

## 도심항공교통(UAM) 운항을 위한 안전 경고 기능 구축

# Establishment of Safety Alert Systems for Urban Air Mobility Operations

최상일<sup>1</sup> · 남승연<sup>2</sup> · 김휘양<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>한국항공대학교 항공교통물류학과

<sup>2</sup>한국항공대학교 미래항공교통학과

<sup>3</sup>한국항공대학교 항공교통물류학부

Sang-il Choi<sup>1</sup> · Seung-yeon Nam<sup>2</sup> · Hui-yang Kim<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Air Transport, Transportation and Logistics, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do, 10540, Korea

<sup>2</sup>Department of Future Air Transportation, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do, 10540, Korea

<sup>3</sup>School of Air Transport, Transportation and Logistics, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do, 10540, Korea

### [요 약]

기존 항공교통관리(ATM; air traffic management) 체계에서는 항공기 위치 및 세부 운항 정보와 함께 항공기 운항의 안전성을 보장하기 위하여 다양한 형태의 안전 경고 기능을 항적 정보를 기반으로 함께 제공한다. 도심항공교통(UAM; urban air mobility)을 대상으로 한 도심항공교통관리(UATM; urban air traffic management) 체계에서도 UAM 운항의 안전성을 보장하기 위한 안전 경고 기능이 제공되어야 한다. UAM의 운항 환경을 고려하였을 때 기존 ATM 체계에서 준용하는 수준과 동등한 또는 더 높은 수준의 안전 경고 기능이 제공되어야 한다. 본 연구는 UAM 도입 및 상용화 단계에 앞서 기존 ATM 체계에서 제공하는 안전 경고 기능과 다른 새로운 UATM 체계의 안전 경고 기능을 제시하고자 한다. UAM의 경로 이탈 발생 시 제공되어야 하는 안전 경고 기능을 중심으로 연구를 진행하였으며 접근 단계에서 적용되는 APM (approach path monitor) 및 순항 단계에서 적용되는 RAM (route adherence monitoring) 두 가지 부분으로 나누어 안전 경고 기능 구축을 진행하였다.

### [Abstract]

In the existing air traffic management (ATM) system, various types of safety alert features are provided based on trajectory data to ensure the safety of aircraft operations, along with aircraft position and detailed flight information. The urban air traffic management (UATM) system for urban air mobility (UAM) should also provide safety alert features to ensure the safety of UAM operations. Considering the operational environment of UAM, it is necessary that the safety alert features provided at least match or exceed those available in the existing ATM system. This study aims to present the safety alert features of the new UATM system that differ from those provided by the existing ATM system before introduction and commercialization of UAM. The study was conducted focusing on the safety alert features that should be provided in the event of a deviation from the UAM's path, and the establishment of the safety alert features was carried out in two parts: approach path monitor (APM), which is applied during the approach phase, and route adherence monitoring (RAM), which is applied during the cruise phase.

**Key word** : Approach path monitor, Corridor, Route adherence monitoring), Safety alert features, Urban air mobility.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.2.163>



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 21 November 2023; Revised 24 April 2024

Accepted (Publication) 27 April 2024 (30 April 2024)

\*Corresponding Author ; Hui-yang Kim

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

E-mail: igreenbee@kau.ac.kr

## I. 서론

도심항공교통 (UAM; urban air mobility)은 전기동력수직이착륙기(eVTOL; electric vertical take-off and landing)를 이용하여 도심 내에서 승객 또는 화물을 운송하는 차세대 교통체계를 의미한다[1]. UAM은 기체 개발, 기반 시설 구축 및 관리, 서비스 제공 등 관련 사업을 모두 아우르는 포괄적 개념이며 도심 내뿐만 아니라 도심 간을 아우르는 광역 교통체제로 운용 범위를 확장하고자 한다[2]. 지역 및 광역 교통체계를 포괄하는 개념으로서 UAM은 AAM (advanced air mobility) 또는 IAM (innovative air mobility)으로 정의된다[2].

인구과밀에 따른 도심 내 교통혼잡 및 환경오염을 완화하는 방안으로서 UAM은 전 세계적으로 많은 주목을 받고 있다. UAM 도입을 위한 관련 연구는 차세대 교통체계 구축의 하나로 활발하게 수행되고 있다. 우리나라는 UAM 기술 선도 및 경쟁력 강화를 위하여 다방면의 연구를 수행하고 있으며 한국형 도심항공교통(K-UAM) 로드맵을 토대로 2025년 UAM의 상용화를 주요 목표로 설정하였다[2].

UAM의 운항은 항공로(ATS route)와 분리되어 독자적으로 운영되는 회랑(corridor) 내에서 이루어진다[1]. UAM 회랑은 항공로와 독립적으로 운영되며 회랑 운영의 안전성을 보장하기 위하여 경로 이탈에 대한 감시가 지속해서 요구된다[3]. UAM의 경로 이탈은 추정 위치 (estimated position)를 기준으로 실시간으로 감시되어야 하며 감시 시스템은 이탈 발생을 인지하여 운항승무원 (cockpit crew) 및 PSU (provider of services for UAM)에게 이탈 사실을 경고하여야 한다[3].

기존 항공교통관리 (ATM; air traffic management) 체계에서는 항공기 추적(tracking)을 위한 시스템의 일환으로 ARTS (automated radar terminal system)를 준용한다. ARTS는 항공교통관제(ATC; air traffic control)를 지원하기 위한 항적 정보 처리 시스템으로 추적하는 항공기의 세부 운항 정보를 파악하고 해당 정보를 항공기의 위치 현시와 함께 데이터 블록 (data block)의 형태로 디스플레이에 표시한다. ARTS는 항공기 위치 및 세부 운항 정보와 함께 항공기 운항의 안전성을 보장하기 위하여 항적 정보를 기반으로 다양한 형태의 안전 경고 기능을 함께 제공한다.

UAM을 대상으로 한 도심항공교통관리 (UATM; urban air traffic management) 체계에서도 UAM 운항의 안전성을 보장하기 위한 안전 경고 기능이 제공되어야 한다. 항공기와 UAM은 기체 사양, 운항 방식 및 운항 환경 등에 있어 차이가 있으며 UAM 고유의 특성을 적절히 고려하여 안전 경고 기능을 구축하여야 한다. UAM은 인구 밀집도가 높으며 인공 장애물이 다수 분포하는 도심 내에서 450±150m 내외의 저고도 운항이 계획된다[1]. 안전한 UAM 운항을 위하여 적절한 안전 경고 기능의 제공은 전제되며 UAM의 운항 환경을 고려하였을 때 기존 ATM 체계에서 준용하는 수준과 동등한 또는 더 높은 수준의 안전 경고 기능이 제공되어야 한다.

본 연구는 UAM 도입 및 상용화 단계에 앞서 기존 ATM 체계에서 제공하는 안전 경고 기능과 다른 UATM 체계의 안전 경고 기능을 제시하고자 한다. UAM의 경로 이탈 발생 시 제공되어야 하는 안전 경고 기능을 중심으로 연구를 진행하였으며 접근 단계에서 적용되는 APM (approach path monitor) 및 순항 단계에서 적용되는 RAM (route adherence monitoring) 두 가지 부분으로 나누어 안전 경고 기능 구축을 수행하였다. 효과적인 안전 경고 기능 구축을 위하여 APM 및 RAM에 대한 운영 알고리즘을 개발하였으며 구축 계산식을 도출하여 수평 및 수직 기능 범위를 산정하였다.

## II. 안전 경고 기능 고찰

항공기 추적을 위한 시스템의 일환으로 기존 ATM 체계에서는 ARTS를 준용한다. ARTS는 항공교통관제를 보조하기 위한 시스템으로 항공기의 위치 정보 및 세부 운항 정보를 디스플레이 상에서 위치 표시 및 데이터 블록으로 제시한다. ARTS는 항적 정보를 실시간으로 수집 및 처리하며 항공기 운항의 안전성을 보장하기 위하여 다양한 형식의 안전 경고 기능을 항적 정보를 토대로 제공한다. 각 안전 경고 기능은 일종의 안전망 (safety nets)으로서 실제 위험 상황 (hazardous situation)이 중대 사건 (incident) 및 사고(incident)로 발전하는 것을 방지한다[4]. 공중비행 단계에서는 APM, APW (area proximity warning), MSAW (minimum safe altitude warning) 및 STCA (short term conflict alert) 등 총 4개의 지상 기반 안전망을 구축한다[4].

APM은 최종 접근 중인 항공기와 자연·인공 장애물에 사이의 근접을 사전에 식별할 수 있도록 설계된 지상 기반 안전망을 의미한다[5]-[7]. 수평 및 수직 차원에서 정의된 범위에 대하여 장애물과의 충돌로 이어질 수 있는 경로 이탈이 발생하는 경우 APM은 이탈 인지 후 사전 경고를 항공교통관제사(air traffic controller)에 제공한다. 항공교통관제사는 사전 경고 수신 후 경로 이탈의 원인을 파악하고 적절한 시정 조치를 시행할 수 있다. APM은 정밀접근 (PA; precision approach) 및 비정밀접근 (NPA; non precision approach) 모두에서 활용되며 선회 접근 (circling approach)에는 활용되지 않는다.

APW는 항적 정보 기반의 비행경로 예측을 통하여 항공기의 진입 제한 구역 접근을 사전에 식별할 수 있도록 설계된 지상 기반 안전망을 의미한다[8]-[10]. 진입이 제한된 구역에 항공기의 접근이 예상되는 경우 APW는 접근 인지 후 사전 경고를 항공교통관제사에 제공한다. 경고 발생 오류를 방지하기 위하여 APW는 CFL (cleared flight level)을 고려하여 항적 정보를 기반으로 항공기의 비행경로를 예측한다.

MSAW는 항공기와 자연·인공 장애물에 사이의 근접을 사전에 식별할 수 있도록 설계된 지상 기반 안전망을 의미한다 [11]-[13]. 항적 정보 기반의 비행경로 예측을 통하여 MSAW는 항공기와 장애물에 사이의 근접을 사전에 식별할 수 있으며 근

접이 예상되는 경우 MSAW는 근접 인지 후 사전 경고를 항공 교통관제사에 제공한다. MSAW 운영의 목적은 항공기 운항의 안전성 향상이며 규정된 최소 고도의 준수 여부 감시는 아니다. MSAW는 ATC를 지원하기 위한 ARTS 일부분이며 ARTS가 제공하는 안전 경고 기능의 하나로 간주하여야 한다.

STCA는 항적 정보 기반의 비행경로 예측을 통하여 항공기와 항공기 사이의 근접을 사전에 식별할 수 있도록 설계된 지상 기반 안전망을 의미한다[14]-[16]. 항공기의 잠재적 또는 실제적 분리 간격 위배가 예상되는 경우 STCA는 위배 인지 후 사전 경고를 항공교통관제사에 제공한다. 경고 발생 오류를 방지하기 위하여 STCA는 CFL을 기준으로 한 1,000 ft 수직분리가 이루어지는 공역 내에서 항공기의 ROC (rate of climb) 및 ROD (rate of descent)가 분당 3,500 ft 이하일 때에는 경고를 제공하지 않는다.

항공기 운항의 안전성을 보장하기 위하여 구축되는 지상 기반 안전망 외에 경로 준수에 관한 안전 경고 기능으로서 RAM이 구축된다[17]. RAM은 항공기가 위치하는 실제 항적과 시스템 내에 입력된 예상 위치 간의 차이를 사전에 식별할 수 있도록 설계된 안전망을 의미한다. 분리 간격 위배, 공역 침범 또는 CFIT (controlled flight into terrain) 위험 증가로 이어질 수 있는 수평 이탈이 발생하는 경우 RAM은 이탈 인지 후 사전 경고를 항공교통관제사에 제공한다. 항공교통관제사는 사전 경고 수신 후 수평 이탈의 원인을 파악하고 적합한 시정 조치를 수행할 수 있다. RAM 이외에 경로 준수에 관한 안전 경고 기능으로서 허가 고도의 준수 여부를 감시 및 경고하는 CLAM (cleared level adherence monitoring)과 허가 기수 방향(heading)의 준수 여부를 감시 및 경고하는 heading alert가 구축된다 [17].

### III. 주요 연구 내용

UAM 도입 및 상용화 단계에 앞서서 새로운 UATM 체계에서 적용할 수 있는 안전 경고 기능을 구축하는 것은 중요하고 필요한 과정으로 관련 연구가 선행되어야 한다. UAM은 항공로와 분리되어 독립적으로 운영되는 회랑 내에서 운항하며 [1] 회랑 이탈 발생 시 감시 시스템은 이탈 발생을 인지하여 운항승무원 및 PSU에게 이탈 사실을 경고하여야 한다[3].

접근 단계에서는 장애물과의 충돌로 이어질 수 있는 경로 이탈에 대한 경보가 안전 경고 기능으로써 제공되어야 한다. 순항 단계에서는 회랑의 수평 및 수직 이탈에 경보가 안전 경고 기능으로써 제공되어야 한다. 본 연구에서는 UAM의 경로 이탈 발생 시 제공되어야 하는 안전 경고 기능을 중심으로 연구를 진행하였으며 접근 단계에서 활용되는 APM 및 순항 단계에서 활용되는 RAM 두 가지 부분으로 나누어 안전 경고 기능 구축을 수행하였다. 효율적인 안전 경고 기능 구축을 위하여 APM 및 RAM에 관한 운영 알고리즘을 개발하였으며 구축 계산식을 산출하여 수평 및 수직 기능 범위를 결정하였다.

### 3-1 APM

#### 1) 운영 알고리즘 개발

기존 ATM 체계에서 APM은 최종 접근 중인 항공기와 자연·인공 장애물의 접근을 사전에 감지할 수 있도록 구상된 안전망을 말한다. 수평 및 수직 차원으로 정의된 영역에서 장애물과의 충돌로 이어질 수 있는 경로 이탈이 발생하는 경우 APM은 이탈 인지 후 사전 경보를 항공교통관제사에 제공한다. 항공교통관제사는 사전 경보 수신 후 경로 이탈의 원인을 분석하고 적합한 시정 조치를 수행할 수 있다.

본 연구에서는 새로운 UATM 체계에서의 APM을 접근 중인 UAM과 자연·인공 장애물에 사이의 근접을 사전에 식별할 수 있도록 설계된 안전망으로 규정하였다. 수평 및 수직 차원에서 정의된 범위에 대하여 장애물과의 충돌로 이어질 수 있는 경로 이탈이 발생하는 경우 APM은 이탈 인지 후 사전 경고를 PSU에 제공한다. 기능적 정의 사항을 토대로 APM 제공을 위한 일련의 단계적 절차로서 APM 운영 알고리즘을 개발하였다.

#### 2) 수평 및 수직 기능 범위 산정

국제민간항공기구 (ICAO; International Civil Aviation Organization)는 국제표준으로써 표준계기출발·도착 및 계기 접근절차에 대한 설계 기준을 제공하며 헬리콥터를 위한 공간점 (PinS; point-in-space) 접근 절차에 관한 설계 기준을 제시한다[18]. PinS 접근 절차는 헬리콥터용으로 개발된 GNSS (global navigation Satellite System) 기반의 접근 절차로 설정된 PinS 지점에 따라 PinS 이전 구간까지는 계기비행방식 (IFR; instrument flight rules)에 따라 비행하며 PinS 이후 구간부터는 시계 상태 (Visually) 또는 시계비행방식 (VFR; visual flight rules)에 따라 비행한다.

ICAO는 PinS 이전 및 이후 구간에 대한 적정 강하율과 장애물 회피표면 (OCS; obstacle clearance surface)의 경사율을 제시한다. 본 연구에서는 해당 수치를 토대로 수직 차원에서의 APM 상방 및 하방 경사율을 다음과 같이 도출하였다.

PinS의 설정 위치에 따라 PinS 이전 및 이후 구간의 길이를

표 1. APM 상방 및 하방 경사율  
Table 1. Upper and lower slopes of APM.

Descent gradient before PinS		6.5%
Descent gradient after PinS		14.5%
OCS slope		12.5%
APM upper slope	Before PinS	6.5%
	After PinS	15.5%
APM lower slope	Before PinS	6.5%
	After PinS	13.5%

조정할 수 있으며 순향고도 및 PinS의 설정 위치에 따라 종적 차원에서의 APM 길이를 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$Lgth_{APM} = Lgth_{BPnS} + Lgth_{APnS} \quad (1)$$

$$Lgth_{BPnS} = ((CA - (Lgth_{APnS} \times 0.145 \times 1852)) / 0.065) / 1852 \quad (2)$$

여기서,

- $Lgth_{APM}$ : APM의 종적 길이
- $Lgth_{BPnS}$ : PinS 이전 구간 길이 (단,  $Lgth_{BPnS} \geq 0$ )
- $Lgth_{APnS}$ : PinS 이후 구간 길이 (단,  $0 \leq Lgth_{APnS} \leq 1.6$ )
- CA: UAM의 순향고도

UAM 운항을 위한 버티포트(vertiport)에는 FATO (final approach and takeoff) 이탈 시 발생하는 손상을 경감하기 위한 SA (safety area)가 설정된다. 횡적 차원에서 APM의 반폭은 SA의 반폭에서 APM의 최대 반폭까지 설정된다. APM의 최대 폭은 RAM의 폭과 동일하게 설정할 수 있으며 PinS의 설정 위치에 따라 APM 횡적 발산율은 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$D_{APM} = ((Width_{APMMax} - Width_{SA}) / 2) / (Lgth_{APnS} \times 1852) \quad (3)$$

여기서,

- $D_{APM}$ : APM의 횡적 발산율
- $Width_{APMMax}$ : APM의 최대 폭
- $Width_{SA}$ : SA의 폭

본 연구에서는 APM을 구축하기 위한 계산식을 PinS 이후 구간과 이전 구간으로 나누어 다음과 같이 산출하였다. APM은 UAM의 접근 단계를 위한 안전 경고 기능으로 접근 단계 시작 지점에서 SA까지 구축되어 안전 경고 기능을 제공하게 된다.

$$APRUBound_{APM}(x, y, z) = (0, Width_{SA} \times 0.5, 0) + t(1, D_{APM}, 0.155) \quad (4)$$

$$BPRUBound_{APM}(x, y, z) = APRUBound_{APM}(x = Lgth_{APnS}) + s(1, 0, 0.065) \quad (5)$$

$$APRLBound_{APM}(x, y, z) = (0, Width_{SA} \times 0.5, 0) + t(1, D_{APM}, 0.135) \quad (6)$$

$$BPRLBound_{APM}(x, y, z) = APRLBound_{APM}(x = Lgth_{APnS}) + s(1, 0, 0.065) \quad (7)$$

$$APLUBound_{APM}(x, y, z) = (0, -Width_{SA} \times 0.5, 0) + t(1, -D_{APM}, 0.155) \quad (8)$$

$$BPLUBound_{APM}(x, y, z) = APLUBound_{APM}(x = Lgth_{APnS}) + s(1, 0, 0.065) \quad (9)$$

$$APLLBound_{APM}(x, y, z) = (0, -Width_{SA} \times 0.5, 0) + t(1, -D_{APM}, 0.135) \quad (10)$$

$$BPLLBound_{APM}(x, y, z) = APLLBound_{APM}(x = Lgth_{APnS}) + s(1, 0, 0.065) \quad (11)$$

여기서,

- $APRUBound_{APM}$ : APM의 우상방 한계(PinS 이후 구간)
- $BPRUBound_{APM}$ : APM의 우상방 한계(PinS 이전 구간)
- $ALRUBound_{APM}$ : APM의 우하방 한계(PinS 이후 구간)
- $BLRUBound_{APM}$ : APM의 우하방 한계(PinS 이전 구간)
- $APLUBound_{APM}$ : APM의 좌상방 한계(PinS 이후 구간)
- $BPLUBound_{APM}$ : APM의 좌상방 한계(PinS 이전 구간)
- $APLLBound_{APM}$ : APM의 좌하방 한계(PinS 이후 구간)
- $BPLLBound_{APM}$ : APM의 좌하방 한계(PinS 이전 구간)
- $t$ :  $\{t \mid 0 \leq t \leq Lgth_{APnS}\}$
- $s$ :  $\{s \mid Lgth_{PinS} < s \leq Lgth_{APnS}\}$

### 3-2 RAM

#### 1) 운영 알고리즘 개발

기존 ATM 체계에서 RAM은 항공기가 위치하는 실제 항적과 시스템 내에 입력된 예상 위치 간의 차이를 사전에 감지할 수 있도록 구상된 안전망을 말한다. 분리 간격 위배, 공역 침범 또는 CFIT 위험 증가로 이어질 수 있는 수평 이탈이 발생하는 경우 RAM은 이탈 인지 후 사전 경보를 항공교통관제사에 제공한다. 항공교통관제사는 사전 경고 수신 후 수평 이탈의 원인을 분석하고 적합한 시정 조치를 수행할 수 있다.

UAM의 회랑 이탈 발생 시 감시 시스템은 이탈 발생을 인지하여 이탈 사실을 즉시 경고하여야 한다. 본 연구에서는 새로운 UATM 체계에서의 RAM을 수평 및 수직 차원에서 UAM의 회랑 이탈 발생 시 이탈 사실을 사전에 식별할 수 있도록 설계된 안전망으로 정의하였다. 기능적 정의 사항을 토대로 RAM 제공을 위한 일련의 단계적 절차로서 RAM 운영 알고리즘을 개발하였다.

#### 2) 수평 및 수직 기능 범위 선정

최상일 등은 UAM 도입 및 상용화에 앞서서 기존 항공로 설계 기준과 다른 새로운 UAM 회랑 설계 기준을 제시하였다[3]. 95% 수평 정확도의 한계로서 EPU (estimated position uncertainty)의 한계를 토대로 normal operating area를 구축하고 해당 구역 이탈 시 안전하게 기존 경로로 복귀하기 위한 recovery area를 구축하여 최종적으로 UAM 회랑 반폭 (half area width)의 도출 방안을 제시하였다.

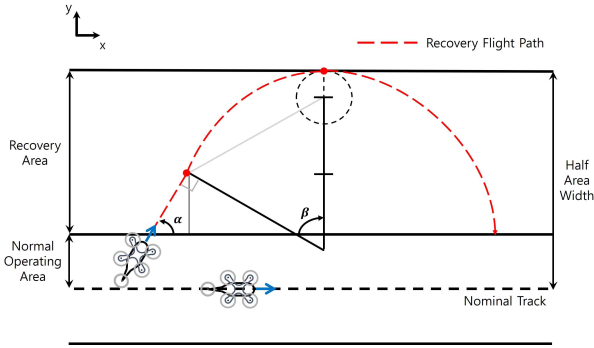


그림 1. UAM 회랑 평면도  
Fig. 1. Plan view of UAM corridor.

UAM 운항을 위한 회랑의 반폭 계산식은 다음과 같다.

$$1/2AW = NOA + RA \quad (12)$$

여기서,

1/2AW: UAM 회랑의 반폭

NOA: Normal Operating Area의 폭

RA: Recovery Area의 폭

이 연구는 UAM 회랑의 반폭 도출 방안과 함께 안전목표기준 (TLS; target level of safety)를 충족하는 반폭 범위를 산출하기 위하여 이탈각 분포를 바탕으로 UAM과 장애물 간의 충돌 위험 평가 (collision risk assessment)를 시행하였다. UAM의 이탈각 분포 데이터가 부재함에 따라 항공기의 이탈각 분포 데이터를 활용하였으며 충돌 위험 평가에 적용하기 위하여 커널 밀도 추정 (kernel density estimation)을 통하여 이탈각 분포의 확률밀도함수를 산출하였다. UAM과 장애물 간의 충돌위험평가를 위한 TLS는 항공기와 장애물 간의 충돌 위험 평가에서 통상적으로 사용되는 수치인  $1.0 \times 10^{-7}$ 으로 설정하였다. 충돌 위험 평가를 시행한 결과 이탈 발생 시 약 754 m 이상의 회랑 반폭 범위에서 설정된 TLS를 충족하였다.

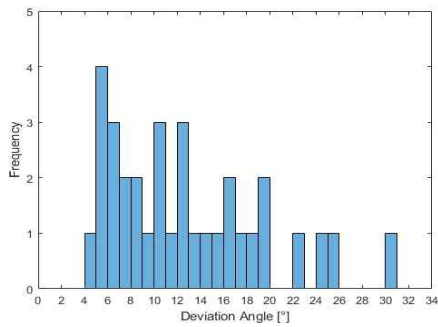


그림 2. 이탈각에 대한 히스토그램  
Fig. 2. Histogram for deviation angle.

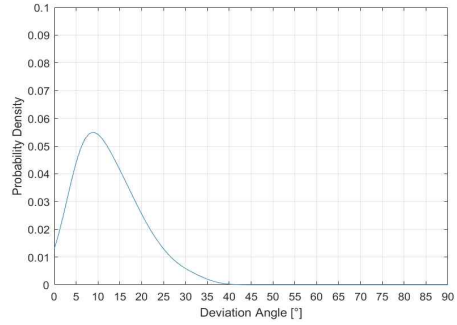


그림 3. 이탈각에 대한 확률밀도함수  
Fig. 3. Probability density function for deviation angle.

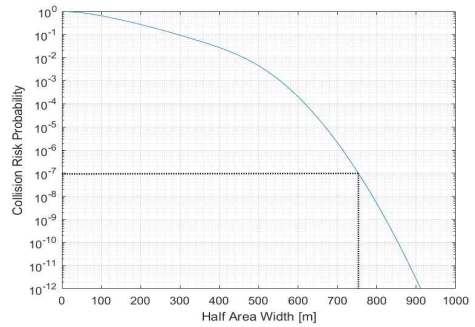


그림 4. 반폭에 대한 충돌 위험 확률  
Fig. 4. Collision risk probability for half area width.

본 연구에서는 UAM 회랑이 횡적 방향으로  $\pm 754m$ , 수직 방향으로 순항고도 $\pm 150m$ 의 기준으로 설계된다고 가정하였으며 RAM을 구축하기 위한 계산식을 다음과 같이 도출하였다. RAM은 UAM의 순항 단계를 위한 안전 경고 기능으로 순항 단계 시작 지점에서 접근 단계의 시작 지점까지 구축되어 안전 경고 기능을 제공하게 된다.

$$RUBound_{RAM}(x, y, z) = (0, 754, CA + 150) + u(1, 0, 0) \quad (13)$$

$$RLBound_{RAM}(x, y, z) = (0, 754, CA - 150) + u(1, 0, 0) \quad (14)$$

$$LUBound_{RAM}(x, y, z) = (0, -754, CA + 150) + u(1, 0, 0) \quad (15)$$

$$LLBound_{RAM}(x, y, z) = (0, -754, CA - 150) + u(1, 0, 0) \quad (16)$$

여기서,

$RUBound_{RAM}$ : RAM의 우상방 한계

$RLBound_{RAM}$ : RAM의 우하방 한계

$LUBound_{RAM}$ : RAM의 좌상방 한계

$LLBound_{RAM}$ : RAM의 좌하방 한계

$u: \{u \mid u \geq Lgth_{APInS}\}$

#### IV. 연구 결과

본 연구에서는 UAM의 경로 이탈 발생 시 제공되어야 하는 안전 경고 기능을 중심으로 연구를 진행하였으며 접근 단계에서 활용되는 APM 및 순항 단계에서 활용되는 RAM 두 가지 부분으로 나누어 안전 경고 기능 구축을 진행하였다. 효과적인 안전 경고 기능 구축을 위하여 APM 및 RAM에 관한 운영 알고리즘을 개발하였으며 구축 계산식을 도출하여 수평 및 수직 기능 범위를 산정하였다.

##### 4-1 운영 알고리즘 개발

UATM 체계에서의 APM을 접근 중인 UAM과 자연·인공 장애물의 접근을 사전에 감지할 수 있도록 설계된 안전망으로 규정하였다. 수평 및 수직 차원으로 정의된 영역에서 장애물과의 충돌로 이어질 수 있는 경로 이탈이 발생하는 경우 APM은 이탈 인지 후 사전 경보를 PSU에게 제공한다. 본 연구에서는 기능적 규정 사항을 토대로 APM 기능 제공을 위한 일련의 단계적 절차로서 APM 운영 알고리즘을 다음과 같이 개발하였다.

APM의 알고리즘은 헬리포트 통과 높이 (HCH; heliport crossing height)로 최종 접근 중인 UAM을 대상으로 운영된다. 각 단계에서는 조건부 질문에 따라 다음 단계로 진행되며 최종적으로 필요한 조치를 취하기 위한 결정에 도달한다. 수평 영역 및 수평 허용오차, 하방 경사면 그리고 기수 허용오차는 경로 이탈의 기준이 되며 APM은 이탈 발생을 인지한 후 경고 필요 여부를 판단한다. 경고 필요 여부는 설정된 inhibit area가 기준이 되며 inhibit area 밖에 UAM이 위치하는 경우 APM은 최종적으로 사전 경고를 PSU에게 제공한다. PSU는 사전 경고 수신

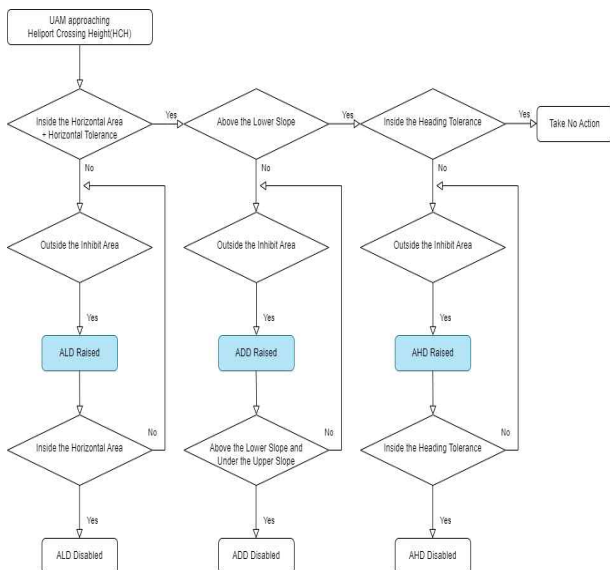


그림 5. APM 운영 알고리즘  
Fig. 5. APM operational algorithm.

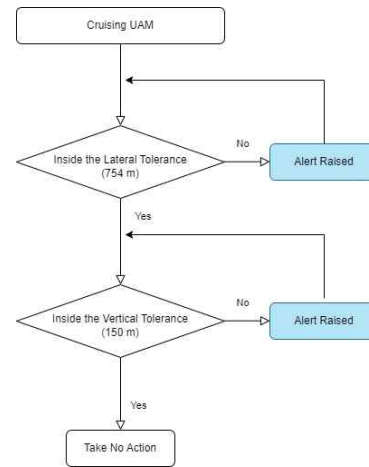


그림 6. RAM 운영 알고리즘  
Fig. 6. RAM operational algorithm.

후 경로 이탈의 원인을 파악한 후 적절한 시정 조치를 수행할 수 있으며 APM은 시정 조치에 따라 경고 해제 여부를 판단하고 경고를 해제한다.

UATM 체계에서의 RAM을 수평 및 수직 차원에서 UAM의 회랑 이탈 발생 시 이탈 사실을 사전에 감지할 수 있도록 설계된 안전망으로 규정하였다. 기능적 규정 사항을 토대로 RAM 제공을 위한 일련의 단계적 절차로서 RAM 운영 알고리즘을 다음과 같이 개발하였다.

RAM의 알고리즘은 항공로와 분리되어 독자적으로 설정된 회랑 내를 순항 중인 UAM을 대상으로 운영된다. 각 단계에서는 조건부 질문에 따라 다음 단계로 진행되며 최종적으로 필요한 조치를 취하기 위한 결정에 도달한다. 횡적 및 종적 허용오차는 회랑 이탈의 기준이 되며 RAM은 회랑 이탈 발생을 인지한 후 사전 경고를 PSU에게 제공한다. PSU는 사전 경고 수신 후 회랑 이탈의 원인을 파악한 후 적절한 시정 조치를 수행할 수 있으며 RAM은 시정 조치에 따라 경고 해제 여부를 판단하고 경고를 해제한다.

##### 4-2 수평 및 수직 기능 범위 산정

본 연구에서는 UAM의 경로 이탈 발생 시 요구되는 안전 경고 기능을 중심으로 연구를 수행하였으며 접근 단계에서 활용되는 APM 및 순항 단계에서 활용되는 RAM 두 가지 부분으로 나누어 안전 경고 기능 구축을 시행하였다. 효율적인 안전 경고 기능 구축을 위하여 APM 및 RAM에 관한 구축 계산식을 산출하여 수평 및 수직 기능 범위를 결정하였다.

결정된 수평 및 수직 기능 범위를 토대로 구축한 APM과 RAM의 예시는 다음과 같다. 그림 7은 전라남도 고흥군 국가중합비행성능시험장을 대상으로 UAM 운항을 위한 통합 안전 경고 기능을 구축한 결과이며 흰색 및 빨간색 영역은 APM, 초록색 영역은 RAM에 해당한다. 그림 8은 통합 안전 경고 기능 중 APM을 구축한 결과이며 흰색 영역은 이탈 경고가 제공되지 않

는 안전구역, 빨간색 영역은 이탈 경고가 제공되는 위험구역에 해당한다. 그림 9 및 그림 10과 같이 APM과 RAM을 토대로 회랑 내를 운항하는 UAM의 경로 이탈 시 감시 시스템은 이탈 발생을 인지하고 운항승무원 및 PSU에게 이탈 사실을 경고한다.

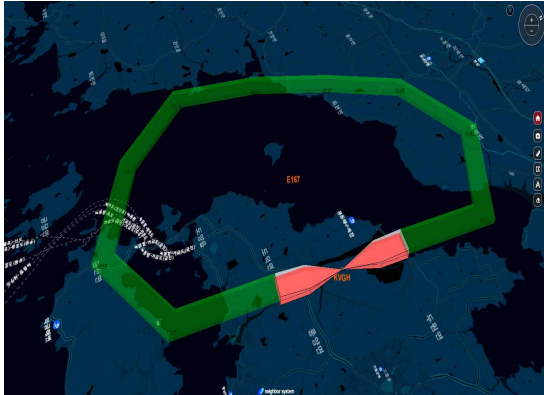


그림 7. APM(흰색, 빨간색)과 RAM(초록색)  
Fig. 7. APM (white, red) and RAM(green).

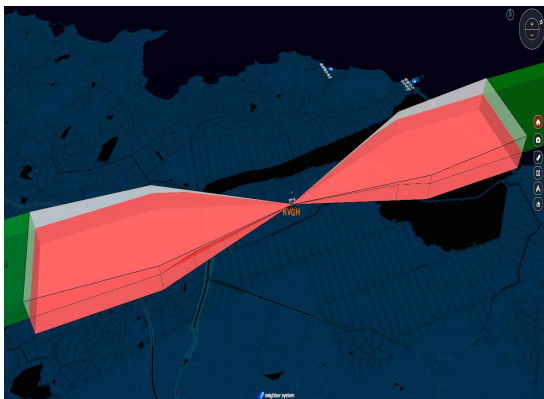


그림 8. APM(흰색: 안전구역 / 빨간색: 위험구역)  
Fig. 8. APM (white: safety area / red: danger area).

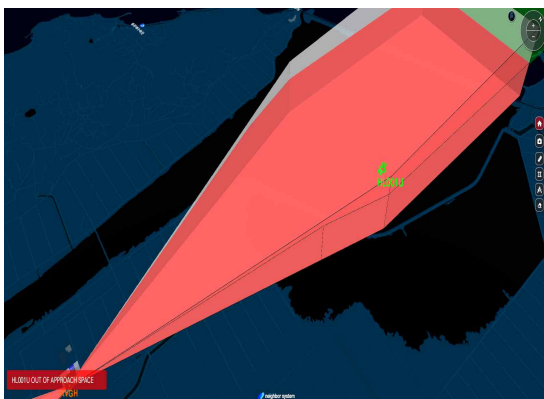


그림 9. APM의 경고 기능  
Fig. 9. Alert features of APM.

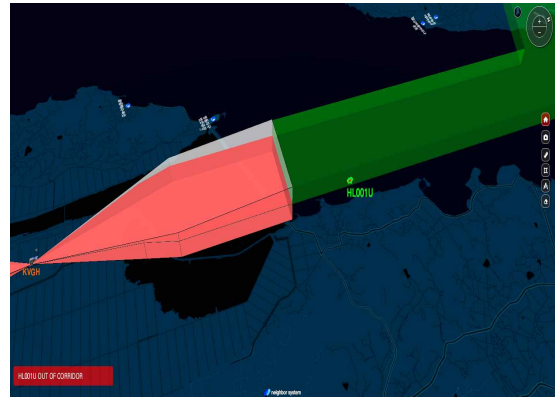


그림 10. RAM의 경고 기능  
Fig. 10. Alert features of RAM.

## V. 결 론

### 5-1 시사점

본 연구는 UAM 도입 및 상용화 단계에 앞서서 새로운 UATM 체계에서 적용할 수 있는 안전 경고 기능을 구축하고자 하는 목적으로 진행되었다. 안전 경고 기능은 접근 단계에서 장애물과의 충돌을 유발할 수 있는 경로 이탈 발생 시 경보를 제공하여야 하며 순항 단계에서 회랑의 수평 및 수직 이탈 발생 시 경보를 제공하여야 한다.

UAM의 경로 이탈 발생 시 제공되어야 하는 안전 경고 기능을 중심으로 연구를 수행하였으며 접근 단계에서 활용되는 APM 및 순항 단계에서 활용되는 RAM 두 가지 부분으로 나누어 안전 경고 기능 구축을 수행하였다. 효율적인 안전 경고 기능 구축을 위하여 APM 및 RAM에 관한 운영 알고리즘을 개발하였으며 구축 계산식을 산출하여 수평 및 수직 기능 범위를 결정하였다.

본 연구는 운영 알고리즘 개발 및 수평·수직 기능 범위 결정을 통하여 UAM 운항의 안전성을 보장하기 위한 안전 경고 기능을 구축하였으며 유용한 결과를 제시하였다.

### 5-2 한계점 및 향후 연구

본 연구는 UAM 운항의 안전성을 보장하기 위한 안전 경고 기능을 구축하였으며 UAM의 경로 이탈 발생 시 제공되어야 하는 기능을 중심으로 연구를 진행하였다. 접근 단계에서 적용되는 APM 및 순항 단계에서 적용되는 RAM 두 가지 부분으로 나누어 안전 경고 기능 구축을 수행하였으며 유용한 결과를 제시하였다.

본 연구는 UAM의 경로 이탈 발생 시 제공되어야 하는 안전 경고 기능으로 한정하여 연구를 진행하였다는 점에서 한계가 있으나 이는 향후 연구를 통하여 개선될 여지가 있다.

UAM 운항의 안전성을 보장하기 위하여 경로 이탈뿐만 아

나라 UAM 사이의 근접 및 UAM과 자연·인공 장애물에 사이의 근접까지 고려하는 안전 경고 기능 구축이 수행되어야 한다. 향후 연구에서는 UAM 간 및 UAM과 장애물 사이의 근접을 사전에 식별할 수 있는 지상 기반 안전망 구축에 관한 연구를 진행하고자 한다.

본 연구는 일부 한계에도 불구하고 UAM 도입 및 상용화 단계에 앞서서 새로운 UATM 체계에 대한 안전 경고 기능 구축을 진행하여 유용한 결과를 도출하였다는데 중요한 의의가 있다고 할 수 있다.

## Acknowledgments

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호: RS-2022-00143625, RS-2022-00156364).

## References

- [1] UAM Team Korea, K-UAM Concept of Operations 1.0, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 10, 14-16, 27, 2021.
- [2] Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, K-UAM Technology Roadmap, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp.10, 33, 2021.
- [3] S. Choi, H. Jang and H. Kim, "A study on the determination of urban air mobility(UAM) corridor width based on EPU bound," in *Proceeding of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 2023 Fall Conference*, Hongcheon: Korea, pp. 557, 558, 2023.
- [4] EUROCONTROL, Safety Nets: A guide for ensuring effectiveness, pp. 4, 6, 2017.
- [5] EUROCONTROL, EUROCONTROL Guidelines for Approach Path Monitor – Part I, EUROCONTROL-GUID-162, Edition 1.0, pp. 1-27, 2017.
- [6] EUROCONTROL, EUROCONTROL Guidelines for Approach Path Monitor – Part II, EUROCONTROL-GUID-162, Edition 1.0, pp. 1-43, 2017.
- [7] EUROCONTROL, EUROCONTROL Guidelines for Approach Path Monitor – Part III, EUROCONTROL-GUID-162, Edition 1.0, pp. 1-46, 2017.
- [8] EUROCONTROL, EUROCONTROL Guidelines for Area Proximity Warning – Part I, EUROCONTROL-GUID-161, Edition 1.0, pp. 1-26, 2017.
- [9] EUROCONTROL, EUROCONTROL Guidelines for Area Proximity Warning – Part II, EUROCONTROL-GUID-161, Edition 1.0, pp. 1-42, 2017.
- [10] EUROCONTROL, EUROCONTROL Guidelines for Area Proximity Warning – Part III, EUROCONTROL-GUID-161, Edition 1.0, pp. 1-56, 2017.
- [11] EUROCONTROL, EUROCONTROL Guidelines for Minimum Safe Altitude Warning – Part I, EUROCONTROL-GUID-160, Edition 1.0, pp. 1-27, 2017.
- [12] EUROCONTROL, EUROCONTROL Guidelines for Minimum Safe Altitude Warning – Part II, EUROCONTROL-GUID-160, Edition 1.0, pp. 1-27, 2017.
- [13] EUROCONTROL, EUROCONTROL Guidelines for Minimum Safe Altitude Warning – Part III, Edition 1.0, EUROCONTROL-GUID-160, Edition 1.0, pp. 1-27, 2017.
- [14] EUROCONTROL, EUROCONTROL Guidelines for Short Term Conflict Alert – Part I, EUROCONTROL-GUID-159, Edition 1.0, pp. 1-28, 2017.
- [15] EUROCONTROL, EUROCONTROL Guidelines for Short Term Conflict Alert – Part II, EUROCONTROL-GUID-159, Edition 1.0, pp. 1-46, 2017.
- [16] EUROCONTROL, EUROCONTROL Guidelines for Short Term Conflict Alert – Part III, EUROCONTROL-GUID-159, Edition 1.0, pp. 1-96, 2017.
- [17] EUROCONTROL, EUROCONTROL Specification for Surveillance Data Exchange ASTERIX: Part 17 Category 004 Safety Net Messages, EUROCONTROL-SPEC-0149-17, Edition 1.12, pp. 1-98, 2020.
- [18] International Civil Aviation Organization, Construction of Visual and Instrument Flight Procedures, Doc 8168(PANS-OPS), Volume II, Seventh Edition, pp. 1-974, 2020.





**최 상 일 (Sang-il Choi)**

2023년 : 한국항공대학교 (이학사)

2023년 3월 - 현재 : 한국항공대학교 항공교통물류학과 석사과정

※관심분야 : 공역 및 비행절차, 도심항공교통(UAM)



**남 승 연 (Seung-yeon Nam)**

2021년 : 한국항공대학교 (이학사)

2023년 9월 - 현재 : 한국항공대학교 미래항공교통학과 석사과정

※관심분야 : 도심항공교통(UAM)



**김 휘 양 (Hui-yang Kim)**

2011년 : 한국항공대학교 (경영학석사)

2000년 2월 - 2018년 2월 : 국토교통부

2018년 3월 - 현재 : 한국항공대학교 항공교통물류학부 조교수

※관심분야 : 공역 및 비행절차, 수용량, 항공교통관리, 항행계획