

# 저탄소·저합금 강의 미세구조 및 기계적 성질에 미치는 가공 열처리 조건의 영향

강주석<sup>1</sup>·Huang Yusen<sup>2</sup>·이창우<sup>1</sup>·박찬경<sup>#</sup>

## Effects of TMCP on the microstructure and mechanical properties of low carbon HSLA steels

J.S. Kang, Y. Huang, C.W. Lee, C.G. Park

### Abstract

Effects of deformation at austenite non-recrystallization region and cooling rate on the microstructure and mechanical properties of low carbon (0.06 wt. %) high strength low alloy steels have been investigated. Average grain size decreased and polygonal ferrite transformation promoted with increasing deformation amount due to increase of ferrite nucleation site. As cooling rate increased, the major microstructure changed from polygonal ferrite to acicular ferrite and the fraction of M/A constituents gradually increased. Discontinuous yielding occurred in highly deformed specimen due to the formation of polygonal ferrite. However, small grain size of highly deformed specimen caused lower ductile-to-brittle transition temperature than slightly deformed specimen.

**Key Words** : TMP, acicular ferrite, HSLA steels

### 1. 서론

원유나 천연가스의 장거리 수송에 사용되는 라인파이프 강(linepipe steels)은 1960 년대에 항복 강도가 60Ksi 급의 API X120 강이 개발된 이래로 수송 효율의 증가 및 극한 지역에서의 사용을 위하여 점차적으로 고강도, 고인성의 특성이 요구되어 왔으며, 현재는 항복강도가 120Ksi 급인 API X120 강에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1~2].

강도와 인성 외에 용접성 또한 라인파이프 강의 중요 물성으로 여겨지기 때문에 라인파이프 강재는 탄소의 첨가량을 낮추고, 저탄소 첨가량으로 인한 강도를 보완하기 위하여 냉각 속도를 증가시켜 베이나이트 조직을 가지도록 합금 및 공정이 설계되고 있다.

철강 재료는 석출 강화, 고용 강화, 변태 강화, 결정립 미세화 등의 여러 가지 야금학적인 기구

를 통하여 강도를 증진시킬 수 있으나, 결정립 미세화를 제외한 다른 강도 증진 기구들은 인성을 저하시키기 때문에 가공 열처리 기술(Thermo-mechanical controlled process)을 통한 결정립 미세화 및 조직 제어에 관한 연구가 진행되어 왔다[3~5].

중탄소강이나 고탄소강과는 달리 저탄소강은 연속 냉각 공정 중에 다양한 베이나이트 구조로 변태되기 때문에 1990 년대 이래로 많은 학자들이 저탄소강의 미세구조를 분류하려 노력해 왔으나, [5~8] 아직까지 명확하게 방법은 제시되지 못하고 있으며, 이로 인하여 조직과 물성의 상관 관계가 체계적으로 정리되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 0.06wt.%의 탄소가 첨가된 저탄소강을 이용하여 오스테나이트 영역에서의 변형량 및 냉각 속도가 미세구조 및 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

1. 포항공과대학교 신소재공학과

2. 포항공과대학교 철강대학원

# 교신저자: 포항공과대학교, E-mail: cgpark@postech.ac.kr

## 2. 실험 방법

본 실험에 사용된 강의 화학 조성은 Table. 1 과 같다. 상기 강종은 고주파 진공 용해로에서 주조 되었으며, 주조 이후 조직의 균질화를 위하여 1200°C 에서 2 시간 동안 열처리를 하고 110mm 두께로 압연을 실시하였다. 압연된 판재의 일부는  $\Phi 7\text{mm} \times 12\text{mm}$  의 cylinder 형태로 가공하여 열간 압연 모사 실험에 사용되었으며, 판재의 나머지는 파일럿 플랜트 (pilot plant)에서 실기 압연을 실시하고 기계적 특성을 평가하는데 사용되었다.

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

C	Si	Mn	Ti	Nb	Ni	Mo
0.06	0.20	1.50	0.018	0.051	0.25	0.25

열간 압연 모사 실험은 Gleeble 3500system 을 이용하여 실시하였다. 강 종의 Ti 와 Nb 를 용해하기 위하여 1150°C에서 10 분간 유지하여 재가열 공정을 모사하였으며, 그 이후 850°C까지 1°C/s 의 냉각 속도로 냉각하였다. 850°C에서 0%에서 60%까지 변형량을 달리하고, 변형 이후 상온까지 냉각 속도를 0.5°C/s 에서 10°C/s 까지 달리하여 열간 압연 공정을 모사하였다.

실기 압연 시, 오스테나이트 영역에서의 변형량을 40%와 70%로 달리하여 압연하였으며 강도 측면을 고려하여 냉각 속도는 10°C/s 로 고정하였다. 실기 압연 이후, 인장 실험과 Charpy 충격 실험을 통하여 기계적 물성을 평가하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 열간 압연 모사 실험

Fig. 1 은 0.5°C/s 의 냉각 속도 조건에서 오스테나이트 영역에서의 변형량에 따른 미세조직의 변화를 보여준다. 오스테나이트 영역에서 변형을 받지 않은 경우 (Fig. 1a), polygonal ferrite 가 network 구조를 이루고 그 내부에 granular bainite 와 acicular ferrite 가 존재하는 형태를 이루고 있다. 변형량이 증가하면 polygonal ferrite 의 분율은 증가하지만 network 구조는 희미해지고 pearlite 가 점차적으로 발달하여 60%의 변형을 받은 시편의 경우, pearlite 가 밴드 구조를 이루게 된다(Fig. 1d).

일반적으로 상변태 시, 핵 생성은 결정립계나 삼중점(triple junction) 같이 에너지 상태가 높은 곳에서 발생한다. 따라서 오스테나이트 영역에서 변형을 받지 않은 시편의 경우 선오스테나이트

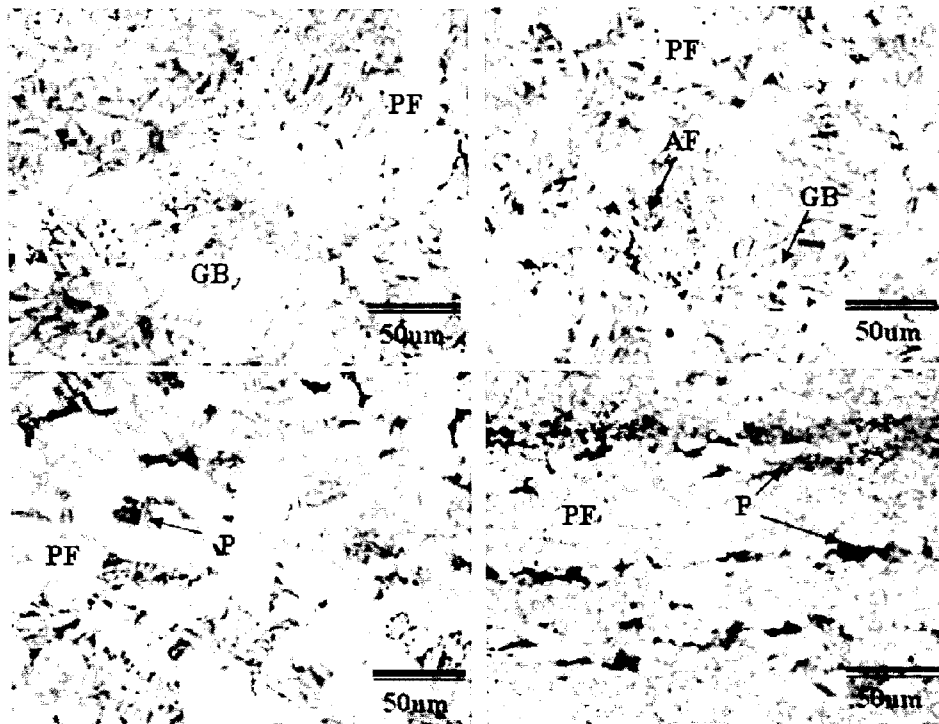


Fig. 1 Optical micrographs showing the microstructure of (a) undeformed (b) 20% (c) 40% and (d) 60% deformed specimens under 0.5°C/s cooling rate condition. (P: pearlite, PF: polygonal ferrite, GB: granular bainite and AF: acicular ferrite)

결정립계를 따라 polygonal ferrite 가 발달하여 network 구조를 형성하고, 이 후 냉각 과정에서 변태되지 않은 오스테나이트는 granular bainite 와 acicular ferrite 로 변태된 것으로 판단된다.

오스테나이트 미재결정 영역 변형이 가해지면 오스테나이트 내부에 변형띠(deformation band)가 생성되고, 이 변형띠가 페라이트 핵생성 자리의 역할을 하게 됨으로써 결정립 미세화가 발생한다[9]. 본 연구에서도 오스테나이트 미재결정 영역에서의 변형량이 증가할수록 페라이트 결정립이 감소하여 60%의 변형 시 평균 입도가 6.5 $\mu$ m 까지 감소하였다. 변형띠의 생성은 페라이트 변태 온도를 증가시켜 상변태를 촉진시키는 역할 또한 하게 되는데, 이로 인하여 변형량이 증가할수록 granular ferrite 나 acicular ferrite 의 분율은 감소하고 pearlite 가 생겨나게 되었다.

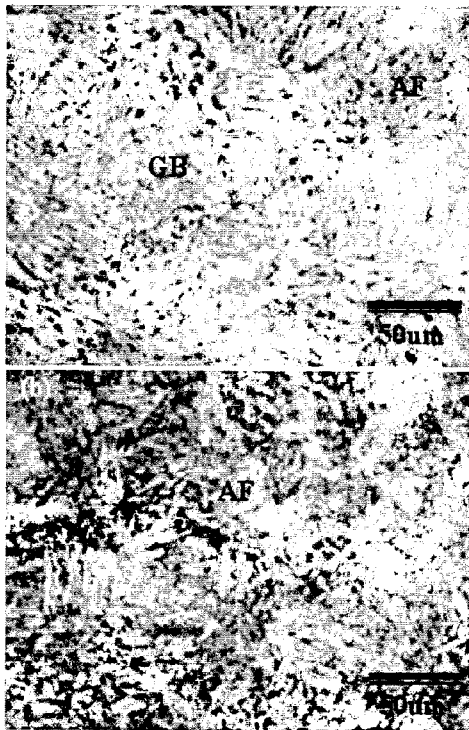


Fig. 2 Optical micrographs showing the microstructure of 20% deformed specimen with (a) 3°C/s and (b) 10°C/s cooling rate condition.

오스테나이트 미재결정 영역에서의 변형은 polygonal ferrite 나 pearlite 의 생성을 촉진시키는데 반해, 냉각 속도를 증가시키면 오스테나이트의 과냉도가 커져 granular bainite 와 acicular ferrite 같은 베이나이트 조직의 발달이 촉진된다. 20% 변형된 시편의 냉각 속도를 3°C/s 까지 증가시키면

polygonal ferrite 는 사라지고 granular bainite 와 acicular ferrite 의 조직이 나타나며, 10°C/s 까지 냉각 속도가 증가되면 acicular ferrite 조직만이 나타난다(Fig. 2).

저탄소강의 베이나이트 구조는 확산 변태 기구와 전단 변태 기구의 중간적인 특성을 지닌다고 보고되고 있다[5]. Granular bainite 나 acicular ferrite 같은 베이나이트 조직의 변태 과정 중 상변태 초기에 탄소의 확산에 의하여 국부적으로 탄소의 농도가 높은 영역이 생겨나게 된다. 국부적으로 생성된 고탄소 영역이 이 후 냉각 과정에서 일부만이 마르텐사이트로 변태하고 나머지는 오스테나이트 결정구조를 유지하게 되면, M/A(Martensit/Austenite) constituents 가 생겨난다. 따라서 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 냉각 속도가 증가되면, 베이나이트 변태와 더불어 M/A constituents 의 양도 증가된다.

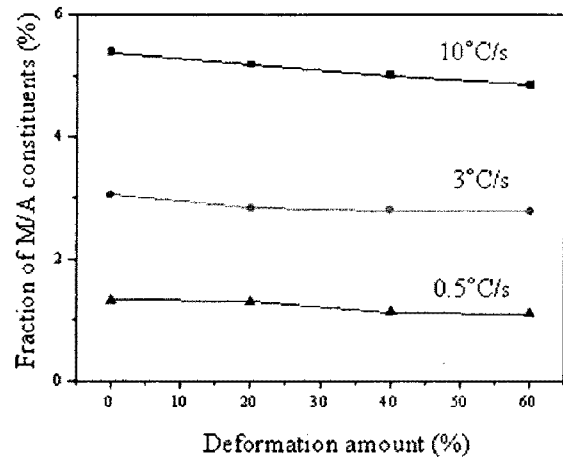


Fig. 3 Volume fraction of M/A constituents according to deformation amount and cooling rate.

### 3.2. 기계적 성질

실기 압연 이후 인장 시험 및 샤피 충격 시험을 통한 기계적 특성치를 Table. 2 에 정리하였다.

Table. 2 Mechanical properties of studied steels

	Deform. amount (%)	YS (Mpa)	TS (Mpa)	e (%)	USE (J)	DBTT (°C)
A	40	461	642	23	200	-65
B	70	557	655	25	175	-85

실기 압연재의 기계적 특성 평가 결과, 두 시편의 인장 강도는 약 650Mpa 내외로 비슷한 수준을 보였으나, 항복 강도는 B 시편이 A 시편보다 약

100Mpa 정도 높았다. 또한, Fig. 4 에서 보는 바와 같이 A 시편은 연속 항복 거동을 보임에 반해 B 시편은 불연속 항복 거동을 보이고 있다.

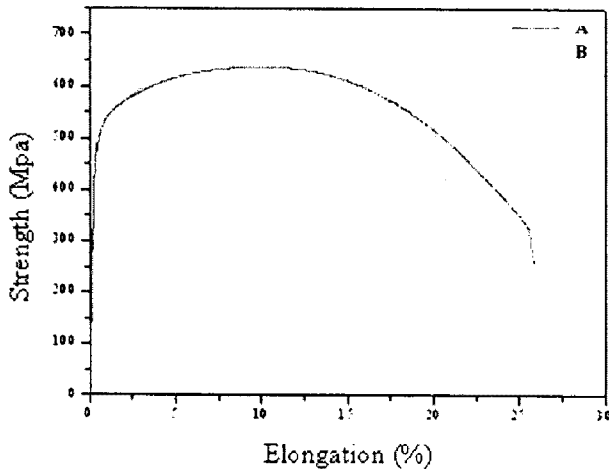


Fig. 4 Flow curve of two rolled steels

두 실기 압연재의 미세 조직 관찰 결과, A 시편은 granular bainite 와 acicular ferrite 로 이루어져 있음에 반해 B 시편은 polygonal ferrite, pearlite 및 소량 (2.9%)의 martensite 의 조직으로 이루어져 있었다. 따라서 베이나이트 조직을 기본으로 하는 A 시편은 연속 항복 거동을 보였으며, 확산 변태 조직인 polygonal ferrite 와 pearlite 를 기본으로 하는 B 조직은 불연속 항복 거동을 보이며 martensite 로 인하여 높은 항복 강도 및 낮은 상부흡수에너지 (upper shelf energy, USE) 특성을 보이는 것으로 판단된다.

평균 입도 측면에서는 B 시편이  $3.5 \mu\text{m}$  로 A 시편 ( $4.2 \mu\text{m}$ )로 작아서 연성-취성 천이 온도 (ductile-to-brittle transition temperature)가 낮아진 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

0.6wt.%의 탄소를 함유한 저탄소강의 압연 모사 실험 및 실기 압연 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 오스테나이트 미세결정 영역에서의 압연량이 증가할수록 polygonal ferrite 및 pearlite 의 변태

가 촉진되었으며, 오스테나이트 내부에서의 핵생성에 의하여 polygonal ferrite 의 평균 입도는 감소하였다. 이에 따라 연성-취성 천이온도는 감소하는 경향을 보였다.

(2) 냉각 속도의 증가는 granular bainite 와 acicular ferrite 의 생성을 촉진 및 M/A constituents 의 분율을  $10^\circ\text{C}/\text{s}$  의 냉각 속도 조건에서 약 5%까지 증가시켰다.

(3) 베이나이트를 기본 조직으로 하는 강은 연속 항복 거동을 보였으나, polygonal ferrite 와 pearlite 를 기본으로 하는 조직은 불연속 항복 거동을 보였다. 그러나 소량의 martensite 가 발달함에 따라 인장강도는 베이나이트 강과 동일한 수준을 유지하였다.

#### 참고 문헌

- [1] J. Y. Koo, Metallurgical Design of Ultra-High Strength Steels for Gas Pipelines, Proc of 13<sup>th</sup> int. Offshore and Polar Eng Conf, ISOPE, Honolulu, 2003, Vol. 4, pp 10-18.
- [2] H. Asahi, The metallurgical design of high-strength steels, and development of X120 UOE linepipe, Pipeline Tech Conf, Ostend, Belgium, 2004, Vol. 2, pp 852-872.
- [3] P.A. Manohar and T. Chandra: ISIJ International, Vol. 38(1998), No. 7, pp. 766-774
- [4] M.C. Zhao, K. Yang, F.R. Xiao and Y.Y. Shan: Mat. Sci. and Eng. A355 (2003), pp. 126-136
- [5] H. J. Jun, Effects of TMP and accelerated cooling on continuous cooling transformation and microstructure in low carbon HSLA steels with/without B, Proc of 2<sup>nd</sup> int conf on thermomechanical processing of steels, Liege, Belgium, 2004, pp 319-325.
- [6] B. L. Bramfitt and J. G. Speer: Metall. Trans., Vol. 21A, April 1990, 817
- [7] H. Ohtani, S. Okaguchi, Y. Fujishiro and Y. Ohmori: Metall. Trans., Vol. 21A, April 1990, 877
- [8] G. Krauss and S. W. Thompson: ISIJ international, Vol 35 (1995), No. 8, pp. 937-945
- [9] T. Tanaka: Intl. Metals Rev., 4, 185 (1981)