

판 압연에서 판 형상 정밀 예측을 위한 유한요소 모델 개발

윤기호*, 김태호**, 신태진*, 이원호***, 황상무*
기계공학과, 포항공과대학교*
자동차가공연구그룹, POSCO 기술연구소**
지식자산실 지적재산팀, POSCO***

The development of FE model for the precision prediction of strip profile in flat rolling

K. H. Yun*, T. H. Kim**, T. J. Shin*, W. H. Lee*** and S. M. Hwang*
Mechanical Engineering Department, POSTECH*
Automotive Steel Application Research Group, POSCO Technical Research Laboratories**
Knowledge Asset Department, Intellectual Property Team, POSCO***

Abstract

A full, finite element (FE)-based approach is presented for the precision analysis of the strip profile in flat rolling. Basic FE models for the analysis of the mechanical behavior of the strip and of the rolls are described in detail. Also described is an iterative strategy for a rigorous treatment of the mechanical contact occurring at the roll-strip interface and at the roll-roll interface. Then, presented is an integrated FE process model for the coupled analysis of the mechanical behavior of the strip, work roll, and backup roll in four-high mill. A series of process simulation are conducted and the results are compared with the measurements made in hot and cold rolling experiments.

Key words : flat rolling, FEM, roll-strip and roll-roll interface.

1. 서론

판 압연에 있어 압연된 제품의 폭 방향에 따른 판 프로파일 또는 두께 분포 예측은 제품 품질의 향상을 위한 매우 중요한 요소이다. 그러나 상하부 워크롤의 초기 형상 및 워크롤과 백업롤 사이의 초기형상, 판과 워크롤, 백업롤의 변형이 모두 연계되어 있기 때문에 정밀한 공정 제어가 매우 힘든 상황이다. 과거 많은 연구자들이 판 프로파일 예측 및 제어를 위해 단순 빔 모델이나 무한 탄성체 모델 등 다양한 근사해석모델을 개발하여 왔으나 기본 모델에 많은 가정을 적용함으로 인해 공정 조건의 범위가 제한적이었고 예측 정밀도가 떨어진다. 최근 3 차원 유한요소 모델을 비롯한 수치해석을 이용한 공정해석 모델들이 개발되어 기존 모델보다 예측 정밀도를 향상시키고 나아가 기존모델을 대체할 수 있음이 가능해졌다.

본 연구에서는 4 단 압연기에서의 판 및 워크롤, 백업롤의 변형을 계산하기 위한 3 차원 엄밀 유한 요소 해석 모델을 제시하였다. 판과 롤 사이의 접촉면에 대한 반복 계산 기법을 통해 판의 소성 변형과 워크롤의 탄성 변형 및 롤 변형에 따른 워크롤과 백업롤의 탄성변형을 연계 해석하여 보았다. 본 모델의 유효성을 검증하기 위해 다양한 압연 공정 조건에 적용하여 열연 및 냉연 실험에서 얻어진 측정치와 비교하여 보았고, 현재 산업체에서 사용되는 근사해석모델과 결과를 비교하여 보았다.

2. 판의 강소성 변형 해석 및 롤의 탄성 변형 해석

판의 영역 Ω 내에서 표면 Γ 을 traction h_i 가 정의된 부분 Γ_h 와 속도 u_i 가 정의된 부분 Γ_u 로 나누어 생각한다. Γ_c 는 판과 롤의 접촉면을 의미한다. 정상상태 판의 소성변형의 경계치 문제는 기하경계조

건을 만족하는 속도장 내에서 임의 함수 ω 에 대하여 다음 적분식의 해 \mathbf{u} 를 찾는다.

$$\int_{\Omega} \sigma'_{ij} \omega'_{ij} d\Omega - \int_{\Omega} -\xi_1 \dot{\epsilon}_{kk} \omega_n d\Omega - \int_{\Omega} f_i \omega_i d\Omega - \sum_{\alpha} \int_{\Gamma_h} h_{\alpha} \omega_{\alpha} d\Gamma - \int_{\Gamma_c} -\xi_2 (u_n - u_n^D) \omega_n d\Gamma - \int_{\Gamma_c} \mu \xi_2 (u_n - u_n^D) g(|\Delta \mathbf{u}|) \omega_i d\Gamma = 0 \quad (1)$$

$$g(|\Delta \mathbf{u}|) = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|\Delta \mathbf{u}|}{a} \right) \quad (2)$$

여기서 a 는 매우 작은 상수이고 ξ_2 는 접촉면의 penalty 상수를 의미한다.

비압축성 조건에 의해 정수압 p 는 $p = -\xi_1 \dot{\epsilon}_{kk}$ 식에 의해 근사화된다.

일반적인 유한요소 근사화에 의해 비선형 대수 방정식을 구현하여 direct iteration method 또는 Newton-Rhapson method 를 사용하여 해를 구한다.

정상상태로 판의 강소성 변형 해석을 위한 자유표면예측은 확장 유선추적법에 기초한 방법을 사용하며, 판의 물성치의 변화는 유선추적에 의해 유선을 역추적하는 방법으로 구한다.

롤의 탄성변형에 대한 경계치 문제의 해는 기하경계조건을 만족하고 임의 함수 ω 에 대한 다음의 적분 방정식을 만족한다.

$$\int_{\Omega} \sigma'_{ij} \omega'_{ij} d\Omega - \int_{\Omega} -\frac{\sigma_{kk}}{3} \omega_n d\Omega - \int_{\Omega} f_i \omega_i d\Omega - \sum_i \int_{\Gamma_h} h_i \omega_i d\Gamma - \int_{\Gamma_c} -\xi (u_n - \bar{u}_n) \omega_n d\Gamma = 0 \quad (3)$$

여기서 롤과 롤 사이의 접촉면 Γ_c 는 무시한다. 위에서와 마찬가지로 식(3)은 일반적 유한요소 근사화하여 비선형 대수방정식을 얻어서 해를 구한다.

3. 접촉 경계면 처리

3.1 Mechanical contact 처리

한 물체가 다른 물체와 접촉하면서 둘 다 변형을 할 때 변형된 상태에서의 경계면 형상은 미리 알려져 있지 않기 때문에 접촉면의 경계조건은 정의될 수 없다. 판과 워크롤의 경계, 롤과 롤의 경계 등이 이에 해당하며 이러한 문제를 풀기 위해 다음의 과정을 반복 수행한다.

Step 1. 물 B 는 present configuration 에 있으며 강체라 가정하여 Γ_c 경계를 가진 물체 A 의 기계적 거동 해석을 수행한다. 이때 경계면에서의 응력분포를 예측한다.

Step 2. step 1 에서 예측된 경계면에서의 응력분포를 traction 으로 정의된 경계를 갖는 물체 B 의 기계적 거동 해석을 수행한다.

Step 3. 물체 B 의 deformed configuration 을 다음 식으로 갱신한다.

$$x_k = X_k + aU_k^i + (1-a)U_k^{i-1} \quad (4)$$

여기서 x_k 와 X_k 는 각각 deformed 와 undeformed configuration 에서의 절점의 위치 벡터를 의미하며, U_k 는 절점의 변위 벡터, i 는 반복횟수, a 는 해를 좀더 잘 수렴시키기 위한 보정계수로 $0 < a < 0.5$ 의 범위에서 선택한다.

Step1~Step3 은 각 물체에 대하여 다음의 수렴조건을 만족할 까지 반복된다.

$$\frac{\|U_k^i - U_k^{i-1}\|}{\|U_k^i\|} \leq \varepsilon \quad (5)$$

여기서 U_k 는 만일 물체가 롤이라면 절점 변위벡터를, 물체가 판이라면 절점 속도 벡터를 의미한다.

3.2 변형된 물체의 표면 정보 계산

물체 A 와 물체 B 사이의 경계에서 물체 B 의 표면 절점 접선벡터의 적절한 표현은 물체 A 의 표면에서의 절점의 접선벡터의 결정에 중요한 요소이다. (예를 들어 판과 워크롤의 연계해석에서 A 가 판이고 B 가 워크롤이 된다.) 또한 변형된 물체(변형된 워크롤)의 표면에서 회전으로 인한 속도 벡터의 계산에도 중요하다. 이에 대해 아래와 같이 deformation gradient 에 기초한 접근 방식을 사용한다.

초기와 변형 후 configuration 을 각각 x_k 와 X_K 로 정의하면 다음과 같다.

$$x_k = x_k(X_K) \quad (6)$$

$$dx_k = x_{k,K} dX_K \quad (7)$$

$$X_{K,k} = x_{k,K}^{-1} \quad (8)$$

여기서 $x_{k,K}$ 는 deformation gradient tensor 를 의미한다.

변형된 표면 ds 에서의 절점의 접선벡터 n_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$n_i ds = J dS N_i X_{I,i} \quad (9)$$

여기서 N_i 는 변형전 표면에서의 절점의 접선벡터이고 $J = |x_{i,k}|$ 의 관계를 가진다.

변형된 표면 ds 에서의 절점의 접선벡터 n_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$n_i = \text{normalize}(N_i X_{I,i}) \quad (10)$$

변형된 표면내 절점에서의 속도 벡터 u_i 는 변형전 속도벡터 V_I 와 다음 식과 같은 관계를 가진다.

$$u_i = x_{i,I} V_I \quad (11)$$

식(10) 와 식(11)로부터 절점에서의 $x_{k,K}$ 를 계산하여야 하지만 두 맞닿은 요소 표면의 경계에서 불연속 하기 때문에 이를 위해 다음처럼 가정한다.

$$x_i^N - x_i^A = x_{i,K}^A (X_K^N - X_K^A) \quad (12)$$

여기서 A 는 deformation gradient 가 계산되는 절점을 의미하고, N 은 절점 A 를 포함한 각 요소에서의 임의의 절점을 의미한다.

$x_{i,K}^A$ 의 평균값은 최소 자승법을 이용하여 다음 식으로부터 구한다.

$$P_{iL} = x_{i,K}^A Q_{KL} \quad (13)$$

$$P_{iL} = \sum_N (x_i^N - x_i^A)(X_L^N - X_L^A) \quad (14)$$

$$Q_{KL} = \sum_N (X_K^N - X_K^A)(X_L^N - X_L^A) \quad (15)$$

식(13)을 식(10), 식(11)에 적용시키면 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$n_i = \text{normalize}(N_i Q_{iL} P_{iL}^{-1}) \quad (16)$$

$$u_i = P_{iL} Q_{ML}^{-1} V_M \quad (17)$$

4. 압연공정 해석 모델

앞에서 제안된 mechanical contact 를 처리하는 방법을 기본으로 다양한 종류의 압연기에서 판과 롤의 변형 연계 해석을 위한 기본 유한 요소 모델은 여러 가지 방법으로 통합되어진다. Fig. 1 에 일반적인 4 단 압연기에서의 계산 과정을 도식화하였다. 이때 대칭성에 의해 전체의 1/4 부분만 고려하여 계산을 수행한다.

여기서 판과 워크롤 사이의 경계면 처리는 판을 물체 A 로 워크롤을 물체 B 로 고려하였고, 롤과 롤 사이의 경계면 처리는 워크롤을 물체 A 로 백업롤을 물체 B 로 고려하였다. 또한 워크롤과 백업롤 사이의 반복 수행을 완료한 후 판의 변형 해석을 하도록 하였다.

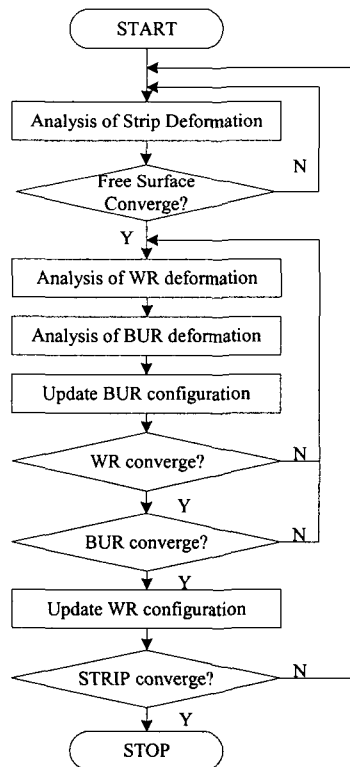


Fig. 1. A computational procedure for the analysis of a quarter system of a four-high mill.

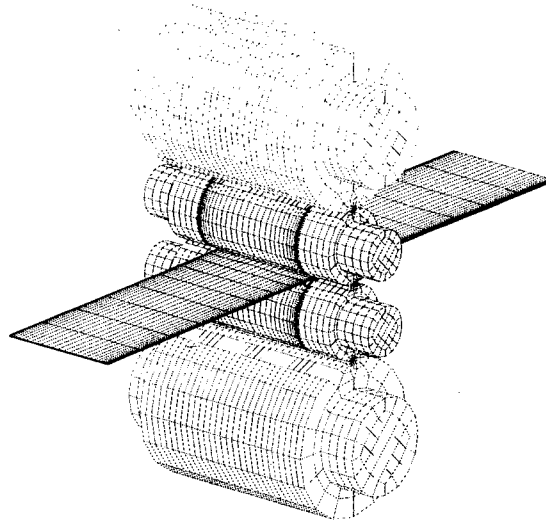


Fig. 2. A schematic representation of the roll meshes and strip mesh used for the analysis of a four-high mill

5. 실제 공정조건에 대한 적용

Fig 2. 는 공정 simulation 을 위해 사용된 판과 워크롤, 백업롤의 유한요소 격자를 나타낸다. 판의 전 후단부는 bite zone 길이의 최소 40 배 이상으로 충분히 늘려 주고 판의 수렴 조건은 $\epsilon = 0.0005$, 반면에 롤에서는 $\epsilon = 0.00001$ 를 수렴조건으로 사용한다.

개발된 유한요소 공정 모델의 유효성을 검증하기 위해 열연 공정 simulation 수행 결과를 시험압연기를 이용한 측정치 결과와 비교하여 보았다. 이때 사용한 공정조건은 다음과 같다.

Table 1. Hot rolling process conditions

Parameter	Value
Strip Flow Stress	$\bar{\sigma} = 157\bar{\epsilon}^{0.21}\bar{\sigma}^{0.13}$ (GPa)
Strip Inlet Dimension	251×3 (mm)
Reduction Ratio	30 (%)
Rolling Speed	55.2 (mpm)
WR Barrel/Diameter	400/200 (mm)
BUR Barrel/Diameter	500/350 (mm)
Young's modulus	208.8(GPa)

Fig. 3 에서 각 초기 워크롤 크라운 조건에 따른 폭방향 판두께 분포는 기존 현장에서 사용되는 profile 예측 모델에 비해 실험 측정치와 매우 잘 맞고 있음을 보여주고 있다. 이때 판-워크롤, 워크롤-백업롤 경계면에서의 폭방향 압하력 분포는 Fig.4 에서와 같이 초기 워크롤 크라운값에 따라 매우 다른 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

한편 냉연 공정에도 유효성을 검증하기 위해 POSCO 에서 수행된 실험측정결과와 비교하여 보았다. 이때 사용한 공정조건은 다음과 같다.

Table 2. Cold rolling process conditions

Parameter	Value
Strip Flow Stress	$\bar{\sigma} = 0.534(0.001 + \bar{\epsilon})^{0.63}$ (GPa)
Strip Inlet Dimension	220,300×0.792 (mm)
Reduction Ratio	30 (%)
Rolling Speed	12 (mpm)
WR Barrel/Diameter	500/200 (mm)
WR Bender Force	-12.3 (ton/chock)
BUR Barrel/Diameter	500/530 (mm)
Young's modulus	205.8(GPa)

Fig.5 에서와 같이 유한요소 모델을 사용한 폭방향 관두께 분포 예측치는 측정치와 근접하고 있음을 확인할 수 있다.

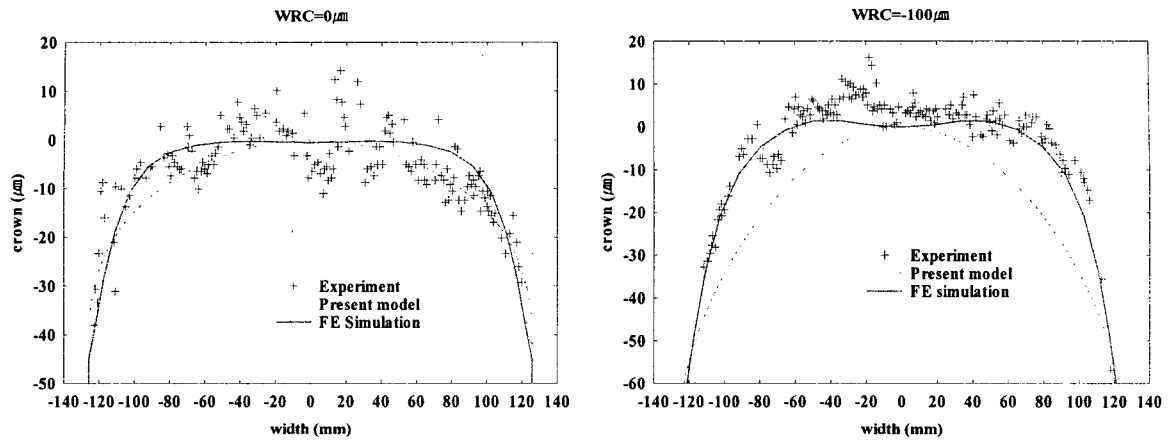


Fig. 3. Strip profiles, measurements and predictions in hot rolling experiments

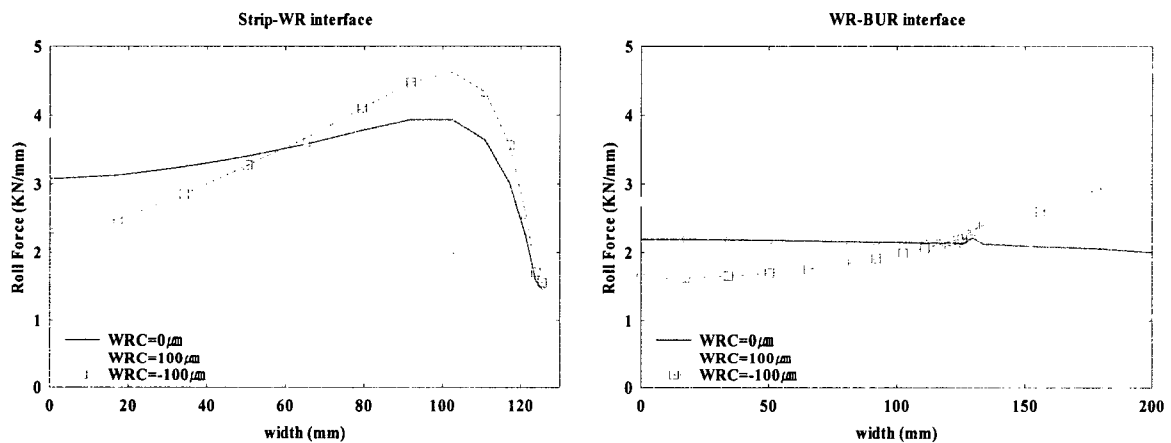


Fig. 4. Distribution of roll force per unit width at strip-WR and WR-BUR interface

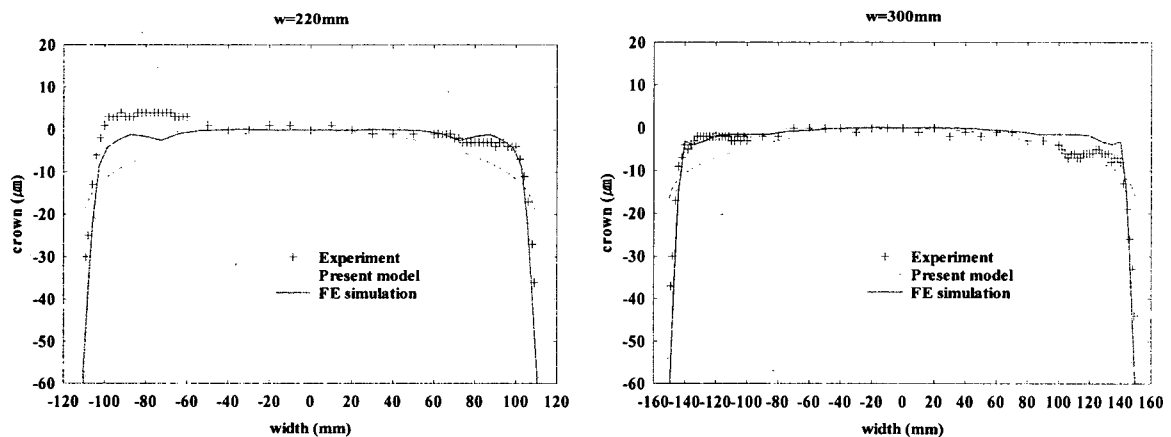


Fig. 5. Strip profiles, measurements and predictions in cold rolling experiments

6. 결론

일반적으로 판 압연에서 일어나는 기계적 거동의 정밀 해석을 위한 모델 개발은 판과 롤 사이, 롤과 롤 사이 접촉면에서 엄밀한 예측 및 경계 조건의 충족을 필요로 한다. 본 연구에서는 기본 유한 요소 모델에 mechanical contact 를 처리하는 반복 계산 전략을 사용하여 좀더 직접적인 정밀 공정 모델을 완성하였다. 제시된 모델은 다양한 공정 변수로 인한 판 profile 의 상세한 양상을 반영할 수 있었다. 앞으로 열팽창 및 롤마모에 의한 롤 갭 profile 변화 등을 연계시켜 제품의 정밀 공정 제어 정확도를 향상시키기 위한 효율적인 도구로서 사용될 수 있도록 발전시켜야 하겠다.

참고문헌

1. Matsumoto, H., Nakajima, K., Kikuma, T., and Uehori, Y., J. Japan Soc. Technology of Plasticity, **23**, 1201(1982).
2. Pawelski, O., and Teutsch, H., Engineering Fracture Mechanics, **21**, 473(1985).
3. Nakanishi, T., Sugiyama, T., Iida, Y., Hashimoto, T., Nishimura, S., Awazuhara, H., Hitachi Review, **34**, 153(1985).
4. Wilms, W., Vogtmann, L., Kloeckner, J., Beisemann, G., Rohde, W., Metallurgical plant and Technology, **8**, 74(1985).
5. Matsumoto, H., and Hamazu, S., J. Japan Soc. Technology of Plasticity, **37**, 1162(1996).
6. Shohet, K.N., and Townsend, N. A., J. Iron Steel Inst., **206**, 1088(1968).
7. Spooner, P. D., and Bryant, G. F., Proc. The Metals Society Conf. on Shape Control, Chester, 1976, pp. 19.
8. Orowan, E., Proc. Inst. Mech. Eng., **150**, 140(1943).
9. Yamada, K., Ogawa, S., and Ataka, M., Proc. Num. Meth. Ind. Forming Processes, A.A.Balkema, Rotterdam, Valbonne, 1992, pp. 755.
10. Yanagimoto, J. and Kiuchi, M., Proc. Num. Meth. Ind. Forming Processes, A.A.Balkema, Rotterdam, Valbonne, 1992, pp. 763.
11. Kim, H. J., Kim, T. H., and Hwang, S. M., J. Material Processing Technology, **104**, 81(2000).