

〔기술자료〕

미세조직 제어에 의한 고탄소 강선의 최근 연구 동향

자료정리 경북대학교
교수 정인상

Currents Researches on Controlling Microstructure in High Carbon Steel Wires

In-Sang Chung

1. 머리말

1998년 4월 5일 세계에서 가장 긴 현수교인 아카시 해협대교(주 : 일본의 혼슈와 시코쿠를 연결하는 다리로서 名石海峡에 건설됨)가 개통되었다. 이 다리의 건설에는 세계 제일의 목표로 하였기 때문에 혁신적인 기술이 많이 채택되었다. 소재측면의 주목할 만한 신기술의 하나는 현수교의 생명이라고 할만한 메인 케이블용 와이어에 세계 최초로 180kg/mm²급의 강선(이전까지는 160kg/mm²이 사용된 것이다. 이와 같은 고강도 강선(鋼線)을 사용함으로써 시공 경비를 절약했음은 물론, 길이가 세계 최장이라는 상반되는 과제를 동시에 해결할 수 있었던 것이다.

그림 11)에서 알 수 있듯이 현수교용 아연도금 강선의 강도는 오랫동안 160kg/mm²급을 넘을 수가 없었다. 그러나 아카시 해협대교에는 180kg/mm²급이 사용된 것이다. 그림 2에는 메인 케이블의 단면구조를 도식적으로

로 나타내었다. 전체 지름이 약 1m가 넘는 이 메인 케이블은 스트랜드(strand)라고 부르는 강선 다발로 구성되어 있고, 부식환경(바다 위에서 사용되므로)에서 사용되는 까닭에 최종 공정에서 용융 아연으로 도금처리 된다. 그러므로 고강도 강선의 강도는 이 용융 도금 공정에서의 강도저하를 어떻게 줄이느냐가 문제의 핵심인 셈이다.

고탄소 강선은 신선(伸線)처리에 의해 가공경화를 활용하여 강도를 높일 수 있으며, 용융 아연 도금 공정에서 온도상승으로 연화(軟化)가 일어나게 된다. 이때의 강도저하를 막을 목적으로, 조직을 과공석으로 만드는 성분 제어나 신선할 때 가공율을 높여서 더 큰 가공경화를 노리게 되면, 단순히 강도는 확보할 수 있을 망정 고강도화에 따른 연성과 인성이 떨어지는 문제에 직면하게 된다. 이것은 구조재료로서의 신뢰성에 문제가 발생하므로, 현수교용 메인 케이블에는 도저히 사용할 수 없는 방법이다. 이런 이유에서 고강도화와 더불어 연성과 인성의 확보라는

* 이 자료는 熱處理(J. of The Japan Society for Heat Treatment), 38(1998)307에 게재된 Kochi Makii and Nobuhoko Ibaraki(榎井浩一, 茨木信彦)의 기술해설, "Currents Researches on Controlling Microstructure in Case of High Carbon Steel Wires"를 번역 정리한 것이다. 두 분은 (주) 神戸製鋼所 技術開發本部 材料研究所 소속으로 세계 최초로 실용 180kg/mm² 급 고강도 강선을 직접 개발한 주역들이다.

양면성을 동시에 가능하게 하는 "미세조직 제어"라는 재질 제어기술이 필요하게 된 것이다.

이것은 고탄소 강선의 미세조직 제어기술이 필요하다는 사회적인 수요의 한 예이다. 한편 이러한 수요에 능동적으로 적용 가능한 물리적 해석 기술(장비를 포함하여)의 진보도 이 연구를 가능하게 한 배경이 될 수 있다. 펄라이트 조직을 갖는 고탄소 강선의 최소 조직단위인 층상(lamella)의 간격이나 시멘타이트의 두께는 나노미터(10⁻⁹m) 수준의 조직이며, 이 조직을 해석하고 제어하는 데에는 최근의 물리적 해석장비(FE-TEM<전계전자현미경>이나 AP-FIM<전계

이온 현미경>처럼 시료로부터 튀어나오는 개개 원자를 검출 가능한 장비)들의 도움 없이는 불가능한 일이었다고 말할 수 있다. 바꾸어 말하면 1990년대가 되어서 비로소 고탄소 강선의 나노 스케일 조직 제어가 가능한 환경이 조성되었다고 말할 수 있다.

이 보고서에서는 지금까지 논의된 고탄소 강선의 고강도화 기구에 관한 모델 문제를 지적하고, 고탄소 강선의 나노 스케일 미세조직 제어에 관한 연구에 관하여 소개한다. 또한 앞으로 미세조직의 관점에서 고강도화 기구에 관한 체계적인 모델을 구축하는 데 유용하다고 생각되는 연구의 예와 최근 연구 동향에 관하여 소개한다.

2. 고탄소 강선에서 미세조직을 고려한 고강도화 기구

옛날에는 Orowan기구에 기본을 둔, 전위의 평균 운동 거리가 층상간격과 거의 같고, 이것이 신선 변형률 ϵ 의 함수가 되므로, 변형응력, σ 는 $\exp(\epsilon/4)$ 에 비례한다는 모델이 제안²⁾되어 있다. 이 모델은 신선함으로서 전위의 평균 운동 거리가 층상 간격이 감소하고 있는 것을 잘 설명하고 있다.

한편 최근 가장 잘 정리되어 있는 피아노 선의 가공경화에 관한 모델로서 西田 등^{3,4)}의 모델이 있다. 이 모델에 의하면 신선된 피아노 선의 강도는 다음 (1)식 또는 (2)식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = V_0\sigma_0 + V_a\sigma_{a_0} + V_a\alpha\mu b \rho^{1/2} \quad (1)$$

$$= V_0\sigma_0 + V_a[\sigma_{a_0} + f(s)\exp(0.5)] \quad (2)$$

여기서 V_0 : 층상 시멘타이트의 체적율, V_a : 층상 페라이트의 체적율, σ_0 : 층상 시멘타이트의 변형응력, σ_{a_0} : 층상 페라이트의 초기 변형응력, α : 정수, μ : 강성율이며, b : Burgers 벡터, ρ : 층상 페라이트

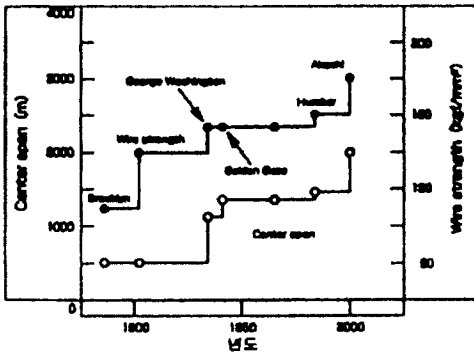


그림 1 대형 현수교의 중앙경간거리와 메인케이블용 아연도금 강선 강도의 변천(그림 내의 명칭은 케이블이 사용된 다리 이름).

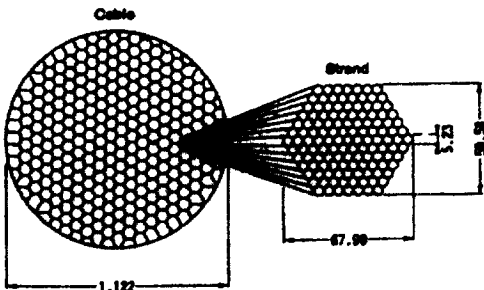


그림 2 메인 케이블의 단면(길이 단위 mm).

중의 전위밀도, $f(s)$ 는 층상 간격의 함수이다 이 모델에는 다음 세 사실을 전제로 하고 있다. 즉 1) 층상 시멘타이트는 가공경화 하지 않는다. 2) 층상 페라이트는 신선 도중에는 단조롭게 전위가 증식되고, 포화되지 않는다. 3) 고탄소 강선의 가공경화 거동은 층상 페라이트의 전위에 의해 강화되고 이의 지배를 받는다.

그러나 층상 페라이트에서 식 (1)을 설명할 수 있을 정도의 전위밀도가 관찰되지 않는다. 또한 전술의 모델³⁴⁾에 의하면 진변형을 1.5 정도에서 층상 페라이트의 전위에 의한 강화량은 1000MPa로 추측된다.(그림 3⁴⁾) 그림 4에 나타내었듯이 신선공정 후 425°C에서 어닐링처리(공업적으로는 bluing이라고 부른다)하면 연신율이 완전히 회복되어 있고, 신선으로 도입된 층상 페라이트에 도입된 전위가 회복된 상태와 회복되지 않은 상태에서의 강도 차이는 대략 300MPa이다⁵⁾. 西田 등은 신선에 의한 층상 페라이트 내의 전위밀도 변화를 정량적으로 측정, 평가하지 않고, 층상 페라이트 중에서 전위가 진변형율에 따라 단조롭게 증가한다고 가정하였다. 그러나 최근 FE-TEM과 같은 고분해능

투과전자현미경으로 관찰한 결과, 西田 등이 예상한 만큼 층상 페라이트에서 높은 전위 밀도가 관찰되지 않았다. 사진 1(steel code 선, 진변형율 3.58)에서 알 수 있듯이 범용 TEM으로는 고탄소 강선에서 진변형율 3.0 이상이 되면 층상조직을 명확하게 구분하여 관찰 할 수가 없었다. 그러나 고분해능 TEM에서는 층상 구조를 명확하게 포착할 수 있고, 층상 페라이트 중에 전위로 추정되는 이미지가 나타나기는 해도 西田 등이 가정한, 고밀도의 전위가 존재하지 않음을 확인할 수 있다.

한편 범용 TEM 관찰 결과는 층상구조가 신선방향으로 놓여 있다는 정도만 알 수 있을 따름이고, 전위가 고밀도로 존재할 것으로 추정하였다. 그러나 고분해능 TEM의 보급으로 전위밀도가 과대 평가된 것이 확인되었으며, 동시에 층상 시멘타이트 막 두께에 주목할만한 점이 있는 것을 발견하였다.⁶⁾ Patenting한 직후, 즉 신선하기 전의 층상 시멘타이트 막 두께는 10nm정도이다. 그러나 진변형율 3.58정도의 층상 시멘타이트 막 두께는 2-3nm로 되어 있고, 층상 시멘타이트가 층상 페라이트에 상당하는 높은

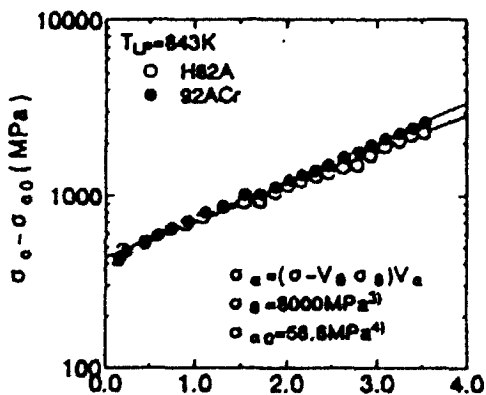


그림 3 전위 강화 모델에 기반을 둔 가공 강화 기구.

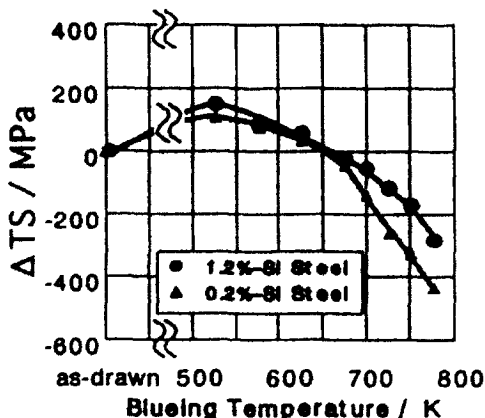


그림 4 1.2% Si강과 0.2% Si강에서 bluing 온도에 의한 ΔTS의 변화.

소성변형능을 가지고 있음을 알았다. 또한 신선 도중에 층상 시멘타이트 자신이 그 결정성이 바뀌고 있다는 보고⁵⁾도 있으며, 범용 TEM을 사용할 때 제안된 강화기구에 관한 모델이 수정되어할 필요가 있게 된 것이다.

최근 층상 시멘타이트 내부의 조직 형태⁶⁻¹¹⁾, 층상 페라이트의 원자 수준의 분석¹²⁻¹⁵⁾을 구사한 연구가 개시되었으며, 이와 같은 실험과 해석의 결과가 쌓여서 원자 크기의 미세조직인자와 기계적 성질에 관한 모델구축이 가능하게 될 것으로 판단된다.

지금까지 제안되어 발전되어 온 고탄소 강선의 미세조직을 고려한 고강도화 기구의 모델들을 시대별로 정리하여 요약하면 다음과 같다.

제 0기 모델 : 펄라이트를 단순한 층상구조로만 보고, 층상 간격만으로 강도를 설명한 모델¹⁾.

제 1기 모델 : 펄라이트를 각 구성 조직(층상 페라이트, 층상 시멘타이트)으로 분리하여, 층상 간격에다 각 구성되는 조직인자를 고려한 모델. 그러나 물리적 해석수단이 부족하여 구성 조직인자의 영향이 제대로 반영되지 못한 모델³⁻⁴⁾.

제 2기 모델 : 90년대 들어 해석수단의 진보에 따라 1기 모델을 재검토하는 단계의 모델. 그러나 초미세조직의 관찰과 해석에만 주력하여 고강도화 기구가 체계적이며 통일적으로 설명할 수 있는 단계까지 발전되지 못한 모델⁷⁻¹⁵⁾. 이 내용은 97년도에 완료된 일본 철강협회의 “철강의 고강도화 연구회” (6, 14, 19)에서 전체 현상을 잘 정리하여 놓았다.

제 3기 모델 : 이것은 현재 남아있는 연구 과제이며, 앞으로 고탄소 강선의 초 고강도화를 위해서 연구방침이라고 할 만한 주제이다.

제 2기에서 다룬 초미세조직과 기계적 성질과의 관계를 더욱 분명하게 밝히고, 초미세조직을 정확하고 정밀하게 제어하는 기술을 확립하여 초고강도를 실현시킬 수 있는 모델이다. 이것은 구조재료 연구팀을 중심으로 초미세조직에 관한 분석적 연구 자료를 축적하고 집대성하여 이 모델을 완성시켜 가는 것이라고 생각된다.

3. 미세조직제어에 주목한 최근의 연구동향

3.1 층상 시멘타이트 내부의 미세조직에 주목한 연구

여기서 소개하는 연구는 머리말에서 언급한대로 사회적 수요가 있는 거대한 현수교를 건설하는데 사용되는 메인 케이블용 고강도 용융 아연 도금강선의 연구가 주체가 되고 있다. 단순하게 과공석조직으로 하거나 합금첨가에 의한 고강도화로서는 연성과 인성이 떨어지는 까닭에 구조재료의 실용화가 어렵다는 과제를 극복하려는 목적으로, 지금까지 시도되지 못했던 나노스케일(원자 크기 수준)의 조직해석과 제어기술이며, 이를 통해 고강도화와 연성과 인성이 확보될 수 있다는 연구 예이다.

구체적으로 말하자면, 아연의 용융 도금 공정에서 연화특성에 미치는 Si의 영향을 미세조직의 관점에서 기초적인 검토를 한 것이다. blueing에 의해 아연 도금처리를 모사하여 기계적 성질과 층상 시멘타이트의 나노구조와의 관련성을 조사하였다. 여기에는 표 1에 기재된 1.2% Si강과 0.2% Si강을 사용하였다. 두 강종을 직경 11.0mm까지 열간 압연한 후, 납 패턴팅처리(950°C에서 오스테나이트화시키고 550°C에서 등온변태)를 하고, 직경 4.9mm까지 신성가공 공정을 거쳤다.

용융 아연도금공정을 모사하기 위해 이 강

선을 blueing(균열시간 15분, 온도 300-500°C)처리 하였다. 이렇게 하여 얻어진 강선의 기계적 성질을 인장시험과 비틀림 시험(시료길이는 직경의 100배, 즉 500mm)으로 평가하고, 그 조직을 관찰하였다.

3.1.1 아연 도금 강선의 부연화특성에 미치는 Si의 영향

Yamaoka 등¹⁷⁾에 의해 Si 첨가형 아연도금 강선의 우수한 템퍼 연화 특성에 관한 보고가 있지만, 그 Si의 첨가영향을 좀 더 상세하게 조사하기 위하여 1.2% Si강과 0.2% Si강의 blueing 특성을 비교하였다.

Table 1. 시료의 조성

시료이름	C	Si	Mn	P	S
0.2% Si 강	0.90	0.22	0.35	0.014	0.006
1.2% Si 강	0.87	1.21	0.73	0.006	0.004

그 결과를 그림 4에 나타낸다. 여기에서는 식 (3)에서 정의한 템퍼링에 의한 연화량, ΔTS 로 두 강종을 비교한 것이다.

$$\Delta TS = TS(\text{신선한 후 인장강도}) - TS(\text{blueing 후 인장강도}) \quad (3)$$

여기서 TS는 두 강의 각 조건에서 구한 인장강도를 나타낸다. 이 두 강종 모두 527K에서 스트레인 시효가 최대가 되고, 그 후 673K까지 완만하게 연화되고 있다. 그러나 698K이상에서는 0.2% Si강만이 급격하게 연화되고 있는 것을 알 수 있다.

결국 Si의 첨가에 의해 템퍼링 연화에 대한 저항이 향상되는 것은 698K 이상이며, 이때 어떤 내부조직의 변화에 Si가 크게 영향을 미치고 있다는 것을 의미하고 있다. 그러나 이 온도 영역에서 TEM을 이용하여 층상조직의 변화를 조사¹⁸⁾ 하였으나 층상간격의 변

화는 전혀 영향이 없었으므로 다른 인자의 영향을 조사해 볼 필요가 있었다.

3.1.2 Si의 blueing 연화 억제효과에 미치는
 층상시멘타이트 내부 구조 변화

앞에서 설명한 연유로 층상 시멘타이트의 내부구조에 주목한 연구가 진행되었다⁸⁾. 시료를 전해하여 추출한 잔사에서 얻은 층상 시멘타이트의 내부구조의 변화가 없는지를 TEM으로 조사하게 된 것이다. 신선공정 후 blueing처리한 강선 중에 층상 시멘타이트는 단순한 판상 단결정 상태인 것이 아니라 수십 나노미터 정도의 입자상의 미세 시멘타이트의 집합체로서 존재한다는 것을 확인하였다. 이것을 그림 5에 모식적으로 나타내었다. 이렇게 나노 스케일의 층상 시멘타이트가 입자상 집합체로 존재하고 있는 상태를

“층상 시멘타이트의 나노구조”라고 부른다.

사진 2에 1.2% Si강과 0.2% Si강의 층상 시멘타이트의 구조를 나노 입자의 지름으로 비교하여 놓았다. 같은 온도 425°C에서 blueing한 경우 1.2% Si강이 더욱 입자의 지름이 미세한 것을 알 수 있다. 고온인 475°C

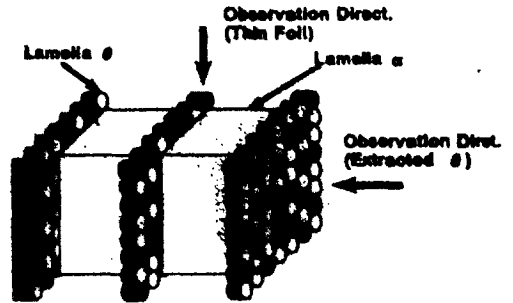


그림 5 층상구조와 층상 시멘타이트의 나노구조의 모식도.

에서는 1.2% Si강의 지름이 425°C에서 0.2% Si강의 지름 정도로밖에 성장하지 않는 것을 알 수 있다. 결국 Si의 첨가에 의해 나노구조가 더욱 미세화 된 것을 확인할 수 있다.

Bleing 후의 층상 시멘타이트의 나노구조와 기계적 성질과의 관계를 조사하였다. 층상 시멘타이트 내부의 나노입자 지름과의 관계를 그림 6에 나타내었다. 나노입자 지름이 미세화 됨에 따라 항복응력(YS), 인장응력(TS), 단면감소율(RA), 뒤틀림 회수(TN)가 향상되며, 강도가 높으면서 연성도 좋아진 것을 알 수 있다. 그러나 연신율(EI)은 나노입자 지름에는 의존하지 않고 있다.

그림 7에는 나노입자의 지름과 blueing 연화저항과의 관계를 앞의 ΔTS 로서 평가한 결과이다. Si의 함량에는 관계없이 연화량은 층상 시멘타이트의 내부구조에는 좋은 직선 관계에 있다. 결국 Si에 의한 용융 아연 도금 강선의 기계적 성질은 층상 시멘타이트의 내부구조 미세화에 영향을 미치고 있다는 사실을 알았다. 강 중에서 탄화물을 형성하지 않는 Si가 어떻게 층상 시멘타이트의

내부구조를 미세화 시키는 가는, FE-TEM의 나노스케일 EDX로서 여러 점분석과 GIF(Gatan사의 Imaging Filter)를 이용하여 조사하였다. GIF라고 하는 것은 TEM 시료 중에서 원소와 전자선의 흡수에 의한 입사 전자선과 투과전자선의 에너지 손실을 계측하는 전자선 흡수분광(Electron Energy Loss Spectroscopy)을 사용하여 단면의 농도분포도를 그리는(mapping) 화상처리장치로서 그냥 Imaging Filter라고 부르는 장치의 일종이다.

그림 8에 1.2% Si강에서 추출한 전해 잔사로부터 얻은 층상 시멘타이트 중의 나노입자 계면에 존재하는 Si의 농도를 EDX로서 나노스케일로 여러 지점을 점분석한 결과이다. 그 결과 나노 입자의 계면에 Si이 농축되어 있다는 사실을 확인하였다. 또한 1.2% Si강의 TEM 막박 시료로부터 얻은 페라이트/시멘타이트 계면에서도 농축되어 있는 Si을 GIF로서 확인하였다. 그 결과가 사진 3이다. 사진 3 (a)는 제로 로스 후, (b)는 Si mapping상이다. 제로 로스 상은 거의 명시야

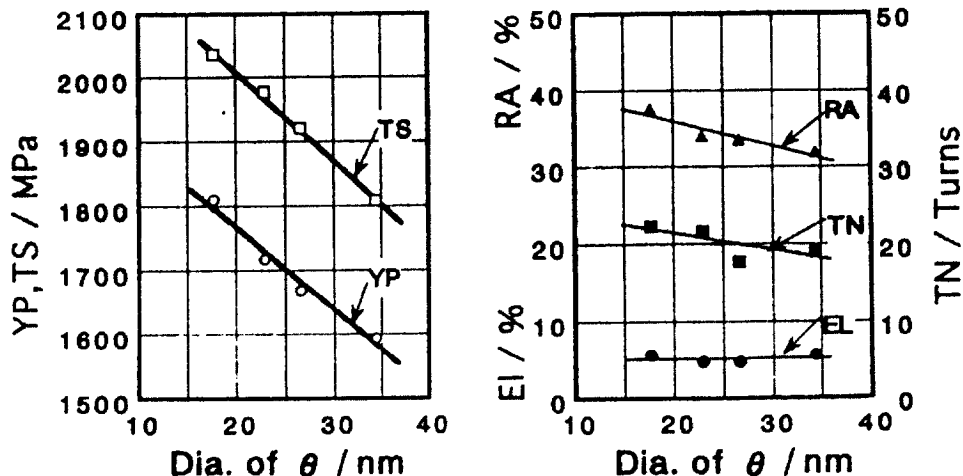


그림 6 층상 시멘타이트의 나노 입자상 지름과 강선의 기계적 성질과의 관계.

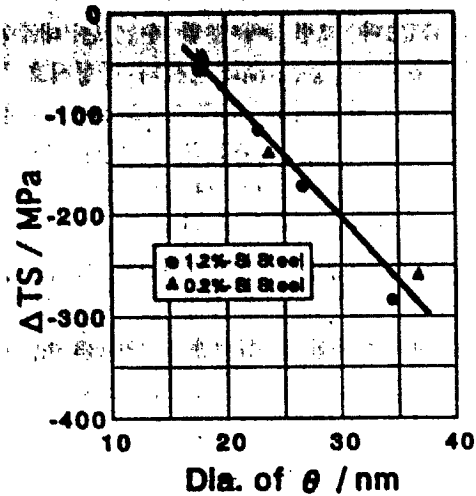


그림 7 층상 시멘타이트의 나노 입자상 지름과 ΔTS 와의 관계.

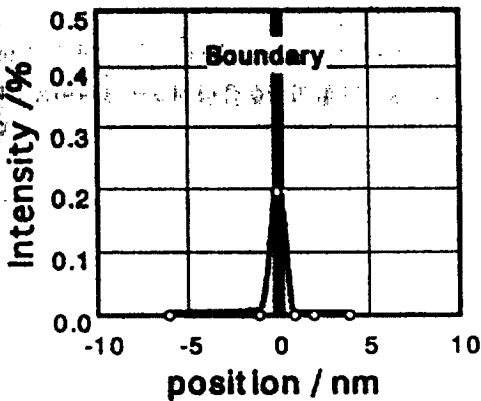


그림 8 1.2% Si강과 0.2% Si강에서 층상 시멘타이트 내부의 나노 입자 계면에 존재하는 Si 편석.

상과 같은 상이 얻어지며, 검고 나란한 부분이 층상 시멘타이트이다. 사진 3 (b)에서 층상 페라이트와 층상 시멘타이트의 계면, 특히 계면의 우측을 따라서 Si의 농도가 높게 존재함을 알 수 있다.

이상의 결과를 정리하면 Si에 의한 아연 도금강선의 기계적 성질에 미치는 층상 시멘

타이트의 미세구조의 영향은 다음과 같이 결론 지을 수 있다.

(1) Si가 층상 시멘타이트의 나노구조를 미세화 시킨다. Si는 나노입자의 입계, 층상 페라이트와 층상 시멘타이트의 계면에 편석하며, 아연 도금공정에서 나노 입자의 성장을 억제한다.

(2) 층상 시멘타이트 내부의 나노 입자 계면에 Si가 국부적으로 편석 함으로서 나노구조 미세화에 기여하는 것으로 생각된다.

(3) Si의 첨가에 의해 층상 시멘타이트의 나노구조를 미세화 되면 blueing 연화특성이 향상되고 강도와 연성이 동시에 증대된다.

사진 3 1.2% Si강에서 층상 페라이트/층상 시멘타이트 계면에 존재하는 Si 편석. (a) 제로 로스 후, (b) Si mapping 상이며는 페라이트, 는 시멘타이트.

3.2 새로운 강화 이론 체계 수립을 위한 연구와 그 필요성

앞에서 소개한 연구 결과는 아연 도금 강선의 고강도화 기구 해명이라는 고탄소 강선에 한정되어 있다. 그리고 그 기구가 해명되어 있다. 그러나 아직도 고탄소 강선의 기계적 성질과 고강도화 기구를 미세 조직의 관점에 체계적으로 설명할 수 있는 모델은 제안되어 있지 않은 실정이다. 그러므로 최근에는 다음 세 가지 이유에서 기구 해명의 필요성이 증대되고 있다.

- (1) 수요 측면에서 점증하고 있는 고강도화의 요구와 이를 달성할 수 있는 기술을 확보하기 위한 실마리로서 금속물리학의 원점에서 문제에 접근할 필요가 있다.
- (2) 신선된 펄라이트와 같은 초미세 층상구조도 해석할 수 있을 정도로 장비의 발전이 이루어져 있다.
- (3) 아직도 고탄소 강선의 강도와 연성을 겸비한 조직의 설명 가능한 모델이 없다.

이중에서 특히 (3)의 관점에서는 현재 일본 철강협회에 구성되어 있는 <조직과 특성 부회>부회에서 “초강가공에 의한 강의 조직 변화 자주 포럼”(좌장 : 규슈(九州)대학, 다카키(高木) 교수)을 만들어 연구 주제로 다루고 있으므로 학술적인 접근이 기대되고 있다. 즉 아직은 미세조직의 관점에서 고탄소 강선의 고강도화 기구를 충분히 설명할 수 있는 단계는 아니지만, 그에 접근하기 위한 몇몇 연구가 진행되고 있으며 그 대표적인 것을 아래에 소개한다.

3.2.1 층상 페라이트 내부의 탄소 존재 형태에 관한 연구

최근 AP-FIM을 이용한 원자수준의 분석¹³⁻¹⁵⁾이 강력한 해석기구로서 등장하여 화제가

되고 있다. 그림 9에서 알 수 있는 대로 横井(Makii)¹²⁻¹⁴⁾ 등은 blueing시의 변형시효 거동을 층상 페라이트 중의 C농도 변화로서 설명하려는 시도를 하였다. 변형시효와 층상 페라이트 중의 C량 사이에는 정성적으로 상관관계가 있는 것이 확인되고 있다. 또한 冨野(Takarano) 등¹⁵⁾은 3차원 AP-FIM을 이용하여 신선 도중에 층상 페라이트 중의 C형태의 변화를 분석적으로 연구하여, 층상 페라이트 중의 C의 입체적인 존재상태를 가시적으로 보여줄 수 있게 하고 있다.

한편 AP-FIM와 같은 특수장비를 사용한 연구는 아니지만 내부마찰¹⁶⁾, 시차주사 열분석기(DSC)¹⁷⁾ 등을 사용하여 고탄소 강선의 층상 페라이트의 내부상태와 기계적 성질과의 관계에 관한 실험적 연구도 진행되고 있다. 전자의 연구¹⁶⁾는 200에서 내부마찰 피크가 관찰되고, 이 피크 거동과 고탄소 강선의 강도 및 연성이 밀접하게 관련되어 있다고 보고하고 있다. 후자¹⁷⁾는 DSC 스펙트럼을 해석한 결과, 가공이 심한 신선재에서는 0.4 mass% 정도의 C가 층상 페라이트 중에 존재하고 있다고 보고하고 있다.

앞서 설명한 최신 층상 페라이트, 특히 층

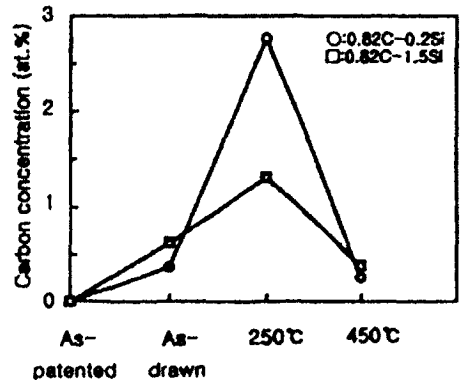


그림 9 AP-FIM에 의해 측정된 층상 시멘타이트 중의 C 농도.

상 페라이트 중의 C형태에 관 여러 실험 연구^{10), 12), 15), 18)}의 결과로부터 큰 변형량으로 신선된 층상 페라이트의 C농도는 0.4mass% 정도라는 결론이 도출된다. 현재 층상 페라이트 중 C농도에 관한 학술적인 논의를 요약하면 다음과 같다.

1) 고농도의 C는 층상 페라이트 중에서 어떤 상태로서 존재하고 있는가?

2) 이 정도의 높은 C를 가진 신선된 소재는 어떻게 연성을 가지고 있는가?

가공으로 도입된 전위에 C가 고착된다고 생각하면, 실제 관찰되는 전위밀도는 이외로 너무 적다¹⁷⁾고 생각되고 있다. 또한 이 정도 고농도의 C를 함유하여도 C의 영향을 무력화시키고, 높은 강도와 연성과 인성을 겸비하게 하는 층상 페라이트 중의 C의 존재형태는 과연 무엇인가 하는 점은 아직도 모르고 있다. 만일 이 점을 밝힐 수 있다면 고탄소 강선의 고강도이면서 고연성을 나타내는 기구가 해명될 수 있다고 판단된다.

지금까지는 그 이유가 모두 층상구조이기 때문으로 설명되어 왔으나 나노 스케일로 원자 수준까지 재료의 조직을 분석하고 해석하는 시기가 되었기에, 지금까지의 이론을 대폭 정정해야할 시점에 온 것으로 판단된다.

3.2.2 층상 시멘타이트의 내부구조에 관한 연구

3.1에서 blueing시의 층상 시멘타이트의 내부구조 변화에 관한 연구를 소개하였으나, 大木(Ohki 등⁸⁾)은 Mössbauer 분광을 이용하여 신선공정 중에 층상 시멘타이트가 비교적 크기가 큰 결정으로부터 나노(nm 수준) 결정화 혹은 비정질화(amorphous)되고 있음을 보고하고 있다. 또한 橫正 등⁹⁾은 진변형을 약 4부근에서는 층상 시멘타이트가 비정질화되고 있다고 있다. 층상 시멘타이트가 심한 가공으로 결정성이 변화

되고 있다는 것은 배어링강 등에서도 보고되기 시작하였으며, 이 결정성의 변화가 기계적 성질에 어떤 영향을 미치고 있는가 하는 점은 현재로서는 전혀 알려져 있지 않다.

다만 사진 1의 고분해능 TEM사진에서 보여준 대로 분자결합성의 층상 시멘타이트가 금속결합의 층상 페라이트와 동등한 연성을 보여주고 있는 것은 Langford 등¹⁸⁾의 설명에 의하면 층상 시멘타이트가 박박화되었기 때문이라고 추정될 뿐이다. 그러나 이들의 추정에서 이해하기 어려운 점은 진변형을 3 이상의 강가공에서는 층상 시멘타이트가 확실하게 박박화되어 있으나, 변형량이 비교적 작은 2 이하의 층상 시멘타이트에서는 그다지 박박으로 되어 있지 않은데도 불구하고 고탄소 강선이 신선이 가능한 사실, 즉 신선 중에 연성을 발휘하고 있는 점은 어떻게 설명할 수 있는가 하는 것이다. 신선도중에 층상 시멘타이트가 그 결정성을 결정에서 나노 결정, 다시 비정질로 변천하고 있는 현상이, 강가공 중에도 공유결합성이 강하여 아주 단단한 층상 시멘타이트가 가공될 수 있고, 최종 제품인 선재상태에서도 연성을 발휘하는 것과 관련이 있지 않다고 판단할 수도 있다.

4. 맺는 말

고탄소 강선의 고강도화에 관한 연구 동향을 살펴하여 보면 1990년대에 들어와서 해석장비의 진보에 힘입어 미세조직에 주목한 실험과 분석연구가 시작된 이후 종래와는 다른 내용이 밝혀지고 있다. 현재로서는 실험적인 결론을 축적하는 단계로서 결론을 도출하기 어려운 점이 많아 고강도화 기구의 모델이 체계화되지는 못하였다. 그러나 일본에서는 철강협회에서 특성부회를 중심으로 집단 연구 및 토론 그룹을 조직하여(참

고문헌 참조), 조직적으로 원자 수준의 분석 기술로 현상과 결과를 연결하는 이론적인 접근을 하고 있으며, 그것을 현장에서 실용화하는 데도 그대로 적용하고 있다. 이상은 본래 자료 내용을 나름대로 충실하게 정리한 것이다.

여기서 이 자료가 열처리 공업 현실과는 관계가 없는 것이 아닌가 하고 생각하는 독자들에게 소개하는 사람으로서 해명할 필요가 있을 것 같다. "열처리"라고 하는 것이 단지 소재의 표면 특성을 바꾸는 단순한 공정만으로 취급하는 우리 나라의 현실에서 귀중한 지면을 할애해서 이러한 자료를 소개하는 것은 다음과 같은 이유가 있다. 즉

1) "열처리"라고 하는 공정이 비단 표면개질에만 한정되는 것이 아니라 소재를 가공하여 생산하는 모든 분야에서, 제품의 부가가치를 높이는데 필수적이라는 것을 다시 한번 확인하자는 것과

2) 소재의 부가가치를 높이는 모든 분야에서 연구개발을 위해서는 첨단 분석장비가 필수적이며, 이를 통해 원리적으로 접근해야만 세계 최고의 기술을 확보할 수 있다는 점이며,

3) 당연하겠지만 최고의 기술은 당연히 경제적인 이득을 가져다 줄 것이고,

4) 이러한 장비는 개개 연구소나 학교 또는 기업이 모두 소유할 수 없으므로 가능하면, 공동으로 사용하고 또한 획득된 정보를 공유하는 시스템이 필요하다는 점을 강조하려는 것이다.

그러므로 한국열처리공학회는 앞으로 그 영역을 소재의 모든 열처리공정까지 확대하여 그에 관한 정보를 교류하는 장으로 확대하여야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1) 本州四國連絡橋工團, 新日本製鐵(株),(株)神戸製鋼所: 明石海峡ケーブル工事パンフレット (1996)
- 2) J. D. Embury and R. M. Fisher: Acta Met., 14(1966)147
- 3) 西田世紀, 今倍正名, 吉江淳彦: 第40回伸線技術分科會資料(1995)
- 4) 西田世紀, 今倍正名: 材料とプロセス, 7(1994)1807
- 5) 隱岐保博, 茨木信彦, 鹿磯正人, 宮本純之, 井浩一, 笹谷京作, 工藤克敏: までりあ, 34(1995)551
- 6) 榎井浩一: (社)日本鐵鋼協會, 材料の組織と特性部會, 鐵鋼の高強度化研究會, "鐵鋼の高強度化と信頼性向上-高強度化の新展開-", (1997)12
- 7) 榎井浩一, 家口 浩, 南田高明, 茨木信彦, 鹿正人, 隱岐保博: 鐵と鋼, 83(1997)42
- 8) 大木繼秋, 家口 浩, 榎井浩一, 茨木信彦, 那須三郎: 材料とプロセス, 11(1998)656
- 9) 榎井浩一, 家口 浩, 南田高明, 茨木信彦, 隱岐保博: 材料とプロセス, 9(1996)1486
- 10) 榎井浩一, 家口 浩, 南田高明, 茨木信彦: 材料とプロセス, 11(1998)491
- 11) 榎井浩一, 茨木信彦: (社)日本鐵鋼協會, 材料と組織特性部會, 「鐵鋼材料におけるヘテロ構造と特性フォーラム」, シンポジウム資料, ヘテロ構造の制御と特性-微細複相材料の設計-, (1998)42
- 12) 樽井敏三: JIM Seminar, "ナノ・メソ組織制御と高機能材料の開発", 日本金屬學會, (1995)29
- 13) 高橋稔彦, 大橋章一, 樽井敏三, 植森龍治, 森川博文: 材料とプロセス, 5(1992)881
- 14) 樽井敏三: (社)日本鐵鋼協會, 材料の組織と特性部會, 鐵鋼の高強度化研究會,

- “鐵鋼の高強度化と信頼性向上-高強度化の新展開-”, (1997)12
- 15) H. G. Read, K. Hono and T. Tarui : 材料とプロセス, 9(1996)1487
- 16) 横井浩一, 樽井敏三, 津崎兼彰 : 社)日本鐵鋼協會, 材料の組織と特性部會, 鐵鋼の高強度化研究會, “鐵鋼の高強度化と信頼性向上-高強度化の新展開-”, (1997)3
- 17) 大藤善弘, 田貴成 : 材料とプロセス, 兵范 11(1998)492
- 18) G. Langford : Met. Trans., 8A(1977)861

용어 해설

Blueing(또는 Bluing - 블루잉 - 청열착색)

㉔ 상온 가공한 강의 탄성한계를 높이기 위해 저온에서 가열하는 처리, 즉 냉간가공에 의한 강선이나 냉간 성형 후에 뒤틀리는 원인이 되는 잔류 내부 응력을 감소시키고, 탄성을 높이기 위한 목적으로 하는 저온 가열.

㉕ 저온에서 가열하면서 공기, 증기, 화공약품 등으로 청색 피막을 만들어 외관이 좋고 내식성을 증가시키는 처리. 즉 철 표면을 가열해서 산화물 박막을 생성시키면 착색되는데 그 색은 층의 두께에 따라 달라서 온도와 시간에 의해 조절된다. 이 방법으로 청색의 표면을 만드는 것이 블루잉인데 여기에는 표면을 잘 연마한 후에 도태 속에 묻어 430°C 내외로 가열하여 기름이나 물 속에서 급냉시킨다. 이렇게 해서 얻은 철 표면은 아름다운 청색이 되며 층이 치밀해서 방청에도 효과가 있다.

Patenting(패턴팅)

열욕 담금질법의 일종으로 중탄소강이나 고탄소강의 강선 제조에 응용되는 열처리 방법, 즉 강선을 용융납 또는 공기로 냉각시키고 퀴칭 조작 하나만으로 강재의 조직을 강인하고 미세한 조직으로 변화시킨다. 패턴팅에 의한 조직은 퀴칭/템퍼링에 의한 것보다 미세하고 연신율이 크기 때문에 신선 작업에서는 아주 좋은 결과를 부여한다. 용융납에 의한 것을 납패턴팅, 공기에 의한 것을 공기패턴팅이라고 부른다.