Research Paper DOI: http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2016.20.2.011

DCPD법을 이용한 분말야금 니켈기 초내열합금의 고온 피로균열진전거동

나성현[a] · 오광근[a] · 김홍규[b] · 김동훈[b] · 김재훈[a,*]

Fatigue Crack Growth Behavior of Powder Metallurgical Nickel-based Superalloy using DCPD Method at Elevated Temperature

Seonghyeon Na[a] · Kwangkeun Oh[a] · Hongkyu Kim[b] · Donghoon Kim[b] · Jaehoon Kim[a,*]
[a] *School of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Korea*
[b] *The 4th R&D Institute - 4th Directorate, Agency for Defense Development, Korea*
[*] *Corresponding author. E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr*

ABSTRACT

Powder metallurgy nickel based superalloy has been used in a high temperature part of turbine engine for airplane. The fatigue crack growth behavior was investigated using CT specimens for the materials at room temperature(R.T.), 600℃ and 700℃. The direct current potential drop(DCPD) method suggested by ASTM E647 was used to measure the crack length during fatigue crack growth at various stress ratios. The fatigue crack growth rate at R=0.5 was faster than that at R=0.1 for all temperature conditions and increased with the increase of stress ratio and temperature. Fractography was conducted for analysis of fracture mechanism.

초 록

분말야금 니켈기 초내열합금은 항공기 터빈 엔진의 고온용 부품으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 상온, 600℃ 및 700℃에서 CT시편을 이용하여 피로균열진전거동이 평가되었다. ASTM E647에서 제시한 직류전위차법이 피로균열진전 동안에 균열 길이를 측정하기 위하여 사용되었다. 응력비 0.5에서 피로균열진전속도는 응력비 0.1에서와 비교하여 더 빠르게 나타났다. 피로균열진전속도는 응력비와 온도의 증가와 함께 증가하였다. 파단면 관찰은 파괴메커니즘 분석을 위해 수행하였다.

Key Words: Direct Current Potential Drop(직류전위차법), Powder Metallurgy(분말야금), Nickel Based Superalloy(니켈기 초내열합금), Fatigue Crack Growth rate(피로균열진전속도)

Received 1 December 2015 / Revised 9 January 2016 / Accepted 14 March 2016
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548
[이 논문은 한국추진공학회 2015년도 추계학술대회(2015. 11. 25-27, 경주 현대호텔) 발표논문을 심사하여 수정 · 보완한 것임.]

1. 서 론

분말야금은 직경이 1 mm 이하의 입자 형상을

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

가진 금속 분말을 압축 및 응축시켜 합금의 형태로 제조하는 방법을 이용하여 제조된다. 이러한 분말야금 합금의 장점은 복잡한 형상의 기계부품을 제작하는데 유리하고, 제조자가 원하는 성분 조성비에 맞춰 제작이 가능하며, 기존 금속에 비해 상당히 작은 미세결정구조를 가진다. 분말야금 합금의 종류는 니켈기나 몰리브덴기 등을 사용한다. 니켈기 초내열합금은 고온 강도, 피로 저항성, 내산화성 및 내부식성이 우수하여 항공기용 엔진터빈이나 터빈블레이드의 부품으로 사용된다.

이러한 니켈기 초내열합금에 대한 국내 연구동향을 보면, 오영진 등[1]은 직류전위차법을 이용하기 위해 직접적으로 장비를 구축하고, 육안으로 균열을 측정하기 어려운 원자력 발전소 부품의 균열성장을 예측하는 방법에 대하여 연구하였다.

국외 연구동향을 보면, Zhang 등[2]은 니켈기 초내열합금의 강화기구의 대표적인 원소인 γ'의 형상 및 크기에 따른 고온 균열진전속도의 변화를 연구하였다. 또한 인장시험을 통한 기계적 물성을 이용하여 피로균열진전속도의 예측 방법을 제안하고, 시험하였다. Luo 등[3]은 분말야금 니켈기 초내열합금인 Udimet720에 대해서 하한계 영역에서 피로균열거동을 연구하였으며, 하한계 영역의 균열에 대한 피로파면의 특징을 분석하였다. Yang 등[4]은 분말야금 니켈기 초내열합금인 GH4169에 대한 고온 피로균열진전시험을 통해 균열선단의 소성역 크기와 결정립 크기의 차이로부터 균열진전에 대한 상관관계를 연구하였다.

본 논문에서는 국내에서 개발된 항공기 터빈 디스크에 사용되는 분말야금 니켈기 초내열합금의 피로균열진전거동을 평가하였다. 이러한 거동은 상온 및 고온에서 직류전위차법을 이용한 피로균열진전시험을 수행하여 분석되었다. 터빈 디스크의 다양한 작동 조건을 고려하기 위해서 온도와 응력비 변화를 평가하였고, 파괴기구를 분석하기 위하여 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 피로파면을 관찰하였다.

2. 이론적 배경

2.1 피로균열진전속도

일정한 진폭 하중에서 피로균열진전에 영향을 미치는 주요 인자는 응력확대계수범위, 응력비 및 온도이다. 피로균열진전거동에 대한 시험 평가는 ASTM 647[5]규정에서 제시한 피로균열진전속도와 응력확대계수범위의 관계가 사용된다. 피로균열진전속도, da/dN는 Eq. 1과 같이 피로균열진전길이, a_i와 피로 반복사이클, N_i의 인접한 두 점사이의 기울기로부터 시컨트법(Secant method)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \tag{1}$$

Eqs. 2와 3은 선형탄성파괴역학에서 균열 주위의 응력확대계수범위 ΔK를 평가하는 식으로 ASTM E647에서 제시되어 있다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} F(\alpha) \tag{2}$$

$$F(\alpha) = \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}}(0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \tag{3}$$

여기서, ΔP는 피로하중범위, B는 시험편의 두께, W는 시험편의 폭, $F(\alpha)$는 시험편 형상에 대한 보정계수, α는 a/W, a는 균열길이이다. $\triangle K$는 응력확대계수범위로, 최대 및 최소 응력을 통해 도출한 응력확대계수 $K_{\max}$와 $K_{\min}$의 차를 통해 나타낼 수 있다. 피로균열진전거동은 da/dN과 $\triangle K$를 이용하여 평가하며, 3개의 영역으로 구분된다. 영역 I은 하한계 영역으로, 응력확대계수범위가 감소함에 따라 균열진전속도가 급격하게 느려지므로 균열이 더 이상 진전하지 않는 영역이다. 영역 II는 da/dN와 $\triangle K$가 거의 직선을 이루는 구간으로, Paris법칙을 만족한다. 영역 III은 피로균열불안정 영역으로, 재료의 최종 파단이 일어나는 영역이므로 da/dN이 급격하

게 증가한다. 피로균열진전속도는 피로균열 안정성장영역인 영역 II에서 Eq. 4와 같이 Paris법칙에 의한 $da/dN-\triangle K$ 의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dN}= C(\triangle K)^m \tag{4}$$

여기서, C 와 m은 실험에서 결정되는 재료상수이다. 그리고 균열진전속도와 응력확대계수범위의 관계는 영역 II의 양대수 좌표에서 직선으로 정리할 수 있다.

3. 재료 및 시험방법

3.1 재료 및 시험편

분말야금 초내열합금은 니켈을 기지(matrix)로 사용하는 재료들을 분말로 제작하고 성형과 소결 과정으로 제작된 합금이다. 이 재료는 기존의 초내열합금보다 상당히 작은 결정립 크기를 가지고 있고, 상온 및 고온에서 높은 강도를 가진다. 본 논문에서 사용된 재료의 니켈의 함량은 약 57% 정도이다. Table 1은 니켈기 초내열 합금의 기계적 특성을 나타낸 것이다. 피로균열진전시험을 수행하기 위한 시험편은 ASTM E647 규격에 의거하여 제작하였다. Fig. 1은 컴팩트 인장(compact tension) 시험편의 형상을 나타낸 것으로, 두께는 8 mm이다. 시편의 노치부는 균열을 용이하고 균일하게 발생하도록 와이어 방전가공에 의해 1 mm 깊이로 가공하였다. 피로예균열은 최대 하중 12 kN 범위에서 최대 응력과 최소 응력의 비로 나타내는 응력비, R은 0.1로 하고, 파형은 정형파(sine wave), 피로시험의 주파수는 10 Hz로 하여 CT 시편의 노치선단으로부터 1.3 mm이상을 생성하였다.

Table 1. Mechanical properties of the material.

Temp. (℃)	σ_{ys} (MPa)	σ_{uts} (MPa)	Elongation (%)	R.A.* (%)
R.T.	1,186	1,537	21.6	21.6
600	1,129	1,414	12.1	12.8
700	1,120	1,393	20.5	11.3

*Reduction of Area

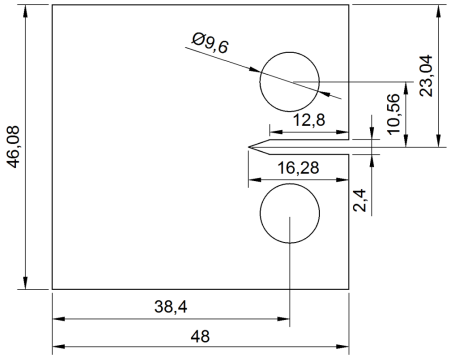


Fig. 1 Configuration of test specimen.

3.2 시험장치 및 방법

본 논문에서 사용된 시험방법은 ASTM E647에서 제시한 직류전위차법을 이용하였다. 이는 전류가일정할 때 저항의 변화에 따라 전위차가 변하는 옴의 법칙을 이용한 것으로, 고온에서 피로균열진전시험 중 정전류를 시험편에 지속적으로 인가하여 데이터 수집장치를 통해 균열길이를 측정하여 연속적으로 기록하는 것이 가능하다. 직류전위차법에 대한 장점은 한번 보정곡선을 얻으면 시험편의 형태 및 전압 측정 위치가 동일할 때 시험온도, 시험환경에 무관하게 사용할 수 있는 것이다. Eq. 5는 ASTM E647에서 제시한 직류 전위차법을 이용한 균열길이에 대한 환산 식을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} a/W = & -0.5051 + 0.8857(V/V_r) \\ & - 0.1398(V/V_r)^2 + 0.0002398(V/V_r)^3 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서, V_r은 시험 전 측정된 초기 균열길이에서 전위차, V는 시험을 진행하면서 변화되는 균열길이 a에서 전위차, W는 시험편의 폭이다. 균열길이에 대한 환산식은 a/W가 0.24~0.7의 범위에서 적용하도록 되어 있다.

시험은 MTS 810을 사용하여 하중 제어방식으로 수행하였다. 시험지그(jig)는 고온에서 변형을

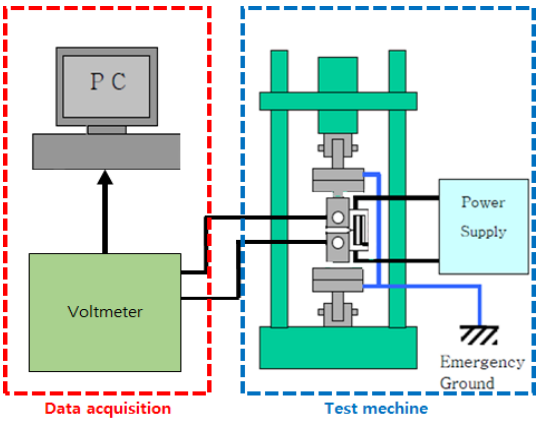


Fig. 2 Schematic diagram of direct current potential drop system.

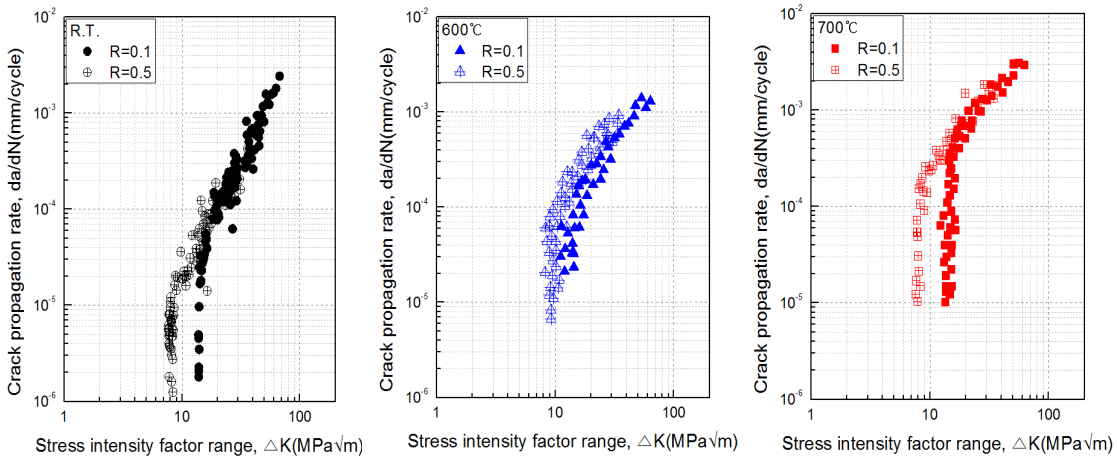
Fig. 3 Insulation apparatus for DCPD.

막기 위하여 초내열합금인 Inconel625를 이용하여 제작하였다. Fig. 2는 직류 전위차법에 대한 시험장비의 개략도를 나타낸 것이며, 데이터 수집 장치, 전원공급기, 절연치구로 구성된다. Fig. 3은 절연치구를 나타낸 것이다. 절연치구는 절연성이 높은 베크라이트(bakelite)를 사용하여, 시험장비에 유입되는 전류를 차단하도록 하였다. 또한 고온 시험 중 온도가 시험장비에 열전달 현상을 억제하기 위해 냉각수를 주입할 수 있도록 제작하였다. 시험조건은 정형파에서 10 Hz의 주파수, 응력비 R은 0.1 및 0.5이다. 피로시험의 분위기 온도는 최대 1200℃까지 온도를 조절할 수 있도록 자체 제작한 고온로를 이용하였으며, K-type의 열전대(Thermocouple)를 이용하여 온도를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 피로균열진전속도의 응력비 영향

Fig. 4는 상온, 600℃ 및 700℃에서 응력비 변화에 대한 피로균열진전속도(da/dN) 와 응력확대계수범위($\triangle K$)의 관계를 log 대 log 좌표로 도시한 것이다. Fig. 4(a)의 상온에서 피로균열진전속도는 낮은 응력확대계수범위에서 응력비가



(a) R.T. (b) 600℃ (c) 700℃

Fig. 4 da/dN–△K curves at various temperature.

Table 2. Material constants at various temperatures.

Temp.	Stress ratio(R)	C	m
R.T.	0.1	8.35×10^{-12}	2.53
	0.5	3.42×10^{-11}	2.33
600℃	0.1	2.04×10^{-11}	2.47
	0.5	8.93×10^{-10}	2.01
700℃	0.1	1.14×10^{-8}	1.68
	0.5	2.99×10^{-8}	1.58

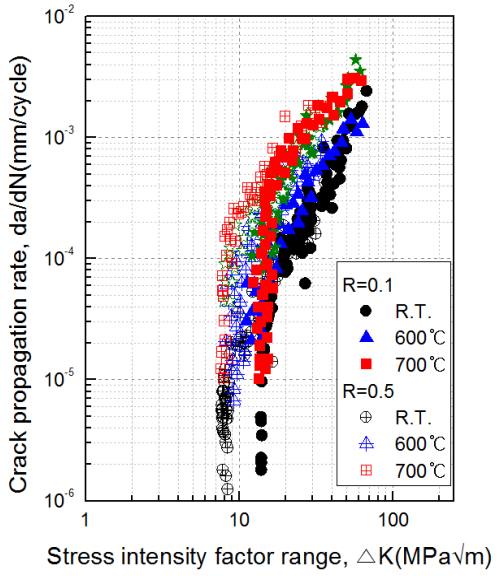


Fig. 5 Results of da/dN-△K curves.

클수록 매우 빠르고 응력확대계수범위가 커질때 응력비의 영향이 점진적으로 감소되어 최종파단에서 동일한 속도를 나타내고 있다. 이는 최종파단의 피로파괴가 재료의 파괴인성에 의존하기 때문이다. Fig. 4(b) 및 (c)의 600℃ 및 700℃에서 균열진전속도도 동일한 낮은 응력확대계수범위에 대해 응력비가 클수록 상온과 마찬가지로 빠르게 진전하고, 응력화계계수범위가 증가함에 따라 응력비의 영향이 감소되어 상온과 마찬가지로 최종파단에서 동일한 속도를 나타내고 있다.

Table 2는 상온, 600℃ 및 700℃에서 응력비 변화에 따른 피로균열 안정성장영역의 Paris 식을 이용하여 구한 재료상수 C와 m을 정리한 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이, 상온 및 600℃ 및 700℃에서 재료상수 C는 응력비 증가에 따라 증가하였고, m은 응력비의 증가에 따라 감소하였다.

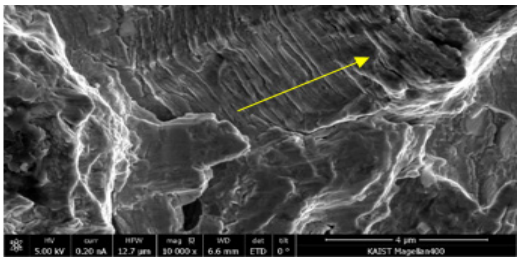
4.2 피로균열진전속도에 미치는 온도의 영향

Fig. 5는 상온, 600℃ 및 700℃에서 각각 응력비의 변화에 대한 피로균열진전시험 결과를 종합하여 나타낸 것이다. 응력비 0.1에서 분석한 결과, 응력확대계수범위가 20 MPa·$m^{1/2}$일 때 피로균열진전속도는 상온에서 9.7×10^{-5} mm/cycle, 600℃에서 1.96×10^{-4} mm/cycle, 700℃에서 6.91×10^{-4} mm/cycle로 나타나고 있다. 이는 고온에서 피로균열진전속도가 빠르게 진전하는 것을 의미한다. 응력비 0.5에서 균열진전속도는 응력비 0.1과 같이 고온에서 빠르게 진전하는 경향을 보이고 있다. 이는 고온에서 재료의 강도가 감소하여 균열이 더 쉽게 진전되기 때문이다. 초내열합금 Inconel 718은 600℃를 기준으로 약 100℃ 정도 증가할 때, 피로균열진전속도가 약 10 배 이상의 차이를 보이지만 니켈기 초내열합금은 약 4 배의 차이를 보인다. 즉, 분말야금 니켈기 초내열합금은 Inconel 718보다 균열에 대한 저항성이 더 우수하다는 것을 의미한다[6].

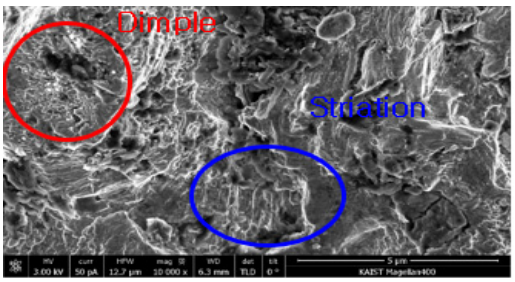
4.3 피로 메커니즘 분석

Figs. 6-8은 상온, 600℃ 및 700℃에서 피로균열진전 시험 후에 피로파면을 SEM 촬영하여 10,000배로 나타낸 것이다. 여기서 A는 초기 균열성장영역이며, B는 안정 균열성장영역, C는 불안정 균열성장영역으로 구분하여 분석하였다.

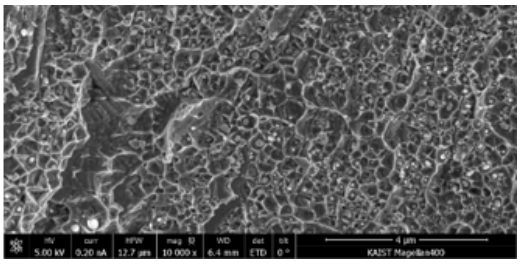
Fig. 6은 상온에서 피로파면을 나타낸 것이다. 초기 균열성장영역의 피로파면은 반복 하중에 의해 형성되는 피로줄무늬(striation)를 형성하고 있다. 안정 균열성장영역에서는 피로줄무늬와 함께 연성파괴의 특징인 딤플(dimple)이 발견되었다. 불안정 균열성장영역에서는 딤플만 나타나고 있다. 이러한 경향은 연성에 의해 재료가 파단된 것을 의미한다. Fig. 7은 600℃에서 피로파면을 나타낸 것이다. 전반적으로 산화의 흔적이 나타나고 있다. 초기 균열성장영역에서는 피로줄무늬, 안정 균열성장영역에서 입계파괴, 불안정 균열성장영역에서 딤플이 발견되었다. Fig. 8은 700℃에서 피로파면을 나타낸 것이다. 600℃ 온도조건과 마찬가지로 산화의 흔적이 많이 나타나고 있다. 700℃에서 피로파면은 600℃와 동일



(A) : Striation

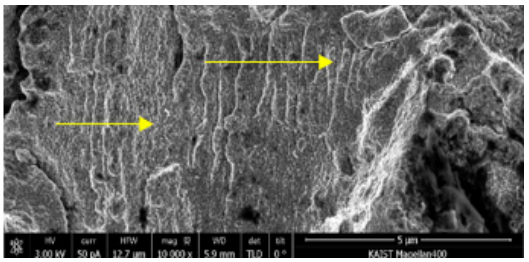


(B) : Striation and dimple

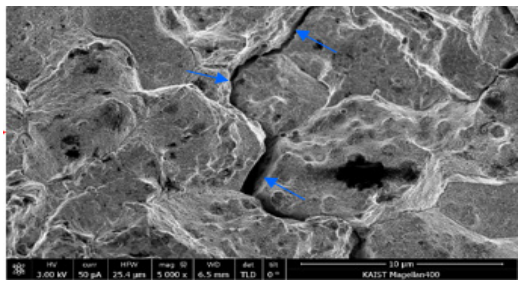


(C) : Dimple

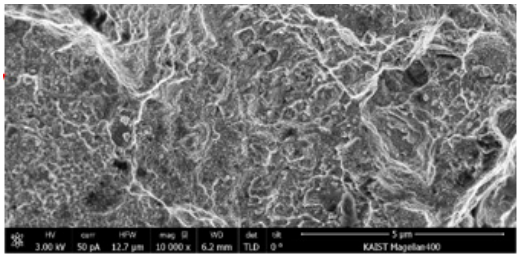
Fig. 6 SEM images of fracture surfaces at R, T.



(A) : Striation



(B) : Intergranular fracture



(C) : Dimple

Fig. 7 SEM images of fracture surfaces at 600℃.

한 고온 피로 파괴기구를 나타내고 있었다. 고온에서 입계파괴(intergranular fracture)가 관찰되는 이유는 고온에서 장시간 동안 하중을 받아서 결정간의 결합력이 떨어졌기 때문이며, 고온피로 파괴의 전형적인 파괴현상이다[7].

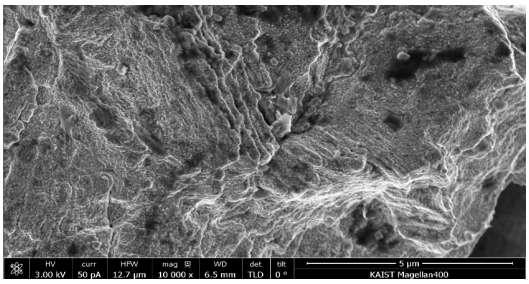
5. 결 론

본 논문에서는 분말야금을 이용한 니켈기 초내열합금의 상온, 600℃ 및 700℃ 온도조건과 응력비 변화에 따라 ASTM E647에서 제시한 직류전위차법을 이용하여 피로균열진전시험을 수행하였고, 피로균열진전속도 및 피로파괴기구를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

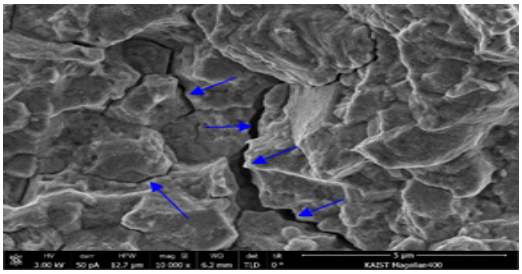
(1) 상온과 고온에서 피로균열진전속도는 동일한 응력확대계수범위에 대해 응력비 증가에 따라 초기에 큰 차이를 보이며 빠르고 불안전 성장영역에서 응력비 영향이 사라진다.

(2) 동일한 응력비에서 상온, 600℃ 및 700℃에 대한 피로균열진전속도는 동일한 응력확대계수범위에서 온도가 증가할수록 균열진전속도는 더 빠르게 진전하고 있다.

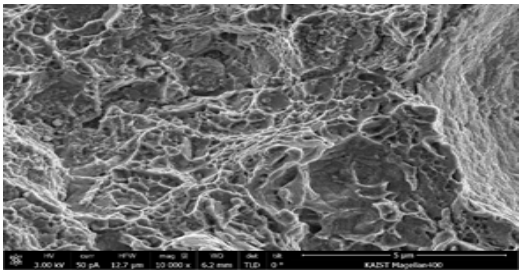
(3) 피로균열진전속도에 대한 재료상수는 Paris



(A) : Striation



(B) : Intergranular fracture



(C) : Dimple

Fig. 8 SEM images of fracture surfaces at 700℃.

법칙에 의해 도출하였고, 이를 이용하여 손상허용설계의 기준으로 제시가 가능하다.

(4) 피로파면 분석 결과, 상온 및 고온에서 초기 균열성장영역은 피로줄무늬가 나타났고, 안정 균열성장영역은 상온에서 피로줄무늬와 딤플이 공존하고, 고온에서 결정간의 결합력 저하로 인해 대부분 입계파괴가 관찰된다. 불안정 균열성장영역은 딤플파괴를 보인다.

후 기

본 연구는 방위사업청의 지원으로 수행한 민군겸용기술사업(13-DU-MP-05)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. Oh, Y.J., Kim, J.H. and Hwang, I.S., "Dynamic Loading Fracture Tests of Ferritic Steel Using Direct Current Potential Drop Method," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 30, No. 3, pp. 221-227, 2002.
2. Zhang, L.N., Wang, P., Dong, J.X. and Zhang, M. C., "Microstructures' Effects on High Temperature Fatigue Failure Behavior of Typical Superalloys," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 587, pp. 168-178, 2013.
3. Luo, J. and Bowen, P., "Small and Long Fatigue Crack Growth Behaviour of a PM Ni-Based," *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, Issue 2, pp. 113-124, 2004.
4. Yang, H., Bao, R., Zhang, J., Peng, L. and Fei, B., "Crack Growth Behaviour of a Nickel-Based Powder Metallurgy Superalloy Under Elevated Temperature," *International Journal of Fatigue*, Vol. 33, Issue 4, pp. 632-641, 2011.
5. ASTM E647-15, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
6. Gustafsson, D., Moverare, J., Johansson, S, Hörnqvistd, M., Simonssona, K., Sjöströma, C. S. and Sharifimajdaa, B., "Fatigue Crack Growth Behaviour of Inconel 718 with High Temperature Hold Times," *Procedia Engineering*, Vol. 2, Issue 1, pp. 1095-1104, 2010.
7. Kang, C.Y., "Fracture Mechanism and Micro Practography - Intergranular Fracture and Fracture at High Temperature," *Journal of KWS*, Vol. 22, No. 3, pp. 6-8, 2004.