

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.12.1367>

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

레이저 열원을 이용한 보론강 및 핫스탬핑강의 용접특성에 관한 연구 (I)

- 핫스탬핑 공정에 사용되는 Al-Si 코팅된 보론강의 레이저 용접특성 -

김종도* · 최소영* · 이수진** · 서 정***

* 한국해양대학교 기관공학부, ** 오사카대학교 접합 연구소,

*** 한국기계연구원 부산레이저기술지원센터

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

- Laser Weldability of Al-Si Coated Boron Steel Used for Hot Stamping Process -

Jong Do Kim^{*†}, So Young Choi^{*}, Su Jin Lee^{**} and Jeong Suh^{***}

^{*} Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ.

^{**} Joining and Welding Research Institute, Osaka Univ.

^{***} Busan Laser Application Support Center, Korea Institute of Machinery & Materials

(Received September 29, 2014 ; Revised November 1, 2014 ; Accepted November 3, 2014)

Key Words: Hot Stamping(핫스탬핑), Al-Si Coated Boron Steel(Al-Si 코팅된 보론강), Laser Welding Parameter(레이저 용접 매개변수)

초록: 전세계적으로 환경문제에 대한 위기의식이 고조됨에 따라 운송산업 분야에서는 차체경량화를 통해 이와 같은 문제를 해결하고자 하였다. 차체경량화의 방법으로써 보론강을 900 °C 이상의 온도에서 가열한 후, 성형과 동시에 냉각하여 1500 MPa 이상의 강도를 얻을 수 있는 핫스탬핑 공정이 제시되고 있다. 하지만 핫스탬핑 공정에 일반적으로 사용되고 있는 보론강의 레이저 용접특성에 대한 연구결과는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 보론강의 레이저 용접특성을 조사하기 위해 레이저 매개변수에 대하여 기초적 연구를 실시하였다. 실험결과, 실드가스에 대한 매개변수의 최적의 조건은 $Q = 20 \text{ l/min}$, $a = 40^\circ$, $d = 20 \text{ mm}$, $l = 0 \text{ mm}$ 이며, 맞대기 용접부의 경도는 용접부에서 마르텐사이트 형성으로 인해 급격하게 상승하였다.

Abstract: As the awareness of the environmental crisis has recently increased around the world, numerous studies in the transport industry have been conducted to solve this problem through lightweight car bodies. The hot-stamping process has been presented as solution to achieve a light weight. Hot-stamping is a method that is used to obtain ultra-high strength steel (1,500 MPa or greater) by simultaneously forming and cooling boron steel in a press die after heating it to a temperature of 900 °C or above. This study involved a fundamental examination of laser parameters to investigate the laser weldability of boron steel. As a result, the following optimum parameters for the shielding gas were found: $Q = 20 \text{ l/min}$, $a = 40^\circ$, $d = 20\text{mm}$, and $l = 0 \text{ mm}$. The hardness of butt weldment increased sharply as a result of martensite formation at the fusion zone.

1. 서론

[†] Corresponding Author, jdkim@kmou.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

최근 전세계적으로 환경문제에 대한 위기의식이 고조됨에 따라 운송산업 분야에서도 경량재료

를 사용하여 완제품의 무게를 경감하거나 공정을 개발하여 연비를 향상시키고, 환경문제를 해결하고자 하였다. 경량재료로 마그네슘 및 알루미늄이 있지만 고가이기 때문에 경쟁력의 약화를 가져올 수 있고, 고강도 철강 재료를 사용하여 재료의 두께를 줄이는 경량방법은 스프링백 현상 및 고강도로 인한 가공 또는 성형이 어렵다는 단점을 극복해야 한다.⁽¹⁾ 이러한 단점을 보완한 보론강을 900 °C 이상의 온도에서 가열한 후, 성형과 동시에 냉각하여 1500 MPa 이상의 강도를 얻을 수 있는 핫스탬핑 공법과 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있다.^(2~5) 핫스탬핑강은 고강도를 가지면서 우수한 가공성, 연신율 그리고 성형성을 가지는 특징이 있다.^(6~8) 하지만 핫스탬핑 공정에 일반적으로 사용되고 있는 보론강에 대하여 레이저 용접을 진행한 연구는 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 핫스탬핑강의 레이저 용접성을 파악하기 위해 보론강에 대해 디스크 레이저를 이용하여 용접특성을 조사하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료

핫스탬핑 공정에는 보론강이 일반적으로 사용된다. 보론은 0.003% 이하의 미량만으로도 담금질 임계 냉각속도를 낮추고, 탄소와 함께 Fe₃B와 같은 경질의 침입형 고용체를 형성하는 특징이 있다. 따라서 본 실험에서는 Al-Si 도금된 보론강을 사용하여 실험을 진행하였으며, 그 화학조성을 Table 1에 나타낸다. Al-Si 코팅은 핫스탬핑 공정시에 표면의 산화 및 탈탄 현상을 방지하기 위해서 실시되었다.⁽⁹⁾ 시험편의 두께는 1.2 mm이며, 150 × 50 mm의 크기로 재단하여 실험에 적용하였다.

2.2 실험방법

실험에서 사용된 레이저 용접장치는 최대출력 4.0 kW의 CW (continuous wave) 디스크 레이저이다. 레이저 파장은 1,030 nm이며, 빔품질은 8 mm · mrad으로 우수하다. 또한 광학계의 초점길이는 223 mm이고, 반사광에 의한 광학계의 손상을 막기 위하여 용접진행방향으로 1°의 전진각을 주었다. 용접은 로봇을 이동하여 실시하였으며, 용접부의 실드를 위해 실드가스 노즐을 레이저 조사 지점의 후방에 설치하였다. 이러한 실험 모식도

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.

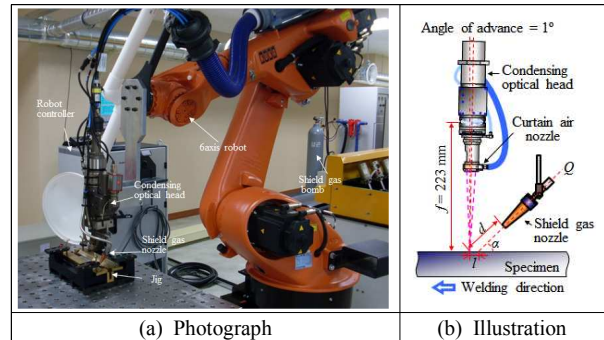


Fig. 1 Setup of experimental equipment

및 장치를 Fig. 1에 나타낸다.

본 연구에서는 보론강의 디스크 레이저 용접특성을 조사하기 위해 먼저 비초점거리를 변화시키면서 비드용접을 실시하였다. 레이저 용접에서 초점의 위치에 따른 에너지 밀도 변화는 키홀의 형상에 큰 영향을 미치며, 비초점거리는 용입깊이를 결정하는 중요한 요소이다. 또한 레이저 용접시 발생하는 플라즈마의 제어 및 용접부의 산화 방지는 용접품질에 큰 영향을 준다고 판단하여 실드가스 노즐 각도와 거리 및 유량을 변수로 하여 그 특성을 비교하였다. 비교한 조건을 기준으로 레이저 출력 및 용접속도를 변화시켜가며 맞대기 용접을 실시하고 그 기계적 특성을 조사하였다.

2. 실험 결과 및 고찰

3.1 비초점거리에 따른 용입특성

디스크 레이저의 광학계 특성을 파악하기 위해 레이저 출력 $P=3$ kW, 용접속도 $v=0.13$ (7.8 m/min)에서 비초점거리(f_d)를 -6 ~ +6 mm로 변화시키면서 비드용접을 실시하였다. Fig. 2는 비초점 거리에 따른 용접부의 비드 및 단면사진을, 그리고 Fig. 3은 그에 따른 용입깊이 및 비드폭의 변화를 나타낸다. 용입 깊이는 $f_d=-1$ mm에서 가장 깊게 얻어졌고, $f_d=-2 \sim +2$ mm의 범위에서 안정적인 비드를 얻을 수 있었다. 그 외의 범위에서는 언더컷이 발생하면서 불안정한 특성을 보였다.

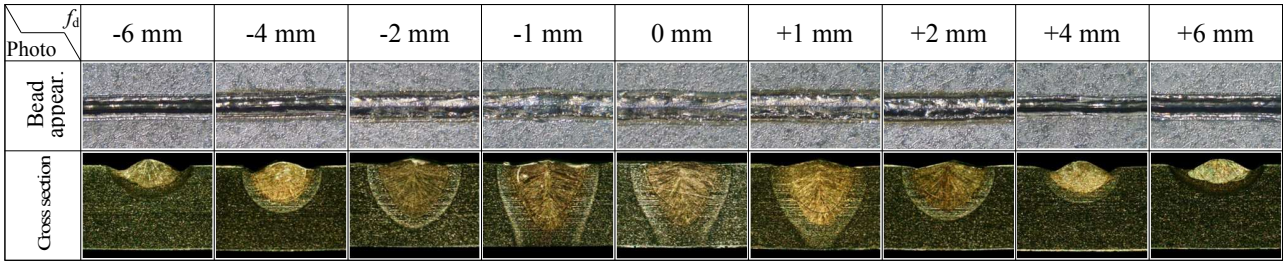


Fig. 2 Bead appearance and cross-section of weld with various defocused distance in Al-Si coated boron steel by disk laser

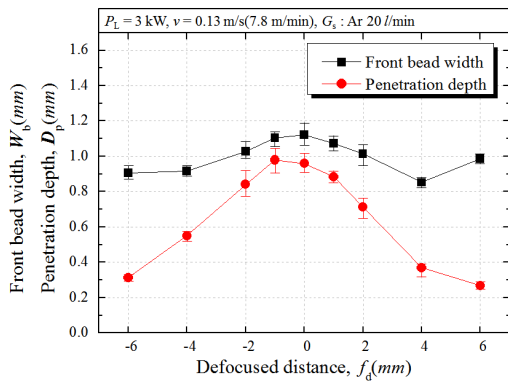


Fig. 3 Variation of penetration with defocused distance in Al-Si coated boron steel by disk laser

비드폭은 초점에서 비초점으로 갈수록 큰 변화가 없었는데, 일반적인 강재에서는 초점에서 비초점으로 갈수록 일반적으로 비드폭이 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 보론강의 용접이 일반적 강재보다 높기 때문에 비초점에서 레이저가 조사된 부분의 시편온도가 용점까지 도달하지 못하고 중앙 부분이 녹았기 때문으로 생각된다. 따라서 보론강의 디스크 용접시 비초점 거리는 $f_d = -1$ mm로 설정하여 실험을 진행하였다.

3.2 실드가스 변수에 따른 용입특성

3.2.1 실드가스 노즐각도의 영향

실드가스 노즐의 각도는 재료 내부에 형성되는 키홀과 용액의 거동에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 레이저 출력 $P = 3$ kW, 용접속도 $v = 0.13$ m/s에서 비초점거리를 $f_d = -1$ mm로 설정하고, 실드가스 종류를 Ar가스로 하여 실드가스 노즐각도 (a)를 $20 \sim 40^\circ$ 의 범위에서 5° 간격으로 변화시키면서 그 영향을 조사하였다. 장비의 특성상 상기의 범위를 벗어난 각도에서는 측정이 불가능하여

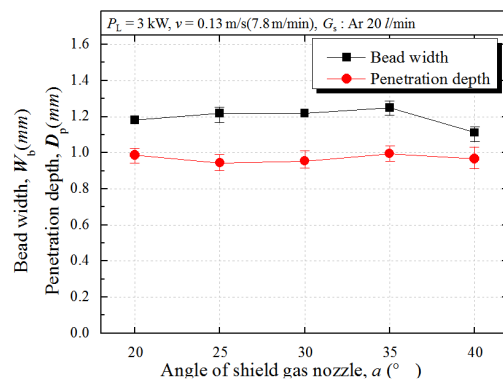


Fig. 4 Variation of penetration with angle of shield gas nozzle

한정적인 범위 내에서 실험을 진행하였다. 그 결과를 Fig. 4에 나타낸다. 그림에서와 같이 각도에 따른 영향은 매우 미미하며, 거의 같은 비드폭 및 용입깊이를 나타내고 있다. 이는 실험재료가 박판으로 노즐 각도가 용융부의 내부에 형성되는 키홀 거동에 미치는 영향이 적기 때문으로 판단된다. 실험된 모든 각도에 대해서 기공이나 언더컷과 같은 결함이 발견되지 않는 안정적인 비드와 용접부를 얻을 수 있었다. 하지만 너무 낮은 각도에서는 실드가스가 용융금속의 유동에 직접적으로 영향을 끼칠 것으로 판단되어 비드폭이 좁고 용입깊이가 깊은 노즐 각도 $a = 40^\circ$ 로 선정하였다.

3.2.2 실드가스 노즐 거리의 영향

실드가스 노즐 거리의 영향은 노즐 끝단과 레이저 조사점과의 거리(d)와 레이저 조사점과 실드가스 분사지점과의 거리(l)로 나누어 실험을 진행하였으며, 이때는 용입특성을 Fig. 5 및 Fig. 6에 각각 나타낸다. 레이저 조사점과 노즐 끝단과의 거리는 $10 \sim 30$ mm의 범위에서 5 mm 간격으로 그 변화를 살펴보았다. 10 mm 이하에서는 용접시 레

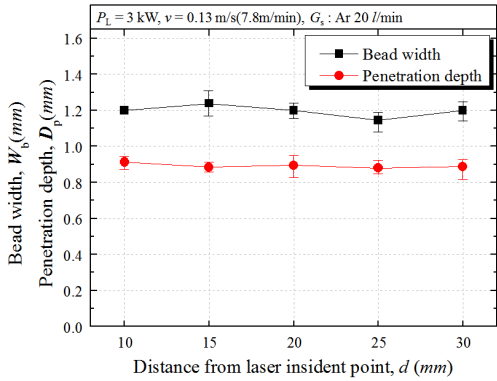


Fig. 5 Variation of penetration with distance of shield gas nozzle-lip and laser incident point

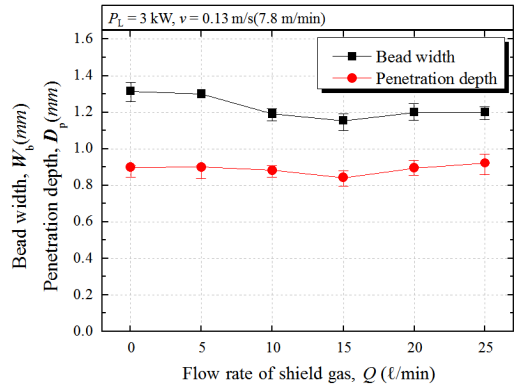


Fig. 7 Variation of penetration with flow rate of shield gas

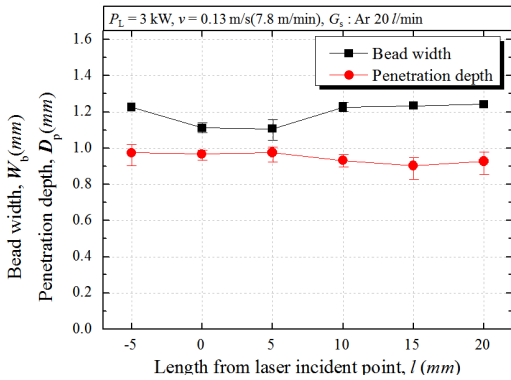


Fig. 6 Variation of penetration with length of shielding zone and laser incident point

이저가 노즐에 조사되어 노즐이 손상될 수 있고, 30 mm 이상에서는 용접부를 실드하기에 적합하지 않다고 판단되어 실험에서 제외되었다. $d = 15$ mm 이하의 조건에서 상대적으로 비드의 형상이 불균일한 특성이 나타냈다. 이는 노즐 거리가 너무 가까워 실드가스가 표면 가까이에 용융 금속의 불안정한 유동을 야기시키기 때문으로 판단된다. 또한 $d = 20$ mm 이상의 조건에서는 비드 표면이 안정하게 형성되었지만 노즐 거리가 너무 멀어지면 실드가스 차폐효과가 감소하여 불안정한 비드가 형성될 우려가 있다. 따라서 양호한 비드 표면을 얻을 수 있는 $d = 20$ mm를 최적의 거리로 선정했다.

또한, 레이저 조사점과 실드가스 분사지점과의 거리는 레이저가 조사점을 향하는 경우를 $l = 0$ mm로, +방향이 조사점 후방에 실드가스가 분사하게 되는 것으로 설정하여 $-5 \sim 20$ mm 범위에서 실험을 진행하였다. -방향의 범위는 레이저가 실드가스 노즐을 손상시키지 않는 거리이며, 20 mm 보다 먼 거리에서는 용접부를 실드하기에 적합하

지 않다고 판단하여 실험조건에서 제외하였다. 실험결과 $l = 0, 5$ mm 외의 조건에서는 비드 형상이 상대적으로 불안정한 험핑 현상을 보이고, $l = -5$ mm의 조건에서는 용접 중 용접 폼(fume)이 다량 발생하는 것을 관찰하였다. 이로부터 $l = 0 \sim 5$ mm 사이의 거리가 양호하다 생각되어 $l = 0$ mm로 결정하였다.

3.2.3 실드가스 유량의 영향

실드가스 유량의 변화에 따른 용입특성을 Fig. 7에 나타낸다. 실험은 실드가스의 유량을 $0 \sim 25$ l/min로 변화시켜가며 진행하였다. 실드가스 유량이 $Q = 10$ l/min 이하의 조건에서는 비드형상이 불안정하게 형성되었다. 이는 유량이 너무 적어 실드가스에 의한 차폐효과가 적어 용융부가 산화 와 접촉하여 산화되면서 다수의 스파터가 발생하여 비드가 형성되이기 때문이다. 비드의 형상은 실드가스의 유량이 증가하면서 점차 안정되었으며, $Q = 20$ l/min 이상에서는 균일한 비드폭이 얻어지고 용입깊이가 깊어졌다. 따라서 비드형상, 용입깊이 및 실드가스의 소모를 고려하여 최적의 실드가스 유량을 $Q = 20$ l/min으로 판단하였다.

3.3 맞대기 용접시의 용입특성

실드가스 변수에 대한 용접 결과를 바탕으로 두께 1.2 mm의 보론강에 대하여 레이저 출력 $P = 2$ kW \sim 4 kW, 용접속도 $v = 0.01$ m/s의 범위에서 맞대기 용접을 실시하였다. 레이저 출력 및 용접속도에 따른 용입특성을 살펴본 결과, 각 레이저 출력에 대하여 용접속도가 증가할수록 시험편에 가해지는 입열량이 감소하여 단면형상이 네일헤드 모양으로 바뀌고, 열영향부의 폭 및 용입깊이

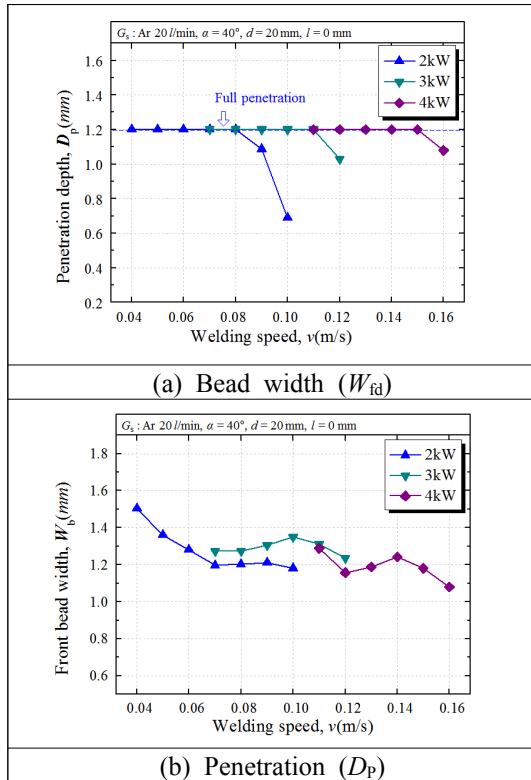


Fig. 8 Variation of penetration, bead width with laser power and welding speed in butt welding of boron steel

가 감소하였다. 모든 용접조건에서 균열과 기공과 같은 결함은 발견되지 않았다.

Fig. 8은 용접부의 비드폭 및 용입깊이의 변화를 나타낸다. 비드폭의 변화를 살펴보면 레이저 출력이 일정할 때 용접속도가 증가할수록 비드폭은 점차적으로 감소하는 경향이 관찰되었다. 용입깊이도 용접속도가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다. 각 출력별 완전용입의 임계조건은 $P = 2$ kW에서 $v = 0.08$ m/s, $P = 3$ kW에서 $v = 0.11$ m/s 그리고 $P = 4$ kW에서 $v = 0.15$ m/s의 조건이며, 임계조건 및 임계조건보다 약간 느린 속도의 조건에서 전면과 이면 비드 모두 안정적인 비드 형상을 얻을 수 있었다.

3.4 용접부의 기계적 성질

Fig. 9 및 Fig. 10은 레이저 출력 $P = 3$ kW에서 $v = 0.1$ m/s의 조건에서 용접한 시험편의 경도분포 및 미세조직을 나타낸다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이, 모재의 경도는 200 ~ 250 Hv, 열영향부의 경도는 250 ~ 530 Hv, 용접부의 경도는 490 ~ 530 Hv를 나타내고 있다. 모재와 가까운 열영향부 부

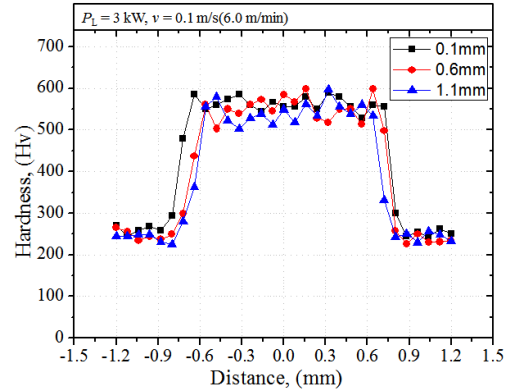


Fig. 9 Hardness distribution of butt welded boron steel

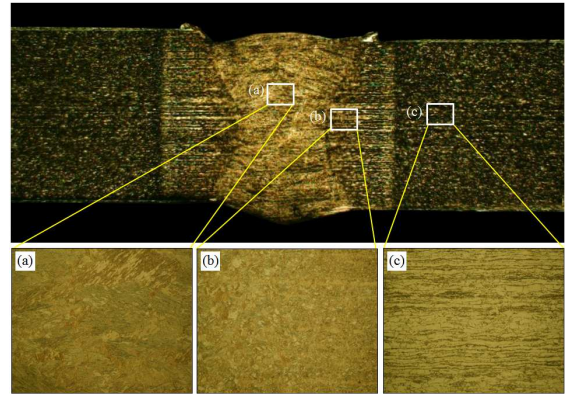


Fig. 10 Cross-section and microstructure observed by OM in weld of boron steel

근에서 용접부 방향으로 급격하게 경도가 상승하였고, 상승한 열영향부의 경도값은 용접부와 비슷하였다. 이는 용접부와 가까운 열영향부의 온도가 용접열에 의해 오스테나이트화 온도까지 상승한 후 냉각에 의해서 마르텐 사이트 조직을 형성하였기 때문이다.

Fig. 10에서 모재, 열영향부, 용접부의 미세조직을 살펴보면, 용접부는 레이저 용접에 의해 시험편이 용융된 후에 급냉으로 인해 기지상의 마르텐 사이트 조직이 관찰되었다. 열영향부는 경도 분포에서 언급하였듯이 용접열에 의해 페라이트가 오스테나이트로 변화한 후 빠른 냉각에 의해서 마르텐사이트 조직과 베이나이트 조직을 형성하였다. 모재는 페라이트 조직이 관찰되어 경도 분포에서 확인한바와 같이 용융부나 열영향부보다 경도가 낮다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

Al-Si 도금된 보론강의 디스크 레이저 용접을

실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 비초점거리에 따른 용접 결과, 보론강이 다른 철강소재와 비교하여 비드폭의 변화가 불규칙한 것은 보론강의 용점이 높기 때문이다.

(2) 디스크 레이저 용접시 최적의 실드가스 조건을 설정하기 위한 실험을 실시한 결과, Ar 분위기에서 유량 $Q=20\text{ l/min}$, 분사노즐의 각도 $\alpha=40^\circ$, 실드가스 노즐 끝단과 레이저 조사점과의 거리 $d=20\text{ mm}$ 그리고 레이저 조사점과 실드가스 분사지점과의 거리 $l=0\text{ mm}$ 에서 가장 건전한 결과를 얻을 수 있었다.

(3) 맞대기 용접시 최적의 조건은 완전용입의 임계조건인 $P=2\text{ kW}$ 에서 $v=0.08\text{ m/s}$, $P=3\text{ kW}$ 에서 $v=0.11\text{ m/s}$ 그리고 $P=4\text{ kW}$ 에서 $v=0.15\text{ m/s}$ 의 조건 및 임계조건보다 약간 느린 속도의 조건이었다.

(4) 용접부 특성을 조사한 결과, 용접부의 경도 값은 모재와 가까운 열영향부 부근에서 용접열에 의한 마르텐 사이트 형성으로 인해 급격하게 상승하여 500~600 Hv의 값을 나타내었다.

참고문헌

(References)

- (1) Cao, W. Y., Kong, J. P., Ahn, Y. N., Kim, C., H. and Kang, C. Y., 2013, "Effect of Coating Thickness on Microstructures and Tensile Properties in Yb:YAG Disk Laser Welds of Al-Si Coated Boron Steel," *Journal of KWJS*, Vol. 31, No. 3, pp. 66~75.
- (2) Je, H. I., Son, C. S. and Nam, K. W., 2011, "A Study on Spot-Welding Characteristics and Material Analysis of Boron Steel for Hot-Stamping Under Different Heat-Treatment Conditions," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 4, pp. 383~391.
- (3) Je, H. I., Lee, M. Y., Kim, T. I., Ahn, S. H. and Nam, K. W., 2009, "Basic Evaluation of Boron Steels for Hot Stamping," *Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 231~235.
- (4) Hwang, S. H. and Nam, K. W., 2012, "A Study on the Properties of Laser-Welded Boron Steel for Hot Stamping According to the Heat-Treatment Conditions," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 3, pp. 319~324.
- (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, E. Y., Kim, J. H. and Kim, Y., 2012, "Mechanical Property of Laser Welded Joint of Al-Si Coated Boron Steel Sheet," *Journal of KSPE*, Vol. 2012, No. 5, pp. 1357~1357.
- (7) Rosa Arias, Alvaro Prada, Eva Vaamonde, Ambroise Vandewynckele, David Gutierrez, Antoni Lara and Michel Garcia, 2010, "Laser Welding Applied to Advanced High Strength Steels for Automotive Applications," *ICALEO*, 1002, pp. 371~379.
- (8) 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.
- (9) Oh, M. H., Kong, J. P., Kwon, M. S., and Kang, C. Y., 2013, "Effect of Hot-stamping on Microstructures and Tensile Properties of Al-Si Coated Boron Steel Welds with Laser Source," *Journal of KWJS*, Vol. 31, No. 6, pp. 96~106.