creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

석사학위논문

피지컬 AI 기반 소방 지능형 현장지휘체계 구축 방안 연구

– 드론, 사족 보행 로봇 합동 운용을 중심으로 –

HANSUNG UNIVERSITY

2026년

한성대학교 행정대학원

사회안전학과

사회안전정책전공

이 진 헌

HANSUNG
UNIVERSITY

석사학위논문
지도교수 류종용

피지컬 AI 기반 소방 지능형 현장지휘체계 구축 방안 연구

- 드론, 사족 보행 로봇 합동 운용을 중심으로 -

A Study on the Establishment of an Intelligent Fire Scene Command System Based on Physical AI
-Focusing on the Joint Operation of Fire Drones and Quadruped Robots-

HANSUNG UNIVERSITY

2026년 6월 일

한성대학교 행정대학원

사회안전학과

사회안전정책전공

이 진 헌

석사학위논문
지도교수 류종용

피지컬 AI 기반 소방 지능형 현장지휘체계 구축 방안 연구

- 드론, 사족 보행 로봇 합동 운용을 중심으로 -

A Study on the Establishment of an Intelligent Fire Scene Command System Based on Physical AI
-Focusing on the Joint Operation of Fire Drones and Quadruped Robots-

위 논문을 사회안전학 석사학위 논문으로 제출함

2026년 6월 일

한성대학교 행정대학원

사 회 안 전 학 과

사회안전정책전공

이 진 헌

HANSUNG UNIVERSITY

이진헌의 사회안전학 석사학위 논문을 인준함

2026년 6월 일

심사위원장 최 천 근 (인)

심 사 위 원 류 종 용 (인)

심 사 위 원 박 기 수 (인)

HANSUNG UNIVERSITY

국 문 초 록

피지컬 AI 기반 소방 지능형 현장지휘체계 구축 방안 연구
-드론, 사족 보행 로봇 합동 운용을 중심으로-

한 성 대 학 교 행 정 대 학 원
사 회 안 전 학 과
사 회 안 전 정 책 전 공
이 진 헌

현대의 재난은 점차 대형화되고 복잡화되는 양상을 보이고 있으나, 현장지휘관은 여전히 119 수보 및 무전기를 통한 파편적인 음성 정보에 의존하여 현장 의사결정을 내리고 있다. 이로 인해 극한의 재난 현장에서 지휘관은 급변하는 수십 가지의 전술적 변수를 동시에 통제하지 못해 인지 과부하를 겪게 된다. 특히 두꺼운 콘크리트 외벽이나 짙은 화재 농연으로 인해 전파가 차단되는 실내 구조물 및 지하 공간에서는 정보 암전 현상에 직면하게 되며, 이는 결과적으로 지휘관의 직관적 판단을 마비시키고 주도적인 상황 통제력을 상실하게 만드는 한계로 작용한다.

본 연구는 이러한 기존 지휘 체계의 구조적 한계를 근본적으로 극복하기 위해, 상공에서 거시적인 위험 요소를 탐지하는 다중 소방 드론과 실내의 미시적 환경을 탐색하는 사족 보행 로봇 등 피지컬 AI 기체를 합동 운용하는 지능형 현장지휘체계 구축 방안을 제시하는 데 그 목적이 있다. 나아가 단일 기체의 단순한 기능적 투입을 넘어, 다수의 첨단 기체와 인공지

능 분석 서버가 유기적으로 연동되는 시스템 오브 시스템즈 차원의 접근을 통해 지휘관의 실질적인 현장 대응 역량을 극대화하고자 하였다.

이론적 고찰과 문헌 연구를 통해 현행 소방 지휘체계와 유무인 복합 운용의 기술적 인지적 문제점을 심층적으로 분석하였으며, 이를 해결하기 위한 구체적이고 실체적인 시스템 개선 방안을 도출하였다. 첫째, 현장지휘관의 인지 과부하를 해소하기 위한 대안으로 멀티소스 데이터 융합 방안을 제안하였다. 이는 기존의 119 수보 정보와 드론, 사족 보행 로봇 등 무인 기체가 수집한 실시간 센서 데이터를 지능형 통합 상황판에 융합함으로써, 효율적인 초기 지휘 우선순위와 최적 자원 배치안을 자동으로 산출하여 지휘관의 정보 처리 부담을 경감시킬 수 있다. 둘째, 인공지능 시스템이 도출한 결과에 대한 지휘관의 책임 중압감과 심리적 불신을 해소하기 위해, 설명 가능한 인공지능 기술과 소방 SOP를 명확하게 연계한 룰 엔진을 도입하였다. 기계의 판단 근거를 소방 공식 규범과 매칭하여 논리적 인과관계에 기반한 위험 예측 시각화 체계를 고안함으로써, 지휘관이 적극적으로 전술적 지시를 내릴 수 있도록 설계하였다. 아울러 이러한 첨단 기술을 재난 현장에서 효과적으로 운용하기 위한 행정적 정책적 대안으로서, 기존 구조 대원의 임무 겸직 모순을 방지하고 통합 관제 능력을 전담하여 수행할 수 있는 소방 드론봇 전담대의 조직 신설을 제안하였다.

본 연구가 제안하는 피지컬 AI 기반 지능형 현장지휘체계는 단순히 첨단 물리적 장비를 현장에 도입하는 것을 넘어, 현장지휘관의 인지적 한계를 보완하고 정확한 데이터와 공식 규범에 근거한 선제적이고 주도적인 지휘를 가능케 하는 패러다임의 전환을 의미한다. 본 연구는 이 지능형 시스템의 성공적인 현장 안착을 위해 단편적인 기술 도입뿐만 아니라, 전문 전담 인력의 양성과 관련 법령 및 제도 정비 등 소방 거버넌스 전반에 걸친 거시적이고 선제적인 혁신이 필수적으로 수반되어야 함을 실증적으로 제시한다.

【주요어】 피지컬 AI, 소방 드론, 사족 보행 로봇, 시스템 오브 시스템즈, 지휘관 의사결정

목 차

제 1 장 서론 ····· 1

제 1 절 연구의 배경 및 목적 ····· 1

1. 연구의 배경 ····· 1

2. 연구의 목적 ····· 3

제 2 절 연구의 범위 및 방법 ····· 6

1. 연구의 범위 ····· 6

2. 연구의 방법 ····· 7

제 2 장 이론적 배경 ····· 10

제 1 절 피지컬 AI의 이론적 고찰과 핵심 기술 ····· 10

1. 피지컬 AI의 개념 ····· 10

2. 무인이동체 자율 비행 및 객체 인식 기술 ····· 13

3. 사족 보행 로봇의 지각 및 통합제어 기술 ····· 16

4. 다중 무인기 군집 제어와 통적 매쉬 네트워크 ····· 19

제 2 절 재난 현장지휘관의 의사결정 메커니즘 ····· 21

1. 재난 현장지휘의 개념과 규범적 의사결정 ····· 21

2. 인간의 인지적 판단 메커니즘 ····· 27

3. 기술 수용성에 관한 심리학적 고찰 ····· 29

제 3 절 지능형 지휘체계 전환을 위한 조직 및 훈련 패러다임 ····· 31

1. 임무 겸직과 전담 조직 개편 사례 ····· 31

2. 데이터 기반 훈련 및 실증연구 사례 ····· 34

HANSUNG UNIVERSITY

제 3 장 국내외 정책 및 기술현황 분석 ····· 37

제 1 절 정책현황 분석 ····· 37
1. 해외 정책 동향 ····· 37
2. 국내 정책 동향 ····· 41

제 2 절 기술현황 분석 ····· 45
1. 해외 기술 동향 ····· 45
2. 국내 기술 동향 ····· 56

제 4 장 현행 운용 실태 및 문제점 분석 ····· 61

제 1 절 단일 무인기 운용의 한계와 정보 암전의 고착화 ····· 63
1. 개별 기체 중심의 무인이동체 운용 ····· 63
2. 통신 단절에 따른 정보 암전 현상 심화 ····· 67

제 2 절 지휘관의 인지 과부하와 블랙박스 AI 불신 딜레마 ····· 69
1. 정보 단절에 따른 직관적 의사결정의 장애 ····· 69
2. 블랙박스 AI에 대한 신뢰 상실과 수용 거부 ····· 72

제 3 절 현장 대원의 임무 겸직과 주관적 경험 훈련의 제도적 한계 ····· 73
1. 임무 겸직으로 인한 현장 대응력 저하 ····· 73
2. 사후 분석 부재와 도제식 경험 전수의 한계 ····· 75

제 5 장 지능형 소방 지휘체계 구축 및 정책적 개선방안 ····· 77

제 1 절 다중 무인기 기반 시스템 오브 시스템즈와 융합 상황판 구축 ····· 77
1. 피지컬 AI 기체의 이기종 군집 제어 및 상대 측위 기술 구현 ····· 77
2. 동적 메쉬 네트워크 구축 ····· 78
3. 3D 디지털 트윈 기반 지능형 통합 상황판 도입 ····· 79

제 2 절 SOP 연계형 AI 의사결정 지원 체계 고도화 ····· 81
1. 멀티소스 데이터 융합 기반의 현장지휘 및 자원 배치 ····· 81
2. XAI 기반 SOP 룰 엔진 적용 및 위험 예측 시각화 ····· 83

제 3 절 첨단 장비 전담대 신설 및 데이터 기반 체득 훈련 제도화 ····· 85
1. 첨단 장비 전담 조직 신설 ····· 85
2. 사후 디지털 피드백 기반의 훈련 체계화 및 소방 특화 리빙랩 도입 ···· 89

제 4 절 피지컬 AI 기반 지능형 현장지휘체계 운용 시나리오 ····· 90
1. 운용 대상 재난환경 및 전체 구성도 ····· 90
2. 다기종 협업 기반의 세부 운용 프로세스 ····· 93

제 6 장 결론 ····· **99**
제 1 절 연구결과 요약 ····· 99
제 2 절 정책적 함의 및 시사점 ····· 100
제 3 절 연구의 한계 및 발전 방향 ····· 102

참고문헌 ····· **105**

ABSTRACT ····· 109

HANSUNG UNIVERSITY

표 목 차

<표 2-1> 각 분야별 피지컬 AI 정의 ····· 11
<표 2-2> 재난현장 표준작전절차상 현장지휘관의 주요 지휘통제 임무 ····· 24
<표 2-3> 제대별 드론봇 운용 및 보유 드론 수 ····· 33
<표 3-1> Horizon Europe 세부 프로젝트 ····· 38
<표 3-2> 무인소방로봇 제원 ····· 43
<표 3-3> 제2차 화재안전정책 기본계획 주요내용 ····· 44
<표 3-4> 국외 차량 기반 실시간 지휘시스템 사례 ····· 46
<표 3-5> 국외 화재 위험 예측 및 대응 지원 시스템 사례 비교 ····· 49
<표 3-6> 주요 사족 보행 로봇 플랫폼 제원 비교 ····· 52
<표 3-7> 주요 재난 대응 드론 플랫폼 제원 비교 ····· 53
<표 3-8> 주요 재난현장용 상용 통신 및 측위 모듈 제원 비교 ····· 55
<표 4-1> 연도별 대형화재 발생 현황(2015~2024) ····· 62
<표 4-2> 화재 및 구조 현장에 소방 드론의 투입 비율 ····· 65
<표 4-3> 서울소방본부 운용 사족 보행 로봇 제원 및 기능 ····· 66
<표 4-4> 최근 10년 소방공무원 순직 및 공사상 현황 ····· 70
<표 4-5> 재난현장 정보 단절이 지휘관의 심리태도에 미치는 영향 ····· 71
<표 4-6> 전국 소방관서 드론 배치 부서 현황 ····· 74
<표 4-7> 전국 소방관서 드론 전담부서 및 전담인력 운영 현황 ····· 74
<표 5-1> 소방 드론봇 전담대 편제안 ····· 87

HANSUNG UNIVERSITY

그 림 목 차

<그림 1-1> 연구 흐름도 ····· 9
<그림 2-1> 무인 이동체의 6자유도 공간 좌표계 및 자세 제어 개념도 ····· 14
<그림 2-2> 사족 보행 로봇의 3D 지각 센서 기반 고도 생성 개념도 ····· 17
<그림 2-3> 로봇과 환경 간의 상호작용을 통한 심층 강화학습 제어 구조 ····· 18
<그림 2-4> 폴리스랩 2.0 사업 사례 ····· 24
<그림 3-1> 2026년 소방청 업무계획 주요내용 ····· 42
<그림 3-2> UAV 사진측량 기반의 구조변형 모니터링 기술 사례 ····· 50
<그림 3-3> 인프라리스 위치추정 및 관제시스템 기술 개발 주요내용 ····· 56
<그림 3-4> 인명탐지 및 화재진압 소방로봇 연구개발 체계도 ····· 58
<그림 3-5> AI기술 활용 긴급통신망 구축 및 매몰자 탐지 시스템 개발도 ···· 59
<그림 3-6> 드론 기반 이동통신 네트워크 구축 기술 개념도 ····· 60
<그림 4-1> 최근 10년간 화재발생 및 인명피해 추이(2015~2024) ····· 61
<그림 4-2> 소방공무원 드론 활용 분야에 대한 인식 실태 결과 ····· 64
<그림 5-1> 지능형 통합 상황판의 멀티소스 융합 및 최적 자원 배치안 표출 예시 ··· 82
<그림 5-2> 지능형 통합 상황판의 XAI 기반 SOP 룰 엔진 시각화 예시 ····· 84
<그림 5-3> 지능형 현장지휘체계 전체 구성도 ····· 92
<그림 5-4> 실외 드론 운용 시나리오 ····· 93
<그림 5-5> 실내 사족 보행 로봇 시나리오(선제 투입 안) ····· 95
<그림 5-6> 실내 사족 보행 로봇 시나리오(로봇-대원 동시 투입안) ····· 96
<그림 5-7> 현장차량 기반 지휘체계 운용 시나리오 ····· 97

제 1 장 서론

제 1 절 연구의 배경 및 목적

1. 연구의 배경

현대 사회의 급격한 도시화, 건축 및 토목 기술의 비약적인 발달, 그리고 기후 변화로 인한 극단적인 기상 이변으로 과거의 통상적인 패턴으로는 전혀 예측할 수 없는 대형 복합재난이 일상화되고 있다. 특히 초고층 건축물과 대형 지하 복합시설, 대형 창고와 공장 등 건축물의 고층화 및 심층화는 공간의 복잡성을 가중시켜 재난 발생 시 그 피해 규모가 기하급수적으로 확대되는 양상을 띤다. 실제 최근 10년간의 화재 추이를 보면, 대규모 인명과 재산 피해를 수반하는 비정형적 대형 화재는 오히려 매년 증가하는 역설적인 현상이 지속되고 있다. 그럼에도 불구하고 현행 국가재난대응체계와 일선 소방 서비스는 여전히 현장 대원의 제한된 육안 관측과 아날로그 무전에 의존하는 유인(有人) 중심 시스템에 머물러 있어, 고도화된 복합재난에 효율적으로 대응하기에는 명백한 구조적 한계를 드러내고 있다(신민준, 2022).

이러한 가혹한 환경 속에서 대규모 복합 건축물 화재나 붕괴 등 극한의 재난 현장에 가장 먼저 선착하는 현장지휘관은, 두꺼운 콘크리트 외벽과 짙은 농연으로 인해 물리적인 시야가 완벽히 차단된, 이른바 정보 암전 상태에 직면하게 된다. 실제 소방활동 현장의 현장지휘자들을 대상으로 한 현상학적 심층 인터뷰(FGI) 결과에 따르면, 일선 지휘관들은 “가장 힘든 거는 순간 판단하기 위해서 상황실에 보고 들어오는 거, 현장 도착하고 통화하면서 사방에 보이는 거 파악하는 게 가장 힘들다”라며 암흑 속 초기 정보 수집의 물리적 한계를 적나라하게 호소하고 있다. 대원들의 위치조차 파악되지 않는 맹목 상태는 지휘관에게 극심한 인지 과부하와 심리적 두려움을 유발한다. 이처럼 불확실성이 극대화된 시간 압박 속에서 지휘관은 대안을 논리적으로 분석할 여유가 없으므로, 평상시 축적한 과거

경험 패턴에 의존하여 직관적으로 작전을 결정하는 인식 기반 의사결정 방식을 주로 취하게 된다(염무열, 2016). 그러나 현대의 비정형 재난은 지휘관 개인의 제한된 과거 경험치를 넘어 합리적 의사결정이 어려운 경우가 많으며, 객관적 데이터가 부재한 상태에서 확신 없는 판단을 내려야 하는 막중한 책임감은 결국 지휘관을 소극적이고 피동적인 지휘 태도로 내몰게 된다. 무엇보다 불명확한 직관에만 의존하여 대원을 진입시킬 경우 이는 돌이킬 수 없는 안전사고로 직결된다. 실제로 화재 현장에서 수많은 소방공무원이 순직하고 공상자가 발생해 온 현실은, 인간의 눈을 대신하여 어둠 속 상황을 파악해 줄 첨단 무인이동체의 재난현장 투입이 무엇보다 시급함을 시사한다.

이러한 현장지휘관의 인지적 한계를 보완하고 정보 암전을 타개하기 위해, 최근 소방 조직은 상공의 거시적 3D 매핑을 수행하는 드론(UAV)과 지상의 비정형 험지를 자율적으로 극복하는 사족 보행 로봇(UGV) 등 피지컬 AI 플랫폼의 편제를 가속화하고 있다(박채희, 2022). 국내에서도 GPS 신호가 닿지 않는 닫힌 공간에서 딥러닝 비전 센서를 통해 자율 비행을 유지하는 기술과 다중 로봇 군집 경로 최적화 연구가 괄목할 성과를 내며 현장 도입을 앞두고 있다. 하지만 이처럼 방대한 기체의 보급과 단위 기술의 비약적인 발전에도 불구하고, 실제 현장에 소방 드론이나 로봇이 투입되는 비율은 화재 출동 시 약 2%, 구조 출동 시 1% 미만 수준으로 현저히 저조한 실정이다.

이러한 저조한 활용도는 단순히 기체 자체의 하드웨어 성능 문제라기보다는, 재난 현장의 극한 환경적 제약과 현행 지휘체계가 안고 있는 복합적인 세 가지 구조적 병목 현상에 기인한다. 첫째, 기술·공학적 측면의 물리적 통신 단절 문제이다. 짙은 농연, 고온, 난기류 및 두꺼운 콘크리트 벽체로 둘러싸인 복합재난 환경에서는 상용 통신망(LTE/5G)과 위성항법 장치 신호가 차단되게 된다. 로봇이 어렵게 내부 데이터를 수집하더라도, 중계 릴레이망이 부재한 단일 기체 중심의 폐쇄형 시스템에서는 이 데이터가 지휘소로 지연 없이 전송되지 못하고 즉각 통제 불능 상태에 빠지게 된다. 둘째, 행정·제도적 측면의 임무 겸직 모순이다. 현재 소방 조직은 고

도의 전문성을 요하는 무인기 조종 업무를 별도의 전담 조직 없이 기존의 화재 진압 및 구조대원들이 현장에서 병행하도록 하고 있다. 일분일초를 다투는 상황에서 인명 구조에 모든 주의력을 쏟아야 할 대원이 복잡한 첨단 기기의 제어까지 도맡아야 하는 구조적 한계는, 결국 초기 골든타임 내 기체 전개 자체를 지연시키고 기피하게 만드는 주요 원인이 되고 있다. 셋째, 심리·인지적 측면의 블랙박스 AI에 대한 불신 딜레마이다. 수집된 현장 데이터를 바탕으로 도출된 인공지능의 위험 예측 결과가 판단 근거가 은폐된 블랙박스를 띠고 있어 발생하는 문제이다. 작전 실패 시 동료 대원들의 생명과 그에 따른 모든 책임 소재를 홀로 감내해야 하는 현장지휘관의 입장에서, 왜 그러한 지시를 내렸는지 논리적으로 설명하지 못하는 기계의 일방적인 권고는 확신을 줄 수 없으며 심리적 수용 저항을 유발하게 된다(이승현, 2024).

결국 개별 하드웨어 기체의 단순한 양적 도입만으로는 한계가 존재한다. 현장 심층 인터뷰에 참여한 지휘관이 “단순히 경험도 중요하지만, 그 경험 플러스 학습이 돼야 된다”고 역설한 바와 같이, 단절된 첨단 기체들과 현장 대원을 하나의 지휘망으로 유기적으로 엮어내는 체계적 진화가 필수적이다. 따라서 공중과 지상의 이기종(異機種) 기체들이 동적 메쉬 네트워크로 융합되어 지능형 통합 상황판으로 객관적 데이터를 전송하고, 지휘관이 이를 합리적으로 신뢰하여 실질적인 상황 판단력을 회복할 수 있도록 돕는 기술적 융합이 우선되어야 한다. 나아가 이러한 첨단 체계가 재난 현장에서 사장되지 않고 실효적으로 가동되기 위해서는, 대원의 임무 겸직 모순을 해소할 전담 조직의 신설과 데이터 기반의 체득형 훈련 등 조직적이고 제도적인 뒷받침이 반드시 병행되어야 한다. 이처럼 공학적 기술, 인지적 신뢰, 그리고 행정·제도적 혁신이 삼위일체로 결합된 피지컬 AI 기반 지능형 통합 현장지휘체계로의 패러다임 전환이 본 연구의 핵심적인 배경이다.

2. 연구의 목적

본 연구의 궁극적인 목적은 극한의 복합재난 현장에서 발생하는 정보 암전 상태와 이로 인해 파생되는 현장지휘관의 인지적 과부하 및 의사결정 마비 현상을 근본적으로 극복하는 데 있다. 이를 위해 상공에서 비행하는 드론과 지상의 비정형 험지를 극복하는 사족 보행 로봇을 유기적으로 결합한 피지컬 AI 기반 지능형 현장지휘체계의 종합적인 구축 방안을 제시하고자 한다. 본 연구는 첨단 무인이동체의 단순한 하드웨어적 도입 수준에 머물러 있는 기존의 단편적인 논의에서 벗어나, 기술·공학적 측면과 심리·인지적 측면, 그리고 행정·제도적 차원을 모두 아우르는 다차원적이고 종합적인 관점에서 실효성 있는 문제 해결책을 도출하는 것을 핵심 목표로 삼고 있다.

구체적인 연구의 첫 번째 목적은 공학적 측면에서, 현행 무인이동체 운용의 물리적 한계를 극복하는 통합 운용 아키텍처를 설계하는 것이다. 기존의 재난 현장 무인기 운용은 개별 기체 중심의 파편화된 시스템에 머물러 있어 두꺼운 콘크리트 외벽이나 지하 공간과 같은 인프라리스 가혹 환경에서 운용 가능성과 통신 연결성을 확보하는 데 명백한 한계를 보여 왔다. 본 연구는 이러한 물리적·통신적 단절을 원천적으로 극복하기 위해 상공의 드론과 지상의 사족 보행 로봇이 합동 정찰을 수행하고 다중 기체가 상호 통신 중계망을 형성하는 피지컬 AI 통합 운용 체계의 개념적 모델을 제시하고자 한다. 이는 단순한 공학적 기술 개발 자체를 목적으로 하는 것이 아니라, 다중 무인기가 현장의 정보 암전을 타개하기 위해 어떠한 구조로 연계되고 현장에 작동되어야 하는지에 대한 시스템적 지향점을 도출하는 데 목적이 있다.

두 번째 목적은 심리·인지적 측면에서, 고도의 불확실성 속에서 재난 현장지휘관이 겪는 의사결정의 딜레마를 해결하고 잃어버린 상황 통제력을 회복하기 위해 설명 가능한 인공지능의 적용 방안을 탐구하는 것이다. 피지컬 AI가 수집한 방대한 현장 데이터가 지휘관의 실질적인 상황 판단으로 직결되기 위해서는 이를 직관적으로 시각화하고 분석해 주는 지능형 상황판이 필수적이다. 다만, 불명확한 재난 상황에서 도출 근거가 은폐된 형태의 블랙박스 AI 결과값은 최종 책임을 지는 지휘관의 심리적 불신과

수용 저항을 유발할 수 있다. 따라서 본 연구는 소방 표준작전절차와 연계하여 AI의 판단 근거를 시각적으로 설명해 주는 설명 가능한 인공지능 아키텍처 도입 방안을 제시함으로써, 지휘관이 기계의 판단을 합리적으로 신뢰하고 인지 과부하를 해소할 수 있는 의사결정 지원 환경의 구성 방안을 모색한다.

세 번째 목적은 설계된 지능형 지휘체계가 현장에서 실질적이고 안정적으로 안착되기 위한 행정 조직 및 훈련 제도 개편을 제언하는 것이다. 기술적으로 정교하게 설계된 시스템이 일선 소방 조직 내에 사장되지 않고 실질적인 지휘 역량으로 융화되기 위해서는 인력과 조직 제도의 혁신이 병행되어야 한다. 본 연구는 고도의 집중력이 요구되는 무인 기체 운용을 기존의 진압 대원이나 구조대원들이 병행해야 하는 임무 겸직의 구조적 모순을 해소하기 위해, 독립된 무인기 전담 조직 신설의 당위성을 벤치마킹 사례와 함께 제언한다. 나아가, 단순히 기체 조작에 머물러 있는 현행 훈련 체계를 탈피하여, 실제 재난 모사 환경에서 객관적 센서 데이터와 지휘관의 의사결정을 교차 대조하는 사후 디지털 피드백 기반의 훈련 제도화 방안을 최종적인 정책적 대안으로 제시하고자 한다.

마지막으로, 본 연구를 통해 도출된 기술적 연계 프레임워크와 정책적 대안들이 단순한 이론적 구상을 넘어 실제 복합 재난 현장에서 톱니바퀴처럼 어떻게 맞물려 작동하는지를 입증하기 위해 구체적인 통합 운용 시나리오를 제시한다.

결과적으로 본 연구는 극한 재난 환경에서 활동하는 피지컬 AI 플랫폼과 판단 근거를 제공하는 XAI 기반의 지능형 통합 상황판, 그리고 이를 실효적으로 뒷받침하는 전담 조직 및 데이터 기반 훈련 체계가 하나의 유기체처럼 결합된 미래형 지휘체계 모델을 완성하고자 한다. 이를 통해 현대 소방 지휘의 패러다임을 과거의 제한적이고 주관적인 직관 의존 방식에서 벗어나 객관적 데이터와 과학적 통제 기반으로 획기적으로 혁신함으로써, 궁극적으로 재난 현장에서 국민 뿐만 아니라 소방대원의 생명을 빈틈없이 수호하기 위한 학술적·정책적 교두보를 마련하는 것을 목적으로 한다.

제 2 절 연구의 범위 및 방법

1. 연구의 범위

본 연구는 단순히 단일 무인 이동체의 하드웨어 성능을 검증하는 공학적 접근을 넘어, 극한의 재난 현장에서 인간(지휘관)과 기계(피지컬 AI) 간 통신망이 유기적으로 결합된 지능형 지휘체계의 통합 프레임워크를 도출하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 본 연구의 범위는 다음과 같이 설정한다.

공간적·환경적 범위는 위성항법장치 신호가 원활하게 수신되고 육안으로 시야가 확보되는 통상적인 개방형 평지 화재 현장보다는, 현대 복합재난에서 빈번하게 발생하며 치명적인 인명 피해를 유발하는 대규모 고층 건축물, 지하 공동구, 복합 물류창고 등 내부 상황을 외부에서 파악할 수 없는 폐쇄적 대상물 중심으로 가정한다. 이러한 현장은 두꺼운 철근 콘크리트 벽체와 짙은 농연, 고온으로 인해 상용 통신망이 단절되고 구조대원의 진입이 불가능한 인프라리스 가혹 환경이다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서 다루는 피지컬 AI 기체의 범위는 단일 장비가 아닌 이기종 플랫폼의 조합을 전제로 한다. 구체적으로는 상공에서 거시적인 3D 매핑과 외부 정찰을 담당하는 소방 드론과 붕괴된 실내 잔해 등 비정형 험지를 극복하고 열화상, 유해가스 등 미시적 위험 요소를 탐지하는 지상 사족 보행 로봇 두 가지 플랫폼으로 국한한다. 이는 현장의 정보 암전을 극복하기 위해 공중과 지상의 데이터를 입체적으로 융합해야만 하는 재난 환경의 필수적 요구사항을 반영하고 현재 시점에서 현실적으로 도입이 가능한 플랫폼이기 때문이다.

내용적 범위로는 개별 무인기의 모터 출력 향상이나 사족 보행 로봇의 관절 제어를 위한 심층 강화학습 알고리즘 개발 등 특정 제어 공학적 차원의 연구를 참고하되, 최근 국가 재난안전 기술개발의 거시적인 지향점에 발맞추어, 이미 개발된 이기종 기체들이 재난 현장에서 어떻게 끊김 없이 연결되고 현장지휘에 활용될 수 있는지에 대한 시스템 오브 시스템즈

차원의 통합 운용 아키텍처 설계에 초점을 맞추었다. 세부적으로는, 통신 음영 지역에서 다중 로봇이 스스로 중계기 역할을 수행하여 정보 연속성을 확보하는 동적 메쉬 네트워크의 운용 개념, 파편화된 이기종 센서 데이터를 지휘차량 모니터에 디지털 트윈으로 표출하는 지능형 통합 상황판, 그리고 블랙박스 형태의 AI에 대한 지휘관의 심리적 불신을 해소하기 위해 소방 표준작전절차와 매핑된 설명 가능한 인공지능 아키텍처 도입 방안으로 연구의 초점을 맞추었다.

마지막으로 행정·제도적 범위에서 본 연구는 기술적 시스템의 완성이 곧 현장의 작동성으로 직결되지 않는다는 문제의식하에, 제안된 시스템이 조직 내에 안착하기 위한 행정적·제도적 혁신 방안을 연구 범위에 포함한다. 즉, 육군 등 타 기관의 미래 무기체계 개편 사례를 준용하여 기존 진압 대원의 임무 겸직을 해소할 첨단 장비 전담 조직 신설의 당위성을 다룬다. 또한, 단순 기체 조작에 머무는 훈련을 탈피하여, 객관적 데이터와 현장지휘관의 의사결정 로그를 교차 대조하는 사후 디지털 피드백 기반의 훈련 제도화 방안을 포괄한다. 최종적으로, 도출된 기술적 프레임워크와 정책적 대안들이 실제 복합재난 현장에서 어떻게 작동하는지를 통합 운용 시나리오를 설계하여 제시하는 것까지를 본 연구의 범위로 설정한다.

2. 연구의 방법

본 연구에서 제안하는 피지컬 AI 기반 지능형 현장지휘체계의 타당성과 실효성을 확보하기 위해, 선행 기술 연구자료와 심층 인터뷰 자료 등을 다각적으로 분석하여 현장의 구조적 문제점을 찾고, 이에 대한 개선점을 모색하여 최종적인 지휘체계 모델을 제시하는 질적 문헌 고찰 중심의 방법론으로 수행한다. 구체적인 연구 방법은 다음과 같다.

우선, 기존 소방 지휘체계와 무인이동체 운용의 한계를 공학적으로 진단하기 위해 국내·외 로봇 공학, 컴퓨터 비전, 무인기 정책과 관련된 선행 기술 자료를 충분히 조사한다. 이를 통해 재난 현장이라는 인프라리스 가혹 환경에서 단일 기체 운용이 지닌 기술적 병목 현상을 선행연구를 통해

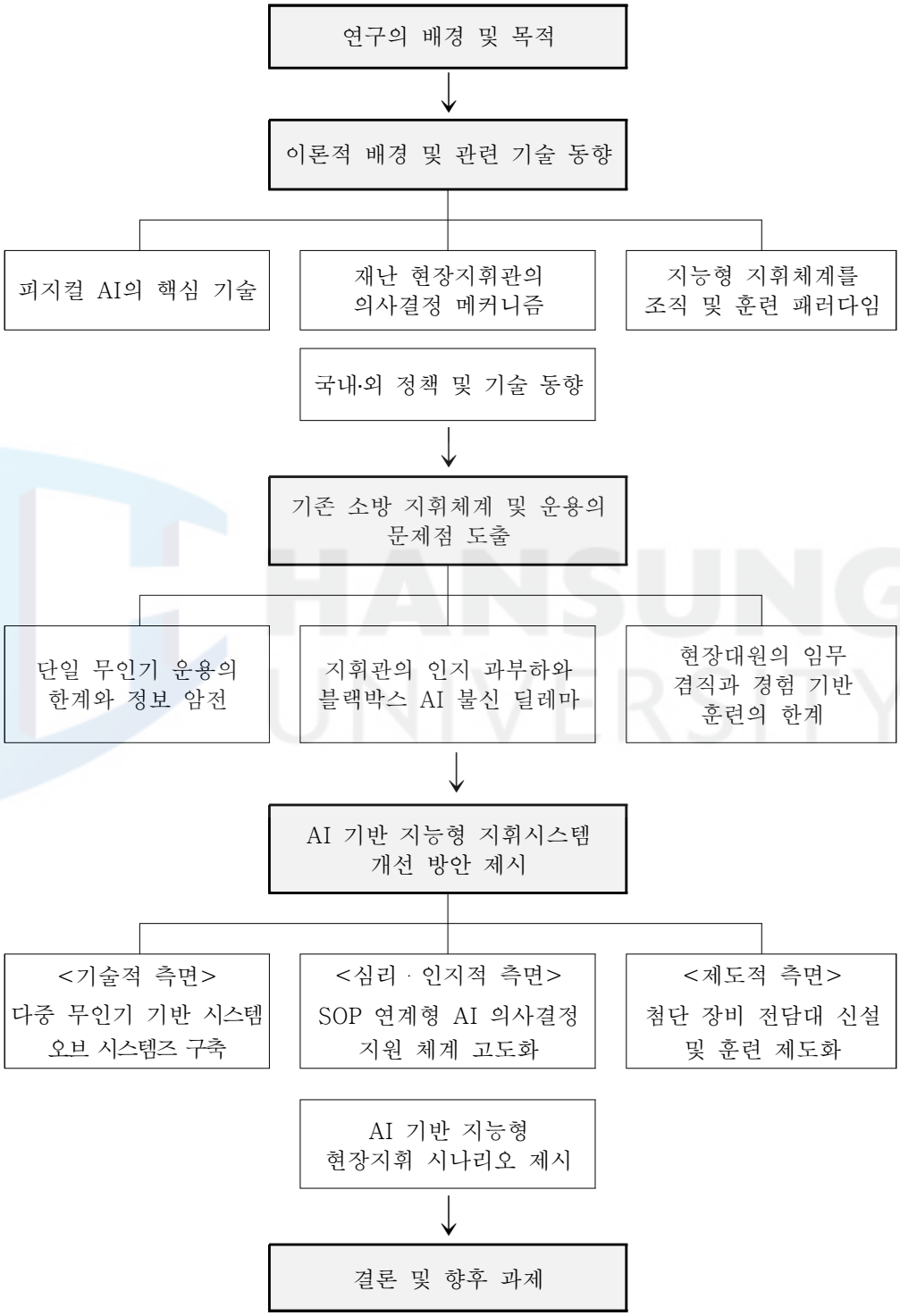
파악하고, 이를 극복하기 위한 다중 로봇 최적화, 메쉬 네트워크, 설명 가능한 인공지능 기술 등의 적용 가능성을 탐색한다. 아울러 다부처 재난안전 대응 기술개발 기획보고서 및 육군의 드론봇 전담 병과 창설 사례 등 국가 정책 및 기술 동향을 종합적으로 검토하여 새로운 체계 도입을 위한 객관적인 지표를 수집한다.

다음으로, 재난 현장지휘관의 의사결정 과정과 심리적 압박감을 규명하기 위해 기존 선행 연구들의 심층 인터뷰 자료를 적극적으로 참고하여 분석하였다. 극한의 환경에서 지휘관이 직면하는 정보 암전 속 공포, 일선 대원의 임무 겸직이 유발하는 중압감 등은 표면적인 통계만으로는 파악하기 어렵다고 본다. 따라서 일선 지휘관들을 대상으로 수행된 다양한 선행 질적 데이터들을 면밀하게 검토함으로써, 첨단 장비가 현장에서 방치되고 지휘 통제력이 상실되는 근본 원인이 기계적 결함이 아닌 블랙박스 AI에 대한 불신과 조직 편제적 모순에 있음을 실증적인 현장의 의견으로 반영한다.

끝으로, 본 연구를 통해 도출된 공학적·심리적·제도적 개선 방안들이 단순한 이론적 제언이나 개별적인 파편에 머물지 않고, 실제 극한의 복합 재난 현장에서 어떻게 유기적으로 작동할 수 있는지를 실증하기 위해 시나리오를 적용한다. 앞서 제안한 상공의 드론 및 지상의 사족 보행 로봇과 같은 이기종 다중 무인기의 합동 운용 체계와 지능형 통합 상황판, 그리고 소방 드론봇 전담대의 현장 전개 모델을 종합하여, 실외 드론 선제투입을 통한 거시적 정보 수집과 실내 사족 보행 로봇 및 진압 대원 동시투입을 통한 미시적 합동 탐색이라는 구체적인 세부 운용 시나리오를 구성하여 제시한다.

이와 같은 다각적인 연구 방법을 통해, 본 논문에서 제안하는 지능형 현장지휘체계가 실제 현장의 정보 암전을 효과적으로 타개하고 현장지휘관의 주도적인 의사결정을 완벽하게 지원할 수 있음을 체계적으로 입증하고자 한다. 구체적인 연구의 흐름은 다음 <그림 1-1>과 같다.

<그림 1-1> 연구 흐름도



HANSUNG UNIVERSITY

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 피지컬 AI의 이론적 고찰과 핵심 기술

1. 피지컬 AI의 개념

인공지능(Artificial Intelligence, AI)은 인간이 아닌 어떠한 인공물이 인간의 지능을 모사하는 것으로, 시스템에 의해 설계된 지능을 가지는 인공적인 기계를 의미한다(김주은, 2019). 인공지능은 기술이 발전함에 따라 현재까지도 계속해서 형태가 변화하고 있어 명확하게 그 범위를 정의하기는 어렵다. 그로 인해 인공지능은 연구하는 학자와 연구방법에 따라 다양하게 정의된다. 러셀과 노빅(S. Russell & P. Norvig)은 인공지능을 '사람처럼 행동하는가, 합리적으로 행동하는가, 사람처럼 생각하는가, 합리적으로 생각하는가'의 4가지 기준으로 정의한 바 있으며, 마쓰오 유카타(Yutaka Matsuo)는 인공지능의 구현 수준을 단순 제어 프로그램(1단계), 입력과 출력의 수가 극단적으로 많은 경우(2단계), 정제된 데이터를 기반으로 학습된 추론이나 예측이 이루어지는 것(3단계), 그리고 대규모 데이터 기반으로 특징 자체를 스스로 학습하는 딥러닝(4단계)으로 세분화하여 그 진화 과정을 설명하였다(김주은, 2019). 과거의 컴퓨터 프로그래밍이 인간이 사전에 정의한 규칙에 수동적으로 의존했다면, 현대의 4단계 인공지능은 심층학습을 통해 능동적 추론과 예측을 수행하며 4차 산업혁명을 견인하는 '인간의 두뇌' 역할을 담당하고 있다(신민준, 2022).

그러나 기존의 소프트웨어 중심 인공지능은 주로 가상의 사이버 공간이나 서버 내부에 머물며 데이터 처리를 수행하는 데 그친다는 명백한 한계를 지니고 있다. 특히 짙은 농연과 붕괴된 잔해물 등으로 인해 인간의 접근이 원천적으로 차단되고 통신망이 두절되는 극한의 복합 재난 현장에서는, 컴퓨터 화면 속의 텍스트나 확률 예측 결과만으로는 눈앞에 닥친 물리적인 위험을 즉각적으로 타개할 수 없다. 현장지휘관이 직면하는 정보 암전 상태를 극복하기 위해서는, 인공지능이 디지털 영역의 연산을 넘어

현실 세계의 험지로 직접 뛰어드는 패러다임의 확장이 필수적으로 요구되었다(염무열, 2016).

이러한 시대적 요구에 부응하여 인공지능이 물리적 실체를 입고 현실 세계와 상호작용할 수 있도록 구현된 차세대 융합 기술이 바로 피지컬 AI(Physical AI)이다. 세계경제포럼(WEF)은 피지컬 AI를 기계공학, AI, 센서, 연결성의 융합을 통해 현실 세계에서 자율적으로 작동하는 자율 시스템으로 정의하였으며, 인공지능이 데이터 처리를 넘어 실제 세계에서 물리적 상호작용을 지능적으로 수행하는 체화된 지능의 진화된 형태로 평가받고 있다(이해수 외, 2025). 피지컬 AI에 대해 아직 공식적 정의나 관련 연구가 부족하지만, 지능이 물리적 실체 속에서 구현되는 통합적 시스템으로 이해되며, 이는 기존의 유사한 개념을 확장하면서 산·학·연에서 다양하게 정의되고 있다.

<표 2-1> 각 분야별 피지컬 AI 정의

구분		정의
학계	Miriyev & Kovač (2020)	• 지능형 유기체와 관련된 작업을 수행할 수 있는 물리적 시스템을 만드는 이론과 실제
	Yingbo Li(2021)	• 센서·액추에이터·AI 알고리즘이 통합된 시스템으로, 물리적 세계에서 자율적으로 작동하는 지능형 시스템
	Yang Liu, SJ Oks, Zikai Zhao(2024)	• 기존의 Embodied AI(체화된 AI), 소프트 로보틱스(Soft Robotics), 사이버물리시스템(Cyber-Physical System, CPS), 적응형 AI(Adaptive AI) 등의 개념들과 밀접하게 연결
연구계	AI4EU(2020)	• 물리적 환경과의 직접적인 상호작용이 수반되는 문제를 해결하기 위해 AI 기술을 활용
	WEF(2025)	• 기계공학, AI, 센서, 연결성의 융합을 통해 현실 세계에서 자율적으로 작동하는 시스템
산업계	NVIDIA(2025)	• 현실 세계에서 복잡한 행동을 인식, 이해 및 수행할 수 있는 자율 시스템
	Google Deepmind (2025)	• AI가 인간처럼 물리 환경에서 안전하고 유연하게 상호작용할 수 있도록 진화해야 한다는 관점
	USAII(2025)	• AI가 데이터 처리를 넘어 실제 세계에서 물리적 상호작용을 지능적으로 수행하는 기술

출처: 소프트웨어정책연구소 자료(2025.4.1.) 재구성

이러한 피지컬 AI 플랫폼이 단순한 기계적 움직임을 넘어 현실에서 자율적으로 상호작용하기 위해서는 다음의 4가지 주요 핵심 기술이 유기적으로 결합되어야 한다. 첫째, 현실 세계를 인식하는 감각 기술이다. 카메라, 3D 라이다, 초음파 센서 등을 통합하는 센서 퓨전을 통해 물체의 위치와 공간적 맥락을 파악하고 비정형 환경을 실시간으로 지각한다. 둘째, 지능적 의사결정을 담당하는 두뇌 기술이다. 수집된 방대한 데이터를 바탕으로 심층 강화학습과 비전-언어-행동(VLA) 모델, 특화된 로보틱스 기반모델을 활용하여 기체가 직면한 상황을 자율적으로 판단하고 최적의 행동 시퀀스를 생성한다. 셋째, 판단을 물리적 움직임으로 변환하는 행동 기술이다. 모라벡의 역설[1]을 극복하고 인간 수준의 기민성을 확보하기 위해, 지능형 관절 모터와 고도화된 액추에이터를 제어하여 미끄러운 험지를 돌파하는 실질적인 물리적 임무를 수행한다. 넷째, 시스템 간의 초연결을 보장하는 연결 기술이다. 통신이 단절되는 인프라리스 재난 환경에서도 기체에 탑재된 신경처리장치(NPU)를 통한 엣지 컴퓨팅과 동적 메쉬 네트워크를 바탕으로 무중단 분산 처리를 수행한다(이해수 외, 2025).

이러한 핵심 기술의 융합 수준과 형태에 따라 현재 피지컬 AI는 크게 4가지 주요 유형으로 분류되어 산업 전반에 확산되고 있다. 첫째, 휴머노이드형으로 기반모델, 비전, 자율 제어 기술이 고도로 통합되어 인간의 외형과 유사한 구조로 걷고 상황을 추론하는 최고 수준의 지능형 물리 에이전트이다. 둘째, 자율주행차형으로 도로 환경에 특화된 센서 세트와 AI 기반의 경로 해석, 정밀 제어 기술이 융합된 차량 기반 시스템이다. 셋째, AGV & AMR형으로 물류 및 제조 현장에 특화되어 사전 정의된 경로를 따르는 지능형 무인 운반차와 SLAM을 기반으로 스스로 자율 경로를 생성하고 장애물을 회피하는 자율이동로봇(AMR)이다. 넷째, 드론형은 공중 이동에 최적화된 경량 AI와 실시간 공간 인식 능력을 바탕으로, 장애물 회피 및 자율 비행 기능을 수행하는 비행형 피지컬 AI 플랫폼이다.

---

1) 1980년대 카네기멜론 대학교의 한스 모라벡(Hans Moravec) 등 로봇공학자들이 제시한 개념이다. 인간에게 어려운 고도의 논리적 연산이나 수학적 추론은 컴퓨터(인공지능)에게 매우 쉬운 반면, 인간이 무의식적이고 본능적으로 수행하는 지각 및 물리적 운동 제어 능력(두 발로 걷기, 장애물 인식 및 회피, 물건 집기 등)은 오히려 기계에게 구현하기가 엄청나게 어렵다는 역설적 현상을 의미한다.

재난 현장에서 정보 암전을 타개하기 위해 투입되는 핵심 피지컬 AI 플랫폼은 바로 험지를 딛고 들어가는 사족 보행 로봇(휴머노이드/AMR 파생)과 상공에서 활동하는 드론이라고 볼 수 있다. 4차 산업혁명의 발전 단계를 데이터화, 정보화, 지능화, 스마트화로 구분할 때, 로봇과 드론은 인공지능의 판단을 현실의 물리적 기동으로 실현하는 최종적인 스마트화 단계에 해당한다(신민준, 2022). 이들은 극한 환경에서 지각, 판단, 행동, 학습이 연결되는 메커니즘을 스스로 반복하며, 현장지휘관에게 객관적이고 과학적인 상황 판단의 토대를 능동적으로 제공한다. 본 절의 이하 내용에서는 이러한 피지컬 AI 무인이동체가 험지를 스스로 인지하고 극복하기 위해 요구되는 세부 요소 기술들의 원리와 동향을 심층적으로 고찰한다.

2. 무인이동체 자율 비행 및 객체 인식 기술

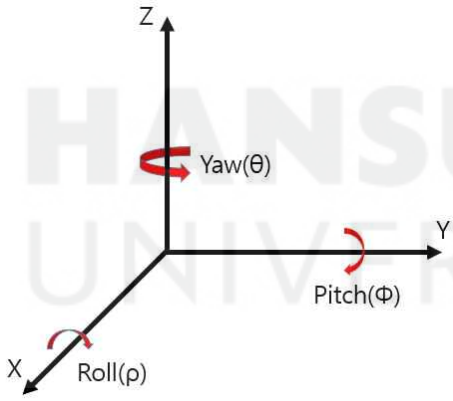
대규모 고층 건축물 내부나 지하 복합시설, 그리고 강한 화염으로 인한 난기류가 발생하는 재난 현장은 위성항법장치 신호가 왜곡되거나 완전히 단절되는 대표적인 인프라리스 및 GPS 음영지역에 해당한다(박채희, 2022). 일반적인 상용 소방드론은 비행 시 위치 제어 및 순항을 GPS 수신기에 전적으로 의존하기 때문에, 이러한 환경에 투입될 경우 위치 추정 오차가 급증하여 자율 비행이 불가능해지며 결국 기체 추락이나 통제 불능 상태로 직결된다(허창식, 2020).

이러한 치명적인 물리적 한계를 극복하기 위해 최근 피지컬 AI 기체에는 동시적 위치 추정 및 지도 작성(SLAM, Simultaneous Localization and Mapping) 기술이 필수적으로 적용되고 있다. SLAM은 통신이 원활하지 않은 환경에서 로봇이 카메라나 라이다 등 센서 데이터를 획득하여 스스로 3차원 지도를 작성함과 동시에, 그 지도상에서 자신의 위치를 실시간으로 파악하게 해주는 자율 운행의 핵심 기술이다. 특히, 드론과 같이 허용 하중(Payload)이 제한적인 경우 무겁고 고가인 3차원 라이다 센서를 탑재하기 어렵다. 이에 대한 대안으로, 단안 카메라나 스테레오 카메라, RGB-D 카메라를 활용해 점 구름(Point Cloud)[2] 데이터를 추출하는

Visual SLAM 기법이 핵심으로 부상하고 있다(김수호, 2020).

그러나 순수하게 영상에만 의존하는 Visual SLAM은 드론의 급격한 회전이나 농연으로 인한 시야 가림 시 위치를 잃어버리기 쉽다는 치명적인 약점이 있다. 이를 해결하기 위해 최근에는 카메라의 시각 정보와 IMU(관성측정장치) 센서의 데이터를 융합하는 VIO(Visual-Inertial Odometry)[3] 기법이 폭넓게 적용되고 있다. VIO 기반의 측위 시스템은 GPS가 원천 차단된 실내에서도 비행 로봇이 스스로 <그림 2-1>과 같은 6 자유도(6 DOF: x, y, z, roll, pitch, yaw)의 정밀한 위치 및 자세 정보를 획득하고 장애물을 회피할 수 있게 해준다(김수호, 2020).

<그림 2-1> 무인 이동체의 6자유도 공간 좌표계 및 자세 제어 개념도



출처: 협소 공간 생존자 탐색 로봇의 다중센터 모듈과 운용에 관한 연구(김성재, 2021) 재인용

또한, 로봇이 유의미한 정보를 획득하기 위해서는 딥러닝 기반 실시간 객체 인식 및 열화상 융합 기술도 필수적이다. 로봇이 SLAM을 통해 물리

2) 라이다(LiDAR) 센서나 심도 카메라 등을 통해 스캔된 3차원 공간의 데이터를 무수히 많은 점(Point)들의 집합으로 표현한 형태. 각 점은 X, Y, Z 좌표 정보와 반사 강도, 색상 등의 속성을 포함하여 주변 사물의 입체적 형상과 거리를 나타낸다.

3) 카메라로부터 얻어지는 시각(Visual) 정보와 가속도 및 각속도를 측정하는 관성측정장치(IMU: Inertial Measurement Unit)의 정보를 융합하여 로봇의 위치와 자세를 추정하는 기법. 카메라의 시야가 가려지거나 급격한 움직임이 발생할 때 IMU 데이터가 오차를 보정해 주어 비행 로봇에 매우 적합하다.

적으로 안전한 비행 경로를 확보하더라도, 수집된 영상이 지휘관의 전술적 의사결정을 돕는 유의미한 데이터로 기능하기 위해서는 화점, 농연, 요구조자, 위험 장애물 등을 기계가 스스로 식별해 내는 시각적 지능이 요구된다. 이를 위해 피지컬 AI 기체에는 합성곱 신경망(CNN: Convolutional Neural Network) 기반의 고도화된 객체 탐지(Object Detection)[4] 알고리즘이 결합된다.

과거에는 영상 내에서 후보 영역을 먼저 제안하고 이후에 객체를 분류하는 2-Stage 방식(예: R-CNN 계열)이 주로 사용되었으나, 일분일초가 시급한 재난 현장에서는 데이터 처리 속도에 한계가 존재했다. 이에 최근에는 1-Stage 모델인 YOLO(You Only Look Once) 알고리즘이 집중적으로 적용되고 있다. YOLO는 그 명칭처럼 '입력 이미지를 한 번만 보고' 객체의 종류와 위치를 동시에 예측하는 딥러닝 모델로, 처리 속도가 매우 빨라 실시간 탐지가 필수적인 무인기나 모바일 기기 환경에서 가장 대표적으로 활용된다(이한영·박대우, 2023; 김동진 외, 2020). 예를 들어, YOLOv4-tiny와 같은 경량화 모델은 드론에 탑재된 소형 임베디드 기기 환경에서도 현장의 장애물과 요구조자를 높은 프레임으로 실시간 탐지해 낸다(김동진 외, 2020). 나아가 객체 인식 기술은 기체의 자율 제어 시스템으로 진화하고 있다. 무인기의 경우 카메라에 인식된 객체의 바운딩 박스 중심점 좌표와 픽셀 오차를 연산하여 기체의 피치(Pitch), 롤(Roll), 요(Yaw) 값을 미세 보정함으로써, 조종자의 개입 없이 목표 지점을 스스로 추종하거나 자율 착륙을 수행한다(박채희, 2022). 한편 지상에서는, 스테레오 카메라와 YOLOv8 객체 인식을 결합하여 화재 지점까지의 거리와 방향을 산출하고, 2축 서보모터를 제어해 목표 지점에 소화탄을 정밀하게 자율 투척하는 궤도형 소방 로봇 기술까지 구현되고 있다(정원진 외, 2025).

나아가, 짙은 농연과 저조도 환경이라는 복합재난 특유의 시야 방해 요인을 극복하기 위해 일반 광학(RGB) 카메라의 한계를 보완하는 열화상 카메라 기반의 딥러닝 탐지 기술이 필수적으로 융합되고 있다. 열화상 카

4) 컴퓨터 비전 및 딥러닝의 주요 분야로, 이미지나 영상 내에서 사람, 불꽃, 자동차 등 특정 객체가 무엇인지(분류, Classification) 식별하고, 그 객체가 어디에 있는지 위치(바운딩 박스, Bounding Box)를 동시에 찾아내는 알고리즘 기술이다.

메라는 절대영도(−273.15℃) 이상의 모든 물질에서 방사되는 적외선 에너지를 감지하여 온도 차이에 따른 실화상으로 변환해 주는 비접촉식 측정 기기이다(김동진 외, 2020). 이는 빛이 없는 야간이나 짙은 농연 속에서도 열원을 통해 객체를 탐지할 수 있어 소방 구조 분야의 필수 장비로 꼽힌다. 저해상도 열화상 이미지를 활용하더라도, 사전에 FLIR Thermal Datasets 등 재난 데이터셋으로 학습된 인공지능 모델은 이 온도 데이터를 기반으로 농연 속 요구조자의 형태를 높은 신뢰도로 검출해 낸다.

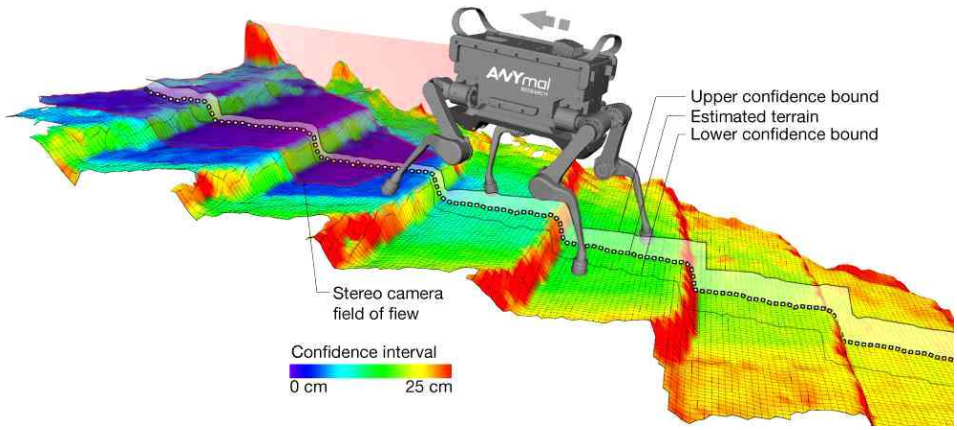
결과적으로, 자율 주행과 딥러닝 기반의 빠르고 정밀한 객체 인식이 결합된 피지컬 AI는 GPS가 닿지 않는 정보 암전의 영역을 개척하여 지휘관에게 가공된 시각 데이터를 조기에 제공해 주는 지능형 현장지휘체계의 기술적 토대가 되게 된다.

3. 사족 보행 로봇의 지각 및 통합 제어 기술

드론이 상공과 건물 외곽에서 거시적인 3차원 데이터를 수집한다면, 붕괴된 콘크리트 잔해와 철근 파편이 산재한 실내의 칠흑 같은 공간은 지상 무인 이동체의 몫이다. 특히 계단, 문턱, 흩뿌려진 잔해물 등 바퀴나 무한궤도 방식으로는 주파가 불가능한 비정형 험지를 극복하기 위해, 지면과의 접촉 면적을 최소화하면서도 3차원적 기동이 가능한 사족 보행 로봇이 피지컬 AI의 핵심 지상 플랫폼으로 대두되고 있다.

복잡한 재난 환경에서 사족 보행 로봇이 자율적으로 이동하기 위해서는 전방과 하단의 지형을 정밀하게 파악하는 지각 시스템이 선행되어야 한다. 로봇에 탑재된 심도 카메라는 방대한 점 구름 데이터를 수집하면, 로봇은 이를 바탕으로 <그림 2-2>와 같이 지면의 높낮이와 굴곡을 격자 형태로 나타내는 고도 지도를 실시간으로 생성한다(김동주, 2026). 이렇게 생성된 고도 지도는 지형의 경사도와 거칠기를 수치화하여 로봇이 스스로 보행 가능한 영역과 회피해야 할 장애물을 구분하게 해주며, 결과적으로 로봇이 전도되지 않고 딛을 수 있는 최적의 안전한 발디딤 위치를 계획하도록 돕는다(안욱진, 2024).

<그림 2-2> 사족 보행 로봇의 3D 지각 센서 기반 고도 생성 개념도



출처: 복잡한 지형에서의 사족로봇 보행 제어를 위한 어텐션 기반 강화학습(김동주, 2026) 재인용

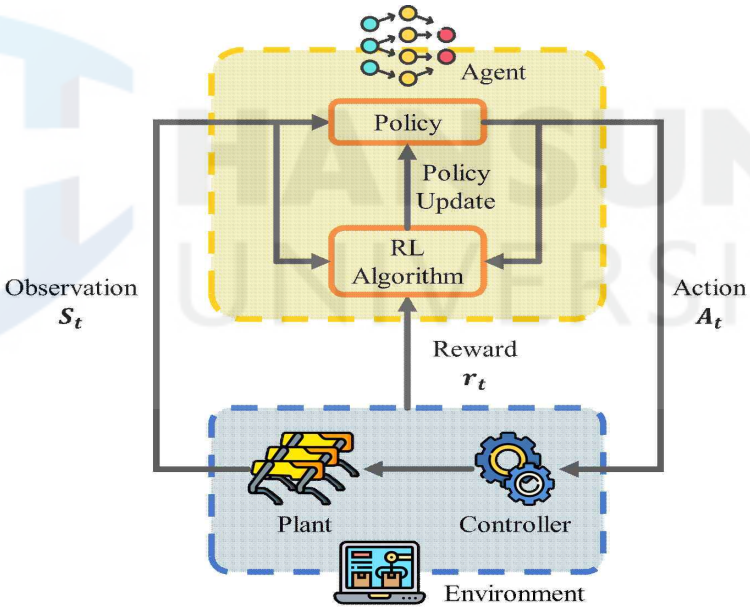
시야를 확보한 로봇이 미끄러운 파편 위에서 균형을 잃지 않고 전진하도록 관절의 모터를 제어하는 것도 재난 로봇 공학의 난제 중 하나이다. 기존의 로봇 보행 제어는 기구학적인 물리 역학 공식에 기반하여 로봇의 미래 상태를 예측하고 최적의 힘을 계산하는 모델 기반 제어기(MPC)[5]에 전적으로 의존해 왔다(전상현, 2024). 하지만 예측 불가능하고 마찰력이 수시로 변하는 재난 지형에서는 12개가 넘는 관절의 비선형적 역학을 실시간 수식으로 계산하는 데 한계가 있으며, 작은 오차만으로도 기체가 쉽게 전도되는 치명적인 약점이 존재했다.

이러한 물리적 계산의 한계를 극복하기 위해 최근 피지컬 AI에는 심층 강화학습(DRL, Deep Reinforcement Learning) 알고리즘이 적극 융합되고 있다. 심층 강화학습은 방대한 센서 데이터를 처리하는 딥러닝의 인지 능력과 에이전트가 환경과 상호작용하며 가장 높은 보상을 얻는 방향으로 행동을 수정해 나가는 강화학습의 의사결정 능력을 결합한 최신 인공지능 기술이다(전상현, 2024). 심층 강화학습이 적용된 사족 보행 로봇은 개발

5) Model Predictive Control: 로봇이나 시스템의 수학적 동역학 모델(상태 방정식)을 바탕으로 짧은 미래의 상태 변화를 미리 예측하고, 주어진 목적 함수(예: 기체의 균형 유지)를 최적화하는 제어 입력을 실시간으로 도출해 내는 제어 기법이다. 다관절 로봇의 정밀한 지면 반력 및 힘 제어에 탁월한 성능을 발휘한다(전상현, 2024).

자가 일일이 다리의 각도를 코딩해 주는 것이 아니라, 가상의 시뮬레이션 환경에서 수만 번 넘어지고 일어나는 시행착오를 거친다. 이 과정을 통해 로봇은 어떤 지형에서 어느 정도의 토크(회전력)를 관절 모터에 주어야 넘어지지 않고 목적지에 도달하여 보상을 얻을 수 있는지 그 최적의 행동 정책을 스스로 터득하게 된다. 특히, 가상 시뮬레이션과 실제 현실 간의 물리적 오차를 극복하기 위해 마찰력, 로봇 무게, 센서 노이즈 등 다양한 환경 변수를 무작위로 부여하는 도메인 랜덤화 기법이 적용되어 현장 적응력을 비약적으로 높이고 있다(김동주, 2026).

<그림 2-3> 로봇과 환경 간의 상호작용을 통한 심층 강화학습 제어 구조



출처: 사족 보행 로봇의 모델 기반 제어기와 딥강화학습 제어기의 통합 제어 연구(전상현, 2024) 재인용

최근의 선도적인 재난 로봇 연구들은 강화학습의 뛰어난 환경 적응력과 역학 모델의 정밀함이라는 두 가지 장점만을 결합한 통합 제어 시스템을 채택하고 있다. 즉, 거시적인 보행 속도와 다리의 스윙 궤적 등 융통성이 필요한 부분은 심층 강화학습 신경망이 직관적으로 결정하고, 로봇의

발이 지면에 닿는 찰나의 순간에 기체의 균형을 잡기 위한 미세한 지면 반력의 분배는 수식 기반의 MPC가 정밀하게 통제하는 상호보완적 아키텍처이다(전상현, 2024).

이처럼 정밀한 3D 지각(고도 지도) 능력과 인공지능 기반의 통합 제어(DRL+MPC) 기술로 무장한 사족 보행 로봇은, 험난한 화재 현장의 잔해를 스스로 딛고 안정적으로 활동하여 지휘관의 시야를 확보하는 역할을 완벽히 수행할 수 있는 실체적인 피지컬 AI로 기능하게 된다.

4. 다중 무인기 군집 제어와 동적 메쉬 네트워크

비행 드론과 사족 보행 로봇이 각각 우수한 자율 제어 및 지각 능력을 갖추더라도, 광범위하고 복잡한 재난 현장에 단일 기체 단위로 투입되는 닫힌 시스템은 탐색 범위 측면에서 물리적 한계를 지닌다. 특히 단일 기체 중심의 운용은 해당 로봇이 비행 중 추락하거나 험지에서 전도될 경우 현장의 정보 수집이 전면 중단되어 버리는 치명적인 취약점, 즉 단일 장애점을 구조적으로 내포하고 있다. 단일 장애점이란, 시스템 구성 요소 중 어느 하나가 파손될 경우 전체 지휘망의 작동이 마비되는 현상을 의미하며, 이를 분산시키고 탐색 효율을 극대화하기 위해 최근의 피지컬 AI 운용 패러다임은 다수의 이기종 기체가 상호 협력하는 다중 로봇 군집 제어 시스템으로 발전하고 있다.

다중 무인기가 칠흑 같은 재난 현장에서 중복 탐색을 방지하고 최단 시간에 화점이나 요구조자를 발견하기 위해서는 수색 경로의 수학적 최적화가 필수적이다. 이를 위해 입자 군집 최적화(PSO, Particle Swarm Optimization) 알고리즘이 핵심적으로 적용된다. PSO는 새 떼나 물고기 무리의 사회적 행동 양식을 모방한 확률적 최적화 기법으로, 각 로봇이 자신이 탐색 중인 현재 위치와 군집 내 다른 로봇들이 발견한 가장 유효한 위험 요소의 정보를 실시간으로 공유한다. 이를 통해 전체 시스템 차원에서 가장 효율적인 진입 경로와 정보 수집 위치를 스스로 연산하고 찾아가는 고도화된 지능형 알고리즘이다(장더롱, 2026).

이러한 군집 비행 및 주행 과정에서 다수의 기체가 좁은 실내 공간에 밀집할 경우 기체 간 충돌 위험이 급증한다. GPS가 차단된 인프라리스 환경에서는 절대적인 위치 좌표를 얻을 수 없으므로, 로봇 간의 충돌을 방지하기 위해 상대 측위 기술이 동원된다. 상대 측위란 외부 위성 신호에 의존하지 않고, 로봇에 탑재된 초음파 센서, UWB(초광대역) 통신 모듈, 또는 카메라 비전을 활용하여 로봇 상호 간의 거리와 방위각을 정밀하게 측정함으로써 자신의 위치를 군집 내에서 상대적으로 추정하는 기법이다. 이 상대 측위와 PSO 알고리즘이 결합됨으로써, 이기종 무인기들은 충돌 없이 재난 현장 곳곳을 빠르고 촘촘하게 훑어내는 거대한 자율 센서 편대로 작동하게 된다.

다수의 로봇이 성공적으로 험지를 돌파하고 방대한 3D 스캔 및 영상 데이터를 수집하더라도, 두꺼운 철근 콘크리트 벽체나 붕괴 매몰 지역 특유의 전파 간섭으로 인해 외부 지휘소와의 통신이 단절된다면 수집된 데이터는 현장지휘관의 의사결정에 아무런 기여를 하지 못한다. 4차 산업혁명 기반의 스마트 소방서비스 환경에서 신속한 상황 판단과 대응 전략 수립은 적시에 정확한 데이터가 지휘관에게 제공되는지 여부에 절대적으로 달려있다(신민준, 2022). 그러나 기존의 드론과 조종기 간 1:1 중앙 집중식 무선 통신 방식은 전파의 회절 능력이 떨어져 인프라가 파괴된 복합재난 환경에 취약하다.

이를 원천적으로 타개하기 위해, 피지컬 AI 기체들을 단순한 영상 수집 단말기가 아닌 이동형 무선 통신 중계기로 활용하는 동적 메쉬 네트워크(Dynamic Mesh Network) 기술이 대안으로 적용되고 있다(한국로봇융합연구원, 2026). 메쉬 네트워크 환경에서는 지상의 사족 보행 로봇과 상공의 비행 로봇이 상호 간에 그물망 형태의 자율적인 초연결망을 구축한다. 건물 내부 깊숙한 험지에서 특정 로봇이 통신 음영 지역에 빠져 외부 지휘차량과의 직접 통신이 단절되더라도, 데이터는 다중 홉(Multi-hop) 라우팅 방식으로 지연 없이 전달된다. 다중 홉 라우팅이란 센서 로봇과 외부 지휘소가 단일 링크로 통신하는 대신, 인접한 여러 대의 이동형 중계 노드(다른 드론 및 사족 보행 로봇)를 징검다리처럼 거쳐 우회 경로로 데

이터를 릴레이 전송하는 방식이다.

이 방식을 적용하면 스마트 로봇 LiDAR 센서 기반의 실내외 3D 디지털 트윈 데이터와 같이 용량이 큰 정보도 원활하게 외부로 송출할 수 있으며, 화염이나 붕괴로 인해 중간에 위치한 로봇 하나가 파손되더라도 메쉬망 내의 다른 로봇을 통해 대체 경로를 스스로 탐색하므로 통신의 복원력을 보장할 수 있다.

결과적으로, 라이다로 획득한 3D 고도 지도, YOLO 알고리즘 기반의 실시간 위험 객체 탐지 정보, 그리고 심층 강화학습으로 험지를 돌파하는 피지컬 AI 기체들이 동적 메쉬 네트워크를 통해 하나의 유기체로 융합될 때, 본 연구가 궁극적으로 지향하는 시스템 오브 시스템즈가 비로소 완성될 수 있다고 본다. 독립적이고 고유한 임무를 수행하는 첨단 단위 시스템들이 상호 연결되어 이전에 없던 통합 지휘 역량을 창출해 내는 이 SoS 아키텍처를 통해 현장지휘관이 칠흑 같은 정보 암전 상태에서 벗어나 지능형 통합 상황판을 통해 과학적·전술적 의사결정을 내릴 수 있도록 보장하는 기술적 장치가 될 것이다.

제 2 절 재난 현장지휘관의 의사결정 메커니즘

1. 재난 현장지휘 개념과 규범적 의사결정

재난 현장에서 지휘란, 법규적 근거 또는 권한 위임에 따라 현장 대원들의 활동을 감독하는 지시, 특정 임무를 할당하는 명령, 그리고 유관 기관을 포함한 모든 자원의 제반 활동을 제어하는 통제 행위를 총칭한다(임태준, 2024). 학술적으로 지휘는 소속 자원에 대해 활동을 지시하는 권한이며, 통제는 전략적·전술적 목표 달성을 위해 타 기관 소속 자원까지 포함하여 제반 활동을 제어하는 권한으로 구분되기도 한다(성호선, 2013). 즉, 소방 지휘란 직위와 직책을 통하여 재난 환경에 적합하게 소방 인력과 장비를 합리적으로 운영하여 피해를 최소화하기 위해 행하는 일체의 권한 행사이다(윤민규, 2019). 이러한 소방 현장지휘의 범위와 기능은 전술적

목표 달성을 위한 표준적 활동으로서, ① 지휘권 장악, 확립(선언), 현장 지휘소 설치 ② 상황평가 ③ 무선통신 관리 ④ 자원관리 ⑤ 전략선정, 작전계획 개발, 임무부여 ⑥ 현장조직 개발 ⑦ 현장활동 평가, 수정 ⑧ 지휘 지속, 이양, 종결 등을 포괄하는 방대한 영역이다(임태준, 2024).

이러한 광범위한 지휘 체계의 중심이 되는 현장지휘관은 전략과 전술의 개발, 자원 동원 및 배분을 포함한 사고 현장의 모든 대응 활동 관리를 총체적으로 책임지는 자를 의미한다. 미국 연방재난관리청(FEMA)은 현장지휘관을 사고 작업 수행에 대한 총체적 권한과 책임을 지닌 자로 정의하며, 「긴급구조대응활동 및 현장지휘에 관한 규칙」 제2조제4항에서 정하는 현장지휘관이란, 긴급구조의 업무를 지휘하는 중앙통제단장, 지역통제단장의 사전명령이나 위임에 따라 현장지휘를 하는 소방관서의 지휘대장 또는 선착대장을 말한다. 중앙통제단장은 소방청장, 지역통제단장은 소방본부장 또는 소방서장으로 규정하고 재난이 발생한 경우에 재난의 종류·규모 등을 통제단장에게 보고해야 하며 이 경우 보고를 받은 통제단장은 통제단의 설치·운영과 지원출동 여부를 결정해야 한다. 또한 현장지휘관은 '재난현장 조치상황과 재난현장지원에 필요한 사항 등을 수시로 통제단장에게 보고해야 한다' 라고 현장지휘관 등의 임무를 규정하고 있다.

현장지휘관이 효과적으로 임무를 완수하기 위해 관리해야 하는 현장지휘의 통솔 범위는 재난 사고의 유형, 임무 수행의 특징, 위험 환경의 장애요소, 대원과의 물리적 거리 등을 종합적으로 고려하여 결정되며, 적절한 통솔 범위의 유지는 현장 대원들의 안전 보장과 원활한 작전 수행을 위한 필수적인 전제조건으로, 현장지휘관은 재난의 규모나 복잡성에 상관없이 인명 구조, 재난의 안정화, 재산 보호라는 전략적 목표를 반드시 달성해야 하는 막중한 책임을 지닌다. 현장지휘관은 재난현장 내 사고 작업 수행에 대한 총체적인 책임과 권한이 있고, 사고현장의 모든 대응활동관리에 있어 관리책임을 가지고 있다. 현장지휘관은 사고현장 전반을 관리하는 최고 책임자이며 현장에서의 중요사항을 판단하고 결정하는 최종 결정권자이다. 현장지휘관은 지휘체계의 핵심기능(총괄지휘기능, 작전기능, 계획기능, 자원지원기능)을 모두 관리할 책임이 있으며, 표준지휘조직체계를 바

탕으로 이를 수행하기 위한 부서를 구성하고 권한을 위임하고 중요사항에 대해 보고받고 지시를 내림으로써 지휘를 수행하게 된다. 현장지휘관은 자신의 지휘 기능을 위임하기 전까지 사고 발생 초기부터 모든 지휘체계 관리를 책임지고 관리해야 한다. 사고 발생 초기부터 지휘권을 확립하는 것이 중요한 이유는 현장지휘가 결여되면 현장대원의 무질서한 활동 등으로 안전을 위협할 수 있고, 신속하게 전체 상황을 분석하고 그에 따른 의사결정을 내리는 것은 지휘관 없이는 불가능하기 때문이다. 또한 사고가 점진적으로 확대되는 초기 상황에서 현장지휘가 없다면 조직 활동은 무질서해지고 대응목표에 의한 관리가 어렵게 된다(임태준, 2024년).

이와 같이 복잡하고 난해한 재난 현장에서 지휘관 개인의 제한된 인지능력만으로 방대한 지휘 범위와 막중한 책임 현안을 모두 완벽하게 통제하는 것은 물리적으로 불가능에 가깝다. 따라서 이러한 한계를 극복하고, 성공적인 현장지휘와 체계적인 재난 대응을 수행하기 위한 규범적인 장치가 필수적으로 요구되었다. 재난대응체계에 있어 신속하고 체계적인 현장지휘와 분야별 대응 전략를 확립하기 위해 소방청은 현장 대원이 따라야 할 기본적이고 일반적인 행동 지침인 「재난현장 표준작전절차(SOP)」를 제정하여 운영하고 있다. 포괄적인 조직 운영 지침서인 재난대응 매뉴얼과 달리, 재난현장 표준작전절차는 긴급구조기관이 체계적인 현장 대응과 상호협조체계를 유지하기 위하여 공통으로 사용하는 표준현장지휘체계 상 현장지휘관 및 현장 대원의 구체적인 대응 절차를 의미한다. 이 절차는 재난 상황에서 지휘관의 판단 오류를 최소화하기 위해 주관적인 표현을 지양하고 객관적이고 명확한 문장으로 기술되어 있으며, 시행 주체별로 지휘, 화재, 사고, 구급, 상황 등 5개 분야로 세분화되어 구성된다.

이 중에서도 특히 지휘통제절차(SOP 100)는 초기 재난 현장을 장악하고 대응 방향을 결정하는 지휘관의 임무를 매우 엄격하게 규정하고 있다. 해당 절차는 현장지휘, 현장지휘소 설치·운영 기준, 지휘 이양, 지휘 활동 기준 및 통합지휘, 위험구역 진입 및 대원 긴급 탈출, 항공 지휘·통제, 상황판단 회의 운영, 재난 현장 브리핑, 출동대 복귀 절차 등 세부 지휘통제 절차를 명시하여 지휘관의 의사결정 기준을 확립하고 있다.

구체적으로 SOP 101(지휘권 확립)에 따라 선착대장은 현장 도착과 동시에 반드시 무전으로 지휘권을 선언하여 대응 초기부터 단일 통제권을 확보해야 한다. 이어 SOP 102(상황평가 및 적용)에 따라 지휘관은 화재의 위치, 구조대상자 유무, 연소 확대 가능성 등 전체 상황을 빠르게 평가하여 가장 심각한 위험 요소를 찾아내야 한다. 이후 SOP 106에 근거하여 대원 안전, 인명구조, 재산보호 순의 전술적 우선순위를 즉각 결정하고 출동대원에게 구체적 임무를 부여하게 된다. 이러한 규범적 절차는 일분일초가 시급한 재난 현장에서 지휘관이 체계적으로 인적·물적 자원을 통제하고 대원의 안전을 담보하기 위해 반드시 선행되어야 하는 이상적인 지휘 기능을 수행하게 한다.

<표 2-2> 재난현장 표준작전절차상 현장지휘관의 주요 지휘통제 임무

○ SOP 101 지휘권 확립

1. 지휘권 확립 원칙

1.1 모든 재난 현장의 지휘체계는 단일 현장지휘체계이며 지휘권 이양 절차에 따라 지휘권을 이양받은 지휘관이 현장지휘관이 된다.

1.2 선착대장은 현장 도착과 동시에 반드시 지휘권을 무전으로 선언한다. 다만, 상시 운영되는 소방서 긴급구조지휘대의 지휘대장(지휘팀장, 대응단장 등)이 현장에 함께 도착한 경우 지휘대장이 지휘권을 선언한다.

1.2.1 후착한 지휘대장은 선착대장이 지휘권을 선언하지 않은 경우 즉시 지휘권을 선언하여 다음의 절차를 통해 재난현장지휘권을 확립한다.

① 현장대원 안전관리를 점검한다.

② 자원을 배치한다.

③ 위험지역 내에서 활동 중인 모든 대원의 위치를 파악한다.

④ 전술상황의 기록을 유지한다.

⑤ 임무 수행 중인 출동대로부터의 진행 상황에 대한 보고를 요청한다

2. 선착대장 지휘권 확립 절차

2.1 지휘권 행사는 선착대장이 무전을 통해 119종합상황실(이하 상황실)과 후착대에 최초상황을 전파함으로써 이루어지며 최초 상황보고 내용은 다음 사항을 포함한다.

① 현장에 도착한 출동대 명칭

② 연소 상황, 구조대상자(사상자) 발생 등 관찰되는 재난 정보

③ 건물용도(주택, 고층건물, 공장 등), 규모(층수, 넓이 등), 건축 방식

④ 위험 요소, 대원 안전과 직결되는 사항

⑤ 지휘관 신분, 지휘 위치 등을 포함한 지휘권 선언

⑥ 시도 중이거나 시도 예정인 소방 활동 상황

⑦ 공격 · 방어 · 병행전략 등 전략 선언

⑧ 필요한 자원 등 지원의 범위 결정 및 요청사항

⑨ 차량 진입 및 회차 가능 여부

2.2 선착대장은 상황에 따라 재난 현장의 전체를 돌아보며 다음 사항을 검토·확인하고, 필요시 즉각 전파한다.

① 최초 상황평가 검토·보완

② 관계인 또는 목격자가 제공하는 믿을 만한 정보

③ 화재(연기)의 위치와 상태 변화

④ 구조대상자, 위험 요소 유무

⑤ 최초 상황평가 시 결정한 전략과 지휘 위치의 적절성

⑥ 임무부여, 자원배치, 대응활동계획 등의 적절성

○ SOP 102 상황평가 및 적용

2.1 선착대장은 아래 단계별로 초기상황 평가 및 판단에 필요한 정보를 수집한다.

2.1.1 출동지령 내용으로 재난유형, 규모, 인명피해 등의 정보를 수집한다.

2.1.2 출동 중 신고내용 및 날씨, 시간대, 대상물 등 상황실 추가정보를 파악한다.

2.1.3 현장도착 즉시 재난 건물(지역)과 주변 건물(지역)의 배치, 재난 진행상황을 파악한다.

2.1.4 현장 도착 후 관계자 진술, 구조대상자 및 인명대피 유무, 연소확대 상황, 현장안전 등의 정보를 수집한다.

2.2 선착대장은 현장에 도착하면 육안관찰을 통하여 다음 정보를 수집한다.

2.2.1 눈에 보이는 구조대상자의 상황을 파악한다.

2.2.2 화재층 및 상층 등으로의 연소확대 상황 및 화재로 인한 인접건물에 대한 영향 등을 파악한다.

2.2.3 건물붕괴 우려 등 대원안전과 관련된 정보를 확인한다.

2.2.4 인명대피를 할 수 있는 피난시설(비상구 및 피난계단) 등의 유무를 확인한다.

2.2.5 기타 대응활동에 참고할 수 있는 정보를 파악한다.

2.3 선착대장은 초기상황평가 및 현장에 도착하여 육안 관찰을 통해 파악한 정보에 기초하여 대응 전략 등을 선택하고 추가 정보에 따라 수정·보완한다.

○ SOP 106 전략 설정, 대응활동계획 수립 및 수정

1. 전략, 전술적 우선순위, 대응활동계획

1.1 전략, 전술적 우선순위, 대응활동계획의 정의는 다음과 같다.

① 전략은 재난현장에 대응하는 전체적인 접근방법을 말한다.

② 전술적 우선순위는 대응활동계획상의 활동 중 중요성 및 긴급성 등에 따라 수행할 활동에 대한 순위로 대원안전→인명구조→재산보호→재난 안정화(화재의 경우, 화재진압)→환경보호의 순서로 진행한다.

③ 대응활동계획이란 전술적 목표(인명구조, 재산보호, 사고 안정화, 환경보호)를 달성하기 위한 구체적인 활동이 포함된 서면 또는 구두상의 계획을 말한다.

1.2 현장지휘관은 재난현장 주요요소에 대한 정보를 수집·분석하고 위험도를 평가하여 전략 및 대응활동계획을 수립한다. 단, 선착대장의 대응활동계획 수립은 상황에 따라 구두로 전파하거나 생략할 수 있다.

하지만, 이론적으로 완벽하게 설계된 SOP 규정들은 재난 대응의 훌륭한 기준점이 되지만, 현대의 비정형적 복합재난 현장이 지닌 가변성 앞에서는 원론적인 실행 한계에 직면하게 된다. 모든 현장의 조건과 환경은 결코 동일할 수 없으므로, 매뉴얼이나 SOP를 기계적으로 현장에 적용하는 것에는 무리가 따른다.

재난 현장에서 소방관의 의사결정 과정을 심층적으로 다룬 선행 연구들에 따르면, 일선 현장지휘관들은 SOP가 현장 대응의 기본적인 틀을 제공한다는 점에는 동의하지만, 급변하는 실제 상황에 이를 완벽하게 부합시하는 어렵다고 판단하는 경향이 뚜렷하다(차주현, 2025). 특히 지휘관들은 경험이 부족한 상태에서 매뉴얼에만 의존하거나 이를 기계적으로 준수하려 할 경우, 오히려 유연한 전술적 의사결정을 방해받고 최적의 대응 타이밍을 놓치는 요인이 될 수 있음을 지속적으로 지적하고 있다. 나아가 붕괴 및 대형 화재 현장에서 무조건적인 규범의 준수는 융통성 없는 대응을 초래하여 결과적으로 작전의 실패를 야기할 가능성이 높다고 평가하게 된다(김수환, 2017).

이는 복잡한 재난 현장일수록 매뉴얼의 단순한 집행 수준을 넘어, 상황 변화에 따른 기관 간 협력, 융통성, 그리고 초기 대응을 넘어서는 전략적

의사결정 능력이 요구됨을 의미한다. 즉, 재난현장 표준작전절차는 지휘관이 마땅히 따라야 할 법적·행정적 최소 기준으로서의 규범적 역할을 충실히 수행하지만, 인간의 예측 범위를 벗어나는 초거대 재난 앞에서는 이러한 규범만으로 상황을 통제할 수 없다는 이론적 맹점을 지니게 된다. 따라서 이러한 규범의 한계를 보완하기 위해 실제 현장의 지휘관들은 자신의 인지적 판단 체계, 즉 경험에 기반한 직관과 추론에 의존하여 의사결정을 내리게 되며, 이에 대한 심리학적 고찰이 요구된다.

2. 인간의 인지적 판단 메커니즘

일분일초가 생명과 직결되는 재난 현장에서 지휘관은 모든 대안을 수집하고 장단점을 비교·평가하는 규범적이고 분석적인 의사결정을 내릴 시간적 여유가 없게 된다. 이러한 긴급 상황에서의 인간 행동을 설명하기 위해 인지심리학자 게리 클라인(Gary Klein)은 자연주의 의사결정(Naturalistic Decision Making) 이론을 바탕으로 '인식 기반 의사결정(RPD, Recognition-Primed Decision)' 모델을 제안하였다[6]. RPD 모델은 소방이나 군사 작전과 같이 시간적 압박이 크고 불확실성이 높은 환경에서, 전문가들이 복잡한 대안 비교 과정 없이 자신의 직관과 과거 경험 패턴을 바탕으로 즉각적인 의사결정을 내리는 과정을 설명하는 이론이다.

이를 반영한 선행연구에서 베테랑 지휘관의 의사결정은 크게 세 가지 단계를 거쳐 신속하게 이루어진다고 보았다. 첫째, '상황인식(Situation Awareness)' 단계이다. 지휘관은 현장에 도착하자마자 화염의 색깔, 연기의 형태 등 파편화된 단서들을 수집하여, 과거 자신이 경험했던 유사한 상황의 패턴과 무의식적으로 대조한다. 둘째, '해결책 도출(Solution Generation)' 단계이다. 일반적인 의사결정 모델이 최적의 대안을 찾기 위해 분석에 시간을 쏟는 반면, RPD 모델은 허버트 사이먼(Herbert Simon)이 제시한 만족화 전략을 따른다[7]. 즉, 수많은 대안을 비교하는 대신 상

6) Gary Klein. "Sources of Power: How People Make Decisions", 1998.

7) Herbert Simon, "A Behavioral Model of Rational Choice", 1955.

황에 가장 적합하다고 판단되는 첫 번째 해결책을 직관적으로 떠올림으로써 시간과 인지적 자원을 극도로 효율화한다. 셋째, '실현 가능성 평가(Evaluation of Feasibility)' 단계이다. 도출된 첫 번째 해결책을 머릿속으로 가상 실행해 보는 멘탈 시뮬레이션을 거치며, 이 과정에서 치명적인 결함이 발견되지 않는다면 즉각적으로 작전 지시에 돌입하게 된다(염무열, 2015). 실제 소방관들을 대상으로 한 심층 인터뷰 따르면, 숙련된 현장지휘관들은 복잡한 매뉴얼을 회상하기보다는 수년간의 현장 활동을 통해 축적된 암묵적 지식을 바탕으로 상황을 판단하는 경향이 뚜렷하게 나타난다(김수환, 2017). 이는 현장지휘관의 의사결정이 철저히 현장에서 체화된 경험적 직관을 근간으로 작동하고 있음을 입증하는 것이다.

앞서 고찰한 RPD 모델은 지휘관의 경험적 직관이 어떻게 신속한 대응을 가능하게 하는지 훌륭하게 설명하지만, 인간의 인지적 판단이 단일한 직관 체계로만 이루어지는 것은 아니다. 이러한 인지적 메커니즘을 보다 거시적이고 구조적으로 규명한 심리학 이론이 바로 조나단 에반스(Jonathan Evans)와 키스 스타노비치(Keith Stanovich) 등이 집대성한 '이중 과정 이론(Dual-Process Theory)'이다[8].

이중 과정 이론은 인간의 사고와 의사결정 과정이 두 가지 독립적인 시스템으로 나뉘어 상호작용한다고 설명한다. '시스템 1(System 1: 직관적 마음)'은 진화적으로 오래된 인지 체계로서, 빠르고 무의식적이며 과거의 암묵적 지식이나 휴리스틱(H에 기반해 즉각적이고 자동적으로 작동하는 특성을 지닌다. 반면, '시스템 2(System 2: 추론적 마음)'는 다소 느리지만 의식적이고 논리적이며, 명시적 지식과 객관적 데이터에 기반해 상황을 통제하고 분석적으로 추론하는 이성적 체계이다(이승현, 2024). 이 두 시스템의 상호작용은 디폴트-간섭주의 모델(Default-Interventionist Model)로 구체화된다. 이 모델에 따르면, 인간은 일상적인 문제나 익숙한 상황에서는 인지적 에너지가 적게 드는 시스템 1을 기본값으로 사용하여 신속하게 결정을 내린다. 그러나 직면한 문제가 시스템 1의 경험 범주를 벗어나거나 높은 인지적 능력이 요구되는 복잡한 상황일 경우, 시스템 2

8) Jonathan St. B. T. Evans & Keith E. Stanovich, "Dual-Process Theories of Higher Cognition: Advancing the Debate", Association of Psychological Science, 2013.

가 옵션으로 개입하여 직관의 오류를 바로잡고 분석적인 통제를 수행하게 된다.

이를 재난 지휘 환경에 적용하면, 소방 지휘관은 일상적인 현장에서는 과거의 경험과 직관에 의존하여 신속한 전술을 하달한다. 그러나 비정형적이고 복잡한 대형 복합 재난 현장에서는 직관의 맹점과 인지적 편향을 방지하기 위해 시스템 2의 이성적 판단과 데이터 분석이 필수적으로 요구된다. 즉, 완벽한 지휘를 위해서는 직관적 판단을 기본으로 하되, 이를 객관적으로 검증하고 통제할 수 있는 논리적 추론이 유기적으로 결합되어야 한다는 것이 이중 과정 이론이 제시하는 의사결정의 핵심적 전제이다.

3. 기술 수용성에 관한 심리학적 고찰

앞서 고찰한 이중 과정 이론에 따르면, 비정형 재난 환경에서 지휘관의 직관적 오류를 보완하기 위해서는 객관적 데이터를 분석하는 추론적 개입이 필수적이다. 이를 위해 최근 국가 안보 및 재난관리 분야에서는 AI 도우미를 도입하여 지휘관의 의사결정을 지원하려는 연구가 활발히 진행되고 있다(이창은, 2021). 그러나 이러한 첨단 시스템이 실제 현장에 성공적으로 안착하기 위해서는 기계가 도출한 결과값을 지휘관이 얼마나 믿고 수용할 것인가 하는 기술 수용성과 신뢰라는 심리학적 문제가 해소되어야 한다. 일반적으로 인간은 불확실성이 높은 환경에서 인지적 에너지를 절약하기 위해, 기계나 자동화된 시스템이 제공하는 정보를 무비판적으로 수용하고 자신의 직관이나 타 객관적 단서들을 무시해 버리는 자동화 편향에 빠지기 쉽다. 반대로, 기계의 판단이 인간의 상식과 충돌하거나 오류를 범할 경우 시스템 전체에 대한 신뢰를 즉각적으로 철회하는 극단적인 양상을 보이기도 한다(이승현, 2024). 특히 재난 현장이라는 고위험 환경에서 현재 산업계에 널리 활용되는 딥러닝 기반의 인공지능은 치명적인 한계를 지닌다. 이들은 방대한 데이터를 연산하여 최적의 결과값을 도출하지만, 내부의 복잡한 알고리즘 계층으로 인해 인간 사용자에게 왜 그러한 결론에 도달했는지 논리적 인과관계를 설명하지 못하는 이른바 블랙박

스 AI의 형태를 띠고 있기 때문이다.

재난 현장에서 지휘관의 단 한 번의 의사결정은 진입 대원들의 생사와 직결된다. 초동지휘자 역량에 관한 연구들에 따르면, 일선 지휘관들은 작전 실패 시 발생할 인명 피해와 그에 따른 책임 소재를 홀로 감당해야 한다는 막중한 심리적 중압감을 겪고 있으며, 상황 통제에 대한 굳건한 확신이 서지 않을 경우 극도로 방어적이고 소극적인 지휘 태도로 고착되는 경향을 뚜렷하게 보인다. 이러한 막중한 책임의 맥락에서 볼 때, 판단 근거가 철저히 은폐된 블랙박스 AI의 일방적인 지시는 지휘관에게 작전을 강행할 확신을 결코 부여할 수 없다. 결과적으로 지휘관은 기계의 조언을 배척하고 불완전한 자신의 직관으로 회귀하거나, 의사결정 자체를 지연시키는 피동적 딜레마에 빠질 수 밖에 없다.

블랙박스 알고리즘이 초래하는 수용성 한계를 타개하고 지휘관의 붕괴된 신뢰를 회복하기 위한 핵심적인 심리학적·공학적 대안이 바로 '설명 가능한 인공지능(XAI, eXplainable AI)'의 융합이다. 미국 국방부 산하 DARPA에서 개발하는 XAI는 AI의 역량을 예측정확도뿐만 아니라 AI가 갖춰야 할 새로운 역량으로 설명능력 개념을 도입하고 XAI를 AI가 최종 결론에 이른 이유와 그 과정을 사람이 이해할 수 있게 설명하는 새로운 AI 소프트웨어로 정의하고 있다. 이를 통해 사람이 차세대의 AI파트너를 이해하고, 적절하게 신뢰하고, 효과적으로 관리할 수 있도록 지원하는 중이다(이창은 외, 2021). 국내의 XAI 프로젝트는 UNIST에서 주관하여 딥러닝 위주의 현재 인공지능 기술의 한계를 극복하기 위해 의사결정 이유를 설명할 수 있는 인간 수준의 학습·추론 프레임워크와 불완전한 데이터로부터 학습이 가능한 프레임워크를 개발 중이며, 이를 바탕으로 사용자 수준에서 이해할 수 있도록 설명이 가능한 인터페이스를 개발하고 최종적으로 의료, 금융 등 전 문 분야에 실제로 적용하는 것을 목표로 하고 있다(이창은 외, 2021).

소방 분야에 이러한 XAI 기술을 도입하는 것은 앞서 언급한 자동화 편향을 구조적으로 방지하는 데 결정적인 역할을 하게 된다. 특히, 판단의 근거가 시각적으로 명확히 공개될 때 지휘관은 기계의 지시를 맹목적으로

추종하는 대신 자신의 현장 경험과 기계의 논리를 교차 검증하면서 비판적이고 분석적인 사고를 활성화할 수 있다. 결국 설명 가능한 인공지능은 단순히 기계적으로 결과값을 제시하는 수준을 넘어 지휘관의 분석적 역량을 제고할 수 있는 인지적 지원 장치로 기능하게 된다. 나아가 XAI가 제공하는 객관적이고 투명한 데이터는 극한의 책임감과 압박감에 놓인 지휘관에게 심리적 안정 수단으로 작용할 수 있다. 실제로 선행 연구에 따르면, 일선 지휘관들은 기계의 판단 근거를 바탕으로 상황을 객관적으로 납득하고 스스로 검증할 수 있을 때 비로소 주도적인 현장 통제력을 획득할 수 있다고 평가하고 있다. 따라서 논리적 인과관계로 뒷받침된 객관적 정보는 지휘관 스스로 의사 결정이 대원들을 불확실한 상황으로 몰아넣지 않는다는 확신을 부여할 수 있다.

결론적으로, 재난 현장에서 설명 가능한 인공지능을 도입해야 하는 당위성은 단순히 공학적 연산 속도의 향상에 머무르지 않는다. 오히려 이는 불명확한 상황에서 지휘관이 겪는 불안과 맹목적 불신을 심리적으로 해소해 주는 핵심 장치이다. 궁극적으로 XAI는 기계에 의사결정권을 종속당하지 않은 채, 지휘관이 주도적인 통제권을 유지하며 최적의 전술을 전개하도록 보장하는 의사결정 지원 체계의 필수 조건이라 볼 수 있다.

제 3 절 지능형 지휘체계 전환을 위한 조직 및 훈련 패러다임

1. 임무 겸직과 전담 조직 개편 사례

현재 소방 조직은 드론을 비롯한 무인 이동체를 재난 현장에 점차 도입하고 있으나, 이를 운용하는 별도의 전담 조직 없이 기존의 구조·진압 대원이 현장에서 조종 임무를 병행하는 임무 겸직 체제를 유지하고 있다. 즉, 한 명의 작업자가 본연의 핵심 임무를 수행하는 동시에, 높은 인지적 주의력을 요구하는 다른 첨단 장비 조종 및 영상 분석 등의 보조 임무를 병행하는 상태에 있다는 의미다. 앞서 제2절에서 살펴본 바와 같이, 복합재난 현장은 그 자체로 극도의 인지적 과부하를 유발하는 공간이다. 화재

진압과 인명 구조라는 본연의 임무에 모든 주의력을 쏟아야 하는 현장 대원이 복잡한 피지컬 AI의 조종기까지 운용해야 하는 상황은, 일분일초가 시급한 재난 현장에서 치명적인 주의력 분산을 초래하며 필연적으로 기체 운용의 실패나 구조 골든타임의 지연으로 이어질 수 밖에 없다. 결과적으로 현재의 운용 방식으로는 다중 무인기 군집 제어나 동적 메쉬 네트워크와 같은 고도화된 시스템 오브 시스템즈 아키텍처를 구현해 낼 수 없다.

이를 극복하기 위해, 육군 미래 무기체계 발전에 따른 전투병과 개편 사례를 살펴볼 필요가 있다. 국방부는 인구 감소와 복무기간 축소 등 불가피한 병력 감축의 현실 속에서, 저비용 고효율의 작전 수행을 위해 사물인터넷, 클라우드, 빅데이터, 인공지능 등 4차 산업혁명의 핵심 기술을 국방에 적극 도입하고 있다(윤성준, 2021). 미래 지상군은 다영역 전투 환경에서 동시다발적인 비선형 근접전투를 수행해야 하므로, 육군은 인간의 한계를 극복할 '드론봇 전투체계'와 'ArmyTiger 4.0' 등 유·무인 복합체계를 핵심 전력으로 격상시켜 미래 전장에 대비하고 있다(이창은 외, 2021).

그러나 이러한 첨단 피지컬 AI 장비들을 단순히 기존 보병의 시야를 돕는 보조 장비로 취급하여 대원에게 조종기를 쥐여주는 미봉책은 현장에서 심각한 한계를 드러내고 있다. 극한의 불확실성이 존재하는 작전 현장에서는 인간 중심의 전통적인 전투 활동과 기계 중심의 조종 임무가 필연적으로 충돌하게 되며, 결국 가혹한 현장 상황 속에서 대원들이 첨단 기체의 전개를 포기하고 장비를 지휘차량 트렁크에 방치하는 역효과가 발생한다. 즉, 첨단 기계의 도입 속도를 기존 조직의 인력 편제가 따라가지 못하는 일련의 행정 지체 현상이 기술의 효용성을 심각하게 훼손하고 있는 것이다. 이러한 행정적 병목과 임무 겸직의 맹점을 타개하기 위해, 육군은 무인 무기체계를 전담하는 조직과 교육 인프라를 체계적으로 분리하여 구축하였다. 정책 및 기획을 총괄하기 위해 육군본부 정책실 내에 드론봇 담당관실을 신설하였으며, 교육사령부 산하에 '드론봇 센터'를 두어 작전 개념 발전과 전력화를 주도하고 있다(윤성준, 2021). 또한 실질적인 운용 인력을 양성하기 위해 육군 정보학교에 드론봇 교육센터를 운영 중이다.

실전 운용 부대로는 2018년 9월에 드론봇 전투단을 창설하였으며, 해당 부대는 공중정찰대대, 특수임무대대, 전자전대대, 로봇중대 등 첨단 무기체계의 기능별로 세분화된 편제를 갖추어 운용되고 있다. 나아가 2020년에는 드론 전투발전센터를 확대·개편함으로써 드론 및 로봇의 실전 효용성을 지속적으로 고도화하고 있다(채범석, 2022년). 이러한 전담 조직 신설과 더불어, 육군은 일선 전투 부대(제대) 단위까지 방대한 양의 드론을 보급하여 정보망을 촘촘하게 구축할 계획이다. 육군 용역연구 결과에 따르면, 미래 보병사단의 제대별 드론 보유 및 운용 계획은 <표 2-2>과 같다.

<표 2-3> 제대별 드론봇 운용 및 보유 드론 수

구분	드론 전문대대	드론 전문중대	드론 전문소대	직할대
운용 제대	사단	여단	대대	사단
제대별 보유	263	32	16	-
사단 총 보유 (548대)	263대 (1×263)	96대 (3여단×32)	144대 (9대대×16)	35대
세부현황	정찰(82대) 공격(103대) 수송(33대) 통신(23대) 화생방(18대)	감시/정찰(10대) 공격용(16대) 수송용(9대)	감시/정찰(6대) 공격용(10대)	-

출처: 국방 드론봇 통합관제체계 개발을 위한 결정요인 연구(윤성준, 2021) 재인용

이처럼 지능형 자율전투 로봇과 드론 등 5대 주요 무기체계가 대량으로 보급됨에 따라, 육군은 기존 병과(보, 포병 등) 대원들이 첨단 기기 조종을 겸직하는 방식이 한계에 직면했음을 절감하였다. 최근 수행된 육군 전투병과 개선 연구의 전문가 합의 결과에 따르면, 기존 무기체계와의 임무 중복 문제를 해결하고 첨단 전력의 전문성을 극대화하기 위해 드론을 통합한 무인 전투 로봇 전담 병과와 사이버 병과를 별도로 신설하여 전문특기로 육성하는 방안이 도출되었다. 이는 첨단 장비의 조종 및 데이터 가

공 임무를 전통적 전투 병과와 철저히 분리하여 대원들이 본연의 전투 임무에만 전념하게 하려는 군 조직의 혁신적 사례이다. 이러한 육군의 전담 편제 개편과 병과 신설 이론은, 유사한 극한의 불확실성 속에서 첨단 무인기를 운용해야 하는 소방 조직의 현장 대응력 누수를 타개하기 위한 정책적·제도적 시사점을 제공한다.

2. 데이터 기반 훈련 및 실증연구 사례

앞서 고찰했듯이, 자연주의 의사결정 및 인식 기반 의사결정 모델에 따르면, 불확실성이 높은 현장에서 전문가는 자신이 과거에 겪었던 유사한 패턴을 회상하여 직관적으로 의사결정을 내리게 된다. 그러나 개인이 일생 동안 겪을 수 있는 대형 복합재난의 빈도는 매우 제한적이므로 주관적인 기억과 선배들로부터 구전되는 도제식 암묵적 지식에만 의존하는 학습은 전례 없는 비정형 재난 앞에서 그 한계를 드러낼 수밖에 없다(차주현, 2025). 인간의 직관이 올바르게 작동하기 위해서는 풍부하고 정확한 경험 데이터가 필수적이나, 개인의 단편적인 경험 범위에만 한정된 훈련은 지휘관이 낯선 상황에 직면했을 때 이성적 추론마저 마비시키는 원인이 된다(염무열, 2016). 따라서 주관적 기억과 편향의 한계를 보완하기 위해, 객관적인 데이터에 기반하여 상황을 복기하는 새로운 훈련 패러다임의 필요성이 이론적으로 대두된다.

경험적 학습의 인지적 한계를 극복하기 위한 대표적인 실무적·학술적 방법론으로 사후 강평(AAR, After Action Review)과 시뮬레이션 훈련이 대두되고 있다. 사후 강평이란 훈련이나 작전 종료 후 객관적인 데이터를 바탕으로 성공 및 실패 원인을 분석하는 체계적인 과정이다. 최근 군사 및 재난 관리 분야에서는 현장지휘관이 자신의 지휘 모습과 판단 내역을 객관적 기록 수단을 통해 직접 되돌아보는 자기 사후검토의 중요성이 강력하게 지지받고 있다. 이러한 자기 사후검토는 지휘관이 자신의 초기 관점만을 수용하려는 확증 편향이나 상황의 일부분에만 집중하게 되는 터널시야 등의 인지적 오류를 스스로 자각하게 돕는다. 결과적으로 이는 극한

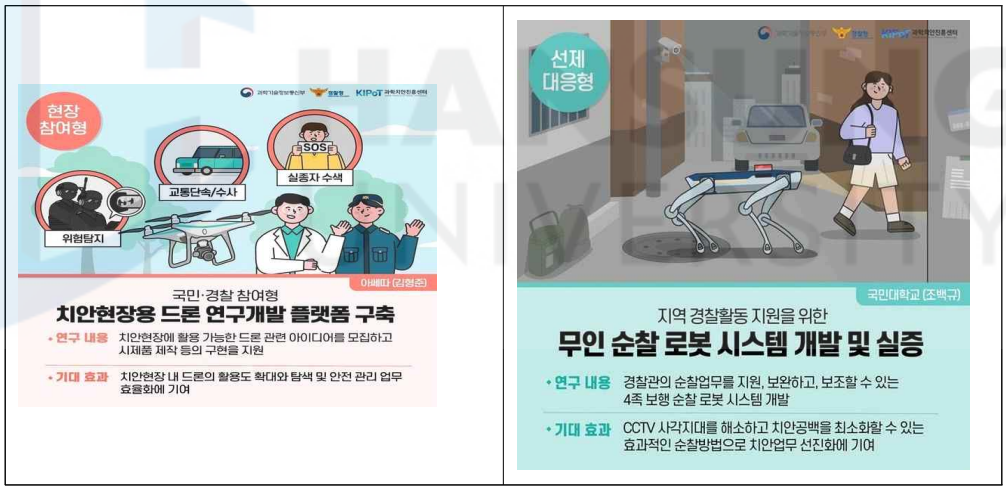
의 불확실성 속에서도 올바른 결심을 내릴 수 있는 지휘관 고유의 직관력과 통찰력을 크게 향상시키는 핵심 기제로 작용한다고 보았다(현승철·박현민, 2020).

나아가, 이렇게 수집된 객관적 사후 데이터는 지휘관의 멘탈 시뮬레이션과 가상현실 기반 훈련을 정교화할 수 있는 핵심 자산이 된다. 다시 말해, 재난 환경의 빅데이터와 가상현실 기술이 결합된 소방 지휘 훈련은 개인이 일생 동안 실제로 경험하기 어려운 대규모 복합 재난 상황을 안전한 환경에서 실전처럼 반복하여 체득할 수 있게 해준다. 빅데이터 분석을 통해 가상현실 기반 소방지휘훈련의 효과성을 실증한 선행 연구에 따르면, 시뮬레이션 기반 훈련은 학습자의 몰입감을 극대화하여 실효성 높은 자기주도적 학습을 유도하며, 예측 불가능한 돌발 위험에 대처하는 현장지휘관의 실질적인 상황판단 능력과 무전 수행과 같은 현장 대응 역량을 비약적으로 강화하는 것으로 확인되었다(김영환, 2022). 결국, 객관적 데이터에 기반한 자기 사후검토와 시뮬레이션 훈련은 개인의 편향되고 제한적인 주관적 경험을 극복하고, 현장의 칠흑 같은 불확실성을 통제할 수 있는 조직 전체의 체계화된 지식으로 전환시켜 주는 이론적 토대가 될 수 있다.

이러한 훈련과 더불어 피지컬 AI가 현장에 실효성있게 안착하기 위해서는 현장 중심의 연구가 지속적으로 뒷받침되어야 한다. 최근 공공안전 분야의 연구개발 패러다임은 연구실 중심의 단편적 기술 개발을 탈피하여, 첨단 기술을 실제 현장에 신속하게 이식하고 실효성을 검증하는 현장 실증 중심으로 변화하고 있다. 대표적인 사례로 과학기술정보통신부와 경찰청이 공동으로 추진 중인 다부처 사업인 ‘치안현장 맞춤형 연구개발사업(폴리스랩 2.0)’을 들 수 있다. 폴리스랩 2.0은 기개발된 원천기술을 적극적으로 활용하여 시의성 높은 현재 및 미래 치안 현장의 문제를 신속히 해결하고, 대국민 치안 서비스를 고도화하는 것을 목적으로 하는 실증형 연구개발 사업이다. 이 사업은 현장 수요의 시급성과 주제 성격에 따라 기존 기술을 활용해 시급한 문제를 해결하는 '긴급대응형', 향후 5년 이내 요구될 솔루션을 선제적으로 발굴하는 ‘선제대응형’, 그리고 ‘현장참여형’ 폴리스랩의 세 가지 유형으로 세분화되어 운영되고 있다. 이 중 현장참여

형 폴리스랩은 일반 국민과 실제 치안 현장의 경찰관이 스스로 치안 현장의 문제를 정의하고, 이를 해결하기 위한 연구개발 수행에 직접 참여하는 지원 모델이다. 이는 개발된 기술을 단순히 일선에 보급하는 하향식 방식을 넘어, 실제 시스템을 운용할 현장 대원의 요구사항을 기획 단계부터 최우선 기준으로 반영하는 상향식 문제 정의 방식을 채택하고 있다. 이러한 경찰청의 폴리스랩 2.0 운용 방식은 사용자(현장 경찰관)의 참여형 개발 경험과 실증 절차를 하나의 제도로써 정립한 구체적인 사례이다. 이는 일상적인 치안 전반을 대상으로 기민한 문제 해결에 중점을 두고 있으며, 기술 개발과 현장 실증이 분리되지 않는 데이터 기반의 체득 환경을 국가기관이 이미 선제적으로 제도화하여 운용하고 있음을 시사한다.

<그림 2-4> 폴리스랩 2.0 사업 사례



출처: 과학기술정보통신부

제 3 장 국내·외 정책 및 기술 현황 분석

제 1 절 정책 현황 분석

1. 해외 정책 동향

가. 미국

미국은 연방재난관리청(FEMA)과 그 산하 기구인 소방청(USFA)을 중심으로, 첨단 ICT 기술을 접목한 통합 데이터 시스템의 고도화 및 현대화를 국가적 핵심 과제로 추진하고 있다. 특히 국립표준기술연구소(NIST) 등 주요 국립연구소와의 긴밀한 협업을 통해 재난 현장에 스마트 시스템을 도입함으로써 국가 차원의 대응 역량을 강화하는 데 주력하고 있다.

미국 정부는 「2024-2027 소방 및 응급 의료 서비스 전략 계획(FEMA, 2024.01)」의 '전략 3: 소방 및 EMS의 연구와 기술 혁신 촉진'을 통해 데이터 시스템의 현대화를 강력히 시행하고 있다. 그 핵심 성과로 2024년 도입된 NERIS(National Emergency Response Information System)는 미국 전역의 화재 및 재난 대응 데이터를 실시간으로 통합·분석할 수 있도록 설계된 차세대 클라우드 기반 정보 시스템이다. 이는 1970년대에 구축되어 API 연계, 실시간 데이터 분석, 시스템 정형화 능력이 부족하다고 평가받아온 기존의 NFIRS(National Fire Incident Reporting System)를 대체하기 위한 것이다. NERIS의 도입을 통해 현장 데이터의 즉각적인 수집과 과학적 분석이 가능해졌으며, 이를 바탕으로 국가적 대응 수준을 획기적으로 향상시킬 수 있는 토대를 마련하였다.

또한, FEMA는 2019년 10월 「국가대응 프레임워크(National Response Framework)」를 발표하여 모든 유형의 재난 및 비상사태에 대응하기 위한 표준화된 지침을 수립하였다. 본 지침의 핵심은 현장 시설, 장비, 인력, 통신 자원을 공통의 조직 구조 내에서 유기적으로 통합하고 관리하는 현장지휘체계(ICS, Incident Command System)의 운용에 있다.

아울러, 현장 사고를 체계적으로 관리하고 지원하기 위한 비상 운영 센터(EOC)의 구성 및 점검을 강화하고 있다. 특히 기후 변화 등으로 인해 발생하는 새로운 유형의 재난에 대한 대처 능력을 개선하기 위해 필요한 장비 기능을 지속적으로 식별하고 있으며, 현장 소방대원들의 요구사항을 충족시키기 위한 종합적인 사고 조정 방안을 구축함으로써 재난 대응의 실효성을 높이고 있다.

나. 유럽(EU)

유럽연합은 단일 국가의 대응을 넘어 유럽 전체의 재난 회복탄력성을 강화하기 위해 범유럽 차원의 공동 연구 및 정책 프로그램을 추진하고 있다. 유럽연합에서는 핵심 정책인 'EU Disaster Risk Management Policies'를 통해 기존의 예방 및 대비 중심에서 완화, 대응 및 복구 조치까지 포함하여 위험을 해결하는 것을 목표로 한 정책을 발표하였다. 이를 실현하기 위해 세계 최대의 연구 혁신 프로그램인 'Horizon Europe'을 통해 약 28억 유로 규모의 R&D 투자 프로그램을 운영하며 기술적 기반을 공고히 하고 있으며, 구체적인 프로젝트를 통해 현장 대원의 안전과 임무 능력을 향상시키기 위한 다각적인 기술 개발을 진행해 왔다. 주요 프로젝트는 다음과 같다.

<표 3-1> Horizon Europe 세부 프로젝트

프로젝트	기간 / 예산	사업 내용
INGENIOUS 프로젝트	2019.09~2022.02, 약 896만 유로	현장 대원의 안전과 임무 능력 향상을 목표로 지상 및 비행 로봇을 포함한 차세대 툴킷을 개발하였으며, 구조원이 직면하는 위험과 위협을 실시간으로 인식하는 기술을 확보
CENTAURO 프로젝트	2015.04~2018.09, 약 412만 유로	재난 대응 시 민첩한 조작을 지원하기 위해 증강현실(AR) 기반의 전신형 원격 조작 로봇을 개발 이를 통해 화재 현장에서의 호스 연결이나 밸브 조작 등 복잡한 이중 수동 조작을 지원하는 기술적 성과 창출

SmokeBot 프로젝트	2015.01~2018.06, 약 381만 유로	연기, 먼지, 안개 등으로 인해 가시성이 극도로 제한된 가혹한 환경에서 로봇 시스템이 원활히 동작할 수 있도록 라이더, 카메라 외에도 3D 라이더, 열화상 카메라, 고대역폭 가스 센서 등을 융합하여 모델링하는 기술을 개발
TRADR 프로젝트	2013.11~2017.12, 약 1,109만 유로	난 현장에서의 다양한 임무 수행을 위해 로봇과 인간의 협업을 위한 다중 로봇 작업 모델 및 협력 모델 개발을 추진
SAFERS 프로젝트	2020.10~2024, 약 325만 유로	공공 행정 기관에서 활용 가능한 의사결정 지원 시스템을 갖춘 통합 오픈소스 빅데이터 비상 관리 시스템으로서, 화재 조기 감지, 화재 경계, 예측 경로 등 정보를 제공하는 체계 구축

출처: https://ingenious-first-responders.eu/ingenious-project 등 홈페이지 참고

다. 일본

일본은 화재 및 재난 현장에 로봇, 드론, 첨단 안전장비 등 신기술을 적극적으로 도입하고 있으며, 일부 지자체를 중심으로 현장 적용 및 전문 인력 양성을 추진하고 있다. 핵심 정책을 살펴보면 다음과 같다.

일본 소방청은 디지털 전환 기술 기반의 화재 안전 강화를 위해 2023년 4월 「소방방재 분야에서의 DX 추진(消防防災分野におけるＤＸの推進)」 정책을 발간하였다. 이 정책 중 드론을 기반한 재해 대응 역량을 높이고 중앙과 지방 간 영상을 공유하도록 시스템을 정비하는 부분은 주목할 필요가 있다. 우선, 드론 기반 재해 대응 역량을 강화하기 위해 전국 소방서에 드론을 배치하고 소방대원 대상 조종 기술 교육을 시행하고 있으며, 영상 정보를 활용한 재해 대응 강습을 통해 광범위한 화재, 토사 재해, 조난자 수색 등에 드론을 실전 활용하고 있다. 또한 소방청과 지방공공단체 간에 재해 현장의 실시간 영상 정보를 공유할 수 있도록 투고형 기능을 갖춘 영상 공유 시스템을 새롭게 구축하였다. 이는 관계 기관과의 의견 교환을 통해 최적의 시스템 구성 및 운용 룰을 마련하는 단계이며, 향후 내각부가 정비 예정인 차기 종합 방재 정보 시스템과의 접속을 염두에 둔 기술 요건 검토가 병행되고 있다.

일본은 무인 방수 로봇 및 첨단 구조 장비 배치도 역점적으로 추진하고 있다. 2024년 총무성 산하 소방청(FDMA)은 재난 대응력 향상과 소방관 안전 확보를 위해 전국의 소방 긴급 지원팀에 무인 방수 로봇 배치를 발표하였다. 무인 방수 로봇을 도입하여 지진이나 쓰나미 경보 상황에서도 현장 탐색이 가능하며, 소방차로부터 용수를 공급받아 진압 임무를 수행한다. 특히 물막이 노즐을 장착하여 불씨 비산을 차단함으로써 화재 확산을 방지하는 데 특화되어 있다. 또한 파손된 도로를 효율적으로 주행할 수 있도록 설계된 소형 구조 차량을 추가 도입할 예정이며, 극한 환경에서 활동하는 대원들을 위해 고성능 냉방 및 단열 기능을 갖춘 휴식·숙박용 텐트를 배치하여 현장 회복력을 지원하고 있다.

또한, 일본은 지자체를 중심으로 재난 시 신속한 피해 파악을 위해 전국 자원봉사 소방대를 대상으로 드론 배치 및 교육 사업을 추진하고 있다. 이를 위해 2023년 기준 약 4,000만 엔의 예산을 배정하였으며, 각 도도부현 소방학교의 운용 교육을 통해 약 400명의 수료생을 배출하였다. 다만, 2023년 기준 전국 724개 소방서 중 약 59%(429곳)에서 드론 교육을 진행하였으나, 실제 장비를 보유한 소방단체는 전체 2,198개 중 약 1.8%(40곳) 수준인 60대 정도가 배치되어 있어 향후 추가적인 보급 확산이 과제로 남아 있다. 대표적인 운영 사례로, 시즈오카현 야이즈시 등 일부 지자체는 소방대 내에 전용 드론 부대를 조직하여 운영 중이다. 이를 통해 감소 추세에 있는 소방대원의 인력 공백을 해소하고, 산악 지역이나 인구 밀집 지역 등 현장 도착 시간이 소요되는 지역에서 효과적인 초기 대응 성과를 거두고 있다.

라. 중국

중국 또한 최근 효과적인 재난 예방과 대응을 위한 장비 고도화를 목적으로 첨단 과학기술을 활용한 소방 산업 지원과 국가 차원의 응급 관리 체계 강화를 적극적으로 추진하고 있다.

중국 공안부 소방국은 2018년 업무 요점 보고를 통해 소방 산업의 현

대화, 기술화 및 전문화를 위한 추진력 확대를 천명하였다. 부서 간의 긴밀한 협업을 바탕으로 과학 기술 정보화를 강화하고, 이를 통해 고도화된 소방 장비 체계를 구축하고 있다. 또한 화재 조사에 대한 책임을 강화하고 데이터 기반의 화재 안전 평가를 수행함으로써 체계적인 화재 예방 시스템을 수립하고 있다. 뿐만 아니라 스마트 소방 산업의 조기 상용화를 위해 소방 장비 시장의 진입 장벽을 완화하고, 관련 심사 및 투자 절차를 간소화하는 등 법적·제도적 규범화를 병행하고 있다.

중국 국가발전개혁위원회는 「14차 5개년 계획」을 발표하며 주요 추진 정책으로 안보를 설정하고 국민의 생명 안전 보장을 최우선 과제로 제시하였다. 국가 응급 관리 체계를 개선하고 응급 물자 보장 체계를 강화함으로써 재난 감소, 재해 방지 및 구제 능력을 전면적으로 제고하고 있다. 그리고 국민의 생명 보호를 최우선으로 두고 대형 재난 상황에서도 공공안전을 확보할 수 있는 국가적 대응 역량을 강화하는 데 주력하고 있다.

중국 국무원에서는 고산 지역의 지진 구호 및 비상 대응을 위한 연구와 훈련을 목적으로 「긴급임무 2022」 계획을 수립하여 시행하였다. 재난 재해 발생 시 인프라 구조 작전, 부상자 치료 및 이송, 손상 도로의 긴급 수리, 철도 터널 붕괴 등 다양한 복합 위기 상황을 가정한 강도 높은 훈련을 수행하였다. 이를 효과적 기술 정책 확인을 위해 해당 계획의 일환으로 새롭게 제작된 드론, 사고 감지 로봇, 첨단 방화복 등 최신 장비 기술을 시연하였으며, 실제 현장에서의 구체적인 활용 방안과 작전 체계를 구축함으로써 기술의 현장 적용성을 검증하였다.

2. 국내 정책 동향

제21대 정부는 재난 대응의 패러다임을 인력 중심에서 첨단 기술 중심으로 전환하기 위해 무인 소방 기술의 필요성을 강력히 추진하고 있다. 대통령 주재 정부 부처 업무보고(2025.12.17.)에서 로봇 기술을 단순한 보조 장비를 넘어 재난 대응의 핵심 주체로서 적극 검토할 것을 지시하였다. 특히 고위험 화재 현장에 소방관을 직접 투입하여 발생하는 인명 피해를

최소화하기 위해 로봇 등 무인 장비를 활용한 대응 체계 구축을 강조하였다. 이에 소방청은 AI를 반영한 첨단장비와 기술 개발에 예산 투자와 함께 적극적인 정책을 추진할 계획이다. 이를 반영하여, 소방청은 2026년 소방청 주요정책을 국민의 일상 안전 강화를 위해 4대 전략 및 12대 추진과제를 설정하고 첨단 기술 기반의 현장 대응력 고도화를 추진하고 있다.

<그림 3-1> 2026년 소방청 업무계획 주요내용



출처: 소방청 내부 자료

특히, 전략과제 4(첨단과학 소방)의 세부 추진 방향을 살펴보면, 현장 대원 보호 첨단장비 개발 과제를 통해 지하주차장과 물류창고 화재 등 위험한 현장에 소방공무원 대신 진입하는 무인소방로봇을 현대차 그룹과 공동 개발하여 현장 도입을 진행 중으로 현재 4대가 중앙119구조본부와 경기·충남소방본부에 배치되어 운용하고 있으며 2027년부터는 전국 소방관서에 확대하여 배치할 예정이다. 또한 고립대원 위치 추적기술, 연기 속 시야확보 기술이 적용된 열화상 카메라의 연구 개발이 진행 중이며, 기후위기와 신유형 재난 대응 첨단장비 도입을 위해 통신 인프라 붕괴 시 드론을 활용한 긴급 통신망 복구 및 음영지역 해소를 위한 이동식 통신 장비 개발을 추진하고 초고층 건축물 화재 시 화재 진압과 인명구조가 가능한 장비 개발도 진행 중이다.

<표 3-2> 무인소방로봇 재원



구분	항 목	개발사양	비 고
주요제원	1. 최고 속도	50 km/h(포장)	
	2. 등판 능력	종 : 60%, 횡 : 40%	
	3. 수직장애물	300 mm 통과	
	4. 운용 시간	5시간↑@ 5kph	정지상태 운용시 10시간 ↑
	5. 크기(+방수포)	3.4×1.9×1.9 (L×W×H [m])	소방임무장치 포함
	6. 차체중량	2.2톤 이하	
	7. 구동 방식	6x6 인휠독립 구동시스템	
	8. 조향방식	애커맨+스키드복합조향, 제자리선회	
	9. 통신	ISM 밴드 / 지하1층	
	10. 열관리방식	통합열관리장치	
	11. 운용방식	원격운용/주행보조기능 포함	
	12. 배터리	리튬폴리머 배터리 (20kWh)	
소방임무	13. 방수포	직사/분무 주수 가능	
	14. 자체분무	저압 미분무 적용	
	15. 시야개선카메라	SWIR/LWIR	농연환경 시야개선SW 적용
	16. 탐조등	확산형(황색)4EA + 직진형(백색)1EA	
	17. 음성송신장치	대피안내방송/ 싸이렌 송신	
	18. 소방호스	65mm 소방호스 + 32mm 고압릴호스	
	19. 이송차량	별도 특장적용	셀프로더

출처: 소방청 내부 자료

이러한 기술적 진화를 위해 AI 첨단기술 기반의 R&D도 확대해 나갈 계획이다. AI, 로봇, 통신, 구급, 산불 등 핵심 분야 기술 개발을 촉진하기

위해 소방청 R&D 규모를 2026년 503억원으로 2025년 대비 64.9% 증액하였고 향후에도 무인 수중 탐색 소방정, 탐색진압로봇, 반도체 펠티어 냉각기술 등을 연구 개발하기 위해 소방 R&D 규모는 확대될 전망이다.

화재 예방과 대응의 중장기 계획인 제2차 화재안전정책 기본계획(2022-2026)에서도 첨단기술 기반의 정책 추진이 강조되고 있다. 본 계획은 '화재로부터 안전한 나라'라는 비전 아래 5년간 화재 사고 사망자 10% 저감을 목표로 4대 추진전략 및 14대 중점과제를 제시하고 있다.

<표 3-3> 제2차 화재안전정책 기본계획 주요내용

추진전략(4)	중점과제(14)
1. 화재안전 제도개선	1 화재위험특성 기반의 특정소방대상물 안전기준 마련
	2 민간점검업 등록기준 개선 및 화재안전 성능 강화
	3 화재대비 시설 등의 안전성 확보
	4 위험물안전관리 규제 내실화
2. 안전한 환경조성	1 주거공간의 화재안전성능 강화
	2 다중이용업소 인명피해 방지를 위한 화재안전관리 강화
	3 소방공무원, 소방기술자 등의 전문성 확보
	4 위험물안전관리자 등의 책임성 및 역량 강화
3. 대국민 화재예방 홍보·교육	1 대국민 소방안전교육 체계 확립 및 품질 고도화
	2 국민체험형 생활안전교육 기반 구축
	3 국민과 함께하는 소방안전문화 저변 확대
4. 화재안전 인프라 확보	1 미래 화재안전 기술 개발·보급
	2 국가화재안전기준센터 건립
	3 국가기술민원센터 운영 활성화

출처: 제2차 화재안전정책 기본계획(소방청)

특히 전략 1(화재안전 제도개선)에서는 물류센터에 특화된 화재 대응 전략 개발 및 현장 소방력 운영 강화를 목표로 물류센터 유형별 시나리오 및 대응 기법을 개발하고 초고층건축물 등에 첨단장비 도입을 연차적으로 추진하고 있다. 또한 전략 Ⅳ(화재안전 인프라 확보)에서는 미래 화재안전 기술 개발 및 보급을 핵심 과제로 설정하고 있다. 이를 위해 소방청

24개 시스템의 데이터와 국토부(건축도면), 행정안전부(인구통계), 산자부(전기·가스) 등 외부 유관기관의 자료를 연계한 빅데이터 분석을 추진 중이다. 이러한 지능형 소방 서비스는 빅데이터 분석 결과를 바탕으로 최적의 소방정책 수립 및 현장대응 지원 시스템을 구축하는 데 기여하고 있다.

제 2 절 기술현황 분석

1. 해외 기술동향

가. 지휘판단 및 의사결정 지원 기술

해외 주요국에서는 인공지능과 컴퓨터 비전 기술을 활용하여 재난 현장의 가시성을 확보하고, 지휘관의 과학적 의사결정을 돕는 지능형 지원 기술 연구가 활발히 진행되고 있다. 주요 기술을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 화재 현장 시각 이미지 기반 자원 및 행동 분석 기술이다. 최근 화재 현장의 시각 이미지와 영상 데이터를 활용하여 가용 자원을 자동으로 탐지하고 분석하는 연구가 시작 단계에 진입하였다. 앞서 이론적 배경에서 고찰했던 딥러닝 기반의 객체 인식 기술(YOLOv8 등)을 활용하여 소방차, 소방관, 소방 장비 등 현장 자원을 자동으로 탐지하는 기술이 개발되고 있다. 특히 단순 탐지를 넘어 소방관의 세부 행동을 인식하거나 개인보호장비(PPE)의 적정 착용 여부까지 실시간으로 분석하여 대원의 안전 관리 효율성을 높이는 연구가 수행 중이다. 또한, 대규모 산불 이미지 및 영상 데이터를 활용하여 서로 다른 배경의 화재 현장에서도 확산 규모를 예측하고 대피 경로를 추정하는 연구가 진행되고 있다. 이는 AI 전이학습과 연합학습 모델을 적용하여 데이터 학습의 효율성을 높이고 미탐지율을 낮추는 방향으로 고도화되고 있다.

둘째, 지휘자의 실시간 판단과 자원 배분, 로봇·인력 간 협력 효율화를 위한 기술이다. 지휘관의 인지적 부담을 경감시키고 무인 플랫폼과 인력 간의 협동 효율을 극대화하기 위한 의사결정 지원 플랫폼 연구가 구체화

되고 있다. 드론과 로봇이 결합된 무인 이동 플랫폼 기반의 실시간 상황 정보 통합 프레임워크 연구가 시작되었다. 이 기술은 이기종 센서 융합(Sensor Fusion), 시멘틱 추론(Semantic Reasoning), AI 기반 상황 분석 기술을 활용하여 현장 대응 전략 수립을 자동화하는 것을 목표로 한다. 아울러, 설명 가능한 인터페이스(XAI) 제공을 통해 다중 로봇 시스템(MRS)이 제안하는 작전안에 대해 지휘관이 논리적으로 납득할 수 있는 인터페이스를 제공함으로써, AI 기반 지휘 권고안에 대한 신뢰성과 현장 적용성을 높이는 연구가 병행되고 있다.

셋째, 실시간 현장 모니터링과 지휘가 가능한 차량 기반의 이동형 지휘 플랫폼이 실전 도입 단계에 있다. 미국과 중국 등을 중심으로 <표 3-4>와 같이 고성능 차량(Ford F-550 등) 기반의 지휘 플랫폼이 운영되고 있다. 이 시스템은 테더드 드론이나 자율 비행 드론, 360° 영상 장비 등을 통합 운용하여 다각도의 외부 모니터링을 수행한다. 이와 맞물려서 HCI(Human-Computer Interaction) 연구를 통해 수집되는 시각화 데이터와 정보량이 급증함에 따라 관리자의 해석 부담과 인지적 과부하가 발생하는 문제를 해결하기 위해 사용자의 편의성을 극대화하고 정보 우선순위를 최적화하는 인간-컴퓨터 상호작용(HCI) 기반의 인터페이스 연구가 일부 진행되고 있다.

<표 3-4> 국외 차량 기반 실시간 지휘시스템 사례

구분	이미지	차량 플랫폼	내부 구성	드론/로봇 운용	통신 인프라	특징
Ford F550 (미국)		Ford F-550 기반 (2023년형)	3개 워크스테이션, 조수석 데스크,	테더드 드론 1기	LTE 기반 영상 송신	스윙 아웃 도어, 외부 지휘 데스크 가능
		Fotokite Sigma (차량 루프탑 박스)	드론 본체, 지상 관제 장치	버튼 하나로 자동 이륙 및 착륙	테더 통한 전원·데이터 통합 통신, 안정적 실시간 제어	24시간 연속 비행, 별도 조종사 라이선스 없이 운용

Yuefei Intelligent (중국)		SUV/밴 기반 시제품	클라우드 제어 시스템	복수드론, 자율 비행, 실시간 영상 출력	4G/5G, GNSS 기반 통합제어	원격제어 시스템 기반 복수 차량 동시 제어
Tianyu Jingwei (중국)		VITO 플랫폼	스크린, 조작 테이블, 전자 지도	최대 5대 드론(M300, M30, M3E 등) 동시 운용	5G, LTE, Wi-Fi	배터리 잔량・위치 추적, GPS 통합
MAN TGM ELW2 (독일)		MAN TGM 15.290	복수 작업대, 회의 좌석, UPS, 스마트보드,	자율드론 운용 (L.A.R.D.S. 연계)	LTE/유선/Wi-Fi/SAT, IP 전화, DECT	차량 내 RFID, SAT 및 원격 카메라 통합 제어
RobLW (독일)		Mercedes-Benz Sprinter 기반	3개 워크스테이션, 로봇 제어 단말, 영상 디스플레이, 음성 통신 장비	드론, 지상로봇, 수상로봇 동시 운용	LTE, Wi-Fi 기반 통신. ROS 기반 다로봇 통합 통신 구조	통신 불안정 환경에서도 다로봇 자율운용 가능

출처: 한국로봇융합연구원(2026) 자료 재구성

나. 화재 현장 환경인식 및 예측 기술

고온, 농연, 분진, 저조도 및 GPS 수신 불능 등 화재 현장의 열악한 환경 조건에서도 강인한 인식 성능을 확보하기 위한 멀티모달 센서 기반 환경인식 기술 연구가 진행 중이다. 레이더, 열적외선 카메라, 라이더 등 서로 다른 특성을 가진 센서 데이터를 결합하는 멀티모달 센서 통합 기술이 핵심이며, 이를 통해 인식 오차를 최소화하고 성능을 극대화하는 크로스모달 학습 연구가 초기 단계에 진입해 있다. 대표적인 사례로 레이더와 비전 센서 등을 결합한 센서 데이터 통합 기술을 들 수 있다. 이 기술은

시야가 차단된 가혹 환경에서 4D 레이더와 같은 비가시성 센서와 적외선 및 비전 센서로부터 수집된 이질적인 다중 모달 데이터를 크로스 모달 학습을 통해 상호 보완적으로 정합시킨다. 이렇게 융합된 멀티모달 센서 데이터는 왜곡이 보정된 고해상도의 3D 심도 정보를 추출해 내며, 궁극적으로 짙은 농연 속에서도 지휘관과 무인이동체에게 정확한 화점 및 인명 위치를 제공하는 핵심 인지 기술로 작용한다.

또한, 실내 구획실 화재 시 발생하는 플래시오버(Flashover)나 백드래프트(Backdraft)와 같은 급격한 연소 확대 현상은 현장 진입 대원의 생명을 위협하는 치명적인 요소이다. 이를 선제적으로 감지하고 방어하기 위해 최근 영상과 센서 데이터를 결합한 딥러닝 예측 모델이 연구되고 있으며, 대표적 사례로 구획실 화재에서의 플래시 오버 조기 감지 체계 연구(Thinnakornsutibutr, Nicharee, et al, 2024)에서는 현장 투입 기체나 웨어러블 장비로부터 수집된 카메라 영상과 온도, 가스 농도 등의 센서 데이터를 고도화된 CNN-LSTM 기반 신경망에 동시 입력하는 메커니즘을 보여준다. 입력된 멀티모달 데이터는 시간 시퀀스에 따라 열방출률(HRR)의 급상승 패턴을 학습하고, 특수 현상 도달 시간을 실시간 예측하여 지휘관에게 조기 경보를 제공하는 AI 기술의 방향성을 제시한다.

데이터 기반의 화재 위험 예측 및 상황 대응 시스템은 전 세계적으로 재난 현장지휘의 디지털 전환을 이끄는 핵심 동력이다. 다음 <표 3-5>은 주요 선진국의 국외 화재 위험 예측 및 대응 지원 시스템 사례와 그 기술적 특징을 비교 분석한 결과를 제시한다. 표에 명시된 대표적 사례인 미국의 AUDREY System은 클라우드 기반의 소프트웨어 AI 에이전트로서 현장 대원과 지휘소를 유기적으로 연결한다. 이 시스템은 소방관이 착용한 웨어러블 기기를 통해 위치 및 온도, 그리고 최대 4가지 가스 동시 측정 정보를 수집하며, 위험 상황 발생 시 디스플레이/LED, 음향, 진동 경보를 다각적으로 송출하게 된다. 이처럼 국외에서 단순한 정보 수집을 넘어 클라우드 연계를 통한 실질적인 현장 대원 안전망 구축 및 의사결정 지원에 박차를 가하고 있음을 알 수 있다.

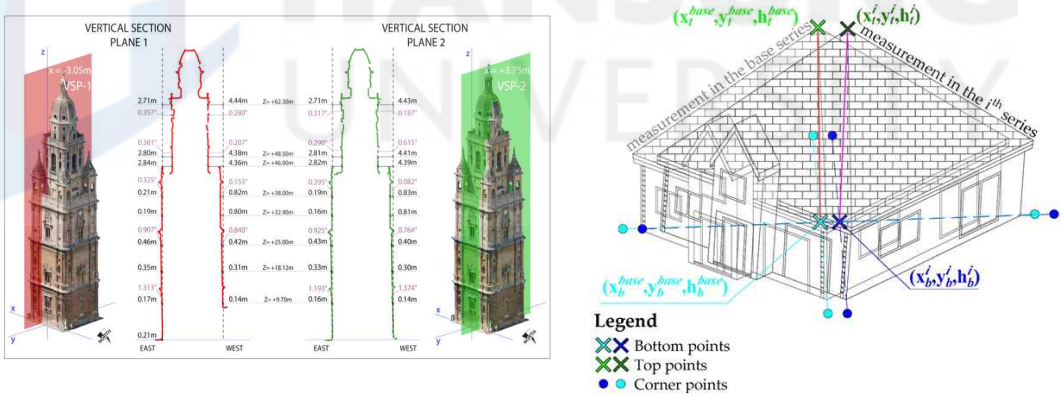
<표 3-5> 국외 화재 위험 예측 및 대응 지원 시스템 사례 비교

구분	이미지	형태	센서	핵심기술	경보체계/ 알림 방식
AUDREY System (미국)		클라우드 기반 소프트웨어 AI 에이전트	웨어러블 (위치/GPS, 온도, 가속도, 가스·화학·생물학 위험)	훈련·실화재 데이터 누적 학습(위험패턴/전술효과)	개인 단말 알림 + 지휘관 대시보드(위치/상태/위험지수)
Realiscape-FireMeister (스위스)		VR 화재진압 훈련 시스템(동시 1~6명)	공간·장비 트래킹, 위치추적(SALT 등)	CFD 기반 실시간 화재 시뮬+합성 시나리오+실장비 인터랙션	시나리오 경보(방송/비상통화 등) + 시·청·촉각 피드백
Siemens Fire Digital TwinTM (미국)		SW기반 화재수신기/알림설비 디지털 트윈	설비 구성요소 가상복제	패널·모듈·전원·주변장치 가상 랙 시뮬레이션/리플레이	시뮬레이션 상의 알람·감시·장애 표시
STS Defence FiRST® (영국)		방화복·SCBA 부착 웨어러블 유닛	열전대 온도 1채널	AI 온도 패턴 분석(플래시오버 임박 경고)	부저+LED 개인 경보 + 원격 모니터링(지휘/제어실)
MSA Safety ALTAIR ioTM 4 (미국)		클립형 가스감지 웨어러블	최대 4가스 동시 측정	클라우드 연계(Connected Worker)	디스플레이/LED + 음향 + 진동 경보

출처: 한국로봇융합연구원(2026) 자료 재구성

대형 화재나 복합 재난 현장에서 고층 건축물의 붕괴 징후를 조기에 포착하는 것은 현장지휘관이 진입 대원의 철수 및 전술 변화를 결정하는 핵심 근거가 된다. 이와 관련하여 무인기를 활용한 구조물 안전 진단 기술이 대안으로 부상하고 있으며, 다음 <그림 3-2>는 UAV 사진측량 기반의 구조변형 모니터링 기술 사례를 명확히 보여준다. 그림에서 보듯, 공중에 체공 중인 드론은 다각도 촬영을 통해 대상 건축물의 정밀한 3D 입체 모델을 생성한다. 이후 생성된 가상 기준면과 현재의 측정 포인트 간의 편차를 알고리즘으로 분석하여, mm/m 단위의 미세한 건물 기울기 및 비틀림 등 구조적 변형을 정량적으로 산출한다. 다만 이 기술은 현재 일반 환경의 계측에 집중되어 있어, 본 연구가 지향하는 실제 재난 환경 내 실시간 붕괴 조기경보로 직결되기 위한 추가적인 실증 고도화가 요구된다 (García-Nieto 외, 2025).

<그림 3-2> UAV 사진측량 기반의 구조변형 모니터링 기술 사례



출처: García-Nieto, M. C., et al. (2025). Structural deformation monitoring using UAV photogrammetry to assess slender historic buildings. Journal of Building Engineering, 100, 111766.

개방된 산불이나 대형 복합시설 화재에서는 바람과 지형에 따른 불규칙한 연기 확산 경로를 입체적으로 파악하는 것이 재난 통제의 성패를 좌우한다. 이를 위해 최근 다수의 무인기를 군집으로 운용하는 연구가 시도되고 있으며, 대표적 사례로 다중 시점 드론 데이터를 활용한 화재 확산

예측 모델 성능 검증을 들 수 있다. 현장에 투입된 다중 시점 드론 군집이 화재 현장의 연기 플룸을 사각지대 없이 포착하게 되고, 이를 통해 수집된 다각도 영상은 IoT 센서 등과 융합되어 디지털 트윈 온도 예측 시스템으로 전달되며, 이를 바탕으로 고정밀 3D 모델링 및 실시간 화재 확산 예측 결과를 시각화해 낸다. 이러한 기술적 접근은 지휘관이 2D 평면을 넘어 연기 거동과 열 확산 경로를 3차원으로 파악하고, 선제적인 자원 배치 및 대피로를 설정하는 데 기술적 근거를 제공한다(Krishnakumar, 2025).

다. 무인플랫폼 군집 운영 기술

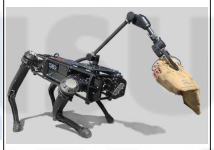
재난 현장의 복잡성과 비정형성을 극복하기 위해 단일 로봇의 한계를 넘어선 하드웨어 고도화와 다수 이기종 플랫폼 간의 유기적인 군집 운용 및 통신 최적화 기술 연구가 활발히 진행되고 있다.

우선 비정형 재난현장 대응을 위한 자율 무인이동체 하드웨어 기술을 살펴보면, 복잡하고 다수의 장애물이 존재하는 재난 공간을 신속하게 탐색하기 위해 이동 효율성과 극복 능력을 동시에 갖춘 다양한 하드웨어 플랫폼이 개발되고 있다. 특히, 본 연구에서 다루는 사족 보행 로봇과 드론 플랫폼에 대한 연구가 집중되고 있다.

사족 보행 이동 플랫폼은 최근 로봇 기술은 고속 이동성과 다리 기반의 장애물 극복 능력을 결합하여 상용화 단계에 진입하였다. 과거의 2족 바퀴형 또는 다리-바퀴 혼합형 구조가 효율성에 집중했다면, 최신 사족 플랫폼은 비정형 지형에서의 안정성과 임무 확장성을 동시에 확보하는 방향으로 발전하고 있다. 현재 시장에서 주목받는 주요 모델들의 기술적 특성으로는, 미국의 보스턴 다이나믹스사가 개발한 Spot은 약 39.7kg의 무게를 지니며 완벽한 자율주행 기능과 통합 관제 시스템(Obit)을 통해 가장 높은 수준의 운용 편의성을 제공한다. 중국 유니트리사의 B2 모델은 약 60kg의 기체 중량에도 불구하고 최대 6m/s의 고속 이동이 가능하며, 특히 연속 보행 시 최대 40kg에 달하는 높은 하중을 견딜 수 있는 배터리 효율과 가격 경쟁력을 갖추고 있다. 극한 환경에서의 신뢰성이 강조된 고

스트 로보틱스의 Vision 60은 영하 45°C에서 영상 55°C까지 견디는 넓은 작동 온도 범위를 자랑하며, 시각 정보가 차단된 상황에서도 촉각만으로 보행하는 블라인드 모드를 통해 거친 지형을 극복한다. 국내 기술로 개발된 레인보우 로보틱스의 PBQ-10은 약 40kg의 무게와 IP54 등급의 방수 성능을 갖추었으며, 무엇보다 국내 최적화된 사후 관리와 ROS 기반의 뛰어난 확장성을 제공하여 사용자의 목적에 맞는 시스템 구축이 용이하다. 이러한 플랫폼들은 공통적으로 각 모듈을 탈부착 가능한 구조로 설계하여 임무에 따른 유연한 확장성을 확보하고 있으며, 이를 통해 다양한 재난 및 산업 현장에서 활용 범위를 넓혀가고 있다.

<표 3-6> 주요 사족 보행 로봇 플랫폼 제원 비교

모 델	스팟	B2	비전60	PBQ-10
사진				
국 가	미국	중국	미국/한국	한국
기 업	보스턴 다이나믹스	유니트리	고스트 로보틱스	레인보우 로보틱스
무 게	약 39.7kg	약 60kg	약 51kg	약 40kg
최대탑재 중량	14kg	40kg (연속 보행 시)	10kg	10kg
최대 이동속도	1.6m/s	6m/s	3m/s	3m/s
운용시간	약 90분	약 4~6시간	약 3시간	약 90분
방수/방진	IP54	IP67	IP67	IP54
작동 온도	-20~45℃	-20~55℃	-45~55℃	-10~55℃
핵심 기능	완벽한 자율주행 및 통합 관제(Obit)	높은 하중과 배터리, 가격 경쟁력	블라인드 모드 (시각 없이 촉각 보행)	국내 최적화 AS, ROS 기반 뛰어난 확장성

출처: 각 제조사 홈페이지 자료 참고

다음으로 드론 플랫폼은 재난 환경의 임무 유형에 따라 장시간 비행, 실내 정찰, 자율 비행에 특화되어 주로 활용되고 있다. DJI사의 Matrice 350 RTK는 교체형 페이로드 시스템을 통해 고정밀 맵핑에 강점을 가지며, 미국 BRINC Drones사의 LEMUR 2는 유리 파쇄기 및 LiDAR 기반 3D 맵 생성 기능을 갖춰 실내 정찰에 최적화되어 있다. 또한 체코 Fly4Future사의 X500(Custom)은 오픈 SDK와 고성능 온보드 컴퓨팅(NUC)을 탑재하여 자율주행 알고리즘 연구 및 개발에 활용되고 있다.

<표 3-7> 주요 재난 대응 드론 플랫폼 제원 비교

모 델	Matrice 350 RTK	LEMUR 2	X500(Custom)
제조사	DJI(중국)	BRINC Drones(미국)	Fly4Future Drones(체코)
사진			
무게	약 3.77kg (배터리 제외)	1.5kg	언급 없음
크기 (L×W×H)	810×670×430 mm	332×405×99 mm	Holybro X500 V2 약 685×600×200 mm
IP등급	IP55	IP24	언급 없음
작동온도	-20~50° C	-20~45° C	언급 없음
비행시간	55분	20분	언급 없음
통신 방식	DJI O3 Enterprise (RTK, Ad-hoc 지원)	LTE/5G, Wi-Fi (Ad-hoc 미지원)	SBUS 프로토콜 기반 원격 수동 조종 (최대 1km)
카메라	교체형 페이로드 (H20T/H20N 열화상, 광학 줌, 야간 비전)	13MP 주 카메라, FLIR 열화상 카메라	머신비전 카메라(mvBlueFOX), UV/IR 필터 등
센서	GNSS, LiDAR (탑재 페이로드에 따라 다름)	117° FOV LiDAR (57만 pts/s), IMU	Ouster OS0 LiDAR, GPS, Garmin 거리 측정기
특징 요약	교체형 페이로드 시스템, 고정밀 3D 측량/맵핑 6방향 장애물 감지	유리 파쇄기, Turtle Mode, 실내 정찰 최적화, 라이다 기반 2D/3D 맵 생성	모듈형 조립식 드론 On-board NUC 기반 고성능 컴퓨팅 자율주행 알고리즘 연구/개발에 적합

출처: 각 제조사 홈페이지 자료 참고

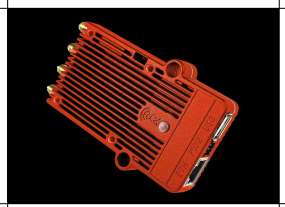
이런 각각의 드론-로봇 이기종이 유기적으로 네트워크를 구성하면서 임무를 수행할 수 있는 군집 운용 제어 및 협업 최적화 기술도 활발히 진행되고 있다.

DroneSense, MatrixSpace(드론 중심), Amazon Robotics(UGV 중심) 등은 중앙 집중형, 분산 자율형, 혹은 이들이 결합된 하이브리드 구조를 기반으로 체계적인 상용화 군집 운용 기술을 구현하고 있다. 이는 재난 대응뿐만 아니라 물류 및 시설 관리 등 다양한 분야에서 자율 협업 모델로 적용되고 있다. 또한 드론과 로봇의 협업 효율을 높이기 위한 중앙·분산형 제어 구조에 대한 비교 연구가 진행 중이다. 최근에는 커버리지 균일성, 충돌 회피, 에너지 효율성 및 시스템 일부가 고장 나도 전체 기능이 유지되는 내결함성을 고려한 현장 적용 응용 연구로 확장되는 과도기 단계에 있다.

군집 운용을 위해서는 이기종 간 원활한 통신이 전제되어야 한다. 이를 위해 실내외 복합 환경에서의 통신 안정성을 위해 저전력·장거리 통신 및 다중 에이전트 간 메시 네트워크 연결 기법이 연구되고 있다. 다만, 협력 위치 추정 기반의 통신 유지 기술 등이 제한적 실증 단계에 있으며, 향후 실제 재난 현장에서 고도화된 실증 연구가 필요한 시점이다.

고신뢰 상용 통신을 위해 Rajant, Persistent Systems, Pozyx 등은 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 기반 고속 무선 통신과 UWB(Ultra-Wideband) 정밀 측위 기술을 적용한 통신 모듈을 상용화하였다. 특히 Rajant의 Cardinal, Persistent Systems의 MPU5 등은 가혹한 환경에서도 끊김 없는 데이터 전송을 지원하며, Pozyx의 UWB는 10-30cm 수준의 높은 정밀도를 바탕으로 실내 위치 추정 및 통신 네트워크 확장에 기여하고 있다.

<표 3-8> 주요 재난현장용 상용 통신 및 측위 모듈 제원 비교

모 델	Rajant Cardinal	MPU5	Pozyx UWB
제조사	Rajant (미국)	Persistent Systems (인도)	Pozyx (벨기에)
사진			
크기/무게	17.8x98x60.68 mm / 90 ± 3 g	38 x 67 x 117 mm / 391 g	229 × 98 × 59 mm / 270 g
RF 작동 주파수 대역	2402-2482 MHz/ 5150-5850 MHz	L-band, BAS-band, C-band(옵션 선택)	3.5-6.5 GHz
안테나	2x2 MIMO	3x3 MIMO	MIMO
안테나 커넥터	SMA(female)	RP-TNC(female)	미확인
최대 RF 전달 파워	25 dBm ± 2 dB	16.5 dBm	10 dBm
Data rate	최대 866.6Mbps (이론치)	150 Mbps	최대 6.8 Mbps
RF 변조	DSSS, CCK, OFDM	OFDM	Pulse
DC Power	10-53 VDC (absolute), 12/24/48 VDC (nominal)	8-28 VDC	6-54 VDC
Ethernet	10/100/1000, auto MDI/MDIX, RJ45, 24/48 VDC passive PoE	10/100, Serial RS-232, USB On-the-Go	PoE, AC/DC adapter
온도	-40~60° C	-40~85 ° C	-25~55 ° C
컴퓨팅 모듈	미확인	1 GHz Quad Core ARM	미확인
통신	Wi-Fi, 4G	미확인	Bluetooth, UWB
특징	- 인터페이스(Ethernet, USB 2.0) - Dual band 2x2 MIMO 송수신기 - IP40	- Wave Relay 온보드 제품 - 3x3 MIMO 송수신기 - 비디오 기능 - 소프트웨어로 주파수 대역 5/10/20 MHz 설정 가능	- 높은 정밀도(10-30 cm) - UWB 기반 통신 - 네트워크 확장성

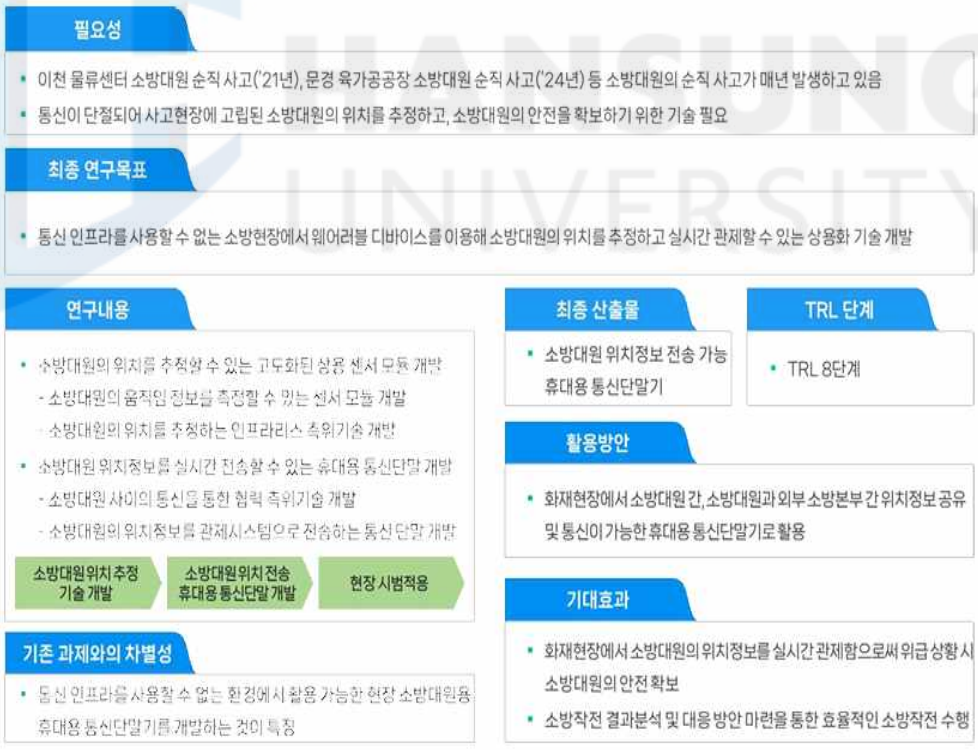
출처: 한국로봇융합연구원(2026) 자료 재구성

2. 국내 기술동향

가. 재난 현장 대응 및 지휘 지원 기술

소방청에서는 소방대원 인프라리스 위치추정 및 관제시스템 개발(2025~2027)에 관한 R&D를 진행 중이다. GPS, LTE, 관성센서, 기압계를 복합적으로 활용하여 실내 수평 정확도 2.5m, 수직 정확도 1m를 달성하는 AI 기반 통합 위치인식 시스템을 개발하고 이와 함께 90분 내열 및 IP67 방수·방진 기능을 갖춘 0.5kg 무게의 단말기와 실시간 모니터링이 가능한 중앙관제 시스템 구축을 목표로 한다.

<그림 3-3> 인프라리스 위치추정 및 관제시스템 기술 개발 주요내용



출처: 소방청 내부 자료

과학기술정보통신부에서는 테러·재난 통합운영 현장 대응장비 연계기술(2025~2027)을 개발하고 있다. 현장의 유해 기체를 포집하여 화학 물질을 식별하고, 시나리오 기반의 확산 예측 소프트웨어를 통해 농도 분포를 예측하는 기술이다. 사족 보행 로봇과 연계하여 주민 대피 및 테러 진압 등 통합 운영 시스템 고도화를 목표로 하고 있다.

재난 현장에서 수집되는 파편화된 정보를 통합하고, 중앙상황실과 지자체, 그리고 현장지휘소 간의 신속하고 정확한 정보 공유를 달성하는 것은 성공적인 초동 대응을 위한 필수 과제이다. 이를 해결하기 위해 행정안전부에서는 스마트 모빌리티 기술을 적용하여 재난 현장 중심의 모바일 기반 지능형 상황관리 체계를 구축하는 연구 개발(2021~2025)이 진행되었으며, 이 시스템에 따르면 복합 재난 현장에 투입된 드론과 로봇, 그리고 대원이 직접 착용한 스마트 헬멧 및 현장 주변의 CCTV 등 다각적인 첨단 모빌리티 채널을 통해 입체적인 데이터가 수집된다. 이렇게 수집된영상들과 현장 센서 데이터는 실시간으로 융합되어 지휘 통제 차량인 행정안전부 스마트 재난현장지원 상황실로 지연 없이 전송된다. 결과적으로 이 시스템은 수집된 재난상황정보 지도에 고도화된 UI/UX 개념을 도입하여 지휘관의 정보 활용성을 극대화하며, 본 연구가 지향하는 피지컬 AI 기반의 지능형 통합 현장지휘체계가 현장과 중앙을 잇는 유기적인 네트워크 속에서 가동될 수 있도록 돕는 기술적 토대를 제공할 수 있다고 본다.

나. 드론-로봇 협업 운용 기술

과학기술정보통신부에서는 육해공 무인이동체 현장대응 기술(2025~2028) 개발 R&D를 통해 대형 화재 발생 후 드론 4대와 수색·중계용 UGV 1대를 협업 운용하여 20분 내에 실내 구조 및 진입 동선을 파악하고 생존자를 수색하는 시스템을 구축하고 있다.

또한, 과학기술정보통신부는 지하시설물 점검용 하이브리드 기술 및 디지털 트윈을 구축(2024~2025)하여 LiDAR 기반 맵핑 및 딥러닝 결합 진단 기술을 적용하여 지하 공동구 내 결함을 탐지할 수 있는 기술을 개발

하였다. 이를 통해 방수 가능한 4륜 구동 로봇과 수륙양용 드론 융합 기술을 통해 유해 환경 내 모니터링을 수행하게 된다.

다. 지상형 무인이동체 임무 수행 기술

과학기술정보통신부에서 자율 사족 보행 모바일 매니퓰레이션 시스템(AQMM, 2024~2028)을 개발 중으로, 강화학습 기반의 전신 제어기와 계층적 그래프 기반의 SLAM 기술을 통합한다. 이를 통해 비정상 상황에 스스로 대응하며 고차원의 임무 및 동작 계획을 수행하는 로봇 시스템 구축을 목표로 하고 있다.

또한, 다부처 R&D로 소방 현장 인명탐색 및 화재진압 지원 로봇(2024~2028) 개발도 진행 중이다. 산업부(사족 로봇 및 진압 솔루션), 행정안전부(재난인식 멀티모달 센서), 소방청(트랙 기반 진압 로봇)이 협력을 통해 인명 탐지 및 화재 진압 활동 등을 지원하는 재난 대응 로봇 기술 고도화를 위한 사업으로, 본 연구가 실현되기 위한 전제인 멀티모달 센서, 다중홉 매쉬망 등의 기술적 과제가 일부 구현될 것으로 기대된다.

<그림 3-4> 인명탐지 및 화재진압 소방로봇 연구개발 체계도



출처: 소방청 내부 자료

라. 재난환경 통신 인프라 기술

산림청에서는 산사태 현장 긴급 통신망 및 매몰자 탐지(2025~2029) 연구 개발을 진행 중으로, 이는 드론을 중계기로 활용하고 긴급 통신 복구 차량을 연계하는 기술이다. AI를 통한 지형 분석 및 통신 체계 추천 시스템, 기상 악화 시 설치 가능한 임시 중계기 기술 등이 포함된다. 대규모 재난으로 지상 통신망이 파괴된 인프라리스 환경은 현장지휘소와 대원, 무인이동체 간의 데이터 공유를 원천 차단하여 매몰자 구조의 골든타임을 위협한다. 이를 극복하고 붕괴 현장에 즉각적인 지휘 통제망을 복원하는 전반적인 시스템의 개념도는 다음 <그림 3-5>와 같다.

이 시스템은 통신이 단절된 산사태 발생지역 상공에 중계기 설치 드론과 다수의 멀티 AI 드론을 투입하여 긴급통신망을 즉각적으로 구축하는 것이 핵심이다. 이렇게 복원된 상공의 통신망을 기반으로 드론 편대는 조난자 디바이스의 무선 신호를 정밀하게 탐지한다. 수집된 조난자 위치와 현장 영상 정보는 국가 재난안전통신망을 거쳐 지휘소의 AI 재해정보공유시스템으로 지연 없이 전송되며 클라우드를 통해 지자체와 공유된다. 결론적으로 이 기술은 물리적 통신이 단절된 가혹 환경에서도 본 연구의 지능형 통합 현장지휘체계가 중단 없이 가동되도록 뒷받침하는 필수 기반 기술이다.

<그림 3-5> AI기술 활용 긴급통신망 구축 및 매몰자 탐지 시스템



출처: 투비유니콘

앞선 긴급통신망과 더불어, 광역 재난 상황에서 무인이동체 자체를 대용량 이동통신 기지국으로 활용하여 전체 네트워크 인프라를 대체하는 기술 역시 활발히 연구되고 있다. 과학기술정보통신부에서는 2020~2024년까지 이동형 이동통신 인프라 기술 연구 사업을 통해 공중 이동체에 기지국 장비를 탑재하여 광범위한 지역에 안정적인 통신을 제공할 수 있는 기술을 구축하였다. 다음 <그림 3-6>은 드론 기반의 이동통신 네트워크 구축 기술(ETRI) 개념도를 보여준다.

그림에 명시된 바와 같이, 화재나 지진 등으로 인한 국가사회적 통신인프라 붕괴 지역이나 산악 지대와 같은 통신인프라 부족 지역 상공에 통신장비를 탑재한 드론 등 공중시스템을 전진 배치하여 지상통신 시스템과 연동한다. 이를 통해 상공과 지상을 잇는 통신인프라 신속대응 체계를 구축하며, 2.5km 이상의 장거리에서도 Gbps급의 안정적인 대용량 데이터 전송을 보장한다. 이렇게 신속하게 확보된 광역 통신망은 현장의 구조대원과 조난자를 위한 감시/정찰/수색 임무 데이터를 통합 상황판으로 전송할 뿐만 아니라, 고용량 영상 데이터가 필수적인 응급환자 원격진료 등 복합적인 구조 활동을 끊김 없이 지원하는 핵심 인프라로 작용할 수 있다.

<그림 3-6> 드론 기반 이동통신 네트워크 구축 기술 개념도

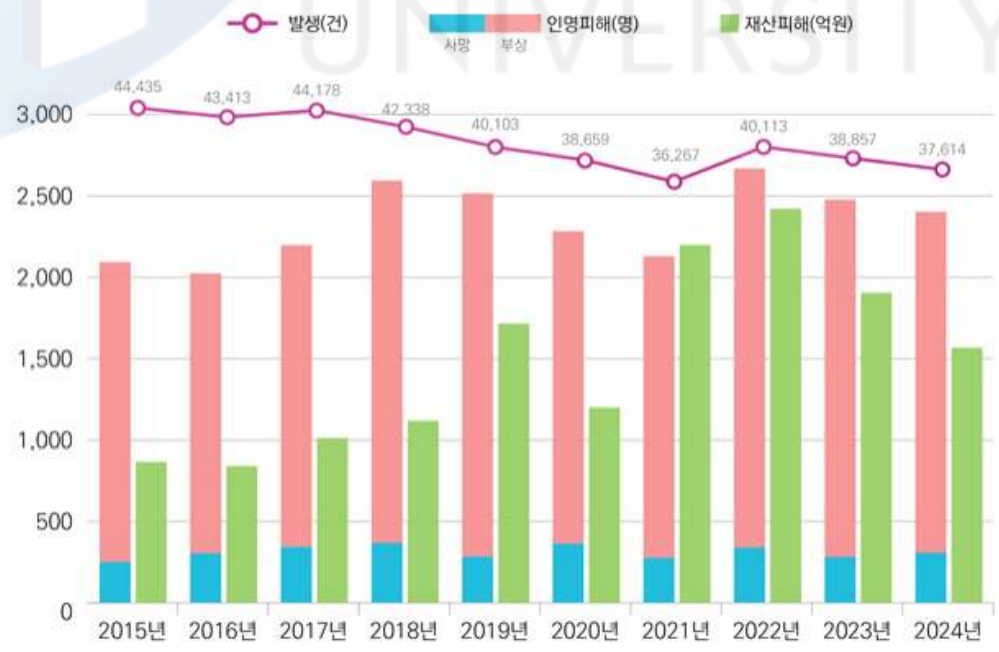


출처: 금강일보(2025.2.16.)

제 4 장 현행 운용 실태 및 문제점 분석

본 장에서는 소방 드론 및 사족 보행 로봇과 같은 피지컬 AI를 활용한 새로운 지능형 현장지휘체계 도입의 타당성을 논증하기에 앞서, 현재 소방 조직이 직면하고 있는 재난 환경의 객관적인 위험성과 무인이동체 운용의 실질적인 한계를 우선 진단하고자 한다. 앞서 언급했듯이 현대 사회의 건축물은 급격히 고층화·심층화되고 있으며, 이는 재난 발생 시 공간적 복잡성을 가중시켜 피해 규모를 기하급수적으로 확대하는 핵심 원인이 되고 있다. 소방청의 최근 10년(2015~2024년)간 화재 발생 및 피해 추이를 살펴보면, 전체 화재 발생 건수는 연평균 약 4만 건 내외로 미세한 감소 또는 유지 추세를 보이고 있다. 그러나 이와 반대로 사상자 수와 대규모 재산 피해 규모는 오히려 지속적으로 증가하는 역설적인 현상이 나타나고 있다.

<그림 4-1> 최근 10년간 화재발생 및 인명피해 추이(2015~2024)



출처: 소방청 통계연보(2025년)

이러한 통계는 단일 화재 건당 발생하는 피해의 강도가 과거와 비교할 수 없을 만큼 치명적으로 변화하고 있음을 방증한다. 실제 연도별 대형화재 발생 현황을 보더라도, 2017년 이전까지 한 자릿수에 머물던 대형 화재가 최근 들어 두 자릿수를 기록하며 급격히 잦아지고 있으며, 이는 곧 수많은 국민과 현장 출동 대원의 생명을 직접적으로 위협하는 참사로 이어지고 있다고 볼 수 있다.

<표 4-1> 연도별 대형화재 발생 현황(2015~2024)

연도별	화재발생 (건)	인명피해(명)			재산피해 (억원)
		합 계	사 망	부 상	
2015	6	157	11	146	786
2016	7	92	12	80	533
2017	9	153	34	119	338
2018	15	317	67	250	880
2019	18	232	12	220	3,973
2020	18	232	62	170	1,313
2021	15	112	6	106	5,624
2022	25	166	30	136	3,960
2023	5	33	2	31	2,230
2024	14	121	32	89	1,441

※ 2022년 이전 기준: 사망 5명 이상, 사상자 10명 이상, 재산피해 50억 이상 추정 시
2023년 이후 기준: 사망 5명 이상, 사상자 10명 이상, 재산피해 100억 이상 추정 시
출처: 소방청 통계연보(2025년)

이와 같은 객관적 지표들은 인력과 육안 관측에 의존해 온 기존의 아날로그적 현장 대응이 이미 물리적 한계치에 도달했음을 시사한다. 이에 소방 조직은 재난 현장의 불확실성을 극복하고자 소방 드론과 사족 보행

로봇 등 첨단 무인이동체를 점진적으로 도입하고 있다. 그러나 가혹한 재난 환경의 제약과 조직 내부의 구조적 문제들이 얽혀 고가의 장비 도입이 실질적인 지휘 역량 강화로는 온전히 이어지지 못하고 있는 실정이다.

따라서 이러한 실효성 저하의 근본 원인을 규명하기 위해, 현행 무인이동체 운용 실태와 초기 지휘의 한계점을 세 가지 핵심 차원으로 세분화하여 심층 분석한다. 제1절에서는 물리적 통신 단절로 인한 단일 기체 운용의 한계와 정보 암전 현상을 공학적 측면에서 짚어보고, 제2절에서는 현장 정보 단절과 블랙박스 AI에 대한 불신이 초래하는 지휘관의 인지적 과부하 문제를 다룬다. 마지막으로 제3절에서는 현장 대원의 임무 겸직과 주관적 경험에 의존하는 훈련 시스템이 가진 행정적·제도적 한계를 중점적으로 다루며, 이를 통해 본 연구가 향후 제안할 피지컬 AI 기반 지능형 통합 현장지휘체계 구축 방안의 실증적 근거가 될 구조적 문제점을 분석하고 제시하고자 한다.

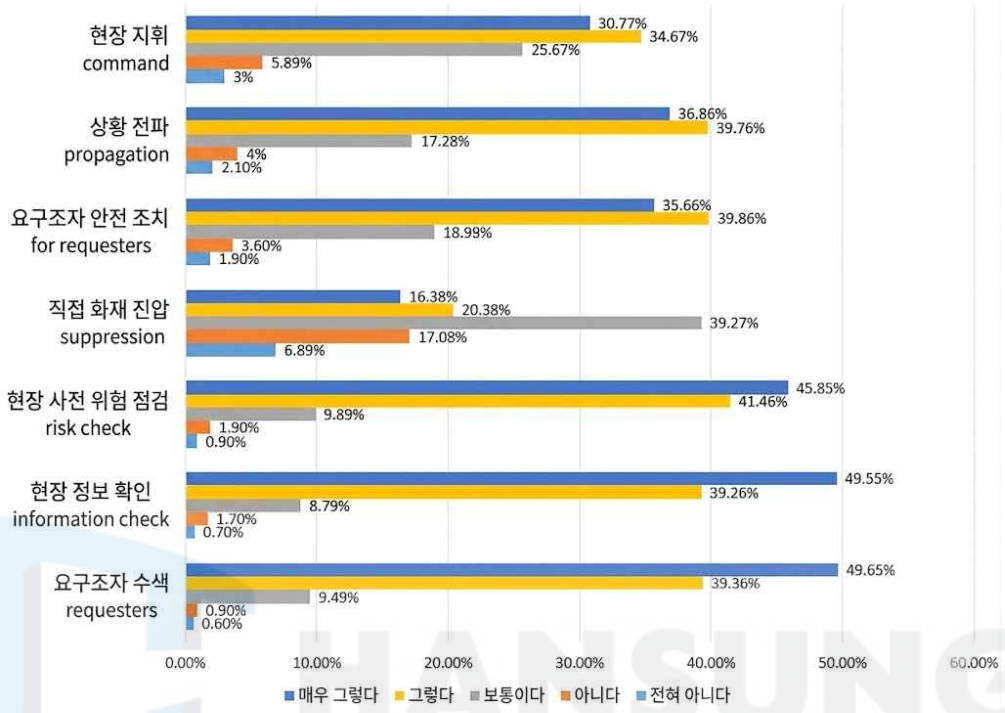
제 1 절 단일 무인기 운용의 한계와 정보 암전의 고착화

1. 개별 기체 중심의 무인이동체 운용

현재 소방 조직은 재난 현장의 입체적인 상황 파악과 대원 안전 확보를 위해 무인이동체를 점진적으로 도입해 오고 있다. 그러나 실제 현장에서의 운용 실태를 살펴보면, 기체가 지닌 공학적 잠재력을 온전히 발휘하여 총괄적인 현장지휘를 돕기보다는 화재진압이나 인명구조 활동 현장에서 조종기 화면에 의존해 단순한 공중 영상을 촬영하는 단일 임무 위주에 머무르고 있다.

실제 소방공무원들을 대상으로 한 소방드론 활용 인식 실태 조사에 따르면, 소방드론의 활용 분야로 요구조자 탐색(49.65%)이나 현장 정보 확인(49.55%) 등의 단순 수색 업무에 대한 요구도는 매우 높게 나타난 반면, 전체 상황 전파(36.86%)나 지휘관의 현장지휘(30.77%)를 지원하는 목적의 활용도는 상대적으로 낮게 인식되고 있었다(하강훈, 2022).

<그림 4-2> 소방공무원 드론 활용 분야에 대한 인식 실태 결과



출처: 소방드론의 활용을 위한 소방공무원의 인식과 적용방안에 대한 연구(하강훈, 2022) 재인용

또한 서울시립대학교의 실증 연구에서도 기체의 도입 대수와 조종 자격 취득 인원은 매년 가파르게 증가하고 있으나, 정작 일분일초를 다투는 긴박한 현장에서 지휘관의 전술적 의사결정을 돕는 데 직접적으로 활용된 실적은 전체 도입량 대비 매우 저조한 불균형을 보인다고 지적하고 있다(허창식, 2020). 실제 소방청의 통계에 따르면, 최근 5년(2020~2024년) 동안 화재 및 구조 현장에 소방 드론이 투입된 비율을 살펴보면 그 심각성이 더욱 명확하게 드러난다. 화재 출동 시 드론이 투입된 비율은 평균 2.87%에 불과하며, 구조 출동 시에는 평균 0.15%만 투입되는 것으로 나타난다.

<표 4-2> 화재 및 구조 현장에 소방 드론의 투입 비율

구분		2020년	2021년	2022년	2023년	2024년	평균
화재	화재 출동	38,659	36,267	40,113	38,857	37,614	38,302
	화재현장 드론 투입 건수	251	646	1,103	1,430	2,060	1,098
	투입 비율(%)	0.65	1.78	2.75	3.68	5.48	**2.87**
구조	구조 출동	838,194	1,062,612	1,199,183	1,309,614	1,318,837	1,145,688
	구조현장 드론 투입 건수	980	1,045	1,534	2,198	2,563	1,664
	투입 비율(%)	0.12	0.10	0.13	0.17	0.19	**0.15**

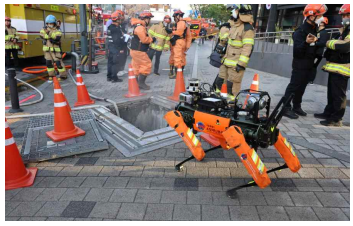
출처: 소방청 통계 기반 분석

이렇게 드론의 활용도가 저조하고 단편적인 임무에 한정되어 투입되는 원인 중 하나는 현재의 드론 운용은 화재 현장의 다양한 정보들을 하나의 디지털 체계로 유기적으로 연계하여 지휘관의 상황인식, 판단, 자원통제를 지원하는 현장작동형 지휘체계로 기능하지 못하고 있다는 점이다. 다시 말해, 개별 기체가 단일 조종자와 1:1로 연결되어 구조·진압 대원들의 현장 활동을 상공에서 2D 영상으로 단순 기록 및 모니터링하는 수준에 그치고 있는 것이다. 결국 고가의 첨단 장비를 투입하고도 지휘관이 획득할 수 있는 데이터는 단편적인 시각 정보에 국한되며, 현장 내부의 실질적인 위협 요소를 입체적으로 파악하여 지휘권을 확립하는 데에는 근본적인 한계를 지니게 된다.

이러한 드론 위주의 단편적인 정보 수집 한계를 극복하고 실내 깊숙한 곳의 입체적인 위험 요소를 파악하기 위해, 최근 소방 조직은 지상형 피지컬 AI 플랫폼인 사족 보행 로봇의 도입을 대안으로 등장하고 있다. 실제 2025년 12월 서울소방재난본부에서는 국내 소방 최초로 사족 보행 로봇

을 선제적으로 도입하여 3차원 공간 정보 파악과 인명 탐색 등에 활용하고 있다. 그러나 이처럼 우수한 하드웨어 제원을 갖춘 사족 보행 로봇을 도입하였음에도 불구하고, 이 역시 실내 및 지하 공간 진입 시 발생하는 치명적인 통신 제약 문제로 인해 단일 기체 운용이 가지는 근본적인 한계를 보인다.

<표 4-3> 서울소방본부 운용 사족 보행 로봇 제원 및 기능

품명	**비전60** **(제조:고스트로보틱스)** 
제원	▶ 작동 온도: -45 ℃ ~ +55 ℃ ▶ 방수·방진 등급: 본체 IP67 / 다리 모듈 IP68 ▶ 구동 방식: 사족 보행 (각 다리 3 자유도 액추에이터) + 전복 복귀 기능 ▶ 크기: 1,100 mm(L), 560 mm(W), 600 mm(H) ▶ 중량: 약 51 kg (배터리 포함) ▶ 배터리 종류: 리튬이온 배터리 (배터리 교체형) ▶ 운용 시간: 연속 3 시간 / 대기 22 시간 ▶ 통신 방식: Wi-Fi, LTE ▶ 카메라(EO/IR): Full HD (1920×1080) / 광학 25배 줌 / 디지털 12배 줌 / ▶ 열화상 640×512 / 측정범위 ;20~550 ℃ / 정확도 ±2 ℃ 또는 ±2% ▶ 라이다(LiDAR): 32채널 / 최대 170 m 감지 / 정확도 ±0.01° / FOV 수평 360°, 수직 42.4° ▶ 가스탐지기: 8종 이상(O_2, CO, H2S, LEL, CO_2 등) 동시 감지 / 경보 LED + 청각 알람 / IP67 ▶ 조명 장치: 전·후방 LED 라이트 (2단계 밝기 조절, 원격 제어 가능) ▶ 통신/음성 장비: 내장형 스피커·마이크 (양방향 실시간 음성 송수신 및 녹음 지원) ▶ 조작기(OCU): 휴대형 태블릿 조작기 + 조이스틱 형태 / LTE·Wi-Fi 통신 / 3 시간 이상 연속 운용
기능	3차원 공간정보 제공, 현장 위험정보 송출, 인명탐색, 가스탐지, 구호물품 운반 등
가격	230백만원, 2025년 12월

출처: 소방청 내부 자료

단일 기체의 단편적인 영상 촬영 한계와 더불어 시스템 구조 차원에서의 기술적 결함도 심각한 상황이다. 앞서 살펴봤듯이 현재 국내·외 재난 안전 분야에서 사족 보행 로봇, 소형 군집 드론 등 개별 기체 단위의 요소 기술은 상당한 수준으로 고도화되어 실증 단계에 진입해 있다. 그러나 이를 재난 현장에서 유기적으로 활용하기 위해 필수적인 장비 간의 운용 가능성, 연결성, 통합성을 전제로 한 구조적 연구개발은 현장 작동 수준으로 결합되지 못한 채 여전히 초기 단계에 머물러 있다.

즉, 상공을 비행하는 드론과 지상을 탐색하는 사족 보행 로봇이 서로의 위치 데이터를 공유하거나 통신을 중계할 수 있는 연결성이 확보되지 않은 채, 각각 독립된 폐쇄형 시스템으로 통제되고 있다. 앞선 고찰했던 것처럼, 예측 불가능한 재난 환경을 타개하기 위해서는 다중 센서가 결합된 융합 정보가 필수적이다. 그러나 현재와 같이 장비 간의 통신 프로토콜과 제어 체계가 파편화되어 있는 구조에서는 기체들이 수집한 파편적인 영상 정보가 지휘관의 지능형 상황판으로 통합하는 것은 불가능하다.

결과적으로 이기종 장비 간 연결성의 부재는 고가의 첨단 로봇이 투입되더라도 '정보 암전'이라는 물리적 장벽을 무너뜨리지 못하게 만들며, 궁극적으로 지휘관에게 체계적인 작전 수립 대신 과거처럼 무전 음성에만 의존하게 만드는 구조적 악순환을 야기할 수 밖에 없는 실정이다.

2. 통신 단절에 따른 정보 암전 현상 심화

앞서 제기된 단일 기체의 임무적 한계는 재난 현장에서 실내 및 지하 공간으로 진입할 경우 공학적인 한계와 맞물린다면 심각한 정보 암전의 결과가 발생하게 된다. 오늘날 복합재난은 주로 두꺼운 콘크리트 외벽으로 둘러싸인 고층 건축물 내부나 지하 상가 시설 등에서 발생한다. 이러한 밀폐된 공간은 위성항법장치 신호가 도달하지 않는 절대적인 전파 음영지역이므로, 기존의 상공 비행용 기술만으로는 기체의 자율 제어나 정밀한 위치 인식이 불가능해진다(박채희, 2022). 특히, 지하 상가나 건물 내부 화재 시 짙은 연기와 분진, 붕괴된 잔해들로 인해 로봇의 시야가 심각하게

제한될 뿐만 아니라 통신 품질마저 급격히 저하될 수 밖에 없다.

이를 극복하기 위해서는 실내·외 통신 연결 품질이 저하될 때 일부 무인기를 통신 중계용으로 자동 전환하거나, 로봇이 스스로 통신 노드를 설치하며 전진하는 형태의 다중 협력 기술이 필수적이다. 그러나 현행 단일 기체 시스템은 이러한 유기적인 통신 릴레이 기능을 갖추지 못하고 있다. 결국 내부로 진입한 첨단 장비는 콘크리트 차폐벽을 넘는 순간 지휘소와의 데이터 연결이 끊어지며 순식간에 통제 불능의 무용지물이 된다.

이러한 실내 통신 단절과 무인기의 무용화는 결국 지휘관이 맹목 상태를 타개하고 현장 내부를 들여다볼 수 있는 유일한 통로인 시각적 데이터마저 원천 차단함을 의미한다. 앞선 고찰한 재난현장 표준작전절차 중, 초기 대응의 성패를 가르는 가장 중요한 지휘관의 임무는 현장 내부의 구조 대상자 유무와 연소 확대 가능성 등 전체 상황을 신속하게 파악하는 상황평가(SOP 102)이다. 그러나 로봇과 드론이 통신 단절로 멈춰 서고 외부 지휘소에 아무런 데이터를 전송하지 못하는 상황에서는, 지휘관이 객관적인 데이터를 근거로 상황을 평가하는 것 자체가 불가능해진다. 실제 선행연구의 일선 지휘관들을 대상으로 한 인터뷰 참여자는 “워낙 광범위 하니까 대원들 통솔 문제가 가장 두렵지, 이 시야를 다 벗어나니까요. 그리고 암흑 속이고 보이지 않는 상황에서 시야를 벗어나고 대원들 위치 하나 제대로 파악이 안 되니까 가장 두려운 게 그거드라고요”라며 시각적 정보의 단절이 가져오는 극도의 공포와 한계를 생생하게 증언하였다(김수환, 2017). 또한 다른 지휘관 역시 “통신으로써 우리가 현장이 어떻게 이루어지고 있다라는 내용들이 커뮤니케이션이 돼야 되는데, 커뮤니케이션이 안 되면 일단 지휘에 문제가 있다고 판단한다”고 토로하였다.

결과적으로 현행 무인기 체계의 통신 단절이 초래하는 정보 암전은 단순한 공학적 결함을 넘어, 앞서 고찰한 초동지휘관의 규범적 상황 평가를 원천적으로 약화시킨다. 나아가 이러한 시각 데이터의 차단은 지휘관에게 파편화된 무전 음성에만 의존하도록 제한함으로써, 궁극적으로 지휘관의 극심한 인지적 과부하를 유발하고 경험에 기반한 직관적 의사결정 체계를 저해하는 결정적 한계로 작용한다.

제 2 절 지휘관의 인지 과부하와 블랙박스 AI 불신 딜레마

1. 정보 단절에 따른 직관적 의사결정의 장애

앞선 제1절에서 확인한 바와 같이, 통신 릴레이 및 이기종 연계가 불가능한 현행 무인기 운용 체계는 재난 현장의 극심한 정보 암전을 타개하지 못한 채 지휘관의 시각적 데이터를 원천 차단하고 있다. 이러한 물리적 정보의 단절은 제2장에서 고찰했던 지휘관의 인지적 판단 메커니즘을 심각하게 훼손하며, 궁극적으로 현장지휘를 주도적 통제가 아닌 피동적 상태로 전락시키는 결정적 요인이 된다.

재난 현장의 초동지휘관은 신속한 의사결정이 필요한 불확실한 상황에서, 본능적으로 과거의 경험치에서 유사한 패턴을 끄집어내는 직관적 의사결정 체계를 기본값으로 활용하여 현장을 통제하려 한다. 실제 현상학적 질적 연구 결과에서도 지휘관들은 현장의 의사결정이 경험과 노하우가 복합적으로 이루어지는 과정임을 진술하며, 경험 기반의 직관이 지휘의 핵심 기제임을 입증하였다. 그러나 현대의 재난은 점차 거대화 및 비정형화 양상을 띠고 있어, 각자의 지휘관이 한 번도 겪어보지 못한 낯선 형태로 전개되는 경우가 대다수이다. 이처럼 경험 데이터베이스에 대조할 패턴조차 부족한 대형 재난의 경우에는 직관 중심의 의사결정 방식이 치명적인 한계를 드러내며 즉각적으로 마비된다(차주현, 2025). 나아가 제1절에서 제기한 기술적 한계로 인한 짙은 농연 속 정보 암전 현상은 이러한 인지 마비를 더욱 가속화하게 된다. 결국 일선 지휘관들은 시각적 정보가 제한된 맹목 상태에서는 합리적 상황 판단 능력이 심각하게 저하되며, 직관을 발동시킬 최소한의 단서조차 확보되지 않아 심리적 공포를 겪게 될 수밖에 없게 된다.

이러한 심리적 공포 속에서 더 큰 문제는, 객관적 데이터가 부재한 상태에서 불명확한 직관에만 의존하여 대원을 진입시킬 경우 이것이 돌이킬 수 없는 대원 안전사고로 직결되게 된다는 점이다. 실제 소방청 통계에 따르면 최근 10년간 재난 현장에서 30명 이상의 소방공무원이 순직하고

9,000여 명이 공상(공무상 상해)을 입었으며, 특히 화재 현장에서 순직 14명, 공상 1,788명이 발생하는 등 현장 대원의 비극적인 사고가 지속적으로 반복되고 있다. 이러한 참혹한 통계는 객관적인 상황 파악 없이 이루어지는 맹목적인 지휘가 얼마나 치명적인 결과를 초래하는지 여실히 보여준다. 따라서 인간의 눈을 대신하여 어둠 속 상황을 파악해 줄 첨단 무인 이동체인 피지컬 AI의 현장 투입이 무엇보다 요구되는 상황임을 방증한다.

<표 4-4> 최근 10년 소방공무원 순직 및 공사상 현황

연도별	합계	순직						공상					
		소계	화재	구조	구급	생활안전	기타	소계	화재	구조	구급	생활안전	기타
2015	411	2	1	-	-	1	-	409	83	42	100	9	175
2016	513	2	-	2	-	-	-	511	97	43	134	12	225
2017	659	2	2	-	-	-	-	657	125	54	132	19	327
2018	830	7	-	2	1	3	1	823	195	68	184	17	359
2019	827	9	1	-	5	1	2	818	180	62	163	23	390
2020	1,006	2	-	2	-	-	-	1,004	195	69	225	26	489
2021	936	3	3	-	-	-	-	933	213	75	213	31	401
2022	1,084	4	3	-	-	-	1	1,080	236	90	241	37	476
2023	1,336	2	2	-	-	-	-	1,334	249	90	296	46	653
2024	1,447	2	2	-	-	-	-	1,445	215	94	287	59	790

출처: 소방청 통계연보(2025년)

직관이 무너진 상태에서 이를 보완해야 할 분석적 추론마저 객관적 데이터의 부재로 가동되지 못하게 되면, 지휘관은 극단적인 인지 과부하 상태에 놓이게 된다. 스스로 상황을 장악하고 전술적 결과를 예측할 수 없게 된 지휘관은 현장에 대한 통제력을 완전히 상실하며, 이는 작전 실패와 동료 대원들의 인명 피해에 대한 심리적 중압감으로 이어진다.

선행 연구에서 지휘관들의 인터뷰 결과는 이러한 상황 통제력 상실이 초래하는 지휘관의 딜레마를 적나라하게 보여준다. 정보가 차단된 칠흑 같은 암흑 속에서 진입 대원의 위치조차 파악되지 않을 때 지휘관들은 두려움을 겪으며, 대형 재난에 대한 주도적 통제 경험이 부족한 상태에서 객관적 정보마저 단절될 경우 능동적인 대응을 포기하는 양상을 보인다.

결국 상황에 대한 강한 확신을 얻지 못한 지휘관은 과감하고 주도적인 작전 지시를 내리지 못하며, 상부의 지시나 획일적인 매뉴얼에 수동적으로 끌려가거나 방어적인 태도로 일관하는 피동적인 상태가 고착화된다. 다음의 <표 4-5>는 선행연구의 질적 분석 결과를 바탕으로 재난 현장의 정보 단절이 현장지휘관의 심리적 딜레마로 이어지는 사례를 보여준다.

<표 4-5> 재난현장 정보 단절이 지휘관의 심리태도에 미치는 영향

현장지휘관 심층 인터뷰(FGI) 및 실증조사 진술 내용	도출된 인지적·심리적 문제점	출처
“경험이 없으면 판단을 못한다“, “해본 사람 아는 거지, 해보지 않고는 할 수 없다“	직관(RPD, 인식기반 의사결정) 마비 - 미경험 대형 재난 직면 시, 과거 사례에 의존하는 직관적 의사결정 메커니즘의 완벽한 작동 불능 상태 초래	(김수환, 2017)
“시야를 벗어나니 가장 두렵다“, “시민들 눈높이지 100이라고 판단하면 우리들 눈에는 가서 50밖에 못보여줘“	상황 통제력 상실 (정보 암전의 공포) - 내부 진입 대원 및 요구조자에 대한 가시성 확보 실패(정보 암전)로 인해 극도의 심리적 불안감이 증폭되고 현장 장악력을 잃음	(김수환, 2017)
“주도권 행사 한 적 없어 항상 피동적이었어. 그냥 시키면 시킨 것만 한 거여“	피동적 태도 고착화 - 객관적 데이터 부재와 불확실성으로 인해 능동적 지휘를 포기하고, 상부나 상황에 끌려가는 방어적이고 수동적인 명령 하달에 머무름	(김수환, 2017)

“확신이 없으니 소극적이 된다“, “아는 것 외에 대한 그 만큼 확신이 없다라는 거죠“	자신감 결여 및 의사결정 지연 - 데이터와 정보의 뒷받침이 없어 자신의 판단에 대한 확신을 잃게 되며, 이는 과감한 전술 전개 타이밍을 놓치는 치명적 지연으로 연결됨	(김수환, 2017)
“새로운 재난형태에 대한 의사결정의 한계“, “돌발상황에서의 상황판단능력 저하“	미경험 재난 앞에서의 인지적 한계 - 과거에 겪어보지 못한 새로운 형태의 복합재난 앞에서 상황을 분석·추론할 인지적 처리 능력이 한계에 부딪히며 상황 판단 능력이 저하됨	(염무열, 2016)
“단독결정에 대한 책임감“, “책임 소재문제로 인해 최선의 의사결정이 아닌 최악의 상황을 고려한 소극적 의사결정“	책임 소재 압박과 방어적 의사결정 기제 - 결과 실패 시 조직에 미칠 비난과 개인적 책임 추궁에 대한 두려움으로 인해, 적극적 문제 해결보다는 비난 회피 중심의 소극적 방어 기제 발동	(염무열, 2016)
“외부의 압력과 간섭으로 인해 어쩔 수 없이 진입을 시도하다 소방대원이 순직하는 사례 발생“	외부 압력에 의한 이성적 판단 붕괴 - 흥분한 군중이나 언론 등 통제 불가능한 외부 환경적 압박에 밀려, 지휘관이 이성적인 위험 평가를 포기하고 비합리적 전술을 강행함	(성호선, 2013)

출처: 선행연구의 지휘관 인터뷰 자료 기반으로 분석

2. 판단 근거가 은폐된 블랙박스 AI에 대한 신뢰 상실과 수용 거부

앞선 <표 4-5>에서 도출된 바와 같이, 정보 암전 속에서 지휘관이 겪는 소극성과 피동성은 단 한 번의 결정으로 대원들의 생사가 갈리는 막중한 책임감과 그에 따른 확신 결여에서 기인한다. 초동지휘자 역량에 관한 심층 인터뷰 결과에 따르면, 일선 지휘관들은 지휘 결과에 대해 본인이 모든 책임을 져야 한다는 강박을 겪고 있으며, 스스로 상황에 대한 객관적 납득과 확신이 서지 않을 경우 방어적이고 소극적인 지휘 태도로 일관하게 됨을 뚜렷하게 보여준다. 이처럼 불확실성이 극대화된 재난 현장에서 지휘관이 주도권을 쥐기 위해서는, 자신의 판단이 동료들을 사지로 몰아넣지 않을 것이라는 명확하고 논리적인 근거가 뒷받침되어야 한다.

최근 이러한 인지적 과부하와 확신 결여를 타개하기 위해, 방대한 전장 및 재난 데이터를 연산하여 최적의 전술을 도출하는 AI 도우미의 도입이 활발히 논의되고 있다. 그러나 현장의 지휘관들은 기계의 판단 결과값을 쉽게 수용하지 못하는 치명적인 딜레마를 겪게 된다. 앞서 고찰한 막중한

책임의 맥락에서, 연산 과정이 철저히 은폐된 이른바 블랙박스 AI 형태의 기술은 현장에서 철저히 배척당할 수밖에 없기 때문이다. 딥러닝 기반의 블랙박스 인공지능은 그 내부 도출 과정이 너무 복잡하여 기계가 어떠한 데이터적 근거로 해당 전술(예: 붕괴 위험에 따른 진입 금지)을 권고했는지 인간 지휘관에게 논리적으로 설명하지 못한다. 작전 실패 시 발생할 인명 피해의 책임 소재를 홀로 감당해야 하는 인간 지휘관 입장에서, 판단 근거가 생략된 채 기계가 일방적으로 지시하는 정답은 지휘관에게 작전을 강행할 확신을 부여할 수 없다.

결국, 판단 근거가 불투명한 기계의 조언은 정보 암전 속 지휘관의 신뢰를 잃게 되며, 지휘관을 다시 불완전한 자신의 직관으로 회귀시키거나 의사결정 자체를 지연시키는 치명적인 악순환에 빠뜨린다(이승현, 2024). 요컨대, 현행 무인기 체계의 물리적 한계와 블랙박스 AI의 인지적 맹점을 동시에 극복하고 지휘관의 무너진 통제력을 회복하기 위해서는, 단순한 데이터를 전달하는 수준을 넘어 판단의 인과관계를 투명하게 시각화하는 새로운 패러다임의 지휘 지원 체계가 요구된다.

제 3 절 현장대원의 임무 겸직과 주관적 경험 훈련의 제도적 한계

1. 임무 겸직으로 인한 현장 대응력 저하

첨단 장비의 기술적 한계와 그로 인한 지휘관의 인지적 붕괴뿐만 아니라, 이러한 첨단 장비들이 소방 조직 내에서 어떠한 행정적·제도적 형태로 운용되고 있는지에 대한 분석 역시 필수적이다. 특히 현행 편제는 지휘관의 의사결정을 체계적으로 지원하기는커녕, 오히려 현장의 혼선을 가중시키고 지휘 역량의 편차를 발생시키며 향후 제5장에서 다룰 첨단 장비 전담 조직 신설의 당위성을 제공한다.

현재 소방 조직은 드론을 비롯한 첨단 무인이동체의 도입량을 점차 늘려가고 있으나, 이를 전담하여 운용하는 독립적인 부대나 전문 직렬은 철저히 부재한 실정이다. 실제 소방청의 전국 소방드론 전담인력 및 부서 운

영현황 통계를 살펴보면 이러한 임무 겸직의 심각성이 명확히 드러난다. 아래 <표 4-6>에서 확인할 수 있듯이, 전국 소방관서가 보유한 소방드론 총 694대 중 약 60%에 달하는 420대가 일선의 구조대(295대)와 현장대응팀(125대)에 집중적으로 배치되어 있다.

<표 4-6> 전국 소방관서 드론 배치 부서 현황

구분	합계	본부	특수구조단	현장대응팀	구조대	안전센터	소방학교	기타
배치현황(대)	694	26	103	125	295	9	106	30

출처: 소방청 내부 자료

그러나 정작 이를 전담하여 운용하는 독립적인 전담대(팀)가 설치된 시·도는 전국 18개 지자체 중 단 한 곳도 없는 것으로 확인되었다. 전국적으로 지정된 전담 인력 역시 7개 시·도의 총 30명에 불과하여, 대부분의 일선 소방서에서는 본연의 화재 진압이나 인명구조 업무를 맡고 있는 기존 대원들이 무인기 조종 업무까지 병행하는 비전담으로 선택적 운용을 하고 있는 실정이다.

<표 4-7> 전국 소방관서 드론 전담부서 및 전담인력 운영 현황

구 분		서울	부산	대구	인천	광주	대전	울산	세종	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주	창원
전담대 구성		전담대 설치 시·도 없음																	
전담	본부											○ (3명)							
	소방서																		
	특수대응단	○ (3명)		○ (6명)	○ (3명)	○ (3명)								○ (6명)	○ (6명)				
비 전담	선택적 운용	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	○	○	○	○	
	즉시 운용									○	○								○

출처: 소방청 내부 자료

실제 소방청 소방드론 관리 및 운용계획에서도 이러한 현행 조직 편제의 한계를 공감하고 있고, 상황 파악 및 현장지휘 등 초기 대응에 드론 영상이 매우 유용함에도 불구하고 전담 직원이 부재하여 기체가 뒤늦게 운용되는 구조적 한계가 지속적으로 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

촌각을 다투는 재난 초기 골든타임에 20kg 이상의 개인 보호 장비를 착용한 대원이 화마에 대응하면서, 동시에 고도의 집중력을 요하는 무인이동체의 운용 제어까지 수행하는 것은 물리적·인지적으로 불가능에 가깝다. 임무 겸직 제도의 한계는 단순한 현장 피로도 증가를 넘어, 지휘관에게 제공되어야 할 데이터의 질을 심각하게 훼손한다. 현장에 비전담으로 투입되는 대원들은 화재 진압 활동 중에 틈을 내어 조종기를 잡아야 하므로, 기체가 수집한 복합 데이터(열화상, 3D 매핑 등)를 분석하여 지휘관이 즉시 활용할 수 있는 객관적 지표로 가공해 낼 전문적 역량과 시간적 여유를 갖추지 못하고 있다.

결과적으로 데이터 가공의 전문성이 결여됨에 따라, 현장의 조종 대원들은 결국 자신이 조종기 화면으로 본 단편적인 시각 정보들을 기존 방식과 똑같이 무전기를 통해 지휘관에게 육성으로 보고하게 된다. 더욱이 수십 개의 무전이 날아오는 인지 과부하를 겪고 있는 현장지휘관에게, 정제되지 않은 조종 대원의 육성 보고가 추가되는 것은 지휘 통신망의 병목과 혼선만을 가중시키는 결과를 낳는다.

2. 사후 분석 부재와 도제식 경험 전수의 한계

현행 소방 지휘체계가 재난 현장의 데이터를 유기적으로 통합하고 기록하는 지능형 상황판을 갖추지 못했다는 사실은 재난 대응 종료 후 수행되어야 할 사후 강평과 훈련 시스템 전반을 부실하게 만드는 핵심 원인으로 작용한다. 일선 지휘관들은 질적 연구를 통해 현장 활동 이후의 지속적인 피드백 과정이 실질적인 대응 시간을 단축시키고 지휘 역량을 향상시키는 결정적 기제임을 공통적으로 강조하고 있다.

그러나 현재의 문제는 피드백 과정이 무인기나 로봇이 기록한 비행 로

그, 열화상 온도 추이, 3D 맵핑 자료 등 객관적인 시각 데이터에 기반하지 않고, 오직 참여 대원 개개인의 주관적인 기억과 진술에만 전적으로 의존하고 있다는 점이다. 심층 인터뷰에 따르면, 객관적 데이터가 뒷받침되지 않은 주관적 회고는 단편적 기억에 머무르거나 자기합리화로 변질될 위험이 존재하여 현장의 불확실성에 대한 지휘관의 불안감을 완전히 해소하지 못하게 한다. 즉, 분석적이고 객관적인 데이터가 결여된 사후 강평은 다음 재난을 대비하기 위한 지휘관의 체계적인 멘탈 시뮬레이션 재료로 결코 활용될 수 없다는 것이다.

또한, 객관적 데이터 기반의 훈련 시스템이 부재한 상황에서 현장지휘관의 위기 대응 역량은 개인이 우연히 마주친 재난의 빈도나 선임자의 역량에 종속되는 도제식 전수에 머무를 수밖에 없다. 과거 화재 양상이 비교적 단순했던 시기에는 선배들의 주관적 노하우를 답습하는 훈련 방식이 일정 부분 통용될 수 있었으나, 비정형적이고 복합적인 현대의 재난 양상의 경우에는 한 개인이 평생 축적할 수 있는 주관적 경험의 양에 명백한 한계가 존재할 수 밖에 없고 주도적이고 체계적인 지휘 경험을 객관적 데이터로 학습하지 못한 지휘관은, 결국 생소한 재난 현장에서 경험에 기반한 합리적 의사결정을 포기하고 상부의 지시나 단순 매뉴얼에만 의존하는 피동적 지휘 태도로 고착화될 수 밖에 없게 된다.

결과적으로 객관적 데이터 수집 체계의 부재와 주관적인 도제식 훈련 제도는 현장의 정보 암전 상태에서 주관적 사후 강평으로 불완전한 경험 전수되다 보니 현장에서의 피동적 지휘라는 악순환을 형성하게 한다. 이는 현장의 시각 데이터를 실시간으로 통합할 전문 인력의 편제와, 축적된 데이터를 바탕으로 객관적인 디지털 사후 강평을 가능하게 할 지능형 통합 상황판 시스템의 전면적 도입이 왜 정책적으로 시급한지를 입증하는 대목이다.

제 5 장 지능형 소방 지휘체계 구축 및 정책적 개선방안

지금까지 살펴봤듯이 현행 재난 지휘체계는 단일 무인기의 물리적 통신 단절, 이에 따른 지휘관의 인지적 과부하, 그리고 체계적 데이터가 부재한 주관적 훈련 및 임무 겸직이라는 복합적이고 구조적인 한계에 직면해 있다. 복합재난의 규모가 점차 대형화되고 불확실성이 증대됨에 따라, 파편화된 현장 정보와 지휘관의 개인적 경험에만 의존하는 기존의 지휘 방식은 더 이상 유효하기 어렵다는 것이 확인되었다.

이번 장에서는 이러한 문제들을 근본적으로 타개하고 재난 대응의 패러다임을 데이터 기반의 지능형 현장지휘체계로 전환하기 위한 종합적인 대안을 제언한다. 이를 위해 공학적 측면에서 다중 로보틱스와 AI 기술을 결합한 시스템 오브 시스템즈 및 융합 상황판의 구축 방안을 제시하고, 인지적 측면에서 지휘관의 확신을 돕고 피동성을 극복하게 할 설명 가능한 인공지능의 도입을 제안한다.

나아가 제안된 시스템이 현장에 실질적으로 안착할 수 있도록, 첨단 장비 전담 조직 신설과 디지털 데이터 기반의 체득형 훈련 제도화 방안을 모색한다. 마지막으로, 이 모든 요소들이 실제 재난 타임라인 속에서 어떻게 맞물려 작동하는지 보여주는 통합 운용 시나리오를 전개함으로써 본 연구가 지향하는 지능형 지휘체계의 실체적 효용성을 입증하고자 한다.

제 1 절 다중 무인기 기반 시스템 오브 시스템즈와 융합 상황판 구축

1. 피지컬 AI 기체의 이기종 군집 제어 및 상대 측위 기술 구현

현대 복합재난 현장의 불확실성을 극복하기 위한 첫 번째 기술적 방안으로, 기존의 1인 1기체 조종 방식을 탈피하여 공중의 비행 드론과 지상

의 사족 보행 로봇을 유기적으로 융합하는 이기종 다중 무인기 군집 제어 체계로의 전환을 고려할 수 있다. 단일 기체의 투입은 해당 로봇이 장애물에 충돌하거나 통신이 두절될 경우 현장의 시각 정보 수집이 전면 중단되어 버리는 단일 장애점의 맹점을 지니기 때문이다.

이러한 한계를 극복하고 다중 무인기가 칠흑 같은 재난 현장에서 중복 탐색을 방지하며 효율적인 경로로 임무를 수행하기 위해서는 앞서 고찰했던 입자 군집 최적화(PSO) 알고리즘의 적용이 적합하다. PSO 알고리즘이 적용된 군집 제어망 하에서 각 로봇은 자신이 파악한 장애물 및 위험 요소 정보를 실시간으로 공유하며, 전체 시스템 차원에서 가장 안전하고 효율적인 진입 경로를 스스로 연산하는 지능형 유기체로 작동하게 된다(장더롱, 2026).

더불어, 위성항법장치 신호가 차단되는 실내나 지하의 가혹 환경에서 로봇 간의 충돌을 막고 대형을 유지하기 위해 상대 측위 기술의 병행이 요구된다. 이는 외부 위성 신호의 도움 없이 기체에 탑재된 초광대역(UWB) 센서 등을 활용하여 로봇 상호 간의 거리를 측정함으로써, 군집 내 자신의 위치를 추정하는 기법이다(현인영, 2025).

결과적으로 이기종 군집 제어와 상대 측위 기술의 융합을 통해, 공중의 드론과 지상의 사족 보행 로봇은 험지에서도 충돌 없이 재난 현장을 훑어내는 거대한 자율 센서 편대로 기능할 수 있다. 이는 제4장에서 지적된 물리적 맹목 상태를 타파할 안정적인 공학적 기반을 제공한다.

2. 동적 메쉬 네트워크 구축

다수의 로봇이 성공적으로 험지를 돌파하고 방대한 3D 스캔 및 영상 데이터를 수집하더라도, 두꺼운 철근 콘크리트 벽체나 붕괴 매몰 지역 특유의 전파 간섭으로 인해 외부 지휘소와의 통신이 단절된다면 그 데이터는 현장지휘관의 의사결정에 활용될 수 없다. 이를 원천적으로 타개하기 위한 핵심 인프라로서, 피지컬 AI 기체들을 단순한 영상 수집 단말기가 아닌 이동형 무선 통신 중계기로 활용하는 동적 메쉬 네트워크 기술 도입

이 요구된다.

메쉬 네트워크 환경에서는 지상의 사족 보행 로봇과 상공의 비행 로봇이 상호 간에 그물망 형태의 자율적인 초연결망을 구축하게 된다. 이를 재난 공간에 구체적으로 대입하면, 화재가 발생한 밀폐 건축물 외부 상공에는 지휘 통제 및 데이터 취합을 담당하는 주 무인기가 체공하고, 전파가 최초로 차단되는 콘크리트 건물 입구나 지하 계단실 구간에는 통신 중계만을 전담하는 예비 무인기들이 전진 배치되어 통신 사각지대를 지우게 된다. 그리고 건물 가장 깊숙한 암흑 속에서는 탐색용 사족 보행 로봇이 인명 검색을 수행하며, 획득한 대용량 데이터는 출발지에서 목적지로 한 번에 전송되는 대신, 인접한 여러 대의 이동형 중계 노드를 징검다리처럼 거쳐 우회하는 다중 홉 라우팅 방식을 통해 지연 없이 전달될 수 있을 것이다.

이러한 외부 상공(드론)-경계 구간(중계 노드)-실내 심층부(탐색 로봇)로 이어지는 다중 무인기 간의 애드혹 기반 메쉬망은, 화염이나 낙하물 등으로 인해 중간에 위치한 특정 로봇이 파손되더라도 전체 통신망이 붕괴되지 않는 완벽한 자율 복원력을 보장할 수 있다. 단일 링크 기반의 닫힌 시스템과 달리, 특정 통신 경로가 단절될 경우 시스템이 즉각적으로 우회할 수 있는 다른 로봇 노드를 스스로 탐색하여 대체 경로를 자동으로 복구하기 때문이다.

이러한 이기종 로봇의 협력과 공간적 메쉬 네트워크의 융합은, 제4장에서 치명적 결함으로 지적되었던 기체의 실내 진입 후 고립 사태를 원천 차단하고 재난 현장 내부의 방대한 데이터를 한 치의 단절 없이 외부 지휘소까지 연결하는 튼튼한 통신망을 완성하게 된다. 결과적으로 동적 메쉬 네트워크의 구축은 재난 현장의 물리적 정보 암전을 타파하며, 향후 지휘차량에 구축될 지능형 상황판에 시각적 데이터를 안정적으로 공급하는 필수적인 공학적 기반 인프라로 기능할 수 있다.

3. 3D 디지털 트윈 기반 지능형 통합 상황판 도입

다중 무인기 군집 제어와 동적 메쉬 네트워크가 험지를 돌파하여 현장의 데이터를 수집하고 전송하는 통로라면, 지능형 통합 상황판(COP, Common Operational Picture)은 이 통로를 통해 유입된 파편화된 데이터들을 지휘관이 직관적으로 인지할 수 있도록 시각화하는 두뇌이자 최종 목적지라 할 수 있다. 방대한 센서 데이터가 정제 과정 없이 유입될 경우, 지휘관은 오히려 또 다른 형태의 인지 과부하에 직면할 위험이 존재한다. 이를 방지하기 위해 미래의 시스템 오브 시스템즈 아키텍처는 상공의 드론이 촬영한 외부 열화상 데이터와, 내부로 진입한 사족 보행 로봇이 스캔한 3D 주행 지도(SLAM) 등 이기종 복합 데이터를 단순히 나열하는 것에 그치지 않는다. 수집된 열화상 분포, 유해가스 농도, 붕괴 위험도 등의 이질적인 정보들을 가상의 3D 공간에 현실과 똑같이 구현하는 디지털 트윈 기술과 융합하여 렌더링하는 고도화 과정이 요구된다. 이를 통해 단일 기체의 2D 평면 영상으로는 결코 파악할 수 없었던 현장의 입체적인 구조와 위험 요소 간의 유기적 관계를 하나의 직관적인 3D 인터페이스로 구현해 낼 수 있다고 보고 있다.

이러한 디지털 트윈 기반의 COP가 현장지휘차량의 메인 스크린에 표출되는 순간, 현장지휘관을 극심한 공포와 인지 과부하로 몰아넣었던 거대한 장벽인 정보 암전은 물리적으로 극복될 수 있다. 과거 콘크리트 외벽과 짙은 농연으로 시야가 철저히 차단된 맹목 상태에서, 지휘관은 내부 대원들이 쏟아내는 수십 개의 다급하고 파편화된 무전 음성에만 의존하여 상황을 추론해야만 했다. 그러나 COP 시스템이 도입된 지휘 환경에서 지휘관은 더 이상 불확실한 청각 정보에 한정되지 않게 된다. 통합 상황판에는 건물 내부의 화점 확산 경로, 붕괴 위험 구역의 실시간 위치, 그리고 투입된 소방 대원들과 다중 로봇들의 동선이 3D 그래픽으로 투명하게 투영되며, 이는 곧 지휘관에게 재난 현장 전체를 위에서 내려다보며 통제할 수 있는 시야를 제공한다. 이렇게 고도화된 UI/UX로 제공되는 객관적 시각 정보는, 앞서 살펴봤듯이 낯선 재난 앞에서 직관이 마비되어 피동적인 태도로 일관하던 지휘관의 이성적이고 분석적인 추론 능력을 강화할 수 있다. 결과적으로 지능형 통합 상황판의 도입은 현장의 불확실성을 걷어

내고 지휘관이 명확한 데이터에 기반하여 상황을 평가함으로써 잃어버렸던 현장 통제력을 회복할 수 있는 공학적 해법으로 작용할 수 있다고 본다.

제 2 절 SOP 연계형 AI 의사결정 지원 체계 고도화

1. 멀티소스 데이터 융합 기반의 초기 현장지휘 및 자원 배치

앞선 제4장에서 진단한 바와 같이, 현장지휘관은 극한의 재난 현장에서 쏟아지는 파편적 정보로 인해 인지 과부하를 겪으며, 판단 근거가 은폐된 블랙박스 형태의 AI 시스템에 대해서는 작전 책임의 중압감으로 수용 저항을 보인다. 불명확한 재난 상황 속에서 지휘관의 이러한 인지적 딜레마를 해소하고 주도적 리더십을 회복하기 위해서는 단순한 정보 나열을 넘어 지휘관의 연산 부담을 시스템이 대신 처리해 주는 실체적인 의사결정 지원 체계가 요구된다. 첫 번째 구체적 대안으로, 멀티소스 데이터 융합 기반의 초기 지휘 우선순위 및 자원배치 자동화 알고리즘의 도입이 필요하다. 현장 현장지휘관이 직면하는 인지적 장벽은 재난 발생 초기, 극히 제한된 시간 안에 수많은 변수를 동시에 고려해야 한다는 것이다. 화재의 확산 속도, 요구조자의 예상 위치, 현재 도착한 소방차량의 수와 종류, 대원들의 진입 동선 등 수십 가지의 파편화된 정보가 무전기를 통해 동시다발적으로 쏟아지게 되고 인간의 작업 기억 한계를 초과하는 이러한 정보량은 지휘관의 과거 경험에 의존하는 인식 기반 의사결정 모델을 마비시키고, 결국 직관의 오류나 지휘의 지연을 초래하게 된다.

이를 근본적으로 극복하기 위해, 본 연구는 개별적으로 운영되던 현장 정보들을 지휘차량 내 AI 분석 서버가 하나로 통합하는 멀티소스 데이터 융합 체계를 구축할 것을 제안한다. 구체적인 데이터의 융합 출처와 메커니즘은 다음과 같다. 첫째, 사전 정보로서 119상황실의 수보 데이터(P119 출동 정보, 신고 내용, 건축물 도면 및 위험물 적재 현황 등)를 실시간으로 연동한다. 둘째, 거시적 시각 정보로서 선착대가 공중에 전개한 다중

소방 드론의 열화상 및 영상을 통해 건물 외부의 연소 확대 방향과 지붕의 붕괴 징후를 수집한다. 셋째, 미시적 환경 정보로서 실내로 선제 투입된 사족 보행 로봇이 수집한 내부 온도 추이, 유해가스 농도, 잔해물 등 진입로의 병목 구간 정보를 수집한다.

AI 지능형 알고리즘은 이렇게 수집된 3가지 차원의 멀티소스 데이터를 실시간으로 종합 연산하여 재난 현장의 최고 위험 구역과 인명 대피 우선 구역을 스스로 특정해 내게 된다. 나아가, 현재 현장에 도착해 있는 펌프차, 고가차, 화학차, 구급차 등 소방차량과 진압 대원의 규모를 파악한 뒤, 어느 방면에 몇 대의 장비와 인력을 투입하는 것이 진압 및 인명 구조에 가장 효율적인가를 계산하여 다음 <그림 5-1>와 같이 최적 자원 배치안을 지능형 통합 상황판에 시각적으로 추천하게 된다. 예시로 보여준 바와 같이, AI는 3D 디지털 트윈 화면 위에 “대안 A: 북측 진입로 인명구조 최우선 배치안(추천율 85%)”, “대안 B: 남측 연소확대 저지 우선 배치안(추천율 60%)” 등 목적에 따른 최적화된 시나리오를 직관적인 그래픽으로 표출해 줄 수 있다.

<그림 5-1> 지능형 통합 상황판의 멀티소스 융합 및 최적 자원 배치안 표출 예시



출처: AI를 활용하여 구성

결과적으로 지휘관은 수많은 전술적 변수와 가용 자원 현황 등을 머릿속으로 일일이 계산해야 하는 극심한 인지 과부하 상태에서 일정 수준 해방될 수 있다. 데이터 수집, 분석, 자원 매칭 같은 방대하고 복잡한 1차적 연산은 AI 시스템이 전담하고, 인간 지휘관은 AI가 도출한 몇개로 압축된 대안 중 현장 상황과 자신의 경험을 종합하여 가장 부합하는 최적안을 비판적으로 선택 및 승인하고 필요시 수정하는 고차원적인 통제 역할에만 집중할 수 있게 된다(이승현, 2024). 이는 기계에 대한 맹목적 의존을 의미하는 자동화 편향을 구조적으로 방지하는 동시에 지휘관의 심리적 압박을 획기적으로 경감시켜, 촌각을 다투는 현장지휘의 속도와 정확성을 극대화하는 실효성 있는 시스템적 대안이 될 것이다.

2. XAI 기반 SOP 룰 엔진 적용 및 위험 예측 시각화

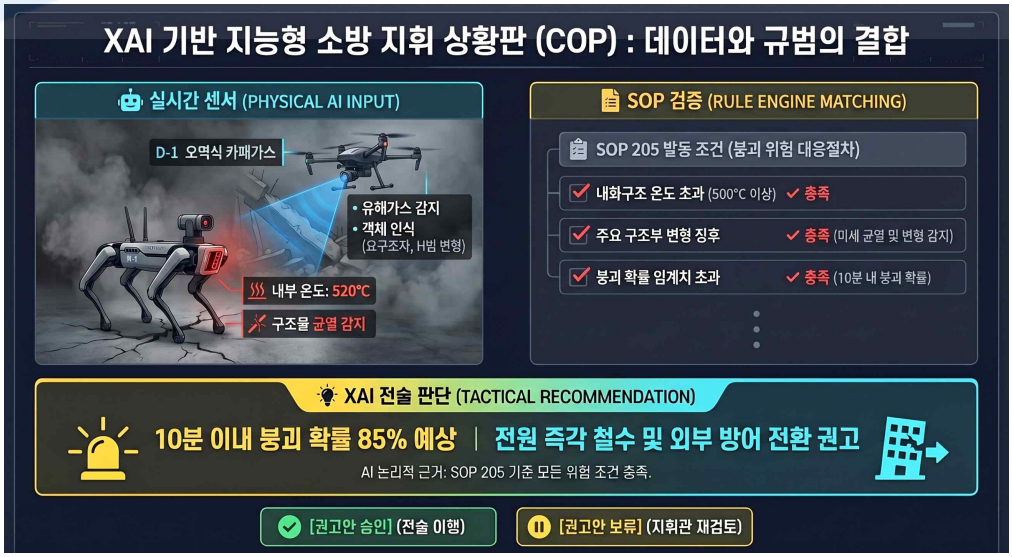
현장지휘관이 재난 현장에서 겪는 또 다른 치명적인 인지적 딜레마는, 도출 근거가 은폐된 블랙박스 형태의 AI 시스템에 대한 심리적 불신과 수용 저항이다. 현장지휘관은 진입, 철수, 전술 변경 등 자신의 의사결정 결과에 대해 막중한 법적·도의적 책임을 져야 한다. 특히 인명 구조를 포기하거나 대원을 철수시키는 등의 보수적 결정은 자칫 사후 문책이나 소극적 대응이라는 비판으로 이어질 수 있어 지휘관에게 엄청난 심리적 압박과 책임의 중압감으로 작용한다(염무열, 2016; 차주현, 2025). 따라서 앞서 고찰했 듯이 단순히 “붕괴 위험: 진입 금지”라는 결과값만 일방적으로 통보하는 AI는 지휘관의 확신을 이끌어낼 수 없다. 기계가 도출한 전술적 판단을 지휘관이 수용하기 위해서는, “왜 그런 판단을 내렸는지”를 명확하고 합리적으로 설명해 주는 설명 가능한 인공지능 기술이 필수적이다.

본 연구는 이러한 블랙박스 AI의 한계를 극복하고 지휘관의 전술적 신뢰를 회복하기 위한 구체적인 시스템으로, XAI 기반 SOP 룰 엔진 적용 및 위험 예측 시각화 체계를 제안한다. 이 시스템은 단순히 물리적인 위험 수치만 보여주는 것이 아니라, 소방청이 규정한 공식적인 현장지휘 규범인 재난현장 표준작전절차를 AI의 딥러닝 판단 기준과 실시간으로 연동하

는 교차 검증 알고리즘이다.

이 지능형 상황판의 구체적인 작동 원리는 화재로 인한 건축물 붕괴 위험상황을 예시로 설명하면 다음과 같은 3단계 프로세스를 거친다. 첫째, 실시간 데이터 측정이다. 실내로 선제 투입된 사족 보행 로봇과 상공의 열화상 드론이 내부 온도 상승 추이, 유해가스 농도, 건축물 주요 하중 지지부의 미세 균열 및 변형 데이터를 실시간으로 수집하여 AI 분석 서버로 전송한다. 둘째, SOP 규정 매칭이다. AI는 수집된 물리적 센서 데이터를 초당 수만 건씩 분석하며 현재 상황이 소방 SOP 규정집의 어느 조항에 도달했는지 탐색한다. 예를 들어 내부 온도가 500℃를 돌파하고 구조물 변형이 감지되면, AI는 즉각 이를 <SOP 205: 낙하물 및 붕괴 위험 대응 절차>의 발동 조건과 매칭시킨다. 셋째, 위험도 예측 및 인과관계 시각화이다. AI는 단순히 "철수 요망"이라는 단편적 결론만 띄우는 것이 아니라, "① 로봇이 측정한 500℃ 이상의 데이터 ➔ ② SOP 205 붕괴위험 기준 초과 ➔ ③ 10분 내 붕괴 확률 85% 예상 ➔ ④ 즉각 대피 권고"라는 명확한 논리적 인과관계를 텍스트와 그래픽으로 풀어내어, <그림 5-2>와 같이 지능형 통합 상황판에 시각적으로 제공하게 된다.

<그림 5-2> 지능형 통합 상황판의 XAI 기반 SOP 룰 엔진 시각화 예시



출처: AI를 활용하여 구성

<그림 5-2>에 나타난 바와 같이, XAI 기반 SOP 룰 엔진은 지휘관에게 단순한 정보의 제공을 넘어 의사결정의 법적·규범적 정당성을 부여하게 된다. 예컨대, 지휘관이 대원들의 철수나 구조 포기를 지시하더라도, 이는 지휘관 개인의 막연한 불안감이나 블랙박스 기계의 맹목적 지시를 따른 것이 아니라 공식적인 SOP 기준치를 초과했다는 객관적 데이터에 근거한 합리적 판단이 되기 때문이다. 결국 XAI 시각화 기능은 사후 문책에 대한 지휘관의 심리적 두려움과 AI에 대한 불신을 동시에 해소해 준다. 지휘관은 시스템이 제공하는 투명한 인과관계를 바탕으로 판단에 대한 확신을 가지게 되며, 극한의 재난 현장에서도 주도적이고 과감한 지휘통제력을 발휘할 수 있는 전술적 참모로서 역할을 기대할 수 있게 된다.

제 3 절 첨단 장비 전담대 신설 및 데이터 기반 체득 훈련 제도화

1. 첨단 장비 전담 조직 신설

현재 소방 조직의 무인이동체 운용은 극소수의 전담 인력을 제외하면 일선 진압 및 구조 대원들이 본연의 임무와 첨단 장비 조종을 병행하는 임무 겸직 구조에 절대적으로 의존하고 있다. 일분일초를 다투는 복합재난 현장에서 인명 구조에 모든 주의력을 쏟아야 할 대원이 고도의 전문성을 요하는 무인기 조종까지 수행하는 것은 심각한 인지적 주의력 분산을 초래하며, 결국 가혹한 환경 속에서 첨단 기기의 전개를 포기하게 만드는 행정 지체 현상의 근본 원인이 된다.

이러한 구조적 한계를 극복하기 위해 앞서 이론적 배경에 다루었던 육군의 첨단 무기체계 편제 개편 사례를 적극 벤치마킹할 필요가 있다. 육군은 미래 다영역 전투 환경에 대비하여 기존 보병이 조종을 겸직하던 방식을 선제적으로 탈피하였고, 드론봇 전투단을 창설함과 동시에 첨단 무인무기체계만을 전담하는 전투 로봇 전담 병과를 별도로 신설하는 대대적인 조직 혁신을 단행한 바 있다. 소방 조직 역시 이러한 선도적 사례를 준용하여, 화재 진압이라는 전통적 현장 파트와 복합 데이터 수집·분석이라는

첨단 정보 파트를 철저히 이원화하는 독립적인 첨단 장비 전담대의 신설이 특히 요구된다.

이러한 첨단 장비 전담대의 신설은 단순히 기체를 조작할 추가 인력을 확보하는 차원을 넘어, 앞서 제안한 지능형 통합 상황판을 현장에서 실질적으로 가동하는 지휘 지원 체계를 온전히 가동할 수 있는 토대가 되고 전담대가 투입된 미래의 재난 지휘 현장은 공간적·기능적으로 완벽한 지휘 분업화를 이룰 수 있다.

구체적으로 전담대는 붕괴 위험과 농연이 도사리는 통제선 내부(Hot Zone)의 진압 대원들은 기계 조작에 대한 어떠한 인지적 부담도 없이 오직 생명 구조 임무에만 에너지를 집중하게 된다. 반면, 안전한 현장 통제선 외부(Cold Zone)의 AI 지휘차량 내부에는 전담대 소속의 데이터 분석 요원들이 상주하며, 이기종 로봇들이 취득한 방대한 원시 데이터를 즉각 정제하여 지휘관에게 스크린을 통해 디지털 트윈과 XAI 정보로 생성하는 핵심 두뇌 역할을 수행한다. 이는 파편화된 무전 음성이 유발했던 지휘 통신망의 병목을 원천적으로 해소하고, 현장지휘관이 전담대가 가공해 준 객관적 시각 데이터를 바탕으로 신속하고 정확한 상황 통제에만 집중할 수 있도록, 시·도 소방본부 및 일선 소방서 단위로 차등하된 가칭 '소방 드론봇 전담대'를 제안한다. 편제 모델은 다음 <표 5-1>과 같다.

<표 5-1> 소방 드론봇 전담대 편제안

구 분	소방본부(드론봇 특수구조대)	소방서(드론봇 현장지원팀)
운용 차량	대형 AI 지휘차량 (유니버스/버스형 규모) -관제석, AI 분석 서버, 대형 디스플레이, 회의석 탑재	중형 AI 지휘차량 (쏠라티/스타렉스 규모) - 관제 모니터 및 소형 데이터 분석 콘솔 탑재
장비	다중 실외 무선 드론 4~5대, 테더드 1대 실내 탐색용 사족 보행 로봇 6대	실외 무선 드론 1~3대, 테더드 1대 실내 탐색용 사족 보행 로봇 2대 이하
인력	총 6명 (지휘 및 데이터 2명 / 운용 4명)	총 4명 (지휘 및 데이터 2명 / 운용 2명)
조직 및 업무 구성	① 통제관 (1명): 전담대 총괄, 비행 승인 및 현장지휘관(본부장) 직속 정책 보좌 ② 데이터 관제·분석관 (1명): 지휘차 내부에서 2D/3D 통합 가시화 엔진 및 XAI 위험 예측 모델 운영, 디지털 리포트 생성 ③ 다중 드론 운용반 (2명): 다기체 자율운용 조종자 1인, 비상상황 수습 및 지원(부조종자) 1인 ④ 실내 로봇 운용반 (2명): 로봇 선제 투입 조작 및 진압 대원과의 협업(동시 투입) 제어 전담	① 통제관 겸 데이터 분석관 (1명): 현장 현장지휘관 보좌, 지휘차량 내 통합 상황판(COP) 관리 및 XAI 정보 브리핑 ② 드론·로봇 통합 운용반 (3명) - 드론 조종자 1명(다기체 자율운용 세팅) - 로봇 조종자 1명(내부 진입 제어) - 부조종자 1명(안전 통제 및 배터리 교체 등)
기대 효과	대형 복합재난 발생 시 광역 통제 및 다량의 이기종 기체(로봇 군집)를 활용한 입체적 3D 지휘망 구축	일상적인 화재 현장의 신속한 초기 전개 및 현장지휘관의 의사결정을 돕는 맞춤형 상황판(COP) 제공

제안된 소방 드론봇 전담대의 편제 규모와 구조는 현 소방 현장활동 인력 규모와 공간, 그리고 기능 연결성 등을 고려하여 실효성 있는 모델을 구상하였다.

첫째, 차량의 탑재 인원과 장비 규모를 고려한 최적화된 차량 편제이다. 대형 복합재난에 투입되는 소방본부 단위 전담대의 경우, 총 6명의 인원과 방대한 장비(4~5대의 무선 드론, 사족 보행 로봇 6대), 그리고 AI 분석 서버 및 대형 디스플레이 등을 제약 없이 수용하고 광역 지휘소의

역할을 온전히 수행하기 위해 공간적 여유가 있는 대형 지휘차량(유니버스/버스형) 편제가 적정하다. 반면, 일상적 화재 현장에 신속히 출동해야 하는 일선 소방서 단위의 경우, 4명의 인원과 필수 장비(1~3대의 무선 드론, 로봇 2대) 탑재 여건은 물론 도심지 좁은 도로망 돌파 등 기동성을 최우선으로 고려하여 '중형 지휘차량(쏠라티/스타렉스 규모)' 편제가 합리적이라고 본다.

둘째, 전문성에 기반한 조직 및 업무 편제를 통한 작전 수행의 효율성 극대화이다. 현장 대응을 단순한 기체 조종이라는 단일 임무로 묶지 않고, 전체를 총괄하는 통제관, XAI 위험 예측 모델을 전문으로 다루는 데이터 관제·분석관, 그리고 현장에 직접 기체를 투입하는 분야별(드론/로봇) 운용반으로 조직 및 업무 구성을 세분화하여 편제하였다. 이러한 체계적인 임무 분배는 파편화된 현장 데이터가 수집, 정제, 가시화를 거쳐 지휘관의 의사결정 보조로 이어지는 일련의 정보 작전 수행이 어떠한 병목이나 지연 없이 유기적이고 효율적으로 작동할 수 있게 한다.

셋째, AI 자율운용 기반의 1인 다기체 통제를 통한 소수 정예화이다. 수많은 조종 인력이 투입되어야 한다는 기존의 고정관념과 달리, 제안된 시스템은 AI 지휘차량의 자동 임무 할당 및 자율 경로 생성을 전제로 한다. 이를 통해 1인의 조작자가 여러 대의 무선 드론과 로봇을 동시에 통제할 수 있다. 즉, 기계가 스스로 길을 찾고 인간은 모니터링과 의사결정 승인만 담당하므로, 본부 6명, 소방서 4명이라는 소규모 인력 편제만으로도 다수의 자율 센서 편대를 확실하게 통제하는 고도의 운영 효율성이 확보된다.

넷째, 일선 소방서 구조대원의 인력 차출 등으로 인한 현장 대응력 훼손을 차단할 수 있다. 현재 일선 소방서 구조대(통상 7~8명 편제)에서 드론 운용을 위해 2~3명의 인력이 차출될 경우, 정작 내부로 진입해야 할 본연의 인명구조 역량이 상실되는 모순이 발생한다. 따라서 소방서 단위에 독립된 4명 규모의 현장지원팀을 편제함으로써, 기존 구조대원들은 전원 현장 인명 구조에 투입되고, 전담대는 정보 수집과 상황판 운영만을 전담하는 확실한 임무 분리가 실현될 수 있다.

2. 사후 디지털 피드백 기반의 훈련 체계화 및 소방 특화 리빙랩 도입

현장에 지능형 상황판과 첨단 장비 전담 조직이 성공적으로 구축되더라도, 이를 실질적으로 운용하는 지휘관이 실전적인 감각을 체득하지 못한다면 첨단 기술의 효용성은 반감될 수밖에 없다. 현재 소방 조직의 사후 강평은 객관적인 데이터베이스 없이 대원들의 주관적 기억과 구두 진술에 크게 의존하고 있어, 지휘관의 의사결정 지연이나 전술적 오류를 정확히 짚어내기 어려운 구조적 맹점을 지닌다. 실제로 현장지휘관들은 심층 인터뷰를 통해 “실전 훈련 시켜야죠, 계속”이라며 모의훈련의 당위성을 강조하는 동시에, “단순 경험도 하지만, 그 경험 플러스 학습이 돼야 다고” 진술하여 맹목적인 경험 누적이 아닌 객관적 피드백 기반의 학습이 필수적임을 역설하고 있다.

이러한 한계를 근본적으로 타개하기 위해, AI 지휘차량에 기록된 객관적인 디지털 로그를 활용한 사후 피드백 시스템의 제도화가 요구된다. 현장 대응이 종료되면 지능형 상황판은 드론 및 로봇의 영상, 3D 좌표, 열화상 추이, 그리고 XAI의 의사결정 지원 내역이 포함된 운용 로그 패키지를 자동 생성한다. 지휘관들은 대형 스크린에 이 디지털 트윈 기록을 띄워놓고, AI 참모가 제시했던 자원 배치 권고안과 실제 하달된 무전 지시 타이밍을 초 단위로 정밀하게 교차 대조함으로써 전술적 오류를 합리적으로 분석할 수 있다. 나아가 이렇게 축적된 실제 재난 데이터는 경험이 부족한 현장지휘관들을 위한 핵심적인 멘탈 시뮬레이션 자료로도 활용될 수 있다. 지휘관은 그동안 축적된 대형 복합재난의 실제 통합 상황판 데이터를 가상 훈련장 모니터에 전개해 놓고, 시시각각 변하는 XAI의 경고 속에서 자신의 의사결정을 반복 숙달하게 된다. 이는 미경험 재난에 대한 인지적 마비를 선제적으로 방어하며, 능동적이고 자발적인 훈련 참여를 이끌어내는 동인으로 작용될 수 있을 것이다.

또한, 무인기와 XAI 기술이 현장지휘관의 완벽한 보조 수단으로 안착하기 위해서는, 첨단 기술의 실증과 훈련이 통제된 연구실 내부에만 머물러서는 안 된다. 기존의 재난안전 기술개발 사업은 기술 중심의 연구가 우

선되어, 실제 현장 수요와의 괴리로 인해 활용도가 제한되는 파편화 사례가 다수 발생하였다. 이를 극복하기 위해 현장 소방관(사용자)과 기술 개발자(엔지니어)가 물류창고나 지하 공동구 등 고위험 복합재난 현장과 동일하게 모사된 공간에서 시스템을 가동하며 효용성을 검증하는 소방 특화 리빙랩(Living Lab) 인프라 구축이 필수적이다.

이러한 리빙랩의 제도적 도입은 폴리스랩 등에서 성공적으로 입증된 바 있는 사용자 참여형 개발 경험과 현장 중심의 문제 정의 방식을 소방 조직에 이식하는 것을 의미한다. 단순한 하향식 장비 보급을 넘어, 기술개발–현장실증–합동운용으로 자연스럽게 이어지는 수요처 타겟형 R&D 구조를 확립하는 것이다. 실질적인 현장 실증 과정은, 사용자 참여형 실증 훈련, 현장 오류 발굴 및 피드백, 지능형 지휘 시스템 고도화, 향상된 시스템 기반의 재훈련으로 이어지는 유기적인 4단계 선순환 프로세스로 작동한다. 예를 들어, 지휘관이 훈련 중 이기종 장비 간 연동을 고려한 플랫폼 인터페이스의 구조적 결함을 발견하거나, 특정 붕괴 환경에서 XAI의 우회 경로 산출 알고리즘이 소방 표준작전절차와 충돌함을 지적하면, 연계된 기술 개발진은 즉각 파라미터를 수정하여 기능이 향상된 시스템을 다시 훈련 현장에 투입한다. 요컨대, 리빙랩 생태계의 구축은 도입된 첨단 장비가 현장의 적용성을 최적화하고, 인간 지휘관과 인공지능 플랫폼이 끊임없이 상호작용하며 진화하는 진정한 의미의 통합 지능형 현장지휘체계를 보완해 나가는 제도적 해답으로 기능할 것으로 기대된다.

제 4 절 피지컬 AI 기반 지능형 현장지휘체계 운용 시나리오

1. 운용 대상 재난환경 및 전체 구성도

본 절에서는 지금까지 설계한 피지컬 AI 기반 지휘 모델이 실제 복합재난 현장에서 어떻게 작동하는지 구체적인 시나리오를 통해 고찰하고자 한다. 기존의 인력 중심 대응체계가 지닌 명확한 한계를 극복하고 다기종 장치들이 실시간으로 데이터를 공유하여 지휘관의 의사결정을 보조하는

유기적 네트워크의 실효성을 분석한다.

시나리오 전제를 위한 가상 재난 환경은 기존의 인력 중심 대응체계로는 한계가 명확하며, 드론 및 사족 보행 로봇 등 피지컬 AI 장비의 투입이 필수적으로 요구되는 다음과 같은 네 가지 주요 극한 재난 환경을 전제로 설정하였다.

첫째, 도심 대형 화재 환경이다. 물류창고, 공장, 대형 쇼핑몰 등 연면적이 넓고 가연물이 밀집된 시설에서의 화재는 급격한 연소 확대와 대량의 농연을 동반하여 지상 지휘부의 육안 확인을 원천적으로 불가능하게 만든다. 이러한 환경은 지휘관이 화재의 전체적인 확산 방향을 파악하고 소방 자원을 적재적소에 배치하기 위해, 드론을 활용한 고도의 시각 데이터 수집이 반드시 선행되어야 하는 영역이다.

둘째, 인명피해 우려 건축물 환경이다. 다수의 인명이 상주하는 복합건축물 내부 화재 시, 정확한 요구조자의 위치와 상태 파악은 작전 성공의 핵심 전제이다. 특히 짙은 연기로 인해 요구조자의 위치 추정이 어렵고 통신이 두절된 상황에서는, 대원 투입 전 내부 구조를 매핑하고 요구조자를 조기에 식별해 낼 수 있는 사족 보행 로봇의 정밀 탐색 시나리오가 특히 요구된다.

셋째, 폭발 및 붕괴 위험 환경이다. 2차 폭발 가능성이 존재하거나 구조물이 완전히 붕괴되지 않고 추가 붕괴 징후가 존재하는 현장은 소방대원의 안전을 위해 내부 진입이 극도로 제한된다. 이러한 진입 불가 영역에 대원을 대신하여 선제 투입되어 내부 위험 요소를 탐색하고 실시간 모니터링을 수행하는 피지컬 AI 체계는, 대원의 순직 사고를 예방하는 대안이 된다.

넷째, 유해 화학물질 누출 환경이다. 눈에 보이지 않는 유해가스나 화학물질의 누출은 현장 대응을 극도로 어렵게 하며 대원의 생명을 직접적으로 위협한다. 따라서 특수 센서를 탑재한 피지컬 AI가 선제 투입되어 누출 물질의 종류와 농도, 확산 범위를 정량적으로 측정함으로써, 지휘관이 안전한 작전 구역을 명확히 설정할 수 있는 환경적 토대를 제공해야 한다.

결과적으로 위와 같은 재난 환경은 정보의 불확실성과 대원의 생명 위험성이 극대화된 지점으로, 드론과 로봇, 그리고 지능형 지휘 플랫폼이 유기적으로 결합된 통합 운용 시나리오가 구현되어야 할 조건으로 충분하다고 본다.

<그림 5-3> 지능형 현장지휘체계 전체 구성도



출처: 한국로봇융합연구원(2026) 자료를 참고하여 AI 활용하여 재구성

앞서 가정한 복합재난 현장에 도입된 피지컬 AI 기반 지능형 현장지휘체계는 단일 장비의 고립된 운용을 넘어, 다기종 무인 이동체가 하나의 통합된 지휘 플랫폼과 연결되어 작동한다. 지휘차와 소방대가 현장에 도착하는 시점부터 전개되는 전체 구성도의 흐름은 다음과 같다.

먼저, 지휘차량이 현장에 도착함과 동시에 다기체 드론이 상공으로 선제 투입된다. 이 드론 편대는 지휘관이 현장에 도착하기 전에 발생할 수 있는 정보의 공백을 메우기 위해 현장 전체의 형상을 스캔하며 화재의 연소 확대 방향, 소방 용수 시설, 출동 차량의 배치 현황 등을 실시간으로

파악한다. 이는 지휘관이 현장에 도착 시 입체적인 전술 지도를 확보하게 함으로써 초기 전략 수립의 속도를 획기적으로 높여주는 장치가 된다. 이와 함께, 연기와 화염으로 대원 투입이 어려운 건물 내부로는 사족 보행 로봇이 투입된다. 로봇은 특수 센서를 통해 유해가스를 식별하고, 가시광선 및 열화상 카메라를 활용하여 다종 연소 중인 가연물을 인식하게 된다.

이렇게 수집된 드론과 로봇의 방대한 데이터는 현장차량 기반의 디지털 지휘 플랫폼으로 실시간 집결된다. 지휘차 내에 탑재된 AI 분석 엔진은 실내외 데이터를 융합하여 상황을 판단하고, 최적의 자원 배치안과 구조 경로를 생성한다. 지휘관은 통합 인터페이스를 통해 광역 영상과 정밀 탐색 정보를 동시에 확인하며 데이터에 기반한 적극적인 지휘권을 행사하게 된다. 결과적으로 이러한 현장지휘체계는 공중-지상-내부를 잇는 입체적인 정보망을 구축함으로써, 지휘관의 경험적 판단에 과학적 근거를 더하여 지능형 지휘를 가능하게 한다.

2. 다기종 협업 기반의 세부 운용 프로세스

가. 실외 드론 운용 시나리오

<그림 5-4> 실외 드론 운용 시나리오

■ 선제적 탐색을 위한 선착대용 소형 원격 제어 드론 투입(안)



1. 선착대 현장 도착 후 드론 스테이션 배치
2. 스테이션 배치 후 자동 이륙
3. 지휘차, 119상황실에서 드론 원격 제어
4. 카메라 및 열화상 센서 기반 현장 상황 실시간 공유

■ 화재현장 실외 드론 투입(안)



실외 드론은 현장 도착 즉시 공중에서 입체적인 정보를 수집하여 지휘관에게 제공하며 사전에 정의된 자율 운용 프로세스를 거치게 된다. 먼저, 재난 신고와 연동된 지휘 시스템을 통해 태블릿 기반의 자동 출동 준비가 이루어진다. 이어지는 임무 및 경로 자동 생성에서는 화재의 규모와 건축물 구조에 최적화된 비행 노선이 다수의 드론에 자동으로 할당된다. 이를 통해 지휘관은 별도의 비행 계획을 수립하는 행정적 지연 없이 현장 전체를 감시할 수 있게 된다. 비행이 시작되면 드론은 실시간 맵 생성과 동시에 인공지능 시각 장치를 활용하여 화점 및 연소 확대 방향 탐색 임무를 수행하게 되고 수집된 데이터는 지휘차로 전송되어 화재의 확산 속도와 위험 지역을 판단하는 근거가 된다. 특히 구조대상자 자동 인식과 자원 현황 모니터링 과정은 지상에서 육안으로 확인하기 어려운 요구조자의 위치는 물론 투입된 소방 차량 및 대원의 배치 현황을 한눈에 파악하게 해준다. 이는 지휘관이 한정된 소방 자원 투입의 우선순위를 신속하고 정확하게 결정하는 데 중요한 역할을 수행하게 된다. 아울러 운용 과정 중 발생할 수 있는 사고와 장비 손실을 방지하기 위해 드론은 스스로 장애물을 회피하고 고온 구역을 우회하는 위험 회피 기술을 발휘한다. 나아가 임무

를 완수하거나 배터리 부족 등 물리적 한계 상황에 직면할 경우에는 지정된 위치로 자동 복귀하여 장비의 운용 지속성을 안정적으로 확보한다.

이러한 실외 드론의 선제적 운용 시나리오는 지휘관에게 지상 지휘의 물리적 한계를 극복하게 해주는 시야를 제공한다. 결국 광역 매핑과 자원 모니터링 기능의 융합은 단순한 영상 전달의 수준을 넘어 현장 전체를 하나의 데이터 셋으로 관리하여 지휘관의 전략 수립을 지원하게 된다.

나. 실내 사족 보행 로봇 운용 시나리오

실내 사족 보행 로봇은 짙은 농연과 고온으로 인해 소방대원의 즉각적인 진입이 제한되거나 시야 확보가 원천적으로 불가능한 화재 구역에 투입된다. 이를 통해 로봇은 지휘관의 눈이 닿지 않는 내부 심층부의 치명적인 위험 정보를 실시간으로 수집하고 가시화하는 역할을 수행한다. 로봇 운용 시나리오는 현장의 위험도와 작전의 목적에 따라 '선제투입(안)'과 '동시투입(안)'의 두 가지 전략적 방안으로 나뉘어 전개된다.

<그림 5-5> 실내 사족 보행 로봇 시나리오(선제 투입 안)

■ 화재구역 실내 로봇 선제 투입(안)



1. 테블릿 연동에 따른 자동 출동 준비
2. 각 로봇 임무 경로 자동 생성 및 할당
3. 실시간 맵 생성
4. 구조대상자, 화점 및 가연물 식별
5. 실시간 영상 정보 전달
6. 발화점 및 구조대상자 인식
7. 장애물 회피, 고열 등 한계 환경 시 회피
8. 탐색 완료 및 배터리 부족 등 자동 복귀

먼저, 화재구역 실내 로봇 선제 투입안은, 소방대원이 험지로 투입되기 전, 현장의 위험도를 정량적으로 측정하고 내부 지형을 파악하는 데 그 목적이 있다. 먼저 태블릿 연동을 통해 자동 출동 준비를 마친 로봇은, 기체별로 할당된 임무 및 경로에 따라 내부로 투입하게 된다. 진입과 동시에 로봇은 LiDAR 센서를 활용하여 실시간 맵을 생성하며, 고속 수색 모드를 통해 구조대상자와 화점, 그리고 다종 연소 중인 가연물을 신속하게 식별해 낸다. 이렇게 수집된 실시간 영상 정보와 화점 및 구조대상자 인식 정보는 메쉬 네트워크 망을 타고 지연 없이 외부 지휘부로 전달된다. 이는 지휘관이 대원의 진입 시점을 조율하고 진압 방식을 결정짓는 객관적이고 결정적인 판단 근거로 작용한다. 또한, 탐색 도중 붕괴 등의 장애물이나 고온 환경을 감지할 경우 로봇은 스스로 우회하는 위험 회피 능력을 발휘하며, 임무를 완수하거나 배터리 부족 등 물리적 한계가 발생하면 지정된 위치로 자동 복귀하여 장비의 손실을 최소화한다.

<그림 5-6> 실내 사족 보행 로봇 시나리오(로봇-대원 동시 투입안)

■ 화재구역 실내 로봇-대원 동시 투입(안)

로봇 출동 준비



1. 테블릿 연동에 따른 자동 출동 준비

로봇 임무 할당 및 경로 생성



2. 각 로봇 임무 경로 자동 생성 및 할당

대원-로봇 동시 투입



3. 실시간 맵 생성



4. 실시간 로봇 위치 정보 및 영상 정보 전달

로봇 임무 재할당

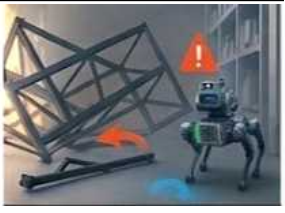


5. 음성 지시 기반 탐색 임무 수행

위험성 탐지



6. 활동 구역 내 특수현상 발생 징후 탐지



7. 장애물 회피, 고열 등 한계 운용환경 시 회피

정보 제공



8. 면체 디스플레이 기반 정보 제공

다음으로, 화재구역 실내 로봇-대원 동시 투입안은, 실제 인명 구조 작전이 전개될 때, 로봇을 대원의 첨병으로 활용하는 능동적 협업 방식이다. 로봇은 진압 대원보다 한발 앞서 기동하며 전방의 숨은 위험 요소를 먼저 감지하고, 자신이 생성한 실시간 맵과 안전한 우회 경로 정보를 대원의 스마트 단말기(면체 내 디스플레이 등)로 즉각 공유한다. 이는 구조 대원이 한 치 앞도 보이지 않는 극한의 농연 속에서도 정확한 방향 감각을 유지하고, 요구조자에게 신속하고 안전하게 접근할 수 있도록 돕는 훌륭한 내비게이터 역할을 하게 된다. 나아가, 로봇은 두꺼운 콘크리트 벽이나 지하 구조로 인해 외부와의 전파 투과가 어려운 대형 플랜트 내부에서, 지휘부와 진입 대원 사이의 통신을 잇는 이동식 통신 중계기의 역할을 충실히 수행함으로써 통신 단절로 인한 대원의 고립 사고를 예방한다.

다. 현장차량 기반 디지털 지휘 플랫폼 운용 시나리오

<그림 5-7> 현장차량 기반 지휘체계 운용 시나리오

■ 현장차량 기반 지휘체계 운용(안)



현장지휘차량에 탑재된 디지털 지휘 플랫폼은 현장에 전개된 다수의 피지컬 AI 장비들이 전송한 방대한 데이터를 통합·분석하여, 현장지휘관에게 최적의 작전 가이드를 제시하는 두뇌 역할을 수행한다. 지휘관은 이 플랫폼을 통해 쏟아지는 현장 데이터를 다음 세 가지 핵심 기능으로 분석하고 실질적인 의사결정에 활용하게 된다.

먼저, 실시간 실내·외 통합 디지털 트윈 가시화 지휘 플랫폼은 실외 드론이 상공에서 매핑한 거시적 지형 정보와 실내 사족 보행 로봇이 심층부에서 수집한 LiDAR 및 영상 데이터를 즉각적으로 융합하여 재난 현장 전체를 3D 모델로 복제해 낸다. 이를 통해 지휘관은 건물의 내부 구조를 파악할 수 있으며, 투입된 대원과 로봇의 실시간 위치를 동일한 3D 공간상에 투영함으로써 사각지대 없는 입체적인 상황 인지를 실현하게 된다.

둘째, AI 기반의 위험 예측 및 최적 작전 경로 산출 플랫폼 내에 탑재된 AI 엔진은 실시간으로 유입되는 온도, 가스 농도 등의 센싱 데이터를 연산하여, 화재의 연소 확대 경로나 플래시오버, 백드래프트와 같은 폭발과 붕괴 위험성을 사전에 시뮬레이션하고 경고한다. 이와 동시에 내부 로봇이 탐지한 붕괴 잔해물 등의 장애물 정보를 반영하여 진압 대원이 요구조자에게 도달할 수 있는 가장 안전하고 신속한 최단 우회 경로를 수학적으로 계산한다. 산출된 경로는 현장 대원의 스마트 단말기로 즉각 전송되며, 이는 급박한 극한의 현장에서 대원의 생명을 보장함과 동시에 작전 성공률을 극대화하는 요인으로 작용할 수 있다.

셋째, SOP 기반 현장활동 임무 리스트 제공 및 자동 활동 리포트 생성하게 된다. 인공지능은 현재 발생한 재난의 규모와 전개 양상을 스스로 분석하여, 소방 SOP에 입각한 지휘관의 핵심 임무 체크리스트를 상황 전개 단계별로 제시한다. 이는 심리적 압박감 속에서 발생할 수 있는 지휘관의 판단 누락을 선제적으로 방어하는 인지적 안전장치가 된다. 나아가, 작전 중 발생하는 모든 센서 데이터와 지휘관의 명령 이력은 타임라인에 따라 자동 기록되어 하나의 디지털 리포트로 생성된다. 이렇게 축적된 객관적 기록은 사후 분석 및 향후 전술 개선을 위한 실증 자료로 활용되며 리빙랩 생태계 구축을 위한 데이터로 활용된다.

제 6 장 결론

제 1 절 연구 결과 요약

본 연구는 갈수록 대형화되고 복잡해지는 현대 재난 환경 속에서, 기존의 인간 중심적이고 경험 의존적인 소방 지휘체계가 지닌 구조적 한계를 극복하고 소방지휘관의 의사결정 역량을 극대화하기 위한 피지컬 AI 기반 지능형 현장지휘체계의 도입 및 운용 방안을 제시하였다. 연구의 목적을 달성하기 위해 재난 현장의 정보 수집 체계, 지휘관의 인지적 의사결정 과정, 그리고 조직 편제 및 훈련 제도의 문제점을 종합적으로 분석하였으며, 이에 대한 기술적·정책적 개선 방안을 도출한 핵심 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 현장지휘관의 인지적 과부하와 정보 암전을 극복하기 위한 기술적 해결책으로 다중 무인기 기반의 지능형 통합 상황판 구축 방안을 제시하였다. 기존의 재난 지휘는 단편적인 음성 무전과 지휘관의 시야에만 의존하여, 경험하지 못한 대형 재난 발생 시 지휘관의 직관적 판단이 마비되는 치명적인 맹점이 존재했다. 본 연구는 붕괴 및 농연 등으로 인간의 접근이 불가능한 구역에 다수의 실외 정찰 드론과 실내 사족 보행 로봇을 동시 전개하고, 메쉬 네트워크를 통해 수집된 파편화된 센서 데이터를 3D 디지털 트윈으로 융합하는 COP 모델을 설계하였다. 이는 지휘관에게 현장의 입체적인 시각 정보를 제공함으로써, 불확실성을 최소화하고 신속·정확한 전술 전개의 기반을 마련한다.

둘째, 인공지능에 대한 자동화 편향을 방지하고 능동적 지휘 통제력을 확보하기 위해 설명 가능한 인공지능의 융합을 제안하였다. 블랙박스 형태의 단순한 AI 예측은 극한의 스트레스 상황에서 지휘관의 기계에 대한 맹신이나 불신을 초래할 수 있다. 이에 온도 추이, 붕괴 징후 등 판단의 근거를 시각적으로 투명하게 제공하는 XAI와 소방 표준작전절차 기반의 지휘 체계의 도입을 제기했다. 이는 지휘관의 소극적인 이성적·분석적 사고를 넘어 기계의 판단을 한 번 더 교차 검증하게 함으로써, 미래 지능형

시스템이 지휘관을 대체하는 개념이 아니라 인지적 능력을 보완하는 보다 완벽한 지능형 지휘 보조 수단으로 가능함을 시사하였다.

셋째, 지능형 지휘체계의 실효성을 담보하기 위한 조직적 해결책으로 첨단 장비 전담대 신설 방안을 도출하였다. 현행 소방 조직은 진압 대원이 첨단 기기 조종을 겸직하는 기형적 구조로 인해, 현장에서 기체가 방치되는 행정 지체 현상을 겪고 있다. 본 연구는 육군의 드론봇 전투단 운영 사례를 벤치마킹하여, 다중 무인기 운용과 데이터 가공만을 전담하는 독립적인 조직 신설을 제안하였다. 나아가 이들 전담대가 AI 지휘차량 내부에 상주하며 상황판을 관제하고, 진압 대원은 물리적 인명 구조에만 집중하게 하는 고도의 지휘 분업화 모델의 필요성을 제시하였다.

넷째, 지휘 역량의 체득화와 시스템의 지속적 진화를 위한 데이터 기반 사후 강평 및 리빙랩의 제도화를 제시하였다. 개인의 주관적 기억과 구전에 의존하던 기존의 훈련 방식을 탈피하여, AI 지휘차량이 자동 생성하는 디지털 로그 패키지를 복기하는 객관적 사후 강평 체계를 구축하였다. 또한, 사용자와 개발자가 함께 모의 훈련을 수행하며 오류를 발굴하고 시스템을 고도화하는 4단계의 리빙랩 선순환 생태계를 모색하였다. 이는 도입된 첨단 과학기술이 사장되지 않고 현장의 요구에 맞게 끊임없이 진화하도록 돕는 필수적인 제도적 기반이 될 수 있을 것으로 본다.

결론적으로, 향후 국가재난대응체계는 과거의 아날로그적 틀에서 벗어나 AI 기반 첨단과학을 적용한 선제적이고 미래지향적인 지능형 체계로 신속히 전환되어야 한다는 점은 명약관화한 사실이다. 본 연구가 제안한 피지컬 AI, XAI 상황판, 전담대 신설, 그리고 리빙랩의 유기적인 결합 모델은 소방 지휘체계의 패러다임을 경험 의존적 직관에서 데이터 기반의 확신과 통제로 혁신하는 정책적 초석이 될 것으로 기대한다.

제 2 절 정책적 함의 및 시사점

본 연구는 대형화되고 복잡해지는 재난 현장에서 초동지휘관이 직면하는 정보 단절과 이로 인한 판단의 어려움을 근본적으로 해결하기 위해, 상

공의 소방 드론과 실내의 사족 보행 로봇을 융합한 피지컬 AI 기반 지능형 현장지휘체계의 구축 방안을 다각적으로 제시하였다. 기존의 연구들이 단일 로봇의 기계적인 성능을 높이는 데 집중했다면, 본 연구는 첨단 기술과 지휘관의 심리, 그리고 소방 조직의 제도를 하나로 연결하여 실제 현장에서 작동할 수 있는 종합적인 대안을 마련했다는 데 그 의의가 있다. 이러한 연구 결과가 향후 소방 조직과 국가 재난대응체계에 대한 정책적 시사점은 크게 세 가지로 정리할 수 있다.

첫째, 소방 지휘의 핵심 방식이 지휘관 개인의 과거 경험과 직관에서 객관적 데이터와 인공지능의 논리적 분석을 바탕으로 한 과학적 방식으로 변화해야 한다. 그동안 일선 지휘관들은 시야가 확보되지 않은 현장에서 불확실성에 의존한 채, 직관에 의해 상황을 통제해 왔다. 하지만 이제는 피지컬 AI 기체들이 현장의 실시간 정보를 실시간으로 수집하고, 설명 가능한 인공지능이 이를 소방 표준작전절차와 비교하여 위험성 분석뿐 아니라 그 논리적 이유를 화면에 명확하게 보여주어야 한다. 이처럼 결과의 이유를 납득할 수 있는 투명한 지능형 시스템이 도입된다면, 지휘관은 작전 실패에 대한 심리적 두려움에서 벗어나 주도적으로 인명 구조와 대원 대피를 지휘할 수 있게 된다. 이는 재난 대응의 성격을 사고가 터진 후 수습하는 피동적 방식에서, 미리 위험을 예측하고 대비하는 선제적 방식으로 바꾸는 중요한 전환점이 될 것이다.

둘째, 첨단 로봇과 드론이 현장에서 방치되지 않고 제대로 쓰이기 위해서는, 단순히 장비를 확보하는 것을 넘어 이를 전문적으로 다룰 수 있는 전담 조직의 신설이 반드시 뒤따라야 한다. 현재의 소방 현장에서는 불을 끄거나 인명 구조에 집중해야 할 대원들이 고도의 집중력을 요구하는 복잡한 드론 조종까지 함께 맡고 있다. 이렇게 현장 활동과 장비 조종을 동시에 수행해야 하는 현실적인 한계 때문에 초기의 귀중한 골든타임에 무인기를 띄우지 못하는 일이 빈번하게 발생하고 있다. 이를 해결하기 위해서는 육군의 첨단 무기체계 운용 사례처럼, 다수의 기체를 원격으로 조종하고 여기서 얻은 정보를 분석하는 일만 전문으로 하는 소방 드론봇 전담대와 같은 독립된 조직이 만들어져야 한다. 이를 현장 대원은 인명 구조

본연의 임무에만 집중하고, 지휘관은 상황판에 정리된 정보를 바탕으로 현장을 통제하는 역할 분담이 이루어져야만 첨단 장비가 실질적인 효과를 낼 수 있다.

셋째, 새롭게 도입되는 지능형 지휘체계가 현장에 안정적으로 정착될 수 있도록 관련 법과 제도의 개선, 그리고 데이터 중심의 훈련 체계 마련이 시급하다. 무엇보다 현장에서 수집된 로봇의 센서 데이터와 인공지능의 분석 결과가 지휘관의 공식적인 명령 근거로 합법적으로 인정받을 수 있도록, 소방의 각종 훈령과 표준작전절차를 시대에 맞게 수정해야 한다. 또한 대형 재난이 발생했을 때 소방뿐만 아니라 경찰, 지자체 등 여러 재난 대응 기관이 기체들이 수집한 현장 정보를 막힘없이 서로 공유할 수 있도록 정보의 전송 규격을 하나로 통일하는 작업도 필요하다. 나아가 이러한 시스템 도입에 발맞추어, 지휘관과 대원들이 인공지능이 제시하는 정보를 바탕으로 최적의 판단을 내리는 훈련을 가상 시뮬레이터 환경에서 반복적으로 연습할 수 있도록 훈련 제도 역시 함께 발전해야 할 것이다.

종합적으로 본 연구는 피지컬 AI 기반 지능형 현장지휘체계의 성공적인 안착을 위해서는 단편적인 기술 이식을 넘어, 소방 행정의 조직, 인사, 법률, 그리고 현장 지휘 문화를 포괄하는 거버넌스 혁신이 반드시 동반되어야 한다는 것을 실증적으로 시사한다.

제 3 절 연구의 한계 및 발전방향

본 연구는 피지컬 AI 기술과 첨단 무인이동체의 협력적 군집 운용 기법을 소방 지휘체계에 도입하여 현장지휘관의 인지적 과부하를 해소하고 과학적 지휘 기반을 마련하는 구체적인 방안을 제시하였다는 점에서 의의가 크다. 그러나 이론적 고찰과 문헌 연구, 그리고 해외 사례 분석을 중심으로 연구를 전개함에 따라 다음과 같은 방법론적, 현실적 한계점을 지니며, 이를 보완하기 위한 향후 연구 발전방향은 다음과 같다.

첫째, 제안된 피지컬 AI 기반 지능형 현장지휘체계의 실효성과 복합지형 극복 능력을 검증할 수 있는 통계적·실증적 데이터가 미비하다는 점

이다. 본 연구는 상공의 소방 드론과 지상의 사족 보행 로봇의 합동 운용, 그리고 동적 메쉬 네트워크 아키텍처의 구축 가능성을 이론적으로 논증하였다. 하지만 도심 밀집 지역, 농어촌, 산악 지대 등 지자체별 고유한 지리적·환경적 특성을 세밀하게 반영하지 못했으며, 실제 고열과 짙은 연기, 복잡한 붕괴 잔해물이 존재하는 극한 환경에서 기체가 장애물을 회피하며 안전하게 노드를 운반할 수 있는지에 대한 물리적 성능 검증 역시 아직 실증 단계에 머물러 있다. 즉, 무인이동체 간의 통신 지연율이나 센서 오작동률이 지휘관의 의사결정에 미치는 부정적 변수를 완전히 계량화하지 못했다. 따라서 향후 연구에서는 가상현실 기반의 재난 시뮬레이터나 실제 소방 훈련장 등에서 지휘관들을 대상으로 피지컬 AI 기체 유무에 따른 상황 인식 속도와 판단 정확도를 측정하는 실증 실험이 수반되어야 한다. 아울러 다수의 로봇과 드론이 붕괴 현장에서 충돌 없이 최적의 감시 경로를 생성할 수 있도록 군집 알고리즘 연구 및 협소 공간 맞춤형 다중 센서 모듈 탐색 기술에 대한 공학적 실증이 지속되어야 할 것이다.

둘째, 기술적 구성 요소의 구체적인 비용 편익 분석과 행정·재정적 현실을 고려한 단계별 도입 로드맵의 세밀함이 부족하다는 한계가 있다. 첨단 장비 다중 제어 시스템, 사족 보행 로봇, 3D 디지털 트윈 기술 등은 막대한 초기 구축 비용과 지속적인 유지보수 예산을 필요로 한다. 본 연구는 임무 겸직의 모순을 타파하기 위해 독립적인 전담대의 신설을 제안하였으나, 이는 소방청 차원의 예산 확보와 정책적 법령 개정이 수반되어야 하므로 단기적 실행에 현실적 어려움이 따른다. 특히, 시·도별 소방 재정 격차를 감안할 때 통합 지휘체계를 전국에 일괄 도입하는 것에는 제약이 따른다. 따라서 후속 연구에서는 오픈소스 기반의 다중 기체 운용 연구를 통해 예산 효율성을 극대화하고, 핵심 장비 위주의 우선순위 도출과 시범 소방서 운영을 통한 경제성 평가 등 중장기적 재원 조달 방안에 대한 행정학적 접근이 보완되어야 한다. 나아가 대형 복합재난 시 산출된 데이터가 소방에만 머물지 않고 공공안전 분야 전반에서 활용될 수 있도록, 다부처 간 합동 지휘망 구축 및 데이터 포맷의 표준화 프로토콜 마련을 위한 정책적 연구가 병행되어야 한다.

셋째, 인공지능 기반 지휘 보조 시스템의 고도화에 따른 인간 지휘관과의 상호작용 및 전술적 신뢰도에 관한 심층적 분석이 제한적으로 이루어졌다. 본 연구는 인공지능이 정제한 정보가 지휘관의 인식 기반 의사결정 모델을 보조하여 판단 오류를 줄여줄 것이라는 긍정적 측면에 중점을 두었다. 그러나 실제 재난 현장에서는 지휘관이 AI의 분석 결과를 과도하게 신뢰하여 오판을 초래하는 자동화 편향이나, 반대로 시스템의 제안을 불신하여 첨단 장비를 완전히 배제하는 현상이 나타날 수 있다. 즉, 인간과 기계 간의 협력적 인터페이스 연구와 더불어, 지휘관이 인공지능의 판단을 어느 수준까지 신뢰하고 수용해야 하는지에 대한 정성적·정량적 기준 마련이 향후 중요한 발전 방향으로 다루어져야 한다. 이와 함께 본 연구는 재난 발생 이후 현장지휘관의 의사결정에 초점을 맞추었으나, 향후에는 인공지능을 활용하여 재난 발생 징후를 사전에 예측하고 탐지하는 예방 단계로 그 외연을 확장해야 하며, 육상뿐만 아니라 해상 수색을 위한 무인 수중·수상 로봇 등 다양한 피지컬 AI 영역을 포괄하는 융합 연구가 요구된다.

결론적으로, 지능형 소방 현장지휘체계의 도입은 단순히 4차 산업혁명 기술을 현장에 물리적으로 이식하는 것을 넘어, 재난 대응의 패러다임을 근본적으로 혁신하는 전환점이다. 본 연구의 결과와 향후 제언된 실증적·공학적 후속 연구들이 유기적으로 결합될 때, 재난 대응 체계는 국민과 소방대원의 생명을 보호하는 미래 지능형 체계로 도약할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 국내문헌

김동주. (2026). “복잡한 지형에서의 사족로봇 보행 제어를 위한 어텐션 기반 강화학습”. 부산대학교 대학원 석사학위논문.

김동진, 고승일, 조우석, 김윤래, 김수현. (2020). “소방 드론의 열화상 카메라를 이용한 딥러닝 기반 실시간 요구조자 탐지 솔루션”. 대한전자공학회 추계학술대회. 728-731.

김성재. (2021). “협소 공간 생존자 탐색 로봇의 다중 센서 모듈과 운용에 관한 연구”. 부경대학교 대학원 석사학위논문.

김수호. (2020). “ 다중 비행 로봇을 이용한 2.5차원 지도 작성 및 지도 정합 방법에 관한 연구”. 한국산업기술대학교 대학원 석사학위 논문.

김수환. (2017). “소방활동 현장의 초동지휘관에게 요구되는 역량”. 공주대학교 대학원 석사학위논문.

김승현. (2024). “드론 조종에서 AI 대체의 문제점과 정책적 대응 방향에 관한 연구”. 수원대학교 대학원 석사학위논문.

김영환. (2022). “빅데이터 분석을 통한 가상현실 기반 소방지휘훈련의 효과성 연구”. 명지대학교 대학원 석사학위 논문.

김주은. (2019). “인공지능이 인간사회에 미치는 영향에 대한 연구”. The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT) Vol. 5, No. 2, pp.177-182,

박용식. (2022) “미래 무기체계 발전에 따른 육군 전투병과 개선 연구”. 광운대학교 대학원 박사학위논문.

박채희. (2022). “GPS 음영지역에서 딥러닝을 활용한 드론 자율 착륙”. 국민대학교 대학원 석사학위논문.

서영훈. (2023). “스마트 로봇 LiDAR 센서 기반 실내외 디지털 트윈의 효용성 평가”. 인천대학교 대학원 석사학위논문.

성호선. (2013). “재난현장 지휘관의 의사결정 역량 강화방안에 관한 연구”. 강원대학교 산업과학대학원 석사학위논문.

신민준. (2022). “4차 산업혁명 과학기술 기반 소방서비스에 관한 분석적 연구”. 한양대학교 대학원 박사학위논문.

안욱진. (2024). “사족 보행 로봇의 복잡한 지형에서의 보행을 위한 지각 기반 동작 계획”. 부산대학교 대학원 석사학위논문.

염무열. (2016). “소방공무원의 재난 현장 대응 시 의사결정과정에 관한 연구”. 강원대학교 산업과학대학원 석사학위논문.

윤성준. (2021). “국방 드론봇 통합관제체계 개발을 위한 결정요인 연구”. 광운대학교 대학원 박사학위논문.

이상일. (2025). “드론 3D 모델링을 통한 보병여단 작전 계획 및 지휘체계 혁신 방안”. 수원대학교 대학원 석사학위논문.

이승현. (2024). “불명확한 상황에서의 의사 결정, AI 도우미에 대한 신뢰에 관하여”. 연세대학교 대학원 석사학위논문.

이용민. (2020). “드론산업 활성화에 따른 드론 운용 법제도 개선방안 연구”. 항공대학교 대학원 석사학위논문.

이진수, 이상광, 김대욱, 홍승진, 양성일. (2018). “딥러닝 기반 객체 인식 기술 동향”. 『전자통신동향분석』. 33(4), pp. 23-32.

이창은, 손진희, 박혜숙, 이소연, 박상준, 이용태. (2021). “지휘관들의 의사결정지원을 위한 AI 군참모 기술동향”. 전자통신동향분석. 36(1). 90-98.

이한영, 박대우. (2023). “화재발생 시 AI소방드론과 인공지능 적용”. The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '23-04 Vol.48. 469-476.

이해수, 유재흥, 안성원. (2025). “피지컬 AI의 현황과 시사점”. 소프트웨어정책연구소. 성남: SPRi.

임태준. (2024). “화재현장 대응능력 강화방안”. 동의대학교 대학원 석사학위논문.

장더롱. (2026). “다중로봇 경로 최적화를 위한 PSO 알고리즘 연구”. 동신대학교 대학원 박사학위논문.

전상현. (2024). “사족 보행 로봇의 모델 기반 제어기와 딥강화학습 제어기의 통합 제어 연구”. 서울과학기술대학교 대학원 석사학위논문.

정원진, 김정은, 방성윤, 조성원, 손정현. (2025). “실시간 화재 대응 AI 기반 이동형 소방 로봇의 설계 및 구현”. ICROS 2025. 997-998.

차주현. (2025). “재난 현장에서 소방관의 의사결정 과정에 관한 연구”. 숭실대학교 대학원 박사학위논문.

채범석. (2022). “오픈 소스 플랫폼을 활용한 소부대급 정찰 및 감시용 드론 운용 연구”. 세명대학교 대학원 박사학위논문.

최상기. (2020). “치안드론 발전방향에 관한 실증 연구”. 경찰대학 치안대학원 석사학위논문.

최원상. (2020). “인공지능 기반의 지능형 재난안전관리체계 구축에 관한 연구”. 『한국방재학회 논문집』. 20(1), pp. 131-138.

하강훈. (2022). “소방드론의 활용을 위한 소방공무원의 인식과 적용방안에 관한 연구”. 부경대학교 대학원 박사학위논문.

허창식. (2020). “재난 현장에서 소방드론의 효율적 운용에 관한 연구”. 서울시립대학교 대학원 석사학위논문.

현승철, 박현민. (2020). “자기 사후검토(SELF-AAR)를 통한 지휘관의 상황판단 · 결심능력 향상”. 국방과 기술. 10(500). 128-131.

현인영. (2025). “이동 무인 군집 로봇의 거리 정보 기반 실시간 상대 측위 기술 개발”. 국립한밭대학교 대학원 석사학위논문.

한국로봇융합연구원. (2026). “디지털기반 소방현장지휘체계 기술개발 기획보고서”. 포항: KIRO.

한국지능정보사회진흥원. (2025). “재난 발생 예방을 위한 AI 활용 사례 및 시사점”. 대구: NIA.

2. 국외문헌

García-Nieto, M. C., Huesca-Tortosa, J. A, Martínez-Segura, M. A, de Gea, A. E, & Navarro, M. (2025). Structural deformation monitoring using UAV photogrammetry to assess slender historic buildings. Journal of Building Engineering, 100, 111766.

Gary Klein, "Sources of Power: How People Make Decisions", 1998.

Herbert Simon, "A Behavioral Model of Rational Choice", 1955.

Shuaifeng Jiang, Qi Qu, Xiaqing Pan, Abhishek K. Agrawal, Richard Newcombe, Ahmed Alkhateeb. "Learnable wireless digital twins: Reconstructing electromagnetic field with neural representations." IEEE Open Journal of the Communications Society (2025).

Kaplan, Berkay, Buhe Li. "PyroGuardian: an IoT-enabled system for health and location monitoring in high-risk firefighting environments." 2025 6th International Conference on Computing, Networks and Internet of Things (CNIOT). IEEE, 2025.

Nikil Krishnakumar, Shashank Sharma, Srijan Kumar Pal, Jiarong Hong. "3D characterization of smoke plume dispersion using multi-view drone swarm." Science of The Total Environment 980 (2025).

ABSTRACT

A Study on the Establishment of an Intelligent Fire Scene Command System Based on Physical AI —Focusing on the Joint Operation of Fire Drones and Quadruped Robots—

Lee, Jin-Heon

Major in Social Disaster and Safety Policy

Dept. of Social Disaster and Safety

Graduate School of Public Administration

Hansung University

Modern disasters are increasingly becoming large-scale and complex, yet on-scene commanders still rely on fragmented voice information received through 119 dispatch reports and radios to make on-scene decisions. Consequently, in extreme disaster scenes, commanders suffer from cognitive overload as they are unable to simultaneously control dozens of rapidly changing tactical variables. In particular, in indoor structures and underground spaces where radio waves are blocked by thick concrete exterior walls or dense fire smoke, they face an information blackout phenomenon, which acts as a limitation that ultimately paralyzes the commander's intuitive

judgment and causes a loss of proactive situational control.

To fundamentally overcome these structural limitations of the existing command system, this study aims to propose a plan for establishing an intelligent on-scene command system that jointly operates physical AI devices, such as multiple fire drones detecting macroscopic risk factors in the air and quadruped robots exploring the microscopic environment indoors. Furthermore, beyond the simple functional deployment of a single device, it aims to maximize the commander's practical on-scene response capabilities through a System of Systems approach in which multiple advanced devices and artificial intelligence analysis servers are organically linked.

Through theoretical considerations and literature reviews, the technical and cognitive problems of the current fire command system and manned-unmanned combined operations were analyzed in depth, and specific and practical system improvement measures were derived to solve them. First, a multi-source data fusion plan was proposed as an alternative to relieve the cognitive overload of the on-scene commander. This can reduce the information processing burden on the commander by fusing existing 119 dispatch information with real-time sensor data collected by unmanned devices such as drones and quadruped robots into an intelligent integrated situation board, thereby automatically calculating the efficient initial command priority and optimal resource allocation plan. Second, to resolve the commander's heavy burden of responsibility and psychological distrust regarding the results derived by the artificial intelligence system, a rule engine clearly linking explainable artificial intelligence technology and fire SOP was introduced. By designing a risk prediction visualization system based on logical causality that matches the machine's basis of judgment with official fire norms, it is designed so that commanders

can issue confident tactical instructions. In addition, as an administrative and policy alternative to effectively operate such advanced technologies at disaster scenes, the establishment of a new organization called the fire dronebot squad was proposed to prevent the contradiction of existing rescue workers holding concurrent duties and to exclusively perform integrated control capabilities.

The physical AI-based intelligent on-scene command system proposed in this study signifies a paradigm shift that goes beyond simply introducing advanced physical equipment to the field, compensating for the cognitive limitations of on-scene commanders and enabling preemptive and proactive command based on accurate data and official norms. This study empirically suggests that for the successful on-site settlement of this intelligent system, not only the fragmented introduction of technology, but also macroscopic and preemptive innovations across overall fire governance, such as the training of dedicated professional personnel and the maintenance of related laws and systems, must essentially be accompanied.

【Keywords】 Physical AI, Fire Drone, Quadruped Robot, System of Systems, Commander's Decision-Making