

3 차원 FEM 을 이용한 CB100 의 압연공정 및 롤 응력 해석

김정민[#] · 박춘수¹ · 우기만¹

Rolling Process and Roll Stress Analysis of CB100 using by 3D FEM

J. M. Kim, C. S. Park, K. M. Woo

(Received November 23, 2009 / Revised March 3, 2010 / Accepted March 11, 2010)

Abstract

CB100 is one of the channel type products in the steel beam. In this study, rolling process of CB100 is analyzed by 3D FEM simulation and rolling process. FEM simulation result is compared with rolling process data. Also the intermediate & finishing roll stress analysis is carried out and the suitability of the roll through roll stress resultant analysis is evaluated. In order to decrease the roll stress, new pass schedule is developed for stable load balance between intermediate and finishing rolling stand. Therefore new rolling pass schedule is verified by the analysis results of rolling process and roll stress. By the analysis results, the credibility of rolling process analysis was obtained and it was determined that the possibility of roll damage between intermediate and finishing mill was high. So the new pass schedule was developed. Through the result of rolling process and roll stress analysis, it was obtained that the reduction of roll stress and stable load balance.

Key Words : FEM Analysis, Rolling, Roll Stress, CB100, Roll Diameter., DEFOEM-3D, Pass Schedule

1. 서 론

일반 형강 중에서 대표적인 제품이 찬넬이다. 이 제품들은 일반적으로 일반구조용, 용접구조용으로 주로 사용되고 웹과 플랜지 길이에 따라 제품 사이즈가 결정된다. 현재 생산하고 있는 찬넬 제품 중 대표적인 것이 CB100이다.

그러나 중간열 및 사상열에서 롤 절손으로 인한, 롤 교체 및 작업지연으로 생산성이 저하되는 문제점이 있다. 본 연구에서는 롤 절손의 원인과 해결 방안을 찾을 목적으로 3 차원 FEM 해석을 수행하였고, 해석을 통해 롤 절손 원인을 찾고자 한다.

기존 연구로는 김홍준 등 [1]은 압연수식을 이용하여 3 차원 유한요소법을 이용하여 형상압연 공형 설계에 관한 연구를 수행하였고, P. Macura 등 [2]은 ANSYS 를 이용한 3 차원 압연 시뮬레이션 및 실험을 통해 소재 형상 및 소재 응력 분포 등을 비교 분석하였고, A.A Milenin 등[3]은 압연 시 소재 변형의 수학적 모델 및 전위 이론을 이용한 유동학 모델을 정립하여 통계적 모델을 개발하였고, 이 모델을 바탕으로 압연해석을 수행하여 시뮬레이션 결과를 비교 분석하였다. 또한 Komori 등 [4]은 3 차원 유한요소법을 이용하여 H 형강의 다단 압연 해석 시뮬레이션을 수행하였고 잔류응

1. 동국제강 중앙기술연구소
교신저자: 동국제강 중앙기술연구소,
E-mail: jeongmin.kim@dongkuk.com

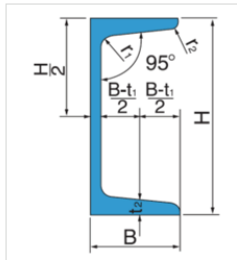


Fig.1 The Shape of Channel

력 및 온도 예측 등을 연구하였다.

상기의 연구들은 모두 형상 압연 해석을 통해 소재에 대한 응력 분포, 온도 등을 조사한 연구이나 본 연구에서는 압연해석뿐만 아니라 롤에 발생하고 있는 응력 해석을 연계하여 롤에 대한 응력의 정량화를 기하고자 한다.

구체적으로는 다음과 같다. 우선 1 단계에서는 CB100 압연 전체 공정을 3 차원 FEM 프로그램인 DEFORM-3D 를 이용하여 압연해석을 수행하고, 해석결과를 조업결과와 비교 분석하여 압연 해석의 신뢰성을 평가한다. 2 단계에서는 1 단계의 압연해석 결과를 이용하여 롤 응력 해석을 수행하고 롤의 응력분포 및 응력값을 획득한다. 그래서 해석 결과 분석을 통해 롤의 적합성을 평가한다.

3 단계에서는 2 단계에서의 해석결과를 토대로 중간, 사상열의 롤 응력을 줄이기 위한 압연공정 개선안을 도출하고, 1, 2 단계와 동일한 방법으로 압연해석/롤 응력 해석을 통해 압연공정 개선안을 평가하였다.

Fig. 1 은 채널 제품 단면 형상이다. 여기서 H 는 웹의 높이를 B 는 플랜지의 폭을 지칭한다. 통상적으로 플랜지와 웹의 길이에 의해 제품 사이즈가 결정된다.

2. 이론적 배경

2.1 압연하중 수식

우선 CB100 의 압연하중을 비교하기 위해 CB100 제품 개발에 적용한 수식 모델을 이용하여 압연하중을 계산하였다. 이 식은 일반적으로 압연하중 모델 개발에 많이 사용하는 Ekelund 압연하중 수식모델[5]이다.

$$P = B\sqrt{R\Delta h} \times \left[1 + \frac{1.6\mu\sqrt{R\Delta h} - 1.2\Delta h}{h_1 + h_2} \right] \times \left[a + K \left\{ \frac{2Ve\sqrt{\Delta h/R}}{h_1 + h_2} \right\} \right] \quad (1)$$

$$\mu = (1.05 - 0.0005t) \quad (2)$$

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad (3)$$

$$B = \frac{B_1 + B_2}{2} \quad (4)$$

$$a = (14 - 0.01t) \times (1.4 + C + Mn + 0.3Cr) \quad (5)$$

$$e = 0.01(14 - 0.01t) \quad (6)$$

식 (1) 은 Ekelund 의 압연하중 식이고 식(2)는 온도에 의한 마찰계수 식이고 식(3)은 압하량을 구하는 식이고, 압연전의 높이와 압연후의 높이차이다. 식(4)의 B 는 소재 폭과, 압연후의 소재 폭의 평균값이다. 식 (5)의 a 는 소재의 고유 상수로서 합금원소량과 온도에 의한 실험식이고 식(6)은 점성계수 식이다. R 은 롤의 반경이고, V 는 압연속도이다.

3. CB100 압연해석

3.1 압연해석조건

본 연구에서는 소성가공 해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 압연해석을 수행하였다. 해석분야는 열전달 및 압연 공정을 연계한 해석이고, 압연해석의 해석조건은 초기온도의 경우, 실제 열간 압연에 적용되는 온도와 동일한 1140℃, 압연속도는 각 압연기의 회전 수(RPM)를 계산하여 적용하였다.

CB100 형상이 좌우 대칭이기 때문에, 대칭 조건을 적용하였고, 경계조건으로 롤과 소재간 마찰을 고려하여 열간가공 해석에서 적용하고 있는 일정 전단마찰계수 0.7을 적용하였다. 압연해석에 적용된 롤은 강체(Rigid Body), 소재는 강소성체(Rigid-Plastic Body)를 적용하였다. 현재 CB100 소재는 SS400 일반재를 사용하고 있지만, SS400의 열적, 기계적 물성치가 확보되지 않아서 DEFORM 3D 프로그램에서 보유하고 있는 AISI1016을 적용하였다. 이는 압연 온도 구간이 900~1200℃의 고온구간 이기 때문에 이 온도에서는 AISI1016과 SS400 변형저항 차이가 거의 없으므로 SS400과 재질 특성이 유사한 AISI1016을 적용하였다.

열전달 해석에서는, 시간은 압연 전, 후 패스간의 압연속도와 스탠드간의 거리를 사용하여 계산하였고 대류 열전달 계수는 0.02N/sec/mm/℃를 적용하였다.

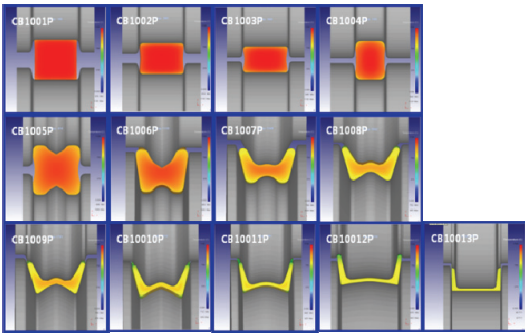


Fig. 2 The cross sectional shape of CB100 with each stage by FEM simulation

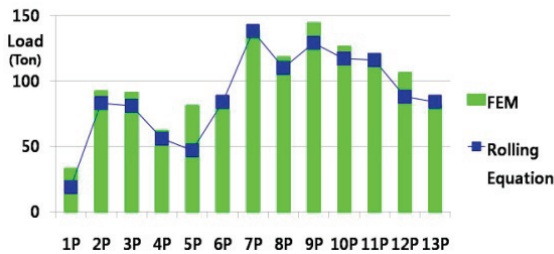


Fig. 3 The comparison of rolling load by FEM and rolling equation model

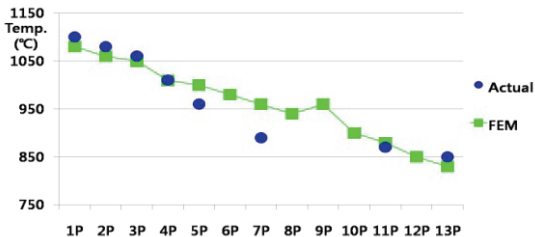


Fig. 4 The comparison of material temperature by FEM and actual measurement

3.2 압연해석결과 및 고찰

CB100의 전체 압연공정 13패스의 해석을 수행하였고 아래의 Fig. 2는 CB100 각 패스 별 소재 단면 형상을 나타낸 그림이다.

Fig. 2에서 1~5패스에서는 일반적인 Box 공형, 5패스 부터 형상공형을 적용하였으며 각 패스 별 소재의 변형을 보여주고 있는 그림이다.

Fig. 3 은 압연하중을 Fig. 4 는 소재 온도를 비교한 표이다. Fig. 3 을 보면 막대그래프는 FEM 해석에서 획득한 압연하중이고 실선은 압연수식모델에서 계산된 압연하중 결과이다. 압

연하중 결과를 비교해 보면 5 패스의 경우, 해석결과는 81Ton, 수식결과는 47ton, 9 패스의 경우, 해석결과는 144Ton, 수식결과는 129Ton, 12 패스의 경우, 해석결과는 106Ton, 수식결과는 88Ton 등 15Ton 이상의 차이가 발생하였다. 이는 Ekelund 압연하중 수식에 사용되는 입력자료와 해석 입력자료의 차이와 경계 조건의 차이이다. 우선 입력자료 차이의 경우 실제 압연 온도구간(900~1100℃)에서의 변형저항은 수식의 경우는 소재의 합금원소량과 압연온도에 의한 실험식에서 계산된 값이고, 해석의 경우 해석 프로그램 Data Base 에 있는 AISI1060 실험자료이다. 그리고 경계조건의 경우 Ekelund 식에서는 소재의 외부, 내부가 동일한 온도로 가정하였으나, 소재 외부에서 내부로 전달되는 열전달 및 물과 소재간의 접촉에 의해 발생하는 온도 편차 등을 무시하였다. 해석의 경우 소재 외부와 내부의 열전달을 고려하였고, 또한 소재와 물 간 접촉부와 미접촉부의 온도편차로 인한 오차 등 이러한 입력자료와 경계조건의 오차로 인해 부분적으로 압연하중의 오차가 발생하였다고 판단한다. 그러나 압연하중의 경향성은 유사하다는 것을 확인하였다. 향후 연구에서는 소재의 물성치 및 실제 압연에서의 마찰조건과 소재의 온도분포 등 정확한 입력자료를 획득할 필요성이 있다.

Fig. 4 를 보면 6, 8, 9, 10, 12 패스에서 압연 시 물과 소재간의 냉각수에 의한 영향으로 정확한 온도 측정 어려움이 발생하였다. 그러나 최종 온도를 비교해보면 실측온도는 850℃, 해석온도는 845℃로 거의 차이가 없음을 확인하였다. 압연하중과 온도 결과 비교를 통해 해석결과의 신뢰성을 확인하였다.

4. CB100 롤 응력 해석

4.1 해석대상 롤 선정

롤의 초기경은 직경이 400mm, 폐기경은 초기 경의 90%인 360mm 이다. 재질은 구상흑연주철 롤 이다. 이 구상흑연주철은 열간압연 롤 용으로 많이 사용하고 있으며 강한 하중에 견딜 수 있는 장점이 있으나 취성이 강한 재료이기 때문에 소성역 구간이 미비하여 해석범위는 탄성영역으로 적용하였다. 해석에 필요한 기계적 물성 데이터는 E=100GPa, u=0.3 이다.

4.2 해석 Set-up 및 경계조건

롤 응력 해석에 적용한 프로그램은 DEFORM-3D의 Die Stress Analysis 이다. 이 프로그램은 주로 단조 금형의 해석에 적용하지만 롤 응력 해석에도 적용이 가능하다고 판단하여 롤 응력 해석에 적용하였다. 롤 응력 해석시 필요한 입력 자료는 압하력이다. 이 압하력은 롤과 소재간의 압연 시 발생하는 힘 이고 롤 응력 해석 Set up 시 압연공정 해석의 패스 별 최종 단계에서 획득한 압하력을 롤의 입력자료로 이용한다. 그리고 롤 형상이 좌우 대칭이므로 대칭 조건을 적용하였다. 그리고 해석 대상은 6~10pass 의 상, 하 롤이다.

아래 Fig. 5(a)의 그림이 압하력을 롤에 적용하는 과정이고 Fig. 5(b)의 그림은 롤의 경계조건을 부여하는 과정이다.

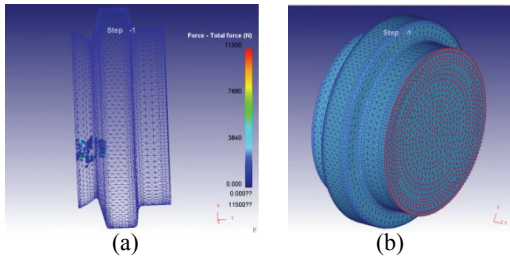


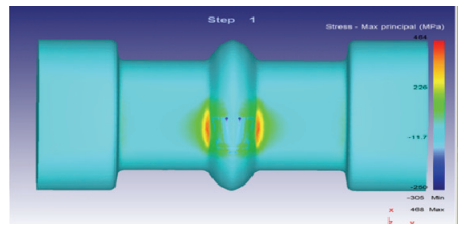
Fig. 5 The set up process of roll stress analysis: (a) data interpolation of rolling force (b) boundary condition

4.3 롤 응력 해석 결과

롤 직경 조건을 초기경 $\Phi 400\text{mm}$, 조업경을 $\Phi 380\text{mm}$, 폐기경을 $\Phi 360\text{mm}$ 로 적용하였으며 6~10패스의 롤 응력 해석을 통해 다음과 같은 결과를 획득하였다.

4.3.1 CB100 롤 응력 시뮬레이션

Fig. 6(a)는 CB100 8패스 상부 롤의 응력 해석 시뮬레이션 결과이고, Fig. 6(b)는 실제 발생한 8 패스 상부 롤 절손 사진이다. Fig. 6(a)의 그림을 보면 청색으로 갈수록 낮은 응력을 나타내고 붉은색으로 갈수록 높은 응력을 나타낸다. 붉은색 구간이 위의 그림과 같은 위치에 발생하였고 이 부분에 응력이 높게 발생한다는 것을 확인하였다. 이는 Fig. 6(b)와 비교 시 해석 상에서의 응력이 높게 발생하는 위치와 실제 절손이 발생한 위치가 동일함을 알 수 있었다.

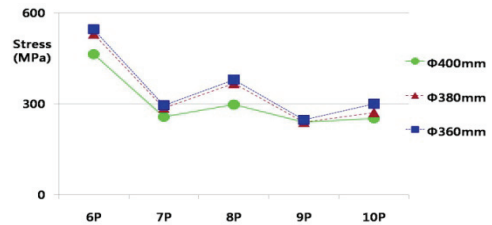


(a)

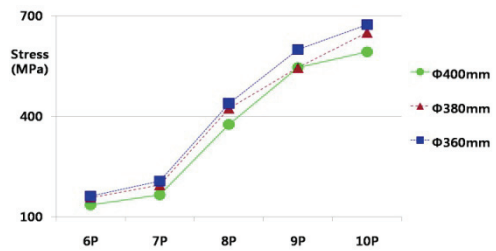


(b)

Fig. 6 Roll Stress distribution and roll damage of CB100 8Pass: (a) FEM analysis (b) present roll damage position



(a)



(b)

Fig. 7 Roll stress of each Pass by FEM analysis : top (b) bottom

Fig. 7 (a), (b)는 CB100 6~10 패스상/하부 롤 응력 결과 그래프이다. 그래프에 표시한 응력은 최대 주응력이다. 최대 주응력이 롤의 인장강도를 초과 할 경우 롤 절손의 위험이 높고, 최대 주응력이 롤의 인장강도 보다 낮을 경우 롤

절손 위험이 작다고 판단하여 이 논문에서는 최대주응력을 적용하였다. 또한 이 최대 주응력이 재료의 항복강도 보다 크고 최대 인장강도 보다 낮게 발생할 경우, 롤 변형 및 가공경화가 발생되어 제품 품질 불량 및 롤 취성 파괴가 발생 할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 롤 가공 및 열처리 작업 등을 수행하여 제품 품질 및 롤 수명을 향상 시킬 수 있다.

Fig. 7(a)를 보면, 6 패스에서 $\Phi 400\text{mm}$ 의 경우, 546MPa 의 응력이 발생하였고 $\Phi 380\text{mm}$ 은 531 MPa 의 응력이 발생하였다. 이는 롤의 최대 인장강도 (550MPa)에 근접하는 결과이다. 그러나 7~10 패스에서는 롤의 최대 인장강도 보다 낮은 응력이 발생하였다. Fig. 7(b)를 보면 6~8 패스에서는 $\Phi 400\text{mm}$, $\Phi 380\text{mm}$, $\Phi 360\text{mm}$ 모두 롤의 최대인장강도 이하의 응력이 발생하였으나 9 패스의 경우, $\Phi 400\text{mm}$, $\Phi 380\text{mm}$ 은 546MPa, $\Phi 360\text{mm}$ 에서는 600MPa 의 응력이 발생하였고, 10Pas 에서는 $\Phi 400\text{mm}$ 이 593MPa, $\Phi 380\text{mm}$ 은 651MPa, $\Phi 360\text{mm}$ 은 674MPa 응력이 발생하였다.

이 결과는 롤의 최대 인장강도에 근접 또는 초과하는 응력이 발생하여, 상부 롤의 경우, 6 패스에서, 하부 롤 에서는 9~10 패스 에서 롤 절손 발생 가능성이 높다는 것을 확인하였다.

5. CB100 압연공정 개선안 도출 및 압연 공정과 롤 응력 해석

5.1 압연공정 개선안 도출

선형 연구에서 획득한 결과를 통해 현재 적용하고 있는 CB100 의 중간 및 사상열에 높은 응력이 발생 하는 것을 확인 하였다. 이러한 문제를 해결하는 방법으로 롤 갭을 수정하여 안정된 압연하중 밸런스를 획득하고 이러한 압연하중 밸런스를 이용하여 6, 9, 10 패스의 응력을 줄이고자 한다. 압연 하중 밸런스 개선안을 획득하기 위한 방법은 일반적으로 롤 형상을 수정하는 방법과 롤 갭, 압연속도 등 패스 스케줄을 수정하는 방법이 있다. 이 연구에서는 롤 형상은 수정하는 방법 대신 패스 스케줄을 수정하는 방법을 적용하였다. 6~8 패스의 롤 갭 수정에 의해 아래의 표 1 과 같은 CB100 의 압연공정 개선안을 도출하였다. 현조업은 현재 적용하고 있는 롤 갭이고 개선안은 최종 수정된 롤 갭이다.

Table 1 The roll gap of pass schedule between present and modified pass schedule

	(mm)					
Passes	5P	6P	7P	8P	9P	10P
Present	9	14	8	4.7	4.2	4.2
Modified	9	13	9	4	4.2	4.2

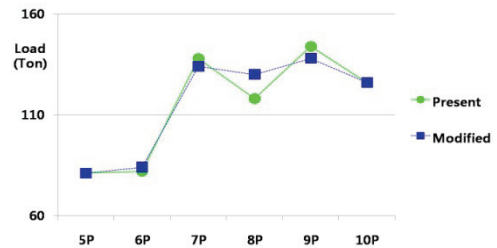


Fig. 8 The comparison of rolling load by FEM using by present and modified pass schedule

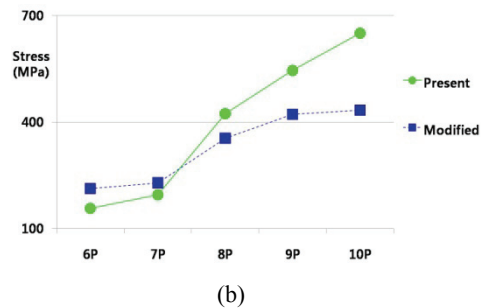
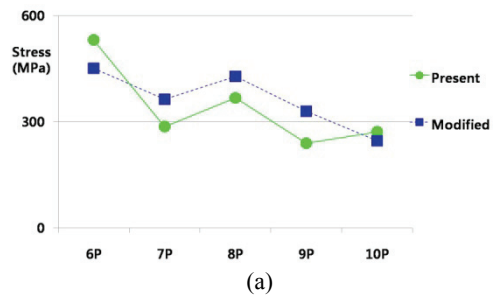


Fig. 9 The comparison of roll stress of each pass by FEM analysis with present and modified pass schedule : (a) top (b) bottom

5.2 압연공정 해석

5.1에서 획득한 CB100 압연 공정 개선안을 이용하여 압연해석을 수행하였다.

Fig. 8 은 CB100 의 현조업과 개선안 압연해석에 의해 획득한 압연하중 비교 그래프이다. 개선안의 7~9 패스 압연하중 분포가 현조업 보다

편차가 적고 이로 인해 현조업 보다 안정된 압연하중 밸런스를 획득하였다.

5.3 롤 응력 해석

5.2 연구결과에 의해 CB100의 개선된 압하 밸런스를 획득하였다. 그래서 개선된 패스 스케줄을 검증하기 위한 방법으로 중간, 사상열의 롤 응력 해석을 수행하였다. 역시 상,하 모두 적용하였으며 4장에서 수행한 롤 응력 해석 방법을 동일하게 적용하였다. 롤 직경은 현조업, 개선안 모두 $\Phi 380\text{mm}$ 을 적용하였다.

Fig. 9 (a),(b)는 CB100의 현조업/개선안에 의한 상/하부 롤 응력을 비교한 그래프이다. 우선 상부 롤의 경우 개선안 적용시 롤의 응력이 6~10 패스 모두 롤 최대인장강도(550MPa) 보다 낮게 발생하였다. 특히 6 패스에서는 현조업의 롤 응력이 531MPa, 개선안은 451MPa의 응력으로 개선안의 롤 응력이 현조업의 롤 응력 결과 보다 안정된 결과를 나타내었다.

하부 롤의 경우 6~10 패스 모두 롤의 최대인장강도 보다 낮은 응력이 발생하였고, 특히 9~10 패스에서는 현조업의 경우 롤의 최대인장강도에 근접 및 초과하는 응력이 발생하였으나 개선안의 경우 9 패스에서 422MPa, 10 패스에서 434MPa의 응력이 발생하였다. 이러한 결과를 통해 개선안 적용 시 롤 응력이 현조업 보다 낮게 발생함으로서 롤 절손이 감소 될 수 있다고 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 3 차원 FEM 해석을 이용하여 CB100 압연공정 및 롤 응력 해석을 수행하였고 해석 결과 분석을 통해 아래와 같은 결론을 획득하였다.

(1) 3차원 FEM 해석 프로그램을 이용하여 현재현장에서 적용하고 있는 CB100의 압연공정

해석을 수행하였고, 해석과 실측에서 획득한 압연하중과 소재 온도 비교 분석을 통해 해석 결과의 신뢰성을 획득하였다. 향후 해석의 정확성을 높이기 위해 소재 물성치, 경계조건에 대한 정확한 입력자료 확보가 필요하다.

(2) CB100 롤 응력 해석을 수행하였고 해석 결과, 6, 9, 10 패스에서 최대 인장강도(Max: 550MPa)에 근접 또는 초과하는 응력이 발생하였다. 그래서 상기 패스 에서는 롤 절손 가능성이 높다는 것을 확인하였다..

(3) 압하 밸런스 및 롤 응력 감소를 위한 CB100 압연공정 개선안을 도출하였다. 그리고 개선안의 압연공정과 롤 응력 해석 결과, 안정된 압연하중 밸런스와 낮은 롤 응력값을 획득하였고 이러한 결과에 의해 롤 응력 감소를 위한 개선안의 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] H. J. Kim, T. S. M Hwang, 2000, Caliber Design in shape Rolling by Finite Element Method, KSTP, Spring Conference Proceeding, pp. 44-47.
- [2] P. Macura, J. Petruska, 1996, Numerical and experimental simulation of pass rolling, JMPT, Vol. 60, pp. 55-60.
- [3] A. A Milenin, H. Djya, S.Mroz, 2004, Simulation of metal forming during multi-pass rolling of shape bars JMPT, Vol.153~154, pp. 108~114.
- [4] Kazutake. Komori, Katsuhiko. Komula, 2000, Simulation of deformation and temperature in multi-pass H-shape rolling, JMPT, Vol. 105, pp. 24~31.
- [5] S. Ekelund, 1933, The Analysis of Factors Influencing Rolling Pressure and Power Consumption in the Hot Rolling of Steel, Steel, Vol. 93.