

# 고 탄소 미세 강선의 기계적 특성에 미치는 잔류 응력과 표면 결함의 영향

양요셉<sup>1</sup>, 배종구<sup>2</sup>, 박찬경<sup>#</sup>

## Effects of Residual Stress and Surface Defect on the Mechanical Properties of the High Carbon Steel Filaments

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

### Abstract

The effects of residual stress and surface defects on the mechanical properties of the high carbon steel filament used for the automotive tire have been experimentally investigated. The samples were fabricated with annealing temperature. The residual stress was measured by focused ion beam and strain mapping software which has advantages, such as data with high accuracy and fast data acquisition time. Mechanical properties, such as tensile strength and fatigue resistance, were gradually increased up to 200 °C and then slightly decreased. From the measurement of residual stress and level of surface defect, it was revealed that the critical factor was varied with different temperature region. That is, the fatigue resistance increased due to decreasing the residual stress and decreased due to increasing the size and distribution of surface defect..

**Key Words** : Fatigue properties, Residual stress, surface defect, microstructure, high carbon steel filament

### 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 펄라이트를 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, 미세 강선의 강도 증가를 통해 스틸 코드의 구조 단순화를 이루고 있다. 극 세선의 강도는 Embury-Fisher의 제안식[2]에 따라, 높은 가공량을 부여하거나 펄라이트 간격을

감소시키는 방법을 통해 증가되고 있다.

강도 특성 외 피로 특성 또한 미세 강선이 가져야 할 중요한 특성인데, 이는 스틸 코드가 굽힘 응력이 반복적으로 작용하는 피로 환경에 사용되기 때문이다. 굽힘 피로 특성에 미치는 인자는 기존 연구자들에 의해 제시되었다. 즉, 내적 측면에서는 ‘펄라이트 층간 간격, 페라이트와 세멘타이트의 계면적[3,4]’ 등이며 외적 측면에서는 표면 잔류 응력, 표면 결함 등[5,6]이다. 다수의 인자가 제시되고 있으나 공정 및 합금 원소가 다양화됨에 따라 굽힘 피로 특성을 지배하는 정확한 인자 규명에 어려움이 있다.

본 연구에서는 굽힘 피로 특성에 영향을 미치는 인자 고찰 및 규명을 그 목적으로 하였다. 이를 위하여 스틸 코드용으로 사용되는 미세 강선을 시험재로 사용하였으며 후속 열처리를 가함으로써 기계적 특성에 차이를 두었다.

1. 포항공과대학교

2. 고려제강 기술연구소

# 박찬경:포항공과대학교, cgpark@postech.ac.kr

## 2. 실험

본 연구에 사용된 소재는 고 탄소 강으로 화학 조성은 Fe-1.02C-0.2Cr-0.23Si-0.26Mn (mass %)이다. 최종 선경 0.18 mm의 미세 강선은 3 번의 다단 신선과 2 번의 열처리를 통해 제조되었으며 최종 신선량은  $\epsilon$ 4.12, 4.32로 차이를 두어 제조하였다. 최종 신선 후 100~500 °C에서 진공 열처리를 하였으며 유지 시간은 60초로 하였다.

미세 강선의 굽힘 피로 특성은 Hunter rotating beam fatigue tester를 이용하였으며 인장 강도의 40 % 이내인 응력 하에서 피로 실험을 수행하였다. 인장 강도는 상온 인장 시험기 (Instron 4206)를 이용하여 평가되었으며 cross head speed는 0.83 mm/sec 조건에서 시험하였다. 피로 특성에 영향을 미치는 인자를 고찰 및 규명하기 위하여 미세 조직, 표면 잔류 응력, 결함을 분석하였다. 미세 조직을 분석하기 위하여 TEM (JEOL 2100)을 사용하였으며 조직 형상을 관찰하였다. 잔류 응력은 높은 정밀도를 갖는 FIB-DIC법을 이용하였으며 마이크로 영역에서 길이 방향에 존재하는 응력을 측정하였다 [7]. 표면 결함은 비 접촉 식 방법인 광학 3-D profiler (Wyko NT1100)를 이용하였으며  $60 \times 60 \mu\text{m}^2$  영역을 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 기계적 특성

신선 가공량과 후속 열처리에 차이를 두어 제조한 미세 강선의 기계적 특성 결과를 그림 1 와 표 1 에 나타내었다. 공정 조건은 기계적 특성에 크게 영향을 미친다. S-N 선도(그림 1 (a))로부터 신선 가공량이 4.12 에서 4.32 로 증가할 때 미세 강선의 굽힘 피로 특성은 증가한다. 즉, 피로한( $\sigma_e$ )의 경우 1300 에서 1320 MPa 로 20 MPa 의 증가함을 확인하였다. 저온에서 열처리를 할 경우, 열처리를 하지 않는 경우에 비해 피로 특성이 증가하는 데 온도 구간에 따라 차이를 보인다. 본 연구에서는 온도 구간을 'Region 1' (0~ 200 °C)과 'Region 2' (200 ~ 500 °C)로 나누었다. Region 1 에서 피로한은 증가하며 200 °C 이후 온도에서는 피로한은 소폭 감소를 보인다.

인장 강도 변화 경향을 표 2에 나타내었다. 신선 가공량이 증가하면 인장 강도는 4459에서 4677 MPa로 약 200 MPa 정도 증가한다. 후속 열처리를

하면 신선 가공량에 상관없이 열처리 온도 200 °C 까지 점차적인 증가를 그 이후 온도에서는 급격한 감소를 나타낸다. 따라서 신선 가공량과 후속 열처리는 미세 강선의 기계적 특성에 영향을 미치며 특히, 적당한 공정 조건은 기계적 특성을 크게 향상시킬 수 있는 것으로 결론지을 수 있다. 또한, 이러한 특성에 영향을 미치는 인자 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

### 3.2 미세 조직

본 연구에서는 신선 가공량이 상대적으로 적은 ( $\epsilon$ :4.12) 미세강선을 분석에 사용하였다. 그림 2은 길이 방향의 미세 조직을 보여주는 TEM 사진이다. 미세 강선의 조직은 연한 상인 페라이트( $\alpha$ )와

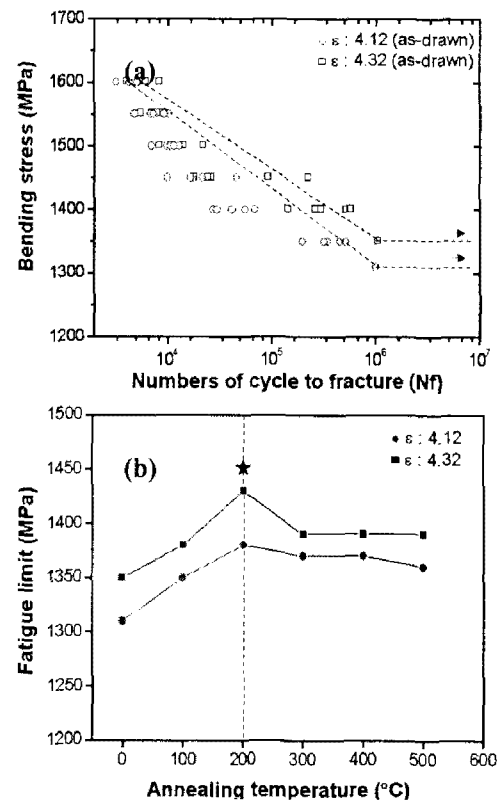


Fig. 1. Fatigue properties of the steel filaments depending on drawing strain and annealing temperature

Table 1. Change of tensile strength of the steel filaments depending on the drawing strain and annealing temperature

$\epsilon$	Annealing temperature (°C)					
	0	100	200	300	400	500
4.12	4459	4651	4647	4519	3703	2681
4.32	4677	4856	4874	4695	4329	2814

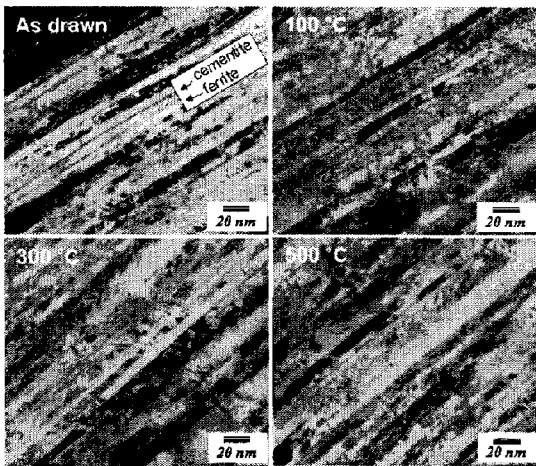


Fig. 2. TEM micrographs showing the longitudinal microstructure of steel filaments depending on annealing temperature

경한 상인 세멘타이트( $\theta$ )가 층상을 갖는 펄라이트인 것으로 확인되었다. 가혹한 조건에서 신선 제조되었기 때문에 펄라이트가 길이 방향으로 재배열되어 신선 방향을 따라 잘 정렬되어 있다. 열처리 온도가 증가함에 따라 미세 조직은 크게 변하지 않는 것으로 보인다. 따라서 기계적 특성에 미세 조직의 영향은 없는 것으로 결론지었다.

### 3.3 표면 잔류 응력

그림 3은 FIB-DIC법을 이용하여 측정된 잔류 응력 측정 결과를 보여준다. 본 저자는 이 방법을 이용한 미세 강선에서의 잔류 응력 측정을 이미 자세하게 소개한 바 있다[7]. 그래프에서 기울기( $\Psi$ )는 잔류 응력( $\sigma_R$ )을 의미하며, y 절편( $\Phi$ )인 SEM 이미지 작업 시 x 방향으로의 병진 운동이 발생해서 나타난 흠여짐 값을 의미한다.

기울기 측정에 앞서 얻어진 데이터의 신뢰성을 알아본 결과 200 °C에서 얻어진 데이터 산포를 제외한 나머지 결과는 정상적인 것으로 확인되었다. 그러나 오차가 가장 큰 경우의 오차 범위가 3.1% 이하이기 때문에 전체적인 데이터 신뢰도는 높다. 기울기 분석으로부터 열처리 유/무에 상관없이 인장 잔류 응력이 형성되어 있음을 확인하였다. 최종 신선 후 얻어진 미세 강선의 잔류 응력은 ~1280 MPa로 1 GPa 이상의 높은 잔류 응력이 존재한다. 미세 강선에 열처리를 하게 되면 높은 잔류 응력은 크게 감소되는 것을 그림 3 (b) ~ (f)를 통해 확인할 수 있다. 열처리 온도를 100에서 300 °C까지 증가시키게 되면 1 GPa 이상 높게 존재했던 인장 잔류

응력은 약 840, 610, 670, 420, 230 MPa로 지속적인 감소를 나타낸다. 이는 저온 열처리가 표면에 국부적으로 크게 존재하는 응력을 이완시켜 인장 잔류 응력을 크게 소멸시키기 때문이다. 따라서 앞 절에서 얻어진 열처리 온도 증가에 따른 피로 특성 증가는 인장 잔류 응력 감소에 따른 것으로 판단된다. 일반적으로 외부 응력이 인가될 때 표면 요철부, 그루브 또는 인장 잔류 응력이 존재할 때 이 부분으로 응력이 집중되고 초기에 파괴가 발생한다. 따라서 감소된 인장 잔류 응력은 응력 집중도를 감소시키고 이는 피로 특성을 증가시킨다. 그러나 열처리 온도 200 °C 이상에서 인장 잔류 응력이 감소함에도 불구하고 피로 특성은 서서히 감소하는 경향을 보이기 때문에 전적으로 잔류 응력에 의존한다고 볼 수는 없다.

### 3.3 표면 결함

광학 3-D profiler를 이용하여 미세 강선의 표면 분석을 시도하였으며 이의 결과를 그림 4에 나타내었다. 상온 신선 공정을 거쳐 미세 강선이 제조되기 때문에 다이스 흔적이 강선 표면에 ‘그루브’ 형태로 존재하게 된다. 즉, 그림 5에서 보이는 것처럼 표면은 어느 정도의 굴곡(roughness)을 가지며 일반적으로 약 300  $\mu\text{m}$ 의 크기를 갖는 것으로 알려져 있다[6]. 측정 시 표준 샘플을 사용하지 않았기 때문에 수치 비교는 어렵지만 경향 비교는 가능하다. 최종 신선된 미세 강선을 포함해서 200 °C까지 열처리된 미세 강선은 거의 동일한 경향을 갖지만 그 이후 온도에서 열처리된 미세 강선의 굴곡은 커진다. 특히, 400, 500 °C에서 열처리된 미세 강선의 표면은 굴곡이 큰 것이 확인 가능하다.

따라서 높은 온도에서 관찰되는 피로 특성의 저하는 결함 크기 증가에 따른 낮은 응력 하에서 균열 형성에 따른 것으로 판단된다.

## 4. 결론

미세 강선의 굽힘 피로 특성을 향상시키기 위해 현재까지 많은 연구가 진행 중에 있다. 후속 열처리를 통해 미세 강선의 굽힘 피로 특성을 향상시켰으며 이에 영향을 미치는 핵심 인자를 찾고자 하였다. 200 °C 이하의 낮은 열처리 온도에서 피로 특성을 지배하는 인자는 잔류 응력이었으며 그 이후 온도에서는 표면 결함에 의해 영향을 받는다.

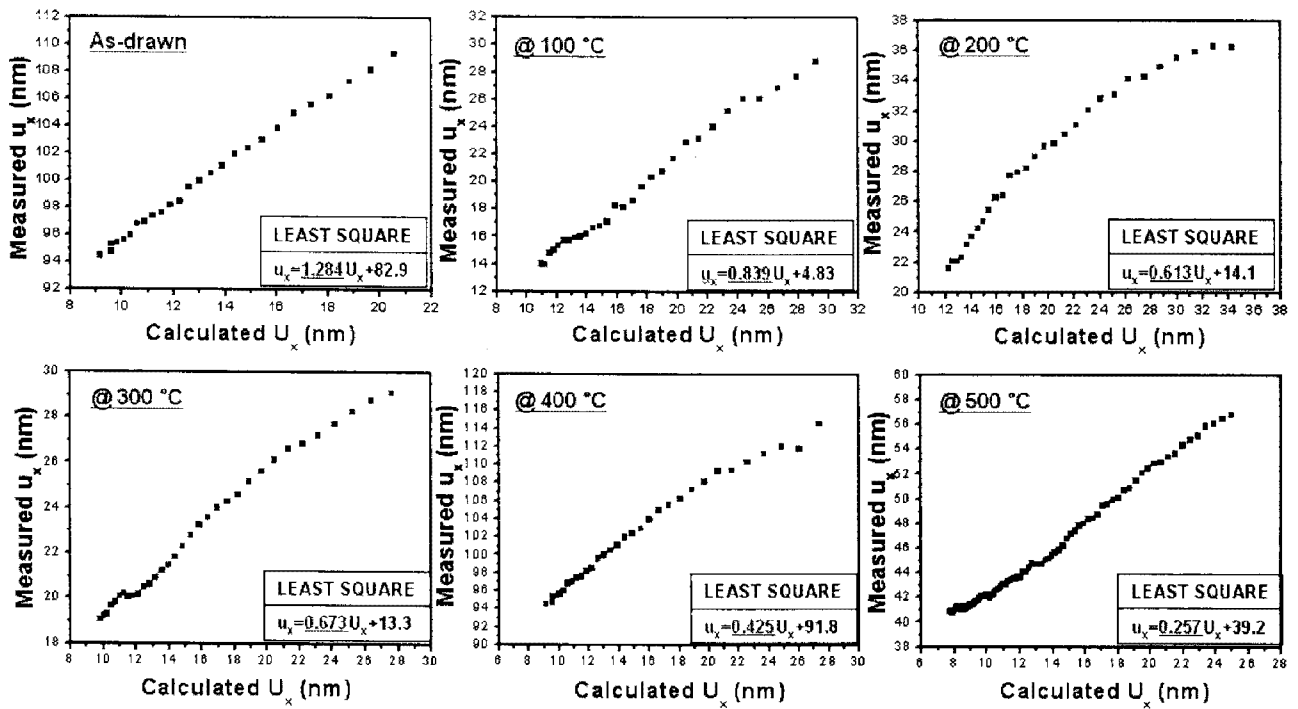


Fig. 3. Comparison of measured and calculated displacements of the steel filaments depending on annealing temperature

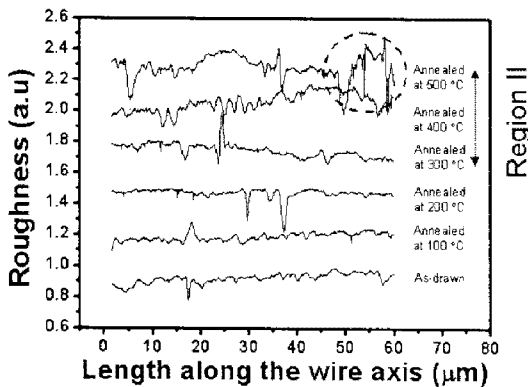


Fig. 4. Level of the surface defects along the wire axis measured by optical 3D profiler

### 후 기

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

### 참 고 문 헌

- [1] M. Dollar, I. M. Bernstein, A. W. Thompson, M. Shemski, 1988, Influence of deformation substructure on flow and fracture of fully pearlitic steel, Acta Metall., Vol. 36, pp. 311~320.
- [2] J. D. Embury and R. M. Fisher, 1966, The Structure and Properties of Drawn Pearlite, Acta Metall. 14, pp. 147~159.
- [3] G. T. Gray, III, A. W. Thompson J. C. and Williams, 1985, Influence of microstructure on fatigue crack initiation in fully pearlitic steels, Met. Trans A 16A, pp.753~760.
- [4] M. A. Daeubler, A. W. Thompson and I. M. Bernstein, 1987, Influence of microstructure on fatigue behavior and surface fatigue crack growth of fully pearlitic steels, Metall. Mater. Trans A 21A, pp.925~933.
- [5] 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.
- [6] I. Verpoest, E. Aernoudt, A. Deruytere and M. De Bondt, 1985, The fatigue threshold, surface condition and fatigue limit of steel wire, International Journal of Fatigue, Vol. 7, pp.199-214.
- [7] 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, vol. 100, pp.012-018.