



Received: 2023/05/26
Revised: 2023/06/12
Accepted: 2023/06/26
Published: 2023/06/30

***Corresponding Author:**

Young-hoon Kim

Force Analysis Test & Evaluation Group, ROK Navy
P.O Box No. 501-280, 663, Gyeryongdae-ro,
Sindoan-myeon, Chuncheon-gangwon-do, 32800,
Republic of Korea
Tel: +82-42-553-7416
E-mail: yhkim2020@navy.mil.kr

드론 낙하산 탑재에 따른 생존성 향상 연구

A Study on Survivability Enhancement of Parachutes Mounted Drone

김영훈^{1*}, 김무근¹, 김원기²

¹해군 전력분석시험평가단 감항인증실 전문군무경력관

²해병대 소령/해병대사령부 제6해병여단 제6정보중대

Young-hoon Kim^{1*}, Mu-Guen Kim¹, Won-Ki Kim²

¹Senior Manager, Office of Airworthiness, Force Analysis Test & Evaluation Group, ROK Navy

²Major ROK Marine Corps/6th Intelligence Company, 6th Brigade, ROK Marine Corps HQ

Abstract

드론 수요 증가에 따라 운용상 발생가능한 인적, 물적 피해 또한 증가하고 있다. 드론 추락으로 인한 2차 피해 예방을 위해 국외 항공당국, 기관 등은 임무, 성능, 기체 중량, 안전성 요구수준 및 운동에너지 등 드론을 분류하고 성능 및 기술기준을 수립하였다. 본 연구는 국외 항공당국, 기관이 제시한 운동에너지양에 기반하여, 드론 낙하 비행 실증시험을 통해 낙하산 장착 드론의 생존성 및 비행안전성 향상 방안을 제시하고자 한다.

As the demand for drones increases, human and material damages that can occur during operation are also increasing. To prevent secondary damage caused by drone crashes, overseas aviation authorities and agencies classified drones by mission, performance, weight, safety requirements and kinetic energy, and established performance and technical standards. This study aims to suggest ways to improve drone survivability and flight safety through a drone drop flight demonstration test based on the amount of kinetic energy presented by overseas aviation authorities and agencies.

Keywords

드론(Drone), 낙하산(Parachute), 생존성(Survivability), 지상 위험(Ground Risk), 충격 모델(Impact Model)

1. 서론

2016년 스위스 다보스에서 개최된 세계경제포럼(WEF, World Economic Forum)에서는 제4차 산업혁명을 선도할 기술로 무인운송수단, 사물인터넷(IoT, Internet of things), 인공지능(AI, artificial intelligence), 로봇공학(robot engineering) 등이 소개되며 사회 전 분야에서 최대 화두로 부상하고 있다[1]. 이 중 무인운송수단은 무인항공기와 무인이동체를 포함하고 있으며, 이에 따라 우리 정부는 2017년 대통령 직속기구로 ‘4차산업혁명위원회’를 조직하여 국방부, 국토교통부, 과학기술정보통신부 등 다부처에서 관련 정책 및 기술 지원에 역점을 두고 있다[2,3].

국방부는 제4차 산업과 관련하여 드론(무인항공기시스템 또는 무인항공기 또는 무인기 등)을 적기에 도입하고 군-민 상생 발전 전략을 수립하기 위해 ‘국방 무인체계 발전 협의회’를 구성하였다. 협의회는 국방부 주관으로 타 부처 및 민간기관 등이 참여하여 국방 무인체계 발전 전략 및 세부 이행계획 수립을 위해 노력하고 있다. 드론 국내·외 개발동향, 기술수준, 발전 방향 등 국방의 소요측면을 고려하여 국방 드론 공통 플랫폼 및 임무장비, 미래 국방 드론 신규소요 아이디어 등을 도출하고 있다[4].

현재 우리군이 전력지원체계를 통해 도입한 드론은 2020년 기준 138종 2,048기가 전력화되어 주요 시설 경계, 물자 수송, 교육·훈련 및 전투실험 등 목적으로 운용 중에 있다. 2021년 예산은 7.2억원에서

2022년 105.4억원으로 확대 편성되며, 향후 드론 구매 사업은 지속적으로 확대될 예정이다.

우리 군은 중요시설경계, 교육훈련 및 전투실험 용도로 드론의 수요 증가에 따른 기술개발 및 정책 지원과 같은 운영 활성화에 치중된 대안을 제시하고 있으나, 드론 생존성 및 비행안전 향상에 대한 연구는 전무한 실정이다. 드론은 형상과 크기가 다양하고 기체-기체 또는 기체-장애물 또는 기체-시설 등 운용 중 예상치 못한 충돌, 추락으로 인한 안전사고 위험성이 유인항공기보다 높다[5,6].

미국 및 이스라엘군이 운용 중인 드론 사고를 분석한 결과(Table 1 참고), 동력과 비행제어에 의한 사고가 전체 사고의 약 60%를 차지하고 있다[7]. 드론 동력 상실 또는 비행 중 통제력 상실 등과 같은 주요 사고원인을 비추어봤을 때, 드론 엔진/모터, 비행제어 로직과 같은 기술적 오류가 개선되지 않는다면 드론 운용 중대에 따라 드론 추락 사고 또한 증가할 것으로 예상된다. 따라서 중요시설경계, 교육훈련 및 전투실험 등 다양한 임무에 투입되는 드론을 안전하게 운용하기 위해서는 비행안전성을 향상시키며 생존성을 담보할 수 있는 대안이 필요하다. 항공선진국은 의도치 않은 기체 추락으로 인해 발생할 수 있는 인적/물적 피해를 최소화하기 위한 운동에너지 사항을 규정에 반영하고, 드론 생존성 및 비행안전성 향상 관련 연구를 지속적으로 진행하고 있다[8-11]. 이에 따라, 본 연구에서는 드론 생존성 및 비행안전성 향상을 위한 대안을 제시하고자 한다.

Table 1. 미국 및 이스라엘 군내 발생한 드론의 주요 고장 원인 및 비율 (단위: %)

사고원인	미국	이스라엘
동력(power propulsion)	38	32
비행제어(flight control)	19	28
통신(communication)	14	11
병력/지상(human/ground)	17	22
기타	12	7
합계	100	100

2. 드론 사고유형 분석

드론 사고는 하드웨어/소프트웨어 오류의 제조상 요

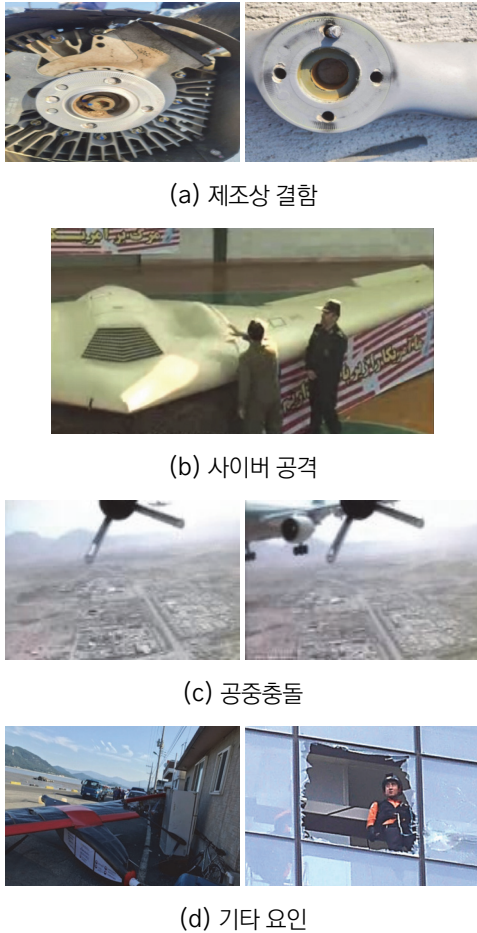
인, 해킹/재밍과 같은 사이버 공격 요인, 운용적 요인에 의해 야기되는 공중충돌, 조종자/정비사에게서 비롯된 인적 요인, 돌풍과 같은 기상급변 상황의 외적 요인 등 다양한 원인으로 인해 발생하고 있다[12]. 운용 고도가 높은 곳에서 발생하는 사고의 경우 중력에 의해 무인기가 추락하게 되고 이로 인해 조종자, 지상의 불특정 다수의 보행자 등 타인의 생명, 신체 상해나 사망 등의 인적 피해와 지상의 차량, 건축물 및 농작물 등 재산상 손해로 이어지게 된다. 대표적인 국내 사례로는 서울 신철동 주차장에 주차된 차량 지붕 위로 드론이 추락하여 차량 지붕이 파손된 사고를 꼽을 수 있다[13].



Fig. 1. 드론 추락 피해 차량 사례

제조상 결함의 예로는, ○○○에서 운용 중인 드론의 엔진-프로펠러를 연결하는 프로펠러 고정볼트 피로균열로 볼트 토크가 상실되어 프로펠러가 이탈하여 기체가 추락하는 사고가 발생하였으며, 이란 북부 카슈마르에서 임무 중이던 미국의 RQ-170(센티널, 록히드마틴사[社]) 1기가 이란의 사이버 공격(스푸핑¹⁾)에 의해 나포되었다. 또한, 2004년 아프가니스탄 카불에서 민항 여객기와 독일 육군의 드론이 공중충돌할 뻔한 사례, 2016년 민항여객기의 착륙 시도 중 드론과 전면부 충돌, 2016년 인천 송도에서 드론이 고층 건물에 부딪혀 발생한 사고 등 공중충돌 사고가 다수 발생하고 있다. 또한, 2016년 충남 천안 지역축제에서 드론 추락으로 인해 어른 및 어린이가 부상당하고, 전남 장흥에서는 개발 중인 드론의 비행시험 중 기체 결함과 기상악화로 추락하여 건물이 훼손되는 등 드론 사고는 지속적으로 발생하고 있다[14-19].

1) 스푸핑 (spoofing): 외부의 악의적인 네트워크 공격자가 구성요소 간의 트래픽을 공격자의 컴퓨터로 우회시켜 정보를 탈취하는 기법 (한국인터넷진흥원, 드론 사이버보안 가이드, 2020)



(a) 제조상 결함

(b) 사이버 공격

(c) 공중충돌

(d) 기타 요인

Fig. 2. 사고유형별 사고 상황

2.1 지상 위험 현황 및 규정 분석

유인항공기의 경우 감항인증을 통해 비행체의 비행 안전성을 확보하나 다양한 운용 목적을 지닌 드론에 유인기와 같은 수준으로 감항인증을 받는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이다. 현재 운용되는 드론 사고로 발생하는 피해 규모는 유인항공기 사고에 비해 상대적으로 작으나, 드론 비행안전성 향상을 위해 국가별, 기관별로 지속적인 연구를 수행하고 있다[20-22].

미 국방부의 JROC(Joint Requirement Oversight Council)는 드론의 임무 및 성능, 미 연방항공청(FAA, Federal Aviation Administration)은 드론의 중량(55 lbs 이하)과 사용 목적(개인/사업용), 유럽항공안전청(EASA, European Union Aviation Safety Agency)는 드론 안전성 요구수준(open/specific/certified), 북대서양조약기구(NATO, North America Treaty Organization)는 중량(150 kg 이하/150 kg - 600 kg/600 kg 초과) 및 운동에너지 등 국가별, 기관별로 분류 목적에 따

라 드론을 상이하게 분류하고 있다[23]. 프랑스, 칠레 및 이탈리아 등 일부 국가의 경우, 운동에너지, 운동에너지 밀도 또는 약식상해척도(AIS, Abbreviated Injury Scale) 등급을 적용하여 드론을 분류하고 있다.

드론 고장 혹은 충돌과 같은 원인으로 추락했을 때 발생하는 위험을 지상 위험(ground risk)이라 하며, failure model, impact model, exposure model 및 harm model 등 4가지 모델로 구분하고 있다[24,25].

JARUS(Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems)가 발간한 드론 운용 위험 평가 가이드라인인 SORA(Specific Operation Risk Assessment)는 드론으로 인해 발생 가능한 지상 피해 및 위험 등 위험 수준을 세부적으로 구분하고, 기체 운용을 위한 안전성 목표 및 요구사항을 제시하고 있다[26].

이에 따라, 드론 운용에 따른 비행안전성 목표와 요구사항을 도출하기 위해 FAA, EASA, 프랑스 민간 항공당국 및 NATO 등이 제시하고 있는 지상 위험 및 관련 규정을 분석하였다.

2.1 미연방항공청(FAA)

취미 및 상업용 드론 관련 규제 및 운용은 미 교통부(DOT, Department of Transportation) 산하의 FAA가 관장하고 있으며, 이와 관련하여 드론 대상, 범위, 운용제한 조건 등 준수해야 할 요구사항들은 2016년 6월 발표한 CFR(Code of Federal Regulations)의 14 Part 107 Small Unmanned Aircraft Systems를 따르도록 하고 있다[27]. Part 107에서는 상업용 드론의 경우, 특히 거주지역, 인구 밀집 지역 상공, 이동하는 차량 상공에서 비행 시 드론 추락으로 인한 충돌 영향성을 다음과 같이 분류함에 따라 비행을 원칙적으로 금지하고 있다[28,29].

- 카테고리 1
 - 0.55 lbs(250 g) 이하 소형 드론은 추락하거나 충돌하여도 위험도가 낮다고 판단하여, FAA는 운용상 추가 제약사항 없음.
- 카테고리 2
 - 0.55 lbs(250 g)를 초과하는 소형 드론이 사람이 모여있는 군중 상공에서 운용 중 추락 시, 소형 드론-사람 충돌로 인해 심각한 부상을 야기하는

운동에너지(14 J 이하)를 기체 제작사가 입증하는 경우 FAA는 운용상 추가 제약사항 없음. 카테고리 1처럼 기체 중량만을 고려하지 않고 운동에너지를 고려한 성능 기반의 요구사항 제시.

- AIS 3등급은 의식불명(1~6시간), 두개골 및 흉부 함몰골절, 심장 타박상, 늑골 골절 2~3개 골절, 사망률 0.8% - 2.1%에 해당[30]

• 카테고리 3

- 카테고리 2에서 제시한 14 J 이하보다 높은 운동에너지(33J 이하)를 제시하고 있으나, 건물 내부 또는 제한 구역 내 사람 머리 상공이 아닌 경우 FAA는 운용상 추가 제약사항 없음

Table 2. FAA 소형드론 분류기준 권고안

등급	분류기준	성능기준
CAT1	- 250 g 이하	- 산업계 자체적 기준
CAT2	- 250 g 초과 - AIS 3등급 가능성 1% 이하	- 운동에너지 시험 - 노출된 회전부품 충격 분석 - 제작사 운용교범 제공
CAT3		
CAT4	- AIS 3등급 가능성 30% 이하	- CAT2 성능기준을 적용하여 추가적인 2차 사고 고려 - 사람 위 비행시 위험경감계획 요구

FAA는 14 CFR part 107을 통해 거주지역, 인구밀집 지역 상공 등에서 드론의 운영을 금지하고 있으나, 드론 추락으로 인한 충돌 영향성 경감 대책이 수립된 드론의 경우 비행 제한 사항을 면제하고 있는 정책을 펼치고 있다.

버지니아 공과대학은 FAA가 규정하고 있는 지상 위험 중 impact model 관련 연구를 통해 사람 위 비행금지에 대한 제한사항 완화를 위한 낙하산 장착 드론 낙하 시험, 드론 낙하시 인체 상해 연구 등을 수행하고 있다[31]. 이 중, DJI사 매빅 상용 기체에 ParaZero사 낙하산을 탑재하여 드론 안전성 시험을 진행하였다. 낙하산이 전개된 상태에서 시속 77 km/91 km/100 km/108 km로 달리는 차량 전면 유리에 부딪혔을 때 운동에너지를 측정하였는데, 차량 유리 긁힘, 깨짐 등은 발생하지 않고 기체와 부딪쳐 생긴 고무자국 흔적만이 발생하였다.

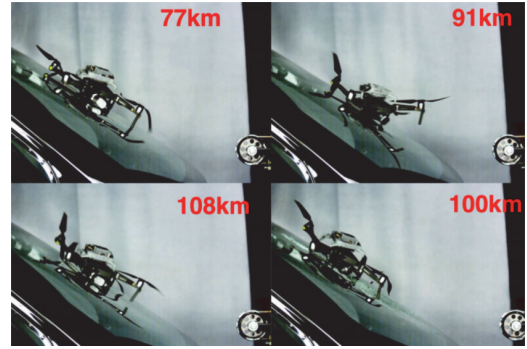


Fig. 3. Impact model 시험 사례

이런 연구결과는 안전한 드론 개발에 도움을 제공함으로써 드론 운용 제고에 많은 기여를 할 것으로 판단된다. 또한, 낙하산 장착 드론은 FAA 규정에서 제한하고 있는 사람이 많이 모여있는 장소, 주거 밀집 지역 및 차량 상공 등에서 최소한의 위험경감계획에 따라 비행이 가능하며, 충돌시 낮은 운동에너지로 인한 드론 생존성 또한 향상되는 효과를 기대할 수 있다.

2.2 유럽항공안전청(EASA)

EASA는 유럽 국가별 민간 항공 당국이 참여하여 항공안전규정 실행 및 감시, 회원국에 대한 안전점검, 안전 분석 및 연구를 수행하는 기관이다. 현재, EASA는 다양한 운용 목적에 따라 운용되는 드론의 안전 확보를 위하여 위험 기반 접근 방식을 준용하고 있다. 이에 따라 EASA는 드론의 운용을 위험도 수준에 따라 저위험군(open), 중위험군(specific) 및 고위험군(certified)으로 구분하고 있다. 운용구역 내 인명을 통제하거나, 충돌시 지상 인명에 전달되는 에너지를 감소시키는 장치(Fig. 4 참고) 및 검증되고 유효한 비상대응 계획 등 위험 완화 장치/계획을 조종자가 준수하도록 권고하고 있다[32-34].



Fig. 4. 비상낙하산 전개 및 충격흡수 에어백 예시

저위험군 드론은 최대이륙중량 25 kg 이하, 균중 머

리 위 운용 금지, 가시거리 및 최대운용고도(지면으로부터 120 m 이하) 운용 등 사람에게 직접적으로 영향을 미쳤을 때 위험이 적은 운용 제한 범위를 설정한 기체를 말한다. 저위험군 드론은 운용상 제한요건에 따라 A1, A2, A3 등 3가지로 분류되며, 상세 내용은 Table 3 과 같다[35].

Table 3. EASA 드론 분류 및 해당 요건

운용방식		드론 등급 및 요건	
분류	운용지역	등급	최대이륙중량/ 운동에너지 (J) 기술요건
		사유지	- 해당 없음
A1 사람 머리 위 운용 가능	(밀집된 군중이 아닌) 운용 무관 사람들 위로 운용 가능	C0	< 250 g - < 19 m/s - 선택가능 제한고도
		C1	< 900 g or < 80 J - < 19 m/s - 운동에너지 고려 - 무선연결 불능 관리 - 선택가능 제한고도
A2 사람 근처 운용 가능	운용 무관 사람들로부터 안전거리 이격하여 운용 가능	C2	< 4 kg - 통신두절 관리 - 선택가능 제한고도
		C3	- 통신두절 관리 - 선택가능 제한고도
A3 사람 멀리 운용 가능	운용 무관 사람들이 위험하지 않다고 합리적으로 예상 가능 지역에서 운용 가능	C4	< 25 kg - 자동비행 금지 원칙
		사유지	- 해당사항 없음

2.3 북대서양조약기구(NATO)

NATO STANAG(Standardization Agreement)은 NATO 협의체 구성원 간의 규격서로, 군사용 또는 기술적 절차, 장비들에 대한 프로세스 및 용어에 대해 기술하고 있다[36]. STANAG은 NATO 회원국 간의 상호 운용성을 위한 것으로 연합 임무수행에 필수적인 통신, 정보시스템 등에 대해 기술하고 있다. 고정익, 회전익 군용무인기 감항인증기술 및 표준화 기구로 무인기 중량 150 kg을 기준으로 4개의 표준 기술을 Table 4와 같이 분류하고 있으며, 군용무인기 중량에 따른 운동에너지 기준 적용 및 최대이륙중량에 따른 가변형 위험기준체계(hazard reference system)를 규정하고 있다.

Table 4. NATO STANAG 표준 기술 분류

기준	종류	중량	비고
STANAG 4671	고정익	150 kg - 20,000kg	- 사단, 군단, MUAV 등 군용무인기 사업 적용 - Part 23급 기준
STANAG 4702	회전익	150 kg - 3,750 kg	- CS-27급 기준
STANAG 4703	고정익	150kg 이하	- 총격 에너지(66 J) 기준
STANAG 4746	경량/초경량 회전익	150kg 이하	

2.4 프랑스 민간 항공 당국(DGAC)

개인 및 상업용 드론 관련 규제 및 운용은 프랑스 민간 항공 당국(DGAC, Directorate General for Civil Aviation)이 관장하고 있으며, DGAC가 2018년 7월 제정한 드론용 낙하산 규정에서는 2 kg 미만, 2 kg - 4 kg, 4 kg - 8 kg 등 드론을 4가지로 분류하고 있다[37].



Fig. 5. 프랑스 민간항공국이 발간한 드론 리플렛

2 kg 미만 드론은 낙하산 장착 의무를 적용받지 않으며, 2 kg - 4 kg 드론의 경우 운동에너지 69 J 제한과 함께 낙하산 개폐는 별도 수신기 또는 채널에 의해 지상으로부터 15 m 높이에서 완전히 개폐되어야 한다고 명시하고 있다. 또한, fail-safe mode가 엔진 정지로 설정되었다면, 낙하산은 자동 개폐되어야 한다는 내용이 명시되어 있다.

4 kg 초과 드론의 경우, 낙하산 개폐 시 엔진 정지, 낙하산 개폐를 위한 무선 주파수 및 수신기는 드론 지휘, 통제 및 통신과 독립적으로 운용, 기체 음성 신호기는 기체 추락 시 음성 신호 제공 및 중력식 개폐 장치가 아닌 스프링 또는 불꽃에 의한 낙하산 개폐 장치여야 한다는 내용을 명시하고 있다.

또한, 2020년 12월 31일부로 프랑스는 자국 드론 규제를 포함하여 EASA에도 부합되어야 하는 이중 규제를 받도록 하고 있다[36].

Table 5. DGCA 드론 분류 및 운용 규정 사항

중량 구분	규정 내용
2 kg 미만	- 낙하산 의무 장착 대상 아님
2 kg - 4 kg	- 기체 지면 도달 시 운동에너지 69 J 이하 - 별도 채널 또는 수신기를 통해 낙하산 개폐 - 지상 15m 이내 낙하산 완전 개폐 - Fail-safe 모드가 엔진정지인 경우, 낙하산 자동 개폐
4 kg - 8 kg	- 낙하산 개폐 시 엔진정지 - 무선 주파수 및 낙하산 수신기는 드론 제어(C3, command, control and communication)에 사용되는 주파수와 독립적으로 운용 - 드론에 탑재된 음성 신호기는 기체 추락 시 경고음 제공 - 낙하산 개폐 장치는 중력이 아닌 스프링이나 불꽃에 의한 개폐 시스템으로 구성 - 충격 에너지(66 J) 기준

2.5 낙하산 장착 드론 소개

민간 드론 중 두산모빌리티 이노베이션이 제작한 DS30은 ParaZero社의 SafeAir Pro(고객맞춤형) 낙하산을 장착하였다. 군용 드론의 경우, 군단정찰용 무인항공기(한국항공우주산업), 사단정찰용 무인항공기(대한항공), SPERWER B(SAGEM사, 프랑스), LUNA X-2000(EMT사, 독일) 등이 낙하산 장착을 통해 드론의 생존성 및 비행안전성 향상을 도모하고 있다[38,39].

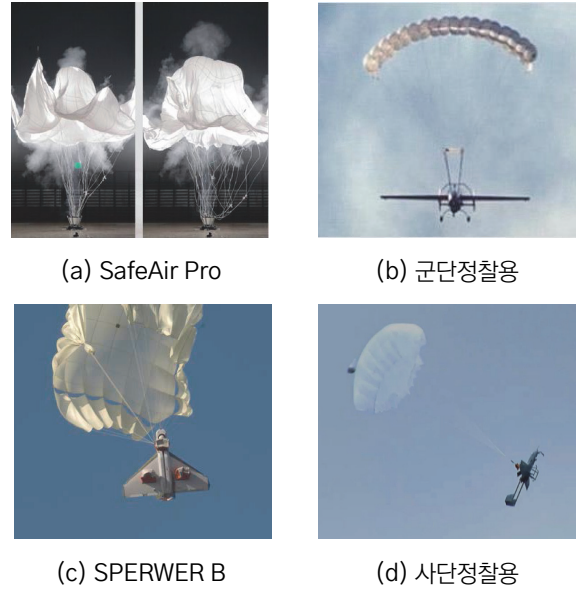


Fig. 6. 낙하산 장착 드론

3. 드론 생존성 비행시험

3.1 비행시험 설정 방법

3차원 공간에서 운용되는 드론은 운용 시 임무고도에서 위치에너지를 가지고 있으나, 돌풍, 통신두절, 조류충돌과 같은 비정상 상황 발생에 따라 양력을 잃고 지면으로 낙하하는 경우 위치에너지가 운동(충격)에너지로 변환되는 특성이 있다. 기체가 지면과 충돌 시 사람, 차량, 시설물 등에 2차 사고를 유발할 가능성이 상존하기 때문에 운동(충격)에너지를 감소시킬 수 있는 방안이 필요하다.

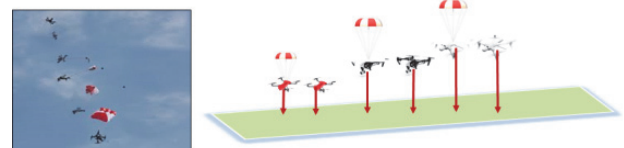




Fig. 7. 드론 낙하산 장착에 따른 낙하 모식도

낙하산은 높은 고도에서 물체 또는 사람을 지상이나 해상에 투하할 때 공기저항을 증가시켜 낙하하는 개체의 속도를 줄여주는 도구이다. 원형(round type), 고리형(circular disk type) 등의 형상이 있으며, 이중 원형(round type) 형상은 삼각뿔 형태의 천을 이어 제작한 제품으로 통기구(vent)가 없어 진동에 영향을 쉽게 받는다. 고리형(circular disk type) 형상은 원형(round

type) 형상과 유사하나 낙하산의 윗부분을 납작하고 통기구(vent)를 만들어 수평 방향으로 항력을 감소시키고 전진속도가 빠른 장점이 있다[40].

Table 6. 낙하산 형상 및 특징

구분	원형 (round type)	고리형 (circular disk type)
형상		
특징	- 상단 통기구로 인해 원형 대비 진동 감소 - 통기구가 없어 진동에 취약함 - 수평방향으로 항력 감소 및 빠른 전진속도	

운동에너지 방정식을 살펴보면 중량이나 속도 또는 고도 변화에 따라 운동/위치에너지는 증가하거나 감소한다. 낙하산 장착에 따른 드론 착륙은 낙하속도를 현저히 감속시킬 수 있어 자유낙하 대비 지면 충돌 시 운동에너지가 감소한다[41]. 이 운동에너지 방정식은 ASTM F3322-22, sUAS parachutes 표준 규격에서도 사용하고 있으며, 본 낙하시험은 기체의 중량 변화와 기체-지면 충돌 시 순간속도 측정을 통해 운동에너지를 계산할 수 있는 방법론을 채택하였다[42]. 낙하산 장착 유무에 따른 운동에너지 비교분석을 위해 낙하산을 장착하지 않은 기체와 낙하산을 장착한 기체를 대상으로 낙하시험을 수행하였다.

$$\frac{1}{2} \times m \times v^2 (\text{운동에너지}[J]) = m \times g \times h (\text{위치에너지}[J]) \quad (1)$$

운동에너지 산술식에 따라, Table 7과 같이 동일 고도에서 자유낙하를 하더라도 중량 변화에 따라 지면충돌속도는 변화가 없지만, 중량 증가 시 운동에너지는 증가한다. 고도를 달리하여 자유낙하하는 경우, Table 8과 같이 중량이 동일하더라도 고도가 증가할수록 지면충돌속도와 운동에너지는 증가한다.

낙하시험을 위한 시험군은 상용으로 많이 사용되는 약 1 kg - 2 kg(배터리 포함한 자체중량)의 드론을 설정하였고, 기체-지면 충돌 시 순간속도 변화 측정을 위해 3 m - 15 m 높이에서 3 m씩 고도를 달리하여 낙하시험

을 수행하였다. 낙하시험을 위한 대상 기체 및 낙하산 사양은 Table 9 및 Table 10과 같다.

Table 7. 중량 변화에 따른 지면 충돌 속도 및 운동에너지

중량(kg)	고도(m)	속도(m/s)	운동에너지(J)
10	15	17.15	1,470
15	15	17.15	2,205
20	15	17.15	2,940
25	15	17.15	3,675
50	15	17.15	7,350

Table 8. 고도 변화에 따른 지면 충돌 속도 및 운동에너지

중량(kg)	고도(m)	속도(m/s)	운동에너지(J)
10	3	7.67	294
10	5	9.90	490
10	10	14.00	980
10	15	17.15	1,470
10	20	19.80	1,960

Table 9. 낙하시험 대상 기체 사양










기체	형상	형태	중량(kg)	비고
기체 A		쿼드콥터	1.247 (배터리 포함)	-
기체 B		헥사콥터	1.634 (배터리 포함)	-
기체 C		쿼드콥터	2.247	기체 A + 무게추 (1 kg)

Table 10. 제품별 낙하산 사양

구분	형상	낙하산 형태	최대 수용가능한 기체 중량(kg)	낙하산 크기 (cm)	낙하산 무게 (g)	런처 포함 무게 (g)	런처 크기 (cm)	금액 (USD)
MARS mini V2			1.8	91.4	31.2	99	11 x 3.8	160
MARS 58 V2		원형 (round type)	4.5	148	88	277.5	13.5 x 5.7	450
Harrier 40-30			2.54	76.2	27.7	81.3	10.3 x 4	310
Harrier 50-48		고리형 (circular disk type)	6.2	121.9	74.4	268.7	17.6 x 5	475

운동에너지 분석은 일반적으로 물리학 시험에서 많이 사용되는 Logger Pro 3을 사용하였다. 이 영상분석 프로그램은 포물선 또는 수직 낙하하는 물체의 위치별 순간속도를 측정할 수 있는 도구로, 영상 내 최초 낙하지점을 사용자가 설정하면 영상분석을 통해 프레임별로 낙하 궤적을 분석하여 프레임별 낙하 지점을 영상 내 표시하고 프레임별 시간, 순간속도 등을 Fig. 8과 같이 그래프 및 표를 통해 해당 지점의 분석된 값(지점별 시간, 순간속도 등)을 사용자에게 제공한다[42].

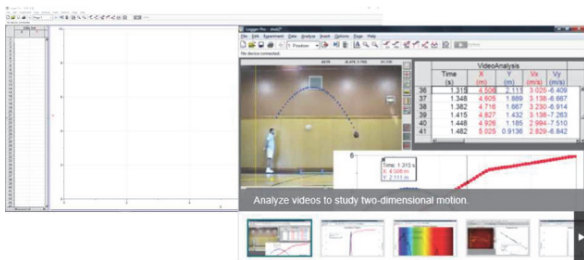


Fig. 8. Logger Pro 인터페이스(예)

3.2 낙하산 미장착 드론 비행시험

드론 양력을 발생시키는 모터를 정지시켜 자유낙하하는 비정상 상황을 모사하여 Fig. 9과 같이 실증시험을 수행하였다. 낙하 고도는 지면으로부터 3 m부터 최대 15 m 높이까지 5구간 (3 m/6 m/9 m/12 m/15 m)으로 설정하여 자유낙하하는 시험 상황을 영상장비로 녹화하였다. logger pro는 녹화 영상으로부터 최초 기체

낙하 고도를 사용자가 설정하면 기체가 지면에 충돌하는 순간속도를 자동으로 분석하여 구간별 순간속도, 운동에너지 등을 사용자에게 제공한다.



Fig. 9. 자유낙하 실증시험 모습(Logger Pro 도구 화면 캡처)

자유낙하 시험 대상 기체별 지면 충돌 직전 속도 및 운동에너지를 산출한 결과는 Fig. 10과 같다. 같은 중량인 경우, 자유낙하 고도가 높을수록 낙하속도가 증가하며, 이에 따라 운동에너지가 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한, 기체 중량이 증가(기체 A: 1.274 kg; 기체 C: 2.272 kg)할수록 동 고도에서 자유낙하 시 중량이 무거운 기체 C의 낙하속도가 증가하고 있는 것으로 분석되었으며, 이에 따른 운동에너지 또한 증가하는 것을 확인

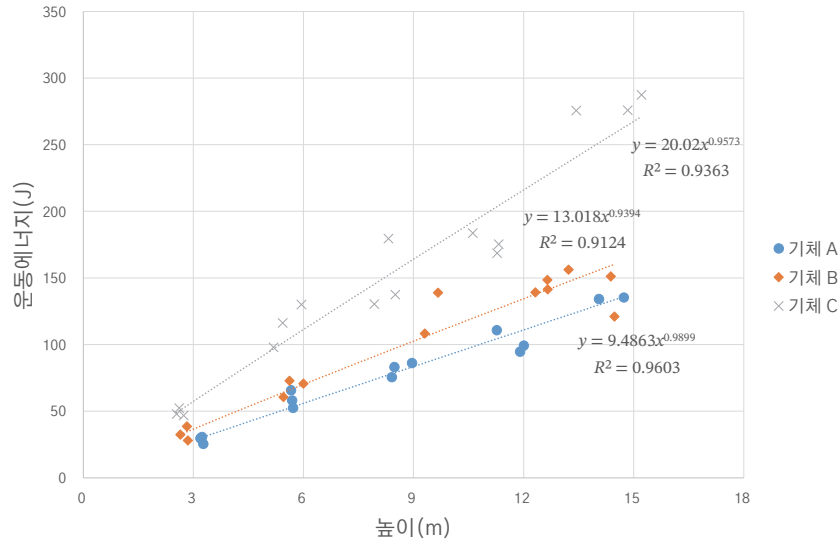


Fig. 10. 중량별 고도별 운동에너지 결과

하였다. 자유낙하 운동에너지 결괏값을 근간으로 추세 예측하였을 때, 결정계수(R^2)는 모두 1에 가까운 값이 도출되어, 통계적 유의성이 잘 설명되었고 이 시험이 유의미한 결과임을 알 수 있다.

3.3 낙하산 장착 드론 비행시험

낙하산이 장착된 드론 낙하 실증시험은 자유낙하 시험과 같이 모터를 중지시켜 낙하시험을 수행(Fig. 11 참고)하였으며, 사출형식의 낙하산은 모터, 프로펠러 작동에 영향을 주지 않는 위치에 장착(Fig. 12 참고)하여 자유낙하할 때 개폐될 수 있도록 설정하였다. 낙하 고도는 6 m부터 15 m까지 4구간(6 m/9 m/12 m/15 m)에서 낙하시험 고도를 설정하고, 자유낙하시험 대상 기체와 동일한 기체(기체 A/B/C)에 MARS 58 V2/MARS mini V2(원형), Harrier 40-30/Harrier 50-48(고리형) 등 4종을 장착하여 낙하시험을 수행하였다.

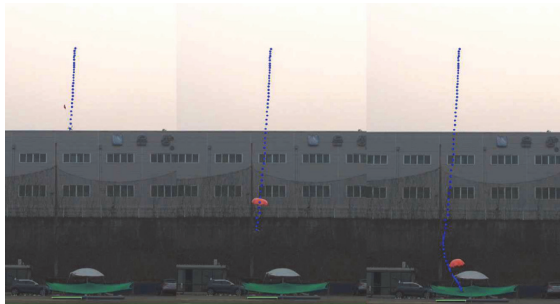


Fig. 11. 낙하산 장착한 기체의 낙하 시험 모습(logger pro 도구 화면 캡처)



Fig. 12. 스프링 사출 방식 낙하산 발사대 형상

해당 시험은 기체 낙하 시 낙하산이 완벽하게 개폐된 시험에 대해서만 분석을 실시하였으며, 완전히 개폐되지 않은 경우는 낙하산 개폐에 따른 영향이 없을 것으로 판단되어 분석 대상에서 제외하였다. 기체 A/B+4종 낙하산, 기체 C+2종 낙하산 장착에 따른 낙하시험 결과, 낙하산 크기가 클수록, 중량이 가벼울수록 지면 충돌속도가 감소하는 것을 확인하였다. 자유낙하 실증시험은 고도가 높을수록 지면 충돌속도 및 운동에너지가 증가하나 낙하산 낙하시험은 낮은 고도일수록 낙하산 개폐에 따른 운동에너지를 충분히 감쇄하지 못하여 운동에너지 및 지면 충돌속도가 증가하는 것으로 분석되었다. 그러나 지면 운동에너지는 자유낙하 대비 높은 수준으로 경감되었음이 확인되어 낙하산 장착 낙하시험을 통해 유의미한 결과가 도출되었다. MARS mini V2 및 Harrier 40-30의 최대 수용가능한 기체 중량이 기체 C 중량을 초과하기 때문에 기체 C+낙하산 장착 낙하시험에서는 제외하였다.

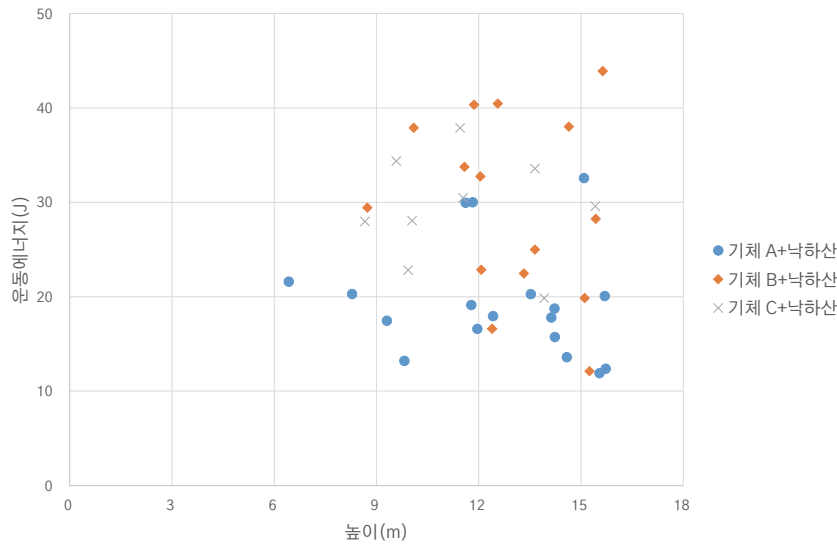


Fig. 13. 낙하산 장착에 따른 운동에너지 결과

4. 결론

세계적으로 드론 활용도 증가에 따라 드론 추돌, 추락과 같은 사고 또한 증가하고 있다. 항공 선진국 및 기관에서는 임무, 성능, 기체 중량, 안전성 요구수준 및 운동에너지 등 다양한 방법으로 드론을 분류하고 성능 및 기술 기준을 수립하고 있다.

FAA, EASA, NATO 및 프랑스 등 대부분의 나라에서는 인구밀집지역, 거주지역, 운동장, 차량 위 등에서의 비행을 제한하고 있다. 비정상상황을 고려한 비행 제한을 명시하고 있으나, 지상 위험 기반 연구를 통해 드론 생존성 및 비행안전성 제고 연구가 진행됨에 따라 인구밀집지역, 거주지역에서의 비행 제한을 해소하는 규정 또한 수립되고 있다.

본 연구에서는 지상 위험 기반의 impact model 분석을 위한 실증시험을 수행하고 이를 산술식과 비교 분석하였다. 낙하산 장착 여부에 따른 지면 충돌 운동에너지 시험 결과, 운동에너지는 드론 중량과 고도 변화에 따라 변화하며, 낙하산 미장착 드론 대비 낙하산 장착 드론의 운동에너지가 감소되는 유의미한 시험 결과값이 도출되었음을 확인하였다. 이 결과는 항공 선진국이나 기관에서 제시하고 있는 운동에너지와 동등하거나 이하 수준이며, 낙하산 장착 드론의 생존성 향상과 비행 제한 구역 내 운용 가능한 비행안전성 증대 효과가 기대된다. 현재 우리나라는 낙하산 장착에 대한 구체적인 규정이 존재하지 않으나, 드론을 도심지, 인구밀집지역 등에서 운용 시 비행금지 조항을 면제할 수 있는

안전장치가 될 수 있다.

드론 낙하산은 스프링, 슬링/캐터펄트, 폭발물, 압축가스 등으로 사출되는 형상의 낙하산이 개발되었으며, 향후 개발 고려되어야 할 부분으로 일반적인 비행상황에서 발생하지 않는 이상 자세각도와 IMU 센서로부터 가속도, 자이로 값을 통해 낙하산 개폐조건을 충족하는 독립형 자가 판단 제어가 필요하다. 향후, 무인비행장치 교통관리(UTM, UAS traffic management), 도심항공모빌리티(UAM, urban air mobility) 등 드론 산업이 발전하게 되면 도심지 비행은 필수적이기 때문에, 비행 안전을 위한 이중화(redundancy) 확보, 기체 안전신뢰도 향상을 위한 연구 및 규정 정비 또한 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] World Economic Forum, world economic forum annual meeting, 2016.
- [2] 국토교통부, 한국형 도심항공교통(K-UAM) 기술로드맵, 2021
- [3] 류태규, “4차 산업혁명 기술과 국방연구개발 방향”, 국방정책연구 제35권 2호, 2019.
- [4] 국방부, 「국방 드론 발전 전략」 추진계획, 전력정책관실, 2021.
- [5] 소재현, 무인비행장치(드론 관리를 위한 법제 개선방안 연구, 한국교통연구원, 2017.
- [6] FAA, committee on assessing the risks of unmanned aircraft systems integration.
- [7] DoD, UAS roadmap 2005-2030.
- [8] FAA, UAS registration task force aviation rulemaking committee, 2015.
- [9] Andrew V.shelly, a model of human harm from a falling

- unmanned aircraft, *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, Vol. 3, No. 3, 2016.
- [10] 김지훈, EU 항공법상 무인항공기 관련 규정의 최근 개정 동향 및 시사점, 강원대학교 비교법학연구소, 제56권, 2019.
- [11] Jeff B., Joyce F., Shereef S., Laurence A., Art B. and Michael H., *Modeling Risk-based Approach for Small Unmanned Aircraft Systems*, MITRE, 2018.
- [12] 김주표, 무인항공기 드론 사고의 법적 책임과 보험제도, *기업법연구* 제32권, 제4호, 2018.
- [13] 박재현, “드론추락으로 차량 박살...드론 주인 몰라 차주가 피해,” *국민일보*, 2018. 5.10.
- [14] ○○○ 제 ○사단, *훈련 비행 중 추락*, 2019.
- [15] *Cybrsecurity Policy*, National Security Presidential Directive-54, Homeland security Presidential Directive 23, JAN. 2008.
- [16] Ben Webster, *This is Your Pilot. You Don't Need Me*, *TIMES(UK)*, APR. 2, 2007.
- [17] The UK Airprox Board, *A British Airways plane approaching Heathrow is believed to have hit a drone while in midair*, 2016. 4. 17.
- [18] 김주엽, “송도 상공 비행하던 드론, IBS 타워 충돌,” *경인일보*, 23면, 2016. 5. 12.
- [19] 신현우, “장흥서 날개 23m 드론 추락...인명피해 없어,” *머니투데이*, 2017. 7. 27.
- [20] EASA, *concept of operations for drones – a risk based approach to regulation of unmmanned aircraft*, cologne, 2015.
- [21] SESAR, *CORUS U-space concept of operations*, 03.00.02 Ed., 2019.
- [22] Ryan W., *Type and Airworthiness Certifications*, FAA UAS symposium, 2017.
- [23] 국방과학연구소, *소형무인기 66J 충돌에너지 의미와 안전설계 적용방안 연구*, 2019.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] JARUS, *JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment*, 2nd Ed., 2019.
- [27] 한국교통연구원, *무인비행장치(드론) 관리를 위한 법제 개선방안 연구*, 2017.
- [28] 14 CFR part 107 subpart B-Operating Rules (§107.11 – 51).
- [29] 14 CFR part 107 subpart D-Operations Over Human Beings (§107.100-165).
- [30] 국토교통부, 한국교통연구원 및 한국항공우주연구원, *드론 활성화 지원 로드맵 연구*, 2017.
- [31] <https://vtx.vt.edu/articles/2021/03/ictas-maap-statefarm-windshield-testing.html>
- [32] EASA, *Commission Implementing Regulation 2019/947 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft*, 2019.
- [33] 항공철도 사고조사 위원회, *항공기 준사고 조사보고서*, ARAIB/AIR1606, 2018.
- [34] <https://www.uasvision.com/2020/01/10/uav-landing-made-safer/>
- [35] EASA, *Opinion No. 01/2018*.
- [36] 국토교통부, *2021년 국내외 드론 산업 동향보고서*, 2021.
- [37] <https://www.ecologie.gouv.fr/en/french-civil-aviation-authority>
- [38] <https://parazero.com/products/safeair-350/>
- [39] 국토교통부, *상업용 민간 무인항공기 보급 기반 구축 기획 최종보고서*, 2012.
- [40] 장우영, *질량 감소가 낙하산 시스템의 하강 고도 변화에 미치는 효과*, 한국항공우주학회, 2016.
- [41] 백경미, *무인기 안전추락방지를 위한 낙하산기반 착륙유도장치 기초연구*, 한국항공우주학회 추계학술대회, 2016.
- [42] ASTM, *Standard specification for small unmanned aircraft system parachutes*, ASTM F3322-22, 2022.
- [43] (주)한국과학, *logger pro 3 프로그램 사용 안내서*, (주)한국과학.