

## 열간압연중 압연하중 및 압연동력 예측 모델

곽우진 \* · 황상무 \*\*

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

Kwak Woo-Jin · Hwang Sang-Moo

#### Abstract

열간 박판 압연공정에서의 압연하중, 압연동력을 실시간으로 계산할 수 있는 모델식을 유한요소 해석결과들을 이용하여 개발하였다.

압연하중, 압연동력값 결정에 비교적 큰 영향을 주는 인자들로는 형상계수, 압하률, 롤직경, 롤속도, 스트립 입측온도, 스트립 탄소함량 그리고 스트립-롤 접촉 마찰계수들이 있다. 이들 인자중 롤직경, 롤속도, 입측온도, 탄소함량, 마찰계수들은 이론적으로 계산이 가능한 무마찰의 균일 평면 변형을 압축 공정의 금형하중( $F'$ ), 동력( $P'$ ) 식을 도입함으로써 내삽모델식에서 제외 시킬 수 있었다.

클롱마찰계수( $\mu$ ) 0.3 일 경우의 유한요소해석 결과 데이터들을 내삽법(interpolation)을 통해서 다항식 형태로  $\frac{F}{F'}$ ,  $\frac{P}{P'}$ ,  $\frac{P_d}{P}$  식들을 구하였다.

마찰계수에 따른  $\frac{F}{F'}$ ,  $\frac{P}{P'}$  값의 변화는 형상계수에 따라 기울기가 결정되는 직선 형태로 나타내어짐을 유한요소해석 결과로부터 관찰할 수 있었다.

이와같이 구한 압연하중, 압연동력 모델식의 유효성을 검증하기 위해 무작위로 추출한 실제공정조건들에서 모델식으로 계산한 압연하중, 압연동력 값들을 유한요소해석결과와 서로 비교해 보았다.

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

\* 포항공과 대학교 대학원

\*\* 포항공과 대학교

# 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 구동모터당 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 있어야 한다. 또한, 다품종소량 생산공정을 위해서는 이들값을 온라인(on-line)으로 예측할 수 있어야 한다.

열간 압연에서의 압연하중, 압연동력 값을 정밀하게 구하기 위해서는 소성유동, 열전달 현상을 유한요소법(FEM) 등과 같은 방법으로 해석을 할 수 있다 [1]. 그러나, 현재 이들의 해석에는 시간이 많이 걸려 온라인으로 결과를 얻기는 힘들다. 본연구에서는 온라인으로 정밀한 압연하중, 압연동력 계산이 가능토록 실제조업 공정조건에 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 유한요소해석을 수행하여야 할 것이다. 그리고 구해진 모델식도 이들 변수가 얽혀있는 복잡한 식이 될것이다. 본연구에서

는 모델식 구하는데 필요한 유한요소해석 횟수를 줄이고, 모델식을 단순화 하기위해 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 변형률속도( $\dot{\epsilon}$ ) 값이 일정하도록 결정하였고, 압축에 소요되는 시간( $\Delta t$ ), 시편의 크기들은 아래와 같이 결정할 수 있었다.

$$\Delta t = \frac{2L'}{v_i + v_p}$$
$$L_1 = \frac{\Delta t v_p H_2}{H_1} : \text{시편의 수평 폭}$$

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)

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

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

$$\frac{F}{F'} = \frac{F}{F'}(s, r)$$

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 롤직경, 롤속도, 스트립 입측온도 그리고 스트립 탄소함량의 변수들은  $F'$ ,  $P'$  식에만 포함되어 형상계수와 압하률 그리고 마찰계수만이 내삽모델식의 변수로 사용된다. 본 연구에서는 쿨롱 마찰계수( $\mu$ ) 0.3에서 형상계수, 압하률만을 변화시킨 공정조건들에 대하여 유한요소해석을 한뒤 이들 데이터를 내삽법을 통해 다항식(polynomial)을 구성하여 식 (2)의 압연하중 관련 내삽모델식, 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

$$F' = \frac{2L_1 H_1 W}{\sqrt{3}} \frac{\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}(y), \dot{\epsilon}_c, T, c)}{y} \Big|_{y=H_2}$$

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

$$E = L_1 H_1 W \int_0^{\epsilon_f} \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\epsilon}_c, T, c) d\bar{\epsilon}$$

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

이때,  $W$  : 스트립 및 압축시편의 두께 (mm),  $\dot{\epsilon}_c$  : 상수값의 변형률 속도,  $\bar{\epsilon}_f$  : 압축 후 유효변형률 값

### 2.5 압연하중, 동력 모델식

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

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

$$g(s, r) = 0.815 - 0.0193r + 0.0575s$$

$$- 0.468r^2 - 0.192rs + 0.0303s^2$$

$$- 1.001r^3 + 0.470r^2s$$

$$- 0.0150rs^2 - 0.000793s^3 \quad (2)$$

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

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

$$b(s) = 1.50 - 0.338s$$

$$+ 0.0927s^2 - 0.00671s^3 \quad (4)$$

$$c(s, r) = -0.101 - 0.0478r + 0.141s$$

$$+ 0.747r^2 - 0.0371rs$$

$$+ 0.000290s^2 \quad (5)$$

$$\text{이때, } b(s) = \frac{P_d}{P'_d} \Big|_{\mu=0.3}(s), c(s, r) = \frac{F_L}{P_d} \Big|_{\mu=0.3}(s, r), g(s, r) = \frac{F'_L}{F'_d} \Big|_{\mu=0.3}(s, r)$$

## 2.6 검증

본 연구는 유한요소해석 결과들로부터 모델식을 결정하였다. 이 모델식의 유효성은 생산이 이루어지는 모든 공정에서 유한요소해석 결과를 얼마나 가깝게 따라가는가에 달려있다. 이러한 비교를 위해 임의의 공정조건에서 유한요소해석 결과와 모델식을 이용하여 계산한 압연하중, 압연동력값들을 비교하였다. 그림 (1)에서 볼 수 있듯이 오차 범위는 0.3 ~ 6.1%로써 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

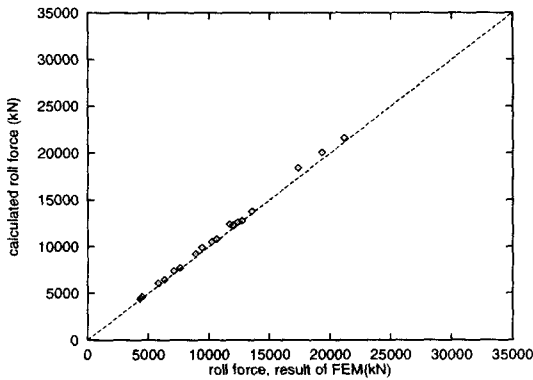


그림 1: 모델식과 유한요소해석 결과의 비교

## 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  $\frac{F}{F'}$ ,  $\frac{P_L}{P_d}$ ,  $\frac{P'_L}{P'_d}$  식이 형상계수, 압하를 만의 함수로 나타내어질 수 있는 무마찰 균일 평면변

형률 압축 공정을 찾을 수 있었다.

롤이 바뀔경우 마찰계수와 롤의 열전달 계수들이 바뀐다. 현재 마찰계수는 모델식속에 포함되어있고, 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.

## 참고 문헌

- [1] S.M.Hwang, M.S.Joun and J.S.Park, Proc. 18th NAMRC, University park, Pennsylvania, 1990, p.13