

레이저 TWB된 이종접합강의 기계적 특성[§]

남기우* · 박상현**† · 이규현** · 이문용**

* 부경대학교 재료공학과, ** 성우하이텍 기술연구소

Mechanical Properties of Laser-Welded Multi-Material Tailor-Welded Blanks

Ki Woo Nam*, Sang Hyun Park**†, Kyu Hyun Lee** and Mun Yong Lee**

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

** Research Institute, Sungwoo Hitech, Co. Ltd.,

(Received December 12, 2011 ; Revised June 8, 2012 ; Accepted June 18, 2012)

Key Words: Center Pillar(센터 필라), Different Material(이종 재료), Tailor Weld Blanks(TWB; 맞춤식 재단 용접), Tensile Test(인장시험), High Speed Bending(고속굽힘), Statically Indeterminate(부정정)

초록: 본 연구에서는 승객의 안전성을 확보하기 위하여 상부 고강도강 SABC1470, 하부 냉간 압연강 SPFH590과 SPFC980으로 경량화를 위하여 레이저 TWB 용접하였다. TWB 이종재료 시험편은 열처리에 의하여 SABC1470 재료에 고강도화 하였다. 수냉까지 대기 시간에 따르는 인장강도와 센터필라와 같은 부정 조건에 의한 고속 굽힘의 변형 거동을 평가하였다. 동일 온도에서 열처리 된 TWB 시험편은 수냉까지 대기 시간에 따라서 인장강도와 굽힘강도가 감소하였다. 850 °C에서 열처리한 SABC1470 + SPFH590 TWB 시험편은 충돌에 의해 차체 파손시 파괴거동을 유도하여 승객을 보호할 수 있는 적절한 조건이었다. 사고에 의한 승객의 안전을 고려하면, 센터필라는 상부재로서 SABC1470, 하부재료로 SPFH590을 사용하는 것이 안전하다.

Abstract: In this study, tailor-welded blanks(TWB) were formed between high-strength steel(SABC1470) and cold rolled steels(SPFH590 and SPFC980) to improve passenger safety and reduce the weight of cars. Multi-material TWB specimens were highly strengthened through the heat treatment of SABC1470. The change in tensile strength caused by the stand-by time until water cooling after stamping and the deformation behavior of high-speed bending in a statically indeterminate condition such as in the center-pillar were evaluated. Multi-material TWB specimens that were heat-treated at the same temperature tended to show a decrease in tensile and yield strength, depending on the stand-by time until water cooling. On the other hand, Multi-material TWB specimens(SABC1470+SPFH590) that were heat treated at 850°C showed good properties that were suitable for ensuring passenger safety in car accidents. From the viewpoint of passenger safety, it is best to use SABC1470 and SPFH590 in the upper and lower area of the center-pillar, respectively.

1. 서 론

자동차 차체는 차량 중량의 30%를 차지하고 있으며, 경량화 요구를 만족하기 위하여 경량 소재를 차체에 적용하는 실정이다.⁽¹⁾ 이와 관련된 기술로 박육 주조 공정, 온간/열간 프레스, 접합 및 조립 등의 기반 기술 확립이 필요하다.⁽²⁾ 보론 첨가 소재의 열간 성형 제품은 자동차 차체, 특히 측면 구조물에서 충격량을 분산시키는 장점이

있다.⁽³⁻⁵⁾ 측면 충돌 시 힘의 분산을 용이하게 할 수 있으며, 이로 인하여 승객의 안전을 향상시킬 수 있다. 또한, 열간 성형 제품별로 국부적으로 붕괴 거동을 더욱 용이하게 할 수 있다면, 승객의 안전을 더욱 확보할 수 있으며, 이를 해결하고자, 보강재에 의한 강성 추가 위주로 개발되고 있는 추세이다. 이를 기술적으로 해결할 수 있는 방법이 레이저 맞춤식 재단 용접(tailor welded blanks; TWB) 기술이다.⁽⁶⁻⁸⁾ 레이저 TWB 기술을 이용하여 부분적으로 두께를 증가시키거나, 일반 고장력강과의 이종재료 접합을 통하여 양호한 붕괴 거동을 유도할 수 있어, 충돌 성능 향상 및 경량화를 극대화할 수 있다.⁽⁹⁾ 센터 필라(center

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011.

11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, ybf9522@naver.com

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

pillar)의 경우는 상부에 보강재를 적용하여 상부 충돌강성을 하부보다 더욱 높게 유지해야 한다. 상/하부가 동일한 강성을 가질 경우 측면 충돌 시 센터 필라의 중간 부분이 직접적으로 충격을 받으면서 승객의 상체에 큰 충격을 주게 된다. 이를 해결하기 위하여 센터 필라의 하부에 상부보다 약한 강성을 부여하여 승객의 안전을 확보해야 한다.

따라서 본 연구에서는 승객의 안전성을 확보하기 위하여 센터 필라의 적용을 고려한 이중재료(상부 보론강, 하부 냉연강) TWB된 소재의 기계적 특성과 충돌을 고려한 부정정보의 고속 굽힘 특성을 연구하였다. 즉, 상부 보론 첨가강이 요구하는 1500 MPa 이상의 인장강도를 유지하기 위한 열처리 조건에서 열처리된 이중접합강의 기계적 특성 및 자동차의 센터 필라가 고정된 조건과 유사한 부정정 조건에서 이중접합강의 고속 굽힘 변형 상태를 연구하였다.

2. 재료 및 실험 방법

사용한 소재는 상부 고강도강은 보론 첨가된 SABC1470 강판으로 산화피막발생을 방지하기 위하여 Al+Si를 도금처리 한 소재이고, 하부 저강도강은 냉연강으로 SPFH590과 SPFC980이다. 소재의 두께는 1.4 mm이며, 기계적 특성 및 화학적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같다.

Table 1 Mechanical Properties

Properties Materials	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)
SABC1470	509	672	18
SPFH590	522	626	26
SPFC980	726	1128	13

Table 2 Chemical composition(wt.%)

Compositions Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	B
SABC1470	0.021	0.26	1.27	0.017	0.003	0.22	0.0028
SPFH590	0.015	0.16	1.38	0.017	0.004	-	-
SPFC980	0.086	0.20	3.09	0.024	0.002	-	-

센터 필라의 경우, 경량화 및 충돌로 인한 승객의 안전성을 확보하기 위하여 Fig. 1과 같이 상부에 고강도 재료를 적용하여 상부 충돌강성을 하부보다 더욱 높게 유지해야 한다. 이러한 특성을 부여하기 위한 레이저 용접은 1.4 mm 이중재 동종 두께의 강판을 야그 레이저 용접기(모델명: 3kW-CW Nd : YAG Laser System)를 이용하여 3 kW 출력으로 4.0 m/min로 시험편 상부에서 초점을 두고 맞대기(Butt) 용접을 실시하였다.

레이저 TWB된 시험편의 수냉 조건에 따른 기계적 특성 변화를 관찰하기 위하여 시험편을 850, 900, 950 °C에서 7분간 열처리한 후 수냉하였다. 수냉 조건은 0과 10 s의 2가지의 조건으로 대기중에 노출 후 수냉하였다. 이 냉각 조건은 핫 스탬핑 조건에서 SABC1470강이 마르텐사이트 변태를 유지할 수 있는 조건이다.⁽¹⁰⁾ 고강도를 유지하기 위하여 열처리가 필요한 부분은 마르텐사이트 변태가 필요한 SABC1470이므로, 하부 냉연강의 열처리 방지를 위하여 이중의 차폐 처리를 하여 열처리 실시하였다. 하부 냉연강은 ZrO_2 세라믹스로 밀폐 처리한 후, 1300 °C 이상의 고온에 견디는 단열재를 사용하여 이중으로 밀폐 후, SABC1470 부분만 마르텐사이트 변태화시켰다.

레이저 용접된 이중재 시험편의 인장시험은 만능 시험기(모델명: Zwick/Roell Z250)를 사용하였다. 시험 조건은 예비하중을 50 N으로 가한 상태에서 시험 속도를 1 mm/min로 실시하였다. 시험편의 형상 및 치수를 Fig. 2에 나타낸다.

센터 필라의 충돌에 의하여 변형되는 양상을 관찰하기 위하여, 부정정 조건으로 구속하여 이중접합재 시험편의 고속 굽힘 시험을 실시하였다. 시험은 49 kN의 만능인장시험기(Instron 4204)를 사용하였다. 시험편은 KS 규격에 의하여 제작하였으며 시험편의 형상과 치수를 Fig. 3에 나타낸다. 하중의 부하는 접합부에서 20 mm 떨어진 SABC1470에 가하였으며, 크로스 헤드 속도는 200 mm/min이다.

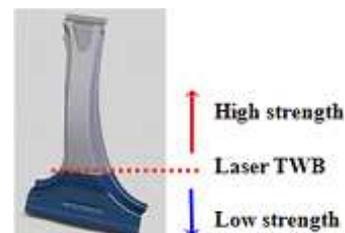


Fig. 1 Outline of center pillar bonded with different materials

시험편의 조직은 나이탈 3% 용액으로 에칭하여 금속현미경으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 TWB 이종용접재의 인장 특성

레이저 TWB된 시험편을 사용하여 SABC1470 소재는 고강도화를 위하여 850, 900, 950 °C에서 7분간 열처리한 후, 수냉한 TWB시험편의 인장시험 결과를 Fig. 4에 나타낸다. 같은 온도에서 열처리한 TWB시험편은 수냉 시간까지 대기시간이 길어짐에 따라서 인장 및 항복강도가 낮아지는 경향을 보였다. 모든 조건에서 SABC1470 + SPFC980의 TWB시험편이 SABC1470 + SPFH590 TWB시험편보다 높은 인장강도를 나타내었다. 이것은 SPFC980의 모재 인장강도가 SPFH590보다 높기 때문이다. 한편 SABC1470강은 840 °C 이상에서 인장강도 1500 MPa 이상을 나타내었다.

SABC1470 + SPFH590 TWB시험편은 이종 재료간의 강도차이가 매우 크다. 이러한 강도차이는 인장시험에서 상대적으로 강도가 낮은 냉연강 및 용접부에서 파단을 일으키는 원인이 되어 전체적으로 낮은 인장강도와 높은 연신율을 나타내는 이유가 되었다고 판단된다. 850과 900 °C의 강도는 모재의 항복강도 정도를 나타내고 있고, 950 °C는 모재보다 높은 강도를 나타내고 있다. 950 °C의 경우는 SABC1470을 열처리할 때, SPFH590으로 열전달이 되는 것을 밀폐시켰지만 높은 온도로 인하여 열처리가 되어 강도가 높게 나타났다고 판단된다.

SABC1470 + SPFC980 TWB시험편은 850과 900 °C의 열처리에서 평균 1000 및 1200 MPa이

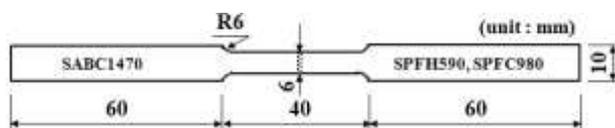


Fig. 2 Shape and dimensions of tension specimen of different materials bonded with laser TWB

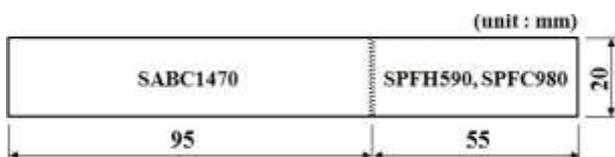
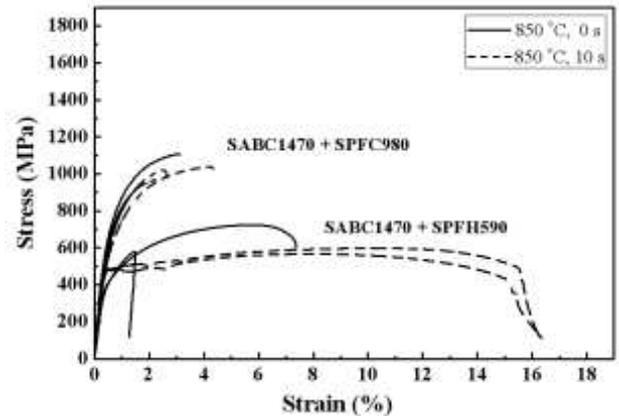
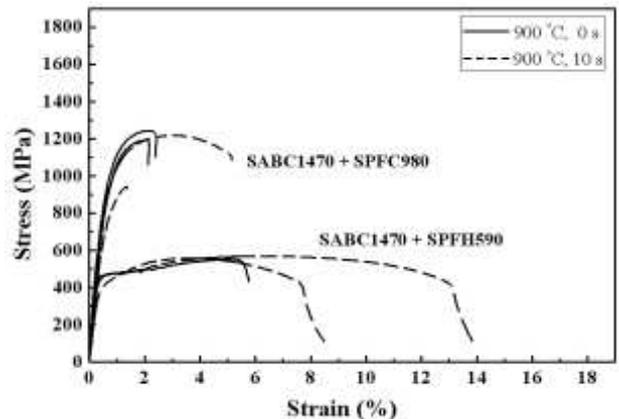


Fig. 3 Shape and dimensions of high speed bending specimen of different materials bonded with laser TWB

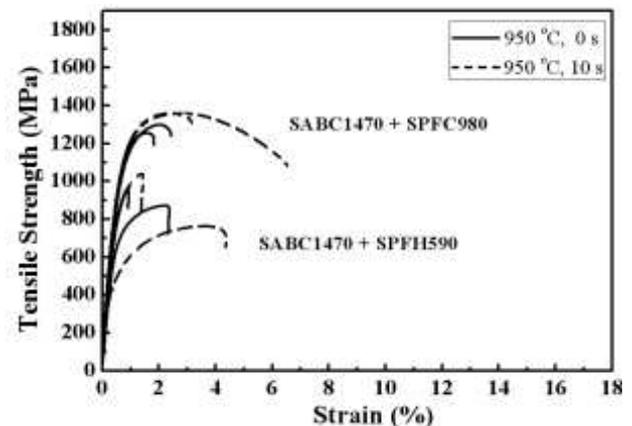
상의 높은 강도를 나타내었으나, 3% 이하의 낮은 연신율을 보였다. 그러나 950 °C, 10 s에서 열처리하여 급냉 처리한 TWB시험편은 평균강도 1359 MPa, 평균연신율 4.8%의 값을 나타내었다. 이 시험편의 경우는 SPFC980의 모재 강도가 높기 때문에 SPFH590 TWB시험편보다 높은 강도를 나타내었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 The curve of stress and strain of different materials bonded with laser TWB. (a) 850 °C, (b) 900 °C, (c) 950 °C

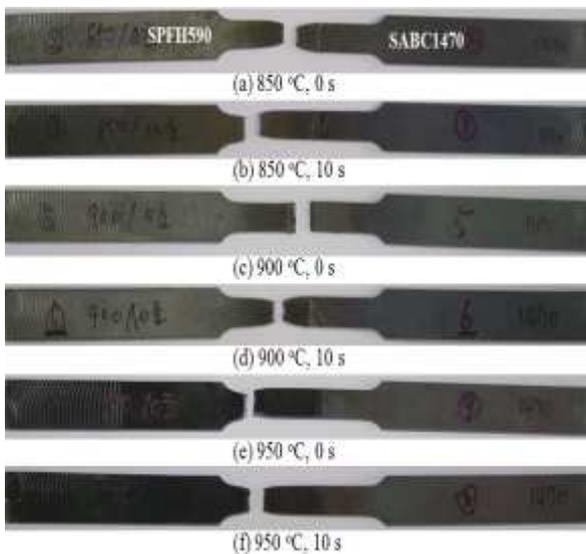
SABC1470 모재열처리강은 840 °C 이상에서 1500 MPa 이상의 인장강도를 가지므로, 본 연구에서 열처리한 850 °C 이상의 온도는 보론강과 냉연강의 이중접합강에서 상부측 SABC1470부는 충분한 강성을 만족시키기 위해 충분하며 추돌에 의하여 승객의 상체를 보호할 수 있는 충분한 고강도를 확보하였다고 판단된다. 또한 냉연강인 SPFC980과 SPFH590의 경우 강도측면에서는 SPFC980이 SABC1470과 접합시 충분한 강성을 만족시킬 것이라 판단되지만 추돌시 승객의 안전확보 측면에서는 강도에 비해 연신률이 우수한 SPFH590이 적합하다. 그 이유는 추돌시 파괴 거동을 유도할 수 있다면 상부의 SABC1470에

비해 강성이 낮은 센터필라 하부의 SPFH590강으로 파괴를 유도하여 승객의 상체에 대한 안정을 확보 가능하기 때문이다.

따라서 충격에너지를 흡수하는 냉연강의 충분한 연성을 고려하면 850 °C의 SABC1470 + SPFH590 TWB 시험편이 적당한 조건이라 판단된다.

인장시험에서 얻어진 파단 시험편의 외관을 Fig. 5에 나타낸다. (a)는 SPFH590 + SABC1470이고, (b)는 SPFC980 + SABC1470이다. Fig. 5(a)와 (b)에서 TWB 시험편은 냉연강인 SPFH590과 SPFC980 또는 용접부에서 파괴하였다. 그러나 보론 첨가강인 SABC1470에서 파단된 것도 있었다. 이것은 시험편의 가공 결함 또는 열처리의 불균일에 의한 것이라 판단된다.

Fig. 6은 본 연구에 사용된 시험편의 조직을 관찰한 것으로 강도차이에 따른 조직 특성을 알 수 있다. SPFH590과 SPFC980은 냉연강으로 Table 1에서 인장강도는 약 500 MPa 정도의 차이를 보인다. 강도차에서 나타나듯이 조직에서도 SPFC980의 조직이 SPFH590보다 결정립이 미세하고 치밀한 것을 볼 수 있다. 보론이 첨가된 SABC1470은 열처리 한 것으로, 마르텐사이트 변태되어 결정립을 형성하고 있다.



(a) SPFH590 + SABC1470



(b) SPFC980 + SABC1470

Fig. 5 Appearance of fractured specimens

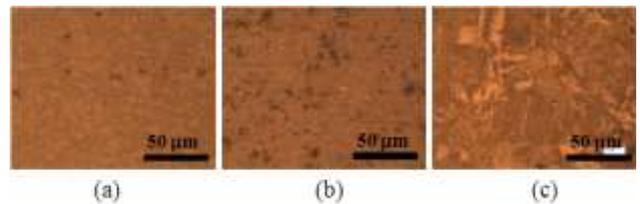


Fig. 6 Microstructure of as-received materials. (a) SPFH590, (b) SPFC980, (c) SABC1470

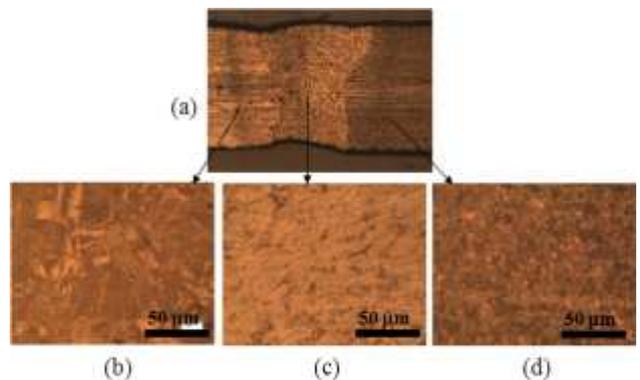


Fig. 7 Microstructure of different materials bonded with SABC1470 and SPFC980. (a) Appearance of weld zone, (b) SABC1470, (c) Weld metal zone, (d) SPFC980

Fig. 7과 8은 각각 인장시험에서 최대 강도를 나타낸 950 °C, 10 s의 SABC1470 + SPFH590 TWB시험편과 SABC1470 + SPFH590 TWB시험편의 미세조직을 나타낸 것이다. (a)는 용접부를 나타낸 것이며, (b)~(d)는 각 부분의 미세조직을 나타낸다. Fig. 7(b)는 보론 첨가한 SABC1470으로 마르텐사이트 조직을 나타내고 있다. Fig. 7(c)는 용착부로 페라이트와 시멘타이트가 침상으로 보이는 하부 베이나이트의 형상을 하고 있으며, Fig. 7(d)는 저탄소강 SPFC980의 조직으로 페라이트와 약간의 펄라이트를 나타낸다. Fig. 8(c)는 용착부로 페라이트와 소량의 펄라이트로 이루어져 있으며, Fig. 8(d)는 SPFH590의 조직으로 Fig. 8(c)보다 약간 조대한 페라이트와 펄라이트를 나타낸다.

3.2 TWB 이중용접재의 부정정 고속 굽힘 특성

승용차의 센터필라가 충돌에 의하여 변형되는 특성을 평가하기 위하여 TWB 시험편의 고속 굽힘 시험을 실시하였다. 센터필라가 구속되어 있는 구조물과 같은 조건을 고려하여 부정정 조건으로 굽힘을 실시하였다.

Fig. 9는 TWB시험편을 사용하여 고속 굽힘 시험을 실시한 후의 외관을 나타낸다. (a)는 SPFH590 + SABC1470 TWB시험편, (b)는 SPFC980 + SABC1470 TWB시험편을 나타낸다. 그림에서 ○는 용접부를 나타낸다. (a)에서 열처리에 의하여 마르텐사이트 변태한 고강도 SABC1470 재료에 고속 굽힘 하중을 가하였지만, 연성이 많은 냉연강 SPFH590 재료가 하중점의 최대 처짐과 같은 처짐으로 소성 변형하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 추

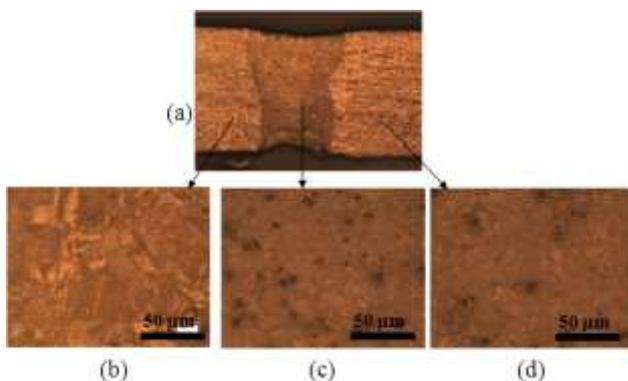


Fig. 8 Microstructure of different materials bonded with SABC1470 and SPFH590. (a) Appearance of weld zone, (b) SABC1470, (c) Weld metal zone, (d) SPFH590

돌이 발생하면, 냉연강 SPFH590 소재는 큰 변형이 나타나고, 보론 첨가강 SABC1470은 거의 변화가 없다는 것은 의미한다. 따라서 SPFH590 소재는 충돌에 의한 에너지를 흡수하여 승객의 상체 부분의 안전성을 확보하기 위한 TWB 이중접합재로 적합하다고 판단된다.

그러나 (b) SPFC980 + SABC1470 TWB시험편은 SPFC980 재료의 인장강도가 1100 MPa 이상이므로 SABC1470 재료에 고속 굽힘 하중을 부하하여도 최대 처짐은 부정정보의 중심에서 발생하고 있다. 이와 같이 강도가 큰 소재로 이루어진 TWB 이중접합재는 승객의 안전성을 확보하기 위한 센터필라의 구조물로서 적당하지 않다고 판단된다.

Fig. 10은 충돌시험후의 변형거동을 나타내고 있다. 충돌 속도는 10 km/h이다. 전체적으로 상부

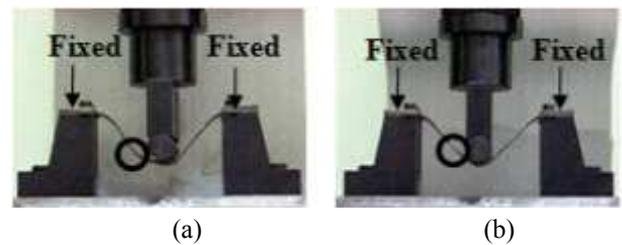
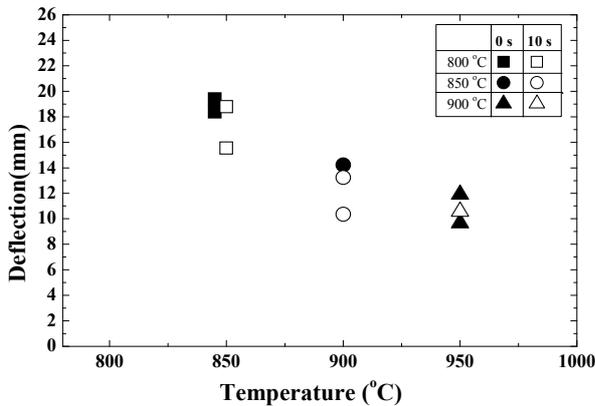


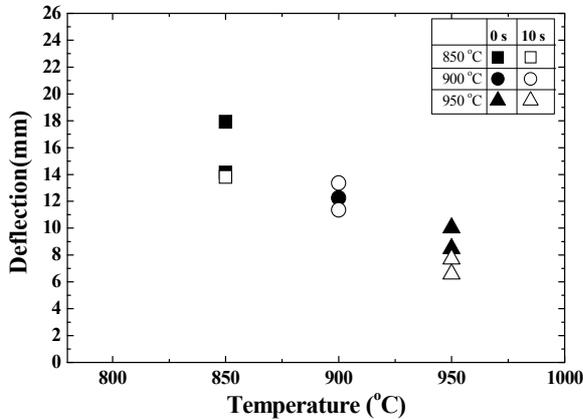
Fig. 9 The pattern of high speed bending. (a) SPFH590 + SABC1470, (b) SPFC980 + SABC1470



Fig. 10 Deformation behavior of the outside for Impact force. (a) SABC1470 + SPFH590, (b) SABC1470 + SPFC980



(a) SABC1470 + SPFH590



(b) SABC1470 + SPFC980

Fig. 11 Deflection according to temperature of TWB specimen at statically indeterminate condition

SABC1470는 변형의 거의 발생하지 않은 반면에, 하부 냉연강에서는 많은 변형이 일어났으며 (a)는 약 101 mm, (b)는 86 mm의 변형량을 나타냈다. 이것은 Fig. 9의 결과와 같이 센터필라의 파괴 거동을 유도하는 데 있어서 SABC1470 + SPFH590 이종접합강이 SABC1470 + SPFC980에 비해 유리하며, 연신율에 의해 충돌시 충돌 에너지 흡수율이 뛰어나다고 판단된다.

부정정 시험편의 고속 굽힘 시험에서 얻어진 하중-처짐 곡선의 2.9 kN 하중점에서의 처짐을 구하여 Fig. 11 나타내었다. (a)는 SABC1470 + SPFH590 TWB 시험편이고, (b)는 SABC1470 + SPFC980 TWB 시험편이다. (a), (b)에서 처짐은 수냉까지의 시간에 큰 상관없이 열처리 온도에 따라서 감소하는 것을 볼 수 있다.

이것은 열처리 온도가 증가함에 따라서 SABC1470의 인장강도가 증가하여 저항력이 증가한 것이 원인이라 판단된다. 그리고 SABC1470 + SPFH590 TWB 시험편의 처짐이 SABC1470 +

SPFC980 TWB 시험편보다 처짐이 약간 큰 것을 알 수 있다. 이것은 SPFH590 소재는 강도가 작고 연성이 많아서, Fig. 9(a)와 같이 SABC1470 소재를 굽힘 하여도 SPFH590 소재가 변형하기 때문이다. 한편 SPFC980 소재는 강도가 크고 연성이 작아 SABC1470 소재와 같은 변형을 하기 때문에 처짐이 약간 작다고 판단된다. 이와 같은 결과로부터 충돌에 의한 승객의 안전성을 고려하면 상부는 보론 첨가강 SABC1470, 하부는 냉연강 SPFH590 소재를 사용하여 TWB하는 것이 안전하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 승객의 안전 및 경량화를 위한 센터 필라에 적용하기 위하여 상부의 보론 첨가강 SABC1470, 하부의 냉연강 SPFH590 및 SPFC980을 사용하여, 레이저 맞춤식 재단 용접(TWB)하였다. TWB 이종시험편을 제작하여 SABC1470 소재는 열처리에 의하여 고강성을 부여하고, 수냉까지 대기 시간에 따르는 인장 특성 및 센터 필라와 같이 구속된 부정정 조건으로 고속 굽힘을 실시하여 변형 특성을 평가하였다.

(1) 동일 온도에서 열처리한 TWB 시험편은 수냉까지 대기시간이 길어짐에 따라서 인장 및 항복강도가 낮아지는 경향을 보였다.

(2) 보론 첨가한 SABC1470은 열처리에 의하여 마르텐사이트 조직을 나타내고, SPFC980의 용착부는 페라이트와 시멘타이트가 침상으로 보이는 하부 베이나이트의 형상을 하고 있으며, SPFC980은 페라이트와 약간의 펄라이트를 나타내었다. SPFH590의 용착부는 페라이트와 소량의 펄라이트 조직이고, SPFH590은 약간 조대한 페라이트와 펄라이트를 나타내었다.

(3) 충돌에 의한 승객의 안전성 확보 및 충격에너지를 흡수하는 냉연강의 충분한 연성을 고려하면 상부는 보론첨가강 SABC1470, 하부는 냉연강 SPFH590 소재를 사용하여 TWB하는 것이 안전하다.

후 기

본 연구는 동남광역경제권 선도산업 육성사업으로 수행되었음.

참고 문헌

(1) Ordinance of Ministry of Land, 2010, "Motor-

- Vehicle Safety Standard," No. 307
- (2) Lim, S. W., 2008, "Advanced Technology for Lightweight Automobile," *The Korean Society for Heat Treatment*, Vol. 21, No. 3, pp. 164~170.
- (3) Kim, B. K., Kim, M. S., Kim, B. J. and Huh, S. J., 2005, "Optimal Design of the Passenger Vehicle Aluminum Seat for Weight Reduction and Durability Performance Improvement," *Transactions of The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 13, No. 3, pp. 58~63.
- (4) Bae, G. H., Huh, H., Lim, J. H. and Kim, G. S., 2010, "Development of a Design Guideline Considering the Light Weight and Crash Worthiness of the ULSAB-AVC Model," *2010 Proceeding of The Korean Society of Automotive Engineers*, pp. 1~8.
- (5) Bae, G. H., Huh, H., Song, J. H. and Kim, S. H., 2006, "Light-weight Design with a Simplified Center-pillar Model for Improved Crash Worthiness," *Transactions of The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 14, No. 6, pp. 112~119.
- (6) Michael, S. B., 2006, " High-Strength Steel Stamping Project(ASP 050), Automotive Light Weighting Materials," *FY 2006 Progress Report*, pp. i154~i158.
- (7) Lee, G. S., Kim, D. J., Han, Y. H. and Song Y. J. 2006, "Forming Analysis of TWB Inner Door Panel Considering Workshop Aspects," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 15, No. 4, pp. 289~294.
- (8) Kim, J. H., Lee, W. O., Chung, K. H., Kim, D. Y. and Kim, C. M., Okamoto, K., Wagoner, R. H. and Chung, K. S., "Spring Back Evaluation of Friction Stir Welded TWB Automotive Sheets," *Met. Mater. Int.*, Vol. 17, No. 1, pp. 83~98.
- (9) Hashimura, T., Fukumoto, K. and Takahashi, N., 2010, "Structural Member of Different Materials," *Patent application number: 20100098969*
- (10) Je, H. I., Son, C. S. and Nam, K. W., 2011, "A Study on the Spot Welding Characteristics and Material Analysis of Boron Steel for Hot-stamping according to the Heat-treatment Conditions" *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 35, No. 4, pp. 383~391.