

## 궤적 기반의 항공 교통 관리를 위한 스케줄링 시스템 개발

# Development of Scheduling System for Trajectory Based Air Traffic Management

오은미\* · 은연주 · 김현경 · 전대근  
한국항공우주연구원 항공기체계부

Eun-Mi Oh\* · Yeonju Eun · Hyounkyoung Kim · Daekeun Jeon

Aircraft System Division, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, 34133, Korea

### [요 약]

차세대 통신링크를 활용한 항공로 교통 관리를 위해 궤적 기반의 관제 지원 스케줄링 시스템을 제안하였다. 차세대 ATS (air traffic services) 데이터링크인 Baseline 2를 사용하는 4DTRAD (4-dimensional trajectory data link) 서비스 내용을 기반으로 항공로 상을 비행 중인 항공기를 대상으로 하는 궤적기반운용 수행 절차를 수립하고 기술하였다. 이러한 절차를 바탕으로, 다양하고 복잡한 데이터 활용으로 인한 관제사의 업무 부담을 완화하기 위해 지상 시스템이 수신한 항공기 데이터를 처리하여 궤적을 예측하고 관제 조인 정보를 제공하는 스케줄링 시스템의 프로토타입을 개발하였다. 또한, 궤적 기반 항행을 위한 시뮬레이션 환경을 구성하여 개발 시스템에 대한 스케줄링 기능을 확인하였다.

### [Abstract]

A trajectory-based scheduling system is proposed for air traffic management using next generation aviation data communication link. Based on the service concept of 4-dimensional trajectory data link (4DTRAD) using air traffic services (ATS) datalink Baseline 2, a procedure for trajectory-based operation of an en-route flight is established and described in detail. To mitigate air traffic controllers' workload which might be caused by various and complicated data utilization, a prototype of the scheduling system, which predicts the aircraft trajectory based on the flight intents received by air traffic service system and provides advisory information for air traffic control, was developed. The simulation environment for trajectory based operation was built to validate the scheduling functionality of the prototype.

**Key word** : Trajectory based operation, Air traffic management, Trajectory prediction, Decision support tool, AMAN (Arrival manager).

<https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.5.367>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 5 October 2018; Revised 8 October 2018

Accepted (Publication) 25 October 2018 (30 October 2018)

\*Corresponding Author ; Eun-mi Oh

Tel: +82-42-870-3544

E-mail: emoh@kari.re.kr

## I. 서론

제한된 공역 내에서의 항공기 교통량 증가는 효율적인 교통 관리의 필요성을 점증시키고 있다. 또한 항공 탑재 장비 및 통신 인프라 기술의 발달에 따라 공중-지상, 또는 공중의 항공기 간에 전달할 수 있는 정보의 범위가 확대되고 있으며, 항공기로부터 수신할 수 있는 보다 정확하고 풍부한 정보를 기반으로 지상에서는 항공기의 궤적을 정밀하게 예측할 수 있을 뿐만 아니라 예측 대상 범위를 확장하여 활용할 수 있고, 이는 장기적인 구간의 비행을 보다 효율적으로 관리할 수 있도록 할 것이다. 이처럼 확장된 전달 데이터에 기반을 두어, 항공기의 주요 위치와 통과 시각에 대한 정보를 포함하는 궤적을 재구성하고 이용하는 항공교통관리 운용 개념을 궤적 기반 항행(TBO; trajectory based operation)이라고 하며, 운용 대상 및 범위에 따라 공항 지상에서부터 항공로 전 구간에 이르기까지 다양하게 적용할 수 있다. 궤적 기반 항행은 전 세계적으로 관심이 있는 차세대 교통 관리 운용 방식으로, ICAO (International Civil Aviation Organization)의 ASBU (aviation system block upgrades)에서는 ‘efficient flight path’이라는 성능 개선 영역(PIA; performance improvement area)에 장기적으로 추진되어야 할 하나의 아이টে็ม으로 포함되어 있다[1]. 궤적 기반 항행은 항공기의 더욱 장기적이고 정확한 정보를 기반으로 효율적인 교통 흐름을 관리하는데 목적이 있으며, 나아가 항공기 예측 정확성 및 안전성 향상, 스케줄링을 통한 정시성 확보 등의 효과를 기대할 수 있다.

본 논문에서는 항공로에서 비행 중인 항공기에 대해 항공기의 탑재 시스템과 지상관제 시스템 간의 송수신 데이터를 기반으로, 항공기의 궤적을 동기화(synchronization - 데이터 링크를 통해 전달되는 한정된 정보를 이용하여 지상시스템에서 항공기의 궤적을 재구성하고 실제 궤적과 일치시키는 것)하고, 이를 이용하여 항공기의 흐름을 관리하는 시스템 개발에 관련된 내용을 기술하였다. 궤적기반항행을 어떠한 관제 절차를 통해 운용할 수 있는지에 대한 운용 개념을 우선 수립하였으며, 사용되는 송수신 데이터에 대한 분석 및 이를 처리하는 시스템의 기능적 설계 및 소프트웨어 구현 사항을 포함하고 있다. 연구개발 중인 시스템은 관제사의 관제 의사 결정을 돕는 지원 도구로서, 관제사의 업무 부담을 줄이고 교통 흐름의 효율적인 관리를 위한 자동화된 시스템의 기능을 수행하는 데 목적이 있다.

2장에서는 궤적 기반 항행에 활용할 수 있는 표준 서비스 및 통신 링크에 대한 분석과 이를 이용하여 궤적 정보에 기반한 항공 교통 운용 방식을 제안하고 있으며, 3장에서는 스케줄링 시스템에 대한 개발 내용 및 시뮬레이션 환경에서의 모의 결과에 대한 내용을 정리하였고, 4장에서 결론을 기술하였다.

## II. 궤적 기반의 항공로 교통 관리 운용 개념

본 연구에서는 개념 검증을 위해 먼저, 공역의 항공로 상에서 적용될 수 있는 궤적 기반의 관제 프로세스로 대상을 한정하였다. 궤적 기반 서비스를 제공하는 주체는 해당 항공기의 관제를 담당하는 ATSU(air traffic service unit)이며 서비스를 받을 수 있는 대상은 궤적 기반 항행에 요구되는 기능 장비를 탑재하고 궤적 기반 항행 서비스를 요청하는 항공기가 된다.

표준화된 데이터 통신 환경을 전제하기 위해, RTCA (radio technical commission for aeronautics)에서 제공된 기술 표준 문서인 DO-350[2], DO-351[3]를 참고하였다. 참고[2]에는 항공로를 비행 중인 항공기들 대상의 궤적 기반 항행에 적용되는 4DTRAD (4-dimensional trajectory data link) 서비스에 필요한 기능 요구사항과 서비스 수행 절차에 대한 내용이 포함되어 있으며, 참고 문헌 [3]에는 해당 서비스에 사용되는 표준화된 데이터의 구성과 구조에 관한 내용을 다루고 있다. 참고 문헌 [2], [3]에서 기술하는 4DTRAD의 각 서비스와 세부 절차, 활용되는 데이터를 분석하여 2.1절과 같이 정리하였으며, 이를 준수하여 궤적 기반 항행을 적용한 관제 프로세스의 전체 과정을 2.2절과 같이 수립하여 항공로 상의 항공기를 궤적 기반의 협상을 통해 관리하는 방식을 제안하였다.

### 2-1 궤적 기반 항행을 위한 데이터링크 활용

참고[2]와 [3]은 항공 교통 시스템 (ATS; air traffic system) 운용을 위한 차세대 데이터 통신으로 B1, FANS 1/A에 이어 B2(Baseline 2)에 대한 기술 표준 관련 내용을 기술하고 있다. 여기에 활용되는 데이터 링크는 크게 ADS-C (automatic dependent surveillance - contract)와 CPDLC (controller pilot data link communication)로, 4DTRAD 서비스를 위해 ADS-C는 항공기와 지상의 관제 시스템 간의 궤적 및 비행 의도 (flight intent) 정보를 공유하여 항공기 궤적의 동기화를 위해 주로 사용되며, CPDLC는 관제 관련 메시지를 문자화된 메시지로 주고받아 오역을 피하고 많은 정보를 보다 정확하고 상세하게 전달하기 위해 사용된다. 참고[2]의 4DTRAD OSD(operational service description)에는 아래와 같이 궤적 기반 항행에 적용될 수 있는 다섯 가지 경우에 대한 각 통신 링크의 역할과 요구 기능에 관하여 기술하고 있다.

- Air-ground synchronization
- RTA(required time of arrival) and speed schedule clearance
- 4D route revision
- Clearance request
- 4D trajectory intent conformance monitoring

궤적 기반 항행에 가장 기본적이고 중요한 기능 중 하나는 궤적 동기화(trajectory synchronization)이다. 궤적 동기화는 지상시스템에서 항공기로부터 제공된 한정된 정보를 이용하여 항공기 궤적에 영향을 미치는 환경 요소 또는 비행 의도의 변경 사항을 실시간으로 처리하여 항공기 궤적을 최대한 정밀하게

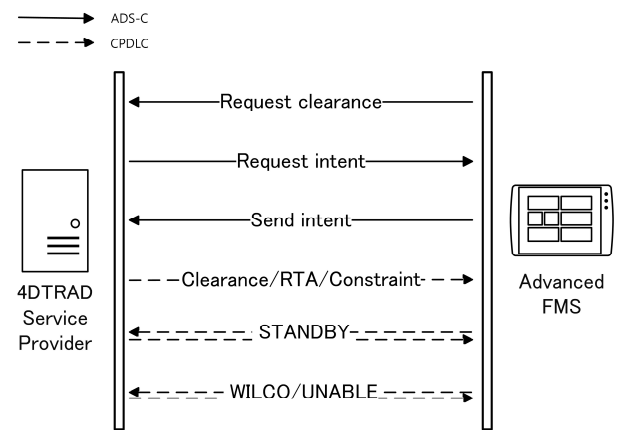


그림 1. 4DTRAD 서비스를 위한 데이터 흐름 구성  
 Fig. 1. Concept of data flow for 4DTRAD service.

예측하는 것이 핵심이다. 이를 위하여 항공기는 ADS-C에 연결되어 있는(contract를 가진) 지상 시스템의 요청에 따라, 항공기가 현재 가지고 있는 비행 정보를 제공할 수 있다. 데이터 포맷인 EPP(extended projected profile)는 ADS-C를 통해 받을 수 있는 비행 의도 정보(flight intent)로써 최대 128개의 지점에 대한 경로, 예상 통과 시각, 속도, 고도의 변경 시점 등의 정보를 기존 데이터 포맷인 IPI(intermediate projected intent)보다 상세히 포함하고 있다[4].

참고 [2]의 4DTRAD 서비스를 활용하기 위해 요구되는 데이터 송수신 절차를 간략히 정리하여 도식화하면 그림 1과 같다. 항공기가 처음 관제 대상이 되는 시점 또는 항공기의 비행 변경에 대한 허가 요청이 있으면, 지상의 ATSU는 ADS-C를 통해 항공기에 비행의도 등의 정보를 요청하고, 항공기는 해당 정보를 송신하여 지상에서는 이를 기반으로 궤적을 예측, 해당 항공편에 대한 관리를 수행한다. 교통 흐름 관리를 위해 항공기의 특정 위치에서의 통과 시각을 조정하거나, 경로를 변경해야 하는 경우 또는 항공기의 요청에 따라 ATSU는 항공기에서 조절 가능한 궤적 관련 파라미터의 범위에 대한 정보를 ADS-C를 통해 요청할 수 있고, 이를 기반으로 비행경로 등을 조정하여 CPDLC UM(uplink message)를 통해 관제 메시지를 전송한다. 항공기는 이를 따를 수 있는지 여부를 확인하여 CPDLC DM(downlink message)를 통해 지상에 응답하고, 비행을 변경하여 허가된 궤적을 추종하는 비행을 수행한다. 관리되는 항공기 예측 궤적과 실제 비행 상태 간의 이탈 여부는 지속적으로 모니터링 되어야 한다.

이처럼 궤적 기반 항행은 ADS-C와 CPDLC를 통해 이루어지며, 이는 각각 표준화된 체계로 정의되어 있다. 표 1과 2는 각각의 데이터 링크에서 궤적 기반 항행에 요구되는 주요 데이터 항목과 메시지 항목을 정리한 것이다. 본 연구에서는 각각의 데이터 구성을 분석하여 궤적 기반 항행에 필요한 지상-탑재 시스템 간의 인터페이스를 정의하였다.

표 1. 궤적 기반 항행을 위해 요구되는 ADS-B 데이터 항목  
 Table 1. Required items of ADS-B message for TBO.

Item	Description
Ground vector	ground speed
Air vector	air speed(IAS, Mach)
Meteorology observation	wind/temperature/turbulence
EPP	position/time/speed/mass
TOA range	time of arrival range at a point
Speed schedule	speed condition for climb/descent

표 2. 궤적 기반 항행을 위해 요구되는 CPDLC 메시지  
 Table 2. Required CPDLC messages for TBO.

Message ID	Description
UM 0/1	“UNABLE”/“STANDBY”
UM 46R/ 51R/ 55R/ 63R	control the level/speed/time at a point
UM 80R/83R	route clearance
DM 0/1/2	“WILCO”/“UNABLE”/“STANDBY”
DM 24R	request route clearance

※ The version of message ID is referenced in [3]

### 2-2 궤적 기반 항행 운용 절차 정의

2.1절에서 기술한 4DTRAD의 다섯 가지 각 서비스 내용을 기반으로, 항공로를 비행 중인 항공기에 대한 궤적 기반의 스케줄링 및 모니터링 방식의 관제 전체 과정을 수립하고 그림 2와 같이 각 단계로 나누어 나타내었다. 항공기는 ADS-C 통신 연계를 위한 초기화 절차를 시점으로 궤적 기반 항행의 대상이 되며 통신 연계를 해제할 때, 또는 관제 범위를 벗어날 때 대상에서 제외된다. 항공기가 ATSU와 궤적 기반 항행을 위한 서비스를 시작(initiation)하면, ATSU는 항공기로부터 궤적 관련 정보를 받아 궤적을 동기화(synchronization)하고 필요에 따라 경로 협상(path negotiation), 시간 협상(time negotiation)을 수행한다. 변경이 필요 없거나, 협상이 완료되면 4차원 궤적에 대한 허가를 발부(4DT clearance)하고 항공기는 이를 추종하는 궤적을 유지한다. ATSU는 항공기의 허가된 궤적의 이탈 여부를 모니터링(conformance monitoring)하고 이탈에 대한 안내 메시지를 송부할 수 있다. ATSU는 대상 항공기의 궤적이 이탈된 것으로 감지된 경우나, 필요에 따라 궤적 정보를 재요청하여 궤적을 최신화할 수 있으며, 조종사의 궤적 변경 요청(request clearance)이 있으면 허가 여부를 판단하여 변경된 궤적에 대한 허가 발부 절차를 거친다. 궤적에 대한 협상에 실패하거나 다른 이유로 궤적 기반 항행 서비스는 중단(service out)될 수 있으며, 이 경우 재요청으로 다시 궤적 기반 서비스를 수행할 수 있다. 해당 서비스는 항공기의 착륙과 동시에 자동으로 종료(termination)되고 항공기는 서비스 대상에서 제외된다.

아래 세부 절에서는 각 수행 단계(action)별 내용을 정리하였

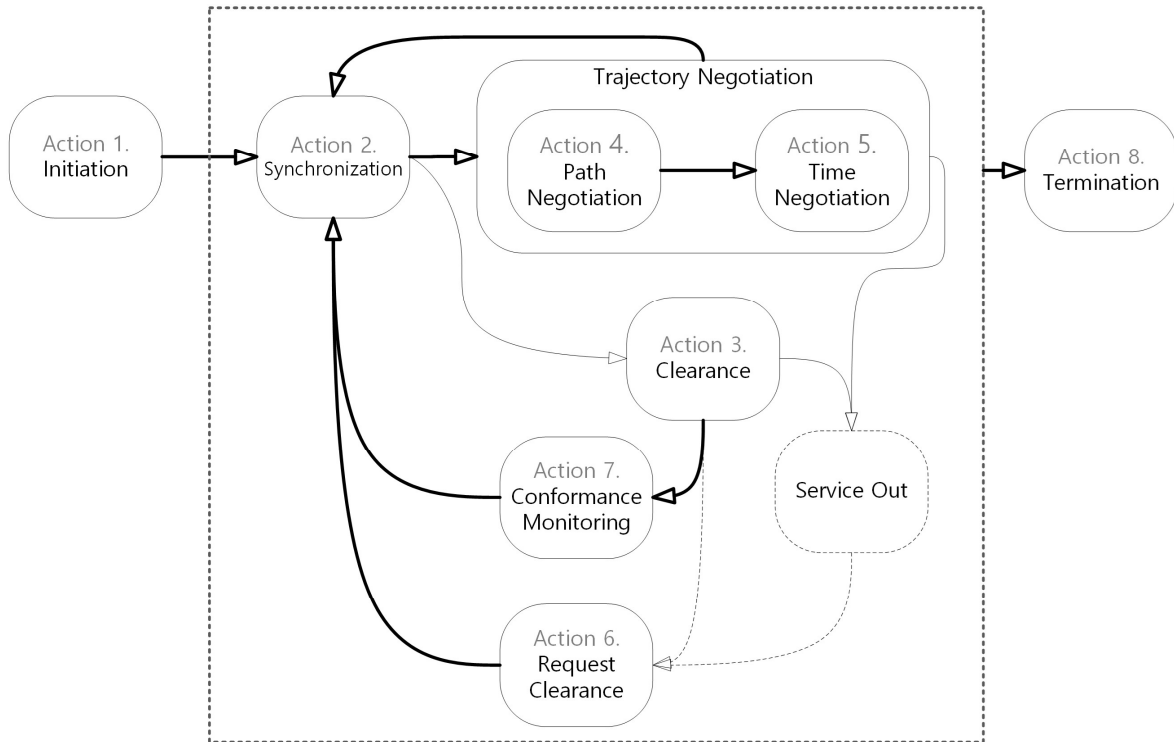


그림 2. 궤적 기반의 관제 서비스 개요  
 Fig. 2. Overview of trajectory based control process.

다. 시스템 관점에서, 관제사가 상황을 확인하고 관제 입력을 할 수 있는 CWP(control working position)와, 궤적 기반 항행 서비스를 위한 관제 조인 정보 생성과 conformance monitoring을 담당하는 궤적 기반 스케줄링 시스템, 그리고 항공기의 탑재 시스템 간 수행되는 프로세스의 내용을 순서대로 정리하였다. 본 연구에서 개발된 궤적 기반 스케줄링 시스템은 trajectory based scheduler and predictor(TBSP)라 명명하였다. 그림 3은 그림 2에 나타난 수행 단계 중 action 3의 시스템 간 데이터 흐름을 정의한 예이다.

**1) Action 1. Initiation for TBO service**

시스템 간의 데이터링크 송수신을 위한 초기 연계 절차 이후, 궤적 기반 항행 서비스를 위한 초기화 단계이다. ATSU는 비행 계획, 항적 등을 이용하여 범위 내의 항공기를 확인하고 해당 항공편의 ADS-C 연결을 요청하여 궤적기반항행 서비스를 시작할 수 있도록 한다.

**2) Action 2. 4DT synchronization**

TBSP는 항공기의 EPP 등 ADS-C downlink 정보를 수신하여 궤적을 예측한다. 궤적 정보는 CWP에 제공하여 관제사가 확인할 수 있도록 한다. 궤적을 검토하여 다른 항공기와 충돌 여부, 제한 지역 침범 여부 등을 확인하고 스케줄링을 통해 주요 지점 통과 시간의 조절이 필요한 지 여부를 판단한다.

**3) Action 3. 4DT clearance**

ATSU에서는 항공기의 예측 궤적을 검토하여 별도의 변경

조치가 필요하지 않은 것으로 판단되면, CPDLC를 통해 4DT 허가를 발부한다. 항공기는 허가를 수신한 즉시 수신 확인 메시지(STANDBY)를 송신하고, 이를 조종석에 현시한다. 조종사는 이 허가를 따를 것인지 여부를 판단하여 이행 여부 응답 메시지(WILCO/UNABLE)를 송신한다. 이행 불가(UNABLE)를 송신한 경우 이유를 포함할 수 있으며, 이 경우 해당 항공기는 궤적기반항행 서비스에서 제외된다. 이 경우 조종사는 허가에 대한 재요청 절차(action 6)를 통해 다시 궤적기반항행 서비스 대상이 될 수 있다. 항공기의 경로나 주요지점 통과 시간의 변경이 필요한 것으로 판단되면 action 4 또는 action 5의 과정을 수행한다.

**4) Action 4. Trajectory revision**

ATSU는 제한 구역 침범, 기상 악화 등의 이유로 경로 변경이 필요하다고 판단된 경우, 대체될 수 있는 새로운 경로 정보를 송신한다. 항공기는 새로운 경로에 대한 이행 가능 여부를 판단하여 이를 따를 경우 이행 가능 메시지(WILCO)를 송신하고 변경된 경로를 추종하도록 FMS(flight management system)에 입력, 최신의 EPP 정보를 제공한다. 이를 따를 수 없는 경우 이행 불가 메시지(UNABLE)를 송신하게 되며, 이 경우 궤적기반항행 서비스에서 제외된다.

**5) Action 5. RTA/time constraints**

ATSU는 교통 흐름 관리 등의 목적으로 특정 위치에서의 도달 시간 조건을 부여할 수 있는데, 이를 위해 특정 위치에 대한 가용한 도착 시각 범위(TOA; time of arrival) 정보를 항공기로

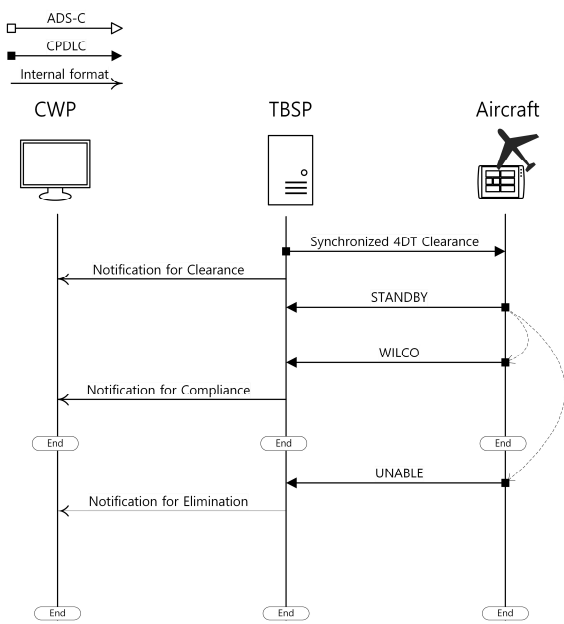


그림 3. 세부 데이터 송수신 흐름 (action 3)  
Fig. 3. Detailed communication flow (action 3).

부터 받는다. 이를 이용하여 항공로 합류 지점등과 같이 특정 위치에서의 CTO(controlled time over) 또는 시간/속도 제한을 항공기에 부여하고 항공기는 이를 받아들일 수 있는 지 여부를 판단하여 이행 또는 불이행 메시지를 송신한다. Action 4와 마찬가지로 항공기는 이행 여부에 따라 허가를 발부 받거나 서비스에서 제외된다.

6) Action 6. Clearance request

조종사는 일시적인 환경 변화, 항공사의 전략, 조종사의 의도 등에 따라 항공기의 궤적 변경을 요청할 수 있다. 조종사가 변경되는 궤적에 대한 정보와 사유 등을 포함하여 새로운 궤적의 허가를 요청하면, ATSU는 이에 대한 허가 발부 가능 여부를 확인하여 허가 또는 거절(UNABLE)의 메시지를 보낼 수 있다. 궤적 변경 허가가 거절된 경우 항공기는 기존의 허가된 궤적을 유지해야 하며, 변경에 대한 허가가 발부된 경우에는 이를 FMS에 반영하고 최신의 EPP를 송신하여 지상에서의 궤적 정보가 업데이트 되도록 action 2의 과정을 수행해야 한다.

7) Action 7. Conformance monitoring

ATSU는 최초 4DT 허가가 발부된 시점부터 서비스가 종료될 때까지 공유된 궤적과 항적 정보 등을 이용하여 궤적 이탈 여부를 모니터링 해야 한다. 항공기의 궤적 이탈이 발생한 경우 ATSU는 이탈에 대한 경고와 함께 항공기로 하여금 새로운 EPP 데이터를 송신하도록 요청하는 궤적 동기화 단계(action 2)부터 다시 수행하도록 한다.

III. 궤적 기반의 스케줄링 시스템(TBSP) 개발

궤적 기반의 스케줄링 시스템은 항공기로부터 송신된 정보

를 이용하여 궤적을 예측하고 교통 흐름을 관리하기 위한 스케줄링 정보를 생성하여 관제사의 의사 결정을 돕는 도구로 활용된다. 따라서 관제 영역의 특성이나 운용 방식에 따라 스케줄링의 대상과 목적이 정해지고 시스템의 요구 기능과 설계내용이 결정된다.

본 연구에서는 항공로에서 접근 관제 구역(TMA; terminal maneuvering area)에 진입하기 위해 모이는 경계의 합류 지점(merge point)을 스케줄링 대상 지점으로 보고, 통과 시간을 조절하는 방식의 스케줄링을 적용하였다. 이는 제한적인 공역에서 많은 교통량을 처리해야 하는 접근 관제 영역의 교통 흐름을 항공로에서부터 고려하여 보다 효율적인 흐름과 경제적인 경로를 제공하기 위함으로, 도착 관리 시스템(AMAN; arrival manager)의 운용 개념을 적용한 스케줄링 방식이다. 궤적 기반 항행의 운용 개념 및 목적에 따라, EPP를 통해 항공기의 실시간 비행 의도 정보를 수신하는 것으로 가정하고 이를 사용하기 때문에 보다 정확하고 최신화된 예측 궤적을 확보할 수 있으며, 스케줄링 결과를 표준화된 CPDLC 메시지로 제공하여 관제사의 업무를 줄이고, 조종사와의 소통을 효율적으로 할 수 있도록 하는 환경을 가정하였다.

3-1 시스템 기능 구성

TBSP 시스템은 크게 궤적 정보 수신, 궤적 구현, 스케줄링 및 모니터링, 관제 정보 생성 및 제공의 기능이 요구되며, 이를 위해 그림 4와 같은 소프트웨어 시스템의 기능 모듈을 구성하였다. ‘codec’은 궤적 기반 항행을 위해 송수신되는 데이터를 디코딩/인코딩하는 역할로, 항공기로부터 수신한 궤적 의도 정보 및 관제 요청 정보나 CWP로부터 받은 관제사 입력, 스케줄링 설정 값 등을 ‘flight info manager’ 모듈에 제공한다. ‘flight info manager’는 수신 정보를 최신화하여 관리하는 역할로, ‘trajectory predictor’ 모듈에서 활용할 수 있는 궤적 의도 정보 및 비행 상태 정보와 ‘scheduler’ 모듈에서 활용될 수신된 관제 메시지를 항공기 별로 관리한다. ‘trajectory predictor’는 궤적 의도 정보를 기반으로 현재 위치로부터 앞으로의 항공기 궤적을 계산하고 주요 지점에 대한 예측 도달 시간 등을 제공한다. ‘scheduler’는 계산된 궤적과 관제 메시지를 고려하여 항공기의 허가 여부 및 변경 가능 궤적에 대한 적절한 솔루션을 찾아 항공기로 송신할 수 있는 관제 메시지를 생성한다. ‘monitoring’은 예측된 궤적을 항공기가 추종하고 있는지를 실시간으로 확인하고 이탈 및 변경이 있을 경우 경고 메시지를 내보낼 수 있도록 한다. 스케줄링의 결과는 CPDLC의 관제메시지 형태로 ‘codec’을 통해 인코딩 되어 외부로 제공된다.

3-2 궤적 예측 모듈 설계

EPP 정보는 항공기의 예상 비행경로를 보다 세분화하여 표현할 수 있어 비행 계획상의 경로에 대한 일시적인 이탈 및 회회, 고도 및 속도 변경에 대한 정보를 구체적으로 파악할 수 있

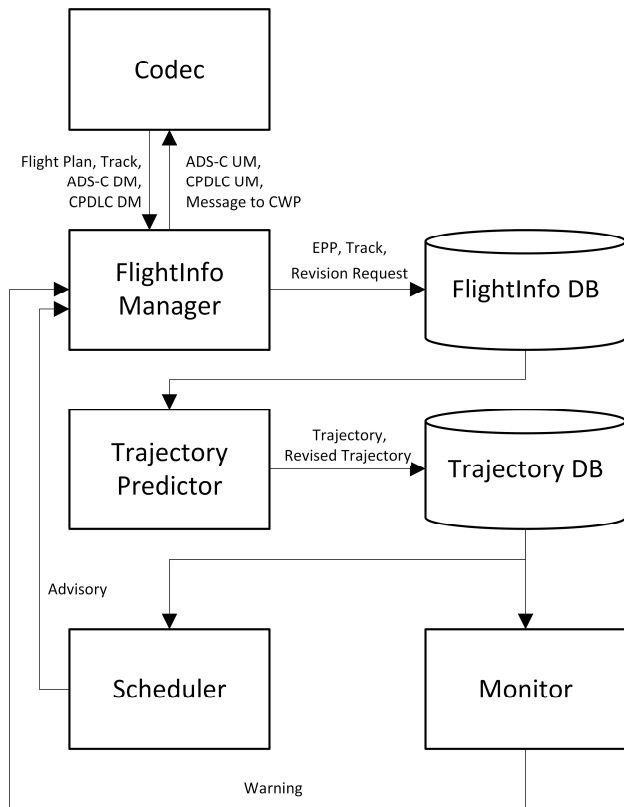


그림 4. TBSP 기능 모듈 구성 및 데이터 흐름도  
 Fig. 4. TBSP functional modules and data flow.

다. 특히 각 지점에 대한 예상 통과 시각(ETO; estimated time over)은 궤적의 동기화의 핵심 정보가 된다. 또한 속도의 변경 위치 및 고도의 변경 위치에 대한 정보를 위/경도로 표현할 수 있어 항공로에 명시된 표준 경유 지점 외의 위치에 대해서도 표현할 수 있다. 궤적 예측 모듈은 기동이 변경되는 구간을 나누어 각 구간에 대해 항공기의 성능을 고려하여 궤적을 생성하며 이때 사용되는 기동 모드는 다음과 같다.

- Straight flight
- Speed change (acceleration/deceleration)
- Altitude change (climb/descent)
- Turn

항공기의 기종 별 성능을 계산하기 위해 유럽항공안전기구(Eurocontrol; european organization for the safety of air navigation)에서 제공하는 BADA(base of aircraft data)를 사용하며, 이를 이용한 성능 산출 및 궤적 모델링 방법은 논문 [5]을 참고하였다.

3-3 스케줄링 모듈 설계

본 스케줄링 모듈은 설정된 특정 위치를 경유하는 항공기의 예상되는 통과 시간을 기반으로, 항공기의 성능 범위 내에서 속

도 및 통과 시간을 조절하여 항공기들의 교통 흐름을 제어하는 역할을 한다. 이 모듈은 항공기 간의 최소 분리 간격 유지, 항공기 궤적 변경으로 인한 항공기 간의 궤적 충돌 여부 등을 고려하여 통과 시각 정보(STO; scheduled time over) 및 요구되는 속도 값을 계산한다. 항공기의 통과 순서는 ETO에 따라 결정되고 항공기 기종 별 성능에 따라 조절 가능한 속도 내의 통과 시각 범위를 정할 수 있다. 항공기 별 통과 시각 범위가 정해지면 이 범위 내에서 정의된 비용 함수를 최소화하는 최적화 문제를 풀게 된다. 최적화 문제의 비용 함수(cost function)는 교통량 최대화, 관제사 일부담 최소화, 운항 경제성 향상 중 사용자의 선택에 따라 결정된다. 최적화 문제를 풀기 위해서 불연속적인 비용 함수의 특수성 등을 고려하여 Branch-and-bound 알고리즘을 적용하였다. 최적화 문제의 비용 함수 정의 및 최적화 알고리즘 적용 기법과 관련한 내용은 논문[6]을 참조하였다.

최적화 문제의 계산 결과 값은 STO가 되며 이를 CTO로 적용하여 통과 시간에 대한 관제 메시지를 생성할 수 있고 STO를 위해 요구되는 속도를 계산하여 속도에 대한 관제 메시지를 생성할 수도 있다. 현재에는 속도를 이용한 STO 추종만이 고려되어 있으나, 많은 지연 시간을 요구하게 되는 경우, 이동 경로를 변경하여 시간을 조절하는 방식의 관제 메시지를 생성할 수도 있다. 관제 메시지는 CPDLC UM 중에서 적절한 형식의 메시지를 선택하여 활용할 수 있으며 전체 궤적에 대한 허가 발부 정보를 제공할 경우에는 'UM83R'과 같은 메시지를 활용할 수 있다.

3-4 시뮬레이션 환경에서의 TBSP 기능 검증

제안된 시스템의 구현 기능 확인과 운용 개념에 대한 검증을 위해 시뮬레이션 환경을 그림 5, 표 3과 같이 구성하였다. 지상 시스템은 CWP와 TBSP로 구성되며 항공기 시스템은 조종석 모의 시스템(pseudo pilot)과 탑재 장비 기능과 항공기 궤적을 모의하는 항공기 시뮬레이션 시스템(aircraft simulator)으로 구성된다. 그 외에도 시뮬레이션을 위한 시나리오 생성, 제어 등을 위한 시뮬레이션 제어(simulation control) 시스템, 3차원 이미지 생성(image generator) 시스템이 포함되어 있다.

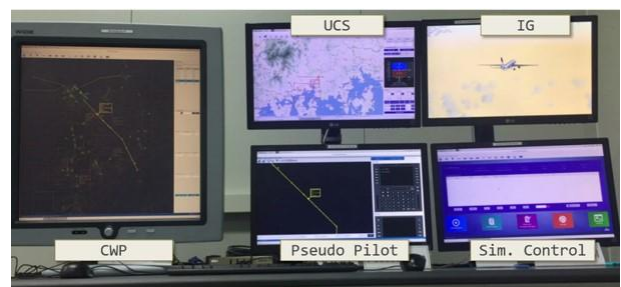
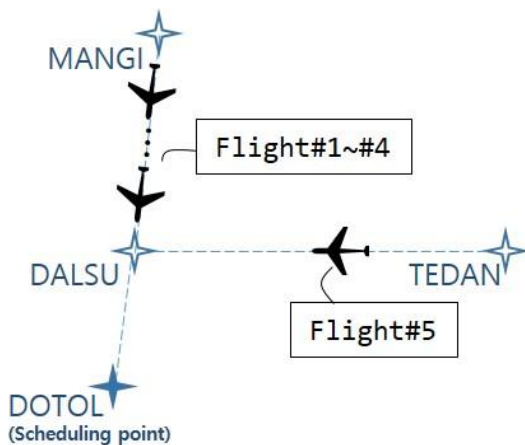


그림 5. 시뮬레이션 시스템 사용자 인터페이스 구성  
 Fig. 5. Simulation system UI(user interface).

**표 3.** 시뮬레이션 시스템의 소프트웨어 구성  
**Table 3.** Software components for the simulation system.

System	Description
CWP	controller UI
TBSP	trajectory based scheduling & prediction
Pseudo pilot	aircraft simulation & pilot UI
Aircraft simulator	trajectory simulation
Sim. control	scenario generation/control
Image generator	3D image processor

TBSP에서 생성되는 STO 값을 확인하여 기능을 검증하기 위한 목적으로 임의의 시나리오를 그림 6과 같이 구성하였다. 시나리오에서는 총 5대의 항공기가 항공로의 표준 경유 지점인 DALSU에서 모두 합류하여 DOTOL을 통과한다. 항공기별 후류 난류 카테고리(WTC; wake turbulence category)를 고려한 분리 기준을 적용하기 위해 Flight #4는 ‘heavy(H)’로 그 외의 항공기는 ‘medium(M)’으로 설정하였다. 시간 흐름을 관리하기 위해 설정된 통과 위치는 DOTOL로 이 위치에 대한 ETO와 스케줄링된 STO의 결과는 표 4와 같다. 스케줄링을 위한 목적 함수는 관제사 일 부담을 최소화(순서 변경 최소화)하는 것으로 설정하였으며, STO\_1은 항공기의 WTC에 관계없이 항공기간 같은 분리 간격(120초)을 적용한 결과이며, STO\_2는 항공기의 WTC에 따라 설정된 분리 간격을 적용한 결과이다. 이 경우, 선-후행 항공기의 WTC가 medium-medium, medium-heavy인 경우의 분리 간격은 90초이고 heavy-medium인 경우 120초의 분리 간격을 설정한 결과를 반영하고 있다. STO를 관제 메시지로 전달하기 위해 CPDLC UM51R(‘CROSS DOTOL AT TIME XX:XX:XX’)를 생성하여 외부로 송신할 수 있으며, pseudo pilot에서는 이를 적용한 비행을 수행하고 이 때 항공기의 탑재 시스템에서 재계산된 EPP 정보를 제공하여 지상 시스템과 재계산된 궤적을 공유할 수 있다.



**그림 6.** 시뮬레이션 시나리오  
**Fig. 6.** Simulation scenario.

**표 4.** TBSP 스케줄링 결과  
**Table 4.** TBSP scheduling results.

Flight ID	ETO	STO_1	STO_2
1	10:13:29	10:13:29	10:13:29
2	10:15:11	10:15:29	10:15:11
3	10:15:29	10:17:29	10:16:41
4	10:16:29	10:19:29	10:18:11
5	10:16:39	10:21:29	10:20:11

**V. 결 론**

근 미래에 적용될 궤적 기반 항행의 기술을 이용하여 항공로에서의 교통 관리 방법과 이를 지원하는 스케줄링 시스템을 제안하였다. 궤적 기반 항행에 사용되는 표준화된 데이터 통신 링크를 분석하여 일련의 항공로 교통 관리 절차를 수립하였으며, 이를 지원해줄 수 있는 소프트웨어의 구성과 주요 기능 모듈에 대한 설계 내용을 기술하였다. 궤적 기반 항행을 위한 시뮬레이션 환경을 구성하여 소프트웨어의 기능적인 검증을 수행하였으며, 궤적 기반의 데이터를 이용한 스케줄링을 통해 항공기간의 분리 기준치를 만족시키는 목표 시각 정보를 제공할 수 있음을 확인하였다. 향후 인적 요소를 고려한 환경에서의 시뮬레이션(human-in-the-loop simulation)을 통해 운용 개념에 대한 검증을 수행할 예정이다.

**Acknowledgments**

본 연구는 국가과학기술연구회에서 지원하는 주요사업 ‘한국형 위성항법 및 차세대 항행 기반기술 연구’에 의해 연구비 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

**References**

- [1] Aviation System Block Upgrades – The Framework for global harmonization appendix B, ICAO, pp.333-355, Jul. 2016.
- [2] Safety and performance standard for Baseline 2 ATS data communications, RTCA, Washington D.C., DO-350, pp. 77-89, Mar. 2014.
- [3] Interoperability requirements standard for Baseline 2 ATS data communications, RTCA, Washington D.C., DO-351, Mar. 2014.
- [4] Y. J. Eun, M. S. Jung, and D. K. Jeon, “Research/development trend of real-time 4D trajectory synchronization

and negotiation technology for trajectory-based operation (TBO),” in *Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, Jeju; Korea, pp. 620-621, Nov. 2016.

[5] E. M. Oh, Y. J. Eun, and D. K. Jeon, “Development of 4-D trajectory modeling using BADA,” *Journal of The Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 20, No. 2, pp. 1-6,

Jun. 2012.

[6] Y. J. Eun, D. K. Jeon, H. K. Kim, and E. M. Oh, “AMAN (arrival manager) scheduler: scheduling methods for arrival flights,” in *Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, Jeju; Korea, pp. 1340-1344, Nov. 2014.



**오 은 미 (Eun-Mi Oh)**

2010년 2월: 부산대학교 항공우주공학과 (공학사)  
2012년 2월: 한국과학기술원 항공우주공학과 (공학석사)  
2011년 12월 ~ 현재: 한국항공우주연구원 연구원  
※관심분야: 항공 교통 관리, 항공 교통 시뮬레이션, 성능 기반 항행



**은 연 주 (Yeonju Eun)**

2002년 2월: 한국과학기술원 항공우주공학과 (공학사)  
2004년 2월: 한국과학기술원 항공우주공학과 (공학석사)  
2004년 ~ 2005년: 삼성중공업 산업기술연구소 연구원  
2010년 9월: 한국과학기술원 항공우주공학과 (공학박사)  
2009년 11월 ~ 현재: 한국항공우주연구원 선임연구원  
※관심분야: 항공교통관리, 최적화



**김 현 경 (Hyouon Kyoung Kim)**

1999년 2월: 충북대학교 컴퓨터공학과 (공학사)  
2001년 2월: 충북대학교 정보통신공학과 (공학석사)  
2000년 12월 ~ 현재: 한국항공우주연구원 선임연구원  
※관심분야: 항공 교통 관리, 항공 관제 소프트웨어, 항공 교통 시뮬레이션 시스템



**전 대 근 (Dae Keun Jeon)**

1993년 2월: 서울대 항공우주공학과 (공학사)  
1995년 2월: 서울대 항공우주공학과 (공학석사)  
1995년 2월 ~ 2000년 8월: 삼성항공산업/한국항공우주산업  
2000년 9월 ~ 2005년 8월: 도담시스템스  
2013년 2월: 한국과학기술원 항공우주공학과 (공학박사)  
2005년 9월 ~ 현재: 한국항공우주연구원 책임연구원  
※관심분야: 항공교통관리, 다중 센서 다중 타겟 추적