

이종재료 레이저 용접부의 피로거동

권응관*(경희대 대학원 기계공학과), 오택열(경희대 기계공학과),
 광대순(경희대 대학원 기계공학과), 이종재(수원과학대 금형설계학과)

The Fatigue Behavior of Laser Weldment in Heterogeneous Materials

Eung-Kwan Kwon, Taek-Yeol Oh, Dai-Soon Kwak, Chong-Jae Lee

ABSTRACT

In this study, Fatigue behavior of laser weldment in heterogeneous materials was investigated. Fatigue strength test and fatigue crack propagation test were performed for specimens with laser weldment in heterogeneous materials, and hardness test was performed. From the fatigue strength test, it was observed that the difference of strength between heterogeneous materials had effect on crack initiation position and fatigue limit. From the fatigue crack propagation test, it was observed that fatigue behavior of laser weldment in heterogeneous materials is different from that in same materials. The difference of strength between heterogeneous materials and laser weldment had effect on fatigue crack propagation rate.

Key Words : Heterogeneous material(이종재료), Fatigue Strength(피로강도), Hardness(경도), Crack Initiation(크랙 발생), Fatigue Limit(피로한도), Fatigue Crack Propagation Behavior(피로균열전파거동), Fatigue Crack Propagation Rate(피로균열전파속도)

1. 서론

레이저가 등장한 이후 레이저는 산업현장에서 여러 가지 형태로 응용되어지고 있다. 레이저 용접은 1969년에 General Motors사가 생산라인에 CO₂레이저를 자동차 산업에 활용하면서 급속히 발전을 해왔으며, 그 응용분야는 대략적으로 부품용접, 차체용 강판용접(Body Sheet Metal Welding), Tailored Blank 용접으로 분류할 수 있다.⁽¹⁾

레이저용접의 응용분야중 가장 주목받고 있는 분야는 Tailored Blank 용접으로서, 둘 이상의 판재를 원하는 모양으로 절단하여 용접시킨 후 프레스 성형하는 기술을 말한다. Tailored Blank 용접의 장점으로는 일체화 성형으로 인해 프레스 공정수를 단축할 수 있고, 외관이 양호하며, 조립정도가 높으며, 강성이 우수한 특성등을 가지고 있다.⁽²⁻⁴⁾

현재 이루어지고 있는 레이저 용접에 대한 연구는 용접부의 금속조직 특성에 관한 연구⁽⁵⁾, 성형이론을 이용한 최적 블랭크설계 및 변형률 예측에 관한 연구⁽⁶⁾, 용접부 형상에 미치는 공정변수의 영향

에 관한 연구⁽⁷⁾, 레이저 용접 parameter가 용접 특성에 미치는 영향에 관한 연구⁽⁸⁾등이 주를 이루고 있으며 레이저 용접부의 피로 강도 평가, 피로거동에 관한 연구는 극히 미약하게 이루어지고 있는 실정이다. 이에 관한 연구도 대부분 동일 재료 동일 두께 혹은 동일 재료 서로 다른 두께의 용접부에서의 피로거동을 다룬 것이 대부분이다. 실제 산업현장에서 항상 동일 재료에 대한 레이저 용접만 이루어지지 않고 있으며, 따라서 레이저 용접을 실제 산업현장에 보다 효율적으로 적용하기 위해서는 서로 다른 재료에 대한 레이저 용접부의 구조적 안정성을 확보할 필요가 있다.

본 연구에서는 박판 이종재료에 대한 Tailored Blank 용접부의 피로강도 특성, 피로 거동을 관찰함으로써 박판 이종재료 레이저 용접부의 안전성 평가에 그 목적을 두고 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편 및 실험장치

본 연구의 시험편 재료로는 두께 0.9 mm인 차체 제작용으로 사용되는 냉간 압연 강판 SPCEN, 고강력 강판 BARE390, 아연 도금 강판 GA340이 사용되었으며 사용되어진 시험편의 종류는 피로강도실험을 위한 피로강도 시험편과 피로균열전파 시험편을 사용하였다. Fig. 1은 피로강도 시험편의 상세도를 나타낸 것으로서, 피로강도 시험편은 SPCEN, BARE390, GA340으로 제작된 것과 하중방향과 평행하게 용접된 SPCEN과 BARE390, SPCEN과 GA340으로 이루어진 이종재료 피로강도 시험편이 준비되었다.

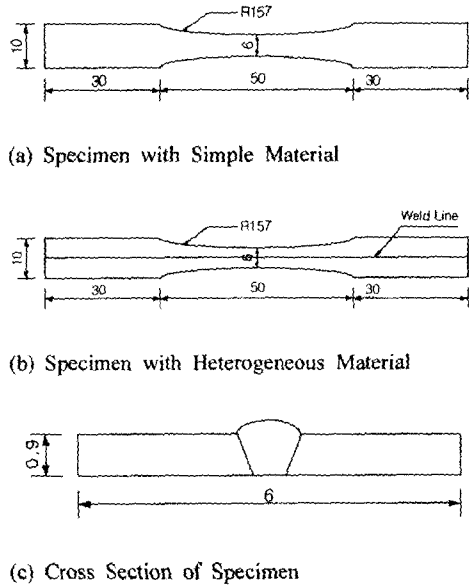
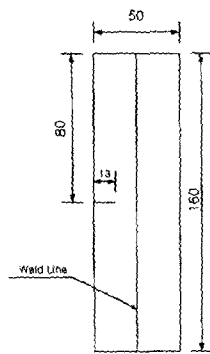
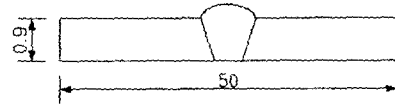


Fig. 1 Specimens for Fatigue Strength Test



(a) Specimen with Heterogeneous Materials



(b) Cross Section of Specimen

Fig. 2 Specimens for Fatigue Crack Propagation Test

Fig.2는 피로균열전파 시험편의 상세도를 나타내며, 피로균열전파 시험편은 하중방향과 평행하게 용접된 SPCEN과 BARE390으로 이루어진 이종재료 피로균열전파 시험편이 준비되었으며 이종재료 피로균열전파 시험편은 13 mm의 예균열(Pre-crack)을 SPCEN 끝단에 생성한 것과 BARE390 끝단에 생성한 것 두가지가 준비되었다.

시험편 용접에 사용된 장비는 Laser welding machine DLW400 기종을 사용하였으며 사용되어진 레이저의 종류는 CO₂ 레이저를 사용하였으며 보조 가스로는 헬륨을 사용하였다. 시험편 용접은 4kW 출력으로 6m/sec 속도로 용접하였다.

피로강도 실험과 피로균열 전파 실험에 사용된 실험기는 Instron 8516인 서보유압식 피로 실험기를 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 피로강도 실험

서보 유압식 피로실험기인 Instron 8516에 의해 피로강도 실험을 수행하였으며 피로강도 실험 설정 조건은 상온에서 완전편진 인장반복하중(응력비 R=0)을 피로강도 시험편에 하중 주파수 30 Hz로 부과하였으며 적용하중의 파형은 Sine파로 설정하였다. 피로실험기의 제어모드(Control Mode)는 하중 제어(Load Control)방식을 채택함으로써 High Cycle Fatigue Testing의 수행을 용이하게 하였다. 실험의 종결조건은 시험편이 완전 분리 파단될 때까지로 하였으며 파단되지 않을 경우 10⁶Cycle을 파단으로 간주하여 실험을 종결하였다.

2.2.1 피로균열 전파 실험

피로균열 전파 실험 역시 Instron 8516에 의해 수행하였으며 상온에서 완전편진 인장반복하중(응력비 R=0)을 Sine파의 형태로 하중 주파수 10 Hz로 피로균열 전파 시험편에 부과하여 실험을 수행하였다. 피로균열 전파거동의 관찰은 광학배율 100X의 이동 현미경을 실험기에 부착하여 CCD 카메라를 통해 관찰하였으며 균열길이 측정은 1/100mm까지 측정 가능

한 접안 마이크로미터를 이용하여 측정하였다. 전반적인 실험방법은 ASTM E 647에 의거하여 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접부 주위의 경도 및 조직변화

Fig. 3은 이종재료 레이저 용접강판의 용접부와 모재 부분을 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 측정한 결과이다. 선도의 왼쪽부분은 SPZEN이고 오른쪽부분은 BARE390의 경도를 나타내고 있으며 중앙의 높은 경도 값을 나타내는 부분이 레이저 용접부이다. SPZEN 평균 경도값은 106 HV이며 BARE390의 평균 경도값은 158 HV로 나타나 BARE390이 SPZEN보다 평균 경도값이 높게 나타났다. 중앙의 레이저 용접부 경도값은 평균 330 HV로 레이저 용접에 의해 경도가 급격히 증가 했음을 알 수 있다. 또한 일반적인 용접에서 나타나는 열영향부에서의 특징이 나타나고 있지 않다. 이는 레이저 용접이 고밀도의 에너지를 집중하여 용접을 하는 심용접방식이기 때문에 레이저가 조사되는 구역에서 격렬한 교반작용이 일어나 불순물이 제거되고 짧은 시간동안 고온을 유지하여 입자의 성장이 제약을 받아 양호한 급속 조직을 얻음으로 인해 용접부의 경도, 인장강도 등의 기계적 성질이 떨어지지 않기 때문으로 판단된다.

Fig. 4는 이종재료 레이저 용접부의 조직사진을 나타낸 것이며 조대한 조직이 SPZEN이며 세밀한 조직을 보이는 부분이 BARE390이다. 조직사진에서 용접부 주위의 열 영향부가 매우 적게 형성되어지고 있음을 알 수 있다.

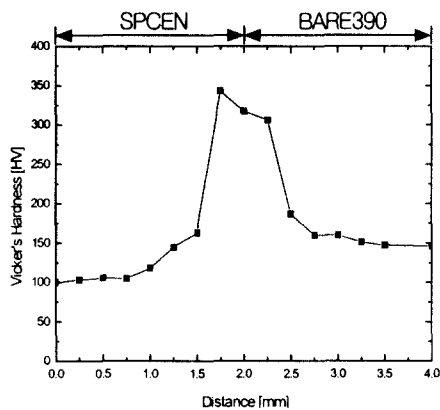


Fig. 3 Micro Vicker's Hardness

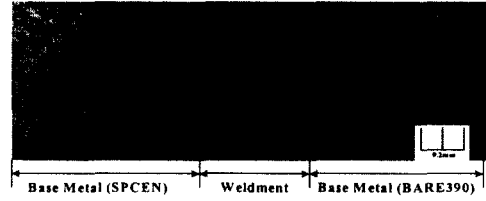


Fig. 4 The Shape of Welding Surface

3.2 피로강도

Fig. 5는 단일재료 시험편과 이종재료로 용접된 시험편에 대한 피로실험의 결과를 S-N 선도로 나타낸 것이며 최소자승법으로 보간하여 S-N 선도를 작성하였다. 단일재료 시험편의 경우 BARE390의 피로한도가 가장 높게 나타났으며 GA340, SPZEN의 순서로 피로한도가 높게 나타났다. 이종재료 시험편의 경우는 SPZEN+BARE390, SPZEN+GA340의 순서로 피로한도가 높게 나타났다. 이종재료로 레이저 용접된 시험편의 피로한도는 각각의 단일재료 피로한도의 사이에서 결정되어지는 것을 볼 수 있으며 피로한도의 차이가 큰 이종재료 시험편이 피로한도 차이가 작은 이종재료 시험편보다 피로한도의 저하가 더 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 각 금속의 강도의 차에 따른 응력구배로 인해 피로한도에 영향을 미친 것으로 보여지며 강도의 차가 클수록 피로한도에 영향을 많이 미친다는 것을 보여준다.

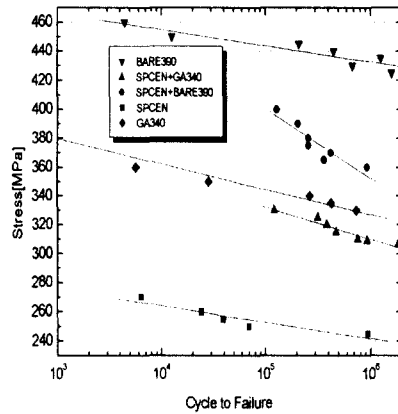


Fig. 5 S-N curve for Fatigue Test

Fig. 6은 시험편의 파단모양을 나타낸 것이다. (a), (b), (c)는 단일 재료의 파단모양을 나타낸 것이

다. (d), (e)는 이종재료의 파단모양을 나타낸 것이고 균열이 용접부에서 SPCEN쪽으로 약간 치우쳐 발생하여 양쪽 모재 방향으로 진전되었음을 알 수 있다. (d)와 (e)를 비교해보면 (e)가 (d)보다 더욱 SPCEN쪽으로 치우쳐 균열이 발생하였다. 이는 양쪽 모재의 경도 차로 인해 생긴 현상으로 보이며 이러한 현상은 경도차이가 더 큰 SPCEN+BARE390 시험편에서 현저하게 나타났다.

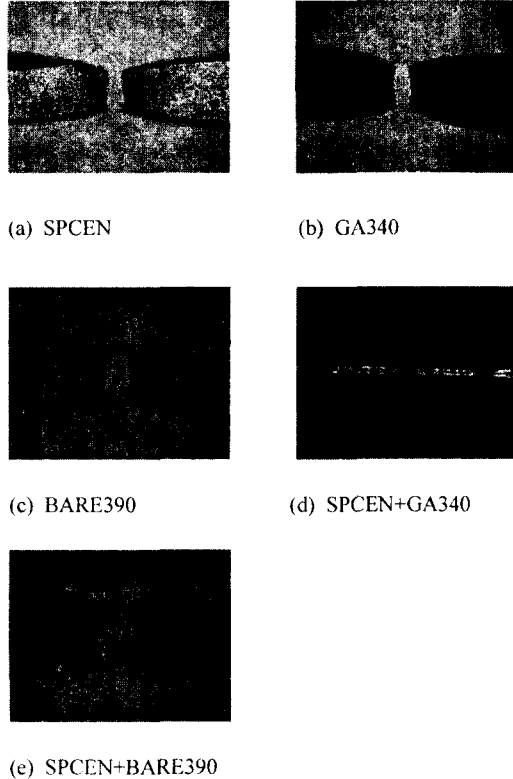


Fig. 6 Fractured Specimens by Fatigue Test

Fig. 7은 시험편의 파단면을 주사전자현미경으로 찍은 것으로 균열발생 부위를 더욱더 명확히 보여준다. (a), (b), (c)는 단일 재료인 SPCEN, GA340, BARE390의 파단면 형상을 보여주고 있으며 (d), (e)는 이종재료인 SPCEN+GA340과 SPCEN+BARE390의 파단면 형상을 보여주고 있다. (e)와 (d)의 그림에서 거칠지 않고 평탄한 부분이 균열이 시작된 부분으로 (e)가 (d)보다 SPCEN쪽으로 더욱 치우쳐져 균열이 시작되었음을 알 수 있으며 균열은 용접부에서 발생하여 양쪽 모재 방향으로 진전하여 시험편이 파단에 이르렀다.

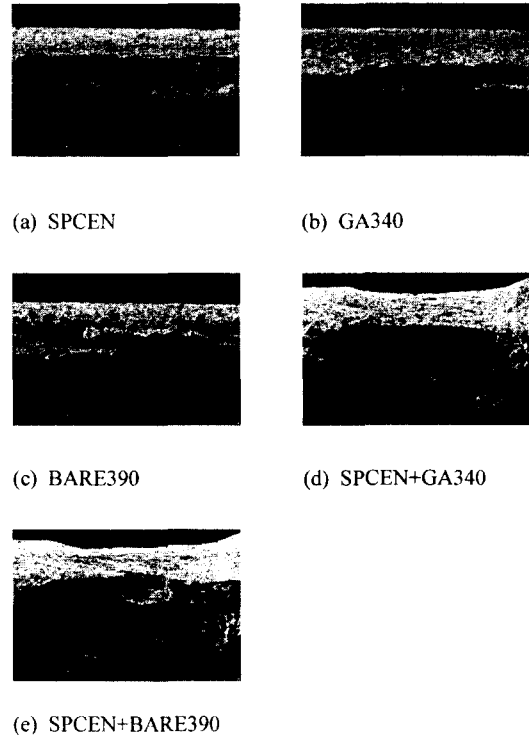


Fig. 7 Fractured Surface by S.E.M. (300X)

3.3 레이저 용접부의 피로균열 전파거동

이종재료 레이저 용접부의 피로균열 전파거동을 관찰하기 위하여 SPCEN+BARE390의 피로균열전파 실험을 수행하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 13mm Precrack을 각각 SPCEN과 BARE390쪽에 주어 피로균열 전파실험을 수행한 결과이다. Fig. 8과 Fig. 9는 피로균열 전파거동을 균열진전속도와 균열길이의 관계, 균열진전속도와 응력확대계수 폭과의 관계를 나타낸 도표이다.

SPCEN+BARE390의 균열진전의 경우를 살펴보면 균열이 용접부 비드부분에 도달하면 균열진전속도가 급속하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 용접비드부와 모재 부분의 강도차에 기인한 것으로 모재에서 균열이 진전하다 용접부 비드 부분에 이르면 용접 비드부의 증가된 강도로 인해 균열진전속도가 급속하게 감소한 것으로 판단된다.

일정시간이 지나 균열이 다시 성장을 시작하여 용접부 비드부를 통과하면서 균열진전속도는 매우 빠르게 증가하는 것을 볼 수 있다. 용접비드부는 모재보다 강도가 높으며 이러한 강도의 증가는 파괴인성치의 감소를 의미한다. 따라서 용접 비드부의 감소된 파괴인성치로 인해 균열 진전속도가 급속하게 증가한 것으로 판단된다.

균열이 용접비드부를 관통한 후 BARE390에서의 균열진전속도 증가율은 SPEN에서의 균열진전속도 증가율보다 약간 감소한다. 이는 BARE390이 SPEN보다 강도가 높아 생기는 현상으로 보이며 일정시간이 지나면 파괴인성치가 더 낮은 BARE390의 균열진전속도 증가율이 급격히 증가하여 파단에 이르게 되는 것을 볼 수 있다.

BARE390→ SPEN의 균열진전의 경우에는 초기에는 균열진전속도가 SPEN→ BARE390과 비교하여 느리게 시작되지만 시간이 지나면서 균열진전속도는 SPEN→ BARE390에서 보다 급증한다. 이는 BARE390이 SPEN보다 강도가 높기 때문에 처음에는 SPEN→ BARE390 보다 느리게 진전한 것으로 보이며 파괴인성치는 BARE390이 SPEN보다 낮아 일정시간이 지난 후 균열진전속도는 SPEN→ BARE390 균열진전속도 보다 급격히 증가한 것으로 보인다.

균열이 용접부 비드 부분에 이르게되면 SPEN→ BARE390에서는 균열진전속도가 큰 감소를 보이는데 반해 BARE390→ SPEN에서는 큰 감소를 보이지 않고 담보상태를 유지하다 비드부를 통과하면서 급격히 증가한다. 이는 BARE390→ SPEN의 균열진전이 용접부와와 강도차가 SPEN→ BARE390보다 작기 때문에 용접부 비드 부분의 높은 강도를 빨리 극복하고 균열진전속도가 급속히 증가한 것으로 판단된다. 용접부를 지나고 나서는 균열 거동 또한 SPEN→ BARE390의 균열진전과는 많은 차이를 보여주고 있는데 용접부를 통과하고나서의 균열진전속도는 이미 급속도로 증가되어 모재의 균열거동은 파단으로 치닫고 있음을 보여준다.

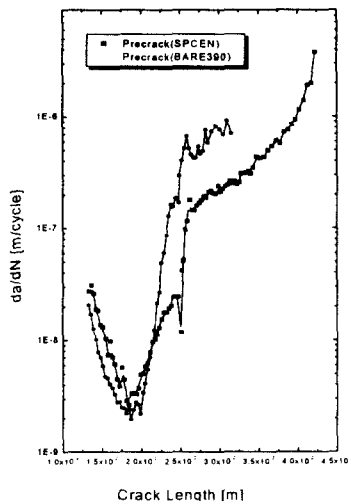


Fig. 8 Fatigue Crack Propagation with Crack Length

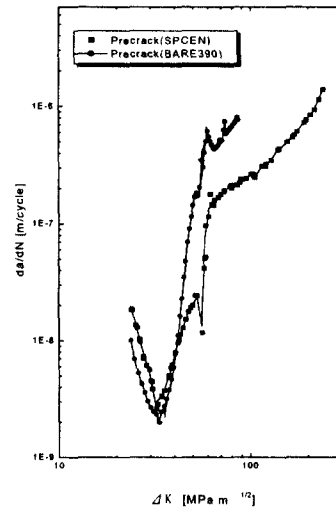


Fig. 9 Fatigue Crack Propagation with ΔK

4. 결론

이종재료 레이저 용접부의 안전성 평가를 위해 박판 이종재료에 대한 레이저 용접부의 피로강도 특성 및 피로 거동을 관찰함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 모재들 사이의 강도차이에 의한 응력구배로 인해 피로한도의 차이가 큰 이종재료 레이저 용접 판재는 피로한도 차이가 작은 이종재료 레이저 용접 판재보다 피로한도의 저하가 더 크게 발생하였다.

(2) 하중방향과 평행하게 레이저 용접된 강판에서 피로균열의 발생은 용접부 부근에서 발생하였고 강도가 약한 모재 부근에 치우쳐 피로균열이 발생하였으며 모재들 사이의 강도차가 클수록 모재 부근으로 더욱 치우쳐 피로균열이 발생하였다.

(3) 용접 비드부와 모재 부분의 강도차에 의해 모재에서 균열이 진전하다 용접부 비드 부분에 이르면 증가된 강도로 인해 균열은 급속하게 성장이 지연된다. 용접 비드부의 강도 증가는 파괴인성치의 감소를 의미하며 따라서 일정 시간이 지나면 균열은 파괴 인성치의 감소로 인해 용접비드부에서 균열진파가 급속하게 증가한다.

(4) 균열이 용접부 비드 부분에 이르게되면 SPEN→ BARE390에서는 균열진전속도가 큰 감소를 보이는데 반해 BARE390→ SPEN에서는 큰 감소를 보이지 않고 담보상태를 유지하다 비드부를 통과하면서 급격히 증가한다. 이는 BARE390→ SPEN의

균열진전이 용접부와의 강도차가 SPEN→ BARE390 보다 작기 때문에 용접부 비드 부분의 높은 강도를 빨리 극복하고 균열진전속도가 급속히 증가한 것으로 판단된다.

(5) 이종재료의 레이저 용접강판은 강도가 강한 모재에서 균열이 발생할 경우 파손의 위험이 더 높은 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 광대순, "자동차 차체제작용 레이저 용접 판재의 피로균열 전파 특성," 자동차공학회논문집, 제9권 3호, pp.181-182, 2001
2. 이건상, "자동차 생산공정에서의 레이저 응용," 자동차공학회지, 제19권, 제1호, pp.56-57, 1997
3. 박황호, "미래의 자동차 용접기술," Journal of KWS, 제15권, 제2호, pp.29-30
4. D.M. Roessler "Update on Laser Processing in the Automotive Industry," Intl. Conf. on Lasers'91, San Diego, 9-13 Dec. 1991, paper WF.5
5. Jiun-Ren Hwang, Ji-Liang Doong, Chee-Chang Chen, "Fatigue Crack Growth in Laser Weldments of Cold Rolled Steel, Materials Transaction," JIM, Vol. 37, No. 8, pp. 1443-1446, 1996
6. 이충호, "박판금속 성형공정에서의 블랭크설계 및 변형률 예측," 대한기계학회, 제20권, 제6호, pp. 1810-1818, 1996
7. 김기철, "테일러드 블랭크용 박판강재의 레이저 용접성 1 용접부 형상에 미치는 공정변수의 영향," 대한용접학회지, 제16권, 제1호, pp. 77-87, 1998
8. 김재용, "Al-7020의 Pulse-GMA 용접에 관한 연구 1 용접변수가 용접부 형상에 미치는 영향," 대한용접학회지, 제6권, 제2호, pp. 47-45, 1225-6153, 1988