

스테인리스강과 양극산화된 알루미늄 합금의 전기화학적 부식특성에 미치는 해수온도의 영향

정상옥¹ · 김성종^{2,†}

¹디엔브이코리아유한회사 기자재검사부, 부산광역시 사상구 광장로 10

²목포해양대학교 기관시스템공학부, 전남 목포시 해양대로 91

(2021년 4월 9일 접수, 2021년 4월 15일 수정, 2021년 4월 15일 채택)

The Effect of Seawater Temperature on the Electrochemical Corrosion Behaviour of Stainless Steels and Anodized Aluminum Alloys

Sang-Ok Chong¹ and Seong-Jong Kim^{2,†}

¹CMC Service Line, DNV, Busan, 46971, Korea

²Division of Marine Engineering, Mokpo Maritime University, 58628, Korea

(Received April 09, 2021; Revised April 15, 2021; Accepted April 15, 2021)

The corrosion damage of materials in marine environment mainly occurs by Cl⁻ ions due to the breakdown of passive films. Additionally, various characteristics in seawater such as salinity, temperature, immersion time, flow rate, and biological activity also affect corrosion characteristics. In this study, the corrosion characteristics of stainless steels (STS 304 and STS 316L) and anodized aluminum alloys (AA 3003 and AA 6063) were evaluated with seawater temperature parameters. A potentiodynamic polarization experiment was conducted in a potential range of -0.25 V to 2.0 V at open circuit potential (OCP). Corrosion current density and corrosion potential were obtained through the Tafel extrapolation method to analyze changes in corrosion rate due to temperature. Corrosion behavior was evaluated by measuring weight loss before/after the experiment and also observing surface morphology through a scanning electronic microscope (SEM) and 3D microscopy. Weight loss, maximum damage depth and pitting damage increased as seawater temperature increased, and furthermore, the tendency of higher corrosion current density with an increase of temperature attributed to an increase in corrosion rate. There was lower pitting damage and lower corrosion current density for anodized aluminum alloys than for stainless steels as the temperature increased.

Keywords: Corrosion, Seawater, Stainless steel, Aluminum alloy, Temperature

1. 서론

스테인리스강과 알루미늄 합금은 대기와 중성 용액에서 내식성이 우수하여 다양한 산업 분야에 널리 사용되고 있다. AA 3003은 Al-Mn 합금으로 성형성과 내식성은 물론 적당한 강도를 가지며, AA 6063은 Mg-Si 합금으로 압출성과 표면처리 특성이 매우 우수하여 일반 산업, 건축자재 등에 주로 사용되고 있다. 그리고 300계열 스테인리스강인 STS 304와 STS 316L은 내식성과 내열성이 우수하여 다양한 분야에서 광범위하게 사용되

고 있다. 특히 Mo를 함유하고 있는 STS 316L은 STS 304에 비해 공식 저항성이 뛰어나 해양 및 화학 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 그러나 해양 환경에서 스테인리스강과 알루미늄 합금은 해수 내 Cl⁻ 이온에 의해 부동태피막 및 산화피막이 파괴되거나 부동태 생성을 방해하여 부식을 일으킨다 [1]. 특히 해수 분위기에서 재료는 염도, 산소농도, pH, 유속, 생물학적 활성도, 온도 등의 많은 인자에 의해 다양한 메커니즘으로 부식 손상이 발생한다. 다양한 부식발생 변수에서 부식 거동을 규명하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. Donik *et al.*은 스테인리스강에 대하여 천연해수와 인공염수에서의 부식 경향을 분석하였으며 [2], Bardal *et al.*은 스테인리스강에 대해 해수 용액의 생물학적 영향과 부식

[†]Corresponding author: ksj@mmu.ac.kr

정상옥: 선임검사관, 김성종: 교수

특성의 연관성에 대하여 연구하였다 [3]. 그리고 Kim *et al.*은 5083-H321 알루미늄 합금에 대하여 유속과 부식 손상 경향에 대해 연구하였다 [4]. 또한 Jang *et al.* 등은 S255ML 강재에 대해 해수 온도 변화에 따른 전기화학적 부식특성을 분석하였다 [5]. 이와 같이 스테인리스강과 알루미늄 합금에 대하여 대부분의 부식 거동에 관한 연구는 많이 이루어지고 있으나 천연해수 용액에서 해수 온도 변화에 대한 연구는 드물다. 해수 온도는 부식 속도에 영향을 미치는 중요한 인자로 해수 온도가 상승할수록 양극 및 음극의 전기화학적 반응이 활발하게 일어난다 [6]. 즉, 해수 온도가 증가할수록 부식성 인자인 Cl⁻ 이온의 전하 이동이 활발해져 부식속도에 영향을 주기 때문에 재료의 수명을 단축시킨다. 즉, 해수 온도 변화에 따라 부식 특성을 고려하여 온도 환경에 적합한 재료를 선정하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 스테인리스강(STS 304 및 STS 316L)과 내식성 향상을 위해 적용되는 양극산화(anodizing) 처리된 알루미늄 합금(AA 3003 및 AA 6063)에 대하여 해수 온도변화에 따른 전기화학적 실험을 실시하여 부식 특성을 분석하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 스테인리스강(STS 304 및 STS 316L)과 양극산화 처리된 알루미늄 합금(AA 3003 및 AA 6063)에 대하여 천연해수 용액에서 온도변화에 따른 전기화학적 실험을 통해 부식 특성을 분석하였다. Table 1

의 (a)와 (b)는 실험에 사용된 각 재료의 화학 조성을 나타냈다. 특히 AA 3003과 AA 6063 재료는 황산용액으로 처리된 연질 양극산화(주식회사 광성)된 재료를 사용하였다. 그리고 실험에 사용된 천연 해수의 화학적 성분과 특성은 Table 2와 같다. STS 304와 STS 316L 시험편은 에머리페이퍼 #600번까지 연마하였으며, 양극산화 처리된 AA 3003과 AA 6063 시험편은 그대로 사용하였다. 전기화학적 실험용 시험편은 홀더(holder)를 자체 제작하여 시험편 표면을 1 cm²만 노출시킨 후 부식 실험을 실시하였다. 전기화학적 실험은 단시간 내 재료의 부식특성과 내식성을 규명할 수 있는 동전위 분극 실험을 수행하였으며 Ag/AgCl 기준전극, Pt 대응전극으로 셀(cell)을 구성하였다. 동전위 분극 실험은 1800초의 안정화 후 개로전위에서 -0.25 V ~ 2.0 V의 범위에서 1.0 mV/sec의 주사속도로 진행하였다. 그리고 온도 조건은 상온(25 °C)과 가혹한 환경에 노출될 경우의 해수 환경을 고려한 온도(50 °C)를 변수로 하고, 자동온도조절 장비를 이용하여 셀 내 온도를 일정하게 유지하였다. 동전위 분극실험 후 주사전자현미경(SEM)과 3D 광학현미경을 이용하여 시편 표면 형상 분석, 시험편의 손상 깊이 및 무게 감소량을 측정하여 온도 변화에 따른 부식특성을 분석하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 STS 304 및 STS 316L의 부식특성

Fig. 1은 천연해수 용액에서 STS 304와 STS 316L에

Table 1. Chemical composition of (a) STS 304 and STS 316L and (b) AA 3003 and AA 6063 (wt%)

(a) STS 304 and STS 316L

	Cr	Si	Mn	Ni	Mo	S	Cu	C	Fe
STS 304	18.16	0.434	1.101	8.08	0.14	0.003	0.418	0.062	Rem.
STS 316L	16.63	0.514	1.38	10.05	2.046	0.002	0.3	0.024	Rem.

(b) AA 3003 and AA 6063

	Si	Mn	Cu	Fe	Mg	Cr	Al
AA 3003	0.169	1.236	0.169	0.546			97.84
AA 6063	0.437	0.041	0.016	0.147	0.533	0.006	98.76

Table 2. Chemical compositions and properties of natural seawater

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

대하여 25 °C 및 50 °C의 온도 조건에서 수행한 동전위 분극실험 결과를 나타낸 것이다. 해수 온도 25 °C의 경우 STS 304와 STS 316L 시험편에서 침지 초기 형성된 부동태 피막 형성으로 전류밀도 상승이 정체되는 부동태 구간이 관찰되었다. 그러나 Cl⁻ 이온의 활성용해반응이 활발해지면서 공식전위 이후 급격한 전류밀도가 상승하는 경향을 나타냈다. 특히 STS 316L 시험편이 STS 304에 비해 높은 공식전위와 넓은 부동태 영역을 나타

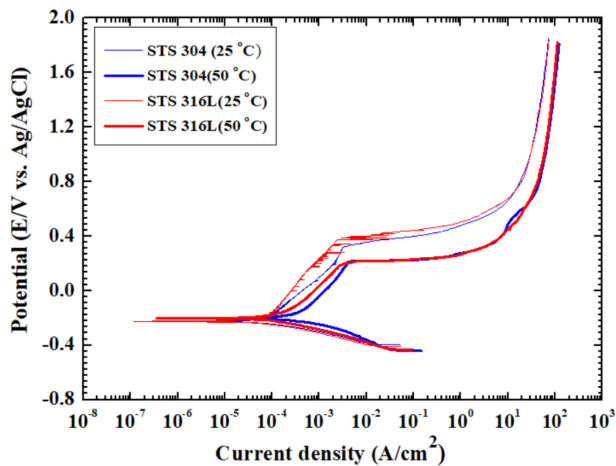


Fig. 1. Potentiodynamic polarization curves in seawater of STS 304 and STS 316L

냈다. 이는 STS 316L 재료에 내식성을 향상시키는 Ni 과 Mo의 높은 함량으로 STS 304에 비해 귀전위를 나타낸 것으로 판단된다 [7]. 한편 해수 온도 50 °C에서는 두 시험편 모두 25 °C에 비해 비전위와 높은 전류밀도를 나타냈으며 STS 316L 시험편이 STS 304에 비해 낮은 전류밀도를 나타냈다. 또한 두 시험편 모두 25 °C에 비해 부동태 영역이 감소하였다. 결과적으로 온도가 증가하면서 두 재료 모두 비한 전위와 높은 전류밀도를 나타냈으며, 이는 온도가 상승할수록 이온의 활동도가 증가하며 특히 부식 특성에 영향을 미치는 Cl⁻ 이온의 이동이 활발해져 비전위를 나타낸 것으로 판단된다.

Table 3은 동전위 분극 그래프에서 타펠 외삽법(Tafel's extrapolation method)을 이용하여 구한 부식전위(E_{corr}), 부식전류밀도(I_{corr}) 및 공식 전위(E_{pit})를 분석한 결과이다. STS 316L 시험편은 STS 304에 비해 25 °C 및 50 °C 온도 조건에서 유사한 부식전위와 낮은 부식전류밀도를 나타냈으며 공식전위는 높게 나타났다. 해수 온도 증가로 STS 304는 약 2.15배, STS 316L은 약 1.53배 정도 높은 부식전류밀도를 나타내어 부식속도가 상승할 것으로 판단된다. 또한 두 시험편 모두 온도가 증가할수록 비한 전위와 낮은 공식전위를 나타내어 열악한 부식 특성을 나타낼 것으로 사료된다.

Fig. 2는 STS 304와 STS 316L에 대하여 동전위 분극

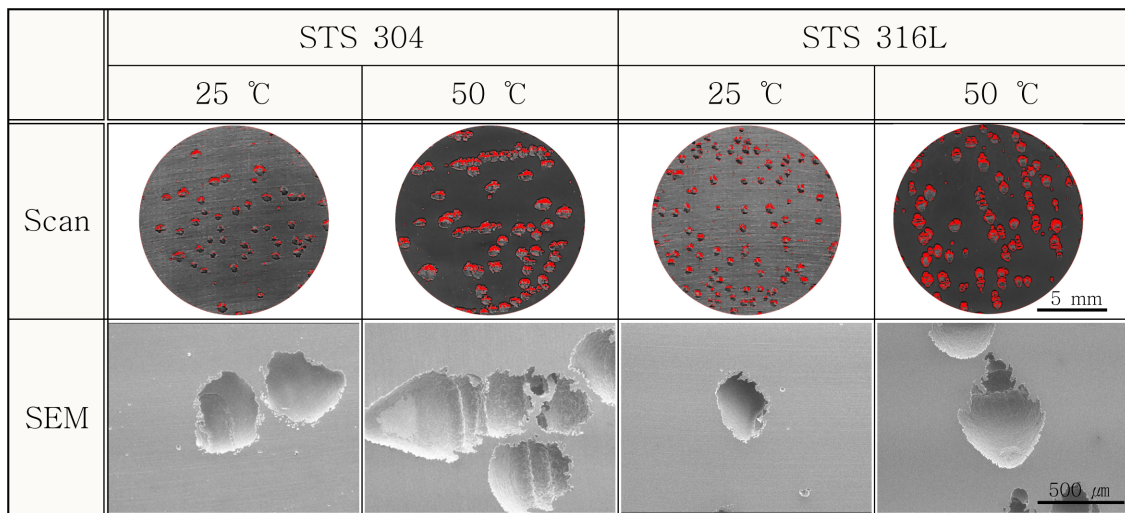


Fig. 2. Surface morphology of STS 304 and STS 316L after potentiodynamic polarization experiment in seawater

Table 3. Tafel analysis of STS 304 and STS 316L after potentiodynamic polarization experiment in seawater

	I_{corr} (A/cm ²)		E_{corr} (V)		E_{pit} (V)	
	25 °C	50 °C	25 °C	50 °C	25 °C	50 °C
STS 304	3.63×10^{-4}	7.80×10^{-4}	-0.213	-0.183	0.329	0.211
STS 316L	8.09×10^{-5}	1.34×10^{-4}	-0.215	-0.188	0.377	0.215

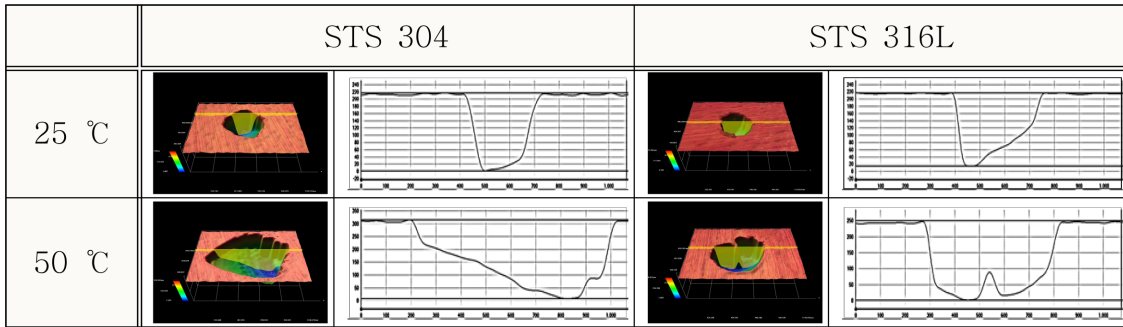


Fig. 3. 3D micrographs of STS 304 and STS 316L after potentiodynamic polarization experiment in seawater

실험 후 표면 스캔과 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 표면 형상을 나타낸 것이다. 25 °C에서는 두 시편 모두 활성용해반응에 의해 다수의 공식 손상이 관찰되었다. 해수 온도가 증가할수록 공식면적이 크게 증가하였으며, 노출면적에 대한 공식손상율(빨간색 부분)을 계측한 결과 STS 304는 4.9%에서 8.7%로 공식면적이 증가하였다. 그리고 STS 316L에서는 4.8%에서 8.6%로 증가하였으나 STS 304에 비해 조금 적은 공식손상비율을 나타냈다. 주사전자현미경을 통해 온도가 증가할수록 공식의 크기와 수가 증가하였으며 STS 316L의 시험편이 STS 304에 비해 적은 공식 손상을 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 STS 304와 STS 316L에 대하여 동전위 분극 실험 후 3D 현미경으로 표면형상 관찰 및 최대 손상 깊이를 분석한 것이다. STS 304와 STS 316L 시편 모두 25 °C에서 공식 손상이 관찰되었으며 해수 온도가 50 °C로 증가할수록 공식이 넓고 깊게 형성되었다. 또한 STS 316L 시험편이 STS 304에 비해 비교적 적은 공식 깊이와 크기가 관찰되었다. 일반적으로 STS 316L은 내식성을 향상시키는 Ni과 Mo이 함유되어 있어 STS 304 보다 내식성이 우수한 것으로 알려져 있으며 이에 기인한 것으로 판단된다 [7]. Chong *et al.* 등은 해수 환경에서 내식성 향상을 위해 플라즈마 이온질화 처리한 후 전기화학적 실험을 통해 내식성을 분석한 결과 STS 316L이 Mo과 질화 처리 시 N과 높은 친화력으로 STS 304보다 현저히 우수한 내식성을 규명한 바 있다 [8].

Fig. 4는 STS 304 및 STS 316L에 대하여 온도변화에 따른 동전위 분극 실험 후 무게 감소량과 손상 깊이를 분석한 것이다. Fig 4a의 무게 감소량 측정 결과 STS 316L이 25 °C 및 50 °C에서 STS 304에 비해 약간 적은 무게 감소량을 나타냈다. 또한 두 시험편 모두 온도가 증가할수록 STS 304는 약 1.89배, STS 316L은 약 1.94 배 정도 무게 감소량이 증가하는 경향을 나타냈다. 그리고 Fig. 4b의 최대 손상 깊이 측정 결과 두 시험편 모두 온도 증가에 따라 손상 깊이가 STS 304는 약 1.42

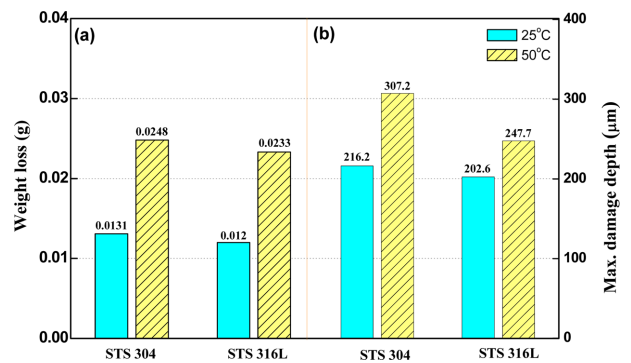


Fig. 4. (a) Weight loss and (b) maximum damage depth of STS 304 and STS 316L after potentiodynamic polarization experiment in seawater

배, STS 316L은 약 1.22배 증가하였으며 STS 304 시험편이 STS 316L에 비해 큰 최대손상깊이가 관찰되었다. 결과적으로 온도가 상승할수록 높은 부식전류밀도 및 낮은 부식전위에 기인하여 무게 감소량과 최대손상깊이 또한 증가하였으며, 높은 부식전위 및 낮은 전류밀도를 나타낸 STS 316L 시험편이 STS 304에 비해 적은 부식 손상 경향을 나타냈다.

3.2 AA 3003 및 AA 6063의 부식특성

Fig. 5는 양극산화 처리된 AA 3003과 AA 6063에 대하여 25 °C 및 50 °C에서 동전위 분극 실험 결과를 나타낸 것이다. 해수온도 25 °C에서 AA 3003과 AA 6063 시험편이 침지 초기 전류밀도가 증가하였으나 재료 표면에 형성된 양극산화피막으로 대단히 넓은 부동태 구간이 관찰되었다. 그러나 전위가 증가하면서 Cl⁻ 이온에 의한 활성용해반응이 활발해지면서 공식전위 이후에 급격한 전류밀도 상승이 관찰되었다. 두 시험편에서 유사한 부동태 범위를 나타냈으나 AA 3003의 시험편이 AA 6063에 비해 낮은 전류밀도를 나타냈다. 한편 해수 온도가 50 °C인 경우 두 시험편에서 25 °C에 비해 높은 전

류밀도를 나타냈으며 부동태 영역 또한 감소하였다. 그리고 AA 6063의 시험편이 AA 3003에 비해 낮은 전류 밀도를 나타내어 25 °C와 다른 부식 경향을 나타냈다.

Table 4는 동전위 분극 곡선에서 온도변화에 따른 AA 3003과 AA 6063의 시험편에 대하여 타펠외삽법에 의해 구한 부식전위(E_{corr}), 부식전류밀도(I_{corr}) 및 공식전위(E_{pit})를 나타낸 것이다. 해수온도 25 °C에서는 AA 3003

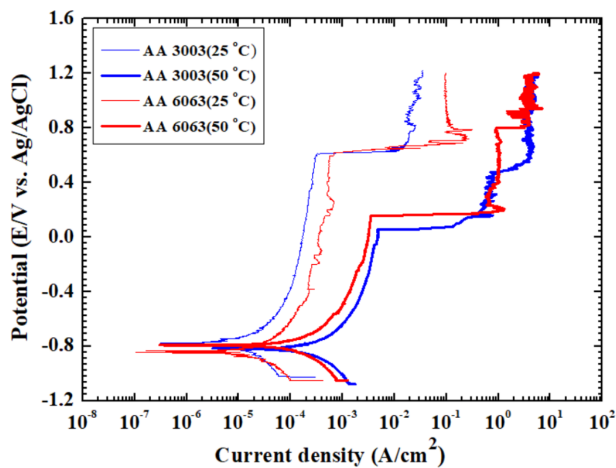


Fig. 5. Potentiodynamic polarization curves in seawater of anodized AA 3003 and AA 6063

시험편이 AA 6063에 비해 낮은 부식전류밀도, 비한 부식전위 그리고 높은 공식전위 값을 나타냈다. 그러나 두 시험편 모두 50 °C로 온도가 증가하면서 25 °C의 결과와 반대의 경향을 나타내어 50 °C에서는 AA 6063의 재료가 AA 3003에 비해 내식성이 우수할 것으로 여겨진다. 해수 온도에 따라 두 시험편이 차이를 보이는 것은 합금 원소의 차이로 판단된다. 즉, 알루미늄 합금 원소 중 Si, Mn, Cu 등은 귀방향으로 Mg 및 Zn 등은 비방향으로 이행하는 경향이 있으며 [9], 특히 온도 변화에 따른 각 원소들 간의 양극 활성화반응에 의해 부식전위의 차이를 나타낸 것으로 여겨진다. 결과적으로 온도가 증가하면서 AA 3003은 약 16.7배, AA 6063은 8.37배 높은 부식전류밀도를 나타냈다.

Fig. 6은 양극산화 처리된 AA 3003과 AA 6063에 대하여 동전위 분극 실험 후 표면 스캔과 주사전자현미경으로 표면 형상을 관찰한 것이다. 전반적으로 25 °C에서의 두 시험편 모두 손상이 거의 관찰되지 않았으나 50 °C인 경우 활성용해반응에 의해 공식 손상이 관찰되었다. 25 °C에서 공식손상비율(빨간색부분)을 분석한 결과 두 시험편 모두 0%였으나 50 °C에서는 AA 6063은 0.68%로 0.9%의 AA 3003에 비해 적은 공식손상비율을 나타냈다. 주사전자현미경을 통해 온도가 증가할수록 공식의 크기와 수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 4. Tafel analysis of anodized AA 3003 and AA 6063 after potentiodynamic polarization experiment in seawater

	I_{corr} (A/cm ²)		E_{corr} (V)		E_{pit} (V)	
	25 °C	50 °C	25 °C	50 °C	25 °C	50 °C
AA 3003	1.56×10^{-5}	2.61×10^{-4}	-0.779	-0.822	0.607	0.05
AA 6063	1.85×10^{-5}	1.55×10^{-4}	-0.84	-0.79	0.623	0.159

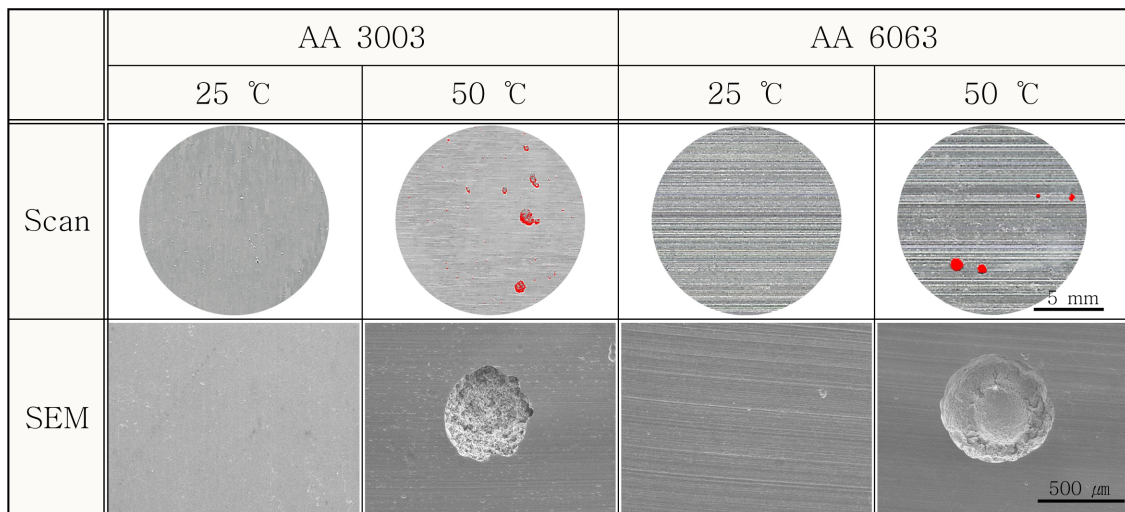


Fig. 6. Surface morphology of anodized AA 3003 and AA 6063 after potentiodynamic polarization experiment in seawater

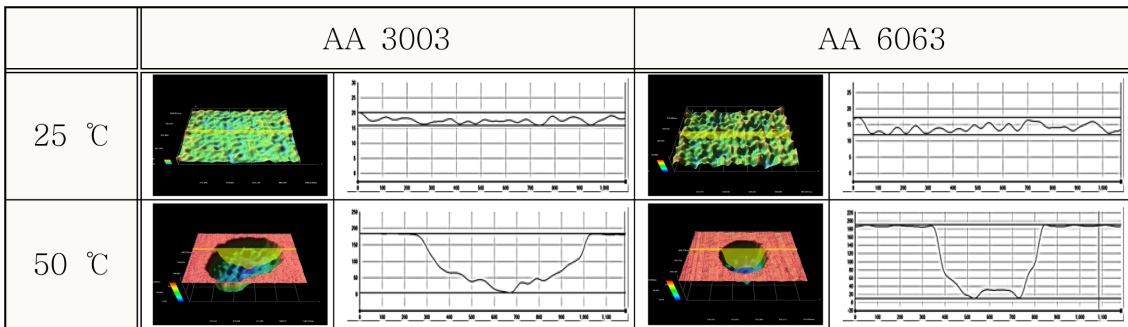


Fig. 7. 3D micrographs of anodized AA 3003 and AA 6063 after potentiodynamic polarization experiment in seawater

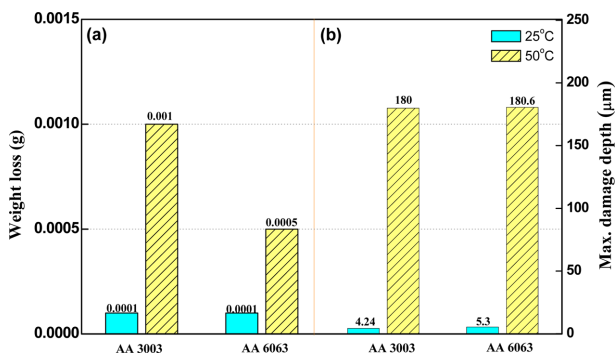


Fig. 8. (a) Weight loss and (b) maximum damage depth of anodized AA 3003 and AA 6063 after potentiodynamic polarization experiment in seawater

Fig. 7은 양극산화 처리된 AA 3003과 AA 6063에 대하여 동전위 분극 실험 후 3D 현미경으로 표면형상 관찰 및 최대 손상 깊이를 분석한 것이다. 해수 온도 25 °C에서는 두 시험편 모두 비교적 얇은 표면 거칠기가 나타났으나 50 °C인 경우 큰 공식이 관찰되었다. 그리고 AA 3003 시험편이 AA 6063에 비해 조금 더 작은 공식 깊이와 크기가 분석되었다. 온도가 증가할수록 전하의 이동이 활발해져 전류밀도가 증가함에 따라 공식 손상이 가속화되고 손상이 깊이방향으로 성장하게 된다 [10].

Fig. 8은 양극산화 처리된 AA 3003 및 AA 6063에 대하여 동전위 분극 실험 후 무게 감소량과 손상 깊이를 분석한 것이다. Fig. 8a의 무게 감소량 측정결과 25 °C에서 두 시험편 모두 무게 감소량 변화가 거의 없었으나 50 °C로 온도가 증가 시 AA 3003은 약 10배, AA 6063은 약 5배의 무게 감소량이 증가하였다. 그리고 AA 6063의 시험편이 AA 3003에 비해 적은 무게 감소량이 측정되었다. 그리고 Fig. 8b의 최대손상깊이 측정결과 25 °C와 50 °C에서 AA 6063의 시험편이 AA 3003에 비해 약간 더 큰 최대손상깊이를 나타냈다. 특히 온도가 50 °C로 증가하면서 AA 3003은 약 42배, AA 6063은 약 34배로 최대손상깊이가 현저하게 증가하는 경향을 보였다. 이는 온도가 높아질수록 금속 표면에 Cl⁻ 이온이 양극용해에 대한 교환전류밀도를 증가시키고 활성용해반응을 가속화시켜 손상깊이가 깊이방향으로 급격하게 증가한 것으로 판단된다 [11].

Fig. 9는 스테인리스강과 알루미늄 합금의 해수분위기에서 부식메커니즘을 나타낸 것이다. Fig. 9a의 스테인리스강은 해수 환경에서 양극분극 시 Cl⁻ 이온에 의해 산화 피막이 파괴되면서 국부적 공식 손상이 발생하며 Cl⁻ 이온이 손상부에서 양극용해반응으로 손상이 증가하게 된다. 즉, 피트(pit) 내부는 양극반응($Fe \rightarrow Fe^{2+} + e^-$)이 발생하며 재료 표면에는 음극반응($O_2 + 2H_2O +$

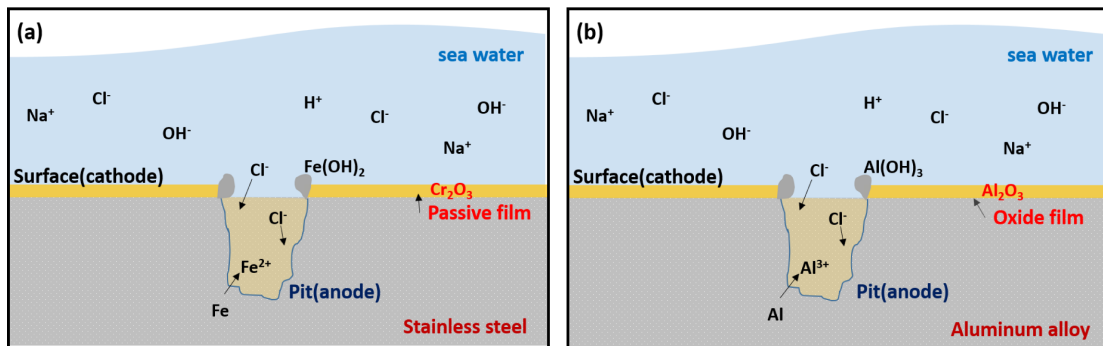


Fig. 9. Pitting mechanism of (a) stainless steel and (b) aluminum alloy in seawater

$4e \rightarrow 4OH$)이 발생한다. 그리고 표면에 부식 생성물 ($Fe^{2+} + 2OH \rightarrow Fe(OH)_2$)이 생성된다 [12]. Fig. 9b는 알루미늄 합금의 공식 메커니즘을 나타낸 것이다. 알루미늄 합금은 금속간 화합물에서 양극용해반응($Al \rightarrow Al_3 + 3e$)의 양극반응과 산소환원반응($O_2 + H_2O + 4e \rightarrow 4OH$)의 음극반응이 발생한다 [13]. 해수 환경에서 Al_2O_3 또는 $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ 등의 산화 피막이 형성되어 내식성을 유지하지만, 해수 내 Cl^- 이온에 의해 산화 피막이 국부적으로 파괴되고 공식이 발생하며 Cl^- 이온이 손상부에 지속적으로 도달하여 산성화되어 더욱 가속화된다 [14]. 부식 향상을 위해 알루미늄 도금된 스테인리스강의 경우 화합물층에서 여러 Fe-Al합금이 생성되며 특히 내식성과 내구성이 우수한 $AlFe_3$, $FeAl$ 등이 생성되며, 이러한 화합물은 해수에 노출될 경우 갈바닉 셀을 형성하여 공식을 가속화시킨다 [15]. 이에 반해 알루미늄 합금은 양극산화에 의해 컴팩트한 산화피막형성으로 부식에 의한 손상이 현저히 감소하게 된다. 이러한 스테인리스강과 알루미늄 합금의 공식 메커니즘은 온도가 증가할수록 양극용해에 대한 교환전류밀도를 증가시켜 활성용해반응이 촉진되어 공식 손상이 증가한다.

3.3 해수온도에 따른 부식특성 비교분석

Fig. 10은 Table 3과 Table 4를 비교 정리한 것으로, 스테인리스강(STS 304 및 STS 316L)과 양극산화된 알루미늄 합금(AA 3003 및 AA 6063)에 대하여 25 °C와 50 °C에서 수행한 동전위 분극 실험 후 부식전류밀도를 나타낸 것이다. 전반적으로 온도 25 °C에는 STS 316L 및 STS 304의 스테인리스강에 비해 AA 3003 및 AA 6063의 알루미늄 합금이 현저히 낮은 부식전류밀도를 나타냈다. 그리고 AA 3003이 가장 낮은 전류밀도를 나타냈으며 STS 304가 가장 높은 부식전류밀도를 나타낸 반면, 50 °C에서는 STS 316L이 가장 낮은 값을 나타냈다. 결과적으로 25 °C와 50 °C에서의 스테인리스강과 알루미늄 합금에 대하여 부식속도를 예측할 수 있는 부식전류밀도 값이 온도 상승에 따라 조금씩 다른 경향을 나타내어 표면 형상관찰 및 종합적 분석을 통해 부식특성 규명이 필요하다.

Fig. 11은 Fig. 4와 Fig. 8의 그래프를 비교 정리한 것으로, 스테인리스강(STS 304 및 STS 316L)과 양극산화된 알루미늄 합금(AA 3003 및 AA 6063)에 대해 무게 감소량 및 최대손상깊이 분석 결과를 종합해 보면, 전반적으로 25 °C 및 50 °C 조건에서 스테인리스강(STS 304 및 STS 316L)이 알루미늄 시험편(AA 3003 및 AA 6063)에 비해 큰 무게 감소량과 큰 손상 깊이를 나타냈다. 그리고 AA 6063이 가장 적은 무게 감소량과 얕은 최대손상깊이를 나타냈으며 STS 304가 가장 큰 무게

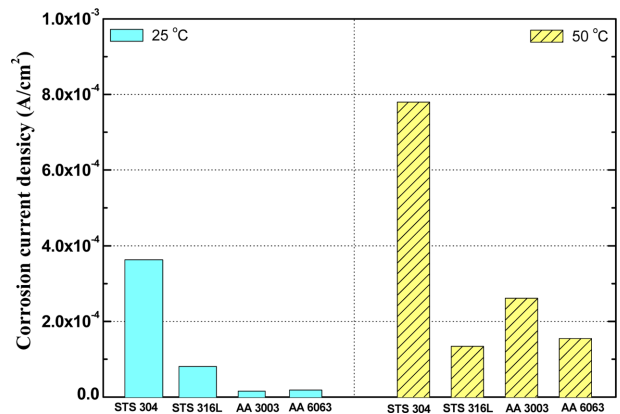


Fig. 10. Comparison of corrosion current density of stainless steel (STS 304 and STS 316L) and anodized aluminum alloy (AA 3003 and AA 6063) after potentiodynamic polarization experiment in seawater

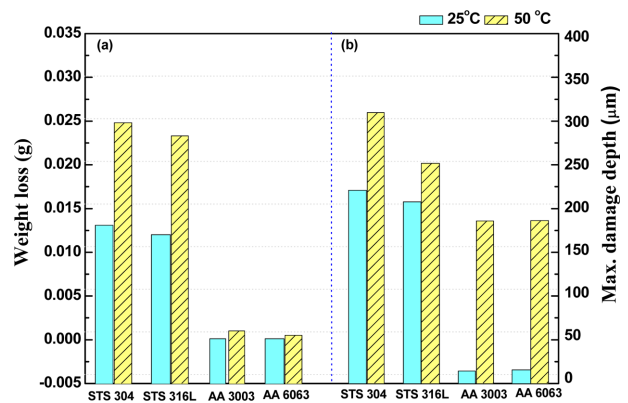


Fig. 11. Comparison of weight loss and maximum damage depth of stainless steel (STS 304 and STS 316L) and anodized aluminum alloy (AA 3003 and AA 6063) after potentiodynamic polarization experiment in seawater

감소량 및 깊은 최대손상깊이가 측정되었다. 결과적으로 해수 속에 포함된 Cl^- 이온에 의한 손상은 스테인리스강(STS 304 및 STS 316L)이 양극산화 처리된 알루미늄 합금(AA 3003 및 AA 6063)에 비해 크며 온도 증가에 따라 두 시험편 모두 손상정도가 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 해수 온도 증가에 따라 스테인리스강(STS 304 및 STS 316L)의 무게 감소량 및 손상 깊이는 큰 증가량을 보이지 않았으나, 양극산화 처리된 알루미늄 합금의 경우 최대손상깊이는 42.4배(AA 3003) 및 34.2배(AA 6063)로 공식이 깊이 방향으로 현저하게 증가하는 경향을 나타냈다. 결과적으로 해수 온도가 증가할수록 양극산화 처리된 알루미늄 합금(AA 3003 및 AA 6063)이 스테인리스강(STS 304 및 STS 316L)에 비해 부식 손상 증가율이 증가하는 경향을 나타냈다. 종합적

Table 5. Comparison of corrosion characteristics of stainless steel (STS 304 and STS 316L) and anodized aluminum alloy (AA 3003 and AA 6063) after potentiodynamic polarization experiment in seawater

Temperature	25 °C	50 °C
Corrosion characteristics	excellent - poor	
I_{corr}	AA 3003 - AA 6063 - STS 316L - STS 304	STS 316L - AA 6063 - AA 3003 - STS 304
E_{corr}	STS 316L - STS 304 - AA 3003 - AA 6063	STS 316L - STS 304 - AA 6063 - AA 3003
E_{pit}	AA 6063 - AA 3003 - STS 316L - STS 304	AA 3003 - AA 6063 - STS 316L - STS 304
Weight loss	AA 3003 ≒ AA 6063 - STS 316L - STS 304	AA 6063 - AA 3003 - STS 316L - STS 304
Max. damage depth	AA 3003 - AA 6063 - STS 316L - STS 304	AA 3003 ≒ AA 6063 - STS 316L - STS 304

으로 보아 낮은 부식전류밀도에 기인하여 양극용해반응이 느려 공식 손상이 적게 관찰된 알루미늄 합금이 스테인리스강에 비해 내식성 우수할 것으로 사료된다. 따라서 전기화학적 부식에 가장 중요한 지표인 부식속도를 결정하는 부식전류밀도를 먼저 고려하여, 해수 환경에서 재료 선정 시 온도에 따른 재료 선정을 결정해야 할 것으로 여겨진다.

Table 5는 스테인리스강(STS 304 및 STS 316L)과 양극산화된 알루미늄 합금(AA 3003 및 AA 6063)에 대하여 동전위 분극 실험 후 해수 온도에 따른 부식경향을 종합 비교한 것이다. 전반적으로 해수 온도에 따라 부식 특성을 파악할 수 있는 지표가 다르게 나타났으며, 특히 재료의 부식속도를 예측할 수 있는 부식전류밀도는 25 °C에서는 AA 3003, 50 °C에서는 STS 316L이 가장 낮은 경향을 나타냈다.

4. 결론

스테인리스강(STS 304 및 STS 316L)과 양극산화 처리된 알루미늄 합금(AA 3003 및 AA 6063)으로 재료에 대하여 25 °C와 50 °C에서 전기화학적 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동전위 분극 실험 결과, 모든 시편에서 전위증가에 따라 전류밀도상승이 정체되는 부동태 구간이 관찰되었으며 온도가 증가하면서 좁은 부동태 범위가 관찰되었다.
2. 타펠 분석결과, 해수 온도 25 °C에서는 AA 3003이 가장 낮은 부식전류밀도 값을 나타냈으며 AA 6063, STS 316L, STS 304 순으로 높게 분석되었다. 그리고 50 °C에서는 STS 316L이 가장 낮게 나타났으며 AA 6063, AA 3003, STS 304 순으로 크게 나타났다.
3. 해수 온도 증가에 따라 공식 손상이 증가하였으며 25 °C에서 스테인리스강이 양극산화 처리된 알루미늄 합금에 비해 현저히 큰 무게 감소량 및 최대손상 깊이가 측정되었다.
4. 해수 환경에서 온도 상승 시 공식 손상이 깊이방

향으로 현저하게 증가하였으며, AA 6063과 AA 3003이 STS 304 및 STS 316L에 비해 공식 손상 저항성이 우수하였다.

Acknowledgements

이 논문은 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(선박 배출 대기오염 물질 동시저감 후처리시스템 실증 및 인증체계 구축).

References

1. S. Y. Cho, H. G. Na, H. R. Cho, J. J. Moon, T. J. Ahn, and H. Jang, Corrosion and Photo-Reflection Behavior of Aluminum and Stainless Steel During Immersion Test in Salt Solution, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 109 (2020). Doi: <https://doi.org/10.14773/CST.2020.19.3.109>
2. Č. Donik and A. Kocijan, Comparison of the corrosion behaviour of austenitic stainless steel in seawater and in a 3.5% NaCl solution, *Materials and Technology*, **48**, 937 (2014).
3. E. Bardal, J. Drugli, and P. Gartland. The behaviour of corrosion-resistant steels in seawater: a review, *Corrosion Science*, **35**, 257 (1993). Doi: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(93\)90157-C](https://doi.org/10.1016/0010-938X(93)90157-C)
4. Y. B. Kim, S. J. Kim, Effect of Flow Rate on Erosion Corrosion Damage and Damage Mechanism of Al5083-H321 Aluminum Alloy in Seawater Environment, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 115 (2020). Doi: <http://dx.doi.org/10.14773/cst.2020.19.3.115>
5. S. K. Jang, S. J. Lee, J. C. Park, and S. J. Kim, Evaluation of Corrosion Tendency for S355ML Steel with Seawater Temperature, *Corrosion Science and Technology*, **14**, 232 (2015). Doi:<http://dx.doi.org/10.14773/cst.2015.14.5.232>
6. H. R. Lee, Corrosion of Metals, pp. 166 - 168, Yeunkyung, Busan (2004).
7. A. J. Sedriks, Corrosion of Stainless Steels, pp. 112 - 120, Wiley-Interscience, New York (1996).

8. S. O. Chong, S. J. Kim. Effects of molybdenum on improvement of anti-corrosion by plasma ion nitriding for austenitic stainless steels, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **19**, 2198, (2019). Doi:<https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16006>
9. Y. B. Kim, S. J. Kim, Comparison of corrosion resistance of 5000 series and 6000 series aluminum alloys in seawater using galvanostatic acceleration corrosion technique, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, **42**, 735, (2018). Doi: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2018.42.9.735>
10. J. Davis, editor. Corrosion of aluminum and aluminum alloys. pp. 25 - 49, USA: ASM International (1999).
11. C. Vargel, *Corrosion of Aluminium, 1st ed.*, pp. 113 - 117, Elsevier Ltd., Oxford (2004).
12. A. J. Sedriks, *Corrosion of Stainless Steels*, pp. 79 - 80, Wiley-Interscience, New York (1996).
13. M. Shao, Y. Fu, R. Hu, and C. Lin, A study on pitting corrosion of aluminum alloy 2024-T3 by scanning microreference electrode technique, *Materials Science and Engineering, A*, **344**, 323, (2003). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00445-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00445-8)
14. H. Ezuber, A. El-houd, F. El-Shawesh, A study on the corrosion behavior of aluminum alloys in seawater, *Materials & Design*, **29**, 801, (2008). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.021>
15. S. O. Chong, I. C. Park, M. S. Han, and S. J. Kim, Evaluation of Electrochemical Corrosion Characteristics for Hot-Dip Aluminized 304 Stainless Steel in Seawater, *Journal of the Korean Institute of Surface Engineering*, **48**, 354 (2015). Doi: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2015.48.6.354>