

## 양극산화된 5083-H321 합금의 천연해수 내 전기화학적 부식 및 응력부식균열 특성에 관한 연구

황현규<sup>1</sup> · 신동호<sup>1</sup> · 정광후<sup>2</sup> · 김성종<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>목포해양대학교 대학원, 전라남도 목포시 해양대학로 91

<sup>2</sup>해사안전교육팀, 한국해양수산연수원, 부산광역시 영도구 해양로 367

<sup>3</sup>기관시스템공학부, 목포해양대학교, 전라남도 목포시 해양대학로 91

(2020년 9월 23일 접수, 2020년 10월 14일 수정, 2020년 10월 14일 채택)

## Investigation on Electrochemical Corrosion and Stress Corrosion Cracking Characteristics of Anodized 5083-H321 Alloy in Natural Seawater

Hyun-kyu Hwang<sup>1</sup>, Dong-Ho Shin<sup>1</sup>, Kwang-Hu Jung<sup>2</sup>, and Seong-Jong Kim<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>Graduate school, Mokpo national maritime university, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

<sup>2</sup>Maritime safety training team, Korea institute of maritime and fisheries technology, Haeyang-ro, Busan metropolitan city, 49911, Korea

<sup>3</sup>Division of marine engineering, Mokpo national maritime university, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

(Received September 23, 2020; Revised October 14, 2020; Accepted October 14, 2020)

Many studies have been conducted to improve the corrosion resistance and durability of various aluminum alloys through the anodizing technique. It is already used as a unique technique for enhancing the properties of aluminum alloys in various industries. This paper investigated the electrochemical corrosion and stress corrosion cracking characteristics of anodized aluminum 5083-H321 alloy in natural seawater. The corrosion characteristics were assessed by the electrochemical technique and potentiodynamic polarization test. The stress corrosion cracking characteristic was evaluated with a slow strain rate tensile test under 0.005 mm/min rate, which showed that the hard anodizing film had a thickness of about 16.8  $\mu\text{m}$ . Although no significant characteristics of stress corrosion cracking were observed in the slow strain rate test, the anodized specimen presented excellent corrosion resistance. The corrosion current density was measured to be approximately 4.2 times lower than that of the base material, and no surface damage was observed in the anodic polarization test.

**Keywords:** 5083-H321, Corrosion, Stress corrosion cracking, Natural seawater, Slow strain rate test

### 1. 서론

해양수산부 통계에 의하면, 총 어선 중 약 90% 이상이 섬유강화수지(Fiber reinforced plastics, 이하 FRP)로 건조되고 있다. 중소형 선박 선체로써 FRP는 가공성과 생산 단가 측면에서 유리하다. 그러나, 화재에 취약하고 폐선 시

재활용이 불가능하다. 이에 대한 방안으로 알루미늄 합금이 중소형 선박 선체 소재로 주목받고 있다. 알루미늄 합금은 철강 재료와 비교하여 높은 비강도와 경량성으로 인해 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있는 소재이다. 특히, 선박 건조를 비롯한 해양산업에서 5xxx 계열 알루미늄 합금에 대한 부가가치와 수요는 지속적으로 증가하는 추세이다. 그 중, 5083-H321 합금은 중소형 선박용 선체 제작에 주로 사용되는 소재이다. 그 이유는 비열처리 합금 중 가장 높은 강도를 가지고 있으며, 용접성, 그리고 성형성이 매우 우수

<sup>†</sup>Corresponding author: ks@mmu.ac.kr

황현규: 석사과정, 신동호: 석사과정, 정광후: 전임강사, 김성종: 교수

하기 때문이다.

일반적인 알루미늄 합금의 내식성은 표면 산화피막에 기인한다. 알루미늄은 매우 높은 활성도를 가진 금속으로 공기 중에서 약 1 ~ 5 nm의 자연산화 피막을 형성한다 [1]. 그러나 자연산화 피막은 그 두께가 매우 얇아 산업적으로 활용가치가 작으며, 특히, 해양환경 또는 해수 내 다량의 Cl<sup>-</sup> 이온이 포함된 환경에서 자연산화 피막의 파괴는 매우 빠르게 진행되어, 충분한 내식성을 나타내지 못하는 경우가 있다. 이에 대한 대책으로 알루미늄과 마그네슘 합금의 활성금속을 대상으로 양극산화 기법이 널리 사용되고 있다.

양극산화는 전기화학적 방법을 통해 보호하고자 하는 금속의 표면 산화피막의 두께를 인위적으로 성장시키는 방법이다. 양극산화 기법을 통해 부식성 외부환경에 대한 금속의 내식성과 내구성 향상을 목적으로 다양한 연구가 진행되었다. Park *et al.* [2,3]은 해양환경용 5083 알루미늄 합금의 내식성과 내구성 향상을 위해 양극산화 표면층에 다양한 봉공처리를 수행하였으며, 그 결과 캐비테이션 저항성과 내식성이 향상되었다. Abdel-Gawad *et al.* [4]은 Al 2014, Al 6061, 그리고 Al 7075 합금을 대상으로 다양한 공정변수에 따른 양극산화 피막층의 내식성과 내구성 향상에 관한 연구를 수행하였다. 그 결과, 대상 금속의 표면 내식성과 내구성이 향상되었다. 양극산화 기법을 통해 알루미늄 합금의 내식성과 내구성 향상을 목적으로 많은 연구가 진행되었으며, 이미 산업계에서는 알루미늄 합금의 물성 향상을 위한 독보적인 기법으로 사용되고 있다. 이처럼 알루미늄 합금의 내식성을 대폭으로 향상할 수 있는 양극산화 기법이 존재한다. 그러나 선체를 비롯한 해양구조물은 자체 하중에 의한 응력이 작용하며, 부식 민감성을 가진 구조물은 응력과 부식의 시너지 효과로 균열이 발생하는 응력부식균열 (stress corrosion cracking, 이하 SCC)에 취약하다. 특히, 높은 강도의 5xxx(Al-Mg) 계열 합금은 SCC에 매우 취약하다 [5]. 그러나 해수 내 양극 산화된 알루미늄 합금에 대한 부식 및 SCC에 관한 연구는 전무하다.

따라서, 본 연구에서는 알루미늄 5083-H321 합금에 양극산화 실시하였으며, 해수 내 부식 및 SCC에 대한 저항성을 평가하기 위해 전기화학적 시험과 저변형률 인장시험 (slow strain rate test)을 수행하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 재료 및 표면 특성

본 연구에서 사용된 소재는 선박건조 및 해양환경용으로 주로 사용되는 알루미늄 5083-H321 합금이다. 5 mm 두께를 갖는 판재를 사용하였으며, 화학조성은 Mg 4.38 wt%, Fe 0.35 wt%, Mn 0.54 wt%, Cr 0.06 wt%, Cu 0.01 wt%, 그리고 나머지는 Al이다. 각 시편에 적용된 경질 양극산화

공정은 상용화된 황산욕 공정((주)진광도금)을 통해 수행되었다. 각 시편에 대한 식별을 용이하게 하기 위해, 모재와 양극산화 처리된 시편은 각각 5083과 5083A로 명칭하였다. 표면 양극산화층에 대한 분석은 주사전자현미경 (scanning electron microscope, SEM)과 에너지 분산 X선 분광법 (energy dispersive X-ray spectroscopy, 이하 EDS)을 통해 수행하였다.

### 2.2 전기화학적 실험

전기화학용 시험편은 2 cm × 2 cm의 크기로 절단하여 사용하였으며, 시험편은 SiC 연마지 #600까지 연마하였다. 연마된 시험편은 아세톤과 증류수로 세척 후 열풍에서 건조 후 사용하였다. 전기화학적 실험을 위한 부식 셀은 상온의 천연 해수를 전해질로 사용하였으며, 3 전극 부식 셀 (three electrode system)을 이용하였다. 작업 전극은 시편이며, 전용 홀더를 사용하여 반응면적 1 cm<sup>2</sup>만 전해질에 노출되도록 하였다. 대극은 백금망(Pt mesh)을, 기준전극은 은/염화은(Ag/AgCl sat. by KCl) 전극을 사용하였다. 분극 전, 개로전위 (open circuit potential, 이하 OCP)는 시험 수용액에 1시간 침지 후 측정하였다. 동전위 양극분극 실험은 작업 전극의 전위를 OCP 기준으로, -0.25 V에서 2.0 V까지 0.5 mV/s의 속도로 주사하여 전위에 따른 전류밀도의 변화를 측정하였다. 부식전위와 부식전류밀도는 동전위 분극 곡선에 대한 Tafel 외삽법을 이용하여 산출하였다.

### 2.3 저변형률 인장 실험

인장 시험편은 표점거리가 25 mm, 평행부 길이는 55 mm 되도록 가공하였다. 인장 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1과 같다. 저변형률 인장시험은 표 1에 제시된 성분의 천연해수 환경에서 2 mm/min과 0.005 mm/min의 변위 제어로 시험편이 파단될 때까지 수행하였다. 실험 종료 후 시험편은 증류수 및 아세톤 세척하였으며, 열풍 건조기를 이용하여 건조 후 50 °C의 진공건조기에 보관하였다. 실험 후 파단면은 SEM을 이용하여 관찰하였다.

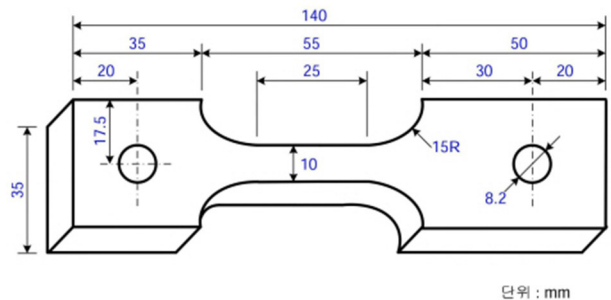


Fig. 1 Schematic diagram of specimen for SSRT.

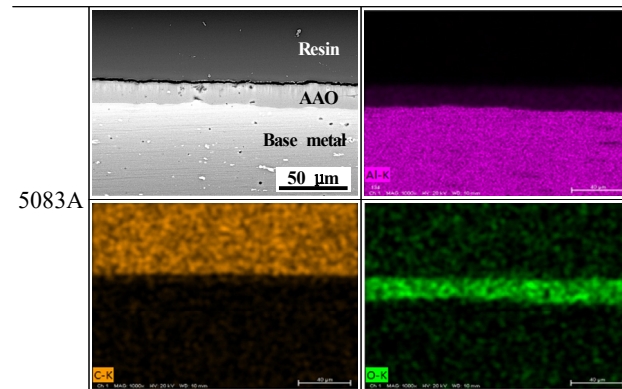
**Table 1** Chemical compositions and properties of seawater (wt%)

Main component (mg/L)						pH	Dissolved oxygen (mg/L)	Electric conductivity (mS/cm)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>			
2,605	17,388	10,414	361	1,215	402	7.9	10.2	49.7

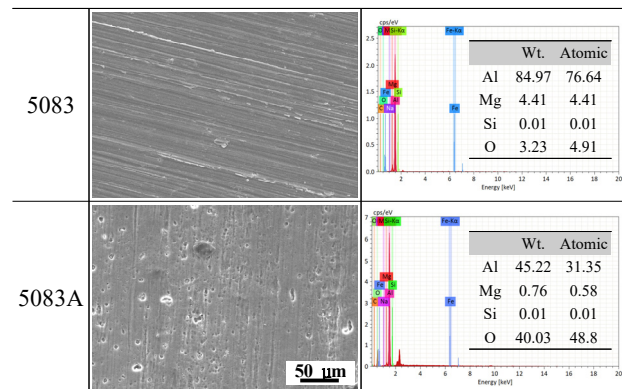
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 표면 양극산화층 분석결과

Fig. 2는 양극산화 처리된 5083A 시편 단면에 대한 Backscatter electron(이하 BSE) 사진 및 EDS 원소 맵 분석결과를 나타낸 것이다. BSE는 목표 시료의 원자번호 차이에 기인한 방출전자를 검출하는 방식이다. 따라서 BSE 이미지를 통해 시료 조성에 대한 정보를 획득할 수 있다. BSE 이미지와 EDS 원소 맵 분석을 통해 양극산화 공정에서 형성된 표면 양극 알루미늄 산화층(anodic aluminum oxide)과 기지금속은 명확히 식별되었으며, 균일하고 치밀



**Fig. 2** BSE image and EDS elemental mapping for a cross-section of 5083A specimen.



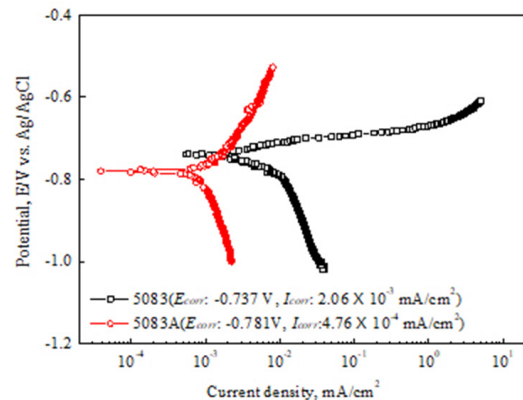
**Fig. 3** SEM images and EDS elemental mapping analysis results for the surface of AAO for 5083 and 5083A specimens.

한 알루미늄 산화층이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 단면 관찰을 통한 5083A 시편의 알루미늄 산화층 두께는 16.8 μm로 계측되었다.

Fig. 3은 5083과 5083A 시편 표면에 대한 SEM과 EDS 분석결과를 나타낸 것이다. 5083의 주 합금원소는 Al, Mg, 그리고 O로 확인되었다. Al과 Mg는 합금의 구성 원소이며, 약 3.23 wt%의 O 원소는 자연적인 대기 환경에서 형성된 표면 알루미나 산화막(1~5 nm)에 기인한 것으로 판단된다. 5083A의 경우, 주 합금원소는 Al(45.22 wt%)와 O(40.03 wt%)로 확인되었다. 양극산화 공정에서 전해액 중 산소이온과 수산화이온은 알루미늄 이온과 결합하여, 금속/산화층 계면에서 알루미늄 산화막과 수산화 피막을 만든다. 산화알루미늄 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 O/Al 원자 비는 1.5이며, 일수화물인 보헤마이트(Al(OH)<sub>3</sub>)는 2에 근사한다. EDS 분석결과를 기초로 하여 O/Al 원자비(atomic ratio)를 계산해 볼 때, 5083A 시료 표면에 형성된 산화층(원자비 1.55)은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 유추할 수 있다 [6].

#### 3.2 전기화학적 실험분석 결과

Fig. 4는 5083과 5083A 시편에 대하여 천연해수 하에서 수행된 Tafel 시험결과를 나타낸 것이다. 5083과 5083A는 유사한 부식 전위를 나타냈다. 이는 정적인 해수 상태에서 천연산화 피막과 양극산화 공정을 통해 형성된 산화피막의 유사한 전기화학적 특성에 기인한 것으로 판단된다 [7]. 그러나, 5083과 5083A의 부식전류밀도는 확연한 차이를



**Fig. 4** Polarization curves and Tafel extrapolation results of 5083 and 5083A specimens in natural seawater solution.

나타냈다. 5083A의 경우, Tafel 영역 내 양극 및 음극 분극 곡선이 전류밀도가 감소하는 방향으로 이동함에 따라 5083 대비 낮은 부식 전류밀도를 나타냈다. 5083과 5083A의 부식 전류밀도는  $2.06 \times 10^{-3}$  mA/cm<sup>2</sup>와  $4.76 \times 10^{-4}$  mA/cm<sup>2</sup>로 5083의 경우가 4.2배 정도의 높은 부식전류밀도를 나타냈다. 일반적으로 금속의 내식성은 금속 표면에서 형성된 자연산화 피막의 치밀성과 화학적 안정성에 기인한다. 5083은 표면 자연산화 피막의 두께가 얇아 해수에서 충분한 내식성을 나타내지 못하였다. 반면, 5083A는 비교적 두꺼운 양극산화 피막에 기인하여, 낮은 부식전류밀도를 나타냈다. Tafel 실험은 단순 환경에서 균일부식 특성을 나타내는 소재에 대한 정량적 부식속도를 산출하는데 적합한 기법이며, 알루미늄과 같이 부동태 특성을 나타내는 금속 소재에 대해서는 한계가 존재할 수 있다. 따라서 각 시료에 대한 명확한 내식성을 평가하기 위해 동전위 분극 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 각 알루미늄 합금 시편에 대하여 천연해수 하에서 수행된 동전위 양극분극 곡선을 나타낸 것이다. 5083 시편은 OCP에서 전위가 상승함에 따라 급격한 전류밀도 증가를 나타내는 일명 ‘활성화 분극(activation polarization)’을 나타냈으며, 알루미늄의 활성용해반응( $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ )에 의한 부식이 진행되었다 [8]. 이후 -0.5 V 이상 전위에서 전류밀도는  $1 \times 10^{-2}$  mA/cm<sup>2</sup> 부근에서 정체 현상을 나타냈다. 부동태 현상은 분극 곡선의 전위 상승 구간에서  $1 \times 10^{-3}$  mA/cm<sup>2</sup> 이하의 전류밀도를 나타내는 것으로 여겨진다 [9–11]. 따라서, 5083 시편에서 나타난 전류밀도 정체는 Semi-Log 스케일의 그래프에서 발생하는 착시이며, 부동태 거동으로 보는 것은 적절하지 않은 것으로 판단된다. 일반적으로 금속의 부동태 현상은 전해질 내 금속의 양극 전위를 특정 전위 이상으로 상승시키면 금속의 용해 속도가 급격히 감소하는 현상이며 [8], 이는 금속 표면에 보호성 피막 형성으로 금속과 전해질의 접촉을 차단

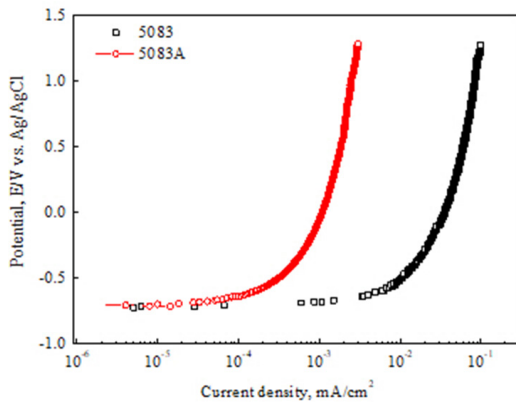


Fig. 5 Anodic polarization curves of 5083 and 5083A specimens in natural seawater solution.

하여 부식속도를 감소시킨다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 알루미늄 합금의 표면에 형성되는 대표적인 부동태 피막으로 외부환경으로부터 기지금속을 보호하는 역할을 한다. 5083A 시편은 양극분극 구간에서 5083 시편의 전류밀도 대비 2%의 매우 낮은 전류밀도값을 나타냈다. 따라서 5083A 시편은 두꺼운 양극산화 피막에 기인하여, 다량의 Cl<sup>-</sup> 이온을 함유한 해수 환경에서 양극분극의 높은 부식 구동력에서도 매우 우수한 내식성을 나타내는 것으로 확인되었다.

Fig. 6은 각 시편에 대한 동전위 양극분극 시험종료 후, 표면 육안관찰 결과를 나타낸 것이다. 양극산화 유무에 따른 표면 손상도는 매우 큰 차이를 나타냈다. 먼저, 5083 시편은 양극분극 과정 중 용해반응에 의한 표면 손상이 발생하였으며, 전처리 과정에서 생성된 연마흔은 부식으로 인해 관찰되지 않았다. 반면, 5083A 시편에서는 육안 식별 가능한 정도의 표면 손상은 관찰되지 않았으며, 시험 전후에 따른 표면 변화는 거의 나타나지 않았다.

Fig. 7은 동전위 양극분극 시험종료 후 5083과 5083A

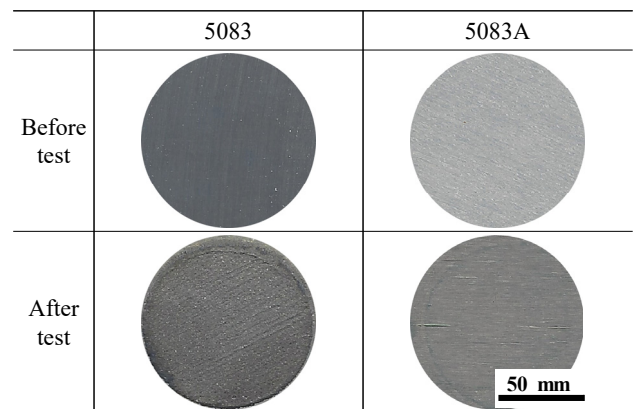


Fig. 6 Macro-observation for the surface after potentiodynamic anodic polarization test in natural seawater.

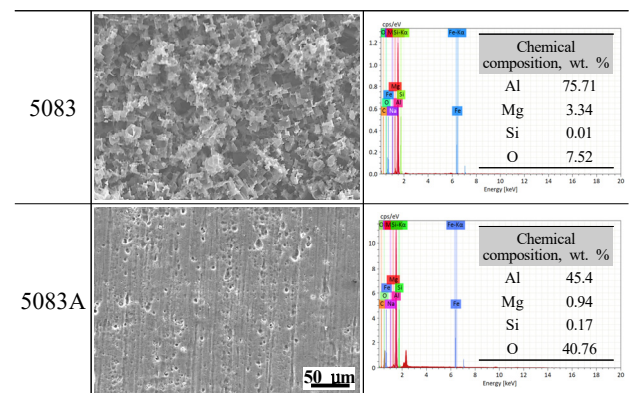


Fig. 7 SEM images and EDS elemental mapping analysis results for the surface of 5083 and 5083A specimens after potentiodynamic anodic polarization test in natural seawater.



시편 표면에 대한 SEM과 EDS 분석결과를 나타낸 것이다. 먼저, 5083 시편은 양극분극에 의한 용해 반응 시 알루미늄 합금에서 일반적으로 관찰되는 결정구조 형상이 관찰되었다. 이러한 손상형태는 결정면 간의 표면에너지 차이에 의한 전위차에 기인하여, 특정 결정면을 따라 활성용해반응이 우선으로 발생하기 때문이다 [12-14]. 5083 시편은 매우 빠른 양극용해 반응으로 인해 연마흔이 관찰되지 않는 정도의 큰 부식 손상이 발생하였으나, 양극산화 처리된 5083A 시편에서는 표면 부식 손상이 크게 식별되지 않았다. 또한, 시험 전후 산화피막의 화학조성도 큰 변화를 나타내지 않음에 따라 해수 내 알루미늄 산화피막의 화학적 안정성도 확인할 수 있었다.

### 3.3 저변형률 인장 실험

Fig. 8은 5083과 5083A 시편에 대하여 해수 내 인장시험과 저변형률 인장시험 후 응력-연신율 곡선을 나타낸 것이며, 이에 대한 상세 기계적 물성값은 표 2에 제시하였다. 변형률 2 mm/min에서 수행된 5083과 5083A 시편에 대한 기계적 물성값을 상호 비교해보면, 인장강도와 항복강도는 유의미한 변화를 나타내지 않았다. 반면, 연신율은 양극산화 공정 처리된 시편에서 미처리 시편 대비 다소 감소하는 경향을 나타냈다. 변형률 0.005 mm/min에서는 2 mm/min

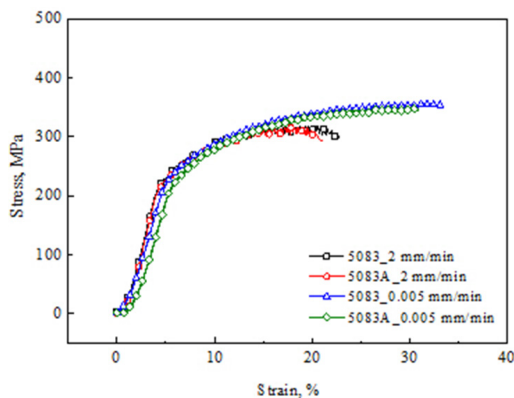


Fig. 8 Stress vs. strain curves in SSRT with strain rate in natural seawater.

Table 2 Detailed properties values derived from stress vs. strain curves of SSRT test

		UTS	YS	Strain	Time to fracture
2 mm/min	5083	319.48	214.49	22.743	204.1 min
	5083A	316.21	210.86	21.06	189.1 min
0.005 mm/min	5083	356.07	221.80	33.305	27.9 hours
	5083A	349.21	214.94	30.832	25.8 hours

과 비교하여, 응력부식균열에 대한 감수성은 유의한 차이를 나타내지 않았으며, 변형률이 감소함에 따라 인장강도는 10% 정도 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 낮은 변형률에서 가공경화 연장에 의한 강도 향상으로 사료된다.

### 3.4 파단면 관찰 결과

Fig. 9는 5083과 5083A에 대하여 저변형률 인장시험 종료 후 변형률에 따른 인장 시험편 파단부 단면을 관찰한 것이다. 변형률과 관계없이 파단부 단면은 초기 단면에 대한 45°의 각도를 가진 파단 형상을 나타냈다. 이는 국부적인 전단 변형에 의한 것이며, 단축 장력 하에서 발생하는 알루미늄 5083 합금의 전형적인 파단형상이다 [15]. 알루미늄 합금의 경우, 부식환경에 노출된 인장 시험편의 파단면은 45° 미만의 기울기를 나타낸다. 즉, 파단부 단면 각도는 부식 환경에 노출된 시편에 부과된 변형률이 느려짐에 따라 감소된다. 이를 통해 각 변형률에서 시편에 대한 해수 내 부식 영향성을 확인할 수 있다. 변형률에 따른 파단부 단면 각도를 상호 비교해보면, 2 mm/min 조건에서 양극산화 유무에 따른 각도 변화는 관찰되지 않았다. 이는 비교적 빠른 변형속도로 인해 해수에 의한 부식 영향성이 거의 작용하지 않은 것을 의미한다. 0.005 mm/min 조건의 경우, 2 mm/min 조건과 비교하여, 최대 8배 정도의 해수 노출 시간에도 불구하고, 파단부 단면 각도의 명확한 변화는 관찰되지 않았다. 이는 5083A 표면에 형성된 산화 알루미늄 피막의 보호성으로 인해 부식 손상이 발생하지 않은 것으로 간주할 수 있다.

Fig. 10은 저변형률 인장시험 종료 후 변형률에 따른 인장 시험편 파단부를 관찰한 것이다. 5083과 5083A의 파단면은 미시적인 분화구 형태로 구성되는 딴플(dimple)이 뚜렷하게 관찰되는 전형적인 연성파괴 양상을 나타냈으며, 변형률과 양극산화 유무에 따라 큰 차이를 나타내지 않았다.

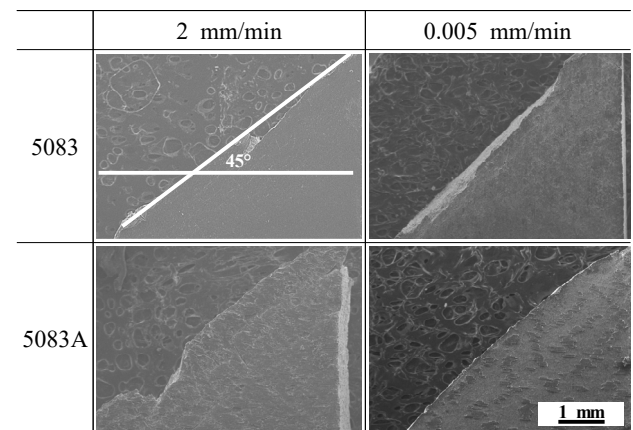


Fig. 9 Fractographies of fracture cross-section for 5083 and 5083A after slow strain rate test in natural seawater.

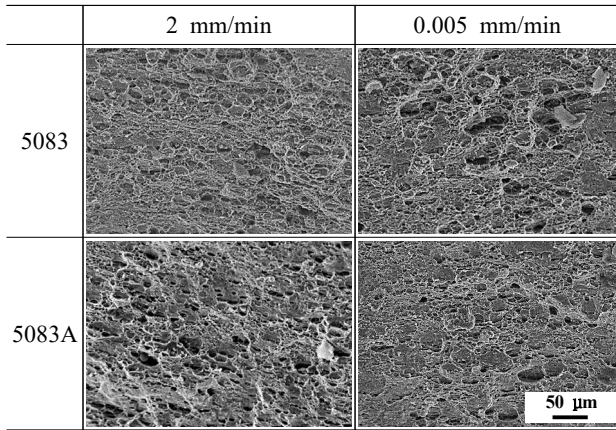


Fig. 10 Fractographies of fractured surface of 5083 and 5083A in natural seawater.

#### 4. 결론

정적 천연 해수 환경하에서 양극산화 적용에 따른 부식전류밀도는 매우 큰 차이를 나타냈다. 양극산화 시편은 모재 시편과 비교하여, 약 4.2배의 낮은 부식 속도를 나타냈다. 또한, 가속시험 환경으로 간주되는 동전위 양극분극 시험에서 양극산화 시편은 모재 시편 대비 현저히 우수한 내식성을 나타냈다.

0.005 mm/min의 저변형률 인장시험에서 양극산화 적용 여부에 따른 5083-H321 알루미늄 합금의 응력부식균열 감수성은 유의한 차이를 나타내지 않았다. 변형률이 감소에 따른 가공경화 구간이 확장으로 인장강도는 10% 정도 증가하였으며, 연신율도 다소 증가하는 경향을 나타냈다.

본 연구에서 적용된 저변형률 0.005 mm/min에서 양극산화 적용 여부에 따른 응력부식균열 감수성에 대한 유의한 차이는 나타나지 않았으나, 양극산화 적용에 따라 내식성이 크게 향상된 점을 고려할 때, 실제 환경에서 응력부식균열에 대한 저항성은 향상될 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 해양수산부의 ‘차세대 한국형 어선 개발 및 실증화’ 사업의 지원을 받아 이루어졌음(알루미늄 합금 선체 회생양극 방식 설계 연구용역, 중소조선연구원).

#### References

1. S. M. Moon, *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, **51**, 1 (2018).  
<https://doi.org/10.5695/JKISE.2018.51.1.1>

2. I. C. Park, J. H. Lee, M. S. Han, and S. J. Kim. *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, **51**(2), 87-94 (2018).  
<https://doi.org/10.5695/JKISE.2018.51.2.87>

3. I. C. Park and S. J. Kim, *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, **49**, 349 (2016).  
<http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2016.49.4.349>

4. S. A. Abdel-Gawad, W. M. Osman, and A. M. Fekry, *Surfaces and Interfaces*, **14**, 314 (2019).  
<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2018.08.001>

5. J. R. Pickens, J. R. Gordon, and J. A. S. Green, *Metall. Trans. A*, **14**, 925 (1983).  
<https://doi.org/10.1007/BF02644298>

6. S. Süzer, F. Kadirgan, H. M. Söhmen, A. J. Wetherilt, and İ. E. Türe, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **52**, 55 (1998).  
[https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00270-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00270-5)

7. S. A. Abdel-Gawad, W. M. Osman, and A. M. Fekry, *Surf. Interfaces*, **14**, 314 (2019).

8. D. A. Jones, *Principles and prevention of corrosion*, Macmillan (1992).

9. R. T. Foley, *Corrosion*, **42**, 277 (1986).  
<https://doi.org/10.5006/1.3584905>

10. H. Ezuber, A. El-Houd, and F. El-Shawesh, *Mater Des.*, **29**, 801 (2008).  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.021>

11. M. S. Han, S. Ko, S. H. Kim, S. K. Jang, and S. J. Kim, *Met Mater Int.*, **14**, 203 (2008).  
<https://doi.org/10.3365/met.mat.2008.04.203>

12. M. Yasuda, F. Weinberg, and D. Tromans. *J Electrochem Soc.*, **137**, 3708 (1990).  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2086291#>

13. S. Y. Yu, P. M. Natishan, and W. E. O’grady, *J. Electrochem. Soc.*, 158-166 (2000).

14. V. S. Sinyavskii, *Prot Met.*, **37**, 469 (2001).  
<https://doi.org/10.1023/A:1012374432246>

15. X. Zheng, H. Castaneda, H. Gao, and A. Srivastava, *Corros. Sci.*, **153**, 53 (2019).  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.03.018>