

# 열처리 조건에 따른 미세 강선의 굽힘 피로 특성 변화

양요셉<sup>1,2</sup>, 배종구<sup>3</sup>, 박찬경<sup>#</sup>

## Effects of Patenting Temperature on the Bending Fatigue Resistance of the Steel Filaments used for Automotive Tire

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

### Abstract

Effects of patenting temperature on bending fatigue resistance of pearlitic steel filaments were investigated experimentally. The fatigue resistance of steel filaments was carried out by using hunter machine, specially designed for ultra fine-sized steel wires, in the controlled conditions. The transmission electron microscopy (TEM) was used for observing the overall microstructure. It revealed that the fatigue resistance as well as tensile strength increased together with increase of patenting temperature from 510 to 600 ° C, while the endurance ratio ( $\sigma_f / \sigma_{TS}$ ) of filaments decreased. It is believed that this variation of mechanical properties with change of patenting temperature should be strongly influenced by the change of microstructure. The bending fatigue properties of steel filaments were discussed based on microstructural parameters

**Key Words:** Bending fatigue resistance, microstructure, steel filaments.

### 1. 서론

신선 가공된 고 탄소 강선은 다른 철강 재료에 비해 고강도 특성을 갖기 때문에 타이어 보강재인 스틸 코드(steel cords)로 사용된다[1,2]. 주행 중 타이어는 인장, 압축 응력이 반복적으로 작용하는 피로 환경에 놓이기 때문에, 스틸 코드는 강도뿐 아니라 피로 특성이 우수하여야 한다. 스틸 코드는 탄소 중량 0.6 ~ 0.9 %, 신선된 0.1 ~ 0.3 mmφ 미세 강선을 꼬아서 사용한다[3].

최근 에너지 절감 연구가 활발히 진행 중에 있으며 경량화를 위하여, 보다 가벼우면서 4 GPa 이상의 강도를 갖는 강선 개발 연구가 활발히 진행 중에 있다. 강선의 고 강도화는 Embury-Fisher 의 강도식 [4]에서 표현된 것처럼 초기 소재의 강도 증가, 펄라이트 층간 간격의 미세화 및 신선 가공량 증가 등의 방법에 의해 진행되고 있다. 이는

탄소 함량 증가, 미량 크롬 첨가, 신선 및 열처리 등의 공정 조건 변화 등으로 충족된다. 탄소 함량 증가 및 미량의 크롬은 세멘타이트의 분율 증가, 세멘타이트의 경화능 향상 및 결정립을 미세화 시켜 강도를 향상시킨다. 강도는 신선 가공량 증가에 의해 지수 함수적으로 증가[1,4,5]하기 때문에 높은 가공량 조건에서 제조를 하여 강도를 증가시킬 필요가 있다. 그러나 이는 강선이 충분히 높은 연성을 갖고 있어야 가능하기 때문에 조업 중 열처리 (patenting)를 해야 되며 최적화 상태에서 제조가 이루어져야 신선 도중 절단, 파단 등을 방지할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 연성에 영향을 미치는 열처리 조건을 달리하여 최종 얻어진 미세 강선의 굽힘 피로 특성에 미치는 영향에 대해 알아보려고 하였다. 이를 위하여 미세 강선의 기계적 특성 평가와 미세 조직 변화를 관찰하여 이들의 상관성 도출 및 이의 특성을 향상 시킬 수 있는 열처리

1. 포항공과대학교  
2. 포항공과대학교 나노기술집적 센터  
3. 고려제강 기술연구소  
# 박찬경:포항공과대학교, cgpark@postech.ac.kr

조건을 제시하고자 하였다.

## 2. 실험

직경 5.5 mm $\phi$ 의 봉형 강선 (Fe-1.02C-0.2 Cr-0.24Mn-0.25Si-0.005S-0.007P, wt.%)을 원 소재로 사용하였으며 최종 미세 강선의 직경은 0.18 mm $\phi$ 으로 하였다. 1000 °C에서 30 초 동안 오스테나이트화 한 후 510, 540, 570, 600 °C에서 10 초간 납(lead)조에서 유지 후 공냉함으로써 열처리에 차이를 두었다.

미세 강선의 굽힘 피로 특성은 인장과 압축 응력을 반복적으로 가할 수 있게 제조된 ‘Hunter machine’을 이용하여 측정되었다. 미세 강선이 파괴될 때까지의 사이클 수를 기록하였으며 10<sup>6</sup>회를 피로한 (fatigue limit,  $\sigma_e$ )으로 정하였다. 피로 시험 분위기는 온도 = 30 ( $\pm 2$ ) °C, 습도 = 25 ( $\pm 3$ ) %, 주파수 = 60 Hz로 일정하게 유지시켰다. 미세 강선의 미세 조직 분석에 TEM (JEOL 2010 FE)을 이용하였다. TEM 시편은 집속 이온빔 (SII 3050SE) 장비를 이용하여 제조하였다. 펄라이트 층간 간격은 세멘타이트가 수직으로 배열된 조직을 선택하여 linear intercept 방법에 의해 측정하였으며 세멘타이트 두께는 O’ Donnelly [6]의 결과를 이용하여 계산하였다.

## 3. 결과

### 3.1 강도 및 피로 특성

열처리 온도 변화에 따른 미세 강선의 기계적 특성 변화를 그림 1에 나타내었다. 그림 1 (a)로부터 열처리 온도가 510 에서 600 °C로 증가할때 피로한은 1430에서 1510 MPa로 크게 증가하며 특히 열처리 온도 570 °C 에서 피로한의 증가가 가장 큰 것을 알 수 있다. 인장 강도의 경우, 열처리 온도가 증가할 때 인장 강도는 증가한다. 그러나 열처리 온도에 따라 다른 증가 경향을 보이는데 510 ~ 570 °C 온도 구간에서 선형적인 증가를 570 ~ 600 °C 구간에서 이의 증가율이 감소하는 경향을 나타낸다.

온도 증가율에 대한 기계적 특성 변화( $\Delta\sigma_e$  or  $\Delta\sigma_{TS} / \Delta\sigma_{TS}$ )는 다음과 같다. 즉, 굽힘 피로 특성의 경우 열처리 온도가 증가할 때 0.33, 1.66, 0.66로

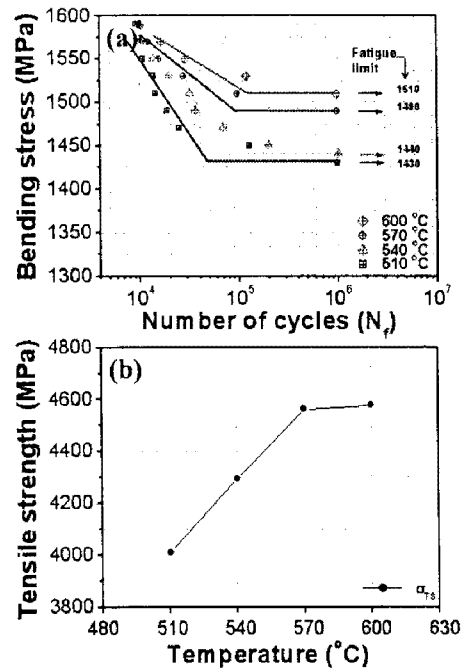


Fig. 1. (a) Bending fatigue resistance and (b) tensile strength of the steel filaments with various patenting temperature.

540 ~ 570 °C 온도 구간에서 큰 증가 경향을 나타낸다. 인장 강도의 온도 의존성은 앞선 결과와 유사 경향을 보이며, 9.51, 8.86, 0.56으로 570 °C 이하 온도 구간에서 증가율이 서서히 감소하다가 이후 온도에서 급격히 저하된다. 따라서 강도를 포함한 피로 특성을 향상시키기 위해서는 높은 온도에서 열처리하는 것이 좋지만, 생산 단가 등을 고려할 경우 최대한의 기계적 특성을 보이는 570 °C 온도가 최적인 것으로 확인되었다.

### 3.2 미세 조직

그림 2는 TEM을 이용한 길이 방향의 미세 조직 분석 결과를 보여준다. 강 가공 상태에서 신선되었기 때문에 연신된 조직이 주를 이루며 층상 구조를 갖는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 G. Langford 등이 제시한 기존 결과와 유사하다[1, 5]. 주된 미세 조직은 펄라이트 (a) 상과 세멘타이트 ( $\theta$ ) 상이 층상으로 존재하는 펄라이트이나, 열처리 온도가 낮은 510 ~ 540 °C에서는 구형의 세멘타이트와 두꺼운 판상이 펄라이트 조직에 끼어 있는 듯한 다른 상이 관찰된다. 이러한 조직은 CCT diagram으로부터 소량의 상부 베이나이트인 것으로 판단된다. 따라서 510 ~ 540 °C에서는 “펄

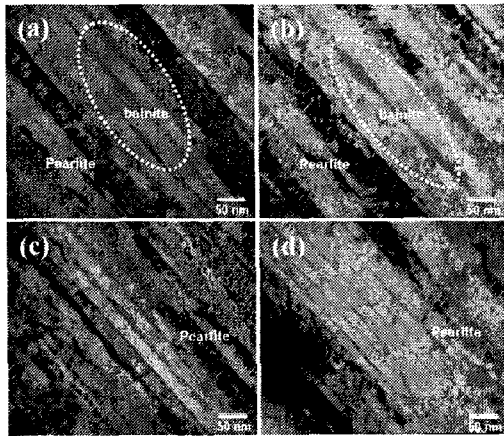


Fig. 2. TEM micrographs showing the longitudinal microstructure of the steel filaments depending on patenting temperature; (a) 510 °C, (b) 540 °C, (c) 570 °C, (d) 600 °C.

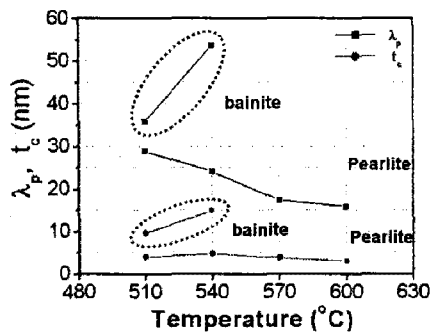


Fig. 3. Various change of microstructural parameters depending on patenting temperature

라이트 + 상부 베이나이트”가, 570 ~ 600 °C 에서는 “순수 펄라이트”로 구성된다. 열처리 온도 증가에 따른 펄라이트 층간 간격 ( $\lambda_p$ ), 세멘타이트 두께 ( $t_c$ ), 베이나이트 형성 등을 고려한 정량 측정 결과를 그림 3 에 나타내었다. 열처리 온도가 증가할 때 펄라이트 층간 간격은 28.79 에서 15.75 nm 로 감소한다. 세멘타이트 두께 또한 3.93 에서 3.0 nm 로 감소하는 것으로 확인되었다. 베이나이트가 형성된 지역의 경우, 펄라이트 층간 간격은 35.64 nm 에서 53.57 nm 로 세멘타이트는 9.57 nm 에서 14.86 nm 로 두께가 증가하였다. 즉, 베이나이트의 형성은 조직의 조대화와 불균일성을 증가시킨다.

#### 4. 고찰

열처리 온도 변화에 따른 미세 강선의 기계적 특성과 미세 조직의 상관성은 다음과 같다. 열처

리 온도 증가에 따른 인장 강도 증가는 펄라이트 층간 간격 감소의 미세화에 의해 영향을 받은 것으로 보인다. 1960년 Embury-Fisher는 강도식을 제안하였으며 강도는 펄라이트 층간 간격에 크게 의존하는 것으로 보고하였다. 즉, 펄라이트 층간 간격의 미세화는 전위의 움직임을 방해하는 장벽 역할을 하는 세멘타이트의 수를 증가시키기 때문에 강도는 증가한다. 또한, 열처리 온도가 낮을 경우, 베이나이트의 형성이 관찰되었는데 적은 분율로 존재할 것으로 보이는 이상은 가공 경화를 낮춰 미세 강선의 강도를 낮게 하는 것으로 사료된다.

미세 강선의 피로 특성은 또한 열처리 온도에 의해 변화된 미세 조직에 의해 영향을 받은 것으로 보인다. 열처리 온도가 증가함에 따라 피로한은 계속 증가하는 경향을 앞서 확인하였는데 이러한 증가는 펄라이트 층간 간격의 미세화에 따른 것이다. 굽힘 피로 에서 다수의 미소 균열은 응력이 집중되는 펄라이트/세멘타이트 계면 또는 취약한 세멘타이트에 형성되고, 미세 균열끼리의 결합에 의해 전파된다. 미세한 펄라이트 층간 간격은 균열의 전파를 방해하기 때문에 피로 특성은 향상된다. 따라서 굽힘 피로특성에 영향을 미치는 인자로 펄라이트 층간 간격으로 판단하였다. 570 °C에서 열처리했을 때 피로 특성이 크게 증가함을 피로한 비교와 피로 한 증가에 따른 온도 증가량 ( $\Delta \sigma_{FL} / \Delta \sigma_T$ )를 통해 확인하였는데 이에 증가에 펄라이트 층간 간격의 감소 외 다른 미세 조직 인자가 영향을 미친 것으로 판단된다. 510 ~ 540 °C 구간은 베이나이트가 형성되는 온도인데 소량으로 형성된 베이나이트는 5 nm 이상의 층간 간격을 9 nm 이상의 세멘타이트 두께를 갖는 것으로 분석되었다. 베이나이트는 두꺼운 판상과 구형 세멘타이트가 혼재된 형상을 갖는다. 베이나이트 형성에 따른 조직의 불균일성 증가는 균열의 전파를 억제하지 못하고 오히려 균열의 전파를 쉽게 도와주는 역할을 할 것으로 사료된다. 이는 펄라이트 구조에서 일부 미 고용된 세멘타이트가 존재할 때 이를 따라 균열이 전파되어 피로 및 연성이 감소된다는 기존의 결과[7,8]와 유사하다.

또한, 본 연구에서는 내구비 (endurance ratio, ER  $\sigma_{FL} / \sigma_{TS}$ )를 사용하여 피로 저항성을 알아보았으며 이의 결과를 그림 4에 나타내었다. 미세 강선의 내구비는 35.7, 33.5, 32.7, 33.0%로 일반적으로 1400

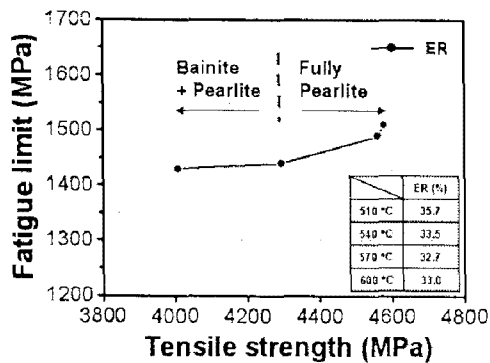


Fig.4. The relation between fatigue limit and tensile strength of the steel filaments

MPa 이상의 인장강도를 갖는 탄소강의 내구비 0.2 ~ 0.4에 존재한다는 값이다. 내구비는 열처리 온도 구간에 따라 다른 경향을 나타내었는데 510 ° C ~ 570 ° C까지는 계속 감소되고 그 이후 온도에서는 다시 증가하였다. 이러한 경향은 피로한의 변화와 유사하며 이로 보아 펄라이트 층간간격의 영향 외 다른 미세 조직 인자 (베이나이트)의 존재에 의한 것으로 판단하였다. 또한, 이 결과로부터 피로 특성과 인장 강도가 서로 밀접한 관계를 가짐을 확인하였으며 인장 강도의 증가를 통해 강선의 피로 특성을 향상을 도모하고 나아가 피로 특성을 예측할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 생산 비용 절감 시키고 피로 특성을 크게 향상시키기 위해서는 베이나이트를 형성 시키지 않는 온도에서 열처리를 하여 펄라이트만 형성시킨 후 진 변형량을 증가시켜야 할 것이다

## 5. 결론

본 연구에서는 열처리 온도가 굽힘 피로 특성에 미치는 영향을 알아보고 이를 미세 조직 측면에서 접근하고자 하였다. 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 미세 강선의 조직은 열처리 온도에 크게 영향을 받으며 온도가 증가함에 따라 펄라이트 층간 간격, 세멘타이트 두께, 베이나이트 형성 등의 미세 조직 인자는 변화하였다. 510 ° C ~ 540 ° C 열처리 온도 구간에서는 소량의 베이나이트와 펄라이트가 혼재되어 있으며 570 ° C 부근에서 600 ° C는 순수 펄라이트 조직이다. 열처리 온도 증가에 따라 펄라이트 층간 간격과 세멘타이트 두께는 감소한 반면 베이나이트가 형성된 부근의 층간 간격과 세멘타이트 두께는 증가되었다.

2. 고 탄소 강선의 굽힘 피로 특성은 열처리 온도에 크게 영향을 받으며 온도가 증가함에 따라 피로 특성은 증가하였다. 피로 특성을 예측하기 위하여 인장 강도도 평가되었으며 마찬가지로 증가하는 경향을 보였다. 강도뿐 아니라 피로 특성은 열처리 온도 증가에 따른 펄라이트 층간 간격의 감소에 크게 영향을 받는 것으로 분석되었다. 570 ° C 열처리 온도 부근에서 피로한, 피로 한도 증가에 따른 온도 증가량, 내구비등이 크게 향상되었는데 이는 소량의 베이나이트 상이 형성되지 않고 순수 펄라이트만 존재하기 때문인 것으로 판단하였다. 이로부터 생산 비용 절감을 통한 피로 특성 향상을 위해서는 베이나이트를 형성시키지 않는 열처리 온도에 대한 최적화가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구가 진행되도록 시편 제조와 연구비 지원을 해준 고려제강(주) 기술연구소, NCNT, NCRC와 BK21에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] G. Langfrod, 1970, Metal. Trans., 1A, pp.465
- [2] N. Ibaraki, K. Makii, K. Ochiai, Y. Oki: 1999, Proc. of 69th wire and cable technical symposium, pp.1.
- [3] N.N.Bekaert, 1985 Bekaert Steel Cord Catalogue (Trans Tech Publications, Belgium) 1k
- [4] J. D. Embury and R. M. Fisher, 1966, Acta Metall., Vol. 14, pp.147.
- [5] G.Langfrod, P.N.Nagata, R.J.Sover, W.C.Lesile, 1972, Metal. Trans., Vol. 3, pp.1843.
- [6] V.Alexandrov, A.Dubravina, R.kilmametov, U.Kazykhanov, Z.Valiev: Met. Mater-Int., 2003, Vol. 9, pp. 151.
- [7] L. E. Miller and G. W. Bries, 1966, ISIJ, Feb., pp.102.
- [8] D. J. Alexander and I. M. Bernstein, 1984, The metallurgical society of AIME, pp.243.