

## 열간압연중 압연하중 및 압연동력 예측 모델

곽우진 \* , 황상무 \*\*  
포항공과 대학교 대학원 \*  
포항공과 대학교 \*\*

### Evaluation of Model equation Predicting Roll Force and Roll Power during Hot Rolling

Kwak Woo-Jin \* , Hwang Sang-Moo \*\*  
Graduate School, POSTECH \*  
Pohang University of Science and Technology (POSTECH) \*\*

#### Abstract

Developed the model equations which calculate roll force, roll power during hot rolling in real time. The variables which mainly effect on the value of roll force, roll power are shape factor, reduction, roll diameter, roll velocity, strip inlet temperature, carbon content of strip and strip-roll contact friction coefficient. Among these variables roll diameter, roll velocity, inlet temperature, carbon content and friction coefficient can be excluded in interpolated model equation by introducing equation of die force( $F'$ ), power ( $P'$ ) of the frictionless uniform plane strain compression which can be calculated without iteration.

At the case of coulomb friction coefficient of 0.3, we evaluated coefficients of polynomial equations of  $\frac{F}{F'}$ ,  $\frac{P_f}{P_d}$ ,  $\frac{P_d}{P'}$  from the result of finite element analysis using interpolation.

It was found that the change of values of  $\frac{F}{F'}$ ,  $\frac{P}{P'}$  with the friction coefficient tend to straight line which slope depend only on shape factor. With these properties, developed model equations could be extended to other values of coulomb friction coefficient.

To verify developed roll force, roll power model equation we compared the results from these model equation with the results from finite element analysis in factory process condition.

**Key Words** : Finite Element Method, Roll Force, Roll Power, Hot Rolling

---

## 1. 서론

실제현장에서 압연하중(roll force), 압연동력(roll power) 값을 정밀하게 예측하는것은 중요하다. 주어진 공정조건에서 발생할 압연하중값을 알아야 목표두께를 얻기위한 롤간격(roll gap)을 설정할 수 있다. 또한, 압연하중은 판크라운(strip crown) 등에도 영향을 준다. 실제 조업에서는 구동 모터당 낼수있는 최고동력값이 제한되어있다. 그리고 공정조건 설계에는 압연동력 배분비를 기준으로 각 스탠드의 압하를, 롤속도 들을 구하기도 한다. 결국 원하는 제품을 생산하기 위해서는 압연하중, 압연동력 값을 정밀하게 예측할 수 있어야한다. 또한, 다품종소량 생산공정을 위해서는 이들값을 온라인(on-line)으로 예측할 수 있어야한다. 지금까지 실시간으로 압연하중을 계산할 수 있는 모델식은 Sims, Orowan등(1,2)에의해 개발되었으나 그 정확도가 떨어진다.

열간 압연에서의 압연하중, 압연동력 값을 정밀하게 구하기 위해서는 소성유동, 열전달현상을 유한요소법(FEM) 등과 같은 방법으로 해석을 할 수 있다(3). 그러나, 현재 이들의 해석에는 시간이 많이 걸려 온라인으로 결과를 얻기는 힘들다. 본연구에서는 온라인으로 정밀한 압연하중, 압연동력 계산이 가능토록 실제조업 공정조건외 범위를 파악한뒤 여러가지 공정조건에대해 유한요소 해석을 수행한뒤 이 결과들을 바탕으로 모델식을 개발하였다.

형상계수, 압하를, 롤직경, 롤속도, 스트립 입측온도, 스트립 탄소함량 그리고 스트립-롤 접촉 마찰계수들은 압연하중 및 압연동력에 비교적 큰 영향을 준다. 유한요소해석 결과 데이터들로부터 모델식을 구하기 위해서는 이 변수들의 조합으로 인해 발생하는 수많은 공정조건에대해 유한요소 해석을 수행하여야 할 것이다. 그리고 구해진 모델식도 이들 변수가 얽혀있는 복잡한 식이 될 것이다. 본연구에서는 모델식 구하는데 필요한 유한요소해석 횟수를 줄이고, 모델식을 단순화 하기 위해 무마찰 균일 평면변형을 압축 (frictionless uniform plane strain compression)에서의 금형하중( $F'$ ), 동력( $P'$ )을 도입하였다. 이 가상적인 공정은 대응되는 압연공정의 스트립 입측온도값의 균일한 온도분포의 시편을 대상으로 한다. 이공정에서는 압축도중 온도가 변하지 않는다. 그리고 압연조건과 대응되는 기하학과 금형 압축 속도를 가진다.

## 2. 본론

### 2.1 유한요소해석 시스템

본연구에서 수행한 유한요소해석 시스템은 다음과 같다.

1. 스트립의 강소성 및 열전달 해석
2. 강체롤의 열전달 해석

### 2.2 $\mu=0.3$ 에서 모델식

여러가지 유한요소해석결과를 관찰하여, 마찰이없는 균일 평면변형을 압축 공정조건을 결정하였다. 금형의 속도는 변형율속도 ( $\dot{\epsilon}$ ) 값이 일정하도록 결정하였고, 압축에 소요되는 시간 ( $\Delta t$ ), 시편의 크기들은 다음과 같이 결정할 수 있었다.

$$\Delta t = \frac{2L'}{v_i + v_p}$$
$$L_1 = \frac{\Delta t v_p H_2}{H_1}$$

이때,  $L'$  : 스트립-롤 접촉영역의 수평길이 (mm),  $v_i$  : 입측 판속도 (mm/s),  $v_p$  : 출측 판속도 (mm/s),  $H_1$  : 압연판 입측두께 (mm),  $H_2$  : 압연판 출측두께 (mm),  $L_1$  : 시편의 수평폭

이러한 무마찰 균일 평면변형을 압축 공정의 금형하중, 동력식을 도입함으로써 내삽법으로 계수들을 구해야할 모델식을 다음과 같이 축소할 수 있었다.

$$\frac{P_f}{P_d} = \frac{P_f}{P_d}(s, r), \quad \frac{P_d}{P'} = \frac{P_d}{P'}(s), \quad \frac{F}{F'} = \frac{F}{F'}(s, r)$$

여기서,  $P_f$  : 마찰에 소모되는 동력 (W),  $P_d$  : 소성변형에 소모되는 동력 (W),  $s$  : 형상계수 ( $s = \frac{2}{2-r} \sqrt{\frac{rR}{H_1}}$ ),  $r$  : 압하률,  $R$  : 롤 반지름 (mm)

이로써 롤지경, 롤속도, 스트립 입측온도 그리고 스트립 탄소함량의 변수들은  $F'$ ,  $P'$  식에만 포함되어 형상계수와 압하률 그리고 마찰계수만이 내삽모델식의 변수로 사용된다. 본연구에서는 쿨롱 마찰계수 ( $\mu$ ) 0.3에서 형상계수, 압하률만을 변화시킨 공정조건들에 대하여 유한요소해석을 한 뒤 이들 데이터를 내삽법을 통해 다항식(polynomial)을 구성하여 식 (2)의 압연하중 관련 내삽 모델식, 식 (4)와 식 (5)의 압연동력 관련 내삽모델식을 구할 수 있었다.

### 2.3 마찰계수를 고려

여러가지 유한요소해석 결과에의해 마찰계수에 따른  $\frac{F}{F'}$ ,  $\frac{P}{P'}$  값의 변화는 형상계수에 따라 기울기가 결정되는 직선 형태임을 알 수 있었다. 이 기울기 또한 유한요소해석 결과 데이터들로부터 내삽법을 이용하여 식 (1)과 식 (3)의 다항식을 구하였다.

### 2.4 $F'$ , $P'$ 계산식

$$F' = \frac{2L_1H_1W}{\sqrt{3}} \frac{\overline{\sigma}(\overline{\epsilon}(y), \dot{\overline{\epsilon}}_c, T, c)}{y} \Big|_{y=H_2}$$

$$P' = \frac{E}{\Delta t}$$

$$E = L_1H_1W \int_0^{\overline{\epsilon}_f} \overline{\sigma}(\overline{\epsilon}, \dot{\overline{\epsilon}}_c, T, c) d\overline{\epsilon}$$

$$\overline{\epsilon}_f = -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{H_2}{H_1}, \quad \dot{\overline{\epsilon}}_c = \frac{\overline{\epsilon}_f}{\Delta t}$$

이때,  $W$  : 스트립 및 압축시편의 두께 (mm),  $\dot{\overline{\epsilon}}_c$  : 상수값의 변형률 속도,  $\overline{\epsilon}_f$  : 압축후 유효 변형률 값

## 2.5 압연하중, 동력 모델식

$$F = \{f(s)(\mu - 0.3) + g(s, r)\}F$$

$$f(s) = 0.0596s^2 + 0.381s - 0.461 \quad (1)$$

$$g(s, r) = 0.815 - 0.0193r + 0.0575s - 0.468r^2 - 0.192rs + 0.0303s^2 - 1.001r^3 + 0.470r^2s - 0.0150rs^2 - 0.000793s^3 \quad (2)$$

$$P = \{a(s)(\mu - 0.3) + b(s)[1 + c(s, r)]\}P$$

$$a(s) = 0.0768s^2 + 0.496s - 0.620 \quad (3)$$

$$b(s) = 1.50 - 0.338s + 0.0927s^2 - 0.00671s^3 \quad (4)$$

$$c(s, r) = -0.101 - 0.0478r + 0.141s + 0.747r^2 - 0.0371rs + 0.000290s^2 \quad (5)$$

이때,

$$b(s) = \frac{P_d}{P} \Big|_{\mu=0.3}(s), \quad c(s, r) = \frac{P_f}{P_d} \Big|_{\mu=0.3}(s, r), \quad g(s, r) = \frac{F}{F'} \Big|_{\mu=0.3}(s, r)$$

## 2.6 검증

본 연구는 유한요소해석 결과들로 부터 모델식을 결정하였다. 이 모델식의 유효성은 생산이 이루어지는 모든 공정에서 유한요소해석 결과를 얼마나 가깝게 따라가는데 달려있다. 이러한 비교를 위해 임의의 공정조건에서 유한요소해석 결과와 모델식을 이용하여 계산한 압연하중, 압연동력 값들을 비교하였다. Fig. 1 에서 볼 수 있듯이 오차 범위는 0.3~6.1% 로써 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

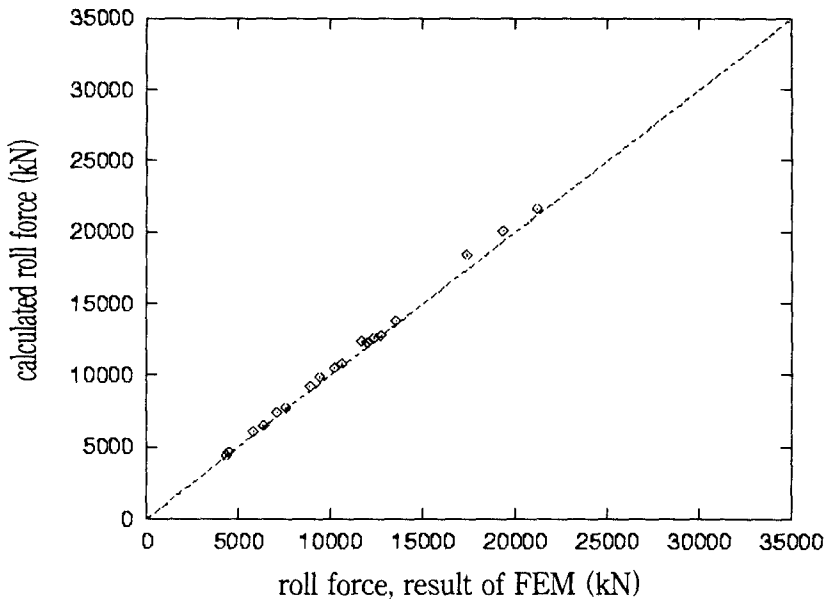


Fig.1 Comparing the result of the calculated roll force with that of FEM

### 3. 결론 및 고찰

본 연구에서는 실시간(on-line)으로 압연하중, 압연동력값을 계산할 수 있는 모델식을 개발하였다. 그리고 본연구에서 구한 모델식은 임의의 공정에서 검증해본결과 유한요소해석 결과값과 잘 일치함을 관찰할 수 있었다.

유한요소해석결과 일정한 마찰계수에서  $\frac{F}{F'}$ ,  $\frac{P_f}{P_d}$ ,  $\frac{P_d}{P'}$  식이 형상계수, 압하를 만의 함수로 나타내어질 수 있는 무마찰 균일 평면변형률 압축 공정을 찾을 수 있었다.

롤이 바뀔경우 마찰계수와 롤의 열전달 계수들이 바뀐다. 현재 마찰계수는 모델식속에 포함되어 있고, 열전달 계수가 바뀔 경우의 압연하중, 압연동력의 변화는 무시할만 함을 관찰할 수 있었다.

이러한 모델식을 개발하기위해 실험데이터를 이용하지 않고, 유한요소해석 결과들을 이용하였다. 만일 충분히 정확하고, 반복성이 좋은 실측데이터가 있다면 이들 데이터를 대상으로 내삽법을 이용해서 다항식을 구할 수도 있을것이다.

### 참고문헌

1. M.Pietrzyk and J.G.Lenard, Thermal-Mechanical Modeling of the Flat Rolling Process, 1991, p.60
2. E.Orowan and Dr. Ing., The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling, p.140-163
3. S.M.Hwang, M.S.Joun and J.S.Park, Proc. 18th NAMRC, Universty park, Pennsylvania, 1990, p.13