

# 레이저 분말 소결(Laser Powder Bed Fusion; L-PBF)법으로 제조된 Inconel 718 합금의 상온 및 고온 피로균열전파 거동

## Room and Elevated Temperature Fatigue Crack Propagation Behavior of Inconel 718 Alloy Fabricated by Laser Powder Bed Fusion

### 1. 연구 배경

적층 제조(additive manufacturing, AM) 기술은 다양한 적층방법을 통해 정밀 정형 형상(near net shape)의 금속 부품을 제조하는 기술로서 항공우주, 자동차, 조선 등 전 산업분야에서 많은 관심을 받고 있다. 특히 항공소재는 가격이 비싼 타이타늄, 인코넬 등이 주로 사용되는데 절삭가공을 하면 소재의 90%를 버리게 되지만, 이를 적층제조 후 절삭가공하면 비용을 대폭 절감할 수 있다. 이러한 장점들로 최근 항공우주산업계에서는 금속 재료를 사용한 AM 기술 적용을 활발하게 시도하고 있다. AM 기술 중 하나인 레이저 분말 소결 (laser powder bed fusion, L-PBF)법은 우수한 표면상태와 정밀도를 가져 분말 소결 기술 중 가장 많은 관심을 받고 있다. 하지만 L-PBF 공정 중 조형체 내부 균열, 기공 등 원치 않는 결함과 높은 잔류응력에 따른 문제가 발생하는 사례가 빈번하게 보고되고 있으며, 이러한 문제해결을 위한 연구가 다수 이루어지고 있는 실정이다. Ni기 초내열합금 중 하나인 Inconel 718 (Ni-Cr-Fe-Nb-Mo-Ti) 합금은 고온 강도, 피로 저항성, 크리프 저항성 및 내부식성이 우수하여 항공기용 엔진 또는 핵융합로 등 고온에서 사용되는 기계부품에 널리 사용되고 있다. AM Inconel 718 합금을 항공 우주 및 발전 산업에서 성공적으로 적용하기 위해서는 상온 및 고온 피로 특성에 대한 연구가 필수적이나 대부분의 AM 연구는 공정 변수에 따른 미세조직 및 정적 특성에 대한 결과들이 주를 이루고 있다. 본 연구에서는 25, 650 °C에서의 인장(tensile) 및 피로균열전파(fatigue crack propagation, FCP) 거동을 연구하였다. 인장 및 피로균열전파 시험 이후 파면과 균열경로를 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 이용하여 관찰하였다. 이러한 관찰을 토대로 AM 공정 중 형성되는 결함, 균열진전 방향(crack propagation direction, CD)과 적층 방향(building direction, BD)의 관계(CD//BD vs CD⊥BD) 및 시험 온도(25 vs 650 °C)가 피로균열전파 저항성에 미치는 영향에 대해 고찰하고자 하였다.

### 2. 실험 결과 및 고찰

#### 1) 미세조직

그림 1과 같이 미세조직 관찰 결과 L-PBF 시편이 CM 시편에 비해 미세한 조직을 갖는 것을 확인할 수 있으며, L-PBF 시편에서는 레이저 스캐닝으로 인해 형성된 용융 풀(melt pool)이 관찰되었다. L-PBF 시편의 미세조직 고배율에서 수지상의 계면(inter-dendritic region)을 따라 석출되어 있는 침상 형태의 δ 상과 비교적 둥근 형상을 가진 Laves 상을 보여주고 있다. 이러한 Laves 상은 Ni기 초내열합금에 나타나는 전형적인 TCP 상으로서 일반적으로 취성상이라 알려져있으며, 시편에 분포하는 석출상의 분율 측정 결과 δ 상(B)과 Laves상(C)이 각각 9% 및 6%로 측정되었다.

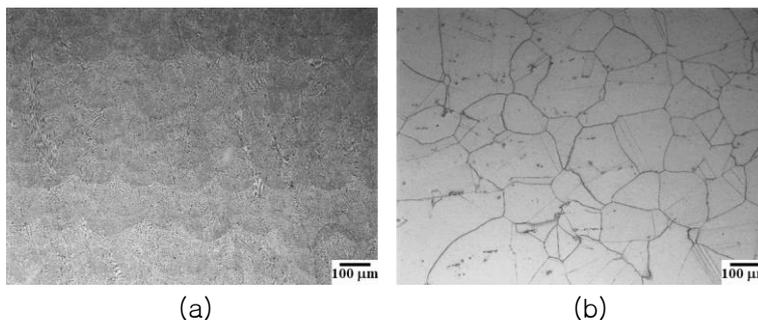


Fig. 1. The optical micrographs of (a) L-PBF and (b) CM Inconel 718 specimens.

2) 인장 특성

L-PBF 시편의 상온 및 고온 인장 특성을 평가하기 위해 25 및 650°C에서 인장 시험을 수행하였다. 표 1은 L-PBF 시편과 CM 시편의 인장 시험 결과를 나타내고 있다. 시험 결과, 시험 온도에 무관하게 L-PBF 시편의 강도 및 연신율 모두 CM 시편에 비해 다소 우수하게 나타났다. L-PBF 시편의 우수한 인장 특성은 그림 1에서 볼 수 있듯이 L-PBF 시편의 미세한 조직에 의한 것으로 사료된다. 각 온도에서 시험된 L-PBF 시편 모두에서 전형적인 딴플(dimple) 파단 양상이 관찰되었으며, 두 인장 파면의 딴플 크기 및 형상은 거의 유사하게 나타났다. 이는 Inconel 718합금의 우수한 고온 특성 때문으로 판단된다.

Table 1. The tensile properties of L-PBF and CM Inconel 718 alloys.

Manufacturing process	Testing temperature (°C)	Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Tensile elongation at failure (%)
L-PBF	25	1,176	1,375	20.8
	650	1,007	1,141	20.3
CM	25	978	1,216	12.4
	650	873	1,061	9.3

3) 피로균열전파 특성

본 연구에서는 L-PBF 시편의 상온 및 고온 피로균열전파 거동을 파악하기 위해 CD//BD 시편, CD⊥BD 시편 및 C-L 방향의 CM 시편에 대해 하중비 0.1, 온도 25 및 650°C에서 da/dN-ΔK 관계를 측정하였다. 그림 2은 25°C에서 시험된 각 시편의 피로균열전파 저항성을 나타내고 있다. 시험 결과, CD//BD 및 CD⊥BD 시편의 임계응력확대 계수범위 (near-threshold ΔK, ΔK<sub>th</sub>) 값은 각각 6.4 및 5.6 MPa√m로, CM 시편의 ΔK<sub>th</sub> 값은 15.2 MPa√m로 L-PBF 시편이 CM 시편에 비해 현저히 낮은 피로균열전파 저항성을 나타냈다. 반면 ΔK가 30 MPa√m이상인 영역에서는 L-PBF시편와 CM시편의 피로균열전파 저항성에 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라, 그림 2에서 볼 수 있듯이 CD//BD 및 CD⊥BD 시편의 피로균열전파 저항성은 전체 ΔK 영역에서 거의 유사하게 나타났다. 즉, L-PBF 시편의 피로균열전파 저항성에 미치는 이방성의 영향이 미미한 것으로 사료된다.

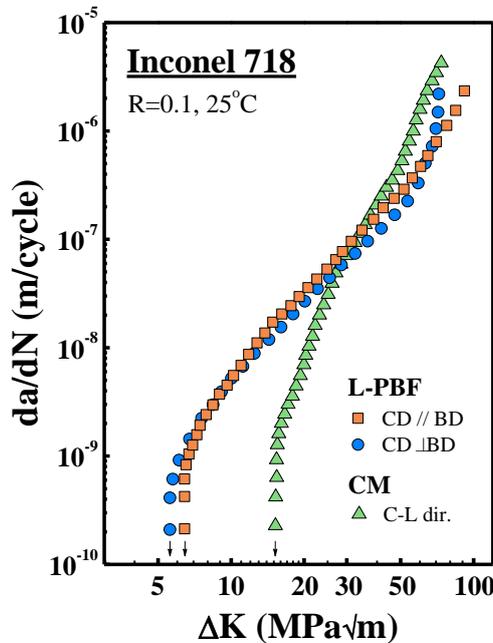


Fig. 2. The da/dN vs ΔK curves of L-PBF and CM Inconel 718 specimens at an R ratio of 0.1 and a testing temperature of 25°C.

이러한 L-PBF 시편의 피로균열전파 거동을 이해하기 위해 시험 완료된 파면을 SEM을 이용하여 관찰하였다. ΔK<sub>th</sub> 영역에서 CD//BD 및 CD⊥BD 시편 모두에서 입내 파괴(transgranular fracture)

양상이 관찰되었으며, 그림 3의 고배율 파면 사진을 보면 시편 가공방향에 관계없이 두 시편 모두에서 basketweave 형상의 파면이 관찰되었다. 이러한 basketweave 형상 파면은 균열이 진전할 때 L-PBF 시편의  $\delta$  상과 Laves 상을 우회하면서 형성된 것으로 사료된다.

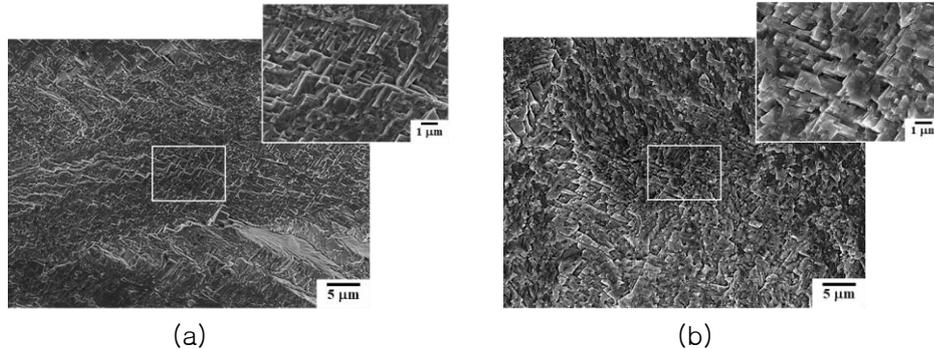


Fig. 3. High-magnification SEM fractographs of FCP tested L-PBF Inconel 718 (a) CD//BD and (b) CD⊥BD specimens at 25 °C, documented in  $\Delta K_{th}$  regime.

이처럼 유사한 피로균열전파 파면은 그림 2의 가공방향에 관계없이 유사한 피로균열전파 저항성을 뒷받침해 주고 있다. 30 및 70 MPa√m 영역에서의 파면 관찰 결과,  $\Delta K$ 가 증가하면서 ductile cleavage mode가 많이 관찰되었으며,  $\Delta K=70$  MPa√m 영역에서는 2차 균열도 일부 관찰되었다. 이처럼 L-PBF 시편의 CD//BD 시편과 CD⊥BD 시편의 파면에서 관찰되는 경향은 두 시편의 균열경로 관찰에서도 잘 나타나고 있다.  $\Delta K_{th}$  영역에서는 균열이  $\delta$  상 및 Laves 상을 우회하는 것을 볼 수 있으며, 높은  $\Delta K$  영역에서는 주로 상들을 자르고 진전하는 것이 관찰되었다. 이후, L-PBF 시편이 CM 시편에 비해 낮은 피로균열전파 저항성을 나타내는 원인을 파악하기 위해 피로균열전파 파면을 SEM으로 관찰하였다.  $\Delta K_{th}$  영역 및 중간 영역에서 basketweave 및 ductile cleavage 형상을 나타내는 L-PBF 시편과 달리 CM 시편에서는  $\Delta K_{th}$  영역 및  $\Delta K=30$  MPa√m 영역 모두에서 벽개파괴(cleavage)에 의한 면(facet)이 관찰되었으며  $\Delta K=70$  MPa√m 영역에서는 피로줄무늬와 덩플이 관찰되었다. 낮은  $\Delta K$  영역에서 피로균열전파 저항성은 슬립가역성에 의해 주로 결정되며, 높은 슬립가역성을 가진 소재인 경우 피로손상이 적게 발생하여 잘 발달된 벽개면과 우수한 피로균열전파 저항성을 가진다. 즉, 균열이 다른 미세조직적 형태(예: 결정립 크기, 석출물의 분포 등)에 영향을 받지 않고 자유롭게 성장할 수 있는 거리가 큰 합금의 피로균열전파 저항성이 그렇지 않은 금속에 비해 우수하게 나타난다. 이러한 논리적 근거에 의하면 L-PBF 시편이 CM 시편에 비해 낮은 피로균열전파 저항성을 가져야 하며, 실제 L-PBF 시편의 피로균열전파 저항성이 낮게 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 L-PBF 공정 중 형성되는 미세한 석출상( $\delta$  및 Laves 등) 및 AM 공정 중 형성되는 결함들로 인해 슬립가역성이 저하되기 때문으로 사료된다. 그림 4(a)와 (b)에는 AM 공정 결함인 융합 부족(lack of fusion, LOF) 및 미용융 분말을 나타냈다. 또한 그림 4(a)의 LOF는 낮은  $\Delta K$  영역에서는 많이 관찰되는 반면 높은  $\Delta K$  영역에서는 미세한 2차 균열들이 많이 관찰되었다. 따라서 낮은  $\Delta K$  영역에서의 LOF는  $\Delta K$ 가 증가하면서 2차 균열을 발생시킨다고 사료된다.

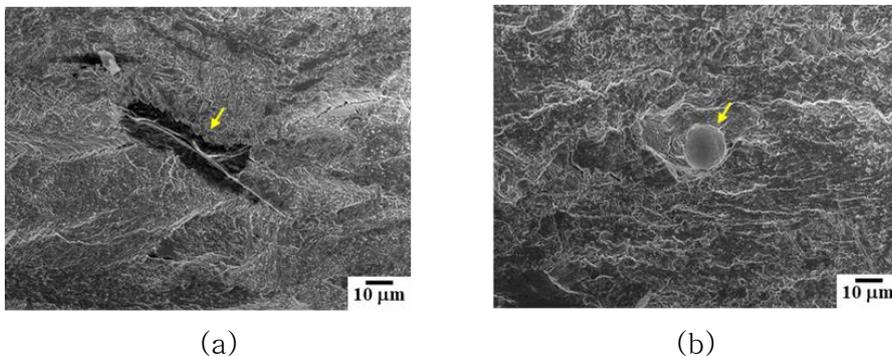


Fig. 4. The SEM fractographs of L-PBF Inconel 718 specimen, FCP-tested at 25 °C, showing (a) lack of fusion (LOF), (b) un-melted powder.

그림 5은 L-PBF 시편의 고온 피로균열전파 결과(그림 5(a))와 시험 후의 미세조직(그림 5(b))을 관찰한 사진이다. 650 °C에서 시험된 L-PBF 시편의  $\Delta K_{th}$  값은 6.6 MPa√m으로 25 °C에서 시험된  $\Delta K_{th}$  값(5.6 MPa√m)에 비해 우수한 피로균열전파 저항성을 나타내었다. 그러나  $\Delta K=7$  MPa√m 이상의 영역에서는 650 °C에서 시험된 시편의 피로균열전파 속도가 급격하게 증가하는 것이 관찰되었다. 이러한 원인을 분석하기 위해 650 °C에서 피로균열전파 시험된 시편의 미세조직을 관찰하였다. 그림 5(b)를 보면 650 °C에서 장시간 노출된 후, 25 °C에서 시험된 시편의 미세조직에서는 관찰하기 어려웠던  $\gamma'$  및  $\gamma''$  상의 조대화가 관찰되었다.

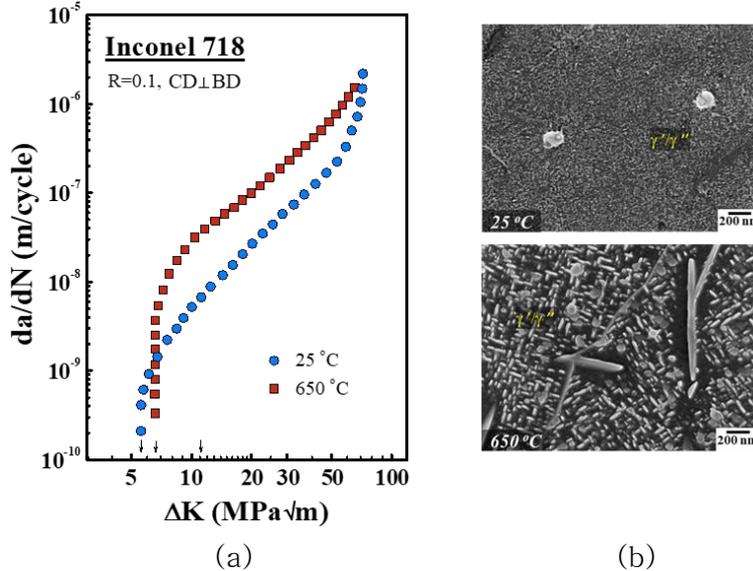


Fig. 5. (a) The  $da/dN$  vs  $\Delta K$  curves of L-PBF Inconel 718 specimens at an testing temperature of 25 and 650 °C and (b) the SEM micrographs of FCP tested L-PBF Inconel 718 specimen.

650 °C에서 시험된 파면의  $\Delta K_{th}$  영역에서 피로줄무늬가 형성된 것을 확인할 수 있으며, 이러한 피로줄무늬는 균열 둔화의 간접적인 증거가 될 수 있다고 보고되고 있다. 반면, 중간 및 높은  $\Delta K$  영역에서는 시험 온도에 관계없이 유사한 피로균열전파 파면이 관찰되었다. 고온 피로균열전파 저항성에 영향을 미치는 인자에는 크게 균열 둔화 현상과 환경적 요인이 있다. 대표적인 현상 중 하나인 균열 둔화 현상이 발생하기 위해서는 고온에서 피로균열전파 속도가 충분히 느려야 하며,  $\Delta K$ 가 증가하면 피로균열전파 속도가 증가하여 균열 둔화 효과가 감소하게 된다고 알려져 있다. 즉, 높은  $\Delta K$  영역에서는 균열 둔화 효과보다 고온에서 발생할 수 있는 환경적 요인에 영향을 많이 받게 되며, 많은 문헌에서 고온에서의 환경적 요인이 Inconel 718 합금의 피로균열전파 저항성을 감소시킨다고 보고되고 있다. 이러한 이유로  $\Delta K_{th}$ 영역에서는 균열 둔화 현상으로 고온에서 다소 우수한 피로균열전파 저항성을 나타냈으며, 균열전파 속도가 급격히 증가하는  $\Delta K=7$  MPa√m에서는 고온 환경에 의한 1) 균열선단의 소성변형 영역(plastic zone)에서 슬립 이동성(slip mobility) 향상과 2)  $\gamma'$  및  $\gamma''$  상의 조대화에 의해 피로균열전파 저항성이 열화된 것으로 판단된다.

### 3. 요약

본 연구에서는 L-PBF Inconel 718 합금의 피로균열전파 거동을 25 °C에서 CM Inconel 718 합금과 비교하여 조사하였으며, 650 °C에서 L-PBF Inconel 718 합금의 피로균열전파 거동을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. L-PBF 시편의 상온 피로균열전파 저항성은 낮은 및 중간  $\Delta K$  영역에서 CM 시편에 비해 현저히 낮게 측정되었으며, 이는 슬립가역성을 감소시키는 L-PBF 시편의 미세한 조직과 AM 공정 결함의 영향인 것으로 확인되었다.
2. L-PBF 시편의 피로균열전파 저항성은  $\Delta K_{th}$  영역에서 온도가 25 °C에서 650 °C로 증가함에 따라 향상되는 경향을 나타냈으며, 이는 균열 둔화 현상에 의한 것으로 판단된다. 반면  $\Delta K$ 가 증가하면서 고온에서의 환경적 효과들(1)  $\gamma'$  및  $\gamma''$  상의 조대화, 2) 슬립 이동성 증가)에 의해 피로균열전파 저항성이 열화되는 경향을 나타내었다.