

미량의 Cu 첨가가 HSLA 강재의 CO₂ 포화된 중성 및 산성 수용액 내 부식거동에 미치는 효과

윤성준¹ · 윤덕빈¹ · 방혜린¹ · 루페쉬 페다네카르¹ · 아시야 자마다르¹ · 김완근² · 박세민³ · 박진성² · 이재원⁴ · 김성진^{1,†}

¹국립순천대학교 첨단신소재공학과, 전라남도순천시 중앙로 255

²POSCO 기술연구원, 전라남도 광양시폭포사랑길 8

³국립부경대학교 신소재시스템공학과, 부산광역시 남구 용소로 45

⁴포항금속소재산업진흥원, 경상북도 포항시 남구 지곡로 56

(2025년 12월 1일 접수, 2025년 12월 30일 수정, 2026년 1월 11일 채택)

Effect of Cu Addition to HSLA Steel on Its Corrosion Behavior in Neutral and Acidic Aqueous Solution Saturated with CO₂

Seong Jun Yun¹, Duck Bin Yun¹, Hye Rin Bang¹, Rupesh S. Pedanekar¹, Aasiya S. Jamadar¹,
Wan Geun Kim², Se Min Park³, Jin Sung Park², Jae Won Lee⁴, and Sung Jin Kim^{1,†}

¹Department of Advanced Materials Engineering, Suncheon National University, Jungang-ro, Suncheon 57922, Republic of Korea

²POSCO Technical Research Laboratories, 8 Pokposarang-gil, Gwangyang 57807, Republic of Korea

³Department of Materials System Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan, Republic of Korea

⁴Pohang Institute of Metal Industry Advancement (POMIA), 56 Jigok-ro, Nam-gu, Pohang-si, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

(Received December 1, 2025; Revised December 30, 2025; Accepted January 11, 2026)

This study investigates the influence of minor Cu addition on the CO₂ corrosion behavior of API-grade HSLA steel in CO₂-saturated aqueous environments. Two types of steel were examined: one Cu-free and one containing 0.5 wt% Cu, under neutral (pH ≈ 6) and mildly acidic (pH 4.0–4.5) conditions. The methods used included electrochemical LPR measurements, microstructural characterization, and surface analyses. The addition of Cu did not significantly alter the ferritic microstructure but allowed for limited precipitation of metallic Cu. Under neutral conditions, Cu accelerated initial Fe dissolution and the formation of CuO/Cu₂O, which suppressed stable FeCO₃ deposition and decreased corrosion resistance. In contrast, under mildly acidic conditions, preferential Fe dissolution led to pronounced Cu enrichment at the surface. The resulting Cu and Cu-oxide layers increased the local pH and promoted more stable FeCO₃ formation during prolonged immersion, resulting in lower corrosion rates compared to the Cu-free steel. These findings demonstrate that while Cu plays a detrimental role in neutral solutions, it enhances corrosion resistance in acidic CO₂ environments, indicating the potential applicability of Cu-microalloyed steel for acidic CO₂ transport conditions.

Keywords: Cu, Alloying element, Steel, CO₂, Corrosion

1. 서론

지구온난화는 전 세계적으로 가장 심각한 환경 문제 중 하나로, 그 심각성은 점차 커지고 있다. 그 주요 원인으로 인간 활동에 의한 대량의 CO₂ 배출이 지목되고 있으며, CO₂의 배출을 줄이기 위한 국제적인 규제와

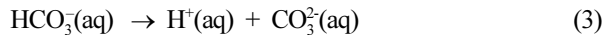
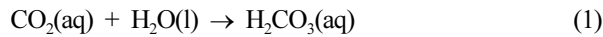
기술개발이 필수적으로 요구되고 있다. 특히, CO₂ 배출 저감을 목표로 한 탄소 포집, 활용 및 저장(Carbon Capture, Utilization, and Storage, CCUS) 기술은 현재 추진하고 있는 핵심적인 솔루션 중 하나로 인식되고 있다.

CCUS 기술을 통해 포집된 CO₂는 다양한 방식으로 저장 또는 활용될 수 있으며, 그 과정에서 CO₂의 안전한 운송 또한 필수적이다. 이를 위해 고압 및 습윤 환경에서 CO₂를 안정적으로 운송할 수 있는 파이프 소재의 개발이 매우 중요한 과제로 부상하고 있다. CO₂의 운송은 주로 배관 시스템을 통해 이루어지며, 이 과정에서 발생

[†]Corresponding author: sjkim56@scnu.ac.kr

윤성준: 학사과정, 윤덕빈: 석사, 방혜린: 석사, 루페쉬 페다네카르: 연구원, 아시야 자마다르: 연구원, 김완근: 연구원, 박세민: 교수, 박진성: 연구원, 이재원: 연구원, 김성진: 교수

하는 부식 문제는 금속소재 기반 파이프의 물리적, 화학적 손상을 야기하여 시스템의 신뢰성을 크게 저하시킬 수 있다. 습한 분위기 내 응축수에 용해된 CO₂는 H₂CO₃를 형성하고, 아래 equation (1-3)에 따라 pH가 지속적으로 감소되며, 금속소재 표면에 형성되는 부식생성물(e.g., 철강소재 상부 FeCO₃, equation (4))의 열역학적 안정도 및 치밀도 등의 특성에 따라 내식성이 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다.



스테인리스 강재는 탄소강 대비 일반적으로 내식성이 우수하여 CO₂ 운송용 파이프 소재로 논의되었으나 경제적 적용성 측면에서 크게 불리하여 장거리·대형 운송 설비로 적용하기에는 한계가 있다 [1]. 이에 선행연구 [2]에서는 미량의 Cr 첨가강을 개발·제한한 바 있다. 하지만, Yun *et al.* [2]에 따르면, Cr 등의 미량의 합금첨가에 따른 내식성 향상 효과는 소재가 노출되는 환경조건, 특히 pH에 따라 민감하게 달라지며 특히 산성분위기 내에 효과가 두드러지는 것으로 보고되었다. 이는 pH 감소에 따라 FeCO₃의 안정도는 감소되며 Cr(OH)₃의 안정도는 오히려 증가됨에 따른 결과로 해석되었다. 최근 Cr의 함량 [3] 및 Cr과 함께 첨가된 C [4], V 및 Mo [2]의 효과 또한 논의된 바 있다. 다만, 일반적으로 강재의 내식성을 일부 개선하는데에 기여하는 것으로 보고된 Cu의 첨가 효과 [5]에 대해서는 CO₂ 내식성에 있어 일부 긍정적 효과가 보고되기도 하였으나 [6], CO₂ 부식현상의 특성상 연구자들 간 실험조건의 상이성 및 불명확성으로 인해 정확한 메커니즘적 연구보고가 부족한 실정이다.

이에, 본 연구에서는 일반적으로 적용되는 API (American Petroleum Institute)급 수송용 강재를 대상으로 미량의 Cu 첨가 유무에 따라 두 가지 시편을 제조하였고, CO₂가 포화된 수용액을 pH에 따라 두 가지 환경조건으로 구분하여 각 조건에서의 부식거동을 이해하고자 하였다. 전기화학적 분극 거동, 부식생성물 단면 형상 변화, 광전자분광분석(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 등의 결과를 토대로 미량의 Cu 첨가강의 CO₂ 내식강으로서의 적용 가능성을 논의하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시편제조 및 미세조직 분석

본 연구의 대상 소재는 HSLA 강재로 API X65급 고청정 소재로 분류될 수 있고, Table 1에 기재된 화학적 조성표에서 알 수 있듯이 미량의 Cu 첨가 유무에 따라 두 가지 시편(W-Cu와 0.5-Cu)으로 구성되었다. 소재는 일반적인 강재 생산공정을 통해 열간 및 냉간 압연하여 10 mm 두께의 판재로 제조 후 A₃ 온도 이상에서 오스테나이트화 처리하여 공냉하였다.

미세조직 분석을 위해 두 시편을 SiC 연마지 #2400 까지 기계적 연마 후 1 μm Diamond suspension으로 미세연마 하였다. 그 후, Nital 용액(3mL HNO₃ + 97 mL 에탄올) 내 수 초간 침지하여 에칭하였다. 전계 방사형 주사전자현미경(Field emission scanning electron microscopy, FE-SEM) 및 에너지 분산 분광기(Energy dispersive spectroscopy)를 활용하여 미세조직 관찰/분석이 수행되었고, 후방 산란 전자 회절 분석(Electron backscatter diffraction, EBSD)을 통해 상 분석이 이루어졌다.

2.2 전기화학적 분극거동 분석

본 연구의 LPR 실험은 CO₂ 환경을 재현하기 위해 제작된 3전극 기반의 전기화학 셀을 이용하여 수행하였다. 5 wt% NaCl 용액을 사용하였으며, 염산을 이용해 pH를 4.5로 조절하였으며 이는 대략 3×10^{-5} M 수준의 염산 농도에 해당한다. 실험 전, 용액 내 용존산소 제거 및 CO₂ 포화를 위해 1 L당 1 bar의 CO₂ 가스를 1시간 동안 주입하였고, 모든 과정은 70 °C의 일정한 온도에서 진행되었다. 전기화학 셀은 시편을 작업전극(Working electrode, WE), 백금(Pt)을 상대전극(Counter electrode, CE), 포화칼로멜전극(Saturated calomel electrode, SCE)을 기준전극(Reference electrode, RE)으로 구성하였다. 분극시험은 개방회로전위(Open circuit potential, OCP)를 기준으로 -15 mV에서 +15 mV 범위의 전위를 0.2 mV/s의 주사속도로 인가하여 수행하였다. 측정된 분극 곡선의 기울기로부터 분극저항(R_p)을 산출하였다.

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} \quad (5)$$

Table 1. Chemical composition of the two tested samples (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Al	V	Nb	Ti	Cu	Cr
W-Cu	0.02~0.04	≤0.3	≤1.5	≤0.08	≤0.01	≤0.05	≤0.05	≤0.05	≤0.03	-	≤0.2
0.5-Cu	0.02~0.04	≤0.3	≤1.5	≤0.08	≤0.01	≤0.05	≤0.05	≤0.05	≤0.03	0.45~0.5	≤0.2

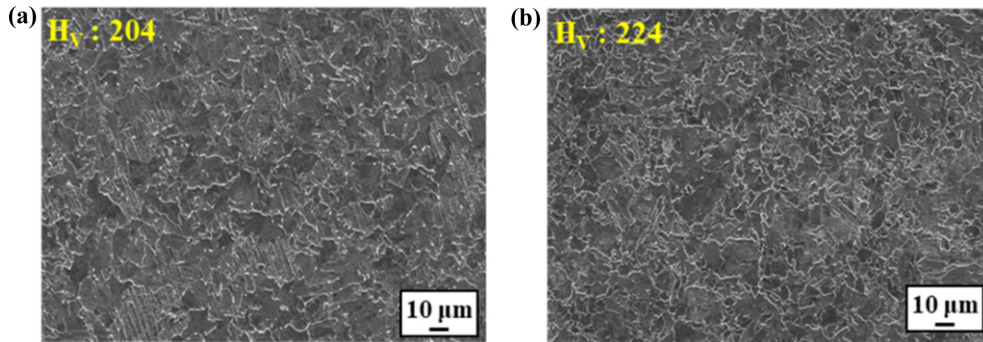


Fig. 1. Microstructures of the two samples. The Vickers hardness values (Hv) are indicated in each image: (a) W-Cu; (b) 0.5-Cu

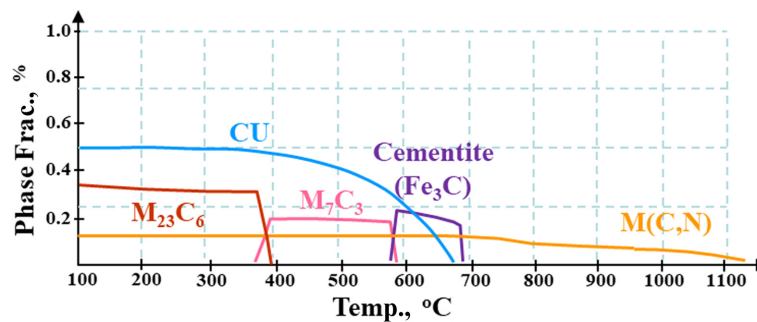


Fig. 2. Equilibrium calculation for the phase fraction of precipitates with temperature, constructed by JmatPro

Δi 과 ΔE 는 각각 분극전류의 변화량과 부식전위 대비 인가전위를 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직 관찰

Fig. 1은 대상소재의 미세조직을 나타낸다. FE-SEM 관찰 및 EBSD 상 분석 결과 불규칙한 형태의 미세 페라이트 기지 내 미량의 Fe_3C 가 석출된 구조를 가지는 전형적인 HSLA 강재의 미세조직과 흡사하며, 0.5% Cu 첨가에 따른 미세조직적 뚜렷한 차이는 나타나지 않았다. 페라이트 기지 내 Cu의 최대 고용도는 대략 0.35%로 알려져 있으며 [7,8], 열역학적 평형 상 예측 (Fig. 2)에서도 0.5% Cu 첨가를 통해 나타날 수 있는 유일한 차이는 Metallic Cu로의 석출입을 짐작해 볼 수 있다(W-Cu 시편의 EBSD 분석결과 및 JmatPro 예측 Data는 선행연구 참조 [2]). 이외에, Cu의 고용 및 석출에 따른 비커스 경도 값 증가는 대략 20 정도 수준으로 나타났다.

3.2 부식속도 및 거동 분석 (pH 6 조건)

중성 수용액 내 시편을 장시간(2주) 침지하며 전기화학적 LPR 측정을 통해 도출된 R_p 값을 나타내었다(Fig. 3). 우선 극초기 시점(1 d), 0.5-Cu 시편은 W-Cu 시편

대비 상당히 낮은 수준의 R_p 값이 측정되었고, 후기 시점(14 d)에서는 R_p 값의 차이가 다소 감소하였으나, 여전히 2배 수준의 차이로 유지되었다. 전기화학적 환원 전위 측면에서 Cu는 Fe 대비 상대적으로 높은 전위 값을 가진다. 본 연구에서 중성 수용액 분위기에서도 기지 내 Metallic Cu의 존재는 침지 초기 인근 Fe의 용출 속도를 가속화시키는 역할을 할 것으로 판단된다. 포화 CO_2 의 지속적 공급 하에 용존산소량이 극히 제한됨을 가정한다면 부식반응을 유지시키는 음극환원반응은 산소 환원반응(equation (6)) 대신, 주로 물분자의 환원반응(equation (7))이 우세함을 예상해 볼 수 있다.



두 반응 모두 Cu의 환원전위($Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$: $0.34 V_{SHE}$) 대비 높으며, 열역학적 측면에서 Fe ($\rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$)와 함께 Cu ($\rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$)의 용해를 예상해 볼 수 있다. 금속/수용액 계면으로 공급된 금속 양이온, 특히 Fe^{2+} 는 CO_3^{2-} 이온과의 결합으로 $FeCO_3$ 를 주로 형성할 것이나, Cu^{2+} 의 경우 $CuCO_3$ 대비 CuO (equation (8)) 및 Cu_2O (equation (9)) 등이 열역학적 안정도가 높고 (i.e., 낮은 Gibbs free energy) [9], 용해도가 낮아 [10], 보다 안정적 형성이 가능할 것으로 짐작된다.

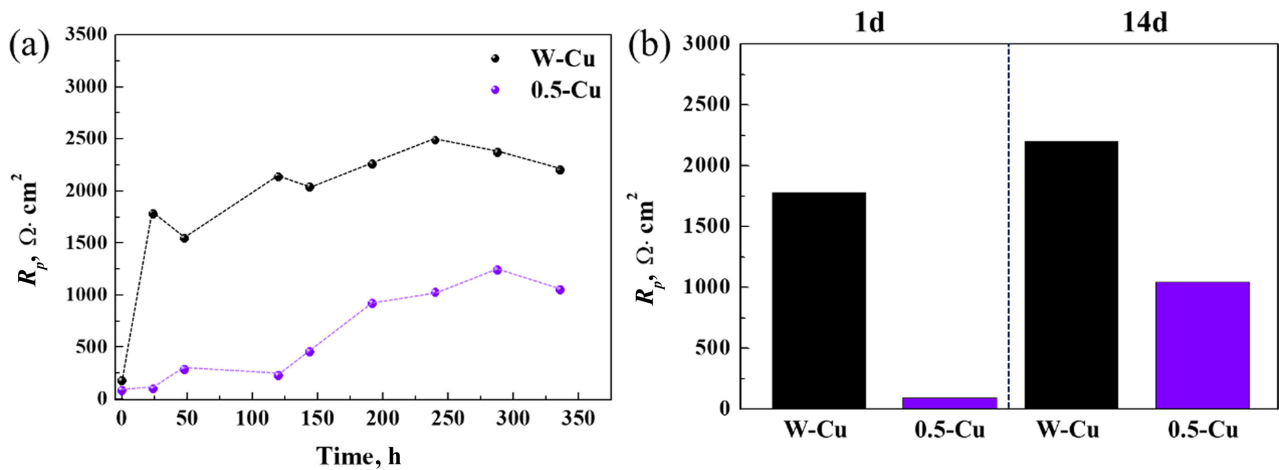


Fig. 3. (a) Changes in polarization resistance (R_p) with immersion times, obtained from LPR measurements; (b) bar-chart comparing the R_p values of the samples after 1-day and 14-days

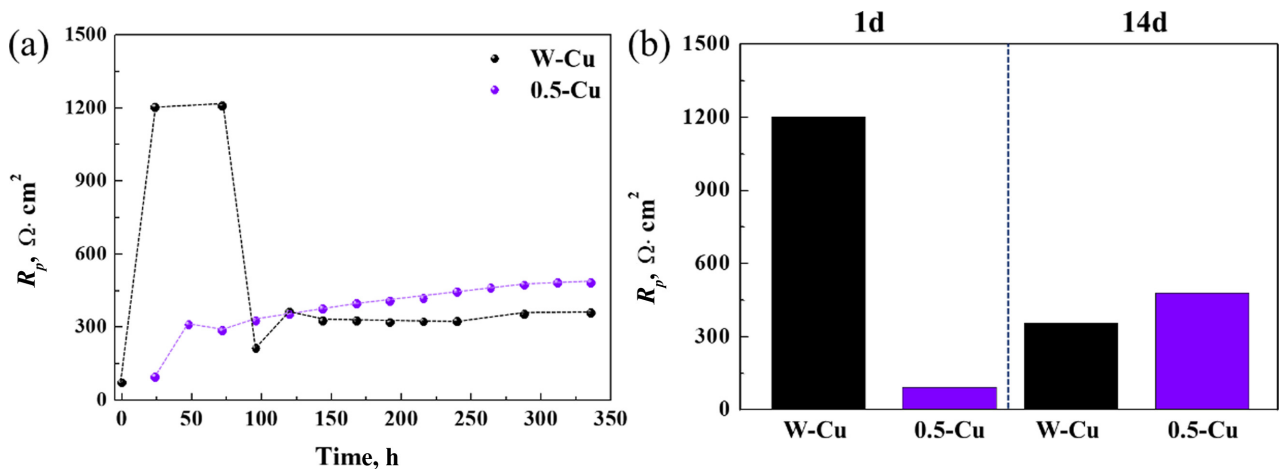


Fig. 4. (a) Changes in polarization resistance (R_p) with immersion times, obtained from LPR measurements; (b) bar-chart comparing the R_p values of the samples after 1-day and 14-days



전기화학적 부식속도 측정 결과와 무게감량 결과 (0.66 mm/year: 선행연구 [2]에서 제시한 일반 API 강재의 감량(0.46 mm/year) 대비 대략 1.4배 수준)으로 판단컨대 중성 CO₂ 조건 하에서 Cu 첨가는 Cu의 국부 용해와 이로 인해 형성되는 Cu 산화물이 FeCO₃의 안정적 석출을 제한하는 부정적 영향을 야기하였을 것으로 판단된다. 이는 전기적 부도체 [11]로서 CO₂ 환경 내 우수한 내식성 유지에 필수적인 요인인 FeCO₃의 안정적 형성에 오히려 방해요인으로 작용하여 내식성을 저하시키는 타 합금원소 첨가(Cr 및 Mo) [2]의 경우와 유사한 맥락으로 이해될 수 있다. 다만, 이 환경 조건 하에서는 내식강으로서의 적용 가능성이 존재하지 않

기 때문에 추가적인 생성물 분석은 배제하였고, 추가로 논의될 산성환경 조건(pH: 4.5 이하) 부분(3.4절)에서 자세한 분석결과를 제시하고자 하였다.

3.3 부식속도 및 거동 분석 (pH 4.5 조건)

Fig. 4는 산성 수용액 내 시편을 노출시켜, Fig. 3의 경우와 동일한 방식으로 도출된 R_p 값을 나타낸다. 우선 극초기(1 d)의 경우 중성 수용액에서 나타난 것과 유사한 형태로 0.5-Cu 시편에서 상당히 낮은 수준의 R_p 값이 측정되었는데, 산성환경에서도 Cu 대비 활성원소인 Fe의 우선 용해속도가 높은 것으로 판단된다. 다만, 이 조건에서 부식반응을 유지시키는 주된 환원반응은 수소환원 반응(equation (10))일 것으로 짐작되며 이 경우, Cu의 환원전위 값 대비 낮아, 기지에 존재하는 Metallic Cu의 용해는 우세한 양극반응으로 간주되지 않는다.

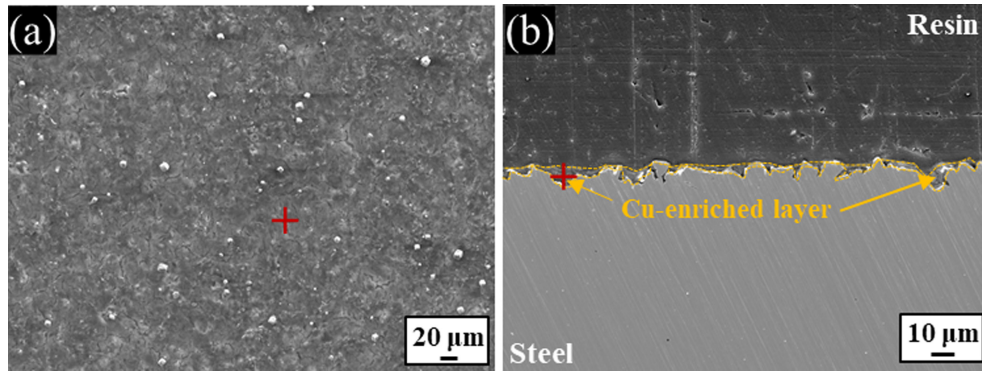


Fig. 5. Surface (a) and cross-sectional (b) morphologies of the 0.5-Cu sample after the initial stage of corrosion



따라서, 부식반응이 지속되면 Fe의 우선 용해로 표면은 Metallic Cu의 농화가 발생할 것으로 예상된다. 후기 시점에는 W-Cu 시편의 R_p 값이 극히 낮게 도출된 반면 0.5-Cu 시편은 상대적으로 높은 수준으로 오히려 내식성이 우수한 것으로 짐작할 수 있다. 즉, 기지의 양극용해 구동력과 수소환원 반응 속도가 높은 산성 분위기의 경우 중성 분위기 대비 일반적으로 높은 부식속도가 예상되나, Cu 첨가강은 상대적으로 부식속도를 억제하는 효과가 나타났다. 이는 무게 감량 결과(0.65 mm/year: 선행연구 [2]에서 제시한 일반 API 강재의 감량(0.79 mm/year)

Table 2. EDS point analysis on area marked on Fig. 5

Element	wt%	at.%
O	09.40	26.88
Fe	79.78	65.34
Cu	10.81	07.78

대비 대략 0.8배 수준)에서도 유사한 거동으로 나타났다. 앞서 언급한 부식초기 표면부 Cu 농화는 Metallic Cu, CuO (equation (8)), Cu₂O (equation (9))의 형태로 나타

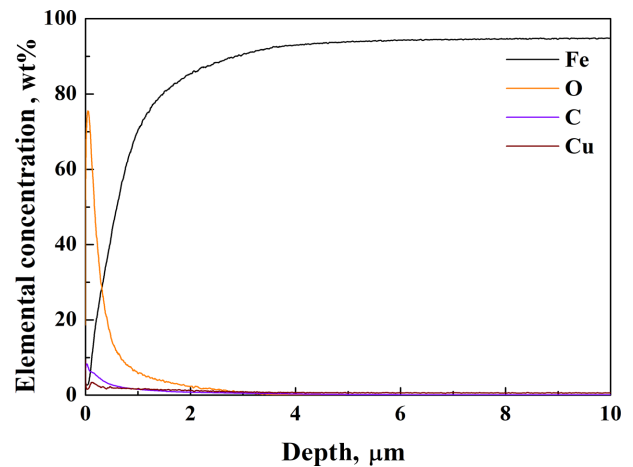


Fig. 6. GDS depth profile of the 0.5-Cu specimen after 3 days of immersion in a 5% NaCl solution with a pH of 4.5 adjusted using HCl

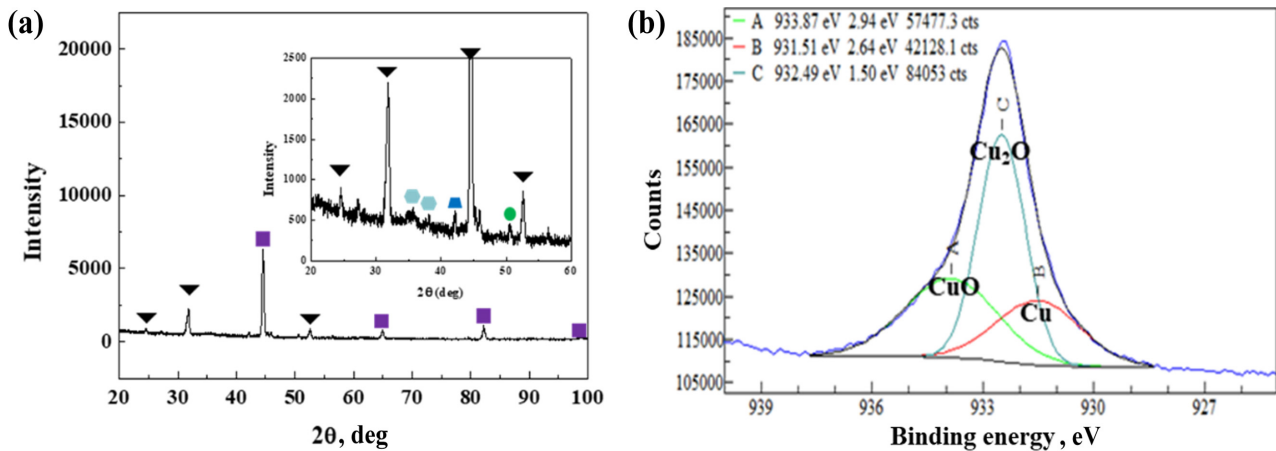


Fig. 7. (a) XRD pattern and (b) XPS Cu 2p_{3/2} spectrum of the 0.5-Cu sample after 3 days of immersion in a 5% NaCl solution with a pH of 4.5 adjusted using HCl

날 것으로 짐작되며, 이는 Fig. 5와 Table 2 에서 일부 확인될 수 있다. EDS 분석으로는 Cu의 농화는 대략

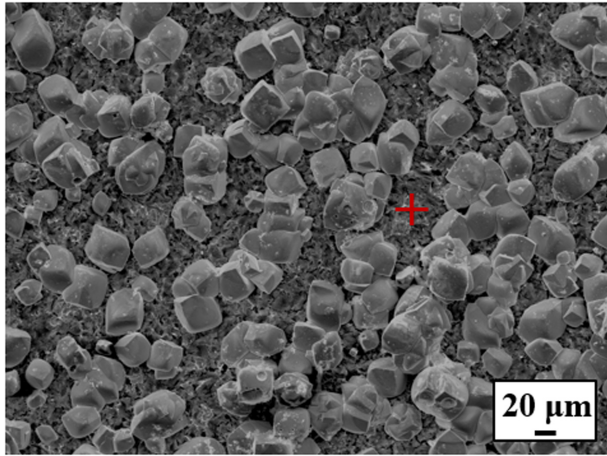


Fig. 8. Surface morphology of the 0.5-Cu sample after 7 days of immersion in a 5% NaCl solution with a pH of 4.5 adjusted using HCl

Table 3. EDS point analysis on area marked on Fig. 8

Element	wt%	at.%
O	07.63	40.55
Fe	57.51	42.24
Cu	26.66	17.21

10~18 wt% 수준까지 측정되었다. W-Cu 시편의 경우 초기 생성물 형성없이 Bare steel이 노출되는 경우 [2]와 대조적이다. 표면에 농화된 Cu 및 그 상부에 형성되는 입자들의 특성 및 본질은 GDS (Fig. 6), XRD, XPS (Fig. 7) 분석 결과에서 명확히 이해할 수 있다. 표면으로부터 최상부는 Fe, O, C 성분으로 이루어진 FeCO_3 와 그 직 하단부는 Cu 농화부 (주로 Metallic Cu, 일부 CuO 및 Cu_2O)로 구성되어 있음을 나타낸다. Fig. 8의 표면 관찰 및 EDS 분석을 통해, 침지가 7일로 증가되면 FeCO_3 입자가 표면 전반에 걸쳐 형성되며 부식속도가 점차 감소됨을 짐작할 수 있다. 다만, 0.5-Cu 시편의 경우 FeCO_3 입자 하단부에는 Cu 농화 수준이 EDS 점 분석으로 대략 27 wt%까지 증가되었음을 알 수 있다. Cu의 경우 수소과전위가 Fe 대비 높아 [12] 상부에서 수소환원 반응(equation (10))이 상대적으로 감소할 수 있으며 표면 수소 Bubbling에 의한 FeCO_3 의 손상 및 불안정한 석출의 효과 또한 감소할 수 있을 것으로 판단된다. 이론적으로, CO_2 포화 수용액의 pH가 4.5로 고정된 경우 FeCO_3 의 안정적 성장이 불리할 것으로 예상할 수 있으나, 부식반응이 진행될수록 pH는 조금씩 상승하며 수용액 내 Bulk pH 대비 시편 직 상단부의 국부 pH는 더욱 상승하는 것이 일반적이다 [2]. 수용액의 pH가 4 이하로 추가적인 감소가 이루어지면 표면 외각측 FeCO_3 의 열역학적 안정도는 보다 감소하여 석출이 크게 제한되며(Fig. 9a), 이 경우, 0.5-Cu 시편의 Cu 농화도 및 상부 FeCO_3

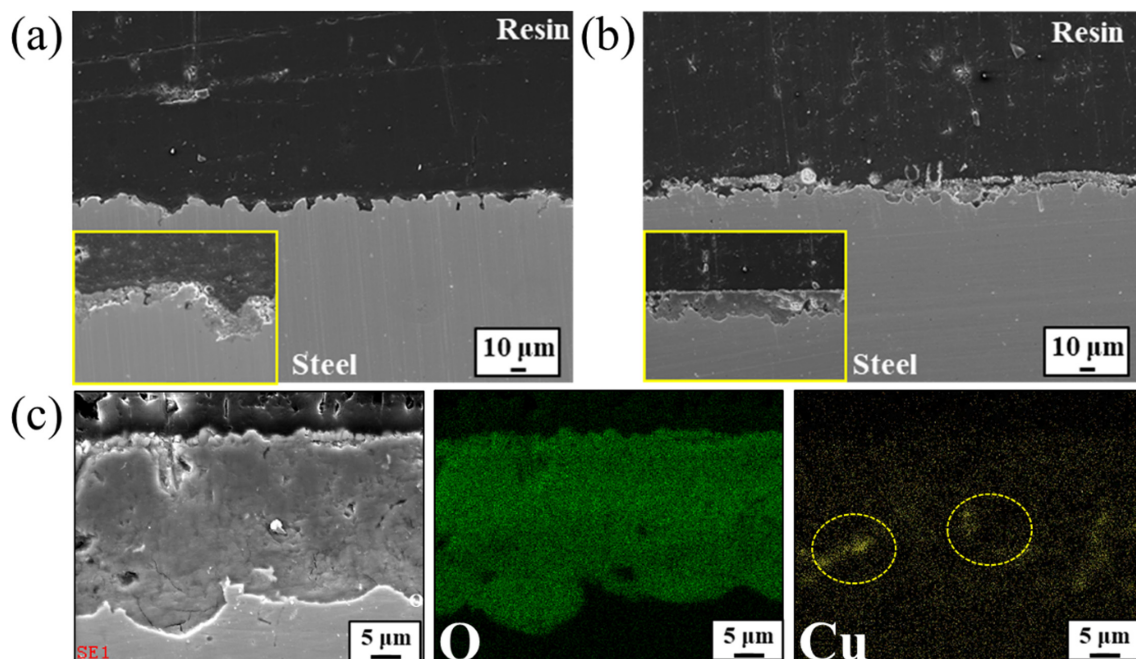


Fig. 9. Cross-sectional morphologies and EDS elemental mappings of the two samples after 7 days of immersion in a 5% NaCl solution with a pH of 4.0 adjusted using HCl: (a) W-Cu; (b) 0.5-Cu. (c) Elemental maps of O and Cu

의 상대적 안정도는 높아질 것으로 판단되어 CO₂ 내식 강으로서의 적용성을 고려해 볼 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 CO₂가 포화된 중성 및 약산성 수용액 환경에서 미량의 Cu 첨가가 HSLA 강재의 부식거동에 미치는 영향을 전기화학적 분석과 부식생성물의 형성특성 측면에서 고찰하였다. 주요 결과는 다음과 같이 요약된다.

미량의 Cu 첨가는 미세조직적 관찰에서 페라이트 기지 내 탄화물의 분포나 조직 형태에 뚜렷한 변화를 유발하지 않지만 열역학적 분석결과 미량의 금속상 Cu 석출 가능성이 예측된다. 이러한 Cu의 존재는 CO₂ 부식 환경에서 전기화학적 반응 경로 및 부식생성물 석출 측면에서 뚜렷한 차이를 야기한다.

중성조건(Bulk pH ~6)에서는 금속상 Cu가 인근 Fe의 용해를 촉진하는 효과를 가져오고, 형성된 CuO 및 Cu₂O는 FeCO₃와의 경쟁적 석출에 기인하여 주 생성물인 FeCO₃의 안정적 석출을 저해함으로써 내식성이 저하된다. 반면, 약산성 조건(Bulk pH ~4, 4.5)에서는 초기의 Fe 용해로 인해 표면에 Cu가 농화되며, 이때 형성된 금속상 Cu 및 산화물층이 수소환원반응 및 수소기포발생을 억제하며 상부에 형성되는 FeCO₃의 안정도를 상대적으로 증가시키는 것으로 판단된다. 즉, 표면에 FeCO₃-Cu 복합층의 성장을 통해 장기적인 내식성 향상의 가능성을 예상해 볼 수 있어, 일반강 대비 CO₂ 내식강으로서의 적용성을 고려해 볼 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2025년 국립순천대학교 글로벌대학 사업비의 지원을 받아(과제번호: 2025-0060) 연구되었음.

References

1. R. Barker, Y. Hua, and A. Neville, Internal corrosion of carbon steel pipelines for dense-phase CO₂ transport in carbon capture and storage (CCS) – a review, *International Materials Reviews*, **62**, 1 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176306>
2. D. B. Yun, H. R. Bang, W. K. Kim, and S. J. Kim, Effect of alloying (Cr, Mo, and V) on corrosion behaviors of API-grade steel in CO₂-saturated aqueous solutions with different pH, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **129**, 435 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.09.003>
3. L. Xu, B. Wang, J. Zhu, W. Li, and Z. Zheng, Effect of Cr content on the corrosion performance of low-Cr alloy steel in a CO₂ environment, *Applied Surface Science*, **379**, 39 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.04.049>
4. S. J. Yun, D. B. Yun, H. R. Bang, W. K. Kim, and S. J. Kim, Effect of micro-alloying (C, V and Mo) on corrosion behaviors of 1Cr-bearing ferritic steel in CO₂-saturated acidic aqueous solution, *Corrosion Science and Technology*, **24**, 527 (2025). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2025.24.6.527>
5. Y. W. Jang, J. H. Hong, and J. G. Kim, Effects of Copper on the Corrosion Properties of Low-Alloy Steel in an Acid-Chloride Environment, *Metals and Materials International*, **15**, 623 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1007/s12540-009-0623-5>
6. Y. S. Choi et al., Effect of alloying elements on the corrosion behavior of carbon steel in CO₂ environments, *Corrosion*, **74**, 566 (2018). Doi: <https://doi.org/10.5006/2705>
7. H. E. Townsend, Effects of Alloying Elements on the Corrosion of Steel in Industrial Atmospheres, *Corrosion*, **57**, 497 (2001). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3290374>
8. H. E. Townsend, T. C. Simpson, and G. L. Johnson, Structure of Rust on Weathering Steel in Rural and Industrial Environments, *Corrosion*, **50**, 546 (1994). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3294356>
9. N. B. Tanvir, O. Yurchenko, Ch. Wilbertz, and G. Urban, Investigation of CO₂ reaction with copper oxide nanoparticles for room temperature gas sensing, *Journal of Materials Chemistry A*, **4**, 5294 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1039/C5TA09089J>
10. D. A. Palmer, Solubility Measurements of Crystalline Cu₂O in Aqueous Solution as a Function of Temperature and pH, *Journal of Solution Chemistry*, **40**, 1067 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1007/s10953-011-9699-x>
11. J. Deuermeier, H. Liu, L. Rapenne, T. Calmeiro, G. Renou, R. Martins, D. Muñoz-Rojas, and E. Fortunato, Visualization of nanocrystalline CuO in the grain boundaries of Cu₂O thin films and effect on band bending and film resistivity, *APL Materials*, **6**, 096103 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1063/1.5042046>
12. J. K. Nørskov, T. Bligaard, Á. Logadottir, J. R. Kitchin, J. G. Chen, S. Pandelov, and U. Stimming, Trends in the exchange current for hydrogen evolution, *Journal of The Electrochemical Society*, **152**, J23 (2005). Doi: <https://doi.org/10.1149/1.1856988>