

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2024.32.4.41>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

항공기의 대기 부식성 위험 분포도 작성

우무성*, 이재원*, 이지혜*, 우경진*, 박종철**

Mapping the Atmospheric Corrosivity Risk Distribution for Aircraft

Mu-sung Woo*, Jae-won Lee*, Ji-hye Lee*, Kyong-jin Woo*, Jongchul Park**

ABSTRACT

Atmospheric corrosion is a critical cause of mechanical failure in aircraft. This study applied three methodologies—PACER LIME, ISO CORRAG, and ICP—to map the atmospheric corrosivity risk distribution for aircraft and conducted an integrated analysis of the results. Geographic Information Systems (GIS) were utilized to map the distribution of 11 environmental variables. The findings revealed that PACER LIME and ISO CORRAG effectively captured the high corrosion risk in coastal areas, whereas ICP had limitations in representing the spatial distribution of corrosion risk and tended to underestimate the risk in inland areas. By integrating the risk distributions from PACER LIME and ISO CORRAG, a comprehensive atmospheric corrosivity risk map for South Korea was proposed, confirming the high corrosion risk in coastal regions. Although aircraft maintenance crews are aware of the dangers of atmospheric corrosion, they face challenges in visually recognizing the regional distribution of risk. The results of this study are expected to provide them with essential information on the distribution of atmospheric corrosion risk, enabling more effective responses to corrosion hazards.

Key Words : Corrosion(부식), Risk(위험도), Mapping(지도화), Spatial Analysis(공간분석), GIS(지리정보체계)

1. 서 론

항공기 사고는 인적 요인 등 다양한 요인에 의해 발생하며(Kim and Lee, 2021; Youn and Park, 2022; Yu, 2023), 부식 역시 항공기 사고 발생 원인 중 하나이다. Yun et al.(2021)에 의하면, 부식은 응력 스트레스 균열과 함께 항공기를 운영할 때 발생할 수 있는 주요 기계적인 결함요인이고, 항공기 결함 발생의 20% 이상

이 부식과 관련되어 있다. 따라서 부식은 항공기 사고의 중요한 부분을 차지하며(Titakis and Vassiliou, 2020), 항공기 유지, 관리 측면에서 대기부식으로 인한 비용은 상당한 비중을 차지하고 있다(Kim et al., 2011). 항공기의 유지·관리를 위한 노력의 목적으로 항공기의 부식 발생 원인을 파악하는 한편, 대기 환경으로 인한 부식 위험을 평가하고, 부식 정도를 예측하는 연구들이 있었다(Summitt and Fink, 1980; Mikhailov, 2004).

부식은 다양한 원인에 의하여 발생하는데, 대기 환경적 요인은 부식을 유발하는 중요한 요인에 포함되며, 습도, 염소 이온의 침적량, 미세먼지, 질소산화물(NO_x), 이산화황(SO_2), 그리고 오존 등이 부식 요인으로 언급되어 왔다(Roberge et al., 2002). 대기 환경적 요인에 의한 부식 가능성을 대기 부식성 위험이라고 하며, 이를 평가하는 방법으로 분류체계 기반의 접근 방법과 통

Received: 08. Sep. 2024, Revised: 07. Oct. 2024,
Accepted: 17. Oct. 2024

* 국립공주대학교 일반대학원 군사과학정보학과 박사과정

** 국립공주대학교 일반대학원 지리학과/군사과학정보학과 부교수
연락처 E-mail : jcp@kongju.ac.kr
연락처 주소 : 충남 공주시 공주대로 56 공주대학교 일반대학원 군사과학정보학과

계적 모형을 이용하는 방법 등이 있다(Roberge et al., 2002; ISO 9223:2012, 2012). 분류체계 기반의 접근 방법으로는 PACER LIME, ISO 9223 등이 있고, 통계적 방법으로는 Corrosion damage function, ISO CORRAG, International Cooperative Program on Effects on Materials(ICP Materials) 등의 방법이 있다(Roberge et al., 2002; Klinesmith et al., 2007).

분류체계 기반 방법 중 PACER LIME은 1960년대 미 공군에서 대기 환경요인이 미치는 영향을 평가하여 부식 환경의 심각도를 분류하고자 제안되었으며, 명료성과 편의성 측면에서 장점이 있어 다양한 연구에 활용되고 있다. 우리나라에서는 Park and Kim(2016)과 Park et al.(2020)에 의해 항공기의 대기부식 위험도를 분석하는 데 활용되었다. Roberge et al.(2002)는 PACER LIME과 같이 분류에 기반한 접근 방법의 명료성과 용이성에 대해서는 동의하였지만, 분류에 이용되는 대기 환경변수가 부식성 오염 물질의 영향을 충분히 반영하지 못한다고 지적한 바 있다. 그들은 PACER LIME에서 이용되지 않는 NO_x, 황화수소, 염소가스, 산성비, 에어로졸, 기온과 같은 변수들도 고려할 필요가 있다고 주장하였다.

Woo et al.(2023)은 분류 기반 접근 방법인 PACER LIME뿐 아니라, 통계적 모형을 기반으로 하는 ICP, CORRAG와 CORRAG-II 모형을 이용하여 우리나라에 분포하는 다양한 기관의 항공기 계류장에 대한 부식 위험도를 평가하였다. 이 연구는 각 지점에 대한 부식 위험도가 방법론에 따라 상이하다는 것을 보여주었다. 연구자들은 이를 근거로 단일 모형에 대한 평가보다는 다양한 모형에 대한 부식 위험도를 평가하고 이에 근거한 부식 관리의 필요성을 주장하였다. 이 연구는 다양한 모형에 의한 차이를 토대로 정책적 시사점을 제시하였다는 점에서 의의가 있지만, 계류장에 대한 점 단위 부식 위험도를 평가하였기 때문에 우리나라 전반의 부식 위험도 분포를 제시하지 못했다는 아쉬움이 있었다.

부식 위험의 공간적 분포는 넓은 지역에 걸친 일관된 부식 예방 및 관리 전략을 수립하는데 중요한 기초 정보이다. 예를 들어, Slamova et al.(2012)는 전 세계 해안 지역에서 염분에 의한 태양광 모듈의 부식 위험도를 분포도로 제시하며, 이 결과가 위험 지역을 식별하고, 예방 조치를 강화하기 위한 대응 전략을 수립하는 등의 태양광 시설을 보호하기 위한 중요한 통찰력을 제공한다고 언급하였다. 항공기에 대한 부식 위험도를 분포도로 구축하는 것 역시 위험 지역 식별, 부식 관련 자원 및 비용의 효율적인 분배, 장기적인 측면에

서 부식 위험 지역을 회피한 계류장 선정 및 운용 전략 수립 등에 도움을 줄 것으로 기대된다.

이에 본 연구는 우리나라의 항공기 대기 부식성 위험 분포도를 작성하여 부식 대응 전략을 수립하기 데 활용 가능한 기초 정보를 제공하고자 하였다. 이를 위해 기존 연구(Woo et al., 2023)에서 위험도를 등급으로 구분한 PACER LIME과 ICP, CORRAG를 부식 위험도 평가를 위한 방법으로 채택하였다. 아울러 분포도 작성을 위해 지리정보체계와 공간분석 방법을 사용하였다.

II. 연구자료 및 방법

2.1 대기 환경변수

연구에 사용한 대기 환경변수는 Table 1에 제시하였다. 염화물에 의한 부식을 고려하기 위해 해안으로부터의 거리(Dist), 염화물의 표면 흡착률(Cl_{depo}), 강수량에 포함된 염소 이온(Cl_{prcp})을 활용하였다. 부식과 연관된 기상 자료로는 연 강수량(Prcp), 연평균기온(Tavg), 상대습도(Rhav)와 절대습도(Ahav)를 사용하였다. 습도 외에 습윤 환경을 고려하기 위한 변수로 습윤 시간(time of wetness, TOW)을 활용하였다. 이는 상대습도가 80%를 초과하고 하루 평균 기온이 0℃를 초과하는 일자의 비율이다. 대기질 자료로는 이산화황(SO₂), 미세먼지(PM₁₀), 그리고 오존(O₃)을 사용하였다.

각 변수는 지리정보체계를 이용한 공간분석을 위해 정규 격자 형태의 지리정보 포맷인 래스터 자료로 구축하였다. Fig. 1은 본 연구에서 11개 변수를 구축하고 가시화한 결과이다.

Table 1. Environmental variables used in the study

Variables	Abb.	Unit
Distance from shoreline	Dist	km
Chloride surface adsorption	Cl _{depo}	mg/m ² /day
Cl ⁻ concentration in Prcp	Cl _{prcp}	mg/L
Annual precipitation	Prcp	cm/yr
Average temperature	Tavg	℃
Relative humidity	Rhav	%
Absolute humidity	Ahav	g/m ³
Time of wetness	TOW	Category
Sulfur dioxide	SO ₂	μg/m ³
Fine dust	PM ₁₀	μg/m ³
Ozone	O ₃	μg/m ³

*Abb: Abbreviation.

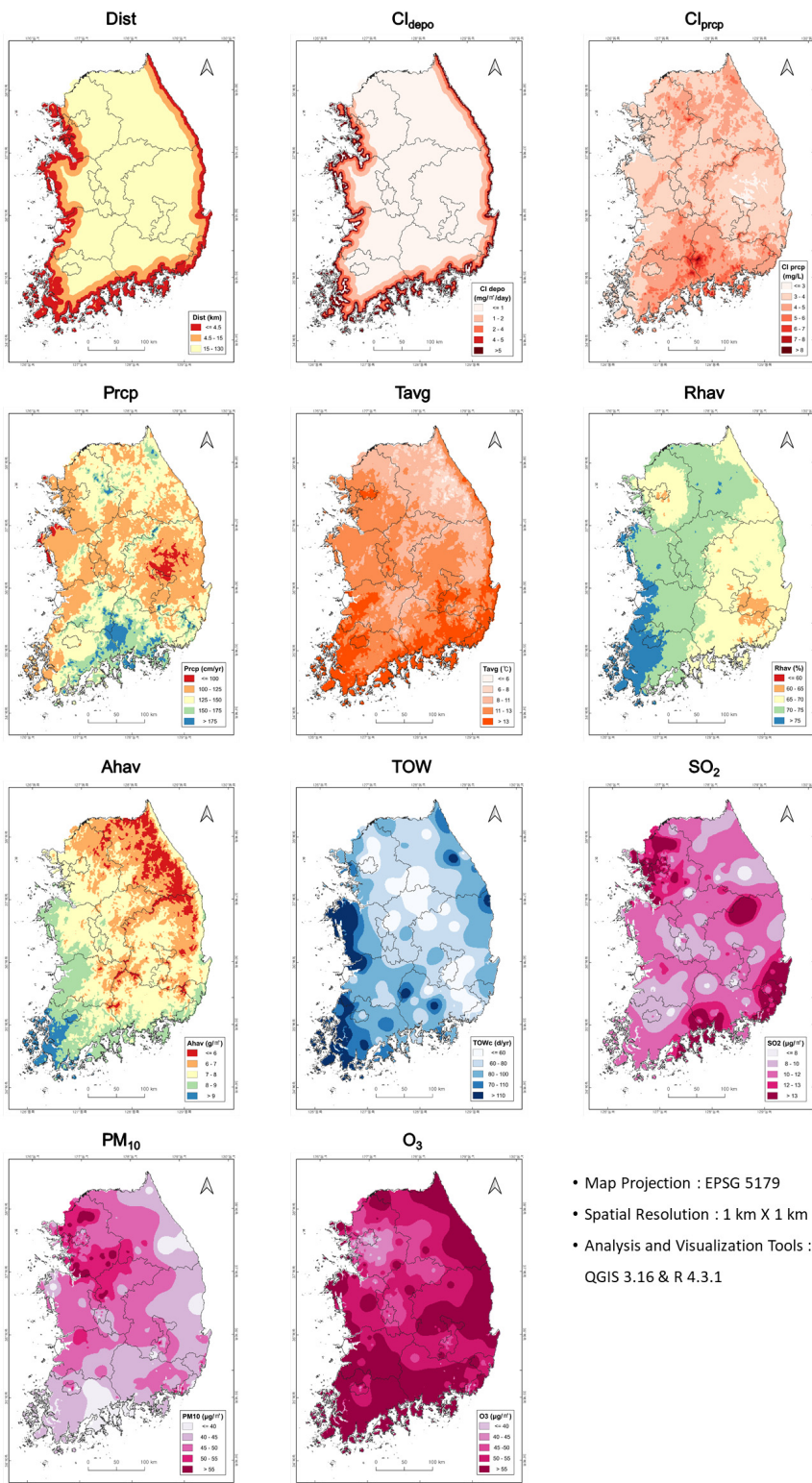


Fig. 1. Distribution maps of atmospheric environmental variables used in the study

2.2 변수의 분포도 구축

연구를 위해 구축한 공간 자료는 공간 해상도가 1km이고, UTM-K(EPSC: 5179) 직각좌표계로 구축하였다. 지형 정보를 포함하고 있는 Dist 외에 나머지 자료들은 기상 자료와 대기질 자료이기 때문에 관측 기간에 대한 고려가 필요하다. 본 연구는 획득 가능한 자료의 특성을 고려하여 2010~2019년(10년)의 기상 자료와 대기질 자료를 획득하여 연구에 이용하였다.

해안으로부터의 거리(Dist) 분포는 R의 raster package에서 제공하는 distance function을 사용하여 산출하였다. 이 분석에 사용된 해안선은 전구수치표고모형(global digital elevation mode, GDEM)에서 0m를 추출하여 작성하였다. GDEM은 NASA(<https://search.earthdata.nasa.gov>)에서 제공하는 version 3 자료를 이용하였다.

염화물의 표면 흡착률(Cl_{depo}) 분포는 Dist 자료에 Park et al.(2016)의 연구에서 제시한 해안으로부터의 거리와 염화물의 표면 흡착률에 관한 역함수(식 1)를 적용하여 추정하였다.

$$Cl_{depo} = 8.6472 \times Dist^{-0.7940} \quad (1)$$

여기에서 Cl_{depo} 는 염화물의 표면 흡착률($mg/m^2/day$)이고, Dist는 해안으로부터의 거리(km)이다.

강수량에 포함된 염소 이온(Cl_{prcp}) 분포는 Prcp(연 평균 강수량) 자료를 일 평균으로 변환한 후 평균 CI 농도를 곱하여 산출하였다. 평균 CI 농도는 우리나라의 연도별 산성 강화물 이온 성분 농도를 평균하여 단일 값인 $1.28mg/L$ (AIRKOREA, 2021)를 사용하였다.

연 평균 강수량(Prcp)과 연 평균 기온(Tavg), 연 평균 상대습도(Rhav) 분포는 기상청의 기후정보포털에서 제공하는 1km 공간해상도의 기상 분포 자료를 획득하여 이용하였다. 이 자료는 MK-PRISM을 이용하여 산출된 자료로 지형성 강우 및 지형에 따른 기온 분포를 잘 재현하는 특징이 있다(Kim et al., 2013; Park and Jang, 2016; Park and Kim, 2016). 연 평균 절대습도(Ahav) 분포는 Rhav 자료에 식(2)의 절대습도 변환식(Lab Science Crab, 2023)을 적용하여 산출하였다.

$$Ahav_d = \frac{217 \times (6.1078 \times 10^b)}{m} \quad (2)$$

$$p = \frac{7.5 \times Tavg_d}{Tavg_d + 237.3} \quad (3)$$

$$m = \frac{(Tavg_d + 273.15) \times Rhav_d}{100} \quad (4)$$

여기에서 $Ahav_d$ 는 주어진 날의 절대습도(g/m^3), $Tavg_d$ 는 주어진 날의 평균기온($^{\circ}C$), $Rhav_d$ 는 주어진 날의 상대습도(%)이다.

습윤 시간(TOW)은 기상청으로부터 관측지점별 일평균 상대습도와 일 평균 기온 자료를 획득한 후, 조건을 만족하는 연 평균 일수를 산출하였다. 이를 위해 기상청의 기상자료개방포털(data.kma.go.kr)을 통해 종관기상관측망(automated synoptic observation system, ASOS) 자료를 획득하였고, 시·공간적인 일관성을 유지하기 위해 매일 20일 이상 관측 결과가 존재하고, 관측 누락 일수가 전체 기간의 1% 미만인 관측지점만을 선택하여 연구에 활용하였다. 이를 통해 총 91개의 기상 관측 지점이 사용되었다(Fig. 2). 지점별로 산출된 습윤시간 자료를 분포도로 만들기 위해 공간적 내삽을 수행하였다. 공간적 내삽 방법으로는 실무에서 자주 이용되는 방법인 역거리 가중(inverse distance weighted, IDW) 내삽법을 사용하였다(Park and Kim, 2013; Yang et al., 2019). IDW 분석에는 R 4.1.3 버전과 R의 sf, raster, stat 라이브러리

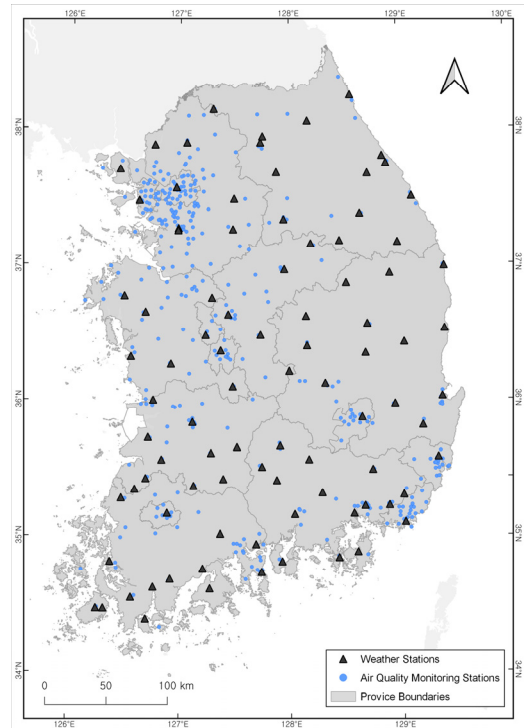


Fig. 2. Meteorological and air quality monitoring networks used in the study

를 활용하였다. 연 평균 분포 지도는 IDW를 이용한 각 연도별 분포 자료를 산출한 후 이를 평균하여 획득하였다.

이산화황(SO₂), 미세먼지(PM₁₀), 그리고 오존(O₃) 분포는 한국환경공단의 에어코리아(airkorea.or.kr)에서 획득한 최종확정 측정자료를 활용하여 구축하였다. 연구에는 도시의 대기질을 대표하는 도시대기측정망 자료를 이용하였고, 20일 이상 관측된 월을 유효 관측 월로 간주하였고, 다음으로는 10개월 이상 관측된 해만 유효 관측 연도로 간주하였다. 이러한 과정을 통해 총 379개의 대기질 관측지점 자료를 획득하였다(Fig. 2). 이 자료 역시 지점별 자료이기 때문에 IDW 내삽법을 이용하여 각 대기질 항목에 대한 분포도를 구축하였다.

2.3 부식성 위험 산정 방법

본 연구에서는 총 3개의 방법을 활용하여 항공기 알루미늄 대기 부식성 모의를 수행하고, 그 결과를 비교하였다. 각 모의 방법은 Table 2와 같으며, 서로 다른 대기 환경변수를 사용한다. PACER LIME은 분류체계에 속하고, ICP, CORRAG는 통계적 모형에 속한다.

1965년 미 공군은 기지별 항공기 부식 예방 관리를

위해 PACER LIME을 개발하였다(Summitt and Fink., 1980). 이 알고리즘은 알고리즘의 첫 번째 분류기준으로 해안으로부터 거리가 4.5km 이내에 있으면 AA등급(매우 심각)으로 분류한다. 4.5km 밖의 거리에서는 '절대습도 혹은 강수량'을 기준으로 기준치(절대습도 7.1g/m³, 연평균 강수량 125cm)에 따라 분류하며, 마지막으로 이산화황(SO₂), 미세먼지(TSP, 공기 중 부유먼지, 본 연구는 PM₁₀ 적용), 오존(O₃) 농도를 기준으로 최종 부식 등급을 AA(매우 심각)~C(약함, 무시)등급으로 분류한다. PACER LIME에 대한 상세한 설명은 Woo et al.(2023)에서 확인할 수 있다.

ISO CORRAG는 1986년 ISO 기술위원회(TC156)가 유럽 및 미국 51개 지역에서 시행한 금속 시편 노출프로그램에 의해 제안되었다. 철, 구리, 알루미늄, 아연 4가지 금속 시편을 평판형과 나선형 2개 형태로 구분하여 1986~1998년간 다양한 장소, 기후대, 습윤시간별 측정된 데이터로 금속 부식에 영향을 미치는 변수와 부식률 간 통계적 상관계수가 산출되었다(식 5).

$$\log(\text{rate}) = -0.739 + 3.26(TOW_c) + 5.02(SO_2) + 6.71(Cl_{depo}) \quad (5)$$

여기에서 $\log(\text{rate})$ 는 알루미늄판의 1년 로그 부식률(g/m²/year)이다. TOW_c는 습윤시간 계수, SO₂는 이산화황, Cl_{depo}는 염화물 침착 속도이다(Roberge et al., 2002).

ICP(International Co-operative Programme) Materials는 UN/ECE 협약에서 활동하는 Convention on Long Range Transboundary air pollution(CLRTAP)의 문화·유산을 포함하는 여러 재료에 관한 대기부식 위험에 관해 연구하는 프로그램을 진행하였다. 그 결과, 알루미늄의 부식 위험도를 산정하는 식(6)을 제안하였다. 아래 식은 1987~1995년에 수행된 8년 실험결과를 기반으로 작성되었다. 2001년 106개 사이트에 대한 실험결과, 이 식의 r²는 0.74이었다(CLRTAP, 2014).

$$ML = 0.0021(SO_2)^{0.23} \times Rhav \times \exp(f(Tavg))t^{1.2} + 0.000023Prcp(Cl_{prcp})t \quad (6)$$

$$f(Tavg) = a(T-10) : \text{if } (T < 10^\circ\text{C}) \\ b(T-10) : \text{else} \quad (7)$$

Table 2. Three atmospheric corrosion estimation methods used in the study

Variables	Atmospheric corrosivity models		
	Classification scheme	Statistical model	
	PACER LIME	ICP	CORRAG
Dist	○		
Cl _{depo}			○
Cl _{prcp}		○	
Prcp	○	○	
Tavg		○	
Rhav		○	
Ahav	○		
TOW _c			○
SO ₂	○	○	○
PM ₁₀	○		
O ₃	○		

*PM₁₀ was used instead of the TSP (total suspended particles), which is a variable for PACER LIME.

여기에서 ML은 부식으로 인한 알루미늄의 손실량 (mass loss, g/m^2)이고, SO_2 는 이산화황, R_{hav} 는 상대 습도이다. Pr_{pcp} 는 연 강수량이며 Cl_{prcp} 는 강수량에 포함된 염소 이온 농도이다. T_{avg} 는 연평균으로 10°C 이상 일 때와 미만일 때 각각 다른 상수($a=0.031$, $b=-0.061$)를 사용한다. t 는 알루미늄이 노출된 기간(연도)이다.

III. 연구결과

3.1 방법별 대기 부식성 위험 분포도

3가지 서로 다른 모델, PACER LIME, CORRAG, ICP를 이용하여 대기 부식성 위험분포도를 작성하고 비교한 결과, 모델에 따른 위험 등급의 공간적 차이를 알 수 있었다. Fig. 3은 각 방법을 이용하여 작성한 대기 부식 위험 등급 분포도이다.

PACER LIME을 토대로 작성한 위험분포도에서는 해안을 따라 가장 높은 부식 위험 등급(AA)이 나타나고 있다. 이는 분류체계에서 해안으로부터의 거리 변수(Dist)의 영향이 반영된 결과이다. PACER LIME 체계에서는 해안으로부터 4.5km 이내 지역은 항공기가 해수에 의해 상당히 해로운 영향을 받는 것으로 판단하여 부식 위험이 가장 높은 AA 등급을 부여한다. 지도에서 보이는 띠 형상의 위험 지역은 이러한 개념이 반영된 결과이다. Summitt and Fink(1980)에 의하면, 바다로부터 약 130km까지 항공기가 해로운 영향을 받을 수 있지만, 상당한 공기 중 염분 농도는 정상적인 날씨에서 해안 근처에서만 발견된다. 특히 염분의 농도는 바다에서 약 15km 내에서 거리에 따라 급격히 감소하고, 그 지점을 초과하면 일정하다. PACER LIME은 이를 더욱 보수적으로 적용하여 4.5km 이내를 위험 지역으로 구분하고 있다. PACER LIME에서 그 외 지역은 A 등급과 B 등급으로 구분되고 있다. B 등급은 주로 강원 남부에서 경북 북동 지역에서 나타난다. 이 지역은 경북 북동지역은 연 평균 강수량이 1,250mm를 넘지 않는 지역이고, 강원 남부는 절대습도가 7.5 g/m^3 미만인 지역으로 나타나기 때문에 상대적으로 낮은 등급이 부여되었다.

ISO CORRAG는 C1~C5 등급으로 위험 등급을 표현한다. C5가 부식 위험이 가장 높은 등급을 의미한다. 본 연구에서는 C4와 C5를 PACER LIME의 AA 등급과 같은 등급의 위험도로 표현하였다. 두 방법으로 작성된 지도를 비교하였을 때, 해안 지역에서의 부식 위험이 두 방법에서 각각 AA와 C4 등급으로 분류되었기 때문

이다. ISO CORRAG를 토대로 한 부식 위험 분포는 PACER LIME과는 상당한 차이를 보인다. 가장 높은 등급인 C5가 우리나라에서 나타나지 않으며, 해안에서도 C4 등급이 나타나는 것이 눈에 띈다. C4 등급은 주로 해안선을 따라 나타난다. 이는 ISO CORRAG의 함수에 포함되어 있는 염화물의 표면 흡착률(Cl_{depo}) 변수의 영향이 반영되었기 때문이다. 염화물의 표면 흡착률이 반영되었음에도 불구하고, 해안 지역에서 C5가 아닌 C4 등급이 부여된 것은 본 연구에서 사용된 래스터의 공간해상도, 거리에 따른 염화물 흡착률의 경험식에 포함된 한계가 복합적으로 반영된 결과로 판단된다. 본 연구에서는 1km 공간 해상도의 래스터 자료를 이용하였기 때문에 염화물의 표면 흡착률 역시 1km 단위로 계산되었다. 해안으로부터의 거리(Dist)에 따른 염화물의 표면 흡착률(Cl_{depo}) 분포는 Park and Kim(2016)의 경험식을 사용하였는데, 이 식은 역함수로 되어 있다. 역함수는 해안으로부터의 거리와 염화물 흡착률 간의 비선형적 관계를 모델링하는데 유용하지만, 거리에 따른 변화가 지나치게 급격하게 나타나는 한계가 있다. 이 식에 의하면 1km에서 2km 사이에 흡착률 양이 약 1/2로 수준으로 감소한다. 이와 같은 값의 급격한 변화가 해안 지역에서 위험지역을 PACER LIME에 비해 제한적으로 표현하는 원인으로 판단된다.

ISO CORRAG의 결과에서 해양과 SO_2 가 복합적으로 반영된 해안에서는 C4 등급 지역이 상대적으로 두꺼운 띠의 형태를 보였고, SO_2 농도가 낮고 해양의 영향만을 받는 해안 지역에서는 C4 등급 지역이 얇은 띠의 형태를 보였다. SO_2 의 높은 농도는 서울·경기·인천 등에서 광범위하게 나타났고, 광양과 여수, 울산과 포항, 부산에서도 나타났다. 따라서 인천, 여수 및 광양, 울산 등지에서 C4 등급 지역은 상대적으로 두꺼운 띠 형태를 보였다. 반면 강원도의 해안 지역과 경북 북부 해안 지역, 전라북도 해안 및 전라남도 서남 해안 지역 등에서는 SO_2 농도가 낮기 때문에 C4 등급 지역이 얇은 띠 형태를 띠고 있다. 서울과 인천에서도 상대적으로 높은 농도의 SO_2 가 나타났음에도 C3 등급이 부여된 것은 해양의 영향이 제한적인 지역이기 때문이다.

한편 ISO CORRAG의 경북 내륙 영주 지역에서는 원형상의 C4 등급 지역이 나타난다. 이는 이 지역에 있는 도시대기측정망에서 높은 농도의 이산화황(SO_2)이 측정되었기 때문이다. 영주 지역의 SO_2 농도는 극단적으로 높기 때문에 해양의 영향이 제한적임에도 불구하고 C4 등급이 부여되었다.

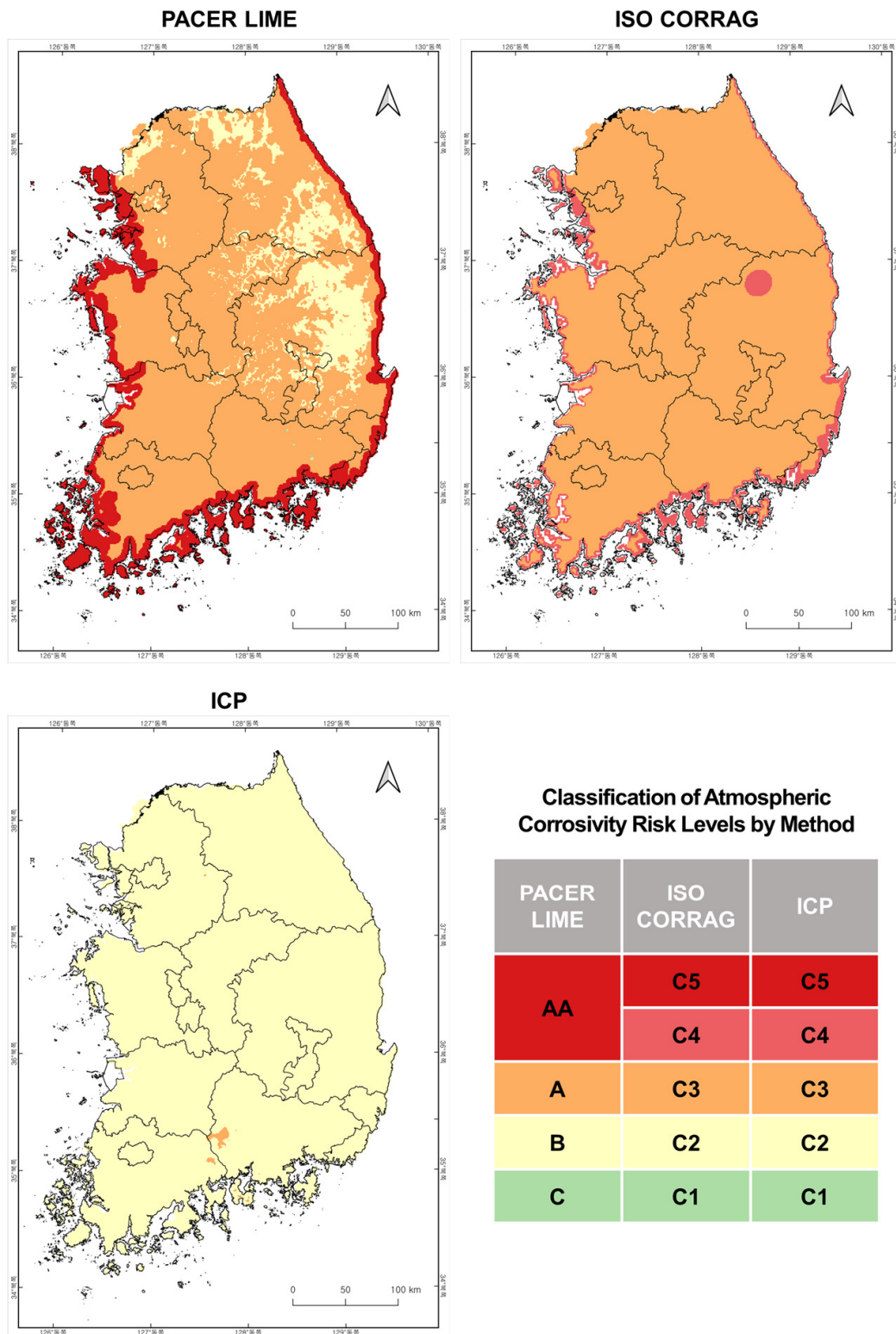


Fig. 3. Corrosion map of atmospheric environment model in Korea

ICP의 위험분포도는 전국 대부분 지역을 C2 등급으로 분류하고 있다. 지리산 지역을 중심으로 C3 지역이 나타나지만, 매우 제한적이다. 지리산에서 상대적으로 높은 위험 등급이 부여된 이유는 이 지역에서 나타나는 높은 강수량과 연관되어 있다. 강수량에 포함된 염소 이온 농도(Cl_{prcp})가 높아 상대적으로 높은 등급이 부여되었다.

3.2 통합 대기 부식성 위험 분포도

ICP 방법에서는 대기 부식성 위험의 공간적인 차이가 나타나지 않았지만, PACER LIME과 ISO CORRAG에서는 모델에 따라 대기 부식성 위험의 공간적인 차이를 확인할 수 있었다. 이는 어느 한 모형에 의해 산출된 대기 부식성 위험을 활용하였을 때 그 위험을 과대평가 또는 과소평가할 수 있다는 것을 의미한다. 본 연구는 대기 부식성 위험의 공간적인 차이가 나타나지 않은 ICP 방법을 제외하고, PACER LIME과 ISO CORRAG를 통합하여 우리나라의 대기 부식성 위험분포도를 작성하였다.

본 연구는 ISO CORRAG의 C5와 C4 등급을 PACER LIME의 AA로 간주하였고, PACER LIME의 A, B, C 등급은 각각 ISO CORRAG의 3, 2, 1 등급으로 간주하였다. Fig. 3의 대기 부식성 위험 수준 분류에서 볼 수 있는 것과 같이 대기 부식성 위험 수준을 PACER LIME은 4등급으로 분류하고, ISO CORRAG는 5등급으로 분류한다. 따라서 두 분류를 평균할 때 두 방법 간의 위험 수준을 매칭할 필요가 있었다. ISO CORRAG에서 C4 등급이 주로 해안 지역의 대기 부식성 위험을 나타내고 있었으며, 이는 PACER LIME의 해안 지역에 관찰되는 AA 위험 수준과 유사한 양상을 보였다. 비록 두 방법의 등급이 상이하더라도 이러한 유사성은 두 등급이 모두 해안 지역에서의 염분에 의한 부식 위험을 반영하고 있기 때문이다. 따라서 두 등급은 유사한 위험 등급으로 간주할 수 있다. PACER LIME의 A와 ISO CORRAG의 C3의 분포 역시 우리나라 내륙 대부분 지역에서 관찰된다는 점에서 유사한 패턴을 보인다. 두 방법 모두 높은 습윤 환경과 이산화황(SO_2)을 고려하기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 방법론적인 특성과 위험 수준의 분포를 고려하여 본 연구는 두 방법에 따른 위험 수준을 매칭하였다(AA=C5와 C4, A=C3, B=C2, C=C1). 아울러 위험 수준을 4등급부터 1등급으로 재분류하였으며, 4등급을

가장 위험한 등급으로, 1등급을 가장 위험이 낮은 등급으로 설정하였다.

PACER LIME과 ISO CORRAG에 의해 결정된 위험 수준을 통합할 때, 위험도를 평균하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 두 가지 다른 평가 방법이 가진 개별적 장점을 결합함으로써, 보다 균형 잡힌 평가를 가능하게 한다. 평균을 사용함으로써, 두 방법에서 발생할 수 있는 편향이나 극단적인 값을 완화할 수 있다. PACER LIME과 ISO CORRAG는 각각 다른 변수와 가중치를 사용해 부식 위험을 평가하므로, 특정 지역에서 어느 한 방법이 과소 평가하거나 과대 평가할 수 있는 가능성이 있다. 평균을 취함으로써 이러한 개별 방법의 편차를 줄이고, 각 방법이 포착하는 위험 요소를 모두 반영하여 전체적으로 더 신뢰할 수 있는 평가 결과를 얻을 수 있다. 예를 들어, PACER LIME에서 고려하는 총량 개념의 강수량과 ISO CORRAG에서 고려하는 습윤 시간 개념이 고려된 포괄적인 위험 평가가 가능하다.

각 방법에 따른 등급을 평균하였을 때 총 6개의 등급이 구성되는데, 본 연구에서는 다음과 같은 위험 등급으로 정의하였다. 두 방법 모두에서 4등급으로 구분된 지역은 극심(extreme)으로 구분하였고, 3.5등급은 매우 높음(very high) 등급으로 구분하였다. 평균 3등급은 높음(high), 2.5등급은 보통(moderate), 2등급은 낮음(low), 1.5 이하 등급은 매우 낮음(very low) 등급으로 구분하였다.

Fig. 4의 지도는 두 방법을 통합하여 우리나라 전역의 대기 부식성 위험도를 시각적으로 표현한 결과를 보여준다. 이 결과를 살펴보면, 해안 지역 전반에서 대기 부식성 위험도가 매우 높은 것으로 나타난다. 특히, 남해안과 서해안 지역은 부식성 위험이 '매우 높음'(very high)에서 '극심'(extreme) 등급으로 구분되었다. 이러한 결과는 모형이 고려하는 요소와 활용 방법에는 차이가 있지만, 근본적으로 염분에 의한 위험을 고려한다면 이 지역에서 바닷물에 의한 염분이 대기에 혼합되어 부식 위험을 높이고 있을 가능성을 의미한다.

반면, 내륙 지역으로 갈수록 부식성 위험도가 점진적으로 낮아지는 경향이 관찰된다. 내륙 중앙부와 일부 산악 지대는 주로 '보통'(moderate)에서 '낮음'(low) 등급으로 분류되고 있다. 이는 해안선으로부터의 거리가 멀어짐에 따라 염분의 영향을 덜 받기 때문으로 보인다. 또한, 이들 지역은 대기 중 습도도 상대적으로 낮아 부식 위험이 줄어드는 것으로 분석된다.

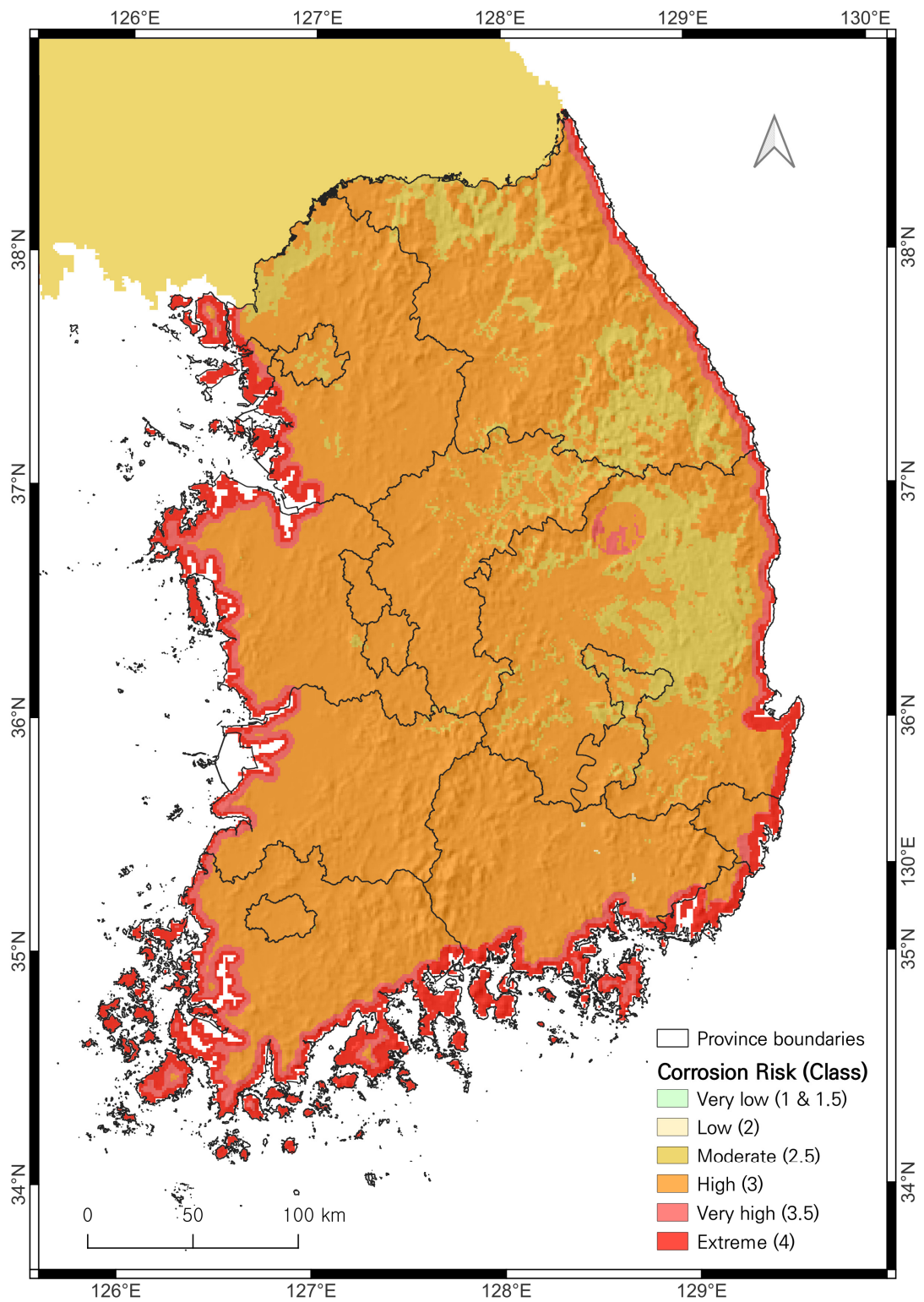


Fig. 4. Composite corrosion risk map highlighting mean risk levels from two methods

지도에서 내륙에서 '매우 낮음'(very low) 등급을 나타내는 경우는 찾아보기 어려웠다. 대부분의 내륙 지역은 '보통'(moderate) 이상의 부식성 위험 등급을 보이고 있으며, 이는 우리나라 전역의 대기가 일정 수준 이상의 부식성을 갖고 있음을 의미한다.

한편, 경북 내륙 일부 지역에서 상대적으로 높은 위험 등급이 나타났는데, 이는 앞서 ISO CORRAG의 결과에서 높은 농도의 이산화황(SO_2)이 나타난 것과 연관되어 있으며, 국지적으로 공업 지역이나 대기 오염이 심한 지역에서는 부식에 대한 위험이 높아질 가능성이 있음을 시사한다.

IV. 토의 및 결론

본 연구는 다양한 평가 방법론을 통해 우리나라의 항공기 대기 부식성 위험분포도를 작성하였으며, 이를 통합하여 대기부식 위험의 공간적 분포와 그에 따른 시사점을 제시하였다. 연구에서는 PACER LIME, ISO CORRAG, 그리고 ICP 세 가지 방법론을 활용하여 각기 다른 대기 환경변수에 기반을 둔 위험분포도를 작성하였으며, 방법론에 따른 결과를 종합적으로 평가하고 통합하였다.

PACER LIME과 ISO CORRAG 두 방법론은 해안 지역의 부식 위험을 높게 평가하며, 특히 해안선에서 발생하는 염화물의 영향을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 반면, ICP 방법론은 부식 위험을 상대적으로 낮게 평가하며, 주로 내륙 지역의 대기 부식성을 낮게 평가하는 경향을 보였다.

방법론에 따라 평가 결과가 상이할 수 있다는 것은 다양한 방법론에 의한 개별적 평가와 함께 통합적이고 포괄적인 평가가 병행되어야 할 필요성을 시사한다. 각 방법론이 사용하는 변수와 가중치에 따라 동일 지역을 평가한 결과가 상이하게 나타날 수 있다는 점은 대기 부식성 평가에서 중요한 고려 사항이다. 예를 들어, PACER LIME 방법은 주로 해안으로부터의 거리와 절대습도, 강수량 등을 주요 변수로 사용하여 부식 위험을 평가하는 반면, ISO CORRAG 방법은 습윤시간, 이산화황(SO_2), 염화물 침착 속도와 같은 오염물질의 영향을 중점적으로 고려한다. 이러한 변수들의 차이는 동일 지역이라도 대기 환경의 특정 요소가 부각되거나 간과될 가능성을 만들고, 특정 환경 조건이나 오염 요소를 반영하는 방법의 차이는 동일 지역의 대기 부식

성 위험 수준에 차이를 유발한다. 특히, 해안 지역에서는 염화물 침착 속도가 주요 변수로 작용하여 부식 위험이 높게 평가될 수 있지만, 내륙 지역에서는 상대적으로 습윤시간이나 이산화황 농도가 더 큰 영향을 미쳐 부식성 평가 결과에 차이가 있었다. 따라서 대기 부식성 평가에서는 더 포괄적이고 정확한 위험 평가를 위해, 단일 방법론에 의존하기보다는 다양한 방법론을 병행하여 사용하는 것이 필요하다.

방법론에 따른 차이를 보완하려고 본 연구는 두 방법론을 평균하는 방안을 제안하였다. 평균을 통한 통합 분포도는 특정 방법론에 의한 편향을 줄이고, 보다 신뢰성 있는 부식 위험 평가를 가능하게 하였다. 이 결과는 해안 지역 전반에서 매우 높은 부식 위험이 존재함을 재확인하였으며, 내륙 지역으로 갈수록 위험이 감소하는 경향을 명확히 보여주었다. 경북 내륙의 특정 지역에서 높은 위험 등급이 나타나는 사례가 있었는데, 이는 국지적인 관측 결과가 부각되어 나타난 연구의 한계이기도 하지만, 공업 지역 또는 대기 오염이 심한 지역에서 국지적으로 부식 위험이 증가할 수 있음을 시사한다.

해안 지역에서 염분에 의한 위험도를 재현하면서 기후와 지형적인 영향이 반영되지 못한 점은 연구의 한계로 지적할 수 있다. 우리나라는 기후적으로 강한 편서풍의 영향을 받으며, 서해안에는 산지가 발달하지 않은 반면 동해안에는 태백산맥이 인접해 위치하는 지형적 특성을 갖고 있다. 이러한 조건에서 서해안의 염분은 내륙 깊숙이까지 영향을 미칠 수 있는 반면, 동해로부터 유입되는 염분의 영향은 상대적으로 제한적일 수 있다. 나아가 서해와 동해의 염분 농도 차이 역시 염분에 의한 위험도에 차이를 유발할 수 있다. 이러한 여러 가능성을 고려하였을 때 동일한 거리를 기준으로 염분에 의한 위험 분포를 결정하는 것은 실제 상황을 반영하는데 한계가 있을 수 있다. PACER LIME은 해안으로부터 4.5km라는 단일 거리를 이용하여 위험 수준을 결정하고, ISO CORRAG는 제한된 연구결과를 토대로 한 염화물 침착 속도를 이용하여 위험 수준을 결정하였기 때문에 위와 같은 우리나라의 기후와 지형적인 특성을 충분히 반영하지 못하고 있다. 본 연구를 통해 대기 부식성 위험 분포에서 염분의 영향이 매우 중요한 요소임이 재확인되었으므로, 염분의 위험 분포를 보다 정교하게 평가하기 위해 기후와 지형적인 특성을 반영한 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 대기부식 변수들의 위험

도가 고도에 따라서 차이가 있을 수 있다. 하지만 대기 부식 변수들 측정에 있어서 기상관측 자료와 대기질 자료들의 관측지점은 관측기관에서 정하는 고도에 따라서 관측함으로 고도에 따른 변수들의 자료를 획득하기에는 한계점이 있다. 그러나 추후 연구에서는 대기부식 변수들에 대한 고도별 자료를 측정하여 고도별 위험도에 대한 비교, 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

몇몇 연구의 한계에도 불구하고, 본 연구의 결과는 우리나라의 대기 부식성 위험도가 지리적 특성에 따라 뚜렷하게 구분된다는 것을 보여주었다. 이는 우리나라 전역의 대기 부식성 위험을 종합적으로 이해하고, 항공기 운영 및 유지보수 전략을 수립하는 데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 특히 본 연구의 결과는 대기 부식성에 대한 지역적 특성을 고려한 부식 예방 전략 수립의 필요성을 보여주었으며, 해안 지역에서 부식 방지 조치의 중요성을 시사한다. 향후 연구에서는 염분으로 인한 부식 위험 분포를 보다 정확하게 평가하기 위해 다양한 기후 조건과 지형 조건을 고려한 연구가 필요할 것이다.

References

- Kim, S. C., and Lee, O. H., "A study on the improvement of education through the correlation analysis of the situation awareness and education satisfaction of helicopter pilots", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 29(1), 2021, pp.82-83.
- Youn, D. S., and Park, J. W., "The effects of organization's safety culture on aircraft maintenance technician's safety behavior", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 30(4), 2022, pp.105-116.
- Yu, T. J., "A study on human error risk analysis of helicopter frequent accidents through AHP method", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 31(2), 2023, pp.47-48.
- Yun, J., Lee, D., Park, S., Kim, M. S., and Choi, D., "The effect of aircraft parking environment on atmospheric corrosion severity", *Journal of the Korean Corrosion Prevention Society*, 20(2), 2021, pp.94-104.
- Titakis, C., and Vassiliou, P., "Evaluation of 4-year atmospheric corrosion of carbon steel, aluminum, copper and zinc in a coastal military airport in greece", *Corrosion and Materials Degradation*, 1(1), 2020, pp.159.
- Kim, Y. S., Lim, K. M., Kim, J. J., Hwang, W. S., and Park, Y. S., "Corrosion cost and corrosion map of Korea - Based on the data from 2005 to 2010", *Corrosion Science and Technology*, 10(2), 2011, pp.109-117.
- Summitt, R., and Fink, F. T., "Pacer lime: An environmental corrosion severity classification system", *AFWAL-TR-80-4102 Part 1*, 1980, pp.45-48.
- Mikhailov, A. A., "The classification system of ISO 9223 standard and the dose-response functions assessing the corrosivity of outdoor atmospheres", *Protection of Metals*, 40, 2004, pp.541-550.
- Roberge, P. R., Klassen, R. D., and Haberecht, P. W., "Atmospheric corrosivity modeling a review", *Materials and Design*, 23(3), 2002, pp.323-325.
- ISO 9223:2012(E), "Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation", 2012, pp.2-7.
- Klinesmith, D. E., McCuen, R. H., and Albrecht, P., "Effect of environmental conditions on corrosion rates", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(2), 2007, pp.123.
- Park, W. D., Gook, P. J., Cho, Y., and Bahn, C. B., "Wash interval optimization to prevent atmospheric corrosion of Korean aircrafts made of aluminum alloys", *Journal of the Korean Corrosion Prevention Society*, 15(4), 2016, pp.189-197.
- Park, S., Yun, J., Lee, D., Yun, S., and Kim, S., "Study of the determination of the aircraft wash interval by using environmental severity of air force bases", *Proceeding of Journal of the Korean Aerospace Society*, 2020, pp.336-338.
- Woo, M. S., Lee, J. W., Lee, J. H., Woo, K. J.,

- and Park, J., "A comparison of four atmospheric corrosivity modeling results for aircraft", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 31(3), 2023, pp.79-92.
15. Slamová, K., Glaser, R., Schill, C., Stefan Wiesmeier, and Köhl, M., "Mapping atmospheric corrosion in coastal regions: methods and results", *Journal of Photonics for Energy*, 2, 2012, pp.022003.
 16. AIRKOREA, "Concentration of major ionic components of acid drop by year ('99~'21)", National Academy of Environmental Sciences, 2021 Addendum to Annual Air Environment Report 4.3, 2022.
 17. Kim, J. U., Kim, M. K., and Kim, Y. H., "Improvement of modified Korean parameter-elevation regressions an independent slopes model based on independent temperature lapse rate", *Journal of Climate Research*, 8(3), 2013, pp.203-215.
 18. Park, J., and Jang, D. H., "Application of MK-PRISM for interpolation of wind speed and comparison with co-kriging in South Korea", *GIScience & Remote Sensing*, 53(4), 2016, pp.421-443.
 19. Park, J., and Kim, M. K., "PRISM-KNU development and monthly precipitation mapping in South Korea", *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 19(2), 2016, pp.27-46.
 20. Lab Science Crab, Relative Humidity, Absolute Humidity, Air & Humidity Conversion <https://blog.naver.com/atago59/222963579990>, Last access date : 2023-06-13.
 21. Park, J., and Kim, M. K., "Comparison of precipitation distributions in precipitation data sets representing 1km spatial resolution over South Korea produced by PRISM, IDW, and cokriging", *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 16(3), 2013, pp.147-163.
 22. Yang, H., Yi, C., Chae, Y., and Park, J., "Comparison of statistical interpolation methods for downscaling of summer temperature data from the Korea meteorological administration's digital forecasts", *Journal of the Association of Korean Photo-Geographers*, 29(4), 2019, pp.19-32.
 23. CLRTAP, 2014. Mapping of Effects on Materials, Chapter IV of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution; accessed on 2022.11.30 on Web at www.icpmapping.org