

신선가공 고탄소 강선에서의 시효현상과 딜라미네이션 발생간의 상관관계 고찰

이중원¹ · 이종철¹ · 강의구¹ · 이용신² · 박경태³ · 남원종^{#,1}

The Relationship between Strain Ageing And Delamination Occurrence of Drawn Steel Wires

J. W. Lee, J. C. Lee, U. G. Gang, Y. S. Lee, K. T. Park and W. J. Nam

¹School of Advanced Materials Engineering, Kookmin University, Seoul, 136-702, Korea

²School of Advanced Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul, 136-702, Korea

³Division of Advanced Materials Science and Engineering, Hanbat University, Taejeon, 305-343, Korea

Abstract

The effects of annealing temperature and time on mechanical properties and microstructures were already investigated in cold drawn pearlitic steel wires. During annealing, the increment of the tensile strength at low temperatures found to be due to age hardening, while the decrease in the tensile strength at high temperatures was attributed to age softening, involving the spheroidization of lamellar cementite and recovery of lamellar ferrite. Since Between increase of tensile strength and the occurrence of the delamination would be closely related to the dissolution of cementite, the increase of drawing strain by lower annealing temperature caused the between higher tensile strength and the easier occurrence of the delamination in cold drawn pearlitic steel wires.

Key Words: Wire drawing, Pearlite, Cementite, Ferrite, Delamination

1. 서론

신선된 고탄소 강선은 상업적으로 상용되는 강 중에서 가장 높은 인장강도를 갖는 재료 중 하나이며 신선 가공공정에 의한 고강도 강선의 발전은 선재 분야에서 중요한 부분을 차지하고 있다. 현재 현수교의 주 케이블에 사용되고 있는 강선은 2GPa의 인장강도를 가진 신선재이며 [1,2], 타이어의 보강재로 쓰이는 타이어 코드, 콘크리트 보강용 강선, dome 등의 대공간 구조물용 강선 등에 신선 가공된 강선이 사용되고 있다.

이들 중 교량용 강선은 열악한 외부 환경에 그대로 노출되기 때문에 450도 부근에서의 아연도금 공정을 통하여 부식에 대한 저항성을 높인다.

이미 아연도금 열처리 온도 및 유지 시간에 따른 시효 연화 현상 혹은 시효 경화 현상이 강선의 인장강도를 변화를 수반한다는 것은 연구되었다[3,4].

이전 연구자들이 펄라이트 강의 신선과정에서 의한 시멘타이트의 국부적인 분해인 동적 시효를 연구하였다[5-9]. 시멘타이트의 분해 기구는 두 가지 메커니즘으로 설명되는데 한가지는 페라이트 계면의 전위와 시멘타이트 내의 탄소원자와의 상호 반응[5,6]이며 또 다른 한가지는 신선 가공으로 인한 시멘타이트의 계면에너지가 불안정해짐으로 인해 분해된다고 보고되어 왔다 [3].

이렇게 신선 가공으로 인해 시멘타이트 분해가 진행되게 되는데, 이는 탄소원자의 확산을 수반하며 후속 열처리 시 열처리 온도와 유지

1. 국민대학교 신소재공학과

교신저자: 국민대학교 신소재공학과,

E-mail:wjnam@kookmin.ac.kr

시간의 증가는 탄소원자의 확산을 활성화 시키며 층상 시멘타이트의 분해를 가속화시키게 되고 강도의 하락을 동반하는 정적시효를 야기한다.

강도가 증가하는 시효 경화 기구는 낮은 온도에서 열처리 시 층상 페라이트에서 분해된 탄소원자의 확산과 전위의 피닝효과에 의해 설명된다[5,6]. 반면 강도가 감소하는 시효 연화 기구는 높은 온도에서 열처리 시 층상 시멘타이트의 분절과 구상화, 층상 페라이트의 회복 및 재결정이 발생함으로써 나타난다[11].

한편 아연 도금 고강도 강선을 산업에 적용하기 위해 로프형태로 연선하는 과정에서 발생하는 파단 형태인 딜라미네이션(Delamination)을 줄이기 위한 노력으로 딜라미네이션 발생의 원인을 찾기 위해 많은 연구자들이 노력하여왔다.

실리콘의 첨가는 페라이트강선의 아연 도금 후의 시효연화 현상을 감소시켜 주는 걸로 알려져 있다[12,13].

이를 바탕으로 시효 현상을 통한 강도의 증가 시 딜라미네이션 발생에 미치는 영향간의 상관관계를 명확히 하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 소재는 열간 압연 후 스텔모아(Stelmor) 방식의 냉각을 실시한 13mm의 강선이며, 화학성분은 표 1에 나타내었다.

열간 압연 된 강선(직경 13mm)은 산세 처리 후 7.40mm ($\epsilon=1.13$, 67.6%)에서 3.95mm ($\epsilon=2.38$, 90.8%)까지 패스 당 20%의 단면감소율로 신선하였다. 아연 도금을 모사하기 위한 열처리온도는 425, 450, 475, 500도에서 실시하였으며, 열처리시간은 30초, 1분, 15분, 1시간이다. 인장 실험은 상온에서 $8.3 \times 10^{-4}/s$ 의 초기변형 속도로 실시하였다. 비틀림 실험 역시 상온에서 30r.p.m.의 속도로 실시하였다.

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

| C | Mn | Si | Cr |
|--------|-------|-------|------|
| 0.9018 | 0.302 | 1.273 | 0.17 |

3. 결과 및 고찰

3.1 인장 실험

교량용 강선의 열처리 온도 및 시간에 따른 인장강도의 변화를 그림 1, 2에 나타내었다.

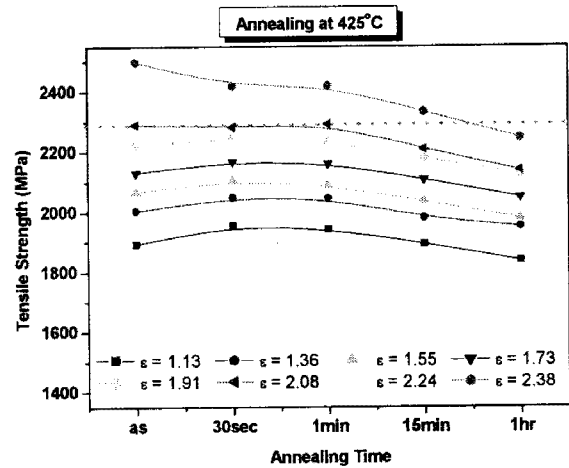


Fig. 1 The variation of tensile strength with annealing time at 425C

그림 1에서 알 수 있듯이 425도 저온에서의 열처리 시 30초, 1분에서는 초기 대비 인장강도의 증가를 보이는 시효경화 현상이 대부분의 시편에서 일어나며 반대로 15분, 1시간으로 열처리 시간이 지속적으로 증가하면 인장강도가 연속적으로 감소하는 시효연화 현상이 지배적으로 나타난다. 더불어 열처리 시간이 증가함에 따른 초기 대비 인장강도의 감소폭은 신선 가공량이 증가할수록 커진다. 이는 일차적으로 신선 가공 공정을 통한 동적 시효로 인하여 야기되는 시멘타이트 분해가 신선 가공량이 증가할수록 더 진행되게 되며 이후 열처리에 따른 시효 연화로 시멘타이트 분해가 더 가속화되었기 때문이다.

열처리 온도를 425도에서 500도로 증가하였을 때의 거동은 다른 양상을 나타냄을 그림 2를 통하여 알 수 있다.

시효경화는 나타나지 않고 열처리 유지 시간이 증가할수록 연속적으로 강도가 떨어지는 시효연화만 나타남을 알 수 있다. 그리고 425도와 같이 초기 대비 인장강도의 감소폭이 신선 가공량이 증가할수록 커지는 것을 알 수 있다.

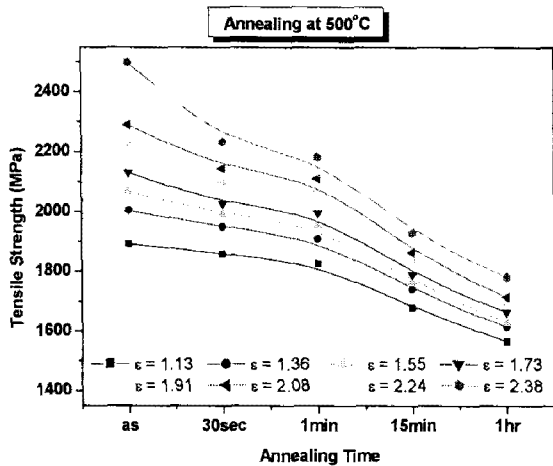


Fig. 2 The variation of tensile strength with annealing time at 500C

그러므로 그림 1과 2를 비교하면 열처리 온도가 높아짐으로써 시효경화 현상은 사라지며 열처리 시간이 증가함에 따라 강도가 감소하는 시효연화 현상만이 지배적으로 나타남을 알 수 있다. 또한 저온에서의 열처리와 마찬가지로 신선 가공량이 증가함에 따라 인장강도의 감소폭이 증가한다.

3.2 비틀림 실험

신선 가공 후 열처리 시 발생하는 시효경화 및 시효 연화와 관련된 시효현상과 델라미네이션 발생간의 상관관계를 알아보기 위하여 열처리 된 강선을 비틀림 실험하였다.

열처리 전의 as-drawn 상태에서 델라미네이션 발생 여부를 표 2에 나타내었다.

Table 2 Occurrence of delamination of drawn wires

| Drawn Strain (ϵ) | Delamination |
|------------------------------|--------------|
| 1.13, 1.36, 1.55 | Not observed |
| 1.73, 1.91, 2.08, 2.24, 2.38 | Observed |

표 2에서 알 수 있듯이 열처리 전 신선의 델라미네이션 발생은 신선 가공량이 증가할수록, 인장강도가 상승할수록 델라미네이션 발생이 증가함을 알 수 있다. 델라미네이션 발생은 신선 가공 중 동적 시효에 의해 확산된 탄소 원자와 페라이트 기지 내의 전위와의 고착으로 인하여 페라이트는 탄소원자를 과포화 고용시키게 되고, 탄소 원자의 과포화 고용으로 인해 국부적으로 경화된 페라이트에 비틀림 시험 중 극심한 전단 응력이 가해지는 것이 원인이라 하였다[10].

이를 토대로 신선 가공량이 증가할수록 동적 시효에 의해 시멘타이트 분해가 가속화되며 경화된 페라이트에 의하여 델라미네이션 발생을 촉진 시켰음을 그림 1, 2와 같이 명확히 설명된다.

신선 가공량이 $\epsilon = 1.13, 2.08$ 인 강선에서 열처리 조건에 따른 인장강도 및 델라미네이션 발생을 그림 3, 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 열처리 시 신선 가공량이 증가할수록 델라미네이션 발생 빈도가 증가함을 뚜렷이 알 수 있다[10]. 하지만 열처리 후 시효경화가 일어나면 델라미네이션이 발생한다고 알려진 기존의 연구 결과와 배치됨을 알 수 있다.

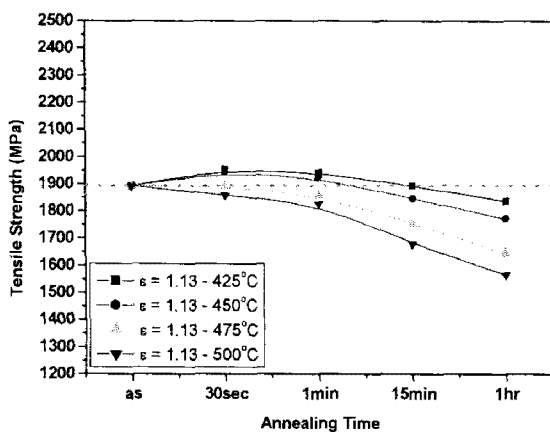


Fig. 3 Occurrence of Delamination in 7.40 mm

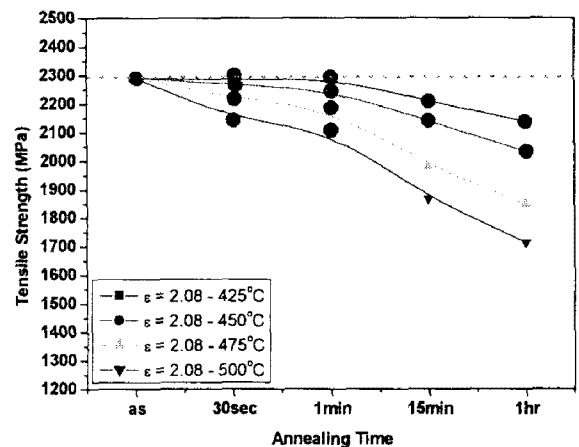


Fig. 4 Occurrence of Delamination in 4.60 mm

또한 열처리 온도 및 유지 시간이 증가하여 시효연화가 나타나면 열처리 전 초기 상태의 강선에서 딜라미네이션이 발생했음에도 열처리 과정을 통하여 딜라미네이션 발생이 사라짐을 알 수 있다. 이는 고온에서 탄소원자의 확산이 더 원활하여 기존에 알려졌던 층상 시멘타이트의 분절과 구상화, 층상 페라이트의 회복 및 재결정 그 이상으로 확산이 진행됨으로써 미세공공의 소멸, 층상 시멘타이트의 분해 및 페라이트로의 확산 등의 이유로 탄소 농도가 균일해짐으로써 이와 같은 현상이 나타난 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 실리콘을 1.273wt% 포함한 냉간 신선한 펄라이트 강선에서 시효 현상과 딜라미네이션 발생간의 상관관계를 연구하였다.

(1) 본 연구에서는 425℃에서 30초, 1분 열처리 시에는 시효경화 현상에 의해 초기에 비하여 인장강도의 증가를 보였으나 열처리 온도 및 유지 시간의 증가 시에는 시효연화 현상에 의해 인장강도가 연속적으로 감소하였다.

(2) 신선 가공량이 증가함으로써 시멘타이트 분해가 활발하여 딜라미네이션 발생이 쉬워지고 후속 열처리 시에도 딜라미네이션 발생 빈도가 증가하였다.

(3) 열처리 시 발생하는 시효경화가 딜라미네이션 발생의 절대적 parameter는 아니며, 또한 딜라미네이션 발생의 임계강도를 추측해 볼 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] T. Tarui, S. Nishida, A. Yoshie, H. Ohba, Y. Asano, and I. Ochiai, Nippon Steel Tech Rep. 80, 44 (1999).
- [2] H. Tashiro, S. Nishida, T. Tarui, S. Ohashi, S. Sasaki, and K. Nakamura, Nippon Steel Tech Rep. 80, 38 (1999).
- [3] J. Languillaume, G. Kapelski, and B. Baudalet, Acta mater., 45, 1201 (1997).
- [4] T. Tarui, T. Takahashi, S. Ohashi and R. Uemori, Iron and Steel Maker, 21, 25 (1994).
- [5] V. N. Gridnev and V. G. Gavrilyuk, Phys Metals, 4, 531 (1982).
- [6] V. N. Gridnev, V. V. Nemoshkalenko, Y. Y. Meshkov, V. G. Gavrilyuk, V. G. Prokopenko, and O. N. Razumov, Phys. Status Solidi (a) 31, 201 (1975).
- [7] F. Danoix, D. Julien, X. Sauvage, and J. Copreaux, Mater. Sci. Eng. A 250, 8 (1998).
- [8] H. G. Read, W. T. Reynolds Jr., K. Hono, and T. Tarui, Scripta materialia 37, 1221 (1997).
- [9] K. Hono, M. Onuma, M. Murayama, S. Nishida, A. Yoshie, and T. Takahashi, Scripta materialia 44, 977 (2001).
- [10] N. Maruyama, T. Tarui, H. Tashiro, Atom probe study on the ductility of drawn pearlitic steels, Scripta Materialia 46, 599.(2002)
- [11] P. Watte, J. V. Humbeeck, E. Aernoudt and I. Lefever, Scripta Materialia 36, 89. (1996)
- [12] Y. Shiota, Y. Tomota, A. Moriai, and T. Kamiyama, Met. Mater. -Int. 11, 371 (2005).
- [13] K. Makii, H. Yaguchi, M. Kaiso, N. Ibaraki, Y. Miyamoto, and Y. Oki, Scripta materialia 37, 1753 (1997).