

## 초내열합금 GTD-111의 고온 저주기피로 수명예측<sup>§</sup>

양호영\* · 김재훈\*† · 유근봉\*\* · 이한상\*\* · 유영수\*\*\*

\* 충남대학교 기계설계공학과, \*\* 전력연구원, \*\*\* 재료연구소

### Low-Cycle Fatigue Life Prediction in GTD-111 Superalloy at Elevated Temperatures

Ho Young Yang\*, Jae Hoon Kim\*†, Keun Bong Yoo\*\*, Han Sang Lee\*\* and Young Soo You\*\*\*

\* Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

\*\* Korea Electric Power Research Institute,

\*\*\* Korea Institute of Materials Science

(Received December 14, 2010 ; Revised March 28, 2011 ; Accepted April 22, 2011)

**Key Words:** GTD-111, Low Cycle Fatigue(저주기 피로), Superalloy(초내열합금), Life Prediction(수명예측), Strain Energy Method(변형률 에너지법)

**초록:** 초내열합금인 GTD-111은 고온강도와 내산화성이 우수하여 가스터빈에서 사용되는 소재이다. 초내열합금의 피로 수명 예측은 가스터빈의 효율을 개선하기 위하여 매우 중요하다. 본 연구에서의 저주기 피로시험은 실제 운전 환경과 유사하게 변형률 범위, 온도를 다양하게 설정하여 시험을 수행하였다. GTD-111의 저주기 피로수명을 예측하기 위하여 변형률 에너지 밀도와 파단 사이클과의 관계를 이용하였다. 시험결과를 토대로 변형률 에너지법과 Coffin-Manson법에 의하여 피로수명을 예측하였다.

**Abstract:** The Ni-base super-heat-resistant alloy, GTD-111, is employed in gas turbines because of its high temperature strength and oxidation resistance. It is important to predict the fatigue life of this superalloy in order to improve the efficiency of gas turbines. In this study, low-cycle fatigue tests are performed as variables of total strain range and temperature. The relationship between the strain energy density and number of cycles to failure is examined in order to predict the low-cycle fatigue life of the GTD-111 superalloy. The fatigue life predicted by using the strain-energy methods is found to coincide with that obtained from the experimental data and from the Coffin-Manson method.

- 기호설명 -

$\Delta\epsilon$  : 전변형률

$\Delta\epsilon/2$  : 변형률진폭

$\Delta W_t$  : 전변형률에너지밀도

$\Delta W_p$  : 소성변형률에너지밀도

$b$  : 피로강도지수

$c$  : 피로연성지수

$\sigma_f'$  : 피로강도계수

$\epsilon_f'$  : 피로연성계수

$K''$  : 반복강도계수

$n'$  : 반복변형률지수

### 1. 서론

항공기 엔진뿐만 아니라 발전용 및 산업용 가스터빈의 핵심 부품에 고온강도, 크리프 및 피로 저항성, 내산화성, 그리고 내부식성이 우수한 초내열합금이 구조재료로 널리 이용되고 있다. GTD-111은 가스터빈의 터빈 블레이드로 사용되는 초내열 합금으로 고온에서 크리프와 피로의 복합적 손상을 받게 되며, 이 중 저주기 피로손

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 (2010. 11. 3.-5., ICC제주) 발표논문임

† Corresponding Author, kimjhoon@cnu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

상은 전체손상의 30%를 차지하는 매우 중요한 손상원인으로 알려져 있다.<sup>(1,2)</sup>

저주기 피로에 대한 연구는 Coffin과 Manson이 피로손상 중 발생하는 반복 소성 변형률에 대한 중요성을 인식하고, 이를 정리하여 Coffin-Manson 법을 만든 것을 시초로 그 후 반복 소성 변형률과 피로수명의 관계에 대한 체계적인 연구가 수행되어 왔다.<sup>(3,4)</sup> 일반적으로 높은 변형률 하에서 피로 손상은 반복 소성변형률에 의하여 발생하며 회복되지 않은 소성변형률은 변형에너지를 소비하므로 소성변형에너지는 손상과정에서 중요한 역할을 하게 된다. Morrow<sup>(5)</sup>는 소성변형에너지를 이용하여 피로수명을 예측하는 개념을 제시하였으며, 이에 기초하여 Ellyin<sup>(6-8)</sup>은 소성변형에너지 손상법칙을 기초로 피로파손 기준을 제안하였다.

본 연구에서는 가스터빈의 효율 증대를 위해 피로수명을 미리 예측함으로써 사고 및 경제적 손실을 예방하고 독자적 기술 개발을 목표로 GTD-111 소재에 대하여 상온 및 고온 저주기 피로 시험을 수행 하였다. 또한 저주기 피로수명을 예측하기 위하여 저주기 피로시험 결과를 Coffin-Manson법, 소성변형률에너지법 및 전변형률 에너지법을 이용하여 비교 분석 하였다. 또한 저주기피로손상 파면은 SEM을 이용하여 관찰하였다.

## 2. 재료 및 시험 방법

### 2.1 재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 재료는 가스터빈 블레이드용 소재인 GTD-111이다. 시험편은 원소재를 정밀 주조 몰드를 이용하여 ASTM E 606에 준하여 Fig. 1과 같은 피로시험편으로 가공하였다. Table 1은 GTD-111의 화학조성을 나타내고 있다. Table 2는 MTS 810 (10 ton) 유압식 만능재료시험기를 이용하여 인장시험 결과 얻은 기계적 성질이다.

### 2.2 시험방법

시험에 사용한 피로시험장비는 전기식 피로시험기인 INSTRON 8861로 최대 용량은 3.5톤이며, 상온 및 870, 927℃에서 시험을 수행하였다. 시험편의 평행부에 12.5 mm 변위측정기(extensometer)를 부착하여 변형률 제어 방식으로 시험을 수행하였다. 파형은 가스터빈의 기동정지를 고려하여 Fig. 2와 같은 Trapezoid 파형으로 인장-유지-압축-

Table 1 Chemical compositions of GTD-111 (wt%)

Cr	Co	Ni	Mo	W	Al	Ti	Ta	C	Hf
14.3	10.0	58.1	1.56	3.88	3.36	5.13	3.29	0.10	0.02

Table 2 Mechanical properties for GTD-111

Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
213	983	1061	40.2	3.90

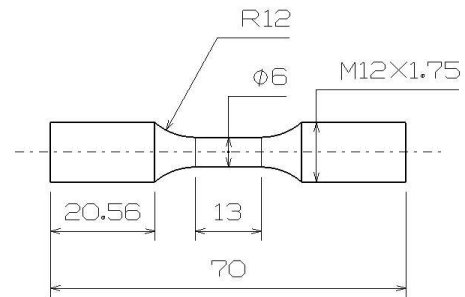


Fig. 1 Shape and dimension of specimen

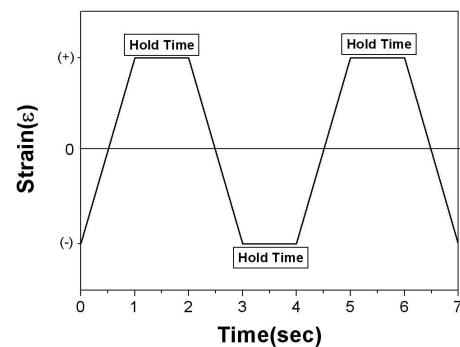


Fig. 2 Wave form of low cycle fatigue test

유지를 각각 1초로 하여 주파수 0.25 Hz로 일정하게 하고, 전 변형률진폭이 0.6~1.6 % 하에서 저주기 피로시험을 수행하였다.

피로수명은 가스터빈 블레이드의 실제 설계조건에 적용되는 25% 하중 감소시점으로 하였다.

## 3. 변형률 에너지법

저주기 피로시험 동안 발생하는 소성변형에너지는 대부분 열로 소비되고, 나머지는 재료에 흡

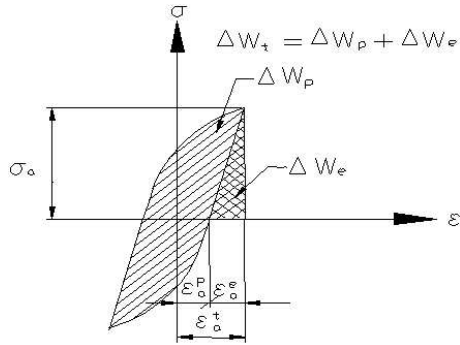


Fig. 3 Definition of plastic and elastic strain energy density

수된다. 따라서 피로손상은 주기적 소성 변형률에 의하여 발생하며, 소성변형에너지는 균열의 진전에 중요한 역할을 하게 된다. 사이클 당 소성변형에너지,  $\Delta W_p$ 는 Massing 형태의 재료 거동을 보이는 경우 Fig. 3과 같은 히스테리시스 선도(hysteresis loop)의 면적과 같다. 본 연구에 사용한 GTD-111의 경우, 안정화된 수명 사이클인 반 수명(half cycle)에서 반복적인 히스테리시스 선도를 관찰한 결과 대칭 되는 거동을 보이고 있어 본 이론을 적용하는데 적합함을 알 수 있었다. 소비되는 총 에너지는 히스테리시스 선도의 면적의 합으로 나타낼 수 있으며, 재료에 따라 에너지를 흡수할 수 있는 일정용량을 가지고 있어 이 한계치에 도달하면 재료는 파손된다. Fig. 3과 같이 재료가 피로하중을 받게 되어 한 사이클당 소비되는 소성변형에너지는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(5,9,10)</sup>

$$\Delta W_p = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p \quad (1)$$

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

$$\sigma = 2\sigma_a, \quad \varepsilon = 2\varepsilon_a^p \quad (2)$$

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

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

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

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

식 (5)를 (3)에 넣어 대입하면,

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

이다. 여기서,  $n''$ 을 응력-변형률 관계의 경화지수  $n'$ 과 같다고 가정하고,

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

이므로, 식 (8)과 같은 소성변형에너지식을 얻을 수 있다.

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

따라서 식 (8)의 소성변형에너지를 이용한 재료의 저주기 피로 수명 예측식은 식 (9)와 같다.

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

여기서,  $\Delta W_p$ 는 파단수명의 1/2사이클에서 소성변형에너지량이며,  $N_f$ 는 파단까지의 반복사이클(cycle to failure)이고,  $A$ 와  $m$ 은 실험상수이다. 그런데 소성변형에너지법을 적용 시 반복하중에 의한 변형률 진폭이 작아질수록 소성변형률 진폭도 작아지므로 소성변형률 에너지밀도는 매우 작고 이를 측정하는 것은 어려워진다. 이러한 이유로 전 수명영역에서의 변형률에너지 밀도를 피로손상변수로 사용하기 위하여 Ellyin과 Kujawski는 Fig. 3과 같이 히스테리시스 선도의 탄성 변형률에너지(elastic strain energy)의 합으로 표현되는 전 변형률에너지 밀도(total strain energy density),  $\Delta W_t$ 를 다음과 같이 표현하였다.<sup>(11,12)</sup>

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

여기서,  $\Delta W_e$ 는 다음과 같은 식을 이용하여 계산할 수 있다.<sup>(11,12)</sup>

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

$$= \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})^2}{2} \quad \text{for } \sigma_{\min} > 0$$

즉, 총변형률 에너지 밀도,  $\Delta W_t$ 는 식 (8)과 식 (11)에 의하여  $R=-1$ 인 경우 다음과 같이 정의된다.

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

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

$$\Delta W_f = \chi(N_f)^a \quad (13)$$

#### 4. 시험결과 및 고찰

##### 4.1 온도가 피로수명에 미치는 영향

Fig. 4는 총 변형률 범위가 1.2%의 파단수명의 1/2 사이클의 상온 및 고온 저 사이클 피로 시험의 이력곡선을 나타낸다. 온도가 증가함에 따라서 소성 변형량은 증가하고, 응력 폭은 감소하는 경향을 보인다. 상온의 경우 유지시간(hold time)에 대한 영향이 거의 나타나지 않은 반면 870°C나 927°C에서는 유지시간동안 크리프 효과로 인해 응력이 시간에 따라 감소하는 응력 완화(stress relaxation)가 발생하며, 이력곡선 내부 면적이 넓어지며 소성변형에너지가 증가하게 된다. Fig. 5는 총변형률 범위가 1.2%의 실험에서 나타난 온도별 피로수명과 응력범위  $\Delta\sigma$ 의 변화를 나타낸다. 온도가 증가함에 따라서 피로수명이 감소하였으며, 응력범위의 변화는 사이클이 진행될수록 응력 진폭이 감소하는 피로연화(cyclic softening) 경향을 보인다. 이것은 재료 내부의 성질이 전위의 이동이 쉬워지는 방향으로 변하게 되는 것이다.

그리고 변형률 범위가 1.2%의 경우에서, 상온의

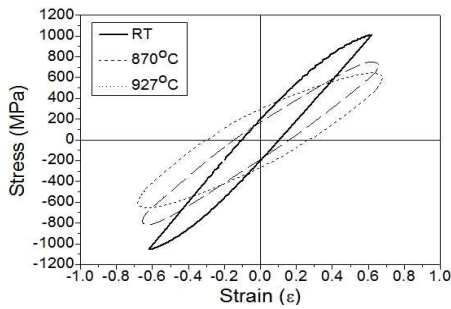


Fig. 4 Hysteresis loop for  $\Delta \epsilon = 1.2\%$

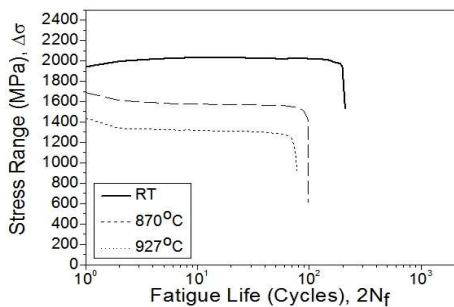
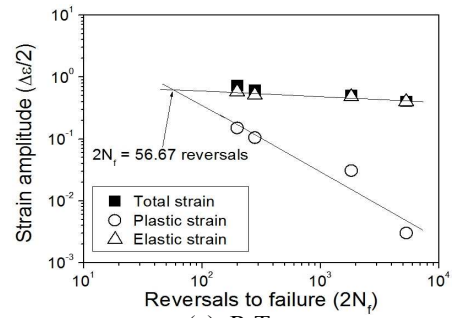


Fig. 5 Variation of stress range during fatigue life for  $\Delta \epsilon = 1.2\%$

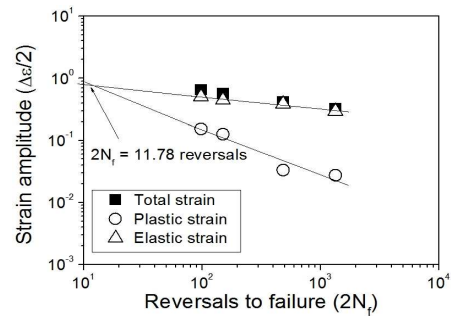
경우 연화현상이 일정하게 진행이 되다가 어느 순간이 되면 파단이 되는 것을 알 수 있다. 고온인 927°C와 870°C 경우는 연화현상이 약간 빠르게 진전되다가 25% 하중감소시점보다 빨리 파단이 되었다. 전체적으로 상온에서는 대부분의 시편이 연화현상의 일정한 부분에서 순간적으로 파괴되는 형태로 나타나는 것을 확인 할 수 있었으며, 870°C나 927°C에서는 870°C,  $\Delta \epsilon = 1.2\%$  경우와 같이 연화현상이 급격히 일어나다가 25% 하중 감소까지 가는 경향을 보였으며 일부가 25% 하중감소 시점까지 도달하지 못하고 파단이 되는 것을 확인할 수 있었다.

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

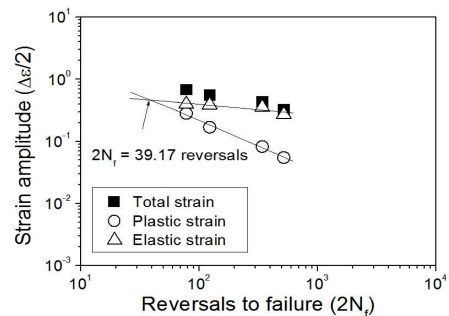
Fig. 6은 변형률-수명 선도 및 Coffin-Manson식



(a) R.T.



(b) 870°C



(c) 927°C

Fig. 6 Strain amplitude and life curves of GTD-111 at various temperatures

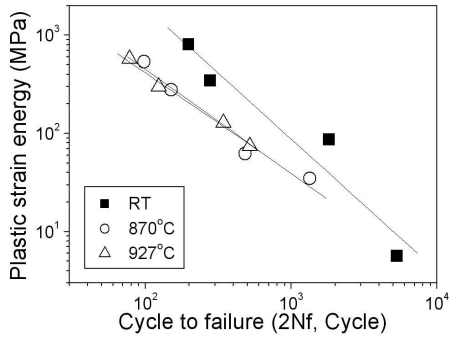


Fig. 7 Plastic strain energy versus cycles to failure of GTD-111 at various temperatures

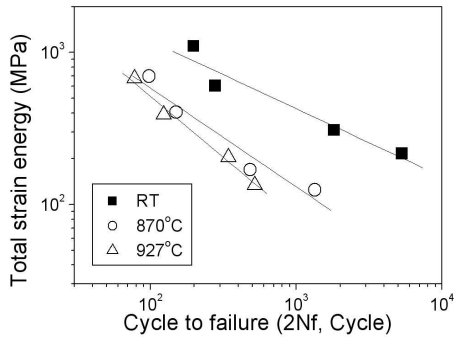


Fig. 8 Total strain energy versus cycles to failure of GTD-111 at various temperatures

의 파라미터를 구하기 위한 탄성변형률-수명 선도, 소성변형률-수명선도를 각각의 온도별로 나타낸 결과이다. GTD-111의 경우 천이수명은 상온에서 56.61 reversals이고, 870°C에서 11.78 reversals 그리고 927°C에서 39.17 reversals로 나타났다. 따라서 상온에서 천이수명이 가장 길고, 고온에서는 870°C보다 927°C에서 천이 수명이 길어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 시험편의 파단까지의 반복 사이클수와 소성변형 에너지량과의 관계를 나타낸 결과이며, Fig. 8은 시험편의 파단까지의 반복 사이클수와 전 변형률 에너지량과의 관계를 나타낸 결과이다.

Fig. 6의 Coffin-Manson 관계를 양 로그 좌표를 이용하여 이 결과를 도시하면 선형으로 데이터가 분포하고, 이들의 관계를 선형최소자승법을 이용하여 계산하여 정리하면 Table 3과 같다.

Table 4와 5는 각각 Fig. 7과 8의 소성변형률 에너지법과 전 변형률에너지법을 계산하여 나타낸 식이다.

4.3 저주기 피로 파단면 특성

Fig. 9은 GTD-111의 피로 저주기 피로 시험과

Table 3 Equations calculated by Coffin-Manson formula

Temperature (°C)	Coffin-Manson formula
RT	$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = 1.816(2N_f)^{-0.092} + 106.83(2N_f)^{-1.086}$
870°C	$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = 2.400(2N_f)^{-0.191} + 8.174(2N_f)^{-0.721}$
927°C	$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = 1.763(2N_f)^{-0.174} + 19.593(2N_f)^{-0.826}$

Table 4 Equations calculated by plastic strain energy method

Temperature (°C)	Plastic strain energy equation
R.T.	$\Delta W_p = 451980.8(N_f)^{-1.2523}$
870°C	$\Delta W_p = 30143.94(N_f)^{-0.9587}$
927°C	$\Delta W_p = 45033.95(N_f)^{-1.342}$

Table 5 Equations calculated by total strain energy method

Temperature (°C)	Total strain energy equation
R.T.	$\Delta W_t = 5724.00(N_f)^{-.3856}$
870°C	$\Delta W_t = 5502.25(N_f)^{-0.5754}$
927°C	$\Delta W_t = 20785.48(N_f)^{-0.803}$

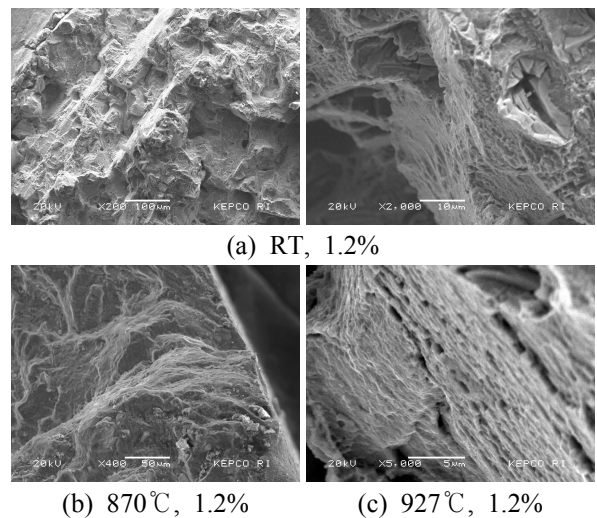


Fig. 9 Scanning electron micrographs of GTD-111

면 사진을 총 변형률 범위가 1.2%에서의 각 온도별로 정리한 사진이다. (a) 상온에서 약간의 연성

과 취성이 섞여 파단되는 양상을 나타냈다. (b) 고온 시험을 통해 산화된 표면에서부터 균열 진전의 스트라에이션이 관찰되었다. (c) 증상으로 취성 파괴된 파면과 연성 파면이 혼재하였다. 고온 시험은 표면과 접하고 있는 입계나 반복 변형 시 생기는 intrusion과 extrusion에 취약한 산화 막을 형성된 부분에서 피로 균열이 쉽게 생성되어 입내로 뚫고 들어가게 되어 피로 수명이 감소된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 초내열합금 GTD-111에 대하여 상온 및 고온 저주기피로시험을 수행하였으며, 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 온도가 증가함에 따라 유지시간의 영향에 의하여 유지시간동안 크리프 변형이 발생하여 소성변형 에너지가 증가한다.

(2) 소성변형률 에너지법으로 수명을 평가한 결과 상온이 가장 우수하며, 870°C와 927°C는 비슷한 수명으로 예측된다.

(3) 전변형률 에너지법으로 수명을 평가한 결과 상온이 가장 우수하며, 온도가 증가함에 따라 감소한다.

(4) SEM을 통하여 관찰한 결과 내부 균열 진전의 스트라이에이션이 발견되며 입계치에 도달되면 파괴되고 있다.

#### 후 기

본 연구는 전력연구원의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Tomkins, B., 1981, *Creep and Fatigue in High Temperature Alloys*, J. Bresers (Ed.), Applied Science Pub.,
- (2) Runkle, J.C. and Pellous, R. M., 1978, *Fatigue Mechanisms*, ASTM STP 675.
- (3) Polak, J., 1991, *Cyclic Plasticity and Low Cycle Fatigue Life of Metals*, Elsevier.

- (4) Bannantine, J.A., Comer, J.J. and Handrock, J.L., 1990, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall.
- (5) 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.
- (6) Ellyin, F. and Kujawski, D., 1984, "Plastic strain Energy in Fatigue Failure," *Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 106, No. 4, pp. 342~347.
- (7) 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.
- (8) 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
- (9) Halford, G.R. 1966, "The Energy Required for Fatigue," *Jornal of Materials*, Vol. 1, No. 1, pp. 3~18
- (10) Morrow, J. D., 1965, "Cyclic Plasticity Strain Energy and Fatigue of Metals," *Internal Friction, Damping and Cyclic Plasticity*, ASTM STP 378, pp. 45~87.
- (11) Ellyin, F. and Kujawski, 1986, "The Energy-Based Fatigue Failure Criterion," *Microstructure and Mechanical Behaviour of Materials*, Vol. 2, pp. 541~600.
- (12) Golos, K. and Ellyin, F., 1988, "A Total Strain Energy Density Theory for Cumulative Fatigue Damage," *Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 110, pp. 36~41.
- (13) Hwang, K. T., Kim, J.H., Yoo, K.B., Lee, H.S., Yoo, Y.S., 2010, "Low-Cycle Fatigue in Ni-Base Superalloy IN738LC at Elevated Temperature," *2010 spring Annual meeting of KSME*, pp. 77~83.