

## 갈판 코팅된 탄소강의 부식 저항성에 미치는 $\text{Cr}^{3+}$ 화성처리 및 폴리머 코팅의 영향

현광룡<sup>1</sup> · 신동호<sup>2</sup> · 황현규<sup>2</sup> · 김성종<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>국립목포해양대학교 해군사관학부, 전라남도 목포시 해양대학교로 91

<sup>2</sup>국립목포해양대학교 대학원, 전라남도 목포시 해양대학교로 91

<sup>3</sup>국립목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대학교로 91

(2024년 9월 27일 접수, 2024년 10월 15일 수정, 2024년 10월 15일 채택)

## Effect of $\text{Cr}^{3+}$ Chemical Conversion Treatment and Polymer Coating on Corrosion Resistance of Galfan-Coated Carbon Steel

Koangyong Hyun<sup>1</sup>, Dong-Ho Shin<sup>2</sup>, Hyun-Kyu Hwang<sup>2</sup>, and Seong-Jong Kim<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>Division of Naval Officer Science, Mokpo National Maritime University, 91, Haeyangdaehak-ro,  
Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

<sup>2</sup>Graduate school, Mokpo national maritime university, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

<sup>3</sup>Division of Marine System Engineering, Mokpo National Maritime University, 91, Haeyangdaehak-ro,  
Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

(Received September 27, 2024; Revised October 15, 2024; Accepted October 15, 2024)

In this study, corrosion properties of galfan-coated carbon steel were compared and analyzed after applying trivalent chromium chemical conversion treatment and polymer coating techniques. Potentiodynamic polarization and galvanostatic corrosion experiments were performed to compare corrosion resistance of galfan-coated carbon steel with different coatings. Results of the potentiodynamic polarization test demonstrated that the specimen treated with both trivalent chromium chemical conversion and polymer coating exhibited superior corrosion resistance to other specimens, showing the lowest corrosion current density of  $0.058 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . In contrast, the specimen coated only with galfan presented the highest corrosion current density of  $0.118 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , indicating the lowest corrosion resistance. These results were further validated through additional analyses, including galvanostatic corrosion experiment, 3D microscopy, scanning electron microscopy, and energy-dispersive spectroscopy. Results of this investigation confirmed that trivalent chromium chemical conversion treatment along with polymer coatings could effectively enhance corrosion resistance of carbon steel, offering a promising and environmentally friendly anti-corrosion technology.

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

### 1. 서론

부식은 금속 재료의 성능과 내구성을 저해하는 주요 핵심요인 중 하나로, 전 세계적으로 막대한 경제적 손실을 초래한다 [1]. 특히, 철강은 다양한 산업 분야에서 광범위하게 사용되나 부식에 매우 취약하다. 이러한 부식 문제를 해결하기 위해, 다양한 코팅 기술이 개발되

었으며, 그 중 크롬 기반 코팅은 오랜 기간 동안 우수한 내식성, 장식성 및 내마모성 등 다양한 산업분야에서 주목받아 왔다 [2-4].

전통적으로 사용되어 온 6가 크롬( $\text{Cr}^{6+}$ ) 기반 코팅은 강력한 부식방지 성능을 발휘하나, 그 유독성과 환경에 대한 위험성 때문에 규제가 강화되었으며 대체 물질에 대한 필요성이 대두되었다 [5]. 이와 같이 6가 크롬 사용 제한에 따라, 3가 크롬( $\text{Cr}^{3+}$ ) 기반 코팅이 보다 친환경적이고 안전한 대안으로 연구되고 있다 [2,5-7]. 3가 크롬은 6가 크롬에 비해 인체와 환경에 미치는 유해성

<sup>†</sup>Corresponding author: [ksj@mmu.ac.kr](mailto:ksj@mmu.ac.kr)

현광룡: 교수, 신동호, 황현규: 박사과정, 김성종: 교수

이 낮아, 다양한 산업에서 그 활용 가능성이 크게 증가하고 있다 [5-7].

3가 크롬 기반 코팅은 기본적으로  $\text{Cr}^{3+}$  이온을 포함한 전해질에서 전착된 금속-산화물층으로 구성되며, 이 코팅층은 철강 기판에 대한 우수한 부식 방지 효과를 제공한다 [5-7]. 또한 금속(철)이 아연 또는 아연-알루미늄 합금과 갈바닉 셀 형성 시, 희생양극 효과로 기판을 효과적으로 보호할 수 있다. 특히, 아연은 철보다 낮은 전기화학적 전위를 가지므로, 부식 매체에 의해 아연은 산화되어 부식되고 철 기판은 환원되어 방식된다 [8-10]. 더불어, 알루미늄 산화피막과 크로메이트 피막은 아연의 산화를 억제하여, 코팅층의 내구성과 내식성을 더욱 향상시킨다 [8-10].

그리고 폴리머(Polymer) 코팅은 이러한 금속-산화물층과 결합하여, 물리적 장벽으로 작용하여 부식 매체의 침투를 억제한다 [11-15]. 또한 외부 환경으로부터 코팅층을 보호하고, 화학적 안정성을 증가시켜 부식 저항성을 강화한다 [12-15]. 이러한 다층 구조는 다양한 부식 환경에서 철강을 보호하는데 매우 효과적이며, 이는 특히 고온, 다습 환경이나 염분이 높은 환경에서 그 중요성이 강조된다.

본 연구는 탄소강에 대한 갈판(Galfan) 코팅은 희생양극 기능으로 방식기능을 수행할 수 있으나 [16], 추가로 내구수명을 더욱 향상시키기 위해 친환경적인 3가 크롬 화성처리 및 폴리머 코팅을 실시하였다.

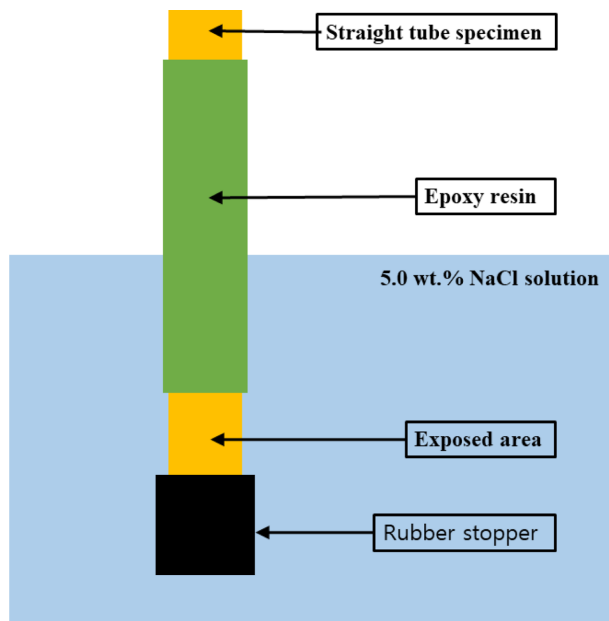


Fig. 1. Schematic diagram of cell for electrochemical experiments

## 2. 실험방법

### 2.1 시편 준비 및 표면 처리

Fig. 1은 전기화학적 실험을 위한 셀의 모식도를 나타낸 것이다. 모든 시편의 직경과 내경은 각각 0.5, 0.3 cm 인 직관을 사용하였다. 시편의 종류는 코팅되지 않은 탄소강(Carbon steel), 갈판(Galfan) 코팅, 갈판 코팅에 3가 크롬으로 화성처리한 코팅(Galfan+ $\text{Cr}^{3+}$ ) 그리고 Galfan+ $\text{Cr}^{3+}$  코팅에 폴리머 코팅을 적용한 코팅(Galfan+Top) 시험편으로 총 4가지이다. 갈판 코팅의 알루미늄과 아연 혼합비는 각각 11%와 89%로 구성되어 있으며, 자세한 코팅 공정 조건은 Table 1에 나타냈다. 전기화학적 실험을 위해 동일 면적( $1 \text{ cm}^2$ )을 노출시키고 나머지 영역은 에폭시 수지로 절연시켰다. 또한, 시편 하부에서 튜브 내부로의 수용액 침투를 방지하기 위해 Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 고무마개(rubber stopper)를 사용하여 밀봉하였다.

### 2.2 전기화학적 실험 및 시편 표면 분석

전기화학적 측정은 potentiostat/galvanostat 장비(Gamry instruments, Reference 3000, USA)를 사용하여 동전위 분극실험과 정전류부식실험을 실시하였다. 모두 3 전극 전기화학 셀을 구성하였으며, 기준전극은 Ag/AgCl (sat. by KCl) 전극을, 대극은  $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$  크기의 백금망을 사용하였다. 표면처리 기술이 적용된 재료의 내식성을 단시간에 평가하기 위해 가혹한 부식 환경인 5 wt%

Table 1. Process conditions for each coating specimen

Galfan	Plating bath	Al	Mg	Cu	Fe
		10~12	2.5~3.5	0.03<	0.075<
		Pb	Sn	Cd	Zn
		0.004<	0.001<	0.001<	Bal.
	Process temp.	440±30 °C			
Galfan + Cr <sup>3+</sup>	Plating bath	Item	Standard conc.		Range
		F-2200 A	150 ml/L		80~300 ml/L
	Process temp.	40 ~ 60 °C			
	Process time	1 ~ 10 s			
	pH	1.2 ~ 2.2			
	Drying temp.	40 ~ 80 °C			
Galfan + Top	Plating bath	Item	Standard conc.		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%				

NaCl 수용액에서 전기화학적 실험을 실시하였다. 동전위분극실험은  $1\text{ cm}^2$  노출시켜 5 wt% NaCl 수용액에서 3600초 동안 안정화 시킨 후 개로전위 기준  $-0.25\text{ V}$ 에서  $0.65\text{ V}$ 까지  $1.0\text{ mV/sec}$ 의 주사속도로 실시하였다. 그리고 개로전위 기준  $\pm 0.25\text{ V}$  범위에서 타펠(Tafel) 외삽법을 사용하여 부식전위와 부식전류밀도를 산출하였다. 정전류부식실험의 경우, 600초 동안 안정화시킨 후 전류밀도  $1\text{ mA/cm}^2$ 에서 3600초 동안 실시하였다. 실험 종료 후 시편은 아세톤과 증류수로 세척하였으며, 진공 건조기에서 24시간 동안 건조하였다. 이후 3D 공초점 레이저 현미경(3D Confocal Laser Microscope, Olympus, OLS-5000, Japan), 전계방출형 주사전자현미경(Field Emission-Scanning Electron Microscope, JEOL, JSM-7500F, Japan) 및 에너지 분산형 분광분석기(Energy Dispersive Spectrometer, Oxford Instruments, AZTec Energy, United Kingdom)로 손상된 표면을 분석하였다.

### 3. 연구결과 및 고찰

Fig. 2는 5 wt% NaCl 수용액에서 다양한 코팅 시험편에 대한 동전위분극실험 결과를 나타낸 것이다. 탄소강의 경우, 개로전위에서 전위가 비방향으로 이행하면서 전류밀도가 완만하게 상승하는 경향을 나타냈다. 한편 전위가 귀방향으로 이행함에 따라 전류밀도는 지속적으로 증가하였다. 그러나 코팅된 시험편의 경우, 개로전위에서 전위가 비방향으로 이행하면서 전류밀도가 감소하거나 정체되는 농도분극의 경향이 관찰되었다. 그리고 전위가 귀방향으로 이행한 경우 전류밀도가 지속적으로 증가하는 활성화분극의 경향이 관찰되었다. 이후 약  $-0.6 \sim -0.5\text{ V}$ 의 전위에서 전류밀도는 정체되거나 감소하는

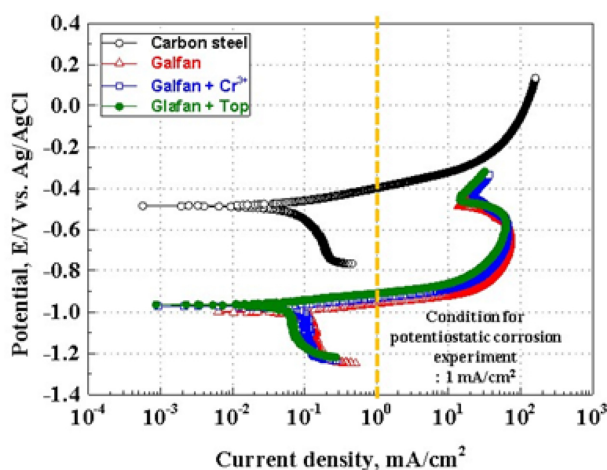
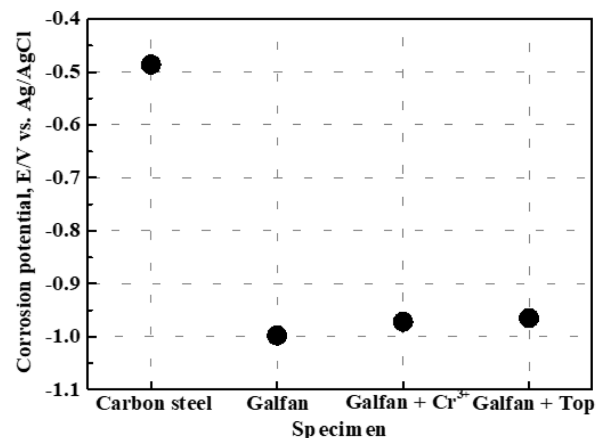


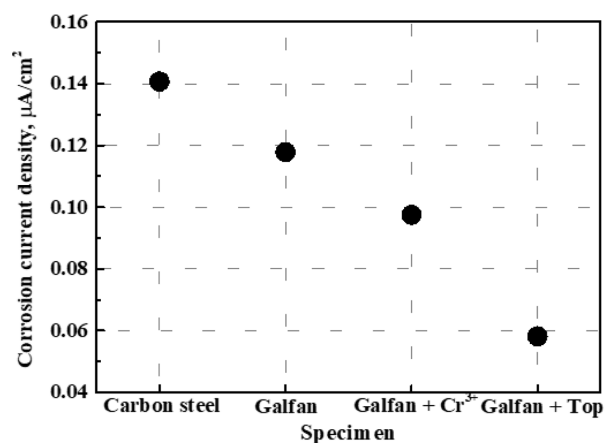
Fig. 2. Results of the potentiodynamic polarization experiment in 5 wt% NaCl solution

부동태 특성이 확인되었으나, 약  $-0.5 \sim -0.4\text{ V}$  이상의 전위에서는 전류밀도가 다시 증가하였다. 부동태 구간의 전류밀도는  $10\text{ mA/cm}^2$  이상으로 높은 값을 나타냈다. 따라서 본 연구에서 관찰된 전류밀도의 정체 및 감소 구간은 유사 부동태 구간으로 사료된다 [17].

Fig. 3은 탄소강, 갈판, 갈판+ $Cr^{3+}$  그리고 갈판+Top 코팅 시편의 동전위분극을 통해 얻은 분극곡선에 대해 타펠(Tafel) 외삽법으로 산출한 부식전위와 부식전류밀도 비교 그래프이다. Fig. 3a는 산출된 부식전위 비교 그래프에서, 탄소강이 가장 높은 부식 전위를, 갈판 코팅이 가장 낮은 부식전위를 나타냈다. 모든 코팅 시편이 탄소강보다 현저히 낮은 전위를 나타냈으므로 희생양극 기능은 충분히 발휘할 수 있을 것으로 사료된다. Fig. 3b의 부식전류밀도의 경우, 갈판+Top 코팅이 가장 낮은 부식전류밀도를 나타냈으며, 그 뒤를 이어 갈판+ $Cr^{3+}$ , 갈판 그리고 탄소강 순서로 증가하는 경향을 나타냈다. 갈판+ $Cr^{3+}$ 은 철보다 낮은 전기화학적 전위를 가진 아연의



(a) Corrosion potential



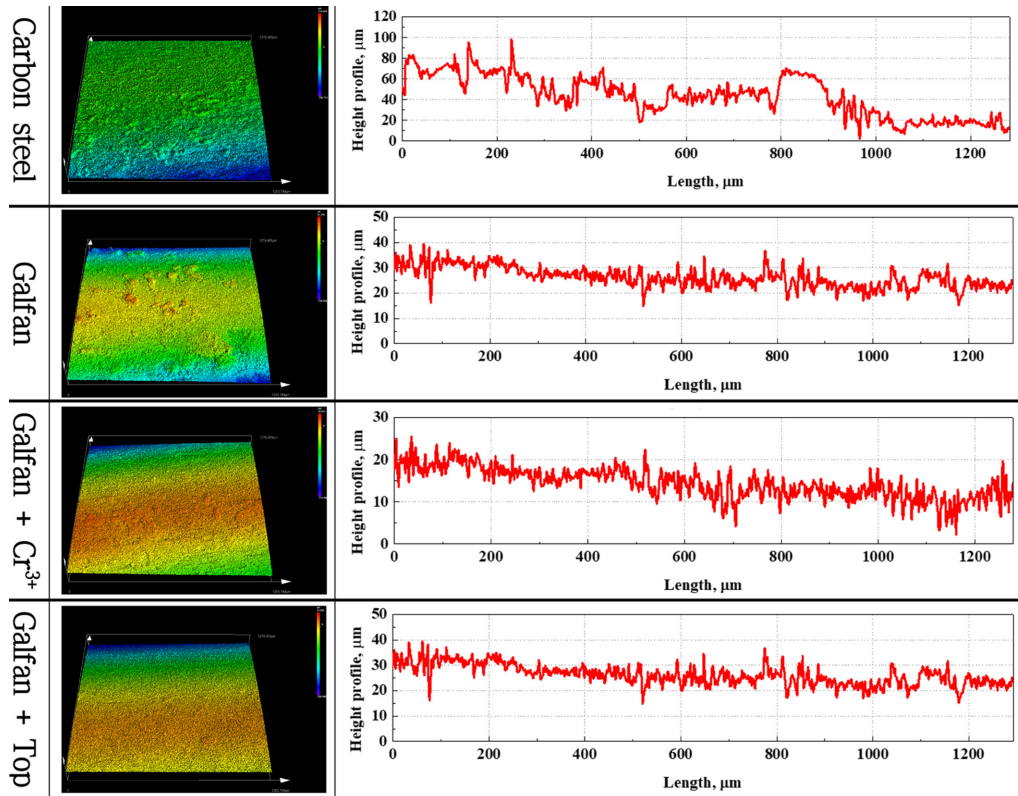
(b) Corrosion current density

Fig. 3. Results of potentiodynamic polarization experiment in 5 wt% NaCl solution

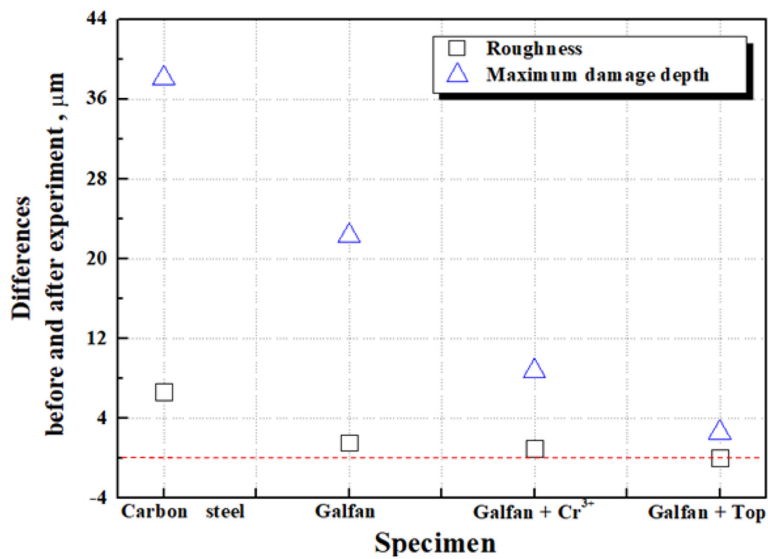
희생양극효과와 더불어, 알루미늄 산화피막과 크로메이트 피막이 아연의 산화를 방지함으로써 탄소강과 갈판 코팅보다 높은 내식성을 나타낸 것으로 판단된다 [18-22]. 갈판+Top 코팅의 경우, 갈판+Cr<sup>3+</sup>의 장점에 더해

비전도성을 가진 폴리머 코팅 혼합물이 포함되어 전기 화학적 반응을 억제함으로써 가장 낮은 부식전류밀도를 나타낸 것으로 사료 된다 [23,24].

Fig. 4a는 동전위분극실험 후 3D 현미경 분석을 통한



(a)



(b)

Fig. 4. 3D analysis images (a) and maximum damage depth (b) after potentiodynamic polarization experiment compared to pre-experiment



**Table 2. Comparison of average surface roughness with potentiodynamic polarization experiment (unit:  $\mu\text{m}$ )**

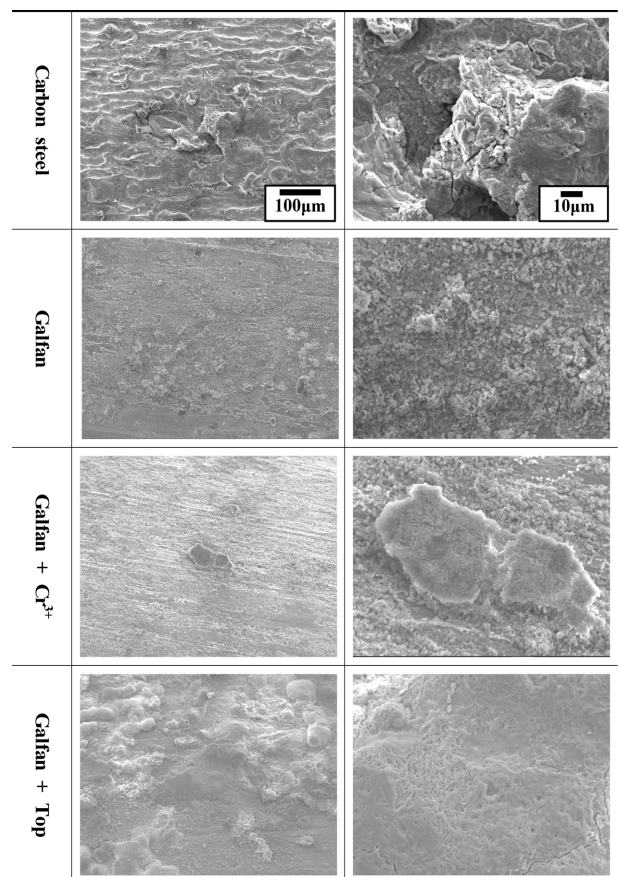
		Carbon steel	Galfan	Galfan + $\text{Cr}^{3+}$	Galfan + Top
Before		1.531	1.166	1.125	2.637
After	1	8.842	3.113	2.324	3.536
	2	6.278	2.303	2.453	2.468
	3	9.581	2.865	1.689	2.146
	Avg.	8.234	2.760	2.155	2.717
Difference		6.703	1.594	1.030	0.080

**Table 3. Comparison of average maximum damage depth with potentiodynamic polarization experiment (unit:  $\mu\text{m}$ )**

		Carbon steel	Galfan	Galfan + $\text{Cr}^{3+}$	Galfan + Top
Before		10.783	3.788	5.181	21.242
After	1	49.205	25.819	10.317	25.956
	2	48.554	22.920	16.076	23.002
	3	48.910	29.585	15.392	22.596
	Avg.	48.890	26.108	13.928	23.851
Difference		38.107	22.320	8.747	2.609

시험편의 표면거칠기 및 최대손상깊이 분석 결과를 나타낸 것이다. 시험편 표면은 세 영역을 관찰하여 표면거칠기와 최대손상깊이 평균값을 산출하여 실험전후의 손상정도를 비교분석하였다. 모든 시험편에서 부식손상이 뚜렷하게 관찰되었다. Fig. 4b는 탄소강, 갈판, 갈판+ $\text{Cr}^{3+}$  그리고 갈판+Top 코팅 시험편의 동전위분극실험 후 3D 현미경을 사용하여 측정한 표면거칠기와 최대손상깊이의 실험 전과 후의 평균값 비교 결과이다. 동전위분극 실험 후 탄소강, 갈판, 갈판+ $\text{Cr}^{3+}$  그리고 갈판+Top 코팅 시험편의 표면 거칠기 평균값은 각각 8.234, 2.760, 2.155, 2.717  $\mu\text{m}$ 로, 최대손상깊이는 48.890, 26.108, 13.928, 23.851  $\mu\text{m}$ 로 산출되었다. 실험 전과 후의 표면거칠기 차이 값은 6.703, 1.594, 1.030, 0.080  $\mu\text{m}$ 로, 최대손상깊이 차이 값은 38.107, 22.320, 8.747, 22.914  $\mu\text{m}$ 로 산출되었다. 자세한 산출과정은 Table 2와 3에 나타났다. 실험 전후의 표면거칠기와 최대손상깊이 차이에서 갈판+Top 코팅 시험편이 모두 가장 낮은 수치를 나타냈으며, 탄소강이 가장 높은 수치를 나타냈다. 일반적으로 실험 전후 표면거칠기와 최대손상깊이 차이가 클수록 부식이 심하게 진행되었다는 것을 의미하므로, 3D 표면 분석결과는 Fig. 2와 3에서의 전류밀도 변화와 비슷한 경향을 나타냈다.

Fig. 5는 탄소강, 갈판, 갈판+ $\text{Cr}^{3+}$  그리고 갈판+Top 코팅 시험편의 동전위분극실험 후 표면 형상을 나타낸 SEM 사진이다. 탄소강에서는 심각한 손상이 발생하였으나,

**Fig. 5. SEM images of surface morphology after potentiodynamic polarization experiment**

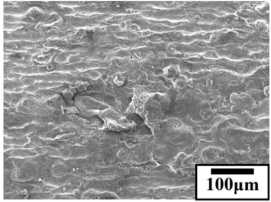
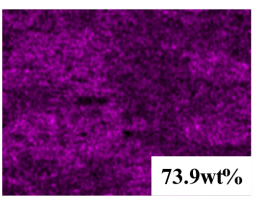
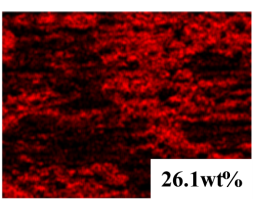
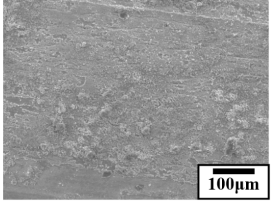
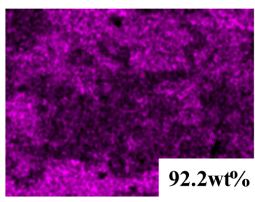
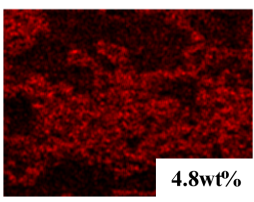
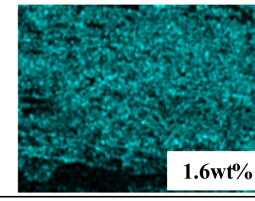
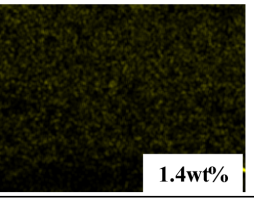
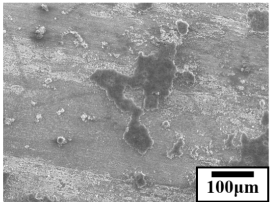
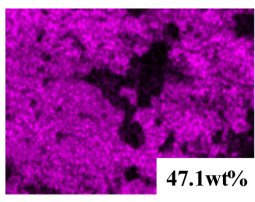
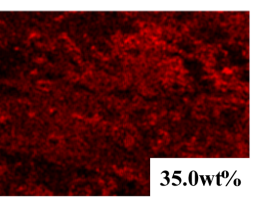
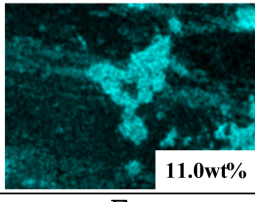
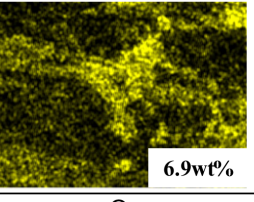
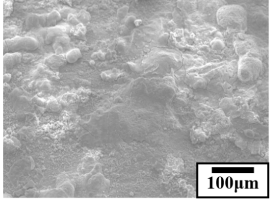
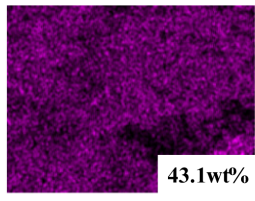
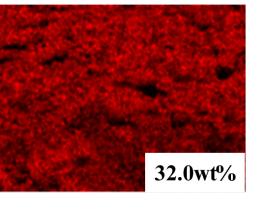
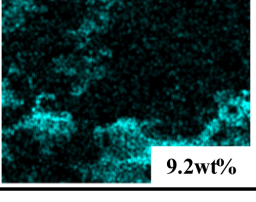
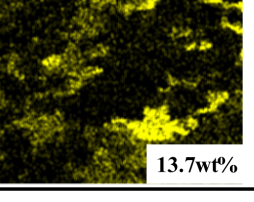
Carbon steel	Image	Fe	O
		 73.9wt%	 26.1wt%
Galfan	Image	Fe	O
		 92.2wt%	 4.8wt%
		Al	Zn
		 1.6wt%	 1.4wt%
Galfan + Cr <sup>3+</sup>	Image	Fe	O
		 47.1wt%	 35.0wt%
		Al	Zn
		 11.0wt%	 6.9wt%
Galfan + Top	Image	Fe	O
		 43.1wt%	 32.0wt%
		Al	Zn
		 9.2wt%	 13.7wt%

Fig. 6. EDS analysis results after potentiodynamic polarization experiment

갈판, 갈판+ $Cr^{3+}$  그리고 갈판+Top 코팅 시편에서는 국부적인 부식손상이 관찰되었다. Fig. 6의 EDS 분석결과에 따르면, 코팅층의 부식손상에 따라 모재에 포함된 철의 원소함량이 증가하는 경향이 나타난다. 갈판 코팅의 경우, 알루미늄과 아연 함량은 각각 1.6 wt%와 1.4 wt%로 가장 낮았고, 철 함량은 92.2 wt%로 가장 높았다. 갈판+ $Cr^{3+}$  코팅 시편에서는 철, 알루미늄, 아연 함량은 각각 47.1 wt%, 11.0 wt%, 6.9 wt%로 나타났으며, 이는 갈판코팅 시편과 비교 시 철 함량이 낮고, 알루미늄과 아연함량이 높았다. 이러한 경향은 갈판+Top 코팅 시편에서도 유사하게 나타났다. 이를 통해 갈판+ $Cr^{3+}$ 와 갈판+Top 코팅이 갈판코팅 시편의 내식성이 우수하다는 것을 알 수 있다. 전체적으로 크롬이 검출되지 않은 것은 높은 전류밀도를 적용한 동전위분극실험의 특성상 얇게 형성된 크로메이트 피막이 모두 용해된 결과로 판단된다.

Fig. 7은 탄소강, 갈판, 갈판+ $Cr^{3+}$  그리고 갈판+Top 코팅 시편에 대하여 5 wt% NaCl 수용액에서 600초 동안 안정화시킨 후  $1 \text{ mA/cm}^2$ 의 전류밀도에서 3600초 동안 정전류부식실험 시 시간에 따른 전위 변화를 나타낸 그래프이다. 실험 결과, 모든 시험편은 약간 높은 전위에

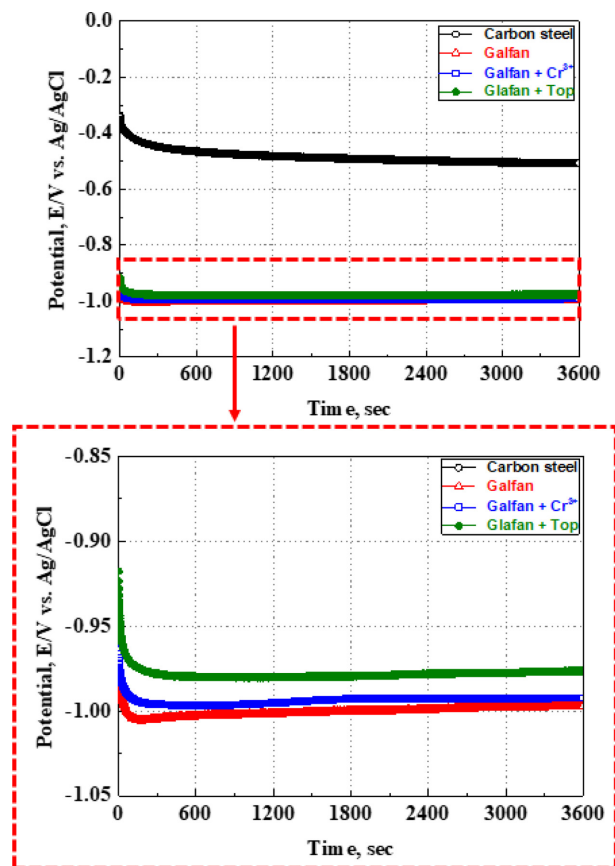


Fig. 7. Results of galvanostatic corrosion experiment in 5 wt% NaCl solution

서 시작하여 시간 경과에 따라 일정 전위를 유지하는 안정화 경향을 나타냈다. 안정화 구간에서의 전위는 갈판, 갈판+ $Cr^{3+}$ , 갈판+Top, 탄소강 시편 순으로 높은 값을 나타냈다. 갈판+Top 코팅 시편의 경우, 폴리머 코팅 재료가 다른 시편보다 전기화학적 특성 측면에서 더 불활성이다. 이러한 코팅층의 장벽역할로 전자 이동이 어려워져 상대적으로 더 높은 전위 값을 나타낸 것으로 사료된다. 일반적으로 전위가 높은 금속은 산화반응이 덜 발생하여 내식성이 우수한 경향이 있다. 특히, 금속의 갈바닉 쌍(Galvanic couple) 형성 시, 상대적으로 전위가 높은 금속은 방식되며, 낮은 금속은 부식되어 희생양극

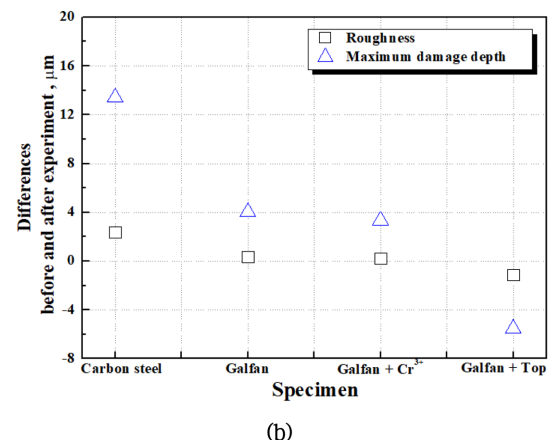
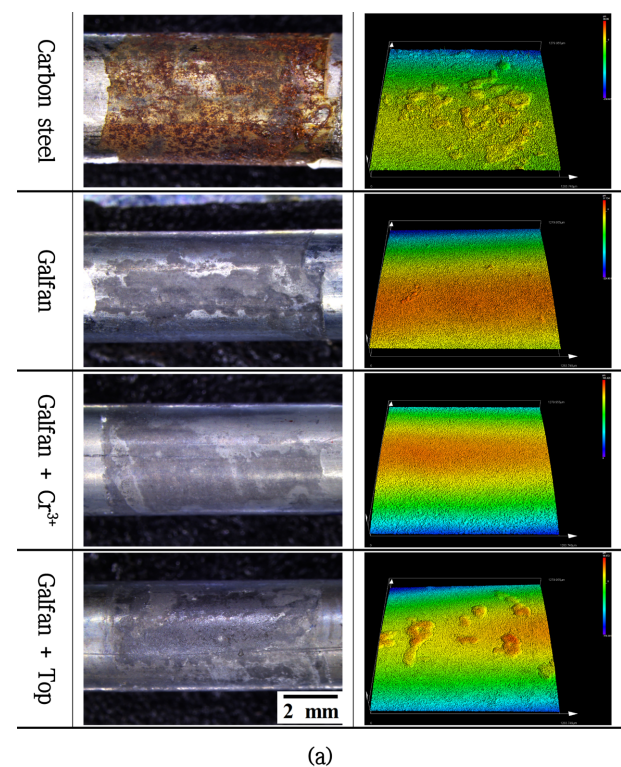


Fig. 8. Microscope (a) and 3D analysis images (b) of the specimen after galvanostatic corrosion experiment

**Table 4. Comparison of average surface roughness with galvanostatic corrosion experiment (unit:  $\mu\text{m}$ )**

		Carbon steel	Galfan	Galfan + $\text{Cr}^{3+}$	Galfan + Top
Before		1.531	1.166	1.125	2.637
After	1	1.765	1.470	1.293	1.248
	2	4.660	1.146	1.308	1.718
	3	5.324	1.981	1.444	1.615
	Avg.	3.916	1.532	1.348	1.527
Difference		2.385	0.366	0.223	-1.110

**Table 5. Comparison of average maximum damage depth with galvanostatic corrosion experiment (unit:  $\mu\text{m}$ )**

		Carbon steel	Galfan	Galfan + $\text{Cr}^{3+}$	Galfan + Top
Before		10.783	3.788	5.181	21.242
After	1	23.450	7.191	8.332	13.938
	2	26.766	8.060	8.822	20.558
	3	22.403	8.172	8.416	12.593
	Avg.	24.206	7.808	8.523	15.696
Difference		13.423	4.020	3.342	-5.546

효과를 나타낸다. 따라서 탄소강과 갈바닉 쌍 형성 시, 가장 낮은 전위 값을 나타낸 갈판 코팅의 희생양극 효과가 가장 크고, 갈판+Top 코팅 시편이 가장 작을 것으로 사료된다. 이러한 특성으로 갈판 코팅은 가장 짧은 수명이 예상되며, 갈판+Top 코팅 시편이 가장 긴 수명을 나타낼 것으로 사료된다.

Fig. 8은 정전류부식실험 후 시편의 실제현미경과 3D 현미경 이미지이다. Fig. 8(a)와 같이 탄소강에서 적청은 넓은 영역에서 관찰되었다. 그러나 코팅 시편에서 코팅 손상은 국부적으로 나타났으나, 적청은 관찰되지 않았다. Fig. 8(b)는 탄소강, 갈판, 갈판+ $\text{Cr}^{3+}$  그리고 갈판+Top 코팅 시편의 정전류부식실험 후 3D 현미경을 사용하여 측정된 표면거칠기와 최대손상깊이의 실험 전과 후 평균값 비교 결과이다. 실험 후 각 시편의 표면거칠기와 평균값은 각각 3.916, 1.532, 1.348, 1.527  $\mu\text{m}$ 로 나타났고, 최대손상깊이는 24.206, 7.808, 8.523, 15.696  $\mu\text{m}$ 로 산출되었다. Fig. 8b에서 나타내듯이 실험 전과 후의 표면거칠기 차이 값은 2.385, 0.366, 0.223, -1.100  $\mu\text{m}$ 로, 최대손상깊이 차이 값은 13.423, 4.020, 3.342, -5.546  $\mu\text{m}$ 로 산출되었다. 자세한 산출과정은 Table 4와 5에 나타났다. 실험 전후의 표면거칠기와 최대손상깊이 차이에서 탄소강이 모두 가장 큰 값을 나타냈으며, 갈판+Top 코팅 시편은 가장 낮은 음의 값을 나타냈다.

Fig. 9는 염소이온이 포함된 부식 환경에서 코팅된 시편의 표면거칠기(a) 및 손상깊이(b)를 모식도로 나타낸 것이다. 먼저, 표면거칠기 변화는 다음과 같다.  $\text{I}_1$ 은

초기 다소 거칠게 코팅된 표면을 나타낸 것이며,  $\text{II}_1$ 은 염소 이온의 영향으로 국부적으로 손상된 코팅층을 나타낸 것이다.  $\text{III}_1$ 에서 희생양극기능에 의한 모재 보호를 위해 코팅층이 지속적으로 부식되어 표면거칠기가 감소한다. 그러나  $\text{IV}_1$  과정에서 코팅층이 모두 부식되어 소모된 후 모재의 부식이 시작되어 표면거칠기는 다시 증가한다. 결과적으로,  $\text{III}_1$  과정과 같이 코팅층이 희생양극기능에 의해 완전히 소모되지 않는 경우, 실험 후 표면거칠기는 실험 전보다 낮아져 두 값의 차이는 음의 값으로 산출된다. 그리고 손상깊이 변화의 경우, 초기  $\text{I}_2$  과정에서 코팅층은 염소이온에 의한 손상으로 기판이 노출되며, 파란색 점선과 같이 산과 골의 수직 거리가 최대손상깊이가 된다.  $\text{II}_2$ 에서 나타낸 바와 같이, 희생양극기능에 의한 코팅층의 부식으로 최대손상깊이는 점차 감소한다. 그리고  $\text{III}_2$ 에서 나타내듯이 희생양극기능에 의해 코팅층이 완전히 소모되고  $\text{IV}_2$  과정을 거쳐 모재 부식이 진행되면서 최대손상깊이는 다시 증가한다. 결과적으로,  $\text{I}_2$ 에서  $\text{III}_2$  과정인 희생양극기능에 의해 코팅층이 부식되어 실험 전후 차이는 음의 값으로 산출된다. 이러한 점을 고려하면, 갈판+Top 코팅 시편이 동전위분극실험보다 더 경미한 조건에서 국부적인 손상 발생 전에 전면 부식이 진행되어 표면이 평탄해진 결과로 판단된다. 따라서 Fig. 8b의 실험 전후의 표면거칠기와 최대손상깊이 차이에서 갈판+Top 코팅 시편이 음의 값을 나타낸 것이 설명이 가능하며, 종합적인 3D 표면 분석 결과도 Fig. 7의 정전류부식실험 그래프 분석과 유사한 경



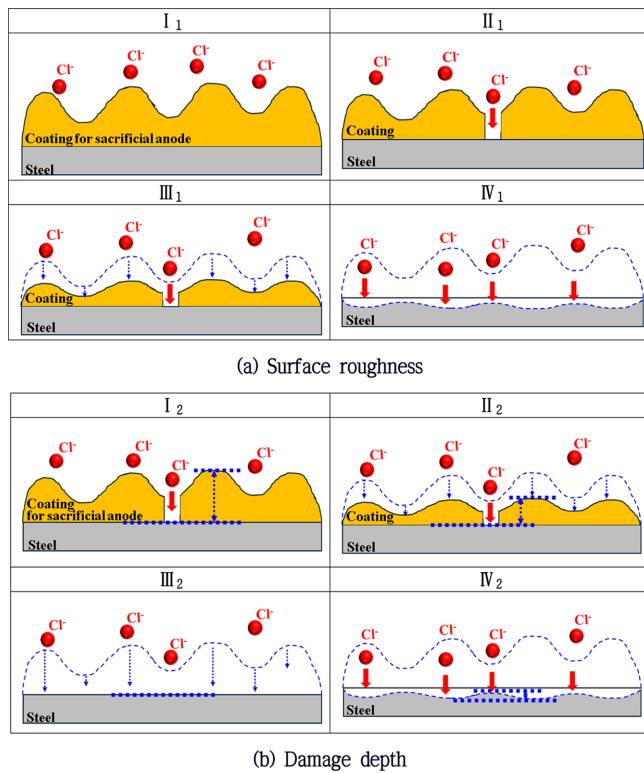


Fig. 9. Schematic diagram of surface roughness (a) and damage depth (b) of coated specimens as sacrificial anodes functioning in a chloride-ion-containing corrosive environment

향을 나타냈음을 알 수 있다.

Fig. 10은 탄소강, 갈판, 갈판+ $Cr^{3+}$ , 갈판+Top 코팅 시편의 정전류부식실험 후 표면 형태를 나타낸 SEM 사진이다. 탄소강에서 현저한 부식으로 인한 손상이 관찰되었고, 갈판 표면에서는 광범위한 마이크로크랙(microcrack)이 확인되었다. 갈판+ $Cr^{3+}$  시편은 손상 영역을 A, B, C로 나누어 분석하였으며, A 영역에서는 크롬 코팅이 부식되지 않고 여전히 존재하는 것으로 확인되었다. B 영역에서는 부식으로 인한 마이크로크랙이 관찰되었으며, C<sub>1</sub> 영역에서는 크롬 코팅층이 손상되어 갈판이 노출된 것으로 판단된다. C<sub>1</sub> 영역을 1000배 확대한 C<sub>2</sub> 영역에서는 노출된 갈판에서도 마이크로크랙이 관찰되었으며, 이는 부식으로 인해 발생한 것으로 판단된다. 그러나 갈판+ $Cr^{3+}$  시편은 갈판 시편보다 마이크로크랙 영역이 적게 관찰되었으며, 이는 코팅층에 일부 크롬이 갈판의 부식을 방지한 것으로 사료된다. 그리고 갈판+Top 시편의 손상된 코팅층의 형태는 갈판+ $Cr^{3+}$ 의 B 영역과 유사하게 관찰되었다. 그러나 갈판+Top 코팅에서는 노출된 갈판 영역( $Cr^{3+}$ 의 C 영역)이 미미하여 코팅층이 여전히 넓게 유지되고 있는 것으로 관찰되었다. 이러한 경향은 Fig. 11에 나타낸 EDS 분석 결과에서도

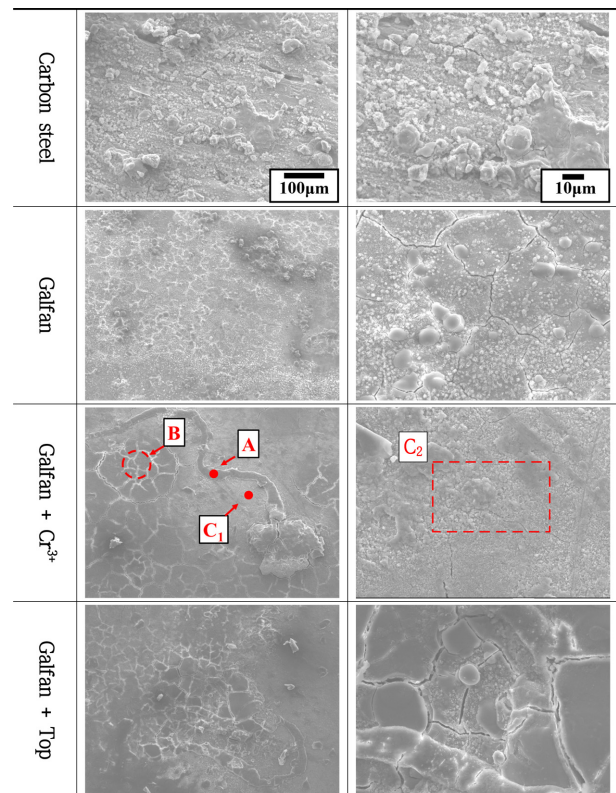


Fig. 10. SEM images of surface morphology after galvanostatic corrosion experiment

확인할 수 있었다. 모재 탄소강의 원소인 철 성분 함량이 표면 EDS 분석에서 높게 나올수록 부식 손상으로 인한 코팅층이 사라진 것으로 판단되므로, 가장 높은 3.8 wt%의 철 함량을 나타낸 갈판 코팅이 부식에 가장 취약한 것으로 평가된다. 갈판+Top 코팅의 경우, 철 함량이 가장 낮은 1.9 wt%를 나타내어 다른 시편들에 비해 우수한 내식성을 나타낸 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 탄소강에 갈판, 갈판+ $Cr^{3+}$ , 갈판+Top 코팅을 실시하여 내식성을 비교 분석하였다. 동전위분극실험과 정전류부식실험 결과, 갈판+Top 코팅기술이 적용된 탄소강이 가장 우수한 내식성을 나타냈으며, 갈판 코팅이 가장 낮은 부식 저항성을 나타냈다. 3D 현미경, SEM 표면 관찰 및 EDS 분석을 통해 동전위분극 및 정전류부식 실험 결과와 일치하는 경향을 확인하였다. 갈판+ $Cr^{3+}$  코팅은 아연의 희생양극 효과와 더불어, 알루미늄 산화피막 및 크로메이트 피막이 아연의 산화를 방지함으로써 탄소강과 갈판 코팅보다 우수한 내식성을 나타냈다. 갈판+Top 코팅은  $Cr^{3+}$  코팅의 장점에 더



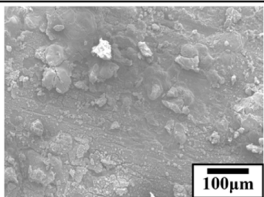
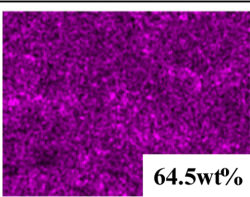
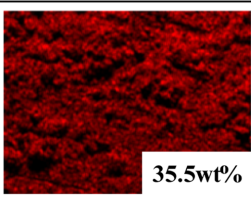
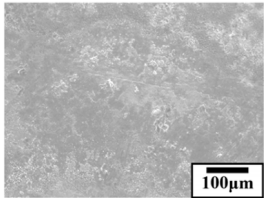
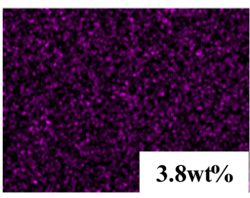
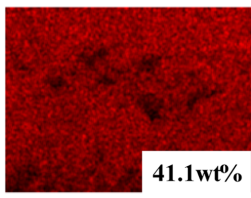
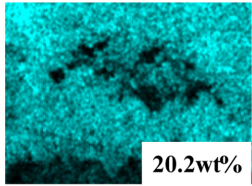
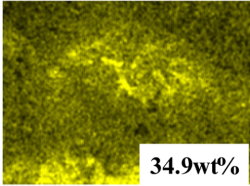
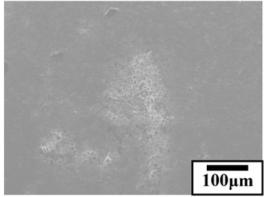
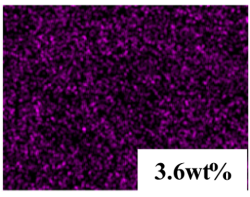
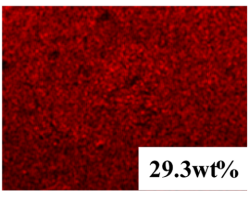
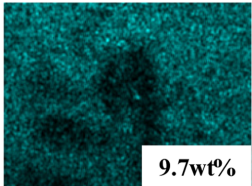
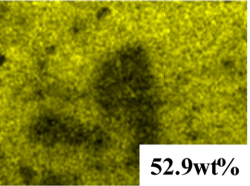
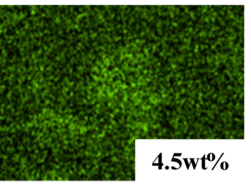
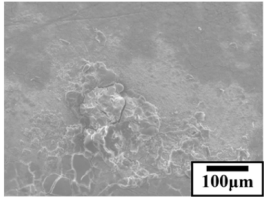
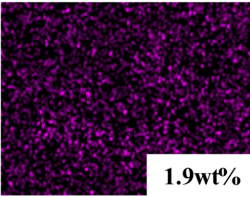
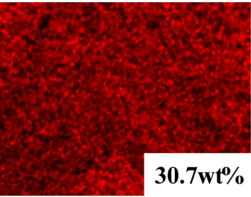
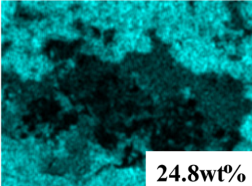
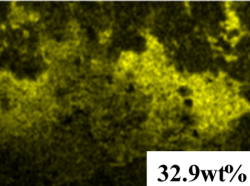
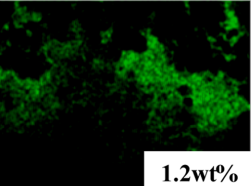
Carbon steel	Image	Fe	O
		 64.5wt%	 35.5wt%
Galfan	Image	Fe	O
		 3.8wt%	 41.1wt%
	Al	Zn	
	 20.2wt%	 34.9wt%	
Galfan + Cr <sup>3+</sup>	Image	Fe	O
		 3.6wt%	 29.3wt%
	Al	Zn	Cr
	 9.7wt%	 52.9wt%	 4.5wt%
Galfan + Top	Image	Fe	O
		 1.9wt%	 30.7wt%
	Al	Zn	Cr
	 24.8wt%	 32.9wt%	 1.2wt%

Fig. 11. EDS analysis results after galvanostatic corrosion experiment

해, 비전도성 폴리머가 포함되어 있으므로 전기화학적 반응을 억제하여 가장 낮은 부식전류밀도를 나타낸 것으로 분석된다. 본 연구는 3가 크롬 기반 코팅이 탄소강의 내식성을 효과적으로 향상시키는 방법임을 제시하며, 이를 통해 친환경적이고 지속 가능한 부식방지기술로서 3가 크롬 코팅과 폴리머 코팅의 가능성을 제시하였다.

## 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. N. V. Mandich and D. L. Snyder, *Electrodeposition of Chromium*, p. 205, Wiley & Sons, New York (2011). Doi: <https://doi.org/10.1002/9780470602638.ch7>
3. J. M. Prabhakar, R. S. Varanasi, C. C. d. Silva, Saba, A. d. Vooy, A. Erbe, and M. Rohwerder, Chromium Coatings from Trivalent Chromium Plating Baths: Characterization and Cathodic Delamination Behaviour, *Corrosion Science*, **187**, 109525 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109525>
4. S. Yeo, J. H. Kim, and H. S. Yun, Effect of Pulse Current and Coating Thickness on the Microstructure and FCCI Resistance of Electroplated Chromium on HT9 Steel Cladding, *Surface and Coatings Technology*, **389**, 125652 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125652>
5. 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>
6. 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>
7. 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>
8. 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>
9. S. Hesamedini and A. Bund, Trivalent Chromium Conversion Coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*, **16**, 623 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11998-019-00210-9>
10. T. T. H. Nguyen, N. P. Thi, T. L. Ba, V. U. Van, B. L. Duc, and T. A. Nguyen, Effects of Nano-SiO<sub>2</sub> and Trivalent Chromium Conversion on Corrosion Resistance of NiZn-plated Steel: towards a Multilayer Coating for Steel Protection, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, **70**, 1 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1108/ACMM-08-2022-2691>
11. G. Grundmeier, W. Schmidt, and M. Stratmann, Corrosion Protection by Organic Coatings: Electrochemical Mechanism and Novel Methods of Investigation, *Electrochimica Acta*, **45**, 2515 (2000). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(00\)00348-0](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(00)00348-0)
12. J. Qi and W. Li, *Conversion Coatings for Magnesium and its Alloys: Chromium-Based Conversion Coatings*, p. 49, Springer, Boston (2022). Doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-89976-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89976-9_3)
13. F. Peltier and D. Thierry, Review of Cr-Free Coatings for the Corrosion Protection of Aluminum Aerospace Alloys. *Coatings*, **12**, 518 (2022). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings12040518>
14. 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>
15. 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>
16. 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>
17. 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](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4825-3_4)
18. 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>
19. 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>
20. 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>
21. 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>
22. 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 Environment, *Scientific Reports*, **13**, 14311 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41629-w>
23. J. E. Edy, H. N. McMurray, K. R. Lammers, 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>
24. 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>