기 술 논 문

하이드로포밍용 열연 강재의 레이저 용접성 및 성형 특성

이 원 범* · 이 종 봉**

*포스코 기술연구소 자동차가공연구그룹
**포스코 기술연구소 접합연구그룹

Laser Weldability and Formability of Hot Rolled Steels for Hydroforming Applications

Won-Beom Lee*and Jong-Bong Lee**

*Automotive steels application research group, POSCO Technical research laboratories, Gwangyang 545-711, Korea
**Joining research Group, POSCO Technical research laboratories, Pohang 790-785, Korea

Abstract

The laser welding and its analysis of thin-sheet carbon steels were carried out with high power CO_2 laser. The main factor of weld quality of laser welding is gap and edge quality. This work was preformed to focus on the gap tolerance problem during laser welding. First, bead on plate welding of thin sheet was examined to investigate the effect of laser welding variables, and to obtain optimum welding condition. Butt welding was also carried out to show the effect of gap on the laser weldability of thin sheet. In order to investigate the effect of gap on formability of welded thin sheet, LDH test was caried out. At high welding speed, the partial penetration was obtained by low heat input. Otherwise, porosity was formed in the bead at low weld speed because of too much heat input. The optimum welding condition of welding was derived from bead width, penetration and hardness property. The maximum gap tolerance on laser welding was observed to be about 0.2mm. This gap size has good relationship with beam size of laser spot(about 0.3mm). The formability of welded sheet was about 80% value of base metal and the gap size has not affected on the formability, although weld quality is dependent on the gap size.

* Corresponding author : wbeom70@posco.co.kr

(Received February 24, 2004)

Key Words : Laser welding, Hydroforming tube, Gap

1. 서 론

현재 자동차 산업은 차체의 안정성, 자동차 경량화에 주요 초점을 맞추고 있으며,이러한 환경에 따라 용접기술은 생산성 향상과 함께 용접부 품질의 고급화 등을 동시에 만족시킬 수 있도록 부단한 노력을 경주하고 있다. 그 노력의 일환으로 레이저를 이용한 용접기술의 적용 범위가 전세계적으로 점차 확대되고 있다. 현재 자동차에서 레이저 용접이 적용되는 곳은 크게 테일러 웰디드 블랭크(Tailor Welded Blank ; TWB), 차체 용접과 하이드로포밍 튜브 용접이 있으며, 이러한 기술은 고출력이 가능한 CO_2 레이저와 Nd:YAG 레이저의 개발과 함께 하고 있다[1-2].

이 중에서 하이드로포밍 기술은 최근에 세계적인 차체 경량화 추세에 따라 차체 설계 및 생산기술 측면에서 활발히 적용되고 있다. 이는 전세계의 철강회사를 중심으로한 초경량차체 개발(Ultra Light Steel Automotive Body) 프로젝트에 있어서 TWB, 하이드로포밍 기술과 같은 신기술이 소개되고부터 더욱 활발히 자동차 회사를 중심으로 연구가 진행되고 있다[3-6].

국외의 경우 하이드로포밍 성형을 이용한 차체 및 샤시 부품 적용이 현재 독일, 미국을 중심으로 적용중에 있으며, 국내에서는 윤영, 화신을 중심으로 일부 적용이 이루어지고 있다. 이러한 하이드로포밍 튜브 제작은 현재까지 주로 ERW를 중심으로 이루어지고 있으나, 앞으로는 튜브의 두께와 직경으로 고려하여 레이저 용접의 적용이 크게 늘어날 전망이다. 그러나, 이와 같이

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.

급속히 증가하는 하이드로포밍 기술에 대한 관심에 비해 강재의 레이저 용접성에 대해서는 아직 확보된 기술이 매우 미진한 상태이다. 또한 일반적인 원형 튜브 이외에도 코니컬 튜브, 테일러드 튜브 등이 제작 기술이 요구되는 실정에서 고출력 레이저 용접 기술은 매우 중요한 기술로서 자리잡고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 하이드로포밍용 강재의 레이저 용접 특성들을 살펴보고용접 결함에 미치는 여러 인자에 대해 고찰하고자 하였다. 이를 위해 하이드로포밍 투브용 강재와 기존 강재간의 레이저 용접부 품질 특성을 비교, 분석하였으며 용접부 품질에 가장 큰 영향을 미치는 갭의 변화에 따른 용접 특성의 변화를 관찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 소재

본 실험에 사용된 소재는 열간압연재 SAPH370, SAPH440 강재 및 SAPH370급 하이드로포밍용 시험재인 SAPH370-A 강재이며, 그 화학성분은 Table 1에 나타내었다. 한편 시험 강재의 두께는 2.3mm로 고정하여 시험을 행하였다.

2,2 실험 방법

본 실험에서는 SAPH370, SAPH440, SAPH370-A 강재에 대한 용접 특성을 분석하고 적정 레이저 용접조건을 도출하기 위해 BOP(Bead On Plate) 용접시험을 행하였다. 본 실험에 이용한 레이저 용접기는 연속출력 6kW의 Trumpf사 TLF6000 이며, 빔 모드는 TEM_{01}*이다. 한편 보호가스는 He 가스를 15liter/min, 초점 길이(F)는 200mm 를 사용하여 용접하였다.

레이저 용접에서 갭의 조절은 용접 품질에 가장 중요한 요소이다. 본 연구에서는 BOP 용접시험 결과를 바탕으로 용접품질에 미치는 갭의 영향을 평가하기 위해 Fig. 1에 나타난 바와 같은 갭 오퍼닝(gap opening) 시험을 준비하였다. 시험편은 300×200mm 판재의 용접 절단면을 밀링 가공한 후 판재를 서로 맞대기로 준비하였다. 그런 다음 한쪽 끝의 갭은 0mm으로 맞추고, 다른 한쪽 끝의 갭은 0.5mm의 갭을 갖게 조정을 하여 시험을 행하였다.

Table 1 Chemical composition of specimens examined (wt.%)

Specimens	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb
SAPH370	~0.01	0.010	~0.5	0.012	0.004	-	-
SAPH440	0.15	0.010	< 1.0	0.015	0.007	-	-
SAPH370-A	< 0.05	0.020	~0.5	< 0.05	0.006	added	-

한편, 본 실험에서는 레이저 용접된 시험재의 성형성을 평가하기 위해 레이저 출력은 6kW, 초점위치 0mm로 고정하여 갭을 일정한 상태로 유지하며, 갭의 변화가 성형성에 미치는 영향을 조사하였다. 성형성은 Limited Dome Height(LDH) 시험방법으로 평가하였으며 최고 하중은 30ton, punch speed는 200mm/min으로 고정하였다.

3. 실험 결과

3.1 BOP 레이저 용접

BOP 레이저 용접 시험은 Table 1의 강재에 대해 용접속도를 변화시켜 행하였다. Fig. 2는 그 한 예로서, 2.3mmt 두께의 SAPH370강재의 용접속도에 따른 레이저 용접 특성을 관찰하기 위한 BOP 시험 결과이다. 용접속도 1m/min에서는 과다 입열량에 의해 내부에 큰 기공이 형성되어 있었으며, 1.5m/min~2.5m/min에서는 기공 등과 같은 결함의 형성은 관찰되지 안았으나 비드폭이 넓게 나타나 있다. 한편, 용접속도 3~7m/min에서는 키홀 용접이 안정적으로 이루어져 적정한 비드가 형성되어 있으며, 그 이상의 용접속도에서는 부분 용입(partial penetration)이 관찰되었다. 한편 SAPH 440, SAPH370-A 강재의 BOP 시험 결과 SAPH370 강재와 매우 유사한 양상을 가지는 것으로 확인되었다.

Fig. 3은 SAPH370강재의 용접속도에 대한 비드의 경도 분포를 보여주고 있다. 경도 분포 분석결과 용접

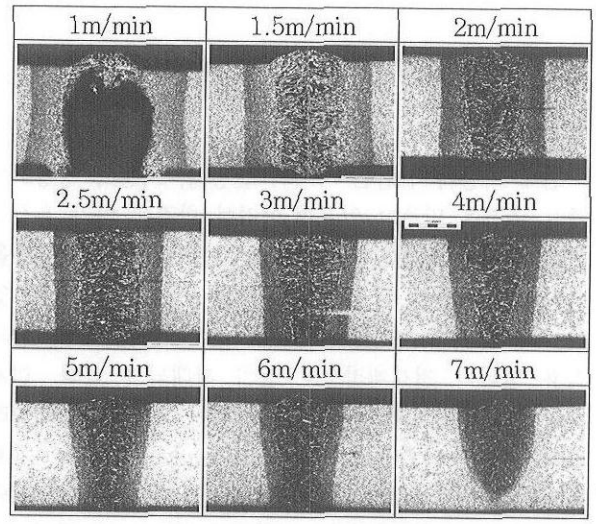

Fig. 2 Variation of laser weld bead shape with various welding speed for SAPH370 steel

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.

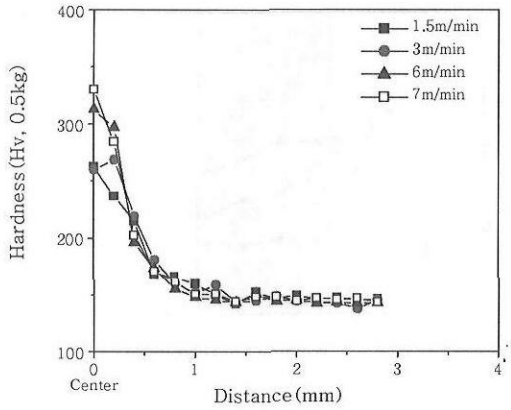

Fig. 3 Hardness distribution on laser weld with various welding speed for SAPH370 steels

속도의 변화에 따른 비드폭의 변화는 크게 나타나지 않았으나 최고 경도값의 변화는 크게 나타난 것으로 확인되었다. 즉, 시험조건 중 용접속도가 낮은 경우에는 약 260Hv의 경도값을 가졌으며, 용접속도가 빨라질수록 최고 경도값은 증가하여 용접속도 7m/min에서는 최고 경도값이 약 330Hv에 이르는 것으로 확인되었다.

3.2 갭 opening 시험

레이저 용접에서 두 강판 사이의 갭과 절단면의 품질(직진도, 직각도)은 용접부의 특성이 큰 영향을 미친다. 일반적으로 갭은 적을수록 좋으며 그 최소한의 값을 가지고 있다. Fig. 4는 SAPH370-A강재의 갭 오퍼닝 시험시 관찰되는 전형적인 표면부 비드 형상과 그 단면 조직을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 용접부 비드는 용접이 정상적으로 이루어지는 영역 I과, 용접 비드에 기공이 주기적으로 반복되며 내부에도 기공이 형성되어 불완전한 용접이 이루어지는 영역 II와, 용접이 전혀 이루어지지 않는 영역 III으로 나뉠 수 있다. 즉 영역 I

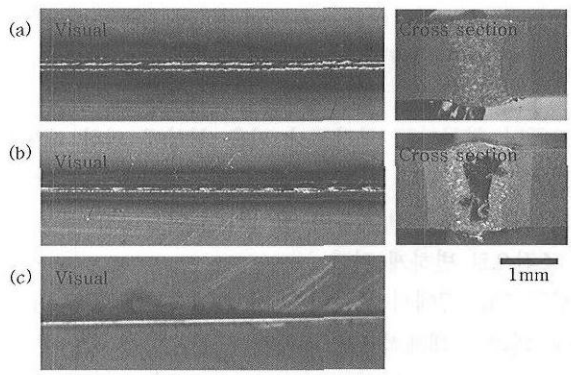

Fig. 4 Typical bead appearance of gap opening test ; (a) Welded zone, (b) Unstable zone, and (c) not welded zone

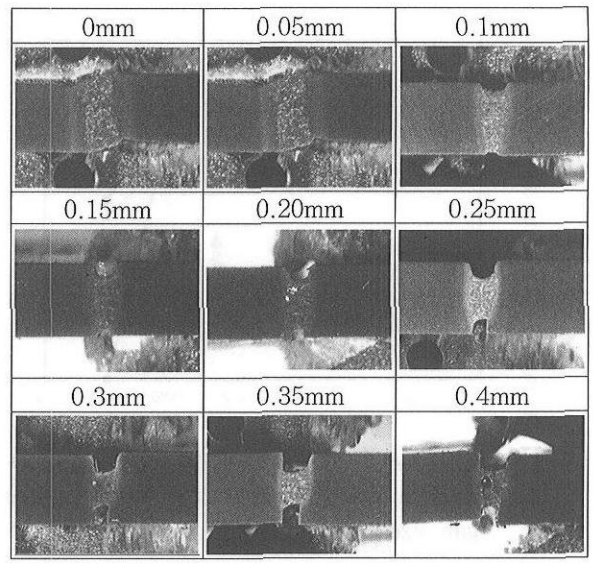

Fig. 5 Variation of bead shape after gap opening test on SAPH370 steel. Laser welding was performed with 6kW laser power and 5m/min welding speed

은 적정 갭을 유지하고 있어 키홀 현상이 안정적으로 이루어지고 있으며 용접이 원활하게 이루어지는 영역을 의미하고 있으며, 영역 II는 넓은 갭으로 인하여 키홀의 반복적인 생성 및 소멸이 주기적으로 일어나 불완전하게 용접이 이루어짐을 알 수 있다. 한편 영역 III에서는 지나치게 넓은 갭으로 인해 재료와 레이저 빔간의 반응이 이루어지지 않는 영역임을 알 수 있다. Fig. 5는 갭 오퍼닝 시험에 대한 단면 관찰의 예로 SAPH370 강재의 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 갭 오퍼닝 시험은 BOP 시험과는 다르게 갭의 정도에 따라 비드의 형상이 변화한다는 것을 알 수 있다. 즉, 갭이 넓어질수록 용융되는 양이 적어짐에 따라 비드의 높이가 줄어들고 있으며 갭이 0.4mm이상인 경우에는 넓어진 갭에 의해 충분히 갭이 채워지지 못한 상태에서 기공이 형성되었다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 이번 시험에 사용된 SAPH440, SAPH370A 강재에서도 비슷하게 나타났다. 이 결과를 바탕으로 각각의 강재의 용접속도와 갭의 변화에 따른 적정 용접속도 및 갭의 허용도를 조사한 결과, 허용 갭 크기는 용접속도에 상관없이 약 0.2mm의 정도인 것으로 관찰되었다.

3.3 성형성 테스트

갭의 변화는 레이저 용접의 품질을 결정하는 중요한 요소로, 갭 오퍼닝 시험에서 나타난 바와 같이 갭의 변화에 따라 비드의 형상이 변하게 되며 결함의 원인으로 발생하게 된다. 즉 이러한 결과로 갭의 변화는 용접부를 포함한 강재의 성형성에도 직접적인 영향을 주게 된다.

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.

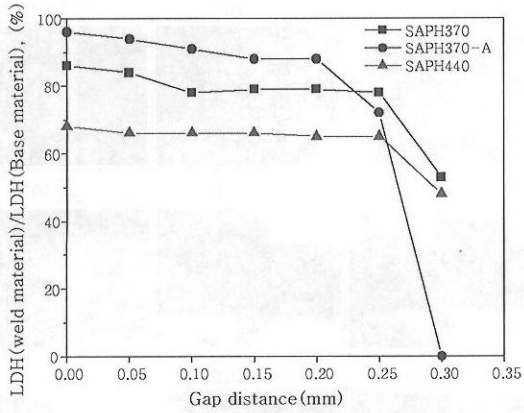

Fig. 6 LDH test results of SAPH370 steel, SAPH370-A steel and SAPH440 steel with various gap size

Fig. 6은 여러 강재의 동일한 갭 크기의 변화에 따른 LDH값의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 SAPH370 강재의 경우에는 갭이 0.25mm까지는 모재의 약 80% 성형성을 보여주고 있으며 그 이상의 갭에서는 성형성이 현저하게 감소되었음을 관찰할 수 있었다. 즉 이것은 갭의 증가로 용접부에 결함이 발생하여 용접부에서 파괴가 일어났으며, 이에 따라 충분한 성형성이 확보되지 않음을 의미한다. 한편, SAPH 370-A 강재의 경우에는 약 90% 이상의 높은 성형성을 가지고 있는 것으로 관찰되어 동종인 SAPH370 강재에 비해 높은 성형성을 가지고 있었음을 확인할 수 있었다. 그러나, SAPH370-A강재는 SAPH370강재에 비해 갭이 증가됨에 따라 현저히 성형성이 감소되어 0.25mm이상의 갭에서는 오히려 SAPH370강재보다 낮은 성형성을 보여주었다.

SAPH 440 강재는 SAPH370 강재에 비해 높은 강도와 낮은 연신율을 가지고 있었으며 Fig. 6에서 보듯이 용접을 한 후에도 모재에 비해 약 70%이하의 낮은 성형값을 보여주는 것으로 나타났다.

4. 고 찰

4.1 용접속도에 따른 비드형상의 변화

Fig. 7은 Fig. 2의 비드 형상을 바탕으로 각각의 강재에 대한 비드 형상을 분석한 결과이다. 그림에서 보듯이 과다 용입이 일어나는 느린 용접속도에서는 상부 비드와 하부 비드의 크기아 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 한편, 용접속도가 빨라질수록 상부 비드폭은 약간 줄어드나, 중간 및 하부 비드폭은 급격히 줄어든 이후 일정한 값을 갖게 됨을 알 수 있다. 이렇게 안정적으로

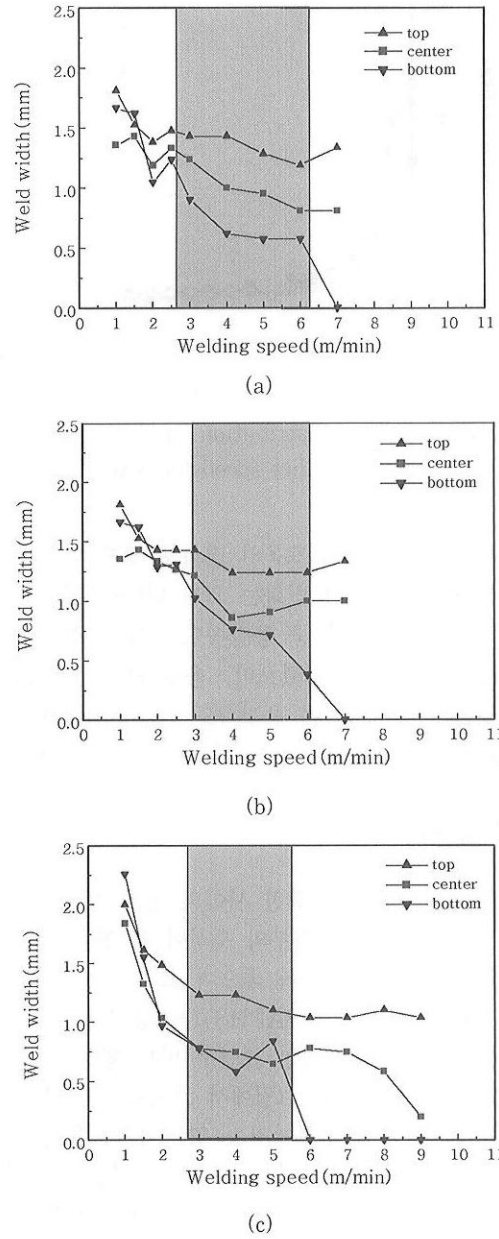

Fig. 7 Variation of weld width after BOP laser welding on (a) SAPH370 steels, (b) SAPH440 steels and SAPH370-A steels with various welding speed

비드폭이 형성되는 구간에서 키홀 현상에 의한 레이저 용접이 안정적으로 이루어지게 된다. 용접속도가 더 빠르게 되면, 하부 비드폭이 급격히 줄어들다가 부분 용입 조건으로 변하게 된다.

한편 Fig. 7에서 보듯이 적정 용접속도 구간은 3 강종에 대해서 대체적으로 비슷하게 분포함을 확인할 수 있었다. 즉 레이저 용접은 유사 강종에 대해서는 화학성분에 큰 관계 없이 일정한 적정 용접속도 구간을 갖고 있으며, 강종의 두께 및 레이저 출력 등에 따라 용

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.

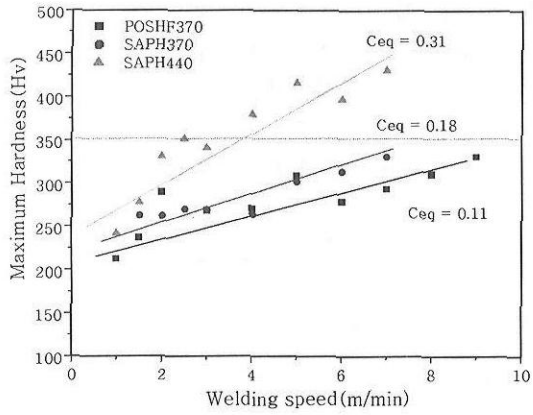

Fig. 8 The effect of welding speed on maximum hardness for various steels examined

접 조건은 변화하게 된다.

4.2 용접 속도 변화에 따른 최고 경고값의 변화

용접에서 최고 경도값의 조절은 매우 중요하다. 일례로 Ford는 TWB 용접시 최고 경도값을 350Hv를 기준으로 관리하고 있다. 용접부의 최고 경도값은 강재의 성분과 냉각 속도에 의해 크게 좌우된다. Fig. 8은 각각의 강재에 대한 최고 경도값의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 용접속도가 빨라질수록 냉각속도는 빠르게 되어 최고 경도값은 증가하게 된다. 한편 강재의 성분을 살펴보면 SAPH370-A 강재는 기존의 SAPH370 강재에 비해 낮은 탄소농도를 가지고 있기 때문에 SAPH370 강재에 비해 낮은 Ceq 및 낮은 경도값을 가지고 있었다. 그러나, SAPH440 강재는 Ceq(IIW)값이 0.31로 가장 높은 값을 가지고 있으며, 용접속도의 변화에 따라 최고 경도값의 변화가 가장 큰 것으로 나타났다. 즉, SAPH440 강재는 용접속도 4m/min 이상에서 최고 경도값이 350Hv이상의 값을 갖는 것으로 확인되어, SAPH440 강재의 용접시에는 최고 경도값 또한 용접 품질을 결정하는 중요한 요소임을 확인할 수 있다.

4.3 갭 허용도와 성형성

레이저 용접에서 갭의 변화는 레이저 용접 품질에 매우 중요한 요소이다. Fig. 5에서 보듯이 갭이 넓어질수록 갭을 채우는 금속의 양은 변화하게 되어 용입부족(underfill)이 발생하기 되며, 그 이상의 갭이 발생한 경우에는 치명적인 결함을 발생시키게 된다. 본 연구에서는 적정 갭 허용도는 0.2mm 이하인 것으로 확인되었는데 이것은 laser 빔의 크기가 약 0.3mm이므로 레이저 빔 크기 이하에서만 용접이 가능하다는 것을 의미한다.

한편, 용접속도를 변화시켜 조사되는 레이저 빔과 금속의 반응을 보다 활성화시키게 되면 용착부족의 정도를 변화시킬 수 있다. 용접속도가 느리게 되면 그만큼 많은 열량이 입열되어 용착부족의 발생은 줄어들게 된다. 레이저 용접의 국제 규격(ISO 13919-1)에 의하면 용착부족의 양은 전체의 10%이하로 제한하고 있다. 즉, 실제 용접에서는 적정 용접속도 구간 안에서는 갭의 정도에 따라 용접속도를 변화시킴으로써 용착부족의 양를 임의적으로 조절할 수 있다. 그러나, Fig. 6에서 보듯이 갭의 변화에 따라 성형성은 크게 변화하지 않는 것으로 나타났다. 즉 갭에 의한 용접 결함이 발생하지 않는 영역 I(region I)인 갭 0.2mm 이하에서는 갭의 변화에 의한 성형성의 변화가 크지 않은 것으로 확인되었다. 이것은 용접부위가 일반 모재에 비해 높은 강도를 가지고 있기 때문에 성형시 모재가 주로 변형을 수용하는 반면 용접부위는 변형량을 매우 적게 받기 때문으로 보인다.

SAPH370-A강재는 SAPH370강재에 비해 높은 성형성을 가지는 것으로 나타났으나, 갭이 0.25mm이상에서는 오히려 낮은 성형성을 나타내었다. 보다 자세히 살펴보기 위해 Fig. 9에서 SAPH370-A강재의 0.25mm 갭을 가진 시편의 단면 조직 사진을 보면 비드 중앙 부위에 용접선 중심을 따라 균열이 발생되어 있다는 것을 알 수 있다. 이 결함을 보다 자세히 살펴보면, 주상정 응고조직이 관찰되어 전형적인 응고 균열 파단면임을 알 수 있다. 즉, 용접시 인장응력에 의해 균열이 생성되고 성장할 시기에 그 표면에는 액상이 잔류하고 있었다는 증거를 나타내주고 있다. 일반적으로 응고 균열의 생성 조건으로는 냉각속도, 용접부의 형상, 조성(P 또는 S 성분) 등이 주요 인자로 대변될 수 있다. SAPH370-A 강재의 경우에 보면 SAPH370강재에 비해 P 성분이 보다 많이 함유되어 균열 감수성이 높다는 것을

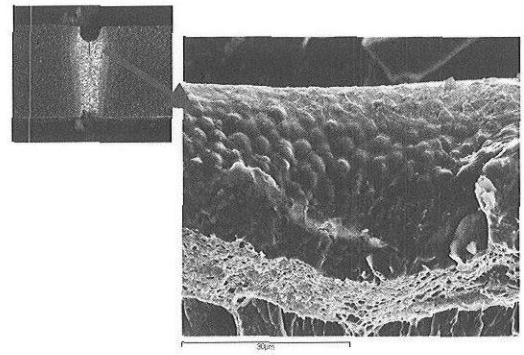

Fig. 9 The effect of welding speed on maximum hardness for various steels examined

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.

알 수 있으며, 갭이 증가될수록 용착부족에 의해 용접 비드의 중심부위로 인장응력이 모이게되어 갭이 0 25mm이상에서 균열이 발생한 것으로 보인다. 즉 SAPH370-A 강재의 0.25mm이상의 갭에서 발생하는 낮은 성형성은 이와 같은 응고 균열의 기인한 것으로 보인다.

5. 결 론

1) BOP 레이저 용접시험 결과 2 3mm의 두께를 갖는 강재에 대해서 6kW 레이저 빔에 의한 레이저 용접시 적정 용접속도는 3~5m/min인 것으로 확인되었다.

2) 용접속도가 빠를수록 비드폭은 작아지며 경도값은 높게 나타났다 그리고 고강도강일수록 용접시 높은 경도값을 갖는 것으로 나타나 고강도강의 용접에서는 용접속도에 의한 최고 경도값의 조절이 필요하다.

3) 성형성에 미치는 갭의 영향을 살펴본 결과, 0 2mm 갭 이하에서는 갭의 크기와 관계없이 일정한 성형성을 갖는 것으로 나타났다.

4) SAPH-A370 강재의 성형성이 가장 우수하게 나타나 모재의 약 90%의 성형성을 가지는 것으로 나타났다 그러나, 갭이 넓어질수록 성형성은 급격한 감소를 나타내었으며, 이것은 갭 발생시 비드 중심부위에 형성되는 응고 균열에 기인한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1 권재욱, 이경돈 Advance, 1997, 28 (in Korean)
2 J C Ion, A S Salminen and Z Sun Weld J, 1996, 75 225S
3 A W Astrop Machinary & production engineering, **23** (1974), 994 W Johnson and A G Mamalis Welding & Metal fabrication, **47** (1979), 375
5 D I Chang, R Nees and M Morin SAE, 960804, 713
6 F Dohmann and C Hartl J Mater Processing Tech **60** (1996), 669
7 G Morphy SAE, 970373, 341

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.