

## 교량용 고강도 강선 개발 동향

남원종\* · 박경태\*\* · 정진영\*\*\*

### Development of Steel Wires for Bridge Cables

W. J. Nam, K.T. Park and J.Y. Chung

#### 1. 서론

미래 사회에 있어서 인구 증가에 따른 인구 과밀화에 대한 개선책으로 향후 인간 활동의 공간 확보 및 공간 활용성 제고를 위해 구조물의 거대화 및 대공간화가 이루어질 것으로 기대된다. 이를 위해서는 경량 및 고강도 특성을 갖는 철강 건축 부재 사용이 필수적이다. 특히 초대형 구조물용 고강도 강선은 교량 및 건축구조물에 부과되는 하중의 대부분을 지지함과 동시에 외적 미관을 결정하며, 특히 콘크리트와 함께 사용되는 PC(prestressed concrete) 강선은 콘크리트 구조의 강화재로서 콘크리트가 갖지 못하는 인성 및 부가적인 강도를 부여하는 철강선재를 소재로 하는 핵심 건축 부재들이다.

최근 장대 교량의 경우 중앙 지경간 거리 2000 m 이상의 특수 초장대교가 일본, 유럽, 중국 등지에서 시공 중이거나 건설 계획되어 있으며, 거대 구조물의 경우 건축 구조는 철골 구조에서 콘크리트 구조로 변화하고 있다. 현재 전 세계적으로 시공 설계 중인 초장대 교량이나 거대 콘크리트 구조물에 사용되고 있는 강선 및 PC 강선 대부분은 철강 선재 및 제품 생산 기술에서 가장 앞선 일본 제품의 물성이 설계 기준으로 적용되고 있는 현실이다. 한편 국내에서는 PC 강선의 경우 현재 1800MPa급을 리비아 대수로관 보강용 강선으로 공급하고 있는 것이 대표적인 적용 사례이다. 그러나 특수 교량용 강선

의 경우는 국내에서 일본과 동등한 수준의 강선(wire)을 제조할 수 있는 충분한 기술력을 갖고 있음에도 불구하고, 최근 개통한 부산 광안대교 및 서해대교에 공급한 것이 유일하다. 이는 전술한 바와 같이 장대 교량의 설계 시공 설계사에 의해 작성되는 특수 시방서에 일본의 제품을 명시하고 있기 때문이다.

표 1에 현재 교량 및 건축용에 사용되고 있는 PC 강선 및 교량용 cable의 강도를 나타내었다.

Table 1 Tensile strength of PC wire and cables for bridges (MPa)

구분	PC 강선	사장교용 wire	현수교용 wire
국내	1800	1800	1800
일본	2000	1800	1900

#### 2. 국내 외 관련기술의 현황

세계 주요 현수교의 중앙지경간 거리와 건설에 사용된 강선의 강도를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에 보인 바와 같이 1990년대까지는 전 세계적으로 1600MPa급 강선이 사용되었으나, 세계 최장 현수교인 일본의 명석해협대교(중앙지경간 거리 1990m)의 건설에 세계 최초로 1800MPa급 강선이 적용되었다. 1800MPa급 강선은 일본의 NSC, Kobe제철소가 동경제강과 함께 10 여

\* 국민대학교 신소재공학부  
\*\* 한밭대학교 신소재공학부  
\*\*\* 고려제강 기술연구소

년에 걸쳐 개발하였으며, 세계 철강사에 큰 획을 긋는 기술 개발로 일본 철강 기술의 위상을 한 단계 높인 것으로 평가되고 있다. 현재 건설 중인 일본 동경대교에는 2000MPa 강선이 일부 구간에 적용되고 있다. 이와 같은 일본의 장대교량은 뛰어난 외적 미관을 가지고 있어 건설 초기부터 국가차원의 대대적인 홍보에 의해 세계적 관광 명소로 육성, 부수적인 경제적 효과를 나타내고 있다. 일본의 1800MPa급 이상 초고강도 강선 제조의 기술적 breakthrough는 관련 업체의 연구 컨소시움에 의한 고 Si 함유 공석 강 합금 설계, 선재 제조 및 wire 가공의 일관 제조기술 개발에 있다.<sup>(1-2)</sup> 특히 일본 국립연구소인 NIMS의 Hono 박사 연구팀은 합금원소의 원자 위치를 mapping할 수 있는 3차원 영상 원자 현미경 시스템을 이용하여 wire 가공시 합금원소의 거동을 파악, 극초고강도 강선을 개발하고 있으며, 해당 분야 연구에서 세계적으로 독보적인 위치를 점하고 있다.<sup>(3)</sup> 일본에서는 이러한 국립연구소, 학계, 기업간 협동연구 체제에 의해 지속적인 신강종 개발과 가공 응용기술이 이루어지고 있는 반면 국내에서는 전무하다.

특수 장대교량용 강선의 경우 편이상 등급은 강도 기준으로 하고 있다. 일본 명석해협 대교 건설 이전에는 1600MPa 급이 전 세계 교량 건설에 이용되었으나, 1800MPa 급 강선이 최초로 명석해협 대교 건설에 적용된 후, 최근 일본 동경만 대교에는 2000MPa 급이 일부 구간에 적용되고 있다. 국내의 경우에도 1800MPa 급이 개발 완료되어, 서해 대교 및 광안 대교 건설에 적용되었다.

표 2에 국내 상용재 및 일본 상용재의 주요 화학 성분을 비교하였다. 일본재의 경우 1800 MPa 급 이전에는 Fe-0.8C-0.2Si-0.8Mn의 선재가 1600 MPa 급으로 사용되어 왔으나, 일본 명석해협 대교에 기존 대비 Si 함량을 대폭 증가시킨 Fe-0.82C-1.0Si-0.8Mn 성분의 1800MPa 급이 적용되었다. Si 함량을 대폭 증가시킨 이유는 Si가 페라이트 고용 원소로서 페라이트-시멘타이트 계면에 주로 편석되어 아연도금시 시멘타이트의 분해를 억제하기 때문이다. 동경만 대교에 적용되고 있는 2000 MPa 급은 Fe-0.88C-1.2Si-0.5Mn-0.3Cr을 주성분으로 하고 있다. 이는 1800 MPa 급에 비해 C, Si의 함량을 증가시킨 외에 Cr을 추가로 첨가한 것으로서, C 및 Cr의 추가 첨

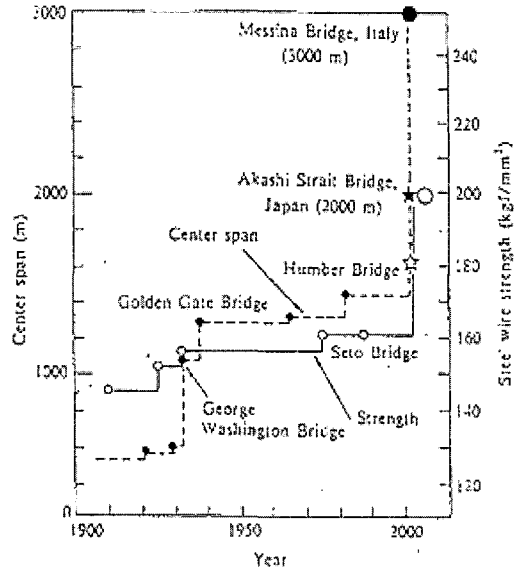


Fig. 1 The relationship between strength of steel wire and center span of bridges

가는 필라이트 층상간격을 더욱 미세화 시켜 원소재의 강도를 대폭 증가시키며, Si를 1800 MPa 급에 비해 0.2% 더 첨가함으로써 아연도금시 시멘타이트의 분해 억제 효과를 더욱 개선시킨 합금설계이다. 2000MPa 급의 경우 경화능 향상 원소인 Cr의 첨가로 또 다른 경화능 향상 원소인 Mn의 함량을 감소시켰다. 그러나 기본적으로는 과공석 조성이므로 신선시 파단을 야기시키는 초석 시멘타이트 석출을 억제하는 급속냉각이 요구된다. 국내재의 경우 Fe-0.8C-0.2Si-0.8Mn을 기본 성분으로 하는 SWRS80, SWRS82B가 대부분 특수 장대교량용 강선의 원소재로 공급되고 있으며, V를 함유한 고 Si 함량의 POSCABLE 80(Fe-0.8C-0.6Si-0.8Mn-0.05V)이 1800MPa 급으로 개발되어 있다.

PC 강선의 경우 원소재는 특수 장대교량용 강선의 원소재인 선재와 유사한 합금성분을 갖고 있으며, 신선시 신선 가공량에 의해 특수 장대교량용 강선의 강도와 차이가 난다. 그러나 강도 저하를 야기시키는 아연도금 과정을 거치지 않으므로 특수 장대교량용 강선과 같이 시멘타이트 분해 억제 합금원소인 Si 함량을 기존 그대로 유지시키며, 대신 C, Mn, Cr의 함량 제어가 필요하다.

Table 2 Chemical compositions of steel wires for bridges

		(wt.%)					
	강종	C	Mn	Si	Cr	V	
국내	SWRS80B or 82B	0.80-0.82	0.80	0.20	-	-	
	POSCABLE80	0.80	0.80	0.60	-	0.05	
일본	180 kg/mm <sup>2</sup> 급	0.82	0.80	1.00	-	-	
	200 kg/mm <sup>2</sup> 급	0.88	0.50	1.20	0.30	-	

### 3. 교량용 강선 및 PC 강선의 고강도화

특수 장대교량용 강선 및 PC 강선은 직경 10-12mm의 공석강 혹은 과공석 선재를 원소재로 5-5.5mm 직경까지 냉간신선 공정을 거친 후 제품 특성에 요구되는 stress relieving 열처리 혹은 아연도금 등의 후처리 공정을 거쳐 제조된다.(Fig. 2) 이러한 제조 공정 중 제품의 최종 기계적 성질에 영향을 미치는 인자는 (1) 원소재의 강도, (2) 냉간신선 가공량, (3) 후열처리 공정시(아연도금 혹은 안정화 열처리) 신선가공 미세조직의 변화이다. 이들 세 인자의 최종 강선 및 강선의 강도에 미치는 영향은 다음과 같다.

특수 장대교량용 강선 및 PC 강선은 세선(細線)과는 달리 신선 도중 펄라이트 층상조직 미세화를 위한 중간 patenting 열처리를 거치지 않으므로 원소재의 강도에 비례하여 최종의 강도가 증가하게 된다. 원소재인 공석조성의 완전 펄라이트 층상조직의 선재 강도는 일반적으로 Hall-Petch 관계에 의해 펄라이트 층상간격이 미세할수록 증가한다. 펄라이트 층상간격은 공석강 합금원소의 페라이트 혹은 시멘타이트 내의 고용도와 상변태시 냉각조건(등온 상변태의 경우 상변태 온 혹은 연속냉각의 경우 냉각속도)에 따른 확산속도에 의해 결정된다. 따라서 원소재의 강도를 증가시키기 위해서는 실제 공정의 냉각조건을 고려한 합금설계가 필수적이다. 냉간 신선재의 강화는 신선가공 중 펄라이트 층상간격 미세화, 페라이트 내 높은 전위 밀도 도입으로 인한 가공강화에 주로 기인하므로 원소재의 신선 가공성 확보가 필수적이다. 냉간 신선시 신선 가공성은 원소재의 강도와 유사하게 펄라이트 층상간격이 미세할수록 증가한다. 그

러나 원소재의 강도 및 신선가공성 확보를 목적으로 첨가하는 펄라이트 층상간격 미세화 합금원소의 대부분(C, Mn, Cr, V 등)은 강의 경화능을 향상시켜 선재 압연 후 냉각 시 마르텐사이트와 같은 경(硬)한 저온 조직을 형성시켜 신선시 파단을 일으키는 주 원인이 되므로 이를 고려한 합금설계가 이루어져야 한다.

신선된 강선들은 가공 중 재료 내부에 축적된 변형 에너지를 감소시키기 위한 stress relieving 열처리, 부식 방지의 목적으로 아연 도금 등의 공정을 거치게 된다. 이러한 공정은 시간은 짧으나 400 C 이상의 고온에서 실시하게 된다. 이 경우 극심한 신선 가공을 받은 시멘타이트 조직은 절단 및 분해가 되며, 이는 페라이트 간격을 증가시키는 효과를 일으켜 결과적으로는 펄라이트 층상간격이 증가하게 되어 최종 제품의 강도를 저하시킨다. 따라서 신선가공시 발생하는 시멘타이트 절단 및 분해 억제를 위한 합금설계도 고려되어야 한다.

위에 언급한 바와 같이 특수 장대교량용 강선 및 PC 강선의 고강도화를 위해서는 다음 목적의 원소재 합금설계 및 개발된 합금 성분에 대한 최적 냉각(즉, 상변태) 조건 설정이 핵심 기술이므로 필히 개발이 이루어져야 한다.<sup>(4-10)</sup>

- (1) 펄라이트 층상간격 미세화
- (2) 신선가공성 확보
- (3) 선재 압연 후 냉각 시 저온 조직 억제
- (4) 시멘타이트 절단 및 분해 억제

이러한 배경 하에 현재 많이 이용되고 있는 합금원소 중, 공석강 제품에 있어서 가장 많이 사용되는 합금원소는 Cr 또는 V으로, 현재 대부분이 고강도 wire rope, 피아노 선재 및 PC강선 등의 용도로 사용되고 있다. 공석강에 첨가되는 합금원소인 Cr과 V는 비록 신선가공성을 다소 저하시키는 경향은 있으나 펄라이트 조직 시멘타이트 층상간격의 미세화로 강도 향상의 효과가 매우 큰 원소인 공통점으로, 국내에서는 수요가의 요구에 따라 소재를 공급하게 되어 두 강종이 혼용되어 사용되고 있다.

교량용 강선 및 PC 강선은 제조 공정뿐만 아니라, 건축 구조물에 사용되어서도 반복적인 충격과 굴곡응력에 견디어야 하므로 인장강도뿐 아니라 피로강도 및 연성도 필요하다. 특히 건축 구조용 강선에서 요구되는 특수한 성질인

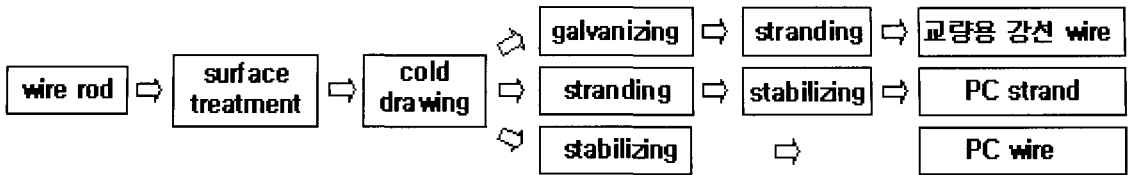


Fig. 2 Processing of steel wire for bridge cable, and PC strand and wire

relaxation에 대한 높은 저항성이 요구된다. 따라서 강선에 있어서 relaxation에 대한 저항성을 높이기 위해서는 강선 제조 후 도금 또는 stress relieving 열처리하는 경우 발생하는 현상인, 시멘타이트의 구상화에 의한 강도 저하를 되도록 억제하는 것이 바람직하다. 이를 위해서 신선 가공 방법의 개선 및 합금성분의 변경 등 많은 노력이 진행되어 왔으나, 합금원소 Si의 첨가가 가장 효과적으로 알려져 있다. 이 합금성분은 일본 명석대교에 사용된 cable에 적용된 합금성분으로, 신선 가공 중에 절단 또는 분해된 시멘타이트가 도금처리 과정에서 구상화된 직후 성장하여 조대한 탄화물을 형성하는데 합금원소인 Si이 탄화물의 성장을 억제하여 미세한 시멘타이트 입자 분포를 형성하여 강선의 강도 저하 방지는 물론 relaxation 성질의 향상을 이루게 된다.

또한 강선의 고강도화에 대한 장애물로서 신선가공량의 증가에 수반해 발생하는 딜라미네이션(delamination, 염회시험 시에 관찰되는 길이 방향의 갈라짐) 들 수 있다. 연성의 지표인 딜라미네이션을 유발하는 요인으로선 선재의 미세 펄라이트 조직에 혼재하는 이상조직 (초석 페라이트, 초석 시멘타이트, 상부 베이나이트, 미고용 탄화물) 또는 비정상 신선에 의해 발생하는 미세 voids나 표면 결함을 들 수 있다.<sup>(11-12)</sup> 榑井梅三은 냉간 신선가공에서 세멘타이트의 불균질 분해와 이 때 발생된 C가 전위에 편석하여 발생하는 펄라이트 강도의 불균질로 인해 강도가 낮은 영역에 전단응력이 집중하여 딜라미네이션이 발생할 수 있다고 하였다.<sup>(10)</sup> 신선 조건에서 딜라미네이션을 억제하는 기술로서는 신선시 발열을 제어하는 냉각신선, 저각도 다이스 신선과 표면의 잔류 응력을 압축잔류응력으로 하기위해 최종 다이스의 가공량을 분할하는 더블다이스 및 저감면을 신선법등이 있다. 그러나,

아직까지 딜라미네이션 현상에 대한 본질적인 규명이 이루어지지 않은 상태이고, 선경이 굵을수록 딜라미네이션이 용이하게 발생하므로, 교량용 강선이나 PC 강선과 같이 가공해야 하는 선재의 선경이 큰 경우 시급히 해결해야 할 과제로 남겨져 있다.

#### 4 결론 및 향후 과제

이상에서 말한 바와 같이 고탄소 펄라이트 강을 신선 가공에 의해 제조하는 교량용 강선 및 PC 강선은 현재 사용되는 공업용 재료 중 높은 강도의 재료로 분류된다. 경량화라는 시대의 요청에 부응하여 고강도화가 계속 진행되어 왔으며, 철강재료의 한계 강도에 도전이라는 점에서 고강도화의 최첨단에 서있다고 할 수 있다.

교량용 고강도 강선의 개발을 위해서는, 기존에 알려진 것과 같은 펄라이트 층상간격의 미세화 및 합금원소 첨가에 의한 가공경화 증가에 의한 방법들이 사용되어 왔으나, 향후 건축 구조용 재료로서 한단계 upgrade하기 위해서는, 신선가공 중의 시멘타이트의 절단 및 분해 억제, 도금 처리시 시멘타이트의 구상화 및 조대화 억제 및 딜라미네이션의 방지와 같은 문제점의 해결과 동시에 강도의 증가를 이룩할 수 있는 기술개발이 필요하다.

이러한 배경 하에 펄라이트 강선에 특성에 영향을 주는 합금성분 및 미세조직, 가공방법 등의 여러 인자의 영향에 대한 재검토를 기반으로 교량용 강선의 고강도화가 가능할 것으로 보인다.

#### 참고 문헌

(1) T.Tarui, S.Nishida, A.Yosie, H.Ohba, Y.Asano,

- I.Ochiai and T.Takahashi; Nippon Steel Tech. Report, 80 (1999) p. 44.
- (2) K.Maki, H.Yaguchi, M.Kaiso, N.Ibaraki, Y. Miyamoto and Y.Oki; Scripta Mater., 37 (1997) p. 1753.
- (3) K. Hono, M. Ohnuma, M. Murayama, S. Nishida, A. Yoshie and T. Takahashi; Scripta Mater., 44 (2001) p. 977.
- (4) Hitoshi TASHIRO; 新日鐵技報 354 (1994) p39.
- (5) I.Ochiai, M.Nagumo, T.Amakawa and T. Takahashi; Wire Journal, 15 (1982) p. 205.
- (6) 田代均, 佐藤洋; 日本金屬學會誌 55 (1991) p. 1078.
- (7) T.Takahashi and M.Nagumo; Trans.JIM, 11, (1970) p. 113.
- (8) 尊井 梅三, 田代均, 佐藤洋; 재료와 프로세스, 5 (1992) p. 2062.
- (9) 大藤善弘, 浜田貴成; 철과강, 86 (2000) p.33.
- (10) 尊井 梅三, 田代均, 丸山直紀; 신전기술분과 회의자료, 47(1999).
- (11) I.Ochiai, S.Nishida and H.Tashiro; Wire Journal International, 26 (1993) p. 50.
- (12) N.Ibaraki, K.Makii, K.Ochiai and Y.Oki; Wire Journal International, 33 (2000) p. 122.