압연 공정에서의 판 쏠림 거동 해석
Analysis of the Lateral Movement phenomenon of Strip in Rolling Process

*#최용준 [1], 이성진 [1], 이민철 [2]
*#Y. J. Choi(cyj@posco.com)[1] , S. J. Lee[1] , M. C. Lee[2]
[1] 포스코 기술연구원 압연공정연구그룹, [2] 부산대학교 기계공학부

Key words : Lateral movement, rolling process, pinch roll, mathematical model

1. 서론

압연 공정(rolling process)에서 좌우 비 대칭 압하 조건이나 초기 철판의 중심 부에서 폭 방향으로의 오프셋(offset)이 존재하거나 철판의 두께에 웨지(wedge)가 있다면, 비대칭 조건으로 인해 폭 방향으로의 철판의 속도 차이가 발생하게 되고, 이런 속도 차이로 인해 각속도(angular velocity)가 발생되어 Fig. 1 과 같이 핀치 롤(pinch roll) 공정에서 철판이 회전하게 된다. 철판이 진행하면서 회전하므로 이것이 폭 방향으로의 판 쏠림 현상이 된다. 이러한 판 쏠림 현상을 수학적으로 수식화한 연구는 많이 진행되었으나[1~3], 가장 중요한 인자라고 판단되는 장력에 대한 판 쏠림의 영향을 고려하는 연구는 많이 이루어지지 않았다[4].

본 연구에서는 판 쏠림 현상에 대해 철판의 폭 방향 움직임에 영향을 주는 장력 등과 같은 관련 인자를 고려한 수식적인 모델을 제시하여, 압연 공정에서의 판 쏠림 현상을 이론적으로 접근하고자 한다.

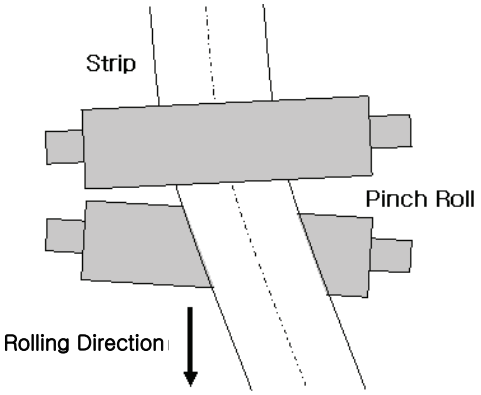


Fig. 1 Lateral movement phenomenon of strip in pinch roll

2. 판 쏠림 모델링

압연 공정의 핀치 롤에서의 철판에 나타나는 판 쏠림 현상을 Fig. 2 에 나타내었다.

여기서, x 는 압연 방향과 일치하는 기준 $x-y$ 좌표계의 x 방향을 의미하며, y 는 철판의 폭 방향과 일치하는 기준 $x-y$ 좌표 계의 y 방향을 의미한다. 기준 $x-y$ 좌표 계는 O 를 원점으로 한다. 또한, v 는 철판 속도, w 는 각 속도(angular velocity), θ 는 회전 각도(rotation angle), y_c 는 기준 좌표 O 에서의 판 쏠림량, M_1 은 판 쏠림에 대한 역 모멘텀(momentum), b 는 철판의 폭, 그리고, T 는 철판의 장력을 나타낸다.

핀치 롤이 철판의 폭 방향에 대해 비대칭 조건으로 Fig. 1 과 같이 누를 경우, 철판은 진행 방향을 지키지 못하고 Fig. 2 와 같이 θ 의 각도를 이루며 기울어 진다. 핀치 롤의 기준 좌표 $x-y$ 에서 발생한 폭 방향의 움직임 y_c 를 초기 판 쏠림 량이라고 한다. y_c 는 핀치 롤의 비대칭 조건이 크면 클수록 Fig. 2 의 점선을 따라 더욱 더 커지게 된다. $x=0$ 일 때 핀치 롤의 기준 좌표 $x-y$ 에서 철판의 움직임을 철판 속도 v 과 각 속도 w 로 표현할 수 있으며 다음과 같다[5]. 여기서 $f_0(x)$ 는 $t=0$ 일 때의 초기 값이다.

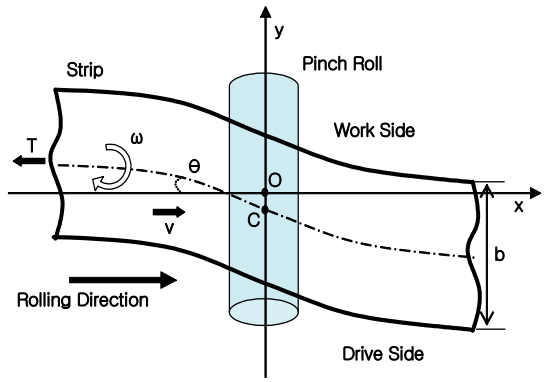


Fig. 2 Configuration of a section of the strip rolling process

$$\ddot{y}_c(t) = v^2 \cdot \frac{d^2 f_0(-vt)}{dt^2} + v\omega(t) \tag{1}$$

Fig. 2 에서 핀치 롤 출측에서의 기울어 진 각도 θ 와 철판의 곡률(curvature)과의 관계를 다음과 같이 유도할 수 있다. 여기서 R_1 은 곡률 반경을 나타낸다.

$$\frac{1}{R_1} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot \frac{1}{\frac{\partial x}{\partial t}} = -\omega(t) \cdot \frac{1}{v} \tag{2}$$

이상의 식으로부터 철판의 장력 T 가 주어지지 않을 때 판 쏠림 량을 계산할 수 있게 된다. 그러나, 핀치 롤 출측에서의 각 속도는 측정 할 수 없는 항목이므로, 식 (2)의 곡률과 웨지 비(wedge ratio)라는 항목을 도입하며 다음과 같이 동역학 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{y}_c &= v^2\left\{\ddot{f}_0(-vt) + \frac{w}{v}\right\} \\ &= v^2\left\{\ddot{f}_0(-vt) + \frac{\Delta\varphi}{b}\right\} \\ \Delta\varphi &= -\frac{h_{df}}{h} = \frac{v_{df}}{v_1} = b\frac{\omega_1}{v_1} = b\frac{1}{R_1} \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 $\Delta\varphi$ 는 웨지 비, h_{df} 는 양 끝 단에서의 철판 두께의 차이, 그리고 v_{df} 는 양 끝 단에서의 속도 차이를 나타낸다.

핀치 롤에 장력 T 가 주어진다면, 장력에 의해 철판의 중심 부로 판 쏠림에 대한 구속을 받게 된다. Fig. 3 은 비대칭 장력 분포에 의해 철판에서 모멘텀이 발생하게 되는 것을 나타낸다. 여기서 단위 장력 분포 중 $\sigma_{uni}(x)$ 는 균일 분포 단위 장력, $\sigma_{pert}(x)$ 는 비대칭 단위 장력 분포를 나타낸다.

Fig. 3 으로부터 철판의 판 쏠림을 유발시키는 비대칭 모멘텀은 다음과 같이 유도될 수 있다.

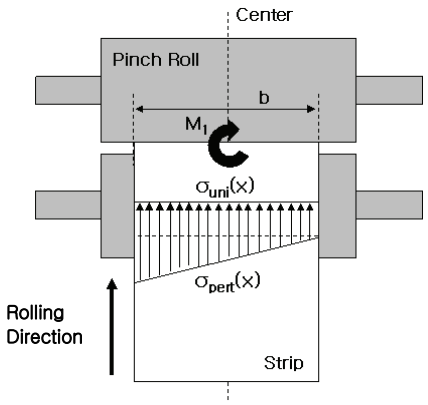


Fig. 3 Tensile stress distribution at the back of pinch roll

$$M_1 = h \cdot \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \sigma_{pert}(x) x dx \tag{4}$$

$$\sigma_{pert}(x) = \frac{2T_{pert}}{hb^2}\left(\frac{b}{2}-x\right) = \frac{2\alpha T}{hb^2}\left(\frac{b}{2}-x\right) \tag{5}$$

여기서 α 는 양의 상수 값을 나타낸다.

식 (4)의 철판에 대한 모멘텀이 구해진다면 티모센코 이론(Timoshenko beam theory)에 의해 모멘텀에 의한 철판의 곡률은 다음과 같이 유도 된다.

$$\frac{1}{R_2} = \frac{M_1}{EI} \tag{6}$$

여기서 I 는 관성 모멘트(moment of inertia), E 는 세로 탄성 계수(Young's modulus)를 나타낸다.

최종적으로 식 (3)과 식(6)에 의해 판 쏠림과 반대방향으로 작용하는 장력의 영향을 고려한 판 쏠림에 대한 동역학적인 모델은 다음과 같다.

$$\ddot{y}_c = v^2\left\{\ddot{f}_0(-vt) + \frac{\Delta\varphi_{total}}{b}\right\} \tag{7}$$

$$\Delta\varphi_{total} = \Delta\varphi - b \cdot \frac{M_1}{EI}$$

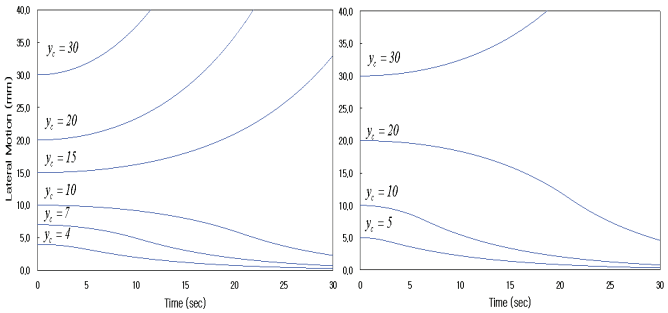
그러므로 핀치 롤이 일정 장력으로 구속 받고 있을 때, 핀치 롤 압하에 있어 웨지 비와 철판의 진행 속도 만으로 철판의 판 쏠림을 예측할 수 있는 수학적인 모델을 유도할 수 있게 된다.

3. 시뮬레이션 해석

2 절에서의 판 쏠림 수학적 모델에 대해 장력의 크기에 따른 판 쏠림 경향을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 초기 판 쏠림 량 및 핀치 롤에서의 철판에 대한 조건은 table 1 과와 같다.

Table 1 Comparison of measured roughness data roughness data

	Case 1	Case 2
Strip Thickness h (mm)	3	3
Strip Width b (mm)	1200	1200
Rolling Speed v (m/min)	50	50
Strip Tension T (ton)	2.88	5.76
Young's Modulus E (Gpa)	100	100
Pinching Force (ton)	10	10
Pinching Load Points Distance (mm)	2,560	2,560
Pinch Roll Length (mm)	1,700	1,700



(a) Case 1 (b) Case 2

Fig. 4 Lateral movement of strip with different tensions

핀치 롤 하중에 대한 철판의 두께 변화를 동일한 조건으로 가정하고, 장력의 변화에 대한 조건을 Case1 과 Case 2 로 시뮬레이션 하였으며, 그 결과 Case 1 의 경우 초기 판 쏠림 량 y_c 가 10 mm 이하, Case 2 에서는 20 mm 이하에서는 판 쏠림이 증가하지 않고 핀치 롤의 중심으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 철판에 인가하는 장력을 크게 할 경우 철판의 판 쏠림을 방지하는 데 효과가 있으리라 판단된다. 그러나, 초기 판 쏠림 량이 더 큰 경우 계속해서 인가하는 장력을 높이게 하면, 부가된 장력으로 인해 철판이 고온에서 인장(elongation)되는 문제가 발생하여 철판의 폭이 줄어드는 품질 이상이 발생하게 되는 단점을 안고 있다. 또한, 장력을 높게 할수록 핀치 롤에서의 구동 모터의 에너지가 증가하게 되는 문제점도 수반하게 된다. 그러므로, 장력 인가보다는 철판의 판 쏠림 제어를 수행함으로써 철판의 인장 및 에너지 증가의 문제를 해결할 수 있으리라 판단된다.

4. 결론

압연 공정에서의 판 쏠림 현상에 대해 철판의 폭 방향 움직임에 영향을 주는 장력 등과 같은 관련 인자를 고려한 수식적인 모델을 제시하였으며, 시뮬레이션을 통하여 장력에 대한 판 쏠림 경향을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 판 쏠림 모델에서는 적정한 장력이 철판에 인가되면 초기 판 쏠림 값이 작을 경우, 안정적으로 핀치 롤의 중심으로 수렴하는 것을 확인하였으며, 장력에 의한 모멘텀이 발생한다는 것을 확인할 수 있었다. 적정 장력 이상의 초기 판 쏠림 량이 인가되면 핀치 롤에서는 수렴하지 않고 판 쏠림이 더욱 더 커져서 발산하는 것을 확인할 수 있다. 그러므로, 이와 같은 경우에 대해서는 핀치 롤의 실린더 갭을 이용한 판 쏠림 제어가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Roberts, W. L., Hot Rolling of Steel, Marcel Dekker Inc, 1983.
2. Ishikawa, T., Tozawa, Y. and Nishizawa, J., "Fundamental study on snaking in strip rolling," Transactions ISIJ, Vol. 28, pp. 485-490, 1988.
3. Shiraishi, T., Ibata, H. and Mizuta, A., "Relation between camber and wedge in flat rolling under restrictions of lateral movement," ISIJ International, Vol. 6, No. 6, pp. 583-587, 1991.
4. Benson, R. C., "Lateral dynamics of a moving web with geometrical imperfection," Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 124, pp. 25-34, 2002.
5. Choi, Y. J., Lee, M. C., "PID sliding mode control for the steering of lateral moving strip in hot strip rolling," International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 399-407, 2009.