

TWB 보론강의 기계적 특성 및 성형성[§]

남기우^{*†}, 황석환^{**}, 김대용^{***}, 이문용^{****}, 이상문^{**}

* 부경대학교 재료공학과, ** 부경대학교 대학원 기계공학학연협동과정, *** 재료연구소 **** 성우하이텍

Mechanical Properties and Formability of TWB Boron Steel

K. W. Nam^{*†}, S. H. Hwang^{**}, D. Y. Kim^{***}, M. Y. Lee^{****} and S. M. Lee^{**}

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

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

*** Korea Institute of Materials Science (KIMS)

** SungWoo Hitech Co, LTD.

(Received February 27, 2012 ; Revised August 20, 2012 ; Accepted August 20, 2012)

Key Words: Boron Steel(보론강), Hot-Stamping(핫스탬핑), TWB(맞춤식 용접 강판), Die Quenching(다이 켄칭), Erichsen Cupping Test(에릭슨 컵핑 시험)

초록: 핫 스탬핑은 오스테나이트 변태 온도 이상에서 프레스 성형 후 급속히 냉각되는 고강도 부품을 제조하는 성형 방법이다. 매우 적은 양의 보론 성분을 가지고 있는 보론강은 핫 스탬핑에 사용되는 재료 중의 하나이다. 본 연구의 목적은 열처리 조건에 따르는 기계적 성질과 에릭슨 컵핑 시험에 의하여 성형성을 조사하는 것이다. 다양한 온도에서 다이켄칭은 대기 시간을 달리하여 실시하였다. 1173 K-0s에서 켄칭 후 TWB는 1203 MPa의 인장 강도를 얻었다. 이것은 모재 인장강도(1,522 MPa)의 79 %이다. 급형 온도(298, 523, 673 K)에 따른 보론강 TWB의 성형성은 차이가 크지 않았다. 그러나 성형 속도가 증가함에 따라 성형성이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract: The hot-stamping technique is a forming method used for manufacturing high-strength parts, in which a 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 mechanical properties of boron steel according to the heat-treatment conditions and the formability by using an Erichsen cupping test. Die quenching from various temperatures was conducted for different elapsed heat-treatment times. Laser-welded boron steel after quenching at 1173 K-0 s has a tensile strength of 1203 MPa. This is 79% of the tensile strength of the base metal (1522 MPa). The formability of boron steel was not significantly different from that at the mold temperature. However, it decreased with increasing forming speed. These properties provide practical information for the use of boron steels for hot stamping.

1. 서 론

온실가스 감축에 대한 규제가 강화됨에 따라 자동차 분야는 환경보전과 경제 발전을 도모하고, 환경규제를 새로운 시장창출의 수단으로 활용하기 위하여 고효율, 고안전, 고감성의 친환경 자동차 개발에 집중하고 있다. 빠른 시간 내에 효과를 볼 수 있는 대응방안으로 차체의 경량화가 요구된다.⁽¹⁻³⁾ 경량화 방법으로 비철 합금의 이

용과 고강도 재료의 사용이 유망하다.^(4,5)

이에 서로 다른 재질, 두께, 강도를 갖는 소재를 레이저 용접을 통하여 맞춤 블랭크로 제조하여 활용하는 TWB (Tailor welded blank) 기술과 핫스탬핑용 보론 강판을 이용한 열간 성형 기술을 접목하여 자동차 분야에 적용될 경우 자체 부품의 경량화 및 고안전성, 생산의 자동화 및 공정 수 감소의 효과를 확보 할 수 있을 것이다.⁽⁶⁾

그러나 보론강은 TWB를 적용하는 핫스탬핑 공정 이력 후 충격에 취약하거나 공정 이력 시 변형에 취약한 물성을 가지고 있다.⁽⁷⁾

따라서 본 연구에서는 레이저 용접된 핫스탬핑용 보론 강판에 열처리 온도를 달리하여, 다이

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2012. 2. 16.-17., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, namkw@pknu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

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.

퀀칭 조건에 따른 기계적 특성을 관찰하였고, 에릭슨 커팅 시험을 이용하여 고온 성형성을 평가하였다. 이를 통하여 보론강 TWB의 용접 특성 및 고온 성형 시 용접 건전성을 조사하였다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1 재료

본 연구에 사용된 재료는 보론강에 산화피막 발생을 방지하기 위해 Al-Si를 이용하여 코팅 처리한 SABC1470 재료로서 보론 강판 두께 1.4 mm 를 사용하였다. 사용된 보론강의 화학조성은 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험 방법

보론 강판의 열처리에 따른 특성을 알아보기 위하여 각각 다른 열처리 조건에서 다이퀀칭한 보론 강판의 기계적 특성 및 미세조직을 관찰하였다. Fig. 1 은 열처리 조건을 모식화한 것으로 1123 K, 1173 K, 1223K의 세 가지 조건에서 안정화하고, 7분간 열처리한 후, 물이 순환하는 냉각 장치 사이에서 냉각시키는 다이퀀칭 방법을 택하여 대기 시간을 달리하여 열처리 하였다. 다이퀀칭을 이용한 이유는 공정에서 핫스탬핑 후 즉시 금형 내에 냉각수를 흘리는 방법을 재현하고자 하였다.

레이저 용접은 1.4 mm 동중두께 보론 강판을 야그 레이저 용접기(모델명: 3 kW-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 강판의 인장시험은 만능시험기(모델명: Zwick/Roell Z250) 를 사용하였다.

시험 조건은 pre-load를 50 N으로 가한 상태에서 시험 속도를 1 mm/min로 실시하였다. 인장시험편의 형상 및 크기는 ASTM 규격으로 Fig. 2(a)

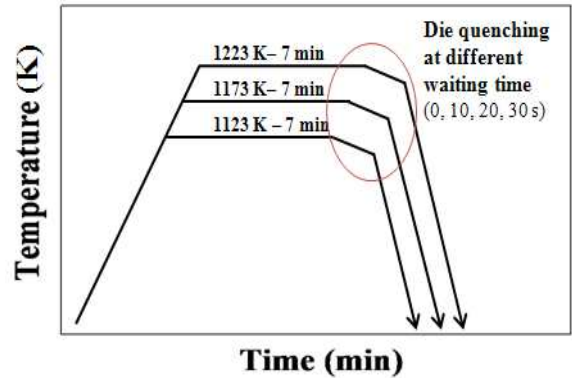
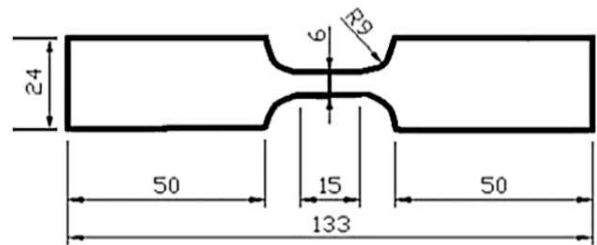
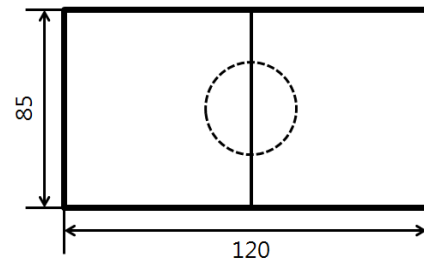


Fig. 1 Diagram of heat treatment conditions



(a) Tensile test specimen



(b) Erichsen cupping test specimen

Fig. 2 Shape and dimensions of the specimen (unit : mm)

와 같다.

마이크로 비커스 경도기를 이용하여 2.94 N의 하중으로 10 초간 압자를 압입하여 비커스 경도를 측정하였다. 미세조직 관찰은 용착부, 열영향부(HAZ), 모재부를 경면 연마 후 질산용액(Nitric acid) 3 % 용액으로 에칭하여 광학현미경으로 관찰하였다.

에릭슨 커팅 시험은 에릭슨사 3.84 kN 용량의 만능시험기(모델명: Erichsen 142)를 이용하여 이축신장 변형 하에서 용접 판재의 성형성을 평가하였다. 시험편의 형상을 Fig. 2(b)에 나타내었으며, 금형의 개략도를 Fig. 3에 도시하였다.

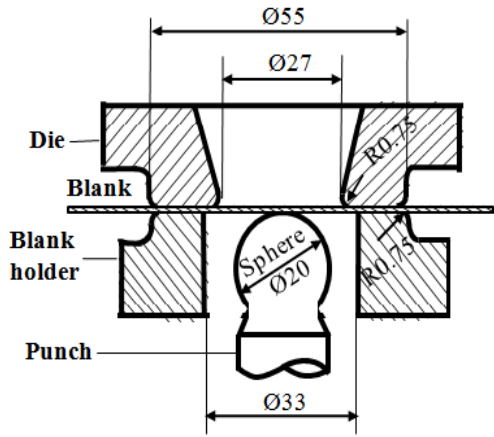


Fig. 3 The schematic view of tool sets for erichsen cupping test

전기로를 이용하여 1223 K에서 7분 동안 가열하여 이송하여 안착하였고, 급형 온도 및 성형 속도를 각각 298, 523, 673 K, 2.5, 5, 10 mm/s로 달리하여, 보론강 TWB의 고온 성형성을 평가하였다.

3. 실험 결과

3.1 인장 시험

Fig. 4는 동중 두께 1.4 mm 용접 시험편의 응력 - 변형률 선도를 열처리 온도별로 나타낸 것이다. Fig. 4는 동일한 열처리 온도에서 다이퀀칭 까지 대기 시간이 길어짐에 따라 인장 및 항복 강도가 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 항복 강도의 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.

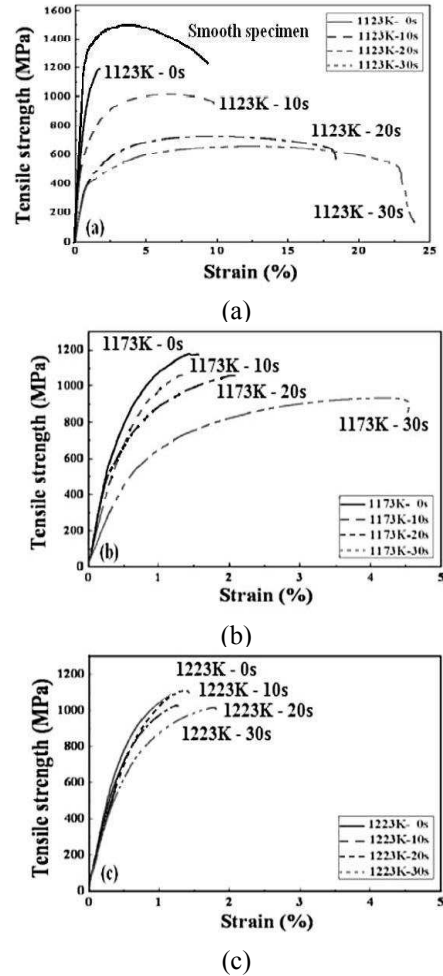


Fig. 4 Stress-strain curve of the same thickness welding specimen according to the waiting time for die quenching. (a) 1123 K, (b) 1173 K, (c) 1223 K

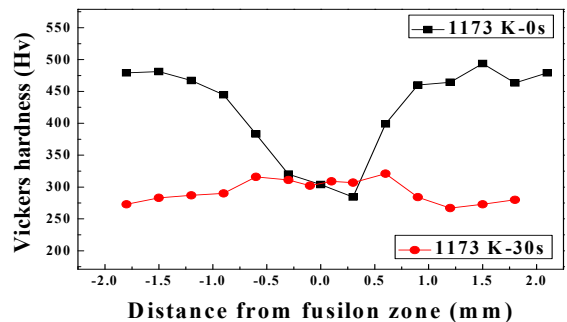
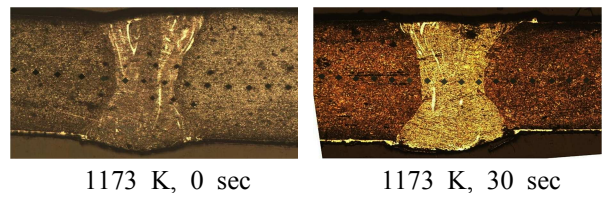


Fig. 5 Comparison of Vickers hardness of TWB specimen of waiting time 0 and 30 s at heat treatment temperature of 1173 K

3.2 비커스 경도 측정

Fig. 5은 1173 K까지 승온하여 대기시간 0초와 30초로 유지한 시험편의 비커스 경도를 나타낸다. 두 시험편 모두 용착부의 비커스 경도는 평균 300 Hv정도로 비슷하였고, 0초의 경우 모재부는 평균 470 Hv로 고강도를 이루었으나, 30초의 경우의 모재부는 평균 260 Hv로 미열처리재와 비슷한 경도를 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 6(a)의 용착부에서 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 제어함으로써 보론강의 레이저 용접부의 강도 향상 및 신뢰성을 더욱 높일 수 있을 것이라고 판단된다.

3.3 미세 조직 관찰

Fig. 6는 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 제어함으로써 보론강의 레이저 용접부의 강도 향상 및 신뢰성을 더욱 높일 수 있을 것이라고 판단된다.

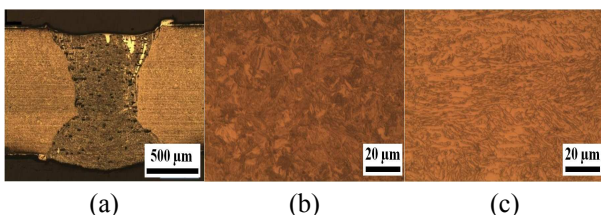


Fig. 6 Microstructure of laser welded specimen with same thickness. (a) Section of weld zone, (b) Base metal, (c) Weld metal (Heat treatment temperature : 1173 K, waiting time : 0 sec)

3.4 EDS 성분 분석

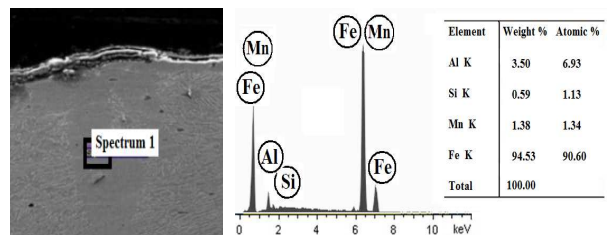
앞 절에서 강도 저하의 원인으로 판단한 Al-Si 용입부와 용착부의 검은 반점에 대하여 EDS 분석을 실시하여 Fig. 7에 나타내었다. (a)는 Al-Si 용입부를 분석한 것이다. Table 1의 성분과 비교하였을 때, 다량의 Al 과 Si가 검출되는 것을 보아 코팅층의 용입부임을 확인할 수 있었다. 이와 같은 용입부의 경도가 다른 부분보다 상대적으로 낮아 인장 시험 시 파단의 원인이 된다고 판단된다. (b)는 용착부의 검은 반점의 결과이다. 이것은 다량의 Al에 Si가 검출되어, 코팅층의 용입부로 판단되며, 용접열에 의하여 Al-Si-Fe 등의 화합물이 형성된 것으로 판단된다.

3.5 금형 온도와 성형성

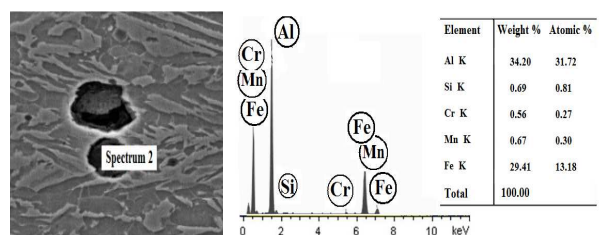
Fig. 8은 금형온도 673 K에서 보론강 TWB의 에릭슨 커핑 시험 후의 파단 양상을 나타낸다. 그리고 Fig. 9는 커핑 시험의 최대 하중과 한계 높이를 나타낸다.

Fig. 8과 같이 금형의 온도와 관계없이 모두 편치 코너 접선 부분에서 파단이 일어났으며, TWB 및 모재(BM)에서 동일한 양상의 파단이 시작됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 9(a)의 커핑 시험 결과에서 균열이 발생하는 보론강 TWB의 최대 하중은 모재(BM)보다 낮으며, 온도가 높아질수록 낮아지는 경향은 비슷하다. 이것으로 고온 성형에서 TWB의 강도는 모



(a) The part of Al-Si coating weld penetration



(b) The point in weld metal zone

Fig. 7 Result of EDS analysis, image of SEM

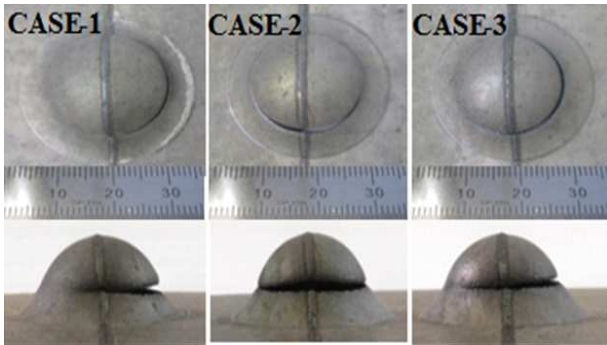


Fig. 8 Failure pattern after cupping test of TWB boron steel at mold temperature, 673 K

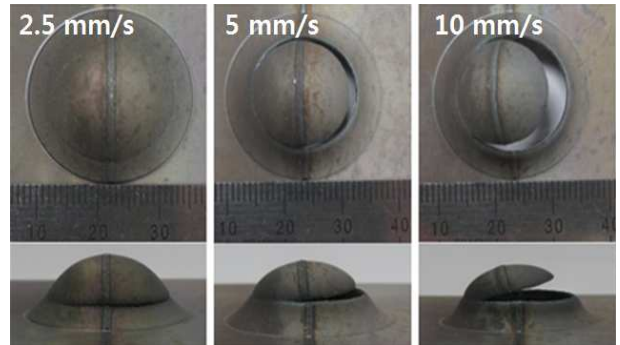
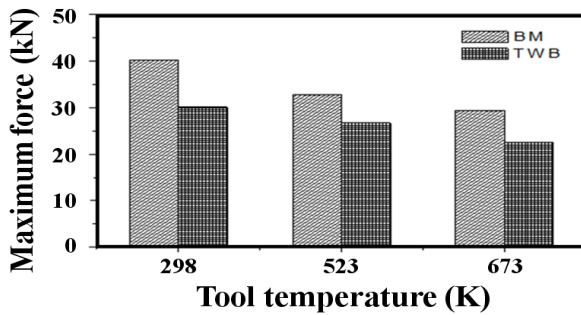
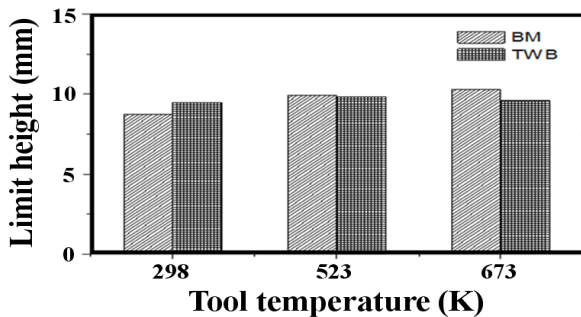


Fig. 10 Failure pattern after cupping test of TWB boron steel at different punching speeds



(a) Maximum force



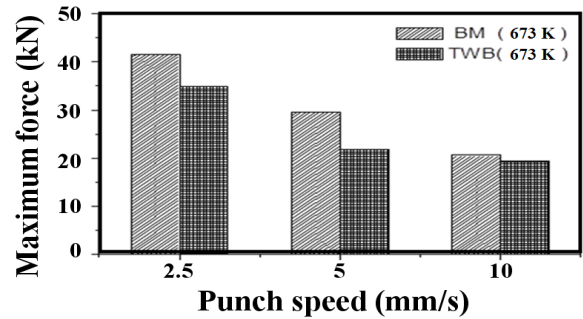
(b) Limit height

Fig. 9 The maximum force and limit height at different temperature of mold

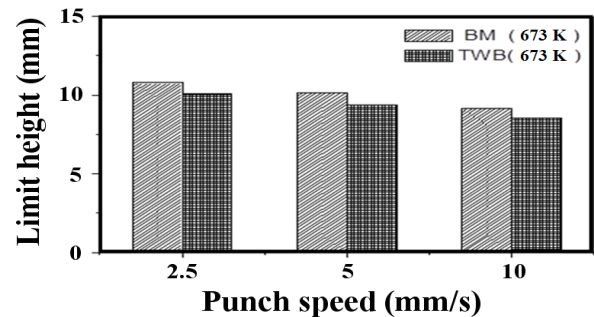
재보다 낮아짐을 알 수 있다. Fig. 9(a), (b)에서 금형온도가 높아질수록 모재의 최대하중은 낮아지고 한계높이가 높아지는 반면, 보론강 TWB의 경우는 최대하중은 낮아지나 한계높이는 비슷하였다.

3.6 성형 속도와 성형성

Fig. 10은 금형온도 673 K에서 성형 속도에 따른 보론강 TWB의 에릭슨 컵핑 시험 후의 파단 양상을 나타낸다. 펀치 속도에 관계없이 모두 편



(a) Maximum force



(b) Limit height

Fig. 11 The maximum force and limit height with different punching speeds

치 코너 접선 부분에서 파단이 일어났다.

보론강 TWB의 성형 속도에 따른 에릭슨 컵핑 시험 후의 최대하중 및 한계높이를 Fig. 11에 나타내었다. 모재와 TWB 모두 속도가 증가함에 따라 최대 하중과 한계높이는 모두 낮아진다. 이러한 경향은 최대하중이 더욱 많이 낮아지며, 한계높이는 최대하중만큼 낮아지지 않는다. 일반적으로 인장 시험에서 속도가 증가할수록 강도는 높아지고 연신율은 낮아지지만, 온도가 증가할수록 강도는 낮아지고 연신율은 높아진다. 이 경우

속도가 최대하중에 미치는 영향보다 속도에 의한 온도가 최대 하중에 미치는 영향이 크다고 볼 수 있다. 주로 파단이 일어난 펀치 접선 부분에서는 소재 물성이 펀치 속도 증가에 따른 열전달의 영향을 덜 받게 되므로 속도가 낮을수록 한계높이는 높아진다. 이 경우는 속도가 한계높이에 미치는 영향이 속도에 의한 온도가 한계높이에 미치는 영향보다 크다고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 Al-Si 코팅된 핫스탬핑용 보론 강관을 동종두께로 레이저 용접하고, 다른 온도로 열처리하여 다이퀀칭 조건에 따른 인장 및 커핑 시험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 보론 강관을 오스테나이트 변태 온도 이상으로 열처리 후 급랭하였을 경우, 인장 강도는 평균 1203 MPa로 모재 대비 79 %의 인장강도를 확보하였다.

(2) 비커스 경도는 용착부에서 300 Hv, 모재부에서 470 Hv 이상을 나타내며 마르텐사이트 조직을 보였으며, Al-Si 코팅층 용입부의 경우 200 Hv 정도로 가장 낮았다.

(3) 금형 온도에 따른 보론강 TWB의 성형성은 금형 온도 298, 523, 673 K에서 차이가 크지 않았다.

(4) 성형속도에 따른 보론강 TWB의 성형성은 성형 속도가 증가함에 따라 성형성이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 광역경제권 선도산업 육성사업의 일환인 동남광역경제권 선도산업 지

원단의 지원으로 수행된 연구 결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 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) 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.
- (7) Maas, J., and Staudinger, W., 2008, "Tailored Blanks in Hot Stamping," *ThyssenKrupp techforum*, Issue 1, pp. 29~31.