

탄소성 유한요소법을 이용한 금속인장교정기의 공정변수 설계

박상래* · 이형욱* · 허 훈*

Parametric Process Design of the Tension Levelling with an Elasto-plastic Finite Element Method

S. R. Park, H. W. Lee and H. Huh

Abstract

This paper is concerned with a simulation-based process design for the tension levelling of metallic strips based on the elasto-plastic finite element analysis with reduced integration and hourglass control. The tension levelling process is performed to elongate the strip plastically in combination of tensile and bending strain by a controlled manner so that all longitudinal fibers in the strip have an approximately equal amount of length and undesirable strip shapes are corrected to the flat shape. The analysis deals with a method for calculating the quantitative level of the curl to investigate the roll arrangements and intermesh suitable to elimination of the curl. The analysis provides the information about the intermesh effect on the amount, the tension effect and distribution of the strain as well as the stress in order to determine the amount of elongation for correction of the irregular shape. The desired elongation is referred to determine the number of work rolls and the value of tension. Especially, the analysis investigates the effect of the mesh size in the non-steady state finite element analysis on the amount and distribution of the strain.

Key Words : Tension Levelling, Intermesh, Elasto-plastic Finite Element Analysis

1. 서 론

현재 자동차와 항공기, 선박 등 기계 산업 전반에서 널

리 사용되고 있는 박판 금속은 일반적으로 냉간 압연이
나 열간 압연에 의해서 생산되고 있는 데, 압연기술의
비약적인 발전으로 인해 압연 판재의 품질이 크게 향상

* 한국과학기술원 기계공학과

되었지만, 현재까지도 압연 후 판재의 형상과 표면, 품질의 결함은 여전히 계속해서 발생하고 있다. 이러한 압연재의 품질 결함은 압연 판재의 실제 사용에 많은 제약을 주고 있으며, 불량률의 원인으로 작용하여 크게 문제가 되고 있다. 금속 판재의 품질이나 형상 결함에는 Curling, Guttering, Wavy Edge, Center Buckling 등이 있는데, Curling은 길이 방향으로 판재가 휘어지는 것이고 Guttering은 폭 방향으로 판재가 휘어지는 것이며, Wavy Edge는 판재의 모서리 부분이 꼬불꼬불하게 되는 것이고 Center Buckling은 판재의 중간부에서 발생하는 결함이다.⁽¹⁾ 금속 판재의 이러한 형상결함을 제거하고 판재의 품질을 개선하기 위해서 롤러 교정기(Roller Leveller), 늘림 교정기(Stretch Leveller)에 의한 교정기술이 먼저 도입되었는데, 롤러 교정기는 롤을 구동시켜 판재에 반복적인 굽힘을 가해 판재의 평탄도를 개선하는 교정기이고 늘림 교정기는 판재에 인장력을 부가해서 판재를 교정하는 기술이다. 롤러 교정기나 늘림 교정기는 파이프나 폭이 좁은 판재에 대해서는 어느 정도 판재의 형상결함을 제거할 수 있지만 폭이 넓은 금속 판재를 교정하는 데에는 문제가 있다. 그래서 오늘날 고품질의 평단도가 요구되는 판재를 원하는 소비자들의 요구가 증대됨에 따라 새로운 판재의 형상교정기술인 인장 교정기(Tension Leveller)가 도입되게 되었다.

현재까지의 실험적인 연구 및 분석으로 Misaka와 Masui⁽²⁾는 판재의 형상결함을 측정하는 방법을 제시하였고, 실험을 통해 평탄도가 불량한 판재를 교정하기 위해 필요한 신장률을 0.3~0.5%로 결정하고 이러한 신장률을 얻기 위해 유효곡률반경을 실험으로 결정해서 압하량의 변화에 따른 형상교정에 필요한 인장력의 변화를 고찰하였다. Patula⁽³⁾는 인장교정 중에 발생하는 에너지 소모량을 실험과 간단한 수치해석을 통해 밝혀냈고 판재가 롤에 감히는 영역을 구분해서 판재의 두께 방향을 따라 그 영역에서 발생하는 응력을 간단하게 이론적으로 제시하였다. 또한 Hattori 등⁽⁴⁾은 Curling, Guttering을 예측할 수 있는 간단한 수학적 모델을 세우고 이를 실험을 통해서 다시 수정하는 방법을 제안하였고, 또한 인장교정기(tension leveler)에 있어서 롤 개수에 따른 판재의 형상교정에 관해 연구를 수행하였는데, 작업롤(work roll)이 많은 인장교정기는 작업롤이 적은 인장교정기에 비해 판재의 결함을 더 쉽게 제거할 수 있었고 교정롤이 많은 인장 교정기는 압하량, 인장력, 판재의 두께의 변화는 판재의 결함의 제거하는 데 크게 영향을 주지 않는다는 결론을 내렸다. 또한 Hibino⁽⁵⁾는 두께와 종류가 다른 여러 가지 재료에 대해 실험으로 교정변형률을 측정하였

고 변형률의 최대값이 판재와 롤이 직접 접촉하는 지점에서 발생되지 않는다는 사실을 실험을 통해 밝혀냈다.

수치적인 방법으로 Kawaguchi⁽⁶⁾는 판재가 롤에 감기는 지점에서 판재의 작업곡률과 롤들 사이에서 판재의 변형률을 기하학적 형상을 고려하여 수치적으로 먼저 예측하고, 롤 바로 위에서 판재의 접선 방향의 각도를 먼저 계산한 다음, 전체적인 휨각(wrapping angle)을 계산하고 이를 바탕으로 강소성 구성방정식을 사용해서 판재의 형상교정에 필요한 인장력과 작업롤(work roll)의 직경, 압하량(roll-intermesh)을 얻었다. 또한, Kajiwara 등⁽⁷⁾은 판재의 작업반경(work radius)은 판재가 롤을 감고 지나가기 전까지는 롤의 반경에 영향을 받지 않으며, 인장 교정 후에 판재의 가공경화가 Curling과 Guttering에 크게 영향을 미치는 것을 밝혀내었다. 최근 Yoshida와 Urabe⁽⁸⁾는 평면변형률 조건 하에 2차원 탄소성 유한요소 프로그램을 개발해서 인장 교정기의 한 유니트에 대하여 인장을 먼저 부가한 후에 압하량을 부가해서 원하는 교정 변형률을 얻을 때까지 롤피치(roll pitch)를 변화시키는 방법을 사용하였다. 또한 가공경화를 고려하여 판재의 이동라인(stream line)을 따라 여러 개의 작업 롤의 압하량이 점차 줄어들도록 작업 롤의 높이를 결정해서 잔류곡률을 줄이는 방법을 제시하였다. 본 논문에서는 상용코드인 ABAQUS/ Standard⁽⁹⁾ 이용한 탄소성 유한요소해석을 바탕으로 인장교정기의 하나의 유니트에 대해 압하량과 인장력의 변화에 따른 변형률과 응력의 분포를 찾아내고 인장교정 후 스프링백에 의한 판재의 최종적인 성형형상을 살펴보고 판재의 잔류곡률의 분포를 밝혀내서 이를 최소화 할 수 있는 공정변수의 설계 방안을 제시한다.

2. 해석 모델 및 조건

인장교정 공정에 대한 탄소성 유한요소 해석에 사용된 모델은 Fig.1과 같고 압하량(Intermesh)에 의한 굽힘에 의해 Curling이나 Guttering과 같은 판재의 형상결함들을 제거하는 데 주로 사용되는 인장교정기의 한 유니트이다. 또한 해석에 사용된 재료는 자동차 강판용 재료로 많이 쓰이는 SPEN이며 사용된 물성치와 판재의 형상과 롤의 크기는 다음과 같다.

탄성계수 : 190GPa

포와송비 : 0.3

항복곡선 : $\bar{\sigma} = 533.252(0.006504 + \bar{\epsilon}^p)^{0.2557}$ MPa

판재와 롤의 마찰계수 : 0.0

작용한 인장력 : 50MPa

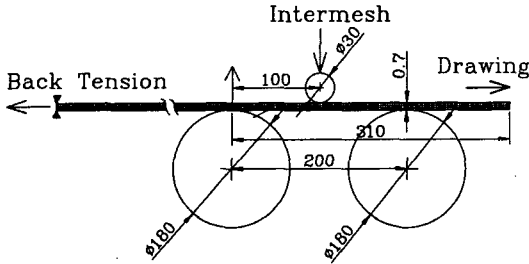


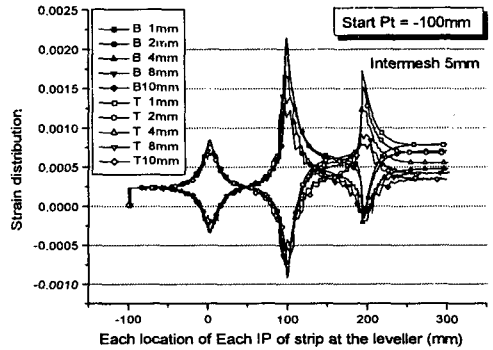
Fig. 1 Unit finite element model for a set of tension bridles in the analysis of tension levelling

3. 인장교정 공정 해석 및 결과

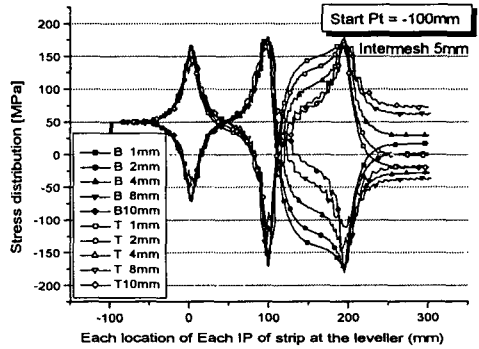
사용된 판재(Strip)의 요소 크기는 1mm, 2mm, 4mm, 8mm, 10mm이며 두께 방향으로 4개로 분할한 경우에 요소크기 변화에 따른 적분점에서의 변형률과 응력의 분포를 살펴보면 Fig.2과 같은데, 요소의 크기가 작을수록 변형률과 응력의 크기는 상대적으로 커지고 있음을 알 수 있다. 또한 요소크기가 1mm, 2mm 일 때만 최대 변형률과 응력분포를 제대로 표현하고 있고 교정 후에 일정변형률의 차이가 상대적으로 적음을 알 수 있다.

한편, Fig.3에는 두께 방향의 아래위의 적분점에서의 최대변형률과 교정 후의 일정변형률이 나타나 있는데, 1mm, 2mm 일 때 최대 변형률의 차이는 상대적으로 크지만 교정 후의 일정변형률의 차이는 0.0001로 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 해석 시간을 살펴 볼 때, 요소크기 1mm 일 때는 슈퍼컴(Cray90)에서 15시간 정도 소요되었지만 2mm 일 때는 4시간 정도 소요되었기 때문에 경제성과 정확성을 고려한다면 0.01% 정도의 변형률의 오차를 예상하고 2mm로 해석을 수행해도 아무런 문제가 없다. 또한 Fig.4에는 요소크기가 2mm인 판재의 두께 방향의 각 적분점에 대하여 하나의 유니트를 지나가는 변형률과 응력분포의 과정을 인발량에 따라 나타내었다. 변형률의 경우 가운데 롤에서 최대값을 가지면서 아래위쪽의 판재의 변형률의 크기가 대칭을 이루며, 두께 방향을 따라 선형으로 변화하는 것을 알 수 있지만, 응력의 경우에는 반복적인 인장과 압축을 받았기 때문에 두께 방향을 따라 응력분포가 비선형적으로 나타나는 것을 알 수 있다.

한편 교정 후에 변형률의 분포가 관측지점 이후에는 일정해져야 하는 것이 중요한데, Fig.5에는 관측점의 위치에 따른 Lagrangian관점에서 살펴본 일정변형률의 분



(a) strain history



(b) stress history

Fig. 2 Strain and stress history at the designated point with the variation of the mesh size; (a) strain history; (b) stress history

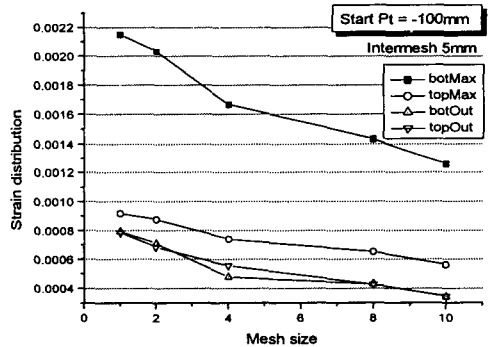
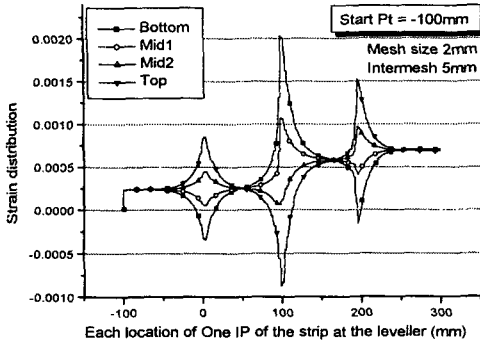
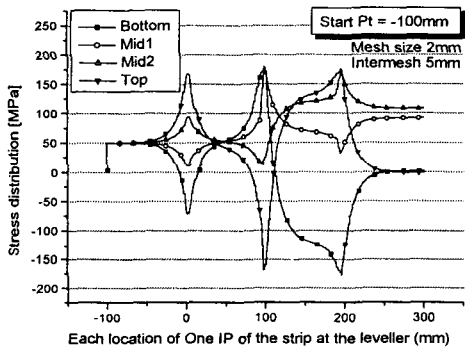


Fig. 3 Maximum strain at the upper and lower surface with respect to the mesh size

포를 나타내고 있다. 관측지점은 첫번째 롤에서 30mm, 50mm, 60mm, 70mm, 80mm, 90mm, 100mm 떨어진 지점이고, 80mm 이후에서는 교정과정 전체에 있어서 변형



(a) strain history



(b) stress history

Fig. 4 Strain and stress history at the designated point along the thickness direction with respect to the drawing location; (a) strain history; (b) stress history

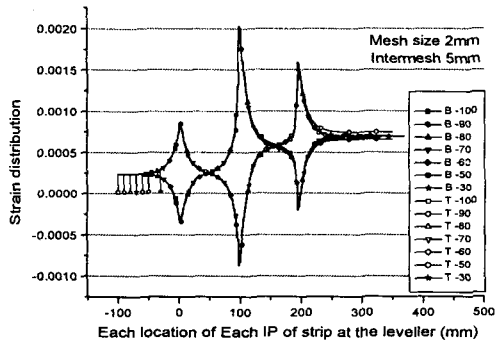


Fig. 5 The steady state of strain history at different designated points passing through the three roller set

롤의 분포가 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig.6에는 Eulerian관점에서 살펴본 롤 사이에서의 판재의 형상을 나타내고 있다. 인발량이 10mm 이상이면 그

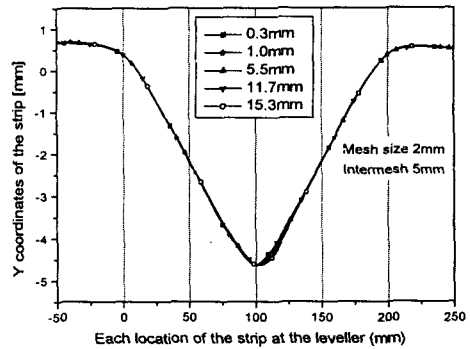


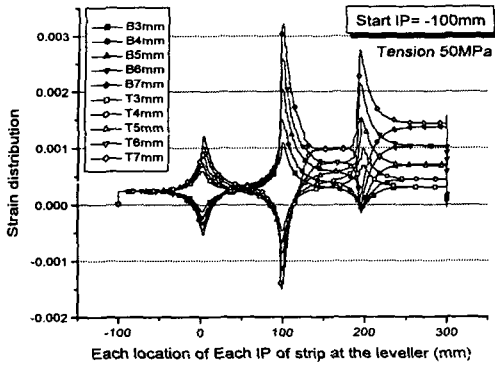
Fig. 6 The steady state of deformed shape of a strip passing through the three-roller set with the amount of drawing

후로는 롤 사이의 판재의 형상이 일정해지는 것을 알 수 있다.

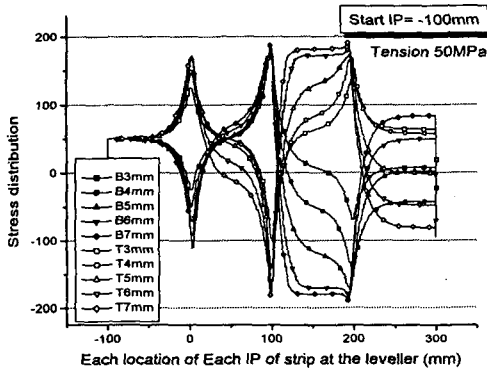
이상에서 알 수 있는 바와 같이 인장교정 공정에 필요한 요소의 크기는 경제성을 고려하여 2mm로 선정할 수 있으며, 교정구간은 롤의 영향이 없는 80mm지점에서 120mm 지점까지 구간을 선정할 수 있다. 또한 교정 후에 판재의 아래위의 일정변형률의 차이는 무시할 수 있을 정도로 작았지만, 스프링백을 수행하면 이 차이는 커질 것으로 예상된다.

이러한 판재의 요소크기에 대한 탄소성 유한요소 해석을 바탕으로 압하량과 인장력의 변화에 따른 변형률과 응력의 분포, 일정변형률(Steady strain)과 스프링백 후의 판재의 잔류변형률, 판재의 최종적인 형상 등을 고찰하고 분석한다.

먼저 압하량(Intermesh)의 변화량의 따른 응력과 변형률의 분포를 살펴보면 Fig.7과 같다. Lagrangian관점에서 첫번째 롤에서 100mm 떨어진 관측지점에서 살펴본 판재의 아래위의 변형률의 분포는 각각의 롤을 지날 때마다 그 값이 증가되는 것을 알 수 있고, 압하를 부근에서 최대변형률을 가지는 것을 알 수 있으며 상대적으로 그 크기는 압하량이 증가할수록 값이 커지는 것을 알 수 있다. 또한 일정변형률의 크기도 압하량이 증가할수록 값이 커지는 것을 알 수 있다. 한편 판재의 아래부분과 위쪽 부분의 적분점에서 살펴보았을 때, 응력의 크기도 각각의 롤을 지날 때마다 그 크기가 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 재료의 경화현상 때문에 응력의 크기 증가는 상대적으로 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 판재의 아래위의 적분점에서 일정변형률의 크기 차이는 거의 없지만 스프링백 후에는 잔류변형률의



(a) strain history

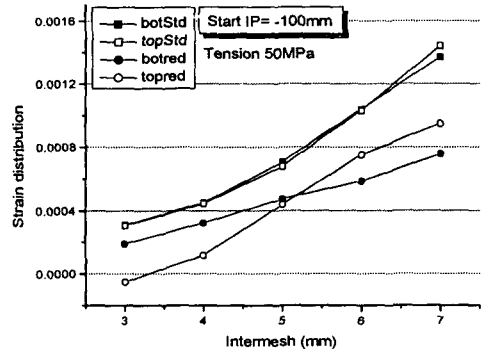


(b) stress history

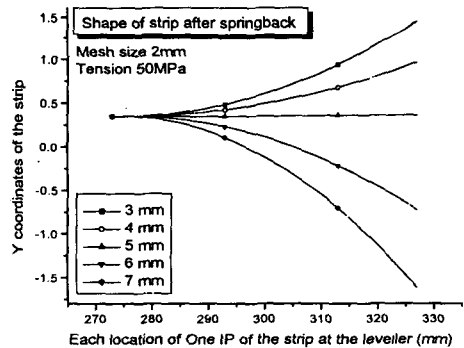
Fig. 7 Strain and stress history at the designated point with the variation of the intermesh; (a) strain history; (b) stress history

차이가 훨씬 커짐을 Fig.8 (a)에서 알 수 있으며 압하량 3mm, 4mm, 5mm에서는 판재의 아래쪽의 잔류변형률이 위쪽보다 크며, 압하량 6mm, 7mm를 부가했을 때는 판재의 아래쪽의 잔류변형률보다 위쪽의 잔류변형률이 더 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 잔류변형률 양상은 최종적인 판재의 형상에 가장 큰 영향을 주게 된다. Fig.8 (b)에는 스프링백 후의 교정된 판재의 형상을 도시하였는데, 인장력이 일정한 상태에서 압하량의 변화에 따라 판재의 최종적인 형상이 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 즉, 압하량 3mm, 4mm, 5mm일 때는 압하률의 굽힘에 의한 변형이 판재의 아래쪽에서 다른 지지물들에 의해 발생한 변형보다 상대적으로 커서 교정 후에는 판재의 아래쪽의 잔류변형률이 더 크게 발생하여 판재가 위쪽으로 휘어지는 것을 알 수 있다. 그러나 압하량 6mm, 7mm에서는 압하률에서 최대변형률이 발생하지만 상대적으로 다른 지지물들에서 발생하는 변형률이 커서

교정 후 스프링백에 잔류변형률이 판재의 위쪽에서 더 크게 발생하여 판재가 최종적으로 아래쪽으로 휘어지는 것을 알 수 있다. 이상에서 알 수 있는 바와 같이 인장 교정이 끝나고 스프링백을 수행한 경우, 압하량이 증가할수록 판재의 잔류변형률이 판재의 아래쪽보다 위쪽이 커서 판재가 아래쪽으로 휘어지는 것을 알 수 있다. 그러므로 압하량을 변화시켜 판재의 최종형상이 아래쪽으로 휘어지게 만들거나 위쪽으로 휘어지게 만들거나 또는 판재를 평평하게 할 수도 있음을 알 수 있다.



(a) residual strain

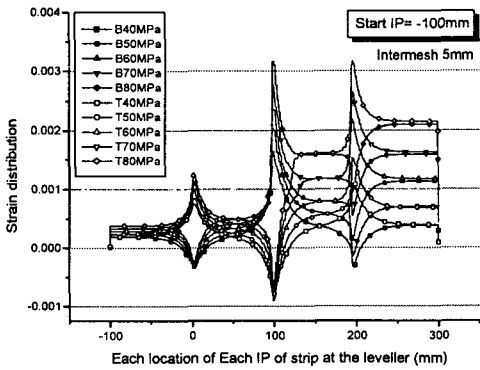


(b) deformed shape

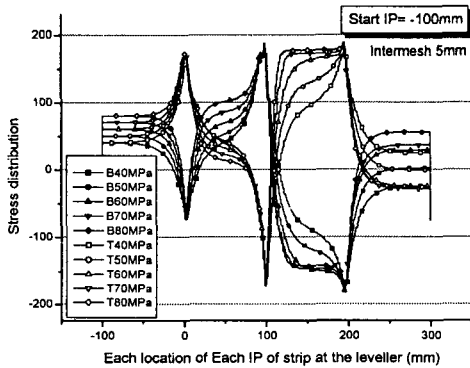
Fig. 8 Residual strain and deformed shape of the strip by the springback after tension levelling; (a) residual strain; (b) deformed shape

두번째로 인장력(Tension)의 변화에 따른 응력과 변형률의 분포를 살펴보면 Fig.9와 같다. Lagrangian관점에서 살펴본 첫번째 롤에서 100mm 떨어진 관측지점에서 판재의 아래위의 변형률의 분포는 각각의 롤을 지날 때마다 그 값이 증가되는 것을 알 수 있고 압하률 부근에서 최대변형률을 가지는 것을 알 수 있으며 상대적으로 그 크기는 인장력이 증가할수록 값이 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 판재의 아래위의 일정변형률의 크기는 압

하량을 증가시킬 때 보다 인장력을 증가시킬 때 상대적으로 그 크기가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 한편, 판재의 아래위의 적분점에서 살펴보았을 때 응력의 크기는 각각의 롤을 지날 때마다 그 크기가 점점 증가하는 것을 알 수 있지만 재료의 경화현상 때문에 응력의 크기 증가는 상대적으로 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 롤 부근에서 판재의 아래쪽과 위쪽의 응력의 차이가 크게 증가하는 것을 알 수 있다.



(a) strain history

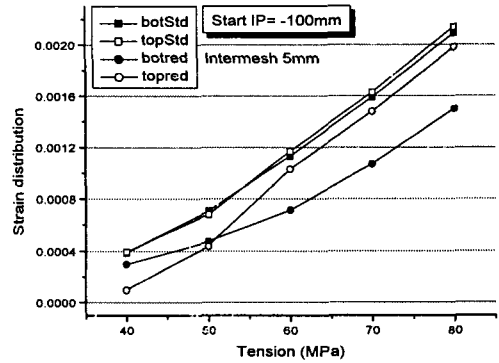


(b) stress history

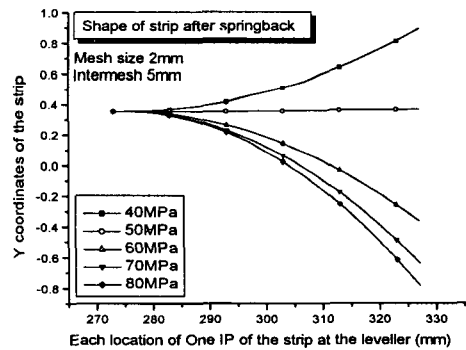
Fig. 9 Strain and stress history at the designated point with the variation of the tension; (a) strain history; (b) stress history

또한 판재의 아래위의 적분점에서 인장력의 변화에 따른 일정변형률과 잔류변형률의 변화를 Fig.10에 도시하였는데, 인장력이 증가함에 따라 일정변형률과 잔류변형률의 크기는 상대적으로 커지는 것을 알 수 있으며, 인장교정 후에 판재의 아래위의 일정변형률의 크기 차이는 거의 없지만 스프링백 후에 잔류변형률의 차이가 훨씬 커짐을 Fig.10 (a)에서 알 수 있다. 즉, 판재의 아래위의 잔류변형률의 차이가 스프링백 후에 증가되며, 인장

력 40MPa, 50MPa에서는 판재의 아래쪽의 잔류변형률이 위쪽보다 크며, 인장력 60MPa, 70MPa, 80MPa를 부가했을 때는 판재의 아래쪽의 잔류변형률보다 위쪽의 잔류변형률이 더 크다는 것을 알 수 있다.



(a) residual strain



(b) deformed shape

Fig. 10 Residual strain and deformed shape of the strip by the springback after tension levelling; (a) residual strain; (b) deformed shape

또한, Fig.10 (b)에는 스프링백 후의 교정된 판재의 형상을 도시하였는데, 인장력이 일정한 상태에서 인장력의 변화에 따라 판재의 최종적인 형상이 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 인장력 40MPa, 50MPa에서는 압하롤의 굽힘에 의한 변형이 판재의 아래쪽에서 다른 지지롤들에 의해 발생한 변형보다 상대적으로 커서 교정 후에는 판재의 아래쪽의 잔류변형률이 더 크게 발생하여 판재가 위쪽으로 휘어지만 인장력 60MPa, 70MPa, 80MPa를 부가했을 때는 압하롤에서 최대변형률이 발생하지만 상대적으로 다른 지지롤들에서 발생하는 변형률이 더 커서 스프링백 후에 잔류변형률이 판재의 위쪽에서 더 크게 발생하여 판재가 최종적으로 아래쪽으로 휘어지는 것

을 알 수 있다.

4. 결 론

이상에서 알 수 있는 바와 같이 인장교정 고정을 해석하기 위해서 먼저 해의 정확성과 시간, 그리고 경제성을 고려하여 탄소성 유한요소 해석에 필요한 금속판재의 요소 크기를 2mm로 결정하였고, 교정구간은 롤의 영향이 배제된 첫 번째 롤에서 80mm 떨어진 지점에서 120mm 지점까지이고 그 교정거리는 40mm로 선정했다. 그리고 Lagrangian관점에서 인발(drawing)에 따른 변형률의 분포가 롤에서 80mm 이상 떨어지면 일정해지는 것을 확인했고, Eulerian관점에서 인발량이 10mm 이상이면 롤 사이의 판재이 형상이 일정해지는 것을 밝혀냈다. 이러한 결과를 바탕으로 결함이 포함되지 않은 금속판재에 대한 2차원 탄소성 유한요소 해석을 수행한 결과, 인장력과 압하량의 변화에 따라 인장교정 공정 후에 판재의 최종적인 형상이 크게 달라져 판재를 아래쪽으로 휘어지게 만들거나 위쪽으로 휘어지게 만들거나 또는 평평하게 할 수 있음을 밝혀 냈다. 그러므로 이상의 탄소성 유한요소 해석 결과는 전체 인장교정 공정을 해석하는 데 있어서 기본 자료로 사용되어질 수 있음을 확인했다.

참 고 문 헌

- (1) Roberts, W. L., 1978, "Cold Rolling of Steel", Marcel Dekker, Inc., New York.
- (2) Misaka, Y. and Masui, T., 1976, "Shape Correction of Steel Strip by Tension Leveller", J. JSTP, Vol. 17, No. 191, pp.988~994.
- (3) Patula, E. J., 1979, "The Tension-Roller-Leveling Process-Elongation and Power Loss", J. Eng. Ind. Trans. ASME, Vol. 101, pp.269~277.
- (4) Hattori, S., Maeda, Y., Matsushita, T., Murakami S. and Hata, J., 1987, "Theoretical Evaluation of Effects of Roll Number in Tension Levelling Machine", J. JSTP, Vol. 28, No. 312, pp.34~40.
- (5) Hibino, F., 1990, "The Practical Formula for Levelling Strain in a Roller Leveler", J. JSTP, Vol. 31, No. 349, pp.208~212.
- (6) Kawaguchi, K., 1980, "A Numerical Study on the Wrapping Angle of Strip in the Tension Roller Leveller", J. JSTP, Vol. 21, No. 236, pp.807~814.
- (7) Kajiwara, T., Hurumoto, H., Takemasa, H. and Taniguchi, N., 1988, Technical Report in Mitsubishi Heavy Industry in Japanese, pp315~320.
- (8) Yoshida, F. and Urabe, M., 1999, "Computer-aided process design for the tension levelling of metallic strips", J. Mater. Process Tech. Vol. 89-90, pp.218~223.
- (9) Hibbit, Karlsson and Sorensen, 1997, ABAQUS/Standard User's Manual