

들불화재 초기 진압을 위한 자동소화드론의 운용 방안

김승환*, 최제호**, 김영현*, 이경수*, 최승규*

*건양대학교 대학원 재난안전소방학과, **건양대학교 대학원 스마트농산업학과
e-mail:skchoi@konyang.ac.kr

Operation of Automatic Diffusion Fire Extinguishing Drone for Initial Suppression of Wild Fire

Seung-Hwan Kim*, Je-Ho Choi*, Young-hyun Kim*, Kyung-Soo Lee*,
Seung-Kyou Choi*

*Dept. of Disaster Prevention and Security, **Dept of Smart Agricultural Technology and Innovation, Konyang University

요약

최근의 산림화재는 기상이상으로 인한 강한 바람과 건조한 날씨로 확산 속도가 매우 빠르며, 짧은 시간에 화재 규모가 대형화된 다. 우리나라는 국토의 약 64.5%가 산림이며, 특히 침엽수 비율이 높아 산림화재에 매우 취약하다. 논·밭두렁 및 쓰레기 소각 등의 실수로 발생하는 들불화재가 확대되어 산림으로 전이된 비율은 17.8%에 이르며, 산림화재의 주요 원인이 되고 있다. 특히, 2025년 3월에 발생한 청도 산림화재는 논, 밭 소각으로 들불이 인근 야산으로 확산되어 큰 인명과 재산피해를 발생시켰다. 들불에서 시작되는 대형 산림화재 진압은 인력과 장비 투입에 한계가 있어 들불화재 초기에 진압하는 것이 매우 중요하다. 이에, 본 논문에서는 RTK-GPS를 이용한 고정밀 비행과 화선을 따라 중첩된 살수반경으로 군집 배치하여 효율적으로 들불화재를 초기에 진압 할 수 있는 강화액 소화약제가 장착된 자동소화드론의 운용 방안과 알고리즘을 제시한다. 제시한 자동소화드론의 운용 방안과 알고리즘이 강한 바람과 복잡한 지형으로 접근이 어려운 들불화재를 초기에 진압할 수 있어 산림으로의 확산하는 대형 화재 방지에 유용할 것으로 기대한다.

1. 서론

우리나라는 국토의 약 64.5%가 산림으로 구성되어 있으며, 이 중 상당 부분은 경사가 급하고 연속된 산지 지형으로 이루어져 있다. 이러한 지형적 특성은 화재 발생 시 소방차나 인력이 직접 접근하기 어렵게 만들고, 화염의 확산 속도를 가속화시키는 요인으로 작용한다. 특히, 활엽수의 비해 화재강도가 2배 높은 침엽수 비율이 36.9%에 달하는 산림 구조는 송진과 낙엽 등 가연성 물질이 많아, 단시간 내 대규모 산림화재로 이어질 가능성이 높다[1].

기후적인 측면에서도, 봄철(3~4월)에는 강수량이 적고, 건조한 편서풍이 불면서 화재 발생 위험이 급격히 높아진다. 실제로 대부분의 대형 산림화재는 이 시기에 집중되고 있으며, 건조특보 발령 지역에서 동시에 산불이 발생하는 '동시다발 화재' 현상도 점차 증가하는 추세다.

또한 농촌 지역에서는 논·밭두렁이나 농업 폐기물의 소각 관행이 여전히 이어지고 있으며, 그 중 상당수가 들불화재로 발전한 후 산림으로 확산되는 양상을 보이고 있다. 특히, 농촌 고령화와 인력 부족으로 인해 소각 후 뒷정리나 감시가 소홀한 경우가 많아, 사소한 부주의가 대형 산림화재로 이어지

는 경우가 빈번하다.

이와 같은 들불에서 확산한 산림화재는 기후이상으로 인한 강한 바람과 건조한 날씨로 매우 빠르게 확산, 대형화 되어 많은 인명과 재산피해를 발생시킨다. 따라서, 산림화재로 확대되기 전 들불 초기에 진압하는 것이 매우 중요하며, 초기 진압을 위해 드론을 활용하면 부족한 인력과 장비를 해결하고 산림화재로 확대되는 것을 방지할 수 있을 것이다[2].

이에 본 논문에서는 RTK-GPS를 이용한 고정밀 비행과 화선을 따라 중첩된 살수반경으로 군집 배치하여 효율적으로 들불화재를 초기에 진압 할 수 있는 강화액 소화약제가 장착된 자동소화드론의 운용 방안을 제안한다.

2. 산림화재 사례 및 특성분석

최근의 산림화재 사례를 보면, 2019년 4월4일 강원도 인제군에서 밭의 잡초를 소각을 하다가 들불화재가 발생하여 산림화재로 확산되었으며, 피해 면적은 345ha로 총 23억4000만원의 재산피해가 있었으며, 2023년 4월2일 충청남도 홍성군 서부면에서 발생한 산림화재로 피해 면적이 1,337ha, 899억의 재산피해가 발생하였다.

한편, 2025년 3월14일 청도 산림화재를 시작으로 전국적으로 확대되어 총 31명이 사망을 하였고 45명의 부상자가 발생하여 많은 인명피해가 발생하였다. 피해 면적은 48,675ha 이상으로 광범위한 임야가 전소되고 가옥이 소실된 최대 규모의 산림화재로 보고되었다. 산림청 자료에 따르면 표1과 같이 매년 산림화재가 전국적으로 빈번히 일어나고 있고 많은 피해가 발생하는 것을 알 수 있다.

[표 1] 5년간 산림화재 발생 현황

년도	2020	2021	2022	2023	2024
건수	620	349	756	596	279
면적(ha)	1,120	766	24,797	4,992	132
금액	158,141	36,125	2,925,560	464,130	9,244

또한, 산림청 원인별 산림화재 발생 현황을 보면 2022년도에 총756건의 산불이 발생 하였으며, 그 중 표 2와 같이 논, 밭두렁 소각이 44건, 쓰레기 소각이 59건으로 13.63%로 조사되었다. 2023년에는 총 596건의 산림화재가 발생하였고 논, 밭두렁 소각이 53건 쓰레기 소각이 73건으로 21.14%이다. 2024년도에는 총 279건 산불 중 논, 밭두렁 소각이 24건, 쓰레기 소각이 28건으로 18.63%로 논, 밭, 쓰레기 소각으로 들불화재가 산림화재로 확산되는 경우가 많다는 것을 알 수 있다. 2025년 3월 전국 동시다발 산림화재에서도 논, 밭, 쓰레기 소각으로 발생한 화재가 많은 부분을 차지하고 있다.

[표 2] 원인별 산림화재 발생현황

원인/년도	2022	2023	2024
입산자실화	253	170	49
논,밭 소각	44	53	24
쓰레기소각	59	73	28
담뱃불실화	53	56	36
성묘객실화	14	23	6
불장난	-	1	1
건축물화재	51	41	14
기타	282	176	121
총	756	596	279

들불화재는 대부분 인위적인 행위에서 발생하며, 발생 초기에는 화재의 규모가 작고 확산 속도도 비교적 느리기 때문에 초기 대응이 적절히 이루어진다면 산림화재로의 확산을 효과적으로 차단할 수 있다.

이에 본 논문에서는 산림화재의 주요 원인인 들불화재를 초기에 진압하기 위한 자동소화드론의 운용 방안을 제안한다.

3. 기존의 화재 진압용 드론 연구 사례 분석

2021년 충청소방학교는 고층 화재 진압을 위한 드론 시연을 진행했다. 드론은 경량 호스를 장착하고 25m까지 상승해 10kg/cm² 압력으로 20m 거리까지 물을 분사하는 성능을 5분간 유지했다. 기존 고가사다리차가 70m까지만 대응 가능한 점을 고려할 때, 드론은 23층 이상 화재 진압의 새로운 대안으로 주목받고 있다.

소화용 공을 발사하거나 투하할 수 있는 이중 메커니즘을 갖춘 소방용 무인 항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 시스템이 제안되었다. 이 UAV는 2.4GHz RF 신호와 영상 감시 장비를 이용해 원격 조종되며, 고층 건물에 신속히 접근해 소방대원의 시야를 확보하고 초기 화재 확산을 효과적으로 차단해 진압 효과와 안전성을 높일 수 있다.

한국 산림청은 구형, 원통형, 단발형 소화탄을 탑재한 드론 시스템을 개발하여 산불 발생 시 초기 대응과 화재 확산 방지를 목표로 운용하고 있다. 이 드론은 차량 접근이 어려운 지역에서도 효과적으로 사용할 수 있으며, 실증 실험을 통해 높은 안정성과 진화 성능을 입증하였다.

상기의 화재 진압용 드론 시스템은 다수의 소화탄을 투하해 방화선을 형성하는 방식이기 때문에, 강한 바람과 지형이 복잡한 환경에서는 분말형 소화약제가 제대로 확산되지 못하거나 화점에 정확히 도달하지 못해 소화 효과가 저하되는 한계가 있다.

4. 들불화재 초기 진압용 자동소화드론

본 장에서는 드론을 이용하여 빠르고 정밀하게 들불 화선을 파악하고 화점에 강화액 소화약제를 분사하여 초기에 화재를 진압하는 자동소화드론의 운용 방안을 제안한다. 제안하는 자동소화드론은 사전에 설정된 경로를 따라 정밀하게 비행하고, 열화상카메라를 탑재해 실시간으로 화재지점을 탐지한다. 열화상카메라는 들불화재의 위치와 형태를 영상으로 송신하고 분석해 화선을 파악하는데 활용된다[4].

자동소화드론은 파악된 화선의 위치 정보를 기반으로 화재의 주요 지점에 신속하고 정밀하게 소화약제를 분사하여 화재진압을 수행할 수 있어야 한다. 이때 활용되는 핵심 기술이 RTK(Real Time Kinematic) 기반의 고정밀 위치 측위 시스템이며, 외부 환경 변화에 보다 유연하게 대응할 수 있고 정밀한 위치 조절을 통해 소화 범위와 효율을 극대화할 수 있다[5].

자동소화드론에 장착되는 소화기는 화원에 강화액 소화약제를 분사시키는 장치로, 기존에는 온도 감지 방식으로 작동하였으나, 드론이 화점에 도달했을 때 자동으로 작동한다. 자

동소화드론에 장착되는 소화기의 외형과 사양은 그림 1와 표 3과 같다.

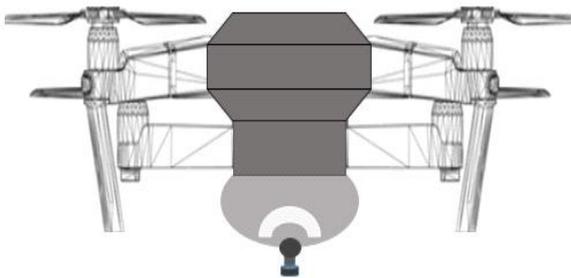


[그림 1] A사 자동식소화기

[표 3] A사 자동식소화기 제품사양

저장압력	0.7~0.98MPa
공칭방호면적	10m ²
사용온도범위	-20℃~40℃
소화약제	강화액 3kg(K ₂ CO ₃)
약제방출방식	축압식
중량	5kg
소화살수거리(살수반경)	6m(3m)

들불 화재의 초기 진압을 보다 효과적으로 수행하기 위한 자동소화드론의 예시도는 그림 2와 같으며, 강화액 소화약제가 축압된 자동식소화기를 장착하고 있다.



[그림 2] 자동소화드론 예시도

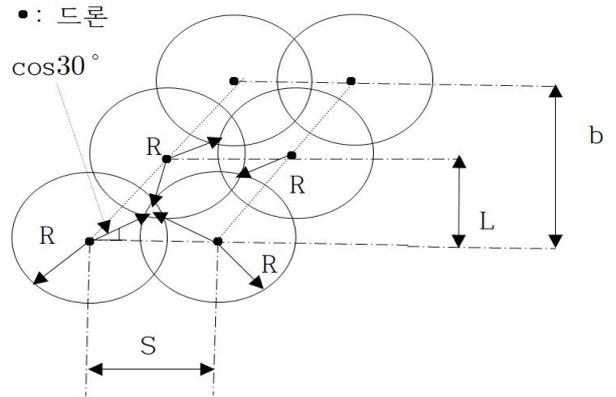
5. 자동소화드론의 운용 방안 및 알고리즘

자동소화드론에 적용되는 RTK-GPS 기반의 측위 기술은 열화상카메라와 결합하여 복잡한 지형에서도 목표 지점에 정확하게 접근할 수 있도록 지원한다. 여러 대의 드론이 협업하는 군집 비행 체계에서도 정밀한 형상 유지와 동기화된 임무 수행이 가능하며, 호버링 기술로 공중에서 흔들림 없이 정지 상태를 유지할 수 있다. 들불화재는 그 발생 영역이 넓고 확산 속도가 빠르기 때문에 단일 드론만으로는 화재진압에 한계가 있다.

이에, 본 논문에서는 들불화재를 초기에 진압하기 위한 자동

소화드론의 군집 협업을 제안한다. 제안하는 자동소화드론의 군집 협업은 열화상 카메라를 장착한 리더 드론이 화성과 지형정보를 파악하여 군집 소화 드론이 수행할 비행 임무 및 목적지에 대한 GPS 경로를 수신한다. 경로를 수신한 리더 드론은 모든 군집 드론을 하나의 네트워크로 연결시키고, RTK 기술 기반으로 신속하고 정밀하게 들불화재 현장으로 이동시켜 소화 작전을 수행한다.

들불화재를 초기에 진압하기 위한 자동소화 군집 드론은 식 1에 따라 살수 범위가 일정 부분 중첩되도록 그림 3과 같이 배치한다.



[그림 3] 자동소화 드론 배치도

$$S = (2R\cos 30^\circ) \times 0.8$$

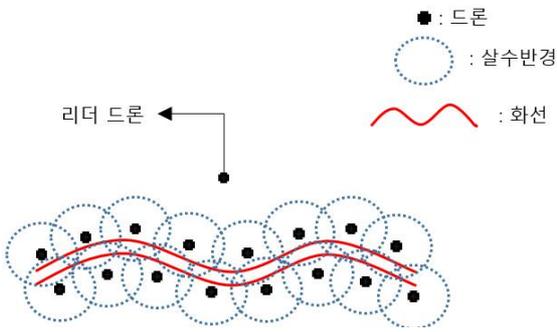
$$b = 2S\cos 30^\circ$$

$$L = \frac{b}{2} \tag{식 1}$$

여기서, S는 자동소화드론의 수평 거리, R은 살수반경, L상단 자동소화드론 수직거리, b는 직상단 자동소화드론 수직거리이다.

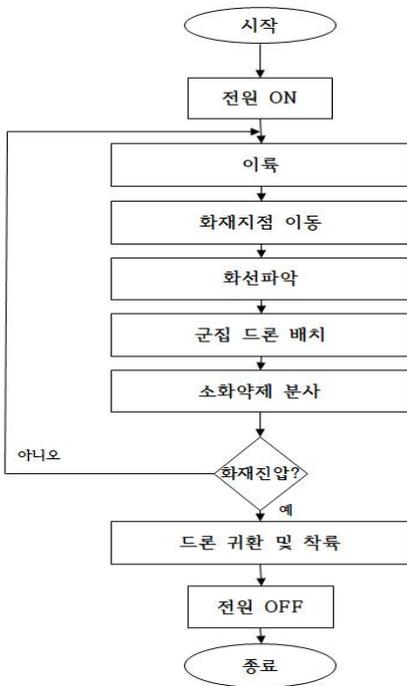
자동소화 군집 드론의 중첩배치는 들불화재 진압의 효율성을 높이는 데 핵심적인 역할을 한다. 중첩률은 인접 드론 간 살수 영역이 겹치는 비율을 의미하며, 실제 화재 진압 환경에서 바람, 지형 변화, 소화약제 분사 오차 등을 보완한다. 중첩률은 일반적으로 10%에서 30% 사이가 가장 이상적이라고 평가되며, 본 연구에는 20% 중첩 기준을 적용하였다.

상기에서 제안한 식과 살수반경을 적용하여 자동소화드론을 화선에 따라 중첩 배치한 예시도는 그림 4와 같다.



[그림 4] 화선에 따른 자동소화드론 배치 예시도

또한, 상기에서 제안한 RTK-GPS를 이용한 고정밀 비행과 화선을 따라 중첩된 살수반경으로 군집 배치하여 효율적으로 들불화재를 초기에 진압 할 수 있는 강화액 소화약제가 장착된 자동소화드론의 운용 알고리즘을 그림 5와 같이 제시한다.



[그림 5] 자동소화드론의 운용 알고리즘

제시한 알고리즘을 구체적으로 설명하면,

- [Step 1] 드론에 전원이 공급되고 이륙하여 화재지점으로 이동하여 화재진압 임무를 시작한다.
- [Step 2] 화재지점으로 이동한 리더드론이 RTK-GPS와 열화상 카메라를 활용하여 정확한 화재규모와 위치 정보를 전송한다.
- [Step 3] 전송된 정보를 바탕으로 자동소화드론의 높이와 살수범위가 화선에 일정 부분 중첩되게 드론을 배치한다.
- [Step 4] 중첩되게 화선에 배치된 자동소화드론에서 일시에 강화액 소화약제를 분사하여 화재를 진압한다.

[Step 5] 화재진압이 완료되면 군집 드론의 임무는 완료되고, 화재진압이 실패하면 귀환하여 소화약제를 교체하고 화재진압 임무를 다시 수행한다.

상기에서 제안한 자동소화드론의 운용 방안을 강한 바람과 복잡한 지형으로 접근이 어려운 야외에서 발생하는 들불화재를 초기에 진압하여 산림으로 확산하는 대형화재 방지에 유용할 것으로 기대한다.

6. 결론

최근의 산림화재는 기상이상으로 인한 강한 바람과 건조한 날씨로 확산 속도가 매우 빠르며, 짧은 시간에 화재 규모가 대형화된다. 우리나라는 국토의 약 64.5%가 산림이며, 특히 침엽수 비율이 높아 산림화재에 매우 취약하다. 눈·발두렁 및 쓰레기 소각 등의 실수로 발생하는 들불화재가 확대되어 산림으로 전이된 비율은 17.8%에 이르며, 산림화재의 주요 원인이 되고 있다. 들불에서 시작되는 대형 산림화재 진압은 인력과 장비 투입에 한계가 있어, 들불화재 초기에 진압하는 것이 매우 중요하다. 이에, 본 논문에서는 RTK-GPS를 이용한 고정밀 비행과 화선을 따라 중첩된 살수반경으로 군집 배치하여 효율적으로 들불화재를 초기에 진압 할 수 있는 강화액 소화약제가 장착된 자동소화드론의 운용 방안을 제안한다. 제안한 자동소화드론의 운용 방안을 강풍이나 복잡한 지형으로 접근이 어려운 야외에서 발생하는 들불화재를 초기에 진압하여 산림화재로의 확산 방지에 유용할 것으로 기대한다.

향후, 본 논문에서 제안한 들불화재 초기진압용 자동소화드론의 운용방안과 알고리즘을 적용된 시뮬레이터를 구현하고 실증하여 산림화재 확산 방지에 유용함을 확인하고자 한다.

참고문헌

- [1] 산림청, 산림기본통계, 2020
- [2] 하강훈, 김재훈, 최재욱, “소방드론 도입에 따른 소방공무원의 인식과 드론의 운용 및 활용에 관한 연구 - 전라남도 소방공무원을 중심으로”, 한국산학기술학회 학회지, pp.332-340, 2021
- [3] 소방청, “소방드론, 지난해3,628번 뺐다. 재난현장서 역할 특특” 보도자료 2024
- [4] 이민재, 신상균, 김주연, 장승수, 한상수, 최찬호, 조우성, “산불의 효과적 진압을 위한 인공지능 및 영상기반 드론 임무제어 시스템”, 한국정보기술학회 학회지, pp.75-85, 2022
- [5] 이상웅, 곽준영, 주백선, “RTK-GPS를 사용한 무인항공기의 자율비행 성능 실험”, 한국정밀공학학회 학회지, pp.54, 2019