

DED 공정으로 제조된 Ti64 합금의 EAF(environment-assisted fatigue crack propagation) 거동

Environment-assisted fatigue crack propagation behavior of Ti64 alloy fabricated by direct energy deposition (DED) process

초록 : 우수한 부식 및 파괴 특성을 가지는 Ti-6Al-4V(Ti64) 합금은 적층제조 공정에 널리 사용되고 있으나, 부식 환경에서의 파괴(environment-assisted fracture, EAF) 거동에 대해서는 아직 많은 연구가 이루어져 있지 않다. 본 연구에서는 DED(direct energy deposition) 공정으로 제조된 Ti64 합금의 3.5% NaCl 환경에서 피로균열전파 거동을 as-built 및 β -annealed DED Ti64 합금의 EAF 거동을 고찰하였다. 균열전파속도 측정 결과 as-built 및 β -anneal 상태 모두 염화이온 환경에서 EAF 민감도를 나타내었으며, 열처리에 따라 민감도의 변화는 크지 않은 것으로 판단된다. 경로 및 파면 관찰 결과, 균열 선단의 응력확대계수범위(ΔK)를 감소시키는 균열의 분기 정도가 염화이온 환경에서 낮아지는 것을 관찰하였으며, 이러한 경향은 상 경계에서 발생하는 피팅 형태의 부식과 관련이 있는 것으로 사료된다.

Key Words : Ti-6Al-4V, 적층제조 공정, 피로균열전파, 열처리

서 론

Ti-6Al-4V(Ti64) 합금은 타이타늄(Ti) 산업의 핵심 합금이며 생물 의학 및 항공 우주 응용 분야에서 가장 중요한 구조용 합금 중 하나로 간주된다⁽¹⁾. 최근 적층 가공(AM, additive manufacturing) 기술이 널리 적용되고 있으며, 가공 매개변수, 미세 구조 및 기계적 특성 간의 관계를 확인하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다⁽²⁾. 우수한 인장, 손상허용특성 및 내부식성으로 인해 Ti64는 생물 의학 및 항공 우주 산업에서 파손 및 부식에 중요한 부품에 대한 우수한 합금으로 간주된다^(1,3). 그러나 Ti64 합금은 염화이온 환경에서 EAF 거동에 취약한 것으로 알려져 있다⁽⁴⁾. 염화이온의 공격은 Ti 합금 표면에 조밀하게 형성된 부동태 피막을 형성하여 예를 들어 바닷물 환경에서 응력부식균열(SCC, stress corrosion cracking) 및 부식피로(CF, corrosion fatigue)에 더 이상 영향을 받지 않는다는 것이 잘 알려져 있다^(3~5). AM Ti64 제품의 손상허용특성 및 내부식성은 생물 의학 및 항공 우주 산업의 재료 선정 및 설계에 중요한 문제이며 각 주제에 대해 꽤 많은 문헌이 출판되었다^(6~8). 예를 들어 J. Yang 등⁽⁶⁾은 NaCl 용액에서 침상 α 상의 미세 구조를 가진 아크 증착된 Ti64 시편의 내식성이 등축정조직(equiaxed) 및 혼합조직(bi-modal)을 갖는 단조 처리된 잉곳 야금 처리의 것과 유사하다고 보고했다. 그들은 구성상의 유형, 크기 및 형태가 AM Ti64 시편의 부식 거동에 영향을 미치고, 아크 증착된 Ti64 시편이 SLM(선택적 레이저 용융) 시편보다 부식에 대한 저항성이 더 우수하다고 주장했다. 또한 D. Seo 등⁽⁷⁾은 AM Ti64 시편의 전기화학적 안정성이 3.5% NaCl 용액에서 CM(일반적으로 제조된) 대응물과 유사하다고 제안했다. N. Dai 등⁽⁸⁾은 500, 850 및 1000°C에서 2시간 동안 열처리하면 3.5% NaCl 용액에서 부동태 피막의 안정성과 SLM Ti64 시편의 내식성이 감소하는 경향이 있다고 제안했다.

기존 방식으로 제조된 CM Ti64 합금의 환경 보조 파괴(EAF)에 대한 많은 문헌이 있지만 AM Ti64 합금의 EAF 거동에 대한 연구는 제한적이다^(9~10). L. P. Borrego 등⁽⁹⁾은 주변 온도에서 3.5% NaCl 용액에서 SLM Ti64 시편의 피로균열전파(FCP, fatigue crack propagation) 거동에 대한 상당한 환경 영향도 보고했다. 그들은 균열분기점의 감소가 부식 환경에서 AM Ti64의 FCP 저항 감소에 책임이 있다고 제안했다. A. Leon 등⁽¹⁰⁾은 SLM Ti64 시편의 응력부식균열 거동을 2.5×10^{-7} /sec의 변형 속도에서 3.5% NaCl 용액에서 저속인장 시험(SSRT, slow strain rate test)을 사용하여 연구했으며, 응력부식균열에 대한 저항성이 다음과 같다고 보고했다. AM Ti64는 CM에 비해 열등하다. 그들은 응력부식균열 저항성의 감소를 결함상 마르텐사이트 α 상의 미세 구조로 인한 것으로 보고 있다.

본 연구는 염화이온 환경에서 AM Ti64 합금의 EAF(environment-assisted fracture) 저항성을 정량적으로 평가하기 위해 DED(Direct Energy Deposit) 공정으로 제조된 Ti64 시편에 대해 대기 및 3.5% NaCl 용액에서 피로균열전파 시험을 수행했다. 시편은 as-built 또는 β -anneal 상태에서 시험되었다. DED Ti64 시편의 EAF 거동에 대한 환경 및 열처리의 영향은 시험된 시편에 대한 파면 및 경로 분석을 기반으로 논의되었다.

실험 방법

항공기 기체 구조용으로 널리 사용되는 Ti64 합금을 사용하였으며, 이는 Technology Carpenter 에서 구입한 Ti64 분말을 이용해 InssTek(모델 MX-600) 3D 프린터를 사용하여 DED Ti64 시편의 직사각형 블록(64mm x 64mm x 7mm)을 제작했다. DED 공정은 650W의 레이저 출력, 850mm/min의 스캔 속도 및 2.5g/min의 이동속도에서 진행되었다. DED Ti64 시편의 블록은 1시간동안 1,023°C 노출 및 수냉시킨 후, 2시간 동안 732°C 노출 및 공냉시켰다. 인장 시험을 위한 봉상 시험편과 피로균열전파 시험을 위한 CT 시험편을 DED Ti64 합금 블록으로부터 가공했다. 그림 1은 DED Ti64 블록의 사진을 각각 (a) 인장 시편 및 (b) 피로균열전파 시편의 도면과 함께 나타냈다. DED Ti64 시편의 미세구조는 광학현미경(OM, optical microscope)과 주사전자현미경(SEM, scanning electron microscope)을 이용하여 관찰하였다. 미세구조 관찰을 위해 크롬 용액(100mL H₂O + 3mL HNO₃ + 5mL HF)을 사용하여 시편을 연마하고 에칭했다.

표 1은 as-built 및 β -annealed DED Ti64 시편의 인장 특성을 나타냈다. β -annealing을 통해 DED Ti64 시편의 항복 및 인장 강도의 다소 감소하였으나 연신율이 상당히 증가했다.

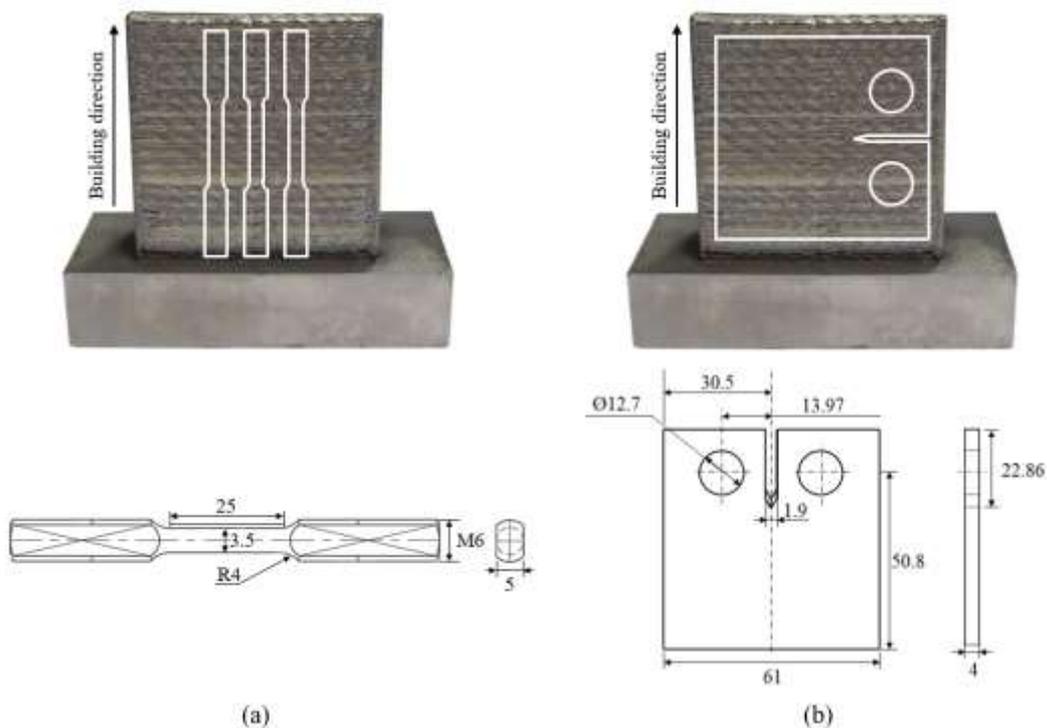


Fig 1. The photo of DED Ti64 blocks with schematic illustration of (a) tensile and (b) FCP specimens prepared from each block.

Table 1. The tensile properties of as-built and β -annealed DED Ti64 specimen.

| Specimen | Heat treatment | Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Tensile elongation (%) |
|----------|-----------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| DED Ti64 | As-built | 938 | 1,027 | 7.9 |
| | β -anneal | 935 | 998 | 8.9 |

부식 및 EAF 특성의 경우, 해안지역 특성과 항공기의 실제 운용 환경을 고려하여, 시험방법 및 환경에 따른 각 특성의 저항성 변화를 파악하기 위해 양분극, 정전위 시험 및 피로균열전파 시험 평가를 진행했다. 양분극 시험은 potentiostat(모델명: Ametek Versa Stat II)장비를 사용하여 실온에서 1 mV/sec의 스캔 속도로 E_{corr} , E_{pit} 및 I_{corr} 를 얻기 위해 3.5% NaCl 용액에서 as-built 및 β -annealed DED Ti64 시편에 대해 양분극 시험을 수행했다. ASTM G5 규격을 의거하여, 각 조건에 대해 적어도 3중 시험을 진행했다⁽¹¹⁾. 정전위 시험은 양분극 시험과 동일 장비를 사용해 7V의 양극 전위를 30분 동안 인가하였다.

EAF 특성은 동적재료시험기(모델명: Instron 8801) 및 potentiostat(모델명: WPG 100)장비를 이용하였으며, as-built 및 β -annealed DED Ti64 시편을 대기 및 $E_{corr} + 0.05 V_{SCE}$ 의 양극 전위 인가하는 3.5% NaCl 환경에서의 피로균열전파 시험을 통해 평가했다. 또한 ASTM E647 규격을 의거해 하중비(R ratio) 0.1, 10Hz의 주파수의 사인 곡선(sine-curve) 형태로 하중을 인가하고, DCPD(direct current potential drop)법을 이용하여 피로균열의 길이를 측정하였다⁽¹²⁾. 그림 2는 피로균열전파 시험의 시스템을 나타냈다.

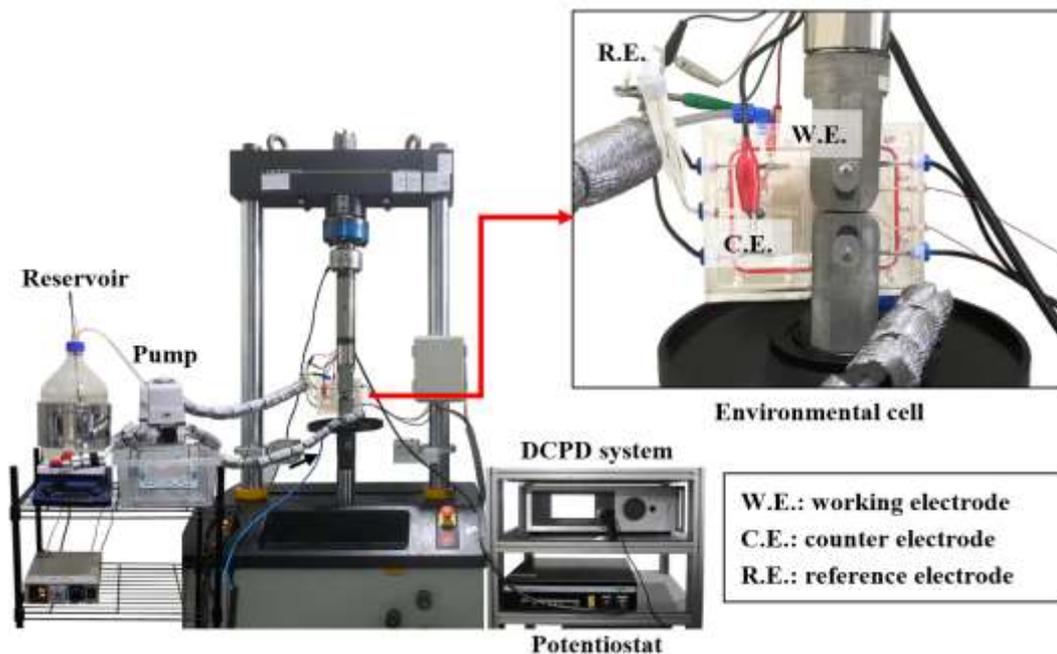


Fig 2. The photos of FCP testing system in an aqueous environment under controlled potential.

실험 결과 및 고찰

1) 미세조직 분석

그림 3은 DED Ti64 합금의 (a) as-built 및 (b) β -anneal 상태의 미세조직을 각각 보여준다. As-built DED Ti64의 미세구조는 적층 방향(BD, building direction)을 따라 연장된 큰 입자 내에서 무작위로 배향된 침상 α 상으로 구성되어 있다. 적층 방향을 따라 성장한 β 결정립 크기는 β -anneal 후 평균 결정립 크기가 196 μm 인 등축 β 결정립이 되는 경향이 있었는데, 이는 DED 공정 동안 형성된 잔류응력으로부터 저장된 에너지에 의해 상변태 온도 이상에서 결정립 재결정화가 발생했음을 알 수 있다. 침상 α 상의 형태와 분포는 변하지 않았지만 침상 α 상의 평균 크기는 β -annealing에 따라 증가했습니다. β -annealed DED Ti64 시편에 대한 침상 α 상의 평균 너비와 길이는 1.6 및 56 μm 인 반면, as-built DED Ti64 시편의 경우 0.8 및 20 μm 로 비교적 미세한 것을 확인할 수 있다. 추가로 침상 α 상의 평균 너비를 측정된 값의 히스토그램을 그림 3(c)와 (d)에 함께 나타냈다.

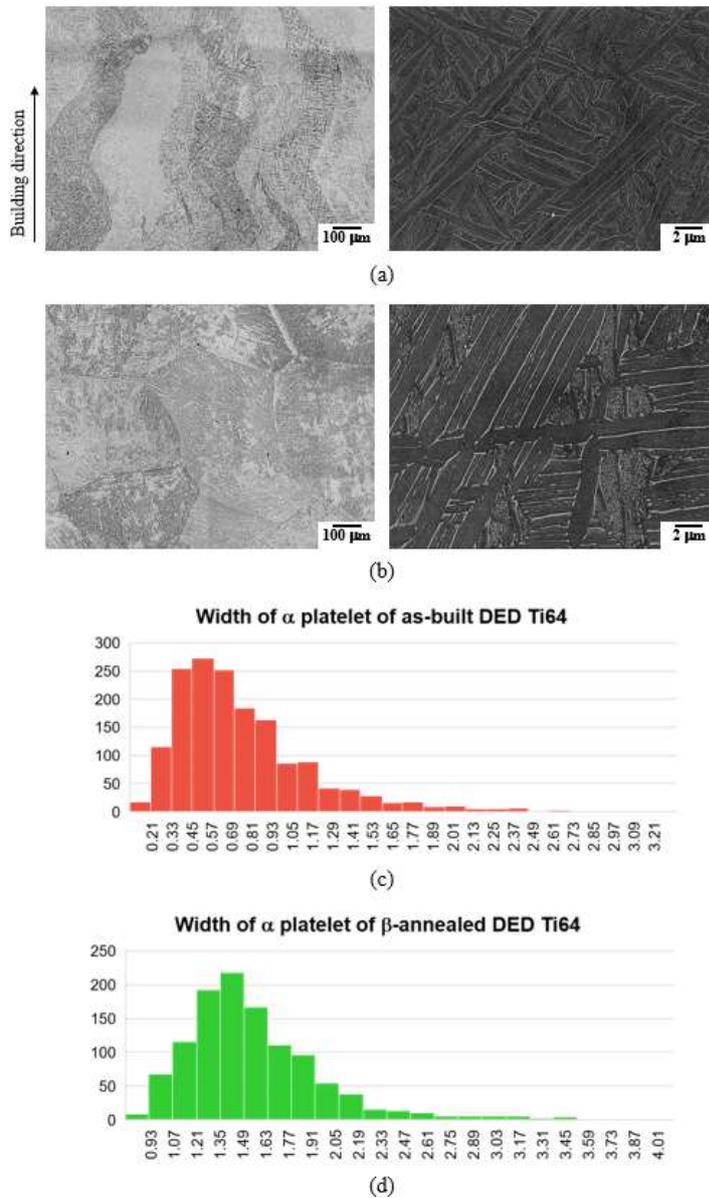


Fig 3. The microstructure of DED Ti64 alloy in its (a) as-built and (b) β -annealed condition. The histograms for width of α platelet of (c) as-built, (d) β -annealed DED Ti64 alloy, is also included.

2) 양분극 및 정전위 시험을 통한 부식 거동 분석

그림 4는 25°C에서 3.5% NaCl 용액에서 as-built 및 β-annealed DED Ti64 시편의 양분극 곡선을 보여준다. 비교를 위해 β-annealed CM Ti64 합금도 함께 나타냈다. DED와 CM Ti64 시편의 E_{corr} 값은 유사한 반면, I_{corr} 값은 DED 시편보다 CM 시편에서 다소 우수하다.

AM Ti64 시편의 전기화학적 안정성과 CM 시편의 전기화학적 안정성은 유사하거나 AM 시편이 약간 열등한 것으로 이전에 여러 문헌에서 보고되고 있다^(6~8). 예를 들어 D. Seo 등⁽⁷⁾은 3.5% NaCl 용액에서 AM Ti64 합금과 CM Ti64 합금의 전기화학적 안정성이 서로 비슷하다고 보고한 반면, A. Leon 등⁽¹⁰⁾은 L-PBF Ti64 합금의 내식성이 CM Ti64 합금보다 낮다는 것을 발견했다. 또한 그림 4에서 as-built 및 β-annealed DED Ti64 시편의 E_{corr} 및 I_{corr} 값이 서로 유사하여 β-annealing이 3.5% NaCl 용액에서 DED Ti64 합금의 전기화학적 안정성에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단된다. 반면 J. Yang 및 N. Dai 등^(6, 8)은 L-PBF Ti64 합금의 부식 저항성은 미세조직적 인자의 영향이 존재하며, E_{corr} 값은 침상 α상이 클수록 향상된다고 보고했다.

DED Ti64 시편의 형태 및 부식 손상 위치를 확인하기 위해 각각 7.0 V_{SCE}의 양극 전위를 인가한 3.5% NaCl 용액에서 정전위 시험을 수행했습니다. 그림 5는 as-built DED Ti64 시편을 이용해 3.5% NaCl 용액에서 정전위 시험을 진행한 후 표면 상태를 SEM 현미경을 이용해 관찰한 사진이다. β상은 침상 α상보다 전기화학적으로 열등하며, DED Ti64 시편에서 β상은 선택적으로 부식되는 것으로 밝혀졌다. DED Ti64 시편의 부식 손상 초기 단계에서 침상 α상과 β상 사이의 계면 영역은 3.5% NaCl 용액에서 부식에 대한 우선적인 위치로 사용되었으며, 이는 상 경계면에서 형성된 피팅 형상을 통해 알 수 있다.

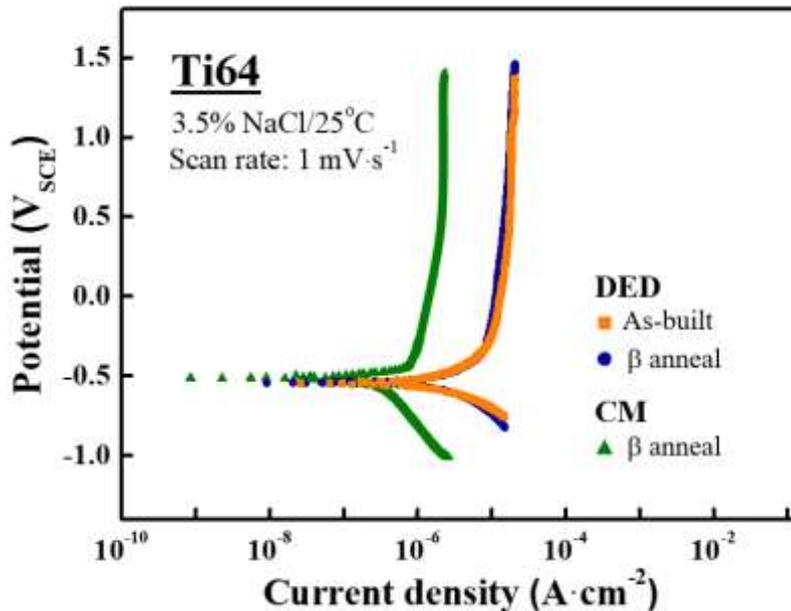


Fig 4. The potentiodynamic polarization curves of as-built and β-annealed DED Ti64 alloys in 3.5% NaCl solution at 25°C. For comparison, that of β-annealed CM Ti64 alloy is also included.

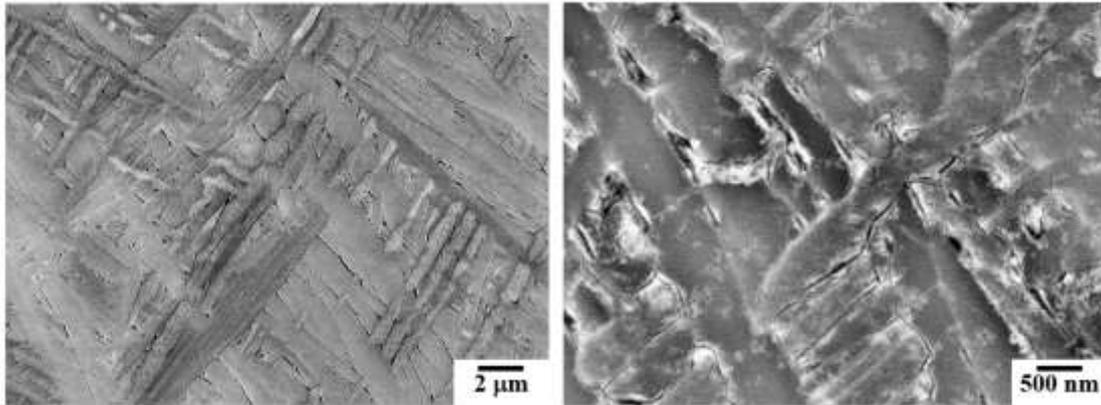


Fig 5. The SEM micrographs of as-built DED Ti64 specimen after potentiodynamic test in 3.5% NaCl solution.

3) 부식 피로균열전파 시험을 통한 EAF 특성 평가 및 분석

그림 5는 하중비 0.1에서 $-0.51 V_{SCE}$ ($E_{corr}+0.05V_{SCE}$)의 양극 인가 전위에서 대기 및 3.5% NaCl 용액에서 (a) as-built 및 (b) β -annealed DED Ti64 시편의 $da/dN-\Delta K$ 곡선을 나타낸다. 비교를 위해 β -annealed CM Ti64 시편의 하중비 0.1, 10Hz의 주파수에서 진행된 피로균열전파 특성을 그림 5(c)에 나타냈다.

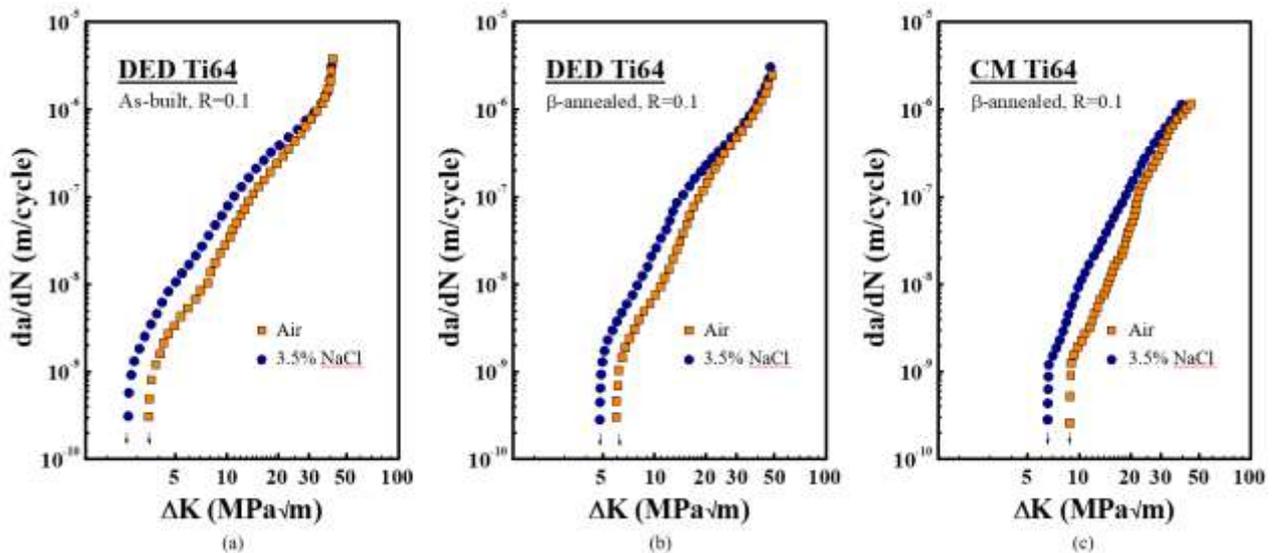


Fig 5. The $da/dN-\Delta K$ curves of (a) as-built and (b) β -annealed DED Ti64 alloys, FCP-tested in air and 3.5% NaCl solution at an R ratio of 0.1 and a frequency of 10 Hz. For comparison, those of β -annealed CM Ti64 specimen.

그림 6은 피로균열전파 시험 후 (a) as-built DED Ti64 시편 및 (b) β -annealed CM Ti64 시편의 피로균열 경로와 파면을 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. 벽개 메커니즘(cleavage mechanism)에 의한 균열 성장 경향은 무작위로 배향된 침상 α 상보다 침상 α 상의 콜로니(colony) 조직을 가진 Ti64 합금에서 실질적으로 더 크다고 이전에 보고되었다^(13~14). 실제로 침상 α 상의 콜로니 조직이 존재하는 CM Ti64 시편의 파단면에서 잘 발달된 큰 벽개파면이 관찰되었다(그림 4(b)). 앞에서 언급했듯이, 큰 벽개파면은 상대적으로 장애물이 적고 균열 선단에서 축적되는 손상이 적은 균열 성장을 확인할 수 있다. 반면 DED Ti64 시편의 경우 소위 "연성 벽개(ductile-cleavage)" 파괴 메커니즘이 두드러지게 나타났다.

Ti64 합금은 용도에 따라 다양한 열처리 조건을 사용할 수 있다⁽¹³⁾. 그 중 β -annealing은 피로균열전파 저항성이 우수하기 때문에 항공우주 산업에서 거의 독점적으로 사용된다⁽¹⁵⁾. β -annealed Ti64 합금의 피로균열전파에 대한 우수한 저항성은 종종 침상 α 상 특성에 기인하여 균열 분기점을 유발하는 것이 대표적인 원인이다⁽¹⁵⁾. 피로균열은 α 상을 절단하거나 α 상 사이의 경계를 따라가는 경향이 있기 때문에 무작위로 배향된 α 상의 미세조직에서 분기 현상이 발생할 수 있다. 분기된 균열 선단에서 유효 응력 집중 계수가 감소하여 균열전파속도가 감소하게 된다.

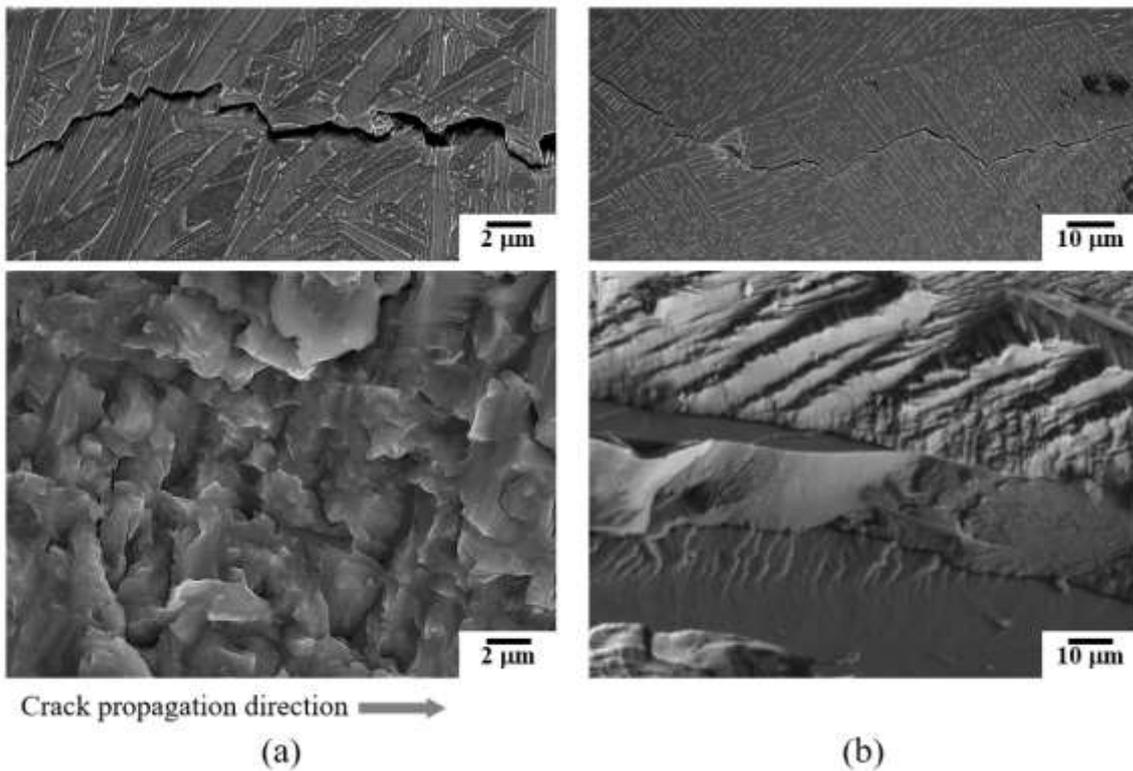


Fig 6. The crack paths and fractographs documented by SEM for the FCP-tested (a) as-built DED Ti64 specimen and (b) β -annealed CM Ti64 specimen.

그림 7은 피로균열전파 시험 후 (a) as-built 및 (b) β -annealed DED Ti64 시편의 약 40MPa/m의 높은 ΔK 영역에서 관찰한 파면 사진이다. 두 DED Ti64 시편의 파괴인성 차이가 있음에도 불구하고, 피로균열전파 시편의 전체 파괴 거동은 유사하게 나타났다. 또한 고배율로 관찰한 파면은 DED Ti64 시편에 대해 높은 ΔK 영역에서 종종 관찰되는 줄무늬(striation) 영역을 보여준다. 또한 그림 8은 as-built DED Ti64 시편의 피로균열 단면을 EBSD 분석한 것으로, 균열 경로가 β 결정립 경계에 따른 영향이 미미한 것을 알 수 있다.

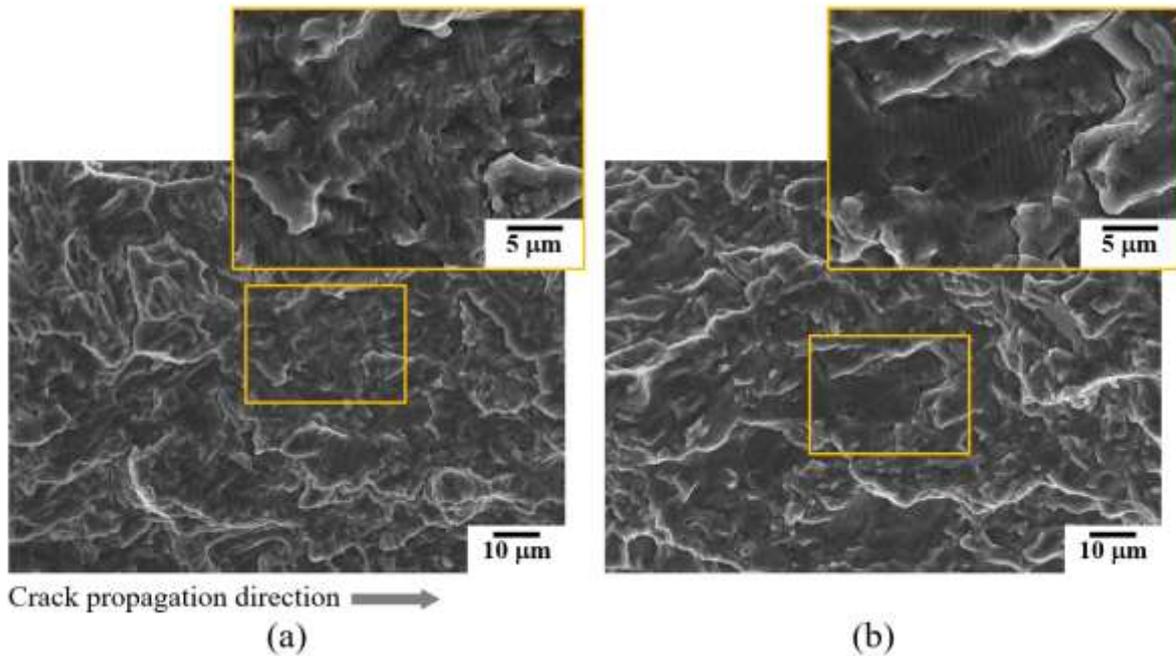


Fig 7. The SEM fractographs of (a) as-built, (b) β -annealed DED Ti64 specimens, documented in high ΔK regime of approximately 40 MPa \sqrt{m} , where the high-magnification SEM fractographs in the inserts show fine striations.

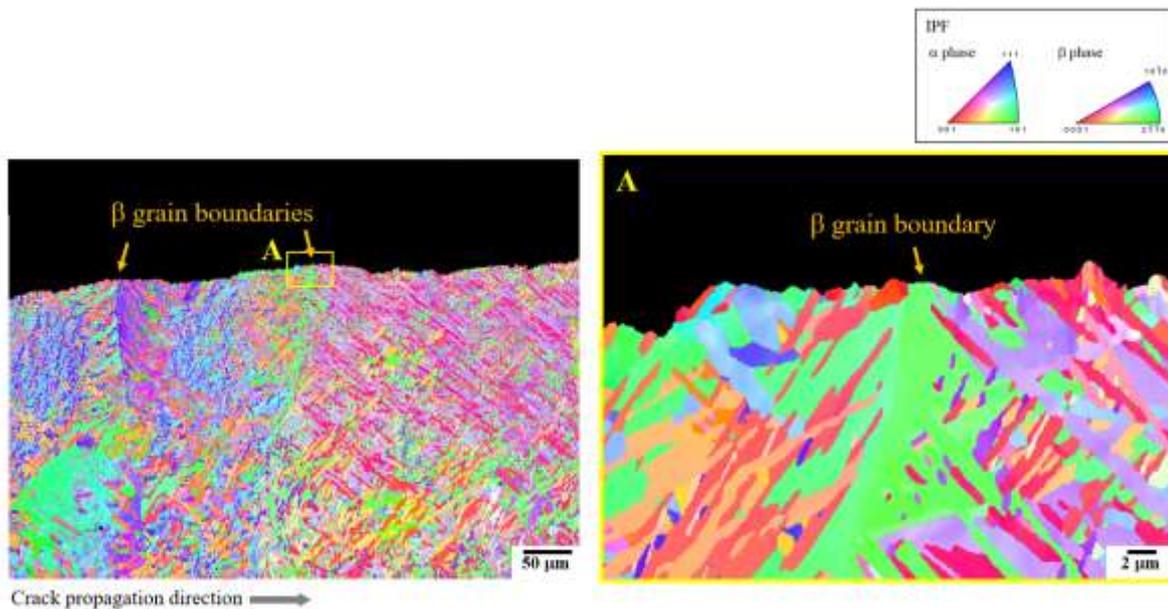


Fig 8. The EBSD cross-sectional views of as-built DED Ti64 specimen, FCP-tested and documented at (a) low-magnification showing β grain boundaries and (b) high-magnification in the vicinity of β grain boundaries.

다시 그림 5를 보면 $E_{corr} + 0.1 V_{SCE}$ 의 양극 전위가 인가되는 3.5% NaCl 용액에서 노출된 상태에서의 (a) as-built 및 (b) β -annealed DED Ti64 시편의 피로균열전파에 대한 저항성이 낮고 중간 ΔK 영역까지 상당히 감소했음을 분명히 보여준다. 피로균열전파 수명의 대부분은 낮은 ΔK 영역에서 소비되기 때문에 균열이 성장하지 않는 임계값 근처 ΔK 값(ΔK_{th})은 금속의 피로균열전파 저항성을 평가하는 가장 중요한 매개변수이다. 균열성장의 시작에 대한 ΔK_{th} 값과 최종 파괴에 대한 K_c 값은 모두 특정 금속에 대한 재료 상수다. 균열전파속도 da/dN 은 이 두 값 사이의 기울기에 의해 결정되며, 이를 종종 Paris' slope이라고 한다. 표 2는 대기 및 3.5% NaCl에서 as-built 및 β -annealed DED Ti64 시편의 ΔK_{th} 값과 Paris' slope를 나타냈다. ΔK_{th} 값의 감소율은 as-built 및 β -annealed DED Ti64 시편에 대해 각각 23% 및 20%였으며, 이는 DED Ti64 합금이 염화이온 환경에서 EAFCP(environment-assist fatigue crack propagation) 거동에 취약함을 알 수 있다.

대기와 3.5% NaCl 용액에서 DED Ti64 시편의 균열전파속도 차이는 da/dN 이 증가함에 따라 환경의 영향이 감소하기 때문에 ΔK 가 증가함에 따라 무시할 수 있다. DED Ti64 시편의 최종 파괴에 대한 K_{max} 값은 Paris' slope와 같이 염화이온 환경에 대한 영향을 받지 않는다. 따라서 그림 5(a)와 5(b)의 비교는 β -annealing이 DED Ti64 시편의 EAFCP에 대한 민감도에 영향을 미치지 않음을 나타낸다.

염화이온 환경에서 DED Ti64 시편의 EAFCP 거동을 이해하기 위해 피로균열전파 시험을 진행한 후 시편의 파단면 및 균열 경로를 분석했다. 그림 9는 대기 및 3.5% NaCl 용액에서 피로균열전파 시험을 거친 후 피로 균열 경로 사진으로 (a) as-built DED Ti64 시편 및 (b) β -annealed CM Ti64 시편을 나타냈다. β -annealing과 함께 증가한 미세조직에 의해 벽개파면이 증가하여 결과적으로 슬립가역성이 더 큰 균열 성장을 나타냅니다. 따라서 균열 선단에 축적되는 피로 손상이 줄어들기 때문에 피로균열전파에 대한 저항성이 증가할 수 있다.

Table 2. The ΔK_{th} values and Paris' slopes for as-built and β -annealed DED Ti64 specimens in air and 3.5% NaCl solution.

| Heat treatment | Test condition | ΔK_{th} (MPa \sqrt{m}) | Paris' slope | Reduction in ΔK_{th} (%) |
|-----------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------|----------------------------------|
| As-built | Air | 3.5 | 3.0 | - |
| | 3.5% NaCl/ $E_{corr}+0.05 V_{SCE}$ | 2.7 | 2.6 | 23 |
| β -anneal | Air | 6.0 | 3.6 | - |
| | 3.5% NaCl/ $E_{corr}+0.05 V_{SCE}$ | 4.8 | 3.2 | 20 |

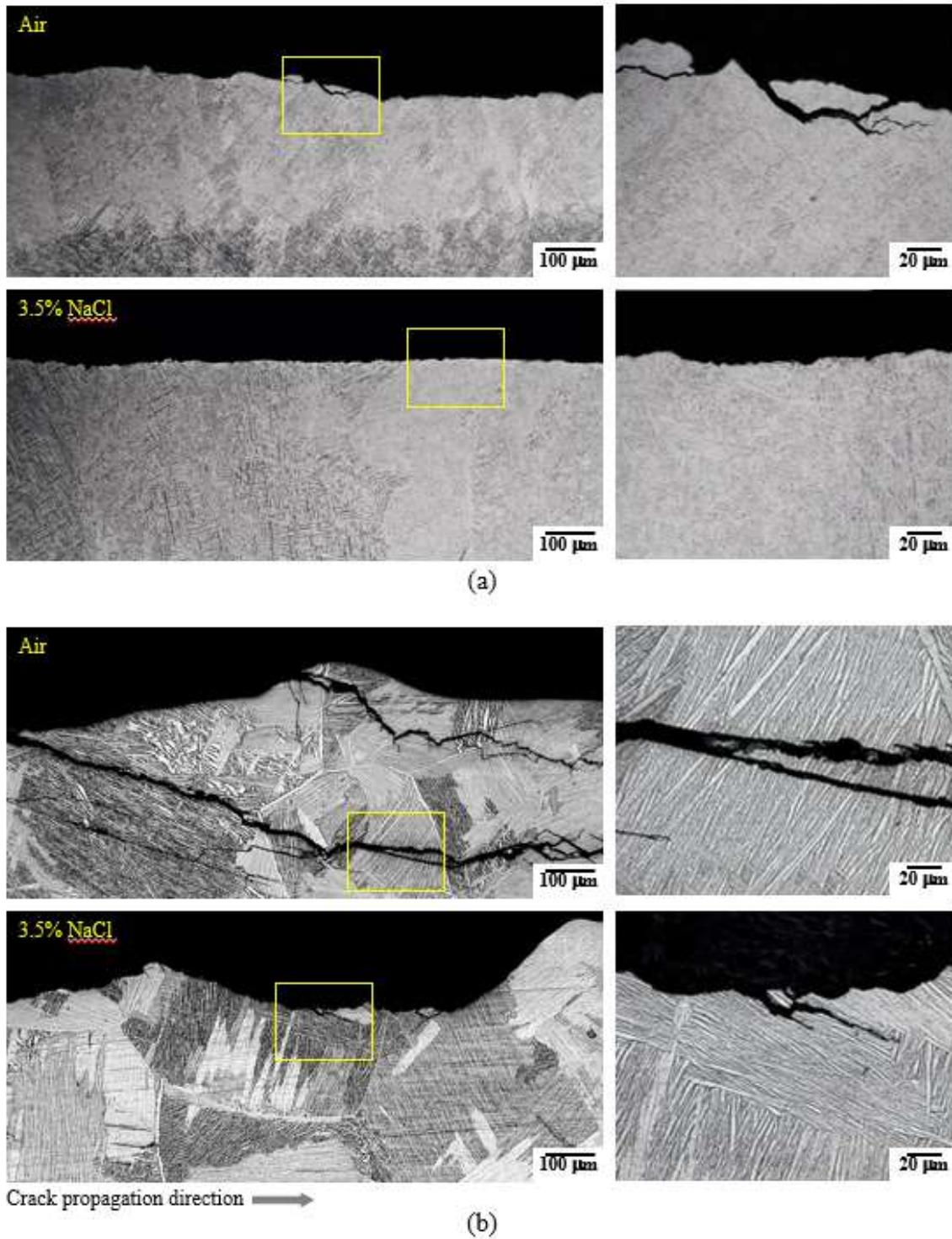


Fig 9. The crack paths of (a) as-built DED Ti64 specimen and (b) β -annealed CM Ti64 in low magnification optical micrographs.

As-built 및 β -annealed DED Ti64 시편 모두의 벽파개면 영역의 수는 3.5% NaCl 용액보다 대기 중에서 더 많았다. 이 평평한 벽개파면은 α 상을 절단하는 대신 침상 α 상 경계를 따르는 균열에 의해 형성되는 것으로 알려져 있다. 그림 8은 (a) 대기 및 (b) 3.5% NaCl 용액에서 피로균열전파 시험을 거쳐 평평한 벽개파면 영역이 as-built 상태에 비해 β -anneal 상태에서 많이 관찰된다.

침상 α 상의 미세조직을 갖는 Ti64 합금의 경우, 3.5% NaCl 용액의 부식은 침상 α 상을 선택적으로 공격하고 α 및 β 상 사이의 경계를 따라 성장하는 균열 선단에서 균열 둔화(blunting)를 유발할 수 있다. 그림 10은 (a) 대기 및 (b) 3.5% NaCl 용액에서 피로균열전파 시험 후 as-built DED Ti64 합금의 균열 경로를 보여주는 고배율 주사전자현미경 사진을 나타낸다. 다수의 부식 피x팅(화살표로 표시)이 균열 경로를 따라 발견되었으며, 이는 그림 5의 정전위 시험 후 시편에 표시된 것과 유사하다. 따라서 다음 균열에 대한 유효 ΔK 는 비해 침상 α 상과 β 상 사이의 계면에서 우선적인 부식으로 인해, α 상을 절단하는 경향이 감소하게 된다.

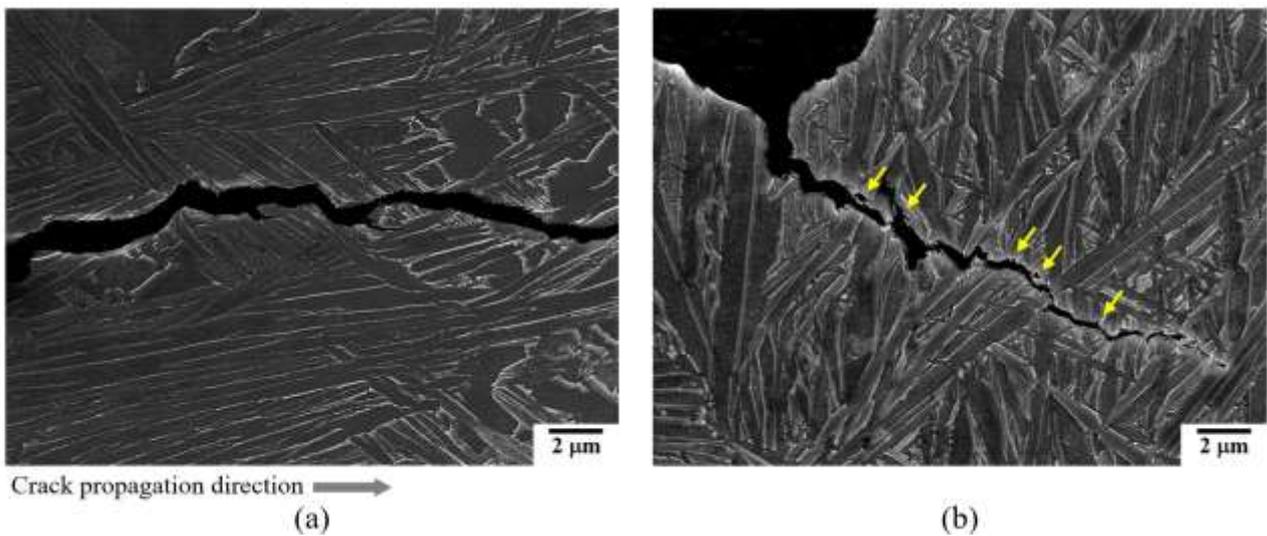


Fig 10. The SEM micrographs showing the crack path of FCP-tested DED Ti64 alloys in (a) air and (b) 3.5% NaCl solution.

결 론

DED Ti64 시편의 EAF 거동은 대기 및 양극 전위 인가되는 3.5% NaCl 용액에서 피로균열전파 시험을 수행하여 조사한 결과, 다음과 같은 결론이 도출되었다.

1. 침상 α 상과 β 상 사이의 계면 영역은 3.5% NaCl 용액에서 부식에 대한 우선적인 위치로 사용되었으며, 이는 상 경계면에서 형성된 피팅 형상을 관찰할 수 있으며, as-built 및 β -annealed DED Ti64 합금의 부식 특성은 유사하다.
2. 본 연구에서는 DED(direct energy deposition) 공정으로 제조된 Ti64 합금의 3.5% NaCl 환경에서 피로균열전파 거동을 as-built 및 β -annealed DED Ti64 합금의 EAF 거동을 고찰하였다. 균열전파속도 측정 결과 as-built 및 β -anneal 상태 모두 염화이온 환경에서 EAF 민감도를 나타내었으며, 열처리에 따라 민감도의 변화는 크지 않는 것으로 판단된다.
3. 경로 및 파면 관찰 결과, 균열 선단의 응력확대계수범위(ΔK)를 감소시키는 균열의 분기 정도가 염화이온 환경에서 낮아지는 것을 관찰하였으며, 이러한 경향은 상 경계에서 발생하는 피팅 형태의 부식과 관련이 있는 것으로 사료된다. 본 연구에서는 DED(direct energy deposition) 공정으로 제조된 Ti64 합금의 3.5% NaCl 환경에서 피로균열전파 거동을 as-built 및 β -annealed DED Ti64 합금의 EAF 거동을 고찰하였다. 균열전파속도 측정 결과 as-built 및 β -anneal 상태 모두 염화이온 환경에서 EAF 민감도를 나타내었으며, 열처리에 따라 민감도의 변화는 크지 않는 것으로 판단된다. 경로 및 파면 관찰 결과, 균열 선단의 응력확대계수범위(ΔK)를 감소시키는 균열의 분기 정도가 염화이온 환경에서 낮아지는 것을 관찰하였으며, 이러한 경향은 상 경계에서 발생하는 피팅 형태의 부식과 관련이 있는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] H. J. Kwon, K. R. Lim, Y. T. Lee, D. G. Lee, J. H. Lee and S. E. Kim, "Effect of Aging Time and Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-39Nb-6Zr Alloy," *Materials Science Engineering A*, vol. 54, pp. 925-930, Dec. 2016.
- [2] R. C. Baker and B. Charlie, "A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718," *Additive Manufacturing*, vol. 30, 100877, Dec. 2019.
- [3] Y. L. Zhou, M. Niinomi, T. Akahori, H. Fukui and H. Toda, "Corrosion resistance and biocompatibility of Ti-Ta alloys for biomedical applications," *Materials Science Engineering A*, vol. 398, pp. 28-36, May 2005.
- [4] D. Jeong, J. Park, S. Ahn, H. Sung, Y. Kwon and S. Kim, "Effect of stabilization annealing on SCC susceptibility of β -annealed Ti-6Al-4V alloy in 0.6 M NaCl solution," *Metals and Materials International*, vol. 24, pp. 101-111, Jan. 2018.
- [5] S. Ahn, D. Jeong, Y. Kwon, M. Goto, H. Sung, Y. Kwon and S. Kim, "Environmental fatigue crack propagation behavior of β -annealed Ti-6Al-4V alloy in NaCl solution under controlled potentials," *International Journal of Fatigue*, vol. 111, pp. 186-195, June 2018.
- [6] J. Yang, H. Yang, H. Yu, Z. Wang and X. Zeng, "Corrosion behavior of additive manufactured Ti-6Al-4V alloy in NaCl solution," *Metallurgical and Materials Transaction A*, vol. 48, pp. 3583-3594, Sep. 2017.
- [7] D. Seo and J. B. Lee, "Corrosion characteristics of additive-manufactured Ti-6Al-4V using microdroplet cell and critical pitting temperature techniques," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 166, pp. 428-433, Sep. 2019.
- [8] N. Dai, J. Zhang, Y. Chen and L. C. Zhang, "Heat treatment degrading the corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 164, pp. 428-434, Sep. 2017.
- [9] L. P. Borrego, J. D. Jesus, J. A. M. Ferrerira, J. D. Costa and C. Capela, "Environmental effect on the fatigue crack propagation of AM Ti-6Al-4V alloy specimen," *Procedia Structural Integrity*, vol. 17, pp. 562-567, Sep. 2019.
- [10] A. Leon, G. K. Levy, T. Ron, A. Shirizly and E. Aghion, "The effect of hot isostatic pressure on the corrosion performance of Ti-6Al-4V produced by an electron-beam melting additive manufacturing process," *Additive Manufacturing*, vol. 33, 101039, May. 2020.
- [11] ASTM International: Standard reference test method for making potentiodynamic anodic polarization measurements G5, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [12] ASTM International: Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates E647, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
- [13] W. Seo, D. Jeong, D. Lee, H. Sung, Y. Kwon and S. Kim, "Effects of cooling rate and stabilization annealing on fatigue behavior of β -processed Ti-6Al-4V alloys," *Metals and Materials International*, vol. 23, pp. 648-659, July. 2017.
- [14] D. Jeong, Y. Kwon, M. Goto and S. Kim, "Environmental fatigue crack propagation behavior of β -annealed Ti-6Al-4V alloy in NaCl solution under controlled potentials" *International Journal of Fatigue*, vol. 111, pp. 186-195, June. 2018.
- [15] G.R. Yoder, L.A. Cooley and T.W. Crooker, "Observations on microstructurally sensitive fatigue crack growth in a widmanstätten Ti-6Al-4V alloy" *Metallurgical Transactions A*, vol. 99, pp. 313-320, Nov. 1977.