

레이저 용접된 박판 지르코늄 합금의 피로특성

정동희* · 김재훈*[†] · 윤용근* · 박준규** · 진경락**

*충남대학교 기계설계공학과

**한전원자력연료

Fatigue Characteristics of Laser Welded Zirconium Alloy Thin Sheet

Dong-Hee Jeong*, Jae-Hoon Kim*[†], Yong-Keun Yoon*, Joon-Kyoo Park** and Kyeong-Rak Jeon**

*Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ., Daejeon 305-764, Korea

**Nuclear Fuel Technology Department, Korea Nuclear Fuel, Daejeon 305-353, Korea

[†]Corresponding author : Kimjhoon@cnu.ac.kr

(Received August 16, 2011 ; Revised September 20, 2011 ; Accepted January 25, 2012)

Abstract

The spacer grid is one of the main structural components in a fuel assembly. It supports fuel rods, guides cooling water and maintains geometry from external impact load and cyclic stress by the vibration of nuclear fuel rod, it is necessary to have sufficient strength against dynamic external load and fatigue strength. In this study, the mechanical properties and fatigue characteristics of laser beam welded zircaloy thin sheet are examined. The material used in this study is a zirconium alloy with 0.66 mm of thickness. The fatigue strength under cyclic load was evaluated at stress ratio $R=0.1$. S-N curves are presented with statistical testing method recommend by JSME- S002 and compared with S-N curves at R.T. and 315°C. As a result of the experimental approach, the design guide of fatigue strength is proposed and the results obtained from this study are expected to be useful data for spacer grid design.

Key Words : Spacer grid, Zirconium alloy, Laser beam weld, Mechanical property, Fatigue characteristics, Vickers hardness

1. 서 론

경수로용 핵연료 집합체는 판스프링 형태의 지지격자 스프링으로 지지되는 250 개의 핵연료봉과 10개 이상의 지지격자 그리고 안내관 등의 핵심 기계부품으로 구성된다. 이러한 구성 부품의 기계/구조적인 건전성을 확보하는 문제는 원자력 발전소의 1차 계통의 방사능 오염방지를 통한 안전성 확보는 물론, 원자력 발전소의 경제성 측면에도 매우 중요한 문제이다. 지지격자는 수명 동안 다양한 화학물질이 포함된 수중에서 고온/고압 및 높은 유속의 난류 유동장하에 놓여 있기 때문에 종방향 및 횡방향으로 랜덤하고 지속적인 유동유발 하중을 받게 된다¹⁾. 따라서 지지격자는 횡방향 하중이 직접

적으로 연료봉에 전달되지 않도록 연료봉을 보호하고 횡방향 하중에서도 구조물의 형상이 크게 변형 되지 않을 만큼의 충분한 강도가 요구된다. 또한 지지격자는 압연 가공된 지르코늄 판재를 레이저 용접 등의 접합공정을 통해 완성되어 사용하는데 지지격자 외부 판은 겹치기 용접으로 접합된다. 지지격자는 핵연료 바로 옆에 놓여 있어 수명기간 동안 매우 높은 중성자 조사를 받게 되며 이것은 길이성장 및 크립으로 인하여 구조물 내에 잔류응력을 유발시킨다. 가장 큰 잔류응력이 발생하는 부분은 용접부가 되며, 잔류응력의 발생은 구조물의 기계적 건전성을 저해하기 때문에 안전한 지지격자를 설계하기 위해서는 원자로 운전온도에서 용접부의 피로특성을 정량화할 필요가 있다. 일부 선진국과 국내에서 지르칼로이-4 구조에 대한 레이저용접 특성 연구,

부식성 시험 및 레이저 용접품질에 대한 연구가 수행된 바가 있다^{2,3)}. 그러나 고온에서 지르칼로이-4 레이저 용접부의 피로거동에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

이 논문은 지지격자 구조물에 대한 기계적 건전성을 예측하고 필요한 데이터 수집을 목적으로 지르코늄합금 레이저용접부에 대한 인장 및 피로시험을 수행하였다.

2. 재료 및 실험장비

2.1 실험재료 및 시편

이용된 재료는 지르코늄 합금으로 경수로용 핵연료 집합체의 핵 연료봉을 지지하는 지지격자용 소재이다. 인장 및 피로 시험에 사용되는 시편의 두께는 0.66 mm 박판으로 겹치기 용접된 상태이다. 본 소재의 화학적 성분 및 레이저 용접조건은 각각 Tables 1, 2와 같고, 인장 및 피로시험에 사용된 시편은 Fig. 1과 같이 가공하였다.

2.2 실험 장비

인장 및 피로 시험은 Fig. 2와 같이 10톤용 MTS 810 재료시험기를 사용하여 수행하였다. 가열장치는 MTS사의 고온로(chamber)를 사용하였고, 최대 가열 온도는 1400℃이다. 온도측정은 시험편에 K 타입 열전대를 부착하여 측정하였다. K 타입 열전대의 최대 측정온도는 1550℃이다. 열전대는 끝단을 열전대 용접기(대현테크, model : DH-TC 100)로 용접한 후 스트레인게이지 용접기(EATON, model : W1200)를 이용하여 열전대를 시편의 3부분으로 나누어 용접하였다. 시험편의 정확한 온도는 온도계측기(Omega, model : HH21)를 사용하여 확인하였다. 고온 분위기의 변형을

Table 1 Chemical compositions of zirconium alloy

Chemical composition (wt%)						
Nb	Sn	Fe	Cr	T.E.	O	Zr
1.0	1.0	0.11	-	-	-	Bal

Table 2 Welding method and parameter

Laser Weld Parameter	
Average Power(W)	420
Pulse Frequency(Hz)	5.5
Pulse Wide(m/s)	2.5
Welding Speed(mm/min.)	200

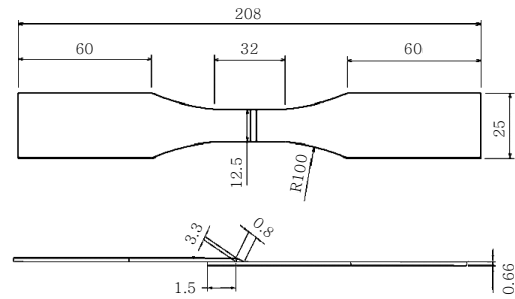


Fig. 1 Configuration and dimensions of Lap weld specimen for fatigue test

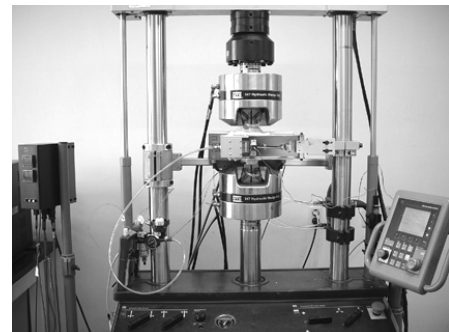


Fig. 2 Configuration of experimental apparatus for MTS 810

은 시험편 접촉 방식의 632.53F-11 고온 변위게이지(extensometer)를 이용하여 측정하였다. 시험하중, 변형률 및 온도는 MTS 사의 TestStar II's controller로 제어하였다.

3. 실험방법

3.1 경도시험 및 인장시험

지르코늄합금 용접부의 기계적 특성을 알아보기 위하여 경도시험 및 인장시험을 수행하였다. 경도시험은 판재의 열처리 온도 및 용접부에서 길이 방향의 위치에 따른 경도변화를 측정하기 위해 마이크로 비커스 경도시험기를 이용하였다. 이 때 용접 중심부에서 모재부분 0~1 mm까지는 0.1 mm 간격으로 측정하였고, 그 다음에 1~2 mm는 0.2 mm 간격으로 Fig. 3와 같이 전체길이 4 mm 범위에서 경도를 측정하였다. 이때 적용하중은 200g, 유지 시간은 10 sec로 수행하였다.

상온 및 고온 인장시험은 ASTM E8 및 E21의 규정⁴⁻⁵⁾에 준하여 수행하였다. 원자로 운전조건과 유사한 온도에서 용접시편의 기계적 특성을 얻기 위하여 시험 온도는 상온, 315℃의 2가지 온도에서 실험하였다. 시험 속도는 상온 및 고온에서 모두 변위 일정시험으로

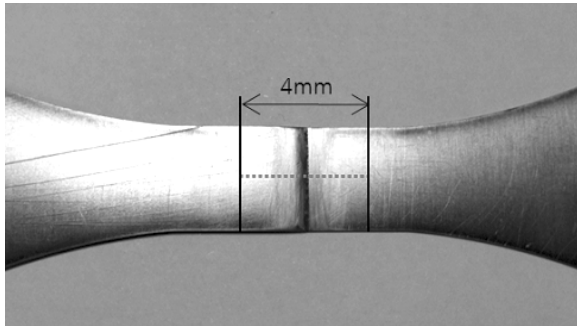


Fig. 3 Micro-Vickers hardness measurement range

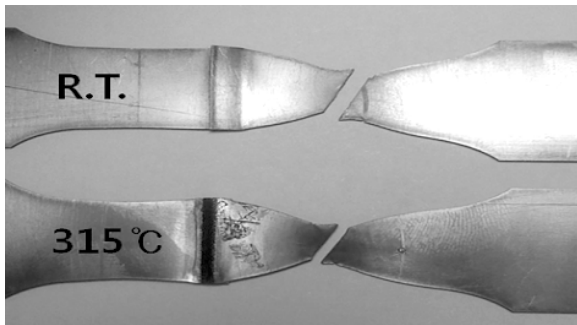


Fig. 4 Fractured specimens for tensile test

2 mm/min 유지하였다. 고온 인장 실험은 고온 노를 이용하여 시험편을 가열한 후 시험편 표면이 시험온도에 도달했을 때부터 10분 동안 온도를 유지한 후 실험하였다. 상온 및 고온 항복강도(σ_{ys})는 응력-변형률 선도로부터 스트레인을 0.2% 읍셋하여 산출하였다. 인장강도(σ_{uts})는 응력-변형률 선도의 최대 위치에서의 응력으로 구하였다. 또한 탄성계수는(E)는 응력-변형률선도의 선형구간의 기울기를 이용하여 산출하였다. 하중변형률 선도를 구하는 소프트웨어는 OriginPro 6.1을 사용하였다. Fig. 4는 실온 및 315°C에서 인장시험 후 모재부분에서 파단 된 사진을 나타낸 것이다.

3.2 피로시험

겹치기 용접부의 피로강도를 평가하기 위하여 고주기 피로실험은 ASTM E466의 규정⁶⁾에 따라 일정진폭 하중제어로 응력비 R=0.1의 조건으로 상온 및 315°C의 온도 조건에서 실험을 수행하였다. 이때의 하중파형은 10Hz의 정현파이다. 먼저 시험응력을 결정하기 위해 예비시험을 수행하였고, $N_f = 1 \times 10^5$ 상당하는 응력범위 85 MPa을 얻어내어 첫번째 피로시험을 응력범위는 168 MPa에서 시작하여 응력레벨을 낮추어 가면서 6단계로 실험을 수행하였다.

용접부 치수의 영향을 받지 않는 S-N 선도를 작성하

기 위하여 100배 확대현미경을 이용하여 각각의 시험편에 대하여 파단면을 촬영하고 실제 단면적을 측정하여 응력으로 환산하여 정리하였다. 또한 JSME-S002⁷⁾에서 제시한 통계적 기법에 따라 파괴확률 50%의 S-N 선도와 파괴확률 10%, 90%의 S-N 선도를 작성하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 겹치기 용접부에 경도특성

Fig. 5는 지르코늄 합금 판재의 레이저 용접된 시험편의 경도 분포를 용접금속(WM), 열 영향부(HAZ), 그리고 모재(BM)의 세부부분으로 구분하여 연속으로 측정된 결과를 보여주고 있다. 겹치기 용접시험편의 모재, 열영향부, 용접부의 경도를 비교한 결과 용접부 경도는 Hv = 270~280으로 모재의 경도 Hv = 220~225에 비하여 25% 크게 나타났고, 열영향부는 Hv = 225~240으로 모재부의 경도보다 5% 크게 나타났다. 전반적인 경향은 용접부의 경도가 가장 크고 용접 열영향부, 모재부의 순으로 나타났다.

4.2 인장시험 결과

Fig. 6은 상온과 315°C에서 모재 및 용접재에 대한 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. 상온에서 모재 및 용접시험편의 인장강도는 거의 동일하고 용접시험편의 파단은 모두 모재에서 발생하고 하였다. 그리고 겹치기 용접시험편의 탄성계수, 항복강도 및 인장강도는 온도가 증가하면 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

4.3 피로시험 결과

지르코늄 합금의 겹치기 용접시험편에 대한 S-N 선도

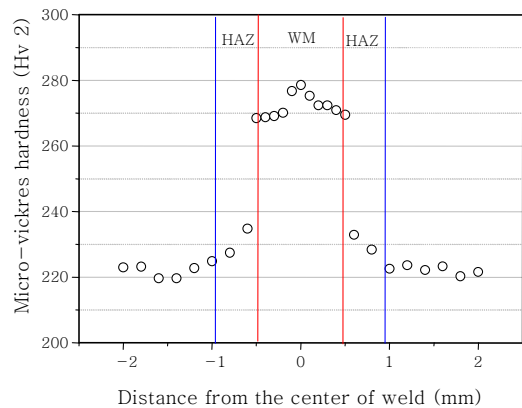


Fig. 5 Microhardness distributions at the weld region and heat affected zone

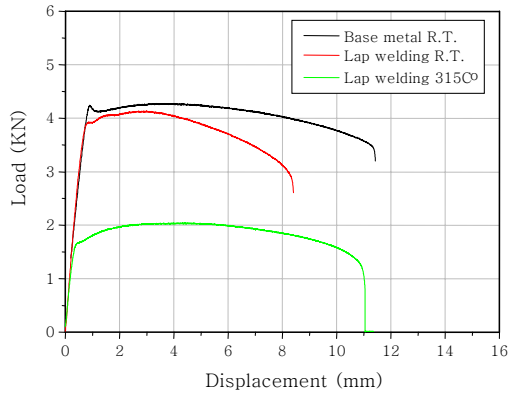


Fig. 6 Load-displacement curves of tensile tests

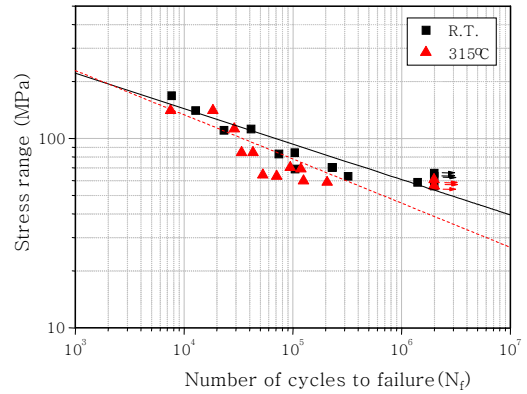


Fig. 9 S-N curves for lap weld specimens at room temperature and 315°C

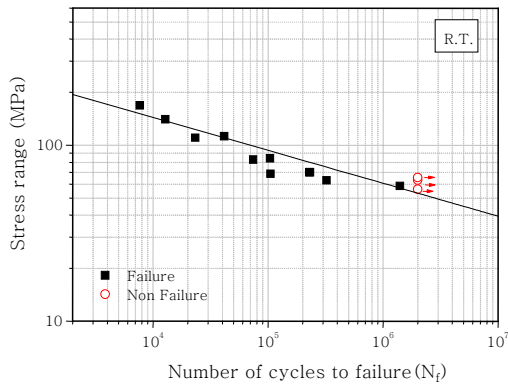


Fig. 7 S-N curve at room temperature

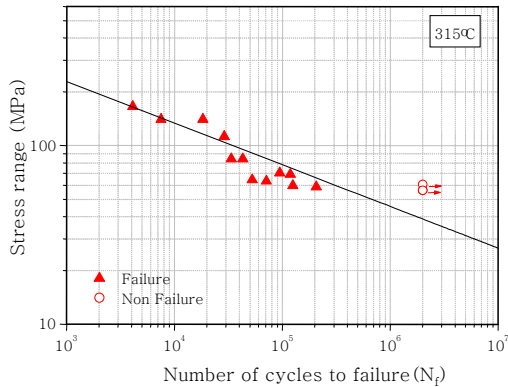


Fig. 8 S-N curve at 315°C

를 작성할 때 파단 위치에서의 실단면 응력범위 등에 의하여 정리하면 치수의 영향을 받지 않는 S-N 선도를 작성할 수 있다고 보고된 것을 참고하여⁸⁾ 피로시험 결과를 파단 위치에서 실단면 응력범위를 기준으로 정리하였다. 실제 피로시험 후 파단 부위는 응력 집중이 예상되었던 겹치기 용접 비드부에서 발생하였다.

Figs. 7 및 8은 각각 상온 및 315°C에서의 겹치기 용접 시편에 대한 피로시험 결과를 응력 범위와 파단

수명의 관계를 나타낸 것이다. 또한 Fig. 9는 상온 및 315°C에서 지르코늄합금의 피로시험에 대한 S-N 선도를 비교한 것으로 피로강도는 거의 차이가 없고, 315°C에서의 피로강도가 약간 작은 것을 알 수 있다. 그리고 실선 및 점선은 응력비가 R=0.1일 때의 상온 및 315°C에서의 파괴확률 50%의 피로수명 선도를 각각 나타내고 있다. 지르코늄 합금의 용접시편에 대한 피로강도 수명 식은 다음과 표시할 수 있다.

$$R.T. : S = 803.68 N_f^{-0.2167} \quad (1)$$

$$350^\circ\text{C} : S = 1143.86 N_f^{-0.2309} \quad (2)$$

Figs. 10, 11은 상온 및 315°C에서 겹치기 용접에 대한 확률분포 P-S-N 선도를 각각 나타낸 것이다. 실선은 파괴확률 50%의 선이고, 점선은 10%의 선, 1점 쇄선은 파괴확률 90%의 P-S-N 선도를 나타내고 있다.

$$\text{Log } N_f = \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \text{Log}(\Delta\sigma) \quad (3)$$

$$\text{Log } N_f = \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \text{Log}(\Delta\sigma) - 1.28 \hat{\sigma}(\text{Log } N_f) \quad (4)$$

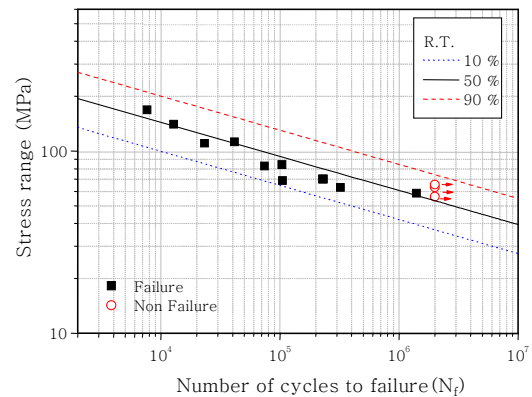


Fig. 10 P-S-N curves at room temperature

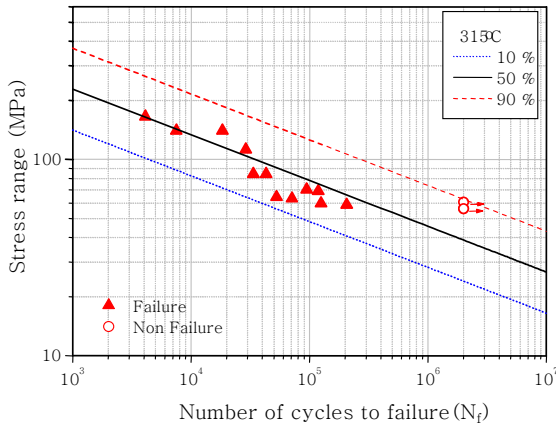


Fig. 11 P-S-N curves at 315°C

피로시험에서 구해진 상온 및 315°C 데이터를 이용하여 구해진 계수 $\hat{\alpha}_2$ 는 각각 13.977, 13.107, $\hat{\beta}_2$ 는 각각 -4.164, -4.286 으로 평가 되었고 파단수명의 표준편차 $\hat{\sigma}(\text{Log } N_f)$ 는 각각 0.433, 0.693이다. 식(3)으로 파괴확률 50%의 P-S-N 선도를 구할 수 있으며, 식(4)로부터 파괴확률 10% 및 90%의 P-S-N 선도를 나타낼 수 있다

P-S-N 선도는 2×10^6 cycles를 무한수명의 기준으로 상온에서 피로한도는 61.61 MPa 이며 파손확률 10% 및 90%는 각각 37.11 MPa, 74.94 MPa 이다. 또한 315°C에서 피로한도는 57.66 MPa 이며 파손확률 10% 및 90%는 각각 23.56 MPa, 64.03 MPa 이었다. 피로한도는 무한수명 데이터의 평균값으로 결정하였다. 따라서 겹치기용접 박판 지르코늄합금의 315°C에서 피로한도는 상온에서 결과보다 6% 정도 작게 평가되었다.

박판소재의 피로강도가 기본적으로 응력집중 정도에 크게 의존되는 것으로 타 연구 문헌에서 보고되고 있으며⁹⁻¹⁰⁾, 반복하중에 의하여 발생하는 잔류응력의 영향이나 야금학 영향에 의한 피로강도의 감소는 상대적으로 미미한 것으로 알려지고 있다¹¹⁾. 따라서 겹치기 용접 시편의 피로 강도는 온도의 영향보다 용접부에서 응력집중에 의한 영향이 주요인자라 할 수 있고 이와 같은 이유로 상온 및 315°C의 피로강도의 차이가 작은 것으로 사료된다.

5. 결 론

지지격자 소재인 지르코늄 합금의 겹치기 용접시편에 대하여 경도시험과 상온 및 315°C에서의 인장 및 피로시험을 수행하였다. 이들로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 겹치기 용접부의 경도를 측정된 결과 용접 부 및 열영향부는 모재부보다 각각 25%, 5% 높은 경도를 보인다.

2) 겹치기 용접시편에서 상온 모재 및 용접시편의 인장특성은 거의 동일하고 용접시편은 모재에서 파단하며, 315°C에서 겹치기 용접시편의 탄성계수, 항복강도 및 인장강도는 상온보다 급격히 감소한다.

3) 겹치기 용접시편의 유한 또는 무한수명 영역에서 피로강도는 상온 및 315°C에서 피로한도는 각각 61.61 MPa 및 57.66 MPa이었다. 그리고 315°C에서 피로한도는 상온에서 결과보다 6%정도 작다.

4) 온도변화에 따른 파괴확률별 P-S-N 선도는 지지격자 설계에 있어서 겹치기 용접부의 피로 강도 설계 기준으로 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2011년 한전원자력연료(주) 연구비 지원으로 수행한 과제이며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. K. H. Lee, K. H. Yun, K. N. Song, J. Y. Kim and H. N. Lee : Free vibration analysis of the Partial fuel assembly under water using substructure method, Proc. of the KSNVE2006 autumn annual meeting, **6** (2006), 246~249
2. C. Dawes : Laser welding abiton publishing, 1992, 51-55
3. V. Ram, G. Kohn and A. Stem : CO₂ laser beam weld ability of Zircaloy-2, AWSI, 1986, 33-37
4. ASTM E8 : Standard methods of tension testing of metallic materials, 1981
5. ASTM E21, : Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic material, 1992
6. ASTM E466 : Standard test methods of strength of Anchors in elevated temperature tension tests of metallic materials, 1996
7. JSME S002 : Standard method statistical fatigue testing, Journal of the japan society of mechanical engineers, 1994, 10~42
8. J. H. Kim : A Study on the fatigue strength of lap weld of LNG tank, KSOE, **13-3** (1999), 29~35
9. B. Pollard : Fatigue strength of spot welds in Titanium-bearing HSLA steal, 1982, SAE paper 820284
10. F. V. Lawrence : An empirical method for estimating the fatigue resistance of tensile-shear spot weld, 1983, SAE paper 830035
11. 高橋, 伊藤, 矢崎 : 鐵と鋼, 1971, 57-9 (in Japanese)