

Steel Cord의 고강도화 개발 동향

임승호

(고려제강(주) 기술연구소)

Development of High Strength Steel Cord

S. H. Lim

1. 서론

현재 여러 가지 재료들이 여러 분야에 걸쳐 구조용 재료로 사용되고 있지만, 래디얼 타이어 보강용으로 사용되는 steel cord가 최고강도의 공업용 재료로 알려져 있다. 1930년대 말에 타이어용 고무 보강재인 레이온, 나이론, 폴리에스터의 대체 재료로 steel cord가 사용되기 시작하였고, 70년대부터는 차량의 성능과 도로의 발달로 고속 운행에서도 견딜 수 있는 타이어 보강재에 대한 강한 요구와 함께 그 사용량이 급속히 증가되었다. 특히 최근에는 환경보호 정책의 강화와 더불어 자동차 연비의 개선을 위한 타이어의 경량화가 요구됨에 따라 타이어 보강용 steel cord도 경량화를 위해 보다 높은 인장강도가 요구되고 있다. 이러한 요구에 따라, steel cord의 고강도화가 꾸준히 진행되어 과공석강 재료에 의해 0.2mm선경에서 4000Mpa급 steel cord가 실용화 단계에 이르고 있으며, 일부에서는 이보다 더 높은 4500~5000Mpa급 steel cord를 목표로 하여 연구 개발이 진행되고 있다.⁽¹⁾ Steel cord는 최종 제조 공정인 연선 공정에서 고속 회전으로 꼬이며 가혹한 비틀림 응력을 받으므로 단선이 발생되기 쉽고, 자동차 타이어에 사용되어 자동차의 운행 중에 노면으로부터 반복적인 충격과 굴곡응력을 받게 되므로 높은 인장강도뿐만 아니라 연성과 인성도 요구된다.

2. Steel cord의 고강도화 기구

재료의 강도를 증가시키는 방법으로는 용매 원자 격자 내에 용질 원자를 고용상태로 첨가시키는 고용강화, 기지에 제2상 입자를 미세하게 분산시키는 분산 강화, 다결정 재료에 있어서 결정립을 미세화 하여 보다 많은 결정립계로 인하여 강도를 증가시키는 입계 강화, 냉간 가공에 의해 발생된 전위가 전위 상호작용이나 이동의 방해물과의 상호작용에 의한 전위강화, 강을 퀴칭하여 오스테나이트에 무확산 전단응력을 일으켜 마르텐사이트로 변태시키는 마르텐사이트 강화 등이 있다.⁽²⁾

Steel cord의 강화에는 파텐팅재의 퍼얼라이트 라멜라 간격의 미세화와 신선에 의한 냉간 가공경화가 이용되며, 그 기본 개념은 Fig.1과 같이 나타낼 수 있다. 고탄소 강선을 파텐팅 후 높은 가공량의 신선에 의해 제조하는 steel cord의 고강도화 수단은 파텐팅재 강도의 증가($\Delta\sigma_1$), 신선 시 가공경화율의 증가($\Delta\sigma_2$), 및 총 가공량의 증가($\Delta\sigma_3$)가 있다. 강도의 증가는 이들의 총합($\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3$)으로 달성된다.⁽³⁾

2.1 파텐팅재의 라멜라 간격 미세화

퍼얼라이트 강의 강도에 대한 지배인자는 주로 라멜라 간격으로, 퍼얼라이트 라멜라 간격의 감소는 $\Delta\sigma_1$ 과 $\Delta\sigma_2$ 를 증가시킨다. 또한 연성 확보에 유리한 퍼얼라이트 배향도를 확보한다면 총가공량을 늘릴 수 있어 $\Delta\sigma_3$ 를 증가시키므로 퍼얼라이트 강의 강도 증가는 파텐팅 조직에 대한 의존성이 대단히 크다.

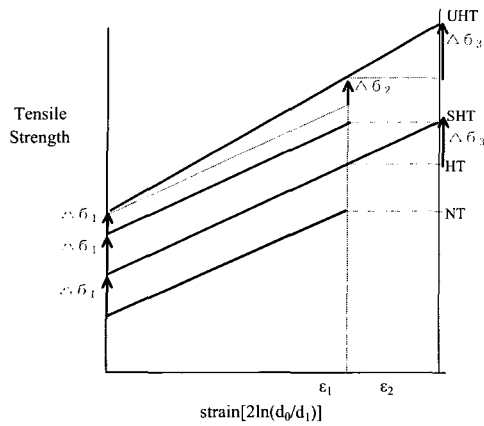


Fig. 1 Mechanism of strengthening

퍼얼라이트 강에 대한 합금원소의 첨가 영향은 다음과 같다. 탄소를 공석이상으로 함유하는 과공석강을 이용하여 C%에 적절한 냉각 속도를 확보하여 파텐팅 처리 하면 신선 가공상 유해한 초석 세멘타이트의 석출 없이 C%의 증가에 의해 라멜라 간격이 미세화되고 퍼얼라이트를 구성하는 세멘타이트 판이 얇아져 파텐팅재의 강도와 가공 경화율이 증가됨과 더불어 신선 가공성도 향상된다. Si는 페라이트 중에 고용되어 퍼얼라이트 강도를 증가 시키고⁽⁴⁾, Mn은 0.7% 이하의 경우에 라멜라 간격의 미세화에 의해 퍼얼라이트의 강도를 증가시키나⁽⁵⁾ 1% 이상에서는 오히려 라멜라 간격을 증가시킨다.⁽⁶⁾ Cr은 1% 이하의 첨가로 라멜라 간격의 미세화에 의해 퍼얼라이트의 강도를 증가시키고,⁽⁷⁾ Ni은 라멜라 간격 미세화의 관여 유무에 대해서는 의견이 나뉘어진다. 그러나, Cr이나 V 등의 탄화물 형성 경향이 큰 원소는 세멘타이트 중에 농축되어 오스테나이트에 세멘타이트의 고용을 저해하고, 퍼얼라이트 변태를 지연시키는 효과를 갖기 때문에 통상의 탄소강에 비해 오스테나이트화 시간과 퍼얼라이트 변태시간을 충분히 유지하여야 한다.

2.2 가공 경화

Fig. 2⁽⁸⁾에 공석 퍼얼라이트강, 단상의 페라이트강과 페라이트와 마텐사이트로된 dual phase steel에 대한 가공 경화율 곡선을 나타내었다. 퍼얼라이트강은 페라이트나 dual phase steel보다 가공 경화율이 커 적은 신선 가공량에서도 높은 인장강도를 얻을 수 있다.

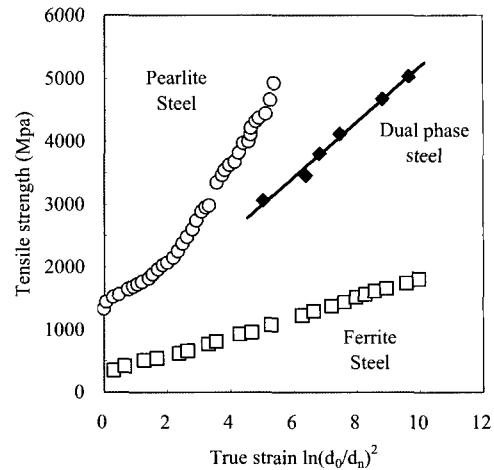


Fig. 2 Relationship between true strain and tensile strength of various materials

현재 퍼얼라이트 강의 높은 가공 경화율에 대해 여러 각도에서 논의 되고 있으며, 그 주된 요인으로 퍼얼라이트 층간 간격, 페라이트의 전위 외에 세멘타이트의 분률, 형상 및 거동 등이 고려 되고 있다.

2.2.1 퍼얼라이트 라멜라 간격의 미세화에 의한 강화

파텐팅재의 퍼얼라이트의 라멜라는 처음에는 불규칙하게 배열되어 있다가 신선 가공 도중에 wire의 신선 가공 방향으로 재배열되고, 신선 가공량이 증가함에 따라 퍼얼라이트 층간 간격이 작아짐과 동시에 세멘타이트 판 두께도 얇아진다. Takahshi 등은 가공 경화율은 퍼얼라이트의 층간 간격에 의존한다⁽⁹⁾고 하였으며, 藤井 梅三 등은 라멜라 간격이 강도의 주된 지배인자라고 가정하여 퍼얼라이트강의 신선 가공재의 인장강도를 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다⁽¹⁰⁾고 하였다.

$$TS = 1000 + 26 \times l_p^{-1} \quad (1)$$

여기서, TS는 퍼얼라이트강의 신선 가공재의 인장강도이고, l_p 는 라멜라간격(μm)이다.

2.2.2 페라이트에 도입된 전위에 의한 강화

가공 경화에 영향을 미치는 전위의 역할은 전위 간의 상호작용이나 전위의 이동을 방해하는

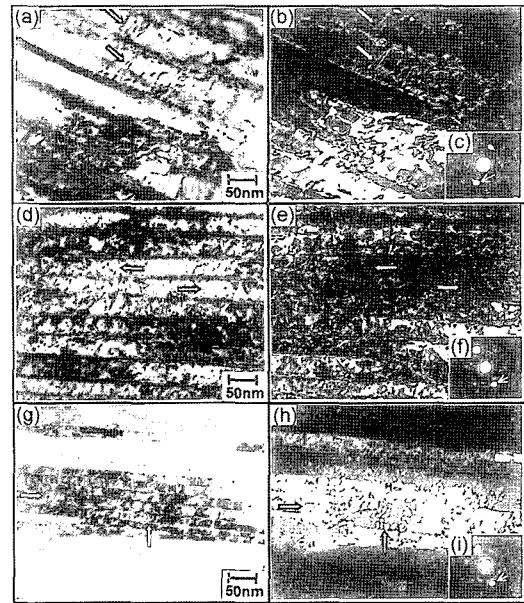
장애물과의 상호작용에 의해 이루어진다.⁽²⁾ 소성 변형에 의해 전위의 수는 증가하며 이들 전위의 상호작용으로 내부응력이 높아진다 어닐링된 금속에서는 전위의 밀도가 $10^4 \sim 10^6/\text{mm}^2$ 에 비하여 심하게 변형된 금속의 전위 밀도는 $10^{10}/\text{mm}^2$ 이다. 소성변형 초기에는 슬립이 주활주면에서 일어나지만, 변형이 계속됨에 따라 교차 슬립이 일어나면서 전위 증식이 일어나 높은 전위 밀도 영역(전위가 엉킨 영역)을 형성하여 전위망으로 발전한다. 높은 냉간 가공상태에서는 높은 전위밀도 조직인 셀벽을 형성하는 셀 하부조직을 나타내게 된다.

Fig. 3⁽¹¹⁾은 0.82%C의 퍼얼라이트 조직을 갖는 1.5mmΦ 재료를 신선 가공하여 가공량별 채취한 샘플의 wire 종단면 방향의 TEM 사진을 나타낸다. (a)~(b)와 (d)~(e)에 나타난 바와 같이 저 가공도 재료인 0.72mm, 0.43mm에서는 화살표로 나타낸 페라이트 중의 전위라고 생각되는 부분이 명료하게 나타났으며, 전위는 세멘타이트 판에서 쏠려 있다. (g)~(h)에 나타난 고가공도 재료인 0.20mm에서는 화살표 부분에 페라이트 중의 전위에 의한 셀 구조라고 생각되는 조직이 존재한다.

2.2.3 냉간 가공에 의한 미세조직의 변화

최근의 연구에 의하면, 가공 경화에 대한 원인으로서는 퍼얼라이트 라멜라 간격의 미세화와 페라이트의 전위에 의한 강화 이외에 냉간 가공에 의한 세멘타이트의 분해와 같은 미세조직의 변화도 강화 요인의 하나라고 생각된다.

세멘타이트의 분해와 분해된 탄소의 존재 위치에 대해서는 많은 연구들이 있다. 大藤善弘 등⁽¹¹⁾은 진변형율 4.0의 냉간 신선에 의해 0.4%C 상당의 세멘타이트가 분해하며, 분해한 세멘타이트로부터 배출된 탄소는 페라이트의 격자간격을 계산해 본 결과 페라이트 중에는 고용하지 않고, 페라이트 중의 전위 근처나 페라이트/세멘타이트 계면에 편재할 가능성이 높다고 하였다. 尊井 梅三 등⁽¹²⁾에 의하면 신선 중에 세멘타이트의 분해가 일어나기 위해서는 C의 trap site가 되는 고 밀도 전위와 C의 확산 속도를 높이는 발열이 필요조건이다. 신선 가공변형의 증가와 함께 전위 밀도가 증가하고, 강도가 증가하기 때문에 가공 발열량도 상승하고 또한 필요한 C의 확산 거리도 신선 가공변형의 증가와 함께 짧아지기 때문에 신



(a) 0.72mmΦ (b) dark field image
 (c) electron diffraction (d) 0.43mmΦ
 (e) dark field image (f) electron diffraction
 (g) 0.20mmΦ (h) dark field image
 (i) electron diffraction

Fig. 3 TEM photographs of the drawn wires (longitudinal section) The incident beam direction is close to the two-beam condition

선 변형의 증가와 함께 세멘타이트의 분해가 일어나기 쉽다.

세멘타이트 분해에 의해 생성된 C의 전위 고착 강화가 가공경화 특성에 대해 중요한 역할을 하고 있다.

2.3 선경 효과

선경이 굵을수록 신선 가공 시 균일한 변형이 어렵고, 연성이 열화하기 쉽기 때문에 신선가공 변형을 크게 할 수 없어 고강도화가 어렵다. 따라서, 강선의 인장강도에 있어서 선경은 아주 큰 의미를 갖는다.

Fig. 4에는 각종 고강도 재료의 선경과 인장강도와의 관계를 나타내었다. 동일한 선경(10μm)으로 가공되었을 때 과공석강의 인장강도가 가장 높다. 인장 강도에 대한 선경 효과는 단편적으로

연구가 되고 있으나, 아직 규명되지 않았다. 선경효과가 규명된다면 steel cord의 고강도화 연구도 한층 더 진척될 것이다.

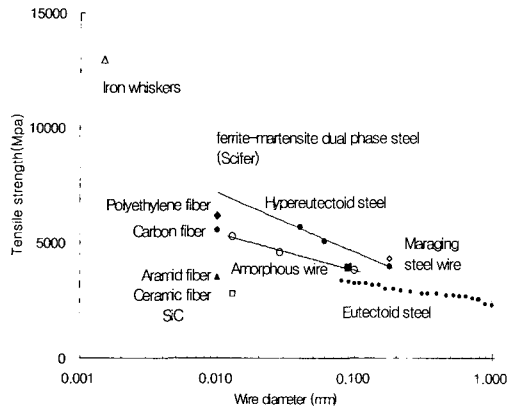


Fig. 4 Relationship between wire diameter and tensile strength of various materials

3. 고강도화의 한계

Steel cord와 같은 구조용 재료는 전위 등의 격자 결함을 갖고 있는 불완전 결정으로 그 한계 강도를 추정하기가 매우 어렵다. 河部와 高木은 예측된 전위강화, 입계 강화, 고용강화, 석출강화의 한계 값을 이용하여 고강도화 한계를 각각 5,000Mpa와 11,500Mpa로 계산하였다. 퍼얼라이트 강선의 고강도화 한계를 라멜라 간격이 주된 인자라고 가정하면, 앞의 식 (1)을 이용하여 인장강도의 한계 값을 추정할 수 있다. 세멘타이트 단위 결정립의 크기가 0.4nm인 세멘타이트 판의 변형한계를 고려하면, 그 때의 라멜라 간격이 3 nm이고 인장강도는 10,000Mpa이 된다. 따라서 현재의 최고 강도가 4,000Mpa임을 감안할 때, 향후 고강도화의 여지가 많으므로 steel cord의 고강도화는 계속적으로 진행될 것으로 생각된다.

서두에서도 말했듯이 steel cord는 제조 공정 뿐 만 아니라, 자동차 타이어에 사용되어서도 노면으로부터 받는 반복적인 충격과 굴곡응력에 견디어야 하므로 인장강도 뿐만 아니라 연성도 필요하다. 강선의 고강도화에 대한 장애물은 신선 가공량의 증가에 수반해 발생하는 delamination (염회시험 시에 관찰되는 시편의 길이방향의 갈라짐)이다. 연성의 지표인 delamination을 유발

하는 요인으로는 파텐팅재의 미세 퍼얼라이트 조직에 혼재하는 이상조직 (초석 페라이트, 초석 세멘타이트, 상부 베이나이트, 미고용 탄화물) 또는 비정상 신선에 의해 발생하는 미세 voids나 표면 결함을 들 수 있다.⁽¹³⁻¹⁴⁾ 榎井 梅 :는 냉간 신선가공에서 세멘타이트의 불균질 분해와 이 때 발생된 C가 전위에 편석하여 발생하는 페라이트 강도의 불균질로 인해 강도가 낮은 영역에 전단 응력이 집중하므로서 delamination이 발생할 수 있다고 하였다. 신선 조건에서 delamination을 억제하는 기술로서는 신선 시 발열을 제어하는 냉각신선, 저각도 다이스 신선과 표면의 잔류 응력을 압축잔류응력으로 하기위해 최종 다이스의 가공량을 분할하는 더블다이스 및 저 감면을 신선법등이 있다. 신선 후 처리로서는 반복 굴곡 (교정)의 방법이 delamination의 억제에 유효하다. 그러나, 아직까지 delamination 현상에 대한 본질적인 규명이 이루어지지 않은 상태이고, 선경이 굵을수록 delamination이 용이하게 발생하는 선경 효과에 대한 이론구축의 과제도 남겨져 있다.

4. 결론 및 향후 과제

이상에서 말한 바와 같이 고탄소 퍼얼라이트 강을 신선 가공에 의해 제조하는 steel cord는 현재 사용되는 공업용 재료중에서 최고 높은 강도의 재료이다. 경량화라는 시대의 요청에 부응하여 고강도화가 계속 진행되어 왔으며, 철강재료의 한계 강도에 도전이라는 점에서 고강도화의 최첨단에 서있다고 할 수 있다. 고강도 강선의 신선 기술이 급속하게 진보하고 있는 중이고, 몇몇 delamination의 발생기구와 개선 기술이 제안되어 고강도화에 기여하고 있지만, 선경 효과 등 아직까지 명쾌하게 규명되지 않은 것들도 있다. 인장강도에 대한 선경효과 또한 규명되어야 할 사항 중의 하나이다. 그럼에도 불구하고, 신선한 퍼얼라이트 강선의 한계강도는 약 10,000MPa(완전 결정립의 강도 및 세멘타이트 두께에서의 계산 결과)로 예측되기 때문에, 앞으로 steel cord를 더 고강도화 하는 것은 가능할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- (1) Hitoshi TASHIRO; 1994, 新日鐵技報 354, p. 39.
- (2) G.E.Diter; Mechanical metallurgy(SI metric edition), p. 184.
- (3) 落合征雄; 熱處理, 33-2(1993) 86.
- (4) I.Ochiai, M.Nagumo, T.Amakawa and T.Takahashi; Wire Journal, 15(1982) 5, 205.
- (5) J.R.Franklin, R.P.Preston and C.Allen; Wire Industry, 47(1980) 11, 967.
- (6) H.Bockenhoff and F.Schwire; Stahl Eisen, 83 (1963), 1616.
- (7) B. I.Edelson and W. M.Bladwin; Trans. ASM, 55(1962) 230.
- (8) 田代均, 佐藤洋; 日本金屬學會誌 55, 1078 (1991).
- (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) 大藤善弘, 浜田貴成; 철과강, vol. 86. (2000) No.2 p. 33.
- (12) 尊井 梅三, 田代均, 丸山直紀; 신선기술분과회의자료, 47 (1999).
- (13) I.Ochiai, S.Nishida and H.Tashiro; Wire Journal International, 26-12 (1993) 50.
- (14) N.Ibaraki, K.Makii, K.Ochiai and Y.Oki; Wire Journal International, 33-3 (2000) 122.