

다양한 코팅기술이 적용된 탄소강의 기계적 가공에 따른 부식저항성 연구

현광룡¹ · 신동호² · 황현규² · 김성종^{3,†}

¹국립목포해양대학교 해군사관학부, 전라남도 목포시 해양대로 91

²국립목포해양대학교 대학원, 전라남도 목포시 해양대로 91

³국립목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대로 91

(2024년 11월 13일 접수, 2024년 12월 03일 수정, 2024년 12월 04일 채택)

Investigation on Corrosion Resistance of Carbon Steel with Various Coating Technologies Under Mechanical Processing

Koangyong Hyun¹, Dong-Ho Shin², Hyun-Kyu Hwang², and Seong-Jong Kim^{3,†}

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

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

³Division of Marine System Engineering, Mokpo National Maritime University, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

(Received November 13, 2024; Revised December 03, 2024; Accepted December 04, 2024)

This study compared and analyzed the electrochemical properties of the galfan+Top coating, which demonstrated excellent corrosion resistance in previous research, against the widely used galvalume+Cr³⁺ coating during bending processes (U type). Results from the potentiodynamic polarization experiment showed that the corrosion current densities for the galfan+Top-coated specimen and the galvalume+Cr³⁺-coated specimen were 0.041 and 0.081 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectively, indicating that the galfan+Top coating exhibited superior corrosion resistance. However, the corrosion resistance trends observed through 3D microscopy, SEM surface analysis and EDS analysis did not align with the results from the potentiodynamic polarization experiment. This discrepancy was attributed to the transpassive behavior of the galfan+Top-coated specimen, where the current density increased from -0.407 V until the end of the potentiodynamic polarization experiment, which was not seen in the galvalume+Cr³⁺-coated specimen. After conducting the galvanostatic corrosion experiment, minimal differences in corrosion resistance were noted through SEM surface analysis and EDS analysis. Nevertheless, 3D microscopy analysis revealed less surface damage on the galfan+Top-coated specimen compared to the galvalume+Cr³⁺-coated specimen, highlighting a difference in corrosion resistance.

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

1. 서론

부식은 금속 자재의 성능과 내구성을 현저히 저하시켜, 전 세계적으로 상당한 경제적 손실을 초래하고 있다 [1,2]. 특히, 철강은 다양한 산업분야에서 광범위하게 활용되나, 부식에 매우 취약하므로 이에 대한 다양한 코팅 기술이 개발되고 있다 [3].

갈판(Galfan) 코팅은 일반적으로 아연과 약 5%의 알루미늄 합금을 철강 표면에 코팅하여 내식성을 향상시키는 기술이다 [4-6]. 아연은 전기화학적으로 철보다 낮은 전위이므로, 부식환경에 노출된 경우 아연은 산화되고 철은 방식되는 희생양극 효과를 나타낸다. 이러한 갈판코팅은 다양한 부식 환경에서도 우수한 특성을 나타내므로 건축 자재 및 자동차 부품 등 다양한 산업분야에서 그 활용도가 높다.

갈바륨(Galvalume) 코팅은 아연과 약 55%의 알루미늄

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

현광룡: 교수, 신동호: 박사과정, 황현규: 박사과정, 김성종: 교수

높은 합금으로 이루어져 있어, 두 금속의 장점으로 내식성을 극대화한 코팅 기술이다 [7,8]. 갈바륨 코팅은 알루미늄의 내식성과 아연의 희생양극 특성을 동시에 제공하며, 기계적 강도와 내구성을 향상시킨다 [9,10]. 그리고 특히 고온이나 염분이 많은 환경에서 뛰어난 성능을 나타내어 조선업, 항공우주 및 에너지 산업 등 다양한 분야에서 각광받고 있다.

그리고 크롬 화성처리는 뛰어난 내식성, 내마모성 그리고 우수한 장식성 등으로 산업 전반에 걸쳐 널리 사용되는 표면처리 기술이다. 특히 6가 크롬(Cr^{6+}) 기반 코팅기술은 강력한 부식방지 효과가 있으나, 유독성과 친환경적이지 않기 때문에 사용이 제한되고 있다. 반면 3가 크롬은 인체와 환경에 대한 친환경적인 부식방지 표면처리 기술 중 대안으로 평가받고 있다 [11-13]. 이 화성처리는 Cr^{3+} 이온을 포함한 전해질에서 전착된 금속-산화물층으로 구성되며, 철강 기판에 대해 우수한 부식방지 효과를 나타낸다 [14,15].

폴리머 코팅은 일반적으로 금속-산화물층 위에 추가적으로 적용되는 보호층으로, 물리적 및 화학적 장벽을 형성하여 부식 매체의 침투를 효과적으로 차단하는 역할을 한다 [3,16-19]. 이 다층 구조는 특히 고온, 습기 및 염분이 많은 환경에서 철강을 효과적으로 보호할 수 있다.

이와 같이 다양한 코팅 연구가 많이 진행 중이며, 현재에도 재료 선정, 설계 및 사용에 대한 연구 사례가 많다. 선행연구에서는 탄소강에 갈판 코팅, 3가 크롬 화성처리 및 폴리머 코팅을 복합 적용한 경우가 우수한 부식저항성을 나타냈다 [20].

따라서 본 연구에서는 갈판 코팅 후 탑 코팅 시편과 갈바륨 코팅에 3가 크롬 화성처리한 시편에 대하여 굽힘공정을 추가하고 각 코팅의 부식 특성을 비교 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 시편 준비 및 표면 처리

Fig. 1은 전기화학 실험용 셀을 도식화한 것이다. 본 실험에 사용된 시편은 외경 0.5 cm, 내경 0.3 cm의 탄소

강 튜브를 사용하였다. 본 연구에 사용된 코팅 시편은 갈판 코팅에 3가 크롬 화성처리와 폴리머 코팅(Galfan+Top)을 적용하였으며, 갈바륨 코팅에는 3가 크롬 화성처리(Galvalume+ Cr^{3+})를 실시하였다. 갈판 코팅과 갈바륨 코팅의 알루미늄과 아연 비율(wt%)은 각각 11% : 89%, 55% : 45%로 구성되어 있으며, 자세한 코팅 공정 조건은 Table 1에 나타났다. 표면처리 시편은 굽힘공정에 의해 U자 형태로 변형시켰으며, 기계적으로 변형된 부분의 전기화학적 특성을 연구하기 위해 동일 면적(1cm^2)을 노출시키고 나머지 부분은 에폭시 수지로 절연시켰다.

2.2 전기화학적 실험 및 시편 표면 분석

전기화학적 실험은 potentiostat/galvanostat 시스템(Gamry Instruments, Reference 3000, USA)을 사용하여 동전위 분극실험과 정전류부식실험을 실시하였다. 3전극 전기화학 셀을 구성하였으며, 기준전극으로는 Ag/AgCl (sat. by KCl) 전극을, 대극으로는 $2 \times 2\text{ cm}$ 크기의 백금망을 사용하였다. 작업전극 노출면적은 1 cm^2 이다. 동전위분

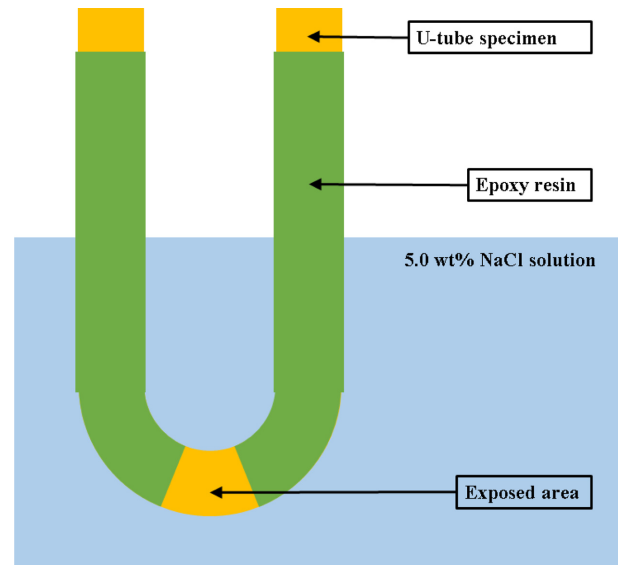


Fig. 1. Schematic diagram of cell for electrochemical experiments

Table 1. Process conditions for each coating specimen

Galfan + Top	Plating bath	Item	Standard concentration	Range
		F-2200 A	150 mL/L	80~300 mL/L
		F-2200 B	50 mL/L	10~100 mL/L
		F-2200 S	20 mL/L	10~50 mL/L
		A : B : C = 15% : 2% : 10%		
Galvalume + Cr ³⁺		Commercial confidentiality		

극실험은 5 wt% NaCl 수용액에서 3600초 동안 안정화시킨 후, 개로전위 기준으로 -0.25 V 에서 0.65 V 까지 1.0 mV/sec 의 주사속도로 실시하였다. 부식전위와 부식전류밀도는 개로전위 기준 $\pm 0.25\text{ V}$ 범위에서 타펠(Tafel) 외삽법으로 산출하였다. 정전류부식실험은 600초 동안 안정화시킨 후 전류밀도 1 mA/cm^2 에서 3600초 동안 수행되었다. 실험 종료 후, 아세톤과 증류수로 세척한 뒤 진공 건조기에서 24시간 동안 건조시켰다. 부식된 시편의 표면 분석은 3D 레이저 현미경(Olympus, OLS-5000, Japan), 전계 방출형 주사전자현미경(FE-SEM, JEOL, JSM-7500F, Japan), 그리고 에너지 분산형 분광분석기(EDS, Oxford Instruments, AZtec Energy, United Kingdom)를 사용하여 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 갈판+Top 코팅 시편과 갈바륨+ Cr^{3+} 코팅 시편의 자연전위 측정 결과이다. 철보다 낮은 전기화학적 전위를 가진 아연을 포함한 두 코팅 시편의 경우, 탄소강보다 현저히 낮은 전위를 나타냈으므로 희생양극 기능은 충분히 발휘할 수 있을 것으로 사료된다. 전반적으로 시간 변화에 따른 자연전위는 상대적으로 알루미늄 성분이 더 많이 포함된 갈바륨+ Cr^{3+} 코팅이 갈판+Top 코팅 시편보다 높은 전위를 나타냈다. 한편, 갈바륨+ Cr^{3+} 코팅 시편의 경우 시간 경과에 따라 자연전위가 귀방향으로 이행한 것은 굽힘공정 중 형성된 미세균열에서 알루미늄 산화피막이 재형성되면서 증가한 것으로 사료된다. 반면에 갈판+Top 코팅 시편의 경우는 개시 시점부터 거의 일정한 값을 유지한 이유는 굽힘공정으로 인한 코팅층의 균열이 상대적으로 적기 때문으로 판단된다.

Fig. 3은 5 wt% NaCl 수용액에서 갈판+Top과 갈바륨+ Cr^{3+} 코팅 시편의 동전위분극실험 결과를 나타낸 것이다. 두 시편 모두 개로전위에서 전위가 비방향으로 이행함에 따라 전류밀도가 완만하게 상승하거나 일정하게 유지되는 농도 분극의 경향이 관찰되었다. 반면, 전위가 귀방향으로 이행한 경우는 전류밀도가 지속적으로 증가하는 활성화 분극의 경향이 관찰되었다. 이후 약 -0.5 V 이상의 전위에서 전류밀도의 정체 또는 감소 현상이 관찰되었으며, 이는 부동태 특성으로 전류밀도는 10 mA/cm^2 이상으로 매우 높은 값을 나타냈다. 따라서 본 연구에서 관찰된 전류밀도의 정체와 감소 구간은 유사 부동태 영역으로 사료된다 [21]. 갈바륨+ Cr^{3+} 코팅 시편은 -0.515 V 에서 실험 종료 시까지 전류밀도가 감소 및 유지되는 부동태 특성이 나타난 반면, 갈판+Top 코팅 시편은 -0.407 V 이후부터 실험종료 시까지 전류밀도가 증가하는 과부동태 특성을 나타냈다.

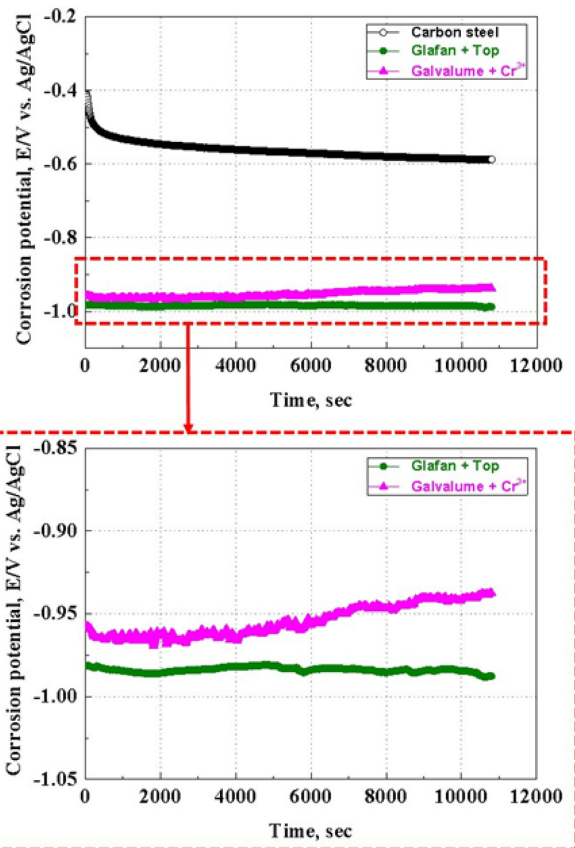


Fig. 2. Results of natural potential measurement in 5 wt% NaCl solution

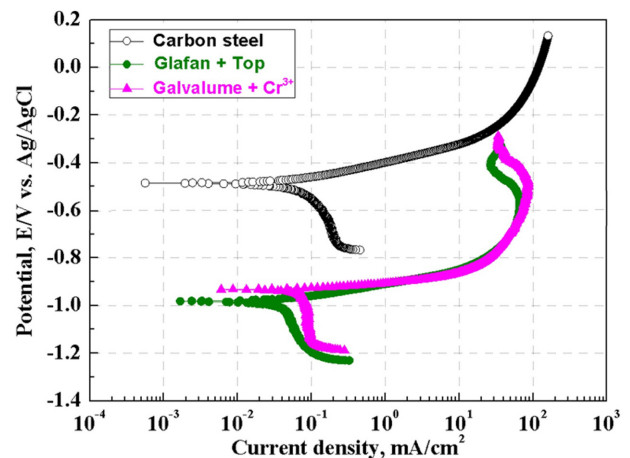
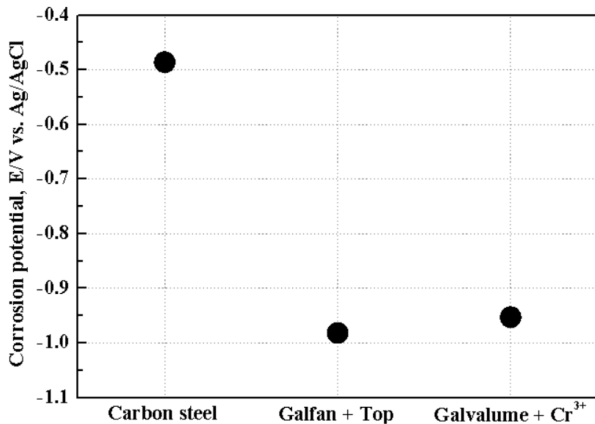
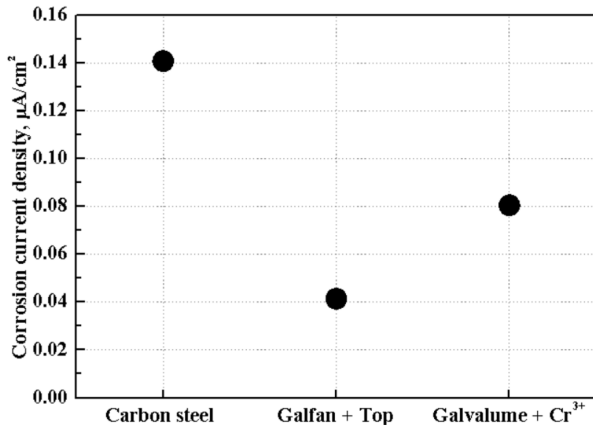


Fig. 3. Potentiodynamic polarization curves in 5 wt% NaCl solution

Fig. 4는 갈판+Top과 갈바륨+ Cr^{3+} 코팅 시편의 동전위 분극실험 결과에 대해 타펠(Tafel) 외삽법으로 산출한 부식전위와 부식전류밀도 비교 그래프이다. 부식전위의 경우, 자연전위 측정과 유사하게 두 코팅 시편이 탄소강보다 현저히 낮은 전위를 나타냈다. 부식전류밀도의 경



(a) Corrosion potential

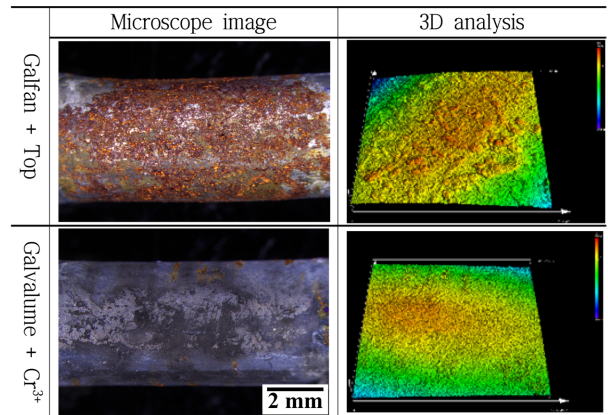


(b) Corrosion current density

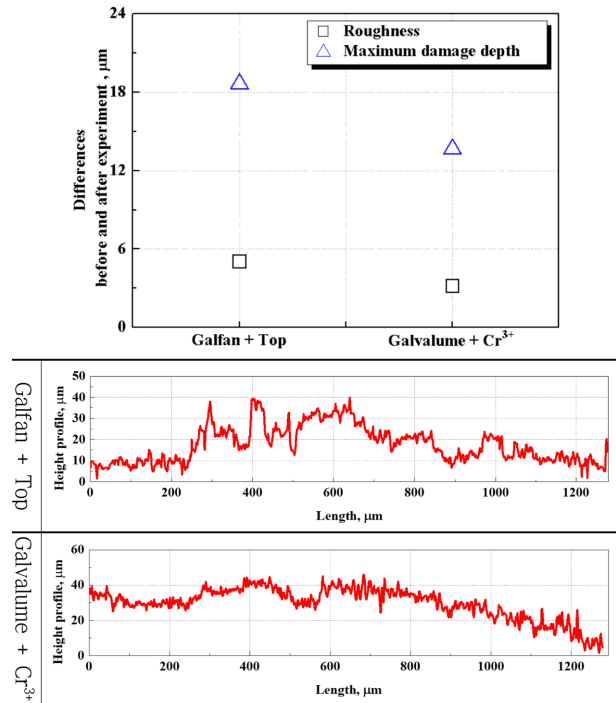
Fig. 4. Results of potentiodynamic polarization experiment in 5 wt% NaCl solution

우, 모든 코팅 시편이 탄소강보다 현저히 낮은 부식전류밀도를 나타냈으며, 갈판+Top 코팅이 갈바륨+Cr³⁺ 코팅보다 더 낮은 부식전류밀도를 나타냈다. 이는 갈판+Top 코팅은 철보다 낮은 전기화학적 전위를 가진 아연의 희생양극 효과와 더불어, 알루미늄 산화피막과 크로메이트 피막이 아연의 산화를 방지하고, 비전도성 폴리머 코팅 혼합물이 전기화학적 반응을 억제하면서 높은 탄성특성으로 굽힘공정에 의한 미세균열형성을 방지한 결과로 판단된다 [12,18,22-27].

Fig. 5는 동전위분극실험 후 갈판+Top과 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편의 실제현미경과 3D 현미경 표면 분석 결과를 나타낸 것이다. 갈판+Top 코팅 시편에서 적청은 넓은 영역에서 관찰되었다. 그러나 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편은 전반적으로 부식손상이 발생하였으며, 적청은 갈판+TOP 코팅 시편보다 국부적으로 적게 관찰되었다. 3D 현미경 표면 분석 이미지에서 두 시편의 경우, 현저한 손상 차이를 나타냈다. 동전위분극실험 후 3D 현미경을 사용하여 측정한 표면거칠기와 최대손상깊이의 실험 전



(a) Microscope and 3D analysis images



(b) Differences before and after experiment

Fig. 5. Surface analysis results using an optical and 3D laser microscope after potentiodynamic polarization experiment

후 평균값 비교하였다 (Fig. 5b). 동전위분극실험 후 갈판+Top과 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편의 표면 거칠기 평균값은 각각 6.359, 5.141 μm로, 최대손상깊이는 30.837, 20.856 μm로 산출되었다. 실험 전과 후의 표면거칠기 차이 값은 각각 5.064, 3.174 μm로, 최대손상깊이 차이 값은 18.637, 13.640 μm로 산출되었다. 자세한 산출과정은 Table 2에 나타났다. 전반적으로 실험 전과 후의 표면거칠기와 최대손상깊이 차이는 갈판+Top 코팅 시편이 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편보다 큰 값을 나타내어 표면 손상이 상대적으로 크게 나타났다. 이 결과는 부식전류밀도

값이 상대적으로 작아 갈판+Top 코팅 시편이 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편보다 상대적으로 내식성이 우수하다고 분석했던 Fig. 4와 상반된 경향을 나타냈다. 이는 동전위분극실험에서 갈판+Top 코팅 시편에서만 관찰되었던 과부동태 구간에서 전류밀도가 증가하여 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편보다 더 많은 부식에 의해 손상된 것으로 판단된다. Fig. 6은 갈판+Top과 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편의 동전위분극실험 후 표면 형상 분석 결과이다. 갈판+Top 코팅

시편은 마이크로크랙에서의 부식과 부분적으로 부식에 의한 박리가 관찰되었다. 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편의 경우, 박리가 관찰되지는 않았으나, 국부부식에 의한 표면 손상을 나타냈다. 이는 갈판+Top 코팅 시편의 동전위분극 실험 시 인위적으로 인가된 높은 전위에서 부식용액이 폴리머 코팅의 결합부위에 침투하여 부식생성물 형성과 응력을 받아 결국 폴리머 코팅이 박리된 것으로 사료된다 [18]. 또한 폴리머 코팅과 기존의 갈판 코팅이 동시

Table 2. Comparison of average surface roughness and maximum damage depth with potentiodynamic polarization experiment (unit: μm)

		Surface roughness		Maximum damage depth	
		Galfan + Top	Galvalume + Cr ³⁺	Galfan + Top	Galvalume + Cr ³⁺
Before		1.295	1.967	12.200	7.216
After	1	5.924	5.511	31.720	22.591
	2	7.040	6.265	32.486	20.209
	3	6.114	3.648	28.305	19.767
	Avg.	6.359	5.141	30.837	20.856
Difference		5.064	3.174	18.637	13.640

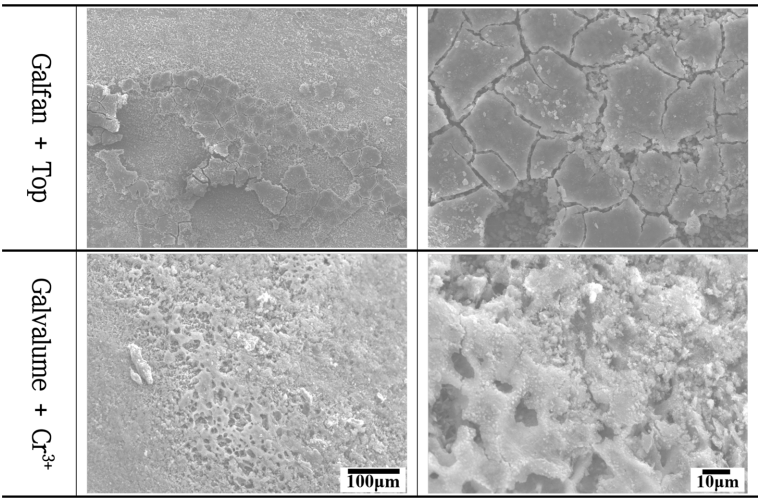


Fig. 6. SEM images of surface morphology after potentiodynamic polarization experiment

	Image	Fe	O	Al	Zn	Cr
Galfan + Top		 33.8wt%	 37.7wt%	 15.4wt%	 12.7wt%	 1.4wt%
Galvalume + Cr ³⁺		 19.8wt%	 31.9wt%	 36.7wt%	 10.4wt%	 1.2wt%

Fig. 7. EDS analysis results after potentiodynamic polarization experiment in 5 wt% NaCl solution

에 박리되어 동전위분극실험 시 전류밀도가 증가하는 과부동태 구간을 나타낸 것으로 판단된다. N. Coni 등에 따르면, 알루미늄은 코팅의 결합력을 강화시키며 탄소강과 반응하여 밀착력을 향상시키는 것으로 보고하였다 [9]. 상대적으로 많은 알루미늄을 함유하고 있는 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편의 경우, 동전위분극실험 시 인위적으로 인가된 높은 전위에서 부식용액의 침입을 억제하여 과부동태 구간이 나타나지 않은 것으로 사료되며, 그로 인해 코팅의 박리는 발생하지 않았으며 국부부식에 의한 표면손상만을 나타낸 것으로 판단된다. Fig. 7의 EDS 분석결과에 따르면, 갈판+Top 코팅 시편의 철 함량이 33.8 wt%를 나타내어 19.8 wt%를 나타낸 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편보다 더 많은 탄소강 표면이 노출되었다. 이것은 Fig. 6의 내용을 뒷받침하는 것으로 동전위분극실험 시 인위적으로 인가된 높은 전위에서 과부동태로 인해 갈판+Top 코팅 시편이 더 많이 손상된 것으로 여겨진다.

Fig. 8은 갈판+Top과 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편에 대하여 5 wt% NaCl 수용액에서 600초 동안 안정화시킨 후 1 mA/cm²의 전류밀도에서 3600초 동안 정전류부식실험 결과를 나타낸 그래프이다. 갈판+Top 코팅 시편은 약 -0.91 V의 전위에서 개시되어 시간 증가에 따라 급격히 감소한 후 -0.97 V에서 다소 안정화되었다. 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편은 약 -0.93 V에서 개시되어 초기 단시간 감소 후 시간 경과에 따라 전위는 약간 증가하였으며 약 -0.93 V에서 안정화되었다. 정전류부식실험 후 측정된 전위는 동전위분극곡선에서 1 mA/cm²의 전류밀도에 상응하는 전위와 거의 유사하게 나타났다. 알루미늄 성분이 상대적으로 더 많이 포함되어 있는 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편이 갈판+Top 코팅 시편보다 높은 전위를 나타낸 것으로 사료된다. 본 연구의 피방식체는 탄

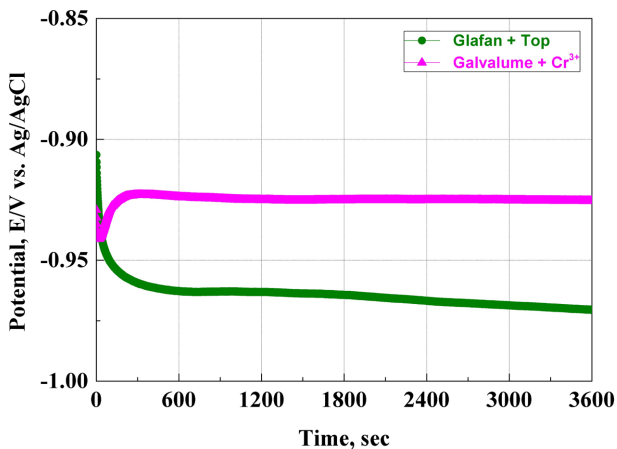
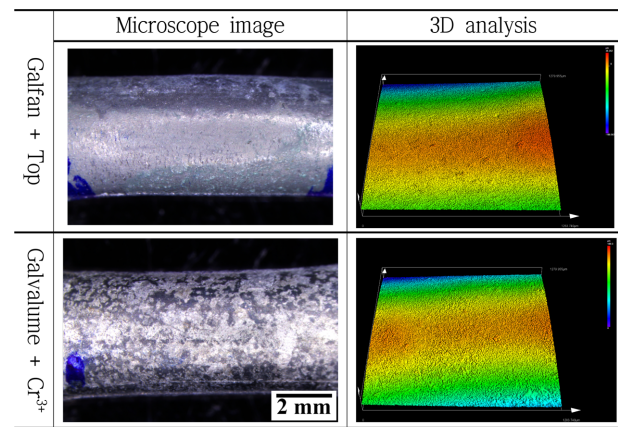


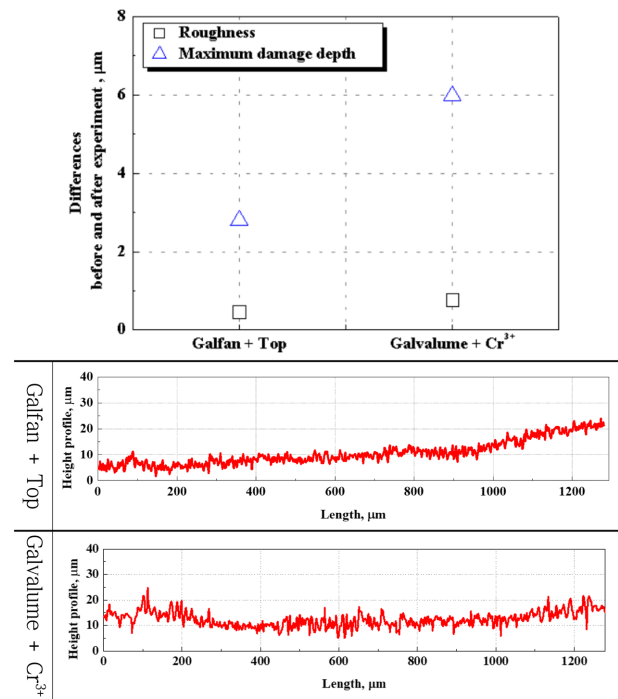
Fig. 8. Results of galvanostatic corrosion experiment in 5 wt% NaCl solution

소강으로 갈판+Top 코팅 시편이 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편보다 낮은 전위를 나타내어 희생양극적 특성이 상대적으로 크게 나타날 것으로 사료된다.

Fig. 9a는 정전류부식실험 후 갈판+Top과 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편의 실체현미경과 3D 레이저 현미경 이미지 사진을 나타낸 것이다. 두 시편 모두 부식에 의한 손상은 국부적으로 나타났으며, 적청은 관찰되지 않았다. 3D 현미경 이미지에서 두 시편의 뚜렷한 손상 차이는 확인되지 않았다. Fig. 9b는 갈판+Top과 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편의 정전류부식실험 후 3D 현미경으로 측정된 표면거



(a) Microscope and 3D analysis images



(b) Differences before and after experiment

Fig. 9. Surface analysis results using an optical and 3D laser microscope after galvanostatic corrosion experiment

칠기와 최대손상깊이의 실험 전후 평균값을 비교한 결과이다. 실험 후 갈판+Top과 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편의 표면거칠기의 평균값은 각각 1.773, 2.750 μm 이며, 최대손상깊이의 평균값은 각각 15.007, 13.191 μm 로 산출되었다(Table 3). Fig. 9b와 같이 갈판+Top과 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편의 실험 전후 표면거칠기 차이 값은 각각 0.478, 0.783 μm 로, 최대손상깊이 차이 값은 각각 2.807, 5.975 μm 로 산출되었다. 실험 전후의 표면거칠기와 최대손상깊

이 차이에서 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편이 갈판+Top 시편보다 모두 큰 값을 나타냈다. 부동태가 발생하는 전류밀도 이하인 활성상태의 전류밀도를 동일하게 인가한 경우, 상대적으로 내식성이 좋은 시편의 손상이 적을 것으로 판단된다. 따라서 정전위분극실험 시 낮은 부식전류밀도를 나타냈던 갈판+Top 코팅 시편이 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편보다 상대적으로 부식저항성이 높아 이와 같은 결과를 나타낸 것으로 사료된다.

Table 3. Comparison of average surface roughness and maximum damage depth with galvanostatic corrosion experiment (unit: μm)

		Surface roughness		Maximum damage depth	
		Galfan + Top	Galvalume + Cr ³⁺	Galfan + Top	Galvalume + Cr ³⁺
Before		1.295	1.967	12.200	7.216
After	1	2.405	2.805	17.814	13.167
	2	1.333	2.263	12.098	13.053
	3	1.58	3.181	15.108	12.352
	Avg.	1.773	2.750	15.007	13.191
Difference		0.478	0.783	2.807	5.975

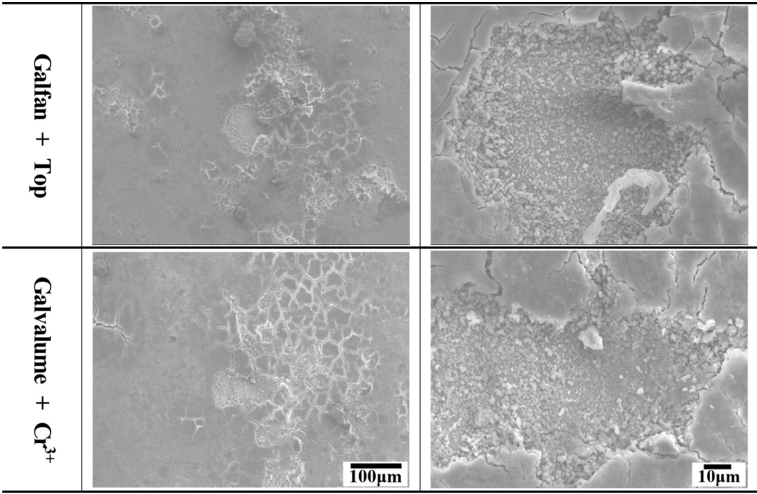


Fig. 10. SEM images of surface morphology after galvanostatic corrosion experiment

	Image	Fe	O	Al	Zn	Cr
Galfan + Top		 2.7wt%	 35.6wt%	 25.9wt%	 33.8wt%	 2.0wt%
Galvalume + Cr ³⁺		 2.4wt%	 35.2wt%	 18.9wt%	 39.9wt%	 3.6wt%

Fig. 11. EDS analysis results after galvanostatic corrosion experiment in 5 wt% NaCl solution

Fig. 10은 갈판+Top과 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편의 정전류부식실험 후 표면 형상을 나타낸 SEM 사진이다. 갈판+Top과 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편은 국부부식과 부식에 의한 탈리현상이 관찰되어 유사한 부식손상 경향을 나타냈으며, 큰 차이는 관찰되지 않았다. Fig. 11에 나타낸 EDS 분석 결과에서도 비슷한 경향을 나타냈다. 모재 탄소강의 원소인 철 성분이 표면 EDS 분석에서 높게 나올수록 부식 손상으로 인한 코팅층 박리를 의미한다. 그러나 표면의 철 함유량이 2.7 wt%인 갈판+Top과 2.4 wt%인 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편의 철 함량 차이는 0.3%로 미미한 값을 나타냈다.

4. 결론

본 연구는 선행연구에서 우수한 내식성을 나타낸 갈판+Top 코팅과 갈바륨+Cr³⁺ 코팅을 탄소강에 실시하여 굽힘공정으로 U자 형태로 변형시킨 부위에 대한 전기화학적 특성을 비교 분석하였다.

동전위분극실험 결과, 갈판+Top 코팅 시편과 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편이 각각 0.041과 0.081 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 부식전류밀도를 나타내어 갈판+Top 코팅 시편이 우수한 내식성을 나타냈다. 그러나 동전위분극실험 후 3D 현미경, SEM 표면 관찰 및 EDS 분석에서 부식저항성에 대한 경향에 차이를 나타냈다. 이는 갈판+Top 코팅 시편이 동전위분극실험 과정 중 -0.407 V 이후부터 실험종료까지 전류밀도가 증가하는 과부동태 특성을 나타냈기 때문으로 사료된다. 즉, 인위적으로 인가된 높은 전위에서 부식용액이 폴리머 코팅의 결합부위에 침투하여 부식생성물이 형성되어 폴리머 코팅과 갈판 코팅이 동시에 박리된 것으로 판단된다.

정전류부식실험 후 측정된 전위는 동전위분극곡선에서 1 mA/cm²의 전류밀도에 상응하는 전위와 거의 유사한 값을 나타냈다. 정전류부식실험 후 SEM 표면 관찰 및 EDS 분석에서 부식저항성의 차이는 미미하였다. 그러나 3D 현미경 분석에서 갈판+Top 코팅 시편이 갈바륨+Cr³⁺ 코팅 시편 보다 표면 손상이 적은 경향을 나타냈다. 부동태가 발생하는 전류밀도 이하인 활성상태의 전류밀도를 두 코팅에 동일하게 인가한 경우, 상대적으로 내식성이 우수한 시편의 손상이 적은 것으로 판단된다.

따라서 정전위분극실험 시 낮은 부식전류밀도를 나타냈던 갈판+Top코팅이 갈바륨+Cr³⁺보다 상대적으로 부식저항성이 높아 이러한 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

References

1. J. Shin, H. J. Kwon, H. Kim, and D. Lee, Atmospheric

- Corrosion Model of Carbon Steel Considering Relative Humidity, Chloride Deposition Rate, and Surface Particles, *Corrosion Science and Technology*, **23**, 324 (2024). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2024.23.4.324>
2. G. H. Koch, M. P. H. Brongers, N. G. Thompson, Y. P. Virmani and J. H. Payer, *Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States*, Report Number R315-01, NACE International, Washington (2002). <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/40697>
3. 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>
4. X. Zhang, C. Leygraf, and I. O. Wallinder, Atmospheric Corrosion of Galfan Coatings on Steel in Chloride-Rich Environments, *Corrosion Science*, **73**, 62 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.03.025>
5. X. G. Zhang, Corrosion and Electrochemistry of Zinc, Plenum Press, New York (1996). Doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9877-7>
6. S. B. Jeon, J. W. Choi, B. K. Son, and I. Son, The Effects of Drying Temperature on Chromate Treatment for Electroplated Zinc, *Journal of the Korean institute of surface engineering*, **56**, 289 (2023). Doi: <https://doi.org/10.5695/JSSE.2023.56.5.289>
7. P. Qiu, C. Leygraf, and I. O. Wallinder, Evolution of Corrosion Products and Metal Release from Galvalume Coatings on Steel during Short and Long-Term Atmospheric Exposures, *Materials Chemistry and Physics*, **133**, 419 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.01.054>
8. X. Zhang, T. N. Vu, P. Volovitch, C. Leygraf, K. Ogle, and I. Odnevall Wallinder, The Initial Release of Zinc and Aluminum from Non-Treated Galvalume and the Formation of Corrosion Products in Chloride Containing Media, *Applied Surface Science*, **258**, 4351 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.12.112>
9. N. Coni, M. L. Gipiela, A. S. C. M. D'Oliveira, P. V. P. Marcondes, Study of the mechanical properties of the hot dip galvanized steel and galvalume, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **31**, 319 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1590/S1678-58782009000400006>
10. D. Persson, D. Thierry, and N. LeBozec, Corrosion Product Formation on Zn55Al Coated Steel upon Exposure in a Marine Atmosphere, *Corrosion Science*, **53**, 720 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.11.004>

11. M. H. Shahini, H. E. Mohammadloo, and B. Ramezanzadeh, 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>
12. S. Ha, J. Eun, C. Choi, S. Cho, and S. Jeon, Fabrication of a Uniform Chromate Conversion Coating on Zn Alloy for Improved Corrosion Resistance in Humid Environments, *Scientific Reports*, **13**, 14311 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41629-w>
13. N. V. Mandich and D. L. Snyder, *Electrodeposition of Chromium*, 15th ed., p. 205, Wiley & Sons, New York (2011). Doi: <https://doi.org/10.1002/9780470602638.ch7>
14. 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>
15. 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>
16. 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>
17. 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>
18. 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>
19. S. Dua, N. Arora, B. G. Prakashaiah, R. C. Saxena, S. K. Ganguly, T. Senthilkumar, 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>
20. K. Hyun, D. -H. Shin, H. -K. Hwang, and S. -J. Kim, Effect of Cr³⁺ Chemical Conversion Treatment and Polymer Coating on the Corrosion Resistance of Galfan-Coated Carbon Steel, *Corrosion Science and Technology*, **23**, 425 (2024). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2024.23.5.425>
21. N. Sato and G. Okamoto, *Electrochemical Passivation of Metals*, p. 193, Springer, Boston (1981). Doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4825-3_4
22. D. R. Raut and S. H. Poratkar, Study the Effect of Aluminum Variation on Hardness & Aluminum Loss in Zn-Al Alloy, *International Journal of Modern Engineering Research*, **3**, 884 (2013). Doi: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14443893>
23. S. Shawki and Z. A. Hamid, Effect of Aluminium Content on the Coating Structure and Dross Formation in the Hot-dip Galvanizing Process, *Surface and Interface Analysis*, **35**, 943 (2003). Doi: <https://doi.org/10.1002/sia.1608>
24. C. Lim, D. Lim, B. Ku, S. E. Shim, and S. -H. Baeck, Optimization of Electrochemical Variables of Pulse-Reverse Electroplating in Trivalent Chromium Bath to Enhance the Corrosion Resistance of Chromium Film, *Korean Journal of Metals and Materials*, **57**, 641 (2019). Doi: <http://dx.doi.org/10.3365/KJMM.2019.57.10.641>
25. J. García-Antón, R. M. Fernández-Domene, R. Sánchez-Tovar, C. Escrivà-Cerdán, R. Leiva-García, V. García, and A. Urtiaga, Improvement of the Electrochemical Behaviour of Zn-electroplated Steel using Regenerated Cr (III) Passivation baths, *Chemical Engineering Science*, **111**, 402 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.03.005>
26. B. Boelen, H. D. Hartog, and H. V. d. Weijde, Product Performance of Polymer Coated Packaging Steel, Study of the Mechanism of Defect Growth in Cans, *Progress in Organic Coatings*, **50**, 40 (2004). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.09.011>
27. A. V. Babaytsev, M. I. Martirosov, L. N. Rabinskiy, and Y. O. Solyaev, Effect of Thin Polymer Coatings on the Mechanical Properties of Steel Plates, *Russian Metallurgy*, **2017**, 1170 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1134/S003602951713002X>