

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

- 보론강 및 핫스탬핑강의 레이저 용접특성 비교 -

최소영* · 김종도**† · 김종수***

* 한국해양대학교 대학원 기관공학과, ** 한국해양대학교 기관공학부, *** 한국기계연구원 부산자동차부품기술센터

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

- Comparison on Laser Weldability of Boron Steel and Hot-Stamped Steel -

So Young Choi*, Jong Do Kim**† and Jong Su Kim***

* Dept of Marine Engineering, Graduate School, Korea Maritime and Ocean Univ.,

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

*** Automotive Parts Technology Support Center, Korea Institute of Machinery & Materials

(Received October 9, 2014 ; Revised November 2, 2014 ; Accepted November 3, 2014)

Key Words: Boron Steel(보론강), Hot-Stamped Steel(핫스탬핑강), Laser Welding(레이저 용접)

초록: 본 연구의 목적은 열처리 전·후의 보론강 레이저 용접성을 비교하는 것이다. 일반적으로 보론강이 핫스탬핑 공정에 사용되고 있으며, 핫스탬핑 공정은 강판을 오스테나이트 온도까지 가열한 후 성형과 동시에 냉각하는 방법이다. 열처리후 보론강은 1500 MPa 이상의 고강도를 가진다. 따라서 본 연구에서는 보론강 및 핫스탬핑강의 레이저 용접성을 조사한 후 비교하였다. CW 디스크 레이저를 이용하여 레이저 출력 및 용접속도를 변화시켜가며 맞대기 및 겹치기 용접을 실시하였다. 맞대기 용접 결과, 핫스탬핑강에서 완전 용입을 얻을 수 있는 임계냉각속도가 보론강보다 낮았으며, 겹치기 용접결과 완전 관통이 일어난 용접 조건에서는 접합부 폭은 용접속도와 관계없이 거의 유사하였다.

Abstract: This study was conducted to compare the laser weldability of boron steel and hot-stamped steel. In general, boron steel is used in the hot-stamping process. Hot-stamping is a method for simultaneously forming and cooling boron steel in a press die after heating it to the austenitizing temperature. Hot-stamped steel has a strength of 1500 MPa or more. Thus, in this study, the laser weldability of boron steel and that of hot-stamped steel were investigated and compared. A continuous wave disk laser was used to produce butt and lap joints. In the butt welding, the critical cooling speed at which full penetration was obtained in the hot-stamped steel was lower than that of boron steel. In the lap welding, the joint widths were similar regardless of the welding speed when full penetration was obtained.

1. 서론

핫스탬핑 공정은 보론강을 900℃ 이상으로 가열한 후 성형과 동시에 급냉하여 고강도 제품을 얻는 방법으로써,^(1,2) 최근 화석연료 사용으로 인한 환경문제 해결 및 연비향상을 위한 차체 경량

화 방법으로 개발되어 연구가 활발히 진행되고 있다.^(3,4) 핫스탬핑 공법으로 성형된 고강도 부품은 1,500 MPa 이상의 강도를 나타내면서도 우수한 가공성과 연신율로 인해 미래 친환경 자동차의 연비와 안정성 향상을 위한 차세대 자동차용 강재로 부각되고 있다. 뿐만 아니라 우수한 성형성으로 인한 치수정밀도가 기존 강판대비 90% 이상 향상되어 우수한 성형품질을 확보할 수 있

† Corresponding Author, jdkim@kmou.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

는 장점도 있다.⁽⁵⁾ 핫스탬핑 공정에는 Al-Si 코팅된 보론강이 일반적으로 사용되고 있다. 보론강을 열처리 후 용접하는 경우 모재 근처의 열영향부에서 연화부가 발생하여 강도가 저하하고,⁽⁶⁾ Al-Si 코팅층이 유입되어 Fe-Al 금속간화합물을 형성하여 접합강도를 저하시킨다고 알려져 있다.^(7,8) 이는 앞서 보론강 및 핫스탬핑강의 레이저 용접특성에 대한 연구결과인 1보와 2보의 논문에서에서 각각 연구된바 있다. 또한 Zhenhwei Gu 등은 핫스탬핑강의 레이저 용접시 미세조직 및 기계적 성질에 대하여 조사하였으며,⁽⁹⁾ 남기우 등은 레이저 용접한 보론강의 기계적 특성을 연구하였다.⁽¹⁰⁾ 이와 같이 보론강과 핫스탬핑강에 대한 연구는 각 재료별로 일부 진행되고 있으며, 열처리에 대한 두 소재의 용접성을 같이 비교 및 정리한 연구는 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 열처리 전·후의 보론강의 도금층을 분석하고, 레이저 용접성의 차이를 비교 및 검토하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료

실험에 사용한 재료는 두께 1.2 mm의 핫스탬핑 전·후의 Al-Si 코팅된 보론강이다. 본 연구에서는 핫스탬핑 공정후의 보론강을 핫스탬핑강이라 정의 하였다. 두 소재는 모두 탄소가 0.22 wt% 그리고 보론이 0.003 wt% 함유되어 있으며, 그 화학적조성을 Table 1에 나타내었다. 핫스탬핑강은 보론강을 900℃로 가열된 후 냉각되어 얻어졌다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 열처리 전의 보론강은 페라이트 조직이 관찰되지만 열처리 후의 보론강

인 핫스탬핑강은 마르텐사이트 조직이 관찰된다.

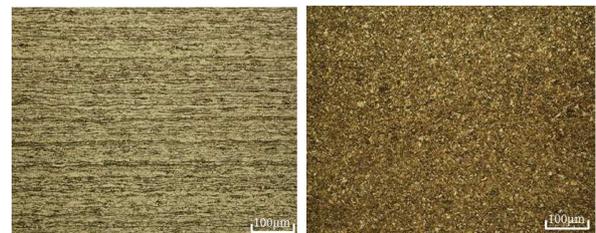
2.2 실험방법

용접 열원으로는 최대출력 4.0 kW의 CW 디스크 레이저를 사용하였으며 광학계 초점길이는 223 mm이다. 실험은 비초점거리($f_d = -1$ mm)에서 맞대기 및 겹치기 용접을 실시하였으며, 맞대기 용접의 경우 접합면의 정도를 높이기 위해 맞댄면은 밀링처리하였다. 주된 용접공정변수로는 레이저출력(P)과 용접속(v)로 한정하였으며, 용접 중 용융지의 산화를 방지하기 위하여 레이저 조사지점의 후방에 실드가스 노즐을 설치하여 용접부를 보호하였다. 실드가스는 Ar을 사용하였으며, 실드유량은 20 l/min으로 고정하였다.

용접 전 재료에 대하여 열처리 전·후 보론강의 코팅층의 변화를 분석하고, 용접이 완료된 시험편은 비드, 용입깊이 그리고 겹치기 용접의 경우

Table 1 Chemical composition of specimen

| Element 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. |



(a) Boron steel (b) Hot-stamped steel

Fig. 1 Microstructure of specimens

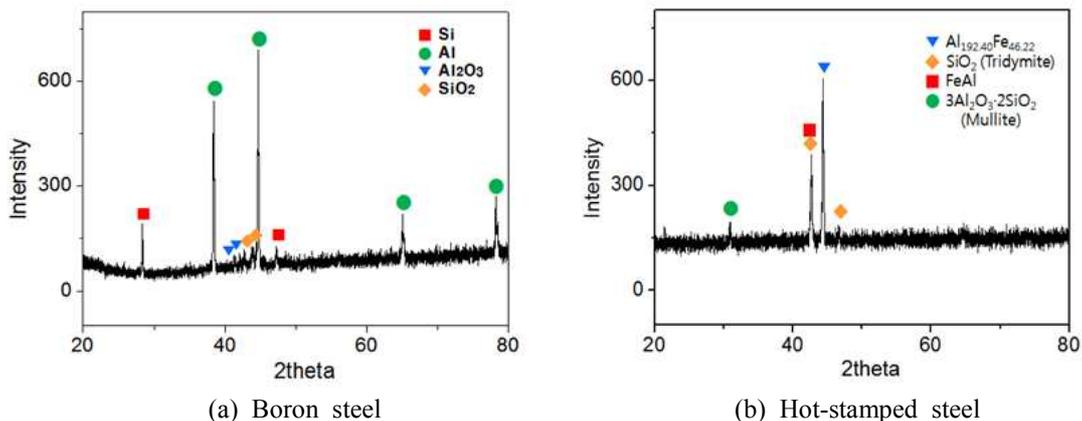
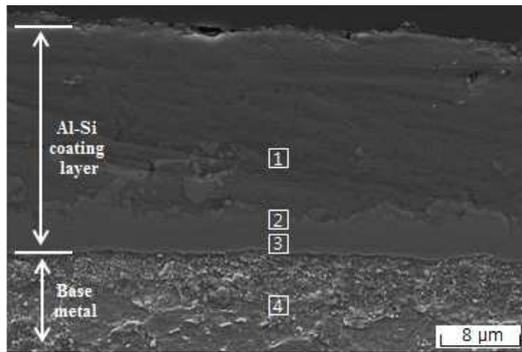


Fig. 2 Results of XRD pattern on boron steel and hot-stamped steel

Table 2 Results of EDS analysis on fig. 3

| No. | Atomic % | | |
|-----|----------|-------|-------|
| | Al | Si | Fe |
| 1 | 45.48 | 27.75 | 1.33 |
| 2 | 44.73 | 23.95 | 1.13 |
| 3 | 38.93 | 24.70 | 8.46 |
| 4 | 0.59 | 0.47 | 54.88 |

**Fig. 3** Positions of EDS analysis on Al-Si coating layer of boron steel

는 추가적으로 접합부쪽을 측정하여 두 재료의 특성을 평가하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

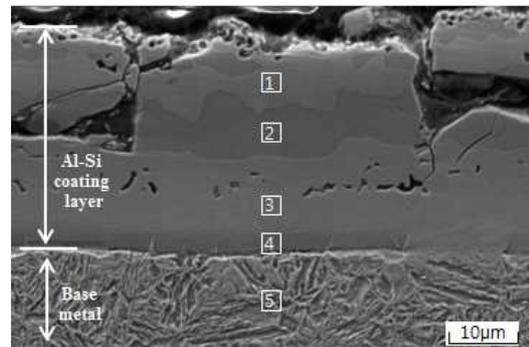
3.1 보론강 및 핫스탬핑강의 도금층 분석

핫스탬핑 열처리시 가열공정에서 표면에 산화에 의한 스케일 생성 및 탈탄 현상을 방지하기 위해 Al-Si 코팅이 되어있다. 이 코팅층을 분석하기 위하여 각 시편 표면을 XRD 분석하였으며, 단면을 EDS 분석하였다. Fig. 2에서 XRD 분석 결과를 확인할 수 있듯이, 보론강의 경우 Al-Si 성분 이외에 Al_2O_3 와 SiO_2 와 같은 산화물이 존재하였다. 이는 Al-Si 도금층이 용융상태 일 때 대기 중의 산소와 반응하여 산화물이 형성된 것이라 판단된다. 핫스탬핑강의 경우 Al과 Si 성분이 모두 Fe이나 O와 결합한 $Al_{192.40}Fe_{46.22}$, FeAl, SiO_2 그리고 $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ 와 같은 화합물의 형태로 존재하였다. 이는 핫스탬핑 열처리시 Fe이 코팅층으로 확산되면서 Al과 결합하여 Fe-Al 금속간화합물을 형성하고, 대기와의 산화반응으로 인해 산화물이 생성되기 때문으로 판단된다.

보론강 및 핫스탬핑강의 코팅층 단면에 대하여 EDS 분석을 실시하였다. 보론강의 EDS 분석 위치와 결과를 Fig. 3과 Table 2에, 핫스탬핑강의

Table 3 Results of EDS analysis on fig. 4

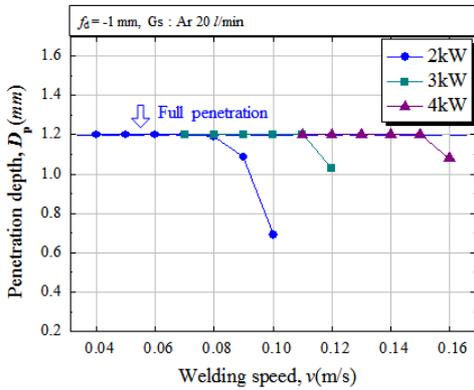
| No. | Atomic % | | |
|-----|----------|-------|-------|
| | Al | Si | Fe |
| 1 | 44.11 | 11.35 | 14.66 |
| 2 | 62.48 | 01.64 | 09.17 |
| 3 | 25.51 | 08.36 | 26.04 |
| 4 | 07.69 | 02.86 | 40.84 |
| 5 | 0.43 | 01.35 | 38.35 |

**Fig. 4** Positions of EDS analysis on Al-Si coating layer of hot-stamped steel

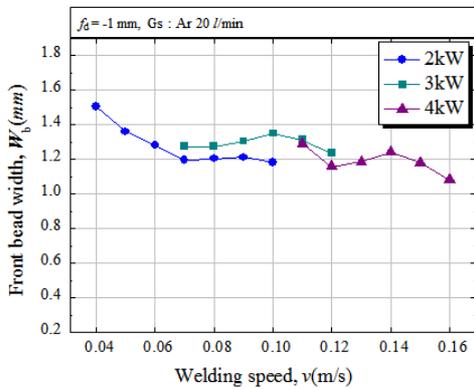
EDS 분석 위치와 결과를 Fig. 4와 Table 3에 각각 나타내었다. 두 재료 모두 코팅층 단면내의 색상 차이에 따라서 성분의 차이가 확인되었다. 보론강의 경우 상부 1번과 2번 층의 도금층에서 Al과 Si의 성분이 높게 나타났지만, 3번은 Al-Si 용융 도금 과정에서 약간의 Fe이 도금층으로 확산하여 Fe의 함유량이 증가하였다. 4번의 모재부에서는 Al이나 Si 성분이 거의 검출되지 않았다. 핫스탬핑강의 경우 핫스탬핑 공정 중의 열처리에 의한 Fe의 확산으로 인하여 도금층에 전체적으로 Fe이 분포해 있었으며, 이는 앞선 도금층 표면 XRD 분석을 통해서도 확인할 수 있었다. Al은 2번의 위치에서 가장 많았고 모재부분의 4번에서 가장 적었다. 이는 도금층의 Al이 열처리에 의해서 모재로 확산되었기 때문으로 판단된다. 또한 1번은 상대적으로 Si의 함유량이 높았으며, 도금층 내부에서 균열 및 기공이 관찰되었다.

3.2 소재별 맞대기 용접성 비교

맞대기 용접은 $f_a = -1$ mm에서 레이저 출력을 2 kW~4 kW까지 1 kW 간격으로 조절하고, 각 출력 별로 용접속도를 0.01 m/s 간격으로 변화시키면서 진행하였다.



(a) Penetration depth

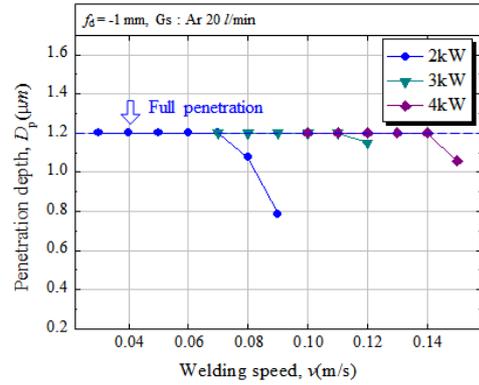


(b) Bead width

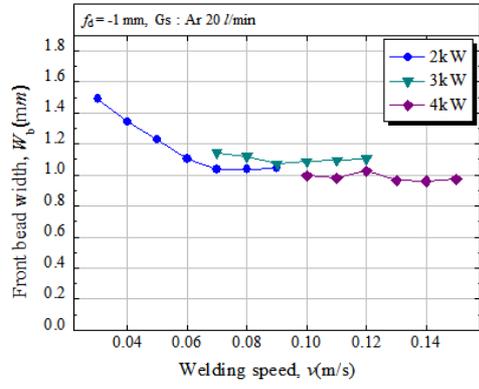
Fig. 5 Butt weldability of boron steel with laser power and welding speed

Fig. 5에 보론강을, Fig. 6에 핫스탬핑강을 레이저 출력 및 용접속도를 변화시키면서 용접한 결과를 나타내었다. 보론강의 경우, 용입깊이는 모든 출력범위에서 용접속도가 증가함에 따라 감소하였다. 비드폭의 경우는 레이저 출력이 일정할 때 용접속도가 증가할수록 점차적으로 감소하였지만 출력이 높아질수록 그 변화의 폭이 크지 않았다. 각 출력별 완전 용입이 이루어지는 임계속도는 2 kW의 경우에는 0.08 m/s, 3 kW는 0.11 m/s, 4 kW는 0.15 m/s이었다.

핫스탬핑강의 경우에도 레이저 출력 및 용접속도에 따른 용입깊이, 비드폭의 변화가 보론강의 결과와 전반적으로 유사함을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 하지만 완전 용입이 이루어지는 임계속도는 2 kW, 3 kW, 4 kW일 때 각각 0.07 m/s, 0.11 m/s, 0.14 m/s로 보론강보다 비슷하거나 약간 느린 속도였다. 이는 열처리 전·후의 시험편의 조직에 따라서 열전도성의 차이 때문으로 판단된다. 모든 시험편에서 균열과 기공과 같은 균열은 관찰되지 않았다.



(a) Penetration depth



(b) Bead width

Fig. 6 Butt weldability of hot-stamped steel with laser power and welding speed

Fig. 7은 대표적으로 3 kW에서 용접된 두 소재의 단면을 비교하여 정리한 것이다. 두 시험편의 용접부 내에서 모두 흰색의 화합물이 관찰되었으며, 특히 보론강에서 두드러지게 나타났다. 흰색의 화합물은 용접시 Al-Si 도금층이 유입되어 형성된 Fe-Al 금속간 화합물이다. 한편, 핫스탬핑강에서 보론강에 비해 금속간 화합물이 더 적은 양이 관찰된 것은 앞서 도금층의 분석에서 확인하였듯이 열처리에 의해서 모재의 Fe 성분이 이미 도금층에 전체적으로 분포하여 있기 때문에 용접시 모재와 잘 융합되었기 때문으로 판단된다.

3.3 소재별 겹치기 용접성 비교

보론강 및 핫스탬핑강의 겹치기 용접 실험은 맞대기 용접에서와 같이 2~4 kW에서 용접속도를 0.01 m/s 간격으로 변화시키면서 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타내었다.

실험결과를 살펴보면, 두 재료 모두 각 출력조건에서 용접속도가 증가함에 따라서 입열량이 감소되어 용입깊이가 얕아지고, 비드폭이 감소하였

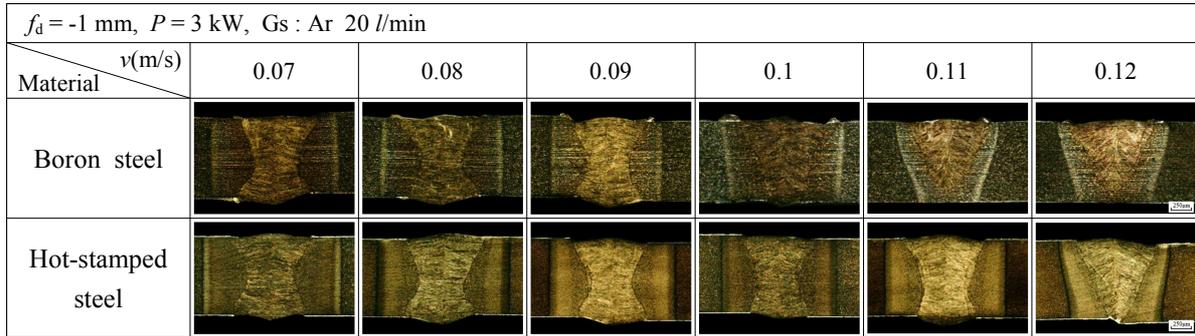


Fig. 7 Comparison of weld morphology with specimens

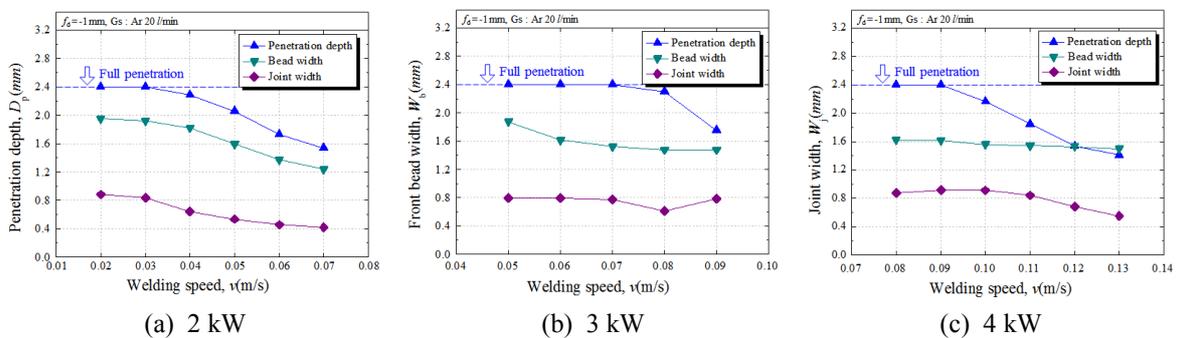


Fig. 8 Lap weldability of boron steel with laser power and welding speed

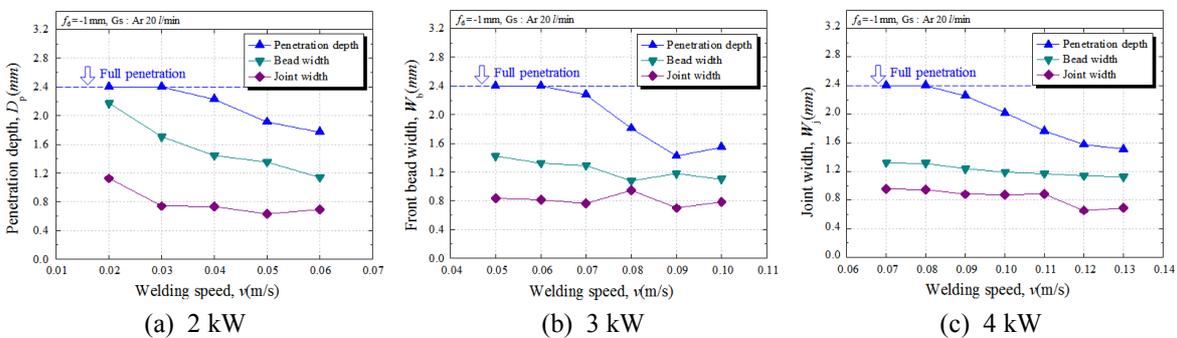


Fig. 9 Lap weldability of hot-stamped steel with laser power and welding speed

다. 또한 비드폭의 경우 출력이 증가할수록 용접 속도에 따른 변화가 크지 않았다. 접합부 폭의 변화는 보론강의 경우 2 kW에서는 용접속도가 증가함에 따라서 일정하게 감소하였지만 3 kW, 4 kW에서는 일정한 양상을 나타내지 않았으며, 핫스탬핑강의 경우 2 kW에서는 용접속도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈지만 3 kW, 4 kW에서는 일정한 양상을 나타내지 않았다. 하지만 모든 출력에서 완전용입이 일어난 경우에는 거의 유사한 접합부 폭을 확인할 수 있었으며, 이로 보아 겹치기 용접시 접합부 폭은 부분 용입 조건에서 용접속도의 영향을 받는 것으로 판단된다.

한편, 겹치기 용접부 내에서도 맞대기 용접부에서와 같이 흰색상이 관찰되었으며, 겹침부 계면 부분에서 용접부 안쪽방향으로 더 많이 관찰되었다.

4. 결론

CW 디스크 레이저를 이용한 보론강 및 핫스탬핑강의 맞대기 및 겹치기 용접성을 평가한 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 보론강 및 핫스탬핑강의 코팅층을 분석한 결과, 보론강의 경우 표면에 Al, Si 뿐만아니라 산화물이 확인되었다. 핫스탬핑강의 경우 산화물

과 Fe-Al 금속간 화합물이 확인되었으며, 이는 열처리에 의해 모재의 Fe이 확산되어 코팅층에 전체적으로 분포하고 있었기 때문이다.

(2) 보론강 및 핫스탬핑강의 맞대기 용접 결과, 열처리 전·후의 시험편의 조직에 따른 열전도성의 차이로 인하여 완전 용입이 이루어지는 용접 속도는 핫스탬핑강이 보론강보다 약간 느렸다.

(3) 보론강 및 핫스탬핑강의 겹치기 용접 결과, 접합부 폭은 완전 관통이 일어난 용접조건에서 용접속도와 관계없이 거의 유사하며, 부분 용입 조건에서는 용접속도에 영향을 받는 것을 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. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 10, pp. 1367~1375.
- (2) Merklein, M. and Lechler, J., 2006, "Investigation of the Thermo-Mechanical Properties of Hot Stamping Steels," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, Issues 1-3, pp. 452~455.
- (3) Fan, D. W. and De Cooman, B. C., 2010, "Formation of an Aluminide Coating on Hot Stamped Steel," *ISIJ international*, Vol. 50, No. 11, pp. 1713~1718.
- (4) Naderi, M., Ketabchi, M., Abbasi, M. and Bleck, W., 2011, "Semi-hot Stamping as an Improved Process of Hot Stamping," *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 27, No. 4, pp. 369~376.
- (5) Kim, Y., Park, K. Y. and Lee, K. D., 2010, "Laser Welding Characteristics of 1.5GPa Grade Hot Stamping Steel for Automobiles," *Journal of KWJS*, Vol. 28, No. 6, pp. 612~617.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Choi, J., K., Kang, M., J., Jo, J., H. and Kim, C. H., 2009, "Laser Welding Characteristics of Ultra High Strength Steel for Automotive Application," *Journal of KWJS*, Vol. 27, No. 5, pp. 471~474.
- (9) 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.
- (10) Nam, K. W., Hwang, S. H. and Kim, D. Y., 2011, "A Study on the High Temperature Tensile Characteristic and Material Properties of Laser Welded Boron Steel for Hot-Stamping According to the Heat Treatment Conditions," *Proceeding of the KSME Spring Annual Meeting*, pp. 133~137.