

Cr³⁺ 화성처리 및 폴리머 코팅한 갈바륨 코팅 탄소강의 전기화학적 특성 및 기계적 특성

현광룡¹ · 신동호² · 황현규³ · 김성종^{4,†}

¹국립목포해양대학교 해군사관학부, 전라남도 목포시 해양대학교로 91

²국립목포해양대학교, 전라남도 목포시 해양대학교로 91

³한국과학기술원 원자력 및 양자공학과, 대전광역시 유성구 대학로 291

⁴국립목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대학교로 91

(2025년 11월 19일 접수, 2025년 12월 15일 수정, 2025년 12월 15일 채택)

Electrochemical and Mechanical Properties of Galvalume-Coated Carbon Steel with Cr³⁺ Chemical Conversion Treatment and Polymer Coating

Koangyong Hyun¹, Dong-Ho Shin², Hyun-Kyu Hwang³, and Seong-Jong Kim^{4,†}

¹Division of Naval Officer Science, Mokpo National Maritime University, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

²Mokpo National Maritime University, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

³Department of Nuclear and Quantum Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 34141, Republic of Korea

⁴Division of Marine System Engineering, Mokpo National Maritime University, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

(Received November 19, 2025; Revised December 15, 2025; Accepted December 15, 2025)

In this study, three coating conditions were applied to carbon steel specimens: (1) galvalume-coated specimens, (2) galvalume-coated specimens treated with trivalent chromium (Cr³⁺) chemical conversion treatment (Galvalume+ Cr³⁺), and (3) polymer top-coated specimens applied over the Galvalume+ Cr³⁺ treated layer (Galvalume+Top). The electrochemical corrosion behavior, surface morphology, and mechanical properties of each specimen were systematically evaluated to clarify the role of each surface modification step. The electrochemical measurements included monitoring the open-circuit potential, conducting cyclic potentiodynamic polarization tests, and performing Tafel extrapolation analysis to determine corrosion potential and corrosion current density. Surface characteristics were examined to identify coating integrity and defect evolution after testing. Mechanical properties were assessed through scratch and indentation tests to evaluate hardness, adhesion strength, and creep resistance. The results indicated that the Galvalume+Top specimens exhibited the highest corrosion resistance, characterized by the lowest corrosion current density. The Galvalume+ Cr³⁺ specimens showed the greatest hardness and excellent creep resistance, while the Galvalume+Top specimens demonstrated superior adhesion strength due to the polymer overlayer. Overall, the combined application of Cr³⁺ chemical conversion treatment and polymer coating effectively enhanced both corrosion resistance and mechanical performance of the galvalume coatings.

Keywords: Carbon steel, Galvalume coating, Trivalent chromium, Polymer coating, Corrosion resistance

1. 서론

부식은 금속 재료의 내구성과 기계적 성능을 저하시키는 주요 열화 특성으로, 해양 구조물·교량·선박·자동차

차·산업 설비 등 다양한 산업 분야에서 심각한 문제를 야기한다 [1-5]. 특히 해양 및 고온·고습 환경에서는 염화물이온(Cl⁻)의 침투와 산소의 존재로 인해 부식이 가속화되어 금속의 내구수명을 현저히 저하시킬 수 있다 [6,7]. 이러한 부식은 단순한 외관 손상뿐 아니라 구조적 안전성 저하와 경제적 손실로 이어지므로, 금속 표면 방식을 위한 효과적인 코팅 기술 개발이 필수적이다 [8-10].

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

현광룡: 교수, 신동호: 박사 후 연구원, 황현규: 박사 후 연구원, 김성종: 교수

이러한 코팅기술 중 갈바륨(Galvalume) 코팅은 알루미늄과 아연이 약 55:45의 비율로 구성된 합금층으로, 알루미늄의 치밀한 산화피막(Al_2O_3)에 의한 장벽효과와 아연의 희생양극특성이 복합적으로 작용하여 우수한 내식성을 제공한다 [11,12]. 갈바륨 코팅은 용융 아연도금에 비해 열적·화학적 안정성이 우수하고 건축·자동차·가전 등 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있으나, 염화물 환경이나 장시간 다습한 환경에서는 국부부식 또는 코팅층 박리(spallation) 등이 발생할 수 있다 [13,14]. 이에 따라 갈바륨 단독 적용만으로는 다양한 환경에서 충분한 내구성을 확보하기 어려운 경우가 존재한다 [15,16].

이러한 한계를 보완하기 위한 방법으로 3가 크롬(Trivalent chromium, Cr^{3+}) 화성처리가 제안되고 있다. 기존의 6가 크롬(Cr^{6+}) 기반 화성처리는 내식성이 우수하나 환경 유해물질로 사용이 제한된다. 이에 따라 환경친화적인 Cr^{3+} 기반 화성처리가 대안으로 부상하였다 [17,18]. Cr^{3+} 화성처리에 의해 형성된 치밀한 산화물층(Cr_2O_3 등)은 소재 표면의 전기화학적 안정성을 높이고 표면 경도를 개선시키는 것으로 보고되었다 [19,20]. 이러한 산화물층은 외부 환경과 금속 소지 간의 반응을 억제하는 방식피막의 역할을 수행하여 초기 내식성 향상에 기여할 수 있다. 특히 Cr^{3+} 화성처리는 도금층의 표면조직을 개선하여 코팅-기판 계면의 결합력을 향상시켜, 내식성뿐만 아니라 기계적 특성 개선에도 기여할 수 있다 [19,21].

또 다른 유망한 보완책은 폴리머(Polymer) 기반의 최상층(Top) 코팅을 결합하는 것이다. 폴리머 코팅은 비전도성의 유기막을 형성하여 이온확산을 차단하고 전기화학적 반응을 억제하는 물리적 장벽역할을 수행한다 [8,10]. 이는 외부 환경으로부터 하부 코팅층을 보호할 뿐만 아니라, 전반적인 화학적 내구성을 증가시켜 결과적으로 부식 저항성을 향상시킨다 [22,23]. 이러한 복합 코팅은 다양한 형태의 부식환경 속에서 철강 소재를 방식시키는 데 탁월한 효과를 보이며, 특히 고온다습하거나 염분 농도가 높은 조건에서 그 중요성이 더욱 부각된다.

선행 연구[24,25]에서는 갈바륨 및 다양한 코팅 기술에 관한 내식성 평가와 기계적 특성 분석을 실시하였다. 그러나 실제 해양 환경에 적용하기 위해서는 부식 저항성뿐만 아니라, 외부 충격이나 응력에 대한 내구성을 결

정짓는 표면 경도, 밀착력, 크리프 거동 등의 기계적 특성과 전기화학적 거동과의 상관관계에 대한 종합적인 고찰이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 갈바륨 단독, Cr^{3+} 화성처리 그리고 폴리머 복합 코팅의 세 가지 조건을 동일한 환경(천연 해수) 하에서 체계적으로 비교·분석하였다. 이를 통해 각 코팅의 전기화학적 방식 메커니즘과 기계적 특성 간의 상호보완적 관계를 규명하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시편 준비 및 표면 처리

본 연구에서는 세 가지 유형의 코팅 기술을 적용하였다. 첫번째는 탄소강에 갈바륨 코팅(Galvalume)을 실시한 것, 두번째는 탄소강에 갈바륨 코팅 및 3가 크롬 화성처리($\text{Galvalume}+\text{Cr}^{3+}$)를 실시한 것, 그리고 세번째는 탄소강에 갈바륨 코팅, 3가 크롬 화성처리와 폴리머 코팅($\text{Galvalume}+\text{Top}$) 기술을 적용한 것이다. 갈바륨 코팅의 알루미늄과 아연 비율은 질량기준으로 각각 55%와 45%이다.

2.2 부식 거동 및 시편표면 분석

전기화학적 특성과 부식 거동을 분석하기 위해 30°C 의 천연 해수에서 자연전위 측정과 순환동전위분극실험을 실시하였다. 천연 해수의 화학 성분은 Table 1에 나타났다. 전기화학실험은 3전극 시스템을 사용하였으며, 기준전극으로는 Ag/AgCl (sat. by KCl) 전극을 채택하고, 대극은 $2 \times 2\text{ cm}$ 크기의 백금망을 사용하였다. 실험을 시작하기 전에 40분 동안 전위 안정화 시간을 두었다. 순환동전위분극실험은 개로전위를 기준으로 -0.25 V 에서 $+0.45\text{ V}$ 까지, 그 후 다시 개로전위로 되돌아오는 방식으로 진행되었으며, 스캔 속도는 0.5 mV/s 로 설정하였다. 실험 종료 후, 타펠(Tafel) 외삽법을 사용하여 부식전류밀도를 산출하였다. 실험 후 시편을 아세톤과 증류수로 세척하고, 진공 건조기에서 24시간 건조하였다. 부식된 표면형상 분석은 3D 레이저 현미경(Olympus, OLS-5000, Japan)을 사용하였다.

2.3 스크래치(Scratch) 실험

스크래치 실험은 Anton Paar사의 마이크로 스크래치

Table 1. Main chemical compositions and properties of the natural seawater

Main component (mg/L)						pH	Dissolved oxygen (mg/L)	Electric conductivity (mS/cm)
SO_4^{2-}	Cl^-	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}			
1746	15721	8401	344	1121	357	7.9	16.1	45.3

테스터(MCT³)를 사용하였으며, ASTM C1624 표준을 준수하였다 [26]. 실험에 사용된 인덴터는 Diamond Rockwell C 타입이며, 직경은 200 μm 였다. 스크래치 거리는 2 mm로, 하중은 0.02 N에서 20 N까지 점진적으로 증가시키며 하중증가 속도는 4 mm/min으로 설정하였다. 실험 후에는 광학현미경, 음향방출 신호, 마찰력 및 침투 깊이를 활용하여 밀착력을 평가하였다.

2.4 인덴테이션(Indentation) 실험

인덴테이션 실험은 Anton Paar사의 MCT3 장비를 활용하여 비교 분석하였다. 실험에는 120°버커스 인덴터를 사용하였으며, 하중함수는 하중증가, 유지 및 감소의 세 단계로 구성하였다. 최대 하중은 0.5 N, 최대 하중 유지시간은 5초, 하중 적용속도는 1 N/min으로 설정하였다. 경도 계산은 압입실험에서 획득한 하중-변위 곡선을 기반으로 Oliver-Pharr 기법을 활용하였다. 실험은 코팅 전후 각각 6회 이상 반복 수행하여 재현성을 확보하였으며, 데이터 분석 시 최대값과 최소값을 제외하고 중간값을 사용하여 물리적 특성을 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 갈바륨, 갈바륨+Cr³⁺ 및 갈바륨+Top 코팅 시편에 대하여 해수에서의 자연전위 측정 결과이다. 갈바륨 코팅 시편은 Ag/AgCl 전극 기준 약 -0.98 V에서 개시되어 약간의 변동이 관찰되었으나, 전위는 초기값과 유사하게 유지되었다. 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편은 -1.01 V 부근에서 시작하여 -0.98 V까지 급격히 상승한 후 약 1300초까지 안정적인 값을 유지하였으며, 이후 약간씩 증가하여 종료시점에서는 -0.97 V를 나타냈다. 한편, 갈

바륨+Top 코팅 시편은 -0.80 V에서 개시되어 시간 경과에 따라 전위가 지속적으로 감소하였고, 약 -0.95 V에서 종료되었다. 일반적으로 갈바륨 코팅은 Al(55 wt%)-Zn(45 wt%) 합금으로 구성되며, 표면에서 Al₂O₃ 및 ZnO와 같은 산화피막이 형성되어 내식성을 향상시킨다 [27]. 특히, Al₂O₃는 고온 환경에서 우수한 내식성을 제공하는 것으로 알려져 있으며, 아연은 희생양극특성으로 모재를 방식시킨다. 따라서 갈바륨 코팅 시편에서 측정된 전위는 Al₂O₃, ZnO 및 미세 갈바닉 커플(Al-Zn)에 의해 형성된 혼합전위로 판단된다. 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편은 초기 약 1500초까지 갈바륨 코팅보다 낮은 전위를 보였으나, 이후 전위가 점차 증가하여 갈바륨 코팅보다 높은 값을 나타냈다. 이는 갈바륨 표면에 형성된 Cr³⁺ 기반 산화피막, 즉 Cr₂O₃에 기인한 것으로 판단된다 [18,19,28]. Cr₂O₃는 염화물이온(Cl⁻)에 대한 우수한 내식성을 제공하므로, 시간 경과에 따라 상대적으로 높은 전위를 나타낸 것으로 해석된다. 갈바륨+Top 코팅 시편은 최상층의 폴리머 코팅 영향으로 초기에 가장 높은 전위를 나타냈다. 그러나 시간 경과에 따른 전위 감소는 폴리머 코팅층 내 미세 결함으로 인해 발생한 것으로 보인다. 이러한 결함은 부식성 이온의 침투 경로를 제공하여 하부 코팅층 및 기판과의 전기화학적 반응을 유발한 것으로 사료된다 [29].

Fig. 2는 갈바륨, 갈바륨+Cr³⁺ 및 갈바륨+Top 코팅 시편의 순환동전위분극 실험 결과를 나타낸 것이다. 개로 전위에서 전위가 비방향으로 이동할 때, 전류밀도는 서서히 증가하거나 일정 수준의 전류밀도를 유지하는 특성이 나타나어 용존산소 환원반응에 의한 농도분극 거동으로 해석된다. 이에 반해, 전위가 귀방향으로 이동하는 경우에는 전류밀도가 지속적으로 상승하는 활성화분

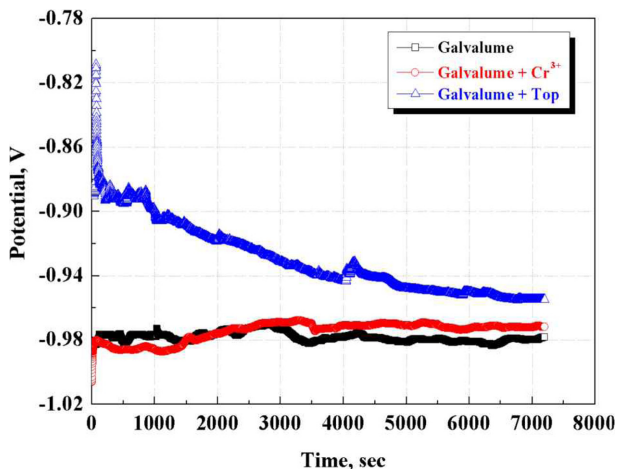


Fig. 1. Results of natural potential measurement in natural seawater

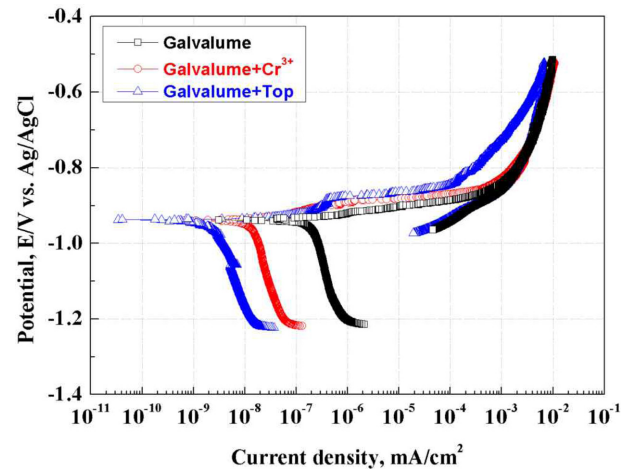


Fig. 2. Cyclic potentiodynamic polarization curves in natural seawater on various coating specimens

Table 2. Comparison of corrosion potential and corrosion current density obtained from cyclic potentiodynamic polarization experiments on various coating specimens

	Corrosion potential (mV)	Corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Galvalume	944.299	0.206
Galvalume + Cr^{3+}	937.632	0.014
Galvalume + Top	933.298	0.003

극 현상이 확인되었다. 갈바륨 및 갈바륨+ Cr^{3+} 코팅 시편은 -0.9 V 이상의 전위 영역에서 전위의 정방향과 역방향에서의 전류밀도의 변화가 거의 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 전위 상승에 따른 피팅(pitting)의 형성과 성장에 유의한 차이가 없음을 시사한다. 반면, 갈바륨+Top 코팅 시편은 -0.9 V 이상의 정방향 전위에서의 전류밀도는 상대적으로 낮게 측정되었으나, 이후 역방향 과정에서 전류밀도가 오히려 높게 나타났다. 이는 정방향 전위 상승 시 형성된 피팅이 역방향의 전위변화 과정에서 더욱 성장(깊이 또는 너비 확장)하여 전기화학적 반응이 더욱 활발하게 진행된 결과로 해석된다. 이러한 현상은 전위 변화에 따른 Top 코팅층의 열화에 기인한 것으로 판단된다 [29].

Table 2는 순환동전위분극 실험결과에 대해 타펠 외삽법으로 산출한 부식전위와 부식전류밀도 비교표이다. 부식전위의 경우, 자연전위 측정과 유사하게 갈바륨+ Cr^{3+} 과 갈바륨+Top 코팅 시편이 갈바륨보다 높은 전위를 나타냈다. 부식전류밀도 분석 결과, 두 코팅 시편은 갈바륨 단일 코팅시편보다 현저히 낮은 값을 나타냈으며, 특히 갈바륨+Top 코팅 시편은 갈바륨+ Cr^{3+} 코팅보다 현저히 낮은 부식전류밀도를 나타냈다. 이러한 특성은 갈바륨+Top 코팅에서 형성된 알루미늄 산화피막과 크로메이트 피막이 아연의 산화를 억제함과 동시에, 비전도성 폴리머층이 추가적인 장벽 역할을 수행하여 전기화학적 반응을 억제시킨 결과로 해석된다 [22,30,31].

Fig. 3은 순환동전위분극실험 전과 후 3D 현미경 분석을 통한 시편의 표면거칠기 및 최대손상깊이 분석 결과를 나타낸 것이다. 모든 시편에서 부식손상이 뚜렷하게 관찰되었다. 순환동전위분극실험 전 갈바륨, 갈바륨

+ Cr^{3+} 및 갈바륨+Top 코팅 시편의 표면 거칠기값은 각각 2.205, 2.204 및 2.361 μm 를 나타냈으며, 최대손상깊이는 19.312, 19.749 및 20.871 μm 를 나타냈다. 실험 후 코팅 시편의 표면 거칠기값은 각각 12.665, 7.769 및 4.722 μm , 최대손상깊이는 82.472, 71.588 및 48.745 μm 를 나타냈다. 실험 전과 후의 표면거칠기 차이 값은 10.460, 5.565 및 2.361 μm 이며, 최대손상깊이 차이 값은 63.160, 51.839 및 27.874 μm 로 산출되었다 (Table 3). 실험 전후의 표면거칠기와 최대손상깊이 변화량을 비교한 결과, 갈바륨+Top 코팅 시편이 가장 작은 값을 보였으며, 갈바륨 코팅 시편은 가장 큰 값을 나타냈다. 일반적으로 이러한 차이가 클수록 부식진행 정도가 심한 것으로 해석되므로, 3D 표면 분석 결과는 Fig. 2의 순환동전위분극 실험에서 관찰된 전류밀도 변화와 유사한 경향을 나타냈다.

Figs. 1, 2, 3의 결과는 코팅층의 열화과정과 그에 따른 부식진행 메커니즘을 단계적으로 보여준다. 우선 초기 침지 단계(Fig. 1)에서 갈바륨+Top 시편은 폴리머 층의 물리적 장벽 효과로 인해 초기에 귀한 전위를 나타냈으나, 시간 경과에 따라 미세결함 부위에 전해질이 침투하여 전위가 저하하는 거동을 나타냈다. 반면 갈바륨+ Cr^{3+} 시편의 경우 침지 초기에는 낮은 전위를 나타냈으나, Cr^{3+} 산화물층의 부동태 형성으로 시간 경과에 따라 전위가 상승하여 전기화학적으로 안정화되는 경향을 나타냈다. 갈바륨+Top 코팅은 결함부위를 통해 전해질이 침투하여 국부적인 공식(Pitting) 가능성을 나타냈으나, 전반적으로 부식전류밀도는 가장 낮게 유지되어 부식 차단 효과가 유효함을 입증했다. 최종적으로 전기화학 실험 후 표면 형상 분석 결과(Fig. 3), 가장 낮은 부식전류밀도를 나타낸 갈바륨+Top 시편이 물리적인 손상 깊이(최대 손상 깊이 차: 27.874 μm) 또한 가장 작게 나타났다. 이는 전기화학적 데이터와 손상 결과가 일치함을 의미하며, 폴리머 코팅층이 열화되는 과정에서도 하부 모재 방식에도 효과적으로 기여했음을 시사한다.

Fig. 4는 표면처리 방법에 따른 스크래치 실험 결과를 나타낸 것으로, 코팅층의 밀착력에 미치는 표면처리 효과를 검토하였다. Beake *et al.* [32,33]은 스크래치 실험 시 깊이 변동이 발생하는 지점을 기준으로 임계하중(L_{ci} ,

Table 3. Comparison of surface roughness and maximum damage depth with cyclic potentiodynamic polarization experiment on various coating specimens (unit: μm)

	Surface roughness			Maximum damage depth		
	Galvalume	Galvalume + Cr^{3+}	Galvalume + Top	Galvalume	Galvalume + Cr^{3+}	Galvalume + Top
Before	2.205	2.204	2.361	19.312	19.749	20.871
After	12.665	7.769	4.722	82.472	71.588	48.745
Difference	10.460	5.565	2.361	63.160	51.839	27.874

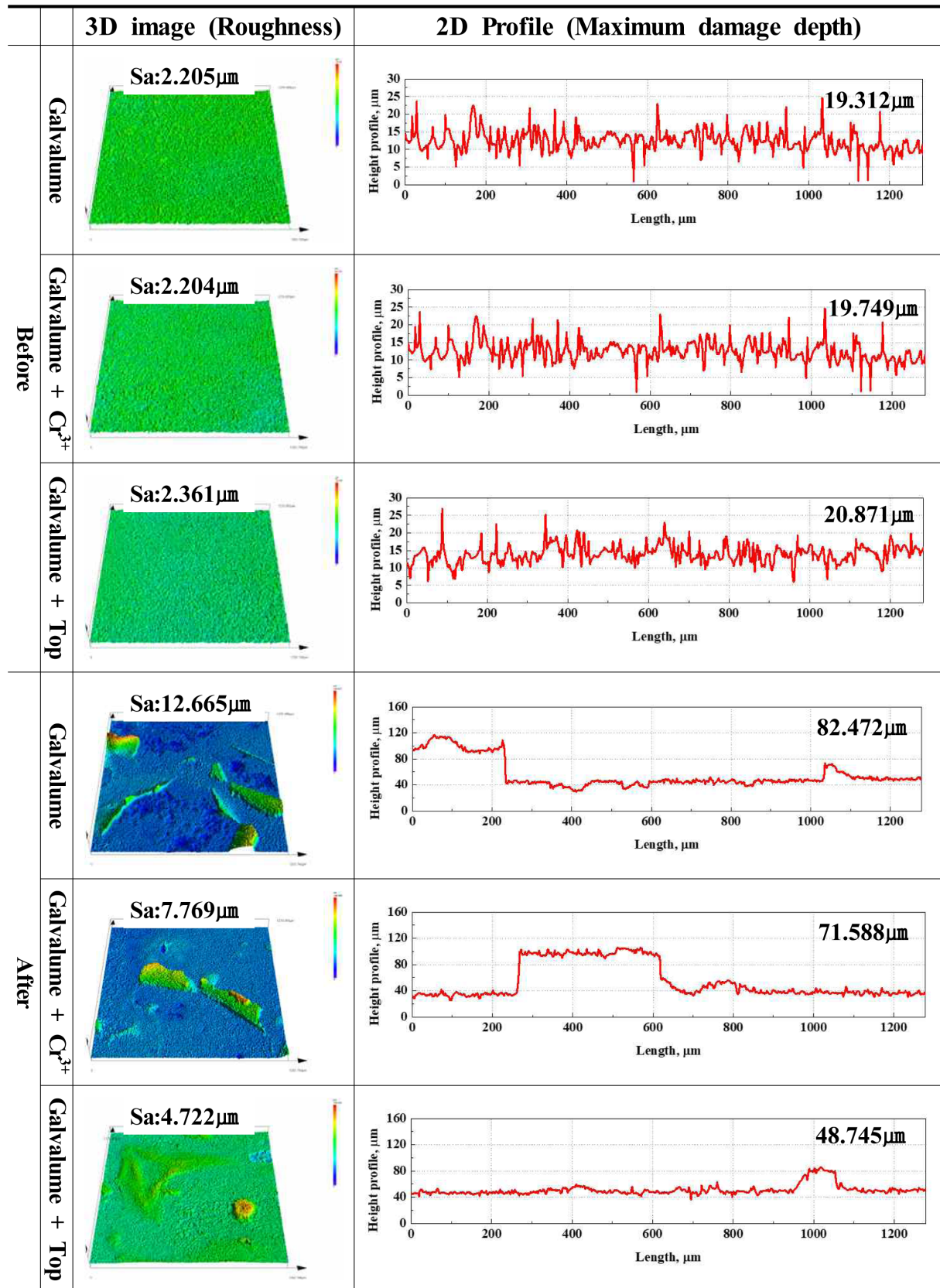
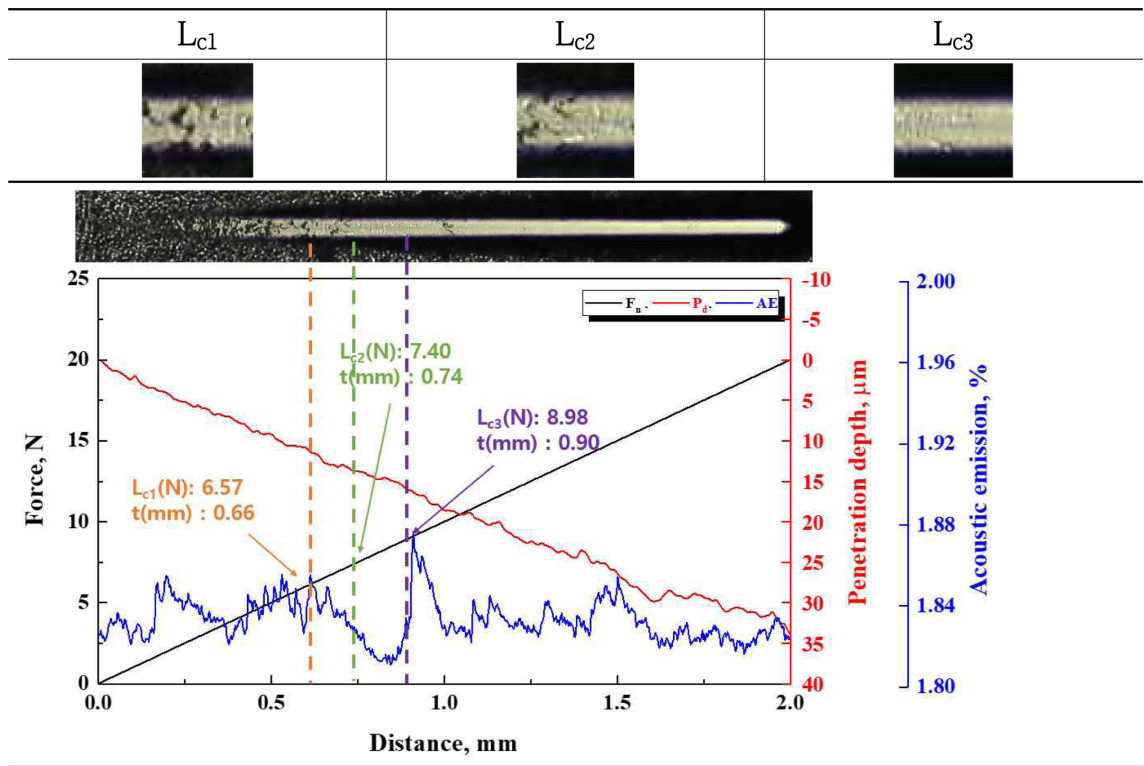
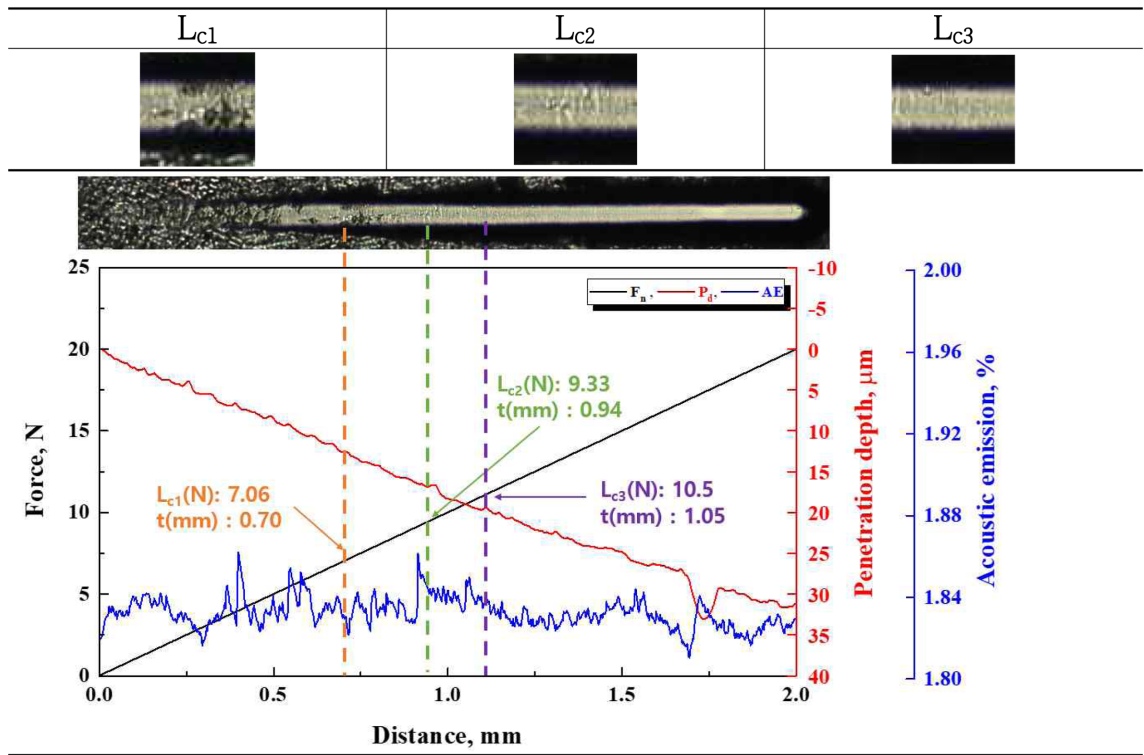


Fig. 3. Surface analysis results obtained using a 3D laser microscope after cyclic potentiodynamic polarization experiment on various coating specimens

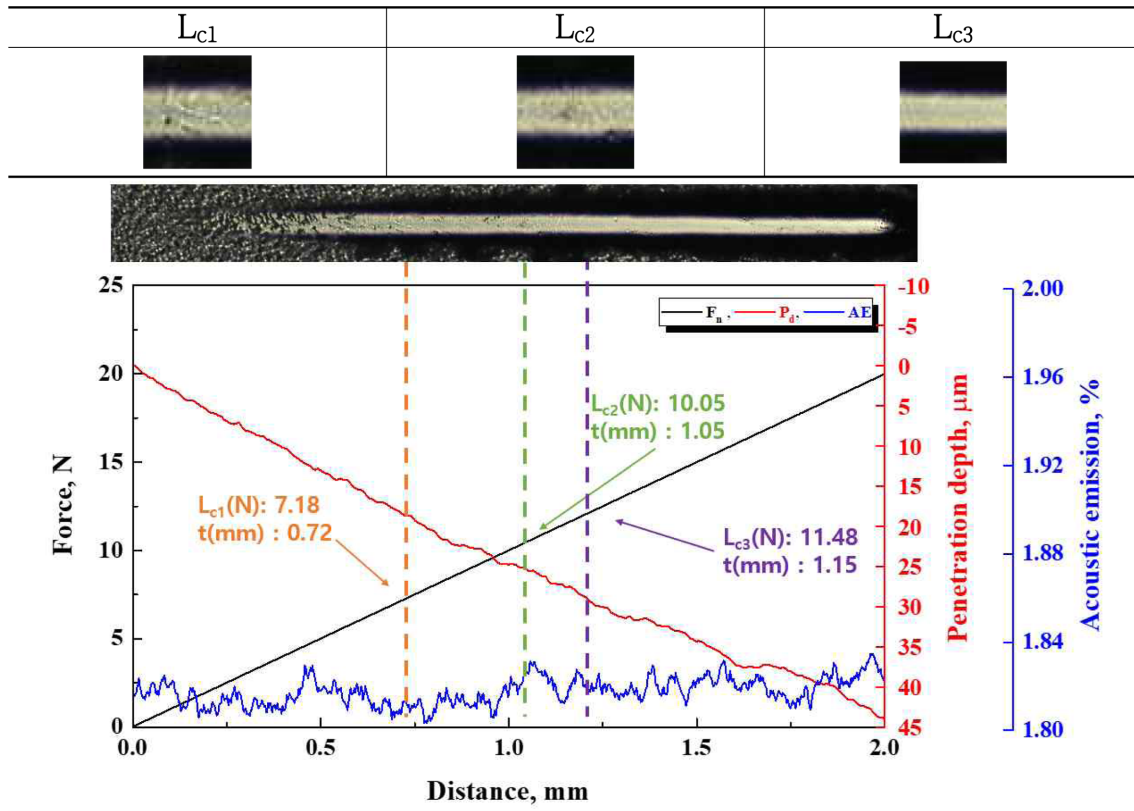


(a) Galvalume



(b) Galvalume + Cr^{3+}

Fig. 4. Results of Scratch test on various coating specimens



(c) Galvalume + Top

Fig. 4. (Continued) Results of Scratch test on various coating specimens

L_{c2} , L_{c3})을 정의하여 밀착력을 평가하였다. 초기 임계하중 L_{c1} 은 코팅층-기판 계면의 국부적인 결합력 파괴로 나타나는 가장 낮은 값이며, L_{c2} 는 코팅층이 부분적으로 박리되어 기판이 부분적으로 노출되는 지점이다. 그리고 L_{c3} 은 코팅층이 완전히 박리되어 기판이 전면적으로 드러나는 지점을 의미한다. 일반적으로 밀착력은 코팅층이 안정적으로 파괴되기 시작하는 L_{c2} 값을 기준으로 평가된다. 본 연구에서는 깊이 변동 및 음향방출 신호가 뚜렷하게 관찰되지 않았으므로, 임계하중은 광학현미경 이미지를 통해 판별하였다. 실험 결과(Fig. 5), 갈바륨, 갈바륨+Cr³⁺ 및 갈바륨+Top 시편의 L_{c1} 은 각각 6.57 N, 7.06 N 및 7.18 N으로 측정되었으며, L_{c2} 는 각각 7.40 N, 9.33 N 및 10.05 N으로 확인되었다. 즉, 갈바륨+Cr³⁺ 코팅은 갈바륨 대비 L_{c1} 과 L_{c2} 가 각각 0.49 N, 1.93 N 증가하였고, 갈바륨+Top 코팅은 각각 0.61 N, 2.65 N 증가하였다. Sharma et al. [34]은 코팅층 내 크롬 함량이 증가할수록 경도와 증착력이 향상된다고 보고하였으며, 이는 크롬이 안정된 전자구조(semi-occupied orbital)를 가져 높은 활성화 에너지를 나타내고, 그 결과 결합 강도가 향상되기 때문이라고 설명하였다. 본 연

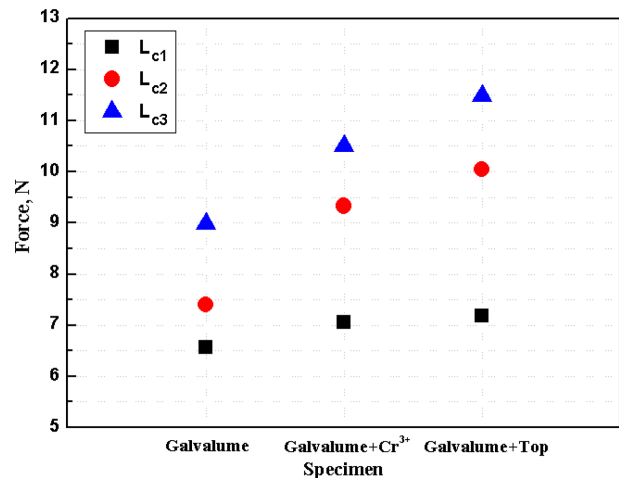


Fig. 5. Comparison of critical loads obtained from scratch test on various coating specimens

구에서 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편의 밀착력이 향상된 것도 이와 같은 크롬 특성에 기인한 것으로 판단된다. 또한, 갈바륨+Top 코팅 시편은 갈바륨+Cr³⁺보다 더 높은 밀착력을 보였는데, 이는 금속 코팅에 폴리머를 결합할 경

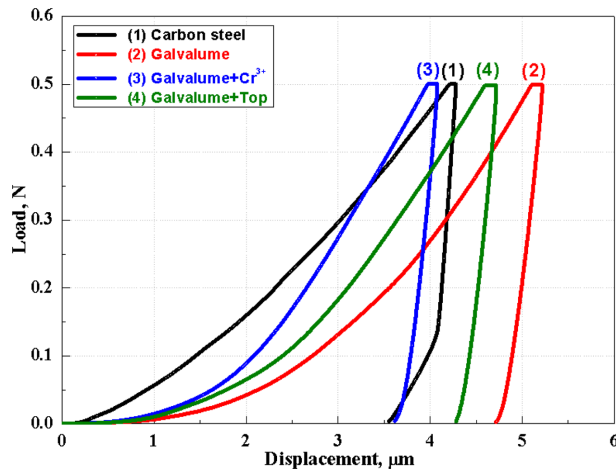


Fig. 6. Displacement-load curve obtained from indentation experiments for various coating specimens

Table 4. Comparison of Vickers hardness values obtained from experiments conducted on various coating specimens

Carbon steel	116.195 HV
Galvalume	76.777 HV
Galvalume + Cr^{3+}	128.076 HV
Galvalume + Top	93.216 HV

우 일부 폴리머가 금속 계면으로 침투하여 결합력을 강화한다는 Putman *et al.* [35]의 보고와 일치한다.

Fig. 6과 Table 4는 표면처리 방법에 따른 표면경도 분석을 위한 인덴테이션 실험 결과를 나타낸 것이다. 일반적으로 최대 인가하중에서 변위가 클수록 표면경도는 낮게 평가된다. 실험 결과, 최대 하중에서 변위 크기는 갈바륨 코팅 시편이 가장 크게 나타났으며, 그 다음으로 갈바륨+Top 코팅, 탄소강 그리고 갈바륨+ Cr^{3+} 코팅 시편 순으로 나타났다. 변위 크기가 가장 작은 갈바륨+ Cr^{3+} 코팅 시편은 128.076 HV로 가장 높은 표면경도를 보였으며, 갈바륨 코팅 시편은 76.777 HV로 가장 낮은 표면경도를 나타냈다. 이 결과는 크롬이 체심입방격자구조(BCC)와 강한 금속 결합력을 가지는 특성에 기인한 것으로, 알루미늄이나 아연보다 상대적으로 높은 경도를 나타내는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 하중-변위 곡선을 이용한 크리프거동 분석 결과를 나타낸 것이다. 크리프 거동은 일정한 하중(응력)이 계속 가해진 경우, 시간경과에 따라 재료의 변형이 지속적으로 증가하는 특성을 의미한다 [36]. 모든 시편은 최대 하중(약 0.5 N)에서 크리프 거동을 나타냈다. 특히 갈바륨 및 갈바륨+Top 코팅 시편에서 크리프 거동이 크게 나타났으며, 탄소강과 갈바륨+ Cr^{3+} 코팅 시편에서는 상대적으로 작게 나타났다. 즉, 경도가 높은 시

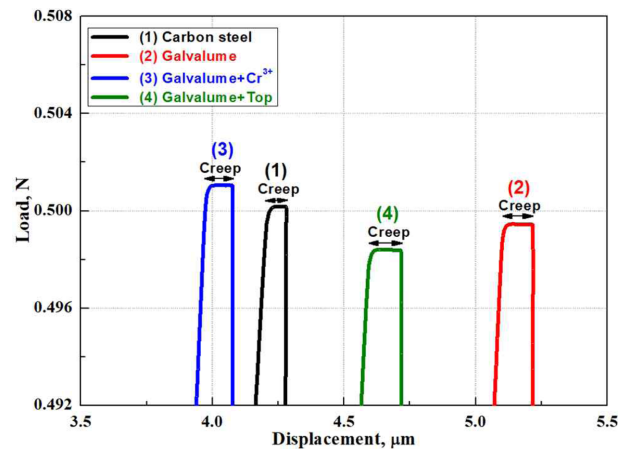


Fig. 7. Results of creep behavior analysis for load-displacement curve

편일수록 크리프 거동은 작게 나타났다. 일반적으로 표면경도와 크리프 거동은 직접적인 상관관계가 없으나, 경화된 표면은 초기 조건을 개선하여 크리프 저항성을 간접적으로 향상시킬 수 있다. Shen *et al.* [37]은 SnBi 합금에서 Sn 함량 증가 시 표면경도와 크리프 저항성이 동시에 향상된다고 보고하였다. 이는 표면경도의 증가는 크리프 거동이 시작되는 임계 조건을 지연시켜 재료의 장기 신뢰성을 개선할 수 있음을 시사한다.

4. 결론

본 연구는 갈바륨, 갈바륨+ Cr^{3+} 및 갈바륨+Top 코팅 기술을 적용한 경우 전기화학적 특성 및 기계적 특성에 대한 실험적 분석을 통해 다음과 같은 주요 결과를 도출하였다.

1. 순환동전위분극실험 결과, 갈바륨+Top 코팅 시편이 가장 낮은 부식전류밀도를 나타내었으며, 이는 알루미늄 산화피막과 크로메이트 피막의 결합과 비전도성 폴리머 코팅층의 영향으로 해석되었다.
2. 갈바륨+ Cr^{3+} 시편은 가장 높은 경도와 탁월한 크리프 저항성을 보였다. 크리프 거동 분석에서는 경도가 높은 시편일수록 크리프 거동이 적게 나타났다.
3. 갈바륨+Top은 폴리머층의 영향으로 탁월한 밀착력을 나타냈다.

종합하면, 외부 마찰이나 지속적인 하중이 작용하는 조건에서 높은 표면 경도와 크리프 저항성이 우수한 갈바륨+ Cr^{3+} 이 유리하다. 반면, 해양 환경과 같이 가혹한 부식 환경에서는 장기적인 내식성과 코팅 밀착력이 최우선으로 고려해야 할 경우에는 폴리머 복합 코팅(갈바륨+Top)을 적용하는 것이 구조물의 내구수명 확보에 가장 적합한 설계 기준이 될 것으로 여겨진다.

References

1. H. Kania, Corrosion and Anticorrosion of Alloys/Metals: The Important Global Issue, *Coatings*, **13**, 216 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings13020216>
2. S. B. Ulaeto, R. P. Ravi, I. I. Udoh, G. M. Mathew, and T. P. D. Rajan, Polymer-Based Coating for Steel Protection, Highlighting Metal–Organic Framework as Functional Actives: A Review, *Corrosion and Materials Degradation*, **4**, 284 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/cmd4020015>
3. S. S. Kumar, N. V. Londe, K. D. Kumar, and M. I. Kittur, A Review on Deterioration of Mechanical Behaviour of High Strength Materials under Corrosive Environment, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **376**, 012106 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/376/1/012106>
4. M. Kang, H. Kwon, E. Hyon, and E. Lee, Anti-Corrosion and Wear Performance of Al-Si Coating deposited by Wire Arc Spray for Marine Applications, *Journal of Advanced Marine Engineering*, **47**, 175 (2023). Doi: <https://doi.org/10.5916/jamet.2023.47.4.175>
5. Y. Na, S. K. Pradhan, J. S. Park, and M. S. Oh, Corrosion Behavior of Zn, Zn-Mg-Al, and Al-Si Alloy Coated Steel Sheet in a Simulated Marine Environment, *Journal of Advanced Marine Engineering*, **48**, 302 (2024). Doi: <https://doi.org/10.5916/jamet.2024.48.5.302>
6. G. P. V. Dalmora, E. P. B. Filho, A. A. M. Conterato, W. S. Roso, C. E. Pereira, and A. Dettmer, Methods of Corrosion Prevention for Steel in Marine Environments: A Review, *Results in Surfaces and Interfaces*, **18**, 100430 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2025.100430>
7. S. Chen, Z. Zhang, X. Mu, R. Kou, Y. Yang, and Y. Zhou, Microscopic Mechanisms of Chloride Ion Influence on the Initial Corrosion Behavior of 3 % Ni Weathering Steel, *Journal of Materials Research and Technology*, **37**, 196 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.06.032>
8. H. S. Aljibori, A. Alamiery, and A. A. H. Kadhum, Advances in Corrosion Protection Coatings: A Comprehensive Review, *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, **12**, 1476 (2023). Doi: <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-4-6>
9. M. Saikia, T. Dutta, N. Jadhav, and D. J. Kalita, Insights into the Development of Corrosion Protection Coatings, *Polymers (Basel)*, **17**, 1548 (2025). Doi: <https://doi.org/10.3390/polym17111548>
10. S. M. Chhipa, S. Sharma, and A. K. Bagha, Recent Development in Polymer Coating to Prevent Corrosion in Metals: A Review, *Materials Today: Proceedings*, In Press (2024). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.09.001>
11. O. D. Rincón, A. Rincón, M. Sánchez, N. Romero, O. Salas, R. Delgado, B. López, J. Uruchurtu, M. Marroco, and Z. Panosian, Evaluating Zn, Al and Al–Zn Coatings on Carbon Steel in a Special Atmosphere, *Construction and Building Materials*, **23**, 1465 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.002>
12. B. S. Chahar, V. Singh, M. K. Bhadu, S. A. Bhatia, S. Hadas, A. N. Bhagat, and K. Mondal, A Sustainable Application of Galvalume Unprocessed and Processed Dross as Sacrificial Anodes for Cathodic Protection of Steel Structures, *Sustainable Materials and Technologies*, **46**, e01702 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01702>
13. A. P. D. Santos, S. M. Manhabosco, J. S. Rodrigues, and L. F. P. Dick, Comparative Study of the Corrosion Behavior of Galvanized, Galvannealed and Zn55Al Coated Interstitial Free Steels, *Surface and Coatings Technology*, **279**, 150 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.08.046>
14. M. Yadav, J. K. Saha, and S. K. Ghosh, Evaluation of Corrosion Behaviour of Galvanised, Galvalume and Colour-Coated Steel Sheets, *Archives of Metallurgy and Materials*, **69**, 865 (2024). Doi: <https://doi.org/10.24425/amm.2024.150907>
15. P. S. G. D. Silva, A. N. C. Costa, O. R. Mattos, A. N. Correia, and P. d. Lima-Neto, Evaluation of the Corrosion Behavior of Galvannealed Steel in Chloride Aqueous Solution and in Tropical Marine Environment, *Journal of Applied Electrochemistry*, **36**, 375 (2006). Doi: <https://doi.org/10.1007/s10800-005-9083-x>
16. T. H. Naing, S. Janudom, N. Mahathaninwong, W. Limbut, and S. Karella, Corrosion-Resistant Superhydrophobic Films on Galvanized Steel by One-Step Electrodeposition, *Materials Today Communications*, **35**, 106241 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106241>
17. M. H. Shahini, H. E. Mohammadloo, and B. Ramezan-zadeh, Recent Advances in Steel Surface Treatment via Novel/Green Conversion Coatings for Anti-Corrosion Applications: a Review Study, *Journal of Coatings Technology and Research*, **19**, 159 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11998-021-00466-0>
18. O. Gharbi, S. Thomas, C. Smith, and N. Birbilis, Chromate Replacement: What Does the Future Hold?, *Nature Partner Journals Materials degradation*, **2**, 12 (2018).

- Doi: <https://doi.org/10.1038/s41529-018-0034-5>
19. D. Mercier, R. Zazpe, X. Wang, M. Michaux, J. Rodriguez-Pereira, S. Zanna, A. Seyeux, J. M. Macak, and P. Marcus, Enhanced Corrosion Resistance of 2024 Aluminum Alloys with Cr_2O_3 thin layers by Atomic Layer Deposition, *Corrosion Science*, **256**, 113167 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.113167>
 20. J. León, B. Ter-Ovanesian, B. Normand, H. Terryn, B. Özkaya, M. Lekka, H. J. Grande, E. García-Lecina, and J. M. Vega, Corrosion Resistance of Electroplated Coatings Based on Chromium Trivalent-Baths, *Surface and Coatings Technology*, **481**, 130616 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130616>
 21. B. O. Okonkwo, C. Jeong, H. B. Lee, C. Jang, E. Rahimi, and A. Davoodi, Development and Optimization of Trivalent Chromium Electrodeposit on 304L Stainless Steel to Improve Corrosion Resistance in Chloride-Containing Environment, *Heliyon*, **9**, e22538 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22538>
 22. Y. H. Kim, J. S. Park, and S. J. Kim, Comparative Study of Corrosion Resistance of Organic Coating and Dry Coating on 304 Stainless Steels Used for Bipolar Plates in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, *Corrosion Science and Technology*, **22**, 242 (2023). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2023.22.4.242>
 23. T. T. Thuy, T. A. Truc, and P. G. Vu, Incorporation of Montmorillonite/Silica Composite for the Corrosion Protection of an Epoxy Coating on a 2024 Aluminum Alloy Substrate, *Corrosion Science and Technology*, **22**, 99 (2023). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2023.22.2.99>
 24. K. Hyun, D. H. Shin, H. K. Hwang, and S. J. Kim, Effect of Cr^{3+} Chemical Conversion Treatment and Polymer Coating on Corrosion Resistance of Galvan-Coated Carbon Steel, *Corrosion Science and Technology*, **23**, 425 (2024). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2024.23.5.425>
 25. K. Hyun, D. H. Shin, H. K. Hwang, and S. J. Kim, Investigation on Corrosion Resistance of Carbon Steel with Various Coating Technologies Under Mechanical Processing, *Corrosion Science and Technology*, **23**, 569 (2024). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2024.23.6.569>
 26. ASTM C1624: Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Microscratch Test, ASTM International (2005).
 27. J. B. Kim and S. K. Lee, Corrosion Behavior of Hot-Dip Galvanized and 55% Al-Zn Alloy Coated Steel Sheet, *Corrosion Science and Technology*, **30**, 247 (2001). https://www.j-cst.org/opensource/pdfs/web/pdf_viewer.htm?code=J00300500247
 28. B. S. Liu, J. L. Li, W. J. Guo, P. F. Xu, S. H. Zhang, and Y. Z. Zhang, Progress in Corrosion-Resistant Coatings on Surface of Low Alloy Steel. *Journal of Iron and Steel Research International*, **30**, 193 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1007/s42243-022-00872-7>
 29. J. E. Edy, H. N. McMurray, K. R. Lammersb, and A. C. A. deVooy, Kinetics of Corrosion-Driven Cathodic Disbondment on Organic Coated Trivalent Chromium Metal-Oxide-Carbide Coatings on Steel, *Corrosion Science*, **157**, 51 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.04.037>
 30. M. F. Montemor, Functional and Smart Coatings for Corrosion Protection: A Review of Recent Advances, *Surface and Coatings Technology*, **258**, 17 (2014). Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.031>
 31. S. Dua, N. Arora, B. G. Prakashaiah, R. C. Saxena, S. K. Ganguly, T. Senthikumar, Conjugated Polymer-Based Composites for Anti-Corrosion Applications, *Progress in Organic Coatings*, **188**, 108231 (2024). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108231>
 32. B. D. Beake, T. W. Liskiewicz, and J. F. Smith, Deformation of Si(100) in Spherical Contacts — Comparison of Nano-Fretting and Nano-Scratch Tests with Nano-Indentation, *Surface and Coatings Technology*, **206**, 1921 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.10.035>
 33. B. D. Beake, M. I. Davies, T. W. Liskiewicz, V. M. Vishnyakov, and S. R. Goodes, Nano-Scratch, Nanoindentation and Fretting Tests of 5–80nm ta-C Films on Si(100), *Wear*, **301**, 575 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.073>
 34. R. K. Sharma, R. K. Das, and S. R. Kumar, Effect of Chromium Content on Microstructure, Mechanical and Erosion Properties of Fe-Cr-Ti-Mo-C-Si Coating, *Surfaces and Interfaces*, **22**, 100820 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surf.2020.100820>
 35. C. O. Putman and U. K. Vaidya, Interfacial Shear Strength in a Metal-Thermoplastic Composite, *Polymers and Polymer Composites*, **18**, 369 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1177/096739111001800703>
 36. W. Blum, P. Eisenlohr, and F. Breuting, Understanding Creep—a Review, *Metall Mater Trans A*, **33**, 291 (2002). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-002-0090-9>
 37. L. Shen, P. Septiwerdani, and Z. Chen, Elastic Modulus, Hardness and Creep Performance of SnBi Alloys using Nanoindentation, *Materials Science and Engineering: A*, **558**, 253 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.07.120>