

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.8.751>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

항공기 터빈 디스크용 니켈기 초내열 분말야금 합금의 고온 피로균열진전 거동 비교 평가

윤동현* · 나성현* · 김재훈*† · 김홍규** · 김동훈**

* 충남대학교 기계공학부, ** 국방과학연구소

Evaluation of Fatigue Crack Propagation Behavior of Nickel-based Powder Metallurgy Superalloy for Aircraft at Elevated Temperature

Dong Hyun Yoon*, Seong Hyeon Na*, Jae Hoon Kim*†, Hongkyu Kim** and Donghoon Kim**

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

** The 4th R&D Institute - 4th Directorate, Agency for Defense Development, Korea.

(Received January 4, 2017 ; Revised March 20, 2017 ; Accepted April 12, 2017)

Key Words: Direct Current Potential Drop(직류전위차법) Fatigue Crack Propagation(피로 균열 진전), Nickel Based Superalloy(니켈기 초내열합금), Powder Metallurgy(분말 야금)

초록: 항공기 터빈 디스크에 사용될 수 있는 니켈기 초내열 분말야금 합금의 피로균열진전 거동이 실제 운전 환경을 고려하여 상온 및 650°C에서 연구되었다. ASTM E647에서 제시하는 직류전위차법을 이용하여 실시간으로 균열의 진전을 측정하였다. 또한 피로균열진전 시험은 응력비 0.1과 0.5의 두가지 조건에서 수행되었다. 시험결과들은 응력비와 온도 조건 모두 피로균열진전 거동에 영향이 있음을 보여주었으며, 응력비와 온도가 증가함에 따라, 니켈기 초내열 분말 야금 합금의 피로균열성장 속도는 증가하게 관찰되었다. 본 연구에서 사용된 니켈기 초내열 분말 야금 합금은 현재 개발 중인 소재로써 보다 정량적인 시험결과 분석을 위해, 본 연구의 피로균열진전 시험결과와 기존에 연구된 Inconel-100 소재의 피로균열진전거동에 대한 상호 비교분석이 수행되었다. 피로균열진전 파단면의 분석은 SEM 촬영을 통하여 수행하였다.

Abstract: The behavior of fatigue crack growth of nickel-based powder metallurgy superalloy that could be used in aircraft turbine disc is investigated at room temperature, and 650°C considering real operating conditions. The direct current potential drop(DCPD) method was used to measure the crack length of material in real time according to ASTM E647. Tests were performed with various stress ratios (0.1 and 0.5). Experimental results show that stress ratio, and temperature all affect the behavior of fatigue crack growth. As the stress ratio and temperature increase, the fatigue crack growth rate of nickel-based powder metallurgy superalloy also increases. Results were compared and reviewed with fatigue crack growth rates of other nickel-based superalloy materials (Inconel-100) that were studied in previous papers. Fractography analysis of the fractured specimens was performed using as SEM.

1. 서 론

오늘날 항공기에서 가장 많이 이용되는 엔진으로 가스터빈 엔진을 말할 수 있다. 가스터빈 엔

진은 공급된 공기를 압축기를 통해 압축 후 연소기에서 연료와 혼합 후 연소시킨다. 연소 후 발생하는 고온 고압의 가스가 터빈을 회전시킴으로써 동력을 발생시켜 가동된다. 터빈은 고온고압의 가스를 이용하여 동력을 발생시키는 터빈 블레이드와 동력전달을 위한 축 그리고 터빈 블레

† Corresponding Author, kimjhoon@cnu.ac.kr

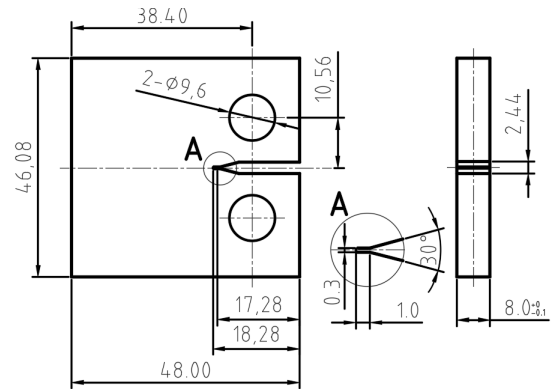
© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Mechanical properties of tested material

Temperature (°C)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Room temperature	1,186	1,536	21.6	21.6
650°C	1,126	1,404	11.3	12.1

이드를 연결하는 터빈 디스크의 총 3가지 부분으로 구성되는데, 이들 중 축과 터빈 블레이드를 연결하는 터빈 디스크는 가장 핵심적인 부품으로 여겨지고 있다. 고온에 장시간 노출되는 터빈에는 고온에 강한 특성을 가지는 니켈기 초내열 합금이 보편적으로 사용되고 있으며 보다 빠른 항공기의 속도를 위하여 공학적인 가열에 의한 비행체 외부 표면의 온도 상승은 물론이고 엔진의 효율 상승을 위한 가혹한 고온 고압의 환경이 지속적으로 요구되고 있고 그에 따른 재료 측면에서의 높은 안전성과 신뢰적인 수명이 요구되고 있다.^(1,2) 이런 상황에 대한 대안으로써 미세구조의 크기를 최소화하여 기존 소재들보다 비교적 더 높은 강도를 가지는 금속 분말합금의 제조를 통해 제작된 초내열 합금의 연구가 진행되고 있다. 이러한 항공기용 가스터빈 디스크에 대한 연구로 국내에서 남승훈 등⁽³⁾은 RFC(retirement for cause) 해석방법을 이용하여 폐기된 항공기용 가스터빈 디스크에 대한 잔여수명 평가를 수행하여 기존의 손상허용서레보다 더 많은 사용수명을 적용할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 본 연구에서 사용된 직류전위차법(DCPD)에 관한 연구로 오영진 등⁽⁴⁾은 원자력 발전 핵심 부품의 균열성정 예측을 위하여 직류전위차법을 위한 장비를 직접적으로 구축하였고 그것을 이용하여 육안으로 균열의 측정이 어려운 상황에서 활용하였다. 또한 Jeong 등⁽⁵⁾은 터빈 디스크 재료인 Inconel 718강에 대하여 사용시간에 따른 고온에서의 피로균열 진전 거동을 연구하였다. 국외 연구동향을 살펴보면, Yang 등^(6,7)은 니켈기 초내열 분말합금인 GH4169의 고온 피로균열진전거동을 바탕으로 균열전단의 소성역 크기와 결정립 크기의 차이를 연구하여 균열진전과의 관계를 규명하였다. 이에 더하여 지연시간(dwell time)이 적용된 시험을 통해서 크리프 균열진전과 피로균열진전의 손상영역 크기 변화에 따른 균열진전속도의 변화를 관찰, 그로부터 균열진전속도에 미치는 제3의 인자를 도출하였다.

본 연구에서는 국내에서 자체적으로 개발된 항

**Fig. 1** Compact tension specimen

공기 터빈 디스크용 니켈기 초내열 분말야금 합금의 실제 운전 환경을 고려하여 상온 및 650°C에서 피로균열진전 시험을 수행하였다. 온도에 의한 영향에 더하여, 응력비에 의한 피로균열진전 거동을 파악하기 위해 응력비 0.1 및 0.5의 조건에서 시험이 진행되었고 고온에서의 균열길이 측정을 위하여 직류전위차법(DCPD)을 이용하였다. 시험 결과를 바탕으로 기존에 사용되고 있는 니켈기 초내열 합금 Inconel 100 재료의 상온 및 고온에서의 피로균열진전 거동과 비교 및 분석이 수행되었다.

2. 재료 및 시험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 재료는 니켈기 초내열 분말야금 합금이다. 분말야금(powder metallurgy) 합금은 금속분말을 이용하여 만들어지는 합금으로서 복잡한 형상의 기계부품의 제작에 유리하고 원하는 성분 조성비에 맞춰 제작이 가능하며, 기존 금속에 비해 상당히 작은 미세결정구조를 가짐으로서 재료의 밀도와 인성이 높은 것이 특징이다. 보통 감마 프라임상 양이 많은 합금을 단조법 또는 분말야금법으로 부품화된다. 본 논문에서 사용된 재료의 니켈함량은 대략 57% 정도로 Table 1에 온도에 따른 재료의 간략한 기계적 물성치를 기록하였다. 시험 시편은 ASTM E647⁽⁸⁾

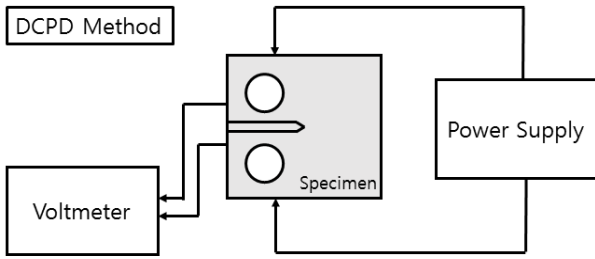


Fig. 2 Schematic of DCPD Method

에 의거하여 CT(compact tension) 시편이 제작되었으며, Fig. 1에 형상 및 치수정보를 나타내었다. Fig. 1의 모든 치수는 mm 단위이다. 피로균열진전 시험 시편의 두께는 8 mm로 선정하였으며 그에 맞는 시편 치수들을 규정을 바탕으로 설계, 제작하였다. 노치부는 와이어커팅을 이용하여 너비 0.3 mm, 깊이 1.0 mm로 제작하였다.

2.2 시험 방법

피로균열진전에 대한 시험법은 ASTM E647⁽⁸⁾에서 제시하고 있으며 피로균열진전속도 da/dN과 응력확대계수범위 ΔK의 관계를 이용하고 있다. 피로균열진전속도 da/dN에서 a는 피로균열진전길이이며, N은 피로 반복사이클을 뜻한다. 근접한 두 점에 대한 직선 기울기를 식 (1)과 같이 분할법을 사용하여 da/dN으로 표현할 수 있다.

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

응력확대계수범위 ΔK는 식 (2), (3)을 이용하여 표현된다.

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

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

ΔP는 피로하중범위, W와 B는 각각 시험편의 폭과 두께이며, F(a/w)는 시험편에 대한 형상보정계수를 의미한다. 여기서 a는 균열길이를 의미한다. 위의 식들을 통하여 얻어진 피로균열진전속도와 응력확대계수 범위의 관계는 식 (4)와 같이 Paris 법칙에 의해 나타내어진다. C와 m은 실험을 통해 얻어진 재료의 고유한 상수이다.

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

본 연구에서는 균열길이의 측정은 ASTM E647⁽⁸⁾에서 제시하는 직류전위차법을 이용하여 수행하였다. 직류전위차법은 일정한 전류를 시편에 가해주면서 시편에서 균열이 발생하며 저항이 감소함에 따라 전압 값이 증가하는 원리를 이용하여 균열길이를 실시간으로 측정하는 방법이다. 직류전위차법에서 제시하는 균열길이에 대한 환산식은 식 (5)와 같다.

$$\frac{a}{W} = -0.5051 + 0.8857\left(\frac{V}{V_r}\right) - 0.1398\left(\frac{V}{V_r}\right)^2 + 0.0002398\left(\frac{V}{V_r}\right)^3 \tag{5}$$

V_r은 반복하중이 가해지기 전, 시편에서 인가되는 전류에 의해 측정되는 전압이며 V는 시험이 진행되면서 실시간적으로 측정되는 전압이다. a와 W는 위와 같은 시편에서의 균열길이와 시편의 폭이다. 직류전위차법은 a/W의 범위가 0.24 ~ 0.7인 범위에서 적용된다. 설명을 보충하기 위해 Fig. 2에 직류전위차법의 개략도를 나타내었다.

피로균열진전 시험은 MTS 810 만능재료시험기를 사용하여 하중제어방식으로 진행되었으며 정형파로 10 Hz의 주파수에서 수행되었다. 니켈기 초내열 분말야금 합금에서 피로균열진전에 미치는 응력비 및 온도의 영향을 파악하기 위하여, 응력비는 0.1과 0.5로 설정하였고 온도 조건은 상온과 실제 가스터빈 엔진의 운전 조건을 고려한 650°C로 설정하여 시험을 수행하였다. 시험 온도 조성은 자체 제작한 고온 노를 이용하여 조성하였다. 노 내부의 온도가 시험온도에 도달한 후, 시편 내부의 균일한 온도 분포와 전압측정 장치로 측정되는 전압의 균일한 상태를 형성해 주기위하여 1 시간의 대기시간을 가진 뒤 피로균열진전 시험을 시작하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 응력비(0.1, 0.5)와 온도(상온 및 650°C)의 조건을 변수로 하여 니켈기 초내열 분말야금 합금의 피로균열진전 거동에 대한 연구가 수행되었다.

3.1 상온 피로균열진전 거동

Fig. 3은 상온에서 수행된 니켈기 초내열 분말

Table 2 Material constant at room temperature

Temp. (°C)	Stress ratio	C	m
Room temperature	0.1	2.18×10^{-12}	3.32
	0.5	2.41×10^{-10}	1.86

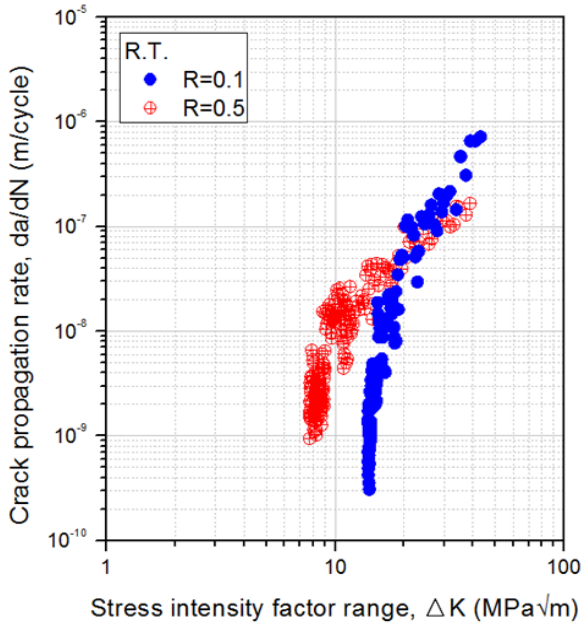


Fig. 3 da/dN vs. ΔK curves at room temperature

야금 합금의 피로균열진전 시험 결과를 응력확대 계수범위 ΔK 에 대한 균열진전속도 da/dN로 나타낸 그래프이다. 응력비는 문자 'R'로 표기하였다. 피로균열진전 시험은 응력비 0.1과 0.5의 두 조건에서 수행되었다. 응력확대계수범위가 작은 영역에서 응력비가 작을수록 균열진전속도는 느리게 나타났다. 응력비가 커질수록 그래프의 점들이 왼쪽으로 치우쳐 있다는 것을 확인할 수 있다. 임의의 응력확대계수범위를 선정하여 관찰해보면, 응력비가 0.1이고, 응력확대계수범위가 12 MPa√m 인 경우의 피로균열진전속도가 응력비 0.5인 경우에는 더 낮은 응력확대계수범위 값인 9 MPa√m에서 나타날 수 있다는 것을 보여준다. 그러나 균열이 진전하며 응력확대계수범위가 커짐에 따라 응력비의 영향은 비교적 사라지게 되었고 거의 동일한 균열진전속도를 보였다. 이러한 현상은 균열이 진전하며 최종 피로파단영역(제 3영역)에 이르면 단순인장에 의한 연성파괴가 나타나며 피로파괴는 재료의 파괴인성에 의존하게 되는 것을 바탕으로 설명될 수 있다. Table 2에서 상온

Table 3 Material constant at 650°C

Temp. (°C)	Stress ratio	C	m
650	0.1	1.47×10^{-9}	1.73
	0.5	5.20×10^{-9}	1.47

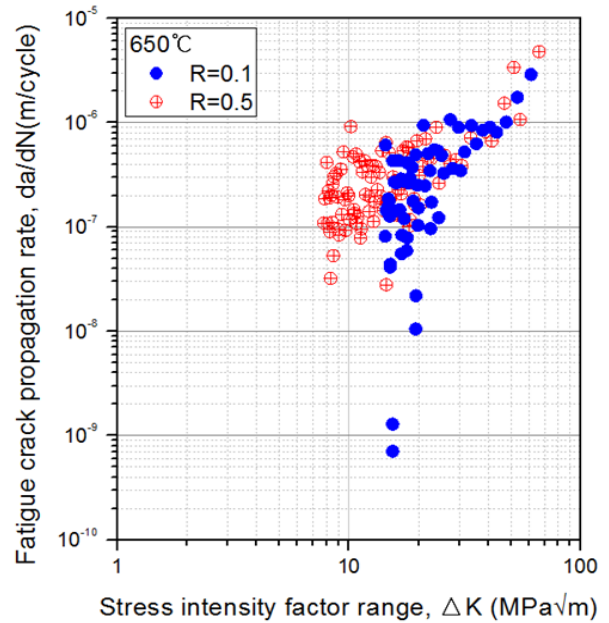


Fig. 4 da/dN vs. ΔK curves at 650°C.

피로균열진전 시험으로부터 구한 Paris식의 재료상수 C와 m의 값을 확인할 수 있다. 응력비가 높아지면서 재료상수 C는 증가하였고, m은 감소하였다.

3.2 고온 피로균열진전 거동

Fig. 4는 고온 650°C에서 수행된 니켈기 초내열 분말야금 합금의 피로균열진전 시험 결과를 da/dN 대 ΔK 로 나타낸 그래프이다. 상온과 마찬가지로 응력비 0.1과 0.5인 두 경우에서 피로균열진전 시험이 수행되었다. 상온에서 수행된 시험의 결과 보다 비교적 그래프의 분포가 넓게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 상온 피로균열진전 시험결과와 유사하게, 응력확대계수범위가 작은 영역에서 응력비가 작을수록 비교적 균열진전속도가 느리게 나타났다. 또한 균열이 진전하여 응력확대계수범위가 커짐에 따라 응력비의 영향은 사라지는 것을 볼 수 있다. Table 3에는 650°C에서 수행된 고온 피로균열진전 시험결과로부터 얻어낸 니켈기 초내열 분말야금 합금의 재료상수 C

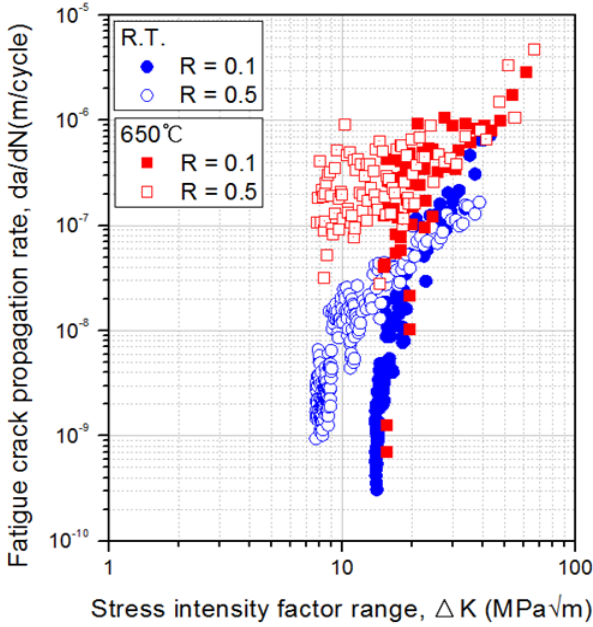


Fig. 5 da/dN vs. ΔK curves at various temperature

와 m 이 나타나 있다. 상온 피로균열진전 시험결과와 마찬가지로, 고온 피로균열진전 시험에서도 응력비가 높아지면서 재료상수 C 는 증가하였지만 m 은 감소한 것을 확인할 수 있다. 하지만 상온에서 응력비 변화에 따른 재료상수들의 변화량 보다는 미미하게 변화가 있음을 확인할 수 있다.

3.3 피로균열진전 거동에 미치는 온도의 영향

상온 및 고온에서 수행된 피로균열진전 시험결과를 바탕으로 피로균열진전 거동에 미치는 온도 변화의 영향을 살펴보았다. Fig. 5에서 상온 및 고온에서 수행된 피로균열진전 시험결과를 한 번에 살펴볼 수 있다. 전체적으로 온도가 올라감에 따라 피로균열진전속도가 확연하게 빨라진 것을 확인할 수 있다. 그래프에서 온도 증가에 따라 피로균열진전속도가 눈에 띄게 증가한 것을 확인할 수는 있지만, 세로축인 피로균열진전속도 da/dN 의 값이 매우 작은 것을 주의해야 한다. 따라서 온도가 증가함에 따라 피로균열진전속도는 응력비에 상관없이 미소하게 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 고온 환경에서 재료의 강도가 감소하기 때문에 피로균열이 더 쉽게 진전되는 것으로 판단할 수 있다. 응력비의 영향은 상온과 비교하여 고온에서 뚜렷하지 않은 것을 볼 수 있다. 이는 고온에서 피로균열이 진전되면서 균열의 틈에 산화물이 형성되고, 이 산화물이

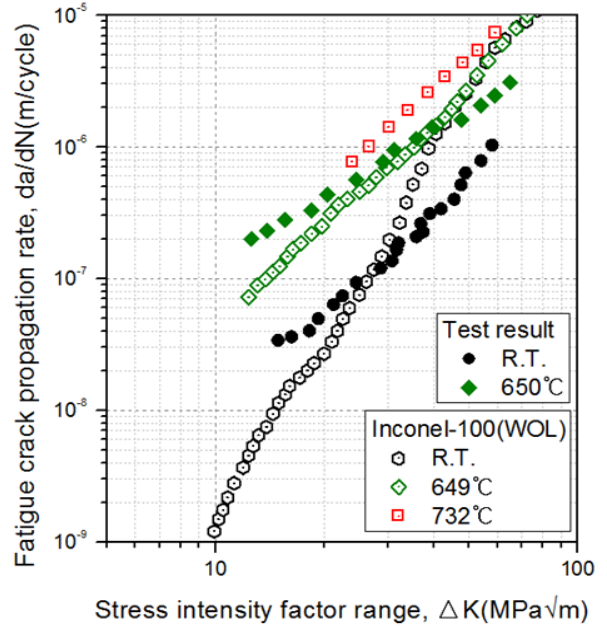


Fig. 6 Comparison with IN-100 WOL specimen

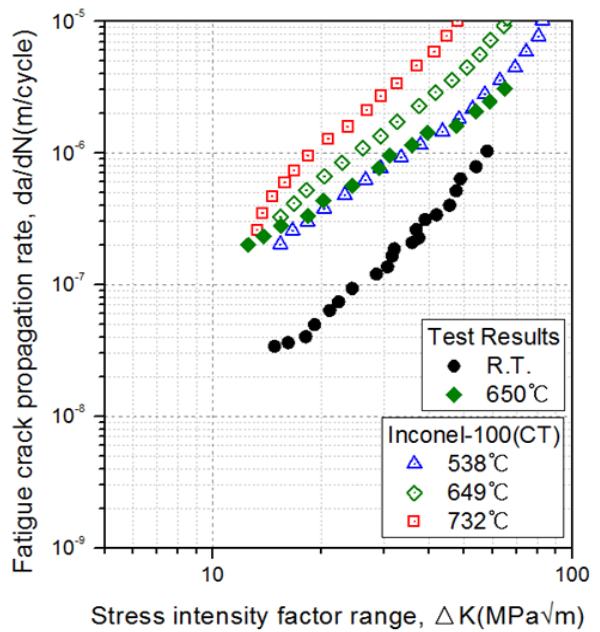


Fig. 7 Comparison with IN-100 CT specimen

커지면서 피로균열부에 모여 균열을 덮어 균열 단합 현상이 발생되기 때문이다.⁽⁹⁾ 이런 고온 환경에서는 균열 팁 부분에서 균열 길이 변화에 의한 전위차를 명확히 얻는 것은 매우 어려운 점이며 큰 오차를 포함하게 된다. 따라서 추후 지속적인 연구를 통해 고온 거동을 명확히 밝힐 필요성이 있다고 사료된다. 온도증가에 따라 재료상수 C 는 증가하였고 m 은 감소하였다.

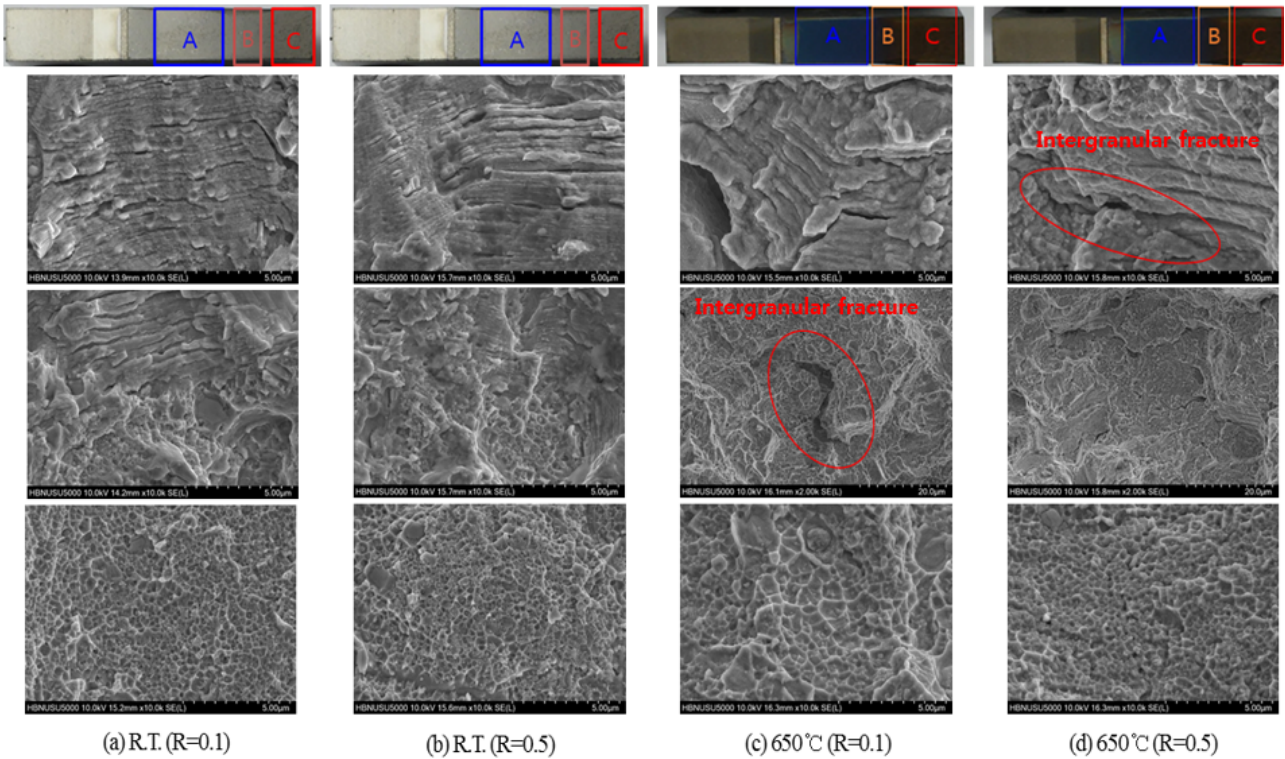


Fig. 8 SEM images of the fatigue crack propagation test

3.4 피로균열진전속도 비교⁽¹⁰⁾

본 연구에서 시험된 니켈기 초내열 분말야금 합금은 국내생산된 재료로써 기존에 연구된 재료와 피로균열진전속도 측면에서 비교 및 평가되었다. Fig. 6은 Inconel-100(IN-100) 재료의 WOL(wedge opening load) 시편을 이용하여 상온, 649°C 및 732°C의 온도조건에서 0.1의 응력비로 수행된 피로균열진전시험 결과와 본 연구에서 0.1의 응력비로 수행된 시험결과를 함께 보여준다. IN-100 재료의 WOL 시편은 본 연구의 CT시편과 유사한 형태를 보인다. IN-100 재료의 시험결과에서도 본 연구와 마찬가지로 온도증가에 따라 피로균열진전 속도가 빨라진 것을 관찰할 수 있다. 낮은 응력확대계수범위에서 분말야금합금의 피로균열진전 속도가 비교적 더 크게 나타났지만 온도가 증가할수록, 그리고 응력확대계수범위가 커질수록 균열진전속도는 서로 유사하게 나타났다. Fig. 7에서는 CT 시편의 Inconel-100에 대하여 538°C, 649°C, 그리고 732°C에 대하여 수행된 피로균열진전시험의 결과와 본 연구에서 수행된 결과를 함께 볼 수 있다. 650°C에서 시험된 니켈기 분말야금 합금의 피로균열진전속도와 649°C에서 IN-100의 피로균열진전속도는 낮은 응력확대계수

범위에서 거의 유사하게 나타났으며, 응력확대계수범위가 높아질수록 IN-100 재료의 피로균열진전속도가 약간 빠르게 나타났다. 본 연구에서 사용된 시편은 CT시편으로 IN-100 재료의 WOL 시편보다는 CT시편 결과와 직접적으로 비교해 볼 수 있다. Fig. 7에 나타난 결과를 바탕으로, 기존 재료인 IN-100보다 본 연구에서 시험된 니켈기 초내열 분말야금 합금의 피로균열의 진전에 대한 저항성이 높은 것으로 확인되었다.

3.5 피로메커니즘 분석

본 연구에서 시험된 니켈기 초내열 분말야금 합금의 파단면을 SEM 촬영을 통해 분석하였다. 상온 및 650°C에서 시험된 시편의 파단면에서 초기 균열성장영역, 안정 균열성장영역, 불안정 균열성장영역으로 구분하여 각각 A, B, 그리고 C로 명명하여 Fig. 8 위쪽에 표시하였다. Fig. 8(a), 8(b), 8(c), 그리고 8(d)는 각각 상온 및 650°C에서 응력비 0.1과 0.5 조건에서 시험된 피로균열진전 시편의 파단면 모습이다. 전체적으로 초기 균열성장영역에서는 반복 하중으로 인한 피로줄무늬(striation)가 관찰 되었으면 안정 균열성장영역에서는 피로줄무늬와 함께 연성파괴의 특성인 딴플(dimple)이 관찰되었다. 불

안정 균열성장영역에서는 덩플의 모습이 지배적이었으며 그로 인해 불안정 균열성장영역에서 니켈기 분말야금 합금의 파괴양상이 연성파괴 모습을 보인다는 것을 확인할 수 있었다. 상온 시험 시편의 파단면과 비교하였을 때, 고온 시험 시편의 파단면에서는 고온 환경에 의한 산화의 흔적을 볼 수 있었다. 또한 고온에서 시험된 시편의 파단면에서는 Fig. 8(c), 8(d)에 빨간색 원으로 표시한 부분과 같이 입계파괴(intergranular fracture)의 모습을 관찰할 수 있었다. 입계파괴 양상은 고온 피로파괴의 전형적인 현상으로써, 고온에서 장시간 하중을 받은 재료가 결정간 결합력이 저하됨에 따라 발생하는 현상이다.⁽¹¹⁾ 입계파괴 현상을 바탕으로 고온 피로균열진전 시험에서 니켈기 초내열 분말야금 합금 재료의 결정 사이의 결합력이 약해진다는 것을 확인하였다.

4. 결론

항공기 터빈 디스크에 사용될 수 있는 니켈기 초내열 분말야금 합금에 대한 시험온도, 응력비를 변수로 설정하여 상온 및 고온에서의 피로균열진전거동을 연구하였다. 그 결과를 바탕으로 기존 재료인 Inconel-100과 피로균열진전 측면에서 비교 및 평가하였다.

(1) 상온 및 고온에서 응력비 0.1과 0.5의 조건에서 피로균열진전 시험을 수행한 결과, 응력확대계수범위가 작은 영역에서는 응력비가 작을수록 균열진전속도가 느리게 나타났지만 응력확대계수범위가 커지면서 응력비의 영향이 비교적 사라지는 것을 볼 수 있었다.

(2) 온도가 증가하면서 피로균열진전 속도가 증가하는 것을 관찰하였다. 고온에서는 상온과 비교하여 응력비 변화에 의한 영향이 뚜렷하게 나타나지 않았다.

(3) 피로균열진전의 제 2영역에서 Paris 식의 재료상수 C는 응력비와 온도가 증가할수록 크게 나타났다으며, 재료상수 m은 작게 계산되었다.

(4) 기존에 수행된 니켈기 초내열합금 Inconel-100의 피로균열진전 시험 결과와 비교하여, 유사한 조건에서 본 연구에서 시험된 재료의 피로균열진전에 대한 저항 특성이 비교적 우수한 것을 확인하였다.

(5) 파단면 분석결과 초기 균열성장영역에서는 피로줄무늬가, 불안정 균열성장영역에서는 덩플

이 지배적으로 관찰되었고 그 사이의 안정 균열성장영역에서는 피로줄무늬와 덩플이 혼재하여 관찰되었다. 고온에서 시험된 시편에서는 상온 시험시편의 모습과는 다르게 입계파괴 모습이 관찰되었다.

후 기

본 연구는 방위사업청 민군겸용기술사업(13-DU-MP-05)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Nahm, S. H., Park, J. H. and Kim, J. Y., 2001, "A Study on the Prediction of Crack Growth Life of Gas Turbine Engine Disk under Creep-Fatigue Loading Condition," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 172~177.
- (2) Huh, J. S., 2012, "A Study on the Structural Integrity of Gas Turbine Engine Disc by Non-Linear Analysis," *The Korean Society of Propulsion Engineers*, pp. 671~674.
- (3) Nahm, S. H., Park, J. H., Kim, J. Y. and Mai, Y. W., 2002, "Life Evaluation of Gas Turbine Engine Disk based on Retirement for Cause Concept," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 26, No. 2, pp. 365~373.
- (4) Oh, Y. J., Kim, J. H. and Hwang, I. S., 2002, "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.
- (5) Jeong, D. H., Choi, M.J., Masahiro G., Lee, H. C. and Kim, S. S., 2014, "Effect of Service Exposure on Fatigue Crack Propagation of Inconel 718 Turbine Disc Material at Elevated Temperatures," *Materials Characterization*, Vol. 95, pp. 232~244.
- (6) Yang, H., Bao, R., Zhang, J., Peng, L. and Fei, B., 2011, "Crack Growth Behaviour of a Nickel-based Powder Metallurgy Superalloy under Elevated Temperature," *International Journal of Fatigue*, Vol. 33, No. 4, pp. 632~641.
- (7) Yang, H., Bao, R., Zhang, J., Peng, L. and Fei, B., 2011, "Creep-fatigue Crack Growth Behaviour of a Nickel-based Powder Metallurgy Superalloy under High Temperature," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 18, No. 3, pp. 1058~1066.
- (8) ASTM Standard E647-13a, 2013, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," ASTM International.

- (9) Park, K. D., Jung, J. G. and Kim, J. H., 2001, "Effect of Stress Ration on Fatigue Crack Propagation Behavior of Pressure Vessel Steel SA516-Grade70 at High Temperature," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 25, pp. 164~170.
- (10) Manson, S. S., 1979, "Aerospace Structural Metals Handbook, Fourth Quarter - Nonferrous Alloys," Vol. 5.
- (11) Kang, C. Y., 2004, "Fracture Mechanism and Micro Practography - Intergranular Fracture and Fracture at High Temperature," *Journal of KWS*, Vol. 22, No. 3, pp. 6~8.