

2롤 교정공정에서 인발선재의 선경변화

문 창 선* · 김 낙 수*†

* 서강대학교 기계공학과

Dimensional Change in Drawn Wire Product in the Two Cross-Roll Straightening Process

Changsun Moon* and Naksoo Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

(Received December 26, 2011 ; Revised August 20, 2012 ; Accepted January 25, 2013)

Key Words: Dimensional Change (선경변화), Residual Stress(잔류응력), Straightness(진직도), Two Cross-Roll Process (2롤 교정공정)

초록: 상온에서의 2롤 교정공정은 인발선재의 진직도를 향상시키기 위한 가공방법이다. 인발과정에서 생긴 인발선재의 내부 및 외부에 남아 있는 잔류응력은 2롤 교정을 거치면서 변하게 된다. 그에 따라서 인발선재의 선경에도 변화가 생긴다. 인발후 잔류응력이 남아 있는 소재에 대하여 롤사이의 거리(h)와 롤의 교차각도(α_u, α_d)에 따른 선경변화를 분석하고 최종제품의 잔류응력과 선경변화를 예측하였다. 2롤 교정을 통한 최종제품의 선경변화를 예측해 실험값과 비교 및 검증한 결과 타당한 계산결과를 얻을 수 있었다. 상부롤과 하부롤의 교차각도는 잔류응력과 선경변화에 미치는 영향이 미미하였다. 반면에, 롤사이의 거리(h)는 잔류응력과 선경변화에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

Abstract: The two cross-roll straightening process at room temperature is a manufacturing method for improving the straightness of a drawn wire. The distribution and magnitude of the internal and surface residual stresses of the drawn wire are changed after the wire-drawing process through the two cross-rolls; this also results in a change in the diameter of the drawn wire. The remaining residual stresses of the drawn wire after the wire-drawing dimensional changes were analyzed according to the distance between the rolls, oblique angle between the axes of the roll and the wire, predicted residual stresses, and dimensional change in the final product. The oblique angle between the concave and convex rolls did not affect the residual stresses or dimensional change, but the distance between rolls did.

- 기호설명 -

V_x	: 공급선재의 수평속도(Horizontal velocity of the fed wire)
σ_x	: 축방향 잔류응력(Axial residual stress)
σ_y	: 반경방향 잔류응력(Radial residual stress)
σ_z	: 원주방향 잔류응력(Hoop residual stress)
α_u	: (상부)오목롤축과 선재 간의 교차각도 (Oblique angle of the axes of the concave roll and the wire)
α_d	: (하부)볼록롤축과 선재 간의 교차각도 (Oblique angle of the axes of the convex roll and the wire)
h	: 롤사이 (틈새)거리(Distance between the rolls)
n	: 롤 회전속도(Rotation speed of the roll)
D_r	: 롤 직경(Diameter of the roll)

1. 서론

상온에서의 2롤 공정은 인발되어 나온 소재가 우수한 진직도를 갖도록 가공하는 방법이다. 인발선재는 인발다이를 통과하면서 직경이 줄어들고 인발다이와 소재가 접촉한 면에서의 압력과 미끄럼 운동에 의해 소재에는 탄성회복, 인발다이에는

† Corresponding Author, nskim@sogang.ac.kr

마찰과 마모가 생긴다. 이로 인해 인발후 소재는 지정된 내경으로 인발제품이 가공되지 않으며 인발제품의 내부 및 외부에 잔류응력이 남게 된다. 인발제품은 2롤 교정을 거치면서 내부 및 외부의 잔류응력과 선경이 변하게 된다. 인발과 2롤 교정 후 소재의 직경간의 차이를 선경변화라고 정의한다. 2롤 교정후 최종제품의 품질은 선경변화량으로 평가하므로, 선경변화를 파악하지 못하면 최종제품의 품질관리가 어렵다. 인발공정에서 인발제품의 품질에 영향을 주는 인자들로 다이의 마모, 온도분포, 각종 공정변수, 열적조건, 그리고 마찰조건에 관하여 여러 연구들이 수행된 바 있다.

Moon 등^(1,2)은 인발공정에서 인발제품에 영향을 미치는 열적조건과 마찰조건을 간단한 측정치들과 비교하여 역공학적으로 결정하였으며, 다이의 온도분포를 고려하여 소재의 탄성회복, 다이의 탄성변형, 그리고 다이와 소재의 열변형이 인발제품의 선경변화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

2롤 교정후 최종제품의 기계적인 성질, 소재의 변형거동, 그리고 공정변수에 따른 최종제품의 진직도에 대한 연구들도 수행되었다. Mutrux 등⁽³⁾(2008)은 유한요소해석을 이용하여 롤사이를 통과하는 소재의 응력분포에 대해 연구하였다. 그들은 교정공정 동안 소재의 질점의 경로를 분석하였다. 그리고 굽힘해석에 의해 얻어진 소재의 변형률의 영향은 미미하다고 가정하였으며 질점의 변형경로에 따른 요소들에 관련된 변형률텐서만 고려하여 계산하였다. 또한, 그들은 혼합 등방-운동 구성모델을 이용하여 변형률 이력에 따른 응력을 계산하였으며, 계산된 결과의 타당성을 위해 실험에서 측정된 소재표면의 응력과 비교하였다. 그 결과, 응력값의 차이는 보이나 경향은 비슷함을 확인하였다. Mutrux 등⁽⁴⁾(2010)은 2롤 교정에서 강종 SAE 1144의 소재에 대한 인장시험을 통해 얻은 구성방정식과 항복응력을 이용하여 소재의 연화에 대해 연구하였다. 그들은 유한요소해석을 통해 계산된 소재의 연화와 측정치를 비교하여 타당한 결과를 얻었다. Mutrux 등⁽⁵⁾(2011)은 유한요소해석을 이용하여 2롤 교정중 소재의 곡률의 변화에 대하여 연구하였다. 그들은 2롤 교정 전후의 소재의 곡률의 변화를 비교하였으며, 교정후 소재의 곡률은 상당히 줄었음을 확인하였다. Kim 등⁽⁶⁾은 인발된 원형 소재를 2롤 교정기의 상부롤과 하부 롤의 교차각도를 변화시키면서 원형 소재의 소성변형에 미치는 영향을 분석하였고, 상부롤과 인발된 원형소재의 교차각도 및 접합부의 길이 변화가 강도 및 강

성에 미치는 영향과 변형된 형상 및 롤에 발생하는 응력집중현상을 파악하여, 롤과 소재사이의 교차각도 변화에 대한 소재의 진직도 변위 및 소성변형에 대해 연구하였다. 그들은 롤 회전전에 따른 소재의 응력분포에 대해 비교한 결과 소재의 중앙부에서 균일한 응력분포를 가짐을 확인하였으며 특정 롤의 교차각도에서 진직도가 좋음을 확인하였다.

Talukder 등⁽⁷⁾은 소재에 작용하는 유효모멘트, 롤에 작용하는 탈착력, 그리고 롤의 교차각도 등의 공정변수들을 고려하여 2롤 교정기의 형태에 따른 소재에 미치는 영향을 분석하였다. 그들은 소재와의 접촉이 짧은 롤 교정기의 경우에 탈착력이 클수록 롤의 진직도에 악영향을 미침을 확인하였다. 반면에, 소재와의 접촉이 긴 롤 교정기의 경우에 소재내부의 횡방향 압축응력으로 인해 소재의 진원도가 교정된다는 것을 확인하였다. Wu 등⁽⁸⁾은 소재의 교정에 대한 탄소성변형공정을 이론과 실험을 통해 연구하였다. 그들은 이론을 통해 2롤 교정기공정 중 변형하는 소재에 대한 교정정도에 대해 정량적으로 분석을 하였다. 그리고 이론을 통해 얻은 모델을 실험에 적용하였으며, 타당한 결과를 얻을 수 있었다. Nastran 등⁽⁹⁾은 교정중 소재의 안정화에 대해 연구하였다. 그들은 수치해석 모델을 통해 소재의 굽힘과 롤의 물림공정으로 인해 변형된 소재의 형상을 분석하였으며, 2롤 교정후 소재의 형상에 영향을 주는 인자들을 고려한 수치해석모델을 이용하여 안정적인 제품을 얻었다.

Wang 등⁽¹⁰⁾은 강소성 유한요소해석을 이용하여 2롤 교정공정을 연구하였다. 그들은 2롤 공정중 소재의 유동, 변형률, 그리고 손상치의 분포에 대한 결과를 분석하였고 이를 이용하여 2롤장비를 설계하였다. Srimani 등⁽¹¹⁾은 교정장비의 특정변수에 대한 선로의 진직도에 대해 연구하였다. 그들은 유한요소법을 이용하여 선로의 길이에 따른 굽힘변형을 분석하고, 설치된 롤의 위치를 조정하여 진직도를 향상시켰다. Kim 등⁽¹²⁾은 소재에 열을 가하거나 인장하여 마이크로미터 단위의 최종제품을 얻는 방법에 대해 연구하였다. 그들은 열을 가하여 소재 표면의 산화작용을 억제 시켰으며 다양한 실험분석을 통해 결정된 최적의 교정상태에서 소재를 인장시켜 진직도가 우수한 마이크로미터 단위의 최종제품을 얻었다. Balica 등⁽¹³⁾은 성형 후 소재의 형상에 대한 예측과 제품의 안정적인 생산을 하기 위한 연구를 하였다. 그들은 랩뷰(LabVIEW)를 이용하여 생산장비들을 조절함으로

써 소재의 형상을 예측하고 생산성을 향상시킬 수 있었다. Yamashita 등⁽¹⁴⁾은 냉간과 상온에서 인장교정이 초미세 소재에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 그들은 냉간보다 상온에서 인발선재를 교정했을 때 진직도가 더욱 개선됨을 확인하였다. 그러나 상온에서 교정시 인장력을 크게 하였을 때, 진직도가 더 나빠질 가능성도 있음을 확인하였다. Lu 등⁽¹⁵⁾은 자동교정장비의 교정정확도를 향상시키기 위해 탄소성이론에 기반한 교정모델에 대한 새로운 방법에 대해 연구하였다. 그들은 새로운 교정모델을 이용하여 교정정확도를 향상시킬 수 있었고, 실험을 통해 입증시켰다.

지금까지의 논문들은 2롤 교정후 최종제품의 기계적인 성질과 소재의 변형거동에 대한 내용이 대부분이며 롤의 교차각도, 롤사이의 거리, 그리고 상부롤과 소재의 접촉길이 등의 공정변수에 따른 최종제품의 진직도에 대한 내용을 주로 다뤘다. 반면에, 2롤 교정시 인발공정후 소재에 남아있는 잔류응력으로 인한 최종제품의 선경변화를 예측하기 위한 내용은 다루어지지 않았다. 본 연구에서는 인발후 소재를 이용하여 롤사이의 거리(h)와 롤의 교차각도(α_u , α_d)에 따른 선경변화를 분석하고 최종제품의 잔류응력과 선경변화를 예측하고자 한다.

2. 실험

상온의 인발공정에서 인발다이와 소재가 접촉면에서의 압력과 미끄럼 운동에 의해 소재에는 탄성회복, 인발 다이에는 마찰과 마모가 생긴다. 또한, 소재의 변형 및 마찰열로 인해 소재와 다이의 온도가 상승하며 이로 인해 지정된 다이 내경으로 제품이 가공되기 어려우며 소재의 선경은 지정된 직경 또는 다이 내경과 다르게 된다. 이로 인해 인발후 소재는 지정된 내경으로 인발제품이 가공되지 않으며 인발제품의 내부 및 외부에 잔류응력이 남게 된다.

소재는 인발 다이를 통과하기 전에 예비교정기 공정에서 1 차적으로 곧게 펴주는 작업을 거친 후 스케일제거공정에서 곧게 펴진 소재 표면의 스케일이 제거된다. 스케일제거공정 후 소재는 인발다이를 통과하면서 직경이 줄어들고 길이는 늘어난다. 인발된 선재는 절단공정으로 3m 씩 일정한 길이로 절단하여, 잘라진 소재를 2 롤 교정기의 롤사이를 통과시킨 후, 50 개의 소재에 대하여 마이크로미터를 이용하여 직경을 측정하였다. 각각의 소재에 일정한 간격으로 3 점의 선경을 측정하고 측

정된 치수들의 평균값을 계산하여 평균선경으로 정의하였다. 선경변화는 최종제품의 평균선경에서 인발후 소재의 평균선경을 뺀 값으로 정의하였다. 공정변수 즉, 롤사이의 거리와 교차각도에 따른 최종제품의 선경변화를 측정하였으며 측정된 선경값의 표준편차는 0.05% 수준이었다. Fig. 1(a)는 2 롤 교정기의 정면도이며 Fig. 1(b)는 2 롤 교정공정의 평면도를 나타낸 것이다. 2 롤 교정의 공정변수는 롤사이의 거리, 롤의 교차각도, 그리고 상부롤과 소재의 접촉길이 등이 있다. 2 롤 교정공정에서 사용된 소재의 강종은 S45CS 이다.

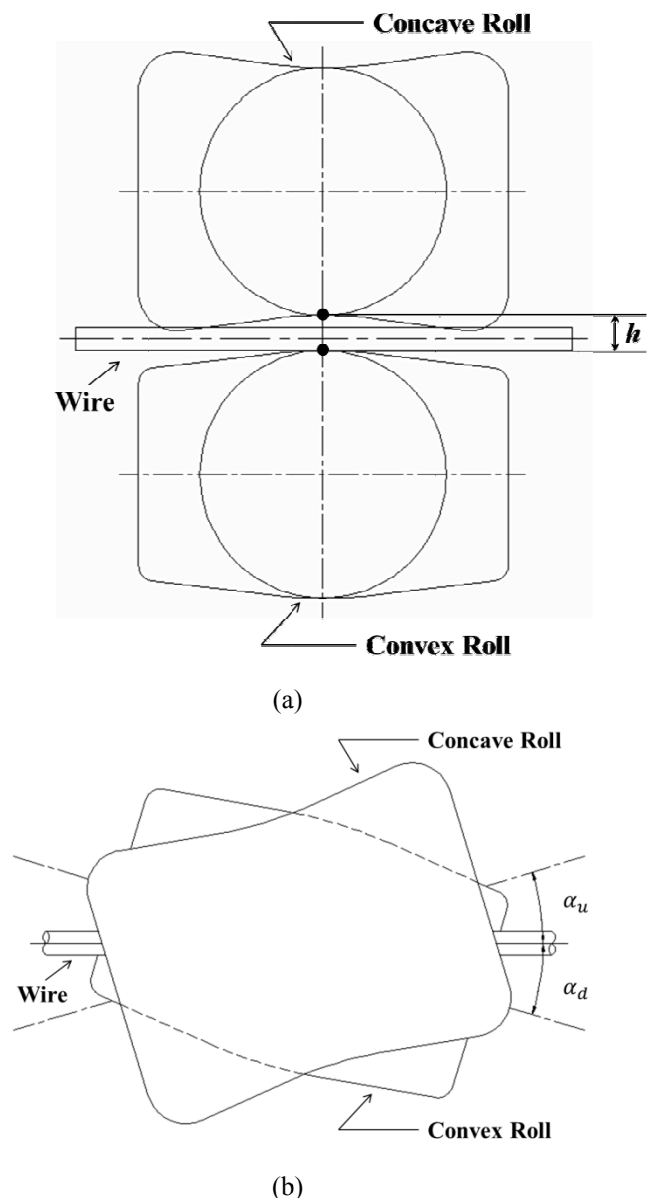


Fig. 1 Sketch of the two cross-roll process: (a) view from the front; (b) view from the top

3. 선경변화 분석

인발공정과 2 롤 교정공정을 통과하는 소재의 변형과 잔류응력은 3 차원 탄소성 유한요소법을 사용하여 해석하였다. 2 롤공정해석을 위해 DEFORM 3D 를 사용하였다. 유한요소해석에서는 소재와 다이의 접촉 및 분리조건에 따라서, 각 표면절점에서 계산되는 선경 값에 미세한 차이가 있다. 그러므로 2 롤 교정후 소재의 수치적인 평균선경을 정의할 필요가 있다. 계산된 평균직경은 소재표면에서 50 개의 절점에 대한 부피평균으로 정의하였다. 계산된 직경은 그 편차가 0.1%미만의 수준이기 때문에 실험과 의미 있게 비교할 수 있다. 식 (1)은 임의의 각도에 대한 롤의 회전속도를 산출하기 위해 나타낸 것이다.⁽¹⁶⁾

$$n = \frac{V_x \times 60}{\pi D_r \sin \alpha_u} \quad (1)$$

유한요소해석에 사용된 공정변수는 실험에서와 같은 값을 갖도록 설정하였다. 즉, 롤의 회전속도는 130rpm 이며, 상부롤과 하부롤은 동일한 방향으로 회전한다. Fig. 2 는 2 롤 교정모델의 각 부분을 나타낸 것이다. 소재는 롤의 회전에 의해 오른쪽에서 왼쪽으로 롤 사이를 통과하게 된다. 상부롤과 하부롤은 강제모델로 설정하였다. 안내장치(a)와 (b)는 2 롤 교정공정동안 소재가 롤사이를 통과할 때 이탈하지 않도록 해주는 역할을 하며, 강제모델로 설정하였다. 안내관은 안내장치와 같이 소재가 롤사이를 통과할 때 이탈하지 않도록 해주는 역할을 하는 동시에 길이가 긴 소재가 롤사이의 통과를 용이하게 해주며, 지탱해주는 역할을 하도록 강제모델로 설정하였다. 소재와 접촉하는 안내장치, 안내관, 그리고 롤사이에는 마찰과 열전달이 없다고 가정하였다.

Fig. 3 은 상온에서 소재의 강종인 S45CS 의 유동응력을 나타낸 것이다. Table 1 은 2 롤 공정에서 사용된 강종의 물성치를 정리한 것이다. 인발전 소재의 직경과 다이내경은 각각 10mm 와 8.1mm 이다. Moon 등^(1,2) 은 다이의 온도변화와 인발동력의 계산결과와 간단한 측정치들을 비교하여 마찰과 열적조건을 결정하였다. 역공학적으로 결정한 조건들을 이용하여 다이의 온도변화와 소재의 변형거동을 수치적으로 해석하였으며, 소재의 탄성회복, 다이의 탄성변형, 그리고 다이와 소재의 열변형이 인발제품의 선경변화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 그들은 이를 바탕으로 소재의 잔류응력과 선경변화를 계산하였다. 잔류응력은 소재가 다이를 완전히 빠져나온 후 다이와 소재의 접촉이 없는 상태에서 계산하였다. Fig. 4 는 인발후 소재

에 대한 축, 반경, 그리고 원주방향의 잔류응력을 나타낸 것이다. 소재의 표면에서 축방향과 원주방향에서는 인장잔류응력 그리고 반경방향에서는 압축잔류응력이 생긴다. Table 2 에는 인발후 선경변화의 측정치, 계산치 등을 비교하여 나타내었다.

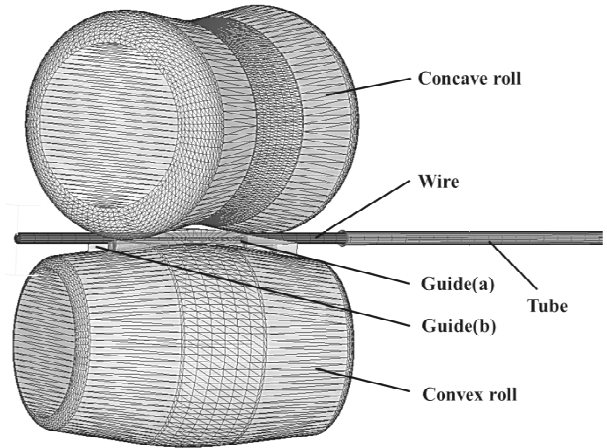


Fig. 2 The different parts of the two cross-roll model

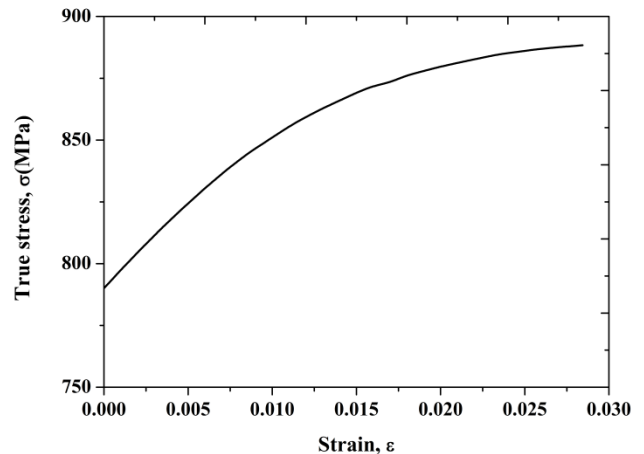


Fig. 3 True stress-strain curve of S45CS

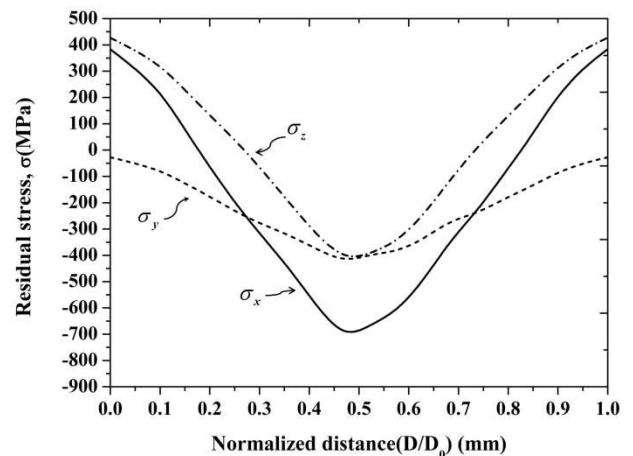


Fig. 4 Residual stresses of the wire after wire-drawing process

Table 1 Material properties used in the simulation

Material	S45CS
Young's modulus (GPa)	192
Poisson's ratio	0.3
Heat conductivity (W/mK)	51.9
Heat capacity (J/mmK)	0.486
Thermal expansion coefficient ($1/K$)	1.397e-05

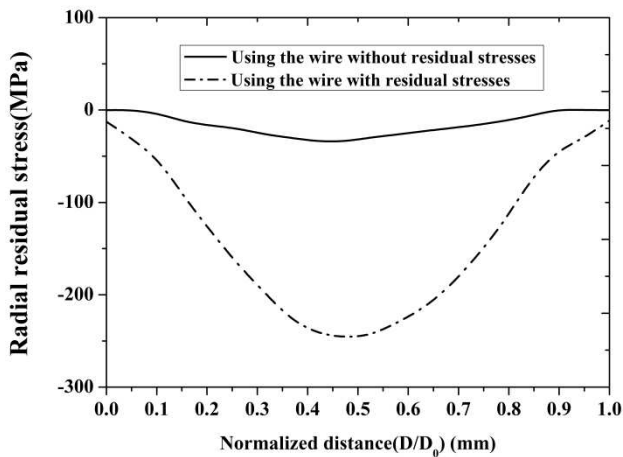


Fig. 5 Comparison of radial residual stress between the wire without residual stresses and the wire with residual stresses after two cross-roll straightening process

3.1 초기 잔류응력에 따른 선경변화

잔류응력은 소재가 변형된 후 외력이 모두 제거된 상태에서도 남아 있는 응력이다. 잔류응력은 가공된 제품의 치수 정밀도 및 품질에 큰 영향을 미친다. 소재의 초기 잔류응력이 선경변화에 미치는 영향을 알아보기 위해 잔류응력이 없는 소재와 인발 후 잔류응력이 있는 소재를 2롤 교정기에 통과시켜 잔류응력분포와 선경변화를 비교하였다. 2롤 교정공정조건으로 상부롤과 하부롤의 교차각도는 각각 17.47° 과 15.33° 이고 롤사이의 거리는 9.5mm의 압하조건으로 설정하였다.

Fig. 5는 잔류응력이 없는 소재와 인발 후 잔류응력이 있는 소재를 2롤 교정기에 통과시킨 후 잔류응력분포를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 잔류응력이 없는 소재를 2롤 교정기에 통과시켰을 때 소재의 반경방향은 압축잔류응력으로 존재한다. 이는 소재의 선경이 감소함을 의미하며

계산된 선경은 8.0992mm 이다. 그리고 인발 후와 2롤 교정 후 소재의 잔류응력분포를 비교했을 때 2롤 교정 후 반경반향잔류응력분포는 이완됨을 확인할 수 있다. 이는 소재의 직경이 증가함을 의미하며 계산된 선경은 8.109mm 이다. 이와 같이 2롤 교정공정에서 초기 잔류응력은 선경변화에 영향을 미침을 확인할 수 있다.

3.2 롤사이의 거리(h)와 상부롤, 하부롤의 교차각도(α_u, α_d)에 따른 잔류응력

인발후 잔류응력이 남아있는 소재를 2 롤 교정기에 통과시켜 공정변수에 따른 잔류응력 변화를 계산하였다. 2 롤 공정에서의 공정변수로는 롤사이의 거리(h)와 교차각도(α_u, α_d)로 정하였다. 상부롤과 하부롤의 교차각도가 각각 17.47° 과 15.33° 가 일 때 롤사이의 거리는 9mm 를 기준으로 h 를 줄여 8.0mm, 8.5mm 로 그리고 h 를 늘려 9.5mm, 10.0mm 로 압하조건을 변경하여 설정하였다. 롤사이의 거리(h)가 8.5mm 일 때 상부롤과 하부롤의 교차각도는 각각 17.47° 과 15.33° 을 기준으로 설정하였다. 상부롤의 교차각도(α_u)가 17.47° 일때 하부롤의 교차각도(α_d)를 $14^\circ, 15.33^\circ, 16^\circ$ 로 그리고 하부롤의 교차각도(α_d)가 15.33° 일때 상부롤의 교차각도(α_u)를 $17^\circ, 18^\circ$ 로 변경하여 설정하였다. Fig. 6은 2 롤 교정후 롤사이의 거리(h)에 따른 최종제품의 잔류응력분포를 나타낸 것이다. 소재의 중심부에서 축, 반경, 그리고 반경방향은 압축잔류응력으로 존재한다. 그리고 Fig. 6(a)와 (c)에서 보는 바와 같이 소재의 표면에서 축방향과 원주방향은 인장잔류응력으로 존재한다. 인발된 소재의 잔류응력분포와 비교시 롤사이의 거리(h)에 따른 2 롤 교정 후 축방향과 원주방향의 잔류응력분포는 비슷하였으나 반경방향 잔류응력분포와는 차이를 보였다. 반경방향잔류응력은 롤사이의 거리(h)에 따라 달라진다. Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 반경방향잔류응력은 h 가 9mm 일 때 가장 크게 이완됨을 확인할 수 있다. 그러나 상부롤과 하부롤의 교차각도(α_u, α_d)는 잔류응력분포에 미치는 영향이 미미함을 확인하였다.

3.3 롤사이의 거리(h)와 상부롤, 하부롤의 교차각도(α_u, α_d)에 따른 선경변화

앞서 언급한 공정변수에 따른 선경변화를 계산하였다. 상부롤과 하부롤의 교차각도가 각각 17.47° 과 15.33° 일 때 롤사이의 거리(h)는 8.0mm, 8.5mm,

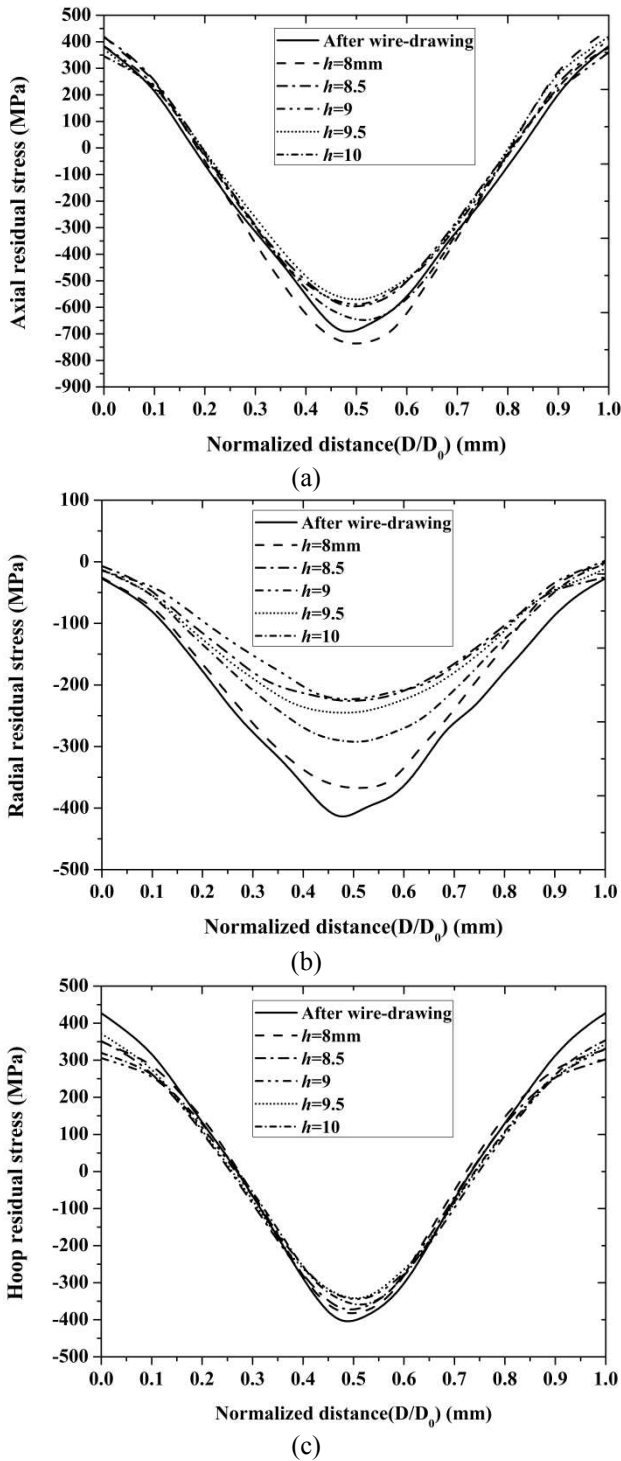


Fig. 6 Residual stress of the wire after two cross-roll process: (a) axial residual stress; (b) radial residual stress; (c) hoop residual stress

9mm, 9.5mm, 10.0mm의 압하조건과 롤사이의 거리 (h)가 8.5mm일 때 상부롤의 교차각도(α_u)가 17.47°에서 하부롤의 교차각도(α_d)를 14°, 15.33°, 16°로 그리고 하부롤의 교차각도(α_d)는 15.33°에서 상부롤의 교차각도(α_u)를 17°, 18°로 변경하여 선경변

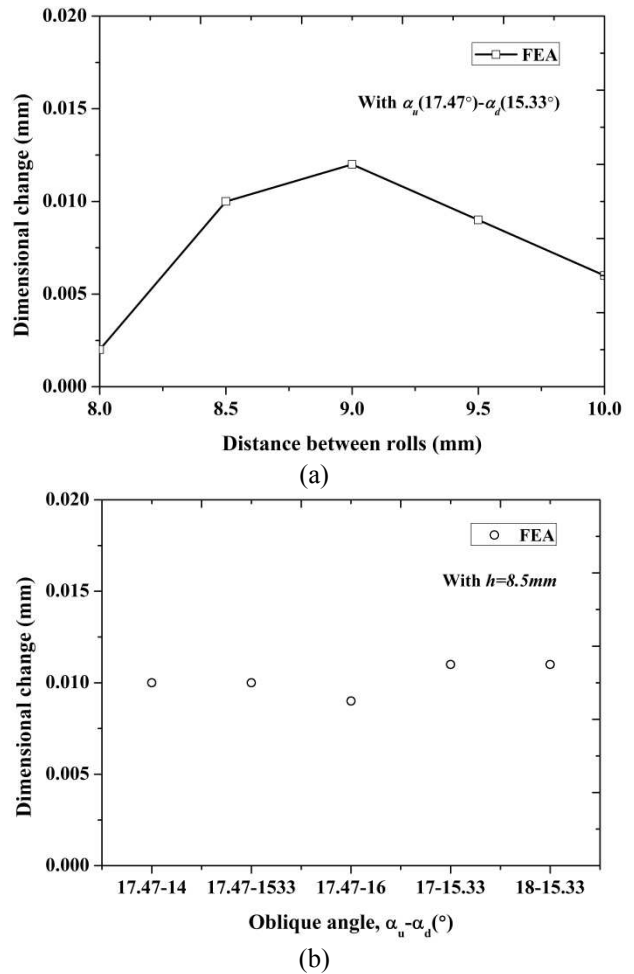


Fig. 7 Dimensional change with process variables: (a) distance between rolls; (b) oblique angle (α_u, α_d)

화 계산하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 롤사이의 거리(h)에 따른 선경변화는 9mm를 기준으로 감소 및 증가하는 경향을 보이며, 상부롤과 하부롤의 교차각도(α_u, α_d)에 따른 선경변화는 비슷한 경향을 보인다.

4. 잔류응력 변화와 선경변화에 대한 고찰

Table 2에는 인발공정후 소재와 2롤 공정후 최종제품의 선경변화에 대한 측정치와 계산치를 나타내었다. 2롤 공정후 최종제품의 선경변화에 대한 측정치와 계산치는 8%~18%의 차이를 보였다.

Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 롤사이의 거리(h)에 따른 인발후의 반경방향잔류응력분포는 2롤 교정공정을 거친 후 이완됨을 확인 할 수 있으며, 롤사이의 거리(h)가 9mm, 8.5mm, 9.5mm, 10.0mm, 8.0mm의 순서로 이완됨이 작아짐을 알 수 있다. 또한, Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 2롤 교정후 선

Table 2 Comparison of dimensional changes between wire-drawing and two cross-roll straightening

CASE	D (mm)	D _f (mm)	Dimensional changes (mm) (Deviation from measurement, %)							
			After wire-drawing		After two cross-roll straightening					
					$\alpha_u - \alpha_d$ 17.47°-15.33°			h(mm) 8.5		
CASE 1	10	8.1	Experi- ment	FEA	h		$\alpha_u - \alpha_d$		Experi- ment	FEA
			0.009	0.008 (11%)					8.5	0.012
			0.009	0.008 (11%)	9	0.014	0.012 (14%)	17.47°-15.33°	0.012	0.010 (16%)
					9.5	0.011	0.009 (18%)	17.47°-16°	0.011	0.009 (18%)

경변화는 롤사이의 거리(h)가 9mm, 8.5mm, 9.5mm, 10.0mm, 8.0mm의 순서로 작아짐을 알 수 있다.

이러한 계산 값에서 볼 수 있듯이 반경방향잔류응력이 이완됨으로써 소재의 선경변화는 늘어나게 되고, 이완됨이 클수록 선경변화량은 증가함을 확인할 수 있다. 그러므로 2롤 교정후 반경방향잔류응력의 이완은 선경변화에 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 축방향과 원주방향잔류응력은 인발후 잔류응력과 큰 차이가 없었다. 인발후의 잔류응력과 큰 차이가 없다는 것은 축방향과 원주방향잔류응력이 선경변화에 미치는 영향이 미미하다는 것을 의미한다. 상부롤과 하부롤의 교차각도(α_u, α_d)은 잔류응력과 선경변화에 미치는 영향이 미미함을 확인하였다(Table 2)

5. 결론

본 연구에서는 인발된 소재를 2롤 교정공정에 통과시켜 잔류응력을 분석하고 최종제품의 유한요소해석을 통한 예측치수와 실제 공정치수를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 2롤 교정을 통한 최종제품의 선경변화를 예측해 실험값과 비교 및 검증한 결과 타당한 계산 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 인발된 소재에 남아 있는 잔류응력은 2롤 공정을 거친 후 최종제품의 선경변화에 영향을 주었다. 반경방향잔류응력이 이완됨으로써 소재의 선경변화는 늘어나게 되고, 이완됨이 클수록 선경변화량은 증가함을 확인할 수 있다. 그러므로 2롤 교정 후 반경방향잔류응력의 이완은 선경변화에 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 설정된 공정변수에서 롤사이의 거리(h)는 잔류응력과 최종제품의 선경변화에 영향을 미치지만 상부롤과 하부롤의 교차각도(α_u, α_d)는 잔류응력

과 최종제품의 선경변화에 미치는 영향이 미미하였다.

후 기

본 연구는 2010년도 서강대학교 교내 연구비 지원에 의한 연구임(201010042).

본 연구는 2011년도 한국연구재단(No.2011-0026807)의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

- (1) Moon C. and Kim N., 2012, "Analysis of Wire Drawing Process with Friction and Thermal Conditions obtained by Inverse Engineering," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, pp. 2903~2911.
- (2) Moon C. and Kim N., 2012, "Study on Dimensional Change in Wire Product during Wire Drawing Process," *Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 36, pp. 723~730.
- (3) Mutrux, A., Berisha, B., Hochholdinger, B. and Hora, P., 2008, "Numerical Modelling of Cross Roll Straightening," LS-DYNA Anwenderforum.
- (4) Mutrux, A., Berisha, B. and Hora, P., 2010, "FE Simulation of Cross Roll Straightening: a Strain Tensor Field Approach," *American Institute of Physics*, Vol. 1252, pp. 941~948.
- (5) Mutrux, A., Berisha, B., Hora, P., 2011, "Prediction of Cyclic Softening in a Medium Carbon Steel During Cross Roll Straightening," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, pp. 1448~1456.
- (6) Kim, Y., Lee, S. W., Han, D. S. and Han, G. J., 2007, "The Influence on the Bar Straightness and Plastic Deformation the Roll intersection angle of a Two Roll Straightener," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 6, pp. 76~80.
- (7) Talukder, N. K. D., Singh, A.N. and Johnson, W., 1990, "Cross-Roll Straighteners and their Performance,"

- Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 21, pp. 101 ~ 109.
- (8) Wu, B. J., Chanb, L. C., Leeb, T.C. and Ao, L. W., 2000, "A Study on the Precision Modeling of the Bars Produced in Two Cross-Roll Straightening," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 99, pp. 202 ~ 206.
- (9) Nastran, M. and Kuzman, K., 2002, "Stabilisation of Mechanical Properties of the Wire by Roller Straightening," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125~126, pp. 711 ~ 719.
- (10) Wang, M. T., Li, X. T. and Du, F. S., 2009, "Analysis of Metal Forming in Two-Roll Cress Wedge Rolling Process Using Finite Element Method." *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 16, pp. 38 ~ 43.
- (11) Srimani, S. L., Pankaj, A. C. and Basu, J., 2005, "Analysis of End Straightness of Rail During Manufacturing," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 47, pp. 1874~1884.
- (12) Kim, W. K., Sin, H. G., Kim, B. H. and Kim, H. Y., 2007, "Straightening of Micro Wires Using the Direct Wire Heating and Pulling Method," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 1046 ~ 1052.
- (13) Balica, J. and Nastran, M., 2002, "An on-line Predictive System for Steel Wire Straightening Using Genetic Programming," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 15, pp. 559 ~565.
- (14) Yamashita, T. and Yoshida, K., 2005, "Tensile Straightening of Superfine Wire and Residual Stress Measurement Using Focused Ion Beam," *The Japan Society of Mechanical Engineer*, Vol. 48, pp. 322 ~328.
- (15) Lu, H., Zhang, X., Leopold, J., Ling, H. and Changqiao Guo, 2008, "Straightening Model and Prediction of Straightening Stroke of Precision Linear Guide Rail," *In Proceedings of ICIRA(2)*, pp. 321 ~328.
- (16) Dvorkin, E. N. and Medina, F. M., 1991, "Finite Element Models for Analyzing the Straightening of Steel Seamless Tubes," *Trans. American Society of Mechanical Engineer*, Vol. 133, pp. 224 ~ 232.