

후판 롤교정기의 최적 교정조건 정립에 관한 연구

이종빈[#], 권혁철¹, 이성진¹

Research on Optimal Leveling Conditions of Roller Leveler in Thick Plate Mill

Jong-Bin LEE, Hyuck-Cheol Kwon, Sung-Jin Lee

Abstract

The high grade thick plate is in great demand in the ship building industry and the construction industry. The main problems to produce the high grade plate are residual stress and flatness of plate. In the previous research, Finite Element Analysis(FEA) was conducted for cold roller leveler to understand the behaviors of cold roller leveler under different conditions of thickness, intermesh, and yield stress. In this study, a numerical model of roller leveler is developed and the calculated results of this model are compared with the FEA results to show the validity of the numerical model. The optimal leveling conditions to improve flatness of plate are suggested using this numerical model.

Key Words : Roller Leveler, Numerical Model, Optimal Leveling Condition, Thick Plate Mill

1. 서론

조선, 건설분야에서 강구조물 제작의 자동화의 발달로 강판에 대한 품질요구가 엄격해 지고 있다. 특히 후판에 있어서 평탄도 및 잔류응력에 대한 품질요구가 엄격해 지고 있다. 최근에는 잔류응력에 의한 소결힘 발생 및 시효효과에 의한 평탄도 불량 등이 품질에서 문제가 되고 있다. 이러한 평탄도 불량 개선 및 잔류응력을 최소화하기 위해서는 교정기의 역할이 강조되어진다.

하지만, 철강공정에 있어서 교정 이론의 연구는 압연 등 타 공정과 비교해서 아직 초보적인 단계에 머물러 있다. 이는 탄성 변형과 소성 변형을 모두 고려해야 하고, 롤 배치가 비대칭인 교정기 내에서 소재와 접촉하는 롤의 수가 많아 엄밀한 교정기의 수식모델을 만들기 위해서는 여러 면에서 복잡한 해석 조건이 요구되기 때문이다[1].

기존의 롤 교정기에 관한 수식모델로는 Soda[2], Araki[3] 등의 모델이 있다. 본 연구에서는 계산이 쉬운 이점이 있는 탄성변형의 굽힘이론에서 유도

된 Matoba모델[4]을 이용한다.

본 저자는 과거의 연구[5]에서 교정의 메커니즘을 이해하기 위한 시작 단계로 유한요소법을 이용한 2차원 냉간 롤 교정기를 모델링하고 후판 광폭박물재에 대해서 유한요소해석을 실시하였다.

본 연구에서는 2차원 냉간 롤 교정기에 대한 수식 모델을 제안한다. 모델은 인터메쉬량에 따른 소재의 곡률 및 모멘트를 구하고, 이 곡률을 이용하여 소재의 두께방향 응력 및 변형률을 구할 수 있도록 구성되어 있다. 본 수식모델 결과와 유한요소 해석 결과를 비교하여 개발된 수식모델의 타당성을 보인다. 개발된 수식모델을 이용하여 인터메쉬량에 따른 초기 잔류곡률과 최종 잔류곡률의 관계를 검토하고 최적의 인터메쉬 설정 방법을 제안한다.

2. 롤 교정기 수식모델

2.1 인터메쉬와 곡률 관계

롤 교정기에서 인터메쉬량과 곡률의 관계를 구하기 위해서 Fig. 1 과 같이 3개의 롤로 구성된 롤 교정기를 살펴보자. 이 경우 롤 교정기를 3

1. 포스코기술연구원 압연공정연구그룹

교신저자: 포스코기술연구원 LICC연구프로젝트팀,

E-mail: misterbean@posco.com

point bending을 받고있는 판으로 단순화 할 수가 있다. 롤 수가 n 개인 롤 교정기의 경우, 이러한 3 point bending을 받고 있는 롤 교정기가 연속적으로 배치되어 있다고 볼 수 있다. 따라서 2번째에서 $n-1$ 번째 롤까지의 인터메쉬량과 곡률의 관계는 3 point bending을 받고있는 판으로 가정하여 다음 식으로 표현할 수 있다[4].

$$k_i = (-1)^{i-1} \frac{24}{L^2} \delta_i \quad (1)$$

여기서 δ_i 는 i 번째 롤의 인터메쉬량, k_i 는 i 번째 롤에서 소재의 곡률, L 은 롤간 거리를 나타낸다(Fig. 1 참조). 곡률 및 모멘트의 부호는 Fig. 2와 같이 위로 볼록한 경우 +부호를 가진다. 1번째 롤과 n 번째 롤에서의 곡률은 0으로 가정한다.

$$k_1 = k_n = 0 \quad (2)$$

소재는 교정기의 각 롤에서 굽힘을 받아 모멘트가 발생한다. 이 상태에서 하중(굽힘)을 제거하여 모멘트를 0으로 했을 때 소재가 가지는 곡률을 잔류곡률이라 한다. 교정 후 i 번째 롤에서의 잔류곡률, k'_i 은 다음 식과 같다.

$$k'_i = k_i - \frac{M_i}{M_y} k_y \quad (3)$$

여기서 k_y 는 항복곡률, M_i 는 i 번째 롤에서 소재에 작용하는 모멘트, M_y 는 항복모멘트이다. 따라서 최종 잔류곡률, k'_n 은 다음과 같다.

$$k'_n = \frac{M_n}{M_y} k_y \quad (4)$$

여기서 M_n 은 n 번째 롤에서 소재에 작용하는 모멘트이다.

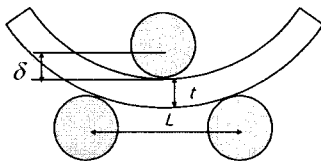


Fig. 1 Roll leveler with 3 rolls

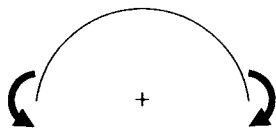


Fig. 2 Sign of curvature and moment

2.2 응력과 모멘트

롤 교정기에서 소재의 두께방향 응력 및 변형을 구하기 위해서 소재는 순수굽힘으로 가정한다. 즉 중립면에 수직인 단면은 변형 후에도 항상 직선이며 중립면에 수직이다. 롤의 접촉점과 접촉점 사이의 곡률을 구하기 위해서 접촉점 사이의 소재를 m 개의 작은 영역으로 다시 나눈다(Fig. 3 참조). 즉 i 번째 롤과 $i+1$ 번째 롤 사이의 k 번째 절점에서의 곡률 $k_{i,k}$ 는 다음과 같다.

$$k_{i,k} = k_{i,k-1} + \Delta k_k = k_i + \sum_{j=1}^k \Delta k_j \quad (5)$$

여기서 Δk_k 는 k 번째 절점에서 곡률 증분이다. 본 연구에서 실제 계산에 있어서는 Δk_k 는 동일한 값을 사용했다.

다음 식과 같이 곡률 증분으로부터 k 번째 절점에서 중립면으로부터 높이 z 인 위치에서 압연방향의 변형률 증분을 구할 수 있다.

$$\Delta \varepsilon_{k,z} = z \Delta k_k \quad (6)$$

여기서 $\Delta \varepsilon_{k,z}$ 는 k 번째 절점 높이 z 에서 압연방향의 변형률 증분, z 는 두께방향으로 중립면으로부터의 거리이다.

소재는 탄완전소성으로 가정하였다. 따라서 k 번째 절점에서 높이 z 인 위치에서 압연방향 응력 증분, $\Delta \sigma_{k,z}$ 은 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \text{if } \sigma_{k,z} \Delta \varepsilon_{k,z} > 0 \\ \Delta \sigma_{k,z} &= E \Delta \varepsilon_{k,z} \quad \text{where } |\sigma_{k,z}| < \sigma_y \\ \Delta \sigma_{k,z} &= 0 \quad \text{where } \sigma_y \leq |\sigma_{k,z}| \end{aligned} \quad (7)$$

else

$$\Delta \sigma_{k,z} = E \Delta \varepsilon_{k,z}$$

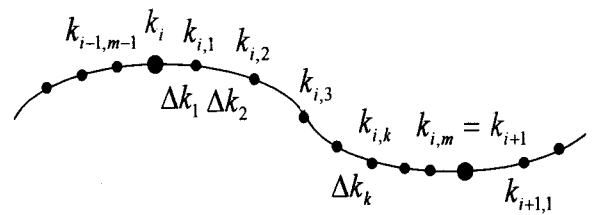


Fig. 3 segments of plate

여기서 $\sigma_{k,z}$ 는 k 번째 절점에서 높이 z 인 위치에서 압연방향 응력, σ_y 는 항복응력, E 는 재료의 탄성계수 이다.

응력 $\sigma_{k,z}$ 와 k 번째 절점에서 모멘트 M_k 는 다음 식과 같다.

$$\sigma_{k,z} = \sigma_{k-1,z} + \Delta\sigma_{k,z} \quad (8)$$

$$M_k = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{k,z} z dA \quad (9)$$

여기서 t 는 판의 두께, dA 는 응력 $\sigma_{k,z}$ 이 작용하고 있는 면의 면적이다.

여기서 소재에 작용하는 모멘트는 롤 접촉점에서 최대값을 가지고 접촉점 간에는 직선적으로 변한다고 가정한다. 이 가정으로부터 i 번째 롤과 $i+1$ 번째 롤 사이의 k 번째 절점에서의 압연방향 좌표 $x_{i,k}$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_{i,k} = x_i + \frac{L}{2} \times \frac{M_k - M_i}{M_{i+1} - M_i} \quad (10)$$

여기서 x_i 는 i 번째 롤과 접촉점에서 소재의 압연방향 좌표, M_i 는 i 번째 롤과 접촉점에서 소재가 받고있는 모멘트이다.

3. 수식모델의 검증

3.1 수식모델과 유한요소해석의 결과 비교

냉간 교정기 모델을 비교적 접촉문제의 해석이 용이한 상용 프로그램 Marc를 이용하여 평면 변형률, 음해법으로 해석했다. 해석에 사용된 소재는 탄완전소성체로 가정하였으며 물성치는 Table 1 과 같다. 판의 두께는 18mm, 교정기 롤의 직경 및 피치는 각각 360mm, 390mm이며, 롤의 배치 및 인터메쉬량은 Fig. 4와 같다.

Fig. 5는 수치해석과 유한요소해석에서 구한 소재의 곡률을 비교한 그림이다. 1번롤과 9번롤을 제외하고는 곡률이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 1번 롤과 9번 롤에서 곡률이 차이가 나는 것은 수식모델에서 1번 롤과 9번 롤의 곡률을 0으로 가정한 결과이다.

Table 1 Constants of Plate

항복응력	탄성계수	프와송비	마찰계수
490 MPa	210 GPa	0.3	0.3

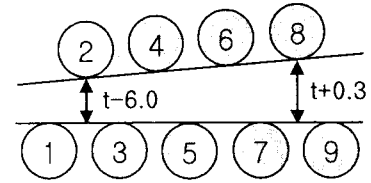


Fig. 4 Roll Number and Intermesh

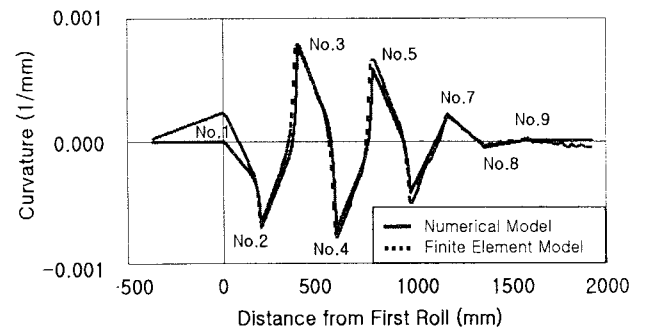


Fig. 5 Curvature of Plate

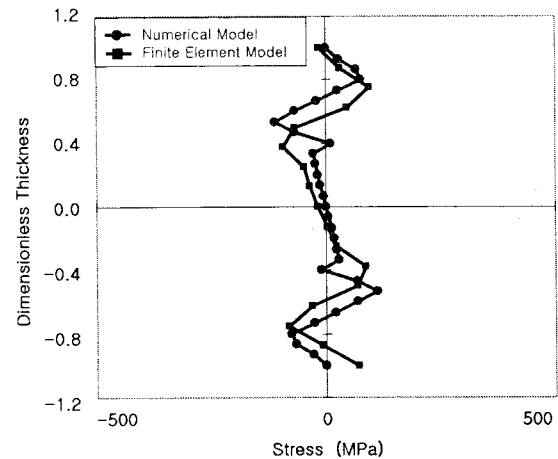


Fig. 6 Distribution of Residual Stress

Fig. 6은 교정 후의 두께방향 잔류응력의 분포결과이다. 수치해석과 유한요소해석에서 구한 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 최적 교정 조건

4.1 단면 소성변형을

소재의 단면적과 단면에서 소성변형된 면적의 비를 단면 소성변형율이라 한다. Fig. 5에서 3번 롤

에서 최대 곡률을 가지는 것을 알 수 있다. 즉 최대 단면 소성변형률은 3번 롤에서 발생함을 알 수 있다. Fig. 7은 최대 단면 소성변형률의 값에 따라 초기곡률 k_0 이 교정 후 어떻게 변화하는지를 보여준다. 여기서 횡축은 초기곡률 계수 k_0/k_y 이고 종축은 각 롤에서 잔류곡률 계수 k/k_y 이다. Fig.7을 보면 최대 단면 소성변형률의 값이 작은 경우 3번 롤에서 잔류곡률의 편차가 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 즉 초기곡률의 차에 따라 교정 후의 곡률이 달라지는 것을 알 수 있다. 반면 최대 단면 소성변형률의 값이 큰 경우는 잔류곡률의 편차는 작으나 잔류곡률은 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 그러나 4~6번 롤로 교정이 진행됨에 따라서 잔류곡률의 크기는 작아지는 것을 알 수 있다. 실제로 교정기에 들어오는 소재의 곡률은 모두 다른 값을 가진다. 여기서 잔류곡률의 편차가 작은 값을 가진다는 것은 교정기 입측의 소재의 곡률에 관계없이 3번롤을 지나면 동일한 곡률이 된다는 것을 의미한다. 즉 입측 곡률에 관계없이 곡률을 동일하게 제어할 수 있다는 것을 의미한다.

Fig.8은 3개의 롤을 가진 교정기의 곡률-모멘트 관계를 나타낸다. 횡축은 곡률계수, 종축은 무차원화한 모멘트이다. 곡률-모멘트 곡선은 최종 롤의 값에 도착한 후 탄성회복으로 선형적으로 모멘트가 0인 값으로 이동함을 알 수 있다. 즉 최종 잔류곡률은 최종 롤의 곡률을 조절해서 결정할 수 있음을 알 수 있다.

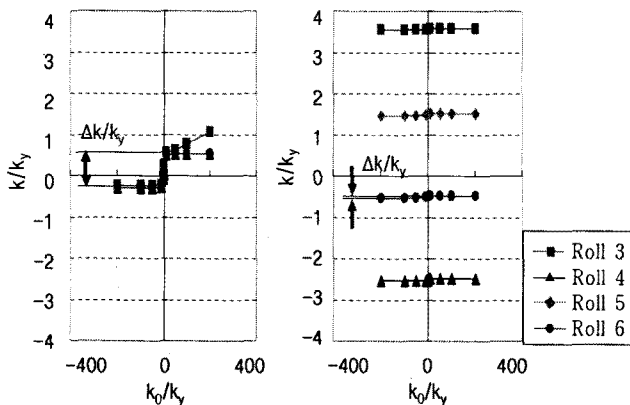


Fig. 7 Plastic Deformation Ratio and Residual Curvature

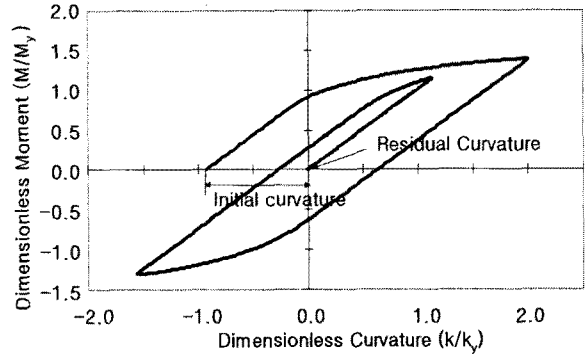


Fig. 8 Curvature-Moment Curve

5. 결 론

입측 소재 곡률과 무관하게 교정이 가능하게 하기위한 최적의 인터메쉬의 설정은 다음과 같다.

1. 3번 롤에 큰 값을 주어서 3번 롤에서 곡률을 동일하게 한다.
2. 각 롤을 지나면서 작은 인터메쉬값을 설정하여 잔류응력을 감소시킨다.
3. 최종 롤에서 잔류곡률이 0이되는 곡률을 설정한다. 이 때의 인터메쉬는 식(1)로부터 구할 수 있다.

단패스 및 다패스 교정에서 잔류응력을 최소화하기위한 교정조건은 향후 과제로 남겨둔다.

참 고 문 헌

- [1] 서재형, 장대섭, 2002, 후판 열간 교정기 교정 특성 해석, 포스코 연구논문, 제7권, 제2호, pp. 291~297.
- [2] Choichiro SODA, Keinosuke OSHIMA, 1961, 판재 교정법의 연구 (제1보), 기계시험소 소보, 제15권, 제4호, pp. 194~232.
- [3] Jinichiro ARAKI, 1971, 교정재의 변형과정에 관한 해석법, 소성과 가공, 제12권, 제129호, pp. 768~775.
- [4] T. Matoba, 1995, Calculation Method of Roller Leveling Conditions for Steel Plates, Journal of JSTP, Vol. 36, No.418, pp. 1306~1311.
- [5] 이종빈, 정제숙, 박해두, 2007, 유한요소해석을 이용한 후판 냉간교정의 연구, 한국소성가공학회 제6회 압연심포지엄 논문집, pp. 19~22.