

36개월간 국내 옥외폭로시험에 따른 갈바륨 강판의 대기부식거동 및 표면외관 변화

김기태 · 유영란 · 김영식[†]

경북 안동시 경동로 1375, 안동대학교 신소재공학부 청정에너지소재기술연구센터
(2020년 12월 15일 접수, 2020년 12월 22일 수정, 2020년 12월 22일 채택)

Atmospheric Corrosion and Surface Appearance of Galvalume Steel following Outdoor Exposure for 36 Months: A Korean Study

K. T. Kim, Y. R. Yoo, and Y. S. Kim[†]

Materials Research Center for Energy and Green Technology, School of Materials Science and Engineering,
Andong National University, 1375 Gyeongdong-ro, Andong, 36729, South Korea

(Received December 15, 2020; Revised December 22, 2020; Accepted December 22, 2020)

Galvalume steel (GL) is widely used in marine and industrial environments. It is characterized by better corrosion resistance than carbon steel. However, corrosion and economic losses may occur as the usage time is increased. Therefore, in this study, an outdoor exposure test of GL for 36 months was conducted across six regions of Korea. Parameters such as corrosion rate, chrominance (color, chroma, and brightness), glossiness, and surface appearance were analyzed. The results showed no significant change in appearance, and the initial corrosion rate was large, but a tendency to decrease with time was observed. Increased outdoor exposure time led to increase in the level of corrosion products. In the case of coastal areas where S, Cl, and other elements were detected, a relatively high decrease in Zn content was observed. Al forms a protective oxide film and exists in the coating layer, but Zn dissolves due to its chemical activity and low potential.

Keywords: Galvanized steel, Outdoor exposure test, Galvalume steel, Atmospheric corrosion

1. 서론

아연도금강판(Zinc Coated Steel Sheet)은 아연을 도금한 강판 전체를 총칭하는 것으로 그 제조방법에 따라 용융 아연 도금 강판(Hot-Dip Galvanized Steel)과 전기 도금 아연 강판(Electrolytic Galvanized Steel)으로 대별된다. 용융아연도금 강판은 순 아연 도금 이외에 합금화 용융아연도금 강판, 갈바륨 강판 및 갈판(Galfan) 등의 용융 아연-알루미늄 합금 도금 강판 등이 있으며 전기 아연도금 강판은 순 아연 도금 이외에 아연철, 아연-니켈 등 전기 아연 합금도금 강판이 있다 [1-3].

본 연구에서의 대상합금은 알루미늄을 포함하고 있는 아연-알루미늄 합금도금강판 (GL)이다. 이 Zn+55%Al계의 합금 도금강판은 아연의 희생 방식 작용과 알루미늄의 부동

태 작용을 가미한 것으로 용융 아연 도금 강판에 비해 동일 부착량에서 수배의 내식성을 나타낸다 [4,5].

아연도금강판은 일반적으로 야외에 광범위하게 사용되게 때문에 아연에 대한 부식 유형 중 가장 많이 알려져 있다. 대기의 다양한 환경에서 아연의 부식 거동을 조사하기 위해 과거에서부터 많은 연구가 진행되어 왔으며 특히, 모사환경 중에서의 연구 및 환경 별 부식생성물 분석에 대한 연구가 진행되었다 [6-12]. 모든 금속에 형성되는 부식생성물은 금속물체의 전반적인 부식 거동과 외관을 결정하는 여러 가지의 화합물을 포함한다. 부식생성물의 형성과 특성은 금속과 환경 사이의 복잡한 상호작용의 결과이다. 부식생성물에 관하여 각 금속 고유한 방식으로 작용하고 게다가 노출되는 환경의 화학적 특성을 반영하여 부식생성물을 형성한다. 따라서 황화물이 다량 존재하는 대기 환경에서의 부식생성물 형성은 대부분 금속 황화물로 구성된다. 반면에 염화물이 풍부한 환경은 금속 염화물이 풍부한 부식생성물이 형성된다 [13-15]. 이와 같이 대기환경에 따라 생성되는 부식

[†]Corresponding author: yikim@anu.ac.kr

김기태: 박사후과정, 유영란: 연구교수, 김영식: 교수

생성물이 다르며 보호 특성 또한 다르기 때문에 대기환경과 부식생성물의 관계에 대한 이해가 필요하다.

한편, 본 연구팀은 36개월 국내 옥외폭로시험에 따른 아연도금강판의 부식거동을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다 [16]; 1) 지역에 상관없이 폭로시간이 길어질수록 부식속도는 감소하는 경향을 보였으며, 폭로 초기에는 galvanized (GA) 시편의 부식속도가 galvanized (GI) 시편보다 컸으나 폭로시간이 길어질수록 GA시편과 GI 시편이 서로 유사한 부식속도를 보이는 것으로 나타났다. 2) 폭로지역에 관계없이 폭로시간이 증가할수록 GA시편표면에서의 Zn 함량이 감소하며 Fe 및 O는 증가하는 경향을 보였다. 한편, GI시편의 경우도 마찬가지로 Zn의 함량은 감소하고 O는 증가하지만 Fe의 함량이 일정하게 나타나는 것으로 보아 GI 시편은 36개월 이상 옥외에 노출되어야 소지인 Fe가 드러날 것으로 추정된다. 3) 지역별 환경인자에 따른 부식속도를 분석한 결과, GA시편은 부착염 농도가 증가함에 따라서 부식속도 또한 증가하는 경향을 보이며, GI 시편은 부착염과 상관없이 다른 경향을 보이는 것으로 나타났다. GA시편은 폭로시간이 증가함에 따라서 아연 도금층이 파괴되어 Fe-Zn 합금층 및 소지인 Fe가 노출되어 부착염의 영향을 받는 반면, GI의 경우에는 폭로 36개월 이상에서도 Zn 도금층이 건전하여 부착염과의 상관성이 부족한 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 아연-알루미늄 합금도금강판을 시험편으로 사용하여 국내 6개 지역에서 옥외폭로시험을 36개월 수행한 뒤 부식속도 측정 및 외관분석을 통하여 환경인자와의 상관성에 대하여 연구하였다.

2. 연구 방법

2.1 옥외폭로 시험

본 연구에서 사용된 시험 시편은 갈바륨 강판 (Galvalume steel (GL)) 1종을 사용하였다. GL시편은 Fe에 Zn-55%Al 합금을 도금한 강판이다. 시편의 크기는 200 × 100 mm이며 두께는 0.4 mm이고, 도금량은 150 g/m² (20 μm)이다. 옥외폭로 조건으로는 45°의 경사를 갖도록 설치하였으며 일조량이 항상 일정하고 통풍이 잘되며 풍향과 풍속의 제약을 받지 않는 평탄한 지반에 설치하였다. 옥외폭로 장소로는 해안, 도시 및 전원지역으로 안동, 서울, 광주, 목포, 부산, 강릉 총 6지역에 설치하였다. 해안으로부터의 거리는 안동 약 55.88 km, 서울 약 39.42 km, 광주 약 41.72 km, 목포 약 0.2 km, 부산 약 0.15 km, 강릉 약 1.2 km이다.

2.2 부식속도 측정

옥외폭로 시험 후 GL 시험편의 부식속도를 측정하기 위해 KS D 9226의 방법 [17]을 이용하였다. 우선 옥외폭로

전 시편의 무게를 측정하고 수거된 시편을 흐르는 물에서 연한 솔을 이용하여 표면에 붙은 이물질 및 부식생성물을 제거하였으나 모든 부식생성물 및 이물질이 제거되지 않아서 화학적 세척을 진행하였다. 본 연구에서 사용한 화학적 세척방법은 1차 세정과 2차 세정으로 나누어 진행하였다. 1차 세정은 70 °C, 100g NH₄Cl + 900 ml H₂O 용액에 4분 동안 침지 시켰으며, 2차 세정은 25 °C, 황산 암모늄용액(100g (NH₄)₂S₂O₈ + 900 ml H₂O)에 5분간 침지하여 진행하였다. 화학적 세정 후 시편의 무게를 측정하고 부식 전 후의 무게변화를 아래 식에 대입하여 부식속도를 구하였다.

$$mm/y = 87.6 \times \frac{W}{DAT}$$

W= 무게감소량(mg), D(밀도)=(g/cm³),

A= 노출면적(cm²), t= 시간(h)

※ GL의 밀도=3.75

※ W=a-b-c

a=폭로시험 전 해당 시편의 무게(mg)

b=화학적 세정에 따른 폭로시험 전 시편의 무게감량(mg)

c=폭로시험 후 화학적 세정 후 무게(mg)

2.3 색도 측정

GL 시험편의 색도를 측정하기 위해 색차 측정기(SP64, X-rite, USA)를 이용하였다. 색도의 측정기준으로는 국제 조명위원회 (Commission internationale de l' éclairage: CIE)에서 정한 L*, a*, b* 값을 이용하였다 [18]. Fig. 1은 CIE에서 정한 L*, a*, b*의 구형 색 좌표로 L* 값은 밝기의 정도, a*와 b*는 색도좌표이다 [19]. 색도 측정 방법으로는 폭로된 시편을 흐르는 물에서 연한 솔을 이용하여 세척한 후 시편의 중앙부위를 파인더에 위치 후 3회씩 반복 측정하

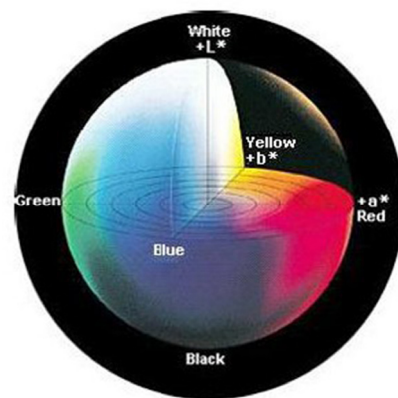


Fig. 1 CIELAB color chart [18].

여 그 평균값을 이용하여 L^* , a^* , b^* 값을 얻었다. 또한 전체적인 색상변화의 양상을 확인하기 위해 ΔL^* , Δa^* , Δb^* 값을 구하고, 아래의 수식을 이용하여 색차 값 ΔE^*_{ab} 를 구하였다 [20].

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

2.4 광택도 측정

GL 시험편의 광택도를 측정하기 위해 광택계 (Micro-TRI-glass, BYK Ins., Germany)를 사용하여 측정하였으며 KS L 2405의 측정방법과 [21], 광택 표준 측정법 국제규격 ASTM D 523에 정의되어 있는 방법을 이용하여 측정하였다 [22]. 광택도 측정 전 흐르는 물에 연한솔을 사용하여 표면에 묻은 이물질 및 부식생성물을 제거한 후 60°의 측정 각도로 5회씩 반복 측정하여 평균값을 산출하였다.

2.5 표면분석

표면 분석에 사용한 장비는 SEM-EDS(VEGA II LMU, Tescan, Czech)이며 옥외폭로 시험 전 후 표면형상의 변화 표면 부식생성물 및 표면조성의 변화를 관찰하였다. 또한 XRD(Ultima IV, Rigaku, Japan)를 이용하여 표면 구조 분석을 진행하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 옥외폭로시간 및 지역에 따른 GL의 부식거동

옥외폭로 시험은 총 6개의 지역에서 1, 6, 12, 24, 36개월 순으로 시험편을 수거하여 외면관찰 및 부식속도 분석을 진행하였다. Fig. 2는 옥외폭로 시간에 따른 GL의 외면 관찰로 폭로시간이 증가함에도 큰 변화는 보이지 않았으며 옥외폭로 지역별 차이도 크게 보이지 않았다. 또한, 소지금속인 Fe가 노출되지 않아 붉은 녹 또한 보이지 않았다. 이는 36개월 옥외폭로 시험 후에도 GL 표면의 Al + Zn도금층이 건전한 것으로 판단된다.

옥외폭로시험에 따른 부식속도는 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3a는 옥외폭로 시험시간에 따른 GL의 부식속도이며, Fig. 3b는 옥외폭로 지역에 따른 GL의 부식속도이다. Fig. 3a에서 보는 바와 같이 폭로 초기에는 부식속도가 크게 나타났으나 폭로시간이 증가함에 따라서 부식속도가 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 안동지역과 강릉지역의 초기 부식속도가 높게 나타났으며, 서울과 목포의 경우 12개월에서 높은 부식속도를 보였다. Fig. 3b의 지역별 부식속도는 옥외폭로 초기에는 전역지역에서 높은 부식속도를 보였으나 36개월 옥외폭로 후 모든 지역의 부식속도는 큰 차이를 보이지 않았으며 낮은 부식속도를 나타냈다.

Months	1	6	12	24	36
Andong					
Seoul					
Gwangju					
Mokpo					
Busan					
Gangneung					

Fig. 2 Effect of outdoor exposure time on the appearance by digital camera of galvalume steel specimens exposed in 6 sites of Korea.

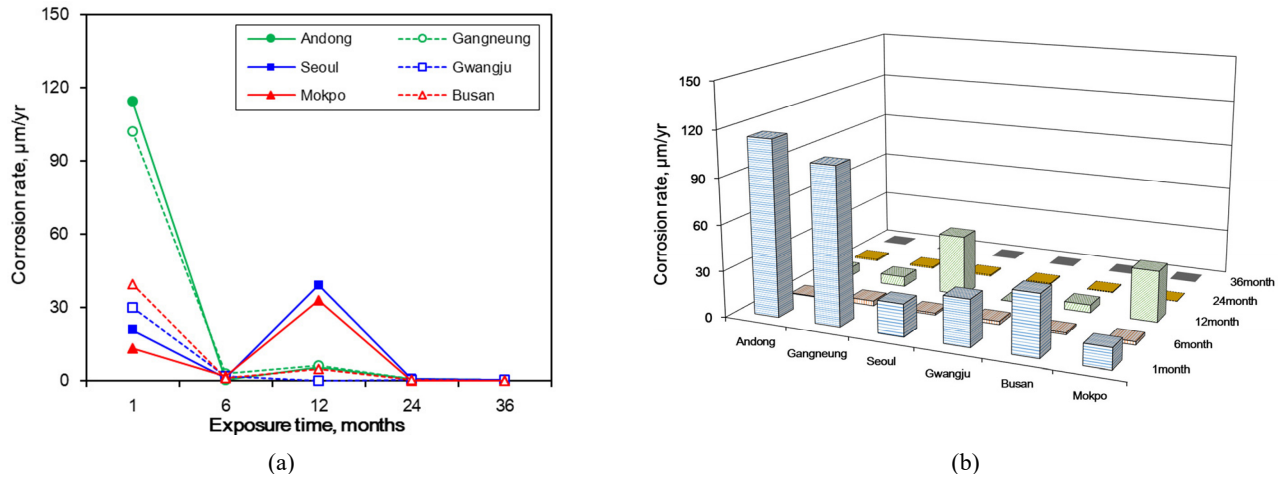


Fig. 3 Corrosion rate of galvalume steel with exposure time and site; (a) exposure time, (b) exposure site.

3.2 옥외폭로시간 및 지역에 따른 광택도 및 색차 변화

Fig. 4는 옥외폭로 시간 및 지역에 따른 GL 시험편의 광택도 및 광택도 차를 나타낸 그림이며 Fig. 4a, a'은 광택도, Fig. 4b, b'는 광택도 차이다. 광택도의 경우, 지역에 상관없

이 1개월에서 가장 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있으며 옥외폭로 시간이 증가함에 따라 광택도의 변화는 감소하는 것으로 나타났다. 지역별 광택도의 경우, 전원지역, 도시지역 해안지역으로 갈수록 광택도가 더욱 감소하는 것을 알 수 있었으며 이 데이터를 통해 광택도 차를 얻은 결과, 광택

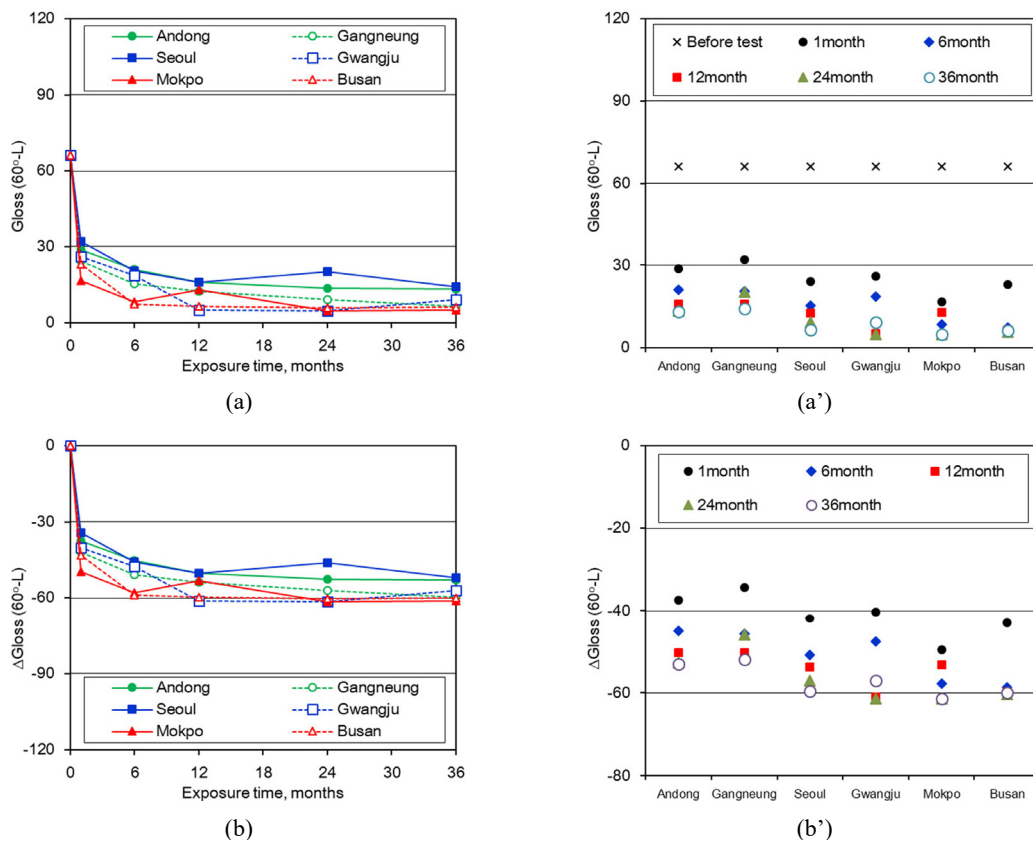


Fig. 4 Glossiness of galvalume steel specimens with exposure time and site; (a, a') exposure time, (b, b') exposure site.

도 차도 마찬가지로 동일한 경향을 보였다. 이는 폭로시간이 증가함에 따라 부식생성물 및 기타 환경에 의한 부착물로 인해 광택도가 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 옥외폭로 시간 및 지역에 따른 GL 시험편의 색상 (Δa^*), 채도 (Δb^*), 명도 (ΔL^*)의 변화를 나타낸 그림으로 Fig. 5a, a'은 색상에 대한 변화, Fig. 5b, b'은 채도의 변화, Fig. 5c, c'은 명도의 변화이다. 각각의 색상, 채도, 명도 분석은 Fig. 1의 CIE 색상을 참고하여 분석하였다. 색상 (Fig. 5a, a')의 경우, 옥외폭로 시간이 증가함에 따라 양의 값으로 증가하는 경향을 보이는데 양의 값으로 증가하

는 것은 적색화가 되는 것을 의미한다. 채도 (Fig. 5b, b') 또한 마찬가지로 옥외폭로 시간이 증가함에 따라 양의 값으로 증가하는 경향을 보였으며 이는 황색화를 의미하며 명도 (Fig. 5c, c')의 경우에는 옥외폭로시간이 증가함에 따라 음의 값으로 감소하는 것으로 나타났는데 이는 흑색화를 의미한다. 전체적인 색상, 채도, 명도를 분석해본 결과, 옥외폭로시간이 증가함에 따라 적색화, 황색화, 흑색화가 일어나는 것을 알 수 있으며 색상과 채도의 경우는 변화폭이 크지 않는 반면, 명도의 경우에는 변화폭이 다소 크게 나타났다. 또한, 적색화와 가장 많이 일어난 지역은 전원지역인

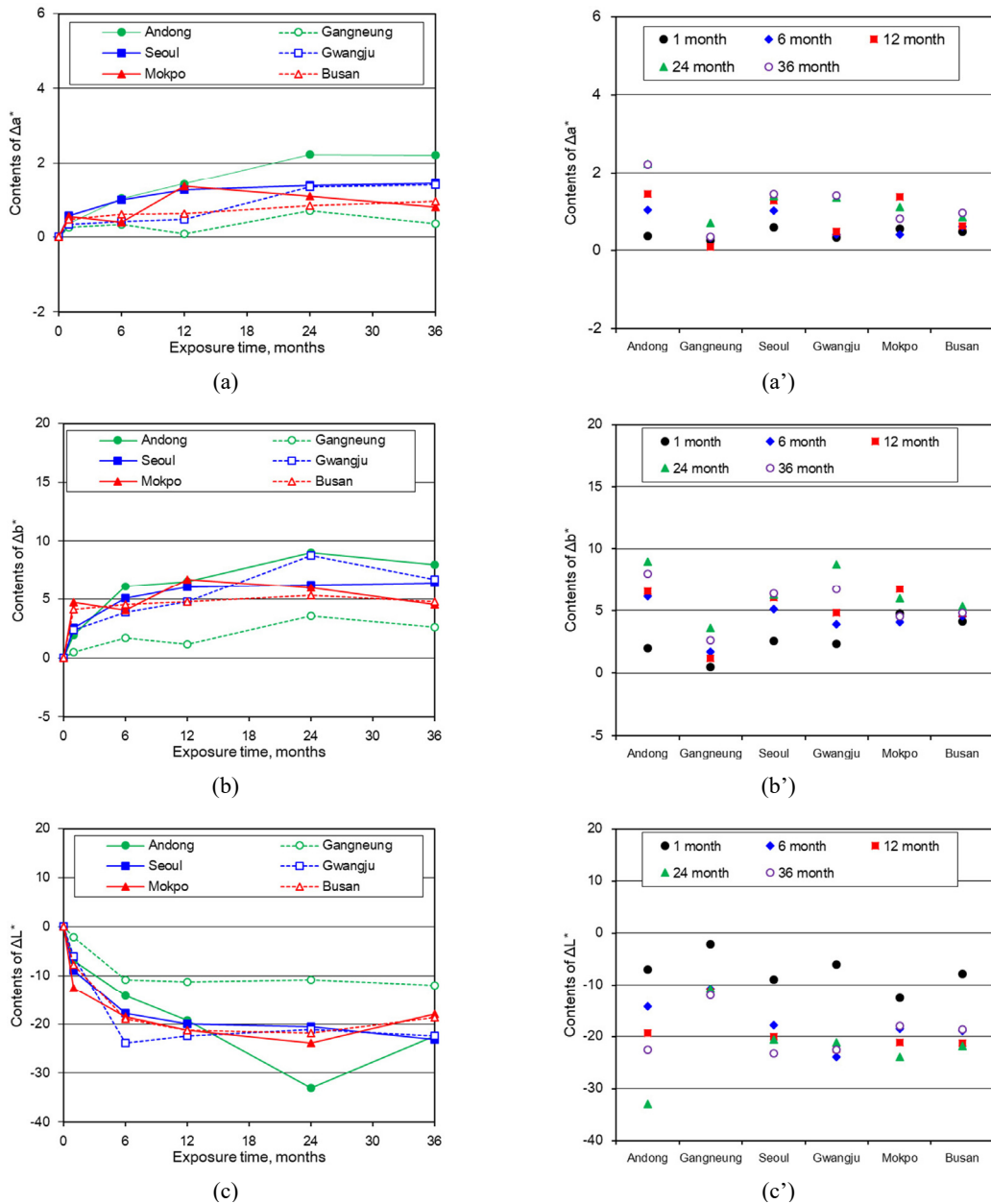


Fig. 5 Chrominance of galvalume steel specimens with exposure time and site; (a, a') Δa^* , (b, b') Δb^* , (c, c') ΔL^* .

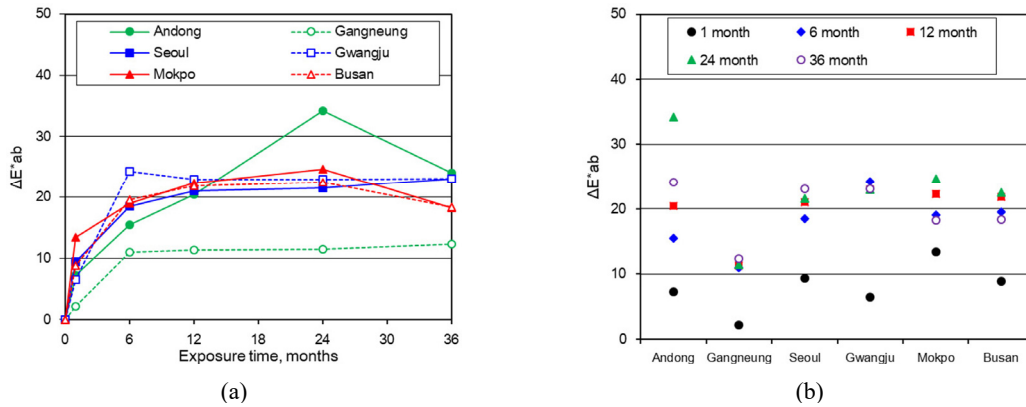


Fig. 6 Color difference of galvalume steel specimens with exposure time and site ; (a) exposure time, (b) exposure site.

안동이며 황색화의 경우 안동과, 광주, 흑색화의 경우에는 안동과 서울이다.

Fig. 6은 Fig. 5의 색상, 채도, 명도를 토대로 종합적인 색차 값을 나타낸 그림이다. Fig. 6a는 옥외폭로시간에 따른 색차 값이며 Fig. 6b는 옥외폭로 지역에 따른 색차 값이다. 지역에 관계없이 옥외폭로 12개월까지는 색차 값이 증가하는 경향을 보이다 12개월 이후부터는 색차 값의 변화가 크게 나타나지 않았다. 옥외폭로 후 12개월까지는 Al + Zn 도금층의 부식생성물 형성과 시편 표면에 환경인자들이 부착됨에 따라서 색차의 변화가 보이는 것으로 보이나 12개월 이후로는 표면상태의 변화가 감소하여 색차의 변화폭이 감소한 것으로 판단된다.

3.2 옥외폭로시간 및 지역에 따른 부식생성물 분석

36개월동안 옥외폭로 시험 후 옥외폭로 시간 및 지역별로 부식생성물에 대해 분석을 진행하였다. Fig. 7은 옥외폭로 시험 후 GL 시험편 표면을 SEM을 통해 분석한 그림으로 모재의 경우에는 덴드라이트(dendrite)의 형태의 조직을 보이는 것으로 나타났으며 전원지역인 안동과 강릉의 경우 국부적으로 조금 파인 곳이 보이나 전체적인 형상은 모재와 크게 다르지 않았다. 도시지역인 서울과 광주는 국부적으로 사각모양의 부식생성물이 형성되었으며 덴드라이트 형태의 조직이 다소 감소하는 것으로 관찰되었다. 해안지역인 목포와 부산의 경우 덴드라이트 형태의 조직이 더욱 감소하는 것으로 나타났으며 표면 전반적으로 사각모양의 부식생성물이 더욱 많이 생성된 것을 확인할 수 있었다. 따라서 옥외폭로 시간이 증가함에 따라 덴드라이트 형태의 조직은 감소하고 사각모양의 부식생성물은 더욱 증가하는 경향을 보였으며 전원, 도시, 해안지역으로 갈수록 사각형태의 부식생성물이 생성되는 것을 확인하였다.

부식생성물이 형성됨에 따라서 GL 시험편 표면의 조성이 어떻게 변화하는지 알아보기 위해 EDS 분석을 진행하였으

며 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8a는 Al 함량, Fig. 8b는 Zn, Fig. 8c는 O, Fig. 8d는 S, Fig. 8e는 Cl 이다. Fig. 8a의 Al의 경우 모재의 함량이 50.48 wt%로 나타났는데 안동, 광주, 서울의 경우에는 모재의 함량보다 전체적으로 높게 나타났으나 광주, 목포, 부산의 경우 모재의 Al 함량보다 낮게 나타났다. Fig. 8b의 Zn는 모재의 함량인 49.54 wt% 보다 모든 지역의 함량이 낮게 나왔으며 전원지역, 도시지역, 해안지역 순으로 갈수록 더 낮은 함량을 보였다. 이와 반대로 O, S, Cl의 경우 전원지역이 가장 낮게 나타났으며 도시지역, 해안지역 순으로 높게 나타났다. 이는 도시지역과 해안지역에는 GL 시험편 표면에 환경인자들이 부착되어 부식이 발생하여 부식생성물이 더 많이 형성된 것으로 판단된다.

위와 같은 이유로 생성된 부식생성물은 어떠한 구조로 이루어져 있는지 확인하기 위해 XRD 실험을 진행하여 Fig. 9에 나타내었으며 시험 시편은 모두 36개월 시험 후의 시편이다. 그림에서 보는 바와 같이 모재와 비교하였을 때 6개의 지역 모두 동일한 피크 값을 갖고 나타내었으며 지역별 부식생성물의 결정학적 구조의 차이는 크게 나타나지 않았다.

따라서 성분을 통해 부식생성물은 분석하고자 SEM-EDS를 이용하여 표면 맵핑(mapping) 분석을 진행하였다. Fig. 10은 36개월동안 옥외폭로 시험 후 지역별 GL 시험편 표면의 원소분포를 나타낸 그림이며 Al은 노란색, Zn는 녹색, O는 보라색, S는 빨간색으로 표시하였다. 전원지역인 안동과 광주, 도시지역인 서울의 경우 모재와 큰 차이점을 보이지 않았으나, 도시지역인 광주, 해안지역인 목포와 부산의 경우 Al과 Zn의 함량이 사각의 부식생성물의 위주로 크게 감소하였으며 표면 전체에 걸쳐 O의 함량이 매우 증가하였고 환경인자인 S또한 검출되었다. 이 결과는 Fig. 8의 조성변화와 동일한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 특히 Zn의 함량이 감소하는 이유는 미세조직에서 찾아볼 수 있다. Fig. 11은 GL 시험편의 단면 및 표면의 형상과 표면 맵핑 데이터

를 보여주고 있다. Fig. 11a의 단면형상을 보면 Al + Zn 도금층은 약 19 μm 로 회색 부분은 Al-농축 덴드라이트 부위이며 검은 부분은 Zn-농축 인터덴드라이트 (interdendrite) 부위이다 [23-26]. Fig. 11b의 표면 또한 마찬가지로 표면에 대해 맵핑 분석한 결과를 통해 Al 농축 부위와 Zn

농축 부위를 확인하였다. 이러한 미세조직으로 인해 보호적인 산화피막을 형성하는 Al은 부식이 덜되고, 전위가 낮고 활성적인 Zn는 부식이 되어 옥외폭로 시간이 증가함에 따라 Zn의 함량이 감소한 것으로 판단된다.

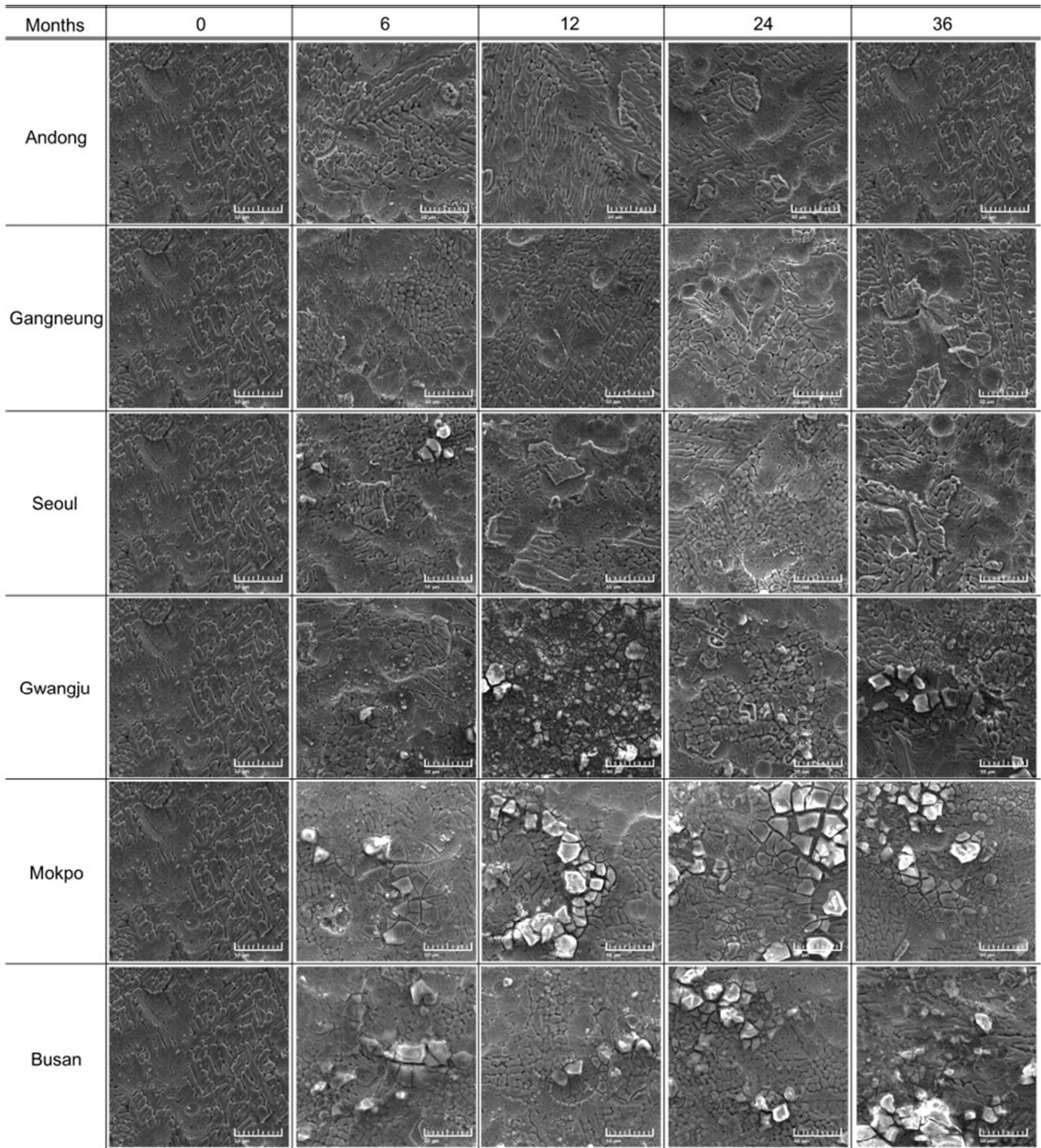


Fig. 7 Surface morphologies of galvalume steel specimens by SEM (x 1000) before and after outdoor exposure test in 6 sites.

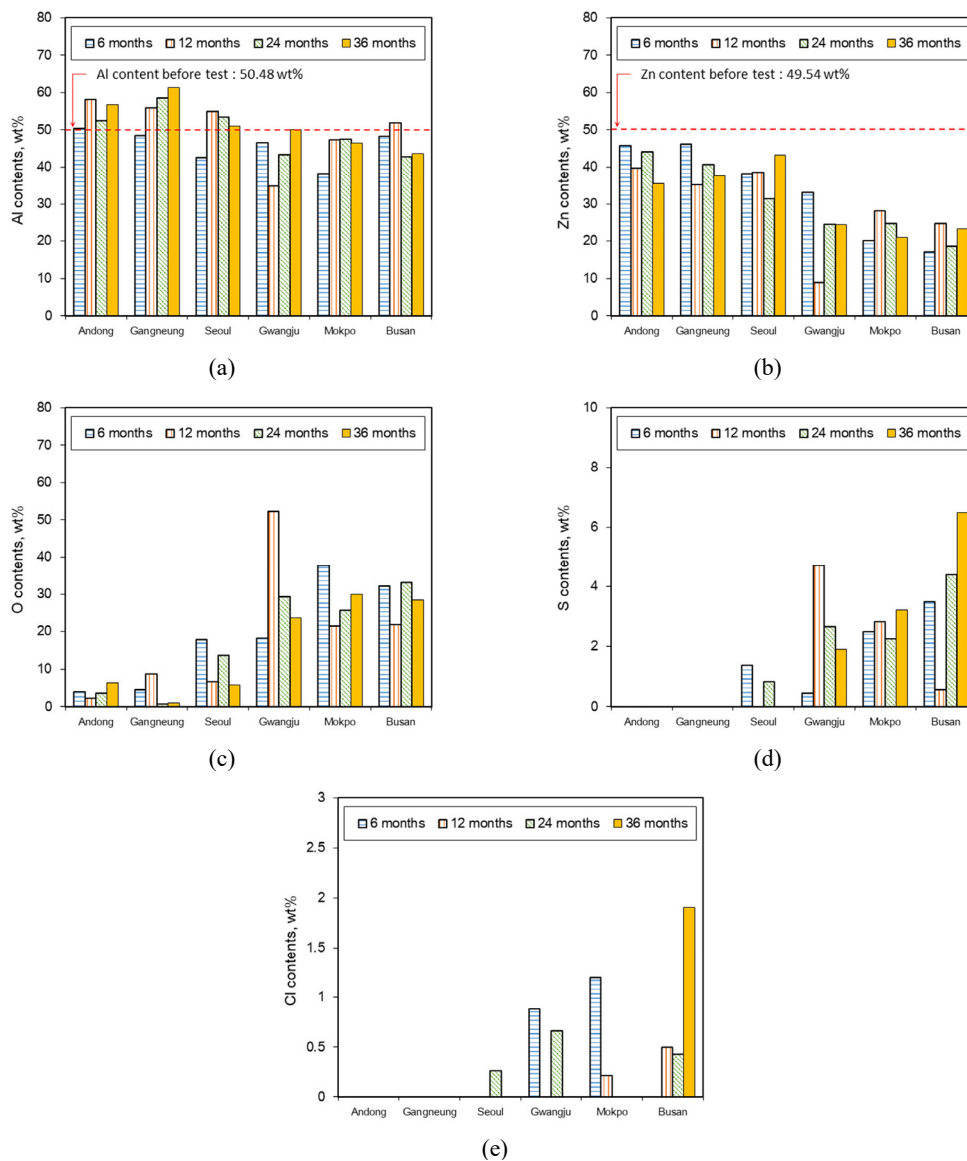


Fig. 8 Effect of exposure site on the variation of composition on the galvalume steel specimens ; (a) Al, (b) Zn, (c) O, (d) S, (e) Cl.

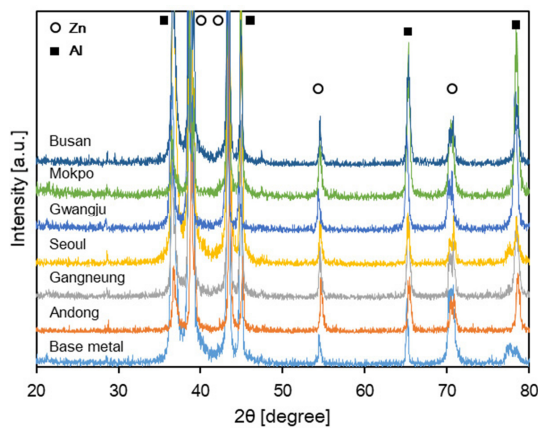


Fig. 9 XRD pattern of galvalume steel specimen surface after 36 months exposure test.

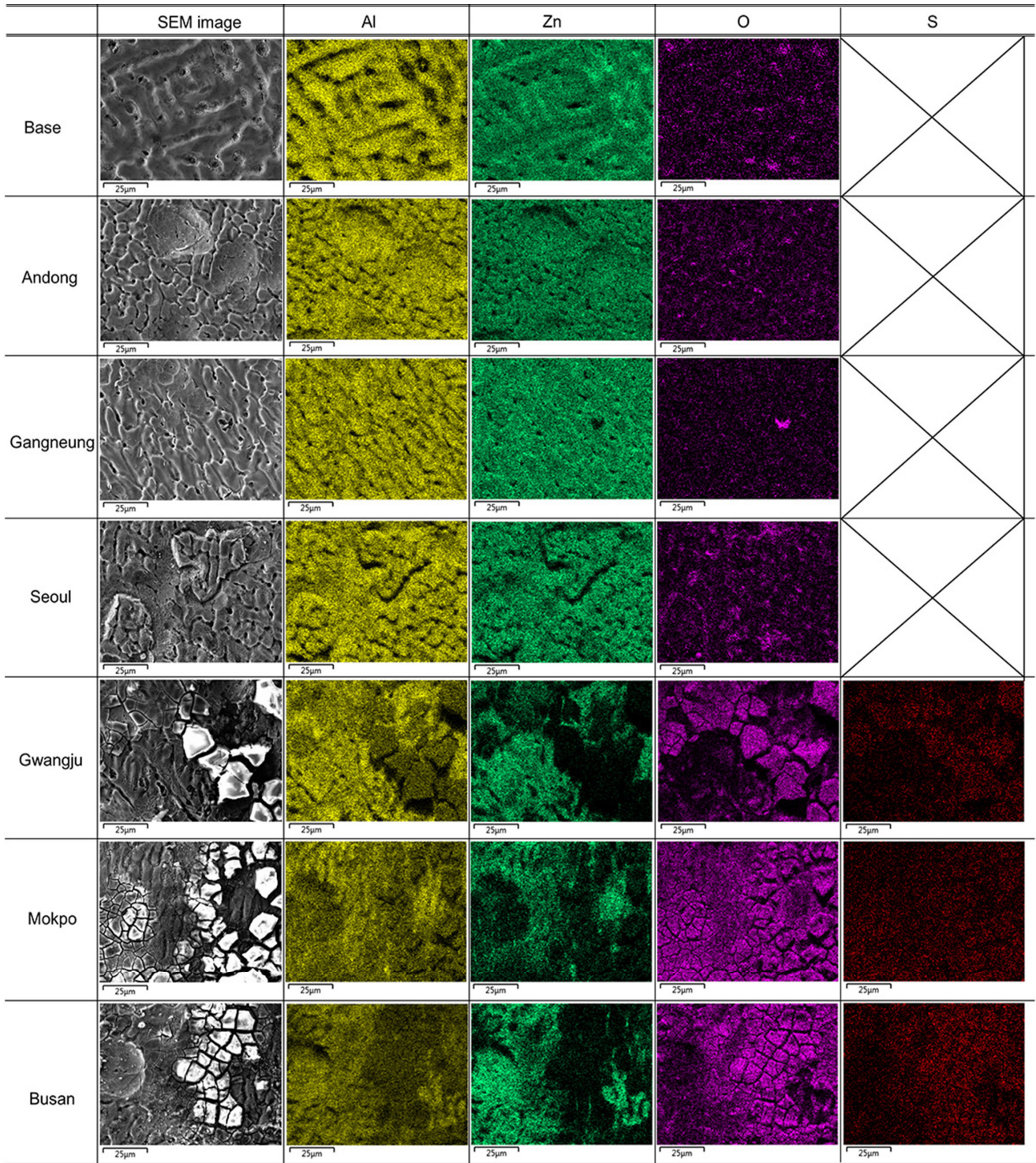


Fig. 10 Elemental distribution by SEM - EDS (x 2000) of galvalume steel specimens exposed for 36 months.

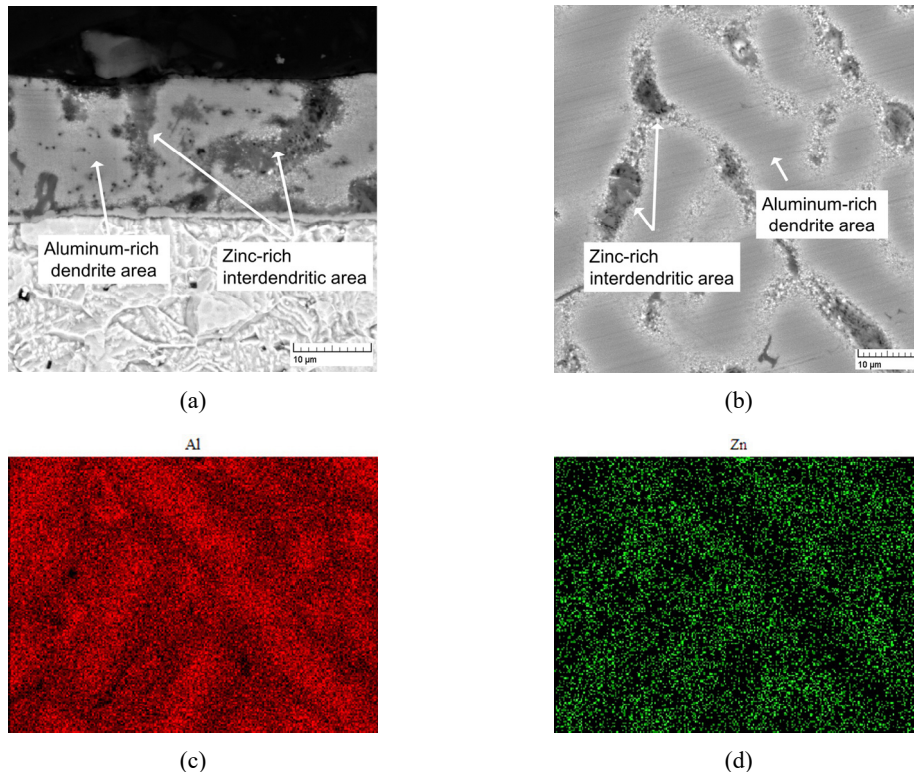


Fig. 11 Cross section and surface microstructure and surface element distribution ; (a) cross section, (b) surface, (c) distribution of Al, (d) distribution of Zn.

4. 결론

본 연구에서는 국내 6개 지역에서 36개월간 국내 옥외폭로 시험에 따른 GL 시험편의 부식거동 및 표면외관 변화를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) GL 시험편의 국내 옥외폭로 시험 후 부식속도 분석결과, 전원, 도시, 해안지역에 크게 상관없이 옥외폭로 초기에는 큰 값을 보이거나 시간이 지남에 따라 감소하는 경향을 보였다. 광택도 또한 초기 6개월까지는 광택도의 감소폭이 컸으나 6개월 이후부터는 광택도의 변화가 크게 나타나지 않았다. 또한, 색차 분석결과, 적색화, 황색화, 흑색화가 진행되었지만 적색화와 황색화의 변화폭은 매우 작아 외관형상에 큰 영향을 미치지 못한 것으로 나타났다.
- 2) 부식생성물 분석결과, 전원, 도시, 해안지역일수록 그리고 옥외폭로 시간이 길어질수록 부식생성물의 양은 증가하였으며, 환경인자(S, Cl 등)가 검출된 해안지역의 경우 Zn 함량이 크게 감소된 것으로 나타났다. Zn 함량이 크게 감소한 이유는 GL 시험편의 미세조직 분석 결과 Al-농축 덴드라이트 부위와 Zn-농축 인터덴드라이트 부위로 이루어져 있어 보호적인 산화피

막을 형성하는 Al은 도금층에 잔존하였으나, 전위가 낮고 활성적인 Zn는 용해되었기 때문으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 안동대학교의 2019-20 연구기금의 연구비 지원에 의한 연구임.

References

1. P. R. Roberge, *Corrosion Engineering Principles and practice*, pp. 379 - 381, McGraw-Hill, New York (2008).
2. J. R. Davis, *Corrosion Understanding the basics*, pp. 387 - 391, ASM International, Ohio (2000).
3. Z. Ahmad, *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, pp. 407 - 411, Elsevier, Oxford (2006).
4. A. R. Marder, *Prog. Mater. Sci.*, **45**, 191 (2000).
[https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(98\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(98)00006-1)
5. F. Rosalbino, E. Angelini, D. Macciò, and A. Saccone, *Electrochim. Acta*, **52**, 7107 (2007).
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.05.041>

6. P. Qiu, C. Leygraf, and I. O. Wallinder, *Meter. Chem. Phys.*, **133**, 419 (2012).
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.01.054>
7. C. Qiao, L. Shen, L. Hao, X. Mu, J. Dong, W. Ke, J. Liu, and B. Liu, *J. Meter. Sci. Tech.*, **35**, 2345 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.05.039>
8. Y. Liu, A. Ooi, E. Tada, and A. Nishikita, *Corros. Sci.*, **147**, 273 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.11.013>
9. M. Fedel, S. Rossi, and F. Deflorian, *Pro. Org. Coat.*, **76**, 194 (2013).
<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2012.09.006>
10. R. Romero, F. Martin, J. R. Ramos-Barrado, and D. Le, *Surf. Coat. Tech.*, **204**, 2060 (2010).
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.10.006>
11. E. A. Alvarenga and V. F. C. Lins, *Surf. Coat. Tech.*, **306**, 428 (2016).
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.04.021>
12. R. R. Pareja, R. L. Ibáñez, F. Martín, J. R. Ramos-Barrado, and D. Leinen, *Surf. Coat. Tech.*, **200**, 6606 (2006).
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.11.098>
13. D. Persson, D. Thierry, and O. Karlsson, *Corros. Sci.*, **126**, 152 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.06.025>
14. E. Almeida, M. Morcillo, and B. Rosales, *British Corros. J.*, **35**, 284 (2000).
<http://dx.doi.org/10.1179/000705900101501353>
15. E. Almeida, M. Morcillo, and B. Rosales, *British Corros. J.*, **35**, 289 (2000).
<https://doi.org/10.1179/000705900101501362>
16. K. T. Kim and Y. S. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **17**, 231(2018).
<https://doi.org/10.14773/cst.2018.17.5.231>
17. KS D ISO 9226, Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres - Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity (2008).
18. ISO 11664-4, Colorimetry - Part 4: CIE 1976 L*a*b* Colour space, ISO, Geneva, Switzerland (2008).
19. S. Sharifzadeh, L. H. Clemmensen, C. Borggaard, S. Støier, and B. K. Ersbøll, *Eng. Appl. Art. Intel.*, **27**, 211 (2014).
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.09.004>
20. ISO 11664-6, Colorimetry - Part 6: CIEDE2000 Colour-difference formula, ISO, Geneva, Switzerland (2013).
21. KS L 2405, Method of Measurement for Specular Glossiness, KS (2011).
22. ASTM D 523, Standard Test Method for Specular Gloss, ASTM (1995).
23. A. R. Moreira, Z. Panossian, P. L. Camargo, M. F. Moreira, I. C. Silva, and J. E. R. Carvalho, *Corros. Sci.*, **48**, 564 (2006).
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.02.012>
24. H. Peng, X. Su, Z. Li, J. Wang, C. Wu, H. Tu, and X. Lai, *Surf. Coat. Tech.*, **206**, 4329 (2012).
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.01.048>
25. D. Persson, D. Thierry, and N. LeBozec, *Corros. Sci.*, **53**, 720 (2011).
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.11.004>
26. A. P. Santos, S. M. Manhabosco, J. S. Rodrigues, and L. F. P. Dick, *Surf. Coat. Tech.*, **279**, 150 (2015).
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.08.046>