

롤러 레벨링 공정시 후판의 잔류응력 예측 - Part I : 모델 개발

예호성¹ · 황상무[#]

Prediction of the Residual Stress for a Steel Plate after Roller Leveling - Part I : Development of the Model

H. S. Ye, S. M. Hwang

(Received December 7, 2012 / Revised January 17, 2013 / Accepted January 22, 2013)

Abstract

Steel plates are widely used in many manufacturing areas such as ship and bridge construction industries and are fabricated by different forming processes. Steel plates can have various shape defects, such as curl or camber. Roller leveling reduces the magnitude of the residual stress by using small amounts of reverse bending via an appropriate arrangement of the rolls and the associated plastic deformation in the steel plate. In this study a model for the residual stress after roller leveling is developed. In order to simplify the formulation, a plane-strain condition is assumed and the stress in the thickness direction is assumed to be negligible. The camber deformation in a real sized plate are measured and compared with the prediction values from the model to validate the accuracy of the model.

Key Words : Roller Leveling, Residual Stress, Plastic Strain, Camber

1. 서론

후판의 중요 수요자인 조선, 건축, 교량 제조회사에서는 강철 구조물의 가공, 조립 공정에 있어서의 자동화를 진행시켜 왔다. 이 때문에 절단이나 용접 후의 치수 변화 수정이 곤란해지고, 후판의 가공 후를 포함한 형상 품질 요구가 더욱 더 중요해지고 있다. 후판의 품질을 결정하는 중요한 척도인 평탄도에 잔류응력은 결정적인 영향을 미친다. 잔류응력의 발생원인으로는 후판 내의 온도 분포 불균일, 소성변형의 불균일, 상변태의 불균일 등이 있다. 이러한 잔류응력은 후판의 비틀림, 절단시 힘 발생 등의 나쁜 영향을 주게 된다. 특히 판을 소절하였을 때 판폭내 길이방향 응력의

불균일에 의해 발생하는 Camber, 판두께내 길이방향 응력의 불균일에 의해 발생하는 Curl은 판의 품질에 중요한 영향을 미친다. 따라서 후판 내의 잔류응력을 해석하고 제어하여 판의 품질을 향상시킬 필요성이 있다. 이러한 잔류응력을 제어할 방법으로 텐션 레벨링[1~3]과 롤러 레벨링 등이 있는데 본 연구에서는 후판에 사용되는 롤러 레벨링에 대해서 연구하였다.

Fig. 1에서 보는 것과 같이 롤러 레벨링은 아래, 위로 롤이 있고 입측 압입량과 출측 압입량을 정해, 이 사이를 판이 지나가면서 벤딩(bending)과 언벤딩(unbending)을 반복하면서 소성변형을 유발하여 판내 잔류응력을 변화시켜 나간다. 결국 Camber와 Curl을 감소시켜 판의 품질을 향상시킨다.

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

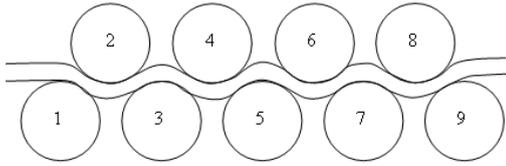


Fig. 1 Schematic figure of the roller level

롤러 레벨러의 해석에 있어 FEM(Finite element method)등의 수치해석 기법을 이용한 모델은 많은 해석 시간을 요구한다[4]. 실제로는 롤러 레벨링 공정 중 잔류응력 변화를 예측하고 공정 조건을 제어해야 하기 때문에 긴 해석시간은 실제 현장에의 적용이라는 점에서 큰 제약이 된다. 따라서 Plane Strain 과 두께방향의 응력분포를 0으로 가정하여 롤러 레벨링 수식 모델을 만들어 짧은 시간에 잔류응력을 예측할 수 있도록 하였다.

2. 잔류응력 예측 모델 수식화

2.1 각 롤의 압입량과 곡률 계산

롤러 레벨링에서 각 롤의 압입량(δ)은 Fig. 2에서 보는 것과 같다. 이때 인터메시(intermesh)를 다음과 같이 정의하여 압입량 대신 사용하기도 한다.

$$\text{Intermesh} = t - \delta \quad (1)$$

각 롤의 압입량은 두번째 롤에서의 입측 압입량과 ($N_R - 1$)번째 롤에서의 출측 압입량을 알면 Fig. 3을 통해서 모든 롤에서의 압입량을 계산할 수 있다.

$$\delta_n - t = \frac{D_{n-1} + 2D_n + D_{n+1}}{4} - \frac{(N_R - 1 - n)H_E + (n - 2)H_D}{N_R - 3} \quad (2)$$

$$H_E = \frac{D_1 + D_2}{2} + t - \delta_2 \quad (3)$$

$$H_D = \frac{D_{N_R-1} + D_{N_R}}{2} + t - \delta_{N_R-1} \quad (4)$$

여기서 δ_n 은 n번째 롤에서의 압입량, t는 판의 두께, D는 롤의 지름, N_R 은 롤의 갯수이다. 이때 첫번째 롤과 마지막 롤에서의 압입량은 0으로 가정하였다.

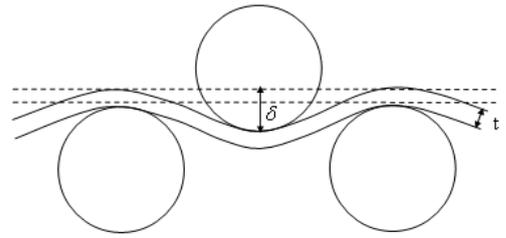


Fig. 2 Definition of the pressed depth

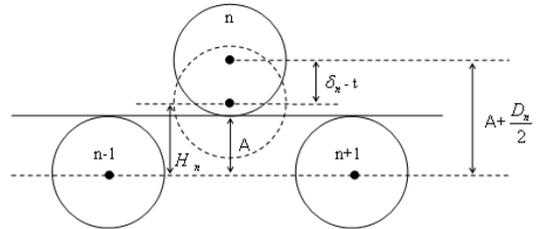


Fig. 3 Pressed depth of upper rollers

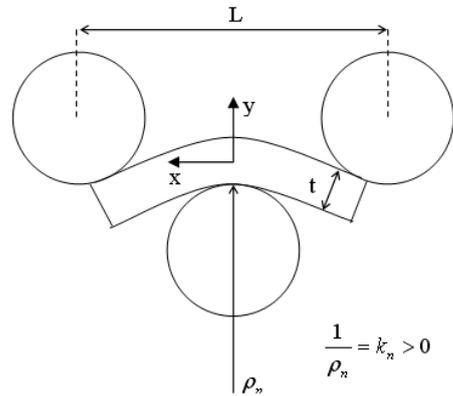


Fig. 4 Curvature of the plate

각 롤에서의 곡률은 Fig. 4와 같이 정의되고 ρ_n 은 n번째 롤에서의 곡률반경이다.

Fig. 5에서 모멘트와 곡률 관계식을 이용하여 주어진 압입량을 통해 곡률을 계산할 수 있다[5]. 이때 Fig. 6에서 보듯이 두번째 롤에서는 좌우가 대칭이 아니어서 그 효과를 고려하여 곡률을 계산하고, ($N_R - 1$)번째 롤에서도 똑같이 적용하였다.

$$k_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\delta_2}{\frac{L^2}{8} - \frac{L^2}{24} \left(1 + \frac{M_1}{M_2} \right)} + \frac{24\delta_2}{L^2} \right] \quad (5)$$

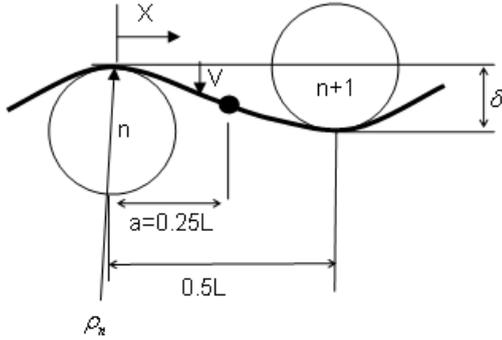


Fig. 5 Relation of the curvature and the moment

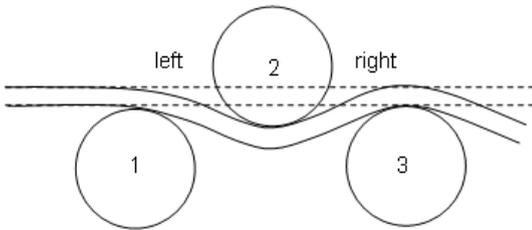


Fig. 6 Curvature of the roll 2

$$k_n = \frac{24\delta_n}{L^2} \quad (n = 3 \sim N_R - 2) \quad (6)$$

$$k_{N_R-1} = \frac{1}{2} \left[\frac{\delta_{N_R-1}}{\frac{L^2}{8} - \frac{L^2}{24} \left(1 + \frac{M_{N_R}}{M_{N_R-1}} \right)} + \frac{24\delta_{N_R-1}}{L^2} \right] \quad (7)$$

여기서 k_n 은 n 번째 롤에서 곡률이고, L 은 롤과 롤 사이의 거리인 롤 피치(roll pitch), M_n 은 n 번째 롤에서의 모멘트(moment)이다.

2.2 Plastic strain 과 응력 계산

Fig. 7과 같이 두께방향과 폭방향으로 Mesh를 나누어 각각의 Element에 대한 응력과 Plastic strain을 계산한다.

먼저 폭방향으로 i 번째의 판중심 변형률($d\varepsilon_c^{(i)}$)을 다음과 같이 정의한다.

$$d\varepsilon_c^{(i)} = - \frac{\left(\frac{\bar{A}_1}{\bar{A}_2} E + A_1^{(i)} \right) dk + \frac{E}{\bar{A}_2} \bar{A}_3 + A_3^{(i)}}{A_2^{(i)} + E} \quad (8)$$

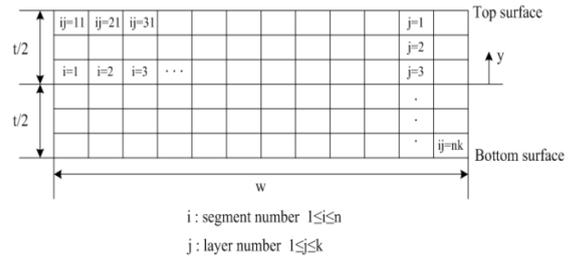


Fig. 7 Meshes used for the model simulation

$$A_1^{(i)} = \frac{1}{t} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \frac{E}{1-\nu^2} y dy \quad (9)$$

$$A_2^{(i)} = \frac{1}{t} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \frac{E}{1-\nu^2} dy \quad (10)$$

$$A_3^{(i)} = - \frac{1}{t} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \frac{E}{1-\nu^2} (d\varepsilon_x^p + \nu d\varepsilon_z^p) dy \quad (11)$$

$$\bar{A}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_1^{(i)}, \quad \bar{A}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_2^{(i)}, \quad \bar{A}_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_3^{(i)} \quad (12)$$

여기서 E 는 Young's modulus, ν 는 Poisson's ratio 이다.

모든 Element에 대한 $d\varepsilon_x$ 를 판중심 변형률과 곡률 증분량을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$d\varepsilon_{x(j)} = dk y_{(j)} + d\varepsilon_c^{(i)} \quad (13)$$

여기서 dk 는 곡률증분량, $y_{(j)}$ 는 j 번째 Element 중심의 두께방향 y 좌표이다.

Radial return algorithm을 이용하여 $R^T > R^{n+1}$ 이면 소성변형으로 Plastic strain을 계산하고 $R^T < R^{n+1}$ 이면 탄성변형으로 Plastic strain을 0으로 가정한다 [6].

$$d\varepsilon_x^p = \frac{R^T - R^{n+1}}{2\mu} \frac{\sigma_x'^{TL}}{R^T} \quad (14)$$

$$d\varepsilon_z^p = \frac{R^T - R^{n+1}}{2\mu} \frac{\sigma_z'^{TL}}{R^T} \quad (15)$$

$$R^T = \sqrt{\sigma_x'^{TL2} + \sigma_y'^{TL2} + \sigma_z'^{TL2}}, \quad R^{n+1} = \sqrt{\frac{2}{3}} Y^{n+1} \quad (16)$$

$$\sigma_x'^{TL} = \sigma_x^n + 2\mu d\epsilon_x', \sigma_y'^{TL} = \sigma_y^n + 2\mu d\epsilon_y', \sigma_z'^{TL} = \sigma_z^n + 2\mu d\epsilon_z' \quad (17)$$

$$d\epsilon_x' = \frac{2-\nu}{3(1-\nu)} d\epsilon_x + \frac{1-2\nu}{3(1-\nu)} d\epsilon_x^p + \frac{1-2\nu}{3(1-\nu)} d\epsilon_z^p \quad (18)$$

$$d\epsilon_y' = -\frac{1+\nu}{3(1-\nu)} d\epsilon_x - \frac{2(1-2\nu)}{3(1-\nu)} d\epsilon_x^p - \frac{2(1-2\nu)}{3(1-\nu)} d\epsilon_z^p \quad (19)$$

$$d\epsilon_z' = -\frac{1-2\nu}{3(1-\nu)} (d\epsilon_x - d\epsilon_x^p - d\epsilon_z^p) \quad (20)$$

여기서 μ 는 Shear modulus, Y^{n+1} 은 (n+1) Step에서의 항복강도이다.

응력 증분량을 계산하기 위해 다음의 두가지 조건을 가정한다

첫번째, 실제의 Plastic strain 증분량은 Plane strain 조건 ($d\epsilon_z = 0$) 하에서 실제 응력 증분량 ($d\bar{\sigma}_x^{(i)}$)을 가해 얻어지는 Plastic strain 증분량과 같다

두번째, 폭방향으로의 각 관중심 변형률 증분량 ($d\epsilon_c^{(i)}$)은 슬리팅(slitting)과 언로딩(unloading)후에도 변하지 않는다.

위의 두가정으로부터 실제 응력 증분량이 다음과 같이 정의된다.

$$d\bar{\sigma}_x^{(i)} = A_1^{(i)} dk + A_2^{(i)} d\epsilon_c^{(i)} + A_3^{(i)} \quad (21)$$

또한 Plane strain 조건과 두께방향 응력을 0으로 가정하여 ($\sigma_y = d\sigma_y = 0$), 응력 증분량은 다음과 같이 계산된다[7].

$$d\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (d\epsilon_x - d\epsilon_x^p - \nu d\epsilon_z^p) \quad (22)$$

$$d\sigma_z = \frac{E}{1-\nu^2} (\nu d\epsilon_x - d\epsilon_z^p - \nu d\epsilon_x^p) \quad (23)$$

따라서 Plastic strain과 응력 증분량이 계산되면 아래와 같이 다음 Step의 Plastic strain과 응력 그리고 곡률이 최종적으로 업데이트(update)된다.

$$\sigma_x^{n+1} = \sigma_x^n + d\sigma_x, \quad \sigma_z^{n+1} = \sigma_z^n + d\sigma_z \quad (24)$$

$$\epsilon_x^{p^{n+1}} = \epsilon_x^{p^n} + d\epsilon_x^p, \quad \epsilon_z^{p^{n+1}} = \epsilon_z^{p^n} + d\epsilon_z^p \quad (25)$$

$$\bar{\sigma}_x^{-n+1(i)} = \bar{\sigma}_x^{-n(i)} + d\bar{\sigma}_x^{-n(i)}, \quad k^{n+1} = k^n + dk \quad (26)$$

3. 모델 검증 및 결과

롤러 레벨링 전과 후의 실제로 잔류응력을 측정할 수 없으므로 판을 잘랐을 때 발생하는 소절힘인 Camber를 측정하여 잔류응력 예측 모델을 검증해 보았다.

우선 롤러 레벨링 전의 Camber를 이용하여 잔류응력을 예측하고 다시 모델을 통해 롤러 레벨링 후의 잔류응력을 예측하여, Camber를 계산한 뒤 실험치와 비교해 보았다.

Table 1의 공정조건에서 Fig. 8에서 보듯이 판을 폭방향으로 양쪽 끝부분을 절사한 뒤, 5등분으로 소절하였다. Fig 9에서와 같이 가운데 소절판을 제외한 4개의 소절판에 대해 롤러 레벨링 전과 후의 Camber를 길이방향으로 1/4, 1/2, 3/4지점에서 각각 측정하였다.

롤러 레벨링 전의 Camber를 이용하여 Fig 10에서 보듯이 Camber와 곡률 관계식을 통해 곡률을 계산하였다.

$$Camber = \rho \left[1 - \cos \left(\frac{Length}{2\rho} \right) \right] \quad (27)$$

또한 곡률과 모멘트 관계식으로 모멘트를 계산하고, 그 모멘트를 가지는 응력 분포를 각각의 소절판에 대해 구하여 초기 응력 분포로 사용하였다.

Fig. 11에 두께방향으로 평균한 응력 분포를 폭방향으로, 롤러 레벨링 전의 초기 응력 분포와 롤러 레벨링 후의 최종 응력 분포를 나타내었다. 롤러 레벨링 후 소성변형이 발생하여 판의 위, 아래 표면에 가까울수록 응력의 크기는 비슷하지만 방향이 반대여서 결국 두께방향으로 평균한 응력이 감소함을 알 수 있다. 모델에 의해 구해진 롤러 레벨링 후의 최종 응력 분포를 가지고 모멘트와 곡률을 계산하고, 롤러 레벨링 후의 Camber를 예측하여 실험치와 비교하여 Fig. 12에 나타내었는데, 응력의 감소로 인해 롤러 레벨링 후 Camber 역시 감소함을 보여준다. 또한 롤러 레벨링 후의 Camber에 대한 모델 예측치와 실험치를 비교했을 때 잘 일치함에 따라 잔류응력 예측 모델의 신뢰성을 검증하였다.

Table 1 Roller leveling conditions for the camber experiment

Thickness	40.35mm
Width	2360mm
Yield Stress	0.451GPa
Young's Modulus	200.1GPa
Roll diameter	360mm
Roll pitch	390mm
Number of the roll	upper : 4, lower : 5
Entry intermesh	t - 6.5mm
Delivery intermesh	t + 0.3mm

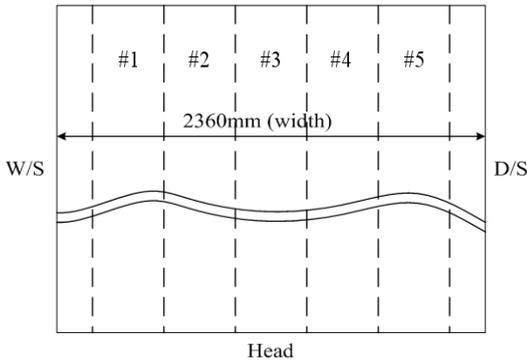


Fig. 8 Schematic figure of the slitting plate

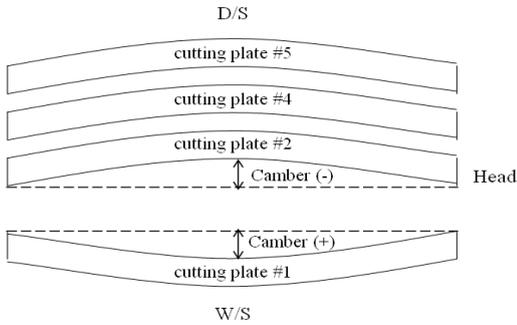


Fig. 9 Shape of the camber

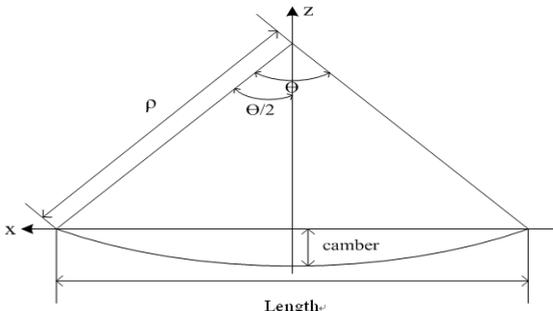
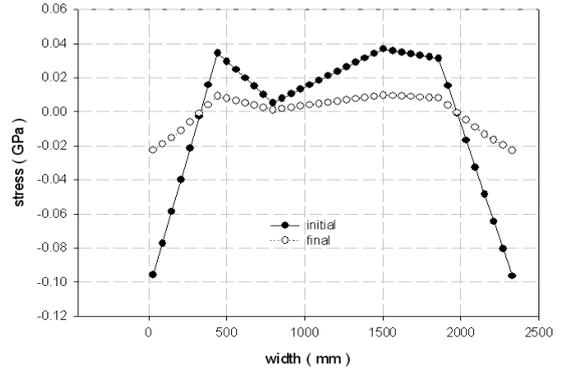
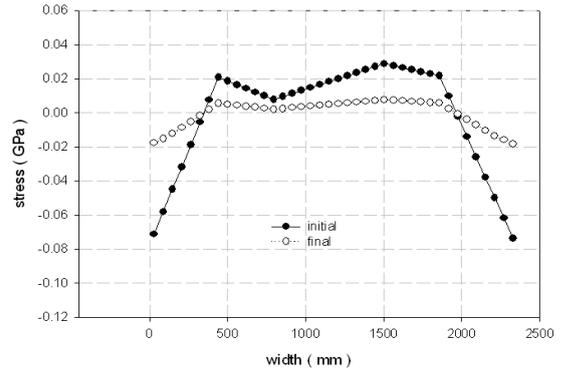


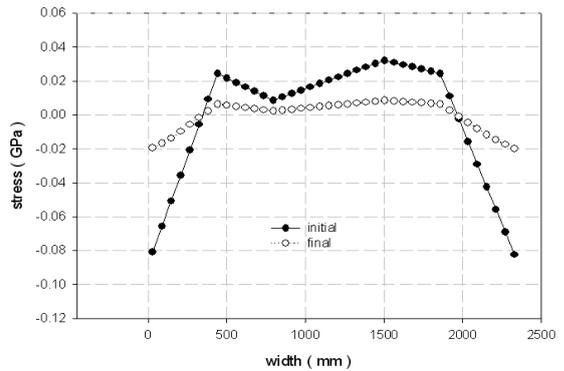
Fig.10 Relation of the camber and the curvature



(a) At the 1/4 length



(b) At the 1/2 length

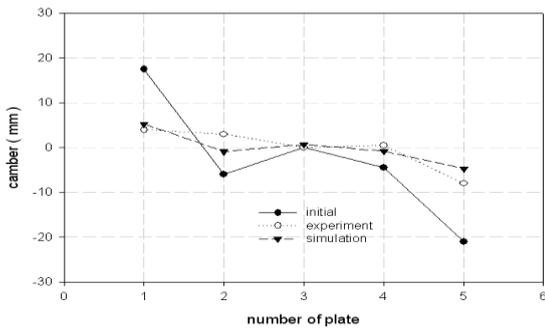


(c) At the 3/4 length

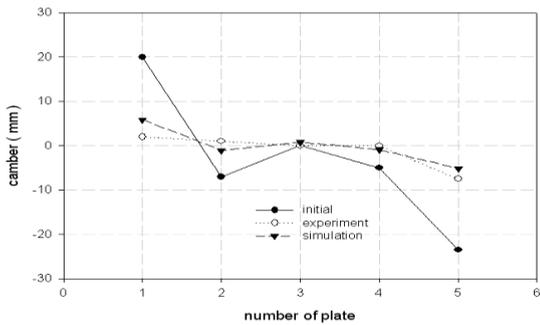
Fig.11 Initial and final average longitudinal stress distributions for the roller leveling

4. 결론

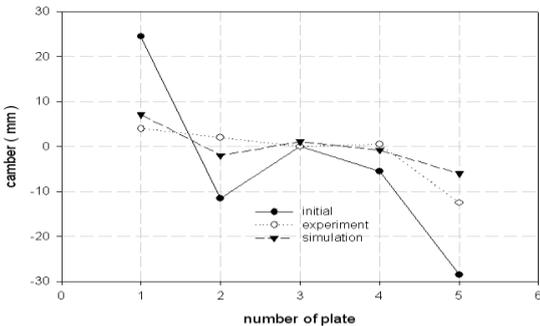
본 논문에서는 롤러 레벨링 공정에서 후판의 잔류응력을 예측함에 있어서 FEM(Finite element method)등의 수치해석 기법을 이용한 모델은 많은



(a) At the 1/4 length



(b) At the 1/2 length



(c) At the 3/4 length

Fig.12 Comparison between simulations and experiments of the camber after roller leveling

해석 시간을 요구하는 단점이 있어 실제 현장에 적용하기가 어려워, 이를 개선하기 위해 몇가지 가정을 통하여 수식 모델을 개발하였다.

개발된 수식 모델을 Camber 실험치와 비교하여 그 신뢰성을 검증하였고, 또한 여러가지 공정 조건에 대한 영향과 응력 분포의 경향성을 해석함에 있어서 매우 용이할 것이다.

참고 문헌

- [1] F. Yoshida, M. Urabe, 1999, Computer-aided Process Design for the Tension Levelling of Metallic Strips, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 89-90, pp. 218~223.
- [2] J. W. Morris, S. J. Hardy, J. T. Thomas, 2002, Some Fundamental Considerations for the Control of Residual Flatness in Tension Levelling, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 120, No. 1-3, pp. 385~396.
- [3] S. Z. Li, Y. D. Yin, J. Xu, J. M. Hou, J. Yoon, 2007, Numerical Simulation of Continuous Tension Leveling Process of Thin Strip Steel and Its Application, *J. Iron. Steel Res. Int.*, Vol. 14, No. 6, pp. 8~13.
- [4] Y. Itami, 2003, Calculation of Deformation on Plate Leveling Process, *CAMP-ISIJ*, Vol. 16, No. 2, pp. 396~398.
- [5] R. D. Krieg, D. B. Krieg, 1977, Accuracies of Numerical Solution Methods for the Elastic-Perfectly Plastic Model, *J. Pressure Vessel Technol.*, Vol. 99, No. 4, pp. 510~515.
- [6] F. P. Beer, E. R. Johnston Jr, J. T. Dewolf, 2006, *Mechanics of Materials 4th ed.*, McGraw-Hill, New York, p. 213.
- [7] J. Chakrabarty, 1987, *Theory of Plasticity*, McGraw-Hill, New York, p. 103.