

스틸코드 롤러교정공정의 압하량에 따른 교정도 평가

배기현¹, 이종섭¹, 허 훈^{1#}, 이준우², 이병호²

Evaluation of the Product Quality According to Intermesh of the Roller Straightening Process of Steel Cord

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

Abstract

This paper deals with an evaluation of the product quality according to intermesh of the roller straightening process of a steel cord. To perform the experiments, a single-layered steel cord with three wires is selected as a target. Intermeshes at inlet and outlet of the roller straightening device are selected as a respective design parameter. According to two intermeshes of the roller straightening device, a design table is generated and experiments were performed. Three assessment items of the product quality, such as the residual torsion, the arc-height and the pre-forming ratio, are measured in each experimental case for the quantitative evaluation of a steel cord. Based on the measured data, the sensitivity of two intermeshes was analyzed and the prediction equation for the product quality of a steel cord was also constructed from the regression analysis.

Key Words : Roller Straightening Process, Intermesh, Steel Cord, Regression Analysis

1. 서 론

스틸코드(steel cord)는 일반적으로 타이어의 성능 향상을 위한 보강재로 사용된다. 이때 스틸코드의 직선성(straightness)과 잔류비틀림(residual torsion)은 최종제품의 품질을 결정하는 주요 평가 기준으로 사용된다. 신선공정(drawing process)에 의하여 가공된 선재는 연선공정(stranding process) 시에 다양한 비틀림 조건을 겪으면서 원하는 구조의 스틸코드 제품으로 생산된다. 신선 및 연선공정 중에 발생하는 불균일한 잔류응력(residual stress)은 스틸코드의 품질을 저하시키는 주요 원인이므로 이를 제거하기 위하여 일반적으로 과도비틀림공정(over-twisting process)과 롤러교정공정(roller straightening process)을 수행한다.[1-2]

롤러교정공정은 과도비틀림공정 이후 스틸코드

의 직선성 향상을 목적으로 수행된다.[3] 스틸코드는 교정롤러를 통과하면서 주기적 굽힘변형(bending deformation)을 겪는다. 주기적 굽힘변형은 소선 간의 잔류응력 불균형을 해소하여 스틸코드의 직선성을 향상시킨다.

롤러교정공정 시에 스틸코드 품질은 압하량(intermesh), 역장력(back tension), 롤러직경(roller diameter) 등의 공정변수에 의하여 결정된다. 이중 압하량은 스틸코드에 추가되는 굽힘변형을 제어하기 위한 가장 중요한 공정변수이다. 하지만 공정변수에 따른 스틸코드 품질의 정량적인 평가는 수행된 바가 없다. 따라서 실제 스틸코드 생산 공정에서는 숙련자의 경험과 시행착오에 의존하여 롤러교정공정이 설계된다.

본 연구에서는 롤러교정공정 시 주요 공정변수 중 하나인 압하량에 따른 스틸코드의 교정도 평가를 실험적으로 수행한다. 실험을 수행하기 위하여 0.3mm의 직경을 갖는 세 가닥의 소선으로 구

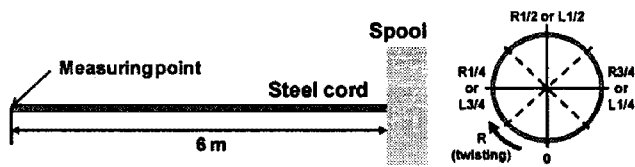
1. KAIST 기계항공시스템공학부 기계공학전공

2. KISWIRE 기술연구소

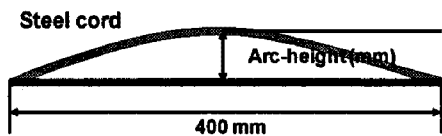
교신저자: KAIST, E-mail: hhuh@kaist.ac.kr

Table 1 Process condition of the stranding process

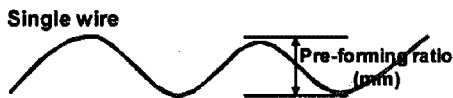
Process Parameter	Value
Over-twisting ratio	1.0
Back-tension	11 kgf
Number of rollers	13 ea
Roller diameter	16 mm
Roller pitch	19 mm
Pitch of a steel cord	14 mm



(a) Residual torsion of a steel cord



(b) Arc-height of a steel cord



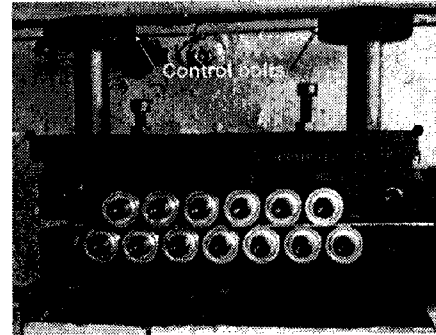
(c) Pre-forming ratio of single wire

Fig. 1 Assessment items of a steel cord product

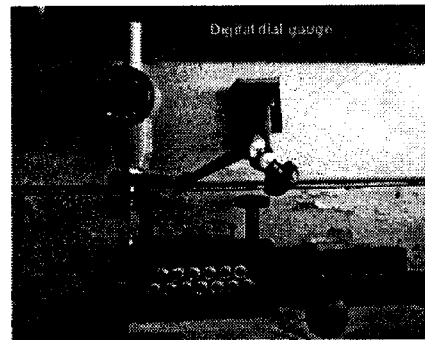
성된 단층연 구조(3x0.30 structure)를 대상으로 선정한다. 롤러교정기 입구와 출구의 압하량을 개별적인 설계변수로 선정하고 두 가지 설계변수에 따라 설계표를 작성한다. 각 실험경우에서 잔류비틀림, 아크 높이(arc-height), 형부율(pre-forming ratio)을 측정한다. 측정결과를 바탕으로 회귀분석을 수행하여 압하량에 따른 민감도를 정량적으로 분석하고 스틸코드 교정도 예측식을 구성한다.

2. 롤러교정공정

롤러교정공정은 스틸코드 연선공정 시에 스틸코드의 잔류응력 불균형을 해소함으로써 스틸코드의 품질을 향상시키기 위한 주요 공정이다. 압하량에 따른 교정도 평가를 위하여 본 연구에서는 0.3 mm의 직경을 가지는 세 가닥의 소선으로 구성되는 스틸코드를 실험대상으로 선정하였다.



(a) Measuring position of intermeshes



(b) Attachment of the digital height gauge

Fig. 2 Roller straightening device of the stranding process

스틸코드 교정을 위하여 수직 및 수평 방향의 롤러교정기가 적용되었으며 동일한 교정조건을 적용한다. 구체적인 스틸코드 연선공정의 공정조건을 Table 1에 제시하였다.

3. 교정도 평가기법

스틸코드의 잔류비틀림 및 최종형상은 제품 품질의 주요 평가기준이 된다. 따라서 스틸코드의 잔류비틀림, 아크 높이 및 소선의 형부율이 품질 평가기준으로 선정되었다. 세 가지 기준의 평가방법을 Fig. 2에 도시하였다. 소선의 형부율을 측정하기 위하여 X-선 투영기(x-ray projector)를 사용하였으며 아크 높이를 측정하기 위하여 아크 높이 측정기(arc-height gauge)를 제작하여 400 mm로 절단된 스틸코드 중심부의 아크 높이를 측정하였다.

4. 압하량 실험

일반적으로 압하량은 각 롤러의 스틸코드 압하깊이로 정의된다. 본 실험에서 사용되는 롤러교정

Table 2 Experimental table of intermesh experiment

Case	Intermesh at inlet, IM_{in} (mm)	Intermesh at outlet, IM_{out} (mm)
1	1.0	1.0
2	1.5	1.0
3	2.0	1.0
4	2.5	1.0
5	1.5	1.5
6	2.0	1.5
7	2.5	1.5
8	2.0	2.0
9	2.5	2.0
10	2.5	2.5

Table 3 Measured results of assessment items

Exp.#	Residual torsion (rotations/6m)	Arc-height (mm/400mm)	Pre-forming ratio (mm)
1	10.2	30.8	0.597
2	5.2	30.0	0.581
3	3.1	10.7	0.571
4	2.5	32.3	0.578
5	2.0	52.5	0.575
6	1.6	61.7	0.574
7	1.6	26.7	0.571
8	0.2	65.0	0.586
9	0.2	117.5	0.577
10	0.0	180.0	0.598

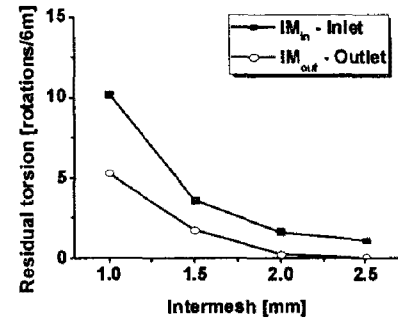
기는 각 롤러의 압하량이 롤러교정기 입구와 출구의 위치를 통하여 결정된다. 따라서 본 연구에서는 롤러교정기 입구와 출구의 위치를 압하량으로 정의하였으며 이를 제어하여 압하량 실험을 수행하였다. 압하량 실험을 위하여 Fig. 2와 같이 디지털 다이얼 게이지를 롤러교정기의 입구와 출구에 부착하여 실험을 수행하기 전에 원하는 압하량을 정밀하게 부가하였다. 또한 수직 및 수평 롤러교정기에 동일한 압하량 조건을 부가하였다.

4.1 실험표

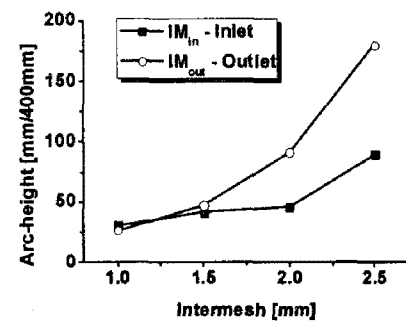
본 실험에서는 입구와 출구의 압하량을 설계변수로 선정하였다. 일반적으로 롤러교정공정 설계시에 출구의 압하량은 입구의 압하량보다 작은 값으로 선정된다. 따라서 Table 2와 같이 0.5mm의 압하량 간격으로 10개의 실험경우를 생성하였다.

4.2 교정도 평가

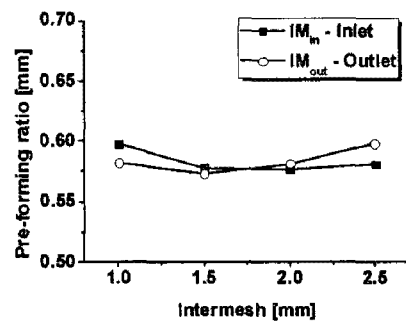
롤러교정공정 후 스틸코드의 교정도를 평가하기 위하여, 세 가지 평가기준인 잔류비틀림, 아크



(a) Residual torsion



(b) Arc-height



(c) Pre-forming ratio

Fig. 3 Variation of assessment items

높이, 형부율을 정량적으로 측정하였다. 잔류비틀림과 아크 높이는 각 실험경우에서 6회의 반복측정을 수행하였으며 측정결과의 평균값을 결과로 제시하였다. 형부율은 X-선 투영기를 사용하여 X, Y 방향에서 소선의 형상을 측정한 후, 각 방향에서 12회 측정하였다. 따라서 형부율은 총 24회 측정 후 평균값을 결과로 제시하였다. 측정 결과는 Table 3에 제시하였다.

4.3 회귀분석

측정된 결과를 바탕으로 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석을 통하여 분석한 각 설계변수에 따

Table 4 Prediction equations of assessment items

Coefficient	Residual torsion (rotations/6m)	Arc-height (mm/400mm)	Pre-forming ratio (mm)
a_0	35.051	158.601	0.676
a_1	-21.410	-68.819	-0.067
a_2	-11.295	-140.733	-0.045
a_3	2.971	35.543	-0.013
a_4	3.886	6.571	0.019
a_5	0.629	44.743	0.026
R^2_{adj}	0.956	0.805	0.814

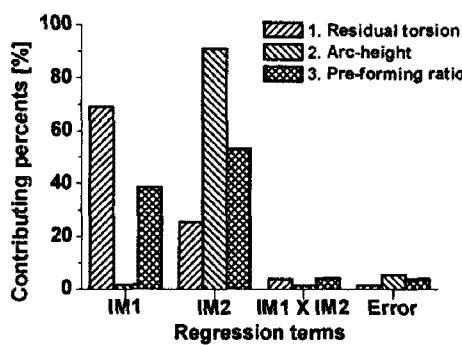


Fig. 3 Contributing percents of main regression terms

큰 교정도의 변화를 Fig. 3에 제시하였다. 잔류비틀림은 압하량의 증가에 따라 급격히 감소하는 경향을 보인 반면, 아크 높이는 급격히 증가하는 경향을 보였다. 이때 형부율은 압하량의 변화에 상대적으로 민감하지 않음을 확인하였다.

회귀분석을 바탕으로 2차의 예측식을 구성하였으며 식의 형태는 아래와 같다.

$$y = a_0 + a_1IM_{in} + a_2IM_{out} + a_3IM_{in}IM_{out} + a_4IM_{in}^2 + a_5IM_{out}^2 \quad (1)$$

구성된 예측식의 계수는 Table 4에 제시하였다. 이를 사용하여 실험수행 이전에 압하량 조건에 따른 스틸코드 교정도를 정량적으로 예측할 수 있다. 따라서 롤러교정공정 설계 시에 설계가이드로서 유용하게 활용할 수 있다.

회귀분석과 동시에 입구 및 출구 압하량의 민감도를 분석하였다. Fig. 4는 민감도 분석을 통한 주요 회귀항의 민감도를 도시한 것이다. 잔류비틀림과 아크 높이는 입구 압하량과 출구 압하량에 의하여 각각 결정되는 것을 확인할 수 있다. 이와 달리, 형부율은 입구 및 출구 압하량의 영향을 동시에 받는 것을 확인할 수 있다. 또한 롤러교정공

정 시에 두 압하량의 교차항은 교정도에 영향이 거의 없음을 확인할 수 있다. 따라서 잔류비틀림의 개선을 위해서는 입구 압하량을 조절하여야 하며, 아크 높이 개선을 위해서는 출구 압하량을 조절하는 것이 효과적이다. 또한 형부율 개선을 위해서는 두 가지 압하량을 모두 활용할 수 있다. 이와 같이 회귀분석을 통하여 각 설계변수의 영향도를 정량적으로 평가하였으며 교정도 개선을 위한 설계 방향을 제시하였다. 또한 압하량에 따른 스틸코드 교정도의 예측식을 구성하여 롤러교정공정 설계를 위한 가이드로 제시하였다.

4. 결론

본 연구에서는 롤러교정공정 실험을 통하여 압하량 조건에 따른 스틸코드 교정도를 정량적으로 평가하였다. 압하량을 정밀하게 부가하기 위하여 디지털 다이얼 게이지를 활용하였으며 실험 후에 잔류비틀림, 아크 높이, 형부율을 교정도 평가기준으로 활용하였다. 회귀분석을 통하여 압하량의 민감도를 분석하고 스틸코드 교정도 예측을 위한 수식을 구성하였다. 이를 통하여 스틸코드 교정도 개선을 위한 설계 방향 및 정량적 설계 가이드를 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. S. Lee, H. Huh, J. W. Lee and B. H. Lee, 2008, Minimization of residual stress of the steel cord for the tire-reinforcement using finite element analysis, Proc. ICTP2008, pp. 642 ~ 647.
- [2] 배기현, 이종섭, 허 훈, 이준우, 2009, 스틸코드 연선 시 주요 공정에 따른 교정효과의 실험적 관찰, 2009 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 286 ~ 289.
- [3] G. H. Bae, J. S. Lee, H. Huh, J. W. Lee and B. H. Lee, 2009, Parameter Study of the Roller Straightening Process of Steel Cords Using Finite Element Analysis, Proc. AsiaSteel2009, S5-08.
- [4] H. Huh, J. H. Heo, 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.3, pp. 345 ~ 350.