

텐션 레벨링 공정 최적화를 위한 수식 모델 - Part I : 곡률 및 압하력 예측

조용석¹ · 황상무[#]

A new Model to Optimize the Process Conditions in Tension Leveling - Part I : Prediction of the Strip Curvature and the Roll Force

Y. S. Cho, S. M. Hwang

(Received June 17, 2013 / Revised August 28, 2013 / Accepted September 16, 2013)

Abstract

The shape defects such as edge waves and center buckles may be formed in the rolled strip because rolling can easily produce non-homogenous elongation across the strip width. The main purpose of tension leveling is to remove such defects by eliminating the differences in elongation. In this paper, a new approach for the optimization of the process conditions in tension leveling is presented. The approach consists of an analytic model for the prediction of the strip curvature and the force at each roll. The accuracy of the proposed model is examined through comparison with the predictions from a finite element model.

Key Words : Tension Leveling, Finite Element Method, Strip Curvature, Roll Force

1. 서론

압연 중에는 판이 폭 방향으로 불균일한 소성 변형, 열 전달, 상 변태 등이 나타나기 때문에 웨이브, 버클 같은 형상 결함이 발생하게 된다. 이러한 압연 후의 형상 결함을 교정해 주는 공정이 바로 레벨링 공정이다. 레벨링 공정은 폭 방향으로 불균일한 판의 길이 편차를 소성 신장을 통해 줄여주게 된다. 특히 텐션 레벨링 공정은 장력(tension)과 굽힘(bending)을 동시에 가함으로써 항복강도보다 낮은 장력 하에서 굽힘을 통해 소성 신장을 줄 수 있다.

기존의 판의 신장을 예측하는 모델은 변형률(strain)을 인장과 굽힘에 의한 것으로 구분한다[1]. 그러나 이 모델은 변형률들을 표현하는데 임의의 가정된 계수를 사용함으로써 이용에 한계가 있다.

판의 곡률을 예측하는 모델들은 실험을 통한 실험식이 대부분이다. Misaka와 Masui에 의해 개발된 식은 현재 텐션 레벨링 공정 제어에 주로 사용되고 있다[2, 3]. 하지만 이러한 실험식들은 넓은 공정 범위에 적용할 수 없다는 한계를 지니고 있어 텐션 레벨링 공정을 정확하게 해석하기 위해서는 이론을 기반으로 한 예측 모델의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 텐션 레벨링 공정 중 판의 곡률 및 압하력을 예측하는 모델을 개발하였다. 이 모델은 임의의 텐션 레벨링 조건 하에서 유한요소 해석과 비교하고 검증하였다.

2. 판 곡률 예측 모델

2.1 기본 가정

1. 포항공과대학교 기계공학과

Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering, POSTECH, E-mail: smhwang@postech.ac.kr

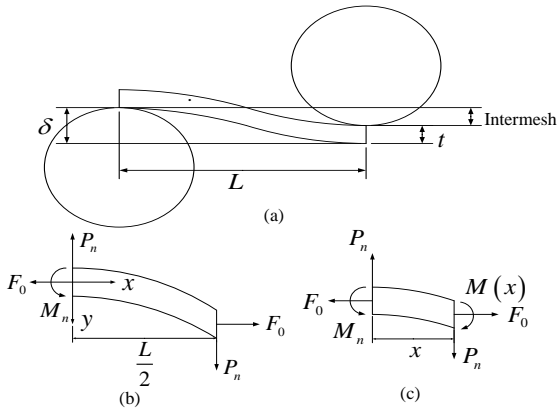


Fig. 1 (a) process geometry (b) the free body diagram for one half of the strip between two adjacent rolls (c) the free body diagram showing the variation of the bending moment in the strip

텐션 레벨링 공정은 순차적으로 교차된 롤 사이에 판을 통과시키는 교정 방법이다. 연속된 롤들을 간략히 롤과 롤 사이로 구분하여 Fig. 1(a)와 같이 표현할 수 있다. 이러한 두 롤 사이의 판 조각(strip segment)을 정의함으로써 이론을 전개하도록 한다. 판 곡률을 예측하기 위해 다음과 같은 세가지 가정이 적용되었다. (1) 곡률의 부호 변화는 두 롤 사이의 중점에서 발생한다. (2) 중점에서 판의 변위는 롤 압입량의 절반 값을 지닌다. (3) 장력은 판의 중립선(center line)에 작용한다. 이러한 세가지 가정을 통해 수식모델이 개발되었다.

2.2 평형 방정식

Fig. 1(b)의 자유 물체도를 통해, 양 끝의 모멘트는 다음과 같이 주어진다.

$$M_n = \frac{P_n L}{2} - F_0 y|_{L/2} \quad (1)$$

여기서 P_n , F_0 은 각각 판에 작용하는 전단력, 장력이다.

또한, Fig. 1(c)를 통해 모멘트 분포는 다음과 같이 나타난다.

$$M(x) = M_n - P_n x + F_0 y(x) \quad (2)$$

식 (1)을 식 (2)에 대입하고, 다음의 식 (3)과 (4)와 같은 빔 이론(beam theory)을 통해

$$\frac{M_n}{EI} = \frac{1}{\rho_n} = \kappa_n \quad (3)$$

$$M(x) = EI \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (4)$$

최종적으로 다음과 같은 미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$y'' - \frac{F_0}{EI} y = \frac{1}{\rho_n} \left(1 - \frac{2x}{L}\right) - \frac{2}{L} \frac{F_0}{EI} y|_{L/2} x \quad (5)$$

여기서 E , I 는 각각 판의 탄성계수, 관성모멘트이고 ρ_n , κ_n 은 판의 양 끝에서의 곡률반경 및 곡률을 나타낸다.

2.3 미분방정식의 해

위의 식(5)와 같은 미분 방정식을 풀기 위해서는 경계조건이 필요하다. 두 롤 사이의 판이 대칭이라는 가정을 통해 다음과 같은 경계조건을 사용할 수 있다.

$$y = y' = 0 \quad \text{at } x = 0 \quad (6)$$

이를 통해 미분방정식의 해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(x) = \frac{EI}{F_0 \rho_n} \cosh\left(\sqrt{\frac{F_0}{EI}} x\right) - \frac{2}{L} \frac{EI}{F_0} \sqrt{\frac{EI}{F_0}} \left(\frac{1}{\rho_n} + \frac{F_0}{EI} y|_{L/2}\right) \sinh\left(\sqrt{\frac{F_0}{EI}} x\right) - \frac{EI}{F_0 \rho_n} + \frac{2}{L} \frac{EI}{F_0} \left(\frac{1}{\rho_n} + \frac{F_0}{EI} y|_{L/2}\right) x \quad (7)$$

식 (7)의 해는 ρ_n , $y|_{L/2}$ 의 두 미지수를 지니고 있다. $y|_{L/2}$ 는 중점에서의 변위를 의미하므로 $x=L/2$ 을 대입하여 정리하게 되면, 중점에서의 변위는 다음과 같이 정의된다.

$$y|_{L/2} = \frac{LA}{2\rho_n} \quad (8)$$

여기서

$$A = \sqrt{\frac{EI}{F_0}} \left[\frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{F_0}{EI}} \frac{L}{2}\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{F_0}{EI}} \frac{L}{2}\right)} - \sqrt{\frac{EI}{F_0}} \frac{2}{L} \right] \quad (9)$$

기본가정 (1)을 통해, 두 롤 사이 판의 양 끝에 크기는 같지만 부호가 반대인 곡률이 작용한다는 것을 알 수 있다. 또한 기본가정 (2)와 식 (8)을 통해 최대 곡률은 다음과 같이 정의된다.

$$\kappa_n = \frac{1}{\rho_n} = \frac{\delta_n}{LA} \quad (10)$$

여기서 δ_n 은 롤의 압입량을 나타낸다.

식 (7)-(10)을 통해 롤의 압입량과 장력에 따른 두 롤 사이 전 구간에서 판의 변위 및 곡률을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(x) = \frac{EI}{F_0} \kappa_n \cosh\left(\sqrt{\frac{F_0}{EI}}x\right) - \frac{2EI}{L F_0} \sqrt{\frac{EI}{F_0}} \left(\kappa_n + \frac{F_0 \delta_n}{EI} \frac{1}{2}\right) \sinh\left(\sqrt{\frac{F_0}{EI}}x\right) \quad (11)$$

$$- \frac{EI}{F_0} \kappa_n + \frac{2EI}{L F_0} \left(\kappa_n + \frac{F_0 \delta_n}{EI} \frac{1}{2}\right) x$$

$$y''(x) = \frac{F_0}{EI} y(x) + \kappa_n \left(1 - \frac{2x}{L}\right) - \frac{2 F_0}{L EI} \left(\frac{\delta_n}{2}\right) x \quad (12)$$

식 (8)에 의해 정의된 곡률은 두 롤 사이의 간격 L 및 압입량 δ 에 따라 달라질 수 있다. 결과적으로, 롤과 맞닿는 부분은 롤 좌우의 인접한 두 판 조각(strip segments)에 모두 영향을 받게 되어 곡률의 불연속이 일어날 수 있다. 하지만 예측된 두 곡률의 평균값이 실제 곡률을 대표한다는 가정을 통해 두 예측 값의 평균을 각 롤에서의 곡률로 근사하였다.

3. 압하력 예측 모델

압하력 예측 모델 또한 곡률 예측모델에서 사용된 기본 가정을 통해 진행된다. Fig. 1(b)를 통해 두 롤 사이 판에 작용하는 전단력은 다음과 같이 정의된다.

$$P_n = \frac{2}{L} \left(M_n + F_0 \frac{\delta_n}{2} \right) \quad (13)$$

굽힘을 받는 판 내부에서의 응력 분포는 Fig. 2와 같이 나타나게 된다.

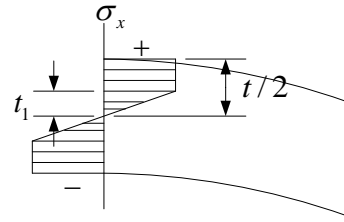


Fig. 2 The longitudinal stress distribution along thickness of the strip by bending

판의 중심으로부터 t_1 까지는 탄성영역이고 그 이외의 부분은 소성 영역으로 정의된다. 이를 통해 판에 작용하는 모멘트는 다음과 같이 표현된다.

$$M = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y dA = 2 \left[\int_0^{t_1} E \frac{y}{\rho} y w dy + \int_{t_1}^{t/2} \sigma_y y w dy \right] \quad (14)$$

여기서 w , σ_y 는 각각 판의 폭, 항복강도를 나타낸다. 이를 통해 판의 양 끝에 작용하는 모멘트는 다음과 같이 정의된다.

$$M_n = \frac{\sigma_y w t^2}{4} \left(1 - \frac{1}{3\alpha_n^2}\right) \quad (15)$$

여기서

$$\alpha_n = \frac{t/2}{t_1} = \frac{\kappa_n t E}{2\sigma_y} \quad (16)$$

식 (13)과 식 (15)를 통해 판에 작용하는 전단력은 최종적으로 다음과 같이 표시된다.

$$P_n = \frac{2}{L} \left(\frac{\sigma_y w t^2}{4} \left(1 - \frac{1}{3\alpha_n^2}\right) + F_0 \frac{\delta_n}{2} \right) \quad (17)$$

롤과 맞닿는 부분은 롤 좌우의 인접한 두 판 조각(strip segments)에 모두 영향을 받게 된다. 따라서 롤에 작용하는 압하력은 예측된 두 전단력의 합으로 정의될 수 있다. 곡률 모델에서와 마찬가지로 식 (17)에 의해 정의된 전단력은 두 롤 사이의 간격 L 및 압입량 δ 에 따라 달라질 수 있다.

4. 유한 요소 모델

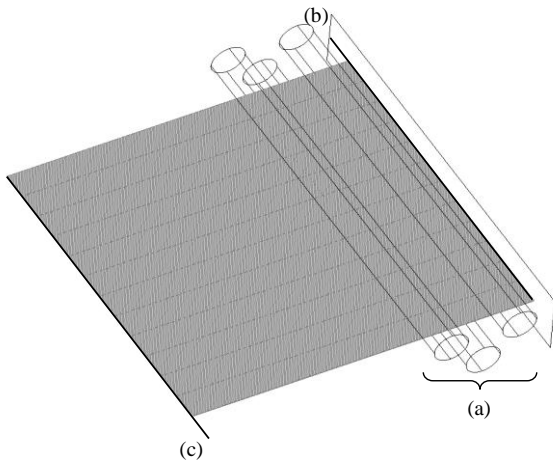


Fig. 3 The type of the boundary conditions for the tension leveling, (a) roll touched boundary condition, (b) prescribed velocity boundary condition, (c) total tension (force) boundary condition

예측 모델의 타당성을 검증하기 위해 3차원 비정상상태 탄-소성 변형 유한 요소 모델이 사용되었다. 모델 검증을 위해 3개의 롤로 구성된 경우에 대한 유한요소 해석을 진행하였다. 유한요소 해석은 다음과 같은 순서로 진행된다. 초기상태에서 판은 Fig. 3에서와 같이 판의 뒷부분인 (c)에 장력이 작용하고 반대쪽, 즉 진행방향 쪽인 (b)에는 마찰이 없는 평다이(flat die)가 접촉되어 있다. 또한 상부의 롤들은 판과 접촉되어 있는 상태이다. 유한요소 해석의 첫 번째 과정은 하부의 롤들을 압입량 만큼 위쪽 방향으로 움직이는 것이다. 하부의 롤들이 자리잡게 되면 두 번째 과정으로 평다이(flat die)에 속도를 가해 판을 이동시키게 된다.

4.1 검증 공정 조건

예측 모델의 검증에 사용된 공정 조건은 다음의 Table 1과 같다. 또한 탄성계수(Young's modulus) 200GPa, 포와송 비(Poisson's ratio) 0.3, 항복강도 400MPa의 값들이 사용되었다.

4.2 예측 모델 검증

위와 같은 공정조건으로 판 곡률 예측 모델과 유한요소 해석 결과를 비교한 것이 다음의 Fig. 4, 5에 나타나 있다. 유한요소해석 결과는 판 길이방향에 따른 곡률을 표시하였고 곡률 예측 모델을 통해서

Table 1 Simulation conditions (three rolls)

Strip Thickness (mm)	1.0
Strip Width (mm)	800
Strip Length (mm)	400
Line Speed (mpm)	300
Tension (MPa)	200
Roll Diameter (mm)	40.0
Roll pitch (mm)	80.0
Intermesh (mm)	1.5, 0.7

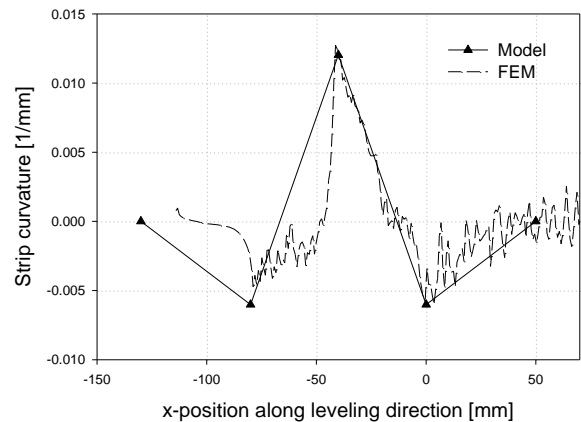


Fig. 4 Strip curvature for 1.5mm intermesh(three rolls)

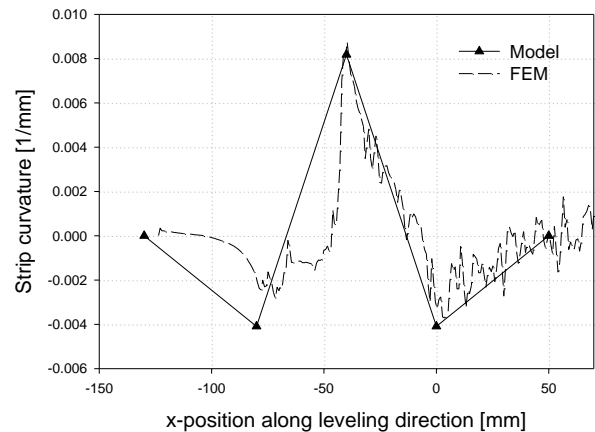


Fig. 5 The strip curvature for 0.7mm intermesh(three rolls)

각 롤에서의 곡률이 표시되어 있다. 결과에서도 알 수 있듯 인터메시(intermesh)량이 증가할수록, 즉 압입량이 커질수록 곡률의 절대치가 커진다는 것을 확인할 수 있다. 또한 유한요소 해석 결과와의 비교를 통해 예측 모델이 해석 결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

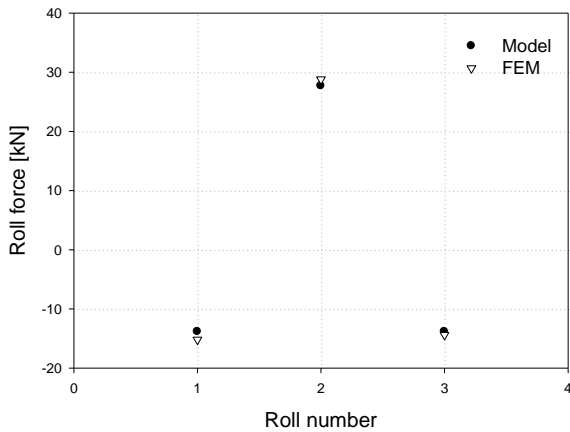


Fig. 6 Roll force for 1.5mm intermesh (three rolls)

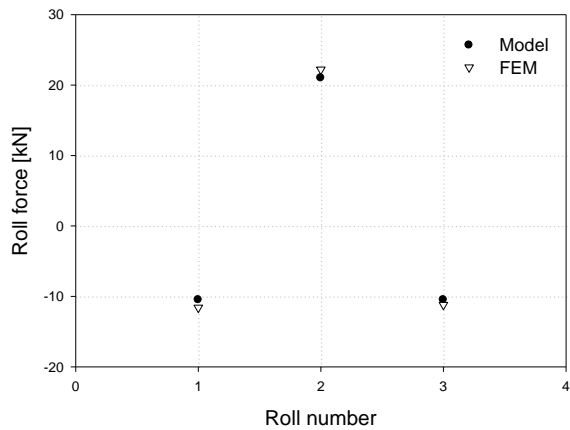


Fig. 7 Roll force for 1.5mm intermesh (three rolls)

Fig. 6, 7은 압하력 예측 모델과 유한요소해석 결과를 비교한 것이다. 압하력 또한 압입량이 증가할수록 큰 값을 지니게 되며 결과 비교를 통해 압하력 예측 모델의 타당성을 검증할 수 있다.

5. 결과 및 토론

모델 검증에 사용된 공정조건은 단순한 등 간격, 동일 직경의 롤들이 사용되었다. 실제 텐션 레벨링 공정은 이보다 복잡한 6개의 롤로 구성되어 있다. 롤과 롤 사이의 간격 또한 같지 않으며 롤의 직경도 다르다. Fig. 8과 Table 2는 실제 텐션 레벨링 공정 조건을 나타낸 것이다.

이외의 조건들은 모델 검증에서 사용된 조건과 동일하다.

다음의 Fig. 9, 10은 각각 예측 모델을 통한 곡률과 압하력을 유한요소해석 결과와 비교한 그림이다.

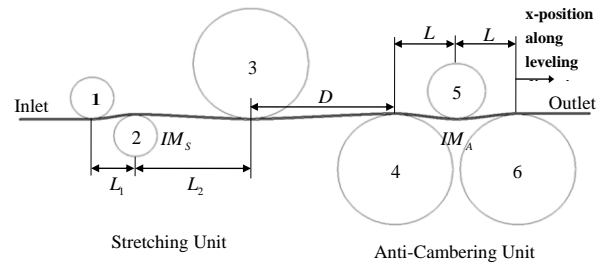


Fig. 8 Process geometry of industrial tension leveling

Table 2 Simulation conditions(industrial tension leveling)

Stretching unit	L_1 (mm)	30.0
	L_2 (mm)	80.0
	Roll 1 diameter (mm)	30.0
	Roll 2 diameter (mm)	30.0
	Roll 3 diameter (mm)	80.0
Between units	D (mm)	100.0
Anti-cambering unit	L (mm)	42.5
	Roll 4 diameter (mm)	80.0
	Roll 5 diameter (mm)	40.0
	Roll 6 diameter (mm)	80.0
	Intermesh IM_A (mm)	0.4

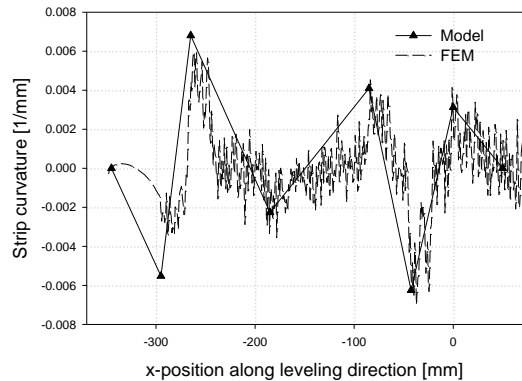


Fig. 9 Strip curvature for industrial tension leveling

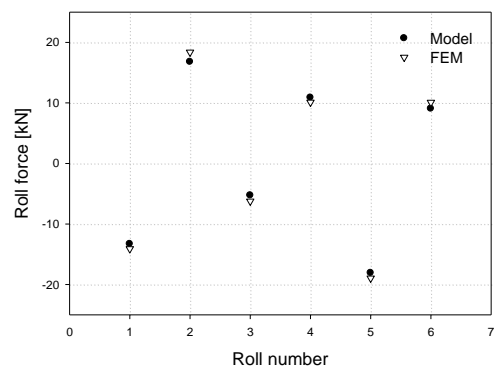


Fig.10 Roll force for industrial tension leveling

이를 통해 복잡한 공정에서도 제안된 곡률 및 압하력 예측모델의 결과가 유한요소해석 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 수학적 수식을 기반으로 텐션 레벨링 공정 시 판의 곡률 및 압하력을 예측하는 모델을 개발하였다. 또한 이를 유한요소해석의 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 본 예측 모델을 통해 시간적 측면에서 제약을 지닌 유한요소 해석을 대체하여 텐션 레벨링 공정 조건을 최적화 할 수 있으리라 기대한다.

REFERENCES

- [1] M. G. Kinnavy, 1972, Recent Development in Tension Leveling, Iron and Steel Engineer, Vol.49, No.11, pp. 67~82.
- [2] Y. Misaka, T. Masui, 1976, Shape Correction of Steel Strip by Tension Leveller, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol.17, pp. 988~994.
- [3] Y. Kimura, M. Ueno, Y. Sodani, 2002, 44th MWSP Conference Proceedings(ed. Margaret A Baker), Vol.XL, Iron & Steel Society, Warrendale, Pa., pp. 1011~1021.
- [4] J. M. Koo, S. R. Ryoo, S. M. Hwang, 2007, Prediction of residual stresses in a plate subject to accelerated cooling - A 3-D finite element model and an approximate model-, Iron Steel Inst. Jpn. Int. 47, pp. 1149~1158.