

## 해수 환경에서 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강의 전기화학적 거동에 미치는 캐비테이션 진폭의 영향

허호성<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  
(2022년 4월 15일 접수, 2022년 4월 19일 수정, 2022년 4월 19일 채택)

### Effect of Cavitation Amplitude on the Electrochemical Behavior of Super Austenitic Stainless Steels in Seawater Environment

Ho-Seong Heo<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 April 15, 2022; Revised April 19, 2022; Accepted April 19, 2022)

The cavitation and potentiodynamic polarization experiments were conducted simultaneously to investigate the effect of cavitation amplitude on the super austenitic stainless steel (UNS N08367) electrochemical behavior in seawater. The results of the potentiodynamic polarization experiment under cavitation condition showed that the corrosion current density increased with cavitation amplitude increase. Above oxygen evolution potential, the current density in a static condition was the largest because the anodic dissolution reaction by intergranular corrosion was promoted. In the static condition, intergranular corrosion was mainly observed. However, damage caused by erosion was observed in the cavitation environment. The micro-jet generated by cavity collapse destroyed the corrosion product and promoted the repassivation. So, weight loss occurred the most in static conditions. After the experiment, wave patterns were formed on the surface due to the compressive residual stress caused by the impact pressure of the cavity. Surface hardness was improved by the water cavitation peening effect, and the hardness value was the highest at 30  $\mu\text{m}$  amplitude. UNS N08367 with excellent mechanical performance due to its high hardness showed that cavitation inhibited corrosion damage.

**Keywords:** Super austenitic stainless steel, Cavitation, Seawater, Electrochemical, UNS N08367

#### 1. 서론

최근 국제해사기구(IMO)의 선박연료유 규제에 인하여 2020년부터 대양을 항해하는 선박은 황 함유량 0.5% 이하의 연료를 사용하거나 배기가스 후처리 장치(Scrubber)를 설치해야 한다 [1]. 그로인해 대형상선은 해수를 세정수로 사용하는 개방형 스크러버(Open loop scrubber)를 대부분 사용하고 있다 [2]. 이러한 개방형 스크러버는 대기 오염물질의 효율적인 처리가 가능하다. 그러나 배기가스에 포함되어 있는 황 성분과 해수에 포함된 염소 이

온에 의해 가혹한 부식환경에서 운전된다[3]. 그리고 스크러버 시스템의 세정수 공급과 배출을 위해 사용되는 원심펌프의 임펠러는 고속으로 운전되기 때문에 캐비테이션이 발생되어 기포붕괴에 따른 큰 충격압력으로 침식 손상이 발생하여 재료의 수명을 현저히 단축시킨다. 그러므로, 스크러버 시스템은 일반적으로 내식성과 기계적 성능이 우수한 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강을 사용한다. 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강은 공식 저항 등가지수(PREN = Pitting resistance equivalent number)가 40 이상인 스테인리스강으로 크롬, 몰리브데넘, 질소, 니켈의 함량을 높여 공식과 틈부식에 대한 저항성이 큰 특징이 있다 [4]. 이러한 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강을 다양한 산업에 적용하기 위하여 여러 환경에서 연구

<sup>†</sup>Corresponding author: ksj@mmu.ac.kr

허호성: 석사과정, 김성종: 교수

가 진행 중이다. S. Ghosh 등은 UNS N08028과 UNS N08367의 내식성을 평가하기 위해 인산에서 염소이온을 변수로 하여 전기화학적 실험을 진행하였다 [5]. 그리고 Fritz 등은 UNS N08367의 염화물에 의한 응력부식균열을 연구하였고, Karayan 등은 UNS N08367의 염화물 용액에서 부동태 통과 특성을 연구하였다 [6,7]. 이처럼 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강에 대한 전기화학적 거동과 응력부식균열에 관련된 연구는 활발하지만 캐비테이션 침식 저항성에 관한 연구는 드물다.

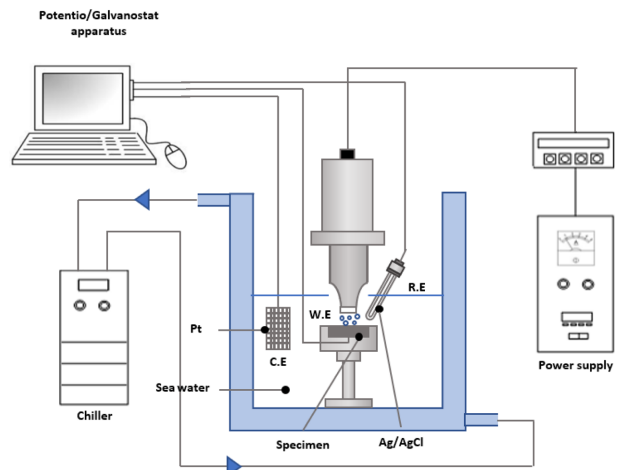
따라서, 본 연구에서는 천연해수에서 UNS N08367의 전기화학적 거동에 미치는 캐비테이션의 영향을 연구하기 위해 진폭을 변수로 캐비테이션 실험과 동전위분극 실험을 동시에 실시하여 그 특성을 분석하였다.

**2. 실험방법**

본 연구에서는 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강 UNS N08367(AL-6XN)을 실험재료로 선정하였으며, Table 1은 화학조성을 나타낸 것이다. 시편준비는 레이저로 지름이 35mm 크기인 원형으로 가공 후 SiC 연마지 #600까지 단계적으로 연마하였다. 그리고, 천연해수에서의 전기화학적 거동을 평가하기 위해 Gamry사의 US/PCI4/750을 사용하였다. 실험용액의 주요 성분 및 특성은 Table 2에 나타내었다. 분극 실험은 30°C의 천연해수 용액에서 실시하였으며 기준전극은 은/염화은(Ag/AgCl/sat. KCl) 전극을, 대용전극은 백금(Pt)을, 작업 전극은 4.2 cm<sup>2</sup>의 면적을 노출시켜 자체 제작한 홀더에 장착하였다. 동전위 분극 실험은 실험 전 3,600초간 침지하여 안정화시킨 뒤 개로전위(Open circuit potential : OCP)를 기준으로 -0.25 V부터 2.0 V까지 0.5 mV/s의 주사속도로 분극시켰으며 총 소요 시간은 75분이었다. 동전위 분극곡선을 통해 공식전위(E<sub>pit</sub>)을 산출하고 Tafel 외삽법으로 부식전류밀도(I<sub>corr</sub>)와 부식전위(E<sub>corr</sub>)를 산출하였다.

캐비테이션 실험은 천연 해수환경에서 ASTM G32 규정을 준하여 실시하였다. 실험은 압전(Piezo electric) 효과를 이용한 진동발생 장치를 사용하였으며, 대향형 진

동법으로 실험을 실시하였다. 60 Hz, 220 V의 전력은 전자회로를 거쳐 20 kHz의 정격진동 출력을 발생시켜 진동자에 공급하는 역할을 하며, 정진폭 자동제어 방식으로 진폭변수는 10, 30, 50 μm로 설정하였다. 압전소자에 의한 진동발생은 원추 혼(Horn)에 전기적인 교류를 인가함으로써 축 방향으로 진동을 발생시켜 캐비티(Cavity)를 생성시킨다. 시험편과 진동자의 혼은 1 mm의 간격을 일정하게 유지하도록 하였다. 온도에 따른 부식과 침식손상 영향을 최소화하기 위해 냉각장치(Chiller)를 사용하여 실험용액의 온도를 30°C로 일정하게 유지하였으며 75분간 실험을 진행하였다. 많은 국내외 연구자들은 캐비테이션 침식실험과 부식실험을 개별적으로 실시하여 재료의 물리적 특성과 전기화학적 특성을 연구하였다. 그러나, 본 연구에서는 천연해수에서 캐비테이션이 UNS N08367의 전기화학적 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해 전기화학 실험과 캐비테이션 실험을 동시에 실시하였으며 모식도는 Fig. 1에 나타내었다. 무게감소량은 시험편을 실험시작 전과 종료 후 초음파 세척기로 3분간 세척하여 건조기에서 24시간 동안 건조시킨 뒤 무게를 측정하여 분석하였다. 그리고, 캐비테이션에 의한 워터피닝 효과를 분석하기 위해 마이크로 비커스 경도계로 표면 경도를 측정하였다. 경도측정 시 하중은 9.8N, 유지시간은 10초로 설정하였다. 실험 후 손상 경향을 파악하기 위해 표면을 주사전자현미경(BRUKER, SNE-4500M Plus)과 레이저 3D 현미경(Olympus, OLS-5000)을 이용하여 분석하였다.



**Fig. 1. Schematic diagram of cavitation-electrochemical cell**

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

C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Fe
0.015	0.27	0.72	0.001	20.62	24.62	6.44	0.53	0.232	Bal

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

	Main component (mg/L)						pH	Dissolved oxygen (mg/L)	Electric conductivity (mS/cm)
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>			
Sea water	1746	15721	8401	344	1121	357	7.90	16.1	45.3

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 천연해수에서 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강 UNS N08367에 대하여 정적 환경과 캐비테이션 진폭 변수로 실시한 동전위 분극실험 결과를 나타낸 것이다. 정적 환경에서 실험한 동전위 분극곡선의 경우 약 + 1.0  $V_{SSCE}$ 인 산소발생전위( $E_{O_2}$ ) 보다 낮은 전위에서는 캐비테이션 환경에 비해 낮은 전류밀도를 나타내었지만 + 1.2  $V_{SSCE}$  이후에는 가장 높은 전류밀도를 나타냈다. Tafel 분석결과를 Table 3에 나타내었으며 정적 환경에서 수행한 동전위 분극실험의 부식전류밀도가 가장 낮은 값인  $2.45 \times 10^{-4} \text{ mA/cm}^2$ 를 나타내었다. 캐비테이션 실험과 동전위 분극실험을 동시에 진행한 경우 진폭이 증가할수록 부식 전류밀도는 증가하는 경향을 나타내었고 진폭 10, 30, 50  $\mu\text{m}$ 의 조건에서 부식전류밀도는 각각  $13.2 \times 10^{-4}$ ,  $21.2 \times 10^{-4}$ ,  $101.5 \times 10^{-4} \text{ mA/cm}^2$ 를 나타냈다. 이는 천연해수에서 알루미늄 합금 6061-T6에 대하여 캐비테이션의 진폭 증가에 따라 부식전류밀도가 증가하는 연구결과와 일치한다 [8]. 그리고 캐비테이션 진폭 증가 시 해수의 강제 순환으로 인해 산소공급이 원활해지고 캐비티의 충격 압으로 부동태 피막과 확산층의 두께 변화로 전하 이동이 증가하여 전류밀도가 상승하였다 [9,10]. 또한, 캐비테

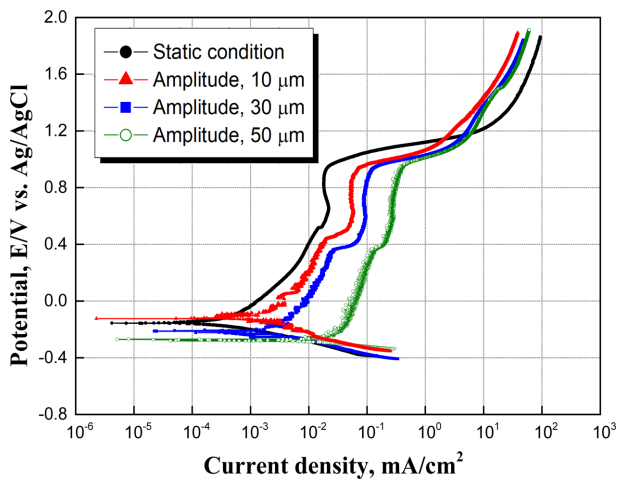


Fig. 2. Potentiodynamic polarization curves of UNS N08367 with cavitation amplitude in seawater

Table 3. Electrochemical parameters obtained from potentiodynamic polarization curves of UNS N08367 with cavitation amplitude in seawater

	$I_{\text{corr}}$ ( $\text{mA/cm}^2$ )	$E_{\text{corr}}$ (V)	$E_{\text{pit}}$
Potentiodynamic polarization (static condition)	$2.45 \times 10^{-4}$	-0.155	Over $E_{O_2}$
Potentiodynamic polarization + 10 $\mu\text{m}$	$13.2 \times 10^{-4}$	-0.140	Over $E_{O_2}$
Potentiodynamic polarization + 30 $\mu\text{m}$	$21.2 \times 10^{-4}$	-0.211	Over $E_{O_2}$
Potentiodynamic polarization + 50 $\mu\text{m}$	$101.5 \times 10^{-4}$	-0.271	Over $E_{O_2}$

이션에 의해 형성된 캐비티는 모재 표면에서 붕괴될 시 고온, 고압의 마이크로 제트가 형성된다 [11]. 반응속도와 온도의 관계를 보여주는 아레니우스 식에 의하면 화학반응의 속도와 온도의 관계는 아래의 식과 같다.

$$k = Ae^{(-E_a/RT)} \quad (1)$$

여기서, k는 속도 상수, A는 아레니우스 상수,  $E_a$ 는 활성화 에너지, R은 기체 상수, T는 절대온도를 뜻한다. 따라서, 캐비테이션의 진폭이 증가할수록 더 많은 캐비티의 붕괴가 발생하고 표면의 온도상승으로 인해 부식전류 밀도가 증가한 것으로 사료된다.

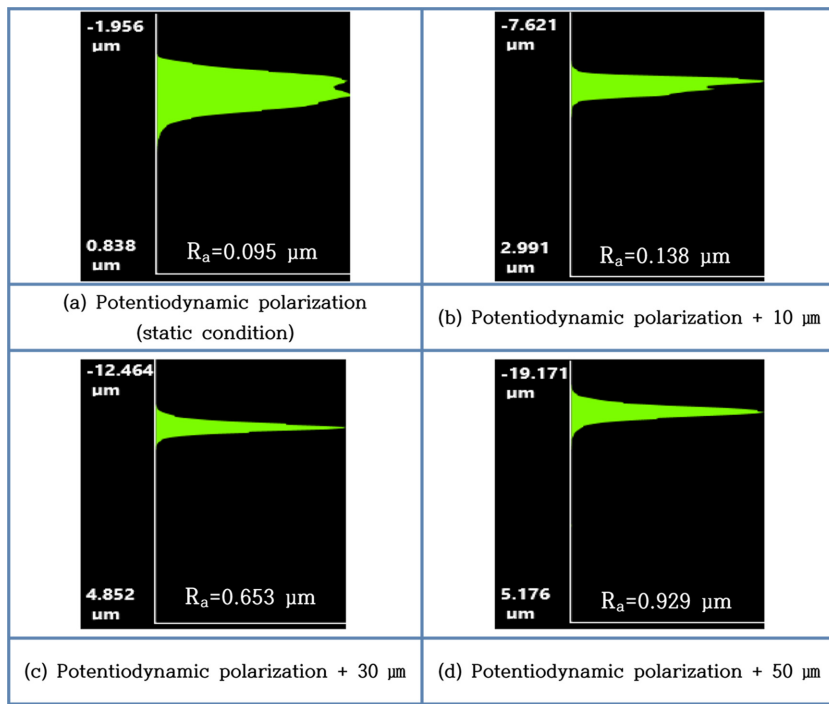
동전위 분극실험 결과, 산소발생에 의한 전류밀도 증가로 인해 공식전위  $E_{\text{pit}}$ 의 정확한 값을 확인할 수는 없지만, 산소발생 전위  $E_{O_2}$  (Oxygen evolution potential)보다 유사하거나 높은 값을 확인할 수 있었다. 중성의 염화물 용액인 해수에서 Ag/AgCl(saturated KCl)전극을 사용할 시 산소발생( $4\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^-$ )은 약 1000  $\text{mV}_{SSCE}$ 에서 발생하며 UNS N08367은 정적 환경과 캐비테이션 환경에서 산소발생전위 이전에 공식에 의한 전류밀도 상승은 관찰되지 않았다. 이는 중성의 염화물 용액에서 내식성이 우수한 스테인레스강이 산소발생으로 인하여 명확한 공식전위를 측정하지 못한 실험결과와 같은 경향을 나타냈다 [12,13].  $E_{\text{pit}}$  값은 공식에 대한 저항력의 척도를 나타내며 UNS N08367의 공식전위는 일반적인 오스테나이트계 스테인리스강인 UNS S30400(STS 304)과 UNS S31603(STS 316L)에 비해 귀방향에 위치한다. 이는 내공식지수 PREN에 영향을 미치는 Cr, Mo, N의 함유량의 차이로 발생한다. UNS N08367의 경우 일반적인 오스테나이트계 스테인리스에 비해 Mo와 N의 함유량이 높은 특징이 있다. 부동태 피막의 양극성모델(bipolar model)을 적용한 연구에 의하면 Mo 첨가로 인하여 피막에서  $\text{MoO}_4^{2-}$ 의 흡수가 양이온 선택층을 형성하여 피막의 탈수소를 증진시켰으며, N은  $\text{H}^+$ 과 반응 후  $\text{NH}_3$  및  $\text{NH}_4^+$ 를 형성시켜 공식영역의 국부적인 pH 강하를 보상하여 피막의 재부동태를 강화시키는 메커니즘으로 내식성을 향상시킨다 [14,15]. 이 원소들이 공식에 저항하는 기여도는 아래의 식과 같다.

$$PREN = \%Cr + 3.3\%(Mo + 0.5\%W) + 16\%N \quad (2)$$

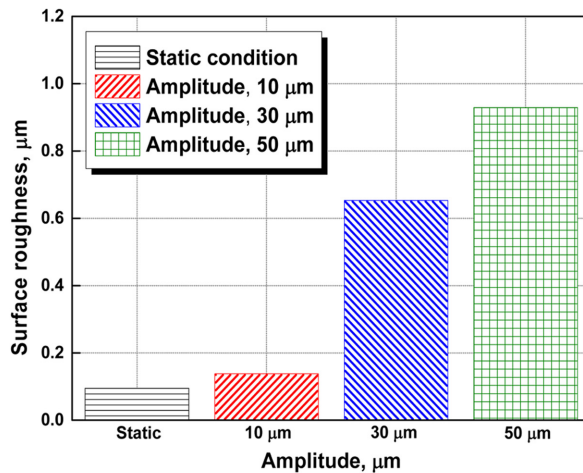
UNS N08637의 내공식지수는 45.6이고 이 값이 40 이상인 스테인리스강은 슈퍼 스테인리스강이라고 하여 해양환경과 석유화학 산업과 같은 가혹한 환경에서 우수한 내식성을 가진다 [16]. 따라서, 공식전위  $E_{pit}$ 가  $E_{O_2}$  보다 높게 형성된 이유는 UNS N08367의 우수한 내식성에 기인한 결과로 판단된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 천연해수에서 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강 UNS N08367에 대하여 정적 환경과 캐비테이션 환경에서 실시한 동전위 분극실험 후 시편의 표면을 3D 현미경을 통해 표면거칠기와 표면손상깊이를 분석한 결과이다. 표면 거칠기 히스토그램은 금속 표면에 대한 손상 깊이 분포를 시각화하여 나타낸 그래프이며, X축은 손상 깊이(변수)에 대한 빈도수를 퍼센트(분포량)로 Y축은 손상 깊이로 나타낸 값이다. Fig. 3에서 표면 거칠기의 경우 정적 환경에서 동전위 분극실험만 실시한 경우 0.095  $\mu m$ 를 나타내었다. 동적 환경에서는 캐비테이

테이션 환경에서 실시한 동전위 분극실험 후 시편의 표면을 3D 현미경을 통해 표면거칠기와 표면손상깊이를 분석한 결과이다. 표면 거칠기 히스토그램은 금속 표면에 대한 손상 깊이 분포를 시각화하여 나타낸 그래프이며, X축은 손상 깊이(변수)에 대한 빈도수를 퍼센트(분포량)로 Y축은 손상 깊이로 나타낸 값이다. Fig. 3에서 표면 거칠기의 경우 정적 환경에서 동전위 분극실험만 실시한 경우 0.095  $\mu m$ 를 나타내었다. 동적 환경에서는 캐비테이

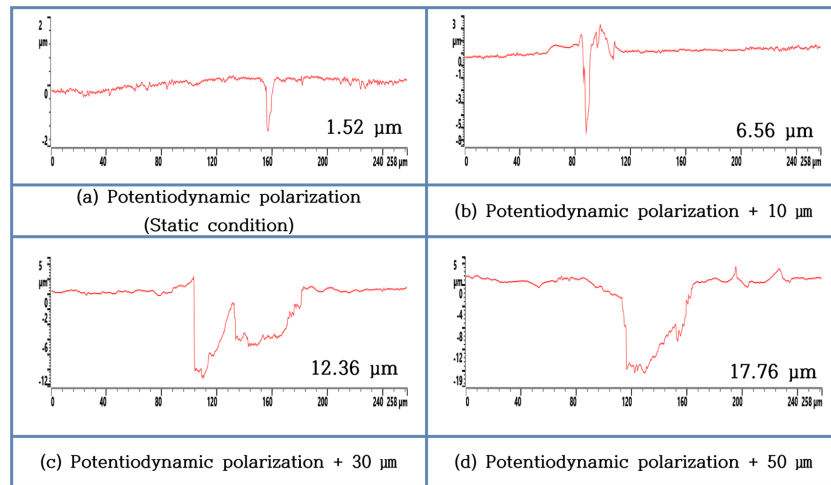


(a) Surface roughness histogram

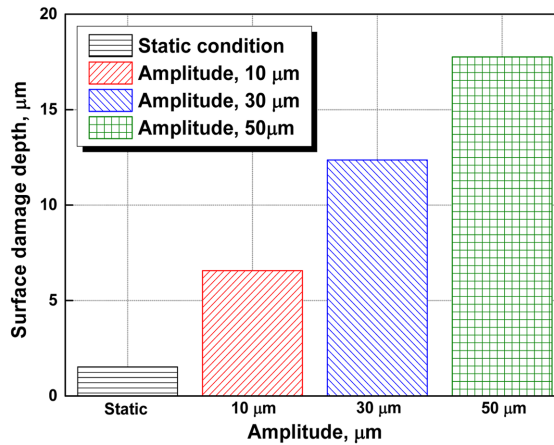


(b) Surface roughness arithmetic mean( $R_a$ ) graph

Fig. 3. Surface roughness after potentiodynamic polarization experiment with cavitation amplitude of UNS N08367 in seawater



(a) Surface damage depth parameter



(b) Surface damage depth graph

**Fig. 4. Surface damage depth after potentiodynamic polarization experiment with cavitation amplitude of UNS N08367 in seawater**

선 진폭이 증가할수록 캐비티의 충격압에 의해 국부적인 침식이 발생하면서 진폭 10, 30, 50 μm의 조건에서 표면 거칠기는 각각 0.138, 0.653, 0.929 μm를 나타내었다. Fig. 4의 표면손상깊이 또한 표면거칠기와 비슷한 양상을 보여주었다. 정적 환경에서 동전위 분극실험만 시행한 경우 손상깊이는 1.52 μm를 나타내었으며, 진폭 10, 30, 50 μm의 조건에서 표면손상깊이는 6.56, 12.36, 17.76 μm로 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 5는 천연해수에서 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강 UNS N08367에 대하여 정적 환경과 캐비테이션 환경에서 실시한 동전위 분극실험 후 시편 표면을 스캔한 것과 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과이다. 정적 환경에서 동전위 분극실험만 실시한 경우 결정립계에서의 부식손상이 전체적으로 관찰되었다. 염화물 용액에서 일반적인 오스테나이트 스테인리스강의 전형적인 손상은 공

식(Pitting)과 틈부식(Crevice corrosion)이나 UNS N08367은 높은 내공식지수로 인해 입계부식에 의한 손상이 관찰되었다 [17]. 그러나, 캐비테이션 환경에서 실시한 동전위 분극실험의 경우 부식에 의한 손상보다 침식에 의한 손상이 크게 관찰되었다. 그리고 캐비티의 충격압에 의해 압축잔류응력이 형성되며 소성변형이 발생하게 된다 [18,19]. 주사전자현미경 관찰결과, 캐비테이션 환경에서 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강 UNS N08367의 손상거동은 정적 환경과는 다른 형상으로 진행됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 천연해수에서 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강 UNS N08367에 대하여 정적 환경과 캐비테이션 환경에서 실시한 동전위 분극실험 후 표면경도를 마이크로비커스 경도계로 측정된 결과이다. 정적 환경과 진폭 10, 30, 50 μm의 조건에서 경도값은 각각 283.2, 301.4, 318.6 및 284.2 Hv값을 나타내었다. 캐비테이션의 피닝효과로

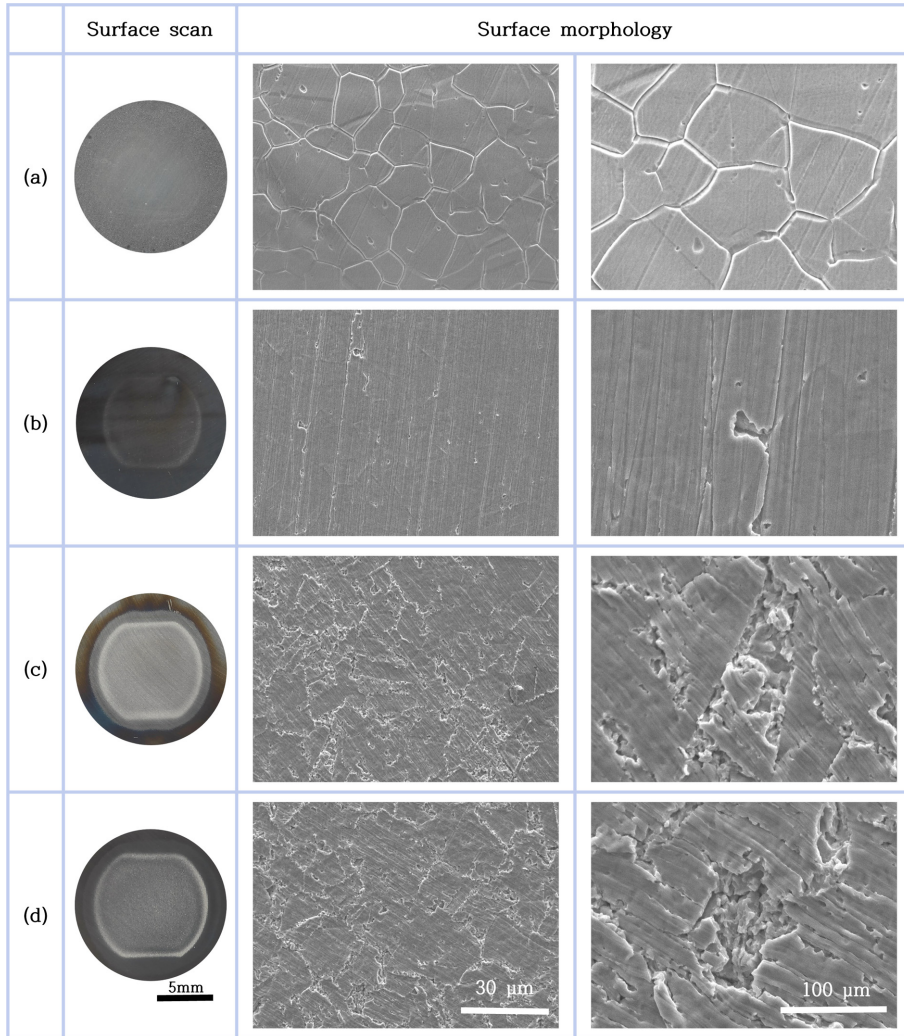


Fig. 5. Surface morphologies after potentiodynamic polarization experiment with cavitation amplitude of UNS N08367 in seawater; (a) Potentiodynamic polarization (static condition), (b) Potentiodynamic polarization + 10  $\mu\text{m}$ , (c) Potentiodynamic polarization + 30  $\mu\text{m}$ , (d) Potentiodynamic polarization + 50  $\mu\text{m}$

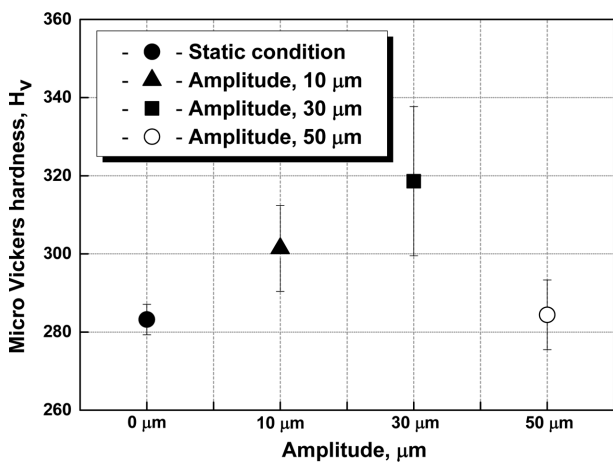


Fig. 6. Micro-Vickers hardness after potentiodynamic polarization experiment with cavitation amplitude of UNS N08367 in seawater

인해 경도값이 상승하였으며 이는 캐비티의 충격압으로 인해 표면에 압축잔류응력이 형성된 결과이다 [20,21]. 진폭 30  $\mu\text{m}$ 에서 가장 높은 경도값이 나타난 반면 진폭 50  $\mu\text{m}$ 에서는 과도하게 큰 충격에너지로 인해 표면에서 침식이 발생하여 표면 거칠기가 증가하였으며 경도값은 감소하는 경향을 나타냈다 [22].

Fig. 7은 천연해수에서 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강 UNS N08367에 대하여 정적 환경과 캐비테이션 환경에서 실시한 동전위 분극실험 후 손상 정도를 거시적으로 판단하기 위해 무게감소량 측정 결과를 나타낸 것이다. 정적 환경에서 동전위 분극실험만 실시한 경우 무게감소량은 14.1 mg이며 캐비테이션 조건에서 실시한 동전위 분극실험의 결과 진폭 10, 30, 50  $\mu\text{m}$  조건에서 각각 0.5, 0.6, 0.7 mg의 무게감소량을 나타냈다. 이와 같은 결과는 Hwang 등이 실시한 천연해수에서 알루미늄 합금

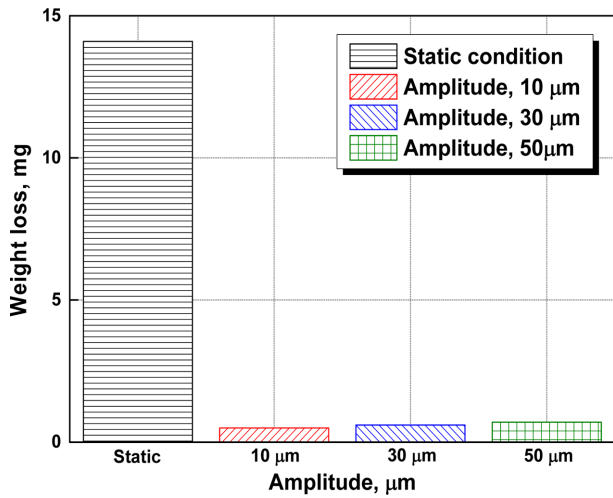


Fig. 7. Weight loss after potentiodynamic polarization experiment with cavitation amplitude of UNS N08367 in seawater

6061-T6의 캐비테이션 환경에서 전기화학적 반응과 상반되는 경향을 나타냈다 [8]. 알루미늄 합금 6061-T6의 경우 정적 환경에서 손상정도가 가장 적었으며 캐비테이션 진폭이 증가할수록 손상정도가 증가하였다. 알루미늄 합금의 경우 연성재료로 실험 초기에 캐비테이션에 의한 압축잔류응력으로 인한 소성변형이 발생하나 마이크로 제트에 의한 물리적인 힘에 의해 응력이 한계치를 넘어 서며 침식이 발생한다 [21]. 그러나 오스테나이트계 스테인리스강은 워터 캐비테이션 피닝효과에 의한 응력으로 변형유기 마르텐사이트 변태가 발생하고  $\gamma$ -austenite의  $\alpha'$ -martensite 변태가 표면에 균일하게 발생하여 내식성과 침식 저항성이 향상되었다 [24].

Fig. 8은 정적 환경과 캐비테이션 환경에서 UNS N08367의 손상거동을 도식화 한 것이다. 천연해수는 약알칼리성의 염화물 용액으로 자가증식기구(Self-propagating mechanism)에 의해 부식이 가속화된다. 동전위 분극실험을 통한 양극분극 상태에서 Fe의 양극용해 반응으로 형성된  $Fe^{2+}$  이온이 불용성의 부식생성물  $Fe(OH)_3$ 를 형성하게 된다.  $Fe(OH)_3$ 는  $Fe^{2+}$  이온이 쉽게 빠져 나가지 못할 정도로 조밀하나,  $Cl^-$  이온은 쉽게 통과할 수 있을 정도의 기공이 형성된다. 따라서,  $Fe(OH)_3$ 의 내부는 높은 산성의 염화물 농도를 유지하게 된다 [25]. 이로 인해 내부의 양극반응은 외부의 부동태 음극표면과 갈바닉쌍을 이루면서 부식이 가속화된다. 그러나, 캐비테이션 환경에서는 마이크로 제트에 의한 진동으로 인해 부식생성물의 접착력보다 강한 에너지로 인해 부식생성물은 모재로부터 탈리된다. 캐비테이션에 의한 지속적인 진동으로 인해 부식생성물의 피로파괴가 발생하게 되면 국부적으로 산성화되어 있던 수용액은 충분한 산소를 포함하고 있는

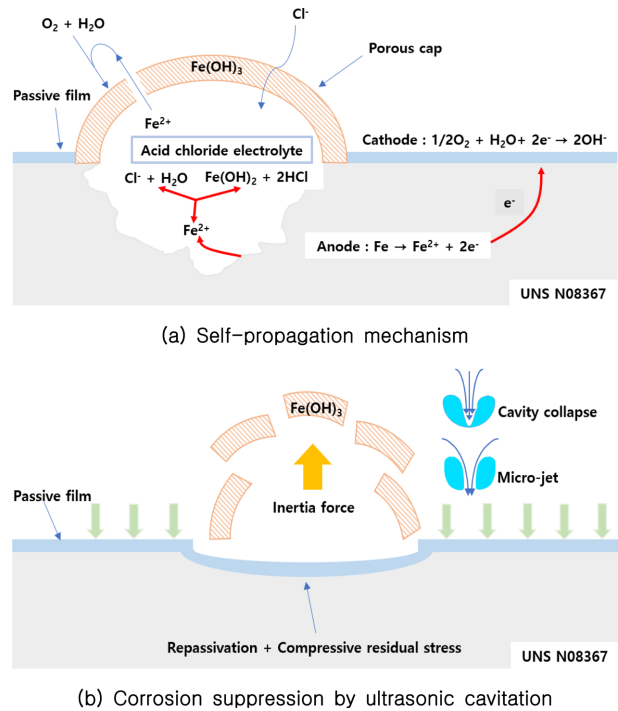


Fig. 8. Schematic diagram of self-propagation mechanism and corrosion suppression by ultrasonic cavitation

수용액과 혼합되면서 손상된 표면은 다시 재부동태된다 [26,27]. 따라서, Fig. 2의 동전위분극 곡선에서 + 1.2 V<sub>SSCE</sub> 전위 이후 전류밀도가 정적 환경에 비해 낮은 이유는 캐비테이션이 부식생성물을 제거하고 많은 산소와 반응하여 재부동태화 되면서 양극용해반응을 억제한 결과로 판단할 수 있다. 이와 같은 결과는 초음파가 염화물에 의한 UNS S31603의 공식성장을 억제시킨 Vasyliov 등의 연구결과와 일치한다 [28]. UNS N08367과 같이 진폭이 증가함에 따라 무게감소량의 차이가 거의 발생하지 않는 캐비테이션 저항성이 높은 재료는 캐비테이션을 사용하여 부식 생성을 억제할 수 있었다. 따라서, 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강 UNS N08367의 정적 환경과 캐비테이션 환경에서 무게감소량의 차이는 캐비티가 붕괴할 시 발생하는 마이크로 제트의 부식생성물 제거효과와 압축잔류응력으로 인한 변형유기 마르텐사이트 변태로 향상된 내식성의 결과로 사료된다.

#### 4. 결론

슈퍼 오스테나이트 스테인리스강 UNS N08367의 전기화학적 거동에 미치는 캐비테이션 진폭의 영향에 관한 연구 결과는 다음과 같다.

1. 동전위 분극실험 결과, 캐비테이션의 진폭이 증가할수록 부식전류밀도는 상승하였으나 + 1.2 V<sub>SSCE</sub> 이후부터

는 결정립계 부식으로 인한 양극용해반응 촉진으로 정적 환경의 전류밀도가 가장 높은 것을 나타냈다.

2. 정적 환경에서의 손상은 주로 입계부식이 나타났으나 캐비테이션 환경에서는 침식에 의한 손상이 주로 관찰되었다.

3. 무게감소량은 정적 환경에서 가장 높게 나타났으며 이는 캐비테이션에 의해 부식생성물인  $Fe(OH)_3$ 가 파괴되면서 부동태 피막의 재부동태화 촉진과 압축잔류응력 형성으로 물리적인 침식손상에 대한 저항성이 향상된 결과로 사료된다.

4. 캐비티의 충격압에 의해 재료표면에 압축잔류응력이 형성되어 경도가 상승하는 워터 캐비테이션 피닝효과를 나타냈으며 진폭 30  $\mu m$ 에서 가장 높은 경도값을 나타냈다.

## 감사의 글

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

## References

1. K. Li, M. Wu, X. Gu, K. F. Yuen, and Y. Xiaoa, Determinants of ship operators' options for compliance with IMO 2020, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **86**, 102459 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102459>
2. N. R. Ammar and I. S. Seddiek, Eco-environmental analysis of ship emission control methods: Case study RO-RO cargo vessel, *Ocean Engineering*, **137**, 166 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.03.052>
3. L. Dahl, Corrosion in flue gas desulfurization plants and other low temperature equipment, *Materials and Corrosion*, **43**, 292 (1992). Doi: <https://doi.org/10.1002/maco.19920430610>
4. H. K. Hwang and S. J. Kim, Electrochemical Characteristics of Superaustenitic Stainless Steel with Temperature in Sea Water, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 391 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.6.391>
5. S. Ghosh and T. Ramgopal, Effect of Chloride and Phosphoric Acid on the Corrosion of Alloy C-276, UNS N08028, and UNS N08367, *Corrosion*, **61**, 609 (2005). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3278197>
6. J. D. Fritz and R. J. Gerlock, Chloride stress corrosion cracking resistance of 6% Mo stainless steel alloy (UNS N08367), I, **135**, 93 (2001). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00142-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00142-4)
7. A. I. Karayan, E. M. Visuet, and H. Castaneda, Transpassivity characterization of the alloy UNS N08367 in a chloride-containing solution, *Journal of Solid State Electrochemistry*, **18**, 3191 (2014). Doi: <https://doi.org/10.1007/s10008-014-2566-0>
8. H. K. Hwang and S. J. Kim, Electrochemical Characteristics with Cavitation Amplitude Under Cavitation Erosion of 6061-T6 in Seawater, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 318 (2020). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.6.318>
9. D. M. G. Garcia, J. G. Anton, A. I. Munoz, E. B. Tamarit, Effect of cavitation on the corrosion behaviour of welded and non-welded duplex stainless steel in aqueous LiBr solutions, *Corrosion Science*, **48**, 2380 (2006). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.09.009>
10. R. M. F. Domene, E. B. Tamarit, D. M. G. Garcia, J. G. Anton, Repassivation of the damage generated by cavitation on UNS N08031 in a LiBr solution by means of electrochemical techniques and Confocal Laser Scanning Microscopy, *Corrosion Science*, **52**, 3453 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.06.018>
11. I. J. Jang, J. M. Jeon, K. T. Kim, Y. R. Yoo, and Y. S. Kim, Ultrasonic Cavitation Behavior and its Degradation Mechanism of Epoxy Coatings in 3.5 % NaCl at 15 °C, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 26 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.1.26>
12. R. Sriram and D. Tromans, Pitting Corrosion of Duplex Stainless Steels, *Corrosion*, **45**, 804 (1989). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3584986>
13. R. Magnabosco and N. A. Falleiros, Pit Morphology and its Relation to Microstructure of 850 °C Aged Duplex Stainless Steel, *Corrosion*, **61**, 130 (2005). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3278167>
14. M. Sakashita and N. Sato, The effect of molybdate anion on the ion-selectivity of hydrous ferric oxide films in chloride solutions, *Corrosion Science*, **17**, 473 (1977). Doi: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(77\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0010-938X(77)90003-8)
15. Y. S. Kim, Synergistic Effect of Nitrogen and Molybdenum on Localized Corrosion of Stainless Steels, *Corrosion Science and Technology*, **9**, 20 (2010). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2010.9.1.020>
16. H. Y. Chang, H. B. Park, Y. S. Kim, S. K. Ahn, and K. T. Kim, Compatibility Evaluation for Application of Lean Duplex Stainless Steels to Seawater Systems in Nuclear Power Plants, *Materials Science Forum*, **654-656**, 382 (2010). Doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net>



MSF.654-656.382

17. M. Asaduzzaman, C. Mohammad, Mustafa, and M. Islam, Effects of concentration of sodium chloride solution on the pitting corrosion behavior of AISI-304L austenitic stainless steel, *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, **17**, 477 (2011). Doi: <https://doi.org/10.2298/CICEQ110406032A>
18. S. J. Kim, K. Y. Hyun, S. K. Jang, Effects of water cavitation peening on electrochemical characteristic by using micro-droplet cell of Al-Mg alloy, *Current Applied Physics*, **12**, 24 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2012.02.013>
19. S. J. Kim, S. J. Lee, S. O. Chong, Electrochemical characteristics under cavitation-erosion for STS 316L in seawater, *Materials Research Bulletin*, **58**, 244 (2014). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.03.029>
20. S. J. Kim, M. S. Han, and M. S. KIM, Evaluation of Corrosion and the Anti-Cavitation Characteristics of Cu Alloy by Water Cavitation Peening, *Corrosion Science and Technology*, **11**, 184 (2012). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2012.11.5.184>
21. O. Takakuwa, T. Ohmi, M. Nishikawa, A. T. Yokobori Jr and, H. Soyama, Suppression of fatigue crack propagation with hydrogen embrittlement in stainless steel by cavitation peening, *Strength, Fracture and Complexity*, **7**, 79 (2011). Doi: <https://doi.org/10.3233/SFC-2011-0126>
22. P. V. Rao, Evaluation of epoxy resins in flow cavitation erosion, *Wear*, **122**, 77 (1988). Doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90008-7)
23. A. Karimi and J. L. Martin, Cavitation erosion of materials, *International Metal Reviews*, **31**, 1 (1986). Doi: <https://doi.org/10.1179/imtr.1986.31.1.1>
24. B. N. Mordyuk, G. I. Prokopenko, M. A. Vasylyev, M. O. Iefimov, Effect of structure evolution induced by ultrasonic peening on the corrosion behavior of AISI-321 stainless steel, *Materials Science and Engineering A*, **458**, 253 (2007). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.049>
25. S. F. Lee, J. F. García, S. S. Yap, and D. Hui, Pitting corrosion induced on high-strength high carbon steel wire in high alkaline deaerated chloride electrolyte, *Nanotechnology Reviews*, **11**, 973 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0060>
26. R. Wang, Effect of ultrasound on initiation, growth and repassivation behaviours of pitting corrosion of SUS 304 steel in NaCl aqueous solution, *Corrosion Engineering Science and Technology*, **51**, 201 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1179/1743278215Y.0000000046>
27. D. Sun, Y. Jiang, Y. Tang, Q. Xiang, C. Zhong, J. Liao, and J. Li, Pitting corrosion behavior of stainless steel in ultrasonic cell, *Electrochimica Acta*, **54**, 1558 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.09.056>
28. G. S. Vasylyev and O. M. Kuzmenko, Pitting Suppression of AISI 316 Stainless Steel Plates in Conditions of Ultrasonic Vibration, *International Journal of Chemical Engineering*, **2020**, 1 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1155/2020/6697227>