

유한요소해석을 이용한 타이어 보강재용 스틸코드의 잔류응력 최소화

이종섭¹· 허훈^{1#}· 이준우²· 이병호²

Minimization of Residual Stress of the Steel Cord for the Tire-reinforcement Using Finite Element Analysis

JongSup Lee, Hoon Huh, Jun-Wu Lee and Byung-ho Lee

Abstract

In this paper, several process parameter studies of the manufacturing process of the steel cords are carried out to verify the relation between the process parameters and the residual stresses on the steel cords. At first, the finite element analysis of the drawing process is performed and the residual stress distributions with respect to the wire material and the area reduction ratio are obtained. The residual stress of the drawn wire is imported the finite element analysis of the twisting process as an initial stress. After that a parameter study of the twisting process is carried out. The process parameters are the applied tension, the over-twisting angle and the tensile strength of the drawn wire. Based on these studies, the optimum values of the process parameters which can remove or reduce the undesired residual stresses are determined. The optimum value of the process parameters are confirmed by the finite element analysis of the elastic recovery process of the steel cords. Finally, the finite element analysis of the roller straightening process is done to study the variation of the distribution of the residual stress before and after the process.

Key Words : residual stress(잔류응력), roller straightening process(롤러교정공정), steel cord(스틸코드), finite element analysis(유한요소해석)

1. 서 론

스틸코드(steel cord)는 현수교의 케이블, 타이어 보강재로 널리 사용되고 있다. 스틸코드의 제작공정은 크게 표면처리(surface treatment), 표면처리 후 수차례의 신선공정(drawing process), 연선공정(stranding process) 및 스틸코드의 직진성 및 연선구조의 안정성을 위한 롤러교정공정(roller straightening process)으로 이루어 진다.

스틸코드의 제조공정 중, 선재는 소성변형을 겪게 되며, 불균일한 소성변형의 분포에 의하여 잔류응력이 존재하며 이는 최종 제품의 품질에 심각한 영향을 미친다.

그 예로는 인발공정 후, 선재의 표면의 분포하는 잔류인장응력(residual tensile stress)은 최종제품의 피로수명에 치명적인 영향을 미치므로 잔류인장응력 또한 제거할 필요가 있다 [1]. 연선공정 중, 구조의 안정성을 위하여 선재에 비틀림에 의한 소성변형을 부과하는 데, 부적절한 비틀림 량에 따른 잔류모멘트가 존재한다. 잔류모멘트는 제품의 품질에 심각한 영향을 미치므로, 공정변수에 따른 정확한 비틀림각의 적용이 요구된다.

제작공정 중 발생하는 치명적인 잔류응력과 잔류모멘트를 제거 또는 감소시키기 위하여 롤러교정공정은 필수적이다.

1. 한국과학기술원 기계항공시스템공학부 기계공학전공

2. KISWIRE 기술연구소

교신저자: 한국과학기술원, E-mail: hhuh@kaist.ac.kr

롤러교정공정 중 선재는 굽힘 변형을 반복적으로 겪게 되어 표면의 잔류인장응력과 소성변형량의 불균일도가 감소하게 된다[2]. 선재의 강도가 증가함에 따라서 롤러 교정력의 증대가 요구되고, 롤러의 제작단가의 증가와 피로수명 단축에 따른 생산비용의 증가가 발생한다.

최소의 롤러교정공정의 적용을 위하여 최적공정변수설계를 통한 잔류응력 및 잔류모멘트감소가 요구되고 있는 실정이다. 신선공정 후 표면에 존재하는 인장 잔류응력의 제거 및 감소를 위한 방법으로 일반적으로 열처리(heat treatment), 작은 다이 반각(half die-angle)의 적용, 스킨패스의 적용 및 wire straightening 등이 있다.

연선공정에 의한 잔류모멘트의 경우, 최적의 비틀림각에 대한 공정변수 영향에 대한 연구가 일차적으로 요구된다.

본 연구에서는 탄소성 유한요소해석프로그램을 통하여 스틸코드의 연선공정에 대한 해석기법을 수립하고 이를 바탕으로 공정변수에 따른 잔류모멘트의 변화를 고찰한다. 최종적으로 스틸코드의 롤러교정공정 해석을 통하여 잔류모멘트 및 잔류응력에 대한 교정효과를 확인한다.

2. 연선공정의 유한요소 해석

2.1 해석조건

본 연구에서는 KISWIRE에서 적용하고 있는 2도연선기를 적절한 가정을 적용하여 해석을 수행한다. 연선공정의 2도연선기와 OT기로 구성된다. 3개의 직경 0.30mm의 신선선은 2도 연선기를 통하여 14mm의 피치(pitch)로 꼬임(twisting)을 부과한 후, OT기에서 같은 량만큼의 꼬임과 풀림(un-twisting)을 연속적으로 받게 된다. OT기에 의한 OT량은 OT회전비에 의하여 결정된다. OT회전비는 연선기의 회전속도와 OT기의 회전속도의 비율이며 식(1)과 같다.

$$OT\text{회전비} = \frac{\omega_{OT}[\text{rpm}]}{\omega_{twister}[\text{rpm}]} \quad (1)$$

여기서, ω_{OT} 는 OT기 회전속도, $\omega_{twister}$ 는 연선기 회전속도이다. 본 연구에서 고려하는 연선기는 1회전에 2번의 꼬임이 발생하는 2도 연선기이므로 OT회전량은 동일 피치(pitch)에 대하여 연선기 회전량의 0.5배이다. 스틸코드의 피치는 스틸코드의 진행속도와 연선기의 회전속도에 의하여

결정된다. 스틸코드의 피치는 식(2)와 같이 결정된다.

$$Pitch[m/twist] = \frac{v_{st/c}}{2\omega_{twister}} \quad (2)$$

여기서, $v_{st/c}$ 는 스틸코드의 분당 진행속도 [m/min]이다. 연선공정 중 스틸코드는 수많은 롤러들을 지나가게 되나, 롤러에 의한 효과는 미미하므로 유한요소해석에는 롤러들을 고려하지 않았다. 유한요소해석에서 고려하는 선재의 길이는 스틸코드의 피치와 같은 14mm로 하였다. 해석에 사용된 유한요소모델은 Fig. 3-1과 같다. 이 유한요소모델을 이용한 해석절차는 다음과 같다.

-STEP 1: 신선선에 역장력 부과

-STEP 2: 3 개의 신선선들 14mm 피치로 연선

-STEP 3: OT 회전비에 따른 OT 각만큼 over-twisting

-STEP 4: OT 각만큼 un-twisting

해의 정확도와 해석의 효율성을 위하여 STEP 1은 ABAQUS/standard를 STEP 2, STEP 3, STEP 4는 ABAQUS/explicit을 이용하여 해석을 수행하였다.

연선공정 해석에 사용된 선재는 2가지 탄소함유율의 선재를 2가지의 단면감소율로 신선공정을 수행하여 총 4가지의 신선을 얻었으며, 각각의 항복응력 및 인장강도는 Table 1과 같다. 신선공정에 의한 잔류응력분포를 ABAQUS의 *IMPORT option을 이용하여 적용하였다.

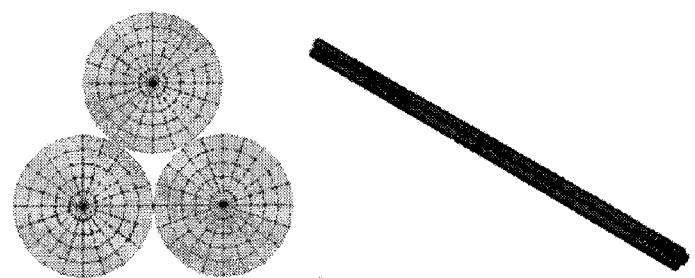


Fig. 1 Finite element model for twisting analysis

Table 1 Wire material properties

material	area reduction ratio [%]	carbon contents [wt%]	yield stress [GPa]	tensile strength [GPa]
M1	97.56	0.92	3.411	4.051
M2		0.82	3.361	3.761
M3	96.85	0.92	2.975	3.656
M4		0.82	2.778	3.376

2.2 해석결과

선재의 강도 및 OT각에 따른 잔류응력 및 잔류토오크의 변화를 고찰하기 위하여 4개의 선재의 대하여 OT각을 90° , 180° , 270° , 360° 로 변화시켜 해석을 수행하였다. 이때의 각각의 OT각에 대한 OT회전비는 0.5, 1.0, 1.5, 2.0이다.

2.1.1 공정변수 영향평가: OT 각

연선기만을 통과한 스틸코드는 구속조건을 제거하면, 다시 풀리게 되어 원하는 피치로 남아있지 않는다. 이러한 풀림 현상을 개선하기 위하여 OT 기에 의하여 충분한 소성변형을 부과하게 된다. OT 기에서 부과되는 OT 각에 따라서 구속조건을 제거하였을 때 풀림 현상 또는 꼬임현상이 발생한다. 이러한 경향을 파악하기 위하여 공정 중 회전각(twisting angle)에 공정 중 토오크의 변화는 Fig. 2에 나타내었다. 그라프상의 점들은 해석의 각 단계가 종료된 시점의 토오크를 나타낸다. Step1을 마무리하여도 스틸코드의 토오크는 0이며, 연선기를 통과하게 되면, 360° 만큼 스틸코드는 꼬여진다. OT 기를 통과하는 step3와 step4에서는 90° 만큼 OT 되었다가 다시 풀리게 된다. 만약 구속조건을 제거하게 되면, 스틸코드는 잔류토오크가 0이 되는 방향으로 탄성복원을 하게 된다. 토오크선도에 따르며, 잔류토오크가 0이 되기 위하여 OT 각 90° 의 경우에는 스틸코드가 풀리게 될 것을 예측할 수 있으며, 이러한 현상은 실 공정에서도 확인된다. 선재 M1의 OT 각에 따른 토오크선도 변화를 Fig. 3에 나타내었다.

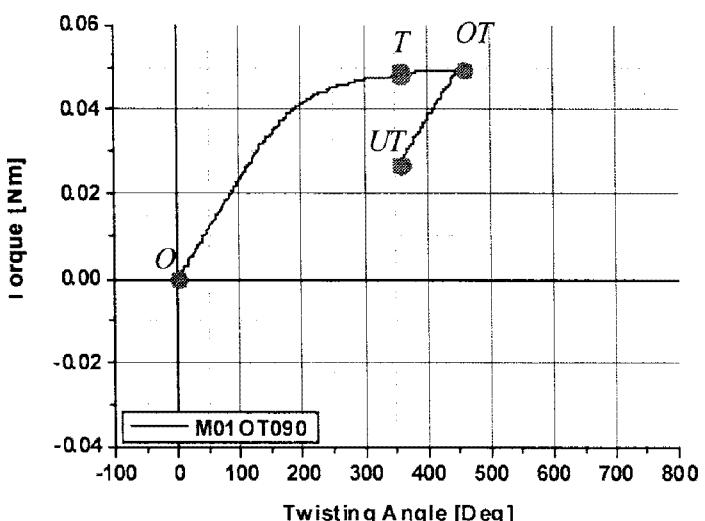


Fig. 2 Torque curves for M1 and OT angle of 180° during the twisting process

OT 각 180° 의 경우에는 잔류 토오크가 더 작아지며, 탄성복원 중 풀리는 각도, 탄성복원각(elastic-recovery angle)이 90° 의 경우보다 더 작아진다. 270° 의 OT 각의 경우에는 잔류토오크가 (-)가 되며, 이에 따라 탄성복원각은 (+)이 된다. 즉, 구속조건을 제거하게 되면, 스틸코드는 360° 보다 더 많이 꼬여진다. 이러한 경향은 360° 의 OT 각에서 도 관찰이 되며, 360° 의 OT 각인 경우에는 step 4 과정에 의하여 소성변형이 생기는 것을 확인할 수 있다.

2.1.2 최적 OT 각의 결정

OT 각에 따라 잔류토오크의 양과 탄성복원각의 방향이 변화한다. 따라서, 잔류토오크를 최소화하여 연선공정 후 원하는 피치의 스틸코드를 얻기 위한 OT 각을 결정할 필요가 있다. 이때, 최적 OT 각이란 연선공정 후 잔류토오크가 되게 하는 OT 각으로 본 연구에서는 정의한다.

스틸코드의 탄성복원과정은 토오크선도에 의하여 예측 가능하다. 선재 M1에 대한 토오크선도는 Fig. 3과 같다. 탄성복원과정에 의하여 잔류토오크는 0이 되어야 하며, 토오크와 비틀림각(twisting angle)은 step 4의 풀림 단계의 기울기와 평행한 직선을 따라 변화한다. 탄성복원각의 양을식(2)에 의하여 계산할 수 있다.

$$\theta_{ER} = -\frac{T_{UT}}{k_{ER}} \quad (2)$$

여기서, θ_{ER} 는 탄성복원각(elastic-recovery angle), T_{UT} 는 풀림 과정 후, 스틸코드의 잔류토오크,

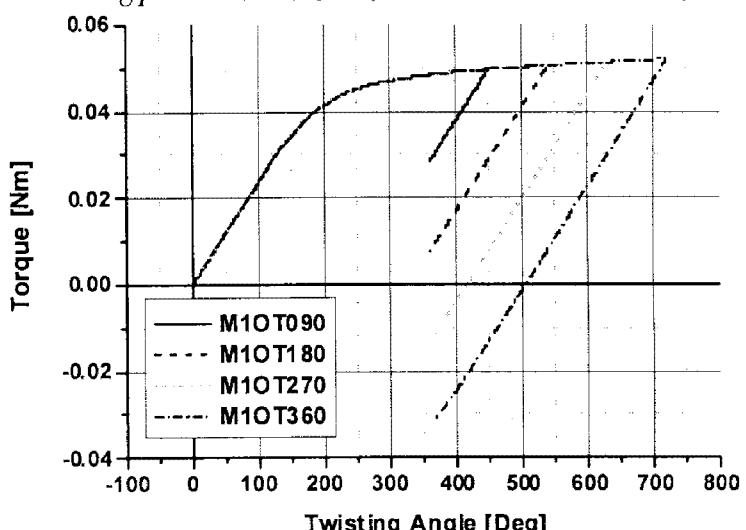


Fig. 3 Comparison of the torque curves with respect to OT angle

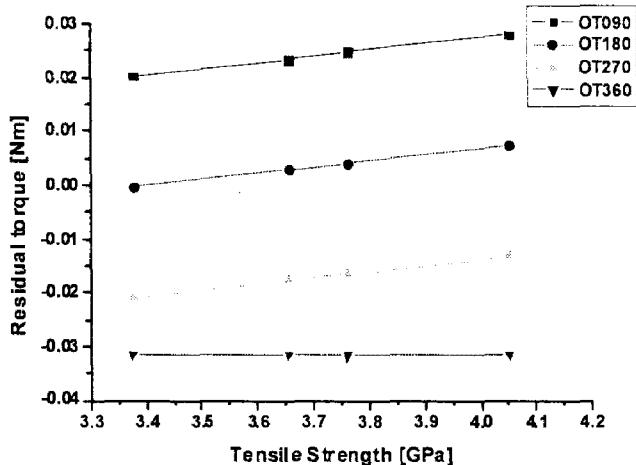


Fig. 3 Variation of the residual torques after step4 with respect to the wire material

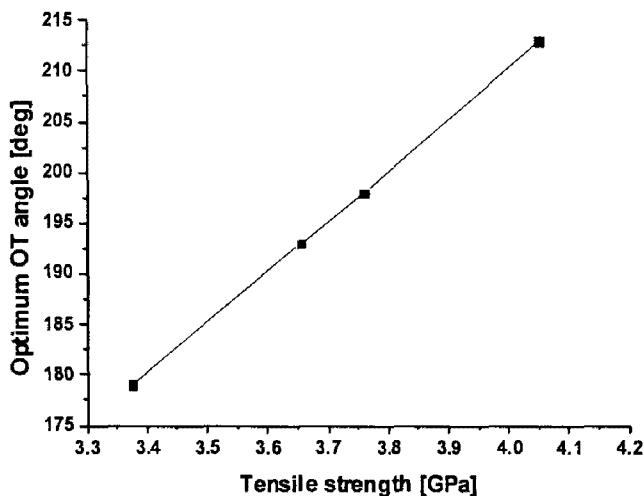


Fig. 3 Variation of the residual torques after step4 with respect to the wire material

k_{ER} 는 풀립 과정 중의 토오크 선도의 기울기이다. OT 각에 따라 선도의 기울기의 변화는 매우 미미하다. 이를 통하여 토오크 선도를 바탕으로 하여 잔류토오크가 0이 되는 최적 OT 각을 결정할 수 있다. 본 연구의 경우, 최적 OT 각은 풀립 과정 후, 비틀림각이 360° 일 때 잔류토오크가 0이 되게 하는 OT 각이다. 이때, 탄성복원직선의 식은 식 (3-4)와 같다.

$$\begin{aligned} T &= k_{ER}^{\text{optimum}}(\theta - \theta') + T' \\ &= k_{ER}^{\text{optimum}}(\theta - 360) \end{aligned} \quad (3)$$

이 때, k_{ER}^{optimum} 은 최적 OT 각에 의한 탄성복원 식의 기울기이며, 인접한 선도의 기울기의 평균값

으로 계산하였다.

2.1.3 공정변수 영향평가: 선재의 강도

각 선재에 대하여 Fig. 4와 Fig. 5에 선재의 인장 강도 변화에 따른 각각 잔류토오크 및 최적 OT각의 변화를 정리하여 보았다. 잔류토오크의 절대값이 클수록, 탄성복원각의 절대값도 크며, 잔류토오크의 반대방향으로 탄성복원이 이루어짐을 확인하였다. 한편, OT각 360° 의 경우, 풀립 과정 중에 소성변형을 하므로, 잔류토오크의 양이 일정하지만, 그 외의 OT각은 모든 선재에 대하여, 선재의 강도가 증가할수록, 잔류토오크가 커짐을 확인할 수 있다. 따라서, 선재의 강도가 증가함에 따라 요구되는 OT각 또한 증가할 것이라고 예측된다.

3. 결 론

신선공정에 의하여 얻어진 잔류응력을 실험과 해석결과를 비교하여 연선공정의 초기응력으로 고려하여 유한요소해석을 수행하였다. 이를 통하여 연선공정에 의한 잔류응력의 변화 및 잔류토오크의 발생원인을 고찰하였다. 신선공정에 의한 초기 잔류응력 분포는 연선공정에 의하여 대부분 제거된다. 연선공정의 주요한 공정변수 중 하나인 OT 각에 따라서, 잔류토오크의 양이 변화한다. 잔류토오크를 최소로 하기 위한 OT각의 계산식은 연선의 토오크선도를 통하여 쉽게 얻어진다. 선재의 강도가 증가하고, 역장력의 크기가 감소할수록, 잔류 토오크는 증가하며, 이를 제거하기 위한 최적OT각 또한 증가하여야 한다. 연선공정 중 최적 OT각의 적용을 통하여, 선재에 존재하는 잔류응력 및 잔류토오크의 최소화가 가능하며 롤러교정 공정의 적용을 최소화할 수 있다.

참 고 문 헌

1. M. Elices, 2004, Influence of residual stresses in performance of cold-drawn pearlitic wires, Journal of Materials Science, Vol. 39, pp. 3889-3899.
2. E. Albert and M. Schilling, 1998, Quality improvements during wire processing, Wire, Vol. 49, No. 1/98, pp. 44-46.