

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.12.1373>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 레이저 열원을 이용한 보론강 및 핫스탬핑강의 용접특성에 관한 연구 (II) - 초고강도 핫스탬핑강의 레이저 용접특성 -

김종도\*† · 최소영\* · 박인덕\*\*

\* 한국해양대학교 기관공학부, \*\* 한국기계연구원 부산레이저기술지원센터

### The Study on Weldability of Boron Steel and Hot-Stamped Steel by Using Laser Heat Source (II)

- Laser Weldability of Hot Stamping Steel with Ultra-High Strength -

Jong Do Kim\*†, So Young Choi\*\* and In Duck Park\*\*\*

\* Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ.

\*\* Busan Laser Application Support Center, Korea Institute of Machinery & Materials

(Received September 29, 2014 ; Revised October 11, 2014 ; Accepted October 13, 2014)

**Key Words:** Hot Stamping Process(핫스탬핑 공정), Laser Welding(레이저 용접), Welding Patameters(용접 매개변수)

**초록:** 핫스탬핑 공정은 고강도의 강을 얻을 수 있는 방법으로써, 일반적으로 보론강을 오스테나이트 온도까지 가열한 후, 성형과 냉각을 통해 제품을 생산한다. 열처리된 보론강은 1500MPa 이상의 강도를 가지기 때문에 경량화와 안전성을 동시에 향상시킬수 있는 특징이 있다. 뿐만아니라 우수한 성형성으로 인한 치수정밀도가 기존 강판대비 90 % 이상 향상되어 우수한 성형품질을 확보할 수 있는 장점도 있다. 따라서 본 연구에서는 디스크 레이저를 사용하여 핫스탬핑 강판의 맞대기 및 겹치기 용접을 실시하여 용접특성을 파악하였다. 실험결과, 맞대기 용접에서는 맞댄면의 갭에 영향으로 인해 겹치기 용접과 비교하여 더 빠른 속도에서도 완전 용입을 얻을 수 있었으며, 모든 용접부에서 열영향부에서 화이트밴드가 관찰되었다.

**Abstract:** Hot-stamping is a method of obtaining ultrahigh-strength steel by simultaneously forming and cooling boron steel in a press die after it has been heated at 900 °C or above. After heat treatment, boron steel has a strength of 1500 MPa or more. This material ensures a high level of quality because it overcomes the spring-back phenomenon, which is a problem associated with high-strength steel materials, and the degree of dimensional precision is improved by 90 or more because of the good formability compared with existing types of steel. In this study, the welding characteristics were identified through the butt and lap welding of hot-stamped steel using a disk laser. Full penetration was obtained at a faster speed with butt welding compared to lap welding, and a white band was observed in every specimen.

## 1. 서 론

최근 지구 환경 및 운전자의 안전에 대한 규제

가 강화되면서, 자동차산업에서는 차체를 경량화 하고 충돌에 대한 안전성을 가질 수 있는 방법을 모색하고 있다. 이에 자동차의 경량화 연구는 크게 3가지 분야에서 진행되고 있다. 첫 번째는 자동차 구조차체를 합리화해 경량화를 추구하는 방법이고, 두 번째는 자동차 재료를 신규재료로 치

† Corresponding Author, [jdkim@kmou.ac.kr](mailto:jdkim@kmou.ac.kr)

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

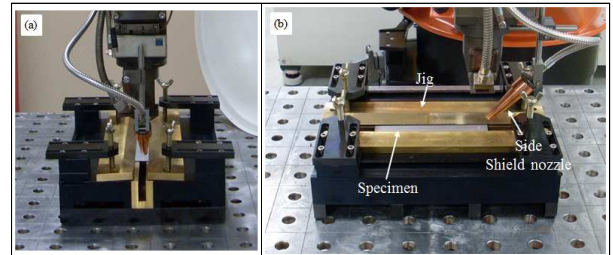
환해 강도는 강화하고 중량은 줄이는 방법이며, 세 번째로는 프로세스상에서 신 공법을 사용해 경량화를 추구하는 방법이다. 따라서 기존의 고강도강관에 비교하여 동등한 수준 또는 그 이상의 강성을 나타내면서 강관의 두께를 줄이기 위해 인장강도 980 MPa 이상의 DP강, TRIP강 등의 초고강도강관이 개발되어 차체부품에 적용되고 있다. 그러나 이러한 초고강도강관은 10% 내외의 낮은 연신율과 높은 항복점으로 인하여 비교적 복잡하거나 깊은 드로잉 깊이를 가진 부품에는 적용이 어려울 뿐만 아니라 하중 제거 시, 탄성회복에 의한 스프링백의 보정이 요구된다. 그렇기 때문에 재료를 로에서 900 °C 이상으로 가열하여 일정시간 유지한 후 다이에서 성형과 동시에 급냉하는 핫스탬핑 공법이 보다 현실적인 대안으로 평가받고 있다. 열처리 후 1500 MPa 이상의 강도를 가지기 때문에 경량화와 안전성을 동시에 향상시킬 수 있으며, 우수한 가공성과 연신율을 가지는 특징이 있다. 뿐만 아니라 우수한 성형성으로 인한 치수정밀도가 기존 강관대비 90% 이상 향상되어 우수한 성형품질을 확보할 수 있는 장점도 있다. 이에 따라 핫스탬핑용 초고강도강의 개발과 함께 용접특성 파악 및 접합 향상을 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다<sup>(1-6)</sup> Rosa Arias 등은 핫스탬핑 강관의 용접시 모재와 용접부에 비해 열영향부의 경도가 현저하게 저하하였으며, 용접속도가 빠를수록 열영향부의 용역이 감소하였다고 보고하였다.<sup>(7)</sup> 또한 Zhengwei GU 등은 용접속도가 빠를수록 입열량이 상대적으로 적어 오스테나이트의 결정크기가 미세해지고, 겹치기 용접시 접합부의 강도가 증가하는 것을 확인하였다.<sup>(8)</sup> 하지만 용접부의 조직적 특성이나 기계적 특성을 분석은 자세하게 기술되지 않았다.

한편, 국내에서도 핫스탬핑용 고강도 강관의 열처리 조건 및 열처리시 기계적 특성에 관해서는 몇몇 연구가 진행되어 왔다. 하지만 핫스탬핑의 도입이 최근해야 이루어짐에 따라 관련 용접 기술 및 용접 후의 용접 현상에 대한 연구 사례는 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 저입열·고속도의 레이저 열원을 사용하여 핫스탬핑 강관에 맞대기 및 겹치기 용접을 실시하여 용접특성을 파악하고, 용접에 의한 핫스탬핑강의 조직적 변화를 파악하고

**Table 1** Chemical composition of specimen

Element(wt%) Materials	C	Mn	Si	Cr	B	P	S	Fe
Boron steel	0.22	2.2	0.4	0.37	0.003	0.03	0.015	Bal.



**Fig. 1** Photos of welding method using disk laser

자 한다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1 실험재료

본 실험에는 Al-Si 코팅된 보론강을 940 °C에서 10분동안 가열한 후 급냉 시켜 얻어진 핫스탬핑강을 사용하였으며, 그 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 열처리 전 보론강은 500 ~ 650 MPa 정도의 강도를 가지지만, 열처리 후에는 1500 MPa의 높은 강도를 나타낸다. 실험에 사용된 판재의 크기는 150 × 50 × 1.2 mm<sup>3</sup>이며, 압연방향은 시험편의 가로방향과 평행하다.

### 2.2 실험방법

실험에는 최대출력 4.0 kW의 CW 디스크 레이저를 용접열원으로 사용하였다. 시험편을 지그에 고정된 후 로봇을 이동시키면서 용접을 실시하였으며, 설치사진을 Fig. 1에 나타내었다. 레이저 광학계의 초점길이는 233 mm이며, 레이저빔은 직경 200 μm 파이버를 통해 전송되었다. 레이저빔 조사시 실드가스는 Ar를 20 l/min의 유량으로 진행방향 후방에서 분사하여 용접부를 실드하였다.

본 연구에서는 핫스탬핑강의 디스크 레이저 용접특성을 조사하기 위해 레이저 출력 및 용접속도를 변화시키면서 맞대기 및 겹치기 용접을 실시하였다. 맞대기 용접시 맞댐면은 밀링처리하여 갭(gap)의 영향을 최소화하였다.

또한 용접부의 기계적 성질을 파악하기 위하여 마이크로 미커스 경도기를 사용하여 용접부의 경

도를 측정하였으며, 광학현미경을 이용하여 미세 조직을 관찰하고, EPMA 분석을 통해 특정 부위에 대한 원소의 분포경향을 분석하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 겹치기 용접시의 용접특성

레이저 출력  $P = 2 \sim 4 \text{ kW}$ , 용접속도  $v = 0.02 \sim 0.13 \text{ m/s}$ 의 범위에서 겹치기 용접을 실시하였으며, 대표적으로 2 kW의 용접부 단면을 Fig. 2에 나타내었다. 용접속도가 증가함에 따라서 입열량이 감소하여 용입깊이가 얕아지고 열영향부의 영역이 감소하였다. Fig. 3에 레이저 출력 및 용접속도 변화에 따른 비드폭, 용입깊이, 접합부 폭의 변화를 나타내었다. 비드폭의 변화(a)를 살펴보면 모든 출력에서 용접속도가 증가함에 따라서 비드폭이 감소하였지만, 출력이 높아질수록 그 변화가 크지 않았다. 이는 용접속도가 빨라지면서 가공재 표면에 레이저빔이 머무르는 시간이 감소하고, 고출력에서의 높은 파워밀도에 의해 빔스폿 부분만을 용융시키기 때문으로 판단된다.

한편 용접조건에 따른 접합부 폭(c)의 변화를 살펴보면, 2 kW의 경우 속도가 증가함에 따라서 일정하게 감소하였지만 3 kW, 4 kW에서는 일정한

경향을 나타내지 않았다. 하지만 모든 출력에서 완전용입이 일어난 조건에서는 거의 유사한 접합부 폭을 확인할 수 있었다. 이로 인해 부분 용입 조건에서의 접합부 폭의 변화가 용접조건에 의해 영향을 받는 것을 알 수 있다.

핫스탬핑강의 레이저 겹치기 용접시 접합이 가능한 조건은 레이저 출력  $P = 2 \text{ kW}$ 에서 용접속도  $v = 0.06 \text{ m/s}$ ,  $P = 3 \text{ kW}$ 에서  $v = 0.10 \text{ m/s}$  그리고  $P = 4 \text{ kW}$ 에서는  $v = 0.13 \text{ m/s}$ 의 조건이었다.

#### 3.2 맞대기 용접시의 용접특성

1.2 mm<sup>1</sup> 핫스탬핑강의 맞대기 용접은 겹치기 용접의 결과를 바탕으로 관통용입이 이루어지도록 레이저 출력  $P = 2 \text{ kW}$ 에서 용접속도  $v = 0.03 \sim 0 \text{ m/s}$ 로 변화시키면서 맞대기 용접을 실시하였다. Fig. 4는 용접속도에 따른 비드외관 및 용접부의 단면형상을 나타낸 것이다. 겹치기 용접의 경우 레이저 출력 2 kW, 용접속도 0.07 ~ 0.08 m/s에서 완전 용입의 용접부를 얻을 수 없었다. 그러나 맞대기 용접의 경우 0.08 m/s까지 관통용입이 가능하였다. 이는 맞대기 용접의 경우 맞댄면 사이의 미세한 갭과 용접 형상인자로 인해 키홀의 형성이 용이하기 때문으로 판단된다.

용접부는 용접속도가 증가할수록 용입깊이 및 열영향부 영역이 감소하였으며, 용융부 내에 기공, 균열과 같은 결함은 발견되지 않았다. 한편, 겹치기 및 맞대기 용접부에서 모두 열영향부 내에 횡방향으로 주위보다 밝은 색의 부분이 관찰되어, 본 연구에서는 참고문헌에 의거하여 이를 화이트밴드라 정의하였다. 안정적인 용접부는 완전 용입을 얻을 수 있는 용접속도와 그보다 느린 속도에서 얻을 수 있었다. 이 결과로부터 레이저 출력 및 용접속도에 따른 생산성을 고려하여 레이저 출력 3 kW, 용접속도 0.11 m/s의 조건을 최적 조건으로 설정하였다.

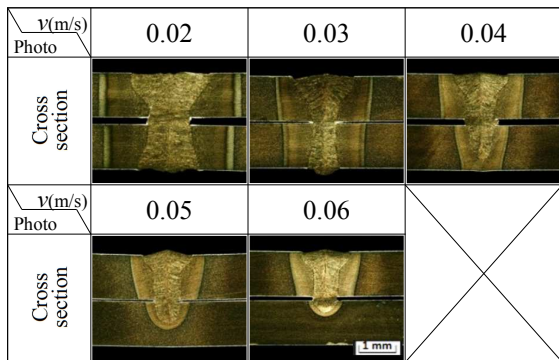


Fig. 2 Cross section of weld with welding speed in hot-stamped steel lap welding

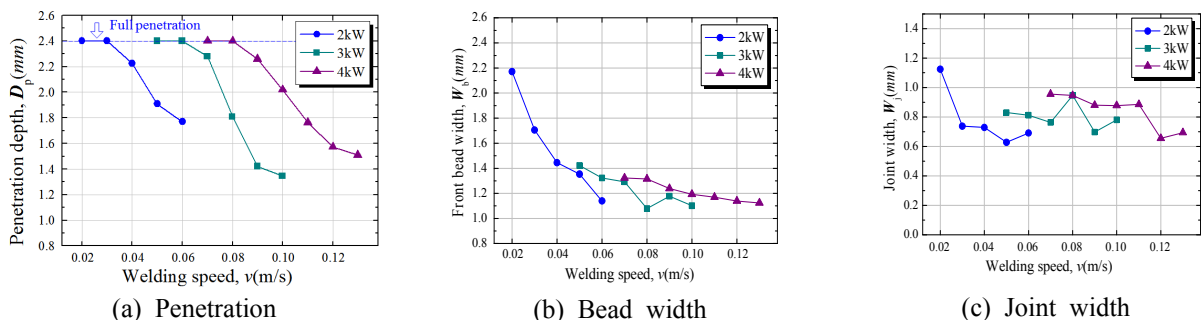


Fig. 3 Variation of penetration, bead and joint width in hot-stamped steel lap welding

P v	2 kW			
	0.03 m/s	0.04 m/s	0.05 m/s	0.06 m/s
Photo				
Cross section				
P v	2 kW			3 kW
	0.07 m/s	0.08 m/s	0.09 m/s	0.11 m/s
Photo				
Cross section				

Fig. 4 Cross section of weld with welding speed in hot-stamped steel butt welding

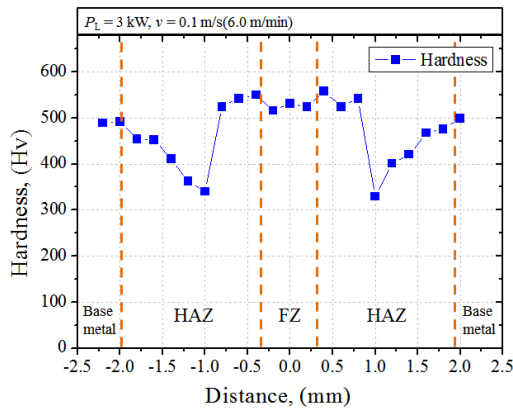


Fig. 5 Hardness distribution of butt welded hot-stamped steel

### 3.3 용접부의 기계적 성질

#### 3.3.1 용접부의 경도분포

경도는 맞대기 시험편에 대하여 하중 980.7 mN에서 유지시간 10초로 중앙위치에서 가로방향으로 200 μm간격으로 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 모재의 경도는 핫스탬핑 공정을 통해 가열되고 급냉되어 450 ~ 500 Hv를 나타내며, 용접부의 경도는 500 ~ 580 Hv로 모재와 비슷하거나 높았다. 또한 열영향부는 용접열에 의한 템퍼링 현상으로 인해 경도가 급격하게 감소하는 부분이 존재하였으며, 경도는 가장 낮은 정도값을 나타내는 부분에서 모재로 갈수록 점차 상승한 반면, 용접부쪽으로는 급격하게 용접부 경도 범위까지 증가하였다.

접기 용접한 시험편의 경도분포에서도 전체적인 경도분포는 맞대기 용접시의 경도분포와 유사한 경향을 나타냈고, 상·하부의 경도 차이는 거의 없었다.

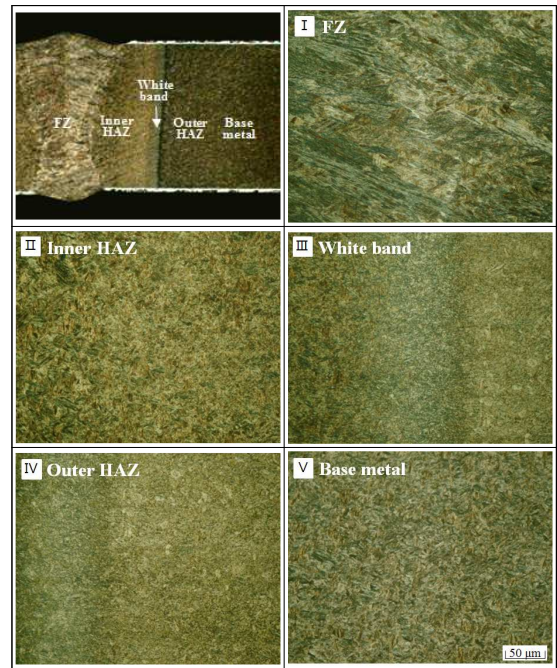


Fig. 6 Microstructure observed in weld of hot-stamped steel

#### 3.3.2 용접부의 미세조직

Fig. 6에 용접부를 각 영역별로 광학현미경과 을 이용하여 관찰한 미세조직을 나타내었다. 용융부(a)는 레이저 용접에 의해 시험편이 용융된 후에 급냉으로 인해 기지상의 마르텐사이트 조직이 관찰되었다. 열영향부는 화이트밴드를 기준으로 용융부쪽을 Inner HAZ 그리고 모재쪽을 Outer HAZ라 정의하였다. Inner HAZ(b)는 용접열에 의해 오스테나이트화 온도까지 상승한 후 빠른 냉각에 의해서 마르텐사이트 조직을 형성하며, 이 마르텐사이트 조직은 용접열에 의한 재결정이 발생하는 것으로 용융부에 비하여 조밀한 조직을 나타낸다. Outer HAZ(d)는 용접열에 의해 A<sub>1</sub>점 이하의 온도로 가열되어 모재가 템퍼링된 조직이 관찰되며, 경도분포에서 다른 조직에 비하여 경도가 낮음을 확인한바 있다.

한편, 화이트밴드 조직(c)을 보면 열영향부 조직들과 다른 형상이 관찰되어, 그 원인을 파악하기 위해 모재 성분을 기준으로 EPMA 분석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림으로부터 C가 화이트밴드와 화이트밴드와 outer HAZ사이의 경계부분에서 많이 밀집되어 있는 것을 확인하였다. 이는 마르텐사이트에 고용되어 있는 탄소가 용접열에 의해 빠져나와 시멘타이트

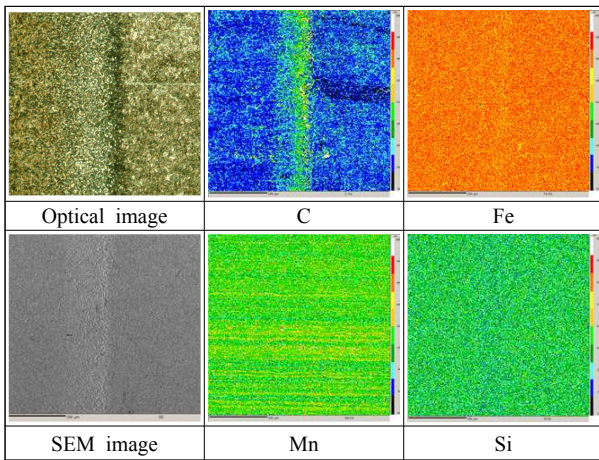


Fig. 7 Results of EPMA on white band

로 분해되기 때문이다. 다른 원소들은 위치에 따른 성분의 차이가 크지 않았다.

#### 4. 결론

핫스탬핑강의 디스크 레이저 용접을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 겹치기 용접시 접합이 가능한 조건은 레이저 출력  $P=2\text{ kW}$ 에서  $v=0.06\text{ m/s}$ ,  $P=3\text{ kW}$ 에서  $v=0.10\text{ m/s}$  그리고  $P=4\text{ kW}$ 에서  $v=0.13\text{ m/s}$ 의 조건이다.

(2) 맞대기 용접시 맞댄면 사이의 미세한 겹과 용접 형상인자로 인해 기홀의 형성이 용의하여, 겹치기 용접과 비교하여 더 빠른 속도에서 완전용입을 얻을 수 있었다.

(3) 경도를 측정된 결과, 용접부의 경도는 모재보다 약간 높았으며, 열영향부에서 용접열에 의해 모재가 템퍼링되어 급격하게 경도가 감소하는 부분이 존재하였다.

(4) 용접부의 미세조직을 관찰한 결과, 용융부와 inner HAZ에는 마르텐사이트 조직, outer HAZ에는 템퍼링된 마르텐사이트 조직이 관찰되었다. 화이트 밴드 영역에서는 EPMA 분석을 통해 탄소가 밀집되어 있음을 확인하였다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Choi, H. S., Kim, B. M., Park, G. H. and Lim, W. S., 2010, "Optimization of Resistance Spot Weld Condition for Single Lap Joint of Hot Stamped 22MnB5 by Taking Heating Temperature and Heating Time into Consideration," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 10, pp. 1367~1375.
- (2) Karbasian, H. and Tekkaya, A. E., 2010, "A Review on Hot Stamping," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 15, pp. 2103~2118.
- (3) Kim, C., Kang, M. J. and Park, Y. D., 2011, "Laser Welding of Al-Si Coated Hot Stamping Steel," *Procedia Engineering*, Vol. 10, pp. 2226~2231.
- (4) Kim, N. H., Kwon, K. Y. and Kang, C. G., 2009, "The Study of Mechanical Property and Micro-Structural Evolution for 22MnB5 During Hot Stamping According to Cooling Condition," *Proceedings KSME Spring Annual Meeting 2009*, pp. 78~83.
- (5) Jee, S. H., Han, M. S., Ahn, K. W., Lee, J. S. and Jeon, E. C., 2011, "A Study on the Optimum Condition for the Welding Spatter Occuring Reduction for Boron Steel Using by Hot-Stamping," *Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, pp. 33~34
- (6) Kim, Y., Park, K. Y. and Lee, K. D., 2010, "Evaluation of Laser Welding Characteristics of 1.5GPa Grade Ultra High Strength Steel for Automotive Application," *Journal of KWJS*, Vol. 28, No. 6, pp. 4~9.
- (7) Arias, R., Prada, A., Vaamonde, E., Vandewynckele, A., Gutierrez, D., Lara, A. and Garcia, M., 2010, "Laser Welding Applied to Advanced High Strength Steels for Automotive Applications," *ICALEO*, 1002, pp. 371~379
- (8) Gu, Z., Yu, S., Han, L., Meng J., Xu, H. and Zhang, Z., 2011, "Microstructures and Properties of Ultra-high Strength Steel by Laser Welding," *ISIJ International*, Vol. 51, No. 7, pp. 1126~1131