

## 技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(4), 349-358(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.4.349

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 항공교통관리 궤적기반운용 연구 개발 동향 및 요소기술

은연주\*, 전대근

## Research/Development Trend and Technical Enablers of Trajectory-based Operations in Air Traffic Management

Yeonju Eun\* and Daekeun Jeon

Korea Aerospace Research Institute

## ABSTRACT

The research and development trend of Trajectory-based Operations(TBO), which is considered as a key concept of future Air Traffic Management(ATM), is presented in this paper. The operational concepts of TBO in ASBU(Aviation System Block Upgrade) from ICAO(International Civil Aviation Organization) have been summarized, and the detailed operational concepts and procedures, which can be realized in the near future, are described through the investigations of operational concept development and related research/development activities of TBO in USA and Europe. The technical enablers, which have been identified based on understanding of TBO operational concepts, are introduced, and related research/development status of each technical enabler has been presented.

## 초 록

본 논문은 미래 항공교통관리(Air Traffic Management, ATM)의 핵심개념으로 받아들여지고 있는 궤적기반운용(Trajectory-based Operations, TBO)에 대한 기술동향을 담고 있다. ICAO(International Civil Aviation Organization)가 발표한 ASBU(Aviation System Block Upgrade)에 기술된 TBO 운용개념을 살펴보고, 미국과 유럽에서 각각 진행 되어온 궤적기반운용에 대한 운용개념 수립과 관련 연구개발 사례들을 통해 근 미래에 실현 가능한 운용개념 및 절차를 구체화하였다. 운용개념 정리를 통해 파악된 요소기술들(technical enablers)을 간단히 소개하며, 관련된 연구개발 진행 현황을 정리하였다.

**Key Words :** TBO(Trajectory-based Operations, 궤적기반운용), ATM(Air Traffic Management, 항공교통관리), 4D Trajectory(4D 궤적), ASBU(Aviation System Block Upgrade), SESAR(Single European Sky ATM Research)

## 1. 서 론

항공교통 선진국인 유럽과 미국 모두에서 궤적기반운용(Trajectory-based Operations, TBO)은

미래 항공교통관리(Air Traffic Management, ATM)의 핵심 개념으로 받아들여지고 있다[1]. TBO에서 궤적을 의미하는 Trajectory는 4DT(4-Dimensional Trajectory)라고도 하며, 경로

† Received : January 5, 2015 Revised : March 23, 2015 Accepted : March 25, 2015

\* Corresponding author, E-mail : yjeun@kari.re.kr

(Path)로 통칭되는 3차원 공간상의 위치 정보에 시간 정보를 더해, 경로상의 각 지점과 그 지점을 항공기가 어느 시간에 지나가게 되는지를 나타낸 정보를 말한다. 통상적으로 이는 Path와 구분되는 Trajectory 자체의 특성이지만, 그 의미 차이를 분명히 하기위해 ATM 분야에서는 4D 라는 용어와 결합하여 4DT로 표현하며, 필요에 따라 속도 정보를 포함하기도 한다. 현재의 항공 관제에서는 항공기 운영자가 제출하는 비행계획을 기반으로 출발 시간 순서와 요청 순서에 따라 First Come First Served 개념으로 처리하고, 비행 중 발생하는 상황에 대하여는 그 때 그 때 관제사가 조종사에게 음성으로 비행경로를 변경하도록 지시하는 등의 운용개념이 적용되고 있다. 그러나 TBO에서는 항공기 각각의 4DT 자체를 사전 조율 및 변경, 스케줄링의 대상으로 삼도록 하여, 증가하는 항공교통량에 대해서도 안전과 효율성을 담보함과 동시에, 운항과 관련된 객체들에게 모두 만족스러운 최적의 결과를 가져오게 하는 의도가 TBO의 운용개념으로 이어져 오고 있다[40].

미국과 유럽은 각각 NextGen(FAA's Next Generation Air Transportation System)과 SESAR(Single European Sky Air Traffic Management System Research)를 통해 TBO에 대한 운용개념들을 정립하고, 이를 가능하게 하는 기술적 요소들에 대한 연구개발을 수행하고 있다. ICAO(국제민간항공기구)는 전 세계적인 CNS(Communication, Navigation, and Surveillance) / ATM 로드맵에 해당하는 ASBU (Aviation System Block Upgrade)를 통해 전 세계적으로 TBO의 운용개념과 적용 일정을 공유하도록 유도하고 있으며, 관련된 국제표준제정을 위한 활동 또한 활발히 전개하고 있다[40]. TBO는 공역의 넓고 좁음, 교통량의 많고 적음에 관계없이 근미래의 항공교통이 공통적으로 갖게 될 특성으로 받아들여지고 있으며, UAV 및 PAV의 민간 공역 진출을 위한 초석으로 여겨지고 있다. 이에 따라 우리나라에서도 현재 미국 및 유럽의 주도로 이루어지고 있는 TBO의 운용개념을 재빨리 흡수하여 관련 기술 연구 개발 및 시스템 도입 운용에 반영할 필요가 있으며, 이에 따라 [40]과 같은 연구 결과가 발표된 바 있다.

TBO라는 용어는 쓰는 주체와 목적에 따라 좁은 의미와 넓은 의미를 갖게 되는데, 넓은 의미에서는 4DT를 활용한 항공교통관리 방법 및 그와 연관된 기술적 요소나 운용개념 전체를 지칭하기 위해 쓰이며, 이러한 4DT를 어떻게 공유하

고 어떤 전략으로 항공교통관제 및 관리에 활용할지를 구체적으로 나타내는, 특정 ATM 운용개념을 지칭하기위해 좁은 의미로 쓰이기도 한다.

본 논문에서는 넓은 의미와 좁은 의미로 혼용되어 쓰이는 TBO의 개념을 좀 더 명확히 하고, NextGen과 SESAR에서의 연구개발 사례를 통해 좁은 의미의 TBO에 대한 구체적인 운용 개념을 살펴보고자 한다. 또한 좁은 의미의 TBO를 가능하도록 하는 기술적 요소들(technical enablers, 이하 요소 기술)에 대해 소개하고 각 요소들에 대한 연구개발 진행현황을 정리하였다. 이를 위한 이후 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 ASBU에 나타난 TBO 관련 로드맵에 대해 소개하고, NextGen과 SESAR의 TBO 관련 연구개발 사례들에서의 운용개념에 대한 설명으로 이를 구체화 하고자 한다. 3장에서는 TBO를 가능하게 하는 요소 기술들을 정리하고 각각에 관련된 연구개발 사례들을 간단히 소개하며, 4장의 결론으로 마무리 된다.

## II. 궤적기반운용(TBO)의 개념

### 2.1 ASBU에서의 TBO

ASBU[3,4]는 국제민간항공기구의 단계별 항공 시스템 최신화(개선)계획으로서, 지역적 국가적 프로그램의 핵심 능력과 성과 향상을 세계적 범위에서 동일한 수준의 성과와 관련 이익을 갖도록 하고자 하는 목표하에 수립되었다. 이에 따라, 계획 이행을 위한 운용개념 뿐 아니라 이행을 위해 필요한 장비 및 시스템, 표준 및 절차, 선행국의 사례와 그 효과 또한 포함하고 있다[2]. 이와 같이 CNS/ATM 전반에 걸쳐 전 세계적으로 공통적인 이행을 위해 노력해야할 일종의 로드맵이자 가이드라인에 해당하는 ASBU에 나타난 TBO의 운용개념을 명확히 이해하는 것이, NextGen이나 SESAR와 같이 특정 지역에서 수행되고 있는 연구개발 사례들의 소개 이전에 선행되어야 할 것으로 생각된다.

앞서 언급한 바와 같이 TBO는 넓은 의미와 좁은 의미로 혼용되어 쓰이기도 하는데, 대표적으로 ASBU에서 그런 경향이 드러난다. ASBU의 스레드(Thread)들은 크게 4가지 성능개선영역(Performance Improvement Area, PIA)으로 나뉘는데[2], 그 중 4번째 성능개선영역은 'Efficient Flight Path - Through TBO' 라는 제목을 갖고 있다. 이 PIA에는 총 4개의 스레드(thread)가 있으며, 이중 하나로 Trajectory-based Operations

(TBO)라는 스펙트럼이 존재한다[3]. 이외의 스펙트럼들로서 Continuous Descent Operations(CDO)와 Continuous Climb Operations(CCO), Remotely Piloted Aircraft Systems(RPAS)가 해당 PIA에 포함된다. 예컨대, CDO와 CCO는 TBO에 포함된다 할 수도 있고, 좁은 의미의 TBO 운용개념을 보조하여 넓은 의미의 TBO를 현실화하는 요소로 작용한다고도 볼 수 있을 것이다. 본 논문에서는 주로 좁은 의미의 TBO 운용개념을 살펴보고, CDO, CCO 등과 같은 다른 운용개념들과 어떤 식으로 상호 작용을 통해 넓은 의미의 TBO를 가능하게 하는지 논의하기로 한다.

ASBU의 TBO 스펙트럼은 Block 0, 1, 3로 구성되어 있다. 현재에 해당하는 Block 0 단계(2013~)에서는 대양 또는 원격지에 해당하는 공역상 비행 단계에서 ADS-C(Automatic Dependent Surveillance - Contract)와 CPDLC(Controller Pilot Data Link Communication)을 이용한 감시 및 통신 강화를 이루어 좀 더 유연한 경로계획이나, 항공기간 분리 축소, 안전 향상을 가능하게 하는 것을 목표로 한다[3]. 2018년부터 이행하는 것을 목표로 하는 Block 1 단계에서는 초기 TBO로서, 추가적인 공대지 데이터 통신을 이용해 항공기로부터 항공기 궤적 예측 정보를 다운링크하여 접근관제구역 진입지점과 같은 Metering Fix에서의 도착순서 최적화를 지상에서 진행하고, 이를 CTA(Controlled Time of Arrival) 형식으로 업링크한 후 항공기에 탑재된 FMS(Flight Management System)으로 하여금 RTA(Required Time of Arrival)의 형태로 주어진 CTA를 만족하도록 하는 것이 주요 내용이다. 또한 기존의 지대지 통신을 강화하여 운영 협력 기능을 개선하도록 하는 내용이 포함되어 있다[2, 3]. 시기적 통일성을 위해 5년 단위로 구분된 ASBU의 Block 구성에서 기술 개발 및 운용 시기의 적절성을 고려하여 Block 2에 해당하는 TBO 모듈은 제외되어 있으며, 2028년부터 이행을 목표로 하는 Block 3에 해당하는 단계에서는 정확한 궤적 예측과 함께 공대지, 공대공 운항 정보와 궤적 정보 공유를 강화하여 운항 정보의 예측성, 문제 해결 기능, 관제 자동화 및 의사 결정의 정확성을 향상시키는 것을 목표로 한다[2, 3].

## 2.2 NextGen의 TBO

NextGen에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 지형지물, 라디오 비콘, 위치보고 등을 이용한 과거의 절차기반관제(Procedural Based Control)에서 VOR/DME, 레이더 등을 이용한 현재의 감시기

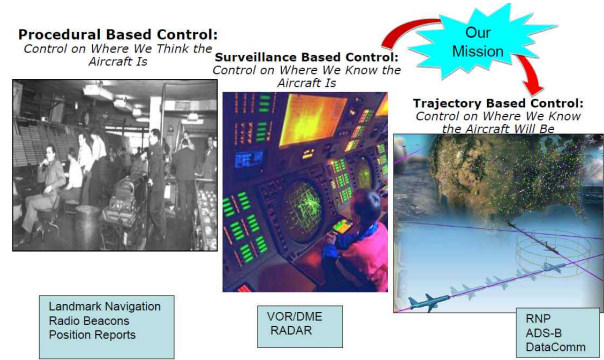


Fig. 1. NextGen TBO mission [6]

관제(Surveillance Based Control)로 변화한 것처럼, 현재로부터 미래에는 RNP, ADS-B, Data Comm. 등을 활용한 체계기반관제(Trajectory Based Control)로의 전환을 목표로 하고 있으며, 이를 위해 JPDO(Joint Planning and Development Office (美))의 Trajectory-based Operations Study Team과 같은 조직의 주도로 TBO 운용개념에 대한 연구가 이루어 졌다[5].

NextGen에서는 TOps(Trajectory Operations, 체계운용)과 TBO(체계기반운용, Trajectory-based Operation)를 구분하고 있는데, [5]의 용어 정의에 따르면 TOps는 관리하는 모든 항공기가 4DT로 표현되어 다루어지는 ATM 시스템이나 방식 전반을 말하며, 수용력과 효율성을 증대시키기 위한 중간 단계의 이행전략에 해당한다. 반면 TBO는 TOps에서 한 층 발전된 적용개념으로, 항공기들의 4DT(현재위치와 미래의 예측위치 모두)를 기준으로 항공기간 간격 분리, 시퀀스 및 합류 등을 제공하는 것을 말한다. 또한 TBO는 Gate-to-Gate 운용을 대상으로 하여 공항 지상/공중, 항로관제구역/접근관제구역, 전략적 단계(Strategic ATM)/전술적 단계(Tactical ATM)의 구분 없이 운항의 모든 단계에서 적용되어 이로 인한 이득을 극대화 하도록 하는 것을 목표로 한다[5].

전 운항단계에서의 적용을 목표로 하기 때문에 TBO는 비행이 시작되기 이전의 전략적 단계에서부터 시작되어 비행이 종료되기까지 각 단계에서 적용될 수 있으며, Fig. 2는 이를 위한 정보의 흐름을 나타낸다. 예컨대, 전략적 단계에서는 항공사의 FOC/AOC(Flight Operations Center/Airline Operations Center)와 ANSP(Air Navigation Service Provider)들 간에 초기 비행계획이나 체계계획에 해당하는 Initial Flight Plan/Object(또는 Business Trajectory. 사전 정의된 4DT로서, 현재의 항로 및 비행절차를 연결한 Gate-to-Gate

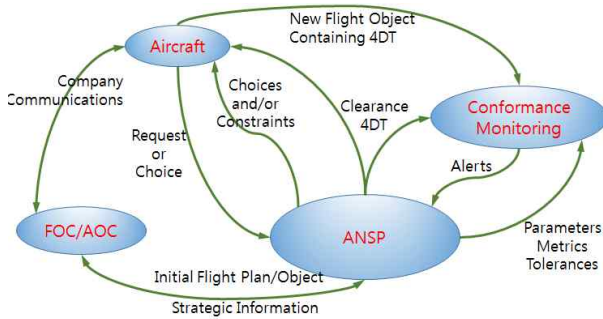


Fig. 2. Information Flow of NextGen TBO [5]

비행경로에 해당하며, 보다 효율적인 비행을 위해 항로 및 비행절차는 PBN 이나 CDO, CCO 등이 적용된 정밀 궤적으로 대체되어 4DT를 형성할 것으로 생각된다.)를 주고받으며 협상(negotiation) 또는 조정이 이루어진다. 항공기의 운항 중에는 운항 중 나타나는 비정상 상황(날씨 또는 기타 상황변화)에서 전략적 단계에서 결정된 Object를 추종하지 못할 것으로 예상되는 경우 ANSP 측으로 궤적 변경 요청을 전한 후 협상을 통해 새로운 Object를 결정하며, 결정된 Object 정보를 항공기에서 Conformance Monitoring 쪽으로 송신하도록 하는 등의 일련의 과정이 나타나 있다.

미국에서 항공기와 지상간의 Object 협상과 같은 운용개념을 위한 시스템 개발 연구는 CTAS-FMS 간 궤적 교환에 대한 연구처럼 1970년대부터 진행되어 왔으며[5], Object 생성을 위해서는 CDO, CCO, Tailored Arrivals 등의 연구가 진행되었다[19]. 비행 중의 비정상 상황에 대한 Initial Object 변경을 위한 협상에서는 주로 항공기에서 FMS를 이용하여 새로운 4DT를 계산한 후 이를 지상으로 다운링크하고, ANSP에서 효율적인 교통관리나 안전을 고려한 제한조건을 CTA의 형태와 같이 다시 항공기로 업링크하는 방법으로 협상이 이루어지며[5], 이와 같은 운용 개념은 ASBU에서 정의한 바와 거의 유사하다. 비행전의 전략적 단계에서 비행중의 전술적 단계까지 각 주체가 해야 할 일과 오고가는 데이터 종류, 그리고 이에 대한 예시로 제시한 여러 가지 운용 시나리오 등, 운용 개념의 실행을 위한 연구 결과가 [5]에 자세히 제시되어 있으며, 이와 같은 운용 개념의 실행을 위한 여러 가지 연구 또한 [7, 8, 9, 15, 20] 에서와 같이 진행되어 왔다.

미국 NASA에서 개발하여 FAA로 기술 이전 중에 있는[14] ATD-1(Air Traffic Management Technology Demonstration : IM-TAPSS(Interval Management - Terminal Area Precision Scheduling

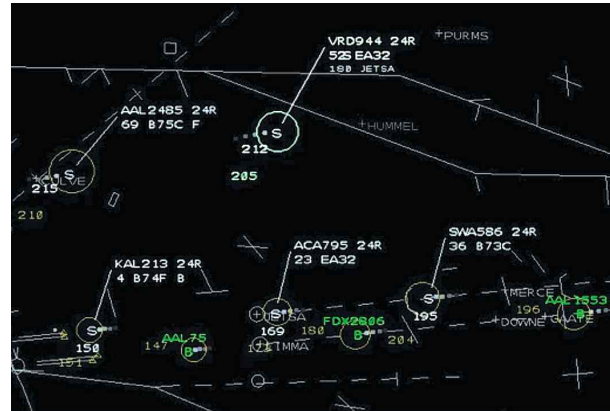


Fig. 3. GUI Display of ATD-1 CMS [10]

and Spacing)[10, 12, 13, 14]도 위와 유사한 TBO 운용개념을 개발/시험 하기 위한 프로젝트로 볼 수 있다. ATD-1은 항공기의 운항 중에 해당하는 전술적 단계의 TBO를 위한 관제사 결정정보조장치와 항공기 탑재 장비들을 포함한 통합 테스트 환경이며, 아래와 같은 시스템 및 기술들이 적용되어 있다[10].

- ADS-B
- Area Navigation(RNAV) Arrival Routes
- Optimized Profile Descent (OPD) Procedures
- Terminal Metering
- Flight Deck Interval Management(FIM)
- Controller Managed Spacing(CMS) tools

RNAV Arrival Routes 및 OPD Procedure는 ASBU에서의 CDO 및 CCO와 유사한 내용이며, Terminal Metering 및 CMS tools는 지상 시설로서, 관제사 결정정보조장치 및 시스템에 해당한다. FIM은 현재의 FMS와 유사하지만 이 프로젝트를 위해 기능이 확장된 탑재장비이며, Terminal Metering을 담당하는 지상장비가 생성한 항공기별 CTA를 만족할 수 있도록 각 항공기의 속도 조절을 담당하고, 생성된 4DT에 대한 조종석 현시 기능을 포함한다. FIM과 같은 탑재장비가 없는 항공기들이 혼재된 교통상황에서는 CMS tools가 4DT를 생성하여 관제사에게 제공하고 기존과 같은 음성 통신을 통해 조종사에게 전달하는 방법 또한 시험하고 있다. ADS-B는 공중 및 지상에서의 감시 기능 강화를 위해 적용되며, CMS tools는 Fig. 3과 같이 관제사들의 상황인식 기능 및 관제조건정보 인식 측면에서의 기능이 강화된 관제사 현시 장치를 포함한다[10].

### 2.3 SESAR에서의 TBO

2012년 발표된 European ATM Master



Table 1. TBO in ASBU and European ATM Master Plan [11]

ASBU	European ATM Mater Plan	
	Key Features	Operational Changes
B0-TBO (Improved Safety and Efficiency through the Initial Application of Data Link En-Route)	Moving from Airspace to 4D Trajectory Management	- System Interoperability with A/G Data Sharing
B1-TBO (Improved Traffic Synchronization and Initial Trajectory-based Operations)	Moving from Airspace to 4D Trajectory Management	- Trajectory Management Framework - System Interoperability with A/G Data Sharing
	Traffic Synchronization	- i4D + CTA
	Integrated Surface Management	- Surface Planning & Routing - Guidance Assistance to Aircraft & Vehicles

Plan[11]에서는 현재에 해당하는 Deployment Baseline으로부터 크게 3단계에 걸친 단계적 운용 개념 변화를 제시하고 있다. 각 단계별로 1단계는 시간기반운용(Time-based Operation), 2단계는 궤적기반운용(Trajectory-based Operation), 3단계에서 성능기반운용(Performance-based Operation)을 목표로 하고 있어 TBO라는 용어 자체는 이 Master Plan에서 넓은 의미로 사용되고 있는 것으로 보여진다.

유럽의 ATM Master Plan은 6개의 핵심 특성(Key Features) 안에 각각의 단계별 운용상 변화(Operational Changes)들이 포함된 형태이다. 6개의 핵심특성 중 ASBU의 TBO 스펙트럼과 연관되어 있는 것은 대표적으로 'Moving from Airspace to 4D Trajectory Management'와 'Traffic Synchronization'이며, ASBU의 TBO스펙트럼의 각 Block과 유럽 ATM Master Plan의 운용상 변화와의 연관 관계는 Table 1과 같다. 본 논문에서는 이중에서도 NextGen의 TBO와 유사하며 근시일내에 구현될 수 있는 운용개념으로서, Gate-to-Gate 관점에서 좁은 의미의 TBO 운용개념을 가장 구

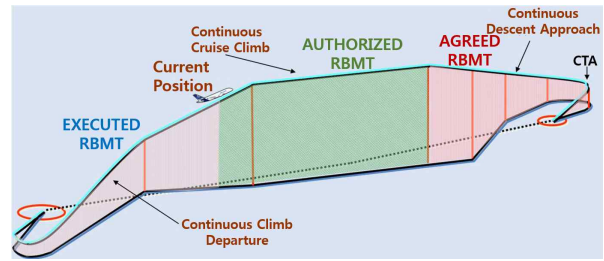


Fig. 4. Business/Mission Trajectory [18]

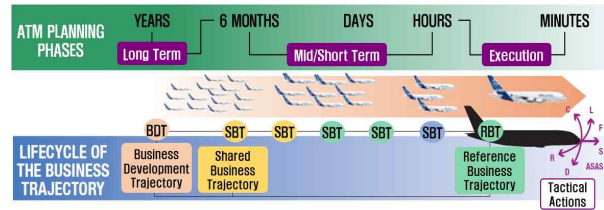


Fig. 5. Life Cycle of Business Trajectory [25]

체적으로 파악할 수 있는 'i4D(Initial 4D)+CTA'의 운용 개념에 대해 알아보기로 한다.

SESAR의 i4D+CTA에서는 Business/Mission Trajectory(B/MT)의 정의를 중요시하고 있다. B/MT는 각 이해관계자들의 동의를 얻어 설정된 4DT로서, BT는 민간항공부분에서, MT는 군관련 부분에서 적용 및 사용하는 4DT를 말한다. Fig. 4에서와 같이 이륙부터 착륙까지 연결된 궤적이며, CCO와 CDO, 또한 도착부분에서 CTA가 적용될 수 있는 4DT이다.

B/MT는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 전략적 단계에서 Shared Business Trajectory(SBT)로서 전략적 ATFM(Air Traffic Flow Management)에 적용되어 협상 및 조정의 대상이 되고, 항공기 출발 전 고정된 4DT가 되면 모든 이해관계자들이 공유한다는 차원에서 Reference Business Trajectory(RBT)로 명칭이 바뀌게 된다[17, 18, 24, 25]. 이는 NextGen에서의 'Closed Trajectory'[5]와도 비슷한 개념이다.

RBT가 결정되고 항공기가 출발하면, 지상에서는 항공기가 비행할 2D 경로의 허가를 발부할 뿐 정확한 4DT의 계산은 항공기에 탑재된 FMS에 의존하며, 각 항공기에 탑재된 FMS에서 계산된 4DT는 ADS-C 등을 이용하여 지상으로 다운로드된다. CTA가 적용되는 지점은 도착 공항의 Metering Fix 1개에만 적용되며, Metering Fix까지의 ETA(Estimated Time of Arrival)에 대한 최대, 최소값을 계산하는 것도 역시 항공기들 자체 탑재된 FMS에 의존한다. 지상에서는 여러 항공기에게 항공기 별 ETA의 최대, 최소값을 받아 항공기들의 도착 시퀀싱과 스케줄링을 수행하

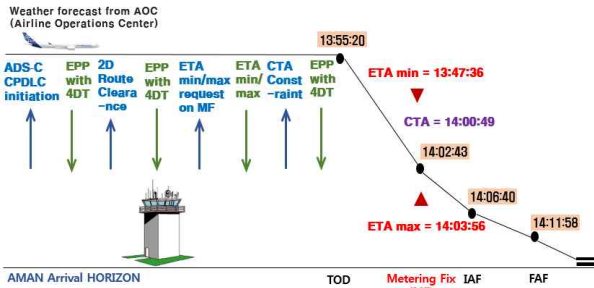


Fig. 6. Operational Concept of i4D+CTA [18]

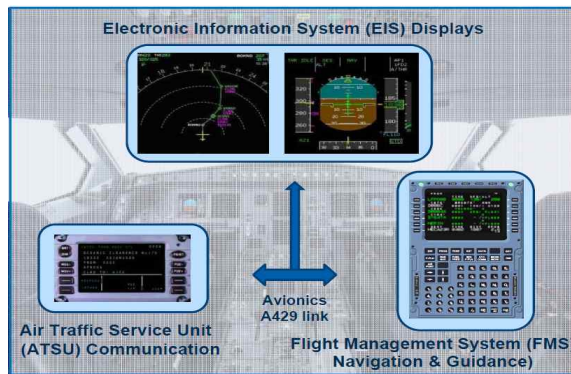


Fig. 7. Onboard Equipments for i4D+CTA [18]

며, 그 결과는 CTA의 형태로 항공기로 업링크 되어 FMS를 통해 각 항공기가 이를 추종하도록 한다. 이상의 절차들이 Fig. 6에 나타나 있다.

위와 같은 운용개념을 위한 항공기 탑재 장비의 구성은 Fig. 7과 같다. i4D+CTA에서는 4DT의 계산을 항공기 탑재장비에 의존하고 있는 만큼, 운용개념의 구현을 위해 현재 사용되고 있는 탑재장비의 기능/성능 증대가 상당히 요구된다. 대표적으로 기존 FMS의 RTA 추종 성능의 정확성이 증대되어야 하며, 날씨 및 기상 상황에 대한 모델링 성능 또한 향상되어야 한다. 정확한 ETA 최대, 최소값 예측을 위해 궤적 예측 정확성 또한 요구되며, CPDLC, ADS-C 등의 데이터 링크 기능도 필요하다[18].

i4D+CTA는 현재 NASA의 ATD-1 과 유사한 환경에서 여러 차례의 시뮬레이션 테스트를 거쳐 실제 비행시험 또한 수행되었으며[16, 17, 18], EUROCAE 및 RTCA의 표준화를 위한 연구결과로 제시되어 EUROCAE WG(Working Group) 85 와 78을 통해 “Datalink B2(Baseline 2)” 및 “4DNav” 등의 표준화에 반영되었다[18].

### III. TBO의 요소 기술

본 장에서는 앞서 알아본 TBO의 운용개념에

Table 2. i4D Airborne Features [18]

<p><b>도착시간 만족 성능 향상</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>정확도 +/-10초 (95% 신뢰구간)</li> </ul>
<p><b>향상된 기상 모델링</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>10단계 바람 모델 포함 (현재 5단계)</li> <li>10단계 기온 모델 포함 (현재 1단계)</li> <li>지상으로부터의 바람 및 기온 정보 업링크 기능 강화</li> </ul>
<p><b>ETA 최대/최소값 예측</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>탑재 시스템에 의한 임의의 경유 지점의 ETA 최대/최소값 예측 - FMS의 RTA 기능 확장</li> <li>ADS-C를 통한 ETA 최대/최소값 전송</li> </ul>
<p><b>데이터링크</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>조종사 HMI와 통합된 데이터 링크 - SC214/WG78에서 제안된 B2 표준 충족</li> <li>CPDLC - 경로 허가 및 RTA 메시지 포함 (초단위 해상도 및 허용오차 값 포함)</li> <li>ADS-C - (요청에 의한/이벤트 성/주기적) 4DT 다운링크</li> </ul>

따라 선별된 요소 기술들(technical enablers)을 소개하고자 한다. Near-Term의 TBO 구현을 위해 해결해야할 기술적 문제 등에 대해서는 앞서 2장에서 정리한 운용 개념에서도 조금씩 소개되었으며, [21, 22, 23]와 같은 연구를 통해 이뤄진바 있다. 본 3장에서는 이를 토대로 요소 기술들을 간단히 정리하였다.

#### 3.1 Advanced FMS Capability

항공기 개개의 정확한 4DT는 항공기 탑재 장비(FMS 등)에서 계산되어야 하므로, TBO를 위한 FMS는 현재의 FMS보다 기능 및 성능이 개선되어야 할 것이다. SESAR의 i4D를 위해 요구되는 FMS의 성능은 다음 Table 2와 같다.

위와 같은 향상된 FMS 성능 및 기능을 위해 CTA의 추종정확성 향상에 연구[26]나, 항공기와 지상간의 4DT 협상(negotiation)을 위한 FMS의 CTA 추종 기능의 확장[27], 시뮬레이션을 통한 적용 연구[39]와 같은 관련된 연구가 진행된 바 있다.

#### 3.2 Data Communication

Air와 Ground 간의 4DT 정보 송수신, AOC와 항공기 간 통신을 위해서는 기존의 음성통신 이외 디지털 통신 링크가 필요하다. 4DT 정보의 송수신을 위해 RTCA SC214/EUROCAE WG78에서는 새로운 통신링크 표준을 정의하기로 하고

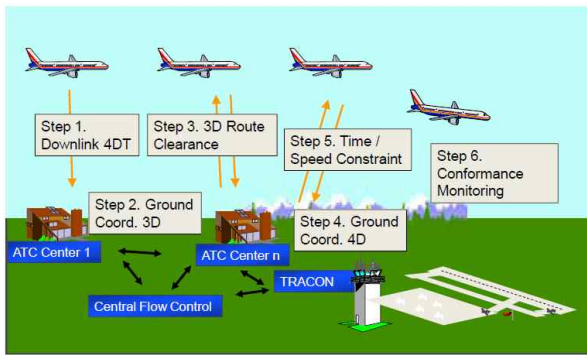


Fig. 8. Operational Concept of 4DTRAD [30]

4DTRAD(4D Trajectory Data Link)[17, 30, 31]를 준비하여 RTCA DO-306 Change1[31] 등에 반영시켰으며, TBO와 상응하는 항공교통서비스용 데이터 통신에 대한 SPR(Safety Performance Requirements) 및 INTEROP(Interoperability Requirements)개발을 위한 활동을 지속해 나가고 있다[42]. RTCA의 4DTRAD 운용개념은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 NextGen이나 SESAR에서의 좁은 의미의 TBO 운용 개념과 일치하는 것을 알 수 있다.

유럽에서는 3단계(short-, mid-, far-term)에 걸쳐 새로운 통신링크 적용에 대한 계획이 수립되었고, 미국에서는 2단계(mid-, far-term)에 걸친 계획이 수립되었으며[17, 28, 29], 4DT가 ACARS(Aircraft Communication Addressing and Reporting System)를 통해 어떻게 공유될 수 있는지에 대한 연구[26] 등이 진행되었다. 이외 AOC와 항공기 간 통신이나 기타 통신에 있어 ADS-C 나 ACARS 등이 계속 활용될 것으로 보인다.

TBO 및 TOPs를 위한 지상에서의 이해관계자들 사이의 정보교환(Ground/Ground)에 있어서도 데이터 표준화에 대한 필요성이 대두되었다[32]. 이를 위해 특히 TBO를 위해 NextGen과 SESAR에서의 각각 정의한 용어들을 통일할 필요성과 함께, FIXM(Flight Information Exchange Model)와 같은 데이터 모델 정의에 대한 필요성이 제기되었으며, 공통적인 데이터 모델 정의를 위한 FIXM Core와 지역적 운용 개념 차이를 반영하기 위한 FIXM Extension에 대한 필요유무가 논의되었다. 현재 'FIXM Core v3.0'이 정의되어 있으며, 'FIXM US Extension v3.0'과 'EUROCONTROL A-CDM Extension'이 각각 정의되어 있다[33].

### 3.3 ADS-B

TBO의 가장 기본적인 전제사항은 지상에서의 향상된 항공감시능력이다. TBO를 위해서는 특히

항공기와 지상 시스템 간에 이전보다 많은 정보를 주고 받아야하며, 기존의 레이다가 커버하지 못하는 지역에서도 향상된 항공 감시 정보가 필요하므로, ADS-B는 TBO의 주요 필요기술로 작용할 것으로 보인다. SESAR와 NextGen 역시 CASCADE 프로그램 등을 통해 ADS-B의 적용을 위해 일찍부터 많은 노력을 기울여 왔으며, 항공기 간 정보교환이나 TIS-B(Traffic Information Service-Broadcasting)와의 정보교환을 위한 ADS-B IN 기능 또한 중요하게 고려된다[22].

### 3.4 결정정보조장치(Decision Support Tool)

결정정보조장치는 항공기로부터 4DT 관련 정보를 전달받아 CTA를 결정하는 지상장비를 말한다. 대표적으로 출도착 관리 부분에서 Metering Fix에서의 도착순서와 CTA를 결정하는 AMAN(Arrival Manager)/DMAN(Departure Manager)이 이에 해당하고, 전략적 단계의 ATFM 차원에서 항공기의 전체 스케줄링을 수행하는 시스템(예를 들어 SESAR의 i4D+CTA에서 SBT를 협상하거나 RBT로 전환시키는 단계에서 사용)이 결정정보조장치가 될 수 있다.

현재 단계에서의 AMAN/DMAN 등은 TBO의 운용개념에 의거하여 만들어진 시스템이라기보다 Time-based Operation 개념에 의해 현재 개발/사용되고 있는 시스템이다. 현재 항공기의 FMS 기능 및 성능이 TBO에서 요구하는 정도에 미치지 못하기 때문에 자체적으로 4DT를 계산하는 기능(Trajectory Prediction)을 포함하고 있는 경우가 대부분이며, 또한 공항단위의 출도착 관리에 쓰이고 있기 때문에 Gate-to-Gate 차원의 4DT가 적용된 시스템이라고 보기 어려운 부분이 있다. AMAN/DMAN이 TBO를 위해 개발되지는 않았지만, TBO 또한 AMAN/DMAN으로 구현된 Time-based Operation에서 발전된 운용개념이기 때문에, 현재 단계에서 그 역할이나 기능이 크게 어긋나는 바는 보이지 않는다. 그러나 항공기로부터 전달된 4DT 정보에 의거하여 스케줄링을 수행하도록 기능이 수정되어야 하고, 4DT에 의거한 스케줄링 결과를 적절한 사용자 인터페이스를 통해 관제사에게 제공해 주어야 할 것으로 생각된다. 또한 근미래에, TBO에 적합한 발전된 기능을 가진 FMS를 탑재한 항공기들과 그렇지 않은 기존의 FMS를 탑재하고 운항하는 항공기들이 혼재된 운용환경을 가정하면, AMAN/DMAN 등은 4DT를 자체적으로 계산하는 기능을 계속 유지하여야 할 것으로 보이며, 항공기의 4DT 추종 여부를 감시할 Conformance Monitoring 기능 또한 요구될 것이다.

NextGen에서는 TOPs 및 TBO에 적합한 항공 감시시스템 및 지상장비로서 ERAM(En-Route Automation Modernization)을 배치할 계획이며 [34], ERAM의 4DT 계산 기능 보안을 위해 NASA에서 개발한 EDA(Efficient Descending Advisor)의 4DT 계산 기능을 ERAM에 통합하는 연구[21]가 수행되었다. 앞서 2장에서 언급한 NASA의 ADT-1에서 Terminal Metering 시스템이나 CMS tool 등도 TBO를 위한 결정정보조장치에 해당한다.

유럽쪽에서는 AMAN/DMAN에 대한 연구개발이 활발히 진행되어 적용단계에 왔으며[35-38], 이와 같은 결정정보조장치들을 TBO의 운용개념에 맞추어 그 기능을 수정/보완하고 다른 시스템과 통합하는 방향으로 개발이 진행될 것으로 생각된다.

#### IV. 결 론

이상을 통해 ASBU의 TBO 운용개념을 정리하였고, NextGen과 SESAR에서 진행 중인 프로젝트들을 통해 각각에서 구현하고 있는 좁은 의미의 TBO에 대한 구체적인 운용개념을 알아보았다. 또한 이를 통해 알게 된 TBO의 요소 기술들에 대한 소개와 연구개발 동향을 정리하였다.

NextGen과 SESAR에서 진행 중인 TBO는 전략적/전술적 단계 구분 없이 Gate-to-Gate 차원의 4DT를 적용하여 비행 전 단계에서부터 항공교통관리가 이루어지도록 하는 큰 개념이 공통적이었으며, 날씨 변화나 도착단계에서의 스케줄링 등을 위한 관제사 임의의 Radar Vectoring을 배제하여, 늘어나는 교통량에 대해서도 관제사 및 조종사의 일부담을 줄이고 항공기의 움직임에 대한 불확실성을 줄여 좁은 지역에서의 안전한 항공 관제 뿐만 아니라 AFTM과 같이 넓은 지역에서의 교통량 밸런싱이 보다 효과적으로 이루어질 수 있도록 하는 큰 맥락과 목적이 일치하는 것으로 보인다.

구체적으로 언급하자면, 다른 항공기들이나 ATFM 차원에서의 효율성을 고려한 항공기들의 운항 스케줄링은 지상에서 담당하고, 항공기 개개의 정확한 4DT는 항공기 탑재 장비(FMS 등)에서 계산된다는 점 또한 공통적이다. 이는 항공기 개개의 비행상황 (날씨나 항공기별 특성 및 현재 상태 등)에 대한 정보를 지상에서 모두 수집하여 계산하는 것보다 훨씬 높은 정확성을 보장할 수 있다는 점, 항공기의 비행상황 정보를 다운링크하고 지상에서 4DT를 계산하여 다시 업링크하는 것보다 자원 활용 면에서 효율적이라는

점을 고려할 때 타당한 전략으로 생각된다. 그러나 항공기들의 개별적인 궤적 예측 정확성이 비슷한 수준에 도달해야 하며, 항공기로부터 전달되는 4DT 데이터의 신뢰성이 보장되어야 한다는 점, 정보 보안 등과 같은 문제가 해결되어야 할 것으로 생각된다.

NextGen과 SESAR를 통해 진행되는 TBO 관련 개념 연구나 기술 개발 사례는 양측 기술수준의 차이나 운용개념상 장단점이 있다고 하기 어려울 만큼 유사한 양상을 보인다. 그러나 양쪽이 처한 상황에 따라 문제를 해결하고자 하는 관점의 차이가 존재하는데, 미국에서는 항공교통의 Bottle Neck에 해당하는 공항 주변에서의 도착관리에서부터 연구개발이 확장된 형상이며, 여러 나라가 모인 유럽에서는 국가 간의 항공교통흐름 관리가 중요시되고, 각국의 ANSP 및 당사자들 사이의 정보공유와 이해 공통된 이익창출을 위해 B/MT 등의 개념 정립과 정의, 공유를 중요시 하는 것으로 보인다. 분명한 것은 4DT 자체를 협상과 운용 및 변경의 대상으로 삼고, 이 정보를 공유하고자 하는 운용개념은 양측이 동일하며, 이에 따라 공통적으로 Air/Ground 사이의 4DT 공유, 또한 Ground/ Ground 사이에서의 정보공유를 중요시한다는 점이다. 이를 위해 Air/Ground 사이의 데이터링크 및 Ground/Ground 사이의 정보교환을 위한 SWIM(System Wide Information Management)이 TBO의 운용개념을 뒷받침 할 것이다.

TBO는 본 논문에서 개괄한 바와 같은 연구개발 사례들을 밑거름으로 최근 ICAO 패널회의 등을 통해 운용개념이 정립되기 시작한 단계이며 [41], 관련한 국제 규정이나 표준은 운용개념 정립이후에 수립될 것이다. 현재 상태에서는 그 간 관련된 연구개발을 꾸준히 수행하여 온 미국과 유럽이 운용개념 수립에 주도권을 쥐고 있으나, 사용될만한 요소기술 측면에 있어서는 ADS-B, SWIM 등 우리나라도 관련된 연구개발을 진행하였거나 진행하고 있는 만큼, 이전의 연구개발결과에서 멈추지 말고 TBO의 운용개념을 재빨리 습득하여 이에 맞춘 요소기술 획득 및 원천기술 개발에 박차를 가해야 할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 국토교통부 연구과제인 '항공기 출발 및 도착 통합 관리 기술 연구'에 의해 연구비 지원을 받았으며, 이에 대해 감사드립니다.



## References

- 1) Torres, S., Kloster, J. K., Ren, L., and Castillo-Effen, M., *Trajectory Synchronization Between Air and Ground Trajectory Predictors*, 30th IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference(DASC), Seattle, WA, October 2011.
- 2) Korea Transport Institute, *Master Plan for the Implementation of Aviation System Block Upgrade - Final Report*, April 2014.
- 3) ICAO(International Civil Aviation Organization), *Working Document for the Aviation System Block Upgrades - The Framework for Harmonization*, March 2013.
- 4) ICAO(International Civil Aviation Organization), *Working Document for the Aviation System Block Upgrades - The Framework for Harmonization*, Ed. 2, Ver. 3, November 2011.
- 5) JPDO(Joint Planning and Development Office), *JPDO Trajectory-based Operations (TBO) Study Team Report*, December 2011.
- 6) Ashford., R, *NextGen Trajectory-based Operations Status Update*, Environmental working Group Operations Standing Committee, May 2010.
- 7) Jackson, M.R.C., O'Laughlin, B.E., *Airborne Required Time of Arrival Control and Integration with ATM*, 7th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations conference, Belfast, NI, 2007.
- 8) Mueller, E., McNally, D., Rentas, T., Aweiss, A., Thippavong, D., Gong C., Cheng, J., Walton, J., Walker, J., Lee, C.H., Sahlman, S., *Controller and Pilot Evaluation of a Datalink-Enabled Trajectory-based Operations Concepts*, 9th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM 2011), Berlin, Germany, June 2011.
- 9) Torres, S., *Swam Theory Applied to Air Traffic Flow Management*, Procedia computer Science 12 (2012) 463-470.
- 10) NASA, *Air Traffic Management(ATM) Technology Demonstration - 1 (ATD-1) : Interval Management - Terminal Area Precision Scheduling and Spaing (IM-TAPSS)*, Fact Sheet, January 2012.
- 11) SESAR, *European ATM Master Plan*, 2nd Edition, October 2012.
- 12) Swenson, H.N., Thippavong, J., Sadovsky, A., *Design and Evaluation of the Terminal Area precision Scheduling and Spacing System*, 9th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM 2011), Berlin, Germany, June 2011.
- 13) NASA, *Air Traffic Management Technology Demonstration-1 Concept of Operations Version 2.0*, NASA/TM-2013-218040, 2013.
- 14) NASA, *Air Traffic Management Technology Demonstration-1 Tech Transfer Document Summary Version 2.0*, NASA/TM-2014- 216658, 2014.
- 15) Wynnyk, C., Balakrichna, M., MacWilliams, P., Becher, T., *2011 Trajectory Based Operations Flight Trials*, 10th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM 2013), Chicago IL, June 2013.
- 16) Mutuel, L.H., Paricaud, E., Neri, P., *Initial 4D Trajectory Management Concept Evaluation*, 10th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM 2013), Chicago, IL, June 2013.
- 17) Eurocontrol, *Initial 4D - 4D Trajectory Data Link (4DTRAD) Concept of Operations*, December 2008.
- 18) Bowen, D., *The SESAR Concept and i4D*, Educational Workshop in ATM global 2014, September 2014.
- 19) Diaz-Mercado, Y., Lee, S.G., Egerstedt, M., Young, S.Y., *Optimal Trajectory Generation for Next Generation flight Management Systems*, Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2013 IEEE/AIAA 32nd, East Syracuse, NY, October 2013.
- 20) Torres, S., Klooster, J.K., Ren, L., Castillo-Effen, M., *Trajectory Synchronization Between Air and Ground Trajectory Predictors*, Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2011 IEEE/AIAA 30th, Seattle, WA, October 2011.
- 21) Cate, K.T., *Challenges in Achieving Trajectory-based Operations*, 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Grapevine,

TX, January 2013.

22) Enea, G., Porretta, M., *A Comparison of 4D-Trajectory Operations Envisioned for NextGen and SESAR, Some Preliminary Findings*, 28th International congress of the Aeronautical Sciences, Brisbane, Australia, September 2012.

23) Lacher, J., Battise, V., Koteskey, R., ADao, A.Q.V., Brandt, S.L., Ligda, S.V., Wu, S.C., *Issues for Near-Term Implementation of Trajectory Based Operations*, 9th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM 2011), Berlin, Germany, June 2011.

24) SESAR Joint Undertaking, *Business Trajectory/4D' Trajectory*, SESAR Factsheet, February 2010.

25) SESAR Consortium, *The ATM Target Concept D3, Sesar Definition Phase - Deliverable 3*, September 2007.

26) Klooster, J.K., Del Amo, A., Manzi, P., *A Controlled Time-of-Arrival Flight Trials*, 8th USA/Europe ATM R&D Seminar, Napa, CA, 2009.

27) Jackson, M.R.C., O'Laughlin, B.E., *Airborne Required Time of Arrival Control and Interaction with ATM*, 7th AIAA Aviation technology, Integration and Operations Conference, Belfast, Northern Ireland, 2007.

28) Hughes, D., *NextGen and SESAR Grapple With 4D Trajectories*, Aviation Week & Space Technology online, August 2008.

29) FAA, *Data Communication Overview*, V. 11, February, 2010.

30) Jackson, M.R.C., Gonda, J., Mead, R., Gaccone, G., *The 4D Trajectory Data Link (4DTRAD) Service - Closing the Loop for Air Traffic Control*, IEEE Audio, Transactions of the IRE Professional Group on, 2009.

31) RTCA, DO-306 Change-1, *Safety and*

*Performance Standard for Air Traffic Data Link services in Oceanic and Remote Airspace (Oceanic SPR Standard)*, March 2011.

32) NextGen Institute, *Joint FAA/SESAR Technical Interchanges Report, DTFAWA-05-A-00005-Task Order 0007, Element 2*, FAA Chief Scientist for Architecture and Next Gen Development, November 2012.

33) FIXM website, <http://www.fixm.aero>

34) FAA, *NextGen Implementation Plan*, August 2014.

35) EUROCONTROL, *AMAN Information Extension to En-Route Sectors-Concept of Operations*, Ed. 1.0, June 2009.

36) EUROCONTROL, *AMAN Status Review 2010*, Ed. 0.1 December 2010.

37) European Airport CDM, *Generic Operational Concept for Pre-departure Runway Sequence Planning and Accurate Take-Off Performance*, Draft, February 2009.

38) EUROCONTROL, *The EUROCONTROL DMAN Prototype - Description of DMAN in the A-CDM context*, Ed.0.4, December 2010.

39) Teller, T. L., *4D FMS TBO Pilot-Controller Human-in-the-Loop simulation*, Research Report of FAA - 4D FMS TBO Program, May 2011.

40) Lee, G., *A Study on the Development and Implementation of International Standards on Trajectory Based Operations (TBO)*, Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, Vol. 22, No. 3, 2014.

41) Hof, H., Moore J., Harada, T., *Trajectory Based Operations Concept Document(TBOCD)*, ICAO ATRMRPP-WG/28-WP/652, March 2015.

42) RTCA Special Committee (SC) 214, *Terms of Reference - Standards for Air Traffic Data Communication Services*, Revision 6, RTCA Paper No. 205-14/PMC-1254, September 2014.