대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집 A pp. 188~193 KSME 00S033

가스터빈 블레이드용 IN738LC의 열기계피로수명에 관한 연구

에릭 플러리*, 하정수*, 현중섭*, 장석원*, 정훈*

Thermo-Mechancal Fatigue of the Nickel Base Superalloy IN738LC for Gas Turbine Blades

E. Fleury, J.S. Ha, J.S. Hyun, S.W. Jang, H. Jung

Key Words: Thermo-Mechanical Fatigue(열기계피로), Superalloy(초내열합금강), Lifetime Prediction(수명예측), Damage Mechanisms(손상기구)

Abstract

A more accurate life prediction for gas turbine blade takes into account the material behavior under the complex thermo-mechanical fatigue(TMF) cycles normally encountered in turbine operation. An experimental program has been carried out to address the thermo-mechanical fatigue life of the IN738LC nickel-base superalloy. In the first phase of the study, out-of-phase and in-phase TMF experiments have been performed on uncoated and coated materials. In the temperature range investigated, the deposition of NiCrAlY air plasma sprayed coating did not affect the fatigue resistance. In the second phase of the study, a physically-base life prediction model that takes into account of the contribution of different damage mechanisms has been applied. This model was able to reflect the temperature and strain rate dependences of isothermal cycling fatigue lives, and the strain-temperature history effect on the thermo-mechanical fatigue lives.

1. 서론

가스 터빈은 비교적 다른 발전 설비에 비하여 저가이므로 투자비 부담이 적고 다른 방식의 발전 플랜트 보다 건설기간이 짧으므로 전력수요예측의 불확실성 등을 고려하여 가스 터빈 설비의 건설이 증가하였으며 지역난방과 연계한 복합화력의 경우 높은 열효율을 가지므로 1990년대에 이르러 국내에서는 가스 터빈을 포함한 복합화력의 비중이 매우 급격하게 증가하였다. 1998년 8월 현재 75기의 복합화력발전소가 가동 중에 있어 이는 전체 발전 용량의 약 25% 로서 그 중요도가 매우 높아가고 있다. 특별히 정비자재의 국산화율이 저조하여 제작사측이 고가구매를 유도함은 물론 고온 부품의 제작가공이 곤란하고 용접 및 코팅등 정비기술이 고난도를 요구하므로 정비보수 비용이 매우 높을 수밖에 없다.

가스터빈의 성능은 터빈 입구온도의 상승에 따라 현저하게 향상되어 왔는데 근래에는 제작사의 주도로 정밀주조 및 코팅 분야등 신기술 개발이 급속하게 이루어지고 있어서 국내 기술로 이를 따라 잡기도 매우 힘든 형편이다. 그러나 정확한 수명평가에 의한 교체 및 정비주기에 관한 기술은 전력회사가 독자적으로 확보해야될 기술이다. 따라서 운용회사 나름대로의 부품상태를 평가할 수 있는 능력을 가지고 있어야 하고 이를 확보하고자 노력하고 있다.

* 한전 전력연구원

Table 1: Chemical composition of the IN738LC.

Ni	C	Cr	Co	Mo	Ta	Ti	Al	W	Si	Mn	Nb	Fe
bal.	0.105	16.0	8.6	1.75	1.8	3.4	3.4	2.7	0.09	0.03	0.82	0.3

Table 2 Plasma spraying conditions.

Powder	amperage (A)	voltage (V)	spray distance (mm)	spray rate (g/min)	Ar flow (cfh)	H_2 flow (cfh)	vibrating air (psi)	gun speed (mm/min)	revolution speed (rpm)	passes
NI-222	500	74	100	50	95	27	10	1894	1000	4

가스 터빈 부품 중 가장 교체빈도가 높고 핵심 부품인 블레이드는 사용온도가 매우 높아지고 있으며 기동 정지시 열적 변형과 함께 기계적 변형을 동시에 받고 있어 고온피로는 물론 열기계피로 수명에 대한 검토가 더욱 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서는 가스터빈용 블레이드로 주로 사용하고 있는 IN738LC 재질을 이용하여 현장 운전조건과 가장 유사한 열기계피로와 고온피로실험을 실시하고 현장조건과 유사하게 NiCrAly 플라즈마 코팅의 영향도 검토하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

본 실험에서 사용한 재질은 주로 사용되고 있는 가스 터빈 블레이드 재질로서 IN738LC로서 화학적 성분은 Table 1과 같다. 시험편은 10㎜ 직경의 길이 25㎜로 주조한 후 기계가공하여 사용하였다. 코팅의 열피로 거동에 미치는 영향을 검토하기 위하여 플라즈마 코팅한 코팅의 조건은 Table 2와 같다. 코팅의 두께는 대략 0.125㎜로서 코팅 후의 부가적인 열처리는 시행하지 않았다.

실험은 10 ton의 직류전동형 열피로 전용실험기를 사용하였으며 5㎾의 인덕션 히터를 사용하여 가열하였으며 균일한 열분포를 위하여 강제냉각은 실시하지 않았다.

고온피로(Isothermal Fatigue)와 열기계피로(Thermo Mechanical Fatigue)를 수행하였는데 기계적 변형률 속도는 5 x 10^{-5} sec^{-1}를 유지하였다. 고온피로는 450℃와 650℃의 등온 상태에서 실시하였으며 열기계피로는 450℃와 850℃ 사이에서 실시하였는데 최고온도에서 인장상태가 되는 동상(in-phase) 열기계피로와 최저온도에서 인장상태가 되는 역상(out-of-phase) 열피로의 두가지 조건에서 실시하였다. 모든 실험은 15%의 하중감소가 발생하는 시점을 수명으로 간주하였다.

3. 실험결과

본 연구에서 실험한 결과와 다른 연구자들이 발표한 문헌을 조사하여 비교하였다. 문헌에 의한 결과는 동일 온도와 변형율 속도에 의한 결과가 아님을 참고하여야 할 것이다.

450℃, 650℃, 850℃에서의 고온피로 실험결과는 Fig. 1, 2, 3과 같다. 파단반복수를 기계적 변형률과 비교한 것으로 문헌에 의한 결과는 다른 변형률 속도에서 실험한 결과이다. 동일한 변형률 속도인 경우 온도가 증가할수록 수명은 감소함을 알 수 있고 나아가 450℃와 850℃에서 피로 수명은 기계적 변형률 속도가 빨라질수록 수명이 길어지고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 다른 연구자들의 논문 결과와도 일치하고 있어서 고온에서 산화와 크리프의 영향이 수명에 미치고 있다는 것을 강조하고 있다.

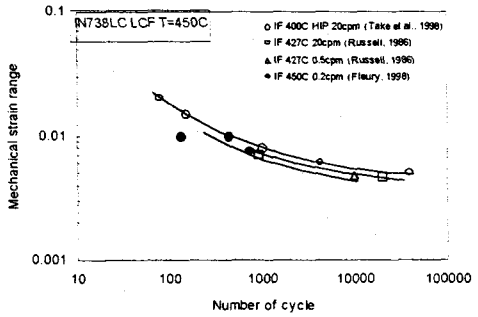

Fig. 1 LCF life of uncoated IN738LC specimens tested at T=450°C and comparison with data from the literature.

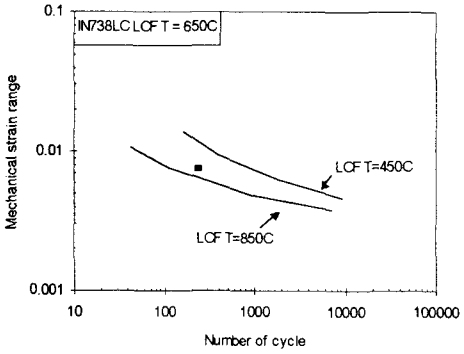

Fig. 2 LCF life of uncoated IN738LC specimens tested at T=650℃ and comparison with experimental LCF lives at T=450℃ and 850℃

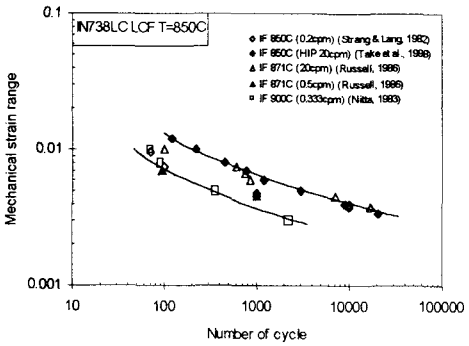

Fig. 3 LCF life of uncoated IN738LC specimens tested at T = 850℃ from the literature showing the strain rate effect.

동상과 역상의 열기계 피로실험결과는 Fig. 4와 같다. 동상과 역상의 피로 수명을 비교한 결과 그림에서와 같이 대략 0.006의 변형률 범위에서 일치하였다가 동상의 열기계피로 수명이 높은 기계적 변형률 영역에서는 역상에 비하여 짧아지고 있다.

한편 동상의 피로수명은 낮은 변형률 영역에서는 상대적으로 길어지고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 동상과 역상의 피로 수명이 교차하는 형태는 다른 재질에서도 많이 나타나고 있다고 보고되고 있다. Al-2024의 알루미늄 합금과 AISI 1010강과 그리고 IN718의 Ni기 초내열합금에서도 동일한 현상이 발견되고 있다고 보고되고 있다. 이러한 결과는 동상과 역상의 손상기구가 서로 다르다는 것을 보여주는 것으로서 역상의 경우에는 피로와 산화가 주요 손상요인이며 동상의 경우에는 피로와 크리프가 주요 손상요인이기 때문에 이러한 손상기구의 차이로 인하여 수명의 차이를 보이는 것으로 밝혀지고 있다.

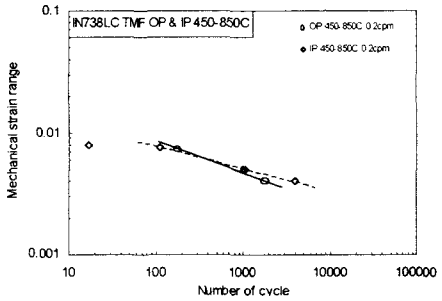

Fig. 4 Comparison of the TMF OP and IP life of IN738LC specimens.

열기계피로 실험이 개발된 이후로 많은 연구자들이 열기계피로 수명과 열기계피로시 최고온도에서의 고온피로 수명과 비교하는 것에 매우 흥미를 가지고 있었다. Fig. 5에서 동상과 역상의 열기계피로 수명과 850℃에서의 고온피로 실험결과와 비교하였다. 그 결과 열기계피로 수명이 850℃에서의 등온피로 수명과 거의 일치하고 있다는 것을 알 수 있다.

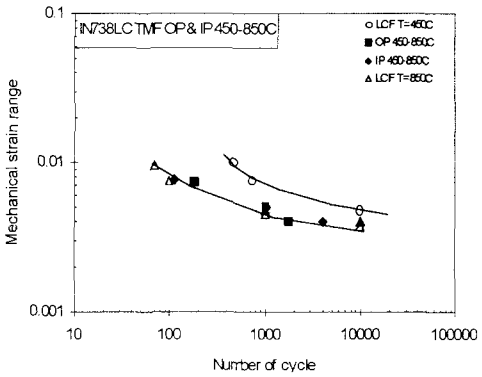

Fig. 5 Comparison of the experimental LCF lives of IN738LC specimens tested at T = 850℃ with IP and OP TMF 450-850℃ lives

실제 가스 터빈에서 사용되는 제일단 블레이드 등은 코팅이 되어 있으므로 코팅의 영향을 분석하기 위하여 NiCrAly의 코팅된 시험편을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험결과는 Fig. 6, 7과 같이

코팅된 실험과 코팅되지 않은 시험편에서 거의 동일한 결과를 얻었다. 이와같은 결과는 다른 연구자들과 일치하는 것이다.

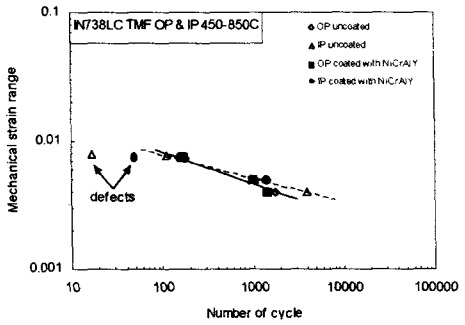

Fig. 6 Comparison of the OP and IP TMF lives of coated and uncoated IN738LC specimens.

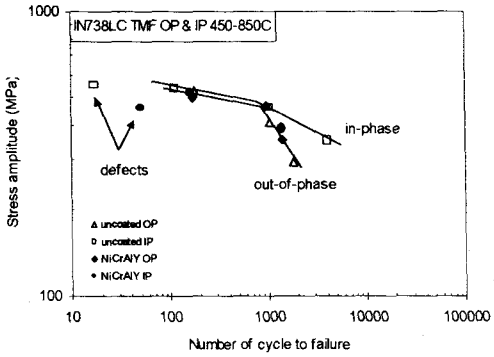

Fig. 7 Comparison of the TMF OP and IP lives of coated and uncoated IN738LC specimens.

3. 수명예측 모델과 적용

상기 실험결과와 같이 고온환경 하에서의 고온피로와 열기계피로 수명에는 피로, 크리프, 산화의 손상기구가 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 열기계피로 수명의 정확한 예측을 위하여는 이들 세가지 손상기구를 모두 고려하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 이와같은 세가지 중요한 요소를 모두 고려한 수명예측 모델에 대하여 검토하고자 한다.

3.1. 손상기구

고온피로 및 열기계 피로 수명을 예측하는 모델로서 사이클 당 전체 손상은 다음 식과 같이 피로, 산화, 크리프 항을 선형적으로 합산할 수 있을 것이다.

$$D_{tot} = D_{fat} + D_{ox} + D_{creep} \qquad (1)$$

피로 수명 N_f라고 하고 하면 상기의 식은 다음과 같이 표현할 수 있을 것이다.

$$\frac{1}{N_f} = \frac{1}{N_f^{fat}} + \frac{1}{N_f^{ox}} + \frac{1}{N_f^{creep}} \qquad (2)$$

3.1.1. 피로 손상

피로 손상은 비교적 낮은 온도 영역에서 주로 발생하는 것으로서 피로 수명을 나타낼 때는 다음과 같은 Coffin- Manson관계식으로 주로 나타내고 있다.

$$\frac{\Delta\varepsilon_{mech}}{2} = \frac{\sigma_f}{E}(2N_f^{fat})^b + \varepsilon'_f(2N_f^{fat})^c \qquad (3)$$

식 (3)은 450℃의 낮은 온도 영역과 빠른 변형률 속도인 $\dot{\varepsilon} = 1 \sim 4\ 10^{-3}\ \mathrm{sec}^{-1}$ 영역에서 주로 잘 맞는다고 밝히고 있다.

3.1.2. 환경(산화) 손상

고온에서의 환경은 피로 균열을 발생시키고 일단 발생한 균열은 균열선단에서 성장에 영향을 미치고 있다. 산화에 영향을 받으면 초기에는 산화보호막이 시험편 표면에 형성되고 층 하단에 게재물이 소모되면서 균열 선단과 경로에도 동일한 현상이 발생한다. 이러한 상태에서 기계적 하중이 작용하면 산화 스케일이 깨지고 발생하는 현상이 반복하게 되면서 균열의 성장에 영향을 미친다. 이러한 현상을 수식으로 표현하며 다음과 같다.

$$\frac{1}{N^{ox}} = \left[\frac{h_{cr}\,\delta_o}{B\,\phi^{ox}(K_p^{eff} + K'^{eff}_p)}\right]^{-1/\beta} \frac{2(\Delta\varepsilon_{mech})^{(2/\beta)+1}}{\dot{\varepsilon}^{1-(\alpha/\beta)}} \qquad (4)$$

여기에서 h_{cr} : 임계산화층의 두께, γ' : 고갈층의 두께, $\delta_o, B, \Phi^{ox}, K_p^{eff}, K'^{eff}_p, \gamma', \alpha, \beta$: 산화와 관련된 재료 상수들이다.

3.1.3. 크리프 손상

피로실험 중 크리프 손상은 압축과 인장 시에 모두 작용하는 것으로 가정하므로 크리프 손상은 온도, effective와 hydrostatic 응력 항으로 구분하여 다음과 같이 표현하고 있다.

$$D^{creep} = \int_0^t \phi^{creep} A \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right)\left(\frac{\alpha_1 \bar{\sigma} + \alpha_2 \sigma_H}{K}\right)^m dt \qquad (5)$$

여기에서 ϕ^{creep} : creep phasing factor, ΔH: activation energy, R: 개스상수, T:온도, $\bar{\sigma}$:effective stress, σ_H:hydrostatic stress, K:drag stress, α_1, α_2 : scaling factor등이다.

각 손상 항에서의 변수들은 다음 Table과 같다.

Table 3 Materials constants for the fatigue damage

E (MPa)	σ_f (MPa)	b	ε_f	c
178,000	520	-0.02	0.1975	-0.65

Table 4 Materials constants for the creep damage

A	m	ΔH (kJ/mol)	ξ^{creep}
$5.5\ 10^{7}$	6.5	246.0	0.9

Table 5 Materials constants for the oxidation damage

a	β	$B\ (s^{-0.5})$	$\delta_o\ (\mu m\ s^{-0.75})$	$D_o\ (\mu m^2/s)$	$Q\ (kJ/mol)$	$h_{cr}\ (\mu m)$	ξ^{ox}
0.95	1.50	$6.75\ 10^{-3}$	$2.16\ 10^{-10}$	matrix : 15.0 γ': $3.72\ 10^{-2}$	matrix : 125.28 γ' : 51.84	461.40	0.44

3.2. 수명예측 결과

450℃에서의 고온피로 수명을 예측한 결과는 Fig. 8과 같고 850℃에서의 고온피로 실험을 수명예측한 결과는 Fig. 9와 같다. 선으로 표시한 것이 예측된 결과이고 실험결과는 기호로 표시되어 있는데 변형률 속도에 따라 약간의 차이를 보이고 있다.

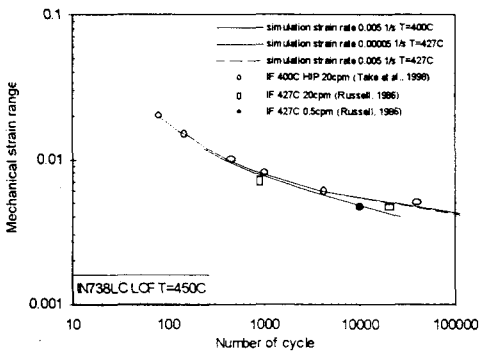

Fig. 8 Comparison between simulated and experimental LCF lives of uncoated IN738LC specimens tested at T=450°C.

낮은 변형률 속도에서는 실험결과와 약간의 차이를 보이고 있는데 이는 산화의 영향을 조금더 고려해야 할 것으로 보인다.

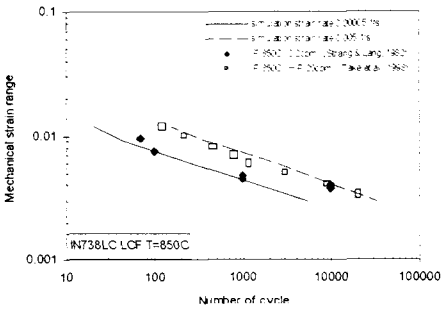

Fig. 9 Comparison between simulated and experimental LCF lives of uncoated IN738LC specimens tested at T=850°C.

Fig 10에서는 역상을, Fig. 11에서는 동상의 열기계피로 실험결과를 예측한 것으로서 동상 열피로 수명예측이 더욱 정확하게 일치하고 있는 것을 보여 주고 있다.

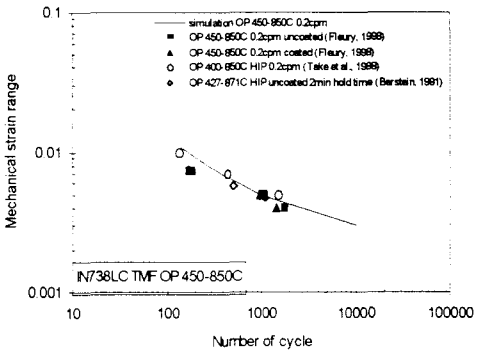

Fig. 10 Comparison between simulated and experimental lives of coated and uncoated IN738LC specimens tested under OP TMF 450-850℃.

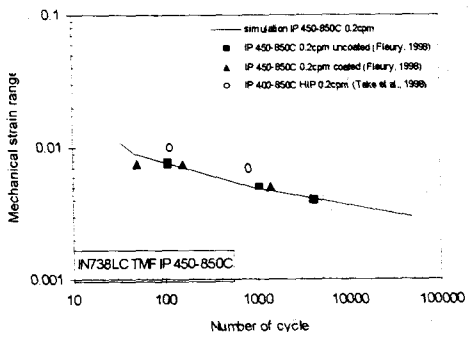

Fig. 11 Comparison between simulated and experimental lives of coated and uncoated IN738LC specimens tested under IP TMF 450-850℃.

4. 결 론

최근 국내에서 급증하고 있는 가스터빈용 블레이드의 재질인 IN738LC 재질을 이용하여 열기계 피로실험과 고온 피로실험을 수행하고 고온에서 발생하는 피로, 크리프, 산화 손상기구를 이용한 수명예측법을 본 실험에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 동상과 역상의 열기계 피로 수명과 최고온도인 850℃에서의 고온피로 수명을 비교한 결과 거의 동일한 수명을 보이고 있음을 알 수 있었다.

나. 코팅의 열기계피로 수명에 미치는 영향을 평가하고자 실험을 수행한 결과 본 재질에서는 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있었다.

다. 크리프, 산화, 피로 손상항을 선형적으로 합산하는 모델을 이용하여 예측한 결과 고온피로 실험과 열기계 피로실험 모두에서 잘 일치하고 있음이 밝혀졌다.

참고문헌

(1) Bernstein H.L., Grant T.S., McClung R.C. and Allen J.M., "Prediction of Thermal-Mechanical Fatigue Life for Gas Turbine Blades in Electric Power Generation", ASTM STP 1186, 1993, pp. 212-238.

(2) Chen W. and Wahi R.P., 1998, "Creep-Fatigue Behavior of Polycrystalline and Single Crystal Nickel-Base Superalloys IN738LC and SC16", in proceedings of the Conference *Materials for Advanced Power Engineering*, Part II, pp. 1069-1077.

(3) Fleury E. and Ha J.S., 2000, "Comparison of two Unified Viscoplasticity Models and Application to the Ni-base Superalloy IN738LC", *International Journal of the KSME*, submitted to publication.

(4) Jaske C.E., 1976, "Thermo-mechanical, Low-Cycle Fatigue of AISI 1010 Steel", in *Thermal Fatigue of Materials and Components*, ASTM STP 612, pp. 170-198.

(5) Karayaka M. and Sehitoglu H., 1991, "Thermo-mechanical Fatigue of Particulate Reinforced Aluminum 2xxx-T4", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 22A, pp. 697-707.

(6) Lemaitre J. and Chaboche J.L., 1990, *Mechanics of Solid Materials*, Cambridge University Press.

(7) Neu R. W. and Sehitoglu H., 1988, "Thermo-mechanical Fatigue, Oxidation and Creep, Part I: A Study of Damage Mechanisms, Part II: A Life Prediction Model", *Metallurgical Transactions A*, vol. 20A, pp. 1755-1767.

(8) Nitta A., 1993, "Study of the Thermo-Mechanical Fatigue of High Temperature Materials for Power Plants", PhD. thesis, CRIEPI.

(9) Remy L. and Skelton, R.P., 1992, "Damage Assessment of Components Experiencing Thermal Transients", in *High Temperature Structural Design*, Mechanical Engineering Publications, pp. 283-315.

(10) Sehitoglu H., 1992, "Thermo-Mechanical Fatigue Life Prediction Methods", in *Advances in Fatigue Lifetime Predictive Techniques*, ASTM STP 1122, pp. 47-76.

(11) Shankar S., Keonig D.E. and Dordi L.E., 1981, "Vacuum Plasma Sprayed Metallic Coatings", *Journal of Metals*, Vol. 33 (10), pp. 13-20.

(12) Strang A. and Lang E., 1982, "Effect of Coatings on the Mechanical Properties of Superalloys", in proceedings of the Conference *High Temperature Alloys for Gas Turbine*, R. Brunetaud & Riedel, Eds., pp. 469-506.