

저사이클피로 하중하의 Alloy 617 모재와 용접부재에 대한 피로 수명 평가

Evaluation of Fatigue Life on Alloy 617 Base Metal and Alloy 617/Alloy 617 Weld Joints under Low Cycle Fatigue Loading

Rando Tungga Dewa* · 김선진**† · 김우곤*** · 김민환***
Rando Tungga Dewa*, Seon-Jin Kim**†, Woo-Gon Kim and Min-Hwan Kim***

(접수일 : 2014년 8월 6일, 수정일 : 2014년 9월 29일, 채택확정 : 2014년 9월 30일)

Abstract: Generally, the mechanical components and structures are joined by many welding techniques, and therefore the welded joints are inevitable in the construction of structures. The Alloy 617 was initially developed for high temperature applications above 800°C. It is often considered for use in aircraft and gas turbines, chemical manufacturing components, and power generation structures. Especially, the Alloy 617 is the primary candidate for construction of intermediate heat exchanger (IHX) on a very high temperature reactor (VHTR) system. In the present paper, the low cycle fatigue (LCF) life of Alloy 617 base metal (BM) and the gas tungsten arc welded (GTAWed) weld joints (WJ) are evaluated by using the previous experimental results under strain controlled LCF tests. The LCF tests have been performed at room temperature with total strain ranges of 0.6, 0.9, 1.2 and 1.5%. The LCF lives for the BM and WJ have been evaluated from the Coffin-Manson and strain energy based life methods. For both the BM and WJ, the LCF lives predicted by both Coffin-Manson and strain energy based life methods was found to well coincide with the experimental data.

Key Words : Alloy 617, Low Cycle Fatigue (LCF), Weld Joint (WJ), Fatigue Life, Coffin-Manson Method, Strain Energy Based Life Method

— 기 호 설 명 —

$\Delta\epsilon_t$: 전변형률범위 [%]

$\Delta\epsilon_p$: 소성변형률범위 [%]

$\Delta\epsilon_e$: 탄성변형률범위 [%]

$\Delta\epsilon$: 전응력범위 [MPa]

**† 김선진(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과

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

*Rando, T. D. : 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

*Rando, T. D. : Graduate School, Pukyong National University.

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

- E : 탄성계수 [GPa]
- ϵ'_f : 피로연성계수
- σ'_f : 피로강도계수
- c : 피로연성지수
- b : 피로강도지수
- N_f : 피로까지의 사이클수(피로수명)
- 2N_f : 파괴시까지의 반복수(1반복수는 1/2사이클)
- n' : 반복변형률경화지수
- K' : 반복강도계수
- ΔWT: 전변형률에너지(MJ/m³)
- ΔWP: 소성변형률에너지(MJ/m³)
- ΔWe: 탄성변형률에너지(MJ/m³)
- A : 재료에너지흡수능력
- α : 피로지수

1. 서론

초고온가스(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 초고온가스(VHTR)의 중간열교환기(IHX)의 유력한 후보재료 중의 하나이다.^{2,4)} 원자로의 기동 및 중지 뿐만 아니라 동력전달은 부재의 저사이클피로 및 크리프-피로 하중을 유발한다.⁵⁾ 따라서 Alloy 617의 신뢰성 있는 설계를 수행하기 위해서는 고온에서의 저사이클피로 및 크리프-피로 수명에 대한 수명예측 자료가 필요하다.

저사이클피로에 대한 수명 예측 연구는 Coffin-Manson⁶⁾이 피로손상 중 발생하는 반복 소성 변형률에 대한 중요성을 인식하고, 이를 정리하여 Coffin-Manson 법을 만든 것을 시초로 그 후 반복 소성 변형률과 피로수명에 대한 체계적인 연구가 수행되어 왔다.^{7,8)} 이들의 결과는 변형률-수명 방법의 기초이고 변형률-수명 관계식이라 부르고 있다. 또한 Morrow⁹⁾는 소성 변형률 에너지를 이용하여 피로수명을 예측하는 개념을 제시하였으며, 이후 많은 연구자들에 의하여 소성 변형률 에너지 손상법칙을 기초로 파괴의 기준을 제안하였다.^{10,11)}

본 연구에서는 상온에서의 Alloy 617 모재 및 Alloy 617/Alloy 617 가스팅그스텐아크 용접된 용접부재에 대한 이전의 저사이클피로 실험의 결과¹²⁾를 활용하여, Alloy 617 모재와 용접부재에 대한 피로 수명을 Coffin-Manson 법과 변형률 에너지법에 의하여 비교 해석하여, 이들 수명 예측식의 파라미터를 고찰하였다. 본 수명 예측 결과는 향후 고온에서의 피로 수명 예측에 유용할 것으로 기대된다.

2. 저사이클피로 수명 예측법

2.1 Coffin-Manson 법(C-M 법)

Basquin⁷⁾은 S-N 관계를 대수좌표 위에 직선으로 나타낼 수 있음을 보여주었고 그것에 의하여 피로의 지수법칙을 다음과 같이 설정하였다.

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (1)$$

여기서, Δσ/2은 응력 진폭을 나타낸다.

Coffin등은 소성변형률-수명 데이터를 로그 로 그 좌표상에서 직선으로 나타낼 수 있음을 주장하였다.⁷⁾ 즉,

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (2)$$

여기서, Δε_p/2은 소성변형률 진폭을 나타낸다. 전변형률은 식 (1) 및 식 (2)를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta\epsilon_t}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (3)$$

식 (3)을 저사이클피로에 대한 변형률-수명 관계식이라 부르며, 일반적으로 Coffin-Manson 식으로 알려져 있다.⁷⁾ 식 (3)를 도식적으로 나타내면 Fig. 1과 같다. 큰 변형률진폭에서 변형률-수명 곡선은 소성곡선에 접근하며 작은 변형률진폭에서는 그 곡선은 탄성곡선에 접근함을 알 수 있다. 한편 Fig. 1에서 탄성 곡선과 소성 곡선의 교점

2Nf를 전이수명(transition life)이라 정의한다. 이 수명은 안정화된 히스테리시스 루프가 동등한 탄성과 소성변형을 성분을 가질 때의 수명이다.

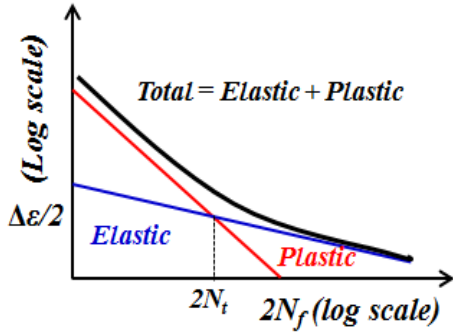


Fig. 1 Schematic diagram of strain-life curve

2.2 변형을 에너지 법

Morrow⁹⁾와 Halford¹³⁾는 소성 변형을 에너지 개념에 의한 금속의 저사이클피로에 대한 해석을 수행하였다. 소성 변형을 에너지(ΔWP) 밀도를 Fig. 2와 같이 반복 응력-변형을 히스테리시스 루프의 내부 면적으로 정의된다.

반복 소성 변형을 에너지는 히스테리시스 루프의 면적으로 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta W_p = \int_0^\epsilon \Delta\sigma d\epsilon_p \quad (4)$$

일반적으로 소성 변형을 에너지는 반 수명에서 계산된다. 본 연구에서도 반수명에서 계산하였다. 소성 변형을 에너지는 경계조건 및 응력-변형률 관계식을 조합하여 정리하면 다음 식으로 주어진다. 즉,

$$\Delta W_p = \left(\frac{1-n'}{1+n'} \right) \Delta\sigma d\epsilon_p \quad (5)$$

여기서, n'은 반복 경화 지수이다.

따라서, 소성 변형을 에너지는 Coffin-Manson 관계식으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta W_p = 4 \left(\frac{1-n'}{1+n'} \right) \sigma'_f \epsilon'_f (2N_f)^{b+c} \quad (6)$$

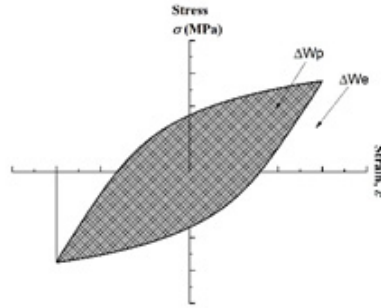


Fig. 2 Definition of plastic and elastic energy density for stable hysteresis loop

선형 탄성 변형을 에너지는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta W_e = \int_0^\epsilon \Delta\sigma d\epsilon_e = \frac{1}{2} \Delta\sigma \Delta\epsilon_e = \frac{1}{2E} \left(\frac{\Delta\sigma}{2} \right)^2 \quad (7)$$

따라서 전변형을 에너지 밀도를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta W_T = 4 \left(\frac{1-n'}{1+n'} \right) \sigma'_f \epsilon'_f (2N_f)^{b+c} + \frac{1}{2E} \left(\frac{\Delta\sigma}{2} \right)^2 \quad (8)$$

식 (12)를 이용한 전변형을 에너지 법에 의한 저사이클피로 수명식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁸⁾

$$\Delta W_T = A(2N_f)^\alpha \quad (9)$$

여기서 A, α는 각각 재료상수로 에너지 흡수 능력을 나타내는 계수와 피로 지수를 의미한다.

그러므로 파단까지의 수명은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$(2N_f) = \left(\frac{\Delta W_T}{A} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (10)$$

본 연구에서 A와 α의 값을 동정하였다.

3. 이전의 실험방법 및 절차

본 연구에 사용된 재료는 Alloy 617로 그 화학적 성분과 기계적 성질은 참고문헌 12를 참조한다. 한편, Alloy 617/Alloy 617 용접은 가스텅그스텐아크용접(GTAW)이 사용되었다. 본 용접에 사용된 용가제는 KISWEL사에서 제조한 KW-T617를 사용하였다. 용접시편의 총 적층 수 및 패스수는 14층 41패스로, 용접형상은



Fig. 3 Shape of the specimen for LCF testing

V-groove, 각도 80도, 10mm root gap을 갖도록 하였다. 본 용접 방법과 조건에 대한 자세한 사항은 참고문헌 1을 참조 바란다. Alloy 617/Alloy 617 용접부재(WJ)의 시험편의 채취방향은 압연방향과 일치하고 용접방향과 수직이 되도록 하였다. 본 실험에 사용된 모재 및 용접부재 시험편은 모두 Fig. 3과 같은 평행부 직경 6mm의 환봉 시험편을 ASTM E606 규정에 의하여 제작하였다. 본 실험에 사용된 실험 장비는 만능 유압 피로시험기(Instron Model 8516)를 사용하였으며, 실험 조건은 모재와 용접부재 모두 0.25Hz, 삼각파형, 완전 양진 변형률 제어 조건하에서 4가지 전변형률범

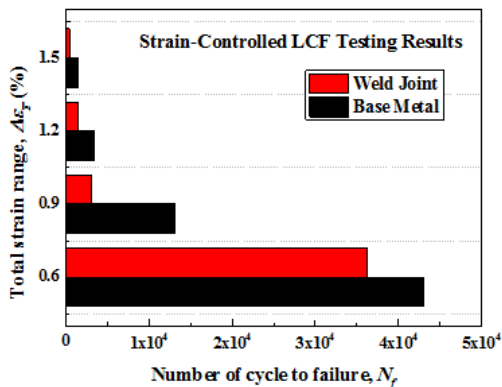


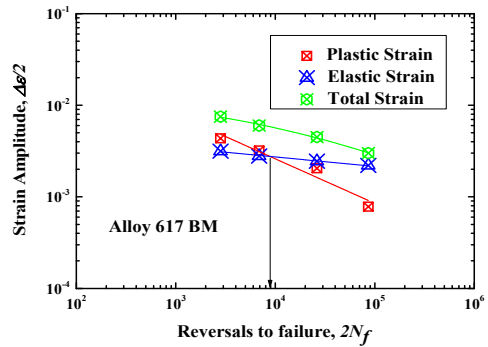
Fig. 4 Cycle to failure for BM and WJ

위 조건에서 수행되었다. 실험결과에 대한 수명 결과를 Fig. 4에 나타낸다.

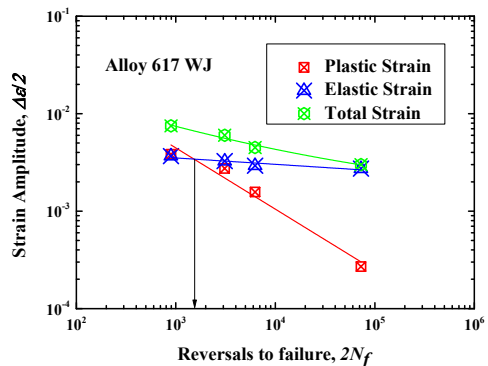
4. 해석 결과 및 고찰

4.1 C-M 법에 의한 수명예측

Fig. 5는 모재와 용접부재에 대한 Coffin-Manson 법에 의한 변형률-수명 선도를 나타낸 결과이다. 모재 및 용접부재 모두 탄성변형률-수명 선도, 소성변형률-수명 선도 그리고 전변형률-수명 선도가 실험 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5에서 모재의 천이수명(2Nt)은 8,790 그리고 용접부재의 천이수명은 1532를 얻었다. 즉, 용접부재의 천이수명이 모재보다 약 5.7배 정도



(a) Alloy 617 base metal



(b) Alloy 617/Alloy 617 weld joint

Fig. 5 Strain-life curves by Coffin-Manson method for the BM and WJ

낮게 나타났다. Fig. 5의 C-M 관계를 선형최소자승법에 의하여 동정한 파라미터를 Table 1에 나타낸다. 피로강도계수는 모재의 경우가 높게 나타났으며, 피로연성계수는 용접부재의 경우가 높게 나타났다. 이는 용접부재의 미세조직과 파괴의 메카니즘의 차이에 기인하는 것으로 사료된다.

3.2 변형률 에너지 법에 의한 수명 예측

Fig. 6은 Alloy 617 모재와 용접부재에 대한 변형률 에너지 법에 의한 전변형률 에너지 밀도-수명 선도를 나타낸 결과이다. 모재 및 용접부재 모두 전변형률 에너지 밀도-수명 선도가 실험 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Alloy 617 모재의 α 는 -0.474이고, 용접부재의 α 는 -0.490로 거의 비슷한 피로지수를 갖는 것으로 나타났다. 하지만 그 정확한 피로지수는 용접부재의 경우가 다소 큰 값을 갖는 것으로 결론지을 수 있다. Fig. 6의 변형률 에너지법에 의한 관계를 선형최소자승법에 의하여 동정한 파라미터를 Table 2에 나타낸다. 에너지의 흡수 능력은 모재의 경우가 용접부재보다 우수한 것으로 나타났다. 따라서 모재의 수명이 큰 것으로 판단된다.

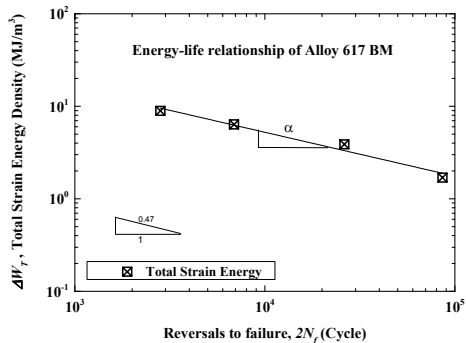
이상의 두가지 수명 예측법에 의하여 해석한 결과는 저사이클피로 실험 결과의 수명을 잘 설명하고 있다고 할 수 있으나, 어느 방법이 더욱 실험결과를 잘 반영하는지 평가할 수 없다. 따라서 이하에서는 수명 예측식에 의한 수명과 실험 결과의 수명을 퍼센트 차이에 의한 오차분석(14)을 수행하여 고찰하고자 한다.

3.3 두 수명 예측법의 검토

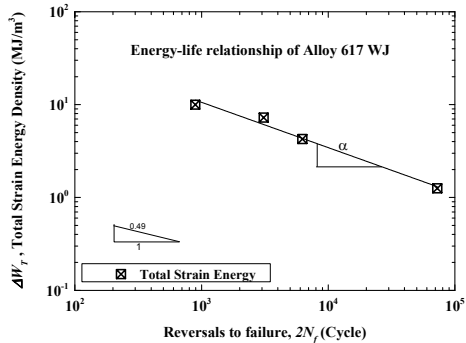
Fig. 7은 Alloy 617의 모재와 용접부재에 대한 Coffin-Manson 법에 의하여 예측한 수명과 실험 결과의 비교한 것이다. 또한 Fig. 8은 Alloy 617의 모재와 용접부재에 대한 변형률 에너지 법에 의하여 예측한 수명과 실험결과를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 모재 및 용접부재 모두 Coffin-Manson 법과 변형률 에너지 법에 의한 수명 예측이 비교적 실험 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 정량적 평가를 위하여 Table 3에 이상의 두 수명 예측 방법에 대한 오차 분석을 수행한 결과를 나타낸다.

Table 1 Regression coefficients for analysis of Coffin-Manson method

Parameter	Base metal (BM)	Weld joint (WJ)
σ'_f	1515.39 (MPa)	1185.29 (MPa)
b	-0.103	-0.066
E	214.4 (GPa)	214.4 (GPa)
ϵ'_f	0.229	0.341
c	-0.486	-0.628



(a) Alloy 617 base metal



(b) Alloy 617/Alloy 617 weld joint

Fig. 6 Strain energy-life curves for the BM and WJ

Table 2 Regression coefficients for analysis of Strain-Energy method

Parameter	Base metal (BM)	Weld joint (WJ)
A	512.7	308.2
α	-0.474	-0.490

Table 3에서 알 수 있듯이 두 수명 예측 방법 모두 비교적 저사이클피로 수명의 실험결과를 잘 반영하고 있다고 할 수 있다. Alloy 617 모재의 경우는 Coffin-Manson 법이나 변형률 에너지법이나 모두 약 19%의 오차로 거의 동일하나, 용접부재의 경우에 있어서는 변형률 에너지법에 의한 오차가 14.63%로 Coffin-Manson 법에 의한 18.43%보다 약 4% 낮으며 다소 우수한 결과를 얻었다.

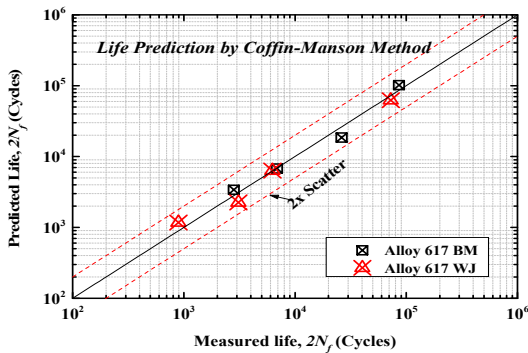


Fig. 7 Life prediction by Coffin-Manson method

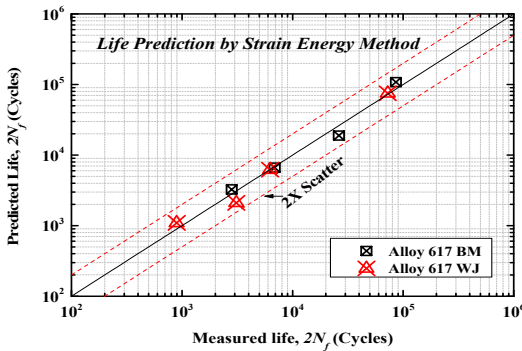


Fig. 8 Life prediction by Strain-Energy method

Table 3 Error analysis of life for two methods

Method	Base metal Error (%)	Weld joint Error (%)
Coffin-Manson method	19.82	18.18
Strain Energy method	18.43	14.63

4. 결 론

본 연구에서는 Alloy 617 모재와 용접부재에 대한 상온에서의 저사이클피로 실험 데이터를 활용하여, Coffin-Manson 법과 변형률 에너지법에 의한 피로수명 해석을 통하여 다음과 같은 주요한 결과를 얻었다.

Alloy 617의 모재 및 용접부재에 대한 수명을 Coffin-Manson 법과 변형률 에너지 법에 의하여 평가할 수 있었으며, 재료에 대한 그들의 파라미터 값을 계산하였다.

Coffin-Manson 법에 의하여 예측한 천이수명은 모재가 8790 반복수, 용접부재가 1532 반복수로, 용접부재의 천이수명이 모재보다 약 5.7배 정도 낮게 나타났다.

용접부재의 경우에는 Coffin-Manson 법보다 변형률 에너지 법에 의한 피로수명 예측이 다소 우수한 결과를 얻었다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(사업명: 원자력연구개발사업-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. 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.
 5. 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.
 6. W. F. Hosford, 2005, "Mechanical Behavior of Materials", Cambridge University Press, New York, pp. 275-298.
 7. J. A. Bannantine, J. J. Comer and J. L. Handrock, 1990, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall, New Jersey, pp. 40-87.
 8. K. T. Hwang, J. H. Kim, K. B. Yoo and H. S. Lee, 2010, "Low Cycle Fatigue in Ni-base Superalloy IN738LC at Elevated Temperature", *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 34, No. 10, pp. 1403-1409.
 9. J. D. Morrow, 1965, "Cyclic Plasticity Strain Energy and Fatigue of Metals", *Internal Friction, Damping and Cyclic Plasticity*, ASTM STP 378, pp. 45-87.
 10. F. Pakandam and A. Varvani-Faragani, 2011, "Fatigue Damage Assessment of Various Welded Joints under Uniaxial Loading based on energy methods", *International Journal of Fatigue*, Vol. 33, pp. 519-528.
 11. K. O. Lee, S. G. Hong and S. B. Lee, 2008, "A New Energy-Based Fatigue Damage Parameter in Life Prediction of High Temperature Structural Materials", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 496, pp. 471-477.
 12. 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.
 13. G. R. Halford, 1966, "The Energy Required for Fatigue", *Journal of Materials*, Vol. 1, No. 1, pp. 2-18.
 14. H. Jahed and A. Varvani-Farahani, 2006, "Upper and Lower Fatigue Limits Model using Energy-Based Fatigue Properties", *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, pp. 467-473.