

## 수치해석을 이용한 선재 롤러교정공정 주요인자의 직진도 영향 분석

방준호<sup>1,2</sup> · 송정한<sup>3</sup> · 이명규<sup>4</sup> · 이희종<sup>5</sup> · 성대용<sup>6</sup> · 배기현<sup>3, #</sup>

### Parametric Study on Straightness of Steel Wire in Roller Leveling Process Using Numerical Analysis

J. H. Bang, J. H. Song, M. G. Lee, H. J. Lee, D. Y. Sung, G. H. Bae

(Received July 4, 2022 / Revised August 26, 2022 / Accepted September 21, 2022)

#### Abstract

In this study, influence of the process parameters of the roller leveling process on the straightness of the steel wire was analyzed using numerical analysis. To construct the numerical analysis model, cross-sectional and longitudinal element sizes, which affect the prediction accuracy of longitudinal stress caused by bending deformation of the steel wire, were optimized, and mass scaling that satisfies prediction accuracy while reducing computational time was confirmed. By using the constructed numerical analysis model, the influence of various process parameters such as input direction of the steel wire, initial diameter of the steel wire, back tension and intermesh on the straightness was confirmed. The simulation result shows that the 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> roller of vertical straightener had a significant influence on vertical shape of the steel wire.

**Keywords:** Steel Wire, Roller Leveling Process, Straightening, Residual Stress, Bending Deformation, Numerical Analysis

## 1. 서 론

선재는 자동차, 가전, 건축 등 많은 산업 분야에서 다양한 용도로 사용되고 있다. 이때 선재는 주로 인발공정(Drawing Process)을 거쳐 코일 형태의 제품으로 공급되며, 제조사에서는 최종 제품의 품질 균일도 확보를 위하여 불균일한 잔류응력(Residual Stress)과 곡률 형상을 교정하여 직진도(Straightness)를 확보하는 것이 매우 중요하다[1-2]. 이를 위하여 일반적으로 제품 가공공정 이전에 롤러교정공정(Roller Leveling Process)을 적용하여 직진도를 확보하게 된다[3-8]. 롤러교정공정은 선재가 여러 개의 회전하는

롤러 사이를 통과하면서 반복적인 굽힘변형(Bending Deformation)을 경험함으로써 잔류응력과 형상을 균질화하는 공정으로 선재의 투입방향, 초기직경 뿐만 아니라 역장력, 롤러 압하량, 롤러 피치 등과 같은 다양한 공정변수에 따라 민감하게 변화하게 된다. 안정적인 가공품질 확보를 위해서는 선재 직진도를 엄격히 관리하여야 하지만 실제 제조 현장에서는 주로 작업자의 경험과 시행착오에 의존하고 있는 상황이다. 따라서 이를 개선하기 위해서는 롤러교정공정 설계변수에 따른 직진도의 정량적 평가를 통한 공정 설계 가이드 수립이 필요하다.

본 연구에서는 롤러교정공정의 주요 인자가 선재 직진도에 미치는 영향을 수치해석을 이용하여 분석한다. 직경 3 mm 이고 저탄소강재인 AISI1010 선재를 대상 소재로 선정하였으며, 수치해석용 물성 확보를 위하여 영상분석기법(Digital Image Correlation, DIC)을 활용한 인장실험을 수행하였다. 수치해석의 효율성을

1. 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소, 학생연구원  
2. 서울대학교 재료공학부, 박사과정  
3. 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소, 수석연구원  
4. 서울대학교 재료공학부, 교수  
5. LG전자 생산기술원 생산공정솔루션팀, 책임연구원  
6. LG전자 생산기술원 생산공정솔루션팀, 팀장  
# Corresponding Author: Korea Institute of Industrial Technology, Incheon Regional Division, E-mail: baegh@kitech.re.kr  
ORCID: 0000-0002-0015-4742

고려하여 요소 크기 및 질량 스케일링(Mass Scaling) 조건을 결정하였다. 정립된 수치해석 모델을 바탕으로 롤러교정공정 주요 공정변수들의 변화에 따른 직진도 영향을 분석하고, 직진도 확보를 위한 공정설계 방안을 제시하였다.

## 2. 선재 롤러교정공정

저탄소강재인 AISI1010 코일 선재의 직진도는 Fig. 1 과 같이 롤러교정공정 (Roller Leveling Process)을 이용한 잔류형상 및 잔류응력의 균일화를 통해 얻어진다. 직경 3 mm 의 선재는 코일형태로 언코일러에 감겨있으며, 이때 감겨있는 선재 코일의 최대/최소 직경은 각각 약 750 mm, 520 mm 이다. 이후 피더를 통해 일정한 속도로 직교로 배치된 동일 형상의 수직/수평 롤러교정기를 연속적으로 통과하여 반복적인 굽힘변형을 부가함으로써 직진도 품질을 확보하게 된다. 본 연구의 대상 롤러교정기는 총 9 개의 롤러를 사용하고 있으며, 5 개의 하부롤러는 고정된 상태에서 4 개의 상부롤러 위치를 조정하여 압하량을 부가한다. 교정 후 선재 직진도 품질은 제품 사이즈에 맞춰 특정 길이로 절단한 후 아크 높이(Arc Height)를 기준으로 평가한다. 본 연구에서는 840 mm 샘플을 기준으로 직진도를 평가하였다.

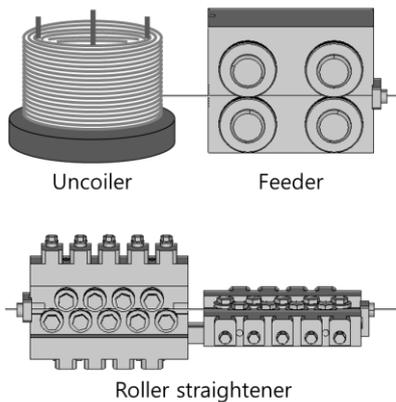


Fig. 1 Roller leveling process of steel wire

## 3. 선재 물성 평가

AISI1010 재질 선재의 인장 특성을 평가하기 위해 Fig. 2 과 같이 MTS810 만능시험기를 사용하였으며, ARAMIS 영상분석 시스템을 이용하여 변형률을 측정하였다. 시편의 표점거리는 50 mm 이며, 0.001/sec 의

준정적 속도를 고려하여 인장속도는 0.05 mm/sec 로 결정하였다. Fig. 3 은 선재의 인장시험 결과를 보여준다. 선재의 경화거동은 식 (1)의 Swift 경화식을 이용하여 근사하였으며, 경화식의 계수는 Table 1 에 제시하였다.

$$\sigma_{swift} = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n \quad (1)$$

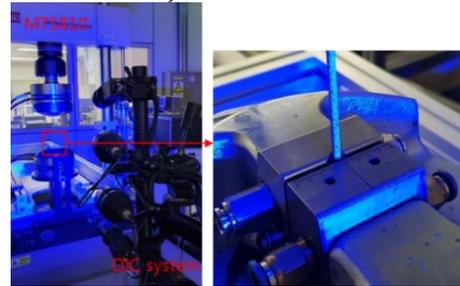


Fig. 2 Tensile testing system for steel wire

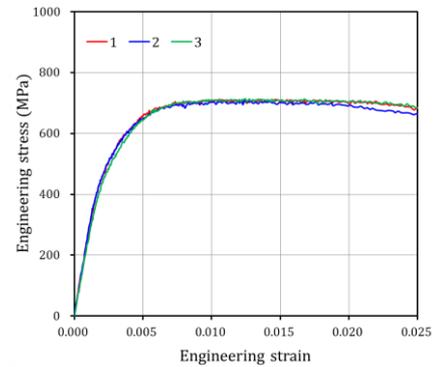


Fig. 3 Eng. stress-Eng. strain curves of steel wire

Table 1 Parameters of swift hardening law for steel wire

Swift hardening law		
$K$	$\epsilon_0$	$n$
833.697	$9.46 \times 10^{-5}$	0.0305

## 4. 수치해석 기법 정립

### 4.1 수치해석 모델 구성

선재 롤러교정공정의 정량적 평가를 위하여 유한 요소를 이용한 수치해석 모델을 구성하였다. 롤러교정공정의 주요 인자가 선재 직진도에 미치는 상대적 영향을 분석을 위해 본 연구는 초기 선재 코일의 잔류응력은 고려하지 않았으며, 초기 선재 코일의 형상을 고려하여 기준 직경을 600 mm 로 결정하였다. 피딩 롤러 직경은 101 mm 이며, 롤러교정기는 90° V 홈형상의 롤러를 사용하며 직경과 피치는 각각 40 mm, 50 mm 이다. 양산 제조공정에서는 입측 교정롤러에서 주로 가장 큰 압하량을 부가한 후 출측 교정롤러로

가면서 압하량이 점차 감소하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 1~4 번 교정롤러에 각각 3.00 mm, 2.33 mm, 1.67 mm, 1.00 mm 의 선형적으로 감소하는 방식의 압하량 조건을 부가하였다. 제시한 롤러 교정공정 형상 정보를 바탕으로 Fig. 4 와 같이 수치 해석 모델을 구성하였다. 이때 롤러와 피더는 강체로 가정하였으며, 선재는 육면체 솔리드 요소로 분할하였다. 롤러와 와이어 간의 접촉 조건을 고려하여 롤러와 와이어 길이방향 요소크기를 0.54 mm 로 작게 분할하였으며, 선재 단면의 응력분포를 상세하게 관찰하기 위하여 단면 상에 8개의 요소를 배치하여 단면 요소 크기를 0.36 mm 로 결정하였다. Fig. 5 는 롤러교정공정의 유한요소모델 구성 결과를 보여준다.

교정롤러의 회전을 고려하여 마찰계수는 0.0 으로 가정하였으며, 선재 이송속도는 피딩 롤러의 회전속도를 고려하여 1.0 m/sec 로 결정하였다. 또한 선재 코일의 중량을 고려하여 역장력을 0.2 kN 으로 가정하였다. 이와 같은 롤러교정공정 수치해석 경계조건을 Fig. 6 에 제시하였다. 수치해석 수행을 위하여 선재에 인장시험을 통하여 구성된 Swift 식을 소재 물성으로 부가하였다. 또한 선재의 밀도, 탄성계수, 포아송비는 각각 7.8 g/cm<sup>3</sup>, 210 GPa, 0.3 으로 적용하였다.

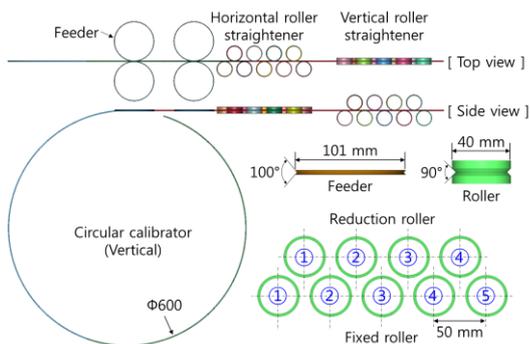


Fig. 4 Schematics of roller leveling process and dimensions for each part

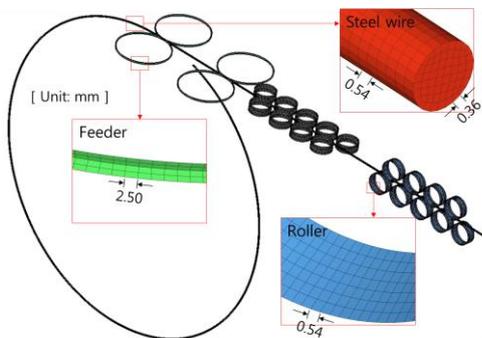


Fig. 5 Finite element model for simulating the roller leveling process

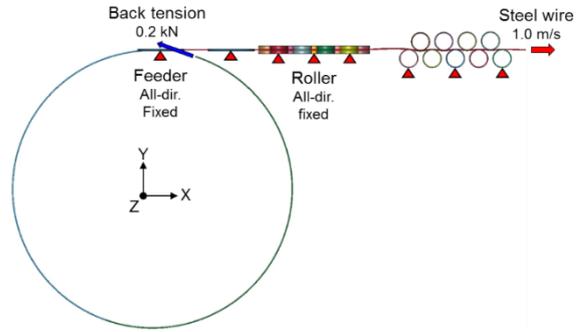


Fig. 6 Boundary conditions for simulation model of roller leveling process

#### 4.2 수치해석 결과

앞서 구성한 유한요소모델 및 경계조건을 활용하여 롤러교정공정의 수치해석을 수행하였다. Fig. 7 은 선재가 교정롤러를 통과하는 동안의 응력 분포를 보여준다. 이와 같이 롤러교정기를 통과함에 따라 주기적인 굽힘변형을 통하여 형상이 교정되게 된다. 해당 유한요소모델의 경우 선재가 롤러교정기를 통과하며 형상이 교정되기 위해서 많은 경계조건 및 접촉 조건을 받기 때문에 상당히 많은 해석시간을 소요한다. 따라서 해석시간 효율을 고려하는 동시에 신뢰성 있는 선재 교정 결과를 예측할 수 있도록 다양한 질량 스케일링에 대한 직진도 민감성을 확인해보았다. 질량 스케일링의 직진도 민감성 검증을 하는데 필요한 해석시간 단축을 위해 앞서 구성된 수치해석 모델의 선재 길이/단면 요소크기보다 상대적으로 큰 각각 3.0 mm 와 0.55 mm 가 적용되었다. Table 2 에서 제시한 바와 같이 100 배의 질량 스케일링 조건이 질량 스케일링을 적용하지 않은 해석결과와 비슷한 직진도를 보이기 때문에 해석시간 효율을 가지는 동시에 신뢰성 있는 선재 교정 결과를 보이는 것을 확인하였다.

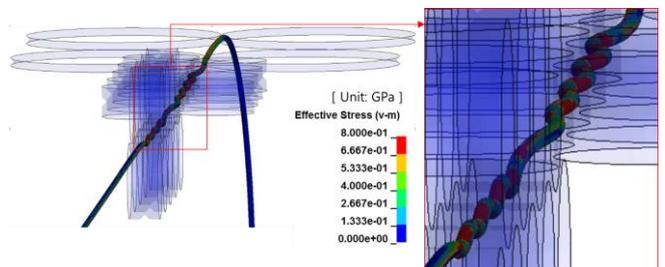
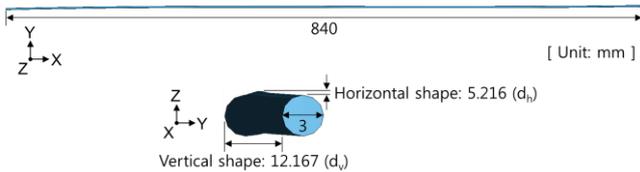


Fig. 7 Investigation of the stress distribution during the roller leveling process

**Table 2 Sensitivity of mass scaling to straightness**

Mass scaling	Vertical shape $d_v$ (mm)	Horizontal shape $d_h$ (mm)	Straightness $h$ (mm)
-	4.11	0.04	4.11
100x	5.06	0.11	5.06
200x	7.57	-0.04	7.57
300x	12.63	0.15	12.63

롤러교정기를 통과한 후 스프링백 해석을 통하여 Fig. 8 과 같이 선재의 직진도를 측정하였다. 선재의 수직과 수평 형상은 각각 12.167 mm 와 5.216 mm 이며 아크 높이는 피타고라스의 정리에 의해 약 13.238 mm 가 발생하는 것을 확인하였다. 제조 현장에서 선재의 직진도 품질은 일반적으로 수 mm 이하를 요구하지만 본 연구에서는 공정변수에 따른 직진도 영향을 분석하는 것이 목적이므로 구성된 수치해석 기법은 롤러교정공정 분석에 활용 가능할 것으로 판단하였다.



**Fig. 8 Measurement of the arc height of steel wire**

### 5. 공정인자 분석

본 연구에서는 선재 투입방향, 선재 초기직경, 역장력, 압하량을 주요 공정변수로 선정하였다. 앞서 정립한 수치해석 기법을 이용하여 각 공정변수 변화에 따른 직진도 영향을 정량적으로 평가하고, 양산 제조공정의 직진도 품질 확보 방안을 제시한다.

#### 5.1 선재 투입방향

선재 투입방향에 따른 직진도 영향을 분석하기 위해 수직/수평 투입방향에 따른 직진도를 비교하였다. Fig. 9 와 같이 투입방향을 수평으로 변경하여도 직진도는 12.016 mm 로 큰 변화가 없다. 이는 선재 투입방향이 변화하더라도 롤러교정기에 의한 직진도 개선이 가능하며, 수직/수평 롤러교정기 순서에 무관하게 각 방향의 직진도를 독립적으로 교정할 수 있음을 의미한다. 따라서 양산 제조공정에서 선재 투입방향에 변화가 발생하더라도 최종 직진도에는 큰 변화가 없을 것으로 예상된다.

Input direction of steel wire	Vertical shape, $d_v$ (mm)	Horizontal shape, $d_h$ (mm)	Straightness, $h$ (mm)
Vertical (Reference)	-12.167	-5.216	13.238
Horizontal	-12.015	-0.038	12.016

**Fig. 9 Comparison of straightness according to the input direction of steel wire**

#### 5.2 선재 초기직경

앞서 제시한 바와 같이 선재 코일의 직경이 약 520~720 mm 수준인 것으로 고려하여 450 mm, 600 mm, 750 mm 의 세 가지 초기직경 조건에 대하여 직진도를 평가하였다. Fig. 10 에 제시한 바와 같이 선재 초기직경이 증가할수록 직진도는 감소하는 경향을 보이지만, 큰 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 따라서 선재 코일의 직경이 변화하더라도 비교적 균일한 직진도 품질 확보가 가능함을 확인할 수 있다.

Initial diameter of steel wire (mm)	Vertical shape, $d_v$ (mm)	Horizontal shape, $d_h$ (mm)	Straightness, $h$ (mm)
$\Phi 450$	-12.463	-5.454	13.605
Reference $\Phi 600$	-12.167	-5.216	13.238
$\Phi 750$	-11.620	-5.747	12.964

**Fig. 10 Comparison of straightness according to the initial diameter of steel wire**

#### 5.3 역장력

선재 코일에 의한 역장력 변화에 따른 롤러교정공정 해석을 수행하고 직진도를 평가하였다. Fig. 11 은 역장력 변화에 따른 직진도 분석결과를 보여준다. 이와 같이 역장력이 증가함에 따라 직진도는 점차 감소하는 경향을 보인다. 일반적으로 롤러교정공정 시에는 역장력을 관리하지 않는다. 따라서 보다 균일한 직진도 품질 확보를 위해서는 롤러교정공정의 시스템 개선을 통하여 역장력을 관리할 필요가 있다.

**Table 3 Comparison of straightness according to intermesh for each roller**

Intermesh of vertical roller straightener (mm)				Vertical shape, d <sub>v</sub> (mm)	Horizontal shape, d <sub>h</sub> (mm)	Straightness, h (mm)	Note
3.00	2.33	1.67	1.00	-12.167	-5.216	13.238	Reference
2.50	2.33	1.67	1.00	-13.226	-5.921	14.492	
3.50				-11.545	-5.296	12.702	
3.00	2.83			-14.531	-6.001	15.725	
	1.83			-11.870	-4.866	12.829	
	2.33			2.17	-47.788	-6.549	48.239
1.17		13.676	-0.614	13.690			
1.67		-1.50	-195.167	2.389	195.183		
	1.50	184.842	-4.080	184.895			

Back tension (kN)	Vertical shape, d <sub>v</sub> (mm)	Horizontal shape, d <sub>h</sub> (mm)	Straightness, h (mm)
0.1	-15.369	-6.749	16.787
0.2 (Reference)	-12.167	-5.216	13.238
0.3	-10.518	-4.068	11.278

**Fig. 11 Comparison of straightness according to the back tension of steel wire**

5.4 압하량

롤러교정기의 교정롤러 압하량 변화에 따른 직진도 영향을 분석하였다. 앞서 제시한 바와 같이 각 교정롤러의 기준 압하량은 3.00 mm, 2.33 mm, 1.67 mm, 1.00 mm 이다. 이때 각 교정롤러에서 ±0.5 mm 의 압하량 변화를 부가하여 직진도 영향도를 분석하였으며, 선재 투입방향과 일치하는 수직 롤러교정기의 압하량 조건만을 변경하였다. Table 3 은 압하량 조건에 따른 직진도 측정 결과이다. 동일한 압하량 변화 조건에서 출측 교정롤러로 갈수록 직진도 영향이 급격히 증가하고 있다. 따라서 양산 제조공정의 선재 직진도 초기품질 확보를 위해서는 출측 교정롤러의 압하량이 가장 중요한 것으로 판단된다. 하지만 직진도 품질의 미세 교정 시에는 출측 교정롤러의 압하량 수정은 적합하지 않을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 롤러교정공정의 주요 공정조건에 따른 선재의 직진도 품질을 수치해석을 통하여 분석하였다. 선재 투입방향 및 초기직경, 역장력, 압하량에 따른 직진도를 정량적으로 평가하였으며, 이를 통하여 직진도 품질 확보를 위한 공정변수 관리 방안을 제시하였다. 이는 향후 롤러교정기를 활용한

선재 직진도 확보가 요구되는 다양한 제조공정에서 기초 설계가이드로 활용 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 내부사업 “전자 핵심부품 생산수율 향상을 위한 공정최적화 기법개발 (KITECH UR-21-0010)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

REFERENCES

[1] M. Elices, 2004, Influence of Residual Stresses in Performance of Cold-drawn Pearlitic Wires, J. Mater. Sci., Vol.39, pp. 3889 ~ 3899. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000031470.31354.b5>

[2] E. Albert, M. Schilling, 1998, Quality Improvements during Wire Processing, Wire, Vol.49, No.1/98, pp. 44 ~ 46. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1570572699268076800>

[3] H. Huh, J. H. Heo, H. W. Lee, 2002, Optimization of a Roller Leveling Process for Al7001T9 Pipes with Finite Element Analysis and Taguchi Method, Int. J. Machine Tools Manufacture, Vol.43, No.3, pp. 345 ~ 350. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00269-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00269-9)

[4] J. Mischke, J. Jonca, 1992, Simulation of the Roller Straightening Process, J. Mat. Proc. Tech., Vol.34, No.1/4, pp. 365 ~ 272. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90116-A](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90116-A)

[5] H. Huh, H. W. Lee, S. R. Park, G. Y. Kim, S. H. Nam, 2001, The Parametric Process Design of Tension Leveling with an Elasto-plastic Finite Element Method,

- J. Mater. Process. Technol., Vol.133, No.1/3, pp. 714 ~ 719.  
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00661-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00661-6)
- [6] J. K. Kim, K .M. Jeong, K. W. Kim, H. S. Jeong, J. H. Lee, 2007, Estimation of the Fatigue Life of Tire Steel Cords, Proc. 2007 Korea Soc. Automotive Engineers Spring Conf., pp. 1245 ~ 1250.
- [7] G. H. Bae, J. S. Lee, H. Huh, J. W. Lee, B. H. Lee, 2009, Evaluation of the Product Quality According to Intermesh of the Roller Straightening Process of Steel Cord, Proc. 2009 Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf. Fall Conf., pp. 271 ~ 274.