

## UAM 비행 경로 계획을 위한 위험 비용 모델 연구 동향 분석

# Research Trend Analysis of Risk Cost Model for UAM Flight Path Planning

김재현<sup>1</sup> · 이동민<sup>1</sup> · 이명진<sup>1</sup> · 최영훈<sup>2</sup> · 권지훈<sup>3</sup> · 나종화<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>한국항공대학교 스마트항공모빌리티학과

<sup>2</sup>한국항공대학교 스마트드론공학과

<sup>3</sup>항공안전기술원 항공인증본부

<sup>4</sup>한국항공대학교 항공전자정보공학과

Jae-Hyeon Kim<sup>1</sup> · Dong-Min Lee<sup>1</sup> · Myeong-Jin Lee<sup>1</sup> · Yeong-Hoon Choi<sup>2</sup> · Ji-Hun Kwon<sup>3</sup> · Jong-Whoa Na<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>School of Smart Air Mobility, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do, 10540, Korea

<sup>2</sup>School of Smart Drone Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do, 10540, Korea

<sup>3</sup>Aviation Certification Center, Korea Aerospace Safety Institute, Incheon, 15530, Korea

<sup>4</sup>School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do, 10540, Korea

### [요 약]

최근 국내의 무인기 시장이 급속도로 성장하고 UAM과 같은 도심 내 UAV 운용의 중요성이 증가함에 따라 UAV의 고장으로 인한 인명 및 재산 피해에 대한 안전 관리 및 규제 체계가 부각되고 있다. 본 연구에서는 안전한 UAM 비행 경로 계획을 위해 운용 지역의 위험을 평가하는 위험 비용 모델들을 비교 분석하고, 각 모델의 주요 한계점을 식별하여 향후 모델 개발 시 고려해야 할 사항들을 도출하였다. 본 연구는 UAM 운용의 안전성 향상을 위한 기초적인 모델을 제공함으로써, UAM 비행 경로 계획 관련 분야의 기술적 개선과 정책 결정에 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

### [Abstract]

With the recent rapid growth of the domestic and international unmanned aerial vehicle (UAV) market and the increasing importance of UAV operations in urban centers, such as UAMs, the safety management and regulatory framework for human life and property damage caused by UAV failures has been emphasized. In this study, we conducted a comparative analysis of risk-cost models that evaluate the risk of an operating area for safe UAM flight path planning, and identified the main limitations of each model to derive considerations for future model development. By providing a basic model for improving the safety of UAM operations, this study is expected to make an important contribution to technical improvements and policy decisions in the field of UAM flight path planning.

**Key word** : Urban air mobility, Risk cost, Risk model, Risk-based path planning.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.1.68>



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 31 January 2024; Revised 26 February 2024

Accepted (Publication) 28 February 2024 (29 February 2024)

\*Corresponding Author; Jong-Whoa Na

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

E-mail: [jwna21@gmail.com](mailto:jwna21@gmail.com)

## I. 서론

최근 국내의 무인기 시장은 급속도로 성장하고 있으며, 항공 사진 촬영, 물품 배송, 교통 모니터링 등을 목적으로 다양한 곳에서 무인항공기 (UAV; unmanned aerial vehicle)가 사용되고 있다[1]. 특히, 미래 스마트 시티 계획에서는 도심 항공 모빌리티 (UAM; urban air mobility)과 같이 도심 지역에서의 UAV 운용이 중요하게 고려될 것이다[2],[3]. 그러나 도심 지역에서 운용되는 UAV는 모터, 프로펠러, 배터리 불량과 같은 하드웨어 문제나 GPS 신호 이상, 비행 제어 시스템 오류와 같은 소프트웨어 문제로 인해 비행 중 추락할 수 있다[4]. 추락하는 UAV는 지상의 사람[5] 또는 차량과 건물 등의 재산에 피해를 유발할 수 있다[6]. 이에 따라 새로운 안전 관리 및 규제 체계의 필요성이 제기되고 있으나, 운용 지역의 위험을 분석하는 명확한 기준과 인프라가 부족한 상태이다.

운용 지역의 위험을 분석하는 명확한 기준이 없다는 문제를 개선하기 위해 위험 비용 모델 연구가 수행되었다. 위험 비용 모델은 사람, 차량[7], [8], 건물, 그리고 UAV와 유인 항공기 간의 충돌[9]-[12] 등과 같은 UAV 운용 지역의 다양한 위험 유형에 대하여 위험을 정량화한 값인 위험 비용을 분석하고, 이를 바탕으로 위험 지도를 생성한다.

본 연구는 기존 위험 비용 모델들 중 사람, 차량, 건물에 대한 충돌 위험 비용 모델들을 분석하고 비교한다. 이를 위해 위험 비용 모델들의 모델식과 주요 파라미터를 확인하고, 위험 비용 분석 과정을 플로우 차트로 표현하였다. 또한 분석 결과를 바탕으로 위험 비용 모델을 구현하고, UAM 회랑으로 지정된 지역 일부분을 대상으로 위험 비용 분석을 수행하여 결과를 비교하였다.

## II. 위험 비용 모델 동향 분석

본 연구에서는 분석 모델로 기존 연구의 위험 비용 모델 중 지상의 사람과 차량에 대한 위험과 건물에 대한 위험에 대하여 위험 비용을 분석하는 모델을 선정하였다.

본 연구에서는 UAV와 유인 항공기의 충돌 위험이나 UAV의 비행 금지 구역 침범으로 인한 위험과 같이 많은 나라에서 법적으로 UAV 운용을 금지한 비행 금지 구역 인근에서 UAV를 운용할 때 발생하는 위험에 대한 모델은 고려하지 않는다.

### 2-1 사람 충돌 위험 비용 모델

사람 충돌 위험 비용은 그림 1과 같이 UAV가 추락하여 지상의 사람과 충돌했을 때 발생하는 인명 피해 위험을 정량적으로 평가한 것이다.

사람 충돌 위험 비용은 3가지 구성 요소로 모델링되며, 각각 (1) UAV가 비행 중 추락할 확률, (2) UAV가 지상의 사람과

충돌할 확률, (3) 지상의 사람이 발생한 치명적 피해를 입을 확률의 3가지 조건부 이벤트[15, 16, 17, 18]의 연속으로 정의된다. 따라서 이는 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$R_{C_p} = P_{crash} \times N_{hit}^p \times R_f^p \quad (1)$$

여기서  $R_{C_p}$ 는 사람 충돌 위험 비용이고,  $P_{crash}$ 는 UAV가 비행 중 추락할 확률로 하드웨어/소프트웨어를 포함한 UAV 시스템의 신뢰성을 통해 결정된다.  $N_{hit}^p$ 는 추락하는 UAV가 지상의 사람이 충돌할 확률이며,  $R_f^p$ 는 UAV와 사람이 충돌했을 때의 치사율(Fatality Rate)이다.

[19, 20]에서는  $N_{hit}^p$ 는 UAV가 추락한 구역의 인구 밀도를 통해 계산한다. 이는 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$N_{hit}^p = S_{hit} \times \sigma_p \quad (2)$$

여기서  $S_{hit}$ 는 UAV가 추락했을 때 영향을 끼치는 영역이고,  $\sigma_p$ 는 추락한 구역의 인구 밀도이다.

위와 같은 방법으로  $N_{hit}^p$ 를 계산하는 경우 사람 충돌 위험 비용에 직접적인 영향을 미치는 필수 변수인 인구 밀도 분포를 정확하게 반영하지 못한다. 인구 밀도 분포는 소비 편의시설[21]과 상관관계가 있다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 편의시설의 반경이 증가함에 따라 인구 밀도는 역 지수 패턴으로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

[22], [23]에서는 도시 편의시설과 인구 밀도 간의 상관관계를 정량적으로 평가하기 위해 중력 모델[24]과 인구 매핑 방법[25]을 기반으로 모델을 확장하여  $N_{hit}^p$ 를 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$N_{hit}^p = S_{hit} \times e^{(1-r^2)} \times \sigma_{(p.avg)} \quad (3)$$

여기서  $r$ 은 지역 편의시설과 UAV가 추락한 구역 간의 거리이며,  $\sigma_{(p.avg)}$ 는 위험 비용을 평가해야 하는 지역 전체의 평균 인구 밀도이다.



그림 1. UAV와 지상의 사람 [21].  
Fig. 1. UAV and pedestrians [21].

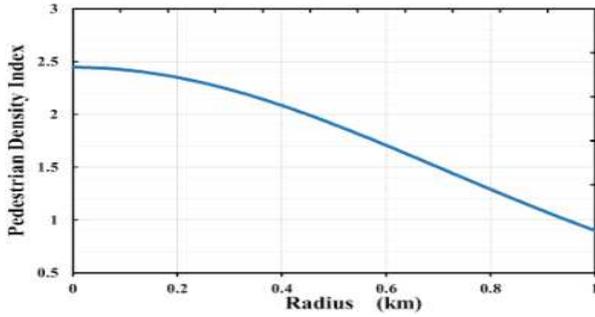


그림 2. 편의시설과의 거리에 따른 인구 밀도 분포 변화 [22].  
 Fig. 2. Changes in population density distribution based on distance to amenities [22].

치사율( $R_f^p$ )은 추락하는 UAV의 운동 에너지와 쉘터 계수 (Shelter Factor) 2가지 요인을 통해 계산된다. UAV의 운동 에너지는 사람에게 가해지는 충격을 결정한다. 쉘터 계수는 건물과 나무 등을 의미하며, 사람보다 먼저 충돌하여 사람에게 가해지는 충격을 완화한다. 이는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_f^p = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{b}{d} \left(\frac{d}{E_{imp}}\right)^{\frac{1}{4S_f}}}} \quad (4)$$

$S_f$ 는 피난 계수를 의미하며, 0에서 1 사이의 실수로 정의된다 [18]. 다양한 환경에 대한  $S_f$  값은 표 1에 나와 있다.  $b$ 는  $S_f$ 가 0.5일 때 50%의 치사율을 유발할 수 있는 충격 에너지이고,  $d$ 는  $S_f$ 가 0에 가까워질 때 치사율을 유발하는 데 필요한 충격 에너지 임계값이다.  $E_{imp}$ 는 추락하는 UAV의 운동 에너지이며, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$E_{imp} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5)$$

$m$ 은 UAV의 질량(kg)을 의미하며,  $v$ 는 UAV가 지면과 충돌할 때의 속도이다. 이때  $v$ 는 식 (6)과 같이 계산된다.

$$v = \sqrt{\frac{2mg}{k} \left(1 - e^{-\frac{hk}{m}}\right)} \quad (6)$$

$$k = R_f S_{hit} \rho_A$$

표 1. 분석 지역의 환경에 따른 쉘터 계수 [26].

Table 1. Shelter factor based on the environment of the analysis area [26].

$S_f$	Type of Shelters
0	None
0.25	Trees
0.50	Low-rise buildings
0.75	High-rise buildings
1	Industrial buildings

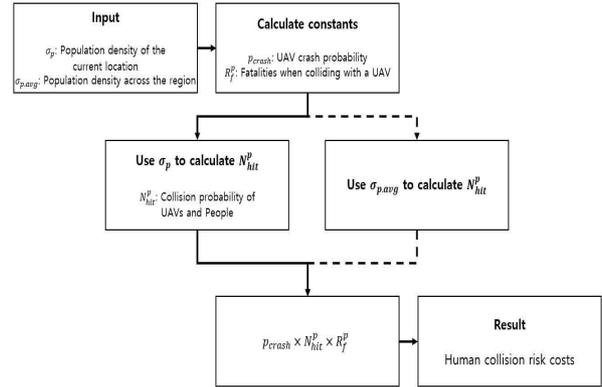


그림 3. 사람 충돌 위험 비용 모델 플로우차트. 실선 플로우는 [19],[20] 내 모델, 점선 플로우는 [22],[23] 내 모델의 플로우는 의미함.

Fig. 3. Flowchart of the human risk cost model. Solid flow represents the analytical model in papers [19],[20], dashed flow represents the analytical model in papers [22],[23].

여기서  $R_f$ 는 UAV의 항력 계수이고,  $\rho_A$ 는 공기 밀도이다. ( $1.225kg/m^3$ ) 그리고  $m$ 과  $g$ 는 각각 UAV의 질량과 중력가속도를 의미한다.  $h$ 는 UAV의 비행 고도를 의미한다. 사람 충돌 위험 비용 모델들을 플로우차트로 표현하면 그림 3과 같다.

### 2-2 차량 충돌 위험 비용 모델

차량 충돌 위험 비용은 그림 4와 같이 UAV가 추락하여 지상의 차량, 차량 통행량이 많은 곳에 떨어졌을 때 발생하는 인명 피해와 교통사고 위험을 정량적으로 평가한 것이다.

차량 충돌 위험 비용은 3가지 구성 요소로 모델링되며, 각각 (1) UAV가 비행 중 추락할 확률, (2) 추락하는 UAV가 지상의 차량과 충돌할 확률, (3) 충돌로 사람이 직접 사망하거나 교통사고가 발생하여 차량에 탑승한 사람이 사망할 확률이다 [18]. 따라서 이는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_c = P_{crash} \times N_{hit}^v \times R_f^v \quad (7)$$

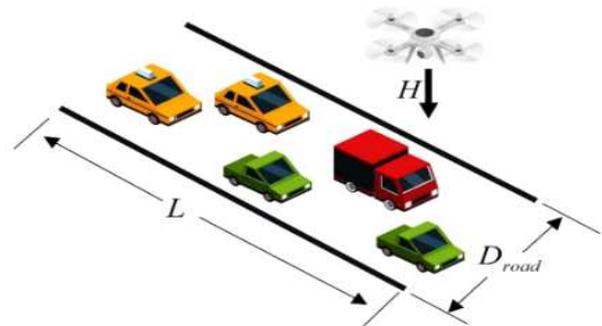


그림 4. UAV와 지상 차량 [21].  
 Fig. 4. UAVs and ground vehicles [21].

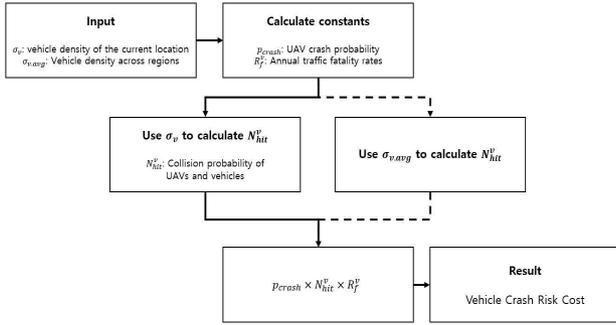


그림 5. 차량 충돌 위험 비용 모델 플로우차트. 실선 플로우우는 [20] 내 모델, 점선 플로우우는 [22], [23] 내 모델의 플로우를 의미.

Fig. 5. Flowchart of the vehicle risk cost model. Solid flow is the flow of the analytical model in the paper [20]. The dashed flow is the flow of the analytical model in the paper [22], [23].

여기서  $R_c$ 는 차량 충돌 위험 비용이고,  $P_{crash}$ 는 UAV가 비행 중 추락할 확률이다.  $N_{hit}^v$ 는 추락하는 UAV와 지상의 차량이 충돌할 확률이며,  $R_f^v$ 는 교통사고로 인한 연간 평균 치사율로 교통사고로 인한 연간 총사망자 수를 연간 총교통사고 수로 나누어서 계산한다.

[20]에서는 지상 차량의 예상 면적  $S_{car}$ 와 지상 차량의 수  $N$ , 도로 면적  $S_{road}$ 를 통해  $N_{hit}^v$ 를 구한다.  $N$ 은 단위길이 당 차량 수와 도로 길이를 통해 계산한다.  $S_{road}$ 는 도로 길이와 도로 폭을 이용하여 계산한다. 이를 수식으로 나타내면 식 (8)과 같다.

$$N_{hit}^v = \frac{S_{car} \cdot N}{S_{road}} \quad (8)$$

[22, 23]에서는 사람 위험 분석 모델의  $N_{hit}^p$ 와 같이  $N_{hit}^v$ 를 계산할 때 차량 밀도 분포를 반영하였다. 이를 수식으로 나타내면 식 (9)와 같다.

$$N_{hit}^v = S_{hit} \times e^{(1-r^2)} \times \sigma_{v,avg} \quad (9)$$

$\sigma_{v,avg}$ 는  $\sigma_{p,avg}$ 와 유사하게 위험 비용을 평가해야 하는 지역 전체의 평균 차량 밀도이다. 차량 충돌 위험 비용 모델들을 플로우차트로 표현하면 그림 5와 같다.

### 2-3 건물 충돌 위험 비용 모델

건물 충돌 위험 비용  $R_c$ 는 UAV가 비행 중 주변 건물과 충돌하는 위험과 충돌을 회피하기 위하여 이동 경로와 비행 속도를 제한할 때 발생하는 운용 비효율성을 정량적으로 평가한 것이다. 건물 충돌 위험 비용은 크게 2가지 유형으로 구분할 수 있다.

첫 번째 유형은 건물의 면적을 기반으로 UAV와 건물의 충돌 위험과 운용 비효율성을 정량적으로 평가한 건물 충돌 위험 비용이다. 두 번째 유형은 건물의 높이를 기반으로 건물 충돌과 운용 비효율성을 정량적으로 평가한 건물 충돌 위험 비용이다.

[22]에서는 건물 면적 데이터와 정규 분포를 이용하여 건물 충돌 위험 비용을 계산하였다. 정규 분포를 사용하는 이유는 건물의 크기의 모양이 다양하기 때문이다. 정규 분포를 사용하여 다양한 분산을 설정하면 건물의 다양한 영향 범위를 반영할 수 있으며, 다른 분포를 사용하거나 직접 분석 지역의 모든 건물의 면적을 계산하는 것보다 간단하다. 이를 수식으로 나타내면 식 (10)과 같다.

$$R_c = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} \quad (10)$$

여기서  $\sigma$ 는 건물의 면적에 대한 표준편차이다.  $d$ 는 2차원 지도에서 UAV의 위치와 건물 중심과의 거리를 의미한다.

[23]에서는 건물 높이 데이터와 로그 정규 분포를 이용하여 건물 충돌 위험 비용을 계산하였다. 이는 저고도에서는 건물의 밀도가 높아 충돌 위험이 컸지만, 고고도에서는 건물 밀도가 낮아 충돌 위험이 낮은 것을 반영한 것이다. 또한 로그 정규 분포를 사용한 이유는 건물의 높이는 음수 값이 될 수 없고, 그 분포가 대칭적이지 않기 때문이다[27, 28]. 이를 수식으로 나타내면 식 (11), (12)와 같다.

$$\psi(h; \mu, \sigma) = \frac{1}{h\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln h - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (11)$$

$$R_c = \begin{cases} \psi(e^\mu), & 0 < h \leq e^\mu \\ \psi(h), & h > e^\mu \end{cases} \quad (12)$$

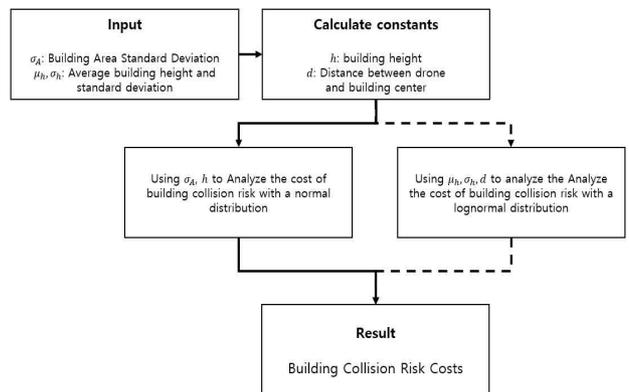


그림 6. 건물 충돌 위험 비용 모델 플로우차트. 실선 플로우우는 [22] 내 모델, 점선 플로우우는 [23] 내 모델의 플로우를 의미.

Fig. 6. Flowchart of the building risk cost model. The solid flow represents the flow of the analytical model in paper [22], and the dashed flow represents the flow of the analytical model in paper [23].

여기서  $h$ 는 건물 높이,  $\mu, \sigma$ 는 각각 건물 높이에 대한 로그 변수의 평균 및 표준편차이다.  $R_0$ 는 건물 충돌 위험 비용이다. 이때  $h$ 가 임계값  $e^\mu$  이하일 경우, 건물 충돌 위험 비용은  $\psi(e^\mu)$ 로 설정된다. 이는 임계값 이하의 건물들은 일반적으로 밀집되어 있어 충돌 위험이 크기 때문이다. 건물 충돌 위험 비용 모델을 플로우차트로 표현하면 그림 6과 같다.

### III. 위험 비용 모델 구현 및 비교

본 연구에서는 앞 장에서 설명한 위험 비용 모델을 비교하기 위해 지역을 선정하고 해당 지역에 대해 위험 비용 모델을 적용했다. 지역 선정 시 해당 지역의 비행 금지 구역 여부는 고려하지 않았으며, 위험 비용 모델은 MATLAB을 활용하여 구현하였다.

#### 3-1 위험 비용 분석 지역

위험 비용 분석 지역은  $6\text{ km} \times 6\text{ km}$  크기의 서울특별시 지역으로 선정하였다. 이는 그림 7의 왼쪽 지도(A)에서 확인할 수 있다.

해당 지역의 인구 밀도 데이터는 국토 정보 플랫폼 국토 정보 맵[29]에서 확보하였다. 해당 지역의 차량 밀도 데이터는 서울 열린 데이터 광장의 서울시 도로 현황 (도로율) 통계[30]와 서울시 교통 정보의 2022년 서울특별시 교통량 조사자료[31]를 이용하여 확보하였다. 해당 지역의 건물 면적, 높이 데이터는 QGIS[32]와 국가공간정보포털 오픈 API의 부동산 개방 데이터[33]를 이용하여 확보하였다.

데이터 분석 결과 해당 지역의 평균 인구 밀도는  $16,314$  명/ $\text{km}^2$ 이다. 또한 그림 7의 오른쪽 지도(B)와 같이 해당 지역의 건축물을 QGIS를 통해 식별한 결과, 건축물의 수는  $37,840$ 동이며, 평균 높이는  $8.42$  m이고 표준편차는  $1.347$ 이다. 또한 해당 지역은 4개의 대형 편의시설이 존재한다.



그림 7. 좌측은 대한민국 서울시의  $6\text{ km} \times 6\text{ km}$  지역 지도 (A), 우측은 QGIS로 식별한 해당 지역의 건물들 (B).  
 Fig. 7. On the left, a map of a  $6\text{ km} \times 6\text{ km}$  area in Seoul, South Korea (A), and on the right, buildings in the area identified in QGIS (B).



그림 8. 이미지 인식 알고리즘을 통해 식별한 주요 도로.  
 Fig. 8. Major roads identified by image recognition algorithms.

그림 8은 OpenCV를 통해 해당 지역의 주요 도로를 식별한 것으로 정확한 교통량을 파악할 수 있는 도로는 3개이다. 각 도로의 교통량은 각 도로의 교통량은  $69,676, 207,617, 139,812$  대/일인 것을 알 수 있었다. 이를 단위 길이당 차량 수로 바꾸면  $10,475, 5,555, 6,355$  대/km이다. 또한 교통사고로 인한 평균 치사율  $R_f^n$ 는 2022년 기준으로  $0.006$  이다[34].

위험 비용 분석에 사용한 UAV로 DJI 팬텀 4를 선택했다. 해당 UAV의 무게는  $1.38\text{ kg}$ 이며, 비행 중 추락할 확률  $P_{crash}$ 는 비행시간당  $3.42 \times 10^{-4}$  이다. UAV가 추락했을 때 영향을 끼치는 영역의 크기  $S_{hit}$ 는  $0.0188\text{ m}^2$ , 항력 계수  $R_f$ 는  $0.3$ 이다.

본 연구에서는 해당 지역의 위험 비용을 분석하기 위해 지역을  $60 \times 60$  크기의 그리드(grid)로 나누었다. 여기서 그리드란 공간을 일정한 크기의 정사각형 또는 정육면체로 나눈 격자 구조를 의미하며, 각 그리드 셀은 균일한 간격으로 배치된다. 이는 대도시 환경에서는 인구 밀도, 차량 밀도, 건물 분포와 같이 위험 비용 분석에 필수적인 데이터가 불규칙적으로 분포되어 있으므로 지역을 작은 단위로 세분화하면 분석에 유리하기 때문이다[13], [14]. 해당 그리드에 [19], [20]과 [22], [23]의 사람, 차량 충돌 위험 비용 모델을 적용한 결과는 각각 그림 9, 그림 10과 같다.

그림 9의 좌우를 비교할 때, 9(B)에서는 대형 편의시설 주변에 있는 그리드 셀의 사람 충돌 위험 비용이 다른 그리드 셀보다 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 9(B)에서 위험 비용 분석 시, 편의시설 주변의 인구 밀도 분포를 반영했기 때문이다. 9(A)는 이를 반영하지 않았기 때문에, 다른 그리드 셀과 편의시설 주변 그리드 셀의 사람 충돌 위험 비용은 큰 차이가 없었다. 이를 통해 9(A)의 적용된 모델의 경우 정확한 위험 비용 평가가 어렵다는 것을 확인할 수 있었다.

그림 10의 좌우를 비교할 때, 10(A)에서 대형 편의시설 주변의 평균 차량 충돌 위험 비용은  $2.431 \times 10^5$ 으로 분석되었으나, 10(B)에서는  $2.436 \times 10^5$ 에서 최대  $3.044 \times 10^5$ 으로 분석되었다. 이는 10(A)에서는 대형 편의시설의 교통량 밀도 분포를 반영하지 않아 낮게 평가됐지만, 10(B)에서는 해당 분포를 반영하였기 때문이다.

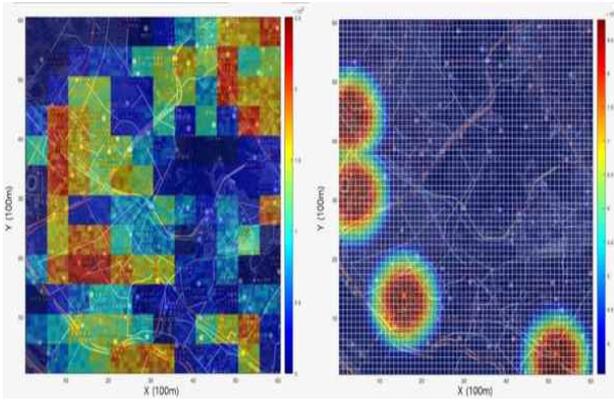


그림 9. 좌측은 [19], [20]의 사람 충돌 위험 비용 모델 결과 (A), 우측은 [22], [23]의 사람 충돌 위험 비용 모델 결과 (B).  
**Fig. 9.** On the left, the results of the human collision risk cost model from [19], [20] (A); on the right, the results of the human collision risk cost model from [22], [23] (B).

건물 충돌 위험 비용의 경우, [22]의 건물 면적 기반 건물 위험 비용 모델은 사람, 차량 충돌 위험 비용 모델을 지역에 적용할 수 없었다. 이는 해당 모델은 정확한 건물 중심 위치를 알아야 하기 때문이다. 따라서 가상의 새로운 지역을 만들고 해당 지역에서 위험 비용 분석을 수행했다. 새로운 지역은  $600m \times 600m$  크기의 가상 지역으로 해당 지역의 랜덤한 위치에 10개의 건물을 배치했으며, 건물 면적 표준편차는 8로 설정하였다. 이는 그림 11에서 확인할 수 있다. 이후 새로운 지역과 기존 지역을  $60 \times 60$  크기의 그리드로 나누고, 각 그리드 셀에 대하여 [22], [23]의 건물 충돌 위험 비용 모델을 적용하여 위험 비용 분석을 수행하였다. 결과는 그림 12와 같다.

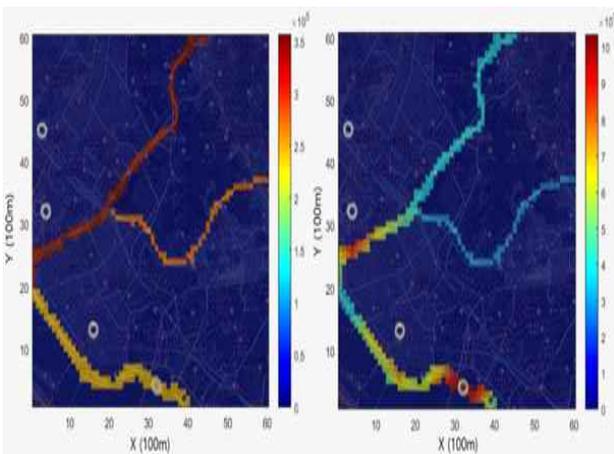


그림 10. 좌측은 [20]의 차량 충돌 위험 비용 모델 결과 (A), 우측은 [22], [23]의 차량 충돌 위험 비용 모델 결과 (B).  
**Fig. 10.** On the left, the results of the vehicle crash risk cost model from [20] (A); on the right, the results of the vehicle crash risk cost model from [22], [23] (B).

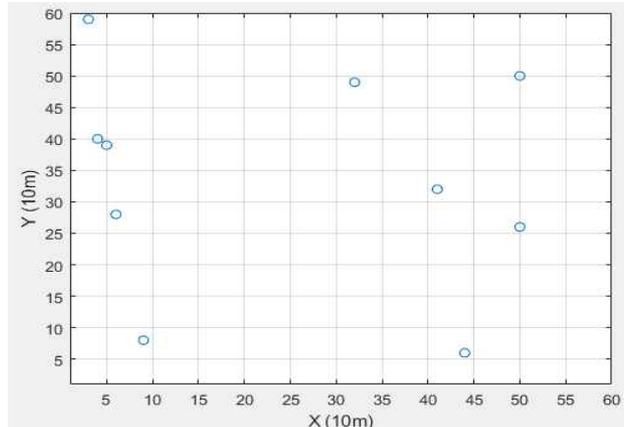


그림 11.  $600m \times 600m$  크기의 가상 지역, 각 점은 건물의 중심을 의미.  
**Fig. 11.** A virtual region measuring 600 meters by 600 meters, with each point representing the center of a building.

그림 12의 좌우를 비교할 때, 12(A)의 건물 면적 기반 건물 충돌 위험 비용 모델의 경우 건물의 면적에 따라 건물 충돌 위험 비용을 계산하였다. 하지만 UAV의 비행 고도를 한정했기 때문에 해당 결과를 바탕으로 경로를 작성할 때 해당 고도 이상의 건물은 모두 장애물로 여겨져 UAV의 경로가 제한된다. 또한 해당 위험 비용 모델은 하나의 그리드 셀에 여러 개의 건물이 포함되어 있을 경우, 적용하기 어려웠다. 12(B)의 경우 12(A)와 다르게 UAV의 비행 고도에 따른 건물 충돌 위험 비용을 계산하여 UAV의 경로가 제한되지 않고 넓은 지역에서도 적용할 수 있었다. 하지만 건물의 높이만 고려하여 위험 비용을 계산했기 때문에 건물 면적에 따른 UAV와 건물의 충돌 위험을 고려하지 못했다.

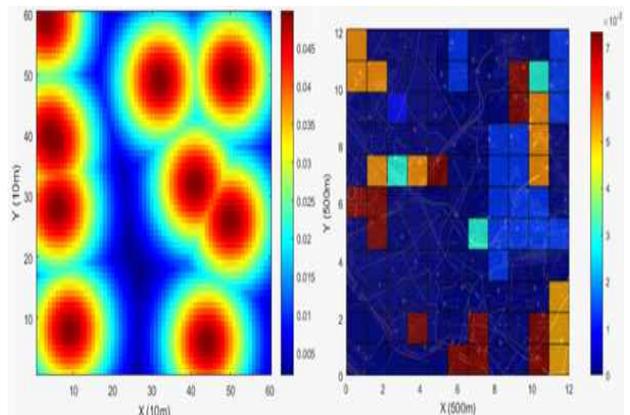


그림 12. 좌측은 [22]의 건물 충돌 위험 비용 모델 결과 (A), 우측은 [23]의 건물 충돌 위험 비용 분석 모델 결과 (B).  
**Fig. 12.** On the left, the results of the building crash risk cost model from [22] (A); on the right, the results of the building crash risk cost analysis model from [23] (B).

표 2. 위험 비용 모델 비교 결과 요약.

Table 2. Summary of risk cost model comparison results.

Model	Paper	Contents
Human	[19]	○ Not reflecting population density distribution
	[20]	○ Grid cells near amenities Low risk cost
	[22]	○ Reflect population density distribution
	[23]	○ Higher risk cost for grid cells around amenities
Vehicle	[20]	○ Not reflecting vehicle density distribution
	[22]	○ Low risk cost around amenities
	[22]	○ Reflect vehicle density distribution
	[23]	○ Higher risk costs around amenities
Building	[22]	○ Assessing the cost of building risk based on building square footage
	[23]	○ Assessing the cost of building risk based on building height

각 위험 비용 모델을 표 2와 같이 정리한 결과, 사람 충돌 위험 비용 모델과 차량 충돌 위험 비용 모델은 인구 밀도 분포와 차량 밀도 분포를 반영한 [22], [23]의 사람, 차량, 건물 충돌 위험 비용 모델이 UAM 비행 경로 계획에 적합했다. 그 이유는 해당 모델이 인구와 차량 밀도가 높을 것으로 예상되는 편의 시설 주변 지역의 위험 비용을 높게 평가했기 때문이다. 건물 충돌 위험 비용 모델은 [23]의 건물 높이 기반 건물 충돌 위험 비용 모델이 적합했다. 이는 [22]의 건물 면적 기반 건물 충돌 위험 비용 모델은 분석에 건물의 중심 좌표가 필요해서 하나의 그리드 셀에 다수의 건물이 포함된 경우는 적용하기 어렵기 때문이다.

그러나 해당 모델들은 다음과 같은 한계점을 확인할 수 있었다. 첫째, 시간에 따른 인구 밀도 분포 변화가 반영되지 않았다. 이는 편의시설의 인구 밀도 분포 변화를 고려하지 않음을 의미하며, 특히 야간 시간대에 기존 모델을 적용하면 현실과 다른 위험 비용을 계산할 위험이 있다.

둘째, 편의시설을 지역적으로 넓은 범위가 아닌 단일 건물로만 고려하였다는 한계가 있다. 이는 인근 지역의 복합적인 인구 밀도와 활동 패턴을 충분히 반영하지 못하여, 실제 도시 환경에서의 위험 분석에 있어서 제한적일 수 있다.

셋째, 건물 면적과 높이를 동시에 고려한 건물 충돌 위험 비용 모델의 필요성이 드러났다. 이는 면적이 넓지만, 높이가 낮은 건물과 면적이 좁지만, 높이가 높은 건물이 모두 존재할 수 있기 때문이다.

#### IV. 결 론

본 연구는 운용 지역의 위험에 따른 안전한 UAM 비행 경로 계획을 세우기 위한 일환으로, 기존 연구의 위험 비용 모델을 비교 분석하고, 향후 모델 개발 시 고려해야 할 주요 한계점들을 식별했다.

비교 분석 결과, 인구 밀도와 차량 밀도를 반영하는 사람과 차량 충돌 위험 비용 모델이 안전한 UAM 비행 경로 계획에 적합했다. 건물 충돌 위험 비용 모델에서는 소규모 분석 지역

에서는 건물 면적 기반 건물 충돌 위험 비용 모델, 대규모 분석 지역에서는 건물 높이 기반 건물 충돌 위험 비용 모델이 적합했다.

본 연구의 분석 결과 및 식별된 한계점은 UAM 비행 경로 계획을 위한 모델의 개선 방향을 제시하며, 관련 분야의 기술적 개선과 정책 결정에 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

#### Acknowledgments

본 논문은 이 작업은 경기도 GRRC 프로그램(GRRC 한국항공대학교 2023-B02) 및 한국연구재단 BK21 FOUR(과제번호:5199990714521)의 지원을 받아 작성되었습니다.

#### References

- [1] G. Cai, J. M. Dias, and L. Seneviratne, "A survey of small-scale unmanned aerial vehicles: recent advances and future development trends," *Unmanned Systems*. Vol. 2, No. 02, pp. 175-199, 2014.
- [2] O. B. Jensen, "Drone city-power, design and aerial mobility in the age of smart cities," *Geographica Helvetica*, Vol. 71, No. 02, pp. 67-75, 2016.
- [3] F. Mohammed, A. Idries, N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, and I. Jawhar, "Uavs for smart cities: opportunities and challenges." in *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Orlando; FL, pp. 267-273, 2014.
- [4] B. Pang, E. M. Ng, and K. H. Low, "UAV trajectory estimation and deviation analysis for contingency management in urban environments." in *ALAA Aviation 2020 Forum*, Virtual Event, June 2020.
- [5] C. H. Koha, K. H. Low, L. Lib, Y. Zhaob, C. Denga, S. K. Tana, Y. Chenb, B. C. Yeapa, and X. Lia "Weight threshold estimation of falling UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) based on impact energy," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 93, pp. 228-55, 2018.
- [6] D. Konstantinos, V. Kimon P, and P. Les A, "Evaluating the risk of unmanned aircraft ground impacts," in *16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Ajaccio-Corsica: France, pp. 709-716, 2008.
- [7] R. A. Clothier, B. P. Williams, and K. J. Hayhurst, "Modelling the risks remotely piloted aircraft pose to people on the ground," *Safety Science*, Vol. 101, pp. 33-47, 2018.
- [8] I. Mariusz, J.-G. Ilona, and G. Paweł, "Minimisation of the probability of serious road accidents in the transport of dangerous goods," *Reliability Engineering and System*

- Safety*, Vol. 217, p. 108093, 2022.
- [9] V. R. M. Arnaldo, C. V. F. Gomez, C. J. A. Perez, S. A. Rodriguez, S. L. Perez, A. E. Sanchez, and N. F. J. Saez, "Development of safety performance functions (SPFs) to analyse and predict aircraft loss of separation in accordance with the characteristics of the airspace," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 186, pp. 143-161, 2019.
- [10] C. H. J. Wang, S. K. Tan, and K. H. Low, "Collision risk management for noncooperative UAS traffic in airport-restricted airspace with alert zones based on probabilistic conflict map," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 109, pp. 19-39, 2019.
- [11] Z. Yiyuan, Z. Honghai, Z. Gang, L. Hao, and F. Dikun. "Collision probability estimation for small unmanned aircraft systems," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 213, p. 107619, 2021.
- [12] P. D. Vascik and R. J. Hansman, "Assessing integration between emerging and conventional operations in urban airspace." in *AIAA Aviation Forum 2019*, pp. 1-24, Published Online:15 Jun 2019.
- [13] J. Cho, and Y. Yoon. "Extraction and interpretation of geometrical and topological properties of urban airspace for UAS operations." in *13th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, Vienna: Austria, 2019.
- [14] M. Salleh, W. Chi, Z. Wang, S. Huang, D. Y. Tan, T. Huang, and K. H. Low, "Preliminary concept of adaptive urban airspace management for unmanned aircraft operations," in *2018 AIAA Information Systems-AIAA Infotech@ Aerospace*, pp. 8-12, Published Online:7 Jan 2018.
- [15] R. Clothier, R Walker, N. Fulton, and D. Campbell, "A casualty risk analysis for unmanned aerial system (UAS) operations over inhabited areas," in *AIAC12, Twelfth Australian International Aerospace Congress, 2nd Australasian Unmanned Air Vehicles Conference*, Bristol: England, pp. 1-15, 2007.
- [16] K. Dalamagkidis, K. P. Valavanis, and L. A. Piegł "On integrating unmanned aircraft systems into the national airspace system: issues, challenges, operational restrictions, certification, and recommendations," *Springer Science & Business Media*, Vol. 54, 2011.
- [17] G. Guglieri, and G. Ristorto, "Safety assessment for light remotely piloted aircraft systems," in *INAIR 2016 - International Conference on Air Transport*, Vol. 1, Vienna: Austria, pp. 1-7, 2016.
- [18] A. Cour-Harbo, "Quantifying ground impact fatality rate for small unmanned aircraft," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol 93, pp. 367-384, 2019.
- [19] S. Primatesta, G. Guglieri, and A. Rizzo, "A risk-aware path planning strategy for UAVs in urban environments," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 95, pp. 629-643, 2019.
- [20] X. Hu, B. Pang, F. Dai, and K. H. Low, "Risk assessment model for UAV cost-effective path planning in urban environments," *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 150162-150173, 2020.
- [21] J. Rappaport, "Consumption amenities and city population density," *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 38, No. 06, pp. 533-52, 2008.
- [22] Q. Shao, J. Li, R. Li, J. Zhang, and X. Gao, "Study of urban logistics drone path planning model incorporating service benefit and risk cost," *Drones*, Vol. 6, No. 12, Online publication, Paper number 418, 2022.
- [23] B. Pang, X. Hu, W. Dai, and K. H. Low, "UAV path optimization with an integrated cost assessment model considering third-party risks in metropolitan environments," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 222, Online publication, Paper number 108399, 2022.
- [24] B. Pang, W. Dai, X. Hu, F. Dai, and K. H. Low, "Multiple air route crossing waypoints optimization via artificial potential field method," *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 34, No. 4, pp. 279-292, 2021.
- [25] P. Devillea, C. Linardc, S. Martine, M. Gilbert, F. R. Stevens, A. E. Gaughan, V. D. Blondela, and A. J. Tatem, "Dynamic population mapping using mobile phone data," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 111, No. 45, pp. 15888-15893, 2014.
- [26] S. Primatesta, A. Rizzo, and A. Cour-Harbo, "Ground risk map for unmanned aircraft in urban environments," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 97, pp. 489-509, 2020.
- [27] T. Hicks, J. Kirtner, and H. Anderson. The application of land use / land cover (clutter) data to wireless communication system design. EDX Engineering, Technology White Paper [Internet]. Available: <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc98/PROCEED/T0550/PAP525/P525.HTM>
- [28] H. Usui, "Statistical distribution of building lot depth: theoretical and empirical investigation of downtown districts in Tokyo," *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, Vol. 46, No. 8, pp. 1499-1516, 2019.
- [29] Korea Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. National land information platform. National Land

Information Map [Internet]. Available: <https://map.ngii.go.kr/ms/map/NlipMap.do?tabGb=total>.

[30] Seoul Open Data Square. Statistics on the status of roads (road ratio) in Seoul [Internet]. Available: <https://data.seoul.go.kr/dataList/258/S/2/datasetView.do>

[31] Traffic information for Seoul. Data from the 2022 Seoul Traffic Survey [Internet]. Available: [https://topis.seoul.go.kr/refRoom/openRefRoom\\_2.do](https://topis.seoul.go.kr/refRoom/openRefRoom_2.do)

[32] Free and open source geographic information systems. QGIS [Internet]. Available: <https://qgis.org/ko/site/>

[33] National Spatial Information Portal Open API. Real Estate Open Data [Internet]. Available: <https://www.data.go.kr/data/15123996/openapi.do>

[34] Seoul. Traffic Accident Statistics. [Internet]. Available: <https://news.seoul.go.kr/traffic/archives/335>



**김 재 현 (Jae-Hyeon Kim)**

2022년 2월: 가톨릭관동대학교 무인항공학과 (공학사)  
2022년 3월 ~ 현재: 한국항공대학교 일반대학원 스마트항공모빌리티학과 석사과정  
※관심분야: 무인항공기, UAM, 경로 계획



**이 동 민 (Dong-Min Lee)**

2018년 2월: 한국항공대학교 정보통신공학 (공학사)  
2020년 2월: 한국항공대학교 일반대학원 항공전자정보공학 (공학석사)  
2021년 ~ 현재: 한국항공대학교 일반대학원 스마트항공모빌리티학과 박사과정  
※관심분야: 감항인증, 신뢰성 분석, 디지털트윈



**이 명 진 (Myeong-Jin Lee)**

1994년: KAIST 전기공학과 (공학사),  
2001년: KAIST 전기공학과 (공학박사),  
2004 ~ 2007년: 경성대학교 전기공학과 조교수  
2007 ~ 현재: 한국항공우주대학교 전자정보공학부 교수  
※관심분야: 멀티미디어 통신 시스템, 동영상 압축

1996년: KASIT 전기공학과 (공학석사)  
2001 ~ 2004년: 삼성전자 수석 엔지니어



**최 영 훈 (Young-hoon Choi)**

2006년 2월: 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 (공학사)  
2008년 2월: 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 (공학석사)  
2019년 8월: School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology (공학박사)  
2021년 ~ 현재: 한국항공대학교 스마트드론공학과 교수  
※관심분야: 임무 계획, 경로 계획, 차량 설계 최적화, 지능형 알고리즘, 자율 시스템



**권 지 훈 (Ji-Hun Kwon)**

2017년 2월: 現)경상국립대학교 전자공학 (공학사)  
2023년 2월: 한국항공대학교 일반대학원 항공전자정보공학 (공학석사)  
2017년 ~ 현재: 항공안전기술원 항공인증본부  
※관심분야: 임베디드 시스템, 소프트웨어 인증, 경량항공기/초경량비행장치 인증



**나 종 화 (Jong-Whoa Na)**

1985년 2월 : 서강대학교 (공학사)  
1988년 5월 : Wayne State University (공학석사)  
1994년 12월 : University of Arizona (공학박사)  
1998년 9월 ~2005년 8월 : 한세대학교 컴퓨터공학전공 부교수  
2005년 9월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 교수  
※관심분야 : 고신뢰성 임베디드 시스템, 신뢰성 분석, 무인자율시스템, 항공 임베디드