

신선 가공한 펄라이트 강선의 어닐링시 미세 조직의 변화와 기계적 성질과의 관계

박대범¹, 강의구¹, 남원중[#]

The Relationship between Microstructures and Mechanical Properties in Cold-drawn and Annealed Pearlitic Steel Wire

D. B. Park, U. G. Gang, W. J. Nam

Abstract

The effects of annealing temperature and time on mechanical properties and microstructures were studied in cold drawn pearlitic steel wires containing 0.84wt% Si. Annealing was performed from 200 °C to 450 °C with different time of 30sec, 1min, 15min and 1hr. The increase of tensile strength at low temperature was related with strain ageing. The decrease of tensile strength at high annealing temperature was related with spheroidization of cementite and the occurrence of recovery of the lamellar ferrite in the pearlite. The improvement of ductility was connected with spheroidization of cementite plate in pearlite and recovery process by reduction of high dislocation density at short time annealing temperature of 400 °C.

Key Words : pearlite, wire drawing, ageing, cementite

1. 서론

고탄소 강선은 상업적으로 상용되는 강 중에서 가장 높은 인장강도를 갖는 재료 중 하나이다. 2000MPa 급의 강도를 가지는 강선이 현수교 등 교량용 강선에 사용되고 있으며[1,2], 타이어의 보강제로 쓰이는 타이어 코드에는 3000MPa 이상의 강도를 갖는 강선이 사용되고 있다.

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

아연 도금시 열처리 조건에 따라 강선의 기계적 성질은 변화 하게 되는데, 특히 저온에서 어닐링시 strain ageing hardening 에 의해 강도가 증가하

며 고온에서 어닐링시 시효 연화에 의해 강도가 감소한다[3,4].

시효 경화는 펄라이트 내 층상 시멘타이트의 분해로 인하여 분해된 탄소원자가 펄라이트 내 페라이트로 확산한 뒤 전위와 고착으로 인하여 일어난다. 시효 연화는 어닐링시 펄라이트 내 층상 시멘타이트의 구상화와 층상 페라이트의 회복과 재결정에 의해 일어난다.

교량용 강선의 강도는 초기 오스테나이트에서 펄라이트를 만드는 상변태시 상변태 온도 조절에 의해 층상 간격을 줄임으로써 증가 시킬 수 있으며 또한 아연 도금 시 시효 연화에 의한 강도의 감소를 줄이고 시효 경화에 의해 강도를 증가 시킬 수 있다. 이런 이유로 강도를 증가시키기 위해서는 strain ageing 에 현상을 이해할 필요가 있다 [13].

1. 국민대학교 신소재공학부

교신저자: 국민대학교 신소재공학부

E-mail: wjnam@kookmin.ac.kr

이전 연구에서, 펄라이트 강선을 신선 가공하면 시멘타이트가 분해되는 것을 High resolution electron microscopy (HREM)[8], Tomographic atom probe (TAP) [9], Atom probe field ion microscopy (APFIM) [10,11], Mössbauer spectroscopy [5,6]으로 관찰을 하였다.

시멘타이트 분해는 두 가지 메커니즘으로 설명되고 있는데 한 가지는 시멘타이트 근처의 페라이트에서 페라이트 계면의 전위와 시멘타이트 내의 탄소 원자의 상호 반응으로 설명할 수 있으며[5,6], 다른 한 가지는 가공에 의한 시멘타이트의 계면 자유 에너지의 증가로 인한 시멘타이트의 불안정에 의해 분해되는 것으로 설명된다[7].

두 가지 메커니즘에서 탄소원자는 확산을 하게 되므로 시멘타이트의 분해 속도는 가공 후 어닐링을 하는 동안 빨라 지게 되고 어닐링 온도가 높아질수록 시멘타이트의 분해는 가속된다. 또한 시멘타이트의 구상화속도와 분해는 합금 첨가 원소에 의해 영향을 받는다.

실리콘은 페라이트와 시멘타이트 계면에 존재하여 페라이트 내의 탄소의 용해도를 감소시킴으로써 층상 시멘타이트의 분해를 억제하기 때문에 실리콘의 첨가는 고온에서 아연 도금시 시멘타이트 구상화에 의한 강도의 감소를 억제할 수 있는 것으로 알려져 있다[4,12].

따라서 본 연구에는 어닐링 시간과 온도의 영향이 실리콘이 0.84wt% 함유된 냉간 신선한 강선에 미치는 기계적 성질과 미세조직의 변화의 관계를 연구하였다.

2. 실험 방법

이 실험에서 사용된 강선의 조성은 표 1에 있다. 직경이 11mm로 열간 압연된 강선을 5mm까지 신선 가공을 하였으며 총 단면 감소율은 79%이다. 신선 가공 속도는 동적 시효 현상을 피하기 위해 느린 속도는 3m/min에서 실시하였고 패스당 단면 감소율은 약 20%이다. 어닐링 시간은 30초, 1분, 15분, 1시간이며 어닐링 온도는 200℃에서 450℃까지 실시하였다. 200℃에서 어닐링은 Oil bath를 사용하였고 300℃이상의 어닐링 온도에서는 Tin bath를 사용하였다.

인장실험은 상온에서 Cross-head speed를 2mm/min로 실시하였으며 초기 가공 경화율은 $8.3 \times 10^{-4}/s$ 이다. 어닐링 후 미세조직의 변화는 투

과 전자 현미경(TEM)으로 관찰하였다. TEM 시편은 시편의 신선 가공의 길이 방향으로 절단 후 100um로 폴리싱한 후 상온에서 전해 연마를 하였으며 연마액은 Acetic acid 90%와 Perchloric acid 10%를 혼합하여 사용하였다.

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

C	Mn	Si	S	P
0.86	0.75	0.84	0.014	0.0046

3. 결과 및 고찰

어닐링 온도와 시간에 따른 항복 및 인장강도는 표 2에 나타내었다.

Table.2 Tensile strength and 0.2% Yield strength with annealing temperature after 79% reduction in cold drawn pearlitic steel wires
(MPa)

		30sec	1min	15min	1hr
200℃	TS	1926	1925	2057	2033
	YS	1782	1800	2000	1982
300℃	TS	2017	2006	1975	1960
	YS	1911	1888	1825	1794
400℃	TS	1957	1941	1884	1848
	YS	1735	1708	1613	1570
450℃	TS	1876	1886	1740	1646
	YS	1611	1592	1465	1394

총 79% 냉간 신선 가공 후, 어닐링을 하기 전 인장강도는 1941MPa이며 항복강도는 1804MPa이다. 30초, 1분 동안 어닐링을 할 때에는 300℃에서 인장 강도의 증가를 보인 후 어닐링 온도가 상승함에 따라 강도가 감소하고 있다. 15분, 1시간 어닐링시에는 200℃에서 최대 인장강도를 보인 후 어닐링 온도가 상승함에 따라 연속적으로 인장강도의 감소를 보인다.

장시간 어닐링 시에는 낮은 온도에서도 강도를 증가시킬 수 있으나 단시간 어닐링 시에는 높은 온도에서도 강도의 증가를 볼 수 있다는 것을 보여 주고 있다.

열처리 온도와 시간에 따른 초기 시편과 어닐링한 시편의 인장강도 차이를 그림 1에 나타내었

다. 200°C에서 30 초, 1 분 열처리 할 때 초기 강도에 비해 큰 변화가 없지만 15 분, 1 시간 어닐링 할 때에는 100MPa 이상의 인장강도의 증가를 보이고 있으며 300°C에서 30 초, 1 분 어닐링 시에는 50MPa 이상의 인장강도의 증가를 보이고 있다. 이 현상은 strain ageing hardening 과 관계가 있다. 신선 가공에 의해 불안정한 탄소원자들이 어닐링을 하는 동안 쉽게 분해되어 층상 페라이트 안으로 확산한 후 Cottrell 분위기를 형성함으로써 전위와 고착하여 강도가 증가 한다[13].

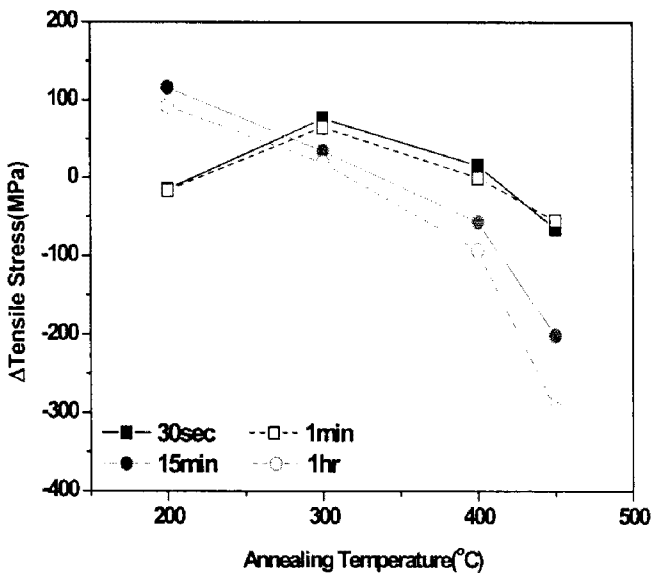


Fig. 1 Variation of Tensile strength difference between as-drawn and annealed wires with annealing temperature after 79% reduction in cold drawn pearlitic steel wires, containing, 0.84wt% Si.

시효 현상에 의한 강화 기구와 연화 기구가 균형을 이루어 300°C에서 15 분, 1 시간 어닐링 할 때와 400°C에서 30 초, 1 분 어닐링 할 때 초기 시편과 인장강도의 변화가 크지 않다. 그것은 300°C에서 15 분, 1 시간 어닐링 시간에 비교하여 어닐링 온도가 증가함에 따라 짧은 어닐링 시간에도 펄라이트 내 층상 시멘타이트의 구상화와 페라이트의 회복에 의한 시효 연화 효과 때문이다.

그림 2 는 어닐링 온도에 따른 연신율을 나타내고 있다. 총 79% 냉간 신선한 강선의 초기 연신율은 3%이다. 200°C에서 각 시간에 대한 어닐링은 연신율에 영향을 보이지 않았다.

200°C 외에는 어닐링 시간과 온도가 증가할수록 연신율의 증가를 그림 2 에서 보이고 있다. 그러

나 어닐링 온도의 증가에 따른 연신율의 증가가 어닐링 시간의 증가에 따른 연신율의 증가보다 더욱 급격하게 증가하는 것을 보아 연신율은 어닐링 시간보다는 온도에 의해 크게 영향을 받는 것을 알 수가 있다.

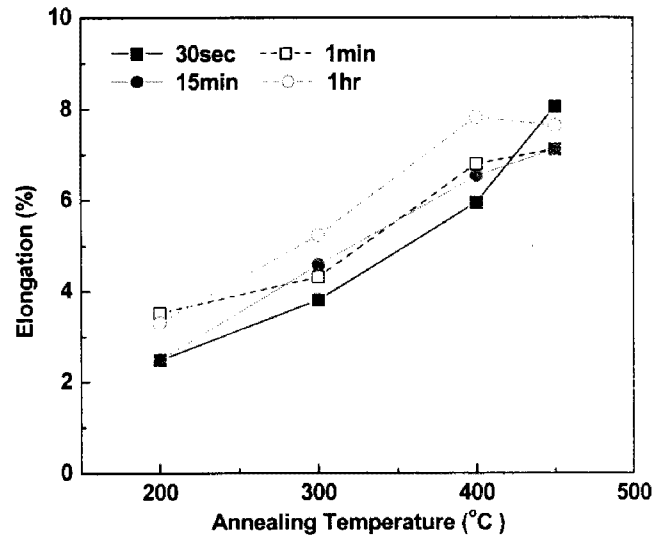


Fig. 2 Variation of total elongation with annealing temperature after 79% reduction in cold drawn pearlitic steel wires, containing, 0.84wt% Si.

400°C 이상 온도에서는 모든 시간, 300°C에서는 1 시간에서 6% 이상의 연신율을 보이고 있으며 특히 400°C 이상 온도에서 1 시간 어닐링 할 때에는 8% 이상의 높은 연신율을 보이고 있다.

어닐링 온도와 시간의 증가에 따른 연신율의 증가는 펄라이트 내 시멘타이트의 구상화와 페라이트의 회복과 밀접한 관련이 있다. 모든 온도 범위에서 1 시간 동안 어닐링을 할 때 연신율은 어닐링 온도가 증가함에 따라 연속적으로 증가하지만 400°C에 이르면 8%의 연신율로 450°C로 어닐링 온도가 증가해도 연신율이 8%로 포화 되는 것을 볼 수 있다.

초기 시편은 1941MPa의 인장강도에 3%의 연신율을 가진다. 400°C에서 30 초, 1 분 어닐링시 강도는 초기 강도와 거의 비슷하고 연신율이 6%로 연성의 확보에 의해 교량용 강선의 아연 도금시 강도의 손실을 억제하고 연성을 확보 할 수 있는 어닐링 조건이라 할 수 있다.

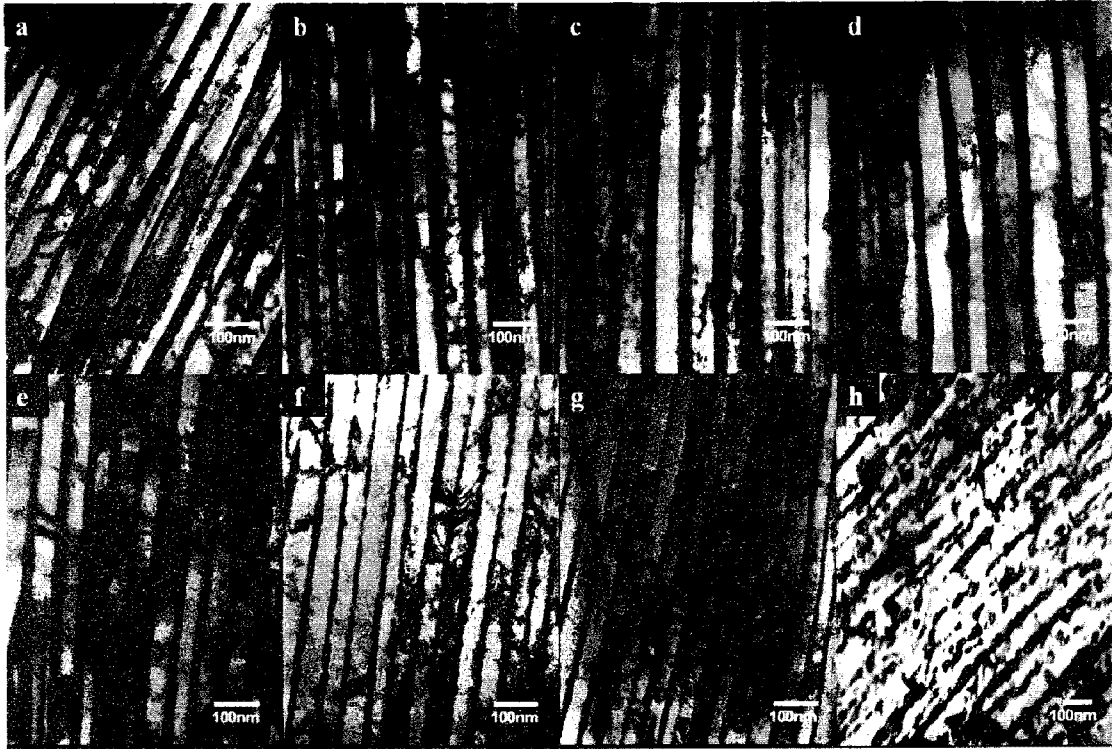


Fig. 3 TEM micrographs of longitudinal cross-section of cold drawn and annealed pearlitic steel wires, containing 0.84wt%Si: (a)As-drawn, (b)Annealed at 200 °C for 30sec, (c)Annealed at 300 °C for 30sec, (d)Annealed at 300 °C for 1hr, (e)Annealed at 400 °C for 30sec, (f)Annealed at 400 °C for 1hr, (g)Annealed at 450 °C for 30sec, (h)Annealed at 450 °C for 1hr

각 어닐링 조건에 따른 미세조직 사진은 그림 3에 있다. 그림 3-(a)에 나타난 초기 미세조직 사진은 신선 가공에 의한 높은 전위 밀도와 얇은 시멘타이트를 볼 수가 있으며, 그림 3-(b)는 200 °C에서 30 초 어닐링한 강선의 미세조직 사진으로 초기 미세조직 사진과 큰 차이점을 보이지 않는다. 그림 3-(c)는 시효 경화에 의해 초기 시편보다 강도가 증가한 300 °C에서 30 초 어닐링한 강선으로 회복을 보임으로서 연신율의 증가를 설명할 수 있다. 그림 3-(d)는 300 °C에서 1 시간 어닐링한 미세조직 사진으로 어닐링을 하는 동안 30 초보다 더 많은 펄라이트 내 층상 페라이트의 회복으로 연신율이 5%에 가까이 증가함을 나타낸다.

그림 3-(e)는 인장강도가 초기시편과 비슷하고 연신율은 약 6%를 보이는 400 °C에서 30 초간 어닐링한 강선의 미세조직 사진으로 층상 시멘타이트의 구상화의 징후가 나타나고 있으며 그림 3-(f)는 400 °C에서 1 시간 어닐링한 강선의 미세조직 사진으로 시멘타이트의 일부분이 조각나면서 구상화의 초기단계를 보이고 있으며 인장강도는

1848MPa 로 초기시편에 비해 약 100MPa 의 강도의 감소를 보이나 페라이트의 회복과 시멘타이트의 구상화로 인해 8%의 높은 연신율을 보이고 있다. 그림 3-(g)는 450 °C에서 30 초 어닐링한 미세조직 사진으로 시멘타이트가 부분적으로 끊어지는 구상화 단계의 시작을 보이고 있고 구상화의 시작으로 인해 강도의 감소와 연신율을 증가를 보이고 있다. 그림 3-(h)는 450 °C에서 1 시간 어닐링한 강선의 미세조직 사진으로 시멘타이트의 구상화가 상당히 진행된 것을 볼 수 있다. 시멘타이트의 구상화로 인해 어닐링 조건 중 가장 낮은 인장강도와 가장 높은 연신율을 보이고 있다.

그림 3-(f),(g),(h)에서 연신율은 6%이상으로, 펄라이트 내 층상 시멘타이트의 구상화가 페라이트의 회복 보다 연성 확보에 더 효과적인 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 실리콘이 0.84wt% 함유된 냉간

신선한 펄라이트 강선에서 어닐링 시간과 온도의 영향이 기계적 성질과 미세조직의 변화의 관계를 연구하였다.

저온에서 어닐링시 시효 경화에 의하여 인장강도가 증가 하였고, 고온에서는 펄라이트 내 층상 시멘타이트의 구상화와 페라이트의 회복으로 인해 강도가 감소하고 연신율이 증가함을 나타내었다.

냉간 신선 공정을 거친 강선의 기계적 성질을 향상시키기 위한 어닐링 조건은 400℃에서 1 분, 15 분과 450℃에서 1 분 미만의 어닐링 처리이며, 이 어닐링 조건은 교량용 강선의 고온에서 야연도급시 강도의 감소량을 줄이고 연성을 확보 할 수 있는 어닐링 조건이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] T. Tarui, S. Nishida, A. Yoshie, H. Ohba, Y. Asano, I. Ochiai, Nippon Steel Tech Rep., Vol. 80 (1999), pp. 44
- [2] H. Tashiro, S. Nishida, T. Tarui, S. Ohashi, S. Sasaki, K. Nakamura, Nippon Steel Tech Rep., Vol. 80 (1999), pp. 38.
- [3] J. Languillaume, G. Kapelski and B. Baudelet: Materials Letters Vol. 33 (1997), pp. 241.
- [4] T. Tarui, T. Takahashi, S. Ohashi and R. Uemori, Iron and Steel Maker, Vol. 21 (1994), pp. 25.
- [5] V.N. Gridnev, V.G. Gavrilyuk, Phys Metals, Vol. 4 (1982), pp. 531.
- [6] V.N. Gridnev, V.V. Nemoshkalenko, Y.Y. Meshkov, V.G. Gavrilyuk, V.G. Prokopenko and O.N. Razumov, Phys. Status Solidi (a), Vol. 31 (1975), pp. 201.
- [7] J. Languillaume, G. Kapelski and B. Baudelet, Acta Mater., Vol. 45 (1997), pp. 1201.
- [8] J. Languillaume, G. Kapelski and B. Baudelet, Acta Mater., Vol. 45 (1997), pp. 1201.
- [9] F. Danoix, D. Julien, X. Sauvage and J. Copreaux, Mater. Sci. & Eng., Vol. A250 (1998), pp. 8.
- [10] H. G. Read, W. T. Reynolds Jr., K. Hono and T. Tarui, Scripta Materialia, Vol. 37 (1997), pp. 1221.
- [11]] K. Hono, M. Onuma, M. Murayama, S. Nishida, A. Yoshie and T. Takahashi, Scripta Materialia, Vol. 44 (2001), pp. 977.
- [12] K. Makii, H. Yaguchi, M. Kaiso, N. Ibaraki, Y. Miyamoto and Y. Oki, Scripta Materialia, Vol. 37 (1997), pp. 1753.
- [13] T. Tarui, T. Takahashi, S. Ohashi and R. Uemori, Iron and Steelmaker, Vol.21, No.9(1994), pp25.