서 마찰계수를 어떻게 평가하느냐에 따라 압하력 예측을 얼마나 정확하게 할 수 있는가가 결정된다고 할

수 있다.

Fig. 4 는 Fig. 3 에서 분석한 마찰계수값을 패스별로 회귀분석한 후 이 값과 그 때의 조업 조건을 롤갭 시뮬레이터의 입력 변수로 하여 예측한 압하력과 실측압하력 사이의 관계를 나타내는 그림이다. 그림에서 실측값 대비 설정값의 차이가 5%인 범위를 직선으로 나타내었는데, 대부분의 결과가 95% 이상의 정확도를 나타내고 있다. 이러한 정확도는 강종별, 메이커별 분류 및 조업조건에 대한 광범위하게 수집된 데이터를 바탕으로 더욱 세밀하게 이루어짐으로써 더욱 향상될 것으로 기대된다.

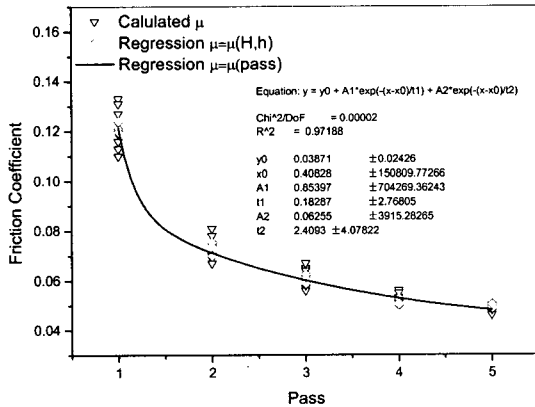


Fig.3 Variation of friction coefficient

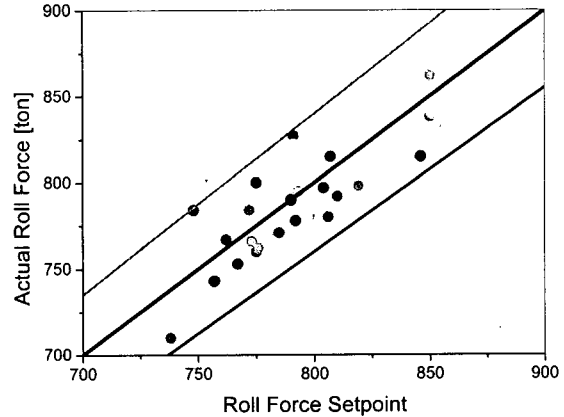


Fig.4 Accuracy of the developed model for roll force prediction

4.5 패스스케줄 설정

Fig. 5 에 개발한 S/W의 실행화면을 나타내었다. 롤 및 코일에 대한 정보와 목표 두께에 대한 정보를 입력되면 적정 패스수와 패스별 압하배분 및 압하력에 대한 설정치가 계산된다. 현재는 조업자가 일일 생산 지시서를 받아서 패스스케줄에 대한 입력치를 직접 입력하는 방식이지만 생산 관제 시스템과의 인터페이스를 통해 조업자의 입력 행위를 줄이도록 준비중이다.

동부제강 인강공장 #3RCM 패스스케줄 Mon Jul 19 17:40:58 2011

소재 데이터

열연 두께: mm 강종: 용량: ton 코일 번호:
 입속 두께: mm 입속 폭: mm 메이커:
 출속 두께: mm 입속 소재 온도: 도 길이: mm 작업조:

TECHICAL DATA

워크롤 지름: mm 중간롤 지름: mm
 백업롤 지름: mm 스트립 최대 속도: rpm

PN	출속 두께 [mm]	진입압 [Ton]	출입압 [Ton]	전방단위 압력 [kg/mm ²]	후방단위 압력 [kg/mm ²]	입구압 강하율 [%]	압하율 [%]	POWER [kW]	POWER [k]	동할 압하력 [TON]	선압하력 [kN/mm]	마할 계수	스트립 속도 [m/min]	워크롤 속도 [m/min]	선정률 [%]	스트립 온도 [℃]	TORQ [kgm]
1	2.839	16.19	16.27	49	55	0.98	11.3	2189.47	98.61	648.97	6.23	0.060	569	569	0.62	28	41.44
2	2.516	16.27	16.27	55	62	0.99	11.4	2178.30	99.01	674.78	6.48	0.055	569	569	0.59	47	41.60
3	2.212	16.27	16.27	62	71	1.05	12.1	2174.22	98.83	699.34	6.71	0.052	569	569	0.64	67	41.53
4	1.926	16.27	16.00	71	80	1.12	12.9	2178.12	99.01	712.97	6.84	0.050	574	574	0.69	86	41.27
5	1.672	16.27	14.26	81	82	1.14	13.2	2190.73	99.12	705.45	6.77	0.048	575	577	0.62	104	41.25
6	1.473	14.57	12.84	84	84	1.03	11.9	2177.14	98.96	669.01	6.42	0.047	695	1000	0.56	120	34.01
7	1.289	13.07	11.43	85	85	1.08	12.5	2181.39	99.15	672.33	6.45	0.046	729	997	0.63	131	32.50
8	1.200	11.50	5.37	86	40	0.60	6.9	2189.97	99.54	544.54	5.23	0.045	871	995	-0.04	141	27.15
9																	
10																	

Fig.5 HMI screen of the developed pass scheduling Software

5. 향후 계획

최근 냉간 압연의 원료인 핫코일의 원료 수급이 원활치 않아 기존의 공급업체의 삼국 소재의 사용량이 늘어나고 있는 실정이다. 같은 강종이라도 메이커별 편차가 존재하여 조업성이 떨어질 가능성이 있어 이에 대한 상세 튜닝 작업이 요구된다. 향후 롤 스택의 변형 모델의 개발과 평탄도 예측 모델 및 설정 제어 모델을 개발하여 Mill Setup S/W을 자체 기술로 완성할 예정이다.

참고문헌

1. N A Fleck, K L Johnson, Proc Instn Mech Engrs, Vol.206, pp. 119-131(1992)
2. N.A. Fleck, K.L.Johnson, Int. J. Mech. Sci., Vol.29, No.7, pp. 507-524(1987)
3. E. Orowan, Proc. Instn Mech. Engrs, Vol.150, pp.140-167(1943)
4. A. J. Carlton, W.J.Edwards and P.J.Thomas, IAS Technical Report, pp.223-248
5. D.R.Bland and Hugh Ford, Proc. Instn Mech. Engrs, Vol.159, pp.144-153(1948)
6. Jortner, D., Osterle, J.F. and Zorowski, C.F., Int. J. Mech. Sci., Vol.2, pp.179-194(1960)