

신선가공한 고탄소 강선의 연성에 영향을 주는 미세조직 인자

남원종*

(2004년 10월 1일 접수)

Effect of Microstructural Factors on Ductility of Drawn Pearlitic Steels

W. J. Nam

Abstract

The effect of microstructural features on ductility of cold drawn pearlitic steels containing 0.52 ~ 0.92 wt%C was investigated. During wire drawing, reduction of area (RA) increased initially with the progressive realignment of randomly oriented cementite, showed a maximum peak due to the completion of the alignment of most cementite, and decreased with thinning or fragmentation of the aligned cementite. Among factors on ductility, cementite thickness was found to be the most dominant microstructural feature for RA of drawn pearlitic wires, regardless of transformation temperature and carbon content in steels.

Key Words : Pearlite, Ductility, Wire Drawing, Cementite

1. 서론

금속재료에 있어서 연성은 소재의 가공공정에 있어서 변형능을 결정하는 인자로서 생산성과 관련된 매우 중요한 성질이다. 특히 강선에 있어서 연성의 확보는 신선 가공 공정에서 중간에 실시하는 열처리인 페이팅(patenting)의 생략을 가능하게 하는 장점을 가지며 또한 가공 변형량의 증가로 고강도를 얻는 데 효과적인 방법이다.

일반적으로 탄소강의 연성을 향상시키는 방법으로 가장 많이 사용되는 방법은 소재의 탄소함량을 줄여 미세조직에서의 초석 페라이트 분율을 증가시키는 방법이다. 그러나 신선용 강선과 같이 고강도가 요구되는 강선을 제조하는 경우, 대부분의 미세조직이 펄라이트로 구성되어 있으므로 강도 향상의 방법으로 펄라이트 층상간격의 미세화가 널리 사용되어 왔다. 펄라이트 층상간격의 미

세화는 소성 변형시 전위 이동거리 감소 효과로 인한 강도의 증가와 함께 펄라이트를 구성하는 라멜라 시멘타이트 두께의 감소에 의한 소성 변형능 향상으로 연성이 향상된다. 한편 조대한 펄라이트는 소성 변형시 응력집중을 유발하므로 강도 및 연성의 저하가 발생한다고 알려져 있다.⁽¹⁻⁵⁾ 그러나 이와 같은 펄라이트의 층상간격의 영향은 탄소 함량이 일정한 소재에 있어서 상변태 온도 변화에 의하여 층상간격이 변화하는 경우에는 명확하게 관찰되나, 탄소함량이 다른 소재에 있어서는 비록 같은 층상간격을 갖는 경우에도 시멘타이트 분율이 다른 이유로 펄라이트 내의 라멜라 페라이트나 시멘타이트의 두께가 달라지게 된다. 따라서 펄라이트 미세조직을 갖는 소재의 강도 및 연성을 지배하는 인자로서 층상간격 이외의 다른 미세조직적 인자의 영향을 고찰해야할 필요성이 제기된다.

한편 철강재료의 신선가공 중의 미세조직 변화

* 교신저자: 국민대학교 신소재공학부

는 초기 불규칙하게 배열되어 있는 펄라이트 콜로니들이 신선 가공 방향으로 회전 및 굴절하여 가공 변형량의 증가에 따라 신선 가공과 평행한 방향으로 배열하게 되어 섬유상 조직을 형성한다.⁽⁵⁻⁹⁾ 따라서 신선방향으로 배열된 펄라이트 미세조직의 기계적 성질은 불규칙하게 배열된 초기 펄라이트 미세조직을 갖는 소재와 다른 거동을 나타낸다.

한편 가공석강 중에서 탄소함량이 비교적 높은 경우는, 빠른 냉각속도 또는 낮은 온도에서의 항온변태를 이용하면 상변태 kinetics에 의해 전체가 펄라이트인 미세조직을 얻을 수 있다.⁽¹⁰⁻¹⁴⁾ 일반적으로 공석 조성의 탄소량에서는 펄라이트 내의 층상 시멘타이트가 연속적으로 잘 발달하지만, 펄라이트 내의 탄소량이 적어지거나 비교적 저온에서 상변태가 이루어지면 시멘타이트 형상이 불연속적인 형태를 나타내게 된다. 이러한 불연속적인 층상 구조를 갖는 펄라이트는 ‘유사 펄라이트’라 불리우며 일반적으로 층상 펄라이트와 배이나이트의 중간 단계로 인식되고 있다. 그러나 유사 펄라이트를 신선가공하면, 신선 가공 중 라멜라 시멘타이트의 소성변형에 의해 신선방향과 평행으로 배열된 형태를 나타내어, 공석강을 신선 가공한 경우와 매우 유사한 형태의 미세조직을 갖게 된다.

따라서 본 연구에서는 탄소함량의 범위를 가공석강인 0.52wt%로부터 과공석강인 0.92wt% 범위의 탄소함량을 갖는 소재를 이용하여, 탄소함량 및 상변태 온도 변화에 의한 소재의 펄라이트 층상간격, 라멜라 펄라이트 두께 및 시멘타이트의 두께 등 미세조직적 인자가 신선 가공된 강선의 연성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 소재로 열간압연 후 스텔모아(Stelmora) 방식의 냉각을 실시한 탄소함량 0.52 ~ 0.92 wt%C의 선재를 사용하였다. 스텔모아 방식은 세계적으로 가장 널리 사용되는 선재를 열간압연 후에 냉각하는 방식으로 코일형의 선재를 공기 송풍량 및 이송속도를 조절하여 냉각속도를 조절하는 냉각방식으로 높은 생산성을 유지하면서 미세조직 제어에 효과적인 방법이다. 열처리 실험시 시편을 가열온도 950 ~ 1150℃로 10분 가열하였으며 상변태 온도를 520 ~ 650℃로 변경하였다. 특히 일정 탄소함량인 0.82 wt%C의 공석강에서의 상변태 온도 변화에 따른 연성의 변화를 분석하기 위

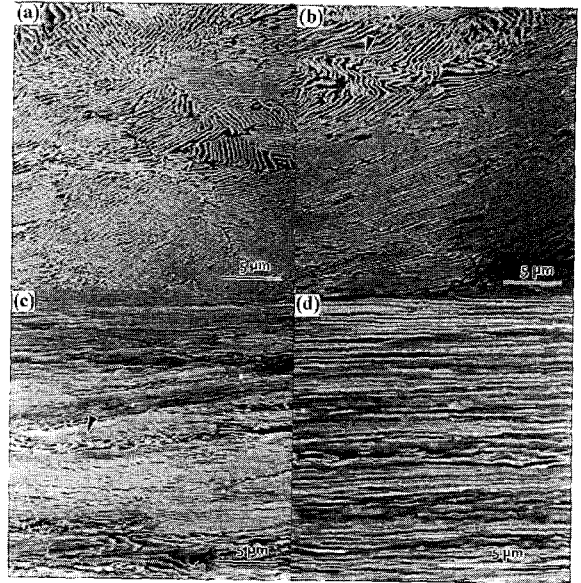


Fig.1 Microstructures of a longitudinal cross-section of drawn eutectoid steel transformed at 580°C. (a) $\epsilon = 0.61$, (b) $\epsilon = 1.19$, (c) $\epsilon = 2.06$ (d) $\epsilon = 2.63$

하여, 950℃에서 10분 가열 후 550 ~ 610℃에서 항온 변태를 실시하였다.

펄라이트 층상간격은 주사 전자현미경(SEM) 하에서 시멘타이트가 수직으로 배열된 콜로니를 선택하여 linear intercept방법에 의하여 측정하였으며 시멘타이트의 두께는 아래의 O'Donnely⁷⁾의 결과를 이용하여 계산하였다.

$$t_c = (s_p / V_p) [(W_{cem} / \rho_{cem}) / (W_{cem} / \rho_{cem} + W_{fer} / \rho_{fer})] \quad (1)$$

여기서, t_c 는 시멘타이트 두께, s_p 는 펄라이트 층상간격, V_p 는 측정된 펄라이트 분율, W_{cem} 는 시멘타이트 무게분율이며 $0.15 \times (wt\%C)$ 로 표현된다. (wt%C)는 소재의 탄소함량을, ρ_{cem} 는 시멘타이트 밀도를 의미한다.

열처리된 시편은 동적시효를 억제하기 위하여 3m/min의 신선속도로 드로우 벤치(Draw bench)를 이용하여 패스당 20%의 감면율을 적용하여 실시하였다. 신선의 각 단계에서 채취한 시편은 기계적 성질을 파악하기 위하여 인장 시험기를 이용하여 상온에서 3×10^{-3} s의 초기 변형 속도로 인장 시험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 신선가공시 미세조직 변화

열간압연 후 상변태에 의해 형성된 펄라이트와 달리 신선 가공한 펄라이트의 연성은 라멜라 시멘타이트가 신선 가공 방향으로 배열된 정도에 의해 크게 영향을 받는다. 위에 언급된 바와 같이 신선 가공은 펄라이트의 시멘타이트의 배열을 변경시킬 뿐 아니라 펄라이트의 층상간격, 페라이트 두께 및 시멘타이트 두께와 같은 미세조직 인자의 형상과 크기에 변화를 준다. 따라서 이와 같이 신선 가공 중 발생하는 미세조직의 변화는 신선한 강선의 연성에 직접적인 영향을 미친다.

신선 가공 중의 미세조직 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 초기 무질서하게 배열되어 있는 펄라이트 콜로니(colony) 들이 신선가공 방향으로 신선 가공량 증가에 따라 배열되기 시작하는데, 신선 방향에 가깝게 배열되어 있던 시멘타이트 들은 소성변형에 의해 신선 방향으로 두께가 감소하며 배열되는 경향을 보이는 반면, 신선 방향에 수직에 가깝게 배열된 시멘타이트 들은 절단 또는 구부러짐이 발생한다.(Fig. 1-(b) and (c)) 그러나 구부러지거나 절단된 시멘타이트 들도 신선 가공이 진행됨에 따라 신선 방향으로 배열하게 되어, 변형량이 2.06(Fig. 1-(c))에 도달하게 되면 거의 대부분의 시멘타이트 들이 신선 방향으로 배열을 완료한다. Fig. 1-(d)에 나타낸 바와 같이 더 이상의 높은 신선 변형량에 도달하게 되면 펄라이트 내의 모든 시멘타이트가 신선가공 방향으로 길게 배열된 섬유상 조직을 갖게 되어, 초기에 다른 방향으로 배열되었던 펄라이트 콜로니 사이의 구분 조차 어렵게 된다.

3.2 공석강의 미세조직 인자와 단면감소율

Fig. 2 에 상변태 온도를 달리하여 펄라이트 층상 간격을 변화시킨 공석강을 신선 가공한 강선에서의 단면감소율에 미치는 미세조직 인자의 영향에 대하여 정밀하게 분석하기 위하여, 단면감소율과 각각의 미세조직 인자들과의 연관성을 검토하였다.

신선 변형량에 따른 단면감소율의 변화는, Fig. 2-(a), 신선 가공시 발생하는 미세조직 변화를 직접적으로 반영한다. 단면감소율이 신선 변형량 $\epsilon = 1.5 \sim 2.0$ 까지 서서히 증가하다 최대값을 보이고 신선 변형량의 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 초기 신선 변형량 증가에 따라 단면감소율이 증가하는 현상은 펄라이트 콜로니 들이 신선방향으로 재배열하기 때문으로 알려져 있으며, 최대값 이후 감소하는 현상은 신선방향으로 배열된 시멘타이트의 소성변형에 따른 경화 및 분절에 기인하는 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁾

한편 미세조직 인자 중 펄라이트 층상간격과 펄라이트의 페라이트 두께 및 시멘타이트 두께는 신선가공이 진행됨에 따라 신선 변형량의 증가에 따라 감소하게 된다. 따라서 신선 가공시 신선방향으로 재배열 및 페라이트와 시멘타이트의 소성변형 등 미세조직 인자들의 변화를 고려한 상태에서, 신선 가공 전 초기 미세조직의 변화가 신선 가공한 경우 단면감소율에 미치는 영향을 분석해보면, 미세조직 인자 중 어떤 것이 신선한 강선의 단면감소율에 가장 크게 영향을 미치는지 알 수 있다.

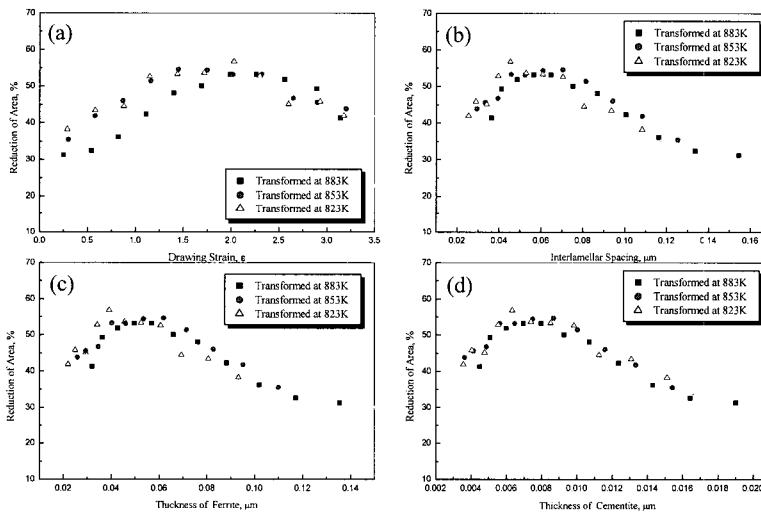


Fig. 2 Variations of RA with (a) drawing strain, (b) interlamellar spacing, (c) thickness of ferrite and (d) thickness of cementite in drawn eutectoid steels

Fig. 2-(b)에 나타난 펄라이트의 층상간격과 단면 감소율과의 관계는, 공석강을 신선 가공한 강선에 있어서 펄라이트 층상간격이 단면감소율에 직접적인 영향을 미치고 있음을 보여준다. 한편 펄라이트의 페라이트 두께(Fig. 2-(c))와 시멘타이트 두께(Fig. 2-(d), Table 1) 또한 단면감소율과 긴밀한 관계를 가지고 있음을 알 수 있는데, 이는 신선 가공시 길이방향의 미세조직 변화가 소재의 크기 변화와 비례하는 축대칭 변형(axisymmetric deformation)을 고려하면,⁽¹⁵⁾ 펄라이트의 페라이트 및 시멘타이트 두께가 층상간격과 비례적으로 변화하기 때문에 당연한 결과로 사료된다.

Table 1 The measured interlamellar spacing and calculated cementite thickness of the eutectoid steel

Trans. Temp.(°C)	Interlamellar spacing(μm)	Cementite thickness(μm)*
550	0.125	0.0154
580	0.142	0.0175
610	0.175	0.0216

* Calculated from the equation (1)

3.3 탄소함량 변화에 따른 미세조직 인자와 단면감소율의 변화

Fig. 3에 탄소함량을 0.52wt%로부터 0.92wt%로 변화시킨 탄소강의 신선가공에 따른 단면감소율의 변화와 신선 변형률 및 미세조직 인자와의 관계를 나타내었다.

Fig. 3-(a)의 모든 강종과 신선 변형률과 관계에 있어서는, 공석강의 경우와 유사하게 단면감소율이 신선 변형률 $\epsilon = 1.5 \sim 2.0$ 까지 서서히 증가하다 최대값을 보이고 신선 변형률의 증가에 따라 최대값을 보이고 감소하는 경향을 보였다. 그러나 Fig. 3-(a)에서 알 수 있듯이 탄소함량에 따라 산포가 상당히 크게 관찰되므로 신선 변형률이 단면감소율에 직접적인 영향을 미친다고 판단하기에는 다소 무리가 있다. 더구나 관찰된 강종에 있어서 탄소함량의 증가함에 따라 단면감소율의 최대값을 나타내는 신선 변형률의 감소하는 경향이 관찰되었다. 이는 다른 탄소함량으로 인한 미세조직 인자의 변화가 단면감소율의 변화에 중대한 영향을 미침을 의미한다.

미세조직 인자의 영향을 분석하기 위하여 펄라이트 층상간격과 단면감소율의 관계를 Fig. 3-(b)에 나타내었다. 공석강의 경우와 달리 층상간격이 단면감소율에 크게 영향을 미치지 못함을 확인할 수 있었다. 특히 단면감소율의 최대값이 소재의 탄소함량이 증가할수록 펄라이트 층상간격이 낮은 값으로 이동하는 현상이 관찰되는데, 이는 소재의 탄소함량에 따라 신선 가공시 낮은 변형률에서 발생하는 시멘타이트가 신선방향으로 재배열하는 속도가 다르기 때문으로 사료된다. 한편 Fig. 3-(c)의 페라이트 두께와 단면감소율과의 관계는 Fig. 3-(b)의 펄라이트 층상간격과 단면감소율의 관계와 거의 유사하게 관찰되는데, 이는 펄라이트 층상간격의 대부분이 페라이트 두께에 의해 구성되며 시멘타이트 두께는 탄소함량에 따라 다르나 대개 층상간격의 15% 이내 이기 때문에 페라이트 두께의 영향은 펄라이트 층상간격의 영향과 유사한 것이 당연하다 하겠다.

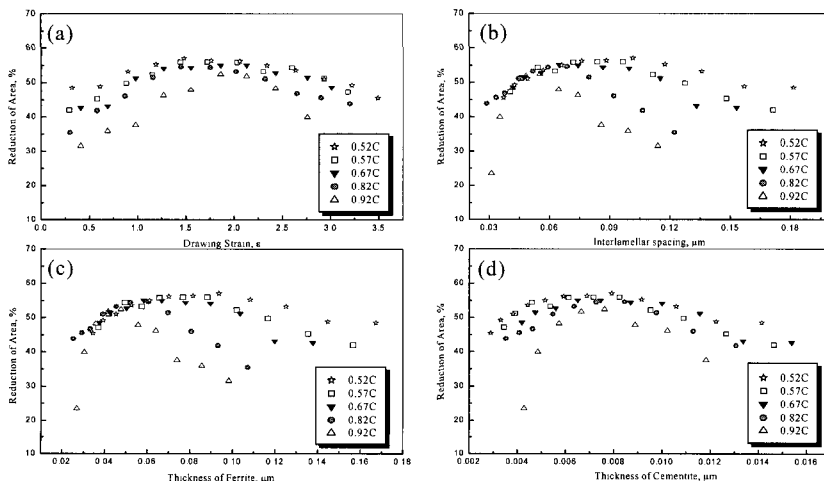


Fig. 3 Variations of RA with (a) drawing strain, (b) interlamellar spacing, (c) thickness of ferrite and (d) thickness of cementite for drawn pearlitic steels containing 0.52 ~ 0.92 wt%C

한편 Fig. 3-(d)의 시멘타이트 두께와 단면감소율과의 관계는 강종 구분 없이 산포가 비교적 작게 관찰됨을 확인할 수 있었다. 이는 신선 가공시 시멘타이트의 변화가 강선의 단면감소율과 직접적인 관계를 가짐을 의미하는 것으로 생각할 수 있다. 한편 그림에서 관찰된 단면감소율 최대값 이전의 낮은 신선 변형량에서 단면감소율이 소재의 탄소 함량이나 초기 펄라이트 층상간격에 상관없이 시멘타이트 두께에 따라 거의 일정하게 관찰되는 특이한 현상은, 신선 가공중 시멘타이트가 신선방향으로 재배열 하는 과정 중 시멘타이트의 소성가공에 의해 두께가 감소하는 현상이 발생하며 또한 강선의 단면감소율이 시멘타이트 두께에 의해 지배적인 영향을 받음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터, 신선 가공한 탄소강의 단면감소율은 신선된 강선의 펄라이트 내의 시멘타이트 두께에 의해 가장 크게 영향 받음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

0.52~0.92 wt%C 의 탄소함량을 갖는 탄소강을 기본 소재로 하여, 탄소함량 및 상변태 온도 변화에 의한 소재의 펄라이트 층상간격, 라멜라 페라이트 두께 및 시멘타이트의 두께 등 미세조직적 인자가 신선 가공된 강선의 연성에 미치는 영향을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 신선 변형량에 따른 단면감소율의 변화는 신선 가공 중 발생하는 미세조직 변화와 직접적인 관계가 있으며, 신선 변형량 증가에 따라 펄라이트 내의 시멘타이트의 재배열 현상으로 단면감소율이 증가하고, 재배열이 완료에 따라 최대값을 보이며, 이후 재배열된 시멘타이트 소성변형 및 분절에 따라 감소하는 현상을 보였다.

(2) 신선 가공한 강선의 단면감소율은 미세조직 인자 등 펄라이트 층상간격, 페라이트 두께 및 시멘타이트 두께 등에 의하여 영향 받으나, 초기 펄라이트 층상간격이나 탄소함량에 관계없이 미세조직 인자 중 시멘타이트 두께에 의하여 가장 크게 영향을 받음을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) D. A. Porter, K. E. Easterling and G. D. W. Smith, 1978, "Dynamic studies of the tensile deformation and fracture of pearlite", *Acta Metal.*, Vol. 26, pp.1405~1422.
- (2) L. E. Miller and G. C. Smith, 1970, "Tensile fracture in carbon steels", *JISI*, Vol. 208, pp. 998~1005.
- (3) M. Dollar, I. M. Bernstein and A. W. Thompson, 1988, "Influence of deformation substructure on flow and fracture of fully pearlitic steel", *Acta Metall.*, Vol. 36, pp. 311~320.
- (4) W. J. Nam and C. M. Bae, *Mat. Sci. Eng.*, 1995, "Void initiation and microstructural changes during wire drawing of pearlitic steels", Vol. 203, pp. 278~285.
- (5) J. W. Pilarczyk, H. Dyja, B. Golis and E. Tabuda, 1998, "Effect of roller die drawing on structure, texture and other properties of high carbon steel wires", *Metals and Materials Inter.*, Vol. 4, pp. 727~731.
- (6) D. J. Alexander and I. M. Bernstein, 1989, "Cleavage fracture in pearlitic eutectoid steel", *Metall. Trans.*, Vol. 20A, pp. 2321~2335.
- (7) B. E. O'Donnely, R. L. Reuben and T. N. Baker, 1984, "Quantitative assessment of strengthening parameters in ferrite-pearlite steels from microstructural measurements", *Met. Tech.*, Vol. 11, pp. 45~51.
- (8) J. Languillaume, G. Kapelski and B. Baudelet, 1997, "Cementite dissolution in heavily cold drawn pearlitic steel wires", *Acta Mater.*, Vol. 45, pp. 1201~1212.
- (9) F. Danoix, D. Julien, X. Sauvage and J. Copreaux, 1998, "Direct evidence of cementite dissolution in drawn pearlitic steels observed by tomographic atom probe", *Mater. Sci. Eng.*, Vol. A250, pp. 8~13.
- (10) E. C. Purcino and P. R. Cetlin, 1991, "Fracture mechanism of coarse pearlite/ferrite mixtures", *Scripta Metall. Mater.*, Vol. 25, pp. 167~170.
- (11) T. Inoue and S. Kinoshita, 1977, "Strain partitioning and void formation in ferrite-pearlite steels deformed in tension", *Trans. ISIJ*, Vol. 17, pp. 245~251.
- (12) J. P. Houin, A. Simon and G. Beck, 1981, "Relationship between structure and mechanical properties of pearlite between 0.2% and 0.8%C", *Trans. ISIJ*, Vol. 21, pp. 726~731.
- (13) C. M. Bae, C. S. Lee, and W. J. Nam, 2002, "Effect of carbon content on mechanical properties of fully pearlitic steels", *Mater. Sci. & Tech.*, Vol. 18, pp.

- 1317~1321.
- (14) E. V. Gregory and B. C. Muddle, 1995, Pro. Int. Conf. on Phase Transformations during the Thermal/Mechanical Processing of Steel, Vancouver, Canada, Aug., Canadian Inst. of mining, Metall. and Petroleum, Montreal, Canada, p. 81.
- (15) J. Toribio and E. Ovejero, 1997, "Microstructure evolution in a pearlitic steel subjected to progressive plastic deformation", Mater. Sci. Eng. A., Vol. 234 ~236, pp. 579~582.