

3.5 wt% NaCl에서 UNS K32045 강의 국부 부식 거동

이준섭^{1,†} · 박시욱² · 김유섭²

¹국립창원대학교 재료금속공학과, 경상남도 창원시 의창구 창원대학교로 20

²국방과학연구소, 대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 35호

(2026년 4월 07일 접수, 2026년 4월 22일 수정, 2026년 4월 22일 채택)

Localised Corrosion Behaviour of UNS K32045 in Chloride Solution

Jun-Seob Lee^{1,†}, Siwook Park², and You Sub Kim²

¹Department of Materials Science and Metallurgy, Changwon National University,

20 Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 51140, Republic of Korea

²Agency for Defense Development, Yuseong P.O.Box 35, Daejeon, 34186, South Korea

(Received April 07, 2026; Revised April 22, 2026; Accepted April 22, 2026)

In this study, the time-dependent localised corrosion behaviour of UNS K32045 steel in 3.5 wt% NaCl solution was investigated using potentiodynamic polarisation, immersion testing, optical observation, SEM-EDS, and Raman spectroscopy. The microstructure mainly consisted of tempered lath martensitic structure with lath packets distributed across the observed surface, providing heterogeneous sites for corrosion initiation. Potentiodynamic polarisation revealed a continuous increase in anodic current without an active-passive transition, with a slope change near $-0.40 V_{SSE}$. This response indicated that the anodic behaviour was associated with the initiation and propagation of localised corrosion in a chloride-containing environment rather than activation-controlled dissolution. Immersion tests showed that mass loss increased with exposure time, although the increase was not constant. The increase was relatively large during the early stage and became less pronounced after longer immersion in the solution. Optical observation revealed that corrosion products formed and became more widely distributed over time, progressively covering the exposed surface. SEM-EDS analysis showed that corroded regions were partially covered with rough, porous corrosion products containing oxygen and chlorine. Raman spectroscopy confirmed that the surface products consisted of mixed iron oxyhydroxides. These results demonstrate that localised corrosion and corrosion-product accumulation developed concurrently with immersion time on the exposed surface.

Keywords: Localised corrosion, Chloride ion, Electrochemical techniques

1. 서론

해양 환경에 적용되는 고강도 구조용 강재 가운데 UNS K32045로 표기되는 강재는 저합금계(Fe-Ni-Cr-Mo) 고강도 강재로 분류되며, 해상 석유·가스 설비와 같은 오프쇼어 구조물, 해상 풍력 지지구조, 선박 및 해양 플랜트의 고하중 구조 부재에서 사용된다 [1,2]. 해양 환경은 염화물 이온이 존재하는 대표적인 부식 환경이며, 강재 표면에서는 국부 부식이 발생하기 쉽다. 이러한 국부 부식에 의한 구조물의 손상은 평균적인 부식

량이 크지 않더라도 특정 위치의 잔존 두께를 먼저 감소시키고, 동시에 국부 응력 집중 조건을 변화시켜 구조 부재의 하중 지지와 피로 거동에 직접적인 영향을 줄 수 있다. 또한 고강도 강재는 동일한 구조 성능을 목표로 할 때 단면 두께 저감이 설계 전략으로 활용되는 경우가 있어 동일한 수준의 국부 부식 손상이 구조 성능 평가에서 차지하는 비중이 커질 가능성이 있다.

해양 구조용 저합금 강재로는 고강도 저합금(high-strength low-alloy, HSLA) 계열, 고향복강도(high-yield, HY) 계열 고강도 강, 미국석유회(American Petroleum Institute, API) 라인파이프용 저합금 강 등이 사용되어 왔으며 이들 강재의 염화물 환경 부식 거동은 비교적 광범위하게 보고되어 있다 [3,4]. UNS K32045 는 Ni-

[†]Corresponding author: junseoble@changwon.ac.kr

이준섭: 교수, 박시욱: 연구원, 김유섭: 연구원

Cr-Mo 를 주요 합금 원소로 포함하는 저합금 고강도 강으로, 상대적으로 낮은 합금 함량에서 고강도를 확보하도록 설계된 강종이다. 이러한 설계는 동일 구조 성능을 더 얇은 단면에서 구현하는 데 유리하나 염화물 환경에서 국부 부식에는 공학적 설계의 허용 여유가 부족하여 해당 강종의 부식 거동을 독립적으로 확보할 필요가 있다.

해양 구조재 부식은 노출 시간이 길어질수록 반응 조건이 달라지면서 부식 손실이 시간에 따라 비선형적으로 변할 수 있으며, 장기 거동을 해석할 때는 시간함수 관점이 중요하다 [5-7]. 반면 국부 부식 평가는 짧은 침지 이후의 동전위분극과 같은 단기 전기화학 지표로 제시되는 경우가 많아 침지 시간이 증가하는 동안 부식 속도가 어느 구간에서 달라지는지와 같은 시간축 정보를 직접 제공하기 어렵다. 또한 전기화학 신호는 전극 전체의 평균 반응을 반영하므로 국부 부식 깊이의 시간 변화처럼 형상 기반 지표와 바로 대응시키기에는 한계가 있다. 국부 부식의 시간 의존 거동을 다루기 위해서는 단일 시점 전기화학 결과에 더해 시간축에서 변화를 보여줄 수 있는 자료 구성이 함께 필요하다.

염화물 수용액에서 강재의 국부 부식은 노출 초기와 시간이 경과한 뒤에 지배 인자가 동일하다고 판단하기는 어렵다. 노출 초기에는 금속 표면의 전기화학 반응이 상대적으로 직접적으로 나타나지만 시간이 지나 부식 생성물이 축적되면 생성물층의 형성과 치밀화에 따라 산소 공급 및 물질 이동 조건이 달라질 수 있고 그 결과 부식 속도의 시간 의존성이 나타날 수 있다 [5]. 또한 염화물 용액에서 자유 침지 또는 일정 전위 조건을 유지하는 동안 전위·전류 응답이 시간에 따라 변하는 사례가 보고돼 [6,7], 단일 시점 전기화학 지표만으로는 시간에 따른 거동 변화를 대표하기 어렵다는 점을 뒷받침한다. 이러한 배경에서 국부 부식의 시간 의존 거동을 함께 고려한 자료 구성과 해석이 필요하다. 다만, 아직까지 UNS K32045 강 of 국부 부식 거동 또는 전기화학적 분극 거동 그리고 침지 시간에 따른 부식 거동 등의 연구 결과에 대한 보고는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 염화물 수용액에서 UNS K32045 강 of 전기화학적 분극 거동과 침지 시간에 따른 부식 속도 변화를 정리하였다. 침지 시간별 부식 속도의 변화 양상을 시간축에서 도출하고 대표 침지 시간에서의 광학 관찰 결과를 함께 제시해 표면 부식 양상의 변화를 비교하였다. 이를 통해 장기 노출 조건에서의 국부 부식 거동 해석에 필요한 시간축 자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험

본 연구에서는 UNS K32045 강을 사용하였다. 화학

조성(wt%)은 2.25–3.50 Ni, 1.0–1.80 Cr, 0.20–0.60 Mo, 약 0.25 Cu, 0.12–0.20 C, 0.10–0.40 Mn, 0.15–0.35 Si이며, 소량의 V와 Ti가 포함되고 잔량은 Fe이다. 시편은 약 870–900 °C 에서 오스테나이트화 후 수랭, 이어서 580–650 °C 에서 템퍼링을 거친 상용 강판에서 채취하였다. 이러한 공정을 통해 템퍼드 마텐자이트 조직이 얻어진다. 침지 시험을 위한 시편은 약 5 × 5 × 15 mm³ 크기로 절단하였다. SiC #100 연마지로 육면을 연마한 뒤 초음파 세척을 수행하였다. 표면 사진 관찰용 시편은 1 μm 다이아몬드 현탁액으로 경면 연마한 뒤 2 vol% 나이탈로 에칭하여 준비하였다.

침지 시험은 3.5 wt% NaCl 수용액에서 수행하였으며, 침지 시간은 0, 2, 6, 24, 72, 120, 168 h로 설정하였다. 각 침지 시간에 도달한 시편은 용액에서 꺼낸 뒤 초음파 세척과 치과용 칫솔을 이용하여 부식 생성물을 제거하였다. 세척이 끝난 시편은 동일 용액에 재침지하지 않았다. 각 시간 조건은 최소 3개 이상의 반복 시험을 수행하였다. 부식 속도는 침지에 따른 질량 감소량을 노출 표면적으로 계산하였다. 각 침지 시간에서의 질량 감소량(초기 질량-침지 후 질량)을 노출된 전 표면적 (m²)으로 나뉘어 g m⁻²로 산출하였고, 반복 시편의 결과를 바탕으로 평균값을 제시하였다. 시편의 표면 부식 상태를 관찰하기 위한 시편은 10 × 10 × 5 mm³ 을 에폭시 레진에 함침 후 노출 면(10 × 10 mm²)을 1 μm 다이아몬드 현탁액으로 경면 연마한 뒤 3.5 wt% NaCl 수용액에서 0, 24, 168 h 시간 침지 하였다. 침지 후 24 시간, 168 시간이 경과한 뒤 동일 시편의 표면에 형성된 부식 생성물을 제거하지 않고 표면을 관찰하였다.

라만 분광 분석은 24시간 침지 후 시편을 침지 용액에서 꺼내어 분석하였다. 생성물이 상대적으로 적은 영역과 많이 덮인 영역을 각각 측정 위치로 선정하였다. 분석에는 532 nm 레이저를 사용하였고 레이저 출력은 1.2 mW, 노출 시간은 0.5 s, 적산 횟수는 100회로 설정하였다.

전기화학 시험은 3전극 셀로 구성하였고 상대 전극은 백금 그물망, 기준전극은 포화 KCl의 은/염화은 전극 (Ag/AgCl, sat. KCl; SSE, saturated silver/silver chloride electrode)을 사용하였다. 작업전극은 약 5 × 5 mm² 시편 표면적으로 에폭시에 함침한 뒤 SiC #600 연마지로 표면을 연마하여 준비하였다. 측정은 3.5 wt% NaCl 수용액에서 수행하였으며 먼저 외부 전류 및 전압을 인가하지 않은 조건에서 5 min 동안 전극 전위를 측정된 뒤, 측정된 전극 전위를 기준으로 -0.1 V에서 동전위분극을 실시하였다. 주사 속도는 1 mV s⁻¹로 설정하였고 전류 밀도는 5 mA cm⁻²까지 분극하였다. 각 조건의 재현성을 확보하기 위해 전기화학 시험은 최소 3회 이상 반복하였다.

3. 연구결과 및 고찰

Fig. 1은 2 vol% 나이탈 에칭 후 광학현미경으로 관찰한 UNS K32045 강 표면 사진이다. 대부분 라스형 패킷 구조의 침상 조직으로 확인되었다. 수십 μm 수준의 패킷이 사진 전반에 걸쳐 분포했다. 패킷들은 일정한 방향으로 정렬되기보다는 서로 다른 방향의 라스 군이 교차하는 형태로 나타났다. 패킷 경계로 보이는 선형 대비가 비교적 연속적으로 관찰됐다. 또한 영역에 따라 에칭 대비가 다른 라스형 영역이 섞여 있어 동일 시야 내에서도 밝게 보이는 부분과 상대적으로 어둡게 에칭되는 부분이 함께 나타났다. 이는 본 강종의 열처리 공정(오스테나이타이징 후 수랭 및 템퍼링)과 라스 패킷 형태를 고려할 때 템퍼드 라스 마텐자이트 조직에 해당한다.

Fig. 2는 3.5 wt% NaCl 수용액에서 측정된 UNS K32045강 표면의 동전위 분극 곡선이다. 부식 전위는

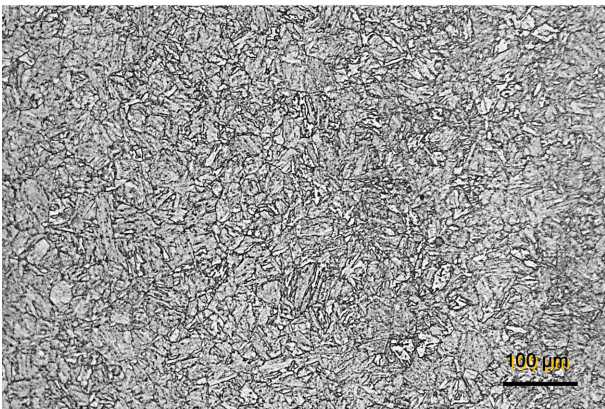


Fig. 1. Optical micrograph of UNS K32045 steel

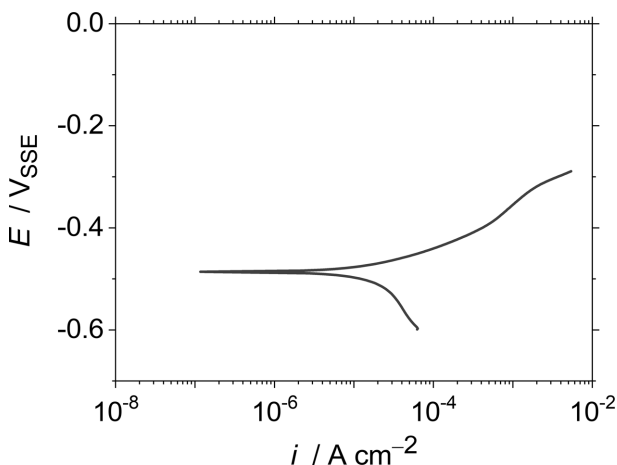


Fig. 2. Potentiodynamic polarisation curve of UNS K32045 steel in 3.5 wt% NaCl solution. SSE: saturated silver/silver chloride electrode

약 -0.48 V 부근에서 형성됐으며 양극 분극 곡선에서는 활성-부동태 전이 구간 없이 전위가 양의 방향으로 이동함에 따라 양극 전류가 증가했다. 양극 전류의 증가는 단조롭지만 증가 양상이 일정하지 않았고 $-0.40\text{ V}_{\text{SSE}}$ 전후에서 기울기 변화가 확인됐다. 곡선에서 양극 분극 곡선의 기울기는 부식 전위에서부터 약 $-0.40\text{ V}_{\text{SSE}}$ 구간에서 약 30 mV dec^{-1} 이며 $-0.40\text{ V}_{\text{SSE}}$ 부근 이후에는 약 $90\text{--}110\text{ mV dec}^{-1}$ 로 증가했다. 이러한 기울기 변화는 부동태 피막의 국부적 파괴나 국부 부식 개시로 해석하기는 어렵다. UNS K32045의 Cr 함량은 약 1.0–1.80 wt% 수준으로 스테인리스강에서 안정한 부동태 피막 형성에 요구되는 Cr 함량(약 10.5 wt% 이상)에 미치지 못한다. 본 실험에서도 부동태 구간이 관찰되지 않았다. 따라서 해당 기울기 변화를 부동태 피막 파괴나 공식 개시에 대응시키기에는 근거가 충분하지 않다. $-0.40\text{ V}_{\text{SSE}}$ 이후 기울기 증가는 두 요인의 복합 기여로 해석된다. 첫째, 양극 반응 진행에 따라 다공성 부식 생성물이 축적되어 물질 이동 저항이 증가한다. 둘째, 전류 밀도 증가에 따라 용액 저항에 의한 전압 강하가 측정 기울기에 반영된다. 이러한 겉보기 기울기 변화는 단일 반응의 활성화 분극 상수로 해석하기에 적절하지 않다. 이에 따라 본 연구에서는 Fig. 2의 분극 곡선으로부터 부식 전류밀도를 정량화하지 않았다.

Fig. 3은 3.5 wt% NaCl 수용액에서 UNS K32045의 침지 시간에 따른 단위 면적당 질량 감소량을 나타냈다. 질량 감소량은 침지 시간이 증가함에 따라 증가했으며 24 h에서 38 g m^{-2} , 72 h에서 65 g m^{-2} , 120 h에서 105 g m^{-2} , 168 h에서 128 g m^{-2} 이다. 시간에 따른 증가 양상은 일정한 기울기보다 구간별 차이가 있으며 2–24 h 구간에서 증가 폭이 비교적 크게 나타난 뒤 24–72 h 구

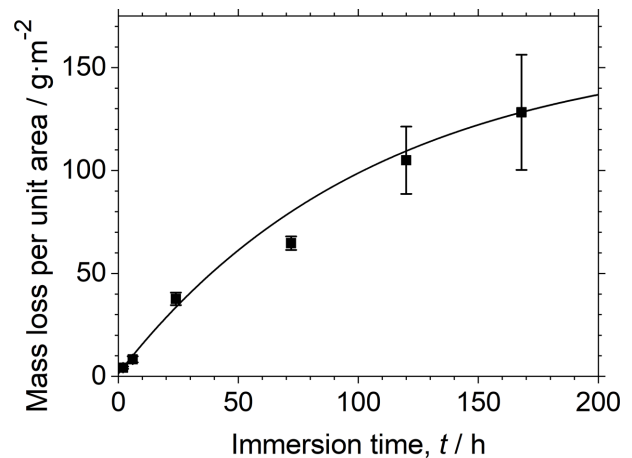


Fig. 3. Change in mass loss per unit area of UNS K32045 steel with immersion time in 3.5 wt% NaCl solution

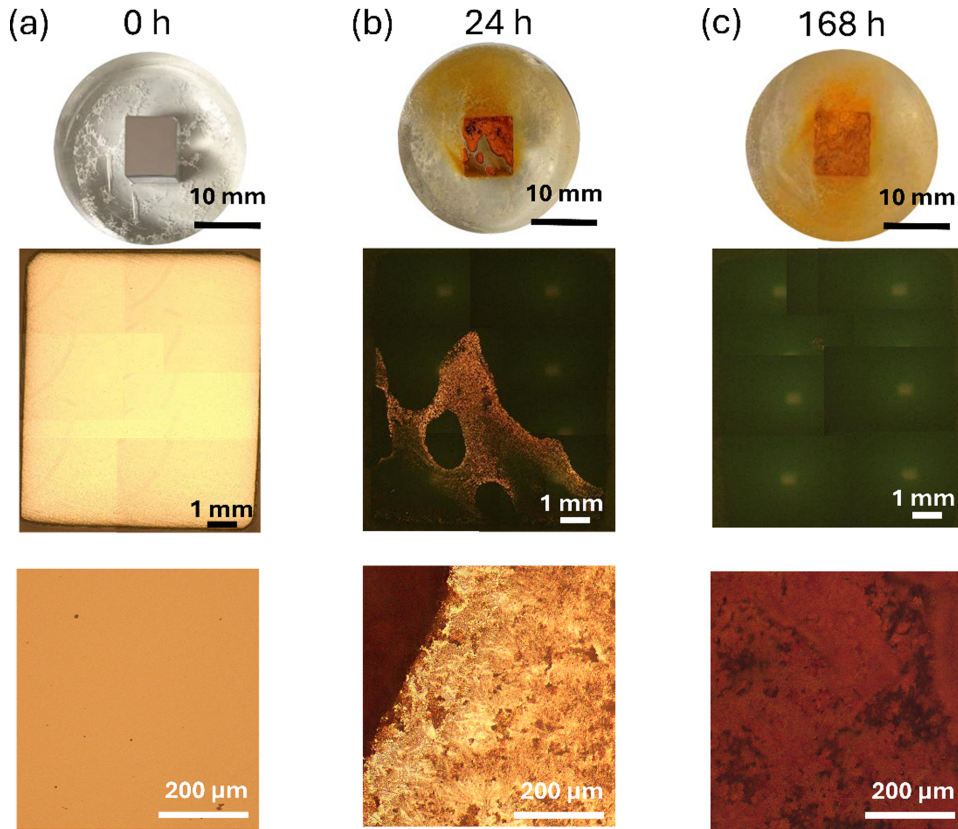


Fig. 4. Surface appearances of UNS K32045 steel after immersion in 3.5 wt% NaCl solution for (a) 0 h, (b) 24 h, and (c) 168 h, observed without removal of corrosion products. Scale bars: 10 mm (top row), 1 mm (middle row), and 200 μm (bottom row)

간에서 증가가 완만해졌고 72–120 h 구간에서 다시 증가 폭이 커지는 경향을 보였다.

Fig. 4는 3.5 wt% NaCl 수용액에서 UNS K32045 시편을 침지한 뒤, 0, 24, 168 h에서 용액에서 꺼낸 직후 별도로 세척하지 않은 상태에서 광학현미경으로 관찰한 표면 외관을 배율별로 정리한 것이다. 0 h에서는 경면 연마 후 표면이 전반적으로 광택이 나는 금속 표면이며 뚜렷한 변색이나 생성물 축적은 관찰되지 않았다. 24 h 침지 후 시편 표면의 일부 영역에서 적갈색 부식 생성물이 형성되었다. 이 부분은 비교적 거칠고 불균일한 표면을 이루며 국부 부식이 진행된 영역에서 생성물의 축적이 두드러지게 나타났다. 168 h 침지 후 24 h 침지된 시편 표면에서 관찰된 생성물 축적 영역이 더 넓게 확장되었으며 표면 전반에서 생성물 분포가 증가한 양상이 관찰됐다. 침지 시간이 증가함에 따라 부분적으로는 국부 부식이 발생하여 부식 생성물이 형성됨에 따라 생성물의 축적 및 분포 영역이 확대되는 과정을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 3.5 wt% NaCl 수용액에 24 h 침지한 UNS K32045 시편의 부식 영역에 대한 SEM-EDS 결과를 나

타낸다. SEM 사진에서는 비교적 평탄한 금속 표면이 남아 있는 영역과 그에 인접한 거칠고 다공성인 부식 생성물이 덮인 영역이 함께 관찰됐다. 생성물로 덮인 영역은 표면이 불균일하였다. EDS mapping 결과, O 신호는 다공성으로 보이는 생성물 영역에서 상대적으로 높게 나타났고 Fe 신호는 전 영역에서 검출됐으나 생성물이 덮인 정도에 따라 분포 차이가 관찰됐다. Cl 신호도 생성물이 덮인 영역에서 함께 확인된 반면 C 신호는 전반적으로 큰 분포 차이 없이 나타났다. 즉, 24 h 침지 후 표면에는 O와 Cl을 포함한 부식 생성물이 부분적으로 덮여 있었다.

Fig. 6a, b는 3.5 wt% NaCl 수용액에 24 h 침지한 UNS K32045 시편 표면을 SEM으로 관찰한 이차전자상 사진이다. Fig. 6a에서는 금속 광택이 부분적으로 남아 있는 영역이 관찰됐으며 표면에 국부적인 거칠어짐과 미세한 부식 흔적이 산재한 형태로 나타났다. 반면 Fig. 6b에서는 금속 광택 부분이 보이지 않고 부식 생성물이 대부분 덮여있는 영역이 관찰되었다. 이차 전자상 사진에서는 부식 생성물층이 분포하면서 표면이 거칠고 다공성인 형상으로 나타났다.

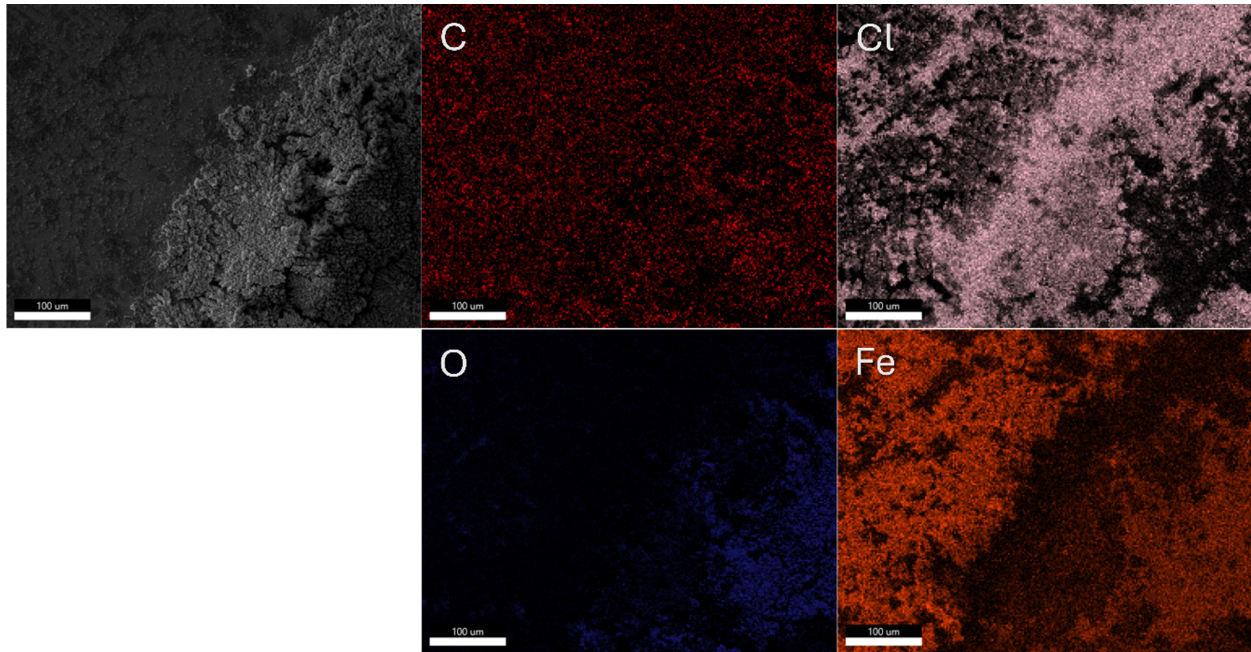


Fig. 5. SEM Secondary electron image and corresponding EDS elemental mapping images on UNS K32045 steel after immersion in 3.5 wt% NaCl solution for 24 h

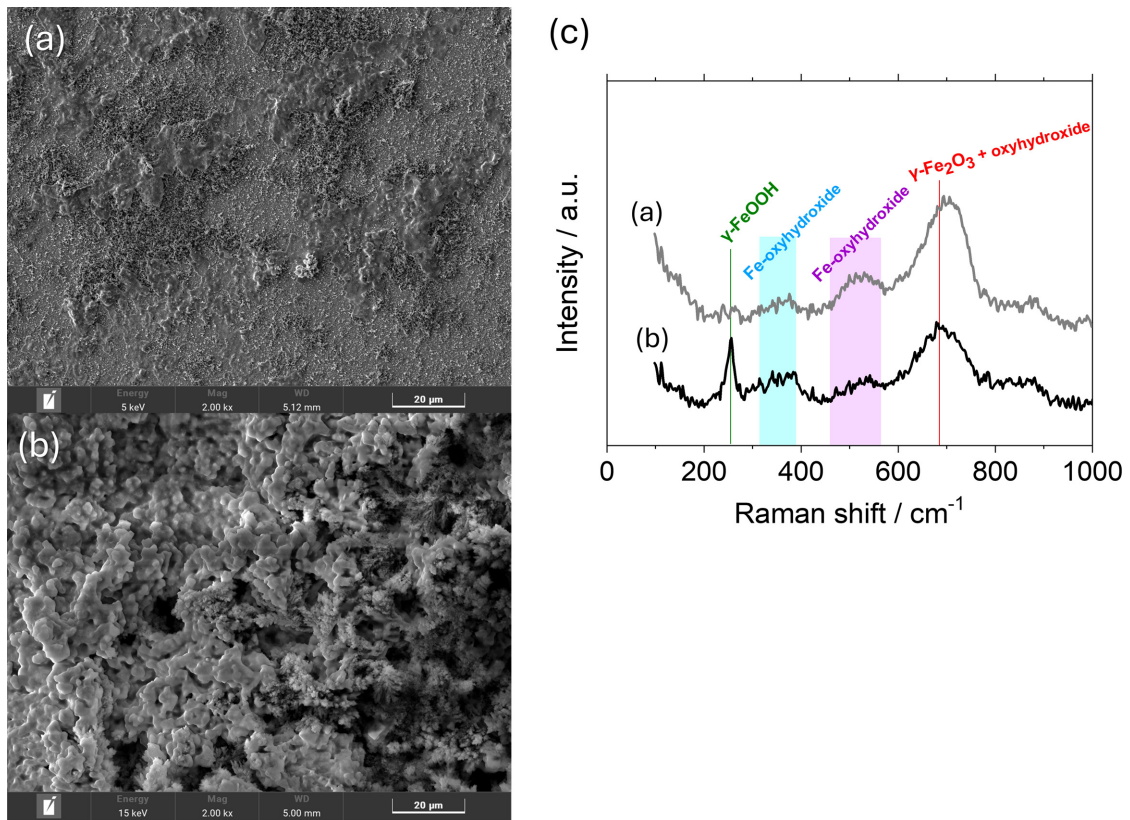


Fig. 6. SEM secondary electron images of the surface of UNS K32045 steel after immersion in 3.5 wt% NaCl solution for 24 h: (a) an area where metallic lustre was partly retained with localised roughening and sparse corrosion products, and (b) an area where the metal surface was no longer visible and was covered by a porous corrosion-product layer; (c) Raman spectra obtained from the areas shown in (a) and (b)

Fig. 6c는 침지 후 시편 표면에서 측정된 라만(Raman) 스펙트럼을 나타낸다. 스펙트럼은 개별 피크가 뚜렷하게 분리되기보다 여러 구간에서 넓은 신호가 겹쳐 나타났으며 이는 표면 부식 생성물이 단일 상보다는 철 산화물과 수산화물이 함께 존재하는 상태임을 보여준다. 특히 Fig. 6a 영역(부식 생성물이 상대적으로 적은 영역)에서 얻은 스펙트럼은 전체 신호 강도가 낮았고 Fig. 6b 영역(부식 생성물이 상대적으로 많은 영역)에서 얻은 스펙트럼은 여러 라만 시프트 구간에서 신호가 더 뚜렷하게 나타났다. Fig. 6c에서 Fig. 6b 영역에 해당하는 스펙트럼을 보면, 약 250–260 cm^{-1} 부근에서 비교적 뚜렷한 피크가 관찰되며 이는 $\gamma\text{-FeOOH}$ 계에서 보고된 해당 라만 시프트 영역의 진동 모드와 대응하는 것으로 해석된다 [8]. 또한 314–383 cm^{-1} 구간에서는 넓은 신호가 나타났는데 이 구간은 철 산화물과 수산화물 계열에서 보고된 여러 진동 모드가 겹쳐 형성된 것으로 판단된다 [9]. 약 445–541 cm^{-1} 구간에서도 여러 피크가 겹친 넓은 신호가 확인됐으며 이는 철 산화물과 수산화물의 중간 라만 시프트 영역 진동 모드가 함께 반영된 결과로 해석된다 [10]. 약 680–705 cm^{-1} 부근에서는 비교적 강한 신호가 관찰됐고 이는 철 산화물/수산화물 계열에서 공통적으로 보고된 해당 영역의 진동 모드와 관련된 것으로 보인다 [8-10]. 즉, 침지 후 표면에 형성된 부식 생성물이 특정 단일 상으로 존재하기보다 철 산화물과 수산화물이 함께 존재하는 상태임을 알 수 있다.

본 연구에서 제시한 3.5 wt% NaCl 수용액 침지 시간에 따른 질량 감소 기반의 부식 속도 정량 자료와 시간 경과에 따른 표면 부식 생성물 분포 변화는 현재까지 공개된 문헌이 제한적인 UNS K32045 강에 대한 기초 부식 거동 자료에 해당한다. 해당 자료는 해양 구조 부재로의 적용 시 부식 허용량 설계, 수명 예측, 방식 계획 수립을 위한 초기 입력 자료로 활용될 수 있다. 또한 시간 구간별 부식 속도 변화와 생성물 축적 양상은 단일 시점 전기화학 지표만으로 설명하기 어려운 장기 노출 거동을 해석하는 데 참고가 될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 3.5 wt% NaCl 수용액에서 UNS K32045의 시간에 따른 국부 부식 거동을 전기화학, 침지, 표면 분석 결과를 바탕으로 검토하였다. 동전위 분극에서는 활성-부동태 전이 없이 양극 전류가 증가했다. 침지 시험에서는 질량 감소량과 표면 생성물 분포가 시간에 따라 증가했으나 그 증가 양상은 구간별로 차이를 보였다. 또한 침지 후 표면에는 SEM에서 확인된 거칠고 다공성인 생성물층이 부분적으로 형성되었다. 라만 분석에

서는 이 생성물이 철 산화물과 수산화물이 함께 존재하는 상태로 나타났다. UNS K32045의 3.5 wt% NaCl에서의 부식은 시간 경과에 따라 국부 부식과 생성물 축적이 함께 진행되는 것으로 이해할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UE231130TD).

References

1. S. İz and Ö. S. Köylüoğlu, Investigation of the economic and sustainability aspects of cathodic protection method for corrosion prevention in marine structures, *Journal of Adhesion Science and Technology*, **37**, 2861 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2132650>
2. J.-A. Jeong, K.-H. Ko, D.-Y. Lee and S.-I. Lee, Corrosion evaluation of a newly developed high-strength steel in marine environments, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, **40**, 883 (2016). Doi: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2016.40.10.883>
3. X. Liu, Y. Sui, H. Zhang, H. Tong, and H. Song, Corrosion behavior of the high-strength low alloy steel welded joint in natural seawater, *Materials and Corrosion*, **74**, 535 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1002/maco.202213373>
4. J. M. Romero, J. L. Villalobos, E. Sosa and M. Amaya, Localized Corrosion of API X52 and API X65 Pipeline Steels in the Presence of Treated Seawater Used in the Oil Industry, *Corrosion*, **60**, 689 (2004). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3287846>
5. J. Amador, E. García-Lecina and F. Varas, Understanding corrosion of active steels in NaCl solution: Experimental and modelling approach, *Electrochimica Acta*, **543**, 147550 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.147550>
6. R. E. Melchers, Predicting long-term corrosion of metal alloys in physical infrastructure, *npj Mater. Degrad.*, **3**, 4 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1038/s41529-018-0066-x>
7. R. E. Melchers, Mathematical modelling of the diffusion controlled phase in marine immersion corrosion of mild steel, *Corrosion Science*, **45**, 923 (2003). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(02\)00208-1](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(02)00208-1)
8. R. J. Thibau, C. W. Brown and R. H. Heidersbach, Raman Spectra of Possible Corrosion Products of Iron, *Applied Spectroscopy*, **32**, 532 (1978). Doi: <https://doi.org/10.1366/000370278774330739>

9. D. L. A. de Faria, S. Venâncio Silva and M. T. de Oliveira, Raman microspectroscopy of some iron oxides and oxyhydroxides, *Journal of Raman Spectroscopy*, **28**, 873 (1997). Doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4555\(199711\)28:11<873::AID-JRS177>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4555(199711)28:11<873::AID-JRS177>3.0.CO;2-B)
10. M. Hanesch, Raman spectroscopy of iron oxides and (oxy)hydroxides at low laser power and possible applications in environmental magnetic studie, *Geophysical Journal International*, **177**, 941 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04122.x>