

NaCl과 NaBr수용액에서 적층가공으로 제조된 Ti-6Al-4V 합금의 공식 저항성 비교

서 동 일 · 이 재 봉[†]

국민대학교 공과대학 신소재 공학부, 02707 서울시 성북구 정릉로 77
(2019년 5월 15일 접수, 2019년 6월 13일 수정, 2019년 6월 13일 채택)

Comparing Resistances to Pitting Corrosion of Additive Manufactured Ti-6Al-4V Alloys in NaCl and NaBr Aqueous Solutions

Dong-Il Seo and Jae-Bong Lee[†]

School of Advanced Materials Engineering, Kookmin University, 77 Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02707, Republic of Korea
(Received May 15, 2019; Revised June 13, 2019; Accepted June 13, 2019)

Resistances to pitting corrosion of additive manufactured (AM) Ti-6Al-4V alloys in 0.6 M NaBr and 0.6 M NaCl aqueous solutions were compared using micro-droplet cell techniques. With respect to the pitting corrosion resistance, this study focused on two different types of halide anions in aqueous solutions, i.e. Br⁻ and Cl⁻. The differences between Br⁻ and Cl⁻ halide anions for breakdown on passive films of AM Ti-6Al-4V alloy were explained using Langmuir adsorption model with their equilibrium adsorption coefficients. The results of the analysis showed that the lower resistance to pitting potential of AM Ti-6Al-4V alloy in Br⁻ aqueous solution was attributed to the higher equilibrium adsorption coefficient of Br⁻. In addition, micro-electrochemical test results showed that the pitting corrosion resistance of dark grains in additive manufactured Ti-6Al-4V alloy was lower as compared to that of bright grains due to the larger volume of α' phase that caused the susceptibility to pit initiation.

Keywords: Pitting corrosion, Additive manufacturing, Halide anion, Polarization, Langmuir adsorption model

1. 서론

높은 강도에 비하여 가벼운 무게를 지니며 우수한 내식성을 가진 타이타늄 합금은 우주항공, 해양 구조물 그리고 생체재료와 같은 많은 산업분야에 사용되고 있다 [1]. 최근에 기존 주조나 절삭가공으로 제조하는 타이타늄 합금을 적층가공 공법으로 제조하는데 이는 타이타늄 합금재료의 비싼 가격이 제일 큰 요소로 작용한다. 적층가공으로 제조하면 절삭가공으로 제조할 시 버려지는 타이타늄 재료의 양을 약 1/20까지 감소시킬 수 있는 장점이 있으며 [2] 또한 용접이나 리벳팅의 필요성이 없어짐에 따라 2차적인 공정이 불필요하게 된다. 이러한 적층가공 공정에는 크게 Powder Bed Fusion (PBF) 방식과 Directed Energy Deposition

(DED) 방식이 존재하는데 PBF 방식은 틀에 분말을 넣고 전자빔을 주사하여 적층하는 방식이며 DED 방식은 분말을 분사하고 그 위에 레이저를 주사하는 방식을 반복하여 적층하는 방식이다 [3]. 본 연구에서는 DED 방식 중 하나인 Laser-aided Direct Metal Tooling (DMT) 방식을 이용하여 적층가공된 Ti-6Al-4V 합금을 실험에 사용하였다 [4].

적층가공된 Ti-6Al-4V 합금은 공정 시 적층을 위한 레이저가 지나간 뒤 급랭에 의해 생성되는 마르텐사이트 α' 상이 적층가공된 Ti-6Al-4V 합금의 내식성에 나쁜 영향을 주는 것으로 알려져 있다 [5]. 종래의 주조나 절삭가공으로 제조되는 기존 Ti-6Al-4V 합금은 주로 α 와 β 상으로 이루어진 이상조각인데 적층가공 Ti-6Al-4V 합금은 적층가공 공정 중 급랭현상에 의한 마르텐사이트 α' 상이 α 와 β 상과 혼재하게 된다. Seo와 Lee [6]는 기존의 α 상과 α' 상의 구별을 위하여 X-ray diffraction (XRD) 분석

[†]Corresponding author: leejb@kookmin.ac.kr

을 시도하였지만 두 상이 같은 Hexagonal Close Packed (HCP) 구조를 지녀 정확한 상의 구분이 용이하지 않아 그 대신 결정립내 침상조직의 정도 차이에 따른 어두운 결정립과 밝은 결정립 각각에 대하여 비커스 미세경도를 측정하므로 결정립 간의 α' 상의 분포 차이를 추정하였다. Lee등은 스테인리스 강의 공식 저항성 측정에 마이크로 드로플릿 셀 기법을 사용한 바 있는데 [7] 이 방식을 NaCl수용액에 침지한 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 각 결정립의 공식 저항성 측정에 적용하였다. α' 상의 분포가 많은 어두운 결정립의 경우 공식전위와 이와 일치하는 공식을 확인하였지만 α' 상의 분포가 상대적으로 적은 밝은 결정립에서는 공식전위를 확인할 수 없었고 공식도 발생하지 않았다 [6].

한편 Basame 등은 수용액 내 Cl^- 이온과 Br^- 이온과 같은 할로젠 이온이 공식에 미치는 영향을 조사하였는데 그들에 따르면 타이타늄 합금의 경우 Br^- 이온이 Cl^- 이온보다 공식에 주는 영향이 더 큰 것을 확인하였는데, 이에 대한 원인은 Br^- 이온의 평형흡착계수가 Cl^- 이온의 평형흡착계수보다 더 크기 때문이라고 주장하였다 [8]. Basame 등의 연구에서는 양이온은 고정시킨 채 다양한 할로젠 음이온을 포함하는 여러 수용액을 사용하여 타이타늄 합금의 공식 저항성을 조사하였는데, Br^- 이온을 포함한 수용액에서 가장 낮은 공식 전위를 관찰하였으며 또한 단일층표면에 물질이 흡착하는 정도를 나타내는 모델인 Langmuir 표면 흡착 모델 [9]을 공식 전위에 대한 결과에 적용하여 평형흡착계수를 구한 뒤 Br^- 이온과 Cl^- 이온의 흡착 정도에 따른 타이타늄 합금의 두 용액에서의 공식 저항성을 상호 비교하므로 Langmuir 흡착 모델과 공식전위와의 관계를 Br^- 이온과 Cl^- 이온의 농도의 함수로 나타내어 결과를 해석하였다.

따라서 본 연구는 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 내식성, 특히 공식저항성에 대하여 0.6 M NaCl 수용액뿐만 아니라 0.6 M NaBr 수용액을 사용하여 0.6 M NaCl 수용액에서는 공식전위가 나타나지 않아 확인할 수 없었던 밝은 결정립의 공식 전위를 0.6 M NaBr 수용액에서 다시 측정하여 공식전위를 구하고자 한다. 또한 실험에 사용된 두 수용액에 포함되어 있는 Br^- 이온과 Cl^- 이온같은 할로젠 음이온이 각각 공식 저항성에 주는 영향을 동전위 분극곡선 실험을 통하여 측정한 후 Langmuir 흡착 모델을 이용하여 Br^- 이온과 Cl^- 이온간의 평형흡착계수를 구하고 두 이온의 평형흡착계수가 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 공식전위에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시편과 실험용액 준비

DMT 방식으로 제조된 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 제

조를 위하여 합금의 분말 (C: 0.011, Fe: 0.18, Al: 6.1, V: 3.7, Sn: 0.01, Ti: Bal)로 DMT 적층 시스템 (InssTek, MX-4, Korea)을 사용하여 잉곳을 제작하였으며 제조된 적층가공 Ti-6Al-4V 합금은 와이어 커팅을 이용하여 26 mm × 25 mm × 2 mm 부피의 시편을 적층방향에 평행하거나 수직방향으로 절단하여 전기화학 시험에 각각 사용하였다.

모든 시편은 2000 grit의 연마지까지 연마한 다음 1 μm 알루미나로 다시 연마한 뒤 2차 증류수로 세척한 후 건조하여 실험에 사용하였다. 실험 용액은 0.6 M NaCl 수용액과 0.6 M NaBr 수용액을 각각 제조하여 상온에서 사용하였다.

2.2 광학 현미경 관찰 및 비커스 미세 경도 측정

광학 현미경 관찰을 위하여 10 mL 질산, 5 mL 불산, 그리고 100 mL 증류수를 혼합한 에칭 용액을 사용하였다. 광학 현미경 (Union MC 86410, Japan)을 사용하여 전기화학적 실험 전후의 시편 표면을 관찰하였으며, 비커스 미세 경도기 (Mitutoyo HM-211)를 이용하여 절삭가공과 적층가공 Ti-6Al-4V 합금표면의 서로 각기 다른 어두운 결정립 혹은 밝은 결정립의 비커스 경도를 각각 측정하였다.

2.3 전기화학적 실험

전위차계 (Gamry PCIB-4750)를 이용하여 전기화학적 동전위 분극 실험을 실시하였다. 특히, 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 서로 다른 결정립의 내식성을 각각 독립적으로 측정하기 위하여 결정립 표면에 μm 단위의 미세전기화학적 실험을 할 수 있는 마이크로 드로플릿 셀 기법 [6,7]을 사용하였는데 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 결정립의 경우 결정립 각각에 분포한 α' 상의 분율이 달라지면 결정립 각각의 내식성도 달라질 수 있으므로 밝고 어두운 여러 결정립들을 각각 분리하여 전기화학적 실험을 실시하여야 하기 때문이다 [6]. 사용한 캐필러리의 직경은 330 μm 로 제작하여 사용하였고, 상대전극은 금전극을, 기준전극은 포화 카로멜 전극을 사용하였다. 분극 실험을 하기 위하여 개방전위를 기준으로 -0.2 V에서 공식전위 또는 9 V까지 1 mV/sec의 주사속도로 전위를 인가 하였다.

Br^- 이온과 Cl^- 이온이 공식 저항성에 주는 영향을 확인하기 위하여 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 적층면에 존재하는 어두운 결정립을 선택하여 0.6 M NaBr 수용액에 0.05, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 그리고 0.7 M NaCl 수용액을 각각 첨가한 혼합 실험용액들을 마이크로 드로플릿 셀을 이용하여 미세 동전위 분극곡선 실험을 실시하였다. 측정한 각 용액에서의 공식전위들을 데이터 커브 피팅 프로그램 (Origin 8.0, Origin lab corporation, USA)으로 분석하여 Br^- 이온과 Cl^- 이온의 평형흡착계수를 각각 구하였다.

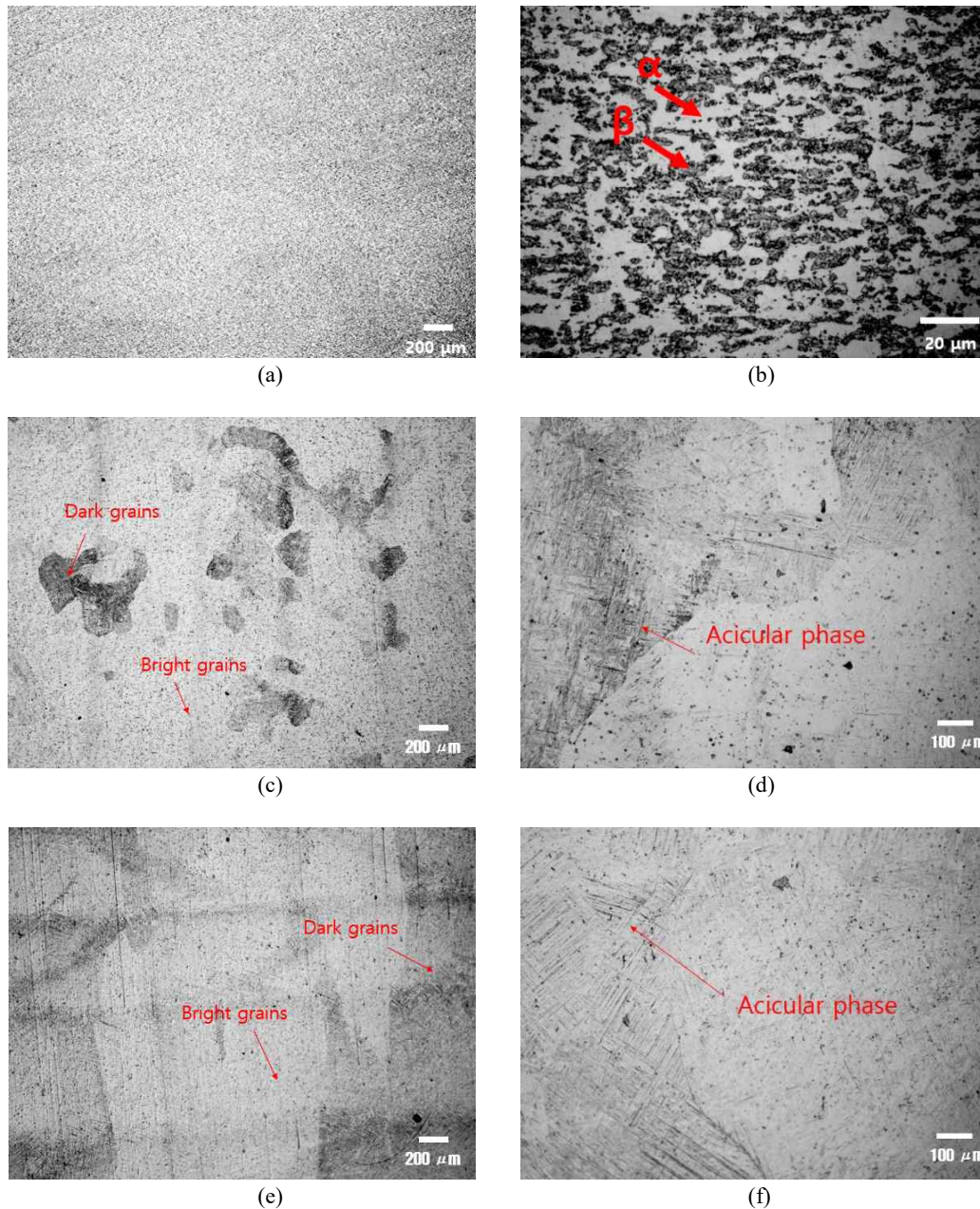


Fig. 1 Optical micrographs of the wrought Ti-6Al-4V ((a) and (b)), and the AM Ti-6Al-4V: the stacked plane ((c) and (d)) and the side plane ((e) and (f)).

3. 실험 결과

3.1 절삭가공과 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 미세조직 관찰결과 및 분석

Fig. 1a, b는 절삭가공된 Ti-6Al-4V 합금의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 결과이다. 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 경우 Fig. 1c, d는 적층면을, Fig. 1e, f는 수직면을 배율을 달리해서 각각 관찰한 것이다. 적층가공 Ti-6Al-4V

합금은 어두운 결정립과 밝은 결정립으로 이루어져 있는데, 배율을 높인 자세한 Fig. 1d와 f를 보면 Fig. 1b의 절삭가공 Ti-6Al-4V 합금에서는 볼 수 없는 침상구조를 발견할 수 있다. Lee등은 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 미세조직을 광학현미경과 FE-SEM으로 관찰할 때 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 경우 기존 절삭가공 Ti-6Al-4V 합금과는 다른 침상조직의 마르텐사이트 α' 상을 발견하고 어두운 결정립과 밝은 결정립 각각의 미세 비커스경도를 측정할 바 있는데

[6] 경도 측정 결과 적층면과 수직면에서 어두운 결정립이 밝은 결정립보다 각각 39 Hv, 48 Hv 만큼 더 높게 측정이 되어 어두운 결정립에 마르텐사이트 α' 상이 더 많이 분포하는 것을 알 수 있었다.

3.2 전기화학적 실험 결과

Fig. 2는 0.6 M NaCl에서 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 적층면, 수직면 각각의 어두운 결정립과 밝은 결정립 각각에 마이크로 드로플릿 셀의 캐필러리 팁을 위치시켜 미세 동전위 분극 시험을 실시한 결과이다. 실험 결과 인가전위

가 전위차계의 최대 인가전위인 9 V에 도달할 때까지 어두운 결정립에서만 공식이 발생한 것을 확인할 수 있다. 밝은 결정립의 경우 0.6 M NaCl 수용액에서는 공식을 확인할 수가 없었는데 [6], 본 연구에서는 0.6 M NaCl 수용액 대신 타이타늄 합금의 공식에 더 공격적으로 작용하는 것으로 생각되는 Br^- 이온을 가진 0.6 M NaBr 수용액을 사용하여 0.6 M NaCl 수용액에서는 측정할 수 없었던 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 밝은 결정립과 어두운 결정립의 공식 전위를 모두 측정하였다.

Fig. 3은 0.6 M NaBr 수용액에서 마이크로 드로플릿 셀

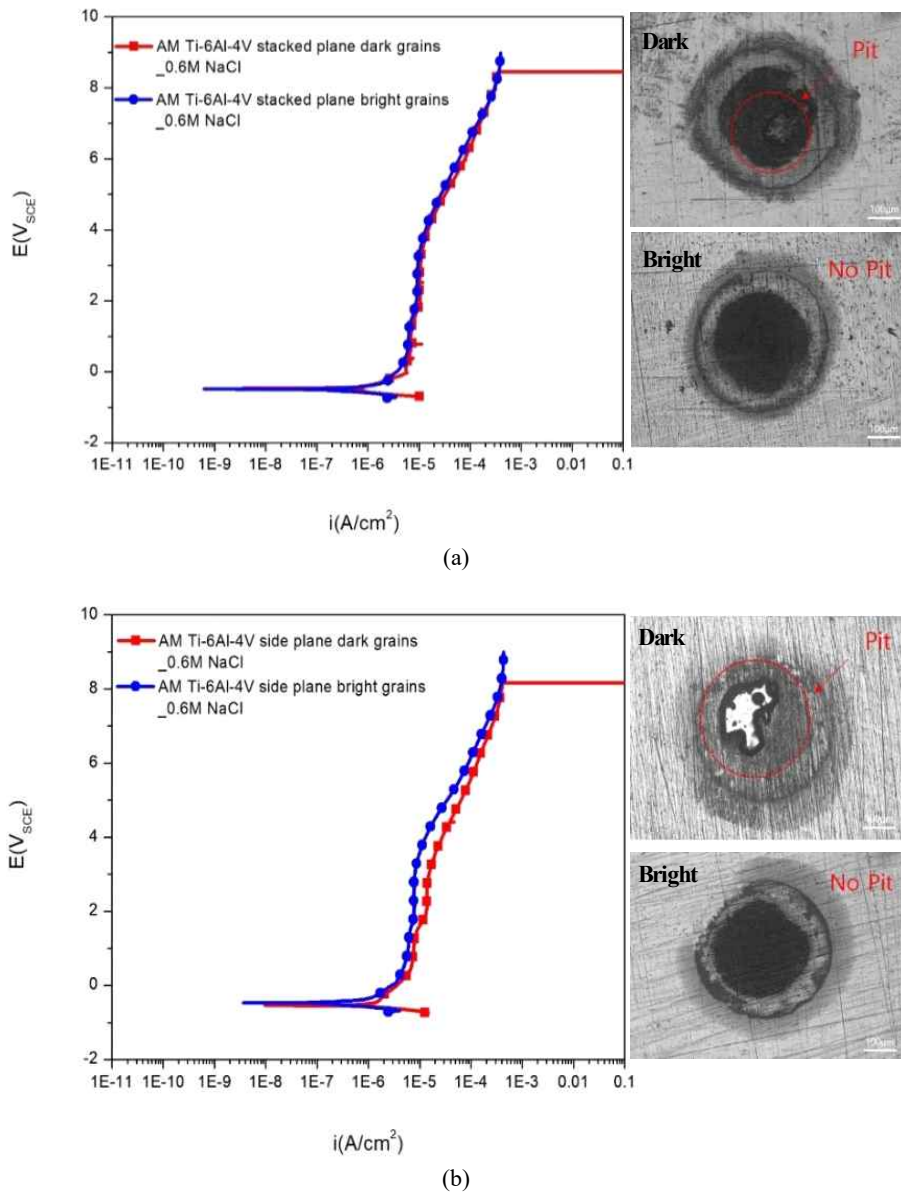


Fig. 2 Potentiodynamic polarization curves of dark or bright grains of AM Ti-6Al-4V and optical micrographs of samples after tests, as collected using a microdroplet cell: (a) stacked plane (b) side plane in aqueous 0.6 M NaCl solution (notice the pit with the corresponding curve).

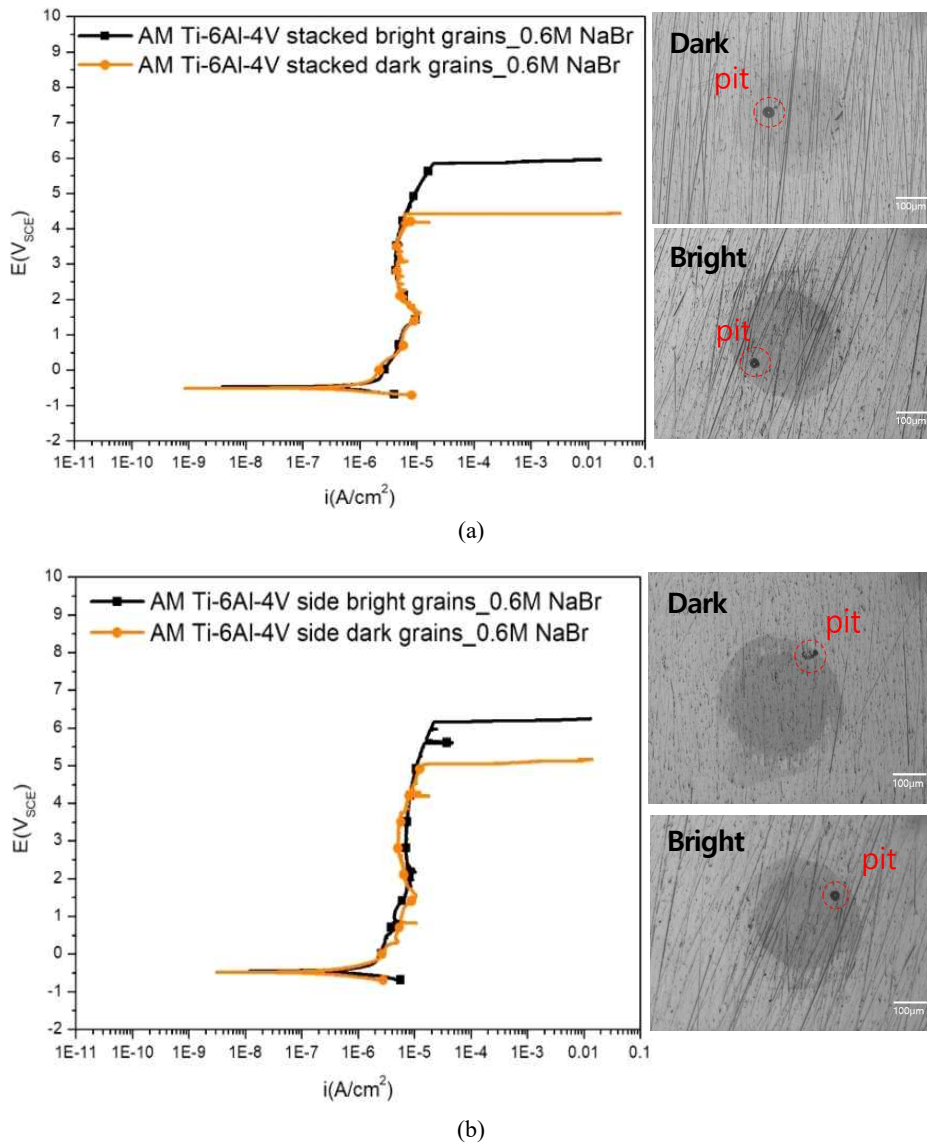


Fig. 3 Potentiodynamic polarization curves of dark or bright grains of AM Ti-6Al-4V and optical micrographs of samples after tests, as collected using a microdroplet cell: (a) stacked plane (b) side plane in aqueous 0.6 M NaBr solution.

기법을 이용하여 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 적층면과 수직면에서 어두운 결정립과 밝은 결정립 각각의 동전위 분극 곡선 실험 결과와 실험 후 캐필라리가 위치했던 지역을 광학현미경으로 관찰한 것인데, 적층면의 경우 어두운 결정립이 4.4 V에서, 밝은 결정립이 6.1 V에서 공식이 발생하였으며, 수직면의 경우 어두운 결정립이 5.0 V에서, 밝은 결정립이 6.5 V에서 공식이 발생하여 앞의 논문 [6]에서 관찰한 0.6 M NaCl에서 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 서로 다른 결정립에 공식 저항성을 실험한 결과와 일치하는 경향의 결과를 얻었다.

Fig. 4는 0.6 M NaBr 수용액에 다양한 농도의 NaCl 수용액을 첨가하여 Br⁻ 이온과 Cl⁻ 이온이 공식 저항성에 주는

영향을 확인한 동전위 분극곡선 실험 결과이며 NaCl 수용액의 농도가 0.05 M 에서 0.7 M로 증가할수록 공식 전위는 증가하였는데 이는 Basame의 실험 결과와 유사하였다 [8]. Fig. 5는 Basame등이 Langmuir 흡착 모델 [9]을 공식전위에 적용한 과정을 본 연구에 적용시켜 얻은 그래프인데 Table 1에 나타난 바와 같이 본 실험의 Br⁻ 이온과 Cl⁻ 이온 각각의 평형흡착계수는 26.0 mM⁻¹과 7.5 mM⁻¹로 구하였는데 Basame등이 순수한 Ti에서 얻은 Br⁻ 이온과 Cl⁻ 이온 각각의 평형흡착계수가 24.7 mM⁻¹와 9.1 mM⁻¹인 것과 비교하면 본 실험에서 얻은 값과 매우 유사한 값이 얻어짐을 알 수 있었다.

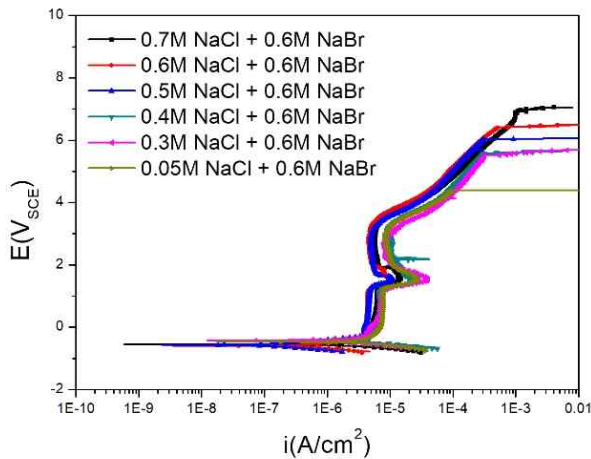


Fig. 4 Potentiodynamic polarization curves of dark grains of stacked AM Ti-6Al-4V, as collected using a microdroplet cell in aqueous solutions containing 0.6 M NaBr and varying concentrations of NaCl.

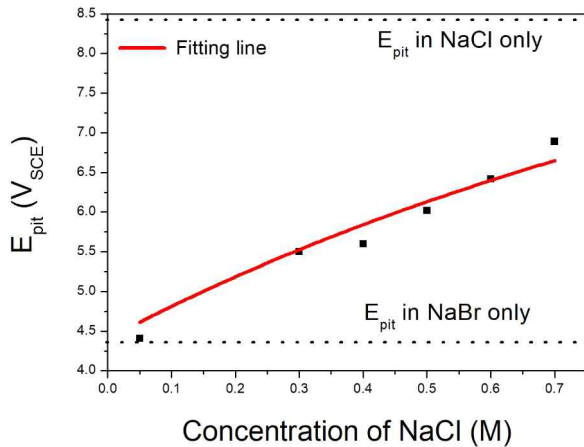


Fig. 5 E_{pit} with the concentration of NaCl (notice that the solid red line through the data corresponds to the theoretical fit (Eq. 1) based on the assumption of a Langmuir adsorption model for the competitive adsorption of Br^- and Cl^-).

4. 고찰

적층가공 Ti-6Al-4V 합금은 기존 절삭가공 Ti-6Al-4V 합금과는 달리 적층가공 공정 중 발생하는 마르텐사이트 α' 상이 존재한다. α' 상은 에너지 상태가 매우 높아 부식에

취약할 것으로 생각되나 XRD 측정으로는 같은 HCP 상인 α 상과 α' 상을 서로 구별할 수가 없어서 침상 조직 정도에 차이가 관찰되는 어두운 결정립과 밝은 결정립 각각에 대한 비커스 미세 경도를 독립적으로 측정하여 α' 상의 분포 정도를 측정하였다. 그 결과 어두운 결정립의 비커스 경도가 밝은 결정립보다 더 큰 값을 나타내어 α' 상의 분포가 더 많을 것으로 판단되어 α' 상의 분포에 따라 마크로 전기화학 실험의 결과도 또한 달라질 수 있다 [6]. 0.6 M NaCl 수용액에서 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 어두운 결정립과 밝은 결정립의 공식 저항성을 마이크로 드롭플렛 셀 기법을 이용하여 각각 측정하였는데 어두운 결정립의 공식전위가 밝은 결정립 보다 더 낮은 것은 확인하였으나 0.6 M NaCl 수용액에서는 밝은 결정립의 공식전위는 확인할 수가 없었다. 한편 Basame 등은 타이타늄 합금의 공식에는 Cl^- 이온보다 Br^- 이온이 더 공격적이라고 주장하였는데, 이는 Br^- 이온이 Cl^- 이온보다 금속 표면에 흡착되는 성질이 강하여 공식이 더 쉽게 발생시키기 때문이라는 것이다 [8]. 따라서 본 연구는 Basame 등의 경우처럼 Br^- 이온을 포함하는 0.6 M NaBr 수용액을 통하여 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 서로 다른 결정립의 공식 저항성을 측정한 결과 0.6 M NaCl 수용액에서 보다 측정된 공식전위보다 0.6 M NaBr 수용액에서 측정된 공식전위가 더 낮아 Basame 등의 결과와 일치하는 결과를 나타내었으며 0.6 M NaCl 수용액에서 확인할 수 없었던 밝은 결정립의 공식전위도 함께 확인할 수 있었다.

0.6 M NaCl 보다 0.6 M NaBr 수용액에서 공식전위가 더 낮은 이유를 설명하기 위하여 Fig. 5에 나타난 것처럼 0.6 M NaBr 수용액에 0.05에서 0.7 M에 이르는 다양한 농도의 NaCl 수용액을 첨가하여 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 어두운 결정립에 대한 공식전위를 측정하였는데 이는 0.6 M NaCl 수용액에서 측정한 어두운 결정립만의 공식전위와 0.6 M NaBr 수용액에서 다양한 농도의 NaCl 수용액을 첨가할 때의 공식전위를 서로 비교할 수 있기 때문이다. 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 어두운 결정립에서 Br^- 이온과 Cl^- 이온의 평형흡착계수는 Basame 등이 Langmuir 흡착 모델에서 유도한 다음과 같은 식으로부터 계산해 낼 수 있다 [8]. 아래 식은 공식전위와 Langmuir 흡착 모델과의

Table 1 Pitting potential (E_{pit}), equilibrium adsorption coefficient (β) and values of ΩI^{sat} for dark grains of AM Ti-6Al-4V alloy in aqueous solutions containing Br^- , and Cl^-

	AM Ti-6Al-4V dark grains			Wrought pure Ti (Basame [7])		
	$E_{pit}(V_{SCE})$	β (mM^{-1})	$\Omega I^{sat}(V)$	$E_{pit}(V_{Ag/AgCl})$	β (mM^{-1})	$\Omega I^{sat}(V)$
Br⁻	4.4	26.0	20.7	1.4	24.7	20.7
Cl⁻	8.4	7.5	11.8	9.4	9.1	11.8

관계를 Br^- 이온과 Cl^- 이온 농도의 함수로 표현한 식인데 Langmuir 모델을 이용하여 단일층에 물질이 흡착되는 정도를 나타내는 것으로 고체 단일층에 수용액의 두 이온이 존재할 때 두 이온들이 경쟁적으로 흡착이 일어나는 정도를 비교할 수 있다.

$$E_{pit}(\Gamma_{Br^-}, \Gamma_{Cl^-}) = E_{pit}(\Gamma_{Br^-}^{sat}) + \Omega_{Br^-} \Gamma_{Br^-}^{sat} \left(1 - \frac{\beta_{Br^-} [Br^-]}{1 + \beta_{Br^-} [Br^-] + \beta_{Cl^-} [Cl^-]} \right) - \Omega_{Cl^-} \Gamma_{Cl^-}^{sat} \left(\frac{\beta_{Cl^-} [Cl^-]}{1 + \beta_{Br^-} [Br^-] + \beta_{Cl^-} [Cl^-]} \right) \quad (1)$$

여기서 E_{pit} 는 공식전위, Γ 는 단위표면 이온농도, Ω 는 비례상수, β 는 평형흡착계수, $[ln]$ 는 이온의 몰농도를 뜻한다. 단위표면 이온농도에 따른 공식전위는 이온의 평형흡착계수와 이온의 몰농도에 따라 변할 수 있음을 보여준다.

Langmuir 흡착 모델과 공식전위 간의 관계를 나타낸 equation (1)에서 Γ (mol/cm²)는 이온의 단위표면 농도이고 Ω 는 음이온의 표면 농도에 따른 공식전위의 민감도를 의미하는 비례상수이며 $E_{pit}(\Gamma_{Br^-}^{sat})$ 는 표면에 Br^- 이온의 흡착이 포화되었을 때의 공식 전위이다. Basame 등의 경우는 0.1 M KBr 수용액에서 Br^- 이온이 타이타늄 표면에 포화 흡착되어 제일 낮은 공식이 발생한다고 생각하였기 때문에 본 연구에 사용된 0.6 M NaBr 수용액에서 Br^- 이온이 시편 표면에 포화되는 것으로 간주하여 이경우의 어두운 결정립의 공식전위인 4.4 V를 $E_{pit}(\Gamma_{Br^-}^{sat})$ 로 간주하였다 [8]. $\Omega_{Br^-} \Gamma_{Br^-}^{sat}$ 과 $\Omega_{Cl^-} \Gamma_{Cl^-}^{sat}$ 값은 Basame 등의 주장에 따르면 할로젠 이온의 경우 큰 차이를 보이지 않는다고 하였기 때문에 본 연구에서도 Basame 등의 할로젠 이온의 경우인 $\Omega_{Br^-} \Gamma_{Br^-}^{sat}$ 는 20.7V를 $\Omega_{Br^-} \Gamma_{Br^-}^{sat}$ 는 18.4 V를 각각 적용시켰다 (Table 1). $[Br^-]$ 와 $[Cl^-]$ 는 Br^- 이온과 Cl^- 이온의 몰농도이고 β_{Br^-} 와 β_{Cl^-} 는 Br^- 이온과 Cl^- 이온의 평형흡착계수인데 데이터 커브 피팅 기법을 사용하여 본 연구의 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 Br^- 이온과 Cl^- 이온의 평형흡착계수를 구한 결과 Basame 등이 구한 평형흡착계수와 유사한 값을 나타내었고 평형흡착계수가 26.0 mM⁻¹인 Br^- 이온이 평형흡착계수가 7.5 mM⁻¹인 Cl^- 이온보다 적층가공 Ti-6Al-4V 합금에서 공

식전위를 낮추는데 큰 영향을 나타내는 것으로 판단되며 Cl^- 이온보다 평형흡착계수가 더 큰 Br^- 이온이 공식전위를 낮추어 부동태 피막을 더욱 잘 파괴하므로 공식을 더 쉽게 유발하는 것으로 판단된다.

5. 결론

1. 적층가공된 Ti-6Al-4V 합금의 α' 상의 분포에 차이가 있는 두 결정립의 공식저항성을 NaCl 수용액과 NaBr 수용액에서 각각 측정한 결과 두 수용액 모두 α' 상이 더 많이 분포한 양이 많은 어두운 결정립에서 밝은 결정립보다 더 낮은 공식전위가 발생하였다.
2. NaBr 수용액의 경우 NaCl 수용액보다 공식전위를 낮추므로 적층가공 Ti-6Al-4V 합금의 공식을 더 잘 일으키며 이는 Br^- 이온이 Cl^- 이온보다 평형흡착계수가 더 크므로 공식전위를 낮추어 부동태 피막을 보다 잘 파괴하여 공식을 더 쉽게 유발하기 때문인 것으로 판단된다.
3. Br^- 이온과 Cl^- 이온의 평형흡착계수는 Langmuir 흡착 모델과 공식전위간의 관계식으로 Br^- 의 평형흡착계수가 Cl^- 의 평형흡착계수보다 더 큰 값을 나타내었다.

감사의 글

이 연구는 2015년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구 (10053656) 임니다. 지원에 감사드립니다.

Reference

1. F. H. Froes and B. Dutta, *Adv. Mater. Res.*, **1019**, 19 (2014).
2. T. J. Horn and O. L. Harrysson, *Sci. prog.*, **95**, 255 (2012).
3. W. E. Frazier, *J. Mater. Eng. Perform.*, **23**, 1917 (2014).
4. T. Shin, S. J. Park, and K. S. Kang, *Int. J. Precis. Eng. Man.*, **18**, 233 (2017).
5. R. Boyer, E. W. Collings, and G. Welsch, *Materials properties handbook: Titanium alloys*, pp. 1 - 1169, ASM International, Material Park, Ohio (1994).
6. D. I. Seo and J. B. Lee, *Corros. Sci. Tech.*, **17**, 129 (2018).
7. K. S. Kim and J. B. Lee, *Corros. Sci. Tech.*, **9**, 300 (2010).
8. S. B. Basame and H. S. White, *J. Electrochem. Soc.*, **147**, 1376 (2000).
9. I. Langmuir, *J. Am. Chem. Soc.*, **40**, 1361 (1918).