

Al-Si Coated Boron Steel과 Zn Coated DP Steel 이종금속의 DISK Laser 용접부 미세조직과 경도

안용규* · 강정윤**† · 김영수*** · 김철희**** · 한태교*****

*부산대학교 하이브리드소재솔루션 국가핵심연구센터(NCRC)

**부산대학교 재료공학과

***성우하이텍 기술연구소

****한국생산기술연구원 정밀접합팀

*****포스코 기술연구소

Microstructures and Hardness of DISK Laser Welds in Al-Si Coated Boron Steel and Zn Coated DP Steel

Yong Gyu An*, Chung Yun Kang**,†, Young Su Kim***, Cheol Hee Kim****
and Tae Kyo Han*****

*National Core Research Center, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

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

***Technical Research Team, SUNGWOO HITECH, Pusan 619-961, Korea

****Advanced Joining Technology Team, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-130, Korea

*****Technical Research Lab, POSCO, Kwangyang 545-090, Korea

†Corresponding author : kangcy@pusan.ac.kr

(Received October 28, 2010 ; Revised December 10, 2010 ; Accepted January 4, 2011)

Abstract

Al-Si coated Boron steel and Zn coated DP steel were welded using DISK laser and the microstructure and hardness of the weld were investigated. Full penetration was obtained, when the welding speed was lower than 4m/min. In the specimen welded with laser power of 3 kW and welding speed of 2 m/min, the hardness was the highest in the heat affect zone in the boron steel (HAZ-B) and that of the heat affect zone in the DP steel (HAZ-D) was lower than HAZ-B. The hardness of fusion zone was in between those of HAZ-B and HAZ-D. The decreased hardness from each HAZ to base metal(BM) could be explained that ferrite contents increases when access to the BM. The variation of hardness in the welds could be explained by the difference of microstructure, that is, full martensite in HAZ-B, mixture of martensite and bainite in the fusion zone, and the mixture of martensite, ferrite and bainite in HAZ-D.

Key Words : Al-Si coated Boron Steel, Zn coated DP steel, Laser welding, Microstructure, Hardness

1. 서 론

최근 자동차 산업의 안전 및 환경규제 강화로 인해 고강도 강판을 차체에 적용한 경량화에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. HSLA강부터 DP강, TRIP강,

TWIP강에 이르기 까지 많은 고강도 강판이 개발되었지만, 일반적으로 이러한 고강도 강판들은 차체부품의 형상을 가공하는 성형성에 있어서 어려움이 있었다¹⁾. 이러한 성형성의 문제를 해결하기 위하여 유럽에서 핫포밍(Hot forming), 핫스탬핑(Hot Stamping), 핫프레스(Hot pressing)이라 불리는 1500MPa 이상의 초

고강도를 가지는 자동차용 강판을 개발하는 금형냉각 공정이 개발되었다.

핫스탬핑 공정은 보론(B)을 첨가하여 소입성을 향상시킨 강판을 A_3 이상의 온도로 가열 후 금형을 이용하여 성형과 동시에 상온까지 냉각시켜 초고강도를 얻는 공정이다²⁻⁶⁾. 핫스탬핑 강판은 주로 충돌안전성이 요구되는 범퍼 빔, 센터필라 등의 구조부재에 적용되고 있으나 충돌법규의 강화로 인하여 루프레일, 임팩트 빔 등 적용 부위가 점차 증가하고 있다⁷⁾.

자동차 차체부품은 대부분 모노코크 구조로서 차체구성을 위해서는 다른 상판 부분들과 용접공정을 통하여 조립되어야 하므로 용접특성이 차량성능을 좌우하는 매우 중요한 변수가 된다⁸⁾. 자동차 차체 접합 방법으로 저항 점용접이 주로 사용되었지만 새로운 강재가 개발되고 접합기술도 발전됨에 따라 다양한 접합기술이 연구되고 있다⁹⁾. 이 중에서 레이저를 이용한 TWB (Tailor Welded Blank)와 같은 이중두께를 가진 이중금속의 접합 기술이 많이 적용되고 있는데, TWB 접합을 적용할 경우 300여개의 부품에 이르는 자동차의 구성품을 66%정도 감소시킬 수 있어 경량화, 생산성 및 충돌성 향상 등 많은 이점이 있다¹⁰⁻¹¹⁾.

기존의 보론 강판의 용접에 대한 연구로는 동종 보론 강판의 레이저 맞대기 용접시 인장성질 및 충돌성에 대한 연구¹²⁾ 및 동종 보론 강판에 대한 겹치기 마찰교반 점용접시 인장성질에 대한 연구¹³⁾, 그리고 DP강판과 저항 점용접시 충돌해석¹⁴⁻¹⁵⁾ 및 아연도금강판과 저항 점용접시 인장성질¹⁶⁾에 대한 연구가 보고되고 있다. 보론 강판의 경우 Al-Si 합금이 코팅되어 있고, 보론 강판과 용접되어 적용되는 강판들은 Zn 코팅처리가 되어 있다. 서로 다른 코팅층, 두께, 합금성분을 가진 두 강판을 용접하게 되면, 용융부에서 혼합된 이중 코팅층 및 모재 합금성분 혼합의 영향에 의해 미세조직과 경도가 모재와 다르게 변할 것으로 예상된다. 그러나 보론 강판과 이중금속의 용접시 이에 관련된 연구는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 자동차 S/MBR에 적용되고 있는 Al-Si coated 보론 강판과 Zn coated DP강판 이중강재의 레이저 TWB 용접시 용접속도의 변화에 따

른 합금성분의 분포, 경도분포, 미세조직의 변화에 대하여 체계적으로 검토하고자 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

본 연구에서는 Al-Si합금이 $25\mu\text{m}$ 두께로 양면에 용융도금 되어있는 1.2mm 보론 강판과 Zn이 양면에 $5\mu\text{m}$ 두께로 전기도금 되어있는 1.6mm DP강판을 사용하였다. Table 1은 두 강판의 화학조성 및 기본 물성치를 나타낸 것이다. 레이저는 4kW급 DISK레이저를 사용하였으며 맞대기 용접으로 실시하였다. 용접조건은 레이저 출력을 3kW로 고정하고 초점거리 0mm에서 용접속도를 $2\sim 6\text{m/min}$ 으로 변화시켰다. 미세조직 관찰은 연마 후 3% Nital 용액으로 에칭 후 광학현미경(OM)과 주사전자현미경(SEM JEOL JM-6400)으로 관찰하였다. 용융부의 조직을 분석하기 위하여 전해연마로 시편을 제작 후 투과전자현미경(Fe-TEM)으로 관찰하였다. 용접부 경도 측정은 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 하중 200g, 유지 시간 10초의 조건으로 용접 중심선을 기준으로 보론강의 모재부터 DP강의 모재까지 $100\mu\text{m}$ 간격으로 3⁵회 측정하여 경도분포가 유사하다고 판단 후 대표적인 측정값을 나타내었다

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접부의 경도분포

용융 특성에 미치는 용접조건을 선정하기 위하여, 우선 용접속도 변화에 따른 비드 단면을 관찰하였다. Fig. 1은 레이저 출력을 3kW로 고정하고 용접속도 변화에 따른 비드 단면의 형상을 나타낸 것이다. 용접속도가 4m/min 이하에서는 완전용입을 얻을 수 있었고, 완전용입 조건에서 비드 형상은 큰 차이가 없었으나 용접속도가 증가할수록 용융부의 폭은 감소하는 것을 볼 수 있다. 모든 조건의 용접부에는 균열과 기공 같은 결함이 검출되지 않았다. 따라서 보론 강판과 DP강판의 레이저 용접시 건전한 용접부를 얻을 수 있다고 판단되고, 서로 다른 합금원소를 가진 금속이 용접되었을 때

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of boron steel and DP steel

Materials	Chemical Composition (wt%)									Mechanical Properties		
	C	Mn	Si	Cr	Ti	B	P	S	Fe	Y.S (MPa)	T.S (MPa)	E(%)
Boron steel (1.2mm)	0.193	1.323	0.589	0.149	0.026	0.005	0	0	Bal.	400	600	25
DP steel (1.6mm)	0.09	1.79	0.26	0	0	0	0.03	0.003	Bal.	380	590	24

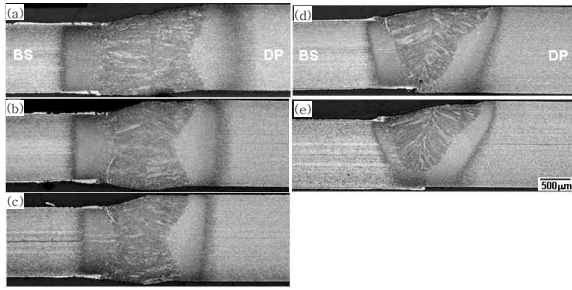


Fig. 1 Cross-section microstructures of bead in joints welded by various welding speed of (a) 2m/min, (b) 3m/min, (c) 4m/min, (d) 5m/min, (e) 6m/min

용접부의 경도분포 현상을 검토하기 위해 대표적으로 완전용입이 일어난 용접조건으로 용접한 용접재를 선택하여 경도를 측정하였다.

Fig. 2는 레이저 출력 3kW에서 용접속도 2m/min, 3m/min, 4m/min으로 용접한 용접부에 대해 용접 중심선을 기준으로 100 μ m 간격으로 비커스 경도를 측정하여 정리한 것이다. 용접부 경도분포를 살펴보면 위의 세 용접속도 조건에서 모두 보론강의 열영향부에서 최대 경도값이 나타났고, 용융부는 그보다 낮은 경도값이 나타났으며 DP강의 열영향부는 용융부보다 경도값이 낮게 나타났다. 두 강판의 열영향부에서 공통적으로 최대 경도값이 나타난 영역에서 용융부 쪽으로 갈수록 경도가 약간 감소하며 모재 쪽으로 갈수록 급격하게 경도가 감소하고 있음을 볼 수 있다. 용융부의 경우 최대 경도값과 최소 경도값이 약 30Hv정도 차이가 났으며 용융부 중심을 기준으로 보론 강판에 가까운 용융부에서 DP강판에 가까운 용융부로 갈수록 평균 경도값이 약간 감소하는 것을 볼 수 있다.

이상의 경도분포 결과로부터, 경도가 다른 이종 간의 용접부는 다음과 같은 특징이 있다. 용융부의 경도가 높은 모재 쪽의 용융부는 낮은 모재 쪽의 것에 비교하여 높은 편이며, 용접부 전반적으로 경도편차가 있다.

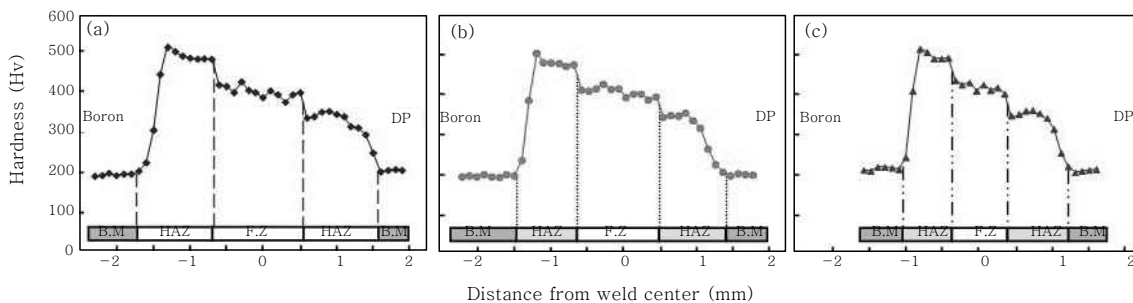


Fig. 2 Hardness distribution near welded zone at welding speeds of (a) 2m/min, (b) 3m/min and (c) 4m/min

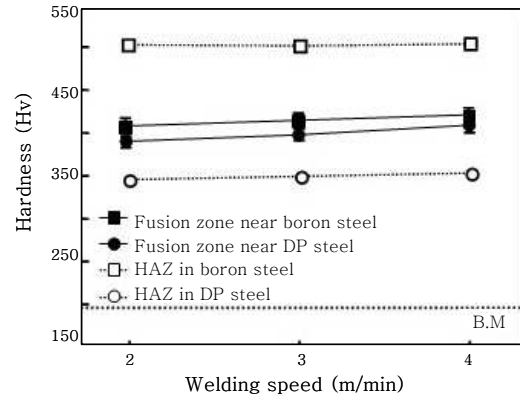


Fig. 3 Variation of average hardness in fusion zone and maximum hardness in HAZ with welding speed

경도가 가장 높은 쪽은 보론강의 열영향부이다.

Fig. 3은 용접속도에 따른 용융부의 평균 경도 및 열영향부의 최대경도를 비교한 결과이다. 여기서 용융부의 경우 위치에 따른 평균 경도값이 차이가 나기 때문에 용융부 중심을 기준으로 구분하여 측정하였다. 열영향부의 최대 경도값은 용접속도에 관계없이 거의 일정하였으며, 용융부의 평균 경도값은 용접속도가 증가할수록 약간 증가하였다. 이는 용접속도가 증가할수록 용융부의 크기가 감소함으로써, 냉각속도가 증가하여 구오스테나이트 결정립이 미세해지기 때문인 것으로 사료된다^[7-18].

3.2 용접부의 미세조직

3.2.1 용융부의 미세조직

전술한 바와 같이 특이한 경도분포를 갖는 이유를 규명하기 위하여 경도와 미세조직과의 상관관계를 검토하여 보았다. 경도분포 경향이 용접속도에 영향을 거의 받지 않기 때문에, 대표적으로 완전용입이 일어난 용접속도 2m/min로 용접한 용접재를 선택하여, 각종 현미경 조직을 검토하였다.

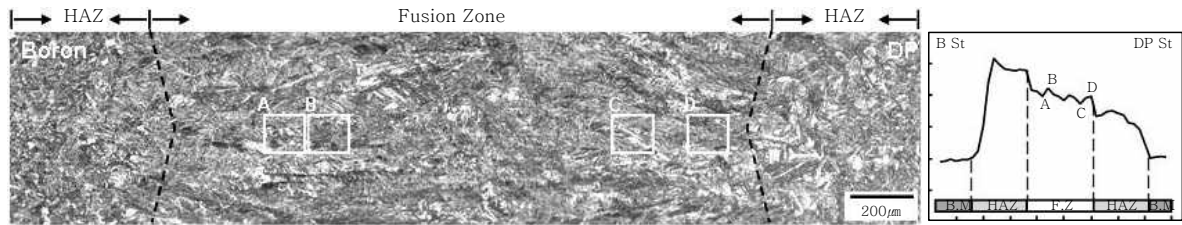


Fig. 4 Optical microstructures in welds with welding speed of 2m/min

Fig. 4는 용접비드 중앙부의 대표적인 광학현미경 조직을 나타낸 것이다. 또한 Fig. 5의 (a)와 (b)는 용융부 중심을 기준으로 보론강에 가까운 용융부에서 최소 경도값을 갖는 Fig. 4의 A영역과 최대 경도값을 갖는 Fig. 4의 B영역의 광학현미경 조직을 나타낸 것이다. 경도가 낮은 곳은 광학현미경에서 백색조직으로 되어 있고, 높은 곳은 흑색조직으로 구성되어 구별된다. Fig. 5의 (c)와 (d)는 각각 Fig. 5의 (a)에 E와 (b)의 F로 표시된 영역을 확대한 SEM 조직이다. 이것으로부터 경도가 높은 흑색조직은 치밀한 마르텐사이트 조직이며, 경도가 낮은 백색조직은 마르텐사이트와 베이나이트의 혼합조직인 것으로 생각된다. 이것을 확인하기 위하여 Fig. 5의 (c)와 (d)에 해당하는 각 영역에 대하여 TEM으로 상세히 관찰하였다. Fig. 6은 그 결과를 나타낸 것으로, (a)~(c)와 (d)~(f)는 Fig. 5의 (c)와 (d)에 해당하는 TEM 조직과 각 상의 회절패턴 및 결정학적 해석결과를 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 검은색은 BCT 구조를 가지는 래스 마르텐사이트(Lath Martensite)로 판단된다. 백색상의 일부분은 TEM 해석결과로부터 BCC구조를 가지는 페라이트 기지 내에 관상의 시멘타이트 조직이 분포하고 있는 것으로 보아 하부 베이나이트(Low Bainite)임을 알 수 있다. 그러나 SEM 조직에서 보면, 백색상은 하부 베이

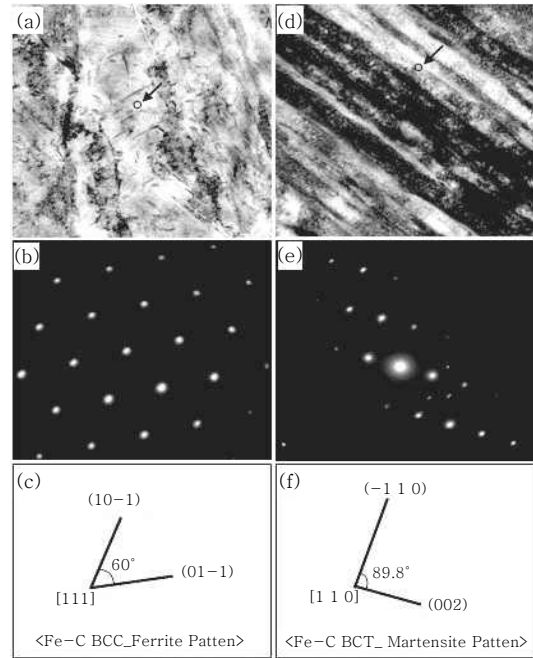


Fig. 6 TEM structures, diffraction patterns and its key-diagrams taking from various phases in the fusion zone near boron steel. (a)(b)(c) bainite, (d)(e)(f) martensite

나이트만이 아니고, 마르텐사이트가 부분적으로 혼재되어 있는 조직임을 알 수 있다.

Fig. 7의 (a)와 (b)는 DP강에 가까운 용융부에서 최소 경도값을 갖는 Fig. 5의 C영역과 최대 경도값을 갖는 Fig. 5의 D영역의 광학현미경 조직을 나타낸 것이다. 역시 백색상은 경도가 낮고, 흑색상은 경도가 높다. Fig. 7의 (c)와 (d)는 각각 Fig. 7의 (a)에 G와 (b)의 H로 표시된 영역을 확대한 SEM 조직이다. 이것으로부터 경도가 높은 흑색조직은 치밀한 마르텐사이트 조직이며, 경도가 낮은 백색조직은 마르텐사이트와 베이나이트의 혼합조직으로 생각된다. 이것을 확인하기 위하여 Fig. 7의 (c)와 (d)에 해당하는 각 영역에 대하여 TEM으로 관찰하여 보았다. Fig. 8은 그 결과를 나타낸 것으로, (a)~(c)와 (d)~(f)는 Fig. 6의 (c)와 (d)에 해당하는 TEM 조직과 각 상의 회절패턴 및

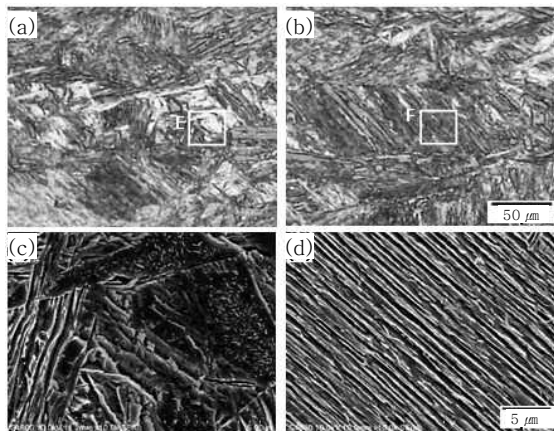


Fig. 5 SEM microstructures in fusion zone near boron steel (a) A, (b) B, (c) E, (d) F

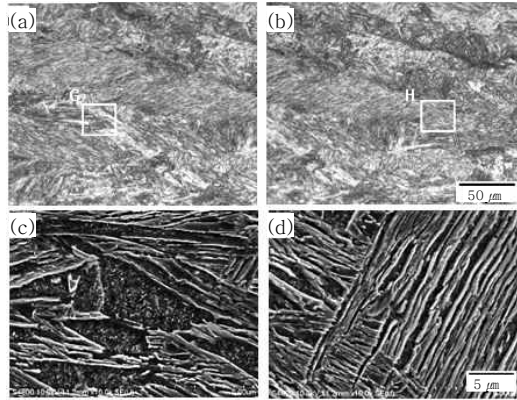


Fig. 7 SEM microstructures in fusion zone near DP steel (a) C, (b) D, (c) G, (d) H

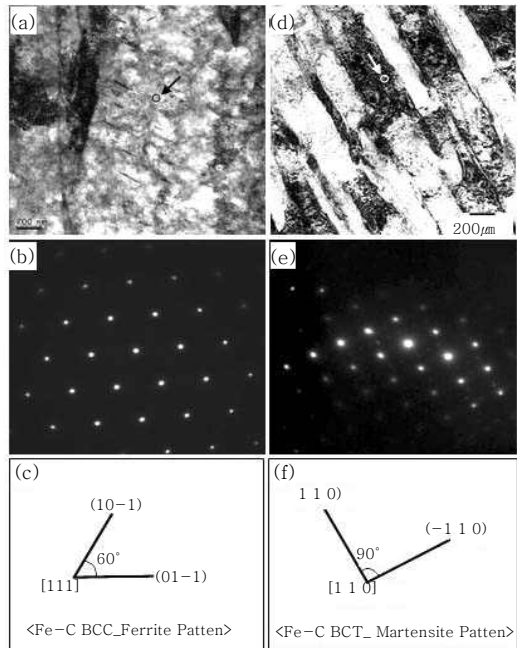


Fig. 8 TEM structures, diffraction patterns and its key-diagrams taking from various phases in the fusion zone near DP steel. (a)(b)(c) bainite, (d)(e)(f) martensite

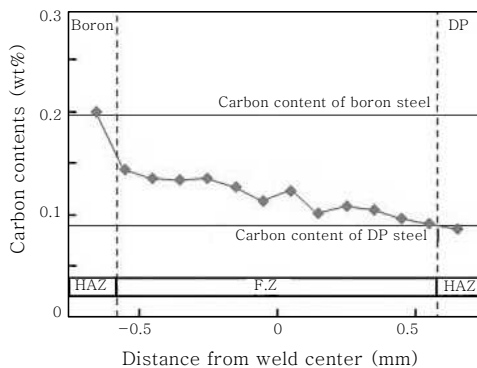


Fig. 9 Carbon contents distribution near fusion zone at 2m/min

결정학적 해석결과를 나타낸 것이다. 이 해석결과와 SEM 조직 결과로부터, 역시 흑색상은 순수 래스 마르텐사이트이고, 백색상은 하부 베이나이트와 래스 마르텐사이트 혼합조직임을 확인하였다.

한편 보론강관부 용융부에서 DP강관부 용융부로 갈수록 평균 경도값이 감소하는 현상을 검토하기 위해서 EPMA-WDS를 이용하여 용융부의 합금원소 분포를 검토하였다. Fig. 9는 용접부의 탄소함량 분포를 나타낸 것이다. 탄소함량의 경우 보론강관에서 DP강관으로 갈수록 선형적으로 감소하는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 급열, 급냉의 레이저 용접 특성상 차이가 나는 합금원소 성분이 충분히 섞이지 못했기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 탄소함량이 감소할수록 마르텐사이트의 패킷사이즈가 증가하여 경도가 감소하기 때문에 DP강관부로 갈수록 평균 경도값이 감소한 것으로 판단된다¹⁹⁻²¹⁾.

이상의 결과로부터, 용융부는 순수 래스 마르텐사이트로 구성되어 있는 흑색조직(광학현미경조직) 영역과 하부 베이나이트와 래스 마르텐사이트의 혼합조직인 백색 영역이 존재하므로 경도 측정 영역에 따라 경도차이가 나는 두 종류의 조직이 존재하기 때문에 약간의 경도차가 발생하는 것으로 생각된다. 또한 DP강 용융부로 갈수록 탄소함량이 감소함에 따라 마르텐사이트 패킷 사이즈가 증가하여 경도값이 점차적으로 감소하는 것으로 판단된다.

3.2.2 열영향부의 미세조직

다음은 열영향부 경도 변화와 미세조직과의 상관관계를 검토한 결과이다. Fig. 10은 용접부의 대표적인 광학현미경 조직과 이에 상응하는 경도분포를 나타낸 것이다. Fig. 11은 Fig. 10에서 보론강의 경도분포에 상응하는 SEM 조직을 나타낸 것이다. 여기서 (a)는 모재이고, (b)~(e)는 모재 쪽에서 용융부 쪽의 열영향부(B~E)의 SEM 조직을 나타낸 것이다. Fig. 11에서 보론강 열영향부의 경우, 모재는 페라이트와 미세 펄라이트로 구성되어 있으나, 용접 열영향부인 B와 C영역에서는 용융부 쪽으로 갈수록 페라이트의 양이 감소하고, D와 E영역에서는 거의 마르텐사이트 조직을 나타낼 수 있다. 이것은 B와 C영역이 A₁~A₃ 온도로 가열되고, D와 E영역은 A₃이상의 온도로 가열되었음을 의미한다.

Fig. 12는 DP강의 경도분포에 상응하는 SEM 조직을 나타낸 것이다. 여기서 (a)는 모재이고, (b)~(e)는 모재 쪽에서 용융부쪽의 열영향부(B~E)의 SEM 조직을 나타낸 것이다. DP강의 열영향부의 조직은 보론

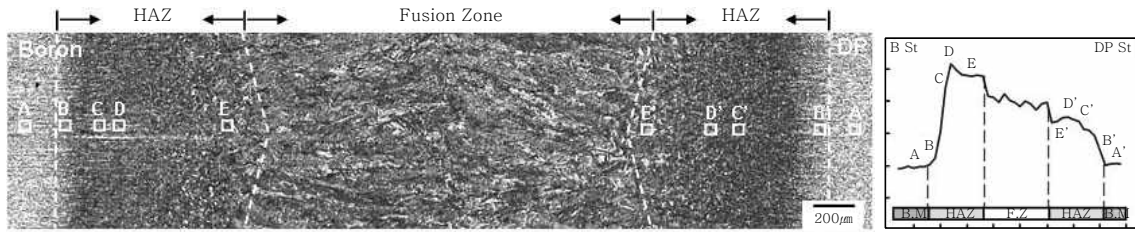


Fig. 10 Optical microstructures near weld with welding speed of 2m/min.

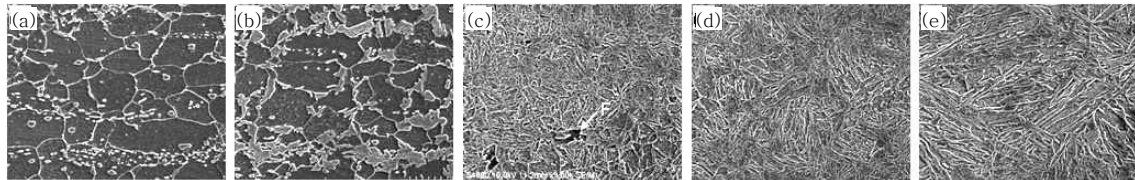


Fig. 11 SEM microstructures near weld with welding speed of 2m/min. (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E

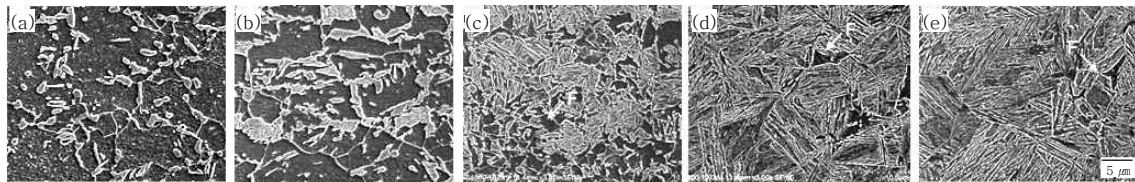


Fig. 12 SEM microstructures near weld with welding speed of 2m/min. (a) A', (b) B', (c) C', (d) D', (e) E'

강과 다르게 용융선 근방까지 페라이트가 존재함을 볼 수 있다. 특히 C~E' 영역에서는 입내페라이트가 아닌 입계페라이트가 존재하고 용융선에 접근할수록 그 양이 감소함을 알 수 있다. 따라서 용융부로 갈수록 페라이트 양이 감소하기 때문에 경도가 증가하는 것을 알 수 있다.

한편 Fig. 11에서 A₃이상 가열된 영역은 모두 마르텐사이트 임에도 불구하고, 모재 쪽의 열영향부(D)가 용융부 쪽의 열영향부(E)보다 경도가 높다. Fig. 13은

Fig. 11의 (d)와 (e)를 부식액(NaOH 5g + Picric acid 3g + boiled water 100ml)으로 구오스테나이트를 현출한 조직을 나타낸 것이다. 이것은 D가 용접 열에 의해 가열된 온도가 낮아 오스테나이트 성장이 일어나지 않았기 때문인 것으로 생각된다. 이상의 결과로부터, 모재 쪽의 열영향부가 A₃ 직상으로 가열되어 구오스테나이트의 결정립 크기가 작고, 따라서 마르텐사이트 크기도 작기[Fig. 11 (d)와 (e) 참조] 때문에, 경도가 높은 것으로 생각된다. Fig. 14는 Fig. 12의

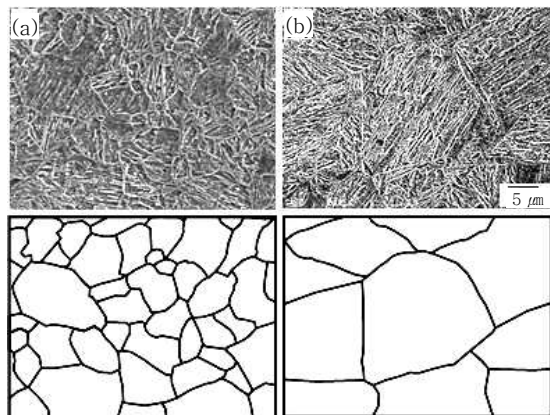


Fig. 13 Comparison of prior austenite grain size in the Boron steel HAZ (a) D, (b) E

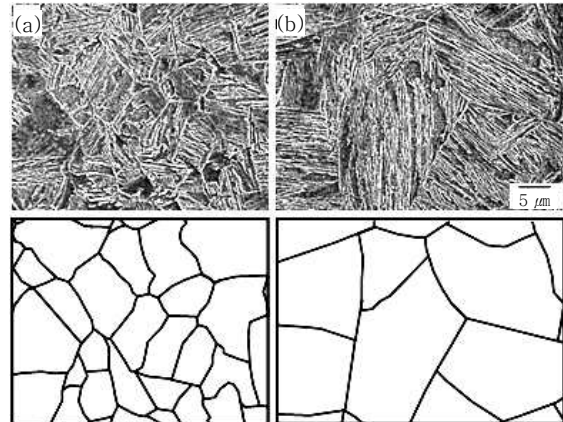


Fig. 14 Comparison of prior austenite grain size in the DP steel HAZ (a) D', (b) E'

(d)와 (e)를 부식액(NaOH 5g + Picric acid 3g + boiled water 100ml)으로 구오스테나이트를 현출한 조직을 나타낸 것이다. 역시 낮은 온도로 가열된 D'의 구오스테나이트 결정립이 미세하지만, E'영역은 고온으로 가열되어 결정립이 크것을 알 수 있다. D' 및 E'에서 존재하는 페라이트는 냉각 중에 형성된 입계 페라이트이기 때문에, 미세한 결정립을 갖는 열영향부의 중앙부가 경도가 높다.

용접부 전반에 걸쳐 경도분포가 보론강 열영향부에서 DP강 모재 쪽으로 갈수록 경도가 낮아지는 이유를 고찰하기 위하여, J-mat Pro 프로그램을 이용하여 보론강 열영향부, 용융부 및 DP강 열영향부의 CCT 곡선을 작성하여 상변태 거동을 검토하여 보았다. 용융부의 조성은 중앙부를 기준으로 보론강 부분과 DP강 부분으로 나누어 EPMA WDS로 10회 측정하여 평균하였다. Thermal calc. 프로그램을 이용한 상태도 작성 및 J-mat Pro 프로그램을 이용하여 각 영역의 A₃온도 및 M_s온도를 구한 결과, 보론강의 A₃온도는 820°C, M_s온도는 378°C이며 용융부의 A₃온도는 835°C, M_s온도는 389°C이고, DP강의 A₃온도는 840°C, M_s온도는 412°C로 나타났다. 이에 따라 용접속도에 따른 냉각속도는 레이저 용접시 900°C에서 300°C까지 냉각될 때의 냉각속도를 구하는 T₉₃식(1)을 이용하여 계산하였

다.⁽²²⁾ 용융부의 물성은 J-mat Pro 프로그램을 이용하여 대입하였다.

$$T_{93} = \frac{\alpha}{4\pi\lambda^2} \times \left(\frac{q}{vh}\right)^2 \times \left[\frac{1}{(300 - T_0)} - \frac{1}{(900 - T_0)} \right]^2 \quad (1)$$

- α : Thermal Diffusivity
- λ : Thermal Conductivity
- q : Heat Input
- T₀ : Preheating Temp.
- V : Welding Speed
- h : Thickness

Fig. 15는 J-mat Pro 프로그램을 이용하여 보론강, 보론강-용융부, DP강-용융부 및 DP강의 CCT 곡선을 나타낸 것이다. 보론강의 경우, 본 연구의 용접속도 범위 내에서, 용접속도와 관계없이 마르텐사이트 조직을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 반면에 DP강의 경우, 모든 용접속도에서 페라이트, 베이나이트 및 마르텐사이트 혼합조직이 얻어짐을 알 수 있다. 또한 용융부의 경우 2강종이 혼합된 상태로서, 보론강 쪽과 DP강 쪽의

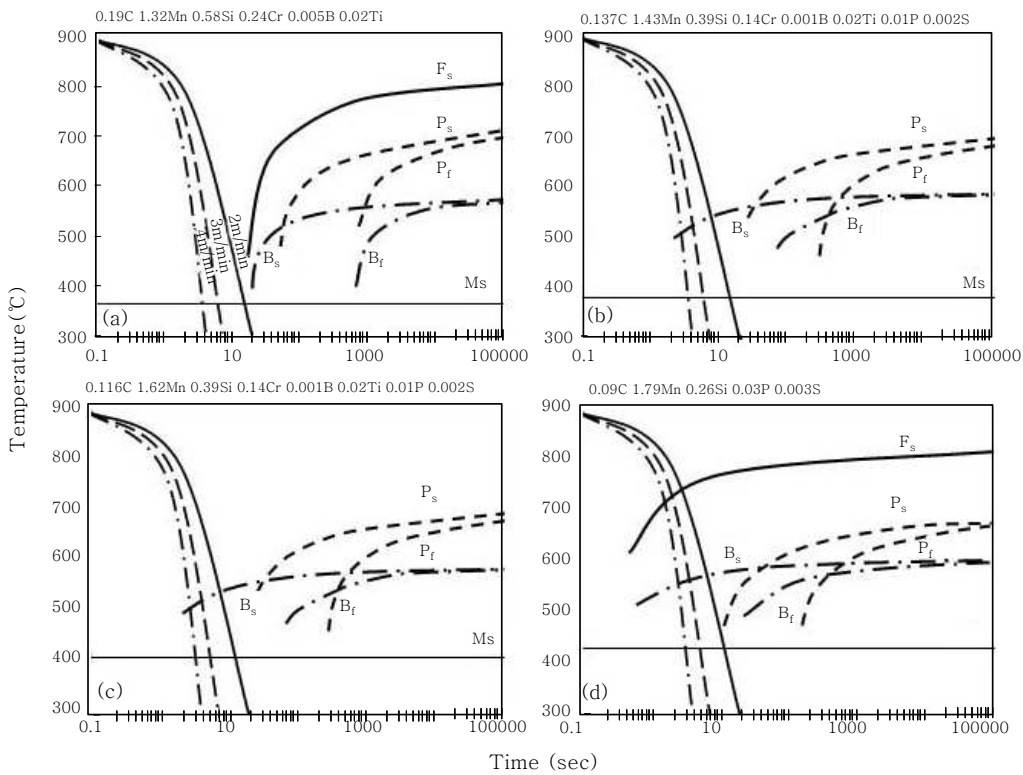


Fig. 15 CCT curves of (a) Boron steel, (b) Fusion zone near Boron steel, (c) Fusion zone near DP steel and (d) DP steel

성분차이는 크지 않아 CCT 곡선이 거의 유사하다. 이 경우에는 베이나이트와 마르텐사이트가 형성되는 것을 알 수 있다. 또한 용접속도가 증가할수록 베이나이트의 생성온도 감소로 인한 베이나이트의 함량이 줄어들기 때문에 용접속도가 증가할수록 용접부 평균 경도값이 약간 상승하는 것으로 판단된다. 이상의 CCT 곡선의 해석으로부터 보론강은 오스테나이트에서 완전 마르텐사이트로 변태하기 때문에 강도가 높고, 용융부는 약간의 베이나이트와 마르텐사이트를 형성하기 때문에, 페라이트, 베이나이트 및 마르텐사이트 3상으로 변태하는 DP강보다 경도가 높은 것으로 생각된다.

4. 결 론

1.2mm두께의 Al-Si coated 보론강판과 1.6mm두께의 Zn coated DP강판을 Laser용접한 경우, 용접 속도에 따른 용접부의 경도분포 경향을 파악하고 그 원인을 미세조직 관찰을 통해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) DISK Laser를 이용하여 출력을 3kW로 고정시키고 용접속도를 276m/min으로 변화시켰을 때 4m/min 이하의 용접속도에서 완전용입이 일어났으며 용접부 내부에 결함은 존재하지 않았다.

2) 용융부의 경도분포는 최대 경도값과 최소 경도값이 차이나는 경도편차가 나타났으며, 보론강쪽 용융부에서 DP강쪽 용융부로 갈수록 평균 경도값이 감소하는 현상이 나타났다. 이러한 현상은 용융부의 경우 경도가 차이나는 마르텐사이트 조직과 베이나이트 조직이 존재하여 경도 측정영역에 따라 국부적으로 다른 경도가 나타나는 것으로 생각된다. 또한 보론강 용융부에서 DP강 용융부로 갈수록 탄소함량이 감소함에 따라 마르텐사이트 패킷크기가 증가하여 경도값이 점차적으로 감소하는 것으로 판단된다.

3) 보론강 열영향부의 경우 A₃온도 이상으로 가열된 최대 경도값이 나타나는 구간에서 용융선까지는 모두 마르텐사이트 조직이 나타났다. 같은 마르텐사이트 조직에서 열영향부 중앙부가 최대 경도값을 나타내는 이유는, A₃직상의 온도로 가열되어 구오스테나이트 결정립 크기가 미세하기 때문으로 판단 된다.

4) DP강 열영향부의 경우 A₃온도 이상으로 가열된 최대 경도값이 나타나는 구간에서 용융선까지는 마르텐사이트 조직과 소량의 입계 페라이트 조직이 나타났다. 같은 마르텐사이트와 입계 페라이트 조직이 나타나

는 구간에서 열영향부 중앙부가 최대 경도값을 나타내는 이유는 보론강 열영향부와 마찬가지로 A₃ 직상의 온도로 가열되어 구오스테나이트 결정립 크기가 미세하기 때문으로 판단된다.

5) 서로 다른 합금성분을 가지는 보론강 열영향부, 용융부, DP강 열영향부의 미세조직이 차이가 나는 원인을 분석하기 위해, CCT 곡선을 해석한 결과, A₃온도 이상으로 가열된 영역에서 보론강 열영향부는 마르텐사이트조직으로, 용융부는 베이나이트와 마르텐사이트 조직으로, DP강은 페라이트, 베이나이트 및 마르텐사이트 3상의 조직으로 변태하는 것으로 나타난다. 이러한 조직적인 차이 때문에 위치에 따라 경도값이 다른 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업 (No. R15-2006-022-02004-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Senuma, T.: Physical Metallurgy of Modern High Strength Steel Sheets, ISIJ Int. 41(2001), 520,
2. R. M. Lyengar, et al : Implication of hot-stamped boron steel components in automotive structure, SAE Paper, No.2008-01-0857
3. Usibor 1500P and Hot-Stamping, AP&T Press Hardening Seminar, Nov 3rd, 2008
4. B.Abdulhay, B.Bourouga : Experimental Study of Heat Transfer in Hot Stamping Process, Int J Mater Form, 2 (2009), 255-257.
5. K. Mori, S. Maki, and Y. Tanaka : Warm and Hot Stamping of Ultra High Tensile Strength Steel Sheets Using Resistance Heating, Ann.CIRP, 54 (2005), 209-212
6. Z.W. Xinga, . Baoa, Y.Y. Yang : Numerical simulation of hot stamping of quenched boron steel, Mater. Sci.Eng A, 499 (2009), 28-31
7. P. Hein : A global approach of the finite element simulation of hot stamping, in: Tagungsband SheMet '05, Erlangen, Germany, 763-769.
8. Yoon, S. H., Lee, J. H. and Lee, K. M. : A study on the fatigue properties of boron steel (AISI 51B20) Korean Society for Precision Engineering, 2001, 802-806 (in Korean)
9. S. G. Shi, S. Westgate : Fiber-Delivered Laser Welding of Ultra-High Strength Steels for Automotive Applications, TWI Report, 865, 2007
10. X.G. Qiu, W.L. Chen, : The study on numerical simulation of the laser tailor welded blanks stamping, Journal of Mater.Proc.Tech., 2007, 128-131

- 11) D.Anand, D.L.Chen. S.D.Bhole : Fatigue behavior of tailor (laser)-welded blanks for automotive applications, *Mater.Sci.Eng.A*, 420(2006), 199-207
- 12) W. Ehling, L. Cretteur, A. Pic : Development of a laser decoating process for fully functional Al-Si coated press hardened steel laser welded blak solutions, *Proceedings of the 5th International WLT-Conf*, 2009, 427-431
- 13) Y. Hovanski,a, M.L. Santellab, G.J. Grant : Friction stir spot welding of hot-stamped boron steel, *Scripta Materialia*, 57 (2007), 873-876
- 14) Johnny K Larsson : Weldability testing of DP1000 Materials Combinations, *LattUHS Report 17*, 2008
- 15) Stanislaw Klimerk : Simulation of Spor Welds and Weld Seams of Press-Hardened Steel (PHS) Assemblies, *LS-DYNA Anwenderforum*, 2008, 21-28,
- 16) H. S. Choi, B. M. Kim, K. H. Park : The Evaluation of Spor Weldability of quenched boron steel and galvannealed steel, *Korean Society of Prec.Eng*, 2009, 117-118 (in Korean)
- 17) George E. Dieter : *Mechanical Metalluirgy* 3rd. Ed, McGraw-Hill, New York, 1986
- 18) Tae-Jun Park, Chung-Yun Kang : Microstructures and Hardness of Al-Si Coated 11%Cr Ferritic Stainless Steel, 409L GTA Welds, *KWJS*, 28-3 (2010), 92-98 (in Korean)
- 19) Behrang Poorganji, Goro Miyamoto : Formation of ultrafine grained ferrite by warm deformation of lath martensite in low-alloy steels with different carbon content, *Scripta Materialia*, 59 (2008), 279-281
- 20) S. Morito, H. Tanaka, : The morphology and crystallography of lath martensite in Fe-C alloys, *Acta Materialia*, 51 (2003), 1789-1799
- 21) S. Morito, H. Yoshida : Effect of block size on the strength of lath martensite in low carbon steels, *Mater.Sci.Engg A*, 2006, 438-440
- 22) BY K. Poorhydarie, D. G. Iveye, : Estimation of Cooling Rate in the Welding of Plates with Intermediate Thickness, *Welding Journal*, 2005, Oct. 149-155