

들불화재 초기 진압을 위한 군집 자동소화드론의 운용 방안 및 검증

김승환*, 최재호**, 김승한***, 조윤찬*, 최승규*

*건양대학교 재난안전소방학과, **건양대학교 스마트농산업학과, ***건양대학교 방재보안학과
e-mail:25609510@konyang.ac.kr

Operation Strategy and Validation of Swarm-Based Automatic Firefighting Drones for Early Suppression of Grassland Fires

Seung-Hwan Kim*, Je-Ho Choi**, SeungHan Kim***, Yun-Chan Jo* Seung-Kyou
Choi*

*Dept. of Disaster Safety & Fire Fighting, **Dept. of Smart Agricultural Technology and
Innovation, ***Dept. of Disaster Prevention and Security, Konyang University

요약

최근 산림화재는 강한 바람과 건조한 기후로 인해 확산 속도가 빠르고 단시간 내 대형화되는 경향을 보인다. 우리나라는 산림 비율이 높고, 논·밭두렁 및 쓰레기 소각으로 발생한 들불화재가 산림으로 확산되는 사례가 많아 초기 대응의 중요성이 강조되고 있다. 이에 본 논문에서는 RTK-GPS 기반의 고정밀 위치 제어를 활용하여 화선을 따라 다수의 드론을 군집 배치하고, 각 드론의 살수 반경이 중첩되도록 구성한 자동소화드론의 운용 방안을 제안하였다. 또한 소프트웨어 기반 시뮬레이션을 통해 제안한 방식의 적용 가능성을 검증한 결과, 다양한 화선 형태에서 군집 드론이 안정적으로 배치되며 화선 전체에 대한 연속적인 대응이 가능함을 확인하였다. 특히 살수 반경 중첩 구조를 통해 대응 공백을 최소화하고 화재 확산을 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하였다. 따라서 제안된 군집 자동소화 드론 운용 방식은 들불화재 초기 진압 및 산림화재 확산 방지에 효과적인 대응 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

우리나라는 국토의 약 64.5%가 산림으로 구성되어 있으며, 복잡한 산악 지형과 높은 침엽수 비율로 인해 산림화재 발생 시 확산 속도가 빠르고 초기 대응이 어려운 특성을 가진다. 특히 농촌 지역에서 발생하는 논·밭두렁 및 농업 부산물 소각은 들불화재로 이어지는 주요 원인이며, 이러한 들불화재는 강풍과 건조한 기후 조건에서 산림화재로 급격히 확산되는 경향을 보인다[1].

이와 같은 특성으로 인해 산림화재로 확대되기 전 들불 단계에서의 초기 진압이 매우 중요하며, 이를 위한 대응 수단으로 드론을 활용한 초기 진압 기술이 주목받고 있다. 기존 연구에서는 단일 드론을 활용한 화재 대응 방안이 제시되어 왔으나, 화재 확산 범위가 넓고 화선이 빠르게 이동하는 들불화재의 특성상 단일 드론만으로는 충분한 대응이 어렵다는 한계가 존재한다.

특히, 화재의 확산 방향과 속도에 따라 실시간으로 대응하기 위해서는 다수의 드론이 협력하여 화선을 따라 동시에 대응하는 군집 운용 방식이 필요하다. 그러나 현재까지 군집 기반 자동소화드론의 운용 전략 및 협업 방식에 대한 연구는 제한적이며, 실제 운용 가능성을 검증하기 위한 소프트웨어 기반 시뮬레이션 연

구 또한 부족한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 들불화재 초기 진압을 위한 군집 자동소화드론의 운용 방안을 제안하고, RTK-GPS 기반의 정밀 위치 제어를 바탕으로 화선을 따라 중첩된 살수 반경을 형성하는 군집 배치 전략을 설계한다. 또한 제안된 운용 방안의 효과성을 검증하기 위하여 소프트웨어 기반 시뮬레이션을 수행하고, 군집 운용에 따른 초기 진압 효율성을 분석한다.

2. 산림화재 사례 및 특성 분석

최근의 산림화재 사례를 보면, 2019년 4월4일 강원도 인제군에서 밭의 잡초를 소각을 하다가 들불화재가 발생하여 산림화재로 확산되었다. 피해 면적은 345ha로 총 23억4000만원의 재산 피해가 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 표 1과 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 총 756건의 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 군집 자동소화드론의 운용 방안을 제안한다.

3. 군집 자동소화드론의 운용 방안

들불화재는 초기에는 국지적으로 발생하지만, 바람과 지형의

영향으로 화선이 빠르게 확장되는 특성을 가진다. 따라서 특정 지점 중심의 대응이 아닌, 화선 전체를 고려한 동시 대응 방식이 요구된다.

기존의 들불화재 대응은 주로 인력 및 소방차 중심으로 이루어지고 있으며, 이러한 방식은 접근성 제한과 초기 대응 지연 등의 문제를 가진다. 특히 산림 임접 농지나 경사지와 같은 지형에서는 장비 접근이 어려워 초기 대응이 늦어질 가능성이 높다[3].

또한 들불화재는 화선이 길게 형성되며 빠르게 확산되는 특성을 가지므로, 특정 지점 중심의 대응 방식으로는 화선 전체를 효과적으로 제어하기 어렵다. 이로 인해 화재 확산 속도에 비해 대응 속도가 지연되며, 초기 진압 효과가 감소하는 문제가 발생한다.

더불어 바람과 지형 조건에 따라 화선의 방향이 수시로 변화하기 때문에, 단일 대응 수단으로는 대응 범위를 지속적으로 조정해야 하는 비효율이 발생한다.

[표 3] 들불화재 대응 방식 비교

구분	단일 드론	군집 드론
대응 범위	제한적	화선 전체 동시 대응 가능
대응 방식	순차적 대응	동시 대응
확산 대응	확산 속도 대응 어려움	화선 따라 동적 대응 가능
효율성	낮음	높음

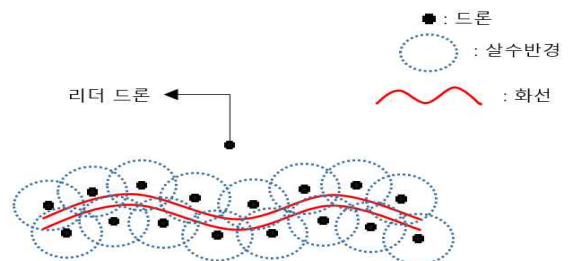
표3 같은 한계를 해결하기 위해서는 다수의 드론이 협업하여 화선을 따라 동시에 대응할 수 있는 군집 운용 방식이 필요하다.

이에 본 연구에서는 RTK-GPS 기반의 고정밀 위치 제어를 활용하여 화선을 따라 다수의 드론을 분산 배치하고, 각 드론의 살수 반경이 중첩되도록 구성함으로써 화재 확산을 효과적으로 억제할 수 있는 군집 자동소화드론의 운용 방안을 제안한다[4].

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

군집 자동소화드론은 다수의 드론이 협업하여 화선을 따라 분산 배치되고, 동시에 소화 작업을 수행하는 시스템이다.

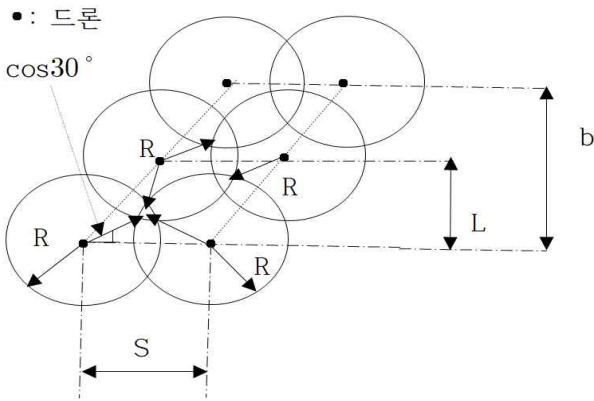
본 연구에서는 RTK-GPS 기반의 고정밀 위치 정보를 활용하여 각 드론의 위치를 실시간으로 제어하고, 그림 1과 같이 화선의 형상에 따라 드론을 일정 간격으로 배치하는 방식을 적용한다.



[그림 1] 화선에 따른 자동소화드론 배치 예시도

각 드론은 독립적으로 비행 및 소화 작업을 수행하면서도, 전체 군집은 하나의 시스템으로 동작하여 화선 전반에 대한 동시 대응을 가능하게 한다. 이를 통해 단일 드론의 한계를 극복하고, 초기 진압 효율을 향상시킬 수 있다[5].

군집 드론의 효과적인 운용을 위해서는 화선의 길이와 확산 방향을 고려한 배치 전략이 필요하다. 본 연구에서는 화선을 기준으로 드론을 일정 간격으로 배치하고, 그림 2와 같이 각 드론의 살수 반경이 서로 중첩되도록 설계하였다.



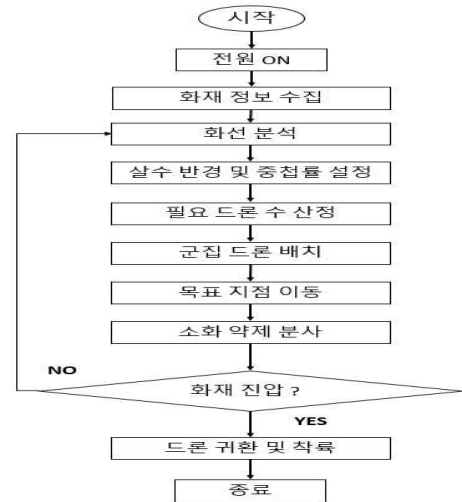
[그림 2] 자동소화 드론 배치도

$$\begin{aligned}
 S &= (2R\cos 30^\circ) \times 0.8 \\
 b &= 2S\cos 30^\circ \\
 L &= \frac{b}{2}
 \end{aligned}
 \tag{식 1}$$

여기서, S는 자동소화드론의 수평 거리, R은 살수반경, L 상단 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.

살수 반경이 중첩되도록 배치할 경우, 화선 사이의 공백을 최소화할 수 있으며, 화재 확산 경로를 효과적으로 차단할 수 있다. 또한 바람 방향에 따라 드론 배치를 조정함으로써, 화재 확산 방향에 대한 선제적 대응이 가능하다.

또한, 상기에서 제안한 RTK-GPS를 이용한 고정밀 비행과 화선을 따라 중첩된 살수반경으로 군집 배치하여 효율적으로 들불 화재를 초기에 진압 할 수 있는 강화액 소화약제가 장착된 자동소화드론의 운용 알고리즘을 그림 3과 같이 제시한다.



[그림 3] 자동소화드론의 운용 알고리즘

- 제시한 알고리즘을 구체적으로 설명하면,
- [Step 1] 군집 드론에 전원이 공급되고 이륙하여 화재지점으로 이동하여 화재진압 임무를 시작한다.
 - [Step 2] 화재지점에 먼저 도달한 리더 드론은 RTK-GPS와 열화상 카메라를 활용하여 화재의 정확한 위치, 화선의 길이 및 확산 방향을 파악하고 관제 시스템과 다른 드론에 전송한다.
 - [Step 3] 전송된 정보를 바탕으로 각 자동소화드론은 화선의 길이와 형상에 따라 살수 반경이 일정 부분 중첩되도록 군집 배치된다.
 - [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 군집 자동소화드론의 운용 방안을 강한 바람과 복잡한 지형으로 접근이 어려운 야외에서 발생하는 들불화재를 초기에 진압하여 산림으로 확산하는 대형화재 방지에 유용할 것으로 기대한다.

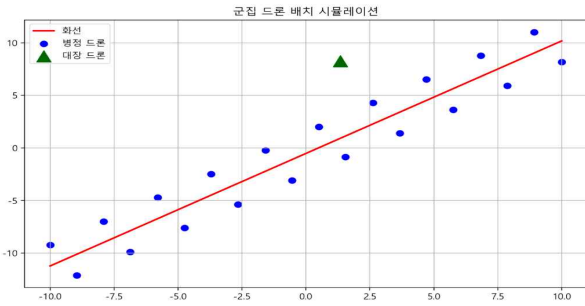
4. 군집 드론 운용 시뮬레이션 및 검증

본 연구에서는 제안한 군집 자동소화드론의 운용 방안에 대한 적용 가능성을 검증하기 위하여 소프트웨어 기반 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 다양한 화선 형태에 대해 군집 드론이 어떻게 배치되며, 초기 화재 진압에 효과적으로 대응할 수 있는지를 분석하는 것을 목적으로 한다.

시뮬레이션 환경에서는 화선을 선형, 곡선 및 비선형 형태로 설정하고, 해당 화선을 따라 드론을 분산 배치하였다. 각 드론은 일정 간격으로 배치되며, 특히 각 드론의 살수 반경이 서로 중첩

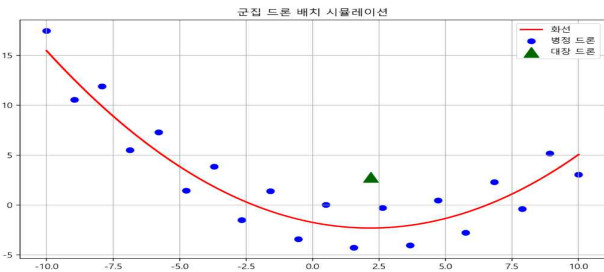
되도록 구성하여 화선 전체에 대한 연속적인 대응이 가능하도록 설계하였다. 또한 군집 내에서 기준 드론을 중심으로 나머지 드론들이 상대적인 위치를 유지하도록 구성하여, 전체 군집이 하나의 시스템으로 동작하도록 하였다[6].

먼저, 선형 형태의 화선에 대한 군집 드론 배치 결과는 그림 4와 같다. 화선은 직선 형태로 설정하였으며, 드론들은 화선을 따라 일정 간격으로 분포한다. 이때 각 드론의 살수 반경이 서로 중첩되도록 배치되어 화선 구간에 대한 공백이 발생하지 않도록 구성하였다.



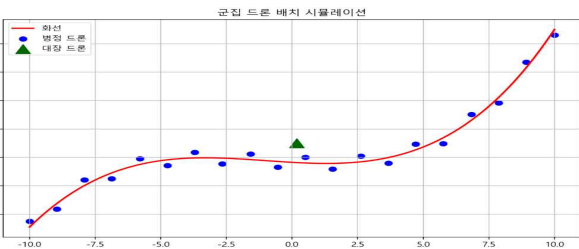
[그림 4] 선형 화선에 대한 군집 드론 배치

다음으로 곡선 형태의 화선에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 5와 같다. 화선의 곡률 변화에 따라 드론의 배치 위치가 조정되며, 전체 화선을 따라 유연하게 분산 배치되는 것을 확인할 수 있다.



[그림 5] 곡선 화선에 대한 군집 드론 배치

비선형 형태의 화선에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 6과 같다. 화선이 불규칙하게 변화하는 상황에서도 군집 드론은 기준 드론을 중심으로 일정한 분포를 유지하며 대응하는 특성을 보였다. 또한 화선의 변화에 따라 드론의 위치가 동적으로 조정되면서도, 살수 반경의 중첩 구조를 유지하여 화선 전체에 대한 연속적인 방어 영역을 형성하는 것을 확인할 수 있다.



[그림 6] 비선형 화선에 대한 군집 드론 배치

종합적으로 본 시뮬레이션을 통해 군집 자동소화드론은 다양한 화선 형태에 대해 안정적으로 대응할 수 있으며, 특히 각 드론의 살수 반경을 중첩시키는 배치 구조를 통해 화선 전 구간에 대한 연속적인 방어 영역을 형성할 수 있음을 확인하였다. 이러한 구조는 단일 대응 방식에서 발생할 수 있는 대응 공백을 최소화하고, 초기 화재 확산을 효과적으로 억제할 수 있는 장점을 가진다.

따라서 본 연구에서 제안한 군집 드론의 살수 반경 중첩 기반 배치 방식은 들불화재 초기 진압에 효과적인 대응 전략으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 들불화재의 산림화재 확산을 방지하기 위해 군집 자동소화드론의 운용 방안을 제안하고, 소프트웨어 기반 시뮬레이션을 통해 적용 가능성을 검증하였다.

제안된 방식은 화선을 따라 다수의 드론을 분산 배치하고, 각 드론의 살수 반경이 중첩되도록 구성함으로써 화선 전 구간에 대한 연속적인 대응이 가능하도록 하였다. 시뮬레이션 결과, 다양한 화선 형태에서도 군집 드론이 안정적으로 배치되며, 대응 공백을 최소화하고 화재 확산을 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하였다.

따라서 군집 자동소화드론 기반 운용 방식은 들불화재 초기 진압에 효과적인 대응 방안으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 향후에는 실제 환경을 고려한 실증 연구를 통해 운용 기술의 실용성을 더욱 검증할 필요가 있다.

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, 지난해 3,628번 떴다. 재난현장서 역할 톡톡” 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] 이상용, 박준영, 주백선, “RTK-GPS를 사용한 무인항공기의 자율비행 성능 실험”, 한국정밀공학회 학회지, pp.54, 2019
- [6] 권상은, 이성진 “드론의 실시간 군집비행 제어시스템”, 한국컴퓨터정보학회지, pp.3-4, 2020