

롤변형에서의 반경방향 변위 예측 온라인 모델

조준호¹, 황상무[#]

FE-based On-Line Model for the Prediction of Radial Displacements in Roll Deformation

J. H. Cho, S.M. Hwang

Abstract

It is essential to predict the deformed roll profile for the prediction of the strip profile in rolling process. The work roll of the Sendzimir mill has a small diameter in comparison to a barrel length, so that it is well deformed by the rolling pressure. Also it has a complex roll system, so it is difficult to analyze the roll deflection. In this paper, 3D finite element method is used for the analysis of the roll deflection of the Sendzimir due to the contact between rolls. But it takes much time to get the results, so that the on-line model to evaluate the radial deformation of a roll is developed on the basis of the finite element method.

Key Words : deformed roll profile, Sendzimir mill, finite element method, radial deformation

1. 서론

압연 공정에서 판 프로파일을 정확히 예측하기 위해서는 롤변형 프로파일을 정확히 예측하는 것이 필수적이다.

현업에서 가동 중인 압연기의 종류에는 기하학적으로 상하 조합인 4단 압연기로부터 임의의 배열 조합을 가진 20단 압연기까지 다양하다. 그러므로 이러한 다단 압연기에서의 롤변형을 해석하기 위해서는 롤의 반경방향 변위 예측 모델 개발의 필요하다.

특히 20단 압연기는 작업롤의 경우 길이 대 직경의 비가 크기 때문에 압연하중에 쉽게 변형이 된다. 그리고 압연기를 구성하고 있는 롤들이 복잡한 배열을 가지고 있다. 이러한 이유로 변형 해석이 어렵다. 기존 연구에서 접근하고 있는 방법은 주로 Shohet 등이 제안한 분할모델을 사용하고 있다[1-3].

본 논문에서는 20단 압연기에서의 롤변형을 구하기 위해서 3차원 유한요소 모델을 이용하였다. 그러나 3차원 유한요소 모델은 많은 시간을 필요로 때문에 이를 기초로 한 반경방향 변위 예측 모델을 개발하였다. 그리고 이를 응용하여 쟈지미어 20단 압연기와 같은 복잡한 롤 배열을 가진 압연기에 부분적으로 적용해 보았다. 모델의 예측 정밀도는 유한요소 모델과 비교하였다.

2. 반경방향 변위 예측 모델

2.1 힘 프로파일과 롤 변형 프로파일에 대한 표현식

롤 간 접촉으로 인한 단위 폭당 힘 프로파일은 다항식으로 표현할 수 있다[4].

$$P_r = \sum_{i=0}^8 q_i \left(\frac{x}{l/2} \right)^i, \quad 0 \leq x \leq \frac{l}{2} \quad (1)$$

1. 포항공과대학교 기계공학과
교신저자: 포항공과대학교 기계공학과,
E-mail: smhwang@postech.ac.kr

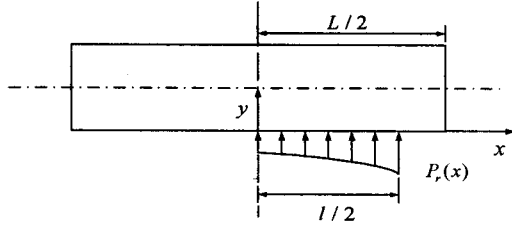


Fig. 1 Concentrated force per unit width

롤의 하부, 상부 및 우부의 변형된 롤 프로파일은 다음과 같이 표현할 수 있다[4].

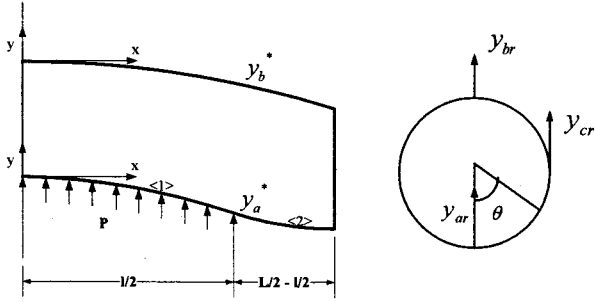


Fig. 2 Schematic diagram of a deformed roll

$$y_{ar}^{* <1>} = \sum_{i=0}^8 \delta_i^{ar} \left(\frac{x}{L/2} \right)^i, \quad 0 < x < \frac{l}{2} \quad (2)$$

$$y_{ar}^{* <2>} = \sum_{i=0}^8 \delta_i^{ar} \left(\frac{L/2 - x}{L/2 - l/2} \right)^i, \quad \frac{l}{2} < x < \frac{L}{2} \quad (3)$$

$$y_{br}^* = \sum_{i=0}^8 \delta_i^{br} \left(\frac{x}{L/2} \right)^i, \quad 0 < x < \frac{L}{2} \quad (4)$$

$$y_{cr}^* = \sum_{i=0}^8 \delta_i^{cr} \left(\frac{x}{L/2} \right)^i, \quad 0 < x < \frac{L}{2} \quad (5)$$

$$\delta_i = \sum_{j=0}^8 k_{ij} q_j, \quad i, j = 0, 1, \dots, 8 \quad (6)$$

여기서 k_{ij} 는 compliance 계수이고 q_j 는 힘 프로파일을 의미한다.

2.2 반경방향 변위 모델

롤의 하부에 힘 $q(x)$ 가 작용할 때 점 (θ, x) 의 반경방향 변위를 $u_r(\theta, x)$ 라 하면, $\Delta u_r(\theta, x)$ 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta u_r(\theta, x) = u_r(\theta, x) - u_r(\theta, 0) \quad (7)$$

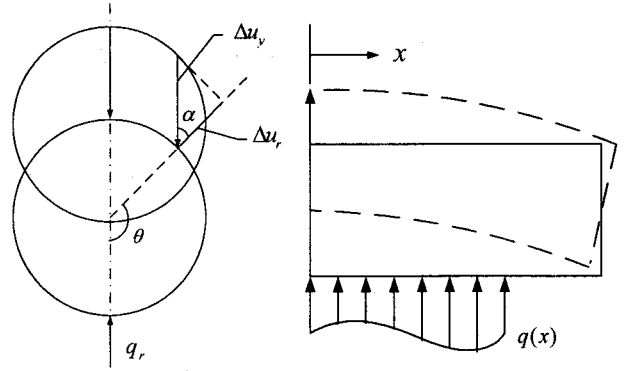


Fig. 3 Definition of $\Delta u_r(\theta, x)$

$\Delta u_r(\theta, x)$ 은 $\Delta u_y(\theta, x)$ 의 반경방향으로의 사영 (projection)에 해당하는 양으로 정의할 수 있다. 유한요소 시뮬레이션을 통해서 $\Delta u_r(\theta, x)$ 의 값은

$\Delta u_y(\pi, x)$ 와 $\Delta u_y(\frac{\pi}{2}, x)$ 즉, y_{br}^* 과 y_{cr}^* 을 계수로 가지는 함수형태로 구할 수 있다. 계수 y_{br}^* 과 y_{cr}^* 을 구한다는 것은 그것을 표현하는 8차 다항식에서 계수 δ_i 를 구하는 것이고, δ_i 는 또한

$\delta_i = \sum_{j=0}^8 k_{ij} q_j$ 이므로 결국 k_{ij} 를 구하는 것으로 귀결된다.

2.3 모델식에 필요한 compliance 계수의 구성

본 연구는 20단 압연기의 롤 사양을 전제로 수행하였기 때문에 k_{ij} 는 다음과 같은 공정조건의 함수로서 표현할 수 있다[4].

$$k_{ij} = f_{ij}(l, D, L, E) \quad (8)$$

여기서 D 는 롤 직경, L 은 롤 배열 길이이고 E 는 Young's modulus이다. 이 식은 Buckingham π 정리에 의해 다음과 같은 무차원 형태의 다항식으로 표현된다[4].

$$Ek_{ij}^r = f_{ij}^r \left(\frac{L}{D}, \frac{l}{L} \right) = \sum_p \sum_q a_{pq} \left(\frac{L}{D} \right)^p \left(\frac{l}{L} \right)^q \quad (9)$$

여기서 계수 a_{pq} 는 유한요소 시뮬레이션을 통해 얻어진 데이터들로부터 최소자승법에 의해 정해진다.

3. 반경방향 변위 예측 모델의 검증

3.1 20단 압연기에 대한 검증 모델식 구성

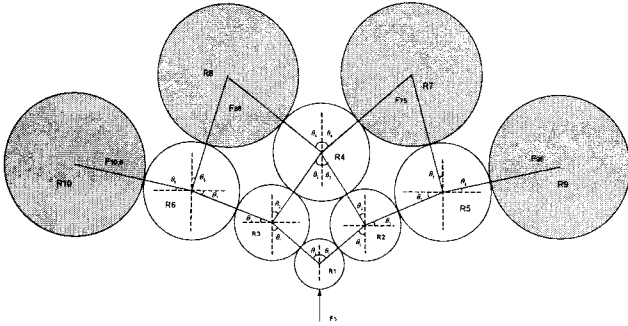


Fig. 4 Schematic diagram of Sendzimir mill

접촉력 q'_j 는 다음의 두 가지 조건에 의해 구해질 수 있다. 첫번째 조건으로 각각의 롤에서의 힘 평형(Force equilibrium)에 의해 다음의 식이 구해진다[4].

$$\sum_j \frac{q'_j(n)}{2j-1} = U_{\sigma(n)}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6) \cdot \sum_i \frac{q'_i(01)}{2i-1} \frac{l}{L_c} \quad (10)$$

이 때 $U_{\sigma(n)}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6)$ 는 롤에 작용하는 힘의 접촉각을 고려한 계수를 나타낸다.

두번째 조건으로 상대적으로 하부에 위치한 i 번째 롤의 상부 프로파일과 상대적으로 상부에 위치한 j 번째의 롤의 하부 프로파일 사이의 완전접촉으로부터 다음의 식이 구해진다[4].

$$I = \int_0^{L_c/2} (y_i^T - y_j^B)^2 dx \quad (11)$$

$$\frac{\partial I}{\partial q'_n(n)} = \int_0^{L_c/2} 2(y_i^T - y_j^B) \left(\frac{\partial y_i^T}{\partial q'_n(n)} - \frac{\partial y_j^B}{\partial q'_n(n)} \right) dx = 0 \quad (12)$$

윗 식으로부터 선형 연립방정식을 도출해낸다. 20단 압연기의 경우는 총 12개의 식이 유도된다. 미지수인 접촉력 q'_j 가 구해지면 압연기를 구성하고 있는 각각의 롤들의 변형된 프로파일을 결정할 수 있다. 다음은 작업롤과 1차 중간롤이 접촉

하는 지점에서의 변형된 롤 프로파일을 나타내는 수식의 예이다.

$$y_1^T = \Delta u_r|_{1,01}(\pi - \theta_1) + \Delta u_r|_{1,13}(2\theta_1) - y_{ar}^*(1,12)$$

$$y_2^B = \Delta u_r|_{2,24}(\pi - \theta_1 - \theta_2) + \Delta u_r|_{2,25} \left(\frac{\pi}{2} + \theta_1 + \theta_3 \right) + y_{ar}^*(2,12) \quad (13)$$

3.2 유한요소 모델 결과와의 비교

압연기의 구조가 상하 좌우 대칭이라고 가정하고 상부 절반만을 대상으로 해석하였다. 본 연구에서는 상부 4개의 보강롤을 제외한 나머지 롤들의 조합에 대해서 검증하였다. 또한 롤 간 접촉으로 인한 변형 모델 검증이 목적이므로 힘은 작업롤 하부에 단면을 기준으로 좌우 대칭적으로 작용하는 경우로 제한하였다.

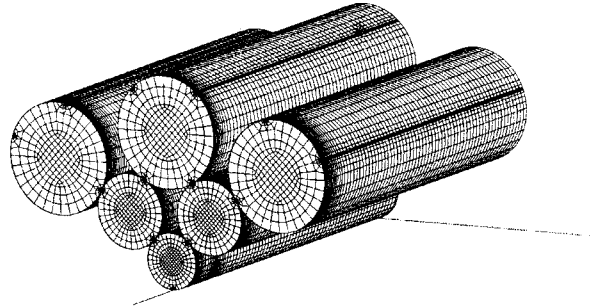


Fig. 5 FE mesh of roll system

Table 1 Process condition

| | D [mm] | L [mm] | E [GPa] |
|---|--------|--------|---------|
| Work roll | 150 | 2000 | 200 |
| 1 st intermediate roll | 200 | 2000 | 200 |
| 2 nd intermediate drive roll | 300 | 2000 | 200 |
| 2 nd intermediate idle roll | 300 | 2000 | 200 |

Table 1은 유한요소 모델의 공정조건을 나타낸다. 작업롤 하부에 작용하는 힘은 판 폭 1800mm에 대해 1kN/mm로 균등하게 작용시켰다. Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8은 각각 작업롤과 1차 중간롤, 1차 중간롤과 2차 중간롤(Drive), 1차 중간롤과 2차 중간롤(Idle)

사이의 접촉력을 비교한 그림이다. 유한요소 모델과 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

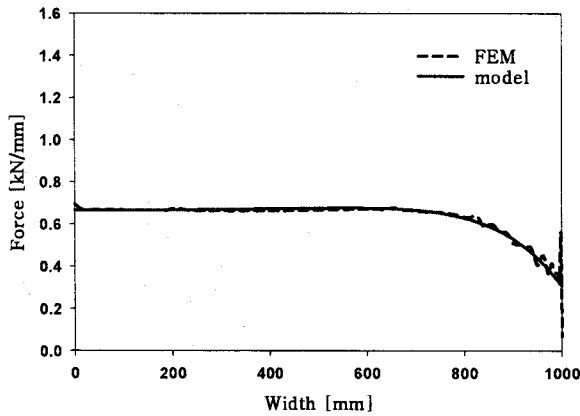


Fig. 6 Force profile at the work roll-1st intermediate roll

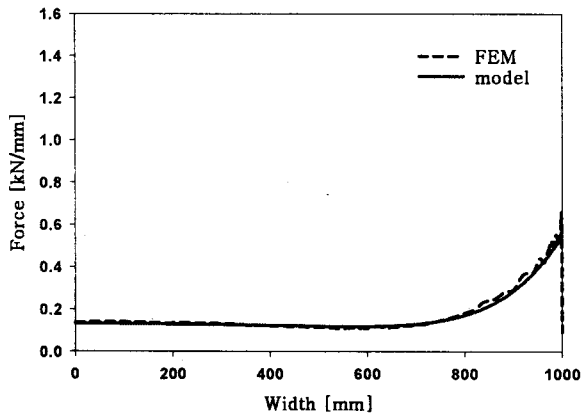


Fig. 7 Force profile at the 1st intermediate roll-2nd intermediate drive roll

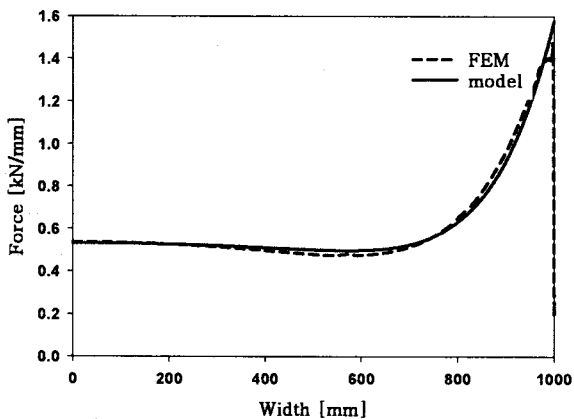


Fig. 8 Force profile at the 1st intermediate roll-2nd intermediate idle roll

Fig. 9는 작업롤 하부의 변형된 롤 프로파일을 비교한 그림이다. 접촉력의 경우와 마찬가지로 유

한요소 모델과 잘 일치함을 알 수 있다.

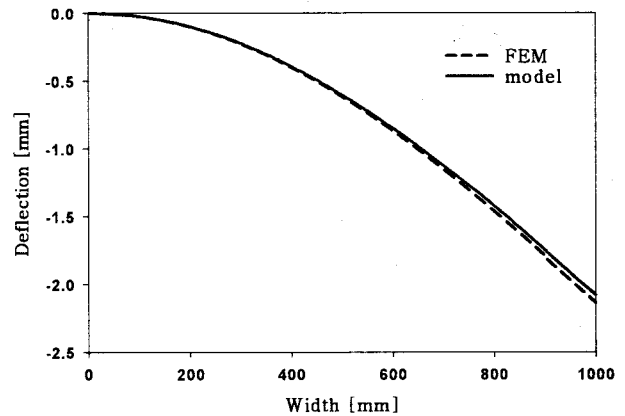


Fig. 9 Deformed roll profile at the work roll

4. 결론

본 연구에서는 롤 간 접촉으로 인한 롤의 변형 모델을 개발하였다. 롤 표면 상의 계수 y_{br}^* 과 y_{cr}^* 의 프로파일을 알면 롤 표면에 분포한 모든 점의 반경방향 변위를 구할 수 있다.

앞으로 20 단 압연기의 정확한 구현을 위해서는 롤과 판 사이의 접촉으로 인한 롤 변형모델식이 필요하다.

참고 문헌

- [1] K.Hara, T.Yamada and K.Takagi, 1991, Shape Controllability for Quarter Buckles of Strip in 20-high Sendzimir Mills, ISIJ Int., Vol. 31, pp. 607 ~ 613.
- [2] T.Masuda, S.Matsubara and A.Takezoe, 1987, An Analysis of Roll Deformation of Sendzimir Mill, pp.39.1-39.6.
- [3] 김종택, 이영호, 한석영, 이준정, 김종근, 1993, 젠지미어 압연기에서 Quarter Wave 방지, 한국소성학회논문집, 제17권, 제2호, pp. 257~266.
- [4] K.H. Yun, T. J. Shin and S.M.Hwang, 2007, A Finite Element-based On-line Model for the Prediction of Deformed Roll Profile in Flat Rolling, ISIJ Int., Vol. 47, pp. 1300 ~ 1308.
- [5] T.H. Kim, W.H. Lee, and S.M. Hwang, 2003, An integrated FE process model for the prediction of strip profile in flat rolling, ISIJ Int., Vol. 43, No. 12, pp. 1947~1956.