

## 금속인장교정기의 공정변수 설계를 위한 탄소성 유한요소해석 (2)-전체공정 해석

이형욱\* · 허 훈\* · 박상래\*

(2001년 11월 14일 접수)

### Elasto-plastic Finite Element Analysis for the Parametric Process Design of the Tension Leveller(2) -Full Set Analysis

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

#### Abstract

The tension levelling process is performed to elongate the strip plastically in combination of tensile and bending strain 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. This paper is concerned with a simulation of the tension levelling process based on the analysis of the unit model for the tension leveller. Analysis technique such as the sequential analysis of the unit model is suggested and verified with the assembly analysis of the unit model for the effective and economic analysis of the full set of the tension leveller. Analysis of the full tension levelling process using sequential unit models is carried out for steel strips with the shape defect and provides the effect of the intermesh and optimum amount of the intermesh in tension levelling process.

**Key Words** : Tension Levelling, Finite Element Analysis, Sequential Model, Assembly Model, Roll Intermesh, Back Tension, Curl

#### 1. 서 론

압연 기술의 발달로 인해 압연재의 품질이 크게 향상되었지만, 압연 후 판재의 형상과 표면, 품질의 결함은 여전히 계속해서 발생하고 있어 압연재의 실제 사용에 많은 제약을 주고 있으며, 불량률의 원인으로 작용하여 크게 문제가 되고 있다.

금속 판재의 품질이나 형상 결함에는 Curl, Gutter, Wavy Edge, Center Buckling 등이 생기게 되며 이러한

판재의 형상결함을 제거하고 품질을 개선하기 위해 새로운 판재의 형상교정기술을 채택한 인장교정기(Tension Leveller)가 도입되었다.<sup>(1)</sup> 인장교정기술은 굽힘과 인장을 판재에 반복적으로 가해 불량한 판재의 형상을 교정하는 기술로 압연 후의 판재의 평탄도 개선에 널리 사용되고 있는 공정이다. 인장 교정기에서 중요한 설계 변수인 롤의 크기, 롤간의 거리, 롤의 배치, 압하량(Intermesh)과 압하중, 인장력 등에 관한 기술은 외국에서 많이 연구되었고, 국내에서는 공정에 대한 실험적인 연구로 많이

\* 한국과학기술원 기계공학과

수행되고 있는 실정이다. 현재까지의 인장교정기의 기구 분석 및 공정설계는 실험에 의존하고 있거나, 간단한 고체역학 이론을 이용한 근사해가 대부분이다.

여러 연구자들에 의해 인장교정기의 실험적인 연구<sup>(2~3)</sup> 및 수치적인 연구<sup>(4~5)</sup>와 분석이 이루어졌다. Hattori 등<sup>(3)</sup>은 Curling, Guttering을 예측할 수 있는 간단한 수학적 모델을 제시하였다. Kawaguchi<sup>(4)</sup>는 판재의 형상교정에 필요한 인장력과 작업롤의 직경, 압하량을 얻었다. 최근 Yoshida와 Urabe<sup>(6)</sup>는 평면변형률 조건 하에 2차원 탄소성 유한요소 프로그램을 이용하여 롤 피치를 변화시키는 방법을 제시했다. 그러나 인장교정 공정은 재료의 비선형 특성과 압하량, 인장력, 롤과 판재의 접촉 등 공정변수들에 의해 복합적인 영향을 받는 비선형 문제이므로 실험을 통한 시행오차 방법에 의한 공정설계는 매우 어렵다. 따라서 여러 가지 공정변수들의 영향을 고려한 인장교정 공정의 해석을 위해서는 탄소성 유한요소법을 통한 공정변수의 설계 방법이 반드시 필요하다. 유한요소법을 이용한 예로 Huh 등<sup>(7~8)</sup>은 단순 모델을 통하여 인장교정 공정을 정적 문제로 바꾸어 유한요소 해석을 수행하였다. 그러나, 전체 교정공정 중 하나의 부분인 단순 모델에 대한 해석으로는 실제의 공정 변수를 모두 예측할 수 없기 때문에 전체 교정공정의 해석을 통한 설계가 요구된다. 전체 교정공정을 해석하는 것은 방대한 데이터 양과 엄청난 계산 시간을 요구하기 때문에 해석을 위한 효율적인 기법이 요구된다.

본 논문에서는 금속 인장교정 공정에 관한 단일 모델 해석을 기반<sup>(7)</sup>으로 전체 인장교정 공정에 관한 해석을 ABAQUS/Standard를 이용하여 수행하였다. 보다 효율적인 인장교정 공정해석을 수행하기 위해 순차모델을 이용하여 해석하는 기법을 제시하고, 이를 검증하였다. 검증된 방법을 이용하여 전체 인장교정 공정에 관하여 해석을 수행하고 판재에 형상결함이 없는 경우에 설계변수인 압하량과 인장력에 관한 영향을 분석하였다. 판재에 형상결함이 없는 경우의 해석을 통하여 얻은 설계변수의 영향을 분석한 결과를 바탕으로, 형상결함이 있는 판재를 교정하는 해석을 수행하여 좋은 결과를 얻었다.

## 2. 유한요소 해석모델 및 해석조건

본 논문에서 해석에 사용되는 인장교정기는 Fig. 1과 같이 4개의 유닛으로 구성되어 있다. 인장교정기는 인장부와 굽힘부로 구성되어있는데 판재는 인장부와 굽힘부를 순차적으로 거쳐 교정되어진다. 이러한 문제를 해석하기 위해서는 인장부와 굽힘부 전체를 포괄할 수 있는

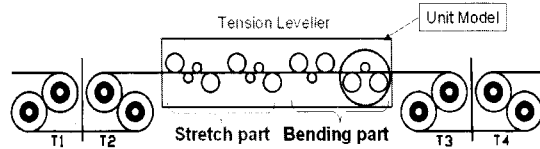


Fig. 1 Schema of the roller system in tension leveller

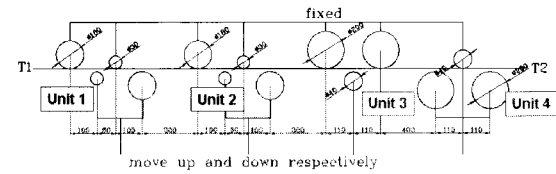


Fig. 2 Analysis model for a full set of tension leveller

판재 모델을 이용하여야 한다. 그러나 교정기 전체 길이에 맞게 판재를 모델링할 경우 해석하는 데는 많은 시간이 걸리게 되어 해석의 효율성이 떨어지게 된다. 본 논문에서는 하나의 유닛에 맞는 판재를 모델링하여 해석이 완료된 유닛을 제거하고 다시 다음 유닛을 설정하여 해석을 수행하는 순차적 모델 해석 방법을 적용하였다. 해석에 사용된 재료는 자동차 강판용 재료로 많이 쓰이는 SPEN이며 탄소계수는 190GPa, 포와송비는 0.3, 변형경화 선도는  $\bar{\sigma} = 533.252(0.006505 + \bar{\epsilon}^p)^{0.2567}$  MPa이며, 롤러는 구동되지 않기 때문에 판재와 롤 사이의 마찰계수는 0.0으로 가정하였다. 기본적인 경계조건은 처음 판재에 인장력을 부과한 후 압하률을 이용해 압하량을 부과한 후 판재의 우측 끝을 인발한 후 교정 롤러를 제거하고, 스프링백 조건을 부과하였다.

## 3. 순차모델과 조합모델의 해석

전체 인장교정 공정을 해석하는 데에는 많은 계산 시간이 소요되기 때문에 본 논문에서는 해석의 효율성을 위하여 순차모델을 제시하였다. 순차모델 해석 결과의 신뢰성 확보를 위하여 Fig. 2에 표시된 바와 같이 유닛 1과 2로 구성된 조합모델 S-S (Stretch-Stretch Roller)와 유닛 3과 4로 구성된 조합모델 B-B (Bending-Bending Roller)에 대해 직접적인 탄소성 유한요소 해석을 수행하고, 결과를 순차모델 S-S와 순차모델 B-B에 대한 해석 결과와 비교하여 살펴보았다. 순차모델은 판재가 하나의 유닛을 통과한 후 다음 유닛을 다시 장착하는 방법을 사용하였다. 두 번째 유닛을 장착할 때 인장력은 제거하지 않고 그대로 두어 스프링백이 되는 것을 방지하였다.

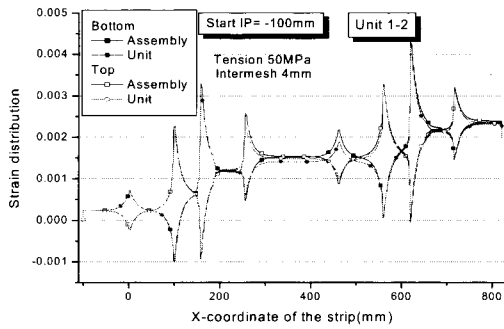


Fig. 3 Strain history at the designated point in the assembly model S-S and the sequential model S-S

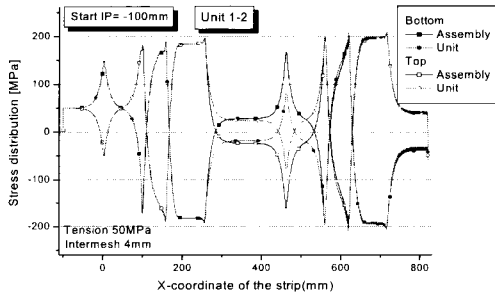


Fig. 4 Stress history at the designated point in the assembly model S-S and the sequential model S-S

조합모델 S-S와 순차모델 S-S의 해석을 위하여 판재는 형상결합이 없는 판재를 사용하였다. 이 모델에 대해서 변형률의 이력, 스프링백 후 판재의 최종 형상 등을 고찰한 후 이를 비교하였다. 같은 방법으로 조합모델 B-B와 순차모델 B-B에 대해서도 변형률의 이력, 스프링백 후 판재의 최종 형상 등을 고찰한 후 이를 비교하였다.

인장부에 해당하는 조합모델 S-S와 순차모델 S-S에 대해 인장력 50MPa이고 압하량 4mm일 때 변형률과 응력의 이력을 Fig. 3과 Fig. 4에 도시하였다. 유닛 1(S)의 첫 번째 롤에서 좌측으로 100mm 떨어진 관측점에서 Eulerian 관점에서 살펴본 판재 아래위의 변형률 이력은 각각의 롤을 지날 때마다 그 값이 증가되는 것을 알 수 있고 압하를 부근에서 최대변형률을 가지는 것을 알 수 있으며 응력도 각각의 롤을 지날 때마다 그 크기가 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 유닛 1(S)을 지나서 유닛 2(S)의 첫 번째 롤까지는 조합모델로 해석한 경우가 순차모델로 해석한 경우에 비해 판재 아래위의 변형률과

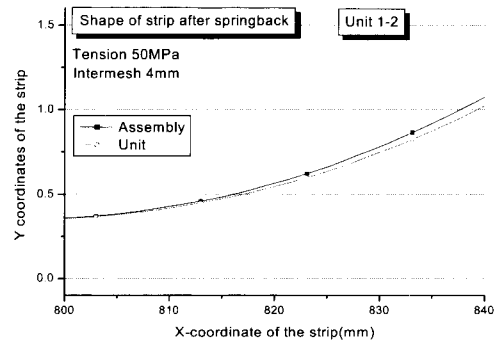


Fig. 5 Deformed shape of the strip by the springback after tension levelling in the assembly model S-S and the sequential model S-S

Table 1 The Comparison on the deformed shape of the strip after the drawing in the assembly model S-S and the sequential model S-S

x-Coordinate (mm)	Assembly model	Sequential model
800	0.358	0.356
840	1.076	1.023
Difference	0.718	0.668

응력이 다소 크게 나타났지만 유닛 2(S)의 두 번째 롤을 지나면서 그 차이가 점점 줄어들고 최대변형률을 가지는 유닛 2(S)의 세 번째 롤에서는 같은 값을 가지게 된다. 반면 교정 후 판재 아래위의 교정변형률은 조합모델로 해석한 경우에 비해 순차모델의 경우가 적게 나타나지만 그 차이는 거의 없음을 알 수 있다. 한편 스프링백 후 판재의 최종형상을 Fig. 5에 나타내었는데 순차모델의 경우에 비해 조합모델의 경우가 위쪽으로 더 변형이 되었다. 이는 순차모델의 경우는 유닛 1(S)이 제거되면서 압하물에 의해 판재에 부가되었던 인장력이 줄어들어 변형률과 응력의 분포에서 알 수 있는 바와 같이 변형률이 적게 발생했기 때문이다. 조합모델로 해석한 경우를 정해라고 가정했을 때 순차모델로 해석한 경우와 수치적으로 비교해 보면 Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 판재의 교정 높이에 있어서 6.9% 정도의 오차가 나는 것을 알 수 있다.

동일한 방법으로 굽힘부에 해당하는 조합모델 B-B와 순차모델 B-B에 대해 인장력 50MPa이고 압하량 5mm일 때 변형률과 응력 이력을 살펴보면 Fig. 6과 Fig. 7과

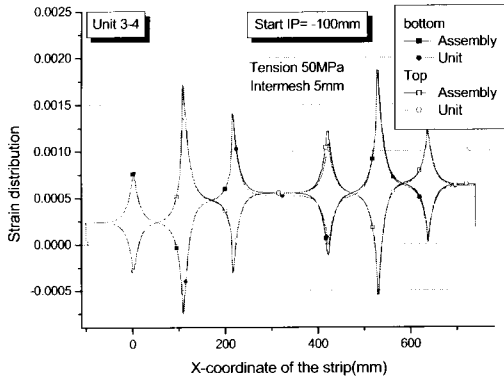


Fig. 6 Strain history at the designated point in the assembly model B-B and the sequential model B-B

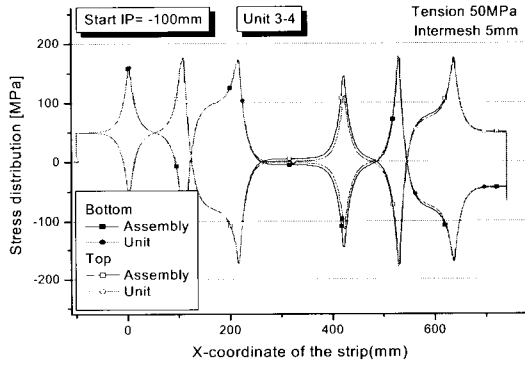


Fig. 7 Stress history at the designated point in the assembly model B-B and the sequential model B-B

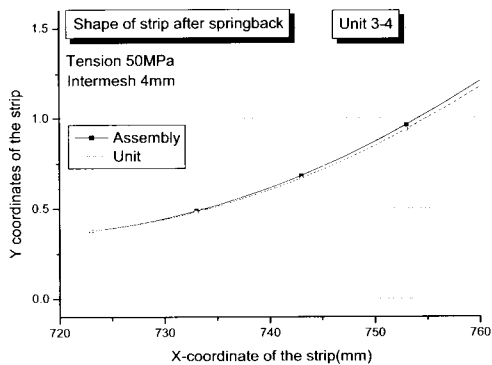


Fig. 8 Deformed shapes of the strip by the springback after tension levelling in the assembly model B-B and the sequential model B-B

Table 2 The Comparison on the deformed shape of the strip after the drawing in the assembly model B-B and the sequential model B-B

x-Coordinate (mm)	Assembly model	Sequential model
720	0.361	0.361
760	1.210	1.177
Difference	0.849	0.816

같다. 유닛 3(B)의 첫 번째 롤에서 좌측으로 100mm 떨어진 관측점에서 Eulerian 관점에서 살펴본 판재 아래위의 변형률 분포는 각각의 롤을 지날 때마다 그 값이 증가되는 것을 알 수 있고 압하롤 부근에서 최대변형률을 가지는 것을 알 수 있으며 응력도 각각의 롤을 지날 때마다 그 크기가 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 유닛 3(B)을 지나서 유닛 4(B)의 첫 번째 롤까지는 조합모델로 해석 한 경우가 순차모델로 해석한 경우에 비해 판재 아래위의 변형률과 응력이 다소 크게 나타났지만 최대변형률을 가지는 유닛 4(B)의 두 번째 롤과 세 번째 롤에서는 같은 값을 가지게 된다. 반면 교정 후 판재 아래위의 교정변형률은 조합모델로 해석 한 경우에 비해 순차모델의 경우가 적게 나타나지만 그 차이는 거의 없음을 알 수 있다. 한편 스프링백 후 판재의 최종형상을 Fig. 8에 나타내었는데 순차모델의 경우에 비해 조합모델의 경우가 위쪽으로 더 변형이 되었다. 조합모델로 해석한 경우를 정해라고 가정했을 때 순차모델로 해석한 경우와 수치적으로 비교해 보면 Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 판재의 교정 높이에 있어서 3.8% 정도의 오차가 나는 것을 알 수 있다.

인장교정 공정을 해석할 경우 두 개의 유닛을 이용한 상기 해석에서 조합모델을 이용하여 해석을 한 경우와 순차모델을 이용한 해석의 계산시간의 비는 조합모델이 5배 더 소요되었다. 따라서, 순차모델로 전체 인장교정 공정을 해석하는 것이 계산시간 상 더 효율적임을 알 수 있다. 유닛들로 구성된 조합모델 S-S와 조합모델 B-B를 순차모델들로 해석한 경우의 해석 결과는 거의 차이가 없다. 약간의 차이는 각각 첫 번째 유닛의 압하롤이 제거되면서 발생하지만 변형률의 이력, 스프링백 후 판재의 최종형상을 고찰한 결과 경제성과 시간을 고려할 경우 순차모델로 해석하는 것이 더 효율적임을 알 수 있다. 다음 장에서는 순차모델을 이용하여 인장교정기 전체 조합을 해석하였다.

#### 4. 순차모델을 이용한 전체 인장교정 공정해석

##### 4.1 형상결함이 없는 판재에 관한 순차모델 해석

순차모델 해석의 효율성과 정확성을 바탕으로 인장교정기 전체 조합에 대한 탄소성 유한요소 해석을 수행하였다. 결함이 포함되지 않은 판재를 해석하기 위하여 선택한 모델은 Fig. 2에 나타난 것과 같고 각각의 단순 모델에 대해 순차적으로 유한요소 해석을 수행하여 인장교정 전체를 묘사하였다. 여기서 사용된 재료는 SPCEN으로 물성치와 기타 해석 조건은 위와 동일하다. 이 모델에 대해서 압하량 변화에 따른 변형률과 응력의 이력, 최종 상태에서의 일정변형률 및 최종 형상 등을 고찰하였다.

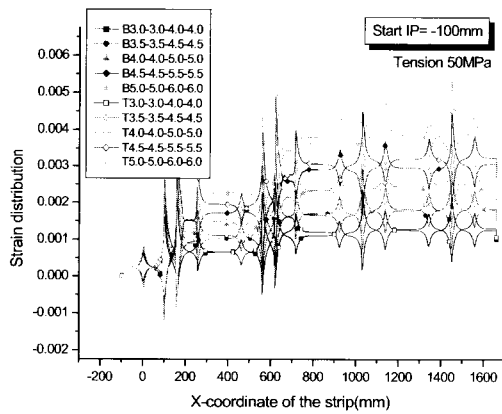


Fig. 9 Strain history at the designated point with the variation of the roll intermesh in the full tension leveller

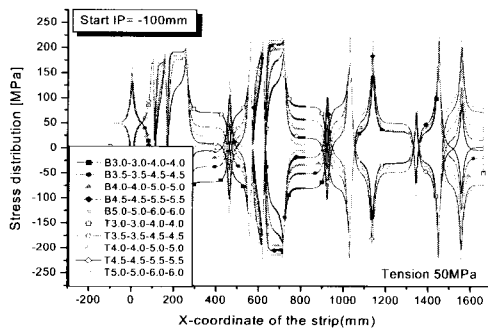


Fig. 10 Stress history at the designated point with the variation of the roll intermesh in the full tension leveller

압하량 변화에 따른 변형률의 이력을 살펴보면 Fig. 9와 같고, 유닛 1(S)의 첫번째 롤에서 100mm 떨어진 관측지점에서 Eulerian 관점에서 살펴본 판재 아래위의 변형률 분포는 각각의 유닛을 지날 때마다, 각각의 롤을 지날 때마다 그 값이 증가되고 각 유닛의 압하를 부근에서 그 유닛에 대한 최대변형률을 가지며 상대적으로 그 크기는 압하량이 증가할수록 값이 커지며 교정변형률도 압하량이 증가할수록 값이 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 9에 나타나 있는 B(또는 T) 4.5 - 4.5 - 5.5 - 5.5의 B는 판재의 아래쪽(Bottom)을 의미하고 T는 위쪽(Top)을 의미한다. 각각 유닛 1(S)의 압하량이 4.5mm, 유닛2(S)의 압하량이 4.5mm, 유닛 3(B)의 압하량이 5.5mm, 유닛 4(B)의 압하량이 5.5mm 임을 의미한다. 대부분의 변형률이 유닛1(S)과 유닛 2(S)에서 발생하고 유닛 3(B)과 유닛 4(B)에서는 약간의 변형률 증가를 보이는데, 이는 유닛1(S)과 유닛 2(S)에서 대부분의 형상결함이 제거할 수 있는 롤 구성 형태를 가지고 있기 때문이다. 그리고 나머지 형상결함 중에서 Curl이나 Gutter는 유닛 3(B)과 유닛 4(B)를 통해서 제거된다. 한편 판재의 아래위 적분점에서 응력 분포를 살펴보면 각각의 롤을 지날 때마다 그 크기가 점점 증가하는 것을 알 수 있는데 유닛1(S)과 유닛 2(S)에서 대부분의 경화현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 유닛 3(B)과 유닛 4(B)에서는 각각의 유닛의 압하물에서 국부적으로 응력이 가장 크게 나타나는 것으로 나타났는데, 이것은 유닛 3(B)과 유닛4(B)가 형상결함 중에서 Curling이나 Guttering을 제거하기 위한 적절한 롤 배치 형태를 가지고 있음을 알 수 있다.

판재의 아래위 적분점에서 압하량의 변화에 따른 교정 변형률의 변화를 Fig. 11에 도시하였는데, 압하량이 증가함에 따라 교정변형률은 상대적으로 커지는 것을 알 수 있으며 판재의 아래위 교정변형률의 차이는 거의 없지만 스프링백 후에는 그 차이가 훨씬 커짐을 알 수 있다. 판재의 아래위 변형률 차이가 스프링백 후에 증가되며, 압하량 3.5 - 3.5 - 4.0 - 4.0mm, 4.0 - 4.0 - 5.0 - 5.0mm, 4.5 - 4.5 - 5.5 - 5.5mm, 5.0 - 5.0 - 6.0 - 6.0 mm에서는 판재의 아래쪽의 잔류변형률이 위쪽보다 크며, 압하량 3.0 - 3.0 - 4.0 - 4.0mm를 부가했을 때는 판재의 아래쪽 잔류변형률 보다 위쪽의 잔류변형률이 약간 더 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12에는 스프링백 후의 판재의 형상을 도시하였는데, 인장력이 일정한 상태에서 압하량의 변화에 따라 판재의 최종형상이 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 압하

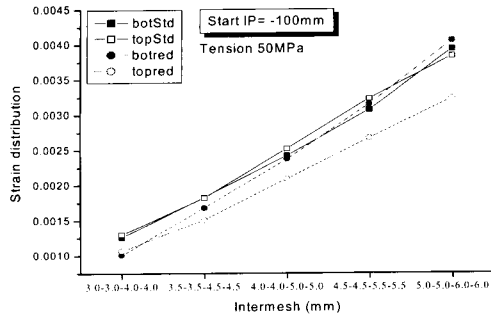


Fig. 11 Residual strain of the strip by the springback after tension levelling in the full tension levelle -r

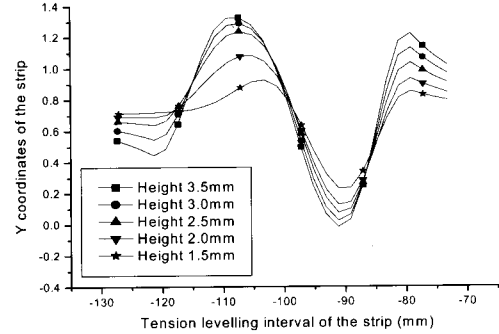


Fig. 13 Shapes of steel strip with the shape defect

폭이 더 커서 판재가 위쪽으로 휘어지는 것을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 설계된 인장교정기에 대해서 판재의 형상과 물성치가 주어져 있을 때 인장력과 압하량을 변화시켜 잔류곡률을 최소화 할 수 있음을 알 수 있으며 인장력 50MPa, 압하량 3.0-3.0-4.0-4.0mm에서 판재의 잔류곡률이 가장 작아짐을 알 수 있다.

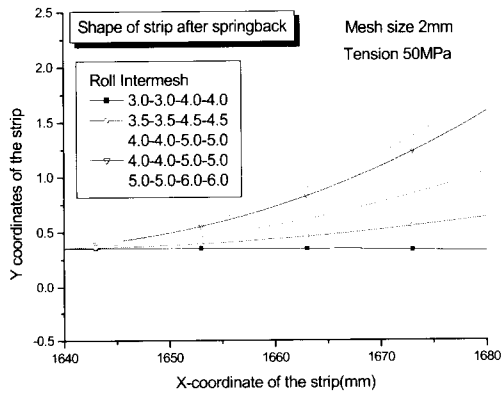


Fig. 12 Deformed shape of the strip by the springback after tension levelling in the full tension leveller

량 3.5 - 3.5 - 4.0 - 4.0 mm, 4.0 - 4.0 - 5.0 - 5.0mm, 4.5 - 4.5 - 5.5 - 5.5 mm, 5.0 - 5.0 - 6.0 - 6.0mm일 때는 압하량의 굽힘에 의한 판재의 아래쪽에서 변형률이 다른 지지물들에 의해 판재의 위쪽에서 발생한 변형률보다 상대적으로 커서 교정 후에 판재의 아래쪽의 잔류변형률이 더 크게 발생하여 판재가 위쪽으로 휘어지는 것을 알 수 있다. 그러나 압하량 3.0 - 3.0 - 4.0 - 4.0mm에서는 압하량에서 최대변형률이 발생하지만 상대적으로 다른 지지물들에서 발생하는 변형률이 상대적으로 더 커서 교정 후 스프링백에 잔류변형률이 판재의 위쪽에서 약간 더 크게 발생하여 판재가 약간 아래쪽으로 휘어지는 것을 알 수 있다. 이상에서 알 수 있는 바와 같이 인장교정이 끝나고 스프링백을 수행한 경우, 본 연구에서 설계된 인장교정기에서는 인장력이 일정할 때 압하량이 증가할수록 판재의 잔류변형률이 판재의 위쪽보다 아래

4.2 형상결함이 있는 판재에 관한 순차모델 해석  
형상결함이 포함된 금속 판재를 해석하기 위해서 선택한 교정기의 모델은 앞 절의 모델과 동일하고, 판재는 정현파(Sine Wave) 형태의 형상결함이 포함된 판재를 선정하였다. 형상결함은 Fig. 13에서 설정된 5가지 중에서 결함 높이가 2mm인 것을 선정하였다. 이것은 현장에서 결함과 가장 유사한 높이/길이 비를 가지는 형상 결함이다. 판재의 형상결함 길이는 40mm이고 결함 높이는 2mm이며 전체 교정구간은 50mm이다. 사용된 재료는 SPCEN으로 물성치와 기타 해석 조건은 위와 동일하다. 이 순차모델에 대해서 인장교정 후, 압하량과 인장력 변화에 따른 판재의 교정구간의 변형률과 응력의 분포, 스프링백 후 판재의 교정구간의 잔류변형률과 잔류응력, 판재의 최종 형상 등을 고찰하였다.

압하량 변화에 따른 판재의 교정구간에서 응력과 변형률의 분포를 각각 Fig. 14와 Fig. 15에 도시하였다. 판재의 아래 부분은 판재의 초기 형상결함 형태와 비슷한 형태의 교정변형률 분포를 나타내고 있는데, 그 크기는 압하량이 증가할수록 상대적으로 더 커지는 것을 알 수 있다. 즉 정현파의 최대값 부근에서 판재의 아래 부분은 굽힘에 의한 최대 인장을 받게 되고 정현파의 최소값 부근에서 판재의 아래쪽은 굽힘에 의해서 가장 크게 압축을 받게 된다. 하지만 인장력이 판재의 전체에 작용하고 있기 때문에 교정변형률의 절대값은 정현파의 최대값 부

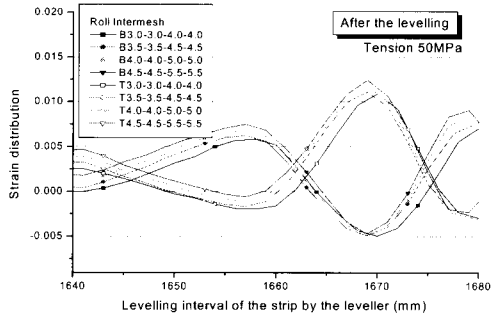


Fig. 14 Strain distribution of the levelling section of the strip after tension levelling with the variation of the back tension in the full assembly model

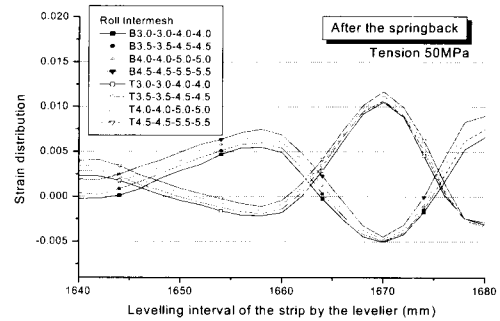


Fig. 16 Strain distribution of the levelling section of the strip after the springback with the variation of the back tension in the full assembly model

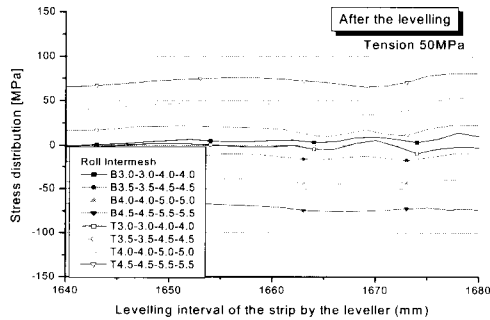


Fig. 15 Stress distribution of the levelling section of the strip after tension levelling with the variation of the back tension in the full assembly model

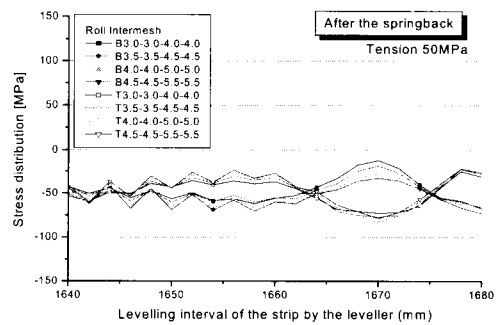


Fig. 17 Stress distribution of the levelling section of the strip after the springback with the variation of the back tension in the full assembly model

근에서 더 큰 교정변형률을 가지게 된다. 판재의 위쪽에서는 판재의 초기 결함 형태와 반대되는 교정변형률 분포를 나타내는데, 압하량이 증가할수록 변형률의 크기도 상대적으로 더 커지는 것을 알 수 있으며 정현파의 최대 값 부근에서 판재의 위쪽은 굽힘에 의한 최대 압축을 받게 되고 정현파의 최소값 부근에서 굽힘에 의해서 교정 구간 내에서 가장 큰 인장을 받게 된다. 교정 후 응력의 분포에 있어서는 변형률의 분포 형태와 약간 다른 경향을 보이는데, 교정구간에 있어서 응력변화가 그다지 크지 않다는 것을 알 수 있다. 압하량의 증가에 따라 판재의 아래위의 응력은 상대적으로 증가하는데 판재의 아래쪽은 압하량 3.5-3.5-4.5-4.5mm, 4.0-4.0-5.0-5.0mm, 4.5-4.5-5.5-5.5mm 일 때 압축응력을 받고 압하량 3.0-3.0-4.0-4.0mm 일 때는 인장응력을 받는다는 것을 알 수 있다. 그리고 판재의 위쪽은 압하량 3.5-3.5-4.5-4.5mm, 4.0-4.0-5.0-5.0mm, 4.5-4.5-5.5-5.5mm 일 때 인장응력을

받고 압하량 3.0-3.0-4.0-4.0mm 일 때는 압축응력을 받는다는 것을 알 수 있다.

스프링백 후에 교정구간에서의 잔류변형률은 교정변형률과 거의 비슷한 분포를 나타내며 그 크기는 탄성한계 차이만큼 작다는 것을 Fig. 16에서 알 수 있다. 인장교정 공정 후 판재는 인장력만 작용하고 있는 상태가 되는데 이 상태에서 하중을 제거했을 때 탄성변형률 만큼 줄어든 변형률 값이 잔류변형률이 되며 영구적으로 판재의 최종적인 형상에 그대로 남아 있게 된다. 그러나 Fig. 17에 나타난 응력분포에 있어서는 압하량에 따라서 그 값은 상대적으로 증가하지만 교정 후 응력분포와는 달리 스프링백 후에는 판재의 아래위는 교정구간에서 전체적으로 압축응력을 받게 된다. 그러나 판재가 교정구간에서 두께방향을 따라 전체적으로 압축응력을 받는 것이 아니라 판재의 아래위는 압축응력을 받고 중간부분은 인장응력을 받는 것을 확인하였다.

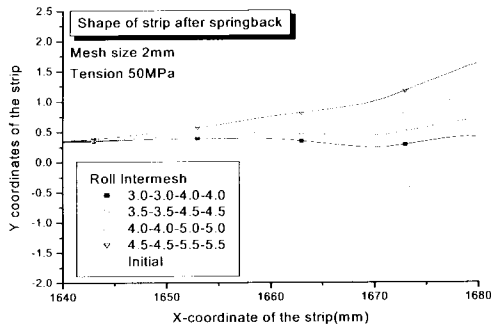


Fig. 18 Deformed shape of the strip by the springback after tension levelling with the variation of the roll intermesh in the full assembly model

스프링백 후에 판재 변형형상을 Fig. 18에 도시하였는데, 압하량이 증가할수록 판재의 최종적인 형상이 위쪽으로 휘어지는 것을 알 수 있다. 교정구간에는 형상결함이 없는 부분이 양쪽에 있고 형상결함이 정현파 형태로 포함된 부분이 있기 때문에 인장교정기 전체에 대해 인장교정을 실시할 경우에 결함이 없는 부분은 그대로 원래의 형상을 유지해야 하며 형상결함이 포함된 부분은 형상결함을 제거하여 잔류곡률을 최소화해야 한다. Fig. 18에서도 알 수 있는 바와 같이 압하량 3.5-3.5-4.5 4.5 mm, 4.0-4.0-5.0-5.0mm, 4.5-4.5-5.5 5.5 mm 일 때는 압하량 3.0-3.0-4.0 4.0mm 에 비하여 형상결함을 더 많이 제거할 수 있지만 형상결함이 없는 부분에 좋지 않은 변형을 발생시켜 오히려 잔류곡률을 증가시키는 결과는 가져왔다. 그러므로 본 연구에서 설계한 인장교정기에 대해 인장력 50MPa, 압하량 3.0 3.0-4.0-4.0mm 일 때 형상결함이 없는 부분의 변형을 최소화하며 형상결함이 있는 부분의 잔류곡률을 최소화 할 수 있음을 알 수 있다.

실제 판재의 인장교정 전후의 판재의 형상결함의 높이 변화율이 최대 0.9 정도이면 판재의 형상결함이 모두 제거되는 데, 본 논문에서 수행한 유한요소 해석 결과 인장교정기에 전체에 대해 인장력 50MPa, 압하량 3.0-3.0-4.0-4.0mm 일 때 높이 변화율이 0.89로 나타났기 때문에 본 순차모델로 인장교정 공정 전체를 해석한 결과는 판재의 형상결함을 제거할 수 있다는 확인하였다.

### 5. 결론

본 논문에서는 계산 시간과 경제성에 의한 문제로 해석이 거의 불가능한 인장교정기 전체를 해석하기 위하여 순차모델 해석 방법을 제안하고 두개의 유닛으로 구성된

인장 교정기 모델에 대하여 조합모델 기법과 비교하여 해석 방법의 정확성과 타당성을 검증했다.

제안된 기법을 이용하여 인장교정기 전체조합에 대해 형상결함이 없는 판재에 대하여 압하량의 변화에 따른 변형률, 잔류변형률, 스프링백 후 판재의 최종형상을 밝혀내었고, 형상결함이 있는 급속 판재에 관한 탄소성 유한요소 해석 결과로 판재의 교정을 위한 최적 압하량과 인장력을 구하였으며, 설계된 교정기가 형상결함을 제거할 수 있음을 확인하였다.

### 후 기

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

### 참 고 문 헌

- (1) W. L. Roberts, Cold Rolling of Steel, Marcel Dekker, Inc., New York, 1978.
- (2) E. J. Patula, "The Tension-Roller-Leveling Process -Elongation and Power Loss", J. Eng. Ind. Trans. ASME, Vol. 101, pp. 269~277, 1979.
- (3) S. Hattori, Y. Maeda, T. Matsushita, S. Murakami and J. Hata, "Theoretical Evaluation of Effects of Roll Number in Tension Levelling Machine", J. JSTP, Vol. 28, No. 312, pp. 34~40, 1987.
- (4) K. Kawaguchi, "A Numerical Study on the Wrapping Angle of Strip in the Tension Roller Leveller", J. JSTP, Vol. 21, No. 236, pp. 807~814, 1980.
- (5) T. Kajiwara, H. Hurumoto, H. Takemasa and N. Taniguchi, "Analysis of the Curling and Cross-bow of Strips on Tension Leveller," Technical Report in Mitsubishi Heavy Industry (in Japanese), pp315~320, 1988.
- (6) F. Yoshida and M. Urabe, "Computer-aided Process Design for the Tension Levelling of Metallic Strips", J. Mater. Process Tech. Vol. 89-90, pp. 218~223, 1999.
- (7) 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., Vol. 113, pp. 714~719.