

열간 빌렛의 평롤 압연시 압연하중 예측

변상민[†] · 박흥식* · 전언찬*

Prediction of Roll Force in Hot Grooveless Rolling of Billet

S.M. Byon, H.S. Park and E.C. Jeon

Key Words : Analytic approach(해석적 방법), Grooveless rolling(무공형 압연), Roll force(압연하중)

Abstract

In this paper, we present a simplified analytic approach for the prediction of roll force to be applicable to the grooveless rolling. The approach is based on the deformation shape deduced from physical considerations and employs the assumption that the deformation homogeneously occurs in three directions. Strain and strain rate are calculated by the geometric relationships between those components and the prescribed deformation functions. Then, stress components are obtained from the Levy-Mises' flow rule. By integrating the stress components along the rolling direction, roll force are finally obtained. The prediction accuracy of the proposed model is examined through comparison with results obtained from the finite element analysis.

기호설명

R: 롤의 반경
L: 롤갭의 접촉 투영길이
h: 길이방향 임의 위치에서 빌렛의 반 높이
 Δh : 롤에 취입 전/후의 빌렛의 반 높이 편차
 h_1 : 빌렛의 입측 반 높이
 h_2 : 빌렛의 출측 반 높이
w: 길이방향 임의 위치에서 빌렛의 반 폭
 w_1 : 빌렛의 입측 반 폭
 w_2 : 빌렛의 출측 반 폭
 ω : 롤의 각속도
 v_x, v_y, v_z : 길이방향 임의위치에서 속도성분
 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$: 길이방향 임의위치에서 변형율성분
 $\dot{\varepsilon}_x, \dot{\varepsilon}_y, \dot{\varepsilon}_z$: 길이방향 임의위치에서 변형율속도
 $\bar{\varepsilon}$: 유효 변형율
 $\dot{\bar{\varepsilon}}$: 유효 변형율 속도
 σ_m : 평균응력
 $\bar{\sigma}$: 유효응력

1. 서론

일반적으로 빌렛은 길고 단면적이 작은 봉 혹은 와이어를 생산하는 원 소재로써 단면이 사각형 형태를 가지고 있다. 이것을 이용하여 원하는 크기의 제품을 생산하기 위해서는 단면적을 연속적으로 줄여 나가야 한다. 공형롤을 이용하여 이것을 구현하는 것이 일반적이지만 초기 몇 패스 정도는 공형롤을 대신하여 평롤을 활용할 수도 있다. 평롤을 사용함으로써 공형 가공 비용 및 측면 마찰이 없기 때문에 에너지 소비를 줄일 수 있는 장점이 있다[1-2].

압연하중은 다단 압연공정에서 패스스케줄을 결정하는 파라미터로써 해당 프로세스를 이해하는 기본적인 수단이다. 따라서 이와 관련된 많은 실험적 및 이론적 연구가 수행되었다. 이와 같은 연구결과는 평면변형 가정하에서의 2 차원적 접근방법[3]이었거나 상계법을 도입하여 빌렛/롤 경계에서 고착상태와 완전 소성재료로 가정한 3 차원 해석[4]으로 요약된다.

빌렛의 압연은 단면폭이 두께에 비해 거의 비슷한 크기이므로 해석시 2 차원적 변형가정은

[†] 회원, 동아대학교 기계공학부
E-mail : smbyon@dau.ac.kr
TEL : (051)200-7639 FAX : (051)200-7656

* 동아대학교 기계공학부

큰 오차가 있으므로 3 차원적으로 접근해야 한다. 또한 마찰조건과 소재의 소성변형거동을 제대로 기술할 수 있어야 한다. 유한요소법을 사용하면 이러한 요구조건을 모두 만족하는 해석을 수행할 수 있다[5]. 그러나 유한요소법을 이용한 3 차원 해석은 많은 계산시간을 필요로 하기 때문에 온라인 상에서 도입하기가 사실상 어렵다.

본 논문에서는 빌렛 압연 시 중요한 변형 특성만 단순하게 모사하여 짧은 시간에 압연하중을 계산할 수 있는 새로운 해석적 접근방법을 기술하고자 한다. 변형형태를 모델링하고 변형률 및 변형률 속도를 계산하는 방법을 소개하였다. 구성방정식으로부터 응력을 계산하는 방법을 보이고 또한 이것의 적분을 통해 압연하중을 계산하는 과정을 소개하였다. 몇 가지 공정조건에 대해 본 해석방법으로 해석한 결과를 유한요소법으로 구한 결과와 비교하여 정확도를 비교하였다.

2. 해석 방법

2.1 변형 기하학

빌렛의 롤갭에서의 변형기하학을 Fig. 1 에 나타내었다. 직교좌표계 x, y, z 방향은 각각 소재의 길이, 높이, 폭 방향을 나타낸다.

롤 갭의 접촉 투영길이는 기하학적 고려로부터 다음과 같이 표현된다.

$$L = \sqrt{2R \Delta h} \quad (1)$$

롤 갭 길이 방향을 따라서 빌렛 높이의 변화 역시 기하학적 고려로부터

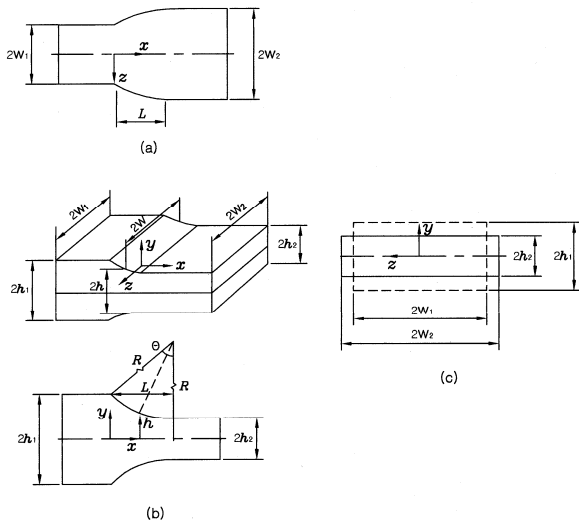


Fig. 1 Definition of roll gap geometry

$$h = h_1 - \frac{L}{R}x + \frac{x^2}{2R} \quad (2)$$

로 나타난다. 폭 w 는 $x=0$ 에서 $w=w_1$ 그리고 $x=L$ 에서 $w=w_2$ 및 $dw/dx=0$ 의 경계조건을 갖는 다음과 같은 이차함수로 근사화 하였다.

$$w = w_1 - 2(w_1 - w_2)\frac{x}{L} + (w_1 - w_2)\frac{x^2}{L^2} \quad (3)$$

출측에서 빌렛 폭 w_2 는 에너지소실 최소화 원리에 의해 결정된다.[6]

2.2 속도, 변형률, 변형률속도 성분

롤의 표면 속도는 $v_R = \omega R$ 로 나타낼 수 있다. 여기서, ω 는 롤의 각속도를 나타낸다. 소재는 롤 갭에 속도 v_1 으로 들어와서 v_2 로 나간다고 하고, 단순화를 위해 $v_2 = v_R$ 로 가정하자. 롤갭 입측에서 임의의 위치 x 에서 길이 방향 속도 v_x 는 일정체적 유동원리에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$v_x = \frac{v_2 h_2 w_2}{h w} \quad (4)$$

균일변형 가정으로부터 y 및 z 방향 속도 성분 v_y 및 v_z 는 다음과 같이 속도성분 v_x 와 관련된다.

$$v_y = v_x \frac{dh}{dx} \frac{y}{h} \quad (5)$$

$$v_z = v_x \frac{dw}{dx} \frac{z}{w} \quad (6)$$

대응하는 변형률 성분 ϵ_y 및 ϵ_z 는 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_y = \ln\left(\frac{h}{h_1}\right) \quad (7)$$

$$\epsilon_z = \ln\left(\frac{w}{w_1}\right) \quad (8)$$

비압축성 조건에 의해 길이방향 변형률 성분은 다음과 같다.

$$\epsilon_x = -(\epsilon_y + \epsilon_z) \quad (9)$$

시간에 관해서 변형률 성분을 미분하여 다음과 같이 변형률속도 성분과 길이방향 속도성분 사이의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_y = \frac{v_x}{h} \frac{dh}{dx} \quad (10)$$

$$\dot{\epsilon}_z = \frac{v_x}{w} \frac{dw}{dx} \quad (11)$$

$$\dot{\epsilon}_x = -(\dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z) \quad (12)$$

전단 변형을 및 전단 변형을 속도는 수직량에 비해 상대적으로 적으므로 무시하였다. 따라서 유효 변형을 및 유효 변형을 속도는 다음과 같이 단순하게 정의된다.

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2)} \quad (13)$$

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{\epsilon}_x^2 + \dot{\epsilon}_y^2 + \dot{\epsilon}_z^2)} \quad (14)$$

2.3 응력성분

응력성분을 결정하기 위해 먼저, 등방성, 강-소성, 비압축성 소재에 대한 Levy-Mises 유동식으로부터 편차 응력성분을 계산한다. 그리고, 길이 방향 응력성분 σ_x 는 영이라는 가정으로부터 평균응력 σ_m 은 다음과 같이 귀결된다.

$$\sigma_m = -\sigma'_x \quad (15)$$

응력성분 σ_y 및 σ_z 는 편차응력의 정의 및 앞서 구한 L-M 유동응력식으로부터 변형율속도의 함수로써 나타낼 수 있다.

2.4 압연하중

압연하중은 롤 표면 압력을 $-\sigma_y$ 와 같다고 놓음으로써 얻을 수 있다. $-\sigma_y$ 를 폭 w 와 곱해서 롤궤를 따라서 적분하면 다음과 같이 압연하중이 계산된다.

$$P = -2 \int_0^L \sigma_y w dx \quad (16)$$

3. 결과 및 논의

3.1 공정조건

본 논문에서 제시된 단순 해석 접근법의 타당성을 보이기 위해 해석해와 유한요소해의 결과를 비교하였다. 더욱이, 압연시 폭방향의 변형 즉, 폭 퍼짐을 무시한 전통적인 2 차원 해석해인 Sims 모델과의 비교를 통해 빌렛의 평롤 압연해석시에는 2 차원적 접근방법이 적합하지 않다는 것을 나타내었다.

두가지 공정조건의 변화의 효과를 고찰하였다.

(a) 빌렛 높이의 압하 비, (b) 마찰 계수가 압연하

중에 미치는 영향을 세가지 빌렛의 형상비 ($w_1/h_1=0.5, 1, 2$)의 경우에 대해 수행하였다. 입측에서의 빌렛의 높이는 100mm, 압연 온도는 1000°C 이고 롤 표면 속도는 2m/sec로 가정하였다. 소재는 0.16% 탄소강으로 했고 유동응력식은 아래와 같이 Shida식[7]을 사용하였다

$$\bar{\sigma} = (0.25\bar{\epsilon}^{0.4} - 0.15\bar{\epsilon})\bar{\epsilon}^{0.12} \quad (17)$$

3.2 빌렛 높이의 압하 비의 효과

Fig. 2 ~ Fig. 3 까지는 빌렛 높이 압하 비에 따른 단순 해석해 결과와 유한요소해석 결과를 비교해 놓았다. 압하비는 0.1 에서 0.4 까지 사용되었고, 마찰계수는 0.35 이고 롤 반경은 360mm 이었다.

Fig. 2 에서 두 압하비 0.1 과 0.4 에 대해서 롤궤에서의 압력분포를 제시한 해석해와 유한요소해에 대하여 비교하여 나타내었다. 분포는 거의 비슷한 형태를 나타내고 있고 값에 있어서 약간의 편차를 보여주고 있다. 빌렛의 높이에 비해 폭이 크게 되어 슬래브 형태의 소재로 모양이 바뀔에 따라 ($w_1/h_1=2$ 의 경우) 그 차이가 커짐을 알 수 있다.

Fig. 3 에서 압하비에 따른 압연하중의 변화를 제시한 해석해, 유한요소해 및 2 차원 Sims 의 해석해를 서로 비교 하였다. 제시한 해석해와 유한요소해석 결과의 차이는 1.0~5.7% 정도인데 반해, 2 차원 Sims 해의 경우는 유한요소해석 결과보다 30% 정도 높게 해석 결과가 나타났다. 폭 퍼짐이 현저하게 수반되는 빌렛 압연의 경우는 제시한 현기법이 훨씬 정해에 잘 맞는 것을 알 수 있다.

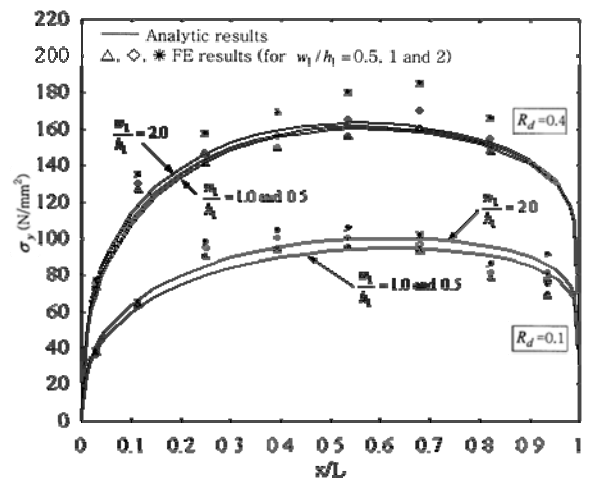


Fig. 2 Effect of height reduction of billet on roll gap pressure σ_y

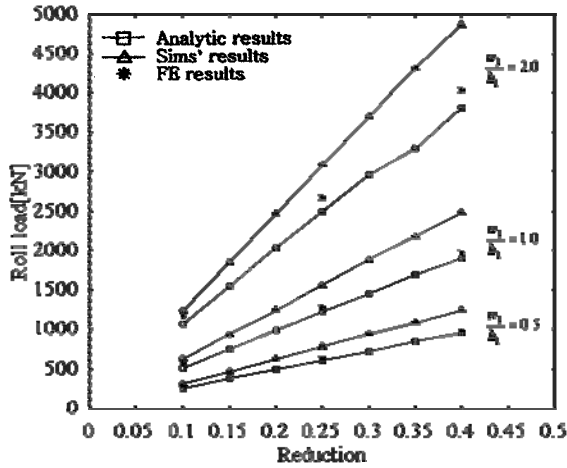


Fig. 3 Effect of height reduction of billet on roll force

3.3 마찰계수의 효과

Fig. 4 에 마찰계수에 따른 단순 해석해 결과와 유한요소해석 결과를 비교해 놓았다. 마찰계수는 0.25 에서 0.45 까지 사용되었고, 압하비는 0.4 이고 롤 반경은 360mm 이었다.

Fig. 4 에서 w_1/h_1 값이 커짐에 따라 압연하중이 증가함을 알 수 있다. 이것을 빌렛 형상비를 변경하기 위해 빌렛 높이를 고정시켜 두고 폭을 증가함에 따른 접촉면적의 증가에 기인한다. 그런데, 마찰계수 변화에 따라서는 압연하중의 변화가 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 이것은 마찰계수 증가에 따라 폭퍼짐은 증대하고 접촉압력은 떨어져 서로 상쇄된 효과가 작용하여 나타난 결과이다. 유한요소해석결과와 비교하여 큰 차이는 없는 것으로 나타나고 있다.

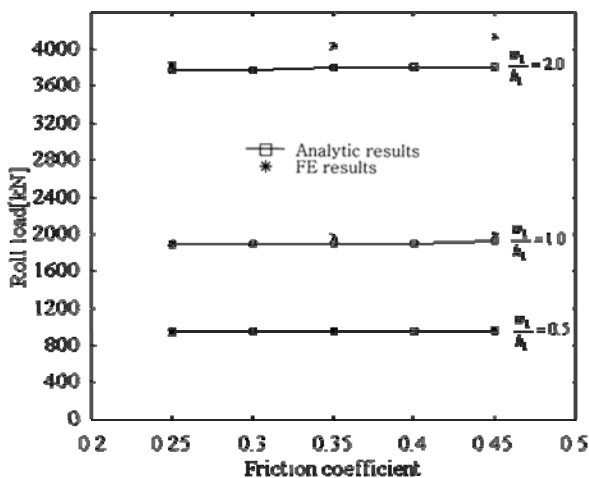


Fig. 4 Effect of friction coefficient μ on roll force

4. 결론

본 논문에서 빌렛의 평롤 압연시 롤에 걸리는 압연하중을 예측하는 단순화된 해석적 접근 방법을 제시하였다. 제시한 방법의 타당성을 검증하기 위해 유한요소해석 결과와 비교하여 비교적 잘 일치함을 보였다. 공정조건 변화에 따른 본 방법을 적용한 결과 안정된 정도를 나타냄을 알 수 있었다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 제시한 단순한 해석적 접근방법은 유한요소해석결과와 비교해 압연하중 예측에서 양호한 정도를 나타낸다.
- (2) 본 방법의 장점은 유한요소해석을 실시할 경우 많은 계산시간을 현저하게 줄일 수 있다는 데 있고 온라인 상에서 활용이 가능하다는 데 있다.

참고문헌

- (1) Yanazawa, T., Tanaka, T., Noda, A., Morita, T., Takeda, R. and Hayashi, H., 1983, "Development of Grooveless Rolling", *Transactions of Iron and Steel Institute of Japan*, Vol. 23, pp. 710~715.
- (2) Biggar, B.J., Moller R.H. and O'Neill, J.C., 1976, "The Rolling of Steel Rod and Bar Using Grooveless Rolls", *BHP Technical Bulletin*, Vol.20, pp. 10~12.
- (3) Sims, R.B., 1954, "The Calculation of Roll Force and Torque in Hot Rolling", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol.168, pp. 191~200.
- (4) Komori, K., 2002, "An Upper Bound Method for Analysis of Three-Dimensional Deformation in the Flat Rolling of Bars", *Int. J. Mech. Sciences*, Vol.44, pp. 37~55.
- (5) Yanagimoto, J. and Kiuchi, M., 1991, "Three-Dimensional Coupled Simulation of Strip and Shape Rolling Processes", *Transactions of the NAMRI/SME*, Vol.19, pp. 15~22.
- (6) Oh, S.I. and Kobayashi, S., 1975, "An Approximate Method for a Three-Dimensional Analysis of Rolling", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.17, pp. 293~305.
- (7) Shida, S., 1969, "Empirical Formula of Flow-Stress of Carbon Steels - Resistance to Deformation of Carbon Steels at Elevated Temperature. 2nd Report", *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol.10, pp. 610~617.