

## 핫스탬핑용 보론 강판의 레이저 용접부에 대한 열처리 조건에 따른 특성 연구§

황 석 환\* · 남 기 우\*\*†

\* 부경대학교 대학원 학연협동 기계공학과, \*\* 부경대학교 재료공학과

### A Study on the Properties of Laser-Welded Boron Steel for Hot Stamping According to the Heat-Treatment Conditions

Seok Hwan Hwang\* and Ki Woo Nam\*\*†

\* UR Interdisciplinary Program of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

\*\* Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received December 19, 2011 ; Revised January 4, 2012 ; Accepted January 9, 2012)

**Key Words:** Boron Steel(보론강), Hot-Stamping(핫스탬핑), TWB(맞춤식 용접 강판), YAG Laser Welding(야크 레이저 용접), Die Quenching(다이 퀴칭)

**초록:** 이산화탄소에 대한 규제가 강화되면서 환경 보호를 위하여 차량의 경량화를 요구하고 있다. 이를 위하여 다른 재질, 두께 및 강도를 갖는 소재를 맞춤 블랭크로 제조하여 활용하는 TWB 기술과 오스테나이트 변태온도 이상으로 승온, 스탬핑 퀴칭하는 핫스탬핑용 보론강을 이용한 열간 성형 기술을 접목함으로써 경량화 및 고안전성을 확보할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 레이저 용접된 보론 강판의 열처리 온도를 달리하여 다이퀴칭 조건에 따른 기계적 특성을 조사하였다. 레이저 용접한 보론 강판을 다이 퀴칭한 후 인장 시험한 결과, 최대인장강도 1454 MPa, 연신율은 6 %로 나타났으며, 이것은 용접하지 않은 모재 열처리재 인장강도, 1522 MPa의 95.5 %이다. 이 값은 핫스탬핑용 보론강 용접재의 실용적인 데이터로 활용될 수 있을 것이다.

**Abstract:** The hot-stamping technique is a forming method for manufacturing high-strength parts, in which the part is cooled rapidly after press forming above the austenite transformation temperature. Boron steel, which contains a very small amount of boron, is one of the materials used for hot stamping. The purpose of this study is to investigate the microstructure and mechanical properties according to the heat-treatment conditions. Die-quenching from various temperatures was conducted for different elapsed heat-treatment times. Laser-welded boron steel after quenching has a tensile strength of 1454 MPa and an elongation of 6 %. It has 94 % of the tensile strength of the base metal (1522 MPa). These properties can provide practical information for the use of boron steels for hot stamping.

#### 1. 서 론

온실가스 감축에 대한 규제가 강화됨에 따라 자동차 분야에서도 환경보전과 경제 발전의 상생을 도모함으로써 환경규제를 새로운 시장창출의 수단으로 활동하기 위하여 고효율, 고안전, 고감성의 친환경 자동차 개발에 집중하고 있다. 단기

간에 효과를 볼 수 있는 대응방안으로 차체의 경량화가 대두 되고 있으며,<sup>(1-3)</sup> 그 방법으로써 비철 합금을 이용하여 재료의 경량화를 도모하는 방법과 고강도 재료를 사용하여 재료의 두께를 줄이는 경량화 방법이 각광을 받고 있다.<sup>(4,5)</sup>

그러나 재료 경량화의 경우, 알루미늄이나 마그네슘 합금 재료가 고가이므로 가격 경쟁력의 약화를 가져 올 수 있으며, 고강도 재료는 스프링백 현상 및 고강도로 인한 가공 또는 성형이 어렵다는 단점을 극복해야 한다.<sup>(6)</sup>

따라서 서로 다른 재질, 두께, 강도를 갖는 소

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회 (2011. 11. 2-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, namkw@pknu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

재를 레이저 용접을 통하여 맞춤 블랭크로 제조하여 활용하는 TWB(Tailor welded blank) 기술과 핫스탬핑용 보론 강관을 이용한 열간 성형 기술을 접목하여 자동차 분야에 적용될 경우 자체 부품의 경량화 및 고안전성, 생산의 자동화 및 공정의 감소 효과를 확보 할 수 있을 것이다.<sup>(7)</sup>

본 연구에서는 레이저 용접된 핫스탬핑용 보론 강관에 열처리 온도를 달리하여, 다이 퀴칭 조건에 따른 기계적 특성을 관찰하였으며, 보론 강관의 이중두께 레이저 용접 특성을 조사하였다.

## 2. 재료 및 실험 방법

### 2.1 재료

본 연구에 사용된 재료는 보론강의 산화를 방지하기 위하여 Al-Si를 코팅한 SABC1470 재료로서, 일반적으로 22MnB5로 알려져 있는 두께 1.2, 1.4 및 1.6 mm를 사용하였다. 화학조성은 Table 1에 나타내었다.

### 2.2 실험 방법

열처리에 따른 특성을 알아보기 위하여 각각 다른 열처리 조건에서 다이퀴칭한 보론 강관의 기계적 특성 및 미세조직을 관찰하였다. Fig. 1은 열처리 조건을 모식화한 것으로 1123, 1173 및 1223 K의 세 가지 조건에서 안정화하고, 7분간 열처리하였다. 그리고 냉각까지의 대기 시간을 달리하여 물이 순환하는 냉각장치 사이에서 다이퀴칭 냉각하였다. 다이퀴칭을 이용한 이유는 공정과 같이 핫스탬핑 후 즉시 냉각수가 흐르는 급형을 재현한 것이다.

레이저 용접은 1.4+1.4 mm 동중 두께, 1.6+1.4 mm 및 1.6+1.2 mm의 이중 두께 보론 강관을 레이저 용접기(모델명: 3kW-CW Nd : YAG Laser System)를 이용하여 3 kW의 고정 출력으로 4.0 m/min의 속도로 시험편 상부에서 초점을 두고 맞대기(Butt) 용접을 실시하였다.

레이저 용접된 보론 강관의 인장 및 굽힘 시험은 만능 시험기(모델명: Zwick/Roell Z250)를 사용하였다. 시험편은 ASTM 규격으로 제작하였으며, 인장 시험편과 굽힘 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 2와 같다. 인장 시험은 pre-load를 50 N으로 가한 상태에서 크로스헤드 속도를 1 mm/min로 실시하였다. 3점 굽힘 시험편의 스패ん길이는 40 mm로 하였으며, 크로스헤드 속도는 20 mm/min

Table 1 Chemical compositions of boron steel

Sort	C	Si	Mn	P	S
wt.%	0.21	0.26	1.27	0.017	0.003
Sort	Cr	Al	Ti	B	Fe
wt.%	0.22	0	0	0.0028	Bal.

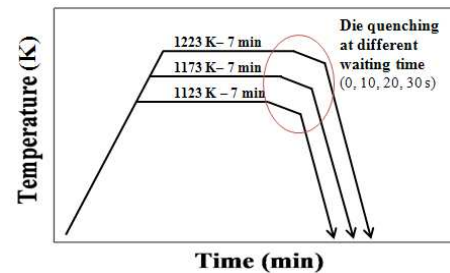


Fig. 1 Diagram of heat treatment conditions

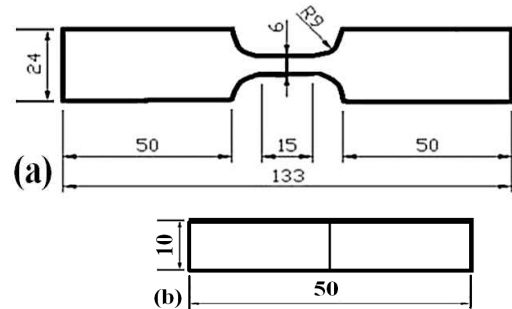


Fig. 2 Shape and dimensions of the specimen (mm); (a) Tensile test specimen, (b) Bending test specimen

으로 하였다. 시험은 상온에서 실시하였다.

비커스 경도는 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 300 g의 하중으로 10초간 압자를 압입하여 측정하였다. 용착부, HAZ부, 모재부의 조직 관찰은 폴리싱 후 나이탈(Nital) 3% 용액으로 에칭하여 광학현미경을 이용하여 관찰하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 최적용접조건

용접성은 레이저 출력을 3 kW, 용접 속도를 2.0 ~ 5.0 m/min으로 용접하여, 입열량에 따른 동중 두께의 단면을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 입열량의 차이에 따라서 단면이 달랐다. 2.0 m/min의 용접 시험편은 용착부 및 열영향부가 넓으며, 3.0 m/min는 언더컷 및 넓은 용착부를 볼 수 있다. 4.0 m/min은 4종류에서 비교적 양호한

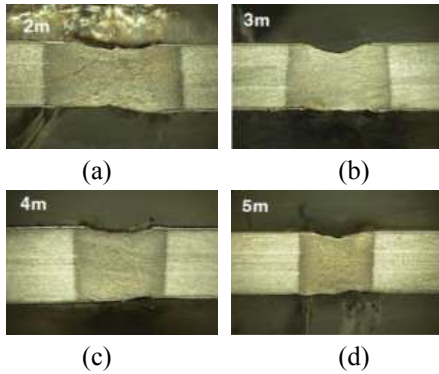


Fig. 3 The section of laser welded specimens according to welding speed; (a) 2.0 m/min, (b) 3.0 m/min, (c) 4.0 m/min, (d) 5.0 m/min

용착부를 나타내었다. 5.0 m/min는 언더컷 및 백비드가 국부적으로 불완전 용입이 나타났다. 따라서 4 가지 조건에서 4.0 m/min을 선택하였으며, 이중 두께의 용접부도 4.0 m/min의 조건이 가장 좋은 것을 관찰할 수 있었다.

3.2 인장 시험

Fig. 4는 동종 두께 1.4 mm 용접 시험편의 응력 - 변형률 선도를 열처리 온도별로 나타낸 것이다. Fig. 4는 동일한 열처리 온도에서 다이퀀칭까지 대기 시간이 길어짐에 따라 인장 및 항복강도가 낮아지는 경향을 나타내었다. 이것은 약 1073 K에서 473 K까지의 마르텐사이트 변태 구간에서 급랭하지 못하면, 페라이트 혹은 펄라이트 변태가 먼저 시작되면서 마르텐사이트 조직의 함량이 작거나 베이나이트로 변태되어 강도가 저하되었다고 판단된다. 그러나 반대로 연신율은 대기 시간이 길어질수록 증가하였다.

그리고 열처리 온도가 높아짐에 따라 냉각 시작까지 대기 시간이 길어지더라도 인장 및 항복강도의 저하 정도가 감소하였다. 한편, Fig. 4(a)에서 다이 퀀칭 후 모재의 인장강도는 1522 MPa로 나타났으며, 다이 퀀칭되었다고 판단되는 1173 K, 0초 용접 시험편의 인장강도의 평균값은 약 1200 MPa로 모재의 약 79 % 강도를 얻었다. 따라서 3종류의 열처리 온도에서 인장강도 및 변형률을 고려하여 가장 양호한 다이 퀀칭 조건은 1173 K, 0초라 판단된다.

이중 두께의 용접성을 평가하기 위하여 대기 시간 0초의 동종 두께 용접 결과와 비교하여, Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5는 1.6+1.4 mm 용접시

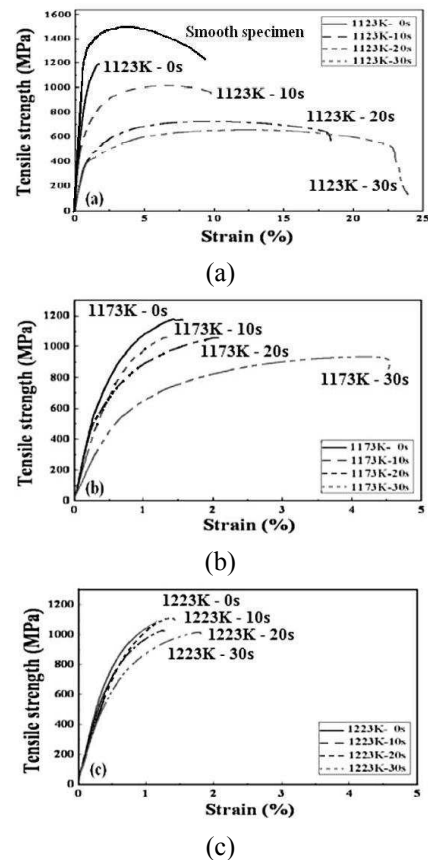


Fig. 4 Stress-strain curve of the same thickness welding specimen according to the waiting time for die quenching; (a) 1123 K, (b) 1173 K, (c) 1223 K

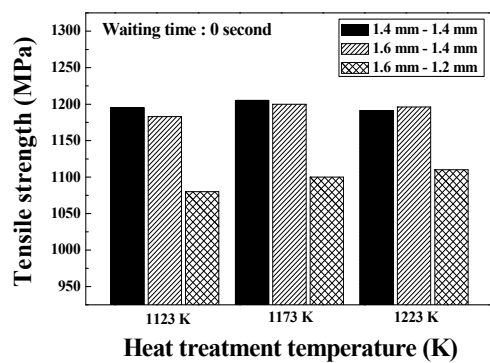


Fig. 5 Comparison of tensile strength of same thickness and different thickness welding specimen

험편과 1.6+1.2 mm 용접시험편의 결과를 1.4+1.4 mm 동종 두께의 결과와 함께 나타내었다. 열처리 온도에 관계없이 1.6+1.4 mm는 동종두께와 거의 비슷한 인장 강도를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 1.6+1.2 mm는 동종두께의 강도보

다 약 6.8 %(100 MPa) 감소한 것을 확인할 수 있었다.

3.3 굽힘 시험

Fig. 6은 1.4 mm 동종 두께 용접 시험편의 굽힘 시험에 의한 하중 - 연신 선도를 열처리 온도 별로 나타내었다. 인장 시험 결과와 비슷한 경향으로 다이퀀칭까지의 대기 시간이 길어짐에 따라 굽힘 하중이 낮아지고, 연신이 많아지는 것을 알 수 있다. 그러나 열처리 온도가 증가할수록 대기 시간에 관계없이 굽힘 하중이 증가하여, 비슷한 강도를 나타내었다.

Fig. 7은 최대 굽힘 강도를 나타내었으며, 대기 시간이 길어짐에 따라 굽힘 강도가 저하하는 것을 알 수 있다. 1123 K, 30초 대기시간의 경우는 거의 퀀칭되지 못하고, 미열처리재와 비슷한 강도를 가지는 것을 알 수 있었다. 그러나 1173 K와 1223 K의 강도는 비슷한 경향을 나타내었다.

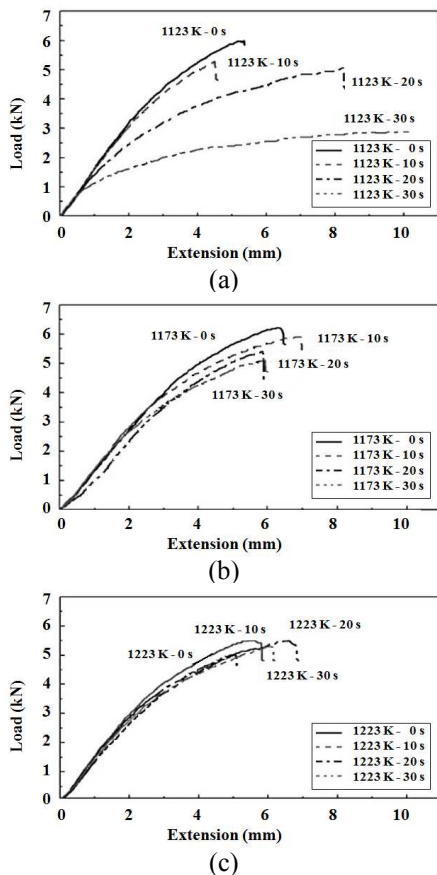


Fig. 6 Load-extension curve of the same thickness welding specimen according to the waiting time for die quenching; (a) 1123 K, (b) 1173 K, (c) 1223 K

3.4 미세조직 관찰 및 경도 측정

Fig. 8은 동종 두께 시험편을 1173 K, 대기 시간 0초에서 냉각한 시험편의 광학현미경 사진을 나타낸다. (a)는 용접부 단면, (b)는 모재, (c)는 용착부이다. 모재(a)는 마르텐사이트 조직으로 판단되며, 비커스 경도 평균값은 Hv 470, 용착부(c)는 베이나이트 조직으로 판단되며, 비커스 경도 평균값이 Hv 300으로 나타났다. 용착부(c)는 검은 반점 모양을 쉽게 관찰할 수 있었으며, Al-Si 코팅층의 용입부라고 생각되는 부분도 확인할 수 있었다. 용착부(a)에서 관찰할 수 있는 Al-Si 코팅층의 용입부(비커스 경도 평균값 Hv 200)는 용접부 파단의 원인으로 인장 강도 및 연신을 저하할 초래 할 수 있다고 판단된다. 또한 용착부에서 관찰되는 검은 반점 등의 강도저하 요인을 제어 함으로써 보론강의 레이저 용접부의 강도 향상 및 신뢰성을 더욱 높일 수 있을 것이라고 판단된다.

3.5 EDS 성분 분석

앞 절에서 강도 저하의 원인으로 판단한 Al-Si 용입부와 용착부의 검은 반점에 대하여 EDS 분석을 실시하여 Fig. 9에 나타내었다. (a)는 Al-Si 용입부를 분석한 것이다. Table 1의 성분과 비교 하였을 때, 다량의 Al 과 Si가 검출되는 것을 보 아 코팅층의 용입부임을 확인할 수 있었다. 이와

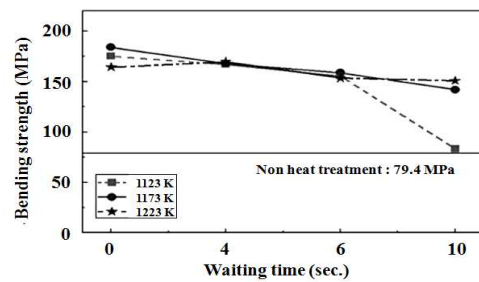


Fig. 7 Relationship of bending strength and waiting time according to die quenching temperature

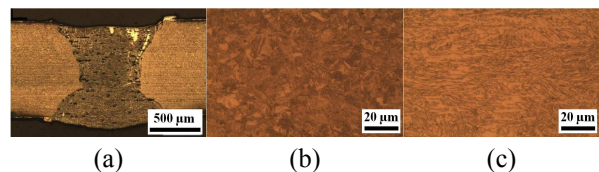


Fig. 8 Microstructure of laser welded specimen with same thickness; (a) Section of weld zone, (b) Base metal, (c) Weld metal

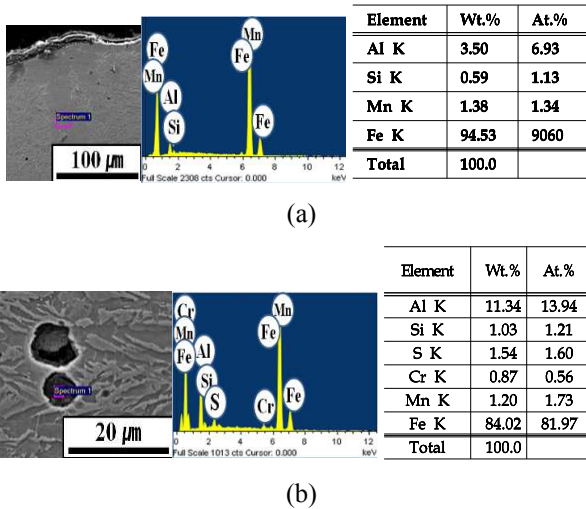


Fig. 9 Result of EDS analysis; (a) Weld penetration part of Al-Si, (b) Black circle



Fig. 10 Structure of longitudinal section of laser welded specimen

같은 용입부의 경도가 다른 부분보다 상대적으로 낮아 인장 시험 시 파단의 원인이 된다고 판단된다. (b)는 용착부의 검은 반점의 결과이다. 이것은 다량의 Al에 Si가 검출되어, 코팅층의 용입부로 판단되며, 용접열에 의하여 Al-Si-Fe 등의 화합물이 형성된 것으로 판단된다.

Fig. 8(a)의 단면에서 부분적인 용입을 확인하였으며, 용접방향인 종단면의 Al-Si 용입을 확인하기 위하여 Fig. 10에 나타내었다. 그림과 같이 용접을 실시한 표면 측에는 다량의 Al-Si가 내부까지 용입하였으며, 뒷면에도 약간의 용입이 나타났다. 이와 같은 Al-Si의 용입이 강도 저하의 원인이 되었으므로, 용접재의 강도 향상을 위해서는 코팅층의 제거가 가장 중요한 요인이라고 판단된다.

### 3.6 코팅층 제거 용접재 인장 시험

보론 강판 표면의 Al-Si 코팅층을 제거한 용접재 시험편의 인장 시험 결과를 대표적으로 Fig. 11에 나타내었다. 이것은 1.6+1.4 mm 이중 두께를 용접한 것으로, 1173 K, 0초 냉각 대기시간의 것이다. Fig. 11에서 이중 두께 시험편의 인장강

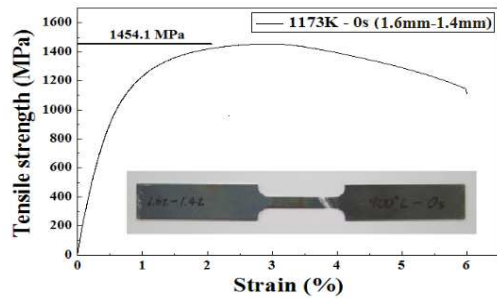


Fig. 11 Stress-strain curve of different thickness welding specimen without coating layer on surface

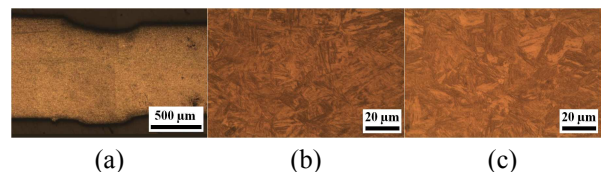


Fig. 12 Microstructure of laser welded specimen without coating layer on surface; (a) Section of weld zone, (b) Base metal, (c) weld metal

도는 1454.1 MPa를 나타내었다. 이것은 Fig. 5(a)의 코팅층 제거 전의 최고강도 1224 MPa보다 약 230 MPa 높으며, Fig. 4(a)에 나타난 모재 인장강도 1522 MPa의 약 96 % 인장 강도를 나타내었다. 또한 연신율은 6 %로 나타났으며, 두께 1.4 mm 모재에서 파단하였다.

Fig. 12는 코팅층을 제거한 용접재의 미세조직을 나타낸 것이다. Fig. 8과 비교하여, 단면부(a)는 용접부가 희미하게 나타나 있으며, 검은 반점을 확인할 수 없었다. 용착부(c)는 코팅층의 용입이 없는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 또한 용착부와 모재의 조직사진을 비교하였을 때, 두 조직 모두 마르텐사이트 조직이 관찰되어 경계가 명확하지 않으며, 비커스 경도 Hv 475 정도로 거의 비슷하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 Al-Si 코팅된 핫스탬핑용 보론 강판을 동중 두께 및 이중 두께로 레이저 용접하고, 각각 다른 온도로 열처리하여 다이퀀칭 조건에 따른 기계적 특성을 평가한 결과, 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 보론 강판을 오스테나이트 변태 온도 이상으로 승온하여 다이퀀칭한 결과, 1173 K-0s조건에서 인장강도는 모재 약 1522 MPa, 용접시험편 약 1203 MPa(모재의 79 %), Al-Si 코팅층 제거

용접시험편 1454 MPa (모재의 96 %)의 높은 인장강도를 나타내며 마르텐사이트 조직으로 변태한 것을 확인할 수 있었다.

(2) 동종 두께 용접재의 최대 굽힘 강도는 약 180 MPa이며, 미열처리재 강도(79.4 MPa)보다 약 2.27배 높은 굽힘강도를 나타내었다. 그리고 강도는 냉각 대기 시간이 길어짐에 따라서 선형적으로 감소하였다.

(3) 용접 시험편은 열처리 온도가 낮을수록, 다이퀀칭 전 대기시간이 길어짐에 따라 강도가 저하하며, 연신율이 증가하는 경향을 보였다.

(4) 1173 K-0s 시험편의 비커스 경도는 용착부 Hv 300, 모재부 Hv 470 이상을 나타내었으나, 코팅층을 제거한 시험편은 약 Hv 475정도로 균일하게 나타났다.

(5) 이종두께 용접 시, 두께 차이 0.2 mm는 용접재 강도에 크게 영향이 없었지만, 0.4 mm는 약 6.8 %의 강도 저하를 보였다.

(6) Al-Si 코팅층은 용접시 용입되어 강도 저하의 원인이 되었으나, Al-Si 제거 용접재는 코팅층의 용입 및 검은 반점을 확인할 수 없었다. 또한 모재부와 용착부의 경계가 명확하지 않고, 모두 마르텐사이트 조직으로 관찰되었다.

(7) 따라서 Al-Si 코팅된 보론강의 용접 강도를 확보하기 위하여, 코팅층을 제거하고 용접할 필요가 있다고 판단한다.

## 후 기

본 연구는 동남광역경제권 선도산업 지원단의 지원으로 수행된 연구 결과이며, 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Altan, T., 2006, "Hot-Stamping Boron-Alloyed Steels for Automotive Parts, Part I : Process Methods and Uses," *Stamping Journal*, pp. 40~41.
- (2) Engels, H., Schalmin, O. and Muller-Bollenhagen, C., 2006, "Controlling and Monitoring of the Hot-Stamping Process of Boron-Alloyed Heat-Treated Steels," *The International Conference New Development in Sheet Metal Forming Technology*, pp.135~150.
- (3) Lee, H. W., Kim, Y. H. and Lee, S. H., 2007, "Effect of Boron Contents on Weldability in High Strength Steel," *Journal of Mechanical Science and Technology* 21, pp. 772~778.
- (4) Lee, M. K., Kim, S. J. and Jeong, W. C., 2008, "Technology of Press Hardening for Manufacturing Ultra-high Strength Automobile Parts" *Machine and Materials*, pp. 83~86.
- (5) Tröster, T. and Rostek, W., 2004, "Advanced Hot Forming," in Proceedings from the International Conference "New Development in Sheet Metal Forming Technology," *Stuttgart, Germany*, pp. 49~63.
- (6) Kollack, R., et al, 2004, "Hot Forming and Cold Forming Two Complementary Processes for Lightweight Auto Bodies," in proceedings from the International Conference "New Development in Sheet Metal Forming Technology," *Stuttgart, Germany*, pp. 235~244.
- (7) Hovanski, Y., Santella, M. L. and Grant, G. J., 2007, "Friction Stir Spot Welding Of Hot-Stamped Boron Steel," *Scripta Materialia*, Vol. 57, pp. 873~876.