

해수 환경에서 듀플렉스 스테인리스강의 전기화학적 거동 및 캐비테이션 특성

허호성¹ · 김성종^{2,†}

¹목포해양대학교 대학원, 전라남도 목포시 해양대학로 91

²목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대학로 91

(2021년 12월 11일 접수, 2021년 12월 15일 수정, 2021년 12월 15일 채택)

Electrochemical and Cavitation-Erosion Characteristics of Duplex Stainless Steels in Seawater Environment

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 December 11, 2021; Revised December 15, 2021; Accepted December 15, 2021)

A wet type scrubber for merchant vessel uses super austenitic stainless steels with pitting resistance equivalent number (PREN) of 40 or higher for operation in a harsh corrosive environment. However, it is expensive due to a high nickel content. Thus, electrochemical behavior and cavitation erosion characteristics of UNS S32750 as an alternative material were investigated. Microstructure analysis revealed fractions of ferritic and austenitic phases of 48% and 52%, respectively, confirming the existence of ferritic matrix and austenitic island. Potentiodynamic polarization test revealed damage at the interface of the two phases because of galvanic corrosion due to different chemical compositions of ferritic and austenitic phases. After a cavitation test, a compressive residual stress was formed on the material surface due to impact pressure of cavity. Surface hardness was improved by water cavitation peening effect. Hardness value was the highest at 30 μ m amplitude. Scanning electron microscopy revealed wave patterns due to plastic deformation caused by impact pressure of the cavity. The depth of surface damage increased with amplitude. Cavitation test revealed larger damage caused by erosion in the ferritic phase due to brittle fracture derived from different strain rate sensitivity index of FCC and BCC structures.

Keywords: Duplex stainless steel, Cavitation, Erosion, Electrochemical corrosion, UNS S32750

1. 서론

대형상선은 디젤엔진 배기가스의 황산화물을 제거하기 위해 해수를 세정수로 사용하는 스크러버(scrubber)가 설치되는 추세이다. 스크러버는 배기가스에 포함되어 있는 황 성분과 해수 내 염소 이온에 기인하여 가혹한 부식환경에서 운용된다 [1]. 특히, 세정수를 공급 및 배출하는 스크러버 시스템의 원심펌프는 고속으로 운전된다. 그로인해, 원심펌프의 임펠러에서는 캐비테이션 현상이 발생되며 캐비티 붕괴에 따른 충격으로 침식 손상의 우려가 있다. 따라서 스크러버 시스템에 사용되는 재료는 내식성과 기계적 특성이 필연적으로 중요하다.

이러한 환경에서 사용할 수 있는 스테인리스강은 슈퍼 오스테나이트계 스테인리스강으로 Mo 함량이 약 6 wt%, Cr과 Ni은 20 ~ 25 wt%, 질소를 약 0.2 ~ 0.3 wt% 첨가하여 내식성이 우수하다 [2]. 그러나, 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강은 Ni의 높은 함량으로 인해 고가인 단점이 있기 때문에 합금 원소의 함량을 조절하여 최적의 합금 개발이 진행중이고 그 중 하나가 듀플렉스 스테인리스강이다 [3]. 듀플렉스 스테인리스강은 페라이트상과 오스테나이트상이 약 50:50의 비율로 매우 미세하게 결합된 구조이며 오스테나이트계 스테인리스강에 비해 항복강도가 2 ~ 3배 높다 [2]. 듀플렉스 스테인리스강은 개발 초기 사용 범위가 극히 제한적이었으나 크롬의 함량을 22 wt%, 몰리브데넘의 함량을 3 wt%까지 높이고 질소를 약 0.15 ~ 0.25 wt% 첨가하여 페라이트 및 오

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

허호성: 석사과정, 김성종: 교수

스테인이트 상에 대한 크롬의 분포를 균일하게 하여 염소 분위기에서 응력부식균열 저항성과 공식, 틈부식에 대한 저항성을 향상시켰다 [4]. 최근에는 기존 크롬의 함량이 22 wt%인 듀플렉스 스테인리스강에 비해서 기계적 강도 및 내식성을 향상시키기 위해 크롬의 함량을 25 wt%까지 향상시킨 듀플렉스 스테인리스강이 제조되고 있다. 그 결과, 해양환경에서 각종 펌프, 밸브, 터빈의 기부속, 열교환기 등에 적용되고 있다 [5]. 이러한 듀플렉스 스테인리스강에 대한 연구는 열처리 온도와 시간에 따른 상분율의 변화와 온도에 따른 공식저항성 비교 및 비금속 개재물의 혼입에 의한 공식 발생 등이 있다 [6,7]. 그러나, 듀플렉스 스테인리스강의 천연해수에서의 캐비테이션-침식에 관련된 연구는 미미하다.

따라서, 본 연구에서는 천연해수에서의 듀플렉스 스테인리스강의 전기화학적 거동과 캐비테이션-침식특성을 연구하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 UNS S32750 (Stainless steel 329J4L)을 실험재료로 선정하였다. UNS S32750의 천연해수에서의 전기화학적 거동과 캐비테이션 저항성을 평가하기 위해 동전위 분극 실험과 캐비테이션 실험을 실시하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 듀플렉스 스테인리스강 UNS S32750의 화학조성을 나타낸 것이다. 시편준비는 열 변형을 최소화하기 위해 냉각수가 공급되는 절단기를 사용하여 2.5 cm × 2.5 cm 크기로 가공 후 SiC 연마지 #2000까지 단계적으로 연마하였다. 연마 후 3분간 초음파 세척을 실시하였고 아세톤과 증류수로 세척 후 진공챔버에서 24시간 건조하였다. 천연해수에서의 전기화학적 거동을 평가하기 위해 BioLogic Science instrument사의 FR/VCP를 사용하였다. 분극 실험 시 30 °C의 천연해수를 사용하여 기준전극은 은/염화은(Ag/AgCl/sat. KCl) 전극을, 대응전극은 백금(Pt)을, 작업 전극은 4.15 cm²의 면적을 노출시켜 홀더에 장착하였다. 동전위 분극 실험은 실험 전 용액에 3,600초간 침지하

여 안정화시킨 뒤 개로전위(Open circuit potential : OCP)를 기준으로 -0.25 V부터 2.0 V까지 0.5 mV/s의 주사속도로 분극시키며 실시하였다. 동전위 분극곡선을 통해 공식전위(E_{pit})을 산출하고 Tafel 외삽법으로 부식전류밀도(I_{corr})와 부식전위(E_{corr})를 산출하였다.

캐비테이션 실험은 천연 해수 환경에서 ASTM G32 규정을 준하여 실시하였다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 압전(piezo electric) 효과를 이용한 진동발생 장치를 사용하였으며, 대향형 진동법으로 실험을 실시하였다. 60 Hz, 220 V의 전력을 전자회로를 거쳐 20 kHz의 정격진동 출력을 발생시켜 진동자에 공급하는 역할을 하며, 정진폭 자동제어 방식으로 진폭변수는 10, 30, 50 μ m로 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 부식손상 영향을 최소화하기 위해 Chiller를 사용하여 실험용액의 온도를 30 °C로 일정하게 유지하였으며 75분간 실험을 진행하였다. 무게감소량 분석은 시험편을 실험시작 전과 종료 후 초음파 세척기로 세척

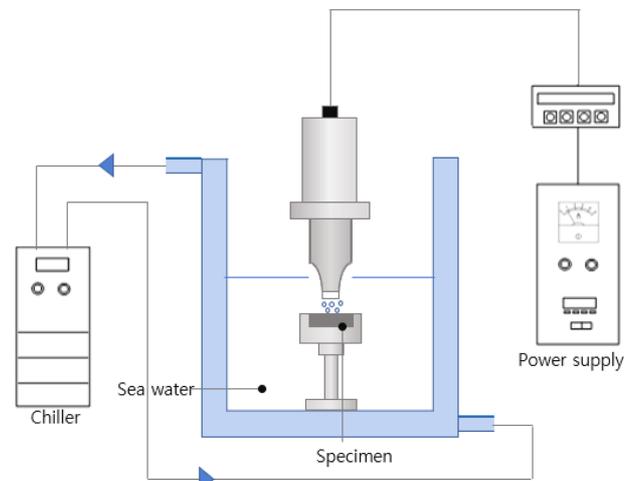


Fig. 1. Schematic diagram of cavitation test apparatus

Table 1. Chemical compositions of UNS S32750 (wt%)

C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Fe
0.023	0.48	0.75	0.001	25.3	7.33	3.14	0.155	0.191	Bal

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

하여 건조기에서 24시간 동안 건조시킨 뒤 무게를 측정하여 분석하였다. 실험용액의 주요 성분 및 특성은 Table 2에 나타내었고 실험 후 손상 경향을 파악하기 위해 표면을 주사전자현미경(BRUKER, SNE-4500M Plus)과 레이저 3D 현미경(Olympus, OLS-5000)을 이용하여 분석하였다. 그리고, 페라이트상과 오스테나이트상의 상분율 및 금속 조직을 관찰하기 위하여 에칭을 40% NaOH 수용액에서 DC 6 V, 10 s 조건에서 실시하였으며 이미지 분석을 통하여 상분율을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 상분율과 금속조직 분석 결과를 나타낸 것이다. 듀플렉스 스테인리스강인 UNS S32750에 대하여 에칭을 실시한 결과 α -페라이트(어두운 면) 상과 γ -오스테나이트(밝은 면) 상으로 형성되었음을 알 수 있다. 금속 조직에 관한 다양한 연구에 의하면 듀플렉스 스테인리스강은 페라이트 matrix와 오스테나이트 island 형태

로 구성되어 있으며 주사전자현미경 분석결과를 통해서 이를 확인할 수 있었다 [8]. 이미지 분석결과 UNS S32750은 상분율이 48:52로 페라이트와 오스테나이트의 상분율이 거의 유사함을 확인할 수 있었다. 염화물 용액에서 듀플렉스 스테인리스강의 상분율과 관련된 실험 결과는 다양하다. UNS S32101의 상분율과 공식의 상관관계에 대한 연구결과에서는 페라이트상의 내공식성 지수가 더 낮고 열처리를 통해 페라이트의 상분율이 증가할수록 공식전위가 비(卑, noble)전위 방향으로 이동하여 오스테나이트상보다 페라이트상에서 우선적으로 공식이 발생하였다. 그리고, 열처리를 통하여 페라이트상이 증가할수록 오스테나이트상과 갈바닉쌍에 의한 전류밀도 상승으로 인해 부식속도가 증가하였다 [9]. 따라서, 상분율은 내식성에 있어서 중요한 요소가 된다. 내공식지수(PREN = Pitting Resistance Equivalent Number)란 스테인리스강의 Chloride-Containing 환경에서 공식에 대한 저항성 수치를 나타낸 값으로 화학원소 성분 조성량에 따라 결정된다. 내공식지수에 영향을 주는 원소로는

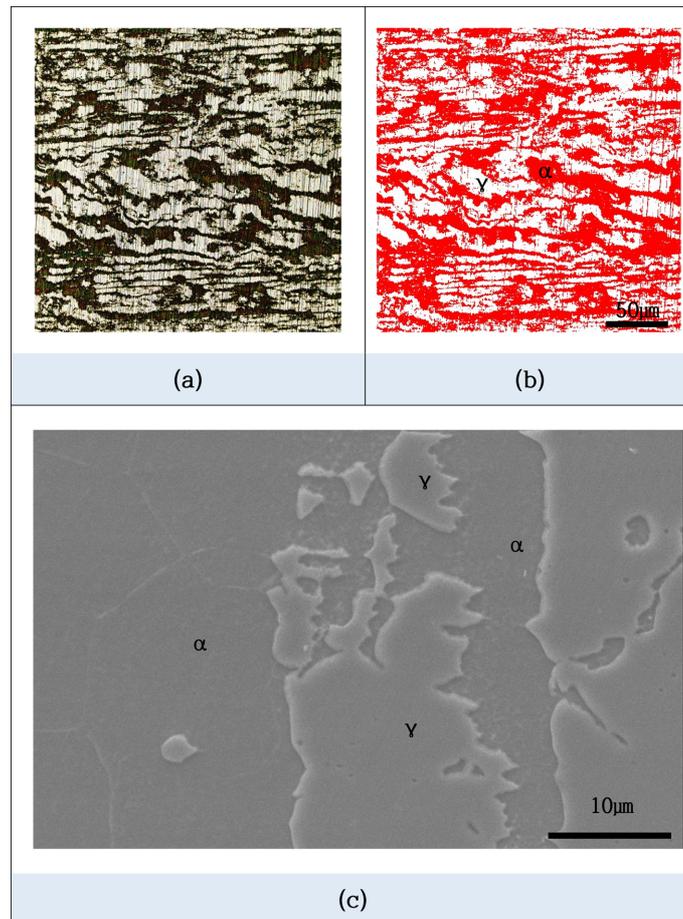


Fig. 2. Surface morphologies of UNS S32750: (a) etched in 40% NaOH, DC 6 V, 10 s; (b) phase fraction ratio(α = 48%, γ = 52%); (c) SEM (α = ferritic matrix, γ = austenitic island)

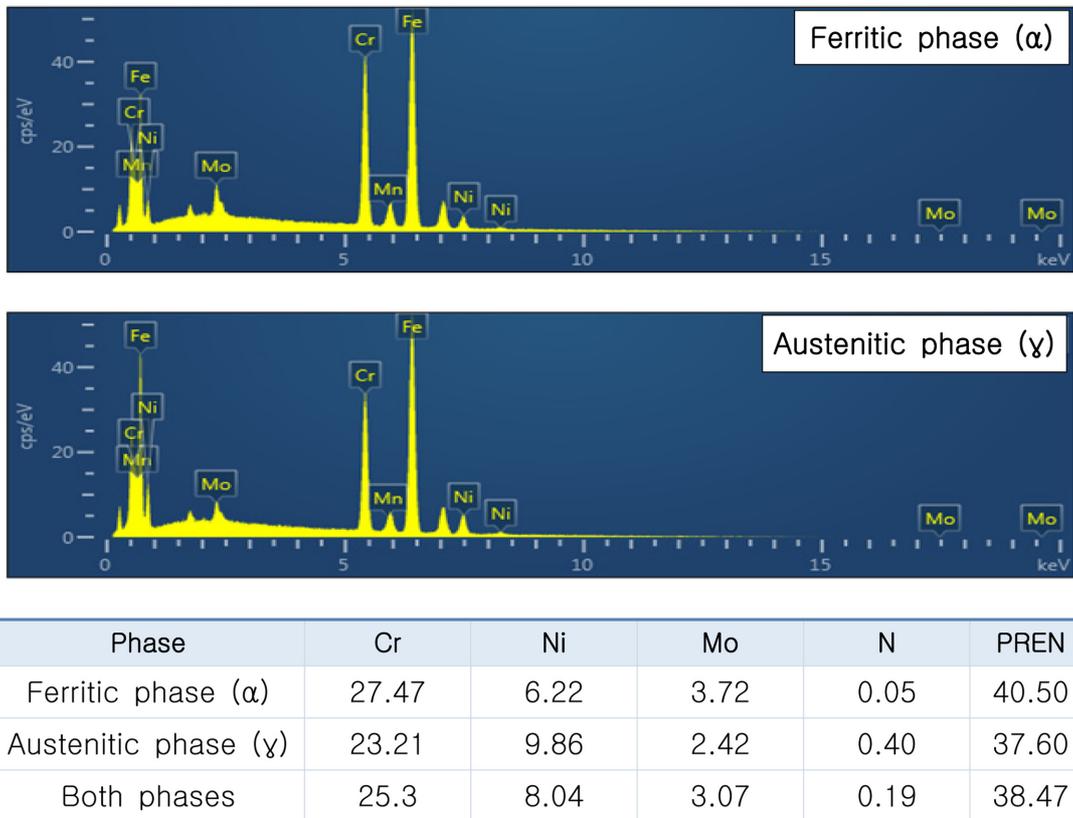


Fig. 3. The chemical composition (wt%) and PREN of UNS S32750

주로 크롬(Cr), 몰리브데넘(Mo), 텅스텐(W), 질소(N)가 있다. 이 원소들이 공식에 저항하는 기여도는 아래의 식과 같다.

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

이러한 식에 의해 내공식지수가 40 이상인 스테인리스강은 슈퍼 스테인리스강이라고 하며 해양환경과 석유화학 산업과 같은 가혹한 환경에서 우수한 내식성을 가진다 [11].

Fig. 3은 UNS S32750의 페라이트상과 오스테나이트상의 EDS 분석 결과와 PREN 값이다. EDS 분석 결과, α 상에서는 페라이트 안정화 원소인 Cr과 Mo의 함량이 더 높게 나타났다. 그리고, γ 상에서는 오스테나이트 안정화 원소인 Ni와 N의 함량이 더 높게 측정되었다. 측정된 원소함량에 따라 내공식 지수를 계산한 결과, UNS S32750의 페라이트상 내공식지수는 40.50을 나타내었으며 오스테나이트상 내공식지수는 37.60을 나타냈다. 듀플렉스 스테인리스강의 공식발생에 관련한 여러 가지 연구결과 페라이트상과 오스테나이트상의 선택적 부식은 합금원소의 함량과 침전물 및 용액변수에 의해 영향

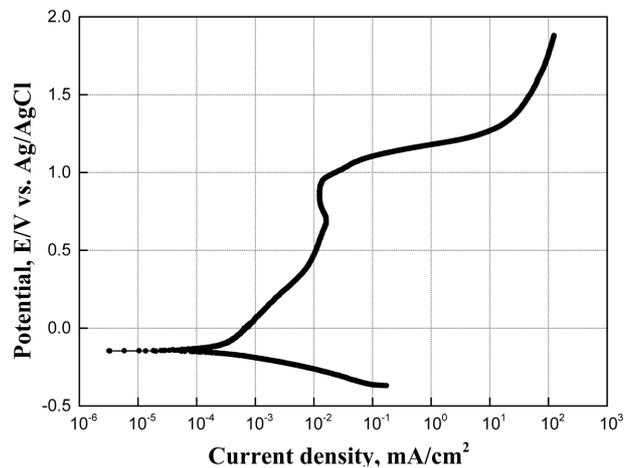


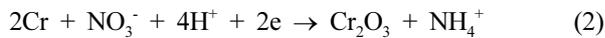
Fig. 4. Potentiodynamic polarization curves of UNS S32750 in seawater

을 받았다 [11,12]. 따라서 천연해수에서의 UNS S32750의 전기화학적 특성을 알아보고자 동전위 분극 실험을 실시하였다.

Fig. 4는 천연해수에서 듀플렉스 스테인리스강 UNS S32750에 대하여 30 °C의 온도조건에서 수행한 동전위

분극 실험 결과를 나타낸 것이다. 시험결과 침지 초기에 형성된 부동태 피막에 의한 부동태 전류 밀도가 관찰되었다. 전위가 상승함에 따라 Cl⁻이온의 침투에 의해 산화피막이 파괴되어 급격한 전류밀도 상승이 관찰되었다. 이는 Cl⁻이온이 부동태 피막의 구조가 다소 불안정한 부분에서 산소나 수산기와 치환되어 국부적으로 피막을 용해하는 결과로 판단된다 [13]. Tafel 분석결과, UNS S32750의 부식전류밀도는 $2.16 \times 10^{-4} \text{ mA/cm}^2$ 를 나타내었고 공식전위인 E_{pit} 는 산소 발생 전위 E_{O_2} (Transpassive potential) 보다 높게 나타났다. E_{pit} 의 값은 공식에 대한 저항력의 척도를 나타낸다. UNS S32750의 공식전위는 일반적인 오스테나이트계 스테인리스강인 UNS S30400과 UNS S31603에 비해 귀방향에 위치한다. 이는 내공식지수 PREN에 영향을 미치는 Cr, Mo, N의 함유량이 더 높기 때문이다. 부동태 피막의 양극성 모델(bipolar model)을 적용한 연구에 의하면 Mo 첨가로 인하여 피막에서 MoO_4^{2-} 의 흡수가 양이온 선택층을 형성하고 피막의 탈수소를 증진시킨다 [14].

그리고, N은 H⁺와의 반응하여 NH₃ 및 NH₄⁺를 형성하며 공식영역의 국부적인 pH 강하를 보상하여 피막의 재부동태를 강화시킨다.



그리고, N은 산화음이온(NOx⁻)의 형태로 존재하여 Mo와 반응하여 몰리브덴산염과 산화질소를 만들어 내식성 향상에 도움을 준다 [15].

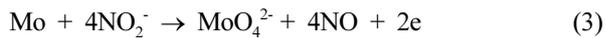


Fig. 5는 동전위 분극 실험과 캐비테이션 실험 후 표면 형상을 나타낸 것이다. 동전위 분극 실험의 경우 결정립계의 손상으로 인해 표면이 전반적으로 손상되었으나 현저하게 공식에 의한 손상은 발견되지 않았다. 캐비테이션 실험 결과, 진폭 증가에 따라 혼 톱 형상의 손상이 가장자리에 집중되어 나타났다. 이는 Fig. 6과 Fig. 7의 3D 현미경으로 관찰한 표면거칠기와 최대 손상 깊이를 분석한 것과 일치한다. 표면 거칠기 히스토그램은 금속 표면에 대하여 손상 깊이의 분포를 시각화하여 나타낸 그래프이며, X축은 손상 깊이(변수)에 대한 빈도수를 퍼센트(분포량)로 Y축은 손상 깊이로 나타낸 값이다. 동전위 분극 실험 결과, 표면거칠기는 0.337 μm, 표면손상깊이는 2.22 μm를 나타냈다. 캐비테이션 실험 결과, 진폭이 증가할수록 표면 손상이 증가하고 거친 표면이 나타났다. 진폭 10, 30, 50 μm에서 표면 거칠기는 0.165, 0.794, 1.632 μm를 나타냈으며 표면손상깊이는

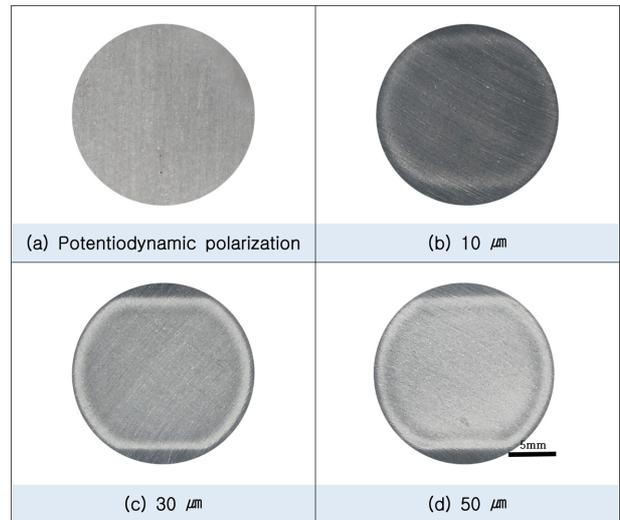
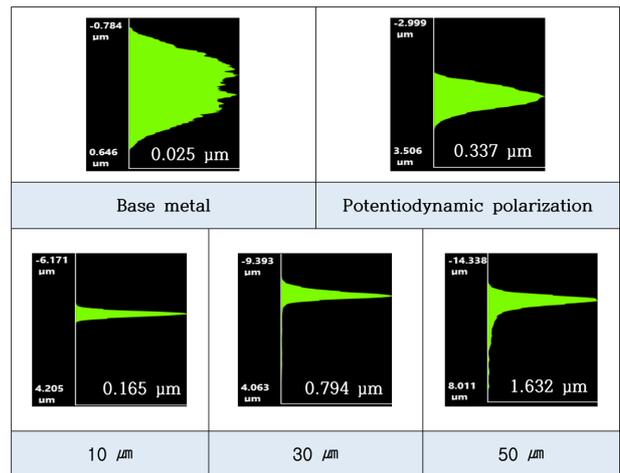
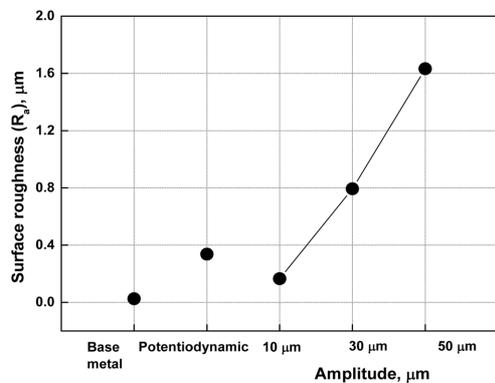


Fig. 5. Surface morphologies after potentiodynamic polarization and cavitation experiment of UNS S32750 in sea water

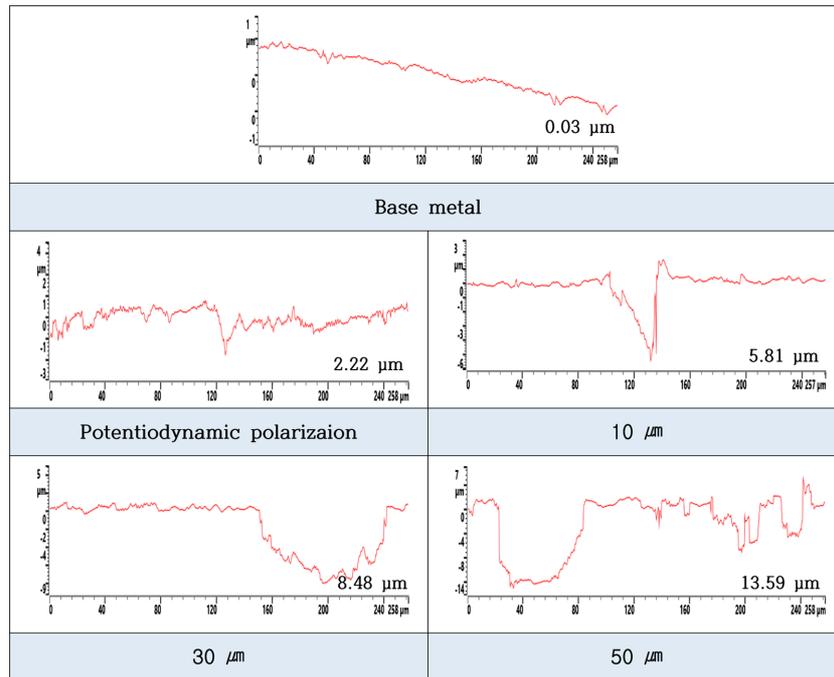


(a) Surface roughness histogram

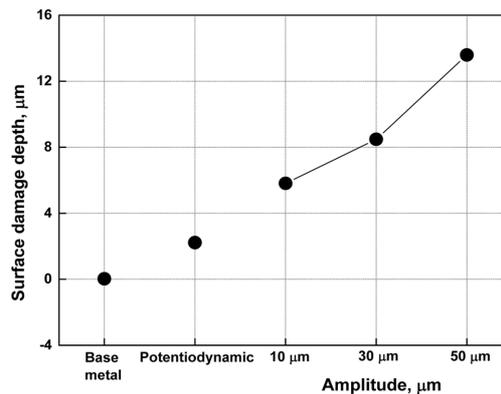


(b) Surface roughness arithmetic mean (Ra)

Fig. 6. Surface roughness after potentiodynamic polarization and cavitation experiment of UNS S32750 in sea water



(a) Surface parameter



(b) Surface damage depth

Fig. 7. Surface damage depth after potentiodynamic polarization and cavitation experiment of UNS S32750 in sea water

5.81, 8.48, 13.59 μm를 나타냈다. 히스토그램의 표준편차란 손상 깊이의 평균으로부터 분포되어있는 정도를 나타내며 이를 산포라고도 한다. 표준편차가 클수록 전체적으로 반응이 진행되어 다양한 깊이 손상을 나타낸 것으로 판단할 수 있으며 진폭 증가 시 표면 거칠기의 산술평균 R_a 와 산포가 증가함을 확인할 수 있다. 이는 캐비테이션이 재료 표면에 충격압을 지속적으로 가하여 재료 내부에 응력이 누적되고, 그 한계치를 넘어서게 되면 표면조직은 피로파괴가 발생하여 손상이 발생하는 연구 결과와 일치한다 [16].

Fig. 8은 동전위 분극 실험과 캐비테이션 실험 후 주사전자현미경으로 표면을 관찰한 결과이다. 동전위 분

극 실험 결과 페라이트상과 오스테나이트상의 경계면에서 손상이 주로 발생하였는데 이는 두 상의 경계면이 Cr과 Mo의 고갈영역으로써 내식성이 저하되고 페라이트상과 오스테나이트 상의 내공식지수 차이에 의한 갈바닉 부식과 공식전위 이후 활성화해 반응의 결과로 사료된다 [17]. 캐비테이션 침식 실험 결과 10 μm 진폭에서는 압축잔류응력 형성에 의한 소성변형으로 표면무늬가 미세하게 관찰되었고 침식에 의한 손상은 국부적으로 관찰되었다. 진폭이 증가할수록 피트의 내부 및 주변에서 새로운 기포 발생이 촉진되어 더 많은 기포의 붕괴로 강한 충격파가 형성되어 침식에 의한 손상과 표면무늬가 더 많이 발생하였고 이는 무게 감소량에 영향

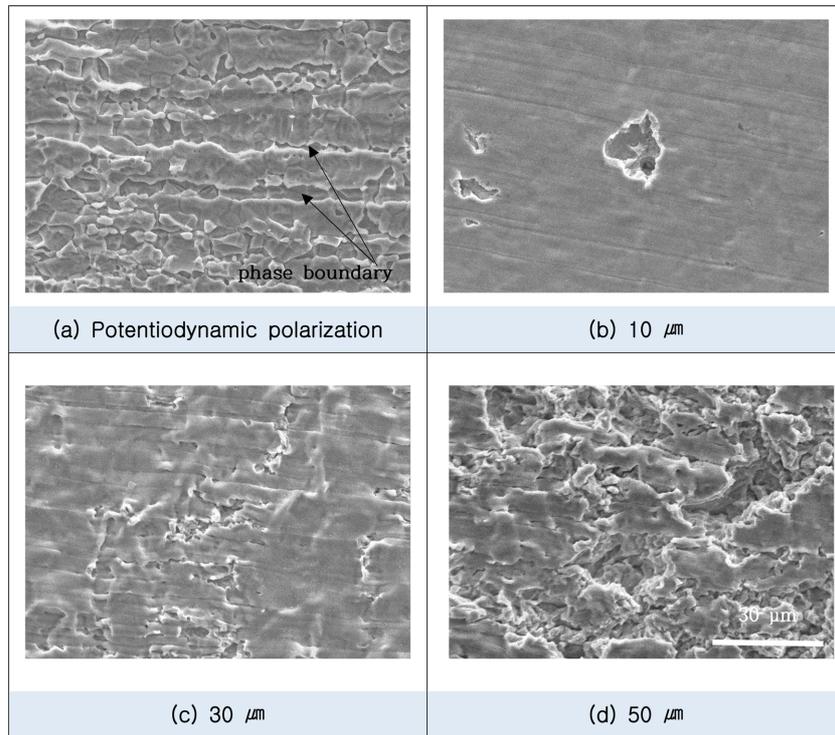


Fig. 8. SEM images after potentiodynamic polarization and cavitation experiment of UNS S32750 in sea water

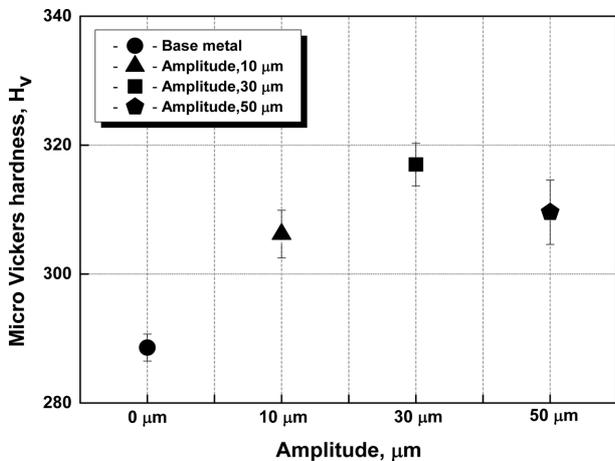


Fig. 9. Micro Vickers hardness after cavitation experiment of UNS S32750 in sea water

을 미쳤다. 진폭 10, 30, 50 μm에서 무게 감소는 각각 0.2, 0.3, 0.5 mg으로 측정되었다. 진폭이 증가할수록 무게 감소량이 증가하나 침식 저항성이 우수한 금속이므로 무게 감소량의 변화가 매우 적게 나타났음을 알 수 있다. Mo 함량이 증가하게 되면 수지상정 간 영역에서 Cr 탄화물의 크기는 감소하고 Mo₂₃C₆ 및 Mo₆C 유형으로 탄화물의 크기가 증가하여 침식에 대한 저항성이 향상되는 연구결과가 있다 [18]. 따라서, 진폭이 증가함에도 무게 감소량의 변화가 적은 이유는 UNS S32750에

포함된 Mo의 영향으로 사료된다.

Fig. 9는 캐비테이션 실험 후 마이크로비커스 경도계로 표면경도 측정결과를 나타내었다. 모재와 진폭 10, 30, 50 μm의 조건에서 경도값은 각각 288.6, 306.2, 317.0, 309.6 Hv값을 나타내었다. 캐비테이션 실험 중 워터 캐비테이션 피닝효과로 인해 모재보다 높은 경도값을 나타내었다 [19]. 이는 캐비티의 충격압으로 인해 표면에 압축잔류응력이 형성된 결과이다 [20]. 가장 높은 경도값은 진폭 30 μm에서 나타났으며 진폭 50 μm에서는 경도값이 저하되었다. 진폭 50 μm에서 경도값이 저하한 이유는 과도한 에너지로 인하여 표면에서 침식이 많이 발생하여 표면 거칠기가 증가하였기 때문으로 판단된다 [21].

Fig. 10은 동전위 분극 실험과 캐비테이션 실험 후 금속 조직을 관찰하기 위하여 40% NaOH 수용액에서 DC 6 V, 10 s 조건으로 에칭을 실시한 후 3D 현미경으로 관찰한 결과이다. 수차례의 시도에도 불구하고 명확하게는 관찰되지 않았으나 어두운 면(페라이트)과 밝은 면(오스테나이트)의 경계면인 결정립계에서 손상이 주로 나타났다. 이는 Fig. 8의 SEM 촬영결과와 같은 이유로 판단된다. 캐비테이션 실험 결과, 모든 조건에서 페라이트 영역이 오스테나이트 영역보다 손상이 심하게 나타났다. FCC 구조인 γ-오스테나이트와 BCC 구조인 α-페라이트는 모두 등방성이지만 γ상이 변형률 속도 민감성이 더

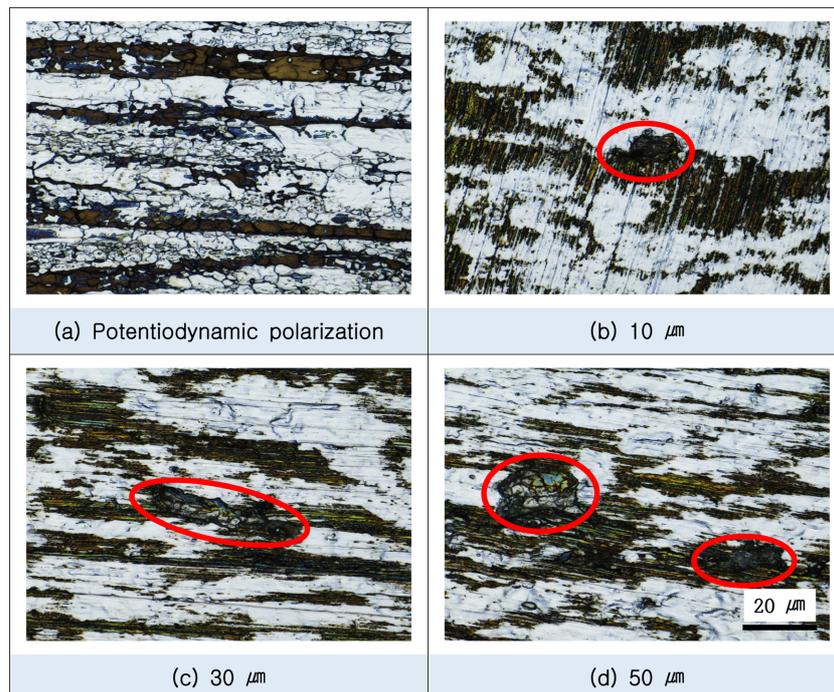


Fig. 10. Etched surface after potentiodynamic polarization and cavitation experiment of UNS S32750 in sea water (○: eroded area)

났다. 즉, α 상은 변형률에 민감하여 변형률이 증가함에 따라 material flow가 어려워져 취성파괴의 경향이 증가한다 [22,23]. 즉, 캐비티에 의한 충격압으로 인해 페라이트상의 취성파괴 경향으로 손상이 증가하는 결과를 관찰할 수 있었다.

4. 결론

듀플렉스 스테인리스강 UNS S32750에 대한 전기화학적 거동 및 캐비테이션 특성은 다음과 같다.

1. 모재 상분율과 조직 분석 결과, 페라이트상과 오스테나이트상의 상분율은 $\alpha:\gamma = 48:52$ 로 큰 차이를 나타내지 않았으며 페라이트 matrix와 오스테나이트 island 형태로 존재함을 확인할 수 있었다.

2. 동전위 분극 실험 결과, 페라이트상과 오스테나이트상의 결정립계에서 손상이 가장 크게 나타났으며 이는 서로 다른 화학성분에 의해 발생한 갈바닉 전류에 의한 결과로 사료된다.

3. 캐비테이션 실험 후 캐비티의 충격압에 의해 재료 표면에 압축잔류응력이 형성되어 경도가 상승하는 워터 캐비테이션 피닝효과를 나타냈으며 진폭 30 μm 에서 경도값이 가장 높게 측정되었다.

4. 주사전자현미경 관찰결과, 캐비티의 충격압으로 인한 소성변형으로 파면무늬가 미세하게 관측되었고 진폭 증가에 따라 표면손상깊이도 증가하였다.

5. 페라이트상의 침식에 의한 손상이 더 크게 발견되었으며 이는 FCC구조와 BCC구조의 변형률 속도 민감성의 차이로 인한 취성파괴의 결과로 사료된다.

References

1. 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*, **26**, 484 (2015). Doi: <http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2015.26.5.484>
2. 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
3. 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 Steels Welds for FGD Plants in Korea, *NACE CORROSION*, p. 98474 (1998). Doi: <https://onepetro.org/NACECORR/proceedings-abstract/CORR98/All-CORR98/NACE-98474/127908>
4. R. M. Davison, T. R. Laurin, J. D. Redmond H. Watanabe, and M. Semchyshen, A Review of Worldwide Development in Stainless Steels, *Materials & Design*, **7**, 111 (1986). Doi: [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(86\)90001-4](https://doi.org/10.1016/0261-3069(86)90001-4)

5. A. Karimi, Cavitation erosion of a duplex stainless steel, *Materials Science and Engineering*, **86**, 191 (1987). Doi: [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(87\)90452-6](https://doi.org/10.1016/0025-5416(87)90452-6)
6. Y. Mori, Y. Gao, J. Liao, S, and S. Motada, The Influence of Inclusions on the Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel, *Corrosion Engineering*, **66**, p. 93 (2017). Doi: <https://doi.org/10.3103/S0892422817040061>
7. H. Hwang and Y. Park, Effects of Heat Treatment on the Phase Ratio and Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel, *Materials Transactions*, **50**, 1548 (2009). Doi: <https://doi.org/10.2320/matertrans.MER2008168>
8. J. A. Jimenez, M. Carsi, and O. A. Ruano, Characterization of a δ/γ duplex stainless steel, *Journal of Material Science*, **35**, 907 (2000). Doi: <https://doi.org/10.1023/A:1004750424897>
9. H. Y. Ha, T. H Lee, C. G. Lee, and H. Yoon, Understanding the relation between pitting corrosion resistance and phase fraction of S32101 duplex stainless steel, *Corrosion Science*, **149**, 226 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.01.001>
10. A. Pardo, E. Otero, M. C. Merino, M. D. Lopez, M. V. Utrilla, and, F. Moreno, Influence of pH and Chloride Concentration on the Pitting and Crevice Corrosion Behavior of High-Alloy Stainless Steels, *Corrosion*, **56**, 411 (2000). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3280545>
11. 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>
12. J. Gaoa, Y. Jianga, B. Denga, W. Zhang, C. Zhonga, and J. Li, Investigation of selective corrosion resistance of aged lean duplex stainless steel, *Electrochimica Acta*, **54**, 5830 (2009), Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.05.03913>
13. K. W. Nam, J. E. Paeng and K. Y. Kim, Immersion Characteristics of STS316L 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>
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. 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>
17. S. H. Bae and H. W. Lee, Effect of Mo Contents on Corrosion Behaviors of Welded Duplex Stainless Steel, *Metals and Materials International*, **19**, 563 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1007/s12540-013-3026-6>
18. J. H. Kim and S. J. Kim, The Effect of Molybdenum on Cavitation Erosion and Corrosion Resistance of Fe-Cr-C-Si Hardfacing Alloys, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **45**, 93 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1080/00223131.2008.10875794>
19. 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>
20. 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>
21. 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)
22. C. T. Kwok, H. C. Man and, F. T. Cheng, Cavitation erosion and damage mechanism of alloys with duplex structures, *Materials Science and Engineering*, **242**, 108 (1998). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00514-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00514-5)
23. A. A. Hashem, P. G. Caceres, A. Abdullah and, H. M. Shalaby, Cavitation Corrosion of Duplex Stainless Steel in Seawater, *Corrosion*, **53**, 103 (1997). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3280438>