

기후변화에 따른 미래 항공기 운영 환경 변화

박수연¹⁾ · 박상환^{1)*} · 이건희¹⁾ · 정혜정¹⁾ · 강경민¹⁾ · 김공요¹⁾ · 황재돈¹⁾ · 김성²⁾

¹⁾공군 기상단, ²⁾(주) 위즈아이

(접수일: 2024년 6월 14일, 수정일: 2024년 7월 11일, 게재확정일: 2024년 7월 18일)

The Impact of Climate Change on Future Aircraft Operation

Su-Yeon Park¹⁾, Sang-Hwan Park^{1)*}, Keon-Hee Lee¹⁾, Hye-Jeong Jung¹⁾,
Gyeong-Min Kang¹⁾, Gong-Yo Kim¹⁾, Jae-Don Hwang¹⁾, and Sung Kim²⁾

¹⁾Republic of Korea Air Force Weather Group, Gyeryong, South Korea

²⁾Wizai, Seoul, South Korea

(Manuscript received 14 June 2024; revised 11 July 2024; accepted 18 July 2024)

Abstract Analyzing the information about climate change on Korean Peninsula is essential for the national defense. In this study, we used HadGEM3-RA model output (a member of CORDEX-EA) and analyzed the 3 operational weather factors (VMC, runway temperature, WBGT), which affect the aircraft field. The number of future limited days was quantitatively calculated based on the model outputs applying SSP1-2.6 and SSP5-8.5 and the operational limits of the previous three factors, and the spatial distribution, time series, and correlation of each result were analyzed. In conclusion, it was analyzed that the number of limited days by VMC would decrease, resulting from the rise in temperature and the drop in relative humidity. This means the operational environment in VMC will improve. On the other hand, the number of limited days by the runway temperature and WBGT would increase, resulting from the rise in temperature. This means the operational environment in runway temperature and WBGT will worsen.

Key words: Climate change, CORDEX-EA, HadGEM3-RA, Limited day, Aircraft operation environment change

1. 서 론

전지구적 화두인 기후변화에 대응하기 위해 국제사회는 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)를 중심으로 과학적인 분석과 예측 및 평가를 수행하고, 그 결과를 평가 보고서(Assessment Report, 이하 AR)로 발간하고 있다. 최근 제6차 평가보고서(AR6)에서 인간의 영향으로 대기와 해양, 육지가 온난화 되는 것은 명백한 사실이며, 이로 인해 이미 전 세계 곳곳에서 폭염 등 극

한 고온과 호우의 빈도가 증가하고 강도가 높아지는 등 극한 이상기후 현상이 발생하고 있다고 밝히고 있다(IPCC, 2021; WMO, 2021).

우리나라도 기후변화 영향으로 수자원, 산림, 농업, 산업 등 다양한 영역에 걸쳐 상당한 영향이 우려(KEI, 2011)되고 있어, 사회 전 분야에 걸쳐 기후변화 대응 방안을 모색하고 있다. 특히 항공 분야도 시정(visibility), 활주로 기온(runway temperature), 난류(turbulence) 등 항공기 운항에 영향을 주는 기상 요소와 기후변화 영향에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다(Stoelinga and Warner, 1999; Gultepe et al., 2006; Coffel and Horton, 2015; Kim et al., 2023).

국방 분야에서도 “국방녹색성장추진계획”을 통해 에너지 효율화, 친환경 및 신재생 에너지 확대 등의 노력을 기울이고 있다. 그렇지만, 기후변화 대응과 더불어

*Corresponding Author: Sang-Hwan Park, Republic of Korea Air Force Weather Group, P.O. Box 501-328, Sindoan-myeon, Gyeryong-si, Chungcheongnam-do 32800, Korea.
Phone: +82-42-552-7390, Fax: +82-42-552-7244
E-mail: kaf73@naver.com

어 변화하는 전장 환경에 적응하기 위해 미래 전장 환경과 그에 따른 작전 영향 분석은 필수적이나 관련 연구는 부족한 실정이다. 과거 대한민국 공군(Republic Of Korea AirForce, ROKAF) 기상단에서 IPCC AR5를 적용하여 미래 온도지수와 활주로 기온 등을 분석했으나, 기온과 강수량 변화 중심의 정성적인 분석이었다는 점과 남한 지역만 분석했다는 점에서 한계가 있었다(Kim et al., 2014; Eom et al., 2015).

최근 기상단은 IPCC AR6와 연계된 국제 지역기후 상세화 프로젝트(COordinated Regional climate Downscaling EXperiment, CORDEX)에 사용된 HadGEM3-RA 전망 결과와 4개의 지상 작전(매복, 도하, 공수, 수색)에서 사용되는 기상제한치를 활용하여 미래 전장 환경 변화를 정량적으로 분석했다(Lee et al., 2023). 이 연구는 선행 연구와 연계하여, HadGEM3-RA 모델 전망 결과와 항공 분야, 특히 항공기 운영에 영향을 미치는 기상 관련 요소를 활용하여 제한일수 분석을 통해 기후변화에 따른 미래 항공기 운영 환경 변화를 정량적으로 분석하고자 한다.

2. 자료 및 분석 방법

이 연구에서 사용한 자료는 SSP (Shared Socioeconomic Pathways, 공통사회경제경로) 시나리오(O'Neill 2014)를 적용하여 국립기상과학원(National Institute of Meteorological Sciences, NIMS)에서 생산한 HadGEM3-RA 모델 전망 결과(수평 해상도 25 km)와 항공기 운영에 영향을 주는 기상 요소의 임계값인 기상제한치이다(ROKAF, 2016). 배출 시나리오는 저탄소 시나리오인 SSP1-2.6과 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5를 사용했다. 기상제한치 기준에 따른 영향 분석을 위해 시간 단위의 전망 결과가 필요하여 HadGEM3-RA 모델의 3 hr (기온, 상대습도, 풍속, 일사량) 결과와 1 hr (강수량) 결과를 사용했다. 미래 영향은 기상제한치를 벗어나 항공기 운영이 제한되는 제한일수를 사용했으며, 하루 중 1회 이상 기상제한치를 벗어나면 제한일수가 증가하는 방식으로 계산했다. 미래 항공기 운영 환경 변화 정도 분석하기 위해 모델에서 모의한 현재와 미래 전망과의 차이(anomaly)를 계산했다. 수집된 모델 자료 중 최근 24년(1991~2014년) 동안의 모델 결과를 현재 기후로, 미래 80년(2021~2100년) 동안의 모델 결과를 미래 전망으로 사용했고, 사용한 변수는 기온, 강수량, 상대습도, 풍속, 일사량이다.

한반도 주요 지점별 변화 경향 분석을 위해, 남한 55개 지점에 대해 최단입점보간법(nearest neighbor remapping)을 사용하여 산출하였다. 각 지점은 남한은 부대와 주요 관심 지역으로, 북한은 WMO에 등재된

공식 지점으로 선정했으며, 각 지점의 위치와 명칭은 군사 보안상의 이유로 명시하지 않았다. 지점별로 산출된 기상 변수를 활용하여 항공기 운영 영향 요소 중 대표적인 3가지 기상요소(시정, 활주로 기온, 온도지수)에 대해 미래(2021~2100년) 항공기 운영 제한일수를 분석하였다.

3. 미래 전장 환경 변화 및 항공기 운영 영향

3.1 미래 전장 환경 변화

미래 항공기 운영에 영향을 주는 기상 요소로 시정, 활주로 기온, 온도지수를 선정했으며, HadGEM3-RA 모델 결과를 적용했다. HadGEM3-RA 모델은 동아시아 지역의 관측 자료와의 공간 상관관계는 평균 기온 0.99, 강수량 0.88로 관측과 유사하게 모의했으며, 평균 기온은 관측보다 과소 모의(-1.29°C)하고, 강수량은 다소 과대 모의(+0.27 mm day⁻¹)하는 특성을 보였다(NIMS, 2020; Kim et al., 2022).

Figure 1은 고탄소 시나리오(SSP5)에 따른 미래(2090년대) 한반도 기온, 상대습도, 풍속 전망과 현재와의 차이를 나타낸 것으로, 기온은 현재 대비 7~8°C 정도 증가하였고, 상대습도는 -3~-1%, 풍속은 -0.3~0.0 m s⁻¹ 정도 감소하는 경향을 보였다. 기온은 고위도로 갈수록 증가하여 국립기상과학원에서 발간한 “한반도 기후변화 전망보고서 2020”과 일치했다(NIMS, 2020). 상대습도는 고위도로 갈수록 감소하는 경향을, 풍속은 해안지역으로 감소하는 경향을 보였으나, 그 변화 폭은 적었다.

3.2 항공기 운영 영향

3.2.1 시계 비행 조건(Visual Meteorological Condition, VMC)

시계 비행 조건이란 시정과 운고(cloud height) 등의 기상 조건에 근거하여 조종사가 항법 보조 장비의 도움 없이 육안으로 비행이 가능한 상태를 의미하며, 시정이 짧고, 운고가 낮으면 제한된다. 이 연구에서는 시정을 기준으로 VMC 제한일수를 분석했으며, 시정이 길면 VMC 제한일수는 감소한다. 제한일수는 시정이 기상제한치를 하루 1회 이상 벗어나면 제한일수가 증가하는 방식으로 계산했다. 시정 계산 방법은 대한민국 공군 등 항공기상 분야에서 과거부터 많이 사용하는 다음의 식을 적용하였다(Doran et al., 1999).

$$Vis = 6,000 \times \frac{T - T_d}{RH^{1.75}} \quad (1)$$

여기서 Vis는 시정(mile), T는 온도(°C), T_d는 이슬점 온도(°C), RH는 상대습도(%)이다.

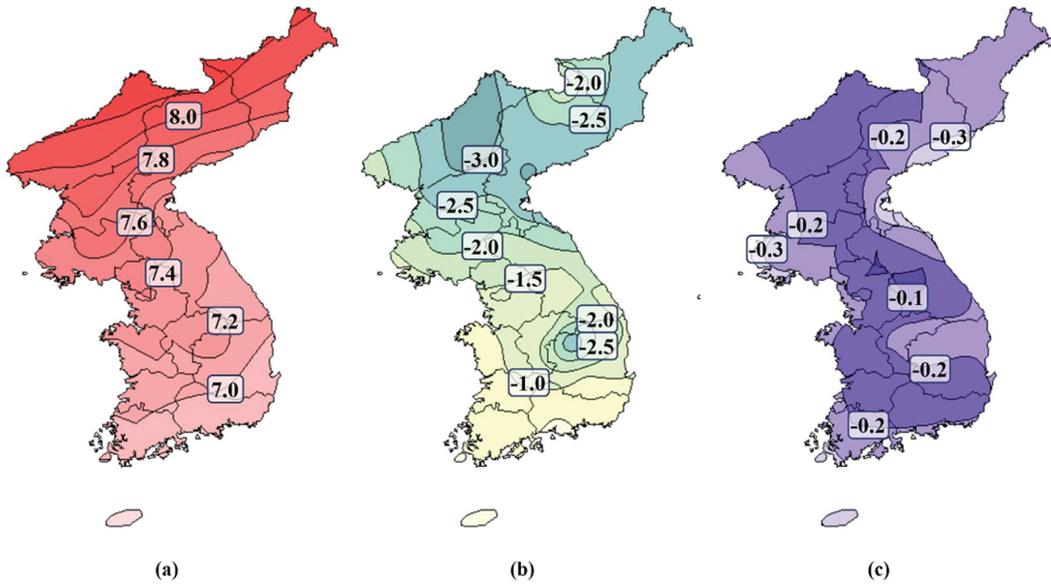


Fig. 1. The anomaly of temperature (a, °C) and relative humidity (b, %) and wind speed (c, m s⁻¹) during 2090~2100 in SSP5.

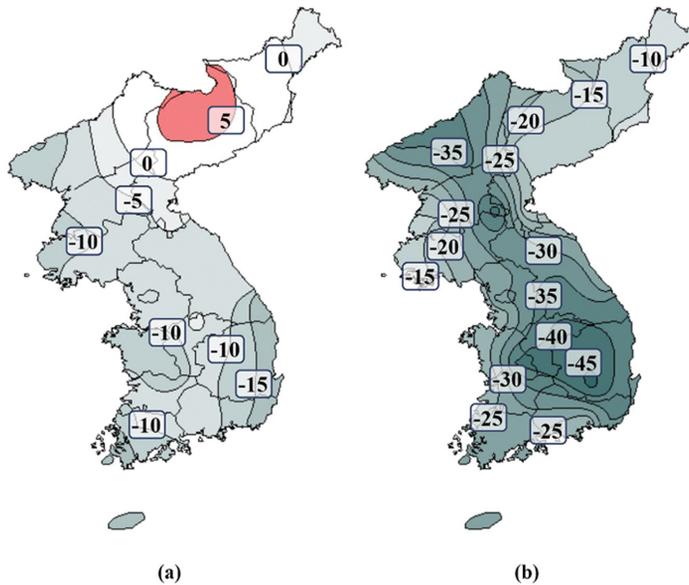


Fig. 2. The anomaly of operational-limited days by VMC during 2090~2100 using SSP1 (a), and SSP5 (b).

이 식에서 필요한 $T - T_d$ 는 Lee and Kim (2016)을 적용하였다.

$$T - T_d \approx (14.55 + 0.114T)x + [(2.5 + 0.007T)x]^3 + [(15.9 + 0.117T)x]^{14}$$

$$x = 1 - RH \tag{2}$$

또한 기상 요소와 VMC 제한일수 간의 상관관계를

분석하기 위해 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)를 사용하였다.

$$Corr(X, Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x - \bar{x})^2)(\sum(y - \bar{y})^2)}} \tag{3}$$

여기서, \bar{x} 는 x (VMC 제한일수)의 평균이고 \bar{y} 는 y (기상요소)의 평균이다.

Table 1. The correlation coefficients between operational-limited days by VMC and anomaly of temperature/relative humidity in SSP5.

Period	20s	30s	40s	50s	60s	70s	80s	90s
<i>T</i>	-0.51*	-0.48*	-0.47*	-0.50*	-0.51*	-0.47*	-0.43*	-0.43*
<i>RH</i>	0.53*	0.55*	0.54*	0.58*	0.55*	0.60*	0.59*	0.59*

* 95% significant level

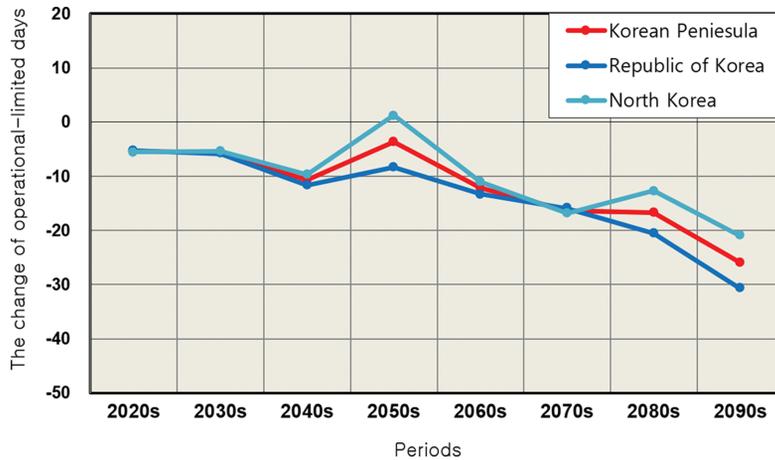
**Fig. 3.** The averaged decadal variation in anomaly of operational-limited days by VMC using SSP5.

Figure 2는 미래(2090년대) VMC 제한일수 변화의 공간분포도를 저탄소(a) 시나리오와 고탄소(b) 시나리오에 따라 나타낸 것이다. 저탄소 시나리오에서 한반도 지역의 제한일수 변화량은 $-17.9 \sim +7.6$ 일로, 북한 북부 지역으로 제한일수가 증가하였으나, 그 외 지역에서는 모두 감소하는 경향이 나타났다. 고탄소 시나리오에서는 $-46.8 \sim -5.4$ 일로 전 지역에서 제한일수가 감소하였으며 특히 영남지역에서 -46.8 일로 최대치를 보였다.

Table 1은 미래(2020~2090년대) VMC 제한일수와 영향 기상 요소인 기온(*T*), 상대습도(*RH*)와의 상관관계를 보인 것으로, VMC 제한일수는 기온과의 상관관계에서 상관계수가 $-0.4 \sim -0.5$ 로 음의 상관관계를 보였고 상대습도와는 $+0.5 \sim +0.6$ 로 양의 상관관계를 보였다. Figures 1, 2와 Table 1의 결과를 종합하면 VMC 제한일수는 기온이 높을수록, 상대습도가 낮을수록 감소했으며 상대습도와의 상관관계가 더 큰 것으로 분석되었다.

Figure 3은 고탄소 시나리오에 대한 VMC 제한일수의 미래 변화를 지역별(남한, 북한, 한반도 전체)로 나타낸 것이다. 제한일수의 변화는 2040년대까지는 큰 변화 경향이 없었으나, 2050년대 들어 감소 경향을 보여 미래(2090년대) 평균 제한일수는 한반도 25.9

일, 남한 30.7일, 북한 21.0일 감소하는 것으로 분석되었다.

3.2.2 활주로 기온(Runway Temperature)

활주로 기온이란 활주로 표면에서 수직으로 1.5 m 높이에서 수은 온도계로 측정된 온도이며 외기 온도 27°C 이상일 경우 측정하고 있다. 활주로 기온이 상승함에 따라 활주로 공기의 밀도는 감소하고 이는 항공기에 작용하는 양력을 감소시킨다(McRae et al., 2021). 양력의 감소는 항공기 이륙을 위한 힘이 부족하다는 의미로 항공기 중량(연료, 탑재체 중량 등)을 줄이거나 활주 거리를 늘리는 등 항공기 운영 환경에 큰 변화를 일으키므로 미래 항공기 운영 환경에 필수적인 요소로 작용한다.

기후변화에 따른 미래 활주로 기온을 산출하기 위해, 2000~2020년까지 각 지점에서 관측한 기상 관측 요소를 예측변수로, 관측된 활주로 기온을 반응 변수로 한 지점별 다중회귀모형을 구축하였다(Eom et al., 2015). 최적의 예측변수를 선택하기 위하여 Stepwise 방법을 사용하였으며, 서로 다른 차원과 분포를 가진 기상 변수를 이용한 모형 구축을 위해 기상 변수를 정규화하여 사용하였다. 또한 변수 간의 다중공선성을 제거하기 위하여 분산팽창계수(Variance Inflation

Table 2. The multiple regression model statistics for runway temperature by location.

Stations	Specifics	Element				Adjusted R-squared	Data count
		T	RH	WS	Intercept		
○○*	Coefficient	0.890500	-0.002133	-0.015562	4.64448	0.7509	8581
	VIF	1.11928	1.337657	1.219335			
△△	Coefficient	1.0220701	-0.0067128	-0.0253070	1.6037420	0.8451	12453
	VIF	1.056908	1.063066	1.013561			
□□	Coefficient	1.0010358	-0.0064392	0.0065255	1.7814092	0.8822	15871
	VIF	1.122464	1.19337	1.073901			
◎◎	Coefficient	0.9729841	-0.0081540		2.6481738	0.8579	13855
	VIF	1.070672	1.070672				
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

* For security reasons, the name of locations was not specified.

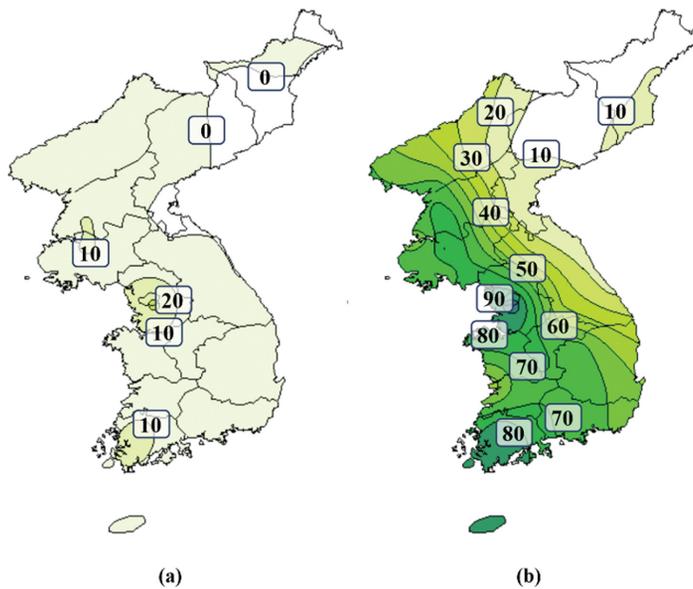


Fig. 4. The anomaly of operational-limited days by runway temperature during 2090-2100 using SSP1 (a), and SSP5 (b).

Factor, VIF)를 계산하였으며, VIF가 10이 넘지 않도록 변수 선택을 하였다. Table 2는 지점별 구축된 다중회귀모형의 결과 일부를 보인 것으로, 구체적인 지명은 군사보안상의 이유로 명시하지 않았다. 활주로 기온 관측값은 북한 관측값이 존재하지 않기 때문에 남한의 지점별 회귀식을 평균하여 북한 지점에 적용하였다. 구축된 회귀식과 시나리오를 적용한 미래 활주로 기온을 산출하고, 활주로 기온이 기상제한치를 하루 1회 이상 벗어나면 제한일수가 증가하는 방식으로 계산했다.

Figure 4는 미래(2090년대) 활주로 기온에 의한 제한일수 변화의 공간분포도를 저탄소(a) 시나리오와 고

탄소(b) 시나리오에 따라 나타낸 것이다. 저탄소 시나리오에서 한반도 지역의 제한일수 변화량은 0~+23.5일로 나타났고 고탄소 시나리오에서는 +2.8~+96.3일로 나타났다. 고탄소 시나리오에서는 전 지역에서 제한일수가 증가하였으며 수도권 지역에서 96.3일로 최대치를 보였다.

Figure 5는 고탄소 시나리오에 대한 활주로 기온에 의한 제한일수의 미래 변화를 지역별로 분석한 것이다. 제한일수는 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며, 특히 2050년대 들어 급격하게 증가하는 추세를 보였다. 미래(2090년대) 운영 제한일수는 한반도 평균 44.6일, 남한 64.4일, 북한 34.4일 증가하였다.

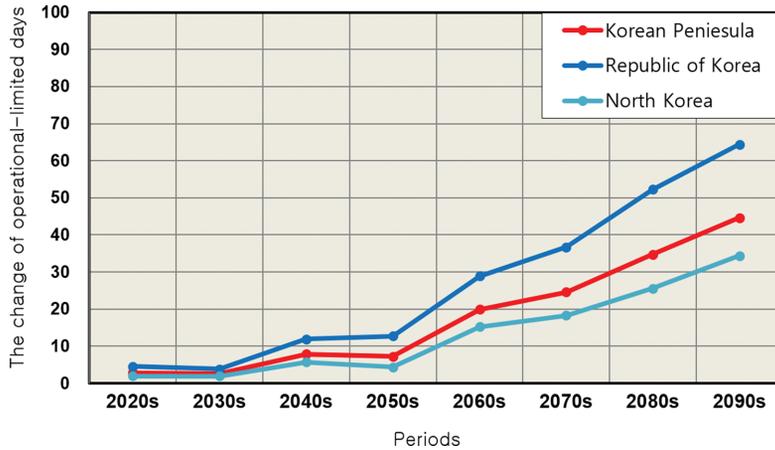


Fig. 5. The averaged decadal variation in anomaly of operational-limited days by runway temperature using SSP5.

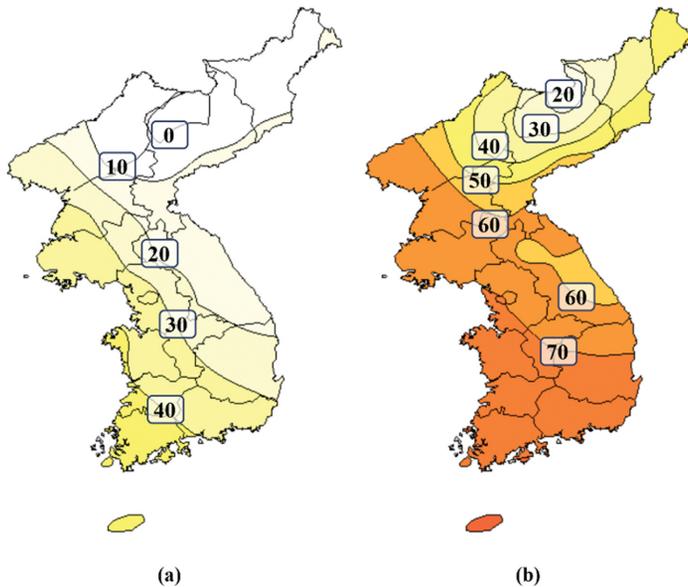


Fig. 6. The anomaly of operational-limited days by WBGT during 2090~2100 using SSP1 (a), and SSP5 (b).

3.2.3 온도지수(Wet Bulb Globe Temperature, WBGT)

온도지수(이하 WBGT)는 전 세계적으로 많이 활용되는 열 관련 지수로 美 국방성에서 개발한 식을 대한민국 공군에서도 사용하고 있다. WBGT가 기상제한치에서 벗어나면 항공기 정비 등 항공기 운영을 위한 지원 여건이 제한되므로 미래 WBGT 변화에 대한 분석은 필수적이다. 산출식은 다음과 같다.

$$WBGT(\text{실외}) = 0.7 \times \text{습구온도} + 0.3 \times \text{흑구온도} \quad (4)$$

하지만 미래 기후변화 시나리오에서 흑구온도를 제공

하지 않으므로, 본 연구에서는 미래 WBGT 산출을 위해 Ono and Tonouchi (2014)가 개발한 추정식을 사용하였다.

$$WBGT = 0.735 \times T + 0.0374 \times RH + 0.00292 \times T \times RH + 7.619 \times SR - 4.557 \times SR^2 - 0.0572 \times WS - 4.064 \quad (5)$$

여기서 T는 기온(°C), RH는 상대습도(%), SR은 일사량(kW m⁻²), WS는 평균풍속(m s⁻¹)이다. 분석 기간동안 WBGT가 기상제한치를 하루 1회 이상 벗어나면 제한일수가 증가하는 방식으로 계산했다. 또한 각 기

Table 3. The correlation coefficients between operational-limited days by WBGT and anomaly of temperature (T), relative humidity (RH) and wind speed (WS) in SSP5.

Period	20s	30s	40s	50s	60s	70s	80s	90s
<i>T</i>	0.74*	0.79*	0.80*	0.79*	0.77*	0.71*	0.74*	0.80*
<i>RH</i>	0.26	0.28*	0.31*	0.34*	0.31*	0.35*	0.26	0.13
<i>WS</i>	-0.35*	-0.32*	-0.30*	-0.26	-0.29*	-0.40*	-0.55*	-0.54*

* 95% significant level

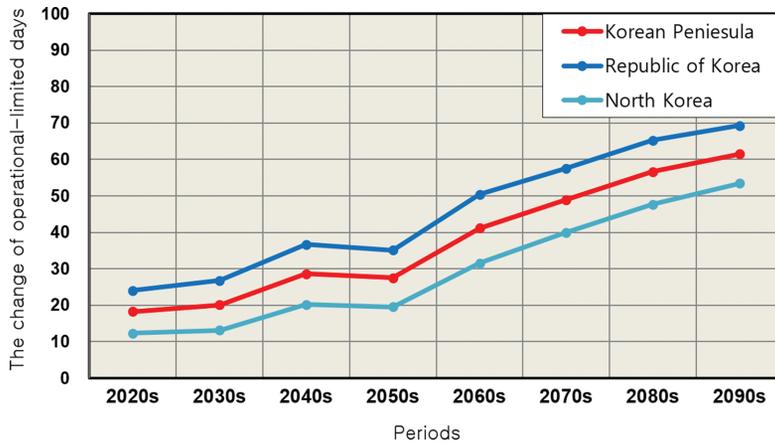


Fig. 7. The averaged decadal variation in anomaly of operational-limited days by WBGT using SSP5.

상 요소와 VMC 제한일수 간의 상관관계를 분석하기 위해 피어슨 상관계수를 사용하였다.

Figure 6은 미래(2090년대) WBGT에 의한 제한일수 변화의 공간분포도를 저탄소(a) 시나리오와 고탄소(b) 시나리오에 따라 그린 것이다. 저탄소 시나리오에서 한반도 지역의 제한일수 변화량은 0~+44.1일로 나타났다. 고탄소 시나리오에서는 전 지역에서 제한일수가 증가하였고 주로 전라, 경상 지역에서 두드러져, 경남 지역에서 79.4일로 최대치를 보였다.

Table 3은 미래(2020~2090년대) WBGT에 의한 제한일수와 제한에 영향을 미치는 기상 요소인 기온(T), 상대습도(RH), 풍속(WS)과의 상관관계를 보인 것이다. 제한일수는 기온과의 상관관계에서 상관계수가 0.7~0.8로 강한 양의 상관관계를 보였고 상대습도와는 상관계수가 +0.1~0.3으로 약한 양의 상관관계를 보였으며, 풍속은 상관계수가 -0.3~-0.5로 음의 상관관계를 보였다. 즉 WBGT에 의한 제한일수는 기온과 상대습도가 높을수록, 풍속이 약할수록 증가하는 경향을 보였으며 기온과의 상관관계가 가장 높은 것으로 분석되었다.

Figure 7은 고탄소 시나리오에 대해 WBGT에 의한 제한일수의 미래 변화를 지역별로 분석한 것이다. 제

한일수는 2020년대부터 지속해서 증가하는 추세를 보였으며 특히 2050년 이후 급격하게 증가하는 형태를 보였다. 미래(2090년대) WBGT에 의한 운영 제한일수는 한반도 평균 61.5일, 남한 69.3일, 북한 53.4일 증가하였다.

4. 결 론

이 연구에서는 저탄소(SSP1), 고탄소(SSP5) 배출 시나리오를 사용하여 국립기상과학원에서 생산한 HadGEM3-RA 모델 자료를 활용하여 VMC, 활주로 기온, WBGT 등 3개의 항공기 운영 주요 영향 요소의 미래 변화 경향을 분석하였다. 이를 위해 한반도 내 55개의 주요 지점을 선정했고, 지점별 항공기 운영 영향 요소와 기상제한치를 적용하여 미래 제한일수를 산출했다.

VMC 제한일수는 시정으로 분석했으며, 기온이 상승하거나 상대습도가 감소하면 증가한다. 미래 VMC 제한일수는 저탄소에서는 -17.9~+7.6일, 고탄소에서는 -46.8~5.4일 변화했으며, 2090년대 평균 제한일수는 한반도 지역으로 25.9일로 분석(고탄소 기준)되었다. 즉, 미래 VMC 제한일수는 현재보다 줄어들어 항공기 운영 환경은 현재보다 양호해질 것으로 판단되었

다. 미래 활주로 기온 제한일수는 저탄소에서는 0~+23.5일, 고탄소에서는 +2.8~+96.3일 변화했으며, 2090년대 평균 제한일수는 한반도 지역으로 44.6일로 분석(고탄소 기준)되었다. 미래 WBGT 제한일수는 저탄소에서는 0~+44.1일, 고탄소에서는 +13.3~+79.4일 변화했으며, 2090년대 평균 제한일수는 한반도 지역으로 61.5일로 분석(고탄소 기준)되었다. 활주로 기온과 WBGT 제한일수는 현재보다 증가하여 항공기 운영 환경은 현재보다 악화할 것으로 판단되었다. 또한, 한반도 미래와 현재 제한일수 차이의 공간적인 분포에서는 저탄소 시나리오와 고탄소 시나리오가 유사한 경향을 보였으나, 변화폭은 고탄소 시나리오가 더욱 큰 경향을 보였다.

이번 연구는 기후변화에 따른 미래 한반도 전장 환경 변화와 그로 인한 항공기 운영 영향을 정량적으로 분석했다는 점에서 의미가 있다. 다만, 단일 모델(HadGEM3-RA)만을 사용하여 결과에 대한 불확실성이 높다는 것과 HadGEM3-RA 모델 전망 자료가 지상 자료만 분석 가능하여 항공기가 이동하는 공중 환경 분석이 제한되었다는 점에서 한계가 있다.

향후 연직 3차원까지 분석할 수 있는, 다종(多種) 모델 결과를 활용하여 다양한 고도 및 운영 환경 조건에 관해 분석하는 연구가 필요할 것이다. 또한 시정, 난류 등 항공 기상요소에 대한 최신 연구 결과를 적용한다면 더욱 정확한 항공기상 정보 제공이 가능할 것이다.

REFERENCES

- Coffel, E., and R. Horton, 2015: Climate change and the impact of extreme temperatures on aviation. *Wea. Climate Soc.*, **7**, 94-102, doi:10.1175/WCAS-D-14-00026.1.
- Doran, J. A., P. J. Roohr, D. J. Beberwyk, G. R. Brooks, G. A. Bayno, R. T. Williams, J. M. Lewis, and R. J. Lefevre, 1999: The MM5 at the Air Force Weather Agency - New products to support military operation. *The 8th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Dallas, Texas.
- Eom, H. S., S. Kim, N. S. Seo, J. D. Hwang, B. M. Lim, K. D. Ki, and J. M. Kim, 2015: The Development of Future Defense Climate Index based on RCP Scenario - Runway Temperature. *1st Annual Korea Meteorological Society Conference*, 10-11.
- Gultepe, I., M. D. Müller, and Z. Boybeyi, 2006: A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **45**, 1469-1480, doi:10.1175/JAM2423.1.
- IPCC, 2021: *Summary for Policymakers. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel*. Cambridge University Press, Cambridge, 88 pp.
- KEI, 2011: *Economic analysis of climate change in Korea(II)*. Korea Environment Institute, 75 pp.
- Kim, J.-U., T.-J. Kim, D.-H. Kim, Y.-H. Byun, E.-C. Chang, D.-H. Cha, J.-B. Ahn, and S.-K. Min, 2022: Performance Evaluation and Future Projection of East Asian Climate using SSP Scenario-based CORDEX-East Asia Phase 2 Multi-RCM Simulations. *J. Climate Change Res.*, **13**, 339-354, doi:10.15531/KSCCR.2022.13.3.339.
- Kim, S., H. S. Eom, S. Y. Hong, J. S. Kim, and C. H. Lee, 2014: The Development of Future Defense Climate Index based on RCP Scenario - WBGT. *2nd Annual Korea Meteorological Society Conference*, 497-499.
- Kim, S.-H., J.-H. Kim, H.-Y. Chun, and R. D. Sharman, 2023: Global response of upper-level aviation turbulence from various sources to climate change. *npj Clim. Atmos. Sci.*, **6**, 12 pp doi:10.1038/s41612-023-00421-3.
- Lee, O. J., and S. D. Kim, 2016: Future PMPs Projection under future dew point temperature variation of RCP 8.5 climate change scenario. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **16**, 505-514, doi:10.9798/KOSHAM.2016.16.2.505.
- Lee, T. J., S. H. Park, S. Y. Park, M. J. Kim, G. M. Kang, J. D. Hwang, and S. Kim, 2023: The Impact of climate change on future ground operations. *J. Korea Institute of Military Science and Technol.*, **26**, 431-438, doi:10.9766/KIMST.2023.26.5.431.
- McRae, M., R. A. Lee, S. Steinschneider, and F. Galgano, 2021: Assessing Aircraft Performance in a Warming Climate. *Wea. Climate and Soc.*, **13**, 39-55, doi:10.1175/wcas-d-20-0098.1.
- NIMS, 2020: *The Climate Change Outlook Report 2020 on Korea Peninsula*. National Institute of Meteorological Sciences, 56 pp.
- O'Neill, B. C., E. Kriegler, K. Riahi, K. L. Ebi, S. Hallegatte, T. R. Carter, R. Mathur, and D. P. Vuuren, 2014: A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, **122**, 387-400, doi:10.1007/s10584-013-0905-2.
- Ono, M., and M. Tonouchi, 2014: Estimation of wet-bulb globe temperature using generally measured meteorological indices. *Jpn. J. Biometer.*, **50**, 147-157, doi:10.

11227/seikisho.50.147.

ROKAF, 2016: *Defence Climate Change White Book*.

Republic Of Korea AirForce Weather Group, 237 pp.

Stoelinga, M. T., and T. T. Warner, 1999: Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling

and visibility for an east coast winter precipitation event. *J. Appl. Meteorol.*, **38**, 385-404, doi:10.1175/1520-0450(1999)038<0385:NMSMSO>2.0.CO;2.

WMO, 2021: *The State of the Global Climate*. World Meteorological Organization, 574 pp.