



오스테나이트 스테인리스강의 해수에서 전기화학적 특성에 미치는 전해연마시간의 영향

황현규^a, 신동호^a, 허호성^a, 김성종^{b,*}

^a목포해양대학교 대학원 ^b목포해양대학교 기관시스템공학부

Effect of electropolishing process time on electrochemical characteristics in seawater for austenitic stainless steel

Hyun-Kyu Hwang^a, Dong-Ho Shin^a, Ho-Seong Heo^a, Seong-Jong Kim^{b,*}

^aGraduate school, Mokpo national maritime university, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

^bDivision of marine engineering, Mokpo national maritime university, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

(Received 19 August, 2022 ; revised 22 August, 2022 ; accepted 23 August, 2022)

Abstract

Electropolishing is a surface finishing treatment that compensates for the disadvantages of the mechanical polishing process. It not only has a smooth surface, but also improves corrosion resistance. Therefore, the purpose of this investigation is to examine the corrosion resistance and electrochemical characteristics in seawater of UNS S31603 with electropolishing process time. The roughness improvement rate after electropolishing was improved by about 78% compared to before polishing, indicating that the electropolishing is effective. As a result of potential measuring of mechanical polishing and electropolishing, the potential of electropolishing was nobler than the mechanical polishing condition. As a result of calculating the corrosion current density after potentiodynamic polarization experiment with electropolishing conditions, the corrosion current density of mechanical polishing was about 6.4 times higher than that of electropolishing. After potentiodynamic polarization experiment with electropolishing conditions, the maximum damage depth of mechanical polishing was about 2.2 times higher than that of electropolishing(7 minutes). In addition, the charge transfer resistance of the specimen electropolished for 7 minutes was the highest, indicating improved corrosion resistance.

Keywords : Electropolishing; Surface roughness; UNS S31603; Potentiodynamic polarization; EIS.

1. 서 론

국제해사기구(IMO)는 선박에서 배출되는 황산화물 배출 저감을 위한 노력으로 2020년부터 배기

가스 내 황 함유량 상한선을 3.5 %에서 0.5 % 미만으로 대폭 강화한 규제를 발효하였다[1]. 이에 대응하기 위해 전 세계 해운업계는 상대적으로 저가인 황산화물 저감장치인 스크러버(Scrubber)를 선박에 설치하였다[2]. 초기 발전소용으로 사용되었던 스크러버는 탄소강으로 제작되었으나 선박의 경우 작동환경(해수와 세정수) 특성 상 부식발생으로 인하여 현재는 스테인리스강으로 제작되

*Corresponding Author: Seong-Jong Kim
Division of marine engineering, Mokpo national maritime university
E-mail: ks@mmu.ac.kr

고 있다[3]. 그러나 선박용 스크리버는 내식성이 우수한 재료를 사용함에도 불구하고 운전·정지로 인한 진습반복과 높은 온도에서의 운전조건으로 부식문제가 해결되지 않은 실정이다[4]. 따라서 스크리버 구조물의 부식방지를 위한 다양한 기술개발이 필요하다. 최근 산업 동향은 기계연마를 이용한 생산이 각광받고 있으며, 이는 대량 생산에 따른 생산 능력이 현저히 향상되었기 때문이다. 그러나 기계적 가공은 가공할 수 없는 부위에 미세 버(micro-burr)가 발생하며, 이로 인해 기계적 결함과 더불어 불순물에 의한 부식이 촉진되어 기계 수명저하를 초래한다[5]. 이러한 문제를 해결하기 위해 비접촉 가공인 전해연마처리가 효과적이다. 전해연마는 미세 버 제거뿐만 아니라 계재물 및 불순물 등을 제거할 수 있기 때문에 정밀의 료용 기구, 반도체 장비 및 식품위생용품 등에 널리 사용된다[6]. 특히 스테인리스강의 전해연마는 부동태산화피막 형성으로 내식성이 향상되며, 표면정결성이 필요한 산업에 널리 적용되고 있다[7]. 이에 따른 다양한 조건에서 전해연마 후 내식성 연구가 활발히 진행 중이다.

S. H. Kim 등은 UNS S30400에 전해질은 황산, 인산과 물을 혼합한 전해질에서 시간과 전류 밀도를 변수로 전해연마를 수행하였으며, 표면거칠기와 미세버(Micro-burrs) 제거 정도를 관찰하여 전해연마공정의 최적화를 고찰하였다[5]. E. S. Lee 등은 UNS S31603에 대하여 전해연마 공정의 매개변수 중 전해질 성분비는 동일조건으로 전류밀도, 시간 및 온도를 요인으로 선정하여 실시하였다. 이는 표면거칠기와 표면형상분석을 통해 전해연마공정의 최적화 조건을 선정하였다[8]. S. J. Lee 등은 작동전극과 대극의 간극(Electrode gap), 시간을 변수로 하여 UNS S31603에 대해 전해연마를 수행하였다[9]. 표면 거칠기와 전해연마한 시편에 대하여 황산용액에서 동전위 분극실험 후 부식속도를 비교하여 전해연마공정 최적화를 연구하였으며, AES(Auger electron spectroscopy)와 XPS(X-ray photoelectron spectroscopy) 분석을 통해 부동태피막 특성을 분석하였다. 이와 같이 다양한 매개변수로 전해연

마공정 최적화 연구와 전해연마 후 전기화학적 특성 연구가 많이 수행되었으나, 전해연마한 오스테나이트 스테인리스강에 대하여 각 연마조건에 따른 천연해수에서의 전기화학적 특성 연구는 전무하다.

따라서 본 연구는 UNS S31603에 대하여 타 연구자의 연마조건과 ASTM B912-02(Standard Specification for Passivation of Stainless Steels Using Electropolishing) 규정을 참조하였으며, 전해연마의 매개변수로 공정시간을 선정하였다. 기계연마(전해연마 전)와 전해연마한 시편에 대하여 동전위 분극실험 후, 각 조건에서의 전기화학적 거동과 전기화학적 임피던스 분광법(Electrochemical impedance spectroscopy, EIS)에 의한 실험으로 부동태피막 특성을 비교·분석하였다.

2. 실험방법

표 1은 해수의 특성과 조성을 나타낸 것이고, 표 2는 본 연구에 사용된 UNS S31603의 화학조성을 나타낸 것이다. UNS S31603은 해양산업에서 가장 널리 사용되는 재료 중 하나이므로 실험 재료로 선정하였다. 시험편 가공은 냉각수가 공급되어 열변형을 최소화하는 미세절단기를 사용하였으며, 노출 면적은 1 cm²로 가공하여 에폭시 레진으로 마운팅하였다. 각 시험편은 에머리페이퍼(Emery paper) #220으로 기계연마(Mechanical polishing)를 실시하였다. 연마한 작동전극은 이물질 제거를 위해 아세톤으로 탈지한 후 증류수에서 3분간 초음파 세척하였으며, 건조기로 완전 건조(24 hours)시킨 후 실험을 수행하였다. 전해연마의 대응전극은 작동전극과 동일한 재료로 선정하였으며, 양극과 대응전극의 면적비에 따라 연마 효과가 달라지기 때문에 ASTM B912 규정에 준하여 면적비를 1:1(Anode:cathode)로 하였다. 기준전극은 은/염화은(Ag/AgCl saturated 3.3M KCl)전극을 사용하였다.

전해연마공정은 공정시간(Process time)에 따라 가공하였고, 일부 나머지 공정조건은 ASTM B912 규정에 준하였으며, 이는 다음과 같다. 전해

Table 1. Chemical compositions and properties of electrolyte(sea water) (wt%)

Main component (mg/L)						pH	Dissolved oxygen (mg/L)	Electric conductivity (mS/cm)
SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺			
1746	15721	8401	344	1121	357	7.9	16.1	45.3

Table 2. Chemical compositions of UNS S31603

Ni	Cr	Mo	C	Si	Mn	P	S	Cu	N	Fe
10.19	16.7	2.03	0.023	0.60	1.05	0.034	0.0028	0.282	0.012	Bal.

액 조성비(95 %/w 황산, 85 %/w 인산)는 3:7(v/v)로, 전류밀도는 $300\text{mA}/\text{cm}^2$ 로, 온도는 75°C 로, 작동전극과 대응전극 간극: 5mm로, 전해연마 시간은 3, 7 분으로 선정하였다. 전해연마 후 전기화학적 특성을 평가하기 위해 자연전위측정, 동전위 분극실험 그리고 전기화학적 임피던스 분광법 실험을 수행하였다. 전기화학실험 시 기준전극은 은/염화은(Ag/AgCl saturated 3.3M KCl) 전극, 대응전극은 백금전극으로 전기화학셀을 구성하였다. 동전위 분극실험 시 안정화 시간은 3,600 초로 선정하였으며, 분극전위는 개로전위 기준 -0.25 V 에서 0.85 V 까지 $1\text{ mV}/\text{s}$ 의 주사속도로 수행하였다. 동전위 분극실험 후 타펠외삽법(Tafel extrapolation method)을 이용하여 부식전류밀도를 산출하였다. 또한, 전해연마공정에 의한 UNS S31603의 부동태 피막의 전기화학적 특성을 연구하기 위해 교류임피던스분광법을 실시하였다. 천연해수에 침지 시킨 후 OCP(Open circuit potential, 개로전위) 전위에서 $100\text{ kHz} \sim 10\text{ mHz}$ 의 주파수와 진폭 10 mV 조건으로 실험을 진행하였다. 전해연마 및 동전위 분극실험 후 3D 분석현미경과 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM)을 이용하여 표면 관찰 및 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 1은 $300\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 인가전류밀도에서 전해연마시간 경과에 따른 전위 변화를 나타낸 것이

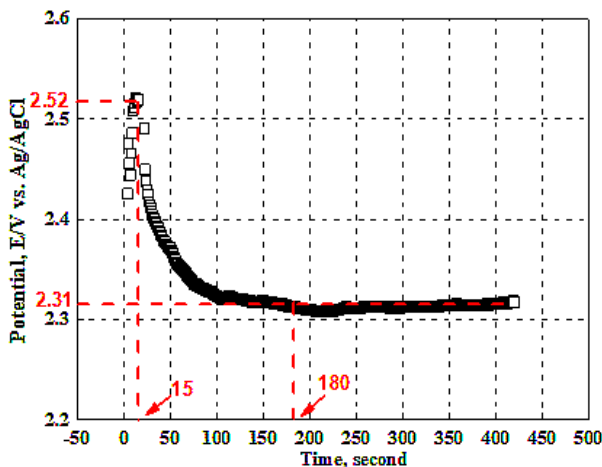


Fig. 1. Galvanostatic experiment for EP with process time

다. 전해연마 초기 전위 값은 급격히 증가하여 15 초에서 2.52 V 로 최대값을 나타낸 후, 급격히 저하하는 경향을 나타냈다. 이후 150초부터 전위는 대략 2.31 V 로 안정한 값을 유지하였다. 본 연구의 전해연마용액에서 전위 값은 150초에서 대체적으로 안정되기 시작하였으므로 180초 동안 전해연마를 수행하였으나, 표면이 미려하지 않아 7분까지 전해연마를 수행하였다. 7분 동안 전해연마한 경우, 표면이 매우 미려하여 전해연마효과를 나타내는 충분한 시간으로 사료되어 3분과 7분을 변수로 선정하였다. M. j. Shin 등은 니티놀(Ni-Ti shape memory alloy; nitinol)의 전해연마 최적조건으로 다양한 매개변수 중 공정시간(Process time)을 4분으로 선정하였으며, S. H. Kim 등은 UNS S31603에 대하여 전해연마 공정시간의 최적조건을 6분으로 선정하였다[[10, 11]. 이와 같이 전해연마조건은 재료와 전해질에 따라 상이하고 본 연구의 전해연마 조건도 타 연구자와 다를 수 있다.

그림 2는 각 조건에 따른 전해연마 후 금속표면을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 기계연마한 시편은 연마흔적(스크레치)이 명확히 관찰되었다. 3분 동안 전해연마한 금속표면은 기계연마한 시편에 비해 미려하나 연마흔적이 완전히 제거되지 않았다. 그러나 7분의 경우, 금속표면이 매우 미려하여 적절한 전해연마 공정조건으로 여겨진다. 이는 전해연마과정에서 산에 형성된 부동태피막 두께가 골에 비해 얇기 때문에 산에 형성된 전류밀도는 상대적으로 높아져 활성용해반응이 촉진된다[12]. 따라서 산과 골에서 용해속도 차이로 인해 표면이 미려한 것으로 사료되며, 7분의 경우, 이러한 용해과정이 충분한 시간으로 판단된다 [13].

그림 3은 공정시간에 따라 전해연마 후 표면 프로파일 및 산과 골의 높이차를 나타낸 것이다. 기계연마한 시편표면은 다량의 산과 골이 관찰되어 거친 표면을 나타내었다. 3분 동안 전해연마한 경우, 기계연마에 비해 산과 골의 높이차는 적어지고, 개수가 감소하여 부드러운 표면 형상을 나타내었다. 그리고 7분의 경우, 표면형상은 산과 골의 형태가 뚜렷하게 나타나지 않아 매우 미려하게 관

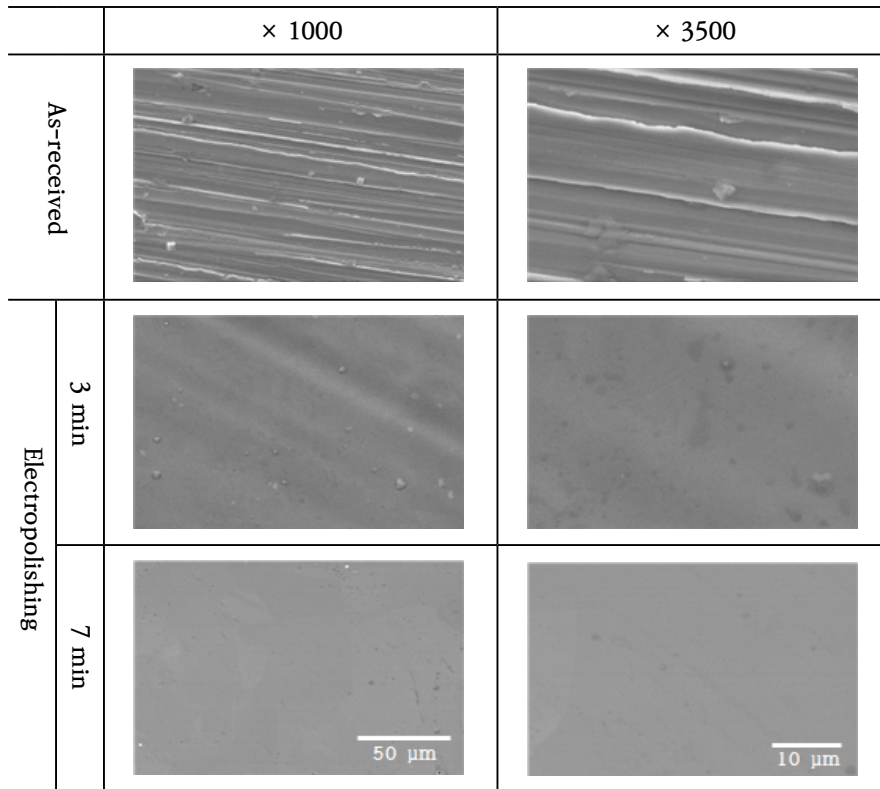


Fig. 2. Surface morphologies after EP with process time

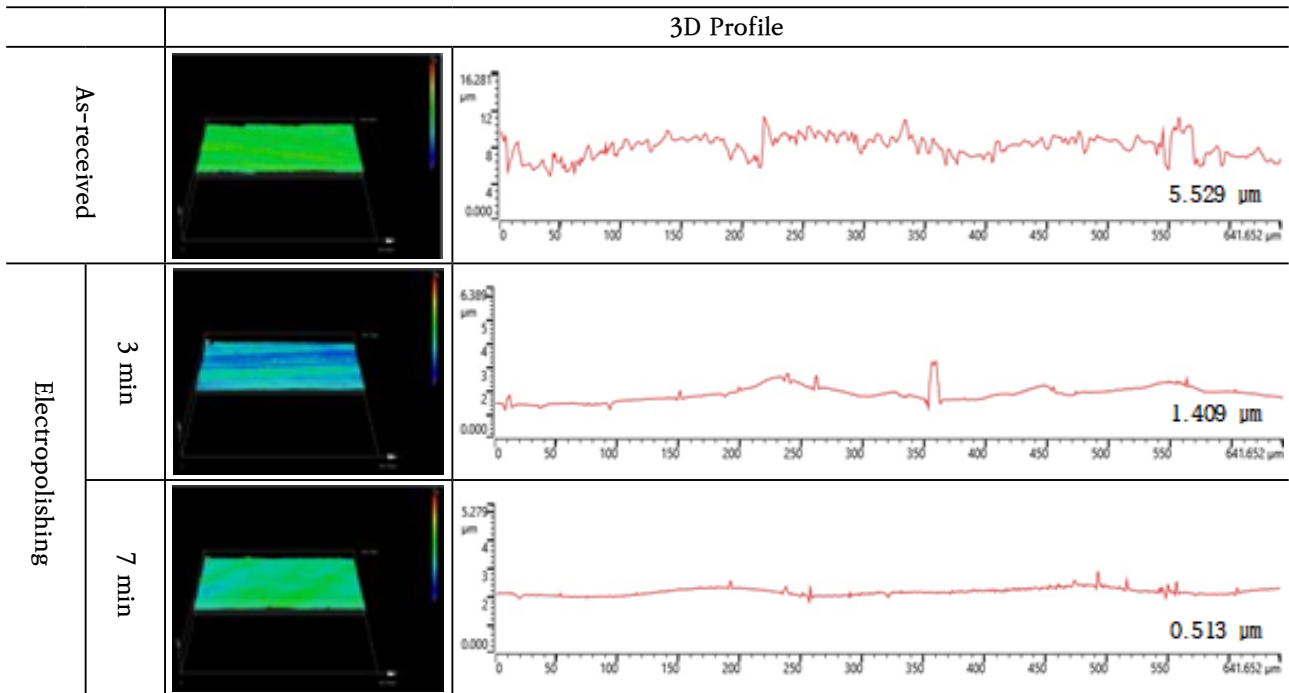


Fig. 3. Height difference between mountain and valley after EP with process time

찰되었다. 전해연마 전과 후(7분 전해연마)의 높이 차는 5.529 μm와 0.513 μm로 측정되었으며, 전해연마 전의 경우, 약 11배 높은 값을 나타냈다. 거친 표면의 시편은 부식환경에 민감하며 특히 천연해수(Cl⁻ 포함)와 같이 할로젠 이온이 포함된 환경에서 부동태피막 파괴 시 매우 가혹한 부식 환경을 조성한다[14]. 표면거칠기가 큰 시편은 준안정성 공식의 개수가 많아, 많은 표면의 국부부위에

서 활성용해반응($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$)이 진행된다. 또한 유체의 흐름이 정체된 부분(골)에서 자가촉매작용(Autocatalysis)이 발생하며, 이에 따라 골의 내부는 산성화가 촉진되어 부식이 가속화된다 [15,16]. 자가촉매작용 메커니즘은 다음과 같다. 철이온과 염소이온의 결합으로 염화산화철이 생성($Fe^{2+} + 2Cl^{-} \rightarrow FeCl_2$)되며, 염화산화철이 물에 의해 가수분해 반응($FeCl_2 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 +$

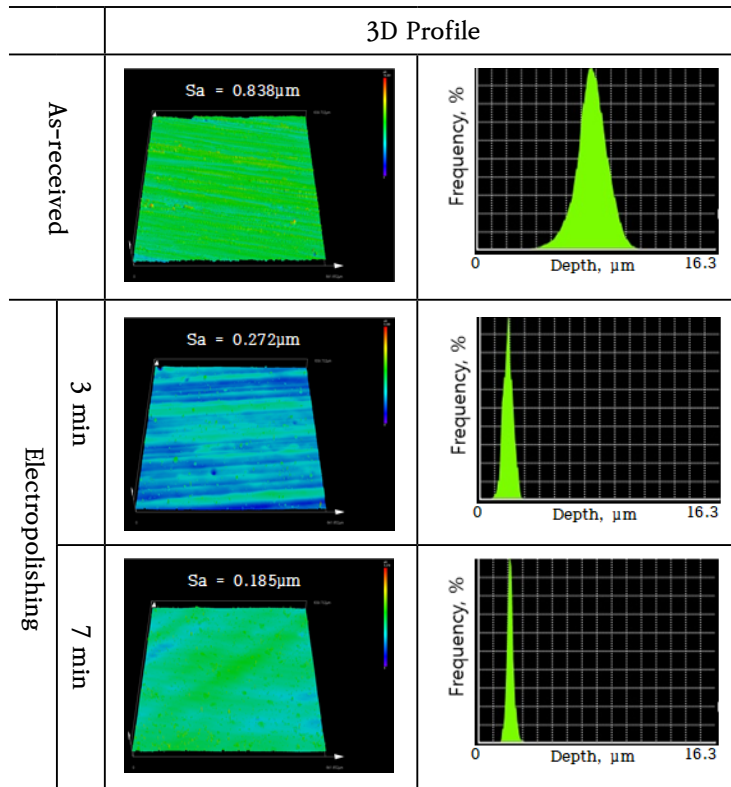


Fig. 4. 3D analysis and histogram of damaged surface after EP with process time

2HCl)이 발생한다. 이와 같은 반응으로 골 내부의 전해질의 pH가 감소하는 현상이다. 따라서 7분 동안 전해연마한 경우, 표면이 미려하여 용액의 정체구간이 적기 때문에 자가촉매작용이 지연될 것으로 사료된다.

그림 4는 공정시간에 따른 전해연마 후 표면거칠기와 깊이히스토그램을 나타낸 것이다. 기계연마 조건, 3분 그리고 7분으로 전해연마한 표면거칠기는 각각 0.838 μm, 0.272 μm 그리고 0.185 μm으로 관찰되었다. 전해연마 전(기계연마)의 거칠기는 연마 후(7분의 전해연마)보다 약 4.5배 크게 나타났다며, 전해연마 후 거칠기 개선률은 약 78% 개선되었다. 일반적으로 전해연마 후 거칠기 개선률이 35% 이상이면 그 효과가 유효하며, 본 실험은 이에 대한 연마조건이 충족되어 적절한 전해연마조건으로 사료된다[11]. 깊이히스토그램을 통해 전해연마정도를 각 조건에 따라 비교하였다. 본 연구에서 깊이히스토그램의 X축은 깊이로, Y축은 각 깊이의 빈도수(분포)를 나타내었다. 전해연마의 깊이 평균값은 산과 골의 높이 차가 기계연마에 비해 감소하여 표면은 미려해진 것으로 사료된다. 또한 히스토그램 산포로 깊이의 분포경향을 알 수 있다[17]. 산포란 기댓값으로부터 깊이(데이터)가 퍼져있는 정도를 나타내며, 이를 바탕으로

로 산포가 클수록 다양한 깊이 형성으로 표면 거칠기가 크다는 것을 의미한다. 전해연마 시 3분과 7분 동안 전해연마 기댓값은 비슷하나 산포도는 7분 동안 전해연마한 시편이 더 작아 깊이의 분포가 기댓값에 밀집되어 있음을 알 수 있다. 따라서 7분 동안 전해연마한 시편이 3분 실시한 시편보다 깊이의 분포가 균등하여 더 미려한 것으로 사료된다.

그림 5는 30°C의 천연해수에서 기계연마와 3분 동안 전해연마한 UNS S31603에 대하여 전위측정(initial delay time) 결과이다. 기계연마한 시편의 전위는 침지 시간에 따라 점차 감소하

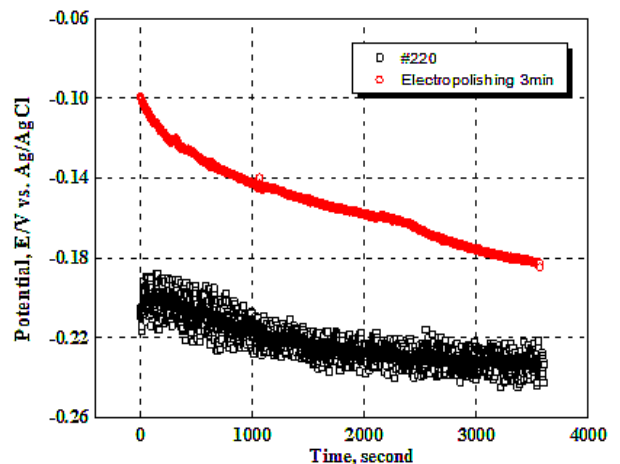


Fig. 5. Open circuit potential measurement with polishing type in sea water at 30°C for UNS S31603

여 약 1600초부터 다소 안정화 되었다. 이에 반해 전해연마한 시편의 경우, 초기 전위변화량은 침지 시간에 따라 기계연마한 시편보다 크게 나타났으며, 귀한 전위 값을 나타냈다. 동일 환경조건 하에서 일반적으로 전위 값에 따라 부식의 개시시점이 달라지기 때문에 내식성 평가 자료로 사용되기도 한다[18]. 일반적으로 전위가 상대적으로 활성방향인 경우, 산화경향이 커서 부식의 개시시점이 빠르며, 귀방향일 경우 부식 개시는 지연된다. 본 실험의 전위 값은 동일 환경(천연해수, 온도)에서 측정 후 비교했으므로 내식성 평가 자료로 참조가 될 것으로 사료된다. F.A Arash 등은 전해연마와 유사한 강산용액에서 오스테나이트 스테인리스강의 침지시간에 따라 부동태특성을 연구하였으며, 연구결과, OCP(Open circuit potential, 개로전위) 증가는 부동태피막 특성향상의 지표이고, 이로 인해 내식성이 향상되었다고 주장하였다[19]. S. J. Lee 등은 전해연마 전과 후, XPS(X-ray photoelectron spectroscopy)와 AES(Auger electron spectroscopy)로 부동태피막 특성을 분석하였으며, XPS 분석결과, 부동태 산화피막의 주요 성분인 크롬산화층(Cr_2O_3) 비율이 증가하였으며, 철산화층(Fe_2O_3)에 대한 크롬산화층(Cr_2O_3)의 함량 증가로 내식성이 향상되었다고 주장하였다[9]. 또한 AES 분석결과, 크롬두께가 전해연마 전에 비해 두꺼워짐을 확인하였다[9]. M. B. Leban 등은 XPS 분석으로 표면거칠기에 따른 부동태피막 특성을 연구하였으며, 철+니켈(Fe+Ni)

대비 크롬(Cr)의 함량이 증가하여 부동태피막 특성이 달라진다고 주장하였다[20]. 본 실험에서 기계연마와 전해연마의 전위는 각각 약 -0.23 V와 -0.18 V로 측정되었다. 이는 동일한 재료일지라도 표면거칠기, 전해연마정도 그리고 표면원소 함량에 따라 부동태특성이 달라지기 때문에 부식 개시시점이 차이가 난 것으로 사료된다[21]. 부식 개시시점은 기계연마한 시편이 전해연마에 비해 다소 빠를 것으로 예측된다.

그림 6은 $30^{\circ}C$ 의 천연해수에서 기계연마와 전해연마한 UNS S31603에 대하여 교류임피던스분광법으로 분석한 나이퀴스트 선도와 피팅에 사용한 등가회로이다. 등가회로에서 R_s 는 전해질과 작동전극 사이의 저항, R_{ct} 는 산화피막과 모재의 계면에서의 전하이동저항을 나타낸다. 그리고, C_{dl} 은 모재와 산화피막 계면에 있어서 전기이중층 커패시턴스를 나타낸다. 피팅 절차에 있어 산화피막 및 표면의 불균일성을 고려하여 커패시턴스는 주로 CPE(Constant phase element)로 대체하여 사용하며 아래와 같은 식 (1)로 나타내었다.

$$Z_{CPE} = [C(j\omega)^n]^{-1} \tag{1}$$

여기서, ω 는 각 주파수, j 는 $\sqrt{-1}$, C 는 CPE 상수로 정의하였다. 그리고, n 은 CPE 지수로서 그 값이 0일 경우 저항을 의미하며 이상적인 커패시턴스의 경우 1의 값을 가진다. 피팅된 값들을 표 3에 제시하였으며 기계연마, 3분 및 7분 전해연마

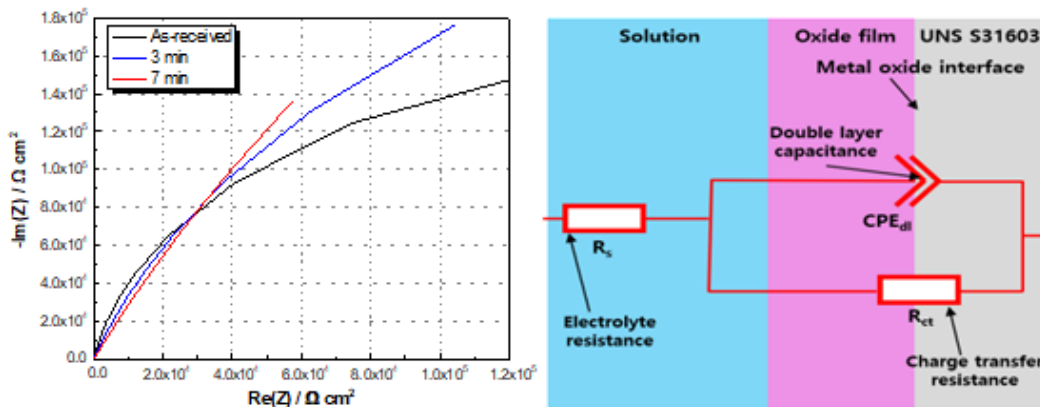


Fig. 6. EIS nyquist plot and equivalent circuit in sea water of EP specimens with process time

Table 3. Fitting parameters in sea water of EP specimens with process time

	R_s (Ω cm^2)	R_{ct} ($\times k\Omega$ cm^2)	CPE_{dl} ($\times 10^{-6} \Omega^{-1} cm^{-2} s^n$)	n_{dl}
As-received	6.7	360	49.57	0.92
EP 3 min	5.5	680	45.21	0.85
EP 7 min	5.8	1790	59.58	0.80

한 시험편의 전하이동저항은 각각 360, 680, 그리고 1790 $k\Omega \cdot cm^2$ 을 나타내었다. 이는 전해연마 공정으로 인해 표면거칠기가 개선되면서 부동태 피막의 안정성이 향상된 결과로 해석할 수 있다 [22]. 따라서 EIS 분석결과는 전해연마 공정이 UNS S31603의 천연해수에서 내식성을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다. 가 작을수록 공식 손상 경향이 더 적게 나타난다는 연구 결과와 유사하다[23]. 또한, 전해연마한 두 시험편 비교 결과, 3분 전해연마 조건의 손상 깊이와 너비는 7분에 비해 각각 약 1.88배, 1.68배 크게 나타났다.

그림 7은 30°C의 천연해수에서 전해연마 조건에 따른 동전위 분극실험 결과를 나타낸 그래프이다. 모든 조건에서 전류밀도는 개로전위에서 공식전위까지 조금씩 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 활성용해반응($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$)과 부동태산화피막 생성이 동시에 발생할 가능성이 높다[23]. 7분 동안 전해연마한 경우, 개로전위에서 공식전위까지 전류밀도 값이 다른 연마조건에 비해 작은 것은 부동태피막이 가장 안정하게 형성되어 활성용해반응이 적기 때문으로 사료된다. 또한 기계연마는 공식전위 전후에서 불안정한 곡선을 나타냈으나, 상대적으로 전해연마한 시험편은 안정적인 곡선이 관찰되었다. 이는 금속표면의 거칠기가 클수록

준안정성 공식의 개수가 많아 부동태피막은 불안정하기 때문으로 사료된다[24]. 기계연마, 3분 및 7분 전해연마한 경우, 부식전류밀도는 5.74×10^{-4} , 9.92×10^{-5} 및 7.98×10^{-5} mA/cm²이며, 공식전위는 0.33, 0.33 및 0.31 V로 관찰되었다. 모든 전해연마조건에서의 부식전류밀도는 기계연마보다 낮은 값을 나타내었다. 기계연마한 조건의 부식전류밀도는 7분의 전해연마 조건보다 약 7.2 배 높은 값을 나타내었다.

그림 8은 손상된 시험편에 대한 표면분석 결과이다. 모든 시험조건에서 균일 부식이 없는 공식 손상만이 관찰되었다. 특히, 전해연마한 시험편의 손상 크기는 기계연마한 시험편보다 크게 관찰되었다. 반면에 3분 동안 전해연마한 시험편과 비교하여 7분 전해연마에서는 손상 크기가 감소하였다. 일반적으로 스테인리스강은 표면에 부동태피막형성으로 우수한 내식성을 나타내는 금속으로 알려져 있다[25]. 그러나 해수에 함유된 염소 이온의 크기는 부동태 피막의 화학적 결합을 침투할 정도로 작기 때문에 부동태피막 결합부에 침투하여 파괴 및 용해시키는 요인으로 작용한다. 따라서 해수 환경에서 동전위분극시험 후 관찰된 공식 손상은 염소 이온에 기인한 것으로 사료된다.

그림 9와 10은 동전위분극시험 후 공식 손상부의 손상깊이 및 너비측정 결과이다. 전해연마한 시험편의 경우 공식 손상깊이는 감소하는 경향을 나타내었다. 특히, 기계연마한 시험편과 비교하여 7분 전해연마한 경우 손상깊이는 약 45%로 감소한 반면, 손상너비는 증가하는 경향을 나타냈다. 이를 통해 기계연마한 UNS S31603의 공식손상은 깊이방향으로 성장한다. 그러나 전해연마한 시험편의 공식손상은 너비방향으로 더 크게 성장함을 나타내었다. 이는 표면거칠기가 작을수록 공식 손상 경향이 더 적게 나타난다는 연구 결과와 유사하다[26]. 또한, 전해연마한 두 시험편 비교 결과, 3분 전해연마조건의 손상깊이와 너비는 7분에

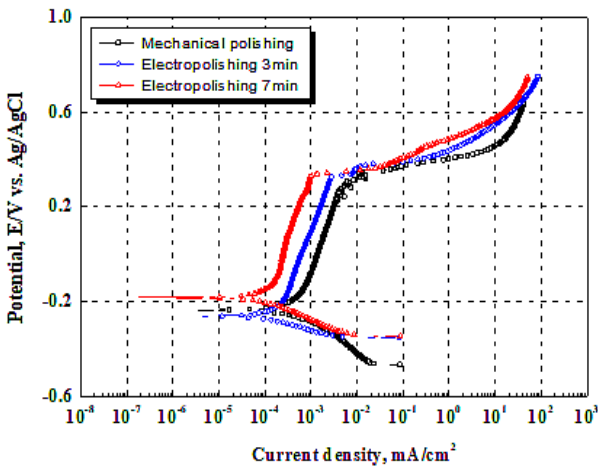


Fig. 7. Potentiodynamic polarization curves in sea water for electropolished specimen

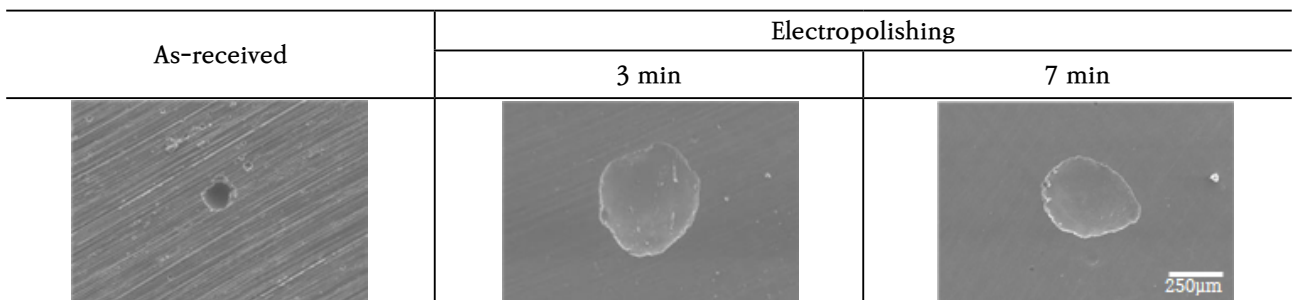


Fig. 8. SEM analysis results of damaged surface after potentiodynamic polarization experiment in sea water for electropolished specimen

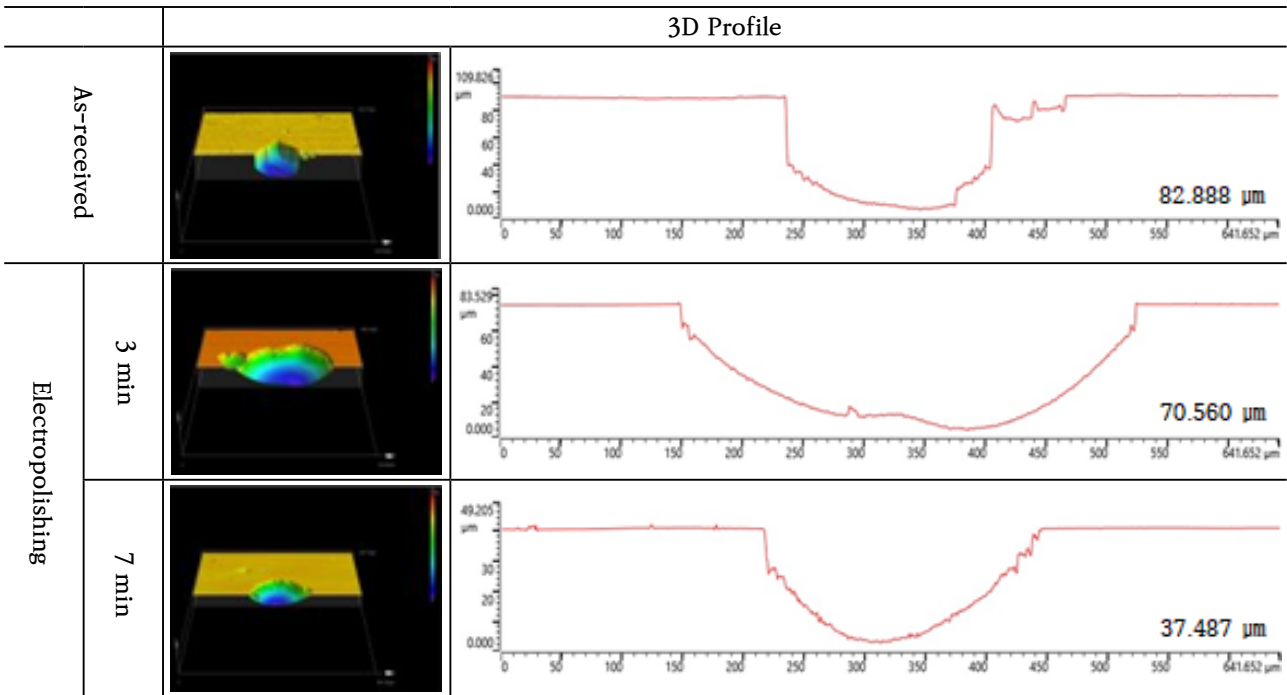


Fig. 9. Maximum damage depths after potentiodynamic polarization experiment in sea water for electroplished specimen

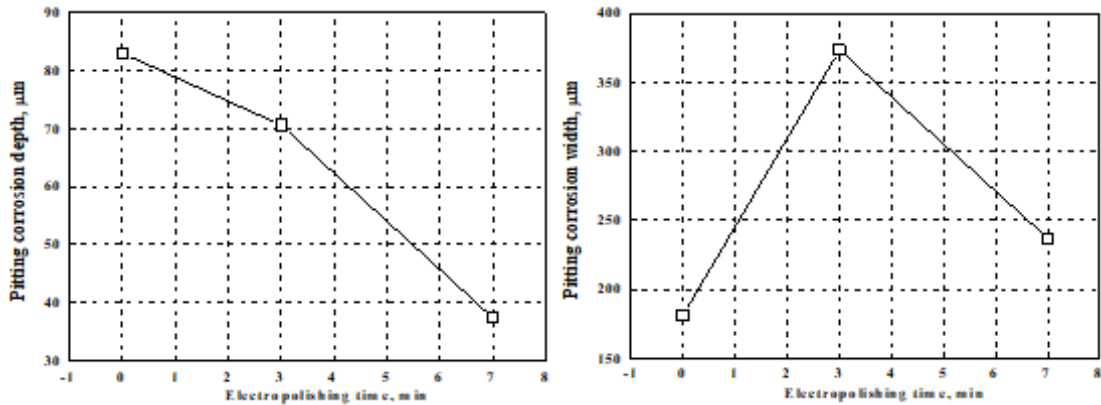


Fig. 10. Pitting corrosion depth and width after potentiodynamic polarization experiment in sea water for electroplished specimen

비해 각각 약 1.88배, 1.68배 크게 나타났다.

그림 11은 전해연마시간에 따른 손상깊이와 손상너비의 비를 이용하여 손상경향값을 산출한 결과이며, 관련식 (2)는 아래와 같다.

$$\text{손상경향값(Damage tendency)} = \frac{\text{손상 깊이 } (\mu\text{m})}{\text{손상 너비 } (\mu\text{m})} \quad (2)$$

손상경향값은 금속과 수용액의 전기화학적 반응에 의해 손상경향성을 나타내는 지표로 사용할 수 있으며, 손상경향값이 1보다 클수록 깊이방향의 손상이 강한 경향을, 작을수록 너비방향의 손상이 강한 경향을 의미한다. 그래프에서 보는 바와 같이, 모든 시험 조건에서 손상경향값은 1보다 낮게 나타났다. 특히, 전해연마수행 후 손상경향값

은 0.2 미만의 매우 작은 값을 나타냈다. 그림 8 ~ 11을 종합하면, 전해연마를 통하여 표면거칠기가

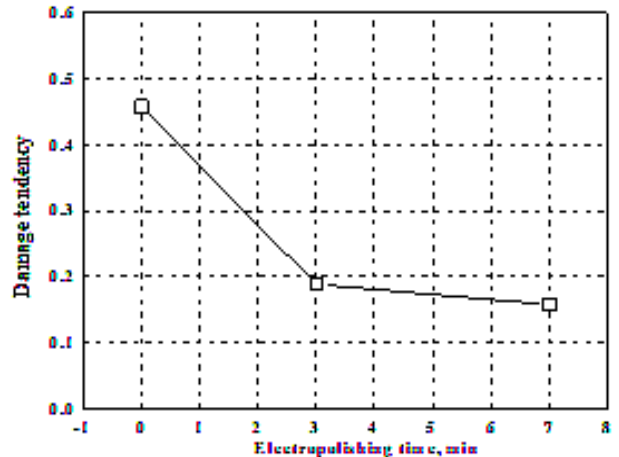


Fig. 11. Damage tendency after potentiodynamic polarization experiment in sea water for electroplished specimen

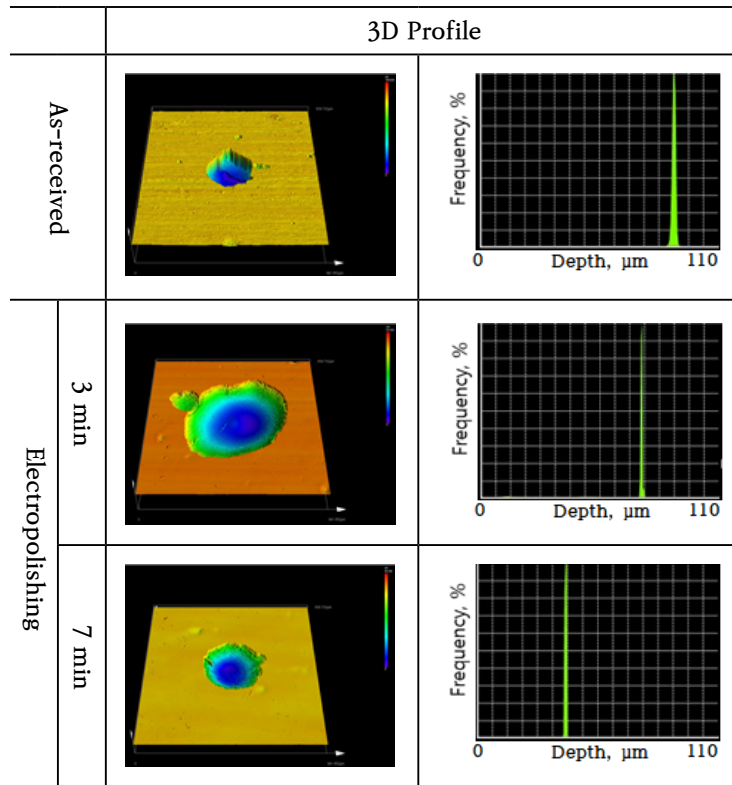


Fig. 12. 3D analysis and histogram of damaged surface after potentiodynamic polarization experiment in sea water for electropolished specimen

작아질수록 깊이방향보다 너비방향으로 손상이 진행되는 경향이 크게 되어 공식 저항성은 개선되었다.

그림 12는 손상된 시험편의 3D 분석 및 깊이히스토그램을 나타낸 것이다. 히스토그램 편차는 깊이 분포를 나타내기 때문에 부식된 경향(표면 거칠기)을 판단할 수 있다. 그러나 본 실험에서 표면 거칠기는 공식손상 외 연마한 표면거칠기가 다르므로 이를 비교 군으로 설정하는 것은 적절하지 않아 평균 깊이만 비교하였다. 기계연마한 시험편의 평균 깊이가 가장 크게 나타났으며, 7분 전해연마한 시험편은 현저히 작은 값을 나타냈다. 이를 통해 7분 전해연마한 시험편은 우수한 공식 저항성을 나타낸 것으로 사료된다.

4.결 론

연마시간 조건에 따라 전해연마 후 동전위 분극 실험과 전기화학 임피던스 분광법을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

동전위 분극실험 결과, 7분 동안 전해연마한 경우, 개로전위에서 공식전위까지의 전류밀도는 다른 연마조건에 비해 낮은 값을 나타내었다. 이는 금속표면이 다른 연마 조건에 비해 가장 미려하고

부동태가 가장 안정하기 때문으로 사료된다.

EIS 분석 결과, 7분 동안 전해연마한 경우, 전하이동저항은 기계연마에 비해 약 5배 크기 때문에 내식성이 향상되었다. 또한 기계연마한 경우, 부식전류밀도는 7분 동안 전해연마한 시편보다 약 7.2 배 높은 값을 나타내었다.

동전위 분극 실험 후 손상 경향 값(손상깊이를 손상너비로 나눈 값)을 비교한 결과, 모든 시험 조건에서 손상 경향 값은 1보다 낮게 나타났으나, 7분 동안 전해연마한 시편의 손상 경향 값은 약 0.16으로 가장 작은 값을 나타냈다.

결과적으로 전해연마효과는 표면을 미려하게 할 뿐만 아니라 내식성 향상에 따른 공식 저항성도 개선되었다.

감사의 글

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

References

[1] K. J. Reynolds, Exhaust gas cleaning

- selection guide, Ship operations cooperative program, The Glosten Associates, Washington DC, 3 (2011)
- [2] H. K. Hwang, S. J. Kim, Effect of temperature on electrochemical characteristics of stainless steel in green death solution using cyclic potentiodynamic polarization test, *Corros. Sci. Tech.*, 20 (2021) 266–280.
- [3] B. S. Phull, W. L. Mathay, R. W. Ross, Corrosion resistance of duplex and 4–6% Mo-Containing stainless steels in FGD scrubber absorber slurry environments, *Corros. Sci.*, 578 (2000)
- [4] J. W. Lee, S. J. Kim, Effects of cooling rates of coating layer on microstructures and corrosion behaviors of Zn-Al-Mg alloy coated steel sheets, *Corros. Sci. Tech.*, 21 (2022) 221–229.
- [5] S. H. Kim, J. H. Cho, S. B. Kim, J. S. Choi, Electropolishing characteristics of stainless steel for industrial application, *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, 49 (2016) 363–367.
- [6] S. H. Kim, J. H. Cho, S. B. Kim, J. S. Choi, Electropolishing characteristics of stainless steel for industrial application, *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, 49 (2016) 363–367.
- [7] Y. B. Patil, S. R. Dulange, A review on electropolishing process and its affection parameters, *Int. J. Adv. Res. Sci. Eng.*, 3 (2014) 246–252.
- [8] E. S. Lee, Machining characteristics of the electropolishing of stainless steel (STS316L), *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 16 (2000) 591–599. the electropolishing of stainless steel (STS316L), *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 16 (2000) 591–599.
- [9] S. J. Lee, J. J. Lai, The effects of electropolishing (EP) process parameters on corrosion resistance of 316L stainless steel, *J. Mater. Process Technol.*, 140 (2003) 206–210.
- [10] M. J. Shin, S. Y. Beak, E. S. Lee, A study for improving surface roughness of nitinol shape memory alloy in micro-electropolishing by taguchi method, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, 2007a (2007), 273.
- [11] S. H. Kim, J. H. Cho, D. H. Lim, C. H. Park, Process optimization for life extension of electropolishing solution using half round bus bar, *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, 49 (2016) 447–453.
- [12] M. Datta, D. Landolt, Fundamental aspects and applications of electrochemical microfabrication, *Electrochim Acta*, 45 (2000) 2535.
- [13] E. L. Smith, A. P. Abbott, K. S. Ryder, Deep eutectic solvents (DESs) and their applications, *Chem. Rev.*, 114 (2014) 11060.
- [14] H. Parangusan, J. Bhadra, A. Thani, A review of passivity breakdown on metal surfaces: influence of chloride- and sulfide-ion concentrations, temperature, and pH, *Emergent Mater.*, 4 (2021) 1.
- [15] A. Farjami, H. Yousefnia, Z. S. Seyedraoufi, Y. Shajari, Investigation of inhibitive effects of 2-mercaptobenzimidazole (2-MBI) and polyethyleneimine (PEI) on pitting corrosion of austenitic stainless steel, *J. Bio Tribocorros*, 6 (2020) 1.
- [16] D. R. Mosera, M. Preet, Singh, L. F. Kahn, K. E. Kurtis, Chloride-induced corrosion resistance of high-strength stainless steels in simulated alkaline and carbonated concrete pore solutions, *Corros. Sci.*, 57, (2012) 241
- [17] D. H. Shin, S. J. Kim, Corrosion characteristics of 316L stainless steel with chloride concentrations in cathode operating conditions of metallic bipolar plate for PEMFC, *Corros. Sci. Tech.*, 20, (2021) 435.
- [18] J. H. Lee, K. H. Jung, J. C. Park, S. J. Kim, Determination of optimum protection potential for cathodic protection of offshore wind-turbine-tower steel substructure by using potentiostatic method, *J. Mar. Eng. Technol.*, 41, (2017) 230.
- [19] F. A. Arash, M. Amir, A. Navid, Electrochemical behaviour of AISI 410 stainless steel at open circuit potential in acidic solutions, *Anal. Bioanal. Electrochem.*, 3 (2014) 284.
- [20] B. L. Mirjam, M. Crt, K. Tadeja, M. Bostijan, K. Janez, The effect of surface roughness

- on the corrosion properties of type AISI 304 stainless steel in diluted NaCl and urban rain solution, *J. Mater. Eng. Perform.*, 23 (2014) 1695–1702.
- [21] D. Gopi, D. Rajeswari, S. Ramya, M. Sekar, Pramod. R, Jishnu Dwivedi, L. Kavitha, R. Ramaseshan, Enhanced corrosion resistance of strontium hydroxyapatite coating on electron beam treated surgical grade stainless steel, *Appl Surf Sci*, 286 (2013) 83.
- [22] Z. U. Rahman, K. M. Deen, L. Cano, W. Haider, The effects of parametric changes in electropolishing process on surface properties of 316L stainless steel, *Appl. Surf. Sci.*, 410 (2017) 432.
- [23] W. Tian, N. Du, S. Li, S. Chen, Q. Wu, Metastable pitting corrosion of 304 stainless steel in 3.5% NaCl solution, *Corros. Sci.*, 85 (2014) 372–379.
- [24] H. K. Hwang, S. J. Kim, Effect of seawater temperature on the cyclic potentiodynamic polarization characteristics and microscopic analysis on damage behavior of super austenitic stainless steel, *Corros. Sci. Tech.*, 20 (2021) 412–425.
- [25] S. Esmailzadeha, M. Aliofkhaezraeia, H. Sarlakb, Interpretation of cyclic potentiodynamic polarization test results for study of corrosion behavior of metals: A review, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 54 (2018) 976.
- [26] R. Walter, M. B. Kannan, Repetitive nucleation of corrosion pits on stainless steel and the effects of surface roughness, *J. Electrochem. Soc.*, 148 (2001) B504–516.
- [27] D. H. Shin, S. J. Kim, Investigation on electrochemical characteristics of battery housing material for electric vehicles in solution simulating an acid rain environment with chloride concentrations, *Corros. Sci. Tech.*, 21 (2022) 147–157.