

저탄소·저합금 강의 베이나이트 미세 구조 연구

강주석¹, 안성수², 유장용², 박찬경[#]

Study on the bainitic microstructure in low carbon HSLA steels

J. S. Kang, S. S. Ahn, J. Y. Yoo, C. G. Park

Abstract

The austenite phase observed in low carbon HSLA steels is well known to be decomposed to various bainitic microstructures, such as granular bainite, acicular ferrite and bainitic ferrite during continuous cooling process. These bainitic microstructures have been usually identified by using either scanning electron microscope (SEM) or transmission electron microscope (TEM). However, SEM and TEM images do not exactly coincide, because of the quite different sample preparation method in SEM and TEM observations. These conventional analysis method is, thus, not suitable for characterization of the complex bainitic microstructure. In this study, focused ion beam (FIB) technique was applied to make site-specific TEM specimens and to identify the 3-dimensional grain morphologies of the bainitic microstructure. The morphological feature and grain boundary characteristics of each bainitic microstructure were exactly identified.

Key Words : granular bainite, acicular ferrite, bainitic ferrite, focused ion beam, HSLA steels

1. 서론

저탄소·저합금 강은 건축물, 교량, 조선, 자동차, 라인파이프 등 구조용 재료로 널리 사용되는 강재이다. 최근 구조물의 안정성 증대와 사용 강재량의 감소를 위하여 페라이트-펄라이트가 아닌 베이나이트를 기저로 하는 저탄소·저합금 강의 개발이 진행되고 있다[1-2].

중탄소강이나 고탄소강이 상부베이나이트와 하부베이나이트로 변태되는 것과 달리 저탄소강의 베이나이트 변태 시에 세멘타이트 형성이 어려워 저탄소강은 복잡한 베이나이트 조직을 가지게 된다. 미세 조직과 물성간의 체계적인 상관 관계 파악을 위해 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 및 투과전자현미경(transmission electron microscope)를 이용하여 저탄소강의 베이나이트 조직을 정의하고 분류하기 위한 연구가 진행되었다[3-5].

주사전자현미경과 투과전자현미경을 이용한 미세 조직의 관찰은 상이한 시편 제조 방식으로 인하여 각 현미경에서의 시편 관찰 영역이 일치하지 않는다는 단점을 가지고 있다. 수십 마이크로 크기의 결정립을 가지는 페라이트-펄라이트 강에서는 이런 단점이 크게 문제되지 않으나, 수 마이크로 크기의 결정립을 가지고 여러 가지 미세 조직이 복합적으로 발생하는 저탄소강의 경우에 일반적인 주사전자현미경-투과전자현미경 관찰 방법은 미세 조직을 정의하는데 적합하지 않게 된다.

이에 반해, 집속이온빔(focused ion beam, FIB) 장비는 Ga 이온을 이용하여 시편을 식각할 수 있는 장비로써, 특정 위치에서 투과전자현미경 시편 제조가 가능한 장점이 있다. 따라서, 본 연구의 목표는 집속이온빔(focused ion beam) 장비를 이용하여 저탄소 베이나이트 조직의 형태학적 특성을 파악하고, 정확한 위치에서 투과전자현미경 시편을 제조하여 베이나이트 조직 특성을 밝혀내는데 있다.

1. 포항공과대학교 신소재공학과

2. 포스코 기술연구소

포항공과대학교 신소재공학과 cgpark@postech.ac.kr

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 강재의 화학 조성은 Table.1 과 같다. 상기 강종은 연속 주조 방식으로 제조 되었으며, 열간 압연 모사 실험을 위하여 $\Phi 7\text{mm} \times 12\text{mm}$ 의 실린더 형태로 가공하였다.

Table.1 Chemical composition of investigated steels (wt%)

Fe	C	Si	Mn	Ti+Nb	Others
Bal.	0.05	0.155	1.90	0.065	Mo, Ni, B

열간 압연 모사 실험은 Gleeble 3500system을 이용하여 실시하였다. 강 중의 Ti와 Nb를 용해 하기 위하여 1150°C 에서 10분간 유지하여 재가 열 공정을 모사하였으며, 그 이후 1100°C 에서 800°C 의 온도 영역에서 60%의 변형을 가하고 0.5°C/s 에서 50°C/s 까지 냉각 속도를 달리하여 열간 압연 공정을 모사하였다.

미세 조직의 3차원 형상은 FIB-SEM dual beam system (SEI 3050)으로 관찰하였다. 우선적으로 시료를 $1\mu\text{m}$ diamond suspension까지 기계적으로 연마한 후, 2% nital 용액으로 표면을 약하게 에칭하여 시료를 준비한다. 다음으로 시료를 FIB-SEM dual beam system에 장착하고, SIM(scanning ion microscope)로 특정 영역을 선택하고 Ga ion으로 식각한다. 장비 내에 FIB column과 55° 기울어져 SEM column으로 시료의 단면을 관찰하여 3차원 형상을 구성한다. 또한, SIM/SEM 영상과 TEM 영상의 일치를 위하여 각 베이나이트 조직의 TEM 시편 또한 FIB-SEM dual beam system으로 제조하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 실험에 사용된 강종과 유사한 강종의 연속 냉각 변태 실험 결과와 마찬가지로 저탄소강은 연속 냉각 중에 granular bainite, acicular ferrite 및 acicular ferrite로 변태된다[6-7].

Granular bainite는 느린 냉각 속도 영역에서 발달하였으며 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 $10\sim 30\mu\text{m}$ 크기의 페라이트 결정립과 입내 및 입계에 존재하는 이차상으로 특징지어진다. Figure 1(a)의 SIM 상에서는 아결정립계가 보이지 않으나, Fig. 1(b)의 3차원 영상 이미지를 살펴보면 수 마이크로 크기

의 아결정립과 아결정립 사이의 이차상이 관찰되며 아결정립계의 존재 여부는 Fig. 1(c)의 회절 패턴에서 보다 분명해진다. 즉, granular bainite 내부에 존재하는 수 마이크로 크기의 결정립들은 유사한 방향으로 배열되어 TEM 상에서 회절 패턴이 수도 이내로만 틀어져 있게 된다.

SEM이나 SIM으로 관찰된 입내의 이차상은 결국 granular bainite의 아결정립 경계에 존재하는 것이며 이들 이차상은 주로 SEM 및 SIM 관찰결과 martensite/austenite (M/A)나 pearlite인 것으로 판단된다.

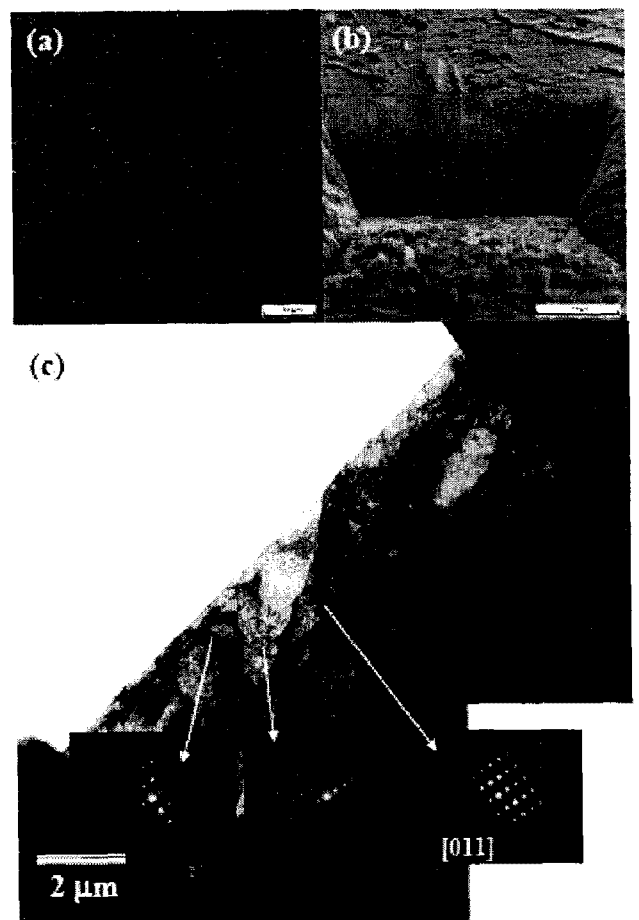


Fig. 1 (a) SIM image, (b) 3-dimensional structure and (c) TEM image of granular bainite. Granular bainite was consisted of ferrite grain and intergrain and intragrain 2nd phase constituents.

Granular bainite보다 빠른 냉각 속도에서 관찰되는 acicular ferrite는 $2\sim 3\mu\text{m}$ 크기의 미세하고 불규칙한 형상을 가진 결정립들의 집합체이다. Acicular ferrite 각각의 결정립은 다소 길쭉한 형상을 가지고 있는데 (Fig. 2(a), Fig. 2(b)), 이는 냉각 속도가

증가함에 따라 전단 변태의 구동력이 높아지기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 전단 변태에 의해 생성된 조직은 저경각 경계를 가지는 조직을 발생시킨다는 특징을 가지고 있으나, acicular ferrite의 특정 결정립들은 Fig. 2(c)에서 보는 바와 같이 고경각 경계로 이루어져 있는 것이 확인되었다. 이는 인접한 두 acicular ferrite가 연속 냉각 과정 중에 서로 다른 방향으로 성장하였음을 의미한다. 미세한 결정립들의 집합체인 acicular ferrite는 변형이 가해진 오스테나이트에서만 변태되므로[6], acicular ferrite 간의 고경각 경계는 전위가 집적된 오스테나이트 내부에서 acicular ferrite가 동시에 핵생성하여 성장하였기 때문인 것으로 사료된다.

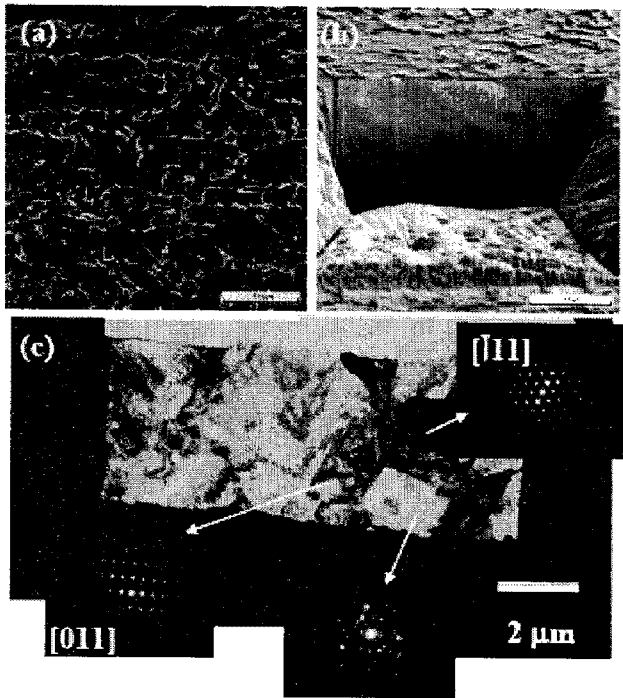


Fig. 2 (a) SIM image, (b) 3-dimensional structure and (c) TEM image of acicular ferrite. Acicular ferrite could be characterized by an aggregate of fine and irregular shaped grains.

Acicular ferrite와는 달리 bainitic ferrite는 평행한 래스 구조로 이루어져 있다. Figure 3(a)에서 보듯이 래스 구조가 오스테나이트 내에서 평행하게 발달하게 되므로 선오스테나이트 구조가 보전되어 있는 것이 bainitic ferrite의 또 다른 특징이다. Bainitic ferrite의 래스는 주로 전단 변태에 의해 발생하게 되므로 Fig 3(c)에서 보는 바와 같이 래스들은 저

경각 경계를 이루게 된다.

Bainitic ferrite의 래스와 같이 유사한 방향으로 성장된 집합체를 packet이라 정의하며, 이와 같은 조직의 물성은 packet의 크기에 의해 결정된다. Figure 3(d)는 acicular ferrite가 bainitic ferrite의 래스 내부에 성장해있는 것을 보여준다. Acicular ferrite와 bainitic ferrite가 고경각 경계를 나타내므로, bainitic ferrite 내에 acicular ferrite가 균일하게 분포하면 packet의 크기를 효과적으로 감소시킬 수 있는 방안이 되리라 판단된다.

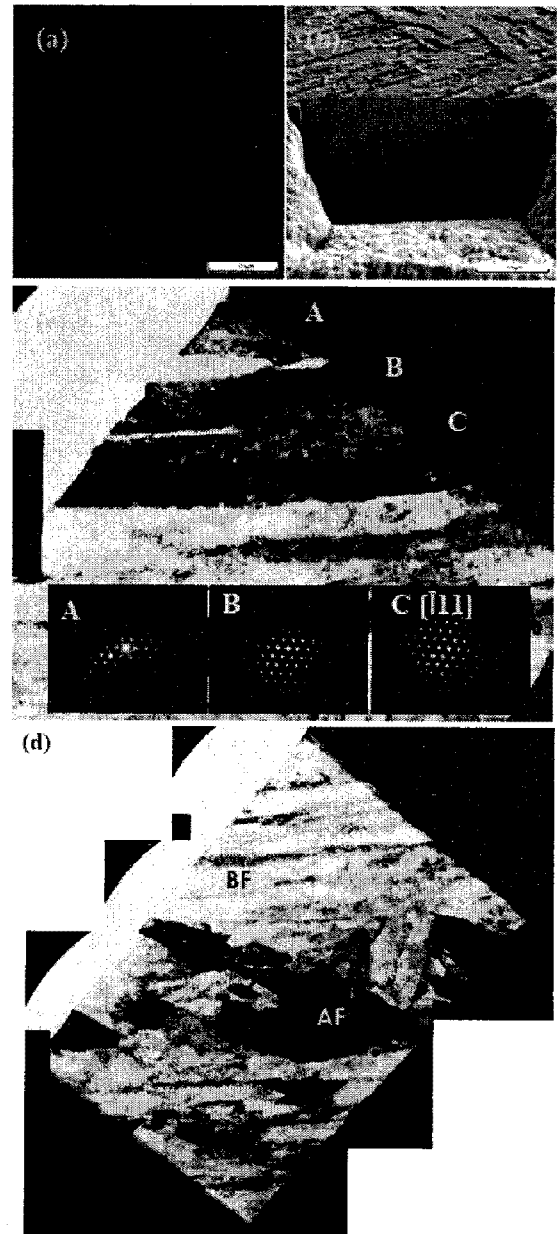


Fig. 3 (a) SIM image, (b) 3-dimensional structure and (c) TEM image of bainitic ferrite. Bainitic ferrite consisted of uniform laths within the prior austenite grain

4. 결 론

집속이온빔 장비를 이용하여 저탄소 베이나이트 구조의 형태학적 특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Granular bainite는 수 마이크론 크기의 아결정립과 아결정립계 또는 결정립계에 M/A나 pearlite의 이차상을 가지는 조직이다.

(2) Acicular ferrite는 침상형의 미세한 결정립들의 집합체이며, acicular ferrite의 결정립계는 고경각 경계로 이루어져 있다.

(3) Bainitic ferrite는 평행한 래스 구조로 이루어져 있으며, 이들 래스는 저경각 관계를 가진다. 또한, bainitic ferrite의 packet은 acicular ferrite에 의해 효과적으로 감소된다.

후 기

본 연구는 POSCO, NCRC, BK21 및 NCNT의 지원 하에 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] S. Das, A. Ghosh, S et. al., Scripta Materialia, Vol. 48, Issue 1, January 2003, p51-57
- [2] A. Ghosh, S. Das et. al., Mat. Sci. Eng. A, Vol. 348, Issue 1-2, May 2003, 299-308
- [3] B. L. Bramfitt and J. G. Speer, Metall. Trans., Vol. 21A, April 1990, p. 817
- [4] H. Ohtani et al., Metall. Trans., Vol. 21A, April 1990, p. 877
- [5] G. Krauss and S. W. Thompson, ISIJ international, Vol 35 (1995), No. 8, p. 937-945
- [6] H. J. Jun, J. S. Kang et al., Mater. Sci. And Eng., A422 (2006) p 157
- [7] J. S. Kang, H. J. Jun et al., The 5th International Offshore and Polar Engineering Conference, June 19-24, 2005, Seoul, Korea