한국표면공학회지
J. Korean Inst. Surf. Eng
Vol.54, No.2, 2021.
https://doi.org/10.5695/JKISE.2021.54.2.62

ISSN 1225-8024(Print)
ISSN 2288-8403(Online)

〈연구논문〉

대기 노출된 Al2024 알루미늄 합금 산화막에 대한 미세조직 분석

권대엽, 최원준, 반치범

부산대학교 기계공학부

Microstructural Analysis on Oxide Film of Al2024 Exposed to Atmospheric Conditions

Daeyeop Kwon, Wonjun Choi, Chi Bum Bahn

School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

(Received 06 February, 2021 ; revised 22 March, 2021 ; accepted 25 March, 2021)

Abstract

Al2024 aluminum alloy specimens were exposed to atmospheric conditions for maximum 24 months and analyzed by electron microscopes to characterize their corrosion behavior and oxide film characteristics. As the exposure time increased from 12 months to 24 months, the number of pitting sites per 1 mm^2 increased from ~100 to ~200. The uniform oxidation (or non-pitting) region of the 12-month exposure specimen showed 30~120 nm thick oxide layer, whereas the 24-month exposure specimen showed 170~200 nm thick oxide with the local oxygen penetration region up to 1 μm deep. There was no local corrosion area observed in the 12-month exposure specimen except pitting. However, in the 24-month exposure specimen, local oxygen penetration region was observed beneath the uniform oxide layer and near the pitting cavity. Al2024 showed two times thicker uniform oxide layer but much shallower local oxygen penetration region than Al1050, which appears to be related to low Si concentration. Further research is needed on the effects of Mg segregation near the tip of the oxygen penetration region.

Keywords : Aluminum alloy, Al2024, Atmospheric corrosion, pitting corrosion, Intergranular corrosion

1. 서 론

알루미늄 합금은 일상 생활용품뿐만이 아니라 자동차, 항공기 산업 등에 널리 사용되고 있으며 계속해서 개발되어 온 합금이다. 가벼우면서 동시에 강도가 높고 연성이 좋은 특성을 가지고 있다. 과도한 하중이나 피로에 의한 기계적 손상 외에도, 알루미늄 합금이 부식을 유발하는 환경에 장시간 노출된다면 부식에 의한 손상도 고려할 필요가 있다. 대기 환경에 장시간 노출되는 경우에는 대기 부식을 고려하여 손상을 방지해야 한다. 일반적으로 알루미늄 합금은 대기에 노출되었을 때 표면에 알루미늄 산화막이 균일하게 형성되어 부식을 억제하는 역할을 하지만, 금속간 개재물(intermetallic particles)의 생성여부 등에 영향을 받아 입계부식(intergranular corrosion) 및 공식(pitting)이 발생할 가능성도 있다[1]. 특히 항공기 구

*Corresponding Author: Chi Bum Bahn
School of Mechanical Engineering, Pusan National University
Tel: +82-51-510-1033; Fax: +82-51-510-1976
E-mail: bahn@pusan.ac.kr

조재료로 널리 사용되는 알루미늄 합금 2024(Al2024)의 경우, 전체 보수 원인의 57%가 피로 균열로 인한 것이고, 그 다음으로 높은 빈도를 기록한 것이 부식에 의한 손상이며 전체 보수 원인의 약 30%를 차지한다고 보고된 바 있다 [2]. 항공기 유지보수 측면에서도 Al2024와 같은 알루미늄 합금의 대기부식에 대한 기초연구가 중요하다고 할 수 있다.

Al2024 [3-7]에 대한 대기부식 특성 연구 외에도 다양한 종류의 알루미늄 합금에 대한 대기부식 특성 연구가 발표된 바 있다. 알루미늄 합금 1050(Al1050) [8], 6061(Al6061) [9], 7072(Al7072) [10], 7075(Al7075) [3, 11] 등에 대한 대기부식 실험 및 분석 연구가 수행되었다. 이 중 Al2024에 대한 대기부식 특성 연구를 보다 상세히 살펴보면 다음과 같다. Sun 등은 Al2024와 Al7075에 대해 최대 20년간 서로 다른 지역에서 노출된 시편을 분석하였다[3]. Al2024 경우, 해안가에 노출되었을 때 표면 부식으로 인한 박리현상이 매우 심하게 발생한 것으로 보고하였다. Wang 등은 염분이 있는 호수 주변 환경에서 최대 6년간 노출된 시편을 분석하였다[4]. 처음 2년간 무게 감소가 주로 발생하였으며, 그 이후에는 무게 감소 비율이 낮게 유지되었다. 공식이나 입계부식(intergranular corrosion) 외에도 잔류응력으로 인한 응력부식균열(stress corrosion cracking) 발생을 보고하기도 하였다. 이러한 부식의 주요 원인으로는 호수에서 발생하여 표면에 흡착된 $MgCl_2$ 입자라고 판단하였다. Sun 등은 공장지대와 해안지역에서 각각 20년간 노출된 시편을 분석하였다[5]. 해안지역에서 노출된 시편이 상대적으로 박리현상이 많이 발생하였으며, 공장지대에서 노출된 시편 표면에는 황(Sulfur) 성분이 검출되었다. 황 성분과 염소가 함께 존재할 때는 황 이온으로 인해 박리현상을 지연시키는 것으로 보고하기도 하였다. Zhang 등은 7년에서 최대 20년간 노출된 Al2024 시편을 분석하였다[6]. 7년에서 20년 사이 두께감소는 선형적으로 발생한다고 보고하였으며, 여러 부위에서 발생한 공식이 서로 연결될 경우 박리 현상을 촉진한다고 보고하고 있다. 표면을 따라 평행하게 발생한 입계부식 단면도 보여주고 있다. Zhang 등은 이전 연구를 이어서 입계부식의 발생 원인을 분석하였다[7]. 입계를 따라 금속간 개재물(intermetallic compound)과 같은 입자들이 많이 존재할수록 입계부식이 보다 쉽게 발생할 수 있으며, 이는 입자생성으로 인해 그 주변 모재에서 Cu 함량이 줄어들어 갈바닉 부식(galvanic corrosion)이 발생할 수 있는 것이 주요 원인이라고 판단하였다. 또한, 표면과 평행한 입계를 따라 입계부식이 쉽게 발생하는 것은, 입자들 또한 표면에 평행한 입계를 따라 많이 생성되어 있으며 부식으로 인한 부식생성물이 상대적으로 팽창하기 쉽기 때문이라고 주장하였다. 앞선 연구들에서 언급되었듯이, 입계부식은 여러 종류의 알루미늄 합금 대기부식에서 공통으로 발견되는 현상이다. 입계부식은 입계에서의 미세조직, 특히 침전물 생성이 중요한 역할을 하는데, 입계에 생성된 금속간 개재물이 산소 침투를 막아주거나 특정 합금 원소들의 농도가 상대적으로 입계에서 높거나 낮은 것이 원인으로 생각되고 있다[12]. 알루미늄 합금의 입계부식과 관련하여, Si, Mg, Cu 등의 합금원소가 영향을 미친다는 연구보고가 있다[13-19].

국내에서도 5년간 장기 대기부식 실험을 통해 다른 합금들과 부식 속도를 비교한 바 있으나 산화막에 대한 상세 분석 결과는 보고되지 않았다[20]. 김선규 등은 대기부식 후 알루미늄 합금 표면에 생성된 산화막에 대한 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy; TEM) 분석을 수행하였다[21]. Al1050과 Al7075 시편을 9개월, 12개월 동안 대기 노출시킨 후 표면 산화막 단면을 관찰하여 각 알루미늄 합금의 대기 부식에 대한 경향성 차이를 분석하였다. 그 결과 Al1050에서 입계를 통한 산소침투, 즉 입계부식이 Al7075에 비해 더 빨리 진행되는 것으로 보고하였으나 그에 대한 원인은 분석하지 못하였다. 김대건 등은 Al1050과 Al7075 시편으로 24개월까지 대기 노출시킨 후 표면 산화막을 분석하였다[22]. Al1050이 입계 산화가 활발한 이유로, MgSi 등으로 개재물을 만들지 않고 남아 있던 잉여 Si가 입계에 상대적으로 많이 존재하면서 입계부식을 쉽게 유발한 것으로 판단하였다. Al2024의 대기부식에 대한 국내연구는 부족한 상황이다.

본 연구에서는 이전 연구에서 보고되지 않았던 비교적 단기간 노출된 Al2024의 대기 부식 특성을 파악하기 위하여 12개월 및 24개월 대기 노출된 Al2024 시편에 대한 산화막 표면 및 단면 분석을 수행하였다.

2. 실험방법

Al2024의 시편을 폭 75 mm와 너비 200 mm의 판 형태로 가공하였다. Al2024의 주요 합금원소는 Cu, Mg 등을 들 수 있다. 실험에 사용된 Al2024의 화학성분은 표 1과 같다. 시편 가공 후 #1500과 #2000 사포를

이용하여 표면을 연마하고 아세톤 및 순수로 세척한 후 대기부식 실험을 진행하였다. Al2024의 결정립 크기는 20~40 μm 범위이다.

Table 1. Chemical composition(wt%) of aluminum alloy Al2024 specimens.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.05	0.14	4.6	0.62	1.5	0.01	0.1	0.03	Bal.

ASTM G50-10[23]에 따라 대기부식 실험을 수행하였다. ASTM G50-10에서 명시하는 재료와 모양 조건에 맞추어 알루미늄 시편 거치대를 제작하였다. 거치대의 몸체는 304 Stainless Steel로 제작하였으며, 시편을 고정하는 부분은 알루미늄 시편과의 galvanic couple을 방지하고자 나일론을 사용하였다. ASTM G50-10에 명시된 여러 제약조건들을 만족하면서 외부인의 접근이 차단된 장소로 부산대학교 내부 건물 옥상(위도: 35°14'01.4"N, 경도: 129°04'59.1"E)을 선정하였다. 시편은 정남향을 바라보게 설치하였으며, 지면에서 30도의 각도를 이루도록 설치하였다. 바닥으로부터 1m이상 간격을 유지하였다. 12개월 및 24개월이 지난 시점에서 시편을 수거하였다. 시편 수거 후 순수에서 초음파 세척을 수행하였다. 알루미늄 시편 거치대 형상은 선행 논문에서 보고한 바 있다[21].

주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)을 이용하여 시편 표면을 먼저 관찰하였다. 그리고 집속 이온빔(Focused Ion Beam, FIB; FEI Scios™ DualBeam ™) 방법으로 공식(pitting)이 발생한 영역과 발생하지 않은 영역에 대하여 각각 수 μm의 크기로 시편을 채취하였다. FIB 가공을 위해서 초기에 백금(Pt) 코팅을 시편 표면에 실시하여 표면 손상을 방지하였다. FIB 가공으로 얻은 시편을 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy, TEM; FEI Talos™ F200X)으로 관찰하였으며, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) 관찰로 산소 및 금속 개재물의 분포를 파악하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 표면 분석

그림 1은 12개월 및 24개월 대기 노출된 Al2024 시편들의 표면 SEM 사진이다. 12개월 노출 시편에서는 시편 준비과정 중 발생한 연마 흔적이 남아 있으나, 24개월 노출 시편에서는 그 흔적을 찾아보기 어렵고 산화로 인해 표면이 변화된 것을 볼 수 있다. 24개월 노출된 시편에서는 12개월 노출된 시편보다 표면산화막이 생성된 후 떨어져 나간 부분이 더 자주 관찰되었다(그림 1에서 사각형 영역 참조). 그림 2에서는 표면에 생성된 공식(pitting)의 개수를 비교하였다. 1mm × 1mm 단위면적당, 12개월 및 24개월 노출된 시편에서 각각 약 100개, 200개가 관찰되었다. 24개월 노출된 시편에서 관찰된 pitting은 개수뿐만이 아니라 크기도 커진 것으로 나타났다. 그림 3은 시편 표면에 생성된 부식생성물 혹은 산화막 영역에 대한 확대 SEM 사진이다. 12개월 및 24개월 노출 시편 모두 표면에 생성된 알루미늄 산화막이 성장하고 습한 조건 및 건조한 조건에 반복 노출되는 과정에서 균열이 발생하고 일부는 떨어져 나간 것을 보여주었다. 12개월 노출된 시편에 비해 24개월 노출된 시편에서는 알루미늄 산화막이 떨어져 나간 부분에 부식이 추가로 더 진행되었다. 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이, 24개월 노출된 시편에서 산화막이 떨어져 나간 부위에 pitting이 자주 관찰되었다. SEM을 이용한 표면분석 결과를 요약하자면, Al2024 시편은 시간에 따라 표면에서 단위면적 당 공식 발생 개수가 증가하고 산화막이 성장 후 떨어져 나가는 경우가 빈번해져 전반적으로 부식이 더 증가한다는 것을 확인하였다.

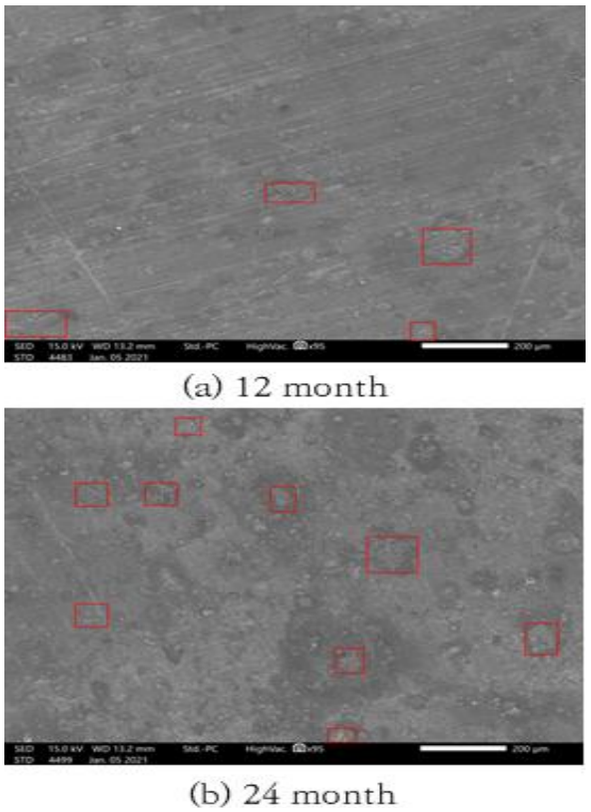


Fig. 1. SEM surface images of Al2024 surface after (a) 12-month and (b) 24-month exposure to atmospheric conditions (Scale bar is 200 μm long).

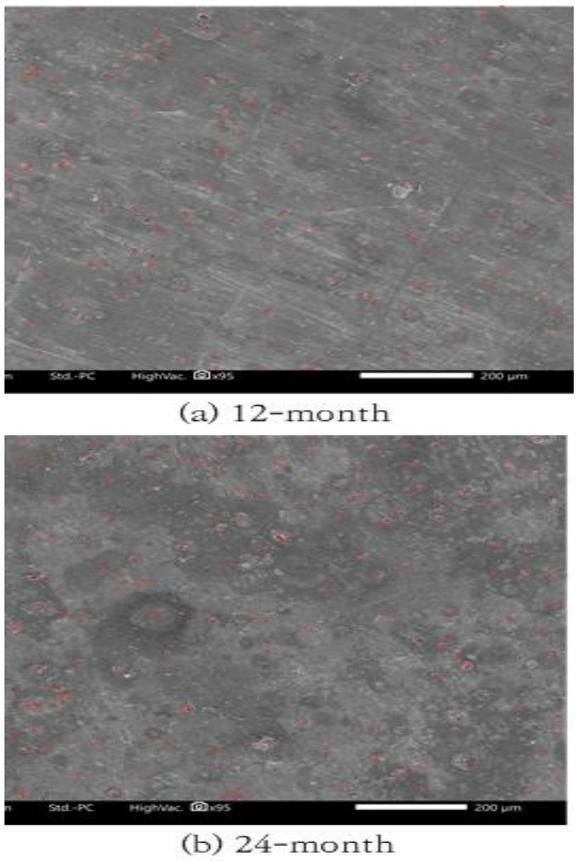


Fig. 2. SEM surface images of Al2024 surface after (a) 12-month and (b) 24-month exposure to atmospheric conditions showing pitting occurrence frequency (Scale bar is 200 μm long).

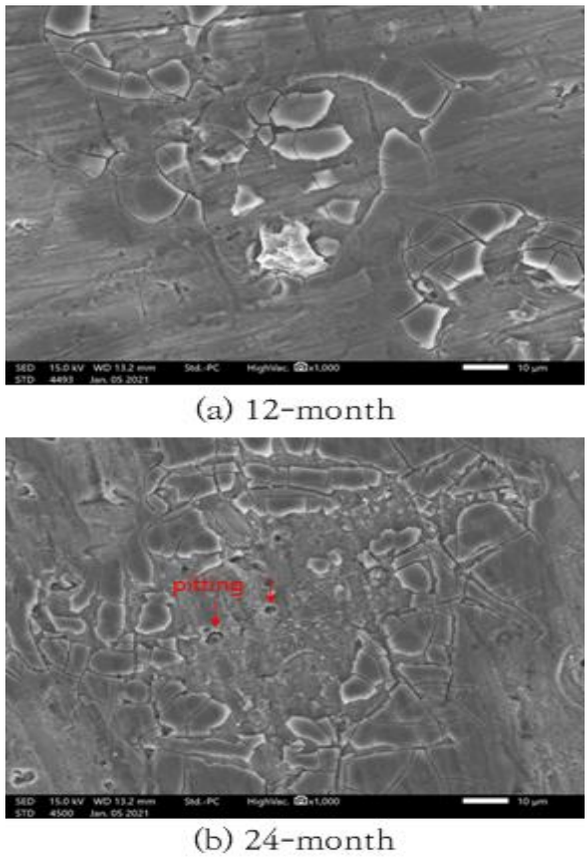


Fig. 3. SEM surface images of corrosion products or oxide on Al2024 after (a) 12-month and (b) 24-month exposure to atmospheric conditions (Scale bar is 10 μm long).

3.2 단면 TEM 분석

12개월 및 24개월 동안 대기에 노출된 Al2024 시편에서 균일 부식 (uniform corrosion) 혹은 pitting이 발생한 부분을 SEM으로 판별 후 표면에 백금코팅을 입히고 FIB 가공하여 시편을 채취하였다. 각각의 시편에서 산화막을 중심으로 TEM EDS 분석을 시도하였다. 그림 4는 TEM 시편을 채취한 표면 위치 및 FIB 가공을 통해 완성된 TEM 시편의 전체적인 형상을 보여주고 있다. 균일 부식이 발생한 경우에는 매우 얇은 산화막이 표면에 형성된 것을 알 수 있으며, pitting 발생 시편은 단면이 깊게 파인 것을 알 수 있다. 공동 내부는 FIB 가공 중 가공의 편의를 위해 백금으로 채워졌다. 24개월 노출 시편 경우, 그림 4(c)에서와 같이 표면에서는 균일한 부식만 확인 가능하였으나 단면에서는 균일한 산화막 외에도 국부적인 부식이 함께 발생한 것을 알 수 있었다. 각 경우에 대한 상세 분석 결과는 아래 기술하였다.

그림 5는 12개월 노출 시편에서 균일하게 형성된 표면 산화막 단면을 따라 촬영한 파노라마 사진이다.

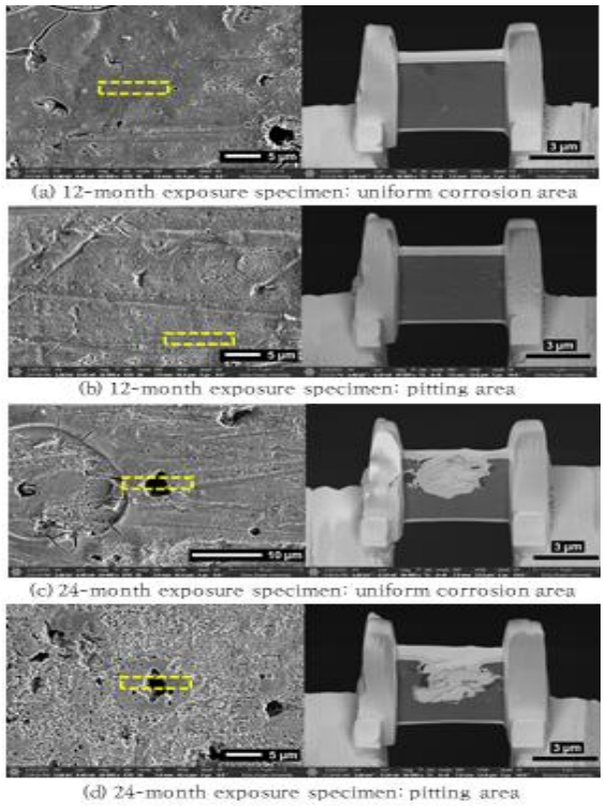


Fig. 4. Surface locations where FIB machining was performed (yellow dotted rectangle in left photos) and overall images of TEM specimens (right photos).

산화막 두께가 30~120 nm 정도로 얇으나 불균일한 산화막이 형성되었다. 그림 6은 24개월 노출 시편에 대한 단면 파노라마 사진이다. 산화막 두께가 약 170~200nm 정도로 단면에 걸쳐 비교적 균일하고, 12개월 대비 더 두꺼워진 것을 알 수 있다. 또한 단면 좌측에 산화막으로부터 최대 1 μm 정도 깊이의 국부적인 산소 침투 영역이 존재하였다. 금속 모재 내 200 nm 이하의 작은 입자들이 관찰되는데, EDS 결과로 볼 때 AlCuMn 금속간 개재물들로 생각된다. 이전 Al-Cu-Mg 합금 미세조직 분석에서도 AlCuMnFe 금속간 개재물 생성을 보고한 바 있으며 [24], 본 시편에서 미량의 Fe도 함께 검출되어 동일한 금속간 개재물로 판단된다.

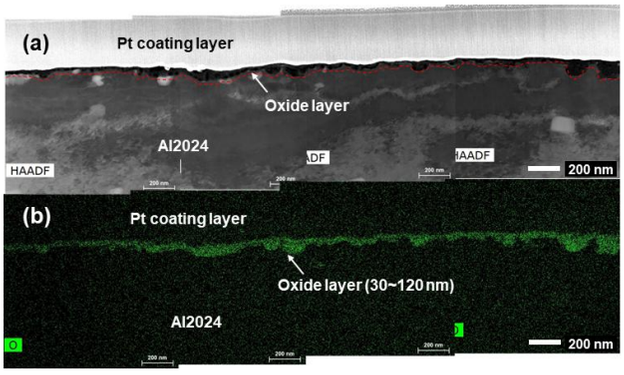


Fig. 5. TEM cross-section panorama images and EDS elemental mapping of surface oxide layer formed on Al2024(non-pitting) after 12-month exposure; (a) dark field image and (b) O.

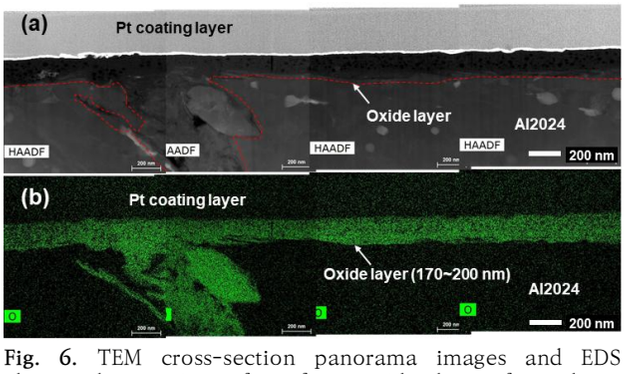


Fig. 6. TEM cross-section panorama images and EDS elemental mapping of surface oxide layer formed on Al2024(non-pitting) after 24-month exposure; (a) dark field image and (b) O.

24개월 노출시편의 단면에서 관측된 부분적인 산소 침투 영역을 보다 상세히 관찰하였다. 그림 7은 부분적인 산소 침투 영역에 대한 TEM EDS 분석 결과이다. 일부는 입계를 따라 산소가 침투한 흔적이 관찰되나 대부분은 입계뿐만이 아니라 결정립 내부까지 모두 산화된 형태를 보여주었다. Cu 및 Mn이 포함된 입자를 따라 산소침투 층이 길게 형성되어 있는 것도 관찰되었다. 금속간 개재물과 산화층 간의 관계를 알아보기 위해 그림 8과 같이 개재물 영역을 확대하여 관찰하였다. Cu가 농축된 부분과 Mn이 농축된 부분이 겹치기도 하면서 겹치지 않는 부분도 있는 것으로 나타났다. 개재물 전체 성분은 AlCuMn으로 볼 수 있으나 그 내부에서는 Cu가 농축된 개재물과 Mn이 농축된 개재물이 서로 섞여 있는 경우도 존재할 수 있다는 것을 그림 8에서 보여주고 있다. 산소 침투 영역은 금속간 개재물을 따라서 형성되어 있어 입계를 따라 길게 형성된 금속간 게재물은 산소 침투의 빠른 통로를 제공할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

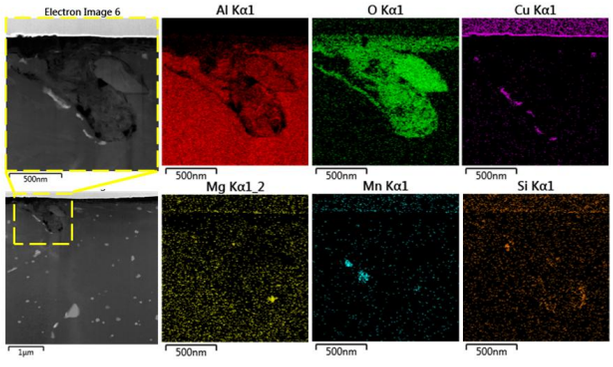


Fig. 7. TEM cross-section image and EDS elemental mapping of local oxygen penetration region observed in the oxide layer formed on Al2024(non-pitting) after 24-month exposure.

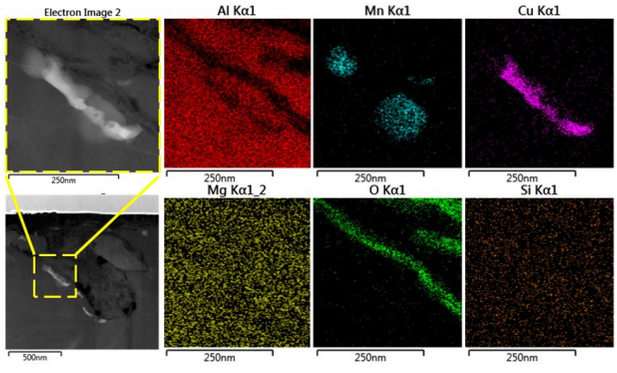


Fig. 8. TEM image and EDS elemental mapping near the intermetallic particle region observed in Fig. 7.

산소 침투 영역에서 특정 원소의 영향 가능성을 파악하기 위해 그림 9와 같이 산소 침투 영역 끝부분에서 고배율 TEM-EDS 관찰을 진행하였다. 산소 침투는 입계를 따라 진행된 것으로 보이나 입계 근처의 결정립 내부까지 산화가 진행된 것으로 판단된다. 그림 9와 같이 산소 침투 영역을 가로지르는 line EDS 분석을 수행하였다. 산소 침투 영역에서 Si 농축은

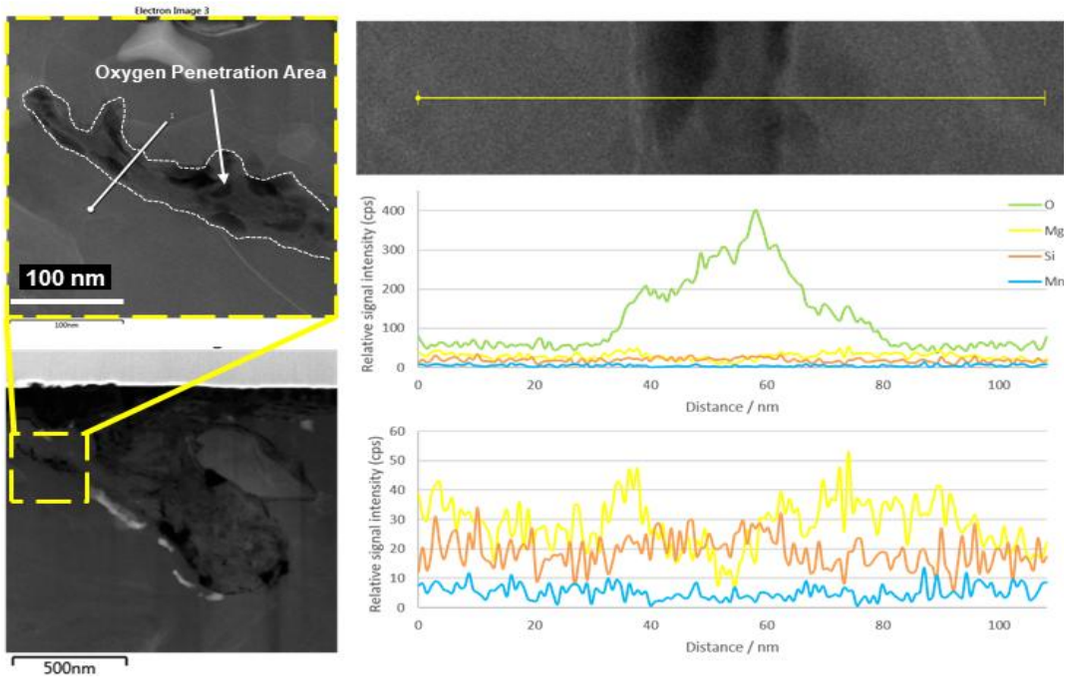


Fig. 9. TEM image and line EDS profile of local oxygen penetration region observed in Fig. 7.

관찰되지 않았으나, 산소 침투 영역과 기저 금속 간 경계면에서 Mg 농도가 다소 증가하였다가 산화영역에서 감소하는 것이 일부 관찰되었다. 그림 10에서는 산소 침투 끝부분에서의 고배율 TEM-EDS 결과를 보여주고 있다. Si이 농축된 것을 볼 수 있으며 Mg이 경계부분에서 미약하지만 농축된 신호가 관찰되었다. 이를 확인하기 위해 그림 10에서 나타낸 바와 같이 line EDS를 수행하였으며 그 결과는 그림 11에 나타내었다. Line EDS 결과상에서도 Si이 산소 침투 영역 내부에 농축된 것을 볼 수 있으며, Mg은 산소 침투 영역에서는 농도가 낮고 산화층과 기저 금속 간 경계에 다소 농축된 것을 보여주고 있다. 그림 9에서는 산화층 내부 Si 농축이 뚜렷하게 관찰되지 않았으나 산화층 끝부분에서는 Si 농축이 관찰되었다. Al2024에 포함된 미량의 Si이 입계부식에 영향을 미친다는 것을 보여주고 있다. 산화층 끝부분에서 Mg이 검출된 점은 Al7075에 대한 분석 결과[22]와 유사하다. Mg이 입계산화에 미치는 영향에 대해서는 추가 연구가 필요하다고 생각된다.

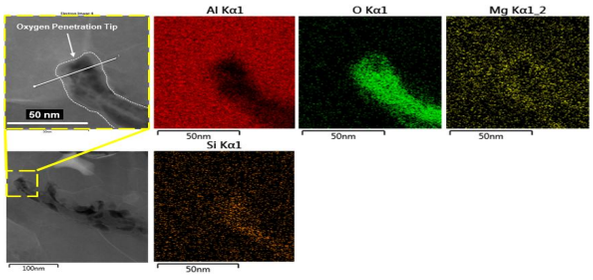


Fig. 10. TEM image and EDS elemental mapping for the tip area of the local oxygen penetration region observed in Fig. 9.

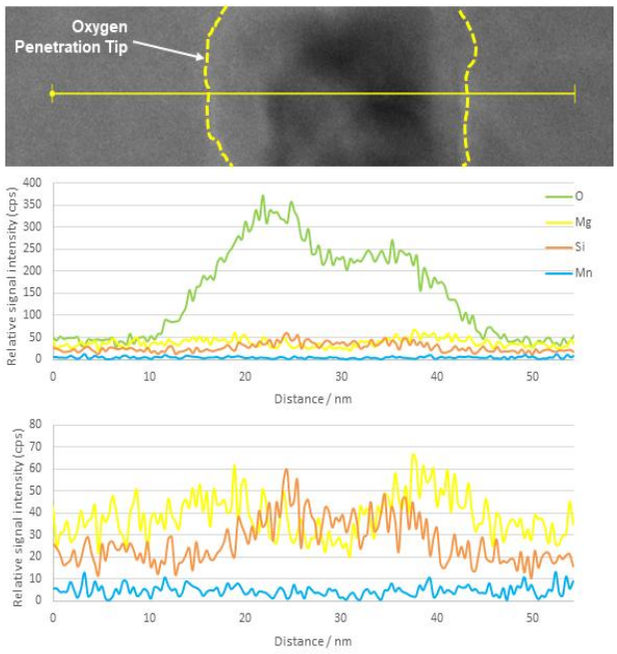
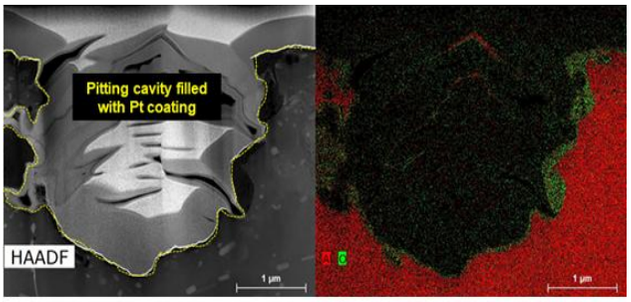


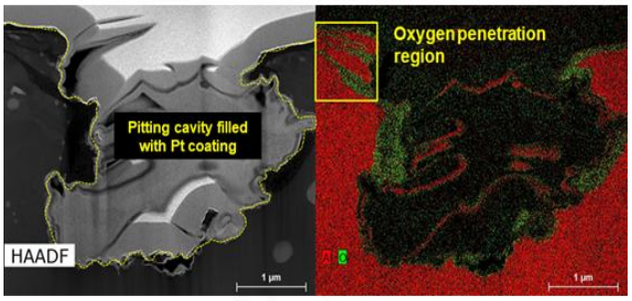
Fig. 11. Line EDS profiles for the tip area of the local oxygen penetration region observed in Fig.10.

그림 12는 Al2024 시편 pitting 단면을 TEM EDS로 분석한 사진이다. Al 분포를 통해 약 3 μm 깊이의 pitting이 발생한 것을 확인하였다. 12개월 및 24개월 시편에서 FIB 가공을 위한 pitting 영역 선정 시 표면에서 pitting 입구 크기가 유사한 두 곳을 선택하였는데, 그림 12에서 볼 수 있듯이 그 깊이 또한 유사한 것으로 나타났다. 산소 신호의 분포를 보면, 12개월 및 24개월 모두 pitting 내부 표면에 산화막이 형성되어 있는 것을 볼 수 있으며, 부분적으로는 두꺼운 산화막이 존재한다는 점도 유사하였

다. 유일한 차이점은, 12개월 시편과는 달리 24개월 노출 시편에서는 산소 침투가 국부적으로 발생한 것을 확인하였다(그림 12(b) 사각형 영역 참조). Pitting이 발생한 내부 벽면에서 입계를 따라 산소 침투가 동시에 진행된 것으로 생각된다. 이는 균일 부식 발생 단면 비교에서도 관찰된 차이점이다. 이를 통해 Al2024 대기부식의 시간에 따른 변화는 다음과 같이 요약할 수 있다. 12개월까지는 pitting을 제외한 국부적인 부식 형태는 발생하지 않으나, 대기 노출 기간이 24개월까지 길어지면 산화막 아래 국부적으로 산소가 깊게 침투하는 현상이 발생할 수 있다.



(a) 12-month exposure



(b) 24-month exposure

Fig. 12. TEM cross-section images and EDS elemental mapping of pitting area in Al2024 exposed to atmospheric conditions for (a) 12 months or (b) 24 months.

3.3 알루미늄 합금 간 대기부식 특성 비교

본 연구와 동일한 위치에서 대기 노출되었던 다른 종류의 알루미늄 합금에 대한 균일 부식 산화막 두께와 비교한 결과를 그림 13에 도시하였다. 12개월 노출 시편 경우, Al2024는 Al1050보다 더 두꺼운 산화막이 형성되었으나 Al7075와는 유사하다고 판단된다. 다만, 두께의 편차가 세 합금 중 가장 크게 나타났다. 24개월 노출 시편 경우에는, Al2024가 Al1050 대비 약 2배 이상 두꺼웠다. Al7075는 산화막 두께 결과가 보고되지 않았으나 12개월 결과와 유사하게 Al2024와 유사한 두께를 보일 것으로 생각된다.

Al2024는 비록 Al1050에 비해 약 2배 이상 두꺼운 산화막이 형성되나, 국부적인 산소 침투 영역은 Al1050 대비 제한적이다. Al1050은 균일한 산화막 아래 입계를 따른 산소 침투가 3 μm 이상 발생한 것이 보고되었다[22]. Al7075 경우, 12개월 이하 시편에서는 균일 부식 산화막 아래쪽에서 입계부식은 매우 부분적으로만 관측되거나 관측되지 않았으나, 24개월 대기 노출 시편에서는 더 자주 입계부식이 관측되었다[21-22]. 이러한 Al7075의 특징은 Al2024 시편이 12개월 및 24개월 대기 노출 후 보여준 결과와 유사하다고 할 수 있다. Al1050 대비 낮은 Si 함량이 입계부식의 정도를 낮춘 것으로 생각된다.

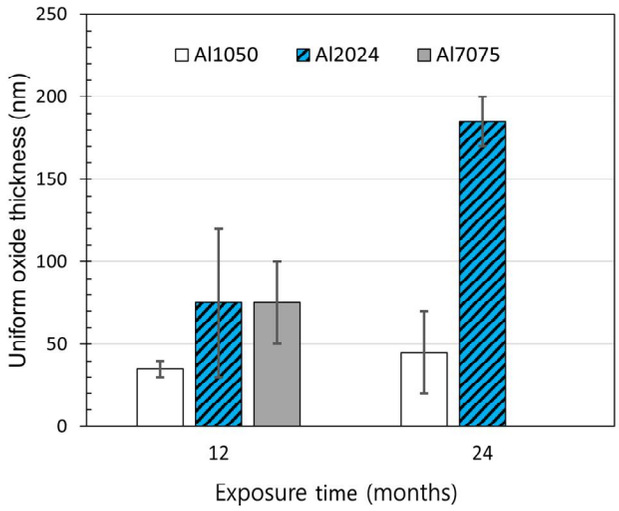


Fig. 13. Comparison of oxide layer thicknesses formed on Al1050[21-22], Al2024(this study), and Al7075[21] exposed to atmospheric conditions.

4. 결 론

대기환경에 12개월 및 24개월간 노출시킨 Al2024 알루미늄 합금 시편을 이용하여 대기부식에 의해 생성된 산화막에 대한 미세조직 분석을 수행하였다. 그에 대한 주요 결론은 아래와 같다.

노출시간이 12개월에서 24개월로 증가함에 따라 표면에서 발생하는 공식 개수가 1 mm^2 당 약 100개에서 200개로 증가하였으며, 손상된 산화막 영역이 표면에서 더 자주 관찰되었다. 12개월 노출 시편 경우 30~120 nm 두께의 산화막이 형성되었으며 부분적인 입계부식은 관찰되지 않았다. 24개월 대기 노출 시편에서는 170~200 nm 정도의 균일한 산화막이 관측되었으며, 균일한 산화막 아래 약 1 μm 깊이의 부분적인 산소침투 영역도 관찰되었다. 12개월까지는 pitting을 제외한 국부적인 부식 형태는 발생하지 않으나, 대기 노출 기간이 24개월까지 길어지면 산화막 아래 국부적으로 산소가 깊게 침투하는 현상이 발생할 수 있다.

Al1050 대비 12개월 노출기준 약 2배, 24개월 노출기준 약 4배 더 두꺼운 균일한 산화막을 가지나 국부적인 산소 침투 깊이는 약 1/3 이하로 얕다. 균일한 산화막은 더 두껍고 국부적인 산소 침투 깊이는 더 얕은 현상은 Al7075와 Al1050 비교에서도 관찰된 바 있으며, Al2024와 Al7075의 상대적으로 낮은 Si 함량이 주요 원인으로 생각된다. 산소 침투 영역 끝부분에서 Mg 성분의 농축 현상이 관찰되었다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

[1] ASM International, ASM Handbook Vol 13A Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, 2003, pp. 196-209.

[2] N. D. Alexopoulos, C. J. Dalakouras, P. Skarvelis, S. K. Kourkoulis, Accelerated corrosion exposure in ultra thin sheets of 2024 aircraft aluminum alloy for GLARE applications, Corro. Sci. 55 (2012) 289-300.

[3] S. Sun, Q. Zheng, D. Li, J. Wen, Long-term atmospheric corrosion behaviour of aluminium alloys 2024 and 7075 in urban, coastal and industrial environments, Corros. Sci. 51 (2009) 719-727.

[4] B. B. Wang, Z. Y. Wang, W. Han, W. Ke, Atmospheric corrosion of aluminum alloy 2024-T3 exposed to salt lake environment in Western China, Corros. Sci. 59 (2012) 63-70.

[5] S. Sun, S. Chen, Y. Ma, Q. Zheng, S. Hu, Exfoliation Corrosion of Extruded AA2024-T4 in the Industrial and Coastal-Industrial Environment, Corrosion 70 (2014) 1064-1073.

[6] T. Zhang, Y. He, R. Cui, T. An, Long-Term Atmospheric Corrosion of Aluminum Alloy 2024-T4 in a Coastal Environment, J. Mater. Eng. Perform. 24 (2015) 2764-2773.

[7] S. Zhang, T. Zhang, Y. He, D. Liu, J. Wang, X. Du, B. Ma, Long-term atmospheric corrosion of aluminum alloy 2024-T4 in coastal environment: Surface and sectional corrosion behavior, J. Alloys Comp. 789 (2019) 460-471.

[8] T. F. Otero, A. Porro, A. S. Elola, Prediction of Pitting Probability on 1050 Aluminum in Environmental Conditions, Corrosion 48 (1992) 785-791.

[9] X. K. Yang, L. W. Zhang, S. Y. Zhang, M. Liu, K. Zhou, X. L. Mu, Properties degradation and atmospheric corrosion mechanism of 6061 aluminum alloy in industrial and marine atmosphere environments, Mater. Corros. 68 (2017) 529-535.

[10] M. Poltavtseva, A. Heyn, E. Boese, Long term corrosion behavior of clad aluminum materials under different atmospheric conditions, Mater. Corros. 64 (2013) 723-730.

[11] J. Ryl, J. Wysocka, M. Jarzynka, A. Zielinski, J. Orlikowski, K. Darowicki, Effect of native air-formed oxidation on the corrosion behavior of AA 7075 aluminum alloys, Corros. Sci. 87 (2014) 150-155.

[12] S.P. Knight, M. Salagaras, A.R. Trueman, The study of intergranular corrosion in aircraft aluminium alloys using X-ray tomography, Corros. Sci. 53 (2011) 727-734.

[13] Yoshiyuki Oya, Yoichi Kojima, Nobuyoshi Hara, Influence of Silicon on Intergranular Corrosion for Aluminum Alloys, MATERIALS TRANSACTIONS, Volume 54, Issue 7, (2013), 1200-1208.

[14] Binger, W. W., Hollingsworth, E. H. and Sprawls, D., In Aluminium Vol. I, ed. Van Horn, ASM, (1967), p. 209.

[15] M. Kaifu, H. Fujimoto and M. Takemoto, Influence of Mn contents and heat treatments on intergranular corrosion of Al-Mn alloys, J. Japan Inst. Met. 32 (1982), 135-142.

[16] M. Zamin, The Role of Mn in the Corrosion

Behavior of Al-Mn Alloys, Corrosion 37 (1981) 627-632.

[17] Y. Zheng, B. Luo, Z. Bai, J. Wang, and Y. Yin, Study of the Precipitation Hardening Behavior and Intergranular Corrosion of Al-Mg-Si Alloys with Differing Si Contents, Metals 7(10), (2017) 387.

[18] J. R. Galvele and S. M. de De Micheli, Mechanism of intergranular corrosion of Al-Cu alloys, Corros. Sci. 10 (1970), 795-807.

[19] Y. Zou, Q. Liu, Z. Jia, Y. Xing, L. Ding, and X. Wang, The intergranular corrosion behavior of 6000-series alloys with different Mg/Si and Cu content, Appl. Surf. Sci. 405 (2017) 489-496.

[20] Y. S. Kim, H. K. Lim, J. J. Kim, W. S. Hwang, and Y. S. Park, Corrosion cost and corrosion map of Korea-Based on the data from 2005 to 2010, Corros. Sci. Tech. 10 (2011) 52-59.

[21] 김선규, 이찬형, 반치범. 대기 부식에 의해 생성된 Al1050 및 Al7075 알루미늄 합금 산화막에 대한 투과전자현미경 분석. 한국표면공학회지, 50(6), (2017) 447-454.

[22] 김대건, 김가림, 최원준, 반치범, 24개월 대기 노출된 Al1050 및 Al7075 알루미늄 합금 산화막에 대한 투과전자현미경 분석. 한국표면공학회지, 52(2), (2019) 62-71.

[23] American Society for Testing and Materials (ASTM) International, ASTM G50-10 Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals (2010).

[24] Z. Cui, X. Li, H.ZhangK.XiaoC.Dong, Z.Liu,L.Wang, Atmospheric corrosion behavior of 2A12 aluminum alloy in a tropical marine environment, Advances Mater. Sci. Eng. (2015) Article ID 163205.