

알루미늄 합금 대기부식 예방을 위한 대한민국 공군 항공기 세척주기 최적화 연구

박 원 동 · 국 필 준 · 조 윤 호 · 반 치 범[†]

부산광역시 금정구 부산대학로63번길 2, 부산대학교 기계공학부
(2016년 2월 26일 접수, 2016년 8월 25일 수정, 2016년 8월 25일 채택)

Wash Interval Optimization to Prevent Atmospheric Corrosion of Korean Aircrafts Made of Aluminum Alloys

Won Dong Park, Phil Jun Gook, Younho Cho, and Chi Bum Bahn[†]

School of Mechanical Engineering, Pusan National University, 2 Busandaehak-ro 63Beon-gil,
Guemjeong-gu Busan, 46241, Republic of Korea

(Received February 26, 2016; Revised August 25, 2016; Accepted August 25, 2016)

It is a common practice to conduct periodic washes at designated intervals in order to prevent the atmospheric corrosion of aircraft. The wash interval depends on the atmospheric conditions, but the wash intervals set by the U.S. Air Force were widely adopted in Korea without detailed knowledge of the background data. Therefore, it is necessary to determine our own wash intervals representing the atmospheric and geographical conditions in Korea. This study analyzed previous wash interval algorithms and atmospheric data in Korea. New wash intervals are then proposed based on the corrosion rate equation in ISO-9223:2012. Atmospheric corrosion testing was conducted using 7075 and 1050 aluminum alloy specimens to verify the accuracy of the corrosion rate equation in ISO-9223:2012. Test results showed a reasonable agreement with the corrosion rates predicted by the equation.

Keywords : atmospheric corrosion, aircrafts wash interval, aluminum alloy, ISO-9223, pitting

1. 서 론

부식은 피로균열과 함께 항공기 구조안정성에 영향을 미치는 결함 중 하나이다. 나아가 항공기가 노후화되면서 발생확률이 증가하기 때문에 공군과 같이 다수의 항공기를 보유하는 경우 체계적인 관리가 필요하다¹⁾. 특히 해안에 인접한 공군기지의 경우 내륙에 비해 부식으로 인한 손상확률이 높아 관리가 더 필요하다. 항공기 부식관리의 핵심은 부식의 발생을 억제하는 것인데, 이를 위해 다양한 방법이 적용되고 있으며 그 중 세척은 부식예방의 가장 기본적인 방법으로써 적절한 세척 주기 설정이 중요하다. 세척주기 설정의 첫 단계는 구조재료의 부식에 영향을 미치는 요소를 식별하는 것으로써 오랜 기간 동안 다각적으로 연구되어 왔다. 먼저 대기환경 요인을 고려한 대기부식 위험도 (ESI: Environmental Severity Index) 분류법을 들 수 있다^{2,3)}.

부식에 미치는 여러 대기환경 인자들을 고려하여 정성적인 대기부식 위험도를 여러 단계로 나누는 방법이다. 그 외, 여러 대기부식 인자들을 고려한 정량적 부식속도를 예측하는 관계식에 대한 연구 사례도 있다³⁻⁵⁾.

대기부식 위험도 분류법은 전체 항공기의 부식 정도와 세척주기를 결정하는데 사용될 수 있으며, 미공군에서 제시한 세척주기를 주로 채용하고 있다. 정량적 부식속도 예측 관계식 (dose-response function, 이하 DR 관계식)은 각각의 대기부식 환경 요소가 부식속도에 미치는 영향을 정량적으로 나타낸 것이다. 대표적인 DR 관계식으로 ISO 9223 : 2012³⁾에서 제시한 관계식을 들 수 있다. 유럽과 미국에 위치한 50여개 측정소에서 실시한 알루미늄을 포함한 금속 시편의 대기노출 시험 결과에 기반하고 있다.

본 연구의 주요목적은, 미 공군에서 제시한 대기부식위험도나 세척주기 알고리즘을 대체할 수 있고 한국 환경에 적합한 세척주기 설정 알고리즘 제안 및 부식도 실험 등을 통한 상관관계 입증이다. 이를 위해 기존 대기부식 위험도 선정

[†] Corresponding author: bahn@pusan.ac.kr

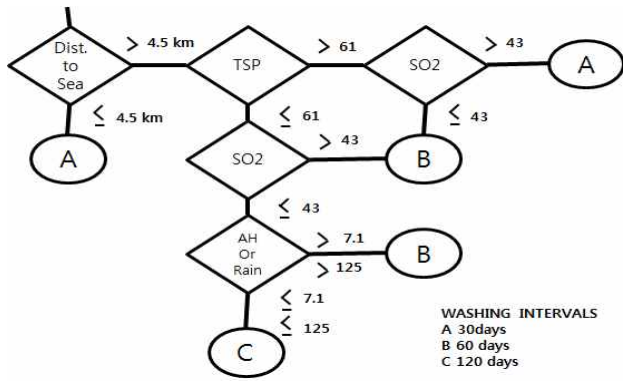


Fig. 1. PACER LIME algorithm to determine a wash interval²⁾.

알고리즘을 분석하고 국내 대기환경 자료를 수집하였다. 이를 바탕으로 국내 환경에 적합한 항공기 세척주기를 제안하였다.

2. 연구방법

2.1 세척주기 설정: 대기부식위험도 알고리즘 분석

미공군의 T.O. 1-1-691⁶⁾에서는 부식에 영향을 미치는 정도에 따라 세 가지 범주로 나누어 미 공군의 각 기지 별 세척주기를 명시하고 있다 (severe: 30 days, moderate: 90 days, mild: 180 days). 해안과의 거리가 1.25 mile (약 2 km) 이상인 기지는 가장 가까운 기지의 세척조건을 따르며 1.25 mile 이하인 기지는 30일 마다 세척을 실시하도록 명시하고 있다. 그 밖의 예외적인 기동 환경에 노출된 항공기의 세척주기는 해수와의 거리 정도에 따라 보수적으로 설정된다. 국내에 위치한 미 공군기지는 지역에 따라 세척주기가 다르게 설정되어 있다. T.O. 1-1-691에서는 어떠한 기준으로 세 단계로 분류할 것인가에 대한 방법론은 구체적으로 제시하지 않고 있다. 아마도 다음에 살펴볼 PACER LIME 알고리즘에 기반한 것으로 추측된다.

PACER LIME Program²⁾은 미 공군에서 1960년대부터 각 대기환경 요인이 미치는 영향을 평가하여 부식 환경의 심각도를 분류하고자 실시한 프로그램으로서 이를 이용하여 세척주기 결정 알고리즘을 개발하였다. 최종적으로 세척주기 결정 알고리즘은 해수와의 거리, 미세 먼지 농도 (TSP), 대기 중 이산화황 농도 (SO₂), 절대습도 (AH), 강수량 (Rain)을 고려하였다.

Fig. 1은 PACER LIME에 따른 부식위험도 분류 및 그에 따른 세척주기 결정 알고리즘을 나타낸다. 부식을 유발하는 요소의 기준 값을 각각 설정하여 부식 환경의 심각도를 A, B, C 등급으로 분류함으로써 이에 따라 세척주기를 각각 30일, 60일, 120일로 구분하였다. 미공군 T.O. 1-1-691과는 세척주기가 다른 것을 알 수 있다. 해안과의 거리도

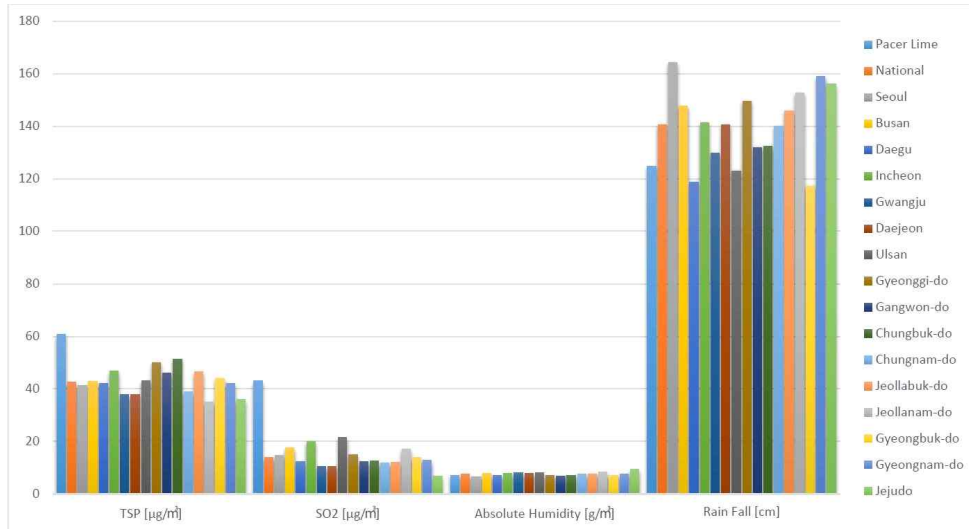
Table 1. Criteria of atmospheric condition parameters to determine wash intervals

	PACER LIME ²⁾	Korea
Distance to Sea [km]	4.5	-
TSP [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	61	43
SO ₂ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	43	14
AH [g/m^3]	7.1	7.6
Rain [cm]	125	141

미공군 T.O. 1-1-691에서 제시한 1.25 mile (약 2 km) 보다 더 보수적인 4.5 km를 제안하고 있다. 미세먼지 농도나 이산화황 농도 등에 대한 기준 값이 어떻게 설정되었는지가 본 알고리즘을 이해하는데 중요하다. 미공군 기지가 있는 각 지역의 연평균 값을 수집하여 그 중 중간값 (median)을 취하는 방법이다. 따라서 대한민국 기상청 홈페이지⁷⁾와 한국환경공단 에어코리아 홈페이지⁸⁾에서 공개되어 있는 대기환경 정보 (raw data)를 바탕으로 PACER LIME과 같은 통계적 분석방법을 적용하여, 다른 나라의 대기기준이 아닌 대한민국 대기환경에 맞는 분류기준을 설정할 수 있다.

Fig. 2는 대한민국의 최근 5년간 (2010년~ 2014년) 지역별 대기환경 자료^{7,8)}를 보여주고 있다. 이를 이용하여 대한민국 전체에 대한 PACER LIME 알고리즘 분류기준 값을 유추할 수 있었다. 각 지역별로 먼저 연평균 값을 구하고 그 지역별 연평균 값들의 중간값을 취하였다. 그 결과, Table 1과 같은 대한민국 대기환경 자료를 이용한 분류기준을 도출할 수 있었다. PACER LIME과 비교하여, 미세먼지 농도는 다소 낮은 값을 보였고, 절대습도는 비슷한 값을 보였다. 강수량이 한국의 경우 다소 높게 나왔고, 가장 큰 차이를 보인 값이 이산화황 농도이다. 한국의 경우 훨씬 낮은 값이 도출되었다. 이러한 차이는 지역적인 대기환경 차이로 인해 발생했다고 볼 수 있다.

Table 1에서 구한 한국적 기준 값을 그대로 적용하여 세척주기를 결정한다면, 낮은 [SO₂] 농도 값으로 인해 다소 보수적인 결과가 초래될 수 있다. 따라서 위 두 기준 값들을 정량적으로 비교할 수 있는 방법이 필요하다. PACER LIME 기준 값과 대한민국 대기를 이용한 기준 값의 정량적 차이를 알게 된다면 보수적인 세척주기 결정을 피할 수 있을 것이다. 또한 PACER LIME에서는 세척주기 알고리즘에 대한 DR 관계식은 제시하지 않았기 때문에, 대한민국의 대기환경 정보에 기반하면서 DR 관계식과 연동되는 분류기준을 설정하는 것이 필요하다. 다음에서 ISO-9223 : 2012 대기부식 위험도 분류법을 살펴보고, ISO-9223 : 2012를 기준으로 하여 Table 1에서 도출한 두 종류의 기준 값의 정량적 차이를 구하고자 하였다.



2010~2014	Pacer Lime	National	Seoul	Busan	Daegu	Incheon	Gwangju	Daejeon	Ulsan	Gyeonggi-do	Gangwon-do	Chungbuk-do	Chungnam-do	Jeollabuk-do	Jeollanam-do	Gyeongbuk-do	Gyeongnam-do	Jeju-do	National (09~13)
TSP [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	61	42.66	41.18	42.98	42.18	46.96	37.78	37.86	43.10	50.29	46.06	51.50	38.79	46.64	35.05	44.04	42.18	35.90	43.06
SO2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	43	13.82	14.63	17.59	12.20	20.04	10.44	10.44	21.47	14.97	12.27	12.56	11.89	11.99	17.14	13.92	12.82	6.70	13.94
Absolute Humidity [g/m^3]	7.1	7.59	6.59	7.79	6.98	7.86	8.03	7.91	8.01	7.08	6.66	6.93	7.55	7.70	8.31	7.11	7.60	9.32	7.49
Rain Fall [cm]	125	140.88	164.63	147.86	118.99	141.51	130.03	140.95	123.32	149.88	132.22	132.63	140.25	146.05	152.95	117.37	159.16	156.34	140.79

Fig. 2. Medians of atmospheric condition parameters measured at various locations in Korea for the last 5 years (2010~2014)^{7,8)}.

ISO-9223 : 2012³⁾는 PACER LIME과 다른 대기부식 위험도 분류법을 제안하고 있으며, 대기부식 위험도를 6단계로 (C1~C5, CX)로 분류하였다. 연간 부식율에 따라 단계를 분류하고 있다. ISO-9223 : 2012에서도 언급하였지만, 철이나 아연, 구리 등과 달리 알루미늄의 경우에는 균일 부식 (uniform corrosion) 외에도 국부 부식 (localized corrosion)이 동시에 발생한다. 원래 ISO-9223 : 2012에서는 알루미늄에 대해 단위면적당 연간 질량 감소의 형태로 부식 범위를 제시하였으나, 본 연구에서는 DR 관계식의 단위와 일치시키기 위해 연간 두께 변화 형태로 변환하여 나타내었다.

PACER LIME과 다른 ISO-9223 : 2012의 장점은 DR 관계식을 대기환경 인자의 함수로 제공한다는 점이다. PACER LIME과는 달리 ISO-9223 : 2012는 대기 중 오염물질 (이산화황, 염화물)의 표면 흡착율을 직접 측정하여 그 결과를 반영해야 한다. 알루미늄의 대기 노출 후 첫 1년간 부식속도 관계식은 아래와 같다.

$$r_{\text{corr}} = 0.0042 \cdot P_d^{0.73} \cdot \exp(0.025 \cdot RH + f_{\text{Al}}) + 0.0018 \cdot S_d^{0.60} \cdot \exp(0.020 \cdot RH + 0.094 \cdot T)$$

$$f_{\text{Al}} = 0.009 \cdot (T - 10) \text{ when } T \leq 10 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\text{otherwise } - 0.043 \cdot (T - 10)$$

where,

r_{corr} is first year corrosion rate of metal, expressed in micrometer per year [$\mu\text{m}/\text{year}$]

T is the annual average temperature, expressed in degrees Celsius [$^\circ\text{C}$]

RH is the annual average relative humidity, expressed as a percentage [%]

P_d is the annual average SO_2 deposition, expressed in milligrams per square meter per day [$\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$]

S_d is the annual average Cl^- deposition, expressed in milligrams per square meter per day [$\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$]

2.2 알루미늄 합금 대기부식 실험 방법

ASTM G50-10⁹⁾에 따라 대기부식 실험을 수행하였다. 항공기 구조재로 사용되는 알루미늄 합금 7075와 대조군으로 사용하기 위해 1050 시편을 판 형태 (폭: 75 mm, 너비: 200 mm)로 가공하였다. #1500과 #2000 사포를 이용하여 표면을 연마한 후 아세톤 및 순수로 세척하였다. 합금별로 90 days (3개월), 180 days (6개월), 240 days (8개월) 주기로 시편을 수거하여 부식량을 측정하였다.

7075 외에 1050을 포함시킨 이유는, ISO-9223 : 2012

Table 2. Chloride deposition rates at various locations reported in earlier study¹³⁾ and measured in this work

Location Name	Cl deposition rates (mg/m ² day)	Distance to sea* (km)	Specific Location assumed in this work*
Goyang	1.3	23.96	From Korea Aerospace University to Chungra-dong, Seo-gu, Incheon
Gwangju	0.4	41	From Chonnam National University to Gungsan-ri, Sonbul-myun, Hampyung-gun, Chonnam
Suwon	1.9	27	From Ajou University to Seonggok-dong, Danwon-gu, Ansan
Ulsan	6.0	6.0	From Ulsan City Hall to Yeochun -dong, Nam-gu, Ulsan
Seoul-Shinchon	4.0	30	From Ehwa Womans University to Kyungseo-dong, Seo-gu, Incheon
Andong	0.3	55.6	From Andong National University to Youngri-beach
Asan	1.4	13.7	From Soon Chun Hyang University to Gulmae-ri, Inju-myun, Asan
Anshan	0.6	18.4	From Ansan University to Songdo-dong, Yeonsu-gu, Incheon
Jochiwon	0.2	45.1	From Hongik University, Sejong Campus to Gongse-ri, Inju-myun, Asan
Incheon	1.2	2.68	From Inha University to Hang-dong 7 th St. Jung-gu, Incheon
Pohang-Wolpo	40.9	0.1418	From Wolpo Public Medical Center to Wolpo Beach
Pohang-RIST	0.2	5.86	From RIST to Songdo Beach
Seoul-Anam	0.3	35.45	From Korea University to Wonchang-dong, Seo-gu, Incheon
Busan-PNU	1.52	9.51	From PNU, Research Institute of Mechanical Technology to Gwanganri Beach

* The reference¹³⁾ did not specify the exact measurement location. The exact location and distance to sea at each location were assumed in this work as reasonable as possible.

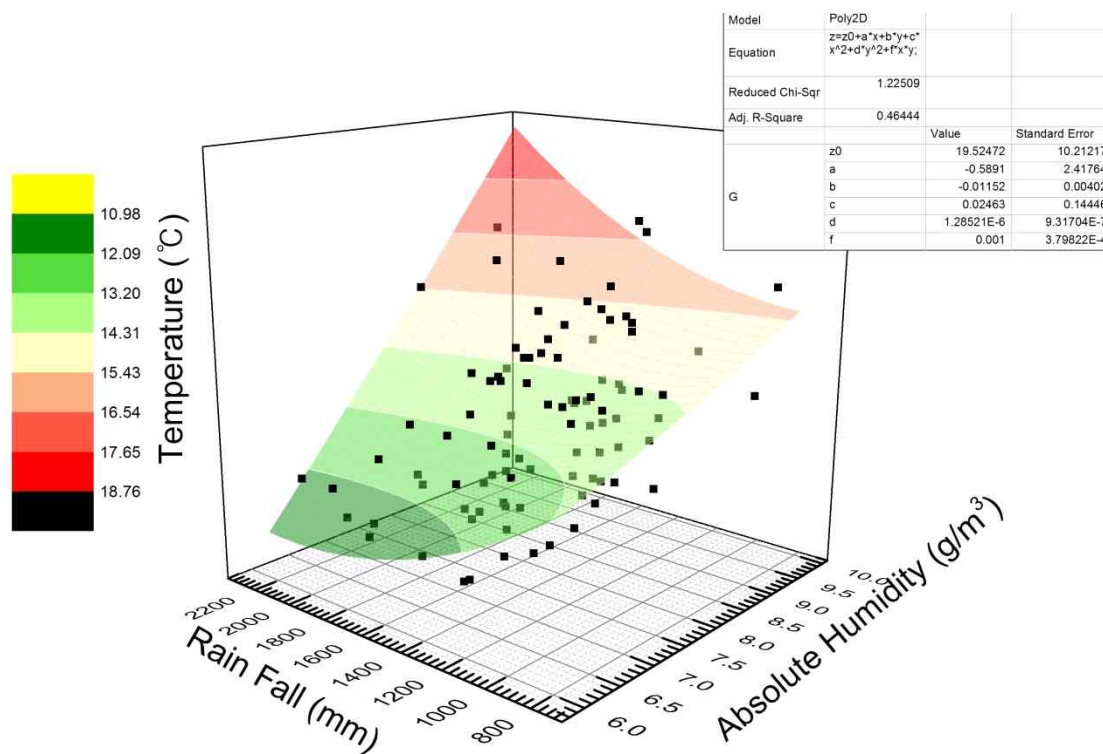


Fig. 3. Average temperature with respect to rain fall and absolute humidity (Temperature can be estimated from Rain Fall and Absolute Humidity by using the equation in the upper-right corner).

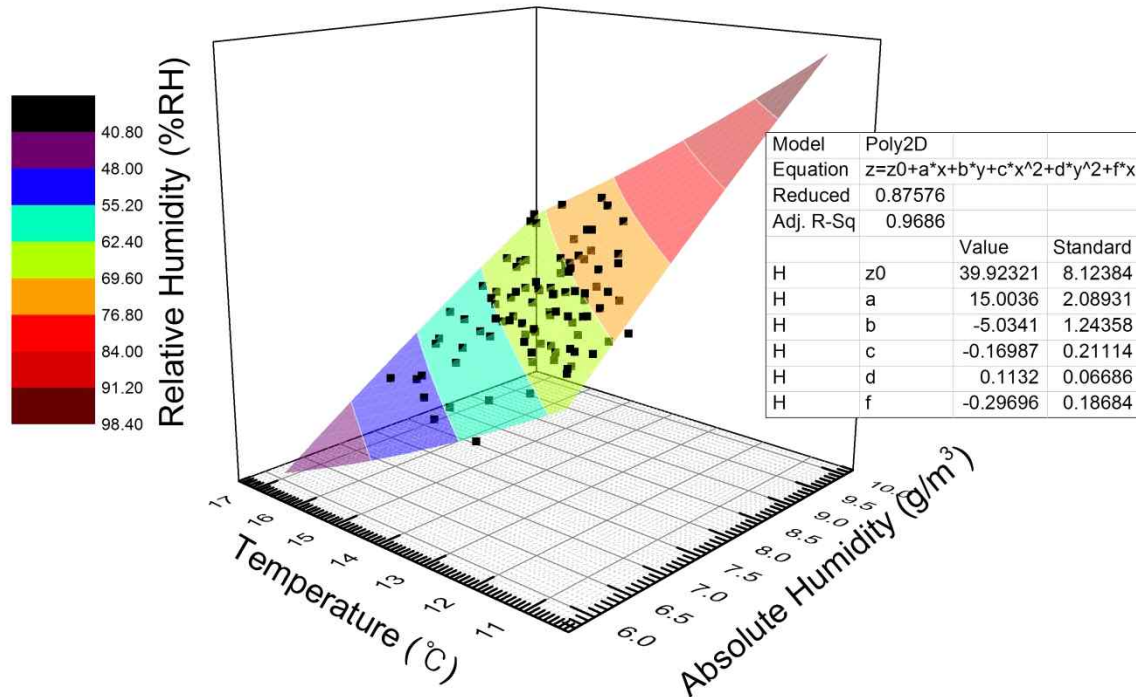


Fig. 4. Relative humidity with respect to average temperature and absolute humidity (Relative Humidity can be estimated from Temperature and Absolute Humidity by using the equation in the upper-right corner).

에서 주어진 알루미늄 부식 속도 관계식에 특정 알루미늄 합금을 언급하지 않았기 때문이다. ISO-9223 : 2012 관계식이 알루미늄 합금 차이로 인한 부식속도의 차이를 얼마나 잘 반영하는지 살펴보고자 하였다.

ASTM G50-10⁹⁾에서 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 장소를 부산대학교 내부에서 결정하였다. 시편 주변 대기의 온습도를 측정하고 기록하기 위하여 온습도 측정기를 설치하였다. 염화물의 표면 흡착율도 직접 측정하기 위하여 ASTM G140-02¹⁰⁾에 제시된 wet candle 방법을 이용하였다. 매달 설치된 wet candle을 수거하고, 수거 후 용액을 ion chromatography로 분석하여 염화물의 흡착량을 계산하였다.

ASTM G1-03¹¹⁾에 제시된 질량변화 측정법을 따라 부식된 시편을 질산 (HNO₃, 1%)에 10~20 초간 수 차례 산 세척함으로써 매번 손실되는 질량을 측정하여 대기부식시험 기간 동안 알루미늄 시편의 표면에 생긴 부식물의 질량을 유추하였다. 산세척 시간에 따라 손실되는 질량을 측정하여 그래프로 나타내면, 알루미늄 산화막과 질산이 반응하는 정도와 알루미늄 합금이 반응하는 정도가 다르기 때문에, 알루미늄 산화막이 모두 제거되고 알루미늄 합금과 질산이

반응하는 지점에서 기울기가 변한다. 이 지점으로부터 알루미늄 시편의 부식량을 구할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 세척주기 설정: PACER LIME과 ISO-9223 분류법의 연계

PACER LIME 기준 값을 ISO-9223 : 2012 DR 관계식과 연관 지을 수 있다면, 앞서 비교하였던 두 종류의 세척주기 분류 기준 값을 정량적으로 비교할 수 있게 된다.

먼저 PACER LIME의 환경인자인 강수량과 절대습도로부터 ISO-9223에 필요한 평균 온도를 유추하고자 하였다. Fig. 3은 대한민국 기후 자료를 이용하여 세 변수 사이의 관계를 도시한 것이다. 상관관계가 아주 강력하지는 않지만 일정 수준의 상관관계를 가지는 것으로 판단하여, 강수량과 절대습도를 이용한 온도 유추 관계식을 도출하였다. 평균온도를 위와 같은 방법으로 유추하였으므로 ISO-9223 : 2012의 또 다른 입력변수인 상대습도를 유추하여야 한다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 상대습도와 온도 및 절대습도간의 상관관계가 매우 뚜렷한 것으로 나타났다. 이를 통해 평균온도와 절대습도로부터 상대습도를 유추하였다.

평균온도와 상대습도를 유추하였으므로 남은 변수는 이산화황과 염화물의 표면 흡착율이다. 이산화황의 대기 중 농도 자료는 이미 확보되어 있으므로 ASTM G91-11¹²⁾에

Table 3. Newly suggested aircraft wash intervals based on ISO-9223 : 2012 DR function

Distance to Sea	Corrosion rate based on ISO-9223 : 2012 DR function [$\mu\text{m}/\text{year}$]	Wash Interval
Less than 2 km	-	30 day
Larger than 2 km	> 0.22	30 day
	0.22 ~ 0.086	90 day
	< 0.086	180 day

서 제시한 관계식을 이용하여 표면 흡착율을 유추하였다. 염화물 흡착율의 경우, 대기 중 미세먼지 농도를 이용하여 염화물 흡착율을 유추하고자 시도하였다. 부산대학교에서 측정된 염화물 흡착율과 기상청에서 보고된 부산대학교 인근에서의 미세먼지 농도 자료를 비교하였으나 뚜렷한 상관 관계를 찾기 어려웠다. 다른 방법으로, 전국 각 지역에서 측정된 염화물의 표면 흡착율 자료를 활용하였다¹³⁾. Table 2에 측정된 위치명과 측정된 흡착율을 함께 나타내었다. 참고 논문¹³⁾에서는 측정된 정확한 위치가 나타나 있지 않아 본 연구에서 최대한 합리적인 위치를 추론하였다.

Fig. 5에서는, Table 2에 정리한 흡착율을 기반으로 하여 해안으로부터의 거리에 따른 염화물 표면 흡착율 변화를 보여주고 있다. 모든 자료에 대한 power law 형태의 근사식도 함께 도시하였다. 근사식을 기준으로 하면, 해안으로부터의 거리가 2 km 이내가 되면 염화물 흡착율이 급격히 증가하기 시작하는 것을 알 수 있다. 따라서 미 공군 T.O. 1-1-691에서 언급한 2 km 이내 기준이 어느 정도 적절하다는 것을 알 수 있었다. PACER LIME의 기준 값인 4.5 km는 다소 보수적인 기준 값으로 생각된다.

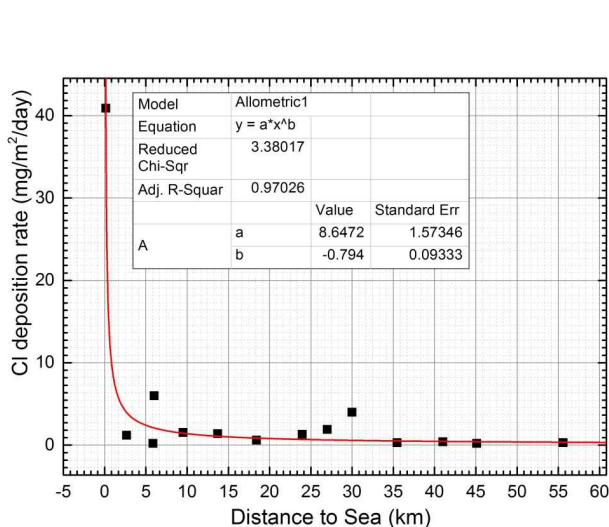


Fig. 5. Variation of chloride deposition rate as a function of the distance to sea (based on data¹³⁾ in Table 2).

3.2 새로운 세척주기 설정

앞서 설명한 유추방법을 이용하여 PACER LIME 기준 값을 ISO-9223 : 2012 관계식에 필요한 입력 값으로 변환하여 알루미늄의 부식속도를 계산하였다. Fig. 6에서는 PACER LIME 알고리즘 기준 값과 대한민국 대기 자료를 이용하여 추출한 기준 값을 이용하여 계산한 알루미늄의 부식속도를 비교한 것이다. 본 계산을 통해 PACER LIME에 도시된 원래 기준 값에 비해 대한민국 대기 자료를 이용하여 추출한 기준 값에 따른 부식속도가 낮다는 것을 정량적으로 판단할 수 있었다. 따라서 한국 대기 자료로부터 추출된 기준 값을 그대로 세척주기에 적용할 경우 매우 보수적이라는 사실을 알 수 있다.

본 분석결과를 바탕으로 하여 새로운 세척주기를 결정할 필요가 있다. 3단계로 나뉘는 세척주기는, 국내에 위치한 미 공군 기지의 세척주기로서 T.O. 1-1-691에서 제시한 30일, 90일, 180일을 따른다. 그 다음으로 각 주기를 나누는 기준을 정할 필요가 있다. 30일과 90일을 나누는 기준은 다음과 같다. PACER LIME 알고리즘에서는 각 대기인자들의 기준 값보다 측정된 대기인자들이 모두 클 경우에 30일의

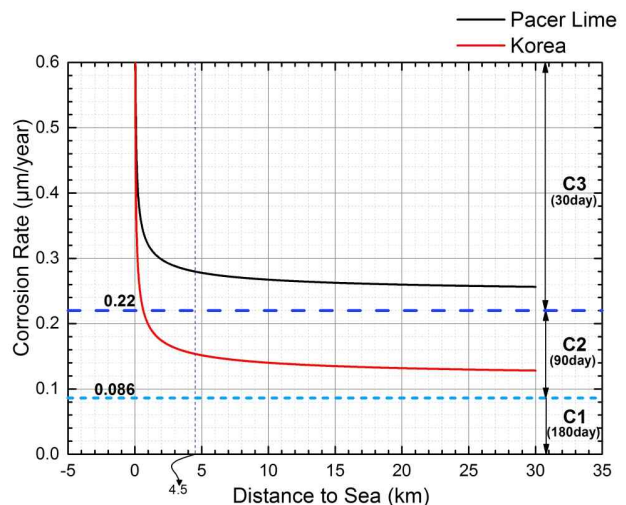


Fig. 6. Corrosion rates of aluminum as a function of the distance to sea for two criteria of atmospheric condition parameters: "Pacer Lime" and "Korea".

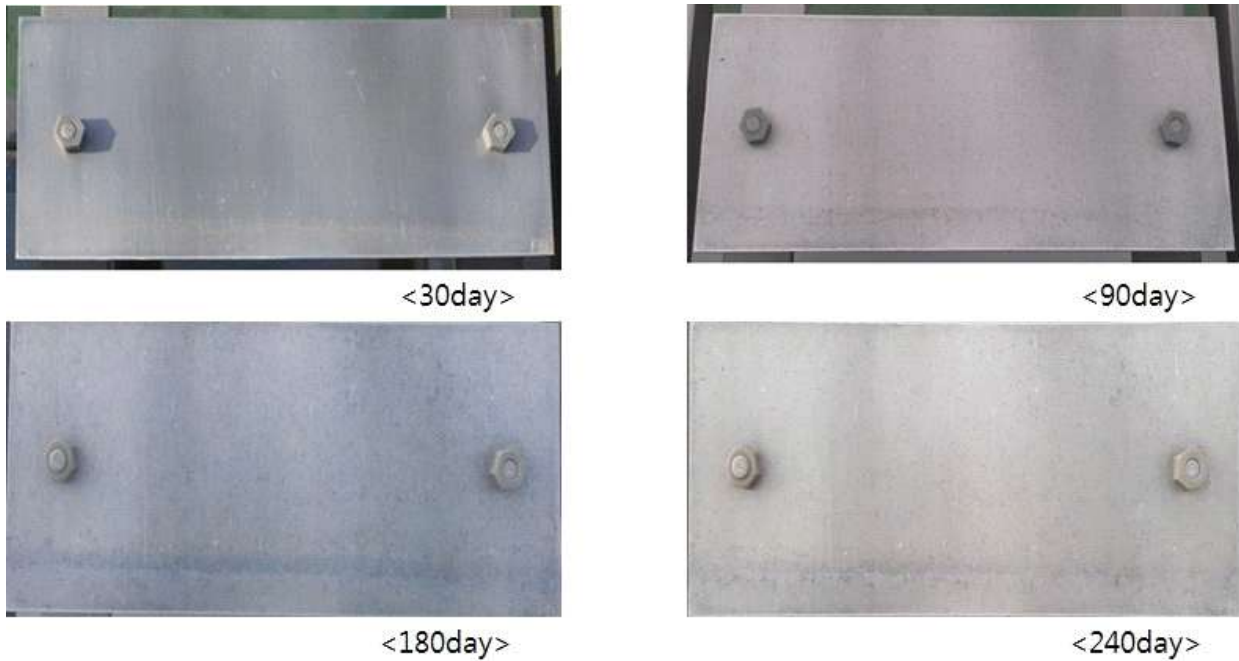


Fig. 7. Photographs showing the history of aluminum alloy 7075 specimen surface appearance as a function of time (Exposure Location: PNU, Busan; Exposure Period: Feb. 2015 ~ Sept. 2015).

세척주기를 명시하고 있다. 즉, Fig. 6에서 보면 PACER LIME에 해당하는 곡선의 부식속도가 30일 세척주기의 경계 값이 된다고 할 수 있다. 곡선은 약 $0.26 \mu\text{m}/\text{year}$ 에서 수렴하는 것을 알 수 있으며, 이 값을 30일과 90일의 경계 부식속도로 정할 수 있다. 하지만, ISO-9223 : 2012에서 알루미늄의 부식속도를 분류할 때 C2와 C3의 경계를 $0.22 \mu\text{m}/\text{year}$ 로 정하였으므로, 다소 보수적이지만 ISO-9223 : 2012 분류기준을 따라 $0.22 \mu\text{m}/\text{year}$ 를 세척주기 30일과 90일의 경계 값으로 정할 것을 추천한다.

이제 90일과 180일의 경계 부식속도를 결정해야 한다. ISO-9223 : 2012에서는 C2와 C1 사이의 경계 값을 정의하지 않고 C1은 부식 속도가 무시할만한 수준이라고만 언급하고 있다. 따라서 본 연구에서는 미 공군 T.O. 1-1-691에서 언급된 대구기지의 세척주기인 180일을 기준으로 하여 경계 값을 추출하고자 하였다. 대구 지역의 최근 5년간 대기 환경 자료를 이용하여 ISO-9223 DR 관계식으로 계산한 알루미늄의 부식 속도는 $0.086 \mu\text{m}/\text{year}$ 이다. 따라서 이 값을 세척주기 90일과 180일의 경계 값으로 설정할 수 있다. Fig. 6에 세척주기에 따른 세 영역을 구분하였다.

세척주기에 대한 분석결과를 정리하면 Table 3과 같다. 해안가로부터의 거리가 2 km 이내일 경우에는 세척주기를 30일로 하며, 거리가 2 km 이상일 경우에는 ISO-9223 : 2012 DR 관계식을 기반으로 하여 계산된 알루미늄의 부식 속도가 $0.22 \mu\text{m}/\text{year}$ 이상이면 30일, $0.22 \mu\text{m}/\text{year} \sim$

$0.086 \mu\text{m}/\text{year}$ 사이일 경우에는 90일, 그리고 $0.086 \mu\text{m}/\text{year}$ 이하이면 180일로 세척주기를 정할 것을 추천한다.

3.3 알루미늄 합금 대기부식 실험 결과

새로운 세척주기 설정을 위해 사용된 ISO-9223 : 2012 DR 관계식의 정확도를 확인하기 위해 대기부식 실험을 수행하였다. 1050 및 7075 시편 표면을 주기적으로 관찰하였다. 1050은 부식속도가 비교적 느리며, pitting 형상이 뚜렷하지 않았다. 초기에는 표면에 큰 변화가 없이 조금씩 부식이 느리게 진행되다가 작은 크기의 pitting 형상이 지속적으로 증가하였다. 그에 비해 7075는, Fig. 7에 나타난 것과 같이, 부식속도가 비교적 빠르며 pitting 형상이 뚜렷하였다. 초기부터 표면에 부식이 눈에 띄게 진행되지만, 일정수준으로 부식이 진행된 6개월 이후에는 눈에 띄게 뚜렷한 변화가 관찰되지는 않았다.

초기상태 대비 3개월 (90일), 6개월 (180일), 8개월 (240일)이 지난 시점에서의 알루미늄의 질량 변화는 Fig. 8과 같다. 3개월과 6개월이 지난 시점에서 대기부식 조건에 놓인 1050 및 7075 시편 모두의 질량이 증가하였다. 7075의 부식량이 1050 보다 많으므로 7075의 부식속도가 크다고 판단된다. 8개월이 지난 시점에서 6개월에 비해 7075 시편의 질량이 감소한 것으로 나타났는데, 이는 pitting으로 인한 질량 손실이 uniform corrosion으로 인한 질량 증가를 초과했다고 추측할 수 있다. 이전 국내 알루미늄 대기부

Table 4. Comparison of estimated weight loss by ISO-9223 : 2012 DR function and measured weight losses of aluminum specimens

Based on ISO-9223 : 2012 DR function [mg]	Measured average weight loss of aluminum alloy specimens [mg]		
	7075	1050	7075 + 1050
7.16	8.76	3.49	6.12

식 실험결과¹⁴⁾에서는 6개월 이후에는 부식량이 매우 낮은 것으로 보고되었으나 노출 지역의 환경에 따라 변화가 클 것으로 예상된다.

ASTM G1-03¹¹⁾에 따라 부식량을 측정하고자 하였다. 8개월 동안 부식되었던 알루미늄 시편들을 산세척하여 세척 시간에 따른 질량 변화량을 Fig. 9에 도시하였다. 그래프의 기울기가 변하는 지점의 질량 감소량이 8개월 동안의

부식량에 해당한다. 7075가 1050에 비해 부식량이 많다는 것을 정량적으로 확인하였다.

3.4 예측값과 측정결과 비교

ISO-9223 : 2012 DR 관계식을 이용하여 8개월 간 노출된 시편의 부식량을 예측하였다. 이렇게 예측된 부식량과 실제 노출시편에서 측정된 부식량을 비교하여 ISO-9223 : 2012 관계식의 정확도를 검증하고자 하였다. 관계식에 필요한 온도, 습도 및 염화물 함착율은 실제 측정한 값을 사용하였으며, 이산화황 함착율은 부산대학교 인근 기상청 측정소에서 측정된 대기 중 이산화황 농도 자료를 이용하였다. 예측된 부식속도는 0.13 $\mu\text{m}/\text{year}$ 였으며, 이는 ISO-9223 : 2012 분류등급 중 C2에 해당한다.

위에서 구한 부식속도와 시편 크기 정보를 이용하여 시편 당 평균 질량 감소량을 구한 후, 산세척 후 평균 질량 감소량을 Table 4에 비교하였다. 7075의 산세척 후 평균 질량 감소량은 8.76 mg 이며, DR 관계식을 통한 예측값인 7.16 mg 보다 다소 높았다. 한편, ISO-9223 : 2012 DR 관계식은 특정 합금에 국한하지 않고, 표준 알루미늄에 대해 구해진 식이므로 합금 종류의 구분이 없다. 따라서 7075와 1050의 평균 질량 감소량을 구하여 비교하였다. 본 연구 실험조건에서의 평균 질량 감소량은 6.12 mg 이며, 이는 예측값과 유사함을 알 수 있다. 알루미늄이 균일부식과 pitting이 동시에 나타나 부식 측정값의 편차가 크다는 점을 감안하면 ISO-9223 : 2012 DR 관계식이 상당히 정확하게 시편 부식량을 예측하였다고 판단된다.

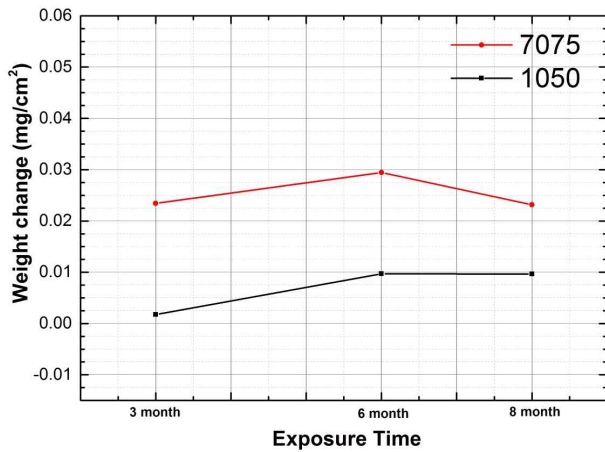


Fig. 8. Weight change of aluminum specimens as a function of exposure time.

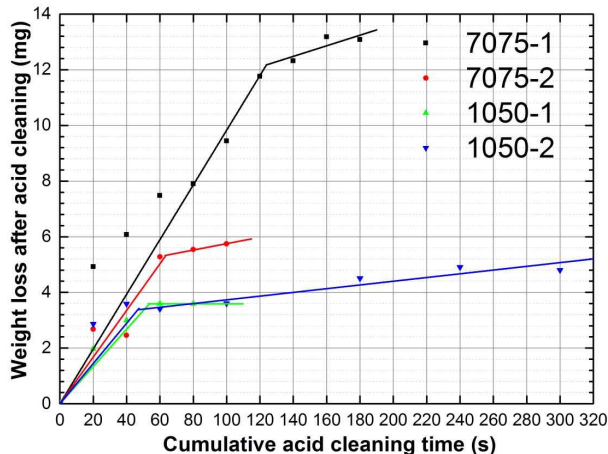


Fig. 9. Weight loss of 8-month exposed aluminum specimens as a function of cumulative acid cleaning time.

4. 결론

항공기의 대기부식 예방을 위해 주기적인 세척이 수행되고 있는데, 세척주기는 미공군의 기준을 따르는 추세이나 근본 알고리즘에 대한 이해는 부족한 실정이다. 따라서 대한민국 대기환경을 반영한 새로운 세척주기 설정 알고리즘을 제안하고자 하였다. 기존 미공군 세척주기 알고리즘인 PACER LIME과 대기부식 위험도 분류 알고리즘인 ISO-9223 : 2012를 결합하여 새로운 세척주기를 제시하였다. 세척주기 설정을 위한 기준 DR 관계식으로서 ISO-9223 : 2012를

적용하였는데, 이에 대한 정확도를 검증하기 위해 7075 및 1050 합금 시편을 이용하여 대기부식 실험을 수행하였다. 합금 종류에 관계없이 시편의 평균 부식량은 ISO-9223 : 2012 예측값과 유사함을 확인하였다. 따라서 알루미늄 시편, 좁게는 항공기 재료인 7075 합금의 대기 부식에 대한 ISO-9223 : 2012 관계식의 예측 정밀도가 실험적으로 검증되었다고 하겠다.

감사의 글

본 연구는 국고(공군 군수사령부 공군항공기술연구소)의 지원 하에 수행되었습니다.

References

1. R. Kinzie, *Aircraft Eng. Aerospace Tech.*, **75**, 123 (2003).
2. R. Summitt and F. T. Fink, PACER LIME: An Environmental Corrosion Severity Classification System, AFWAL-TR-80-4102 Part 1 (1980).
3. ISO 9223 : 2012(E), Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation (2012).
4. P. R. Roberge, R. D. Klassen, and P. W. Haberecht, *Mater. Design*, **23**, 321 (2002).
5. A. A. Mikhailov, J. Tidblad, and V. Kucera, *Protection of Metals*, **40**, 541 (2004).
6. U. S. Air Force, Technical Manual: Cleaning and Corrosion Prevention and Control, Aerospace and Non-Aerospace Equipment, TO 1-1-691, Change 12 (2016).
7. Korea Meteorological Administration, Measured Data (Local Information), Weather Data (Archive Data), <http://www.kma.go.kr> (As of October 15, 2015).
8. Korea Environment Corporation AirKorea, Air Quality Database, <http://www.airkorea.or.kr> (As of October 15, 2015).
9. ASTM G50-10, Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals, ASTM International (2010).
10. ASTM G140-02, (Reapproved 2008) Standard Practice for Determining Atmospheric Chloride Deposition Rate by Wet Candle Method, ASTM International (2008).
11. ASTM G1-03, (Reapproved 2011) Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, ASTM International (2011).
12. ASTM G91-11, Standard Practice for Monitoring Atmospheric SO₂ Deposition Rate for Atmospheric Corrosivity Evaluation, ASTM International (2008).
13. Y. S. Kim, H. K. Lim, J. J. Kim, and Y. S. Park, *Corros. Sci. Tech.*, **10**, 109 (2011).
14. Y. S. Kim, H. K. Lim, J. J. Kim, W. S. Hwang, and Y. S. Park, *Corros. Sci. Tech.*, **10**, 52 (2011).