한국소성가공학회 2009년도 춘계학술대회 논문집 pp. 286~289

스틸코드 연선 시 주요공정에 따른 교정효과의 실험적 관찰

배기현[1] · 이종섭[1] · 허 훈[1#] · 이준우[2] · 이병호[2]

Experimental Investigation of the Steel Cord Straightening during the Stranding Process

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

Abstract

This paper deals with the experimental investigation of the steel cord straightening during the stranding process. The over-twisting and roller straightening process are essential to improve the product quality during the stranding process. To investigate the effectiveness of two processes, four experimental cases are constructed according to the use of an over-twister and two roller straighteners. Three assessment items, 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. The steel cord shape is also measured to investigate the variation of the straightness efficiently after passing through each process. Finally, the effectiveness of the over-twisting and the roller straightening process is explained based on the experimental results.

Key Words : Stranding process, Over-twisting Process, Roller Straightening Process, Steel Cord

1. 서 론

스틸코드(steel cord)는 현수교의 케이블, 타이어 보강재 등으로 널리 사용된다. 이때 스틸코드의 직선성(straightness)과 잔류비틀림(residual torsion)은 최종제품의 품질을 결정하는 주요 평가기준으로 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]

과도비틀림공정은 스틸코드에 비틀림 변형을 부가하여 신선 공정에서 발생한 잔류응력을 해소하고 재료 내부의 응력을 재분포시키는 공정이다. 이때 비틀림양을 제어하여 스틸코드의 잔류비틀림을 감소시킬 수 있다.[3] 롤러교정공정은 과도비틀림공정 이후 스틸코드의 직선성 향상을 목적으로 수행된다.[4-6] 스틸코드는 교정롤러를 통과하면서 주기적 굽힘변형(bending deformation)을 겪는다. 주기적 굽힘변형은 소선 간의 잔류응력 불균형을 해소하여 스틸코드의 직선성을 향상시킨다. 두 가지 주요 공정의 중요성에도 불구하고 각 공정에 따른 교정도의 정량적 평가는 수행된 바 없다. 따라서 스틸코드 연선공정은 숙련자의 경험과 시행착오에 의하여 설계되는 실정이다.

본 연구에서는 스틸코드 연선 시 주요 공정인 과도비틀림공정과 롤러교정공정에 따른 스틸코드 교정도의 정량적 평가를 실험적으로 수행한다. 실험을 수행하기 위하여 과도비틀림기(over-twister)와 롤러교정기(roller straightener)의 사용 유무에 따른 네 가지 실험경우를 구성한다. 각 실험경우에서 스틸코드 품질 평가기준인 잔류비틀림, 아크 높이(arc-height), 형부율(pre-forming ratio)을 측정한다. 측정 결과를 바탕으로 주요 공정에 따른 스틸코

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
Pitch of a steel cord	14 mm

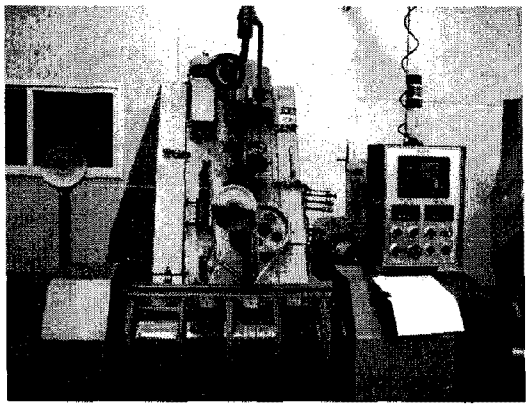


Fig. 1 Stranding machine of a steel cord

드 교정도의 변화를 정량적으로 분석하며 각 공정의 역할을 규명한다.

2. 스틸코드 연선공정

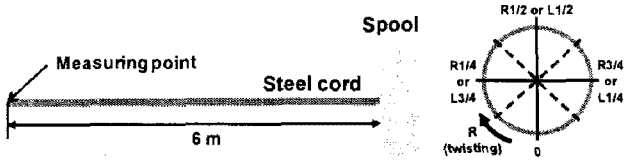
연선공정은 신선공정을 거친 선재를 원하는 형태의 스틸코드 구조로 생산하기 위한 것이다. 보빈에서 공급되는 선재는 원판휠의 회전에 의하여 원하는 피치를 가지도록 꼬인다. 이후 스틸코드의 품질을 확보하기 위하여 과도비틀림공정과 롤러교정공정을 순차적으로 거친다. 본 연구에서는 0.3 mm의 직경을 가지는 세 가닥의 소선으로 구성되는 스틸코드를 실험대상으로 선정하였다. 본 스틸코드 구조의 직경은 0.646 mm이다. 스틸코드 연선공정의 공정조건을 Table 1에 제시하였다.

3. 교정도 평가기법

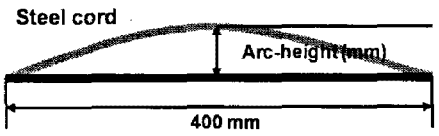
스틸코드의 최종형상 및 잔류비틀림은 제품 품질의 주요 평가기준이 된다. 따라서 스틸코드의 잔류비틀림, 아크 높이 및 소선의 형부율이 일반적인 품질 평가기준으로 측정된다. 세 가지 대표적인 평가기준과 평가방법을 Fig. 2에 도시하였다.

Table 2 Experimental table of the stranding process

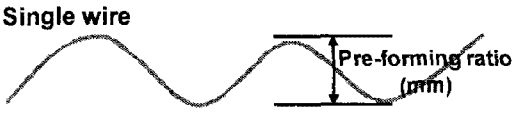
Case	Over-twister	Roller straightener (Vertical)	Roller straightener (Horizontal)
1	X	X	X
2	O	X	X
3	O	O	X
4	O	O	O



(a) Residual torsion of a steel cord



(b) Arc-height of a steel cord



(c) Pre-forming ratio of single wire

Fig. 2 Assessment items of a steel cord product

소선의 형부율은 X-선 투광기(X-ray projector)를 사용하여 정밀하게 측정하였다. 이와 동시에 스틸코드의 형상변화를 추가적으로 관찰하였다. X-선 투광기의 측정범위는 100 mm이며 측정대상을 두 가지 방향에서 순차적으로 측정하도록 제작되었다.

4. 연선공정 실험

4.1 실험표

연선공정 시에 스틸코드의 품질 향상을 위하여 과도비틀림공정과 롤러교정공정을 사용한다. 롤러교정공정은 교정 방향에 따라 수직 및 수평 롤러교정공정으로 나뉜다. 본 연구에서는 주요 공정의 교정효과를 평가하기 위하여 과도비틀림기와 두 가지 롤러교정기의 사용 유무에 따라 Table 2와 같이 네 가지 실험경우를 구성하였다.

Table 3 Measured results of assessment items (Case1)

Exp.#	Residual torsion	Arc-height (mm)	Pre-forming ratio (mm)
1	L107	12	0.872
2	L121	18	0.391
3	L111	22	1.257
4	L127	40	0.457
5	L109	10	0.430
6	L124	20	1.039
Average	**L155**	**20.333**	**0.741**

Table 4 Measured results of assessment items (Case2)

Exp.#	Residual torsion	Arc-height (mm)	Pre-forming ratio (mm)
1	R4 1/2	24	0.601
2	R4 1/2	24	0.976
3	R4 1/2	24	0.640
4	R4 1/2	27	0.410
5	R4	24	0.742
6	R4 1/2	28	0.833
Average	**R4 1/2**	**25.167**	**0.700**

Table 5 Measured results of assessment items (Case3)

Exp.#	Residual torsion	Arc-height (mm)	Pre-forming ratio (mm)
1	L4 1/2	25	0.591
2	L4 1/2	28	0.575
3	L4 1/4	28	0.564
4	L4 1/2	32	0.574
5	L4 1/2	26	0.562
6	L4 1/2	30	0.563
Average	**L4 1/2**	**28.167**	**0.572**

Table 6 Measured results of assessment items (Case4)

Exp.#	Residual torsion	Arc-height (mm)	Pre-forming ratio (mm)
1	0	12	0.664
2	0	11	0.642
3	0	10	0.629
4	0	10	0.646
5	0	12	0.625
6	0	10	0.619
Average	**0**	**10.833**	**0.638**

4.2 교정도 평가

앞 절에서 작성한 각 실험경우에서 세 가지 평가기준을 측정하였으며 결과를 Table 3-6에 제시하였다. 측정결과의 산포가 존재하므로 각 실험경우에서 6회의 반복실험을 수행하였다.

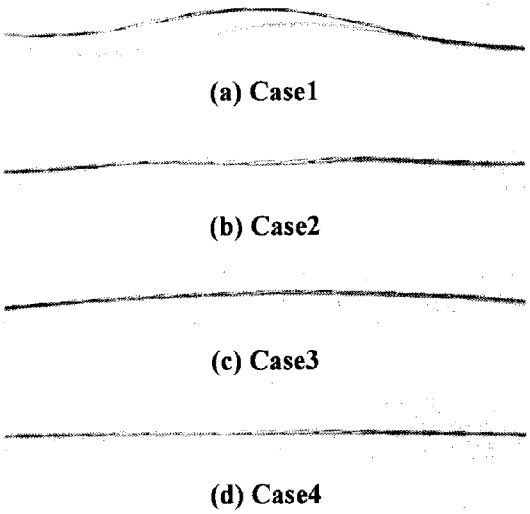


Fig. 3 Steel cord shape after experiments

과도비틀림기와 롤러교정기를 모두 사용하지 않은 경우(Case1), 스틸코드의 잔류비틀림이 매우 크게 발생하며 아크 높이와 형부율 또한 매우 불균일하게 나타난다. 따라서 스틸코드는 꼬인 형태를 유지하지 못하며 기하학적 형태 또한 매우 불량하다. 과도비틀림기를 사용한 경우(Case2), 추가적으로 부가한 비틀림 변형에 의하여 잔류비틀림이 크게 감소한다. 하지만 스틸코드의 직선성은 교정되지 않으며 소선의 형부율은 여전히 불균하게 나타난다. 수직방향 롤러교정기를 추가적으로 사용한 경우(Case3), 롤러교정의 효과로 인하여 잔류비틀림의 방향이 역전된다. 이와 동시에 수직방향의 교정으로 인하여 형부율이 균일화된다. 하지만 수직방향의 교정만을 수행하였으므로 아크 높이는 여전히 크게 발생한다. 최종적으로 과도비틀림기와 두 가지 롤러교정기를 모두 사용한 경우(Case4), 스틸코드의 잔류비틀림이 모두 제거되며 수평방향의 교정으로 인하여 직선화된 스틸코드를 얻을 수 있다. 또한 스틸코드의 직선화로 인하여 소선의 형부율이 매우 균일해지며 코드경에 가까운 값을 가진다. 이는 스틸코드의 꼬인 형상이 매우 양호함을 의미한다.

각 공정에 따른 스틸코드의 형상을 Fig. 3에 도시하였다. 과도비틀림기와 롤러교정기를 사용함에 따라 스틸코드가 순차적으로 직선화되는 것을 확인할 수 있다. 이는 스틸코드의 평가기준을 통한 분석 결과와 일치한다.

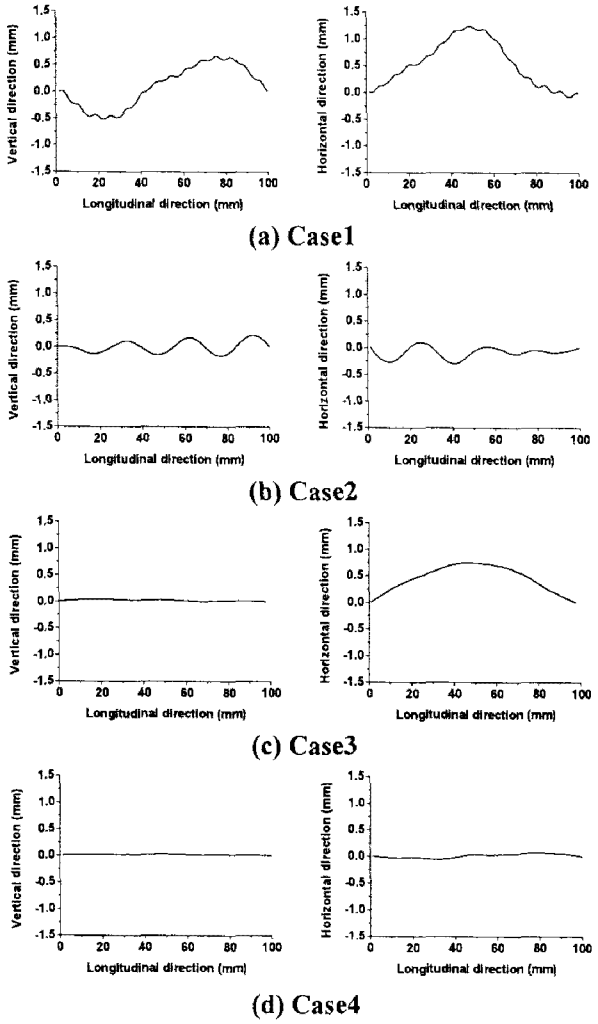


Fig. 4 Measured results of the steel cord shape after each experiment in the vertical and horizontal direction

정밀한 교정형상 분석을 위하여 X-선 투광기를 사용하여 스틸코드의 형상을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 과도비틀림기의 사용으로 인한 비틀림 변형은 잔류응력의 재분포를 통하여 스틸코드의 풀림을 방지한다. 하지만 스틸코드는 길이방향으로 나선형의 주기적 형상을 가지며 그 주기는 스틸코드 피치의 2배(28 mm)와 일치한다. 이는 연선공정 시 과도비틀림기의 회전비와 자체 진동에 의한 영향으로 예상된다. 이후 수직방향의 롤러교정기에 의하여 스틸코드가 수직 방향으로 직선화됨을 확인할 수 있다. 하지만 수평방향으로는 여전히 직선화되지 않으며 수평 방향의 롤러교정기를 통과한 후 최종적으로 스틸코드는 직선화된다. 이와 같이 과도비틀림기와 각 방향의 롤러교정기를 사용함으로써 스틸코드의 잔류비틀림이 제거되며 순차적으로 직선화된다.

5. 결 론

본 연구에서는 스틸코드 연선 시에 품질 향상을 위한 주요 공정인 과도비틀림공정과 롤러교정공정의 교정효과를 정량적으로 평가하였다. 주요 공정의 교정효과 평가를 위하여 네 가지 실험경우를 구성하였으며 각 실험에서 스틸코드의 잔류비틀림, 아크 높이 및 소선의 형부율을 측정하고 평가기준으로 사용하였다. 세 가지 평가기준을 통하여 과도비틀림기와 두 가지 롤러교정기의 역할을 분석하였다. 각 공정에 따른 스틸코드 형상을 보다 정밀하게 관찰하기 위하여 X-선 투광기를 사용하여 형상을 정밀하게 측정하였으며 순차적인 스틸코드의 교정효과를 관찰하였다.

참 고 문 헌

[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, M. Schilling, 1998, Quality improvements during wire processing, Wire, Vol.49, No.1/98, pp. 44 ~ 46.

[3] 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.

[4] 배기현, 이종섭, 허 훈, 이준우, 2008, 유한요소해석을 이용한 스틸코드 롤러교정공정의 영향인자 분석, 2008 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 245 ~ 248.

[5] 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.

[6] 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. Tech., Vol. 113, pp. 714 ~ 719.