

변형률 에너지법을 이용한 Inconel 617의 저주기피로 수명 예측

김덕회[†] · 김기광, 김재훈, 이영신* · 박원식**

Prediction of Low Cycle Fatigue Life for Inconel 617 using Strain Energy Method

Duck-Hoi Kim, Ki-Gwang Kim, Jae-Hoon Kim, Young-Shin Lee
and Won-Sik Park

Key Words: Low cycle fatigue (저주기피로), Total strain energy density (전변형률에너지밀도), Plastic strain energy density (소성변형률에너지밀도), Coffin-Manson method (Coffin-Manson법), Cyclic softening (주기적 연화)

Abstract

Low cycle fatigue tests are performed on the Inconel 617 that be used for a hot gas casing. The relation between strain energy density and numbers of cycles to failure is examined in order to predict the low cycle fatigue life of Inconel 617. The life predicted by the strain energy method is found to coincide with experimental data and results obtained from the Coffin-Manson method. Also the cyclic behavior of Inconel 617 is characterized by cyclic hardening with increasing number of cycle at room temperature.

1. 서 론

저주기 피로 특성인 변형률-수명에 의한 시험 평가는 재료의 반응이 대부분 부재에 있어 변형률이나 변위에 의존한다는 관찰에 근거를 두고 있다. 일반적으로 하중이 낮은 범위에서 응력과 변형률의 관계는 선형적 관계이다. 그 결과 이 영역에서는 하중제어와 변형률 제어에 의한 시험 결과는 동일하다. 그러나 저 사이클 영역, 즉 높은 하중 범위에서의 반복응력-변형률 반응과 재료의 거동은 변형률 제어 조건하에서 가장 잘 모델화 시킬 수 있다.

Inconel 617은 hot gas casing에 사용되는 구조재로 터빈의 기동/정지 동안 벽의 두께에 따른 온도의 구배 즉 케이싱 온도의 불균일 분포에 의하여 발생하는 열응력 때문에 케이싱 내부 단면 변화부에서 피로 균열이 발생하게 된다. 이런 열피로를 받는 구조물에 사용되는 소재는 저주기 피로, 열피로 특성에 대한 선행 연구가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 Inconel 617을 hot gas casing 구조재로 적용하기 위하여 저주기 피로 특성에 관한 연구를 수행하였다. Hot gas casing의 주요 균열 발생 부위가 용접부임을 감안하여 모재와 용접재에 관하여 저주기 피로 시험을 수행하였다. 저주기 피로 시험 결과는 Coffin-Manson 식, 소성변형에너지법 및 전변형률 에너지법을 이용하여 저주기 피로 수명 예측식을 산출하였다. 모재 및 용접재의 저주기 피로 파면 특성을 평가하기 위하여 파면을 SEM을 이용하여 관찰하였다.

[†] 원자력환경기술원

E-mail : kdwh@naver.com

TEL : (042)870-0376 FAX : (042)822-7366

* 충남대학교 기계설계공학과

** 전력연구원

2. 시험방법

본 시험에 사용된 재료는 Inconel 617 모재 및 용접재로 Table 1에 기계적 특성을 정리하였다. 시험편의 형상 및 치수는 ASTM E 606에 준하여 uniform gage type으로 Fig. 1과 같은 형상으로 가공하였다.⁽¹⁾

저주기 피로시험기는 유압서보 피로 시험기 (MTS 810)로 최대 용량은 25톤이며 상온 중에서 시험하였다. 시험편의 평행부를 잡아 25mm의 변위측정기(extensometer)를 부착하여 변형률 일정 조건에서 시험하였다.

대부분 금속에서의 저 사이클 피로 시험이 ± 0.2 % 사이의 변형률 진폭에서 수행된다는 점을 감안하여, 피로 시험은 주파수를 1 Hz로 일정하게 하고 전변형률 범위(total strain range)가 0.8 %, 1.2 %, 1.6 %, 1.8 %, 2.0 % 하에서 삼각 파형 연속 저 사이클 피로 실험을 수행하였다.⁽²⁾ 피로 수명은 시험편의 파면 보호를 위하여 20% 응력 감소 시점으로 하는 것이 적당하다는 연구도 있으나, 본 연구에 사용된 재료는 인장하중이 10kgf 이하로 거의 작용하지 않는 시점을 피로 수명으로 간주하였다^(3,4). 각 시험편에 대해서 적당한 사이클마다 변형률 및 하중을 자동 저장하였다.

3. 전변형률 에너지 밀도

저주기 피로시험 동안 발생하는 소성변형에너지는 대부분 열로 소비되며, 나머지는 재료에 흡수된다. 따라서, 피로 손상은 주기적 소성 변형률에 의하여 발생하며 소성변형에너지는 손상의 진전에 중요한 역할을 한다.

사이클 당 소성변형에너지, ΔW_p 는 Masing 형태의 재료 거동을 보이는 경우 Fig. 2와 같은 히스테리시스 선도(hysteresis loop)의 면적과 같다. 소비되는 총 에너지는 이들 선도의 면적의 합으로 나타낼 수 있으며 재료에 따라 에너지를 흡수할 수 있는 일정용량을 가지고 있어 이 한계치에 도달하면 재료는 파손된다. Fig. 2와 같이 재료가 피로하중을 받게되어 한 사이클 당 소비되는 소성변형에너지는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.^(5,6)

$$\Delta W_p = \int \sigma_j d\epsilon_j^p \quad (1)$$

Table 1 Mechanical properties for Inconel 617

Material	Youngs modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness HRB
Base material	220.3	270.0	813.3	71.2	86.7
Welded material	200.4	257.2	777.0	41.9	92.1

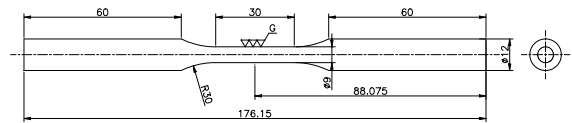


Fig. 1 Dimension and configuration of low cycle fatigue specimen

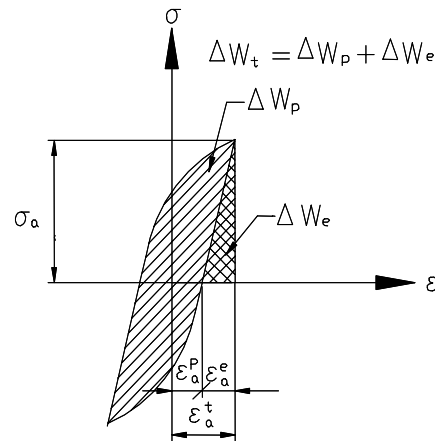


Fig. 2 Plastic and elastic strain density definition

식 (1)에 식 (2)와 같은 경계조건을 대입하여 다시 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\sigma = 2\sigma_a, \quad \epsilon = 2\epsilon_p \quad (2)$$

$$\Delta W_p = 4\sigma_a \epsilon_a^p - 2 \int_0^{2\epsilon_p} \epsilon_p d\sigma \quad (3)$$

Morrow는 응력-변형률 관계가 식 (4)와 같은 power law를 따른다고 가정하여,

$$\sigma = K''(\epsilon^p)^{n''} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{2\sigma_a}{(2\epsilon_a^p)^{n''}} (\epsilon_p)^{n''} \quad (5)$$

식 (5)를 (3)에 대입하면,

$$\Delta W_p = 4\sigma_a \epsilon_a^p \frac{1-n''}{1+n''} \quad (6)$$

이다. 여기서, n'' 을 응력-변형률 관계의 경화

지수(cyclic strain hardening exponent) n' 과 같다고 가정하고,

$$\epsilon_a^p = \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{1/n'} \quad (7)$$

이므로, 식 (8)과 같은 소성변형에너지식을 얻을 수 있다.

$$\Delta W_p = 4K'^{(-1/n')} \sigma_a \frac{1+n'}{n'} \frac{1-n'}{1+n'} \quad (8)$$

따라서, 식 (8)의 소성변형률에너지를 이용한 재료의 저주기 피로수명예측식은 식 (9)와 같다. 이 개념은 소성변형에너지는 파단반복수의 1/2 사이클에서 이력곡선의 면적으로 식 (9)와 같이 파단반복수와 관계로 표현될 수 있다는 개념을 기초로 한다.^(7~9)

$$\Delta W_p = A(N_f)^m \quad (9)$$

여기서, ΔW_p 는 파단수명의 1/2 사이클에서 소성변형에너지량이며 N_f 는 파단까지의 반복사이클(cycles to failure)이고 A 와 m 은 실험 상수이다. 그런데 이 방법을 적용 시 반복하중에 의한 변형률 진폭이 작아질수록 소성변형률 진폭도 작아지므로 따라서 소성변형률 에너지밀도는 매우 작고 이를 측정하는 것은 어려워진다. 그러나 낮은 하중수준에서의 피로, 즉 고사이클 피로에서 소성변형률은 매우 중요한 역할을 하므로 이에 대한 고려가 필수적이다.

이런 이유로 전 수명영역에서의 변형률에너지 밀도를 피로손상변수로 사용하기 위하여 Ellyin과 Kujawski는 Fig. 2와 같이 히스테리시스 선도의 탄성 변형률 에너지(elastic strain energy)와 소성변형률 에너지(plastic strain energy)의 합으로 표현되는 전변형률에너지 밀도(total strain energy density), ΔW_t 를 다음과 같이 표현하였다.⁽¹⁰⁾

$$\Delta W_t = \Delta W_p + \Delta W_e \quad (10)$$

여기서, ΔW_e 는 아래식을 이용하여 계산할 수 있다.^(11,12)

$$\begin{aligned} \Delta W_e &= \frac{1}{2E} \left(\frac{\Delta \sigma}{2} + \sigma_m \right) = \frac{\sigma_{\max}^2}{2E} \quad \text{for } \sigma_{\min} \leq 0 \\ &= \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})^2}{2} \quad \text{for } \sigma_{\min} > 0 \end{aligned} \quad (11)$$

즉, 총변형률 에너지 밀도, ΔW_t 는 식 (8)과 식 (11)에 의하여 $R=-1$ 의 경우 다음과 같다.

$$\Delta W_t = 4K'^{(-1/n')} \sigma_a \frac{1+n'}{n'} \frac{1-n'}{1+n'} + \frac{\sigma_{\max}^2}{2E} \quad (12)$$

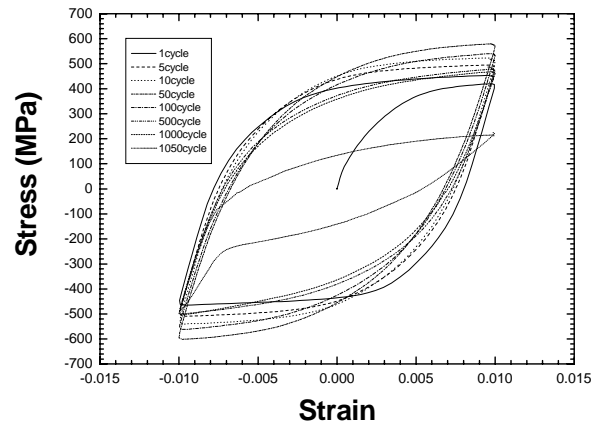


Fig. 3 Hysteresis loop of base Inconel 617 under $\Delta \epsilon=0.02$ low cycle fatigue

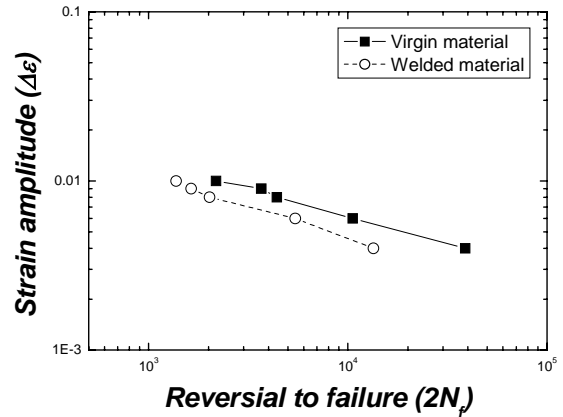


Fig. 4 Strain-life curves for low cycle fatigue test

식 (12)를 이용한 전변형률에너지법에 의한 피로수명예측식은 식 (13)과 같다.

$$\Delta W_t = \kappa(N_f)^a \quad (13)$$

4. 시험 결과 및 고찰

4.1 모재와 용접재의 저주기 피로 특성

Fig. 3은 Inconel 617 모재의 히스테리시스 선도에이다. 모재 뿐만 아니라 용접재도 전형적인 주기적 경화거동을 보이고 있다. Manson은 단순하중하에서 극한강도 대 항복강도의 비가 1.4 이상이면 반복적으로 경화될것으로 예측하였는데 이 예측은 본 시험 결과와도 잘 일치하고 있다.

Fig. 4에 두 종류 시험편의 저주기 피로 시험 결과를 나타내었다. Inconel 617 원소재가 용접재에 비하여 동일한 변형률 진폭에서 우수한 피로 특성을 보이고 있다.

4.2 Coffin-Manson법, 소성 변형률 및 전 변형률 에너지법에 의한 피로수명 예측

저사이클 피로 수명을 평가하는 방법 중 가장 대표적인 Coffin-Manson식은 식 (14)의 형태로 반수명(half cycles to failure)에서의 히스테리시스 선도를 이용하여 변형률을 탄성 및 소성 변형률 성분으로 나누고 이를 선형 최소자승법(linear least square method)을 이용하여 피로강도지수(σ_f'), 피로강도계수(b), 피로연성계수(ϵ_f'), 피로연성지수(c)를 구하는 방법이다.

$$\frac{\Delta\epsilon_t}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\sigma_f'}{E}(2N_f)^b + \epsilon_f'(2N_f)^c \quad (14)$$

Fig. 5에 변형률-수명 선도 및 Coffin-Manson식의 파라미터를 구하기 위한 탄성변형률-수명 선도, 소성변형률-수명 선도를 수록하였다. 또한 Table 2는 두 종류 시험편에 대하여 저주기 피로 수명을 Coffin-Manson법에 의하여 평가한 결과이다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 Inconel 617 모재의 경우 천이수명은 36,656 reversals이고, 용접재의 경우 8,430 reversals로 모재의 천이수명이 길다.

Table 2 Equations calculated by Coffin-Manson formula

Specimens	Coffin-Manson formula
Base material	$\frac{\Delta\epsilon_t}{2} = \frac{1,024,41}{220,300} (2N_f)^{-0.078} + 0.308 (2N_f)^{-0.477}$
Welded material	$\frac{\Delta\epsilon_t}{2} = \frac{1,295,14}{200,400} (2N_f)^{-0.110} + 0.482 (2N_f)^{-0.587}$

Table 3 Equations calculated by plastic strain energy method

Specimens	Equation
Base material	$\Delta W_p = 439.04 (N_f)^{-0.517}$
Welded material	$\Delta W_p = 675.41 (N_f)^{-0.624}$

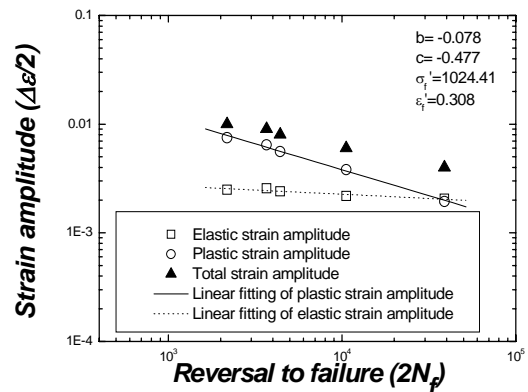
Table 4 Equations calculated by total strain energy method

Specimens	Equation
Base material	$\Delta W_t = 351.81 (N_f)^{-0.479}$
Welded material	$\Delta W_p = 502.99 (N_f)^{-0.57}$

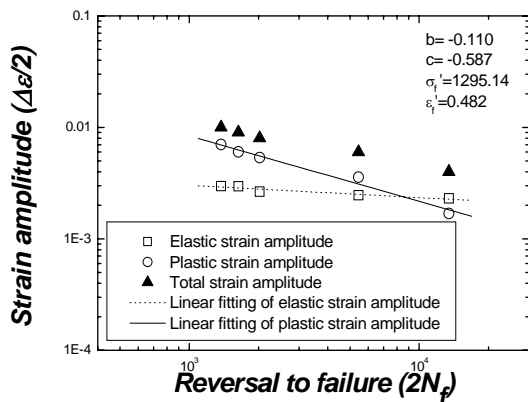
Fig. 6은 두 종류 시험편의 파단까지의 반복 사이클수와 소성변형에너지량과의 관계를 나타낸 결과이다. 양 로그 좌표를 이용하여 이 결과를 도시하면 선형으로 데이터가 분포하고, 이들의 관계를 선형최소자승법을 이용하여 계산하여 정리하면 Table 3과 같다.

Fig. 7은 두 종류 시험편의 파단까지의 반복 사이클수와 전변형률에너지량과의 관계를 나타낸 결과이다. 마찬가지로 이들의 관계를 정리하면 Table 4와 같은 전변형률에너지를 이용한 피로수명예측식을 구할 수 있다.

Fig. 8은 두 종류 시험편에 대하여 Coffin-Manson 및 소성 및 전변형률에너지법에 의하여 구한 저주기 피로 수명 예측식 및 시험 결과를 비교한 그래프이다. 대부분의 경우에서 시험결과와 예측식에 의한 결과는 잘 일치하고 있다.

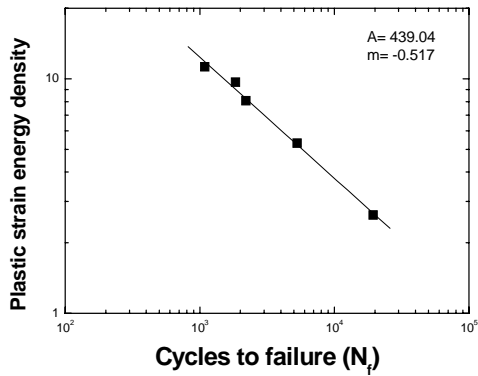


(a) Base material

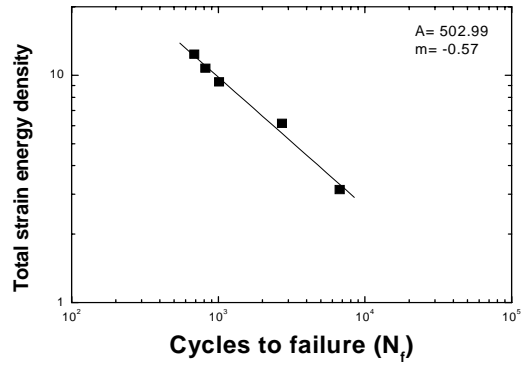


(b) Welded material

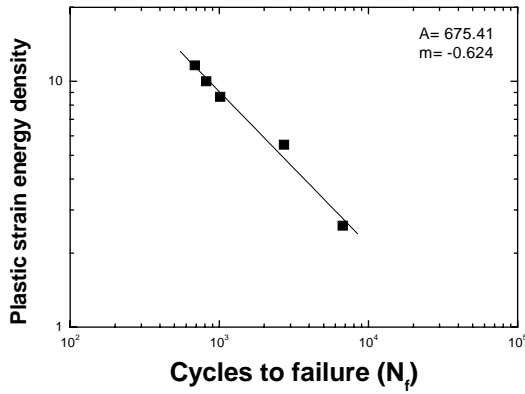
Fig. 5 Strain amplitude and life curve



(a) Base material



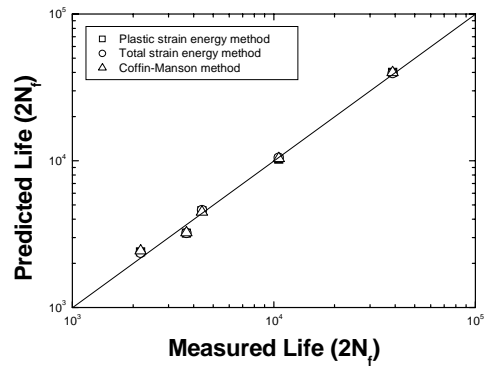
(b) Welded material



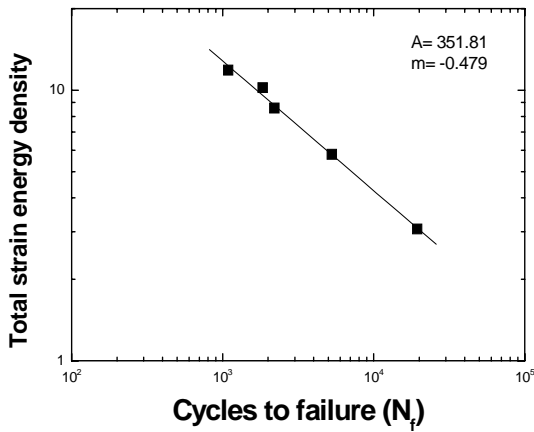
(b) Welded material

Fig. 6 Plastic strain energy density versus cycles to failure of Inconel 617

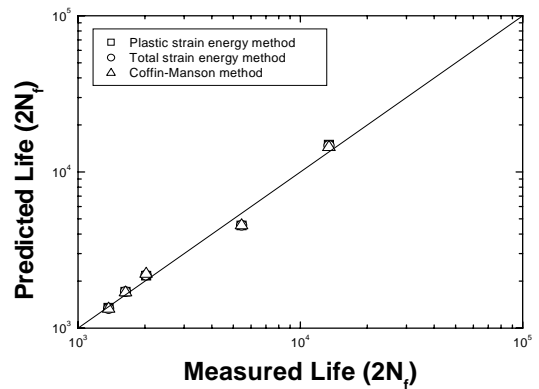
Fig. 7 Total strain energy density versus cycles to failure of Inconel 617



(a) Base material



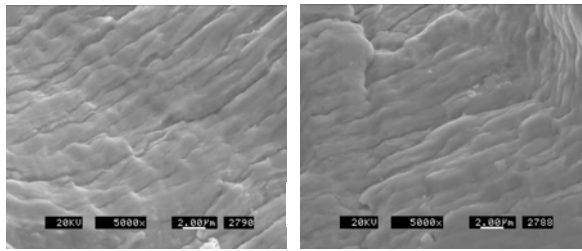
(a) Base material



(b) Welded material

Fig. 8 Measured life versus predicted life of Inconel 617

참고문헌



(a) base ($\Delta \varepsilon=0.02$) (b) welded ($\Delta \varepsilon=0.02$)

Fig. 9 Scanning electron micrographs of Inconel 617

4.3 저주기 피로 파단면 특성

Fig. 9는 Inconel 617 모재 및 용접재에 대한 저주기 피로 파면 SEM 사진이다. 대부분의 SEM 사진들에서 반복 하중으로 인하여 형성되는 줄무늬 형태의 스트라이에이션을 관찰할 수 있으며 연성파면의 형태를 띄고 있고 있는 것을 볼 수 있다. 프래투우 혹은 팻치라고 불리는 띠 형상은 균열진전방향에 직각으로 존재하고 있다. 스트라이에이션의 간격은 재료마다 약간의 차이가 있으나 그 크기는 크지 않다. 스트라이에이션이 명확하게 관찰되지 않는 부분들은 저사이클 피로시험이 단순인장시험과는 달리 인장-압축이 반복되면서 압축시에 양 파면이 서로 맞부딪쳐 파면에 손상을 입혀기 때문으로 생각된다. 모재는 용접재에 비하여 연성 파면이 보다 넓게 분포하고 있다.

5. 결 론

(1) Inconel 617 모재의 저주기 피로수명이 용접재에 비하여 우수하며, 두 재료의 천이수명은 모재의 경우 36,566 reversals, 용접재의 경우 8,430 reversals로 평가되었다.

(2) Coffin-Manson법, 소성변형률 및 전변형률 에너지법에 의하여 예측된 저주기 피로수명식은 실험결과와 잘 일치하여 수명평가식으로 사용하는데 적합할 것으로 판단된다.

(3) 두 재료 공히 주기적 경화 거동을 보이며, 파면은 연성파면이다.

(1) American Society for Testing and Material E606-77T, 1977, "Tentative Recommended Practice for Constant-Amplitude Low Cycle Fatigue Testing,"

(2) Raske D. T and Morrow J. D, 1969, "Mechanics of Materials in Low Cycle Fatigue Testing," *Manual on Low Cycle Fatigue Testing*, ASTM STP 465, pp. 1~25.

(3) Rao K. B. S., Sandhya R., Ray S. K., Manson S. L and Rdriguez, 1985, "On the Failure Condition in Strain-Controlled Low Cycle Fatigue," *International Journal of Fatigue*, Vol. 7, pp. 141~147.

(4) Kwon J. D., Woo S. W., Park J. C., Lee Y. S. and Park Y. W., 2000, "A Study on the 430°C Degradation Behavior of Cast Stainless Steel," *Transactions of the KSME A*, Vol. 24, No. 9, pp. 2183~2190.

(5) Halford G. R., 1966, "The Energy Required for Fatigue," *Journal of Materials*, Vol. 1, No. 1, pp. 3~18.

(6) Feltner C. E. and Morrow, J. D., 1961, "Micro Plastic Strain Hysteresis Energy as a Criterion for Fatigue Fracture," *Journal of Basic Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 15~22.

(7) Ellyin F. and Kujawski D., 1984, "Plastic Strain Energy in Fatigue Failure," *Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 106, No. 4, pp. 342~347.

(8) Lefebvre D and Ellyin F, 1984, "Cyclic Response and Inelastic Strain Energy in Low Cycle Fatigue," *International Journal of Fatigue*, Vol. 6, No. 1, pp. 9~15.

(9) Ellyin F, 1985, "Effect of Tensile Mean Strain on Plastic Strain Energy and Cyclic Response," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 107, pp. 119~125.

(10) Ellyin F. and Kujawski D., 1986, "The Energy-Based Fatigue Failure Criterion," *Microstructure and Mechanical Behaviour of Materials*, Vol. II, pp. 541~600.