

금속인장교정기의 공정변수 설계를 위한 탄소성 유한요소해석 (1)-단순모델 해석

이형욱* · 허 훈* · 박상래*

(2001년 11월 14일 접수)

Elasto-plastic Finite Element Analysis for the Parametric Process Design of the Tension Leveller(1) -Unit Model Analysis

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

Abstract

This paper is concerned with the simulation-based process design method involved non-steady state problem of tension levelling considering the elasto-plastic hardening behavior of a metallic strip by a commercial code ABAQUS/Standard. 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. Objectives of this paper are the development of a general method for the design of a tension leveller by a finite element method and parameter studies for the design variables such as the applied tension, the roll intermesh and initial defects. The unit model analysis includes the determination of the steady state using the simple unit of the tension levelling line and the effect of the finite element mesh size on the amount and distribution of the strain calculated. The analysis provides the information about the intermesh effect on the amount and final shapes of the strip and distribution of the strain in order to determine the amount of elongation for correction of the irregular shape.

Key Words : Tension Levelling, Roll Intermesh, Back Tension, Unit Model, Curl, Steady-State Problem, Elasto-plastic Finite Element Analysis

1. 서론

현재 자동차와 항공기, 선박 등 기계 산업 전반에서 널리 사용되고 있는 박판 금속은 일반적으로 냉간 압연이나 열간 압연에 의해서 생산되고 있는 데, 압연기술의

비약적인 발전으로 인해 압연 판재의 품질이 크게 향상되었지만, 현재까지도 압연 후 판재의 형상과 표면, 품질의 결함은 여전히 계속해서 발생하고 있다. 이러한 압연 재의 품질 결함은 압연 판재의 실제 사용에 많은 제약을 주고 있으며, 불량률의 원인으로 작용하여 크게 문제가 되

* 한국과학기술원 기계공학과

고 있다. 금속 판재의 형상 결함에는 curling, guttering, wavy edge와 center buckling 등이 있다.⁽¹⁾ 금속 판재의 이러한 형상결함을 제거하고 판재의 품질을 개선하기 위해서 인장 교정기(Tension Leveller)가 도입되었다.

인장교정기에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 실험적인 방법과 수치적인 방법으로 수행되었다. 실험적인 연구 및 분석으로 Misaka와 Masui⁽²⁾는 판재의 형상결함을 측정하는 방법을 제시하였고, 실험을 통해 판재를 교정하기 위해 필요한 신장량을 얻기 위한 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 감기는 영역을 구분해서 판재의 두께방향을 따라 그 영역에서 발생하는 응력을 간단하게 이론적으로 제시하였다. Hattori 등⁽⁴⁾은 curling과 guttering을 예측할 수 있는 간단한 수학적 모델을 세우고 이를 실험을 통해서 다시 수정하는 방법을 제안하였다. Hibino⁽⁵⁾는 두께와 종류가 다른 여러 가지 재료에 대해 실험으로 교정변형률을 측정하였고 변형률의 최대 값이 판재와 롤이 직접 접촉하는 지점에서 발생되지 않는다는 사실을 실험을 통해 밝혀냈다.

수치적인 방법으로 Kawaguchi⁽⁶⁾는 강소성 구성방정식을 사용해서 판재의 형상교정에 필요한 인장력과 작업롤의 직경, 압하량(Intermesh)을 얻었다. Kajiwaru 등⁽⁷⁾은 판재의 작업반경은 판재가 롤을 감고 지나가기 전까지는 롤의 반경에 영향을 받지 않으며, 인장 교정 후에 판재의 가공정도가 curling과 guttering에 크게 영향을 미치는 것을 밝혀내었다. 최근 Yoshida와 Urabe⁽⁸⁾는 평면변형률 조건 하에 2차원 탄소성 유한요소 프로그램을 개발해서 인장 교정기의 단위모델에 대하여 인장을 먼저 부가한 후에 압하량을 부가해서 원하는 교정변형률을 얻을 때까지 롤 피치(Roll Pitch)를 변화시키는 방법을 사용하였다. Huh 등⁽⁹⁻¹⁰⁾은 탄소성 유한요소 프로그램을 이용하여 비정상상태인 인장교정문제를 정상상태의 문제로 해석하는 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 상용코드인 ABAQUS/Standard⁽¹¹⁾를 이용한 탄소성 유한요소해석을 바탕으로 비정상상태의 인장교정문제를 정상상태의 문제로 해석하는 방법과 해석에 가장 적절한 조건을 결정하였다. 그리고 결정된 유한요소 해석조건을 이용하여 인장교정기의 기본 단위모델에 대해 압하량(Intermesh)과 인장력(Back Tension)등 공정변수의 영향을 변형률과 응력의 이력, 최종형상 등을 분석하여 공정변수의 설계 방안을 제시하도록 하였다.

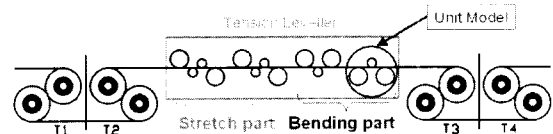


Fig. 1 Schema of the roller system in tension leveller

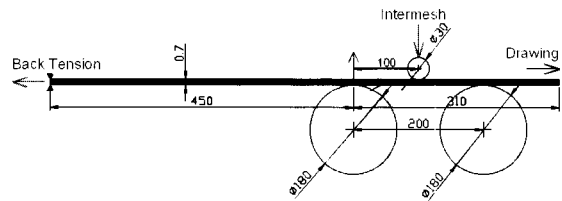


Fig. 2 Unit finite element model for a set of tension bridges in the analysis of tension levelling

2. 해석 모델 및 조건

일반적인 인장교정기의 개요를 Fig. 1에 도시하였다. 그림에서 좌우의 구동롤의 속도차이에 의해 판재에 인장력이 걸리게 되며 인장교정기 내의 늘림부와 굽힘부의 롤러의 조합으로 인장교정기가 구성된다. 본 논문에서는 인장교정 공정에 대한 탄소성 유한요소 해석을 위한 기본 단위모델로 굽힘부의 롤러를 설정하였다. 단위모델에 대해 비정상상태의 문제를 정상상태의 문제로 해석하는 기법의 검증을 수행하였다.

기본 단위모델로 설정한 롤러는 압하량에 의한 굽힘에 의해 curling이나 guttering과 같은 판재의 형상결함들을 제거하는데 주로 사용되며, 본 논문에서 사용한 모델의 형상 및 치수와 해석의 경계조건은 Fig. 2에 도시하였다. 판재의 모델링은 ABAQUS/Standard의 2차원 연속체 요소인 CPE4R요소를 사용하였고, 해석시간을 줄이기 위해 저감적분을 하였다. 유한요소 해석순서는 먼저 판재에 인장력을 부과하고, 압하량을 이용하여 압하량을 부과한다. 이후 판재의 우측 끝단에 변위 경계조건을 부과하여 인발과정을 수행한다. 마지막으로 스프링백 조건을 주어 최종형상을 얻는다. 탄소성 유한요소 해석에 사용된 재료는 자동차 강판용 재료로 많이 쓰이는 SPEN이며 사용된 물성치와 판재의 치수는 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
 판재의 길이 : 760mm
 판재의 너비 : 1000mm
 판재의 두께 : 0.7mm

3. 유한요소 크기의 결정

교정공정을 해석하기 위해서 접촉을 고려한 탄소성 유한요소법을 사용할 경우 비선형 계산으로 인해 많은 해석시간이 요구된다. 따라서 적절한 해석시간과 해의 정확도를 고려하여 유한요소의 크기를 결정하여야 한다. 해석에 사용된 판재의 압연방향의 유한요소 크기는 1mm, 2mm, 4mm, 8mm, 10mm이며 두께방향으로 4개로 분할하였다. 유한요소의 가우스 적분점에서의 판재 길이 방향의 변형률과 응력의 분포를 요소크기 변화에 따라 Fig. 3과 Fig. 4에 도시하였다. 'Bottom'과 'Top'은 각각

4 겹의 요소 중 가장 외측의 유한요소의 일점 적분점을 의미한다. 유한요소의 크기가 작을수록 변형률과 응력의 크기는 상대적으로 커지고 있음을 알 수 있다. 또한 요소크기가 1mm, 2mm 일 때만 최대변형률과 응력 분포를 제대로 표현하고 있고 교정 후에 일정변형률(Steady Strain)의 차이가 상대적으로 적음을 알 수 있다. 요소크기가 2mm일 때의 해석에서, 두께방향을 따라 길이 방향 변형률과 응력을 Fig. 5 와 Fig. 6 에 각각 도시하였다.

Fig. 5에 도시된 변형률의 경우 가운데 롤에서 최대값을 가지면서 아래, 위쪽의 판재의 변형률의 크기가 대칭을 이루며, 두께방향을 따라 거의 선형으로 변하는 것을 알 수 있다. Fig.6의 응력은 반복적인 인장과 압축을 받았기 때문에 롤러를 빠져나온 후의 상태에서 두께방향을 따라 응력 분포가 비선형적으로 나타나는 것을 알 수 있다. 아래쪽과 위쪽의 외층은 거의 응력이 나타나지 않고, 내층의 응력은 주어진 인장력의 크기에 관계되어 나

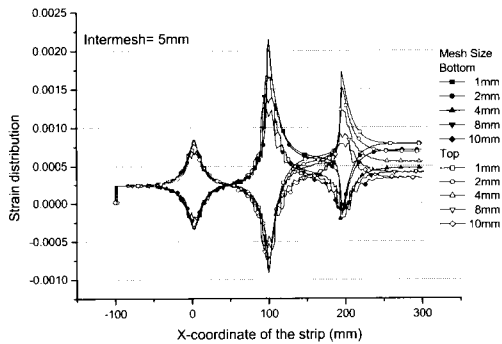


Fig. 3 Strain history at the designated point with the variation of the mesh size

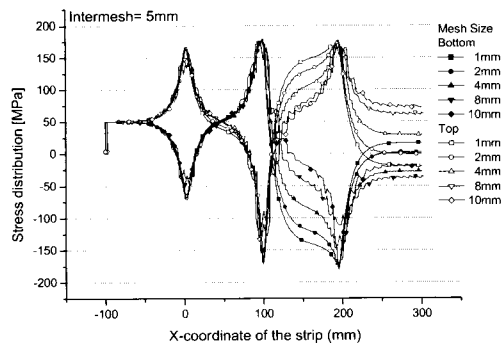


Fig. 4 Stress history at the designated point with the variation of the mesh size

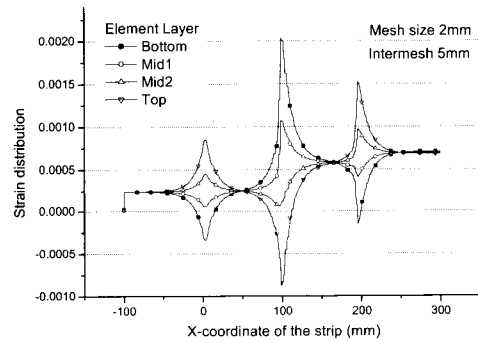


Fig. 5 Strain history at the designated point along the thickness direction with respect to the drawing location

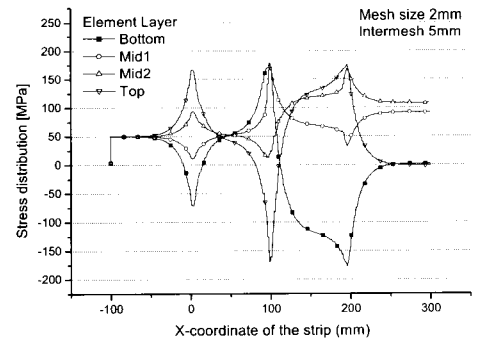


Fig. 6 Stress history at the designated point along the thickness direction with respect to the drawing location

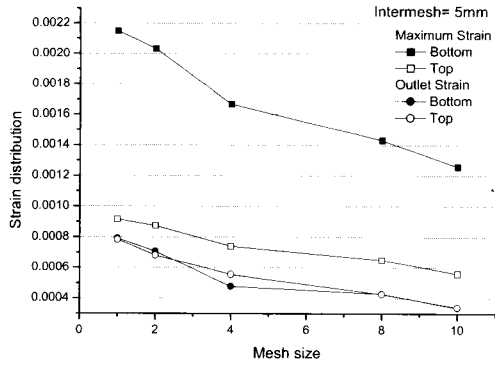


Fig. 7 Maximum strain at the upper and lower surface with respect to the mesh size.

타나는 것을 알 수 있다. Fig. 7에 두께방향의 아래위의 적분점에서의 최대변형률과 교정 후의 일정변형률을 도시하였다. 1mm, 2mm 일 때 최대변형률의 차이는 상대적으로 크지만 교정 후의 일정변형률의 차이는 0.0001로 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 해석시간의 관점에서는 요소크기 1mm 일 때는 슈퍼컴(Cray90)에서 15시간 정도 소요되었지만 2mm 일 때는 4시간 정도 소요되었기 때문에 경제성과 정확성을 고려하여 0.01% 정도의 변형률의 오차를 허용하여 유한요소 크기의 최적치를 2mm로 결정하였다.

4. 정상 상태의 결정

인장교정 공정은 관재가 연속적으로 교정되는 공정이기 때문에 비정상 상태의 문제로 분류될 수 있다. 이런 비정상 상태의 문제를 정상 상태의 문제로 변환하기 위해 인발량과 관계없이 동일한 해를 얻기 위한 검증과정이 요구된다.

본 논문에서는 필요한 인발량과 정상 상태의 영역을 구하기 위해 여러 지점에서 관측된 변형률의 분포와 일정구간에서의 변형형상을 분석하였다. 변형률의 분포가 관측지점 이후에는 일정해져야 하는 것이 중요한데, Fig. 8에는 Lagrangian관점에서 정상 상태를 확인하기 위해 관측지점의 위치에 따른 변형률의 이력을 도시하였다. 관측지점은 좌측의 첫째 롤에서 30, 50, 60, 70, 80, 90, 100mm 떨어진 지점이다. Fig. 8에서 80mm 이후에서 관측한 변형률의 이력은 90mm, 100mm의 경우와 일치하는 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 롤에서 80mm 이상인 벗어난 지점부터는 롤의 영향을 정상 상태로

간주할 수 있다. Fig. 9에는 Eulerian관점에서 살펴본 롤 사이에서의 관재의 형상을 나타내고 있다. 인발량이 11.7mm 이상인 경우의 형상은 15.3mm와 거의 동일한 형상임을 알 수 있다. 따라서 인발량이 11.7mm 이상인 경우 이 공정은 정상상태의 문제로 간주할 수 있음을 알 수 있다. 두 경우를 동시에 고려하면 좌측 하단 롤로부터 80mm 떨어진 점이 우측 하단 롤의 80mm 떨어진 점을 통과하도록 하는 인발량이 해석에 필요한 최소 인발량이다. 본 논문에서 사용된 모델의 경우 교정구간을 80mm 지점에서 -120mm 지점까지 40mm로 설정하여 400mm(=40+80+200+80)의 인발량으로 해석을 수행하였다. 교정 후에 관재의 아래위의 일정변형률의 차이는 무시할 수 있을 정도로 작았지만, 스프링백을 수행하면 이 차이는 커질 것으로 예상된다.

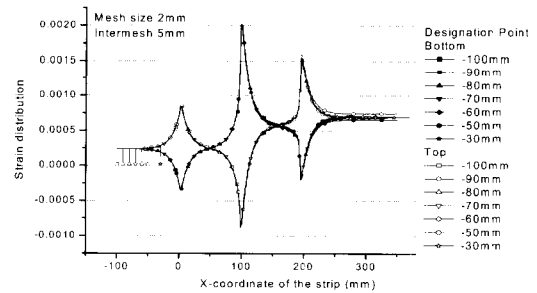


Fig. 8 The steady state of strain history at different designated points passing through the three roller set

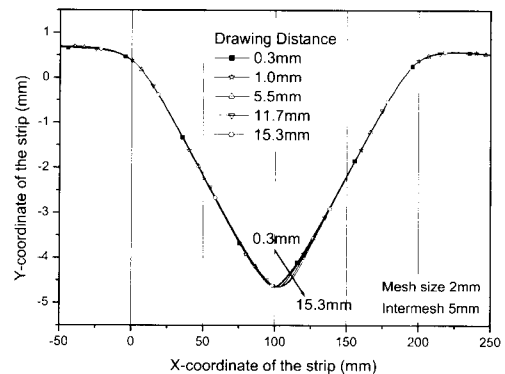


Fig. 9 The steady state of deformed shape of a strip passing through the three-roller set with the amount of drawing

5. 형상결함이 없는 판재의 해석

앞절의 해석에서 구한 유한요소 크기, 인발량, 정상상태 구간 등의 해석조건을 바탕으로 결함이 없는 판재에 대해 압하량과 인장력 변화에 관한 교정공정의 영향을 분석하였다. 해석을 통하여 변형률과 응력의 이력, 최종 상태에서의 일정변형률과 스프링백 후의 판재의 잔류변형률, 최종적인 형상 등을 분석하였다.

압하량의 변화량에 따라 좌측 하단 볼에서 100mm 떨어진 점에서 관측된 응력과 변형률의 이력을 Fig. 10과 Fig. 11에 도시하였다. 이때 인장력은 50MPa로 고정하였다. 변형률은 각각의 볼을 지날 때마다 값이 증가되고, 압하를 부근에서 최대변형률을 가지는 것을 알 수 있으며 그 크기는 압하량이 증가할수록 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

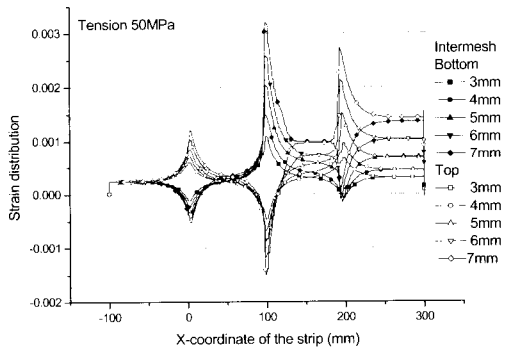


Fig. 10 Strain history at the designated point with the variation of the intermesh

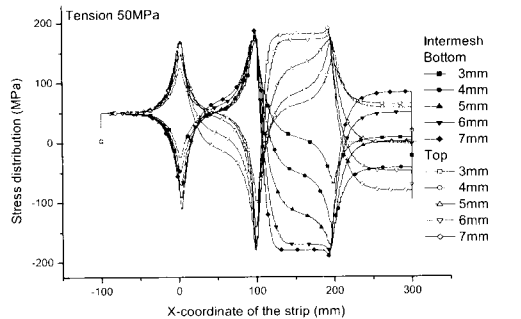


Fig. 11 Stress history at the designated point with the variation of the intermesh

각각의 볼을 지날 때마다 그 크기가 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 재료의 경화현상 때문에 응력은 상대적으로 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다.

판재의 아래, 위의 적분점에서 일정변형률의 크기 차이는 거의 없지만 스프링백 후에는 잔류변형률의 차이가 훨씬 커짐을 Fig. 12에서 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. 13에는 스프링백 후의 교정된 판재의 형상을 도시하였다. 인장력이 일정한 상태에서 압하량의 변화에 따라 판재의 최종적인 형상이 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 즉, 압하량 3mm, 4mm, 5mm일 때는 압하량의 굽힘에 의한 변형이 판재의 아래쪽에서 다른 지지물에 의해 발생한 변형보다 상대적으로 커서 교정 후에는 판재

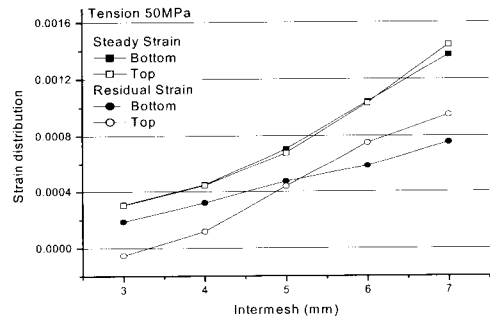


Fig. 12 Residual strain of the strip by the springback after tension levelling

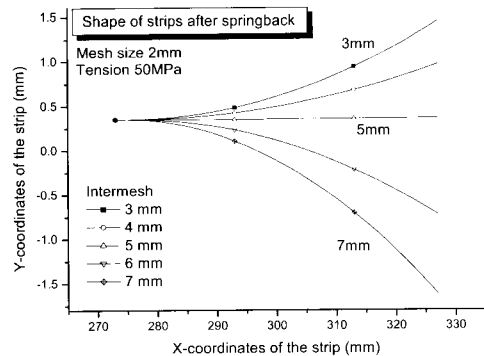


Fig. 13 Deformed shape of the strip by the springback-k after tension levelling

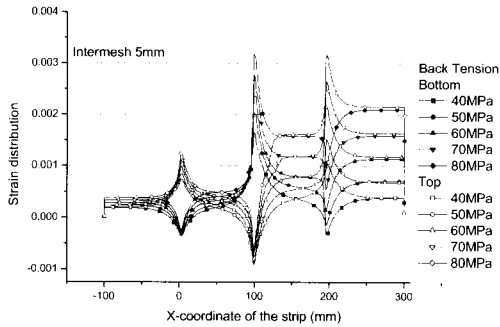


Fig. 14 Strain history at the designated point with the variation of the tension

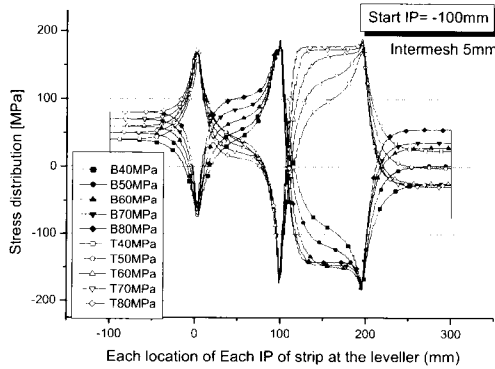


Fig. 15 Stress history at the designated point with the variation of the tension

의 아래쪽의 잔류변형률이 더 크게 발생하여 판재가 위쪽으로 휘어지는 것을 알 수 있다. 그러나 압하량 6mm, 7mm에서는 압하률에서 최대변형률이 발생하지만 상대적으로 다른 지지롤에서 발생하는 변형률이 커서 교정 후 스프링백에 잔류변형률이 판재의 위쪽에서 더 크게 발생하여 판재가 최종적으로 아래쪽으로 휘어지는 것을 알 수 있다. 따라서 교정공정의 관점에서 볼 때, 형상 결함이 없는 판재는 교정 후에도 동일한 곡률을 유지하여야 하므로, 이 단위 모델에서는 인장력 50MPa 일 때, 적정 압하량이 5mm 임을 알 수 있다.

인장력의 변화에 따른 변형률과 응력의 이력을 Fig. 14와 Fig. 15에 도시했다. 이 경우 압하량은 5mm로 고정하였다. 압하량을 변화시켰을 때와 동일한 양상을 보이고 있으나, 판재 아래위의 일정변형률의 크기는 압하량을 증가시킬 때보다 인장력을 증가시킬 때 상대적으로 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 인장력에 따른 스프링백 전, 후의 일정변형률 값과 최종 형상을 Fig. 16와

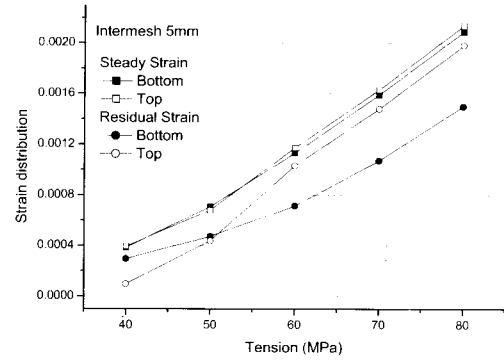


Fig. 16 Residual strain of the strip by the springback after tension levelling

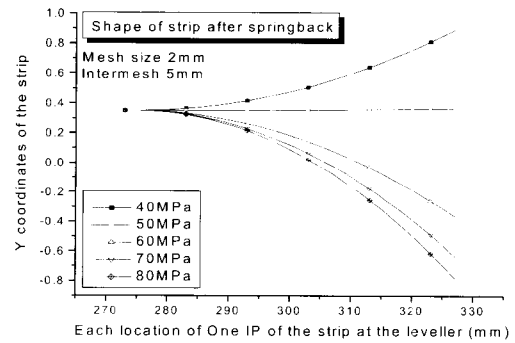


Fig. 17 Deformed shape of the strip by the springback after tension levelling

Fig. 17에 도시하였다. 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 압하량의 변화의 결과보다 훨씬 커짐을 알 수 있다. 인장력을 50MPa 이상으로 부과하였을 때와 압하량이 5mm이상일 때, 아래로 판재가 치지는 것을 보면 한계이상의 인장변형률이 부과되면 판재가 역으로 변형을 하는 것을 알 수 있다. 이것으로 교정공정의 변수는 한계치에서 정해지는 것이 아니라 적절한 범위 내에서 결정된다는 것을 확인할 수 있다.

6. 형상결함이 있는 판재의 해석

결함이 포함된 급속 판재를 해석하기 위해서 정현파 형태의 형상결함이 포함된 판재를 선정하였다. 형상결함

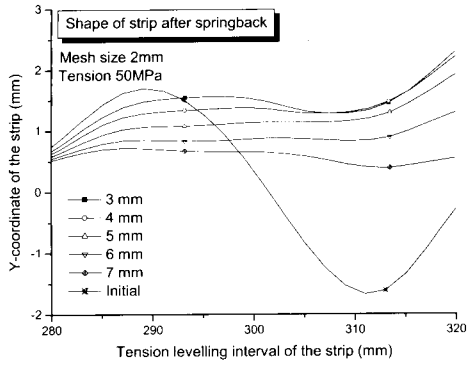


Fig. 18 Deformed shape of the strip by the springback after tension levelling

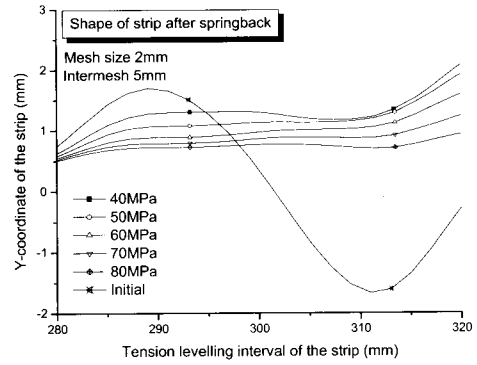


Fig. 20 Deformed shape of the strip by the springback after tension levelling

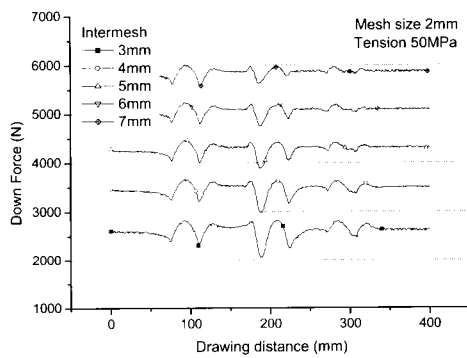


Fig. 19 Variation of the down force with respect to the intermesh

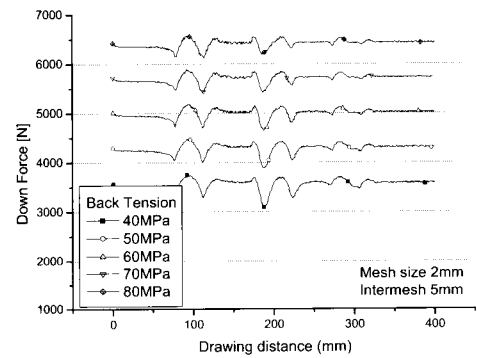


Fig. 21 Variation of the down force with respect to the tension

의 최대높이와 폭은 실제 압연과정 후 발생하는 형상결함에 비례하도록 선정하였다. 결함이 포함되어 있는 얇은 부분에서 판재의 아래부분까지의 높이는 최대 1.3mm 이고 폭은 50mm이다. 또한 사용된 재료는 SPCEN으로 물성치와 기타 조건은 위의 해석과 동일하다. 교정공정 변수인 압하량과 인장력 변화에 따라 판재의 교정구간의 최종형상과 압하중을 검토하였다.

압하량에 따른 판재의 변형형상을 스프링백 후 상태에 대해 판재의 초기형상과 같이 Fig. 18에 도시하였다. 압하량이 증가할수록 판재의 최종적인 형상은 인장력과 압하량에 의한 굽힘에 의해 변형이 증가되면서 더 평평하게 되는 것을 알 수 있다. 압하량에 따른 압하중 변화를 Fig. 19에 도시하였는데, 결함이 포함되어 있지 않는 판재의 경우에 있어서는 압하중이 일정한 값을 가지는데 반하여, 결함이 포함된 판재의 경우에 있어서는 판재의

결함형상에 따라 압하중의 변화가 심함을 알 수 있다. 즉 정현파 형태의 판재 형상에 있어서 정현파의 최대값 부근에서 압하중은 최대값을 가지며 정현파의 최소값 부근에서 압하중은 최소값을 가지게 되며, 이것은 판재의 형상결함 부분이 롤 부근을 지날 때 발생한다. 이 값은 인발이 진행됨에 따라 판재의 형상결함이 제거되므로 변화 크기가 감소된다. 그리고 압하중은 압하량 증가에 따라 결함이 없는 판재의 경우와 마찬가지로 압하량 1mm에 800N 정도의 증가량을 보인다.

인장력 변화에 따른, 스프링백 후 판재의 변형형상을 판재의 초기형상과 같이 Fig. 20에 도시하였는데, 인장력이 증가할수록 판재의 최종적인 형상은 인장력의 변화와 압하률에 의한 굽힘에 의해 변형이 증가되면서 더 평평하게 되는 것을 알 수 있다. 인장력에 따른 압하중의 변화를 Fig. 21에 도시하였는데, 결함이 없는 판재의 경우

에 있어서는 압하중이 일정한 값을 가지는데 반하여, 결함이 포함된 판재의 경우에 있어서는 판재의 결함 형상에 따라 압하중이 변화하게 됨을 다시 확인할 수 있었다. 정현파 형태의 판재의 형상에 있어서 정현파의 최대값 부근에서 압하중은 최대값을 가지며 정현파의 최소값 부근에서 압하중은 최소 값을 가지게 되며, 이것은 판재의 형상결함 부분이 롤 부근을 지날 때 발생한다. 이 값은 인발이 진행됨에 따라 판재의 형상결함이 제거되므로 그 변화 크기도 감소된다. 그리고 압하중은 인장력의 증가에 따라 결함이 포함되지 않은 판재에서의 경우와 마찬가지로 인장력 10MPa 에 대략 750N 정도 증가함을 알 수 있다.

위와 같이 결함이 포함된 금속 판재에 대한 탄소성 유한 요소 해석 결과, 인장력과 압하중 변화에 따라 교정 후 판재의 최종형상이 크게 달라지며 교정에 필요한 압하중도 크게 달라지는 것을 알 수 있었다. 또한 결함이 포함된 판재의 교정구간에서 교정 후 교정구간 내의 결함의 크기에 따라 교정변형률의 크기가 달라져 판재의 초기 결함을 제거하고 최종형상을 좀더 평평하게 만들 수 있음을 알 수 있다. 그리고 압하중과 인장력이 증가될수록 판재의 교정 후 형상은 더 평평하게 되는데, 여기서는 하나의 단위 교정 유닛을 사용해서 교정하였기 때문에 판재를 완전히 평평하게 교정할 필요는 없다.

7. 결론

압연공정에서 나타나는 형상결함을 제거하기 위한 인장교정 공정은 여러 가지 비선형성으로 인해 설계와 해석에 어려움이 있다. 유한요소 해석을 이용하면 경제적 효과와 정확도를 높일 수 있다. 유한요소 해석 시 시간적인 면과 정확도를 절충해 해석에 사용될 유한요소 크기를 결정하고 유한요소 해석의 신뢰도를 위해 일정상태가 되는 지를 검토하였다. 탄소성 유한요소 해석에 필요한 금속판재의 유한요소의 길이방향의 크기는 2mm로 결정하였다. 교정구간은 롤의 영향이 배제된 첫 번째 롤에서 -80mm 떨어진 지점에서 -120mm지점까지이며 교정거리는 40mm로 선정했다.

위의 결과를 바탕으로 결함이 포함되지 않은 금속판재에 대한 2차원 탄소성 유한요소 해석을 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 인장력이 일정한 상태에서 압하중을 변화시켜 교정된 판재의 형상을 스프링백 후 살펴본 결과 판재의 최종형상이 압하중에 따라 크게 달라지는 것을 알 수 있었

다. 압하중을 변화시켜 판재의 최종형상이 아래쪽으로 휘어지게 만들거나 위쪽으로 휘어지게 만들거나 또는 판재를 평평하게 할 수도 있음을 알 수 있었다. 본 논문의 모델의 경우 압하중 5mm에서 평탄도가 유지되어 기본값으로 설정하였다.

(2) 인장력 변화에 따른 해석 결과는 압하중의 변화시킬 때와 비슷한 경향을 보이지만 판재의 아래위 일정변형률의 크기는 압하중을 증가시킬 때 보다 상대적으로 그 크기가 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 본 논문의 모델의 경우 인장력 50MPa에서 평탄도가 유지되어 인장력의 기본값으로 설정하였다.

(3) 정현파 형태의 형상결함이 포함된 판재의 해석의 경우, 압하중 변화에 따른 영향을 스프링백 후에 판재의 변형형상을 통하여 검토한 결과 압하중이 증가할수록 판재의 최종형상은 더 평평하게 되는 것을 알 수 있었다. 인장력의 변화에 따른 결과는 인장력이 증가할수록 판재의 최종형상은 인장력의 변화와 압하중에 의한 굽힘에 의해 더 평평하게 되는 것을 알 수 있었다.

이상의 결과에서 형상결함이 포함된 판재의 교정 후 형상결함 크기에 따라 교정변형률의 크기가 달라져 판재의 초기 결함을 제거하고 판재의 최종형상을 평평하게 만들 수 있음을 밝혀냈다. 추후 기본 값으로 설정된 압하중과 인장력을 기준으로 전체 교정공정의 해석을 수행하여야 할 것이다.

후 기

본 연구는 포항산업과학연구원원의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

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, “Analysis of the Curling and Cross-bowing of Strips on Tension Leveller,” Technical Report in Mitsubishi Heavy Industry in Japanese, pp.315~320.
- (8) Yoshida, F. and Urabe, M., 1999, “Computer-aided Process Design for the Tension Levelling of Vol. Metallic Strips”, J. Mater. Process Tech. Vol. 89-90, pp.218~223.
- (9) Huh, H., Lee, H. W., Park, S. R., Kim, G. Y. and Nam, S. H., 2001, “Parametric Process Design of the Tension Levelling with an Elasto-plastic Finite Element Method”, J. Mater. Process Tech., 113, pp. 714~719.
- (10) 박상래, 이형욱, 허 훈, 2001, “탄소성 유한요소법을 이용한 금속인장교정기의 공정변수 설계”, 한국소성가공학회 추계학술대회, pp. 42~48.
- (11) Hibbit, Karlsson and Sorensen, 1997, ABAQUS/Standard User’s Manual.