

고강도강의 냉간 조질 압연 시 호일 압연이론을 이용한 압연하중의 예측

송길호^{*†}, 정제숙^{*}

* 포스코 기술연구원 압연계측연구그룹

Roll Force Prediction of High-Strength Steel Using Foil Rolling Theory in Cold Skin Pass Rolling

Gil Ho Song^{*†} and Jae Chook Jung^{**}

* Rolling & Measurement Research Group of Posco Technical Research Laboratory

(Received July 3, 2012 ; Revised October 5, 2012 ; Accepted October 8, 2012)

Key Words : Skin Pass Rolling(조질압연), Rolling Force(압연하중), Foil Rolling(호일압연), Roll Bite(롤 바이트), Flattening Deformation(편평변형), Non Circular Arc Model(비 원호모델)

초록: 냉간압연 및 소둔공정에서의 조질압연 과정은 강종별로 적정 연신율을 부여함으로써 프레스 가공시 항복점 연신 현상을 제거해주는 중요한 공정이다. 적정 연신율 확보를 위해서는 강종별, 사이즈별 정확한 압연하중 예측이 필수이다. 열간 및 냉간압연과는 달리 조질압연에서는 2%이내의 연신율을 부과하는 공정이므로 압연하중 작용 시 롤 바이트 내에서의 롤의 탄성변형 거동이 복잡하여 정확한 압연하중을 예측하기가 어려워 예측모델이 정립되어 있지 않다. 그럼에도 불구하고 최근 인장강도 590MPa 급 이상의 자동차용 고강도강 개발이 가속화 됨에 따라 조질압연시 정확한 압연하중의 예측은 더욱더 중요하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 조질 압연 시 롤 바이트 내에서 롤의 변형거동이 유사하다고 알려져 있는 호일(foil)압연 이론식을 이용해 조질 압연 시 전체 생산 강종을 대상으로 압연하중 예측 가능성에 대해 검토하였다. 그 결과 인장강도 350MPa 이상 980MPa 이하의 강종에 대해서는 non circular model 이 circular 모델보다 압연하중 예측 정도가 우수하며, 이 영역에서 압연하중 예측 모델로의 적용이 가능함을 확인하였다.

Abstract: Skin pass rolling is a very important process for applying a certain elongation to a strip in the cold rolling and annealing processes, which play an important role in preventing the stretching of the yield point when the material is processed. The exact prediction of the rolling force is essential for obtaining a given elongation with the steel grade and strip size. Unlike hot rolling and cold rolling, skin pass rolling is used to apply an elongation of within 2% to the strip. Under a small reduction, it is difficult to predict the rolling force because the elastic deformation behavior of the rolls is complicated and a model for predicting the rolling force has not yet been established. Nevertheless, the exact prediction of the rolling force in skin pass rolling has gained increasing importance in recent times with the rapid development of high-strength steels for use in automobiles. In this study, the possibility of predicting the rolling force in skin pass rolling for producing various steel grades was examined using foil rolling theory, which is known to have similar elastic deformation behavior of rolls in the roll bite. It was found that a noncircular arc model is more accurate than a circular model in predicting the roll force of high-strength steel below TS 980 MPa in skin pass rolling.

- 기호설명 -

2a : 롤과 스트립의 접촉길이
b0, b2 : 입, 출측 스트립 두께
R : 작업 롤(Work roll) 반경

R' : 편평(flattened) 작업 롤 반경
 σ_x, σ_z : x, z 방향으로의 인장응력
 τ : 전단응력
q : 마찰응력
 ω : 각 속도
 p_0 : 롤 바이트 내 최대 압력
 $p(x)$: 압력분포

- a_0, a_2 : 롤 바이트 접촉길이 시작점 및 끝점
 K_p : 탄성모델에서 압력분포를 위한 비례상수
 Δb : 압하에 의한 스트립 두께 변동량의 1/2
 μ : 마찰계수
 Y_S : 스트립의 항복응력
 U : 무 차원 수($= \frac{\mu E_R^*}{Y_S}$)
 E_R^*, E_S^* : 롤과 스트립의 평면변형 Young's modulus
 E' : 강성계수($\frac{1}{E'} = \frac{(1-2\nu_R)(1+\nu_R)}{E_R} + \frac{\nu_S(1+\nu_S)}{E_S}$)
 r, r_1 : 전체 압하율 및 롤 바이트 중간지점에서의 압하율
 L_3, L_4, L_5, L_6, L_7 : 상수
 $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \gamma$: Non-slip 영역에서 stress 를 정의하기 위해 사용된 파라메타
 l_d : 압연시 롤과 스트립의 접촉길이

1. 서론

냉간 압연 및 소둔 공정에서의 조질 압연 과정은 강종별로 적정 연신율을 부여함으로써 프레스 가공 시 항복점 연신 현상을 제거해주는 중요한 마무리 공정이다. 적정 연신율 확보를 위해서는 강종 별, 사이즈 별 정확한 압연하중 예측이 필수이다. 열간 및 냉간 압연과는 달리 조질 압연에서는 2%이내의 연신율을 부과하는 공정이므로 압연하중 작용 시 롤 바이트 내에서의 롤의 탄성변형 거동이 복잡하다. 따라서 정확한 압연하중을 예측하기가 어려워 예측모델이 아직 정립되어 있지 않다. 그럼에도 불구하고 최근 인장강도 590MPa 급 이상의 자동차용 고강도 강 개발이 가속화 됨에 따라 요구되는 기계적 성질을 확보하기 위해 조질 압연 시 정확한 압연하중의 예측은 더욱더 중요하게 되었다. 조질 압연 시 압연하중 예측에 대한 연구 결과는 1990년대 중반부터 보고되기 시작하였다. 그 대부분이 Fleck & Johnson⁽¹⁾에 의해 정리된 호일(foil)압연 이론 식을 근거로 하고 있다. Fleck & Johnson은 thin plate 및 호일압연 시 압연하중을 예측할 수 있는 이론을 정리하여 1987년에 보고하였다. 그 핵심은 압연하중이 작용할 때 롤 바이트 내에서 롤의 탄성변형은 열간 및 냉간 압연 하중 예측 시 가정하는 원호⁽²⁾형태가 아니라 비-원호 형태가 되며 no-slip 구간이 포함된다는 것이다. 이 이론은 Bland & Ford 및 Ford & Alexander⁽³⁾에 의해 최초 제안되어 Johnson & Bantall,⁽⁴⁾ Grimble⁽⁵⁾ 및 Quan 등⁽⁶⁾에 의해 추가적

으로 연구가 되었다. 하지만 상기 연구에서는 공통적으로 롤 바이트 내에서 롤의 탄성변형은 비-원호 형태로 가정했지만, 롤 바이트 내에서 no-slip 구간이 존재함을 간과하였다. 조질 압연 공정은 2%미만의 연신율을 부여하는 공정으로 롤 바이트 내에서 롤의 탄성변형 거동이 Fleck & Johnson에 의해 정리된 호일압연 시 롤의 탄성변형 거동과 유사하다. 따라서 철강 프로세스 관련 연구자들은 조질 압연 시 압연하중 예측 모델을 검토하기 위해 Fleck & Johnson의 호일압연 이론을 도입하여 그 타당성에 대해 보고하고 있다. Yuen 등^(7,8)은 상기 이론을 근거로 조질 압연 시 오프라인 및 온라인 모델을 만들기 위해 검토한 연구를 수행한 바 있다. 또한 최근에는 유한요소해석^(9,10)을 통해 조질압연시 롤 바이트 내에서의 롤의 탄성변형 거동 및 압연하중 예측 정도를 파악하고자 하는 연구도 많이 진행되고 있다. 하지만 현재 개발 강종의 추세는 인장강도 590MPa 급 이상의 고강도 강 인데도 불구하고 보고된 자료는 거의 일반강을 대상으로 하고 있다. 따라서 고강도강의 경우, 일정하중을 받았을 때 재료가 쉽게 소성변형하는 일반강과는 달리 재료의 변형저항이 상당히 증가하게 되므로 롤 바이트내에서 롤의 탄성변형 거동은 비-원호 모델에서 제시하는 각 영역별 특성이 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 당사에서 생산하고 있는 냉연강판 전체 강종을 대상으로 Fleck & Johnson 모델의 적용 가능성에 대해 검토, 정리하고자 하였으며 그 결과를 기존 압연하중 예측 모델과도 비교하였다.

2. Non Circular Arc 모델

2.1 스트립(strip)의 거동

Fig. 1은 일반적인 열간 및 냉간 압연 시 압연하중 예측 식을 유도하기 위해 적용하는 모델을 나타낸다. 이 모델로부터 스트립은 균일변형(homogeneous deformation)을 하며, 폭 방향 변형이 없다고 가정하면 스트립 두께방향으로의 응력분포는 식(1)과 같이 된다. 본 내용에 나타난 식(1)~식(20)은 참고문헌 [6]에서 인용한 식이다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial(z/b_0)} \left(\frac{\tau}{p_0} \right) &= - \left(\frac{b_0}{a} \right) \frac{\partial}{\partial(x/a)} \left(\frac{\sigma_x}{p_0} \right) \\
 \frac{\partial}{\partial(z/b_0)} \left(\frac{\sigma_z}{p_0} \right) &= - \left(\frac{b_0}{a} \right) \frac{\partial}{\partial(x/a)} \left(\frac{\tau}{p_0} \right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

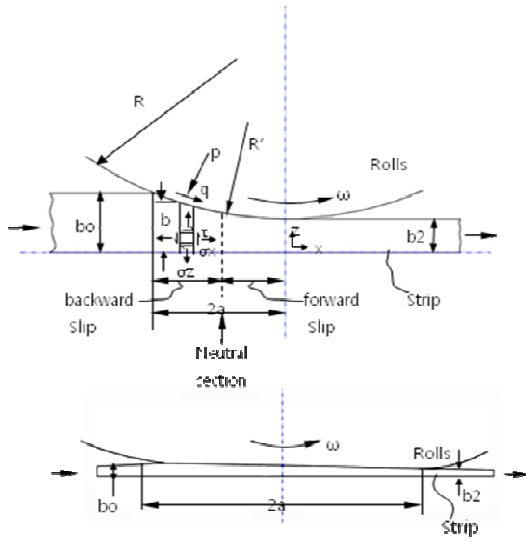


Fig. 1 Cold rolling of (a)thick strip and (b) thin strip

식 (1)에서 박막 호일의 조건 즉, $b_0/a \ll 1$ 을 고려하면 스트립 두께방향으로의 응력변화는 무시할 수 있으며, Fig. 1 의 미소면적에 작용하는 σ_z, σ_x, q 는 수직응력 p 에 비해 아주 작은 값을 가지게 되며, 또한 σ_z, σ_x 는 주 응력으로 취급할 수 있게 된다. 따라서 압연방향으로의 힘의 평형방정식은 최종적으로 식 (2)와 같이 된다.

$$b \frac{d\sigma_x}{dx} + (\sigma_x - \sigma_z) \frac{db}{dx} + q = 0 \quad (2)$$

2.2 롤(roll)의 거동

박막 호일 압연과 같이 소성 압축 변형량에 비해 탄성 압축 변형 량이 큰 경우 롤 바이트 내에서의 전체 압력분포는 거의 Hertzian 압력분포와 유사하며 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(x) = p_0 \sqrt{1 - (x/a_0)^2} - K_p \Delta b \quad (3)$$

2.3 롤 바이트 내 각 영역별 특징

Fig. 2 는 박막 호일 압연 시 롤 바이트 내에서의 스트립의 변형거동 및 slip 특성에 따라 구분된 영역을 나타내며, 각 영역에서의 특성은 다음과 같다. 영역 A 에서 스트립은 탄성변형을 하며, 스트립 두께의 변화는 없다. 영역 B 및 F 에서 스트립은 소성변형을 하며 스트립과 롤 간에 슬립(slip)이 발생한다. 또한 영역 C,D,E 에서 스트립은 소성변형을 하지 않으며 특히, 영역 D 에서는 슬립이 발생하지 않는다. 그리고 영역 G 에서 스트립은 탄성변형을 하며 스트립의 속도는 롤의 속도보다 빠르게 된다.

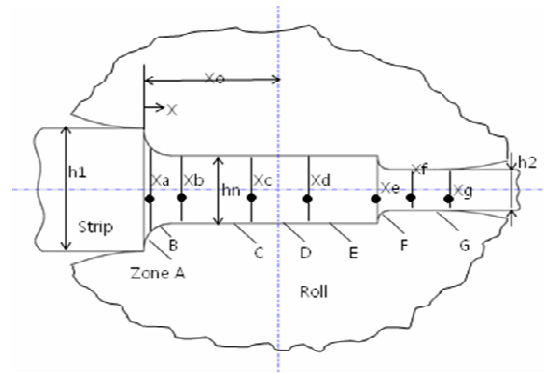


Fig. 2 Non circular arc model

2.4 롤 바이트 내 각 영역별 응력 계산

Fig. 2 에 나타낸 각 영역에서의 압연방향 및 스트립 두께 방향으로의 응력은 다음과 같이 각 영역 별로 제시된 수식에 의해 계산된다.

[영역 A]

$$\frac{-\sigma_z}{p_0} = \frac{p}{p_0} = \sqrt{1 - (x/a_0)^2} \quad (4)$$

$$\frac{-\sigma_x}{p_0} = \frac{1}{2} \frac{\mu a_0}{b_0} \left[\frac{x}{a_0} \sqrt{1 - (x/a_0)^2} + \sin^{-1} \frac{x}{a_0} + \pi/2 \right] \quad (5)$$

[영역 B]

$$\frac{\sigma_x}{p_0} = \frac{\sigma_z}{p_0} + \frac{Y_S}{p_0} \quad (6)$$

$$\frac{d(\sigma_z/p_0)}{d(x/a_0)} = \frac{-\left(\frac{\sigma_z}{p_0}\right) + \frac{1}{U} \frac{E_R^*}{a_0 K_p} \frac{x/a_0}{\sqrt{1 - (x/a_0)^2}}}{\frac{b_0}{\mu a_0} - \frac{E_R^*}{a_0 K_p} \frac{a_0}{2\mu R} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a_0}\right)^2} - \frac{E_R^*}{a_0 K_p} \frac{a_0}{2\mu R} \frac{\sigma_z}{p_0} - \frac{1}{U} \frac{E_R^*}{a_0 K_p}} \quad (7)$$

σ_z 는 Runge-Kutta 수치해석 방법을 이용하여 영역 A 의 경계조건을 이용하여 식 (7)을 적분하여 구한다.

[영역 C]

$$\frac{\sigma_x}{p_0} = \frac{\sigma_z}{p_0} + \frac{Y_S}{p_0} \quad (8)$$

$$\frac{-\sigma_z}{p_0} = \sqrt{1 - (x/a_0)^2} - \left(1 - \frac{1-r}{1-r_1}\right) \frac{b_0}{\mu a_0} \frac{2\mu R}{a_0} \frac{a_0 K_p}{E_R^*} \quad (9)$$

[영역 D]

$$\frac{\sigma_x}{p_0} = \frac{\sigma_z}{p_0} + \frac{Y_S}{p_0} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{-\sigma_x}{p_o} &= L_3 + L_4 \exp\left(\frac{\gamma x}{a_o}\right) + L_5 \exp\left(\frac{-\gamma x}{a_o}\right) \\ &\quad - \frac{E_R^* E_S^* \mu a_o a_o K_q 1-r_1}{\mu E_S^* E^* b_o E_R^* 1-r} \left[\alpha_3 + \alpha_4 \left(\frac{x}{a_o}\right)^2 + \alpha_5 \left(\frac{x}{a_o}\right)^4 + \alpha_6 \left(\frac{x}{a_o}\right)^6 \right] \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $\gamma^2 = \frac{1-r_1}{1-r} \frac{a_o K_q}{E_R^*} \frac{E_R^* \mu a_o}{\mu E_S^* b_o}$

$$L_3 = \frac{1}{\gamma^2} \frac{1-r_1}{1-r} \frac{a_o K_q}{E_R^*} \frac{2\mu R \xi}{b_o} - \frac{E_S^* a_o K_p}{E^* E_R^* a_o} \frac{2\mu R}{\mu a_o} \frac{b_o}{1-r_1} \left(1 - \frac{1-r}{1-r_1}\right)$$

$$\alpha_3 = \frac{45}{\gamma^8} + \frac{3}{\gamma^6} + \frac{1}{\gamma^4} - \frac{1}{\gamma^2}$$

$$\alpha_4 = \frac{45}{2\gamma^6} + \frac{3}{2\gamma^4} + \frac{1}{2\gamma^2}$$

$$\alpha_5 = \frac{15}{8\gamma^4} + \frac{1}{8\gamma^2}$$

$$\alpha_6 = \frac{1}{16\gamma^2}$$

[영역 E]

$$\frac{\sigma_x}{p_o} = \frac{1}{2} \frac{\mu a_o}{b_o} \frac{1-r_1}{1-r} \left[\frac{x}{a_o} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a_o}\right)^2} + \sin^{-1} \frac{x}{a_o} \right] - \frac{(1-r_1-1)}{(1-r)} \frac{2\mu R a_o K_p}{a_o E_R^*} \frac{x}{a_o} + L_6 \quad (12)$$

$$\frac{-\sigma_z}{p_o} = \sqrt{1 - (x/a_o)^2} - \left(1 - \frac{1-r}{1-r_1}\right) \frac{b_o}{\mu a_o} \frac{2\mu R a_o K_p}{a_o E_R^*} \quad (13)$$

여기서 L_6 는 임의 적분 상수이다

[영역 F]

$$\frac{\sigma_x}{p_o} = \frac{\sigma_z}{p_o} + \frac{Y_S}{p_o} \quad (14)$$

$$\frac{d(\sigma_z/p_o)}{d(x/a_o)} = \frac{\frac{\sigma_z}{p_o} + \frac{1}{U} \frac{E_R^*}{a_o K_p} \frac{x/a_o}{\sqrt{1 - (x/a_o)^2}}}{\frac{b_o}{\mu a_o} - \frac{E_R^* a_o}{a_o K_p 2\mu R} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a_o}\right)^2} - \frac{E_R^* a_o \sigma_z}{a_o K_p 2\mu R p_o} - \frac{1}{U} \frac{E_R^*}{a_o K_p}} \quad (15)$$

σ_z 는 Runge-Kutta 수치해석 방법을 이용하여 영역 G의 경계조건을 이용하여 식 (15)를 적분하므로써 구할 수 있다.

[영역 G]

$$\frac{-\sigma_x}{p_o} = -\frac{1}{2} \frac{\mu a_o}{b_o} \frac{1}{1-r} \left[\frac{x}{a_o} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a_o}\right)^2} + \sin^{-1} \left(\frac{x}{a_o}\right) \right] + \frac{r}{1-r} \frac{2\mu R a_o K_p}{a_o E_R^*} \frac{x}{a_o} + L_7 \quad (16)$$

$$\frac{-\sigma_z}{p_o} = \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a_o}\right)^2} - r \frac{b_o}{\mu a_o} \frac{2\mu R a_o K_p}{a_o E_R^*} \quad (17)$$

여기서 L_7 은 임의 적분 상수이다.

2.5 롤 바이트 내 각 영역의 영역 계산

식 (4)와 식 (5)를 항복 조건 식 $\sigma_x - \sigma_z = Y_S$ 에 대입하고 정리하면 식 (18)를 얻을 수 있는데 이 식 (18)을 Newton-Raphson 법을 이용하여 풀면 Fig. 2에서 영역 A의 끝에 해당하는 x 좌표 x_A 를 구할 수 있다.

$$\sqrt{1 - \left(\frac{x_A}{a_o}\right)^2} - \frac{1}{2} \frac{\mu a_o}{b_o} \left[\frac{x_A}{a_o} \sqrt{1 - \left(\frac{x_A}{a_o}\right)^2} + \sin^{-1} \left(\frac{x_A}{a_o}\right) + \frac{\pi}{2} \right] - \frac{Y_S}{p_o} = 0 \quad (18)$$

영역 B와 영역 C의 경계에 해당하는 x_B 좌표는 식 (7)을 $db/dx=0$ 의 조건을 만족할 때 까지 Newton-Raphson 법을 이용하여 적분함으로서 구할 수 있으며, x_E 의 좌표는 영역 F에서 적분된 압력곡선과 영역 E에서의 압력분포의 교차점으로부터 구한다. 또한 x_C 와 x_D 에서 전단응력(q)과 σ_x 는 연속성을 가지며, x_C 에서 dq/dx 는 연속성을 가진다는 경계조건을 이용하면 각각 x_C 와 x_D 를 구할 수가 있게 된다. 또한 식 (16) 및 (17)에 $x=x_F$ 에서 $d(\sigma_x - \sigma_z)/dx=0$ 의 경계조건을 적용하면 식 (19)를 얻을 수가 있으며, 이 식 (19)를 Newton-Raphson 수치해석 방법을 이용하여 풀면 x_F 가 얻어지게 된다.

$$\frac{1}{1-r} \frac{\mu a_o}{b_o} \left(1 - \left(\frac{x_F}{a_o}\right)^2\right) - \frac{x_F}{a_o} - \frac{r}{1-r} \frac{2\mu R a_o K_p}{a_o E_R^*} \sqrt{1 - (x_F/a_o)^2} = 0 \quad (19)$$

마지막으로 스트립과 롤의 접촉 길이는 식 (20)에 의해 구할 수 있으므로 접촉길이의 시작점과 끝점인 a_0 및 a_2 를 알 수 있다.

$$l_d = \sqrt{(R' \cdot (b_0 - b_2))} \quad (20)$$

3. 시뮬레이션 및 결과 검토

3.1 시뮬레이션 개요

냉연 조질 압연 시 의미 있는 압연하중 예측을 위한 호일압연이론식의 적용 가능성을 검토하기 위해, 앞 절에서 설명한 롤 바이트 내 각 영역에서의 압연하중 예측 식을 이용하여 프로그램을 구

Table 1 Calculation conditions for TS 590Mpa grade.

Thickne ss (mm)	Width (mm)	Elongation (%)	Entry tension (Kgf)	Exit tension (Kgf)
1.185	1262	0.82	4738	5266

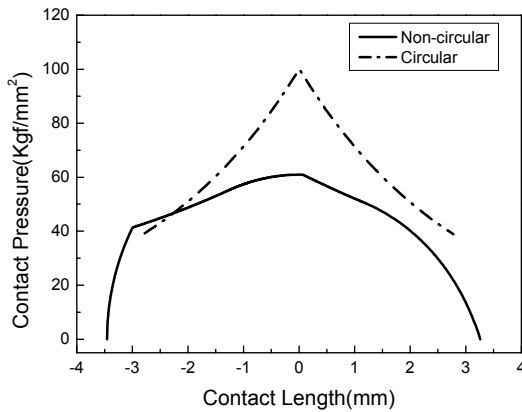


Fig. 3(a) Predicted pressure distribution in the roll bite

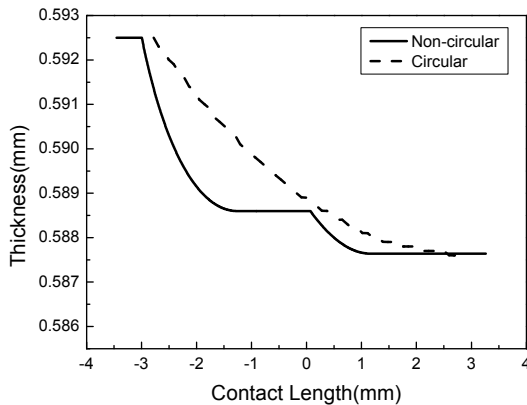


Fig. 3(b) Predicted thickness distribution in the roll bite

성하고 인장강도 590MPa 급 강종을 대상으로 기본 특성을 파악하였다. 인장강도 590MPa 급 강을 대상으로 한 기본특성 파악 후 현재 생산하고 있는 CR(cold rolled)재를 대상으로 호일압연이론의 적용성에 대해 검토하였으며 동시에 각 case 에 대한 결과를 기존 냉간 및 열간 압연 시 압연하중을 예측하는데 사용되고 있는 Bland & Ford 모델 결과와 비교 하였다. 여기서는 Bland & Ford 모델 식⁽¹⁾에 대해 별도로 설명을 하지 않으므로 참고문헌을 참고하기 바란다.

3.2 시뮬레이션 결과의 기본적 검증

Table 1 은 인장강도 590MPa 급 강종의 시뮬레이션에 사용된 기본 계산조건을 나타내며, Fig. 3 은

Table 2 Results of prediction of roll force with model

	Non circular	Circular	Plant
Roll Force(Ton)	384	460	401
Error ratio(%)	4.1	14.7	

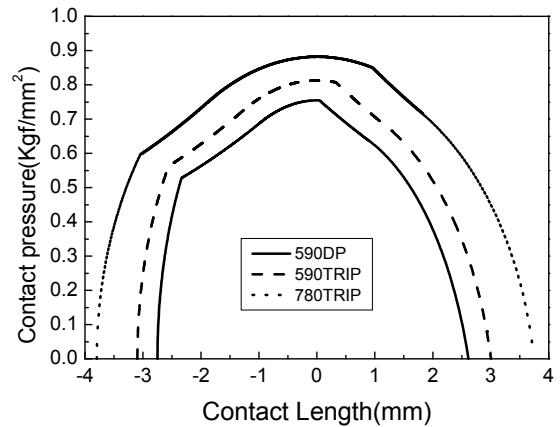


Fig. 4(a) Characteristics of pressure distribution in the roll with steel grade($\mu=0.1$, Roll Dia.=480mm)

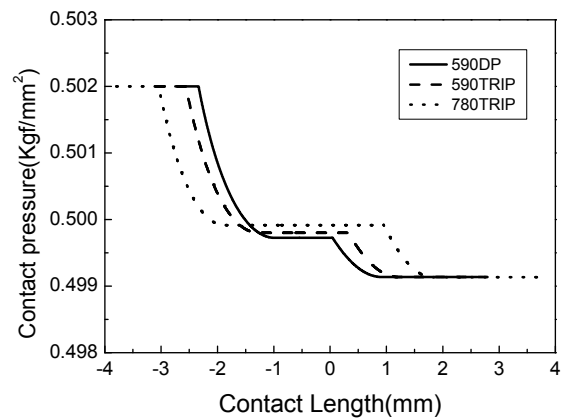


Fig. 4(b) Characteristics of thickness distribution in the roll with steel grade($\mu=0.1$, Roll Dia.=480mm)

롤 바이트 내에서 호일압연 모델과 Bland & Ford 모델에 의해 예측된 압연압력 및 스트립 두께분포를 나타낸다. Fig. 3(b)에서 스트립 두께는 1/2 을 나타낸다.

Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 비-원호 모델에 의해 예측된 압력분포에는 기존 모델에서 나타나는 friction hill 현상이 뚜렷하게 나타나지 않으며 두께 분포 결과로 부터는 롤 바이트 내에서 소성변형은 앞 절에서 언급한 바와 같이 B 와 F 영역에서 발생함을 확인할 수 있다.

Table 2 는 비-원호 모델 및 원호 모델에 의해

예측된 압연하중을 실제 현장 조질 압연기에서 측정된 압연하중과 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 4(a), (b)는 각각 강종 변화에 따른 롤 바이트 내 압력분포 및 스트립의 두께분포 변화를 나타낸 것이다. 여기서 압력분포는 최대 압력 값으로 나누어진 비로 정리하였으며 두께는 1/2 을 나타낸다. 또한 Fig. 5(a), (b)는 이때 각 영역별 길이 및 압연하중의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)로부터 고 강도 강으로 갈수록 압력분포의 면적은 커지며, 즉 압연하중은 커지며 압력분포 곡선도 중심부를 기준으로 완화되어감을 확인할 수 있다. 한편, 스트립의 두께 분포 데이터로부터는 고강도 강으로 갈수록 B,D,E 의 영역이 점차 확대되어짐을 확인할 수 있는데 이로 인해 Fig. 5(b)에서와 같이 B,D,E 영역에서의 압연하중이 증가하게 된다. 즉, Fig. 5(a), (b)에 나타난 바와 같이 강종의 변화에 따라 전 영역에서의 영역별 길이 및 각 영역에서의 압연하중이 변하게 되는데 이 중 강종이 단단해짐에 따라 영역 C,D,E 에서의 변화가 가장 크게 나타남을 확인할 수 있다. 결론부에서 다시 언급하겠지만, 이와 같은 특성으로

인해 인장강도 980MPa 급 이상의 초 고강도 강에서는 압연하중이 크게 고 평가되어 압연하중의 예측 모델로 적합하지 않게 된다.

Fig. 6 은 인장강도 590MPa 급 강종의 스트립 두께 0.6 ~ 2.3mm 에 해당하는 280 코일을 대상으로 비-원호 모델과 원호 모델의 압연하중 예측 정도를 현장 조질 압연기에서 측정된 실측 압연하중을 기준으로 정리하여 나타낸 것이다. 전체 코일 평균 압연하중 예측 정도는 비-원호 모델은 90%, 원호모델은 82%로서 인장강도 590MPa 급 강에 대해서는 비-원호 모델의 예측 정도가 우수함을 알 수 있다.

3.3 조질 압연 시 압연하중 예측 모델로의 타당성 검토

앞 절에서와 같이 인장강도 590MPa 급 강을 대상으로 비-원호 모델을 조질 압연 공정에서의 압연하중 예측 모델로 적용하는 것이 타당한지에 대한 기본적인 검토를 하였다. 이를 바탕으로 본 절에서는 자동차용 고 강도 강을 포함한 전체적인 강종에 대해 적용 가능한지에 대한 종합적인 검토를 수행하였다. Table 3 은 검토대상 강종 및 size 를 나타낸다.

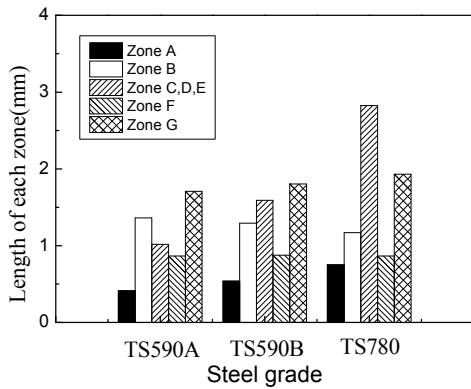


Fig. 5(a) Characteristics of variations of length of each zone with steel grade

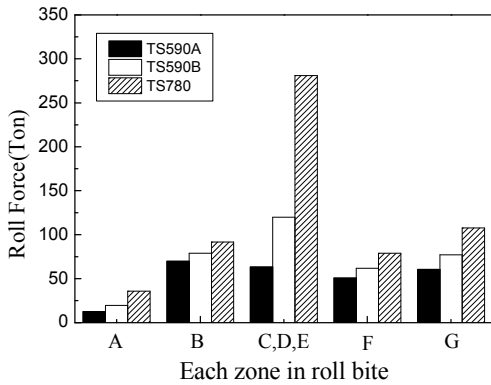


Fig. 5(b) Characteristics of variations of roll force of each zone with steel grade

Table 3 Steel grades and entry strip thickness used in analysis

S/G	Thickness(mm)	S/G	Thickness(mm)
A	0.4~2.3	J	0.9~2.0
B	0.4~2.3	K	0.8~2.0
C	0.4~2.3	L	0.6~2.3
D	0.4~2.3	M	1.2~2.0
E	0.6~2.0	N	1.1~1.5
F	0.4~2.0	O	1.0~2.0
G	0.7~2.3	P	1.0~1.2
H	0.6~2.3		
I	1.5~2.2		

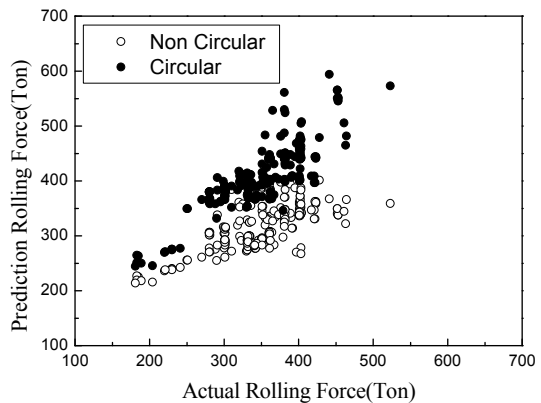


Fig. 6 Tendency of prediction of roll force with strip size ($\mu=0.1$, Roll Dia.=480mm)

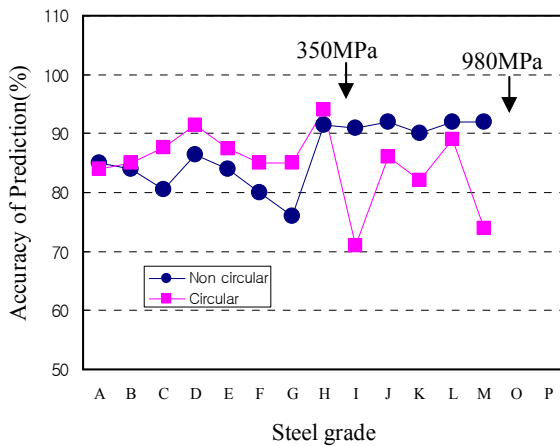


Fig. 7 Comparison of the accuracy of prediction for roll force with circular and non circular model

Fig. 7 은 비-원호 모델과 원호 모델의 압연하중 예측 정도를 검토 대상 전체 강종을 대상으로 정리하여 나타낸 것이다. Fig. 7 의 결과로부터 인장강도 350MPa 이하 강종에서는 원호 모델의 정도가 우수하며 인장강도 350MPa 이상 980MPa 이하에서는 비-원호 모델의 압연하중 예측 정도가 우수함을 알 수 있다. 또한 인장강도 980MPa 이상의 강종에 대해서는 예측 에러율이 150%를 초과하여 두 모델 모두 압연하중을 예측 할 수 있는 모델로서 부적합하였다. 980MPa 급 이상에 대해서는 에러율이 큰 관계로 Fig. 7 에 나타내지 않았다(O, P 가 980MPa 급 이상을 나타냄). 이와 같은 특성을 나타내는 이유는 일반강일 경우 롤 바이트내에서 롤의 탄성변형 거동이 원호 모델에 가깝고, 재료가 고강도화 될수록 롤의 탄성변형이 비-원호 모델 형태가 되어지기 때문인 것으로 추측되어진다. 또한 재료가 초고강도화가 되면 Fig. 2 에 나타낸 C,D,E 영역에서의 압연하중이 급격하게 상승하면서 실측값대비 예측값이 크게 평가되게 된다.

4. 결론

호일(foil)압연 시 압연하중 예측을 위해 제안된 비-원호 모델을 압연하중 예측 모델이 정립되어 있지 않은 냉간 조질 압연 공정에 적용하는 것이 가능한지에 대한 검토를 수행하였다. CR (cold rolled) 강종을 대상으로 검토한 결과는 다음과 같다.

(1) 롤 바이트 내 압력분포 예측 시 비-원호 모델은 원호 모델과 같이 friction hill 을 가지지 않으므로 인장강도 980MPa 이하 강종에서는 압연하중이 과다 평가되지 않는다. 하지만, 초 고 강도 강 의 경우 소성변형이 발생하지 않는 flat 한 영역이

크게 발달되어 압연하중이 크게 과다 평가된다.

(2) 인장강도 350MPa 이하의 강종에 대해서는 원호 모델 (Bland & Ford)이 비-원호 모델보다 예측 정도가 우수하다.

(3) 인장강도 350MPa 이상 980MPa 이하의 강종에 대해서는 비-원호 모델이 원호 모델보다 압연하중 예측 정도가 우수하며, 이 영역에서 압연하중 예측 모델로의 적용이 가능하다.

(4) 인장강도 980MPa 이상의 강종에 대해서는 두 모델 모두 냉간 조질 압연공정에서의 압연하중 예측 모델로는 적합 치 않으며 새로운 모델 도입이 필요하다.

인장강도 980MPa 이상의 강종에 대해서는 향후 유한요소 해석을 통해 압연하중 예측 모델을 개발할 예정이며 향후 보고 드릴 예정이다.

참고문헌

- (1) Fleck, N.A and Johnson,K.L., 1987, Towards a New Theory of Cold Rolling Thin Foil, *Int.J.Mech.Sci.*, Vol 29. No.7. pp.507~524.
- (2) Bland, D.R. and Ford, H., 1948, The Calculation of roll Force and Torque in Cold Strip Rolling with Tensions, *Proc. Inst. Mech. Engrs*, Vol.159, pp.144
- (3) Ford, H. and Alexander, J.M., 1959, Rolling Hard Material in Thin Gauges. Basic Consideration, *J. Inst. Metals*, Vol. 88, p.193
- (4) Johnson, K.L. and Bentall, R.H., 1969, The Onset of Yield in the Cold Rolling of Tin Strip, *J.Mech.Phys.Solids*, Vol.17, p.253
- (5) Grimble, M.J., 1978, Solution of Nonlinear Funtional Equations Representing the Roll Gap Relationships in a Cold Mill, *J.Optimization Theor. Applic.*, Vol.26, No.3, p.427
- (6) Quan, Z., 1984, Deformation Characteristics of the Cross Shear Cold Rolling of Ultra Thin Strip and the Theory of the Estic Plug, *Proc. Adv. Technol. Plastic*, Vol. 2, p.1173
- (7) Yuen, W.Y.D, 1996, The Modelling of the Mechanics of Deformation in Flat Rolling, *Journal of Meterials Processing Technology*, pp. 87~94
- (8) Yuen, W.Y.D, 2003, On-Line and Off-Line Models for the Rolling Process, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, pp.86~93
- (9) Alexander, K. and Konrad, K., 2003, FE-Simulation of Thin Strip and Temper Rolling Processes, ABAQUS Austria User's Conference
- (10) Sun, J.-n., Huang, H.-g., 2009, Nonlinear Finite Element Analysis of Thin Strip Temper Rolling Process, *Eournal of Iron and Steel Research*, Vol.16, No.4, pp. 27~32.