

항공기 주기환경이 대기부식위험도에 미치는 영향

윤주희¹ · 이두열^{2†} · 박승렬¹ · 김민생¹ · 최동수³

¹공군 항공기술연구소, 대구시 동구 아양로 352 사서함 304-150호

²국방대학교 국방관리대학원 국방과학학과, 충청남도 논산시 양촌면 황산별로 1040

³공군사관학교 항공우주공학과, 충청북도 청주시 상당구 남일면 사서함 335-1호

(2021년 1월 18일 접수, 2021년 3월 3일 수정, 2021년 3월 4일 채택)

The Effect of Aircraft Parking Environment on Atmospheric Corrosion Severity

Juhee Yun¹, Dooyoul Lee^{2†}, Sungryul Park¹, Min-Saeng Kim¹, and Dongsu Choi³

¹Aero Technology Research Institute, Republic of Korea Air Force, 352 Ayang-ro P.O. Box 304-150, Dong-gu, Daegu-si, 41052, Korea

²Department of Defense Science, Graduate School of Defense Management, Korea National Defense University, 1040 Hwangsanbeol-ro, Yangchon-myeon, Nonsan-si, Chungcheongnam-do, 33021, Korea

³Republic of Korea Air Force Academy, Republic of Korea Air Force, P.O. Box 335-1, Namil-myeon Sangdang-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, 28187, Korea

(Received January 18, 2021; Revised March 03, 2021; Accepted March 04, 2021)

Atmospheric corrosion severity associated with aircraft parking environment was studied using metallic specimens, and temperature and humidity sensors installed at each aircraft operating base. Data were analyzed after a year of exposure. Silver was used to measure chloride deposition by integrating X-ray photoelectron spectroscopy depth profiles. Carbon steel was utilized to determine the corrosion rate by measuring the weight loss. The time of wetness was determined using temperature and humidity sensor data. Analysis of variance followed by Tukey's "honestly significant difference" test indicated that atmospheric environment inside the shelter varied significantly from that of unsheltered parking environment. The corrosion rate of unsheltered area also varies with the roof. Hierarchical clustering analysis of the measured data was used to classify air bases into groups with similar atmospheric corrosion. Bases where aircraft park at a shelter can be grouped together regardless of geographical location. Unsheltered bases located inland can also be grouped together with sheltered bases as long as the aircraft are parked under the roof. Environmental severity index was estimated using collected data and validated using the measured corrosion rate.

Keywords: Environmental severity index, Atmospheric corrosion, Outdoor exposure test

1. 서론

항공기, 선박 등 외부환경에서 장기간 장비를 사용하는 산업분야에서 부식은 장비의 성능저하와 지속적인 비용손실을 유발하는 중요한 문제이다. 특히, 항공분야에서 부식은 피로균열과 함께 항공기를 운영하며 발생할 수 있는 주요 결함요인 중 하나로 연구에 따르면 항공기 부품 결함의 20% 이상이 부식과 관련된 결함이다 [1].

부식의 발생요인은 금속의 종류, 전위차, 대기부식환

경 등 다양하다. 특히 장기간 외부환경에 운영되는 항공기의 경우 대기부식환경에 큰 영향을 받는다. 대기부식을 유발하는 요인으로 상대습도, 비, 안개, 이산화황, 이산화탄소, 암모니아, 황화수소, 염소, 먼지 등이 알려져 있다 [2]. ISO 9223에서는 재료의 부식에 영향을 미치는 대기환경 요인으로, 상대습도, 염화물 흡착률, 그리고 이산화황 흡착률을 주요 요인으로 제시하고 있다 [3].

일반적으로 대기 중의 오염물질은 수분의 전해성과 대기로부터 응축되는 수막의 안정성을 높여 부식을 촉진한다 [4]. 이러한 부식 유발요인으로 인한 결함을 예방하기 위하여 항공기 정비현장에서는 도장, 방청제 도포, 세척 등 예방정비 활동을 수행하고 있다. 항공기의 외부 표면에 부착된 이물질은 부식을 유발할 수 있으

[†]Corresponding author: ido010@airforce.mil.kr

윤주희: 선임연구원, 이두열: 조교수, 박승렬: 연구원, 김민생: 책임연구원, 최동수: 조교수

로 기술도서에 제시된 기준 또는 자체 계획에 따라 주기적으로 항공기를 세척한다. 그러나 항공기의 운영환경은 배후 도시의 규모, 해안까지의 거리 등 다양한 지리적인 요인에 따라 달라지기 때문에 실제 환경을 측정할 필요가 있다. 특히, 군용기는 수명의 대부분을 주기된 상태로 소모하므로 대기부식환경에 대한 정확한 측정이 중요하다 [5].

대기부식환경과 부식속도의 상관관계를 규명하기 위한 여러 연구들이 진행되어 왔다 [6-10]. Abbott 등은 1997년부터 2006년까지 전세계 미군기지에 일정 기간 금속시편을 폭로(Exposure)하여 기지별 대기부식환경을 모니터링하고, 그 결과를 바탕으로 항공기 세척주기를 결정하였다 [10]. 국내에서도 시편의 폭로 환경에 따른 염화물, 황화물 등 부식생성물의 농도와 부식속도의 차이를 연구한 사례가 있다 [11,12]. Kim 등은 상용 아연도강 시편 2종을 국내 6개 지역에 36개월동안 폭로하여 대기환경에 의한 부식속도를 측정하고, 아연도강의 종류에 따른 부식특성을 분석하였다 [11].

본 연구에서는 항공기가 주기되는 위치에서 대기부식환경을 모니터링 할 수 있는 시스템을 설계하고, 지리적 환경이 다른 기지별 대기부식환경을 측정하였다. 측정된 데이터는 통계적인 방법으로 분석하여 대기부식위험도를 결정함으로써 각각의 주기환경이 항공기 구조재료의 대기부식에 미치는 영향을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1. ISO 9223 대기부식위험도

본 연구에서 기지별 대기부식위험도는 표준금속을 1년간 대기환경에 폭로 후 부식률을 계산하고, 부식성 카테고리 결정을 ISO 9223의 대기부식위험도(Environmental Severity Index, ESI) 측정 방법을 참고하여 결정되었다 [3]. ISO 9223은 금속의 부식속도에 따라 대기부식위험도를 6단계로 분류하고 있다. 이중 탄소강(Carbon Steel)의 부식률에 따른 대기부식위험도를 Table 1에 제시하였다. 부식속도는 연간 단위면적당 재료의 부식량으로 측정된다. 부식속도가 빠를수록 많은 양의 금속 부식의 의미하므로 대기부식위험도는 높게 평가된다. ISO 9223은 대기부식환경 분석방법으로 Fig. 1과 같이 두 가지 방법을 제시하고 있다. 첫째, 폭로 환경 정보를 활용하여 예측하는 방법으로 해당 장소의 온도, 상대습도, 염화물 흡착률, 그리고 이산화황 흡착률을 측정하여 부식률을 산출할 수 있다. 둘째, 금속시편을 대기환경에 폭로하고, 1년 후 부식으로 인한 무게 감소량을 측정하여 부식률을 실험적으로 산출한다. 실험적인 방법은 폭로 환경 정보를 이용하여 예측한 부식률에 대한 타당성을

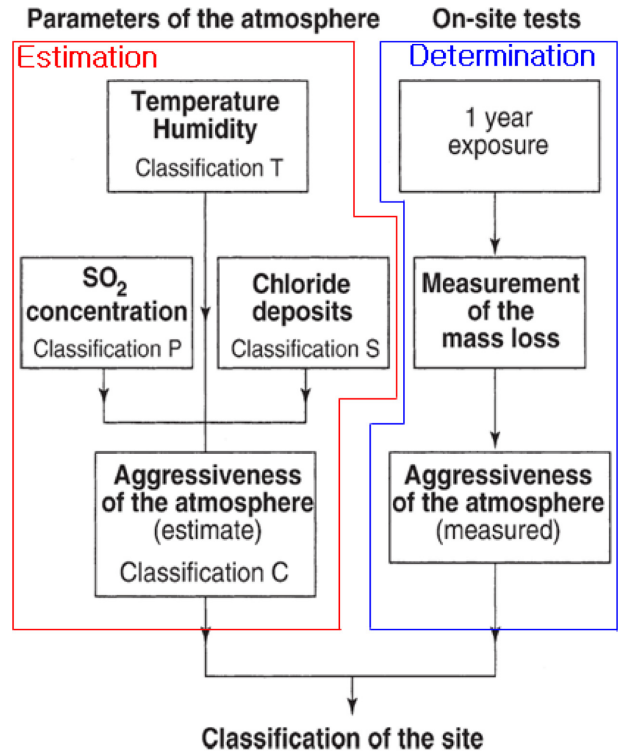


Fig. 1. ISO 9223 ESI determination and estimation flow chart [13]

Table 1. Categories of corrosivity of the atmosphere [3]

Category	Corrosion Rate of Carbon Steel (g/m ² y)	Corrosivity
Category 1	≤ 10	Very Low
Category 2	11 ~ 200	Low
Category 3	201 ~ 400	Medium
Category 4	401 ~ 650	High
Category 5	651 ~ 1,500	Very High
Category X	1,501 ~ 5,500	Extreme

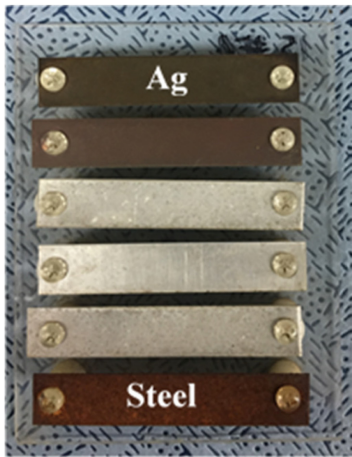
검증하는데 사용된다. 본 연구에서는 두 가지 방법을 모두 사용하여 폭로 환경 측정과 실험을 동시에 수행하였다.

2.2. 시편

대기부식 유발물질 및 부식속도 측정을 위하여 금속 시편과 온습도 센서(Testo-174H)를 설치하였다(Fig. 2a). 시편 재료는 대기부식환경 측정을 위한 은(99.9%)과 부식속도 산출을 위한 탄소강(AISI 1006)으로 구성하였다. 은은 대기와의 반응을 측정할 수 있는 금속으로 염화물이나 황화수소(H₂S) 등 특정 오염물질과 반응하기 때문에 염화물의 흡착률 측정을 위하여 사용하였다 [14]. 탄소강은 부식에 민감한 특성으로 인해 높은 민감도의 센



(a) Atmospheric environment monitoring set



(b) Specimen card after exposure

Fig. 2. Atmospheric environment monitoring set and specimen card

Table 2. Experimental groups according to the installation environment

Environment	Coastal	Inland
Unsheltered	UC_{1R}, UC_{2R}	$UI_{1}, UI_{2R}, UI_{3}, UI_{4R}$
Sheltered	SC_{1}, SC_{2}, SC_{3}	$SI_{1}, SI_{2}, SI_{3}, SI_{4}$

서로 활용 가능하기 때문에 부식 연구에 널리 사용된다 [10]. 본 연구에서는 폭로 후 탄소강의 무게 감소량을 측정하여 부식속도를 산출하였다.

시편은 상용 은, 탄소강 박판을 이용하여 14 × 77 mm 크기로 제작 후 시편카드(Fig. 2b)에 배치하였다. 각 금속시편에 생성되는 산화물이 다른 시편에 미치는 영향을 최소화하도록 설계하였으며, 특히, 빠르게 생성되는

산화철이 은 시편에 영향을 주지 않도록 탄소강 시편을 최하단에 고정하였다. 시편거치대는 실제 항공기 주기장소 벽면에 지상 1.5 m 높이로 설치하였다. 시편거치대는 총 13개를 제작하여 전 공군기지에 설치하였다. 본 연구에서는 대기부식의 주요인자인 온도, 상대습도, 그리고 염화물 흡착률에 영향을 미치는 요인으로 지리적 위치(해안가와 내륙)와 주기형태(염체호와 옥외)를 고려하였다. 따라서 폭로 환경은 총 네 개의 그룹으로 나눌 수 있고, 각각 UC (Unsheltered Coastal), UI (Unsheltered Inland), SC (Sheltered Coastal), 그리고 SI (Sheltered Inland) 그룹이다. 옥외 환경에 항공기를 주기하는 기지 중 지붕이 있는 경우 아래 첨자 R을 추가하였다(Table 2). 지붕은 직사광선과 우천에 시편이 직접적으로 노출되는 것을 감소하는 효과가 있다. 단, 문이 없으므로 외기의 유입을 차단하지는 않는다.

2.3. 표면분석

1년간 폭로 후 회수된 탄소강 시편은 항공기 주기환경별 부식된 표면 형상을 비교하기 위하여 광학 현미경 (Optical Microscope, OM)으로 관찰하였다. 회수된 은 시편은 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하여 부식된 표면을 관찰하였고, 에너지 분산형 분광분석(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)을 통하여 표면에 생성된 산화물을 분석하였다.

2.4. 대기부식환경 분석

본 연구에서는 금속의 부식에 영향을 미치는 주요인자로서 젖음시간(Time of Wetness, TOW)과 염화물 흡착률을 분석하였다. 젖음시간은 연간 온도가 0 °C를 초과하고, 상대습도가 80% 초과하는 시간을 말하며, 시편 거치대에 설치된 온습도 센서 데이터를 이용하여 산출하였다. 염화물 흡착률을 정량적으로 산출하기 위하여 X선 광전자분광(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)을 이용해 수직적 조성 및 분포 분석(Depth Profiling)을 실시하였다. 1년간 폭로한 은 시편에 흡착된 각 원소의 질량 계산을 위하여 식각속도를 다음과 같이 계산하였다.

$$Etch Rate = \left(\frac{Yw}{\rho}\right)\left(\frac{I}{A}\right) \times 10^{-2} \quad (1)$$

여기서 Y 는 스퍼터링(Sputtering) 수율, w 는 원자량, ρ 는 밀도, I 는 이온 빔 전류(단위 : μA), 그리고 A 는 식각면적(단위 : mm^2)을 나타낸다. 식각속도는 은의 원자량과 밀도를 이용하여 계산하였다. 식각속도에 이온 빔의 노출 시간을 곱하여 시료가 식각된 깊이를 구하였다. 식각깊이와 식각면적을 곱하여 식각부피를 구하고, 은의 밀도를 곱하여 식각질량을 계산하였다. 마지막으로 각

원소의 수직적 조성 및 분포 분석 결과를 이용하여 노출기간 동안의 염화물 흡착률을 계산하였다. 시편은 깊이별로 조성이 변하므로 이와 같은 계산법은 오차를 수반한다. 계산 결과의 타당성을 검증하기 위해 다른 정량적인 방법인 X선 회절(X-ray Diffraction, XRD) 분석법과 전기화학적 환원(Coulometric Reduction) 방법으로 측정된 동일 시편의 염화물 흡착률 [15] 사이의 상관관계를 분석하였다. 젖음시간과 염화물 흡착률은 통계패키지인 미니탭(Minitab)을 이용한 분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)과 사후분석(Tukey's HSD test)을 수행하여 각 기지 그룹별 환경에 따라 통계적으로 유의한 차이가 있는지 확인하였다 [16].

2.5. 부식속도 분석

부식속도는 폭로한 시편을 회수한 후 1년간 부식으로 인한 질량변화를 측정하여 산출하였다 [10]. 회수된 시편은 외부에 부착된 이물질을 제거하기 위해 1분간 초음파 세척 후 분석하였다. 탄소강 시편은 세척 후 무게를 측정하고, 50 vol% 염산 수용액에 2분간 산세척 후 무게를 측정하여 기록하였다. 회수한 시편은 산화철의 생성으로 시편의 무게가 초도 설치 상황보다 증가하였으며, 산세척의 횟수가 증가함에 따라 무게는 감소하였다. 산세척 및 무게 측정은 광학현미경으로 관찰 시 산화철이 표면에서 완전히 제거될 때까지 반복해서 실시하였다. 이 방법은 부식 산화물과 모재의 염산 수용액 내에서 용해속도 차이를 이용한 것이다. 반복적인 산세척을 통해 획득한 시편 무게의 산점도(Scatter Plot)에서 두 개의 추세선을 그릴 수 있으며, 각각 산화물 용해로 인한 무게 감소 구간과 모재 용해 구간을 나타낸다. 두 추세선의 교차점은 부식 산화물이 제거된 모재의 무게

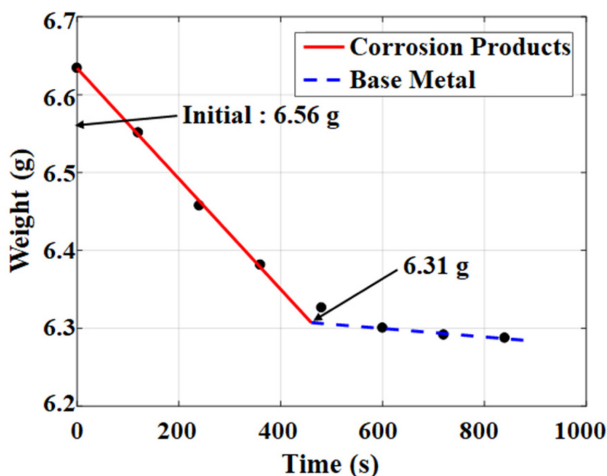


Fig. 3. Mass loss of corroded UC_{2R} specimen after repetitive cleaning cycles

를 나타낸다. Fig. 3은 UC_{2R} 에서 회수한 탄소강 시편의 반복 산세척에 따른 무게 변화를 나타낸다. 추세선 교차점에서의 무게는 6.31 g으로 부식 산화물이 제거된 모재의 무게이고, 초도 무게 6.56 g과의 차이인 0.25 g이 부식에 의한 무게 감소이다. 이렇게 측정된 시편의 연간 부식량으로 연간 부식률을 계산할 수 있다. 재료의 연간 부식률은 폭로시간, 시편 면적, 연간 부식량, 그리고 재료의 밀도와 관계가 있다 [17].

$$Corrosion\ Rate = \frac{KW}{ATD} \quad (2)$$

여기서 K 는 상수($1.00 \times 10^4 \times D$), W 는 부식으로 인한 무게 감소량(단위 : g), A 는 시편의 면적(단위 : cm^2), T 는 폭로 시간(단위 : h), 그리고 D 는 재료의 밀도(단위 : g/cm^3)를 나타낸다. 산출된 부식률은 분산분석과 사후분석을 통하여 각 기지 그룹별 환경에 따라 통계적으로 유의한 차이가 있는지 확인하였으며, 산점도 행렬(Scatter Plot Matrix)을 통하여 다른 대기부식환경 요인인 젖음시간, 염화물 흡착률, 그리고 부식속도 간의 상관관계를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 표면분석

Fig. 4는 1년간 폭로된 탄소강 시편을 회수 후 부식상

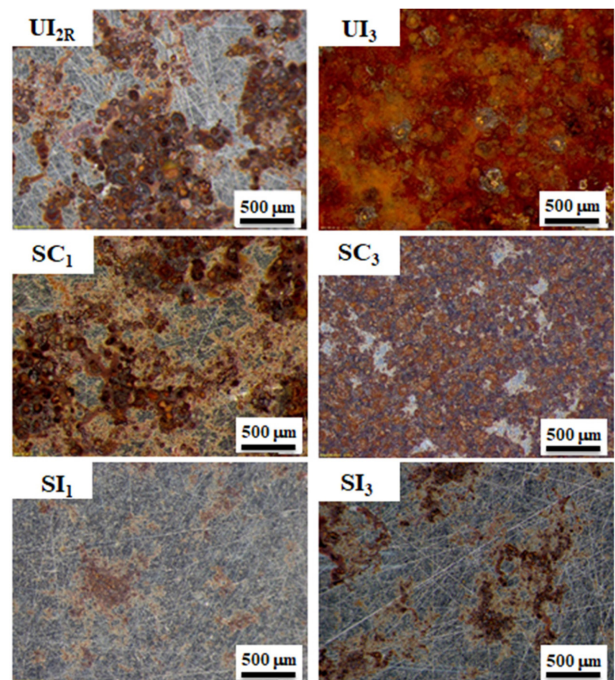


Fig. 4. Surface morphologies of carbon steel specimens by OM after exposure

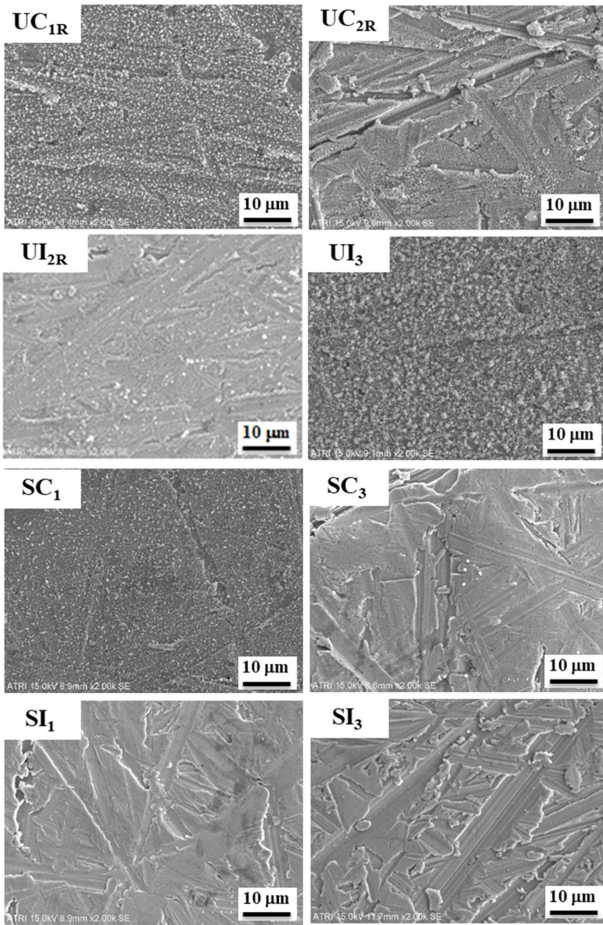


Fig. 5. Surface morphologies of Ag specimens by SEM after exposure

태를 실제 현미경으로 관찰한 것이다. 시편의 부식상태는 폭로 환경에 따라 차이를 보였으며, 옥외에서 설치된 시편에서 부식이 더 뚜렷이 관찰되었다. 옥외에 설치된 UI그룹의 시편은 표면에서 붉은 산화철이 관찰되었다. 특히, UI₁과 UI₃의 시편은 표면의 대부분에서 산화철이 관찰되었고, 박리현상도 관찰되었다. 이에 반해 UI_{2R}과 UI_{4R}의 시편에서는 표면의 일부분에서 산화철이 관찰되었고, 산화되지 않은 모재도 관찰되었다. 염채호에 설치된 SC₁, SC₃, SI₁, 그리고 SI₃의 시편은 UI그룹 시편과 상대적으로 넓은 부식되지 않은 표면이 관찰되었다. 같은 염채호 폭로 환경이라도 해안과 인접한 지역에 위치한 SC₁과 SC₃의 시편이 내륙에서 폭로된 SI₁과 SI₃의 시편에 비해 상대적으로 심한 부식이 관찰되어, 지리적 위치가 부식정도에 영향을 미침을 알 수 있다.

1년간 폭로한 은 시편의 거시적인 관찰에서 대부분의 시편들이 어두운 회색을 띄었고, 옥외에서 폭로된 시편에서 상대적으로 더 어두운 색이 관찰되었다. 일반적으

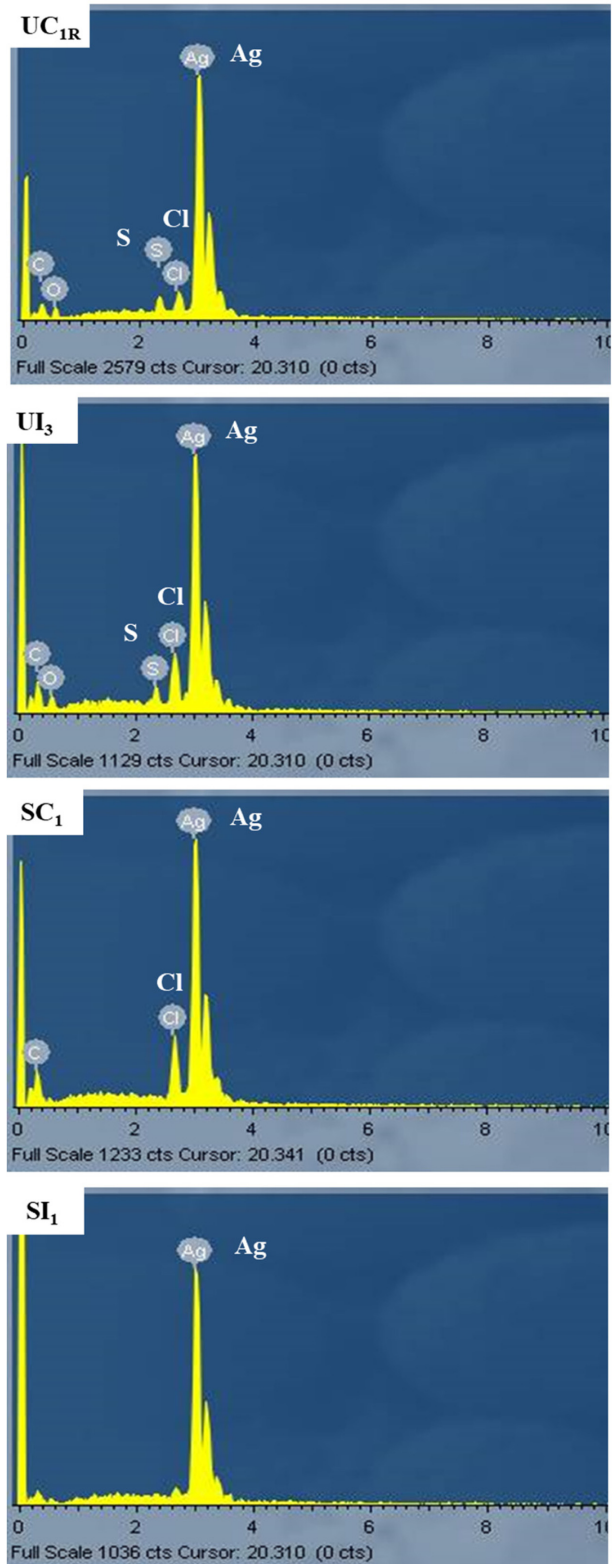


Fig. 6. SEM-EDS results of Ag specimens

로 표면의 염화물이 흡착되어 AgCl 생성 시에는 어두운 회색을 띄며, 환원된 황이 흡착되어 Ag₂S가 생성되

면 옅은 푸른색을 띤다 [10]. Fig. 5는 1년간 폭로한 은 시편의 표면분석을 위하여 SEM으로 2,000배 확대하여 관찰한 것이다. 대부분의 시편에서 균일한 입자 형태의 산화물이 생성되었다. UC그룹의 경우 해안가 옥외 환경에 지붕이 있는 공통점이 있으나, UC_{2R}보다 해안과의 거리가 인접한 UC_{1R}에서 상대적으로 굵은 입자가 관찰된다. UC_{2R}의 경우 다른 지붕형 옥외 환경보다 지붕의 높이가 높아 시편이 직사광선과 우천에 직접적으로 노출될 확률이 높다. 따라서 입자가 아닌 비교적 균일한 필름 형태를 나타내는 것으로 판단된다. UI그룹의 경우 지붕 유무에 따라 비교적 명확한 표면형태의 차이를 나타내는 것을 볼 수 있다. SC그룹 또한 표면형태에 차이가 있으며, 서해 해안가에 위치한 SC₃ 보다 동해 해안가에 위치한 SC₁의 표면에서 좀 더 입자의 밀도가 높았다. 내륙 염채호 환경에 설치된 SI₁과 SI₃의 시편에서는 산화물이 거의 관찰되지 않았다. 옥외에서 폭로된 UI그룹의 시편에서 해안가 염채호 환경에 설치되었던 SC그룹 시편보다 상대적으로 큰 산화물이 관찰되었다. 특히, UI₁의 시편에서는 10 μm 크기의 산화물이 관찰되었다.

산화물의 성분을 확인하기 위해 SEM-EDS 분석을 실시하였고, 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 옥외에 폭로된 UC_{1R}과 UI₃의 시편에서 염소와 황이 식별되었다. UC_{1R}의 경우 지붕이 있어 지붕이 없는 UI₃와 폭로 환경에 차이가 있다. 바다와 인접한 염채호에서 폭로된 SC₁의 시편에서는 염소만 식별되었다. 내륙의 염채호에서 폭로된 SI₁의 시편에서는 염소와 황이 검출되지 않았다. Fig. 7은 XPS 분석 결과이며, 결합에너지(Binding Energy)를 비교하여 시편의 표면에서 염화물과 황화물을 식별하였다. AgCl의 Cl2p 결합에너지 피크값은 198.2 eV이고, Ag₂S와 Ag₂SO₄의 S2p 결합에너지 피크값은 각각 161.1 eV, 168.4 eV이다 [15]. 따라서 시편 표면의 염화물과 황화물은 AgCl과 Ag₂S 또는 Ag₂SO₄ 형태로 존재함을 확인하였다. 황산염의 경우 습식흡착(Wet Deposition) 또는 수용액 내에서 석출(Precipitation)을 통해 AgCl로 변환된다 [14]. 다만, 충분한 유동 Cl가 없는 경우 완전한 변환이 이루어지지 않는다. 황산염은 UC_{2R}, UI₁, UI₃, UI_{4R}, SC₁, SC₂, 그리고 SC₃의 시편에서 관찰되었고, SI그룹에서는 확인되지 않았다. UC_{2R}을 제

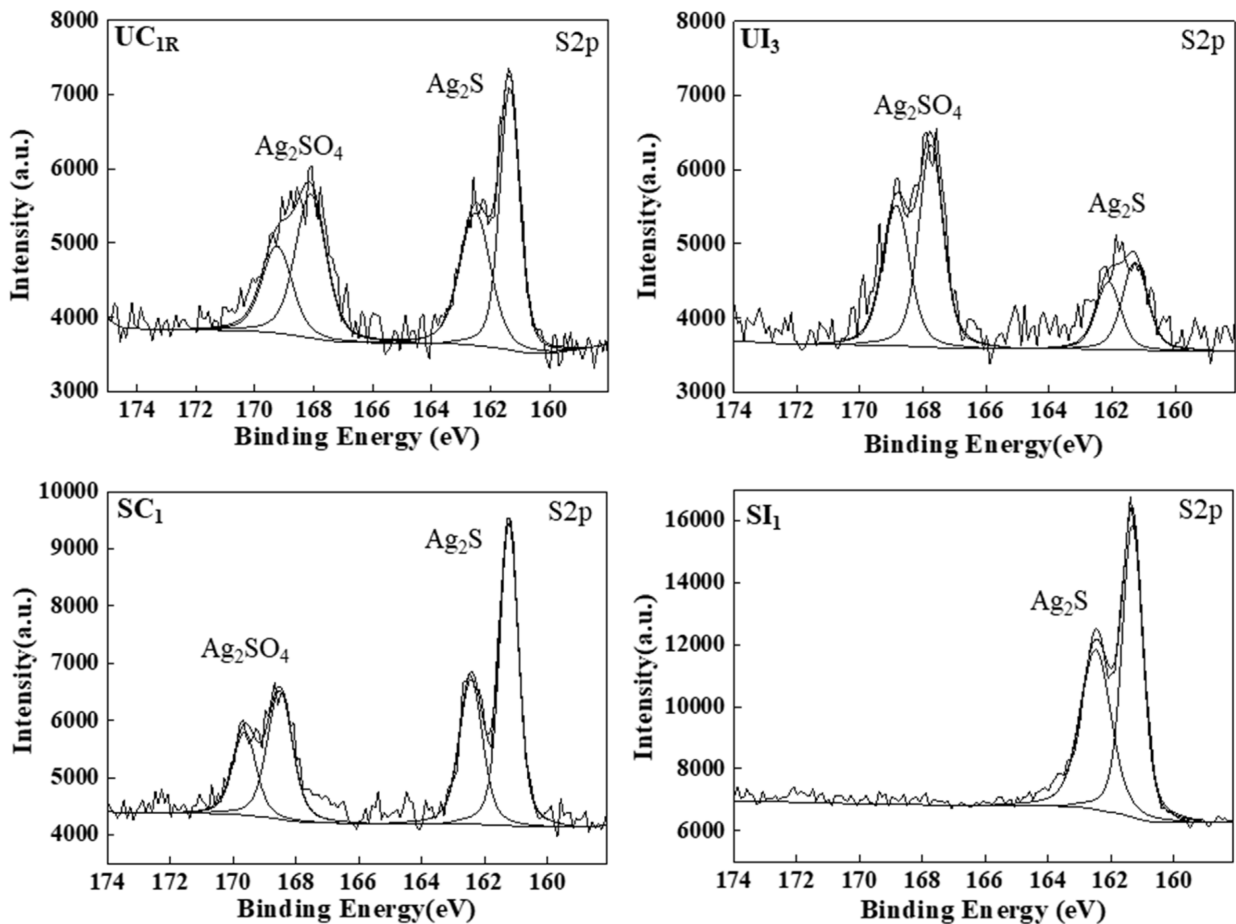


Fig. 7. XPS results of Ag specimens

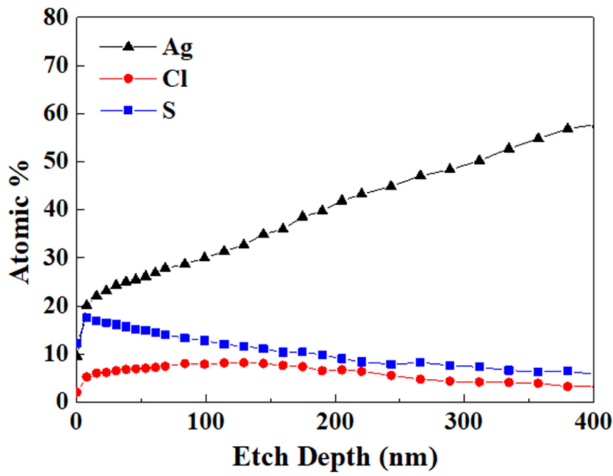
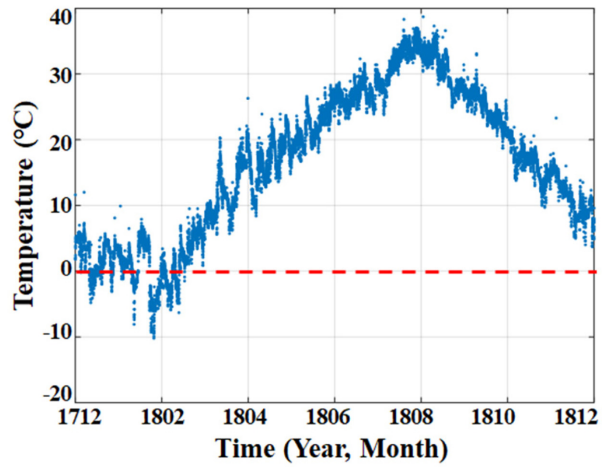


Fig. 8. XPS depth profile of film on Ag specimen exposed for one year at UC_{2R}

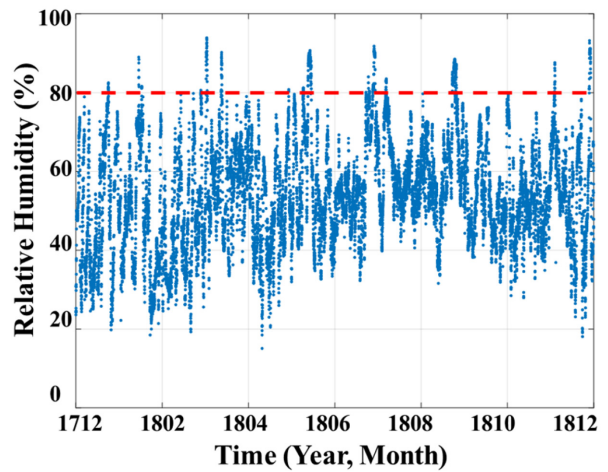
외하고 내륙과 엄체호 환경에서 주로 관찰되는 것으로 판단할 때 이들 환경에서 황산염의 변환에 필요한 충분한 수분 또는 유동 Cl가 존재하지 않았던 것으로 판단된다. Fig. 8은 1년간 노출한 UC_{2R} 의 시편 산화피막 수직적 조성 및 분포 분석 결과를 나타낸다. 염소의 분율은 표면 근처에서 가장 높고 깊이가 깊어질수록 감소한다. 황은 표면을 제외하고 내부로 들어갈수록 분율이 단조감소하는 것을 확인할 수 있다. 산화피막의 수직적 조성 및 분포 분석 결과는 염화물 흡착률 계산에 사용되었다.

3.2. 대기부식환경 분석

각 기지별 시편과 함께 설치한 센서를 이용하여 80분 단위로 온도와 상대습도를 측정하여 젖음시간을 산출하였다. Fig. 9a와 9b는 SI_1 에서 80분 단위로 측정된 온도와 상대습도를 나타낸다. Fig. 9c는 각 기지 그룹별 젖음시간의 평균과 95% 신뢰구간을 나타낸 것으로 13개 기지의 평균 젖음시간은 1,789시간이다. 기지별 젖음시간은 최소 240시간부터 최대 3,231시간까지 분포하였다. 옥외에 센서가 설치된 기지는 대부분 젖음시간 2,000시간 이상을 보였으며, 엄체호에 설치된 기지는 2,000시간 미만의 젖음시간을 나타내었다. 옥외 환경에 주기하는 UC와 UI그룹의 젖음시간이 엄체호 내부에 주기하는 SC와 SI그룹의 젖음시간에 비해 높은 것을 확인할 수 있다. 기지 그룹별 젖음시간의 평균에 차이가 없다는 귀무가설을 세우고 분산분석을 실시한 결과, P값은 0.006으로 기지 그룹별 젖음시간의 평균에 통계적으로 유의한 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 사후분석(Tukey's HSD Test) 결과 SI그룹의 평균이 UC와 UI그룹 각각의 평균과 유의하게 다르며, SC그룹 또한 유사한 경향을 나타내었다. UC와 UI그룹 또는 SC와 SI그룹은 하나의



(a) Temperature of SI_1



(b) Relative humidity of SI_1

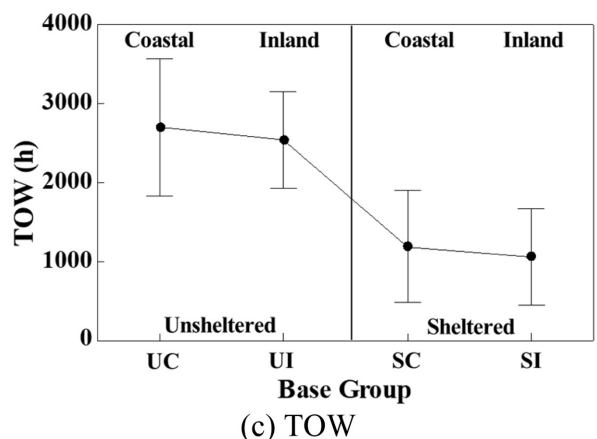


Fig. 9. Temperature, relative humidity of SI_1 , and TOW for groups of airbases

그룹으로 묶을 수 있어 기지의 지리적 위치에 상관없이 주기형태가 젖음시간에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

이는 야간이나 비행이 없는 경우 문을 닫아 놓는 엄체호의 대기환경과 항시 외기에 폭로되어 있는 옥외 환경이 젖음시간의 증감에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 젖음시간이 주요 부식인자인 것은 상대습도가 임계값보다 높은 경우 부식성이 증가한다는 연구에 근거한다 [18,19]. 금속재료 표면의 수분에 대기 중의 오염물질이 용해되어 전해질로 작용하고, 부식이 촉진된다 [20]. 따라서 엄체호의 젖음시간 감소는 항공기 부식방지에 효과를 나타낼 것으로 판단된다 [5].

1년간 폭로된 은 시편을 XPS 분석하여 염화물 흡착률을 산출하였다. 본 연구에서 사용한 방법의 타당성을 검증하기 위해 다른 정량적인 방법(XRD, Coulometric Reduction)으로 측정된 동일 시편의 염화물 흡착률 [15]과 함께 Fig. 10에 산점도 행렬로 나타내었다. XPS - XRD를 이용한 염화물 흡착률과 XPS - Coulometric Reduction을 이용한 염화물 흡착률의 피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient, PCC)는 각각 0.7과 0.82

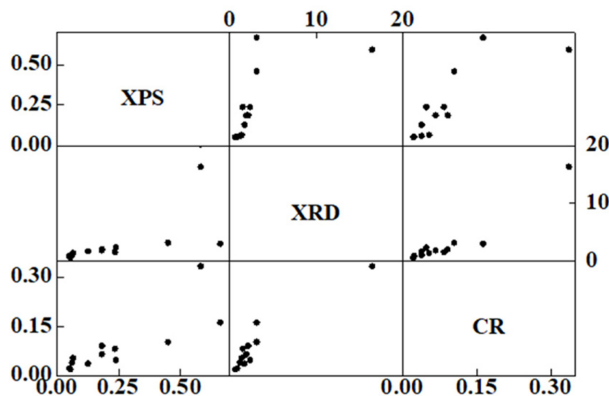


Fig. 10. Scatter plot matrix for chloride deposition rate measured by XPS, XRD, and coulometric reduction (CR)

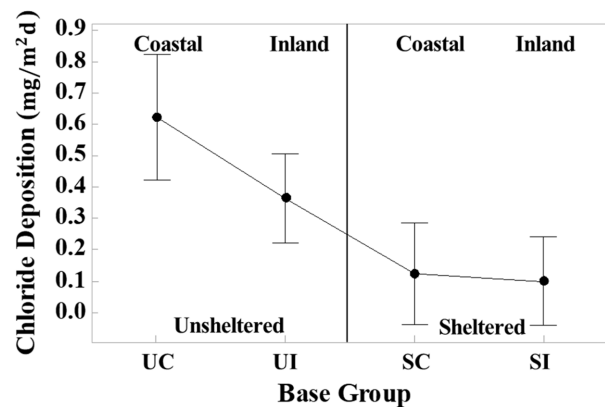


Fig. 11. Chloride deposition rate for groups of airbases

로, XPS와 다른 정량적인 방법으로 측정된 염화물 흡착률이 높은 상관관계를 나타냄을 확인하였다. 피어슨 상관계수는 두 변수의 상관관계를 통계학적으로 계량화한 값으로 1에 가까울수록 높은 선형 상관관계를 의미한다 [21]. 염화물 흡착률 계산 결과 13개 기지의 평균은 0.27 mg/m²d이었다. Fig. 11에 각 기지 그룹별 염화물 흡착률의 평균과 95% 신뢰구간을 나타내었다. 정성적으로 판단할 때 염화물 흡착률은 해안가 보다 내륙기지에서 낮은 경향을 나타내고, 엄체호의 염화물 흡착률이 가장 낮다. 기지 그룹별 염화물 흡착률의 평균에 차이가 없다는 귀무가설을 세우고 분산분석을 실시한 결과, P값은 0.003으로 기지 그룹별 염화물 흡착률의 평균에 통계적으로 유의한 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 사후분석 결과 SI그룹의 평균이 UC그룹과 유의하게 다른 반면 SC그룹의 경우는 UC와 UI그룹 각각의 평균과 유의한 차이가 있다는 결정적인 증거를 확인할 수 없었다. UC와 UI그룹 또는 UI, SC, 그리고 SI그룹은 하나의 그룹으로 묶을 수 있어 기지의 지리적 위치에 상관없이 주기형태가 염화물 흡착률에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 따라서 엄체호는 염화물 흡착률을 감소시켜 항공기 부식방지에 효과를 나타낼 것으로 생각된다.

3.3. 부식속도 분석

산세척을 통한 부식속도 측정결과, 13개 기지의 평균 부식률은 40.2 g/m²y이다. Fig. 12는 각 기지 그룹별 탄소강 시편의 부식률 평균과 95% 신뢰구간을 나타내며, 전체적으로 염화물 흡착률과 유사한 경향이 확인된다. 정성적으로 판단할 때 해안가 보다 내륙기지에서 부식률이 낮으며, 가장 낮은 부식률을 나타내는 환경은 엄체호이다. 기지 그룹별 부식속도의 평균에 차이가 없다는 귀무가설을 세우고 분산분석을 실시한 결과, P값은 0.011로 기지 그룹별 부식률의 평균에 통계적으로 유의

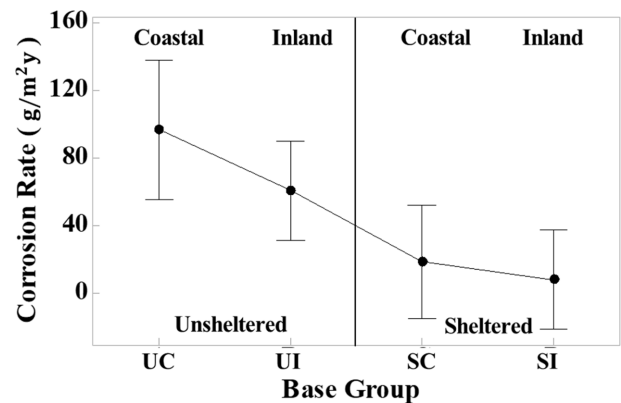


Fig. 12. Corrosion rate of carbon steel for groups of airbases

한 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 사후분석 결과 *SI* 그룹의 평균이 *UC* 그룹과 유의하게 다른 반면 *SC* 그룹의 평균은 *UC*와 *UI* 그룹 각각의 평균과의 차이에 유의성이 있다는 결정적인 증거를 확인할 수 없었다. 염화물 흡착률과 마찬가지로 부식률은 *UC*와 *UI* 그룹 또는 *UI*, *SC*, 그리고 *SI* 그룹을 하나의 그룹으로 묶을 수 있어 기지의 지리적 위치에 비해 주기형태가 부식속도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

3.4. 염체호와 지붕의 효과

Fig. 13은 젖음시간, 염화물 흡착률, 부식률의 산점도 행렬을 나타낸 것이다. 산점도 행렬에서 젖음시간과 염화물 흡착률은 부식률과 양의 상관관계를 나타낸다. 피어슨 상관계수는 젖음시간과 부식률이 0.63이고, 염화물 흡착률과 부식률이 0.86으로 염화물 흡착률이 부식률과 강한 상관관계를 나타냄을 알 수 있었다.

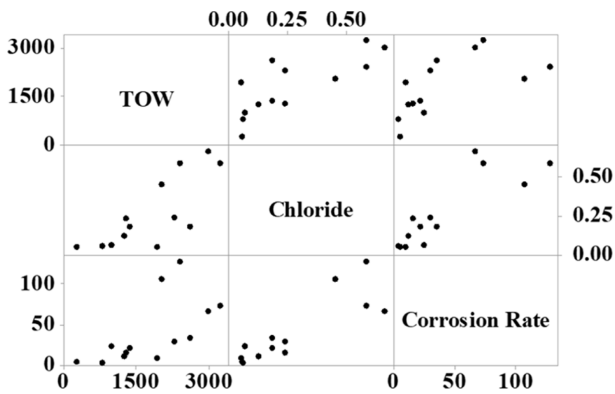


Fig. 13. Scatter plot matrix for TOW, chloride deposition rate, and corrosion rate of carbon steel

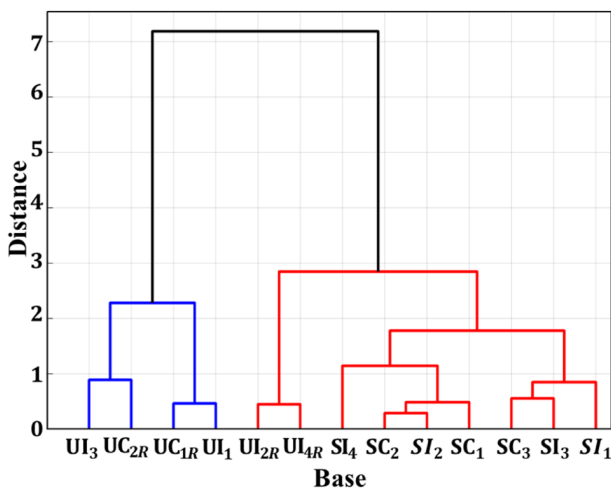
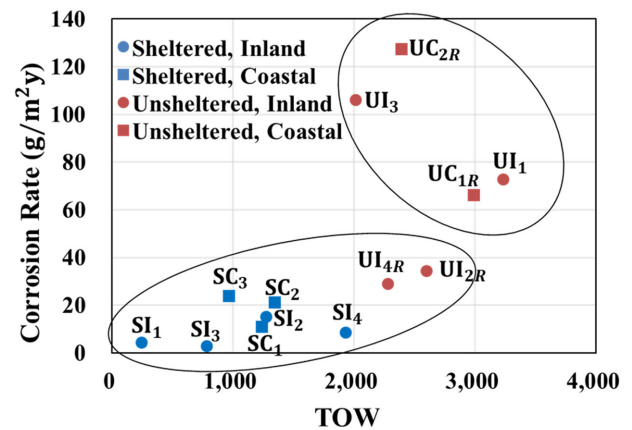


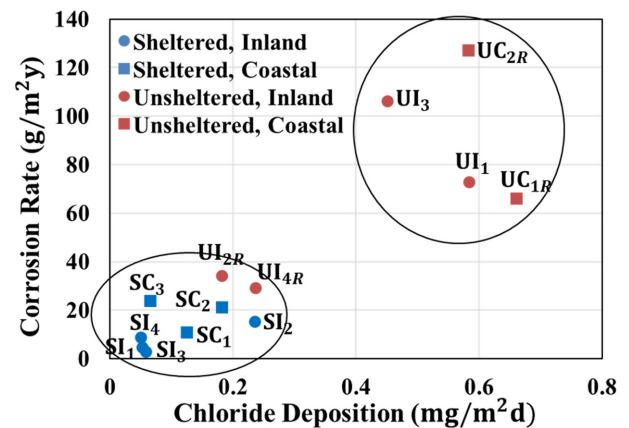
Fig. 14. Dendrogram represents hierarchical clustering result

통계패키지인 JMP를 활용하여 젖음시간, 염화물 흡착률, 그리고 부식률 데이터를 표준화(Standardization)한 후 계층적 군집화(Hierarchical Clustering) 분석을 실시하였다. Fig. 14는 분석 결과를 나타내는 덴드로그램(Dendrogram)이다. 덴드로그램에서 수평선의 높이는 그룹 간의 거리를 나타낸다. 즉 수평선 사이의 거리가 멀면 멀수록 두 그룹은 뚜렷이 구분된다. Fig. 14에서 청색과 적색 그룹은 다른 군집에 비해 비교적 명확히 구분된다. 청색 그룹은 해안가 옥외 환경과 내륙 옥외 환경에서 지붕이 없는 환경에 주기하는 기지들이 속해 있다. 적색 그룹의 경우 일부 내륙 옥외 환경에 주기하는 기지를 포함하는 염체호 환경 기지로 구성되어 있다. 적색 그룹에 포함되어 있는 내륙 옥외 환경 기지는 주기 장소에 지붕이 있어 다른 내륙 옥외 환경 기지와 명확히 구분되는 대기부식 특성을 갖는 것으로 판단된다.

Fig. 15는 각각 부식률과 젖음시간, 부식률과 염화물 흡착률 그래프에 표시한 군집화 분석 결과를 나타낸다.



(a) TOW vs. corrosion rate



(b) Chloride deposition vs. corrosion rate

Fig. 15. Airbases clustered on planes of factors affecting environmental severity

Table 3. Environmental severity Index of airbases

Base	Chloride	TOW	Corrosion Rate of Carbon Steel
UC_{1R}	S0	T4	Category 2
UC_{2R}	S0	T3	Category 2
UI_1	S0	T4	Category 2
UI_{2R}	S0	T4	Category 2
UI_3	S0	T3	Category 2
UI_{4R}	S0	T3	Category 2
SC_1	S0	T3	Category 2
SC_2	S0	T3	Category 2
SC_3	S0	T3	Category 2
SI_1	S0	T2	Category 1
SI_2	S0	T3	Category 2
SI_3	S0	T3	Category 1
SI_4	S0	T3	Category 1

옥외에 주기하는 UC와 UI그룹의 부식률, 젖음시간, 그리고 염화물 흡착률은 엄체호에 주기하는 SC와 SI그룹보다 높게 나타났다. 엄체호의 경우 비행이 없는 경우 문을 폐쇄하기 때문에 대기온도가 외기보다 높다 [5]. 따라서 상대습도가 외기에 비해 낮아 동일 지역에서 젖음시간이 옥외 환경에 비해 짧게 계산된다. 또한 대기 중 염화물의 유입을 차단하여 염화물 흡착률을 낮추는 것으로 판단된다 [14]. 내륙 옥외 환경에서 지붕이 있는 UI_{2R} 과 UI_{4R} 의 경우 높은 젖음시간에도 불구하고 낮은 부식률과 염화물 흡착률을 나타낸다. 이는 지붕이 있는 UI_{2R} 보다 지붕이 없는 UI_3 에서 탄소강 시편 표면의 산화철 생성 비율이 높고, 은 시편 표면에 상대적으로 큰 산화물 입자가 관찰되는 것과 연관성 있는 결과이다. 즉, 지붕으로 인한 직사광선과 우천의 직접적인 영향 감소 효과로 판단된다. 비슷한 지붕 높이를 갖는 UC_{1R} 과 비교 시 해안과 내륙의 차이로 인한 대기 중 염화물의 양 또한 흡착률에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다 [22]. 배후도시의 규모에 따른 대기 중 염화물, 오존(Ozone), 그리고 질소산화물(NO_x)의 차이 또한 영향을 미칠 수 있으므로 지붕의 유무가 염화물 흡착률에 결정적인 영향을 미친다고 판단하기는 곤란하다 [23]. 다만 질소산화물과 동일하게 은의 부식에 영향을 미치는 자외선을 차단하는 효과가 있으므로 추가 연구가 필요한 것으로 생각된다 [24-27].

3.5. 대기부식위험도 결정

Table 3은 대기부식위험도를 나타내며, 기지별 환경

정보 및 부식률을 ISO 카테고리별로 분류한 것이다. 염화물 흡착률은 ISO 기준 전 기지가 카테고리 S0로 매우 낮음에 해당한다. 젖음시간이 가장 낮은 SI_1 의 경우 T2에 해당하며, ISO 9223에서 제시하는 T2의 예는 별도 기후관리를 하지 않은 실내환경으로, 엄체호 내에 관측세트가 설치되어 있는 상태와 부합하다고 할 수 있다. 가장 높은 젖음시간이 측정된 SC_1 은 건조하거나 기온이 낮은 상태가 아닌 일반 실외환경을 의미하는 T4에 해당하며, 옥외에 설치되어 쉽게 비를 맞는 환경과 부합하다고 할 수 있다. 폭로 환경에 따른 젖음시간은 엄체호에 설치된 경우 T2~T3 카테고리에 포함되고, 옥외에 설치된 경우 T3~T4 카테고리에 포함된다. 탄소강의 부식률은 SI_1 , SI_3 , 그리고 SI_4 의 경우 시편의 부식률 매우 낮음 단계인 Category 1에 해당하며, 나머지 시편은 부식률 낮음 단계인 Category 2에 해당한다.

4. 결론

본 연구에서는 대한민국 공군 기지별 대기부식환경을 바탕으로 항공기 주기환경이 구조재료의 대기부식에 미치는 영향을 확인하였다. 온-습도 센서와 1년간의 폭로한 금속시편의 분석을 통하여 항공기 주기환경에서의 젖음시간, 염화물 흡착률, 그리고 부식률을 측정하였다. 항공기의 주기환경과 지리적 환경을 고려하여 4개 그룹으로 나눠 통계적인 방법으로 분석한 결과, 엄체호 내부의 시편이 옥외 시편보다 젖음시간, 염화물 흡착률, 그리고 부식률이 낮음을 확인하였다. 계층적 군집화 분석을 통해 내륙 옥외 주기환경인 경우에도 지붕 유무에 따라 대기부식 관련 측정값에 큰 차이가 있음을 확인하였다. 이는 자외선과 오존을 포함한 다른 대기오염 물질의 농도가 부식속도에 영향을 미칠 가능성을 나타낸다. ISO 9223 기준으로 기지별 염화물 흡착률을 평가한 결과, 전 기지 낮음 단계인 S0에 해당하였다. 탄소강 시편의 무게 감소량을 이용하여 측정된 부식률은 SI_1 , SI_3 , 그리고 SI_4 3개 기지는 Category 1에 포함되며, 나머지 기지는 Category 2에 포함되어 대기부식위험도는 각각 매우 낮음과 낮음에 해당하였다. 이와 같이 기지별 대기부식위험도 결정에 대한 과학적인 근거를 마련하였으며, 향후 항공기 기골, 항전장비 및 탄약 부식 방지대책 수립에 활용할 계획이다.

감사의 글

이 연구는 공군 항공기술연구소의 지원에 의해 연구되었으며 지원기관에 감사드립니다.

References

1. S. J. Findlay and N.D. Harrison, Why aircraft fail, *Materials Today*, **5**, 18 (2002). Doi: [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(02\)01138-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(02)01138-0)
2. C. Vargel, *Corrosion of Aluminum*, Elsevier Inc., San Diego, CA (2004).
3. ISO 9223, *Corrosion of Metals and Alloys – Corrosivity of Atmospheres – Classification*, p. 3, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland (1992).
4. D. A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ (1996).
5. D. Lee, K. Kim, S. Park, M. S. Kim, and G. Shin, Study of the Effect of Controlled Humidity Protection, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, **42**, 739 (2018). Doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2018.42.8.739>
6. S. Feliu, M. Morcillo, and S. Feliu Jr., The prediction of atmospheric corrosion from meteorological and pollution parameters—I. Annual corrosion, *Corrosion Science*, **34**, 403 (1993). Doi: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(93\)90112-T](https://doi.org/10.1016/0010-938X(93)90112-T)
7. L. Veleva and L. Maldonado, Classification of atmospheric corrosivity in humid tropical climates, *British Corrosion Journal*, **33**, 53 (1998).
8. R. Summitt and F. T. Fink, *Air Force Wright Aeronautical Laboratories*, Wright-Patterson Air Force Base, OH (1980).
9. C. Leygraf and V. Kucera, *UNECE International Co-operative Programme on Effects on Materials, Including Historic and Cultural Monuments. Report No 1 Technical Manual*, Swedish Corrosion Institute, Stockholm, Sweden (1988).
10. W. H. Abbott, *A Decade of Corrosion Monitoring in the World's Military Operating Environments*, Battelle Columbus Operations, Columbus, OH (2008).
11. K.T. Kim and Y. S. Kim, Corrosion Behavior of Galvanized Steels with Outdoor Exposure Test in Korea for 36 Months, *Corrosion Science and Technology*, **17**, 231 (2018). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2018.17.5.231>
12. Y. S. Kim, H. K. Lim, J. J. Kim, and Y. S. Park, *Corrosion Science and Technology*, **10**, 109 (2011).
13. S. W. Dean, *ASTM Standardization News*, 36 (1987).
14. H. Lin, G. S. Frankel, and W. H. Abbott, Analysis of Ag corrosion products, *Journal of the Electrochemical Society*, **160**, C345 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1149/2.055308jes>
15. W. Choi, D. Lee, and C. Bahn, Quantitative Analysis Methods of Chloride Deposition on Silver for Atmospheric Corrosion Monitoring in South Korea, *Corrosion*, **77**, 53 (2021). Doi: <https://doi.org/10.5006/3622>
16. D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed., Wiley, Hoboken, NJ (2012).
17. ASTM G1-03, *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*, ASTM International, West Conshohocken, PA (2011).
18. E. Schindelholz, R. G. Kelly, I. S. Cole, W. D. Ganther, and T. H. Muster, Comparability and accuracy of time of wetness sensing methods relevant for atmospheric corrosion, *Corrosion Science*, **67**, 233 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.10.026>
19. S. Sun, Q. Zheng, D. Li, S. Hu, and J. Wen, Exfoliation corrosion of extruded 2024-T4 in the coastal environments in China, *Corrosion Science*, **53**, 2527 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.04.010>
20. F. Vidal, R. Vicente, and J. M. Silva, Review of environmental and air pollution impacts on built heritage: 10 questions on corrosion and soiling effects for urban intervention, *Journal of Cultural Heritage*, **37**, 273 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.11.006>
21. K. Pearson, *Proc. R. Soc. Lon.*, **58**, 240 (1895). Doi: <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041>
22. W. D. Park, P. J. Gook, Y. Cho, and C. B. Bahn, Wash Interval Optimization to Prevent Atmospheric Corrosion of Korean Aircrafts Made of Aluminum Alloys, *Corrosion Science and Technology*, **15**, 189 (2016). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2016.15.4.189>
23. M. Forslund, J. Majoros, and C. Leygraf, A Sensor System for High Resolution *In Situ* Atmospheric Corrosivity Monitoring in Field Environments, *Journal of The Electrochemical Society*, **144**, 2637 (1997). Doi: <https://doi.org/10.1149/1.1837876>
24. D. Liang, H. C. Allen, G. S. Frankel, Z. Y. Chen, R. G. Kelly, Y. Wu, and B. E. Wyslouzil, Effects of Sodium Chloride Particles, Ozone, UV, and Relative Humidity on Atmospheric Corrosion of Silver, *Journal of The Electrochemical Society*, **157**, C146 (2010). Doi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.3310812>
25. Y. Wan, E. N. Macha, and R. G. Kelly, Modification of ASTM B117 Salt Spray Corrosion Test and Its Correlation to Field Measurements of Silver Corrosion, *Corrosion*, **68**, 036001-1 (2012). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3693699>
26. Z. Y. Chen, D. Liang, G. Ma, G. S. Frankel, H. C. Allen, and R. G. Kelly, Influence of UV irradiation and ozone on atmospheric corrosion of bare silver, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, **45**, 169 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1179/147842209X12579401586681>
27. H. Lin and G. S. Frankel, Accelerated Atmospheric Corrosion Testing of Ag, *Corrosion*, **69**, 1060 (2013). Doi: <https://doi.org/10.5006/0926>