

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2026.34.3.198>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

협력적 항공교통 흐름관리 시스템 개발 및 시험운용

전대근*, 김현경*, 정명숙**, 오은미**, 이소망**, 김소윤**, 장영훈***, 은연주*, 김혜옥***

Development and Field Demonstration of a Collaborative Tactical Flow Management System

Daekeun Jeon*, Hyounkyoung Kim*, Myeongsook Jeong**, Eun-Mi Oh**, Somang Lee**,
Soyeun Kim**, Younghoon Jang***, Yeonju Eun*, Hyewook Kim***

ABSTRACT

Air traffic demand continues to increase, resulting in growing congestion in airspace and airports. This paper presents the development and field demonstration of a collaborative tactical flow management system for the Korean air traffic environment. The system requirements were derived by considering concentrated international traffic, limited airspace, and regional air traffic flow management coordination. Based on these requirements, the system architecture and core algorithms were developed to provide integrated flight plan processing, four-dimensional trajectory prediction, traffic demand prediction, and traffic management initiative generation. A prototype was deployed at the Air Traffic Command Center and evaluated through field demonstrations. The results confirmed that all system requirements were satisfied, while evaluations by operators with flow management experience demonstrated the system's applicability and usability for air traffic flow management.

Key Words : Air Traffic Flow Management(항공교통흐름관리), Collaborative Decision Making(협력적 의사결정), Traffic Demand-Capacity Balancing(수요-수용량 균형), Trajectory-Based Operations(궤적기반항행)

1. 서 론

최근 항공 교통량의 지속적인 증가와 더불어 공역 및 공항의 운영 환경은 점차 복잡해지고 있다. 특히 아시아·태평양 지역은 전 세계에서 가장 빠르게 항공 수요가 증가하는 지역 중 하나이며(IATA, 2026), 항공로

혼잡과 공항 수용량 한계로 인한 지연 문제 또한 지속적으로 증가하고 있다(ICAO, 2022). 이러한 상황에서 항공교통의 안전성과 효율성을 동시에 확보하기 위해서는 공역 및 공항의 운영 상황을 사전에 예측하고 교통 흐름을 조정할 수 있는 체계적 관리가 요구된다.

우리나라의 항공교통 환경은 공역 구조가 제한적이고 군·민 공역이 혼재되어 있으며, 국제선 중심의 운항 패턴을 갖는 등 복잡한 특성을 가지고 있다. 특히 국제선의 상당 부분이 인천공항에 집중되어 있고, 인접국과의 공역 연계 및 운항 제한의 영향이 국내 항공교통 흐름에 직접 반영된다는 점에서, 국내선 중심의 전통적 흐름관리 방식만으로는 효율적인 대응에 한계가 있다(Jeon et al.,

Received: 7. May. 2026, Revised: 7. Sep. 2026,
Accepted: 11. Sep. 2026

* 한국항공우주연구원 항공혁신연구소 책임연구원

** 한국항공우주연구원 항공혁신연구소 선임연구원

*** 한국항공우주연구원 항공혁신연구소 연구원

연락처 E-mail : bigroot@kari.re.kr

연락처 주소 : 대전광역시 유성구 과학로 169-84

2022).

이러한 배경에서 본 연구에서는 국내 공역 환경과 국제 협력 여건을 동시에 고려할 수 있는 한국형 항공교통 흐름관리 시스템인, 협력적 항공교통 흐름관리 시스템(collaborative tactical flow management system, CTFMS)을 개발하였다.

CTFMS 연구는 국내 항공교통 환경 및 국내외 기술 동향 분석을 통한 연구주제 식별, CTFMS 요구사항 정의(Jeon et al., 2022), 시스템 설계 및 시제품 개발(Jeon et al., 2023, 2024), 그리고 국토교통부 항공교통본부 소속 항공교통통제센터(air traffic command center, ATCC)에서의 현장 시험운용의 단계적 과정을 거쳐 수행되었다. 본 논문에서는 이러한 CTFMS의 개발 및 시험 전 과정의 결과를 제시한다.

본 연구의 주요 기여는 다음과 같다. 첫째, 국내 항공교통 환경을 고려한 CTFMS의 요구사항과 시스템 구조를 제시하였다. 둘째, 항공기의 4차원 궤적 예측과 수요-수용량 분석을 기반으로 다양한 흐름관리 조치를 생성할 수 있는 흐름관리 시스템을 구현하였다. 셋째, 개발된 시스템을 실제 운용환경인 ATCC에 구축하고 현장 시험운용을 수행함으로써 시스템의 요구사항 충족 여부와 실제 운용 가능성을 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 항공교통 흐름관리의 개요와 국내 항공교통 환경을 고려한 CTFMS의 요구사항을 제시한다. 이어서 시스템 아키텍처와 주요 구성 요소 설계, 핵심 알고리즘 개발 내용을 기술하고, 시제품 구현 결과와 현장 시험운용 과정 및 결과를 제시한다. 마지막으로 III장에서는 본 연구의 결론과 향후 발전 방향을 기술한다.

II. 본 론

2.1 항공교통 흐름관리 개요

항공교통 흐름관리(air traffic flow management, ATFM)는 공역 및 공항의 수용량(capacity)을 초과하는 교통 수요(demand)가 발생하지 않도록 항공교통의 흐름을 사전에 조정하는 항공교통관리(air traffic management, ATM)의 핵심 기능 중 하나이다(ICA0, 2018). 공역 및 공항은 시간당 처리 가능한 항공기 수에 제한이 있으며, 이 수용량은 기상, 공역 구조, 관제 여건 등에 따라 변동될 수 있다. 반면 항공

교통 수요는 특정 시간대에 집중되는 경향이 있어, 수요가 수용량을 초과할 경우 공역 혼잡이나 공항 지연이 발생하고 이는 항공기의 체공 증가 및 전체 항공교통 효율 저하로 이어질 수 있다.

ATFM의 주요 목적은 Fig. 1과 같이 공역 및 공항의 수요-수용량 균형을 유지함으로써 항공기 간 안전한 분리를 확보하고 항공교통 시스템 전체의 효율성을 향상시키는 데 있다. 이를 위해 ATFM은 전통적인 항공교통관제(air traffic control, ATC)와 달리 실시간 관제 이전 단계에서 교통 흐름을 사전에 조정한다. 즉, ATC가 항공기의 위치와 속도를 직접 통제하여 안전한 비행을 실시간으로 보장하는 역할을 수행한다면, ATFM은 항공기의 출발 시각 및 경로를 사전에 조정함으로써 공역 전체의 혼잡을 예방하는 역할을 수행한다(ICA0, 2018).

대표적인 흐름관리 조치로는 공항 지연 프로그램(ground delay program, GDP), 공역 흐름 프로그램(airspace flow program, AFP), 지상정지(ground stop, GS), 출발정지(departure stop, DS), 경로 재설정(re-routing) 등이 있다(ICA0, 2018). 이들 조치는 항공기의 공항 출발 시각을 조정하거나 비행 경로를 변경함으로써 특정 구간에 집중되는 교통 수요를 분산시키며, 이를 통해 항공기의 체공을 최소화하고 연료 소모 및 지연을 줄일 수 있다. 이러한 흐름관리 기능을 효과적으로 수행하기 위해서는 교통 수요 예측, 수요-

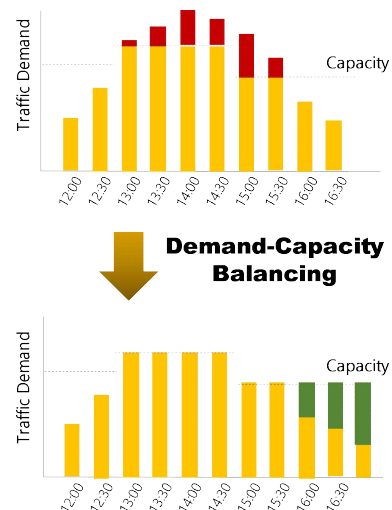


Fig. 1. Demand-capacity balancing (Jeon et al., 2024)

수용량 분석, 흐름관리 조치 생성 및 운전자 의사결정 지원 기능을 포함하는 통합 ATFM 시스템이 요구되며, 이는 ICAO와 Eurocontrol에서도 차세대 ATM 시스템의 핵심 기능으로 제시하고 있다(ICAO, 2018; Eurocontrol, 2024).

2.2 CTFMS 요구사항 정의

ATFM 시스템은 공역 및 공항의 수요-수용량 균형을 유지하기 위해 다양한 기능을 수행한다. 일반적으로 ATFM 시스템은 공역 및 공항의 교통 수요를 예측하고, 이를 수용량과 비교하여 혼잡이 예상되는 경우 앞서 언급한 여러 종류의 흐름관리 조치(AFP, GDP, GS, DS 등)에 따라 조정 이륙 시간(calculated take-off time, CTOT)을 생성하여 제공함으로써 교통 수요를 분산시킨다.

그러나 이러한 일반적인 기능 요구사항만으로는 모든 항공교통 환경에서 효과적인 흐름관리 수행을 보장하기 어렵다. 즉, 각 국가의 공역 구조, 교통 수요 분포, 국제 협력 여건 등에 따라 요구되는 기능의 적용 방식과 중요도가 달라지며, 일부 환경에서는 추가적인 기능이나 보다 정교한 처리 방식이 필요하다. 따라서 국내 항공교통 환경에서 효과적인 흐름관리를 수행하기 위해서는 이러한 환경적 특성을 반영하여 ATFM 시스템의 요구사항을 보다 구체화하고 확장할 필요가 있다.

우리나라 항공교통 환경은 다른 국가와 비교하여 아래와 같은 몇 가지 특징적인 구조를 가진다.

먼저, 국내 항공교통은 국제선 중심의 운항 패턴을 보인다. 2025년 기준, 전체 항공교통 중 약 60%가 국제선이며, 이 중 약 80%가 인천공항에 집중되어 있고, 인천공항의 국제선 비중은 약 99%에 달한다(KCAA, 2026). 이러한 구조는 국내선 중심으로 공항 간 교통이 분산된 미국이나 호주와는 상이하며, 특정 공항에 국제선 교통 수요가 집중된 우리나라의 환경에서는 기존의 국내선 중심 ATFM 방식만으로는 효율적인 흐름관리 수행에 한계가 있다.

둘째, 우리나라 공역은 인천 비행정보구역(flight information region, FIR)의 규모가 상대적으로 협소하고 민·군 공역이 혼재되어 있어 공역 활용에 제약이 존재한다. 특히 인천공항과 FIR 경계 간 거리가 짧은 구조적 특성으로 인해, 항공기의 출발 시간 조정이 공역 혼잡 관리에 직접적인 영향을 미친다(Fig. 2 참조).

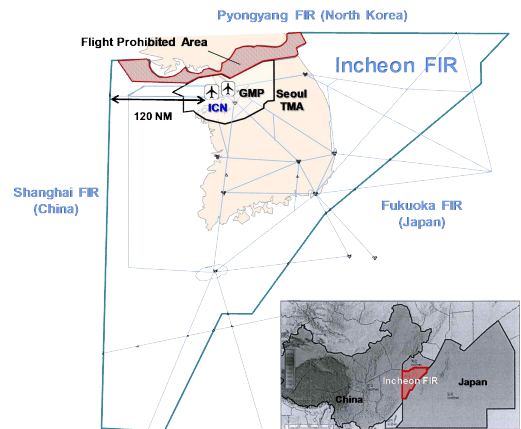


Fig. 2. Air traffic environment in Korea (Jeon et al., 2024)

또한 중국 및 동남아 국가 등 주변국으로부터 임박하고 복합적인 형태의 ATFM 제한사항이 빈번하게 발부되며, 이러한 제한은 예측 가능성이 낮고 다수의 제약 조건이 동시에 적용되는 특징을 가진다. 따라서 단일 구속조건 기반의 전통적인 ATFM 방식으로는 효과적인 대응이 어려우며, 정밀한 4차원 궤적 예측을 기반으로 공항과 공역을 통합적으로 고려하는 스케줄링과 다중 제약조건 처리가 요구된다.

셋째, 주변국과의 항공교통 흐름관리 협력 필요성이 증가하고 있다. 동북아 지역에서는 NARAHG(North Asia Regional ATFM Harmonization Group), 동남아 지역에서는 AMNAC (Asia-Pacific Multi-Nodal ATFM Collaboration)과 같은, 지역적인 ATFM (Regional ATFM) 협력 체계가 운영되고 있으며, 국내 ATFM 시스템 또한 이러한 국제 협력 체계와의 연계를 지원할 필요가 있다(Brown et al., 2022). 특히 국가 간 교통 흐름이 밀접하게 연결된 환경에서는 CTOT 뿐만 아니라 조정 통과 시간(calculated time-over, CTO)을 교환하고 공동으로 흐름관리를 수행하는 것이 매우 중요한 요소로 작용한다.

그러나 현재 국내 ATFM 운영을 지원하는 기존 ATFM 시스템은 국내선 중심의 ATFM 환경을 기반으로 설계된 외산 시스템으로, 우리나라 항공교통 환경의 특수성을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다. 특히 정밀한 4차원 궤적 예측, 공항·공역 통합 스케줄링, 복합 흐름관리 제약조건 처리, 그리고 NARAHG 및 AMNAC과 같은 지역 ATFM 협력 체계 지원 측면에서

기능적 제약이 존재한다.

이상의 배경을 기반으로, 보다 협력적이고 전술적인 항공교통 흐름관리 시스템, CTFMS의 기능 요구사항을 정의하였다.

Table 1에서와 같이, CTFMS는 다양한 형태의 비행계획을 통합적으로 처리하고, 이를 항적자료 및 기상자료와 연계하여 4차원 궤적을 예측할 수 있도록 요구사항을 정의하였다. 또한 예측된 궤적을 기반으로 공항 및 공역의 교통 수요를 산출하고, 이를 활용하여 수요-수용량 균형을 유지하기 위한 흐름관리 기능을 수행하도록 하였다.

흐름관리 기능으로는 AFP, GDP, GS, DS와 같은 전통적인 슬롯 기반 흐름관리 조치를 기본적으로 지원하도록 하였으며, 다수의 공역 제한사항을 동시에 고려하는 다중 구속조건 기반 흐름관리 기능도 포함하였다. 또한 re-routing과 출발 시각 조정 등을 사전에 검토할 수 있는 What-if 분석 기능을 통해 흐름관리사의

의사결정을 지원하도록 하였다.

이와 함께 아태지역 지역 흐름관리 체계인 AMNAC과 동북아 지역 흐름관리 체계인 NARAHG를 지원할 수 있도록 하였으며, 공항 운영 정보와 공역 흐름관리를 연계하기 위한 공항·공역 통합 스케줄링 기능과 슬롯의 자동 및 수동 조정 기능도 요구사항에 포함하였다.

아울러 운영자가 흐름관리 상황을 직관적으로 파악할 수 있도록 공역 및 공항의 교통현황 요약 현시, 수요-수용량 현시, 비행 목록 현시, 지도 기반 공역·공항·항적·궤적 현시 기능 등을 제공하도록 하였다. 또한 이러한 기능 수행을 위해 비행계획, 항적, 기상자료 등의 입력 기능과 흐름관리 조치 결과 출력 기능도 함께 정의하였다.

특히 Table 1에서 음영 표시한 다중 구속조건 기반 흐름관리, what-if 분석, 지역 ATFM 지원, 공항·공역 통합 스케줄링, 슬롯 개선 기능 등은 기존 운용시스템 대비 CTFMS에 특화된 요구사항으로, 우리나라의 복잡한 항공교통 환경에 대응함과 동시에 향후 궤적기반 항행(trjectory based operations, TBO)(ICAO, 2020) 기반의 협력적 흐름관리 체계로 확장하기 위한 핵심 요소라 할 수 있다.

Table 1. Major requirements of CTFMS

구분	요구사항
흐름관리	통합 비행계획 처리
	4차원 궤적 예측
	공항·공역 교통 수요 예측
	공역 흐름 프로그램 (AFP)
	지상 지연 프로그램 (GDP)
	지상 정지 (GS)
	출발 정지 (DS)
	다중 구속조건 고려한 흐름관리 조치
	What-if 분석 (Re-routing 포함)
	아태지역 지역 흐름관리(AMNAC) 지원
	동북아 지역 흐름관리(NARAHG) 지원
	공역·공항 통합 스케줄링
	슬롯 관리 (자동·수동 슬롯 개선 포함)
	공역·공항의 교통현황 요약 현시
현시	공항·공역 수용량 대비 교통 수요 현시
	비행 목록 현시
	공역·공항·항적·궤적 지도 현시
연계	비행계획, 항적, 기상 자료 등 입력
	흐름관리 조치 결과 출력

2.3 CTFMS 설계

2.2절에서 정의한 CTFMS 요구사항을 지원할 수 있도록 시스템을 설계하였다. 본 절에서는 전체 시스템 구조와 각 구성 요소의 설계 내용을 설명한다.

2.3.1 시스템 아키텍처 설계

CTFMS는 다양한 외부 시스템으로부터 데이터를 수집하고 이를 기반으로 흐름관리 기능을 수행하는 구조로 설계되었다. 전체 시스템은 Fig. 3과 같이 외부 자료 연계 시스템(external interface system, EIF), 흐름관리 서버(flow management server, FMS), 흐름관리 터미널(flow management terminal, FMT)로 구성된다.

EIF는 비행계획, 항적, 기상정보 등 다양한 외부 데이터를 수집하고 이를 내부 처리에 적합한 형태로 정제한다. FMS는 정제된 데이터를 기반으로 4차원 궤적 예측, 교통 수요 예측, 흐름관리 조치 생성을 담당한다. FMT는 이러한 분석 결과를 시각화하여 제공하며, 운영자가 교통 상황을 파악하고 흐름관리 조치를 설정할 수 있도록 지원한다.

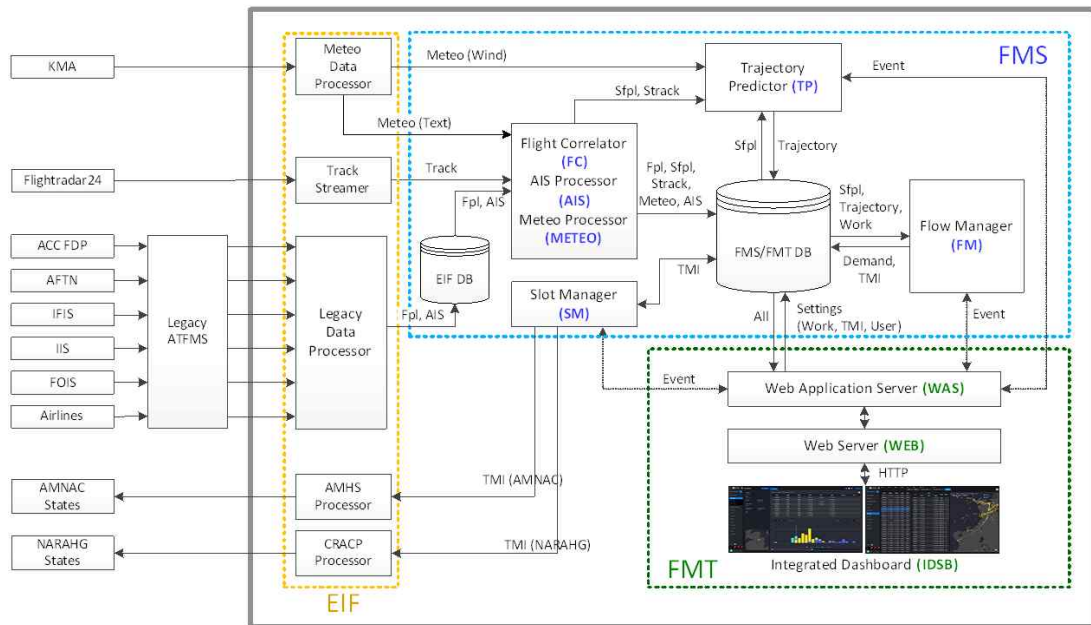


Fig. 3. CTFMS system architecture

이와 같이 CTFMS는 데이터 수집·처리(EIF) - 흐름 관리를 위한 분석·처리(FMS) - 운영자를 위한 시각화(FMT) 기능을 분리하여 시스템의 확장성과 유지보수성을 확보하였다.

2.3.2 외부 자료 연계 시스템(EIF) 설계

EIF는 CTFMS가 외부 시스템으로부터 항공교통 관련 데이터를 수집하고 이를 내부 시스템에서 활용 가능한 형태로 변환하는 기능을 수행한다. 주요 입력 데이터에는 비행계획, 항적, 기상정보 등이 포함되며, 이러한 데이터는 교통 상황 분석과 흐름관리 조치 생성을 위한 기본 자료로 활용된다.

구체적으로, EIF는 항공 고정 통신망(aeronautical fixed telecommunication network, AFTN) 또는 항공 교통센터(area control center, ACC)의 비행계획 처리 시스템(flight data processor, FDP)으로부터 입력되는 비행계획, 인천국제공항공사 및 한국공항공사의 A-CDM(airport - collaborative decision making) 시스템인 IIS(integrated information system)와 IFIS (integrated flight information system)로부터 입력되는 A-CDM 정보, 운항·비행정보 시스템(flight operation and information system, FOIS) 및 항공사로부터 입력되는 스케줄 정보 등을 기존 운용중인

ATFM 시스템으로부터 연계 받아 처리한다. 또한, 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)의 기상자료, Flightradar24의 전세계 항적자료 등 다양한 외부 데이터도 수집·처리한다. 한편 EIF는 입력 데이터 처리뿐만 아니라, 흐름관리 결과를 AMNAC 및 NARAHG 국가로 전송하는 기능도 수행한다.

EIF의 설계에서 중요한 점은 서로 다른 입력 자료 간 시간 정합성과 형식 일관성을 확보하는 것이다. 이를 위해 EIF는 데이터 구조 변환, 오류 검사, 유효성 검증, 누락 데이터 처리와 같은 전처리 기능을 포함하도록 설계되었다.

2.3.3 흐름관리 서버(FMS) 설계

FMS는 CTFMS의 핵심 기능을 수행하는 서버로서, 항공기의 비행계획과 항적 데이터를 연계하여, 이를 바탕으로 4차원 궤적을 계산하고, 구역 및 공항의 교통 수요를 예측하며, 필요 시 흐름관리 조치를 생성한다.

FMS는 flight correlator, trajectory predictor, flow manager, slot manager로 구성된다. Flight correlator는 비행계획과 항적 자료 간의 연계를 수행하여 항공기별 상태를 일관되게 관리한다. Trajectory predictor는 비행계획, 항적, 기상자료, 항공기 성능자료 등을 이용하여 각 항공기의 4차원 궤적을 예측 생

성한다. Flow manager는 예측된 궤적을 이용해 공역 및 공항의 교통 수요를 계산하고, 수용량과 비교하여 수요-수용량 불균형이 발생하는 경우 적절한 흐름관리 조치를 모델링한다. Slot manager는 흐름관리 조치의 결과인 CTOT/CTO 관리 및 AMNAC/NARAHG 기반 조정시간 연계 기능을 지원한다.

FMS 설계의 특징은 궤적 예측 - 교통 수요 예측 - 수용량 비교 - 흐름관리 조치 모델링 - 결과 검토 및 조치 발부라는 운용 흐름을 서버 기능으로 체계화한 것에 있다.

2.3.4 흐름관리 터미널(FMT) 설계

FMT는 운영자가 시스템을 통해 항공교통 흐름관리 기능을 수행할 수 있도록 하는 사용자 인터페이스로서, 접근성과 확장성을 고려하여 웹 기반으로 설계하였다. 이를 통해 별도의 클라이언트 설치 없이 웹 브라우저를 통해 시스템에 접근할 수 있으며, 다수 사용자 동시 접속과 원격 운용 환경을 지원하도록 구성하였다.

FMT에서는 공역 및 공항의 교통 상황을 지도 기반으로 시각화하여 제공하며, 교통 수요 그래프, 항공편 목록, 흐름관리 조치 설정 화면, 통합 현황판, 슬롯 관리 및 국제 조정시간 관리 기능 등을 함께 제공한다. 지도 화면에서는 공역, 공항, 항적 및 예측 궤적을 통합적으로 표시하여 전체 교통 흐름을 직관적으로 파악할 수 있도록 하였으며, 그래프 기반 수요 현시를 통해 혼잡 발생 가능성을 사전에 식별할 수 있도록 하였다.

운영자는 FMT를 통해 흐름관리 조치를 생성·수정·검토할 수 있으며, 조치 적용 전후의 교통 수요 변화를 비교할 수 있다. 또한 What-if 분석 기능을 통해 다양한 시나리오에 대한 흐름관리 조치의 효과를 사전에 평가할 수 있도록 하였다.

2.4 CTFMS 핵심 알고리즘 개발

2.3절의 설계 결과를 바탕으로, 흐름관리 처리를 담당하는 FMS에 포함되는 핵심 알고리즘을 개발하였다. 본 절에서는 비행계획 처리, 4차원 궤적 예측, 교통 수요 예측, 흐름관리 조치 생성 알고리즘의 주요 내용에 대해 설명한다.

2.4.1 비행계획 처리 알고리즘

비행계획 처리 알고리즘은 다양한 외부 시스템으로

부터 수신되는 비행계획 및 항적 데이터를 통합하여 항공교통 흐름관리에서 활용 가능한 형태로 변환하는 기능이다. 항공교통 흐름관리에서 교통 수요 예측의 정확도는 입력 데이터의 일관성과 완전성에 크게 의존하므로, 서로 다른 시스템에서 제공되는 데이터를 통합 관리하는 과정이 필수적이다(Kim and Jeon, 2022).

CTFMS에서는 먼저 ICAO FPL(flight plan), 운항 스케줄, A-CDM 정보 등 다양한 형태의 비행계획 데이터를 수신하면, 구문 오류 검사, 유효성 검증, 데이터 표준화 과정을 거쳐 시스템 내부 형식으로 변환한다. 이후 Callsign, 비행일자, 출발공항 등의 정보를 기반으로 고유 식별자를 생성하고, 동일 항공편에 대한 기존 데이터와 병합하여 통합비행계획을 구성한다(Kim and Jeon, 2023).

통합비행계획은 시간에 따라 지속적으로 갱신되며, 항적 데이터와의 연계를 위해 correlation 과정이 수행된다. Correlation은 callsign, 시간 정보, 위치 정보 등을 기반으로 통합비행계획과 항적 간의 연관성을 판단하여 수행되며, 일정 기준을 만족하는 경우 두 데이터가 연결된다. 이를 통해 항공기의 실제 운항 상태와 계획 정보를 일관된 형태로 관리할 수 있다(Kim and Jeon, 2022).

한편, 흐름관리에서는 모든 항공편에 대해 비행경로 정보가 필요하나, 운항 스케줄과 같이 경로 정보가 포함되지 않은 데이터가 존재하는 경우가 있다. 이를 보완하기 위해 CTFMS에서는 과거 비행계획 데이터를 기반으로 비행경로를 예측하여 적용하였다. 구체적으로, 출발-도착 공항 조합별 과거 비행경로를 군집화하고, 각 군집의 대표 경로를 선정하는 방법을 적용함으로써, 경로 정보가 없는 항공편에 대해서도 현실적인 비행경로를 생성할 수 있도록 하였다(Kim et al., 2024).

이와 같은 통합 처리 과정을 통해 생성된 통합비행계획은 이후 4차원 궤적 예측 및 교통 수요 예측 알고리즘의 입력으로 활용된다.

2.4.2 4차원 궤적 예측 알고리즘

4차원 궤적 예측 알고리즘은 항공기의 비행계획, 항적, 기상 정보를 기반으로 항공기의 미래 위치를 시간 정보와 함께 예측하는 기능이다. 예측된 4차원 궤적은 공역 및 공항 교통 수요 예측의 기초 자료로 활용된다.

CTFMS에서는 Fig. 4와 같이, 항공기의 비행계획,

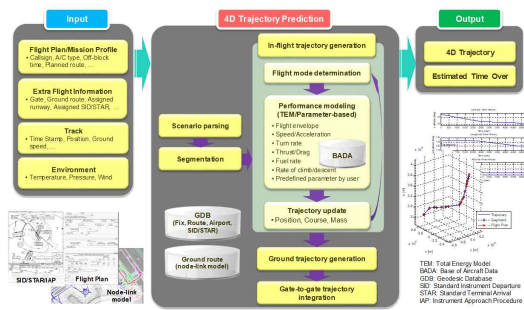


Fig. 4. Four-dimensional trajectory prediction (Jeon et al., 2024)

항적, 풍향·풍속 등 기상자료와 함께 eurocontrol의 BADA(base of aircraft data)를 성능자료로 활용하고, TEM(Total Energy Model)에 기반한 항공기 성능 모델을 적용하여 궤적을 계산하였다(Eurocontrol, 2022).

알고리즘은 입력 - 예측 - 출력의 구조로 구성된다. 먼저 입력 단계에서는 비행계획, 항적 정보, 기상자료와 함께 항공기 성능 데이터가 수집되고, 항공기별 상태 및 운항 조건에 대한 초기 설정이 수행된다.

이후 시나리오 파싱과 세그먼트 분할 과정을 통해 항공기의 상태를 공중(in-flight) 구간과 지상(ground) 구간으로 구분한 후 각각에 대한 궤적을 생성한다. 공중 구간의 궤적 생성에서는 항공기 성능 모델을 기반으로 상승(climb), 순항(cruise), 하강(descend) 단계별 궤적을 계산하며, 풍향 및 풍속에 따른 외란을 반영하여 시간-위치 정보를 동시에 산출한다. 이 과정에서 출발 절차(standard instrument departure, SID), 도착 절차(standard terminal arrival route, STAR), 접근 절차(instrument approach procedure, IAP) 등이 함께 반영된다. 한편, 지상 구간에서는 taxi-out 및 taxi-in 이동 경로와 시간을 모델링하여 공항 내 이동 궤적을 생성한다. 이후 생성된 공중 및 지상 궤적을 통합함으로써 항공기의 출발 게이트부터 도착 게이트까지의 gate-to-gate 궤적 예측이 가능하도록 하였다.

생성된 궤적은 시간 기반의 위치 정보 시퀀스로 구성되며, 이는 이후 교통 수요 예측 및 흐름관리 조치 생성 알고리즘의 입력으로 활용된다. 이를 통해 CTFMS는 공역 및 공항 수준에서 일관된 기준의 정밀한 궤적 기반 분석을 수행할 수 있도록 하였다.

2.4.3 교통 수요 예측 알고리즘

교통 수요 예측은 특정 시간대에 특정 공역이나 공항을 통과하거나 점유할 것으로 예상되는 항공기 수를 산출하는 기능으로, 항공교통 흐름관리에서 수요-수용량 균형을 판단하기 위한 핵심 요소이다.

교통 수요는 예측된 항공기의 시각 정보를 기준으로 일정 시간 구간으로 분할된 윈도우에 항공편을 할당하고, 각 구간별 항공기 수를 집계하는 방식으로 산출된다. 공항의 경우 예상이륙시각(estimated take-off time, ETOT) 또는 예상착륙시각(estimated landing time, ELDT)을 기준으로 항공편을 시간 구간에 할당하여 수요를 계산하며, 공역의 경우 항공기의 진입 시각 또는 점유 시간을 기준으로 수요를 산출할 수 있다. 특히 공역 수요는 항공기가 해당 영역에 진입하는 시각을 기준으로 하는 entry count 방식과 일정 시간 동안 해당 공역을 동시에 점유하는 항공기 수를 기준으로 하는 occupancy count 방식으로 구분될 수 있으며, 적용 방식에 따라 예측 결과가 달라질 수 있다 (Jeong and Jeon, 2023).

CTFMS에서는 4차원 궤적 예측 결과를 기반으로 교통 수요를 산출한다. Fig. 5와 같이, 먼저 예측된 궤적으로부터 공항의 경우 이륙 및 착륙 시각을 추출하고, 공역의 경우 섹터, 항공로, 경로점 등 흐름관리 대상 영역에 대한 진입 및 통과 시각을 계산한다. 이때 공역의 기하학적 형상을 고려하여 궤적과 영역 간의 교차점을 기반으로 진입 및 진출 시각을 산출함으로써, 섹터, 선형 구간, 다각형 영역 등 다양한 형태의 공역에 대해 일관된 방식으로 수요를 계산할 수 있도록 하였다. 이후 수요 예측 시간 구간을 일정 간격의 sub-time window로 분할하고, 각 항공편의 시각 정보를 해당 구간에 할당하여 교통 수요를 집계하는 방식으로 시간대별 교통 수요를 산출한다(Jeong and Jeon, 2022).

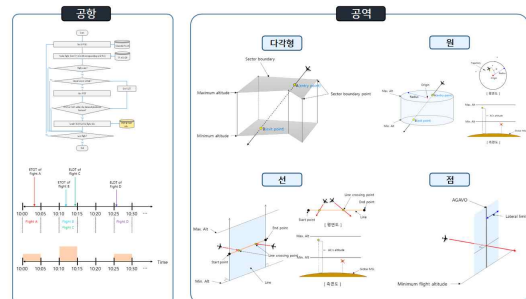


Fig. 5. Air traffic demand calculation

2.4.4 흐름관리 조치 생성 알고리즘

흐름관리 조치 생성 알고리즘은 수요-수용량 비교 분석 결과를 기반으로, Fig. 6과 같이 공항 및 공역의 혼잡을 완화하기 위한 적절한 흐름관리 조치를 생성하는 기능이다.

대표적인 흐름관리 조치로는 Fig. 7과 같이 공역 AFP와 GDP가 있으며, GDP는 적용 대상에 따라 도착 공항의 수용량 제약을 반영하는 GDP-A(GDP-arrival)와 출발 공항의 수용량 제약을 반영하는 GDP-D(GDP-departure)로 구분된다. 이러한 조치는 항공기의 출발 시각을 조정하는 방식으로 구현되며, 그 결과는 CTOT 또는 CTO의 형태로 항공편 운영에 반영된다(Krozel et al., 2006; Cox and Kochenderfer, 2015).

한편, 공항 또는 공역의 수용량이 0으로 제한되는 극단적인 상황에서는 보다 강한 형태의 조치가 적용된다. 공항 수용량이 0인 경우에는 GS를 통해 해당 공항으로 향하는 항공기의 출발이 전면 중지되며, 공역 수용량이 0인 경우에는 DS를 통해 해당 공역을 통과하는 항공기의 출발이 제한된다.

일반적인 흐름관리 방식에서는, GDP-A를 예로 들면, 항공기의 ELDT를 기준으로 분리 간격(예: 시간당 5대)을 만족하도록 시간 슬롯(예: 12:00, 12:12,

12:24, 12:36 등)을 사전에 구성하고, 이를 기반으로 CTOT를 할당한다. 이 경우 ELDT가 사전에 정의된 슬롯보다 조금이라도 지연되면 다음 슬롯으로 배치되어 추가 지연이 발생하는 문제가 있다. 반면, CTFMS에서는 가용 슬롯을 사전에 고정하지 않고, 선행 항공기와의 분리 간격을 만족하는 범위 내에서 항공편별 최적 시점을 동적으로 탐색하여 CTOT를 생성하도록 설계하였다. 예를 들어, 선행 항공기와 후속 항공기의 ELDT가 각각 12:00, 12:13인 경우, 기존 방식에서는 후속 항공기의 슬롯 배정시각이 12:24로 지연되지만, CTFMS에서는 분리 간격을 만족하는 범위 내에서 12:13으로 배정할 수 있다.

또한 우리나라 항공교통 환경에서는 복수의 흐름관리 제한사항이 동시에 적용되는 상황이 빈번하게 발생한다는 점을 고려하여, 이를 처리할 수 있는 흐름관리 조치 생성 알고리즘을 개발하였다. 예를 들어 인천 FIR 경계지점인 AGAVO를 통과하는 항공기에 대해 일정 분리 간격을 적용하는 상황에서, 중국 관제기관의 요청에 따라 특정 도착 공항별 추가 제약조건이 동시에 부과될 수 있다(Lee et al., 2021). 즉, 하나의 항공편이 다수의 흐름관리 조건을 동시에 만족해야 하는 상황이 발생할 수 있다. 그러나 기존 운용 시스템은 이러한 다중 제약 환경을 체계적으로 처리하는 데 한계가 있어, 실제 운용에서는 흐름관리사의 경험적 판단에 기반하여 CTOT를 순차적으로 설정하는 방식으로 운용되고 있다. 본 연구에서는 다양한 제약 조건을 동시에 고려할 수 있는 통합 스케줄링을 위해 혼합정수선형계획법(mixed integer linear programming, MILP) 기반의 최적화 기법과 휴리스틱 기반 기법을 함께 검토하였다(Lee et al., 2021, 2022, 2025). 최적화 기법은 전체 지연 최소화 측면에서 우수한 해를 도출할 수 있으나 계산 복잡도가 높아 실시간 운용에는 한계가 있다. 반면, 휴리스틱 기법은 분리 조건을 만족하도록 순차적으로 슬롯을 할당하는 방식으로 계산 속도가 빠르고 결과의 안정성이 높다. 특히, 고려하는 항공기의 수가 증가할수록 계산 시간이 급격하게 증가하는데, CTFMS에서 상정하는 수준에서는 휴리스틱 기법에 비해 최적화 기법의 계산 시간이 100배 이상의 차이를 보였다. CTFMS에서는 이러한 특성을 고려하여 휴리스틱 기반 알고리즘을 채택하여, 다중 제약조건을 고려한 흐름관리 기능을 구현하였다.

한편, 지역 ATFM 체체인 AMNAC 및 NARAHG를

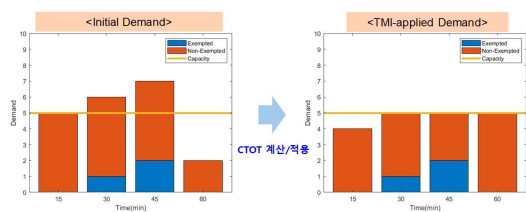


Fig. 6. CTOT calculation and application

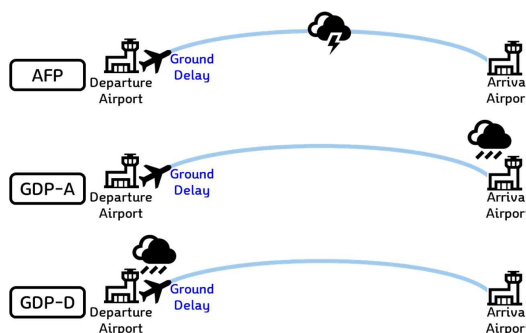


Fig. 7. Slot-based traffic management initiatives

지원하기 위해, 해당 국가에서 요청한 CTOT 또는 CTO를 반영하여 국내 출발 항공기의 CTOT 및 국내 영공을 통과하는 항공기의 FIR 진입 지점에서의 CTO를 산출할 수 있도록 하였다. 또한 국내 공항 및 공역에서 발생하는 수요-수용량 불균형에 대한 흐름관리 조치 역시 AMNAC 및 NARAHG 체계에 따라 CTOT 또는 CTO 형태로 발부할 수 있도록 구현하였다.

공역-공항 통합 스케줄링 기능은 전술적 흐름관리가 요구되는 국내 환경을 고려한 핵심 요구사항 중 하나로, A-CDM에서 제공되는 TOBT(target off-block time), TTOT(target take-off time) 등 공항 운영 정보와 스케줄링 결과가 흐름관리 모델링 및 슬롯 관리 과정에 반영될 수 있도록 알고리즘에 포함하였다.

What-if 기능은 흐름관리사가 다양한 흐름관리 조치 시나리오를 사전에 가정하고, 각 조치에 따른 수요-수용량 변화 및 지연 영향을 분석할 수 있도록 하는 기능으로, 실제 운용 모드와는 독립적으로 수행되도록 구현하였다. 이를 통해 AFP, GDP, re-routing 등 다양한 흐름관리 조치를 적용하기 전에 그 효과를 비교·검토할 수 있으며, 보다 합리적인 의사결정을 지원할 수 있도록 하였다.

2.5 CTFMS 시작품 구현

CTFMS 시작품은 상기 설계 결과를 바탕으로 구현되었으며, 운영자가 실제 항공교통 상황을 기반으로 흐름관리 기능을 시험할 수 있도록 구성되었다. 시작품은 FMS에서 수행한 통합 비행계획 처리, 궤적 예측, 교통 수요 예측, 흐름관리 조치 모델링 결과를 FMT 화면을 통해 직관적으로 제공하는 형태로 구현되었다.

FMT에서는 통합 비행계획 목록, 항적 및 궤적 예측 결과 현시, 공역 및 공항의 교통 수요 현시, 수요-수용량 균형을 위한 흐름관리 조치 생성 및 적용 전후 비교, 슬롯 생성 및 관리, 흐름관리 현황판 등 다양한 기능이 제공된다(Fig. 8~13).

Fig. 8은 통합 비행계획 목록 화면으로, 비행계획과 항적이 통합된 항공편 정보를 제공하며 필터링 및 검색 기능을 통해 대상 항공편을 효율적으로 관리할 수 있도록 구성되었다. Fig. 9는 항적과 예측된 4차원 궤적을 지도상에 중첩하여 표시한 화면으로, 각 경로점에서의 통과 시각을 함께 제공함으로써 항공기의 미래 위치를 시간 기반으로 확인할 수 있다.

Fig. 10은 공역 및 공항의 교통 수요 상세 화면으로, 대상 영역의 위치 정보와 함께 해당 영역을 통과하는 항공편 목록 및 시간대별 수요 분포를 제공한다. 이러한 수요 현시는 공역 및 공항의 혼잡도를 직관적으로 파악하고 흐름관리 조치 필요성을 판단할 수 있도록 구성되었다.

Fig. 11은 흐름관리 조치 생성 및 분석 화면으로, AFP 및 GDP 적용을 위한 수용량 설정과 함께 모델링 결과로 산출된 CTOT를 확인할 수 있으며, 조치 적용 전후의 수요 분포를 비교할 수 있도록 구현되었다.

Fig. 12는 슬롯 생성 및 관리 화면으로, 항공편별

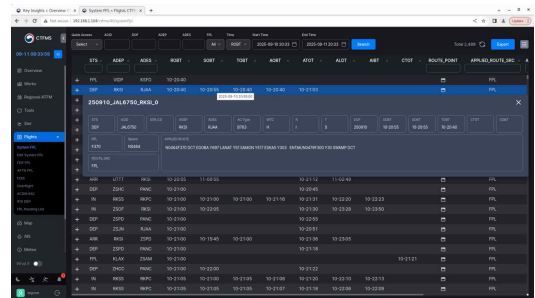


Fig. 8. Flight list

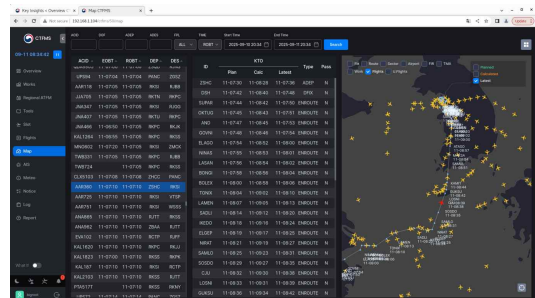


Fig. 9. Tracks and trajectories on map

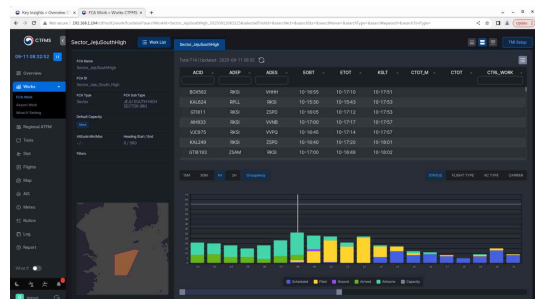


Fig. 10. Air traffic demand in airspace

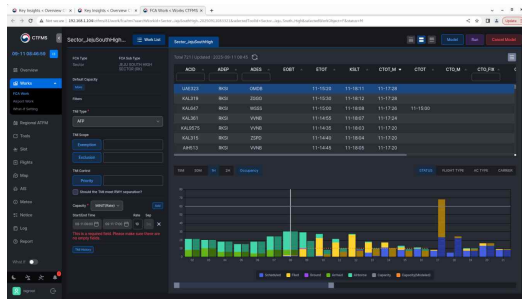


Fig. 11. Generation of TMI for DCB

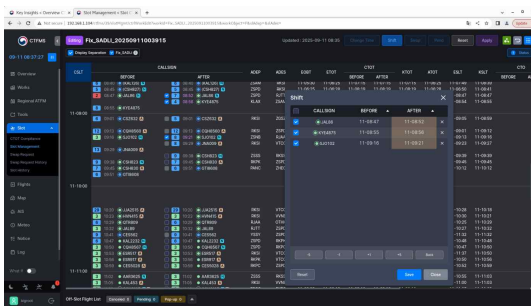


Fig. 12. Slot management

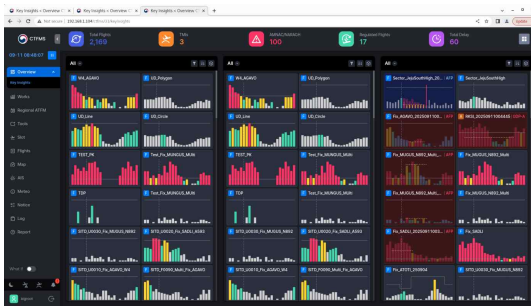


Fig. 13. Flow management dashboard

CTOT 자동 할당 결과를 확인하고 필요 시 수동 조정할 수 있도록 구성되어 흐름관리 조치의 세부 운영을 지원한다.

Fig. 13의 흐름관리 현황판은 관리 대상 공항 및 공역의 수요를 수용량 대비 요약하여 제공하며, 흐름관리 조치의 진행 상태 및 적용 여부를 색상으로 구분하여 표시함으로써 운영자가 전체 상황을 신속하게 인지할 수 있도록 한다.

2.6 CTFMS 설치 및 시험운용

개발된 CTFMS의 운용 가능성을 검증하기 위해 시스템을 실제 운용 환경에 설치하고 현장 시험운용을 수행하였다. 본 절에서는 CTFMS의 시험환경, 시험운용 방법 및 결과를 설명한다.

2.6.1 CTFMS 시험환경

개발된 CTFMS의 운용성을 검증하기 위해 국토교통부 항공교통본부의 ATCC에 시스템을 설치하였다.

시험운용은 단순한 일회성 검증이 아니라, 사용자 피드백을 지속적으로 수렴하고 이를 반영하여 시스템의 운용성을 개선하는 데 목적이 있다. 이에 따라 효율적인 시험운용과 연구개발을 위해 CTFMS 구성 장비를 한국항공우주연구원과 ATCC에 분산하여 구축하였다(Fig. 14 참조).

구체적으로, FOIS, AFTN, A-CDM 등으로부터 데이터를 수신하는 INF(기존 운용 중인 흐름관리 시스템의 일부)에서 데이터를 분기하여 EIF로 전달하는 메시지 큐(MQ) 시스템과, AMNAC 국가로부터 제공되는 CTOT 처리를 위한 AMHS Client를 ATCC 현장에 설치하였다. 또한 사용자 인터페이스인 FMT 역시 흐름관리실, 교육실, 공항공사 사무실, 장비실 등에 배치하여 실제 운용 환경에서 활용할 수 있도록 구성하였다.

한편, 연계 데이터 전처리를 수행하는 EIF, 흐름관리 핵심 기능을 담당하는 FMS, FMT의 백엔드 역할을 수행하는 WAS(web application server), WEB(web server), 그리고 인터넷 기반 항적 및 기상자료 연계를 위한 TS(track streamer)와 meteo processor는 한

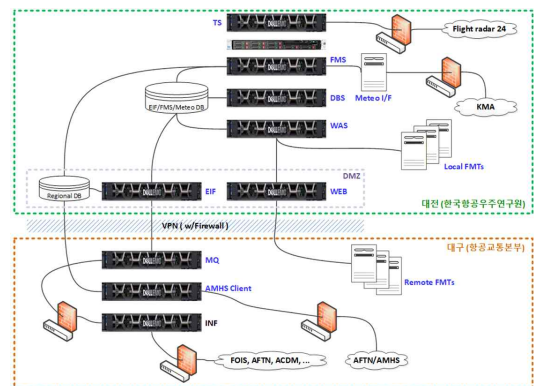


Fig. 14. CTFMS deployment and interface architecture

관한 사항으로 국제선 출발 관리, 국제선 도착 관리, 국내선 출도착 관리, 비행 경로 재지정(What-if 분석)으로 그룹핑하여 설문항목을 정하였다. 기존 시스템 대비 개선 효과 항목으로는 흐름관리 상황 인지 편의성, 흐름관리 조치 설정 편의성, CTOT 산출 및 조정의 편의성, 슬롯 사용의 효율성, 복수 제한사항 대응 능력, 국제 흐름관리 협업 지원 능력, 의사 결정 지원 능력, 전반적인 업무 효율성 등으로 구성하였으며, 실운용 적용 가능성 평가 항목으로는 시스템 사용의 용이성, 사용자 인터페이스의 직관성, 제공되는 정보의 적절성, 시스템 응답 속도, 시스템 결과에 대한 신뢰도, 실제 운용 환경에의 적용 가능성, 시스템 만족 여부 등이 포함되었다.

2.6.3 CTFMS 시험운용 결과

현장 시험운용은 2025년 4월부터 2026년 7월까지 수행하였다. 시험운용은 2.6.2절에서 기술한 SITD를 기준으로 국토교통부 항공교통본부 ATCC와 공동으로 수행하였으며, Fig. 15와 같이 시험운용 과정에서 사용자 의견을 지속적으로 수렴하고 이를 반영하여 소프트웨어를 반복적으로 수정·보완하였다. 시험운용 기간 동안 기능 개선이 지속적으로 이루어졌음을 고려하여, 최종 수정된 소프트웨어를 대상으로 2026년 5월부터 7월까지 전체 시험을 재수행하였다.

시험 결과는 Table 4와 같다. 기능, 성능, 보안 및 Use Case를 포함한 총 45개의 시험 항목에 대해 최종적으로 모두 통과하였으며, 이를 통해 SSS에 정의된 요구사항 및 Use Case가 충족됨을 확인하였다. 특히 4차원 궤적 예측, 교통 수요 예측, AFP/GDP 기반 흐름관리 조치 생성 등 CTFMS의 핵심 기능이 실제 운용 환경에서 정상적으로 동작함을 확인하였으며, 개발된

시스템이 실제 항공교통 흐름관리 업무를 지원하기 위한 기술적 요구사항을 충족함을 확인하였다. 성능시험의 경우, 시스템 초기화 시간은 요구 기준 30분 이내에 대해 12분 24초, 흐름관리 조치 생성 처리 시간은 1분 이내에 대해 13초로 측정되었다. 비행계획 처리 용량은 요구 기준 6,000편 이상에 대해 10,957편을 처리하였으며, 수요량 예측 및 흐름관리 조치 모델링 범위는 각각 최대 2일 및 1일로 요구 기준을 충족하였다.

시험운용 이후에는 개발된 CTFMS의 운용 적합성과 활용성을 평가하기 위해 실제 시험운용에 참여한 운영자를 대상으로 사용자 설문조사를 수행하였다. 설문에는 총 8명의 운영자가 참여하였으며, 모두 항공교통본부에서 흐름관리 업무 경험을 보유한 전문가로 구성되었다. 응답자의 평균 흐름관리 경력은 4.4년이며, 현재 팀장, 절차 담당자 및 흐름관리사 등 다양한 직무를 수행하고 있다. 설문은 기능 적합성, 운용 시나리오 활용성, 기존 시스템 대비 개선 효과 및 실운용 적용 가능성의 네 가지 분야, 총 32개 문항으로 구성하였으며, 모든 항목은 10점 척도(1점: 매우 낮음, 10점: 매우 높음)를 적용하였다.

설문 결과는 Table 5와 같다. 기능 적합성 평가에서는 AFP·DS 생성 기능(9.38점)과 GDP·GS 생성 기능(9.38점)이 가장 높은 평가를 받았으며, 통합 비행계획 처리 기능(8.75점)과 슬롯 관리 기능(8.75점)도 높은 점수를 기록하였다. 반면 What-if 분석 기능은 6.50점으로 상대적으로 낮게 평가되었다. 관련하여 수집된 정성적 의견에서는 현재 단일 항공편을 대상으로 제공되는 What-if 기능을 다수의 항공편과 복합 조건에 대해 동시에 분석할 수 있도록 개선이 필요하다는 의견이 제시되었다. What-if 분석 기능은 기존 운용 시스템에서는 전혀 제공되지 않는 기능으로, 향후 TBO 기반 운용환경을 지원하기 위해 운용자와 요구사항을 보다 구체화 시켜 점진적으로 기능을 확장할 필요가 있을 것으로 판단된다.

운용 시나리오 활용성 평가에서는 국제선 도착 관리(8.75점)와 국제선 출발 관리(8.50점)가 높은 평가를 받아, CTFMS가 우리나라 항공교통 환경에서 빈번하게 수행되는 국제선 흐름관리 업무를 효과적으로 지원할 수 있는 것으로 나타났다. 반면, 비행경로 재지정(re-routing) 분석 기능은 What-if 관련 기능으로서 6.75점으로 평가되어 향후 기능 보완이 필요한 것으로 재차 확인되었다.

Table 4. Number of verified test items

구분	시험 항목	Pass ('26.5)	Pass ('26.7)	Pass (최종)
기능	24	22	2	24
성능	4	2	2	4
보안	2	2		2
Use case	15	15		15
합계	45	41	4	45

Table 5. User evaluation results

구분	항목	평균
기능 적합성 평가	통합 비행계획 처리 기능	8.75
	4차원 궤적 예측 기능	8.13
	공역 교통 수요 예측 기능	8.13
	공항 교통 수요 예측 기능	8.13
	AFP·DS 기능	9.38
	GDP·GS 기능	9.38
	다중 제약조건 기반 흐름관리 기능	8.38
	What-if 분석 기능	6.50
	AMNAC·NARAHG 연계 기능	7.63
	공항 운영정보(A-CDM) 연계 기능	7.63
	슬롯 관리 기능	8.75
	교통현황 요약 현시 기능	8.63
	지도 기반 항적·궤적 현시 기능	8.25
시나리오별 활용성 평가	국제선 출발 관리	8.50
	국제선 도착 관리	8.75
	국내선 출발도착 관리	7.88
	비행 경로 재지정 (What-if 분석)	6.75
기존 시스템 대비 개선 효과	흐름관리 상황 인지 편의성	7.50
	흐름관리 조치 설정 편의성	8.00
	CTOT 산출 및 조정 편의성	8.88
	슬롯 사용의 효율성	9.13
	복수 제한사항 대응 능력	9.00
	국제 흐름관리 협업 지원 능력	8.63
	의사 결정 지원 능력	7.75
	전반적인 업무 효율성	8.25
실운용 적용 가능성 평가	시스템 사용 편의성	7.25
	사용자 인터페이스의 직관성	7.63
	업무수행을 위한 제공 정보의 적절성	9.13
	시스템 응답속도	8.38
	시스템 제공 결과의 신뢰도	8.38
	실제 운용 적용 가능성	9.00
	전반적인 시스템 만족도	9.00

기존 시스템 대비 개선 효과에서는 슬롯 사용 효율성(9.13점)과 복수 제한사항 대응 능력(9.00점)이 가장 높은 평가를 받았으며, CTOT·CTO 산출 및 조정 편의성(8.88점)과 국제 흐름관리 협업 지원 능력(8.63점) 역시 높은 점수를 기록하였다. 이는 국내 운용환경을 고려하여 추가한 CTFMS의 주요 기능에 대해 운영자들이 기존 시스템 대비 개선 효과를 긍정적으로 평가하였음을 보여준다.

실운용 적용 가능성 평가에서도 제공 정보의 적절성(9.13점), 실제 운용 적용 가능성(9.00점) 및 전반적인 만족도(9.00점)가 높게 평가되어 개발된 CTFMS의 실제 운용기관 적용 가능성에 대해서도 운영자들이 긍정적으로 평가한 것으로 나타났다. 다만 시스템 사용 편의성(7.25점)과 사용자 인터페이스의 직관성(7.63점)은 상대적으로 낮은 점수를 보여 개선이 필요한 것으로 나타났다.

상기 정량적인 설문과 별도로 유용한 기능과 추가 개선/개발 필요 기능 식별을 위한 정성적 의견을 수렴하였는데, AMNAC·NARAHG 연계 기능, 슬롯 관리 기능, 다중 제약조건 기반 흐름관리 기능 등이 실제 업무에 가장 유용한 기능으로 평가되었다. 반면 사용자 인터페이스 개선, What-if 기능 고도화, 통계 및 사후 분석 기능 추가 등에 대한 의견이 제시되었으며, 이러한 사항은 향후 기존 운용 시스템과의 병행 운용 및 고도화 연구개발 과정에 반영할 예정이다.

III. 결 론

본 연구에서는 국내 항공교통 환경의 특성을 반영한 협력적 항공교통 흐름관리 시스템인 CTFMS를 개발하고, 국토교통부 항공교통본부에서의 시험운용을 통해 시스템의 운용 가능성을 검증하였다. 시험운용 결과, CTFMS는 우리나라의 항공교통 흐름관리에 필요한 기능·성능·보안 및 운용 시나리오에 대한 요구사항을 모두 만족하는 것을 확인하였다. 또한 실제 흐름관리 업무 경험을 보유한 운영자를 대상으로 한 사용자 평가에서는 AFP·GDP 기반 흐름관리, 슬롯 관리, 복수 제한사항 대응 및 국제 흐름관리 협업 지원 기능이 높은 평가를 받아, 개발된 CTFMS의 운용성과 활용 가능성을 확인하였다.

본 연구는 국내 항공교통 환경을 고려한 한국형 항공교통 흐름관리 시스템을 설계·구현하고 실제 운용기

관에서 검증하였다는 점에서 의의를 가진다. 다만 CTFMS에 새롭게 적용된 일부 기능은 기존 시스템에서 지원되지 않아 동일 기능 간 직접적인 정량 비교에 한계가 있었으며, 이에 따라 기존 시스템 대비 개선 효과는 운영자 설문평가를 통해 분석하였다. 또한 본 연구에서 개발한 CTFMS는 기존 ICAO 비행계획(FPL2012) 기반의 항공교통 흐름관리를 지원하는 플랫폼으로, 향후 TBO 환경을 지원하기 위해서는 FIXM(flight information exchange model) 기반의 trajectory 정보를 활용하여 항공사 및 타국 ATM 서비스 제공기관(ATM service provider, ASP)과의 궤적 공유 및 협상을 보다 자동화할 수 있는 기능에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 이에, 향후에는 기존 운용 시스템과의 병행 운용을 통해 시스템의 안정성과 활용성을 지속적으로 검증하고, 후속 연구를 통해, FF-ICE(flight and flow - information for a collaborative environment)와 같은 차세대 ATM 기술과 연계한 TBO 기반 항공교통 흐름관리 시스템으로 고도화할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원 (과제번호 RS-2021-KA163373)으로 수행되었으며, 관계부처에 감사드립니다.

References

1. Brown, M., Kim, H., Wang, Y., Lee, K., Hirabayashi, H., Wickramasinghe, N., et al., "International air traffic flow management in North and East Asia", The 14th Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2022), Japan, 2022.
2. Cox, J., and Kochenderfer, M., "Optimization approaches to the single airport ground-holding problem", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 38(12), 2015, pp.2399-2406.
3. Eurocontrol, "User manual - base of Aircraft Data (BADA)", EIH Technical/ Scientific Report No. 22/05/12-45, 2022.
4. Eurocontrol, "ATFCM Operations Manual, Edition MAINT-2", 2024.
5. International Air Transport Association, "Long-Term Air Transport Passenger Demand projections", 2026, p.2.
6. International Civil Aviation Organization, "Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management (ATFM)", ICAO Doc 9971, 2018.
7. International Civil Aviation Organization, "Global TBO concept (Version 0.11)", ICAO Doc 10130, 2020.
8. International Civil Aviation Organization, "Report of the Tenth Meeting of the Asia/Pacific Air Traffic Management Sub-Group (ATM/SG/10)", Bangkok, Thailand, 2022, p.6.
9. Jeon, D., Eun, Y., Kim, H., and Yeom, C., "Operational concept of collaborative tactical flow management system", 2022 KSAS Fall Conference, The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Korea, 2022, pp.280-281.
10. Jeon, D., Kim, H., Eun, Y., Jeong, M., Oh, E., Lee, S., Jang, Y., and Kim, H., "Development of collaborative tactical flow management system prototype (Phase 1)", 2023 KSAS Fall Conference, The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Korea, 2023, pp.370-371.
11. Jeon, D., Kim, H., Eun, Y., Jeong, M., Oh, E., Lee, S., Jang, Y., Kim, H., and Kim, S., "Development of collaborative tactical flow management system", The 15th Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2024), Australia, 2024.
12. Jeong, M., and Jeon, D., "A study on deterministic air traffic demand prediction", 2022 KSAS Fall Conference, The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Korea, 2022, pp.1125-1126.
13. Jeong, M., and Jeon, D., "A study on sector demand prediction methods", 2023 KSAS

- Fall Conference, The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Korea, 2023, pp.1217- 1218.
14. Kim, H., and Jeon, D., "A study on processing of flight plans and tracks for air traffic flow management", 2022 KSAS Fall Conference, The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Korea, 2022, pp.1112-1113.
 15. Kim, H., and Jeon, D., "Effective method for integration and management of flight plan data for air traffic flow management", 2023 KSAS Fall Conference, The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Korea, 2023, pp.1075-1076.
 16. Kim, H., Jeon, D., and Kim, J., "A flight route prediction method using dynamic hybrid clustering", Korea Computer Congress 2024, Korea, 2024, pp.119- 121.
 17. Korea Civil Aviation Association, "Aviation Statistics 2025", 2026, p.571.
 18. Krozel, J., Jakobovits, R., and Penny, S., "An algorithmic approach for airspace flow programs", Air Traffic Control Quarterly, 14(3), 2006, pp. 203-229.
 19. Lee, S., Eun, Y., and Jeon, D., "Optimal air traffic flow management algorithm under multiple traffic management initiatives", 2021 KSAS Fall Conference, The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Korea, 2021, pp.378-379.
 20. Lee, S., Eun, Y., and Jeon, D., "Priority-based air traffic flow management algorithm for multiple traffic management initiatives", 2022 KSAS Fall Conference, The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Korea, 2022, pp.1130-1131.
 21. Lee, S., Eun, Y., and Jeon, D., "Traffic management initiative modeling algorithm considering issued CTOT", 2025 KSAS Spring Conference, The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Korea, 2025, pp.1218- 1219.