보론강의 경화능과 인장 특성에 미치는 C, Mo, Cr의 영향

임현석 · 정우연 · 황병철[†]
서울과학기술대학교 신소재공학과

Effects of C, Mo and Cr on Hardenability and Mechanical Properties of Boron-Bearing Steels

H-S. Yim, W-Y. Jung, B. Hwang[†]

Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
Seoul 139-743, Korea

Abstract Hardenability and mechanical properties of boron-bearing steels containing C, Mo and Cr were investigated in this study. Using quench dilatometer, the steel specimens were cooled down to room temperature at different cooling rates to construct continuous cooling transformation diagrams and then the transformation products from austenite were examined. A critical cooling rate was introduced as an index to quantitatively evaluate the hardenability. The C addition to boron-bearing steels did not significantly affect hardenability compared to boron-free steels although it increases the hardenability. With the same content, the Mo addition largely increased the hardenability of boron-bearing steels than the Cr addition because it decreased both the transformation start and finish temperatures at low cooling rates. In particular, the Mo addition completely suppressed the formation of eutectoid ferrite even at the slow cooling rate of 0.2°C/s, whereas the Cr addition nearly suppressed it at the cooling rates above 3°C/s.

(Received August 2, 2012; Revised August 8, 2013; Accepted August 16, 2013)

Key words : Boron steel, Hardenability, Mechanical properties, C, Mo, Cr

1. 서 론

보론(B)은 C, Mo, Cr 등의 다른 원소와 달리 수십 ppm 이하의 미량 첨가를 통해서도 오스테나이트에서 페라이트로의 확산 변태를 지연시켜 강의 경화능(hardenability)을 크게 향상시킨다. 이러한 B의 경화능 향상 효과는 오스테나이트 결정립계에 편석된 B 원자들이 결정립계 에너지를 낮추어 초석 페라이트의 생성을 억제시키기 때문으로 알려져 있다[1-5]. 그러나 B은 강 중 고용도가 낮기 때문에 열처리 조건에 따라 결정립계에서 석출물을 쉽게 형성하여 경화능 향상 효과가 저하되기도 하며, 다른 합금원소와의 상호작용으로 인해 경화능이 더욱 증가되기도 한다[4-12].

ASTM A255 표준 시험법[13]에 따르면 강의 경화능은 오스테나이트 온도로부터 급랭에 의하여 경화

될 수 있는 깊이의 척도로 규정되어 있다. 강의 경화능을 평가하는 가장 일반적인 방법은 조미니 시험법(Jominy test)으로 오스테나이트화 온도에서 열처리한 조미니 바를 시험 장치에 장착하고 아래 면에서 물을 분사시켜 시편을 냉각시킨 후 조미니 바의 경도를 측정하여 경화된 정도를 측정하는 방법이다. 조미니 시험법은 시험 방법이 간단하고 빠른 결과를 얻을 수 있는 장점이 있지만, 재현성이 부족하여 정량적인 경화능을 측정하기 곤란한 단점이 있다. 또한 Grossman의 연구 결과[14]에 근거하여 강재의 화학 조성으로부터 경화능을 계산하는 방법이 제시되어 있지만, 오스테나이트화 온도 및 냉각 계수의 영향을 객관적으로 고려하기 어렵기 때문에 경화능의 실제적인 정량화에는 한계가 있다. 최근 특정한 경화 조직이나 경화된 정도값을 가지는 임계 냉각 속도(critical cooling rate)를 사용하여 강재의 경화능을

[†]Corresponding author. E-mail : bhwang@seoultech.ac.kr
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

Table 1. Chemical composition of boron-bearing steel specimens investigated in this study (wt.%)

Specimen	C	Si	Mn	Mo	Cr	B	Ti	Al
0.05C	0.05	0.31	1.52	—	—	0.0020	0.015	0.020
0.1C	0.10	0.31	1.52	—	—	0.0023	0.017	0.036
0.15C	0.15	0.31	1.50	—	—	0.0020	0.018	0.041
0.1C-Mo	0.10	0.31	1.50	0.50	—	0.0021	0.017	0.034
0.1C-Cr	0.10	0.33	1.51	—	0.49	0.0022	0.015	0.026
0.1C-Mo-Cr	0.10	0.33	1.52	0.50	0.50	0.0022	0.014	0.024

정량화하는 방법이 도입되고 있는데, 대표적으로 사용되고 있는 것이 90% 마르텐사이트(martensite) 경도값을 나타내는 임계 냉각 속도($V_{c,90}$)이다[3, 5-8]. 임계 냉각 속도가 작으면 경화능이 높고, 임계 냉각 속도가 크면 경화능이 낮다고 할 수 있다.

본 연구에서는 탄소강의 경화능과 기계적 특성에 큰 영향을 미치는 C, Mo, Cr을 단독으로 또는 복합적으로 첨가한 보론강 시편을 제조한 후 냉각 속도에 따른 미세조직과 변태 온도의 변화로부터 경화능을 평가하고, 보론강의 경화능에 미치는 합금원소의 영향을 규명하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 C, Mo, Cr의 첨가에 따른 보론강의 경화능을 평가하기 위하여 보론강의 화학조성을 Table 1과 같이 설계하였다. 문헌조사 결과를 토대로 가장 높은 경화능을 나타낼 수 있도록 B 농도를 0.002 wt.%(20 ppm)로 일정하게 유지하고, C를 0.05, 0.1, 0.15 wt.%로 변화시키고, Mo과 Cr을 모두 0.5 wt.%씩 단독 또는 복합적으로 첨가하여 총 6 종류의 보론강 시편을 제조하였다. BN의 형성에 따른 용질 B 농도의 감소를 막기 위해 질소(N)를 AlN, TiN으로 고정시키고자 Ti과 Al를 각각 0.015, 0.3 wt.% 씩 첨가하였다.

실험에 사용된 강재는 50 kg으로 진공용해한 후 1,200°C에서 오스테나이트화 처리하고 950°C 이상에서 두께 20 mm로 열간 압연하였다. 이 판재로부터 길이 10 mm, 지름 3 mm의 원통형 시편을 가공한 후 가열 온도와 냉각 속도를 정밀하게 제어할 수 있는 선팽창 분석 장치(Dilatometer, Dilatronic III, Theta Inc.)를 이용하여 열처리를 수행한 후 냉각

속도에 따른 경도값의 변화로부터 시편의 경화능을 임계 냉각 속도($V_{c,90}$)로 평가하였다. 이를 위해 시편을 1,100°C에서 5 분간 유지한 후 0.2~50°C/s의 다양한 냉각 속도로 상온까지 냉각하고, 미세조직 분석과 경도 시험을 실시하였다. 또한 판재로부터 sub-size의 판상 시편(표점거리 25.4 mm, 직경 6.3 mm)으로 가공한 후 시편을 1,100°C에서 5분간 유지하고, 0.2, 3, 20°C/s의 냉각 속도로 상온까지 냉각한 시편들에 대하여 ASTM E8 표준 시험법에 따라 10톤 용량의 Instron 시험기를 이용하여 2 mm/min의 속도로 인장 시험을 실시하였다. 인장 시험 시 연속 항복 거동을 나타내는 시편들의 경우 응력-변형률 곡선으로부터 0.2% offset한 유동응력을 항복 강도로 하였고, 불연속 항복 거동을 나타내는 시편들의 경우 하부 항복점을 항복 강도로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

열간 압연 판재의 초기 미세조직을 Fig. 1에 나타내었다. C 함량이 0.05~0.15 wt.%이거나 Cr이 0.5 wt.%로 단독 첨가된 판재의 미세조직은 전형적인 페라이트-펄라이트(ferrite-pearlite)의 구조로 되어 있지만, Mo이 0.5 wt.% 단독 첨가되거나 Mo과 Cr이 복합 첨가된 판재의 미세조직은 대부분 베이나이트(bainite)로 구성되어 있다. 열간 압연 후 냉각 과정에서 거의 같은 냉각 속도로 상온까지 냉각되었음을 고려할 때 C나 Cr 첨가와 달리 보론강에 Mo이 첨가되었을 경우 판재의 경화능이 크게 향상됨을 이들 미세조직을 통해 간접적으로 알 수 있다.

보론강의 C 함량에 따른 연속냉각 변태(continuous cooling transformation, CCT) 도와 경도 변화를 Fig. 2(a)와 (b)에 나타내고, 이들 시편들에

Fig. 1. Optical micrographs of the (a) 0.05C, (b) 0.1C, (c) 0.15C, (d) 0.1C-Mo, (e) 0.1C-Cr, and (f) 0.1C-Mo-Cr boron-bearing steel specimens. Nital etched.

Fig. 2. (a) Continuous cooling transformation (CCT) diagram and (b) hardness profile for the boron-bearing steel specimens with different carbon contents. The dotted parallel lines indicate the bainite start (B_s) and martensite start (M_s) temperatures calculated by empirical equations. A critical cooling rate ($V_{c,90}$) having the hardness corresponding to 90% martensite structure was measured from the hardness profile, as shown in the arrow for the 0.1C boron-bearing steel. The upper dark and lower bright symbols indicate the transformation start and finish temperatures, respectively.

대한 미세조직 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 미세조직 분석과 경도 시험 결과를 토대로 마르텐사이트와 베이나이트가 90% 이상 존재하는 미세조직의 경계를 Fig. 3에 녹색과 노란색 점선으로 각각 표시하였다[15]. 연속냉각 변태도를 보면, C 함량의 증가는 보론강의 경화능을 증가시키고 있으며, 특히 3°C/s 이상의 빠른 냉각 속도에서 경화능 증가의 폭이 두드러졌다(Fig. 2(a)). C 함량이 다른 0.05C, 0.1C, 0.15C 시편의 임계 냉각 속도($V_{c,90}$)는 각각 45.5,

34.8, 33.3(°C/s)로 측정되어 90%의 마르텐사이트 경도를 얻기 위해서는 30°C/s 이상의 냉각 속도가 필요하였다. 또한 90%의 베이나이트 경도를 얻기 위해서는 10°C/s 이상의 냉각 속도가 요구되는 것을 알 수 있다(Fig. 3). 이와 같이 C 함량의 증가가 경화능을 증가시키는 것은 사실이지만, 보론강에서 90%의 마르텐사이트나 베이나이트를 형성시키는 데 필요한 임계 냉각 속도의 차이는 크지 않은 것으로 보인다. 이는 C의 경우 B와 마찬가지로 오스테나이트

Fig. 3. Optical micrographs of the 0.05C, 0.1C, 0.15C boron-bearing steel specimens cooled with various rates from 1,100°C. The left and right dotted lines represent boundaries having 90% martensite and bainite structure, respectively.

Fig. 4. (a) Continuous cooling transformation (CCT) diagram and (b) hardness profile for the 0.1C, 0.1C-Mo, 0.1C-Cr, 0.1C-Mo-Cr boron-bearing steel specimens. A critical cooling rate (V_{c-90}) having the hardness corresponding to 90% martensite structure was measured from the hardness profile, as shown in the arrow for the 0.1C boron-bearing steel. The upper dark and lower bright symbols indicate the transformation start and finish temperatures, respectively.

트 결정립계로 편석되는 경쟁 관계에 있기 때문에 B의 오스테나이트 편석이 감소되어 B의 경화능 향상 효과를 감소되기 때문이다[16]. 따라서 B가 첨가된 보론강 시편들은 B가 첨가되지 않은 시편들에 비해 0.05~0.15 wt.%의 C 범위에서 경화능에 미치는 C 함량의 영향은 상대적으로 작다고 할 수 있다.

Fig. 4(a)와 (b)에 0.1 wt.% C가 포함된 보론강의 연속냉각 변태도와 경도 변화에 미치는 Mo와 Cr의 영향을 나타내고, Fig. 5에 그 미세조직 변화를 나타내었다. C 함량의 변화와는 달리 Mo 첨가는 느린 냉각 속도에서도 변태 시작과 종료 온도를 모두

크게 낮추어 보론강의 경화능에 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 변태 시작 온도가 낮아지는 것은 느린 냉각 속도에서 초석 페라이트의 핵생성이 억제되는 것을 의미하며, 빠른 냉각 속도에서는 베이나이트나 마르텐사이트와 같은 저온 변태 조직이 생성될 수 있음을 알려 준다. 한편 Cr 첨가는 Mo와 같은 첨가량에도 불구하고, 느린 냉각속도에서 변태 시작과 종료 온도에 큰 영향을 주지 못하여 Mo에 비해 상대적으로 보론강의 경화능에 큰 영향을 미치지 못하고 있다.

냉각 속도에 따른 미세조직 변화를 비교해 보면

Fig. 5. Optical micrographs of the 0.1C, 0.1C-Mo, 0.1C-Cr, 0.1C-Mo-Cr boron-bearing steel specimens cooled with various rates from 1,100°C. The left and right dotted lines represent boundaries having 90% martensite and bainite structure, respectively.

(Fig. 5), Mo 첨가는 0.2°C/s의 낮은 냉각 속도에서도 초석 페라이트의 형성을 완전히 억제할 수 있었지만, Cr 첨가는 적어도 3°C/s 이상의 냉각 속도에서 초석 페라이트의 형성을 억제하였다. 그러나 Cr 첨가의 경우 마르텐사이트를 형성시킬 수 있는 경화능은 Mo와 큰 차이를 나타내지 않았다. 연속냉각 변태도를 보면(Fig. 4(a)), 10°C/s 이상의 빠른 냉각 속도에서 Cr 첨가는 Mo 첨가와 거의 같은 변태 시작과 종료 온도를 나타내며, 경도값도 거의 유사한 수준을 나타내었다. Mo와 Cr이 복합 첨가되는 경우에는 0.2°C/s의 낮은 냉각 속도에 초석 페라이트의 형성을 완전히 억제할 수 있을 뿐만 아니라 3°C/s의 냉각 속도에서 90% 이상의 마르텐사이트 조직이 형성시켜 Mo의 단독 첨가에 비해 경화능이 보다 향상됨을 알 수 있었다.

한편 본 연구에서 경화능을 정량적으로 평가하는 방법으로 사용되는 임계 냉각 속도(V_{c-90})를 여러 냉각 속도에서 얻어진 경도값을 90% 마르텐사이트 조직의 경도값과 비교하여 구하였다. 0.1C 시편의 임계 냉각 속도는 35°C/s 정도인 반면, Mo와 Cr이 첨가된 0.1C-Mo, 0.1C-Cr, 0.1C-Mo-Cr 시편의 임계 냉각 속도는 각각 7.3, 11.1, 1.4(°C/s) 정도로 나타났다. 이들 임계 냉각 속도는 연속냉각 변태도나

Fig. 6. Comparison of measured and calculated critical cooling rates (V_{c-90}) for the boron-bearing steel specimens containing C, Mo, and Cr. The critical cooling rate was calculated by Ueno's equation⁶⁾ ($\log V_{c-90} = 2.94 - 0.75 \times [2.7C + 0.4Si + Mn + 0.45Ni + 0.8Cr + 2Mo]$).

미세조직 변화와 마찬가지로 Mo 첨가(7.3°C/s)가 Cr 첨가(11.1°C/s)보다 낮은 임계 냉각 속도를 나타내어 상대적으로 우수한 경화능을 나타내었고, Mo와 Cr이 복합 첨가된 경우 가장 낮은 임계 냉각 속도를 나타내어 가장 우수한 경화능을 나타내었다.

Fig. 6은 Mo와 Cr 첨가에 따른 보론강의 임계

Fig. 7. Room temperature tensile properties of the 0.1C, 0.1C-Mo, 0.1C-Cr, 0.1C-Mo-Cr boron-bearing steel specimens: (a) yield strength, (b) tensile strength, and (c) elongation.

냉각 속도를 Ueno에 의해 제시된 경험식으로 계산된 값과 비교한 결과이다. 대부분의 보론강 시편들은 합금원소에 관계없이 직선적인 상관관계를 대체로 잘 만족하고 있다. 그러나 일부 시편들의 경우 합금원소에 따라 조금씩 차이가 나타나는데, 이는 Ueno 식의 경우 오스테나이트화 온도를 고려하고 있지 않기 때문이다. 오스테나이트화 온도의 경우 합금원소에 따라 B의 비평형 편석 거동에 따라 경화능에 영향을 줄 수 있다[7, 8, 17].

냉각 속도에 따른 인장 특성의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 합금원소에 관계없이 냉각 속도가 증가함에 따라 저온 변태 조직의 형성이 많아져 인장 강도는 모두 서서히 증가하고, 연신율은 감소하였다. 특히 Mo이 단독으로 첨가되거나 Mo과 Cr이 복합 첨가된 시편은 냉각 속도가 0.2°C/s에서 3°C/s로 증가함에 따라 냉각 시 형성되는 베이나이트나 마르텐 사이트의 분율이 높아져 항복 강도가 크게 증가하는 것으로 관찰된다. Mo와 Cr이 복합 첨가된 시편은 Mo 단독 첨가된 시편과 비교할 때, 3°C/s와 20°C/s

의 냉각 속도에서 항복 강도와 인장 강도가 모두 100 MPa 이상 높지만, 연신율은 큰 차이가 없는 우수한 인장 특성을 나타내었다.

4. 결 론

선판창 분석 장치를 이용하여 보론강의 정량적인 경화능 평가 방안을 고려하였고, 미세조직과 기계적 특성 평가를 통해 그 타당성을 확인하였다. 보론강에서 C 첨가는 경화능을 증가시키지만, B이 첨가되지 않은 시편들에 비해 0.05~0.15 wt.%의 C 범위에서 경화능에 미치는 C 함량의 영향은 상대적으로 작았다. Mo 첨가는 Cr과 같은 첨가량에도 불구하고, 느린 냉각속도에서 변태 시작과 종료 온도를 크게 감소시켜 Cr에 비해 상대적으로 보론강의 경화능에 큰 영향을 주었다. 미세조직 변화를 보면, Mo 첨가는 0.2°C/s의 낮은 냉각 속도에서도 초석 페라이트의 형성을 완전히 억제하였지만, Cr 첨가는 적어도 3°C/s 이상의 냉각 속도에서 초석 페라이트의 형성을 거의

억제할 수 있었다. 그러나 10°C/s 이상의 빠른 냉각 속도에서 Cr 첨가는 Mo 첨가와 거의 같은 변태 시작과 종료 온도를 나타내고, 경도값도 거의 유사하며, 마르텐사이트를 형성시킬 수 있는 경화능은 Mo과 큰 차이를 나타내지 않았다. 한편 Mo과 Cr이 복합 첨가된 경우에는 0.2°C/s의 낮은 냉각 속도에 초석 페라이트의 형성을 완전히 억제할 수 있을 뿐만 아니라 3°C/s의 냉각 속도에서 90% 이상의 마르텐사이트 조직이 형성시켜 Mo의 단독 첨가에 비해 경화능이 보다 향상됨을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비의 일부 지원으로 수행되었습니다.

References

1. S. K. Banerji and J. E. Morral : Proc. Int. Symp. Boron in Steels, TMS-AIME, PA (1979).
2. D. H. Werner : Boron and Boron Containing Steels, Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf (1995).
3. D. V. Doane and J. S. Kirkaldy : Hardenability Concepts with Application to Steel, TMS-AIME, Warrendale, PA (1978).
4. Ph. Maitrepierre, D. Thivellier and R. Tricot : Metall. Trans. A, **6** (1975) 287.
5. Front of Research on Behavior of Boron in Steels, Iron Steel Inst. Jpn. (2003).
6. M. Ueno and T. Inoue : Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **13** (1973) 210.
7. H. Asahi : ISIJ Int., **42** (2002) 1150.
8. B. Hwang, D. -W. Suh and S. -J. Kim : Scr. Mater., **64** (2011) 1118.
9. L. Karlsson, H. Norden and H. Odelius : Acta Metall., **36** (1988) 1.
10. X. L. He, Y. Y. Chu and J. J. Jonas : Acta Metall., **37** (1989) 147.
11. S. Khare, K. Lee and H. K. D. H. Bhadeshia : Int. J. Mat. Res., **100** (2009) 11.
12. K. A. Taylor : Metall. Trans. A, **23** (1992) 107.
13. Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel, ASTM International, Designation: A 255-02 (2002).
14. G. Krauss, Principles of Heat Treatment of Steel, ASM Intl. (1989).
15. J. C. Ion and L. M. Anisdahl : J. Mat. Proc. Tech., **65** (1997) 261.
16. B. C. De Cooman, J. G. Speer, I. Y. Pyshmintsev and N. Yoshinaga : Materials Design - The Key to Modern Steel Products, GRIPS media GmbH (2007).
17. D. J. Mun, E. J. Shin, Y. W. Choi, J. S. Lee and Y. M. Koo : Mater. Sci. Eng. A, **545** (2012) 214.