

## 무인항공기 SORA 위험평가를 위한 지상위험도 및 완화수단 분석

권태화<sup>†</sup> · 장세원 · 전승목

항공안전기술원

## A Study on Ground Risk and Mitigation in the SORA Methodology

Taehwa Kwon<sup>†</sup>, Sewon Chang, Seungmok Jeon

Korea Institute of Aviation Safety Technology

## Abstract

In the SORA methodology developed for the operational risk assessment of a specific category of operation of a UAS, the ground and the air risk levels are determined, and a SAIL indicating the level of assurance and integrity for the corresponding risk is assigned, and accordingly, the operational safety level for the proposed operation. Objectives should be demonstrated at an appropriate level of robustness. Because of the nature of the specific category of operation, people on the ground are the first risk subjects to be considered. The resulting ground risk class plays an important role in the allocation of SAIL. In this paper, the impact on SAIL and OSO according to the final risk level and the reduction of the level through the determination of the ground risk level and the application of mitigation measures among risk assessments for specific categories of UAV operation was investigated.

## 초 록

특정범주 무인항공기 운용의 위험평가를 위해서 개발된 SORA 방법론에서는 지상 및 공중위험 등급을 결정하고 해당 위험도에 대한 특정보증 무결성 수준을 나타내는 SAIL이 할당되어 제안된 운용에 대한 운용 안전도 목표를 적절한 강건도 수준으로 입증해야 한다. 인명의 수송은 제외하는 특정범주 무인항공기 운용의 특성상 지상의 인명이 가장 먼저 고려되어야 하는 위험의 대상이며, 여기서 평가된 지상 위험도는 공중위험도와 함께 SAIL의 할당에서도 중요한 역할을 한다. 위험도는 초기에 결정된 등급에 세 가지 종류의 완화수단이 적용되는 것으로 등급이 경감되어 최종 등급이 결정된다. 본 논문에서는 무인항공기의 특정범주 운용에 대한 위험평가 중에서 지상위험 등급의 결정과 완화수단의 적용을 통한 등급의 감소 및 최종 위험 등급에 따른 SAIL과 OSO에 미치는 영향에 대해서 분석하였다.

**Key Words** : UAS(무인항공기 시스템), Risk Assessment(위험평가), SORA(특정범주 운용 위험평가), Ground Risk Class(지상위험도)

## 1. 서 론

전통적으로 유인항공기에서는 탑승한 승객의 안전을 위해서 시스템의 신뢰성에 기반한 항공기의 형식증명을 통해서 안전도를 확보한다. 탑승한 조종사가 없이 운용되는 항공기로 정의되는 무인항공기의 경우, 특히 민간 무인기는 운용뿐 아니라 설계의 다양성으로 인해

서 유인항공기와 동일한 접근방식을 적용하지 않고 운용의 위험도에 따라서 인증방식이 달라진다. 특히, 탑승자가 허용되지 않는 특정범주(Specific Category) 무인항공기는 해당 운용의 위험도 수준에 비례하는 완화수단의 적용이 필요하며, 이를 위해서 무인항공기 전문가 그룹인 JARUS에서는 위험도 평가를 위한 방법론인 SORA(Specific Operations Risk Assessment)를 개발하였다[1].

SORA에서는 지상위험과 공중위험 등급을 설정하고 이에 따라서 할당되는 위험도 수준에 따라서 운용안전

Received: Mar. 05, 2022 Revised: May 02, 2022 Accepted: May 06, 2022

<sup>†</sup> Corresponding Author

Tel: +82-32-727-5879, E-mail: kwonth@kiast.or.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

목표를 만족해야 하는 강건도 수준이 결정된다. 탑승한 조종사가 없으며, 또한 특정범주 운용의 경우 탑승객이 허용되지 않는 특성상 지상의 인명에 대한 위험도 수준이 특히 중요한 의미를 갖는다.

본 논문에서는 무인항공기의 특정범주 운용에 대한 위험도평가 방법론인 SORA의 10단계 프로세스 중에서 지상위험 등급의 결정에 필요한 매개변수의 역할과 의미, 그리고 이와 같이 결정된 위험등급을 감소시킬 수 있는 완화수단의 개념과 적용에 대해서 분석하였다. 또한, 지상위험 등급이 특정보증 무결성 수준과 운용안전 목표에 미치는 영향 분석을 통해서 향후 국내 무인항공기 위험평가 방안의 수립에서 고려해야 할 사항에 대해서 제시하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 무인항공기 위험평가 개요

모든 항공기는 안전한 운용 또는 운항을 위해서 적절한 수준의 안전도가 입증되어야 한다. 이때 안전이란 위험이 없는 상태를 의미하며, 이를 입증하기 위한 과정을 항공기의 감항성(Airworthiness)에 대한 인증(Certification)이라고 할 수 있다[2].

무인항공기의 경우 설계 및 운용의 다양성으로 인해서 기존의 유인항공기와는 다른 접근방법이 필요하며, 이때 적용되는 방법은 비행체가 아닌 운용의 위험도에 기반하여 비례하는 수단이 적용되는 것이다. 이에 따라서 무인항공기는 그 운용의 위험도에 따라서 지정된 제한사항을 준수하는 것으로 운용이 허용되는 개방(Open) 범주, 유인항공기와 동일한 수준의 항공기 인증이 필요한 인증(Certified) 범주, 그리고 개방과 인증범주 사이의 모든 운용을 포함하는 특정(Specific) 범주로 구분하며, 각 범주에 따라서 안전도를 확보하는 방안이 달라진다.

특정 범주에 적용되는 방법은 위험도 평가를 통해서 해당하는 수준에 따라서 적절한 완화수단을 적용하고 이에 근거해서 제안된 운용을 승인하는 과정으로 이루어진다. 이때 평가에 사용되는 방법이 바로 특정범주 운용 위험도 평가인 SORA이다. JARUS에서 개발된 SORA는 운용승인을 위한 도구로써, 그 자체로 인증 또는 승인과 같은 효력을 갖는 것은 아니다. 현재

EASA의 이행규정에서는 SORA를 특정범주 운용승인을 위한 적합성 입증방법(Acceptable Means of Compliance, AMC)로 채택하고 있다[3].

SORA에서는 지상위험 및 공중위험 등급에 따라서 SAIL을 결정하고 이에 따라서 할당되는 운용안전목표를 해당하는 강건도 수준으로 입증하는 과정으로 이루어진다.

Figure 1과 같이 총 10단계로 이루어지는 SORA 프로세스는 순서대로 진행되어 종료되는 것이 아니라 원하는 결과를 얻기까지 반복해서 수행될 수 있다. 여기서 원하는 결과는 운용의 승인이 아닌 위험도 수준을 나타내는 특정보증 무결성 수준(Specific Assurance Integrity Level, SAIL) 또는 이에 따라서 만족해야 할 목표에 대한 강건도 수준을 결정하는 지상위험 및 공중위험 등급에 해당한다. 만약 제안된 운용이 높은 위험등급을 갖는 것으로 나타난다면 이에 비례해서 운용안전목표(Operational Safety Objectives, OSO)를 만족해야 하기 때문이다.

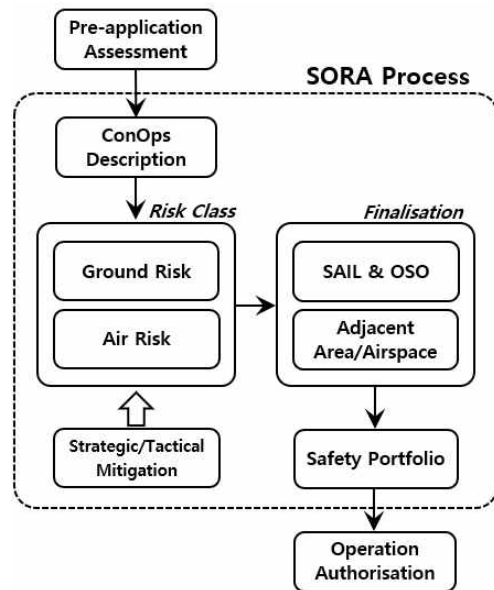


Fig. 1 Simplified SORA Process

제안된 운용에 대해서 적절한 기준을 적용하기 위해서는 위험을 최대한 완화하는 것이 바람직하며, 이때 적용되는 것이 바로 위험도 완화수단(mitigation)이다. 완화수단 외에도 운용개념(Concept of Operation, ConOps)을 변경하는 것도 고려할 수 있다. 완화수단

의 추가 또는 변경 및 운용개념의 변경을 통해서 위험 등급이 감소하고 결과적으로 SAIL이 줄어들게 되어 OSO를 적정 수준의 강건도로 만족시킬 수 있다.

## 2.2 본질적인 지상위험 등급

인명의 운송은 제외되는 특정범주 무인항공기의 적용대상에 따라서 기존의 유인기에서 관심 대상이었던 탑승자(occupant)는 위험평가의 대상에 해당하지 않는다. 대신 해당 무인항공기의 운용에 관련되지 않는 지상의 인명 및 공역상의 다른 사용자 그리고 사회구성원에게 중대한 영향을 미칠 수 있는 인프라구조가 위험의 대상이다[4].

다만, SORA에서 다루는 위험의 대상은 인프라구조를 제외한 지상위험과 공중위험이다. SORA에서는 공중위험도 평가에서도 상대 항공기의 물질적인 피해에 대해서는 명시적으로 다루지 않고 있다. 그러나 이러한 피해도 향후 추가적인 위험의 대상으로 고려되어야 할 사항이라고 판단된다.

두 가지 위험도는 모두 초기에 결정된 등급에 완화수단을 적용해서 최종 등급이 결정되는 방식으로 동일하다. 그러나 공중위험에 대한 초기 위험등급과는 달리 지상위험에서는 항공기 자체의 특성치수와 운동에너지를 포함한 본질적인(intrinsic) 등급으로 표현하고 있다. 지상위험에서는 특성치수와 운동에너지를 포함한 항공기 자체의 물리적인 특성이 본질적으로 내포하는 위험의 정도를 결정하기 때문이다.

### 2.2.1 특성치수와 운동에너지

기본적으로 무인항공기의 분류는 운용의 위험도에 따라서 구분하는 위험기반 접근방법을 채용하고 있으나, 비행체의 물리적인 특성이 위험도에 직접적인 영향을 미치기 때문에 위험도 결정에서 반드시 고려되어야 한다. 무인기에서 고려되는 위험 대상인 지상의 인명, 다른 공역 사용자 그리고 인프라구조 중에서도 지상의 인명에 대해서는 물리적 특성이 가장 직접적인 영향을 미친다.

무인항공기의 충돌시에는 충돌영역의 형상과 이로 인해서 영향을 받는 면적에 큰 차이가 발생할 수 밖에 없다. 따라서, 이때 고려되는 사항으로는 무인항공기의 특성치수(Characteristic dimension)와 운동에너지

(Kinetic Energy)가 있다.

특성치수의 경우, 고정익 형상에서는 날개의 스패, 회전익 형상에서는 로터 블레이드 길이, 그리고 멀티로터 형상에서는 최대치수로 고려한다. 이와 같은 배경으로는, 무인항공기의 치명도는 인체의 어느 부위와 충격하는가에 무관하게 일단 충격이 발생하면 치명상이 일어나는 것으로 가정하기 때문에 무인항공기가 지면으로 떨어지는 상황에서 지면의 인명과 충돌할 수 있는 최대 치수를 감안한 결과이다. 충격 부위에 따른 부상의 치명도는 현재까지 무인항공기 위험도 평가에서는 고려하지 않고 있다. 충돌이 발생하면 치명상이라고 가정하는 것이 보다 보수적인 방법이다.

Table 1 Parameter Selection for GRC

	Fixed Wing	Rotary Wing	Multicopter Drone
Characteristic Dimension	Wing Span	Blade Length	Maximum Dimension
Velocity	$V_{CR}$	$V_T$	$V_T$

운동에너지 계산에 사용되는 속도는 Table 1과 같이 고정익 형상인 경우 순항속도, 회전익 또는 멀티로터인 경우에는 항공기 운용 한계에 따른 종극속도를 사용한다[5].

### 2.2.2 인구밀도

지상위험도는 무인항공기의 운용에 관련되지 않은 비관련자(Uninvolved people)로 정의되는 지상의 인명에 대한 위험도를 나타낸다. 무인항공기의 운용과 관련된 원격승무원(Remote crew)은 해당 운용으로 인한 위험도를 인지하고 있으며, 이를 감수하는 사람으로 정의한다. 여기서 원격승무원은 무인항공기를 직접 제어하는 조종사를 포함 운용에 필요한 모든 인원을 의미한다.

지상의 인명 또는 비관련자의 밀도는 지상위험도에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 중요한 의미를 갖는다. 인명의 집합(Assembly of people)은 인구밀도로 인해서 이동이 제한된 상태를 의미한다. 통제지역(Controlled ground area)는 적극적인 UAS 운용 참여자 또는 주변의 운용을 인지하는 사람만이 포함된

의도된 UAS 운용지역을 의미한다.

인구 밀집지역(Populated area)과 비밀집지역(Sparsely populated area)에 대한 정량적인 기준은 없는 상태이며, 현재는 신청자가 제시하고 당국이 인정하면 그대로 처리되는 것으로 이루어진다. 인구 밀집도는 지상위험에서 매우 중요한 역할을 하며, 현재 그리드에 따라서 단위면적에 대한 정적인 인구밀도를 이용하는 방법과, 휴대폰 기지국 정보를 이용하는 것과 같이 실시간으로 특정 구역에 대한 동적 인구밀도를 파악해서 이를 적용하려는 방안 역시 고려되고 있다. 인구밀도에 대한 정량적인 기준으로는 단위 km<sup>2</sup>당 100~300명 수준이 될 것으로 예상된다[6].

이와 같이 시간이 개입되는 정의는 운용체적(Operational Volume)에도 동일하게 적용된다. 운용체적은 단순히 3차원 공간상에 일정한 영역을 의미하는 것이 아닌 시간에 따라서 해당 구역 내에서 위험의 대상이 달라질 수 있기 때문에 특정 시간대까지 추가되는 4차원 상의 공간으로 이해해야 한다. 다시 말해서, 동일한 공간상의 위치에 대한 동일한 종류의 운용이라고 하더라도 시간대에 따라서 위험도 등급이 달라질 수 있다는 의미이다.

### 2.2.3 운용모드의 구분

무인기의 운용 모드는 무인비행체에 대한 원격조종사의 시정(Visibility)에 따라서 구분된다. 만약 원격조종사가 비행체를 시력교정을 위한 렌즈의 도움 이외의 육안으로 직접 접촉을 유지할 수 있는 경우 이를 가시권(VLOS) 운용으로 정의한다. 따라서 이러한 정의를 만족하지 못하는 경우 비가시권 운용이 된다. 만약 통제권을 갖는 원격조종사(Pilot in Command, PIC) 이외에 1인 이상의 인간 관측자(Visual Observer)의 도움으로 무인항공기와의 접촉 유지하며 운용되는 경우 이를 확장 가시권(Extended Visual Line of Sight, EVLOS) 운용이라고 한다. 다만, EVLOS의 경우 지상위험도 평가의 목적으로는 BVLOS로 간주한다[1].

운용모드가 가시권인가 비가시권인가의 여부는 단순히 비행하는 무인항공기를 원격 조종사의 가시영역 내에 존재하는가의 차이를 설명하는 분류가 아니다. 조종되는 무인항공기가 원격 조종사의 시야에 존재한다는 의미는 해당 무인항공기에 대해서 위험의 대상인

지상의 인명을 회피할 수 있는 능력을 갖기 때문이다.

### 2.2.4 초기 지상위험 등급 결정

무인항공기의 위험도 등급을 결정하기 위해서는 앞에서 언급된 바와 같이 제안된 운용이 이루어질 4차원의 시공간이 정의되어야 한다. 이는 위도, 경도, 고도로 정의되는 3차원 공간에 실제 무인항공기가 운용 시간대까지 추가됨을 나타낸다. 이와 같은 운용체적이 정의되고, 특성치수와 운용모드 그리고 인구 밀도까지 확인되면 Table 2에 따라서 무인항공기 고유의 본질적인 지상위험도 등급이 결정된다.

가로축은 무인항공기의 운용모드를 나타내며, 세로축은 특성치수와 운동에너지를 나타낸다. 따라서 서로 일치하는 지점의 수치가 지상위험도 등급을 나타낸다. 만약 최대 특성치수와 운동에너지가 서로 일치하지 않는다면 보수적인 접근방법으로 더 높은 항목을 기준으로 등급을 결정할 수 있다. 지상위험 등급 결정시 어느 항목을 기준으로 하는 것이 적절한가의 여부는 해당 무인항공기의 운용개념(Concept of Operation)을 고려할 필요가 있다.

Table 2 Ground Risk Class Table[1]

Max. Characteristic Dimension	~1m	~3m	~8m	>8m
Kinetic Energy	<700J	<34kJ	<1084kJ	>1084kJ
Scenario	Intrinsic GRC			
Controlled Area VLOS/BVLOS	1	2	3	4
Sparsely populated Environment VLOS	2	3	4	5
Sparsely populated Environment, BVLOS	3	4	5	6
Populated Environmentm VLOS	4	5	6	8
Populated Environment, BVLOS	5	6	8	10
Over Gathering of People VLOS	7	-	-	-
Over Gathering of People, BVLOS	8	-	-	-

위의 표를 참고하면, 동일한 인구밀도에서 운용모드의 차이는 GRC에서 1 (또는 일부 경우에는 2)의 차이

를 보이는 반면, 동일한 운용모드에서 인구밀도의 차이를 기준으로 GRC에서 2 (또는 일부 경우 3이나 4)의 증가를 나타내고 있다. 다시 말해서, 지상위험도 결정시 가시권/비가시권과 같은 운용모드보다는 인구밀도가 더 큰 영향을 갖는다는 것을 의미한다. 결과적으로, 지상위험도를 감소시키기 위해서는 운용모드보다는 인구밀도의 변경이 더욱 효과적이라는 것으로 이해할 수 있다. 따라서 지상위험도 완화수단의 적용시 요구되는 완화 정도에 따라서 이러한 차이를 고려해서 적절한 수단을 선택할 필요가 있다.

만약 본질적인 지상위험 등급이 7보다 높다면 이는 완화수단을 통해서 적절한 수준으로 감소시킬 수 없는 것으로 간주된다. 이런 경우에는 운용개념을 변경하거나 또는 운용승인 신청이 필요한 특정범주 운용이 아닌 무인항공기 비행체에 대한 형식증명이 필요한 인증범주 운용으로 변경하는 것을 고려할 수 있다.

위의 표에서 알 수 있듯이, 무인항공기의 물리적인 치수와는 무관하게 인명의 집합 상공에서 BVLOS 운용은 특정범주에 포함될 수 없다. 이는 EASA의 무인항공기 운용에 대한 이행규정의 제6조 인증범주에 대한 정의에도 일치하는 내용이다. 또한, 무인항공기의 치수가 3m를 초과하는 경우 인구 밀집지역에서의 BVLOS 운용 역시 SORA를 통한 운용승인은 해당하지 않으며, 치수가 8m를 초과하는 경우에는 VLOS 운용이라고 하더라도 인구 밀집지역에서의 운용은 더 이상 특정범주로 처리될 수 없다.

### 2.3 완화수단과 강건도 개념

앞에서 살펴본 위험도는 무인항공기 자체의 물리적인 특성에 의해서 결정되는 본질적인 위험도 등급이다. 이는 적절한 완화수단(mitigation)의 적용을 통해서 위험을 관리하고 등급을 감소시킬 수 있다. 이때 각 완화수단의 강건도(robustness)에 따라서 감소될 수 있는 등급이 달라진다.

강건도 지정은 안전도 이득을 나타내는 무결성(Integrity)과 이를 입증하는 방법인 보증(Assurance)에 따라서 결정된다. 높은 무결성 수준은 완화수단의 적용을 통해서 높은 안전도 이득을 확보할 수 있다는 의미이다. 이와 같은 높은 안전도 이득을 어느 수준으로 보장할 수 있는가를 결정하는 요인이 보증의 수준

이다. 따라서 두 가지 중에서 어느 하나만 높다고 해서 강건도가 높다고 할 수는 없다.

SORA에서 정의하는 강건도는 무결성과 보증수준 중에서 낮은 항목을 기준으로 설정된다. 이는 다시 말해서, 만약 적용하려는 해당 완화수단의 무결성(안전도 이득)이 낮은 수준이라면 이를 높은 보증수준으로 입증할 필요가 없이 낮은 수준으로 입증하는 것으로 충분하다는 의미이다. 반대로, 만약 산업표준에서 제시하는 표준의 적용과 같은 높은 보증수준을 만족할 수 없는 상황이라면 높은 무결성을 갖는 완화수단을 적용하더라도 강건도는 보증수준에 따라서 결정될 것이므로 해당하는 무결성 수준에 해당하는 강건도를 달성할 수 없다. 일반적으로 완화수단에서 보증수준의 증가는 설계 또는 장비 등의 복잡성으로 인해서 항공기 또는 운용에 적용되는 비용의 증가를 의미하기 때문이다. 결과적으로 완화수단에 대한 강건도는 Table 3과 같이 무결성과 보증수준의 매트릭스 상에서 대각선 방향으로 이동하면서 결정된다고 볼 수 있다.

**Table 3 Determination of Robustness[1]**

	Low Assurance	Medium Assurance	High Assurance
Low Integrity	Low Robustness	Low Robustness	Low Robustness
Medium Integrity	Low Robustness	Medium Robustness	Medium Robustness
High Integrity	Low Robustness	Medium Robustness	High Robustness

무결성 요구조건은 일반적으로 중간수준에 대해서 제시되는데, 이를 만족하지 못하는 경우 낮은 수준으로 내려가며 감항당국에서 검증이 된다면 높은 수준으로 올라간다.

**Table 4 Assurance Requirements**

Level	Requirements
Low	Applicant's declaration No evidence required
Medium	Supporting evidence available
High	Validated by competent authority Compliance with Industry standard

보증의 경우 Table 4와 같이 근거자료가 없이 신청자의 선언으로만 이루어진다면 낮은 수준으로 인정받을 수 있으며, 중간 수준을 위해서는 이를 입증하기 위한 근거자료가 필요하다. 근거자료는 시험, 해석, 시뮬레이션, 설계검토 또는 과거 경험자료 등이 포함될 수 있다. 높은 수준의 보증은 이와 같은 근거자료가 감항당국 또는 감항당국에서 인정한 산업표준에 따라서 검증된 경우에 해당한다.

## 2.4 지상위험 완화수단

유인항공기의 경우 비상착륙 상황에서 탑승객을 보호하기 위해서 내추락성 설계 요구조건이 필요하다. 이는 항공기 자체가 충격을 흡수하는 것으로 탑승객에게 전달되는 에너지를 최소화하는 것이 목적이다. 또한, 충돌시 인체를 속박하고 주변 장착물로 인한 인체의 부상을 최소화할 필요가 있다[7].

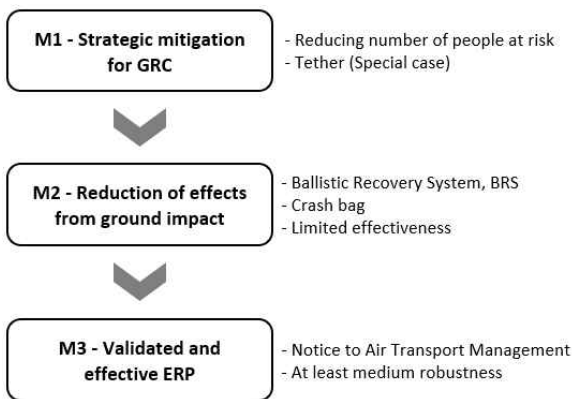


Fig. 2 Mitigation for Ground Risk

이에 비해서 무인항공기에서는 해당 운용과는 관계가 없는 제3자에 대한 위험을 완화하는 것이 목적이며, 일단 인명과 충돌이 발생하는 경우 특성치수에서 논의된 것과 같이 충돌부위 또는 정도에 따른 부상 수준에 대한 고려가 없이 무조건 치명상이 발생하는 것으로 가정한다. 이러한 차이로 인해서 무인항공기에서는 비행체 자체의 파손이나 내추락성은 고려하지 않으며, 잠재적인 충돌의 대상인 지상의 인명에 전달되는 에너지를 최소화하는 목적으로 위험도 완화수단이 필요하다.

지상위험에서 고려하는 완화수단에는 Fig.2와 같이

전략적 완화수단인 M1, 충돌시 인명에 전달되는 에너지를 감소시키는 M2 그리고 비상 상황을 ATM(Air Traffic Management)에 통보하는 절차를 포함하는 M3가 있다. 이러한 완화수단은 해당 순서대로 적용되어야 하며, 앞에서 살펴본 무결성 및 보증수준에 대한 요구조건에 따라서 강건도가 결정될 수 있다.

지상위험의 완화수단은 JARUS SORA의 부속서 중의 하나인 Annex B에 각 항목별 무결성 및 보증 수준에 대한 요구조건이 상세히 기술되어 있다[8].

### 2.4.1 M1 전략적 완화

전략적 완화수단에서 전략적(strategic)이라는 용어는 ICAO의 Doc 9854 항공교통관리 운용 개념서의 충돌관리(Collision Management)에서 전술적(tactical)보다 먼저 적용된다는 개념이다[9]. 이는 항공기가 비행을 시작하기 전에 위험의 대상에 대해서 미리 조치하는 것을 의미한다. 따라서 비행이 시작되고 나면 M1은 적용이 불가능하며, 이러한 전략적 개념은 지상위험과 공중위험에 동일하게 적용된다. 이런 의미에서 전략적 완화 M1은 지상에서 위험에 노출되는 인명의 수를 감소시키는 것이 목적이다.

일반적인 경우 M1 완화수단은 지상위험 완충지대 및 위험에 처한 인명의 평가에 대한 기준을 해당하는 무결성 및 보증수준에 따라서 만족해야 한다.

지상위험 완충지대의 경우 낮은 무결성을 위해서는 1:1 규격에 따라서 최소 비행고도와 동일한 거리의 완충지대를 확보해야 한다. 중간 및 높은 무결성을 위해서는 완충지대 설정시 단일 고장으로 인해서 운용체적을 벗어나지 않도록 해야하고, UAS의 기동성에 영향을 미칠 수 있는 기상조건, 지면 및 기체의 성능 등을 고려해야 한다.



Fig. 3 Tethered UAV Example

M1 완화수단의 특별한 경우로는 Fig.3과 같은 테더(tether)를 사용하는 운용이 있다. 지상에서 무인항공기에 와이어 연결을 통해서 무인항공기가 정해진 범위를 벗어날 수 없도록 적극적으로 통제하는 것으로 지상의 인명에 대한 위험을 완화하는 방법이다. 이때 테더는 UAS의 일부로 취급되어야 하며, 무결성과 보증 수준 모두 기술적인 설계특성 및 절차에 대한 요구조건을 만족해야 한다.

#### 2.4.2 M2 충격감소를 통한 완화

M2 완화수단은 지상 추락시 충돌에너지를 감소시켜 지상의 인명에 대한 피해를 최소화하는 것이 목적이다. 이를 위해서 고려할 수 있는 대표적인 방안으로는 Fig.4와 같은 비상 낙하산과 충격을 흡수할 수 있는 에어백 등이 있다.



Fig. 4 Drone Parachute

드론에 장착하여 사용할 수 있는 비상 낙하산이 널리 사용되고 있으며, 중량에 따라서 낙하산의 캐노피 크기가 결정될 수 있다. 현재 사용되고 있는 이와 같은 낙하산의 실질적인 목적은 지상위험도라기 보다는 드론 비행체의 안전한 회수에 있다고 볼 수 있으나, 결과적으로 드론의 강하속도가 감소되는 것으로 인해서 지상의 인명에 대한 충격에너지가 줄어드는 효과에는 차이가 없을 것이다.

SORA의 지상위험도 평가에서 M2 완화수단은 비상 낙하산 자체를 위한 요구조건이 아닌 지상 충돌시 충격을 감소시킬 수 있는 수단을 포괄적으로 지정하고 있음을 이해할 필요가 있다.

비상낙하산에 대해서 감항당국에서 인정할 수 있는 표준으로는 ASTM에서 개발된 산업표준인 55lbs 이하 소형 무인항공기에 적용할 수 있는 ASTM F3322를 고려할 수 있다[11].

#### 2.4.3 M3 비상대응계획

SORA에서는 위험평가를 사용하는 이용자 사이에 공통된 용어와 개념을 사용하기 위해서 운용에 대한 용어의 정의를 나타내는 의미론 모델(Semantic model)을 적용하고 있다. 이에 따라서 무인항공기 운용의 상태를 다음 Fig.5와 같이 도식적으로 표현할 수 있다[1].

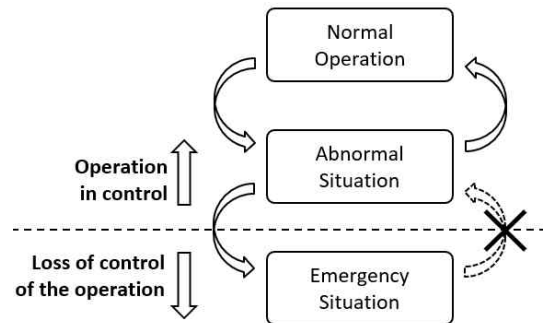


Fig. 5 Mitigation for Final GRC

정상 운용은 비행구역(Flight geography) 내에서 표준 운용 절차로 정상적으로 운용되는 상태이고, 이를 의도하지 않게 벗어나서 긴급체적(Contingency volume)으로 진입하는 경우를 비정상 상황으로 정의한다. 이때는 긴급절차 또는 비정상절차가 작동해서 다시 비행구역 이내의 정상운용 상태로 회복된다. 긴급절차의 사례로는 자동으로 작동하는 귀환모드(Return to home), 수동조종 또는 사전에 설정된 지점으로 착륙하는 절차 등이 포함된다. 비행구역과 긴급체적을 합해서 운용체적(Operational volume)으로 정의하고 이는 운용이 통제된 상태를 의미한다.

긴급체적에서 운용되는 비정상 상황을 벗어나는 경우를 비상(emergency) 상황으로 정의하고 다음과 같은 특성을 갖는다.

- 상황의 결과가 운에 따라서 결정됨
- 긴급절차로 처리될 수 없음
- 심각하고 즉각적인 치명상의 위험이 있음

이는 결과적으로 비정상 상황 또는 정상 운용으로 회복될 수 없는 통제가 상실된 운용에 해당한다. 비상상황의 경우 최대한 신속한 착륙 또는 비행종료 시스템의 작동과 같은 비상절차(Emergency procedure)가 작동해야 한다. 이때는 비행체의 손실뿐 아니라 지상의 인명에 대한 치명상이 예상될 수 있다. 비상절차는 JARUS에서 개발된 무인항공기의 형식증명을 위한 기술기준인 CS-UAS의 서브파트 F 시스템 및 장비의 CS-UAS 2570 비상 회수 능력 및 절차(Emergency Recovery Capability and Procedure, ERCP) 중에서 조항 (a)에 규정된 지상의 인명에 치명상으로부터의 보호에 해당하는 무인항공기 비행체에 적용되는 요구조건이다[13].

비상절차와는 달리 비상대응 계획(Emergency Response Plan, ERP)은 원격 승무원에게 적용되는 지침 또는 절차의 성격으로 볼 수 있다. 이는 통제를 상실한 운용으로 인해서 발생하는 지상의 인명에 대한 피해가 확대되지 않도록 하는 것이 목적으로, 주변 항공교통관리에 통보하는 것이 포함된다.

세 가지 지상위험도 완화수단 중에서 M1, M2와는 달리 M3는 가장 낮은 강건도 수준을 만족하는 경우 위험도 등급에서 1이 추가된다. 최소한 중간 강건도 수준에서도 위험등급은 그대로 유지되기 때문에 이는 선택이 아닌 필수사항이라고 볼 수 있으며, 또한 무결성과 보증수준 역시 최소한 중간을 만족해야 본질적인 GRC가 그대로 유지될 수 있다.

ERP가 존재하지 않거나 또는 중간이나 높은 무결성 수준을 만족하지 못하는 경우에는 GRC가 1만큼 증가한다. ERP가 존재하면서 추락으로 인한 영향을 증가시키지 않으며, 비상상황을 식별할 수 있는 기준이 정의되어 있으며, 또한 원격승무원의 임무를 명확히 기술하고 있다면 중간 수준을 만족하는 것이다. 만약 비상절차를 통해서 지상위험도 수준의 감소를 원하는 경우에는 이에 추가해서 운용의 통제 상실시 ERP가 지상에서 위험에 노출된 인명의 수를 현저히 감소시킨다는 것이 입증되어야 한다.

## 2.5 최종 지상위험 등급 결정

최종 지상위험 등급은 완화수단의 종류와 강건도에 따라서 Table 5와 같이 초기 등급에 추가 또는 감소

되어 결정된다.

M1 완화수단에서는 높은 강건도 요구조건을 만족한다면 위험등급이 4만큼 감소될 수 있다. 이를 위해서는 무인항공기의 레이턴시(latency), 항공기의 기동특성 등을 고려해서 고도대 거리 비율로 1:1 규칙에 따른 위험 완충지대(Risk buffer)를 설정하고, 이를 시험, 해석, 시뮬레이션 등을 통한 근거를 제시하며 또한 이에 대한 감항당국의 검증을 받아야 한다. 만약 초기 지상위험도가 3으로 결정되었다면 제시하는 절차를 거쳐서 M1 완화수단을 적용할 필요가 없다는 것으로 이해할 수 있다.

**Table 5** Implementation of Mitigation for GRC[1]

Sequence	Mitigation	Robustness		
		Low/None	Medium	High
1	M1	0 (None) -1 (Low)	-2	-4
2	M2	0	-1	-2
3	M3	1	0	-1

또한, 예를 들어 무인항공기의 크기가 3m 이상이고 인구 비밀집지역에서 VLOS로 운용되는 경우 초기 지상위험 등급은 3으로 지정되는데, 이때 M1 완화수단으로 중간 강건도를 만족하는 경우 -2만큼 경감되어 최종 등급이 1로 계산되는 것이 아닌 해당하는 물리적인 크기에 대한 최소 등급인 3보다 작아질 수는 없다. 각 물리적인 크기에 대해서 통제구역에서 운용되는 경우의 등급보다 더 낮아질 수는 없음을 의미한다.

계류식(tethering)과 같이 위험의 대상인 인명에 대한 확실한 대책이 마련된 경우라면 위험도 수준이 급격히 감소될 수 있는 반면, 실질적으로 일부 한정된 임무에서만 적용 가능성이 있다. 또한, 지상위험도 결정표를 참고하면, 위험도 등급이 최소한 4 이상인 운용모드는 예를 들어서 도심과 같은 인구밀집 환경인데, 이러한 지역에서 위험에 노출되는 지상의 인명을 통제할 방법과 이를 입증할 근거를 제시하는 것은 쉽지 않을 것으로 보인다.

## 2.6 지상위험 완화수단 적용 사례

지상의 인명에 대한 위험도를 감소시키기 위한 완화



수단에 대한 이해를 위해서 도심 한강변에서 무인항공기의 시연비행 상황을 가정한다. 우선 M1 전략적 완화수단을 위해서는 비행이 이루어지는 구역에 대해서 지상의 인명을 통제하는 것을 고려할 수 있다.

그러나 비행구역에 대한 인명의 접근 차단이 불가능한 상황이라면 인구밀도가 낮은 시간대로 운용을 제한하면서 충돌시 에너지를 감소시킬 수 있는 비상낙하산과 같은 M2 완화수단을 적용할 수 있다.

이에 추가해서 M3 완화수단으로써 조종불능과 같은 비상상황시 원격승무원이 취해야 하는 조치를 기술한 비상대응 계획이 마련되어야 한다. 이는 앞서 언급된 것과 같이 비상시 자동으로 작동하는 기술적인 장치 아닌 비상 상황에서 준수해야 하는 운용자의 절차를 의미하는 것이다.

### 3. 논 의

지상위험도 등급에서 1이 갖는 정량적인 의미는 완화수단 적용에 따라서 인구밀도를 기준으로 10배 또는 90%의 감소를 의미한다[6]. 따라서 GRC가 1만큼 감소되었다고 주장하기 위한 정량적인 근거를 위해서는 이와 같은 차이를 입증해야 한다.

**Table 6** SAIL Determination[1]

Final GRC	Final ARC			
	a	b	c	d
~2	I	II	IV	VI
3	II	II	IV	VI
4	III	III	IV	VI
5	IV	IV	IV	VI
6	V	V	V	VI
7	VI	VI	VI	VI
7~	Category Certified			

지상위험도는 Table 6과 같이 공중위험도와 조합되어 특정보증 무결성 수준(Specific Assurance Integrity Level, SAIL)을 결정한다[1]. SAIL은 제안된 운용의 위험도를 나타내는 지표로 이해할 수 있다. 공중위험도 등급이 b까지는 지상위험도가 지배적인 영향을 갖는 반면, 공중위험도가 기준 c부터는 공중위험

도가 더욱 지배적이다. 공중위험도 결정시 공항 인근 영역 여부에 따라서 등급이 b와 c를 결정하는 기준이 되므로, 만약 제안된 운용이 공항인근에서 이루어지지 않는다고 가정하면 지상의 인명에 대한 지상위험 등급이 더 중요한 의미를 갖는 것이다.

최근 개정된 EASA의 이행규정에 대한 적합성 입증 방법에 정의된 표준 시나리오(Standard Scenario, STS) 및 사전 정의된 위험평가(Pre-Defined Risk Assessment, PDRA)에 대한 운용개념을 요약하면 다음 Table 7과 같다[3].

**Table 7** STS and PDRA based on AMC

Type	Dim	Mode	Density	GRC
STS-01	<3m	VLOS	Controlled	2
STS-02	<3m	BVLOS	Controlled	2
PDRA-S01	<3m	VLOS	Controlled	3
PDRA-S02	<3m	BVLOS	Controlled	3
PDRA-G01	<3m	BVLOS	Sparsely	3
PDRA-G02	<3m	BVLOS	Sparsely	3

세부적으로 규정된 제한사항을 만족한다는 신청자의 선언만으로 비행이 승인되는 STS의 경우 모두 지상위험 등급은 2로 설정되어 있으며, 해당하는 공중위험 등급과 조합되면 SAIL은 I로 할당되어 실질적으로 개방범주에 해당한다고 볼 수 있다.

제안된 4개 PDRA의 경우 모두 최종 GRC가 3으로 결정될 수 있도록 운용개념이 설정되어 있다. 예를 들어서 PDRA-G의 경우 초기 GRC는 4이지만 완화수단의 적용으로 최종 GRC는 3이 되는데, 해당 PDRA에서 제시된 운용개념상 공중위험도 등급이 ARC-b인 것을 감안하면 SAIL은 II가 되어 역시 낮은 위험도 수준이 된다.

일반적으로 SAIL을 기준으로 I~II는 저위험도, III~IV는 중위험도 그리고 V~VI는 고위험도로 구분한다. 아래 Table 8과 같이 저위험도의 경우 일부 선택사항을 제외한 나머지 대부분의 OSO 항목을 낮은 수준의 강건도로 만족할 수 있다. 이에 비해서 중위험도에서는 일부 높은 수준의 강건도 항목을 제외하면 대체로 중간 강건도 수준으로 충분하지만, 고위험도인 경우 거의 대부분의 OSO에 대해서 높은 강건도 수준으로 만족해야 한다.

Table 8 OSO and Robustness Level

SAIL	Robustness Level				Note GRC
	O	L	M	H	
I	9	15	-	-	~2
II	6	14	4	-	~3
III	1	6	13	4	~4
IV	-	1	17	6	~5
V	-	-	4	20	~6
VI	-	-	-	24	~7

앞에서 완화수단에 대한 무결성 및 보증수준에서 분석한 내용과 마찬가지로 OSO에 대해서도 높은 강건도를 위해서는 근거자료에 대한 감항당국의 검증 또는 합의기반 산업표준에 대한 적합성 입증 필요하기 때문에 실제로 신청자에게는 해당 항목에 대해서는 형식 증명과 유사한 수준의 작업이 필요하다고 볼 수 있다.

따라서 실질적으로 무인항공기의 운용승인을 목표로 SORA를 적용하는 경우 결과적인 SAIL을 중위험도인 III~IV를 목표로 하는 것이 합리적이라고 추론할 수 있다. 이는 다시 말해서 최종 GRC를 기준으로 5를 넘지 않아야 한다는 의미이다. 최종 GRC가 6~7이라면 SAIL은 V~VI으로 결정될 가능성이 높으며 따라서 대부분의 OSO 항목을 높은 강건도로 만족해야 한다.

여기서, SORA 평가를 통한 운용승인은 특정범주 운용개념에만 적용되는 것이라는 것을 감안하면, 다수의 요구조건을 감항당국의 검증을 통해서 만족해야 하는 높은 강건도를 만족하는 것보다는 다양한 운용의 가능성을 확보할 수 있는 형식증명을 고려하는 것이 신청자의 입장에서는 인증범주 운용까지 확장할 수 있기 때문에 더욱 유리할 수도 있을 것이다. 이는 특정범주 내에서 최초 운용개념을 설정할 때 위험도에 기반한 인증당국 또는 규제에 개입수준을 고려하여 적절한 지상위험도 수준을 목표로 설정할 필요가 있다는 결론으로 이어진다.

#### 4. 결 론

무인항공기의 지상위험도는 무인기의 물리적 특성, 제안된 운용모드 및 인구 밀집도에 따라서 1~10 사이

에서 결정된다. 이러한 본질적인 초기 위험도 등급은 다양한 완화수단의 적용에 따라서 적절한 수준으로 감소되어 최종 등급이 결정된다. 이때 적용되는 완화수단의 무결성 및 보증수준에 따라서 감소되는 정도가 달라진다.

초기 지상위험도가 7보다 큰 경우에는 완화수단을 적용하더라도 위험도가 허용할 수 있는 수준으로 감소될 수 없기 때문에 SORA를 통한 운용승인으로 처리될 수 없다. 이러한 제한은 공중위험도 등급과는 무관한 것으로, 지상의 인명에 대한 위험도의 영향성을 보여주는 것이다.

지상위험도 및 공중위험도 등급에 따라서 SAIL이 할당되고 이에 따라서 OSO의 각 항목을 만족해야 하는 강건도 수준이 달라지기 때문에 무인항공기의 위험도에 비례하는 운용승인을 위해서는 지상위험도 등급에 대한 고려가 반드시 필요하다.

SORA는 현재 유럽항공안전청 EASA의 무인항공기 운용에 대한 이행규정인 (EU) 2019/947의 적합성 입증방법으로 채택되었다. 또한 신청자의 접근성을 위해서 표준 시나리오(STS) 및 사전에 정의된 위험평가(PDRA)를 제시하고 있다.

EASA 기준에 따른 특정범주 무인항공기 운용은 유럽뿐 아니라 국내에서도 낮은 페이로드 수준의 배송용 무인항공기와 같이 많은 수요가 예상되기 때문에 국내에서도 SORA 위험평가를 적용한 방안을 도입할 고려할 필요가 있다. 또한 이를 위해서 표준 시나리오 또는 미리 당국에 의해서 처리된 평가방안을 제시하고 신청자가 이에 대한 입증을 제시하는 방안을 고려하는 것이 필요할 것이다. 이를 위해서는 지상위험도 등급이 SAIL에 미치는 영향을 분석해서 향후 예상되는 무인항공기 운용의 수요를 고려해서 적절한 수준의 시나리오를 구축하는 방안이 마련될 필요가 있다.

#### 후 기

본 연구는 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 소형무인비행기 시스템 시범 인증 체계 및 인증 기술개발 (22AUV-B152932-04) 사업의 지원을 받아 수행되었음

## References

- [1] JARUS, Guidance on Specific Operations Risk Assessment (SORA), Sep. 2019.
- [2] Joonsu Ko, Taehwa Kwon, *Aircraft Airworthiness Certification*, Kyungmoon Books, Oct. 2020.
- [3] EASA, Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulation (EU) 2019/947 and Regulation (EU) 2019/945), Jan. 2021.
- [4] JARUS, UAS Operational Categorization, Jun. 2019.
- [5] EASA, E.Y013. Policy Statement Airworthiness Certification of Unmanned Aircraft Systems (UAS), Aug. 2009.
- [6] Natale Di Rubbo, Antonio Marchetto, Proposed Way Ahead, Operations in the Medium Risk of the Specific Category, EASA, Oct. 2020.
- [7] Todd Hurley, et al. *Small Airplane Crashworthiness Design Guide*, Simula Technologies, Apr. 2002.
- [8] JARUS Guidelines on SORA Annex B Integrity and Assurance Levels for the Mitigations used to reduce the intrinsic Ground Risk Class, Jan. 2019.
- [9] ICAO Doc 9854 Global Air Traffic Management Operational Concept, 2005.
- [10] Understanding and Maximizing Tethered Drone Cable Performance in Harsh Operating Conditions, W. L. Gore & Associates, Mar. 2019.
- [11] ASTM F3322, Standard Specification for Small Unmanned Aircraft System (sUAS) Parachutes, Sep. 2018.
- [12] Aircraft Incident Investigation Report, ARAIB/AIR1606, Aviation and Railway Accident Investigation Board, Sep. 2018.
- [13] JARUS, CS-UAS, Recommendations for Certification Specification for Unmanned Aircraft Systems, Sep. 2019.