JANT 한국항행학회논문지
Journal of Advanced Navigation Technology

항공 우주 해상

J. Adv. Navig. Technol. 27(6): 710-715, Dec. 2023

저밀도 운용 환경에서의 도심항공교통 분리 기준에 관한 연구

A Study on the Separation Minima for Urban Air Mobility in Low-Density Operation Environments

장 효 석[1] · 김 도 현[1*] · 김 재 우[2] · 김 다 니 엘[2] · 조 희 덕[3]
[1]한서대학교 항공교통물류학과
[2]대한항공 항공기술연구원
[3]대한항공 종합통제본부

Hyoseok Chang[1] · Dohyun Kim[1*] · Jaewoo Kim[2] · Heeduk Cho[3] · Daniel Kim[2]

[1]Department of Air transportation & Logistics, Hanseo University, Seosan 32158, Korea
[2]R&D Center, Koreanair, Daejeon 34054, Korea
[3]Operations Control Center, Koreanair, Seoul 07505, Korea

[요 약]

도시화가 가속화되면서 교통 혼잡, 주거 및 환경 문제 등의 사회적 이슈가 도출되고 있다. 이를 해결하기 위해 도심항공교통(UAM; urban air mobility)과 같은 혁신적인 교통시스템 개발에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 초기 저밀도 운항 환경에서 기존의 항공교통시스템에 부담을 주지 않으면서도 안전하게 비행이 이루어져야 하고, 공역을 효율적으로 관리하고 운영하는 능력이 요구된다. 따라서 UAM은 회랑을 통한 경로의 운영으로 예측 가능성을 높여 초기 운영단계에서는 저밀도 상황에서의 운항에 대한 데이터를 축적해 나가는 것이 중요하다. 이를 위해서는 운영하기 전 각종 시뮬레이션을 활용한 시나리오를 생성하여 UAM 기체 간의 잠재적인 충돌 가능성을 예측하고 항공기 간격 즉 분리에 대한 손실 (LoS; loss of separation), 그리고 근접 공중충돌 (NMAC; near mid air collision) 위험에 대한 검토가 필요하다. 항적 난기류는 항공기 간의 안전한 분리를 보장하는 중요한 요소로, 기존 항공교통에서는 활주로와 항로의 분리에 필수적으로 사용되었다. UAM 비행체는 저고도에서 밀집된 공간에서 운영되기 때문에, 항적 난기류에 관한 추가적인 연구가 필요하며, 이를 위해 다양한 데이터를 활용하여 기체의 성능을 정밀하게 분석하고 있다. 본 논문에서는 국내외 연구 결과를 바탕으로 UAM의 분리 기준 설정에 필요한 요구사항과 고려해야 할 사항들을 확인하는 데 초점을 맞추고자 한다.

[Abstract]

Urbanization brings many challenges such as traffic, housing, and environment. To solve these problems, researchers are working on new transportation systems like urban air mobility (UAM). UAM aircraft should fly safely without burdening the existing air traffic system in the early stage of low-density operation. The airspace should also be managed and operated efficiently. Therefore it is important to make urban air traffic predictable by using corridors and collecting data on low-density operations in the early stage. For this purpose various simulations are needed before operation to create scenarios that estimate potential collisions between UAM aircraft and to evaluate the risks of aircraft spacing, loss of separation (LoS), and near mid air collision (NMAC). This paper focuses on identifying the requirements and considerations for setting separation standards for urban air traffic based on the results of studies.

Key word : Air traffic management, Loss of separation, Near mid air collision, Separation minima, Urban air mobility.

http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.6.710

Received 15 November 2023; **Revised** 5 December 2023
Accepted (Publication) 18 December 2023 (29 December 2023)

***Corresponding Author: Dohyun Kim**

Tel:*** - **** - ****
E-mail: dhkim@hanseo.ac.kr

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-CommercialLicense(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.

Ⅰ. 서 론

세계의 주요 도시에는 기업이 집중되어 있어 일자리를 제공하고, 다양한 편의 시설은 생활에 대한 편리성을 높인다. 또한, 교육 인프라와 사회적 네트워크의 확장으로 인해 도시화가 가속화되면서, 교통 혼잡, 주거 문제, 환경 문제 등의 사회적 이슈가 심화하고 있다. 교통 혼잡은 이동 시간의 증가와 함께 공기 질의 저하를 초래하여 환경오염을 유발하게 된다. 이러한 문제를 해결하고자 도시 계획을 수정하고, 대중교통 시스템을 확대하며, 교통관리 시스템의 도입 등 다양한 대안이 제시되고 있지만, 그 효과는 제한적이다. 따라서 도심항공교통 (UAM; urban air mobility)과 같은 혁신적인 교통시스템 개발에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이는 도심 내에서의 항공 운송을 가능하게 함으로써 교통 체증을 완화하고 이동에 대한 효율성 향상에 이바지할 수 있는 새로운 교통시스템이다. UAM은 지상이 아닌 고도 300~600 m의 전용으로 분리 운영되는 공역, 즉 회랑을 사용하여 직선거리로 이용하기 때문에 빨리 목적지에 도달할 수 있고, 화석 연료가 아닌 전기를 이용하는 기체로 개발되어 탄소 배출량을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 그리고 수직 이착륙이 가능한 기체를 사용하기 때문에 기존 항공기가 이용하는 비행장 내의 활주로와 같은 시설이 필요하지 않기 때문에 도심 내의 공간을 효율적으로 활용할 수 있다. 이러한 장점을 활용하여 서비스를 혁신하기 위한 노력으로 전 세계 주요 국가들은 해당 기술을 적용한 기체 개발 연구를 꾸준히 진행하고 있다. 미국에서는 다수의 기업이 기체 개발을 포함한 UAM을 활용한 확장된 서비스 제공을 위하여 노력하고 있다. 이를 지원하기 위해서 미국의 연방항공국 (FAA; federal aviation administration)은 안전한 운영을 보장하는 규제를 마련하고 있다. 또한, UAM 시스템의 안전성을 평가하고 인증하는 프로세스를 개발하는 정책을 추진하고 있으며 산업계와의 협력을 적극적으로 추진하고 있다. NASA (national aeronautics and space administration)와 같은 연구 기관은 AAM (advanced air mobility) 프로젝트를 통해 UAM 기체의 안정성, 효율성, 환경적 영향 등 다양한 연구를 진행하고 있다. UAM은 회랑을 통한 경로의 운영으로 예측 가능성을 높여 초기 운영단계에서는 저밀도 상황에서 운항에 대한 데이터를 축적해 나가는 것이 중요하다. 이를 위해서는 운영하기 전 각종 시뮬레이션을 활용한 시나리오를 생성하여 UAM 기체 간의 잠재적인 충돌 가능성을 예측하고 항공기 간격 즉 분리 손실 (LoS; loss of separation), 그리고 근접 공중충돌위험 (NMAC; near mid-air collision)에 대하여 검토가 필요하다. 본 논문에서는 국내외 연구 결과를 통해 UAM의 분리 기준을 설정하는 데 필요한 요구사항과 고려해야 할 사항들을 확인하는 데 초점을 맞추고자 한다.

Ⅱ. 항공교통 분리

항공교통관리는 도시 내 공항과 항로를 이용하는 항공기의 공역을 관리하도록 설계되었으며, 통신은 주로 무선을 통해 이루어지며 감시 기술을 활용하여 수 마일 떨어진 항공기를 추적한다. 지상 기반의 항행안전시설은 위성항행시스템 (GNSS; global navigation satellite system)을 이용한 감시 정보에 대한 백업 역할을 한다. 그러나 UAM은 도심 곳곳에 있는 수많은 버티포트에서 이착륙하며, 고밀도 항적을 수용하기 위해 더욱 세밀한 분리 기준이 있어야 하므로 항적 감시에는 적합하지 않다. 예상되는 UAM 운항의 규모와 밀도는 항공교통관제사가 안전하게 업무를 수행할 수 있는 용량을 초과할 것이므로 항공기 분리 기능에 대한 자율적인 해결책이 필요할 것이다 [1]. 이러한 상황에서 드론은 UAM과 유사한 이동 수단으로 항공교통관제 시스템과의 호환성과 안전성을 보장하기 위한 새로운 기술과 규제가 요구된다. 드론은 오랫동안 이미 상업 및 산업용으로 널리 사용되며, 운송, 인프라, 에너지, 의료 등 다양한 분야에서 활용되면서 전 세계적으로 교통량이 급증하고 있다 [2]. 항공교통관리는 관제업무를 제공하고, 공역에서 교통량을 조정하는 중요한 역할을 하고 있다. 충돌관리는 항공기를 지형, 위험기상, 공역의 제한 등 다른 항공기 및 위험 요소로부터 안전하게 분리하는 항공교통시스템의 핵심 운영 구성 요소 중 하나이다 [3]. 미연방항공국은 UAM Concept of operations v2.0에서 UAM의 안전을 위해 항공교통관리와 협력하여 운용하는 공역을 협력 구역(Cooperative area)이라고 정의하고 있다. 협력 구역 내에서는 규정에 따라 운용을 위한 의도와 정보를 공유하고 교환하는 것을 협력 운용이 이루어진다. 항공교통관제기관은 UAM과 같이 협력 운용에 참여하지 않는 항공기를 협력 구역으로부터 분리한다 [4].

UAM은 새롭게 운영되는 혁신적인 교통시스템이다. 따라서 UAM 기술의 안전성과 신뢰성을 확보하면서 시장에 안정적으로 도입하는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위해서는 UAM 기체의 기술발전, UAM에 대한 사회적 수용성, 지상 교통과의 연계성 등 운용 여건에 따라 유연하게 대응해야 한다. NASA에서는 UML (urban air mobility maturity level)에 따라 6단계로 구분하였는데 저밀도 운영환경은 2, 3단계에 해당한다. 2단계는 저밀도 항적, 복잡성이 상대적으로 적고 자동화에 대한 의존도가 낮으며 양호한 기상에서 제한된 지역에서 실시할 것으로 예상한다. 3단계는 2단계에 비해 조금 더 복잡하고 포괄적으로 자동화에 더 의존하는 단계로 이에 필요한 기술이 도입되고 운영적으로 평가되는 과도기적 시기가 될 것으로 예상한다[5].

2-1 분리 기준

항공기 간의 분리 요구사항은 항공교통관제 업무의 핵심 요소로, 안전한 운항과 항공기 간 충돌 방지를 위해 항공기 사이에 최소한의 거리인 분리 최저치(separation minima)를 설정하고 유지하는 것이다.

표 1. 전략적, 전술적 분리의 정의
Table 1. Definition of strategic deconfliction and tactical separation

separation	definition
strategic deconfliction	Deconfliction of UAM operational intent via flight plans with information exchanges
tactical separation	The avoidance of tactical conflict and collision by maintaining separation between UAM aircrafts in the corridor during flight

항공교통관제 시스템은 비행 단계별로 분류된 항공교통관제기관에 의해 공항 관제탑, 접근 관제소 및 지역 관제소에서 분리 업무를 제공한다. UAM 생태계에서는 기존 관제사의 역할에 상응하는 역할과 교통관리 방식이 새롭게 정립될 것으로 예상한다. UAM은 UAM 관리서비스제공자 (PSU; provider of service)가 관리하며 이들은 감시 시스템을 기반으로 UAM 운항 안전정보를 공유하고 교통흐름을 조절한다. PSU는 기존 항공교통관제와 유사한 업무를 수행하며 UAM의 비행계획을 승인하고 항로 이탈 등을 감시한다. 또한, UAM 간 충돌 위험을 방지하고 안전한 운항을 보장하기 위해 전략적, 전술적 분리 기법을 적절히 사용하여 항공기 사이의 안전거리를 확보한다. 따라서 최소 분리 거리 선택에 영향을 줄 수 있는 UAM 기체의 탑재 위치 추적 시스템의 성능을 이해하는 것을 포함하여 향후 UAM 운항을 위한 분리 기준에 대한 개발과 공역 및 경로 설계가 필요하다 [6]. 이러한 방식으로 UAM 생태계는 기존 항공교통관제 시스템을 효과적으로 대체하며 UAM의 안전과 효율성을 높일 것으로 기대한다. 전략적, 전술적 분리에 관한 한국형 도심항공교통 운용 개념서 1.0에서의 정의는 표 1과 같다.

2-2 분리 손실

항공기 간의 최소 분리 기준은 국제민간항공기구의 표준에 따라 설정되며, 각국의 항공 교통 관제 기관에 의해 지정된다. 분리 손실은 이런 최소 분리 기준이 위반되었을 때 발생하는 상황을 의미한다. 즉, 항공기가 지정된 수평 또는 수직 분리의 최솟값을 초과하면 분리 손실이 발생한다. 이는 반드시 충돌을 의미하지는 않지만, 공중에서 잠재적으로 충돌이 발생할 수 있는 상황을 나타낸다. 그러나 항공교통관제의 높은 안전성 요구로 인해 부정적인 결과를 가져온 데이터는 상대적으로 부족하다. 이로 인해 항공기 간 분리 손실을 일으키는 요인에 관한 연구는 제한적이다. Jurado et al.(2023)은 순간적인 수요나 섹터 점유는 항공기간 분리 손실을 일으키는 주된 요인으로 간주하고, 비행과 관련된 고도, 속도 및 방향의 변화 등 다른 변수들 역시 관련성이 있다고 판단되었다 [7].

2-3 근접충돌 위험(NMAC, Near Mid-Air Collisions)

근접충돌위험은 두 항공기가 공중에서 충돌 위험에 노출될 정도로 가까이 접근한 상황을 의미한다. 안전한 운항을 위하여 항공기 간 시간과 거리를 적정하게 분리해야 하고 항공기 간의 수평 또는 수직 분리 최솟값의 50% 이하로 접근하게 되면 발생한다. Lee et al.(2022)은 UAM 100대가 동시 운영될 수 있는 6단계 UAM 성숙도를 기반으로 한 시뮬레이션을 진행하였다. 이 시뮬레이션에서는 각 UAM 회랑을 이동 방향마다 두 개의 트랙으로 분리하였고 횡적 분리에 필수항행성능 (RNP; required navigation performance) 0.1을 적용하였다. 또한, 각 버티포트에서 UAM 비행 사이의 30초 간격을 부과하여 출발 전 전략적 충돌관리를 위해 도착과 출발에 대한 교통량을 제어하였다. 그림 1에서 보이는 시뮬레이션 결과에 따르면 수평 분리가 1,500 ft 미만일 때 20% 이상으로 증가하였다. 이는 1,800 ft의 수평 분리에서의 충돌 위험에 대한 수치보다 약 2배 높은 것으로 확인되었다. UAM 간의 근접충돌위험은 주로 버티포트 공역의 출발과 도착 단계에서 발생하므로, 기존 항공교통체계에서 공항 주변의 분리에 대해 다른 분리 최저치와 특정 입출항 절차를 적용할 것이 권장된다. 또한, UAM 간 공중충돌 가능성을 최소화하고 충돌을 피하기 위한 전술적 분리를 위해 사전에 계획된 전략적 분리계획에서의 이탈을 줄이기 위한 출발 전 전략적 충돌관리의 개발과 적용이 필요하다고 권고하였다 [6]. Embraer는 호주의 대도시인 멜버른을 중심으로 미래의 UAM 교통관리 환경에 관한 연구를 진행하였다. 이를 위해 멜버른 인근에 가상의 버티포트 3곳을 설정하고, 4시간 동안의 교통량을 수집하였는데 이 과정에서 다양한 시나리오가 제시되었다 [8].

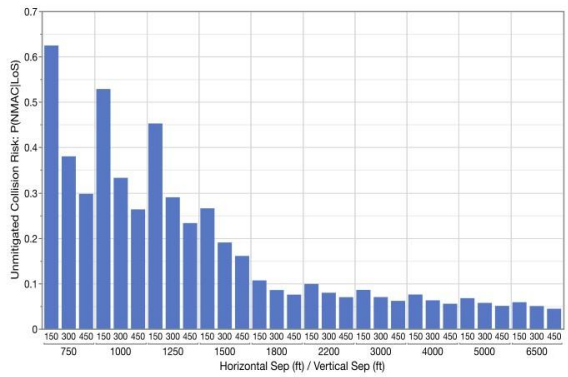

그림 1. 항로에서 UAM 기체 간 완화되지 않은 충돌 위험
Fig. 1. Unmitigated conditional collision risk for conflicts between UAM flights during en-route flight phase

기존 헬기 회랑을 이용하여 현재의 교통관리 체계와 통합하여 운영할 경우, 평균 운항시간은 18.9 분이며 총 운항횟수는 92회이다. 이 중에서 UAM 간에는 16회, UAM과 non-UAM 간 54회의 충돌 발생 위험이 있다. 반면 전용 회랑을 이용하는 방식은 기존 헬기 회랑을 이용한 방식에 비해 운항횟수는 8회 감소하지만, UAM 간에는 12회, UAM과 Non-UAM 간에는 42

회로 충돌 발생 위험이 줄어든다. Embraer는 표 2에서와같이 시뮬레이션을 통해 UAM 분리 기준을 설정하였다. 이 기준은 두 UAM 사이에서 0.25 NM (수평), 1,000 ft (수직) 분리가 실패하거나, 하나의 UAM과 non-UAM 사이에 1 NM (수평), 1,000 ft (수직) 분리가 실패할 경우, 근접충돌 위험이 많이 증가한다. 이 기준은 UAM 운영이 성숙 단계에 도달하고 운항 빈도가 높아지면 안전하게 분리를 유지할 수 있는 최저치로 간주한다.

표 2. UAM 분리 기준[8]
Table 2. UAM Separation minima

	horizontal	vertical
between UAMs	0.25 NM	1,000 ft
between UAM and Non-UAM	1 NM	

한편, UAM 순항단계에서 종적 충돌 가능성에 관한 연구는 두 항공기가 제약이 없는 공간에서 비행한다는 가정하에 진행되었다. 이 연구에서는 항법의 정확도가 높아질수록 분리 최저치를 효과적으로 관리할 수 있음을 확인하였다 [9].

Ⅲ. UAM 분리 기준

3-1 UAM 항공기의 분리 요구사항

분리 기준은 UAM의 안전성과 효율성을 보장하는 데 중요한 역할을 하며, UAM의 기술과 운영 방식의 발전에 따라 지속해서 검토하고 개선해야 한다. 점차 자율화되는 항공 교통 관리 시스템과 함께 발전하기 위해, 확장성을 고려한 검증 가능한 안전성을 제공하는 방식을 채택해야 한다. 도심 저고도 공역에서 UAM이 비행하게 될 때 고려해야 할 여러 특성이 있다. 제한된 저고도 공역, 높은 교통량, 다양한 UAM 비행 성능에 따른 교통 흐름 특성이 포함된다. 이러한 환경에서 다양한 기체와 공기 역학적 성능을 가진 UAM을 안전하게 운용하기 위해서 분리 기준과 통제 관련 시스템을 포함하는 종합적인 접근방식이 필요하다. 기존 항공기의 충돌을 방지하기 위한 분리 방법을 보면, 수직 분리와 수평 분리, 그리고 혼합 분리 등이 있다. 항공기 사이에 유지해야 하는 최소한의 거리는 사용하는 항행안전시설의 종류와 특성, 그리고 해당 항공기의 특성에 따라 다르게 결정된다. 초기 저밀도 UAM 운용 시나리오에서는 수평 분리 기법만으로도 충돌을 방지할 수 있어, 상대적으로 수직 분리에 대한 요구사항은 많지 않으리라고 예상한다. 따라서 초기 UAM의 상용화 과정에서는 기존 헬리콥터와의 안전한 수직 분리를 통해 헬리콥터와 UAM 간 안전을 확보할 것이다[10].

3-2 UAM 비행방식

2023년 상반기에 발간된 FAA UAM concept of operations v2.0에 따르면, UAM의 비행방식에 대해 자동비행규칙 (AFRs; automated flight rules)을 검토하고 있다 [4]. AFR은 현재의 시계비행규칙(VFR; visual flight rules)과 계기비행규칙 (IFR; instrument flight rules) 체제를 반영하면서, 개발 중인 기술 및 기체 간 데이터 교환 등의 절차를 고려하여 만들어진 규칙이다. AFR 하에는 특정 조건 아래에서 시스템이 자동화되어 사전에 결정된 분리자 (predetermined separator)의 임무를 수행하게 된다. 사전 결정된 분리자란 항공기를 위험 요소로부터 안전하게 분리하려는 책임이 누구에게 있는지를 명확히 하는 원칙을 따르는 것을 의미한다. 항행 중 분리 업무에 대한 책임은 운영자에게 있다 [3]. UAM 초기 운영단계에서는 교통량이 상대적으로 낮은 저밀도 상황에서 현 비행방식을 따를 것으로 예상하지만, 기술과 장비의 발전에 따라 증가하는 용량에 대비해야 할 필요가 있다. 이에 따라 운영의 복잡성이 증가하게 되며, 이런 상황에서는 VFR 회랑, 항로 등이 추가 교통량을 수용하는 방안으로 사용될 수 있다 [4].

초기 UAM 운용 단계에서는 회랑 내에서 전략적인 충돌 회피가 가능할 것으로 보이지만, 비행 중에는 조율 업무와 운항 정보 공유 그리고 전술적인 충돌에 대한 회피 업무 제공이 필요하게 될 것이다. 따라서 저밀도 운용 환경에서의 UAM 관리는 목적지인 버티포트의 수용 능력에 집중하게 될 것이다.

3-3 UAM 분리 기준 고려사항

항공기 간의 안전한 거리를 유지하고 항적 난기류의 영향을 최소화하기 위해 분리 기준이 적용된다. 고정익 항공기는 활주로를 이용해 이착륙하는 반면, UAM은 버티포트에서 수직으로 이착륙한다. UAM 비행체는 낮은 고도의 밀집된 공간에서 운영되므로 항적 난기류에 민감하게 반응할 수 있다. 항적 난기류는 UAM 비행체의 제어력을 감소시키고 비행 안정성을 저하하며 이로 인해 충돌 위험이 증가할 수 있다 [11].

또한, UAM이 출발하고 도착하는 장소인 버티포트 내의 이착륙구역의 규모와 UAM의 이착륙시간에 대한 이해가 필요하다. 이착륙구역은 접지 및 이륙패드 (TLOF; touchdown and lift-off area), 최종 접근 및 이륙구역 (FATO; final approach and takeoff), 그리고 안전구역 (safety area)으로 구분할 수 있다. FAA는 버티포트 이착륙장의 규모에 관한 기준을 제시하고 있다. 이 기준은 특정 비행조건이나 최대이륙중량을 전제로 하였으며, 표 3은 UAM 이착륙대 규격에 관한 내용이다[12]. 일반적으로 헬리포트의 크기를 결정할 때는 단일 로터의 헬리콥터의 경우, 로터의 지름 (RD; rotor diameter)을 기준으로 수치를 설정한다.

표 3. UAM 이착륙대 기준[12]
Table 3. UAM touchdown and lift-off area dimension

Element	Dimension
TLOF	1D
FATO	2D
Safety Area	3D (½ D added to edge of FATO)

D: Controlling Dimension

그러나 UAM은 헬리콥터와 달리 다중 추진 장치가 장착되어 있어 기존 헬리콥터의 기준을 그대로 적용하기 어렵다. 이를 고려하여 FAA는 UAM의 이착륙구역 설치기준을 정할 때 기체의 양쪽 끝단 사이의 최장 거리(tip-to-tip span)를 단위로 사용하도록 권고하고 있다. 이런 기준은 일반적인 헬리패드가 아닌 운송용 헬리패드 수준에 해당하며, 이는 UAM의 이착륙 단계에서 엔진 고장, 항적 난기류 등의 문제로 인해 연구가 부족함을 고려하여 보수적인 기준을 적용한 결과이다. 따라서 UAM은 헬리콥터와 비교하면 완충 기준이 필요함을 알 수 있다. 버티포트 수용량은 인프라 및 기체 이동에 영향을 주는 운영변수 등에 따라 결정되며 [13], 이는 UAM을 전략적으로 분리하는데 중요한 요소이다. Vascik et al.(2019)은 버티포트의 수용 능력 산출을 위해 도착, 출발, 게이트 이동, 격납고 이동, Turnaround Time 등을 고려하여 버티포트 내에서 UAM 한 대가 점유하는 시간을 산출하였고 [14], 그 결과는 표 4와 같다.

표 4. 버티포트에서 한 대의 UAM 점유 시간 [14](단위: 초)
Table 4. UAM dwell time at the vertiport

	arrival	departure	Gate taxi	staging stand taxi	turnaround
time	15~90		5~90	90 or 1/2 of ground time	30~600

Ⅳ. 결론

UAM은 신규 교통수단으로서, 초기 도입 단계에서 가장 중요한 요소는 안전성이다. 본 연구에서는 초기 운용 시점을 가정하여 저밀도 환경에서의 UAM 분리 기준에 관하여 연구하였다. UAM 분리 기준을 설정하는 과정에서 현재까지 공개된 UAM 기체 제원의 정보가 부족하므로, 정확한 수치적 기준의 제시는 어려움이 있다. 그러나 본 연구에서는 기존 항공기의 분리 기준을 바탕으로 UAM 분리 기준을 만들고자 할 때 고려해야 할 요소들에 중점을 두어 제안하였다.

항적 난기류는 기존 항공교통에서 활주로와 항로 분리 등 항공기 간 분리에 필요한 특성이다. 그러나 다양한 데이터를 통해 기체의 성능을 확인하는 등 UAM 항적 난기류에 관한 추가 연구가 필요하다. 이러한 연구를 통해 고정익, 회전익 항공기와의 항적 난기류 규모와 강도 등을 비교하면 UAM 간, 그리고 UAM과 기존 항공교통 간에 적용할 수 있는 적절한 분리 기준을 마련할 수 있다. 또한, UAM 이착륙구역의 특성도 고려해야 한다. 이착륙구역의 구조뿐만 아니라 이착륙 표면의 상태와 운영 상황에 따라 UAM 분리 기준을 설정할 수 있다. 이착륙구역은 한 대의 기체가 이륙하고 착륙하는 비교적 좁은 구역이므로 이착륙 간 다른 UAM과의 적절한 분리는 필수적이다.

마지막으로, 버티포트의 수용 능력도 고려해야 한다. UAM 초기 운용 단계에서는 저밀도 환경에서 VFR 기반 운항이 이루어지므로, 버티포트 수용량을 고려할 필요성은 상대적으로 적지만, 향후 증가하는 UAM 교통량 처리를 위해서는 반드시 고려되어야 한다. 분리 기준에 대한 시스템적 영향은 초기에는 낮을 것으로 예상하지만, 중장기적으로 UAM 운용 단계가 발전하고 비행방식 및 회랑 종류가 다양해질 경우 사전에 설계된 분리 기준에 기반하여 교통관리 시스템을 적용하는 것이 우선시 될 것이다. 그러므로 UAM 운용 초기부터 분리 기준을 설정하고, 이를 바탕으로 교통관리 시스템을 단계적으로 도입하고 검증함으로써 성장기와 성숙기에 대비해야 한다.

Acknowledgments

국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행중인 '도심항공모빌리티 감시 정보 획득체계 개발사업' 과제 (과제번호 RS-2022-00143625)의 연구 결과이며 지원에 감사드립니다.

References

[1] S. Bharadwaj, T. Wongpiromsarn, N. Neogi, J. Muffoletto, and U. Topcu, “Minimum-violation traffic management for urban air mobility,” *NASA Formal Methods symposium,* pp. 37-52, 2021.

[2] Z. Zhang and L. Zhu, “A review on unmanned aerial vehicle remote sensing: platforms, sensors, data processing methods, and applications,” *Drones*, Vol. 7, No. 6, pp. 398, 2023.

[3] ICAO Doc 9854, *Global air traffic management operational concept*, 1st ed, Montreal, Canada, 2005.

[4] Concept of Operations v2.0 Urban Air Mobility (UAM), Federal Aviation Administration(FAA), Washington, DC, 2023.

[5] B. Hill and D. DeCarme, Urban air mobility(UAM) vision concept of operations(ConOps) UAM maturity level (UML)-4 overview, NASA, 2021.

[6] S. M. Lee, M. Abramson, J. D. Phillips, and H. Tang, “Preliminary analysis of separation standards for urban air mobility using unmitigated fast-time simulation,” in *2022 IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference (DASC),* Portsmouth: VA, pp. 1-10, 2022.

[7] R. D. A Jurado, V. F. G. Comendador, M. Z. Suárez, F. P. Moreno, C. E. V. Gallego, and R. M. A. Valdés, “The variables with the greatest influence on ATM safety barriers,” *Safety Science*, Vol. 163, pp. 106101, 2023.

[8] Flight plan 2030: an air traffic management concept for urban air mobility, Embraer, 2019.

[9] J. Y. Kim, N. H. Kim, and K. J. Lee, “Study on vertical

separation standards for urban air mobility(UAM) using reich CRM," in t*he Korean Society for Aeronautical and Space Science conference,* Hongcheon, Nov. 2023.

[10] H. Tang, Y. Zhang, V. Mohmoodian, and H. Charkhgard, "Automated flight planning of high-density urban air mobility," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 131, pp. 103324, 2021.

[11] N. T. Nguyen, G. Bartolini, J. E. Baculi, W. Okolo, and J. Xiong, "Wake vortex interaction of urban air mobility aircraft," in *AIAA Scitech Forum,* San Diego: CA, pp. 1031, 2022

[12] Vertiport Design, Engineering brief #5, Federal Aviation Administration, 2022.

[13] H. Zhang, Y. Fei, J. Li, B. Li, and H. Liu, "Method of vertiport capacity assessment based on queuing theory of unmanned aerial vehicles," *Sustainability*, Vol. 15, No. 1, pp. 709, 2023.

[14] P. D. Vascik and R. J. Hansman, "Development of vertiport capacity envelopes and analysis of their sensitivity to topological and operational factors," in *AIAA Scitech Forum*, San Diego: CA, 2019.

장 효 석 (Hyoseok Chang)
1997년 2월 한국항공대학교 항공교통학과 (이학사)
2010년 2월 한국항공대학교 항공교통학과 (이학석사)
2018년 8월 한국항공대학교 항공교통학과 (이학박사)
2000년 7월 ~2020년 8월 ㈜ 대한항공
2021년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 항공교통물류학과 교수
항공교통학 이학박사
※관심분야 : UAM, 항공교통, 항공사 경영, 항공사 연료관리

김 도 현 (Do-Hyun Kim)
1997년 2월 한국항공대학교 항공교통학과 (이학사)
2000년 2월 한국항공대학교 항공교통학과 (이학석사)
2010년 8월 한국항공대학교 항공교통학과 (이학박사)
2000년 6월 ~2002년 2월 인천국제공항공사 계류장관제사
2002년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 항공교통물류학과 교수
※관심분야 : 공역, 공항시설, 위험평가, 항공교통관리

김 재 우 (Jaewoo Kim)
1992년 2월 인하대학교 기계공학과 (학사)
1997년 2월 인하대학교 기계공학과 (석사)
2017년 7월 국방대학교 국방사업관리 (석사)
2021년 8월 광운대학교 방위사업학과 (박사)
1999년 10월 ~현재 : ㈜대한항공 (구조시험/연구기획/사업기획/사업개발/외주개발)
(전)한국무인기시스템협회 이사
※관심분야 : UAM, 항공교통, 버티포트, Ai

조 희 덕 (Heeduk Cho)
1996년 2월 경북대학교 천문기상학과(학사)
1995년 12월 ~ 현재 : (주)대한항공
2015년 7월 ~ 2019년 6월 : (주)대한항공 일본지역 운항관리지원센터
※ 관심분야 : UAM, 운항관리 및 통제, 운항통제 시스템

김 다 니 엘 (Daniel Kim)
2020년 2월 한국항공대학교 항공교통물류학과(학사)
2022년 8월 한국항공대학교 항공교통물류학과(석사)
2022년 12월 ~ 현재 : ㈜ 대한항공 (UAM 교통관리시스템 개발)
※ 관심분야 : UAM, 항공교통, 항공교통관제