한국소성가공학회 2006년도 춘계학술대회 논문집 pp. 191~194

Steel Cord 선재의 잔류응력 평가 및 완화에 관한 연구

이상곤[1] · 황원호[1] · 김병민[#] · 배철민[2] · 이충열[2]

The Evaluation and Relaxation of Residual Stress of Steel Cord

S. K. Lee, W. H. Hwang, B. M. Kim, C. M. Bae, C. Y. Lee

Abstract

Recently the quality improvement of the steel cord product is demanded by the tire market. After wire 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 drawn wire, it is important to measure the residual stress, because the residual stress decides a variety of the quality level which is demanded in the drawn wire. This study proposed a residual stress relaxation method in the drawn wire using FE analysis. The validity of the analysis results was verified by nanoindentation test.

Key Words : Steel Cord(스틸코드), Wire Drawing(신선), Residual Stress(잔류응력), Stress Relaxation(응력완화), Nanoindentation test(나노압입시험)

1. 서 론

잔류응력은 냉간 가공된 제품의 치수 정밀도 및 품질에 큰 영향을 미친다. 잔류응력 분포는 적절한 공정설계에 의해서 제어가 가능하지만, 잔류응력을 감소시키거나 제어하는 방법들에 관한 연구는 드물다. 잔류응력의 크기를 제어할 수 있는 효과적인 방법이 개발된다면, 최종 제품의 치수정도 및 제품의 품질을 향상시킬 수 있다[1-2]. 자동차 타이어 보강제로 사용되는 스틸코드는 냉간 신선공정에 의해 생산되고 있다. 스틸코드 제품은 최근 자동차 타이어 시장에 의해 최종 제품의 품질 향상이 요구되고 있다. 신선 후 스틸코드 제품의 표면에 분포하게 되는 인장 잔류응력은 선재의 직진성과 내구성에 악영향을 미쳐 최종 제품의 품질을 저하시키게 된다. 스틸코드 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 표면균열생성 및 전파 촉진 등으로 인해 탄성한계 감소, 피로강도 및 파단특성에 치명적인 악영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 스틸코드 생산을 위한 신선공정에 대하여 탄소성 유한요소해석을 통해 주요 공정변수가 선재의 잔류응력에 미치는 영향을 평가하고 그 결과를 기초로 선재 표면에 분포하게 되는 인장 잔류응력 완화 방법을 제안하였다. 제안된 방법에 대하여 신선 시험 및 나노압입시험을 통하여 그 결과의 타당성을 검증하였다.

2. 공정변수 영향평가

유한요소해석을 통하여 신선공정변수가 잔류응

1. 부산대 대학원 정밀기계공학과
2. POSCO 선재연구그룹
교신저자: 부산대 정밀정형및금형가공연구소,
E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

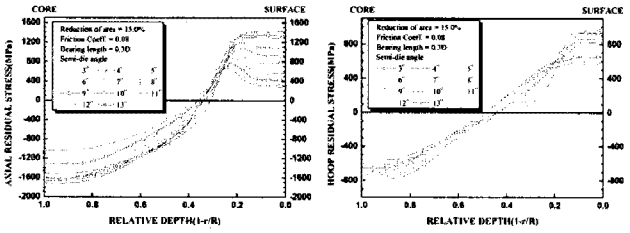
력에 미치는 영향을 평가하였다. 적용한 재료는 고탄소강 AISI1080 선재로 유한요소해석을 위한 유동응력식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 3008\bar{\varepsilon}^{0.3185}[MPa] \quad (1)$$

유한요소해석은 사용코드 DEFORM 을 이용하여 1/2 단면에 대하여 수행하였다. 잔유응력은 소재가 다이를 완전히 빠져나온 후 다이와 소재의 접촉이 전혀 없는 상태에서 평가하였다.

2.1 다이반각 영향

다이반각이 선재의 잔류응력에 미치는 영향을 평가하기 위하여 초기 직경 2.0mm 선재에 대하여 감면율 15%, 마찰계수 0.08, 베어링 길이는 초기 선재 직경의 0.3 배로 설정하고, 다이 반각을 3~13°로 하여 잔류응력 분포를 평가하였다. Fig. 1 에 다이반각에 따른 축방향 및 원주방향 잔류응력을 나타내었다. 다이 반각이 증가할수록 표면부에서의 축방향 및 원주방향 잔류응력도 증가한다.

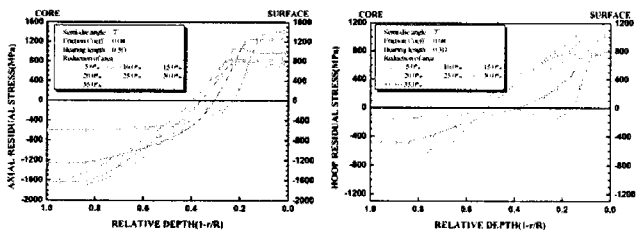


(a) Axial stress (b) Hoop stress

Fig. 1 Residual stress according to semi-die angle

2.2 단면감소율 영향

단면감소율이 선재의 잔류응력에 미치는 영향을 평가하기 위하여 초기 2.0mm 선재에 대하여 다이반각 7°, 마찰계수 0.08, 베어링 길이는 선재 직경의 0.3 배로 설정하고, 단면감소율을 5~35%로 변화시켜 해석을 수행하였다.



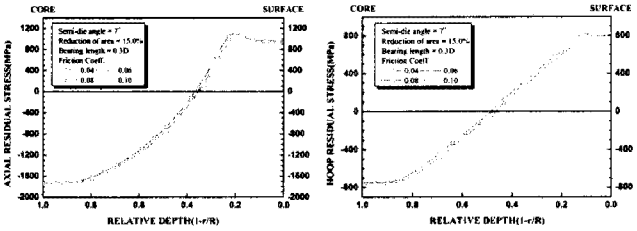
(a) Axial stress (b) Hoop stress

Fig. 2 Residual stress according to die reduction

Fig. 2 는 단면감소율변화에 따른 축방향 및 원주방향 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 표면부의 축방향 잔류응력은 단면감소율이 감소할수록 표면부에서의 변형집중으로 인하여 감소하며, 원주방향의 경우 단면감소율이 증가할수록 잔류응력도 증가하였다.

2.3 마찰계수 영향

선재와 다이 사이의 마찰계수를 0.04~0.10 으로 변화시켜 잔류응력에 미치는 영향을 평가하였다. 초기선재 직경은 2.0mm, 다이반각은 7°, 단면감소율은 15%, 베어링 길이는 선재직경의 0.3 배이다. Fig. 3 에 마찰계수에 따른 잔류응력분포를 나타내었다. Fig. 3 의 결과에서 0.04~0.10 범위의 마찰계수는 축방향 및 원주방향 잔류응력 분포에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

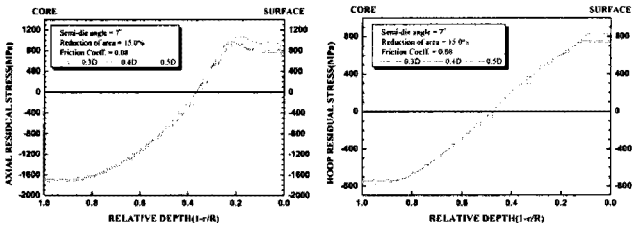


(a) Axial stress (b) Hoop stress

Fig. 3 Residual stress according to friction coefficient

2.4 베어링 길이 영향

베어링길이가 잔류응력 분포에 미치는 영향을 평가하기 위하여 선재 직경 2.0mm, 다이반각 7°, 단면감소율 15%, 마찰계수 0.08 에 대하여 베어링 길이를 초기 선재직경의 0.3, 0.4, 0.5 배로 변화시켜 해석을 수행하였다.



(a) Axial stress (b) Hoop stress

Fig. 4 Residual stress according to bearing length

Fig. 4 에 베어링길이에 따른 잔류응력 분포를 나타내었다. 해석결과에서 알 수 있듯이, 베어링 길이는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

이상의 공정변수 영향평가에서 신선시 마찰계수와 베어링 길이의 영향은 거의 없지만, 다이반각과 단면감소율은 선재의 잔류응력 분포에 큰

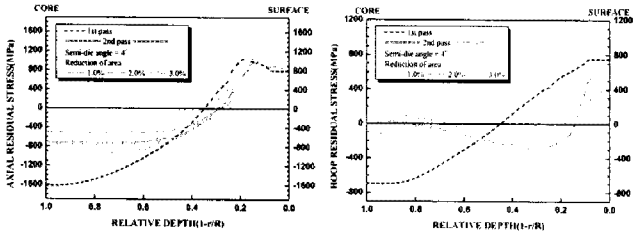
영향을 미침을 알 수 있었다.

3. 잔류응력 완화 방법

본 연구에서는 공정변수영향 평가결과를 기초로 신선된 선재의 잔류응력을 완화시킬 수 있는 방법을 제시하고 그 효과를 평가하였다.

3.1 스킨패스 적용

신선공정시 마지막 단계에서 스킨패스에 의한 잔류응력 완화효과를 평가하기 위하여 초기 선재 직경 2.0mm, 다이반각 7°, 단면감소율 15%, 마찰계수 0.08, 베어링 길이는 선재 직경의 0.3 배로 설정하여 1 패스 신선 후 두번째 패스의 단면감소율을 1.0, 2.0, 3.0%로 설정하여 해석을 수행하였다.

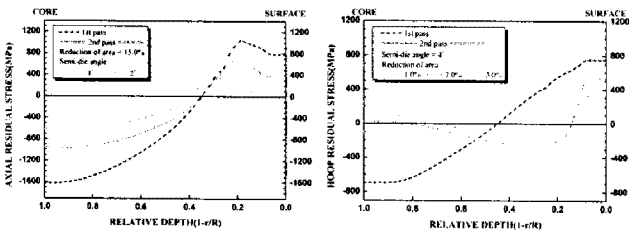


(a) Axial stress (b) Hoop stress

Fig. 5 Residual stress according to skin pass reduction

Fig. 5 에 스킨패스 감면율에 따른 잔류응력분포를 나타내었다. 결과에서 다이반각 4°의 스킨패스 적용시 감면율 1.0%에 대하여 미소한 잔류응력완화 효과가 있었다. 원주방향의 경우 모든 감면율에 대하여 잔류응력 완화 효과가 나타났지만, 선재중심부의 잔류응력이 증가하였다.

3.2 저 다이반각 적용



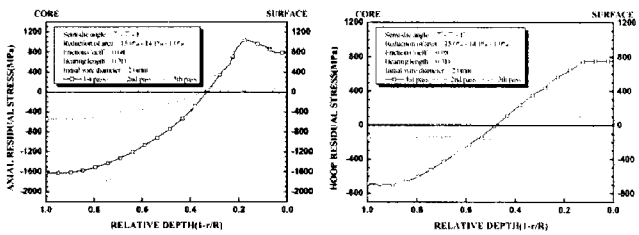
(a) Axial stress (b) Hoop stress

Fig. 6 Residual stress according to low semi-die angle

신선 시 마지막 단계에서 저 다이 반각의 잔류응력 완화효과를 평가하기 위하여 스킨패스 효과와 동일한 조건으로 1 패스를 진행한 후 두번째 패스에서 다이반각을 1°, 2°의 저 다이반각을 적용하여 선재의 잔류응력 분포를 평가하였다. Fig. 6 의 결과에서 알 수 있듯이 다이반각이 작을수록 선재 표면부의 잔류응력 완화효과는 더욱 크게 나타났다.

3.3 스킨패스와 저 다이반각의 동시 적용

이상의 연구결과로부터 마지막 단계에서 스킨패스와 저 다이반각을 동시에 적용한 경우에 대한 잔류응력 완화 효과도 평가하였다. 공전조건은 초기 선재직경 2.0mm, 다이반각 7°, 마찰계수 0.08, 베어링 길이는 선재 직경의 0.3 배인, 단면감소율 15%-14%-1%인 3 패스공정으로 마지막 패스에서 1°의 저 다이반각과 1%의 스킨패스를 동시에 적용하여 해석을 수행하였다.



(a) Axial stress (b) Hoop stress

Fig. 7 Effect of skin pass with low semi-die angle

Fig. 7 의 결과에서 감면율이 낮은 스킨패스와 저 다이반각을 동시에 적용할 경우 선재 표면부의 잔류응력이 현저히 완화됨을 알 수 있다. 따라서, 실제 연속 신선 시에도 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사려된다.

4. 나노압입시험을 통한 잔류응력 측정

본 연구에서는 선재 표면부의 잔류응력을 측정하기 위하여 Kwon 등이 제안한 나노압입시험법을 이용하였다[3]. 잔류응력의 영향으로 나노압입시험에서 얻어지는 압입하중 곡선은 Fig. 8 과 같은 형태로 나타난다. 동일 압입하중에 대하여 인장 잔류응력 상태에서의 최대 압입깊이는 무응력 상태의 최대 압입깊이보다 증가하게 되며, 압축 잔류응력 상태에서의 최대 압입깊이는 무응력 상태의 압입깊이보다 감소하게 된다. Fig. 8 에서 압입자와 시편이 실제 접촉상태에 있을 때에 항상 일정 접촉면적을 갖게 된다. 무응력 상태에서 인장 잔류응력 상태와의 압입깊이 차인 h_n 만큼의 추가변형

을 동반하기 위해서는 추가 압입하중 L_{res} 가 필요하게 된다. 잔류응력은 다음은 식(2)로 평가하였다[3].

$$\sigma_{rres} = \frac{L_{res}}{A_c} = \frac{3E_r a_{eff}}{(1-\nu^2)A_c}(h_t^T - h_t) \qquad (2)$$

여기서, E_r은 환산탄성계수(Reduced modulus), A_c는 접촉투영 면적, a_{eff}는 $(A_c/\pi)^{1/2}$ 이다.

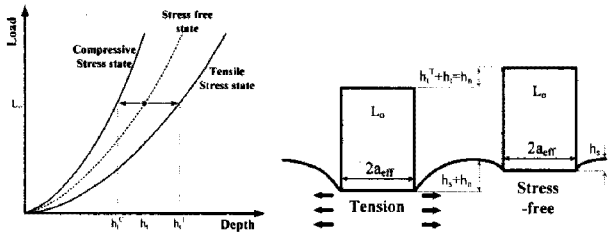


Fig. 8 Max. indentation depth and release of elastic sink-in depth by stress-relief

본 연구에서는 식(2)를 이용하여 선재 표면부의 잔류응력을 정량적으로 평가하였다. Fig. 9 는 초기 선재(sample 1), 다이반각 5°와 단면감소율 15%-15%의 공정을 적용한 선재 단면의 표면부에서의 나노 압입하중 곡선(sample 2), 그리고 처음과 두 번째 패스에서 다이반각 2°, 단면감소율 15%-14.1%-1%의 공정을 적용한 선재 단면부 표면부의 나도 압입하중곡선(sample 3)이다.

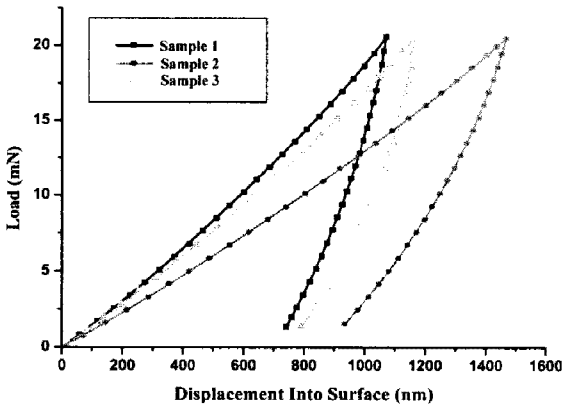


Fig. 9 Result of nanoindentation test

Table 1 에 선재표면부에서의 축방향 잔류응력을 유한요소해석과 나노 압입시험을 통하여 정량적으로 나타내었다. Table 1 에서 1%의 스킨패스와 2°의 저 다이반각을 동시에 적용한 경우 선재 표면부의 축방향 잔류응력이 매우 크게 감소한 것을 알 수 있다.

Table 1 Axial residual stress(FE-analysis and Nanoindentatin test)

	Indenatation depth(mm)	Exeperiment	FE-analysis
		Residual stress(MPa)	
Sample 1	1059.7	0	0
Sample 2	1453.4	1383.9	1248.6
Sample 3	1130.2	248.0	269.5

이상의 결과에서 신선시 마지막 공정에서 스킨패스와 저 다이반각을 동시에 적용할 경우 잔류응력완화효과가 뛰어남을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 고탄소강 선재를 이용하는 타이어 스틸코드 신선공정에 대하여 불균일한 소성변형에 의해 발생하는 선재의 잔류응력을 유한요소해석을 통하여 예측하고, 잔류응력을 최소화할 수 있는 방법을 제시하였다. 신선공정시 다이반각과 다이감면율이 선재의 잔류응력 크기 및 분포에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었으며, 신선시 마지막 패스에서 단면감소율이 낮은 스킨패스와 다이반각이 작은 저 다이반각을 동시에 적용할 경우 최종 신선후 선재 표면부의 잔류응력을 현저히 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 나노 압입시험을 통하여 본 연구에서 제시한 방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] T. Kuboki, M. Akiyama, Y. Neishi, K. Kuroda, 2000, 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.

[2] T. Kuboki, M. Aliyama, Y. Neishi, K. Kuroda, 2001, Effect of die geometry on residual stress level present after bar drawing, Ironmaking & Steelmaking, Vol. 28, pp. 65~71.

[3] Y. H. Lee, J. I. Jang, D. I. Kwon, 2002, Evaluation of thin film residual stress through the theoretical analysis of nanoindentation curve, KSME Part-A, Vol. 26, pp. 1270~1279.