



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 49(9), 781-789(2021)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.9.781

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

도심 지역 비행을 위한 지상 인명 피해 기반 소형무인기 고장 빈도 분석

김연실¹, 배중원²

Small UAV Failure Rate Analysis Based on Human Damage on the Ground Considering Flight Over Populated Area

Youn-Sil Kim¹ and Joong-Won Bae²

Korea Aerospace Research Institute

ABSTRACT

In this paper, we quantitatively analyzed the required UAV(Unmanned Aerial Vehicle) failure rate of small UAV ($\leq 25\text{kg}$) based on the harm to human caused by UAV crash to fly over the populated area. We compute the number of harm to human when UAV falls to the ground at certain descent point by using population density, car traffic, building to land ratio, number of floors of building data of urban area and UAV descent trajectory modeling. Based on this, the maximum allowable UAV failure rate is calculated to satisfy the Target Level of Safety(TLS) for each UAV descent point. Then we can generate the failure rate requirement in the form of map. Finally, we divide UAV failure rate into few categories and analyze the possible flight area for each failure rate categories. Considering the Youngwol area, it is analyzed that the UAV failure rate of at least 10^{-4} (failure/flight hour) is required to access the residential area.

초 록

본 연구에서는 소형무인기($\leq 25\text{kg}$)가 도심 지역에서 비행하고자 할 때 요구되는 고장 빈도를 무인기 추락 시 발생할 수 있는 지상 인명 피해를 기반으로 정량적으로 분석하였다. 도심 지역의 인구 밀도, 차량 교통량, 건폐율, 건물 층수 데이터 및 무인기 추락 궤적 모델링을 이용하여 특정 위치에서 무인기 추락 시 인명 피해를 계산하였고 이를 바탕으로 각 무인기 추락 위치에서 안전성 목표값을 만족하기 위한 최대 허용 가능 무인기 고장 빈도를 계산하였다. 이를 통해 각 무인기 추락 위치별 고장 빈도 요구사항을 맵 형태로 도출할 수 있었다. 최종적으로 최대 허용 가능 무인기 고장 빈도를 몇 구간으로 구분하여 각 구간별 도심 지역 비행 가능 영역을 분석하였다. 영월 지역을 대상으로 했을 때 인구 주거 지역 접근을 위해서는 최소 10^{-4} (failure/flight hour) 이하의 무인기 고장 빈도가 요구됨을 확인하였다.

Key Words : Ground Risk Map(지상 피해 맵), UAV Failure Rate(무인기 고장 빈도), Flight over Populated Area(도심 지역 비행)

1. 서 론

최근 저고도에서 운용되는 소형무인기에 대한 활

용이 크게 증가함에 따라 소형무인기를 기존 공역에 안전하게 통합하는 것에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 무인기가 기존 공역에서 비행할 수 있기 위

† Received : June 9, 2021 Revised : July 19, 2021 Accepted : August 13, 2021

¹ Senior Researcher, ² Principal Researcher

¹ Corresponding author, E-mail : younsil@kari.re.kr, ORCID 0000-0001-6053-8492

© 2021 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

해서는 이에 대한 규정이 마련되어야 하는데 기존의 유인기에 적용되는 규정은 무인기에 적합하지 않기 때문에 무인기에 대한 규정이 새로이 마련되고 있다.

유인기의 경우 감항인증을 통해 비행체의 비행 안전성을 확보한다. 무인기 또한 동일한 수준의 감항인증을 받는다면 유인기와 같은 수준의 안전한 비행이 가능하겠지만 현실적으로 무인기에 유인기 수준의 감항인증을 적용하는 것은 어려운 일이다. 또한 무인기 사고로 발생하는 피해 규모가 유인기 사고에 비해 비교적 작으므로 이에 대한 고려가 필요하다. 이에 대한 방안으로 미국, 유럽에서는 무인기 규정 개발에 위험 기반 접근 방식을 채택하고 있다[1-3]. 위험 기반 방식이란 무인기가 발생시킬 수 있는 위험의 수준에 따라서 무인기에 적용되는 요구사항을 구분하는 것이다. 전 세계 63개국이 참여하는 JARUS (Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems)에서 발간한 무인기 운용 위험 평가 가이드라인인 SORA (specific operation risk assessment)를 살펴보면 무인기 운용으로 발생할 수 있는 지상 피해 및 유인기 위험을 바탕으로 해당 무인기 운용에 적용되는 안전성 목표와 요구사항을 도출함을 확인할 수 있다[4].

무인기 고장 혹은 충돌 등 어떠한 원인으로 무인기가 추락했을 때 발생할 수 있는 위험을 지상 위험(ground risk)이라 하며 ground risk model 관련된 기존 연구들이 많이 진행되어 왔다[5-17].

Ground risk model은 Fig. 1과 같이 몇 개의 하위 요소 모델로 구성되며, 이 하위 요소 모델에는 대표적으로 failure model, impact model, exposure model, harm model 등이 있다[5,6].

Failure model은 무인기 고장 발생에 대한 빈도를 시스템 형상, 환경 조건 등에 따라 모델링한 것이다. 간단히는 무인기 전체에 대한 고장 빈도 값으로 가정하기도 하고 보다 상세히는 비행 단계(이륙, 순항, 착륙) 혹은 추진시스템, 전원시스템, 비행제어시스템, 항법시스템 등 무인기의 서브시스템에 대해 모델링하기도 한다[5].

다음으로 impact model은 무인기가 추락했을 때 지상 추락 위치 및 추락에 영향을 받은 영역을 계산하는 모델이다. 관련된 연구로 Kim, S. H.은 간단한 자유낙하 모델을 활용하였으며[7], Breunig, J., la Cour-Harbo, A., Primatesta, S., Kim, Y. S.은 항력을 고려한 자유낙하 모델을 근사화하여 지상 충돌 확률 분포를 계산하였다[6,8-12]. 이 연구들은 질점 모델을 활용하였고 6DOF (degree of freedom) 모델을 사용한 연구로는 Levasseur, B.와 Lin, C. E.의 연구가 있다[13,14]. 고정익 비행체의 경우 여러 연구에서 글라이딩 하강에 대한 간략한 수식을 통해 비행체 추락 위치 및 영향을 받는 영역을 모델링하였다[9,10,15,16].

Exposure model은 특정 시간, 위치에 인명을 포함한 가치를 가지는 물체의 존재를 나타내기 위한 모델이다. 기존 연구들을 살펴보면 평균 인구밀도 값[6,14,16] 혹은 인구밀도 맵[9-12], 차량 교통량[7,11,12,15] 등이 특정 시간, 위치에 인구 및 차량의 존재를 근사하는 데 활용되었다.

Harm model은 노출 대상(인명 등)에 충격이 가해졌을 때 피해 확률을 나타낸다. 대부분의 연구에서 인명에 대한 피해를 harm model로 모델링하였다. 관련 연구로는 보수적으로 해당 확률을 1로 가정한 연구[15] 및 충돌 시 운동에너지에 대해 인명 피해 확률을 모델링한 연구들이 있다[6,7,9,10-12,17].

이러한 ground risk model은 무인기 운영 시 발생할 수 있는 위험을 정량적으로 평가하는 데 활용될 수 있으며, 또한 무인기 운용에 대한 안전성 목표값을 만족시키기 위한 무인기 성능 요구사항에 대한 기준을 도출하는 데 활용될 수 있다.

본 논문에서는 이와 같은 기존 연구내용들을 바탕으로 국내 도심 지역의 무인기 운용을 고려하여 ground risk model을 바탕으로 target level of safety(TLS) 값을 만족하기 위해 무인기가 가져야 하는 최대 허용 가능 고장 빈도(failure rate)를 정량적으로 분석해 보았다. 영상 촬영, 택배 드론 등에 수요가 많을 것으로 예상되는 25kg 미만의 멀티콥터를 대상으로 하였고 국내 지역 중 강원도 영월군을 무인기 운용 지역으로 가정하고 분석을 수행하였다.

영월군의 인구밀도 맵, 차량 교통량, 건폐율을 활용하여 무인기 추락 시 충돌에 노출되는 인구 밀도를 계산하였고 25kg 이하의 멀티콥터 중 한 비행체를 선정하여 추락 위치 시뮬레이션을 수행하였다.

항력을 고려한 자유낙하 모델에 비행체 속도, 방향, 풍속, 풍향 등의 불확실성을 고려하여 지상 추락 위치에 대한 2D 확률 분포를 계산하였고 해당 위치에 무인기와의 충돌에 노출되는 인구 밀도를 곱함으로써 지상 인명 피해를 계산하였다. 이를 기반으로 ground risk가 TLS보다 작은 값을 가지도록 하는 무인기 고장 빈도를 각 무인기 위치마다 계산함으로써 영월 지역에 대한 최대 허용 가능 무인기 고장 빈도 맵을 도출하였다. 이를 활용하여 각 영월 공역을 비행하기 위한 무인기 고장 빈도 요구사항을 분석해보았다.

본 논문에서 활용한 고장빈도 도출 방법은 2장에 설명되어 있고 3장에는 무인기 최대 허용 가능 고장 빈도 및 고장 빈도 구간별 접근 가능 공역 분석 결과를 제시하였다.

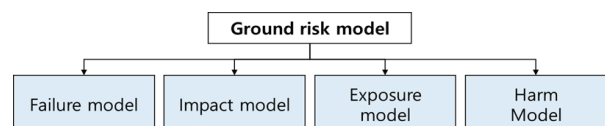


Fig. 1. Main component of ground risk model

II. 무인기 고장 빈도 도출 방법

2.1 고장 빈도 도출 개요

무인기의 고장 빈도 요구사항을 도출하기 위한 방법은 다음과 같다. Fig. 2는 무인기 운용으로 발생하는 ground risk를 도식적으로 표현한 그림이다.

본 논문에서 ground risk는 비행시간 당 사망자 수를 의미하며 ground risk 값이 TLS보다 작도록 하는 무인기 고장 빈도를 도출하였다. Fig. 2와 같이 특정 위치에서 무인기가 추락했을 때 발생할 수 있는 인명 피해를 계산하기 위해서는 지상의 무인기 충돌 위치에 대한 확률 분포 및 해당 충돌 위치의 인구수가 필요하다. 국내 기관에서 제공하는 다양한 데이터베이스를 활용하여 특정 범위에 대한 인구수를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 인구밀도, 차량 교통량, 건폐율 데이터베이스를 활용하였다.

고장으로 인한 무인기 추락으로 발생하는 인명 피해를 수식적으로 나타내면 수식 (1)과 같다. 무인기가 고장나면 반드시 추락한다고 가정하였다.

$$N_{HH} = N_{failure}(x_d, y_d) \times N_{HH \setminus failure}(x_d, y_d) \quad (1)$$

N_{HH} (fatality/flight hour)는 비행시간 당 사망자 수를 나타내고 $N_{failure}(x_d, y_d)$ 는 무인기 고장 빈도 (failure/flight hour), (x_d, y_d) 는 무인기 추락 위치, $N_{HH \setminus failure}(x_d, y_d)$ 는 (x_d, y_d) 위치에서 무인기가 추락했을 때 발생할 수 있는 사망자 수(fatality/failure)를 의미한다.

$$N_{HH} \leq TLS \quad (2)$$

비행시간 당 사망자 수는 수식 (2)와 같이 TLS 값보다 작아야 한다. 본 연구에서 TLS 값은 ICAO 값

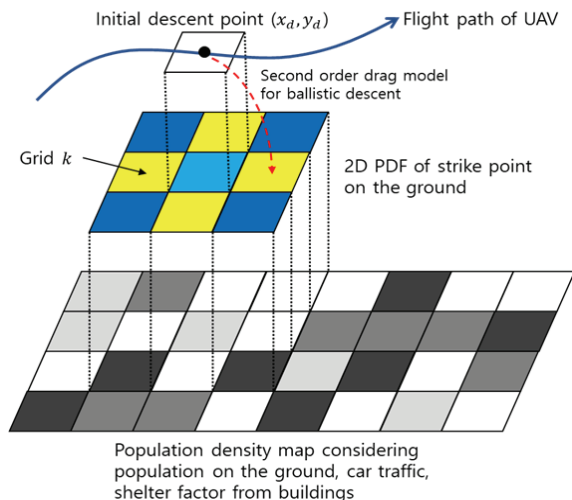


Fig. 2. Concept of UAV ground risk [11,12]

을 바탕으로 10^{-7} (fatality/flight hour)로 설정하였다 [18]. 참고문헌에서 TLS의 분자는 사람이 탑승하는 유인기를 고려하여 number of fatal accidents(적어도 1명의 사망자가 발생하는 사고) 혹은 number of collisions(충돌 시 각 항공기에서 적어도 1명씩 총 2명의 사망자 발생)로 사용했는데 본 연구의 대상인 무인기의 경우 사람이 없는 지역에 추락했을 때는 사망자를 발생시키지 않기 때문에 사고 횟수 대신 사망자 수를 TLS의 분자로 사용하였다.

$$N_{failure}(x_d, y_d) \leq TLS / N_{HH \setminus failure}(x_d, y_d) \quad (3)$$

이를 만족하도록 하는 $N_{failure}(x_d, y_d)$ 를 각 무인기 위치마다 계산하면 무인기 고장 빈도 맵을 도출할 수 있게 된다. 따라서 본 논문에서 failure model은 무인기 전체에 대한 고장 빈도 값으로 가정되었다고 볼 수 있다. $N_{failure}(x_d, y_d)$ 를 도출하려면 수식 (3)에서 TLS 값은 상수 값이므로 $N_{HH \setminus failure}(x_d, y_d)$ 를 정량적으로 도출하는 것이 핵심이다.

2.2 무인기 고장 시 인명 피해

Figure 2에서 그림으로 표현한 바와 같이 $N_{HH \setminus failure}$ 는 지상의 무인기 충돌 위치 격자에 대해 수식 (4)와 같이 나타낼 수 있다[11,12]. 수식 (4)에서 k는 격자 인덱스를 나타내며, 격자 범위는 Fig. 2와 같이 무인기 지상 충돌 2D 확률 분포에 의해 결정되고 격자 간격은 데이터베이스 해상도에 따라 달라진다.

$$N_{HH \setminus failure}(x_d, y_d) = \sum_{Allk} N_{impact \setminus failure}(k) \times P_{HH \setminus impact}(k) \quad (4)$$

수식 (4)에서 $N_{impact \setminus failure}(k)$ 는 무인기가 k번째 격자에 추락하여 충돌하는 인명의 수이고 $P_{HH \setminus impact}(k)$ 는 k번째 격자에 존재하는 인명과 충돌했을 때 사망 확률을 나타낸다. $N_{impact \setminus failure}(k)$ 는 Fig. 1의 impact model과 exposure model을 합친 것으로 다시 수식 (5)와 같이 쓸 수 있다[10-12].

$$N_{impact \setminus failure}(k) = \rho(k) \times A_{exp} \times P_{fall \setminus failure}(k) \quad (5)$$

수식 (5)에서 $\rho(k)$ 는 제곱미터 당 충돌에 노출되는 인구수, A_{exp} 는 무인기 추락 시 영향을 받는 면적, $P_{fall \setminus failure}(k)$ 는 무인기가 k번째 격자에 떨어질 확률을 의미한다. 수식 (5)에서 $A_{exp} \times P_{fall \setminus failure}(k)$ 항이 impact model을 나타내고 $\rho(k)$ 항이 exposure model을 나타낸다.

2.2.1 무인기 추락 시 충돌에 노출되는 인구

제곱미터 당 충돌에 노출되는 인구수 $\rho(k)$ 는 인구 밀도에 차량 교통량 데이터를 바탕으로 계산된 차량 내부의 인구수를 더해 수식 (6)과 같이 계산되었다.

$$\rho(k) = \rho_{pop}(k) \left\{ 1 - S_{building}(k) \times \frac{F_{building}(k) - 1}{F_{building}(k)} \right\} + \rho_{car}(k) \quad (6)$$

$\rho_{pop}(k)$ 의 경우 건물에 의한 보호효과를 적용하기 위해 건물 내의 인명은 모든 층에 고루 분포하며 이 중 최상층의 인명만 층돌에 노출된다고 가정하였다. 또한 기존 연구를 참고하여 4인치 콘크리트 지붕에 의한 층돌에너지 흡수량을 고려하였다[19].

건폐율 데이터를 바탕으로 $\rho_{pop}(k)$ 중 건물 내의 인구수를 도출하고 건물 층수 데이터를 통해 최상층의 인구수를 계산하였다. 이렇게 계산된 건물 내 최상층 인구에는 지붕에 의한 층돌에너지 흡수량을 제외한 나머지 층돌에너지가 가해진다고 가정하였다.

수식 (6)에서 $S_{building}(k)$ 는 건폐율 값이고 $F_{building}(k)$ 는 건물의 층수를 나타낸다.

$\rho_{car}(k)$ 의 경우 참고 문헌에 따라 차량 지붕 steel에 의한 에너지 흡수량을 고려하여 보호효과를 적용해 주었다[19].

2.2.2 무인기 추락 시 층돌에 노출되는 면적

무인기 추락 시 영향을 받는 면적 A_{exp} 를 계산하는 방법은 무게에 따른 모델링을 활용하는 방법, 기하학적 모델을 바탕으로 계산하는 방법 등이 존재하며 기존 논문에 따르면 무게에 따른 모델이 기하학적 모델보다 실제 결과를 더 잘 모사하는 것으로 나타났다[5,7]. 따라서 본 논문에서는 A_{exp} 를 계산하는 데 기존 논문에서 사용한 무게에 따른 모델링을 활용하였다[7].

$$A_{exp} = 0.220464 \times W \quad (7)$$

W 는 무인기 무게를 kg으로 나타낸 값이다.

2.2.3 무인기 추락 위치 확률 분포

다음으로 무인기가 k 번째 격자에 떨어질 확률 $P_{fall \mid failure}(k)$ 는 무인기 추락 궤적 모델링을 활용하여 무인기 지상 충돌 위치에 대한 2D PDF(probability distribution function)를 계산하고 이를 k 번째 격자 구역에 대해 적분함으로써 계산할 수 있다.

$$P_{fall \mid event}(k) = \int_{gridk} 2D \text{ PDF } dA \quad (8)$$

2D PDF 계산에 사용된 무인기 추락 궤적 모델링은 다음과 같다. 본 논문에서는 멀티콥터의 추락 궤적을 계산하기 위해 기존 논문에서 고려한 항력을 고려한 자유낙하 모델을 사용하였다[8-12].

$$\vec{m}\vec{v} = \vec{m}\vec{g} - c|\vec{v}|\vec{v} \quad (9)$$

수식 (9)에서 c 는 항력계수와 관련된 상수로 수식

(10)과 같다. \vec{v} 는 속도 벡터, m 은 무게, \vec{g} 는 중력가속도 벡터를 나타낸다.

$$c = \frac{1}{2} \rho_{air} A C_d \quad (10)$$

ρ_{air} 는 공기 밀도(kg/m³), A 는 frontal area, C_d 는 항력 계수이다. 본 논문에서는 중력 가속도 9.81 m/s², 공기 밀도 1.225 kg/m³을 가정하였다.

수식 (9)는 analytic solution이 없기 때문에 본 논문에서는 기존 논문에서 사용한 다음과 같은 근사식을 활용하였다[8-12].

$$\begin{aligned} m\dot{v}_x &= -c \max(v_x, v_z) v_x \\ m\dot{v}_z &= mg - c |v_z| v_z \end{aligned} \quad (11)$$

수식 (11)에서 v_x 는 비행체 종 방향 속도, v_z 는 수직 방향 속도를 나타낸다. 본 논문에서 무인기 수직 방향 속도는 아래 방향이 +이며 무인기 추락 시부터 지상 충돌 시까지 +값을 가진다.

수식 (11)의 analytic solution으로 도출된 무인기 추락 위치에서 지상 충돌 위치까지 종 방향으로 움직인 거리는 다음과 같다.

$$t_c = \frac{m(-\Gamma H_d + v_{x,i}(1 + H_d^2))}{mg - cv_{x,i}\Gamma H_d} \quad (12)$$

$$t_{impact} = \frac{\Gamma}{g} \cosh^{-1} \left(\exp \left(\frac{c}{m} z(0) + G_d \right) - H_d \right) \quad (13)$$

t_c 는 수식 (11)에서 v_x 와 v_z 가 같아지는 시간이며 t_{impact} 는 무인기가 지상에 충돌하기까지 걸린 시간을 나타낸다. t_c 가 t_{impact} 보다 크거나 작음에 따라서 종 방향 거리를 계산하는 식이 달라진다. t_c 와 t_{impact} 는 수식 (12), (13)과 같이 계산할 수 있다.

$v_{x,i}$ 는 종 방향 초기속도, $v_{z,i}$ 는 수직 방향 초기속도를 나타내며 $z(0)$ 는 무인기 운용 고도를 나타낸다.

수식 (12), (13)에서 Γ 는 terminal velocity이며, γ 는 $1/\Gamma$ 을 의미한다. Γ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\Gamma = \sqrt{mg/c} \quad (14)$$

수식 (12), (13)에서 H_d , G_d 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H_d &= \tanh^{-1}(v_{z,i}\gamma) \\ G_d &= \ln(\cosh(H_d)) \end{aligned} \quad (15)$$

$t_c < t_{impact}$ 일 때 종 방향 이동거리 x_{impact} 는 수식 (16)과 같다.

$$x_{impact} = \frac{m}{c} \ln \left(1 + \frac{c}{m} v_{x,i} t_{impact} \right) \quad (16)$$

$t_c \leq t_{impact}$ 일 때 종 방향 이동거리는 수식 (17)과 같다.

$$x_{impact} = \frac{m}{c} \ln \left(1 + \frac{c}{m} v_{x,i} t_c \right) + \frac{\Gamma}{g} v_{x,c} e^{G_c (\tan^{-1}(\sinh(g\gamma(t_{impact} - t_c) + H_c)) - \sin^{-1}(\gamma v_{z,c}))} \quad (17)$$

수식 (17)의 각 파라미터는 다음과 같다.

$$v_{x,c} = \frac{m v_{x,i}}{m + v_{x,i} t_c} \quad (18)$$

$$v_{z,c} = \Gamma \tanh(g\gamma t_c)$$

$$H_c = \tanh^{-1}(v_{z,c} \gamma) \quad (19)$$

$$G_c = \ln(\cosh(H_c))$$

이와 같이 계산된 무인기의 종 방향 이동 거리에 바람의 영향을 수식 (20)과 같이 고려하였다[8]. 무인기 추락 시간 동안 공기는 동일한 속도, 방향으로 움직인다고 가정하였다.

$$\begin{bmatrix} x_E \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{impact} \\ 0 \end{bmatrix} + w \begin{bmatrix} \cos\psi \\ \sin\psi \end{bmatrix} t_{impact} \quad (20)$$

수식 (20)에서 (x_E, y_N) 는 수식 (16), (17)을 통해 계산된 종 방향 이동거리에 바람의 영향까지 고려된 무인기의 East, North 지상 충돌 위치를 나타낸다. θ 는 비행 방향, w 는 풍속, ψ 는 풍향을 의미한다. 자세한 유도과정은 참고 문헌에서 확인할 수 있다[8].

2.2.4 무인기 충돌 시 인명피해 확률

무인기 충돌 시 인명피해 확률 $P_{HH|impact}(k)$ 는 무인기가 k번째 격자에 추락하여 사람과 충돌했을 때 인명 피해 확률로 참고 문헌 내용을 바탕으로 수식 (21)을 이용하여 계산하였다[5,6,11,12,17].

$$P_{HH|impact}(k) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(E(k) - E_0))} \quad (21)$$

수식 (21)에서 E_0 는 50%의 인명 피해를 발생시키는 운동에너지로 본 논문에서는 103 J을 사용했으며, α 는 0.09이다[17]. $E(k)$ 는 k번째 격자에 충돌하는 무인기의 평균 충돌에너지 값이다.

본문 2.2.1에서 설명한 바와 같이 $E(k)$ 를 계산할 때 건물에 의한 보호효과를 고려하기 위해 건물용 데이터 및 건물 층수 데이터를 활용하여 건물 내 무인기와의 충돌에 노출되는 인구를 계산하였다. 건물 내의 인구는 모든 층에 고루 분포되어 있고 이 중 최상층에 있는 인구가 무인기와의 충돌에 노출되어 있다고 가정하였으며, 4인치 콘크리트 지붕의 에너지 흡수량 10,000J[19]을 고려해주었다.

차량의 경우 차량 지붕 steel에 의한 에너지 흡수

량 200J[19]을 제외한 나머지 에너지가 인명에 가해진다고 가정하여 보호효과를 적용해주었다.

III. 무인기 고장 빈도 도출 결과

3.1 무인기 추락 위치 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 무인기 추락 궤적 모델링을 위해 25kg 이하의 소형무인기 중 한 비행체를 선정하였다.

본 연구에서 선정한 무인비행체는 미국 Aurelia Aerospace 사의 X6 pro 모델(Fig. 3)이다. X6 pro는 최대 5kg에 해당하는 장비를 탑재할 수 있고 배터리 포함 기체 무게 10.346kg, 최대 이륙 중량 15.345kg의 스펙을 가지며 최대 15m/s의 속도로 비행할 수 있다[20]. Aurelia Aerospace 사에 따르면 X6 pro 모델은 NATO가 현장의 군인들에게 탄약을 전달하는 드론으로 사용된 바 있으며, 캐나다 북부의 광물 조사 임무에도 활용된 바 있다[20].

Table 1은 본 연구에서 활용한 무인기 추락 궤적 시뮬레이션 파라미터이다. Table 1에서 N은 $N(mean, \sigma)$ 인 가우시안 분포를 의미하고 U는 $U(lower\ lim, upper\ lim)$ 인 균일 분포를 의미한다. Exp는 $Exp(\lambda)$ 인 지수 분포를 나타낸다.



Fig. 3. Aurelia Aerospace X6 pro drone [20]

Table 1. UAV descending trajectory simulation parameter

Parameter	Value
Weight	15 kg
Frontal area	0.12 m ²
Drag coefficient	N(0.7, 0.2)
Horizontal speed	U(5, 15) m/s
Vertical speed	0 m/s
Height	100 m
Flight direction	U(0, 2 π) rad
Wind direction	U(0, 2 π) rad
Wind speed	Exp(1.0624) m/s

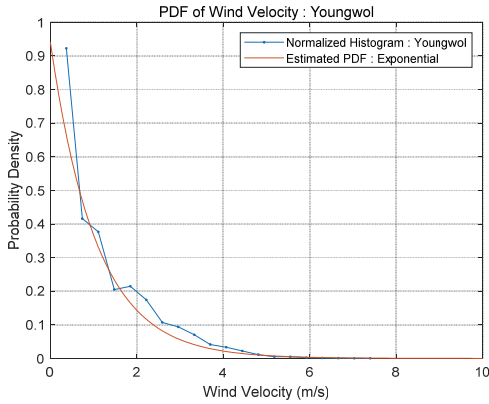


Fig. 4. Wind velocity distribution (Youngwol)

기체 무게, 형상, 속도는 X6 pro의 스펙을 사용하였으며 항력 계수는 참고 문헌에서 멀티콥터 형태의 무인기에 적용한 값을 활용하였다[10]. 무인기 비행 방향 및 풍향은 0에서 360까지 균일 분포를 가정하였다. 풍속은 영월 지역의 1년간의 풍속 데이터[21]를 지수 분포로 근사하여 적용하였다. Fig. 4는 2017년 영월 지역 풍속 데이터의 히스토그램 및 근사화된 분포를 나타낸다.

영월 지역 풍속 모델에 사용된 지수 분포의 확률 밀도 함수는 수식 (22)와 같다.

$$f(w) = \lambda e^{-\lambda w}, \quad w \geq 0 \tag{22}$$

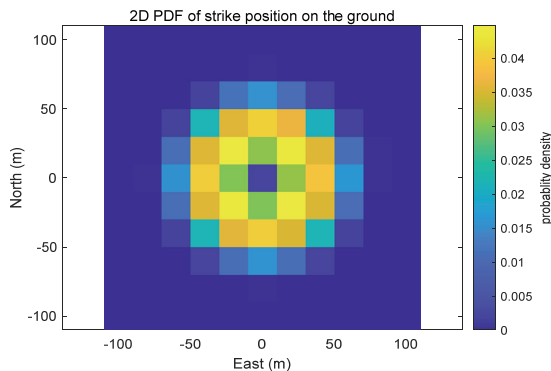


Fig. 5. PDF of UAV strike point on the ground

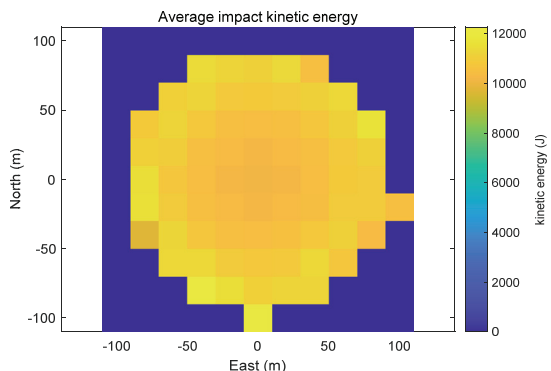


Fig. 6. Average impact energy

Figure 5는 Table 1의 시뮬레이션 파라미터를 사용하여 도출한 무인기 지상 충돌 위치에 대한 확률 분포이다. (0, 0) 점이 무인기의 초기 수평 위치이다.

Figure 6은 각 격자에 충돌하는 비행체의 평균 운동에너지를 나타낸다. 최대 약 12,000 J 가량의 충돌 에너지가 가해짐을 확인할 수 있다. 2D PDF 및 평균 충돌에너지 값은 20m 격자에 대해 계산되었다.

3.2 무인기 추락 시 충돌에 노출되는 인구 계산 결과

다음으로는 수식 (6)의 무인기 추락 시 충돌에 노출되는 인구밀도 $\rho(k)$ 를 구하는 과정을 설명한다.

Figure 7은 본 논문에서 대상으로 한 영월군의 지도이다[22]. 지도에서 보라색으로 표시된 내용은 100m 격자 내에 포함된 인구수를 나타낸다. 영월군의 경우 100m 격자 내에 최대 827명의 인구가 존재할 수 있음을 알 수 있다.

본 논문에서 사용된 좌표계는 UTM-K (GRS80)로 EPSG (European Petroleum Survey Group) code 5179 좌표계를 사용하였다.

Figure 8은 2017년 10월의 인구밀도 데이터, Fig. 9는 2017년 11월의 건폐율 데이터, Fig. 10은 2017년 11월의 건물의 층수 데이터, Fig. 11은 2017년 연평균 차량 교통량 데이터를 각각 나타낸 그림이다.

차량 교통량 데이터는 한국교통연구원에서 운영하는 ViewT 홈페이지에서 제공받았다[23]. 한국교통연구원에서 추정된 각 도로의 차종별(승용차, 버스, 트럭) 추정교통량에 차종별 평균 탑승자수(Table 2)를 고려하여 도로에 대한 인구밀도를 계산하였다[7].

참고로 Figs. 8, 9, 10의 제공 데이터 해상도는 100m 이나 본 논문에서 사용한 격자크기에 맞춰 20m 격자에 대한 값으로 변환하여 사용하였다. 100m 격자 내에 인구분포가 균일하다고 가정함으로써 100m 격자에 대한 인구밀도를 25로 나누어 20m by 20m 내의 인구밀도를 계산할 수 있다.

이와 같이 인구밀도, 건폐율, 건물 층수, 차량 교통량 데이터를 활용하여 수식 (6)을 바탕으로 무인기 추락 시 충돌에 노출되는 인구수를 계산하였다. Fig. 12

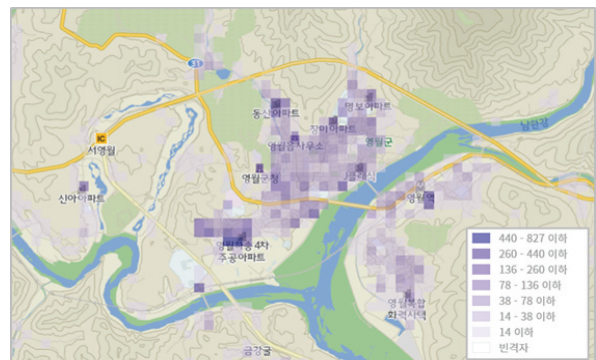


Fig. 7. Interested mission area [22]

Table 2. Average number of passengers per vehicle type [7]

Vehicle type	Number of passengers
Passenger vehicle	1.54
Bus	18.37
Truck	1.39

는 결과적으로 계산된 충돌에 노출되는 인구수이다. Figs. 8, 11, 12는 모두 20m 격자 내에 존재하는 인구수를 나타내며 log10에 대한 값으로 표현되었다.

Figure 12의 결과를 살펴보면 영월군의 경우 20m 격자 내에 최대 10명가량의 무인기와의 충돌에 노출되는 인구가 존재함을 확인할 수 있다.

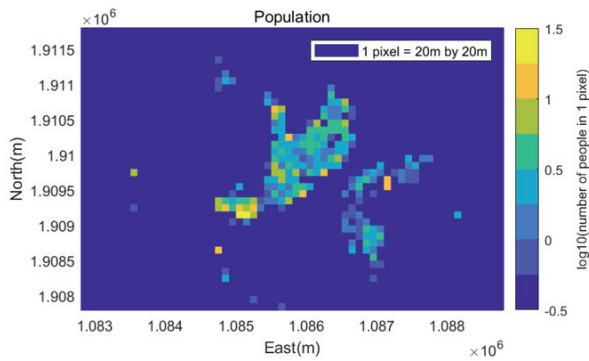


Fig. 8. Population density map

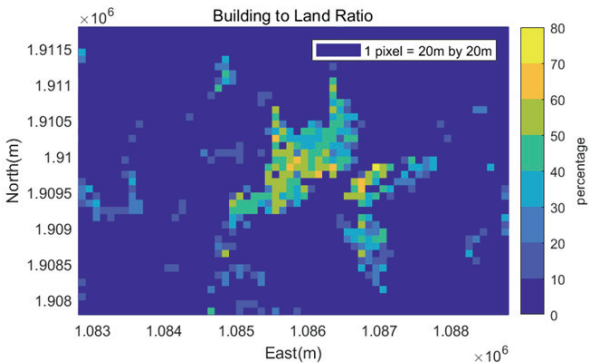


Fig. 9. Building to land ratio map

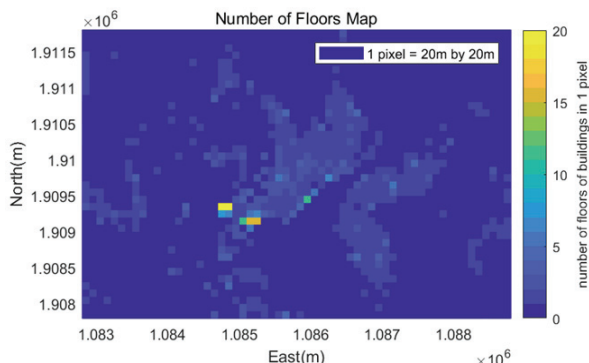


Fig. 10. Number of floors of building map

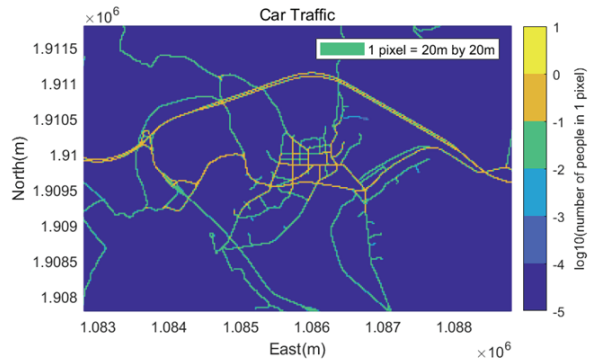


Fig. 11. Car traffic data map

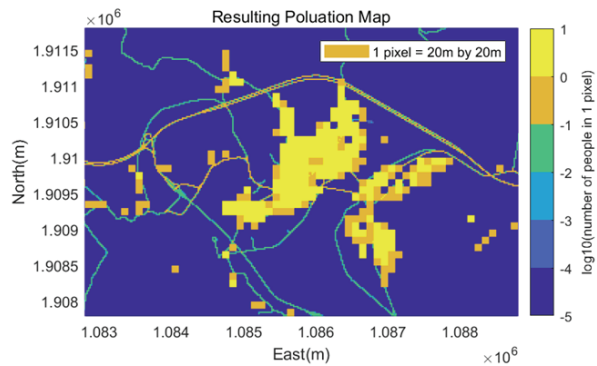


Fig. 12. Number of people exposed to UAV collision

3.3 최대 허용가능 고장 빈도 맵 생성 결과

2장의 수식에 따라 $N_{HH|failure}(x_d, y_d)$ 를 각 (x_d, y_d) 마다 계산하면 해당 위치에서 무인기가 추락하여 발생할 수 있는 사망자 수를 Fig. 13과 같이 계산할 수 있다. $N_{HH|failure}(x_d, y_d)$ 는 log10에 대한 값으로 표현되었다.

Figure 12 및 Fig. 13을 살펴보면 무인기와의 충돌에 노출되는 인구수가 많은 영역의 경우 해당 영역에 무인기가 추락했을 때 최대 0.1명의 사망자가 발생할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 13 및 수식 (3)을 바탕으로 TLS 값을 만족하기 위한 비행시간당 무인기 고장 횟수는 Fig. 14와 같이 도출되었다. 비행시간 당 고장 횟수는 log10에 대한 값으로 표현되었다.

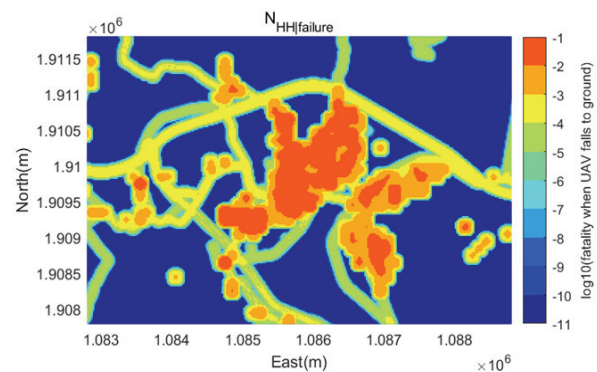


Fig. 13. Fatality when UAV falls to the ground

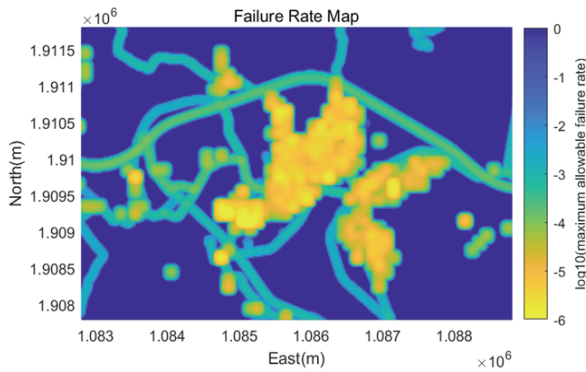


Fig. 14. Resulted failure rate (failure/flight hour) map

Figure 14를 살펴보면 영월 지역의 모든 공역을 비행하기 위해서는 비행시간당 10^6 보다 작은 비행체 고장 성능이 요구됨을 확인할 수 있다. 비행시간당 10^6 의 고장 횟수는 약 114년의 비행동안 1번의 고장이 발생하는 수준이다.

3.4 고장 빈도 구간 별 비행가능 영역 분석

다음으로는 무인기 고장 빈도 구간을 Fig. 15와 같이 구분하여 해당 무인기 고장 빈도를 가지는 무인기가 비행할 수 있는 영역을 분석하여 보았다.

본 논문에서는 무인기가 가지는 최소 고장 빈도 성능을 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 로 가정하였다. 고장 빈도 구간은 $10^{-1} \sim 10^{-2}$, $10^{-2} \sim 10^{-3}$, $10^{-3} \sim 10^{-4}$, $10^{-4} \sim 10^{-5}$, $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 의 다섯 구간으로 나누었다. Fig. 15의 고장 빈도 구간에서 작은 값의 고장 빈도를 가져야 해당 공역을 모두 비행할 수 있다고 보면 된다.

Figure 15를 살펴보면 인구 밀집 지역을 비행하기 위해서는 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 의 고장 빈도 성능이 요구됨을 알 수 있다. 즉, 영월의 모든 공역을 비행하기 위해서는 10^{-6} 이하의 고장 빈도 성능을 가져야 한다는 의미이다.

Figure 8과 비교했을 때보다 인구가 덜 밀집한 지역도 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 의 고장 빈도 성능이 요구되며 Fig. 11과 비교했을 때 도로 위 공역의 경우 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 의 고장 빈도 성능이 요구됨을 확인하였다.

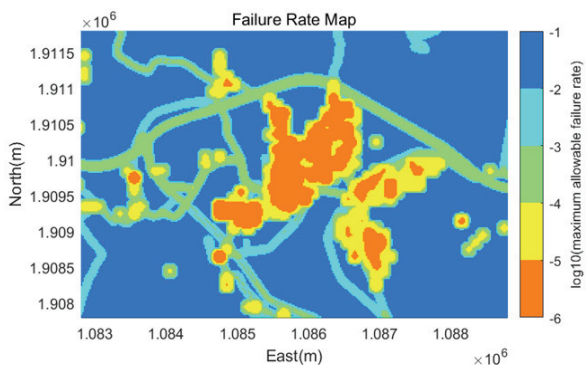


Fig. 15. Accessible airspace according to failure rate

Figure 12와 비교하여 사람이 거주하는 지역은 Fig. 14에서 노란색으로 표시된 경계선과 유사하며 이에 접근하기 위해 무인기는 최소 10^{-4} 이하의 고장 빈도 요구사항을 만족해야 함을 알 수 있다. 그러나 대부분의 도심지 중심의 경우 10^{-5} 이하의 고장 빈도 성능이 요구되기 때문에 10^{-4} 이하의 고장 빈도 성능으로 접근할 수 있는 도심 지역은 매우 한정적이다. 10^{-4} 의 고장 빈도 성능은 1년의 비행 시간동안 약 1번의 고장이 발생하는 수준을 나타내며 10^{-5} 의 고장 빈도 성능은 11년의 비행 시간동안 약 1번의 고장이 발생하는 수준이다.

더불어 인거 주거 지역과 떨어진 도로 위를 비행하는 경우에도 대부분의 도로에서 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 가량의 고장 빈도 성능이 요구되어 도로 위를 가로지르는 비행경로는 가지는 무인기 또한 적절한 고장빈도 성능이 만족되어야 함을 확인할 수 있었다.

최종적으로 Fig. 15의 결과로부터 10^{-6} 이하의 고장 빈도 성능을 가져야만 영월 지역의 모든 공역을 비행 가능하다는 것을 고장 빈도 맵을 통해 정량적으로 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 소형무인기의 도심 지역 비행을 위해 안전성 목표값을 바탕으로 무인기 고장 빈도 성능 요구사항을 정량적으로 분석할 수 있는 방안을 제안하였다.

인구 밀도, 건폐율, 건물 층수, 차량 교통량 데이터 베이스를 활용하여 무인기 추락 시 충돌에 노출되는 인구수를 계산하였고 25kg 이하의 소형무인기 중 한 멀티콥터 기체를 선정하여 무인기 추락 궤적을 모델링하였다. 또한 영월 지역의 기상데이터를 무인기 추락 위치 분포를 계산하는 데 적용하였다. 이를 통해 무인기가 특정 위치에서 추락했을 때 발생할 수 있는 사망자 수를 도출할 수 있었다.

이에 더불어 TLS 값을 설정하고 무인기 추락 시 사망자 수를 맵 형태로 표현한 결과를 바탕으로 TLS를 만족하기 위한 무인기 고장 빈도 요구사항을 각 무인기 추락 위치에 대해 도출할 수 있었다. 결과적으로 무인기 위치에 대한 최대 허용 가능 무인기 고장 빈도값을 계산함으로써 고장 빈도 맵을 생성하였고 이를 기반으로 무인기의 고장 빈도 성능에 따라 특정 지역에서 해당 무인기가 접근할 수 있는 공역을 분석해보았다.

영월 지역을 대상으로 했을 때 최대 15m/s로 비행할 수 있는 15kg 멀티콥터의 경우 10^{-6} 이하의 고장 빈도 성능을 가져야 해당 지역의 모든 공역을 비행할 수 있음을 알 수 있었고 또한 인구 주거 지역을 접근하기 위해서는 최소 10^{-4} 이하의 고장 빈도 성능이 요구됨을 확인할 수 있었다.

본 논문의 연구 결과는 도심 지역 비행을 위해 무인기가 가져야 하는 안전성 요구사항을 정량적으로 도출하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호: 21USTR-B127901-05)

References

- 1) *Concept of Operations for Drones - A Risk Based Approach to Regulation of Unmanned Aircraft*, EASA, Cologne, 2015.
- 2) Ryan, W., "Type and Airworthiness Certifications," *FAA UAS Symposium*, 2017.
- 3) *CORUS U-space Concept of Operations*, 03.00.02 Ed., SESAR, Brussels, 2019.
- 4) *JARUS Guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA)*, 2nd Ed., JARUS, 2019.
- 5) Washington, A., Clothier, R. A. and Silva, J., "A review of unmanned aircraft system ground risk models," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 1, No. 95, 2017, pp. 24~44.
- 6) Breunig, J., Forman, J., Sayed, S., Audenaerd, L., Branch, A. and Hadjimichael, M., *Modeling Risk-Based Approach for Small Unmanned Aircraft Systems*, MITRE Corporation, McLean, 2018.
- 7) Kim, S. H., "Third-Party Risk Analysis of Small Unmanned Aircraft Systems Operations," *Journal of Aerospace Information Systems*, Vol. 17, No. 1, 2020, pp. 24~35.
- 8) la Cour-Harbo, A., "Ground impact probability distribution for small unmanned aircraft in ballistic descent," *Proceeding of the 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2020, pp. 1442~1451.
- 9) la Cour-Harbo, A., "Quantifying Risk of Ground Impact Fatalities for Small Unmanned Aircraft," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 93, No. 1, 2019, pp. 367~384.
- 10) Primatesta, S., Rizzo, A. and la Cour-Harbo, A., "Ground Risk Map for Unmanned Aircraft in Urban Environments," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 97, No. 3, 2020, pp. 489~509.
- 11) Kim, Y. S., Cho, A. and Bae, J. W., "Navigation Performance Derivation for Safe Separation of UAVs for Local-area UAS Traffic Management Based on Ground Risk Map," *Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2020)*, 2020, pp. 236~261.
- 12) Kim, Y. S., "Ground Risk Model Development for Low Altitude UAV Traffic Management," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 24, No. 6, 2020, pp. 471~478.
- 13) Levasseur, B., Bertrand, S., Raballand, N., Viguier, F. and Goussu, G., "Accurate ground impact footprints and probabilistic maps for risk analysis of UAV missions," *2019 IEEE Aerospace Conference*, March 2019, pp. 1~10.
- 14) Lin, C. E. and Shao, P. C., "Failure analysis for an unmanned aerial vehicle using safe path planning," *Journal of Aerospace Information Systems*, Vol. 17, No. 7, 2020, pp. 358~369.
- 15) Bertrand, S., Raballand, N. and Viguier, F., "Evaluating ground risk for road networks induced by uav operations," *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, June 2018, pp. 168~176.
- 16) Zhang, X., Liu, Y., Zhang, Y., Guan, X., Delahaye, D. and Tang, L., "Safety assessment and risk estimation for unmanned aerial vehicles operating in national airspace system," *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 2018, Article ID. 4731585, 2018, pp. 1~11.
- 17) Shelley, A. V., "A model of human harm from a falling unmanned aircraft: Implications for UAS regulation," *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, Vol. 3, No. 3, 2016, pp. 1~42.
- 18) Lin, X., Fulton, N. and Westcott, M., "Target level of safety measures in air transportation - Review, validation and recommendations," *Proceedings of the IASTED International Conference*, October 2009, pp. 222~229.
- 19) Hardwick, M. J., Hall, J., Tatom, J. W. and Baker, R. G., *Approved Methods and Algorithms for DOD Risk-Based Explosives Siting*, 4th Revision, U.S. Department of Defense Explosives Safety Board, VA, 2009, TR No. 14, p. 75.
- 20) [Internet]. Available: <https://aurelia-aerospace.com/product/aurelia-x6-pro/>
- 21) [Internet]. Available: <https://data.kma.go.kr/>
- 22) [Internet]. Available: <http://map.ngii.go.kr/>
- 23) [Internet]. Available: <https://viewt.ktdb.go.kr/>