

## 순환동전위 분극실험을 이용한 스테인리스강의 그린데스용액에서 전기화학적 특성에 미치는 온도의 영향

황현규<sup>1</sup> · 김성종<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>목포해양대학교 대학원, 전라남도 목포시 해양대학로 91  
<sup>2</sup>목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대학로 91  
(2021년 9월 30일 접수, 2021년 10월 6일 수정, 2021년 10월 6일 채택)

### Effect of Temperature on Electrochemical Characteristics of Stainless Steel in Green Death Solution Using Cyclic Potentiodynamic Polarization Test

Hyun-Kyu Hwang<sup>1</sup> and Seong-Jong Kim<sup>2,†</sup>

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

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

(Received September 30, 2021; Revised October 06, 2021; Accepted October 06, 2021)

Since 2020, the International Maritime Organization (IMO) has updated regulations on the sulfur content to be less than 0.5% in exhaust gas emitted from ships. Accordingly, the exhaust gas post-treatment device for ships, which is SO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> reduction technology, was introduced. However, the exhaust gas post-treatment device is suffering corrosion because of the harsh corrosive environment formed by sulfate and chlorine oxide through the desulfurization process. In this investigation, cyclic potentiodynamic polarization (CPDP) experiment for UNS S31603 and UNS N08367 was performed in a green death solution that simulates the environment of a desulfurization device. The corrosion rate of UNS S31603 at the highest temperature was about 3 times higher than that of UNS N83067. Also, electron microscope scan revealed corrosion type UNS N83067 presents intergranular corrosion tendency. On the other hand, UNS S31603 was observed as general corrosion. The  $\alpha$  values of UNS N08367 at 30 °C and 60 °C were higher than those of UNS S31603, thus UNS N08367 is considered to have a higher local damage tendency. Whereas, since the  $\alpha$  value of UNS S31603 at 90 °C is larger than that of UNS N08367, UNS S31603 is considered to have a higher local damage trend.

**Keywords:** UNS S31603, UNS N08367, Green death solution, Temperature, Cyclic potentiodynamic polarization

### 1. 서론

선박 운항 중 저질 중유 연료 연소 시 발생하는 황산 화물과 질소산화물은 세계적으로 주목받고 있는 심각한 대기오염 물질이다 [1]. 이에 따라 국제해사기구 2020년부터 배출규제해역을 제외한 모든 해역에서 배기가스 내 황 함유량을 0.5% 이하로 규제를 강화하였다. 황 함유량이 적은 연료는 고가이기 때문에 상대적으로 저렴한 배기가스 후처리 장치 설치가 확산되고 있는 추세다 [2]. 배기가스 후처리 장치는 해수 또는 화학적으로 제

조된 세정수를 이용하여, 황 함유량이 높은 저가 연료를 사용할 수 있도록 하는 배기가스 처리 기술이 적용된 장치이다. 그러나 배기가스 후처리 장치에 사용되는 금속재료의 경우 탈황과정 중 발생하는 염화물, 황산화물에 의해 공식 및 틈부식과 같은 국부부식을 초래한다 [3]. 또한 국부부식은 장비의 운전·정지로 인한 건습의 반복과 배기가스에 의해 형성된 고온 환경에 의해 가속화된다. 따라서 배기가스 후처리 장치는 국부부식저항성이 우수한 재료를 선정해야한다.

슈퍼 오스테나이트 스테인리스강인 IN-748 (Fe-27%Ni-20%Cr-8.5Mo)은 1960년대 International nickel company에서 개발된 합금으로 국부부식에 대한 저항성을 향상시켜 해양환경용 와이어로프로 활용되었다 [4]. 이러한

<sup>†</sup>Corresponding author: [ksj@mmu.ac.kr](mailto:ksj@mmu.ac.kr)

황현규: 석사과정, 김성종: 교수

**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.
UNSN08367	24.62	20.6	6.44	0.015	0.27	0.72	0.017	0.001	0.53	0.232	Bal.

슈퍼 오스테나이트 스테인리스 강은 일반 오스테나이트 스테인리스강보다 고가이기 때문에 이를 완화시키기 위해 Mo, Cr 및 N 함량을 조절함으로써 최적 합금을 개발하여 사용 중이다 [5]. 그 예로 UNS S31254, UNS N08367, UNS N08926 등의 강들이 해수용 슈퍼 오스테나이트계 스테인리스강으로 개발되었다. 이 합금들은 Mo 함량을 6% 이하로, Cr과 Ni를 20~25%로 낮추고, 내식성 향상을 위해 질소를 약 0.2~0.3% 첨가하였다 [6]. 공식 저항성 등가지수(Pitting resistance equivalent number, PREN)는 내식성을 평가하는 여러 지수 중 공식에 대한 저항성을 평가하는 값으로, 스테인리스강에 첨가된 합금 원소 중 Cr, Mo 및 N 함량에 기인하여 산출되며, 이 값이 클수록 공식에 대한 저항성이 우수하다 [7].

다양한 부식 환경에서 순환동전위 분극실험을 통해, 일반 오스테나이트 스테인리스강인 UNS S31603과 다양한 슈퍼 오스테나이트계 스테인리스강을 비교하는 연구가 활발히 진행 중이다. S. Nagarajan 등은 천연해수에서 순환동전위 분극실험을 통해 UNS S31603과 UNS S34565의 공식에 대한 연구를 수행하였으며 [8], 그린데스솔루션에서 순환동전위 분극실험을 통해 UNS S31603과 UNS N08926의 부식저항성을 비교하는 연구를 수행하였다 [9]. A. Taheri 등의 연구는 용접된 UNS S31603과 UNS S32750에 대하여 순환동전위 분극실험을 통해 두 금속의 부식특성을 비교하였다 [10]. 이와 같이 다양한 부식 환경에서 UNS S31603과 슈퍼 오스테나이트계 스테인리스강에 대하여 순환동전위 분극실험을 통해 부동태 거동과 공식 저항성 연구는 수행되었으나, UNS S31603과 UNS N08367에 대하여 그린데스용액에서 온도 변수에 따라 두 금속을 비교하는 연구는 전무하다. 온도는 부동태 산화피막의 재부동태 거동과 부식속도에 영향을 미치는 인자로, 온도 상승에 따라 이온교환속도가 활발해지기 때문에 재료의 수명에 영향을 미친다. 또한 배기가스 후처리장치의 내부는 다양한 온도분포를 형성하기 때문에 온도 변수에 따른 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 UNS S31603과 UNS N08367에 대하여 그린데스솔루션에서 온도변수에 따른 순환동전위 분극실험을 수행하여, 각 조건에서의 전기화학적 거동과 손상 정도를 비교 분석하였다.

**Table 2. Chemical composition of green death solution**

Sulfuric acid (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	16.9 vol. %
Hydrochloric acid	0.35 vol. %
Distilled water	Bal. (total : 1000 ml)

## 2. 실험방법

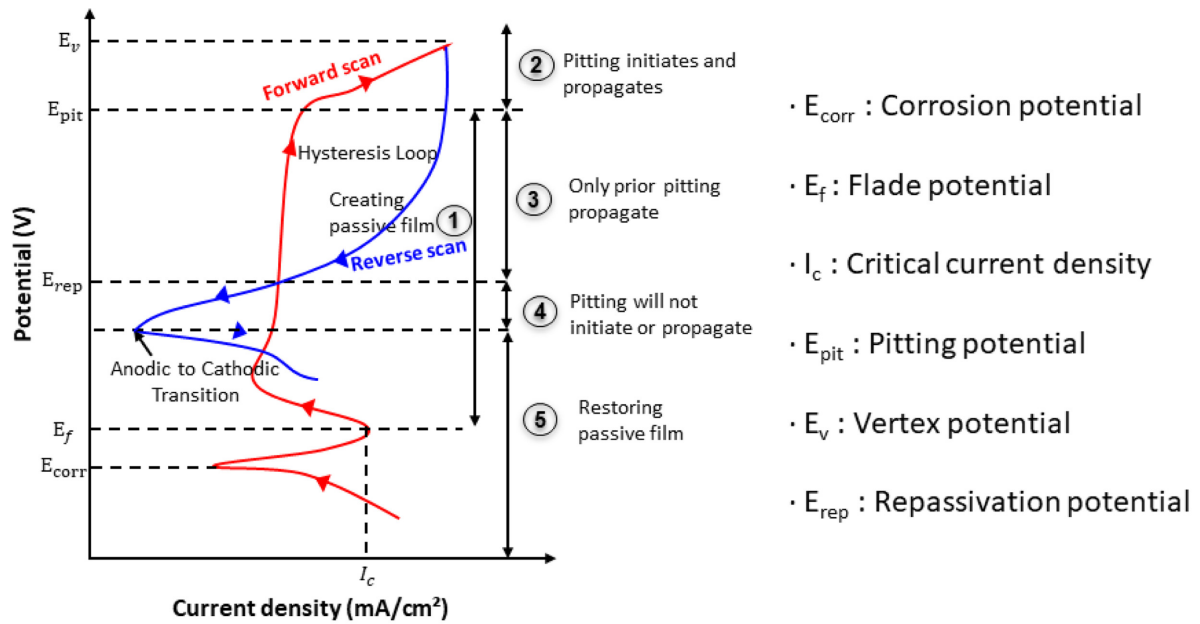
일반 오스테나이트 스테인리스강인 UNS S31603과 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강인 UNS N08367에 대하여 그린데스솔루션에서 온도변수에 따라 순환동전위 분극실험을 수행하였다.

Table 1은 본 연구에 사용된 UNS S31603과 UNS N08367의 화학조성을 나타낸 것이다. UNS S31603과 UNS N08367은 공식 저항성 등가지수(PREN)는 각각 23.6과 45.6으로 산출되며, 공식저항성 등가지수 산출식은 아래와 같다 [7].

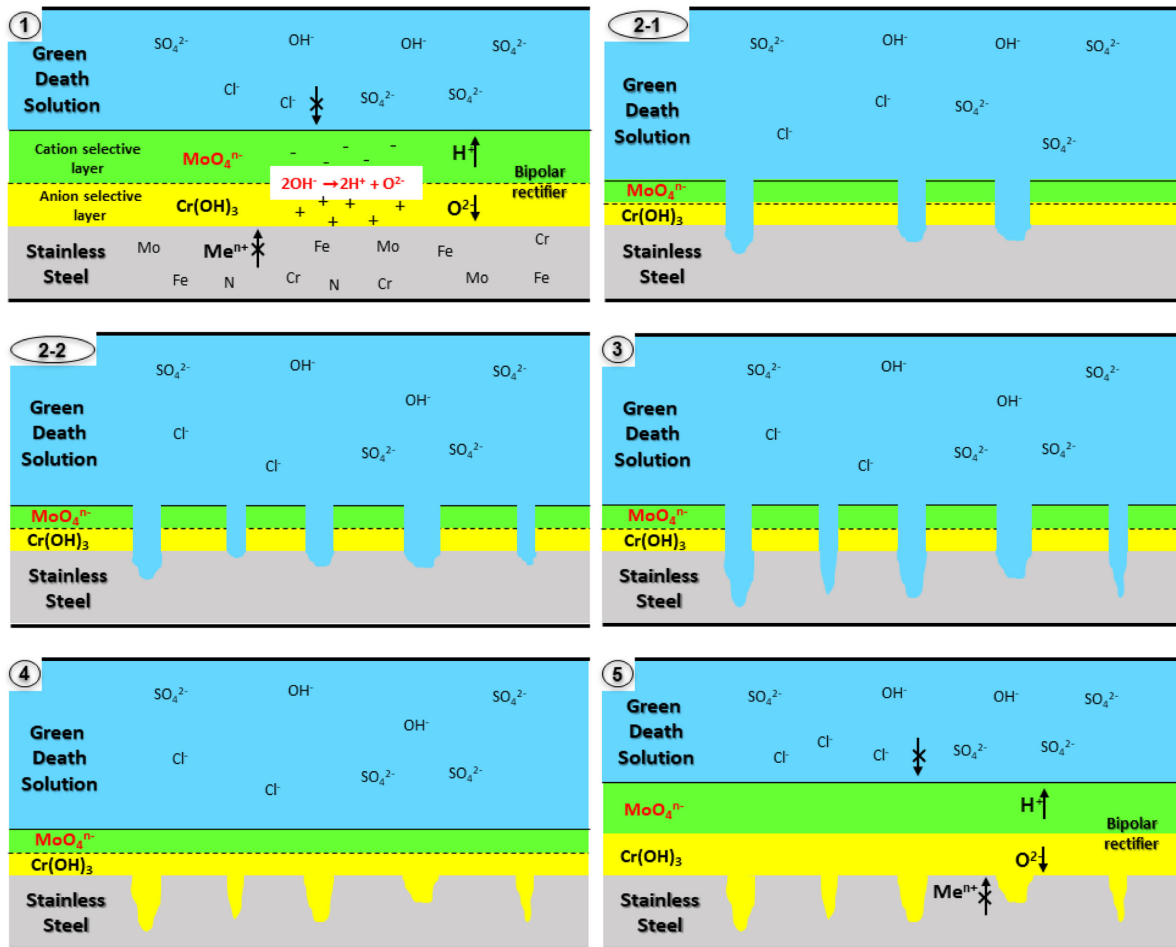
$$PREN = \%Cr + 3.3\%Mo + 16\%N \quad (1)$$

시험편은 PREN 값이 약 2배인 경우 전기화학적 특성을 비교하기 위해 선정하였다. 시험편은 냉각수가 공급되어 열변형을 최소화하는 미세절단기를 이용하여 10 mm × 10 mm 크기로 가공하였다. 가공된 시험편은 전도성 구리 리드선을 연결한 후 고내식·고온용 예폭시로 마운팅하였다. 노출된 표면은 에머리페이퍼(Emery paper) # 2000까지 단계적으로 연마하여 1 cm<sup>2</sup>의 유효면적을 노출시켰다. 초음파 세척을 통해 가공 과정에서 발생한 이물질을 제거한 후 아세톤과 증류수로 세척하였다. 시험편은 건조기에서 완전 건조시킨 후 시험에 사용되었다. 전기화학셀 구성요소는 기준전극은 은/염화은(Ag/AgCl) 전극, 대응전극은 백금전극을 사용하였다.

Table 2는 그린데스솔루션의 성분을 나타낸 것이다. 그린데스솔루션은 탈황장치 환경을 모사한 대표적인 용액으로 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>과 HCl이 혼합된 것이다 [11]. 온도 조건은 사각 습식 스크리버 내부구조의 온도 분포를 참조하여 30, 60 및 90 °C에서 수행하였다 [12]. 전기화학실험은 재부동태 거동을 통해 재료의 국부부식 저항성을 평가할 수 있는 순환동전위 분극실험을 수행하였다. 실험



(a) Schematic diagram [15]



(b) Schematic corrosion mechanism

Fig. 1. Schematic diagram and corrosion mechanism of CPDP curves for stainless steel with Mo and Cr

전 안정화 시간으로 1,800초 동안 침지 후, 분극전위는 개로전위 기준  $-0.25\text{ V}$ 에서 순방향으로 시작하여  $1.6\text{ V}$ 에 도달된 후 역방향으로 개로전위까지  $0.5\text{ mV/s}$ 의 주사속도로 수행하였다. 순환동전위 분극실험 후 타펠외삽법(Tafel extrapolation method)을 이용하여 부식전류밀도를 산출하였다. 전기화학적 실험 후 손상 비율은 Image J 소프트웨어를 통해 산출하였으며, 3D 분석현미경 및 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM)을 이용하여 표면을 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

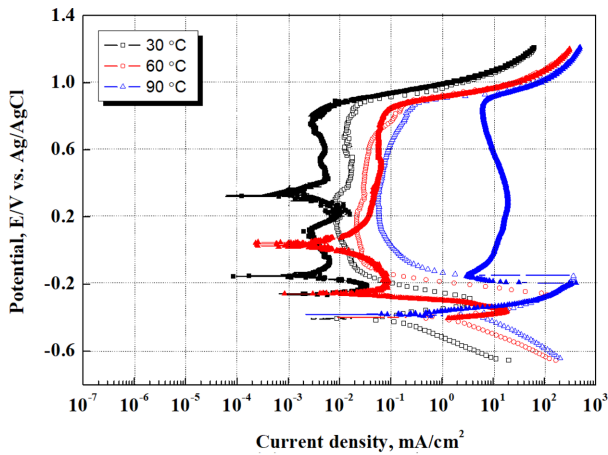
Fig. 1은 Mo와 Cr이 포함된 스테인리스강에 대하여 순환동전위 분극실험에 대한 그래프 모식도와 그에 따른 부식 메커니즘에 관한 모식도를 나타낸 것이다. Anodic to cathodic transition은 양극 반응에서 음극 반응으로 전이되는 현상을 뜻한다. Anodic to cathodic transition 전위 이후에 손상된 부동태 피막은 회복된다. 이에 기인하여 Anodic to cathodic transition와  $E_{\text{corr}}$ 의 차이 값은 부동태 피막의 지속성과 부동태 층의 안정화 정도를 판단하는데 사용된다 [13,14]. 이를 바탕으로 순환동전위 분극실험 곡선의 거동은 아래와 같다.

정방향(Forward scan)에서, 활성화 영역( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^-$ )을 지나 플레이트 전위에서 부동태 피막이 생기는 부동태 영역이 시작된다. ① ( $E_{\text{f,for}} \rightarrow E_{\text{pit,for}}$ )은 부동태 피막이 생성되어 부식이 억제되는 구간이다. 전위가 인가되면서 공식전위에 도달하며 공식전위는 전류밀도가 급격히 상승하는 현상이 발생하는 시작점이다. 전류밀도가 급격히 상승되는 현상은 2가지 의미로 해석된다 [15]. 첫 번째는 부동태피막이 불안정하여 부동태피막 일부결함으로 인해 부동태영역에서 안정적이지 않다. 이에 따라 표면 결함이 활성화되어 전류 밀도가 증가한다. 두 번째는 부식을 유발시키는 이온이 있을 때 부동태 피막이 파괴되어 공식 부식이 발생하기 때문이다. 부식을 발생시키는 이온이 없는 경우 부동태피막은 산소 발생 전위이상에서 안정적이다. ② ( $E_{\text{pit,for}} \rightarrow E_{\text{pit,rev}}$ )은 국부 부식이 시작되고 새로운 국부부식의 핵을 생성하여 전파되는 영역이다. ③ ( $E_{\text{pit,rev}} \rightarrow E_{\text{rep,rev}}$ )는 생성된 국부부식의 새로운 핵은 생성되지 않고, 이전 형성된 국부부식이 계속 성장되는 영역이다. 이에 기인하여 이 구간의 면적은 히스테리시스 루프(Hysteresis loop)의 면적으로 국부부식으로 인해 손상되는 정도를 의미한다. ④ ( $E_{\text{rep,rev}} - E_{\text{anodic to cathodic transition}}$ )는 국부부식이 더 이상 진행되지 않는 영역이다. ⑤ ( $E_{\text{anodic to cathodic transition}}$ )는 양극 반응이 음극 반응으로 바뀌면서 부동태 피막이 회복되는 영역이다. Fig. 1(b)의 ①에서 부동태 피막의 모식도는 Mo와

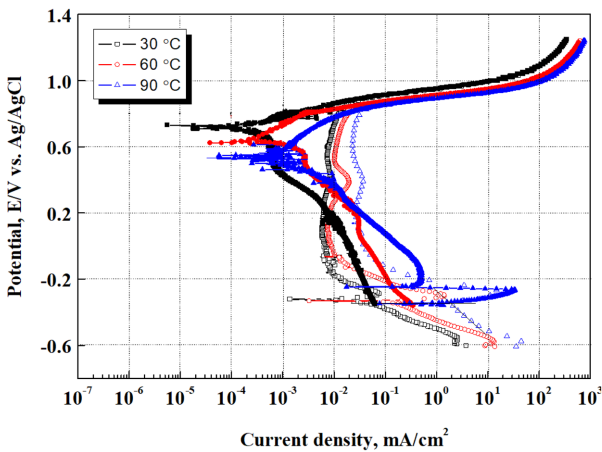
Cr이 포함된 스테인리스강의 양극 모델 가설을 적용하여 나타낸 것이다. 2상 멤브레인은 Mo와 Cr이 포함된 스테인리스 강의 부동태 산화 피막에서 형성되며, 이는 내식성을 향상시키는 기구이다 [16]. 2상 멤브레인의 구성은 양이온 선택층과 음이온 선택층으로 되어 있으며, 이는 Mo와 Cr에 의해 형성된다. Mo가 첨가된 스테인리스강의 금속표면에서 그린데스솔루션에 포함된 황산과 염산의 화학적 반응에 의해  $\text{CrO}_4^{2-}$ 와  $\text{MoO}_4^{2-}$ 의 음이온을 형성한다 [16].  $\text{MoO}_4^{2-}$ 은 양이온 선택층을 형성함으로써 음이온인 황산이온, 염소이온 및 수산화 이온 침입을 억제하여 스테인리스강의 산화반응속도를 늦춘다. 수산화크로뮴( $\text{Cr}(\text{OH})_3$ )과 수산화이온( $\text{OH}^-$ )은 탈수소화 반응에 의해 분해되어 산소이온과 수소이온을 형성시킨다. 형성된 수소이온은 양이온 선택층을 통해 용액으로 배출되어 금속표면의 산도는 감소된다. 산소이온은 음이온 선택층을 통해 금속 표면으로 이동하여 금속표면의 크롬(Cr)과 결합함으로써 크롬산화층( $\text{Cr}(\text{OH})_3$ )을 형성하여 부동태 피막은 안정화된다 [16,17]. 질소는 수산화이온과 화학적 반응을 통해 질산염을 생성시킨다. 생성된 질산염은 부동태 피막 외층에 음이온 선택층으로 형성되며, 이는  $\text{MoO}_4^{2-}$ 와 동일한 메커니즘으로 부식전류밀도를 감소시킨다 [17,18]. 따라서 부동태 피막층의 안정화는 Mo, Cr 및 N의 원소에 기인한다.

Fig. 2a와 b는 각각 UNS S31603과 UNS N08367에 대하여 그린데스 솔루션에서 온도변수에 따라 수행한 순환동전위 분극곡선을 나타낸 것이다. 이를 순환동전위 분극곡선 모식도와 비교하여 설명하면 다음과 같이 해석된다. 전위가 순방향으로 진행될 때, UNS S31603과 UNS N08367 모두 임계전류밀도 발생 후, 전류밀도가 저하되는 부동태 특성을 나타냈다. UNS S31603과 UNS N08367 모두 부동태 구간을 나타낸 후, 약  $0.85\text{ V}$ 에서 전류밀도가 급격히 상승하는 과부동태 구간이 관찰되었다. 두 금속의 공식전위는 비슷하기 때문에 그린데스 솔루션 용액에서 유사한 공식 저항성을 갖는 것으로 사료된다. 따라서 공식 전위로 내식성을 비교하는 것은 무의미하다. 그러나 전위가 역방향 진행될 때, UNS S31603과 UNS N08367의 곡선 형태는 다르게 관찰된다. 볼텍스 전위 통과 후 분극곡선은 부동태 피막의 지속성과 안정화에 기인되기 때문에 두 시험편의 형태는 다르게 관찰된 것으로 사료된다. UNS N08367은 모든 온도 조건에서  $E_{\text{pit,for}} \rightarrow E_v$ 의 곡선과  $E_v \rightarrow E_{\text{rep}}$ 의 곡선이 동일하여 전면부식이 발생된다 [15]. 또한 이는 히스테리시스 루프를 형성하지 않기 때문에 전위가 역방향으로 진행될 때, 국부부식이 중단됨을 알 수 있다. 국부부식이 중단된 후 양극 반응에서 음극반응으로 전이되는 현상이 관찰되어 부동태 피막은 회복된다. UNS





(a) UNS S31603



(b) UNS N08367

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

S31603의 역방향 분극곡선의 특성은 다음과 같다. 30 °C에서 UNS N08367과 같이 히스테리시스 루프는 관찰되지 않는다. 반면, 60 °C에서 약간의 히스테리시스 루프가 발생했으며, 90 °C에서 전형적인 역방향의 전류밀도가 순방향보다 증가된 히스테리시스 곡선을 나타내어 뚜렷한 히스테리시스 루프가 관찰되었다. 따라서 모든 온도 조건 중 90 °C에서 UNS S31603의 히스테리시스 루프 면적이 가장 넓게 관찰되므로 국부적인 손상이 가장 많이 진행된 것으로 사료된다. 이는 부동태 피막의 지속성과 안정성이 현저히 저하한 것으로 여겨진다.

모든 조건에서 UNS S31603과 UNS N08367의 부식 전위( $E_{corr}$ ) 값의 평균은 각각 약 -0.4와 -0.32 V이다. 일반적으로 귀한 부식전위는 높은 부식 저항성과 화학적으로 더 불활성을 의미한다 [17]. 이는 Mo, Cr, 및 N의 함량이 높기 때문에, UNS N08367의 부식전위 값이 귀한 영역으로 이동한 것으로 사료된다.

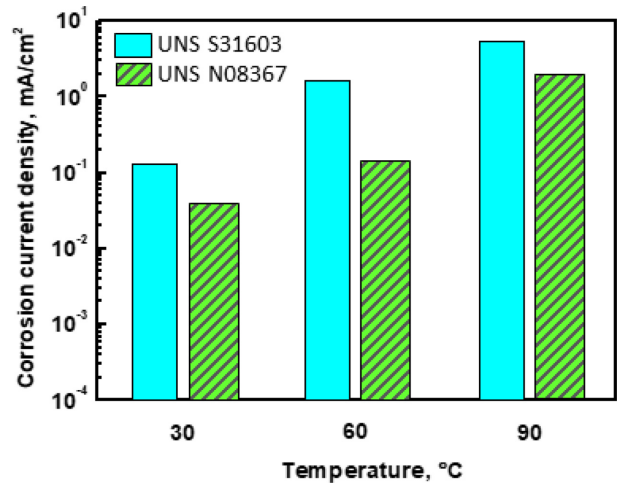


Fig. 3. Comparison of corrosion current density by Tafel analysis after CPDP experiment for UNS S31603 and UNS N08367 in green death solution

Fig. 3은 그린데스솔루션에서 순환동전위 분극실험 후 타펠외삽법에 의해 산출된 부식전류밀도 값을 그래프로 나타낸 것이다. 30 °C, 60 °C 및 90 °C에서 UNS S31603의 부식전류밀도 값은 각각 0.13, 1.61 및 5.48 mA/cm<sup>2</sup>을 나타낸 반면 UNS N08367의 부식전류밀도 값은 각각  $0.36 \times 10^{-1}$ , 0.13 및 1.95 mA/cm<sup>2</sup>으로 산출되었다. 두 오스테나이트 스테인리스강의 부식전류밀도 값은 온도 상승에 따라 활성용해반응이 진전하면서 증가하는 경향을 나타냈다. 실험용액의 온도 변화에 따라 재료와 액체의 특성 및 용액 내 용존산소량 등도 다양한 거동을 보인다. 따라서 부식속도의 영향을 온도의 영향만으로 단정지어 설명할 수는 없다. 그러나 다공성의 수산화 제 2철( $Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$ )의 반응은 온도가 높을수록 촉진되기 때문에 부식속도는 증가하게 된다 [19]. 또한 염소이온, 수산화 이온 및 산소 이온 등은 온도가 높아짐에 따라 금속표면에 흡착능이 향상되어 금속이온의 수화를 촉진시킨다 [20]. 그리고 온도 상승에 따라 금속 표면의 점도가 감소하기 때문에 확산계수가 증가하여 부식이 촉진된다. UNS N08367의 부식전류밀도는 전체적으로 UNS S31603보다 낮은 값이 관찰되었다. 특히 온도 변수 중 60 °C에서 가장 높은 차이 값을 나타냈으며, UNS S31603의 부식전류밀도 값은 UNS N08367보다 무려 12배 높은 값을 나타내었다. UNS N08367의 부식전류밀도가 UNS S31603보다 현저히 낮은 원인은 함유된 합금원소의 함량에 기인한 것으로 여겨진다. 이 합금원소는 부동태 산화피막에 영향을 주는 원소인 Mo, N, Cr 및 Cu로 사료되며, 함량이 증가될수록 부동태 산화피막의 형성능과 안정성이 우수해진다.

Fig. 4는 양극에서 음극으로 변화되는 전위와 부식전

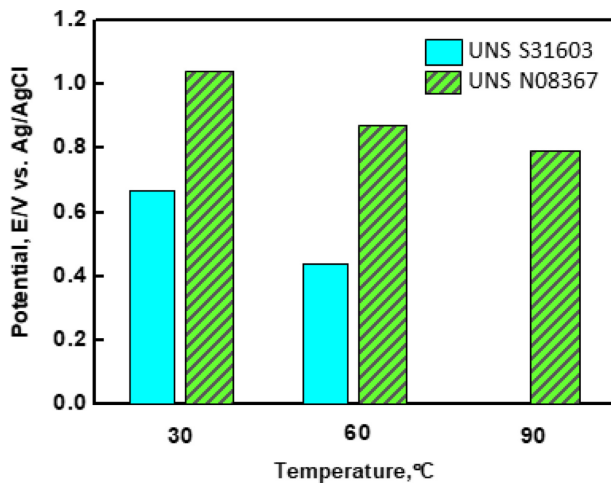
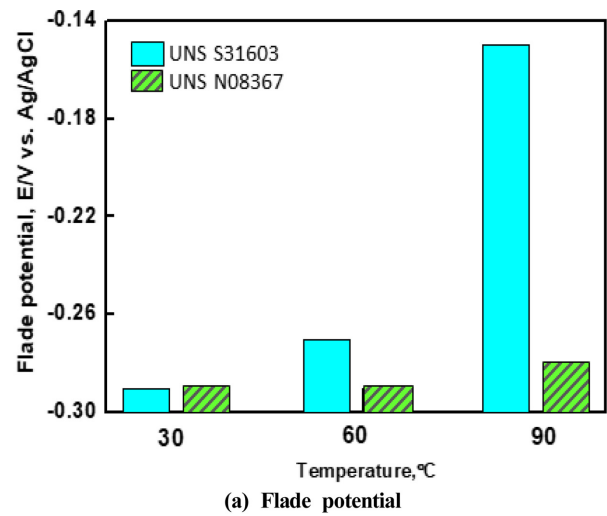


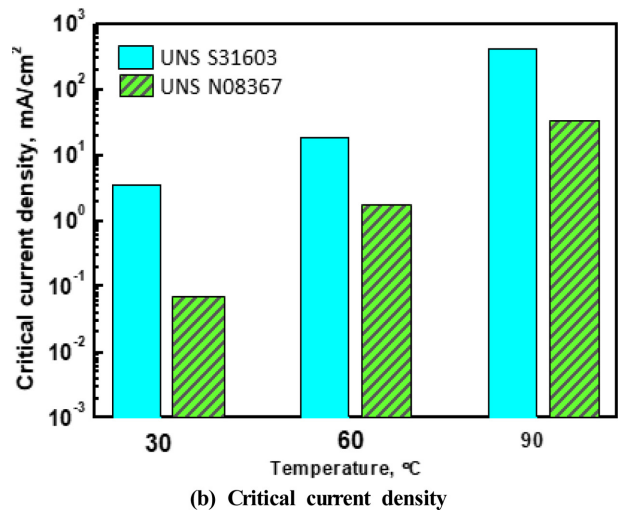
Fig. 4. Difference between reverse scan, anodic to cathodic transition potential and corrosion potential after CPDP experiment for UNS S31603 and UNS N08367 in green death solution

위의 차이 값을 나타낸 것이다. 역방향 곡선에서, 양극에서 음극으로 전이되는 전위는 활성태-부동태 전이 전위(Reverse scan, anodic to cathodic transition)라고 칭한다 [15]. 양극에서 음극으로 바뀌는 전이는 부식전위보다 귀한 방향에서 발생하며, 이 전위에서 손상된 부동태 산화피막이 회복된다. 활성태-부동태 전이 전위는 부동태 피막 생성에 민감한 금속이거나 공식에 민감하지 않는 금속에서 나타나는 현상이다. 이 차이 값을 바탕으로 부동태 피막의 지속성을 결정하는데 사용되며, 부동태층(Passive layer)의 안정성을 평가할 수 있다 [15]. UNS N08367에서 이와 같이 전이되는 전위가  $E_{cor}$ 보다 더 귀한 값을 나타냈다. 이는 부식되는 영역의 전위(양극)가 부식되지 않는 영역의 전위(음극)보다 더 귀한 값을 갖게 된다. 양극 반응이 음극 반응으로 바뀌면서 음극 영역으로 작용하기 때문에 부동태 피막은 회복된다. UNS N08367에서 차이 값은 30, 60 및 90°C에서 각각 1.04, 0.87 및 0.79 V이다. UNS S31603의 차이 값은 30과 60°C에서 각각 0.67과 0.44 V이며, 90°C에서 역방향시 양극에서 음극으로 바뀌는 현상이 관찰되지 않았다. 이는 가장 가혹한 부식조건에서 UNS S31603의 부동태 지속성이 현저히 저하함을 알 수 있다. 모든 조건 중 30°C에서 UNS N08367의 차이 값이 가장 크게 나타났다. 따라서 30°C에서 부동태 피막의 안정성과 지속성이 가장 우수하여, 내식성이 가장 우수한 것으로 판단된다. 또한 UNS N08367과 UNS S31603의 차이 값을 비교하면, 60°C에서 가장 높은 격차가 발생하였다. 60°C에서 UNS N08367의 차이 값은 UNS S31603보다 약 2.5배 높다.

Fig. 5는 플레이드 전위(Flade potential)와 임계전류밀



(a) Flade potential



(b) Critical current density

Fig. 5. Comparison of flade potential and critical current density after CPDP experiment with temperature for UNS S31603 and UNS N08367 in green death solution

도(Critical current density)값을 나타낸 것이다. 플레이드 전위는 스테인리스강 부동태피막 고유의 안정성을 나타낸 값이다 [21]. 또한 플레이드 전위 값이 클수록 부동태피막은 불안정하거나 얇은 부동태 피막이 형성된다는 것을 의미한다. 두 금속의 플레이드 전위 값은 온도가 높아짐에 따라 증가한다. 이는 온도가 높을수록 부동태 피막의 본래의 특성은 불안정함을 나타낸다. 전체적으로 UNS N08367의 플레이드 전위 값이 UNS S31603보다 낮기 때문에 UNS N08367 부동태 피막 특성이 우수함을 의미한다. 이는 부동태 특성을 우수하게 하는 원소의 함량이 많기 때문으로 사료된다. 임계전류밀도는 분극곡선의 활성영역에서 가장 전류밀도가 높은 값을 의미하며, 실질적인 부식률과 관련이 있다 [22]. 임계전류밀도가 더 높을수록, 금속부식이 더 많이 발생함을 의



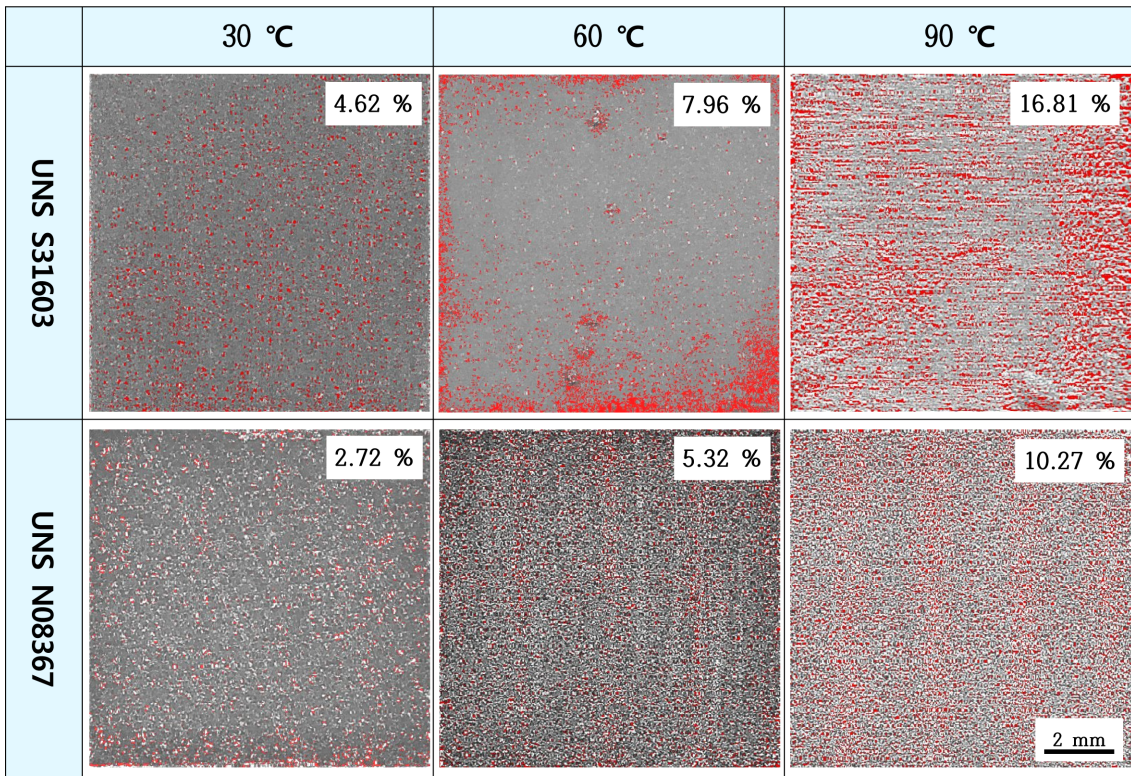


Fig. 6. Corrosion area ratio after CPDP experiment with temperature for UNS S31603 and UNS N08367 in green death solution

미한다 [22]. UNS N08367의 임계전류밀도 값은 30, 60 및 90 °C에서 각각 0.07, 1.45 및 33.85 mA/cm<sup>2</sup>이며, UNS S31603는 3.59, 18.57, 424.7 mA/cm<sup>2</sup>을 나타냈다. 가장 가혹한 부식조건에서 UNS S31603의 임계전류밀도 값은 UNS N08367보다 약 12.5배 높게 나타났다. 임계전류밀도 값은 Mo과 Cr의 함량이 더 많을수록 낮아진 것으로 판단된다. 이는 Mo와 Cr의 함량이 증가함에 따라 활성영역과 부동태 영역에서의 용해율이 감소되는 것으로 해석된다. E. A. Lizloves 등은 몰리브데넘의 함량 증가에 따라 부동태 피막 형성 반응이 향상되어, 임계부식전류밀도가 현저히 낮아지는 것으로 보고하였다 [23].

Fig. 6은 그린테스솔루션에서 다양한 온도 조건에 따라 순환동전위 분극시험 후 부식 비율을 나타낸 것이다. 두 스테인리스강의 부식비율은 온도 상승에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 두 시험편은 HCl과 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>에 의해 부식에 의한 손상이 전면에 걸쳐 관찰되었다. 전면에 걸쳐 관찰된 부식은 전면 부식으로 개로전위에서 플레이트 전위까지 전위가 상승함에 따라 발생한 손상으로 사료된다. Fig. 2의 순환동전위 분극 곡선에서 활성 영역 중 부식전위에서 플레이트 전위까지 금속 표면에서 Fe → Fe<sup>2+</sup> + 2e<sup>-</sup>의 양극 반응에 의해 균일부식이 지배적

로 발생하였다 [19]. 이 영역은 UNS N08367보다 UNS S31603에서 더 뚜렷이 관찰되었다. 또한 이 영역에서 UNS S31603의 전류밀도는 UNS N08367보다 전위가 상승함에 따라 높은 값을 나타냈다. 따라서 UNS S31603의 부식 손상 비율이 더 높게 나타난 것으로 판단된다. 이는 UNS N08367이 부동태 산화피막의 형성능 향상과 안정화되어 우수한 내식성 형성으로 전류밀도가 현저히 감소된 것으로 사료된다. 전체적인 경향은 UNS N08367의 부식비율이 UNS S31603보다 적기 때문에 UNS N08367의 공식에 대한 저항이 우수한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 그린테스솔루션에서 순환동전위 분극실험 후 표면을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 두 스테인리스 강 모두 Cl<sup>-</sup>과 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>에 의해 국부적인 손상이 분포됨을 알 수 있다. Cl<sup>-</sup>는 다른 할로젠원소(I, Br, F)보다 부동태피막 파괴에 상당한 영향을 미친다. 부동태피막 파괴는 3단계를 통해 이루어진다. 첫 단계는 할로겐화물 흡착되며, 두 번째는 부동태 피막의 두께가 감소되며, 마지막으로 할로겐화물의 침투를 통해 부동태 피막은 파괴된다 [24]. 첫 단계의 할로젠 원소의 흡착은 금속 표면 산소 이온의 빈 공간을 차지함으로써 이뤄진다. 이 단계에서 산소이온의 빈 공간이 팽창되어 상대적으로 큰 반지름을 가진 할로젠 이온을 수용할 수 있기 때



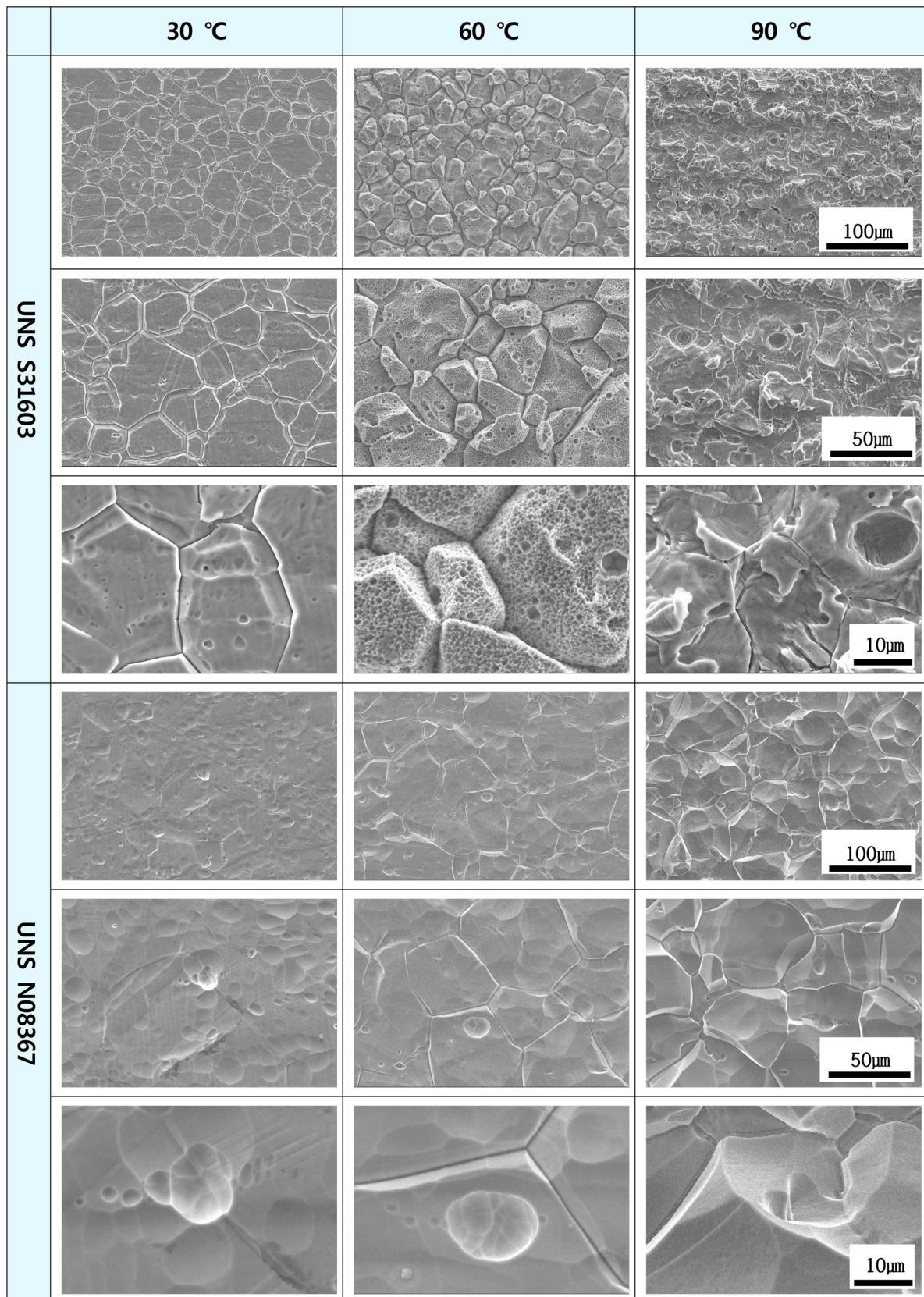


Fig. 7. Surface morphologies after CPDP experiment with temperature for UNS S31603 and UNS N08367 in green death solution

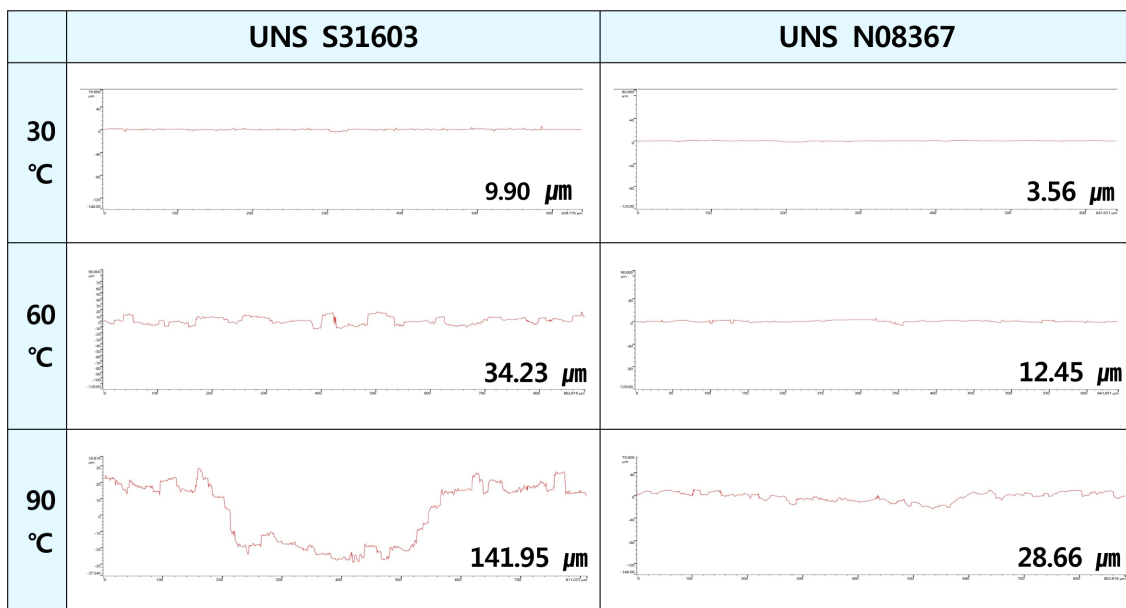
문에 할로젠 원소는 부동태 피막으로 침투한다. 이를 에너지 관점에서 보면, 각각의 과정을 위해 깎는 에너지를 고려해야 한다. 부동태 피막을 수화시키기 위해 필요한 염소이온의 깎는 에너지는 할로젠 원소 중 높은 절대 값을 갖고 있다. 따라서 Cl<sup>-</sup>이온의 화학 반응을 통해 방출되는 에너지가 크기 때문에 화학 반응이 연쇄 작용하여 부동태피막의 수화 작용이 매우 활발히 일어난다. 결국 부동태피막은 빠르게 파괴된다. Cl<sup>-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>에 의한 부동태 피막 파괴는 상대적으로 열역학적으로 에너지가 높은 입계에서 반응이 먼저 발생하여 국부적으로 진행된다. 이때 국부적으로 손상된 부동태 피막 내 금속이 노출되어 양극으로 그 주변의 부동태 피막은 음극으로 형성된다. 이와 같이 갈바니 부식에 의한 빠른 속도로 국부 부식이 진행된다. UNS S31603의 부식형태는 입계부식으로 관찰되었으며, 열역학적으로 에너지가 높은 입계를 따라 성장된 것으로 사료된다. 60 °C에서 부식형태는 상대적으로 에너지가 높은 입계를 따라 성장된 손상과 입내에 형성된 공식이 함께 관찰되었다. 입내에 형성된 공식은 결국 국부적으로 불안정한 부동태 피막이 파괴되어 발생한 것으로 사료된다. 90 °C에서 입계부식과 입내에 형성된 공식이 성장하여 심각한 손상을 나타낸다. 이는 마치 전면부식된 것으로 보이며 부분적으로 공식이 깊이 방향으로 크게 성장한 것이 관찰되었다. 반면, UNS N08367의 30 °C에서 입계부식보다 국부부식에 의한 공식 손상이 관찰되었다. 60 °C에서 상대적으로 열악한 입계를 따라 부식된 형태가 분명하게 관찰되며 입내에 발생한 공식도 성장하여 함께 관찰되었다. 90 °C에서 입내의 공식 손상과 입계 부식에 의한 국부부식이 뚜렷이 관찰되었다.

Fig. 8은 그린테슬루션에서 다양한 온도 조건에 따른 순환동전위 분극실험 후 표면을 최대손상깊이의 프로파일(a)과 비교그래프(b)을 나타낸 것이다. Fig. 8a의 값은 전체적으로 온도 상승에 따라 증가함을 알 수 있으며, 이는 온도 상승에 의해 염소 이온과 황산이온의 활발한 이동성 때문이다 [25]. 30 °C 온도 조건에서, UNS S31603과 UNS N08367의 최대 손상깊이는 각각 9.90과 3.56 μm이며, 60 °C 온도 조건에서 28.66과 12.45 μm, 90 °C 온도 조건에서 141.95와 34.23 μm를 나타냈다. Fig. 8b의 그래프를 보면, 전체적으로 UNS S31603보다 UNS N08367에서 최대손상깊이가 작게 관찰되었다. 두 조건에서 각각의 증가된 폭을 비교해보면, UNS N08367의 경우, 30 °C에서 60 °C의 상승폭은 8.89 μm이고, 60 °C에서 90 °C의 상승폭은 21.78 μm로, 온도가 상승할수록 최대 손상깊이의 상승폭도 증가한다. 반면, UNS S31603의 경우, 30 °C에서 60 °C의 상승폭은 18.76 μm이고, 60 °C에서 90 °C의 상승폭 113.29 μm이다. 두 재료 모두 온도가 상승할수록 최대 손상깊이의 상승폭도 증가하였

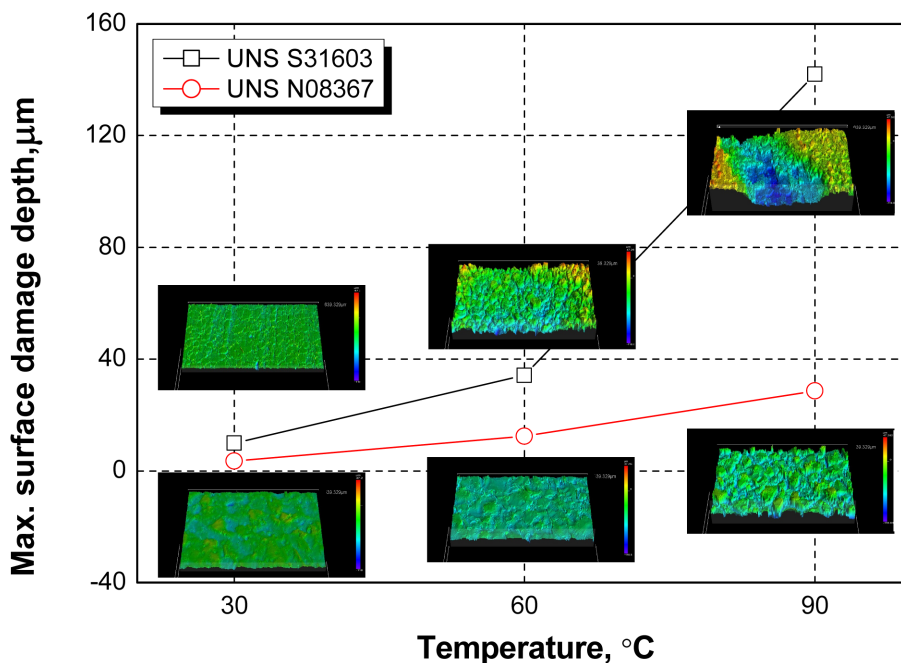
다. 그러나 UNS N08367의 상승 폭은 UNS S31603보다 현저히 낮은 값을 나타냈다. UNS N08367의 최대 손상깊이가 UNS S31603보다 낮은 이유는 2 가지로 사료된다. 첫번째는 Mo, Cr, N이온에 의한 재부동태로 인한 부동태피막의 안정화와 Cu이온에 의한 염소이온의 분산효과로 사료된다. Cu는 산소와 염소 이온과 반응하면, 국부적인 염소이온 농도를 감소시킨다. 국부 부식의 원인이 되는 염소이온의 양이 분산되어 금속 표면을 공격할 기회가 감소하기 때문에 부식 깊이는 더 감소하게 된다 [26]. 두번째는 UNS N08367의 Cr, Mo, N의 함량이 많기 때문에 2상 멤브레인의 음이온 선택층과 양이온 선택층으로 구성된 부동태 피막은 UNS S31603보다 안정화 된다. 이에 따라 O<sup>2-</sup>은 안정화된 음이온 선택층을 통해 금속 표면으로 이동하여 부동태 피막의 재부동태화가 진행되며, H<sup>+</sup>는 양이온 선택층에 의해 용액으로 이동하여 산도의 감소로 인하여 최대손상깊이의 폭이 감소된 것으로 사료된다.

Fig. 9는 손상된 표면의 거칠기와 깊이 히스토그램을 나타낸 것이다. 거칠기는 전기화학적 반응에 의해 금속이 부식되면서 산화반응에 의해 금속 표면은 산과 골이 생기게 된다 [27]. 따라서 부식이 많이 발생할수록 거칠기는 증가하게 된다. 두 스테인리스강 모두 온도 상승에 따라 부식이 빠르게 진행되어 거칠기는 증가하는 경향을 나타내었다. UNS N08367의 거칠기는 전체적으로 UNS S31603보다 작기 때문에 UNS N08367의 부식속도는 UNS S31603보다 적음을 알 수 있다. 히스토그램이란 변수(손상깊이)에 대해서 구간별 분포된 빈도수의 퍼센트를 시각화하여 나타낸 그래프이다. 변수인 X축은 깊이를, Y축은 분포된 빈도수의 퍼센트를 나타낸다. 표준편차를 통해 각 깊이의 분포경향을 알 수 있다. 표준편차란 산포, 즉 깊이가 평균을 중심으로 퍼져있는 정도를 나타내는 가장 일반적인 척도다. 따라서 본 실험에서 실험된 스테인리스강의 부식형태는 입계부식으로 나타나므로 표준편차가 클수록 깊이가 다양하게 분포되어 균일부식일 가능성이 높다는 의미이다. UNS S31603의 3D 표면은 입계부식과 입내의 공식이 동시에 진행되어 마치 균일부식 경향을 나타냈으므로 이는 다양한 깊이 분포도를 나타냈다. 반면에 UNS N08367의 3D 표면은 입계부식이 뚜렷이 관찰되어 국부부식 경향을 나타내는 좁은 깊이 분포도를 나타낸다.

Fig. 10은 그린테슬루션에서 다양한 온도 조건에서 순환동전위 분극실험 후 ASTM-G102에 의거하여 부식속도 계산 후 결과를 나타낸 것이다 [28]. UNS N08367의 부식속도는 전반적으로 UNS S31603보다 낮은 값을 나타냈으며, 가장 가혹한 조건인 90 °C에서 UNS S31603의 부식속도는 UNS N08367보다 약 3배 빠르다. 이는



(a) 3D Profile



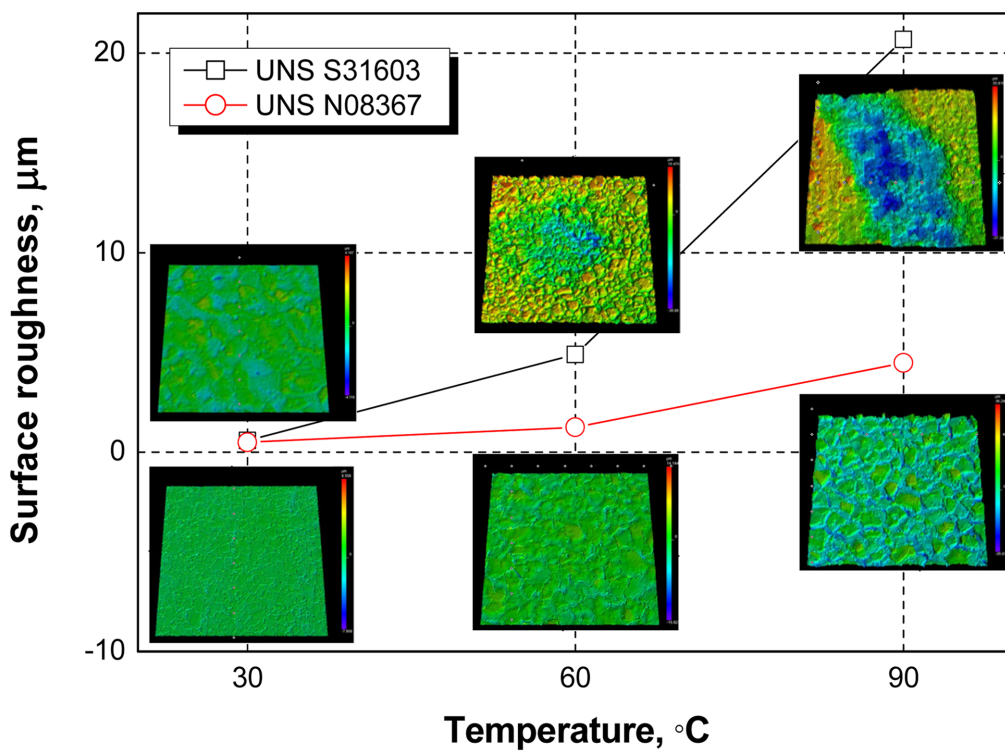
(b) Maximum surface damage depth

Fig. 8. Maximum surface damage depth after CPDP experiment with temperature for UNS S31603 and UNS N08367 in green death solution.

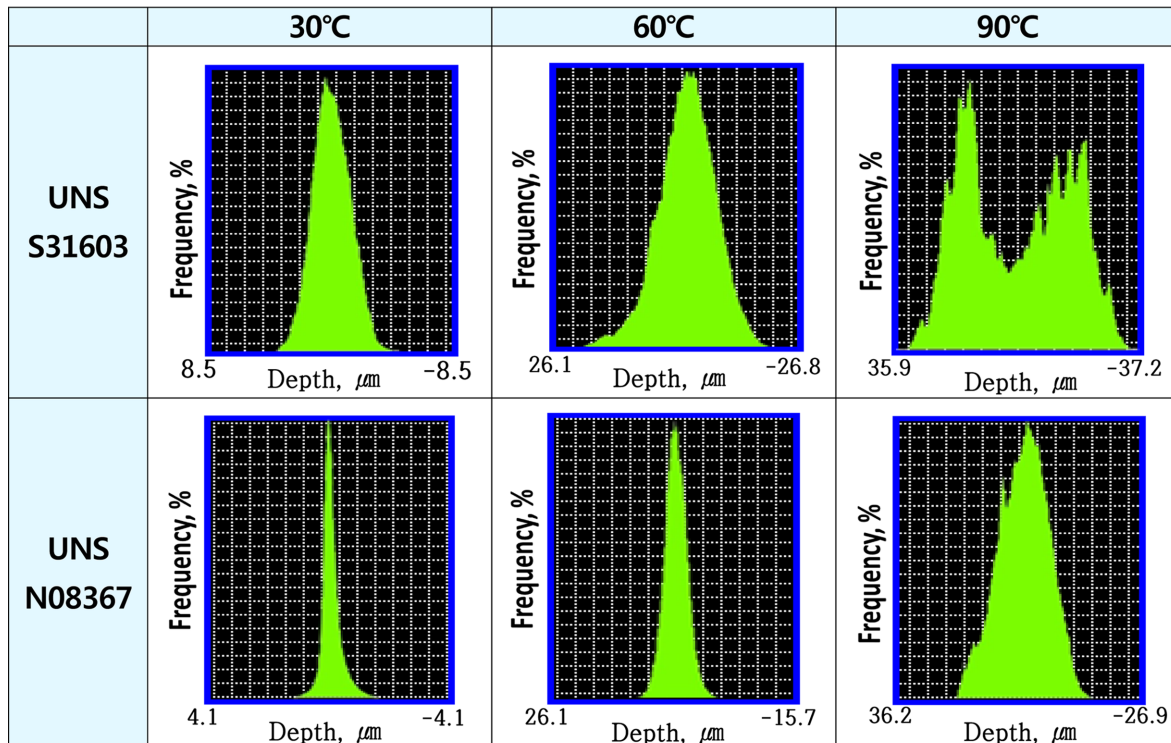
두 금속의 합금원소 함량에 따른 부동태 피막의 안정화 특성과 형성능의 차이로 인해 부식속도가 지연되는 것으로 사료된다. UNS S31603과 UNS N08367의 부식속도 차이 값은 30, 60 및 90 °C에서 각각 약 0.98, 15.70 및 37.77 mm/yr로, 온도가 상승할수록 두 시편의 부식

속도 차이도 증가됨을 나타낸다. 두 금속 재료 모두 온도가 상승할수록 열역학적으로 에너지가 증가하여 화학반응이 활발하게 진행되었다. 이로 인해 부식손상이 증가하였으나, UNS N08367의 부식속도는 부동태 산화피막의 지속성과 형성능이 우수하여 UNS S31603보다 지





(a) Surface roughness



(b) Depth histogram

Fig. 9. 3D analysis and depth histogram of surface roughness after CPDP experiment with temperature for UNS S31603 and UNS N08367 in green death solution

연된 것으로 판단된다.

장 등은 캐비테이션-침식 실험 후 최대손상깊이로 계산된 부식률과 무게감소량으로 계산된 부식률을 비교하여 둘 사이의 관계를 나타내었으며, 이 관계식은 아래와 같다 [29].

$$\alpha = \frac{\text{최대손상깊이의 부식률(국부부식)}}{\text{무게감소량의 부식률(전면부식)}} \quad (2)$$

식 (2)는 최대 손상 깊이로 계산된 부식률은 무게 감소량으로 계산된 부식률 보다  $\alpha$ 배 만큼 높다는 의미다.

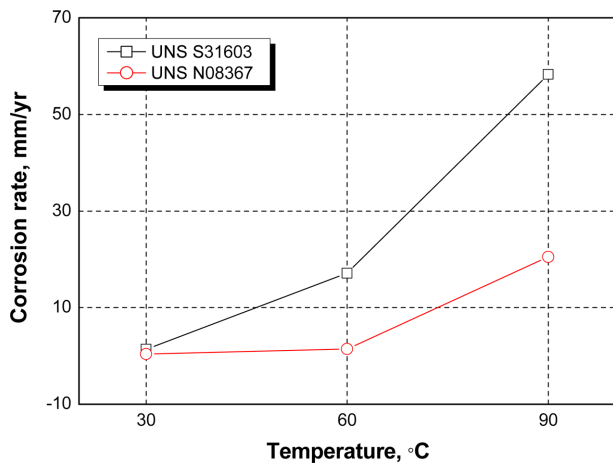


Fig. 10. Corrosion rate after CPDP experiment with temperature for UNS S31603 and UNS N08367 in green death solution

이에 기인하여 무게 감소로 계산된 부식률(전면부식)을 부식전류밀도로 계산된 부식률로 대체하여 각 시편의 국부 부식 정도를 비교하였다.

Table 3은 그린데스솔루션에서 다양한 온도 조건에서의 순환동전위 실험 후 측정된 최대손상깊이와 부식전류밀도로 각각 부식률(mm/yr)을 산출하였으며, 이 두 값을 이용해  $\alpha$  값을 산출한 과정을 나타낸 것이다. UNS S31603의 경우 30, 60 및 90°C의 경우, 각각 0.44, 0.12 및 0.15를 나타냈다. 즉, 최대손상깊이를 통해 얻은 부식률이 부식전류밀도를 통해 얻은 부식률보다 각각 0.44, 0.12 및 0.15배 높다는 의미다. UNS N08367의 경우 30,

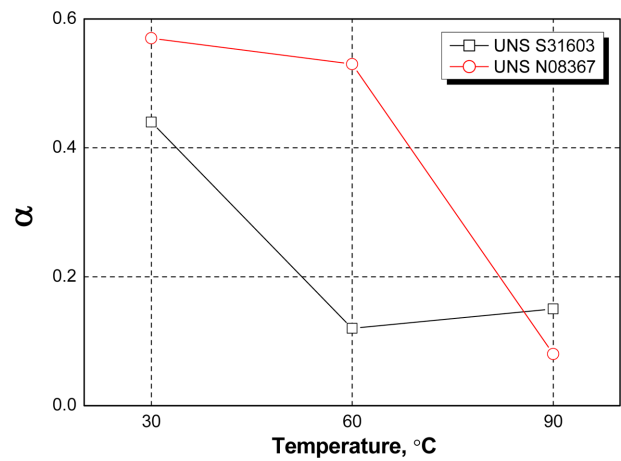


Fig. 11. Alpha(α) value after CPDP experiment with temperature for UNS S31603, UNS N08367 in green death solution

Table 3. Alpha(α) value calculation process after CPDP experiment with temperature for UNS S31603, UNS N08367 in green death solution

	E.W (1/N <sub>EQ</sub> )	D (g/cm <sup>3</sup> )	Temperature (°C)	I <sub>cor</sub> (μA/cm <sup>2</sup> )	MPY	mm/Year
UNS S31603	25.73281	7.99	30	128	53	1.36
			60	1610	674	17.12
			90	5480	2294	58.27
UNS N08367	25.66358	8.06	30	36	14	0.38
			60	135	55	1.42
			90	1950	807	20.50
	Temperature (°C)	Corroded depth (μm)	mm/Year	α		
UNS S31603	30	9.90	0.60	0.44		
	60	34.23	2.07	0.12		
	90	141.95	8.57	0.15		
UNS N08367	30	3.56	0.22	0.58		
	60	12.45	0.75	0.53		
	90	28.66	1.73	0.08		



60 및 90 °C의 경우, 각각 0.58, 0.53 및 0.08을 나타냈다.

Fig. 11은 산출된  $\alpha$  값을 그래프로 나타낸 것이다. 30 °C와 60 °C에서 UNS N08367이 UNS S31603보다  $\alpha$  값이 크므로 국부 손상 비율이 더 높다. 그러나, 90 °C에서 UNS S31603의  $\alpha$  값은 UNS N08367보다 크다. 이는 Fig. 7의 30 °C에서 UNS S31603은 입계부식이 뚜렷하게 나타나지만, 입내에 발생된 공식이 함께 형성됨으로써 전체적으로 손상된 것처럼 나타났다. UNS N08367은 상대적으로 입계부식 손상보다 공식에 의한 손상이 관찰된 것으로 사료된다. 이는 UNS N08367의 부동태 피막은 형성능과 안정화가 우수하기 때문에 공식이 발생하는 반면, UNS S31603은 부동태 피막이 상대적으로 불안정하기 때문에 입계 부식과 입내의 공식이 함께 발생된 것으로 판단된다. 60 °C에서 두 재료 모두 입계 부식과 입내에 발생된 공식이 함께 형성됨으로써 전체적으로 손상된 것처럼 관찰되어  $\alpha$  값은 감소하였다. 이는 UNS N08367도 온도가 상승함에 따라 부동태 피막이 상대적으로 불안정하여 입내의 공식과 입계부식이 함께 발생된 것으로 사료된다. 90 °C에서 UNS N08367의 손상은 60 °C에서 손상이 더 뚜렷하게 관찰되어  $\alpha$  값은 감소하였다. 반면 UNS S31603의 손상은 90 °C에서 너무 많이 진전되어 전면부식된 것으로 보이며 부분적으로 공식이 깊이 방향으로 크게 성장된 것이 관찰된다. 따라서 UNS S31603의 공식이 깊이 방향으로 크게 성장하여,  $\alpha$  값은 증가하였다. 또한 순환동전위 분극곡선 Fig. 2a의 90 °C에서 UNS S31603은 순방향의 전류 밀도가 역방향보다 감소된 히스테리시스 곡선을 나타냈다. 이와 같은 히스테리시스 곡선의 루프가 닫히면, 루프의 면적만큼 공식이 성장했다는 것을 의미한다. 따라서 UNS N08367은 이러한 루프가 관찰되지 않았으며, 30 °C와 60 °C에서 UNS S31603도 뚜렷하게 관찰되지 않았다. 90 °C에서 UNS S31603은 루프가 닫혀있는 면적만큼 공식이 성장하여, 국부적인 손상 경향이 증가한 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

그린데스솔루션에서 온도 조건에 따른 순환동전위 분극실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

Active-passive transition potential과 부식전위 차를 통해 그 값이 클수록 부동태 피막의 안정성과 지속성이 우수하다. 모든 조건에서 UNS N08367의 값이 UNS S31603 보다 크기 때문에 Mo, Cr, N, Cu 이온의 함량이 높아 우수한 내식성을 나타낸 것으로 사료된다.

두 시편 모두 온도 상승에 열역학적으로 에너지가 높아짐에 따라 염소 이온과 황산이온의 화학반응이 활발

해져 부식속도는 증가하였으나 가장 가혹한 부식조건에서 UNS S31603의 부식속도는 UNS N08367보다 3배 정도 크게 나타났다.

30 °C와 60 °C에서 UNS N08367이 UNS S31603보다  $\alpha$  값이 크므로 국부부식에 의한 손상이 큰 것으로 판단된다. 이는 UNS S31603은 입내에 발생한 공식과 입계 부식이 함께 관찰된 반면, UNS N08367은 공식에 의한 국부적인 손상을 나타냈기 때문으로 판단된다. 그러나 90 °C에서 UNS S31603이 UNS N08367보다  $\alpha$  값이 크므로 국부부식에 의한 손상이 큰 것으로 판단된다. 이는 90 °C에서 재부동태 전위가 너무 늦게 생성되어, 국부적인 손상 경향이 증가한 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

This research was a part of the project titled 'Demonstration of aftertreatment systems of Ship's air pollutant (NOx/SOx/PM) and establishment of their certification system', funded by the Ministry of Oceans and Fisheries, Korea.

#### References

1. H. K Eom, B. H. Pack, S. K Jeong, and S. S Kim, Trend and Prospect of Scrubber Technology for Regulatory on Sulfur Content in Marine Fuel Oil, *KIC News*, **5**, 22 (2019). Doi: <https://papersearch.net/thesis/article.asp?key=3708153>
2. K. J. Reynolds, *Exhaust Gas Cleaning Systems Selection Guide*, Ship Operations Cooperative Program, p. 3, The Glosten Associates, Washington DC (2011). Doi: <https://www.scribd.com/document/120034262/Exhaust-Gas-Cleaning-Systems-Guide>
3. J. H Ha, C. H Jeon and Y. C Kwon, A Study on the Emission Characteristics for Blended Power Bio-Fuel Oil, *Transaction of the Korean hydrogen and new energy society*, **5**, 26 (2015). Doi: <http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2015.26.5.484>
4. S. D. See, J. M. Lee, C. Y. Kang, J. H. Kim and D. H. Lee, Effect of Grain Size on Corrosion Resistance and High Temperature Oxidation Behavior of 22Cr-12Ni-5W Super Austenitic Stainless Steels, *Journal of Power System Engineering*, **14**, 5 (2004). Doi: <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01026180>
5. K. K. Baek, H.J Sung, I. P Hong, C. S Im and D. K. Kim, Evaluation of Pitting Corrosion Resistance of High-Alloyed Stainless Steel Welds for FGD Plants in Korea, *NACE CORROSION*, p. 98474 (1998). Doi: <https://onepetro.org/NACE->

- CORR/proceedings-abstract/CORR98/All-CORR98/NACE-98474/127908
6. J. R. Davis, *ASM specialty handbook on stainless steel*, ASM international, 1, p. 378 (1994), Doi: [https://www.asminternational.org/home/-/journal\\_content/56/10192/06398G/PUBLICATION](https://www.asminternational.org/home/-/journal_content/56/10192/06398G/PUBLICATION)
  7. K. H. Jung, A thesis for a doctorate, pp. 10 - 11, Mokpo National Maritime University (2020). [http://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p\\_mat\\_type=be54d9b8bc7cdb09&control\\_no=65083188ad4bfa24ffe0bdc3ef48d419](http://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p_mat_type=be54d9b8bc7cdb09&control_no=65083188ad4bfa24ffe0bdc3ef48d419)
  8. S. Nagarajan and N. Rajendran, Crevice corrosion behaviour of superaustenitic stainless steels: Dynamic electrochemical impedance spectroscopy and atomic force microscopy studies, *Corrosion Science*, **51**, p. 217 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.11.008>
  9. S. Nagarajan, S. Tamilselvi and N. Rajendran, Evaluation of localised corrosion behaviour of super austenitic stainless steels using dynamic electrochemical impedance spectroscopy, *Materials and Corrosion*, **58**, p. 33 (2007). Doi: <https://doi.org/10.1002/maco.200503973>
  10. A. Taheri, B. Beidokhti, B. Shayegh Boroujeny and A. Valizadeh, Characterizations of dissimilar S32205/316L welds using austenitic, super-austenitic and super-duplex filler metals, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, **27**, 119 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1925-3>
  11. S. H. Kim, A thesis for a doctorate, pp. 15 - 31, Sungkyunkwan University (2017). Doi: [http://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p\\_mat\\_type=be54d9b8bc7cdb09&control\\_no=d8f0ea0f962ae657ffe0bdc3ef48d419](http://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p_mat_type=be54d9b8bc7cdb09&control_no=d8f0ea0f962ae657ffe0bdc3ef48d419)
  12. S. M. Lee, B. M Kwon and K. H Park, Flow characteristics according to internal structure of square wet scrubber, *The Korean Society of Marine Engineering*, **43**, 1 (2019). Doi: <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07614880>
  13. D. C. Silverman, *Practical Corrosion Prediction Using Electrochemical Techniques*, John Wiley and Sons, pp. 5 - 15 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1002/9780470872864.ch85>
  14. D. C. Silverman, Tutorial on Cyclic Potentiodynamic Polarization Technique, *NACE CORROSION*, **1**, 21 (1998). Doi: <https://onepetro.org/NACECORR/proceedings-abstract/CORR98/All-CORR98/NACE-98299/127779>
  15. S. Esmailzadeha, M. Aliofkhazraeia and H. Sarlakh, 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>
  16. C. R. Clayton and Y. C. Lu, A Bipolar Model of the Passivity of Stainless Steel: The Role of Mo Addition, *Journal of the Electrochemical Society*, **133**, 12 (1986). Doi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2108451/meta>
  17. K. T. Moon, A thesis for a doctorate, pp. 4 - 10, Chonnam National University (1994). Doi: [http://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p\\_mat\\_type=be54d9b8bc7cdb09&control\\_no=507606f35856845b](http://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p_mat_type=be54d9b8bc7cdb09&control_no=507606f35856845b)
  18. H. C. Choe, Effects of Mo addition and ion nitriding on the corrosion behavior of austenitic stainless steel, *Journal of the Korean institute of surface Engineering*, **31**, 73 (1998). Doi: <https://journal.kisehome.or.kr/html/?pmode=DBpia&smode=view&seq=702>
  19. J. H. Lee, A thesis for a master, pp. 66 - 71, Mokpo National Maritime University (2012). Doi: [http://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p\\_mat\\_type=be54d9b8bc7cdb09&control\\_no=2cc8e63bf820eb3ffe0bdc3ef48d419](http://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p_mat_type=be54d9b8bc7cdb09&control_no=2cc8e63bf820eb3ffe0bdc3ef48d419)
  20. 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: <http://dx.doi.org/10.14773/cst.2015.14.5.232>
  21. G. E. C. Bell, T. Lnazumi, E. A Kenik and T. Kondo, Electrochemical and microstructural characterization of an austenitic stainless steel irradiated by heavy ions at 515 °C, *Journal of Nuclear Materials*, **187**, p. 170- (1992). Doi: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(92\)90549-Z](https://doi.org/10.1016/0022-3115(92)90549-Z)
  22. Herbert H. Uhlig and Glenn E. Woodside, Anodic Polarization of Passive and Non-passive Chromium-Iron Alloys., *The Journal of PHYSICAL CHEMISTRY*, **57**, 280-283 (1953). Doi: <https://doi.org/10.1021/j150504a005>
  23. E. A. Lizlovs and A. P. Bond, Anodic Polarization Behavior of High Purity 13 and 18% Cr Stainless Steels, *Journal of the Electrochemical Society*, **122**, 719 (1975). Doi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2134307/meta>
  24. Mariano A. Kappes, Localized corrosion and stress corrosion cracking of stainless steels in halides other than chlorides solutions: a review, *The Journal Corrosion Reviews*, **38**, 1 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1515/corr-rev-2019-0061>
  25. I. C. Park, M. S. Min, Analysis of Electrochemical Corrosion Resistance of Inconel 625 Thermal Spray Coated Fin Tube of Economizer, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, **27**, 187 (2021). Doi : <https://doi.org/10.7837/kosomes.2021.27.1.187>
  26. Roland Tolulope Loto and Cleophas Akintoye Loto,

- Potentiodynamic Polarization Behavior and Pitting Corrosion Analysis of 2101 Duplex and 301 Austenitic Stainless Steel in Sulfuric Acid Concentrations, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, **17**, 672 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0291-6>
27. Toloei, A, Stoilov, V and Northwood, D, *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, **2B(Advanced Manufacturing)**, pp. 15 – 21 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1115/IMECE2013-6549828>
28. ASTM G102-89, Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements, pp. 1 - 7 (2004). <https://www.astm.org/Standards/G102>
29. 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>