

# 유한요소법에 기초한 박판에서의 압하력 및 압연동력 정밀 예측 On-Line 모델 (II) 장력의 영향

곽우진\* · 김영환\*\* · 박해두\*\*\* · 이중형\* · 황상무\*

## FE-based On-Line Model for the Prediction of Roll Force and Roll Power in Finishing Mill (II) Effect of Tension

W. J. KWAK, Y. H. KIM, H. D. PARK, J. H. LEE and S. M. HWANG

### Abstract

On-line prediction model which calculate roll force, roll power and forward slip of continuous hot strip rolling was built based on the results of plane strain, rigid-viscoplastic finite element process model. Using the integrated FE process model, a series of finite element simulation was conducted over the process variables, and the influence of various process conditions on non-dimensional parameters was inspected. The prediction accuracy of the proposed on-line model under front and back tension is examined through comparison with predictions from a finite element process model over the various process conditions. In addition, we examined the validity of the on-line prediction model through comparison with roll force of experiment in hot rolling.

**Key Words** : Hot Strip Rolling, On-Line Model, Roll Force, Roll Power, Forward Slip, Tension

### 1. 서 론

열간압연에서 정밀한 공정설계를 위해서는 작업물에 걸리는 하중, 롤모터를 구동하기 위한 동력, 그리고 스트립과 롤의 미끄러짐과 같은 현상을 정밀하게 예측하는 시스템이 필요하다.

열간압연 시스템은 소성유동 및 열전달, 롤과 스트립의 접촉과 같은 현상들이 복합적으로 작용하고 있다. 많은 연구자들이 압연에 대한 연구를 진행하였고, 최근에는 유한요소해석과 같은 방법으로 정밀한 해석이 이루어지고 있다. 유한요소해석과 같은 방법은 해의 신뢰도는

높지만, 계산시간이 많이 소요된다. 제품을 생산하기 위한 공정설계에는 정밀하게 예측하는 것 뿐만 아니라 제품 생산전에 짧은 시간내에 공정설계가 이루어져야 하므로 현재로써는 유한요소해석 시스템을 on-line 공정설계에 이용할 수는 없다.

실시간 예측모델은 대부분 Orowan의 이론<sup>(1)</sup>과 그 변이들에 기초해서 만들어졌다<sup>(2-6)</sup>. 그런데, 다양한 공정조건에서 Orowan 모델과 정밀한 유한요소해석 결과를 비교한 결과 예측 정밀도가 얻어질 수 있는 공정조건 범위는 제한적임을 확인할 수 있다. 이러한 예측 정밀도를 높이기 위해서 장력이 없을 때의 열간압연에서의 예측

\* 기계공학과, 포항공과대학교

\*\* 포스코 기술연구소, 스테인레스 연구그룹

\*\*\* 포스코 기술연구소, 광양 압연 생산 연구그룹

시스템이 개발되었고<sup>(7)</sup>, 본 논문에서는 열간 압연 실험을 통해서 장력이 없을 때의 on-line 수식모델의 해의 정밀도를 확인하였다. 또한, 기존에 개발한 장력이 없을 때의 on-line 수식모델을 발전시켜 상상열간압연에서 전후방장력의 효과를 고려한 수식모델을 개발하였다.

## 2 열간압연의 모델식검증 실험

열간압연 실험을 통해서 측정한 압연하중값과 수식모델로 계산한 압연하중값을 비교함으로써 수식모델의 유효성을 확인한다.

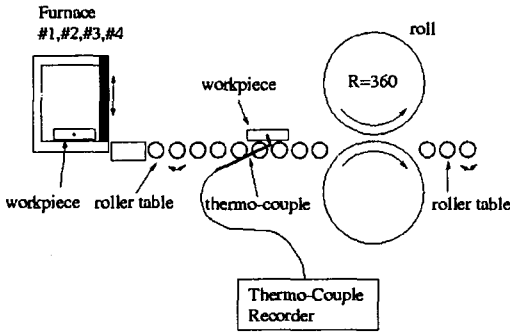


Fig. 1 Schematic diagram of experiment equipments

그림 1 에서와 같은 실험장치를 이용해서 열간압연 실험을 수행하였다. 롤반경(R)은 360mm 이다. 가열로에는 산화막 방지를 위해 질소가스 이용하였고 잔류변형과 스트립내의 편석을 제거하고 균일한 온도를 얻기 위해서 가열로에서 온도를 제어한다. 실험이 평면변형의 조건에 최대한 가깝게 하기위해  $\frac{W}{L_x} > 6$  이 되도록 시편의 초기두께, 압하율을 설정하였다. 또한, 실험 장치에서 수용할 수 있는 롤속도와 압연하중 그리고 압연동력의 한계치를 고려하여 적절한 범위의 공정조건들을 같이 설계하였다. 시편은 모두 17 개이다. 재질은 stainless 304 이고, 압연방향으로의 폭과 길이는 모두 250 mm, 200 mm 로 일정하다. 지름 5 mm 인 thermo-couple 을 삽입하기 위해 지름 5.5 mm, 깊이 125 mm 의 구멍을 시편의 옆면 가운데에 하나씩 뚫었다.

수식모델에 이용하는 온도값은 목표온도값이 아닌 시편의 중심부에 삽입한 thermo-couple 로 직접 측정할 압연이 시작될 당시의 시편의 중심부 온도값이다.

수식모델로 압연하중을 계산하기 위해서는 실험에서

사용한 시편의 유동응력식이 필요하다. 여기에서는 stainless 304 재료에 대해 Kim<sup>(8)</sup> 등이 개발한 유동응력식을 이용하였다. 실험에서의 마찰 조건은 클롱마찰  $\mu = 0.3$  으로 가정하여 수식모델을 계산하였고, 롤탄성을 효과를 고려하기위해 수식모델 계산에서 Hitchcock 식을 이용하였다.

수식모델과 실험치의 압연하중값은 그림 2 에서 볼 수 있듯이 최소 0.0% 의 오차, 평균 6.4% 의 오차를 나타내고 최대 15.2% 의 오차이다. 이로써 개발한 수식모델<sup>(7)</sup> 은 장력이 없고, 초기 잔류변형이 없을때의 열간압연 시스템의 압연하중값을 잘 예측하고 있다고 판단이 된다.

## 3 장력을 고려한 On-Line 수식모델

### 3.1 변수, 무차원 인자들

전방장력  $\sigma_1$ , 후방장력  $\sigma_2$  는 다음과 같이  $\sigma_m$  을 도입해서  $t_1, t_2$  로 무차원화 시킬수 있다.

$$t_1 = \sigma_1 / \sigma_m \quad (1)$$

$$t_2 = \sigma_2 / \sigma_m \quad (2)$$

$$\sigma_m = \bar{\sigma}(\epsilon_m, \dot{\epsilon}_m, T) \quad (3)$$

여기서,

$$\epsilon_m = \int \epsilon d\Omega / \int d\Omega, \quad \dot{\epsilon}_m = \int \dot{\epsilon} d\Omega / \int d\Omega,$$

$$\epsilon = 1.15 \log \frac{H_1}{h}, \quad \dot{\epsilon} = 1.15 \frac{2 \tan \phi}{h^2} V_2 H_2 \quad \text{이고, } V_2 :$$

스트립 출측속도,  $\Omega$  는 그림 3 에서와 볼 수 있듯이 롤갭(roll gap) 에서의 스트립 영역이다.  $\sigma_1$  은 후방장력,  $\sigma_2$  는 전방장력이다.

장력까지 포함한 압연동력, 하중, 선진율값을 구하기 위해서  $P/P^*, F/F^*$  의 무차원 함수를 도입한다. 장력이 없을때의 압연동력, 하중값  $P^*, F^*, f_s^*$  들은 기존에 개발된 모델로<sup>(7)</sup> 정밀하게 구할수 있다.

전,후방 장력을 포함한 일련의 유한요소공정 시뮬레이션을 각 교란세트(perturbed sets) - 기준 공정 세트에서 적어도 다음의 공정변수들중 한가지는 변화시킴: 스트립 재료, 롤반경(R), 롤각속도( $\omega$ ), 스트립 입측온도( $T_1$ ) - 에 대해서 수행하였다. 무차원화 시킨 장력( $t_1, t_2$ )을 도입하여 일정하게 유지시킬 경우

$P/P^*, F/F^*, f_s$  의 무차원 함수들은 이들 공정변수에 거의 영향을 받지 않음이 밝혀졌다.

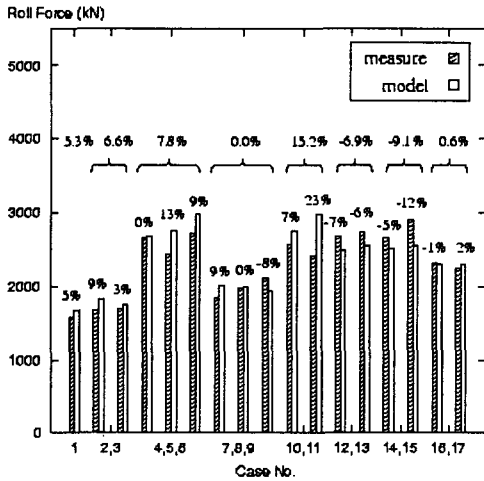


Fig. 2 Comparison between the value of roll force predicted from the on-line model and those measured from the experiment

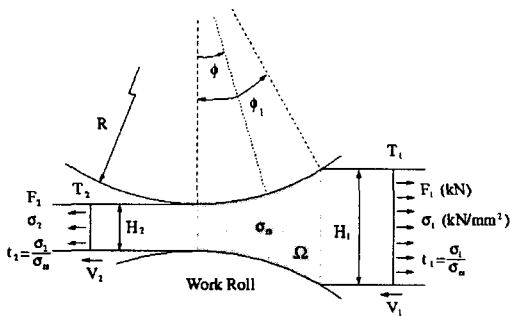


Fig. 3 Geometry of roll bite under front and back tension

### 3.2 수식모델

앞의 결과들로부터 아래와 같이 단위폭당 압연동력, 압연하중 그리고 선진율을 결정할 수 있다.

$$P = f_1 P^* \quad (4)$$

$$F = f_2 F^* \quad (5)$$

$$f_s = f_s^* + L_{f_s} t_{12} \quad (6)$$

이때,

$$t_{12} = t_2 - t_1 \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}$$

$$f_1 = 1 + A_{P/P^*} \cdot t_1 + B_{P/P^*} \cdot t_2$$

$$f_2 = 1 + A_{F/F^*} \cdot t_1 + \left\{ B_{F/F^*} \cdot \left( 1 - \frac{t_1}{0.4} \right) + D_{F/F^*} \cdot \left( \frac{t_1}{0.4} \right) \right\} t_2$$

여기서,  $A_{P/P^*}, B_{P/P^*}, A_{F/F^*}, B_{F/F^*}, D_{F/F^*}$ , 그리고

$L_{f_s}$  들은  $s, r, \mu$  인자로 구성된 다항식이다. 이들은 유한요소해석 결과중 기준공정 데이터들로부터 구하였다.

상부 롤과 하부 롤을 구동하는 모터 각각 재료가공에 소모되는 단위폭당 동력은 다음과 같이 구한다.

$$P_M = \frac{1}{2} (P - \sigma_2 H_2 V_2 + \sigma_1 H_1 V_1) \quad (7)$$

이때  $V_1, V_2$  : 스트립의 입,출측 속도이다.

### 3.7 유한요소해석 결과와 비교

기준공정(reference sets), 교란공정(perturbed sets) 그리고 열간사상압연공정 범위내의 다양한 공정조건에 대해서 총 1476 가지 유한요소해석을 수행하여 압연하중, 압연동력 그리고 선진율 값을 수식모델로 구한 값과 비교해 본 결과 그림 4 와 같이 잘 일치 함을 알 수 있다.

## 4. 결론

사상열간압연 공정 범위내의 공정조건의 열간압연 실험을 통해서 수식모델의 유효성을 확인하였다. 장력과, 압연하중 그리고 압연동력의 무차원화를 통해서 전후방 장력이 걸릴때의 열간압연 시스템을 예측하는 on-line 수식모델을 개발할 수 있었다. 그리고, 장력이 포함된 다양한 공정조건에서 수식모델 결과와 유한요소해석 시스템의 결과를 비교한 결과 아주 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 열간압연중의 재결정의 효과를 반영할 수 있다면 현재까지 개발한 on-line 수식모델은 사상열간압연의 정밀한 공정제어에 이용될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- (1) E. Orowan, 1943, "The calculation of roll pressure in hot and cold flat rolling", Proc. Instn. Mech. Engrs., vol. 150, pp. 140.
- (2) R. B. Sims, 1954, "The Calculation of Roll Force and Torque in Hot rolling Mills", Proc. Instn. Mech. Engrs., vol. 168, pp. 191~200.
- (3) J. M. Alexander, 1972, "On the theory of rolling", Proc. Royal Soc. London, vol. A326, pp. 535.
- (4) T. Tamano et al., 1977, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., vol. 43, pp. 2885.
- (5) H. R. Le et al., 2001, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 43, pp. 1404~1419
- (6) J. Y. Jung et al., 2000, "Fuzzy algorithm for calculating roll speed variation based on roll separating force in hot rolling", International Journal of Mechanical Sciences, vol. 42, pp. 249~272
- (7) W. J. Kwak et al., 2000, "FE-based On-line Model for the Prediction of Roll Force and Roll Power in Hot Strip Rolling", ISIJ International, vol. 40, pp. 1013~1018
- (8) Y. H. Kim et al., 1999, Int. Cong. Stainless Steel '99, AIM, pp. 285.

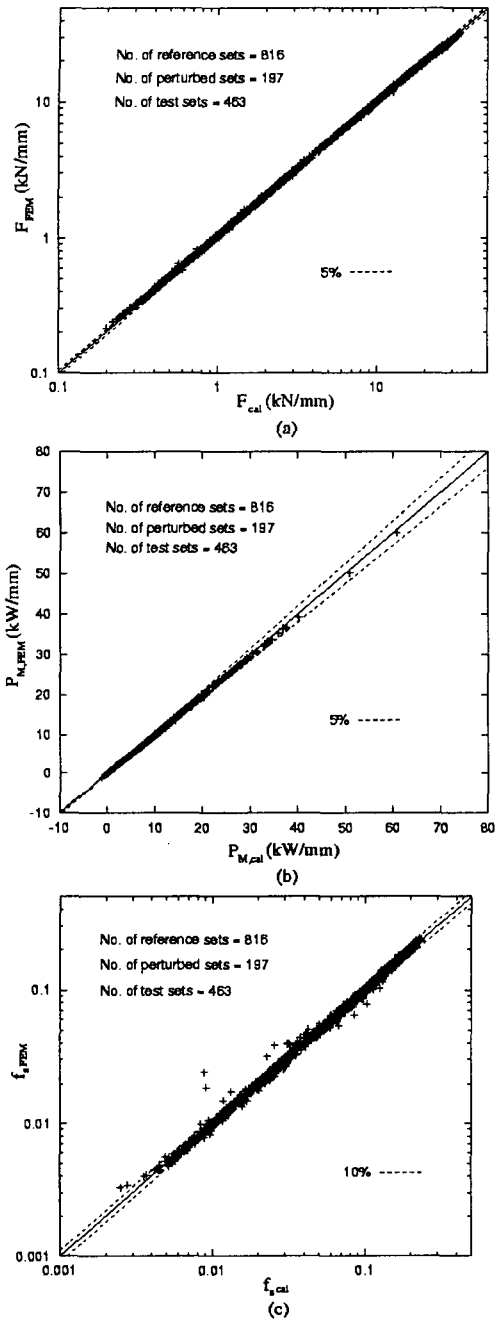


Fig. 4 Comparison between the values of the on-line model and those predicted from the FE process simulation under front and back tension. (a) Roll Force (b) Roll Power (c) Forward slip