

실시간 압연하중 및 압연동력 예측 모델의 개선

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

New FE On-line Model

W.J. Kwak, Y.H. Kim, H.D. Park, J.H. Lee and S.M. Hwang

Abstract

Investigated via a series of finite element process simulation is the effect of diverse process variables on some selected non-dimensional parameters characterizing the thermo-mechanical behavior of the strip in hot strip rolling. Then, on the basis of these parameters an on-line model is derived for the precise prediction of roll force and roll power. The prediction accuracy of the proposed model is examined through comparison with predictions from a finite element process model.

Key Words : Hot Strip Rolling, Roll Force, Roll Power, On-Line Model, Finite Element Process Model

1. 서 론

열간스트립압연에서 롤하중과 롤동력의 정밀한 예측 능력은 안전한 공정제어에 중요하다. 이전까지, 실시간 예측모델은 대부분 Orowan의 이론⁽¹⁾과 그 변이들에 기초를해서 만들어졌다^(2~4). 그런데, 원하는 예측 정밀도가 얻어질수있는 공정조건 범위는 다소 제한적이다. 이는 주로 Orowan의 이론에서 전해져내려오는 많은 단순화 가정으로인해 비롯된다. 예측 정밀도에 관련해서는 엄격하게 수식화된 유한요소해석모델이 가장 적합한 선택일 것이다. 그런데, 유한요소해석모델은 많은 CPU 시간을 필요로해서, 실시간 목적용으로는 부적합하다.

본논문에서는, 유한요소해석에 기반을둔 실시간 예측 모델이 사상압연에서 정밀한 공정제어에 이용됨을 보인다. 기술한것은 롤-스트립 시스템의 열적-기계적 구체적 인 성질을 밝힐수 있는 통합된 유한요소해석 모델이다. 여러가지 공정변수의 열간박판압연에서 스트립의 열적-기계적 거동을 특징짓는 몇가지 선택된 무차원 매개변수로의 영향을 조사하기위해 유한요소해석모델을 이용해서, 일련의 유한요소 공정 시뮬레이션을 수행하였다. 그 런뒤, 이러한 매개변수들을 기초로해서 롤하중과 롤동력을 예측하는 실시간 모델을 유도할수있음을 보였다. 제안한 모델의 예측 정밀도는 유한요소해석모델의 예측결과와 비교함으로써 검증하였다.

* 포항공과 대학교 대학원
** 포스코 기술 연구소
*** 광양 압연 기술 연구소
**** 포항공과 대학교

2. 압연의 가설모드(Hypothetical Mode)

실제 압연에서, 출측속도와 출측온도 각각 V_2 와 T_2 에서 스트립 (입측온도 = T_1 , 유동응력 = $\overline{\sigma}(\overline{\epsilon}, \overline{\epsilon}, T)$)의 두께가 H_1 에서 H_2 로 압하될 때를 가정해본다. 이제, 동일한 압연형상과 동일한 스트립에 대해 스트립의 각부분이 H_1 에서 H_2 로 단축압축을 받고있는 압연의 가설모드(hypothetical mode)를 고찰한다. 이때, 그림 1 에서 볼수있듯이 바이트(bite) 영역을 통과하고 롤-스트립 접촉면에 마찰이 없을때이다. 게다가, 바이트 영역에서 스트립의 온도는 두께방향으로 균일하고 입측과 출측 온도가 T_1 과 T_2 와 일치하게끔 압연방향으로 선형적으로 변한다. 또한, 출측속도는 V_2 와 일치한다고 가정한다. 그러면, 가설모드의 변형 에너지를 P' 는 다음과 같이 근사화 될 수있다.

$$P' = V_2 H_2 E' \quad (1)$$

$$E' = \int \sigma d\epsilon = 1.15 \int_{H_2}^{H_1} \frac{\overline{\sigma}(\overline{\epsilon}, \overline{\epsilon}, T)}{h} dh \quad (2)$$

$$\overline{\epsilon} = -1.15 \ln \frac{h}{H_1} \quad (3)$$

$$\overline{\epsilon} = -1.15 \frac{2 \tan \phi}{h^2} V_2 H_2 \quad (4)$$

$$T = T_1 + \frac{1}{2} \Delta T \quad (5)$$

여기에서 $\Delta T = T_2 - T_1$. 주목할것은 V_2 와 T_2 는 앞에서 기술했듯이 유한요소해석모델로 부터 정밀하게 예측할 수 있다.

3. 실시간 모델

일련의 유한요소공정 시뮬레이션을 각 교란세트(perturbed sets) - 기준 공정 세트에서 적어도 다음의 공정변수들중 한가지는 변화시킴: 스트립 재료, R , ω , T_1 , 롤의 열역학 성질, 롤-스트립 접촉면의 열전달계수 (h_{lub}) - 에 대해서 수행하였다. 앞에서 기술한 무차원 매개변수는 이러한 공정 변수들에 거의 영향을 받지 않음이 밝혀졌다. 이것은 다음과 같이 선진율, 롤동력, 그리고 롤하중의 예측에대한 실시간 모델 개발을 가능케 해주었다.

μ , s , 그리고 r 에 따른 선진율, 과잉롤동력(roll power redundancy), 그리고 토크팩터(torque factor)의 변화는 기준공정세트의 공정시뮬레이션으로 부터 얻은 데이터들을 내삽법(interpolation)을 이용해서 수학적으로 표현할 수 있다. 결과는 표 1 에 요약되었다. 다음과같은 컴퓨터 계산 과정을 이용해서 롤하중과 롤동력을 계산한다. 스트립 재료의 유동응력 특성은 주어져있다고 가정한다. 그러면,

1. $R, \omega, H_1, H_2, T_1, \mu$ 를 읽는다
2. s, r 을 계산
3. f_s 를 계산
4. 적절한 모델이 있다면 ΔT 계산, 아니면 $\Delta T = 0$.
5. P' 계산 (식 1 이용)
6. P 계산 (표 2 의 식 A-2 이용)
7. F 계산 (표 2 의 식 A-3 이용)

4. 결론

통합 유한요소해석 모델의 공정 시뮬레이션을 통해서 여러가지 공정변수의 스트립의 열적-기계적 거동을 결정하는 몇가지 선택된 무차원 매개변수들의 영향을 자세하게 연구했다. 그리고나서, 이러한 무차원 매개변수들을 기본으로 롤하중과 롤동력에 대한 실시간 예측모델이 개발될 수 있음을 보였다. 그림 2에서 볼수있듯이 현재 모델에서의 예측값들은 여러가지 다양한 공정조건에서 유한요소해석모델의 값들과 탁월하게 잘 일치한다.

만일 바이트 영역에서 온도변화를 결정하는 적절한 모델이 있다면 더 나은 예측 정밀도를 달성할 수 있음에 주목해야한다. 스트립의 입측온도의 정밀한 예측과 더불어 재결정과 상변태의 효과 뿐만아니라 스트립 장력과 롤의 평평해지는 효과를 적절히 고려하면, 현재의 모델은 열간스트립압연에서 정밀한 공정 제어에대한 효과적인 도구로 쓰여질 수 있을것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- (1) E. Orowan, 1943, Proc. Instn. Mech. Engrs., vol.150, p140.
- (2) R. B. Sims, 1954, Proc. Instn. Mech. Engrs., vol.168, p191.
- (3) J. M. Alexander, 1972, Proc. Royal Soc. London, vol.A326, p535.
- (4) T. Tamano and S. Yanagimoto, 1977, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., vol.43, p2885.
- (5) C. S. Sun, C. S. Yun, J. S. Chung, and S.M. Hwang, 1998, Metall. Mater. Trans. A, vol.29A, p2407.
- (6) S. Shida, 1969, J. Jpn. Soc. Technol. Plasticity, vol.20, p610.
- (7) Y. H. Kim et al., 1999, Int. Cong. Stainless Steel '99, AIM, p285.

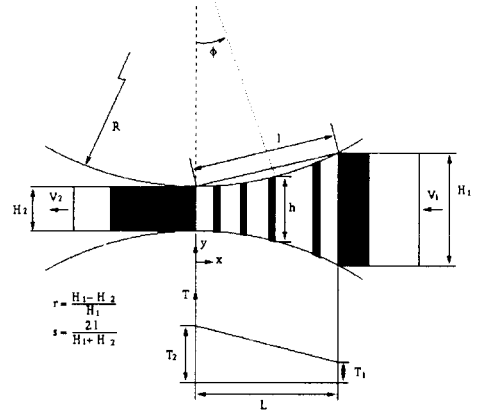


Fig. 1 An hypothetical mode of rolling

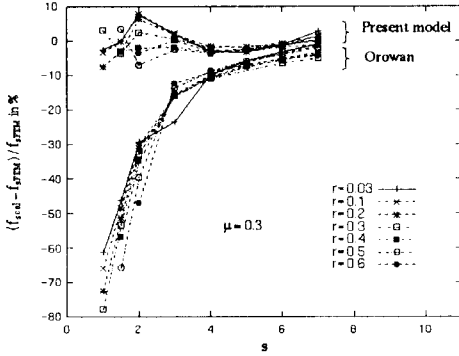
Table 1 Mathematical expressions used in the on-line model

$$\begin{aligned}
 f_s = & 0.0048914 - 0.02909\mu + 0.42262r - 0.0058703\alpha + 0.031745\mu^2 + 0.68881r\mu \quad (A-1) \\
 & - 1.7152r^2 + 0.0319\alpha\mu - 0.22413ar + 0.00097891\alpha^2 - 0.87795r\mu^2 + 4.1419r^2\mu \\
 & - 0.63324r^3 - 0.027919\alpha\mu^2 - 0.8103ar\mu + 1.3149ar^2 - 0.0041996\alpha^2\mu \\
 & + 0.093593\alpha^2r - 2.9166r^2\mu^2 + 0.89133ar\mu^2 - 0.80781ar^2\mu + 0.29699ar^3 \\
 & + 0.052652\alpha^2r\mu - 0.30145\alpha^2r^2
 \end{aligned}$$

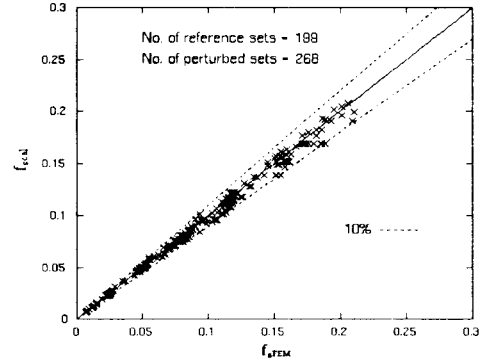
$$\begin{aligned}
 \frac{P}{P'} = & 1.57 - 0.33606s - 0.78526r\mu + 1.3463r^2 - 0.195s\mu - 0.13517sr + 0.11115s^2 \quad (A-2) \\
 & - 0.5415r^2\mu + 0.33508s\mu^2 + 0.80566sr\mu - 0.83616sr^2 + 0.3214s^2\mu + 0.066161s^2r \\
 & - 0.024367s^3 - 1.2389sr\mu^2 + 1.8449sr^2\mu - 0.18925s^2\mu^2 - 0.18317s^2r\mu \\
 & + 0.075145s^2r^2 - 0.008277s^3\mu - 0.0041867s^3r + 0.0015512s^4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{P}{RwF} = & 1.1683r - 1.451ar + 0.20337r^2 + 0.90187a^2r + 1.1169r^3 - 0.30378a^3r \quad (A-3) \\
 & - 1.4188ar^3 + 0.042717a^4r - 0.017804a^3r^2 + 0.43945a^2r^3
 \end{aligned}$$

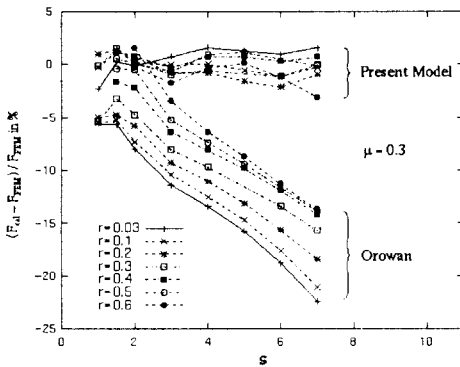
where $\alpha = \log e(s)$



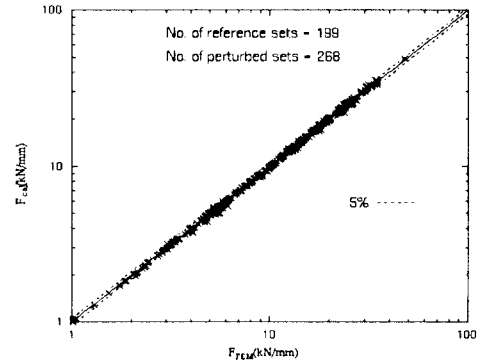
(a) Forward Slip, The reference sets



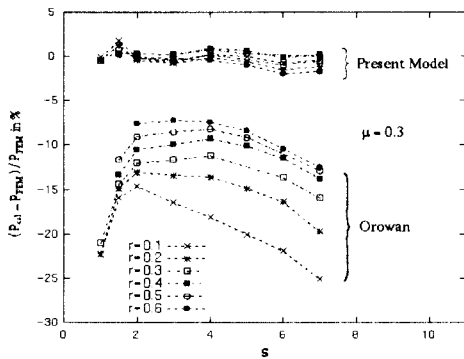
(b) Forward Slip, All the reference and perturbed sets



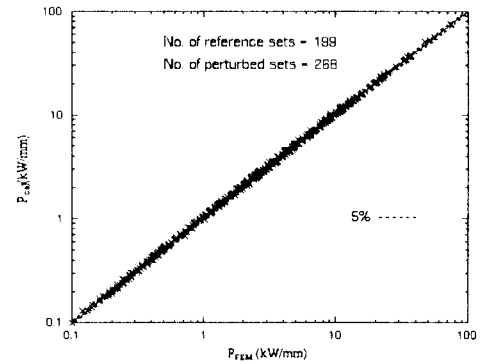
(c) Roll Force, The reference sets



(d) Roll Force, All the reference and perturbed sets



(e) Roll Power, The reference sets



(f) Roll Power, All the reference and perturbed sets

Fig. 2 Comparison from the on-line model and these predicted from process Simulation