

## 저탄소 HSLA강의 천이 온도 미치는 미세 조직의 영향

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

### Effects of microstructure on impact transition temperature of low carbon HSLA steels

J. S. Kang<sup>1</sup>, C. W. Lee<sup>3</sup>, C. G. Park<sup>1,2</sup>

#### Abstract

Effects of microstructure on the toughness of low carbon HSLA steels were investigated. Nickel decreased the ferrite-austenite transformation temperature, resulted in increase of the fraction of bainitic ferrite. However, it was decreased with increasing deformation amount at austenite region. Since fine austenite grains formed by dynamic recrystallization under large strain transformed to acicular ferrite or granular bainite rather than bainitic ferrite. The effective grain size, thus, was decreased by deformation and it resulted in lower ductile-brittle transition temperature (DBTT). The bainitic ferrite was thought to inhibit the fracture crack initiation and to delay the crack propagation by its high dislocation density and hard interlath 2<sup>nd</sup> phase constituents, respectively. Thus, DBTT was also decreased by Ni addition in low carbon HSLA steels.

**Key Words:** acicular ferrite, bainitic ferrite, DBTT, HSLA steels

#### 1. 서론

원유 및 천연 가스의 수송에 사용되는 라인파이프 강은 경제성과 수송 효율성의 향상 및 극지방으로의 사용 환경 확대를 위하여 강도를 증가시키고 저온 인성을 개선하는 방향으로 연구가 진행되어 현재 항복 강도가 830Mpa, 상부 흡수 에너지가 -30°C에서 230J 수준인 라인파이프 강재가 개발되었다<sup>1-2)</sup>.

저온 인성은 상부흡수에너지(upper shelf energy)와 연성-취성 천이 온도의 두 가지 개념으로 나누어질 수 있다. 상부흡수에너지는 연성 파괴 시, 외부 응력을 흡수하는 능력으로 기지 조직의 내충격 특성에 의하여 결정되나, 연성-취성 천이 온도(Ductile-brittle transition temperature, DBTT)는 철강재료의 파괴 모드가 바뀌는 온도로서 기지 조직 및 크랙(Crack)의 전파에 의해 그 특성이 결정된

다. 따라서 시베리아나 알래스카 등과 같은 극지방에 라인파이프를 건설하기 위해서는 저온 파괴에 대한 기초적인 이해가 더 필요한 시점이다.

페라이트 강에서 결정립 미세화에 의한 DBTT는 증가 사례는 보고되었으나<sup>3)</sup> 래스 구조를 가지는 저탄소 베이나이트 강 경우, 유효 결정립 크기를 정의하기가 쉽지 않고, 유효 결정립 조절을 위해 압연 공정을 조절하면 미세 조직이 바뀌기 때문에 결정립 미세화와 DBTT의 상관 관계에 대한 연구가 미흡하다. 결정립 미세화와 더불어 Ni은 교차 슬립을 증가시켜 DBTT를 감소시키는 합금 원소로 알려져 있으나<sup>4)</sup>, Ni 첨가량 증가 또한 저탄소 강의 기본 미세 조직을 변화시키며, 라인파이프의 파괴와 같은 동적 파괴 시에 교차 슬립이 발생 여부에 대한 논거가 부족하기 때문에 Ni이 저탄소 베이나이트 강 DBTT에 미치는 영향에 관한 연구 체계적인 연구 결과가 아직 보고되

1. 포항공과대학교 신소재공학과

2. 포항나노기술집적센터

3. 포스코 후판부

# 포항공과대학교 신소재공학과, cgpark@postech.ac.kr

지 않은 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 저탄소 베이나이트 강을 제조하여 미세 조직이 저탄소 강의 천이 온도에 미치는 영향을 고찰해 보고자 한다.

## 2. 실험 방법

본 실험에 사용된 강종은 0.05wt%의 저탄소강으로 Ni 첨가량을 달리하여 진공 고주파 유도용해로에서 Table. 1과 같은 성분으로 용해 주조하였다. 상기 시료의 조직 균질화를 위하여 1200℃에서 2시간 동안 균질화 열처리를 실시한 뒤,  $\Phi 7\text{mm} \times 12\text{mm}$  크기 실린더 형태의 시편을 가공하여 열간 압연 모사 실험을 실시하였으며 110mm 두께의 판상 시편을 제조하여 실기 압연을 실시하였다.

Table. 1 Chemical composition of studied steels

|       | C     | Si    | Mn   | Ni   | Ti+Nb   |
|-------|-------|-------|------|------|---------|
| 0.5Ni | 0.051 | 0.252 | 1.92 | 0.5  | 0.1~0.2 |
| 1Ni   |       |       |      | 1.00 |         |
| 2Ni   |       |       |      | 1.99 |         |

열간 압연 공정은 Gleeble 3500 system을 이용하여 모사하였다. 모사 실험 중에 시편은 1100℃에서 10분간 가열한 뒤, 850℃에서 0~80%로 변형량을 달리하여 다단 압연 공정을 모사하였다. 압연 공정 이후 베이나이트 조직을 만들기 위하여 20℃/s의 냉각 속도로 상온까지 냉각하였다. 모사 실험재의 유효 결정립 크기는 8% perchloric acid + 92% acetic acid 혼합 용액으로 시편을 전해 연마한 후 FE-SEM에 부착된 TSL사의 EBSD로 측정하였다.

상기 강재의 Charpy 시험을 통한 천이 온도를 구하기 위하여 실기 압연을 실시하였다. 실기 압연 시, 재가열 온도는 모사 실험 조건과 동일하였으며 900℃와 700℃ 사이에서의 다단 압연을 통하여 압연량을 제어하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

Ni 첨가량 증가에 따른 미세 조직의 변화는 기존에 연속 냉각 변태 실험에서 보고된 바와 같다<sup>5)</sup>. 즉, 오스테나이트 안정화 원소인 Ni 첨가량의 증가에 따라 냉각 중 변태 시작 온도가 낮아

지고 이로 인하여 저온 변태 조직인 bainitic ferrite의 발달이 두드러지게 된다. 오스테나이트 영역에서 압연량의 증가는 페라이트 핵생성 자리를 증가시켜 변태 노즈를 느린 냉각 속도 영역으로 이동시키므로<sup>6)</sup> acicular ferrite 및 granular bainite 조직의 발달을 초래하게 된다.

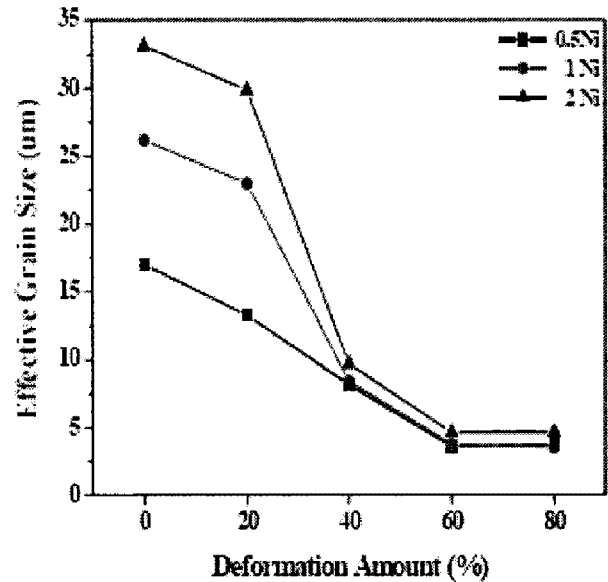


Fig. 1 Effective grain size of simulated specimens. Tolerance angle for the determining of effective grain size was 15°

Ni 첨가량 및 변형량 증가에 따른 유효 결정립도의 변화는 Fig. 1에 나타내었다. 변형량이 작은 경우 Ni 첨가량의 증가는 유효 결정립도의 증가를 야기하나, 변형량이 40% 이상이 되면 Ni 첨가에 의한 결정립 크기의 차이는 미비해진다.

재가열 공정 모사 이후 강 중 Ti와 Nb의 용해량은 Ni 첨가량에 상관없이 각각 첨가량의 50%와 4% 정도로 일정하게 유지되므로, Ni 첨가에 의한 유효 결정립도의 증가는 Ni 첨가에 의한 가열 중 오스테나이트 변태 시작 온도의 감소로 인해 오스테나이트 결정립 성장이 발생했기 때문인 것으로 판단된다.

Ni 첨가량이 0.5 wt. %인 강의 압연 시의 유도곡선을 살펴 보면(Fig. 2a), 40%의 변형 시부터 연화 작용이 발생하여 추후 변형 공정에서 연화가 계속 진행되는 것을 볼 수 있다. 고온 변형 도중의 연화는 동적 재결정에 의한 것으로 Fig. 2b와 같이 동축정의 미세한 오스테나이트 결정립을 만

들게 된다. 따라서, 오스테나이트 영역에서 동적 재결정이 발생하게 될 정도로 변형을 받게 되면 오스테나이트 결정립계 면적이 증가하게 되어 페라이트 핵 생성 자리를 증가시켜 결정립 미세화를 효과를 가져오게 된다.

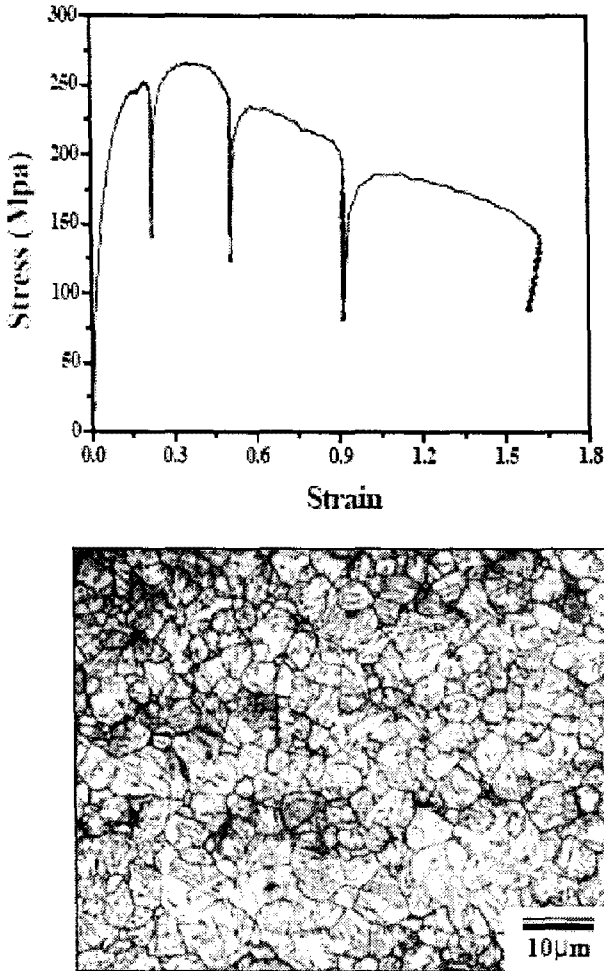
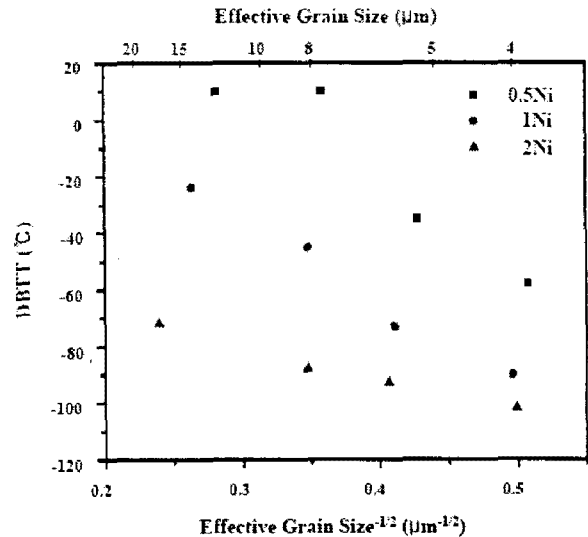


Fig. 2 (a) Flow curve of 0.5 Ni steel during hot deformation performed by Gleeble 3500 system (b) Recrystallized austenite grain of 0.5 Ni steel after hot deformation

실기 압연재도 열간 압연 모사 실험재와 마찬가지로 Ni 첨가량의 증가에 따라 bainitic ferrite의 분율은 증가되었으나, 60%이상으로 압연량이 많기 때문에 Ni 첨가에 따른 유효 결정립도의 차이는 생기지 않았다. 그러나, Ni 첨가량의 증가는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 DBTT를 감소시키는 결과를 야기하였다. 이는 크랙 개시와 전파의 측면에서 고려해 볼 수 있다. 즉, 크랙 개시를 위한 응력 집중 계수  $K_{Ic}$ 는 기지 조직의 항복 응력의 제곱근

에 비례하므로 Ni 첨가에 의해 강도가 높은 bainitic ferrite 조직의 분율이 증가하게 되면 크랙의 생성이 저하되게 된다. 또한 bainitic ferrite는 래스 경계에 martensite/austenite (M/A) constituents를 포함하고 있고, 이런 이차상에서 크랙이 전파 방향이 꺾이게 되므로 bainitic ferrite는 크랙 전파 측면에서도 유리한 점을 가지게 되어 Ni 첨가량의



증가가 DBTT의 감소를 가져온 것으로 사료된다.  
Fig. 3 Relation between effective grain size and ductile-brittle transition temperature (DBTT). DBTT was proportional to the square roots of effective grain size.

#### 4. 결론

본 연구에서는 0.05 wt. %의 저탄소강에 Ni 첨가량을 0.5 wt. %에서 2.0 wt. %까지 달리한 시편을 제조하고, 열간 압연 모사 실험 및 실기 압연 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Ni 첨가량의 증가는 페라이트-오스테나이트 변태 온도를 낮춘다. 이로 인하여 Ni 첨가량이 많은 강은 재가열 공정 중에 오스테나이트 결정립 성장이 일어나고, 연속 냉각 후에 bainitic ferrite를 기지 조직으로 가지게 된다.

(2) 오스테나이트 영역에서의 변형량의 증가는 동적 재결정을 발생시켜 유효 결정립의 감소를 야기한다.

(3) Bainitic ferrite 조직은 항복 강도가 높고 래스 경계에 강도가 높은 이차상을 포함하고 있으므로, 낮은 천이 온도를 가진다.

## 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] F. B. Pickering and T. Gladman, J. Iron and Steel Inst., 205, p 161, 1967
- [4] H. E. McGannon, The Making, Shaping and Treating of Steel, 10<sup>th</sup> ed., 1985
- [5] 강주석, 전현조, 박찬경, 한국소성가공학회 2005년도 추계학술대회 논문집, p456-459
- [6] H. J. Jun, J. S. Kang et. al., Mat. Sci. and Eng. A, 422 (1-2), p157-162 (2006)