

## 레이저 용접된 보론강판의 고온 인장 특성 평가

김대용<sup>1</sup> · 김지훈<sup>#</sup> · 유동훈<sup>2</sup> · 정관수<sup>2</sup> · 김 용<sup>3</sup> · 이문용<sup>4</sup>

# Flow Behavior of Laser Welded Boron Steel Sheet in Uniaxial Tension at Elevated Temperature

D. Kim, J. H. Kim, D. H. Yoo, K. Chung, Y. Kim, M. Y. Lee

(Received June 13, 2011 / Revised July 21, 2011 / Accepted July 22, 2011)

### Abstract

For the purpose of improving crashworthiness qualities and maximizing weight saving efficiency, TWB's (tailor welded blanks) of quench-hardenable boron steel sheet formed by hot stamping processes has been used for automotive BIW (body in white) applications. In this work, the flow behaviors of TWB of quench-hardenable boron steel sheet were investigated in uniaxial tension tests at elevated temperature. TWB's having a uniform thickness of 1.4mm were fabricated by laser welding. Specimens with two weld line directions were used to test the mechanical property and reliability of the weld zone. After heating at 950°C for 5min, the specimens were subjected to tension test at 650, 700 and 800°C with a strain rate of 0.01 /s and at 700°C with strain rates of 0.01, 0.1 and 1/s. The ultimate strength of the weld zones was higher than that of the base materials at 650 and 700°C, but was similar to the base metal at 800°C. Fracture occurred at the base material at 650 and 700°C, but at the weld zone at 800°C.

**Key Words** : Hot Stamping, Laser Welding, Tailor Welded Blank(TWB), Boron Steel Sheet, Flow Behavior

## 1. 서 론

최근 자동차 관련 법규는 승객의 안전성 강화를 위해 엄격한 차체(body in white, BIW) 충돌 성능을 요구하고 있다. 또한 환경에 대한 인식이 높아지면서 배기가스 규제에 따른 연비 기준이 강화되어 이에 따른 차체 경량화에 대한 필요성이 지속적으로 높아지고 있다. 충돌성능향상과 경량화라는 요구 조건을 동시에 만족하기 위한 노력의 일환으로 고강도 강판의 차체 적용 양이 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 고강도 강판의 경우 연신율이 낮기 때문에 높은 성형성을 요구하

는 복잡한 형상 부품에 대해서는 그 적용이 제한될 수 밖에 없다. 이를 극복하기 위하여 고온에서 가열된 보론 첨가 소재(보론강판)를 프레스에서 성형한 후 냉각하는 열간 성형(핫 스탬핑(hot stamping), 핫 프레스 포밍(hot press forming) 또는 프레스 하드닝(press hardening))기술이 1990년대 말부터 개발되었고, 핫스탬핑 기술을 이용한 1400MPa 급 차체 부품이 개발되어 다양하게 적용되고 있다 [1~3]. Fig. 1에 정리된 대로 EuroCarbody[4] 학회에 출품된 차체에 적용된 신 기술을 살펴보면, 최근 보론강판의 핫스탬핑 기술은 부품의 부위별 요구 성능을 달리하여 부품의 성능을 최적화하는 맞춤

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 변형제어연구그룹  
2. 서울대학교 재료공학부  
3. 고등기술연구원 로봇/생산기술센터  
4. 성우하이텍 기술연구소  
# 교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소 변형제어연구그룹,  
E-mail: kimjh@kims.re.kr

Table 1 Chemical composition of 22MnB5 steel sheet (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	B	Fe
0.18	0.21	1.27	0.017	0.002	0.22	0.0028	Bal.

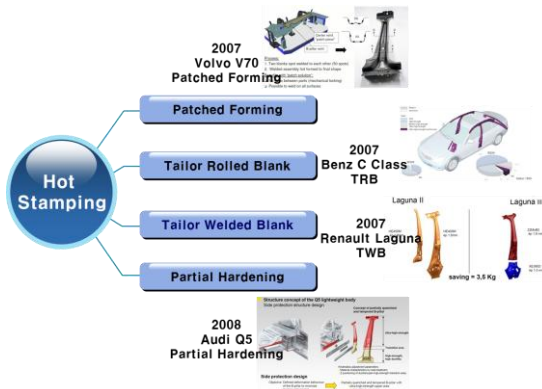


Fig. 1 Applications of BIW parts having tailored properties with hot stamping process in summary of EuroCarbody conference

blank, TWB) 기술을 핫스탬핑 기술과 접목하는 연구나, 핫스탬핑 공정 시 위치별로 냉각조건을 달리하여 물성을 달리하는 부분냉각(partial quenching) 기술에 대한 연구가 그것이다[1, 5]. 그 중에서 TWB 보론강판 핫스탬핑 기술은 보론강판과 종류나 두께가 다른 소재를 용접(주로 레이저 용접)하여 블랭크를 제작하고 이를 핫스탬핑 공법으로 부품을 성형하는 기술로 부품의 충돌 향상 및 경량화를 극대화시킬 수 있는 장점이 있다. 이러한 TWB 보론강판의 핫스탬핑 기술을 확보하기 위해서는 TWB 보론강판의 고온 변형의 특성을 이해하는 것이 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 레이저 용접된 보론강판을 핫스탬핑 공정과 유사한 공정 이력에서 인장 시험을 수행하여 TWB 보론강판의 고온 인장 특성을 평가하였으며, 이를 통하여 TWB 보론강판의 고온 인장 물성과, 용접부의 건전성을 확인하였다.

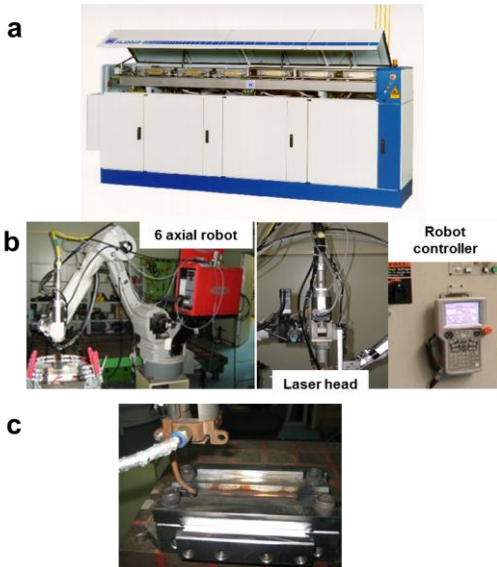


Fig. 2 Laser welding machine with (a) laser oscillator, (b) 6 axial robot system and (c) nozzle for shielding gas.

형(tailoring) 기술로 확대 되어 연구되고 있다. 종전에 냉간 성형 기술에서 적용되고 있는 일체 화 성형(patch forming) 기술, 맞춤압연판재(tailor rolled blank, TRB) 기술 또는 맞춤용접판재(tailor welded

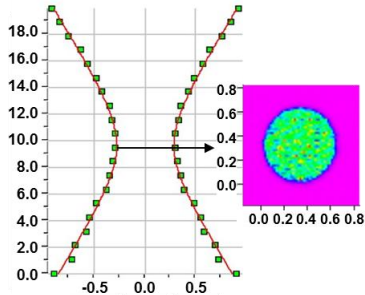
## 2. 실험 방법

### 2.1 재료 및 용접

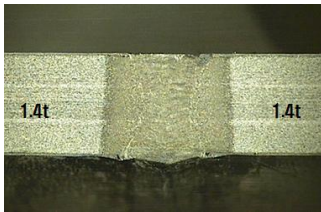
핫스탬핑을 위한 보론강판은 고온 성형 시 산화와 부식을 방지하기 위하여 7~11wt%의 Si를 함유하고 있는 Al-Si 합금을 도금을 하여 사용하는 데 [6], 본 연구에서는 Al-Si 합금(9wt% Si)의 도금 부착량이 약 80g/m<sup>2</sup>인 1.4mm 두께의 22MnB5 보론강판이 사용되었다. 사용된 보론강판의 화학성분을 Table 1에 정리하였다. TWB 보론강판은 레이저로 동종 두께 맞대기 용접되어 제조되었다. 레이저 용접은 Fig. 2(a)에서 도시된 CW-ND:YAG 레이저 소스를 갖는 Trumpf사의 HASS HL3006D 용접기를 이용하였다. 레이저 빔의 출력은 3kW로 고정하였다. 용접은 Fig. 2(b)에 도시한 Yaskawa 6축 로봇을 이용하였다. 보호 가스는 4mm 지름을 가진 구리 노즐(Fig. 2(c))을 통하여 분사되었고, 용접 시 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. Fig. 3을 통하여 측정된 레이저 빔의 프로파일을 확인할 수 있다. 건전한 용접 시편을 제작하기 위하여 Table 2에 정리된 용접 변수에 대하여 용접을 수행하였으

**Table 2 Tested welding conditions**

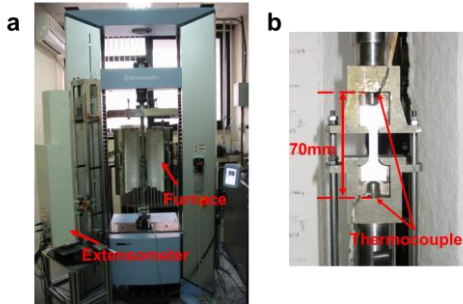
Laser source		Butt surface		Shielding gas	
Angle (°)	Speed (m/min)	Gap (mm)	Milling	Materials	Flow rate (l/min)
0.0, 5.0, 10.0	2.0, 4.0	0.0, 0.1, 0.2	Yes, No	Ar, He	10.0, 20.0, 30.0



**Fig. 3 Measured laser beam profile**

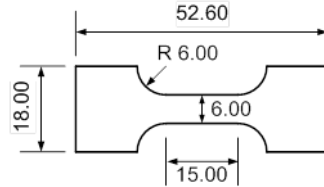


**Fig. 4 Optical photographs of welding cross-section**

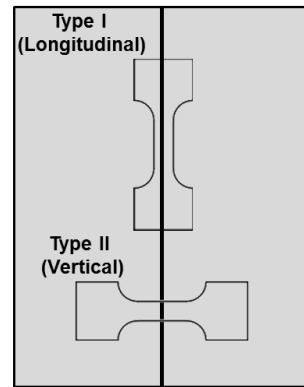


**Fig. 5 (a) Universal tensile test machine at high temperature equipped with external extensometer and furnace, (b) test grip with a specimen**

며, 외관상 키 홀, 언더컷, 내부기공 등이 적은 조건은 고온 인장 시험을 위한 시편 제조조건으로 선정하였다. 선정된 조건을 Table 2에 굵은 글씨체로 표기하였다. 레이저 빔은 판재의 수직방향 위에서 조사되었고, 용접속도는 4.0m/min로 하였다. 소재의 맞대기 부분은 밀링 가공하여 표면을 매끄럽게 하였고, 갭은 0.1mm이었다. 보호 가스로는 헬륨이 사



**Fig. 6 Dimension of the specimen (unit: mm)**



**Fig. 7 Schematic view of two types of specimens**

용되었고, 20l/min의 속도로 분사되었다. 제조된 용접시편의 용접부 단면형상을 Fig. 4에 도시하였다.

## 2.2 고온 인장 실험

레이저 용접된 TWB 보론강판의 고온 인장 특성을 평가하기 위하여 온도와 변형률 속도를 달리하며 인장시험을 수행하였으며, 모재(base material, BM)와 그 결과를 비교하였다. 고온 인장시험은 Fig. 5(a)에 도시된 가열로가 장착된 인장시험기(모델명: Shimadzu AG-100kNx)에서 수행되었다[7]. Fig. 6에 도시된 대로 시편은 ASTM E 8M 소형 크기 시편 형상을 고온 인장 시험에 적합하도록 수정하였으며, 수정된 시편이 체결될 수 있는 그림을 Fig. 5(b)와 같이 제작하여 사용하였다. 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 인장방향과 용접선의 방향이 다른 두 종류 즉, 인장방향과 용접선이 수평인 시편(type I)과 인장 방향과 용접선이 수직인 시편(type II)을 제작하여 고온 인장 시험을 수행하였다. 용접선이 인장방향과 수평한 시편의 경우 용접부

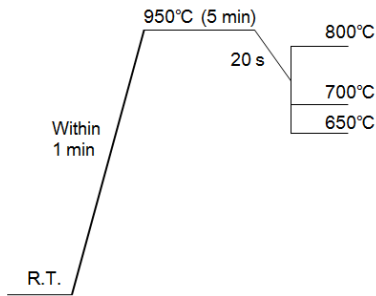


Fig. 8 Thermal histories of tensile test

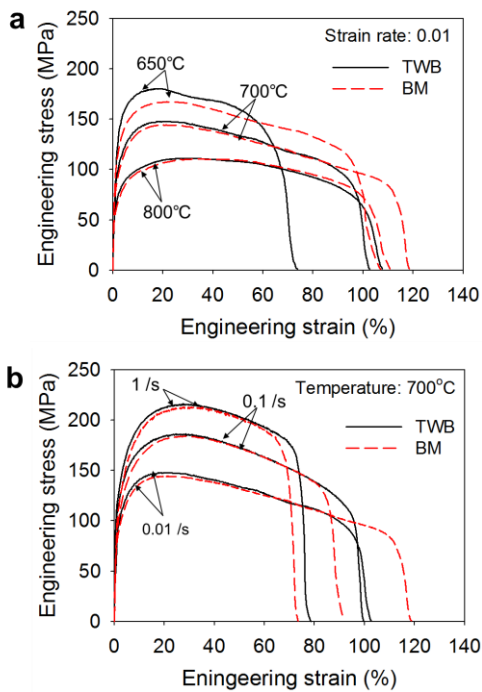


Fig. 9 Stress-strain curves of TWB boron steel sheets for type I specimen with different (a) temperatures and (b) strain rates

의 인장물성을 평가할 수 있다. 반면, 용접선이 인장방향과 수직인 시편은 용접부의 건전성을 평가할 수 있으며, 용접부에서 파단이 일어나는 경우에 대해서는 용접부의 파단강도를 측정할 수 있다. 핫스탬핑 공정 조건과 유사한 온도 이력 상태에서 TWB 보론강판의 변형거동을 살펴보기 위해서 Fig. 8와 같은 온도 이력 조건에서 실험이 수행되었다. 시험편을 외부 가열로에서 950°C, 5분간 유지시킨 후 가열로가 장착된 인장시험기에 이동

하여 장착하고 약 20초 후 시편의 온도가 원하는 온도가 되었을 때 인장 시험을 실시하였다. 고온 인장 시험의 온도와 변형률 속도 조건은 통상적으로 핫스탬핑 공정에서 성형이 이루어지는 조건으로 정하였다. 참고로 복 등[8]의 연구에서 자동차 부품의 열간 성형 온도는 639~836°C이었다. 고온 인장 시험은 Type I과 type II 시편 동일하게 변형률 속도 0.01/s에서 온도를 650, 700, 800°C로 달리하고, 온도 700°C에서 변형률 속도를 0.01/s, 0.1/s, 1.0/s로 달리하여 수행하였다.

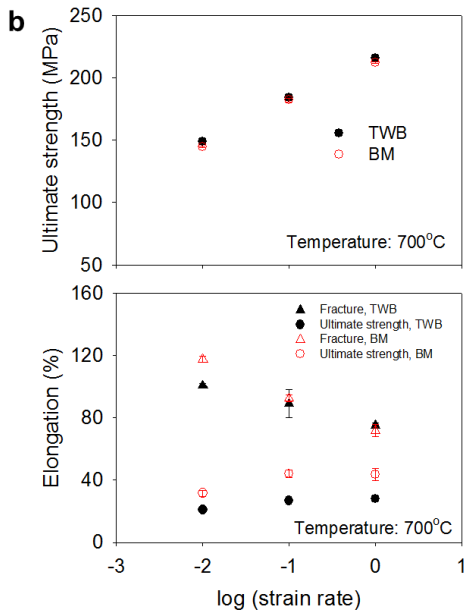
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수평 방향 인장 실험

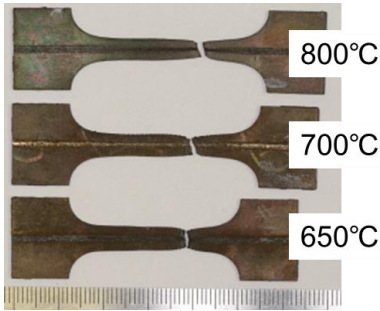
Fig. 9는 type I 용접시편과 모재시편에 대해서 온도와 변형률 속도를 달리하며 측정된 응력-변형률 선도를 보여 준다. Fig. 10에 온도와 변형률 속도에 따른 인장강도(ultimate strength)와 연신율(elongation)을 정리하였다. 연신율은 최대응력에서와 파단에서의 연신율을 각각 비교하였다. Fig. 11은 파단까지 인장 시험된 type I 용접시편의 형상을 보여준다.

변형률 속도 0.01/s에서 온도를 달리한 고온 인장 실험 결과 온도가 증가할수록 인장강도와 최대응력 연신율(elongation at ultimate strength)은 type I 용접시편과 모재시편 모두 인장강도는 낮아지고 연신율은 높아짐을 Fig 9(a)와 Fig. 10(a)에서 확인할 수 있다. 용접시편의 파단 연신율(elongation at fracture)은 온도에 따라서 증가하나, 모재시편의 파단 연신율은 650°C에서 700°C에서 높아지다가 800°C에서는 오히려 낮아진다.

0.01/s에서 650, 700, 800°C모두에 대해서 인장강도는 용접시편이 모재시편 보다 높고 파단 연신율은 용접시편이 모재시편 보다 낮다. 또한, 용접시편과 모재시편의 인장강도와 파단 연신율의 차이가 온도가 높아짐에 따라 작아지다가 800°C에서 용접시편과 모재시편의 인장강도와 파단 연신율 차이가 거의 없어지는 경향을 보인다. 미미하나 800°C에서 초기 변형률에서의 응력은 용접시편이 모재시편보다 높고, 약 40%이상 변형률에서의 응력은 오히려 용접시편이 모재시편 보다 낮음을 확인할 수 있다. 혼합법칙(rule of mixture)을 고려한다면, 변형률 속도 0.01/s에서 온도 650°C와 700°C에서는 용접부의 인장강도가 모재부보다 높아지고, 용접부의 연신율을 낮아지는 반면 800°C



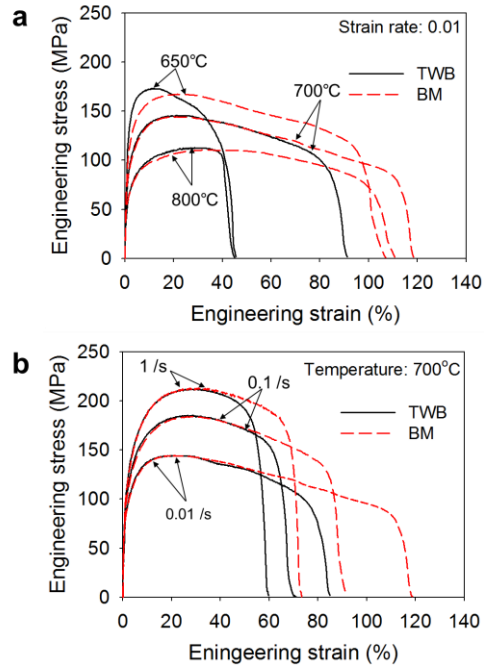
**Fig.10** Ultimate strength and elongation of TWB boron steel sheets for type I specimen with different (a) temperatures and (b) strain rates



**Fig.11** Type I tension test specimens of TWB boron steel sheet with different temperatures

에서는 용접부의 물성 변화가 크지 않음을 유추할 수 있다.

Fig. 9(b)와 Fig. 10(b)는 온도 700°C에서 변형률 속도를 달리한 고온 인장 시험 결과를 보여준다. 변형률 속도가 증가 할수록 type I 용접시편과 모재시편의 인장강도는 증가하고 파단 연신율은 낮아짐을 확인할 수 있다. 인장강도와 인장강도 연신율은 변형률 속도 0.01, 0.1, 1/s에서 용접시편이 모재시편 보다 높았다. 반면 파단연신율의 경우 0.01/s에서는 모재시편이 용접시편보다 높았으나, 0.1/s과 1/s에서는 유사하였다.

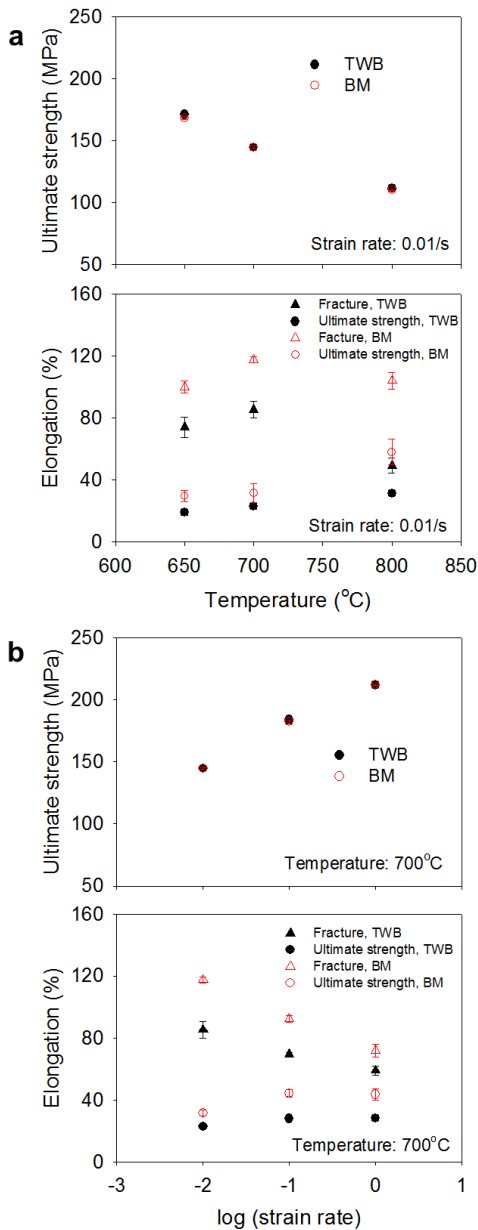


**Fig.12** Stress-strain curves of TWB boron steel sheets for type II specimen with different (a) temperatures and (b) strain rates

### 3.2 수직 방향 인장 실험

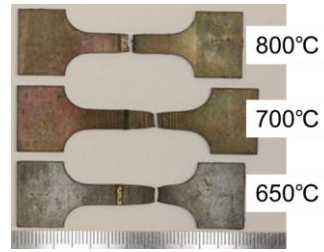
Fig. 12은 type II 용접시편과 모재시편에 대해서 온도와 변형률 속도를 달리하며 측정된 응력-변형률 선도를 보여 준다. Fig. 13에 온도와 변형률 속도에 따른 인장강도와 연신율을 정리하였다. 변형률 속도 0.01/s에서 온도를 달리한 고온 인장 실험 결과 type II 용접시편의 인장강도와 최대응력 연신율은 온도가 증가함에 따라 증가하나, 파단 연신율은 650°C에서 700°C에서 높아지다가 800°C에서는 급격히 낮아짐을 Fig. 12(a)와 Fig. 13(a)에서 확인할 수 있다. 이는 650°C와 700°C에서는 파단이 모재부에서 일어난 반면 800°C에서는 용접부에서 파단이 일어나기 때문이다(Fig. 14). 이는 앞에서 type I 용접시편에 대해서 설명한 용접부와 모재부의 인장강도 차이로 type II 용접시편의 파단 원인을 유추할 수 있다. 파단은 type I 용접시편의 경우 등 연신 조건(iso-strain condition)에 따라 모재와 용접부의 파단 연신율과 관련이 높고 type II 용접시편은 힘 평형 조건에 따라 강도 및 두께와 밀접한 관계가 있다[9, 10].





**Fig.13 Ultimate strength and elongation of TWB boron steel sheets for type II specimen with different (a) temperatures and (b) strain rates**

용접부의 인장강도가 650°C와 700°C에서는 모재부 보다 높기 때문에 인장강도가 낮은 모재부에서 변형이 집중되어 모재부에서 파단이 일어난다. 반면, 800°C에서는 용접부와 모재부의 인장강도는 차이가 없으나, 인장강도 연신율이 용접부는



**Fig.14 Type II tension test specimens of TWB boron steel sheet with different temperatures**

32.3%(±1.63)이고 모재부는 59.9%(±8.25)이므로 모재부의 인장강도 연신율까지 늘어난 이후 용접부에서 변형이 집중되어 파단이 일어난다. 이때 파단 연신율이 49.3%(±5.03)이었다. 따라서 TWB 보론 강관으로 열간 성형 시 800°C에서는 용접부의 파단이 일어날 소지가 높다.

Fig. 12(b)와 Fig. 13(b)는 온도 700°C에서 변형 속도를 달리한 고온 인장 시험 결과를 보여준다. 변형 속도가 증가 할수록 type II 용접시편과 모재시편의 인장강도는 증가하고 파단 연신율은 낮아지는 일반적인 결과를 보인다. 용접시편과 모재시편의 인장강도는 유사하였으나, 최대응력 연신율과 파단 연신율은 용접시편이 모재시편보다 낮았다. 온도 700°C에서는 변형 속도 0.01, 0.1, 1/s 모두에 대해서 모재부에서 파단이 일어나므로 인장강도는 유사하게 나타난다. 반면 온도 700°C와 변형 속도 0.01, 0.1, 1/s에 대해서 용접시편의 용접부가 모재부 보다 강하므로 용접부에서 변형은 적고 모재부에서 불균일한 변형이 유도되어 최대 응력 연신율과 파단 연신율이 낮게 된다.

#### 4. 결론

레이저 용접된 TWB 보론강관을 핫스탬핑 공정의 온도 이력 조건에서 용접선이 인장방향과 수평, 수직인 시편으로 고온 인장 시험을 수행하였으며 다음과 같은 주요한 결론을 도출하였다.

(1) 0.01/s 에서 type I 고온 인장 시험 결과 650, 700°C에서 용접부의 인장강도는 모재부 보다 높았으며, 800°C에서는 유사하였다.

(2) 0.01/s 에서 type II 고온 인장시험 결과 용접부의 650, 700°C에서는 모재부에서 파단이 발생하고, 800°C에서는 용접부에서 파단이 발생했다. 이는 650, 700°C에서 용접부의 물성이 모재보다 높기 때문이다.

## 후 기

본 과제는 지식경제부에서 시행한 광역경제권 선도산업 육성사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. Karbasian, A. E. Tekkaya, 2010, A Review on Hot Stamping, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 210, pp. 2103~2118.
- [2] H. Choi, K. Nam, W. Lim, D. C. Ko, B. M. Kim, 2010, The Optimizat on of Hot Press Bending for Improving Dimensional Accuracy and Mechanical Strength of Bent Product, *Met. Mater. Int.*, Vol. 16, No. 6, pp. 1001~1007.
- [3] D. H. Lee, T. J. Kim, J. D. Lim, H. J. Lim, 2009, Development of High Strength Steel Body by Hot Stamping, Vol. 18, No. 4, pp. 304~309.
- [4] Information on <http://www.automotive-circle.com>.
- [5] K. Mori, Y. Okuda, 2010, Tailor Die Quenching in Hot Stamping for Producing Ultra-High Strenght Steel Formed Parts Having Strength Distribution, *CIRP Annuals-Manuf. Technol.*, Vol. 59, pp. 291~294.
- [6] D. W. Fan, H. S. Kim, J. K. Oh, K. G. Chin, B. C. De Cooman, 2010, Coating Degradation in Hot Press Forming, *ISIJ International*, Vol. 50, pp. 561~568.
- [7] D. Yoo, D. Kim, K. Ahn, H. G. Kim, H. Son, G. S. Kim, K. Chung, 2010, Characterization of Mechanical Properties of Hot Press Forming, *Steel Res. Int.*, Vol. 81, No. 9, pp. 857~860.
- [8] H. H. Bok, M. G. Lee, H. D. Kim, M. B. Moon, 2010, Thermo-Mechanical Finite Element Analysis Incorporation the Temperature Dependent Stress-Strain Response of Low Alloy Steel for Practical Application to the Hot Stamped Part, *Met. Mater. Int.* Vol. 16, No. 2, pp. 185~195.
- [9] D. Kim, W. Lee, J. Kim, C. Kim, K. Chung, 2009, Experimental Formability Investigation for FSW Sheets with Respect to Base Material's Directional Combination, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 18, No. 1, pp. 73~79.
- [10] W. Lee, K. H. Chung, D. Kim, C. Kim, K. Okamoto, R. H. Wagoner, K. Chung, 2009, Experimental and Numerical Study on Formability of Friction Stir Welded TWB Sheets Based on Hemispherical Dome Stretch Tests, *Int. J. Plasticity*, Vol. 25, No. 9, pp. 1626~1654.