

# 인공신경망과 대기부식환경 모니터링 데이터를 이용한 항공기 세척주기 결정 알고리즘

권혁준<sup>1</sup> · 이두열<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 신소재공학과, 서울특별시 서대문구 연세로 50

<sup>2</sup>국방대학교 국방과학학과, 충청남도 논산시 양촌면 황산별로 1040

(2022년 12월 05일 접수, 2023년 4월 03일 수정, 2023년 6월 13일 채택)

## Algorithm for Determining Aircraft Washing Intervals Using Atmospheric Corrosion Monitoring of Airbase Data and an Artificial Neural Network

Hyeok-Jun Kwon<sup>1</sup> and Dooyoul Lee<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, 50 Yeonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul, 03722, Korea

<sup>2</sup>Department of Defense Science, Korea National Defense University, 1040 Hwangsanbeol-ro, Yangchon-myeon, Nonsan, Chungcheongnam-do, 33021, Korea

(Received December 05, 2022; Revised April 03, 2023; Accepted June 13, 2023)

Aircraft washing is performed periodically for corrosion control. Currently, the aircraft washing interval is qualitatively set according to the geographical conditions of each base. We developed a washing interval determination algorithm based on atmospheric corrosion environment monitoring data at the Republic of Korea Air Force (ROKAF) bases and United States Air Force (USAF) bases to determine the optimal interval. The main factors of the washing interval decision algorithm were identified through hierarchical clustering, sensitivity analysis, and analysis of variance, and criteria were derived. To improve the classification accuracy, we developed a washing interval decision model based on an artificial neural network (ANN). The ANN model was calibrated and validated using the atmospheric corrosion environment monitoring data and washing intervals of the USAF bases. The new algorithm returned a three-level washing interval, depending on the corrosion rate of steel and the results of the ANN model. A new base-specific aircraft washing interval was proposed by inputting the atmospheric corrosion environment monitoring results of the ROKAF bases into the algorithm.

**Keywords:** Atmospheric corrosion, Artificial neural network (ANN), Aircraft wash interval

### 1. 서론

공군 항공기 장기 운용에 따라 항공기 부식 관련 결함의 수리비용은 해마다 증가하고 있는 추세이다. 항공기 부식결함은 수리가 까다롭고 재발 가능성이 높아 세척, 제습, 부식방지 콤파운드 적용 등의 방법으로 사전에 억제하는 것이 효과적이다 [1]. 특히 세척은 항공기 표면에 잔류하는 부식성 물질(Corrodant)을 제거하거나 희석해 부식속도를 낮추는 가장 기본적인 부식관리 방법이다.

현재 공군 기지별 항공기 세척주기는 미공군 부식 관

련 기술도서(Technical Order, TO)인 TO 1-1-691 [2]과 지리적인 위치를 고려하여 설정되어 있다. TO 1-1-691에는 주한 미군 기지인 오산, 군산 기지와 공동운영기지인 대구 기지의 세척주기가 명시되어 있다. 이들 기지의 세척주기는 미공군이 자군의 세척주기 결정 알고리즘에 의해 결정하여 적용 중인 주기와 동일하게 적용하고 있다 [3]. 다른 공군 기지의 경우 대기부식환경을 측정하지 않아 항공기 세척주기에 대한 정량적 근거가 부족하다.

공군은 10년 전부터 세척주기 결정의 중요성을 인식하고 지속적으로 알고리즘을 개선하려는 노력을 기울여왔다. 초기에는 미공군 프로그램 코드명인 PACER LIME [4]의 알고리즘을 직접 적용하려고 시도하였다 [5]. 이후 제한적인 대기부식환경 모니터링과 관련 연구 데이

<sup>†</sup>Corresponding author: idoo10@korea.kr

권혁준: 박사과정, 이두열: 조교수

터 [6], ISO 9223의 부식속도 관계식을 참고하여 알고리즘을 개선하였다 [7]. 2016년부터는 전국에 산재해 있는 기지에 대기부식환경 모니터링 장비를 설치하여 기지별 최소 1년 치 데이터를 확보하였다 [8].

본 연구의 주요 목적은 미공군 기지별 대기부식환경 모니터링 데이터와 TO 1-1-691의 세척주기를 바탕으로 새로운 기지별 세척주기 결정 알고리즘을 개발하는 것이다. 미공군 데이터를 사용하여 알고리즘을 개발하는 이유는 대기부식환경 데이터와 세척주기의 쌍이 공개되어 있고, 결정된 세척주기가 운용을 통해 검증되었기 때문이다. 개발된 알고리즘에 공군 기지의 대기부식환경 모니터링 데이터를 입력하여 더욱 합리적인 세척주기를 산출하였다. 이를 통해 한국 운영환경에 부합하는 기지별 항공기 세척주기를 결정하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 공군 항공기 주기환경

주기환경이란 항공기가 지상에서 보관되는 장소를 의미하는 것으로, 공군 항공기 주기환경은 크게 리베트먼트(Revetment)와 엄체호로 나뉜다(Fig. 1). 리베트먼트는 항공기 높이보다 높은 담 형태의 구조물이다(Fig. 1a). 일부 기지의 리베트먼트에는 지붕이 있고, 소형 항공기는 낮은 지붕(Fig. 1b), 대형 항공기는 높은 지붕(Fig. 1c)을 설치한다. 엄체호는 일반적으로 파형강판을 콘크리트로 감싼 후 흙을 덮는 방법으로 시공되어 있다(Fig. 1d). 엄체호는 대부분 문이 있어 비행이 없는 경우 폐쇄한다.

공군 기지는 Table 1과 같이 지리적 위치와 주기환경에 따라 4개의 형태로 구분할 수 있다. 지리적 환경은

해안과 내륙으로 구분되고, 리베트먼트 또는 엄체호 주기환경과 조합된다. Table 1에서 모자(^) 표시가 있는 기지( $\hat{A}_1, \hat{A}_2, \hat{B}_2$ , 그리고  $\hat{B}_4$ )는 리베트먼트에 지붕이 설치되어 있다.  $\hat{A}_2$  기지의 리베트먼트에는 높은 지붕이 설치되어 있다. Fig. 2a는 주요 기지의 주기환경을 나타낸다.

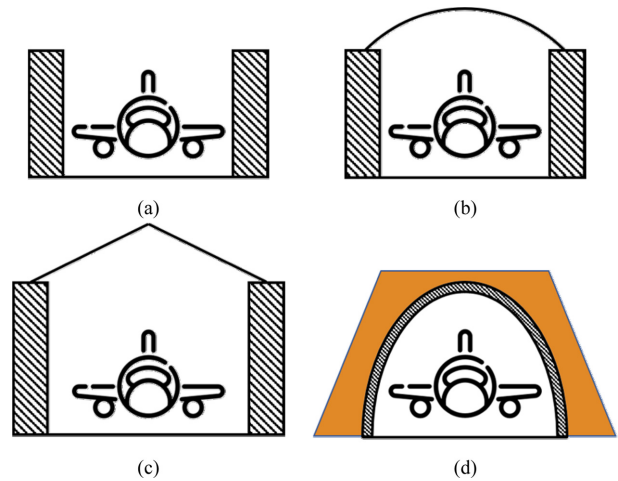


Fig. 1. Types of aircraft parking area showing (a) revetment, (b) revetment with roof (low), (c) revetment with roof (high), and (d) shelter with door

Table 1. Air bases categorized by geographical locations and types of aircraft parking area

Environment	Coastal	Inland
Revetment	$\hat{A}_1, \hat{A}_2$	$B_1, \hat{B}_2, B_3, \hat{B}_4$
Shelter	$C_1, C_2, C_3$	$D_1, D_2, D_3, D_4$

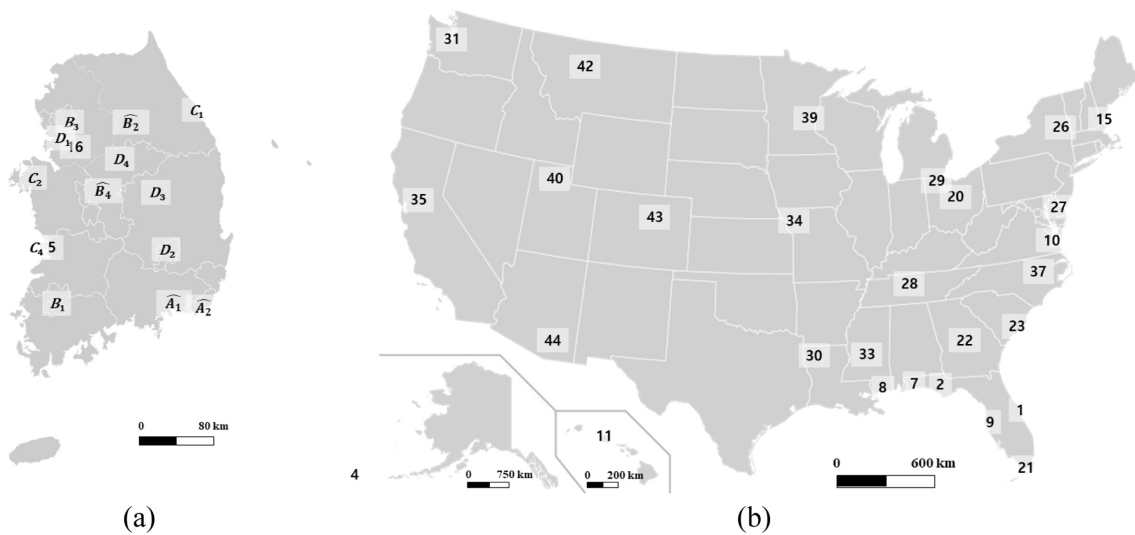


Fig. 2. Atmospheric corrosion monitoring sites at (a) the Korean peninsula and (b) U.S. continent

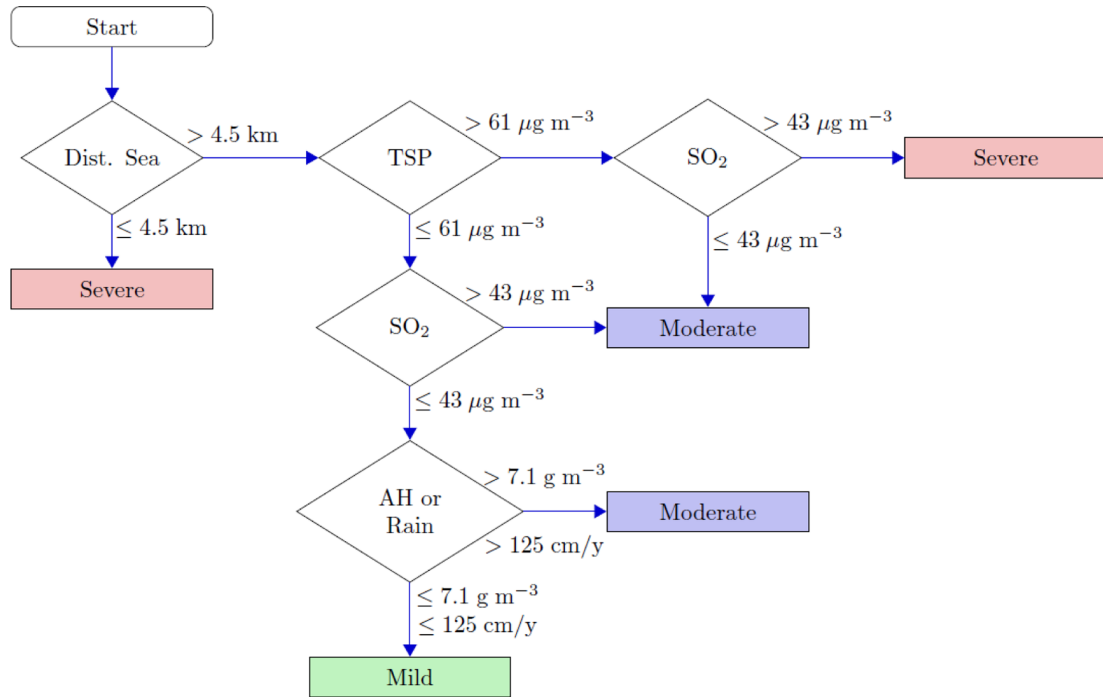


Fig. 3. PACER LIME algorithm flowchart [4]

### 2.2. 기존 세척주기 결정 알고리즘

현재 공군에서 항공기 세척주기 설정 기준으로 준용하고 있는 TO 1-1-691의 세척주기는 PACER LIME [4] 과 ISO 9223 [9]의 대기부식환경 위험도 결정 알고리즘에 기반하고 있다 [3]. PACER LIME은 1960년대부터 각 대기환경 요인들이 부식에 미치는 영향을 연구한 결과로 세척주기 결정 알고리즘은 Fig. 3과 같다. PACER LIME의 주요변수는 해안까지 거리(Distance to Sea), 미세먼지 농도(Total Suspension Particles, TSP), 대기 중 이산화황 농도(SO<sub>2</sub>), 절대습도(Absolute Humidity, AH), 그리고 강수량(Rain)이다. 최종적으로 대기부식환경은 심각(Severe), 중간(Moderate), 그리고 경미(Mild)로 구분된다. 대기부식환경에 따라 항공기 세척주기는 30일(심각), 90일(중간), 그리고 180일(경미)을 적용하고 있다.

ISO 9223의 대기부식 위험도는 부식속도 관계식으로 추정된 부식률과 1년간 대기에 노출된 금속의 무게감소로 계산한 부식률에 기반하여 6단계(C1~C5, CX)로 분류된다. 각 단계별 부식률은 Table 3에 나타나 있다. 예를 들어 탄소강(Steel)의 대기 노출 후 첫 1년간 부식속도 관계식은 아래와 같다.

$$r_{corr} = 2.77P_d^{0.52}(\exp(0.020RH + f_{St}) + 0.102S_d^{0.62}\exp(0.033RH + 0.040T)) \quad (1)$$

여기서  $r_{corr}$ 은 부식률,  $T$ 는 연평균온도,  $RH$ 는 연간 상대

습도,  $P_d$ 는 연평균 이산화황(SO<sub>2</sub>) 누적률,  $S_d$ 는 연평균 염화물(Cl) 누적률을 나타낸다.  $f_{St}$ 는 온도에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$f_{St} = 0150(T - 10) \text{ when } T \leq 10^\circ\text{C}; \\ \text{otherwise } -0.054(T - 10) \quad (2)$$

미공군 세척주기 결정 알고리즘인 PACER LIME 알고리즘과 ISO 9223의 변수 중 세척주기 결정에 큰 영향을 미치는 요인을 찾기 위해 민감도 분석을 수행하였다.

### 2.3. 대기부식환경 모니터링

미공군 사례 [10]를 참고하여 주요 금속 재료의 부식속도, 상대습도, 그리고 염화물 누적률을 측정하기 위해 대기부식환경 모니터링 세트 및 시편카드를 설계하였다 (Fig. 4). 시편카드에는 총 6개의 금속시편으로 구성되어 있고, 염화물 누적률 측정을 위한 은(Ag)과 재료의 부식속도 측정을 위한 구리(Cu), 알루미늄 합금(AA2024, AA6061, AA7075), 그리고 탄소강으로 구성하였다. 전국 13개 기지의 항공기 주기장소에 설치한 시편 카드는 6개월 주기로 항공기기술연구소에서 회수 및 분석하였다. 회수한 시편들은 ASTM G1 [11]에 의거 부식률을 계산하였다 [12]. 시편의 이물질을 제거하기 위해 1분간 초음파 세척 후 분석하였다. 탄소강 시편의 경우 세척 후 무게를 측정하고, 50 vol% 염산 수용액에 2분간 산세척

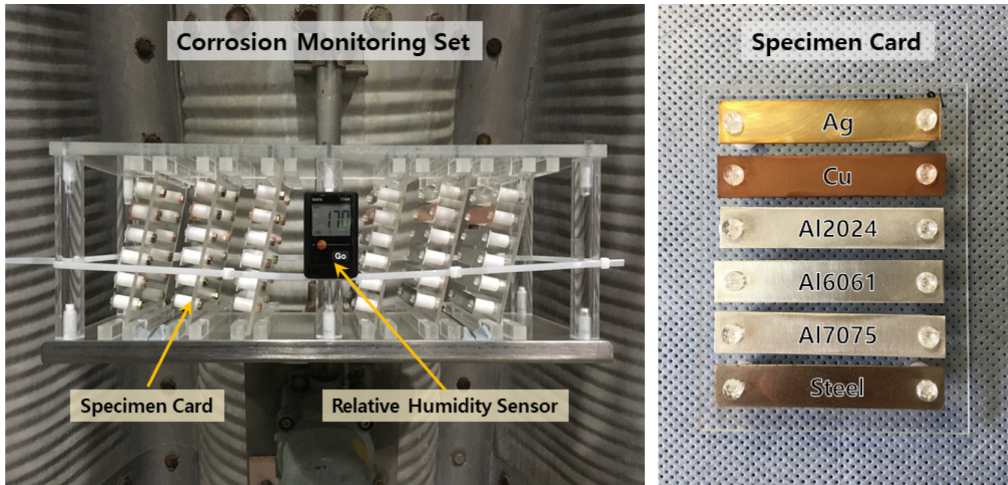


Fig. 4. Corrosion monitoring set equipped with 6 specimen cards and relative humidity sensor, and details of a specimen card

후 다시 무게를 측정하는 과정을 여러 번 반복하여 결과를 그래프에 표시하였다. 부식물과 모재의 반응 정도가 다르므로 그래프의 기울기가 변하는 지점에서 부식물 제거가 완료된 것으로 판단하여 노출기간 동안 표면에 생긴 부식물의 질량을 유추하였다.

상대습도는 온습도 센서(Testo-174H)를 사용하여 측정하였다. 기온이 0°C를 초과하고, 상대습도가 80%를 초과하는 시간인 젖음시간(Time of Wetness, TOW)을 계산하였다. 연평균 염화물 누적률은 시편 표면의 X선 광전자분광분석(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) 결과를 이용하여 추정하였다 [8]. 구체적으로 설명하면 식각속도에 이온 빔의 노출 시간을 곱하여 시료가 식각된 깊이를 구하였다. 식각깊이와 식각면적을 곱하여 식각 부피를 구하고, Ag의 밀도를 곱하여 식각질량을 계산하였다. 마지막으로 각 원소의 수직적 조성 및 분포 분석(Depth Profiling) 결과를 이용하여 노출기간 동안의 염화물 누적률을 계산하였다. 시편은 깊이별로 조성이 변하므로 이와 같은 계산법은 오차를 수반할 수 있지만, X선 회절(X-ray Diffraction, XRD)분석법과 전기화학적 환원(Coulometric Reduction)방법 등 다른 방법으로 측정한 동일 시편의 염화물 누적률과 비교적 높은 상관관계 나타내므로 타당한 것으로 판단하였다 [8,12].

#### 2.4. 인공지능경망 항공기 세척주기 결정모델 개발

전 세계에 위치한 44개의 미공군 기지(Fig. 2b)의 대기부식환경 모니터링 데이터와 세척주기 [10]를 사용하여 ISO 9223 대기부식 위험도 분류(6단계)와 TO 1-1-691의 세척주기 분류(3단계)의 상관관계를 확인하였다. 미공군의 경우 염화물 누적률이 한국공군(무게)과 달리 두께(Angstrom)로 표기되어 직접적인 변환이 곤란하였

다. 따라서 중앙값이 동일하다는 가정 하에 미공군 데이터의 스케일을 변환하였다. 전처리를 거친 데이터를 활용하여 쌍곡탄젠트(Hyperbolic Tangent) 함수를 활성화 함수로 사용하는 인공지능경망(Artificial Neural Network, ANN)을 개발하였다. 쌍곡탄젠트 함수는 이진분류(Binary Classification) 문제를 푸는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 반복 학습을 통해 여러 인공지능경망을 개발하였고, K겹 교차검증(K-fold Cross Validation)으로 모델의 타당성을 검증하였다. 이후 한국공군 데이터를 입력하여 기지별 항공기 세척주기를 결정하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1. 대기부식환경 모니터링 데이터 비교

대기부식환경 모니터링 데이터 중 해안까지 거리, 젖음시간, 염화물 누적률, 그리고 탄소강 부식률을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 미공군의 경우 젖음시간과 탄소강 부식률의 상관관계는 통계적으로 유의하지 않았다. 염화물 누적률과 탄소강 부식률은 비교적 높은 양의 상관관계(피어슨 상관계수 0.6)를 갖는다. 반면 한국공군의 경우 젖음시간과 탄소강 부식률은 양의 상관관계(피어슨 상관계수 0.6)를 나타내고, 염화물 누적률과 탄소강 부식률은 강한 상관관계(피어슨 상관계수 0.9)를 나타낸다. 이와 같은 차이는 미공군 데이터가 노천에서 측정되었기 때문으로 생각된다. 노천에서 시편은 빗물에 노출되고, 충분한 강수는 세척효과를 갖기 때문이다. 젖음시간과 강수량은 약하지만 통계적으로 유의한 상관관계를 나타낸다.

미공군의 경우 전반적으로 젖음시간, 염화물 누적률, 그리고 부식률이 한국공군에 비해 높은 수준을 나타낸

ALGORITHM FOR DETERMINING AIRCRAFT WASHING INTERVALS USING ATMOSPHERIC CORROSION MONITORING OF AIRBASE DATA AND AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

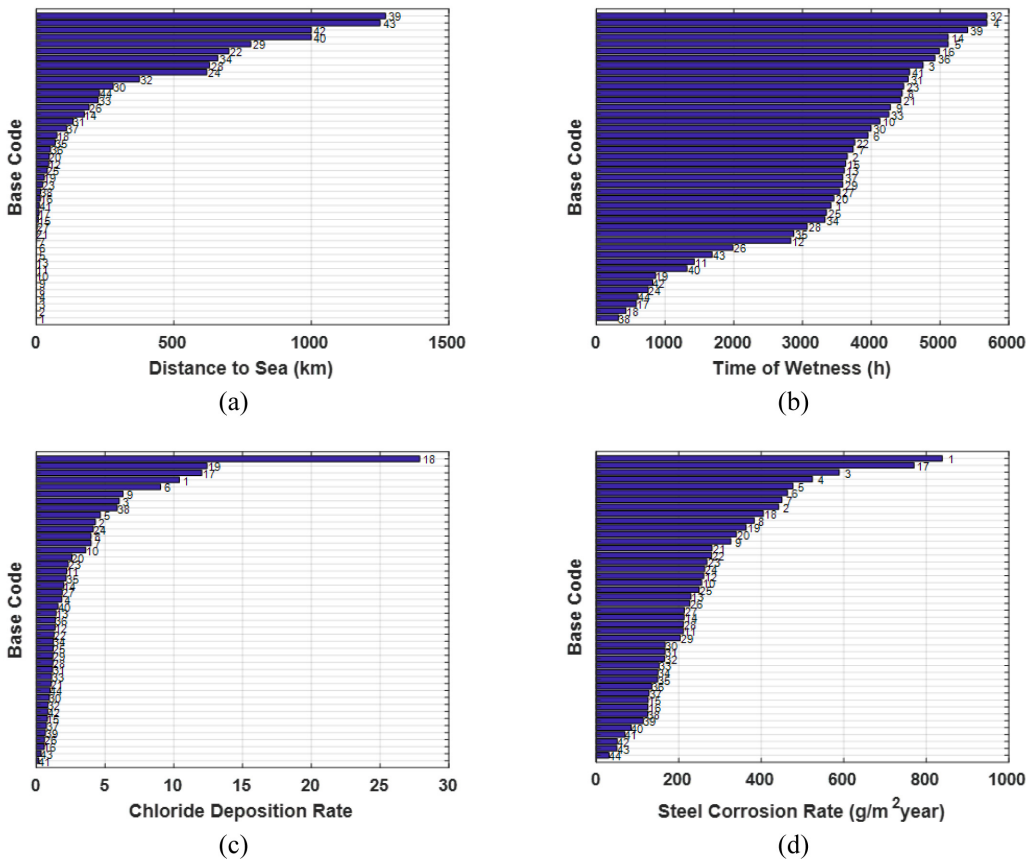


Fig. 5. Comparison of atmospheric corrosion monitoring data of USAF showing (a) distance to sea, (b) time of wetness, (c) chloride deposition rate, and (d) steel corrosion rate

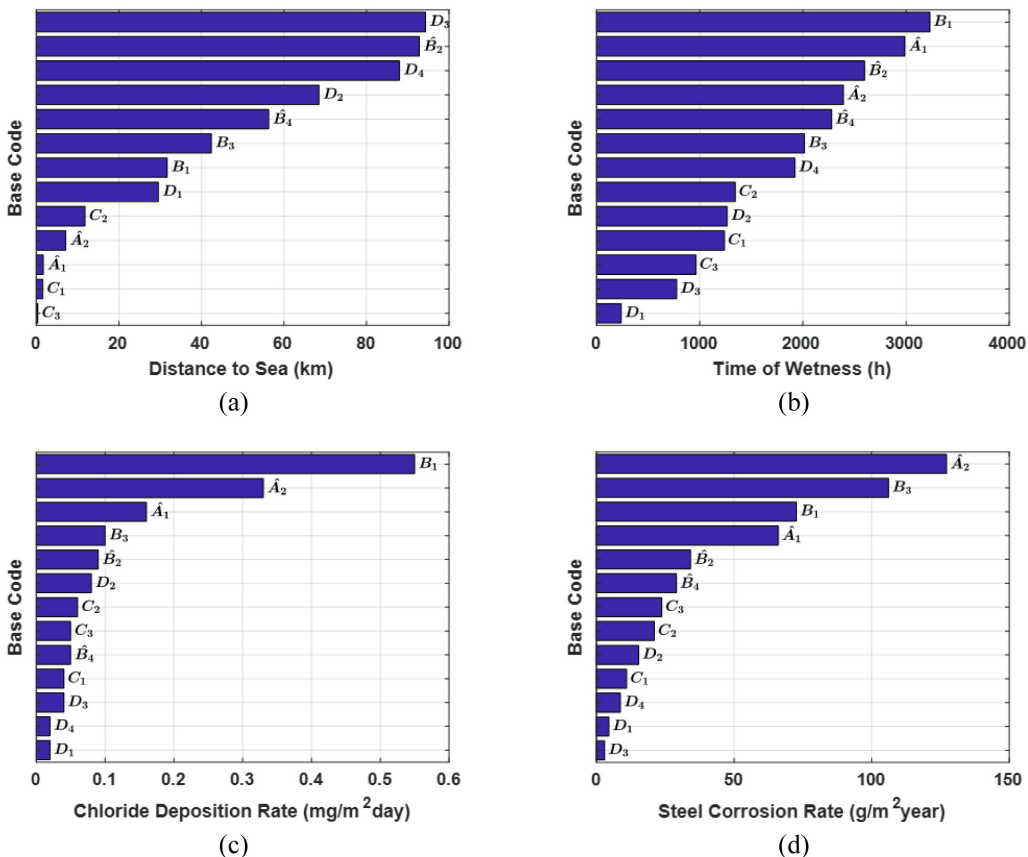


Fig. 6. Comparison of atmospheric corrosion monitoring data of ROKAF showing (a) distance to sea, (b) time of wetness, (c) chloride deposition rate, and (d) steel corrosion rate



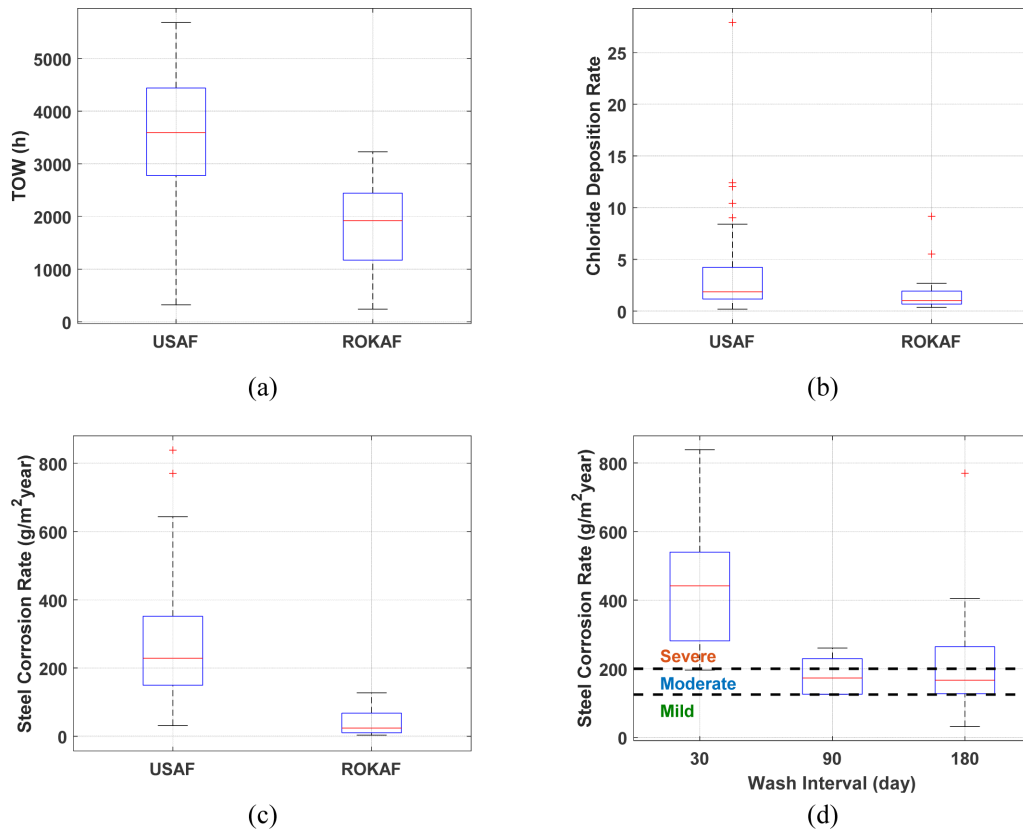


Fig. 7. Comparison of atmospheric corrosion monitoring data of USAF and ROKAF showing (a) time of wetness, (b) chloride deposition rate, (c) steel corrosion rate, and (d) corrosion rate vs. wash interval

다(Fig. 7). 변동의 폭 또한 한국공군보다 매우 넓다. 이와 같은 이유는 미공군 기지가 전 세계에 산재하여 지리적으로 좁은 한반도에 분포한 한국공군 기지에 비해 대기환경의 변화가 크기 때문으로 판단된다. 또한 미공군의 경우 주로 노천에 항공기를 주기하기 때문에 대기부식 위험도가 한국공군에 비해 높은 것으로 판단된다. Fig. 7d는 세척주기를 기준으로 미공군 부식모니터링 데이터 중 탄소강의 부식률을 나타낸다. 대기부식환경이 심각한 경우 부식률은 비교적 뚜렷한 차이를 나타내지만 중간과 경미는 구분이 어려운 것을 알 수 있다. 앞서 살펴보았듯이 세척주기는 다양한 요인에 의해 결정되므로 어떤 특정 요인만으로 세척주기 결정 알고리즘을 역산하기 곤란하다.

미공군 항공기 세척주기 결정 알고리즘의 주요 인자를 식별하기 위해 민감도분석을 실시하였다. Fig. 8은 대기부식환경 모니터링 데이터와 세척주기 사이의 민감도분석 결과를 나타내고, 해안까지 거리(Dist. Sea), 염화물 누적률(Cl), 그리고 탄소강의 부식률(Steel CR)이 세척주기 분류에 80% 이상의 영향을 주는 주요 인자임을 알 수 있다. 나머지는 젖음시간과 강수량(Precip.)이 기여한다.

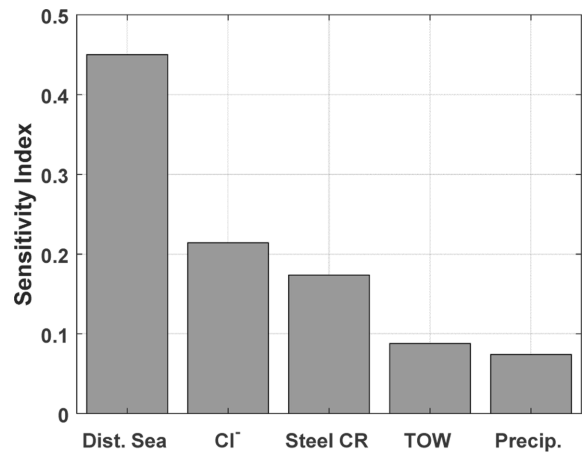


Fig. 8 Sensitivity analysis results

한국공군 기지별 대기부식환경 모니터링 데이터 분석 결과 항공기 주기환경이 세척주기 결정 주요 인자인 염화물 누적률과 탄소강의 부식률에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 젖음시간은 염체호가 리베트먼트에 비해 전체적으로 짧고, 부식률은 높은 지방 또는 지방 없는 리베트먼트가 가장 높았으며, 다음으로 낮은 지방 리베트먼트 그리고 염체호가 가장 낮았다. Fig. 9는 계층

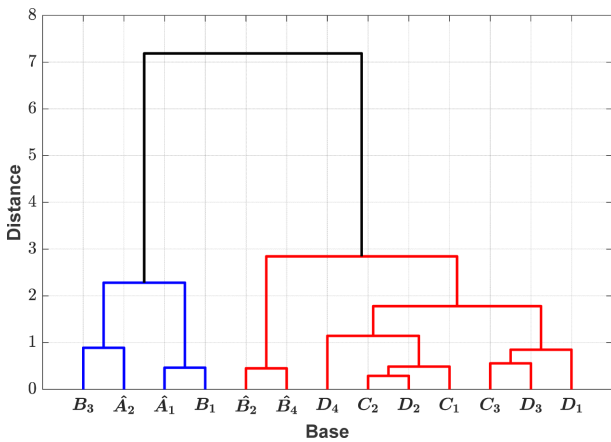


Fig. 9. Dendrogram showing two groups of bases

적 군집화(Hierarchical Clustering) 분석 결과를 나타내는 덴드로그램(Dendrogram)으로 청색으로 연결된 곳은 해안기지이며, 붉은색은 내륙기지에 해당한다. 분석을 위해 젖은시간, 염화물 누적률, 그리고 탄소강의 부식률 데이터는 표준화되었다. 덴드로그램에서 수평선 높이(distance)는 그룹 간의 거리를 나타낸다. 즉, 값이 클수록(거리가 멀수록) 두 그룹 간의 차이가 크다는 것을 의미하므로, 본 연구에서는 거리가 떨어져 있을수록 두 곳의 부식환경 차이가 크다는 것을 말한다. 예를 들어  $\hat{A}_1$  과  $\hat{B}_2$  의 경우 동일하게 낮은 지붕 리베트먼트에 항공기 주기가 이루어지나 노출된 시편의 부식률은 약 2 배 차이를 보임과 동시에 각각 해안기지와 내륙기지에 속함에 따라서 덴드로그램상 거리차이가 크게 나타난다. 엄체호의 경우 기지의 지리적 위치와 무관하게 유사한 대기부식환경을 보이고, 다른 그룹에 비해 비교적 염화물 누적률과 부식속도가 낮다. 이는 야간 엄체호 폐쇄로 인해 외부 대기환경의 영향이 감소한 것과 주간 자

외선이 차단되었기 때문으로 판단된다 [13]. 리베트먼트의 경우 지붕의 높이에 따라 부식속도의 차이가 발생하였다. 요약하면 동일 주기형태에서도 지리적 위치에 따라 부식속도에 큰 차이가 있으며, 이는 덴드로그램을 통해 확인되었다.

### 3.2. 주요 인자와 세척주기의 상관관계

세척주기와 세척주기 결정 주요 인자인 해안까지 거리, 염화물 누적률, 그리고 부식률의 상관관계를 분석하였다. 해안까지 거리의 경우 세척주기에 가장 큰 영향을 미친다. TO 1-1-691에 따르면 해안까지 거리가 1.25 마일(약 2 km) 이하인 기지는 한 군데를 제외하고 모두 세척주기가 심각으로 분류되어 있다. 여기에는 여러 요인이 있으나 다른 세척주기 결정 주요 인자인 염화물 누적률이 해안까지 거리가 2 km 이하일 때 급격하게 증가한다는 것과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다 [7].

다른 세척주기 결정 주요 인자인 부식률과 세척주기 분류 기준의 관계를 확인하기 위해 분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)을 수행하였다. P값이 0.001 미만으로 부식률 평균의 차이는 통계적으로 유의한 것을 확인하였다. 사후검정(Tukey's Honest Significant Difference Test) 결과 경미와 심각, 중간과 심각한 평균은 통계적으로 유의한 차이가 있으나, 경미와 중간 평균의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다. 각 세척주기별 부식률의 95% 신뢰구간은 Table 2와 같다.

세척주기 결정 주요 인자들에 대한 분석결과를 바탕으로 미공군 세척주기와 ISO 9223 대기부식환경 분류 기준과의 상관관계를 확인하였다. 앞서 언급한 바와 같이 해안까지 거리가 2 km 이내는 심각으로 분류하였다. 심각과 중간을 구분하는 기준은 심각에 해당하는 부식률의 최소값인 200 g/m<sup>2</sup>y 로 판단되고, 이는 ISO 9223

Table 2. Corrosion Rate corresponding to TO 1-1-691 classification via sensitivity analysis. The standard for each wash interval is presented in TO 1-1-691 [2]

Wash Interval	Mild (180 days)	Moderate (90 days)	Severe (30 days)
Corr. Rate (g/m <sup>2</sup> y)	127 ~ 214	126 ~ 271	327 ~ 506

Table 3. Comparison of environmental severity between USAF and ISO 9223

USAF			ISO 9223	
Category	Wash Intv.	CR (g/m <sup>2</sup> y)	CR (g/m <sup>2</sup> y)	Category
Mild	180	≤125	≤10	C1 (Very Low)
Moderate	90	>125, ≤200	>10, ≤200	C2 (Low)
			>200, ≤400	C3 (Medium)
Severe	30	>200	>400, ≤650	C4 (High)
			>650, ≤1,500	C5 (Very High)

의 C2 상한에 해당한다. 중간과 경미를 구분하는 기준은 중간에 해당하는 부식률의 최소값인 125 g/m<sup>2</sup>y로 판단되며, 이는 ISO 9223의 C2 중간에 위치한다. 중간과 경미의 신뢰구간이 넓어 분류가 어려움에 따라 중간의 최소값을 분류기준으로 결정하였다. 민감도분석을 통한 세척주기 분류기준과 ISO 9223 대기부식환경 분류기준의 관계는 Table 3과 같다. Fig. 7d에 결정된 세척주기 분류기준을 표시하였다.

### 3.3. 인공신경망 모델과 항공기 세척주기 결정 알고리즘

Fig. 10a의 인공신경망 모델을 사용하여 미공군 기지(44개)의 대기부식환경 모니터링 데이터와 TO 1-1-691의 세척주기 데이터를 학습하였다. 34회의 학습 및 반복 검증을 수행한 결과, 전체적으로 약 90%의 정확도를 보였다. 심각과 경미의 경우 학습/검증데이터 대상으로 90% 이상의 예측 정확도를 보이는 반면 중간은 학습데이터 75%, 검증데이터 50%의 예측 정확도를 나타내었다(Fig. 10b). 이는 심각의 17개, 경미의 29개의 데

이터 수에 비해 중간의 데이터의 수가 6개로 현저히 적어 정확도가 떨어지기 때문으로 판단된다. Fig. 11은 해안까지 거리와 탄소강 부식률에 따라 대기부식환경이 심각과 경미로 분류될 확률을 나타낸다. 학습된 인공신경망 모델을 살펴보면 해안까지 거리가 가깝고 부식률이 높을수록 심각으로 분류될 확률이 올라가고, 반대의 경우 경미로 분류될 확률이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

세척주기 설정에 제일 큰 영향을 미치는 것으로 확인된 해안까지 거리가 2 km 이내의 기지는 심각(30일)으로 분류하고 그 외 기지들은 부식률과 신경망 모델 기준으로 분류된 세척주기 결과 중 가장 보수적인 주기로 선정하였다. Fig. 12는 새로운 세척주기 결정 알고리즘을 나타낸다. 새로 제시한 세척주기와 현재 운영 중인 세척주기 비교결과, 총 13개 기지 중 5개 기지를 제외하고 현재 운영 중인 세척주기와 동일하였다. 세척주기가 변경된 5개 기지 중 3개 기지는 동일 기지 내에서 기중에 따라 상이한 세척주기를 운영하고 있었고, 나머지 2개 기지는 세척주기를 90일에서 180일로 완화하였다.

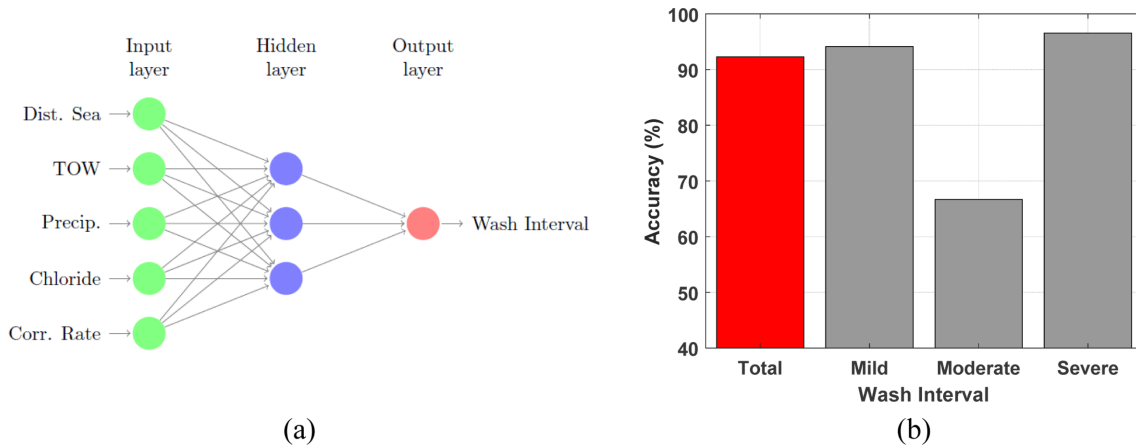


Fig. 10. (a) ANN for wash interval discrimination and (b) validation result

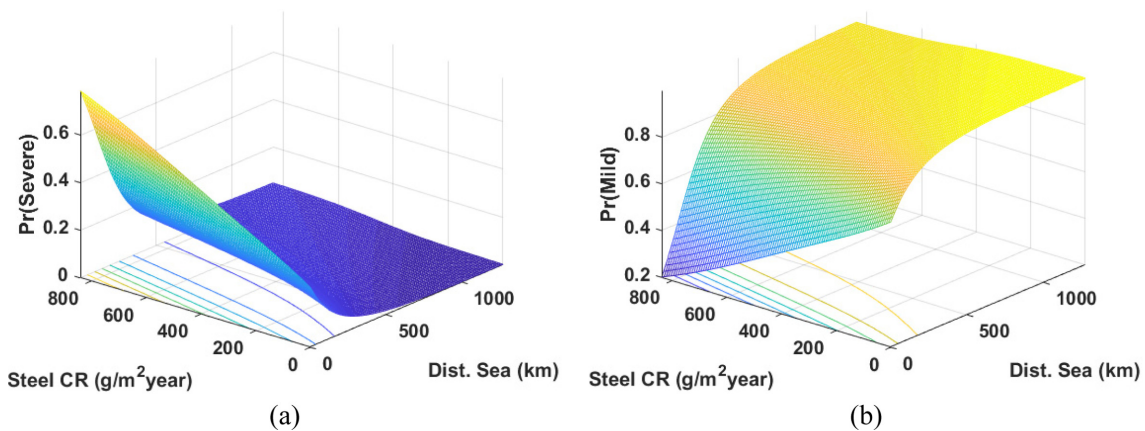


Fig. 11. Probability of environmental severity discriminated as (a) severe and (b) mild



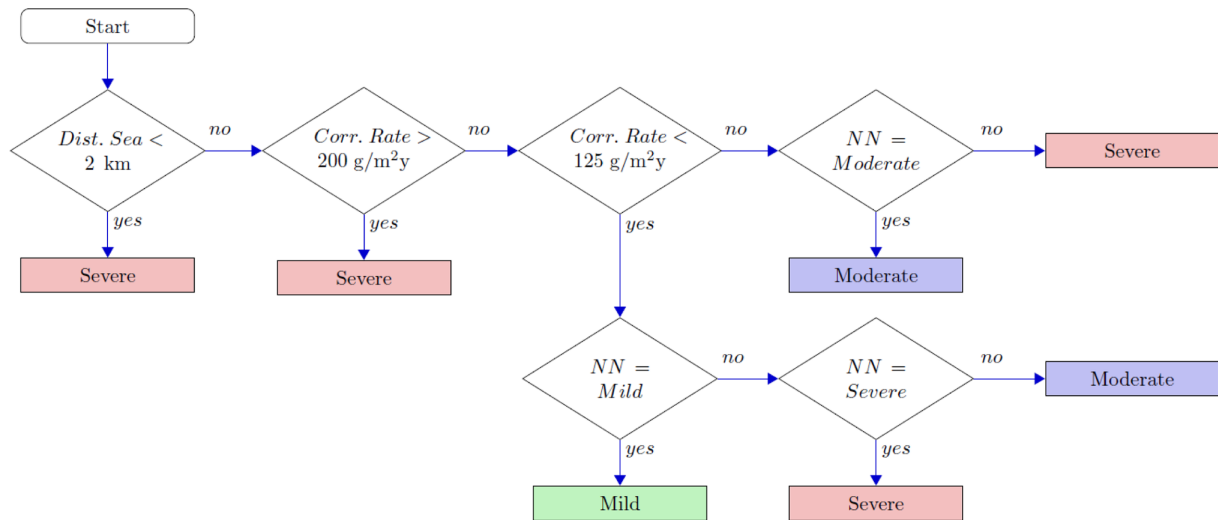


Fig. 12. Algorithm for wash interval determination using ANN (decision nodes with NN)

향후 추가 연구를 통해 Fig. 12의 세척주기 결정 알고리즘에 주기환경의 영향을 반영할 계획이고, 해안가 업체호에 주기하는 항공기 세척주기에 변화가 있을 것으로 예상된다. 궁극적으로 부식관리는 고정된 시간 간격이 아닌 실제 부식인자의 누적량을 바탕으로 수행하는 것으로 변화할 필요가 있다 [14]. 이미 최신 전술기인 F-35는 내장된 부식센서를 통해 부식수준을 실시간으로 모니터링 하는 것이 가능하다 [15]. 다만 실시간 또는 연속적인 부식 모니터링을 위한 센서는 고가이고, 오류도 잦은 편이므로 실제 효과는 기대에 미치지 못하고 있다. 따라서 고전적이거나 상대적으로 간단하면서도 신뢰성 있는 금속 시편 기반 부식 모니터링 기술을 지속 유지, 발전시킬 필요가 있다. 특히 기초 대기부식환경 데이터를 수집한다는 측면에서 매우 의미가 있는 연구이다. 현재 한국공군의 경우 부식관리에 과도할 정도로 비용을 투입하고 있기 때문에 합리적인 세척주기 결정은 비용과 효과를 최적화하는 과정의 첫 단계로 볼 수 있다.

#### 4. 결론

공군 기지별 대기부식환경 데이터에 대한 분석을 통해, 주기환경이 항공기 부식에 현저한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 미공군 대기부식환경 모니터링 데이터와 세척주기에 대한 민감도분석을 통해, 세척주기는 세척주기 결정 주요 인자인 해안까지 거리와 부식률을 기반으로 분류되었음을 확인하였다. 인공지능망 세척주기 결정 모델과 세척주기 결정 주요 인자에 기반한 분류 모델을 상호보완적으로 사용하여 세척주기를 결정하는 알고리즘을 개발하였다. 이를 통해 정량적인 데이터 분

석에 기반한 항공기 세척주기를 제안하였다. 그 결과 총 13개 기지 중 5개 기지의 세척주기가 변화되었고, 그 중 2개 기지에서 세척주기가 완화되었다. 수십 년간 관행에 의존하던 세척주기를 과학적으로 결정한 것이 가장 큰 성과로 부식으로 인한 위험을 높이지 않으면서 비용을 절감하는 방법을 제시하였다. 향후 추가 연구를 통해 세척주기 결정 알고리즘에 주기환경의 영향을 반영할 계획이다. 항공기 대부분을 업체호에 주기하는 공군의 특성상 세척주기에 큰 변화가 있을 것으로 예상된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국고(공군 항공기술연구소)의 지원으로 수행되었습니다.

#### References

1. D. Lee, K. Kim, S. Park, M. Kim, and G. Shin, Study of the Effect of Controlled Humidity Protection, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, **42**, 739 (2018).
2. U. S. Air Force, Technical Manual: Cleaning and Corrosion Prevention and Control, Aerospace and Non-Aerospace Equipment, TO 1-1-691, Change 17 (2019).
3. R. Klassen and P. Roberge, Optimising aircraft wash intervals from maintenance records, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, **43**, 236 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1179/174327807X214888>
4. R. Summitt and F. T. Fink, PACER LIME: An Environmental Corrosion Severity Classification System, AFWAL-TR-80-4102 Part I (1980).

5. D. Lee and J. Choi, *JCAAT 2010*, Gyeongsang NU, Jinju, Korea (2010).
6. 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, *Corrosion Science and Technology*, **10**, 52 (2011). [https://www.j-cst.org/open-source/pdfs/web/pdf\\_viewer.htm?code=C00100200052](https://www.j-cst.org/open-source/pdfs/web/pdf_viewer.htm?code=C00100200052)
7. 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>
8. W. Choi, D. Lee, and C. B. Bahn, *Corrosion*, **77**, 53 (2021).
9. ISO 9223: 2012(E), Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation (2012).
10. W. H. Abbott, A Decade of Corrosion Monitoring in the world's Military Operating Environments, Batelle Columbus Operations, Columbus, OH (2008).
11. ASTM G1-03, Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA (2011).
12. J. Yun, D. Lee, S. Park, M. Kim, and D. Choi, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 94 (2021).
13. 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>
14. C. Jones, *ASIP Conference 2017*, Jacksonville, FL (2017).
15. I. G. Hebden, A. M. Crowley, and Wayne Black, *EWSHM 2018*, Manchester, UK (2018).