

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2022.30.3.019>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

도심 항공 모빌리티와 장애물 간의 감시장비 기반 충돌 위험도 평가모형

김동신*, 이금진**

Surveillance-based Risk Assessment Model between Urban Air Mobility and Obstacles

Dongsin Kim*, Keumjin Lee**

ABSTRACT

Urban Air Mobility is expected to resolve some problems in urban transportation such as traffic congestion and air pollution. Various studies for a large-scale commercialization of UAM are being actively conducted. To that end, the UAM Traffic Management system aims at securing a safety and an efficiency of UAM operations. In this study, a risk assessment model is proposed to evaluate the risk of collision between a vehicle and surrounding obstacles. The proposed model is conceived from the past studies for determining a proper separation distance between parallel runways for their independent operations. The model calculates the risk that the surveillance system fails to meet a target level of safety for a given buffer zone size between a designed route and surrounding obstacles. The model is applied to one of the routes proposed in K-UAM roadmap to evaluate its performances.

Key Words : Urban Air Mobility(도심 항공 모빌리티), UAM Traffic Management(도심 항공교통관리), Sensitivity Analysis(민감도 분석), Risk Assessment(위험성 평가), Target Level of Safety(목표 안전 수준)

1. 서 론

도심 항공 모빌리티(urban air mobility, 이하 UAM)는 도심 내에서 승객이나 화물을 운송하기 위하여 등장한 신개념 교통수단으로, 도심화에 따른 교통혼잡과 환경·대기오염 등의 문제들을 개선하는 데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대되고 있다. 주요 선진국들을 중심으로 UAM 상용화를 위한 다양한 연구개발이 진행 중에 있으며, 우리나라 역시 다부처 협력을 통해 한국형 도심

항공교통(K-UAM) 로드맵을 발표하고 2025년 UAM 상용화 시작을 목표로 다양한 연구개발을 수행하고 있다[1-5].

UAM 상용화를 위한 다양한 노력 중 한 가지로, 도심 항공교통관리(UAM traffic management, UATM) 시스템에 대한 연구가 이루어지고 있다(Table 1). 도심 항공교통관리 시스템이란 UAM 항공기의 안전하고 효율적인 운항을 위한 교통관리 시스템을 의미하며, 기존의 항공교통관리(air traffic management, ATM) 시스템과 유사하지만, UAM 항공기들이 도시의 인구구조물 사이를 저고도로 순항 비행한다는 측면 등에 있어서 차별화된다[6,7].

비행 중인 UAM 항공기로 인한 위험은 크게 UAM 항공기의 추락으로 인한 지상 위험(ground risk)과 UAM 항공기와 기존의 항공운송수단 간의 충돌위험, 그리고

Received: 13. Jun. 2022, Revised: 18. Jul. 2022,
Accepted: 26. Jul. 2022

* 한국항공대학교 항공교통물류학과 석사

** 한국항공대학교 항공교통물류학과 교수

연락처 E-mail : keumjin.lee@kau.ac.kr

연락처 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76

Table 1. Research & development goals of UATM system by period[4]

구분		초기 2025~	성장기 2030~	성숙기 2035~
기술 수준	순항 속도	150 km/h	240 km/h	300 km/h
	자율 비행	On board	Off board	Autonomous
	교통 관리	자동화 도입	자동화 주도 및 인적 감시	완전자동화 주도
	경로 설계	Fixed corridor	Mixed corridor	Mixed corridor

UAM 항공기와 주변 장애물 간의 충돌위험으로 구분할 수 있다. 먼저 UAM 항공기의 추락으로 인한 지상 위험의 경우, failure 모형, impact 모형, exposure 모형, harm 모형 등 위험 수준을 정량적으로 평가하는 데 도움이 될 수 있는 다양한 모형들이 제안되었다[8-14]. UAM 항공기(무인기 포함)와 기존의 항공운송 수단 간의 충돌위험의 경우, 경로에 기반한 확률적 모형[15]이나 3차원 몬테카를로(Monte-Carlo) 모형[16]을 활용하여, UAM 항공기가 공항 주변에서 운용될 때 발생 가능한 충돌위험을 평가하고 UAM 항공기를 위한 경로를 설계하는 연구들이 진행되었다[17-19].

본 연구에서는 UAM 항공기와 주변 장애물 간의 충돌위험을 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 제안한다. 본 연구에서 제안된 방법론은 독립 이착륙을 위해 필요한 평행활주로 중심선 사이의 간격을 결정해야 했던 과거 사례에서 착안하였다[20-24]. 관련된 기존 연구로써, UAM 항공기가 고장(내부적인 요인)이나 돌풍(외부적인 요인) 등으로 인하여 계획된 경로를 이탈하였을 때의 주변 장애물과의 충돌위험에 관한 연구가 일부 진행되었으나[25-26] 여전히 관련된 연구가 부족한 실정이다.

2장에서는 순항 중인 UAM 항공기와 주변의 장애물 간의 충돌 위험도를 평가하기 위한 제안된 방법론을 설명한다. 3장에서는 제안된 방법을 K-UAM 로드맵에서 제시된 항로에 적용하여, 해당 항로를 비행하는 UAM 항공기와 주변 장애물 간의 충돌위험을 평가하였다.

II. 도심 항공 모빌리티와 장애물 간의 충돌위험 평가모형

2.1 운용 개념

본 연구에서 고려하는 UAM 항공기와 장애물 간의 충돌방지 개념은 Fig. 1에 나타나 있다. 그림에 나타난

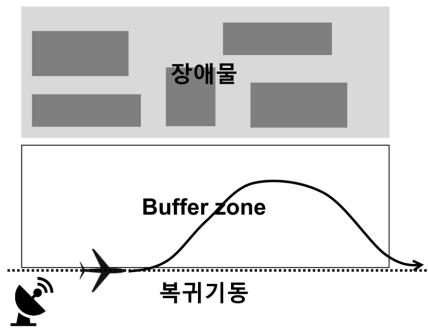


Fig. 1. Active monitoring & control model

바와 같이, 지상에 설치된 감시장비를 통해 UAM 항공기의 위치가 실시간으로 감시되고 있으며, UAM 항공기가 정해진 항로를 이탈하였을 경우 이에 대한 경고가 발부된다. 경고가 발부되면 UAM 항공기는 원래의 경로로 복귀하기 위한 기동을 수행하게 되는데, 복귀과정 중에 UAM 항공기와 장애물 간 충돌이 발생하지 않기 위해서는 경로와 장애물 간에 설정된 안전지역(buffer zone)이 충분한 크기로 설정되어야 한다. 본 연구에서는 UAM 항공기가 정해진 buffer zone을 벗어나 장애물과 충돌할 확률의 최대값, 즉 target level of safety(TLS)를 10^{-8} 으로 설정하였으며, 이는 평행 활주로에서 독립 이착륙하는 항공기 간에 적용되는 TLS와 같은 값이다.

2.2 Buffer Zone의 크기 결정방법

제시된 모형에서는 UAM 항공기와 장애물이 평행하게 떨어져 있는 상황에서 UAM 항공기는 주어진 항로를 따라 직선 비행한다고 가정하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 buffer zone은 normal operating zone과 intervention zone으로 구성된다.

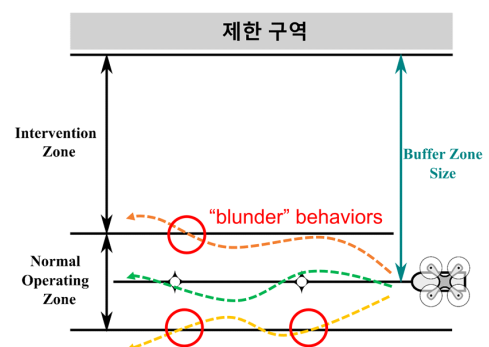


Fig. 2. Configuration of a buffer zone

Normal operating zone은 해당 항로의 중심선으로부터 총 비행시간의 99%를 포함하는 영역으로 정의하며, normal operating zone을 벗어나는 항공기를 이탈(blunder) 항공기로 간주한다. Intervention zone은 normal operating zone을 벗어난 blunder 항공기가 원래의 비행경로 방향으로 복귀하는 데 필요한 영역으로 정의하며, 본 연구에서는 blunder 항공기가 intervention zone을 벗어나 장애물과 충돌할 확률이 10^{-6} 이하가 되도록 intervention zone의 크기를 설정하였다. 항공기가 normal operating zone을 벗어나 날 확률이 10^{-2} 임을 고려하면[22], UAM 항공기가 정해진 항공로를 벗어나 장애물에 충돌할 확률이 10^{-8} , 즉 TLS보다 작게 됨을 알 수 있다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이, intervention zone은 다시 recovery maneuver zone과 detection zone으로 나뉘어지며, 이 중 detection zone은 지상의 감시장비가 blunder 항공기를 감지하기 위하여 요구되는 영역을 의미한다. Fig. 3은 감시장비가 normal operating zone을 이탈한 blunder 항공기를 감지할 때까지의 과정을 표현한 그림이다.

UAM 항공기는 속력 V 와 이탈각(deviation angle) α 를 가지고 normal operating zone을 이탈하였으며, 감시장비는 항공기의 위치를 T 초마다 갱신하고 있다. 항공기가 normal operating zone을 이탈한 이후 처음으로 감시장비를 통해 관측된 시점은 $\delta(0 \leq \delta < T)$ 이며, 이때의 이탈 거리 y_1 은 식 (1)과 같다. 만약 감시

장비의 y 방향 위치 오차가 $-y_1$ 이상 발생할 경우, blunder 항공기는 normal operating zone 내에 위치하는 것으로 감지될 것이며, 이 경우 blunder 항공기는 회복기동을 시작하지 못한 채 진행 방향으로 계속 비행하게 된다. T 초가 더 지난 후, blunder 항공기가 normal operating zone으로부터 이탈한 거리(y_2)는 식 (2)와 같으며, 마찬가지로 만약 감시장비의 y 방향의 위치 오차가 $-y_2$ 이상 발생할 경우, blunder 항공기는 여전히 normal operating zone 내에 위치하는 것으로 감지될 것이다. 이러한 방식으로, 만약 감시장비의 위치오차로 인한 인식 오류가 n 회 연속하여 발생할 경우, blunder 항공기는 normal operating zone으로부터 y_n 만큼 이탈하게 될 것이다(식 (3)).

$$y_1 = V\delta \sin(\alpha) \quad (1)$$

$$y_2 = V\{\delta + T\} \sin(\alpha) \quad (2)$$

$$y_n = V\{\delta + (n-1)T\} \sin(\alpha) \quad (3)$$

감시장비의 y 방향 위치오차를 확률변수 Y 라고 할 때, blunder 항공기를 인식하지 못할 오류가 n 회 연속하여 발생할 확률은 식 (4)와 같이 계산된다. 특정한 $\delta(0 \leq \delta < T)$ 에 대해서 식 (4)가 10^{-6} 보다 작아지기 위한 N 의 최솟값(N_δ)을 구할 수 있는데, 이는 blunder 항공기의 감지에 실패할 확률이 10^{-6} 보다 작아지기 위해 필요한 최소 관측 횟수를 의미한다.

$$\begin{aligned} & \prod_{n=1}^N P(Y \leq -y_n) \\ &= \prod_{n=1}^N P(Y \leq -V\{\delta + (n-1)T\} \sin(\alpha)) \end{aligned} \quad (4)$$

N_δ 가 결정되면 이를 식 (3)에 대입하여 y_{N_δ} 를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 δ 값의 모든 범위에 대하여, blunder 항공기가 detection zone을 벗어날 확률이 10^{-6} 이하가 되도록 제한하였으며, 따라서 detection zone의 크기(DZ)는 식 (5)를 통해 도출할 수 있다.

$$DZ = \max_{0 \leq \delta < T} [V\{\delta + (N_\delta - 1)T\} \sin(\alpha)] \quad (5)$$

다음으로, 감지된 blunder 항공기의 기수를 항로 방향으로 안전하게 복귀시키기 위하여 필요한 영역을 recovery maneuver zone으로 정의한다. 항공기의

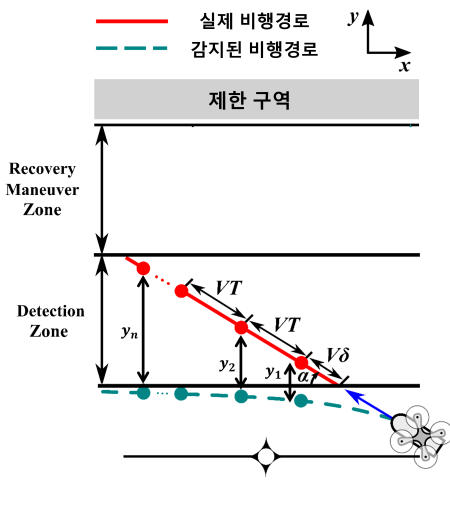


Fig. 3. Definition of a detection zone

복귀기동은 $(T_p + T_A)$ 초 동안의 직진기동과 일정한 반경의 선회기동으로 구성된다. 여기서 T_p 는 조종사의 반응시간을, T_A 는 조종사의 대응 이후 UAM 기체의 반응시간을 의미한다. 본 연구에서는 감시장비가 경로 이탈을 인지한 후 조종사에게 통보하는 과정 중에서의 소요된 시간은 고려하지 않았으나 향후 연구에서는 반영할 필요가 있을 것으로 보인다.

Fig. 4는 항공기의 복귀기동을 표현한 그림으로, 변수들 간의 기하학적 관계를 고려하면 recovery maneuver zone의 크기(RMZ)는 식 (6), (7)과 같이 구할 수 있다. 여기서 ω_2 와 c_γ 는 각각 복귀기동 시의 각속도(turn rate)와 경사각 변화율(bank rate)을 의미하고, g 는 중력가속도(gravitational constant)를 의미한다.

$$RMZ = V(T_p + T_A) \sin(\alpha) + \{R - R \cos(\alpha_f)\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \bullet T_A &\approx \frac{V\omega_2}{c_\gamma g} \\ \bullet R &= \frac{V}{\omega_2} \\ \bullet \alpha_f &= \alpha - \Delta\alpha \approx \alpha - \frac{V(\omega_2)^2}{c_\gamma g} \end{aligned} \quad (7)$$

2.3 Buffer Zone 크기 민감도 분석

Buffer zone의 크기를 결정하는 주요 파라미터(V , T , ω_2 , c_γ)에 대하여, 파라미터의 변화에 따른 buffer zone의 크기 변화를 살펴보았다. Buffer zone을 구성하는 요소 중에서 normal operating zone의 크기는 해당 파라미터값에 따라 변화하지 않으므로, 본 절에서는 intervention zone의 크기(IMZ) 변화만을 고려하였다. Fig. 5부터 Fig. 8은 각 파라미터 값을 변화시키

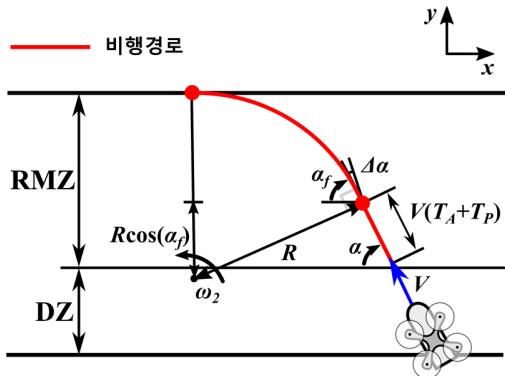


Fig. 4. Definition of a recovery maneuver zone

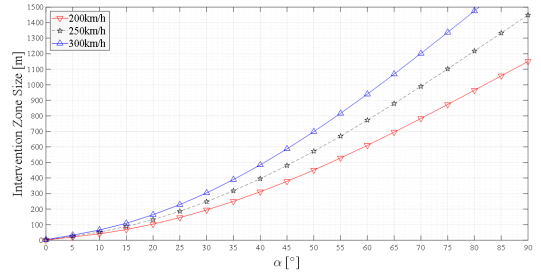


Fig. 5. Sensitivity analysis of an intervention zone size with respect to V (common parameters: $T=0.5$ sec, $\omega_2=3^\circ/\text{sec}$, $c_\gamma=10^\circ/\text{sec}$)

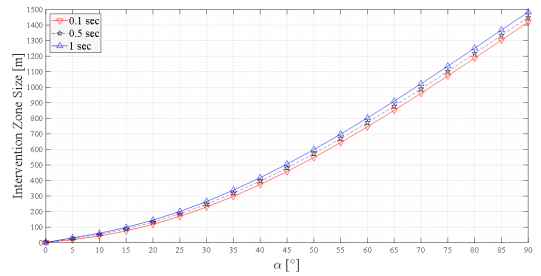


Fig. 6. Sensitivity analysis of an intervention zone size with respect to T (common parameters: $V=250$ km/h, $\omega_2=3^\circ/\text{sec}$, $c_\gamma=10^\circ/\text{sec}$)

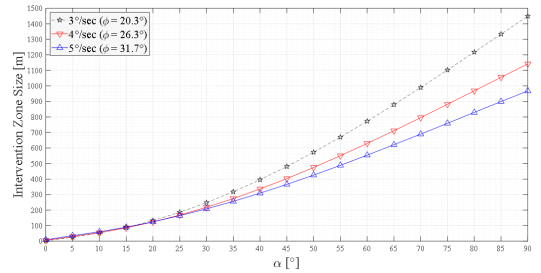


Fig. 7. Sensitivity analysis of an intervention zone size with respect to ω_2 (common parameters: $V=250$ km/h, $T=0.5$ sec, $c_\gamma=10^\circ/\text{sec}$)

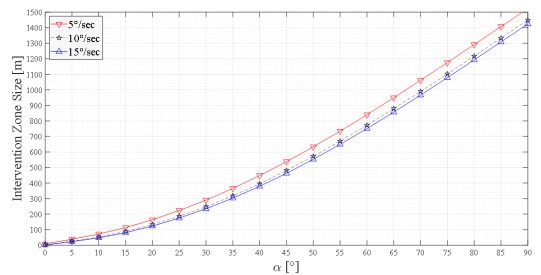


Fig. 8. Sensitivity analysis of an intervention zone size with respect to c_γ (common parameters: $V=250$ km/h, $T=0.5$ sec, $\omega_2=3^\circ/\text{sec}$)

며 이탈각 α 에 따른 IMZ를 나타낸 그래프이다. UAM 항공기의 속도(V)은 K-UAM 로드맵 등을 참고하여 200 km/h, 250 km/h, 300 km/h를 고려하였으며, 복귀기동 시의 각속도(ω_2)와 경사각 변화율(c_γ)은 참고문헌[25]에 있는 일반 항공기에 관한 수치를 참고하였다. 감시장비를 통한 UAM 항공기 위치갱신 주기(T)는 항공교통에서 사용되는 ADS-B(automatic dependent surveillance broadcast)를 참고로 하여 0.5초와 1초를 고려하였고 미래에는 보다 개선된 형태의 감시장비가 사용될 수 있음을 감안하여 추가로 0.1초를 고려하였다. 또한, 감시장비의 y 방향의 위치 오차 Y 는 정규분포 $N(0, \sigma_p^2)$ 를 따른다고 가정하였으며, 실시간 이동측위(real-time kinematic, RTK) 기술 등을 통한 오차 보정을 고려하여 $\sigma_p = 1\text{m}$ 를 적용하였다.

Fig. 9는 이탈각 α 가 60° 일 때, Fig. 5부터 Fig. 8의 결과를 추출하여 정리한 그래프이며, $V = 250\text{ km/h}$, $T = 0.5\text{ sec}$, $\omega_2 = 3^\circ/\text{sec}$, $c_\gamma = 10^\circ/\text{sec}$ 에 대한 IMZ값인 772.4 m를 기준으로, 각 파라미터가 변화함에 따라 intervention zone의 크기가 어느 정도로 변화하는지를 보여주고 있다. 그림에 나타난 바와 같이, 주요 파라미터 중에서도 UAM 항공기의 속도(V)와 각속도(ω_2)가 intervention zone의 크기에 가장 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 따라서 만일 여유공간이 충분하지 않은 건물 사이에서 불가피하게 UAM을 운용해야 하는 경우에는 해당 구간에서의 UAM 항공기의 속력을 제한함으로써 안전을 보장할 수 있을 것이다.

2.4 UAM-장애물 간 충돌위험 평가 방법

앞선 장에서는 항로를 이탈한 UAM 항공기가 감시장비에 의해 발견된 후 원래의 경로로 복귀하는 과정

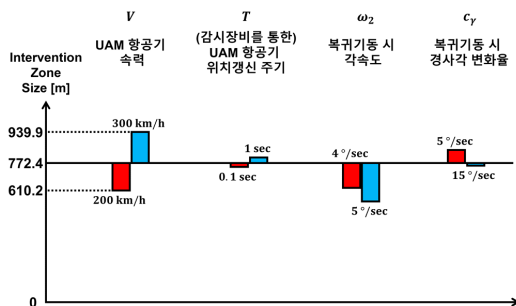


Fig. 9. Sensitivity analysis of an intervention zone size at $\alpha = 60^\circ$

중에 주변 장애물에 충돌할 위험성이 $TLS(10^{-8})$ 보다 작아지기 위해 필요한 buffer zone의 크기를 계산하는 방법을 설명하였다. 본 절에서는 반대로, UAM 항로와 장애물 간의 buffer zone의 크기가 미리 주어졌을 때, 해당 항로를 비행하는 UAM 항공기와 장애물 간의 충돌위험이 TLS를 만족하지 못할 확률을 계산하는 방법에 대해 설명하고자 한다.

앞서 살펴보았듯이, UAM 항공기가 안전하게 원래의 경로로 복귀하는 데 필요한 공간의 크기는 항공기의 이탈각(α)에 따라 달라지게 된다. 따라서 정해진 크기의 buffer zone에 대해서 UAM 항로와 장애물 간의 충돌위험이 TLS를 만족하기 위한 최대 이탈각(α_M)을 Fig. 10과 같이 구할 수 있다. UAM 항공기 이탈각에 대한 확률변수 A 에 대한 확률밀도함수를 $f(\alpha)$ 라고 하면, UAM 항로와 장애물 간의 충돌위험이 TLS를 만족하지 못할 위험도 확률 P 는 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$P = \int_{\alpha_M}^{\infty} f(\alpha) d\alpha \quad (8)$$

식 (8)을 사용해 위험도 P 를 계산하기 위해서는 이탈각에 대한 확률밀도함수가 필요하다. 현재까지 UAM 항공기의 이탈각 분포에 대한 자료가 없기 때문에, 본 연구에서는 기존 일반 항공기의 이탈각 분포에 대한 과거 연구자료를 사용하였다.

과거 연구[27]에서는 미국의 주요 공항 총 12곳에서 수집한 항적을 사용해서 평행활주로 instrument landing system(ILS) 접근 절차 수행 중 정해진 경로를 벗어난 blunder 항공기의 이탈각에 대한 분석이 수행되었다. 해당 자료의 수집 기간은 2008년과 2009년이었으며,

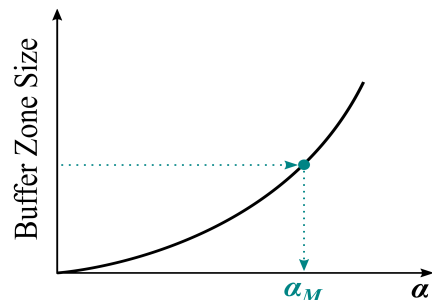


Fig. 10. Diagram to determine a maximum deviation angle (α_M)

총 785,203회의 운항편 가운데 32회의 운항편에서 항공기가 정해진 경로를 벗어난 것으로 확인되었다. 항적 자료를 분석한 결과 이러한 blunder 항공기들의 이탈각은 5° 에서 31° 범위에 분포하는 것으로 확인되었으며, Fig. 11은 blunder 항공기들의 이탈각 분포에 대한 히스토그램을 보여주고 있다. 이를 정규분포로 근사화(fitting)하여 얻은 확률밀도함수는 Fig. 12에 나타나 있다. Fig. 12의 확률분포를 사용해 다양한 buffer zone의 크기에 대한 위험도 P 를 계산한 결과는 Fig. 13에 나타

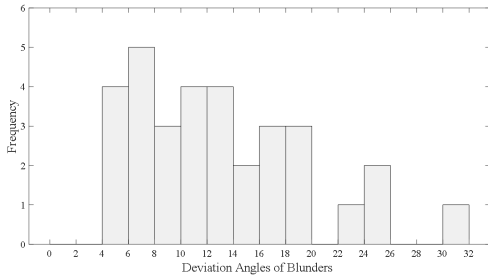


Fig. 11. Histogram of a deviation angle of a blunder aircraft that performed an instrument landing system approach procedure on a parallel runway

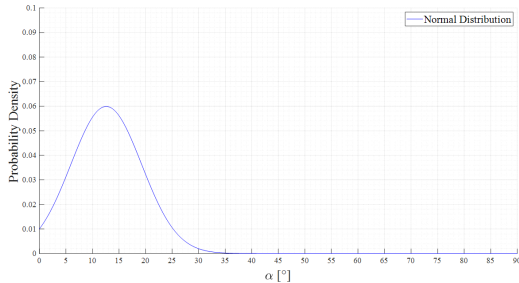


Fig. 12. Probability density function of a deviation angle of a blunder aircraft that performed an instrument landing system approach procedure on a parallel runway (μ : 12.6° , σ : 6.7°)

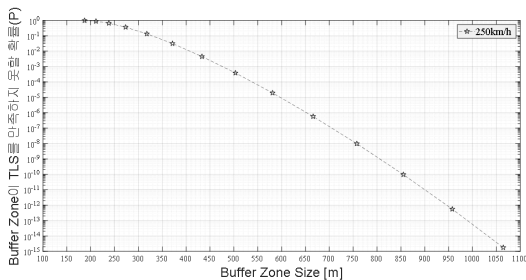


Fig. 13. Probability (P) that a risk of collision between UAM route and obstacles does not satisfy a target level of safety

나 있으며, 이때 이탈각에 따른 buffer zone 크기를 계산하기 위해 사용된 파라미터값은 Table 2에 나타나 있다.

Normal operating zone의 크기는 UAM 항공기의 항법성능에 따라 결정이 되는데, 본 연구에서는 UAM 항법정확도 0.1 nmi를 고려하였으며[28], 항법오차의 크기가 정규분포를 따른다고 가정하면 normal operating zone은 항로 중심선의 좌우 양쪽으로 각각 0.1 nmi (약 185.2 m)의 폭을 형성한다.

Ⅲ. 도심 항공 모빌리티-장애물 간의 충돌위험 평가 사례 연구

3.1 대상 구간 및 장애물 데이터

앞 장에서 제시한 모형을 사용하여 한강 회랑(성수대교~영동대교 구간)을 비행하는 UAM 항공기와 주변 장애물 간의 충돌위험을 평가해보았다(Fig. 14).

Fig. 15와 같이 강남구 북동부 지역의 총 2,504개의 장애물 데이터를 분석한 결과, 성수대교부터 영동대교 구간의 UAM 회랑과 장애물 사이의 최단 거리는 약 391m로 계산되었다. 이에 따라, UAM 회랑의 buffer zone의 크기를 391m로 설정하였으며, 보수적인 평가를 위하여 본 연구에서는 UAM 기체가 회랑의 중심선으로부터 391m 이상 벗어날 경우, 장애물과의 충돌이 발생한다고 간주하였다.

3.2 UAM-장애물 간 충돌위험 평가 결과

Table 2의 파라미터 값에 대해, UAM 항공기의 경로이탈이 발생할 경우, 이탈각이 26.6° 이상이 되면 주어진 buffer zone 크기인 391m를 벗어나 주변 장애물과의 충돌할 위험이 $TLS(10^{-8})$ 을 만족하지 못함을 알 수 있다. 또한 UAM 항공기의 이탈각에 대한 분포

Table 2. Parameter values to determine a buffer zone size

파라미터
• $V = 250 \text{ km/h}$
• $T = 0.5 \text{ sec}$
• $\omega_2 = 3^\circ / \text{sec} (\rightarrow \phi = 20.3^\circ)$
• $c_\gamma = 10^\circ / \text{sec}$
• $\sigma_p = 1 \text{ m}$

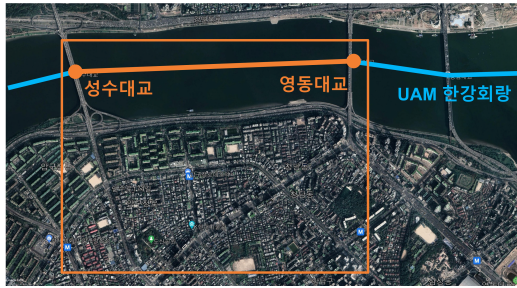


Fig. 14. Satellite image of UAM Han River corridor (Seongsu bridge~Yeongdong bridge) [29]

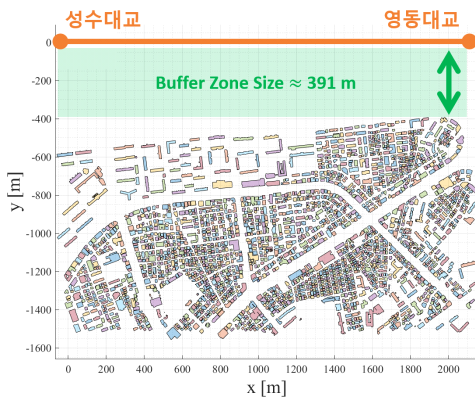


Fig. 15. Analysis of the shortest distance between the UAM Han River corridor (Seongsu bridge~Yeongdong bridge) and surrounding obstacles

가 Fig. 12와 같다고 가정하면, 경로 이탈각이 26.6° 이상이 될 확률은 1.782×10^{-2} 임을 알 수 있다. 이를 종합하면, 성수대교부터 영동대교 구간에서 UAM 항공기의 경로 이탈이 발생하였을 경우 주변 장애물과의 충돌 확률은 1.782×10^{-10} 수준임을 알 수 있다.

충돌 위험도를 낮추기 위해서는 감시장비에 대한 성능개선을 통해 경로를 이탈한 UAM 항공기를 보다 이른 시점에서 탐지할 수 있도록 하거나, UAM 항공기의 비행 성능을 향상시켜 복귀 기동을 보다 민첩하게 수행토록 하는 것이 필요하다. 또 다른 방법으로는 해당 구간에서의 UAM 속도를 느리게 유지토록 함으로써 충돌 위험도를 낮출 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 UAM 항공기와 장애물 간의 충돌위험을 평가하기 위한 모형을 제안하였다. 지상의 감시장

비를 통해 UAM 항공기의 실시간 위치를 능동적으로 감시하고 있는 상황을 고려하였으며, 정해진 항로를 이탈한 항공기가 안전하게 원래의 경로방향으로 복귀하기 위해 필요한 buffer zone의 크기를 결정하는 방법이 제시되었다. UAM 항공기의 이탈각에 대한 확률분포가 주어졌을 경우, blunder 항공기와 장애물 간의 충돌 위험도가 TLS를 만족하지 못할 확률을 제안된 방법을 사용해 계산할 수 있다. 제안된 모형을 K-UAM 로드맵에서 제시된 한강 회랑(성수대교~영동대교 구간)에 적용해 회랑을 순항비행 중인 UAM 항공기와 주변 장애물 간의 충돌위험도를 평가해 보았다.

본 연구의 한계로는 각기 다른 장애물의 고도를 고려하지 못한 점과 바람과 같은 외부적인 요인이 UAM 항공기의 회복기동 수행 성능에 미치는 영향을 고려하지 못한 점 등이 있다. 이와 같은 요인들을 고려할 수 있도록 모형을 개선할 필요가 있으며, 또한 UAM 항공기 성능을 보다 정확히 반영한 파라미터 값을 적용해 모형의 성능을 평가해 볼 필요가 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 “무인비행장치 안전운항을 위한 저고도 교통관리체계 개발 및 실증시험 과제”(22USTR-B12 7901-06)와 “도심항공교통(UAM)을 위한 장애물 충돌 위험평가모형 개발”(NRF-2021R1F1A1061752) 과제의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport et al., “Korean Urban Air Mobility (K-UAM) Roadmap”, 2020.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport et al., “Korean Urban Air Mobility (K-UAM) Technology Roadmap”, 2021.
3. UAM Team Korea, “Korean Urban Air Mobility (K-UAM) Concept of 1. Operations 1.0”, 2021.
4. Korea Airports Corporation (KAC), “KAC Urban Air Mobility (UAM) Traffic Management Concept of Operations”, 2021.
5. Choi, J. S., and Hwang, H. W., “A study on the development status and economic impacts of drone taxis”, Journal of the Korean Society

- for Aviation and Aeronautics, 28(4), 2020, pp.132-140.
6. Lee, Y. J., Kwag, T. H., Jeong, G. M., An, J. H., Chung, B. C., and Lee, J. W., "Flight routes establishment through the operational concept analysis of urban air mobility system", *Journal of the Korean Society Aeronautical and Space Sciences*, 48(12), 2020, pp.1021-1031.
7. Choi, J. S., Lee, S. H., Baek, J. S., and Hwang, H. W., "A study on vertiport installation standard of drone taxis (UAM)", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 29(1), 2021, pp.74-81.
8. Kim, Y. S., and Bae, J. W., "Small UAV failure rate analysis based on human damage on the ground considering flight over populated area", *Journal of the Korean Society Aeronautical and Space Sciences*, 49(9), 2021, pp.781-789.
9. Nam, H. S., Park, B. S., and Lee, H. T., "Research on the crash location and speed distribution of low altitude fixed-wing aircraft", *Journal of the Korean Society Aeronautical and Space Sciences*, 50(1), 2022, pp.59-66.
10. Washington, A., Clothier, R. A., and Silva, J., "A review of unmanned aircraft system ground risk models", *Progress in Aerospace Sciences*, 95, 2017, pp.24-44.
11. Kim, S. H., "Third-party risk analysis of small unmanned aircraft systems operations", *Journal of Aerospace Information Systems*, 17(1), 2020, pp.24-35.
12. la Cour-Harbo, A., "Ground impact probability distribution for small unmanned aircraft in ballistic descent", 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2020, pp.1442-1451.
13. Primatesta, S., Rizzo, A., and la Cour-Harbo, A., "Ground risk map for unmanned aircraft in urban environments", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 97(3), 2020, pp.489-509.
14. Kim, Y. S., "Ground risk model development for low altitude UAV traffic management", *Journal of Advanced Navigation Technology*, 24(6), 2020, pp.471-478.
15. Zhang, N., Liu, H., Ng, B. F., and Low, K. H., "Collision probability between intruding drone and commercial aircraft in airport restricted area based on collision-course trajectory planning", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 120, 2020, 102736.
16. Wang, C. J., Tan, S. K., and Low, K. H., "Three-Dimensional (3D) Monte-Carlo modeling for UAS collision risk management in restricted airport airspace", *Aerospace Science and Technology*, 105, 2020, 105964.
17. Bulusu, V., Sridhar, B., Cone, A. C., and Thippavong, D. P., "Analysis of interactions between urban air mobility (UAM) operations and current air traffic in urban areas: Traffic alert and collision avoidance system (TCAS) study for UAM operations", *AIAA Aviation 2019 Forum*, 2019, 3521.
18. Vascik, P. D., Cho, J., Bulusu, V., and Polishchuk, V., "Geometric approach towards airspace assessment for emerging operations", *Journal of Air Transportation*, 28(3), 2020, pp.124-133.
19. Frej Vitale, R., Zhang, Y., Normann, B., and Shen, N., "A model for the integration of UAM operations in and near terminal areas", *AIAA Aviation 2020 Forum*, 2020, 2864.
20. Fantoni, J. A., "Evaluation of Parallel Runway Spacing", Test and Experimentation Division, National Aviation Facilities Experimental Center, 1961.
21. Kulke, B., Minkoff, R. T., and Haroules, G. G., "Accurate Surveillance in the Terminal Area", *Transportation Systems Center Cambridge Mass*, 1971.
22. Kullstam, P. A., "Parallel runway spacing",

- Journal of the Institute of Navigation, 19(1), 1972, pp.19-28.
23. Allen, J. B., and Denlinger, E. J., "Parallel Approach Surveillance", MIT Lincoln Laboratory, 1972.
 24. Haines, A. L., and Swedish, W. J., "Requirements for Independent and Dependent Parallel Instrument Approaches at Reduced Runway Spacing", MITRE CORP MCLEAN VA METREK DIV, 1981.
 25. Banerjee, P., Gorospe, G., and Ancel, E., "3D representation of UAV-obstacle collision risk under off-nominal conditions", 2021 IEEE Aerospace Conference, 2021, pp.1-7.
 26. Banerjee, P., and Gorospe, G., "Risk assessment of obstacle collision for UAVs under off-nominal conditions", Annual Conference of the PHM Society, 12(1), 2020, 9.
 27. Flight Systems Laboratory, "Angles of Deviation from Localizer Course During Simultaneous Independent Approaches to Parallel Runways (DOT-FAA-AFS-450-58)", Federal Aviation Administration, 2010.
 28. Verma, S. A. et al., "Lessons learned: Using UTM paradigm for urban air mobility operations", 2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2020, pp.1-10, DOI: 10.1109/DASC50938.2020.9256650.
 29. Google Earth, <https://earth.google.com/web/@37.52790429,127.04565363,36.56010252a,3523.25951274d,35y,20.97233935h,0.31454272t,-0r>