

초고강도 수소용 파이프 강재 내 미량 첨가된 Cr 및 Mo가 수소트랩효율 및 장기 내식성에 미치는 효과

오정완^{1,2} · 루페쉬 페다네카르¹ · 아시아 자마다르¹ · 박진성³ · 이재원⁴ · 박세민⁵ · 김성진^{1,†}

¹국립순천대학교 첨단신소재공학과, 전라남도 순천시 중앙로 255

²한국폴리텍대학교 순천캠퍼스, 전라남도 순천시 기적의도서관 1길 41

³POSCO 기술연구원, 전라남도 광양시 폭포사랑길 8

⁴포항금속소재산업진흥원, 경상북도 포항시 남구 지곡로 5

⁵국립부경대학교 신소재시스템공학과, 부산광역시 남구 용소로 45

(2026년 3월 12일 접수, 2026년 3월 30일 수정, 2026년 3월 31일 채택)

Effect of Minor Additions of Cr and Mo on Hydrogen Trapping Efficiency and Long-Term Corrosion Behavior in Ultra-Strong Pipeline Steel for Hydrogen Service

Jung Wan Oh^{1,2}, Rupesh S. Pedanekar¹, Aasiya S. Jamadar¹, Jin Sung Park³,
Jae Won Lee⁴, Se Min Park⁵, and Sung Jin Kim^{1,†}

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

²Department of Industrial Facilities, Suncheon Campus of Korea Polytechnic, Suncheon 57975, Republic of Korea

³POSCO Technical Research Laboratories, 8 Pokposarang-gil, Gwangyang 57807, Republic of Korea

⁴Pohang Institute of Metal Industry Advancement (POMIA), Pohang 37666, Republic of Korea

⁵Department of Materials System Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan, Republic of Korea

(Received March 12, 2026; Revised March 30, 2026; Accepted March 31, 2026)

This study investigates the effect of minor Mo addition in Cr-bearing ultra-high-strength pipeline steel on microstructure, hydrogen transport behavior, and corrosion response. Two steels with different Mo contents were produced through quenching and tempering, and their characteristics were analyzed using electron backscatter diffraction (EBSD), electrochemical hydrogen permeation testing (HPT), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). EBSD analysis revealed that increased Mo content refined the tempered martensitic lath structure and reduced the prior-austenite grain size, indicating suppressed grain growth during heat treatment, which influences hydrogen transport and trapping behavior in the steel. HPT results demonstrated that hydrogen permeation during the charging stage was similar for both steels; however, a clear difference emerged during the desorption stage. The higher Mo content resulted in a faster decrease in permeation current during the decay transient, indicating greater hydrogen trapping efficiency. This behavior is associated with interactions between hydrogen and microstructural features, including Mo-containing precipitates and associated lattice distortions. EIS results further indicated that the higher-Mo steel exhibited increased polarization resistance during prolonged immersion, suggesting improved long-term corrosion resistance. These results suggest that increasing Mo content enhances hydrogen trapping efficiency and surface stability of the Cr-bearing ultrastrong steels, improving durability for hydrogen transport applications.

Keywords: Cr, Mo, Hydrogen trapping, Corrosion, Ultra-strength steel

1. 서론

최근 수소 에너지의 활용 확대와 함께 수소 생산, 저장 및 수송 인프라 구축에 대한 관심이 급격히 증가하

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

오정완: 교수 및 박사과정, Rupesh S. Pedanekar: 연구원, Aasiya S. Jamadar: 연구원, 박진성: 연구원, 이재원: 연구원, 박세민: 교수, 김성진: 교수

고 있다. 특히 장거리 수소 수송을 위한 파이프라인 시스템은 대규모 수소 인프라 구축에 있어 핵심적인 요소로 인식되고 있으며, 이에 따라 수소 환경에서의 기계적 안정성과 내구성을 동시에 확보할 수 있는 고강도 파이프 강재의 개발이 중요한 연구 주제로 부각되고 있다 [1]. 그러나 일반적인 강재는 수소 환경에 노출될 경우 수소 취성(Hydrogen embrittlement) 및 수소 유기 열화(Hydrogen-assisted degradation) 현상에 취약할 수 있으며, 이는 소재의 장기 신뢰성을 저하시키는 주요 요인으로 지적된다 [2,3].

강재 내 수소 거동은 수소의 유입 및 확산 특성과 함께 미세조직 내 존재하는 다양한 수소 트랩(Hydrogen trap)에 의해 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 전위(Dislocation), 입계(Grain boundary), 탄화물 및 석출상(Precipitate)과 같은 미세조직적 결함은 수소의 트랩 사이트로 작용하며, 이러한 트랩의 종류와 분포는 수소의 확산 및 축적 거동을 결정짓는 중요한 요인으로 작용한다 [2-4]. 특히 미량 합금 원소의 첨가는 강재의 미세조직과 석출 거동을 변화시킴으로써 수소 트랩 특성에 영향을 미칠 수 있으며, 이러한 상관관계에 대한 이해는 수소 환경에서의 강재의 장기 신뢰성을 향상시키기 위한 중요한 연구 주제로 간주되고 있다.

강재에 첨가되는 미량 합금성분 중 Cr은 고강도 파이프 강재에서 경화능(Hardenability) 향상과 탄화물 형성 제어를 위해 널리 활용되는 원소로 알려져 있다. 우선 $M_{23}C_6$ 형태의 안정적인 미세 탄화물 석출에 기여하며 내부로 유입된 수소의 트랩 역할 또한 제시되고 있다 [5]. 또한 Cr은 부식 환경에 노출 시 강재 표면에 $(Fe,Cr)_3O_4$ 형태의 비교적 치밀하고 안정적인 산화물을 재빨리 형성함으로써 강재의 내식성 향상에도 효과적인 것으로 보고되고 있다 [6,7]. 이러한 Cr 기반 합금 설계와 함께, Mo 또한 미량 첨가 시 강재의 석출 거동 및 미세조직 안정성에 영향을 미칠 수 있으며, 일부 연구에서는 Mo 첨가가 탄화물 형성 거동을 변화시키거나 국부적인 격자 왜곡(Lattice distortion)의 유도 가능성 또한 언급되며 수소 확산 및 트랩 거동에 영향을 미칠 수 있을 것으로 지적된 바 있다 [8]. 또한, sk의 연구 [9]에 따르면, 수용액성 CO_2 분위기에서 강재 내 미량의 Cr 및 Mo의 복합 첨가는 안정적인 부식생성물의 형성 속도를 증가시키는 것으로 보고되었다. 하지만, 일정 함량 이상의 Mo 첨가는 경화능을 크게 증가시키며, 수소에 기인한 균열의 전파 저항성을 저하시킬 수 있으며 [10], H_2S 함유 환경 내에서는 황화물 기반 생성물의 안정도를 오히려 감소시킬 수 있는 단점 또한 지적되었다 [11]. 이러한 결과는 합금 원소의 미량 첨가가 강재의 수소거동 및 내식 특성에 복합적인 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

강재 내 미량의 합금성분 첨가에 따른 수소거동 해석을 위해 주로 Thermal desorption spectroscopy (TDS)를 활용한 연구가 다수 보고되고 있으나, 전기화학적 수소 투과 실험 기반의 전류상승 과도구간(Rising transient) 및 전류감쇠 과도구간(Decay transient)의 거동을 복합적으로 분석함으로써 강재 내 수소 확산, 트랩 및 탈착 거동 해석에 대한 연구는 극히 제한적이다. 특히, 최근 개발되고 있는 수소 이송용 기가급 초고강도 파이프 강재에서 Cr과 Mo의 복합 첨가가 미세조직, 수소 트랩 특성, 그리고 장기 내식성에 미치는 영향을 체계적으로 분석한 연구에 대해서는 크게 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 수소 이송용 초고강도 강재를 대상으로 Cr과 함께 미량의 Mo 첨가량 변화를 통해 미세조직, 수소 트랩 및 탈착 거동, 그리고 장기 내식성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이를 위해 전자 후방산란 회절(Electron backscattered diffraction, EBSD) 분석을 활용한 미세조직적 특성 비교, 전기화학적 수소 투과 실험(Electrochemical hydrogen permeation) 기반의 수소 트랩 효율 및 탈착 거동 분석과, 전기화학적 임피던스 분석(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) 활용을 통한 표면 반응성 측면에서의 전기화학적 특성 분석을 수행하였다. 이를 통해 대상 강재의 장기 내식성 향상을 위한 합금 설계 측면에서의 학술적인 정보를 제시하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시편제조 및 미세조직 분석

본 연구의 대상 소재는 수소이송용 파이프 강재로 인장강도 1 GPa의 초고강도급 소재로 분류될 수 있고, Table 1에 기재된 화학적 조성표에서 알 수 있듯이 미량의 Cr과 함께 Mo 함량 변화에 따라 두 가지 시편(Sample A와 Sample B)으로 구성되었다. 소재는 일반적인 강재 생산공정을 통해 열간 압연 후 $820^\circ C$ 의 온도에서 오스테나이트화 및 수냉하였고, 이후 인성부여를 위해 $630^\circ C$ 에서 템퍼링(Tempering) 처리하여 시편을 제조하였다.

미세조직 분석을 위해 두 시편을 SiC 연마지 #2400까지 기계적 연마 후 $1\mu m$ 및 $0.25\mu m$ Diamond suspension으로 미세연마 하였다. 이후 가속전압 20 kV, 전류 1 nA, 스텝 크기 40 nm 조건 하에서 전자 후방산란 회절 분석을 통해 이미지 및 역극점도(Inverse pole figure) 지도를 통한 조직 분석과 커널 평균 방위차(Kernel average misorientation, KAM) 지도를 통한 국부변형 및 전위밀도 분포에 대한 분석이 이루어졌다. Mo 함량 증가에 따른 미세조직 내 존재상의 특성은 JMatPro 소프트웨어 (Sente software, UK)를 이용하여 계산된 평형상

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

	C	Si	Mn	Al	Cr	Mo
Sample A	0.3 ~ 0.4	0.15 ~ 0.25	0.6 ~ 1.2	0.015 ~ 0.025	1.1 ~ 1.5	0.15 ~ 0.25
Sample B	0.3 ~ 0.4	0.15 ~ 0.25	0.6 ~ 1.2	0.015 ~ 0.025	1.1 ~ 1.5	0.4 ~ 0.5

예측 결과와 연계하여 논의하였다.

2.2 전기화학적 수소투과 분석

시편들 간 수소화산 및 트랩 거동 분석을 위해 ISO 17081 [12]에 기반한 전기화학적 수소투과실험을 수행하였다. #2000까지 연마한 시편들은 에탄올로 세척하였고, 시편이 노출되는 수소검출부 (Detection side) 면에 산화효율 향상을 위한 팔라듐 (Pd) 도금층을 대략 100 nm 수준으로 전기도금 처리하여 형성시켰다. Pd 도금의 경우, 500 mL NH₄OH + 2.54 g PdCl₂ 용액 내에서 -2.8 mA/cm²의 전류밀도를 150초 동안 인가하는 방식으로 수행되었다. 수소주입 전, 검출부에 탈기된 0.1 M NaOH 용액을 주입하고 배경전류 획득을 위해 0.27 V vs SCE의 산화전위를 인가하였다. 이후 검출부의 배경전류가 0.1 μA/cm² 수준에 도달하면 주입부에 3.5% NaCl + 0.3% NH₄SCN 수용액을 주입하고 -1 mA/cm²의 음극전류를 인가하여 수소를 주입하였다. 측정되는 투과전류가 정상상태에 도달 시 아래의 식 (Equation (1))을 이용하여 수소화산계수를 도출하였다.

$$D_{app} = \frac{L^2}{6t_{lag}} \quad (1)$$

여기서, D_{app}, L 및 t_{lag}는 수소화산계수, 시편두께 및 정상상태의 투과전류밀도의 63%의 전류밀도를 나타낼 때의 시간을 의미한다.

수소주입에 따른 투과전류 값의 상승곡선 (Rising transient) 이후 수소주입을 중단하며 감소되는 투과전류 값 곡선 (Decay transient)에 대한 측정을 통해 수소 트랩 및 탈착 거동을 분석하였고, Rising 및 Decay 각 곡선은 아래의 이론적 식 (Equation (2), (3)) [13]으로 Fitting 하였다.

-H permeation rising phase:

$$\frac{i_t - i_0}{i_\infty - i_0} = \frac{2L}{\sqrt{\pi Dt}} \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 L^2}{4Dt}\right] \quad (2)$$

-H permeation decay phase:

$$\frac{i_t - i_\infty}{i_0 - i_\infty} = 1 - \frac{2L}{\sqrt{\pi Dt}} \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 L^2}{4Dt}\right] \quad (3)$$

여기서, D, i₀, i_∞, n은 각각 수소화산계수, 초기 투과전류밀도, 정상상태에서의 투과전류밀도, Fitting을 위해 취하는 값 (0,1,2,3)을 의미한다.

2.3 전기화학적 임피던스 (EIS) 분석

본 연구의 EIS 실험은 소재의 표면 반응성을 토대로 장기적 부식거동을 파악하기 위해, 3전극 기반의 전기화학적 Flat-type 셀을 이용하여 수행하였다. 전해질로 3.5 wt% NaCl 수용액을 사용하였으며, 25 °C의 일정한 온도에서 진행되었다. 전기화학 셀 내 시편을 작업전극 (Working electrode, WE), 백금(Pt)을 상대전극(Counter electrode, CE), 포화칼로멜전극(Saturated calomel electrode, SCE)을 기준전극(Reference electrode, RE)으로 구성하였다. EIS 실험의 경우 개방회로전위(Open circuit potential, OCP) 대비 ±10 mV의 교류전위를 인가하며, 100,000 ~ 0.01 Hz의 주파수 범위 내에서 수행되었다. 실험을 통해 획득한 Nyquist plot은 등가회로를 바탕으로 Fitting 하여 전기화학적 변수(용액저항 (R_s), 부식생성물의 커패시터(Q_i), 부식생성물의 저항(R_i), 부식생성물 및 소지금속 계면의 커패시터(Q_{ct}), 부식생성물 및 소지금속 계면의 전하이동 저항(R_{ct}), 그리고 부식생성물과 전기이중층의 비이상적 거동을 나타내는 지수값(n_p, n_d))들을 정량적으로 도출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직 관찰

Fig. 1은 본 연구의 대상소재의 미세조직을 나타낸다. 두 시편 모두에서 오스테나이트화 열처리 후 수냉 및 템퍼링 처리를 거치면서 전형적인 래스 형태의 템퍼드 마르텐사이트 조직을 형성하고 있는 것으로 확인된다. 이러한 조직은 인장강도 1 GPa급 고강도 파이프 강재에서 일반적으로 나타나는 미세조직으로, 높은 강도와 동시에 일정 수준의 인성을 확보하기 위한 열처리 조건에 의해 형성되어 진다.

그러나 미량의 Mo 함량 증가(0.25 → 0.45 wt%)에 따른 미세조직적 차이 또한 관찰되었다. Mo가 상향 첨가된 Sample B에서는 마르텐사이트 래스 간격이 보다 미세하고 조밀한 형태로 분포하는 경향과 구 오스테나이트 결정립 또한 상대적으로 감소하는 특징을 보였다. 이

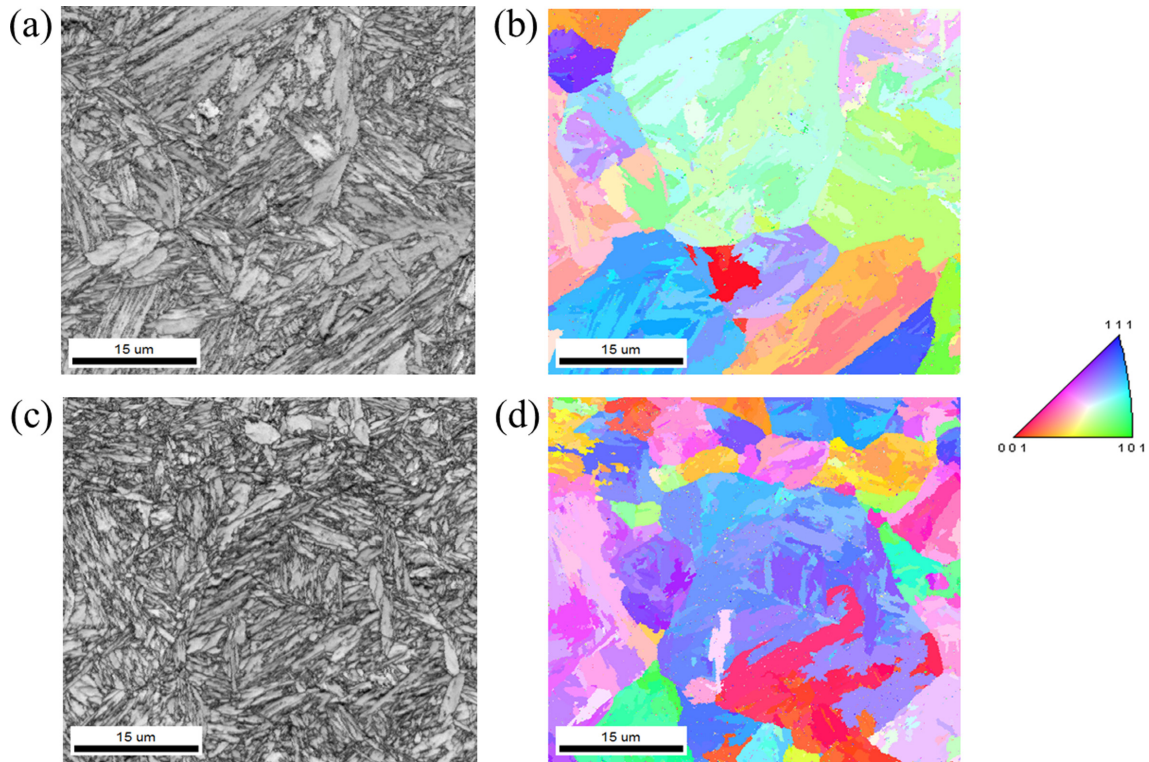


Fig. 1. Microstructure examination via EBSD: (a,c) image quality (IQ) maps of sample A and B, respectively; (c,d) inverse pole figure (IPF) maps of sample A and B, respectively

러한 차이는 Mo 첨가량 증가에 따른 석출물 형성 거동의 변화 및 이에 따른 오스테나이트 결정립(Prior-austenite grain, PAG) 성장 억제 효과에 기인한 것으로 판단된다. 일반적으로 Mo는 탄화물 형성 원소로 작용하며, 템퍼링 과정에서 미세한 합금 탄화물의 형성을 촉진함과 동시에 오스테나이트 입계 이동을 억제하는 효과를 갖는 것으로 알려져 있다 [14,15]. 따라서 Mo 함량 증가에 따른 이러한 석출경향 및 입계 이동 억제 효과가 보다 미세한 PAG 및 래스 구조 형성에 기여한 것으로 판단되며, 이는 소재가 수소환경 내 노출될 경우 수소의 유입, 확산, 트랩 및 탈착 등의 거동에 있어 차이를 야기하여 소재의 수소취화 저항성 및 구조적 건전성 또한 크게 의존할 것으로 예상된다.

3.2. 전기화학적 수소투과 및 탈착 거동

Fig. 2는 두 시편에 대한 전기화학적 수소투과 실험 결과로부터 도출된 Rising transient 및 Decay transient 곡선을 나타낸 것이다. 먼저 수소 주입 단계에서 나타나는 Rising transient의 경우, 두 시편 모두 유사한 형태의 곡선과 기울기 형태를 나타내며 정상상태(Steady-state)에 도달하는 거동 또한 큰 차이를 보이지 않았다. 반면, 수소 주입을 종료한 이후의 Desorption 단계에서

획득된 Decay transient에서는 두 시편 간에 비교적 뚜렷한 차이가 나타났다. Decay transient는 Rising transient에서 정상상태 투과전류밀도가 형성된 이후 수소 주입을 종료하고, 검출부 측에서 측정되는 수소 투과전류의 감소 거동을 나타낸 것이다. 이 단계에서는 추가적인 수소 주입이 이루어지지 않기 때문에, 강제 내부에 존재하던 수소 중 격자 내 존재하는 수소 및 가역적 트랩(Reversible trap)에 포획되어 있던 수소만이 탈착되어 검출부 측으로 방출되며, 비가역적 트랩(Irreversible trap)에 포획된 수소는 방출되지 않는 것으로 알려져 있다 [10]. 따라서 Decay transient는 강제 내 가역적 트랩 특성 및 탈착 동역학을 평가하는 데 중요한 정보를 제공한다.

본 연구에서 Sample A의 경우 Sample B에 비해 Desorption 단계에서 검출 측으로 방출되는 수소의 감소 속도가 상대적으로 느리게 나타나는 특징이 나타났다. 즉, Sample B 대비 Sample A는 투과전류가 배경 전류 수준으로 수렴하는 데 보다 긴 시간이 소요되었으며, 이는 강제 내부에 존재하는 수소가 장시간에 걸쳐 점진적으로 방출되고 있음을 의미한다. 선행 연구 [16,17]에 따르면 이러한 Desorption 단계에서의 방출 거동은 주로 Weak trap 및 Intermediate trap에 포획된 수소의 방출 특성과 밀접한 관련을 갖는 것으로 보고되고 있다. 일반

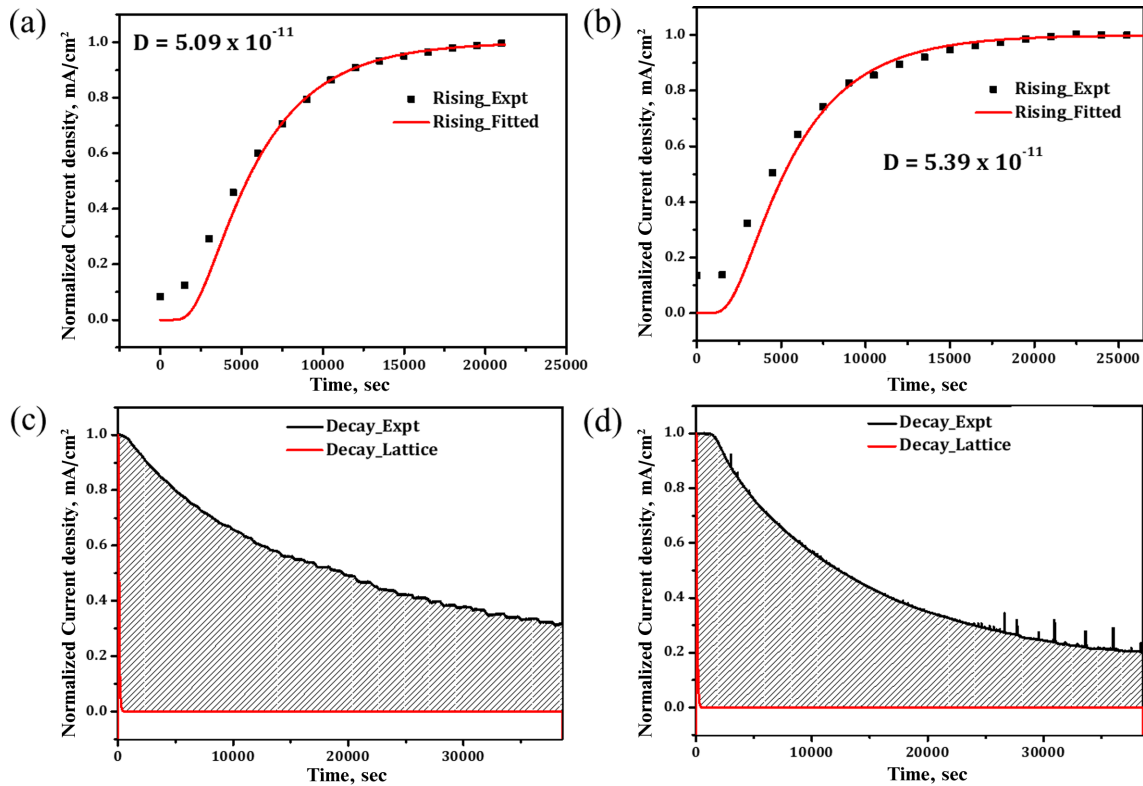


Fig. 2. Electrochemical hydrogen permeation transients: (a,b) rising transients and (c,d) decay transients for samples A (a,c) and B (b,d), respectively

적으로 Weak trap에 포획된 수소는 비교적 빠르게 이탈 되는 반면, Intermediate trap에 포획된 수소는 일정한 결합에너지를 가지면서도 상온에서 방출이 가능하기 때문에 비교적 완만한 Kinetics를 나타내는 것으로 알려져 있다. 이는 금속재료 내 수소의 흡수, 격자확산, 트랩 및 트랩이탈, 표면탈착 등의 단계에서 트랩이탈 과정이 전체 Kinetics를 지배하는 율속단계로 작용함을 의미하며, 이러한 해석은 Kissinger 분석법의 기본 가정과 수소 열탈착 거동 해석에 관한 선행 연구와 부합한다 [18,19].

Sample A의 Decay transient에 한하여 일반적으로 적용되는 이론적 Decay 모델 (Equation (3))을 이용하여 Fitting한 결과를 Fig. 3에 나타내었는데, 초기 탈착 구간에서는 이론 곡선과 실험 결과가 비교적 유사한 경향을 보였으나, 탈착 중후반부 영역에서는 실험값이 이론값에 비해 상대적으로 높은 투과전류 값을 유지하는 경향이 확인된다. 즉, 이론적으로 예측되는 감소 속도보다 실제 실험에서 측정된 투과전류가 보다 느린 속도로 감소하는 특징을 보였다. 이러한 현상은 강재 내 존재하는 일부 트랩이 수소와 비교적 높은 결합에너지를 가지면서도 상온에서 방출이 가능한 수준의 Intermediate trap 특성을 가지기 때문인 것으로 해석될 수 있다.

한편 Decay transient의 하부 면적은 시간에 따른 수

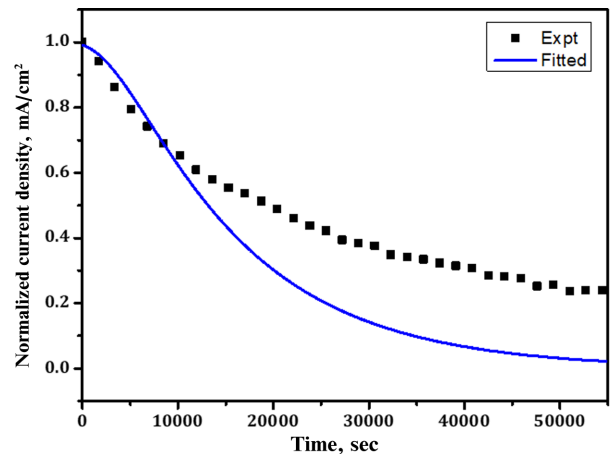


Fig. 3. Curve-fitting to experimental decay curve of sample A using the diffusion equation during the decay phase

소 투과전류의 적분값(Equation (4))으로서 탈착 과정에서의 총 전하밀도(Q)에 해당하며, 이를 Faraday 법칙에 기반하여 수소 몰 농도(C_H) 형태로 환산하여 두 시편을 비교할 수 있다 (Sample A: $2.17 \times 10^{-3} \text{ mol/cm}^3$, Sample B: $1.76 \times 10^{-3} \text{ mol/cm}^3$) (Equation (5)).

$$Q = \int I dt \quad (4)$$

$$C_H \text{ (mol/cm}^3\text{)} = \frac{Q \left(\frac{mC}{cm^2} \right) \times 10^{-3}}{FL \text{ (cm)}} \quad (5)$$

여기서 I, F, L은 각각 투과전류밀도, Faraday 상수, 시편 두께를 의미한다.

비록 본 연구에서는 투과 전류 값을 정규화 (Normalization) 하였기 때문에 시편 간 절대적인 탈착 수소량을 비교하는 것은 적절치 않으나, Sample B에서 보다 빠른 탈착 거동이 나타난다는 상대적 경향은 명확히 판단 가능하다. 특히 Desorption current가 초기 값의 절반 수준으로 감소하는 시간($t_{1/2}$)을 비교한 경우에도 Sample A와 Sample B 사이에 뚜렷한 차이가 나타나며 (Sample A: 19,500s, Sample B: 12,450s), 이는 Sample B에서 상대적으로 효율적인 수소 트랩 거동이 형성되고 있음을 시사한다.

이러한 차이는 두 시편 간 미세조직 및 석출 거동의 차이와 밀접하게 연관되는 것으로 판단된다. 일반적으로 강재 내 미량 첨가된 Cr은 $M_{23}C_6$ 형태의 안정적인 합금 탄화물 석출을 형성하는 경향이 있는 것으로 알려져 있다 [5]. 그러나 Mo가 동시에 첨가되는 경우 일부 탄화물 내에 Mo가 고용되거나 복합 탄화물 형태로 존

재하면서 격자 왜곡(Lattice distortion) 및 전위밀도 증가를 유도할 수 있으며, 경우에 따라 M_7C_3 형태의 탄화물 또는 독립적인 Mo 기반 탄화물 석출이 형성될 가능성 또한 보고되고 있다 [8,20]. 특히 Mo 기반 탄화물의 경우 수소원자와의 높은 트랩 에너지(40 kJ/mol 이상)가 보고되었다 [21]. 이러한 경향은 Fig. 4a와 (b)에 제시된 EBSD KAM 분석 결과에서 Sample B의 경우 래스 경계를 따라 조밀하게 분포하는 고변형 영역으로 인해 국부적인 Lattice misorientation이 다소 증가하는 경향을 보이는 점, 상대적으로 높은 인장강도 값(Sample A 대비 대략 180 MPa 더 높음), 그리고 Fig. 4c의 열역학적 계산 결과에서 Sample B에 국한하여 M_7C_3 탄화물 형성 가능성이 예측되는 점을 통해 일부 추측해 볼 수 있다. 이러한 변형 추적 상태 및 탄화물 석출에 의한 국부적 응력장은 수소 탈착 속도 지연에 기여하는 요인으로 판단된다. 다만 Mo 기반 탄화물의 독립적인 형성 거동에 대해서는 고분해능 투과전자현미경(TEM) 등을 활용한 추가적인 분석이 필요할 것으로 사료된다.

3.3 전기화학적 임피던스 거동

Fig. 5는 두 시편의 장기적인 부식 거동 예측을 위해 중성 수용액(3.5 wt% NaCl) 환경에서 수행한 장기 침

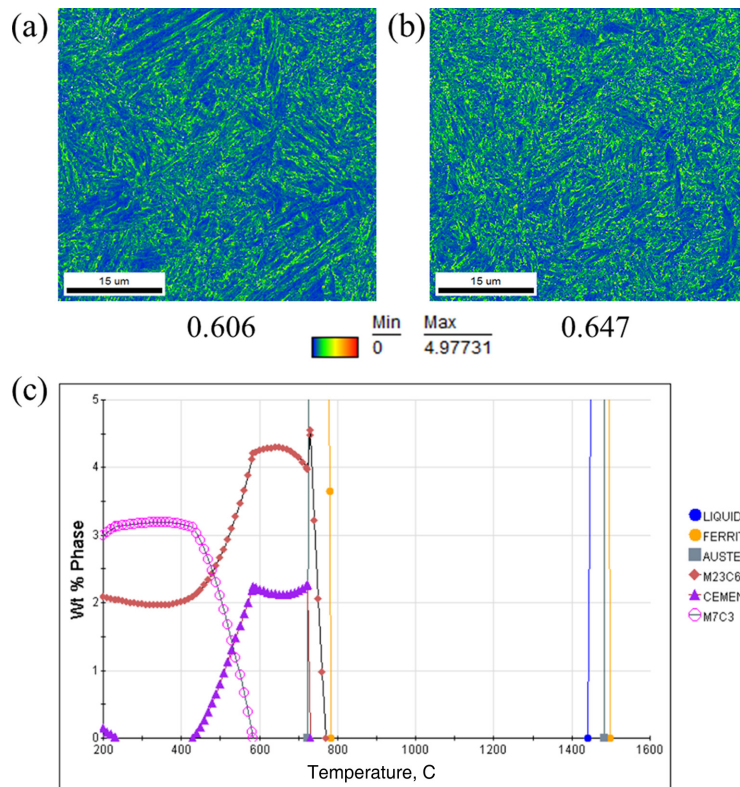


Fig. 4. (a,b) EBSD KAM maps and average KAM values for samples A and B, respectively, and (c) calculated phase fraction of precipitates as a function of temperature using JMatPro

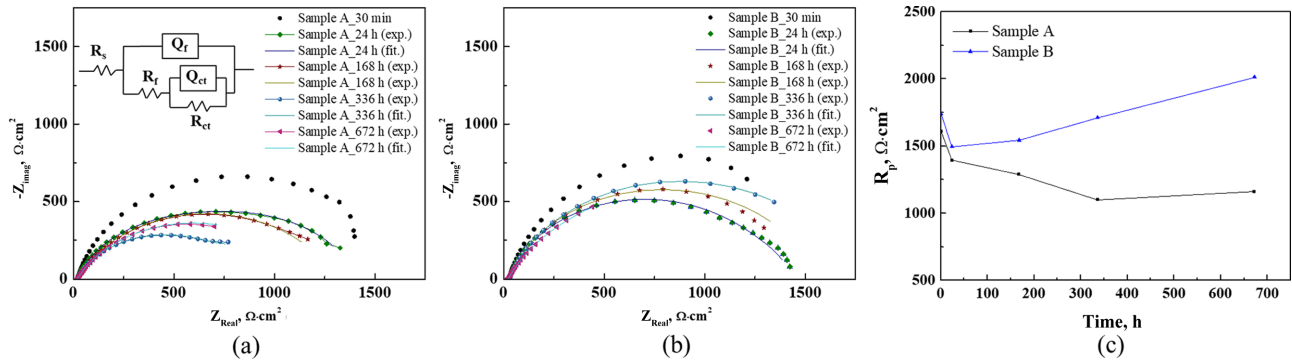


Fig. 5. (a,b) EIS Nyquist plots of samples A and B, respectively, and (c) variation of R_p with immersion time

Table 2. Various electrochemical parameters obtained from fitting the EIS Nyquist plots of two samples immersed in 3.5% NaCl solution for 672 h

	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	Q_{ct} ($\times 10^{-3} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{n-1}$)	n_{dl}	R_f ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	Q_f ($\times 10^{-3} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{n-1}$)	n_f
Sample A	17.5	1130	5.4	0.719	25	3.21	0.69
Sample B	23	1957	4.11	0.754	55.4	3.16	0.9

지 과정 중 측정된 EIS Nyquist plot과 분극저항(Polarization resistance, R_p) 변화를 나타낸 것이다. 침지 초기 단계에 해당하는 30 min에서 관찰되는 Inductive loop 특성은 부식반응 초기 계면에서 발생하는 흡착종(Adsorbed species)의 형성 및 탈착 과정, 또는 금속 용해 과정 중 형성되는 중간반응종의 동역학적 거동과 관련된 현상으로 보고되고 있다 [22]. 이러한 초기 과도구간을 제외하곤 이후의 Nyquist plot에 대해서는 Fig. 5에 제시된 등가 회로 모델을 이용하여 Fitting을 수행하였으며, 이를 통해 다양한 전기화학적 변수들을 도출하였으며 대표적으로 4주 침지 조건에서의 변수 값을 Table 2에 나타내었다. 특히 분극저항 값($R_p = R_{ct} + R_f$)의 변화를 토대로 두 시편 간 장기 부식 거동의 차이를 보다 명확히 비교 평가 할 수 있도록 Fig. 5c에 도표 형태로 나타내었다. 결과적으로, 침지 극초기 구간을 제외한 대부분의 침지 시간에서 Mo가 상향 첨가된 Sample B에서 Sample A 대비 일관되게 높은 R_p 값의 경향이 나타났다. 또한, 상대적으로 높은 n_f 값에 기인하여 Nyquist plot에서 나타나는 Depression angle이 감소하는 경향을 보였으며, 이는 전극/전해질 계면에서의 정전용량성 거동이 보다 지배적으로 나타남을 의미하며, 계면이 상대적으로 균일하고 안정한 표면막 특성을 형성하고 있는 것으로 추측해 볼 수 있다 [23,24]. 이를 토대로, 동일한 환경 조건에서 Sample B의 경우 금속계면의 전기화학적 반응 속도가 상대적으로 낮으며, 장기적인 표면 열화 속도가 보다 완만할 가능성을 시사한다.

일반적으로 미량의 Cr이 첨가된 강재는 부식 과정에

서 표면에 형성되는 부식 생성물 중 Fe_3O_4 와 함께 스피넬 구조의($\text{Fe,Cr})_3\text{O}_4$ 가 형성되는 것으로 알려져 있으며, 이러한 Cr 함유 스피넬 산화물은 기지 금속과의 높은 계면 접착력(Adhesion)을 바탕으로 비교적 치밀하고 안정적인 보호층을 형성하여 중성 수용액 환경에서의 장기 내식성을 향상시키는 것으로 보고되고 있다 [6,7,24]. 한편, 본 연구에서 추가적으로 첨가된 Mo의 경우에도 부식 거동에 영향을 미칠 수 있는 역할에 대한 메커니즘이 제시되고 있다. 일부 연구에서는 Mo가 부식 생성물 내에 부분적으로 고용되거나, Mo 함유 Oxide 또는 Hydroxide 형태로 존재하면서 산화물 층의 안정성을 향상시키는 효과를 나타낼 수 있는 것으로 보고되고 있다 [25]. 또한 Mo의 존재는 국부적인 용해 반응을 억제하거나 부식 생성물 층 내 Cr 산화물의 안정도를 향상시키는 데 기여 가능성이 제시되고 있다 [26]. 이러한 측면에서 볼 때, 본 연구에서 관찰된 Sample B의 상대적으로 높은 R_p 값은 Mo의 상향 첨가에 따른 부식 생성물 층의 안정성 증가 또는 계면 반응 속도의 감소와 일정 부분 관련될 가능성을 고려해 볼 수 있다.

다만 본 연구에서는 표면 부식 생성물의 조성 및 구조에 대한 직접적인 분석이 수행되지 않았기 때문에, Cr 및 Mo의 복합 첨가에 따른 산화물 형성 거동 및 보호 특성의 구체적인 메커니즘을 명확히 규명하기에는 한계가 있다. 따라서 향후에는 XPS, Raman, TEM 또는 단면 분석 등을 통한 부식 생성물의 조성 및 구조적 특성에 대한 추가적인 분석이 수행될 필요가 있으며, 이를 통해 Cr과 Mo의 복합 첨가가 강재의 장기 내식성에 미

치는 상호작용 효과를 보다 정량적으로 규명할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 수소 이송용 기가급 초고강도 파이프 강재에서 미량 첨가된 Cr 및 Mo가 미세조직, 수소 트랩 거동, 그리고 장기 내식성에 미치는 영향을 분석하였다.

두 시편 모두 오스테나이트화 후 수냉 및 템퍼링 공정을 통해 전형적인 래스 형태의 템퍼드 마르텐사이트 조직을 형성하였다. 다만 Mo 함량이 증가된 Sample B에서는 마르텐사이트 래스 간격과 PAG 크기가 상대적으로 미세하게 나타났으며, 이는 Mo 첨가에 따른 석출 거동 변화 및 결정립성장 억제 효과와 관련된 것으로 판단된다.

전기화학적 수소투과 실험 결과 Rising transient에서는 두 시편 간 확산 거동의 유의미한 차이가 나타나지 않은 반면, Desorption 단계에서의 Decay transient에서는 뚜렷한 차이가 관찰되었으며, Mo 함량이 높은 Sample B에서 상대적으로 빠른 탈착 Kinetics가 나타났다. 이는 Mo 첨가에 따른 미세조직 및 석출 특성 변화가 수소 트랩 형성에 영향을 미쳐, 결과적으로 Sample B에서 보다 높은 수소 트랩 효율이 형성되었음을 시사한다. 또한 EBSD KAM 분석 및 열역학적 계산 결과는 Mo 첨가에 따른 격자 왜곡 증가와 탄화물 석출 거동 변화 가능성이 일부 뒷받침하였다.

장기 침지 조건에서 수행된 전기화학적 임피던스 분석 결과에서도 Mo 함량이 증가한 Sample B에서 전반적으로 높은 분극저항 값을 나타내어 상대적으로 우수한 장기 내식 특성의 가능성이 확인되었다. 이는 Cr이 포함된 스피넬형 부식 생성물과 함께 Mo 첨가에 따른 계면 반응 안정화 효과가 복합적으로 작용한 결과로 추측된다.

다만 Cr과 Mo의 복합 첨가에 따른 탄화물 형성 및 부식 생성물 형성 메커니즘에 대해서는 향후 보다 정밀한 미세구조 및 표면 분석을 통한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

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

References

1. H. Li, R. Niu, W. Li, H. Lu, J. Cairney, Y. S. Chen,

Hydrogen in pipeline steels: Recent advances in characterization and embrittlement mitigation, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **105**, 104709 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104709>

2. U. Javeria, S. J. Kim, Investigation of hydrogen embrittlement in steel alloys: mechanism, factors, advanced methods and materials, applications, challenges, and future directions: A review, *Journal of Materials Research and Technology*, **38**, 1276 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.07.269>

3. S. J. Kim, K. Y. Kim, An overview on hydrogen uptake, diffusion and transport behavior of Ferritic Steel, and Its Susceptibility to Hydrogen Degradation, *Corrosion Science Technology*, **16**, 209 (2017). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2017.16.4.209>

4. A. H. M. Kram, A. Bakker, Hydrogen trapping models in steel, *Metallurgical and Materials Transactions B*, **31**, 1475 (2000). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11663-000-0032-0>

5. S. Jakob, B. Sefer, S. W. Ooi, M. Thuvander, The hydrogen trapping potential of Cr-rich $M_{23}C_6$ and M_7C_3 carbides in hybrid steel alloys investigated by atom probe tomography, *Microscopy and Microanalysis*, **31**, ozafo48.152 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1093/mam/ozaf048.152>

6. G. B. Baek, E. H. Hwang, S. W. Lee, S. J. Kim, Effect of Minor Alloying Elements (Cr and Si) on Surface Oxide Formation During Processing and Corrosion Behavior of Ultra-High-Strength Steel in 3.5% NaCl Solution, *Corrosion Science and Technology*, **24**, 289 (2025). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2025.24.4.289>

7. H. N. Chi, L. V. Truong, D. B. Yun, E. H. Hwang, R. S. Pedanekar, A. S. Jamadar, S. J. Kim, Experimental and DFT-based computational study on corrosion behavior of micro-alloyed steel in 3.5% NaCl solution, *npj Materials Degradation*, **9**, 133 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1038/s41529-025-00680-w>

8. P. Y. Liu, B. Zhang, R. Niu, S. L. Lu, C. Huang, M. Wang, F. Tian, Y. Mao, T. Li, P. A. Burr, H. Lu, A. Guo, H. W. Yen, J. M. Cairney, H. Chen, Y. S. Chen, Engineering metal-carbide hydrogen traps in steels, *Nature Communications*, **15**, 724 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45017-4>

9. M. H. Sk A. Ablulah J. QL M. Ku B. Ingham, N. Layondk, M. Ryanand D. Williams, The Effects of Cr/Mo micro-alloying on the corrosion behavior of carbon steel in CO₂-saturated (sweet) brine under hydrodynamic control, *Journal of the Electrochemical Society*, **165**, C278

- (2018). Doi: <https://doi.org/10.1149/2.1011805jes>
10. J. S. Park, J. W. Lee, J. K. Hwang, S. J. Kim, Effects of alloying elements (C, Mo) on the hydrogen assisted cracking behavior of A516-65 steels in sour environments, *Materials*, **13**, 4188 (2020). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma13184188>
 11. S. U. Koh, J. M. Lee, B. Y. Yang, K. Y. Kim, Effect of molybdenum and chromium addition on the susceptibility to sulfide stress cracking of high-strength, low-alloy steels, *Corrosion*, **63**, 220 (2007). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3278346>
 12. ISO 17081:2004 (E), Method of Measurement of Hydrogen Permeation and Determination of Hydrogen Uptake and Transport in Metals by an Electrochemical Technique, ISO, Switzerland (2004).
 13. L. Gan, F. Huang, X. Zhao, J. Liu, Y. F. Cheng, Hydrogen trapping and hydrogen induced cracking of welded X100 pipeline steel in H₂S environment, *International Journal of Hydrogen Energy*, **43**, 2293 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.155>
 14. J. Lin, G. Shi, X. Fu, T. Tang, Q. Wang, P. Wang, The effect of Mo on the microstructure and mechanical properties of high-manganese railway frog steel produced with the thermal mechanical control process, *Metals*, **15**, 1025 (2025). Doi: <https://doi.org/10.3390/met15091025>
 15. C. Liu, F. Xiong, Y. Wang, Y. Cao, X. Liu, Z. Xue, Q. Peng, L. Peng, Strengthening mechanism and carbide precipitation behavior of Nb-Mo microalloy medium Mn steel, *Materials*, **14**, 7461 (2021). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma14237461>
 16. J. S. Park, S. P. Jung, S. J. Kim, Mitigating hydrogen embrittlement of advanced high-strength steel by controlling carbides (cementite and alloy carbides) and microstructural modification, *Journal of Materials Research Technology*, **28**, 4703 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.036>
 17. S. J. Kim, J. S. Park, E. H. Hwang, S. M. Ryu, H. G. Seong, Y. R. Cho, A Mechanistic study on the hydrogen trapping property and the subsequent electrochemical corrosion behavior of quenched and tempered steel, *International Journal of Hydrogen Energy*, **43**, 17912 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.187>
 18. H. E. Kissinger, Reaction kinetics in differential thermal analysis, *Analytical Chemistry*, **29**, 1702 (1957). Doi: <https://doi.org/10.1021/ac60131a045>
 19. E. J. Song, Hydrogen desorption in steels, Thesis for Doctor of Philosophy (2015).
 20. M. Kameya, S. Taniguchi, Y. Kobayashi, N. Matsui, S. Yamasaki, Carbide precipitation and hydrogen trapping behavior in Mo and V added tempered martensitic steel, *ISIJ International*, **64**, 645 (2024). Doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-304>
 21. G. M. Pressouyre, A classification of hydrogen traps in steel, *Metallurgical Transactions A*, **10**, 1571 (1979). Doi: <https://doi.org/10.1007/BF02812023>
 22. Y. Qiang, H. Zhi, L. Guo, A. Fu, T. Xiang, Y. Jin, Experimental and molecular modeling studies of multi-active tetrazole derivative bearing sulfur linker for protecting steel from corrosion, *Journal of Molecular Liquids*, **351**, 118638 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118638>
 23. S. B. Shin, S. J. Song, Y. W. Shin, J. G. Kim, B. J. Park, Y. C. Suh, Effect of molybdenum on the corrosion of low alloy steels in synthetic seawater, *Materials Transactions*, **57**, 2116 (2016). Doi: <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2016222>
 24. J. S. Park, S. O. Kim, Y. J. Jeong, S. G. Lee, J. K. Choi, S. J. Kim, Long-term corrosion behavior of strong and ductile high Mn-Low Cr steel in acidic aqueous environments, *Materials*, **15**, 1746 (2022). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma15051746>
 25. H. R. Bang, J. S. Park, H. G. Seong, S. J. Kim, Effect of minor alloying elements (C, Ni, Cr, Mo) on the long-term corrosion behaviors of ultrahigh-strength automotive steel sheet in neutral aqueous environment, *Korean Journal of Metals and Materials*, **60**, 35 (2022). Doi: <https://doi.org/10.3365/KJMM.2022.60.1.35>
 26. M. Sun, Y. Pang, C. Du, X. Li, Y. Wu, Optimization of Mo on the corrosion resistance of Cr-advanced weathering steel designed for tropical marine atmosphere, *Construction and Building Materials*, **302**, 124346 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124346>