

## 유한요소해석을 이용한 스틸코드 롤러교정공정의 영향인자 분석

배기현<sup>1</sup>, 이종섭<sup>1</sup>, 허 훈<sup>1#</sup>, 이준우<sup>2</sup>

### Parameter Study of Roller Leveling Process of Steel Cord Using Finite Element Analysis

G. H. Bae, J. S. Lee, H. Huh, J. W. Lee

#### Abstract

This paper deals with the parameter study of roller leveling process of steel cord using finite element analysis. A simplified model of roller leveling process is constructed for the efficient numerical simulation considering the computing time. Using the constructed simulation scheme, the parameter study of main process parameters, such as back-tension and intermesh, is carried out in order to evaluate elastic recovery angle and roller force quantitatively. The effect of the initial shape of steel cord is also evaluated during the parameter study. And the mechanism of roller leveling process is verified by investigating the residual stress distribution.

**Key Words** : Roller Leveling Process, Parameter Study, Steel Cord, Finite Element Analysis

#### 1. 서 론

스틸코드(steel cord)는 현수교의 케이블, 타이어 보강재 등으로 널리 사용되고 있다. 특히 타이어 보강재 용 스틸코드의 직선성(straightness)은 최종 제품의 품질을 결정하는 매우 주요한 기하학적 요소이다. 인발공정(drawing process)에 의하여 생산된 선재는 연선공정(stranding process) 시에 다양한 비틀림 조건을 겪으면서 불균일한 잔류응력(residual stress)을 갖게 된다. 불균일한 잔류응력은 스틸코드의 직선성을 저하시키는 주요 원인이므로 이를 제거하기 위하여 일반적으로 롤러교정공정(roller leveling process)을 수행한다.[1,3]

롤러교정공정은 스틸코드 제품의 기하학적 품질을 향상시키기 위한 성형공정 기법의 하나이다. 롤러교정공정 중 스틸코드는 교정롤러를 지나면서 주기적인 굽힘변형(bending deformation)을 겪게 된다. 이를 통하여 선재 표면의 잔류인장응력과 소성변형량의 불균일성이 감소하게 된다. 이와 같

은 롤러교정공정의 원리를 통하여 스틸코드의 제작공정 중 발생하는 치명적인 잔류응력과 불균일한 소성변형을 개선할 수 있다.[2,3]

스틸코드의 품질 및 교정롤러의 수명은 롤러교정공정의 다양한 공정변수(process parameter)에 의하여 결정된다.[3,4] 주요 공정변수로는 롤러 압하량(roller intermesh), 롤러 간격(roller pitch), 롤러 반경(roller radius), 역장력(back-tension) 등이 있다. 일반적으로 롤러교정공정은 숙련자의 경험과 시행착오에 의하여 설계되는 것이 대부분이다. 따라서 설계의 효율성을 높이고 보다 좋은 품질의 스틸코드를 생산하기 위해서는 공정변수에 따른 롤러교정공정의 정량적 평가가 선행되어야 한다.

본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 스틸코드 롤러교정공정의 영향인자 분석을 수행한다. 해석시간의 효율성을 고려하여 단순 유한요소해석 기법을 구성한다. 구성된 유한요소해석 기법을 바탕으로 주요 공정변수인 역장력과 압하량에 따른 탄성복원각(elastic recovery angle) 및 롤러하중

1. KAIST 기계항공시스템공학부 기계공학전공  
2. KISWIRE 기술연구소  
# 교신저자: KAIST, E-mail: hhuh@kaist.ac.kr

(roller force)을 정량적으로 평가한다. 이와 동시에 초기 스틸코드의 형상에 따른 롤러교정공정의 교정효과를 분석한다. 롤러교정공정 전후의 잔류응력분포를 관찰함으로써 롤러교정공정의 교정 매커니즘을 확인한다.

## 2. 롤러교정공정의 유한요소해석

### 2.1 유한요소모델

본 연구에서는 롤러의 수, 롤러 반경, 롤러 간격을 각각 7개, 5 mm, 13 mm로 고정하고 역장력과 압하량을 공정변수로 선정하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 스틸코드 유한요소모델의 단면형상과 롤러교정공정의 유한요소모델이다. 스틸코드는 세 가닥의 선재로 구성되어 있다. 스틸코드의 형상에 따른 롤

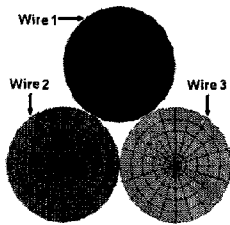


Fig. 1 Cross sectional view of finite element model of steel cord

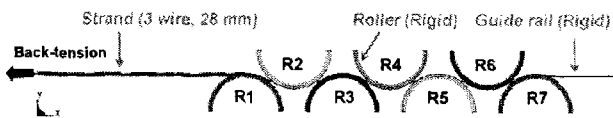


Fig. 2 Finite element model of roller leveling process with seven rollers

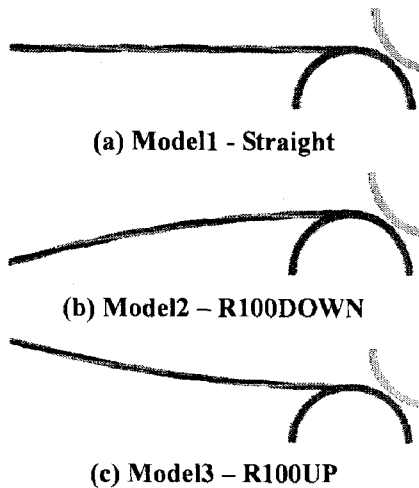


Fig. 3 Initial shape of steel cords

러교정공정의 교정도를 분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 100 mm의 곡률반경을 갖는 두 가지 형상의 스틸코드를 추가적으로 고려하였다. 해석은 외연적 상용 유한요소해석 프로그램 LS-DYNA3D v971을 사용하여 수행하였다. 롤러는 강제요소로 모델링하였으며 롤러와 스틸코드 사이의 마찰과 롤러의 회전을 무시하였다. 각 선재의 직경은 0.3 mm이며, 스틸코드의 길이는 28 mm로 단순화하였다. 선재의 재료물성은 Table 1과 Fig. 4에 제시하였다.

스틸코드를 단순화하기 위하여 압하공정의 유한요소해석을 수행하고 이를 바탕으로 스틸코드의 경로를 확보하였다. 압하공정의 해석은 내연적 상용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS/Standard v6.7-1을 사용하였으며 Fig. 5에 변형형상을 도시하였다. 경계조건으로 스틸코드의 좌측 끝단에 역장

Table 1 Reference of the wire material

Material	M4
Carbon contents (wt%)	0.92
Area reduction ratio (%)	97.56
Final diameter (mm)	0.3
Yield stress (GPa)	3.411
Tensile stress (GPa)	4.051

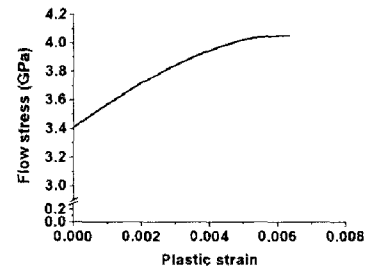


Fig. 4 Flow stress curve of the wire material

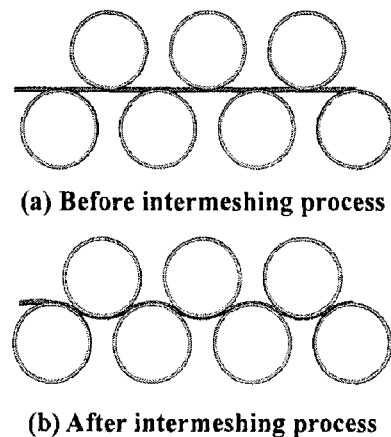


Fig. 5 Finite element analysis of intermeshing process

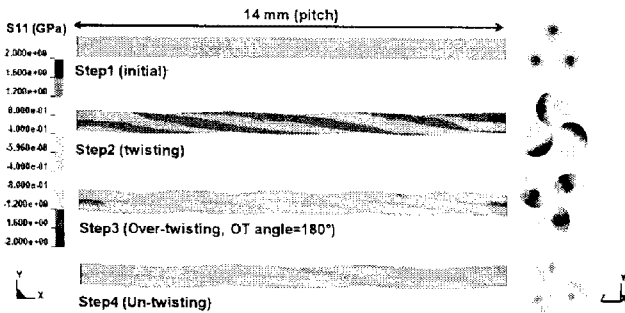


Fig. 6 Result of finite element analysis of over-twisting process (1 pitch, 14 mm)

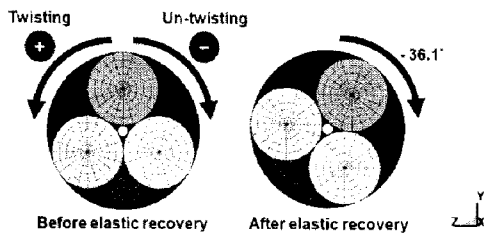


Fig. 7 Measurement of elastic recovery angle before roller leveling process

력을 부가하였으며 우측 끝단에 구속조건을 부가하였다. 해석시간의 효율성을 고려하여 스틸코드는 표면요소(surface element)로 모델링하였다. 스틸코드를 지정된 경로로 통과시키기 위하여 확보한 경로를 0.05 mm 오프셋하여 강체요소로 모델링하고 스틸코드 양끝 단면의 중심과 접촉조건을 부가하여 구속하였다. 위의 과정을 통하여 롤러교정공정의 단순 해석기법을 구성하였으며 해석시간을 크게 단축하였다.

롤러교정공정 전의 스틸코드는 다양한 비틀림 조건을 받기 때문에 이를 고려한 초기조건을 부가하여야 한다. 스틸코드의 연선공정 중 대표적인 비틀림 조건은 over-twisting 공정에서 발생한다. 따라서 Fig. 6과 같이 over-twisting 공정의 유한요소해석을 수행하여 잔류응력을 확보하고 롤러교정공정의 초기조건으로 부가하였다. 이때 선재의 인발공정 시에 발생하는 잔류응력을 over-twisting 공정의 초기조건으로 고려하였다.

## 2.2 해석 결과

롤러교정공정의 초기 경계조건으로 압하량 1.5 mm, 역장력 500 MPa을 부가하고 유한요소해석을 수행하였다. 스틸코드는 롤러교정공정 동안 각 롤러를 통과하며 주기적인 굽힘변형을 겪으며 이를

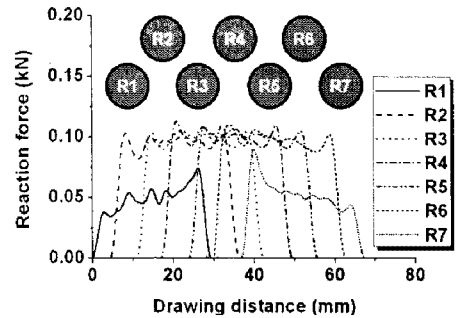


Fig. 8 Reaction force at each roller during roller leveling process

Table 2 Measuring result of the roller force

Roller number	Roller force (kN)	Roller number	Roller force (kN)
R1	0.050	R5	0.101
R2	0.097	R6	0.099
R3	0.101	R7	0.052
R4	0.102	Max.	0.102

통하여 최종 제품의 잔류응력을 감소시키며 스틸코드의 직선성을 향상시킨다.

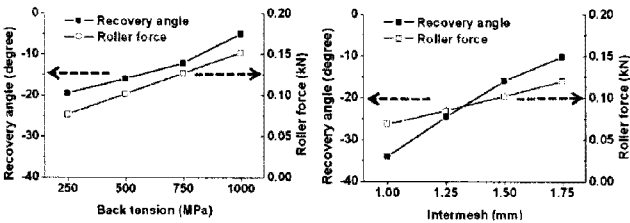
롤러교정공정의 교정도 및 롤러수명을 평가하기 위하여 스틸코드의 탄성복원각 및 롤러하중을 측정하였다. 탄성복원각을 측정하기 위하여 Fig. 7과 같이 롤러교정공정 전후에 탄성복원해석을 수행하고 스틸코드의 비틀림각을 측정하였다. 롤러교정공정 중 각 롤러에서 발생하는 하중을 Fig. 8에 도시하였다. 스틸코드가 롤러와 연속적으로 접촉하는 시점에서는 준정적인 하중영역이 발생하며 이때의 평균값을 롤러하중으로 선정하였다. 각 롤러에서 측정한 롤러하중을 Table 2에 제시하였다. 양끝단 롤러에서는 약 50%의 롤러하중이 발생하며 이를 통하여 각 롤러에서 스틸코드의 굽힘량에 따라 롤러하중이 결정됨을 알 수 있다. 롤러하중이 증가할수록 롤러의 수명은 감소하므로 각 롤러에서 발생하는 하중 중에서 최대치를 대표값으로 선정하여 평가기준으로 활용하였다.

## 3. 롤러교정공정의 인자분석

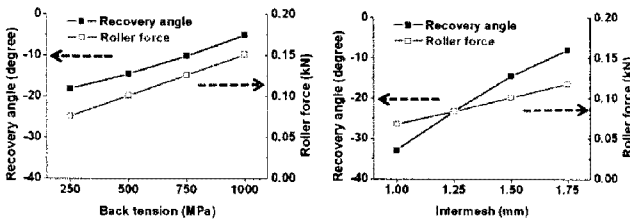
역장력과 압하량의 변화에 따른 인자분석을 수행하고 탄성복원각과 롤러하중을 정량적으로 평가하였다. Table 3과 같이 4수준으로 설계표를 작성하였으며 각 설계경우에 대하여 유한요소해석을

**Table 3 Design table for parameter study**

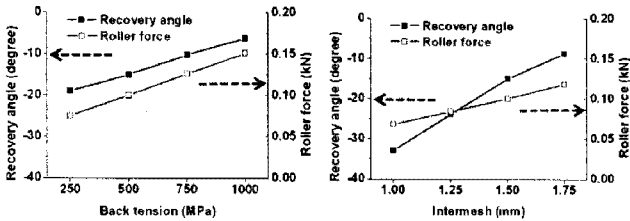
Design parameter	Value			
Back-tension (MPa)	250	500	750	1000
Intermesh (mm)	1.0	1.25	1.5	1.75



(a) Model1 - Straight

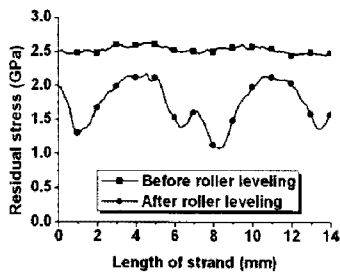


(b) Model2 - R100DOWN



(c) Model3 - R100UP

**Fig. 9 Result of parameter study with respect to back tension and intermesh**



**Fig. 10 Residual stress distribution before and after roller leveling process (wire1, shear stress, S12)**

수행하였다. 세 가지 스틸코드 초기형상에 대한 인자분석 결과를 Fig. 9에 제시하였다. 모든 경우 역장력과 압하량의 증가에 따라 탄성복원각이 감소함과 동시에 롤러하중이 증가한다. 따라서 롤러 교정 공정 시에 스틸코드의 교정도와 롤러수명은

서로 상반되며 이를 동시에 고려한 롤러교정공정의 설계를 수행하여야 한다. 또한 스틸코드 초기형상에 대하여 교정도와 롤러하중이 거의 차이가 없으므로 롤러교정공정은 스틸코드의 초기형상에 관계없이 교정이 가능함을 알 수 있다.

롤러교정공정의 메커니즘을 확인하기 위하여 롤러교정공정 전후에 선재의 잔류응력 분포를 비교하였다. 경계조건의 영향을 제외하기 위하여 선재 중앙부로부터 1 피치(14 mm)를 관찰하였다. Fig. 10은 롤러교정공정 전후의 잔류응력의 분포를 도시한 그래프이다. 이를 통하여 롤러교정공정의 메커니즘은 주기적 하중조건에 따른 잔류응력의 감소로 설명할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 롤러교정공정의 단순 유한요소 해석 기법을 구성하고 주요 공정변수의 인자분석을 수행하였다. 이를 통하여 주요 공정변수에 따른 탄성복원각 및 롤러하중을 평가하였으며 잔류응력 분포를 관찰하여 롤러교정공정의 메커니즘을 설명하였다. 인자분석 결과를 통하여 롤러교정 공정 설계 시에 주요 공정변수의 조절을 통하여 롤러수명과 교정효과를 동시에 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

#### 참고 문헌

- [1] M. Elices, 2004, Influence of residual stresses in performance of cold-drawn pearlitic wires, *J. Mater. Sci.*, 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.
- [3] 이종섭, 허훈, 이준우, 배종구, 김득태, 2007, 반응표면법을 이용한 스틸코드의 롤러교정기 설계 최적화, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 238~241.
- [4] H. Huh, J. H. Heo and H. W. Lee, 2003, Optimization of a roller levelling process for Al7001T9 pipes with finite element analysis and Taguchi method, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 43, No. 4, pp. 345~350