

오스테나이트계 스테인리스강과 니켈합금의 해수 농도 변화에 따른 전기화학적 부식 손상 특성

허호성¹ · 김성종^{2,†}

¹목포해양대학교 대학원, 전라남도 목포시 해양대학로 91
²목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대학로 91
(2021년 9월 23일 접수, 2021년 10월 8일 수정, 2021년 10월 8일 채택)

Electrochemical Corrosion Damage Characteristics of Austenite Stainless Steel and Nickel Alloy with Various Seawater Concentrations

Ho-Seong Heo¹ 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 September 23, 2021; Revised October 08, 2021; Accepted October 08, 2021)

Due to advancement of the industry, operation of a device in a harsh environment is increasing. Especially, the marine environment contains Cl^- ions which causes localized corrosion such as pitting and crevice corrosion of stainless steel and various metals. In this study, electrochemical corrosion behaviors of austenitic stainless steel (STS 316L) and nickel alloy (Inconel 600) with different seawater concentrations (fresh water, seawater, mixed water) were investigated. The STS 316L and Inconel 600 were etched in 10% oxalic acid and composed of an austenitic phase. Results of Tafel analysis in seawater showed that STS 316L and Inconel 600 presented the highest corrosion current densities of $7.75 \times 10^{-4} \text{ mA/cm}^2$ and $1.11 \times 10^{-4} \text{ mA/cm}^2$ and the most negative pitting potentials of 0.94 V and 1.06 V, respectively. The maximum damage depths and surface damage ratio by pitting corrosion increased with chloride concentration. The STS 316L had higher PREN than Inconel 600. However, the surface damage and weight loss of Inconel 600 were superior to STS 316L. It was difficult to compare the pitting resistance of STS 316L based on Fe and Inconel 600 based on Ni with PREN simply.

Keywords: STS 316L, Inconel 600, Seawater concentration, Electrochemical corrosion, PREN

1. 서론

다양한 산업분야에 사용되는 금속은 부식으로 인해 전세계 GDP의 3.4%에 해당하는 경제적 손실을 야기한다 [1]. 산업의 고도화로 인해 가혹한 환경에서 운용되는 기기의 사용이 증가하는 추세이다. 따라서, 우수한 내식성과 내마모성을 가진 재료를 선정하는 것은 대단히 중요하다. 특히, 가혹한 해양환경에 장기간 노출되어 있는 선박과 해양구조물은 적합한 재료 선정과 운용에 관한 신뢰성 확보는 매우 중요하다 [2,3]. 최근, 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는

선박연료유에 기인한 대기오염물질 배출 규제에 의하여 배기가스 후처리장치인 스크러버 시스템(Scrubber system)을 도입하기 시작했다. 국제해사기구는 선박의 항로, 교통규칙, 항만시설 등을 국제적으로 통일하기 위하여 설치된 유엔 전문기구로써 모든 해사기술문제와 법률문제에 대한 규정과 관행에 관하여 정부간의 협력을 조절하는 역할을 한다. 스크러버는 저질중유를 연료유로 사용하는 선박의 디젤엔진 배기가스에 포함되어 있는 황산화물을 제거하는 장치이다. 대부분의 선박에 사용되는 습식 스크러버는 대기오염물질 처리가 간단하지만 이산화황(SO_2)과 염소이온(Cl^-) 환경하에서 운용되어 부식에 취약하다 [4]. 특히, 대형선박의 경우 해양환경 뿐만 아니라 담수환경 등 다양한 환경에서 운용되기 때문에 여러 환경에서 내식성이 우수한 재료 사용은 필수불가결

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

허호성: 석사과정, 김성종: 교수

하다. 오스테나이트계 스테인리스강인 STS 316L은 선박에서 각종 밸브와 펌프 뿐만 아니라 담수화 장치 등 다양한 장비의 재료로 사용되며 크롬산화피막 형성으로 우수한 내식성을 지니고 있어 산업현장에서 널리 사용되고 있다 [5,6]. Inconel 600은 니켈을 기반으로 한 Ni-Cr-Fe합금이며, 주로 발전소의 증기발생기 전열관에 사용되며 고온에서의 응력부식균열 저항성이 우수한 재료이다 [7]. STS 316L과 Inconel 600은 우수한 내식성으로 인해 다양한 환경에서 사용된다. STS 316L은 Mo 첨가로 인해 강화된 내식성을 평가하기 위한 해양환경에서의 연구가 활발하다. 그러나, Inconel 600은 높은 함량의 니켈로 인한 고온에서의 응력부식균열에 관한 연구는 많으나 해양환경에서의 연구는 거의 없다 [8,9].

따라서 본 연구에서는 다양한 환경에서 운용되는 스크러버 재료로써 오스테나이트계 스테인리스강 STS 316L과 니켈합금인 Inconel 600의 해수 농도 변화에 따른 부식특성을 파악하기 위해 해수, 담수, 혼합수에서 전기화학적 거동을 비교, 분석하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 오스테나이트 스테인리스강 STS 316L과 니켈 합금인 Inconel 600을 실험재료로 선정하였으며, Table 1은 화학조성을 나타낸 것이다. STS 316L과 Inconel 600의 해수농도 변화에 따른 내식성을 평가하기 위해 해수, 담수, 혼합수(해수:담수 = 1:1)를 전해액으로 사용하여 전기화학적 거동을 비교, 분석하였다. 시편준비는 열 변형을 최소화하기 위해 냉각수가 공급되는 절단기를 사용하여 1 cm × 1 cm 크기로 가공 후 에폭시 레진으로 마운팅하였다. 마운팅 후 SiC 페이퍼 #600번까지 단계적으로 연마하였다. 연마 후 3분간 초음파 세척을 실시하였고 아세톤과 증류수로 세척 후 진

공챔버에서 24시간 건조하였다. 해수농도 변화에 따른 내식성을 평가하기 위해 BioLogic Science instrument사의 FR/VCP를 이용하여 동전위 분극실험 후 타펠 분석을 실시하였다. 분극 실험 시 기준전극은 은/염화은(Ag/AgCl) 전극을, 대응전극은 백금(Pt) 전극을 사용하였다. 실험용액의 주요 성분 및 특성은 Table 2에 나타내었다. 동전위 분극실험은 실험 전 30°C 용액에 3,600초간 침지하여 안정화시킨 뒤 개로전위(Open circuit potential : OCP)를 기준으로 -0.25 V부터 2.0 V까지 1.67 mV/s의 주사속도로 실시하였다. 동전위 분극곡선을 통해 공식전위(E_{pit})를 산출하고 타펠외삽법으로 부식전류밀도(I_{cor})와 부식전위(E_{cor})를 산출하였다. 또한, 동전위 분극실험 후 무게를 측정하여 공식에 의한 무게감소량을 비교하였다. 그리고, 실험 후 부식경향 파악을 위해 표면을 주사전자현미경(BRUKER, SNE-4500M Plus)과 3D 광학 현미경(Motic, PSM-100, I-solution)을 이용하여 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 금속 미세조직을 관찰하기 위해서 에칭을 실시한 결과이다. 10% 옥살산(oxalic acid)용액에서 DC 6 V 조건에서 15초 동안 에칭을 실시하였으며 STS 316L과 Inconel 600의 결정립과 결정립계를 확인할 수 있다. 두 시편 모두 오스테나이트상으로 이루어져 있으며 구조상 큰 차이는 관찰되지 않았다. 일반적으로 결정립 보다는 탄화물의 함량이 높은 결정립계에서 우선적으로 부식이 발생한다 [10]. 상대적으로 높은 탄소 함량으로 인해 Inconel 600의 결정립계는 STS 316L보다 선명하게 관찰되었다. 니켈합금에 대한 합금원소의 영향 연구에 따르면 스테인리스강과 니켈합금은 같은 오스테나이트 구조를 가지는 합금이지만 내공식지수(Pitting Resistance Equivalent Number, PREN)를 비교하기 위해서는 여러

Table 1. Chemical compositions of STS 316L and Inconel 600 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Al	Fe
STS 316L	0.023	0.603	1.05	0.034	0.003	16.7	10.19	2.03	0.282	0.012	0.003	Bal
Inconel 600	0.05	0.24	0.33	-	0.006	15.7	73.7	-	0.03	-	-	8.8

Table 2. Chemical compositions and properties of electrolyte (wt%)

	Main component (mg/L)						pH	Dissolved oxygen (mg/L)	Electric conductivity (mS/cm)
	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺			
Sea water	1746	15721	8401	344	1121	357	7.90	16.1	45.3
Mixed water	1073	9989	5367	218	695	237	7.75	16.0	29.10
Fresh water	333	3267	368	77	225	104	7.52	16.0	11.16

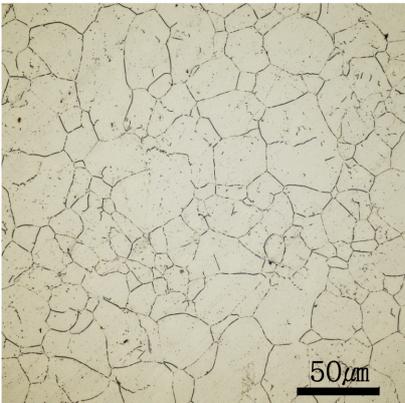
	STS 316L	Inconel 600
Surface image		
phase	Austenite phase	Austenite phase

Fig. 1. Metallographic analysis of STS 316L and Inconel 600

변수가 존재한다. 내공식지수란 스테인리스강의 염화물 함유 환경(Chloride-containing environment)에서 공식에 대한 저항성 수치를 나타낸 값으로 화학원소 성분 조성량에 따라 결정된다. 내공식지수에 영향을 주는 원소로는 주로 Cr, Mo, W, N가 있다. 이 원소들이 공식에 저항하는 기여도는 아래의 식과 같다.

$$PREN = \%Cr + 3.3\%(Mo + 0.5\%W) + 16\%N \quad (1)$$

위의 식으로 계산을 하면 STS 316L과 Inconel 600의 PREN 값은 각각 23.6과 15.7이다. 그러나, Fe를 기반으로 한 스테인리스강(STS 316L)과 Ni을 기반으로 한 니켈합금(Inconel 600)은 합금원소가 용해될 수 있는 양이 다르다. 예를 들어, Mo은 최대 6%까지 Fe에 용해될 수 있지만 Ni에는 최대 30%까지 용해될 수 있다 [11]. 금속조직에서는 큰 차이를 발견할 수 없으나 Fe-Cr-Ni 기반인 STS 316L과 Ni-Cr-Fe 기반인 Inconel 600의 전기 화학적 부식 거동은 합금원소의 함량 차이로 인하여 다른 거동을 나타낼 수 있다.

Fig. 2는 담수, 해수, 혼합수에서 오스테나이트계 스테인리스강 STS 316L에 대하여 30°C의 온도조건에서 수행한 동전위 분극실험 결과를 나타낸 것이다. 양극 분극곡선에서는 침지 초기에 형성된 부동태 피막(Cr₂O₃)에 의한 전류밀도 상승이 다소 정제되는 부동태구간이 관찰되었다. Cl⁻ 이온의 농도가 가장 낮은 담수에서 해수와 혼합수에 비해 귀한 공식전위(E_{pit})와 넓은 부동태구간이 관찰되었다. 공식은 공식전위인 E_{pit}에서 개시되기 때문에 E_{pit}의 값은 공식에 대한 저항력의 척도를 나타낸다. STS 316L의 공식전위는 해수, 혼합수, 담수에

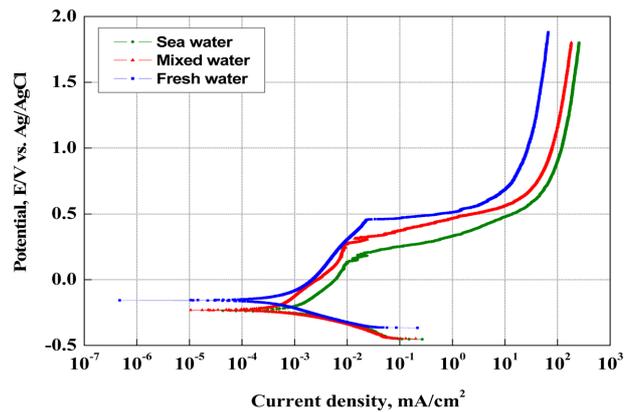


Fig. 2. Potentiodynamic polarization curves of STS 316L in various solutions

서 각각 0.139, 0.271, 0.452 V가 측정되었다. 그리고 개로전위(OCP)에서 공식전위 E_{pit}까지의 범위는 해수, 혼합수, 담수에서 각각 0.375, 0.502, 0.627 V를 나타냈다. 동전위분극 실험결과 해수, 혼합수, 담수에서 모두 Cl⁻ 이온의 활성용해반응이 활발해지면서 산화피막 파괴로 공식이 발생하여 급격하게 전류밀도가 상승하는 경향을 나타냈다. 공식은 Cl⁻ 이온이 부동태 피막의 구조가 다소 불안정한 부분에서 산소와 수산기로 치환되어 피막을 파괴시키는 것으로 사료된다 [12]. 해수는 담수보다 Cl⁻ 이온의 농도가 약 4.8배 높기 때문에 부동태피막이 더 쉽게 파괴되었다. 공식의 성장은 핵생성(nucleation), 준안정성 피트(metastable pit)와 안정한 피트(stable pit)와 같이 3단계로 표현할 수 있다. 그리고 준안정성 피트가 발생할 시 전류밀도가 급격하게 상승한다. 위의 실험결과는 Cl⁻ 농도가 증가할수록 STS 316L의 준안정성

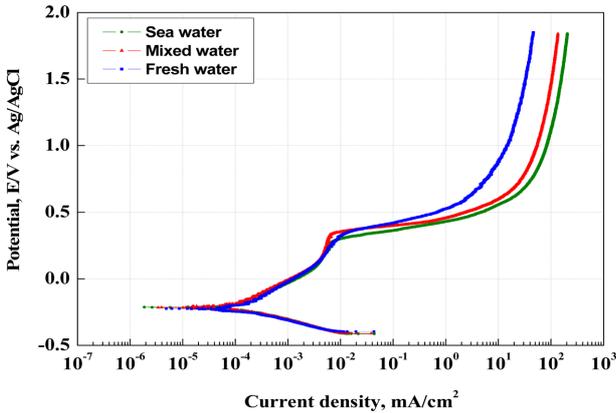
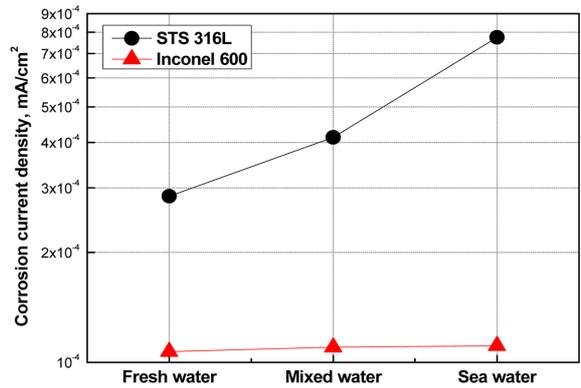


Fig. 3. Potentiodynamic polarization curves of Inconel 600 in various solutions

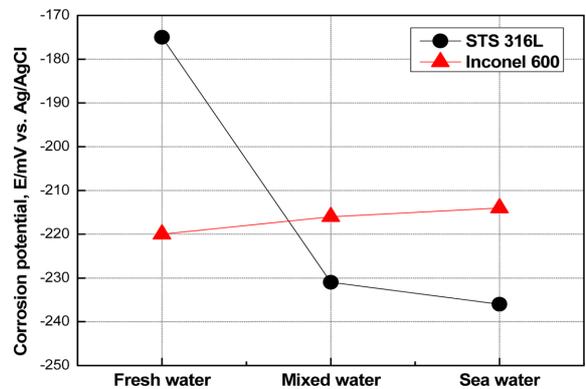
피트 발생빈도와 피크 전류의 세기가 증가한다는 연구 결과와 일치한다 [13].

Fig. 3은 담수, 해수, 혼합수에서 니켈 합금인 Inconel 600에 대해 30°C의 온도조건에서 수행한 동전위 분극실험 결과를 나타낸 것이다. STS 316L과 마찬가지로 크롬으로 인해 침지 초기에 부동태 피막(Cr_2O_3)이 형성되어 전류밀도 상승이 정제되는 부동태 구간이 관찰되었다. Cl⁻ 이온의 농도가 가장 낮은 담수에서 해수와 혼합수에 비해 귀한 공식전위(E_{pit})와 넓은 부동태 구간이 나타났다. 그러나 Inconel 600의 경우 용액변수에 따른 공식전위와 부동태 구간의 범위가 STS 316L에 비하여 작게 측정되었다. 이는 NaCl 농도를 변수로 STS 304, STS 316, Inconel 600, Incoloy의 국부부식에 대한 연구 결과와 일치한다 [14]. STS 304, STS 316의 NaCl 농도변수에 따른 공식전위 변화는 니켈 합금의 공식전위 변화보다 크게 측정되었다. Inconel 600의 공식전위는 해수, 혼합수, 담수에서 각각 0.301, 0.335, 0.343 V가 측정되었다. 그리고 개로전위(OCP)에서 공식전위 E_{pit} 까지의 범위는 해수, 혼합수, 담수에서 각각 0.515, 0.551, 0.563 V를 나타냈다. 동전위분극 실험결과 Cl⁻ 이온의 활성화해반응이 활발해지면서 산화피막 파괴에 기인한 공식형성으로 급격한 전류밀도 상승이 관찰되었다.

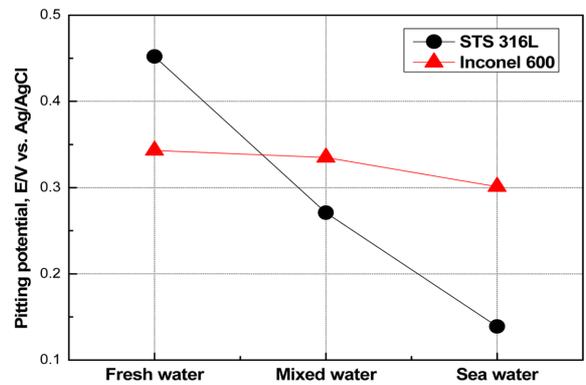
Fig. 4는 STS 316L과 Inconel 600의 동전위 분극실험 후 분극곡선 분석과 타펠분석 결과를 나타낸 것이다. STS 316L의 부식전류밀도는 해수, 혼합수, 담수 순으로 각각 7.75×10^{-4} , 4.13×10^{-4} , 2.85×10^{-4} mA/cm²를 나타냈다. 이는 해수가 혼합수와 담수에 비해 이온의 농도가 높아 전기전도도가 가장 높고, 부식에 크게 영향을 미치는 Cl⁻ 이온의 농도가 높기 때문이다. 동전위분극 실험결과, Cl⁻ 농도가 증가할수록 공식전위와 부식전위는 비전위 방향으로 이동하고 부식전류밀도는 증가하였다. 이는 표면손상 분석 시 해수에서 공식 손상이 가



(a) Corrosion current density



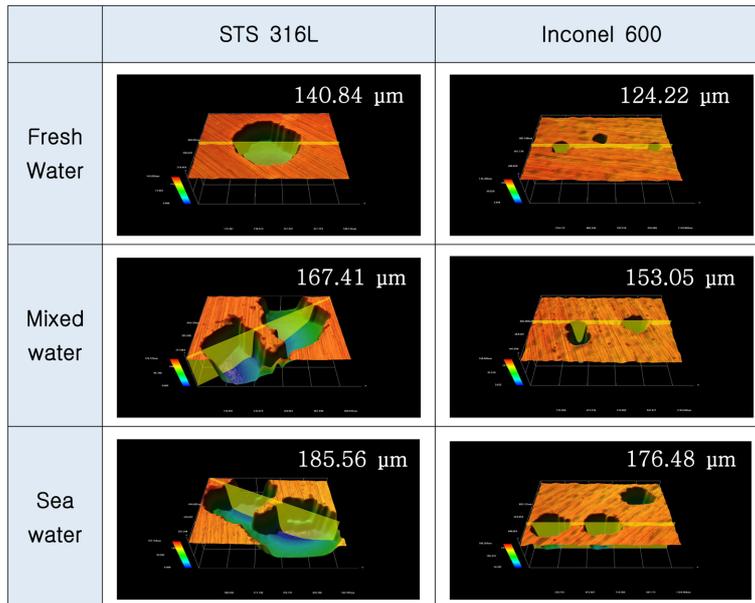
(b) Corrosion potential



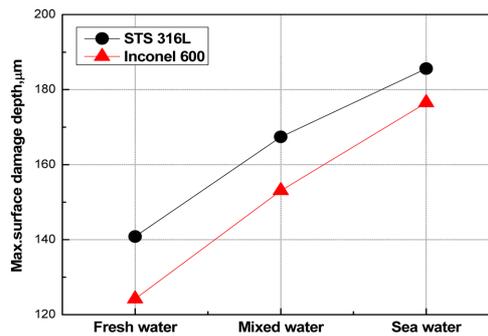
(c) Pitting potential

Fig. 4. Results of polarization curves analysis and Tafel analysis after potentiodynamic experiments in various solutions

장 클 것으로 예상할 수 있다. 한편, Inconel 600의 부식전류밀도는 해수, 혼합수, 담수 순으로 각각 1.11×10^{-4} , 1.10×10^{-4} , 1.07×10^{-4} mA/cm²를 나타냈다. Inconel 600은 용액 변수별 부식전류밀도의 차이가 STS 316L보다 현저히 적음을 알 수 있다. 부식전류밀도는 페러데이식에 대입하여 전면부식 속도를 구할 수 있다. 타펠



(a) 3D analysis



(b) Max. surface damage depth

Fig. 5. 3D analysis results of STS 316L and Inconel 600 after potentiodynamic polarization experiment in various solutions

분석을 통해 Inconel 600이 STS 316L에 비해 해수농도 변화에 따른 전면부식 속도의 변화가 적음을 알 수 있다. 공식전위의 변화를 비교해보면 STS 316L은 해수와 담수의 공식전위의 차이가 0.313 V이나 Inconel 600은 0.042 V임을 알 수 있다. Cl⁻ 이온농도의 변화가 부식전류밀도, 공식전위, 부동태 구간에 미치는 영향은 Inconel 600이 STS 316L의 경우보다 작은 경향을 나타냈다. 따라서, Inconel 600은 다양한 염화물 농도의 환경에서 적용될 수 있음을 예상할 수 있다.

Fig. 5는 동전위 분극 실험 후 STS 316L과 Inconel 600을 3D 현미경으로 표면 형상 및 최대 손상깊이를 분석한 것이다. 모든 용액에서 공식에 의한 손상이 관찰되었으며 혼합수와 해수에서의 공식이 담수보다 넓고 깊게 형성되었다. STS 316L은 혼합수와 해수에서의 최대 공식깊이는 각각 167.41 μm, 185.56 μm로 담수에서의 최대 공식깊이 140.84 μm에 비해 각각 1.19배, 1.32

배 증가하였다. 그리고 Inconel 600은 혼합수와 해수에서의 최대 공식깊이는 각각 153.05 μm, 176.48 μm로 담수에서의 최대 공식깊이 124.22 μm에 비해 각각 1.23배, 1.42배 증가하였다. 해수 농도가 증가할수록 공식의 크기가 증가하였는데 이는 Cl⁻가 내부 전자 이동을 가속화하여 공식 성장을 촉진한다는 연구결과와 일치한다 [13].

Fig. 6은 동전위 분극 실험 후 표면 스캔과 공식손상물을 나타낸 것이다. STS 316L과 Inconel 600은 표면 스캔 결과 모든 용액에서 공식에 의한 손상을 발견할 수 있었다. STS 316L은 Inconel 600보다 공식에 의한 표면 손상물이 높게 발생하였으며 두 시편 모두 표면 스캔 결과 Cl⁻ 농도가 증가할수록 공식의 크기와 수가 증가함을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 동전위 분극실험 후 주사전자현미경으로 관찰한 표면 형상이다. 두 시편 모두 Cl⁻ 농도가 증가할수록 공식의 크기와 수가 증가하였으며 이는 Fig. 6의 표

		Fresh water	Mixed water	Sea water
STS 316L	Damaged area			
	ratio	0.81%	4.45%	5.01%
Inconel 600	Damaged area			
	ratio	0.52%	2.89%	4.69%

Fig. 6. Appearance of STS 316L and Inconel 600 after potentiodynamic polarization experiment in various solutions

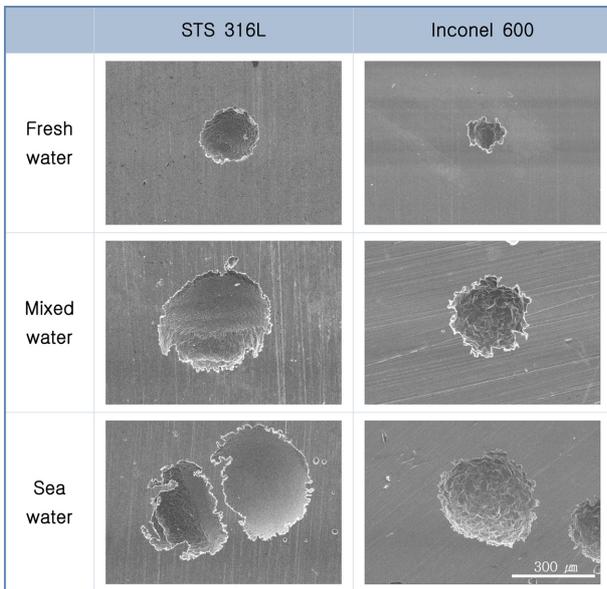


Fig. 7. Surface morphologies after potentiodynamic polarization experiment of STS 316L and Inconel 600 in various solutions

면 스캔 결과와 일치한다. 본 실험결과 PREN 지수가 상대적으로 높은 STS 316L에 비해 Inconel 600이 중성의 염화물 용액에서 공식에 의한 손상이 적게 발생한 것을 확인할 수 있다. 즉, 같은 γ -오스테나이트상 구조이나 Fe을 기반으로 한 합금과 Ni을 기반으로 한 합금의 내공식성은 단순한 PREN 값으로 비교하기 어렵다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 8은 동전위 분극 실험 후 STS 316L과 Inconel 600의 무게감소량을 측정한 그래프이다. 모든 용액에서 STS 316L의 무게 감소량이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 Cl⁻ 농도가 증가할수록 스테인리스강의 부동

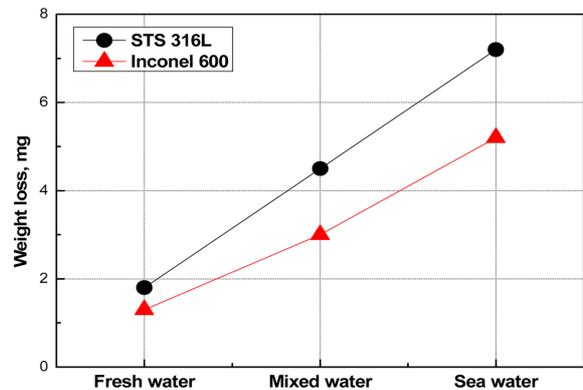
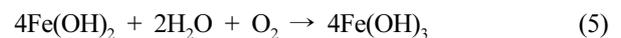
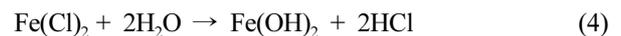


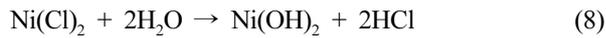
Fig. 8. Weight loss after potentiodynamic polarization experiment of STS 316L and Inconel 600 in various solutions

태 피막 파괴가 쉽게 발생하고 그로 인해 국부부식에 의한 손상이 증가한다는 연구결과와 일치한다 [15]. 염소이온의 농도가 증가할수록 Fe의 부식기구는 강화되는데 과정은 아래와 같다 [16].



위와 같이 생성된 Fe(OH)₃는 Fe²⁺ 이온이 공식으로부터 쉽게 빠져나가지 못할 만큼 조밀하지만 Cl⁻ 이온이 공식 내부로 쉽게 통과할 수 있는 기공이 있어 공식 내부를 높은 산성의 염화물 분위기로 만든다. 염소 이온

에 의한 Ni의 부식기구 또한 Fe과 비슷한 메커니즘이며, 그 화학 반응은 아래와 같다 [17].



부식이 발생하기 위해서는 Fe과 Ni의 양극반응이 기본적으로 발생한다. 여기서, Fe²⁺와 Ni²⁺의 25°C에서의 표준 깃스 자유에너지는 각각 -78.8684kJ/mol과 -45.6056kJ/mol이며 Fe(Cl)₂와 Ni(Cl)₂의 표준 깃스 자유에너지는 각각 -302.3358kJ/mol과 -259.0649kJ/mol이다 [18]. 깃스 자유에너지는 화학반응이 자발적으로 진행될지 예측하기 위해 정의된 열역학적 특성으로 음의 값을 가질수록 자발성이 크다고 판단할 수 있다. 더 높은 PREN 값을 가지는 STS 316L이 최대 공식 깊이와 무게감량에 있어서 Inconel 600에 비해 큰 이유는 Fe를 기반으로 한 STS 316L이 Ni을 기반으로 한 Inconel 600보다 산화반응의 자발성이 큰 것으로 예측할 수 있다. 물론, 깃스 자유에너지는 특정한 반응이 일정한 온도와 압력에서 가지는 자발성의 정도를 나타내는 척도일 뿐이며 반응속도를 예측할 수 없으므로 추가적인 연구가 필요하다.

해양환경 및 석유화학의 재료선정 기준인 ISO 21457과 NORSOK M-001 기준에 의거하면 PREN값이 40이하인 재료는 음극방식이 적용되지 않은 상태에서의 적용을 권장하고 있지 않다[19]. 동전위 분극실험 결과 모든 시편에서 공식에 의한 손상이 크게 발견되었다. 이는, STS 316L과 Inconel 600 모두 음극방식을 적용하지 않을 시 해양환경에서의 적용이 어렵다는 사실을 알 수 있다.

4. 결론

오스테나이트 스테인리스강 STS 316L과 니켈합금 Inconel 600에 대한 해수농도 변화에 따른 전기화학적 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. STS 316L과 Inconel 600 모두 오스테나이트상으로 구성되어 있으며 결정립계는 탄소의 함량이 더 높은 Inconel 600에서 더 선명하게 관찰되었다.

2. 동전위 분극 실험 결과, 모든 시편에서 전위증가에 따라 전류밀도상승이 정체되는 부동태 구간이 관찰되었으며 해수농도가 증가하면서 부동태 범위는 작게 관찰되었다.

3. 타펠 분석결과, 모든 시편에서 해수, 혼합수, 담수

순으로 부식전류밀도가 높은 값을 나타냈다. 그러나, Inconel 600은 STS 316L에 비해 용액변수에 따른 부식전류밀도의 차이가 현저히 작은 값을 나타냈다.

4. 내공식지수(PREN)는 STS 316L(23.6)이 Inconel 600(15.7)보다 높지만 모든 용액에서 공식에 의한 최대 손상은 STS 316L에서 더 크게 관찰되었다. 즉, Fe을 기반으로 한 스테인리스강과 Ni을 기반으로 한 인코넬의 공식저항성은 단순한 PREN 값으로 비교하기 어렵다.

5. 해양환경 및 석유화학의 재료선정 기준인 ISO 21457과 NORSOK M-001기준에 의거하여 STS 316L과 Inconel 600 모두 음극방식이 적용되지 않은 상태에서 해양환경에서의 적용은 어려울 것으로 판단된다.

References

1. Inamuddin, M. I. Ahamed, M. Luqman, and T. Altalhi, Sustainable Corrosion Inhibitors, *Materials Research Foundations*, **107**, 206, (2021). Doi: <https://doi.org/10.21741/9781644901496>
2. G. Okamoto, Passive Film of 18-8 Stainless Steel Structure and its Function, *Corrosion Science*, **13**, 471, (1973). Doi: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(73\)90031-0](https://doi.org/10.1016/0010-938X(73)90031-0)
3. F. Mansfeld, R. Tsai, H. Shih, B. Little, R. Ray, and P. Wagner, An Electrochemical and Surface Analytical Study of Stainless Steels and Titanium exposed to Natural Seawater, *Corrosion Science*, **33**, 445 (1992). Doi: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(92\)90073-C](https://doi.org/10.1016/0010-938X(92)90073-C)
4. E. Hanki, P. Byung Hyun, J. Soon-Kwan, K. Sung Su, Trend and Prospect of Scrubber Technology for Regulatory on Sulfur Content in Marine Fuel Oil, *KIC News*, **22**, No. 5 (2019). Doi: <https://www.cheric.org/PDF/PIC/PC22/PC22-5-0001.pdf>
5. B. Cai, Y. Liu, X. Tian, F. Wang, H. Li, and R. Ji, An experimental Study of Crevice Corrosion Behaviour of 316L Stainless Steel in Artificial Seawater, *Corrosion Science*, **52**, 3235 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.05.041>
6. S. S. Xin and M. C. Li, Electrochemical corrosion characteristics of type 316L stainless steel in hot concentrated seawater, *Corrosion Science*, **81**, 96 (2014).
7. M. K.-Ranjbar, J. Mankowski, and D. D. Macdonald, Pitting corrosion of inconel 600 in high temperature chloride solution under controlled hydrodynamic conditions, *CORROSION*, **41**, 197 (1985). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3581991>
8. S. A. Chavez, G. E. Korth, and D. M. Harper, and T. J. Walker, High-temperature tensile and creep data for Inc-

- onel 600, 304 stainless steel and SA106B carbon steel, *Nuclear Engineering and Design*, **148**, 351 (1994). Doi: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(94\)90120-1](https://doi.org/10.1016/0029-5493(94)90120-1)
9. Lv Jinlong, L. Tongxiang, W. Chen, Surface enriched molybdenum enhancing the corrosion resistance of 316L stainless steel, *Materials Letters*, **171**, 38 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.01.153>
 10. S. X. Lin, W. K. Bao, J. Gao, and J. B. Wang, Intergranular corrosion of austenitic stainless steel, *Applied mechanics and materials*, **229-231**, 14 (2012). Doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.229-231.14>
 11. H. S. Klapper, N. S. Zadorozne, and R. B. Rebak, Localized corrosion characteristics of nickel alloys: A Review, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, **30**, 296, (2017). Doi: <https://doi.org/10.1007/s40195-017-0553-z>
 12. K. W. Nam, J. E. Paeng, and K. Y. Kim, Immersion Characteristics of STS 316L with Degree of Different Cold Rolling, *Journal of Power System Engineering*, **24**, 90 (2020). Doi: <https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.3.090>
 13. Y. Zuo, H. Wang, J. Zhao, and J. Xiong, The effects of some anions on metastable pitting of 316L stainless steel, *Corrosion science*, **44**, 13 (2002). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00031-2)
 14. C. J. Semino, P. Pedferri, G. T. Burstein, and T. P. Hoar, The localized corrosion of resistant alloys in chloride solutions, *Corrosion Science*, **19**, 1069, (1979). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(79\)80125-0](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(79)80125-0)
 15. S. Esmailzadeha, M. Aliofkhaeaeia, 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>
 16. S. Piyamahant, S. Ros, and H. Shima, Simulation for corrosion cracking of cover concrete in reinforced concrete structures, *Journal of JSCE*, **1**, 162 (2013). Doi: https://doi.org/10.2208/journalofjsce.1.1_162
 17. N. Makuch, The importance of phase composition for corrosion resistance of borided layers produced on nickel alloys, *Materials* 2020, **13**, 5131 (2020). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma13225131>
 18. Dean, John A., *Lange's Handbook of Chemistry, 12th ed.*, pp.4 – 94, McGraw-Hill, New York (1979).
 19. M. Iannuzzi, M. Rincon Ortiz, M. Kappes, M. A. Rodriguez, R. M. Carranza, and R. B. Rebak, Selecting corrosion resistant alloys for seawater applications. CORROSION/2014, Research in Progress Symposium (Houston, TX: NACE, 2014).