

Zn-Al-Mg 합금도금강판의 도금 층 냉각속도 제어에 따른 미세조직 및 부식거동 분석

이재원¹ · 김성진^{2,†}

¹포항금속소재산업진흥원 소재솔루션연구실, 경상북도 포항시 지곡로 56

²순천대학교 신소재공학과, 전라남도 순천시 중앙로 255

(2022년 6월 11일 접수, 2022년 6월 21일 수정, 2022년 6월 21일 채택)

Effects of Cooling Rates of Coating Layer on Microstructures and Corrosion Behaviors of Zn-Al-Mg Alloy Coated Steel Sheets

Jae-Won Lee¹ and Sung Jin Kim^{2,†}

¹Pohang Institute of Metal Industry Advancement (POMIA), Pohang 37666, Republic of Korea

²Department of Advanced Materials Engineering, Suncheon National University, Suncheon 57922, Republic of Korea

(Received June 11, 2022; Revised June 21, 2022; Accepted June 21, 2022)

To understand effects of cooling rates of coating layer on microstructures and corrosion behaviors of hot-dip alloy coated steel sheets (Zn-5%Al-2%Mg) in a neutral aqueous condition with chloride ion, a range of experimental and analytical methods were used in this study. Results showed that a faster cooling rate during solidification decreased the fraction of primary Zn, and increased the fraction of Zn-Al phase. In addition, interlamellar spacing became refined under a faster cooling rate. These modifications of the coating structure had higher open circuit potentials (OCP) with smaller anodic and cathodic current densities in the electrochemical potentiodynamic polarization. Surface analyses after a salt spray test showed that the increase in the Zn-Al phase in the coating formed under a faster cooling rate might have contributed to the formation of simonkolleite ($Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$) and hydrotalcite ($ZnAl_2(OH)_6Cl_2 \cdot H_2O$) with a protective nature on the corroded outer surface, thus delaying the formation of red rust.

Keywords: Hot dip galvanizing, Zn-Mg-Al alloy coatings, Cooling rate, Corrosion, Microstructure

1. 서론

아연도금강판은 철 대비 전기화학적 활성원소에 해당되는 아연의 희생방식효과와 표면에 치밀한 부식생성물을 형성하여 부식성 인자가 소지 철 내부로 침투됨을 억제하는 장벽효과를 토대로 강재의 수명을 연장시킬 수 있는 표면처리 제품으로 알려져 있다 [1-4]. 이는 1960년대 상용화되어 건설, 전자, 자동차산업의 소재로 적용되고 있으며, 대부분의 아연도금강판은 용융도금으로 생산하고 있다. 아연도금강판의 내식성 향상을 위한 합금원소 첨가 연구는 오래전부터 진행되어 왔으며, Al이 첨가된 Galvalume (55% Al-43.4%Zn-1.6% Si)과 Galfan (Zn-5%Al)이 먼저 상용화되었다.

Zn-Al 합금도금강판의 도금 층 미세구조는 Zn-rich 상과 Al-rich 상으로 이루어져 있어 우수한 표면 내식성을 보이지만, 절단 부위(cut-edge) 및 도금 손상부의 희생방식 효과는 기존의 아연도금 대비 열위한 특성을 나타낸다[5-8]. 1980년대에 절단 부위 및 도금 층 손상부의 내식성을 향상시킬 목적으로 기존의 Zn-Al 합금도금에 Mg을 첨가하는 연구가 진행되어 1990년대 후반에 3원계(Zn-Al-Mg) 합금도금강판이 상용화되었다[9-13]. Mg이 첨가된 합금도금강판의 우수한 내식성에 대한 메커니즘은 명확하게 규명되지 않았지만, 부식환경에서 용출된 Mg이 수분과 반응하여 음극영역에서 alkalinity를 감소시켜 치밀한 형태의 부식생성물(e.g., simonkolleite ($Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$))을 형성한다는 연구가 보고되고 있다 [14-19]. 일반적으로 용융합금도금강판의 도금 층 미세구조는 열역학적 측면에서 비평형상의

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

이재원: 연구원, 김성진: 교수

조직들로 구성되어 있다. 이는 대부분의 연속식 용융 도금공정에서는 도금두께 조절을 위해 air knife 공정이 적용되어 도금 층이 급냉 조건에서 형성되기 때문이다. 따라서 용융도금 후 급냉이 이루어지면 primary dendrite의 핵생성 촉진됨에 따라 dendrite의 수가 증가하여 최종적으로 미세한 조직이 형성될 것으로 예상된다. 또한 도금 층이 급냉되어 Zn 초정과 Zn-Al 상이 공존하는 미세구조를 가지게 되면 부식환경에서 hydroxalite ($ZnAl_2(OH)_6Cl_2 \cdot H_2O$)의 형성이 가능하여 내식성을 향상시킨다는 연구 또한 보고된 바 있다[9,16]. 하지만 대부분의 선행연구가 합금도금재의 조성 (Al 및 Mg 첨가)에 따른 도금 층의 미세구조 및 부식거동의 고찰과, 내식성 향상을 위한 최적 합금조성의 제시에 초점을 맞추어 이루어져 왔다. 반면, 특정 합금조성 하에서 냉각공정조건 변화에 따른 도금 층의 미세구조 변화와 부식거동에 대해 발표된 선행연구 결과는 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 용융도금 시플레이트에서 용융도금 후 냉각처리 조건(Natural Cooling, Air Spray, Water Spray)을 변화시키며 시편을 제작하여 도금 층의 미세구조 변화와 염수환경에서의 부식거동 및 주요 부식생성물의 형성과 내식성에 대한 상관성 측면에서 실험적, 학술적 고찰을 토대로 바람직한 냉각공정조건을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 용융합금도금강재 정보 및 도금 층 미세구조 분석

1 mm 두께의 냉연강판을 140 × 300 mm 크기로 절단하고 방청유 제거 및 탈지 후 용융도금시플레이트(HDPS, Rhescra)에서 도금을 진행하였다. 용융도금 전 5% 수소분위기에서 환원열처리를 하고 상용 Galfan (Zn-5%Al) 제품 조성에 2%Mg을 첨가한 440 °C 도금 욕에 침지하여 용융도금 후 냉각하였는데 이 과정을 용융도금시플레이트 내에서 진행하였다. 이때 냉각속도 조절을 위해 용융도금 후 Natural Cooling (공냉), Air Spray (N₂ 가스 냉각) 그리고 Water Spray (수냉)을 적용하여 냉각시켜 세 종류의 용융합금도금강판 시편을 제작하였다. 합금도금 층의 미세구조 분석을 위해 15 × 10 mm 크기로 절단하여 시편을 수직으로 hot mounting 한 후 sand paper에서 에탄올로 연마 후 최종적으로 0.25 μm 크기의 건식 연마제를 이용하여 미세연마를 하였으며, 정밀한 도금 층 미세조직 관찰을 위해 99% n-amyl alcohol + 1% nitric acid 용액 내 10초간 에칭하였다. 도금 층의 표면 및 단면 미세구조 분석을 위해 광학현미경(OM, Nikon MA200)과 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM, Hitachi SU-6600)이 각각 활용되었다.

Table 1. Conditions of salt spray test in reference to KS D 9502

Test parameters	Specification
Concentration by mass of NaCl (g/L)	50 ± 5
pH value	6.5 to 7.2
Temperature in spray cabinet (°C)	35 ± 2
Spray quantity (mL/80 cm ² /h)	1.5 ± 0.5

2.2 용융합금도금강재의 부식거동 분석

용융도금 후 냉각속도 제어에 따른 부식거동을 비교 분석하기 위해 우선 Potentiostat (Gamry, Reference 600)을 활용하여 전기화학적 실험이 수행되었다. 이를 위해 포화칼로멜전극(Saturated Calomel Electrode (SCE))과 백금전극이 각각 기준전극 및 상대전극으로 사용되었다.

우선 5% NaCl 용액 내 시편을 노출(노출면적: 1 cm²)시켜 개방회로전위(Open Circuit Potential (OCP))를 측정하고, 0.2 mV/s의 스캔속도로 전위를 상승시키며 동전위분극 데이터를 획득하였다. 양분극실험의 경우 용액 내 침지하여 30분 이후 OCP 대비 +200 mV 구간까지 상승시키며 분극곡선을 획득하였으며, 음분극실험의 경우 6시간 동안 염수분무실험(Salt Spray Test, SST) 수행 후 시편을 대상으로 OCP 대비 -200 mV 구간까지 하강시키며 분극곡선을 획득하였다. SST의 경우 150 × 70 mm² 크기로 절단한 시편의 cut-edge 부를 테프론 테이프로 sealing하여 KS D 9502규격(Table 1 참조)을 토대로 수행되었다. SST 수행 후 각 시편 표면에 형성된 부식생성물의 형상을 실체현미경으로 관찰하였으며, 푸리에 변환 적외선 분광분석(Fourier-Transform Infrared spectroscopy, FT-IR)과 X선 회절분석(X-Ray Diffraction, XRD)을 활용하여 부식생성물의 상분석을 수행하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 도금 층 미세구조

Fig. 1에 Zn-5%Al-2%Mg 조성의 합금도금강판 표면 부를 광학현미경으로 분석한 사진을 나타내었는데, 냉각속도가 상이한 세 시편 모두 Zn 초정과 Zn-MgZn₂ 이원공정으로 이루어진 spangle과 Zn-Al-MgZn₂의 삼원공정상으로 이루어진 경계면으로 미세구조가 형성되었음을 알 수 있다. 반면, 냉각속도가 빠른 Water Spray > Air Spray > Natural Cooling 순으로 spangle의 크기가 감소하였다. 도금층의 응고과정 초기에 핵이 생성된 후 수지상이 성장되면서 spangle의 형성이 이루어

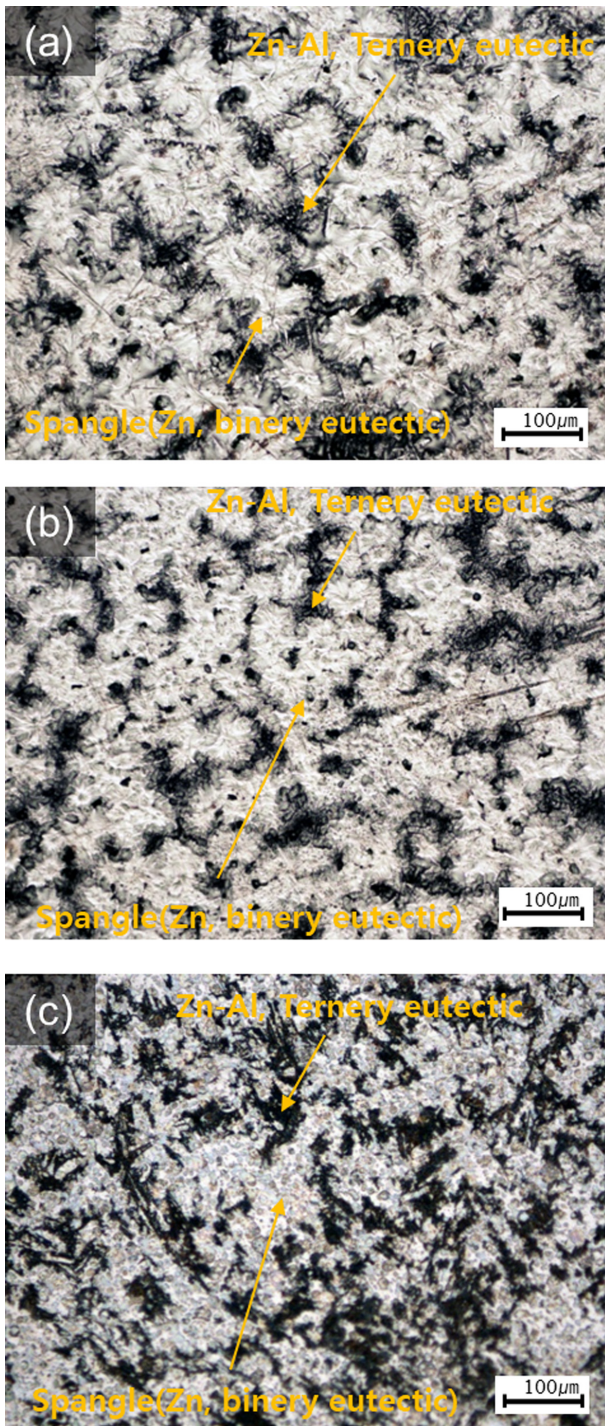


Fig. 1. Surface views showing the microstructures of Zn-5%Al-2%Mg alloy coated steel sheets, observed by OM: (a) Natural Cooling; (b) Air Spray; (c) Water Spray

지는데 냉각속도가 빠를수록 핵생성은 촉진되지만, 수지상이 성장할 시간적 여유가 줄어들기 때문에 냉각속도를 빠르게 처리한 시편에서 spangle의 크기가 작아지는 것으로 이해될 수 있다.

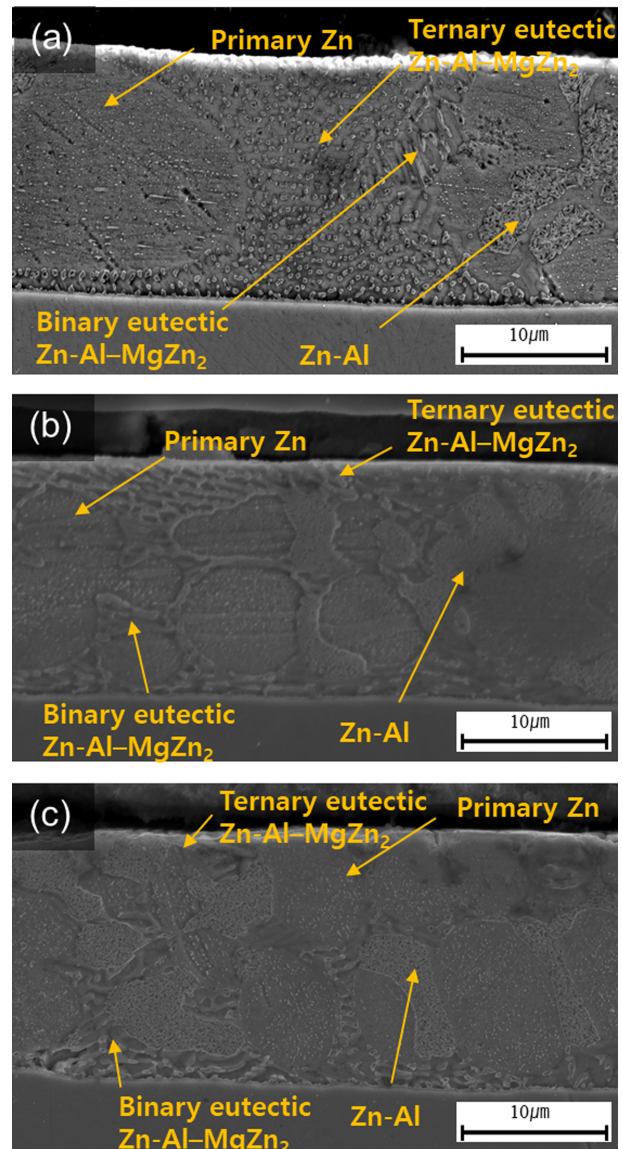


Fig. 2. Cross sectional views showing the microstructures Zn-5%Al-2%Mg alloy coated steel sheets, observed by FE-SEM: (a) Natural Cooling; (b) Air Spray; (c) Water Spray

FE-SEM으로 도금 층의 단면 미세구조를 분석한 결과(Fig. 2) 합금도금강판의 미세조직은 Zn 및 Zn-Al 상, Zn-MgZn₂ 이원공정, 그리고 Zn-Al-MgZn₂의 삼원공정 상으로 구성되어 있었다. 이는 3원계 합금도금강판 도금 층의 미세구조를 제시한 선행연구 [7,9,16]와 유사한 분석결과로 이해될 수 있다. 기존의 Galfan은 95%Zn-5%Al의 공정점의 조성으로, 도금 층의 미세구조가 Zn-rich 상과 Al-rich 상으로 구성되어 있는 것으로 보고되고 있지만 [1,20], 2%Mg이 첨가된 합금도금의 경우 도금 층의 미세구조는 Zn 초정, Zn-Al 상, Zn-MgZn₂ 이원공정상, 그리고 Zn-Al-MgZn₂의 삼원공정상으로 구성

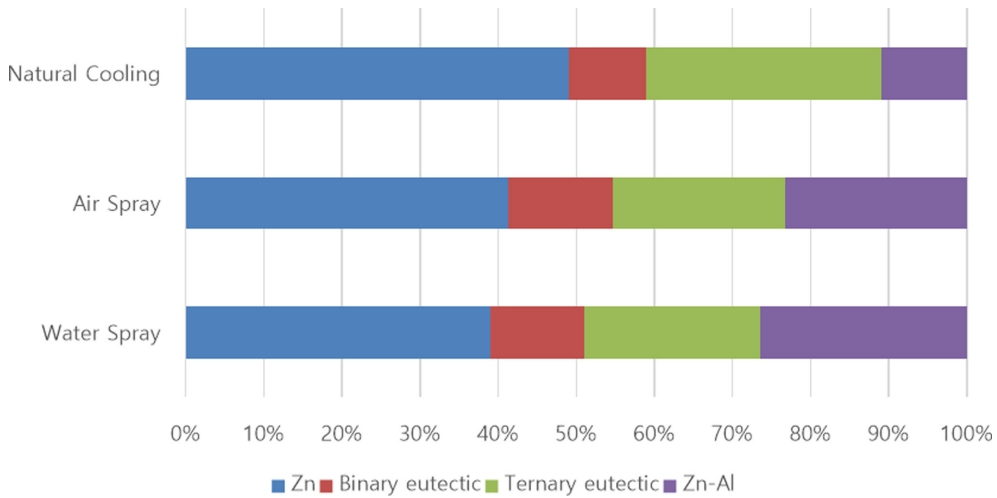


Fig. 3. Area fractions of Zn primary, Zn-Al, and binary and ternary eutectic phases in the coating layers of Zn-5%Al-2%Mg alloy coated steel sheets, measured by an image analyzer

되었다. Zn 초정에 Zn-Al 상이 공존하는 구조는 도금 조성 내 Mg이 첨가되면서 Zn-Al 공정점이 변화된 것에 따른 것으로 사료되는데, 이는 일본 일신제강의 ZAM (91%Zn-6%Al-3%Mg)의 미세구조(Zn-Al 초정; Zn-MgZn₂ 이원공정상; Zn-Al-MgZn₂ 삼원공정상)를 통해 추측할 수 있다 [21]. 본 연구의 합금도금 조성에서 냉각속도를 빠르게 처리한 도금 층에서 Zn-Al 상의 분율이 증가되었음을 알 수 있다(Fig. 3). Zn-Al 상의 분율이 증가되면서 Zn 초정의 분율과 공정상의 분율이 감소되었으며, 표층부 보다는 주로 도금 층 내부에 분포하는 것이 관찰되었다. 용융도금 후 빠른 냉각과정 중 미세한 Zn 초정과 Zn-Al 상이 빠르게 형성되면서 상대적으로 Zn-MgZn₂ 이원공정상과 Zn-Al-MgZn₂ 삼원공정상의 분율은 감소된 것으로 사료된다.

3.2. 냉각속도에 따른 전기화학적 부식거동

Fig. 4는 도금 층의 냉각방식에 따른 OCP의 변화를 나타낸 그림으로, 냉각방식에 따라 OCP가 대략 50 mV 이내에서 차이가 나타났으며, 냉각속도가 빠를수록 OCP가 다소 높아지는 경향을 보였다. OCP 측정 초기, 대략 3500초에서 Air spray와 Natural cooling 시편의 OCP가 역전되며 변화의 폭이 큰 것은 침지초기 표면반응이 일어난 후 안정화가 이루어지는 과정에서 나타난 현상으로 사료된다. 또한 동전위분극 실험결과(Fig. 5)를 통해 냉각속도가 증가할수록, 동일 전위에서 양극 전류밀도가 감소하는 것으로 나타났다. 이를 토대로 도금 층 응고 시 냉각속도를 빠르게 하여 표면 미세조직의 상 분포를 제어하면 도금 층의 초기 양극용해(M → Mⁿ⁺ + ne)량을 감소시켜 내식성 향상에 일부 기여할

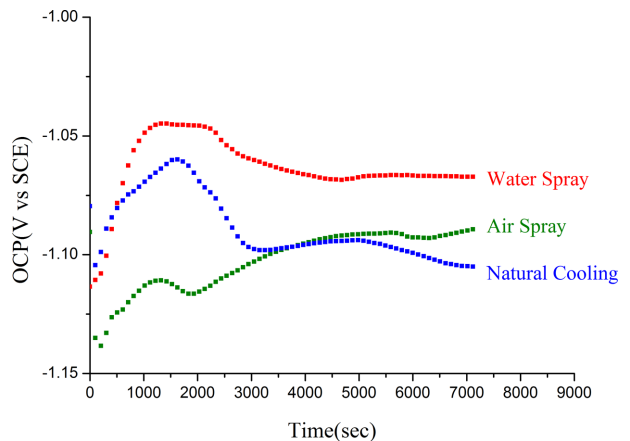


Fig. 4. Changes in OCP of Zn-5%Al-2%Mg alloy coated steel sheets with different cooling rates of coating layer

수 있음을 추측할 수 있다. 이와 관련하여 도금층의 냉각속도가 느린 조건 하에서 초정이 상대적으로 조대해지며, Zn-MgZn₂-Al 삼원공정조직이 넓게 형성되면서 개방회로전위가 낮게 나타난 것으로 사료된다. 또한, 냉각속도 증가는 도금 층 구조 내 Zn-Al 상분율 증가와 Zn 초정 및 삼원공정상 분율 감소를 야기하여 각각의 상 비율의 균형도가 높아져 마이크로갈바닉 부식에 대한 구동력이 감소할 수 있는 것으로 추측된다. 물론, 공정조직 자체 또한 상이한 상의 층상구조로 이루어져 있어 갈바닉 부식으로부터 자유로울 수 없으나, 양극음극의 갈바닉 쌍들의 면적비가 유사해지고 또한 그 형태가 미세할수록 갈바닉 전류가 감소하여 거시적인 부식거동에 미치는 영향이 낮을 것이라는 가정 하에, 도금 층 극 표층부 공정조직과 Zn-Al 상의 형성은 내

식성 향상에 일부 기여할 수 있을 것으로 예상해 볼 수 있다. 다만, 부식반응에 대한 구동력을 단 시간 내에 인위적으로 상승시키며 측정하는 전기화학적 동전위분극 거동만으로는 희생방식효과에 의한 장기적인 내식성을 논의하기에 한계가 있으므로 염수분무시험을 통해 보다 장기적인 부식거동을 확인하여야 한다. 실제로 음분극거동의 경우 냉각속도가 제어된 세 시편에 있어 차이가 미미하였으나 6시간의 염수분무시험 후 측정된 음분극곡선(Fig. 5b)에서는 냉각속도가 증가할수록, 음극 전류밀도가 감소하는 경향을 나타내었다. 시편별 OCP가 상이하여 냉각속도 증가에 따른 음극 전류밀도의 감소를 단정하는 것에는 무리가 있으나 6

시간의 염수분무시험을 통해 표면 부식생성물의 형성, 분포, 특성에 의존하여 음극환원($O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$)량이 일부 감소될 수 있음을 추측할 수 있다. 보다 장기간의 염수분무시험 후 표면 부식생성물의 특성 분석과 부식거동은 3.3절에서 상세히 논의하고자 한다.

3.3. 냉각속도에 따른 부식거동

염수분무시험에서 GI 대비 3원계 합금도금강판의 적청 발생시간이 크게 지연됨을 보여준다(Fig. 6). GI는 부식환경에 노출된 면의 대부분이 백청이 형성되어 덮이게 되고 이후 적청이 발생되어 적청 면적이 점차 증가되는 부식거동을 나타내었으나, 3원계 합금도금강판

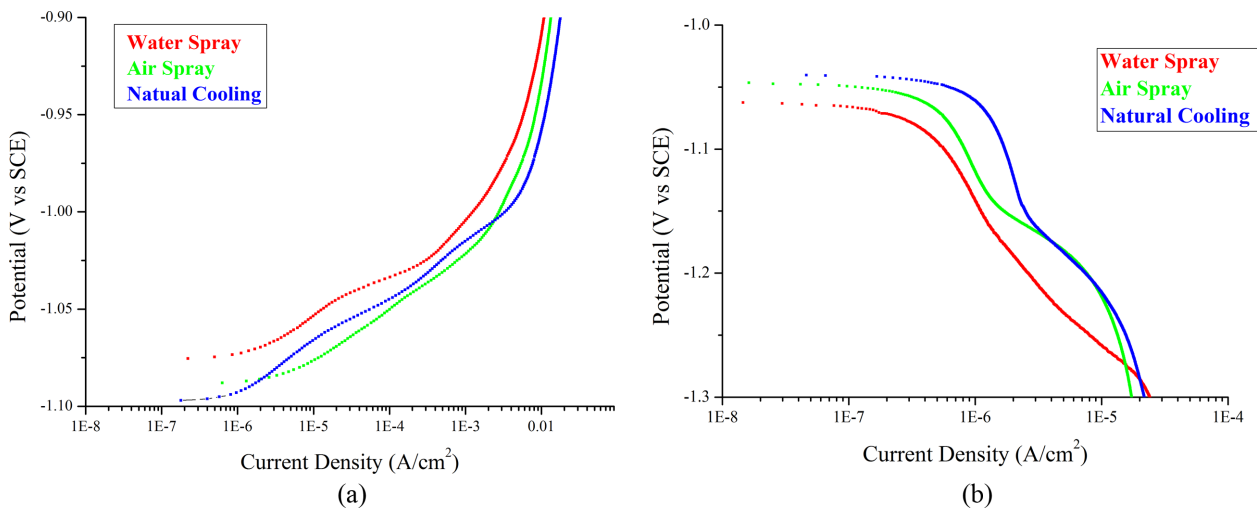


Fig. 5. Potentiodynamic polarization curves of Zn-5%Al-2%Mg alloy coated steel sheets with different cooling rates of coating layer: (a) Anodic polarization curves of the sample; (b) Cathodic polarization curves of the sample obtained after SST for 6 h

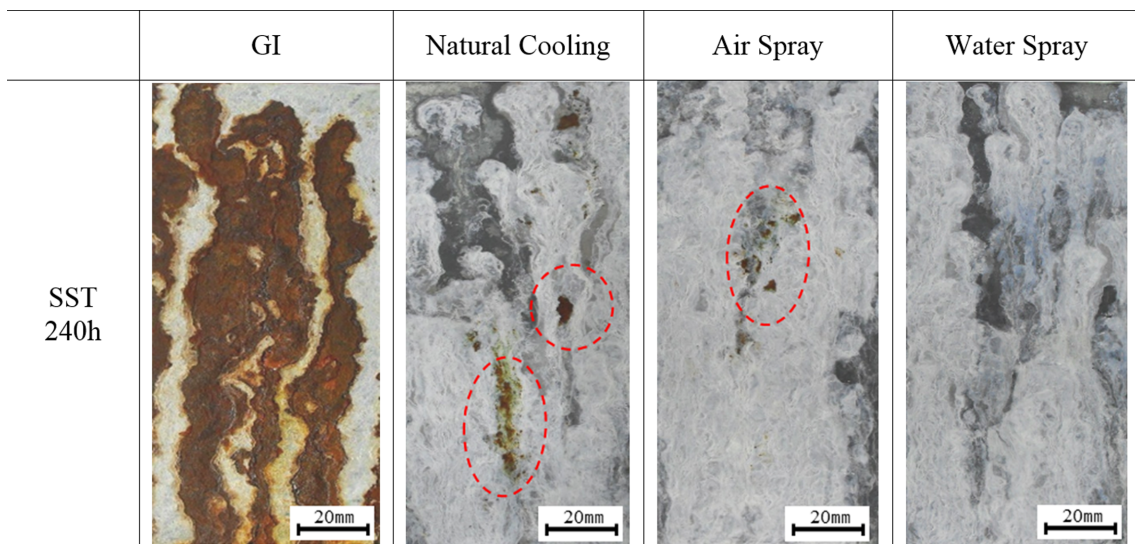


Fig. 6. Surface views of conventional GI and Zn-5%Al-2%Mg alloy coated steel sheets with different cooling rates of coating layer, observed after SST for 240 h

표면의 일부분에서는 백청이 형성되지 않고, 도금 층 본연의 상태와 유사하게 유지된 것이 관찰되었으며 적청 또한 백청이 형성되지 않은 일부 영역에서 발생되었는데, 이는 표면에 형성되어 있는 합금상 별로 상이한 부식거동을 보이는 것으로 추측해 볼 수 있다. 즉, 일부 합금상은 양극으로 작용하면서 지속적인 이온 용출이 이루어지고 음극에서는 백청이 형성되어, 결국 소지철이 노출될 때까지 지속적인 이온 공급이 이루어진 양극에서 우선 적청이 발생된 것으로 사료된다. 또한 빠른 냉각속도 조건 하에서 제작된 시편(Air Spray, Water Spray)의 적청 발생이 상대적으로 지연됨을 알 수 있다. 이는 앞서 논의한 전기화학적 부식거동을 토대로, 냉각속도를 빠르게 처리한 도금 층에서 도금 층

을 구성하는 상들의 마이크로갈바닉 구동력이 감소하여 부식초기부터 Zn, Al, 및 Mg 이온의 용출이 상대적으로 균일하게 진행되어 부식생성물의 안정적 형성에 기여하며 장기적으로 내식성이 향상된 것으로 사료된다.

부식생성물의 형성 측면에서, GI에서는 주로 ZnO가 형성되지만 Galfan의 경우 ZnO와 Al₂O₃ 부식생성물이 형성되어 내식성이 향상되는 것으로 알려져 있다 [1,20]. 하지만 Fig. 7과 Fig. 8에 나타낸 염수분무시험 후 부식생성물을 FT-IR과 XRD로 각각 분석한 결과에서 Mg이 첨가된 Zn-5%Al-2%Mg 합금도금강판에서 ZnO와 Al₂O₃ 생성물이 아닌, hydroxy 계 부식생성물의 형성이 확인되었다. Mg의 첨가로 인하여 초기 부식환경에서

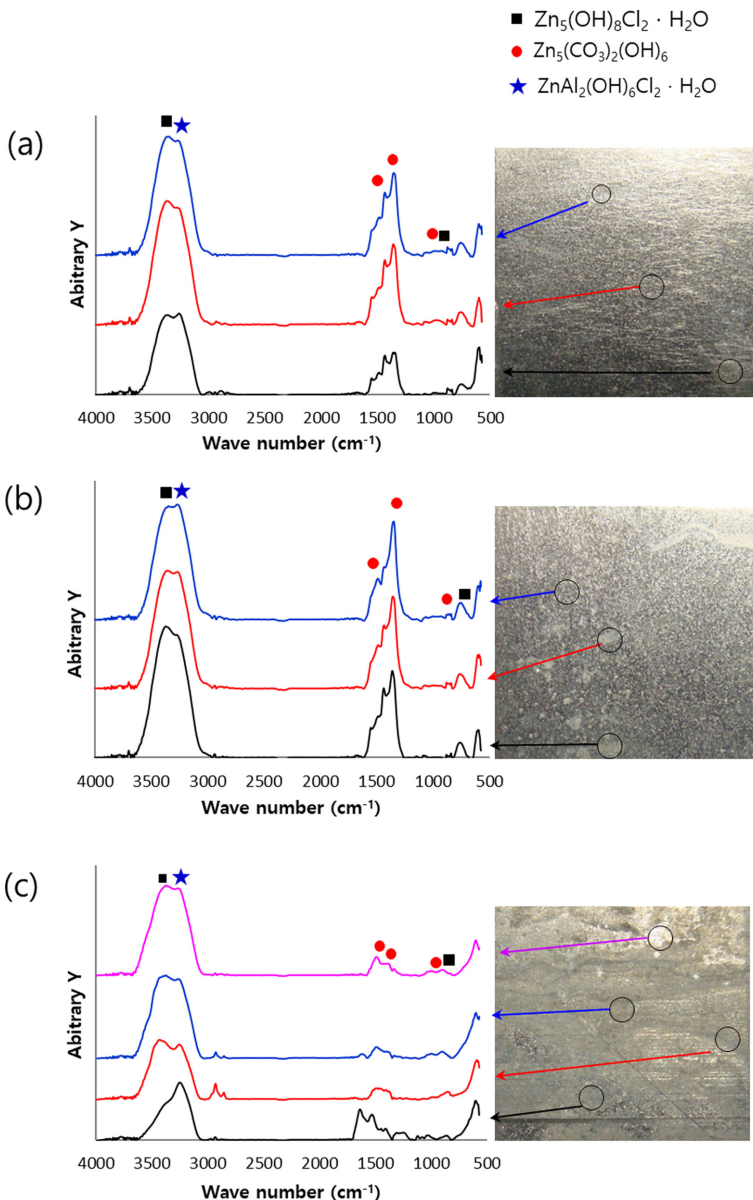


Fig. 7. FT-IR patterns and OM images of Zn-5%Al-2%Mg alloy coated steel sheets with different cooling rates of coating layer, examined after SST for 24h: (a) Natural cooling; (b) Air Spray; (c) Water spray

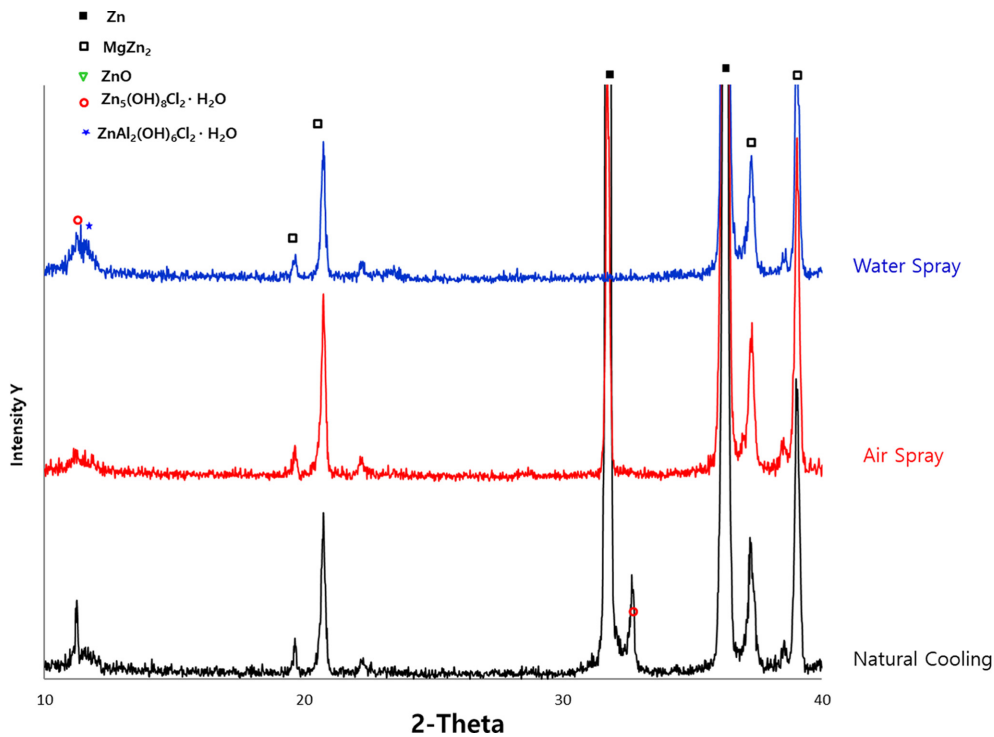


Fig. 8. XRD patterns of Zn-5%Al-2%Mg alloy coated steel sheets with different cooling rates of coating layer, examined after SST for 120 h

용출된 Mg이 음극 영역에서 alkalinity를 감소시켜 (i.e., $Mg(OH)_2$ 형성에 기인함 [15-18]) hydroxy 계열인 simonkollite ($Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$)와 hydroxalite ($ZnAl_2(OH)_6Cl_2 \cdot H_2O$) 생성물의 형성을 촉진하며 ZnO와 Al_2O_3 의 형성을 억제한 것으로 사료된다. 특히, 염수분무시험 24시간 진행 후 분석한 FT-IR 분석 결과에서 hydroxy계 부식생성물인 $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$ 와 $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$ 및 $ZnAl_2(OH)_6Cl_2 \cdot H_2O$ 의 형성이 명확히 관찰되었다. 냉각속도 제어효과로 Natural Cooling과 Air Spray 시편 대비 Water Spray 시편에서는 부식환경 내 노출 초기부터 $ZnAl_2(OH)_6Cl_2 \cdot H_2O$ 의 형성이 특히 촉진되는 것으로 분석되었다. 또한, 염수분무시험 240시간 진행 후 형성된 부식생성물의 XRD 상분석 결과에서도 냉각속도를 빠르게 한 Air Spray와 Water Spray 시편에서는 $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$ 와 $ZnAl_2(OH)_6Cl_2 \cdot H_2O$ 이 복합적으로 형성되어 존재하는 것이 확인되었으나 Natural Cooling 시편에서는 $ZnAl_2(OH)_6Cl_2 \cdot H_2O$ 보다는 $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$ 의 단일 형성이 이루어진 것으로 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이, 용융도금 후 도금 층 형성 시 냉각속도가 증가할 경우 도금 층 내 Zn-Al 상의 형성 분율이 증가하고 공정상의 층상구조 간격이 미세해 지며 부식과정 초기 금속이온의 용출이 촉진될 것으로 판단되는데, 이때 Zn-MgZn₂의 이원공정상에서는 $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$ 이, Zn-Al 상

과 Zn-MgZn₂-Al의 삼원공정상에서는 $ZnAl_2(OH)_6Cl_2 \cdot H_2O$ 의 형성이 주로 이루어질 것으로 사료된다. 부식환경 내 노출 시 표면에 형성되는 두 생성물($Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$ 와 $ZnAl_2(OH)_6Cl_2 \cdot H_2O$)은 ZnO 대비 치밀한 구조 [7,13,16]를 형성하며 부식인자가 소지 철 내로 침투하는 현상을 효과적으로 억제하였을 것으로 사료된다. 뿐만 아니라, 도금 층 표면에 주로 Al_2O_3 생성물이 형성되어 표면 내식성을 향상시키는데 효과적인 2원계 도금강판인 Galfan의 경우 대비, 앞서 언급한 hydroxy 계열에 해당되는 치밀한 생성물($Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$ 와 $ZnAl_2(OH)_6Cl_2 \cdot H_2O$)의 복합형성이 이루어지는 3원계 도금재는 표면의 국부적인 손상영역 또는 소지철이 일부 노출될 수 있는 절단면 등에서의 내식성이 특히 우수할 것으로 사료된다. 특히, 도금 층 형성 시 냉각속도가 빠른 경우 부식과정 초기 희생양극적 보호기능과 중·후기 치밀한 hydroxy 계열 생성물의 복합형성에 따른 장벽기능이 보다 우수하여 강판의 수명증가에 효과적일 것으로 판단된다.

4. 결론

Zn-5%Al-2%Mg 조성의 3원계 합금도금강판을 대상으로, 용융도금 후 상이한 냉각속도(Natural Cooling,

Air Spray, Water Spray) 하에서 시편을 제조하였고, 각 시편의 미세조직과 부식거동을 분석하여 다음의 결론을 도출하였다.

도금 층 형성 시 냉각속도가 증가할수록 Zn 초정 상 분율이 감소되는 반면 Zn-Al 상의 분율이 증가되었고 공정상의 층상구조 간격이 미세해졌다. 전기화학적 부식거동 분석결과, 냉각속도의 증가를 통한 도금 층의 미세구조 변화는 개방회로전위의 상승 및 동전위분극 시 양극 전류밀도의 감소 효과가 있음을 확인하였다. 짧은 시간 염수분무시험 이후 측정된 음분극곡선에서도 표면 부식생성물 형성과 관련하여 냉각속도 증가에 따른 음극 전류밀도 감소의 거동이 나타났다. 또한 장기적인 염수분무시험 및 표면생성물 분석결과, 빠른 냉각속도 하에서 형성된 도금 층 표면에서 simonkolleite ($Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$)와 hydrotalcite ($ZnAl_2(OH)_6Cl_2 \cdot H_2O$)의 복합형성이 촉진되어 적층발생이 효과적으로 지연되는 것으로 판단되었다.

Acknowledgement

순천대학교 교연비 사업에 의하여 연구되었음.

References

1. H. C. Shih, J. W. Hsu, C. N. Sun, S. C. Chung, The life-time assessment of hot-dip 5% Al-Zn coatings in chloride environments, *Surface Coating Technology*, **150**, 70 (2002). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01508-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01508-0)
2. J. W. Lee, B. R. Park, S. J. Kim, Corrosion resistance and adhesion of paint coating film on Zn-Mg-Al hot-dip galvanized steel sheets, *Korea Journal of Metals and Materials*, **57**, 7 (2019). Doi: <http://dx.doi.org/10.3365/KJMM.2019.57.2.77>
3. S. Tanaka, K. Honda, A. Takahashi, Y. Morimoto, M. Kurosaki, H. Shindo, K. Nishimura, M. Sugiyama, The performance of Zn-Al-Mg-Si hot-dip galvanized steel sheet, *6th Galvatech*, p. 153, Brussels, Belgium (2001).
4. M. B. Moon, S. S. Cha, Effect of alloy addition in hot dip galvanizing bath on corrosion behavior of hot dip Zn coated layer, *Journal of the Corrosion Science Society of Korea*, **22**, 11 (1992).
5. M. Bright, S. Ellis, Minimizing zinc consumption in hot-dip galvanizing lines, *Corrosion Science and Technology*, **10**, 43 (2011).
6. M. S. Oh, S. H. Kim, J. S. Kim, J. W. Lee, J. H. Shon, 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>
7. J. W. Lee, S. J. Kim, M. S. Oh, Influence of alloy content on microstructure and corrosion resistance of Zn-based alloy coated steel product, *Korea Journal of Metals and Materials*, **85**, 169 (2020). Doi: <http://dx.doi.org/10.3365/KJMM.2020.58.3.169>
8. T. Prosek, J. Hagstrom, D. Persson, N. Fuertes, F. Lindberg, O. Chocholaty, C. Taxen, J. Serak, D. Thierry, Effect of the microstructure of Zn-Al and Zn-Al-Mg model alloy on corrosion stability, *Corrosion Science*, **110**, 71 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.04.022>
9. J.W. Lee, B.R. Park, S.Y. Oh, D.W. Yun, J.K. Hwang, M.S. Oh, 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>
10. K. Nishimura, H. Shindo, K. Kato, Y. Morimoto, *Proc. 4th Galvatech*, p. 437, Chiba, Japan (1998).
11. T. Prosek, D. Persson, J. Stupilil, D. Thierry, Composition of corrosion products formed on Zn-Mg, Zn-Al-Mg coatings in model atmospheric conditions, *Corrosion Science*, **86**, 231 (2014). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.05.016>
12. M. Salgueiro Azevedo, C. Allely, K. Ogle, P. Volovitch, Corrosion mechanisms of Zn (Mg, Al) coated steel: 2. The effect of Mg and Al alloying on the formation and properties of corrosion products in different electrolytes. *Corrosion Science*, **90**, 482 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.07.042>
13. P. Volovitch, T. N. Vu, C. Allély, A. A. Aal, K. Ogle, Understanding corrosion via corrosion product characterization: II. Role of alloying elements in improving the corrosion resistance of Zn-Al-Mg coatings on steel, *Corrosion Science*, **53**, 2437 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.03.016>
14. S. J. Kim, Y. J. Kwak, T. Y. Kim, W. S. Jung, K. Y. Kim, Surface darkening phenomenon of Zn-Mg alloy coated steel exposed to aqueous environment at high temperature, *Journal of Materials Research*, **30**, 3605 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2015.356>
15. N. C. Hosking, M. A. Ström, P. H. Shipway, 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, 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. F. Thébault, B. Vuillemin, R. Oltra, C. Allely, K. Ogle, O. Heintz, Influence of magnesium content on the corrosion resistance of the cut-edges of Zn–Mg-coated steel, *Corrosion Science*, **97**, 100 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.04.019>
18. T. Prosek, A. Nazarov, U. Bexell, D. Thierry, J. Serak, Corrosion mechanism of model zinc-magnesium alloy in atmospheric conditions, *Corrosion Science*, **50**, 2216 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.008>
19. J. Sullivan, S. Mehraban, J. Elvins, In situ monitoring of the microstructural corrosion mechanisms of zinc-magnesium-aluminium alloy using time lapse microscopy, *Corrosion Science*, **53**, 2208 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.02.043>
20. X. Zhan, C. Leygraf, I. O. Wallinder, Atmospheric corrosion of galvanized coatings on steel in chloride-rich environment, *Corrosion Science*, **73**, 62 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.03.025>
21. M. Uranaka, T. Shimizu, Corrosion resistance of hot-dip Zn-6%Al-3%Mg alloy coated steel sheet used in automotive parts, *Metallurgical Science and Technology*, **30**, 29 (2012).