

## 저고도 무인기 교통관리를 위한 지상 충돌 위험 모델 개발

# Ground Risk Model Development for Low Altitude UAV Traffic Management

김연실

한국항공우주연구원 무인기연구부

Youn-sil Kim

Unmanned Aircraft System Research Division, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, 34133, Korea

### [요 약]

본 연구에서는 무인기가 운용 중에 고장이 발생하여 추락함으로써 발생할 수 있는 지상 충돌 위험을 정량적으로 계산하기 위한 지상 충돌 위험 모델을 개발하였다. 지상 충돌 위험 모델은 무인기 고장 확률, 무인기가 지상에 추락하여 사람과 충돌할 확률, 무인기가 사람과 충돌했을 때 인명 피해가 발생할 확률을 이용하여 계산된다. 본 연구에서는 무인기 운용의 지상 충돌 위험을 평가하기 위해 수학적으로 각 확률을 유도하였다. 또한 무인기와의 충돌에 노출되는 인구수를 추정하기 위해 인구 밀도 맵, 건폐율 맵, 차량 교통량 데이터베이스를 활용하였다. 최종적으로 대전에서 두 가지 무인기 경로에 대한 운영을 가정하여 각 무인기 경로에 대한 지상 충돌 위험을 평가하였다.

### [Abstract]

In this paper, we develop the ground risk model of unmanned aerial vehicle (UAV) operation to quantify the ground risk when the UAV falls to the ground during the intended operation in case of UAV failure. The ground risk is computed by using the UAV failure probability, the probability of impact a person when UAV falls to the ground, the probability of fatality when UAV strikes the person. We mathematically derive each probability to evaluate the ground risk of UAV operation. Also, the population density map, building to land ratio map, car traffic database is used to estimate the number of people exposed to collision with UAV. Finally, we assumed the operations of a UAV with two paths in Daejeon city and evaluate the ground risk of each UAV operations.

**Key word** : UAS operational risk, UAS traffic management, Ground risk map.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.6.471>



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 2 November 2020; Revised 10 December 2020  
Accepted (Publication) 14 December 2020 (30 December 2020)

\*Corresponding Author, Youn-sil Kim

Tel: +82-42-870-3505

E-mail: younsil@kari.re.kr

# 1. 서론

최근 저고도에서 운용되는 소형 드론에 대한 활용이 크게 증가함에 따라 소형 무인기를 기존 공역에 안전하게 통합하는 것에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 각 국가에서는 이와 관련된 규정들도 속속 발표가 되고 있다. 미국의 경우 part 107 규칙[1]을 발표하여 이를 만족하는 무인기 운용의 경우 별도의 승인 없이 비행이 가능하도록 하였고 유럽의 경우에는 표 1과 같이 무인기 운용을 open, specific, certified 세 가지로 구분하여 각 무인기 운용에 따라 적절한 절차를 통해 무인기 비행이 가능하도록 하였다[2]. 무인기 운용을 open, specific, certified로 구분하는 기준은 무인기 운용이 발생시키는 위험의 수준이다. Open 카테고리는 위험이 가장 낮은 단계를 말하여 specific 카테고리는 중간 정도의 위험을 가지는 운용, certified 카테고리는 가장 높은 수준의 위험을 가지는 무인기 운용을 의미한다. Open 카테고리의 경우 위험이 낮기 때문에 운용 위험 평가가 필요하지 않고 certified 카테고리의 경우 위험이 너무 높아 유인기 수준의 인증이 요구된다. Specific 카테고리의 경우 JARUS (joint authorities of rulemaking of unmanned system)에서 무인기 운용 위험 평가 가이드라인 SORA (specific operation risk assessment)를 따른 운용 위험 평가가 요구된다[3]. 비가시권 비행을 하는 많은 상업용 드론 운용이 specific 카테고리에 포함될 것으로 예상된다.

JARUS SORA는 specific 카테고리 무인기 운용에 대한 위험을 평가하는 절차를 제시하고 있는데 이를 그림으로 간략히 나타내면 그림 1과 같다. 무인기의 운용 개념(ConOps; concept of operation)을 입력으로 지상 충돌 위험 클래스와 유인기와의 공중 충돌 위험 클래스를 결정한다. 이 과정에서 운용자는 여러 완화 방법을 통해 GRC(ground risk class) 및 ARC(air risk class)를 감소시킬 수 있다. GRC/ARC가 결정되면 해당 레벨에 따라서 성능 요구사항, 보증 및 무결성 수준, 안전성 목표가 결정되는데 무인기 운용자가 이를 모두 만족함을 입증하면 무인기 운용 승인을 받는다.

표 1. Open, specific, certified 카테고리 운용  
Table 1. Open, specific, certified category operation.

Operation category	Summary
Open	-Low risk
	-Without involvement of aviation authority -Limitations (visual line of sight, maximum altitude, distance from airport and sensitive zones)
Specific	-Increased risk
	-Safety risk assessment (JARUS SORA) -Airworthiness of drone and competence of staff based on risk assessment
Certified	-High risk
	-Comparable to manned aviation -Type certificate (TC), Certificate of airworthiness, noise certificate, approved organisations, licences

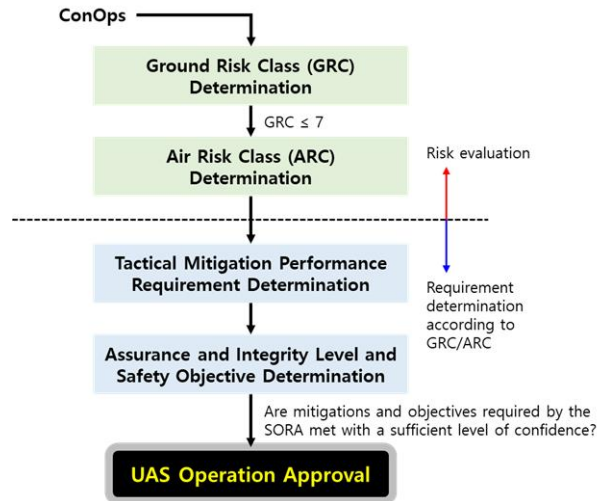


그림 1. 무인기 운용 위험 평가 절차  
Fig. 1. UAV operational risk evaluation process.

본 논문에서는 이와 관련하여 무인기의 지상 충돌 위험을 정량적으로 계산할 수 있는 무인기 지상 충돌 위험 모델을 개발하는 연구를 수행하였다.

관련 연구로 2018년 MITRE 사에서 무인기 고장 빈도, 무인기 운용 지역의 평균 인구 밀도 등을 활용한 무인기 지상 충돌 위험 평가에 대한 기술 문서를 발행한 바 있다[4]. 이와 유사한 방식으로 la cour harbo는 바람 영향을 고려한 무인기 추락 궤적을 모델링을 통해 지상 충돌 위험을 정량적으로 계산하는 것에 대한 논문[5]-[6]을 발표하였고, Primatesta는 la cour harbo의 모델링을 바탕으로 특정 도시에 대한 ground risk map을 생성하는 방안에 대한 논문[7]을 발표하였다. 이외에도 Lee는 레이더를 통해 측정된 항공 교통량 데이터를 기반으로 air risk를 map 형태로 생성한 논문을 발표한 바 있다[8].

본 논문은 이와 같은 기존 연구들을 기반으로 국내의 특정 도시에 무인기를 운용할 때 발생할 수 있는 지상 충돌 위험 정량적으로 평가할 수 있는 지상 충돌 위험 모델에 대한 연구를 수행하였다. Primatesta가 제안한 ground risk map의 개념을 활용하여 무인기 운용에 따라 발생할 수 있는 ground risk를 평가하는 모델을 개발하였다. Groud risk map은 무인기 운용 위험을 특정 지역에 대한 맵 형태로 표현하는 개념이다.

또한 본 연구에서는 ground risk map을 생성할 때 기존 연구에서 활용한 인구밀도 맵에 추가로 차량 교통량 데이터를 활용하여 더욱 실제적인 지상 충돌 위험 평가가 가능하도록 하였다. 데이터 분석 결과 무인기 추락 시 충돌에 노출되는 인구수를 계산할 때 차량 내에 존재하는 인구수는 무시 가능한 수준이 아님을 확인하여 차량 교통량 적용의 필요성을 확인하였다.

이에 더불어 각 운용 별 위험을 평가하기 위해 ground risk map 내에서 계획된 무인기 비행경로에 대해 지상 충돌 위험을 평가할 수 있는 모델을 제안하였다. 이를 국내 저고도 무인기 교통관리 시스템에 적용하면 비행 전에 해당 무인기 운용으로 인한 ground risk를 정량적으로 도출할 수 있다.

## II. 무인기 지상 충돌 위험 모델

무인기 운용에 대한 지상 충돌 위험 모델은 식 (1)과 같이 정의할 수 있다. 무인기가 계획된 경로를 지난다고 할 때, 무인기가 특정 위치에서 추락할 확률에 무인기가 추락했을 때 인명피해 확률은 곱하여 모든 경로에 대해서 더함으로써 해당 무인기 운용에 대한 지상 충돌 위험을 계산할 수 있다. 무인기 고장이 발생했을 때 추락 확률은 보수적으로 1로 가정하였다. 참고로 ground risk가 격자화된 맵에 불연속적인 값으로 표현되기 때문에 적분 대신 합계가 사용된다.

$$Risk = \sum_{path} P_{event}(x_d, y_d) \times P_{fatality|event}(x_d, y_d) \quad (1)$$

식 (1)에서  $P_{event}(x_d, y_d)$ 는 무인기가 격자  $(x_d, y_d)$ 에 해당하는 위치에서 추락할 확률이며  $P_{fatality|event}(x_d, y_d)$ 는  $(x_d, y_d)$  위치에서 무인기가 추락했을 때 인명 피해가 발생할 확률을 의미한다. 여기에서  $P_{fatality|event}(x_d, y_d)$ 는 다시 무인기가 추락하여 사람과 충돌할 확률과 무인기가 사람과 충돌했을 때 사망확률의 곱으로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{fatality|event}(x_d, y_d) = \sum_{Allk} P_{impact|event}(k) \times P_{fatality|impact}(k) \quad (2)$$

식 (2)에서  $P_{impact|event}(k)$ 는 무인기가  $(x_d, y_d)$ 에서 떨어져 지상의 k 번째 그리드에 추락했을 때 무인기와 충돌하는 인구수이다. 이를 그림으로 나타내면 그림 2와 같다.  $P_{fatality|impact}(k)$ 는 k번째 그리드에 무인기가 추락하여 인명과 무인기가 충돌했을 때 인명의 fatality 확률을 의미한다. 식 (2)와 같이 이를 모든 그리드에 대해서 계산함으로써  $P_{fatality|event}(x_d, y_d)$ 를 계산할 수 있다.

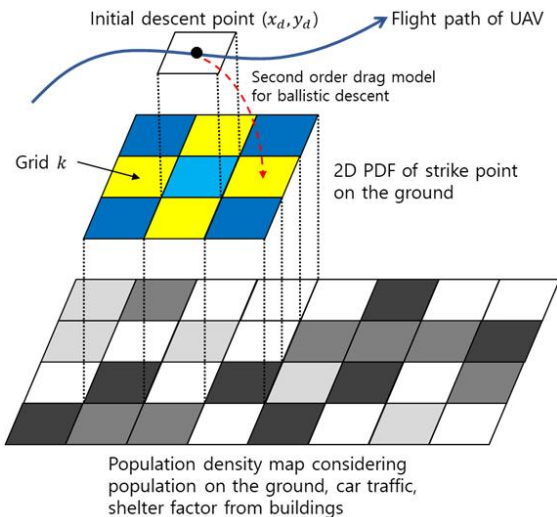


그림 2. 무인기 지상 충돌 위험 도출 개념  
Fig. 2. Concept of UAV ground risk computation.

여기에서 그리드 영역의 범위는 그림 2와 같이 무인기가  $(x_d, y_d)$  위치 및 임무 고도에서 추락했을 때 지상 충돌 위치에 대한 2차원 PDF (probability density function) 영역을 계산함으로써 결정할 수 있으며, 2D PDF는 다시 인구밀도 데이터베이스의 해상도를 기준으로 격자화된다. 만약 무인기가  $(x_d, y_d)$  위치 및 임무 고도에서 임의의 방향으로 추락했을 때 도달할 수 있는 최대 거리가 50m라면 그리드 영역의 범위는 가로 100m, 세로 100m 크기의 정사각형이 된다.

다음으로  $P_{event}(x_d, y_d)$ ,  $P_{impact|event}(k)$ ,  $P_{fatality|impact}(k)$  확률에 대한 모델링을 2-1, 2-2, 2-3장에 차례로 기술하였다.

### 2-1 무인기 추락 확률

무인기가 추락할 수 있는 상황은 다양하지만 본 논문에서는 무인기의 고장으로 인한 추락 상황을 고려하였다. 정확한 무인기 고장 확률은 무인기 설계 및 제작을 진행한 무인기 제작사의 산출물로 주어져야 한다.

본 논문에서는 MITRE 기술 문서에서 비행체 무게 클래스에 따라 가정한 무인기 고장 빈도를 활용하였다[4]. 무인기가 고장 나면 반드시 추락한다는 가정 하에 무인기 고장 빈도는 무인기 추락 빈도와 같아진다. 무인기 고장 빈도는 표 2에서 볼 수 있듯이 비행시간 당 값으로 주어지기 때문에 임의의 그리드 위치에서의 무인기 추락 확률은 그림 3과 같이 무인기 고장 빈도에 해당 그리드를 지나는 시간을 곱하여 계산할 수 있다. 이를 수식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$P_{event}(x_d, y_d) = P_{failure/hr} \times T \quad (3)$$

표 2. 무게 클래스에 따른 비행체 고장 빈도 가정  
Table 2. Nominal vehicle failure rates by weight class.

Weight category	Failure rate per flight hour
Micro ( $\leq 0.25$ kg)	1e-2
Mini ( $\leq 2$ kg)	1e-3
Limited ( $\leq 9.5$ kg)	1e-4
Bantam ( $\leq 25$ kg)	1e-5

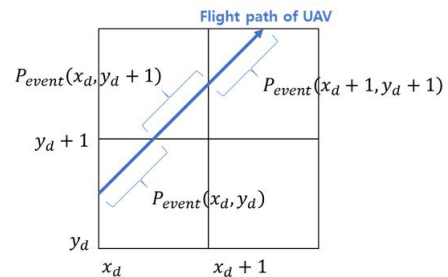


그림 3. 무인기 추락 확률 계산  
Fig. 3. Computation of probability of UAV crash.

무인기가 해당 그리드를 지나가는 시간은 그리드 크기, 무인기 임무 궤적 및 이동 속도를 통해 쉽게 계산할 수 있다.

**2-2 무인기 추락 시 인명과 충돌 확률**

무인기가  $(x_d, y_d)$  위치에서 추락하여 k 번째 그리드에 떨어져 인명과 충돌할 확률(무인기와 충돌하는 인구수)은 기존 논문의 내용을 바탕으로 식 (4)와 같이 표현할 수 있다[6]-[7].

$$P_{impact|event}(k) = S(k) \times \rho(k) \times A_{exp} \times P_{fall|event}(k) \tag{4}$$

식 (4)에서  $S(k)$ 는 shelter factor로 건물 내에 있는 인명은 건물로 인해 무인기 충돌에서 안전하므로 이에 대한 영향을 고려하는 값이다.  $\rho(k)$ 는 인구 밀도이며  $A_{exp}$ 는 무인기 추락 시 충돌에 노출되는 범위의 크기,  $P_{fall|event}(k)$ 는  $(x_d, y_d)$  위치에서 무인기가 추락하여 k 번째 그리드에 떨어질 확률을 의미한다.  $A_{exp}$ 는 무인기 무게로 모델링 된 기존 논문 결과[8]를 활용하였으며  $W$ 는 비행체 무게를 나타낸다.

$$A_{exp} = 0.220464 \times W \tag{5}$$

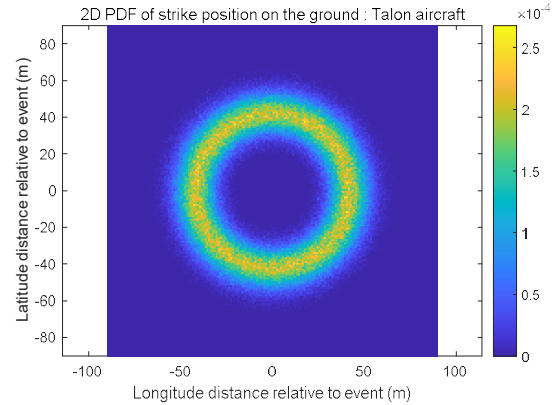
$P_{fall|event}(k)$ 는  $(x_d, y_d)$  위치, 임무 고도, 무인기 속도 등으로 무인기 추락 궤적을 모델링함으로써 도출할 수 있다. 본 논문에서는 [5] 논문에서 제시한 항력과 바람의 영향을 고려한 ballistic fall 모델을 활용하여 무인기 추락 궤적을 도출하였다. Ballistic fall 모델의 입력 파라미터에 불확실성을 표2와 같이 고려하여 시뮬레이션을 통해 2D PDF를 그림 4와 같이 계산하였다. 2D PDF를 계산하고 나면  $P_{fall|event}(k)$ 는 각 그리드에 대해서 식 (6)과 같이 계산된다.

$$P_{fall|event}(k) = \int_{gridk} 2D\ PDF\ dA \tag{6}$$

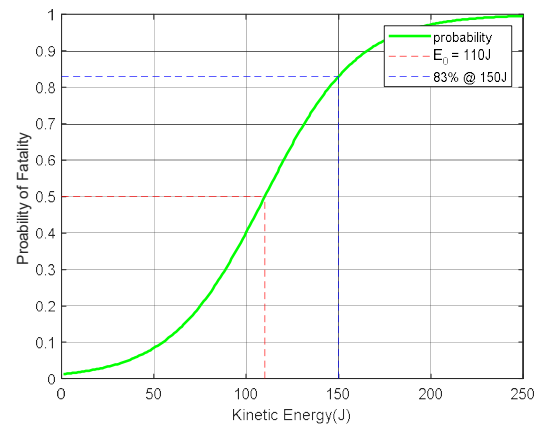
**표 3.** 무인기 및 임무 파라미터

**Table 3.** Parameter for vehicle and mission.

Parameter	Value
Weight	3.75 kg
Frontal area	0.1 m <sup>2</sup>
Drag coefficient	N(0.9, 0.2)
Horizontal speed	N(18, 2.5) m/s
Vertical speed	N(0, 1) m/s
Height	N(50, 5) m
Flight direction	U(0, 2π) rad
Wind direction	U(0, 2π) rad
Wind speed	Rayleigh(1.32565655311) m/s



**그림 4.** 무인기 지상 충돌 위치에 대한 2D PDF  
**Fig. 4.** 2D PDF of UAV ground strike position.



**그림 5.** 무인기 충돌 시 인명 피해 확률 [4]  
**Fig. 5.** Probability of fatality [4].

시뮬레이션에 사용된 무인기 및 임무 파라미터는 표 3과 같다. [5] 논문에서 사용된 Talon 무인기의 파라미터 값을 기반으로 모델링하였으며, 바람 속도는 대전의 2017년 매 시간별 기상 데이터[10]를 활용하여 Rayleigh 분포로 모델링 하였다[11].

**2-3 무인기 충돌 시 인명 피해 확률**

무인기가 인명과 충돌 했을 때 fatality 확률에 대해서는 기존에 여러 연구가 진행된 바 있다.

$$P_{fatality|impact}(k) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(E(k) - E_0))} \tag{7}$$

본 연구에서는 [4]의 결과를 활용하여  $P_{fatality|impact}(k)$ 를 계산하였다. 해당 문서에서는 수식 (7)과 같이  $P_{fatality|impact}(k)$  확률을 충돌 에너지에 대해 모델링 하였다. 식 (7)에서  $\alpha$ 는 0.0397,  $E_0$ 는 110J이며 충돌 에너지  $E$ 는 수식 (8)과 같이 계산할 수 있다. 이를 그림으로 나타내면 그림 5와 같다.

$$E(k) = \frac{1}{2} W V_{impact}^2 \tag{8}$$

수식 (8)에서  $W$ 는 비행체 무게,  $V_{impact}$ 는 무인기가 충돌할 때 속도이다.  $V_{impact}$ 는 앞선 무인기 추락 시뮬레이션에서 추락 위치를 계산할 때 함께 계산할 수 있다.

### III. Ground Risk Map

#### 3-1 인구 밀도 데이터

본 연구에서는 대전시의 인구밀도 데이터, 건폐율 (building to land ratio), 차량 교통량 데이터를 이용하여 무인기 추락 시 충돌에 노출되는 인구 분포를 계산하였다. 참고로 건폐율이란 대지에 건물이 덮고 있는 building coverage를 나타내며 우리나라 건축 규정에 따라 건폐율의 최대값은 90%이다. 건폐율을 활용하여 전체 인구 분포 중 무인기 추락 시 충돌에 노출되는 인구를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 차량에 대한 shelter factor는 고려하지 않았다.

인구밀도 데이터 및 건폐율 데이터는 국토정보플랫폼 국토정보 맵에서 제공하는 데이터를 활용하였으며[12] 차량 교통량 데이터는 한국교통연구원에서 제공하는 Veiv T 데이터를 활용하였다[13]. 인구밀도 맵과 건폐율 맵은 각각 2017년 10월, 11월 데이터를 활용하였으며 차량 교통량 데이터는 한국교통연구원에서 제공하는 2017년 추정교통량 연평균 값을 활용하였다. 맵 데이터베이스 활용 절차는 그림 6과 같다.

차량 교통량 데이터는 QGIS 프로그램을 통해 격자 기반 데이터베이스로 변환하였으며 격자 크기는 20m이다. 인구밀도 및 건폐율의 격자 크기는 100m이지만 차량 교통량 격자 크기에 맞춰 20m 격자로 값을 변환하여 사용하였다. 최종 ground risk map도 20m 격자로 계산하였다. 대전시의 인구 분포 맵과 차량 교통량 맵을 확인하여 보면 20m 격자 당 인구수로 비교하였을 때 그림 9의 차량 내 인구수가 그림 7의 인구 분포 수에 비교하여 1/5 수준으로 무시할만하지 않음을 확인할 수 있다.

차량 교통량 데이터는 자동차, 버스, 트럭에 대해 교통량이 측정되어 있고 각 차량 당 평균 탑승객 수[8]를 기반으로 20m 격자 당 차량 내 인구수를 계산하여 활용하였다.

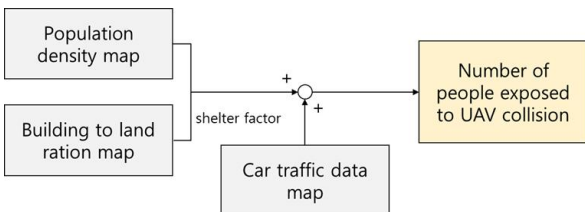


그림 6. 맵 데이터베이스 활용  
Fig. 6. Utilization of map database.

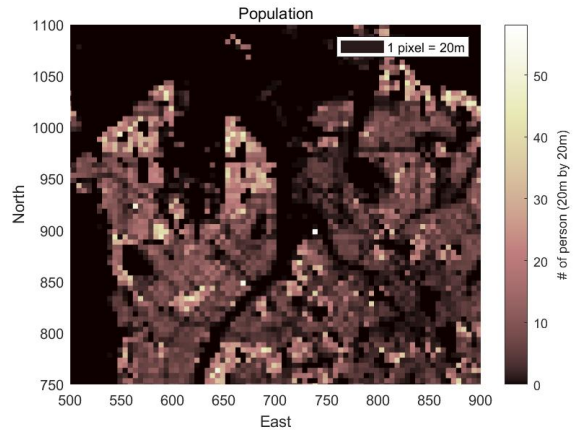


그림 7. 대전시의 인구 분포 맵  
Fig. 7. Population density map of daejeon.

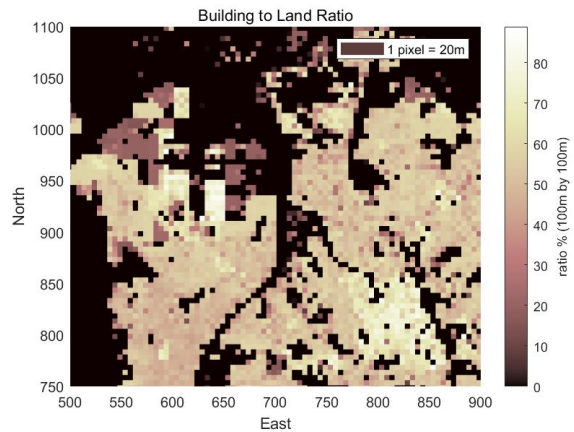


그림 8. 대전시의 건폐율 맵  
Fig. 8. Building to land ratio map of daejeon.



그림 9. 대전시의 차량 교통량 맵  
Fig. 9. Car traffic map of daejeon.

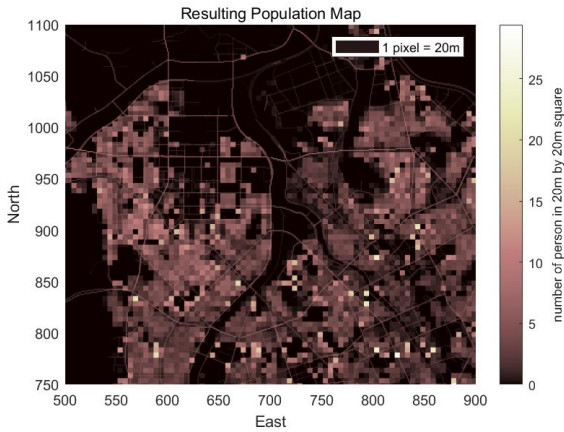


그림 10. 무인기 충돌에 노출되는 인구 수  
 Fig. 10. Number of people exposed to UAV collision.

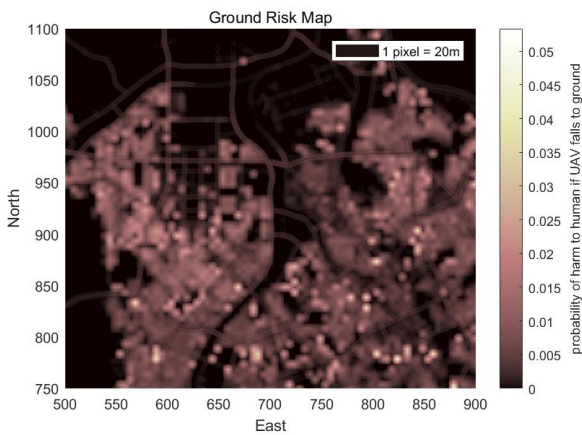


그림 11. 무인기 운용에 대한 지상 충돌 위험 맵  
 Fig. 11. Ground risk map of UAV operation.

인구 밀도, 건폐율, 차량 교통량 데이터를 통해 도출된 무인기 추락 시 충돌에 노출된 인구 밀도는 그림 10과 같다. 그림 7의 인구 분포와 그림 9의 차량 교통량이 함께 고려된 것을 육안으로도 확인할 수 있다.

그림 10을 확인해 보면 대전의 인구, 건물, 차량 상황을 고려하였을 때 20 m × 20 m 정사각형 면적에 많으면 25명 내외의 인구가 지상에 추락하는 무인기와의 충돌에 노출될 수 있음을 확인할 수 있다.

3-2 Ground Risk Map 생성 결과

그림 10의 무인기 충돌에 노출되는 인구수 맵과 수식 (2)를 이용하면  $(x_d, y_d)$  위치 및 임무 고도에서 무인기가 추락했을 때  $P_{fatality|event}(x_d, y_d)$  값을 계산할 수 있고 이를 모든 격자에 대해서 계산하면 그림 11과 같다.

본 연구에서는 그림 11을 ground risk map으로 정의하였다. Ground risk map의 각 점은 해당 위치에서 무인기가 추락했을 때 발생할 수 있는 인명 피해 확률을 의미한다.

그림 11을 보면 그림 10에 비해서 흐릿한 형태를 띠고 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 수식 (2)에서  $P_{fatality|event}(x_d, y_d)$ 를 계산할 때 인구 밀도 맵에 그림 4의 2D PDF를 가지고 weighted averaging하는 것과 유사한 계산을 수행하기 때문이다.

그림 4의 2D PDF는 운용하고자 하는 무인기 특성 및 임무에 따라 다른데 2D PDF 영역이 크면 클수록 인구 밀도 맵이 더 큰 영역에 대해서 weighted averaging이 되는 것이기 때문에 ground risk map은 더욱 흐릿한 형태를 가지게 된다.

IV. 무인기 운영 위험 평가 결과

3장에서 도출한 ground risk map을 바탕으로 그림 12와 같이 같은 출발점, 도착점을 가지는 두 가지 무인기 비행경로에 대하여 지상 충돌 위험을 평가해 보았다. 첫 번째 경로는 출발점에서 도착점까지 가는 최단 경로이며 두 번째 경로는 ground risk가 작은 경로를 나타낸다.

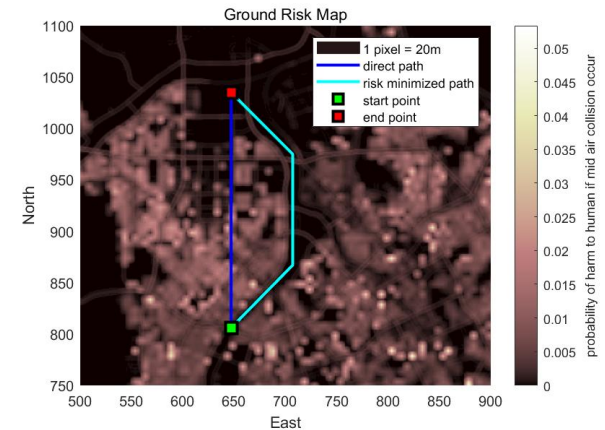


그림 12. 무인기 운용 경로  
 Fig. 12. Paths of UAV operations.

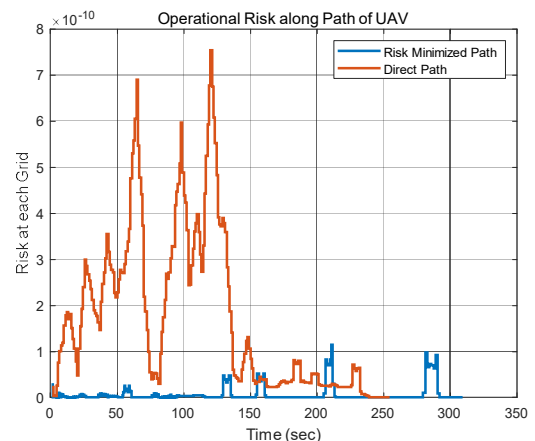


그림 13. 비행경로에 대한 무인기 운영 위험  
 Fig. 13. UAV operation risk along flight path.

표 4. 무인기 지상 충돌 위험 평가

Table 4. Ground risk evaluation of UAV.

Path	Ground risk evaluation
Direct path (fatality per operation)	3.8376e-08
Risk minimized path (fatality per operation)	1.9066e-09

표 5. 무인기 비행시간

Table 5. Flight time of UAV.

Path	Flight time
Direct path	254.4 sec
Risk minimized path	309.4 sec

그림 13이 수식 (1)을 통해 도출된 각 경로에 대한 risk 값이다. 정확히는 수식 (1)에서  $P_{event}(x_d, y_d) \times P_{fatality|event}(x_d, y_d)$  값을 그린 것이다. 이를 모든 경로에 대해서 더하면 두 가지 경로에 대한 지상 충돌 위험을 표 4와 같이 계산할 수 있다.

표 4를 살펴보면 첫 번째 경로에 비해 두 번째 경로의 risk가 20배가량 작은 것을 확인할 수 있다. 또한 두 가지 경로의 비행 시간을 비교해보면 표 5와 같다. 첫 번째 경로는 출발점에서 도착점까지 최단 경로로 비행하기 때문에 당연히 비행시간은 50 초 가량 더 짧지만 지상 충돌 위험이 두 번째 경로에 비해 현저하게 크기 때문에 무인기 운용에 적합하지 않을 수 있다.

이와 같이 본 연구에서는 특정 지역에서 임의의 경로를 비행하는 무인기 운용에 대해서 발생할 수 있는 지상 충돌 위험을 정량적으로 평가하는 지상 충돌 위험 모델을 개발하였다.

본 연구내용을 바탕으로 4장에서와 같이 무인기 경로를 목적에 맞게 설정하는데 활용될 수 있으며 더 나아가 무인기 비행 승인 여부를 내리기 위한 참고 자료로도 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

현재 도심 내 무인기 비행 승인 관련해서는 적절한 국내의 규정이 없는 상황이다. 이에 따라 무인기 운용 위험을 전체 구간에 대한 값 혹은 최대값 등을 적용하여 비행 승인 여부에 적절하게 활용할 수 있다.

## V. 결 론

본 연구에서는 무인기가 운용 중에 고장이 발생하여 추락함으로써 발생할 수 있는 지상 충돌 위험을 정량적으로 계산하기 위한 지상 충돌 위험 모델을 개발하였다. 지상 충돌 위험을 무인기 고장 확률, 무인기가 지상에 추락하여 사람과 충돌할 확률, 무인기가 사람과 충돌했을 때 인명 피해가 발생할 확률로 구분하여 수학적으로 각 확률을 유도하였다.

또한 인구 밀도 맵, 건물 맵, 차량 교통량 데이터베이스를 활용하여 무인기와의 충돌에 노출되는 인구수를 추정하였으며 최종적으로 대전에 대해서 두 가지 무인기 경로에 대한 운영을

가정하여 각 무인기 경로에 대한 지상 충돌 위험을 평가하였다.

하나의 도시 내에서도 위치에 따라 ground risk가 크게 달라지기 때문에 어떤 경로를 설정하느냐에 따라 무인기 운용으로 발생할 수 있는 지상 충돌 위험도 크게 달라짐을 확인하였다. 이를 통해 무인기 운용을 위한 적절한 비행경로를 설정하는데 활용될 수 있을 것으로 예상되며 더불어 무인기 비행 승인을 위한 참고 자료로도 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

## Acknowledgments

본 논문은 2020년도 한국항공우주연구원의 재원으로 항공우주기술시드사업의 지원을 받아 수행된 연구임(FR20M23).

## References

- [1] National Archives. A point in time eCFR system [Internet]. Available: <https://ecfr.federalregister.gov/>.
- [2] CORUS U-space Concept of Operations, EUROCONTROL, Edition 03.00.02, Oct. 2019.
- [3] JARUS Guidelines on Specific Operations Risk Assessment(SORA), Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems, JAR-DEL-WG6-D.04, Jan. 2019.
- [4] J. Breunig, J. Forman, S. Sayed, and L. Audenaerd, Modeling Risk Based Approach for Small Unmanned Aircraft Systems. MITRE CORP MCLEAN VA MCLEAN, Virginia, Technical Report AD1107953, 2018.
- [5] A. la Cour-Harbo, "Ground impact probability distribution for small unmanned aircraft in ballistic descent," in *Proceeding of the 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Athens: Greece, pp. 1442-1451, 2020.
- [6] A. la Cour-Harbo, "Quantifying risk of ground impact fatalities for small unmanned aircraft," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 93, No. 1-2, pp. 367-384, 2019.
- [7] S. Primates, R. Alessandro, and A. la Cour-Harbo, "Ground risk map for unmanned aircraft in urban environments," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 97, No. 3, pp.489-509, 2020.
- [8] H. Lee, L. A. Meyn, and S. Kim, "Probabilistic safety assessment of unmanned aerial system operations," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 35, No. 2, pp. 610-616, 2013.
- [9] S. H. Kim, "Third-party risk analysis of small unmanned aircraft systems operations," *Journal of Aerospace Information Systems*, Vol. 17, No. 1, pp. 24-35, 2020.
- [10] Korea Meteorological Administration. Weather Data

Opening Portal [Internet]. Available: <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltnList.do?pgmNo=36>

- [11] Y. S. Kim, A. Cho, and J. W. Bae, "Navigation performance derivation for safe separation of UAVs for local-area UAS traffic management based on ground risk map", in *Proceedings of ION GNSS+ 2020*, Virtual, pp. 236-261, 2020.

[12] [Internet]. Available: <http://map.ngii.go.kr/ms/map/NlipMap.do?tabGb=statsMap>

[13] [Internet]. Available: [https://viewt.ktdb.go.kr/cong/map/index\\_sidoCodelist.do](https://viewt.ktdb.go.kr/cong/map/index_sidoCodelist.do)



**김연실 (Youn-Sil Kim)**

2009년 2월 : 세종대학교 항공우주공학 (공학사)

2011년 2월 : 서울대학교 항공우주공학 (공학석사)

2016년 2월 : 서울대학교 항공우주공학 (공학박사)

2016년 ~ 현재 : 한국항공우주연구원

※관심분야 : 저고도 무인기 교통관리, GNSS/INS 통합항법, 반송파 기반 정밀 항법