

## 냉연 형상 교정시 Stress 천이 현상 연구

최환택\* · 황상무\*\* · 구진모\*\* · 박기철\*\*\*

### The study of stress distribution of cold rolled Steel sheets in tension leveling process

H. T. Choi, S. M. Hwang, J. M. Koo and K.C. Park

#### Abstract

The shape of cold rolled steel sheets is the degree of flatness, and the flatter, the better. Because undesirable strip shapes of cold rolled steel sheets can affect not only visible problem but also automatic working process in customer's lines, the requirement of the customers is more and more stringent. So we usually used the tension leveler to make high quality of strip flatness. For the improvement of the quality of strip flatness, this report developed three-dimensional FEM (Finite Element Method) simulation model, and analysis about the strain and stress distribution of strip in the tension leveling process.

**Key Words** : Tension leveler, Stress distribution, Strain distribution, Strip shape, Strip flatness, FEM

#### 1. 서 론

냉연강판의 형상이란 강판의 평탄한 정도로 평편할수록 우수한 제품이며, 재질 및 치수와 함께 최종 제품의 등급을 결정하는 주요 인자가 된다. 고장력 하에서 작업하는 냉간압연 공정에서는 강판의 형상이 평탄하지만 압연 중에 불균일 온도분포, 기계적 정밀도 및 조정불량 등을 인한 강판 내부의 불균일 응력 때문에 강판의 형상 불량 발생 하게 된다.

냉연강판의 형상불량은 외형상의 가시적인 문제뿐만 아니라 후 공정에서의 자동화 업무에 지대한 영향을 미치므로 강판의 평탄도에 대한 요구는 가공, 제조 라인의 자동화와 제품 품질경쟁이 치열해지면서 점점 엄격해 지고 있다. 냉연 제조공정 중 레벨링 공정은 최종적으로

형상품질을 제어하는 공정이며, 엄격한 평탄도를 요구하는 제품에 대해서는 일반적으로 텐션 레벨러를 활용한다. 텐션 레벨러는 강판의 길이차이 (국부연신) 를 제거하기 위하여 인장력을 가한 상태에서 급히 변형을 주는 교정 방법이다

본 연구에서는 3차원 유한요소 모델을 최초로 자체 개발하여 텐션 레벨러 공정에서 강판의 변형과 응력 분포를 해석하게 되었는데, 이 모델은 레벨링 전과정 (전,중,후)에 걸쳐 강판의 길이방향, 폭방향의 변형 및 응력분포의 변화, 잔류응력의 변화를 해석할 수 있게 되었다.

#### 2. 이론적 배경

##### 2.1 텐션 레벨러 교정원리

\* 포스코 포항 냉연부

\*\* 포항공대 기계공학과

\*\*\* 포스코 기술연구소 박판연구그룹

텐션 레벨러는 판에 장력을 가한 그대로 굽힘을 반복하여 주게 되면 단순인장의 경우에 비하여 작은 장력에서 재료가 신장 되어 간다는 Swift<sup>(3)</sup> 가 밝혀낸 성질을 이용하고 있다.

Fig.1 는 굽힘과 인장력이 중첩에 의해 연신 변형이 용이하게 얻어지는 기구를 나타낸다. 장력에 의한 인장변형 a-a 는 응력분포도에서는 a'-a' 에 해당된다. 여기에 굽힘을 가하면 변형은 b-b, 응력은 b'-b' 로 되어야 하나, 응력은 항복응력을 초과할 수 없고, 판의 단면에 수직방향의 힘의 합은 일정하기 때문에 결국 c'-c' 의 응력 분포가 된다. 이것은 변형분포도에서는 c-c 에 대응하며 이때 중앙면에 생기는 변형 0e 는 단순인장변형 0d 보다 커지게 된다. 이 인장변형 0e 는 장력과 곡률이 커질수록 커지게 된다.

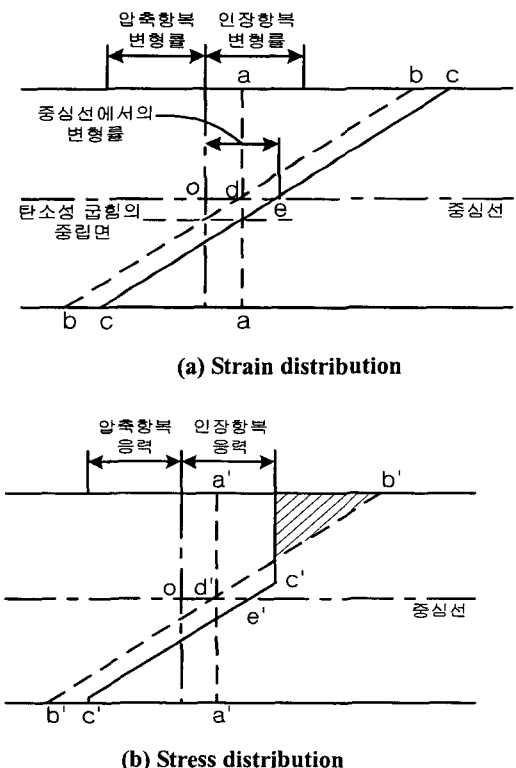


Fig. 1 Strain and stress distribution at bending under tension process

2.2 유한 요소 해석 모델

판의 응력과 변형에 대한 평형 방정식은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_j = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2.1)$$

변형을 속도간 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}'_{ij} = \dot{\epsilon}'_{ij} - \dot{\epsilon}^P_{ij} \quad (2.2)$$

위의 응력과 변형에 대한 평형 방정식에 기계적 경계 조건을 적용하여 변동식을 세우고 이에 대한 Divergence theorem 을 적용하고 정리하여 최종식을 구성하면 다음과 같다.<sup>(9)</sup>

$$\int_{\Omega} \Delta T_{ij}^{n+1} w_{j,i} d\Omega + \int_{\Omega} T_{ij}^n w_{j,i} d\Omega - \int_{\Omega} \rho_{n+1} b_j w_j d\Omega - \sum_{j=1}^3 \int_{\Gamma_j^{n+1}} \bar{t}_j^{n+1} w_j d\Gamma = 0 \quad (2.3)$$

위의 식에서  $T_{ij}^{n+1}$  은  $T_{ij}^{n+1} = T_{ij}^n + \Delta T_{ij}^{n+1}$  의 관계를 이용하여 구해지는 Piola-Kirchhoff stress 이며, 다음과 같이 근사화 할 수 있다.<sup>(10)</sup>

$$\Delta T_{ij}^{new} = \Delta \tau_{ij}^{J(new)} - \Delta \epsilon_{im}^{new} \tau_{mj}^{n+1} - \tau_{im}^{n+1} \Delta \epsilon_{nj}^{new} + \tau_{im}^{n+1} \Delta u_{j,i}^{n+1} \quad (2.4)$$

$$\Delta \tau_{ij}^{J(new)} = 2\mu \left( \Delta \epsilon_{ij}^{new} - \Delta \epsilon_{ij}^{Pnew} \right) + k \left( \Delta \epsilon_{kk}^{new} \right) \delta_{ij} \quad (2.5)$$

앞의 식에서  $\tau_{ij}^J$  는 Kirchhoff stress 의 Jauman rate 를 의미한다.

위의 식들과 응력의 항복 조건식의 만족에는 Krieg and Krieg<sup>(11)</sup> 의 Radial Return algorithm 을 사용하여 판의 응력과 변형에 대한 경계치 문제를 해석 하였다.<sup>(12)</sup>

위의 탄소성 변형 해석 모델을 적용한 프로그램을 개발하여 실제 텐션 레벨러에서 냉연 강판의 형상 교정 과정에서의 판의 변형 및 유효 응력, 유효 변형 등을 시뮬레이션 하였고, 그 결과를 형상 교정 해석에 적용하여 연계 해석하여 판의 변형 및 응력의 분포도를 얻었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 텐션 레벨러 시뮬레이션

본 시뮬레이션은 텐션 레벨러 공정에서 형상(Wave)의 변화 및 교정 과정을 연구하기 위해서 3 차원으로 유한 요소법으로 수행하였으며 텐션 레벨러 공정 중 형상에 관련된 유닛트 1,2 부분으로 개략도는 Fig.2 와 같고, 소재조건은 Table.1 과 같다.

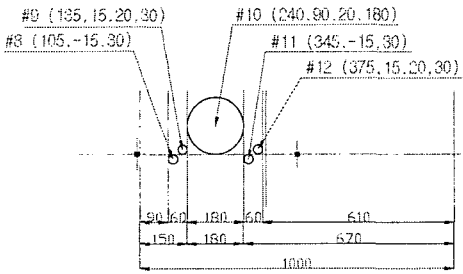


Fig. 2 Layout of Tension Leveler for 3-dimension simulation.

Table. 1 Mechanical properties of tested sheets.

소재	두께 (mm)	YS (kgf/mm <sup>2</sup> )	TS (kgf/mm <sup>2</sup> )	EL (%)
T4	0.20	30.2	44.7	23.5

3.1.1 텐션 레벨러 롤 포지션 전

텐션 레벨러 롤 포지션 전 강판의 길이방향 응력분포로 초기 급준도가 1.0%의 이파에 해당하는 값을 초기 응력값으로 부여하면 강판의 에지부는 압축응력이 센터부는 인장응력이 작용하고 있는데 응력 값의 차이는 5.2kgf 수준이다.

3.1.2 텐션 레벨러 롤 포지션 후

Fig.3는 텐션 레벨러 롤 포지션 된 상태와 그때의 응력분포를 보여준다. 강판의 양 끝은 고정된 조건이므로 에지부와 센터부는 인장응력을 받게 되고 응력 값의 차이는 약 2.7kgf 수준으로 줄어 든다.

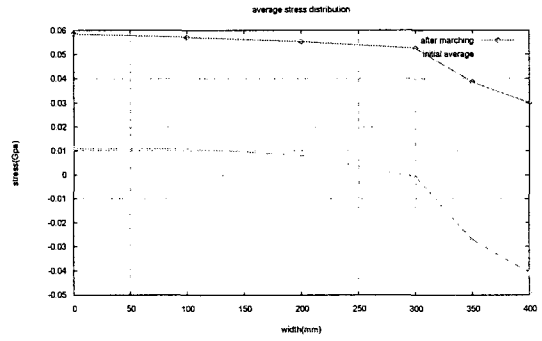
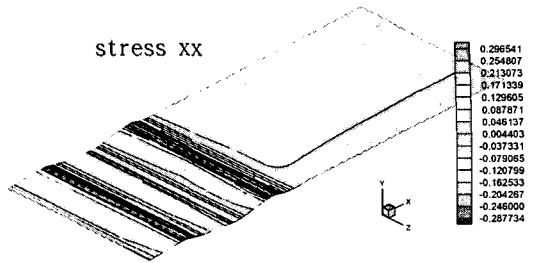
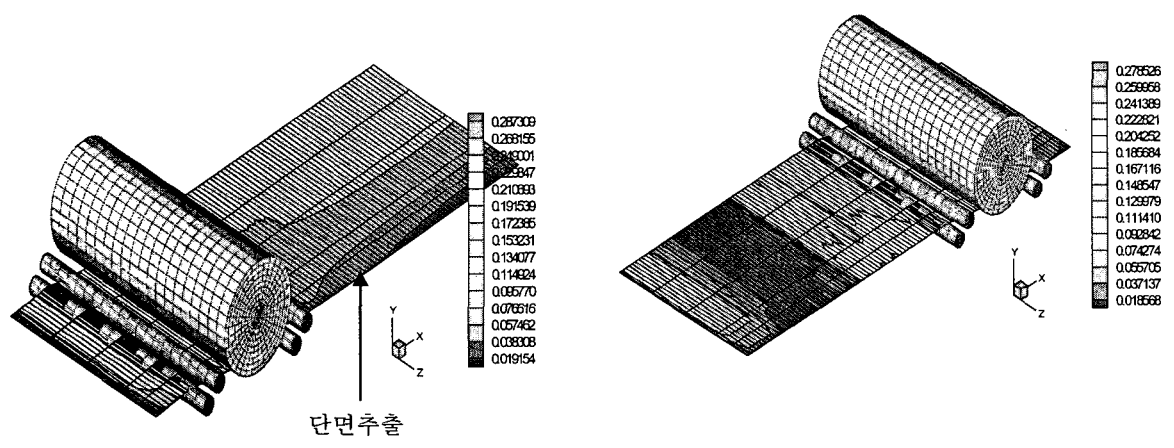


Fig. 3 Stress distribution after leveler roll position.

3.1.3 텐션 레벨러 롤 510mm 전진 후

텐션 레벨러 롤 을 510mm 전진 후의 상태와 그때의 응력분포를 Fig.4에 나타내는데 단면 추출 지점은 레벨러 롤 후방에서 전방으로 전진 하였음을 보여준다. 강판의 양 끝은 고정된 상태이므로 에지부와 센터부는 인장응력을 받고 응력 값의 차이는 약 2.4kgf 수준으로 줄어 들었다.



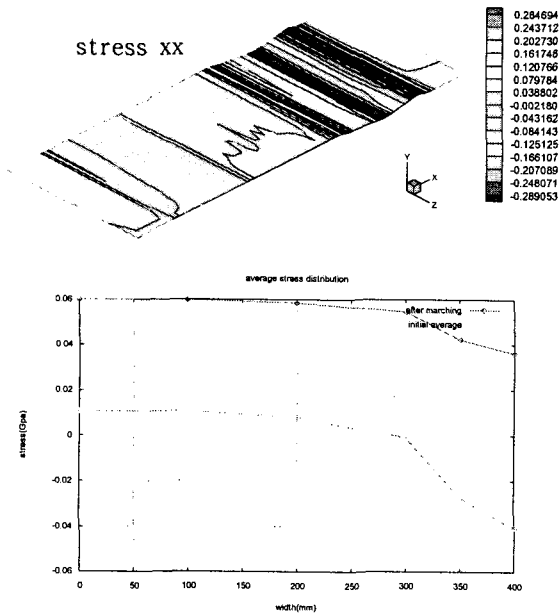


Fig. 4 Stress distribution after 510mm passing the leveler.

### 3.1.4 텐션 레벨러 를 제거 후

텐션 레벨러 를 제거 및 장력을 오프 상태 일때 잔류응력 값의 차이는 약 0.45kgf 수준으로 급준도로 환산하면 당초 1.0%에서 0.294% 로 개선 들었다.

### 3.2 인터메시에 따른 변형과 응력분포

Fig.5 는 인터메시에 따른 소성 유효 변형의 변화를 보여 준다. 인터메시가 증가 할수록 변형이 증가함을 알 수 있다.

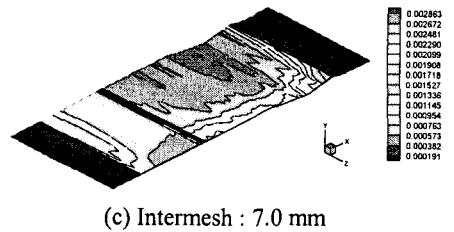
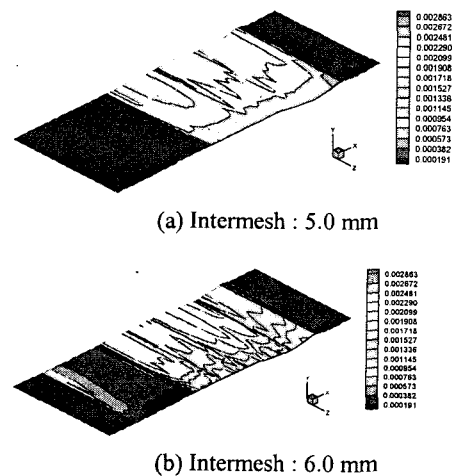


Fig. 5 Plastic effective strain distributions depend on intermesh.

Fig.6 은 인터메시에 따른 강판의 폭, 두께 방향 응력 분포의 변화를 보여 준다. 인터메시가 증가 할수록 응력의 변화가 증가함을 알 수 있다.

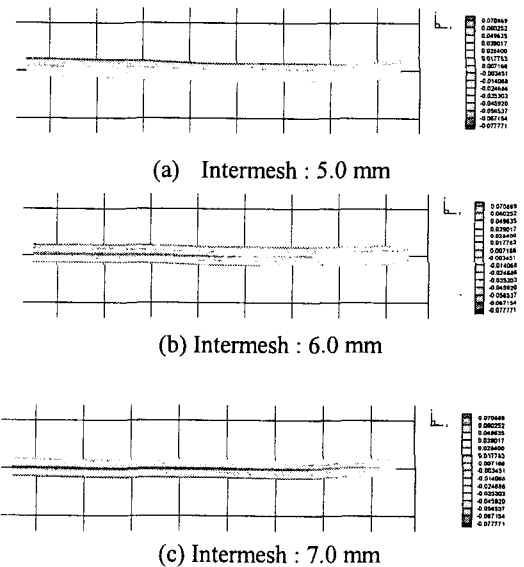


Fig. 6 Strain distributions depend on intermesh.

Fig.7 은 인터메시 변경에 따른 최종 급준도로 나타내는데, 인터메시 값이 증가 할수록 최종 잔류하는 응력 차가 감소하여 최종 급준도가 감소 함을 알 수 있다.

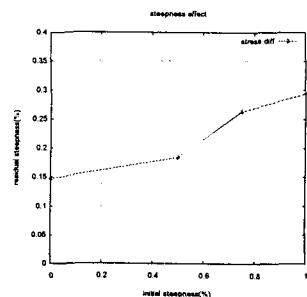
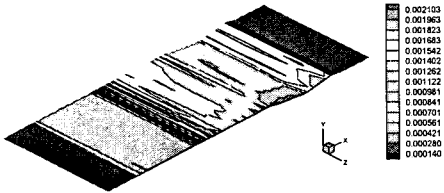


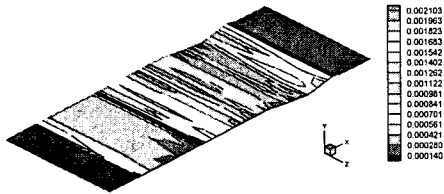
Fig. 7 Residual steepness depend on intermesh.

### 3.3 초기 급준도에 따른 변형과 응력분포

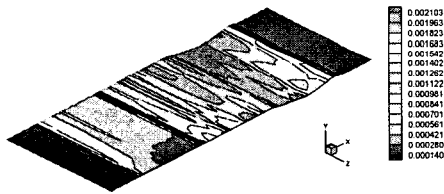
Fig.8 은 초기 급준도가 0.0%, 0.5%, 0.75% 1.0%인 경우에 소성 유효 변형의 변화를 보여 준다. 초기 급준도가 증가 할수록 변형이 증가함을 알 수 있다.



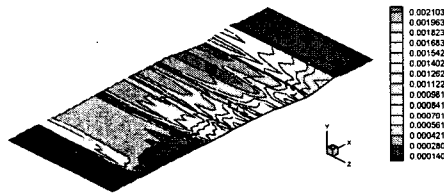
(a) Initial Steepness : 0.0%



(b) Initial Steepness : 0.5%



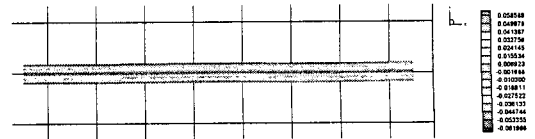
(c) Initial Steepness : 0.75%



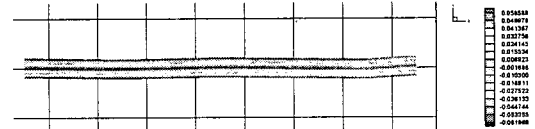
(d) Initial Steepness : 1.0%

Fig. 8 Plastic effective strain distributions depend on initial steepness.

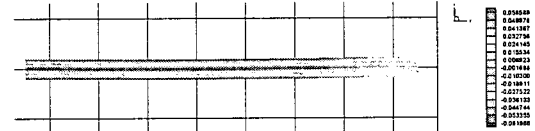
Fig.9 은 초기 급준도에 따른 강판의 폭, 두께 방향 응력 분포의 변화를 보여 준다. 초기 급준도가 0.0% 일때는 응력의 분포가 균일하나 초기 급준도가 증가 할수록 에지부의 응력의 변화가 증가함을 알 수 있다.



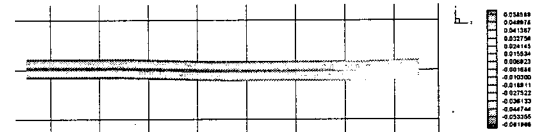
(a) Initial Steepness : 0.0%



(b) Initial Steepness : 0.5%



(c) Initial Steepness : 0.75%



(d) Initial Steepness : 1.0%

Fig. 9 Strain distributions depend on initial steepness.

Fig.10 은 초기 급준도에 따른 최종 급준도의 영향을 나타내는데, 초기 급준도가 증가 할수록 최종 잔류하는 응력차가 증가하고 최종 급준도가 증감 함을 알 수 있다.

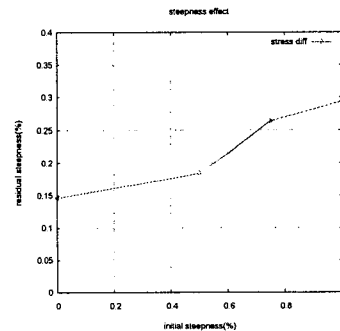


Fig. 10 Residual steepness depend on initial steepness.

## 4. 결론

본 연구의 수행을 통하여 유한 요소법(FEM)에 의한 최초의 3차원 텐션 레벨러 형상 예측 모델이 개발 되어, 가시적인 효과 뿐만 아니라

보다 정확한 형상 예측이 가능하게 되었다.

텐션 레벨링 전 과정 (전, 중, 후)에 걸쳐 길이, 폭, 두께 방향으로 응력변화, 변형변화 및 잔류응력의 변화 등의 데이터를 수집 및 분석 가능하게 되었다.

본 시뮬레이션 결과를 요약하면,

(1) 인터메시가 증가하면 잔류응력 차가 감소되어 급준도가 개선 됨을 알 수 있었다.

(2) 초기 급준도가 작을수록 최종 급준도는 보다 개선됨을 확인 하였다.

금번 연구에서는 급준도 예측 모델이 개발이 되었으므로 온-라인 급준도 예측 모델화의 기반이 마련 되었고, 향후 온-라인 반곡 예측 모델 및 온-라인 잔류응력 예측 모델이 개발되면 텐션 레벨러 공정에서 완전한 형상 예측 모델이 될 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- (1) T. Masui, 1994, “판재교정기술의 현상과 동향”, 소성과 가공, pp. 94-95.
- (2) 일본소성가공협회, 1991, “교정가공”
- (3) H.W.Swift, 1948, “Engineering”, 166-Oct, p. 333
- (4) 曾田長一郎, 1969, 소성과 가공, 10-107, p. 853
- (5) M.G.Kinnavy, 1972, “Recent developments in tension leveling”, Iron and Steel Engineer, pp. 605-610.
- (6) Y. Misaka and T.Masui, 1976, “Shape correction of steel strip by tension leveler”, JSTP, Vol.17, No.191, pp. 988-994.
- (7) 山本直道, 1971, 昭49春塑加講論, p. 105.
- (8) 美坂佳助 등, 1976, JSTP, 17-191, p. 988.
- (9) C.G. Sun, C.S. Yun, J.S. Chung and S.M. Hwang, 1998, Metall. Master. Trnas. A, Vol.29A p. 2407..
- (10) S.I. Oh, T. Altan and S. Kobayashi, 1989, “Metal Forming and The Finite-Element Method”, Oxford University Press.
- (11) R.D. Krieg, D.B. Krieg, 1977, J. Pressure Vessel Technology, November, p.510
- (12) Manabe.K, Hwang.Z and Ueda.K, 1996, Journal-Japan Society for Precision Engineering, Vol. 62, p.1151.
- (13) S.P.Timoshenko and J.M.Gere, 1961, “Theory of Elastic Stability”, McGraw-Hill Book Company.
- (14) T.Hira, H.Abe and S.Azuma, 1988, “Analysis of sheet metal deformation under repeated bending in processing lines and its application”, 川崎製鐵技報 20(1) pp.7-13.