

오스테나이트계 18Mn강의 인공해수 내 부식 및 마모 거동

유재민¹ · 박진성² · 이상철² · 김성진^{1,†}

¹국립순천대학교 신소재공학과, 전남 순천시 중앙로 255

²POSCO 기술연구원, 전남 광양시 폭포사랑길 8

(2025년 9월 25일 접수, 2025년 10월 17일 수정, 2025년 10월 20일 채택)

Corrosion and Wear Behavior of Austenitic 18Mn Steels in Artificial Seawater

Jae Min Yu¹, Jin Sung Park², Sang Cheol Lee², 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

(Received September 25, 2025; Revised October 17, 2025; Accepted October 20, 2025)

This study examines the corrosion–wear behavior of microalloyed high-Mn steels and carbon steel in artificial seawater, focusing on the role of Cr. Microstructural characterization, electrochemical testing, weight-loss measurements, and molecular dynamics (MD) simulations were conducted. The Cr-containing 18Mn steel demonstrated superior electrochemical stability during the corrosion–wear process owing to the formation of Cr-rich oxides (e.g., Cr₂O₃, Fe_xCr_{3-x}O₄) and their rapid reformation after mechanical damage from repeated wear. Consequently, it exhibited the lowest corrosion current density and the highest polarization resistance over 14 days of testing. In contrast, conventional 18Mn steel showed the greatest electrochemical activity and weight loss, exceeding those of carbon steel, due to accelerated Mn dissolution and repeated wear by coarse V-bearing carbides that degraded surface protection. MD simulations further revealed that, under aqueous conditions, Fe–Mn alloy system undergo greater atomic-scale surface disruption than Fe–Cr alloy system, hindering the formation of stable interfacial oxides. These results elucidate the corrosion–wear mechanism and propose a viable alloying strategy to enhance the durability of offshore structural components exposed to cyclic wear and seawater environments.

Keywords: Artificial seawater, Corrosion, Cr, High Mn steel, Wear

1. 서론

고농도의 염분, 용존 산소, 미생물 등 다양한 부식 유발 인자를 포함하고 있는 해양 환경에서 조류나 파랑에 따른 해수의 지속적인 유동으로 인해 해양 구조물 강재는 반복적인 침식 및 마모에 노출된다. 특히 동종 혹은 이종 금속 간 마모에 노출되는 경우 해수에 의한 부식과 마모가 동시에 작용하는 복합 열화 현상으로 인해 해양 구조물 강재는 기계적 물성 뿐 아니라 부식-마모 복합 저항성이 함께 요구된다 [1]. 해양 환경 내 부식 피해 사례는 지속적으로 보고되고 있으며, 주요 피해 영역 중 체인(Chain) 등의 철강소재 기반 시스템 내에서 발생하는 피해가 가장

높은 것으로 알려져 있다 [2]. 구체적으로는 선박 고정 시 Chain에 인장 응력이 반복적으로 인가되며 해수의 유동에 따라 소재 간 마찰부에서 부식-마모 현상이 발생하게 되는데, 기존에 널리 사용되던 탄소강은 염수 내 빠른 부식 속도와 낮은 마모 저항성으로 인해 급격한 중량 손실과 짧은 수명을 야기하여 이를 대체할 수 있는 내구성 높은 소재 개발이 필요하다. 이에 부합하는 특성을 갖추는 강재의 개발이 활발히 진행되고 있는데, 그 중 고Mn강(18 wt% Mn)의 경우 오스테나이트 기지에서 발생하는 변형 쌍정(TWIP) 거동을 기반으로 인성과 인장강도 간의 우수한 균형을 확보할 수 있어 [3] 석유화학, 조선, 건설 등의 다양한 산업분야에서 적용 가능성이 제기되고 있다. 하지만 소재가 해수에 노출될 경우, Mn의 빠른 용출 경향과 Mn 기반 산화물의 불안정적 표면모

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

유재민: 학사과정, 박진성: 연구원, 이상철: 연구원, 김성진: 교수

호 성능에 기인하여 소재의 장기적 내식성 확보에 크게 불리하다 [4-6]. 이에 따라 Cr, Mo, V 등 미량의 합금 원소 첨가를 통해 표면 산화물의 조성 및 안정성을 제어하고 기계적 특성을 보완하려는 연구가 진행되고 있다. 구체적으로, Cr은 Fe 기반 산화물 내에서 치환 반응을 유도하여 치밀하고 안정적인 Cr 농화 산화물(e.g., Fe_xCr_{3-x}O₄)을 형성하고 [7,8], Mo와 V는 산화물의 내구성 향상에 기여하는 것으로 알려져 있으며, 이 중 Mo는 보호성 산화막 형성과 화학적 안정성을 통해 내식성을 강화하는 역할을 한다 [9,10]. 최근 Cr 및 Mo가 첨가된 고Mn강의 해양 환경 내 부식-마모 복합 거동을 평가한 연구가 보고된 바 있다. Yun *et al.* [11]은 마모 후 형성된 표면 산화물의 형태, 안정성과 기계적 손상 간의 연관성에 중점을 두고, 각 합금 원소가 내식성과 내마모성에 미치는 영향을 고찰하였다. 그러나 실제 해양 환경에서는 반복적인 기계적 손상으로 인해 산화막이 지속적으로 파괴되고 재생되므로, 특정 시간에서의 감량 측정과 산화물 형태 분석만으로는 부식 거동을 충분히 설명하기에 한계점이 지적되었다. 이에 본 연구에서는 선행 연구와 동일한 고Mn강 조성 및 실험 조건 하에 표면의 반복적인 기계적 손상 후 산화막의 재생 과정을 실시간 전기화학적 분석을 통해 정량적으로 추적하였다. 또한 부식-마모 환경 내 노출 시간을 세분화하여 장기적인 부식-마모 열화 저항성을 예측하였으며, 메커니즘적 이해를 돕기 위해 표면에서 발생하는 반응기반 분자동역학 시뮬레이션을 추가로 수행하였다. 이를 바탕으로 미량의 Cr 첨가된 18Mn 기반 구조용 강재의 해수환경, 특히 Chain 부품 적용 측면에서 장기 내구성 확보 가능성과 바람직한 합금설계 방향을 제안하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시편정보 및 미세조직 관찰

본 연구에서 사용된 시편 제작 및 부식-마모 복합 실험 방법은 선행연구 [11]에서 제시된 절차와 조건을 기반으로 수행하였다. 본 연구에서는 18 wt% Mn을 포함한 고Mn강 시편 두 종류를 사용하였으며, 이

중 하나는 Cr이 3 wt% 이하로 첨가된 합금이고 다른 하나는 Cr을 포함하지 않았다. 3 wt% 수준은 선행연구 [12]를 토대로, C 함량을 고려하여 선정하였다. 비교재료는 일반구조용 탄소강(C.S.) 시편을 함께 준비하였다. 각 시편의 화학 조성은 Table 1에 정리하였다. 시편(20×20×5 mm³)은 마운팅 처리 후 SiC 연마지 #2400 까지 1차 기계적 연마를 수행하였으며, 이어서 1 μm 입자의 서스펜션을 활용하여 미세 연마하였다. 이후, 준비된 시편을 3% Nital 용액(질산 3 mL + 에탄올 97 mL)에 약 10 초간 침지하여 에칭을 진행하였다. 미세조직 분석은 전계 방사형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscopy, FE-SEM)과 후방산란전자 회절 분석기(Electron Backscatter Diffraction, EBSD)을 활용하여 수행되었다. 추가적으로 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy, TEM)과 에너지 분산형 X선 분광법(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)을 활용하여 석출상의 조성과 분포를 분석하였다.

2.2 전기화학적 실험

본 연구의 전기화학적 실험은 선행연구 [11]와 동일하며, 부식-마모 복합거동 분석을 위해 실험 전후 시편의 개방회로전위(Open Circuit Potential, OCP)를 측정하여 전위 변화 경향을 파악하였다. 이후 선형분극저항(Linear Polarization Resistance, LPR) 및 전기화학적 임피던스(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) 실험을 통해 각 시편의 분극저항 및 부식전류밀도(Corrosion Current Density)의 변화를 정량적으로 측정하였다. 전기화학적 실험은 3전극 시스템을 기반으로 수행되었으며, 세 종류의 시편은 작업전극(Working Electrode)으로, 포화 칼로멜 전극(Saturated Calomel Electrode, SCE)은 기준전극(Reference Electrode)으로, 그리고 mesh 형태의 백금전극(Pt Mesh)은 상대전극(Counter Electrode)으로 각각 적용하였다. LPR 실험은 시편의 OCP 대비 -0.02 V ~ 0.02 V 전위 구간을 0.3 mV/s의 속도로 스캔하며 14일 동안 전류밀도의 변화를 측정하였다. 실험을 통해 도출된 분극 결과 데이터는 Semi-log 형태로 변환한 후, Wagner-Traud equation (1)과 Stern-Geary equation (2)를 적용하여

Table 1. Chemical composition of the three tested steels (wt%)

	Fe	C	Mn	Si	Cr	V	Mo	Ni
C.S.	Bal	~0.3	<2	<0.4	<1	<0.01	<0.3	<0.2
18Mn3Cr0.5Mo	Bal	<1.0	~18	-	~3	~1	<0.5	-
18Mn0.5Mo	Bal	<1.0	~18	-	-	~1	<0.5	-

Fitting 후 부식 전류 밀도 (i_{corr})를 정량화하였다.

$$i = i_{corr} \left[\exp\left(\frac{2.303(E-E_{corr})}{\beta_a}\right) - \exp\left(\frac{-2.303(E-E_{corr})}{\beta_c}\right) \right]$$

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303 \cdot R_p \cdot (\beta_a + \beta_c)}$$

는 Fitting으로 도출된 전류밀도(A/cm²), i_{corr} 는 부식 전류밀도(A/cm²), E_{corr} 는 부식 전위(V), β_a 와 β_c 는 각각 양극과 음극의 Tafel 기울기(V/decade), R_p 는 분극 저항($\Omega \cdot \text{cm}^2$)을 의미한다.

EIS 실험은 OCP 기준 ± 10 mV의 교류 전위와 0.01 ~ 100,000 Hz의 Frequency 범위에서 수행되었으며, 등가회로를 토대로 Nyquist plot을 Fitting 함으로써 R_p 값을 정량적으로 도출하였다.

2.3 부식, 마모 및 부식-마모 복합 거동 분석

본 연구의 부식-마모 복합 실험은 선행연구 [11]와 동일하며, 구체적으로 각 시편($35 \times 35 \times 5$ mm³)을 SiC 연마지(#1200)로 연마한 후 시편들의 부식감량 측정을 위해 인공 해수 내 14일간 침지 하였다. 침지 후 시편은 에탄올에서 초음파 세척하여 표면의 생성물을 제거하였고, 이후 침지 전후의 무게 변화를 전자저울을 이용해 측정하였다. equation (3)을 통해 부식 속도(Corrosion Rate, *Corr rate*)를 계산하였으며, 이 값은 마모 영향을 제외한 순수한 부식 손실량(C_0)으로 사용되었다.

$$Corr \cdot rate (g \cdot cm^2) = \frac{W_1 - W_2}{A \cdot h} \quad (3)$$

equation (3)에서, W_1 과 W_2 는 각각 침지 전과 후의 질량(g)이고, A 는 시편의 표면적(cm²), h 는 실험이 진행된 시간(336 시간)을 의미한다.

부식의 영향을 배제한 순수한 마모 거동을 비교하기 위해, 동일한 마모 조건에서 대기 환경과 Ar 주입 환경의 두 가지 조건에서 추가 실험을 진행하였다. Fig. 1은 무게 손실량 측정을 위해 설계된 장비의 개략도로, 셀 하단부에 위치한 시편($40 \times 14 \times 5$ mm³)은 하부에 구리테이프를 부착한 채로 콜드마운팅 처리 후 홀더에 고정하였으며, 그 상부에 동일 소재의 편 형태 시편(반경 3.5 mm)이 정속으로 선형 반복 운동 하되 그 상부에는 무게추가 장착되어 일정한 하중 하에서 마모가 이루어질 수 있도록 구성하였다.

부식 반응 억제를 위해 Ar 주입이 이루어진 탈기된 0.1 M NaOH 수용액 내 29.5 N의 일정 하중에서 7 cm/s의 속도로 10시간 동안 마모를 진행한 후 14시

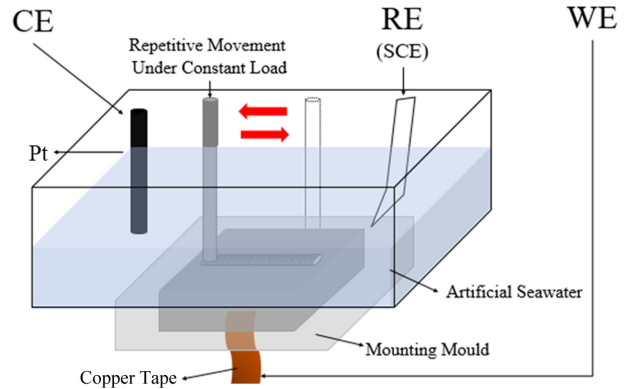


Fig. 1. Schematic diagram of the integrated wear-corrosion test configuration enabling simultaneous electrochemical measurement and wear loss evaluation

간의 침지 과정을 반복하였다. 14일 동안 반복된 마모 및 침지 실험을 마친 시편은 홀더에서 분리하여 초음파 세척하였고, 마모 전후의 무게 변화를 전자저울로 측정된 뒤 equation (3)에 대입하여 순수한 마모 손실량(W_0)을 산출하였다. 부식-마모 복합작용에 따른 무게 감량을 정량적으로 평가하기 위해, 인공해수 환경 하에서 부식-마모 실험을 수행하였다. 본 실험에서 측정된 무게 감량은 부식과 마모가 복합적으로 작용한 결과로서 전체 무게 손실량(V_T)에 해당하며, 이는 전체 부식 손실량(V_C)과 전체 마모 손실량(V_W)의 합으로 정의된다. 또한, V_C 는 순수한 부식 손실량(C_0)과 마모에 의해 유도된 부식 손실량(C_W)으로 구분되며, V_W 역시 전체 무게 손실량(V_T)과 부식에 의해 유도된 마모 손실량(W_C)로 구성된다. 이와 같은 상호 작용 관계는 아래 식과 같이 표현될 수 있다 [13,14].

$$V_T = V_W + V_C = W_0 + W_C + C_W + C_0 \quad (4)$$

$$V_W = V_T - V_C \quad (5)$$

$$W_C = V_W - W_0 \quad (6)$$

$$C_W = V_C - C_0 \quad (7)$$

각 구성 값들의 정량 도출 과정은 선행연구 [11]에서 자세히 기술하여 본 연구에서는 생략하기로 한다.

2.4 분자동역학 (Molecular Dynamic, MD) 시뮬레이션

MD 시뮬레이션은 LAMMPS를 이용하여 ReaxFF를 기반으로 수행되었으며, Fe/Cr/Mn/O/H 계 대상 매개 변수 세트를 적용하였다 [15]. 시뮬레이션 시스템은

(111)면을 표면으로 하여 Cr 및 Mn을 각각 치환시킨 Fe 기판과 그 상부에 배치된 H₂O 2000 분자, O₂ 15 분자로 구성하였다. 시뮬레이션 박스 크기는 31Å X 31Å X 106Å이며, X,Y 축에는 주기적 경계조건을, Z 축에는 상단 반사벽을 적용하였다. 온도는 300K, 압력은 1 atm을 적용하였으며 시뮬레이션 시간 간격과 Cutoff 거리는 ReaxFF의 화학결합 반응성을 고려하여 각각 0.1 fs와 10 Å으로 설정하였다. 초기 구조는 에너지 최소화를 위한 Relaxation 과정을 거친 후 본 시뮬레이션을 진행하였다. 결과 해석에는 OVITO를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전기화학적 분극 및 침지 실험결과

Fig. 2는 부식·마모 환경 내 노출하며 시간에 따른 OCP 변화를 나타낸 것으로 OCP 측정은 추가 마모

전 회복 단계와 마모 후 손상 단계의 두 조건으로 구분하여 수행하였다. 마모 전 회복 단계는 선 마모 후, 추가 마모 전까지 시편이 용액 내에 침지된 상태에서 추가 마모 직전에서의 측정 단계를 의미하며, 마모 후 손상 단계는 마모 직후 표면 손상이 발생한 상태에서의 측정 단계를 의미한다. OCP 측정 결과, 실험 전·후 관계없이 C.S. 시편은 전위가 일정하게 유지되는 경향을 보였다. C.S. 시편 내 포함된 미량의 Cr 및 Mo는 Fe 계열 산화물 형성 시 제한된 범위 내에서 그 안정도 및 부착력 향상효과 [9,16]를 가질 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 18Mn0.5Mo 시편은 침지 기간이 장기화됨에 따라 전위가 점진적으로 감소하는 양상을 나타냈다. 이는 표면의 부식·마모 과정에 따른 불안정한 부식생성물의 형성과 지속적인 표면열화에 따른 현상으로 해석된다. 반면 Cr이 추가 첨가된 18Mn3Cr0.5Mo 시편은 실험 전후를 포함하

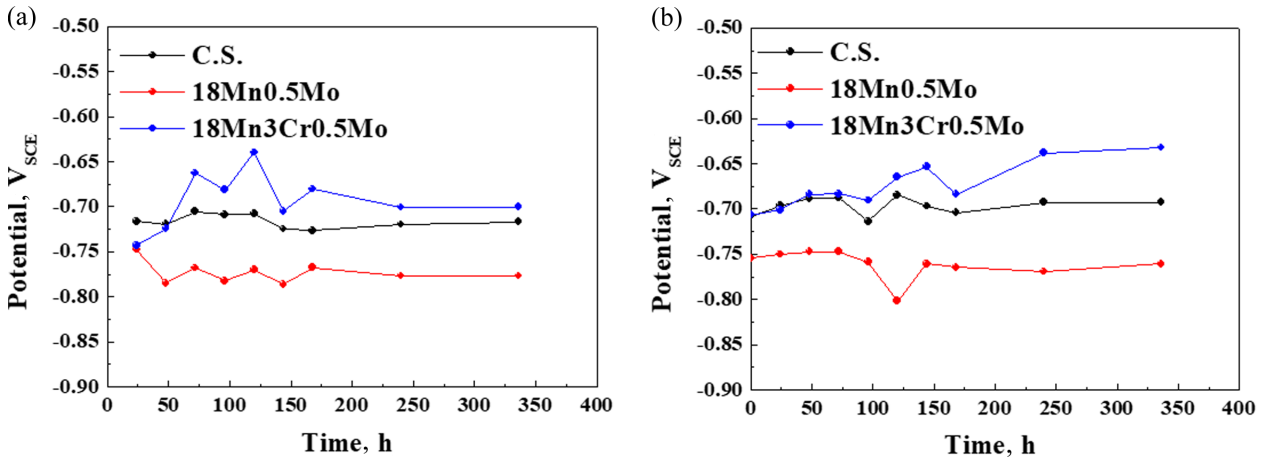


Fig. 2. OCP responses measured during (a) the recovery phase prior to wear and (b) the damage phase after wear exposure

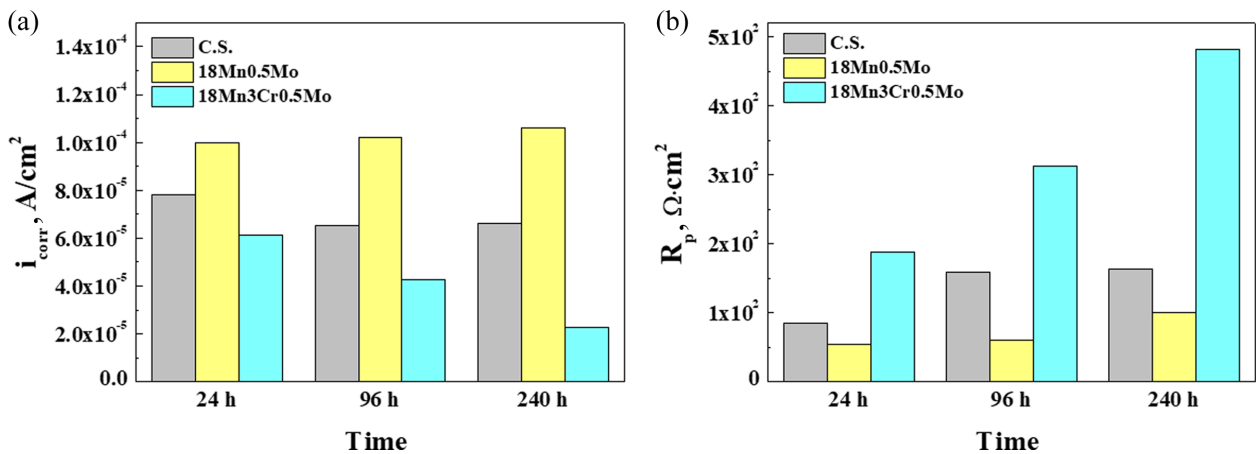


Fig. 3. Representative values of (a) i_{corr} and (b) R_p measured after 14 days of corrosion-wear testing in artificial seawater prepared according to ASTM D1141-98

여 전위가 점차 증가하는 경향을 나타냈으며, 마모 후, 마모 전 수준으로의 전위 회복 시간은 대략 6 시간 이내로 확인되었다. 따라서, 반복적인 부식-마모 환경에서도 표면 열화가 쉽게 발생하지 않는 것으로 판단되며, 이는 지속적인 부식-마모 과정 중에도 Cr 농화 생성물이 시편 표면에 안정적으로 형성될 수 있는 것으로 추측된다.

OCP 결과에서 확인된 Cr 첨가 시편의 전위 안정성은 Fig. 3에 제시된 침지시간에 따른 LPR (Fig. 3a) 및 EIS (Fig. 3b) 분석 결과를 통해 명확히 이해될 수 있다. 특히 18Mn3Cr0.5Mo 시편은 가장 낮은 i_{corr} 와 가장 높은 R_p 을 나타내었으며, 이는 표면에서의 부식 반응이 효과적으로 억제되고 있음을 정량적으로 입증한다. 이러한 결과는 Cr 농화 산화물의 형성이 계면 반응을 안정화시키고, 장기적인 내식성 확보에 기여하고 있음을 시사하며, 이는 OCP 분석에서 관찰된 전위 상승 경향과도 밀접한 연관성을 갖는다.

3.2 마모 및 부식-마모 복합 실험결과

Fig. 4 및 Fig. 5은 부식반응이 배제된 조건에서 부식-마모 환경에서 무게 감량을 측정된 결과와 순수한 마모 손실량(W_0)에 따른 무게 감량을 나타낸다. 마모 거동 분석 결과, C.S. 및 18Mn3Cr0.5Mo 시편에 비해 18Mn0.5Mo 시편의 마모 감량이 상대적으로 높은 수준으로 측정되었다. 18Mn0.5Mo 시편의 마모량 증가는 동종소재 간 마모 과정에서 조대한 크기의 V-carbide (V_4C_3) 입자가 탈락하며 추가적인 마모 작용을 일으킨 데 기인한 것으로 판단된다. 18Mn0.5Mo 시편의 조직 내 입계를 따라 석출된 V-carbide는 Fig.

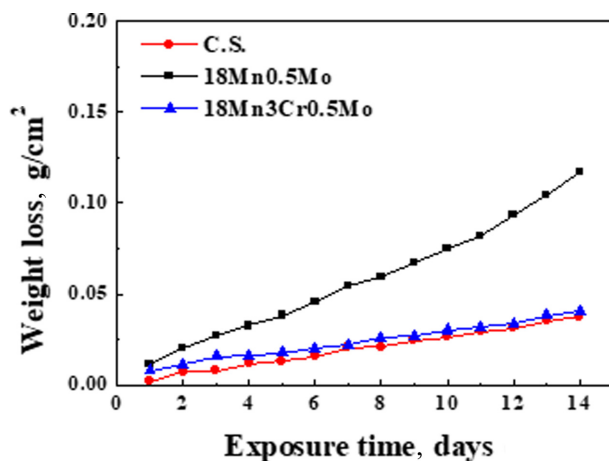


Fig. 4. Weight loss of the three samples after 14 days of wear testing in a 0.1 M NaOH solution deaerated by continuous Ar purging

6에 나타내었다. 보다 명확한 이해를 위해, 대기 조건 및 Ar purging 조건 하에서 추가 실험을 수행하였다. 그 결과, 18Mn0.5Mo 시편은 두 조건 모두에서 18Mn3Cr0.5Mo에 비해 부식-마모에 의한 무게 감량이 크게 나타나 18Mn0.5Mo가 동종 시편 간 부식-마모 복합 환경 내에서 마모로 인한 손상에 가장 취약할 것으로 사료된다.

Fig. 7의 결과 역시 이러한 경향을 뒷받침하며 부식-마모 실험 후 무게 감량은 18Mn0.5Mo > Microalloyed steel > 18Mn3Cr0.5Mo 순으로 나타났는데, 이는 앞서 수행된 전기화학실험 결과(LPR 및 EIS)와 유사한 거동임을 확인할 수 있다. 18Mn0.5Mo 시편의 경우, 표면으로부터 Mn 성분이 지속적으로 용해되어 Mn 및 (Mn, Fe) 계열 산화물이 안정적으로 형성되지 않는다는 선행연구 [4]를 고려할 때, 본 시편의 내식성이 가장 열위하며, 앞서 언급한 부식환경 내 동종

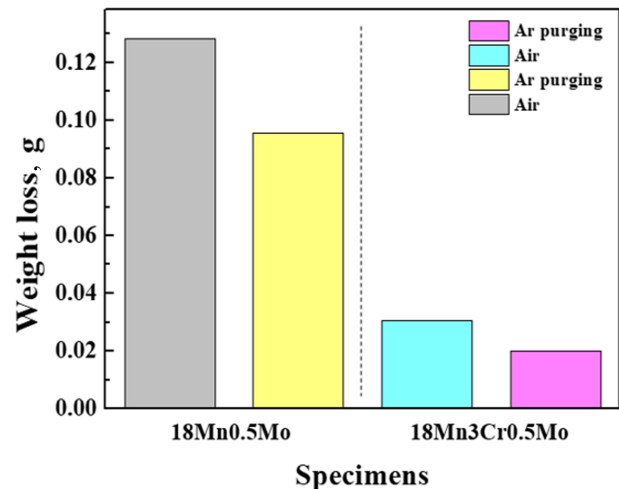
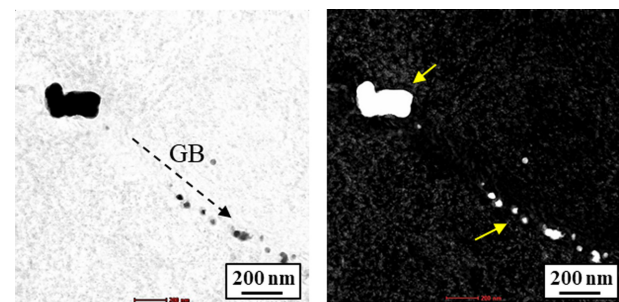


Fig. 5. Comparison of weight loss in the three samples after 14 days of immersion in ASTM D1141-98 solution under two conditions: air (atmospheric) condition and Ar purging



V: 30.6 wt.%; Mo: 11 wt.% C: 23.6 wt.%
Fig. 6. TEM image and corresponding EDS analysis of the precipitates in the 18Mn0.5Mo specimen

소재 간 마모량 또한 가장 높을 것으로 판단할 수 있다. 특히, 7일에서 14일로 노출시간 경과에 따라 감량 증가 폭이 타 소재들 대비 현저히 높게 나타났다. 반면, 18Mn3Cr0.5Mo 시편은 가장 낮은 부식 속도를 나타냈다. Cr은 초기 부식 단계에서 Mn과 유사하게 빠르게 이온화되지만 부식생성물층 내부에 비교적 안정한 Cr₂O₃ 및 Fe_xCr_{3-x}O₄를 형성시키는데 기여한다 [16]. Fe-Mn 및 Fe-Cr 합금계 대상 MD 시뮬레이션 결과(Fig. 8a), 임의의 동일 시간간격(300,000 Step) 후 계면부 금속원자-물분자 및 산소와의 전하교환반응을

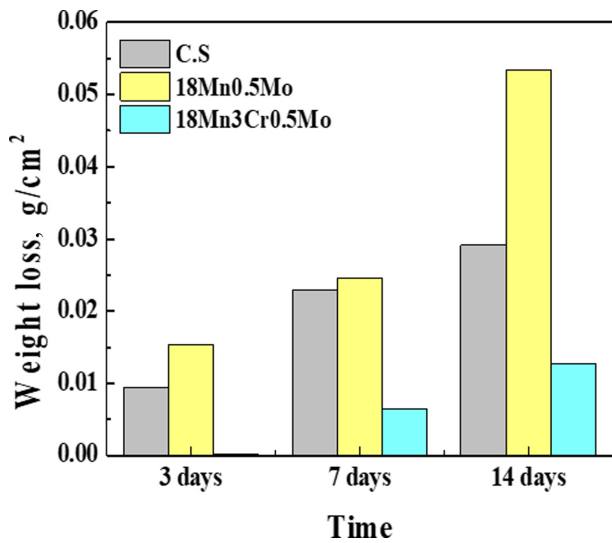


Fig. 7. Weight loss measurement of tested specimens after corrosion-wear combined exposure in artificial seawater for 3, 7, and 14 days

통한 표면구조 붕괴 수준이 Fe-Mn 합금계의 경우 보다 높음을 알 수 있다. 반면, Fe-Cr 합금계의 경우 계면부 전하분포 경향(Fig. 8b)을 토대로 부식반응 초기 Fe-Cr-O의 산화층 형성 가능성과 표면구조 유지 수준이 상대적으로 높음을 추측할 수 있다. 선행연구 [17]의 Radial distribution function (RDF) 분석 결과, 반응이 지속될수록 계면부에 형성되는 주된 산화물은 Fe_xCr_{3-x}O₄ (1 ≤ x ≤ 1.5)으로 추측되었다. 이는 기지 금속과의 높은 접착특성 및 Cl⁻와 같은 부식성 음이온의 침투억제 효과(i.e., 양이온 선택성) [18]를 토대로 내식성의 향상과 함께, 마모의 복합조건 하에서도 부식생성물의 완충효과에 기인한 소지금속 보호 가능성 또한 예상해 볼 수 있다.

Fig. 9은 선행연구 [11]에서 기술된 바와 같이 부식-마모 복합 작용으로 발생한 전체 무게 손실량(V_T)를 네 가지 항목으로 나뉘어 나타낸 것으로, 본 연구에서는 이를 시각적으로 재구성하여 각 항목의 기여도를 비교하였다. 해당 항목은 순수한 부식 손실량(C_0), 마모에 의해 유도된 부식 손실량(C_w), 부식에 의해 유도된 마모 손실량(W_C), 그리고 순수한 마모 손실량(W_0)으로 구성된다. 분석 결과, C_0 와 C_w 는 전체 무게 손실에 대한 기여도가 상대적으로 낮았으며, 대부분의 손실은 W_0 와 W_C 에 의해 발생한 것으로 나타났다. 특히 18Mn3Cr0.5Mo 시편은 다른 시편들과 비교했을 때 V_T 가 가장 낮은 수치를 보였고, 부식과 마모 요인의 분포가 상대적으로 균형있게 나타났다. 이러한 거동은 시편 표면에 형성된 부식생성물(Cr₂O₃ 및 Fe_xCr_{3-x}O₄등)이 기지와 강한 결합력을 가지며, 부식-

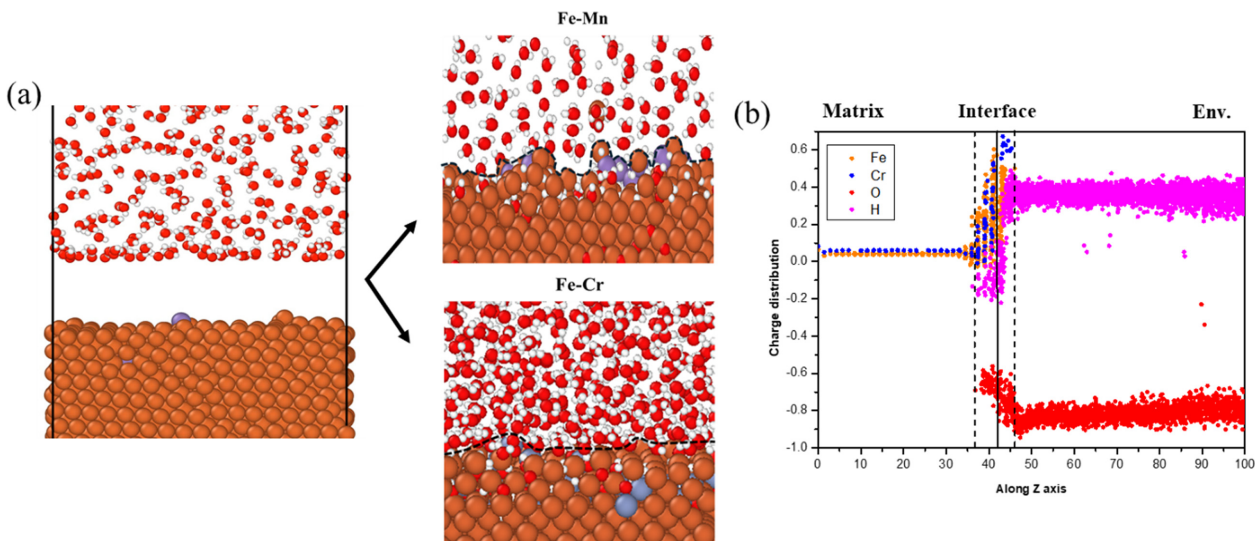


Fig. 8. (a) MD simulation results of the Fe-Mn and Fe-Cr alloy systems after 300,000 timestep (orange spheres: Fe atoms; bluish spheres: Mn, Cr atoms); (b) charge distribution at the interface between the matrix and the environment in the Fe-Cr alloy system

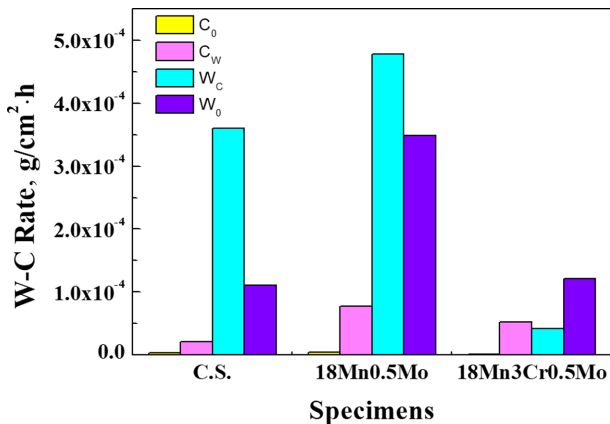


Fig. 9. W-C rate (weight loss) of the three specimens evaluated after 14 days of corrosion-wear testing in ASTM D1141-98 synthetic seawater [11] (Each value represents the average of three measurements, and the deviation falls within $\pm 15\%$)

마모 복합조건 하에서도 완충효과에 기인하여 손실을 효과적으로 억제하여 나타난 결과로 해석된다 [19]. 즉, 반복적인 기계적 손상 이후에도 산화막이 단 시간 내 안정적으로 재형성되어 부식-마모 반응에 대한 저항이 높음을 시사한다.

결론적으로, Cr을 소량 첨가하면 부식생성물의 형성 및 기지와 결합력이 향상되어, 부식과 마모가 동반되는 환경에서도 W_c 손상을 효과적으로 줄일 수 있음을 확인하였다. 따라서, 해수유동 뿐 아니라, 동종소재 간 반복적인 마찰에 의한 손상의 우려가 존재하는 해양구조물용 강재로는 18Mn3Cr0.5Mo의 적용이 추천된다.

4. 결론

본 연구에서는 C.S., 18Mn0.5Mo, 18Mn3Cr0.5Mo 시편을 대상으로 인공 해수 환경 내 부식 및 마모 거동을 규명하고자 하였으며, 이를 위해 미세조직 관찰, 전기화학적 분극 실험, 침지 후 무게 감량 측정, 분자동역학 시뮬레이션 등이 활용되었다. 주요 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

전기화학적 실험 수행 결과, 18Mn3Cr0.5Mo 시편은 마모 전후 OCP가 점진적으로 증가하였고, 가장 낮은 부식전류밀도와 가장 높은 분극저항 값을 나타내었다. 무게감량 측정 결과 시편간 저항성 측면에서 유사한 경향을 나타내어, 미량의 Cr 첨가를 통한 내식성 향상효과를 입증되었다. 이는 부식반응 초기 Mn과 달리 Cr의 경우 계면부 Cr 농화 산화물(e.g., Cr_2O_3 , $Fe_xCr_{3-x}O_4$)의 형성과 표면구조의 높은 안정성에 기인

한 것으로 판단되며, 이는 추가적인 마모 이후에도 기지금속의 손상을 억제함과 동시에 손상이후 빠른 재형성 속도와 안정화를 토대로 부식-마모 복합 저항성 향상에도 효과적으로 기여하였다.

반면, 18Mn0.5Mo 시편의 경우, 가장 높은 수준의 전기화학적 반응성과 무게감량 수준을 나타내었고, 동종소재의 마모 시 조대한 V-탄화물 (e.g., V_4C_3)의 탈락/재마모에 기인하여 부식-마모 복합환경 내 가장 열위한 저항성을 나타내었다.

따라서, 18Mn1V 기반 강재는 미량의 Cr 첨가를 통해 해양구조물, 특히 반복적인 동종/이종 소재와의 마찰과 부식반응이 복합적으로 작용하는 체인 부품 등에 있어 장기 내구성 확보를 위한 효과적인 기술전략이 될 수 있을 것으로 예상된다.

Acknowledgement

This research was supported by the Regional Innovation System & Education (RISE) program through the Jeollanamdo RISE center, funded by the Ministry of Education (MOE) and the Jeollanamdo, Republic of Korea (2025-RISE-14-003).

References

1. Y. Ma, Y. Li, and F. Wang, Corrosion of low carbon steel in atmospheric environments of different chloride content, *Corrosion Science*, **51**, 997 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.02.009>
2. A. L. Yaghin and R. E. Melchers, Long-term inter-link wear of model mooring chains, *Marine Structures*, **44**, 61 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2015.08.001>
3. A. Belyakov, R. Kaibyshev, and V. Torganchuk, Microstructure and mechanical properties of 18%Mn TWIP/TRIP steels processed by warm or hot rolling, *Steel Research International*, **88**, 1600123 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1002/srin.201600123>
4. Y. J. Jeong, J. S. Park, H. R. Bang, S. G. Lee, J. K. Choi, and S. J. Kim, Effect of Cr addition to high Mn steel on flow-accelerated corrosion behaviors in neutral aqueous environments, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 373 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.6.373>
5. S. O. Kim, J. K. Hwang, and S. J. Kim, Effect of alloying elements (Cu, Al, Si) on the electrochemical corrosion behaviors of TWIP steel in a 3.5% NaCl solution, *Corrosion Science and Technology*, **18**, 300 (2019). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2019.18.6.300>

6. M. B. Kannan, R. K. Singh Raman, and S. Khoddam, Comparative studies on the corrosion properties of a Fe–Mn–Al–Si steel and an interstitial-free steel, *Corrosion Science*, **50**, 2879 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.07.024>
7. Y. H. Qian, D. Niu, J. J. Xu, and M. S. Li, The influence of chromium content on the electrochemical behavior of weathering steels, *Corrosion Science*, **71**, 72 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.03.002>
8. M. Sun, C. W. Du, Z. Y. Liu, C. Liu, X. G. Li, and Y. M. Wu, Fundamental understanding on the effect of Cr on corrosion resistance of weathering steel in simulated tropical marine atmosphere, *Corrosion Science*, **186**, 109427 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109427>
9. S. B. Shin, S. J. Song, Y. W. Shin, J. G. Kim, B. J. Park, and 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>
10. Z. Zhou, Q. Shan, Y. H. Jiang, Z. L. Li, and Z. X. Zhang, Effect of nanoscale V₂C precipitates on the three-body abrasive wear behavior of high-Mn austenitic steel, *Wear*, **436–437**, 203009 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203009>
11. D. B. Yun, J. S. Park, S. C. Lee, J. K. Choi, and S. J. Kim, Effect of Cr addition on the corrosion - wear behaviors of 18Mn (V, Mo) steel in a seawater environment, *Korean Journal Metals Materials*, **61**, 633 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3365/KJMM.2023.61.9.633>
12. J. S. Park, S. C. Lee, J. K. Choi, and S. J. Kim, Advanced Hadfield steel with Cr-optimization resists against corrosion and erosion-corrosion, *Applied Surface Science*, **637**, 157875 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.157875>
13. J. Liu, J. Wang, and W. Hu, Erosion–corrosion behavior of X65 carbon steel in oilfield formation water, *International Journal of Electrochemical Science*, **14**, 262 (2019). Doi: <https://doi.org/10.20964/2019.01.51>
14. ASTM G119-09, Standard guide for determining synergism between wear and corrosion, ASTM International (2009). Doi: <https://doi.org/10.1520/G0119-09>
15. Y. K. Shin, H. Kwak, A. V. Vasenkov, D. Sengupta, and A. C. T. Van Duin, Development of a ReaxFF Reactive Force Field for Fe/Cr/O/S and Application to Oxidation of Butane over a Pyrite-Covered Cr₂O₃ Catalyst, *ACS Catalysis*, **5**, 7226 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1021/acscatal.5b01766>
16. X. Yang, Y. Yang, M. Sun, J. Jia, X. Cheng, Z. Pei, Q. Li, D. Xu, K. Xiao, and X. Li, A new understanding of the effect of Cr on the corrosion resistance evolution of weathering steel based on big data technology, *Journal Materials Science & Technology* **104**, 67 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.05.086>
17. H. N. Chi, L. V. Truong, D. B. Yun, E. H. Hwang, R. S. Pedanekar, A. S. Jamadar, and S. J. Kim, Experimental and DFT-based computational study on corrosion behavior of micro-alloyed steel in 3.5% NaCl solution, *npj Materials Degradation*, in press (2025).
18. J. S. Park, H. R. Bang, D. B. Yun, A. S. Jamadar, R. S. Pedanekar, S. C. Lee, J. K. Choi, and S. J. Kim, Superior performance of 18Mn3Cr0.5Mo1V ferrous alloy for strength, ductility, and prolonged corrosion resistance in seawater, *npj Materials Degradation*, **9**, Article number 18 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1038/s41529-025-00564-z>
19. X. Ji, C. Luo, J. Jin, Y. Zhang, Y. Sun, and L. Fu, Tribo-corrosion performance of 316L stainless steel enhanced by laser clad 2-layer coating using Fe-based amorphous powder, *Journal of Materials Research and Technology*, **17**, 612 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.046>