

## 반응표면법을 이용한 스틸코드의 롤러교정기 설계 최적화

이종섭<sup>1</sup>, 허훈<sup>1#</sup>, 이준우<sup>2</sup>, 배종구<sup>2</sup>, 김득태<sup>2</sup>

### Design Optimization of Roller Straightening Process for Steel Cord using Response Surface Methodology

Jong-Sup Lee, Hoon Huh, Jong-Gu Bae, Jun-Wu Lee and Deuk-Tae Kim

#### Abstract

A roller straightening process is a metal forming technique to improve the geometric quality of products such as straightness and flatness. The geometrical quality can be enhanced by eliminating unnecessary deformations produced during upstream manufacturing processes and minimizing any detrimental internal stress during the roller straightening process. The quality of steel cords can be achieved by the roller straightening depends the process parameters. Such process parameters are the roll intermesh, the roll pitch, the diameter of rolls, the number of rolls and the applied tension. This paper is concerned with the design optimization of the roller straightening process for steel cords with the aid of elasto-plastic finite element analysis. Effects of the process parameters on the straightness of the steel cord are investigated by the finite element analysis. Based on the analysis results, the optimization of the roller straightening process is performed by the response surface method. The roller straightening process using optimum design parameters is carried out in order to confirm the quality of the final products.

**Key Words:** Optimization, Roller Straightening Process, Steel Cord, Response Surface Methodology, Finite Element Analysis

#### 1. 서론

인발(drawing) 공정을 통하여 제작되는 스틸코드(steel cord)는 현수교의 케이블, 타이어 보강재로 널리 사용되고 있다. 특히 타이어 보강재 용 스틸코드 생산공정에 있어서, 기하학적인 품질 중 하나인 스틸코드의 직진성(stightness)은 스틸코드를 이용한 최종제품의 품질을 좌우하기 때문에 매우 중요하다. 인발공정을 통하여 단면적은 감소하고 길이가 길어지는 스틸코드는 다이(die)와의 마찰 등에 의하여 단면을 통하여 불균일한 소성변형을 하게 된다. 이 불균일한 소성변형량의 분포에 의하여 최종적으로 스틸코드는 휘어지게 된다. 따라

서, 스틸코드의 직진성을 확보하기 위하여 불균일한 소성변형을 제거 또는 최소화하여야 한다. 한편 인발공정 후, 선재의 표면의 분포하는 잔류인장응력(residual tensile stress)은 최종제품의 피로수명에 치명적인 영향을 미치므로 잔류인장응력 또한 제거할 필요가 있다 [1].

롤러교정공정(roller straightening process)은 제품의 기하학적 품질을 향상시키기 위한 성형공정 기법의 하나이다. 제작공정 중 발생하는 치명적인 잔류응력과 불균일한 소성변형을 제거 또는 감소시키기 위하여 롤러교정공정은 필수적이다. 롤러교정공정 중 선재는 굽힘변형을 반복적으로 겪게되어 표면의 잔류인장응력과 소성변형량의 불균일도가 감소하게 된다[2].

1. 한국과학기술원 기계항공시스템공학부 기계공학전공

2. KISWIRE 기술연구소

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

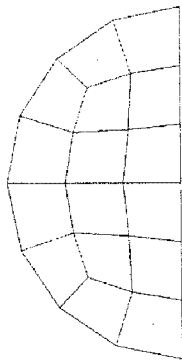


Fig. 1 Cross sectional view of finite element model of the wire

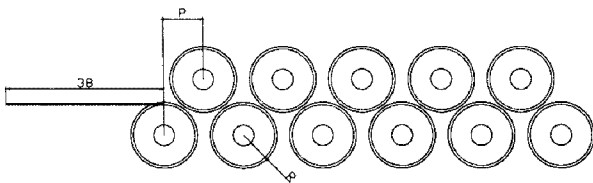


Fig. 2 Schematic diagram of the roller straightener and the wire

롤러교정공정을 통하여 개선할 수 있는 스틸코드의 품질은 다양한 공정변수(process parameter)에 의하여 결정된다 [3]. 주요 공정변수로는 롤러 압하량(roll intermesh), 롤러의 간격(roll pitch), 롤러의 직경, 롤러의 수, 선재에 작용하는 역장력(applied tension)등이 있다 [4-5].

제품의 경량화를 위하여 선재의 강도가 증가함에 따라 스틸코드의 교정공정을 위한 공정변수를 더 이상 경험적인 방법으로 결정하기란 매우 많은 어려움이 따른다. 효과적인 공정변수 설계를 위한 좀더 체계적인 기법을 도입할 필요가 있으며, 이를 위하여 유한요소해석(finite element analysis)을 바탕으로 한 반응표면법(response surface method)이나 다구찌법(Taguchi method)과 같은 실험계획법을 응용한 설계기법이 롤러교정기의 공정변수 설계에 적용되어 왔다 [6].

본 논문에서는 탄소성(elasto-plastic) 유한요소해석을 이용하여 롤러교정공정의 설계최적화를 수행한다. 롤러교정공정의 유한요소해석을 통하여 공정변수의 교정결과에 대한 영향을 분석한다. 이를 바탕으로 반응표면법을 적용한 공정변수 설계 최적화를 수행한다. 마지막으로, 유한요소해석을 통하여 제안된 최적설계안을 확인한다.

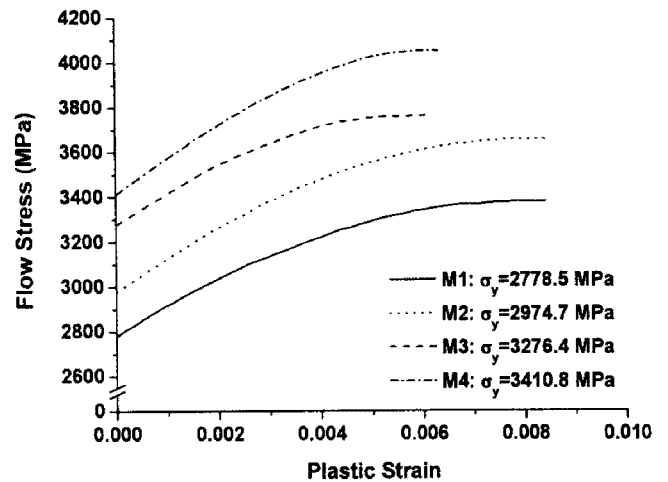


Fig. 3 Flow stress curves of 4 different wire materials

Table 1 Conditions of 4 wire materials

material	carbon contents [wt%]	area reduction ratio[%]	yield stress [Mpa]
M1	0.8	96.85	2778.5
M2	0.9	96.85	2974.7
M3	0.8	97.56	3276.4
M4	0.9	97.56	3410.8

## 2. Parameter study of roller straightening process

### 2.1 롤러교정공정의 유한요소해석

본 연구에서는 롤러의 수를 11개로 고정된 롤러교정기의 롤러직경, 롤러간격과 역장력을 설계변수로 선정하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 유한요소해석을 위하여 구성된 유한요소모델의 단면형상과 롤러교정기의 개략도이다. 내연적 상용해석코드인 ABAQUS/standard가 사용되었으며, 해석의 효율성을 위하여 대칭조건을 이용하였다. 롤러는 Analytic rigid surface로 모델링하였다. 롤러와 스틸코드사이의 마찰과 롤러의 회전은 무시하였다. 선재의 직경은 0.30mm, 길이는 38mm이며 Table 1과 Fig. 3의 해석에 사용된 4가지 선재의 탄소함유량과 가공량 및 유동응력곡선이다. 선재의 Young's modulus 값은 210 GPa이다.

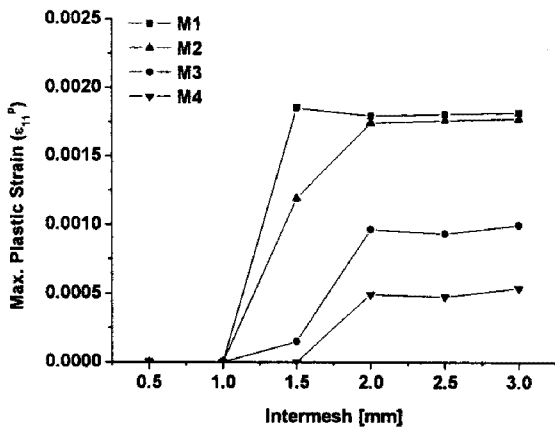


Fig. 4 maximum plastic strain along the longitudinal direction with respect to the intermesh

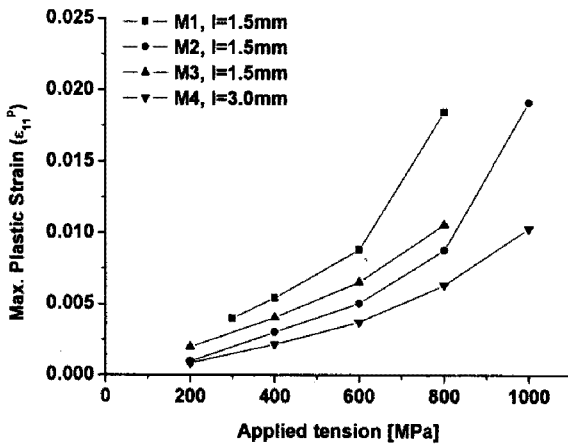


Fig. 5 maximum plastic strain along the longitudinal direction with respect to the applied tension

## 2.2 Parameter study 결과

공정변수가 교정결과에 영향을 미치는 정도는 상호 연관되어 있기 때문에 최종 결과값을 비교하기란 쉽지 않다. 하지만, 스틸코드에 부과되는 최대 소성변형률의 크기에 따라서, 강도증가에 따른 공정변수의 설계의 기준을 제시할 수는 있다. 따라서 유한요소해석을 통하여 공정변수에 따른 선재에 부과되는 소성변형률의 변화를 관찰하였다. Fig. 4 와 Fig. 5 는 각각 롤러의 압하량, 역장력에 따른 스틸코드에 부과되는 최대 소성변형률을 나타낸 그래프이다. 선재의 강도가 올라갈수록 소성변형을 부과하기 위한 역장력이나 압하량의 크기가 증가하여야 한다. 한편 압하량의 경우, 압하량의 증가로 얻을 수 있는 소성변형률의 한계가 존재한다.

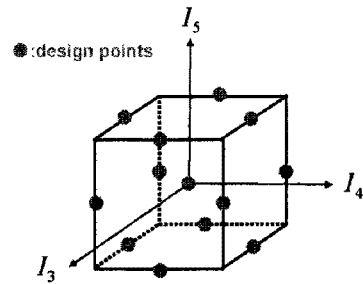


Fig. 6 design points of the Box-Behnken design

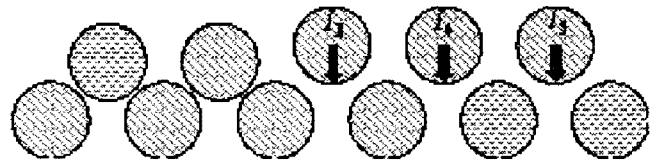


Fig. 7 design variables of the optimization

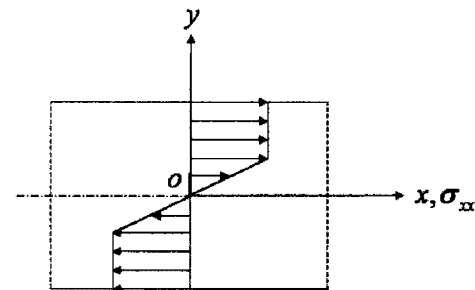


Fig. 8 moment and stress of wire

## 3. 롤러교정공정의 설계 최적화

### 3.1 Optimization process

설계변수로는 5 개의 상부 롤러 중 3 개의 압하량을 Fig. 7 과 선정하였다. 반응표면을 얻기 위하여 본 연구에서는 Box-Benken design 을 사용하였다. 3 개의 설계변수에 대한 Box-Benken design 의 설계점은 Fig. 6 과 같다. 설계 목적함수는 Fig. 8 과 나타낸 바와 같이 선재의 단면에 작용하는 잔류 모멘트를 감소시키는 것으로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\text{minimize } \Phi = \Phi(I_3, I_4, I_5) = \int_{L_{wire}} \left( \int_{A_{wire}} \sigma_{xx} y dA \right)^2 dx$$

$$\text{s.t. } I_{min} \leq I_i \leq I_{max}, i = 3, 4, 5$$

여기서,  $L_{wire}$  과  $A_{wire}$  는 선재의 길이와 단면적을 뜻하며  $I_i$  는  $i$  번째 롤러의 압하량을 의미한다.

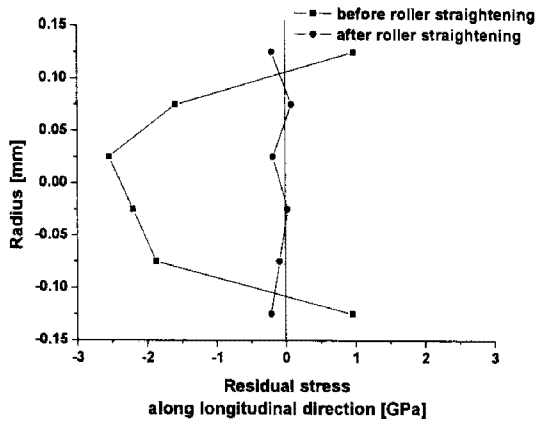


Fig. 9 comparison of residual stress of wire between before roller straightening and after roller straightening

최소, 최대 압하량은 각각 0.6mm, 1.4mm 이다. 최소압하량은 소성변형을 부과할 수 있는 가장 작은 압하량을 의미하며, 최대압하량은 롤러간의 직경과 간격에 의하여 결정된다.

### 3.2 optimization results

표 2 는 각 해석에서의 설계 값을 나타낸 표이며, 이 결과 구성된 회귀식은 다음과 같다.

$$\Phi = 10884.58 - 469.57I_3 + 7881.16I_4 + 23028.37I_5 + 16.50I_3I_4 - 715.62I_3I_5 + 6488.23I_4I_5 + 33.32I_3^2 + 4461.93I_4^2 + 12939.62I_5^2 + 3238.20I_4^2I_5 - 342.89I_4^2I_5^2$$

Table 2 run table for FEA, [mm]

run	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	Run	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>
1	1.00	1.40	1.40	8	0.60	1.00	0.60
2	1.00	0.60	1.40	9	1.40	1.40	1.00
3	1.00	1.40	0.60	10	0.60	1.40	1.00
4	1.00	0.60	0.60	11	1.40	0.60	1.00
5	1.40	1.00	1.40	12	0.60	0.60	1.00
6	0.60	1.00	1.40	13	1.00	1.00	1.00
7	1.40	1.00	0.60				

Table 3 Conditions of 4 wire materials

variable	value
I <sub>3</sub>	0.859
I <sub>4</sub>	0.803
I <sub>5</sub>	0.806

이 식을 통하여 얻어진 최적설계안은 표 3 과 같으며, 최적설계안에 따라 롤러교정공정 해석을 수행하였을 때, 롤러 단면에 존재하는 잔류응력의 변화를 나타낸 그래프는 Fig. 9 와 같다. 최적설계안에 따른 롤러교정공정을 통하여 표면의 인장잔류응력과 단면에 작용하는 모멘트가 크게 감소함을 확인할 수 있다.

### 3. 결론

롤러교정공정에 설계변수들에 대한 영향을 유한요소해석을 통하여 평가하였다. 선재의 강도증가에 따라서 요구되는 압하량과 역장력의 크기 또한 증가한다. 한편, 롤러교정공정의 반응표면법을 적용한 설계최적화를 각각의 롤러의 압하량을 설계변수로 하여 수행하였다. 이를 통하여 스틸코드에 존재하는 잔류인장응력과 모멘트를 감소시켰다.

### 참고 문헌

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.
3. M. Paech, 2002, Factors relating to the wire straightening process: process and peripherals, Wire journal international, Vol. 35, No. 12, pp. 64-68.
4. H. Schneiderei and M. Schilling, 1996, Determination of the minimum number of rollers on wire straightening units, Wire, Vol. 47, No. 5, pp. 318-320.
5. N. K. D. Talukder and W. Johnson, 1981, On the arrangement of rolls in cross-roll straighteners, International Journal of Mechanical Science, Vol. 23, pp. 213-2201.
6. 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, International journal of machine tools & manufacture, Vol. 43, No. 4, pp. 345-350.
7. HyperStudy 7.0 User's Manual, Altair Engineer