

미래 기후변화로 인해 발생하는 항공기 결항 및 경제적 손실 전망 Projection of Flight Cancellations and Economic Losses Caused by Future Climate Change

이호용* · 김경훈** · 황보종구*** · 김수전****

Lee, Hoyong*, Kim, Kyunghun**, Hwang-Bo, Jong Gu***, and Kim, Soojun****

Abstract

The aviation industry plays an important role in daily life because of the increase of demand attributable to the development of air logistics as well as domestic and foreign tourism. However, the higher frequency of extreme weather caused by climate change has a large adverse effect on the operation of aircraft. As this effect is expected to increase, measures to reduce flight cancellation are needed. Therefore, in this study, the number of future flight cancellations and related economic losses were calculated for 13 domestic airports and six domestic airlines. To calculate the future climate of the airports, we used the recently released Shared Socioeconomic Pathways (SSP) climate change scenario. Then, we applied machine learning and the nearest neighbor with genetic algorithm method for spatial and temporal downscaling, respectively. The calculated results were applied to aircraft cancellation criteria and a damage estimation formula. Depending on the scenario, rainfall intensity increased by 2.02 to 3.54 times and wind speed increased by 1.16 to 1.24 times during 2100 to 2081. Economic losses from aircraft cancellations attributable to future climate increased by up to approximately 8.29 times. The results of this study highlight the necessity of preparing for and responding to climate change within the airline industry.

Key words : Climate Change, Downscaling, Flight Cancellations, SSP Scenarios

요 지

항공운송산업은 국내·외 관광뿐만 아니라 항공물류의 발달로 수요가 증가함으로 생활에서 중요한 역할을 하고 있다. 하지만 기후변화로 인한 극한기상이 빈번하게 발생하여 항공기의 운항에 막대한 악영향을 주고 있다. 기후변화로 인한 극한기상은 더 심각해질 것으로 예상되는 만큼 결항에 대한 피해 대책이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 국내선을 운영하는 13개의 공항과 6개의 항공사를 대상으로 미래의 결항 횟수와 그에 따른 경제적 손실을 산정하였다. 이를 위해 SSP (Shared Socioeconomic Pathways) 시나리오를 이용하여 공간적 축소기법과 시간적 축소기법을 적용하였다. 공간적 축소는 머신러닝을 활용하였고, 시간적 축소는 최근린 방법과 유전자 알고리즘을 이용하였다. 그 결과 시나리오에 따라 강우강도는 먼 미래(2081~2100년도)에 2.02배에서 3.54배 증가하였고, 풍속은 최소 1.16배에서 최대 1.24배의 증가하는 것으로 나타났다. 이에 따라 항공기 결항 기준에 따른 결항의 경제적 손실은 최대 약 8.29배의 증가가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해서 항공 산업에서의 기후변화에 대한 대비 및 대응 대책의 필요성을 제시하고자 하였다.

핵심용어 : 기후변화, 축소기법, 항공기 결항, SSP시나리오

*정회원, 인하대학교 일반대학원 스마트시티공학과 석사과정(E-mail: hy5890@nate.com)

Member, Master's Course, Program in Smart City Engineering, Inha University

**교신저자, 정회원, 인하대학교 공과대학원 토목공학과 박사과정(Tel: +82-32-872-8729, Fax: +82-32-860-7717, E-mail: tgb611@naver.com)

Corresponding Author, Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Inha University

***인하대학교 공과대학원 토목공학과 박사수료(E-mail: hbjong9@kihs.re.kr)

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Inha University

****정회원, 인하대학교 공과대학 사회인프라공학과 교수(E-mail: sk325@inha.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Inha University

1. 서론

항공기는 우리 삶에 있어서 없어서는 안 되는 주요 교통수단으로서 활용되고 있다. 항공협회에서 제공하고 있는 연도별 항공운송 실적에 따르면, 2000년도를 기준으로 2018년 국내선 여객기 항공 운송 실적은 약 140% 증가한 약 3,160만대가 운행되었으며, 국내선 화물기에 경우에는 63%가 증가한 약 27만대가 운행되었다(Korea Civil Aviation Association, 2021). 항공 전문가들에 따르면, 이러한 항공기 이용은 지속적으로 증가할 것이며, 특히 아시아 지역의 경우에는 다른 지역들보다 더 많이 증가할 것으로 전망하였다(Airbus, 2021). 이러한듯 앞으로 우리 생활에 더욱 더 밀접한 관계를 가지는 항공기는 다른 운송 수단들에 비해서 기상에 많은 영향을 받는다. 기후변화로 인해서 전 세계적으로 이상기후의 빈도가 활발해짐에 따라서 항공기 운항에 막대한 악영향을 주고 있다. 한국공항공사에서 제공하는 항공통계자료에 따르면, 2000년도에 기상에 의한 항공기 결항은 전체 결항 횟수의 58%이지만, 2018년에는 1.23배인 71%로 증가한 것을 확인할 수 있다(Korea Airports Corporation, 2021). 이러한 비행기 결항의 증가는 항공사에게 막대한 피해를 야기 시키고, 기후변화로 인해서 더욱 심화될 것으로 보여 이에 대한 대책이 필요하다.

기상현상이 항공기 운항에 미치는 영향을 규명하기 위한 연구는 국내외에서 활발하게 진행되었다. Park et al. (2007)은 인천공항에 발생한 안개발생 사례를 기반으로 안개로 인한 항공기 회항 및 결항의 경제적 손실에 대해서 분석하였으며, Klein et al. (2011)은 항공기 운항 요소, 위기 대응 능력, 항공기 수요, 날씨 등을 고려하여 모델을 만들어서, 기후로 인해서 발생하는 악영향을 정량적으로 분석하였다. Lee et al. (2011)은 각 공항별로 결항 및 지연 사례에 대해서 분석하고, 각 공항별 운항에 영향을 주는 핵심기상요인을 도출하였다. Schultz et al. (2018)은 유럽 항공망에 대해서 각 기상 요소의 영향력을 정량적으로 산정하고 항공기 운항에 영향을 줄 수 있는 기상 요소별 악천후의 기준을 제시하였다. McWilliam et al. (2021)은 로지트 모델을 이용하여 각 기상요소가 항공기 지연 및 결항을 일으킬 확률을 산정하고 이를 기반으로 각 기상 요소의 영향력을 분석하였다. 이외에

도 기후변화 시나리오를 넣어서 미래의 항공기 결항과 이에 따른 경제적 손실에 관한 연구(Koetse and Rietveld, 2009; Goodman and Small Griswold, 2019; Zanin et al., 2020; Lee et al., 2021), 악천후에 대한 대응 전략 연구(Ferguson et al., 2010; Yoo, 2018) 등 다양한 연구들이 진행되었다.

2021년에 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)는 기후변화에 대한 평가보고서인 제6차 평가보고서(Sixth Assessment Report, AR6)를 발표하였다. AR6는 기존 AR5의 기후변화 시나리오에 사회경제구조의 변화를 반영한 새로운 기후변화 시나리오인 공통사회 경제경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSP)를 산출하여 제공하고 있다. 이에 본 연구에서는 AR6의 새로운 기후변화 시나리오를 이용하여 국내선 비행기 결항을 전망하였으며, 이를 바탕으로 결항으로 인해서 항공사에 발생한 경제적 손실을 산정하였다. 결과를 통해서 기후변화로 인한 기상 변화가 항공기 운항 및 항공사 운영에 있어서 미치는 영향을 평가하고자 한다.

2. 방법론

2.1 기후변화 시나리오 및 축소기법

2.1.1 공통사회 경제경로 시나리오

IPCC 제6차 평가보고서에서는 새로운 기후변화 시나리오인 SSP 시나리오를 활용하고 있다. SSP 시나리오는 제5차 평가보고서(AR5)의 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오의 2100년 기준 복사 강제력 강도의 개념과 함께 미래 사회경제 지표의 변화를 미래의 완화와 적응노력에 따라서 5개의 시나리오로 구분될 수 있다(O'Neill et al., 2014). 미래 사회경제 지표로 인구통계, 경제발달, 복지, 생태계 요소, 자원, 제도 등을 다양한 요소를 포함하고 있다. SSP 시나리오의 표준경로는 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5의 4종으로 각 시나리오의 첫 번째 숫자는 사회발전과 온실가스 감축 정도에 따라서 사회경제지표를 나타내며, 두 번째 숫자는 RCP 시나리오와 같이 2100년 기준의 복사 강제력(2.6, 4.5, 7.0, 8.5 W/m²)을 나타낸다(Table 1).

본 연구에서는 SSP2-4.5와 SSP5-8.5를 활용하여 미래의

Table 1. Meanings of SSP Scenarios (National Institute of Meteorological Sciences, 2020)

Scenarios	Meanings
SSP1-2.6	Low-emission scenario of sustainable social economy structure with good adaptability and mitigation of climate change due to reduction of social imbalance and rapid development of eco-friendly technology
SSP2-4.5	With the socioeconomic scenario of moderate growth, the level of climate change mitigation and socioeconomic development is assumed to be intermediate
SSP3-7.0	Scenarios of socioeconomic structures that are vulnerable to climate change due to imbalances in socioeconomic development and institutional restrictions
SSP5-8.5	High emission scenario of socioeconomic structure with good ability to adapt to climate change but low mitigation capacity due to lack of climate policy, fossil fuel-based growth and high human investment

기상에 의한 비행기 결항 횟수를 전망하였다. SSP2-4.5는 4가지 대표 시나리오 중에서 중간에 해당하는 시나리오로 현재의 사회경제경로의 경향성을 그대로 반영하고 있으며, SSP5-8.5는 화석연료의 사용이 높고 무분별한 개발로 인해 기후변화의 영향이 가장 큰 시나리오이다. 두 가지 시나리오를 통해서 현재의 경향성을 유지한 경우와 최악의 경우를 전망하고자 하였다.

2.1.2 축소기법(Downscaling)

기후변화 시나리오는 GCMs (General Circulation Models) 형태의 자료로 제공이 되고 있다. GCMs은 대기, 해양, 빙권 및 지표면의 물리적 과정을 나타내는 전 지구적 수치모델로 온실 가스 농도에 따라 기후 시스템을 분석하여 여러 기후인자들에 대한 값들을 전망한다. GCMs은 3차원의 격자로 구성되어 일반적으로 250~600 km의 해상도로 자료를 제공하고 있다. 따라서 GCMs 자료를 그대로 분석에 사용하기에는 저해상도를 가지고 있기 때문에 이를 축소하는 과정이 필요한데, 이러한 과정에서 사용되는 것이 축소기법이다 (Kim et al., 2014). 축소기법은 축소하고자 하는 요소에 따라서는 공간적 축소(Spatial downscaling)와 시간적 축소(Temporal downscaling)으로 나눌 수 있다. 공간적 축소는 GCMs 자료의 해상도를 고해상도로 변환하는 것이며, 시간적 축소는 GCMs 자료가 제공하고 있는 연단위, 월단위 등을 일단위, 시단위 등 더 작은 시간적 단위로 변환하는 것을 의미한다. 두 가지 축소에 대해서 여러 동역학적 및 통계학적 방법론들이 다양하게 활용되고 있다. 본 연구에서는 기후변화 시나리오를 지점자료로 공간적 축소하기 위해서 머신러닝 기법을 활용하였으며, 비행기 결항을 판단하기 위한 시단위로의 시간적 축소를 실시하기 위해서 최근린 방법과 유전자 알고리즘(Nearest Neighbor-Genetic Algorithm, NN-GA)을 활용한 방법론을 적용하였다.

2.1.3 머신러닝 기반의 공간적 축소

컴퓨팅 기술과 데이터 처리 속도의 발전으로 기존 통계모형들보다 정확도가 높다고 알려진 머신러닝 기법들이 다양한 분야에서 활용되고 있다(Jung et al., 2021). 기후변화 시나리오에 대한 축소기법에서도 Gementic Programming (GP), K-Nearest neighbor (K-NN), Artificial Neural Networks (ANNs), Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF), Gradient Boosting Machine (GBM) 등 다양한 머신러닝 기법들이 활용되었으며, 축소기법이 적용된 결과에서 준수한 성능을 보여주었다(Ghosh, 2010; Pour et al., 2016; Sachindra et al., 2018; Xu et al., 2020).

본 연구에는 기존 연구에서 활용된 머신러닝 기법들 중에서 K-NN, RF, GBM 그리고 SVM을 활용하여, 각 지점이 속한 격자자료를 공간적 축소 기법을 적용하여 지점자료로 변환하였다. 각 기법들에 대한 자세한 설명은 Wang et al. (2018)과

Saadi et al. (2020)을 참고하면 된다. 각 머신러닝 기법들에 대해서 검증 데이터에 대해서 가장 좋은 성능을 보여준 기법을 선정하여 최종적으로 공간적 축소에 활용하였다.

2.1.4 최근린 방법과 유전자 알고리즘을 이용한 시간적 축소

시간적 축소를 수행하기 위해서 Markov chain과 Monte carlo simulation이 결합된 형태의 일기발생기 모형, 전이함수 기법을 활용한 Statistical Downscaling Model (SDSM), 신경망을 활용한 방법론, K-NN 기법, 비정상성 Markov chain model 등 여러 통계 모형들이 제안되어졌다(Kim et al., 2016). 과거 자료의 특성 및 기후변화 시나리오가 가지는 비정상성을 고려하기 위해서 많은 요소들이 활용되었지만 기본적으로 가지고 있는 전제 조건들에 의해서 발생하는 한계점들을 보여주었다. 이러한 문제점을 해결하고자 Kim et al. (2016)은 최근린 방법과 유전자 알고리즘을 활용한 시간적 축소기법을 제안하였다. NN-GA는 상태공간(Phase space) 차원에서의 비선형 시계열 분석에 근간을 두고 있는 최근린 방법론과 대상에게 랜덤성을 부여할 수 있는 유전자 알고리즘이 결합된 방법론이다. NN-GA를 활용할 경우 강수 발생 여부, 강수량의 발생 및 분포, 비정상성 개념 접근, 불확실성 해석 및 공간상관성을 고려한 일 기상계열 발생이 가능하다. NN-GA 기법은 Kim et al. (2016)의 연구를 참고하였다.

2.2 항공기 결항 기준 및 결항에 따른 경제적 손실 산정

2.2.1 항공기 결항 기준

공항 내에 계류 중인 항공기를 포함한 지상의 모든 항공기, 공항시설 및 공항업무와 항공로 상에서 항공기 안전운항에 영향을 미칠 수 있는 기상현상이 발생할 가능성이 있을 경우에 항공기상 특보를 발표하여 항공기의 안전을 관리한다(Aviation Meteorological Office, 2021). 항공기상특보는 총 14가지의 특수 상황들을 포함하고 있으며, 각 요소별 기준은 Table 2와 동일하다.

항공기 결항의 경우에는 항공기상특보 뿐만 아니라 해당 항공기의 운항 노선에 따라서 결항 조건이 다르다. 중장거리 노선의 경우에는 항공기상특보에 포함되어 있는 현상이 1~2일에 걸쳐 비행을 어렵게 하지 않는다면 운항을 진행하고, 단거리 비행 또는 국내선 노선의 경우에는 이륙할 당시의 기상이 결항조건을 만족할 경우에는 결항된다. 본 연구에서는 14가지 기상요소 중에서 강풍과 호우만을 고려하여 항공기 결항을 전망하였다. 두 기상요소의 경우에는 명확한 기준 값을 가지고 있는 것뿐만 아니라 각 공항 주변에 위치한 기상관측소에서 과거부터 현재까지 30년 이상의 시단위 자료를 보유하고 있기 때문이다.

Table 2. Criteria for Aerodrome Warnings (Aviation Meteorological Office, 2021)

Type	Criteria
Tropical cyclone	Strong wind or heavy rain due to tropical cyclones is expected to reach alert levels
Thunderstorm	A thunderstorm occur or is expected at the aerodrome
Heavy snow	Snow fall occur or is expected 3 cm / 24 h or more
Strong wind	Strong wind (10-minute mean surface wind speed with 25 kt or more or gust with 35 kt or more) occur or is expected
Ceiling	It occur or is expected a level below a criterion according to the agreement among the local meteorological authority, the air traffic services authority and aircraft operation at the aerodrome
Low visibility	
Heavy rain	It occur or is expected the rain fall of 30 mm/h or more, 50 mm/3h or more

When the following phenomena occur or are expected

1. Hail
2. Freezing rain
3. Frost
4. Sand or dust up in the air
5. Sand or dust storm
6. Squall
7. Volcanic ash
8. Tsunami
9. Volcanic ash sediment
10. harsh chemical

Table 3. Date of Peak Seasons

Peak seasons	Dates
Beginning of the Year	January 1st
Korean New Year's Day	February 14th - 19th
Independence Movement Day	February 23rd - March 1st
Children's Day	May 4th - 7th
Buddha's Birthday	May 19th - 22nd
Summer Season	July 21st - August 19th
Korean Thanksgiving Day	September 21st - 27th
National foundation Day of Korea & Hangeul Proclamation Day	October 3rd - 9th
Christmas	December 22nd - 25th
End of the Year	December 29th - 31st

2.2.2 결항에 따른 경제적 손실

기상악화로 인해 결항이 발생하여 항공기 이용객들이 항공권 취소를 원하는 경우에는 항공사에서는 전액을 환불하는 것을 원칙으로 하고 있다. 이용객들이 구매하는 항공권에 경우에는 기본 운임비뿐만 아니라 유류할증료, 국내공항 시설이용료 등 다양한 요소들이 포함되고 있고, 결항이 발생하면 이러한 비용을 온전히 항공사에서 책임지게 되어 막대한 경제적 피해가 발생하게 된다. 본 연구에서는 비행기 결항에 의한 항공사의 피해액을 산정하기 위해서 Eqs. (1) and (2)를 활용하였다.

$$\text{경제적 손실} = \text{결항 횟수} \times \text{탑승객 수} \times \text{총 운임} \quad (1)$$

$$\text{총 운임} = \text{운임비} + \text{유류할증료} + \text{공항시설 사용료} \quad (2)$$

예약한 항공기가 결항되는 경우에 해당 비행기를 예약한 모든 고객들이 항공기 취소를 원하는 것으로 가정하였으며, 항공기 탑승객 수 및 운임비는 2018년을 기준으로 선정하였다. 2018년을 기준으로 선정한 이유는 2019년부터 COVID-19

(corona virus disease 19)의 발생으로 인해 항공기 운항 및 이용에 막대한 영향을 받았기 때문이다. 운임비를 각 8개의 항공사에서 제공하는 노선별 날짜별(주중, 주말, 성수기) 항공기 운임비와 유류할증료(5,500원), 공항시설 사용료(4,000원)를 포함하여 산정하였다. 이때 주중은 월~목, 주말은 금~일, 성수기는 Table 3과 같이 구분하였다. 또한 운임비의 경우에는 일반석을 기준으로 산정하였다.

3. 대상지역 및 기상 자료 수집

본 연구는 국내선 항공기를 운영하는 13개의 공항(김포(GMP), 원주(WJU), 대구(TAE), 청주(CJJ), 포항(KPO), 김해(PUS), 제주(CJU), 사천(HIN), 울산(USN), 무안(MWX), 여수(RSU), 광주(KWJ), 군산(KUV))을 대상지역으로 선정하여 분석을 수행하였다(Fig. 1). 인천 공항의 경우는 국내선 비행기보다는 국제선의 비율이 월등히 높기 때문에 이번 연구에서 제외하였다.

기후변화 시나리오에 대해서는 3개의 GCMs 모형(CanESM5,

Table 4. CMIP6 Global Climate Models

Institution ID	Modeling center	Model name	Atmospheric resolution (Lat × Lon)
CCCma	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis, Canada	CanESM5	64 × 128
IPSL	L'Institut Pierre Simon Laplace, France	IPSL-CM 6A-LR	143 × 144
MIROC	National Institute for Environmental Studies, The University of Tokyo, Japan	MIROC6	128 × 256

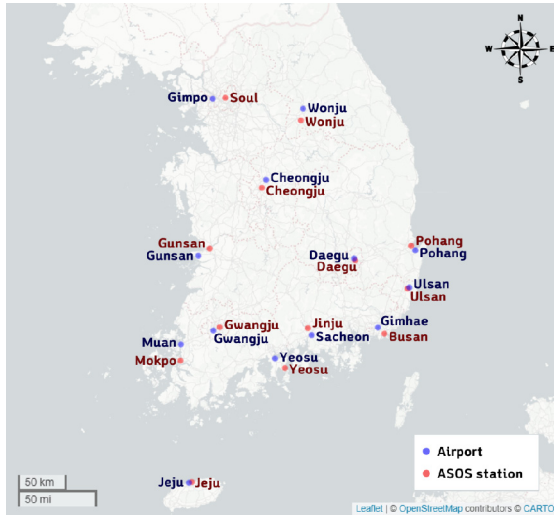


Fig. 1. Locations of Domestic Airports and ASOS Weather Stations

IPSL-CM6A-LR, MIROC6)을 활용하였다(Table 4). 3개의 모형들은 국내 및 동아시아를 대상으로 SSP 기후변화 시나리오를 활용한 연구들에서 가장 많이 활용된 모형들이다(Ha et al., 2020; Jung et al., 2020; Sung et al., 2021). 각 모형들에 대해서 각 11개(psl, ta, ua, zg, sfcWindmax, va, pr, hur, hus, hfls, hfss)의 기후변수를 수집하였다(Table 5). 이들 기상인자들의 경우, 강우와 풍속에 축소기법을 적용하는데 있어서 기존 연구들에서 주로 활용된 기상인자들이다(Anh et al., 2019; Dupre et al., 2020; Wang et al., 2020). 기후변화 시나리오에 축소기법을 적용하기 위해서 각 공항에서 가장 근접해 있는 종관기상관측소(ASOS)의 자료를 활용하였다. 공항에서 관측한 기상자료가 존재하지만, 기후변화 자료를 축소하기 위한 장기간의 기상자료가 존재하지 않기 때문에 종관기상관측소 자료를 사용하였다. 기상청에서 제공하고 있는 여러 기상 인자들 중에서 강수량, 최대 풍속, 평균 기온, 평균 상대습도를 활용하였으며, 모두 기간은 1980년부터 2014년까지 일단위 자료로 구축하였으며, 강수량과 최대 풍속에 경우에는 시간적 축소기법을 적용하기 위해서 시단위 자료도 구축하였다.

결항에 의한 항공사별 피해액을 산정하기 위해서 국토교통부에서 운영하고 있는 항공정보포털시스템(Air portal,

Table 5. Climate Variables

Variable	Definition	Unit
psl	air pressure at sea level	Pa
pr	precipitation flux	kg/m ² /s
ta	air temperature	K
ua	eastward wind	m/s
va	northward wind	m/s
zg	geopotential heights	m
sfcWindmax	Maximum Near-Surface Wind Speed	m/s
hur	relative humidity	%
hus	specific humidity	-
hfls	surface upward latent heat flux	W/m ²

Table 6. Airline ‘A’ Fare (Unit: KRW)

Route	Regular seat fare		
	Weekdays (WKDY.)	Weekends (WKND.)	Peak seasons (PS.)
GMP ⇌ KWJ	71,500	83,500	95,500
GMP ⇌ PUS	77,500	87,500	95,500
GMP ⇌ RSU	82,500	95,500	106,500
GMP ⇌ USN	73,500	84,500	89,500
GMP ⇌ CJU	95,500	109,500	129,500
CJU ⇌ KWJ	65,800	77,500	91,500
CJU ⇌ TAE	83,500	94,500	111,500
CJU ⇌ PUS	75,500	86,500	96,500
CJU ⇌ RSU	69,500	81,500	90,500
CJU ⇌ USN	82,500	92,500	103,500
CJU ⇌ CJJ	85,500	96,500	114,500

<https://www.airportal.go.kr>)에서 운항 노선에 따른 항공기 이용객 수를 조사하였다. 또한 비행기 운항 스케줄은 한국공항공사에서 제공하고 있는 항공기 운항정보(Korea Airport Corporation, 2020)를 공공데이터포털(<https://www.data.go.kr>) 오픈 API (Open Application Program Interface)를 통해 수집하여 활용하였다. 6개 항공사의 운임비를 조사하기 위해서 각 항공사에서 제공하고 있는 국내선 운임표를 수집하였다. 각 항공사의 운임표는 노선별, 날짜별(주중, 주말, 성수기)로 구분되어 있다(Table 6).

4. 적용 및 결과

4.1 축소기법 적용

4.1.1 공간적 축소 모델 선정

ASOS 일단위 자료(평균 기온, 최대 풍속, 평균 상대습도, 강우량)를 종속변수로, 11개의 기후변수를 독립변수로 설정하여 공간적 다운스케일링을 진행하였다. 다른 기상인자들에 비해서 강우량은 무강우량에 의해서 불연속적인 특성을

가지고 있기 때문에 다른 기상인자들과 다르게 전처리 과정을 추가하였다. 각 기상인자에 대한 공간적 축소기법 적용 및 결과는 다음과 같다.

4.1.1.1 평균 기온, 최대 풍속, 평균 상대습도의 공간적 축소

3가지 기상인자 자료들을 Train set과 Test set으로 무작위성을 적용하여 7:3으로 나누고, 4가지 머신러닝 모델(K-NN,

Table 7. Optimal Machine Learning Model for 3 Weather Factors of Each Airport

GCMs	Airport	Model		
		Air temperature	Maximum windspeed	Relative humidity
CamESM5	Gimpo	GBM	GBM	GBM
	Wonju	GBM	GBM	GBM
	Daegu	GBM	GBM	GBM
	Chengju	GBM	GBM	GBM
	Pohang	GBM	GBM	GBM
	Gimhae	GBM	GBM	GBM
	Jeju	GBM	GBM	GBM
	Sacheon	GBM	GBM	GBM
	Ulsan	GBM	GBM	GBM
	Muan	GBM	GBM	GBM
	Yeosu	GBM	GBM	GBM
	Gwangju	GBM	GBM	GBM
	Gunsan	GBM	GBM	GBM
IPSL-CM6A-LR	Gimpo	GBM	GBM	GBM
	Wonju	GBM	GBM	GBM
	Daegu	GBM	GBM	GBM
	Chengju	GBM	GBM	GBM
	Pohang	GBM	GBM	GBM
	Gimhae	GBM	GBM	GBM
	Jeju	GBM	GBM	GBM
	Sacheon	RF	GBM	GBM
	Ulsan	GBM	GBM	GBM
	Muan	GBM	GBM	GBM
	Yeosu	GBM	GBM	GBM
	Gwangju	GBM	GBM	GBM
	Gunsan	GBM	GBM	GBM
MIROC6	Gimpo	GBM	GBM	GBM
	Wonju	RF	GBM	RF
	Daegu	RF	GBM	GBM
	Chengju	RF	GBM	RF
	Pohang	RF	GBM	GBM
	Gimhae	RF	GBM	GBM
	Jeju	GBM	GBM	GBM
	Sacheon	RF	GBM	GBM
	Ulsan	RF	GBM	GBM
	Muan	GBM	GBM	GBM
	Yeosu	GBM	GBM	GBM
	Gwangju	GBM	GBM	GBM
	Gunsan	GBM	SVM	GBM

RF, GBM, SVM)에 적용하여 각 모델별 최적의 매개변수를 도출하여 Test set에 대한 결과를 기반을 최적의 모델을 선정하였다. 이때 비교 통계 지표로는 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 사용하였다(Table 7). 그 결과 CanESM5의 경우 모든 공항과 모든 기상인자에 대해서 GBM 모델이 가장 낮은 오차를 도출하였다. IPSL-CM6A-LR은 사천공항의 기온을 제외하고 GBM이 가장 적합한 모델로 선정되었다. 사천공항의 기온에 대해서는 RF가 가장 낮은 오차를 보여주었다. MIROC6 모델에서는 대부분의 경우에는 GBM이 좋은 결과로 도출하였다.

4.1.1.2 일 강우의 공간적 축소

무강우에 의한 일 강우의 불연속적인 특징은 일 강우량의 공간적 축소에 있어서 여러 문제를 발생시킨다(Xu et al., 2020). 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자 K-NN기반의 강우 및 무강우 분류 모델을 선행적으로 적용하고, 이후 다른 기상인자들과 동일한 방법을 통해서 최적의 공간적 축소 모델을 선정하였다. K-NN 분류 모형을 개발하기 위해서 Train set과 Test set을 7:3의 비율에 따라 무작위성을 적용하여 나누었으며, Train set을 오버샘플링 기법인 SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique)를 적용하여 모델을 생성한 후 Test set으로 f1-score 검증을 하였다. 그 결과 CanESM5의 13개 공항 평균 f1-score는 0.40, IPSL-CM6A-LR은 0.41, MIROC6는 0.41이 도출되었다. 이후 다른 기상인자들 처럼 4개의 서로 다른 머신러닝 기법들에 대해서 적용하였으며, 결과는 Table 8과 동일하다. CanESM5에서는 김해공항에서만, IPSL-CM6A-LR에서는 김포공항과 김해공항에서, MIROC6에서는 포항만 SVM이 선정되었고, 나머지는 모두 GBM으로 선정되었다.

4.1.2 시간적 축소기법 적용 결과

공간적 축소의 결과를 가지고 최근린 방법(NN)과 유전자 알고리즘(GA)을 적용하여 강우와 풍속 기상인자의 시간적 축소를 진행하였다. 먼저 최근린 방법을 이용하여 기후변화 시나리오 결과에 ASOS 관측소(일단위 강우량, 최대 풍속, 평균 기온, 평균 상대습도)와 비슷한 경향을 가지고 있는 일자를 도출한 다음 시간 단위 강우와 최대 풍속의 시계열분포를 결정하였다. 다음으로 유전자 알고리즘의 변이를 적용하여 과거에 발생한 시계열분포가 반복해서 일어나지 않도록 고려해주었다.

각 GCMs 모형별 SSP2-4.5와 SSP5-8.5의 시나리오의 시간 단위 강우량과 평균 풍속을 구한 결과를 비교하기 위해서, 2021년부터 2100년까지 4개의 구간(2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100)으로 나누어서 평균을 산정하였다 (Fig. 2). 먼저 시간 단위 강우강도 결과를 살펴보면, 모든 경우는 먼 미래로 향할수록 강우강도 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 강우강도의 증가에 있어서 MIROC6 모델이 최대 3.28배 증가된 강우강도 값을 전망하였으며, 이에 반해서 IPSL-CM6A-LR에서는 최대 1.88배 증가된 값을 전망하였다. 각 GCMs 모형에서 시나리오에 따른 결과를 비교해보면, 모두 SSP5-8.5에서 더 큰 값들이 전망된 것을 확인할 수 있으며, 시나리오별 전망치의 차이가 먼 미래로 갈수록 커지는 것을 볼 수 있다. 시간 단위 최대 풍속에서는 시간 단위 강우강도와 다른 양상이 나타났다. 모든 GCMs 모형들에서 SSP2-4.5 시나리오에서 전망된 풍속 값이 SSP5-8.5보다 더 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. GCMs 모형별 결과를 비교해 보면, IPSL-CM6A-LR에서 현재 대비 약 1.29배 증가된 풍속이 전망되었으며, CanESM5에서는 약 1.20배 증가된 최대 풍속을 전망하였다. 시간적 축소기법 적용 결과를 통해서 13곳

Table 8. Optimal Machine Learning Model for Rainfall According to Airport and Climate Model

Airport	Climate change model		
	CanESM5	IPSL-CM6A-LR	MIROC6
Gimpo	GBM	SVM	GBM
Wonju	GBM	GBM	GBM
Daegu	GBM	GBM	GBM
Chengju	GBM	GBM	GBM
Pohang	GBM	GBM	SVM
Gimhae	SVM	SVM	GBM
Jeju	GBM	GBM	GBM
Sacheon	GBM	GBM	GBM
Ulsan	GBM	GBM	GBM
Muan	GBM	GBM	GBM
Yeosu	GBM	GBM	GBM
Gwangju	GBM	GBM	GBM
Gunsan	GBM	GBM	GBM

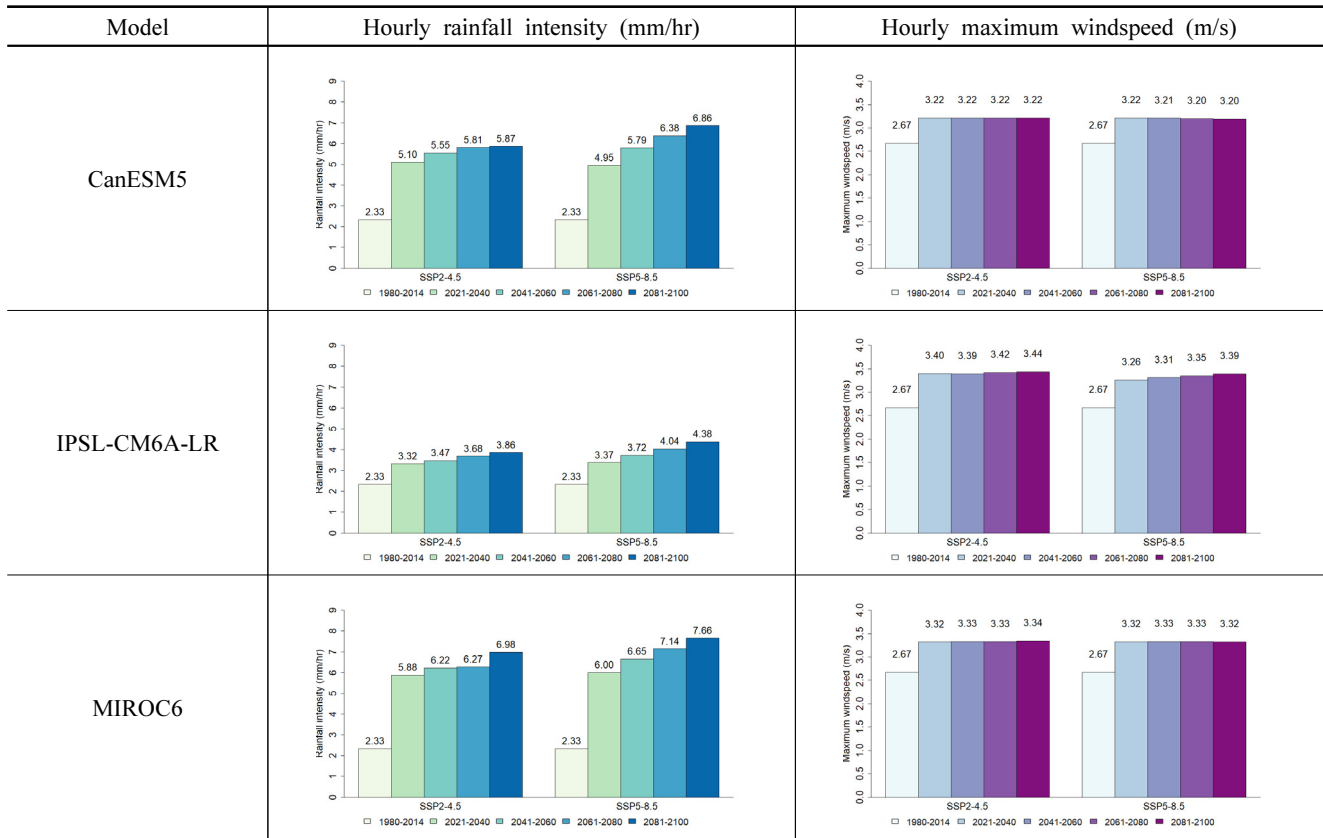


Fig. 2. Results of Temporal Downscaling

지점들의 강우강도 및 풍속이 현재에 비해서 증가되는 것을 확인할 수 있다.

4.2 결항기준에 따른 미래 항공기 결항횟수

4.1절을 통해서 전망된 강우강도 및 풍속을 기반으로 항공기 결항 횟수를 산정하였다. 각 공항의 비행기 스케줄의 경우에는 2018년을 기준으로 2021년부터 2100년까지 동일하게 적용하였으며, 4개의 기간으로 나누어서 GCMs 모형 및 시나리오별 결과를 비교하였다(Fig. 3).

SSP2.4.5 시나리오에 대한 결과를 보게 되면 3가지 GCMs 모형들 모두 먼 미래로 갈수록 항공기 결항 발생 수가 증가되는 것을 볼 수 있다. CanESM5에서는 강우에 의한 발생하는 항공기 결항 횟수가 풍속에 의한 경우보다 압도적으로 많으며, 먼 미래로 갈수록 지속적으로 증가되는 것을 확인할 수 있다. 이와 달리 풍속의 경우에는 증가와 감소가 반복되는 형태를 보이고 있다. MIROC6에서도 강우에 의한 결항 횟수가 압도적으로 더 많다. MIROC6에서도 강우에 의한 결항은 지속적으로 증가하는 것에 비해서 풍속에 의한 경우는 증가와 감소가 반복되어졌다. IPSL-CM6A-LR에서는 앞선 모델들과는 다른 결과를 보여주었다. 풍속에 의한 항공기 결항 횟수가 강우에 의한 경우보다 항상 2배 이상 많이 존재하고 있다. CanESM5와 MIROC6 모델은 유사한 수의 항공기

결항 횟수를 전망한 반면에 IPSL-CM6A-LR에서는 이에 비해서 적은 결항 횟수를 전망하였다.

SSP5-8.5 시나리오 결과에서도 SSP2.4.5 시나리오에서의 결과와 유사한 형태가 나타났다. CanESM5와 MIROC6에서는 강우에 의한 항공기 결항이 월등히 큰 형태로 나타났으며, IPSL-CM6A-LR에서는 풍속에 의한 경우가 더 많이 나타났다. 또한 3가지 모델에서 모두 먼 미래로 갈수록 항공기 결항 횟수가 증가하는 것을 볼 수 있다.

SSP2.4.5와 SSP5-8.5를 비교해보면, CanESM5와 MIROC6 모델에서는 SSP5-8.5에서의 항공기 결항 횟수가 증가한 것을 볼 수 있는 반면에 IPSL-CM6A-LR에서는 결항 횟수가 감소하였다. IPSL-CM6A-LR에서는 기후변화가 더 활발하게 발생하는 SSP5-8.5 시나리오에서 오히려 항공기 결항 횟수가 감소한 이유를 4.1절에서 시간적 축소 결과를 통해서 유추할 수 있다. IPSL-CM6A-LR 모델의 풍속에 대한 시간적 축소 결과를 보게 되면, 모든 기간에 대해서 SSP2.4.5가 더 큰 값을 가지고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 풍속에 의한 항공기 결항이 높은 비율을 차지하고 있는 IPSL-CM6A-LR 모델의 SSP5-8.5시나리오는 더 적은 항공기 결항 횟수가 산정되어 SSP2.4.5보다 적은 항공기 결항이 발생할 것으로 전망되었다.

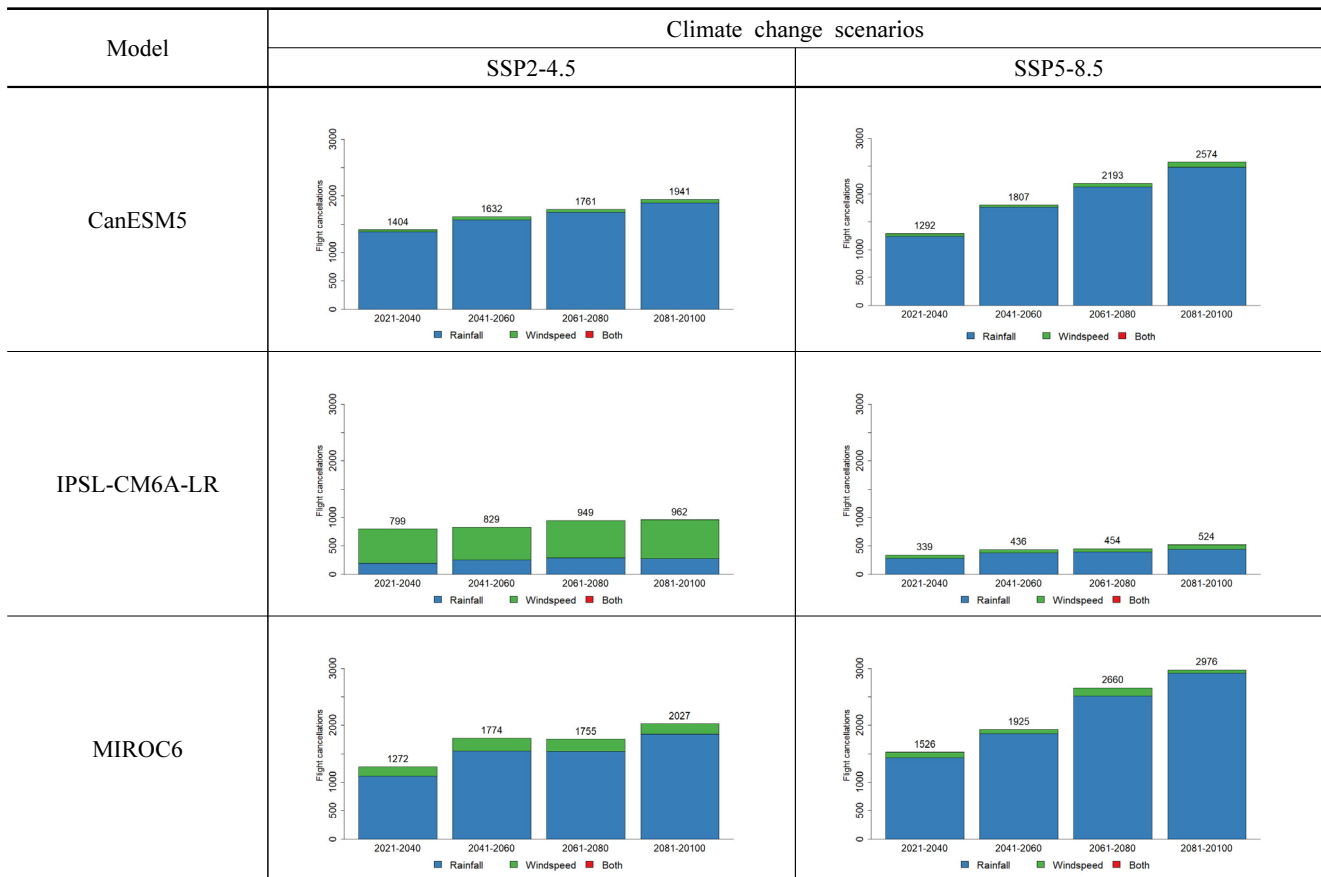


Fig. 3. The Number of Flight Cancellations for Each Model

Table 9. Average Number of Passengers by Flight in 2018

Route	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
GMP ⇌ KWJ	123	128	115	124	125	119	112	115	132	118	123	121
GMP ⇌ PUS	132	141	123	135	130	128	137	117	128	127	131	123
GMP ⇌ TAE	100	136	108	113	141	122	117	117	114	111	103	104
GMP ⇌ HIN	74	85	75	91	94	84	87	83	92	86	89	78
GMP ⇌ RSU	103	113	106	124	119	102	103	103	111	109	119	114
GMP ⇌ USN	105	109	100	109	106	103	101	94	102	98	108	102
GMP ⇌ CJU	207	176	177	208	197	198	175	196	183	192	186	173
GMP ⇌ KPO	66	73	59	63	66	58	56	54	67	54	65	67
PUS ⇌ CJU	182	167	168	195	188	193	172	188	176	184	176	164
CJU ⇌ KWJ	152	144	137	168	158	161	149	163	146	154	145	127
CJU ⇌ KUV	160	141	119	168	160	145	110	139	120	129	122	103
CJU ⇌ TAE	169	153	161	181	173	175	159	171	155	163	166	154
CJU ⇌ MWX	151	126	145	168	158	160	153	154	122	143	145	113
CJU ⇌ HIN	115	104	113	151	158	150	135	137	118	117	118	103
CJU ⇌ RSU	130	117	112	142	143	146	133	148	123	133	123	104
CJU ⇌ USN	140	122	131	149	141	144	133	152	141	147	142	125
CJU ⇌ WJU	131	124	115	143	139	141	114	127	120	122	112	107
CJU ⇌ CJJ	168	157	158	178	175	176	167	172	167	170	163	145

4.3 결항에 따른 경제적 피해

본 연구에서는 2.2.2절의 Eq. (1)을 이용하여 항공기 결항에 따른 항공사 피해액을 산정하였다. 피해액을 산정하기 위해서는 4.2절에서 산정한 항공기 결항 횟수, 2018년 기준의 항공기 탑승객 수와 지정한 8개 항공사의 운임 비용이 필요하다. 항공정보포털에서 제공하고 있는 항공편당 평균 탑승객 수를 각 노선 및 월별로 정리하면 Table 9와 동일하다. 노선 중에서 가장 많은 탑승객을 이용한 노선은 ‘김포⇒제주’였으며, 월별 중에서는 4월이다.

운임 비용의 경우에는 본 연구에서 선정한 6개의 항공사의 운임자료를 기반으로 노선 및 시기별(주중, 주말, 성수기)로 평균 운임비를 산정하였다. 항공기 좌석 중에서 일반석을 기준으로 하였으며, 일부 노선에 대해서 운임비가 나오지 않은 경우에는 노선 운항거리에 따른 운임비의 비율을 적용

하여 산정하고 유류할증료와 공항이용료를 합산하였다 (Table 10).

앞서 산정된 값을 이용하여 항공기 결항에 따른 피해액을 산정하였으며, 4개의 구간으로 나뉘서 산정한 평균의 결과는 Fig. 4와 동일하다.

Eq. (1)을 통해서 산정한 2018년 경제적 피해는 41.17억 원으로 나타났으며, 세가지 GCMs 모형에서 모두 2018년 피해액보다는 더 큰 피해가 발생하는 것으로 전망되었다. MIROC6에서 가장 큰 피해액이 전망되었으며, 다음으로 CanESM5, IPSL-CM6A-LR 순으로 나타났다. IPSL-CM6A-LR에서는 다른 GCMs 모형들에 비해서 월등히 작은 피해액이 산정되었으며, 또한 시나리오별 비교에서 SSP2-4.5에서 SSP5-8.5보다 더 큰 피해액이 전망되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 시나리오에 의해서 나타난 미래 기후 전망치

Table 10. Flight Fare of the 6 Airlines According to Flight Route and Date (Unit: KRW 1,000)

Route	Airline ‘A’			Airline ‘B’			Airline ‘C’			Airline ‘D’			Airline ‘E’			Airline ‘F’		
	WK DY.	WK ND.	PS.	WK DY.	WK ND.	PS.	WK DY.	WK ND.	PS.	WK DY.	WK ND.	PS.	WK DY.	WK ND.	PS.	WK DY.	WK ND.	PS.
GMP ⇒ KWJ	81.0	93.0	105.0	85.0	95.0	110.0	66.5	77.5	89.5	71.5	83.5	95.5	66.5	77.5	89.5	79.0	90.0	98.0
GMP ⇒ PUS	87.0	97.0	105.0	95.0	107.0	117.0	75.5	87.5	97.5	74.5	87.5	95.5	75.5	87.5	95.5	85.0	97.0	105.0
GMP ⇒ TAE	83.0	94.0	106.0	83.0	93.0	107.0	68.5	78.5	90.5	68.5	78.5	90.5	67.5	80.5	91.5	77.0	89.0	94.0
GMP ⇒ HIN	88.0	99.0	111.0	88.0	99.0	114.0	72.5	83.5	97.5	72.5	85.5	97.5	72.5	84.5	97.5	81.0	92.0	102.0
GMP ⇒ RSU	92.0	105.0	116.0	89.0	100.0	116.0	82.5	95.5	106.5	73.5	86.5	99.5	82.5	95.5	106.5	81.0	93.0	104.0
GMP ⇒ USN	83.0	94.0	99.0	94.0	105.0	117.0	73.5	84.5	97.5	74.5	87.5	100.5	74.5	85.5	99.5	81.0	94.0	99.0
GMP ⇒ CJU	105.0	119.0	139.0	101.0	114.0	136.0	75.1	89.5	116.5	79.5	94.5	115.5	79.5	94.5	116.0	88.0	99.0	125.0
GMP ⇒ KPO	87.0	99.0	111.0	88.0	98.0	113.0	82.5	95.5	106.5	72.5	84.5	97.5	72.5	83.5	96.5	80.0	92.0	101.0
PUS ⇒ CJU	85.0	96.0	106.0	83.0	92.0	109.0	65.5	78.8	92.5	73.5	83.5	96.5	74.5	82.5	96.5	79.0	89.0	106.0
CJU ⇒ KWJ	75.3	87.0	101.0	75.0	84.0	98.0	57.5	69.5	82.5	61.5	72.5	80.5	60.0	74.0	82.5	72.0	83.0	81.0
CJU ⇒ KUV	85.0	96.0	108.0	85.0	95.0	110.0	71.5	81.5	92.5	70.5	82.5	93.5	71.4	81.4	92.4	79.0	90.0	97.0
CJU ⇒ TAE	93.0	104.0	121.0	91.0	102.0	118.0	77.5	89.5	99.5	77.5	89.5	98.5	76.5	84.5	99.5	83.0	94.0	107.0
CJU ⇒ MWX	73.0	84.0	94.0	72.0	81.0	93.0	59.5	69.5	77.5	61.5	70.5	76.5	60.0	74.0	82.5	70.0	82.0	78.0
CJU ⇒ HIN	81.0	92.0	103.0	81.0	90.0	104.0	66.5	77.5	87.5	67.5	78.5	87.5	65.5	78.5	88.5	76.0	87.0	90.0
CJU ⇒ RSU	79.0	91.0	100.0	75.0	83.0	96.0	61.5	71.5	80.5	62.5	72.5	79.5	57.5	69.5	80.5	72.0	83.0	81.0
CJU ⇒ USN	92.0	102.0	113.0	93.0	104.0	121.0	80.5	86.5	103.5	76.5	89.5	104.5	76.5	88.5	102.5	84.0	94.0	113.0
CJU ⇒ WJU	100.0	111.0	126.0	102.0	114.0	133.0	84.5	101.5	119.5	82.5	98.5	116.5	84.5	95.5	112.5	89.0	100.0	125.0
CJU ⇒ CJJ	95.0	106.0	124.0	91.0	102.0	121.0	69.6	82.5	104.5	74.5	88.5	105.5	74.5	88.5	104.5	85.0	96.0	113.0

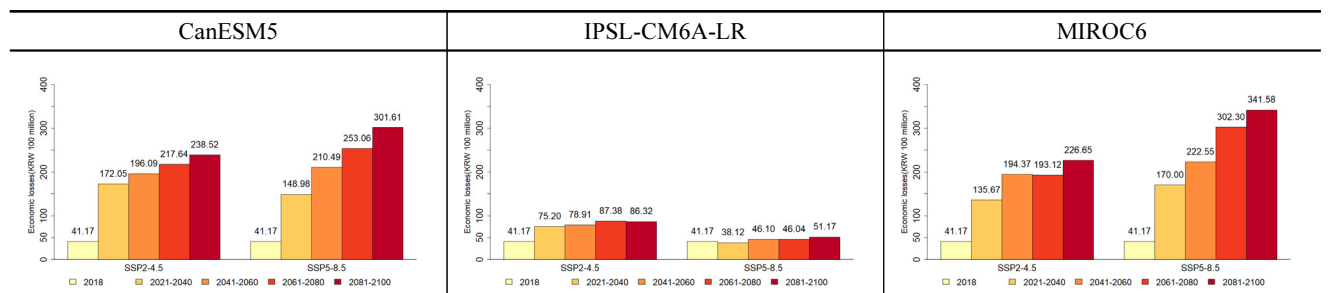


Fig. 4. Airline's Economic Losses Due to Flight Cancellations

에 의해서 나타난 특징으로 볼 수 있다. CanESM5와 MIROC6에서는 먼 미래로 갈수록 경제적 피해액이 증가되는 것을 볼 수 있으며, 2018년 대비해서 먼 미래에 최대 7~8배가 증가된 피해가 발생할 것으로 전망하였다. 이러한 결과를 통해서, 기후변화로 인한 항공기 결항이 미래 항공기 산업에 막대한 피해를 발생시키는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 2022년에 새롭게 제시되는 SSP 기후변화 시나리오를 통해서 기후변화에 따른 항공기 결항 횟수 및 이에 따른 경제적 피해를 전망하였다. 항공기 결항을 발생시키는 강우 및 풍속이 현재 대비 증가함에 따라서 항공기 결항 횟수가 증가하였다. 결항에 따른 경제적 피해액은 SSP2-4.5에서는 최대 약 239백만 원, SSP5-8.5에서는 최대 약 342백만 원으로 산정되었다.

기후변화에 따른 항공기 결항 및 피해액 산정에 있어서 본 연구는 몇 가지 한계점을 가지고 있다. 먼저 기후변화 시나리오는 사용한 모형에 따라서 미래에 대한 다른 전망치를 가지고 있어서 불확실성이 크다. 따라서 기후변화를 고려하여 미래를 전망하는 연구들에서는 다양한 시나리오를 활용하여 분석한다. 본 연구에서도 동일하게 3개의 시나리오를 사용하였지만, 추후 연구에서는 보다 많은 시나리오를 활용하여 불확실성에 대한 문제를 보완하고자한다. 두 번째로 기후변화 시나리오에 대해서 축소기법을 적용할 때 공항에서 관측한 기상자료가 아닌 인접한 기상관측소를 활용하였다. 공항에서 관측한 자료와 인접한 기상 관측소의 자료는 관측 값에서 차이가 난다. 따라서 공항에서 관측한 자료를 활용해야 한다. 그러나 공항관측 자료의 경우에는 일부 공항에서 관측한 자료가 제공되지 않거나 축소기법을 적용하기 위한 충분한 자료를 포함하고 있지 않고 있다. 따라서 공항 기상 관측 자료를 축소기법에서 활용할 수 없었고 가장 유사한 관측 값을 가지고 있는 인접 기상관측소 자료를 이용하였다. 추후 연구에서는 공항 기상 관측 자료를 최대한 확보하여 연구를 진행하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 세 번째로 각 공항별 축소된 기후변화 시나리오에 대해서 항공기상청에서 제공하고 있는 항공기 결항 기준을 적용하여 항공기 결항을 산정하였다. 이때 본 연구에서는 강우와 풍속에 대해서만 산정하였다. 그러나 실제 항공기 결항을 일으키는 원인들을 보게 되면 기상현상에 의한 시정저하가 가장 큰 비율을 차지하고 있다. 해외에서도 기상인자별 기준보다는 기상현상에 의해서 발생하는 시정범위를 기준으로 항공기 결항 여부를 결정한다. 따라서 본 연구에서 산정한 항공기 결항 횟수는 발생할 수 있는 항공기 결항의 일부분만을 산정한 것으로 볼 수 있다. 따라서 추후 연구에서는 여러 기상인자와 시정 부분을 포함하여 항공기 결항을 산정할 필요가 있다. 마지막 한계점으로 항공기 결항에 의한 피해액

산정 시에 미래조건이 모두 2018년과 동일하다는 조건하에 평균값들을 이용하여 피해액을 산정하였다. 항공기 운항 수, 탑승 고객, 항공기 운임비는 여러 경제 및 사회적 요소들에 의해서 영향을 받아서 지속적으로 변화한다. 따라서 이러한 요소들의 변화들 또한 반영하여 피해액을 산정한다면 보다 합리적으로 전망할 수 있을 것으로 판단된다.

미래에 대해서 전망하는 것은 복잡하고 언제나 불확실성을 포함하고 있다. 그러나 미래 전망을 통해서 발생할 수 있는 위험에 대해서 파악한다면 다가올 위험에 대해서 대비할 수 있다. 이에 본 연구에서는 기후변화의 영향을 항공기 결항 피해액에 형태로 정량적으로 산정하였다. 이러한 연구 결과를 통해서 항공 산업에 있어서 기후변화에 대한 대비 및 대응 대책의 필요성을 제시하고자 하였다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 재난피해 복구역량강화 기술개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2021-MOIS36-002).

References

- Airbus. (2021). *Airbus global market forecast 2021-2040*. Airbus. Retrieved April 4, 2022, from <https://www.airbus.com/>
- Anh, D.T., Van, S.P., Dang, T.D., and Hoang, L.P. (2019). Downscaling rainfall using deep learning long short-term memory and feedforward neural network. *International Journal of Climatology*, Vol. 39, pp. 4170-4188.
- Aviation Meteorological Office. (2021). *Manual for aerodrome warnings and wind shear warnings*. Report No. ISO-I-06, Aviation Meteorological Office. Retrieved November 3, 2021, from <https://amo.kma.go.kr/>
- Dupre, A., Drobinski, P., Alonzo, B., Badosa, J., Briard, C., and Plougonven, R. (2020). Sub-hourly forecasting of wind speed and wind energy. *Renewable Energy*, Vol. 145, pp. 2373-2379.
- Ferguson, J., Hoffman, K., Sherry, L., Donohue, G., and Kara, A.Q. (2010). Airline response to changing economics and policy. *2010 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceeding*, J6-1-J6-12.
- Ghosh, S. (2010). SVM-PGSL coupled approach for statistical downscaling to predict rainfall from GCM output. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 115, pp. 1-18.
- Goodman, C.J., and Small Griswold, J.D. (2019). Meteorological impacts on commercial aviation delays and cancellations in the continental united states. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 58, No. 3, pp.

- 479-494.
- Ha, K.J., Moon, S., Timmermann, A., and Kim, D. (2020). Future changes of summer monsoon characteristics and evaporative demand over Asia in CMIP 6 simulations. *Geophysical Research Letters*, Vol. 47, No. 8, pp. 1-10.
- Jung, J., Han, H., Kim, K., and Kim, H.S. (2021). Machine learning-based small hydropower potential prediction under climate change. *Energies*, Vol. 14, No. 12, pp. 1-10.
- Jung, S.M., Hwang, S., Kim, J., Kwak, J., Kim, K., Lee, H.J., et al. (2020). Future inundation risk evaluation of farmland in the moohan stream watershed based on CMIP5 and CMIP6 GCMs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 62, No. 6, pp. 131-142.
- Kim, S., Kwak, J., Kim, H.S., Jung, Y., and Kim, G. (2016). Nearest neighbor-genetic algorithm for downscaling of climate change data from GCMs. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 55, No. 3, pp. 773-789.
- Kim, S., Kwak, J., Noh, H.S., and Kim, H.S. (2014). Evaluation of drought and flood risks in a multipurpose dam under climate change: A case study of Chungju Dam in Korea. *Nat Hazards*, Vol. 73, pp. 1663-1678.
- Klein, A., Lee, R.S., and Robinson, M. (2011). A refined model for identifying unavoidable portion of the impact of weather and other factors on airport operation, *2011 IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference*, 2B4-1-2B4-13.
- Koetse, M.J., and Rietveld, P. (2009). The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 14, No. 3, pp. 205-221.
- Korea Airport Corporation. (2020). *Aircraft operation information. Public data portal*. Retrieved July 6, 2021, from <https://www.data.go.kr/>
- Korea Airports Corporation. (2021). *Aviation statistics*. Retrieved July 10, 2021, from <https://www.airport.co.kr/>
- Korea Civil Aviation Association. (2021). *Aviation market trend & analysis*. Report No. 144, Airportal. Retrieved April 4, 2022, from <https://www.airportal.go.kr/>
- Lee, J., Maria, L., and Vaishnav, P. (2021). The impact of climate change on the recoverability of airline networks. *Transport Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 95, pp. 1-27.
- Lee, J.W., Ko, K.K., Kwon, T.S., and Lee, K.K. (2011). A study on the critical meteorological factors influencing the flight cancelation and delay: Focusing on domestic airports. *Journal of the Korean Society for Aeronautical Science and Flight operation*, Vol. 19, No. 1, pp. 29-37.
- McWilliam, O., Ana, B.R.E., Marcelo, X.G., Mayara, C.R.M., and Rogeria, A.G. (2021). Analysis of airport weather impact on on-time performance of arrival flights for the Brazilian domestic air transportation system. *Journal of Air Transport Management*, Vol. 91, pp. 1-5.
- National Institute of Meteorological Sciences. (2020). *Global climate change forecast report for AR6 response*. National Institute of Meteorological Sciences. April 22, 2021, from <http://www.nims.go.kr>
- O'Neill, B.C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K.L., Hallegatte, S., Carter, T.R., et al. (2014). A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, Vol. 122, pp. 387-400.
- Park, J.K., Jung, W.S., Lee, J.W., Choi, H.J., Kwon, T.S., and Back, J.H. (2007). Analysis of the economic disaster scale for fog case occurred at the incheon international airport. *The Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 15, No. 2, pp. 40-47.
- Pour, S.H., Shahid, S., and Chung, E.S. (2016). A hybrid model for statistical downscaling of daily rainfall. *Procedia Engineering*, Vol. 154, pp. 1424-1430.
- Saadi, Z., Shahid, S., Pour, S.H., Ahmed, K., Chung, E.S., and Yaseen, Z.M. (2020). Multi-variable model output statistics downscaling for the projection of spatio-temporal changes in rainfall of Boreno Island. *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 31, pp. 62-75.
- Sachindra, D.A., Ahmed, K., Rashid, M.M., Shahid, S., and Perera, B.J.C. (2018). Statistical downscaling of precipitation using machine learning techniques. *Atmospheric Research*, Vol. 212, pp. 240-258.
- Schultz, M., Lorenz, S., Schmitz, R., and Delgado, L. (2018). Weather impact on airport performance. *Aerospace 2018*, Vol. 5, No. 4, pp. 1-19.
- Sung, H.M., Kim, J., Lee, J.H., Shim, S., Boo, K.O., Ha, J.C., and Kim, Y.H. (2021). Future changes in the global and regional sea level rise and sea surface temperature based on CMIP6 models. *Atmosphere*, Vol. 12, No. 90, pp. 1-14.
- Wang, B., Zheng, L., Liu, D.L., Ji, F., Clark, A., and Yu,

- Q. (2018). Using multi-model ensembles of CMIP5 global climate models to reproduce observed monthly rainfall and temperature with machine learning methods in Australia. *International Journal of Climatology*. Vol. 38, pp. 4891-4902.
- Wang, Q., Huang, J., Liu, R., Men, C., Guo, L., Miao, Y., et al. (2020). Sequence-based statistical downscaling and its application to hydrologic simulations based on machine learning and big data. *Journal of Hydrology*, Vol. 586, pp. 1-15.
- Xu, R., Chen, N., Chen, Y., and Chen, Z. (2020). Downscaling and projection of Multi-CMIP5 precipitation using machine learning methods in the upper han river basin. *Hindawi Advances in Meteorology*, Vol. 2020, pp. 1-17.
- Yoo, K.E. (2018). Strategies for international aviation to respond to climate change. *Journal of Climate change Research*, Vol. 9, No. 4, pp. 313-318.
- Zanin, M., Zhu, Y., Yan, R., Dong, P., Sun, X., and Wandelt, S. (2020). Characterization and prediction of air transport delays in China. *Applied Science*, Vol. 10, No. 6165, pp. 1-15.

Received	April 21, 2022
Revised	April 25, 2022
Accepted	May 9, 2022

