

펄라이트 강선의 어닐링 조건이 딜라미네이션 발생에 미치는 영향

박대범¹·이중원¹·남원종[#]

The Effect of Annealing Condition on the Occurrence of the Delamination in Pearlitic Steel Wires

D. B. Park, J. W. Lee, W. J. Nam

Abstract

The effects of annealing condition on the occurrence of the delamination in cold drawn hyper-eutectoid steel wires, were investigated. Annealing treatment was performed on cold drawn steel wires for temperature range of 425°C ~ 500°C with the variation of annealing time from 30sec to 15min. The increase of annealing temperature and time would cause the decrease of tensile strength and the increase of ductility. However, the occurrence of the delamination, representing torsional ductility, showed the different way from the variation of ductility.

Key Words : Drawing, Pearlite, Delamination, Strain Aging

1. 서론

고탄소 펄라이트 강선은 상업적으로 상용되는 강 중에서 높은 인장강도를 갖는 재료 중 하나로서, 현수교 등 교량용 강선으로는 2000Mpa급의 강도를 가지는 강선이 사용되고 있으며[1], 타이어 보강재로 사용되는 타이어 코드에는 3000MPa 이상의 강도를 갖는 강선이 사용되고 있다.

공석조성을 가지는 교량용 강선은 미세 펄라이트 구조로 신선 가공에 의해 높은 강도를 가지게 된다. 일반적으로 교량용 강선은 신선 가공 후에 부식에 대한 저항성을 높이기 위해 고온에서 아연 도금을 실시하게 된다.

교량용 강선은 아연 도금시 도금 온도 및 시간에 따라 기계적 성질이 변화하게 되며, 특히 저온 또는 짧은 시간 열처리시 시효 경화에 의해 강도가 증가하며 고온 열처리시 시효 연화 현상에 의해 강도가 감소한다[1].

시효 경화 현상은 펄라이트 내 층상 시멘타이트의 분해로 인해, 분해된 탄소 원자가 펄라이트 내 페라이트로 확산한 뒤 전위와 고착함으로써 일어나며, 시효 연화 현상은 펄라이트 내 층상 시멘타이트의 구상화와 층상 페라이트의 회복 및 재결정에 의해 일어난다.

한편 아연 도금 고강도 강선을 로프(rope)형태로 연선하는 과정에서 발생하는 파단 형태인 딜라미네이션(delamination)은 고강도 강선 또는 신선가공을 심하게 받은 강선에서 관찰되는 현상이다. 이를 줄이기 위한 노력으로 딜라미네이션 발생의 원인을 찾기 위해 많은 연구자들이 노력하여 왔으며, 불균질 집합조직 발달, 가공 중 발생한 잔류 응력의 불균질 분포, 신선 가공 조건(선경, 신선속도, 운할 방법)의 변화 및 신선 가공 중 발생하는 동적 시효 등이 딜라미네이션의 발생으로 도출되었다[2-7]. 특히 동적 시효는 딜라미네이션 발생에 크게 영향을 미치는 것으로 보고 되었으

1. 국민대학교 신소재공학과
#교신저자: 국민대학교 신소재공학과,
wjnam@kookmin.ac.kr

며 이에 따라 동적 시효 발생을 억제하기 위한 노력이 진행되어 왔다.

이와 같이 동적 시효로 인한 딜라미네이션의 발생 여부 및 딜라미네이션 발생을 예측하기 위한 방법 등에 대한 연구들은 활발하게 진행되고 있으나, 신선가공 후 야연 도금과 같은 열처리에 의한 정적 시효 현상이 딜라미네이션 발생에 미치는 영향에 대해서는 연구가 이루어 지지 않고 있는 실정이다. 이러한 배경 하에 본 연구에서는 어닐링 열처리 조건이 딜라미네이션 발생에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 실험 방법

이 실험에 사용된 강선의 조성은 표 1 과 같다.

Table 1 Chemical composition of steel wire. (wt.%)

C	Si	Cr	Mn
0.92	1.2	0.3	0.5

직경이 10.5mm인 강선을 항온변태를 시킨 미세 조직은 펠라이트로 이루어져 있으며 펠라이트 층상 간격은 99.3nm 이다(사진1-(a)). 항온변태 시킨 강선을 4.92mm까지 연속 신선기를 이용하여 가공을 하였으며 신선 변형량은 1.6이고 총 감면율은 78%이다.

야연 도금을 묘사하기 위해 열처리 온도는 400도에서 500도 사이에서 실시하였으며 열처리 시간은 30초, 1분, 5분, 15분 동안 Tin bath를 사용하여 실시하였다.

기계적 성질의 평가로써, 인장실험은 상온, Cross-head speed 1mm/min의 조건으로 실시하였으며 초기 변형속도는 $3.0 \times 10^{-3}/s$ 에 해당된다. 또한 연선 과정 중 발생하는 딜라미네이션 발생을 simulation 하기 위해, 열처리한 강선을 30r.p.m의 속도로 비틀림 시험을 실시하였다. 비틀림 시험 후 파면의 양상을 보기 위해 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM)을 사용하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 강선의 기계적 성질

강선의 열처리 조건에 따른 기계적 성질의 변화를 그림 1에 나타내었다. 냉간 신선 가공 후 열처리를 하기 전 인장강도는 2030MPa이다. 인장

강도는 모든 열처리 시간에 대해서, 열처리 온도 425°C에서 peak를 보인 후 열처리 온도가 상승함에 따라 연속적으로 감소하는 경향을 보였다.

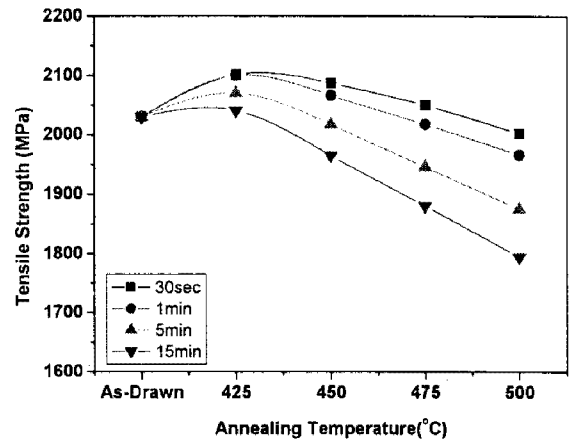


Fig. 1 Variation of tensile strength with annealing temperature in cold drawn pearlitic steel wires

열처리 온도 425°C에서, 30 초 ~ 5 분의 비교적 짧은 시간 열처리 할 때에는 약 100MPa 정도 인장강도의 증가를 보이는 반면 장시간에 속하는 15 분 열처리 할 때에는 초기 강도에 비해 큰 변화가 없었다. 이러한 짧은 시간 열처리시 강도 증가 현상은 시효 경화 현상과 관계가 있다. 신선 가공에 의해 불안정해진 탄소 원자들이 열처리를 하는 동안 쉽게 분해되어 층상 페라이트 안으로 확산한 후 Cottrell 분위기를 형성함으로써 전위와 고착하여 강도가 증가한다[9].

한편 450°C 이상에서는 열처리 온도의 상승에 따라 인장 강도가 연속적으로 감소하는 경향을 보이지만, 열처리 시간 30초, 1분에 해당되는 인장 강도는 500°C에서도 초기 강도 수준을 유지하고 있다. 이는 시효 경화 현상에 의한 인장강도 상승 효과와 펠라이트 내 층상 시멘타이트의 구상화, 페라이트의 회복 등 기구에 의한 연화 효과가 균형을 이루기 때문이라고 말할 수 있다.

또한 높은 열처리 온도와 열처리 시간 5분 및 15분의 충분한 가열 시간으로, 층상 시멘타이트의 구상화와 층상 페라이트의 회복 및 재결정에 의한 시효 연화 현상이 그림 1의 연속적인 인장 강도 감소 현상을 유발하였음을 알 수 있었다.

3.2 딜라미네이션

연선 과정 중 발생하는 딜라미네이션 발생을

simulation 하기 위에 열처리된 강선을 비틀림 실험을 실시하였다. 딜라미네이션이 발생한 열처리 조건과 인장강도를 표 1에 나타내었다. 표 1에서 인장 강도 기준으로 구분할 수 있듯이 딜라미네이션 발생은, 425°C-30sec에서 발생 가능한 시효 경화 현상에 의해 인장강도가 높아진 경우(2100MPa)와 500°C-5min, 500°C-15min의 높은 열처리 온도 및 장시간의 가열조건에서 발생하는 시효 연화가 심화되는 경우(1875MPa, 1794MPa)에 일어난다는 것을 알 수 있었다.

Table 1 Mechanical properties of annealed wire.

Annealing Condition	Tensile Strength (MPa)	Number of torsions	Delamination
As-Drawn	2031.21	19	Not observed
425°C-30sec	2100.90	8	Observed
500°C-5min	1875.14	11	Observed
500°C-15min	1794.43	10	Observed

Maruyama의 보고에 의하면[8], 딜라미네이션 발생은 신선 가공 중 동적 시효에 의해 확산된 탄소 원자와 페라이트 기지내의 전위의 고착으로 인하여 페라이트는 탄소 원자를 과포화 고용시키게 되고, 탄소 원자의 과포화 고용으로 인해 국부적으로 경화된 페라이트에 비틀림 시험 중 극심한 전단응력이 가해지는 것이 원인이라 하였다. 신선 가공 후 425°C 30초 열처리에서는 탄소 원자가 페라이트로 확산이 가속되고 시효 경화 현상을 일으킨다. 시효 경화 현상에 의해서 경화된 페라이트는 비틀림 시험 중 가해지는 전단응력에 의해 크랙이 생성되고 전파되어 딜라미네이션이 발생한다. 그림 2-(b)를 보면 페라이트/시멘타이트 계면에 크랙이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 생성된 크랙이 페라이트/시멘타이트 계면을 따라 성장하는 것을 보여준다.

높은 열처리 온도 및 장시간의 가열조건에서 발생하는 딜라미네이션은 시효 연화 과정에서 생성되는 구상 시멘타이트 입자에 기인 된다고 볼 수 있다. 비틀림 시험 중 페라이트와 구상 시멘타이트 계면에서 생성된 미세공공 들(그림 2-(c))은 비틀림 시험이 진행되면서 연결되어 크랙으로 발전하여 딜라미네이션이 발생하게 된다.

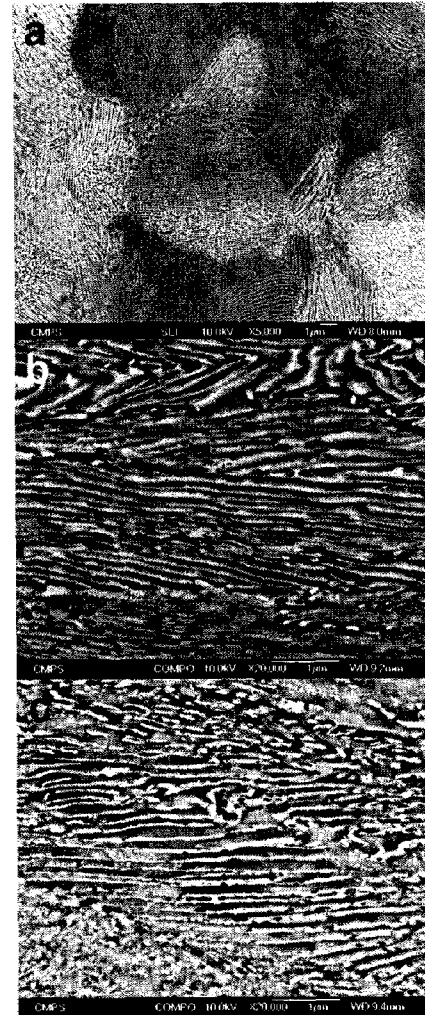


Fig. 2 SEM micrographs of longitudinal cross-section of patented and annealed steel wire:

- (a) patented wire
- (b) annealed at 425°C for 30sec,
- (c) annealed at 500°C for 15min

4. 결론

본 연구에서는 펄라이트 강선의 열처리 조건이 딜라미네이션 발생에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

(1) 30 초, 1 분 열처리시에는 시효 경화 현상에 의해 인장강도의 증가를 보였으며 5 분, 15 분 열처리 시에는 425°C에서 인장강도 최대값을 보인 후 시효 연화 현상에 의해 인장강도가 감소하였다

(2) 425°C, 30 초 열처리 조건에서 시효 경화 현상에 의해 딜라미네이션이 발생하였으며, 시효 연

화 현상이 발생하는 500℃, 5 분 15 분의 열처리 조건에서도 딜라미네이션이 발생하였다.

(3) 시효 경화 현상에 의해 딜라미네이션이 발생한 경우 크랙의 전파는 층상 페라이트와 시멘타이트 계면을 따라 전파하였다.

참 고 문 헌

- [1] T. Tarui, S. Nishida, A. Yoshie, H. Ohba, Y. Asano, I. Ochiai, 1999, Effect of silicon on the age softening of high carbon steel wire, Nippon Steel Tech Rep., Vol. 80, pp. 25~30.
- [2] Y. Kanetsuki, R. Ogawa, Influence of texture on the torsional deformation behavior of drawn pearlitic carbon steel wires, 1981, Proceedings of 6th International Conference on Texture of Materials II: Iron Steel Institute of Japan, pp. 1127~1136.
- [3] A. Brownrigg, R. Boelen, M. Toyama, Delamination of hard drawn eutectoid steel wires, 1984, Advances in Fracture Research: Pergamon Press, Oxford, Vol. 2; pp. 1431~1438.
- [4] T. Montesin, J. J. Heizmann, J. B. Pelletier, Study of the texture evolution in steel cord, 1991, Wire J. Inter., Mar., pp. 56~59.
- [5] L. Godecki, Influence of the drafting schedule and die angle on properties of steel spring wire, 1972, Wire Industry, Jun., pp. 518~521.
- [6] P. F. Willemse and B. P. Naughton, Effect of small drawing reductions on residual surface stresses in thin cold-drawn steel wire, as measured by X-ray diffraction, 1985, Mater. Sci. & Tech., Vol. 1, pp. 41~45.
- [7] W. Van Raemodock, I. Lefever and U. D'Haene, Torsion tests as a tool for high strength wire evaluation, 1994, Wire J. Inter., Jun, pp. 68~75.
- [8] N. Maruyama, T. Tarui, H. Tashiro, 2002, Atom probe study on the ductility of drawn pearlitic steels, Scripta Materialia, 46, pp.599~603.
- [9] V. N. Gridnev, V. G. Gavrilyuk, Cementite decomposition in steel under plastic deformation, 1882, Phys. Metals, Vol.4 (3), pp.531~551