한국소성가공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집 pp.201~204

순차 단순모델을 이용한 전체 인장교정 공정의 탄소성 유한요소해석

이형욱* · 허 훈* · 박상래*

Finite Element Elasto-plastic Analysis of a Full Tension Levelling Process using Sequential Unit Models

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 and provides the effect of the intermesh and optimum amount of the intermesh in tension levelling process.

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

1. 서 론

박판금속 성형공정이 다른 가공공정에 비해 가공표면과 정밀도가 양호하며 제조원가 낮아 생산성이 높으며, 최종제품이 경량이고, 부품으로서의 교환성이 뛰어나기 때문에 현대산업의 많은 부분에서 박판재료의 수요는 갈수록 증가하고 있는 실정이다. 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, 불량의 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.[1] 인장교정기술은 굽힘과 인장을

* 한국과학기술원 기계공학과

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 대부분 일본 기업에 집중되어 있는 실정이다. 현재까지의 인장교정기의 기구분석 및 공정설계는 실험에 의존하고 있거나, 간단한 고체역학 이론을 이용한 근사해가 대부분이다.

여러 연구자들에 의해 인장교정기의 실험적인 연구[2-3] 및 수치적인 연구[4-5]와 분석이 이루어졌다. Hattori 등[3]은 Curling, Guttering을 예측할 수 있는 간단한 수학적 모델을 제시하였다. Kawaguchi[4]는 판재의 형상교정에 필요한 인장력과 작업롤의 직경, 압하량을 얻었다. 최근 Yoshida와 Urabe[6]는 평면변형률 조건 하에 2차원 탄소성 유한요소 프로그램을 이용하여 롤피치를 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.

본 논문에서는 금속 인장교정 공정에 관한 단일 모델 해석을 기반[7]으로 전체 인장교정 공정에 관한 해석을 수행하였다. 보다 효율적인 인장교정 공정해석을 수행하기 위해 순차 단순모델을 이용하여 해석하는 기법을 제시하고, 이를 검증하였다. 검증된 방법을 이용하여 전체 인장교정 공정에 관하여 해석을 수행하고 설계변수인 압하량에 관한 영향을 분석하였다.

2. 유한요소 해석모델 및 해석조건

본 논문에서 해석에 사용되는 인장교정기는 Fig. 1과 같이 4개의 유닛으로 구성되어 있다. 전체 인장교정 모델에 관한 해석을 위해 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 단순 모델 해석 방법을 적용하였다. 해석에 사용된 재료는 자동차 강판용 재료로 많이 쓰이는 SPCEN이며 탄성계수는 190GPa, 포와송비는 0.3, 변형경화 선도는 $\bar{\sigma}=533.252(0.006505+\bar{\varepsilon}^{p})^{0.2557}$MPa이며, 판재와 롤 사이의 마찰계수는 0으로 가정하였다.

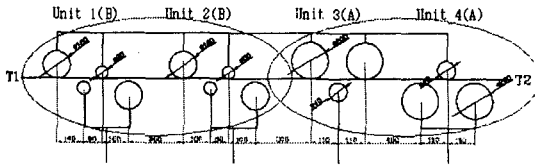

Fig. 1 Roll arrangement of the designed tension leveller and the assembly model A-A and the assembly model B-B

3. 순차모델과 조합모델의 해석

전체 인장교정 공정을 해석하는 데에는 많은 시간과 경제적 손실이 따르기 때문에 본 논문에서는 해석의 효율성을 위하여 순차 단순 모델을 해석하였다. 순차 단순 모델 해석 결과의 신뢰성 확보를 위하여 Fig. 1에 표시된 바와 같이 조합 모델 B-B와 조합 모델 A-A에 대해 직접적인 탄소성 유한요소 해석을 수행하고, 결과를 순차 단순 모델 B-B와 순차 단순 모델 A-A에 대한 해석 결과와 비교하여 살펴보았다. 조합 모델 B-B와 순차 단순 모델 B-B의 해석을 위하여 판재는 형상결함이 없는 판재를 사용하였다. 이 모델에 대해서 변형률의 분포, 스프링백 후 판재의 최종 형상 등을 고찰한 후 이를 비교하였다. 같은 방법으로 조합 모델 A-A와 순차 단순 모델 A-A에 대해서도 변형률의 분포, 스프링백 후 판재의 최종 형상 등을 고찰한 후 이를 비교하였다.

조합 모델 B-B와 순차 단순 모델 B-B에 대해 인장력 50MPa이고 압하량 4mm일 때 유닛 1(B)의 첫 번째 롤에서 100mm 떨어진 관측점의 변형률을 추적하여 Fig. 2에 도시하였다. 유닛 1(B)을 지나서 유닛 2(B)의 첫 번째 롤까지는 조합 모델로 해석 한 경우가 순차 단순 모델로 해석한 경우에 비하여 판재 아래위의 변형률이 다소 크게 나타났지만 유닛 2(B)의 두 번째 롤을 지나면서 그 차이가 점점 줄어들고 최대 변형률을 가지는 유닛 2(B)의 세 번째 롤에서는 같은 값을 가지게 된다. 교정 후 판재 아래위의 교정변형률은 조합 모델로 해석 한 경우에 비해 순차 단순 모델의 경우가 적게 나타나지만 그 차이는 거의 없음을 알 수 있다.

조합 모델 A-A와 순차 단순 모델 A-A에 대해 인장력 50MPa이고 압하량 5mm일 때 유닛 3(A)의 첫 번째 롤에서 100mm 떨어진 관측점의 변형률을 Fig. 3에 도시하였다. 앞의 경우와 마찬가지로 유닛 3(A)을 지나서 유닛 4(A)의 첫 번째 롤까지는 조합 모델로 해석 한 경우가 순차 단순 모델로 해석한 경우에 비해 판재 아래위의 변형률이 다소 크게 나타났지만 최대변형률을 가지는 유

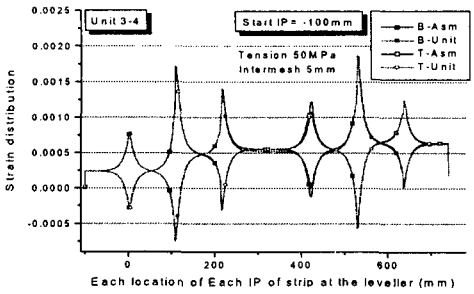

Fig. 2 Strain and stress history at the designated point in the assembly model A-A and the sequencing unit model A-A

닛 4(A)의 두 번째 롤과 세 번째 롤에서는 같은 값을 가지고 교정 후 판재 아래위의 교정변형률은 조합 모델로 해석 한 경우에 비해 순차 단순 모델의 경우가 적게 나타나지만 그 차이는 거의 없음을 알 수 있다. 스프링백 후 판재의 최종형상은 순차 단순 모델의 경우에 비해

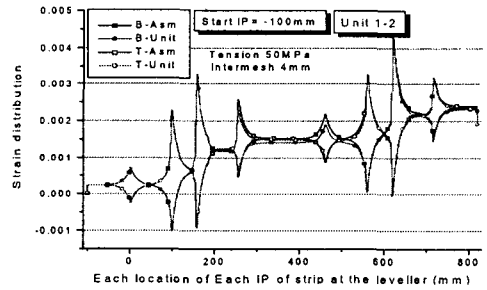

Fig. 3 Strain history at the designated point in the assembly model B-B and the sequential unit model B-B

조합 모델의 경우가 위쪽으로 더 변형이 되었다. 이는 순차 단순 모델의 경우는 첫 번째 유닛이 제거되면서 압하롤에 의해 판재에 부가되었던 인장력이 줄어들어 변형량이 적게 발생했기 때문이다. 조합 모델로 해석한 경우를 정해라고 가정했을 때 순차 단순 모델로 해석한 경우와 수치적으로 비교해 보면, A-A 모델의 경우는 교정 높이에 있어서 3.8% 정도, B-B 모델의 경우는 교정 높이에 있어서 6.9% 정도 오차가 나는 것을 알 수 있다.

위와 같이 전제 인장교정 공정에 사용되는 두 개의 유닛들로 구성된 조합 모델 B-B와 조합 모델 A-A를 순차 단순 모델들로 해석한 경우와 비교해 보았을 때 해석 시간은 5배 더 소요되고 해석 결과는 거의 차이가 없다. 약간의 차이는 각각 첫 번째 유닛의 압하롤이 제거되면서 발생하지만 변형률의 분포, 스프링백 후 판재의 최종형상을 고찰한 결과 경제성과 시간을 고려할 경우 순차 단순모델로 해석하는 것이 더 효율적임을 알 수 있다. 다음 장에서는 순차 단순모델을 이용하여 인장교정기 전체 조합을 해석하였다.

4. 순차모델을 이용한 전체 인장교정 공정해석

순차 단순 모델 해석의 효율성과 정확성을 바탕으로 인장교정기 전체 조합에 대한 탄소성 유한요소 해석을 수행하였다. 결함이 포함되지 않은 판재를 해석하기 위하여 선택한 단순 모델은 Fig. 1과 같고 각각의 단순 모델에 대해 순차적으로 유한요소 해석을 수행해서 인장교정 전체를 묘사하였다. 이 모델에 대해서 압하량 변화에 따른 변형률의 분포, 최종 형상 등을 고찰하였다.

압하량 변화에 따른 변형률의 분포를 살펴보면 Fig. 4와 같고, 유닛 1(B)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 압하롤 부근에서 그 유닛에 대한 최대변형률을 가지며 상대적으로 그 크기는 압하량이 증가할수록 값이 커지며 교정변형률도 압하량이 증가할수록 값이 커지는 것을 알 수 있다. 여기서

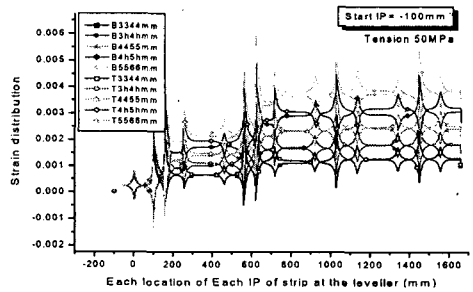

Fig. 4 Strain history at the designated point with the variation of the Intermesh in the full tension leveller

Fig. 4에 나타나 있는 B4h5h는 B는 판재의 아래쪽을 의미하고 각각 유닛 1(B)의 압하량이 4.5mm, 유닛 2(B)의 압하량이 4.5mm, 유닛 3(A)의 압하량이 5.5mm, 유닛 4(A)의 압하량이 5.5mm 임을 의미한다. 대부분의 변형률이 유닛1(B)과 유닛 2(B)에서 발생하고 유닛 3(A)과 유닛 4(A)에서는 약간의 변형률 증가를 보이는데, 이는 유닛1(B)과 유닛 2(B)에서 대부분의 형상결함이 제거할 수 있는 롤 구성 형태를 가지고 있기 때문이다. 그리고 나머지 형상결함 중에서 Curl이나 Gutter는 유닛 3(A)과 유닛 4(A)를 통해서 제거된다. 스프링백 후의 판재의 최

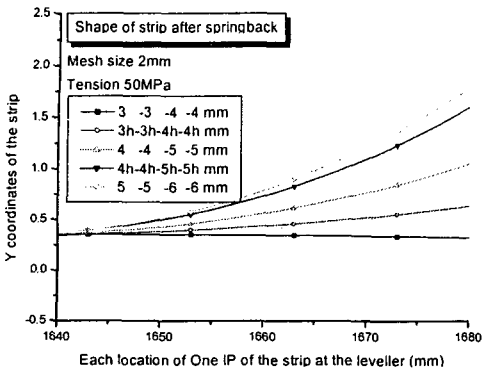

Fig. 5 Deformed shape of the strip by the springback after tension levelling in the full tension leveller

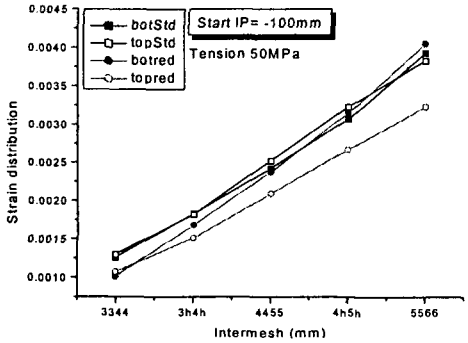

Fig. 6 Residual strain of the strip by the springback after tension levelling in the full tension leveller

종형상을 Fig. 5, 교정변형률과 잔류변형률을 Fig. 6에 도시하였다. 압하량이 증가함에 따라 교정변형률은 상대적으로 커지며 교정변형률의 차이는 거의 없지만 스프링백 후 잔류변형률은 그 차이가 훨씬 커짐을 알 수 있다. 압하량의 변화에 따라 판재의 최종형상이 크게 달라지는데, 압하량 3.5-3.5-4-4mm, 4-4-5-5mm, 4.5-4.5-5.5-5.5 mm, 5-5-6-6 mm일 때는 판재가 위쪽으로 휘어지고 압하량 3-3-4-4mm일 때는 판재가 약간 아래쪽으로 휘어지는 것을 알 수 있다. 본 해석에 사용된 인장교정기에서는 인장력이 일정할 때 압하량이 증가할수록 판재의 잔류변형률이 판재의 위쪽보다 아래쪽이 더 커서 판재가 위래쪽으로 휘어지는 것을 알 수 있다. 그러므로 본 논문에서 설정한 인장교정기에 대해서 판재의 형상과 물성치가 주어져 있을 때 압하량을 변화시켜 잔류곡률을 최소화 할 수 있음을 알 수 있으며 인장력 50MPa, 압하량 3-3-4-4mm에서 판재의 잔류곡률이 가장 작아짐을 알 수 있다.

5. 결 론

인장교정기 전체를 전체 모델로 해석하는 것이 거의 불가능하기 때문에 시간과 경제성을 고려하여 인장교정기 전체 조합를 해석할 수 있는 순차 단순 모델 해석 방법을 제안하고 두개의 유닛으로 구성된 조합 모델에 대한 유한요소 해석 결과와 비교해서 이 해석 방법의 정확성과 타당성을 검정했다.

제안된 결과를 이용하여 인장교정기 전체조합에 대해 형상결함이 없는 판재에 대하여 압하량의 변화에 따른 변형률, 잔류변형률, 스프링백 후 판재의 최종형상을 밝혀내었고, 형상결함이 포함되지 않은 금속 판재에 관한 탄소성 유한요소 해석 결과, 압하량의 변화에 따라 교정 후 판재의 최종형상이 크게 달라지는 것을 확인하고, 판재의 교정을 위한 최적 압하량과 인장력을 구하였다.

후 기

본 연구는 포항산업과학연구원의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) W. L. Roberts, 1978, Cold Rolling of Steel, Marcel Dekker, Inc., New York.

(2) E. J. Patula, 1979, "The Tension-Roller-Leveling Process-Elongation and Power Loss", J. Eng. Ind. Trans. ASME, Vol. 101, pp. 269~277.

(3) S. Hattori, Y. Maeda, T. Matsushita, S. Murakami and J. Hata, 1987, "Theoretical Evaluation of Effects of Roll Number in Tension Levelling Machine", J. JSTP, Vol. 28, No. 312, pp. 34~40.

(4) K. Kawaguchi, 1980, "A Numerical Study on the Wrapping Angle of Strip in the Tension Roller Leveller", J. JSTP, Vol. 21, No. 236, pp. 807~814.

(5) T. Kajiwara, H. Hurumoto, H. Takemasa and N. Taniguchi, 1988, Technical Report in Mitsubishi Heavy Industry (in Japanese), pp. 315~320.

(6) F. Yoshida and M. Urabe, 1999, "Computer-aided process design for the tension levelling of metallic strips", J. Mater. Process Tech. Vol. 89-90, pp. 218~223.

(7) 박상래, 이형욱, 허훈, 2000, "탄소성 유한요소법을 이용한 금속인장교정기의 공정변수 설계", 한국소성가공학회 2000년도 추계학술대회 논문집, pp. 42~48