

## CP강의 디스크레이저 용접부의 경도특성에 미치는 B 함유량의 영향

박태준\* · 유정우\* · 강준일\*\* · 한태교\*\*\* · 진광근\*\*\* · 강정윤\*†

\*부산대학교 재료공학과

\*\*Autoen 기술연구소

\*\*\*POSCO 기술연구원

### Effect of B Contents on Hardness Characteristic of Disk Laser Beam Welded CP Steels

Tae-Jun Park\*, Jung-Woo Yu\*, Jun il Kang\*\*, Tae-kyo Han\*\*\*, Kwang-Keun Chin\*\*\*  
and Chung-Yun Kang\*†

\*Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

\*\*Autoen R&D center Development, Changwon 641-290, Korea

\*\*\*POSCO Technical Research Laboratories, Pohang 545-711, Korea

†Corresponding author : kangcy@pusan.ac.kr

(Received November 5, 2010 ; Revised December 23, 2010, Accepted January 3, 2011)

#### Abstract

CP steel was developed to reduce the weight and increase the strength of car body. When it was welded using state-of-the-art disk laser welding, the effected of boron on the microstructure and hardness were investigated. Welding power was fixed at 3.5kW and welding speeds were 4,8 and 12m/min. Full penetration occurred in welding speed of 12m/min and weld bead was almost unchanged with boron contents. But the welding speed increased, the upper and lower bead were narrowed. In a welding speed of more than 8m/min, underfill defects were formed on the bead bottom. The hardness of weld zone was somewhat fluctuation in fusion zone and HAZ showed the highest hardness values. The hardness of each region showed little change with the boron contents, and softening phenomenon occurred in the HAZ near the base metal regardless of the boron contents.

Key Words : CP steel, Boron, Disk laser, Microstructure, Hardness

#### 1. 서 론

최근에 자동차의 배기가스 저감, 연비 향상, 안정성 향상 등과 관련된 기술을 개발하기 위해 자동차 회사들은 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 친환경적이며 연비의 효율이 높은 하이브리드 자동차에 대한 관심이 증대되고 있다<sup>1)</sup>. 이러한 친환경적이며 안전한 차를 생산하기 위하여 차체 구조의 경량화 및 차체 소재의 안정성 확보가 이루어져야 한다. 그러나 이와는 반대로 하이브리드 자동차는 기존의 가솔린 엔진과 더불어 전기 엔진, 전지 배터리 그리고 2차 연료보관 탱크 등의 여러 장치가 추가되고 있다. 또한 운전자의 편의 시설 등

이 지속적으로 추가 되면서 차체의 중량은 증가되고 있다. 외부적인 중량 증가분을 보완하면서 차체의 경량화를 실현하기 위해서는 얇으면서도 고강도-고연성을 유지할 수 있는 소재의 개발이 필수적이다<sup>2)</sup>.

현재 자동차 차체에는 일반 강에서 AHSS까지 다양한 강종들이 적용되고 있으며, 최근 재료가 경량화되면서 강도는 높고 성형성을 확보할 수 있는 고강도-고연성복합조직상의 TRIP, CP, TWIP강의 개발은 자동차 경량화에 큰 역할을 하였다<sup>3)</sup>. TRIP 강은 현재 많은 개발이 진행되어 왔으며 일부 적용이 시도되고 있고, TWIP강은 기초적인 개발단계이며, 상업적 생산 및 적용까지는 상당한 시간이 걸릴 것으로 예상하고 있다. CP강은 마르텐사이트, 잔류오스테나이트, 베이나이트,

페라이트의 복합조직 강으로 초고강도 강으로 높은 항복강도와 우수한 가공성을 가지고 있다. 하지만 CP강의 개발 및 적용은 아직 미진한 수준이다.

자동차 차체 부품을 최종 제품으로 생산하기 위해서는 용접공정이 필수적이며, 용접특성이 차량성능을 좌우하는 매우 중요한 변수가 된다<sup>4)</sup>. 자동차 차체 접합 방법으로 저항 점 용접이 주로 사용되었지만 새로운 강재가 개발되고 접합기술도 발전됨에 따라 다양한 접합기술이 연구되고 있다<sup>5)</sup>. 이 중 생산속도가 빠르고 안전한 레이저 용접법이 많이 적용되고 있다. 기존에 개발된 CO<sub>2</sub>, Nd:YAG 레이저에 관한 고장력강의 용접성 평가에 대한 연구는 많이 보고되어 왔다<sup>5-7)</sup>. 그러나 가장 최근에 개발되고 일부 적용되고 있는 고효율의 디스크 레이저에 관한 용접성 평가에 대한 연구는 아직 보고된 바가 거의 없다.

또한, CP강에서 합금원소에 따른 레이저 용접부 특성에 대한 연구 결과는 거의 없다. 한편, B(Boron)은 경화능이 우수한 합금원소로 오래전부터 연구되어져 왔다. 이러한 경화능이 우수한 B를 CP강에 적용 시 미세조직 및 기계적 성질에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 또한, 냉각속도가 다른 레이저 용접 시 B함유량에 따라 미세조직과 기계적 성질이 달라 질것으로 예상된다.

본 연구에서는 경량화 고강도 추세에 맞추어 개발된 CP강과 가장 최근에 개발된 디스크 레이저로 용접한 경우, 용접부의 미세조직 및 경도 특성에 미치는 모재의 B 함유량의 영향에 대하여 검토하였다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

본 연구에서는 두께 1.2mm 냉연판재인 Complex Phase강(이하 CP강)을 사용하였고, B의 함유량을 4 수준으로 변화하였다. 이에 대한 화학 조성은 Table 1에 나타낸다.

사용된 레이저 용접기는 최대 출력이 5kW인 Trumpf사의 TruDisk 8002를 사용하였다. Table 2와 3은 디스크 레이저 용접기의 조건과 용접조건을 나타낸 것으로, 비초점거리(fd) 0mm에서 이음부 형태를 비드온

Table 2 Technical data for the disk laser used

Gain material	Yd:YAG Disk
Diameter of Delivery fiber	200 $\mu$ m
Max. power consumption	5kW
Focal length	200mm
Type of delivery fiver	D type

Table 3 Welding condition

Welding power	3.5kW
Welding speed	4,8,12 m/min
Focal distance	0mm
Shielding gas	Non Shield
Joint	Bead on plate

플레이트(Bead On Plate, BOP)방식으로 용접을 실시하였다. 주 용접공정변수로는 용접속도(v)로 했으며, 레이저 출력(p)을 3.5 (kW)로 고정하고, 4-12 (m/min)까지 4m/min 간격으로 하였다. 이때, 보호가스는 사용하지 않았다.

미세조직 관찰은 연마 후 칼라엡칭 인 Lepers's (Picric acid 4.3g + Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1g + methanol 100ml + 증류수 100ml)와 4% 나이탈 용액으로 엡칭 후 광학현미경(OM)과 주사전자현미경(SEM JEOL JM-6400)으로 관찰하였다. 또한, Fe-DATA 열학적 데이터베이스를 JmatPro v-5 소프트웨어와 커플링하여 CCT곡선을 작성하여, 미세조직과 경도와와의 상관관계를 검토하였다.

용접부 경도는 마이크로 비커스 경도기를 사용하여, 하중 300g, 유지 시간 10초로 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 모재의 미세조직과 기계적 성질

B 함유량에 따른 모재 내의 상 구분 및 분율 변화를 검토하기 위해 컬러 엡칭 인 Lepers's 용액으로 엡칭 후 광학현미경과 SEM을 이용하여 관찰하였다.

Table 1 Chemical composition of materials

Sample name	Wt%							Ceq(IIW) 0.24limit	Hv.
	C	Si	Mn	P	S	B	Fe		
P200-B0	0.07	0.1	2.4	0.02	0.003	0	Bal.	0.245	236
P200-B10	0.07	0.1	2.4	0.02	0.003	0.0010	Bal.	0.245	269
P200-B25	0.07	0.1	2.4	0.02	0.003	0.0025	Bal.	0.245	311
P200-B40	0.07	0.1	2.4	0.02	0.003	0.0040	Bal.	0.245	338

Fig. 1은 대표적으로 B 함유량이 0 ppm과 40 ppm이 함유한 강을 컬러 에칭 후의 광학현미경 조직 (a), (b)과 (a)와 (b)에서 □ 로 표시된 부분의 SEM 조직 사진을 나타낸 것이다. 여기서, 파란색은 페라이트, 갈색 및 회색은 베이나이트, 흰색은 마르텐사이트와 잔류오스테나이트 조직을 의미한다. (a)와 (b)의 그림으로부터, B의 함유량이 0ppm에서 40ppm으로 증가할수록 파란색의 페라이트의 양은 감소하고, 흰색의 마르텐사이트와 회색의 베이나이트의 분율이 증가 하는 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 Lepers's 용액으로 에칭 한 광학현미경과 SEM조직 사진을 바탕으로 Image Pro Plus를 이용하여, 분율을 측정한 결과를 나타낸 것이다. 그림으로부터 B함유량 증가에 따라 페라이트의 분율은 감소하고, 마르텐사이트와 베이나이트 분율은 증가 하는 것을 알 수 있다.

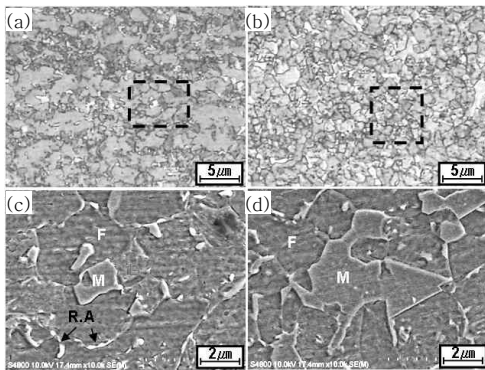


Fig. 1 Optical (a),(b) and SEM micrographs (c), (d) with B contents[(a),(c) : 0 ppm B, (c),(d) : 40 ppm B] from the LePera etching. F : ferrite (green-blue), B: bainite (brown), and M-A : martensite/retained austenite (white)

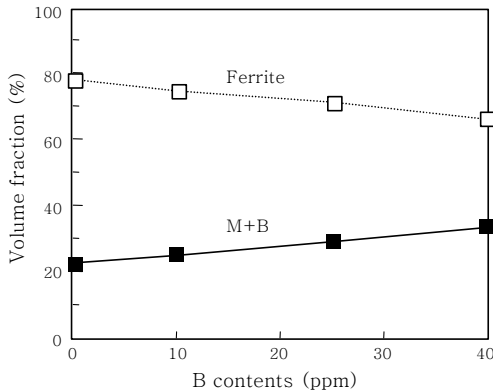


Fig. 2 Phase volume fraction (%) with B contents (ppm)

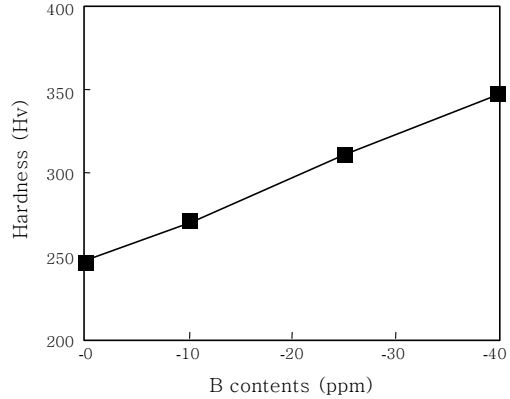


Fig. 3 Hardness (Hv.) of base metal with B contents (ppm)

Fig. 3은 B함유량에 따른 모재의 경도 변화를 나타낸 것이다. 모재의 경도 값은 B함유량이 증가할수록 직선적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이 이유는 Fig. 1과 2의 결과로부터 B함유량이 증가할수록 연질이 페라이트 분율이 감소하고, 경질인 마르텐사이트와 베이나이트 분율이 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 이와 같이 B의 함유량이 극소량 변화함에 따른 모재 조직의 상변화 이유를 고찰하기 위해, JMat Pro V5 시뮬레이션을 이용하여 B의 함유량이 0ppm과 40ppm 일 때의 CCT 곡선을 작성하고, 실제 본 강종을 만들기 위한 열처리 사이클을 대입하여 모재의 상변태 거동을 검토하여 보았다. 그 결과를 Fig. 4에 나타낸다. B의 첨가에 따라 초기 페라이트의 생성 온도가 낮아지고, 베이나이트의 생성온도는 상승한다. 또한 선행연구에 따르면 B는 오스테나이트 입계를 따라 편석 되어 페라이트의 형성을 억제한다고 보고하고 있다<sup>8-10)</sup>. 따라서 동일한 열처리과정을 거치더라도 B의 함유량이 많을수록 페라이트의 생성량은 감소하고, 베이나이트 및 마르텐사이트의 생성량은 증가하는 것으로 판단된다.

### 3.2 용입 특성

Fig. 5는 3.5 (kW)의 레이저 출력에서 B 함유량과 용접속도에 따른 용접부의 비드 단면 사진을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 B함유량에 따라서는 비드 형상은 크게 변화지 않음을 알 수 있다. 이는 B함유량에 미량 변화기 때문에 용입 특성에는 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 그러나 B함유량에 상관없이 용접속도가 느린 4m/min의 용접속도에서는 비드 모양은 하부 폭이 상부 폭보다 넓은 사다리꼴의 형상을 하고, 용접속도가 증가 할수록 하부 폭이 감소하여 I 자

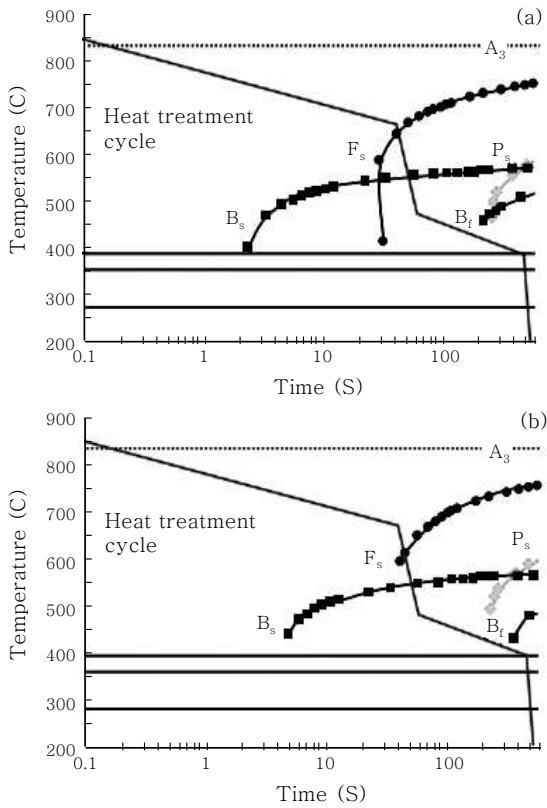


Fig. 4 CCT curve by JmatPro v-5 with B contents (ppm) and heat treatment cycle. a) 0 ppm B (b) 40 ppm B

모양으로 변화하는 경향이 있다. 또한, 용접속도가 증가할수록 하부 비드에 언더필의 높이가 증가하는 경향이 있다. 이상의 결과로부터, B함유량이 다른 CP강에서 보호가스를 사용하지 않고 디스크 레이저용접 하는 경우, 12m/min(실험에 사용한 장치에서 가장 빠른 용접속도) 고속의 용접속도에서도 완전 용입되지만, 하부에 언더필이 결함이 형성되는 것을 알 수 있다.

### 3.3 용접부 경도분포 특징

용접부 근방의 경도분포에 미치는 용접속도와 B함유량에 따른 영향을 검토하기 위하여, 용접부 중심선에 따라 100 $\mu$ m간격으로 비커스 미소경도를 측정하였다.

Fig. 6은 B의 함유량과 용접속도(4m/min, 12m/min)를 변화시켰을 때 용접부의 경도 분포를 나타낸 것이다. HAZ와 용융부의 경도는 모재보다 높고, 용융부 내의 경도가 변동(Fluctuation)하며, 모재에 가까운 HAZ에서 최고경도를 나타낸다. B함유량 및 용접 속도에 따른 경도분포 형상은 거의 동일하지만 절대 경도값은 다소 다르다. 또한 HAZ와 모재 경계에서 모재보다 경도가 낮은 연화부가 존재하고, B량이 증가할수록 경도차가 커지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 B의 함유량과 용접속도에 따른 HAZ에서의 최고경도값( $H_{max}$ )과 용융부에서의 평균경도값( $H_{av}$ )의 변화를 나타낸 것이다. 여기에 모재를 900 $^{\circ}$ C에서 열처리한 후 수냉 처리한 시편의 경도값( $H_{W,Q}$ ) 변화도 함께 나타낸다. 용융부 평균 경도( $H_{Fz}$ )는 B 함유량에 따라 거의 변화 없지만, 용접속도가 증가할수록 증가하는 경향이 있다. 한편, HAZ 최고경도( $H_{max}$ )는 B의 함유량 증가에 따라 미미하게 증가하는 경향이 있다고 볼 수 있다. 모든 강종의 용접부 영역 별 경도를 비교하면, 용융부의 평균경도, 수냉된 모재 경도, HAZ의 최고경도 순으로 높다.

Fig. 8은 B의 함유량에 따른 모재 경도( $H_{BM}$ )와 HAZ 연화부 경도( $H_{Sz}$ )를 나타낸 것이다. B의 함유량이 증가할수록 연화부의 경도가 증가하고, 모재와 경도 차이도 증가 한다.

### 3.4 경도와 미세조직의 상관관계

B의 함유량에 따른 용접부 경도 변화를 요약하면 다

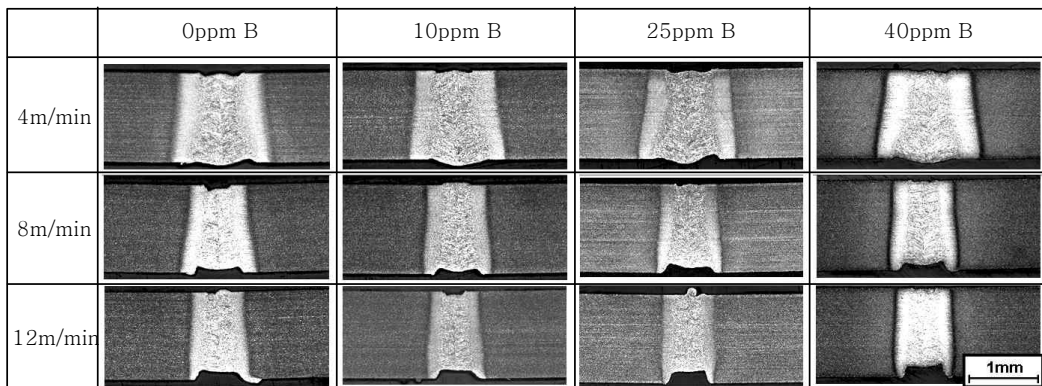


Fig. 5 Cross-section of bead in laser welded with various welding speed (m/min) and B contents (ppm) at the laser power (kW) of 3.5 kW

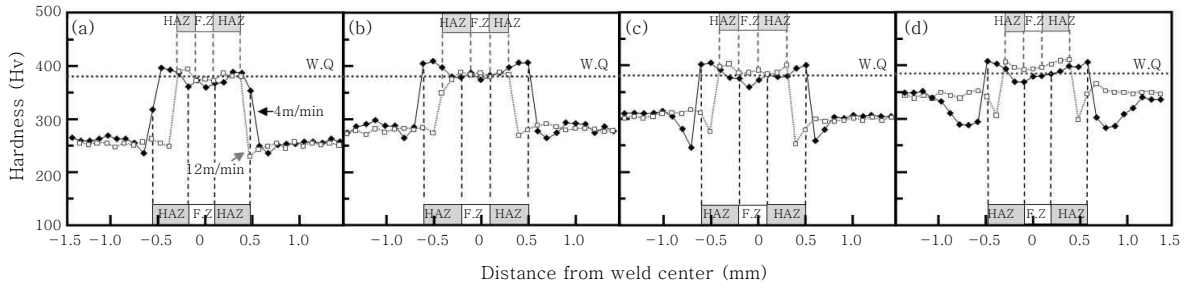


Fig. 6 Hardness (Hv.) distributions of laser welded with welding speed (m/min) at the laser power of 3.5 (kA) and B contents (ppm). (a) 0ppm B, (b) 10ppm B, (c) 25ppm B, (d) 40ppm B

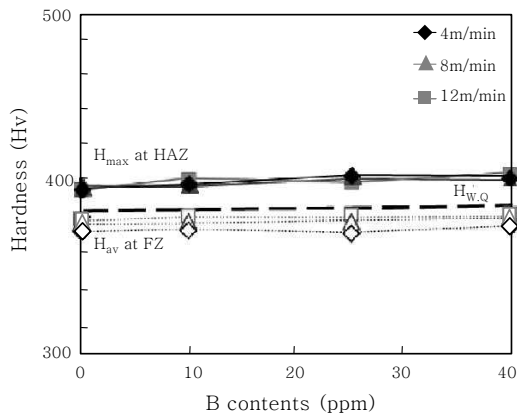


Fig. 7 Maximum hardness (Hmax) at HAZ and average hardness (HFZ) at fusion zone with welding speed (m/min) and B contents

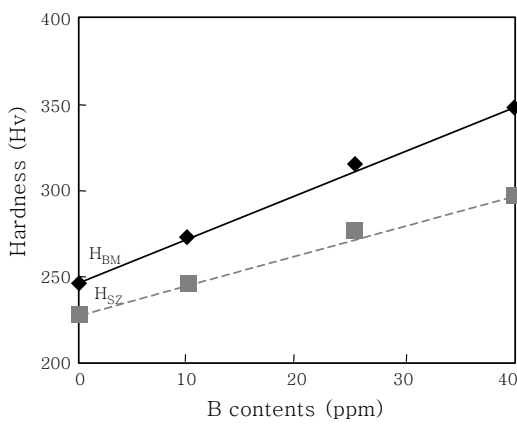


Fig. 8 Hardness (Hv) of base metal (HBM) and softening zone (HSZ) with B contents (ppm)

음과 같다. 1) 용융부 내에 경도 값이 다소 변동하는 현상이 있다. 2) HAZ의 경도가 용융부 경도와 수냉한 모재 경도 보다 높다, 3)용접속도가 증가 할수록 용융부의 경도가 높지만, 4) HAZ/모재 경계에서 연화현상

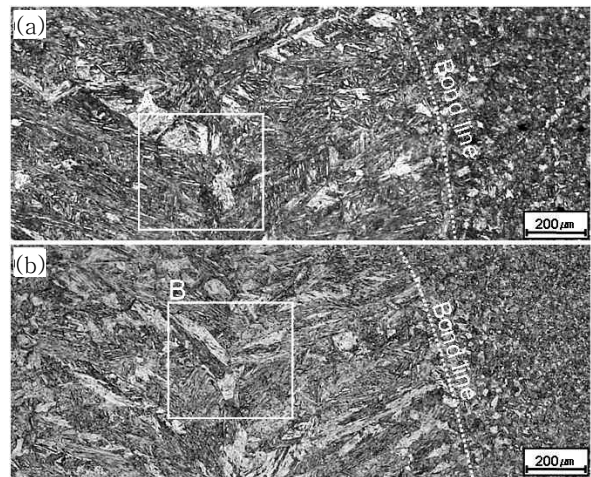


Fig. 9 Optical micrographs weld zone of 0ppm B (a) and 40ppm B (b) steels at welding speed 4m/min

이 발생하고, B함유량이 증가함에 따라 경도 값은 증가하지만, 모재와의 경도차는 커진다. 이러한 경도특성이 나타나는 이유를 파악하기 위하여 경도와 미세조직과의 상관관계를 검토하였다.

Fig. 9는 용융부에서 경도 변동이 발생하는 이유를 파악하기 위해서 경도를 측정된 부위 근처의 미세조직을 비교하였다. (a)와 (b)는 각각 0ppm과 40ppm의 B가 함유된 강에 용접 속도 4m/min으로 용접한 용접부의 단면 거시조직을 나타낸 것이다. Fig. 10과 Fig. 11은 Fig. 9의 (a)와 (b)의 용융부에 □로 표시한 영역을 각각 확대한 광학현미경 사진(a)와, SEM 조직을 나타낸 것이며, 각 조직의 경도값도 함께 나타내었다. Fig. 10과 Fig. 11의 SEM 조직 분석으로부터, 공통적으로 용융부의 조직은 완전한 마르텐사이트로 이루어져 있고, 경도가 낮은 조직은 마르텐사이트의 래스(lath)가 넓고, 경도가 높은 흰색 조직은 lath가 아주 치밀한 것을 알 수 있다. 따라서 용융부에서 경도 변동 현상은 lath 크기가 다른 마르텐사이트가 불규칙적으로

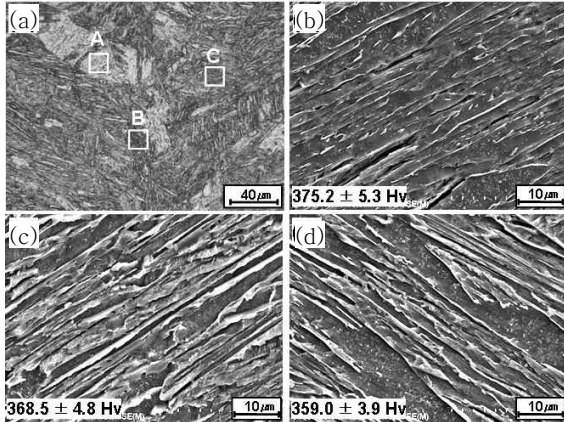


Fig. 10 Optical (a) and SEM micrographs of region denoted by □ in Fig.9(a). (b) A(White), (c) B(Dark brown), (d) C (White brown)

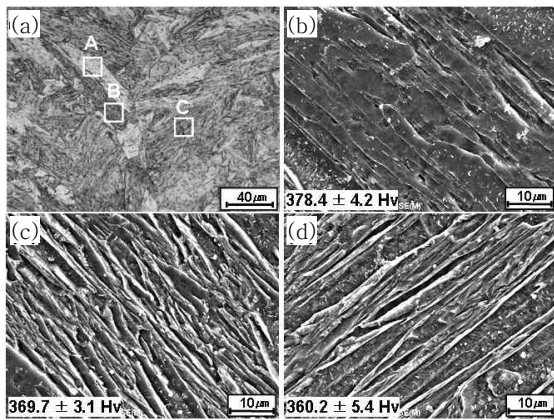


Fig. 11 Optical (a) and SEM micrographs of region denoted by □ in Fig.9(b). (b) A(White), (c) B(Dark brown), (d) C (White brown)

존재하여 국부적으로 경도가 다르기 때문인 것으로 생각된다.

용융부가 냉각하는 과정에서 상변태 거동을 파악하기 위하여, JMat pro V5 소프트웨어를 이용하여 CCT 곡선을 작성하고 용접속도에 따른 냉각속도를 계산하여 보았다. Fig. 12는 JMat pro V5를 사용하여 CCT곡선을 작성한 것이다. 디스크 레이저 용접부는 아주 좁은 영역이고, 용접속도도 아주 빠른 편이므로, 용접속도에 따른 레이저 용접부의 실제 온도를 측정하기는 어렵기 때문에 냉각속도를 계산으로 구하였다. 두께가 얇은 판의 관통 레이저 용접이 이동선열원으로 수행되는 것으로 근사하면, 고온 T와 저온 Tx 사이에 냉각시간  $t_{T/Tx}$ 는 다음과 같은 식으로 표현된다<sup>11-12)</sup>.

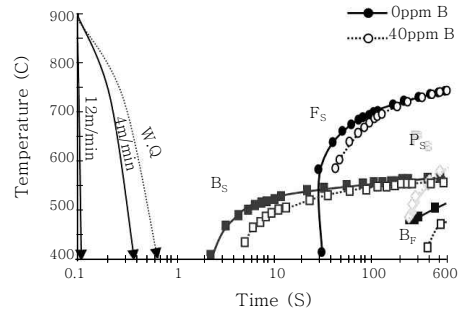


Fig. 12 CCT curve with B contents and cooling rate

$$t_{T/Tx} = \frac{\alpha}{4\pi\lambda^2} \left( \frac{q}{vh} \right)^2 \left( \frac{1}{(Tx - T_0)^2} - \frac{1}{(T - T_0)^2} \right) \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$ ,  $T_0$ ,  $v$ ,  $h$ 는 각각 열확산율(Thermal diffusivity), 예열온도, 용접속도, 판두께를 나타낸다. 열확산율은 열전도율( $\lambda$ )/밀도( $\rho$ )x비열( $c$ )로부터 구할 수 있다. 열전도율, 밀도 및 비열은 각각 30.0(W/mK), 7860(kg/m<sup>3</sup>), 680(J/kg/K)을 사용하였다<sup>13)</sup>. 또한 디스크 레이저 입열량( $q$ )는 정확히 추정하기가 곤란하지만, 디스크 레이저 효율을 60%로 하여 나타낸 결과<sup>14)</sup>를 참고로 3.5kWx0.6으로 계산하였다. Fig. 12의 CCT 곡선에서 할 수 있는 바와 같이 베이나이트 생성 곡선이 400℃ 근방에 있다. 이를 고려하여 900℃에서 400℃까지 냉각하는 시간,  $t_{9/4}$ 를 (1)식으로 구하고 CCT 곡선에 삽입하여 분석하였다. 이상의 결과로부터 본 연구의 용접속도 범위 내에서, 용접속도와 관계없이 마르텐사이트 조직을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 용접속도가 증가할수록 용융부의 경도가 증가하는 이유를 알아보기 위해, 용융부의 구오스테나이트 결정립을 비교한 조직을 나타낸 것이다. 이것으로

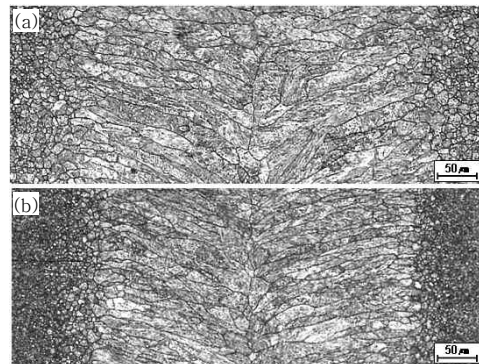


Fig. 13 Optical micrographs in fusion zone in 40ppm B welded with welding speed at Primary austenite etched. (a) 4m/min, (b) 12m/min

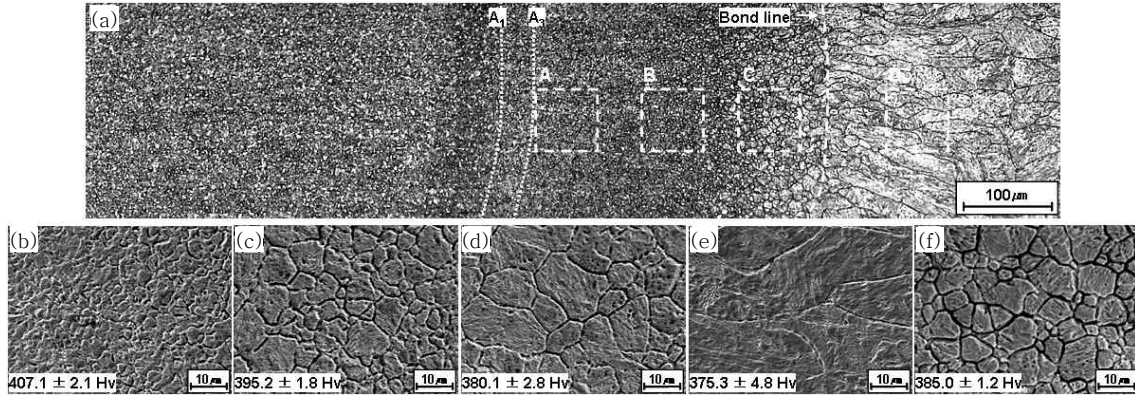


Fig. 14 Optical (a) and SEM micrographs near weld in 40ppm B welded with welding speed of 4m/min at primary austenite etched. (b) A(HAZ of Hmax), (c) B(Center of HAZ), (d) C(HAZ near bond line), (e) D(Fusion zone near bond line, (f) Water quenched steel

부터, 용접속도가 빠른 용융부가 구오스테나이트 결정립이 더 미세함을 알 수 있다. 따라서 구오스테나이트가 결정립이 미세하기 때문에 냉각 시 형성된 마르텐사이트가 치밀하기 때문에 경도가 높은 것으로 생각된다. 또한 용접속도가 빠를수록 용융풀의 크기가 감소함으로써, 냉각속도가 증가하기 때문에 결정립이 미세한 것으로 생각된다.

또한, 각 강종에서 같은 조성이고, 급랭에 의해서 얻어진 조직임에도 불구하고, HAZ의 경도가 용융부 경도와 수냉한 정도 보다 높은 이유를 파악하기 위하여 구오스테나이트 결정립을 현출하여 미세조직을 비교해 보았다.

Fig. 14는 40ppmB 강의 HAZ, 용융부 및 수냉한 모재의 구오스테나이트 결정립을 비교한 것이다. (b)~(e)는 (a)에 □로 표시한 영역을 각각 확대한 SEM 조직이고, (f)는 900°C에서 가열한 후, 수냉한 모재의 SEM 조직을 나타낸 것이다. 최고경도를 나타내는 HAZ의 결정립 크기가 가장 미세하고, 상대적으로 경도가 가장 낮은 용융부가 아주 조대한 것을 볼 수 있다. 수냉한 것의 구오스테나이트 결정립 크기는 최대 경도를 갖는 HAZ의 것보다 크고, 용융부의 것보다는 작다. 이러한 결정립의 크기 차이가 나는 이유는 용융부에서 모재쪽으로 갈수록 가열된 온도가 상대적으로 낮고 냉각속도도 빠르다. 따라서 최고경도를 갖는 HAZ는 모재에 인접한 A<sub>3</sub> 선 직상으로 가열된 부분으로서, 오스테나이트 변태 후 성장하지 못하고 순간적으로 냉각되므로 구오스테나이트 크기가 아주 미세하게 나타나는 것으로 생각된다. 이상의 결과로부터 같은 마르텐사이트 조직임에도 불구하고 경도 차이가 나는 이유는 구오스테나이트 결정립 크기가 다르고, 이로 인해 냉각에 의

해 최종 형성되는 마르텐사이트 크기가 다르기 때문인 것으로 생각된다.

한편, HAZ/모재 경계에서의 연화현상은 용접한 모든 시편에서 나타났고, 동일한 용접 조건에서 B의 함유량이 증가함에 따라 연화정도가 증가한다. 이러한 원인을 미세조직과 검토하여 보았다. 그 결과를 Fig. 15에 나타낸다. 연화부에서는 마르텐사이트가 템퍼링 효과에 의해 분해된 양상을 하고 있다. 모재는 마르텐사이트, 베이나이트 및 페라이트로 구성되어 있고, 용접열사이클에 의해 A<sub>1</sub> 변태 직하 온도로 가열되는 용접부 근처 부분에서는 불안정한 조직인 마르텐사이트가 템퍼링됨으로써 경도가 감소하는 것으로 생각된다<sup>13)</sup>. 그리고 B의 함유량의 증가에 따라서 연화정도가 큰 것은 Fig. 2에 알 수 있는 바와 같이 B의 함유량이 많을수록 모재의 강화상인 마르텐사이트의 양이 많아 템퍼링 효과가 크기 때문인 것으로 생각된다.

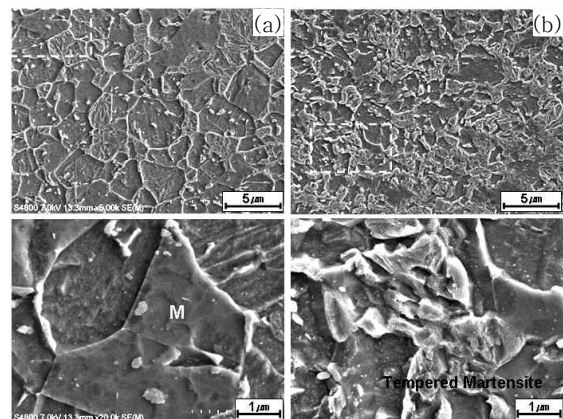


Fig. 15 Martensite transformation to tempered martensite (a) Base metal, (b) Softening zone

## 4. 결 론

차체용으로 사용되는 고장력강인 CP강을 디스크 레이저 용접한 경우, B의 함유량에 따라 용접부 미세조직과 경도에 어떤 영향을 미치는가에 대하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) B의 함유량이 증가할수록 모재내의 페라이트의 상분율이 감소하고, 마르텐사이트 및 베이나이트의 상분율이 증가하였다. 이것을 JMat pro 시뮬레이션으로 작성한 CCT 곡선과 실제 열처리 사이클을 대입한 결과를 검토해본 결과 B의 첨가에 따라 초기 페라이트의 생성온도가 낮아지고, 베이나이트의 생성온도가 상승하기 때문이다.

2) B함유량에 비드형상은 크게 변화지 않았고, 용접속도가 12m/min에서도 완전 용입이 일어났다. 용접속도가 증가할수록 상부 및 하부의 비드 폭은 좁아지고, 8m/min이상의 용접속도에서는 비드 아래 부분에 언더필 결함이 형성되었다.

3) B함유량 및 용접 속도에 따른 경도분포 형상은 거의 동일하지만 절대 경도 값은 다소 다르다. 또한 HAZ와 모재 경계에서 모재보다 경도가 낮은 연화부가 존재하고, B량이 증가할수록 경도차가 커지는 것을 볼 수 있다.

4) 용융부에서 경도 변동이 발생하는 이유는 SEM 조직으로부터 분석한 결과, 공통적으로 용융부의 조직은 완전한 마르텐사이트로 이루어져 있고, 경도가 낮은 조직은 마르텐사이트의 래스(lath)가 넓고, 경도가 높은 흰색 조직은 lath가 아주 치밀한 것을 알 수 있다. 따라서 용융부에서 경도 변동 현상은 lath 크기가 다른 마르텐사이트가 불규칙적으로 존재하여 국부적으로 경도가 다르기 때문인 것으로 생각된다.

5) 각 강종에서 같은 조성이고, 급랭에 의해서 얻어진 조직임에도 불구하고, HAZ의 경도가 용융부 경도와 수냉한 경도 보다 높은 이유를 검토한 결과, 최고경도를 나타내는 HAZ의 구오스테나이트 결정립 크기가 가장 미세하고, 상대적으로 경도가 가장 낮은 용융부가 아주 조대한 것을 볼 수 있다. 따라서 같은 마르텐사이트 조직임에도 불구하고 경도 차이가 나는 이유는 구오스테나이트 결정립 크기가 다르고, 이로 인해 냉각에 의해 최종 형성되는 마르텐사이트 크기가 다르기 때문인 것으로 생각된다.

## 후 기

본 논문은 부산대학교 자유 과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

1. S. J. Kim, C. G. Lee, C. S. Oh, D. W. Seo, T.H. Lee, H.N. Han : Development advanced high strength steel for automobile, KIMM, 2010 (in korea)
2. S. J. Kim, K. G.jin : Development and application of advanced high strength steel for automobile, 2004 45-52 (in korea)
3. Debanshu Bhattacharya : Developments in advanced high strength steel, (2005) The Joint International Conference of HSLA Steels
4. S. H. Yoon, J. H. Lee and K. M. Lee : A study on the fatigue properties of boron steel (AISI 51B20), Korean Society for Precision Engineering, 2001, 802-806
5. S. G. Shi, S. Westgate : Fiber-Delivered Laser Welding of Ultra-High Strength Steels for Automotive Applications, TWI Report, 2007, 865
6. J. Y. Jang, W. N. Choi, B. H. Jung, C. Y. Kang : Effect of Welding Speed on Mechanical Properties and Formability in Nd:YAG Laser Welds of 1000MPa Grade DP Steel, Journal of KWS, 27-2(2009) 69-75 (in Korean)
7. W. S. Jang : Advanced high strength steel weld properties, Journal of KWS, 용접공학 하계대학교제 (2003), 149 - 185 (in Korean)
8. S. K. Kim, J. S. Kim and N. J. Kim : Metall. Mater. Trans. A, 33A, No. 3 (2002), 701
9. C. T. Liu, C. L. White, J. A. Horton, Acta Metall. 33 (1985), 213
10. T. B. Cameron, J. E. Morral, Metall. Trans. A17, 1986, 1481
11. Rosenthal, D. : Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. Welding Journal 20(5) (1941), 220-234.
12. Rosenthal, D. : The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. Trans. ASME48, 1946, 848-866
13. Mingsheng XIA, Elliot BIRO, Zhiling TIAN and Y. Norman ZHOU : Effects of Heat Input and Martensite on HAZ Softening in Laser Welding of Dual Phase Steels, ISIJ International, (2008) 48-6, 809-814
14. Jari Hovikorpi, Apricon Oy : Disk Lasers at TRUMPF, Lasertekniikan Workshop, ELME-Studio Nivala, 2007