

레이저 분말 소결(Laser Powder Bed Fusion; L-PBF)법으로 제조된 Inconel 718 합금
의 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.

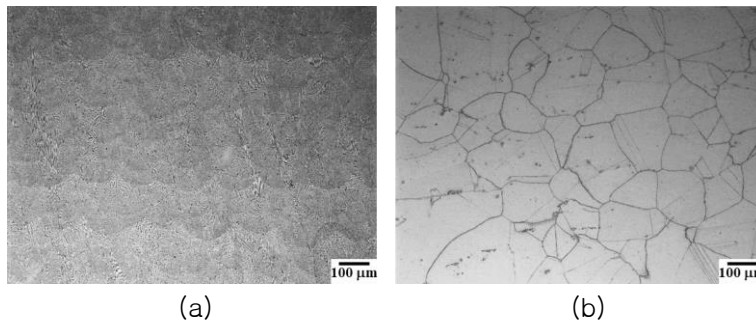


Fig. 1. The optical micrographs of (a) L-PBF and (b) CM Inconel 718 specimens.

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_{th}) 값은 각각 6.4 및 5.6 MPa√m로, CM 시편의 ΔK_{th} 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.

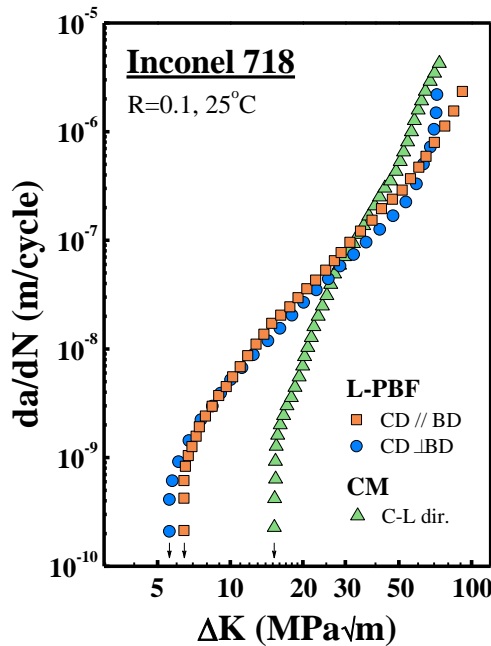


Fig. 2. The da/dN vs ΔK curves of L-PBF and CM Inconel 718 specimens at an R ratio of 0.1 and a testing temperature of 25°C.

이러한 L-PBF 시편의 피로균열전파 거동을 이해하기 위해 시험 완료된 파면을 SEM을 이용하여 관찰하였다. ΔK_{th} 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 δ 상과 Laves 상을 우회하면서 형성된 것으로 사료된다.

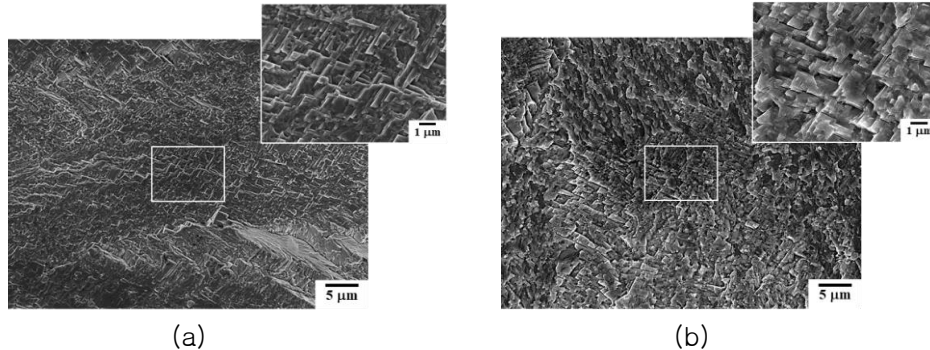


Fig. 3. High-magnification SEM fractographs of FCP tested L-PBF Inconel 718 (a) CD//BD and (b) CD⊥BD specimens at 25 °C, documented in ΔK_{th} regime.

이처럼 유사한 피로균열전파 파면은 그림 2의 가공방향에 관계없이 유사한 피로균열전파 저항성을 뒷받침해 주고 있다. 30 및 70 MPa√m 영역에서의 파면 관찰 결과, ΔK 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. ΔK_{th} 영역에서는 균열이 δ 상 및 Laves 상을 우회하는 것을 볼 수 있으며, 높은 ΔK 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. ΔK_{th} 영역 및 중간 영역에서 basketweave 및 ductile cleavage 형상을 나타내는 L-PBF 시편과 달리 CM 시편에서는 ΔK_{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 ΔK 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(δ 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 ΔK 영역에서는 많이 관찰되는 반면 높은 ΔK 영역에서는 미세한 2차 균열들이 많이 관찰되었다. 따라서 낮은 ΔK 영역에서의 LOF는 ΔK 가 증가하면서 2차 균열을 발생시킨다고 사료된다.

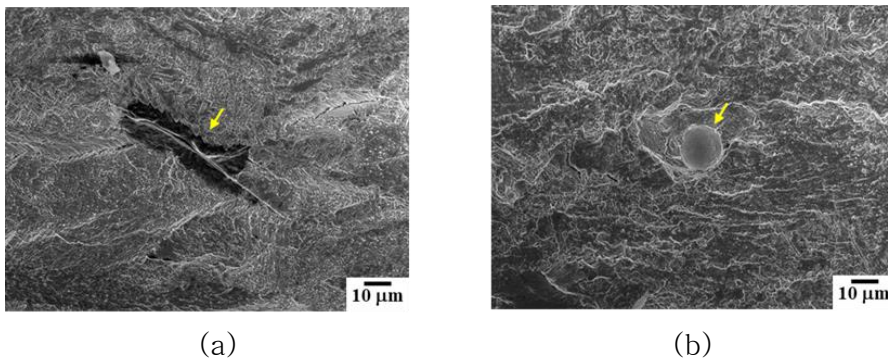


Fig. 4. The SEM fractographs of L-PBF Inconel 718 specimen, FCP-tested at 25 °C, showing (a) lack of fusion (LOF), (b) un-melted powder.

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 ΔK_{th} 값은 6.6 MPa√m으로 25 °C에서 시험된 ΔK_{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 γ' 및 γ'' 상의 조대화가 관찰되었다.

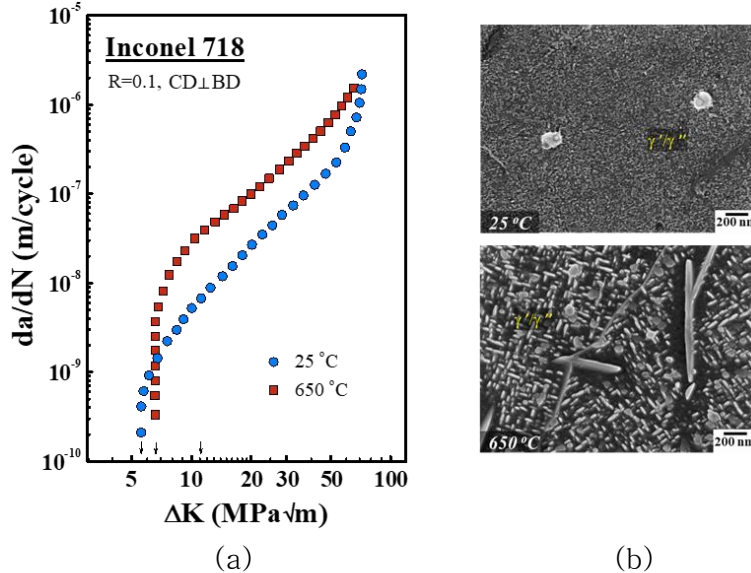


Fig. 5. (a) The da/dN vs ΔK curves of L-PBF Inconel 718 specimens at an testing temperature of 25 and 650 °C and (b) the SEM micrographs of FCP tested L-PBF Inconel 718 specimen.

650 °C에서 시험된 파면의 ΔK_{th} 영역에서 피로줄무늬가 형성된 것을 확인할 수 있으며, 이러한 피로줄무늬는 균열 둔화의 간접적인 증거가 될 수 있다고 보고되고 있다. 반면, 중간 및 높은 ΔK 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, ΔK 가 증가하면 피로균열전파 속도가 증가하여 균열 둔화 효과가 감소하게 된다고 알려져 있다. 즉, 높은 ΔK 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 ΔK_{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) γ' 및 γ'' 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 ΔK 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 ΔK_{th} 영역에서 온도가 25 °C에서 650 °C로 증가함에 따라 향상되는 경향을 나타냈으며, 이는 균열 둔화 현상에 의한 것으로 판단된다. 반면 ΔK 가 증가하면서 고온에서의 환경적 효과들(1) γ' 및 γ'' 상의 조대화, 2) 슬립 이동성 증가)에 의해 피로균열전파 저항성이 열화되는 경향을 나타내었다.