

펄라이트 강의 신선가공성에 영향 미치는 인자

남원종* · 배철민**

(국민대학교 신소재공학부* · 포항제철 기술연구소**)

Factors on the Drawability in Pearlitic Steels

W. J. Nam and C. M. Bae

1. 서 론

최근 구조용 재료로 사용되고 있는 펄라이트 미세조직을 갖는 신선용 철강재료에 있어서, 친환경 재료의 개발 및 고강도화에 의한 경량화 등 산업환경의 변화에 따른 요구에 부응하기 위한 노력이 진행되고 있다. 특히 고강도화는 자동차용 steel cord 및 비드 와이어, 건축용 강선 등 분야에서 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 펄라이트 미세조직을 갖는 철강재료의 고강도화를 이루는 방법으로는, 아래의 Embury-Fisher의 강도식에서 표현된 바와 같이,

$$\sigma = \sigma_0 + \{k_y / (2S_0)^{1/2}\} \exp(\epsilon/4)$$

재료의 초기 강도를 증가시키거나, 초기 층상간격의 미세화 또는 Hall-Petch parameter로 표현되는 가공 경화율의 증가 및 신선가공 진변형량을 증가시키는 3가지 방법이 있다. 초기 강도를 증가시키는 방법으로는 탄소함량을 증가시키는 방법이 가장 많이 사용되고 있으며 증가된 탄소 함량에 따른 펄라이트 내의 세멘타이트 분율의 증가로 저비용으로 강도가 증가하는 장점이 있으나 탄소량의 증가에 따른 소재 내의 중심편석의 심화 및 세멘타이트 분율 증가에 의한 연성의 감소 문제점이 발생하여 이를 극복하기 위한 기술 개발이 이루어지고 있다. 한편 펄라이트의 초기 층상간격의 미세화 및 가공경화율의 증가를 위한 방법이 연구되고 있으나, 현재 사용되고 있는 재료의 펄라이트 층상간격은 제조설비의 능력 범위

에서 최소한의 층상간격을 제조할 수 있는 조건에서 생산이 이루어지고 있어 제조설비의 개선이 이루어지지 않는 한 용이한 방법이 아니며, 다른 방법인 합금원소 첨가에 의해 층상간격의 미세화를 이루려는 노력이 진행되고 있다. 한편 합금원소를 많이 첨가하는 경우 연속 냉각곡선이 장시간으로 이동하게 되어 미세한 층상간격을 얻기에 유리한 점도 있으나 과도한 첨가의 경우 선제 상태에서 신선가공에 치명적인 결함으로 작용하는 저온조직, 즉 베이나이트나 마르텐사이트 발생 가능성이 높아지므로 첨가되는 합금원소 양에 제약이 따른다. 한편 가공경화율의 경우, 일반적으로 탄화물을 형성하는 합금원소는 펄라이트 내의 세멘타이트의 강도를 높여 가공경화율을 높이는 역할을 하나 세멘타이트 연성에 악 영향을 미칠 수 있으므로 첨가되는 합금원소의 종류와 함량의 선택에 많은 주의가 필요하다. 따라서, 펄라이트 강의 강도를 높이는 방법 중 부작용이 가장 작은 방법으로 신선가공성의 향상에 의한 진변형량을 증가시키는 방법을 들 수 있다. 이 방법은 가공량의 증가에 따라 강도가 증가하는 가공경화를 이용한 방법으로, 이상적인 방법이나 신선가공량을 늘이기 위한 제조방법 및 재료의 미세조직 개선에 관한 방법의 개발에 어려움이 많아 개발 속도가 느린 단점이 있다. 그러나, 철강재료의 신선가공성의 개선 방법은 아공석강이나 과공석강과 같은 펄라이트를 함유하는 모든 강에 적용할 수 있으므로 그 파급효과가 크다 할 수 있다.

2. 펄라이트 강의 신선시 미세조직 변화

펄라이트 강의 신선시 발생하는 단선의 발생 원인을 분석하면, 신선가공성을 향상시키기 위한 대책을 수립할 수 있다. 따라서 본 절에서는 신선가공시 단선 발생 원인과 미세조직 변화 거동을 검토하고자 한다.

다른 미세조직을 갖는 강에서와 유사하게 신선용 재료에 있어서도, 비금속 개재물의 존재는 소재의 신선가공성을 악화시키는 1차적인 원인으로 작용하므로 강의 청정도를 높이는 것이 필요하다. Fig. 1에 비금속 개재물에서 생성된 크랙의 형상을 보여준다. 한편 탄소함량이 공석조성인 0.8% 보다 많은 경우, 오스테나이트로부터 냉각속도가 느려지면 상태도에서 알 수 있듯이 초석 세멘타이트가 발생한다. 세멘타이트는 화합물로서 강도가 높고 연성이 매우 작은 상으로 그 두께가 어느 기준 이상이되면 소성변형이 일어나지 않고 가공 중 크랙의 발생기점으로 작용하여 파단이 발생하게 된다. Fig. 1-(b)에 초석 세멘타이트에서 발생한 크랙의 형상을 보여준다.

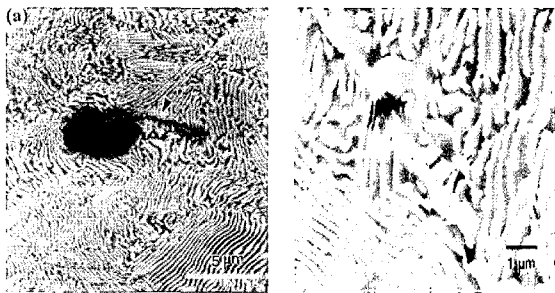


Fig. 1 Crack initiation at (a) non-metallic inclusion and (b) pro-eutectoid cementite

한편 Fig. 1의 크랙 생성 장소 이외에 철강재료의 미세조직에 따른 신선가공시 크랙 발생이 용이한 장소를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 알 수 있듯이, 페라이트로 구성된 순철 및 저탄소강의 경우에는 페라이트 결정립계에 존재하는 세멘타이트 입자와 결정립계가 신선가공량이 증가하는 경우 크랙의 생성 장소로 작용한다. 한편 페라이트와 펄라이트로 구성된 중탄소강의 경우, 페라이트 결정립계의 세멘타이트 입자 > 페라이트와 펄라이트 계면 > 조대한 펄라이트 > 펄라이트 내의

Table 1 Crack initiation sites during wire drawing in ferritic steels

Phase	Sites
ferrite	cementite film at gb, grain boundary
Ferrite + pearlite	gb cementite > ferrite/pearlite interface > pearlite nodule > fracture of cementite in pearlite
pearlite	fracture of cementite

세멘타이트의 순서로 크랙의 생성이 용이해진다. 즉 페라이트 결정립계의 세멘타이트 입자가 없는 경우 신선 가공시 가공량의 증가에 따라 크랙이 생성되기 쉬운 장소가 페라이트와 펄라이트의 계면이 된다. 한편 펄라이트 미세조직으로 구성된 공석강의 경우, 페라이트가 존재할 가능성이 작으므로 펄라이트 내의 세멘타이트의 파단이 신선가공량을 결정짓는 요소가 된다. 따라서, 탄소 함량이 많은 재료인 경우, 펄라이트 이외의 다른 미세조직인 페라이트나 초석 세멘타이트와 같은 다른 미세조직이 존재하지 않는 경우의 신선가공 변형량이 증가할 수 있다.

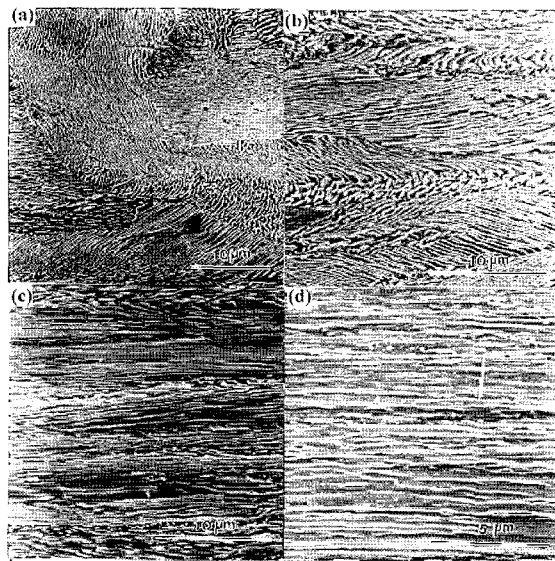


Fig. 2 Microstructures of drawn pearlitic steel wires

최근 대부분의 고강도 재료가 0.8% 이상의 탄소함량을 갖는 펄라이트로 구성된 미세조직을 갖

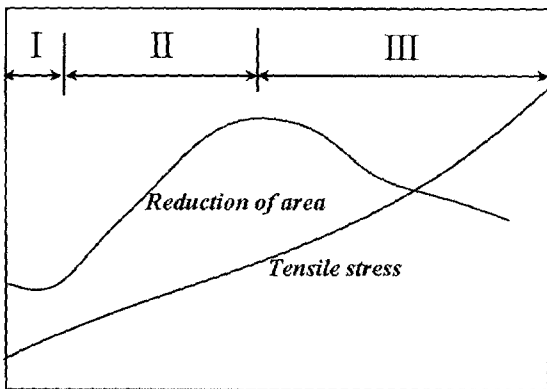
는 경우가 대부분이므로, 펄라이트 강의 신선가공 시 미세조직 변화를 통하여 세멘타이트의 파단을 방지하는 방안을 검토해볼 필요가 있다. Fig. 2에 펄라이트 강의 신선시 미세조직 변화를 나타내었다. 초기 random하게 배열되어 있는 펄라이트 콜로니(colony) 들이 신선가공 방향으로 신선가공량의 증가에 따라 배열되기 시작하여 높은 변형량에 도달하게 되면 펄라이트 내의 모든 세멘타이트가 신선가공 방향으로 길게 배열된 섬유상 조직을 갖게 되어, 초기에 다른 방향으로 배열되었던 펄라이트 콜로니 사이의 구분 조차 어렵게 된다.

이와 같은 미세조직 변화에 따라, 펄라이트 내의 세멘타이트는 소성 변형을 받게 되어 세멘타이트의 두께가 신선가공량의 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. (Fig. 3)

신선 가공된 강선의 기계적 성질 또한 신선가공 중 발생한 미세조직 변화와 밀접한 관계를 갖는다.



Fig. 3 Necking of cementite in drawn pearlitic steels



Drawing strain

Fig. 4 Mechanical properties of drawn pearlitic steels

Fig. 4에서의 영역 I는 초기 random 하게 배열되어 있는 펄라이트 내의 페라이트 부분에서의 가공경화로 인한 강도 상승 및 연성 저하가 발생한 영역을 의미하며, 영역 II는 펄라이트 콜로니 들이 신선가공에 따라 가공방향으로 재배열되며 펄라이트 내의 세멘타이트가 소성가공되어 두께가 감소해가는 과정을 나타내며, 이에 따라 연성인 단면감소율이 증가하게 되며 또한 인장강도도 증가하게 된다. 영역 III은 세멘타이트의 신선가공 방향으로의 재배열이 완료되어 섬유상 조직을 나타내는 구간으로서 재배열된 세멘타이트와 페라이트가 신선가공량의 증가에 따라 소성변형되어 가공경화가 급격히 이루어지는 구간으로서, 변형량이 어느 정도 이상에 도달하게 되면 세멘타이트의 파단이 발생하게 된다. 이 구간에서는 강도가 급격히 상승하며 가공경화에 따라 연성의 저하가 발생한다. Fig. 5에 공석강의 신선가공량이 진변형율 3.51에 도달했을 때의 세멘타이트의 투과전자현미경 사진을 나타내었다. 진변형량의 증가로 인한 세멘타이트의 분절 현상이 관찰되며 이 보다 더 많은 변형량을 부과하는 경우 분절된 세멘타이트 입자 들이 용해되어 최종에는 세멘타이트가 존재하던 흔적 만이 남겨진 형태의 탄소 과포화 고용한 페라이트 만이 존재하게 된다.

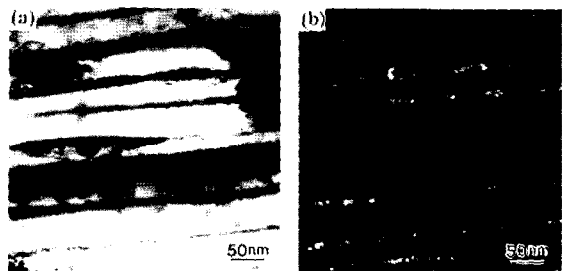


Fig. 5 TEM photographs of the drawn wires

현재 상용되고 있는 모든 펄라이트 미세조직이 위에서 설명한 바와 같은 변화를 일으키는 것은 아니다. 일반 펄라이트 강의 신선가공성에 강한 영향을 주는 인자로 펄라이트의 층상간격을 들고 있다. 즉 일정한 탄소함량을 갖는 소재에 있어서는 펄라이트의 층상간격이 감소하면 세멘타이트의 두께가 감소하게 되고 따라서 세멘타이트의 소성변형능이 향상된다. 일반적으로 알려진 바와 같이 세멘타이트의 두께가 두꺼운 조대한 펄라이트의 경우 가공시 페라이트 내부의 응력의 국부

적인 집중으로 두꺼운 세멘타이트의 분절에 의한 파단이 낮은 변형량에서 발생하게 되어 소재의 가공성을 저하시키는 반면, 미세한 필라이트의 경우 필라이트 내의 페라이트에서 응력이 균일하게 분포되어 얇은 세멘타이트의 소성변형이 이루어지게 된다. 따라서 미세한 필라이트를 갖는 소재의 신선가공성이 높게 나타난다.

한편 Fig. 4에 나타내었던 신선 가공 도중 강선의 연성 변화는, 신선 가공에 의하여 세멘타이트가 신선 가공 방향으로 재배열하고, 필라이트 층상간격이 미세하여지기 때문에 최대의 연성을 보이는 변형량이 존재한다고 설명된다.⁽¹⁵⁾ 그러나 신선 도중 필라이트 내의 세멘타이트는 가공 방향과의 각도에 따라 변형 거동이 달라져, 가공 방향과 유사한 방향의 세멘타이트는 변형 도중 가공 방향으로 재배열되거나 가공 방향에 수직인 세멘타이트는 재배열 보다는 buckling된다.(Fig. 6) 이와 같이 buckling된 세멘타이트는 신선가공이 진행됨에 따라 구형 세멘타이트를 형성하게 되어 극세선으로 가공시 크랙의 생성 기점으로 또는 신선 가공후 비틀림에 의한 연선시 단선 발생의 원인으로 작용하게 된다.

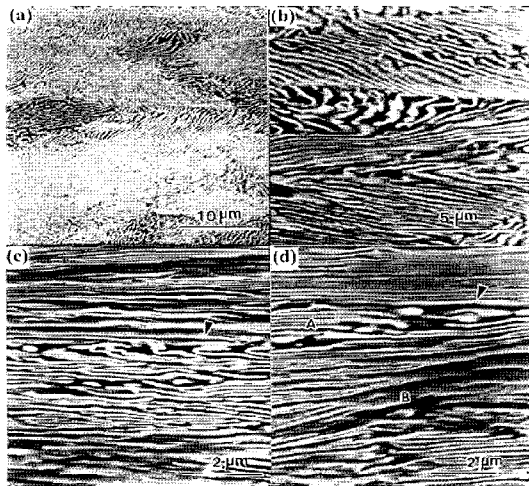


Fig. 6 The formation of globular cementite particles

3. 비틀림 연성

강선은 사용 특성 상 최종 제품의 성형시 비틀림 변형을 받는 경우가 많아 비틀림 응력하에서 연성은 강선의 매우 중요한 물성 중의 하나이다. 강가공된 강선을 비틀림 변형을 할 경우, 선의 길

이 방향을 따라 여러 층으로 분리되면서 파괴가 발생하는 경우가 있는데 이러한 현상을 delamination 이라 하며 항복 직후에 강선 길이 방향으로의 균열이 발생하여 응력의 저하를 보인다. Fig. 7에 소재의 강도와 delamination과의 관계를 나타내었는데 동일한 강도의 강선에서 신선 가공량을 증가하여 얻는 방법이 소재의 강도를 증가시키는 방법에 비하여 delamination의 발생이 심하다.

Delamination 발생 원인에 대하여서는 주로 신선 도중 집합 조직의 발달, 동적 시효 현상, 잔류 응력 등에 영향 등의 연구가 진행되어 Ogawa 등은 신선시 형성되는 집합 조직이 선의 표층과 내부층 사이에 다르게 발달되고 이러한 방향과 비틀림 변형시 응력 방향의 차이에 의하여 페라이트와 세멘타이트 계면에서 균열의 발생이 주 원인이라고 하였으며, Brownrigg 등은 강선의 길이 방향으로 전단 응력에 의하여 shear band가 형성되고 이러한 shear band에 의한 균열의 발생이 delamination의 발생 원인이라도 보고하였다. 선의 응력 변화와 delamination을 연결하는 해석은 大橋章一 등에 의하여 진행되었는데 이들은 강선의 방향에 따른 강도의 변화를 조사한 결과 신선 가공이 진행됨에 따라 항복강도는 급격히 증가하나 전단 강도는 완만히 증가하여 이 두 응력 비가 어느 임계 점을 넘을 경우 delamination이 발생한다고 보고하였다. 그러나 대부분의 연구가 균열의 발생 및 전파에 대한 관찰은 행하여지지 않고 응력 변화에 대한 해석으로 균열 발생 현상을 유추하고 있는 실정으로 발생 기구를 파악하기 위해서는 강의 강선의 미세조직과 연결된 균열의 발생 및 전파에 대한 조사가 필요하다.

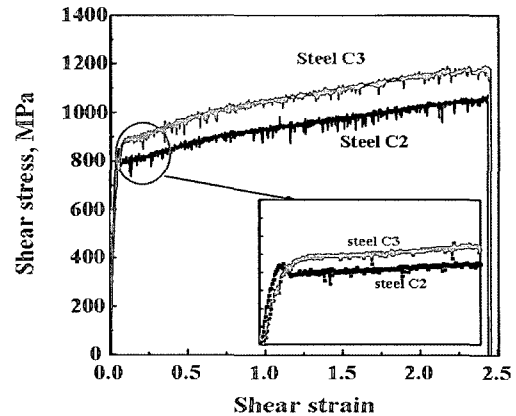


Fig. 7 Shear stress-strain curve of drawn steel wires

4. 최근 연구 동향

이상에서 말한 바와 같이 고탄소 펄라이트 강을 신선 가공에 의해 제조하는 경우, 신선가공성 향상을 위해 펄라이트 미세조직의 엄격한 제어 이외에도 다른 미세조직을 이용한 강선의 제조 가능성에 대한 검토가 이루어지고 있다. 예를 들면 상부 베이나이트 미세조직을 갖는 과공석강, 페라이트와 마르텐사이트로 구성된 이상조직강, 구형 탄화물을 함유한 펄라이트로 구성된 과공석강 및 탄소함량을 다소 줄이고 미세조직을 degenerated pearlite로 단일화 시킨 중탄소강 등 과거의 제조기술로는 불가능하였던 미세조직 들에 대한 적용 가능성의 재검토가 이루어지고 있다.

참 고 문 헌

- (1) 배철민; 박사학위 논문. 1999.
- (2) A. Brownrigg, R. Boelen, and M. Toyama : Proc. of 6th Inter. Conf. on Fracture, (1984) p. 143.
- (3) 大橋章一 : CAMP-ISIJ, 6, (1993) p. 1686.
- (4) A. Inoue, T. Ogura and T. Masumoto : Trans. JIM., 17, (1977) p. 143.
- (5) G. Lanford and M. Cohen : Trans ASM, 62(1969) p. 623.
- (6) H.J. Rack and M. Cohen : Mat. Sci. & Eng., 6,(1970) p. 320.
- (7) J. D. Embury and R. M. Fisher : Acta Met., 14,(1966) p. 147.
- (8) V. K. Chandhok, A. Kasak, and J. P. Hirth : Trans. ASM., 59, (1966) p. 288.
- (9) T.Takahashi and M.Nagumo; Trans.JIM, 11, (1970) p. 113.
- (10) 尊井 梅三, 田代均, 佐藤洋; 재료와 프로세스, 5, 2062 (1992).
- (11) G. Langford : Met. Trans., 1A, (1970) p. 465.
- (12) I. P. Kemp : Material Forum, 14, (1990).
- (13) 15. E. Aernoudt and J. G. Sevillano : JISI, Oct,(1973) p. 716.
- (14) D. A. Porter and K. E. Eastering : Acta Met., 26, (1978) p. 1405.
- (15) L. Godecki : Wire Industry, Jun., (1972) p. 525.