

소성변형률 에너지밀도를 이용한 In738LC의 고온저주기피로수명 예측

Prediction of Low-Cycle Fatigue Life of In738LC Using Plastic Strain Energy Density

위성욱¹, 석창성^{1,#}, 구재민¹, 이정민¹
Sung Uk Wee¹, Chang Sung Seok^{1,#}, Jae Mean Koo¹, and Jeong Min Lee¹

¹ 성균관대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)
Corresponding Author / E-mail: seok@skku.edu, TEL: +82-31-290-7446
ORCID: 0000-0002-1205-9996

KEYWORDS: Gas turbine (가스터빈), Low-cycle fatigue (저주기피로), Life prediction (수명예측)

Gas turbine blades are important parts of a power plant, and thus, it is necessary to be able to predict the low-cycle fatigue life of the blades. In this study, a low-cycle fatigue test of In738LC, which is used primarily in gas turbine blade manufacture, was performed at various high temperatures (750°C, 800°C, and 850°C). From the test results, the stress-strain curve and the stress-strain hysteresis loop were obtained. It was established that In738LC has no strain hardening or softening. The life prediction equations for low-cycle fatigue were derived using the Coffin-Manson equation and the energy model. In conclusion, one equation for predicting the life low-cycle fatigue was obtained using the energy level with temperature as the varying factor.

Manuscript Received: May 8, 2018 / Revised: October 22, 2018 / Accepted: November 1, 2018

1. 서론

일반적으로 고온에서 사용되는 금속부품들은 상온에서와는 다른 거동을 보이는 것으로 알려져 있다.¹⁻⁵ 특히 가스터빈 블레이드는 장시간 동안 고온의 환경에 노출되어질 뿐 만 아니라, 사용 중 잦은 가동 및 정지특성으로 인해 저주기적인 피로를 받기 때문에 많은 연구자들이 이에 대한 연구를 수행하여 왔다.⁶ 이와 같은 가혹한 고온 환경 하에서 사용되는 가스터빈 설비의 파손방지 및 신뢰성을 확보하기 위해 블레이드의 기계적 특성에 관한 연구가 필수적이다.^{7,8} 오늘날 가스터빈의 효율을 높이기 위해서 입구온도를 점점 더 상승시키는 추세이지만, 이는 가스터빈 블레이드의 수명을 단축시키는 원인으로 작용하기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위해서 가스터빈 블레이드에는 다양한 냉각기술들이 적용되고 있다.⁹⁻¹¹ 가스터빈의 입구온도와 적용 되는 냉각기술의 조건에 따라 가스터빈 블레이드가 노출되는 온도조건이 달라지기 때문에 가스터빈 블레이드의 다양한 온도에 따른 저주기피로수명 예측은 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 가스터빈 블레이드 부

품의 재료로 널리 사용되는 니켈기 초내열 합금인 Inconel738LC에 대하여 각각 750°C, 800°C, 850°C에서 저주기피로 시험을 수행하였다. 시험 결과로부터 수명-변형률 선도와 히스테리시스루프를 도출하였으며, 수명예측에 널리 사용되는 Coffin-Manson^{12,13} 및 Basquin¹⁴의 식과 소성변형률 에너지밀도를 이용한 방법으로 고온에서 온도변화에 따른 수명예측식을 제시한 후, 비교 고찰하였다.

2. 시험 장치 및 방법

인장시험 및 저주기 피로시험은 가스터빈 블레이드의 재료로 사용되는 Inconel738LC에 대하여 수행하였으며 시편의 화학적 조성은 Table 1에 나타내었다. 시편의 저주기 피로 시험에 앞서 시험조건을 도출하기 위하여 저주기 피로 시험시의 온도조건인 750°C, 800°C, 850°C에서 인장시험을 수행하였다. 인장시험은 저주기피로시험과 동일한 시험편을 사용하여 시험을 수행하였다. 시험편의 형상은 Fig. 1와 같이 외경 16 mm, 내경 4 mm, 평행부

Table 1 Chemical compositions of IN738LC (wt%)

Cr	Mp	C	Co	Fe	Zr	Nb
16.2	1.71	0.10	8.78	0.2	0.04	0.84
Al	B	Ti	Ta	W	Ni	
3.35	0.0008	3.37	1.77	2.63	Balance	

Table 2 Experimental conditions

Temperature	Strain (%)			
750°C	0.602	0.708	0.813	0.964
800°C	0.560	0.710	0.820	1.000
850°C	0.483	0.573	0.625	0.983

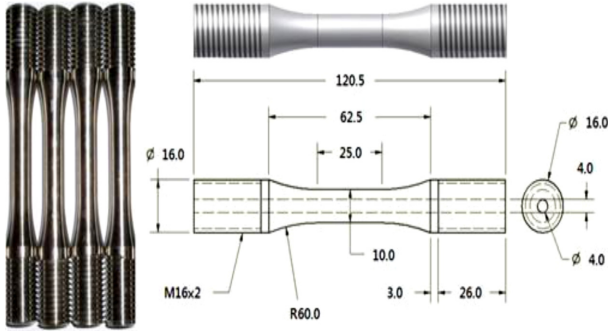


Fig. 1 Dimension of specimen

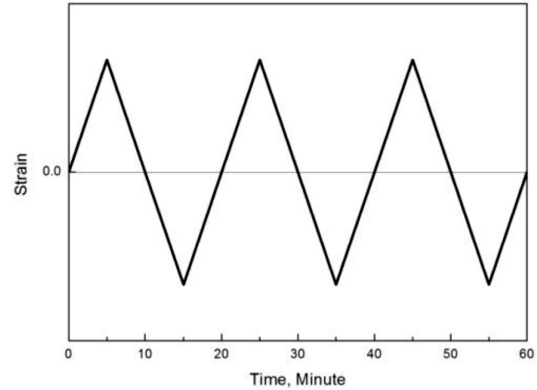


Fig. 3 The strain-time curve



Fig. 2 Equipment for low cycle fatigue test

길이를 25 mm로 하였으며, ASTM E-8을 참고하여 1 mm/min의 속도로 시험을 수행하였다. 인장시험으로부터 응력-변형률 선도를 도출하였으며, 이로부터 저주기 피로 시험에서의 적정 피로 변형률 진폭을 결정하였다.

고온에서의 온도의 변화에 따른 Inconel738LC의 저주기피로 특성을 평가하기 앞서, 동일한 시편으로 750°C, 800°C, 850°C에서 각각 인장시험을 수행하였다. 인장시험 결과 인장강도는 930 MPa, 843 Mpa, 756 MPa으로 온도가 상승할수록 인장강도는 낮게 평가되었으며, 연신률은 증가하였다. 또한, 1.5%이내의 변형률에서 탄성 및 탄소성영역의 거동을 나타냈다. 인장시험 결과로부터 각 온도에 대한 저주기피로시험의 변형률 조건을 선정하였으며, 이를 Table 2에 나타내었다. 각 온도별로 4개 조건에서 피로 시험을

수행하였으며, 시험을 수행하기 앞서 시험편이 충분히 열평형 상태에 도달하도록 시험편이 목표온도에 도달한 이후 3시간 동안 온도를 유지시켰다. 온도의 측정은 K-Type의 Thermocouple을 이용하여 시험편의 평행부의 온도를 측정하였다. 시험장비로는 25 ton SI 단위용량의 전기모터식 시험기와 1300°C 용량의 고온전기로 사용하였으며, Fig. 2에 나타내었다. 시간의 변화에 따른 하중 및 변형률을 측정하였으며 피로수명은 시험편의 완전파단을 기준으로 하였다.

시험방법은 Fig. 3과 같이 삼각파형태로서, Dwell Time없이 R = -1의 변형률비(Strain Ratio)를 적용하여 인장, 압축이 반복되도록 하였고, 1 Cycle에 20분의 속도로 시험을 수행하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 Coffin-Manson Method

저주기피로시험 결과로부터 온도별 응력-변형률 히스테리시스 루프 선도를 획득 하였으며, Fig. 4에 파단수명의 1/2에 해당하는 안정된 응력-변형률 히스테리시스루프를 나타내었다. 히스테리시스루프에서 전체 변형률은 탄성변형률과 소성변형률의 합으로 나타낼 수 있는데, 소성변형률은 응력이 0일 때, 히스테리시스루프의 폭에 해당하며 탄성변형률은 전체변형률에서 소성변형률을 제외한 값과 같다.

Coffin-Manson^{12,13}과 Basquin¹⁴은 변형률과 수명의 관계를 Log-Log 좌표에서 선형으로 나타낼 수 있으며, 그 관계식을 식(1)과 같이 제시하였다.

$$\Delta\epsilon/2 = \sigma_f'/E(2N_f)^b + \epsilon_f'(2N_f)^c \tag{1}$$

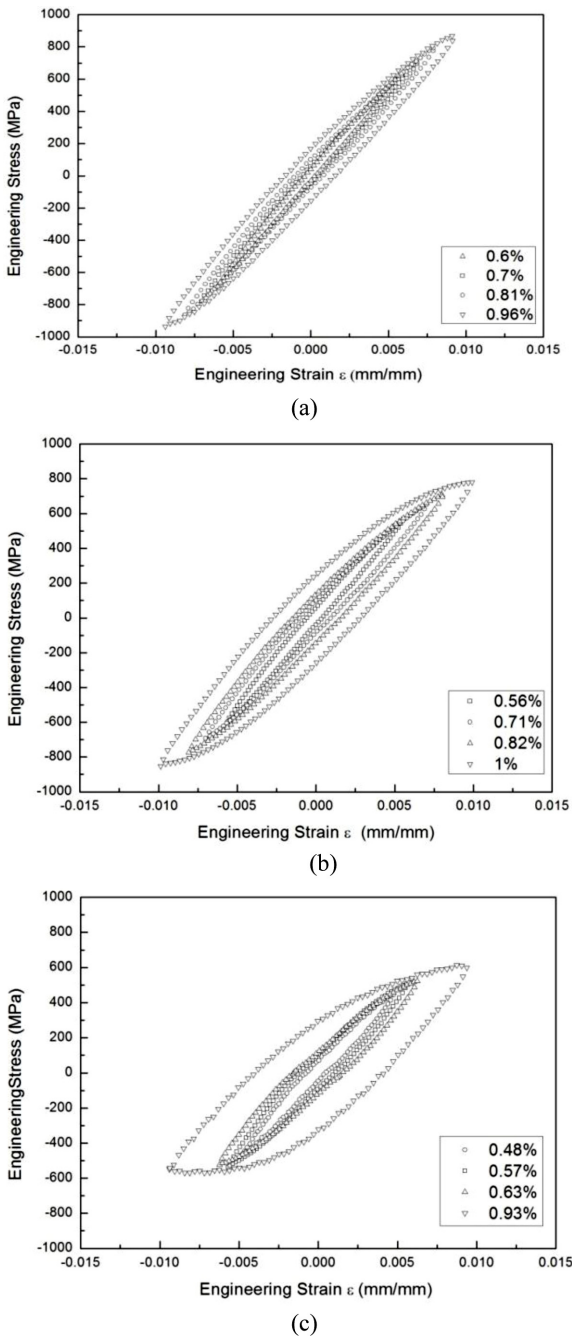


Fig. 4 Stress-Strain hysteresis loop (a) 750°C, (b) 800°C, (c) 850°C

Fig. 4로부터 온도별 변형률 조건에서 소성변형률과 탄성변형률을 구할 수 있으며, Coffin-Manson과 Basquin식을 이용하여 온도별 수명예측식 및 변형률-수명 선도를 식(2)에서 (4)와 Fig. 5에 각각 나타내었다.

$$\Delta\epsilon_{750}/2 = 0.0134(2N_{f,750})^{-0.1449} + 0.1054(2N_{f,750})^{-1.397} \quad (2)$$

$$\Delta\epsilon_{800}/2 = 0.0114(2N_{f,800})^{-0.1346} + 0.0236(2N_{f,800})^{-0.868} \quad (3)$$

$$\Delta\epsilon_{850}/2 = 0.0075(2N_{f,850})^{-0.1029} + 0.0312(2N_{f,850})^{-0.844} \quad (4)$$

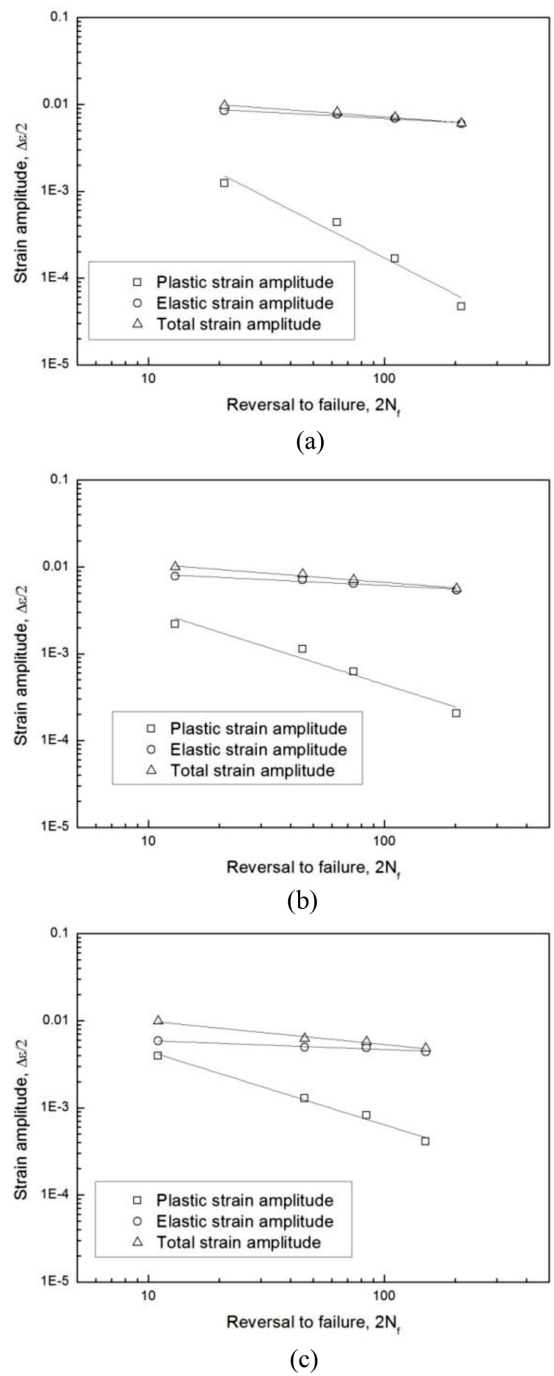


Fig. 5 Strain-Life curve (a) 750°C, (b) 800°C, (c) 850°C

Fig. 5의 변형률-수명 선도로부터 동일 온도에서 변형률이 증가할수록 수명이 짧아졌으며, 동일 변형률에서는 온도가 증가할수록 수명이 더 짧게 나타남을 확인하였다. 각 온도에서 최저변형률과 최고변형률에 해당하는 탄성변형률과 소성변형률의 증가량을 비교하였을때, 750°C의 경우 탄성변형률은 1.4배 증가한 반면 소성변형률은 약 26.4배 증가하였으며 800°C의 경우 탄성변형률은 1.4배, 소성변형률은 10.6배 증가하였고 850°C의 경우 탄성변형률이 1.3배, 소성변형률이 9.6배 증가하였다. 이는 저주기 피로 수명에서 소성변형률이 수명에 미치는 영향이 지배적임을 알 수

있으며 이는 재료가 흡수한 소성 변형률에너지를 측정하여 저주기피로수명과 관계의 비교한 Ellyin¹⁵의 연구 결과와 일치한다.

3.2 Hysteresis Energy Model

Ellyin¹⁶은 저주기 피로시험의 Stress-Strain 히스테리시스 루프로부터 변형률 에너지를 이용하여 피로파괴의 모델을 제시하였다. Ellyin¹⁶의 모델에서 R. Liu¹⁷는 소성변형률 에너지밀도를 이용한 히스테리시스 에너지모델을 식(5)와 같이 제시하였다.

$$D = \sum_{i=1}^{N_f} D_i = \sum_{i=1}^{N_f} (W_i/W_0)^\beta = 1 \quad (5)$$

D 는 i 번째 사이클의 피로데미지, W_i 는 i 번째 사이클에서의 소성변형률 에너지밀도를 나타내며, W_0 와 β 는 재료상수이다. W_0 는 재료가 수용할 수 있는 최대 에너지용량을 나타내는 파라미터이다. 따라서, W_0 가 클수록 재료의 피로파괴에 더 큰 에너지가 필요하다. 파손까지의 피로데미지를 1이라 하였을 때, 전체 파손피로 데미지 D 는 각 사이클당 피로데미지의 합으로 나타낼 수 있다.

사이클이 진행에 따른 응력의 변화를 확인하기 위해 각 온도별 Cyclic-Stress Responses를 Fig. 6에 나타내었다. 700°C의 경우 변형률이 0.6%, 0.7%일때, 1 - 2 Cycle에서 경화현상을 보이다 점차 안정된 상태를 보인다. 800°C의 경우 모든 변형률에서 경화 또는 연화 현상 없이 안정된 상태를 보이며, 850°C에서는 0.98%의 변형률 조건을 제외하고는 모두 변형률경화 또는 변형률연화 현상 없이 안정화된 상태를 나타냈다. 따라서 i 번째 사이클의 소성변형률 에너지 밀도 W_i 를 파단수명의 1/2에 해당하는 안정화된 소성변형률 에너지밀도 W_a 와 같다고 가정한다면 식(5)는 식(6)과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{1}{N_f} = \left(\frac{W_a}{W_0}\right)^\beta \quad (6)$$

식(6)을 안정화된 소성변형률 에너지밀도 W_a 에 관하여 정리하면 식(7)과 같다.

$$W_a = W_0 \cdot N_f^{-1/\beta} \quad (7)$$

식(7)로부터 안정화된 소성변형률 에너지밀도 W_a 와 수명 N_f 과의 관계를 log 스케일 좌표에서 선형으로 나타낼 수 있다. Fig. 4의 히스테리시스루프의 면적으로부터 각 온도 및 변형률별 소성 변형률의 에너지밀도 W_a 를 도출하였다. 변형률이 증가할수록 소성 변형률 에너지밀도 W_a 가 증가하였으며, 이는 높은 변형률로 갈수록 한 사이클당 더 많은 에너지가 필요함을 나타낸다.

$$W_a = 57.35 \cdot N_f^{-0.8056} \quad (8)$$

Fig. 4에서 각 온도별 최대 변형률을 비교하였을 때, 800°C의 경우 최대응력이 약 780 MPa로 나타나지만 750°C에서의 최대응력은 887 Mpa로 변형률이 더 작음에도 불구하고 더 큰 응력을

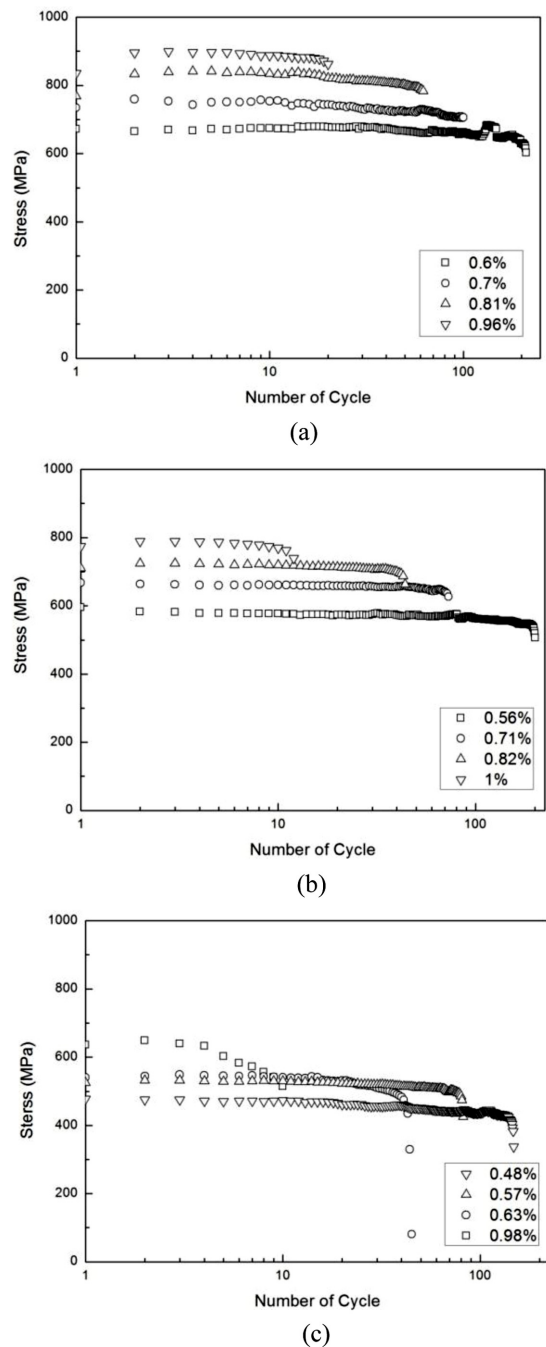


Fig. 6 Result of cyclic-stress responses (a) 750°C, (b) 800°C, (c) 850°C

나타낸다. 마찬가지로 750°C와 850°C를 비교하였을 때 850°C에서 더 큰 변형률을 갖지만 더 작은 응력을 나타낸다. 따라서, 고온으로 갈수록 같은 변형률에 필요한 응력이 더 작은 것으로 판단된다. 식(2)에서 식(4)의 경우 온도변화에 따른 소성변형률의 값의 변화만 반영하지만 소성변형률 에너지밀도를 이용한 방법은 소성변형률뿐만 아니라 고온으로 인한 응력값의 변화까지 모두 반영되어 온도에 독립적인 하나의 선도로 나타낼 수 있다. 따라서 소성변형률 에너지 밀도와 피로수명의 관계를 식(7)을 이용하여 수명예측식(8)을 도출하였으며, 수명예측선도를 Fig. 7에 나타내

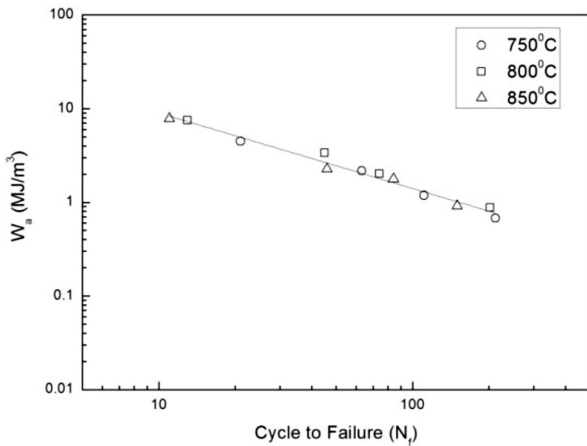


Fig. 7 Plastic strain energy density-life curve

었다. Coffin-Manson과 Basquin식을 이용한 수명예측방법은 각 온도별로 수명예측식을 구해야 하기 때문에 온도와는 독립적인 하나의 선도로 나타낼 수 있는 소성변형률 에너지밀도를 사용한 수명예측방법이 더 간단하고 효율적인 방법으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 니켈기 초내열합금 Inconel738LC에 대하여 온도와 변형률의 변화에 따른 저주기 피로시험을 수행하였다. 저주기 피로시험을 통하여 온도별 변형률-수명 선도 및 히스테리시스 루프를 도출 하였고, 그 결과로부터 소성변형률 에너지밀도를 이용하여 수명예측식을 도출하였으며 결론은 다음과 같다.

(1) 700°C에서 850°C로 온도가 증가함에 따라 저주기 피로수명이 점차 감소하는 결과를 보였으며 소성 변형률은 증가하는 경향을 보인다. 시험 결과로부터 각 온도별 변형률-수명 선도를 도출하였으며, Coffin-Manson과 Basquin의 식을 이용하여, 수명예측식을 제시하였다.

(2) 소성변형률 에너지밀도를 이용한 수명예측식을 제시하였으며, 재료의 경화 및 연화 현상이 없이 안정된 상태의 경우 소성변형률 에너지밀도를 이용하여 온도와는 독립적인 저주기피로수명예측식으로 나타 낼 수 있다.

(3) Coffin-Manson 과 Basquin식을 이용한 수명예측은 온도의 변화에따른 소성변형률만 반영하지만, 소성변형률 에너지밀도를 이용한 수명예측은 온도에 따른 소성변형률 및 응력의 변화까지 반영하여 온도에 독립적인 하나의 선도로 나타낼 수 있기 때문에 소성변형률 에너지밀도를 이용한 방법이 저주기피로수명예측에 적용하는데 더 간단하고 적합한 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 한국연구재단(NRF), 산업통상자원부(MOTIE) 및 한

국에너지기술평가원(KETEP)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다(No. 20161120100370), (No. 2015R1A2A1A10055230).

REFERENCES

1. Kim, K.-M. and Kang, C.-G., "Forgebility Evaluation of SNCM 220 Steel by Warm Compression Test and Microstructure Behaviors Characteristics," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 105-110, 2016.
2. Park, D.-H. and Kwon, H.-H., "Development of Automobile Engine Mounting Parts Using Hot-Cold Complex Forging Technology," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol. 3, No. 2, pp. 179-184, 2016.
3. Petre nec, M., Polák, J., Tobiáš, J., Šmíd, M., Chlupová, A., et al., "Analysis of Cyclic Plastic Response of Nickel Based IN738LC Superalloy," International Journal of Fatigue, Vol. 65, pp. 44-50, 2014.
4. Vasseur, E. and Rémy, L., "High Temperature Low Cycle Fatigue and Thermal-Mechanical Fatigue Behaviour of an Oxide-Dispersion-Strengthened Nickel-Base Superalloy," Materials Science and Engineering: A, Vol. 184, No. 1, pp. 1-15, 1994.
5. Mahobia, G., Paulose, N., Mannan, S., Sudhakar, R., Chattopadhyay, K., et al., "Effect of Hot Corrosion on Low Cycle Fatigue Behavior of Superalloy IN718," International Journal of Fatigue, Vol. 59, pp. 272-281, 2014.
6. Wright, I. G. and Gibbons, T., "Recent Developments in Gas Turbine Materials and Technology and Their Implications for Syngas Firing," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, No. 16, pp. 3610-3621, 2007.
7. Brooks, J. and Bridges, P., "Metallurgical Stability of Inconel Alloy 718," Superalloys, Vol. 88, pp. 33-42, 1988.
8. Evans, W., Screech, J., and Williams, S., "Thermo-Mechanical Fatigue and Fracture of INCO718," International Journal of Fatigue, Vol. 30, No. 2, pp. 257-267, 2008.
9. Al-Zurfi, N. and Turan, A., "Les of Rotational Effects on Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer Coefficient in a Gas Turbine Blade with One Row of Air Film Injection," International Journal of Thermal Sciences, Vol. 99, pp. 96-112, 2016.
10. Yao, Y., Zhang, J.-Z., and Wang, L.-P., "Film Cooling on a Gas Turbine Blade Suction Side with Converging Slot-Hole," International Journal of Thermal Sciences, Vol. 65, pp. 267-279, 2013.
11. Tawancy, H., Mohammad, A., Al-Hadhrami, L., Dafalla, H., and Alyouf, F., "On the Performance and Failure Mechanism of Thermal Barrier Coating Systems Used in Gas Turbine Blade Applications: Influence of Bond Coat/Superalloy Combination," Engineering Failure Analysis, Vol. 57, pp. 1-20, 2015.

12. Coffin Jr, L. F., "A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal," Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 76, pp. 931-950, 1954.
13. Manson S. S., "Behavior of Materials Under Conditions of Thermal Stresses," NACA Technical Report 1170, pp. 317-350, 1954.
14. Basquin, O., "The Exponential Law of Endurance Tests," in Proc. of American Society for Testing and Materials, pp. 625-630, 1910.
15. Ellyin, F., "Effect of Tensile-Jean-Strain on Plastic Strain Energy and Cyclic," Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 107, No. 2, pp. 119-125, 1985.
16. Ellyin, F. and Kujawski, D., "Plastic Strain Energy in Fatigue Failure," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 106, No. 4, pp. 342-347, 1984.
17. Liu, R., Zhang, Z., Zhang, P., and Zhang, Z., "Extremely-Low-Cycle Fatigue Behaviors of CU and CU-AL Alloys: Damage Mechanisms and Life Prediction," Acta Materialia, Vol. 83, pp. 341-356, 2015.



Jeong Min Lee

Ph.D. researcher in the Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His research interest is Fracture Mechanics .

E-mail: lee5317@hanmail.net



Sung Uk Wee

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His research interest is Fracture Mechanics.

E-mail: sinkill2@naver.com



Chang Sung Seok

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His research interest is Fracture Mechanics.

E-mail: seok@skku.edu



Jae Mean Koo

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University. His research interest is Fracture Mechanics.

E-mail: kjm9000@hanmail.net