

Alloy 617 모재와 용접부재의 저사이클피로 거동에 관한 실험적 고찰

An Experimental Investigation on Low Cycle Fatigue Behavior of Alloy 617 Base Metal and Alloy 617/Alloy 617 Weld Joints

최필호* · 김선진**† · 김우곤*** · 김민환***

Pil-Ho Choi*, Seon-Jin Kim**†, Woo-Gon Kim and Min-Hwan Kim***

(접수일 : 2014년 8월 6일, 수정일 : 2014년 9월 1일, 채택확정 : 2014년 9월 2일)

Abstract: Alloy 617 is the one of the leading candidate materials for intermediate heat exchangers(IHX) of a very high temperature reactor(VHTR) system. Some of the components are joined by many welding techniques and therefore the welded joints are inevitable in the construction of systems. In the present paper, the low cycle fatigue(LCF) behaviors of Alloy 617 base metal(BM) and the gas tungsten arc welded (GTAWed) weld joints(WJ) are investigated experimentally under strain controlled LCF tests. Fully axial total-strain controlled tests have been conducted at room temperature with total strain ranges of 0.6, 0.9, 1.2 and 1.5%. The weld joints have shown a lower fatigue lives compared with base metals at all the testing conditions. The weld joints have shown a higher cyclic stress response behavior than base metal. Both BM and WJ exhibited cyclic strain hardening behavior, depending on the total strain range. In addition, the strain-life parameters for BM and WJ were determined, based on Coffin-Manson equations.

Key Words : Alloy 617, Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), Low Cycle Fatigue (LCF), Weld Joint (WJ)

1. 서 론

초고온가스로나(VHTR)는 수소와 전기를 경제적으로 생산하기 위한 제4세대(Gen-IV) 원자로 중의 하나로 가장 유망 받는 노형 중의 하나이다.¹⁾ 원자력용 니켈기 초합금인 Alloy 617은 초고온가스로나(VHTR)의 중간열교환기(IHX)의 유력한 후보재

료 중의 하나이다.^{2,3)} 원자로의 기동 및 중지 뿐만 아니라 동력전달은 부재의 저사이클피로 및 크리프-피로 하중을 유발한다.³⁾ 따라서 Alloy 617의 신뢰성 있는 설계를 수행하기 위해서는 고온에서의 저사이클피로 및 크리프-피로 수명에 대한 물성 자료가 필요하다.

이러한 관점에서 국제적으로 많은 연구자들이

**† 김선진(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과

E-mail : sjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6163

*최필호 : 부경대학교 대학원

***김우곤, 김민환 : 한국원자력연구원

**† Seon-Jin Kim(corresponding author) : Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University.

E-mail : sjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6163

*Pil-Ho Choi : Graduate School, Pukyong National University.

***Woo-Gon Kim, Min-Hwan Kim : Korea Atomic Energy Research Institute.

Alloy 617에 대한 저사이클피로 및 크리프-피로 거동에 대한 많은 연구를 수행하여 왔다.²⁻⁷⁾ 하지만 이들의 연구는 대부분은 Alloy 617 모재에 대한 연구 결과이다. 국내의 경우는 Alloy 617에 대한 저사이클피로에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다. 실용적 관점에서 구조부재는 필연적으로 용접에 의하여 접합되므로 용접부재에 대한 저사이클피로 특성의 수집 및 신뢰성 있는 데이터의 확보가 필수적이다.^{8,9)}

이러한 관점에서 고온에서의 Alloy 617 용접부재의 저사이클피로 특성을 평가하기 위한 기준 자료를 획득하기 위한 연구의 일환으로써, 본 연구에서는 먼저 상온에서의 Alloy 617 모재 및 Alloy 617/Alloy 617 가스텅그스텐아크 용접된 용접부재에 대한 저사이클피로 실험을 수행하여 본 재료에 대한 모재와 용접부재에 대한 저사이클피로 거동을 실험적으로 고찰하고자 하였다.

2. 실험방법 및 절차

본 연구에 사용된 재료는 Alloy 617로 열간압연 판재로서 제조사에서 생산된 Heat Number는 Haynes 617, R617 6 8837이며, 원 판재의 크기는 25mm(T) × 1200mm(W) × 3600mm(L)이다. 본 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다. 본 재료의 화학적 성분은 Table 1에서 볼 수 있는 것처럼 ASTM 규격(10)을 잘 따르고 있음을 알 수 있다.

본 연구에 사용된 용접은 가스텅그스텐아크용접(GTAW)이 사용되었다. 본 용접에 사용된 용가재는 KISWEL사에서 제조한 KW-T617를 사용하였다. 용접시편의 총 적층 수 및 패스수는 14층 41패스로, 용접형상은 V-groove, 각도 80도, 10mm root gap을 갖도록 하였다. 본 용접 방법과 조건에 대해서는 참고문헌¹⁾를 참조 바란다.

Alloy 617/Alloy 617 용접부재(WJ)의 시험편 채취 모식도를 Fig. 1에 나타낸다. WJ 시험편의 채취방향은 압연방향과 일치하고 용접방향과 수직이 되도록 하였다. 본 실험에 사용된 모든 시험편은 Fig. 2와 같이 평행부 직경 6mm의 환봉 시험편을 ASTM E606 규정(11)에 의하여 제작하였다.

저사이클피로 실험을 수행하기 위해 사용된 실험 장비로는 만능 유압 피로시험기(Instron Model 8516)를 사용하였다.

Table 1 Chemical composition in wt% of the Alloy 617 plate used in this study

Element	ASTM B168-08	This study
C	0.05-0.15	0.08
Ni	44.5 min	53.11
Fe	3.0 max	0.949
Si	1.0 max	0.084
Mn	1.0 max	0.029
Co	10.0-15.0	12.3
Cr	20.0-24.0	22.2
Ti	0.6 max	0.41
P	0.015 max	0.003
S	0.015 max	<0.002
Mo	8.0-10.0	9.5
Al	0.8-1.5	1.06
B	0.006 max	<0.002
Cu	0.5 max	0.0268

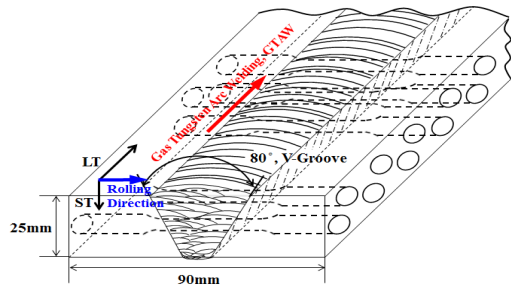


Fig. 1 Illustration of specimen cutting from the GTAWed pad (Alloy 617/Alloy 617)

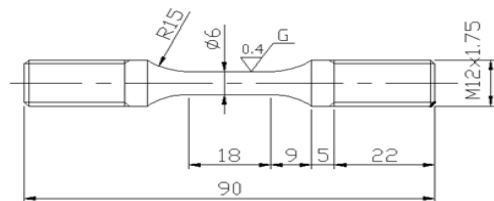


Fig. 2 Shape and dimensions of cylindrical specimen

실험 조건은 모재와 용접부재에 모두 상온의 환경에서 주파수 0.25Hz, 삼각파형, 전변형률범위 조건은 0.6%, 0.9%, 1.2% 그리고 1.5%의 네 가지 조건하에서 신중하게 실험이 수행되었다. 그리고 Fig. 3에 네 가지 조건의 전변형률범위에 대한 연속 반복 피로에 대한 변형률 이력의 개념도를 도식적으로 나타내었다.

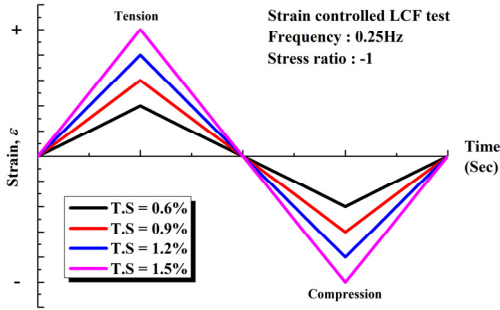


Fig. 3 Schematic diagram of strain history for continuous cycle fatigue

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 저사이클피로 수명 거동

Alloy 617 모재 및 용접부재에 대한 저사이클피로 수명을 Fig. 4에 나타낸다. 모든 전변형률범위 조건에서 용접부재가 모재보다 수명이 더 낮게 나타났다. 이는 저사이클피로 하중하에서의 재료의 미세조직과 강도에 기인하는 영향이라 사료된다. Fig. 5에 Alloy 617의 모재와 GTAW 용접한 용접부재의 미세조직을 나타낸다. Alloy 617 모재의 미세조직은 조대하고 미세한 결정입경을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이에 반해 용접부재의 용접부의 미세조직은 덴드라이트(dendritic) 구조의 큰 기둥 형상의 결정입경(larger columnar grain)으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 이는 Carrot12의 조직관찰 결과와 잘 일치하고 있다.

전변형률범위 0.6%의 경우 파단 수명은 모재 43030cycle (48hr), 용접부재 36292cycle (40hr)이고, 전변형률범위 1.5%의 경우 모재는 1409cycle (1.57hr), 용접부재는 447cycle (0.5hr)로 나타났다.

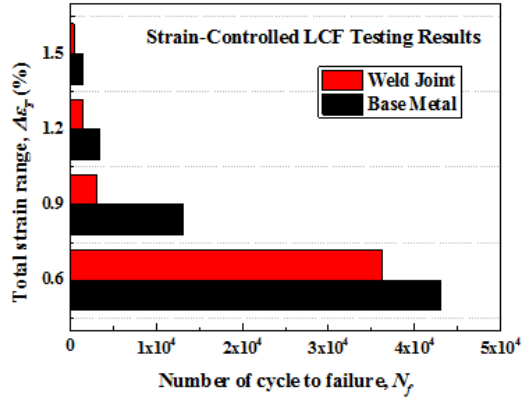


Fig. 4 Cycle to failure for BM and WJ

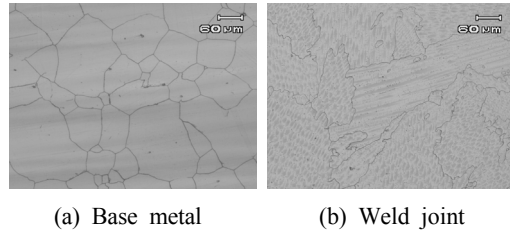


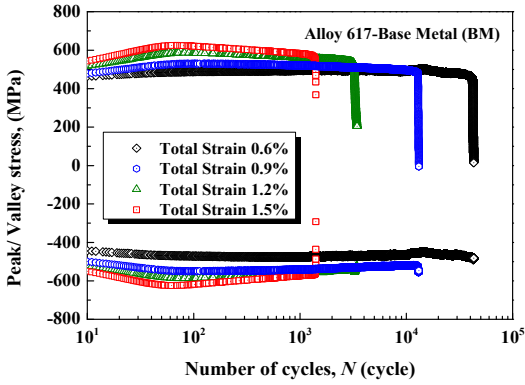
Fig. 5 Microstructure of the Alloy 617 BM and the WJ

전변형률범위가 증가하게 되면 재질에 관계없이 수명은 감소하였다. 공학적 관점에서의 피로수명 평가는 지면관계상 차후 보고하고자 한다.

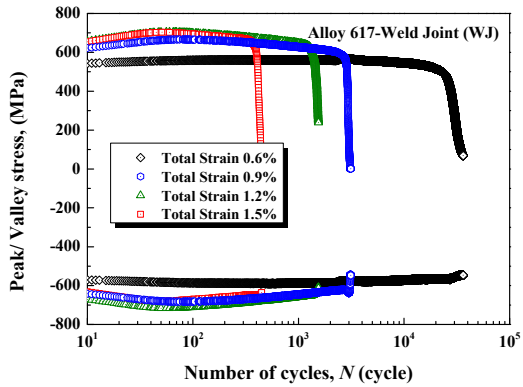
3.2 저사이클피로 거동

3.2.1 반복 응력 반응 거동

반복 응력 반응 거동은 저사이클피로 시험중 재료의 응력 반응 변동을 나타낸다. 일반적으로 반복 응력 반응 거동은 경화(hardening), 연화(softening) 그리고 유지(saturation)의 영역을 포함한다.13) 이들 영역의 상대적인 비율은 재료에 따른 초기 미세조직과 변형률 제어 중 미세조직의 변화 등에 의존하는 것으로 알려져 있다. Fig. 6은 모재(a)와 용접부재(b)에 대한 모든 전변형률범위의 실험 조건에서의 최대 인장 및 압축응력을 반복수의 함수로 나타낸 것이다. 거시적으로 볼 때 반복 응력 반응 거동은 모재와 용접부재 둘 다 비슷한 양상을 보였지만, 모든 조건에서 용접부재의 경우가 더 큰 반복 응력 피크치를 나타내고 있다.



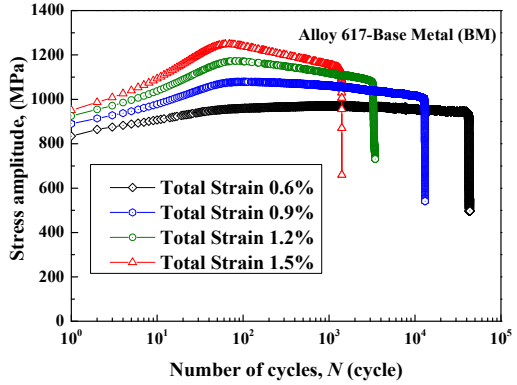
(a) Base metal



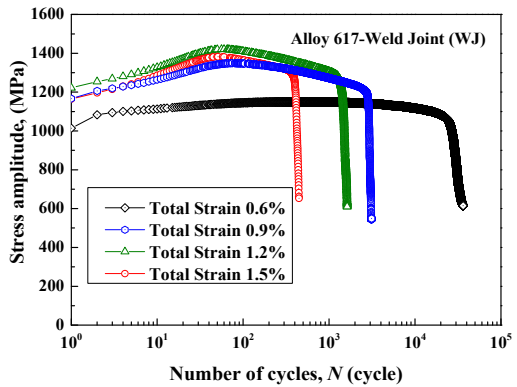
(b) Weld joint

Fig. 6 Peak tensile and compressive stresses as a function of number of cycle for BM and WJ

이는 용접부재가 모재보다 더 낮은 파단사이클을 가지는 원인이라 사료된다. 그리고 전변형률범위가 증가함에 따라 응력 피크치의 변동도 증가하였다. 상대적으로 낮은 전변형률범위인 0.6%인 경우 다른 조건들에 비해 소성 변형이 많이 일어나지 않기 때문에 응력 피크치의 값이 초기 수십 사이클 영역을 제외하고 비교적 일정한 안정화 구간인 비가 큰 것으로 사료된다. 모재와 용접부에 대한 반복 응력 반응 거동을 좀 더 명확히 파악하기 위하여 응력진폭을 반복수의 함수로 다시 Fig. 7에 나타내었다. 모재와 용접부재 모두 반복수가 증가함에 따라 초기에는 반복 경화현상을 보이고 있으며 그 다음 반복 연화하는 현상을 보이고 있다. 하지만 모재와 용접부재의 반복 응력 반응 거



(a) Base metal



(b) Weld joint

Fig. 7 Variation of stress amplitude as a function of number of cycle for BM and WJ

동은 전변형률범위에 따라 그 거동에 영향을 미침을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 모재와 용접부재 모두 전변형률범위가 증가할수록 응력 진폭의 기울기가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 이하에서는 경화율의 영향에 대하여 조사하였다.

3.2.2 모재와 용접부재의 경화율의 비교

초기 변형률 사이클에 대한 응력진폭의 영향을 좀 더 면밀히 고찰하기 위하여 초기 사이클 수에 대한 Fig. 7의 응력진폭 그래프를 정규좌표를 사용하여 Fig. 8에 확대하여 나타내었다. Fig. 7과 Fig. 8에서 알 수 있듯이 Alloy 617 모재 및 용접부재의 상온에서 저사이클피로 과정은 거시적으

로 수명의 대부분을 반복 연화 현상에 의하여 지배되는 것을 알 수 있다. 그러나 초기 사이클수에 있어서는 반복 변형을 경화 현상이 모재와 용접부재에서 모두 나타남을 알 수 있다. 모재 및 용접부재에 대한 초기 경화 현상을 나타내는 사이클수는 전변형률범위가 증가할수록 감소하는 경향을 보여주고 있다. 초기 경화 현상의 정도를 전변형률범위의 함수로 평가하기 위하여, 이들의 관계를 전변형률범위에 대하여 Fig. 9에 나타낸다. 전변형률범위가 증가할수록 초기 경화를 지배하는 사이클수는 감소하는 경향을 보여주고 있다. Alloy 617의 모재와 용접부재에 대한 초기 반복 변형을 경화의 영향을 면밀히 검토하기 위하여,

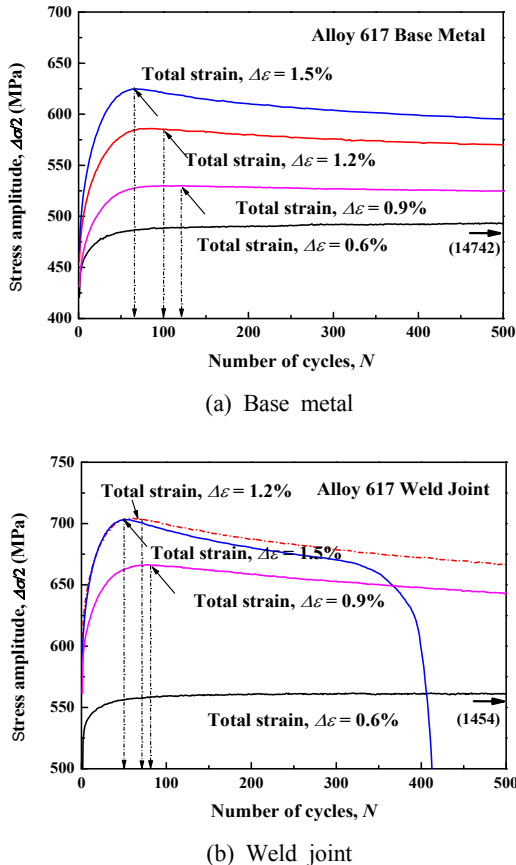


Fig. 8 Initial changes of stress amplitude as a function of cycle for each total strain range

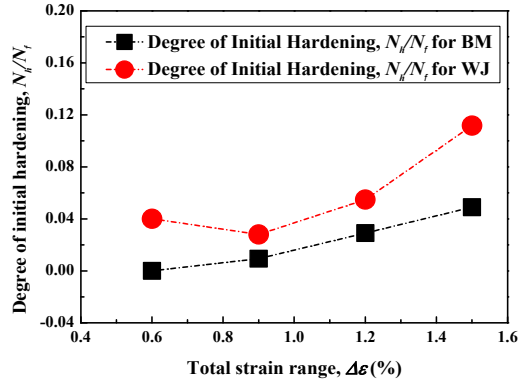


Fig. 9 Effects of DOIH on total strain range for the BM and WJ

초기 반복 변형을 경화의 사이클수의 기여율을 다음과 같이 정의하였다. 즉,

$$DOIH = \frac{N_h}{N_f} \times 100\% \quad (1)$$

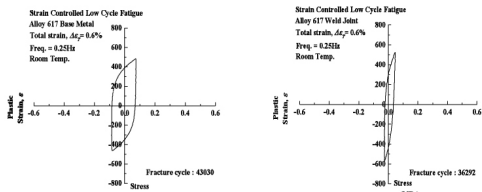
여기서, DOIH는 degree of initial hardening의 약어로 반복 경화의 기여율을 나타내며, N_f 는 파단까지의 사이클수를 나타내며 그리고 N_h 는 최종 응력 진폭을 나타낼 때의 사이클수를 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 수명에 대한 초기 경화율의 기여는 모재와 용접부재 모두 전변형률범위가 증가할수록 거시적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 동일 전변형률범위에서의 경화율의 기여는 모재보다도 용접부재의 경우가 높은 것으로 나타났다. 즉, 초기 반복 경화율의 기여가 전체적인 저사이클피로 수명에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.2.3 소성변형률과 응력 거동

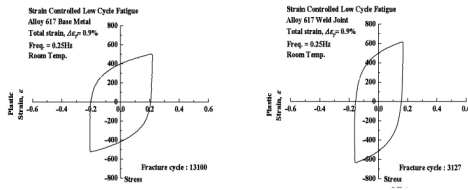
Fig. 10에 Alloy 617의 모재와 용접부재에 대한 반수명(half-life)에 있어서는 소성변형률-응력 선도를 비교하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 소성변형률 진폭은 용접부재에 비하여 모재의 경우가 모든 전 변형률범위에서 모두 크게 나타났다. 이는 모재의 경우가 용접부재보다도 항복강도가 낮기 때문이라 사료된다. 한편, 전변형률범위

가 증가할수록 모재와 용접부재의 소성변형을 진폭의 범위는 좁아지는 경향을 보였다.

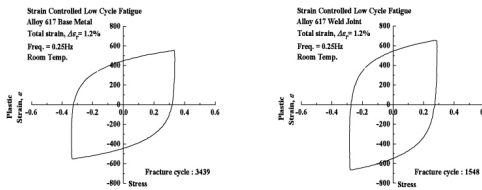
Alloy 617 모재 및 용접부재에 대한 전변형률범위에 미치는 소성변형률 진폭의 영향을 Fig. 11에 정리하여 나타내었다. 즉, 소성변형률 진폭은 용접부재의 경우가 모든 조건에서 모재보다 낮게 나타났으며, 모재 및 용접부재 모두 전변형률범위가 증가할수록 선형적으로 증가하였다. 이러한 영향은 모재와 용접부재의 미세조직에 의한 상대적 전위 밀도의 영향과 관계있는 것으로 사료된다.¹³⁾



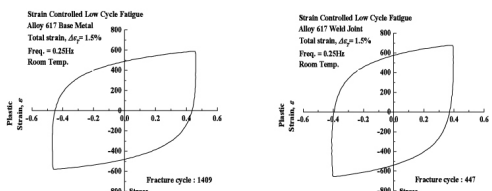
(a) BM (left) and WJ (right) for strain range, 0.6%



(b) BM (left) and WJ (right) for strain range, 0.9%



(c) BM (left) and WJ (right) for strain range, 1.2%



(d) BM (left) and WJ (right) for strain range, 1.5%

Fig. 10 Comparison of BM and WJ for plastic

strain-stress curves

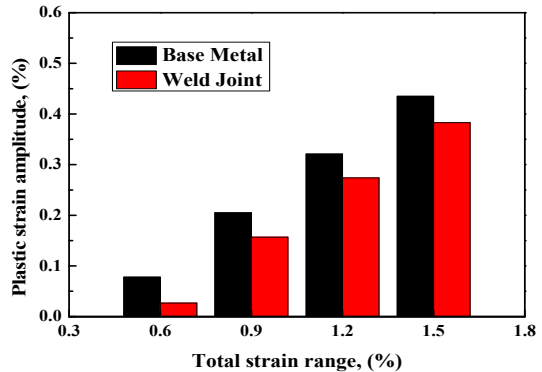


Fig. 11 Effect of total strain range on plastic strain amplitude for BM and WJ

4. 결 론

본 연구에서는 Alloy 617 모재 및 Alloy 617/Alloy 617 가스팅그스텐아크 용접된 용접부재에 대하여 상온에서의 저사이클피로 실험을 수행하여 다음과 같은 주요한 결과를 얻었다.

(1) Alloy 617의 저사이클피로 수명은 용접부재의 경우가 모재보다 낮았으며, 모재 및 용접부재 모두 전변형률범위가 증가할수록 그 수명은 감소하였다.

(2) 용접부재의 경우가 모재보다 반복 응력 반응이 높게 나타났다. 모재 및 용접부재 모두 초기 변형률 경화 현상을 보인 다음 지속적인 연화 현상을 나타낸 후 파괴에 이르는 저사이클피로 과정을 보였다.

(3) 수명에 대한 초기 경화율의 기여는 모재와 용접부재 모두 전변형률범위가 증가할수록 거시적으로 증가하였으며, 동일 전변형률범위에서의 경화율의 기여는 모재보다도 용접부재의 경우가 높았다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(사업명: 원자

력연구개발사업-NRF-2013M2A8A2025870)로서, 이에 감사드립니다.

Reference

1. W.G. Kim, J. Y. Park, M. W. Ekaputra, S. D. Hong, S. J. Kim and Y. W. Kim, 2013, "Comparative Study on the High-Temperature Tensile and Creep properties of Alloy 617 Base Metal and Weld Metals", *J. of Mechanical Science & Technology*, Vol. 27, No. 8, pp. 2331-2340.
2. L. J. Carroll, C. Cabet, M. C. Carroll and R. N. Wright, 2013, "The Development of Microstructural Damage during High Temperature Creep-Fatigue of a Nickel Alloy", *International Journal of Fatigue*, Vol. 47, pp. 115-125.
3. T. C. Totemeier and H. Tian, 2007, "Creep-Fatigue Interactions in INCONEL 617", *Material Science and Engineering A*, Vol. 468-470, pp. 81-87.
4. M. A. Burke and C. G. Beck, 1984, "The High Temperature Low Cycle Fatigue Behavior of the Nickel Base Alloy IN-617", *Metallurgical and Material Transactions A*, Vol. 15A, pp. 661-670.
5. K. B. S. Rao, H. Schiffers, H. Schuster and H. Nickel, 1988, "Influences of Time and Temperature Dependent Processes on Strain Controlled Low Cycle Fatigue Behavior of Alloy 617", *Metallurgical and Material Transactions A*, Vol. 19A, pp. 359-371.
6. X. Chen, Z. Yang, M. A. Sokolov, D. L. Erdmann III and K. Mo, 2014, "Effect of Creep and Oxidation on Reduced Fatigue Life of Ni-Based Alloy 617 at 850°C", *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 444, pp. 393-403.
7. J. K. Wright, J. Carroll, J. A. Simpson and R. N. Wright, 2013, "Low Cycle Fatigue of Alloy 617 at 850°C and 950°C", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Transactions of the ASME, Vol. 135, pp. 1-8.
8. P. H. Choi, S. J. Kim, W. G. Kim and Y. S. Kim, 2014, "Fracture Behavior of Alloy 617 Base Metal and Weld Joints under Low Cycle Fatigue Loading", *Proceedings of the KSPSE 2014 Spring Conference*, pp. 68-69
9. R. T. Dewa, S. J. kim, W. G. Kim and B. T. Kim, 2014, "Low Cycle Fatigue Properties of GTAWed Alloy 617 Weld Joints", *Proceedings of the KSPSE 2014 Spring Conference*, pp. 70-71.
10. ASTM B168-08, 2008, "Standard Specification for Nickel-Chromium-Iron Alloys and Nickel-Chromium-Cobalt-Molybdenum Alloy plate, Sheet, and Strip", *ASTM Standard by ASTM International*, USA.
11. ASTM E606-92, 1992, "Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing", *ASTM Standard by ASTM International*, USA.
12. T. C. Totemeier, H. Tian, D. E. Clark and J. A. Simpson, 2005, "Microstructure and Strength Characteristics of Alloy 617 Welds", *INL/EXT-05-00488*, Idaho National Laboratory, pp. 1-22.
13. G. V. P. Reddy, R. Sandhya, M. Valsan and K. B. S. Rao, 2008, "High Temperature Low Cycle Fatigue Properties of 316(N) Weld Metal and 316L(N)/316(N) Weld Joints", *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, pp. 538-546.