

레벨링 공정 해석에 의한 교정 조건이 열연 고강도 강판의 잔류응력에 미치는 영향 연구

박기철*

Effect of the Leveling Conditions on Residual Stress Evolution of Hot Rolled High Strength Steels by Deformation Analysis of Leveling Process

K. C. Park

Abstract

In order to analyze the effect of leveling conditions on residual stress evolution of hot rolled high strength steels, a numerical algorithm was developed. It was able to implement the effect of plastic fraction (intermesh) in leveling, line tension, work roll bending, and initial residual stress and curl distribution. The effect of work roll bending on residual stress and curl were studied by using the developed program. The validity of simulated results was verified from comparison with the experimentally measured residual stress and curl in a sheet.

Key Words: Leveling, Residual stress, High strength hot rolled sheet, Camber, Deformation Analysis by Slit Model

1. 서 론

열연 고장력 강재는 자동차 구조부재 및 상용차의 프레임 용으로 사용되는 소재이다. 이러한 고강도 특성을 확보하기 위하여 특별한 성분과 압연 및 냉각 과정을 거치는 제조과정에서 불가피하게 발생하는 길이 및 폭 방향의 온도 이력 불균일로 인하여 비교적 큰 잔류응력이 내부에 존재하고 있다. 이러한 고강도 열연 강판은 연속 프레스 가공용으로 사용되는 경우는 slitting 된 작은 폭의 coil 로 절단하여 프레스 입측의 feed leveler 에서 교정을 거쳐 사용되며, 용도에 따라서는 sheet 작업 후 gas 나 플라즈마 절단으로 가공하여 사용하고 있다. 그리고 열연코일 상태에서 rough leveler 를 거친 후에 프레스에 적합한 폭으로 slitting 을 하고 finish leveler 에서 만곡을 교정하는 경우도 있다. 이러한 다양한 방법으로 열연 고장력강을 사용하는 경우에 강판에 잔류응력이 존재하는 경우 플라즈마나 slitting 절단 후에 강판에 camber 가 발생하여 후 가공이 어렵게 된다[1].

본 연구에서는 이러한 열연 강판 가공과정에서 반드시 거치게 되는 교정공정의 공정 조건에 따른 잔류응력 변화에 대하여 해석할 수 있는 프로그램을 개발하고, 이를 이용한 해석 결과의 타당성을 실험 결과와 비교하여 검증하였다. 먼저 leveling 과정에 대한 변형해석 기술을 기존에 알려진 교정이론에 대한 방법[2,3]을 응용하여 초기 잔류응력의 반영 및 변형 중 잔류응력 변화에 대한 고려를 하여 개발 하였다. 그리고 교정의 공정 변수들 중 work roll 의 탄성 변형 또는 교정 효과를 위하여 임의로 설정하는 bending 효과에 대한 해석을 수행하였다. 그리고 실험이 가능한 부분에서 실험과 해석 결과를 비교하여 그 타당성을 검토하였다.

* 교신저자: 포스코 기술연구원 강재솔루션연구그룹, E-mail: parkkc@posco.com

2. 레벨링 공정의 특징과 해석 방법

2.1 레벨링 공정의 특징

레벨링은 다수의 work roll 을 거치는 과정에서 작은 인장력으로 강판에 소성 변형을 부여하여 형상 및 내부의 잔류응력을 교정하는 공정이다. 여기에는 인장력이 항복강도의 1/3 수준인 텐션레벨러와 인장력이 없거나 공정 간 소재 흐름을 위하여 작은 인장력이 가해지는 roller leveler 가 대표적이다. 강판 폭 위치 별로 다른 잔류응력이 있는 경우에 대하여 텐션레벨러의 경우는 소성변형이 전체 강판 두께에 걸쳐서 가해지므로 연신 변형 발생이 용이하여 교정 효과가 탁월하나, 롤러 레벨러의 경우는 두께의 일부만 소성변형을 거치므로 제한적인 교정 능력을 가진다. 그러나 텐션레벨러에 비하여 roller leveler 는 두께 방향의 강판 내부 잔류응력을 감소 시키는 면에서는 탁월한 효과를 발휘한다[4]. 본 연구에서는 강판의 폭 방향 위치 별로 다른 수준의 잔류응력 분포를 교정하는 기술에 대한 부분을 연구하였다.

2.2 레벨링 공정 해석 방법

2.2.1 인장력 조건에서의 Bending-Unbending 해석 과정

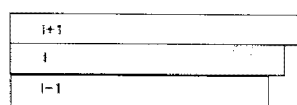
Leveler 에 의한 교정 과정은 bending-unbending 변형이 인장력 작용하에서 연속적으로 발생하는 것으로 볼 수 있다. 단지 텐션 레벨러의 경우는 인장력이 크며, roller 레벨러의 경우는 그 크기가 작거나 없는 경우이다. 이러한 인장력 작용조건에서 굽힘 변형에 대한 해석 기술은 기존의 연구들[1,2]에서 이미 소개되어 있으며 여기는 박기철등의 방법[5]을 적용하였다.

2.2.2 교정에 의한 잔류응력 변화 계산 방법

잔류응력이 있는 판의 경우는 교정 과정에서 작용하는 인장력에 강판 내부의 잔류응력이 인장력 또는 압축력으로 더하여 교정 변형에 역할을 하게 된다. 따라서 인장력이 작용하거나 다른 부분에 비하여 인장력이 큰 부분에서는 타 부분에 비하여 미소하게 길이가 늘어나고, 반대로 압축응력이 있거나 인장력이 작은 부분에서는 길이가 다른 부분에 비하여 상대적으로 작게 늘어나거나 감소한다. 이에 따라 전체적인 잔류응력의 분포가 조정되면서 잔류응력의 절대적인 크기는 감소한다. 그러나 교정작업을 직접 수행하는 leveler 의 work roll 이 굽힘 변형 등의 영향으로 강판 전폭에서 균일하지 않게 굽힘 변형을 교정 중에 발생시키는 경우 잔류응력의 크기는 증가 될 수 있다. 본 연구에서는 work roll 의 굽힘 변형에 따른 불균일한 교정 변형의 경우에 강판 각 위치 별로 다른 크기의 굽힘 변형을 부여한 해석이 가능할 수 있도록 해석 절차를 고안하여 반영하였다.

시편 폭(y 축)위치 별 길이(x 축)방향 (전체 두께위치에서의) 평균 잔류응력은 다음의 (1) 식과 같다. 그리고 강판 두께 중앙의 변형률이 ϵ_c 이면, 이는 각 slit 에서 인장력 하의 bending-unbending 과정에서 응력과 인장력의 평형을 고려하여 구해진다. 교정중의 최대 가공곡률을 n 등분하여 증분 계산을 하는데, 1 개의 roll 에서 변형을 계산하는데 n 개의 bending 과 n 개의 unbending 과정을 거치게 된다. 강판의 폭 방향(y 축) 분할을 Fig.1 과 같이 하는 경우 점진적인 교정 과정에서 이러한 평균 잔류응력 변화를 前田恭志의 방법[3]을 참고하여 아래와 같이 구하였다.

$$\sigma_{OUT}(y) = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x(z) \cdot dz/t \quad (1)$$



Δy : Slit width
 $\langle d\epsilon_c \rangle$: Average $d\epsilon_c$ along width of plate
 $\Delta l(x)$: length of element

Fig. 1 Slit model for leveling analysis.

Fig.1 에 나타낸 교정 과정 해석에 대한 slit model 에서 i-요소의 변형과 관계되는 힘들을 Fig.2 와 같이 정리하였다.

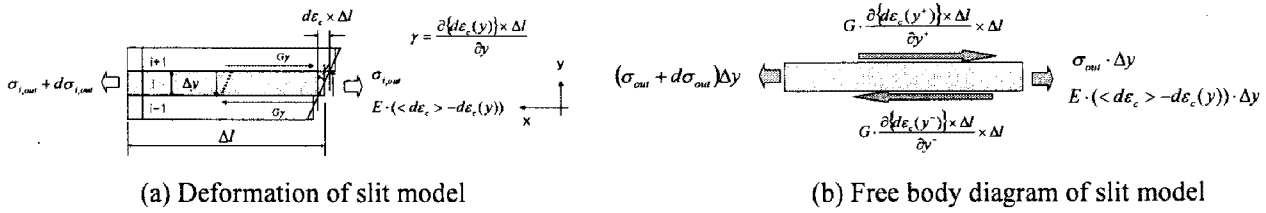


Fig.2 Deformation and equilibrium condition of slit model during leveling.

이러한 변형과 응력 및 평형조건을 고려하여 slit model 에서 교정에 의한 잔류응력의 변화를 나타내는 식은 아래와 (2) 식과 같이 구할 수 있다.

$$d\sigma_{out}^{(i)} = -f \cdot E \left(d\epsilon_c^{(i)} - \frac{\sum_{i=1}^L d\epsilon_c^{(i)}}{L} \right) + f \cdot G \cdot \left\{ \frac{d\epsilon_c^{(i+1)} - d\epsilon_c^{(i)}}{\Delta y} - \frac{d\epsilon_c^{(i)} - d\epsilon_c^{(i-1)}}{\Delta y} \right\} \cdot \frac{\Delta l^2(k)}{\Delta y} \quad (2)$$

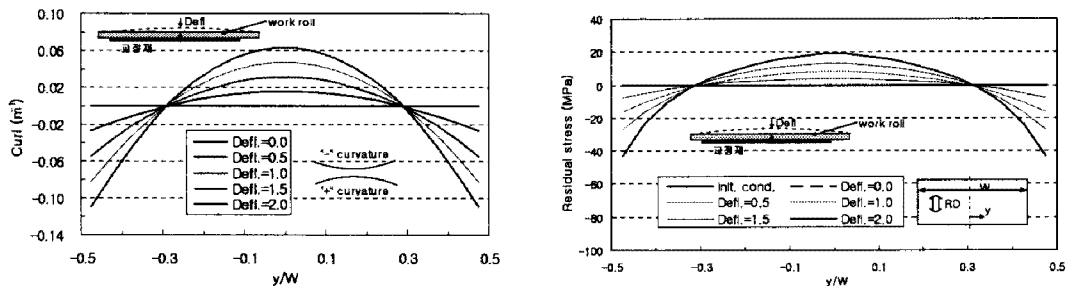
위의 식에서 f 는 교정과정에서의 굽힘 변형 중에 두께 위치 별로 탄성과 소성 부분이 공존하므로 이를 고려하는 계수로 도입하였다. 탄성계수를 E, 소성계수는 대강 0.01E 정도이며, 교정 조건으로 많이 사용되는 소성비 (plastic fraction) 가 85% 조건에서 변형중인 소재의 강성계수는 $0.85 \times 0.01E + 0.15 \times E = E/6.3 \approx E/6.5$ 이므로 $f=1/6.5$ 를 반영하였다.

3. 교정조건에 따른 잔류응력 변화 해석 결과

3.1 잔류응력이 없는 판에서 work roll 의 deflection 이 잔류응력 변화에 미치는 영향

Work roll 의 deflection 에 의한 강판 내 잔류응력 변화를 해석하였다. 소재는 두께가 8.0mm, 항복강도(YS)가 80kgf/mm², 그리고 폭이 1430mm 이며, width division 은 대칭조건을 고려하여 전체의 반폭을 10 등분하였다. 해석 조건은 roller leveler 의 intermesh 는 -1.5 (Entrance) ~ 7.8 (Delivery) 로 설정하였다. 이 조건은 plastic fraction 이 85% 인 조건이다.

초기 잔류응력이 없는 강판에 대하여 상·하부 work roll(길이2670mm)이 2차 곡선으로 deflection 하는 경우의 교정 후 강판 내부 만곡 분포와 잔류응력 분포를 Fig.3 에 정리하였다. Deflection 이 커질수록 만곡 및 잔류응력이 크게 발생함을 알 수 있다. 그리고 교정에서 back up roll 설정에 의한 work roll 의 변형을 최대한 억제하여 소재의 형상 및 잔류응력에 미치는 변형을 최대한 없애야 함을 알 수 있다.



(a) Curl due to work roll deflection

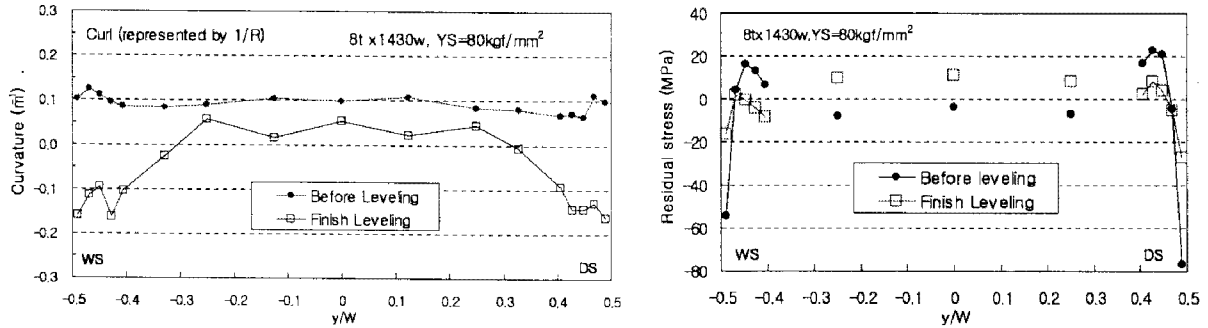
(b) Residual stress due to work roll deflection

Fig.3 Curl and residual stress after leveling through 11 leveling work rolls with 87% plastic fraction condition and some amount of work roll deflection.

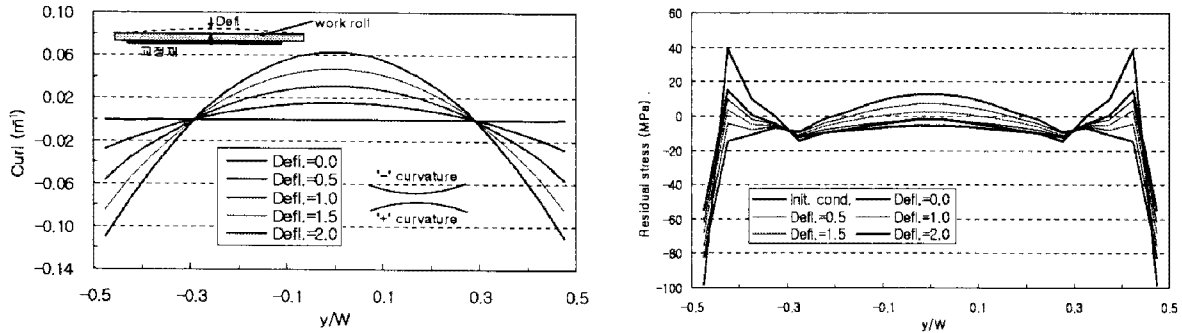
3.2 Work roll 의 deflection 이 잔류응력 변화에 미치는 영향 실험과 시뮬레이션 비교

Fig.4 는 실제 coil center 에서 교정 과정중의 항복강도 80kgf/mm² 수준의 8t 강재에 대한 잔류응력과 형상 변화에 대한 시험 데이터를 박기철[1]과 같은 방법으로 시험하여 정리한 것이다. 그리고 아래의 Fig.5 는 교정 전 소재 (Fig.4 의 (b)) 의 잔류응력과 유사한 수준 및 분포를 가지는

강판으로 교정 과정에서의 변화를 계산으로 구한 결과이다. 실험과 simulation 결과를 비교하면 일단 강판의 만곡 분포에서 leveler 는 교정 시에 약 2mm 수준의 work roll deflection 이 발생하였을 것임을 알 수 있다. 그리고 잔류응력은 실제 실험과 simulation 에서 모두 edge 는 압축응력 쪽으로 그리고 중앙부는 인장응력을 가지는 경향으로 변화하였음을 알 수 있다. 그리고 이러한 simulation 과 실험 결과로부터 해석의 타당성을 확인할 수 있다. 또한 교정한 강판은 교정 전 상태의 coil 에 비하여 형상 및 잔류응력이 불리한 쪽으로 변화되므로 설비 점검이 필요하다고 판단 할 수 있다.



(a) Curl of sheet before and after leveling (b) Residual stress due to work roll deflection
 Fig.4 Curl and residual stress in sheets leveled at cut to length line of a coil center.



(a) Curl due to work roll deflection (b) Residual stress due to work roll deflection
 Fig.5 Curl and residual stress in sheets leveled at cut to length line of a coil center (simulation results at 87% plastic fraction condition).

4. 결론

열연 고강도 강판의 leveling 과정에서 강판의 면내 잔류응력이 변화하는 과정을 해석하는 프로그램을 개발하였다. 교정 중에 교정기의 work roll 이 탄성 변형하여 불균일한 소성변형이 교정 중인 강판에 가해지는 경우에 발생하는 불균일 만곡과 잔류응력의 발생 및 변화 과정을 해석 하였다. 그리고 특정 레벨러에서 교정된 판재의 잔류응력 및 형상을 시험한 결과와 비교하여 해석 프로그램의 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 박기철, 류재화, 2008, 냉간 성형용 열연 고강도 강판의 교정 중 잔류응력 변화와 절단 후 캠버 발생 예측, 한국소성가공학회지, 제17권, 제2호, pp. 107~112.
- [2] Y.Misaka, etc, 1978, Shape Correction of Steel Strip by Tension Leveller, Transactions ISIJ, Vol.18, pp. 478~484.
- [3] 前田恭志, etc, 2003, Residual stress control in steel plate by leveling process, CAMP-ISIJ, Vol.16, pp.392-395.
- [4] T.Matoba, etc, 2001, Residual Stress and Sheet Flatness in Manufacturing of Tin-Gauge Steel Sheets, Vol.42, no.488, pp. 959~963.
- [5] 박기철, 전영우, 정기조, 1997, 박 강판 제조 공정에서의 소재 굽힘 변형과 잔류 만곡 발생 해석, 한국소성가공학회지, 제6권, 제2호, pp. 118~135.