

충돌 위험 모델을 활용한 UAM 평행 항로 충돌 위험 분석

UAM Parallel Corridor Collision Risk Analysis based on Collision Risk Model

김연실* · 배중원

한국항공우주연구원 무인기연구부

Youn-sil Kim* · Joong-won Bae

UAS Research Division, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

[요 약]

본 연구에서는 유인기 회랑에 적용되는 충돌 위험 모델을 활용하여 UAM (Urban Air Mobility) 회랑의 충돌 위험을 분석하였다. K-UAM 로드맵과 운용개념서에 따르면 UAM은 기존 유인기 운항과 유사하게 지정된 항로를 비행하는 형태를 가지며 출발지와 도착지를 왕복하는 두 가지의 노선으로 운행될 것으로 예상된다. 국내 유인기 노선 중 김포공항-제주공항 간 유인기 운항이 이와 유사하며 두 개의 노선 간 횡 방향 분리간격을 가진 평행항로 형태를 띤다. 본 연구에서는 이와 유사한 형태의 UAM 회랑에 대해 유인기 평행 항로 충돌 위험 분석에 활용되는 충돌 위험 모델을 활용하여 횡 방향 분리간격에 따른 UAM 회랑의 충돌 위험을 분석하였다. 이를 바탕으로 최종적으로 K-UAM 실증 노선을 고려하여 한강폭 내에 몇 개의 평행 항로가 설치될 수 있는지 분석하였다.

[Abstract]

In this study, the collision risk of the UAM (Urban Air Mobility) corridor was analyzed using a collision risk model applied to the manned aircraft corridor. According to the K-UAM roadmap and operating concept, UAM is expected to fly on a designated route similar to existing manned aircraft operations and operate on two routes, traveling back and forth between the departure point and the destination point. Among domestic manned aircraft routes, the manned aircraft operation between Gimpo Airport and Jeju Airport is similar to this and takes the form of a parallel route with a lateral separation distance between the two routes. In this study, we analyzed the collision risk of the UAM corridor according to the lateral separation distance using a collision risk model used to analyze the collision risk of manned aircraft parallel routes for a similar type of UAM corridor. Based on this, we finally analyzed how many parallel routes could be installed within the width of the Han River, considering the K-UAM demonstration route.

Key word : Collision risk model, Parallel route, Urban air mobility, UAM corridor.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.5.561>



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 15 September 2023; Revised 12 October 2023
Accepted (Publication) 24 October 2023 (30 October 2023)

*Corresponding Author; Youn-sil Kim

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

E-mail: younsil@kari.re.kr

1. 서론

최근 드론 및 UAM (Urban Air Mobility) 등 새로운 비행체를 기존 공역에 안전하게 통합하기 위한 연구가 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 미국의 경우 2020년 첫 번째 버전의 UAM 운용개념서를 발행하였고 2023년 두 번째 버전을 업데이트 하였다 [1], [2]. 우리나라의 경우에는 2020년 5월 K-UAM 로드맵을 발행한 후 2021년 K-UAM 운용개념서를 발간한 바 있다 [3], [4].

K-UAM 로드맵과 운용개념서에 따르면 UAM은 UAM 용 회랑에서 비행하는 형태를 띠며 초기, 성장기, 성숙기 단계에 따라 고정형 회랑에서 동적 회랑망으로 확장된다. 이는 공항에서 공항 간 지정된 항로로 비행하는 유인기 운용 방식이 버티포트에서 버티포트 간 운용으로 축소되는 형태로 볼 수 있다. 2023년 5월 보도된 서울시 보도자료에 따르면 그림 1과 같이 총 3개의 UAM 실증 노선이 제시되어 있으며 K-UAM 운용개념서에 따르면 그림 2와 같이 한강 헬기 회랑을 이용하는 서울 도심 실증노선(안)이 제시되어 있다 [4], [5]. UAM 버티포트 간 운용은 유인기 운용 형태와 유사하게 출발지와 목적지를 왕복하는 최소 두 개의 노선으로 구성될 것으로 예상된다.

유인기 항로의 경우 지속적으로 항로 내 유인기 간 충돌 위험을 분석하며 충돌 위험이 TLS (Target Level of Safety) 내에 있는지를 확인한다 [6]-[8]. ICAO (International Civil Aviation Organization) 표준 9689에 관련한 충돌 위험 모델이 제시되어 있는데 1966년 제안된 Reich 모델을 기본으로 한다 [9], [10].

Reich 모델을 통해 여러 개 평행 항로에 대해서 항로 내 비행체 간 충돌 위험을 계산할 수 있다. 기본 모델에서 여러 시나리오에 따른 확장된 모델들이 연구된 바 있다 [6].

또한 비행체 크기 및 속도 등을 제외하고 유사한 평행 항로를 비행하는 무인기에 대해서도 동일하게 충돌 위험 모델을 적용할 수 있기 때문에 관련한 연구도 꾸준히 진행되고 있다 [11]-[14]. Terrence는 2017년 Reich 모델을 무인기 회랑에 적용하였으며 Hong은 2019년 무인기 분리거리 계산에 해당 모델을 적용한 바 있다 [11], [12]. Valtteri는 2021년 Reich 모델을 무인기에 적용하기 위해 각 파라미터의 유효성을 검증하였다 [13]. Kim은 2022년 도심지 위에 위치한 무인기 회랑에 Reich 모델 기반 종 방향 및 횡 방향 충돌 위험을 분석한 바 있다 [14].

그림 3,4는 국내 공역의 항공로를 나타내며 김포-제주 공간간 운행되는 Y711, Y722 평행 항로가 도시되어 있다 [18]. 교통 연구원에서는 ICAO RASMAG (Regional Airspace Safety Monitoring Advisory Group)에서 해당 항로에 대해 평행 항로 모델을 이용하여 충돌 위험을 평가한 결과를 제시하였다 [7].



그림 1. UAM 실증 노선
Fig. 1. Route for UAM demonstration

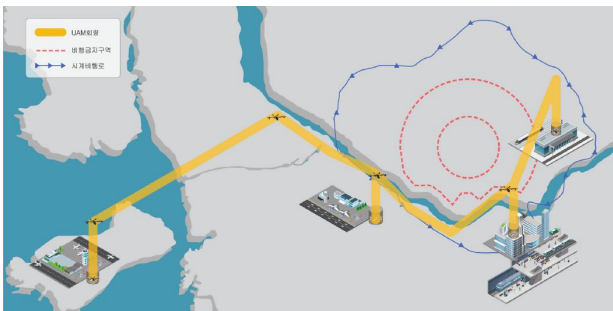


그림 2. 2024년 UAM 실증 노선안
Fig. 2. 2024 route for UAM demonstration

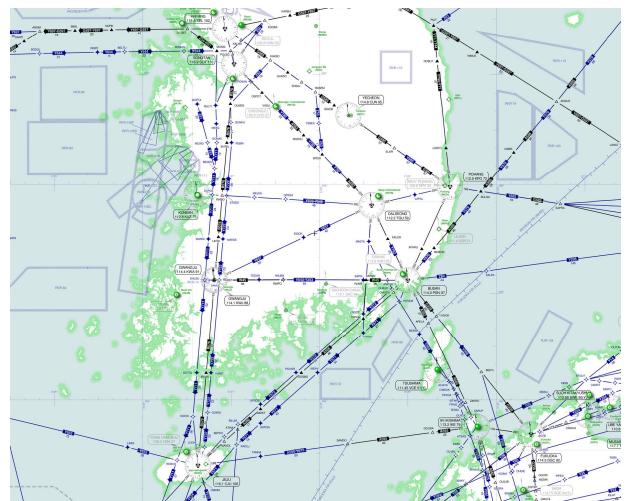


그림 3. 국내 공역 항공로
Fig. 3. Airways of domestic airspace



그림 4. Y711, Y722 항로
Fig. 4. Y711, Y722 route

이러한 Reich 모델은 유인기 운용과 유사하게 출발지-도착지 간 2개 이상의 평행 항로로 운용될 것으로 예상되는 UAM 항로에도 적용이 가능하다. UAM 회랑에 대해서는 UAM과 장애물 간 충돌 위험을 분석한 연구는 있지만 회랑 내 비행체 간 충돌 위험을 분석한 연구는 아직 없다 [15]-[17]. 따라서 본 연구에서는 한강을 지나는 UAM 회랑을 가정하고 교통량, 분리거리 등에 따른 충돌 위험을 분석하였다. 최종적으로 TLS를 만족하기 위한 UAM 회랑의 횡 방향 분리거리를 분석하여 한강 내 최대 몇 개의 평행 항로가 설치 가능한지 분석하였다.

II. 평행 항로 충돌 위험 모델

2 장에서는 ICAO 표준 9689에 제안된 횡 방향 평행 항로 충돌 위험 모델을 기술하였다.

2-1 횡 방향 충돌 위험 모델

수식 1은 본 연구에서 활용한 유인기 평행 항로의 횡 방향 충돌 위험을 분석하는 충돌 위험 모델이다. 아래 모델은 김포-제주 공항 비행에 활용되는 Y711, Y722 평행 항로 간 횡 방향 충돌 위험을 평가하는 데에도 활용된 바 있다 [7]. UAM은 목적상 이러한 유인기 운항 형태와 유사한 항로 비행을 할 것으로 예상되기 때문에 모델 파라미터를 UAM에 적합하도록 수정해주면 UAM 용 평행 항로 횡 방향 충돌 위험 모델에도 활용 가능하다.

$$N_{ay} = P_y(S_y)P_z(0) \frac{\lambda_x}{S_x} \left[E_s \left(\frac{|\bar{x}|}{2\lambda_x} + \frac{|\bar{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\bar{z}|}{2\lambda_z} \right) + E_o \left(\frac{2V}{2\lambda_x} + \frac{|\bar{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\bar{z}|}{2\lambda_z} \right) \right] \quad (1)$$

수식 1에서 $P_y(S_y)$ 는 항로 간 횡 방향 분리간격이 S_y 일 때, 비행오차, 항법 오차 등에 따른 비행체 간 횡 방향 중첩 확률을 나타낸다. $P_z(0)$ 는 동일 고도를 갖는 항로에 대해서 수직 방향 중첩 확률을 나타낸다. $P_y(S_y)$ 와 유사하게 수직 방향 비행오차, 항법 오차 등에 따라 값이 결정된다. $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 는 비행체를 직사각형으로 모델링 했을 때 X, Y, Z 방향 크기를 나타낸다. S_x 는 종 방향 분리거리를 나타낸다. E_s, E_o 는 같은 방향, 반대 방향 점유도를 나타낸다. V 는 ground speed를 나타내며 $|\bar{x}|, |\bar{y}|, |\bar{z}|$ 는 X, Y, Z 방향 비행체 간 상대 속도를 나타낸다.

유인기 충돌 위험 분석에서는 이러한 파라미터들이 유인기에 맞춰져 있었다면 UAM 회랑에 대한 충돌 위험 분석에서는 UAM 운항에 맞게 파라미터 재설정이 필요하다.

2-2 UAM 적용을 위한 파라미터 재설정

표 1. 횡 방향 충돌 위험 모델 파라미터

Table 1. Parameter of lateral collision risk model

Parameter	Description
$P_y(S_y)$	Probability of lateral overlap of aircraft nominally flying on laterally adjacent paths at the same flight level
$P_z(0)$	Probability of vertical overlap of aircraft nominally flying at the same flight level
$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$	Average length, width, height of an aircraft
E_s, E_o	Same, opposite direction lateral occupancy
V	Average ground speed
$ \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} $	Average relative speed of two aircraft in along-track, cross-track, vertical direction
S_x	Longitudinal window used in the calculation of occupancies
S_y	Lateral separation between paths

표 1은 수식 1의 횡 방향 충돌 위험 모델에서 UAM에 맞게 재설정해야 할 파라미터를 나타낸다.

파라미터 재설정을 위해 표 1의 항목들을 하나하나 살펴볼도록 하겠다. 먼저 $P_y(S_y)$ 는 기존 문헌에 따라 수식 2와 같이 나타낼 수 있으며 $P_z(0)$ 도 유사한 방식으로 수식 3과 같이 나타낼 수 있다 [12].

$$P_y(S_y) \approx 2\lambda_y \int_{-\infty}^{\infty} f_y(y) f_y(y+S_y) dy \quad (2)$$

$$P_z(0) \approx 2\lambda_z \int_{-\infty}^{\infty} f_z(z) f_z(z) dz \quad (3)$$

수식 2,3에서 f_y, f_z 는 각각 수평 방향 항법 오차 및 수직 방향 항법 오차 모델을 나타낸다. 본 연구에서는 수평, 수직 방향 오차 모델에 라플라시안 분포를 가정하였다 [6], [12]. 또한 K-UAM 운용개념서에 따르면 항로상에서 SBAS (Satellite Based Augmentation System)를 사용하는 것으로 제시되어 있다. 우리나라의 SBAS인 KASS (Korea Augmentation Satellite System)의 성능 목표인 APV (Approch Procedure with Vertical Guidance)-1 급의 경우 수평 방향 95% 정확도 16m, 수직 방향 95% 정확도 20m를 가진다. 이 수치를 이용하여 라플라시안 분포의 파라미터를 설정하였다.

수식 4는 라플라시안 분포를 나타내며 파라미터 a 를 결정 해주면 분포가 정의된다. 수평 방향 95% 정확도 수치를 2.996으로 나누면 이에 해당하는 a 가 도출된다.

$$f_L(y) = \frac{1}{2a} e^{-\frac{|y|}{a}} \quad (4)$$

ICAO 표준 9689에 따르면 항법 오차 분포를 가정할 때 정상 상태일 때 뿐 아니라 비정상 상황에서의 항법 오차를 함께 고려한다. 이에 따라 전체 항법 오차를 두 개의 라플라시안 분포의 합으로 표현하는데 하나의 항은 정상 상태의 항법 오차 분포를

나타내고 나머지 항은 비정상 상태의 항법 오차 분포를 나타낸다. 두 분포의 비율을 설정하는 파라미터를 통해 최종 분포가 결정된다. 이를 수식으로 나타내면 수식 5와 같다 [6].

$$f_y(y) = \frac{1-\alpha}{2a} e^{-\frac{|y|}{a}} + \frac{\alpha}{2b} e^{-\frac{|y|}{b}} \quad (5)$$

수식 5에서 첫 번째 항은 APV-1 급 항법 오차에 따라 결정되고 두 번째 항의 파라미터 b 는 ICAO 표준 9689에서 제시된 방식에 따라 S_y 로 설정 가능하다. α 는 비정상 항법 상황의 비율을 나타내는 파라미터로 유인기에서 활용되는 값을 활용하여 0.000187로 가정하였다 [6]. 수직 방향에 대해서도 유사하게 95% 정확도 수치를 기반으로 수직 방향 항법 오차 분포 모델을 정의할 수 있다.

다음으로 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 는 기존 문헌에 제시된 UAM 기체 제원을 바탕으로 대략적으로 가정하였다 [19]. 표 2는 참고한 기체 제원을 나타내며 본 연구에서는 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 를 보수적으로 각각 10m, 10m, 3m로 설정하였다.

다음으로 E_s, E_o 는 같은 방향, 반대 방향 점유도로 항로의 교통량, 비행체 속도, 종 방향 분리거리가 정해지면 수식 6과 같이 계산될 수 있다 [6]. 횡 방향 충돌 위험 모델에서 점유도는 비행 시간 당 기체 앞뒤로 종 방향 분리거리 내에 포함되는 횡 방향으로 분리된 근접 트랙에 있는 비행체의 평균 개수를 의미한다. 횡 방향 트랙 설계 시 바로 옆 트랙과 진행 방향이 교차되도록 하면 같은 방향 점유도는 0이 되고 반대 방향 점유도는 수식 6과 같이 된다.

$$E_o = \frac{4S_x}{V} \frac{\sum_i m_{i-1} m_i}{\sum_i m_i} \quad (6)$$

수식 6에서 m_i 는 i 번째 항로의 시간 당 교통량을 나타낸다. 만약 모든 항로의 교통량이 같다고 가정하면 m 으로 쓸 수 있다. 본 연구에서는 교통량을 변수로 두고 이에 따른 충돌 위험을 분석하였다.

V 는 ground speed로 표 2의 UAM 제원을 기반으로 약 150km/h의 속도를 가진다고 가정하였다.

표 2. UAM 기체 제원

Table 2. UAV specification

	Volocity	Ehang216	A3 Vahana	Boeing PAV
length	9.3m	5.61m	5.86m	9.14m
width	9.3m	5.61m	6.25m	8.53m
height	2.5m	1.77m	2.81m	NA
cruise speed	90km/h	100km/h	220km/h	180km/h
MTOW	900kg	650kg	1066kg	800kg

$|\bar{x}|, |\bar{y}|, |\bar{z}|$ 는 X, Y, Z 방향 비행체 간 상대 속도를 나타내는데 횡 방향 트랙 설계 시 바로 옆 트랙과 진행 방향이 교차되도록 설계한다고 가정하면 수식 1에서 E_s 가 0이 되어 $|\bar{x}|$ 항은 설정할 필요가 없어진다. $|\bar{y}|, |\bar{z}|$ 는 기존 문헌에서 유인기 값을 기반으로 무인기에 대해 추정된 값을 활용하여 각각 2 kts, 0.15 kts로 설정하였다 [11].

S_x 는 점유도 계산 시 비행체가 근접했다고 판단하는 종 방향 분리간격인데 실제 계산에서는 수식 내에서 상쇄된다. S_y 는 횡 방향 회랑 간 분리간격으로 본 연구에서는 이를 변수로 두고 횡 방향 충돌 위험을 분석하였다.

즉 본 연구에서는 m, S_y 를 변수로 두었고 다른 파라미터들은 위와 같이 기존 문헌 및 UAM 기체 제원을 참고하여 적합한 값으로 설정하였다.

III. UAM 평행 항로 충돌 위험 분석

3-1 TLS 설정

유인기 분야에서는 지정된 TLS에 대해 실제 트랙에 대한 충돌 위험이 TLS를 만족하는지 주기적으로 확인한다 [7]. 표 3은 기존 문헌을 바탕으로 다양한 공역 운영에 대한 TLS를 나타낸다 [20].

횡 방향 분리에 대해서는 $0.8 \times 10^{-8} \sim 1.6 \times 10^{-8}$ 정도의 값을 가진다고 되어있다. 그림 3,4의 김포-제주 공항 간 노선 Y711, Y722 평행 항로의 경우 횡 방향 충돌 위험에 대한 TLS를 5×10^{-9} 로 설정하여 충돌 위험을 분석한 바 있다 [7].

본 연구에서는 UAM에 대한 횡 방향 충돌 위험 목표 값이 따로 연구된 바가 없기 때문에 유인기 횡 방향 충돌 위험 분석에 사용된 동일한 값을 TLS로 활용하였다. 결과적으로 본 연구에서는 UAM에 적합하게 재설정된 파라미터 기반으로 수식 1을 활용하여 항로의 횡 방향 충돌 위험이 5×10^{-9} 보다 작도록 하는 분리거리 및 교통량을 분석하였다.

표 3. 다양한 공역 운영에 대한 TLS

Table 3. TLS for various airspace operation

Airspace operation	TLS
TLS with minimum navigation performance specification	6×10^{-8} per flight hour
TLS for lateral separation	$0.8 \times 10^{-8} \sim 1.6 \times 10^{-8}$ per flight hour
TLS for reduced vertical separation	0.25×10^{-8} per flight hour
TLS for enroute mid-air collision	1.5×10^{-8} per flight hour
TLS for horizontal radar control	1×10^{-9} per flight hour
TLS for final approach and landing	1×10^{-8} per mission
TLS for multi-runway ILS landing	4×10^{-8} per approach
TLS for surface movement	1×10^{-8} per operation

3-2 충돌 위험 분석 결과

다음은 2장에서 설명한 충돌 위험 모델 및 파라미터를 기반으로 횡 방향 충돌 위험을 분석하였다. 그림 5는 회랑 교통량과 횡 방향 분리거리에 대해 충돌 위험을 계산한 결과이다. 그림 5는 출발지-도착지를 왕복하는 두 개의 평행 회랑을 가정하고 분석을 수행하였다. 두 개의 회랑을 가정할 경우, 그림과 같이 횡 방향으로 60미터 이상의 분리 간격이 요구됨을 확인할 수 있다. 직관적으로 예상할 수 있듯이 교통량이 증가할수록 횡 방향 충돌 위험 또한 증가하며 시간 당 10대의 비행체를 운용할 경우 최소 80미터 이상의 분리 간격이 요구됨을 확인할 수 있다. 그림 5의 Y 축의 충돌 위험은 log10에 대한 값이다. 분리 간격이 증가됨에 따라 충돌 위험 커브의 간격은 줄어들는데 이는 수식 5의 항법 오차 분포가 heavy-tailed 분포를 가짐에 따라 분리 간격이 증가하여도 $P_y(S_y)$ 는 완만하게 감소하기 때문이다.

그림 5의 결과를 바탕으로 한강 폭을 고려하여 몇 개의 평행 회랑이 설치될 수 있을지를 추가로 분석하였다. 그림 6은 서울시에 위치한 한강 일부에 대한 폭을 측정해본 결과이다. 약 600미터 가량의 폭을 가지고 있는 것을 알 수 있다.

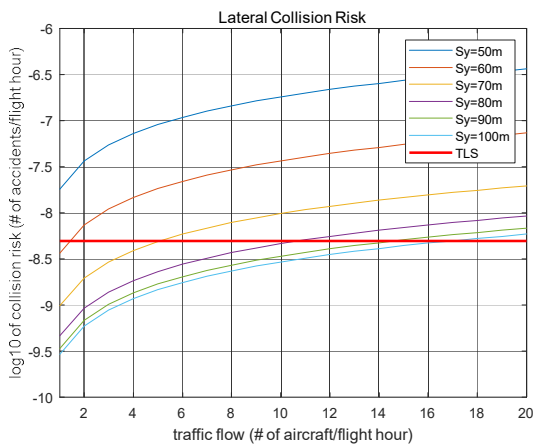


그림 5. 횡 방향 충돌 위험
Fig. 5. Lateral collision risk



그림 6. 한강 너비
Fig. 6. Width of Han river

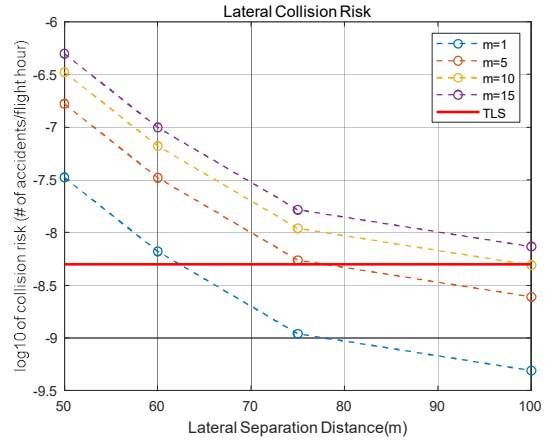


그림 7. 여러 개 회랑을 고려한 충돌 위험
Fig. 7. Collision risk considering multiple corridors

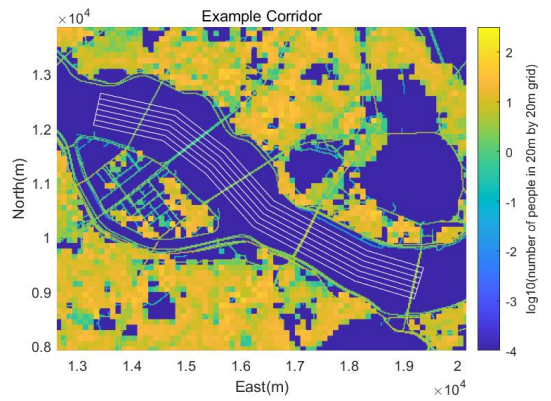


그림 8. 한강 위 평행 회랑 예시
Fig. 8. Parallel corridor example above Han river

그림 7은 한강 폭 내에 각각 50m, 60m, 75m, 100m의 횡 방향 분리간격을 가진 12개, 10개, 8개, 6개의 평행 회랑이 설치될 경우 회랑의 교통량에 따른 횡 방향 충돌 위험 분석 결과이다. 근접한 회랑 간 동행 방향은 반대로 운용된다고 가정하였다.

그림 7에서 횡 방향 분리 간격을 100m로 보수적으로 설정할 경우 회랑 내에는 최대 시간 당 10대의 UAM 운항이 가능한 것으로 분석되었다. 그림 5에서 두 개의 회랑만을 고려했을 때는 100m 분리간격에 대해서 시간당 최대 17대 가량의 UAM 운항이 가능했으나 회랑이 6개(분리 간격 100m)로 증가했을 때는 허용 가능한 교통량이 시간 당 10대로 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 회랑 개수가 증가함에 따라 근접한 총 5쌍의 회랑에 대한 충돌 위험이 반영되기 때문이다.

그림 8은 100m 분리를 적용한 UAM 회랑 예시이다. UAM 운용 초기에는 많은 교통량이 예상되지는 않으나 점차 교통량이 증가할 것으로 판단되므로 미래의 최대 교통량을 고려하여 횡 방향 분리간격을 설정하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 K-UAM 운용개념서 및 로드맵에 제시된 UAM 운용 개념을 바탕으로 UAM 회랑은 출발지-목적지 간 양방향 최소 두 개 이상의 평행 회랑을 가진다고 가정하고 이와 유사하게 운항되는 유인기 충돌 위험 모델을 적용하여 UAM 회랑의 횡 방향 충돌 위험을 분석하였다. 김포-제주 공항 간 운항에 활용되는 Y711, Y722 노선에 적용되는 평행 항로 모델을 활용하였으며 해당 모델에서 유인기에 맞춰진 파라미터들을 기존 문헌 조사 및 UAM 제원 분석을 통해 UAM에 적합하도록 파라미터 재설정을 수행하였다. K-UAM 실증 노선을 고려하여 한강 쪽 내에 회랑이 설치된다고 가정하고 최소 두 개의 회랑이 설치될 때에 회랑 간 횡 방향 분리거리 및 회랑 내 교통량에 따른 충돌 위험을 분석하였다. Y711, Y722 노선에 적용되는 TLS를 동일하게 적용하였으며 이를 만족하는 충돌 위험을 분석한 결과 두 개의 회랑에 대해서는 시간 당 10대의 UAM을 운항하기 위해 최소 80미터 이상의 분리간격이 요구되는 것을 확인하였다. 더불어 한강 쪽 내에 여러 개의 평행 항로가 설치된다고 가정할 때 분리거리 및 교통량에 따른 충돌 위험을 분석하였다. 그 결과, 100미터의 분리간격을 고려할 때 최대 시간 당 10대의 UAM 운용이 가능함을 확인하였다. UAM 상용화시기에 예상되는 교통량을 고려하여 횡 방향 분리간격을 설정하는 것이 적합할 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 UAM 평행 회랑 설계의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

Acknowledgments

본 연구는 산업통상자원부/한국산업기술평가관리원의 지원으로 수행 중인 'eVTOL 비행안정성, 운용성 실증시험평가 및 충돌회피처리 기술 개발' 과제 (과제번호: 20016489)의 연구 결과이며 지원에 감사드립니다.

References

[1] UAM Concept of Operations, FAA, v1.0, Jun. 2020.
 [2] UAM Concept of Operations, FAA, v2.0, Apr. 2023.
 [3] Korean Urban Air Mobility(K-UAM) Roadmap, Joint Collaboration between Relative Ministries, May 2020.
 [4] K-UAM Concept of Operations 1.0, UAM Team Korea, Sep. 2021.
 [5] Seoul City Press Release. [Internet]. Available: https://www.seoul.go.kr/news/news_report.do#view/387267
 [6] Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination of Separation Minima, ICAO, Montreal: Canada, Doc 9689-AN/953, 1998.

[7] J. H. Han, C. H. Kim, H. S. Cho, Safety Assessment of RNAV ATS Routes Y71 and Y72, Daejeon: Republic of Korea, RASMAG/17-WP19, pp.1-13, Aug. 2012.
 [8] S. K. Kim, D. W. Shin, "The Study on RVSM Safety Assessment of Incheon FIR," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Flight Operation*, Vol. 14, No. 1, pp. 49-54, Mar. 2006.
 [9] P. G. Reich, "Analysis of Long-range Air Traffic Systems: Separation Standards- I," *Journal of Navigation*, Vol. 50, Issue 3, pp. 436-447, 1997.
 [10] P. G. Reich, "Separation Standards- II," *Journal of Navigation*, Vol. 19, Issue 2, pp. 169-186, 1966.
 [11] T. Martin, A. McFadyen, "CNPC Implications for UTM Separation Standards," in *Proceedings of the ICAO Unmanned Aircraft Systems (UAV) Industry Symposium: Drone Enable*, Montreal, Canada, pp. 1-38, Sep. 2017.
 [12] G. S. Hong, Safe Separation Distance Determination for Unmanned Aerial System Traffic Management, Master dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, 2019.
 [13] V. Kallinen, A. McFadyen, "Collision Risk Modeling and Analysis for Lateral Separation to Support Unmanned Traffic Management," *Risk Analysis*, Vol. 42, No. 4, pp. 854-881, 2022.
 [14] Y. S. Kim, J. W. Bae, "Risk-Based UAV Corridor Capacity Analysis above a Populated Area," *Drones*, Vol. 6, No. 9, pp. 1-12, 2022.
 [15] S. G. Lee, N. H. Gray, K. J. Lee, "Analysis of Collision Risk in the Han-gang Corridor during UAM (Urban Air Mobility) Operations, Using Collision Risk Model," in *Proceeding of KSAS 2021 Spring Conference*, Samcheok, Korea, pp. 264-265, 2021.
 [16] N. H. Gray, K. J. Lee, "A Study on the Need to Develop a Collision Risk Model to Assess the Risk of Collision between UAM (Urban Air Mobility) Aircraft and Obstacles," in *Proceeding of KSAS 2022 Fall Conference*, JeJu, Korea, pp. 1150-1151, 2022.
 [17] D. S. Kim, K. J. Lee, "Surveillance-based Risk Assessment Model between Urban Air Mobility and Obstacles," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Flight Operation*, Vol. 30, No. 3, pp. 19-27, Sep. 2022.
 [18] SkyVector Aeronautical Charts. [Internet]. Available: skyvector.com
 [19] The Future of Transportation: White Paper on Urban Air Mobility Systems, EHang, Guangzhou, China, pp.1-44, Jan. 2020.
 [20] X. Lin, N. Fulton, M. Westcott, "Target Level of Safety Measures in Air Transportation – Review, Validation and

Recommendations,” in Proceedings of the IASTED International Conference Modelling, Simulation, and

Identification (MSI 2009), Beijing, China, pp. 222-229, Oct. 2009.



김연실 (Youn-Sil Kim)

2009년 2월 : 세종대학교 항공우주공학 (공학사)
2011년 2월 : 서울대학교 항공우주공학 (공학석사)
2016년 2월 : 서울대학교 항공우주공학 (공학박사)
2016년 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 선임연구원
※관심분야 : 저고도 무인기 교통관리, GNSS/INS 통합항법, 반송파 기반 정밀 항법



배중원 (Joong-Won Bae)

1995년 2월 : 한양대학교 제어계측공학과 (공학사)
1997년 2월 : 한양대학교 제어계측공학과 (공학석사)
2019년 8월 : 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
1997년 2월 ~ 2004년 2월 : 한국항공우주산업 연구원
2004년 3월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 책임연구원
※관심분야 : 차세대항행시스템(CNS/ATM), 항공전자, UTM