

고강도 극 세선의 피로 특성 향상을 위한 특정 인자 제시

양요셉¹, 배종구², 박찬경[#]

Critical Parameters governing on the Fatigue Properties in the Hyper-eutectoid Steel Wires used for Automotive Tire

Y. S. Yang, J. G. Bae, C. G. Park

Abstract

In this study, we focused on investigation of governing parameters affected on the fatigue properties in the hyper-eutectoid steel wires used for TBR tires. Steel wires are fabricated under different drawing strain from 3.36 to 3.80. Their diameters are 0.21mm and 0.185mm, respectively. The fatigue properties was measured by hunter rotating beam tester, specially designed thin-sized steel wires. The results showed that the fatigue properities of steel wire, marked as A-1, were greater than the others, due to the low value of residual stress. In order to elucidate the variations of fatigue properties, the microstructure, surface defect and residual stress were observed and measured by useful analysis technique, such as TEM, 3D profiler and FIB.

Key Words : Fatigue properties, Residual stress, surface defect, microstructure, hyper-eutectoid steel wire

1. 서론

고 탄소 강선은 가혹한 신선을 거치기 때문에 높은 강도 특성을 보인다[1]. 이러한 특성으로 인하여 트럭/버스 용 타이어의 카카스 및 벨트 부분에 보강재 (steel cord)로 사용된다. 일반적으로 스틸 코드는 다단의 신선 (drawing)과 미세 펠라이트를 형성시키기 위한 열처리 (patenting) 및 코드를 만들기 위한 연선 (stranding)의 공정을 거쳐 제조된다[3]. 최근 타이어의 수명 향상 및 경량화를 위하여 스틸 코드의 고강도화를 통해 구조 단순화를 꾀하고 있다. 스틸 코드는 이를 구성하는 극 세선의 물성에 의존하기 때문에, 극 세선의 강도 증가를 통해 스틸 코드의 구조 단순화를 이루고 있다. 극 세선의 강도는 Embury-Fisher의 제안식[2]에 따라, 높은 가공량을 부여하거나 펠라이트 간격을 감소시키는 방법을 통해 증가되고 있다.

강도 특성 외 피로 특성 또한 극 세선이 가져

야 할 중요한 특성인데, 스틸 코드가 굽힘 응력이 반복적으로 작용하는 피로 환경에 사용되기 때문이다. 기존 연구자들은 피로 특성에 영향을 미치는 인자에 대해 펠라이트 층간 간격, 세멘타이트 재분해 현상, 표면 결함 등을 제시하였다[2-4]. 그러나 이 인자들은 가공 방법 특히, 신선 제조 방법, 가공량에 크게 영향을 받기 때문에 피로 특성에 영향을 미치는 핵심 인자로 판단하기에는 다소 어려움이 따른다. 따라서 피로 특성을 향상시키기 위해서는 확실한 인자 규명을 통해 문제점을 찾아내고 이를 통해 공정의 개선방법을 모색할 필요가 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 극 세선의 피로 특성에 영향을 주는 인자 고찰 및 규명을 본 목표로 한다. 이를 위해서 선경이 다른 두 극 세선 (0.21 mm, 0.185 mm ϕ)을 다른 공정 방법을 통해 제조하여 물성 특성에 차이를 두었으며, 이의 분석을 위하여 3D profiler, FIB, TEM 등의 최신 분석 기기를 이용하였다.

1. 포항공과대학교
2. 고려제강 기술연구소
박찬경:포항공과대학교, cgpark@postech.ac.kr

2. 실험

열간 압연된 5.5 mmφ 봉형의 강선을 본 소재로 하여 극 세선을 제조하였다. 이의 합금 조성은 Fe-0.94C-0.2Cr-0.44Si-0.28Mn-0.0036S-0.007P이다. 1×0.21+18×0.185를 구성하는 극 세선이기 때문에 0.185, 0.21 mmφ 두 선경을 시험재로 선택하였다. 가공 방법을 다르게 하여 제조하였으며 이의 조건을 표 1에 나타내었다.

극 세선의 피로 특성은 스틸 코드용 굽힘 피로 시험기인 Hunter rotating beam fatigue tester기를 이용하였으며 인장 강도의 40 % 이내인 1550 MPa 응력 하에서 피로 실험을 수행하였다. 피로 특성의 인장 강도 실험을 수행하였으며 상온 인장 시험기 (Instron 4206)를 이용하여 cross head speed는 0.83 mm/sec 조건에서 시험하였다.

피로 특성에 영향을 미치는 인자를 고찰 및 규명하기 위하여 표면 결함, 잔류 응력, 미세 조직 측면에서 접근하여 분석하였다. 표면 결함은 비접촉 식 방법인 광학 3-D profiler를 이용하였으며 60 × 60 μm² 영역을 분석하였다. 잔류 응력은 높은 정밀도를 갖는 FIB-DIC법을 이용하였으며 마이크로 영역에서 길이 방향에 존재하는 응력을 측정하였다 [5]. 미세 조직 분석을 위하여 TEM (JEOL 2100)이 사용되었으며 이의 시편은 FIB (SEI 3050)를 이용하여 제조하였다.

Table 1 Fabrication conditions of the steel wires

		P.W. (mmφ)	F.W. (mmφ)	R.A (%)
A	-1	1.220	0.185	97.7
	-2	1.404	0.21	97.8
B	-1	1.131	0.185	97.3
	-2	1.131	0.21	96.5

3. 결과 및 고찰

3.1 강도 및 피로 특성

가공법에 차이를 두어 제조된 극 세선의 인장 강도와 피로 특성 결과를 그림 1에 나타내었다. A 가공법을 사용하여 제조된 A-1, A-2 시편이 B 가공법을 통해 제조된 극 세선에 비해 상대적으로 높은 인장 강도를 갖는 것으로 확인되었다. A-1, A-2의 인장 강도는 4173, 4232 MPa이었으며, B-1, B-2는 이보다 낮은 3988, 3768 MPa의 강도를 나타내었다. 그림 1(b)에 극 세선의 피로 시험 결과를

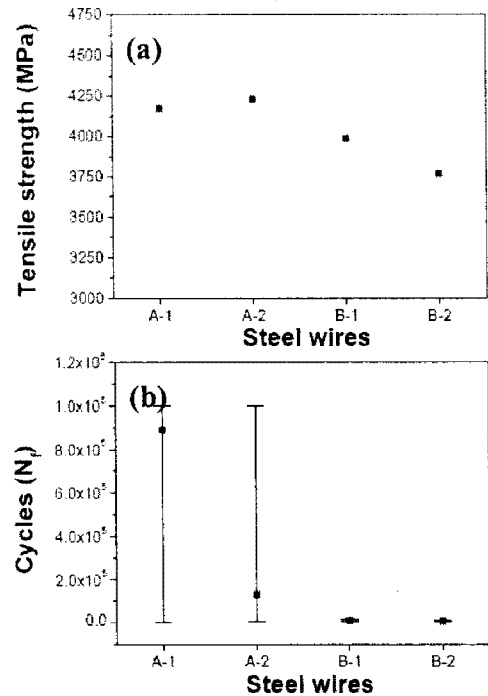


Fig. 1. Variations of the tensile strength (a) and fatigue resistance (b) of the steel wires fabricated under different drawing strain

나타내었다. 횟수는 1550 MPa의 고 하중 하에서 시험재가 파괴될 때까지의 수를 나타낸다. A 가공법을 통해 제조된 극 세선이 B 가공법에 비해 상대적으로 높은 피로 특성을 갖는 것으로 확인되었다. A-1과 A-2는 타이어 회사에서 제시하는 기준인 10⁶ 회를 충족시키는 높은 피로 특성을 갖는 반면 B-1과 B-2는 매우 낮은 값을 가졌다. 그러나 A 가공법을 통해 제조된 A-1과 A-2 시험재의 피로 강도는 큰 차이를 보이는데, A-1의 평균 회전수가 9×10⁵로 대부분 높은 피로 수명을 갖는 반면 A-2 시험재는 평균 회전수가 1×10⁵로 낮은 피로 수명을 갖는 것으로 확인되었다. 따라서 높은 피로 수명을 갖게 하기 위해서는 A 가공법을 통한 극 세선 제조가 효율적인 것으로 판단된다. 또한, 동일한 가공법을 통해 제조된 경우에도 피로 수명에 큰 차이를 보이는데 이에 영향을 미치는 인자 고찰 및 규명을 통해 피로 특성을 향상시켜야 할 필요가 있다.

3.2 표면 결함의 영향

3-D profiler를 이용하여 극 세선의 표면 분석을 시도하였으며 이의 결과를 그림 2에 나타내었다. 모든 시험 재에서 신선에 의해 형성된 groove 등이 존재하였다. 부분적으로 scratch가 A-1 극 세선

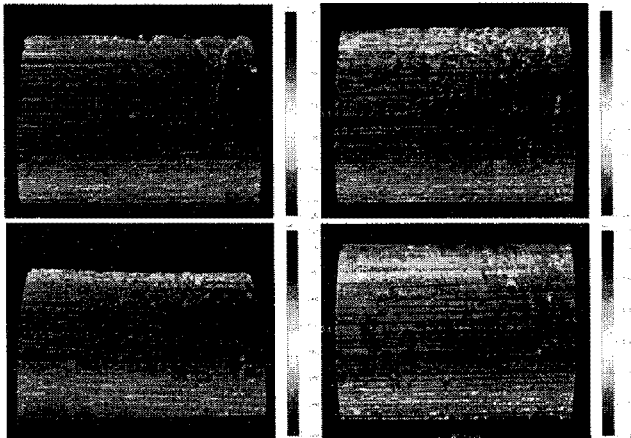


Fig. 2. 3-D interferometric images of steel wires in a $60 \times 60 \mu\text{m}^3$ measured by optical 3D profiler; (a) A-1, (b) A-2, (c) B-1, (d) B-2

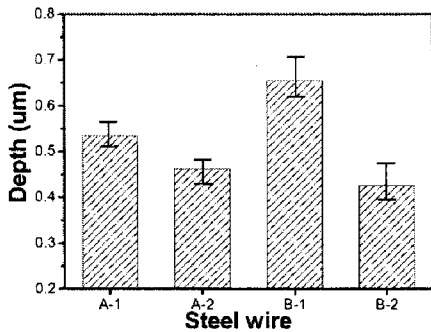


Fig. 3. Depth of grooves formed on the surface of the steel wires

표면에서 관찰되었다. 표면 결함이 형성되어 있는 부분에서 표면의 결함을 깊이 방향으로 측정하였으며 이의 결과를 그림 3에 나타내었다. 모든 시편 재에서 결함 측정 시 큰 오차 범위를 보였으며 결함의 크기는 $0.4\sim 0.6 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이의 결과는 결함이 가공법에 의해 크게 영향을 받지 않은 것으로 판단된다. 따라서 일반적으로 심한 가공에 의해 형성된 표면 결함이 피로 특성에 미친다는 기존 연구 결과[3]와는 다르게 이의 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

3.3 표면 응력의 영향

그림 4는 FIB-DIC 법을 이용하여 측정된 잔류 응력 측정 결과를 보여준다. 본 저자는 이 방법을 이용한 극 세선에서의 잔류 응력 측정을 이미 자세히 소개한바 있다[5]. 그림 4 (a)는 이온 빔에 의해 형성된 슬롯 주변에서의 응력 변위장을 contour map 으로 나타낸 것이며 그림 4 (b)는 극 세선 중심 부근의 특정 영역 ($y=0, +1, -1 \mu\text{m}$)에서

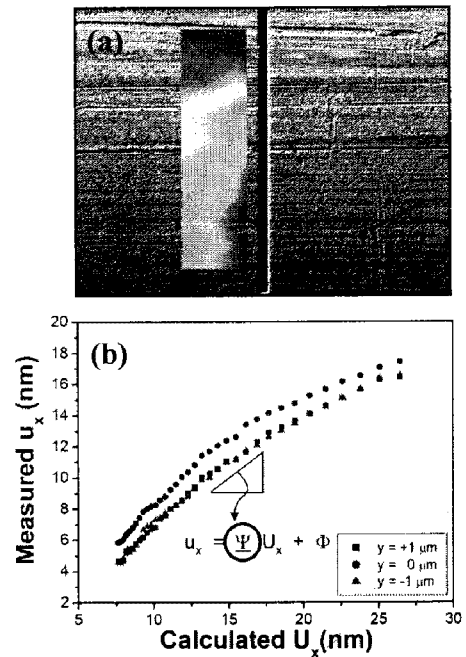


Fig. 4. (a) Typical photographs showing the contour in the displacement fields and (b) comparison between the measured displacement and calculated displacement

측정된 변위값과 가상 응력, $\sigma_{vs} = -1 \text{ GPa}$, 이 존재할 때의 가상 변위값을 비교해놓은 결과를 나타낸다. 여기서 기울기 (Ψ)는 잔류 응력(σ_R)을 의미하며, y 절편(Φ)인 SEM 이미지 작업 시 x 방향으로의 병진 운동이 발생해서 나타난 흠어짐 값을 의미한다.

측정된 잔류 응력 값을 표 2에 정리하여 나타내었다. 모든 시험재의 표면에 인장 잔류 응력이 형성되어 있었다. A-1 극 세선은 다른 극 세선과 비교했을 때 가장 낮은 값인 244.4 MPa 를 갖는 것으로 확인되었는데 이의 피로 특성은 다른 극 세선의 특성 치보다 높은 것을 그림 1 (b)에서 확인된 바 있다. 따라서 피로 특성에 크게 영향을 미치는 인자는 신선 제조 시 발열 현상, 다이싱 공정 조건 등에 영향을 받는 잔류 응력치에 크게

Table 2 Summary of residual stress and deviation value obtained from the steel wires

		Equation ($u_x = \Psi U_x + \Phi$)	Residual stress (MPa)
A	-1	$u_x = 0.24447U_x + 22.52$	244.47
	-2	$u_x = 0.69680U_x + 35.59$	696.8
B	-1	$u_x = 0.91929U_x - 1.250$	919.29
	-2	$u_x = 0.62172U_x + 8.480$	621.72

Table 3 ICP analysis result in all steel wires

	A-1	A-2	B-1	B-2
g/kg	5.02	5.00	5.05	5.05

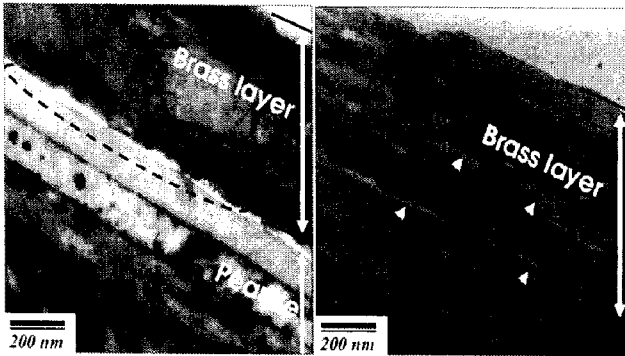


Fig. 5. TEM micrographs showing the brass layer and pearlite in the steel wires of B-2 fabricated by using B method

영향을 받는 것으로 판단된다. 그러나 A-2와 B-2의 경우 잔류 응력치는 각각 696.8과 621.7 MPa로 거의 비슷한데 이의 피로 특성치는 큰 차이를 보였다. 따라서 이에에는 잔류 응력 외 다른 인자의 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

3.4 황동층의 영향

표면 코팅층이 없는 극 세선의 경우 신선에 의해 표면에 형성된 표면 결함에 응력이 집중되기 때문에 낮은 응력 하에서도 균열이 초기에 형성되어 피로 특성이 낮아진다. 본 연구에서는 코팅의 두께 또는 코팅량을 확인하기 위하여 ICP 분석을 시도하였으며 분석 결과 모든 시험재에 약 5.02 g/kg 도금층이 형성된 것을 확인하였다. 따라서 도금층 두께에 의해 피로 특성은 발생하지 않는 것으로 판단된다. B 가공법을 통해 제조된 극 세선의 미세 조직 및 코팅층 상태를 TEM으로 분석하였으며 이의 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 5 (a)는 황동층과 소재 금속과의 접합상태를 보여주는데 B-2 극 세선의 경우, 황동층이 소재 금속과 분리되어 있는 것으로 확인되었다. 그림 5 (b)는 황동층 내 다수의 균열이 존재하는 것을 보여주는데 이러한 결함의 존재는 황동층이 균열 방지막 형성을 하지 못하여 동일 응력이 주어졌을 때 균열 형성을 억제하지 못하여 피로 특성을 악화시킨 것으로 판단하였다.

4. 결론

본 연구에서는 극 세선의 피로 특성에 영향을 미치는 인자 규명을 하고자 하였으며 이의 결론 다음과 같이 정리하였다.

- (1) 표면 결함은 황동 층이 입혀진 극 세선의 피로 특성에는 영향을 미치지 않는다. 정상적인 황동 층이 형성된 극 세선의 피로 특성은 표면 잔류 응력에 영향을 크게 받는 것으로 확인되었으며 피로 특성을 향상시키기 위해서는 200~600 MPa의 낮은 잔류 응력을 표면에 형성시켜야 한다.
- (2) 황동 층은 피로 특성을 향상시키기 위하여 열처리 중 표면 처리하지만 소재 금속과의 낮은 접합 성, 황동 층 내 균열 형성은 피로 특성을 열화시키는 역할을 한다.

후 기

본 연구가 진행되도록 시편 제조와 연구비 지원을 해준 고려제강㈜ 기술연구소, 포항 나노 집적 센터와 BK21에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] M. Dollar, I. M. Bernstein, A. W. Thompson, M. Shemanski, 1988, Influence of deformation substructure on flow and fracture of fully pearlitic steel, *Acta Metall.*, Vol. 36, pp. 311~320.
- [2] J. LLorca, V. Sanchez-Galvez, 1989, Fatigue limit and fatigue life prediction in high strength cold drawn eutectoid steel wires, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 12, pp. 31~45.
- [3] K. Katagiri, T. Sato, H. S. Shin, L. Takahashi, H. Tashiro, S. Sasaki, 1997, Effects of drawing strain and bluing on the fatigue strength of eutectoid steel wires, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 20, pp. 1677~1686.
- [4] J. W. Hutchinson, Z. Suo, 1992, Mixed mode cracking in layered materials, *Adv. Appl. Mech.*, Vol. 29, pp. 63~91.
- [5] Y. S. Yang, J. G. Bae, C. G. Park, 2007, Measurement of residual stress by using focused ion beam and digital image correlation method in the thin-sized wires used for steel cords, *J. of Physics* (to be submitted)