

베이나이트계 비조질강에서 미세조직과 기계적성질에 미치는 합금원소의 영향

원성호· 박현균¹

Effect of Alloying Elements on Microstructures and Mechanical Properties of Bainitic Microalloyed Steels

S. H. Won, and H. G. Park

Abstract

Bainitic microalloyed steels have drawn a lot of attention because of high strength combined with high toughness. In order to process the alloys easily, it is necessary to get the alloys of high hardenability. Mo and B were added to enhance the hardenability, which was demonstrated by TTT simulation and microstructures. It was also identified using BNCT that B, hardenability raising element, was distributed more evenly as cooling rate went up. Examination of grain coarsening temperature depending upon austenitizing temperature revealed that V and Ti effectively inhibited the grain growth up to 1000°C and 1050°C, respectively

Key Words : Microalloyed Steels, Bainite, Hardenability, Neutron Beam, Grain Coarsening

1. 서론

기존의 비조질강은 페라이트와 펄라이트를 기본 조직으로 강도는 조질처리 강과 비슷한 수준을 맞출 수 있었으나 인성은 낮아 그사용 범위에 한계를 가지고 있다. 낮은 인성을 해결하기 위해 탄소의 함량을 0.2wt%이하로 낮추고 대신에 Mn, Cr과 같은 경화능 향상 원소를 첨가하여 조직을 베이나이트로 만들어 강도와 인성을 동시에 향상시킬 수 있는 베이나이트계 비조질강이 개발되었다.[1]

또한 비조질강에 미량 첨가되는 Ti은 질소 및 탄소와 결합하여 생성된 석출물이 고온에서 오스테나이트 결정립의 성장을 방해하여 결정립을 미세화 시킨다.[2] 결정립 미세화는 베이나이트 변

태온도를 낮추고 베이나이트 생성조직을 미세화 시키며 이로인해 강도와 인성을 동시에 향상시킬 수 있는 장점이 있다. Mo, B은 냉각시 경화능을 향상시킬 뿐만 아니라 베이나이트의 생성을 용이하게한다. 또한 보론은 분포하는 위치와 다른 원소와의 결합여부에 따라 경화능에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 나타나고 있다.

본 연구에서는 베이나이트계 비조질강에 미량 첨가되는 V, Ti이 오스테나이트 결정립 미세화에 미치는 영향과 Mo, B이 경화능에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편의 미세조직 및 기계적 특성 측정 실험에 사용된 시편의 조성은 표1과 같다. 시편 1을 기본 조성으로 하여 2번에는 Cr과 V를 강도

1. 한국산업기술대학교 신소재공학과

향상을 위해 첨가하였고 시편 3 과 4 에서는 경화능향상을 위해 B 및 다른 함량의 Mo 를 추가 첨가하였다. VIM 을 이용하여 중량 150g 의 용해재를 알루미늄이나 도가니에 넣어 진공 10^{-1} Torr 이하의 진공도에서 용해하였다. 용해된 시편은 1150℃에서 3 시간 유지하여 균질화 열처리를 하였다. 냉각된 시편은 상온에서 두께 5 mm 판재로 압연 후 900℃로 재가열 하여 30min 유지 후 공냉 및 강냉 열처리를 실시하였다.

결정립 미세화 원소의 영향을 알아보기 위해 900 ~ 1200℃사이에서 30 분 유지 후 수냉하여 결정립 크기를 측정하였다. Mo 첨가량 변화에 따른 미세조직 관찰과 기계적 특성을 평가하기 위해 900℃에서 공냉 및 선풍기를 이용한 강냉 열처리를 실시하였다.

Table 1 Chemical composition of alloys (wt %)

NO	C	Si	Mn	Cr	V	Ti	B	Mo
1	0.19	0.15	1.53					
2	0.15	0.15	1.57	0.35	0.15			
3	0.12	0.15	1.54	0.65	0.11	0.04	0.003	
4	0.13	0.15	1.04	0.64	0.11	0.04	0.004	0.15
5	0.12	0.15	1.11	0.63	0.11	0.03	0.003	0.29
6	0.13	0.15	1.07	0.64	0.11	0.04	0.003	0.44

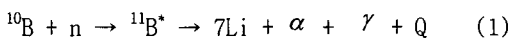
2.2 TTT-곡선의 모사

B 과 Mo 가 미세조직에 미치는 영향을 예측하기 위해 Stecal 3.0 프로그램을 이용하여 TTT-Curve 를 모사하였다.

2.3 BNCT(Boron Neutron Capture Therapy) 를 이용한 보론의 분포 분석

시편 3 을 900℃에서 로냉, 공냉, 수냉처리하여 SiC 연마지와 알루미늄으로 시편을 연마 후 Detector(CN 85) 필름을 시편에 부착하여 중성자를 조사하였다.

^{10}B 의 열중성자 흡수반응을 고려하면 식 (1)과



같다. $^{11}\text{B}^*$ 의 6%는 1.78MeV 의 α 와 1.01MeV 의 7Li 으로 붕괴하며, 94%는 1.47MeV 의 α 와 0.84MeV 의 7Li 으로 붕괴하여 서로 정반대 방향으로 방출된다. 방출된 7Li 및 α 에 의해

Detector 필름에 반응이 일어나고 이를 50℃로 가열 된 NaOH 용액에 50 분 동안 예칭하였다. 예칭된 필름은 증류수로 세척하여 건조한 후 광학현미경을 이용하여 B 원자의 분포를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 V 및 Ti 이 오스테나이트화 온도에 따른 결정립 성장에 미치는 영향

V 은 VC, VCN 을 형성하여 석출 강화 및 분산 강화를 일으켜 강도 향상에 중요한 역할을 하며 [3] 미량 첨가되는 합금중 높은 고용도를 나타내는 원소로, 결정립 미세화 첨가 원소로 사용되고 있다. Ti 는 질소와 반응하여 TiN 으로 석출된다. 석출된 TiN 은 고온에서 고용도가 낮고 입자 성장 속도가 느려 고온에서 결정립 미세화에 효과적으로 기여한다.[4] 오스테나이트 결정입도 감소는 베이나이트 변태개시온도를 감소시켜 상부베이나이트를 감소시키고 하부베이나이트 분율을 증가시킬 수 있다. Fig. 1 에서 시편 1 의 경우 온도에 따른 결정립 직경이 직선적인 성장을 나타내고 있다. 시편 2 에서 1000℃까지 결정립 성장에 V 석출물이 장애물로 작용하여 결정의 직경 변화가 미미하나 1000℃와 1050℃서 결정립의 크기가 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이는 입계에 존재하여 결정립 성장을 억제 있던 V 석출물이 분해되어 기지에 고용되어 결정립 미세화제의 작용이 소실된 것으로 보인다. 시편 3 은 Ti 이 강중의 질소와 결합하여 TiN 을 형성 하였을 것으로 판단되며 TiN 이 1050℃까지 결정립 크기는 약간 증가하는 것으로 나타났다.

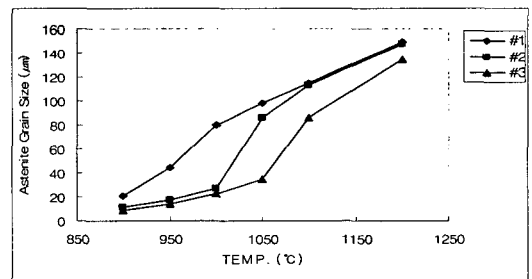


Fig.1 Austenite grain size vs austenitizing temperature

3.2 Mo 이 TTT-Curve 에 미치는 영향

Stecal 3.0 프로그램을 이용하여 Mo 함량변화에

다른 TTT-Curve 의 변화를 조사하였다. 열간단조 후 제어냉각을 통해 베이나이트계 비질강을 얻기 위해서는 TTT-Diagram 의 펄라이트의 노즈가 우측으로 이동하여 비교적 느린 냉각속도에서도 쉽게 베이나이트 조직을 얻는 것이 유리하다. 강도와 인성을 확보하기 위해서는 페라이트 및 펄라이트 조직 보다는 미세조직을 베이나이트로 하는 것이 유리하다. Fig. 2 에서 Mo 함량이 증가함에 따라 펄라이트 노즈가 베이나이트 노즈에 비해 오른쪽으로 이동해 가는 현상을 관찰할 수 있다. 펄라이트 노즈가 상대적으로 우측으로 이동해 있는 경우 Mo 가 첨가되지 않은 강에 비해 느린 냉각속도에서도 페라이트 생성없이 베이나이트 조직을 얻을 수 있는 장점이 있음을 알 수 있다.

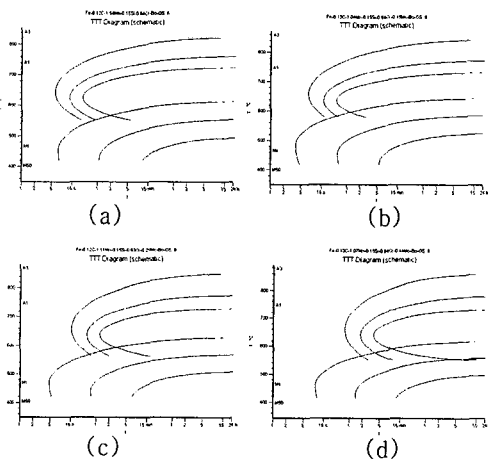


Fig.2 TTT-diagram of alloys (a) alloy3 (b) alloy4 (c) alloy5 (d) alloy6

3.3 Mo 함량이 미세조직과 기계적 성질에 미치는 영향

시편 1, 2 에서는 공냉과 강냉에서 페라이트+펄라이트 조직을 나타냈다. 시편 3 은 공냉시 페라이트+펄라이트이며 강냉시에는 페라이트와 베이나이트가 혼합된 조직으로 나타났다. Mo 가 첨가된 시편 4, 5 공냉의 경우 페라이트와 베이나이트가 혼재하나 시편 6 의 경우 입상형 베이나이트 조직을 가지는 것으로 보인다. 입상형 베이나이트는 저탄소강에서 냉각도중 상부베이나이트 형성온도에서 형성될 수 있다.[5] Mo 은 공냉시키면 냉각속도가 느려서 조대한 석출물을 분산시켜 인

성을 저하시킬 수 있으나, 빠른 냉각속도에서는 Ms 온도 저하에 의한 탄화물의 미세화 및 조직 치밀화로 인성이 개선된다.[6] Fig.3 은 Mo 첨가량에 따른 미세조직으로 바람을 이용하여 냉각을 시켰다. 강냉의 경우 시편 4, 5, 6 모두 베이나이트 조직이며 Mo 함량이 증가 함에 따라 미세화됨을 관찰할 수 있다.

Fig.4 는 시편 4, 5, 6 을 강냉하여 압연율에 따른 경도값 변화를 나타내고 있다. 강냉처리된 시편의 경우 Mo 의 함량이 증가함에 따라 원소재의 경도값이 21, 25, 29. 5 로 점차 증가하였으나 가공경화율은 감소함을 보여주고 있다.

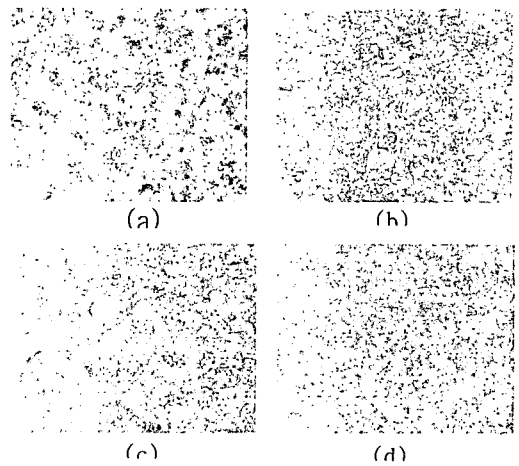


Fig.3 Microstructure after forced cooling at 900°C (a) alloy3 (b) alloy4 (c) alloy5 (d) alloy6

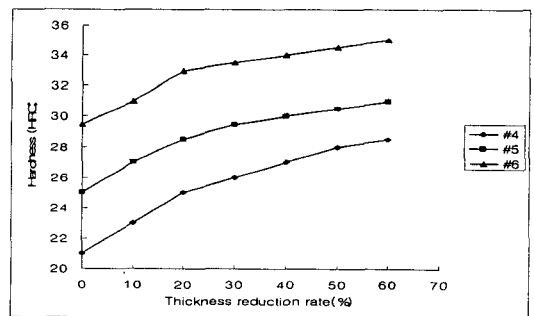


Fig.4 Hardness change vs thickness reduction rate (a) alloy5 (b) alloy6 (c) alloy7

3.4 BNCT 를 이용한 보론의 분포

강에 첨가되는 보론은 원자의 크기가 첨가량

또한 매우 적어 기존의 방법을 이용하여 분포상태를 분석하는데 한계를 가지고 있지만 증성자빔을 이용한 BNCT 법을 활용하면 보론의 분포를 광학현미경을 이용하여 관찰할 수 있는 장점을 가지고 있다. Fig. 4 는 BNCT 을 활용한 필름을 광학현미경으로 관찰한 사진으로 검은 반점이 보론의 위치 나타내고 있다. 수냉의 경우는 보론이 결정입계와 결정립 내부에 균일하게 존재하는 데 반하여 공냉의 경우는 결정입계에 집중적으로 보론이 분포하고 있음을 확인 할 수 있었다. 이는 냉각속도가 느린 경우 결정입계에 조대한 석출물로 존재하고 있음을 보여주며 보론의 분포형태가 냉각속도에 따라 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

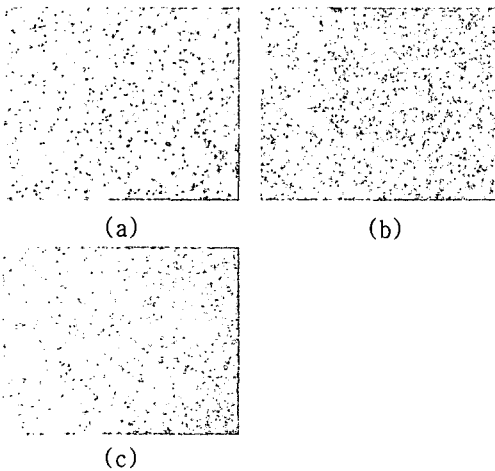


Fig.5 Comparison of boron distribution depending upon the cooling rate at 900°C (a) furnace cooling, (b) air cooling, (c) water cooling

4. 결론

베이나이트계 비조질강에 첨가되는 합금원소가 미세조직과 기계적 성질에 미치는 영향에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) V 및 Ti 첨가강에서 의해 오스테나이트 결정립이 미세화되며 V 첨가강의 경우 1000°C에서 Ti 첨가강은 1050°C에서 급격히 결정립 조대화가 일어남을 관찰할 수 있었다.

(2) Mo 첨가는 TTT-diagram 에서 펄라이트의 노즈를 상대적으로 우측으로 이동시키는 것을 모사를 통해 예측하였고 미세조직 관찰을 통해 확인되었다.

(3) BNCT 실험을 통해 보론의 분포는 냉각속도에 크게 좌우되며 냉각속도가 느린 경우 조대한 보론 석출물이 형성됨이 관찰되었다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 청정생산기술개발 사업인 “차세대 환경친화형 냉간단조 비조질강 제품개발”과제의 일환으로 수행되었으며 연구비지원지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] D.K Matlock, G. Krauss, J.G. Speer, 2001, Microstructures and properties of direct-cooled microalloy forging steels, *Journal of Materials Processing Technology* 117, p.324-328.
- [2] J. Zrník, T. Kvackaj, D. Sripinproach, P. Sricharoenchai, 2003, *Journal of Materials Processing Technology* 133, P.236-242
- [3] J.R. Davis, 2003, *Alloying understanding the basics*, p.139
- [4] T.N.Baker, 1994, *Titanium Technology in Microalloyed Steels*, p.16.
- [5] Fang Hongsheng, Zheng Yankang, Chen Xiuyun, Huang Yunqing, Jiang Zhongliang, Cao Jianjun, 1992, *The Minerals, Metals & Materials Society*.
- [6] F.Hugishiro, 1989, *Tetsu-to-Hagane*, 4, p.143.