

Research Article

나래웨더를 위한 궤적기반 항공기상 정보와 항공교통 정보의 통합 방안

김상일¹⁾ · 안도섭²⁾ · 김지연²⁾ · 김승철²⁾ · 한경수^{3)*}

An Integration Approach of Trajectory-Based Aviation Weather and Air Traffic Information for NARAE-Weather

Sang-il Kim¹⁾ · Do-Seob Ahn²⁾ · Jiyeon Kim²⁾ · Seungchul Kim²⁾ · Kyung-Soo Han^{3)*}

Abstract: In support of the National ATM Reformation and Enhancement Plan (NARAE), a trajectory-based aviation weather service is under development through the NARAE-Weather project. Specifically, weather data presented in a standardized digital format facilitates the seamless integration of digital weather data with air traffic information. Thus, this paper introduces an approach that entails structuring numerical model data to integrate aviation weather information and flight trajectory data. The extraction results using structurally transformed data showed superior performance compared to the results extracted from the original data in terms of performance, and this research is poised to enhance the safety and efficiency of airline operations.

Keywords: NARAE-Weather, Numerical model, Aviation weather, Trajectory-based, Integration

요약: 항공기상청은 국가항행계획(National ATM Reformation and Enhancement Plan, NARAE)을 지원하기 위해 NARAE-Weather 프로젝트를 통한 궤적기반 항공기상 서비스를 개발 중에 있다. 특히, 기상자료는 표준화된 형식의 디지털 데이터를 제공하므로 항공기상 데이터와 항공교통 정보와 통합하는 것이 가능하다. 따라서 본 논문에서는 수치모델 자료의 구조화를 통해 기상 정보와 비행 궤적 정보의 데이터 통합을 위한 접근 방식을 제안하였다. 구조 변환된 자료를 활용한 추출결과는 성능 측면에서 원본자료에서 추출한 결과보다 우수한 결과를 보였으며, 해당 연구를 통해 항공 운항의 안전성과 효율성을 향상시키는데 도움이 될 것이다.

주요어: NARAE-Weather, 수치모델, 항공기상, 궤적기반, 통합

Received November 29, 2023; Revised December 4, 2023; Accepted December 5, 2023; Published online December 31, 2023

¹⁾ 한국전자통신연구원 위성통신인프라연구실 선임기술원(Senior Engineer, Satellite Wide Area Infra Research Section, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, Republic of Korea)

²⁾ 한국전자통신연구원 위성통신인프라연구실 책임연구원(Principal Researcher, Satellite Wide Area Infra Research Section, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, Republic of Korea)

³⁾ 부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학과 교수(Professor, Department of Spatial Information Engineering, Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea)

* Corresponding author: Kyung-Soo Han (kyung-soo.han@pknu.ac.kr)

Copyright © 2023 by The Korean Society of Remote Sensing. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

국제민간항공기구(International Civil Aviation Organization, ICAO)는 2030년까지 민간 항공 교통량이 3천만대에서 6천만 대로 두 배 이상 증가할 것으로 예측하고 있다(International Civil Aviation Organization, 2013). 항공 교통관리(air traffic management, ATM)의 패러다임 전환을 주도하기 위해 ICAO는 전지구 항행계획(global air navigation plan, GANP)을 통해 미래 항행 계획에 대한 새로운 비전을 제시하고 각국의 이행을 요구하고 있다. 또한, ICAO는 각국에 GANP 이행을 의무화함으로써 예상되는 항공 교통량 증가를 수용하기 위해 새로운 기술을 위한 글로벌 표준과 로드맵을 제공한다(International Civil Aviation Organization, 2016). 이러한 정책에 따라 미국과 유럽은 각각 Next Generation Air Transportation System (NextGen) 및 Single European Sky ATM Research (SESAR) 프로젝트를 주도하여 ICAO의 항공 교통 관리 지침 이행을 추진하고 있으며, 후발주자로 국내에서도 National ATM Reformation and Enhancement Plan (NARAE) 프로젝트를 진행하고 있다. 이러한 이니셔티브(initiative)는 ICAO의 항공 교통 관리 지침 이행과 항공 교통의 미래를 위한 첨단 기술 개발을 촉진하는 것을 목표로 추진되고 있다. 또한, 핵심 구성 요소는 시공간적으로 이동하는 항공기의 비행 경로를 정의할 때 최적화된 궤적의 전술적, 전략적 계획을 세울 수 있게 자동화 수준을 갖춘 trajectory-based operations (TBO)를 도입하는 것이다(Federal Aviation Administration, 2017).

항공기상은 예측할 수 없는 시공간적 위험요소가 존재하기 때문에 TBO의 주요 과제 중 하나는 기상을 TBO에 통합하는 것이며, 이는 안전과 지연에 모두 영향을 미치기 때문에 주요 제약 사항 중 하나이다. 특히, 항공교통운항 중 기상 현상에 대처가 미비하면 항공편 취소 및 지연으로 인한 막대한 손실이 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 미국의 NextGen Weather로 알려진 항공 기상 서비스 관련 프로젝트가 진행 중이며, 항공기 운항에 영향을 미치는 기상 요인을 고려하여 보다 정확한 기상 예측을 제공하고 항공 교통을 보다 효율적으로 관리하는 서비스를 개발하고 있다(Federal

Aviation Administration, 2023). SESAR 프레임워크 내에는 trajectory based operations-meteorology (TBO-MET), flow management position meteorology (FMPMet) 그리고 probabilistic nowcasting of winter weather for airports (PNOWWA) 등 계절적 날씨와 불확실성이 항공 교통 관리에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되어 왔다 (SESAR, 2023a; SESAR, 2023b).

이처럼 기상 관련 지연, 우회, 사고로 인한 비용을 최소화하려는 ATM의 지속적인 요구는 항공 기상 서비스 분야의 계획 및 개발이 시급하다는 것을 강조하며, 첨단 항공 기상 기술에 대한 미래 수요를 충족하고 지속 가능한 생태계를 구축해야 할 필요성을 대변한다. 특히, 현 시점에 항공안전과 효율성 제고를 위한 항공기상 및 항공교통정보의 융합을 촉진하고 핵심 기술을 확보하는 기술 개발이 중요한 시점이다(Park et al., 2021).

현재 국내에서도 ATM의 요구에 부합하기 위해 항공교통과 항공기상의 통합을 위해 NARAE-Weather 프로젝트가 진행되고 있다. NARAE-Weather의 구성 중 플랫폼서비스의 기능으로 기상자료 서비스를 위해 TBO의 개념을 도입한 4D 궤적기반 항공교통/항공기상 융합 정보 제공기술을 개발 중에 있다. 따라서 본 연구는 NARAE-Weather 프로젝트의 주요 기능 중 하나인 궤적기반 서비스를 위해 공간정보에 기반한 4D 궤적기반 항공기상 서비스에 대한 프로토타입 연구를 진행하였다. 항공기상 데이터의 주요 자료인 Numerical Weather Prediction (NWP) 모델 데이터는 현재 시스템에서 사용할 수 있는 것보다 더 높은 주기의 해상도로 NARAE-Weather 프로젝트에서 산출될 예정이다. 이러한 NWP 자료를 구조화하여 데이터의 저장 공간을 최적화하고, 최적의 데이터 검색 및 처리를 가능하게 할 수 있다. 특히, 사용자 요구 공간정보 기반 기상정보 제공 application programming interface (API) 서비스를 위해서는 단일파일의 빠른 접근과 추출성능을 보장하여야 한다. 따라서 본 연구는 NWP 모델을 활용하여 4D 궤적기반서비스를 위한 경량화 및 구조변경을 통해 빠르게 액세스 할 수 있는 방안을 검토하고 이를 통해 궤적기반 데이터 추출기능 구현을 위한 효과적인 접근방식을 제안하고자 한다.

2. 연구자료 및 방법

2.1. 연구 자료

연구 지역은 2023년 6월 28일 인천국제공항에서 비행 거리 약 6시간 반경 이내의 비행경로를 중심으로 선정하였다. 선정된 6개 비행경로에 필요한 정보는 데이터 수집 기술인 automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B)를 활용해 수집되었고 FlightAware (<https://flightaware.com>)에서 제공된다. ADS-B는 항공기의 위치, 속도, 고도 등 다양한 정보를 수집하는 데 활용되는 기술이다(International Civil Aviation Organization, 2012; Strohmeier et al., 2014). 항공 산업에서 감시 목적으로 널리 사용되고 있으며 상황 인식을 향상시키는 데 유용한 것으로 입증되었다. 특히, 기상 관측 중 온도 및 기압과 관련된 데이터를 수집하는 데에도 활용된다(Stone and Kitchen, 2015). Table 1은 ADS-B에서 취득한 6개의 비행경로에 대한 정보를 나타낸다.

사용된 NWP 모델 데이터는 기상청의 통합모델(UM, N1280)을 기반으로 한 global data assimilation and prediction system (GDAPS) 자료를 기반으로 연구를 수행하였다.

N1280 GRIB2 자료는 대략 10 km 해상도로 전 세계 영역을 격자로 표현되어 있고, 시간해상도는 84시간까지 3시간 간격으로 예측장을 생산하여 예측자료를 제공하고 있다. 또한, 변수는 지표면과 다양한 높이에서의 기온, 바람 성분, 상대 습도 등이 포함되어 있다(Korea Meteorological Administration, 2023). 본 연구에서 사용한 변수는 아래의 Table 2에 제시하였다.

Fig. 1은 연구에 활용된 모델영역과 비행경로를 나타내고 있고, 비행 경로에서 NWP 모델 영역에 해당하는 특정 지리적 영역을 표현한다. 비행경로(궤적 정보)에 해당하는 모델자료의 예측시간은 현재 제공되는 수치모델자료(GADPS) 기준으로 3시간 간격의 예측장을 제공하고 있지만 본 연구에서는 궤적기반 서비스를 위한 데이터 추출기능을 위한 효과적인 접근방식에 초점을 맞추고 있으므로 수치모델자료의 시간 주기는 데이터의 전체 규모만큼 중요하지 않다. 따라서, 추후 NARAE-Weather 프로젝트에서 생산될 모델자료들의 주기를 고려하여 자료의 형식의 변형 없이 3시간 간격의 자료를 동일 파일로 1시간 간격으로 예측자료를 대체하여 활용하였다.

Table 1. Flight path information (28 June 2023)

No.	Departure	Arrival	Duration	Point
KE725 (ICN-KIT)	SEOUL, SOUTH KOREA (Incheon International Airport)	IZUMISANO, JAPAN (Kansai International Airport)	2h	174
KE187 (ICN-TPE)	SEOUL, SOUTH KOREA (Incheon International Airport)	TAIPEI, TAIWAN (Taiwan Taoyuan International Airport)	3h	213
KE623 (ICN-MNL)	SEOUL, SOUTH KOREA (Incheon International Airport)	METRO MANILA, PHILIPPINES (Manila International Airport)	4h	361
KE461 (ICN-DAD)	SEOUL, SOUTH KOREA (Incheon International Airport)	DA NANG, VIETNAM (Da Nang International Airport)	5h	396
KE659 (ICN-BKK)	SEOUL, SOUTH KOREA (Incheon International Airport)	BANGKOK, THAILAND (Suvamabhum Bangkok International Airport)	6h	504
KE643 (ICN-SIN)	SEOUL, SOUTH KOREA (Incheon International Airport)	SINGAPORE (Singapore Changi)	6h	434

Table 2. Parameter of GDAPS model data used in this study

Parameter	Dimension		
	x	y	z
Temperature	2560	1920	26
u-component of wind	2560	1920	26
v-component of wind	2560	1920	26
Vertical velocity	2560	1920	26
Relative humidity	2560	1920	19

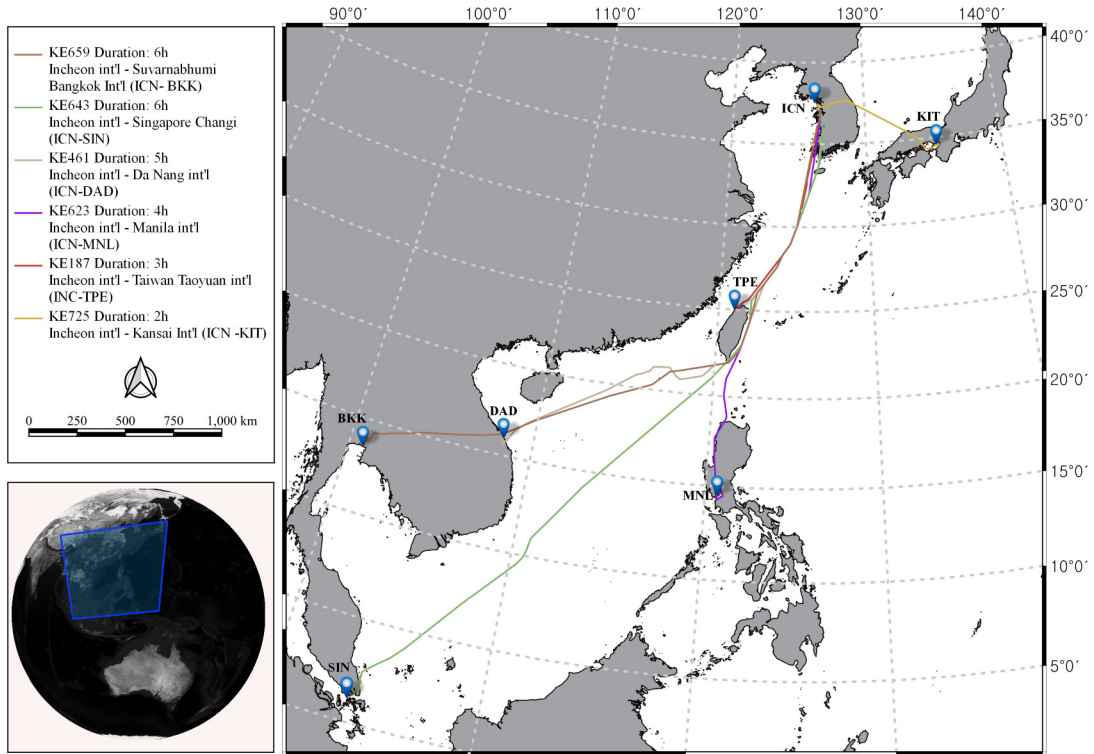


Fig. 1. Flight path corresponding GDAPS data (within 6 hours).

2.2. 연구 방법

2.2.1. 시스템 설정

프로토타입 시스템은 NWP와 비행경로를 통합하도록 설정되었고, 모델 자료가 입력되면 자동적으로 구조 변환을 수행하도록 설정되었다. 또한, 비행 궤적정보(위도, 경도, 고도, 시간)의 쿼리를 통해 구조 변환된 자료에서 궤적기반 기상 변수를 추출하는 기능을 가진다. 프로토타입 시스템의 환경은 윈도우 환경의 자바프로그램을 이용하여 수행되었으며, 32개 코어와 256 GB 메모리 그리고 2.9 GHz CPU를 갖춘 컴퓨팅 시스템에서 수행되었다.

2.2.2. NWP 모델 데이터 구조화 및 궤적기반 추출

NWP 모델은 서로 다른 고도에 걸쳐 위치와 여러 기상 변수(온도, 기압, 바람 성분, 상대습도 등)를 나타내기 위해 두 개의 공간 차원(i, j)과 고도 차원(k)을 포함하는 3차원 격자 시스템을 사용하여 대기를 특성화한다. 이 3D 데이터 큐브를 물리적 기억에 맞게 1D로 변환하는 방식에 따라 데이터 순서가 달라진다. 기존 원격탐

사의 데이터 관리 프로세스에는 이미지 픽셀에 대해 각 밴드의 픽셀 값이 연속적으로 저장하는 band sequential (BSQ), 각 레이어에 걸쳐 각 라인의 픽셀 값이 저장되는 band-interleaved-by-line (BIL), 각 밴드의 픽셀 값이 함께 저장되지만 각 픽셀은 밴드를 교차로 저장하는 band-interleaved-by-pixel (BIP)과 같이 Multiband 이미지들을 조직화 할 수 있는 일반적인 방법들을 활용하여 다양한 형식을 사용하여 메모리 또는 디스크에 저장된다.

이러한 형식은 이미지 픽셀 데이터를 구성하고 저장하는 각기 다른 방법을 나타낸다(Althausen, 2001). 이러한 다양한 형식은 이미지 픽셀을 저장하고 액세스하는 데 유연성을 제공하므로 사용자는 요구 사항에 따라 가장 적합한 포맷을 선택할 수 있다. 포맷 선택은 원하는 액세스 패턴, 계산 효율성, 메모리 제약 등의 요인에 따라 달라진다. Aragón et al. (2019)에 의하면 BSQ와 BIP는 다양한 선형대수(linear algebra) 연산에 적합한 행렬 구조를 제공하는 반면 BIL은 프로그래밍 프로세스가 매우 복잡해져 개발자의 생산성에 부정적인 영향을 미친다는 보고가 있다. 따라서, 본 연구에서는 BSQ와 BIP 형

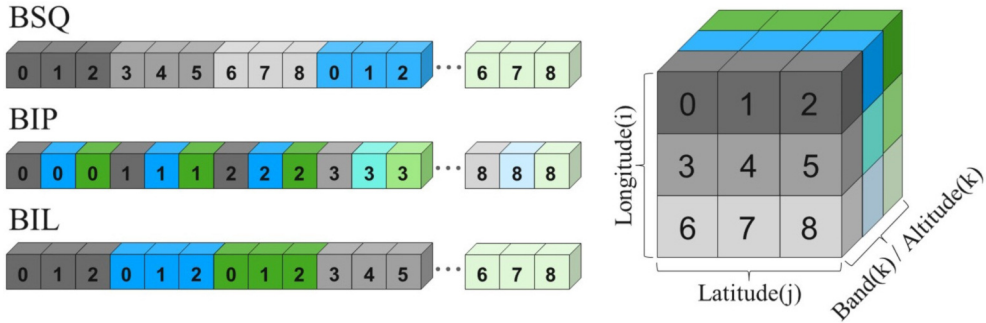


Fig. 2. Visualization of the three NWP model data orderings (BSQ, BIL, and BIP) in memory by representing them with a 3D image having three rows, three columns, and three bands (altitude).

식만을 고려하여 연구를 수행하였다. 또한, BSQ와 BIP 형식으로 Fig. 2와 같이 band (k)를 altitude (k)로 사용하였으며, Table 2에서 제시한 기상 변수 별로 데이터를 구조화하였다.

또한, 4차원 기상 그리드(Grid)는 기상 조건을 나타내는 기상 변수(W_x)와 각각 경도, 위도, 고도 및 시간 간격을 나타내는 인덱스는 i, j, k 및 t 로 정의된다. 따라서 식 (1)에서 제시된 것처럼 4차원 궤적(4DT)은 경도(i), 위도(j), 고도(k) 및 시간 간격(t)으로 정의된 특정 그리드 셀에서 W_x 와 연관된다. 또한 비행시간이 6시간임을 감안하여 가상의 1시간 간격예보장을 바탕으로 비행 궤적 정보에 가장 가까운 시간으로 매핑하였으며, 궤적기반 기상 정보 추출을 4DT- W_x 로 정의하였다.

$$4DT = W_x(i, j, k, t) \quad (1)$$

3. 연구결과 및 토의

3.1. NWP 구조 변환 성능 테스트

구조변환을 위한 성능 테스트를 위해 본 연구에서는 비행 궤적정보와는 무관하게 많은 양의 데이터로 구동이 필요하다. 따라서, Fig. 3은 가상의 수치모델 자료 24시간(1시간 간격) 예측장 24개(1.56 GB × 24)를 기상 변수 별로 구조 변환하는 처리시간을 나타내며, 병렬화를 통한 성능 향상을 보여준다.

전반적으로 hard disk drive (HDD)에서 보다 solid state drive (SSD)에서 성능 향상을 보인 것은 입출력의 병목이 전체 성능에 많은 영향을 미쳤다는 것을 대변한다. 병렬 작업의 수는 컴퓨터 시스템의 최대 코어 수(32개)보다 적은 24개를 사용하였고, SSD 기준으로 처리 성능이 단일 코어 보다 6배 향상되는 것을 관찰할 수 있다. 또한 16개 코어 이상으로 성능이 평균화된 것은 코어의

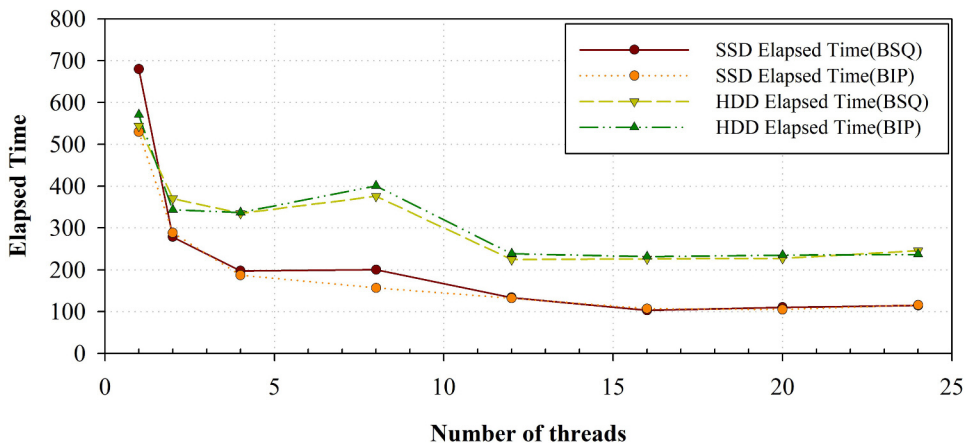


Fig. 3. Improvement in elapsed-time from parallelization of organizing multi-band image data.

약 50%만 필요했음을 나타낸다. BSQ와 BIP 형식으로 각각의 기상변수 5가지(24 × 5)로 구조를 변환하는 성능 차이는 보이지 않았지만 구조변환에 소요되는 시간이 대략 2분 이내에 처리할 수 있기에 Fig. 2에서와 같이 사용자의 빈번한 파일의 접근을 요하는 해당 시스템에 적합한 형식으로 구조화되었음을 시사한다.

3.2. 4DT-Wx 추출 성능 테스트

본 논문에서는 구조 변환된 자료에서 4DT-Wx 추출 성능을 비교하기 위해 원본자료와 비교/분석을 수행하였다. 즉, BSQ와 BIP 형식으로 구조변환한 자료에서 6개의 궤적정보에 해당하는 포인트(Table 1)를 추출하고 동일한 궤적정보를 이용하여 원본파일(grided binary, grib)에서 기상정보를 직접 추출한 방법을 비교/분석하였다. 특히, grib 자료에서 직접 추출하기 위한 방법은 climate data operators (CDO)를 활용하였고, 다양한 기

후 및 NWP 모델에서 생성된 데이터를 처리하고 분석할 수 있는 기능을 제공하는 것으로 잘 알려져 있다 (Schulzweida, 2023). Fig. 4는 CDO를 활용한 원본자료에서 직접 추출한 결과와 구조변환한 데이터에서 추출한 결과를 나타내며, 구조변환을 통한 추출 방법은 모든 궤적에서 대략 0.05초 이내에 추출 결과를 도출하였고, CDO를 활용한 방법은 대략 40초에서 110초 이내에 구동되어 성능차이가 확연히 나는 것을 알 수 있다.

또한 구조변환의 형식을 선정하기위해 BSQ와 BIP의 성능의 차이를 분석하기 위해 궤적 정보(포인트)를 기준으로 50 km, 100 km 반경의 segment를 크기에 해당하는 궤적 정보의 샘플 자료 수를 증가시켜 성능차이를 분석하였다. Fig. 5는 성능차이를 분석하기 위해 BIP와 BSQ의 시간차이를 나타내는 그래프로 양의 값을 가지면 BSQ 형식이 추출 성능이 뛰어나고 음의 값을 가지면 반대로 BIP 형식이 성능이 우수하다는 것을 나타낸다.

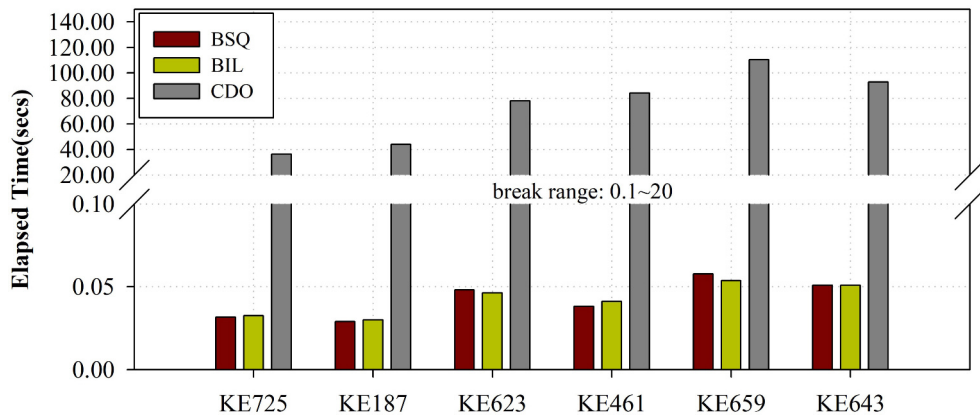


Fig. 4. Elapsed-time of 4DT-Wx integrated queries for 6 flight paths.

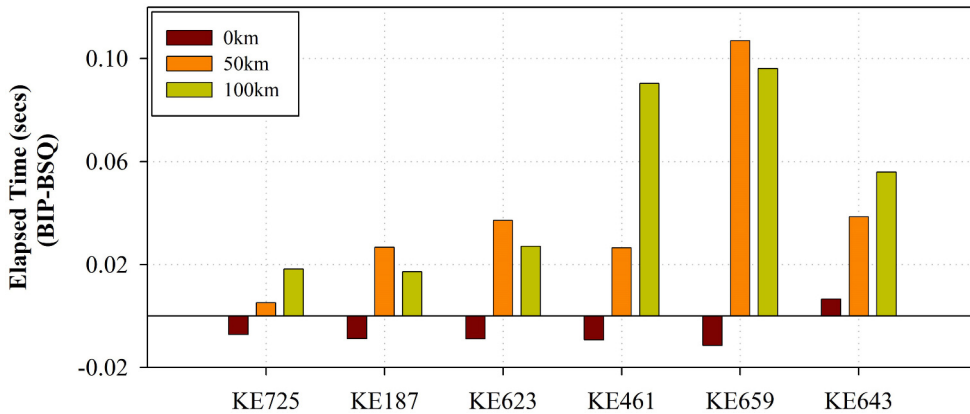


Fig. 5. Difference (BIP-BSQ) in elapsed-time of 4DT-Wx segment integrated queries for 6 flight paths.

궤적 포인트만을 추출할 때는 성능 부분에서 형식 간의 차이가 크게 나진 않았지만, 샘플자료가 늘어날수록 BSQ 형식에서 추출할 때 더 높은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

3.3. 추가 토의

결과적으로 Fig. 6에서는 6개의 비행경로에 해당하는 100 km 반경의 segment와 실제 추출된 결과의 예시(KE623)를 보여준다. KE623 궤적정보에 해당하는 추출 결과에서 고도에 따른 불연속 면이 존재하는 것을 알 수 있고 이는 궤적정보의 시/공간적 범위의 보간 기능이 추가적으로 고려되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서는 GDAPS 자료를 이용하여 연구를 수행되어 동일한 해상도와 동일한 위/경도 투영을 가지고 연구를 수행하였지만, 다른 데이터 소스(지역예보모델, 국지예보모델, 초단기 예보모델 등)를 활용하면 해상도

와 투영법이 다르기 때문에 동일한 비행구간에서 서로 다른 그리드에 매핑되는 문제가 있다. 따라서, 이러한 불일치를 해결하기 위한 추가적인 고려가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

날씨와 비행 구간을 데이터 프레임으로 나타낼 때, 시간과 공간적으로 동일한 지역에 이를 결합함으로써 특정 교통 수요에 따른 날씨의 영향을 용이하게 파악할 수 있다. 다시 말해, 비행 궤적을 기반으로 특정 위치의 기상 상태를 해당 비행 구간과 직접적으로 연결할 수 있다. 따라서 기상과 비행 운항 정보를 통합함으로써, 주어진 항공교통 수요 내에서 기상이 항공 운항에 미치는 영향을 보다 쉽게 분석할 수 있다.

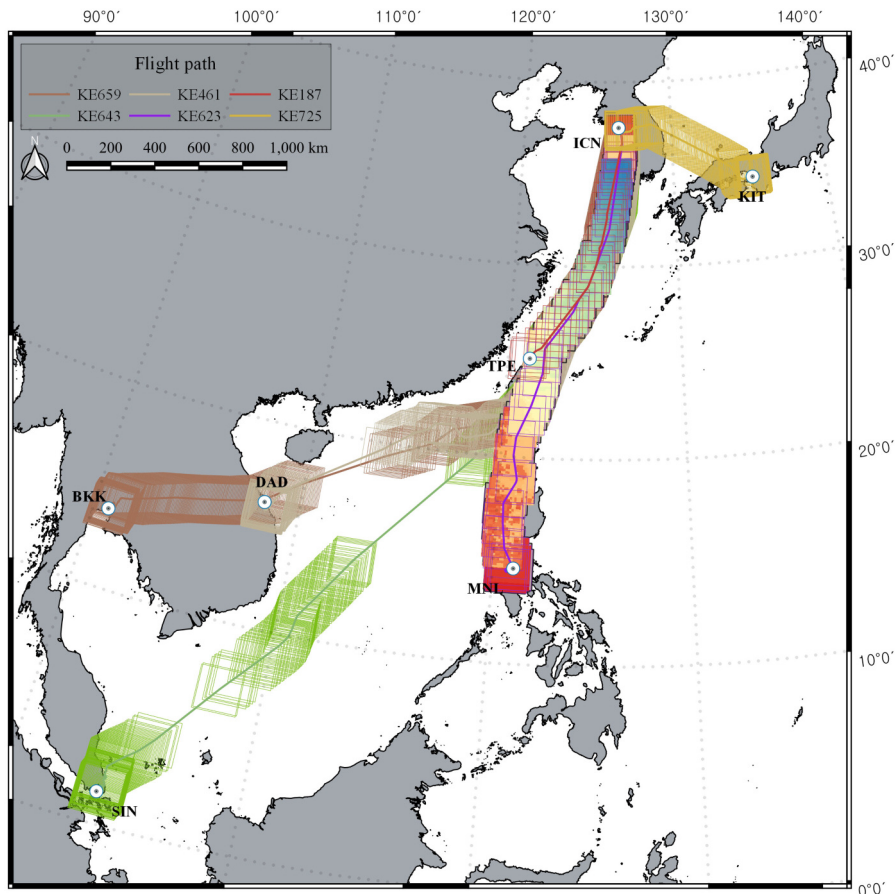


Fig. 6. Mapping for 4DT-Wx segments (100 km radius) and weather (temperature).

향후에는 다양한 모델과 데이터 소스에서 나온 정보를 통합하여 항공기상 자료를 제공하기 위한 “seamless” 항공기상 자료를 위해 필요한 세부적인 기능과 적용방안에 대한 지속적인 연구가 필요하며, 이러한 연구를 통해 기상과 비행 운항 간 상호 작용에 대한 중요한 통찰력을 제공하여 항공 운항의 안전성과 효율성을 향상시키는데 도움이 될 것이다.

사사

이 연구는 기상청 「차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발(NARAE-Weather)」(KMI2022-01810)의 지원을 받아 수행되었습니다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- Althausen, J. D., 2001. What remote sensing system should be used to collect the data?. In: Bossler, J. D., Jensen, J. R., McMaster, R. B., Rizos, C. (eds.), *Manual of geospatial science and technology*, CRC Press, pp. 276–297.
- Aragón, J. S., Ramírez, S. S., López, R. L., Quintín, D. M., Perea, R. S., Martínez, E. J. et al., 2019. Characterizing hyperspectral data layouts: Performance and energy efficiency in embedded GPUs for PCA-based dimensionality reduction. In *Proceedings of the 2019 34th Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS)*, Bilbao, Spain, Nov. 20–22, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/DCIS.2019.49030.2019.8959835>
- Federal Aviation Administration, 2017. *Vision for trajectory based operations* (NextGen Report V2.0). Federal Aviation Administration.
- Federal Aviation Administration, 2023. NextGen programs and resources. Available online: <https://www.faa.gov/nextgen/programs> (accessed on June 10, 2023).
- International Civil Aviation Organization, 2012. *Technical provisions for mode S services and extended squitter* (ICAO Doc 9871-AN/460). International Civil Aviation Organization. <https://store.icao.int/en/technical-provisions-for-mode-s-services-and-extended-squitter-doc-9871>
- International Civil Aviation Organization, 2013. *Global air transport outlook to 2030 and trends to 2040 (CIR 333)*. International Civil Aviation Organization. <https://store.icao.int/en/global-air-transport-outlook-to-2030-and-trends-to-2040-cir-333>
- International Civil Aviation Organization, 2016. *2016–2030 Global air navigation plan* (ICAO Doc 9750-AN/963). International Civil Aviation Organization. <https://www.icao.int/aimavigation/Documents/GANP-2016-interactive.pdf>
- Korea Meteorological Administration, 2023. Weather forecast. Available online: <https://www.kma.go.kr> (accessed on June 10, 2023).
- Park, Y. M., Kang, T. G., Ku, B. J., Kim, S. I., Kim, S. C., Ahn, D. S. et al., 2021. The development strategy of the future aviation weather service technologies and realization of NARAE-Weather. *Electronics and Telecommunications Trends*, 36(4), 48–60. <http://doi.org/10.22648/ETRI.2021.J.360405>
- Schulzweida, U., 2023. CDO: Climate data operators version 2.3.0. Available online: <https://code.mpimet.mpg.de> (accessed on Oct. 30, 2023).
- SESAR, 2023a. Meteorological uncertainty management for Flow Management Positions. Available online: <https://fmp-met.com> (accessed on Sept. 4, 2023).
- SESAR, 2023b. Probabilistic nowcasting of winter weather for airports. Available online: <http://fmispace.fmi.fi/index.php?id=pnowwa> (accessed on Sept. 4, 2023).

Stone, E. K., and Kitchen, M., 2015. Introducing an approach for extracting temperature from aircraft GNSS and pressure altitude reports in ADS-B messages. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32(4), 736–743. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00192.1>

Strohmeier, M., Schäfer, M., Lenders, V., and Martinovic, I., 2014. Realities and challenges of NextGen air traffic management: The case of ADS-B. *IEEE Communications Magazine*, 52(5), 111–118. <http://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6815901>