

## 플랜트팜용 3원계 (Zn-Al-Mg) 합금도금 강판의 국부손상에 따른 부식 메커니즘

박진성<sup>1</sup> · 이재원<sup>2</sup> · 김성진<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>순천대학교 첨단신소재공학과

<sup>2</sup>포항금속소재산업진흥원

(2023년 4월 17일 접수, 2023년 4월 20일 수정, 2023년 4월 21일 채택)

## Corrosion Mechanism According to Localized Damage of Zn-Al-Mg Alloy Coated Steel Sheet Used in Plant Farm

Jin Sung Park<sup>1</sup>, Jae Won Lee<sup>2</sup>, and Sung Jin Kim<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Advanced Materials Science and Engineering, Suncheon National University,

Jungang-ro, Suncheon 57922, Republic of Korea

<sup>2</sup>POMIA (Pohang Institute of Metal Industry Advancement), 56 Jigok-ro, Pohang 790-834, Republic of Korea

(Received April 17, 2023; Revised April 20, 2023; Accepted April 21, 2023)

This study aimed to evaluate corrosion resistance of steel coated with GI and Zn-Al-Mg alloy using cyclic corrosion test (CCT) with electrochemical polarization and impedance measurements. Results showed that the Zn-Al-Mg alloy coated steel had a much higher corrosion rate than GI coated steel in early stages of corrosion. With prolonged immersion, however, the corrosion rate of the Zn-Al-Mg alloy coated steel greatly decreased, mainly owing to a significant decrease in the cathodic reduction reaction and an increase in polarization resistance at the surface. This was closely associated with the formation of protective corrosion products including  $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Zn}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{16}\text{CO}_3$ . Moreover, when the steel substrate was locally exposed due to mechanical damage, the kinetics of anodic dissolution from the coating layer and the formation of protective corrosion products on the surface of the Zn-Al-Mg alloy coated steel became much faster compared to the case of GI coated steel. This could provide a longer-lasting corrosion inhibition function for Zn-Al-Mg alloy coated steel used in plant farms.

**Keywords:** Zn-Al-Mg, Hot-dip galvanized steel, Corrosion, Localized damage, Electrochemical polarization test

### 1. 서론

세계적인 기후변화와 물부족 현상으로 인하여 농산물의 안정적인 공급이 사회적 이슈로 관심이 높아지고 있다. 이에 따라, 농작물의 안정적인 생산 및 공급을 위한 스마트 플랜트팜(Smart plan farm) 구축에 대한 관심이 증가하고 있으며, 설비의 규모는 점차 대형화되고 있다. 하지만, 온난 다습한 환경이 반복되는 플랜트팜 설비 내 적용되는 금속재료의 소재 및 부품은 부식환경에 지속적으로 노출될 수 있어, 우수한 기계적 물성뿐만 아니라 구조물의 장기적 사용수명 보증을 위

한 고내식 특성이 요구되고 있다. 이에 대하여, 간단한 처리 공정 및 희생방식 특성을 바탕으로 경제적이면서 고내식 특성 구현이 가능한 아연도금강재가 플랜트팜 내 적용 가능성이 높은 것으로 평가되고 있다. 하지만, 설비 형상 제작을 위한 기계적 가공 및 용접 등이 수반되는 경우, 도금층 내 균열형성 및 아연 휘발로 인하여 국부적으로 소지금속이 노출될 가능성이 존재한다 [1,2]. 이때, 아연 단일 도금층의 경우 국부적 노출 영역에 대한 소지 철 보호 성능이 상대적으로 부족하다는 한계가 지적되었다. 따라서, 학계 및 산업계에서는 도금재의 용접성 향상 및 국부적 노출영역에 대한 내식성 향상을 위해 합금화 열처리 및 추가적인 합금 원소 첨가를 통해 아연 단일 도금재의 부족한 성능을 보완하고자 노력해오고 있다 [3,4]. 이에 대한 노력의

<sup>†</sup>Corresponding author: [sjkim56@scnu.ac.kr](mailto:sjkim56@scnu.ac.kr)

박진성: 박사과정, 이재원: 연구원, 김성진: 교수

일환으로 개발된 Zn-Al-Mg 기반의 3원계 합금도금은 기존 아연 도금 내 Al 및 Mg이 포함된 2원 및 3원 공정상을 형성하여 아연도금 대비 희생방식 보호 성능을 개선시킨 제품으로 알려져 있다 [5,6]. 뿐만 아니라, 현재까지도 학계에서는 3원계 합금도금재의 보다 높은 내식성 확보를 위한 다양한 연구가 지속적으로 수행되고 있다 [3,6,7]. 대다수의 선행연구는 SST (Salt spray test) 및 CCT (Cyclic corrosion test)와 같은 가속부식 실험을 통한 적청 발생 시간을 기준으로 내식성 평가에 초점을 두고 있다. 하지만, 전기화학적 관점에서 도금재의 국부적인 손상 유무에 따른 분극 거동 및 임피던스의 변화를 기반으로 한 부식거동의 해석은 상대적으로 부족한 실정이다.

본 연구는 1원계 용융아연도금 강재(Galvanizing, GI) 및 3원계 합금아연도금 강재 (Zn-Al-Mg)를 대상으로 한 전기화학적 분석을 토대로 부식거동을 비교·분석하고자 한다. 아울러, 도금층의 국부손상에 의해 소지철의 특정 면적이 노출된 조건에서 도금층의 보호성능을 비교하기 위해, 도금층에 일정한 면적의 인위적 손상을 인가한 후 침지 시간에 따른 부식 형상 및 손상 수준의 변화를 비교하고 이를 전기화학적 거동과 연관지어 해석하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편 정보

본 연구에 사용된 시험편은 두 가지 도금강판(GI (Zn-0.03% Al) 및 Zn-Al-Mg (Zn-1.5% Al-1.5% Mg)) 이다. 도금 시험편의 경우, 용융도금 전 강재 표면 산화물 형성을 억제하기 위해 5% 수소분위기에서 환원 열처리를 진행하였다. 열처리 직후, 440~460 °C로 유지되고 있는 도금욕에 침지하여 시험편 추출과 동시에 합금상 형성 및 도금층 두께 조절을 위해 도금 표면은 Air-knife 처리되었다.

### 2.2 복합가속부식시험 및 부식생성물 분석

도금 시험편의 적청 발생 시간을 기준으로 한 도금층의 내식성을 평가하기 위해 염수분무(5 wt% NaCl), 습윤 및 건조 분위기에 반복적으로 노출되는 복합가속부식평가를 pH 6.5~7.0 조건에서 수행하였다. 이후, 표면에 형성되는 부식생성물의 형상관찰 및 상분석을 위해 각각 FE-SEM (Field-emission scanning electron microscopy) 및 XRD (X-ray diffractometer)가 활용되었다.

### 2.3 전기화학적 선형분극저항 및 임피던스 분석

시험편별 전기화학적 부식거동 분석을 위해 작업전극

(Working electrode, WE), 상대전극(Counter electrode, CE), 기준전극(Reference electrode, RE)의 3 전극을 기반으로 한 선형분극저항(Linear polarization resistance, LPR) 및 임피던스(Electrochemical Impedance spectroscopy, EIS) 실험이 수행되었다. 기준전극 및 상대전극의 경우, 각각 포화 칼로멜 전극(Saturated calomel electrode, SCE) 및 Pt 전극을 사용하였다. LPR 실험의 경우, 개방회로 전위(Open circuit potential, OCP)를 기준으로 -0.02 ~ 0.02 V 구간의 전위를 0.2 mV/s의 속도로 인가하며 도출되는 전류밀도를 측정하는 방식으로 수행되었다. 실험에서 획득한 Semi-log 형태의 분극 곡선은 Wagner Traud (equation 1) [8] 및 Stern Geary (equation 2) [9] 식을 통해 Fitting하여 시편별 부식속도 (mpy)를 도출하였다.

$$i = i_{corr} \left[ \exp\left(\frac{2.303(E-E_{corr})}{\beta_a}\right) - \exp\left(\frac{-2.303(E-E_{corr})}{\beta_c}\right) \right] \quad (1)$$

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303 \times R_p \times (\beta_a + \beta_c)} \quad (2)$$

여기서,  $i$ ,  $i_{corr}$ ,  $E$ ,  $E_{corr}$ ,  $\beta_a$ ,  $\beta_c$  및  $R_p$ 는 각각 측정된 전류밀도(A/cm<sup>2</sup>), 부식전류밀도(A/cm<sup>2</sup>), 측정된 전위(V), 부식전위(V), 양극산화에 대한 Tafel 기울기(V/decade), 음극환원반응에 대한 Tafel 기울기(V/decade), 분극저항( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )을 의미한다.

EIS 실험의 경우, OCP 대비  $\pm 10$  mV의 전위를 100 kHz ~ 10 mHz의 주파수 범위 내에서 교류로 인가하며 측정되었다. 실험을 통해 획득한 Nyquist plot은 용액저항( $R_s$ ), Film 저항( $R_f$ ), Film 커패시터( $Q_f$ ), 금속계면의 전하 이동 저항( $R_{ct}$ ) 및 소지금속 계면의 커패시터( $Q_d$ )로 구성된 등가회로를 바탕으로 Fitting 하여 분극 저항( $R_p$ ,  $R_p = R_f + R_{ct}$ ) 값을 도출하였다.

### 2.4 도금층의 인위적 손상과 부식 거동 분석

1원계 도금재 및 3원계 합금 도금재를 대상으로 도금층 내 인위적 손상 형성 후 나타나는 부식거동을 분석하기 위해 Fig. 1a에 나타난 바와 같이 정적하중기를 활용하여 도금층 표면 내 너비 3 mm 수준의 소지금속이 노출될 수 있는 손상을 인위적으로 형성시켰다. 이 경우, 도금층/소지금속의 갈바닉쌍이 형성(예시: Fig. 1b) 될 것으로 예상된다. 이에 대한 부식거동 분석을 위해 인위적 도금층 손상이 형성된 시험편을 대상으로 3.5 wt% NaCl 수용액 내 3일간 침지 후 선형분극저항 및 임피던스 실험을 수행하였다. 또한, 장기적 부식 형상 관찰을 위해 14일간 3.5 wt% NaCl 용액 내 침지 후 표면 부식형상을 관찰하였다.

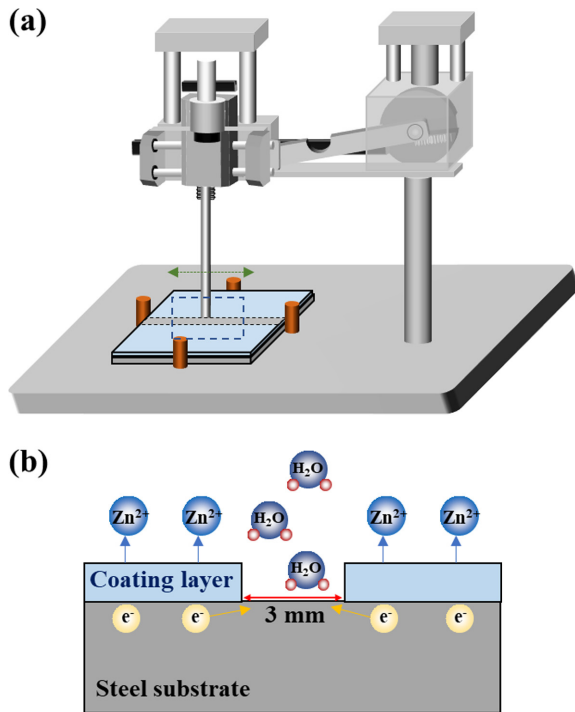


Fig. 1. Schematic diagram showing (a) the constant loading device used for making artificial damage on the coating layer, and (b) the galvanic corrosion cell between the steel substrate and Zn coating

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 복합가속 부식거동 및 전기화학적 분극 거동 분석

Fig. 2는 100 및 200 cycle 동안 복합가속부식실험을 진행한 후 관찰된 두 가지 도금강재 시편의 표면 부식 형상을 나타낸다. 100 cycle 수준에서 소지철의 부식생성물(적녹)이 관찰된 GI 도금 시편과 달리 3원계 합금 도금 시편은 200 cycle이 진행됨에도 불구하고 적녹의

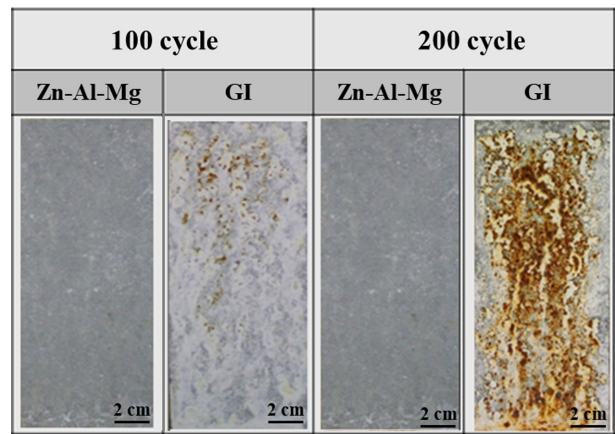


Fig. 2. Surface views of the coated steel samples after CCT

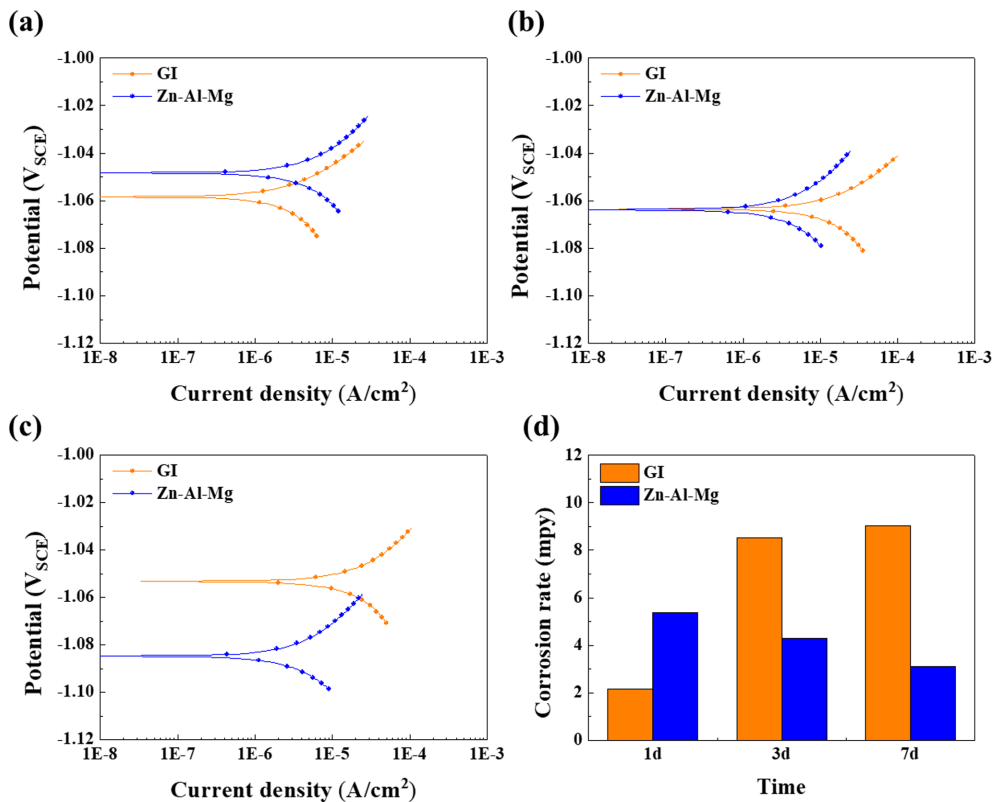


Fig. 3. LPR curves of the coated steel samples, measured after (a) 1 day, (b) 3 days, and (c) 7 days in a 3.5 wt% NaCl solution, and (d) the corrosion rate (mpy) determined by curve-fitting to LPR data

발생이 관찰되지 않았다.

전기화학적 부식거동 분석을 위한 선형분극저항 실험 결과(Fig. 3), 상대적 초기 시점(1 d)에서 측정된 부식속도는 GI 대비 3원계 합금도금재가 2배 이상 높게 나타났다. 이는 합금도금재의 주요 구성상으로 알려진 금속 간화합물(MgZn<sub>2</sub>)의 전기화학적 전위(-1.5 V<sub>SCE</sub>)가 조정 Zn (-0.99 V<sub>SCE</sub>)대비 낮아 [10,11] 표면에서 우선 용출됨에 기인한 결과로 판단된다. 이는 갈바닉 전류 측정 실험(면적비=1:1)에서 Zn 대비 MgZn<sub>2</sub>가 양극으로 작용하여 MgZn<sub>2</sub>에서 Zn로 전자가 제공되는 것으로 보고된 선행연구결과 [11,12] (Fig. 4 참조)와 동일한 맥락에서 이해될 수 있다.

반면, 침지 기간이 장기화(3-7 d) 됨에 따라 측정된 부식속도는 3원계 합금도금재 대비 GI에서 높게 측정되었고 그 차이는 점차 증가하였다. 이는 침지 장기화에 따라 3원계 합금도금재 표면에 형성되는 부식생성물의 안정도 및 치밀도가 지속적으로 높아짐에 따른 결과로 예상된다. 침지 장기시점의 분극곡선에서 나타난 바와 같이 3원계 합금도금재의 음극환원량이 GI의 그것 대비 현저히 낮음을 토대로 합금도금재 표면에 형성된 부식생성물이 산소환원반응( $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ )을 억제하는 데에 특히 효과적인 것으로 판단되며 이는 장

기적으로 양극용해량을 감소시켜 내식성을 향상시키는 요인이 될 것이다. 합금도금재 표면에 형성된 부식생성물에 대한 자세한 분석은 3.2절에서 논의하기로 한다.

Fig. 5는 전기화학적 임피던스를 통해 측정된 Nyquist plot을 나타낸다. 측정된 Nyquist plot의 형태는 도금층/부식생성물이 표면에 형성된 것에 기인하여 고주파수와 저주파수에서 각각 측정된 2개의 Semi-circle이 겹쳐진 형태로 나타났다. 하지만, GI의 경우 침지 기간이 장기

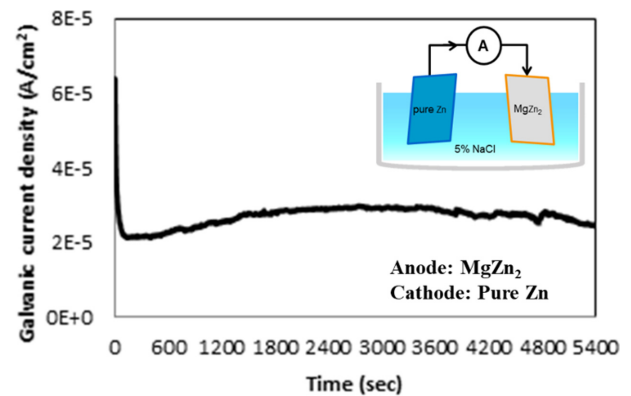


Fig. 4. Galvanic current density between the MgZn<sub>2</sub> and Zn in a 5 wt% NaCl solution [12]

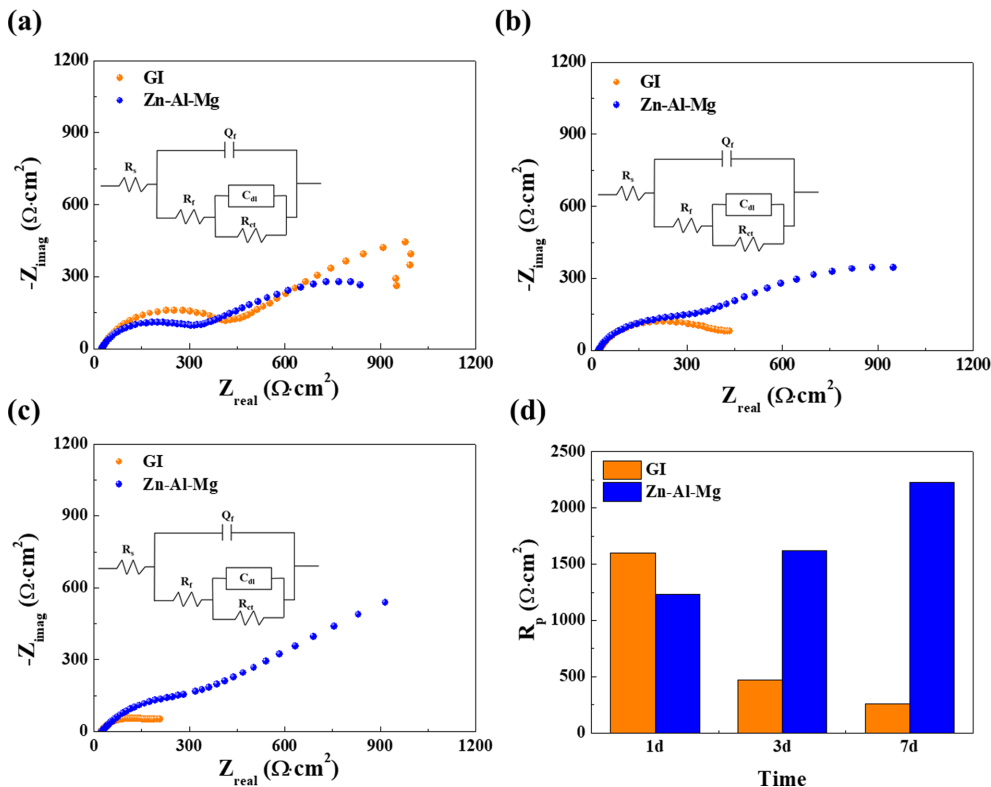


Fig. 5. EIS Nyquist plots of the coated steel samples, measured after (a) 1 day, (b) 3 days, and (c) 7 days in a 3.5 wt% NaCl solution, and (d) the changes in polarization resistance ( $R_p$ ) with immersion times

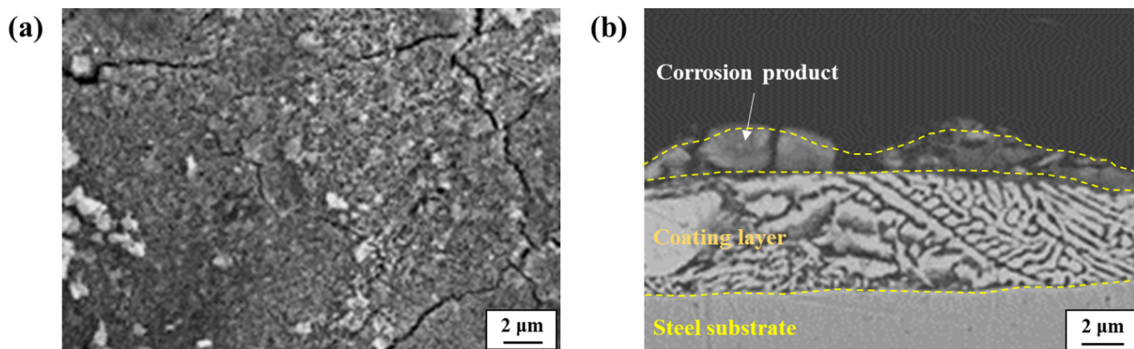


Fig. 6. FE-SEM images showing the (a) surface and (b) cross-section morphologies of the Zn-Al-Mg alloyed coated steel sample, observed after CCT for 200 cycles

화됨에 따라 저주파수에서 측정되는 Semi-circle이 크게 구분되지 않았으며 1개의 Semi-circle만이 측정된 것 같은 형태가 나타났다. 일반적으로, 저주파수에서 측정되는 Semi-circle은 표면에 형성된 도장/도금층 혹은 부식 생성물과 같은 Film의 저항( $R_f$ )에 대한 정보를 나타내는 것으로 알려져 있다 [13]. 이를 고려할 때, 침지 장기화에 따라 GI 표면에 형성되는 부식생성물은 치밀도가 낮아 효과적인 보호기능을 제공하기 어려운 것으로 판단할 수 있다. 한편, 측정된 분극저항( $R_p + R_{ct}$ )은 선형분극저항 측정 결과와 동일한 경향으로, 침지 초기 시점(1 d)에서의 분극저항은 GI가 3원계 합금도금재 대비 상대적으로 높은 수준으로 측정되었으나, 침지 장기화에 따라 GI 대비 3원계 합금도금재의 분극저항이 크게 증가하여 보다 높게 측정되었다. S. Nešić *et al.* [14]의 선형연구에 따르면, 수용액 환경 내 장기적 내식성은 표면생성물 내 기공 및 결함 수준 등에 크게 의존하는 것으로 보고된 바 있다. 따라서, 3원계 합금도금재 표면에 형성되는 부식생성물은 안정도 및 치밀도가 점차 증가하여 도금층/용액 계면에서 이온의 이동 및 전자전달반응이 상대적으로 억제될 수 있는 것으로 판단된다.

### 3.2 부식생성물 분석

Fig. 6은 복합가속부식 실험(200 cycles) 후 3원계 합금도금재의 표면 및 단면 부식형상을 나타낸다. 도금층 표면에 형성된 부식생성물에는 일부 균열과 같은 결함이 존재하였지만 전체적으로 균일한 형상을 나타내었고 하부 도금층 또한 손상수준이 극히 낮은 것으로 관찰되었다. 또한, EDS 성분 분석 결과, 부식생성물 내 일부 Mg 성분이 검출되었다. 이는,  $MgZn_2$  상으로부터 Mg의 우선적인 양극용해로 인해  $Mg(OH)_2$ 와 같은 생성물의 형성으로 나타난 결과로 해석할 수 있다 [11]. Fig. 7은 표면에 형성된 부식생성물의 XRD 분석 결과를 나타낸다. 3원계 합금도금재의 부식생성물에는 GI의 대표적인 생성물로 알려진 ZnO 뿐만 아니라 상대적으로 치밀한 특

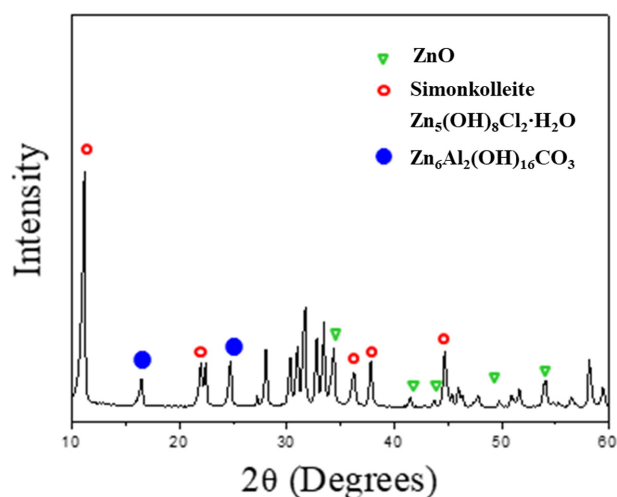


Fig. 7. XRD pattern of Zn-Al-Mg alloyed coated sample, obtained after CCT for 200 cycles

성을 갖는 것으로 알려진 Simonkolleite ( $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$ ) 및  $Zn_6Al_2(OH)_{16}CO_3$ 가 측정되었다 [15,16]. 이러한 두 가지 생성물의 복합형성이 계면에서의 이온의 이동 및 전자전달반응을 억제하여 환원반응을 효과적으로 제어하며 내식성이 점차 증가하는 것으로 판단된다.

### 3.3 도금층의 인위적 손상형성 후 부식거동 분석

Fig. 8은 GI 및 3원계 합금도금재에 일정면적의 인위적 손상을 형성시킨 후 Cut-edge 부를 실링하고 3.5 wt% NaCl 용액 내에서 침지한 시편들의 시간에 따른 표면 부식 형상을 나타낸다. GI의 경우, 국부적으로 소지철이 노출된 영역 인근에서 도금층의 손상이 진행되었으며 침지 기간이 장기화됨에 따라 손상 영역이 점차 넓어지는 형상을 나타내었다. 또한, 다량의 도금층 탈락 및 Blister 영역이 관찰되었으며 14 d 침지 시점에서 적 녹이 다량 발생한 것을 확인할 수 있었다. 반면, 3원계 합금도금재의 경우 인위적 손상영역에서 초기 부식반응이 집중되었으나, 인근영역으로의 추가적인 부식 손상



은 관찰되지 않았으며 부식생성물이 손상 영역 표면부에 빠르게 형성되었다. 또한, 14 d 침지 기간에도 불구하고 도금층의 탈락 또는 적록발생은 관찰되지 않았다.

이에 대한 전기화학적 부식 거동을 분석하기 위해 3.5

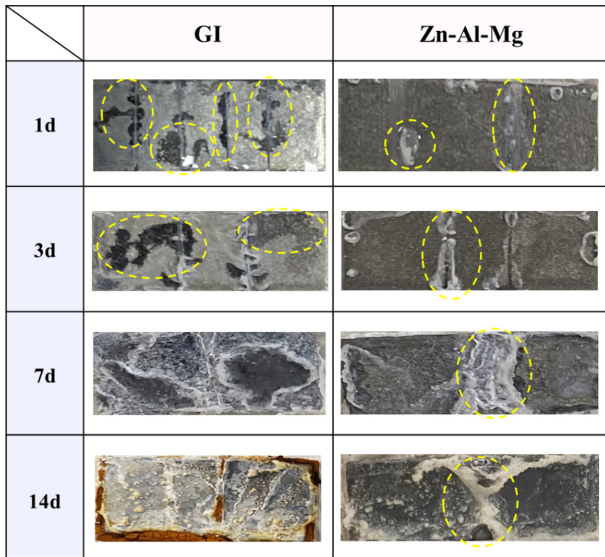


Fig. 8. Surface views of the coated steel samples after immersion in a 3.5 wt% NaCl solution for 14 days

wt% NaCl 수용액 내 1일 및 3일간 침지 후 선형분극 저항 및 임피던스 실험을 수행하였고 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 인위적 손상이 없는 조건에서 수행된 선형분극저항 및 임피던스 실험 결과 Fig. 3 and 5)와 달리, 상대적 초기 시점(1 d)에서도 GI 대비 3원계 합금도금재의 부식전류밀도가 낮았고 분극저항은 높게 측정되었다. 이는 인위적 갈바닉쌍이 형성되어 있는 조건에서 초기 도금층의 양극용해 속도가 현저히 가속되어 [17], 1 d 시점에서도 3원계 합금도금재 표면에 치밀한 형태의 부식생성물이 형성됨에 따른 결과로 예측된다. 즉, 노출 극초기 시점(3 h 이내)에서는 도금층의 빠른 양극용해 속도를 나타내었을 것으로 예상되나, 극초기 시점 이후 GI와 비교하여 동일 기간 노출에도 불구하고 내식성 회복 수준이 빠른 것으로 판단할 수 있다. 반면, GI의 경우 안정적인 부식생성물 형성이 제한되고 Zn 도금층의 지속적인 양극용해가 이루어지는 것으로 예상할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 GI 및 Zn-Al-Mg의 3원계 합금도금강재를 대상으로 복합가속부식시험, 전기화학적 분극 및 임피던스 실험을 통해 중성의 염수 환경 내 부식거동을

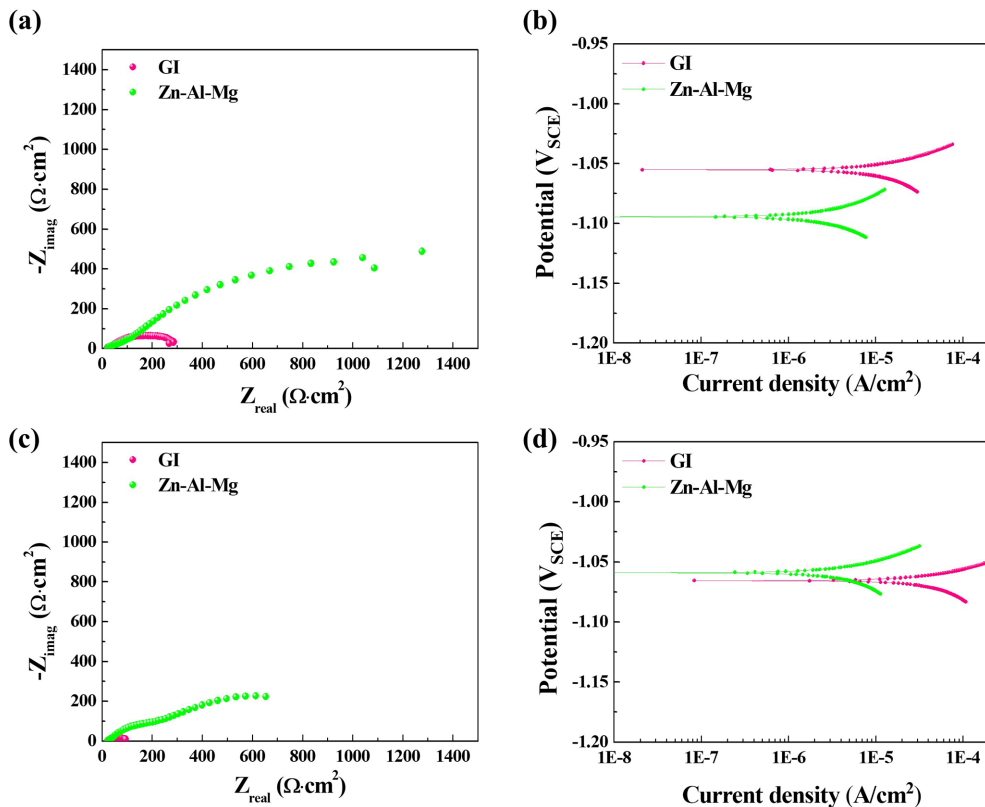


Fig. 9. (a,c) EIS Nyquist plots and (b,d) LPR curves of the coated steel samples, measured in a 3.5 wt% NaCl solution for (a,b) 1 day and (c,d) 3 days

규명하고자 하였고, 도금층 내 인위적 손상 형성에 따른 부식거동의 변화를 비교 분석하였다.

3원계 합금도금재는 부식환경 내 노출 초기시점에서 Mg을 포함한 금속간화합물(MgZn<sub>2</sub>)의 우선 용해에 기인하여 GI 대비 부식속도가 높았다. 하지만, 노출 기간이 장기화됨에 따라 표면에 치밀한 구조의 부식생성물 (Zn<sub>5</sub>(OH)<sub>8</sub>Cl<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O, Zn<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(OH)<sub>16</sub>CO<sub>3</sub>)이 형성되며 도금층 표면에서 부식성 이온의 접근 및 전자전달반응이 효과적으로 억제되며 음극환원반응이 현저히 감소하였다.

또한, 도금층에 일정한 면적의 인위적 손상영역을 형성하여 소지철이 노출되는 경우 침지 초기 3원계 합금도금재의 도금층 구성상으로부터 양극용해를 통한 희생양극적 보호속도가 현저히 가속되며, 손상영역 내 안정적인 부식생성물 또한 빠르게 형성되어 소지철 노출영역에 대한 보호성능이 우수하게 유지되었다. 이를 토대로, 플랜트팜용 소재·부품제작 시 수반되는 가공 및 용접공정에 기인하여 적용 도금강재의 도금층 내 국부적인 손상이 발생하더라도 3원계 합금도금재의 경우 GI 대비 내식성 회복의 속도가 현저히 빠르며 장기적인 수명보증이 가능할 것으로 사료된다.

### Acknowledgement

This work was supported by the Technology Innovation Program (20015158, Development of processing and fastening technology to minimize damage to the plating layer of highly corrosion-resistant, highly-formed plated steel materials for plant farms.) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea). In addition, this research was supported in part by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2022R1A2C4001255).

### References

1. G. Li and X. Long, Mechanical behavior and damage of zinc coating for hot dip galvanized steel sheet DP600, *Coatings*, **10**, 202 (2020). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings10030202>
2. Z. Wen, G. Yu, S. Li, Y. Li, S. Chen, S. Chen, J. Huang, and J. Yang, Influence of Ni/Zn double coating on the steel on penetration welding-brazing by CMT arc-laser hybrid heat source, *Optics & Laser Technology*, **134**, 106602 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlas-tec.2020.106602>
3. J. W. Lee and S. J. Kim, Effects of cooling rates of coating layer on microstructures and corrosion behaviors of Zn-Al-Mg alloy coated steel sheets, *Corrosion Science and Technology*, **21**, 221 (2022). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2022.21.3.221>
4. J. H. Kim, H. S. Bang, and H. S. Bang, Evaluation of weldability for MAG and LASER with galvanized steel, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **18**, 1787 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.14996>
5. J. W. Lee, S. J. Kim, and M. S. Oh, Influence of alloy content on microstructure and corrosion resistance of Zn-based alloy coated steel product, *Korean Journal of Metals and Materials*, **58**, 169 (2020). Doi: <http://dx.doi.org/10.3365/KJMM.2020.58.3.169>
6. T. Shimizu, H. Asada, and S. Morikawa, Performance of hot-dip Zn-6%Al-3%Mg alloy coated steel sheet as automotive body material, *Corrosion Science and Technology*, **9**, 74 (2010). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2010.9.2.074>
7. S. Zhou, C. Shen, S. Han, Q. Tao, and Z. Chen, Effects of Ce and In on microstructure and corrosion properties of Zn-9Al-2.5Mg alloy, *Materials Research Express*, **6**, 086508 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab120f>
8. C. Wagner and W. Traud, Über die Deutung von Korrosionsvorgängen durch Überlagerung von elektrochemischen Teilvorgängen und über die Potentialbildung an Mischelektroden, *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie*, **44**, 391 (1938). Doi: <https://doi.org/10.1002/bbpc.193804407028>
9. M. Stern and A. L. Geary, Electrochemical polarization: I. A theoretical analysis of the Shape of polarization curves, *Journal of the electrochemical society*, **104**, 56 (1957). Doi: <https://doi.org/10.1149/1.2428496>
10. M. S. Oh, S. H. Kim, J. S. Kim, J. W. Lee, J. H. Shon, and Y. S. Jin, Surface and cut-edge corrosion behavior of Zn-Mg-Al alloy-coated steel sheets as a function of the alloy coating microstructure, *Metals and Materials International*, **22**, 26 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1007/s12540-015-5411-9>
11. J. W. Lee, B. R. Park, S. Y. Oh, D. W. Yun, J. K. Hwang, M. S. Oh, and S. J. Kim, Mechanistic study on the cut-edge corrosion behaviors of Zn-Al-Mg alloy coated steel sheets in chloride containing environments, *Corrosion Science*, **160**, 108170 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108170>
12. J. W. Lee, S. Y. Oh, B. R. Park, M. S. Oh, and S. J. Kim, Corrosion behaviors of the eutectics structure in Zn-Al-Mg

- alloy coated steel in chloride containing aqueous environment, *Korean Journal of Metals and Materials*, **58**, 610 (2020). Doi: <http://dx.doi.org/10.3365/KJMM.2020.58.9.610>
13. A. Cristoforetti, S. Rossi, F. Deflorian, and M. Fedel, On the limits of the EIS low-frequency impedance modulus as a tool to describe the protection of organic coatings exposed to accelerated aging tests, *Coatings*, **13**, 598 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings13030598>
  14. S. Nešić, M. Nordsveen, R. Nyborg, and A. Stangeland, A mechanistic model for carbon dioxide corrosion of mild steel in the presence of protective iron carbonate films-part 2: a numerical experiment, *Corrosion*, **59**, 489 (2003). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3277579>
  15. N. C. Hosking, M. A. Ström, P. H. Shipway, and C. D. Rudd, Corrosion resistance of zinc-magnesium coated steel, *Corrosion Science*, **49**, 3669 (2007). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.03.032>
  16. J. W. Lee, I. J. Son, and S. J. Kim, Newly designed surface control using Si addition in trace quantity for Zn-2Al-3Mg alloy coated steel sheet with improved corrosion resistance, *Applied Surface Science*, **598**, 153868 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153868>
  17. D. P. B. Nergis, D. D. B. Nergis, and C. Bejinariu, Galvanic corrosion behavior of different types of coatings used in safety systems manufacturing, *Coatings*, **11**, 1542 (2021). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings11121542>