

## 안전한 도심항공교통 운영을 위한 전략적 충돌 관리 방안

# Strategic Conflict Management for Safe Urban Air Mobility Operations

윤태경<sup>1</sup> · 오수환<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한화시스템

<sup>2</sup>한서대학교 항공산업공학과

Tae gyeong Yun<sup>1</sup> · Soohwan Oh<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Hanwha Systems, Gyeonggi-do, 13524, Korea

<sup>2</sup>Department of Aerospace Industrial and Systems Engineering, Hanseo University, Choongcheongnam-do, 32158, Republic of Korea

### [요약]

도심항공교통 (UAM; urban air mobility)의 상용화 가능성이 증가하고 있지만, 대규모 UAM 운항의 안전성을 확보하기 위한 기술적 기반은 아직 부족하다. 본 논문은 UAM 교통관리체계 내 전략적 충돌 관리 적용 방안을 도출하기 위해, 기존 항공 교통에서 활용되는 전략적 충돌 관리 기법과 UAM 관련 연구 및 기술 동향을 분석하였다. 이를 통해, 수요 및 수용량 관리 기법이 UAM 충돌 관리에 적용될 가능성이 크며, 시스템 전체론적인 접근의 필요함을 확인하였다. 특히, 비행시간의 불확실성과 대규모 운영 상황에서의 효과적인 구현을 위해 필요한 사항으로 데이터 공유, 확률론적 접근 방법 등이 식별되었다.

### [Abstract]

Urban air mobility (UAM) shows great promise for commercialization, yet the technical foundations for ensuring safety in large-scale operations remain a challenge. The purpose of this paper was to analyze current air traffic conflict management techniques in order to develop strategies for implementing strategic conflict management within UAM traffic management systems. We found that UAM conflict management can benefit from demand and capacity balancing techniques, and a system-wide approach is essential. Specifically, the use of data sharing and probabilistic methods is essential for addressing flight time uncertainty and large-scale UAM operations effectively.

**Key word** : Demand capacity balancing, Separation, Strategic conflict management, Urban air mobility, Urban air mobility traffic management.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.4.450>



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 12 August 2024; Revised 20 August 2024

Accepted (Publication) 25 August 2024 (30 August 2024)

\*Corresponding Author; Soohwan Oh

Tel:\*\*\* - \*\*\*\* - \*\*\*\*

E-mail: suhwan@hanseo.ac.kr

## I. 서 론

기존 육상교통체계는 도심지역의 교통혼잡 문제를 효과적으로 해결하지 못하고 있어, 이에 대한 해결책으로 도심항공교통(UAM; urban air mobility)이 부상하고 있다[1]. UAM의 상용화 가능성 또한 분산 추진 시스템, 통신 기술, 자율 비행 기술 등 첨단 기술의 발전과 함께 조비 에비에이션, 필리움 등의 항공모빌리티 선도 기업들의 성공적인 시범 비행을 통해 점차 구체화되고 있다[2].

상용화를 거쳐 도심항공교통이 성숙기에 이르르면 도심 내 운항하는 항공기의 수가 급격히 증가할 것으로 예측된다[3]. 그러나 기존의 항공교통관제 절차로는 업무부하 측면에서 도심 내 증가된 UAM 교통량을 수용하기 어렵다[4]. 증가된 UAM 교통량을 효과적으로 수용 및 처리하기 위해서는 UAM 항공기를 대상으로 적용되어야 할 UAM 교통관리체계(UATM; UAM air traffic management)가 필요하다. UAM 교통관리체계에서는 UAM 교통관리서비스 제공자가 기존 항행서비스 제공자를 대체하여, UAM 항공기가 비행하는 전용 공역 내에서 수요 및 수용량 관리, 분리업무 등 항공 교통 관리 서비스를 제공할 것으로 예상된다[1].

도심 내 제한된 공역에서 운항하는 UAM 항공기 대상 분리업무가 전술적 단계에서의 항공기 간 분리에만 의존하게 될 경우, UAM 교통관리서비스 제공자에게 상당한 업무 부담을 초래할 수 있다. 즉, UAM 교통관리체계가 전술적 분리에 의존할 경우, UAM 항공기 간의 충돌 확률이 높아지고, 이에 따라 운항 안전성이 저해될 수 있다[5].

이에 따라 전술적 분리를 최소화하기 위한 방안으로 비행 계획 단계에서 이륙 시간을 조절하는 방법 등 수요-수용량 균형의 관점에서의 전략적 충돌 관리가 검토되고 있다. 대표적으로 NASA는 전략적 충돌 관리의 UAM 교통관리체계 적용 가능성과 그 효과를 검토하기 위해 UAM 교통관리서비스 제공 기업과 협력하여 UAM 시뮬레이션 환경을 구축하고 테스트를 진행하였다[5]. UAM 환경 내 전략적 충돌 관리의 효과성을 평가하기 위해 다양한 시나리오에서 PSU (provider of services for UAM) 간 데이터 동기화, 수요-수용량 균형(DCB; demand and capacity balancing)을 통합한 시나리오 테스트 환경을 구축하여 전략적 충돌 관리가 전술적 분리의 부담을 줄일 수 있다는 사실을 확인하였다.

UAM 교통관리체계 내에서의 전략적 충돌 관리에 관한 연구는 아직 초기 단계에 있으며, 이를 향후 점진적으로 도입하기 위한 필요사항에 대한 시스템 통합 측면의 접근(system of system)에 관한 연구는 부족한 상황이다. 이에 본 논문에서는 UAM 교통관리체계 내 전략적 충돌 관리 기능 도입을 위해 필요한 사항을 식별한다. 전략적 충돌 관리의 총체적인 개념을 검토하고 최근 NASA를 비롯한 항공 관련 연구기관에서 수행된 UAM 교통관리체계 내 전략적 충돌 관리 적용 방안에 대한 문헌 분석을 수행한다. 이를 통해, 국내 UAM 교통관리체계 내 진

략적 충돌 관리 도입을 위한 시스템 전체론적인 관점에서 필요한 사항을 식별한다.

## II. 전략적 충돌 관리

본 장에서는 글로벌 항공교통관리 운영개념(GATMOC; global air traffic management operation concept) 내 전략적 충돌 관리가 기존 항공교통시스템에 적용된 사례 분석을 통해, 현실 시스템에서 어떻게 구현되고 운영되는지를 살펴본다. 구체적으로 DCB가 적용된 항공교통흐름관리 시스템과 트래픽 동기화가 적용된 출발·도착 관리 시스템의 주요 기능과 작동원리를 검토하였다.

### 2-1. 전략적 충돌 관리 목적 및 정의

국제민간항공기구에서 발간한 GATMOC 문서에 따르면, 항공교통관리(ATM; air traffic management)는 (1) 공역 구성 및 관리(airspace organization and management), (2) 공항 운영(aerodrome operations), (3) 수요 및 수용량 관리(demand and capacity balancing), (4) 트래픽 동기화(traffic synchronization), (5) 공역 사용 운영(airspace user operations), (6) 충돌 관리(conflict management), (7) 항공교통관리업무 공유 관리(ATM service delivery management)로 구성되어 있다. 구성 요소들은 서로 독립적으로 기능하기보다는 상호 연관되어 있으며, 본 논문의 분석 대상인 전략적 충돌 관리는 공역 구성 및 관리, 수요 및 수용량 관리, 트래픽 동기화와 유기적으로 관련되어 있다[6].

충돌은 항공기와 잠재적인 위험 요소 간에 설정된 분리 최소치 기준이 위반되는 상황을 의미한다. 여기서, 위험 요소는 다른 항공기뿐만 아니라 지형 장애물도 포함된다. 또한, 분리 최소치를 산정할 때는 항공기의 현재 궤적뿐만 아니라 미래에 비행할 것으로 예측되는 궤적도 함께 고려된다. 충돌 관리는 항공기와 위험 요소 간의 충돌 위험을 허용 가능한 수준으로 제한하는 것을 의미한다. 충돌 위험을 허용 가능한 수준 이하로 낮추는 단계는 (1) 충돌 위험 측정, (2) 허용 가능한 수준 설정, (3) 충돌 위험 저감을 위한 조치 이행의 과정을 따른다.

충돌 관리의 시간적 범위는 비행스케줄 생성 단계부터 실제 비행이 이루어지는 단계까지를 포괄하며, 이는 전략적 충돌 관리, 전술적 충돌 관리, 그리고 충돌 회피의 세 가지 계층으로 구분된다. 전략적 충돌 관리란 항공기와 위험 요소 간의 충돌 위험을 전략 단계에서부터 최소화하기 위한 계획적 조치를 의미하며, 수요 및 수용량 관리, 공역 구조 및 관리, 트래픽 동기화 방법론 적용 등을 통해 수행된다. 이러한 전략적 조치를 통해 전술적 충돌 관리와 충돌 회피 조치의 필요성을 최소화할 수 있다.

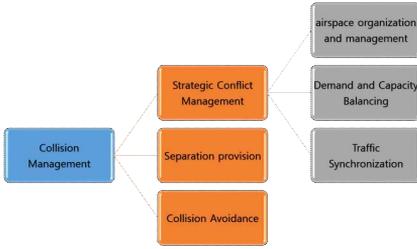


그림 1. 충돌 관리 개념 구조도  
**Fig. 1.** Collision management concepts hierarchy [6].

여기서, 전략적이라는 용어는 전술적 조치가 수행되기 이전에 이루어지는 조치를 의미하며, 이는 비행 계획 단계에서만 아니라 비행 중에도 적용될 수 있다. 예를 들어, 비행 중 충돌 위험이 예측될 경우 비행경로를 사전에 변경하는 방식으로 전략적 충돌 관리 조치가 이루어질 수 있다.

**2-2. 수요 및 수용량 관리**

수요 및 수용량 관리의 주요 목표는 공역 및 공항의 수요와 수용량을 조정하여 과밀화를 방지하고, 이를 통해 충돌 위험을 최소화하는 것이다. 특히, 항공기가 비행 중 충돌할 경우 심각한 사고를 초래할 수 있으므로, 체계적이고 정교한 공역 사용계획의 수립 및 조정이 필수적이다. 이러한 계획은 시간, 장소 및 방법에 관한 결정뿐만 아니라, 타 공역 또는 공항의 수용량과 상충하는 상황을 효과적으로 조정하는 과정을 포함한다. 따라서 교통 흐름과 수용량을 전략적으로 평가 및 분석하고, 이를 기반으로 효과적인 관리 방안을 마련하는 것이 중요하다 [6].

수요 및 수용량 간 불균형 해소는 협력적 의사결정을 기반으로 수행된다. 이 과정에서 자원 할당의 최적화가 이루어져 처리량이 극대화되며, 비행스케줄 또한 조정되어 최적화된다. 특히, 항공교통업무 제공자는 유도로, 활주로, 주기장 등의 자원 배분과 항공기 궤적, 공역 진출입 시간 등을 조정함으로써 수요와 수용량 간의 불균형을 해소한다. 이러한 조정 과정은 전체 항공교통시스템의 효율성을 향상시키고, 항공 교통의 원활한 흐름을 보장하여 충돌 위험을 최소화하는 데 기여한다.

수요와 수용량 간의 균형을 달성하기 위해서는 사용자 요청 궤적과 실제 궤적 간 차이 최소화, 계획되지 않은 상황에 대한 수용 가능성 확보, 출발 게이트에서 도착 게이트까지의 전 비행 과정 내 수요와 수용량 간 균형 기능 등이 필요하다. 그러나 이 과정에서 다음과 같은 제한 사항도 존재할 수 있다. 첫째, 실시간으로 운영 관련 의사결정에 제약이 있어 신속한 대응이 어려울 수 있다. 둘째, 수요 조정에 필요한 시간적 여유가 부족할 수 있어 신속한 수요 조정이 요구된다. 셋째, 예측에 기반한 오류가 발생할 수 있다. 넷째, 항공 교통의 확률적 특성에 기인한 불

확실성이 존재한다. 이러한 요소들은 수요 및 수용량 관리의 복잡성을 증가시키며, 이에 대한 적절한 대응 방안을 마련하는 것이 중요하다.

**2-3. 트래픽 동기화**

트래픽 동기화는 항공 교통 관리에서 항공기 간의 움직임 조정하여 효율적이고 안전한 흐름을 유지하는 개념이다. 이는 출발, 도착, 경로를 포함한 모든 비행 단계에서 적용되며, 항공기의 간격을 최적화하고 충돌 위험을 줄이며 공역과 공역의 용량을 최대한 활용하는 것을 목표로 한다. 트래픽 동기화는 수요와 용량의 균형 조정, 충돌 관리와 밀접하게 연관되어 있으며, 이들과 통합되어 지속적이고 조직적인 교통 흐름을 유지하게 될 것이다.

트래픽 동기화에서 도입될 핵심 변화로는 동적 4D 궤적 기반 관제와 궤적 조정을 통한 충돌 분리, 병목 지점 제거, 그리고 활주로 처리량의 극대화를 위한 교통 순서 최적화가 있다. 이러한 변화는 트래픽 동기화가 공역과 공항의 모든 부분에서 적용될 수 있도록 하며, 항공 교통 시스템의 전반적인 효율성과 안전성을 높이는 데 기여한다.

출발 단계에서는 실시간으로 트래픽의 경향을 분석하여 출발 항공편을 순항 기간에 유연하게 통합하고, 순항 단계에서는 흐름의 순서 정리와 간격 조정을 통해 충돌 관리에 대한 의존도를 줄인다. 도착 단계에서는 도착 흐름의 최적 간격과 순서를 계획하고 달성하여, 활주로 처리량을 극대화하는 것이 주요 목표이다. 트래픽 동기화의 성공적인 구현을 위해서는 협력적이고 전술적인 의사결정이 필요하며, 조종사에게 TBM(time based metering)이 적용된다 [6].

**2-4. 공역 구조 및 관리**

공역 조직 및 관리(AOM; airspace organization and management)는 공역을 효율적이고 안전하게 운영하기 위해 유연적이고 유연하게 관리하는 개념이다. AOM의 목표는 고정된 경계에 얽매이지 않고, 교통 흐름에 맞춰 공역 경계를 조정하면서 모든 공역을 최대한 활용 가능한 자원으로 만드는 것이다.

AOM은 공역을 전략적으로 조직하고 관리하는 방식이며, 이를 통해 충돌 위험을 줄이고, 안전성을 높이며, 공역의 수용 능력을 최대화하려는 목적을 가진다. 예를 들어, 교통량이 많은 시간대에 더 많은 항공기를 처리할 수 있도록 공역을 유동적으로 재배치하는 방식을 사용한다. 공역을 고정된 구역으로 나누는 것이 아니라, 실제 공역 사용 상황에 따라 경계를 조정하고, 필요에 따라 협력적 의사결정을 통해 공역을 관리한다. 이를 통해 공역 사용자들이 충돌 없이 효율적으로 비행할 수 있게 지원 하는 역할을 한다 [6].

표 1. 항공교통흐름관리 조치

Table 1. Phases of ATFM [9].

Strategic	pre-tactic	tactic	post-analysis
- Planning - Data collection and analysis	- Traffic analysis - Comparison and revision compared to established plan	- Predictions based on accurate information - Implementation of flow management measures	- Analysis of flow management action data - Evaluation of the appropriateness of action
Until: 2M-1W	1W-2D	2D-event	event~

2-5. 전략적 충돌 관리 적용 사례 및 시스템

1) 항공교통흐름관리 시스템

항공교통흐름관리 시스템은 DCB의 목적으로 개발되었다 [7]. 항공교통흐름관리는 항공교통업무기관에서 설정한 수용량 범위 내에서 항공교통 관제 용량을 최대한 효율적으로 활용 되도록 안전하고, 질서정연하며, 항공교통 흐름을 효율적으로 운영하기 위한 업무를 의미한다 [8]. ATFM은 업무 단계에 따라 <표 1>과 같이 전략적 단계, 전술적 단계, 전술적 단계, 사후분석 단계 순서로 수행된다.

미국의 교통흐름관리 시스템은 monitor alert parameter (MAP)를 통해 수용량 모니터링을 수행한다. MAP는 특정 시간 내에 Fix또는 공항의 효율성이 저하될 수 있음을 알리는 수용량 기준으로, 만약 특정 Fix 및 공항 진입 수요가 MAP 값을 초과할 것으로 예상되면, 교통흐름관리 시스템은 교통 흐름 관리자에게 알람을 제공한다 [10].

흐름 관리 조치(TMI; traffic management initiatives)는 교통 흐름 관리를 위해 특정한 작업 조치를 수행하는 과정으로, 주요조치 사항은 다음과 같다. time-based metering (TBM)은 특정 지점에서 항공기 도착 시간을 조정하여 항공기 간 간격을 최적화하는 기법으로, 주로 공항 접근 시 혼잡을 줄이고 지연을 최소화하는 데 사용된다. ground delay program (GDP)는 공항 도착 수요가 용량을 초과할 것으로 예상될 때 항공기 출발을 지연시켜 도착 시 혼잡을 완화하는 프로그램이다. airspace flow program (AFP)는 공역의 특정 부분에서 수용량이 부족할 경우 발생되며, 해당 공역을 운항하는 특정 항공편을 대상으로 우회 경로가 적용되거나, 속도가 조절된다. collaborative trajectory options program (CTOP)은 항공사에 여러 대체 경로 옵션을 제공하고 항공사가 최적의 경로를 선택할 수 있도록 지원하는 자동화 시스템이다 [11].

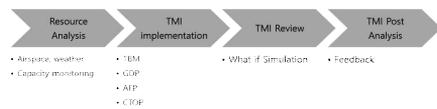


그림 2. 항공교통흐름 관리 시스템 주요 기능  
Fig. 2. Functions of traffic flow management system.

2) 출발·도착 관리 시스템

Arrival manager (AMAN)와 Departure manager (DMAN) 시스템은 항공기의 도착 및 출발을 최적화하기 위해 개발된 출도착 관리 시스템으로, AMAN은 도착 항공기의 최적의 도착 시퀀스와 시간을 계산하여 공항의 활주로와 공역의 효율성을 극대화하고, 도착 항공편으로 인한 공역 혼잡을 최소화하는 역할을 하며, DMAN은 출발 항공기의 최적의 이륙 순서와 시각을 계산하여 출발 지연을 최소화하고 연료 소비와 탄소 배출을 줄이는 동시에 공항의 활주로 사용 효율성을 높이는 것을 목표로 한다 [12],[13].

AMAN 시스템은 비행 데이터 처리 시스템 (FDP; flight data processor), 감시 데이터 처리 시스템 (SDP; surveillance data processor), 기상 정보, 공역 및 경로 정보를 통합하여 항공기의 도착 계획을 예측하고, 이를 통해 특정 픽스와 활주로에 대한 예상 도착 시간 (ETA; estimated time of arrival)과 스케줄된 도착 시간 (STA; scheduled time of arrival)을 산출하며, 관계사에 게 도착 순서와 시간, 그리고 이를 준수하기 위한 조건 정보(속도 조절 등)를 제공한다.

DMAN 시스템은 ATC에서 제공되는 비행데이터, A-CDM에서 제공되는 등의 마일스톤 정보, 전자비행스트림을 통해 사용 활주로 및 비행정보를 수집한다. 이를 통해 목표 출발 시각 (TSAT; target start-up approval time)과 목표 이륙시간(TTOT; target take off time)를 계산하고, 4D 궤적 생성을 통해 출발 항공기의 합류 지점과 활주로 사용 가능 시간을 예측한 후 최적의 이륙 순서를 산출하여, 출발 지연을 최소화하고 활주로에서의 혼잡을 줄이기 위해 출발 시퀀스를 조정한다.

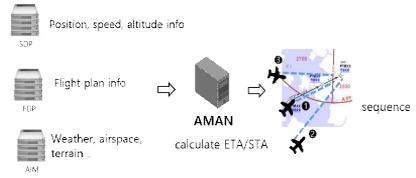


그림 3. AMAN 운영 개념  
Fig. 3. Concept of AMAN system.

표 2. DMAN 입력 데이터

Table 2. DMAN input data [14].

sources	ATC	A-CDM	Flight Strip
contents	Aircraft call sign, departure and arrival airports, estimated departure time, aircraft type, route (SID)	Target start-up approval time, stand, calculated take-off time, actual departure time, actual take-off time	Runway allocation, SID, ASAT

### III. DCB 기반 전략적 충돌 관리 방법론 연구

본 장에서는 제2장에서 살펴본 항공교통시스템 내 전략적 충돌 관리 개념이 UAM 교통관리체계에 어떻게 적용될 수 있는지를 탐구한다. 문헌 조사를 통해 UAM 교통관리체계 내 전략적 충돌 관리 핵심 구성 요소로, 버티포트 및 회항의 수용량에 맞춰 교통 수요를 조정하는 DCB 기술이 식별되었다. 해당 기술의 구체적인 구현 방안과 각 연구의 핵심 내용은 다음과 같다.

#### 3-1. DCB 기반 전략적 충돌 관리

기존 항공 교통 시스템에서는 비행 계획 단계에서 DCB를 달성하기 위해 비행스케줄 조정, 지상 지연 관리, 대체 경로 설정 등 다양한 전략을 적용해왔다. 특히, 수용량이 제한된 공항 또는 공역의 수요를 효과적으로 관리하기 위해 기존 솔루션들은 주로 비행 지연 확산 방지, 지상 운영 최적화, 출발 및 도착 슬롯 관리에 초점을 맞추어 혼잡 관련 비용과 지연을 최소화하는 데 중점을 두었다. 그러나 지상 지연 및 슬롯 관리에만 의존하는 접근 방식은 충분하지 않았으며, 악천후 및 기타 예기치 못한 상황 발생 시 효과적으로 적용되지 못했다. 이러한 문제를 해결하기 위해 연구자들은 확률적 항로 및 공역 설정에서 포화 및 수용량 불균형 문제를 해결하기 위해 다양한 최적화 모델을 개발하였다. 예를 들어, 출발 공항에서의 대기 시간 분포를 추정하고 이를 기반으로 한 비행스케줄 조정을 통해 공역 또는 도착 공항의 혼잡을 완화하거나, 경로 제약과 경로 전환을 고려하여 공역의 수용량과 수요를 균형 있게 조정하는 알고리즘을 개발하여 항공 교통 체계의 전반적인 성능을 개선하였다[17].

여기서 DCB는 단순히 과도한 수요가 발생할 때 대응하는 것만을 의미하지 않는다. 대신, 과도한 수요를 억제하기 위해 통제된 출발 지연을 도입하여 공중에서 전술적 충돌 관리의 필요성을 최소화하고, 안전하고 효율적인 항공 교통 흐름을 지원하는 것을 의미한다. 이때 승객의 예측 가능성을 높이고 자원 관리를 최적화하기 위해, 이륙 전 충분한 시간을 두고 DCB 기능을 적용하는 것이 중요하다[16].

#### 3-2. DCB 기반 UAM 전략적 충돌 관리

기존 항공 교통 시스템과 유사하게, UAM 교통 관리 시스템에서도 4D 계획 기반의 비행 계획 공유 및 조정을 통해 처리량을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다[15]. 그러나 이륙 직전의 비행 계획에는 승객 탑승으로 인한 오프블록 시간 지연, 불확실한 기상 조건 등으로 인해 상당한 불확실성이 존재한다. 이러한 상황에서 전략적 단계 전반에 걸쳐 충돌 위험이 없는 비행 계획 상태를 유지하려면, 조건 변화에 따라 4D 비행 계획을 지속해서 수정할 필요가 있다. UAM 운영 환경에서 이러한 문제를 해결하기 위한 핵심 구성 요소로 DCB가 중요한 역할을 한다[16].

미국 연방항공청(FAA: Federal Aviation Administration)은

UAM 운영 실행을 위한 필수 요소로 DCB를 명시적으로 강조하였다. 운영 불확실성이 존재하는 상황에서도 DCB는 운영 효율성과 안전 수준 간의 균형을 이루는 효과적인 도구로 기능할 것으로 기대된다. 그러나 UAM 운영은 매우 조밀하고 역동적인 환경에서 신속한 의사결정을 요구하므로, 기존 항공 교통 체계에서 사용된 DCB 알고리즘보다 개선된 DCB 알고리즘이 필요하다[18]. 기존 항공 교통 체계에서 적용된 것과 마찬가지로, UAM 체계에서도 DCB는 수용량을 정의하고 제한된 자원에 대한 수요를 조절하는 전략적 충돌 관리 도구로 기능할 것이다. UAM 운영이 확대됨에 따라, 효과적인 DCB 기술의 중요성이 더욱 주목받고 있다.

NASA는 X4 프로젝트를 통해 UAM 운영을 위한 전략적 충돌 관리 기능 개발에 집중하고 있으며, 특히 DCB 알고리즘 개발에 중점을 두고 있다. DCB는 항공 교통 시스템 전체 흐름과 버티포트 용량에 대한 전략적 평가를 제공하여 공역 사용자가 언제, 어디서, 어떻게 운영할지 결정할 수 있도록 하고, 공역 및 버티포트 용량에 대한 상충하는 요구를 완화한다. 유사하게, UAM 운영자들도 이러한 자원의 용량 제한을 고려하여 버티포트, 회항 등 공유 자원 사용에 대해 조정해야 한다. VFR 하의 UAM 운영에서는 공유 자원에 과부하를 방지하기 위해 UAM 운영자 간에 전략적 계획을 조정해야 하며, 조종사가 예상되는 불확실성을 처리할 수 있도록 충분한 버퍼를 마련해야 한다. IFR 하의 UAM 운영에서는 전략적 계획이 여전히 UAM 운영자의 책임일 수 있지만, 여전히 항공 교통 관제에 중요한 역할을 할 수 있다.

NASA의 DCB 서비스 구현은 4단계로 진행된다. 1단계는 제약된 자원의 용량을 식별하는 것이다. X4에서 용량 제약은 모든 운영자와 PSU가 정의된 API를 통해 사용할 수 있는 권한 있는 소스에 의해 버티포트에만 부과된다. 2단계는 해당 자원의 교통 수요를 식별한다. 제안된 모든 작업에 대해 DCB 기능은 출발지와 목적지 버티포트에서 현재 수요를 식별한다. 3단계는 제약된 자원(버티포트)에서 수요와 용량 간에 불균형이 있는지를 확인한다. 이는 지정된 시간 간격 내에 수요가 주어진 수용량보다 많은 버티포트를 식별하는 것을 의미한다. 마지막으로, 4단계는 출발 전 지연을 할당하여 식별된 불균형을 해결하는 것이다.

구체적인 절차는 다음과 같다. 버티포트 중 하나 또는 둘다에서 불균형이 있는 각 작업에 대해 PSU는 불균형을 해결하기 위해 운영 계획을 업데이트한다. 새로운 항공편의 경우, 운항자는 먼저 출발지와 도착지 이착륙 공역에 사용 가능한 시간에 대한 요청을 관련 PSU로 보낸다. PSU는 자원 레지스트리에서 서비스 레지스트리를 찾아 PSU가 연결해야 할 서비스를 식별한다. DCB에 대한 정보를 받으면, PSU는 관심 있는 각 버티포트에 대한 DCB 서비스에 사용 가능한 시간 창을 요청한다. DCB 서비스는 다른 항공편에 대한 기존 수요를 제약 가능한 서비스에서 제공하는 용량과 비교하여 사용 가능한 시간 창을 확인한다. 출발 및 도착 버티포트 리소스에서 사용 가능한 시간 범위(time window)를 얻을 때, PSU는 해당 정보를 운항사로 전달한다.

Estimated time of arrival(ETA) generation service에서 제공된 경로를 따라 있는 경우지의 ETA를 기반으로 운행하는 목적지에서의 예상 착륙 시간을 계산하고, 제안된 비행 계획(여러 일정 및/또는 경로 옵션이 있는 경우 여러 계획)을 작성한다. 여기서는 가능한 경우 원하는 출발 시간에 가장 가까운 출발 시간을 선택한다. 운행사는 PSU를 통해 UAM 서비스 제공자 간의 데이터 공유체인 discovery and synchronization service (DSS)에 비행 계획을 제출하고, DSS에서는 해당 비행 계획을 승인한 후 PSU 네트워크를 통해 다른 운영자와 운영 의도를 공유한다[5].

### 3-3. DCB 기반 UAM 전략적 충돌 관리 솔루션

NASA뿐만 아니라, 여러 연구에서 UAM 운영을 지원하기 위한 전략적 충돌 관리를 위해 선형계획법, 휴리스틱 및 머신러닝 기반 접근 방식을 제안하였다 [19-20]. 일부 연구는 충돌 위험을 저감할 수 있는 4D 계획 생성 문제에 초점을 맞추었고, 몇몇 연구는 충돌 저감을 위해 지상 지연과 같은 항적의 제약조건을 정의하는 문제를 다루었다.

Yokohama et al. (2024)는 셀 기반 DCB 알고리즘을 혼합 정수 선형계획법을 기반으로 개발하였다. 휴리스틱 및 확률적 검색 방법과 비교할 때, 이러한 유형의 접근 방식의 주요 장점은 솔루션이 있는 경우 유한 시간 내에 솔루션을 찾을 수 있고, 솔루션이 없더라도 유한 시간 내에 실행 불가능성을 신뢰할 수 있게 결정할 수 있다는 것이다. 그러나 정수 선형계획법을 사용하는 기존 접근 방식은 비행 계획의 공간적 및 시간적 불확실성을 반영한 솔루션을 도출하기에는 적합하지 않다. 이는 주로 불확실한 비행 계획에서 개별 비행 계획이 어느 셀에 남아 있고, 어느 셀로 이동하는지를 처리하기 복잡하기 때문이다 [14].

Tang et al. (2022)의 연구는 UAM의 기본 공역 구조를 정의하고 DCB를 사용하여 슬롯 할당과 계획 선택을 최적화하였다. 중요한 점은 모든 항공기의 각 경우지에 특정 플라이오버 시간을 할당하는 것과 같은 명시적인 전략적 충돌 방지 조치를 고려하지 않았다는 것이다. 이러한 전략은 운영 효율성을 손상시키고 불확실성을 관리하는 데 어려움을 줄 수 있다 [19]. Chen et al. (2022) 연구에서는 UAM을 위한 구조화된 공역 내에서 중요 수렴 지역(CCR; critical convergence region)을 식별하는 방법과 기술적 충돌 방지와 DCB를 통합하여 안전과 운영 효율성을 모두 보장하는 방법을 제안하였다. 그러나 결정론적 기준으로 작동하는 단일 라운드 DCB 모델은 공역 관리의 동적 특성에서 비행시간 불확실성이 존재하는 경우와 대규모 운영 시나리오에는 적용하기 어렵다 [23].

이러한 솔루션을 통해 유망한 결과를 얻었지만, 최근 연구에서는 성능에 대한 불확실성의 영향이 주목받고 있다. UAM 운영의 맥락에서, Huang et al. (2023)는 바람 불확실성이 항공편 취소 및 지연에 미치는 영향을 평가했고 [20], Lee et al. (2022)은 비행 속도와 출발 시간 불확실성이 버티포트 지연에 미치는 영향을 분석했다 [21]. 불확실성의 영향은 Shone et al. (2021)에서 철저히 검토한 것처럼 기존 항공에서 광범위하게 연구되

었지만, 매우 확률적인 환경에서 충돌 관리 솔루션의 성능에 대한 추가 분석은 여전히 필요하다 [22]. 해당 연구는 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하여 이러한 이해에 기여하는 것을 목표로 하여, 제안된 전략적 충돌 관리 솔루션이 운영 환경에 불확실성이 있는 경우 성능에 어떤 영향을 미치는지 평가하였다.

앞에서 제시된 DCB 알고리즘들은 제출된 4D 비행계획을 바탕으로 각 공간의 밀도, 즉 주어진 시간 간격 내에 존재하는 4D 비행계획의 수가 용량을 초과하는지를 검토한다. 만약 용량에 대한 초과가 발생할 경우, 밀도 제어 문제는 4D 비행계획의 통과 지점의 시간을 최적화하여 이러한 공간 밀도의 시간 이력을 조정하는 것이다. 따라서 DCB 알고리즘의 성공적인 구현을 위해서는 4D 항적에 대한 정확한 추정 및 예측이 필수적이다. Pradeep et al. (2022)는 eVTOL 항적을 바람 조건에 맞게 조정하는 방안을 검토하였으며, 뉴욕을 대상으로 한 시나리오 분석에서 최단 경로 계획에 비해 바람 조건에 맞게 조정된 계획의 잠재적 운영상 이점을 보여주었다. 비록 공기 역학적 특성은 반영되지 않았으나, Dijkstra 및 그 변형과 같은 최단 경로 알고리즘과 휴리스틱 기반 접근 방식을 사용하여 경로 재지정 결정을 모델링하였다.

여기서, 비행시간 불확실성의 주요 문제 중 하나는 CCR에서 항공기 도착 시간이 불확실한 경우, 종종 전술적 충돌 관리로 인한 속도 변화와 같은 조치로 인해 발생한다. 항공기가 긴 시간에 걸쳐 점점 더 복잡해지는 공역을 비행함에 따라 이러한 도착 시간 불일치가 누적되어 DCB의 사전 계획에 영향을 미치고 오히려 특정 시간에서 과밀화를 발생시킬 수 있다. 그리고 단일 라운드 DCB는 모든 항공기의 요청을 처리하고 전체 시간 범위에 걸쳐 최적화 문제를 해결할 수 있다. 그러나 항공기 수와 시간 범위가 증가함에 따라 계산 시간이 상당히 증가하여 실시간 대규모 운영에는 적합하지 않다 [24].

요약하자면, UAM 운영 환경에서 DCB를 효과적으로 적용하기 위해서는 비행시간 불확실성에 대응할 수 있는 확률론적 접근 방식이 필요하다. 이러한 접근 방식에서, 데이터 공유를 기반으로 한 4D 계획 예측은 불확실성을 최소화하는 데 기여할 수 있다. 또한 UAM의 대규모 운영 환경은 매우 조밀하고 역동적인 환경에서 신속한 의사결정을 요구하므로, 이러한 특성에 적합한 개선된 DCB 알고리즘에 관한 심층적인 연구가 필수적이다.

## IV. 결론 및 시사점

본 연구는 UAM 교통관리체계 내에서 전략적 충돌 관리의 적용 방안을 도출하기 위해, 기존 항공교통시스템에서 활용되는 전략적 충돌 관리 기법에 대한 면밀한 검토와 UAM 전략적 충돌 관리 관련 연구 및 기술 동향을 분석하였다. 이를 통해, DCB 기법이 NASA를 비롯한 여러 연구자에 의해 UAM 전략적 충돌 관리에 적용될 가능성이 검토되고 있음을 확인하였다. 또한, 비행시간의 불확실성과 대규모 운영 상황에서 DCB를 효

과적으로 적용하기 위해서는 여러 이해관계자 간의 데이터 공유와 확률론적 접근 방법의 필요성을 확인하였다.

UAM 산업 초기 단계에서 전략적 충돌 관리의 효과적인 적용을 위해서는 데이터 수집 절차의 수립과 수집된 데이터 분석을 통한 DCB 및 TS 기법의 적용이 요구된다 [25]. 특히, UAM 항공기의 제적 데이터 수집 및 생성 기술은 중요한 요소로, 항공기의 제적 예측 기술과 함께 실시간으로 기체에서 생성된 제적 정보를 공유하기 위한 이해관계자 간 협력이 필요하다.

DCB의 효과적인 적용을 위해서는 기존 ATM 시스템의 수용량 산정 연구가 기반이 될 수 있으나, UAM 운영환경 특성에 맞춰 버티포트와 회랑의 수용량을 산정하는 방법에 관한 추가 연구가 필요하다.

그리고 비행 전 과정에서 이해관계자 간의 실시간 정보 공유 체계가 필수적이다. 특히, 기존 항공교통시스템에서 발전된 SWIM 기반의 실시간 정보 공유 체계를 활용해야 하며, 이는 현재 제한된 비행계획 정보와 교환 방식에서 벗어나 FF-ICE 기반의 비행계획 운영 시스템을 도입해야 함을 의미한다. 또한, 대규모 UAM 운영이 내포하는 불확실성을 극복하기 위해서는 충돌 관리 측면에서 확률론적 접근 방법의 적용이 필수적이다.

향후 UAM 산업이 성숙기에 접어들면서 도심 내 고밀도 운영환경이 실현될 경우, UATM 서비스 제공자는 다수의 UAM 항공기에 대해 효과적인 교통관리 서비스를 제공해야 한다. 이를 위해서는, DCB 뿐만 아니라 트래픽 동기화, 공역 구조 및 관료와 같은 다양한 전략적 충돌 관리 기법을 통합적으로 적용해야 한다. 여기서, 전략적 충돌 관리를 교통관리 기능의 독립된

**표 3. NASA UML별 전략적 충돌 분리 기술 발전 양상 [25]**

**Table 3. Development of strategic conflict management technologies according to NASA UML [25]**

	SCM	Rules
UML 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Collect trajectory generation data</li> <li>-Collect DCB data</li> <li>-Collect traffic synchronization data</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Existing flight rules apply</li> <li>-Separation responsibility: IFR-ATC, VFR-PIC)</li> </ul>
UML 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Identification of flights that do not comply with PSU flight plans</li> <li>-Operation of traffic synchronization</li> <li>-Sharing of airspace availability through DCB operation</li> <li>-Reflection of airspace structure, cruising section, and departure/arrival procedures</li> <li>-Operation of real-time shared flight plans</li> <li>-Allocation of PSU airspace resources</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-New flight rules applied</li> <li>-Separate responsibility: PIC expansion (VMC+IMC)</li> </ul>
UML 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Increased level of automation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-New flight rules apply</li> <li>-Separate responsibility: Third party other than ATC, PIC</li> </ul>

**표 4. UAM 성장단계별 전략적 충돌 분리 관련 선결 기술**

**Table 4. Prerequisite technologies for strategic conflict management at each stage of UAM growth.**

	Initial	Growth	Maturity
DCB	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Establishment of DOB operation concept</li> <li>-Study of capacity calculation technique</li> <li>-Collection of data related to capacity based on vertiport (processing capacity, takeoff/landing separation, FATO occupancy time, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-DCB pilot operation</li> <li>-Collection of data related to corridor capacity (throughput, separation interval, ATC impact, etc.)</li> </ul>	-DCB Operation and Automation
Trajectory & SWIM	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Research on UAM aircraft 4D prediction technique</li> <li>-Establish UAM trajectory-based operation concept</li> <li>-Trajectory data collection</li> <li>-Establish UAM real-time information sharing system standard</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Improvement of trajectory prediction model</li> <li>-Application of flight plan trajectory compliance monitoring technology</li> <li>-Introduction of UAM real-time information sharing infrastructure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-UAM trajectory-based operation</li> <li>-UAM real-time information sharing system operation and expansion of information sharing between ATMs</li> </ul>
Test bed	Simulation environment verification (Shadow mode)		Actual Operation

요소가 아닌, 다른 교통관리 기능과 유기적으로 연계된 시스템의 일환으로 이해하는 것이 중요하다.

마지막으로, DCB 기반 UAM 전략적 충돌 관리를 실제로 검증하기 위해서는 가상의 테스트베드 환경이 필요하다. 따라서, NASA와 유사한 UAM 시뮬레이션 환경을 국내에서도 구축하여, UAM 운항이 본격적으로 증가하기 전에 관련 기술과 관리 방안을 분석할 수 있는 기반을 마련해야 한다. 이러한 시뮬레이션 환경은 UAM 운영의 복잡성을 실질적으로 평가하고, 효과적인 충돌 관리 전략을 개발하는 데 중요한 역할을 할 것이다.

**Acknowledgments**

본 연구는 2024년 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행 중인 과제(과제명 : 저밀도 도심항공모빌리티(UAM) 교통관리용 CNSI 획득·활용체계 신뢰성 검증 기술 개발, 과제번호 : RS-2022-00143625)의 연구 결과이며, 관계부처의 지원에 감사드립니다.

**References**

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *Korean urban air Mobility (K-UAM) roadmap*, Republic of Korea, 2020. Retrieved from [https://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m\\_71/dtl.jsp?id=95083976](https://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?id=95083976).
- [2] Korea Electronics Technology Institute, *Policy recommendations for the development of the domestic UAM industry*, Republic of Korea, 2022. Retrieved from [https://ettrends.etri.re.kr/ettrends/203/0905203004/036-046.%20%ED%99%8D%EC%95%84%EB%A6%84\\_203%ED%98%B8.pdf](https://ettrends.etri.re.kr/ettrends/203/0905203004/036-046.%20%ED%99%8D%EC%95%84%EB%A6%84_203%ED%98%B8.pdf)
- [3] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *K-UAM technology roadmap*, Republic of Korea, 2021. Retrieved from <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO202100022122>.
- [4] S. Verma, J. Keeler, T. Edwards, and V. Dulchinos, "Exploration of near-term potential routes and procedures for urban air mobility," in *19th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, Dallas: TX, 2019. DOI: 10.2514/6.2019-3624.
- [5] A. W. Cheng, K. E. Witzberger, D. R. Isaacson, S. A. Verma, H. M. Arneson, H. Lee, C. H. Seah, and I. Levitt, *National campaign (NC)-1 strategic conflict management simulation (X4) final report*, 2022. Retrieved from <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220018159/downloads/X4-Final-Report-V8.pdf>
- [6] International Civil Aviation Organization, *Global air traffic management operational concept, Doc 9854 AN/458, First Edition*, 2005. Retrieved from <https://www.icao.int/publications/Pages/doc-series.aspx>.
- [7] S. Mondoloni, and N. Rozen, "Aircraft trajectory prediction and synchronization for air traffic management applications," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 119, Article No: 100640, 2020. DOI: 10.1016/j.paerosci.2020.100640.
- [8] International Civil Aviation Organization. *Annex 11 to the convention on international civil aviation: Air Traffic Services (14th ed.)*, 2016. Retrieved from <https://www.icao.int/publications/Pages/doc-series.aspx>.
- [9] K-ATFM, Korea air traffic flow management system [Internet]. Available: <https://katfm.molit.go.kr/>
- [10] Federal Aviation Administration, *Traffic flow management concept of operations for flow management data and services (FMDS) for investment analysis readiness decision (IARD)*, 2022. Retrieved from <https://faa-tfm-aid.nianet.org/wp-content/uploads/FMDS-ConOps-Final.pdf>
- [11] Federal Aviation Administration, *Order JO 7210.3DD: facility operation and administration*, U.S. Department of Transportation, 2024. Retrieved from [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/orders\\_notices/index.cfm/go/document.information/documentID/1041701](https://www.faa.gov/regulations_policies/orders_notices/index.cfm/go/document.information/documentID/1041701).
- [12] Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, *Final report for research for integrated management technology for aircraft departure and arrival, Seoul, Republic of Korea*, 2020. Retrieved from <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO202300002795>.
- [13] Eurocontrol, *AMAN implementation guidelines and lessons learned (Edition Number: 0.1)*, 2010. Retrieved from <https://skybrary.aero/bookshelf/arrival-manager-implementation-guidelines-and-lessons-learned-17-december-2010>.
- [14] SESAR Joint Undertaking, *Basic DMAN operational service and environment definition (OSED) (Report No. D32)*, 2011. Retrieved from [https://sesar.eu/sites/default/files/documents/solution/Sol1106%204%20DMAN%20baseline\\_OSED.pdf](https://sesar.eu/sites/default/files/documents/solution/Sol1106%204%20DMAN%20baseline_OSED.pdf)
- [15] N. Yokoyama, "Strategic conflict management algorithm for AAM using cell-based demand capacity balancing," in *AIAA SCITECH 2024 Forum*, 1078, Jan. 2024. DOI: 10.2514/6.2024-1078.
- [16] H. Kim, Y. Eun, and D. Jeon, "Demand capacity balancing at Vertiports: A pending slot technique to accommodate on-demand urban air mobility operations," in *AIAA Aviation Forum and Ascend 2024*, Las Vegas: NV, 2024. DOI: 10.2514/6.2024-3787.
- [17] Y. Xie, A. Gardi, M. Liang, and R. Sabatini, "Hybrid AI-based 4D trajectory management system for dense low altitude operations and urban air mobility," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 129, No. 109422, Sep. 2024. DOI: 10.1016/j.ast.2024.109422.
- [18] W. S. S. A. Souza, and M. C. R. Murça, "Simulation of strategic conflict management performance for advanced air mobility operations," in *2023 IEEE/AIAA 42nd Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, Barcelona: Spain, Oct. 2023. DOI: 10.1109/DASC58513.2023.10311166.
- [19] Y. Tang, Y. Xu, and G. Inalhan, "An integrated approach for on-demand dynamic capacity management service in U-Space," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 58, No. 5, pp. 4180-4195, Oct. 2022. DOI: 10.1109/TAES.2022.3159317.
- [20] C. Huang, I. Petrunin, and A. Tsourdos, "Strategic conflict management using recurrent multi-agent reinforcement learning for urban air mobility operations considering uncertainties," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 107, No. 2, Article No: 202302, Feb. 2023. DOI: 10.1007/s10846-022-01784-0.
- [21] H. Lee, K. A. Moolchandani, and H. Arneson, "Demand capacity balancing at vertiports for initial strategic conflict management of urban air mobility operations," in *2022 IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, Portsmouth: VA, Sep.

2022. DOI: 10.1109/DASC55683.2022.9925753.

- [22] R. Shone, K. Glazebrook, and K. G. Zografos, "Applications of stochastic modeling in air traffic management: methods, challenges and opportunities for solving air traffic problems under uncertainty," *European Journal of Operational Research*, Vol. 292, No. 1, pp. 1-26, Jan. 2021. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.10.039.
- [23] S. Chen, A. D. Evans, M. Brittain, and P. Wei, "Integrated conflict management for UAM with strategic demand capacity balancing and learning-based tactical deconfliction," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 23, No. 4, pp. 1234-1246, Apr. 2024. DOI: 10.1109/TITS.2024.3351049.
- [24] P. Pradeep, G. B. Chatterji, T. A. Lauderdale, K. Sheth, C. F. Lai, H. Erzberger, and B. Sridhar, "Wind-optimal lateral trajectories for a multirotor aircraft in urban air mobility," *Frontiers in Aerospace Engineering*, Vol. 1, Article No: 1064142, Dec. 2022. DOI: 10.3389/fpace.2022.1064142.
- [25] I. Levitt, N. Phojanamongkolkij, A. Horn, and K. Witzberger, *UAM airspace research roadmap-rev. 2.0 (20230002647)*, 2023. Retrieved from <https://ntrs.nasa.gov/citations/20230002647>.



**윤 태 경 (Tae Gyeong Yun)**

2019년 8월: 한국항공대학교 (이학사)  
2023년 2월: 한국항공대학교 (이학석사)  
2023년 5월~: 한화시스템 미래정보통신연구소 연구원  
\* 관심분야: 항공교통관리, 도심항공교통, 시뮬레이션



**오 수 환 (Soohwan Oh)**

2016년 2월: 한국항공대학교 (이학사)  
2023년 2월: 한국과학기술원 (공학박사)  
2022년 11월 ~ 2024년 2월: 한국공항공사 항공산업연구원 선임연구원  
2024년 3월 ~ : 한서대학교 항공산업공학과 조교수  
\* 관심분야: 항공교통, 항공안전, 도심항공교통, 드론교통관리