

신선 시 선재의 잔류응력 완화 방법에 관한 연구 및 나노 압입 시험을 이용한 잔류응력 평가

고대철*, 황원호**, 이상곤**, 김병민#

A Study on the Method of Residual Stress Relaxation during Wire Drawing and Evaluation of Residual Stress Using Nano Indentation Test

Dae Cheol Ko*, Won Ho Hwang**, Sang Kon Lee** and Byung Min Kim#

ABSTRACT

Steel cord which is used as reinforcement in car tires is produced by wet-drawing process. Recently the quality improvement of the steel cord product is demanded by the tire market. After cold drawing process, produced residual stresses have a harmful effect on the durability of the wire and become the cause which decreases the quality of the product. Therefore, to improve the quality of the steel cord product, the research regarding the method of residual stress relaxation is necessary. To evaluate the quality of the cold drawn wire, it is very important to measure the residual stress, because the residual stress decides a variety of the quality level which is demanded in the cold drawn wire. The aim of this study is to propose residual stress relaxation method in the drawn wire using FE-analysis. The validity of the analysis results was verified by Nano indentation test.

Key Words : Steel cord(스틸코드), Wire drawing(신선), Residual stress(잔류응력), Stress relaxation(응력 완화), Nano indentation test(나노압입시험)

1. 서론

냉간 가공의 이점은 최종 제품을 절삭이나 선삭과 같은 추가적인 가공 없이도 여러 가지 기계 장치의 조립에 곧바로 사용할 수 있다는 것이다. 시장의 최근 경향은 이전보다 더욱 최종 제품의 정밀성을 요구하고 있으므로 냉간 가공 후 제품의 치수와 품질을 향상시키는 것이 매우 중요하다. 잔

류응력은 냉간 가공된 제품의 치수 정밀도 및 품질에 큰 영향을 미친다. 잔류응력 분포는 적절한 공정 설계에 의해서 제어 가능하지만, 잔류응력을 감소시키거나 제어하는 방법들에 관한 연구는 드물다. 산업현장에서의 활용이라는 관점에서 볼 때, 이와 같은 방법의 개발은 아주 중요한 것이다. 잔류응력의 크기를 제어할 수 있는 효과적인 방법이 개발된다면, 최종 제품의 치수 정밀도 및 제품

☞ 접수일: 2005년 12월 31일; 게재승인일: 2006년 4월 14일

* 부산대학교 동남권부품소재산학협력혁신연구소

** 부산대학교 대학원 정밀기계공학화

교신저자: 부산대학교 기계공학부

E-mail bmkim@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2319

의 품질을 향상시키는 것이 가능하다.^{1,4}

자동차 타이어 보강재로 사용되고 있는 스틸코드(Steel cord) 제품은 최종적으로 냉간 습식 신선 공정에 의해서 생산되고 있다. 스틸코드 제품은 최근 자동차 타이어 시장에 의해 최종 제품의 품질 향상이 요구되고 있다. 냉간 습식 신선 공정 후 스틸코드 제품의 표면에 분포하게 되는 인장 잔류응력은 선재의 직진성과 내구성에 악영향을 미쳐 최종 제품의 품질을 저하시키는 원인이 된다.

스�틸코드 제품의 표면에 압축 잔류응력이 분포할 때 잔류응력은 제품 표면의 균열발생과 표면의 마모손상을 억제할 수도 있지만, 신선 후 선재의 표면에 인장으로 분포하는 축방향 및 원주방향 잔류응력은 선재의 표면 균열 생성 및 전과 촉진 등으로 인해 탄성한계를 감소, 피로강도 및 파손특성에 치명적인 악영향을 미치게 된다.^{5,6}

따라서 본 연구에서는 스틸코드 생산을 위한 습식 신선 공정 시 선재 표면에 분포하게 되는 인장 잔류응력의 완화 방법을 제안하였다. 이를 위해 본 연구에서는 유한요소 해석 S/W 인 DEFORM 으로 축대칭 탄소성 유한요소 해석을 수행하여 습식 신선 시 주요공정 변수인 다이 반각, 단면감소율, 마찰계수, 베어링 길이가 선재의 잔류응력 분포에 미치는 영향을 평가하고, 나노 압입 시험을 통해 유한요소 해석 결과의 타당성을 검증하였다.

2. 유한요소 잔류응력 해석

2.1 AISI 1080 선재의 재료 물성

스�틸코드 제품의 재료로 사용되는 고탄소강 선재 AISI 1080 의 유한요소 해석을 위해 인장시험을 수행하여 유동 응력식을 다음과 같이 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 3007.80\bar{\epsilon}^{0.3175} (MPa) \quad (1)$$

2.2 해석 모델 및 방법

신선 후 선재의 잔류응력을 평가하기 위하여 본 연구에서는 유한요소 해석 S/W DEFORM-2D 탄소성 해석을 이용하였다. Fig. 1 에 유한요소해석 모델을 나타내었으며, 잔류응력은 소재가 다이를 완전히 빠져나온 후 다이와 소재의 접촉이 전혀 없는 상태에서 측정하였다.

3. 잔류응력에 대한 공정변수의 영향

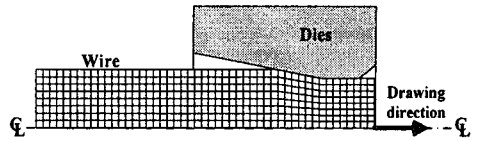
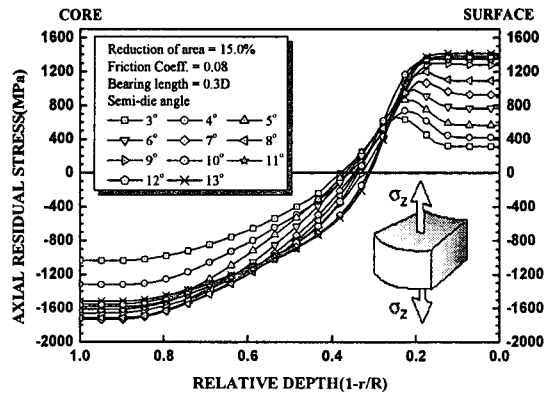
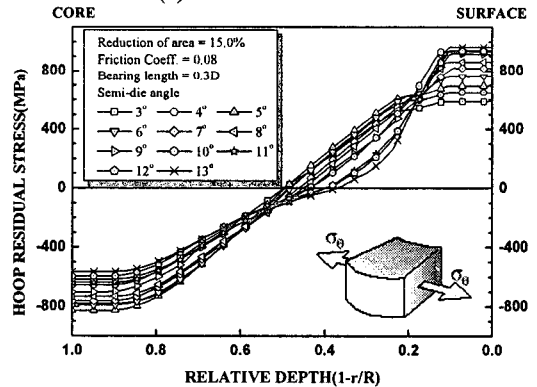


Fig. 1 2D-axisymmetric FE model for wire drawing



(a) Axial residual stress



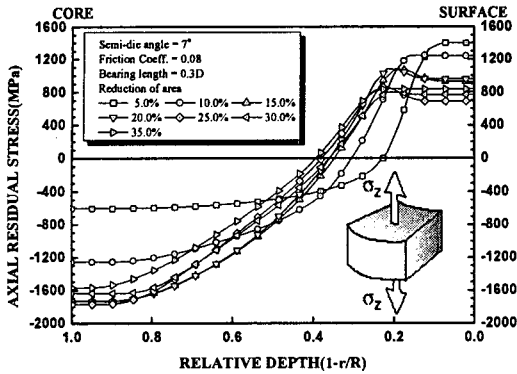
(b) Hoop residual stress

Fig. 2 Distribution of residual stresses with various semi-die angles

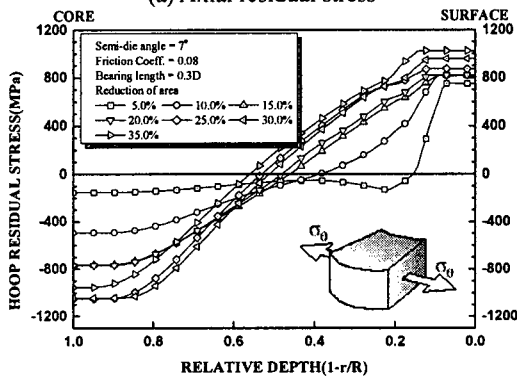
3.1 다이 반각의 영향

신선 공정 시 선재의 잔류응력 분포에 대한 다이 반각의 영향을 평가하기 위하여 선재 직경은 2.0mm, 단면 감소율은 15.0%, 마찰계수는 0.08, 베어링 길이는 선재 직경의 0.3 배로 고정하고, 다이 반각을 3° ~ 13° 로 하여 선재의 잔류응력 분포를 평가하였다.

Fig. 2 는 다이 반각의 변화에 대한 축방향과 원주방향 잔류응력 분포에 대한 해석 결과이다. 축방향 잔류응력과 원주방향 잔류응력은 다이 반각이 클수록 선재의 표면부에서 커진다. 다이 반



(a) Axial residual stress



(b) Hoop residual stress

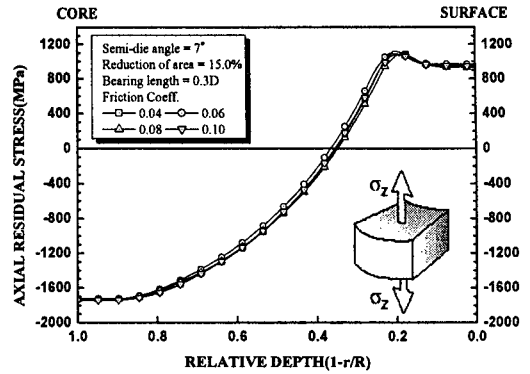
Fig. 3 Distribution of residual stresses with various reduction in area

각이 커질 경우 선재 표면부의 변형을 분포가 더욱 불균일해지기 때문이다.

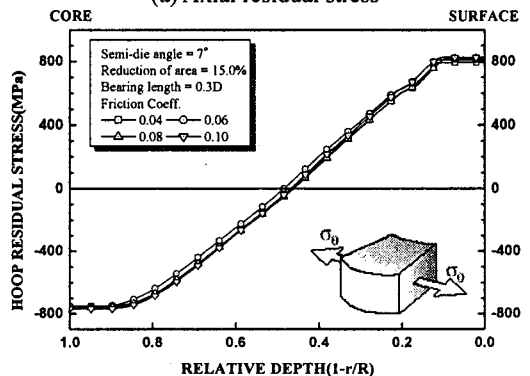
3.2 단면감소율의 영향

신선 공정 시 선재의 잔류응력 분포에 대한 단면감소율의 영향을 평가하기 위하여 선재 직경은 2.0mm, 다이 반각은 7°, 마찰계수는 0.08, 베어링 길이는 선재 직경의 0.3 배로 고정하고, 단면감소율을 5% ~ 35%로 하여 선재의 잔류응력 분포를 평가하였다.

Fig. 3 은 단면감소율의 변화에 대한 축방향 잔류응력과 원주방향 잔류응력 분포에 대한 해석 결과이다. 선재 표면에서 축방향 잔류응력은 단면감소율이 증가할수록 감소한다. 이는 단면감소율이 작을수록 선재의 표면부에서 변형이 집중되기 때문이다. 원주방향 잔류응력은 단면감소율이 증가할수록 증가한다.



(a) Axial residual stress



(b) Hoop residual stress

Fig. 4 Distribution of residual stresses with various friction coefficients

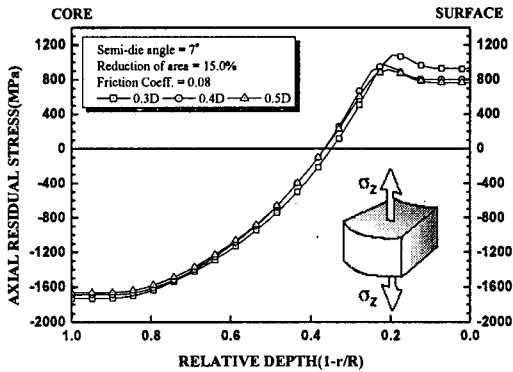
3.3 마찰계수의 영향

습식 신선 공정 시 다이와 선재 사이의 마찰계수는 약 0.04~0.10 정도이다. 신선 공정 시 선재의 잔류응력 분포에 대한 다이와 선재 사이의 마찰계수 영향을 평가하기 위하여 선재 직경은 2.0mm, 다이 반각은 7°, 단면 감소율은 15.0%, 베어링 길이는 선재 직경의 0.3 배로 고정하고, 마찰계수를 0.04 ~ 0.10 으로 하여 선재의 잔류응력 분포를 평가하였다.

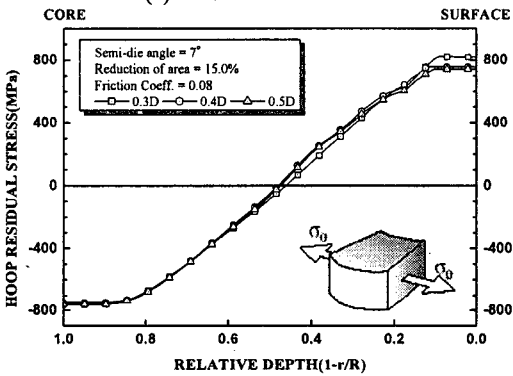
Fig. 4 는 마찰계수의 변화에 대한 축방향 잔류응력과 원주방향 잔류응력 분포에 대한 해석 결과이다. 0.04~0.10 범위의 마찰계수는 축방향 잔류응력과 원주방향 잔류응력 분포에서 그 영향을 무시할 수 있을 정도로 그 영향이 매우 작은 것으로 나타났다.

3.4 베어링 길이의 영향

신선 공정 시 선재의 잔류응력 분포에 대한



(a) Axial residual stress



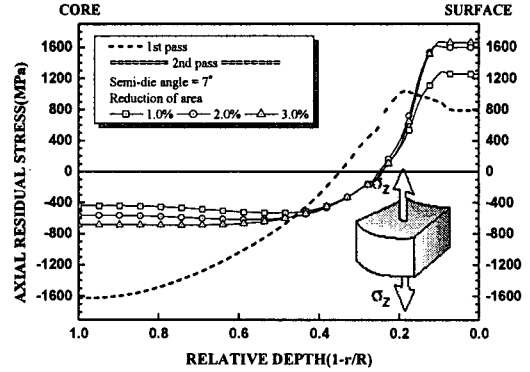
(b) Axial residual stress

Fig. 5 Distribution of residual stresses with various bearing lengths

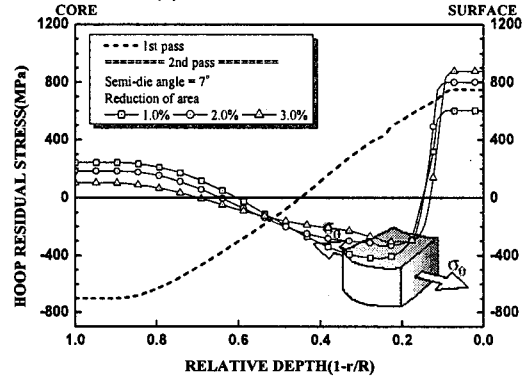
베어링 길이의 영향을 평가하기 위하여 선재 직경은 2.0mm, 다이 반각은 7°, 단면 감소율은 15.0%, 마찰계수는 0.08 로 고정하고, 베어링 길이를 선재 직경의 0.3, 0.4, 0.5 배로 실 공정에서 사용하고 있는 값을 적용하여 선재의 잔류응력 분포를 평가하였다.

Fig. 5 는 베어링 길이의 변화에 대한 축방향 잔류응력과 원주방향 잔류응력 분포에 대한 해석 결과이다. 해석 결과에서 베어링 길이의 변화에 대한 선재 표면부의 축방향 잔류응력과 원주방향 잔류응력은 베어링 길이가 길어질수록 다소 낮아지는 것을 알 수 있다.⁷

이상의 잔류응력에 대한 습식 신선 공정변수의 영향 평가에서 마찰계수와 베어링 길이의 영향은 무시할 수 있을 정도로 작으며, 다이 반각과 단면 감소율이 신선 시 선재의 잔류응력 분포에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.



(a) Axial residual stress



(b) Hoop residual stress

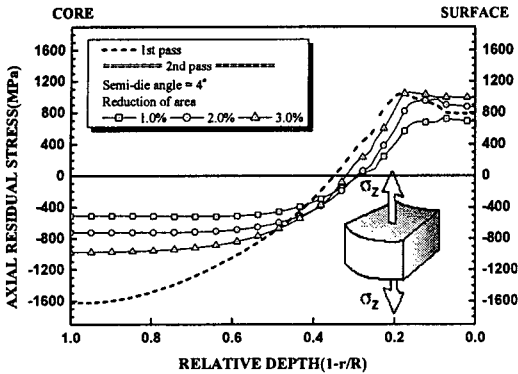
Fig. 6 Distribution of residual stresses with skin passes (2nd pass: $\alpha = 7^\circ$)

4. 잔류응력 완화 방법

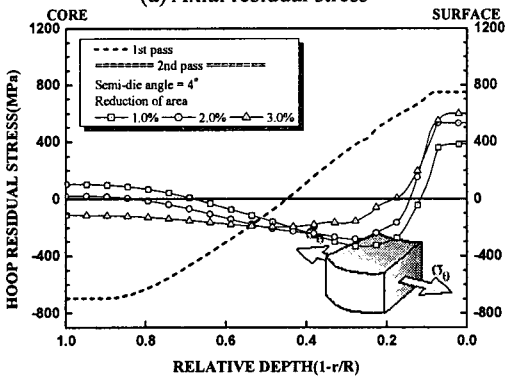
일반적으로 최종 성형제품의 잔류응력은 냉간 가공 시 마지막 단계에서 약간의 소성변형을 가해주는 방법을 통하여 최소화할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러므로 본 연구에서는 스틸코드 제품의 잔류응력을 최소화 하기 위해 몇 가지 방법들을 제안하여 신선 공정의 마지막 단계에 적용하여 잔류응력 완화 효과를 평가하였다.

4.1 스킨 패스의 적용

신선 공정의 마지막 단계에서 스킨 패스의 잔류응력 완화 효과를 평가하기 위하여 공정조건을 선재 직경은 2.0mm, 다이 반각은 7°, 단면감소율은 15%, 마찰계수는 0.08, 베어링 길이는 선재 직경의 0.3 배로 정하고 한 패스를 수행한 후 두 번째 패스에서 1.0%, 2.0%, 3.0%의 단면감소율을 적용하여 선재의 잔류응력 분포를 평가하였다.



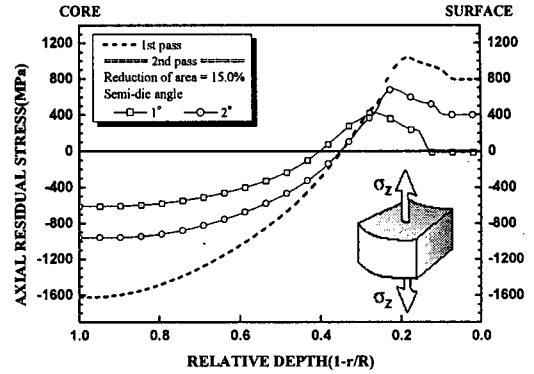
(a) Axial residual stress



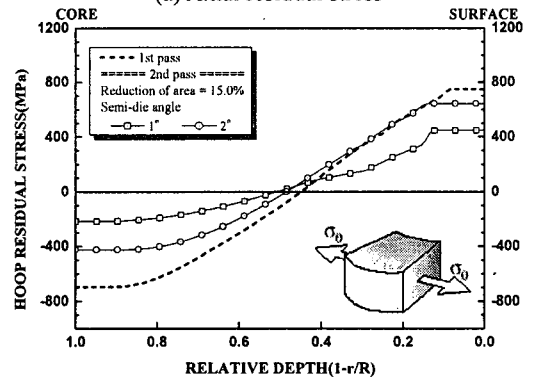
(b) Hoop residual stress

Fig. 7 Distribution of residual stresses with skin passes (2nd pass: $\alpha = 4^\circ$)

Fig. 6 (a)의 해석 결과에서 두 번째 패스에서 다이 반각이 7° 인 경우 스킨 패스에 의한 선재 표면부의 축방향 잔류응력 완화 효과는 나타나지 않으며, 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 6 (b)의 해석 결과에서는 스킨 패스가 1.0%일 경우 선재 표면부에서 원주방향 잔류응력의 완화 효과가 나타나지만, 1.0%, 2.0%, 3.0%의 스킨 패스를 적용한 경우 선재 중심부에서 인장 잔류응력이 분포하게 된다. 스킨 패스에 의한 잔류응력 완화 효과를 확인하기 위하여 두 번째 패스의 다이 반각을 4° 로 하여 해석을 수행하였다. Fig. 7 (a)의 해석 결과에서 두 번째 패스에서 다이 반각이 4° 인 경우 1.0%의 스킨 패스에서 선재 표면부의 축방향 잔류응력 완화 효과가 나타나며, Fig. 7 (b)의 해석 결과에서 1.0%, 2.0%, 3.0%의 스킨 패스에 의해 선재 표면부에서 원주방향 잔류응력의 완화 효과가 모두 나타나지만, 1.0%와 2.0%의 스킨 패스의 경우 선재 중심부에서 인장 잔류응력이 분포하게 된다.



(a) Axial residual stress



(b) Hoop residual stress

Fig. 8 Distribution of residual stresses with low semi-die angles

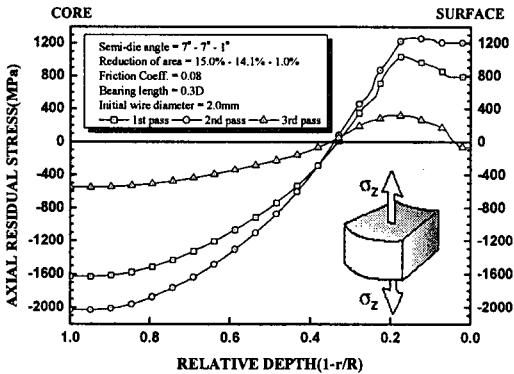
4.2 저 다이 반각의 적용

선선 공정의 마지막 단계에서 저 다이 반각의 잔류응력 완화 효과를 평가하기 위하여 공정조건을 선재 직경은 2.0mm, 다이 반각은 7° , 단면감소율은 15%, 마찰계수는 0.08, 베어링 길이는 선재 직경의 0.3 배로 정하고 한 패스를 수행한 후 두 번째 패스에서 1° , 2° 의 저 다이 반각을 적용하여 선재의 잔류응력 분포를 평가하였다.

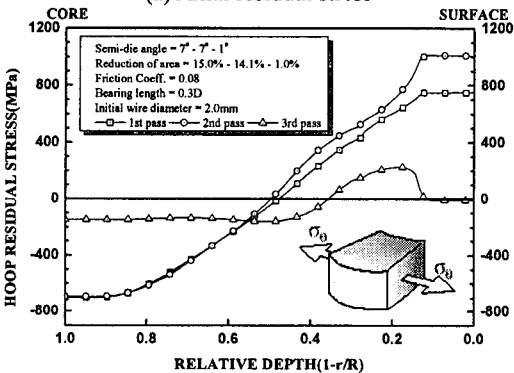
두 번째 패스에서 1° , 2° 의 저 다이 반각을 적용한 경우 축방향과 원주방향에서 잔류응력의 완화 효과가 있음을 Fig. 8의 결과에서 알 수 있으며, 다이 반각이 작을수록 선재 표면부의 잔류응력 완화 효과는 더욱 크게 나타난다. 그리고 선재 중심부에서 원주방향 잔류응력이 압축 잔류응력으로 분포하게 된다.

4.3 스킨 패스와 저 다이 반각 동시 적용

이상의 연구 결과로부터 마지막 단계에서 스



(a) Axial residual stress



(b) Hoop residual stress

Fig. 9 Effects of skin pass with low semi-die angle

킨 패스와 저 다이 반각을 동시에 적용한 경우에 대한 잔류응력 완화 효과도 평가하였다.

공정조건은 선재 직경은 2.0mm, 다이 반각은 7°, 마찰계수는 0.08, 베어링 길이는 선재 직경의 0.3 배로 정하고, 단면감소율은 15% - 14.1% - 1%로 하는 3 패스 공정으로 마지막 패스에서 1°의 저 다이 반각과 1%의 스킨패스를 동시에 적용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 9의 해석 결과에서 첫 번째 패스와 두 번째 패스에서 선재 표면부의 잔류응력은 증가하였으며, 저 다이 반각과 스킨 패스를 동시에 적용한 마지막 패스인 세 번째 패스에서 선재 표면부의 축방향 및 원주방향 잔류응력이 대략 0MPa 까지 감소하는 매우 뛰어난 잔류응력 완화 효과가 있음을 알 수 있다.

5. 나노 압입 시험을 통한 잔류응력 평가

X-ray 회절 시험으로 신선 후 선재 표면부에

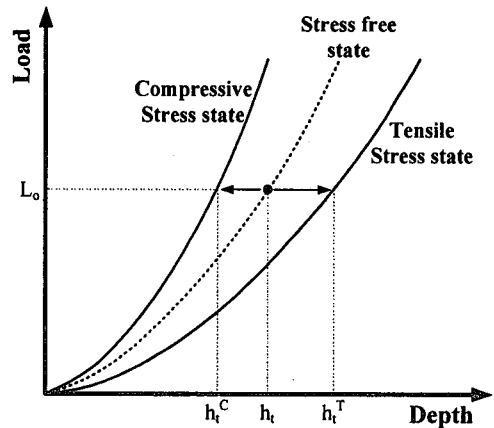


Fig. 10 Change of maximum indentation depth by residual stress

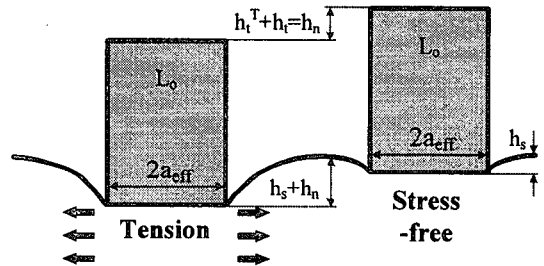


Fig. 11 Release of elastic sink-in depth by stress-relief

발생한 잔류응력을 측정할 수 있는 방법이 있지만, 본 연구의 잔류응력 측정 시험에서 사용된 직경 5mm 이하인 선재의 경우 X-ray 회절 시험으로 잔류응력을 정확하게 측정하는 것은 불가능하였다. 그러므로 본 연구에서는 Kwon 등이 제안한 나노 압입 시험법을 이용하여 선재 표면부의 축방향 잔류응력을 평가하였다.^{5,8}

잔류응력의 영향으로 인해 나노 압입 시험에서 얻어지는 압입하중 곡선은 Fig. 10 과 같은 형태로 나타난다. 동일 압입하중에 대해 인장 잔류응력 상태에서의 최대 압입깊이는 무응력 상태의 최대 압입깊이보다 증가하게 되며, 압축 잔류응력 상태에서의 최대 압입 깊이는 무응력 상태의 압입 깊이보다 감소하게 된다.

Fig. 11 에서 압입자와 시편이 실제 접촉상태에 있을 때는 항상 일정 접촉면적을 갖게 된다. 무응력 상태에서 인장 잔류응력 상태와의 압입깊이 차이 h_n 만큼의 추가 변형을 동반하기 위해서는 추가 압입하중 L_{res} 가 필요하게 된다. 잔류응력 유도 수

직하중인 L_{res} (Residual stress-induced normal load)는 다음 식(2)와 같다.⁵

$$L_{res} = \frac{2E_r a_{eff}}{1-\nu^2} h_n = \frac{2E_r a_{eff}}{1-\nu^2} (h_i^r - h_i) \quad (2)$$

여기서, E_r 는 환산탄성계수(Reduced modulus)이다.

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi S}}{2\sqrt{A_c}} \quad (3)$$

여기서, S 는 강성계수(Stiffness)이며 A_c 은 접촉투영 면적이다. 투영면적 A_c 을 이용하여 $a_{eff} = (A_c/\pi)^{1/2}$ 을 구한 후 다음의 잔류응력 평가식(4)에 대입하여 계산하면 나노 압입 시험을 통하여 정량적인 잔류응력을 구할 수 있게 된다.⁵

$$\sigma_{res} = \frac{L_{res}}{A_c} = \frac{2E_r a_{eff}}{(1-\nu^2)A_c} (h_i^r - h_i) \quad (4)$$

본 연구에서는 잔류응력 평가식(4)을 이용하여 선재 표면부의 축방향 잔류응력을 정량적으로 평가하였다. Fig. 12는 초기선재 단면의 표면부에서의 나노 압입하중 곡선(Sample 1), 다이반각 5°와 단면감소율 15% - 15%의 공정을 적용한 선재 단면의 표면부에서의 나노 압입하중 곡선(Sample 2) 그리고 처음과 두 번째 패스에서 다이 반각 5°와 세 번째 패스에서 다이 반각 2°, 단면감소율은 15% - 14.1% - 1%의 공정을 적용한 선재 단면의 표면부에서의 나노 압입하중 곡선(Sample 3)이다.

초기 선재의 강성계수는 88.534kN/m이며, Table 1은 선재 표면부에서의 축방향 잔류응력을 유한요소 해석과 나노 압입 시험을 통하여 정량적으로 평가한 결과이다. Table 1의 결과에서 유한요소해석과 나노 압입 시험을 통해 잔류응력을 평가한 결과가 잘 일치함을 알 수 있으며, 1%의 스킨 패스와 2°의 저 다이 반각을 동시에 적용한 경우 선재 표면부의 축방향 잔류응력이 매우 크게 감소된 것을 알 수 있다.

이상의 나노 압입 시험과 유한 요소 해석 결과를 통해서 습식 선재의 마지막 공정에서 스킨 패스와 저 다이 반각을 동시에 적용할 경우 뛰어난

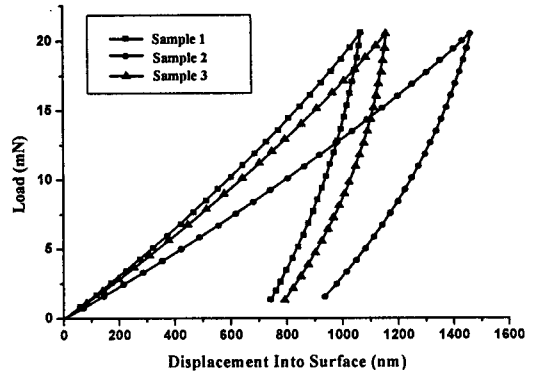


Fig. 12 Evaluation of residual stress by Nano-indentation test

Table 1 Comparison between FE-simulation and Nano-indentation test on axial residual stress

	Indentation depth(nm)	Experiment	FE-Simulation
		Residual stress(MPa)	
Sample 1	1059.681	0	0
Sample 2	1453.400	1383.87	1248.60
Sample 3	1130.231	247.98	269.48

잔류응력 완화효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 타이어 보강재인 스틸코드 제품의 내구성 및 품질을 향상시키기 위해 선선 공정에서 불균일한 소성변형에 의해 발생하는 선재의 잔류응력을 예측하고, 잔류응력을 최소화할 수 있는 방법에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 잔류응력에 대한 선선 공정변수들의 영향 평가에서 마찰계수와 베어링 길이의 영향은 매우 작으며, 다이 반각과 단면감소율이 선선 시 선재의 잔류응력 분포에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

(2) 선재의 잔류응력을 완화시키기 위해 선선 공정의 마지막 단계에서 스킨패스와 저 다이 반각을 적용하는 방법을 제안하였으며, 유한요소해석을 통해 스킨 패스와 저 다이 반각을 동시에 적용하는 방법이 잔류응력을 완화시키는 효과가 매우

뛰어남을 확인하였다.

(3) Kwon 등이 제안한 나노 압입 시험을 통한 잔류응력 평가식을 이용하여 선재 표면부에서 축방향 잔류응력을 정량적으로 평가하였으며, 신선공정의 마지막 단계에서 스킨패스와 저 다이 반각을 동시에 적용할 경우 매우 뛰어난 잔류응력 완화 효과가 나타남을 나노 압입 시험을 통해 검증하였다.

이상의 연구 결과로부터 습식 신선의 마지막 공정에서 스킨 패스와 저 다이 반각을 동시에 적용할 경우 뛰어난 잔류응력 완화효과를 얻을 수 있어 최종 제품의 잔류응력을 최소화하여 내구성 및 품질을 크게 향상 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국산업기술재단(KOTEF)에서 지원하는 지역혁신 인력양성사업 연구과제인 “고기능, 고정도 판재성형 및 금형설계 기술개발 인력양성” (TS-32)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kuboki, T., Akiyama, M., Neishi, Y. and Kuroda, K., “Effect of final drawing with light reduction on the leveling of residual stress distribution in cold bar drawing,” Proc Instn Mech Engrs Part C, Vol. 214, pp. 1389-1400, 2000.
2. Kuboki, T., Akiyama, M., Neishi, Y. and Kuroda, K., “Effect of die geometry on residual stress level present after bar drawing,” Ironmaking and Steelmaking, Vol. 28, No. 1, pp. 65-71, 2001.
3. Atienza, J. M., Martinez-Perez, M. L., Ruiz-Hervias, J., Mompean, F., Garcia-Hernandez, M. and Elices, M., “Residual stresses in cold drawn ferritic rods,” Scripta Materialia, Vol. 52, pp. 305-309, 2005.
4. Kuboki, T., Kawakami, I., Neishi, Y., Kuroda, K. and Akiyama, M., “A study on the influence of mechanical properties on the distribution of axial residual stress after cold drawing of metallic bars,” Materials Science Research International, Vol. 7, No. 1 pp. 41-46, 2001.

5. Lee, Y. H., Jang, J. I. and Kwon, D. I., “Evaluation of thin film residual stress through the theoretical analysis of nanoindentation curve,” KSME Part-A, Vol. 26, No. 7, pp. 1270-1279, 2002.
6. Akiyama, M. and Kuboki, T., “Optimisation of method for reducing residual stresses after cold bar drawing,” Ironmaking and Steelmaking, Vol. 29, No. 2, pp. 101-106, 2002.
7. Martinez-Perez, M. L., Mompean, F. J., Ruiz-Hervias, J., Borlado, C. R., Atienza, J. M., Garcia-Hernandez, M., Elices, M., Gil-Sevillano, J., Peng, R. L. and Buslaps, T., “Residual stress profiling in the ferrite and cementite phases of cold-drawn steel rods by synchrotron X-ray and neutron diffraction,” Acta Materialia, Vol. 52, pp. 5303-5313, 2004.
8. Ji, W. J., Lee, Y. H., Kim, W. S., Kim, C. M. and Kwon, D. G., “Evaluation of residual stress on welded joint in API X65 pipe line through nondestructive instrumented indentation technique,” Journal of KWS, Vol. 21, No. 5, pp. 547-554, 2003.