

다단 압연기에서의 롤 변형 프로파일 예측 모델 - Part II : 젠지미어 압연기로의 적용

조준호¹ · 황상무[#]

An FE-based Model for the Prediction of Deformed Roll Profile in Multi-high Rolling Mills - Part II : Application to a Sendzimir Mill

J. H. Cho, S. M. Hwang

(Received July 18, 2012 / Revised September 24, 2012 / Accepted September 28, 2012)

Abstract

The work roll of a Sendzimir mill has a small diameter in comparison to its length, so it is easily deformed by the rolling pressure. It also has a complex back up roll system, so it is difficult to analyze the roll deformation. For this reason in Part I we have developed a model which predicts the radial displacement of the roll. In this paper, we apply the model to a Sendzimir mill and propose a new model for the prediction of the deformed roll profile in a Sendzimir mill. The prediction accuracy of the new model is demonstrated through comparison of the predictions from the FE model.

Key Words : Deformed Roll Profile, Sendzimir Mill, Finite Element Method, Radial Displacement

1. 서론

젠지미어 20단 압연기는 냉간압연에서 스테인리스강과 같은 고강도재료를 압연하기 위해서 고안된 압연기이다. 작업롤(work roll)의 경우 길이대 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 방법들은 주로 Shohet 등이 제안한 분할모델을 사용하고 있다 [1~5]. 이러한 기존 모델은 롤을 단순히 보(beam)나 반무한체(semi-infinite solid)로 가정하고 있다. 그렇기 때문에 이로부터 롤 변형 예측에서의 오차가 야기된다[6]. 이러한 이유로 최근에는 유한요

소법을 이용한 연구들이 많이 행해지고 있는 추세이다[5].

본 논문에서는 Part I에서 개발한 롤 간 접촉과 판과 롤 접촉으로 인한 반경방향 변위 예측 모델을 가지고 젠지미어 20단 압연기에 적용하였다. 이로부터 작업롤 하부의 변형된 프로파일을 예측하는 모델을 개발하였다. 모델의 예측 정밀도는 유한요소 모델과 비교하여 검증하였다.

2. 젠지미어 압연기로의 적용

2.1 힘 평형(Force equilibrium)

Part I에서 개발한 반경방향 변위 예측 모델을 Fig. 1에서 보는 바와 같이 젠지미어 20단 압연기에 적용하고자 한다. 수식을 체계적으로 나타내기

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

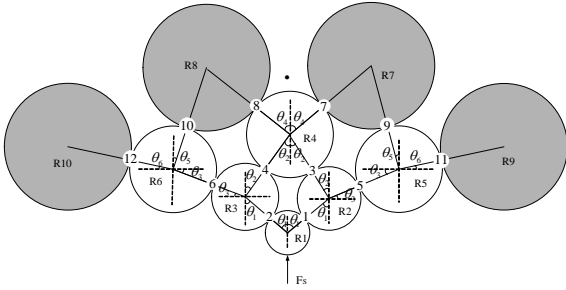


Fig. 1 Roll numbers, interface numbers, and the definition of angles used in the calculation

위해서 경계 m 을 형성하는 롤들의 쌍 (c,d) 을 아래와 같이 정의하기로 한다.

$m = 1, 2, 3, \dots, 12$ 일 때 $(c,d) = (1,2), (1,3), (2,4), (3,4), (2,5), (3,6), (4,7), (4,8), (5,7), (6,8), (5,9), (6,10)$.

F_s 를 롤 하중이라 하고 F_m 를 경계 m 에 작용하는 접촉하중의 크기라 하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_s = 2 \int_0^{l/2} P_s(x) dx \quad (1)$$

$$F_m = 2 \int_0^{L_c/2} P_r^{(m)}(x) dx \quad (2)$$

여기서 $P_s(x), P_r^{(m)}(x)$ 은 Part I에서 정의한 것과 같이 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$P_s(x) = \sum_{i=1}^7 q_i^s \left(\frac{x}{l/2} \right)^{2(i-1)}, \quad 0 < x < \frac{l}{2} \quad (3)$$

$$P_r^{(m)}(x) = \sum_{i=1}^5 q_i^{r(m)} \left(\frac{x}{L_c/2} \right)^{2(i-1)}, \quad 0 < x < \frac{L_c}{2} \quad (4)$$

Fig. 1에 정의된 롤 번호와 각도를 사용해서 각 롤의 자유물체도로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_1 = F_2 = \frac{1}{2 \cos \theta_1} \cdot F_s \quad (5)$$

$$F_3 = F_4 = \frac{\cos(\theta_1 + \theta_3)}{\cos(\theta_2 - \theta_3)} \cdot \frac{1}{2 \cos \theta_1} \cdot F_s \quad (6)$$

$$F_5 = F_6 = \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\cos(\theta_2 - \theta_3)} \cdot \frac{1}{2 \cos \theta_1} \cdot F_s \quad (7)$$

$$F_7 = F_8 = \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_4} \cdot \frac{\cos(\theta_1 + \theta_3)}{\cos(\theta_2 - \theta_3)} \cdot \frac{1}{2 \cos \theta_1} \cdot F_s \quad (8)$$

$$F_9 = F_{10} = \frac{\cos(\theta_3 + \theta_6)}{\cos(\theta_5 - \theta_6)} \cdot \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\cos(\theta_2 - \theta_3)} \cdot \frac{1}{2 \cos \theta_1} \cdot F_s \quad (9)$$

$$F_{11} = F_{12} = \frac{\cos(\theta_3 - \theta_5)}{\cos(\theta_5 - \theta_6)} \cdot \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\cos(\theta_2 - \theta_3)} \cdot \frac{1}{2 \cos \theta_1} \cdot F_s \quad (10)$$

수식을 간략히 나타내기 위해서, 식 (5~10)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_m = f_m(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6) \cdot F_s, \quad m = 1 \sim 12 \quad (11)$$

식 (1-4)와 식 (11)로부터 최종적으로 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$X_s^m = 9 \left(- \sum_{j=1}^4 \frac{X_j^m}{2j-1} + f_m(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6) \cdot \sum_{i=1}^7 \frac{q_i^s}{2i-1} \frac{l}{L_c} \right) \quad (12)$$

여기서 $X_n^m = q_n^{r(m)}, m = 1 \sim 12$

2.2 적합 조건 (Compatibility condition)

롤 c 와 롤 d 가 서로 접촉해 있다고 가정하자. 그리고 $y_{c,cd}^T$ 와 $y_{d,cd}^B$ 는 각각 롤 c 와 롤 d 의 접촉하고 있는 지점에서의 실제 변형된 롤 프로파일을 나타낸다고 하자. 그리고 $y_{c,cd}^T$ 의 경우는 롤 c 의 표면에서 외향법선방향(outward normal direction)을, $y_{d,cd}^B$ 의 경우는 롤 d 의 표면에서 내향법선방향(inward normal direction)을 양의 값으로 하기로 한다.

완전 접촉하고 있는 롤 c 와 롤 d 사이의 경계에서의 적합 조건은 다음과 같은 범함수를 최소화함으로써 얻을 수 있다.

$$I_{(c,d)} = \int_0^{L_{(cd)}/2} (y_{c,cd}^T - y_{d,cd}^B)^2 dx \quad (13)$$

Fig. 1과 같은 젠지미어에 대한 적합 조건은 다음과 같은 범함수를 최소화하기 위한 요구를 나타내는 12개의 모든 접촉경계에 대해서 만족되어야 한다.

$$\Phi = \sum_{i=1}^{12} I^i \quad (14)$$

여기서 i 는 경계 번호를 나타낸다.

또한, $y_{c,cd}^T - y_{d,cd}^B$ 의 계산을 위해 Part I에 주어진 수식들을 사용해서 다음과 같이 표현하였다.

$$y^T \Big|_{1,12} = \Delta u_r \Big|_{1,10} (\Theta_{10}, x) + \Delta u_r \Big|_{1,13} (\Theta_{12}, x) - \Delta u_y \Big|_{1,12} (x) \quad (15)$$

$$y^B \Big|_{2,12} = -\Delta u_r \Big|_{2,24} (\Theta_{13}, x) - \Delta u_r \Big|_{2,25} (\Theta_{15}, x) + \Delta u_y \Big|_{2,21} (x) \quad (16)$$

$$y^T \Big|_{1,13} = \Delta u_r \Big|_{1,10} (\Theta_{20}, x) + \Delta u_r \Big|_{1,12} (\Theta_{21}, x) - \Delta u_y \Big|_{1,13} (x) \quad (17)$$

$$y^B \Big|_{3,13} = -\Delta u_r \Big|_{3,34} (\Theta_{24}, x) - \Delta u_r \Big|_{3,36} (\Theta_{26}, x) + \Delta u_y \Big|_{3,31} (x) \quad (18)$$

$$y^T \Big|_{2,24} = \Delta u_r \Big|_{2,21} (\Theta_{31}, x) + \Delta u_r \Big|_{2,25} (\Theta_{35}, x) - \Delta u_y \Big|_{2,24} (x) \quad (19)$$

$$y^B \Big|_{4,24} = -\Delta u_r \Big|_{4,43} (\Theta_{34}, x) - \Delta u_r \Big|_{4,47} (\Theta_{37}, x) - \Delta u_r \Big|_{4,48} (\Theta_{38}, x) + \Delta u_y \Big|_{4,42} (x) \quad (20)$$

$$y^T \Big|_{3,34} = \Delta u_r \Big|_{3,31} (\Theta_{42}, x) + \Delta u_r \Big|_{3,36} (\Theta_{46}, x) - \Delta u_y \Big|_{3,34} (x) \quad (21)$$

$$y^B \Big|_{4,34} = -\Delta u_r \Big|_{4,42} (\Theta_{43}, x) - \Delta u_r \Big|_{4,47} (\Theta_{47}, x) - \Delta u_r \Big|_{4,48} (\Theta_{48}, x) + \Delta u_y \Big|_{4,43} (x) \quad (22)$$

$$y^T \Big|_{2,25} = \Delta u_r \Big|_{2,21} (\Theta_{51}, x) + \Delta u_r \Big|_{2,24} (\Theta_{53}, x) - \Delta u_y \Big|_{2,25} (x) \quad (23)$$

$$y^B \Big|_{5,25} = -\Delta u_r \Big|_{5,57} (\Theta_{59}, x) - \Delta u_r \Big|_{5,59} (\Theta_{511}, x) + \Delta u_y \Big|_{5,52} (x) \quad (24)$$

$$y^T \Big|_{3,36} = \Delta u_r \Big|_{3,31} (\Theta_{62}, x) + \Delta u_r \Big|_{3,34} (\Theta_{64}, x) - \Delta u_y \Big|_{3,36} (x) \quad (25)$$

$$y^B \Big|_{6,36} = -\Delta u_r \Big|_{6,68} (\Theta_{610}, x) - \Delta u_r \Big|_{6,610} (\Theta_{612}, x) + \Delta u_y \Big|_{6,63} (x) \quad (26)$$

$$y^T \Big|_{4,47} = \Delta u_r \Big|_{4,42} (\Theta_{73}, x) + \Delta u_r \Big|_{4,43} (\Theta_{74}, x) + \Delta u_r \Big|_{4,48} (\Theta_{78}, x) - \Delta u_y \Big|_{4,47} (x) \quad (27)$$

$$y^B \Big|_{7,47} = 0 \quad (28)$$

$$y^T \Big|_{4,48} = \Delta u_r \Big|_{4,42} (\Theta_{83}, x) + \Delta u_r \Big|_{4,43} (\Theta_{84}, x) + \Delta u_r \Big|_{4,47} (\Theta_{87}, x) - \Delta u_y \Big|_{4,48} (x) \quad (29)$$

$$y^B \Big|_{8,48} = 0 \quad (30)$$

$$y^T \Big|_{5,57} = \Delta u_r \Big|_{5,52} (\Theta_{95}, x) + \Delta u_r \Big|_{5,59} (\Theta_{911}, x) - \Delta u_y \Big|_{5,57} (x) \quad (31)$$

$$y^B \Big|_{7,57} = 0 \quad (32)$$

$$y^T \Big|_{6,68} = \Delta u_r \Big|_{6,63} (\Theta_{106}, x) + \Delta u_r \Big|_{6,610} (\Theta_{1012}, x) - \Delta u_y \Big|_{6,68} (x) \quad (33)$$

$$y^B \Big|_{8,68} = 0 \quad (34)$$

$$y^T \Big|_{5,59} = \Delta u_r \Big|_{5,52} (\Theta_{115}, x) + \Delta u_r \Big|_{5,57} (\Theta_{119}, x) - \Delta u_y \Big|_{5,59} (x) \quad (35)$$

$$y^B \Big|_{9,59} = 0 \quad (36)$$

$$y^T \Big|_{6,610} = \Delta u_r \Big|_{6,63} (\Theta_{126}, x) + \Delta u_r \Big|_{6,68} (\Theta_{1210}, x) - \Delta u_y \Big|_{6,610} (x) \quad (37)$$

$$y^B \Big|_{10,610} = 0 \quad (38)$$

여기서 $\Delta u_r \Big|_{c,cd} (\Theta_{ql}, x)$ 은 물 c 와 물 d 사이의 접촉으로 인한 물 c 의 반경방향 변위를 나타내고, Θ_{ql} 은 경계 q 와 경계 l 사이의 각도를 나타낸다.

그리고 $\Delta u_y \Big|_{c,cd} (x)$ 은 물 c 와 물 d 사이의 접촉으로 인한 물 c 의 그 접촉경계에서의 반경방향 변위를 나타낸다.

주어진 수식들을 대입하고 전개해보면 Φ 는 경

계에서 작용하는 각각의 힘 성분 $X_n^m (= q_n^{(m)})$ 의 함수임을 알 수가 있다. Φ 의 최소화를 유도하는 X_n^m 은 다음의 식을 만족시킨다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial X_n^m} = \sum_{i=1}^{12} \frac{\partial I^i}{\partial X_n^m} = 0 \quad (39)$$

여기서 m 은 경계 번호를 나타내고 1~12의 값을 갖는다. 그리고 n 은 1~5의 값을 가진다.

2.3 행렬 방정식(Matrix Equations)

식 (39)는 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{l=1}^{12} \sum_{j=1}^5 A_{nj}^{l, ml} X_j^l = B_n^m, \quad m = 1 \sim 12, n = 1 \sim 5 \quad (40)$$

$$A_{nj}^{l, ml} = \sum_{q \in Q_l \cap Q_m} T_{nj}^{m, -ql} \quad (41)$$

여기서 Q_l 은 경계 l 에 작용하는 롤 하중 성분(경계 l 을 포함)에 영향을 주는 모든 경계를 포함하는 경계 번호의 집합을 나타낸다. 예를 들어, $m=1$ 이고 $l=2$ 일 때 $Q_1 = \{1, 2, 3, 5\}$ 이고 $Q_2 = \{1, 2, 4, 6\}$ 이다. 그러므로 이 경우에 q 는 1과 2의 값을 가진다.

$T_{nj}^{m, -ql}$ 의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{nj}^{m, -ql} = L_c^{(cd)} & \cdot \left\{ \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^4 \frac{A_{ij}^{ql} A_{kn}^{qm}}{2i+2k+1} \right. \\ & + \delta_{ql} \cdot \sum_{n_1=1}^5 \frac{\alpha^{2n_1}}{(2n_1)! \cosh \alpha - 1} \sum_{k=1}^4 \frac{A_{5j}^{ql} A_{kn}^{qm}}{2n_1+2k+1} \\ & + \delta_{qm} \cdot \sum_{n_1=1}^5 \frac{\alpha^{2n_1}}{(2n_1)! \cosh \alpha - 1} \sum_{i=1}^4 \frac{A_{ij}^{ql} A_{5n}^{qm}}{2n_1+2i+1} \\ & \left. + \delta_{ql} \delta_{qm} \cdot \frac{A_{5j}^{ql} A_{5n}^{qm}}{(\cosh \alpha - 1)^2} \left(\frac{\sinh 2\alpha}{4\alpha} - \frac{2}{\alpha} \sinh \alpha + \frac{3}{2} \right) \right\} \quad (42) \end{aligned}$$

$$A_{ij}^{ql} = k_{ij}^{ar} (d, L_c^{(de)} / 2) + k_{ij}^{ar} (e, L_c^{(de)} / 2) \quad (43)$$

$$\begin{aligned} A_{ij}^{ql} = & \left\{ -\cos^3 \Theta_{ql} k_{ij}^{Ar} (d, L_c^{(de)} / 2) \right. \\ & \left. - \cos \Theta_{ql} \sin^2 \Theta_{ql} k_{ij}^{Br} (d, L_c^{(de)} / 2) \right. \quad (44) \end{aligned}$$

$$\left. + 2 \sin^2 \Theta_{ql} \cos \Theta_{ql} k_{ij}^{Cr} (d, L_c^{(de)} / 2) \right\} \left(\frac{L_c^{(de)}}{L_d} \right)^{2i}$$

여기서 $L_c^{(cd)}$ 는 경계 q 를 형성하는 롤 c 와 롤 d 사이의 접촉 길이를 나타낸다. 그리고 $k_{ij}^{ar} (d, L_c / 2)$ 는 롤 d 의 변형과 관계된 컴플라이언스(Compliance) 계수를 나타낸다. 이 때 d 는 경계 q 와 경계 l 양쪽 모두를 형성하는 데 기여하는 롤 번호를 나타내고, e 는 롤 d 와 경계 l 을 형성하는 데 기여하는 롤 번호를 나타낸다.

B_n^m 의 정의는 다음과 같다.

$$B_n^m = \sum_{q \in Q_l \cap Q_m} S_n^{m, -q} \quad (45)$$

$m = 1 \sim 6$ 일 때, 식 (45)에서 Q_0 는 작업물에 형성되는 경계 번호들의 집합을 나타낸다. 즉, $Q_0 = \{1, 2\}$ 이다.

$$B_n^m = \sum_{q \in Q_l \cap Q_m} S_n^{m, -q} \quad (46)$$

$m = 7 \sim 12$ 일 때, 식 (46)에서 Q_0 는 강체 롤에 형성되는 경계 번호들의 집합을 나타낸다. 이 경우에는 $Q_0 = \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$ 이다.

$S_n^{m, -q}$ 의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_n^{m, -q} = & \left\{ \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^4 \frac{B_i^q A_{kn}^{qm}}{2i+2k+1} \right. \\ & \left. + \delta_{qm} \cdot \sum_{n_1=1}^5 \frac{\alpha^{2n_1}}{(2n_1)! \cosh \alpha - 1} \sum_{i=1}^4 \frac{B_i^q A_{5n}^{qm}}{2n_1+2i+1} \right\} \cdot L_c^{(cd)} \quad (47) \end{aligned}$$

여기서 $L_c^{(cd)}$ 는 경계 q 를 형성하는 롤 c 와 롤 d 사이의 접촉 길이를 나타낸다.

$m = 1 \sim 6$ 일 때,

$$\begin{aligned} B_i^q = & \sum_{j=1}^7 \left[-\cos \Theta_{q0} \left\{ \frac{k_{ij}^{As} (1, l/2) - k_{ij}^{BMs} (1, l/2)}{2} \right. \right. \\ & \times \cos a_M (\Theta_{q0} - (\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{a_M})) \\ & \left. \left. + \frac{k_{ij}^{As} (1, l/2) + k_{ij}^{BMs} (1, l/2)}{2} \right\} \right. \quad (48) \\ & \left. + \sin \Theta_{q0} \left\{ \frac{k_{ij}^{CMs} (1, l/2) - k_{ij}^{DMs} (1, l/2)}{2} \right. \right. \\ & \times \sin a'_M (\Theta_{q0} - (\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{a'_M})) \\ & \left. \left. + \frac{k_{ij}^{CMs} (1, l/2) + k_{ij}^{DMs} (1, l/2)}{2} \right\} \right] \left(\frac{L_c^{(cd)}}{L_l} \right)^{2i} q_j^s \end{aligned}$$

$m = 7 \sim 12$ 일 때,

$$B_i^q = \delta_i^q \left(\frac{L_c^{(cd)}}{L_q} \right)^{2i} \quad (49)$$

식 (48)에서 경계 q 가 작업롤의 우편에 접촉해있을 때는 $M = 1$ 이고, 경계 q 가 작업롤의 좌편에 접촉해있을 때는 $M = 2$ 이다.

또한, 식 (40)에 힘 평형에 관한 식 (12)를 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\sum_{l=1}^{12} \sum_{j=1}^4 A_{nj}^{ml} X_j^l = B_n^m \quad (50)$$

여기서,

$$A_{nj}^{ml} = A_{nj}^{ml} - \frac{9}{2j-1} A_{n5}^{ml} \quad (51)$$

$$B_n^m = B_n^m - 9 \sum_{i=1}^7 \frac{q_i^s}{2i-1} \frac{l}{L_c} \times \sum_{l=1}^{12} A_{n5}^{ml} \cdot f_l(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6) \quad (52)$$

3. 결과 및 토론

롤의 탄성변형에 대한 모델의 예측값은 Fig. 2과 같은 유한요소 모델의 결과와 비교하였다. 이 때 모든 롤 크라운은 0이고 1차 중간롤들의 축방향 이동은 없다고 가정하였다. 그리고 백업롤들은 강체로 가정하였다. 작업롤에는 360ton의 롤 하중을 가하였고, 프로파일은 판 폭 1800mm를 따라 균일하게 주었다. 롤 사양은 Table 1에 표기하였다.

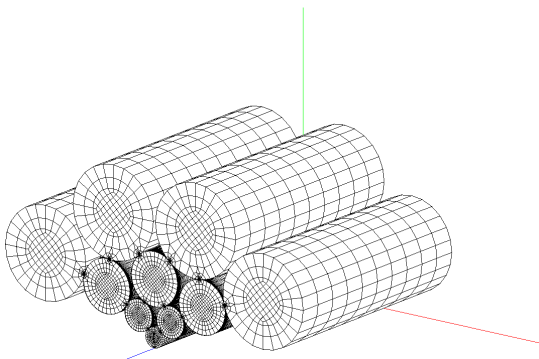


Fig. 2 The mesh used for FE analysis of the elastic deformation of the rolls in a 20-high Sendzimir mill

	D [mm]	L [mm]	E [GPa]
Work roll	88	2000	200
1 st intermediate roll	138	2000	200
2 nd intermediate roll	235	2000	200
Back up roll	406.42	2000	assumed rigid

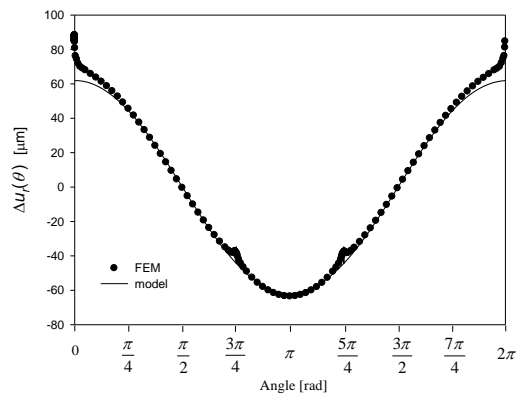


Fig. 3 Radial displacement of the work roll (R1), at the cross-section 900mm apart from the center of the roll, predictions from the model and from FE analysis. The angle is measured counterclockwise from the bottom of the roll

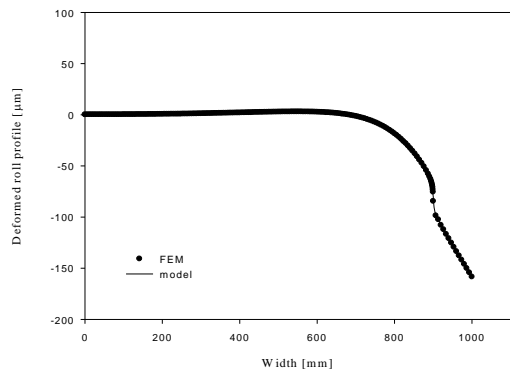


Fig. 4 Deformed roll profile at the bottom of the work roll, Predictions from the present model and FE analysis. Roll barrel length=2000mm, strip width=1800mm, roll force=2.0kN/mm, uniformly distributed

Fig. 3은 작업롤의 반경방향 변위를 나타내는데, 모델의 예측값과 유한요소 예측값과 잘 일치함을 보여주고 있다. 그리고 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 작업롤 하부의 변형된 프로파일에 대해서도 유한요소 해석 결과가 모델의 예측값과 매우 잘 일치하고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 Part I에서 개발한 롤 간 접촉과 판과 롤 간 접촉으로 인한 변형된 롤 프로파일 예측 모델을 사용하였다. 그리고 이 모델을 젠지미어 20단 압연기에서의 적합 조건에 적용함으로써 작업롤의 변형된 프로파일을 예측하였다. 젠지미어 20단 압연기로의 적용을 통해서 개발된 모델이 유한요소 해석의 예측값과 매우 잘 일치함을 알 수 있었다.

본 논문에서는 고려하지 않았지만, 앞으로 백업롤의 변형 효과와 1차 중간롤의 축방향 이동과 관련해서도 본 논문에 제시한 방법론을 채택해서 개발된 모델에 병합할 수 있을 것으로 본다. 이러한 관점에서 개발된 모델은 다단 압연기의 정밀한 제어를 위한 기반이 될 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] G. W. D. M. Gunawardene, M. J. Grimble, A. Thomson, 1981, Static Model for Sendzimir Cold-rolling Mill, *Met. Technol.*, Vol. 8, No. 7, pp. 274~283.
- [2] S. Hattori, A. Mizuta, M. Kitayama, Y. Yamaguchi, 1984, Effects of Roll Arrangements and Roll Sizes on Shape Controllability of Cluster Mills, *Adv. Tech. Plast.*, Vol. 2, pp. 1230~1235.
- [3] T. Masuda, S. Matsubara, A. Takezoe, 1987, *Proc. 4th Int. Steel Rolling Conf., IRSID, Deauville, France*, pp. 39.1~39.6.
- [4] K. Hara, T. Yamada, K. Takagi, 1991, Shape Controllability for Quarter Buckles of Strip in 20-high Sendzimir Mills, *ISIJ Int.*, Vol. 31, No. 6, pp. 607~613.
- [5] H. L. Yu, X. H. Liu, G. T. Lee, 2007, Analysis to Rolls Deflection of Sendzimir Mill by 3D FEM, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 17, No. 3, pp. 600~605.
- [6] K. H. Yun, T. J. Shin, 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, No. 9, pp. 1300~1308.