

Ni기 초내열합금 GTD111 DS의 고온 저주기 피로수명 예측§

김진열* · 윤동현* · 김재훈*† · 배시연** · 장성용** · 장성호**
* 충남대학교 기계공학부, ** 한국전력연구원

Life Prediction of Low Cycle Fatigue for Ni-base Superalloy GTD111 DS at Elevated Temperature

Jin Yeol Kim*, Dong Hyun Yoon*, Jae Hoon Kim*†, Si Yeon Bae**, Sung Yong Chang** and Sung Ho Chang**
* School of Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ., ** KEPCO Research Institute

(Received January 17, 2017 ; Revised April 18, 2017 ; Accepted April 22, 2017)

Key Words: Coffin-Manson Equation(Coffin-Manson 식), Directional Solidification(방향성 응고), Fatigue Life (피로 수명), Low Cycle Fatigue(저주기 피로), Superalloy(초내열합금)

초록: Ni기 초내열합금인 GTD111 DS는 가스터빈 블레이드에 사용된다. 본 논문에서는 실제 운전조건과 유사한 조건을 설정하여 GTD111 DS의 저주기 피로시험을 실시하였다. 상온, 760°C, 870°C의 온도범위와 다양한 변형률에서 저주기 피로시험을 수행하였다. 실험결과 총 변형률이 증가함에 따라 피로수명은 감소하였다. 상온 및 760°C에서는 주기적 경화반응이 나타났으며 870°C에서는 주기적 연화반응이 나타났다. 870°C에서 응력완화 현상은 유지시간에 따른 크리프의 영향으로 나타났다. 피로수명과 총 변형률의 관계는 Coffin-Manson 식을 통해 얻었다. 파단면은 SEM을 통해 초기균열 및 피로진전지역을 관찰하였다.

Abstract: GTD111 DS of nickel base superalloy has been used for gas turbine blades. In this study, low cycle fatigue test was conducted on the GTD111 DS alloy by setting conditions similar to the real operating environment. The low cycle fatigue tests were conducted at room temperature, 760 °C, 870 °C, and various strain amplitudes. Test results showed that fatigue life decreased with increasing total strain amplitude. Cyclic hardening response was observed at room temperature and 760 °C; however, tests conducted at 870 °C showed cyclic softening response. Stress relaxation was observed at 870 °C because creep effects occurred from holding time. A relationship between fatigue life and total strain range was obtained from the Coffin-Manson method. The fractography using a SEM was carried out at the crack initiation and propagation regions.

- 기호설명 -

- σ_f' : 피로강도계수(fatigue strength coefficient)
- ϵ_f' : 피로연성계수(fatigue ductility coefficient)
- b : 피로강도지수(fatigue strength exponent)
- c : 피로연성지수 (fatigue ductility exponent)

- $2N_f$: 파단까지의 반복수(reversal to failure)
- $\Delta\epsilon_t$: 총변형률(total strain amplitude)

1. 서론

Ni기 초내열합금은 고온에서 기계적 성질이 우수하며 크리프 및 피로저항성, 내산화성, 내부식성이 우수하여 비행기 엔진, 선박엔진 및 발전용 가스터빈 블레이드의 재료로 사용된다. 이러한 구성요소들은 항상 반복적으로 열적응력에 노출

§ 이 논문은 대한기계학회 2016년도 학술대회(2016. 12.14.-16., 강원랜드 컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, kimjhoon@cnu.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Chemical compositions of GTD111 DS (wt%)

C	Cr	Co	Mo	W	Re	Ta	Nb	Al	Ti	Hf	Ni
0.1	14	9.45	1.55	3.8	<0.15	2.8	<0.15	3	4.9	0.15	bal.

되며 피로 및 크리프의 복합적인 손상을 받게 된다. 따라서 고온 저주기피로특성은 터빈블레이드의 수명에 영향을 미치는 중요한 인자이다.^(1,2)

오랫동안 많은 연구자들은 Ni기 초내열합금에 대한 피로특성에 관한 연구를 진행하였으며 새로운 합금을 개발하기도 하였다. 황⁽³⁾과 양⁽⁴⁾은 각각 IN738LC, GTD111의 고온 저주기피로특성에 대해 실험하여 Coffin-Manson식 및 변형률 에너지 법으로 해석하였으며, Chu⁽⁵⁾는 DZ951에 대한 피로특성을 전위구조를 이용하여 설명하였다. Shi⁽⁶⁾는 중국에서 개발된 단결정 합금에 대한 피로시험을 진행하였다. Ibanez⁽⁷⁾는 GTD111 DS의 크리프변형과 파괴거동에 관한 연구를 진행하였고 양⁽⁸⁾은 GTD111 DS의 기계적 성질에 대하여 해 연구하였다. 이처럼 방향성 응고된 GTD111 DS의 저주기피로특성에 관한 연구는 거의 진행되지 않았다. 본 논문에서는 GTD111 DS(directional solidification)이 고온에서 저주기피로특성을 이해하기 위해 변형률제어 통해 상온 및 고온에서 저주기 피로시험을 수행하였다.

2. 시험 방법

2.1 재료 및 시험편

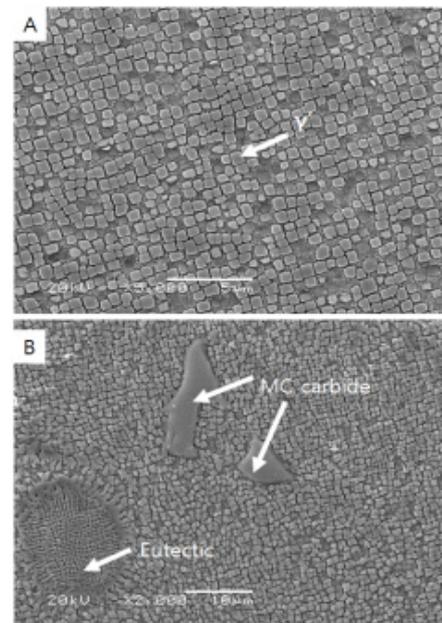
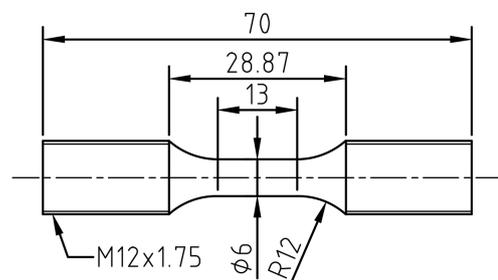
본 논문에서 사용된 초내열합금은 방향성응고(directional solidification)된 GTD111 DS으로 화학 조성은 Table 1과 같다. Table 2는 상온 및 고온에서 기계적 성질을 정리한 것이다.

GTD111 DS의 기지조직 관찰은 전해액(distilled water : HNO₃ : CH₃COOH = 17 : 2 : 1)을 이용하여 3A, 5초간 전해부식을 하였고, Fig. 1은 기지조직을 나타낸 SEM 사진이다. Fig. 1(a)를 보면 GTD-111 DS는 약 0.5 μm의 크기의 입방형 모양 primary γ'상이 규칙적으로 관찰되었으며 Fig. 1(b)과 같이 결정립계 주변에 MC탄화물(EBS결과; Ti, Ta 주성분)과 공정조직이 관찰되었다.

저주기피로시험 시편은 ASTM E 606⁽¹⁰⁾에 준하여 제작하였다. Fig. 2는 저주기피로 시험편형을 나타낸 것이며, 직경은 6 mm, 게이지 길이는 13 mm이다.

Table 2 Mechanical properties of GTD111 DS⁽⁹⁾

Temperature (°C)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
R.T.	1,035	860	7.5
760	1,056	855	15.4
870	863	660	31.4

**Fig. 1** SEM images showing microstructure of GTD111 DS**Fig. 2** Specimen of low cycle fatigue test

2.2 시험방법

피로시험장비는 전기식 피로시험기인 INSTRON 8861로 최대 하중용량은 3.5톤이다. 실험온도는 상온, 760°C, 870°C에서 진행하였으며 총 변형률

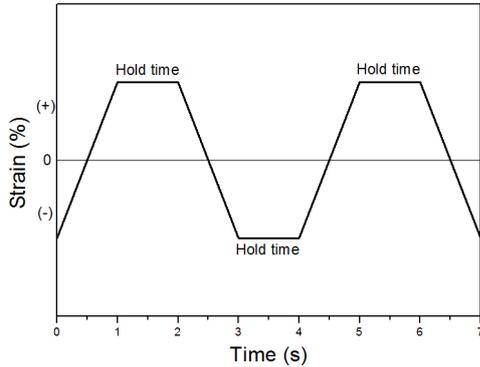


Fig. 3 Wave form of low cycle fatigue test

은 1.4~1.8% 범위에서 변형률비 $Re = -1$ 로 피로 시험으로 진행하였다. 총 변형률은 시편 평행부에 장착된 신율계로 변형률 제어하였다. 파형은 Fig. 3과 같이 사다리꼴(trapezoid)파형으로 인장-유지-압축-유지 총 4단계로 각각 1초로 하여 주파수를 0.25 Hz로 일정하게 실험하였다. 고온에서 시편의 온도변화는 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 내로 유지하였다. 저주기 피로 시험의 파단수명은 최대하중의 25% 감소되는 하중의 시점으로 결정하여 시험을 중단하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 주기적 응력반응 거동

Fig. 4는 상온 및 고온에서 서로 다른 총변형률 하에서 파단 사이클 대 응력진폭선도를 나타낸 것이다. GTD111 DS의 주기적 응력반응은 온도에 의존하는 거동을 보이고 있다. 상온에서 초기에 주기적 경화반응이 나타나며 이후 안정화된 응력 거동을 보이고 있다. 760°C 에서 총 변형률 $\Delta\epsilon_t \leq 1.6\%$ 인 경우, 초기 안정화된 응력거동을 나타냈지만 높은 변형률($\Delta\epsilon_t = 1.8\%$)일 때에는 상온과 같이 주기적 경화반응이 나타나고 있다. 하지만 870°C 인 경우 상온과 760°C 와 달리 초기에 주기적 연화반응이 나타났으며 이후 안정한 응력거동을 보이며 파단 직후에는 피로균열의 전파로 인하여 응력이 감소하였다. 같은 변형률조건에서 하중은 상온에서 가장 크게 나타났으며 온도가 증가할수록 감소하였다. 피로수명은 760°C 에서 가장 크게 나타났으며 상온, 870°C 순으로 나타났다. 온도가 증가할수록 응력과 피로수명의 변화는 GTD111 DS의 인장특성으로 설명할 수 있다. 상온 및 760°C 에서 인장강도 및 항복강도는 유사하지만, 760°C 에서 저주기 피로수명은 연신율의 증가로 상온보다 길게 나타나고 있다. 870°C 인 경우 연신율은 증가하였으나 인장강도 및 항복강도가 크게 감소하여 피로수명이 감소하는 것으로 판단된다.

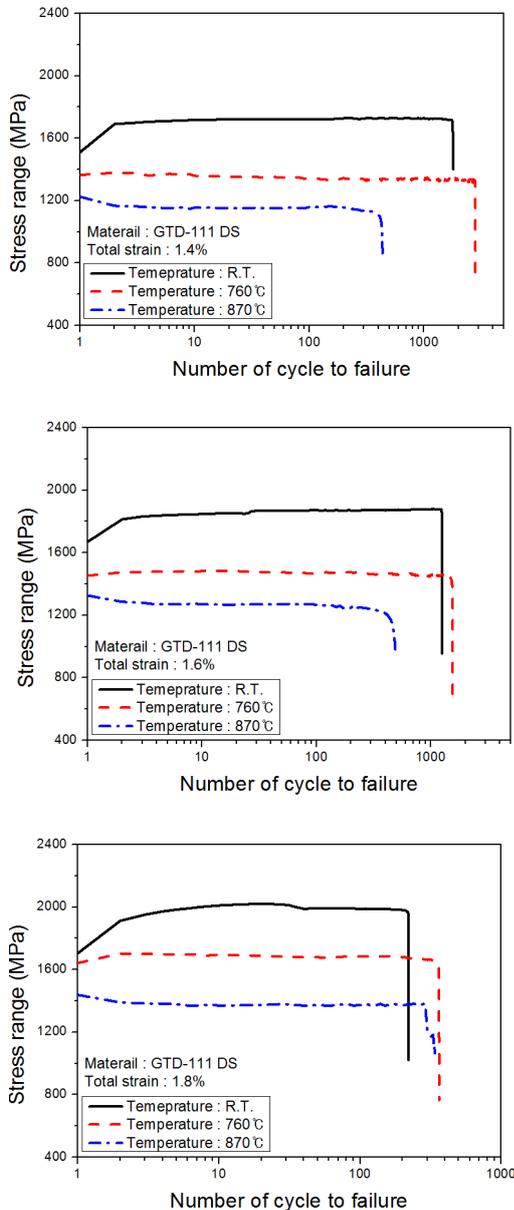


Fig. 4 Stress range vs. N_f curves for total strain amplitudes at various temperatures

3.2 히스테리시스 루프(Hysteresis loops)

Fig. 5는 상온 및 고온에서 수명의 절반에서 얻어진 히스테리시스 루프를 나타낸 것이다. 히스테리시스루프의 면적을 보면 상온에서 소성변형이 거의 발생하지 않아 면적은 작지만 온도가 증가할수록 소성변형양이 커지면서 면적도 커지는 것을 확인할 수 있다. 총변형률 $\Delta\epsilon_t \geq 1.6\%$ 인

Table 3 Strain-life parameters of GTD111 DS at various temperatures

Material	Temperature (°C)	σ_f'/E	b	ϵ_f'	c
GTD111 DS	Room temperature	1.1524	0.0736	29.1501	1.0782
	760	1.2699	0.0815	10.2468	0.7679
	870	1.5898	0.1401	2.1505	0.4660

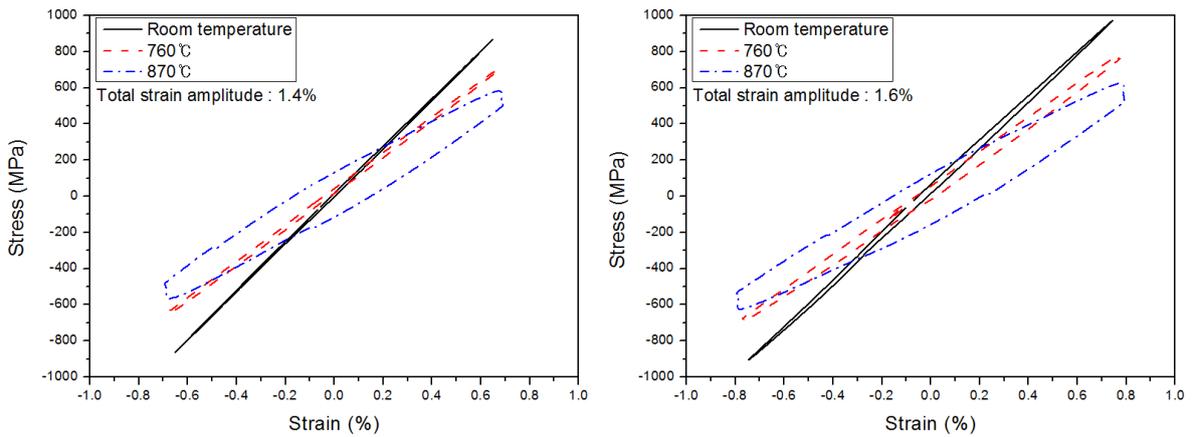


Fig. 5 Hysteresis loops for total strain amplitudes of 1.4% and 1.6% at various temperatures

경우, 760°C와 870°C에서 인장 및 압축에 유지 시간의 영향으로 크리프 효과가 발생하였다. 크리프 효과로 인해 응력이 시간에 따라 감소하였으며 응력완화(stress relaxation)가 발생하였다. 하지만 상온과 760°C의 총 변형률 1.4%일 때에는 크리프 효과가 발생하지 않았다. 따라서 상온과 760°C의 총 변형률 1.4%에서의 피로수명은 총 변형률의 영향이 지배적인 반면, 760°C의 총 변형률 1.6% 이상인 경우와 870°C에서는 총 변형률과 크리프효과의 복합작용이 피로수명에 지배하는 것으로 판단된다.⁽¹²⁾

3.3 Coffin-Manson 식에 의한 피로수명 예측

일반적으로 재료가 변형률 제어실험에서 저주기피로거동 문제를 설명하기 위해 Coffin-Manson 식을 이용한다. 총 변형률 범위는 다음과 같은 식으로 탄성 및 소성변형률 범위로 분리하여 표현할 수 있다.

$$\Delta\epsilon_t = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p = \frac{\sigma_f'}{E}(N_f)^{-b} + \epsilon_f'(N_f)^{-c} \quad (1)$$

여기서 $\Delta\epsilon_e$ 와 $\Delta\epsilon_p$ 는 각각 탄성과 소성 변형률을 나타내며, N_f 는 파단 사이클 수, σ_f' 와 ϵ_f' 는 피로강도계수와 피로연성계수, 그리고 b 와 c 는

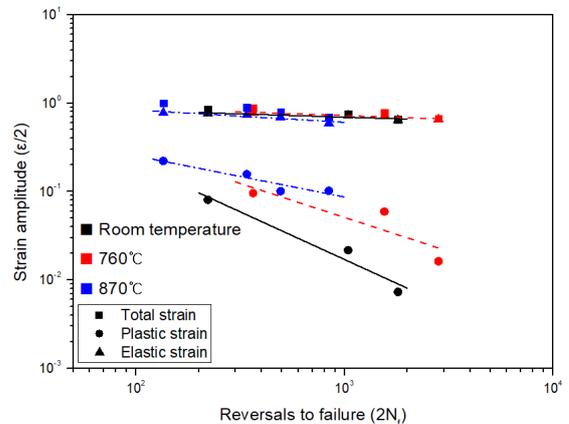


Fig. 6 Strain amplitude vs. 2Nf for GTD111 DS at various temperatures

피로강도지수 및 피로연성지수이다.

Fig. 6은 소성 및 탄성변형률 값과 파단 사이클의 관계를 log-log 스케일로 나타낸 것이다. 소성 및 탄성변형률 범위는 피로수명의 절반에서 얻었다. 모든 데이터는 식 (1)에 따라 각 온도에서 선형핏팅하였고, Table 3은 상온 및 고온에서 변형률-수명 상수들을 Coffin- Manson식으로부터 얻은 결과들이다.

상온 및 760°C에서 소성 변형률은 매우 작았으며 탄성 변형률이 총 변형률과 유사한 값이었다.

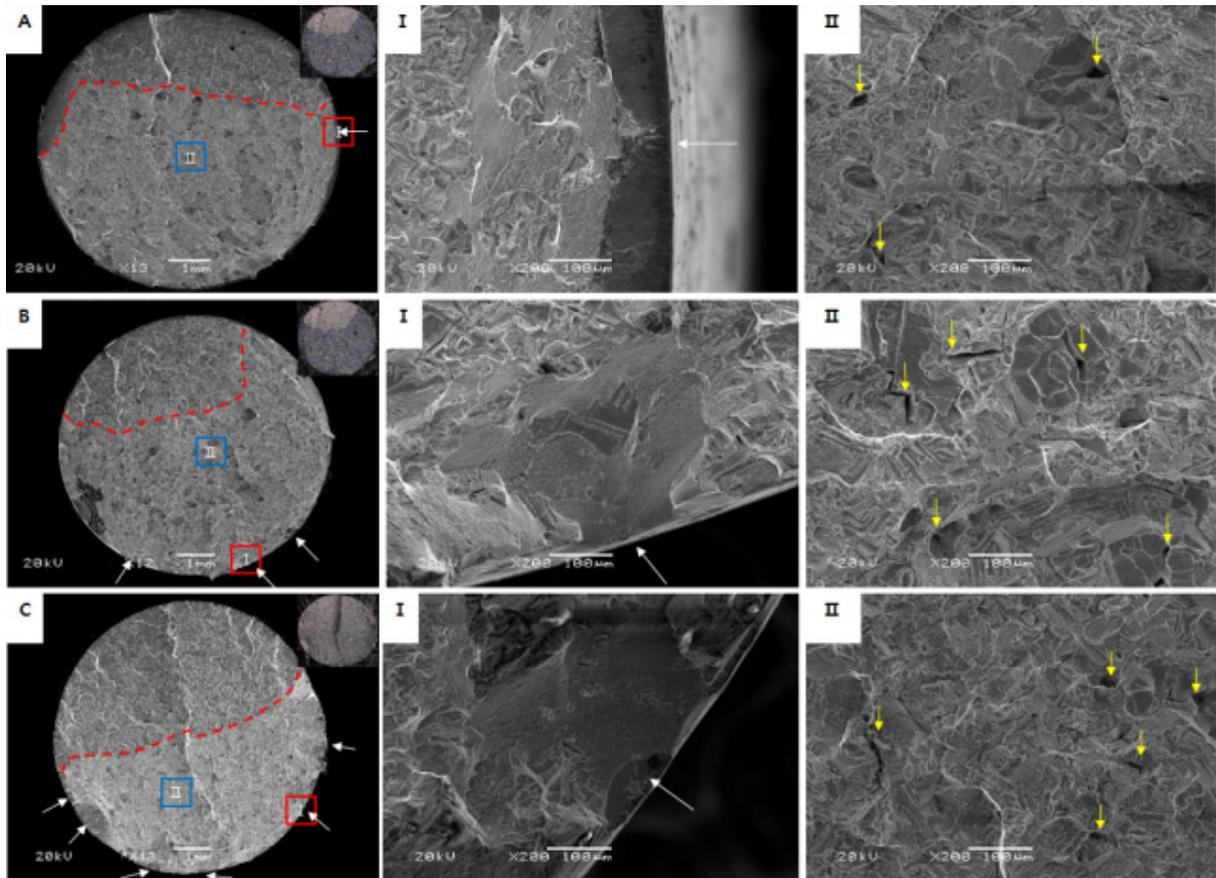


Fig. 7 Fatigue fractographies of GTD111 DS for various strain amplitudes at elevated temperatures (a) 760°C - 1.4%, (b) 760°C - 1.6%, (c) 870°C - 1.6% (I : crack initiation, II : crack propagation)

하지만 870°C인 경우 유지시간에 따른 크리프의 영향으로 인하여 소성변형이 증가하여 소성 변형률도 증가하였다. GTD111 DS의 변형률-수명 파라미터를 보면 온도에 복합적인 효과를 가지고 있음을 알 수 있다. 온도의 증가에 따라 피로강도계수(σ_f'/E)와 피로강도지수(b)는 증가하며, 피로연성계수(ϵ_f')와 피로연성지수(c)는 감소하였다. 이러한 경향은 GTD111 DS의 인장특성을 보면 인장강도와 연신율의 감소로 영향이 있는 것으로 판단된다.⁽¹³⁾

3.4 파단면 분석

Fig. 7은 GTD111 DS의 760°C와 870°C, 총 변형률 1.4%와 1.6%에 대한 저주기 피로시험 후에 파단면 사진을 나타낸 것이다. 균열이 진전되다가 하중의 감소가 25% 되었을 때 파단면을 사진 촬영한 것이다. SEM 오른쪽 상단은 OM이미지이며 피로파단(산화부)과 최종파단(비 산화부)을 눈으로도 확인할 수 있으며 빨간색 점선을 통해 그

계계를 나타낸 것이다. 초기 피로균열 발생위치(하얀색 화살표) 및 영역(I), 균열 진전영역(파란색 영역, II)로 표시하였다. 총 변형률과 온도가 증가할수록 피로파단의 면적은 증가하였으며 초기 피로균열위치도 공히 증가하였다. 초기 피로균열은 MC탄화물(Ti, Ta 주성분)에서 발생하였다. 균열 진전지역 SEM 사진을 보면 2차 균열도 나타났다으며 총 변형률이 증가할수록 다량의 2차 균열이 발견되었다. 피로파괴의 특징인 피로줄무늬는 발견되지 않았고 모든 실험조건에서 피로파면은 취성파괴 양상을 나타내고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 Ni기 초내열합금인 GTD111 DS에 대하여 상온 및 고온 저주기피로시험을 수행하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 상온과 760°C에서 저주기 피로시험동안의 응력거동은 초기에 주기적 경화반응을 보이고,

870°C에서 주기적 연화반응을 나타낸다. 이후 안정화되고 파단 직전에서 주기적 연화반응을 나타내고 있다.

(2) 상온 및 760°C에서 낮은 변형률조건에 대한 GTD111 DS의 저주기 피로수명은 총 변형률에 의해 지배되고 있다. 반면에 760°C에서 높은 변형률 조건 및 870°C에서 피로수명은 총 변형률과 크리프의 복합작용에 의해 영향을 받는다.

(3) Coffin-Manson 식으로 수명을 평가한 결과, 온도가 증가하면 저주기 피로강도계수는 증가하며 피로연성계수는 감소한다.

(4) SEM 관찰로부터 초기 피로균열은 MC탄화물에 의해 시작되며 피로균열의 진전에 따라 2차 균열이 발생된다. 또한, 총 변형률이 증가에 따라 초기 피로균열 발생영역과 2차 균열은 공히 증가한다.

후 기

본 연구는 한전 전력연구원의 연구비 지원을 받아 수행한 연구과제의 일부입니다.

참고문헌 (References)

- (1) Tomkins, B., 1981, Creep and Fatigue in High Temperature Alloys, Bresers J. (Ed.), Applied Science Publication.
- (2) Runkle, J.C. and Pellous, R. M., 1978, Fatigue Mechanisms, ASTM STP 675.
- (3) Hwang, K. T., Kim, J. H., Yoo, K. B., Lee, H. S. and Yoo, Y. S., 2010, "Low-Cycle Fatigue in Ni-Base Superalloy IN738LC at Elevated Temperature," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 10, pp. 1403~1409.
- (4) Yang, H. Y., Kim, J. H., Yoo, K. B., Lee, H. S. and You, Y. S., 2011, "Low-Cycle Fatigue Life Prediction in GTD-111 Superalloy at Elevated Temperatures," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 7, pp. 753~758.
- (5) Chu, Z. K., Yu, J. J., Sun, X. F., Guan, H. R. and Hu, Z. G., 2010, "High Temperature Low Cycle Fatigue Behavior of a Directionally Solidified Ni-base Superalloy DZ951," *Materials Science and Engineering*, Vol. 488, pp. 389~397.
- (6) Shi, Z. X., Wang, X. G. Liu, S. H. and Li, J. R., 2015, "Low Cycle Fatigue Properties and Microstructure Evolution at 760°C of a Single Crystal Superalloy," *Progress in Natural Science*, Vol. 25, pp. 78~83.
- (7) Ibanez, A. R., Spinvasan, V. S. and Saxena, A., 2006, "Creep Deformation and Rupture Behaviour of Directionally Solidified GTD111 Superalloy," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 29, pp. 1010~1020.
- (8) Yang, S. H., Kim, M. Y., Park, S. Y. and Kim, S. H., 2009, "Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of the Nickel Base Superalloy GTD111DS," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No. 3, pp. 19~24.
- (9) EPRI, 2006, Gas Turbine Blade Superalloy Material Property Handbook, EPRI Technical Report, pp. 267~276.
- (10) ASTM, 2004, Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing, ASTM Standards, ASTM E 606-04, pp. 1~16.
- (11) Choe, B. H., Lee, J. H., Kim, H. M. and Lee, H. C., 1991, "Low Cycle Fatigue Properties of Polycrystalline and Directionally Solidified CM247LC Superalloy," *Korean Journal of Metals and Materials*, Vol. 29, No. 6.
- (12) Hwang, K. T., 2011, "A Study on Low Cycle Fatigue Characteristics of Superalloy Used Turbine Blade," Department of Mechanical Design Engineering, Graduate School Chungnam National University.
- (13) He, L.Z., Zheng, Q., Sun, X.F., Guan, H.R., Hu, Z.Q., Tieu, A.K., Lu, C. and Zhu, H.T., 2005, "High Temperature Low Cycle Fatigue Behavior of Ni-base Superalloy M963," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 402, pp. 33~41.