

슈퍼오스테나이트 스테인리스강의 순환동전위 분극특성에 미치는 해수온도의 영향과 손상 거동에 관한 미시적 분석

황현규¹ · 김성종^{2,†}

¹목포해양대학교 대학원, 전라남도 목포시 해양대학로 91

²목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대학로 91

(2021년 11월 25일 접수, 2021년 12월 10일 수정, 2021년 12월 10일 채택)

Effect of Seawater Temperature on the Cyclic Potentiodynamic Polarization Characteristics and Microscopic Analysis on Damage Behavior of Super Austenitic Stainless Steel

Hyun-Kyu Hwang¹ and Seong-Jong Kim^{2,†}

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

²Division of marine engineering, Mokpo national maritime university, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

(Received November 25, 2021; Revised December 10, 2021; Accepted December 10, 2021)

Because austenitic stainless steel causes localized corrosion such as pitting and crevice corrosion in environments containing chlorine, corrosion resistance is improved by surface treatment or changes of the alloy element content. Accordingly, research using cyclic potentiodynamic polarization experiment to evaluate the properties of the passivation film of super austenitic stainless steel that improved corrosion resistance is being actively conducted. In this investigation, the electrochemical properties of austenitic stainless steel and super austenitic stainless steel were compared and analyzed through cyclic potentiodynamic polarization experiment with varying temperatures. Repassivation properties were not observed in austenitic stainless steels at all temperature conditions, but super austenitic stainless steels exhibited repassivation behaviors at all temperatures. This is expressed as α values using a relational formula comparing the localized corrosion rate and general corrosion rate. As the α values of UNS S31603 decreased with temperature, the tendency of general corrosion was expected to be higher, and the α value of UNS N08367 increased with increasing temperatures, so it is considered that the tendency of localized corrosion was dominant.

Keywords: UNS S31603, UNS N08367, Sea water, Temperature, Cyclic potentiodynamic polarization

1. 서론

오스테나이트 스테인리스강은 우수한 기계적 특성과 높은 부식 저항성을 나타내기 때문에 석유화학, 전력 발전 및 원자력 발전 등에 널리 사용된다 [1]. 그 예로 가압수형 원자로(Pressurized water reactor)는 높은 온도조건에서 운전 시 결함이 없어야 하며, 이에 따라 우수한 내식성은 원자력발전소의 수명과 안전에 크게 기여한다 [2]. 오스테나이트 스테인리스강은 염소가 포함되어 있

는 환경에서 공식이나 틈부식과 같은 국부부식을 일으키기 쉽기 때문에 공식저항성을 향상시키는 원소의 함량을 증가시키거나 표면처리를 실시하여 내식성을 향상시켜 사용한다. 이에 따라 일반오스테나이트 스테인리스강과 내식성을 향상시킨 스테인리스강에 대하여 공식에 대한 민감성과 재부동태 특성연구에 적합한 순환동전위 분극실험을 실시하여 부식특성을 평가하는 연구가 활발히 진행 중이다.

Robert D. Moser 등은 오스테나이트 스테인리스강(UNS S31603, UNS S30403)과 펄라이트 프리스트레스강(Pearlitic prestress steel)을 순환동전위 분극실험을 통해 부식 특성을 비교하였다 [3]. Yushu Wang 등은 오스

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

황현규: 석사과정, 김성종: 교수

테나이트 스테인리스강(UNS S31603, UNS S30403)과 듀플렉스 스테인리스강(UNS S32101, UNS S31803)을 티오황산염과 염소이온이 포함된 환경에서 순환동전위 분극실험을 이용하여 부식거동특성을 연구하였다 [4]. Jiamei Wang은 오스테나이트 스테인리스강(UNS S30400)과 냉간 가공 정도를 변수로 한 UNS S30400에 대하여 순환동전위 분극실험을 실시하여 전기화학적 특성을 비교하였다 [5]. 이와 같이 오스테나이트 스테인리스강과 내식성을 향상시킨 스테인리스강의 경우만 비교할 뿐 환경 변수에 따른 상호 비교 연구는 드물다.

내식성 향상에 영향을 미치는 재부동태 특성은 온도, pH 및 할로젠 이온(공격적인 이온)의 농도 등 환경적인 영향에 의존한다 [6]. 특히 온도는 부동태 산화피막 특성에 영향을 미치는데 이는 온도에 따라 열에너지가 변하여 전기화학적 반응속도가 달라지기 때문이다 [1]. 따라서 온도 변수에 따라 내식성을 향상시킨 스테인리스강과 일반오스테나이트 스테인리스강을 비교하는 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 일반오스테나이트 스테인리스강과 부동태피막 특성을 향상시키는 원소를 증가시킨 슈퍼오스테나이트 스테인리스강을 천연해수용액에서 온도에 따라 순환동전위 분극실험을 하여, 각 조건에서의 부식거동과 전기화학적 특성을 상호 비교 분석하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 재료는 해양환경에서 일반적으로 사용되는 UNS S31603(일반 오스테나이트 스테인리스강)과 몰리브데넘, 크롬 및 질소 등 함량을 조절하여 개발된 UNS N08367(슈퍼 오스테나이트 스테인리스강)로 선정하였다.

Table 1은 UNS S31603과 UNS N08367의 화학조성을 나타낸 것이다. 재료선정은 공식저항성 등가지수에 기인하였으며, UNS S31063과 UNS N08367의 공식저항성 등가지수는 식(%Cr + 3.3%Mo + 16%N)에 의해 각

각 23.6과 45.6으로 산출되었다. 전기화학 실험은 3-전극 시스템을 구성하여 실시하였다. 전기화학셀의 작동전극은 선정된 재료로, 대응전극은 백금 망으로, 기준전극(Reference electrode)은 은/염화은(Ag/AgCl saturated 3.3M KCl)전극으로 구성하였다. 시험편은 냉각수가 공급되어 열변형을 최소화시키는 미세절단기를 이용하여 10 × 10 mm(실험 면적: 1 cm²) 크기로 가공하였다. 가공된 시험편에 구리선을 연결하였으며, 몰딩재료로 고내식성 및 고온용 에폭시 레진을 사용하여 마운팅하였다. 마운팅된 시험편은 냉각수가 공급되는 기기를 이용하여 에머리페이퍼(Emery paper) # 2000까지 순차적으로 연마하여 일정 표면을 용액에 노출시키도록 하였다. 연마 과정에서 발생한 이물질은 아세톤으로 탈지한 후 증류수에서 3분간 초음파 세척하였다. 가공한 작동전극은 건조기로 완전 건조시킨 뒤 실험을 실시하였다.

Table 2는 본 실험의 전해질로써 사용된 천연해수 성분을 나타낸 것이다. 온도 조건은 30 °C, 60 °C 및 90 °C에서 수행하였다. 전기화학실험은 재료의 부동태피막 특성과 공식 거동 등을 평가하기 위해 순환동전위 분극실험으로 수행하였다. 실험 전 안정화(개로전위측정)시간으로 1,800초 동안 침지한 후 분극시켰다. 분극전위는 개로전위 기준 -0.25 V에서 순방향으로 시작하여 1.6 V에서 역방향으로 개로전위까지 수행하였으며, 주사속도는 0.5 mV/s의 주사속도로 진행하였다. 순환동전위 분극실험 후 부식전류밀도는 타펠외삽법(Tafel extrapolation method)으로 산출하였으며, 부식속도산출은 페러데이 법칙(Faraday's law)을 이용하였다. 전기화학적 실험 후 3D 분석현미경 및 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM)을 이용하여 표면을 관찰 및 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 90 °C인 천연 해수용액에서 UNS N08367에 대하여 순환동전위 분극실험 결과를 나타낸 것이다. 이는 측정된 순환동전위 분극곡선 중 히스테리시스 루프의 단

Table 1. Chemical compositions of UNS S31603 and UNS N08367 (wt%)

	Ni	Cr	Mo	C	Si	Mn	P	S	Cu	N	Fe
UNS S31603	10.19	16.7	2.03	0.023	0.60	1.05	0.034	0.0028	0.282	0.012	Bal.
UNS N08367	24.62	20.6	6.44	0.015	0.27	0.72	0.017	0.001	0.53	0.232	Bal.

Table 2. Chemical composition of sea water

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

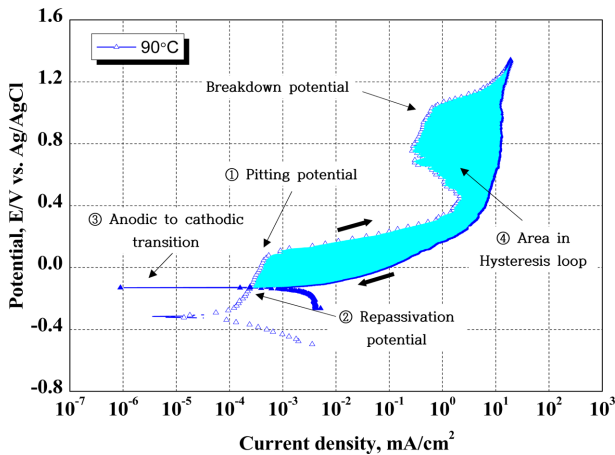
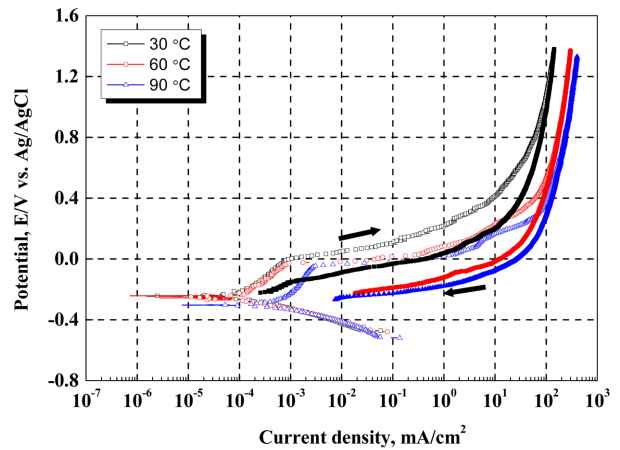


Fig. 1. Example interpretation of cyclic potentiodynamic polarization curves for UNS N08367 in seawater (↔, Scan direction)

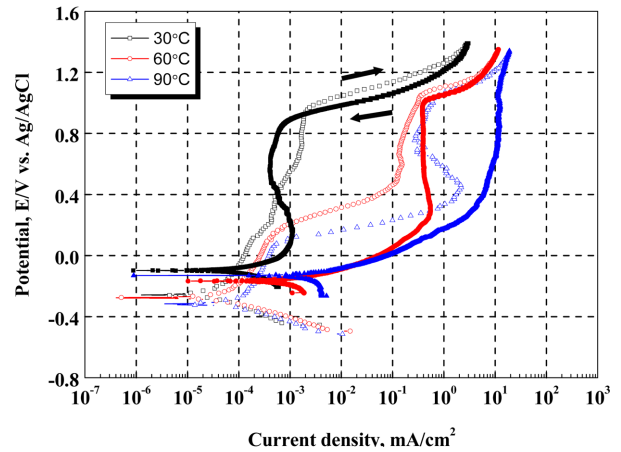
힌 영역을 나타내는 곡선의 대표적인 예이다 [7]. 본 실험은 재료의 공식이나 틈부식 저항성 평가 요인 중 ① 공식 전위(Pitting potential, E_{pit}), ② 재부동태 전위(Repassivation potential, E_{rep}), ③ 양극에서 음극 반응으로 전이되는 전위(Anodic to cathodic transition, $E_{anodic\ to\ cathodic\ transition}$) 그리고 ④ 히스테리시스 곡선 내 닫힌 영역의 넓이(Enclosed area of hysteresis loop, sky-blue color)를 이용하였다 [7]. 이와 같은 공식 저항성 평가 요인이 사용되는 이유는 다음과 같다. 재부동태전위는 역방향의 전류밀도가 정방향의 전류밀도보다 클 때 발생하는 값이며, 공식 성장이 멈추기 때문에 이를 보호 전위라고도 한다. 또한 $E_{anodic\ to\ cathodic\ transition}$ 와 E_{corr} 의 차이 값을 통해 부동태 산화 피막 층의 지속성과 안정화를 평가하는데 이는 파괴된 부동태 산화피막이 역방향 시 Anodic to cathodic transition 전위 이후 다시 회복하기 때문이다. 히스테리시스 루프 내 면적은 같은 전위의 순방향 전류밀도와 역방향전류밀도 차이 값의 총 합(적분)을 나타내며, 이 차이 값은 부동태 피막 파괴 결과이기 때문에 시편에 가해진 전체적인 손상을 의미한다.

Fig. 2a와 b는 천연 해수용액에서 UNS S31603과 UNS N08367에 대하여 온도 에 따른 순환동전위 분극실험 결과를 나타낸 것이다. 분극 곡선을 통해 온도에 따른 각 재료의 전기화학 거동은 해석하였다.

UNS S31603의 경우, 순환동전위 분극곡선은 모든 온도에서 유사한 경향의 그래프를 나타냈다. 순방향 시, 개로전위에서 공식전위까지 전위상승에 따라 전류밀도가 조금씩 증가하는 경향을 나타냈으며, 이는 부동태 산화피막 생성과 약간의 활성용해반응($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$)이 동시에 일어났을 가능성이 높다 [8]. 공식전위 이후 전류밀도가 급격히 증가하였으며, 그 값은 30 °C, 60 °C 및



(a) Polarization curve for UNS S31603



(b) Polarization curve for UNS N08367

Fig. 2. Cyclic potentiodynamic polarization curves for UNS S31603 and UNS N08367 with temperature in seawater (Open symbol : Forward scanning, Solid symbol : Reverse scan)

90 °C에서 각각 -0.004, -0.036 및 -0.05 V이다. 역방향 시, 순방향 전류밀도보다 역방향 전류밀도가 더 높은 히스테리시스 곡선이 관찰되었으며, 이 곡선은 공식이 더 이상 금속표면에 전과되지 않으며, 기 생성된 손상에서 깊이 방향으로 공식이 성장하게 된다 [9]. 그리고 모든 조건에서 재부동태 전위는 관찰되지 않았으며, 온도 상승에 따라 그래프는 양극 분극과 음극분극 모두 오른쪽으로 이동(전류밀도 상승)하였는데, 이는 온도가 상승할수록 활성화 반응이 활발히 진행된 것으로 사료된다 [10].

반면 UNS N08367의 경우 순환동전위 분극곡선은 온도에 따라 다양한 곡선의 형상을 나타내었다. 순방향 시 부식전위에서 전위상승에 따라 전류밀도가 조금씩 증가하나 UNS S31603보다 전위상승에 따른 전류밀도 상승이 작게 나타났으며, 이는 활성용해반응과 부동태 산화피막의 생성이 동시에 진행되어 활성반응이 억제된 것

으로 사료된다. 이후 공식전위는 30 °C, 60 °C 및 90 °C에서 각각 0.97, 0.19, 0.09 V이다. 이후 60 °C에서 0.45에서 1.05까지 분극곡선의 활성용해반응이 지연되었으나 전위상승에 따라 높은 전류밀도를 나타냈다 [9]. 그리고 1.05 V에서 전류밀도는 급격히 상승하였으며, 이는 산소발생전위에 도달하여 산소발생과 같이 부식이 급격히 진행된 것으로 판단된다. 90 °C에서 0.45 V에서 0.75 V까지 전위가 상승함에 따라 전류밀도가 감소되는 부동태적 경향을 나타내는 영역이 관찰되었으며, 0.75 V 이후 전류밀도가 급격히 상승하였다.

UNS N08367의 경우 역방향 시 모든 온도조건에서 재부동태 전위는 30 °C, 60 °C 및 90 °C에서 각각 0.93 V, -0.13 V, -0.16 V로 나타났으며, 양극에서 음극으로 전이되는 현상도 관찰되었다.

Fig. 3은 천연해수에서 온도에 따라 순환동전위 분극 실험 후 타펠외삽법을 통해 산출된 UNS S31603과 UNS N08367의 부식전류밀도 값을 나타낸 것이다. UNS S31603의 부식전류밀도는 30 °C, 60 °C 및 90 °C의 경우 각각 1.48×10^{-4} , 1.99×10^{-4} 및 8.39×10^{-4} mA/cm²으로, UNS N08367의 경우, 4.46×10^{-5} , 8.14×10^{-5} 및 1.17×10^{-4} mA/cm²으로 산출되었다. UNS S31603에 대하여 30 °C ~ 60 °C 범위에서 부식전류밀도 증가폭은 0.51×10^{-4} mA/cm²이었으나, 60 °C ~ 90 °C 범위에서는 6.4×10^{-4} mA/cm²으로 증가하였다. 60 °C ~ 90 °C 범위에서 부식전류밀도 상승폭은 30 °C ~ 60 °C보다 약 12배 큰 값을 나타냈다. 따라서 UNS S31603에 대하여 전자의 범위보다 후자의 부식전류밀도 값 증가폭이 크기 때문에 온도가 증가할수록 부식반응속도가 가속화됨을 알 수 있다. 반면 UNS N08367의 경우 30 °C ~ 60 °C 범위에서 부

식전류밀도 증가폭은 0.41×10^{-4} mA/cm²이고, 60 °C ~ 90 °C 범위에서는 0.36×10^{-4} mA/cm² 증가하였다. UNS N08367은 온도상승에 따라 부식전류밀도 값 증가폭의 변화는 거의 없다. 따라서 UNS N08367의 부식전류밀도 값은 온도변화에 따라 민감하지 않기 때문에 우수한 내식성을 나타낸다.

Fig. 4는 천연해수에서 온도에 따라 순환동전위 분극 실험 후 UNS S31603과 UNS N08367의 공식전위 값을 나타낸 것이다. 30 °C, 60 °C 및 90 °C에서 공식전위는 UNS S31603의 경우 각각 -0.004, -0.036 및 -0.05 V이고, UNS N08367은 0.97, 0.19, 0.09 V로 측정되었다. 해수 환경에서 용액 온도는 공식 개시속도에 영향을 미치기 때문에 UNS S31603과 UNS N08367은 온도상승에 따라 공식전위는 낮아졌다 [11]. 여기서 온도의 역할은 반응물 이동성과 확산 속도를 증가시키기 때문이다. 부동태 피막의 두께는 불균일하며 이에 따라 상대적으로 열악한 영역에서 전기화학적 반응이 우선적으로 발생하여 온도상승에 따라 국부부식 손상이 촉진되었다 [12]. 또한 반응을 일으키는 활성화 에너지는 온도상승에 따라 낮아지기 때문에 더 낮은 전위(에너지)에서 염소이온에 의한 국부부식의 개시가 빨라진다 [12]. 전체적으로 UNS N08367의 공식전위가 UNS S31603보다 더 높은 값을 나타내었다. UNS N08367은 활성화 에너지가 낮아짐에도 불구하고 공식의 개시가 지연되었기 때문에 공식 저항성이 우수한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 천연해수에서 온도에 따라 순환동전위 분극 실험 후 UNS N08367에 대하여 공식 저항성을 평가하는 요인 중 재부동태 전위, E_{anodic to cathodic transition}와 E_{cor.}의 차이 값을 그래프로 나타낸 것으로 재부동태 형성 및

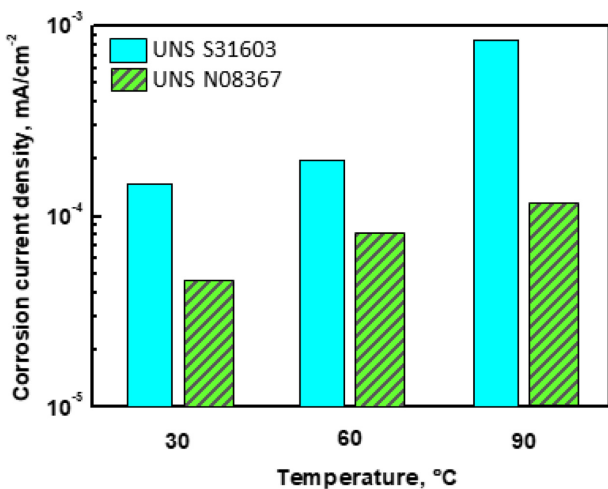


Fig. 3. Comparison of corrosion current density by Tafel analysis after cyclic potentiodynamic polarization experiment for UNS S31603 and UNS N08367 in sea water

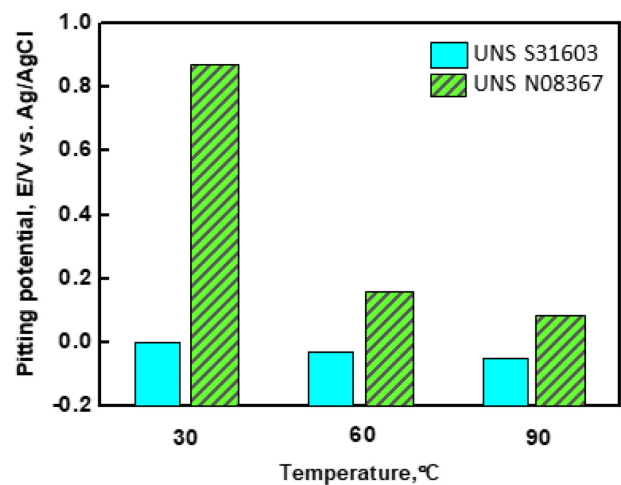


Fig. 4. Comparison of pitting potential after cyclic potentiodynamic polarization experiment for UNS S31603 and UNS N08367 in sea water

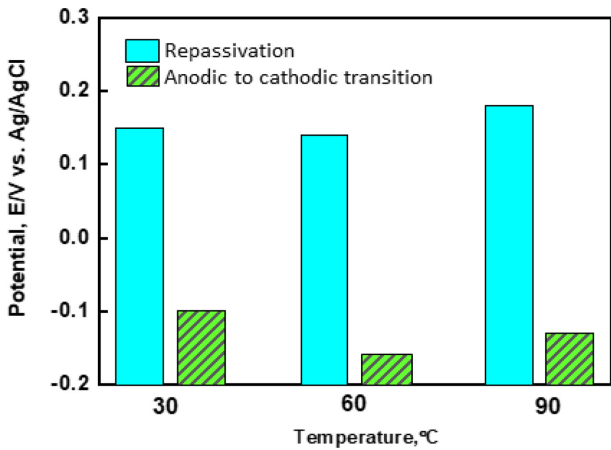


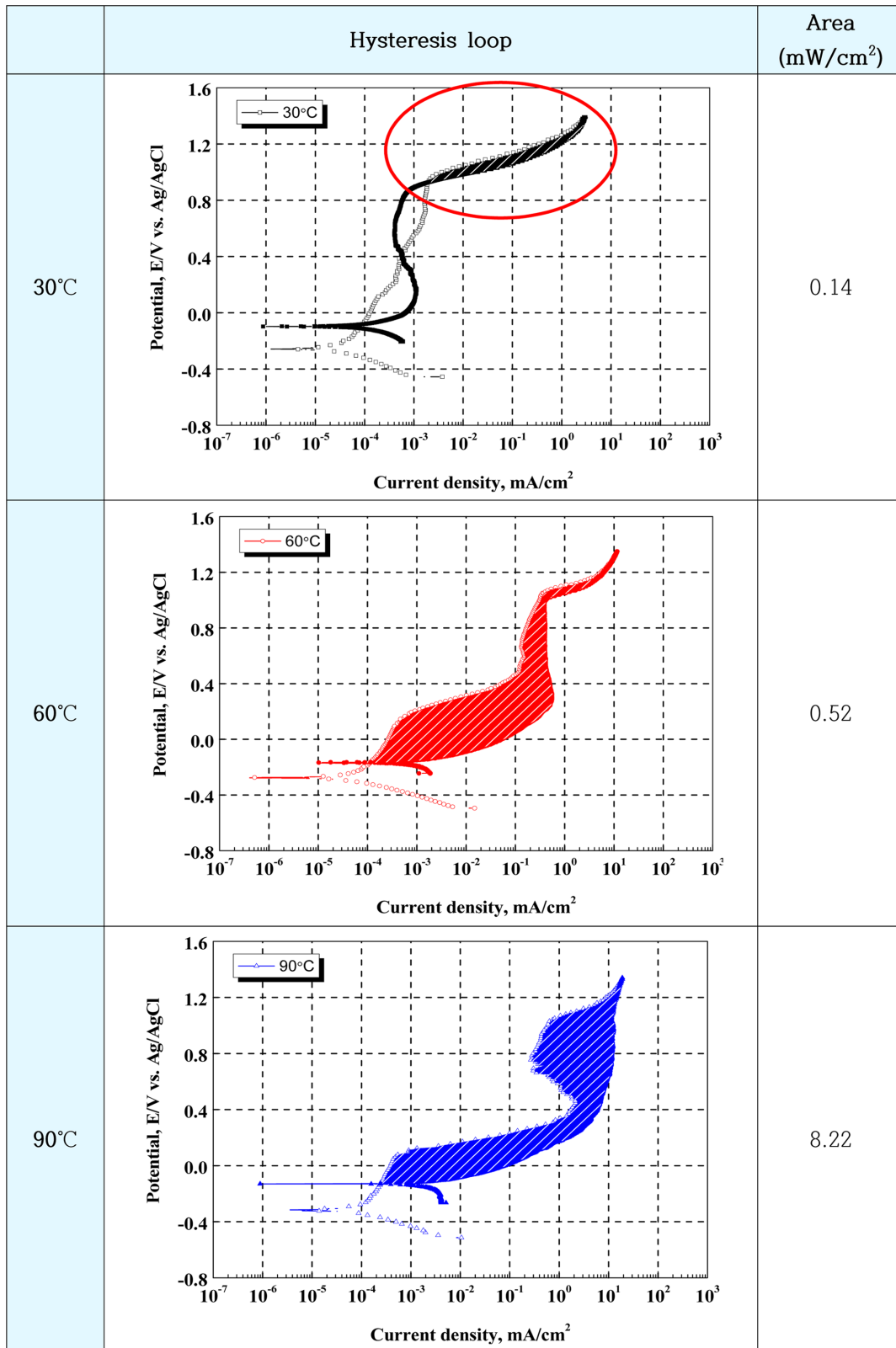
Fig. 5. Repassivation and anodic to cathodic transition potential at reverse scan after cyclic potentiodynamic polarization experiment for UNS N08367 in sea water

특성을 분석하였다.

UNS N08367만 언급한 이유는 UNS S31603에서 재부동태 전위와 양극에서 음극으로 전이되는 현상이 관찰되지 않았기 때문이다. UNS S31603은 역방향으로 개로전위 아래까지 외삽시킬 경우, 정방향의 곡선과 역방향의 곡선은 부식전위보다 낮은 전위에서 교차된다. 이와 같은 현상은 새로운 공식의 핵은 생성되지 않지만, 기 생성된 공식은 계속 성장한다는 것을 의미한다 [7]. 따라서 손상된 영역에서 재부동태 특성이 나타나지 않는다. 공식이 발생한 영역은 양극으로 작용하며 반면, 나머지 부분인 넓은 면적은 음극으로써 작용(소양극-대음극의 갈바니부식)하여 국부부식이 가속화되며 진행된다 [13]. 그러나 몰리브데넘은 재부동태 특성을 향상시켜 공식 형성에 따라 발생하는 갈바니부식을 억제하여 결과적으로 모재의 용해반응을 감소시킨다 [12]. 몰리브데넘은 재부동태 형성 기구들에 대한 가설이 있으며 이는 다음과 같다 [14]. 첫 번째, 공식에서 발생하는 활성 상태 영역에 몰리브데넘산염이나 몰리브데넘 산수산화물이 석출되어 재부동태를 촉진시킨다. 두 번째, 몰리브데넘산 이온(MoO_4^{2-})을 포함하는 피막의 외부 층은 양이온 선택층으로 양이온을 선택적으로 통과시키기 때문에 금속에 공격적인 Cl^- 와 SO_4^{2-} 등의 침투를 억제시키며, 동시에 피막내 형성된 H^+ 를 외부로 배출시켜 산성화를 감소시킨다. 또한 내부 층은 음이온 선택층 형성으로 음이온을 선택적으로 통과시켜 O^{2-} 는 Cr과 반응하여 금속표면의 부동태 특성을 향상시킨다 [15]. 이를 양극성(bipolar)구조 또는 2상 맴브레인이라고 한다. UNS N08367은 60 °C의 경우, 부동태 산화피막이 0.15 V에서 파괴된 후 0.45 V ~ 1.05 V범위에서 활성용해반응이 지연되었으며, 90 °C의 경우 0.09 V에서 부동태산화피막은

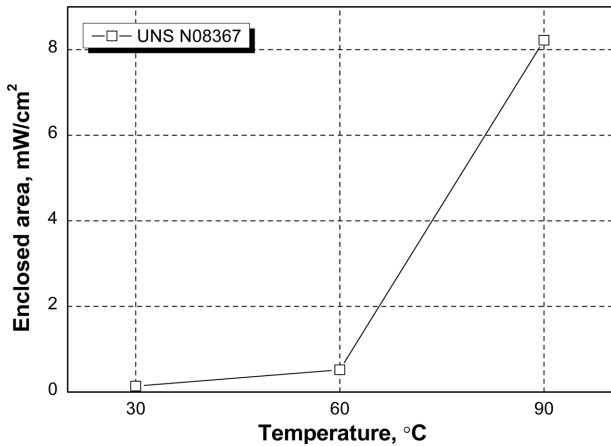
파괴되었으나, 0.45 V ~ 1.04 V 범위에서 전류밀도가 감소하는 부동태특성을 나타내었다. 이를 바탕으로 온도 상승에 따라 부식이 가속화되나, 양극성 구조를 빠르게 형성하여 부식이 억제되었으며, 1.04 V에서 부동태피막은 재 파괴되는 것으로 판단되어 두 번째 가설에 기인한다 [15]. 천연 해수에서 각 온도조건의 재부동태 전위와 $E_{\text{anodic to cathodic transition}}$ 와 E_{corr} 의 차이 값은 큰 값을 나타내지 않기 때문에 UNS N08367의 부동태 피막 형성능이 매우 우수함을 알 수 있다 [7].

Fig. 6은 UNS N08367에 대하여 히스테리시스루프 닫힌 면적(a)과 그 값을 비교한 그래프(b)이다. 이를 통해 부식거동을 분석하였다. 히스테리시스 루프 내 닫힌 면적은 30 °C, 60 °C 및 90 °C에서 각각 0.14 0.52 및 8.22 mW/cm^2 (Unit: $\text{V} \times \text{mA}/\text{cm}^2$)으로 계산된다. 60 °C와 90 °C의 닫힌 면적은 육안으로 유사해 보이나, 그래프 X축이 로그 값(log scale)이기 때문에 각각 면적(적분) 값은 큰 차이를 나타낸다. 이 닫힌 면적은 부식손상의 양을 나타내는 파라미터로 사용된다 [3]. 일반적으로 부식의 양을 측정하는 파라미터는 공식전위와 재부동태 전위의 차(a)와 히스테리시스 루프내 닫힌 면적(b)이 있다 [7]. 전자(a)보다 후자(b)의 파라미터는 준안정적인 공식과 안정된 공식사이의 차이 및 부식거동을 상대적으로 명확하게 파악할 수 있다 [3]. 또한 닫힌 면적의 단위는 mW/cm^2 으로 단위면적당 작용하는 유효전력이기 때문에 닫힌 면적의 값이 크면, 면적당 에너지를 많이 받아 국부적인 부식의 경향이 더 증가하는 것으로 사료된다. 타 연구자의 연구결과에 따르면, 닫힌 면적 값에 따라 다음과 같이 3가지 경우로 해석하였다 [3]. 첫 번째는 완전재부동태가 형성되어 히스테리시스 루프의 내부면적이 관찰되지 않는 경우이다. 두 번째 히스테리시스 루프의 내부면적이 0.1 mW/cm^2 미만일 경우 안정된 공식성장(Stable pitting)보다 준안정적인 공식(Metastable pitting) 성장이 더 지배적으로 관찰되는 경우이다. 마지막으로 0.1 mW/cm^2 보다 더 클 때 안정된 공식으로 성장하고 진행된다. UNS S31603은 닫힌 면적이 관찰되지 않았으므로 부식에 대해 매우 예민하다는 것을 알 수 있다. 타 연구자의 경우 일반 오스테나이트 스테인리스강이기 때문에 안정된 공식성장을 0.1 mW/cm^2 를 기준으로 하였으나, 본 실험에서는 공식저항성이 우수한 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강이기 때문에 안정된 공식성장은 일반오스테나이트보다 높은 에너지가 필요할 것으로 사료되는 점과 Fig 6a의 닫힌 면적 값 바탕으로 UNS N08367의 안정된 공식성장의 기준점은 높을 것으로 사료된다. UNS N08367은 30 °C와 60 °C는 내부면적 0.1 mW/cm^2 에 가깝기 때문에 안정된 공식성장보다 준안정성 공식이 지배적으로 발생할 것으로 유추할 수 있는



(a) Enclosed(shaded) area in hysteresis loop

Fig. 6. Enclosed area in hysteresis loop at reverse scan after cyclic potentiodynamic polarization experiment for UNS N08367 in sea water



(b) Values of enclosed area in hysteresis loop

Fig. 6. Continued

반면, 90 °C의 경우 0.1 mW/cm²보다 상당히 높은 값으로 초과했기 때문에 공식의 안정적인 성장이 지배적인 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 7은 천연해수에서 온도에 따라 순환동전위 분극 실험 후 UNS S31603과 UNS N08367의 표면 형상을 나타낸 것이다. UNS S31603의 손상은 Fig. 2a 그래프의 경향과 비교하여 손상 경향도 유사하게 관찰되었으며, 전형적인 타원의 공식 형태가 관찰되었다. 부동태 피막을 형성하는 제3산화크롬(Cr₂O₃)은 물과 반응하는 가수분해를 통해 CrO₄²⁻를 형성하여 결국 용액으로 용해(Cr₂O₃ + 5H₂O → 2CrO₄²⁻ + 10H⁺ + 6e⁻)된다 [3]. 이에 따라 부동태의 안정성은 Cr의 영향이 지배적이며, 부

동태 산화피막은 금속표면에 크롬이 고르게 분포되지 않으므로 안정적이지 않은 영역에서 국부적으로 용해되어 손상이 공식 형태가 된 것으로 판단된다 [11]. 또한 온도 상승에 따라 동일 전위에서 높은 전류밀도가 관찰되어 손상 정도가 증가된 것으로 사료된다. UNS N08367의 손상은 Fig. 2b의 그래프에서 나타난 것처럼 다양한 양상이 관찰되었다. 30 °C에서 손상은 전반적으로 넓은 면적에서 관찰되었으며, 60 °C에서는 더 넓은 면적에서 손상되었으며, 90 °C의 경우는 감소된 것처럼 보인다. 본 연구의 30 °C와 60 °C에서 표면손상은 타 연구자와 같이 히스테리시스 루프의 닫힌 면적이 0.1 mW/cm² 기준 값 미만에서 준안정적인 공식이 안정된 공식 성장보다 더 지배적으로 발생했다는 연구와 유사한 경향을 나타냈다 [3]. 이는 본 연구에서의 30 °C와 60 °C에서 손상의 형태가 깊이 방향(안정된 공식)이 아닌 넓이 방향(준안정성 공식)으로 성장한 것과, 90 °C에서 닫힌 면적은 0.1 mW/cm²보다 매우 크게 초과하여 공식이 깊이 방향으로 안정적인 성장이 지배적이기 때문에 타 연구와 유사한 경향을 나타냈음을 뒷받침한다.

Fig. 8은 천연 해수용액에서 순환동전위 분극실험 후 표면을 주사전자현미경으로 관찰한 것으로 손상거동을 미시적 관점에서 비교분석하였다. 모든 온도조건에서 UNS S31603의 Fig. 2a와 같이 공식전위 이후 실험 종료까지 재부동태 전위가 발생되지 않고, 지속적으로 활성용해반응이 진행되었다. 그 결과, 표면 손상은 순환동전위 분극동안 공식 개시와 지속적으로 성장하여 공식 손상이 지배적인 경향을 나타냈다. UNS S31603에 대

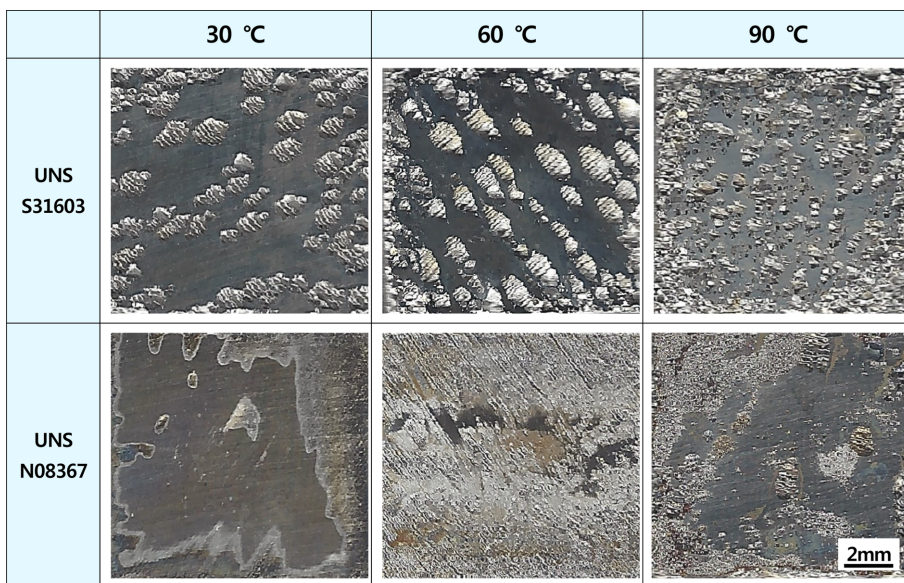


Fig. 7. Appearance after cyclic potentiodynamic polarization experiment with temperature for UNS S31603 and UNS N08367 in sea water

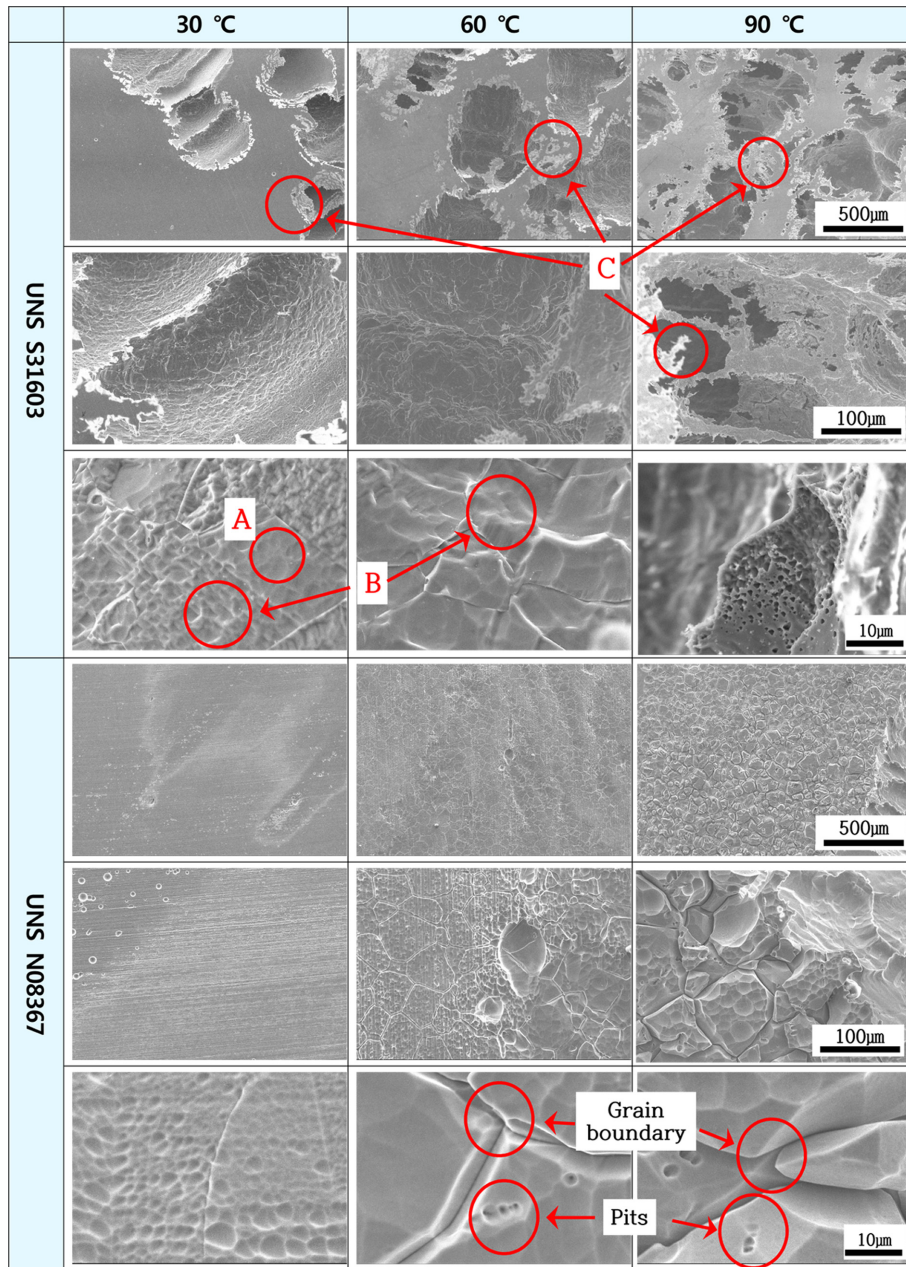


Fig. 8. Surface morphologies after cyclic potentiodynamic polarization experiment with temperature for UNS S31603 and UNS N08367 in sea water

하여 30 °C의 고배율에서 내부는 매끄럽게 관찰되는 영역(A 영역)과 거친 영역(B 영역)이 동시에 관찰되었으나 상대적으로 거친 면이 지배적이다 [16]. 60 °C와 90 °C에서는 매끄럽게 관찰되는 영역은 거의 없으며, 거친 영역이 지배적으로 관찰된다. 거친 면은 공식의 지속적인 성장 가능성을 나타내기 때문에 모든 온도 조건에 공식에 대해 매우 민감한 반응을 나타낸다. 또한 주목할 만한 손상은 공식 손상의 가장자리 영역에서 마이크로 크기의 레이스(Lace) 형상의 손상(C 영역)이다 [3]. 손상

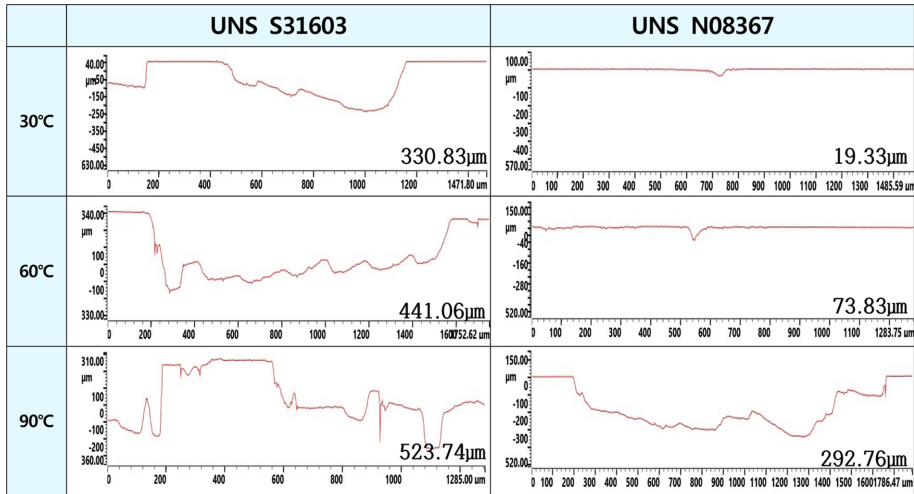
크기는 얇은 마이크로 단위이며, 형상은 마치 레이스와 같이 얇은 잎 모양의 장식처럼 보이는 영역을 의미한다. 타 연구자의 연구 결과에 따르면 레이스 형상의 손상이 흥미로운 이유는 다음과 같다. 레이스 손상 영역은 일반적인 영역(Bulk)과 같이 Fe, Cr, 및 Ni로 구성되어 있으나 함유된 원소들이 일반적인 영역보다 약간 더 높게 집중되었기 때문이다 [4]. P. Ernst 등은 이러한 레이스 부식손상은 연속적인 공식 핵(Pit nucleation)의 성장과 부동태피막의 재부동태가 함께 작용하여 준안정적인

공식(Metastable pitting)이 발생하며 결과적으로 이러한 준안정적인 공식이 금속표면의 언더컷과 같이 깊이방향의 손상을 야기시킬 가능성이 높다고 보고하였다 [17]. 본 실험의 90 °C 고배율에서 깊이 방향으로 성장된 형상은 타 연구자의 연구보고와 잘 일치한다.

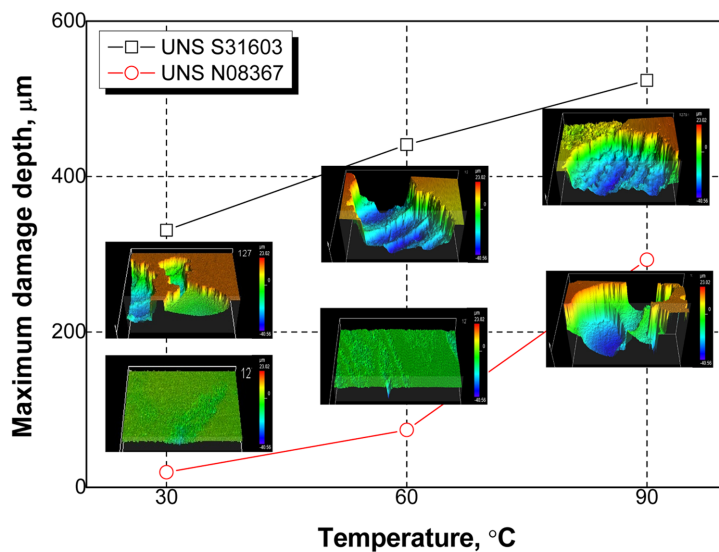
UNS N08367의 60 °C와 90 °C에서 입계가 인접된 부분사이의 홈(Groove)형태의 손상이 발생하였으며, 입내의 거친 부분에서는 공식이 관찰되었다. 이 홈은 틈 부식 개시와 전파를 촉진시켰다. 부식의 형태는 물리적인 원인인 입계, 전위(Dislocation) 및 함유 원소의 집합점에서 부식이 먼저 발생된다는 점과 화학적 원인인 반응성이 높은 계면에서 우선적으로 발생한다는 점이 동시

에 작용하기 때문에 사료된다 [16]. 따라서 입계에서 부식이 우선적으로 발생되었으며, 입내의 평탄한 면적보다 에너지가 집중되는 거친 영역에서 공식이 먼저 발생되었다. 전체적으로 UNS N08367의 손상은 입계부식이 지배적으로 관찰되어 깊이 방향으로 성장된 공식의 형태를 나타내는 UNS S31603보다 지연되었음을 알 수 있다.

Fig. 9는 해수 온도에 따른 순환동전위 분극실험 후 표면에 대한 최대손상깊이의 프로파일(a)과 비교 그래프(b)를 나타낸 것이다. 온도 상승에 따라 최대손상깊이는 전체적으로 증가하였다. 공식의 개시와 성장 과정은 다음과 같다 [3,18]. 부동태 산화피막은 물리적 요인과 화학적 요인에 의해 금속 표면은 각기 다른 종류의



(a) 3D Profile

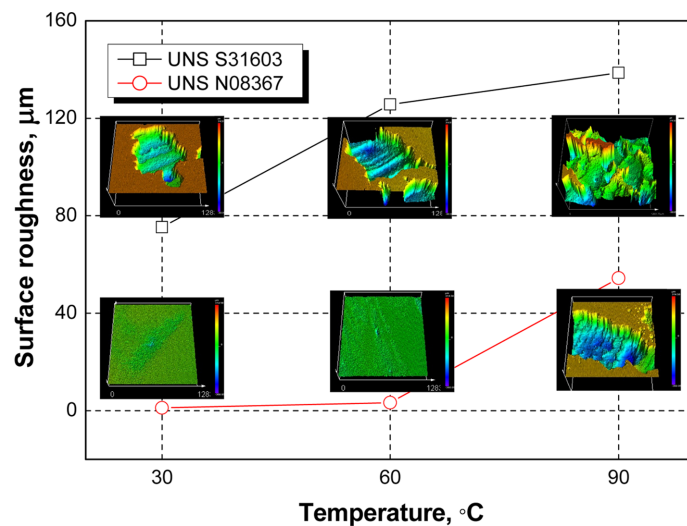


(b) Maximum damage depth

Fig. 9. Maximum damage depth after cyclic potentiodynamic polarization experiment with temperature for UNS S31603 and UNS N08367 in sea water

작은 손상이 발생된다. 작게 손상된 영역은 자기촉매작용 메커니즘(autocatalytic mechanism)에 의해 깊이방향으로 성장하며, 과정은 다음과 같다. 공식 내부(Anode)에서 발생한 전자($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$)는 부동태피막(Cathode)으로 이동하는 전기화학적 반응($1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$)을 일으킨다 [18]. 상대적으로 넓은 면적과 반응 밸런스를 맞추기 위해 좁은 면적의 공식 내부는 단위 면적당 더 많은 양극반응을 일으킨다 [13]. 또한 공식내부의 철이온은 염소이온과 반응하여 염화산화철이 발생($\text{Fe}^{2+} + 2\text{Cl}^- \rightarrow \text{FeCl}_2$)하며, 염화산화철의 가수분해 반응($\text{FeCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{HCl}$)과 크롬산화피막의 가수분해 반응($\text{Cr}_2\text{O}_3 + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CrO}_4^{2-} + 10\text{H}^+ + 6\text{e}^-$)에 의해 공식 내부의 전해질의 pH가 감소하기 때문에 부식을 가속화시킨다 [3,18]. 온도가 높을수록 이와 같은 자기증식반응(Self-propagation mechanism)이 촉진되기 때문에 최대손상깊이는 증가한다. Fig. 9b의 그래

프에서, 전체적으로 UNS N08367의 최대손상깊이는 UNS S31603보다 현저히 작게 관찰되었다. 두 조건에서 각각 증가 폭을 비교하면, UNS S31603의 경우, 30 °C에서 60 °C의 상승폭은 110.23 μm이고, 60 °C에서 90 °C의 상승폭은 82.68 μm로, 온도가 상승할수록 최대손상깊이 상승은 감소하였다. 순환동전위 분극곡선의 형태가 유사하기 때문에 이는 부동태 특성보다 오스테나이트 강에 함유된 구리이온의 특성으로 사료된다. 오스테나이트 스테인리스강에 대하여 NaCl용액에서 공식 내부를 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy) 분석한 결과 구리이온이 발견되었다 [19]. 이는 Cu층이 공식손상 영역에 염화구리층을 형성($\text{Cu}^{2+} + 2\text{Cl}^- \rightarrow 2\text{CuCl}_2$)함으로써 부식을 지연시키는 것을 뒷받침해준다 [19]. 반면, UNS N08367의 경우, 30 °C에서 60 °C의 상승폭은 58.5 μm이고, 60 °C에서 90 °C의 상승폭 218.93 μm이다. 이는 본 실험은 동전위 분극실험이 아닌 순환동전위 분극실험이



(a) Surface roughness

	30°C	60°C	90°C
UNS S31603	 Frequency, % vs Depth, μm -300.1 to 112.6	 Frequency, % vs Depth, μm -364.2 to 237.3	 Frequency, % vs Depth, μm -403.3 to 215.3
UNS N08367	 Frequency, % vs Depth, μm -40.51 to 23.07	 Frequency, % vs Depth, μm -89.1 to 74.1	 Frequency, % vs Depth, μm -296.3 to 96.3

(b) Depth histogram

Fig. 10. Depth histogram and surface roughness after cyclic potentiodynamic polarization experiment with temperature for UNS S31603 and UNS N08367 in sea water

기 때문에 분극곡선의 특성이 다양하게 나타났으며, 30 °C와 60 °C의 히스테리시스 루프의 닫힌 면적(국부부식 손상량)의 값보다 90 °C에서의 닫힌 면적이 상당히 크기 때문에 판단된다.

Fig. 10은 손상된 표면 거칠기(a)와 깊이 히스토그램(b)을 나타낸 것이다. 이를 통해 온도에 따라 각 재료의 내식성과 부식 경향을 분석하였다. 거칠기는 부식 반응성을 나타내며 거칠기가 클수록 표면에 더 높은 에너지가 작용하여 거친 영역이 많이 발생하기 때문에 반응성이 높다는 것을 의미한다 [20]. 두 스테인리스강 모두 전체적으로 온도상승에 따라 거칠기도 증가하였다. 이는 온도 증가에 따라 반응물질의 이동성을 향상시켜 금속표면의 양극과 음극 반응속도가 증가하기 때문이다. 따라서 금속표면 손상이 촉진되어 거친 표면이 지배적으로 발생되었다. UNS N08367의 거칠기는 UNS S31603보다 낮기 때문에 양극과 음극 반응속도가 지연된 것으로 사료된다. 깊이 히스토그램은 금속 표면에 대하여 손상 깊이의 분포를 시각화하여 나타낸 그래프이며, X축은 손상 깊이를, Y축은 손상 깊이(변수)에 대한 빈도수를 퍼센트(분포량)로 나타낸 값이다 [9]. 히스토그램의 표준편차란 변수(손상 깊이)의 평균으로부터 분포되어 있는 정도를 나타내며 이를 산포라고도 한다. 표준편차가 클수록(넓은 분포량) 전체적으로 반응이 진행되어 다양한 깊이 손상을 나타내기 때문에 전면부식일 가능성이 높다는 의미이다. UNS S31603의 3D 분석 결과 온도 상승에 따라 표준편차는 증가하였으며, 이는 금속표면적에 공식이 전파되고 성장하여 전면부식의 경향이 높아진 것으로 유추할 수 있다. UNS N08367의 3D 표면분석 결과, 30 °C와 60 °C에서 손상 정도가 작아 전체적으로 손상된 것처럼 보이며, 이에 따라 히스토그램은 넓은 깊이 분포가 관찰되어 전면부식일 가능성이 높다. 그러나 90 °C에서의 3D 분석결과 공식의 형태가 관찰되었기 때문에 깊이 분포는 좁게 나타났으며 이를 통해 국부부식의 경향으로 유추할 수 있다.

Fig. 11은 천연 해수에서 온도에 따라 순환동전위 분극실험 후 ASTM-G102에 기인하여 부식속도 계산 후 결과를 나타낸 것이다 [21]. 부식속도 식은 패러데이법칙(Paraday's law)을 참조하였다. 패러데이식은 측정된 부식전류밀도(Corrosion current density, I_{corr} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)를 당량무게(Gram equivalent weight, EW)와 밀도(Density in g/cm^3 , ρ)로 나눈 뒤 비례상수(Proportionality constant, K_1)를 곱(Corrosion rate = $K_1 \frac{I_{corr}}{\rho}$ EW)하였다. 해수환경에서 두 스테인리스강 모두 온도 상승에 따라 부식속도는 증가하였다. 염소이온이 포함된 환경에서 스테인리

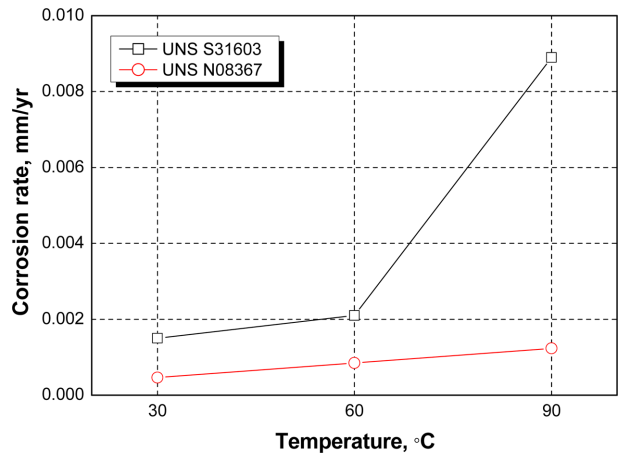


Fig. 11. Corrosion rate after cyclic potentiodynamic polarization experiment with temperature for UNS S31603 and UNS N08367 in sea water

스강 모재와 부동태 산화피막의 EIS (Electrical impedance spectroscopy) 측정 결과, 분극저항 값은 낮게 나타났다 [22]. 분극저항이 낮아짐에 따라 공격적인 염소이온의 이동을 더 용이하여 활성화용해반응이 촉진된 것으로 사료된다. UNS S31603과 UNS N08367의 부식속도 차이 값은 30 °C, 60 °C 및 90 °C에서 각각 약 1.0×10^{-3} , 1.25×10^{-3} 및 7.7×10^{-3} mm/yr로, 두 시편의 부식속도 차이는 온도 상승에 따라 증가하였다. 온도상승에 따라 모재와 부동태산화피막의 분극저항은 낮아졌으나, UNS N08367의 부동태 산화피막 특성을 향상시키는 합금원소에 따라 형성능이 향상된 UNS N08367의 부식속도는 UNS S31603보다 상대적으로 증가 폭이 낮아져서 결과적으로 두 스테인리스강의 차이 값은 증가된 것으로 사료된다.

타 연구는 캐비테이션-침식 실험 후 최대손상깊이로 산출된 부식률과 부식전류밀도로 산출된 부식률을 비교하여 둘 사이의 관계를 나타내었으며, 이 관계식은 국부부식속도(최대손상깊이 부식률)를 균일부식속도(부식전류밀도의 부식률)로 나눈 값이다 [9,23]. 이 관계식에 의해 산출된 값은 α 로 정의하였으며, 이는 국부부식속도와 균일부식속도를 비교하는 값으로, 국부부식속도가 전면부식속도보다 α 배 높다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구는 α 값을 통해 부식 경향을 분석하였으며, 산출과정 및 분석은 다음과 같다.

Table 3은 천연해수용액에서 온도에 따라 순환동전위 분극실험 후 측정된 최대손상깊이와 부식전류밀도로 각각 부식률(mm/yr)을 산출하였으며, 이 두 값을 이용해 α 값을 산출한 과정을 나타낸 것이다. 본 실험에서 타 연구에 비해 α 값이 현저히 높은 이유는 순환동전위 분극

Table 3. Alpha(α) value calculation process after cyclic potentiodynamic polarization experiment with temperature for UNS S31603 and UNS N08367 in sea water

	E.W (1/N _{EQ})	D (g/cm ³)	Temperature (°C)	I _{corr} (μA/cm ²)	MPY	MM/Year
UNS S31603	25.73281	7.99	30	0.148	0.062	0.0015
			60	0.199	0.083	0.0021
			90	0.839	0.351	0.0089
UN N08307	25.66358	8.06	30	0.045	0.02	0.00046
			60	0.081	0.034	0.00085
			90	0.117	0.484	0.00123

	Temperature (°C)	Corroded depth (μm)	MM/Year	$\alpha/1000$
UNS S31603	30	330.83	19.99	13.32
	60	441.06	26.64	12.69
	90	523.74	31.64	3.55
UNS N08307	30	19.33	1.17	2.54
	60	73.83	4.46	5.21
	90	292.76	17.68	14.37

실험법에 기인한다. 이는 순방향의 부식손상과 달리 역방향의 손상이 진행됨에 따라 공식이 깊이 방향으로 성장하였기 때문에 국부부식의 경향은 높게 나타났다.

Fig. 12는 산출된 α 값을 1000으로 나눈 그래프로 나타낸 것이다. UNS S31603에 대하여 30, 60 및 90 °C에서 각각 13.32, 12.69 및 3.55로 산출되었다. 즉, 국부부식속도가 균일부식속도보다 각각 13.32, 12.69 및 3.55 배 높다는 의미다. UNS N08367의 경우 30 °C, 60 °C 및 90 °C의 경우, 각각 2.54, 5.21 및 14.37을 나타냈다. UNS S31603의 경우 온도상승에 따라 α 값은 작아졌으며, 이는 SEM 결과를 통해 뒷받침할 수 있다. SEM 관찰 결과, 30 °C의 경우 전형적인 공식 손상이 관찰되었기 때문에 α 값이 큰 것과 60 °C, 90 °C에서 국부부식이 진행됨과 동시에 전면적으로 공식 손상이 분포되었으므로 α 값이 감소된 것과 일치한다. UNS N08367의 경우, 온도 증가에 따라 α 값도 상승하였으며 이는 SEM 관찰 결과와 순환동전위 분극실험 후 발생된 히스테리시스 루프의 닫힌 면적을 통해 뒷받침 할 수 있다. SEM 관찰 결과, 30 °C의 경우 전체적으로 낮은 공식의 깊이 손상이 전면적으로 관찰되었다. 60 °C에서 입계부식이 발생된 영역에서 공식이 성장하였으며, 90 °C에서는 공식 성장이 더 뚜렷하게 나타났기 때문에 α 값이 증가한 것을 뒷받침한다. 또한 Fig. 6b의 히스테리시스 루프의 닫힌 면적은 온도 상승에 따라 증가하였으며, 이는 α 값이 커진 것과 동일하다. 히스테리시스 내 면적이 30 °C와 60 °C에 비해 90 °C의 경우 현저히 높은 값으로 산출되어 공식 성장이 안정적으로 진행되었으므로 α 값도 현저히

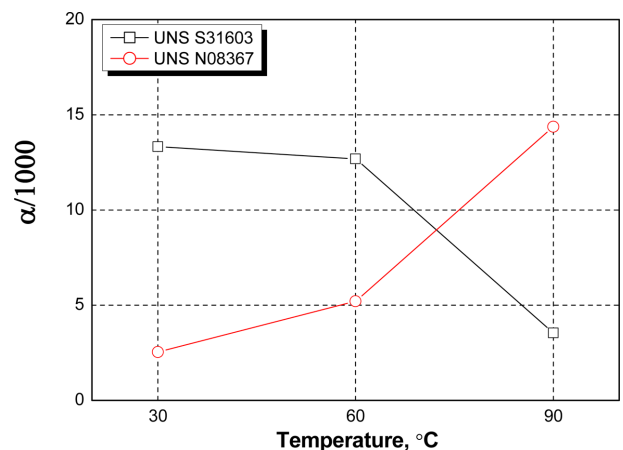


Fig. 12. Alpha (α) value after cyclic potentiodynamic polarization experiment with temperature for UNS S31603 and UNS N08367 in sea water

상승하였다. 이에 따라 α 값은 국부부식의 경향을 판단할 수 있다.

4. 결론

천연해수온도에 따른 순환동전위 분극실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

UNS N08367은 부동태 피막의 안정성과 지속성을 평가하는 요인인 재부동태 전위와 Active-passive transition potential 현상이 관찰되었으나 UNS S31603은 이러한 현상이 나타나지 않았다. 이에 따라 Mo, Cr, N 이온의

함량이 높아 재부동태를 형성하여 우수한 내식성을 나타낸 것으로 사료된다. SEM 분석 결과, UNS S31603은 전형적인 공식성장을 나타냈으며, 온도 상승에 따라 공식 성장이 전파되었으나, UNS N08367은 전면적으로 입계부식이 지배적이며, 부분적으로 입내에서 성장한 공식이 관찰되었다. 30 °C와 60 °C에서 UNS S31603이 UNS N08367보다 α 값이 크므로 국부부식에 의한 손상이 큰 것으로 판단된다. 그러나 90 °C에서 UNS N08367이 UNS S31603보다 α 값이 크기 때문에 국부부식에 의한 손상이 큰 것으로 판단된다. 이는 90 °C에서 히스테리시스 루프의 면적이 현저히 상승하여 안정된 공식 성장이 뚜렷하게 나타났기 때문으로 사료된다.

References

- Helmuth Sarmiento Klapper, John Stevens and Gabriela Wiese, Pitting Corrosion Resistance of CrMn Austenitic Stainless Steel in Simulated Drilling Conditions—Role of pH, Temperature, and Chloride Concentration, *CORROSION*, **69**, 1095 (2013). Doi: <https://doi.org/10.5006/0947>
- E. Blasco Tamarit, D. M. Garcia and J. Garcia Anton, Imposed potential measurements to evaluate the pitting corrosion resistance and the galvanic behaviour of a highly alloyed austenitic stainless steel and its weldment in a LiBr solution at temperatures up to 150 °C, *Corrosion Science*, **53**, 784 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.11.013>
- Robert D. Mosera, Preet M. Singh, Lawrence F. Kahn, and Kimberly E. Kurtis, Chloride-induced corrosion resistance of high-strength stainless steels in simulated alkaline and carbonated concrete pore solutions, *Corrosion Science*, **57**, 241 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.12.012>
- Yushu Wang and Preet M. Singh, Corrosion Behavior of Austenitic and Duplex Stainless Steels in Thiosulfate- and Chloride-Containing Environments, *CORROSION*, **71**, 937 (2015). Doi: <https://doi.org/10.5006/1694>
- Jiamei Wang and Le Fu Zhang, Effects of cold deformation on electrochemical corrosion behaviors of 304 stainless steel, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, **64**, 1 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1108/ACMM-12-2015-1620>
- H. Parangusan, J. Bhadra, and Al-Thani, A review of passivity breakdown on metal surfaces: influence of chloride- and sulfide-ion concentrations, temperature, and pH, *Emergent Materials*, **4**, 1 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00194-6>
- S. Esmailzadeha, M. Aliofkhazraeia and H. Sarlakb, Interpretation of Cyclic Potentiodynamic Polarization Test Results for Study of Corrosion Behavior of Metals: A Review, *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, **54**, 976 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1134/S207020511805026X>
- J. H. Lee, K. H. Jung, J. C. Park and S. J. Kim, Determination of optimum protection potential for cathodic protection of offshore wind-turbine-tower steel substructure by using potentiostatic method, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, **41**, 230 (2017). Doi: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2017.41.3.230>
- H. K. Hwang and S. J. Kim, Effect of Temperature on Electrochemical Characteristics of Stainless Steel in Green Death Solution Using Cyclic Potentiodynamic Polarization Test, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 266 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.5.266>
- 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**, 5 (2015). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2015.14.5.232>
- H. C. Choe and Y. M. Ko, Surface Characteristics of Stainless Steel Wire for Dental and Medical Use, *Journal of the Korean surface Engineering*, **36**, 339 (2003). Doi: <https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE01041927>
- G. Latha and Rajeswari, Pitting and Crevice Corrosion Behaviour of Superaustenitic Stainless Steels in Sea Water Cooling Systems, *Journal Corrosion Review*, **18**, 1 (2000). Doi: <https://doi.org/10.1515/CORRREV.2000.18.6.429>
- Denny A Jones, *Principles and prevention of corrosion*, second edition, p. 29 (1995).
- H. S. Kwon, H. S. Kim, C. J. Park, and H. J. Jang, *Comprehension of stainless steels*, p.198, Steel & Metal News (2007).
- K, T. Moon, A thesis for a doctorate, p. 4, Chonnam National University (1994).
- Ping Zhu, Xinyuan Cao, Wei Wang, Jiancang Zhao, Yonghao Lu and Tetsuo Shoji, An investigation on microstructure and pitting corrosion behavior of 316L stainless steel weld joint, *Journal of Materials Reserch*, **32**, 3904 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2017.316>
- P. Ernst and R. C. Newman, Pit growth studies in stainless steel foils. I. Introduction and pit growth kinetics, *Corrosion Science*, **44**, 927 (2002). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00133-0](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00133-0)
- A. Farjami, H. Yousefnia, Z. S. Seyedraoufi, and Yazdan Shajari, Investigation of Inhibitive Effects of 2-Mercapto benzimidazole (2-MBI) and Polyethyleneimine (PEI) on Pitting Corrosion of Austenitic Stainless Steel, *Journal*

- of *Bio-and Tribo-Corrosion*, **6**, 1 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1007/s40735-020-00397-0>
19. S. Mehrazi, A. J. Moran¹, J. L. Arnold, R. G. Buchheit and R. S. Lillard, The Electrochemistry of Copper Release from Stainless Steels and Its Role in Localized Corrosion, *Journal of The Electrochemical Society*, **165**, C860 (2018). Doi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0071813jes/meta>
20. Arash Shahryari, Sasha Omanovic and Jerzy A. Szpunar, Enhancement of biocompatibility of 316LVM stainless steel by cyclic potentiodynamic passivation, *Journal of Biomedical Materials Research*, **50**, 1728 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1002/jbm.a.32053>
21. ASTM G102-89, Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements, p.1 (2004).
22. H. Y. Ha, T. H. Lee, J. H. Bae and D. W. Chun, Molybdenum Effects on Pitting Corrosion Resistance of FeCrMnMoNC Austenitic Stainless Steels, *Metals*, **8**, 653 (2018). Doi: <https://doi.org/10.3390/met8080653>
23. I. J. Jang, K. T. Kim, Y. R. Yoo, and Y. S. Kim, Effects of Ultrasonic Amplitude on Electrochemical Properties During Cavitation of Carbon Steel in 3.5% NaCl Solution, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 163 (2020). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.4.163>