

극저탄소 냉연강판에서 합금원소 및 어닐링조건이 미세조직에 미치는 영향

정우창

대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

Effects of Alloy Additions and Annealing Parameters on Microstructure in Cold-Rolled Ultra Low Carbon Steels

W. C. Jeong

School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu, Gyeongsan 712-702, Korea

Abstract Effect of annealing parameters on the formation of ferrites transformed at low temperatures were studied in cold-rolled ultra low carbon steels with niobium and/or chromium. Niobium and chromium were found to be effective in the formation of the low temperature transformation ferrites. The low temperature transformation ferrites more easily formed when both higher annealing temperature and longer annealing time, allowing substitutional alloying elements to distribute between phases, are in combination with faster cooling rate. It was found from EBSD study that the additions of niobium or chromium resulted in the increase in the numbers of high angle grain boundaries and the decrease in those of the low angle grain boundaries in the microstructures. Both granular bainitic ferrite and bainitic ferrite were characterized by the not clearly etched grain boundaries in light microscopy because of the low angle grain boundaries.

(Received January 26, 2004)

Key words : Ultra-low carbon steel, IF(Interstitial Free) steel, Cold-rolled sheet steel, Low temperature transformation ferrites, Polygonal ferrite, Quasi-polygonal ferrite, Granular bainitic ferrite, Bainitic ferrite, EBSD

1. 서 론

현재 자동차 차체의 내·외판용으로 사용되는 냉연강판은 대부분 인장강도 300-400 N/mm²급을 사용하고 있으나, 향후에는 440 N/mm² 이상으로 고강도화되어 자동차의 경량화에 기여할 것으로 판단된다[1-6]. 성형성이 우수하면서 인장강도가 440 N/mm² 이상인 고강도 냉연강판을 제조하기 위해서는 Ti나 Nb가 첨가된 극저탄소 IF(interstitial free)강을 기본 합금성분으로 하며, 강도를 높이기 위해 P, Si, Mn, Mo, Cr, B등의 합금원소를 단독 혹은 복합으로 첨가해야 한다. 이러한 강화형 합금원소들은 냉각 시 오스테나이트에서 페라이트로 변태되는 과정에 영향을 미쳐 등축(polygonal) 페라이트외에 quasi-polygonal 페라이트, granular bainitic 페라이트, bainitic 페라이트 등의 다양한 저온 변태 페라이트를 생성시키게 된다[7-9]. 이러한 저온변태상의 생성은

합금원소외에 열처리온도, 시간 및 냉각조건 등에도 영향을 받게 된다.

저온변태상에 관한 연구결과는 대부분 저탄소강을 중심으로 보고[7-9]되어 있다. 인장강도 440 N/mm² 이상의 극저탄소강에 관한 연구결과[1-6]는 대부분 성형성과 인장성질의 향상에 관한 것이며, 저온변태상에 관한 연구는 매우 제한적으로 언급되어 있다. 또한 저온변태상을 지칭하는 용어로 quasi-polygonal 페라이트, granular bainitic 페라이트, bainitic 페라이트외에 massive 페라이트, widmanstatten 페라이트, acicular 페라이트 등으로 혼재되어 사용[7-8]하고 있어 많은 혼란을 일으키고 있다. 따라서 극저탄소강에서 저온변태 페라이트의 형성과정에 주요한 역할을 할 것으로 기대되는 합금원소와 열처리조건의 영향을 연구함으로써 저온변태 페라이트에 대한 체계적인 이해가 필요할 것으로 판단되었다.

Mn은 오스테나이트 안정화원소로서 A_{C3} 변태온도

를 저하시키기 때문에 페라이트와 오스테나이트의 2상구역이나 오스테나이트 단상구역을 저온으로 낮추어 준다. 자동차용 강판의 어닐링에 사용되는 연속어닐링라인(continuous annealing line, CAL)은 최대 가열온도가 850~860 °C 정도이기 때문에 어닐링온도가 낮으면서 인장강도와 성형성의 조합을 우수하게 할 수 있는 합금성분의 선택이 매우 중요하다. 따라서 Mn을 다량으로 첨가하거나 Mn 역할을 대신 할 수 있는 Cr이나 Mo를 첨가한 강과 같이 저온 어닐링을 가능하게 한 새로운 개념의 고강도 냉연강판 개발에 많은 관심[10]을 가지고 있다.

본 연구에서는 기계적 성질이 우수한 2.0 % Mn을 첨가한 극저탄소강에 Cr과 Nb를 첨가하여 이를 합금원소와 어닐링조건이 저온변태 페라이트의 형성과정에 미치는 영향을 조사함으로써 저온변태 페라이트의 특성을 이해하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 합금성분계 설계 및 시편제작

본 연구에 사용된 시료강은 0.003%의 극저탄소와 2.0%의 Mn을 함유하는 강을 기본 성분계로 저온변태 페라이트의 형성을 유도하기 위해 Cr 혹은 Nb를 첨가한 강이다. Nb는 냉연강판의 탄소를 NbC로 석출시켜 디프드로잉(deep drawing)성이 우수한 집합조직을 발달시키고 연성을 향상시키기 위해 첨가되는 원소로서 본 연구에서는 이러한 목적 외에 저온변태 페라이트의 형성에 미치는 영향을 조사하기 위해 첨가되었다. Cr은 경화능 향상 원소로 잘 알려져 있으나 인장강도가 440 N/mm² 이하로 낮고 성형성이 요구되는 냉연강판에는 잘 첨가되지 않는 원소이다. 그러나 인장강도를 440 N/mm² 이상으로 강도를 높이기 위해서는 Mn과 함께 Mo나 Cr등을 함께 첨가할 수 있는데 이 경우 첨가되는 Mn양을 줄일 수 있다. 본 연구에서는 조직 내에 다양한 종류의 저온변태 페라이트를 형성시키고, 이를 저온변태 페라이트와 Cr의 상관성을 조사하기 위해 1.38 %의 Cr을 첨가하였다. Cr이 증가하면 강도가 증가하고 연신율이 감소하지만 본 연구에서는 우수한 기계적 성질을 얻기 위한 목적보다는 다양한 형태의 저온변태 페라이트를 형성시키기 위해 1.38 %의 Cr을 첨가하였다.

Table 1. Chemical compositions of steels(wt%)

Steel	C	Mn	P	S	Sol.Al	N	Nb	Cr
S1	0.0035	1.86	0.010	0.011	0.028	0.003	-	-
S2	0.0030	1.92	0.014	0.010	0.040	0.003	0.017	-
S3	0.0030	1.94	0.011	0.011	0.045	0.003	0.018	1.38

본 연구에 사용된 모든 시료강은 고주파 유도로에서 진공용해 하였으며 탄소, 황 동시분석기와 습식분석으로 분석된 시료강의 화학성분을 Table 1에 나타내었다.

용해, 주조된 강과는 1250 °C의 오스테나이트 단상 영역에서 균일화 열처리하여 30 mm 두께의 슬라브 상태로 1차 열간압연을 한 후 마무리 열간압연을 실시하였다. 마무리 열간압연을 위해 다시 강판을 1250 °C의 오스테나이트 단상영역에서 1시간 동안 가열하여 균질화시킨 후 5회의 반복 압연에 의해 4.0 mm 두께로 열간압연 하였다. 이때 열간압연 마무리온도는 900 °C로 일정하게 하였다. 열간압연이 끝난 강판은 540 °C까지 공냉한 후 각각의 온도로 유지된 로에 장입하여 1시간동안 유지시킨 후로냉하여 공장제조시의 열연판 코일링(coiling)공정을 재현하였다. 열간압연시 형성된 열연판 표면의 산화피막을 깨끗이 제거한 후 75 %의 냉간압하율로 1.0 mm의 두께까지 냉간압연하였다.

2.2 열처리 및 미세조직 관찰

자동차용 강판의 제조에 사용되는 전형적인 연속어닐링조건은 약 8 °C/sec의 속도로 800~860 °C까지 금속가열하여 약 30-40초 동안 유지한 후 650 °C까지 5 °C/sec로 냉각하게 되며, 650 °C까지 냉각된 강판은 다시 400-450 °C의 과시효(overaging) 온도까지 30-40 °C/sec로 급속냉각하여 약 3분 동안 유지한 후 상온까지 5 °C/sec의 속도로 최종 냉각하는 과정으로 구성된다.

그러나 본 연구에서는 저온변태 페라이트의 생성과정에 미치는 어닐링온도, 어닐링 시간 및 냉각속도 등의 어닐링조건의 영향을 조사하기 위해 어닐링온도는 860 °C와 920 °C, 어닐링시간은 50초와 30분 등 각각 두 종류로 변화시켰다. 860 °C, 50초는 고강도 냉연강판의 전형적인 연속 어닐링 조건이고, 920 °C와 30분은 자동차용 강판 제조에 적용하는 전형적인

조건보다 훨씬 높은 온도, 긴 시간이지만 저온 변태 페라이트를 생성시켜 각각의 특성을 이해하기 위한 목적으로 선택하였다. 모든 시편의 열처리는 염욕로 (salt bath furnace)를 이용하였으며, 냉각은 수냉과 공냉 두 종류를 사용하였다. 저온변태상은 나이탈로 부식하여 광학현미경으로 관찰하였다. 저온변태상의 하부조직 차이를 정성적으로 평가하기 위해 비커스 경도(하중 10g)를 측정하여 광학현미경 조직과 대응 시켜 상 구분에 이용하였다. 경도는 5-10회 측정한 결과의 평균값이며 압흔크기는 약 20 μm 이었다.

2.3 EBSD 및 TEM 관찰

저온변태 페라이트의 결정립계, 하부조직 특성을 이해하고 저온변태 페라이트의 결정립계가 애칭시 선명하게 관찰되지 않는 이유를 규명하기 위해 EBSD(Electron Back Scattering Diffraction)를 이용하였다. EBSD 기술을 이용하여 인접한 결정립이 이루는 방위차이를 2-5°, 5-10°, 10-15°, 15° 이상으로 분류한 후 인접 결정립끼리 이루는 각도의 분포를 조사하였다. 여기서 2-5°는 2° 이상 5° 미만을 의미한다.

또한 주사형 투과전자현미경(STEM, JEM 200-CX)을 이용하여 하부조직을 관찰하였다. 0.15 mm 정도의 두께까지 기계적으로 연마한 후 HF와 H₂O₂를 부피비로 5 : 95로 혼합한 용액에서 0.05 mm 두께까지 화학연마시켜 기계연마시 생긴 변형층을 제거하였다. 이렇게 얻어진 극박의 시편을 -15°C로 유지된 전 해액(부피비로 65% Butanol - 30% Methanol - 5% Perchloric acid)에서 전극 양단간의 전위차가 50-70볼트 되는 조건으로 twin jet polishing 해서 천공시켜 하부조직 관찰에 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직에 대한 어닐링조건과 Nb, Cr의 영향

지금까지의 연구결과들[1-8]을 보면 저온변태 페라이트를 지칭하는 용어에 일관성이 없어 다소 혼란스런 측면이 있다. 본 연구에서는 일본철강협회가 발간 한 보고서[7]에서 정의되고 사용되는 용어를 사용하였다. 이 보고서에 따르면 페라이트는 등축 페라이트

(α_p), quasi-polygonal 페라이트(α_q), granular bainitic 페라이트(α_B) 및 bainitic 페라이트(α^o_B), widmanstatten 페라이트(α_w)등으로 구분되며 각각의 페라이트는 다음과 같은 특성을 가진다고 설명하였다. α_p 는 polygonal, polyhedral 혹은 equiaxed 페라이트로 불리어지며 대부분 재결정되어 있는 조직으로, 페라이트 결정립계는 전형적인 대경각입계(High angle grain boundary)라고 정의되어 있다. Quasi-polygonal 페라이트를 단순히 polygonal 페라이트로 부르기도 하지만 엄밀히 보면 α_q 는 불규칙하고 변화가 심한 결정립계로 되어 있으며, 급냉된 고순도철에서 관찰되는 massive 페라이트를 포함한다. 또한 저온에서 구(prior) 오스테나이트 결정립계를 가로질러 성장하며, 대부분 회복된 조직이라고 정의하고 있다. α_B 는 전위밀도가 높은 하부조직을 가지나 대부분 회복되어 있고 래스(Lath)가 없는 조직에 해당하며, α^o_B 는 탄화물석출이 없는 래스들을 가지는 sheaf-like 조직을 가지며, bainitic 조직안에 구 오스테나이트 결정립계가 보존된다고 정의하고 있다. α_w 는 전형적인 플레이트 혹은 래스조직을 나타내고, 극저탄소강에서는 잘 관찰되지 않으며, α_q 가 생성되는 온도에서 생성된다고 보고 되어 있다.

그러나 이들 분류 역시 주로 저탄소강을 대상으로 한 것이기 때문에 극저탄소강에서는 상술한 내용과 다소 다른 하부조직 특성을 가질 수 있다고 판단된다.

Fig. 1에 Nb를 첨가하지 않은 극저탄소 Al-killed 강인 SI강을 860°C와 920°C에서 50초 및 30분간 가열한 후 공냉하거나 수냉하여 나이탈로 부식시켜 얻은 광학현미경 조직사진을 나타내었다. 50초는 연속어닐링 라인에서 냉연강판의 어닐링에 적용되는 전형적인 시간에 해당된다. 그러나 30분은 연속어닐링에 적용될 수는 없는 긴 시간이지만 장시간 가열하는 동안 일어날 수 있는 Mn, Cr등 치환형 합금원소의 분배가 변태과정에 미치는 영향을 조사하기 위해 선택하였다.

Fig. 1의 사진 왼쪽 아래에는 10 g의 하중으로 측정한 비커스 경도를, 사진 왼쪽 위에는 미세조직을 정성적으로 분석한 결과를 나타내었다. 미세조직을 나타내는 기호중 앞의 기호는 조직에서 가장 많이 존재하는상을, 두 번째와 세 번째 기호는 각각 그 다음으로 많이 존재하는상을 나타낸다. 그러나 조직

을 구성하는 각 상의 분율을 정량적으로 측정하는 것은 불가능하였다.

Nb이나 Cr이 첨가되지 않은 S1강을 공냉하면 어닐링 조건에 관계없이 결정립계가 분명하게 부식되는 조대한 α_p 로 조직이 구성되며 비커스 경도는 105-112 정도의 낮은 값을 나타내었다. 조직이 조대한 것은 결정립성장을 강하게 억제하는 역할을 하는 Nb이 첨가되지 않은 극저탄소강이기 때문이다. 열처리조건에 관계없이 조직이 100% α_p 로 구성되는 것은 공냉이라는 느린 냉각속도에 기인한 것으로, 어닐링온도와 시간보다는 냉각속도가 저온 변태 페라이트의 형성을 촉진시키고 있음을 암시 한다.

그러나 수냉시킨 조직은 어닐링온도와 시간에 관계 없이 α_p 는 관찰되지 않고 $\alpha_B + \alpha_q$ 혹은 $\alpha^o_B + \alpha_B + \alpha_q$ 의 저온변태 페라이트 조직을 나타내었다. 특히 본 연구에서 택한 가장 높은 온도인 920°C에서 가장

긴 시간에 해당하는 30분간 유지한 후 수냉한 경우는 $\alpha^o_B + \alpha_B + \alpha_q$ 의 조직을 나타내었으며 비커스 경도도 150으로 매우 높은 값을 나타내었다. α^o_B 로 판단되는 조직은 결정립계의 윤곽이 불분명하게 관찰되었다. Fig. 1의 수냉 조직사진 위에 전형적인 α_q , α_B , α^o_B 를 표시하였는데, 불규칙하고 변화가 심한 결정립계를 가지는 결정립은 α_q 이며, 부식이 잘 되지 않아 희미한 결정립계를 가지는 결정립은 α_B 나 α^o_B 에 해당된다. α_q 는 대경각 혹은 소경각 결정립계를 가진다고 보고[7]되어 있으나 본 연구에서는 결정립계의 부식형태로 보아 대경각 입계에 가까운 특성을 가지는 것으로 판단된다. 반면에 α_B 나 α^o_B 는 보고[7]되어 있는 바와 같이 소경각 결정립계를 가지므로 부식이 잘 되는 않은 것으로 판단된다. 광학현미경상에서 α_B 나 α^o_B 는 구분이 용이하지 않으나 본 연구에서는 Fig. 1에 표시한 바와 같이 결정립계가 잘

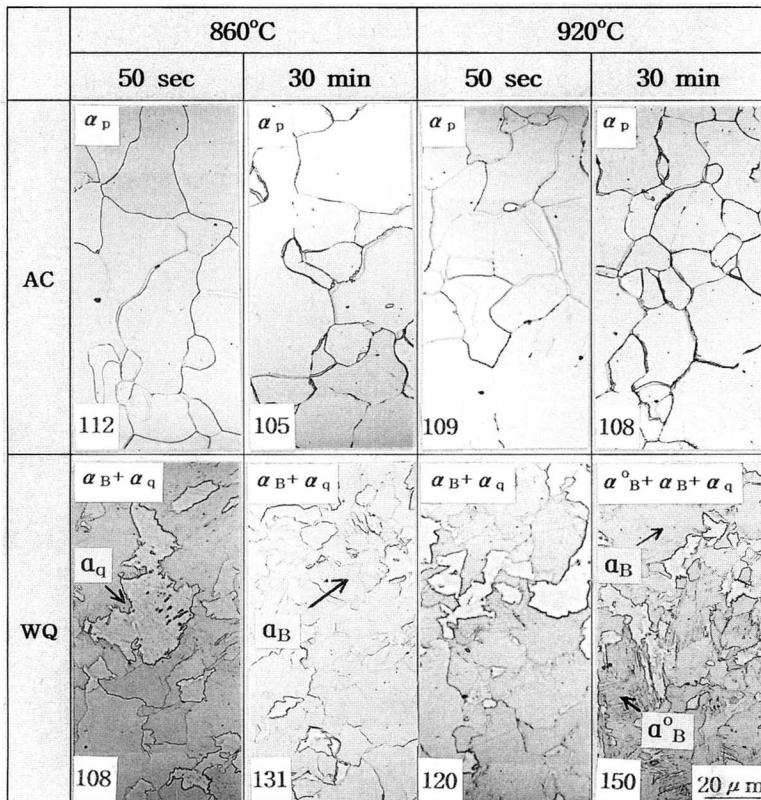


Fig. 1. Optical micrographs showing the effect of annealing parameters on the microstructure in steel S1. AC ; air-cooled and WQ ; water-quenched.

부식되지 않으면서 하부조직의 흔적이 보다 선명하고 경도가 높은 조직을 α_B^o 로, 결정립계가 잘 부식되지 않으나 하부조직이 상대적으로 선명하지 않은 것을 α_B 로 판단하였다.

한편 수냉한 S1강은 어닐링 온도가 증가하거나 어닐링 시간이 길어지면 경도가 크게 증가하였다. 이것은 고온에서 장시간 유지되는 동안 치환형 합금원소인 Mn의 농도구배가 일어나서 수냉이라는 빠른 냉각동안 α_p 로의 변태를 억제하고 대신 α_q , α_B , α_B^o 등의 저온변태 페라이트의 생성을 촉진시켰기 때문으로 판단된다. Mn은 치환형 합금원소로서 탄소나 질소에 비해 확산속도가 느리기 때문에 어닐링하는 동안 페라이트가 오스테나이트로 변태할 때 페라이트와 오스테나이트에 계면근처에서 Mn의 농도구배가 생기게 된다. 즉 생성되는 오스테나이트중 페라이트

에 인접한 부분은 Mn 농도가 매우 높고 오스테나이트에 인접한 페라이트에는 Mn 농도가 매우 작아지게 된다. 이러한 Mn의 농도구배에 의해 Mn의 농도가 높은 영역은 저온변태 페라이트의 생성을 촉진하는 것으로 판단된다. 어닐링 온도가 증가하고 어닐링 시간이 길어질수록 α_q 보다는 α_B , α_B 보다는 α_B^o 의 생성이 촉진되었다. 이러한 현상은 뒤에서 설명하듯이 Nb이 첨가된 S2강이나 Nb이나 Cr이 함께 첨가된 S3강의 수냉재에서도 동일하게 관찰되었다. 그러나 공냉재에서는 강종에 관계없이 고온, 장시간 어닐링의 효과가 관찰되지 않았는데 이것은 치환형 합금원소의 농도구배보다는 냉각속도가 저온변태 페라이트의 형성에 미치는 영향이 큼을 의미한다.

Fig. 2는 S1강에 0.017%의 Nb가 첨가된 극저탄소 Al-killed강인 S2강을 860 °C와 920 °C에서 50초 및

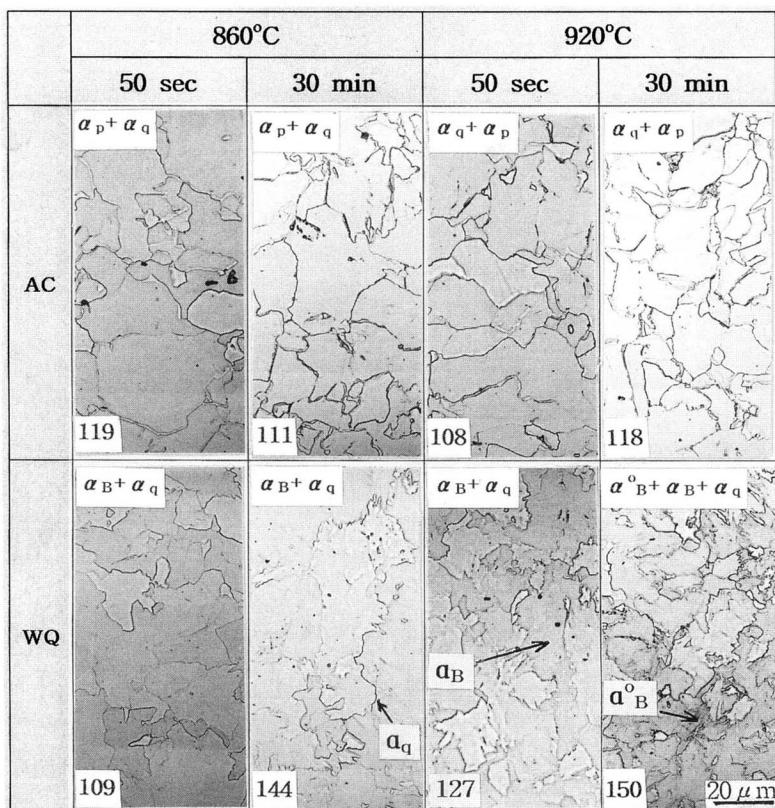


Fig. 2. Optical micrographs showing the effect of annealing parameters on the microstructure in steel S2. AC ; air-cooled and WQ ; water-quenched.

30분간 가열한 후 공냉하거나 수냉하여 나이탈로 부식시켜 얻은 광학 현미경 조직사진을 나타낸 것이다. 0.017%의 Nb가 첨가된 S2강은 공냉재에서도 결정립계가 불규칙하고 결정립크기가 불균일한 α_q 를 함유하는 $\alpha_p + \alpha_q$ 혹은 $\alpha_q + \alpha_p$ 조직을 나타내었으며, S1강에 비해 훨씬 미세한 조직을 보여주었다. 이 결과로부터 Nb은 결정립을 미세화시킬 뿐만 아니라 α_q 의 생성을 촉진시킨다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 조직내에 α_q 가 함유되어도 100% α_p 조직에 비해 비커스 경도의 증가가 10 이하에 그쳐 α_q 가 α_p 에 비해 강도가 현저히 높은 상은 아님을 보여주었다. 한편 어닐링온도가 높을수록 또한 어닐링시간이 길어질수록 조직내에 α_q 의 양이 증가하였다. 이것은 전술한 바와 같이 Mn의 농도구배 효과에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 공냉된 S2강에서는 α_B 나 α^o_B 는 관찰되지 않았다.

S2강을 수냉시킨 경우에는 수냉된 S1강과 거의 동일하게 $\alpha_B + \alpha_q$ 나 $\alpha^o_B + \alpha_B + \alpha_q$ 의 미세조직을 나타내었다. 그러나 S1강에 비해 조직내에 α_q 의 양이 다소 감소 하고 대신 α^o_B 와 α_B 의 양은 증가하였는데 이것은 저온변태 페라이트의 생성을 촉진하는 Nb의 효과에 기인한 것으로 판단된다. Nb은 결정립의 크기를 미세하게 할 뿐 아니라 전위밀도가 높은 경질의 저온 변태 페라이트의 생성을 용이하게 하기 때문에 이들 복합 작용에 의해 경도를 증가시키는 것으로 판단된다. 본 연구에서 Nb/C의 원자비는 1보다 작기 때문에 여기서 Nb는 고용 Nb가 아닌 석출물 NbC의 효과로 판단된다. Fig. 1과 Fig. 2의 조직적 특성을 비교해 보면 저온변태 페라이트의 형성에 미치는 Nb의 효과도 있지만 0.017%의 Nb 첨가 효과보다는 냉각속도를 증가시키는 것이 저온변태 페라이트의 생성에 훨씬 효과적임을 알 수 있다.

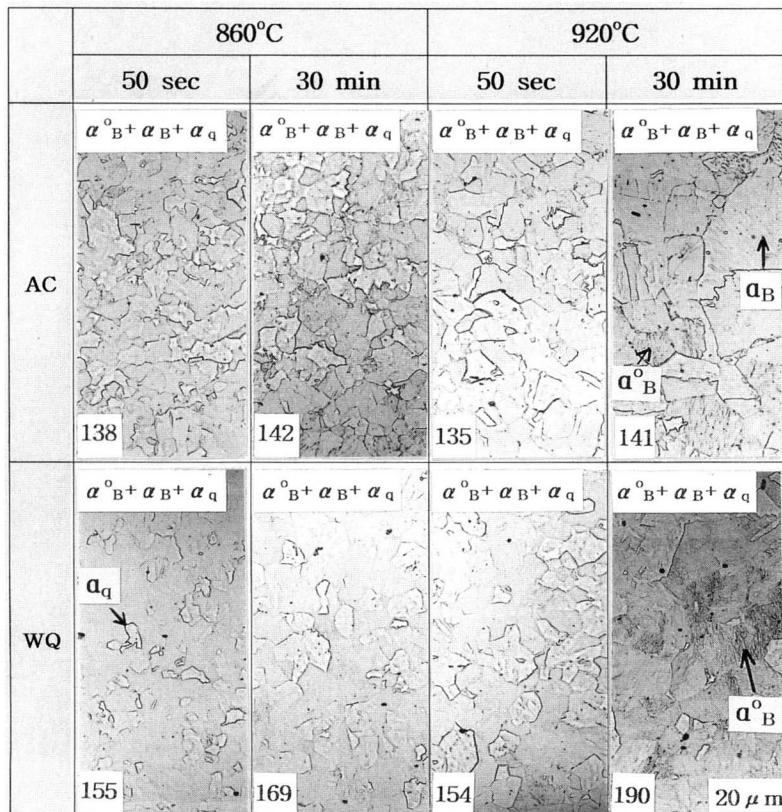


Fig. 3. Optical micrographs showing the effects of annealing parameters on the microstructure in steel S3. AC : air-cooled, WQ : water-quenched.

Fig. 3은 S1강에 0.018%의 Nb와 1.38%의 Cr이 첨가된 극저탄소 Al-killed강인 S3강을 860 °C와 920 °C에서 50초 및 30분간 가열한 후 공냉하거나 수냉하여 나이탈로 부식시켜 얻은 광학 현미경 조직 사진을 나타낸 것이다.

0.018%의 Nb와 1.38%의 Cr을 첨가한 S3강은 어닐링 온도, 어닐링 시간 및 냉각속도에 관계없이 모든 미세조직이 다양한 저온변태 페라이트를 함유하는 $\alpha_B^o + \alpha_B + \alpha_q$ 로 구성되어 있다. 조직내에 α_p^o 로 판단되는 페라이트는 전혀 관찰되지 않았다. 공냉된 S3강은 100% α_p^o 로 구성되어 있는 S1강의 공냉재와 α_p^o 나 α_q^o 의 혼합조직으로 구성되어 있는 S2강의 공냉재와는 달리 각각의 결정립 윤곽을 쉽게 확인하기 힘들었다. 이것은 조직내에 α_q^o 도 일부 존재하지만 주로 소경각입계의 $\alpha_B^o + \alpha_B$ 로 구성되기 때문이다.

수냉된 S3강은 공냉된 S3강에 비해 결정립의 결정립계가 훨씬 더 불분명하고 희미한 양상으로 관찰되었다. 이것은 수냉조직이 이웃한 결정립사이에 이루는 각이 가장 작은 결정립계를 가지는 α_B^o 가 훨씬 다량으로 존재함을 의미한다. 이러한 결과는 저온변태 페라이트의 생성이 냉각속도가 빠르고 탄소당량 (C_{eq})과 Mn당량(M_{neq})이 높을수록 용이하다는 연구결과[7]와 잘 일치하고 있다. 탄소당량과 Mn 당량은 각각 아래 식[7]으로 주어지며 S3강의 경우 탄소당량과 Mn 당량에 기여도

$$C_{eq} = C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5$$

$$M_{neq} = Mn + Cr + Cu + Mo + Ni/2 + 10(Nb - 0.02)$$

가 큰 Cr이 1.38%나 첨가되어 있다. 흥미로운 것은 위 식이 0.02% 이하의 Nb이 첨가되면 오히려 Mn 당량이 감소하고 또한 Nb은 탄소당량에 영향이 없는 것으로 표시되어 있다는 점이다. 그러나 전술한 바와 같이 Nb가 0.017% 첨가된 S2강에서도 저온변태 페라이트의 생성이 용이함을 확인하였기 때문에 Nb는 탄소당량이나 Mn 당량에의 기여를 통한 기구와는 다른 기구에 의해 저온 변태 페라이트의 형성에 기여하는 것으로 판단된다.

앞에서 설명한 바와 같이 공냉된 S3강은 어닐링 온도나 시간에 관계없이 135-142의 비슷한 비커스 경도값을 나타내었으나 수냉재에서는 어닐링 온도가

높을수록, 어닐링 시간이 길어질수록 경도가 높아졌다. 920°C의 고온에서 30분간 유지한 후 수냉한 시편은 S3강의 다른 수냉조직과는 달리 광학현미경조직에서 하부조직이 다소 다른 양상으로 관찰되었다. 결정립을 확인시켜 주는 결정립계가 거의 없을 만큼 결정립계가 거의 부식되지 않는 반면 결정립내부는 하부조직의 흔적을 강하게 보여주는 차이를 나타내었다. 이 강의 비커스 경도는 190으로 본 연구에서 연구된 시편중에서 가장 높은 경도를 나타내었는데 이것은 경도가 가장 높은 저온 변태상인 α_B^o 가 조직의 대부분을 차지하고 있음을 의미한다.

어닐링 조건에 관계없이 1.38%의 Cr을 첨가하면 경도가 크게 증가하였으며, 이것은 앞에서 설명하였듯이 1.38%의 Cr이 α_B^o , α_B , α_q^o 등의 저온변태상 생성을 촉진시켰기 때문이다. 그러나 경도 증가에는 Cr의 고용경화도 일부 기여한 것으로 판단되지만 Cr의 고용경화효과가 P, Si, Mn 등에 비해 현저히 작기 때문에 그 정도는 크지 않을 것으로 판단된다.

3.2 결정립계 특성

860 °C에서 30분간 어닐링하여 수냉시킨 S3강의 미세조직은 $\alpha_B^o + \alpha_B + \alpha_q^o$ 로 구성되어 있다. 이처럼 다양한 저온변태 페라이트가 존재하는 조직을 대상으

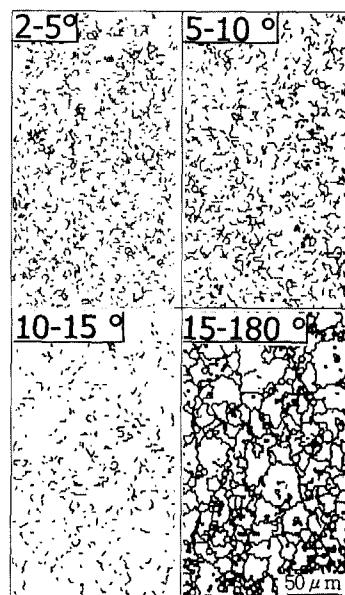


Fig. 4. EBSD results showing misorientation distribution of the grain boundaries in steels S3.

로 EBSD 패턴을 이용하여 각각의 페라이트의 결정립계 특성을 조사하였다.

Fig. 4에 인접한 결정립이 이루는 각도가 $2\text{--}5^\circ$, $5\text{--}10^\circ$, $10\text{--}15^\circ$, 15° 이상인 결정립계의 분포를 각각 나타내었다. 수냉된 S3강에서는 15° 이상의 방위차이를 가지는 대경각 결정립계 뿐만 아니라 15° 미만의 방위 차이를 가지는 소경각 결정립계도 현저하게 많이 관찰되었다. 특히 $2\text{--}5^\circ$ 의 매우 작은 방위차이를 가지는 소경각입계의 결정립도 매우 많이 관찰되었다. 15° 이상의 대경각입계는 연속적으로 이어져 한 개의 독립된 결정립을 형성하는 반면에 15° 보다 작은 방위 차이를 가지는 결정립계들은 불연속적인 형태로 관찰되어 독립적인 결정립의 윤곽을 나타내지 않았다. 이것은 소경각입계의 결정립계들이 대경각 결정립계들을 서로 연결하는 아결정립계 역할을 하거나 대경각 결정립 내부의 하부조직의 결정립계에 해당되기 때문으로 판단된다. 수냉된 S3강에서 대경각입계는 주로 α_q 에 해당하고 소경각입계는 α_B^o 와 α_B 에 해당되지만 방위 차이가 작을수록 α_B 보다는 α_B^o 가 많아지는 것을 의미하는 것으로 판단된다. 이러한 소경각입계는 예칭이 잘 되지 않아 광학현미경에서 관찰이 용이하지 않기 때문에[7], 미세조직에서 희미하게 관찰되는 특징이 있다.

3.3 TEM 결과

Fig. 5에 860°C 에서 50초간 가열한 후 공냉한 S1강과 S3강의 TEM 조직을 각각 나타내었다. 광학현미경 조직 관찰 결과 S1강의 미세조직은 100% α_p 이고, S3강의 미세조직은 $\alpha_B^o + \alpha_B + \alpha_q$ 로 구성되어 있었다. TEM 조직을 보면 S1강은 상대적으로 전위밀도가 낮아 전형적인 α_p 의 하부조직을 나타내는 반면 S3강은 현저히 전위밀도가 높은 하부조직을 나타내었다. 전위밀도가 높아지면 전위 셀을 형성하거나 아결정립을 형성하게 되어 광학현미경에서 희미한 결정립계로 관찰되거나 결정립 내부의 하부조직 형태로 관찰되게 된다. 이러한 높은 전위밀도는 α_B^o , α_B , α_q 등의 저온변태 페라이트의 하부조직으로 판단되며 이 결과 경도가 증가하게 된다.

α_B 는 전위밀도가 높으나 회복되어 있고 래스가 없는 조직이며, α_B^o 는 탄화물석출이 없는 래스들을 가지는 sheaf-like 조직을 가지고 또 bainitic 조직안에

구 오스테나이트 결정립계가 보존된다고 문헌[7]에서 보고하고 있으나, 본 연구의 TEM 연구에서는 상술한 이론으로 α_B^o , α_B 및 α_q 등의 저온 변태 페라이트를 구분하는 것은 용이하지 않았다. 향후 저온 변태 페라이트의 하부 조직적 구분에 대한 체계적이고 깊은 TEM 연구가 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

2.0% Mn을 첨가한 극저탄소강과 이 강에 Nb과 Cr을 단독 혹은 복합으로 첨가한 극저탄소강에서 저온변태 페라이트의 형성에 미치는 Cr과 Nb의 첨가 및 열처리조건의 영향에 대해 연구하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

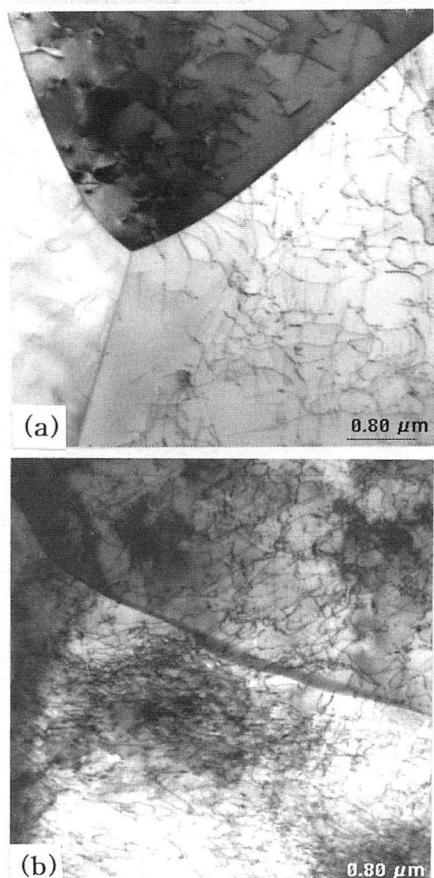


Fig. 5. TEM micrographs showing the substructures in steels (a) S1 and (b) S3 annealed at 860°C for 50 seconds followed by air cooling.

1. Nb과 Cr은 저온변태 페라이트의 생성을 촉진하였다.
2. 어닐링 온도를 높이고 어닐링 시간을 길게 하여 치환형 합금원소의 농도구배가 일어나게 한 후 냉각 속도를 증가시키면 저온변태 페라이트의 생성이 용이하였다.
3. Nb과 Cr이 첨가되면 대경각입계의 α_p 가 줄어드는 대신 소경각입계를 가지는 저온 변태상이 현저히 증가함을 EBSD에 의해 확인하였다.
4. 본 연구에서 저온변태 페라이트 α_q 는 소경각입계보다는 대경각입계에 가까운 특성을 나타내었다.
5. α_B^o 와 α_B 등의 저온변태상은 소경각입계를 가지므로 광학현미경 조직에서 결정립계가 선명하지 않은 상태로 관찰되며, 전위밀도가 높다.
6. EBSD 패턴은 저온변태 페라이트의 특성 연구에 매우 효과적으로 활용될 수 있었다.

후기

본 연구는 2004학년도 대구가톨릭대학교 일반연구비 지원에 의한 것임.

REFERENCES

1. S. Okada, S. Satoh, T. Kato and T. Takasaki : Proceedings of the Symposium on High Strength Sheet Steels for Automotive Industry, R. Pradhan(Ed.), ISS, Warrendale, (1994) 233.
2. K. Seto, K. Okuda and K. Sakata : Proceedings of the Symposium on High Strength Sheet Steels for Automotive Industry, R. Pradhan(Ed.), ISS, Warrendale, (1994) 201.
3. K. Sakata, K. Okuda, K. Seto and T. Obara : Tetsu-To-Hagane, 83(1997) 593.
4. 정우창, 조경목 : 대한금속재료학회지, 37 (1999) 672.
5. N. Yoshinaga, K. Ushioda and O. Akisue : Proceedings of the Symposium on High Strength Sheet Steels for Automotive Industry, R. Pradhan(Ed.), ISS, Warrendale, (1994) 149.
6. Matsumoto, S.Hamanaka, T.Yamada, T.Tanaka : Inter. Forum for Physical Metallurgy of IF Steels, ISIJ, Tokyo (1994) 269.
7. Atlas for Bainitic Microstructures, ISIJ, Tokyo(1992).
8. G. Krauss and S. W. Thompson : ISIJ International, 35 (1995) 937.
9. Tadashi Maki : Inter. Forum for Physical Metallurgy of IF Steels, ISIJ, Tokyo (1994) 183.
10. 정우창, 이재연, 진영술 : 대한금속재료학회지, 39 (2001) 622.