

탄소강의 신선 가공성에 미치는 미세조직의 영향

배 철민

포항제철(주) 기술연구소 후판연구 그룹

서론

신선 가공에 의해 제조되는 강선은 현수교, 엘리베이터 리프트 등에 사용되는 와이어 로프, 초 고 전압 전선의 보강용 심선, 레디얼 타이어 및 벨트 코드의 보강재, 각 종 스프링 등 산업계 및 일상 생활에서 쉽게 접할 수 있는 매우 넓은 범위에서 사용되고 있다. 이러한 강선은 대개 5.5 ~ 13mmφ 선경의 0.4%C ~ 0.9%C 탄소강 선재를 신선 가공 한 후 최종 제품의 특성에 따라 적합한 열처리 및 도금을 하여 제조된다. 이때 연성을 확보하기 위하여 신선 도중 1~2회의 열처리를 통하여 미세조직을 제어한다.

이러한 강선 제조 분야의 발전 방향은 스케일 제거, 윤활제 코팅, 열처리 공정 등의 생략, 연속화와 고 부가가치를 증대시키기 위한 제품의 고강도화로 크게 분류할 수 있다. 제품의 고강도화는 소재의 고강도화와 신선 가공량의 증대에 의하여 가능하다. 공정의 생략은 현재 사용하는 제품의 물성을 동일하게 확보하면서 생산공정의 일부를 생략하는 개념으로 이 두 방법 공히 신선 도중 단선이 발생하지 않아야 하고 최종 제품의 형태로 성형할 때 품질의 문제가 발생하지 않아야 하므로 소재 및 신선 선에서의 연성의 확보가 매우 중요하다. 강선의 제조시 연성에 미치는 인자는 크게 소재의 미세조직, 편석 및 개재물 분포 등 소재적인 요인과 윤활 조건, 단면 감소율, 다이스 형상 신선 속도 등 가공 공정 요인이 동시에 영향을 미칠 수 있으나 여기에서는 소재를 공급하는 각

제철소에서 입장에서 가장 중요한 미세조직과 신선 가공성의 상관성에 관하여 논하고자 한다.

신선 가공에 따른 미세조직 변화

BCC 결정구조를 갖는 소재를 신선 가공하면 <110> 방향으로 집합 조직이 형성되며[1~4] 이러한 과정에서 미세조직 변한다. 그림 1은 공석강의 신선 가공량에 따른 강선의 단면부(transverse section) 미세조직으로 신선 가공에 의하여 wavy 또는 intercurling되는 형태의 조직이 형성되는 것을 보여주고 있다. 이는 BCC 결정 구조의 슬립 방향과 집합 조직 방향을 고려하면, 축 대칭 변형(axi-symmetric deformation)보다는 plane strain조건에서 변형이 에너지적으로 쉽게 변형될 수 있기 때문이다[4]. 또한 변형량이 증가함에 따라 인접 콜로니 간의 변형 compatability를 유지하기 위해 이러한 경향이 현저하다.

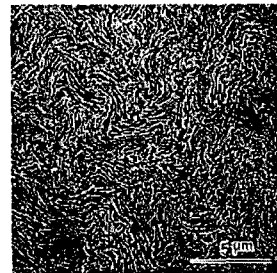


Fig. 1. Microstructure of a transverse section of drawn wires of 0.8%C($\epsilon=3.21$)

한편 신선 가공에 따른 미세조직

변화를 사진 2와 같이 선 방향(longitudinal section)에서 관찰하면, 신선 방향으로의 라메라 재 배열 거동이 쉽게 관찰된다. 변형 전에 불규칙하게 배열된 펄라이트가 변형량 증가에 따라 펄라이트 층간간격이 미세해지면서 신선 방향으로 점차적으로 재배열된다. 이러한 재 배열은 $\epsilon=0.5$ 의 변형량에서 관찰이 가능하며[5] $\epsilon=1.2$ 의 변형량에서 완료된다고 보고[6]가 있으나 실제 관찰하면 보고된 결과보다 많은 변형량이 필요하여 $\epsilon=1.5\sim 2.0$ 에서 거의 완료되고 있다.

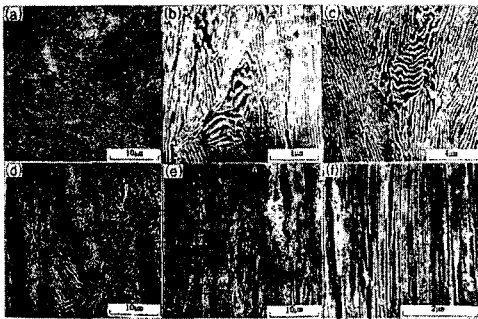


Fig. 2. Variation of microstructures in as received and after drawing.

(a) as received (b) $\epsilon=0.6$ (c) $\epsilon=0.92$ (d) $\epsilon=1.16$ (e) $\epsilon=1.5$ (f) $\epsilon=2.92$

균열 발생 거동

신선 가공용 소재로 널리 사용되는 0.4%C 이상의 탄소강의 미세조직은 페라이트 + 펄라이트, 또는 펄라이트로 구성되며 이러한 미세조직은 소재의 탄소량 뿐 아니라 변태 과정에서 분률 및 형상이 변화한다. 이때 미세조직 변화에 따른 신선 도중 균열 발생 위치를 살펴보면 그림 3과 같다. 페라이트+ 펄라이트 조직에서는 균열이 페라이트와 펄라이트 결정립계 및 페라이트 결정립계에 단독으로 존재하는 결정립계 세멘타이트에서 우선적으로 발생한다. 이는 신선 가공에 의한 변형이 상대적으로 연한 페라이트에 집중되어 펄라이트 또는 결정립계 세멘타이트 계면에 응력이 집중되기 때문이다. 한편 페라이트가 잔존하지 않는 공석강에서는 세멘타이트 파괴에 의하여 균열이 발생하며 과공석강에서 변태 과정에서 우선적으로 생성되는 초석 세멘타이트가 존재할 경우 세멘타이트의 소성능 부족에 의하여 균열이 발생하게 된다. 따라서 신선 가공용으로 사용되는 소재의 미세조직은 초석 페라이트 또는 초석 세멘타이트가 존재하지 않는 펄라이트 상이 가장 유리하다고 생각할 수 있다.

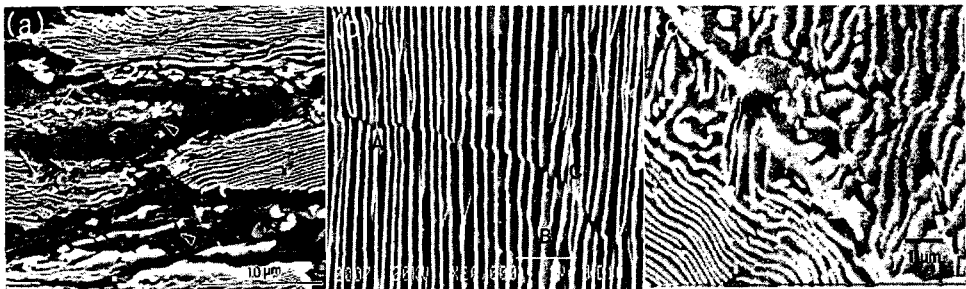


Fig. 3. Void initiation sites during drawing in various steels.

(a) hypo-eutectoid steel (b) eutectoid steel (c) hyper-eutectoid steel

간격이 펄라이트 변형에 미치는 영향을 보여

펄라이트 강의 신선성에 미치는 인자

그림 4는 신선 가공시 펄라이트 층간

추고 있다. 신선 가공 도중 형성되는 Slip

band는 펄라이트 층간간격에 관계없이 신선 방향과 일치한 콜로니에 국한되어 형성되고 방향이 다른 콜로니로 전파되지 않았다. 그러나 펄라이트 층간간격이 조대한 강에서는 slip band 폭이 넓고 집중적인 변형이 발생하였으나 펄라이트 층간간격이 미세한 강은 변형량이 많음에도 불구하고 slip band가 균질하게 분포되고 있고 있어 조대한 펄라이트에서 세멘타이트로의 응력 집중이 현저하였다. 이러한 slip band 형성 거동 차이는 세멘타이트 파괴 기구를 변화시켜 조대한 펄라이트에서는 세멘타이트가 intense한 slip band에서 shear에 의하여 균열이 발생하고 있으나(사진 5(a)의 ▲) 펄

라이트 층간간격이 미세한 경우 세멘타이트가 necking에 의하여 분절되고 있어 세멘타이트가 소성 변형을 하고 있음을 보여주고 있다(사진 5(b)). 이러한 세멘타이트 necking에 의한 void는 조대한 세멘타이트에서 생성된 void에 비하여 현저히 미세할 것이며 또한 본 연구에서는 관찰하지 못하였지만 Porter[7]등이 언급한 바와 같이 원주 방향에서 중심부 방향으로 부과되는 정수압에 의하여 void의 re-healing이 쉬울 것으로 생각되어 미세한 펄라이트가 신선도중 균열의 발생 및 전파가 어려울 것으로 생각된다.



Fig. 4. Microstructures showing shear bands
(a) interlamellar spacing = 0.222 μm , $\epsilon=0.27$
(b) interlamellar spacing = 0.175 μm , $\epsilon=0.88$

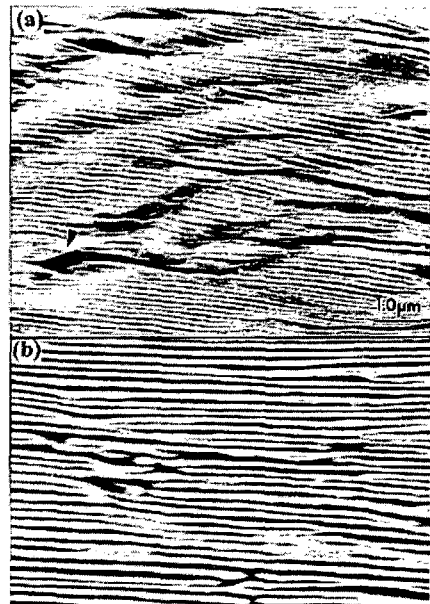


Fig. 5. Fracture of cementite aligned to drawing during drawing.
(a) coarse pearlite (b) fine pearlite

그림 6은 공석강에서 펄라이트 층간간격 변화에 따른 강선의 연성 변화를 보이고 있다. 약 $\epsilon=1.5\sim 2.0$ 까지는 변형량이 증가함에 따라 연성이 증가한 후 이후 계속

되는 변형에 따라 점차적으로 감소하는 경향을 펄라이트 층간간격에 관계없이 보이고 있다. 변형이 진행되면 연성이 감소하는 일반적 현상과는 달리 펄라이트 강에서 연성이 증가하는 현상은 신선 가공된 펄라

이트 강의 고유 특성 중의 하나로, 이는 소재 상태에서는 불규칙하게 배열되어 있던 플라이트가 신선 방향으로의 재 배열하여 fiber 형태를 나타내고 동시에 플라이트 층간간격이 미세하여지지 때문에 알려져 있다[8]. 따라서 $\epsilon=1.5\sim 2.0$ 에서 최대 연성을 보이는 것은 신선 방향으로 세멘타이트 라메라의 재 배열이 완료되었음을 의미하며 이후의 연성 감소는 재 배열된 라메라의 심한 변형과 세멘타이트 파괴에 기인하게 된다. 따라서 변형 초기에는 플라이트 층간간격이 미세할수록 우수한 연성을 보이는 것은 결정립 미세화에 의한 연성의 증가와 세멘타이트 소성 변형능이 향상되며 일단 세멘타이트에서 균열이 발생하더라도 두께가 얇아 조대한 플라이트에 비해 그 크기가 매우 작기 때문에 생각된다.

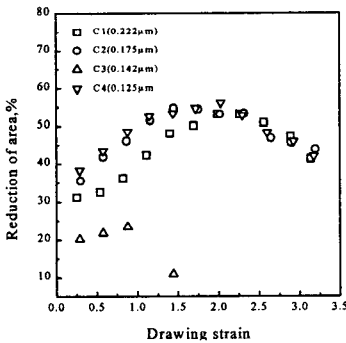


Fig. 6. Effect of interlamellar spacing on the variation of ductility with drawing strain.

그림 7은 신선 가공 도중 선의 연성에 미치는 오스테나이트 결정립도의 영향을 보고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 오스테나이트 결정립도가 미세하면 강선의 연성이 우수함을 보여주고 있으며 이는 플라이트 노들 크기가 미세하여 소재의 연성이 우수함과 동시에 신선 도중 신선 방향으로의 라메라 재배열이 쉽기 때문이라고 설명되고 있다[9].

한편 플라이트 내의 탄소량이 변하면

그림 8에서 보는 바와 같이 변형에 따른 연성 거동은 유사하나, 탄소량이 감소할수록 플라이트 층간간격이 조대함에도 불구하고 실험된 변형량에서 연성이 우수하여 $\epsilon=3.5$ 에의 0.52%C강 연성이 $\epsilon=2.5$ 에서의 0.82%C강의 연성과 동등하였다.

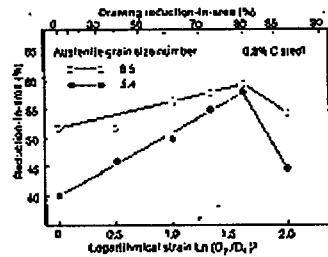


Fig. 7. Effect of austenitic grain size on the mechanical properties of drawn wire.

이는 플라이트 내의 탄소량이 감소함에 따라 균열의 발생 위치로 작용하는 세멘타이트 분율이 감소하고 또한 두께도 작아져 세멘타이트의 소성능이 향상되기 때문이다. 따라서 세멘타이트 분율이 감소한 플라이트 조직이 연성 측면에서 보면 신선 가공에 가장 적합한 조직이라고 생각할 수 있다.

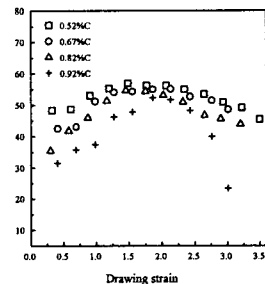


Fig. 8. The variation of ductility with drawing strain in pearlitic steels with various carbon contents.

비틀림 특성

단면 감소률에 따른 연성의 평가는 소재의 신선량이 클 경우 측정 오차가 커져 정확한 연성 평가가 어렵고 또한 선의 사용 도중 비틀림 응력이 부과되는 경우가 많아 비틀림시 연성의 확보가 강선의 매우 중요한 품질 특성 중의 하나가 된다. 강선에 비틀림 응력이 부과되면 정상적인 소재의 경우 그림 9의 steel A와 같이 선 방향에 직각 방향으로 파단이 발생하나 연성이 부적하면 그림 9의 steel C3와 같이 선 방향으로 소재가 분리되는 현상이 나타나며 이를 delamination이라 한다. 이러한 delamination은 강선의 변형량을 증가시키는데 가장 큰 장애물로 작용한다.

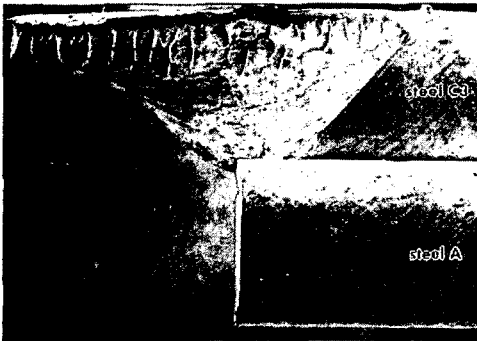


Fig.9. Appearance of drawn wire after torsion test.

그림 10은 탄소량이 다른 소재의 미세조직에 따른 delamination의 발생 거동을 조사하여 나타낸 그림이다. 이때 숫자는 신선된 강선의 선경을 의미한다. 페라이트가 잔존하는 경우(open mark), delamination이 발생하는 강도와 선경이 모두 감소하고 있으며 펄라이트 단상으로 미세조직을 제어한 경우(solid mark) 본 시험 조건에서는 강선의 화학 성분에 관계없이 인장강도가 약 $250 \pm 10 \text{ kg/mm}^2$

까지는 delamination이 발생하지 않았다. 이는 위의 단면 감소률의 경향과 마찬가지로 강선의 강도와 delamination의 발생 거동도 밀접한 상관성을 갖고 있음을 보여주고 있으며 이는 240- 260 kg/mm^2 의 大橋章一 결과[10] 및 "**"로 표시한 KOBE 제철소의 0.8%C강을 410m/min으로 실 생산된 강선의 250-260 kg/mm^2 의 범위와 잘 일치하고 있다. 한편 그림에서 보면 탄소량이 적은 펄라이트 강은 delamination이 고탄소강에 비하여 훨씬 적은 선경에서 발생되고 있음을 알 수 있는데 이는 임의의 선경에서 동일한 강도를 얻을 경우 저 탄소 펄라이트 강도의 경우 신선 도중 실시하는 열처리를 생략할 수 있음을 의미한다.

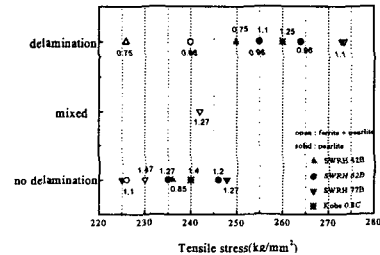


Fig. 10. Dependency of torsional behavior on tensile stress of wires. .

요약

신선 가공용 소재로 사용되는 0.4%C이상의 탄소강의 신선성은 미세조직 변화에 크게 영향을 받아 제2상으로 존재하는 초석 페라이트 또는 세멘타이트의 형성을 적극 억제하여야 한다. 펄라이트 조직에서는 오스테나이트 결정립 크기 및 세멘타이트 두께를 미세하게 하는 것이 신선성 향상에 유리하며 특히 야공석강에서 펄라이트 단상으로 미세조직을 제어하면 매우

우수한 신선성의 향상을 얻을 수 있어
신선 도중 실시하는 중간 열처리를 생략할
수 있다.

참고문헌

1. G. Lanford and M. Cohen : Trans ASM, 62,
(1969) p623
2. J. F. Peck and D. A. Thomas : Trans. TMS-
AIME, 221, (1961)p1240
3. E. S. Meieran and D. A. Thomas : Trans.
TMS-
AIME, 233, (1965)p937
4. W. F. Hosford , Jr. : Trans. TMS-AIME, 230,
(1964)p12
5. G. Langford : Met. Trans., 1A, (1970)p465
6. V. K. Chandhok, A. Kasak and J. P. Hirth :
Trans. ASM., 59, (1966)p288
7. D. A. Porter and K. E. Eastering : Acta Met.,
26, (1978)p1405
8. E. Aernoudt and J. G. Sevillano : JISI, Oct.,
(1973)p716
9. T. Nishimura , T. Fujiwara, and Y. Tanaka :
Wire J., Oct., (1980) p64
10. 大橋章一 : CAMP-ISIJ, 6, (1993)p1686