

보론강 용접 맞춤 판재의 고온 에릭슨 컵핑 평가

김영일^{1,4}· 김지훈¹· 김 용²· 이문용³· 문영훈⁴· 김대용[#]

Formability Evaluation of Tailor Welded Blanks of Boron Steel Sheets by Erichsen Cupping Test at Elevated Temperature

Y. I. Kim, J. H. Kim, Y. Kim, M. Y. Lee, Y. H. Moon, D. Kim

(Received October 11, 2011 / Revised November 2, 2011/ Accepted November 8, 2011)

Abstract

The combination of tailor welded blank (TWB) and hot stamping often offers improved crash-worthiness and reduced mass of stamped parts in the automobile body. To investigate the formability of laser TWB and the reliability of weld line, the present study used 22MnB5 boron steel sheet of the same thickness and used the Erichsen cupping test at elevated temperatures. The effects of laser direction, die temperature, weld line positions and forming speed on formability(the limiting dome height) were studied and the results were compared with the formability of the base material.

Key Words : Tailor Welded Blank, Hot Stamping, Boron Steel Sheet, Erichsen Cupping Test, Formability

1. 서 론

자동차 업계는 안전성 및 연비 향상 등의 상품성을 높이기 위해 자동차 차체의 충돌 성능 및 경량화율을 높이기 위한 노력을 지속하고 있다. 최근 자동차 차체의 충돌 성능 및 경량화율을 동시에 향상시키고 이들 성능을 극대화 하기 위한 방법으로 맞춤 용접 판재(tailor welded blank, TWB) 기술을 핫스탬핑(hot stamping) 공정 기술과 융합하여 차체 부품을 개발하려는 시도가 이루어지고 있다[1, 2]. 강 또는 비철 판재의 TWB 기술과 보론강판의 핫스탬핑 공정 기술은 각각의 기술로는 이미 성숙기에 접어들어 자동차 차체에 다양하게 적용되고 있고 관련 연구가 많이 진행되어 왔다. 그러나 보론

강 TWB를 적용하는 핫스탬핑 기술에 대해서는 아직 심도 있게 진행되고 있지 못한 상태이다. 그 이유 중 하나는 보론강 TWB의 용접부가 핫스탬핑 공정 이력 후 충격에 취약하거나 핫스탬핑 공정 이력 시 변형에 취약한 물성을 가지고 있어[1, 3], 보론강 TWB를 적용하는 핫스탬핑 기술을 자동차 차체 부품 적용에 쉽지 않았기 때문인데, 이를 해결하려는 다양한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 에릭슨 컵핑 시험을 이용하여 핫스탬핑과 유사한 고온 성형 온도 이력에서 용접 조사 방향, 용접선 위치, 금형의 온도, 성형 속도에 따른 보론강 TWB의 성형성을 평가하였다. 이를 통하여 이축 신장 변형시 보론강 TWB의 용접 건전성을 확인하였다.

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 변형제어연구그룹
2. 고등기술원 로봇생산기술센터
3. 성우하이텍 기술연구소
4. 부산대학교 기계공학과
교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소 변형제어연구그룹,
E-mail: daeyong@kims.re.kr

2. 실험 방법

2.1 재료 및 용접

본 연구에서 사용된 보론강 TWB의 재료와 용접 방법은 Kim 등[2]의 연구에 정리되었으며, 이를 다시 간략히 소개하면 다음과 같다. 본 연구에서 사용된 보론강관은 Al-Si 합금(9wt% Si)의 도금 부착량이 약 80g/m²인 1.4mm 두께의 22MnB5 강관이다. 보론강 TWB는 레이저로 동종 두께 맞대기 용접되어 제조되었다. 레이저 용접은 CW-ND:YAG 레이저 소스를 갖는 Trumpf사의 HASS HL3006D 용접기를 이용하였다. 레이저 빔의 출력은 3kW로 고정하였다. 용접은 Yaskawa 6축 로봇을 이용하였다. 보호 가스는 4mm 지름을 가진 구리 노즐을 통하여 분사되었고, 용접시 노즐과 시편과의 거리는 5mm로 유지되었다. 노즐은 조사되는 빔으로부터 60°를 유지한 채 레이저 빔과 함께 이동하였다. 레이저 빔의 직경은 0.6mm, 렌즈의 초점거리는 200mm 이다. 레이저 빔은 관제의 수직 방향 위에서 조사되었고, 용접 속도는 4.0m/min로 하였다. 소재의 맞대기 부분은 밀링 가공하여 표면을 매끄럽게 하였고, 겹은 0.1mm이었다. 보호 가스로는 헬륨이 사용되었고, 20l/min의 속도로 분사되었다.

2.2 에릭슨 컵핑 시험

에릭슨 컵핑 시험(Erichsen cupping test)[4]는 에릭슨 사 40ton 용량의 만능시험기(Erichsen 142)를 이용하여 이축 신장 변형 하에서 관제의 성형성을 평가하는 시험 방법이다. 에릭슨 컵핑 시험에서 사용되는 금형의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 핫스탬핑 온도 이력과 유사한 고온 성형 온도이력을 에릭슨 컵핑 시험에서 구현하기 위해서 관제를 960℃의 가열로 안에서 7분 동안 가열하고 이송하고 에릭슨 컵핑 금형에 안착 한 후 펀치를 상승시켜 성형하였다. 가열로에서 금형까지 이송 시간은 약 3초, 이송 후 금형 안착 시간은 약 10초가 소요되었다. 펀치의 초기 온도는 상온(room temperature) 25℃로 고정하고, 다이와 홀더의 초기 온도는 실험조건에 따라 25, 250, 400℃로 달리하였다. 다이와 홀더의 온도를 달리하기 위해서 에릭슨 사에서 제공하는 금형 가열기와 이에 장착 가능한 고온 다이와 홀더를 사용하였다. 펀치의 속도는 실험조건에 따라 2.5, 5, 10mm/s으로 달리하였으며, 홀더의 가압력은 10kN으로 하였다. 관제

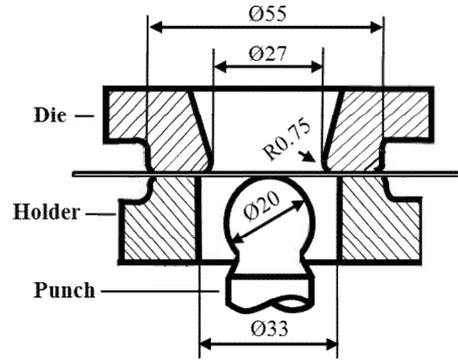


Fig. 1 The schematic view of tool sets for Erichsen cupping test

와 금형 간의 윤활제는 사용하지 않았다. 실험에 사용된 관제의 크기는 고온 다이와 홀더에 장착하기 용이하도록 하기 위하여 85mm×120mm으로 하였다. 실험 조건에 따라 용접 조사 방향이 펀치 상승 방향과 일치하거나 반대 방향으로 달리하였다. 또한 실험 조건에 따라 용접선은 펀치의 정중앙 또는 중앙에서 5mm 치우도록 하였다.

본 연구에서는 에릭슨 컵핑 시험을 통하여 용접 조사 방향, 금형 온도, 용접선 위치, 성형 속도에 따른 보론강 TWB의 고온 성형성 평가를 수행하였다. 각 조건 별로 5회의 실험을 수행하였으며, 편차가 큰 상 하위 2회의 결과를 제외한 3회의 실험 결과를 정리하였다. 모든 결과는 동일한 조건에서 시험된 원소재의 결과와 비교되었다. 각 조건에 대한 파단 양상과 최대 하중(maximum load) 및 한계 높이(limit height)를 분석하였다. 최대 하중과 한계 높이는 에릭슨 컵핑 시험에서 얻어진 펀치의 하중-변위 선도에서 추출하였다. 에릭슨 컵핑 시험의 하중-변위 선도에서 보듯, 한계 높이는 펀치의 최대 하중에서의 변위 값으로 정의한다. 한계 높이는 에릭슨 컵핑 시험에서 에릭슨 지수(Erichsen index, EI)로 부르기도 하며 이축 신장 변형 하에서의 성형성을 대표한다.

2.2.1 용접 조사 방향의 영향

용접 시 발생하는 용접 용융부의 형태는 Fig. 2에 나타난 것처럼 용접 조사 방향에 따라 형태가 달라진다. 용접 조사 방향에 따른 보론강 TWB의 성형성을 평가하기 위하여 용접 조사 방향과 펀치 상승 방향과 일치하는 정방향(forward direction)

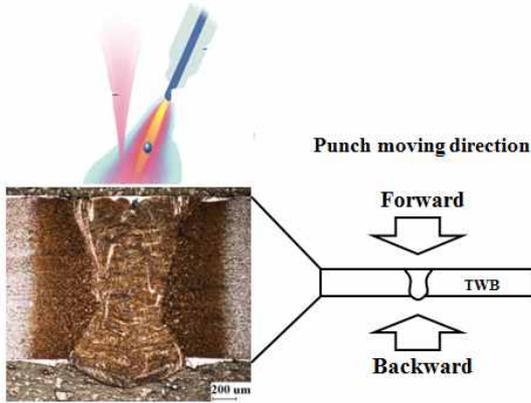


Fig. 2 Microstructures of welding fusion zone and definition of forming direction

과 용접 조사 방향과 펀치 상승 방향이 반대인 역방향(backward direction)에 대해서 에릭슨 커핑 시험을 수행하였다. 상온과 고온에서 용접 조사 방향의 영향을 평가하기 위하여 금형과 TWB가 모두 상온 일 경우와 펀치 초기 온도는 25℃, 다이와 홀더 초기 온도는 400℃, TWB는 960℃에서 7분 가열 후 금형으로 이송 안착하여 성형한 경우 두 가지 조건으로 실험을 수행하였다. 펀치의 속도는 5mm/s로 하였다. 용접선은 펀치 중앙부에 위치하였다.

2.2.2 금형 온도의 영향

금형의 온도 조건에 따른 보론강 TWB의 성형성을 평가 하기 위하여 펀치의 온도는 25℃로 고정하고 다이와 홀더의 초기 온도는 25, 250, 400℃로 달리 하였으며 보론강 TWB는 960℃에서 7분 가열 후 금형으로 이송 안착하여 시험하였다. 다이와 홀더의 초기 온도에 따라 보론강 TWB가 다이와 홀더 안착 시 열전달의 차이가 발생하고, 이에 따른 성형 온도의 차이가 유발되어 보론강 TWB의 성형 온도에 따른 영향을 평가할 수 있도록 하였다. 펀치의 속도는 5mm/s로 하였고, 용접 조사 방향은 펀치 상승 방향과 정방향으로 하였으며, 용접선은 펀치 중앙부에 위치하였다.

2.2.3 용접선 위치의 영향

보론강 TWB 용접 선이 성형성에 미치는 영향을 평가 하기 위하여 Fig. 3 에서와 같이 펀치 위치 대비 용접선이 정중앙에 위치한 경우와 펀치 대비 용접선이 5mm 치우친 경우에 대하여 에릭

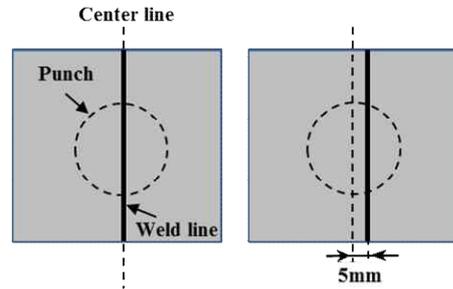


Fig. 3 The schematic view for weld line position

슨 커핑 시험을 수행하였다. 에릭슨 커핑 시험으로 수행하는 용접선의 성형성 평가는 전자의 경우와 같이 용접선을 펀치의 정중앙에 위치하는 하는 것이 통상적이나, 에릭슨 커핑 시험 시 변형이 크게 일어나 과단이 발생하는 펀치 접선 근처 부위에 용접선이 놓였을 때 성형성을 평가하기 위하여 후자와 같이 용접선을 펀치의 정중앙에서 5mm 치우치게 하여 시험을 수행하였다. 펀치 초기 온도는 25℃, 다이와 홀더 초기 온도는 400℃, 보론강 TWB는 960℃에서 7분 가열 후 금형으로 이송 안착하여 시험하였다. 펀치의 속도는 5mm/s로 하였고, 용접 조사 방향은 펀치 상승 방향과 정방향으로 하였다.

2.2.4 성형 속도의 영향

성형 속도에 따른 보론강 TWB의 성형성을 평가하기 위하여 펀치 속도를 2.5, 5, 10mm/sec로 달리하며 에릭슨 커핑 시험을 수행하였다. 펀치 초기 온도는 25℃, 다이와 홀더 초기 온도는 400℃, 보론강 TWB는 960℃에서 7분 가열 후 금형으로 이송 안착하여 시험하였다. 펀치의 속도는 5mm/s로 하였고, 용접 조사 방향은 펀치 상승 방향과 정방향으로 하였으며 용접선은 펀치 중앙부에 위치하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접 조사 방향의 영향

보론강 TWB의 용접 조사 방향에 따른 에릭슨 커핑 시험 후 과단 양상을 Fig. 4에 보였다. 고온 성형 온도 이력이 없이 상온에서 에릭슨 커핑 시험 시 과단은 펀치 정중앙 용접부에서 일어났다. 용접 조사 방향이 정방향인 경우는 용접선과 수직방향(Fig. 5의 Type I)으로, 역방향인 경우는 용접

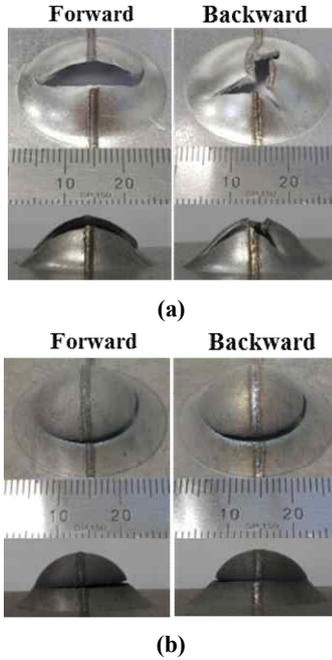


Fig. 4 Failure pattern for TWB with different blank directions at (a) room temperature and (b) elevated temperature

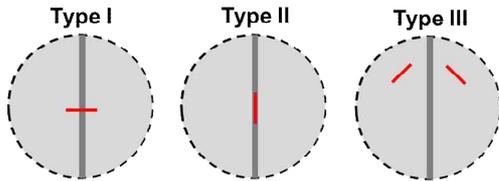


Fig. 5 Typical failure types in Erichsen cupping tests

선과 수평방향(Fig. 5의 Type II)으로 파단이 발생하였다. 정방향인 경우는 용입부의 중앙에 블록 튀어난 부분에서 파단이 시작되었으며, 역방향인 경우는 용입부와 모재 경계에서 파단이 시작된 것으로 판단된다. 고온 성형 온도 이력을 고려한 고온 시험시 파단은 정방향과 역방향 모두 펀치 아래 접선 부위에서 파단이 일어났으며 모재부(Fig. 5의 Type III)와 용접부에서 동일한 확률로 파단이 시작되었다. 보론강 TWB의 용접 조사 방향에 따른 에릭슨 컵핑 시험 후 최대 하중과 한계 높이를 Fig. 6에 정리하였다. 상온에서 보론강 TWB의 최대 하중 및 한계 높이는 원소재보다 낮았다. 레이저 용접 후 용접부 강도는 모재 보다 높아지고 연신율을 낮아진다[2]. 이에 에릭슨 컵핑 시험

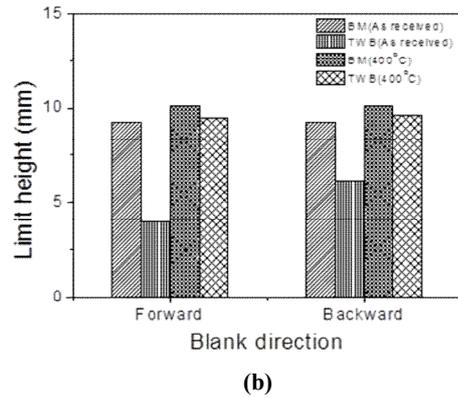
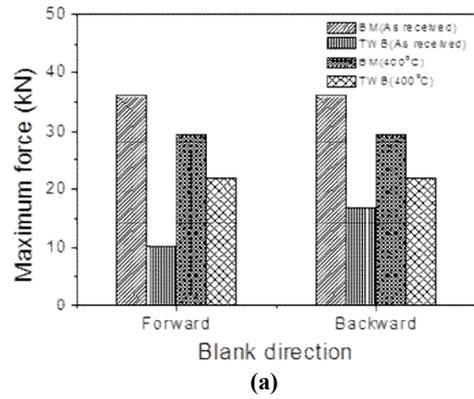


Fig. 6 (a) Maximum force and (b) limit height with different blank directions

초기에 변형이 원할이 이루어지지 않고 용접부에서 파단이 일어나기 때문이다. 상온에서 정방향의 최대 하중 및 한계 높이는 역방향 보다 모두 높았다. 이는 파단 양상 차이에 의해서 기인한다고 유추할 수 있다. 고온에서 정방향과 역방향의 최대 하중과 한계 높이는 거의 유사였다. 이는 보론강 TWB가 고온 성형 온도 이력을 거치면서 모재와 용접부의 물성 차이가 줄어들었기 때문으로 판단된다.

3.2 금형 온도의 영향

금형 온도에 따른 보론강 TWB의 에릭슨 컵핑 시험 후 파단 양상을 Fig. 7에 보였다. 다이, 홀더의 초기 온도가 25, 250, 400°C 경우 모두 파단은 펀치 코너 접선 부위에서 파단이 일어났으며 모재부와 용접부에서 동일한 확률로 파단이 시작되었다. 보론강 TWB의 용접 조사 방향에 따른 에릭슨 컵핑 시험 후 최대 하중과 한계 높이를 Fig. 8

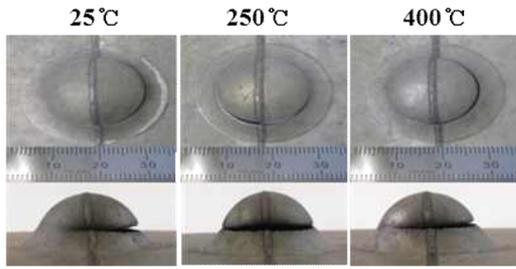


Fig. 7 Failure pattern for TWB with different temperatures of die and holder

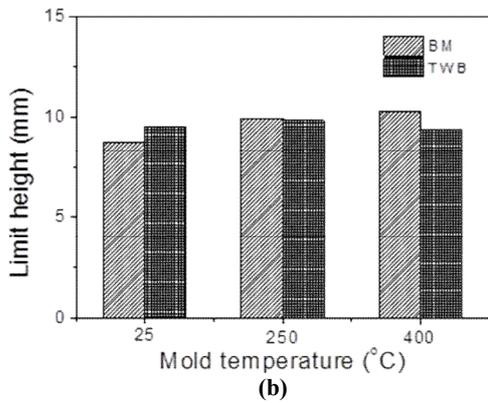
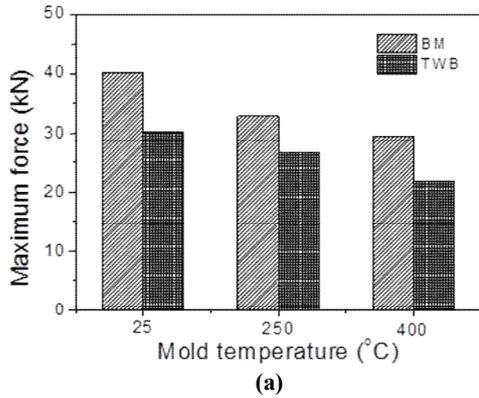


Fig. 8 (a) Maximum force and (b) limit height with different temperatures of die and holder

에 정리하였다. 보론강의 TWB의 최대 하중은 원소재 보다 낮아진다. 이를 통하여 고온 성형 온도 이력에서 용접부의 강도는 원소재보다 낮아짐을 유추할 수 있다. 다이, 홀더의 온도가 높아질 수록 원소재의 경우 최대 하중은 낮아지고 한계 높이는 높아지는 반면 보론강 TWB의 경우 최대 하중은 낮아지나 한계 높이는 유사하였다.

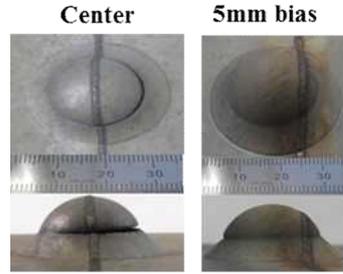


Fig. 9 Failure pattern for TWB with different weld line positions

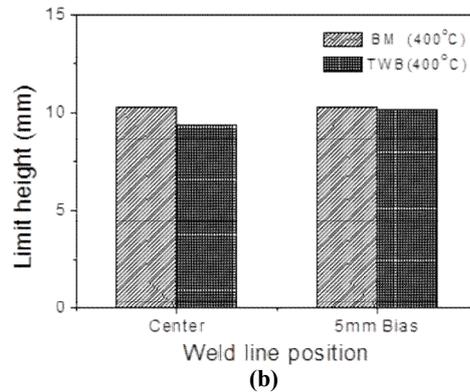
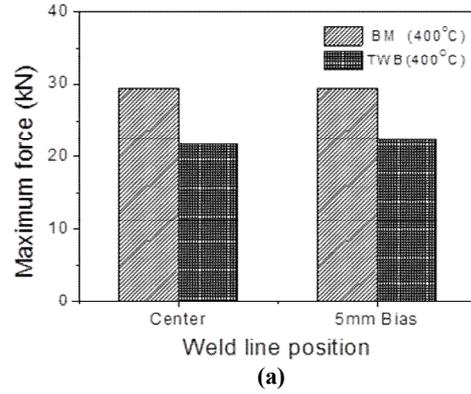


Fig.10 (a) Maximum force and (b) limit height with respect to weld line positions

3.3 용접선 위치의 영향

용접선 위치에 따른 보론강 TWB의 에릭슨 커 시험 후 파단 양상을 Fig. 9에 보였다. 원소재와 TWB 모두 파단은 펀치 코너 접선 부위에서 파단이 일어났다. 원소재와 용접선이 5mm 치우친 TWB의 파단은 모재에서 시작하였으나 용접선이 중앙에 위치한 TWB는 용접부에서 파단이 시작되었다. 보론강 TWB의 용접선 위치에 따른 에

릭슨 커핑 시험 후 최대 하중 및 한계 높이를 Fig. 10에 정리하였다. 최대 하중은 원소재, 용접선이 5mm 치우친 TWB, 용접선이 중앙에 위치한 TWB 순으로 높았다. 이는 용접부의 강도는 고온 성형 온도 이력에서 원소재 보다 낮고, 용접선이 중앙에 위치한 TWB의 용접선이 5mm 치우친 TWB의 용접선보다 변형에 더 많이 관여하였기 때문이다. 반면, 한계 높이는 원소재와 용접선이 5mm 치우친 TWB는 유사하고 용접선이 중앙에 위치한 TWB는 그 보다 낮다. 이는 원소재와 용접선이 5mm 치우친 TWB의 파단은 모재에서 시작하였으나 용접선이 중앙에 위치한 TWB는 용접부에서 파단이 시작되었기 때문이라고 판단된다.

3.4 성형 속도의 영향

성형 속도에 따른 보론강 TWB 커핑 시험 후 파단 양상을 Fig. 11에 보였다. 펀치 속도가 2.5, 5, 10mm 경우 원소재와 TWB 모두 펀치 코너 접선 부위에서 파단이 일어났다. TWB의 파단은 펀치 속도와 무관하게 용접부에서 시작되었다. 보론강 TWB의 성형 속도에 따른 에릭슨 커핑 시험 후 최대 하중 및 한계 높이를 Fig. 12에 정리하였다. 원소재와 TWB 모두 속도가 증가함에 따라 최대 하중과 한계 높이는 모두 낮아진다. 통상적으로 보론강 소재의 일축 인장 시험에서 속도가 증가할수록 강도는 높아지고 연신율을 낮아지며, 온도가 증가할수록 강도는 낮아지고 연신율은 높아진다[2]. 최대 하중은 펀치와 다이 곡률부에서 소재의 변형과 주로 연관되어 있는 반면에 한계 높이는 펀치 접선 부의 변형과 주로 연관이 되어 있다. 소재가 금형과 접촉되어 있는 펀치와 다이 곡률부에서는 소재 물성이 펀치 속도 증가에 따른 열전달의 영향을 받게 되는데, 속도가 낮을수록 열전달이 원활이 이루어져 낮은 온도에서 성형이 일어나게 되어 되므로 최대 하중은 높아진다. 이 경우는 속도가 최대 하중에 미치는 영향보다 속도에 의한 온도가 최대 하중에 미치는 영향이 크다고 볼 수 있다. 반면 소재가 금형과 접촉되어 있지 않은 펀치 접선 부위에서는 소재 물성이 펀치 속도 증가에 따른 열전달의 영향을 덜 받게 되므로, 속도가 낮을수록 한계 높이는 높아진다. 이 경우는 속도가 한계 높이에 미치는 영향이 속도에 의한 온도가 한계 높이에 미치는 영향보다 크다고 볼 수 있다.

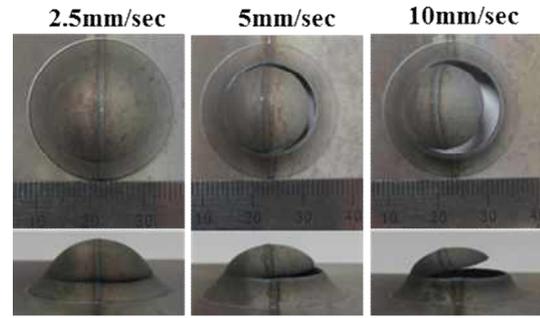
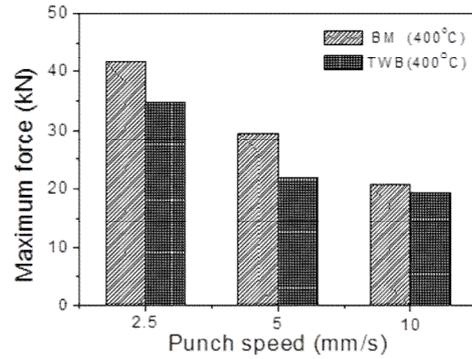
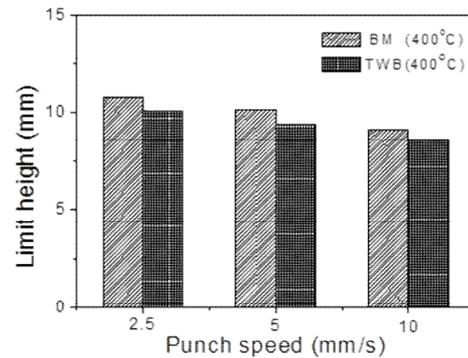


Fig.11 Failure pattern for TWB with different weld line positions with different punch speeds



(a)



(b)

Fig.12 (a) Maximum force and (b) limit height with different punch speeds.

4. 결론

본 연구에서는 레이저 용접된 보론강 TWB의 고온 성형성을 평가하기 위하여 고온 성형 이력을 고려한 온도에서 에릭슨 커핑 시험을 수행하

였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 용접 조사 방향에 따른 보론강 TWB의 성형성을 평가한 결과 상온에서 정방향의 성형성은 역방향 보다 높았고 고온에서 정방향과 역방향의 성형성은 차이가 없었다.

(2) 금형 온도에 따른 보론강 TWB의 성형성을 평가한 결과 금형 초기 온도 25, 250, 400℃에서의 성형성의 차이는 크지 않았다.

(3) 용접선 위치에 따른 보론강 TWB의 성형성을 평가한 결과 용접선이 5mm 치우친 경우가 용접선이 중앙에 위치한 TWB 보다 높았다.

(4) 성형 속도에 따른 보론강 TWB의 성형성을 평가한 결과 2.5, 5, 10mm/s로 성형속도가 증가함에 따라 성형성이 감소하였다.

참 고 문 헌

- [1] H. Karbasian, A. E. Tekkaya, 2010, A Review on Hot Stamping, J. Mater. Process. Technol., Vol. 210, No. 15, pp. 2103~2118.
- [2] D. Kim, J. H. Kim, D. H. Yoo, K. Chung, Y. Kim, M. Y. Lee, 2011, Flow Behavior of Laser Welded Boron Steel Sheet in Uniaxial Tension at Elevated Temperature, Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 5, pp. 362~363.
- [3] J. Maas, W. Staudinger, 2008, Tailored Blanks in Hot Stamping, ThyssenKrupp techforum, Issue 1, pp. 29~31.
- [4] W. F. Hosford, R. M. Carddell, 1983, Metal Forming: Mechancis and Metallurgy, Prentice-Hall, New Jersey, p. 303.