CORROSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol.19, No.6(2020), pp.288~295 pISSN: 1598-6462 / eISSN: 2288-6524
[Research Paper] DOI: https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.6.288

선박용 AA5083-H321의 유속에 의한 침식손상 방지를 위한 최적 음극방식전위 규명

정 상 옥[1] · 박 일 초[2] · 김 성 종[3,†]

[1]DNV GL 해사팀, 부산광역시 사상구 광장로 10
[2]목포해양대학교 승선실습과정부, 전남 목포시 해양대학로 91
[3]목포해양대학교 기관시스템공학부, 전남 목포시 해양대학로 91

(2020년 10월 06일 접수, 2020년 12월 02일 수정, 2020년 12월 02일 채택)

Investigation of Optimum Cathodic Protection Potential to Prevent Erosion with a Flow Rate of AA5083-H321 for Marine Vessels

Sang-Ok Chong[1], Il-Cho Park[2], and Seong-Jong Kim[3,†]

[1]Division of Maritime, DNV GL, Busan, 48120, Republic of Korea
[2]Division of Cadet Training, Mokpo Maritime University, Mokpo, 58628, Republic of Korea
[3]Division of Marine Engineering, Mokpo Maritime University, Mokpo, 58628, Republic of Korea

(Received October 06, 2020; Revised December 02, 2020; Accepted December 02, 2020)

This study investigated the erosion-corrosion characteristics of 5038-H321 aluminum alloy in a natural seawater solution through various electrochemical experiments and flow rate parameters. Cathodic polarization experiments were conducted at flow rates ranging from 4 to 12 knots. Considering the concentration polarization section representing a relatively low current density, the range of the potentiostatic experiment was determined to be -1.6 to -1.0 V. The potentiostatic experiment was conducted at various potentials for 180 minutes in seawater. After the experiment, the corrosion characteristics were evaluated by observing surface morphology and measuring surface roughness. As a result, as the applied potential was lower, the amount of calcareous deposits increased and the roughness tended to increase. On the other hand, it was confirmed that the roughness was larger in the static condition than the flow rate condition due to the influence of the flow velocity. Variations in the chemical composition with flow rate variations were analyzed by energy-dispersive spectroscopy (EDS). In conclusion, the cathodic potential of AA5083-H321 in seawater was determined to be -1.0 V.

Keywords: *Erosion-corrosion, Aluminium alloy, Seawater, Flow rate*

1. 서론

해양환경에서 알루미늄 합금은 해수 속에 포함된 염소이온에 의해 산화피막이 파괴되어 전기화학적 부식 손상이 발생한다 [1]. 특히 선박의 선체는 항해 중 해수의 충돌에 의한 액적 충격으로 침식부식 손상이 더욱 가속화된다 [2]. 선박에서 액적 충격의 가장 큰 원인은 파도 충격(wave impact)에 의한 해수 스프레이(sea spray)이며, 기존 연구에서 유체 속도가 빠를수록 부식속도가 커진다는 사실이 보고된 바 있다 [3]. 따라서 알루미늄 선박은 45 knot의 고속 운항이 가능하기 때문에 고속 운항 시 액체 충격에 의한 침식부식에 더 취약한 조건을 지니고 있다 [4,5]. 이에 해양환경 하에서 알루미늄 합금에 대하여 유속에 따른 침식부식 특성에 대한 많은 연구가 진행 중이다. George 등은 5456-H117 알루미늄 합금에 대해 유속이 증가할수록 부식속도가 증가함을 규명하기 위해 표면 형상을 관찰하여 부동태 피막 파괴와 침식손상 메커니즘을 연구하였다 [4]. 또한 천연해수 용액에서 양극산화된 5083-H321 알루미늄 합금에 대해 유속이 없는 정적상태(stagnant)와 다양한 유속에서의 공식 손상을 상호 비교하였다. 그 결과 정적상태에서 공식 손상이 감소하였으며, 유속이 증가하면서

†Corresponding author: ksj@mmu.ac.kr
정상옥: 선임검사관, 박일초: 조교수, 김성종: 교수

부식전류밀도가 증가한다고 보고하였다 [6]. 그리고 해양 환경 하에서 유속이 증가할수록 Al-Mg계의 5000계열이 Al-Mg-Si계의 6000계열 알루미늄 합금에 비해 침식손상이 증가하여 내식성이 더 취약한 것으로 알려져 있다 [7]. 또한 해양 환경에서 알루미늄 합금의 부식 방지를 목적으로 음극방식에 대한 연구도 진행되었으나 [8,9], 정적인 상태에서 최적 조건을 선정하였기 때문에 실제 환경에 바로 적용하는데 한계가 있다.

본 연구에서는 5000계열 알루미늄 합금 중 해양 선박용 선체 재료로 널리 사용되는 5083-H321 알루미늄 합금 재료에 대하여 실제 환경을 고려하여 다양한 유속조건에서 전기화학적 실험을 통해 액체 충격 침식부식 특성을 분석하였다. 또한 음극분극 및 정전위 분극실험 등의 전기화학적 실험 후 침식부식 특성을 파악하고 다양한 분석법을 종합하여 음극방식 적용 시 최적의 방식전위를 규명하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 AA5083-H321에 대하여 천연해수를 활용한 다양한 유속으로 액체 충격 전기화학적 실험을 실시하여 침식부식 특성을 분석하였다. AA5083-H321은 Al-Mg 합금으로 4.48Mg, 0.358Fe, 0.542Mn, 0.0652Cr, 0.013Cu, 0.0005Si, Al(balance, wt%)의 화학적 조성으로 이루어져 있다. 시편은 2 cm × 2 cm으로 제작하여 에머리 페이퍼(#2000)까지 순차적으로 연마 후 아세톤과 증류수로 세척하여 건조하였다. 액체 충격 전기화학적 실험을 위해 홀더(holder)를 이용하여 시편은 1 cm^2만 노출시킨 후 유속 변화에 따른 침식 특성을 파악하였다.

Fig. 1은 액체 충격 침식부식 실험장비의 모식도를 나타낸 것이며, 노즐 직경 1.6 mm을 통해 시편 표면에 일정한 유속으로 충격을 가하였다. 실험에서 유속 조건은 유속에 따른 침식특성 경향을 규명하기 위해 정적상태(stagnant, 0 knot)와 4 knot, 8 knot 및 12 knot의 다양한 유속에서 실시하였다. 노즐과 시편 사이 거리는 5 mm로 유지하였으며, 노즐과 시편 전면 충격각도(impact angle)는 90° 로 설정하였다. 이는 선체 표면에 수직하게 작용하는 정상 조파저항(steady wave resistance)을 구하는 조건과 동일한 조건이다. 알루미늄 선박은 도장되어 있다 할지라도 필연적으로 결함이나 손상으로 인하여 음극방식이 필요하며, 적합한 방식전위를 규명하기 위해 동전위 음극분극 실험과 정전위 실험을 실시하였다. 전기화학적 실험은 기준전극으로 은/염화은(Ag/AgCl) 전극, 대응전극으로 백금(Pt) 전극을 사용하여 셀을 구성하였다. 동전위 음극분극 실험은 개로전위를 기준으로 -2 V까지 2 mV/sec의 주사속도로 실시하였다. 정전위 분극실험은 인가전위 -1.0, -1.2, -1.4 그리고 -1.6 V 조건으로 3시간 동안 진행하였으며, 실험 후 EDS (energy dispersive spectrometer)를 통해 유속과 전위에 따른 시편 표면의 화학성분 변화를 분석하였다. 또한 주사전자현미경과 3D 광학현미경을 통해 표면 형상을 관찰하여 침식부식 특성을 분석하였다.

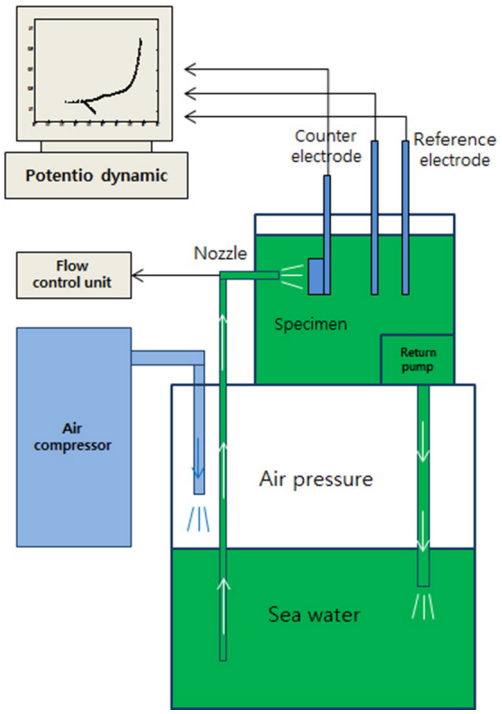


Fig. 1 Schematic diagram for erosion-corrosion test.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 AA5083-H321에 대하여 다양한 유속 조건하에서 개로전위(OCP, open circuit potential)를 기준으로 0 V ~ -2 V 구간에서의 음극분극 실험 결과를 나타낸 것이다. 정적상태(stagnant) 환경에서는 개로전위에서 전위가 저하함에 따라 전류밀도가 증가하였다. 음극분극 곡선에서 분극 초기 단계로써 비교적 낮은 전류밀도를 나타냈으며, 이는 방식전위 구간이며, 용존산소 환원반응($O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$)에 의한 농도분극 경향이 관찰되었다. 해당 전위구간 -1.8 V ~ -0.6 V를 확대한 그래프에서 용존산소 환원반응에 의한 농도분극과 전위 저하에 따라 급격한 전류밀도 증가를 나타낸 활성화 분극의 변곡점(turning point)은 -1.43 V이고 전류밀도는 4.32 × 10^{-5} A/cm^2로 분석되었다. 반면 모든 유속변수에서는 전위 저하에 따라 전류밀도가 꾸준히 상승하는 경향을 나타냈으며, 유속이 4 knot에서 12 knot로 증가할수록 전류밀도가 소폭 상승하는 경향을 나타냈다. 결과적으로 정적상태의 조건과 달리 유속

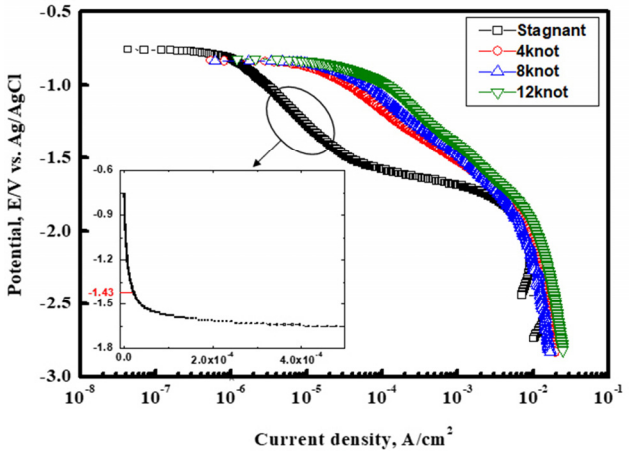
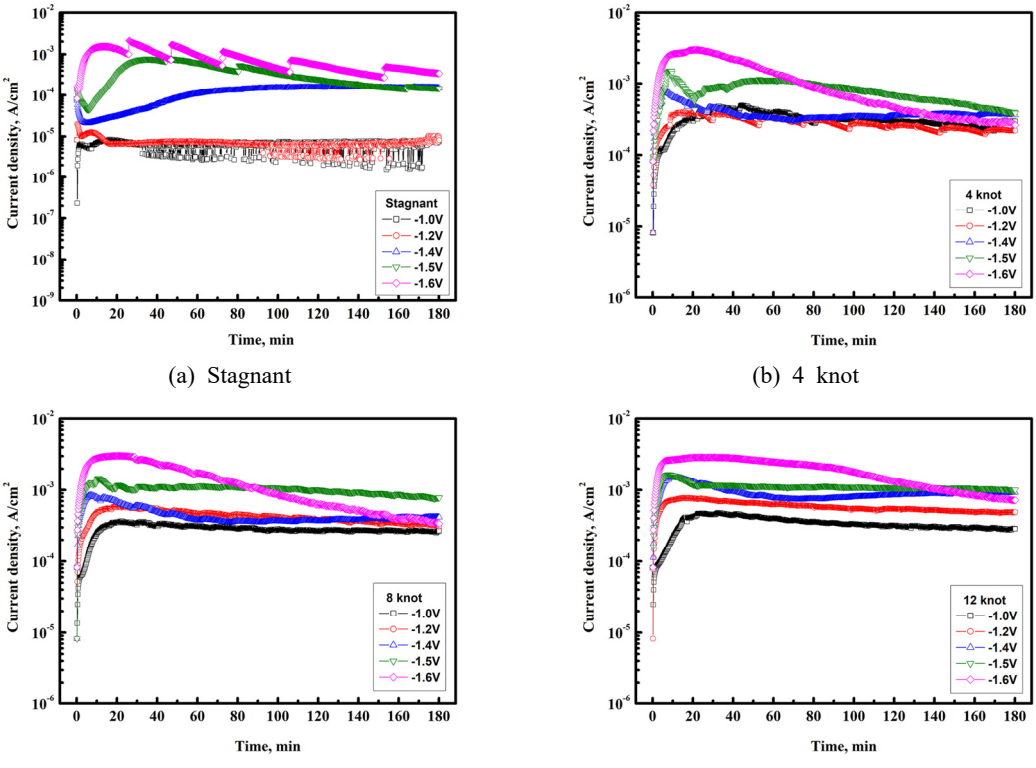


Fig. 2 Cathodic polarization curves of AA5083-H321 in sea water.

조건에서는 농도분극과 활성화분극이 명확하게 구분되어 나타나지 않았다. 일반적으로 음극방식 전위구간은 본 음극분극 실험 결과에서와 같이 인가전위 변화에 따른 전류변동이 적고 전류밀도 역시 상대적으로 낮은 농도분극 구간에서 선정된다. 따라서 이후 진행되는 방식전위 규명을 위한 정전위 실험은 음극분극 실험 결과를 토대로 -1.6 V ~ -1.0 V의 전위구간으로 선정하였다.

Fig. 3은 AA5083-H321에 대하여 다양한 유속 조건하에서 -1.6 V ~ -1.0 V 전위에서 120초 동안 안정화 후 180분 동안 정전위 실험을 실시하여 시간-전류밀도 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3a의 정적상태(stagnant)에서는 인가 전위가 낮을수록 높은 전류밀도를 나타냈다. 정적상태 -1.0 V와 -1.2 V에서는 실험시간 경과에 따라 대체적으로 낮은 전류밀도가 관찰되었으며, 실험이 진행하면서 시편 표면에 산화피막이 해수 속의 염소이온에 의해 생성과 파괴가 반복함으로써 전류밀도가 헌팅하는 현상을 나타낸 것으로 판단된다. 한편 -1.6 V ~ -1.4 V로 전위가 낮을수록 활성화분극 반응이 활발해져 전류밀도가 크게 나타난 것으로 사료된다. 인가전위 -1.6 V 경우 헌팅현상이 발생하는 이유는 해당 조건이 가장 큰 음극분극 조건으로써 실험시간이 경과 할수록 시편 표면에 음극반응에 따른 수소기포의 발생 및 성장 그리고 이탈이 반복적으로 나타나면서 발생되는 현상으로 사료된다. 유속조건의 경우에는 유속의 영향으로 기포가 표면에 부착되어 성장하지 않고 바로 이탈되어 헌팅현상이 발생하지 않은 것으로 여겨진다. Fig. 3b의 4 knot 유속에서는 전위가 낮아짐에 따라 실험 초기에 전류밀도가 급격히 상승한 후 실험이 진행되면서 하강하는 경향이 관찰되었다. 그리고 실험 종료 시 모든 전위조



(a) Stagnant (b) 4 knot

(c) 8 knot (d) 12 knot

Fig. 3 Time-current density curves of AA5083-H321 after potentiostatic experiment in sea water.

건에서는 전류밀도 값은 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 Fig. 3c와 Fig. 3d의 8 knot와 12 knot에서는 전류밀도가 조금 더 크게 나타났으나 4 knot와 유사한 경향을 나타냈다. 즉, 유속 환경에서는 실험 초기 피막 파괴로 전류밀도가 상승하였으나 이후 석회질 피막이 생성되면서 전류밀도가 감소하는 경향을 나타낸 것으로 판단된다. 특히 -1.4 V ~ −1.0 V는 농도분극 구간, 즉 방식전위 구간으로 전류밀도가 낮게 형성되고 적은 전류밀도 변화를 나타냈다. 그러나 -1.6 V의 낮은 전위에서는 변곡점 -1.43 V 보다 낮은 수소발생에 의한 활성화분극 구간으로 수소이온의 원자화 반응($H^+ + e^- \rightarrow H$)에 의해 전류밀도가 증가한 것으로 판단된다. 활성화 분극 구간에서는 원자성 또는 분자성 수소가 발생하면서 활성화 분극 반응이 촉진되어 전류밀도가 증가한다 [10]. 그러나 일정 시간 이후 재료 표면에 석회질 피막(calcareous deposit)이 생성되고 증가하면서 전류밀도가 감소하는 경향을 나타낸 것이다 [11]. 특히, −1.6 V의 경우 모든 유속 조건에서 실험 초기에는 가장 큰 전류밀도를 형성하였으나 실험시간이 경과함에 따라 점차 전류밀도가 감소하여 다른 정전위 조건에 비해 유사하거나 오히려 작아지는 현상이 나타났다. 이는 실험 초기에 낮은 전위 형성에 따른 큰 전류밀도 형성으로 시편 표면에 상대적으로 두꺼운 석회질 피막이 형성되어 전류의 흐름을 방해하는 역할을 수행했기 때문으로 여겨진다.

Table 1은 AA5083−H321에 대하여 다양한 유속 조건하에서 180분 동안 수행한 정전위 실험 종료 시 전류밀도 값을 나타낸 것이다. 정적상태(stagnant)에서는 전위가 비방향으로 이행할수록 높은 전류밀도를 나타냈으며, -1.2 V ~ −1.0 V에서 비교적 낮은 전류밀도를 나타냈다. 유속 환경에서는 정적상태에 비해 높은 전류밀도를 나타내었으며, 유속이 증가할수록 -1.0 V의 12 knot에서의 전류밀도 값이 8 knot 보다 약간 낮은 값이나 거의 유사한 값이며, 전체적으로 인가 전위에서 높은 전류밀도가 분석되었다. 일반적으로 유체 흐름이 물질전달 경계층(mass transfer boundary layer)의 두께를 감소시키고 부식반응에 참여하는 Al^{3+}과 부식 화합물의 확산을 용이하게 하여 부식속도가 증가한다고 알려져 있다 [12]. 결과적으로 정적 상태에서는 -1.2 V ~ −1.0 V에서 낮은 전류밀도를 나타냈으며 유속 조건에서 4 knot ~ 8 knot에서는 -1.4 V ~ −1.0 V 그리고 12 knot에서는 -1.2 V ~ −1.0 V에서 비교적 낮은 전류밀도를 나타냈다.

Fig. 4와 5는 정적상태 및 12 knot 유속에서 EDS 분석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4의 정적상태 조건의 경우 낮은 전위에서 O, Mg 그리고 Ca 함량이 증가하는 경향을 보였다. 또한 Fig. 5의 12 knot 유속 조건에서도 정적상태와 동일하게 인가전위가 작아짐에 따라 O, Mg 그리고 Ca 함량이 증가하였다. 이는 시편 표면에 음극 전위를 인가할 경우 $CaCO_3$ 또는 $Mg(OH)_2$ 등의 석회질 전착물이 석출되어 부착되기 때문이다 [13]. 기존 연구 결과에 따르면 [14,15], 일반적으로 천연해수는 적절한 농도의 무기이온(Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_8^-)을 포함하고 있으며, 음극분극된 시편 표면의 pH가 11~12 정도로 상승하게 되면 시편 표면에 $CaCO_3$ 또는 $Mg(OH)_2$ 등의 석회질 전착물(calcareous deposit)이 석출되는데, 이러한 전착물 코팅은 선체 표면이 해수와의 직접적인 접촉을 막는 장벽 역할을 수행하므로 방식성능을 가진다. 이 전착물 코팅의 Ca과 Mg의 혼합비는 인가된 전류밀도가 크고 pH가 높을수록 Mg의 함량이 증가하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 EDS의 성분 분석 결과와 표면 형상 관찰을 통해 시편 표면에 해당 전착물이 생성되고 낮은 인가 전위일수록 전착물의 생성량이 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 전착물의 생성량은 정적상태에 비해 12 knot 유속 환경에서 상대적으로 작게 나타났다. 따라서 알루미늄 합금에 대하여 음극방식 적용 시 석회질 전착물이 표면에 생성되며 인가전위가 낮을수록 그 생성량이 증가하나 유속은 전착물 생성을 방해하는 역할로 작용하는 것으로 판단된다.

Fig. 6과 7은 AA5083−H321에 대하여 다양한 유속 조건 및 -1.6 V ~ -1.0 V 범위에서 정전위 실험 후 3D 현미경으로 시편의 표면 거칠기를 분석한 것이다. Fig. 6에서 표면 형상 분석 결과, 전반적으로 정적상태에서는 전위가 낮아짐에 따라 표면 거칠기가 증가하였으며, 특히 -1.6 V에서는 석회질 전착물의 영향으로 거친 표면과 굴곡이 관찰되었다. 유속 조건에서는 전반적으로 유사한 표면 형상을 나타냈으나 정적상태에 비해 비교적 표면 거칠기가 작게 관찰되었다.

Fig. 7은 다양한 실험 조건에 따른 표면 거칠기를 비교한

Table 1 Corrosion current density of AA5083-H321 after potentiostatic experiment in sea water

Applied potential[V]	Corrosion current density [A/cm^2]			
	Stagnant	4 knot	8 knot	12 knot
-1.0 V	7.93×10^{-6}	3.01×10^{-4}	2.71×10^{-4}	2.85×10^{-4}
-1.2 V	8.06×10^{-6}	2.24×10^{-4}	3.14×10^{-4}	4.89×10^{-4}
-1.4 V	1.19×10^{-4}	3.69×10^{-4}	4.15×10^{-4}	9.26×10^{-4}
-1.6 V	3.38×10^{-4}	2.68×10^{-4}	3.39×10^{-4}	7.16×10^{-4}

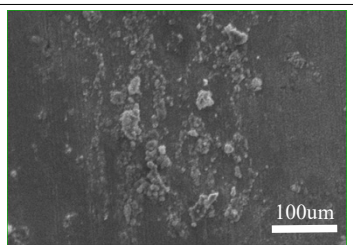
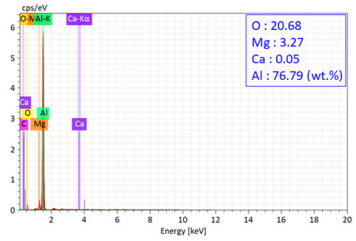
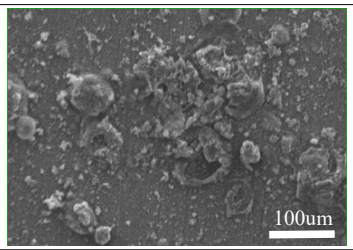
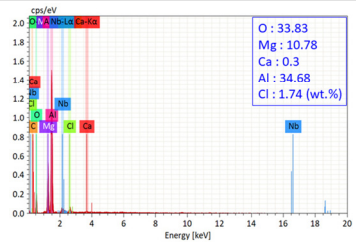
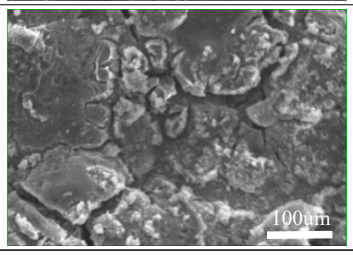
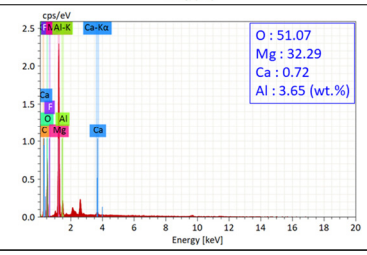
Condition	Surface image	EDS Spectra
-1.0 V		
-1.4 V		
-1.6 V		

Fig. 4 EDS analysis results of AA5083-H321 after potentiostatic experiment at stagnant condition in sea water.

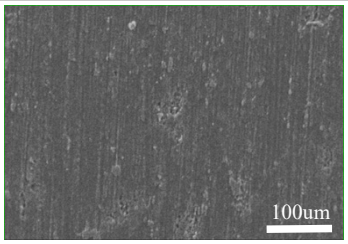
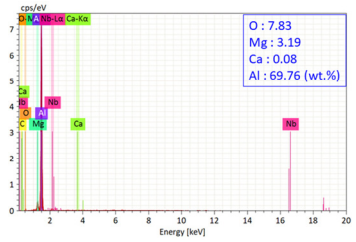
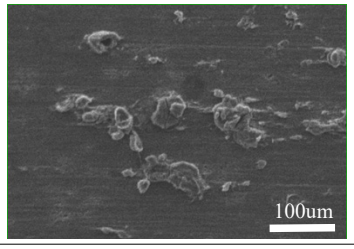
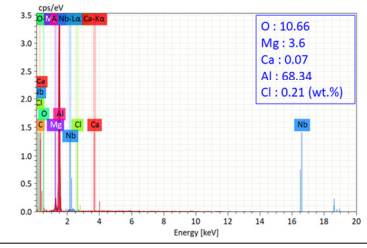
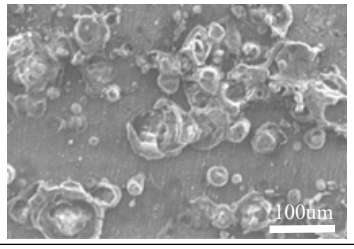
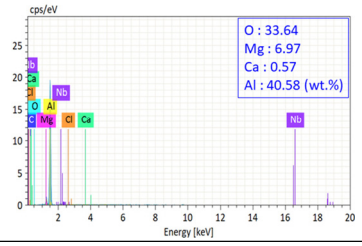
Condition	Surface image	EDS Spectra
-1.0 V		
-1.4 V		
-1.6 V		

Fig. 5 EDS analysis results of AA5083-H321 after potentiostatic experiment at 12 knot in sea water.

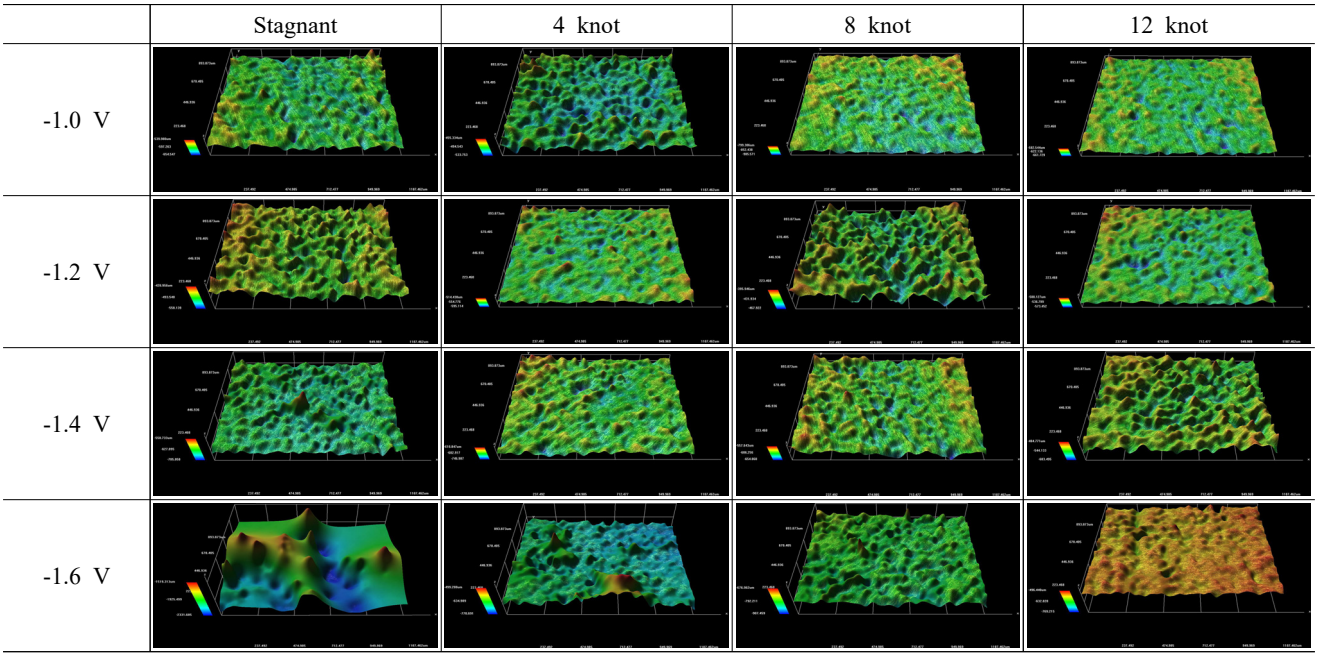


Fig. 6 3D analysis results of AA5083-H321 after potentiostatic experiment in sea water.

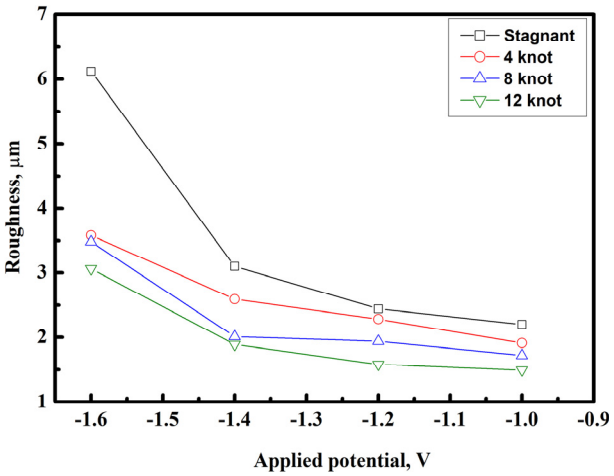


Fig. 7 Surface roughness of AA5083-H321 after potentiostatic experiment in sea water.

그래프이다. 정적상태의 경우 -1.0 V에서 2.2 ㎛로 계측되었으나 전위가 낮을수록 거칠기가 증가하였으며 -1.6 V에서는 전착물 생성으로 6.12 ㎛로 급격하게 증가하였다. 그리고 유속 조건에서는 정적상태에 비해 비교적 작은 거칠기가 관찰되었으나 전위가 낮을수록 거칠기가 증가하는 동일한 경향을 보였다. 또한 인가전위와 유속이 클수록 표면 거칠기는 작아지는 경향이 확인되었다. 특히 12 knot의 가장 큰 유속에서 -1.0 V는 1.49 ㎛로 가장 작은 거칠기를 나타냈으며, −1.6 V는 3.06 ㎛로 정적상태 대비 약 4배 작은 값이 계측되었다. 결과적으로 유속 조건은 정적상태에 비해 거칠기가 상대적으로 작게 나타났으며 유속의 증가와 인가전위가 낮아질수록 표면 거칠기가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 시편 표면에 형성되는 전착물이 인가전위와 유속의 영향에 따라 그 생성량이 다르기 때문으로 표면의 손상에 기인한 표면 거칠기의 영향은 상대적으로 작은 것으로 판단된다.

Fig. 8은 AA5083−H321에 대하여 다양한 유속 조건에서 정전위 실험 후 주사전자현미경으로 표면 형상을 관찰한 것이다. 정적상태에서는 인가전위가 -1.0 V에서 -1.6 V로 저하할수록 전착물의 부착량이 증가하였으나 공식(pitting)과 같은 표면 손상은 나타나지 않아 전반적으로 양호한 표면 형상이 관찰되었다. 한편, 12 knot 유속 조건의 경우 -1.0 V에서는 전반적으로 양호한 표면 형상이 관찰되었으나 -1.4 V에서는 부분적으로 공식 손상과 전착물이 함께 관찰되었다. 그리고 -1.6 V에서는 AA5083−H321의 표면 손상은 관찰되지 않았으나 전착물 생성량이 증가하고 전착물 일부에서 공식 손상이 관찰되었다. 따라서 유속 조건에서는 유체 흐름에 의해 표면에 생성된 전착물이 이탈되어 정적상태에 비해 표면에 전착물이 적게 형성된 것으로 판단된다. 또한 전착물에 생성된 공식 손상은 활성화분극 반응에 의한 수소 기포에 기인한 것으로 AA5083−H321 표면의 손상된 산화피막 부위에 전류밀도 공급이 과잉되어 수소 기포가 다량 발생하면서 나타난 표면 형상으로 판단된다 [16]. 결과적으로 정전위 실험 후 EDS 분석, 표면 형상 관찰 그리고 표면 거칠기 분석을 종합해 보면 모든 유속 조건에서 음극방식 전위는 변곡점보다 높은 전위 −1.0 V로 판단된다.

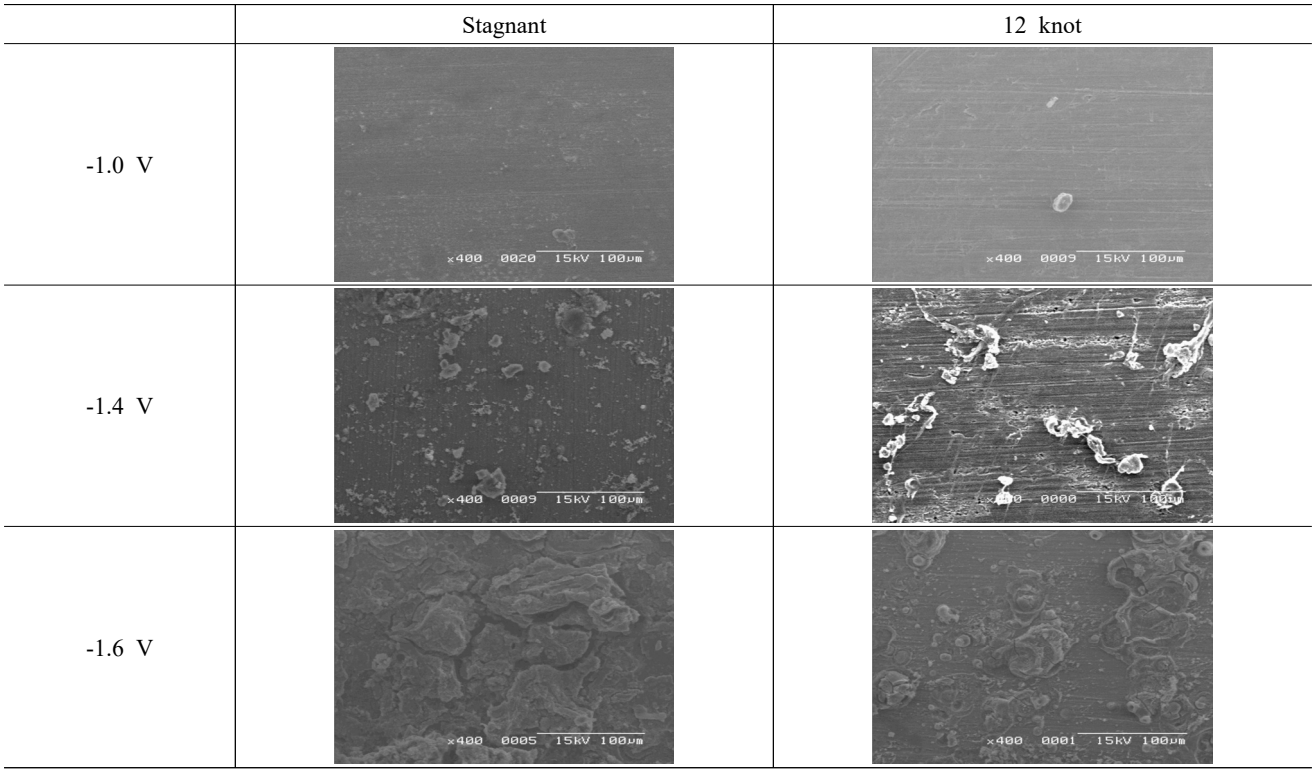


Fig. 8 Surface morphology of AA5083-H321 after potentiostatic experiment in sea water.

4. 결론

해양환경용 알루미늄 합금 5083-H321에 대하여 천연해수 용액에서 다양한 유속 조건 하에 액체 충격 조건하에서 전기화학적 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동전위 음극분극 실험 결과, 정적상태 환경에서는 전위가 낮아짐에 따라 농도분극과 활성화분극의 변곡점이 관찰되었으나 유속조건에서는 명확한 변곡점이 관찰되지 않았으며 유속이 증가할수록 동일 전위에서 상대적으로 높은 전류밀도를 나타냈다.
2. 다양한 유속조건에서 정전위 실험 후 다음의 결론을 얻었다.
   (1) 시간-전류밀도 분석 결과, 유속조건에서 정적상태 조건에 비해 높은 전류밀도를 나타냈으며, 유속이 증가할수록 전반적으로 동일 인가전위 대비 높은 전류밀도를 나타냈다.
   (2) 3D 광학현미경을 활용한 시편의 표면 거칠기 분석 결과, 유속조건은 정적상태에 비해 작은 표면 거칠기가 계측되었으며, 유속이 증가할수록 그리고 정전위 분극실험의 인가전위가 높을수록 낮은 표면 거칠기 값을 나타냈다.
   (3) 주사전자현미경을 통한 시편 표면 형상 관찰 결과, 모든 조건에서 정전위 분극실험의 인가전위가 낮아질수록 시편 표면에 전착물의 부착량이 증가하였으며 유속조건에 비해 정적상태 조건에서 더 많은 부착량이 관찰되었다.
3. 정전위 실험 후 표면 형상과 거칠기 그리고 EDS 분석 등을 종합한 결과, 음극방식 전위는 변곡점보다 높은 전위인 −1.0 V로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 중소조선연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었음(용역명: 알루미늄 합금 선체의 희생양극 방식설계 연구용역).

References

1. S. Y. Cho, H. G. Na, H. R. Cho, J. J. Moon, T. J. Ahn, and H. Jang, *Corros. Sci. Tech.*, **19**, 109 (2020). https://doi.org/10.14773/CST.2020.19.3.109
2. H. Ezuber, A. El-Houd and F. El-Shawesh, *Mater. Des.*, **29**, 801 (2008). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.021
3. S. R. Dehghani, Y. S. Muzychka, and G. F. Naterer,

Cold Reg. Sci. Technol., **127**, 1 (2016). https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.03.010
4. G. A. Gehring Jr. and M. H. Peterson, *Corrosion*, **37**, 232 (1981). https://doi.org/10.5006/1.3577276
5. Jefa Rudder, Stray current corrosion of ship, (2018). https://www.jefa.com/install/electro.htm
6. I. C. Park and S. J. Kim, *J. Korean Inst. Surf. Eng*., **49**, 349 (2016). https://doi.org/10.5695/JKISE.2016.49.4.349
7. Y. B. Kim and S. J. Kim, *Corros. Sci. Tech*., **18**, 292 (2019). https://doi.org/10.14773/cst.2019.18.6.292
8. S. J. Kim, S. K. Jang, M.S. Han, J. C. Park, J. Y. Jeong, and S. O. Chong, *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, **23**, 636 (2013). https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62510-8
9. J. S. Jeon, D. H. Jeon, and M. H. Lee, *J. Corros. Sci. Soc. of Kor*., **15**, 3 (1986). https://www.j-cst.org/opensource/pdfjs/web/pdf_viewer.htm?code=J00150400003
10. E. McCafferty, *Introduction to Corrosion Science*, Springer Science & Business Media, New York (2010). https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0455-3
11. S. L. Wolfson and W. H. Hartt, *Corrosion*, **37**, 70 (1981). https://doi.org/10.5006/1.3593848
12. S. J. Lee, M. S. Han, S. K. Jang, and S. J. Kim, *Corros. Sci. Tech*., **14**, 226 (2015). https://doi.org/10.14773/cst.2015.14.5.226
13. H. J. Ryu and M. H. Lee, *J. Corros. Sci. Soc. of Kor*., **29**, 240 (2000). http://www.j-cst.org/opensource/pdfjs/web/pdf_viewer.htm?code=J00290400240
14. W. H. Hartt, C. H. Culberson, and S. W. Smith, *Corrosion*, **40**, 609 (1984). https://doi.org/10.5006/1.3581927
15. K. E. Mantel, W. H. Hartt, and T. Y. Chen, *Corrosion*, **48**, 489 (1992). https://doi.org/10.5006/1.3315965
16. C. J. Li and M. Du, *RSC Adv*., **7**, 28819 (2017). https://doi.org/10.1039/C7RA03709K