

유한요소법을 이용한 조압연에서의 압하력 및 압연동력 예측 온라인 모델 개발

김성훈* · 곽우진** · 황상무***

Development of an On-Line Model for the Prediction of Roll Force and Roll Power in Roughing Mill by FEM

S. H. Kim, W. J. Kwak and S. M. Hwang

Abstract

In this paper on-line model is derived from investigating via series of finite element process simulation. Some variables that little affect on non-dimensional parameters. ie. forward slip and torque factor. is extracted from composing on-line model Especially, this research focused on deriving on-line model which exactly predict roll force and roll power in the roughing mill process under small shape factor and small reduction ratio. The prediction accuracy of the proposed model is examined through comparison with predictions from a finite element process model

Key Words : Roughing Mill Process, Roll Power, Roll Force, On-Line Model, Shape factor, Reduction Ratio

1. 서 론

열간 압연 공정에서의 롤 하중 및 롤 동력의 예측을 행하는데 있어서 지금까지의 실시간 예측모델식은 대부분 Orowan의 이론 및 그의 변형에 의해 이루어져왔다. 하지만 이론상 많은 가정과 단순화로 인해 정확하게 예측가능한 범위는 극히 제한적일 수 밖에 없었다.

이를 해결하기 위해 유한요소법을 통해 온라인 모델을 개발하여 보다 넓은 범위에서 정밀하게 롤 하중 및 롤 동력을 예측하는 것이 본 실험실의 선행연구에서 제안되

었다. 그리고 제안된 온라인 모델의 정확성 및 유효성에 대해서도 검토된 상태이다.

본 연구에서는 앞서의 연구를 이어받아 온라인 모델식의 유도에 있어서 압하율이 매우 작고, 특히 shape factor가 1보다 작은 경우에 대해서 행하였다. 그리고 예측된 온라인 모델식과 유한요소해석 결과를 적용가능한 범위내의 전 영역에서 비교하였다.

2. 압연의 가설모드(Hypothetical Mode)

* 포항공과 대학교 대학원

** 포항공과 대학교 대학원

*** 포항공과 대학교

실제 압연에서, 출측속도와 출측온도 각각 V_2 와 T_2 에서 스트립(입측온도= T_1 , 유동응력= $\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \bar{\epsilon}, T)$)의 두께가 H_1 에서 H_2 로 압하될 때를 가정해 본다. 이제, 동일한 압연형상과 동일한 스트립에 대해 스트립의 각부분이 H_1 에서 H_2 로 단축압축을 받고있는 압연의 가설모드(hypothetical mode)를 고찰한다. 이 때 그림 1에서 볼 수 있듯이 바이트(bite)영역을 통과하고 롤-스트립 접촉면에 마찰이 없을 때이다. 게다가, 바이트 영역에서 스트립의 온도는 T_1 과 T_2 와 일치하게끔 압연 방향으로 선형적으로 변한다. 그러면, 가설모드의 변형에너지 P' 는 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

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

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

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

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

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

여기에서 $\Delta T = T_2 - T_1$, 주목할 것은 V_2 와 T_2 는 앞에서 기술했듯이 유한요소해석모델로부터 정밀하게 예측할 수 있다.

3. 변수의 추출

Roll power 및 Roll Power를 결정하는데 영향을 미치는 인자들 중에서 온라인 모델식 구성의 변수로서 사용되지 않는 것을 추려내기 위해 다음의 시뮬레이션을 실행하였다. 우선 각 변수들에 따른 무차원변수들의 변화량을 조사하여 온라인 모델의 변수에 사용되어지지 않는 다음과 같은 변수들을 추려내었다. 그림4와 그림5는 무차원 변수에 영향을 주지 않는 인자인 롤 속도와 온도를 찾아내는 것을 나타내고 있다. 이런식으로

① 롤 반경(Roll Radius), ② 롤 속도(Roll Speed), ③ 온도(Temperature), ④ 탄소함량(C)

위의 변수를 제외한 다음의 변수를 사용하여 온라인 모델식을 유도하였다.

① s (shape factor), ② r (reduction ratio), ③ μ (Coulomb friction)

시뮬레이션에 사용된 공정 조건은 그림2와 그림 3과 같다. 온라인 모델식에는 μ , s 그리고 r 에 따른 선진롤과잉롤동력(roll power redundancy)의 변화는 주어진 공정조건의 데이터를 최소 자승법을 사용하여 수식화하였다. 온라인 모델식은 표 1에서 정리하였다.

4. 결론

유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 통해 형상계수와 압하율이 적은 경우에 있어서 적용할 수 있는 새로운 온라인 모델식을 유도하였다. 식의 유도에 있어서 여러 가지 공정 변수 중 몇 가지 선택된 무차원 매개변수와의 관계를 조사함으로써 보다 간단한 변수를 사용하여 온라인 모델식을 유도할 수 있었으며 유도된 식은 앞서의 그림들에서와 같이 공정범위내에서 매우 잘 일치함을 보여 주고 있다.

이처럼 공정조건과 관련된 무차원수와 공정의 영향을 줄 수 있는 변수들과의 관계를 잘 이용하면 본 연구에서 적용된 범위 이외의 넓은 영역에서도 간단한 수식으로 표현할 수 있는 온라인 모델의 유도도 가능하리라 생각 된다.

참고 문헌

- (1) E. Orowan, 1943, Proc. Instn. Mech. Engrs., vol.150, p140.
- (2) R. B. Sims, 1954, Proc, Instn. Mech. Engrs., vol.168, p191.
- (3) C. S. Sun, C. S. Yun, J. S. Chung and S. M. Hwang: Metall. Mater. Trans. A, 29A(1998), 2885
- (4) W. J. Kwak, Y. H. Kim, H. D. Park, J. H. Lee and S. M. Hwang, 2000, "FE-based On-line Model for the Prediction of Roll Force and Roll Power in Hot Strip Rolling ISIJ Int., vol. 40, p1013-1018
- (5) 박우진, 김영환, 박해두, 이중형, 황상무, 2000, "실시간 압연하중 및 압연동력 예측 모델의 개선", 한국소성가공학회 2000년도 춘계학술대회 논문집, p52

Table 1 Mathematical expressions used in on-line model

$$\begin{aligned}
 fs = & 0.0108144282 \mu + 0.102906957s + 5.31240911r \mu \\
 & - 14.3300643 r^2 - 0.428021015s \mu + 3.15511189sr \\
 & - 0.320422017 s^2 - 12.0551952r \mu^2 + 31.621056 r^2 \mu \\
 & + 20.458773 r^3 + 0.83383553s \mu^2 - 7.34393028sr \mu \\
 & + 1.76205339s r^2 + 0.464914931 s^2 \mu - 1.61104871 s^2r \\
 & + 0.218581837 s^3 + 8.5524236r \mu^3 - 30.4289563 r^2 \mu^2 \\
 & - 0.601828249s \mu^2 + 7.58134268sr \mu^2 - 1.73913977s r^2 \mu \\
 & - 30.1419839s r^3 - 0.430523311 s^2 \mu^2 + 0.147551674 s^2r \mu \\
 & + 10.1581104 s^2 r^2 - 0.973006615 s^3r
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{P}{P'} = & 1.43727195 + 1.78269327 \mu - 2.11126266 r \\
 & + 1.26222731 x - 3.07040929 \mu^2 - 14.3703536r \mu \\
 & + 10.3272647 r^2 + 2.76579999 x \mu - 18.8639496 xr \\
 & + 4.75051293 x^2 + 1.93597327 \mu^3 + 20.1015095r \mu^2 \\
 & + 34.527296 r^2 \mu - 6.10607754 x \mu^2 + 42.3536056 x r^2 \\
 & - 25.153208 x^2r + 3.0682164 x^3 - 13.0394039r \mu^3 \\
 & - 82.4423191 r^3 \mu + 3.25207775 x \mu^3 + 5.08965724 xr \mu^2 \\
 & - 1.59774491 x^2 \mu^2 + 7.62261771 x^2r \mu + 17.1024101 x^2 r^2 \\
 & - 0.553976263 x^3 \mu - 6.606796 x^3r + 0.8076093 x^4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{P}{R\omega F} = & -0.0359361235 - 0.0922515131 x + 1.75656941r \\
 & - 0.0533173054 x^2 + 2.10202269 x^2r - 2.35489218 x r^2 \\
 & - 22.6665185 y^3 + 0.0053492564 x^4 - 18.2106266 x r^3 \\
 & + 74.3131372 r^4, \text{ where } x = \log(s)
 \end{aligned}$$

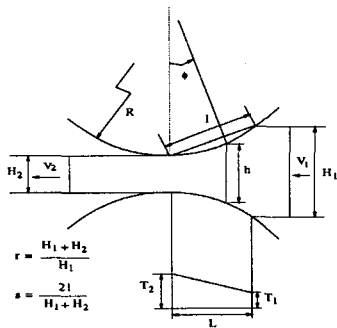


Fig. 1 An hypothetical mode of rolling

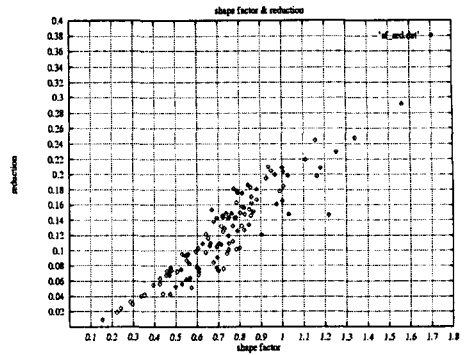


Fig. 2 Reference range of Roughing Mill Process

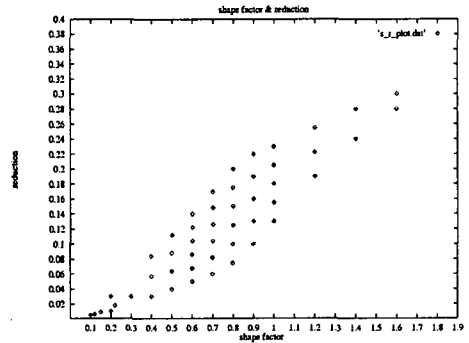


Fig. 3 Simulation set range of Process

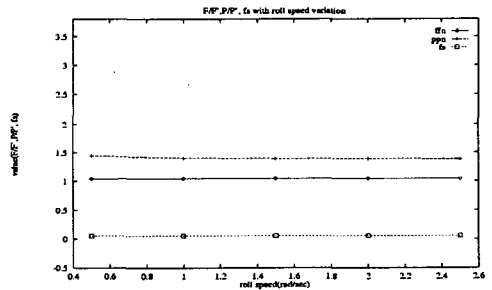


Fig. 4 The effect of roll speed on the non-dimensional parameters

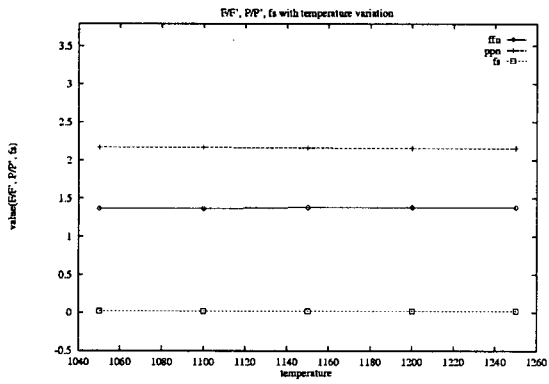


Fig. 5 The effect of temperature on the non-dimensional parameters

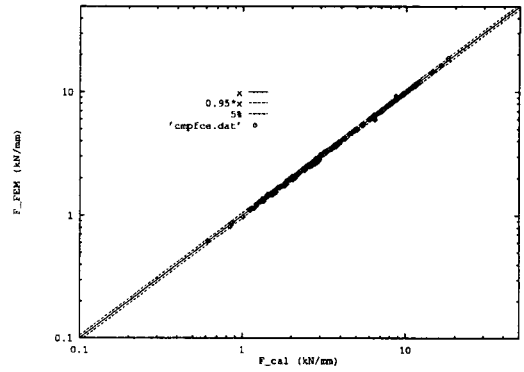


Fig. 7 Roll Force, All the reference and perturbed sets

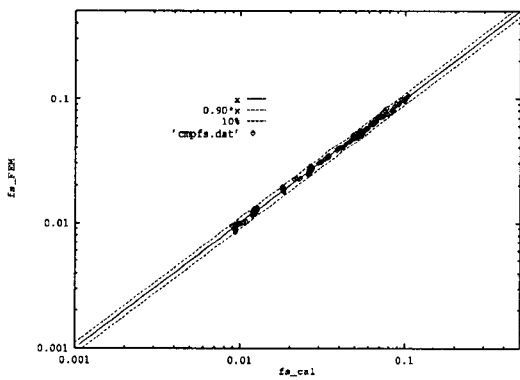


Fig. 6 Forward Slip, All the reference and perturbed sets

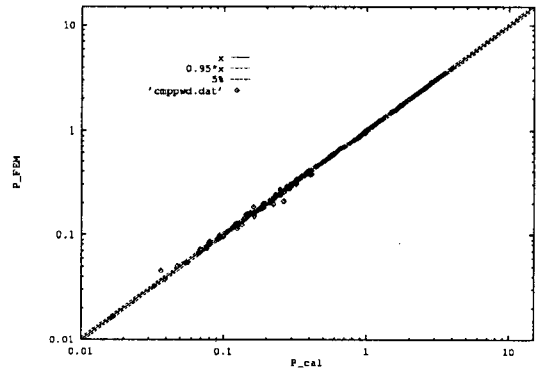


Fig. 8 Torque Factor, All the reference and perturbed sets