

국방과학기술

1. 인공지능 강화학습 국방적용과 과학적 분석평가 방법론 연구
2. 전장에서 포병화력 살상효과 모델링 분석 및 무인체계 실시간 제어 기법 연구



국방과학기술



국방대학교
국가안전보장문제연구소

2023 안보연구시리즈 제 5-4호

국방과학기술

인 쇄 2023년 12월 31일

발 행 2023년 12월 31일

발 행 처 국가안전보장문제연구소

발 행 인 국가안전보장문제연구소장

주 소 33021 충청남도 논산시 양촌면 황산벌로 1040

전 화 TEL : 041-831-6412 FAX : 02-748-7588

홈페이지 <http://www/kndu.ac.kr>

<http://www.kndu.ac.kr/rinsa>

디자인 및 인쇄 디자인해리아 TEL : 041-675-9963

© 국가안전보장문제연구소 2023

비매품

ISSN 2586-5323

1. 본 연구보고서 내용은 연구진의 개인적인 견해이며 소속 기관의 공식적인 견해가 아닙니다.
2. 본 연구보고서는 정책입안시 참고자료로만 활용하고 타기관에 불필요한 자료유출을 삼가주시기 바랍니다.

2023년은 미·중 간의 전략경쟁이 지역별·분야별로 다변화되는 가운데 국제질서의 불안정성이 더욱 고조되는 한 해였습니다. 유럽과 중동지역에서 동시에 진행된 두 개의 전쟁으로 국제사회의 균열은 더욱 심화되었으며, 이른 기간 내에 종전은 어려울 것으로 전망되고 있습니다. 한반도에서는 북한이 핵무력정책을 헌법에 명시하고 전술핵잠수함 건조를 공식화하는 등 핵무기 능력 강화 노력을 지속하고 있습니다. 이에 대응하여 한국 정부는 한미동맹의 핵심인 확장억제의 실행력을 제고하고 유엔사 회원국들과의 군사협력을 강화하면서 글로벌 중추국가로의 발전을 추구하였습니다.

이와 같은 국제정세 속에서 사안의 본질을 보다 정확하게 파악하여 올바른 대응방향을 모색하기 위해서는 여러 안보 현안에 대한 보다 깊이 있고 체계적인 연구가 중요하다고 생각됩니다. 이에 따라 국방대학교 국가안전보장문제연구소는 매년 국방부, 합참, 각 군 본부 등의 의견을 수렴하여 국가안보 및 국방정책 수행과 관련하여 필요한 연구 주제를 선정하고, 관련 분야의 전문성을 가진 교내·외 연구자들에게 심층적인 연구를 의뢰해 왔습니다. 2023년도에는 외교·안보와 북한, 국방정책 및 군사전략, 경제안보와 국방관리, 국방과학기술, 예비전력 정예화 및 미래혁신의 5개 주제를 중심으로 18개의 정기(기초) 연구과제를 선정하여 양질의 연구를 수행하였으며, 그 결과를 안보시리즈로 발간하게 되었습니다.

모쪼록 이러한 연구결과가 국가안보 및 국방정책 관련 부처의 정책개발 및 집행과정에 기여하고, 이 분야를 연구하는 연구자 및 학생들에게 유용한 참고자료로 활용될 수 있기를 기대합니다. 끝으로 제한된 기간에도 불구하고 국가안보를 위한 연구에 열과 성을 다해 주신 교내·외 연구자 여러분께 깊은 감사의 말씀을 전합니다.

2023년 12월 31일

국방대학교 국가안전보장문제연구소장 교수 박 영 준

1. 인공지능 강화학습 국방적용과 과학적 분석평가 방법론 연구 1
(국방대학교 연구책임자 **이용복** / 국방대학교 연구원 **조남석** /
국방대학교 연구보조원 **강승욱, 윤진성**)

I 연구 개요 17

II 인공지능 강화학습 국방적용 연구 20

III 과학적 분석평가 방법론 55

**2. 전장에서 포병화력 살상효과 모델링 분석 및 무인체계 실시간 제어 기법
연구 105**
(육군사관학교 기계·시스템 공학과 부교수 **김종환, 백승원** /
배제대학교 드론 철도건설 공학과 **차도완**)

I 연구 개요 105

II 연구 내용(세부#1) 108

III 연구 내용(세부#2) 138

인공지능 강화학습 국방적용과 과학적 분석평가 방법론 연구

국방대학교 연구책임자 이 용 복

국방대학교 연구원 조 남 석

국방대학교 연구보조원 강 승 욱

국방대학교 연구보조원 윤 진 성

I. 연구 개요

II. 인공지능 강화학습 국방적용 연구

III. 과학적 분석평가 방법론

요약문

제1장 연구 개요

제1절 개요

1. 연구 배경

가. 국방혁신 4.0 기본계획에 「AI 기반 핵심첨단전력 확보」가 선정되는 등 인공지능 기술의 중요성 증대. 반면, 강화학습 기술은 상대적으로 기술이 미성숙한 상태이며, 국방 분야에서도 기술 활용에 대한 방향성 미정립

나. 국방혁신 4.0 등 미래 군의 변화를 이끌어갈 다양한 추진계획들이 수립. 따라서 복합적인 과제 및 과업에 대한 분석평가 시 객관적이고 과학적인 방법을 적용해서 신뢰성 있는 추진 진도 및 성과 산출 필요

2. 연구 목적

- 가. 인공지능 강화학습 기술의 국내·외 최신 연구 동향과 적용 사례를 조사하여 강화학습의 국방에서의 적용 분야 탐색 및 정책제안 제시
- 나. 국방혁신 4.0과 같은 대형 프로젝트의 과학적 분석평가 방법론 제시

3. 주요 연구내용

- 가. 인공지능 강화학습의 국방 적용분야 탐색
- 나. 과학적 분석평가 방법론 조사 및 국방혁신 4.0 적용사례 제시
- 다. 인공지능 강화학습의 국방 적용과 국방혁신 4.0에서 과학적 분석평가 방법 적용을 위한 정책적 제언 제시

제2장 인공지능 강화학습 국방적용 연구

제1절 인공지능 강화학습 기술의 국내·외 최신 연구동향

1. 강화학습의 이해

가. 강화학습(Reinforcement Learning)은 머신러닝(Machine Learning) 기술의 한 분야로, 학습을 하는 에이전트(agent)가 환경(Environment)과의 상호작용을 통해 의사결정을 배우는 방법

나. 강화학습의 구성 요소는 에이전트(Agent), 행동(Action), 환경(Environment), 상태(State), 보상(Reward), 정책(Policy) 등이 있음

2. 강화학습의 역사

가. 1950년대 : 동물의 행동에서 피드백의 중요성을 연구한 B. F. Skinner와 체커 게임을 통해 기계가 '배운다'는 개념을 소개한 Arthur Samuel 의 연구가 있음

나. 1960년대-80년대 : Richard Bellman의 동적계획법, Bellman Equation 이나 Richard Sutton 등의 Q-Learning 등이 있음

3. 강화학습의 최신 연구

가. DRL(Deep Reinforcement Learning)

딥러닝(Deep Learning)과 강화학습(Reinforcement Learning)이 합쳐진 개념으로, 강화학습에서 함수 등의 계산을 위해 딥러닝의 인공신경망(Neural Network)을 이용하는 개념

일반적인 기계 학습 방법보다 더 많은 양의 데이터와 계산 능력이 필요하지만, 복잡한 패턴과 표현을 학습할 수 있음

예를 들어, 간단한 게임인 Tic-Tac-Toe만 하더라도 상태의 크기는 19,683에 육박하는데, 주어진 환경이 복잡할 경우에 딥러닝 기술을 이용하여 함수를 ‘근사’해야만 함

2013년 DeepMind의 아타리 게임에 대한 연구를 기점으로, 다양한 방면에서 DRL 연구가 부흥하고 있음

나. MARL(Multi Agent Reinforcement Learning)

단일 에이전트가 아닌 다수의 에이전트를 학습시키는 기술임. MARL의 환경은 협동(cooperative)과 경쟁(competitive) 또는 이 둘의 혼합으로 구성되며, 각 경우별로 에이전트들이 학습하는 환경이 다르게 구성됨

MARL은 문제의 차원이 증가할 때 균형점을 찾기 어렵다는 점, 계산 복잡도 측면, Non-stationary의 문제 등 난관이 있지만, 중요하기 때문에, 연구가 증가하고 있음

다. Safe Reinforcement Learning

강화학습 에이전트의 행동의 결과가 위험을 초래할 수 있는 경우에 이를 다루는 연구 분야임

대표적으로, 자율주행차는 강화학습으로 훈련되지만, 잘못된 주행이 탑승자에게 위험을 줄 수 있기 때문에 Safe RL의 범주에 들어감

외에도, 금융, 헬스케어 등 다양한 분야에서 Safe RL을 필요로 함

이 기술의 핵심은, 보상의 극대화 외에도 안전 제약(Safety Constraints)을 인공지능이 학습 간 준수하도록 하는 것임

제2절 인공지능 강화학습 기술의 국내·외 최신 적용사례

1. 강화학습의 장점

가. 복잡한 문제 해결에 강점 : 기존의 의사결정 방법 중 하나인 규칙기반 방법(Rule-Based)은 환경이 복잡해지면 구현의 난이도가 증가하는데, 강화학습은 “Trial-and-Error”를 통해 학습이 진행되는 본질적으로 간단한 학습 메커니즘

나. 적응력 : 강화학습은 범용성을 가진 ‘강 강화학습’ 연구가 지속되고 있고, 적응력이 더 향상될 것으로 기대

다. 낮은 도메인 지식 의존성 : 경험을 축적하면서 학습하는 방식

라. 데이터 비의존성 : 지도학습의 경우 많은 데이터가 필요한데, 강화학습은 경험과 함께 데이터를 생성하는 방식

2. 강화학습의 적용분야

가. 자율주행 (Autonomous Driving)

주행이라는 과업은 시나리오의 크기, 환경의 복잡성, 목표의 다양성 등으로 매우 복잡한 문제이며, 강화학습이 광범위하게 활용

대표적으로, 테슬라(Tesla)의 오토파일럿(Autopilot) 기능이 강화학습 기술을 활용함을 위해, 실시간 주행 데이터를 수집하고 시뮬레이션 환경을 구축하여 인공지능을 학습시키고 있음

나. 로봇 (Robotics)

로봇 분야에도 강화학습이 활용되는데, 기존 제어 방법들에 비해 효율성이 비약적으로 향상되거나 또는 풀지 못했던 과업 등을 해결

다. 게임 분야

게임 분야에서의 강화학습은 목적이 아니라 수단으로 역할이 중요하지만, 향후에는 게임 산업 발전을 위해 강화학습이 많이 활용

여기에는, NPC(Non-Player Character)의 행동에 인공지능 기술을 입히는 것부터, 게임 제작 프레임워크를 지원하는 것도 포함

라. 기타 분야

GPT와 같은 대화형 인공지능 모델, 주식 등의 트레이딩 모델, 헬스케어, 추천 시스템 등 다양한 분야에서 강화학습을 활용

제3절 강화학습의 국방에서의 적용분야 탐색

1. 강화학습 측면에서 국방의 특성

가. 목적 : 민간은 비용 절감, 효율성 향상 등의 목표가 다양하지만, 국방에서는 임무의 달성이라는 절대적인 목표가 존재

나. 보안 : 국방 분야의 데이터 접근성 문제와 강화학습 환경 구성 자체의 어려움

다. 윤리적 문제 : 인공지능의 무기화, Human-In-the-Loop 필요성 등 다양한 논쟁과 담론이 존재함

라. 복잡성 : 군 작전의 경우 많은 변수가 존재함. (거부활동, 적의 공격 등)

2. 강화학습의 국방적용 분야

가. 드론 등 공중자산의 임무 수행

러시아-우크라이나 전쟁에서 드론의 활약으로 전장에서 드론의 활용은 상수이며 지속적으로 증가할 것임

드론의 운용에는 운용 요원이 존재하는데, 미래에는 드론의 지능화가 요구될 것임
드론의 지능화에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 여기에서 강화학습은 자율적 비행 및 기동, 경로계획 및 탐색, 장애물 회피, 자동 목표 탐지 및 추적, 다중 드론 협력, 에너지 및 자원 관리, 위협 평가 및 대응 등 여러 분야에서 적용되어 활용될 수 있음

선행 연구 결과를 보면, DRL 기술을 적용하여 드론이 정찰 활동을 하는 것이 시뮬레이션 환경에서 실증되었음

나. 위협분석과 표적할당

위협분석과 표적할당은 강화학습 외에 다른 방법론으로 많이 연구가 되었지만, 빠른 속도로 발전하는 인공지능 기술에 대한 기술적 당위성으로 연구가 이루어지고 있음

위협분석과 표적할당을 위해 필요한 환경 정보는 상당히 많으며, 보상을 정의하기 어렵다는 사실로, 이 연구도 어려운 것으로 인식됨

현재 강화학습 기술이 스타크래프트와 같은 실시간 전략 게임과 FPS 게임에서 인간을 초월하는 실력을 갖게 되었다는 점 등은 향후 이 분야의 실현 가능성을 기대하게 함

다. 자원관리

기존의 대표적인 자원관리(운영분석) 문제들을 최신 기술인 강화학습으로 해결하고자 하는 움직임이 많음

예를 들어, 외판원 문제(TSP, Travel Salesman Problem)이나 배낭 문제(Knapsack Problem)를 강화학습으로 푸는 연구임

라. 의사결정

인공지능 지휘관, 인공지능 참모와 같이 인간 지휘관의 의사결정을 돕거나 인간을 대신하여 이하 결정을 내리는 것을 포함함

이 분야의 발전도 상당히 도전적인데, 전투에서의 의사결정이 즉각 결과로 이어지지 않고, 전투에서의 결정이 '술'적인 측면이 강하다는 점에서 비롯함

전투 의사결정 강화학습은 2 대 2 전투나, 1 대 1 전투기 대결과 같은 제한적인 분야에서만 실증되었음

다만, 최근 범용인공지능(AGI, Artificial General Intelligence)이 기술적으로 불가능하지 않다는 연구가 나오면서 기대를 갖게 함

마. 워게임 CGF 자동화

워게임 CGF는 워게임 안에서 전투를 하는 객체인데, 최근 CGF의 자동화 모의가 중요한 토픽으로 대두되고 있음

CGF를 자동화하기 위해서는 규칙 기반 방법론, 에이전트 기반 방법론과 함께 강화학습이 사용될 수 있음

워게임은 하나의 전투 모델로서 강화학습 구현 환경이 될 수 있기 때문에, 이 분야 연구가 더 중요해지고 있음

제4절 정책적 제언

1. 정책 제언

가. 싸우는 개념과 기술의 동시 발전

소요군으로 대표되는 군사전략가와 방산 업체 또는 학교 및 연구 기관으로 대표되는 기술자들의 간극은 생각보다 큼

기술자들은 소요군의 '요구사항'을 모르고 군사전략가들은 기술을 모르기 때문에 생기는 간극임

특히, 기술이 세분화될수록 요구사항, 즉 싸우는 방법이 구체화되는 것이 중요함

나. 강화학습을 위한 환경 확보

강화학습은 연산량이 방대해 높은 리소스를 필요로 하는데, 군 관련 기관에서는 이를 충분하게 구비하고 있지 못한 것이 현실임

보안에 저촉이 되지 않는 범위에서 독립적인 장비를 갖추던지, 클라우드 구독 서비스 지원 등을 통한 환경 확보에 대한 관심이 요구됨

다. 효과적인 거버넌스 구축

국방 기획 단계에서부터 과학자의 참여가 요구되며, 어떤 기술도 개개인이 그것을 따라잡는 것은 어렵기 때문에 거버넌스의 형태로 참여가 필요함

제3장 과학적 분석평가 방법론 연구

제1절 일반적인 과제·과업의 분석평가 방법론 개요

1. 개요

가. 프로젝트는 단일 목표하에 부여된 작업을 완성하기 위해 일정한 순서에 의해 상호 연결되어 수행되는 활동들의 조합

나. 프로젝트는 성격·규모·복잡성·평가 방법·기간 등 내·외부적인 환경에 따라 매우 다양하기 때문에 프로젝트와 과제 및 과업의 분석평가 방법론 다수

다. 본 장에서는 대표적으로 활용되고 있는 일반적인 과제 및 과업의 분석평가 방법론 중 PM(Project Management) 기반 분석평가 방법, 목표비용 기반 분석평가 방법, 성과기반 분석평가 방법을 중심으로 기술

2. 프로젝트 관리 기반 과제·과업의 분석평가 방법

가. 프로젝트 관리(Project Management : PM)는 과제 및 과업의 목표를 달성하기 위해 프로젝트를 계획·조정·실행·평가 및 완료하는 성과관리 기법

나. 국방개혁은 복잡하고 다양한 과업으로 구성되어 있기 때문에 PM 관리 요소를 활용하여 국방개혁의 수준과 진도를 평가하는 것이 효과적임.

3. 목표비용 기반 과제·과업의 분석평가 방법

가. CAIV(Cost As an Independent Variable)는 비용 독립변수로 과제·과업을 관리 및 평가하는 방법

나. 프로젝트 관리자는 CAIV 개념을 적용하여 비용·성능·일정 간에 적절한 절충(Trade-Off) 방안을 분석평가할 수 있음.

4. 성과 기반 과제·과업의 분석평가 방법

가. 성과관리체계(EVMS: Earned Value Management System)

EVMS는 프로젝트 관리에서 주로 사용되는 성과 측정 및 예측 도구로서 성과가치 측정방법을 이용하여 성과·일정·비용 목표를 조정·통제하는 통합된 관리체계를 구축하고 적용하는 개념

프로젝트의 진척 상황을 파악하고, 프로젝트의 예산과 일정이 원래의 계획대로 진행되고 있는지 평가하는 데 유용한 방법

제2절 단일 과제·과업에 대한 평가지표 선정 및 추진진도 평가 방법론

1. 단일과제 추진진도 평가 방법론의 이해

가. 단일 과제와 과업의 추진 진도 평가를 위한 대표적인 방법은 PERT(Program

Evaluation and Review Technique), CPM(Critical Path Method), GERT(Graphical Evaluation and Review Technique), Monte Carlo Simulation에 의한 변동관리 방법 등이 있음.

나. PERT와 CPM은 활동 간의 연관성을 고려하면서 프로젝트를 기획·관리하며 통제할 수 있는 효율적인 프로젝트 관리기법

다. PERT는 불확실한 프로젝트에서 일정 계획 수립 및 관리에 유용하고, 각 과업의 일정 변경이 전체 프로젝트 일정에 미치는 영향에 대한 예측 가능

라. CPM은 프로젝트 일정을 예측하고, 계획한 일정을 실제 일정과 비교하고, 일정을 추적하고 제어하는데 사용

제3절 성격이 다른 과제·과업에 대한 그룹화 및 평가지표 선정 방법론

1. 개요

가. 성격이 다른 과제 및 과업을 다수 포함한 추진계획에 대한 그룹화 방법론 및 평가지표 선정 방법은 평가 결과의 정량화 가능성에 따라 정량·정성적 분석 방법으로 분류하는 방법, Delphi, 프로젝트 관련자 의견 수립, 설문조사 등 전문가 의견수렴 방법이 있음.

2. 분석방법에 의한 그룹화 및 평가지표 선정 방법

가. 분석방법에 의한 그룹화 및 평가지표 선정 방법은 과업 평가 기준과 각 과업에 대한 데이터 분석 가능성을 평가하여 정량적 과업과 정성적 과업, 정량 및 정성적 방법, 기타 방법이 혼합된 그룹으로 분류하는 방법임.

1) 정량적 과업 유형은 전력 증강·부대 개편 등 과업의 목표와 완료 기준이 가시적이고, 사업추진 절차가 국방기획관리체계를 준용할 수 있는 과업

2) 정성적 과업 유형은 전략·작전개념 발전, 법령·업무 수행체계 개선 등 과업의 목표와 완료 기준이 개념적이고, 사업추진 절차가 일반적인 보고체계 또는 교리발간 절차를 준용할 수 있는 과업

3) 정량 및 정성 병행 과업 유형은 과업의 하위 업무인 세부과업들이 단일 유형이 아닌 정량과 정성 유형이 혼합된 과업

4) 별도 과업 유형은 과업별 성과평가 지표가 각각 다르게 구성되어 정량·정성·정량 및 정성 병행 유형에 속하지 않는 과업

제4절 성격이 다른 과제·과업에 대한 그룹 단위 및 전체 종합평가 방법론

1. 복합과제 종합평가 방법론의 이해

가. 성격이 다른 과제 및 과업을 다수 포함한 추진계획에 대한 그룹 단위 전체 과제 및 과업에 대한 종합평가는 각 그룹에 대해 가중치를 부여한 뒤 평가하는 방법이 일반적이다.

나. 가중치를 부여하는 방법은 ‘AHP(Analytic Hierarchy Process, 분석적 계층과정)’, ‘ANP(Analytic Network Process, 분석적 네트워크 과정)’가 있음.

1) AHP는 계층구조를 구성하는 요소 간의 쌍대비교(Pair-wise Comparison)에 의한 판단을 통하여 평가자의 지식, 경험 및 직관을 포착하고자 하는 방법. AHP를 통해 성격이 다른 과제 및 과업에 대해 상대적 중요도를 정량화하여 유형이 다른 세부 과업으로 구성된 전체 과제를 종합적으로 평가

2) ANP는 네트워크 구조에서 의사결정 문제를 해결하는 AHP의 일반화된 형태로써 각 요소의 독립을 가정하는 계층구조 대신 요소들 간의 상호작용을 고려할 수 있는 네트워크 구조를 사용. 따라서 ANP는 AHP보다 더 복잡한 추진계획에서 과업의 가중치 부여 가능

다. 전체 과제 및 과업에 대한 종합평가 방법은 가중치를 전체 계층구조의 요소로 활용해서 종합하는 방법과 일정과 비용 관리에 초점을 둔 EVMS 방법 등이 있음.

1) EVMS(Earned Value Management System)

가) EVM(Earned Value Management)은 프로젝트의 성과를 측정하고 예산과 일정을 추적하는 프로젝트 관리 방법으로 프로젝트 일정, 비용 및 기타 요인을 평가하여 프로젝트의 성과를 수치화함으로써 비용과 예산을 최적화

나) EVMS에서는 프로젝트의 일정과 비용 성과를 시각적으로 표현하는 방법으로 프로젝트의 상태를 일정성과지수(SPI : Schedule Performance Index)와 비용성과지수(CPI : Cost Performance Index)를 사용

제5절 사례 적용 결과

1. 개요

가. 국방개혁은 복잡하고 다양한 요소들이 관련되어 있으므로 정량적 접근과 정성적 접근을 적절히 활용하여 논리적으로 타당하면서 합리적으로 평가하는 것이 중요함.

나. 그동안 국방개혁 관련 연구는 추진계획을 효율적으로 관리할 수 있는 관점보다는 특정 분야 또는 이슈를 중심으로 이루어졌으며, 특히 정량적 평가보다 정성적 평가 관점에서 접근한 사례가 많았음.

다. 현재 국방부에서 추진하고 있는 국방혁신 4.0은 기존 수행한 국방개혁과 개념이 같으며, 앞에서 기술한 여러 과제가 혼합된 대형 프로젝트와 성격이 같음.

라. 따라서 본 절에서는 국방혁신 4.0에 대해 과학적 분석평가 방법을 적용한 사례를 제시하며, 주요 내용은 다음과 같음.

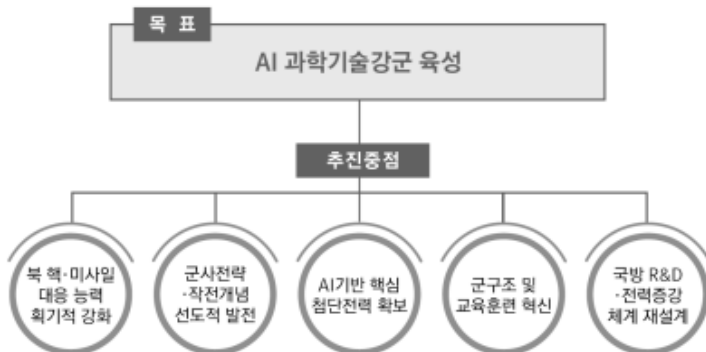
- 1) 국방혁신 4.0 일반사항
- 2) 국방혁신 4.0에 대해 성과평가 지표 선정 방법 적용 결과
- 3) 국방혁신 4.0 과제·과업에 대해 그룹화 방법 적용 결과
- 4) 국방혁신 4.0 분야·과제에 대해 가중치 결정 방법 적용 결과
- 5) 국방혁신 4.0 과업에 대해 가중치 결정 방법 적용 결과
- 6) 국방혁신 4.0 전체 과제·과업에 대해 성과평가 방법 적용 결과

2. 국방혁신 4.0 일반사항

가. 국방혁신 4.0은 유례없는 도전에 직면한 국방 현실과 기존의 개혁방식으로는 이러한 도전에 대응하기에는 한계가 있다는 국방 전략환경에 대한 평가를 통해 혁신적인 변화를 추구하는 것이 목표

나. 국방혁신 4.0은 ‘AI 과학기술강군 육성’이라는 목표로 미래 군의 변화를 이끌어갈 다양하고 성격이 다른 추진계획들이 아래 그림과 같이 5개 추진 중점(분야)으로 구성되어 있으며, 그 아래 16개의 과제와 44개의 과업으로 구성

다. 국방혁신 4.0의 최종상태는 북한 핵·미사일 위협에 대한 대응능력을 획기적으로 강화하여 대북 억제력을 달성하고 AI·무인 로봇 등 첨단 과학기술 기반 경쟁우위의 작전 수행능력 구비



3. 국방혁신 4.0에 대해 성과평가 지표 선정 방법 적용 결과

가. 문헌 고찰, 국방혁신 4.0 관계자 인터뷰 결과 등을 통해 성과평가 항목을 중요성·긴급성·효과성으로 선정

1) 중요성(Importance) : 국방혁신 4.0 최종상태 달성과 'AI 과학기술 강군 육성' 목표 달성에 중요한 정도

2) 긴급성(Urgency) : 국방환경 도전요인의 해소와 국방혁신 4.0 목표 및 최종상태 달성을 위해 우선 추진해야 하는 정도

3) 효과성(Effectiveness) : 국방환경이 직면한 도전요인을 해소하고, 국방혁신 4.0 최종상태와 목표 달성에 효과적으로 기여하는 정도

나. 국방혁신 4.0 과업별 성과평가 항목은 프로젝트 관리 주요 요소와 국방혁신 4.0 정책효과에 대한 성과를 평가할 수 있는 항목 선정

성과평가 항목		내 용
프로젝트 관리	목표 관리	① 과업의 목표(완료 조건)가 정의되었는가?
	범위 관리	① 과업의 세부업무별 우선순위가 부여되었는가? ② 과업의 범위가 구체적으로 정의되었는가?
	일정 관리	① 과업 추진을 위한 마스터플랜이 수립되었는가? ② 과업 추진 진도관리가 되었는가?
	원가 관리	① 계획된 예산 범위에서 과업을 수행할 수 있는가?
	인적자원 관리	① 과업의 세부업무별 인원의 전문성은 유지되고 있는가?
	의사소통 관리	① 내·외부 유관부서와 소통하고 있는가?
	위험 관리	① 과업의 위험요소에 대한 대응계획이 수립되었는가? ② 위험요소에 대해 적절하게 대응하고 있는가?
	조달 관리	① 과업 추진을 위한 예산 확보 계획은 수립되었는가? ② 과업 추진간 예산이 확보되었는가?
정책 효과	구체적 성과 발생	① 과업 추진결과가 실제 시행되고 있는가?
	상위목표 달성에 기여	① 과업 추진현황이 과제의 목표 및 최종상태, 국방혁신 4.0 목표 및 최종상태 달성에 기여했는가?

다. 과업별 성과평가 항목은 10% 단위 구간으로 표시됨. 따라서 10% 내에서의 구간별 진도율은 평가지표 달성 시 구간별 최대 진도율을 부여하고, 미달성 시 다음과 같은 방법으로 '0% 초과 ~ 10% 미만'으로 부여

4. 국방혁신 4.0 과제·과업에 대해 그룹화 방법 적용 결과

가. 정량적 과업과 정성적 과업, 정량 및 정성적 과업, 별도 과업 유형으로 분류

계	정량적 유형	정성적 유형	정량·정성 병행 유형	별도 유형
44개	13개	13개	7개	11개

〈과업 유형 분류 결과 예시〉

중점·과제·과업		과업 유형			
		정량	정성	병행	별도
V.	국방 R&D-전력증강체계 재설계				
㉓	전력증강 프로세스 재정립				
	① 신속·효율적 국방획득체계 개선		○		
	② 각 군 주도 하 맞춤형 연구개발사업 신설			○	
	③ 국방부 정책기능 강화 및 거버넌스 구축		○		
㉔	혁신·개방·융합의 국방 R&D 체계 구축				
	① 혁신·개방·융합의 국방 R&D 체계 정립		○		
	② 한·미 국방과학기술 협력 강화		○		
	③ 국방 R&D 예산 확대			○	
㉕	국방 AI 기반 구축				
	① 양질의 국방데이터 구축·관리			○	
	② 초고속·초연결 네트워크 구축	○			
	③ 국방 AI 센터 창설 및 발전 여건 구축		○		
	④ AI 기반 군수혁신 및 인재관리		○		
㉖	국방과학기술 혁신을 위한 조직개편				
	① 국방과학기술 혁신을 위한 조직개편		○		

5. 국방혁신 4.0 중점·과제에 대해 가중치 결정 방법 적용 결과

가. AHP 설문으로 국방혁신 4.0 중점·과제에 대한 성과평가 항목의 가중치 결정
 나. 가중치 결정 모형에 따라 AHP 설문지를 구성하여 국방혁신 4.0 군 내·외부 전문가 39명을 대상으로 의견을 수렴하여 가중치 결정

다. 중점·과제별 가중치는 Bottom-up 개념에 의해 하위에서 상위 계층으로 종합
 1) 성과평가 항목 가중치

구분	계	중요성	긴급성	효과성
가중치(%)	100.00	31.78	45.37	22.85

2) 중점·과제별 가중치

중점	가중치(%)	과제	가중치(%)
1. 북 핵·미사일 대응능력 획기적 강화	31.33	① 한국형 3축 체계 운영태세 강화	13.16
		② 한국형 3축 체계 능력 획기적 강화	12.30
		③ 전략사령부 창설 및 발전	5.87
- 종 략 -			
5. 국방 R&D·전력증강체계 재설계	18.45	⑬ 전력 증강 프로세스 재정립	5.75
		⑭ 혁신·개방·융합의 국방 R&D 체계 구축	3.61
		⑮ 국방 AI 기반 구축	5.91
		⑯ 국방과학기술 혁신을 위한 조직 개편	3.18
계	1.00	계	1.00

6. 국방혁신 4.0 과업에 대해 가중치 결정 방법 적용 결과

가. 과업별 가중치는 과제 관점에서 평가한 과업의 중요도를 과업별 가중치로 활용

과업 번호	분야·과제·과업	가중치	계	중요성	긴급성	효과성
I. 북 핵·미사일 대응능력 획기적 강화						
① 3축체계 운영태세 강화						
1	① 운영개념 및 작전수행체계 발전	0.60	18	6	6	6
2	② 연습·훈련 발전 및 전문인력 육성	0.40	12	4	4	4
③ 전략사령부 창설 및 발전						
7	② 전략사령부의 진화적 발전	...	...	...	...	...

7. 국방혁신 4.0 전체 과제·과업에 대해 성과평가 방법 적용 결과

가. 국방혁신 4.0 성과평가를 위한 계층구조는 현재 추진 중인 국방혁신 4.0과 동일하게 5개 중점·16개 과제·44개 과업으로 구성

나. 과업은 사업추진 방법을 고려한 정량적 과업, 정성적 과업, 정량 및 정성적 병행 과업, 별도 과업의 3개 유형으로 구분해서 평가

다. 국방혁신 4.0 전체 성과는 Bottom-up 개념에 의해 과업별 성과가 과제별 성과에 합산되고, 이 결과가 분야별 성과에 합산되어 최종적으로 국방혁신 4.0의 성과에 종합

라. 추진 성과와 예산 사용 현황은 직관적으로 확인할 수 있도록 EVMS 방법의 시각화 방법인 Bull's Eye Chart 기법을 활용해서 시각화

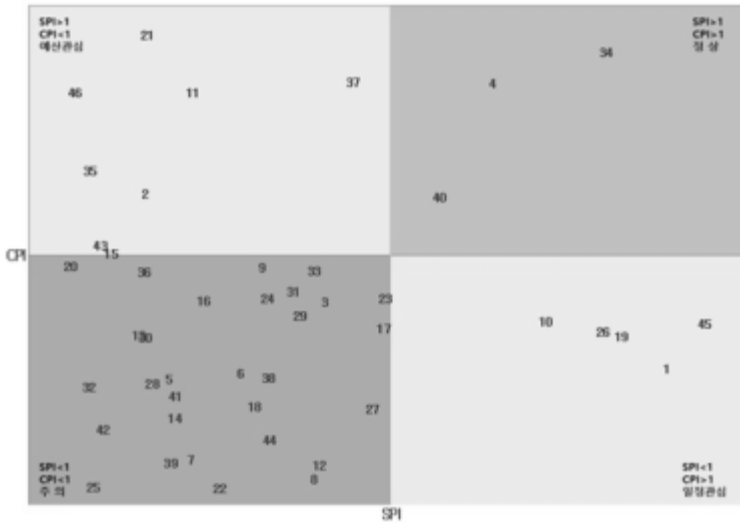
1) 과업별 계획 일정 계획 대비 추진현황을 지수화한 일정성과지수(SPI)를 정의하고, 과업별 예산 소요 대비 획득 현황을 지수화한 예산성과지수(CPI)를 정의

SPI > 1, 일정 계획 대비 성과 우수	CPI > 1, 예산 소요 대비 초과 획득
SPI < 1, 일정 계획 대비 성과 미흡	CPI < 1, 예산 소요 대비 적게 획득
SPI = 1, 일정 계획대로 진행	CPI = 1, 예산 소요만큼 획득

마. Bull's Eye Chart를 이용한 과업별 성과평가 결과 예시

구분	과업번호	과업	CPI	SPI	과업별 성과 계획
과제1	1	윤호개념 및 직권수령체계 발전	1.763	0.906	52%
	2	연승훈련발전 및 정량인력 육성	0.320	1.245	55%
	3	북핵 WMD 미사일 조기 무력화를 위한 감시 및 표적 타격능력 확보	0.816	0.788	94%
과제2	4	북핵 대응 미사일 방어체계 구축	1.279	1.710	75%
	5	압도적 대항공성포화 능력 강화	0.365	0.465	24%
과제3	6	전략적 억제 대응을 위한 전략사형부 창설	0.581	0.487	66%
	7	전략사형부의 진화적 발전	0.444	0.127	70%
과제4	8	미래 안보환경에 부합하는 군사전략 발전	0.706	0.043	92%
과제5	9	협동무기 및 유무인 복합중심의 '전역적 통합작전' 개념 발전	0.643	0.936	78%
	10	새로운 단계적전개념 발전	1.426	0.705	82%
과제6	11	유무인 복합전투체계 단계적 진화	0.450	1.673	13%
	12	유무인 복합 공격시스템 구축	0.801	0.101	73%
	13	네트워킹 연동표준 구축	0.301	0.647	73%
	14	소요 주파수 확보 및 활용기술 개발	0.401	0.300	43%
	15	보안 암호체계 구축	0.225	0.981	94%
	16	드론 통합관제체계 구축	0.481	0.795	55%
과제7	17	합동성에 기반한 국방우주력 발전	0.979	0.679	66%
	18	사이버작전 수량 고도화를 위한 개념 발전 및 전력 구축	0.621	0.347	71%
	19	전자기작전 수량을 위한 개념 발전 및 전력 구축	1.635	0.645	10%
	20	합동전 영역 지휘통제(MADC2) 개념연구 및 기반체계 구축	0.113	0.941	39%
과제8	21	인공지능(AI) 기반 지휘통제체계 발전	0.925	1.916	43%
	22	지속적으로 추진 가능한 전문조직 발전	0.526	0.007	6%
	23	미래 연합방위 및 전 영역 통합작전을 고려한 지휘구조 발전	0.984	0.902	96%
과제9	24	AI 기반 유무인 복합전투체계 중심의 부대구조 발전	0.657	0.904	31%
	25	미래 상비병력 규모 판단 및 국방인력 구조 발전	0.175	0.010	51%
	26	협단과학기술 기반의 전력구조 발전	1.587	0.665	18%
과제10	27	실전적 훈련을 위한 중단훈련체계 구축	0.949	0.337	27%
	28	과학화훈련장 개선 및 국방융합훈련장 구축	0.338	0.443	37%
과제11	29	지역방위사단 개편과 연계한 예비군 구조 재설계 및 제도 개선	0.746	0.730	72%
	30	훈련장 과학화 및 예비군훈련체계 개선	0.318	0.640	10%

과업별 SPI, CPI



Bull's Eye Chart

제6절 기대효과

가. 그동안 국방개혁 관련 연구는 추진계획을 효율적으로 관리할 수 있는 관점보다는 특정 분야 또는 이슈를 중점으로 이루어졌으며, 특히 정량적 평가보다 정성적 평가 관점에서 접근한 사례가 많음.

나. 국방개혁은 복잡하고 다양한 요소들이 관련되어 있기 때문에 정량적 접근과 정성적 접근을 적절히 활용하여 합리적으로 평가하는 것이 중요

다. 본 연구는 국방혁신 4.0과 같은 대규모 프로젝트의 추진진도 및 성과 산출 방법론 구축하는 방법론과 사례를 보임.

라. 본 연구결과는 국방부·합참·각 군에서 진도평가 및 성과 측정에 활용 가능

제1장 연구 개요

제1절 개요

1. 연구 수행

가. 연구 기간 : 2023. 6. 7. ~ 11. 6.(5개월)

나. 수행 기관 : 국방대학교 산학협력단(연구책임자 교수 이용복 등 4명)

2. 연구 배경

가. 인공지능 강화학습 국방적용 분야

1) 현재 사회 전 분야에서 인공지능 기술이 활용되고 있으며 국방 및 안보 영역에서도 인공지능 기술을 활용해야 할 수요가 크게 증가하고 있다.

2) 특히, '23년 3월 우리 정부에서 발표한 「국방혁신 4.0 기본계획」에 북 핵·미사일 대응능력 획기적 강화 등을 포함한 국방혁신의 5개 과업 중 하나로 「AI 기반 핵심 첨단전력 확보」를 선정하기도 하였다.

3) 군은 “국방 AI 센터 창설”, “AI 기반 유·무인 복합전투체계 구축” 등 국방혁신의 핵심 세부 과업을 체계적으로 추진하고 있으며, 이에 따라 우리 군이 인공지능 기술을 기반으로 하는 최첨단 과학기술군으로 거듭날 것으로 기대하고 있다.

4) 다만, 군이 추구하는 목표 달성을 위해서는 상당한 수준의 인공지능 기술이 필요하다는 것이 일반적인 과학자들의 시선이며, 현재 기술성숙 수준은 이에 현저히 미치지 못한다는 의견도 존재한다.

5) 따라서, 국방 영역에서의 지속적인 인공지능 관련 연구가 요구되고 있다.

6) 국방 분야에서 활용할 인공지능 기술은 민간 영역에서의 인공지능 기술 성장에 맞추어 함께 성장하고 있으며, 특히 인공지능 기술의 한 분야인 지도학습(supervised learning)을 이용하는 영상기반 표적 식별, 검출, 추적 기술은 높은 수준으로 성숙하였다고 볼 수 있다.

7) 어떤 과학기술의 성숙도를 가늠할 수 있는 Gartner 社의 Hype Cycle¹⁾에서도 컴퓨터비전(Computer Vision) 기술을 인공지능 기술 중 가장 성숙한 기술로 분류하고 있다.

1) 22년 Artificial Intelligence Hype Cycle : Gartner 홈페이지(gartner.com)

8) 반면, 인공지능 기술의 또 다른 분야인 강화학습(Reinforcement Learning) 기술은 상대적으로 기술이 미성숙한 상태이며, 국방 분야에서도 이 기술을 어떻게 활용할 것인가에 대한 구체적인 방향성이 정립되지 않고 있다.

9) 강화학습 기술은 알파고(AlphaGo)의 기반 기술로 널리 알려져 있으며, 최신 자율주행차를 학습시키는 등 다양한 의사결정(decision making) 영역에서도 활발하게 활용되고 있기 때문에 국방의 영역에서도 적용할 수 있는 분야가 상당할 것으로 예상된다.

10) 이러한 배경에 따라 본 보고서에서는 인공지능 강화학습 기술의 최신 연구 현황을 조사하고, 국방 및 안보 분야에서 해당 기술이 활용된 사례를 조사한다. 궁극적으로는, 국방혁신 4.0의 목표 달성을 위하여 강화학습 기술을 어떻게 활용해야 하는지에 대한 정책적인 제안을 제시하고자 한다.

나. 과학적 분석평가 방법론 분야

1) 국방혁신 4.0 및 각 군의 군사혁신 과제 등 미래 군의 변화를 이끌어갈 다양한 추진계획들이 수립되고 있다. 따라서 이러한 과제 및 과업에 대한 분석평가 시 객관적이고 과학적인 방법을 적용해서 신뢰성 있는 추진 진도 및 성과 산출이 필요하다.

2) 특히 국방혁신 4.0과 같은 대형 프로젝트의 성과를 평가하기 위한 동일 성격의 여러 과제에 대한 추진 진도와 성과 산출을 위한 평가지표들뿐만 아니라, 성격이 다른 여러 과제와 과업들이 혼합되어 있는 추진계획들에 대한 분석평가 방법론 개발 요구가 증대되고 있다.

3) 그러나 그동안은 개별 과제 평가에 대한 분석평가 방법론은 일부 연구된 바가 있으나, 여러 과제와 과업을 포함하고 있는 부분을 객관적이면서 종합적으로 분석평가할 수 있는 방법론 연구는 부족한 것이 현실이다.

4) 따라서 성격이 다른 여러 과제와 과업들을 포함하고 있는 추진계획에 대해서 과제 및 과업 성격을 파악하여 평가지표를 그룹화하고 표준화하여 과학적인 평가도구를 적용하는 방법론 연구가 필요하다. 이러한 배경에 따라 본 보고서에서는 국방혁신 4.0의 성과를 평가할 수 있는 방법론을 제시하고자 한다.

3. 연구 목적 (과제 제기부서 요구사항)

가. 인공지능 강화학습 국방적용 연구 분야

1) 인공지능 강화학습 기술의 국내·외 최신 연구 동향

- 2) 인공지능 강화학습 기술의 국내·외 최신 적용 사례
- 3) 강화학습의 국방에서의 적용분야 탐색
- 4) 정책적 제언

나. 과학적 분석평가 방법론 분야

- 1) (요구1) 일반적인 과제 및 과업의 분석평가 방법론 조사
- 2) (요구2) 단일 과제와 과업에 대한 평가지표 선정 및 추진 진도 평가 방법론 조사
- 3) (요구3) 성격이 다른 과제 및 과업을 다수 포함한 추진계획에 대한 그룹화 방법론 및 평가지표 선정 방법론 연구
- 4) (요구4) 성격이 다른 과제 및 과업을 다수 포함한 추진계획에 대한 그룹 단위 종합평가 및 전체 과제 및 과업에 대한 종합평가 방법론 연구
- 5) (요구5) 요구3과 4의 타당성 입증을 위한 구체적인 사례에 적용한 결과를 제시

4. 주요 연구내용 (인공지능 강화학습 국방적용 연구 분야)

가. 인공지능 강화학습 국방적용 연구 분야

- 1) 강화학습 국방적용, 과학적 분석평가 방법론 관련 최신 연구동향 고찰
- 2) 강화학습 국방적용, 과학적 분석평가 방법론 관련 최신 적용 사례 연구
- 3) 분야별(강화학습 국방적용, 과학적 분석평가 방법론) 연구 수행
- 4) 연구 결과에 대한 국방에서의 적용 분야 탐색(강화학습 국방적용 분야)
- 5) 연구 결과 타당성 입증을 위한 구체적인 사례 적용 결과 제시(과학적 분석평가 방법론 분야)
- 6) 정책적 제언 제시

5. 주요 연구내용 (과학적 분석평가 방법론 분야)

가. 일반적인 과제 및 과업의 분석평가 방법론 조사

- 1) PM(Project Management), 체크리스트 방법, 자체 평가 방법, 매트릭스 평가법, 복합평가법을 중심으로 각 방법론의 장·단점 등 조사

나. 단일과제와 과업에 대한 평가지표 선정 및 추진 진도 평가 방법론 조사

1) PERT, CPM, GERT를 중심으로 각 방법론의 장·단점 등 조사

다. 성격이 다른 과제 및 과업을 다수 포함한 추진계획에 대한 그룹화 방법론 및 평가지표 선정 방법론 연구

1) 정량·정성적 분류 방법, 의견수렴방법(Delphi, 프로젝트 관련자 의견 수렴, 설문조사)을 이용한 그룹화 및 평가지표 선정 방법론 연구

라. 성격이 다른 과제 및 과업을 다수 포함한 추진계획에 대한 그룹 단위 종합평가 및 전체 과제 및 과업에 대한 종합평가 방법론 연구

1) 'AHP(Analytic Hierarchy Process, 분석적 계층 과정)', 'ANP(Analytic Network Process, 분석적 네트워크 과정)'를 이용한 종합평가 방법론 연구

마. 요구3과 4의 타당성 입증을 위한 구체적인 사례에 적용한 결과를 제시

1) 연구결과를 국방혁신 4.0 추진계획에 적용하여 성과평가한 사례 제시

바. 연구 기대효과 및 정책적 제언 제시

제2장 인공지능 강화학습 국방적용 연구

제1절 인공지능 강화학습 기술의 국내·외 최신 연구동향

1. 강화학습의 이해

강화학습 기술의 최신 연구 동향을 살펴보기에 앞서 먼저 강화학습이 무엇인지에 대해 간략하게 설명한다.

강화학습(Reinforcement Learning)은 머신러닝(Machine Learning) 기술의 한 분야로, 학습을 하는 에이전트(agent)가 환경(Environment)과의 상호작용을 통해 의사결정을 배우는 방법이다. 에이전트, 즉, 인공지능 학습의 대상이 되는 객체는 자신이

선택한 결정에 대해 환경으로부터 보상(Reward) 또는 패널티(Penalty)라는 피드백(Feedback)을 받으면서, 궁극적으로는 보상의 값이 커지는 방향으로²⁾ 학습을 이어간다.

간단한 예로, 주인에게 손을 내미는 강아지를 훈련시킨다고 가정하자. 강아지가 손을 내밀고 또는 내밀지 않는 행동(Actions)에 따라 간식이라는 보상을 주게 되면, 에이전트에 해당하는 강아지는 끊임없는 환경과의 상호작용(간식을 주는 주체가 누구이며, 내가 간식을 받게 되는 행동이 무엇인지 등)을 통해 궁극적으로 주인에게 손을 내미는 행동을 배우게 되는 원리이다.

위에서 설명한 몇 가지 기본 요소들은 강화학습 이론에서 매우 중요하게 다루어지는데, 구성 요소를 다음과 같이 요약할 수 있다.

가. 에이전트(Agent) : 에이전트는 환경 속에서 행동을 선택하고 보상을 받는 객체이다. 쉽게, 인공지능을 학습하는 대상이라고 생각할 수 있다. 에이전트의 주된 목표는 장기적으로 보상을 최대화하기 위한 행동을 선택하는 것이다.

나. 행동(Action) : 에이전트가 현재 시점에서 취할 수 있는 선택들의 집합이다. 행동은 에이전트가 무엇인지에 따라 다양하게 정의될 수 있다. 예를 들어, 에이전트가 비교적 간단한 비디오 게임 속 플레이어라면 동-서-남-북과 같은 방향으로의 이동, 또는 점프하기와 같이 단순한 행동(공학에서는 이를 이산적인(discrete) 행동으로 표현)으로 정의되었지만, 위에서 설명한 현실 세계의 강아지라고 한다면 강아지가 취할 수 있는 수만 가지의 행동으로 정의될 수도 있다. 이 경우 행동은 연속(continuous)형으로 정의된다고 할 수 있다.

다. 환경(Environment) : 에이전트가 속해 있고 행동을 취하며 지속적으로 상호작용하는 물리적 또는 추상적인 공간이다. 환경은 에이전트에게 현재의 상태를 제공하고 에이전트의 행동을 받아들여 그 결과를 반환한다. 예를 들어, 비디오 게임 속 플레이어의 환경은 해당 스테이지의 장애물, 적 등으로 구성되어 있고, 체스 게임의 환경은 체스 판과 상대의 말이 될 것이다. 반면, 손을 내미는 강아지의 환경은 현실의 환경을 그대로 가져간 복잡한 공간이 될 수 있다.

라. 상태(State) : 환경 속에서 특정한 시간(또는 Step)의 형태(position)를 표현하

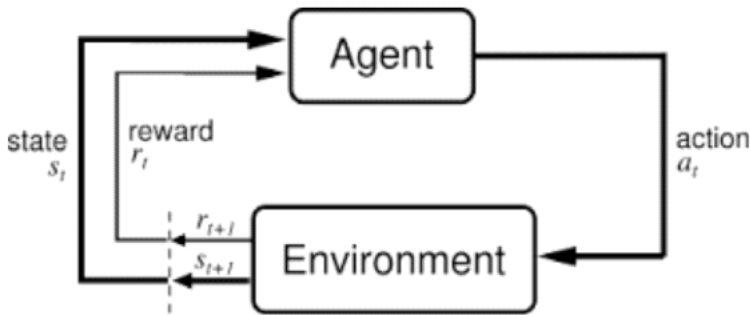
2) 정확하게는, 특정한 시간의 누적 보상의 기대값(Expected Cumulative Reward)을 최대화 하고자 함.

는 개념이다. 예를 들어, 강아지의 실제 환경은 여러 명의 주인과 많은 방, 여러 가지 간식 등으로 꽤 복잡하게 구성되어 있겠지만, 강아지가 손을 내미는 방법을 학습하는 그 시간 그 장소에는 앞에 있는 주인 한명과 그때 자신이 하는 행동으로 구성된 비교적 '간략한' 환경을 관찰하고 있을 것이다(이 때문에, 어떤 연구자들은 상태를 환경을 이해하기 위한 창(window)으로 표현한다). 일반적으로 상태는 벡터(vector)등으로 표현되며 이것은 곧 세상의 모든 복잡한 현상들을 상태 정보로서 포함하기는 어렵다는 것을 의미하기도 한다. 즉, 에이전트의 학습에 중요한 영향을 끼치는 것들을 모아 놓은 개념이라고 할 수 있다.

마. 보상(Reward) : 보상은 에이전트가 특정한 상태에서 선택한 행동을 통해 얻게 되는 피드백(feedback)을 의미한다. 다만, 보상을 받게 되는 시점과 보상의 정도 등은 가변적으로 정의될 수 있다. 예를 들어, FPS(First Person Shooting) 비디오 게임에서 플레이어가 적 한명을 제압하는 경우 그 즉시 보상을 받을 수도 있지만(이것을 immediate reward 라고 부른다), 체스와 같이 에피소드로 구성된 게임에서는 지금 막 적의 말을 잡은 행위보다는 그러한 선택들이 모여서 최종적으로 승리를 해야 하는 궁극적인 목표가 있기 때문에, 즉각적인 보상을 주기 보다는 최종적으로 게임에서 이겼을 때 보상을 하기도 한다(이것을 delayed reward 라고 부른다).

바. 정책(Policy) : 정책은 에이전트가 현재 상태에서 자신의 행동을 선택하게끔 만드는 일종의 전략이다. 다시 말해, 어떤 상태에서 에이전트가 취할 수 있는 행동은 여러 개가 있는데, 보상을 극대화 한다는 측면에서 최선이라고 부를 수 있는 행동을 선택하는 것을 좋은 정책으로 간주하고, 이것을 계산하고 정의해 놓은 것이 바로 정책이다. 이 정책은 에이전트가 환경과 상호작용하면서 계속 변화하게 되는데, 당연히 보상값이 커지는 방향으로 변화하고자 할 것이며 이 과정이 바로 에이전트가 학습을 하는 모습이다.

이와 같은 강화학습 구성 요소 소개를 바탕으로, 강화학습의 기초 원리를 표현한 것이 <그림 2-1>이다. 특정한 시간 t 에 에이전트는 어떤 행동(a_t)을 선택하고 이 행동은 에이전트가 속한 환경과 상호작용을 한다. 일반적으로 우리는 환경이 어떻게 작동하는지 알 수 없기 때문에(이것을 Black-box 환경이라고 부른다) 에이전트는 환경을 스테이트(s_t)를 통해 이해하며(또는 정의하며) 환경에서 주어지는 보상(r_t)을 최대화 하기 위해 다음 행동을 다시 선택한다. 이 과정은 보상을 최대화 하는 정책이 만들어졌을 경우(수렴)까지 반복된다.



〈그림 2-1〉 강화학습의 기초 개념 다이어그램

강화학습은 다른 머신러닝 방법론과 다르게 이처럼 시간이라는 도메인을 중요하게 다루고 있다. 특정한 시간에 존재했던 “상태-행동(state-action)”의 쌍은 에이전트가 행동을 학습하는 중요한 단서가 되기 때문이다.

예를 들어, 주인이 간식을 손에 들고 있는 특별한 상태에서 강아지가 손을 내미는 행동을 하는 것이 중요한 단서가 되는 것이지, 주인이 간식을 손에 들지 않고 관심이 없는데 강아지 손 내미는 행동은 의미가 없는 것이 되는 것이다. 지금까지 에이전트는 보상의 합을 최대화하기 위한 행동을 선택한다고 하였는데, 앞서 설명한 바와 같이, 즉각적으로 주어지는 보상 보다는 특정 에피소드가 종료된 후 알 수 있는 목표에 대한 보상이 더 중요한 경우가 많다. 다시 말해, 보상은 일종의 함수로 생각할 수 있는데, 일반적으로는, 서로 다른 시간대의 보상의 합을 더한 함수값을 계산한다. 이때, 현재 시간대에 가까운 보상에 더 큰 의미를 들지 아니면 그 반대로 정할지에 따라 가중치를 다르게 부여하는데, 이를 할인율(discount factor)이라고 부른다.

지금까지, 본 보고서에서 추가적인 설명 없이 그러나 반복적으로 사용될 강화학습의 중요한 몇 가지 기본 용어와 기초 개념에 대해 설명하였다. 이 보고서는 정책적인 수준에서 강화학습을 논의할 것이기 때문에, 이 이상의 기술적인 개념을 이해할 필요는 없다고 판단된다.

2. 강화학습의 역사

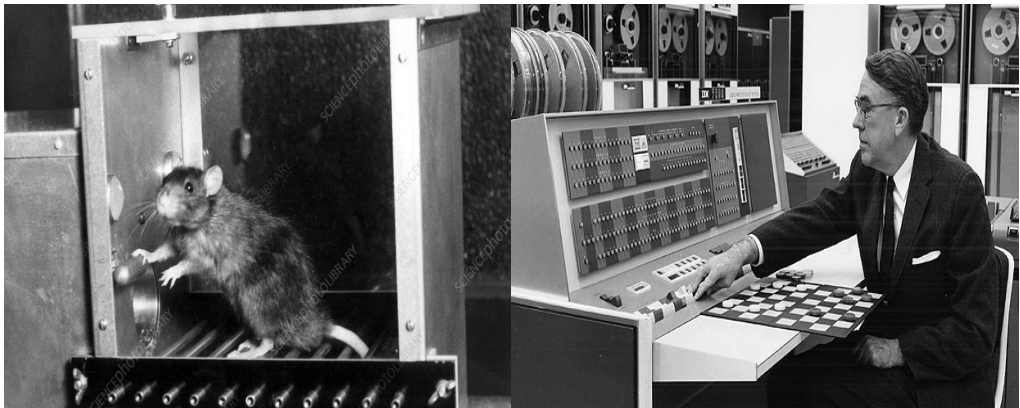
본 절에서는 앞서 소개한 강화학습의 기초 지식을 바탕으로 강화학습 기술의 역사를 간략하게 살펴본다. 과거의 역사를 살펴보는 것은, 최신 연구 동향을 이해하는데 도움을 줄 수 있기 때문이다.

가. 1950년대(태동기)

강화학습 연구의 태동기는 동물의 행동을 결정하는데 있어 피드백의 중요성을 제시한 행동주의 심리학자 스키너(B.F. Skinner)의 연구부터, 1955년에 작성된 아서 사무엘(Arthur Samuel)의 체커(Checker) 게임을 학습하는 방법에 대한 연구로 이어진다.

먼저, 스키너는 조작적 조건화(Operant conditioning)라고 불리는 연구를 통해 행동에 이어지는 보상을 변화시키면서 행동을 강화하거나 약하게 할 수 있다고 주장하였다. 이 주장은 비록 심리학의 이론이지만, 강화학습의 기본 원리를 제공했다고 평가받기도 한다.

이어서, 머신러닝을 처음으로 정의한 학자로도 잘 알려진 아서 사무엘은 보드게임의 한 종류인 체커 게임을 컴퓨터가 플레이할 수 있도록 프로그램을 제작하였다. 이 연구의 획기적인 부분은 컴퓨터(머신)에게 ‘명시적인(explicitly)’ 규칙을 제공하지 않고도 체커 게임을 학습시켰다는데 있다. 즉, 기계가 배운다(Learn)는 행위를 최초로 수행했다고 볼 수 있다. 이렇게 탄생한 IBM의 체커 프로그램은 1956년 처음 대중에게 공개되면서 화제가 되기도 하였다.



스키너의 박스

아서 사무엘의 체커 게임

〈그림 2-2〉 강화학습의 초창기 연구들

나. 1960년대-80년대

강화학습 연구는 태동기를 지나 1950년대-60년대의 리처드 벨만(Richard Bellman)이 동적계획법(Dynamic Programming) 방법론을 강화학습의 프레임워크로 발전시키면서 진일보하게 된다.

동적계획법은 최적화 방법론의 한 부류라고도 볼 수 있으며 복잡한 문제를 풀기 위

해 비교적 간단한 여러 개의 소문제(Sub-problems)를 구성하여, 전체 최적의 해를 찾는 방법론이다. 소문제를 푸는 것이 전체 문제를 푸는 것에 기여를 하기 위해서는 문제를 일반화 할 수 있어야 하는데, 이 일반화를 위해 재귀적(recursive)인 특성을 수학적식(equation)으로 표현하는 작업이 수반되어야 한다. 이러한 특성을 바탕으로, 먼 시점의 보상기대값이라고 할 수 있는 가치함수(value)의 최적의 값을 계산하는 일종의 수학적식인 벨만 방정식(Bellman Equation)이 고안되었고, 지금까지도 강화학습의 기초 원리로서 사용되고 있다.

이후, 1980년대의 리처드 서튼(Richard Sutton), 크리스토퍼 왓킨(Christopher Watkins) 등에 의해 강화학습 방법론의 근간이 되고 있는 Q-Learning, TD(Temporal Difference) 방법 등이 발전하였다. 벨만의 동적계획법과 Q-Learning의 차이는 우리가 환경(모델)에 대해 얼마나 알고 있느냐, 즉 환경에 대한 정보 수준의 차이가 있는데, 환경을 잘 알고 있는 경우에는(Model-based) 에이전트가 어떤 행동을 택했을 때 변화하는 환경과 보상 등에 대해 잘 알고 있기 때문에 큰 보상을 주는 행동을 추적할 수 있다. 반면, 환경에 대한 지식이 없는 경우(Model-free)에는 에이전트에게 주어진 보상과 변화하는 환경에 대한 짧은 이해를 근거로 삼아 최적의 정책을 찾아야 한다. 이 경우에는 탐험(Exploration)이라고 부르는 시도 행위가 매우 중요한 요소가 되며, 이러한 Model-free 조건에서 보상 예측값의 최적을 찾기 위한 방법론을 Q-Learning이라고 한다. 이처럼, 많은 탐험을 통해 보상값을 예측해야 하는 경우, 보상값의 대푯값을 어떻게 정할지, 어느 시점의 샘플 데이터를 사용할 것인지 등에 따라서 다양한 방법들이 존재한다. 그 중 에피소드가 완전히 끝날 때까지 기다리지 않고 특정한 시간대마다 기댓값을 예측하는 방법이 Temporal Difference(이하 TD)이다.

지금까지, 강화학습의 대표적인 이정표 정도로 평가받는 몇 가지 역사에 대해 설명하였다. 강화학습은 궁극적으로는 에이전트에게 어떤 행동을 배우게 만드는 일련의 수학 알고리즘이기 때문에 환경 구성의 특성, 인공지능 학습의 목적 등 수 많은 특정 환경에 따라 알고리즘 역시 다르게 적용되고 있다.

3. 강화학습의 최신 연구

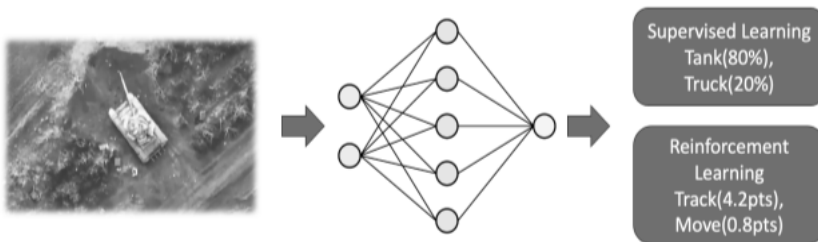
본 절에서는 앞서 소개한 강화학습의 기초 지식과 강화학습 연구의 핵심 발전 사례를 바탕으로 최신(또는 비교적 최근) 강화학습 연구의 방향을 살펴본다. 본 절의 구성 역시 보고서의 기대효과를 충실히 고려하여, 강화학습에 사전 지식이 많은 공학자보다는 정책을 담당하는 비전문가에게 유익할 수 있는 내용으로 구성하였다.

가. DRL(Deep Reinforcement Learning)

첫 번째로 소개할 DRL은 강화학습 연구에서 가장 중요하게 다루어지고 있는 분야이다. DRL은 용어 그대로 딥러닝(Deep Learning)과 강화학습(RL, Reinforcement Learning)이 합쳐진 개념이다. 정확히는, 강화학습의 틀 아래 함수 등의 계산을 위하여 딥러닝의 인공신경망(Neural Network)을 이용하는 개념이다. 여기서 핵심은 인공신경망을 가져와야만 하는 이유이다. 제1절에서 강화학습의 구성 요소인 환경, 행동, 상태, 보상, 그리고 정책 등에 대해 설명하였다. 어떤 에이전트가 좌로 이동, 우로 이동, 점프로만 행동이 구성된 게임 속에서 학습을 하는 것과, 3-D 환경에서 이동도 전 방향으로 할 수 있으며, 게임을 해결할 수 있는 방법 또한 다양한 복잡한 게임을 학습을 하는 것이 분명히 다른데, 이것은 환경과 행동의 크기(Space)가 다르게 정의되어야 하기 때문이다. 또한, 강화학습에서 다루는 환경과 상태는 우리가 예측하는 것보다 훨씬 더 방대한 경우가 많다. 예를 들어 비교적 간단한 게임인 Tic-Tac-Toe의 경우에도 상태공간의 크기는(State Space) 19,683가지에 육박하며, 바둑 게임의 상태공간의 크기는 우주의 원자 수보다도 많다고 알려져 있다.

이처럼, 주어진 환경이 복잡할 경우에는 보상을 측정하는 가치함수나 정책을 ‘근사(approximation)’해야만 하는데 이때 이 근사값을 제공하는 것이 바로 딥러닝 기술이다. 딥러닝 기술의 적용 모습은 다른 지도학습(supervised learning)에서의 적용과 크게 다르지 않다. 즉, 딥러닝 신경망은 최적의 가중치(weight)와 계수(coefficient)값을 찾는 방향으로 개선된다.

반면, <그림 2-3>에서 보는 것처럼 신경망이 도출하는 결과에는 다소 차이가 있는데, 똑같은 영상 이미지를 본다고 했을 때, 지도학습에서의 신경망은 분류기(Classifier)의 역할을 하는데 반해(예를 들어, 사진 속 객체가 전차인지 일반 차량인지를 구분하는 역할), 강화학습에서는 에이전트가 선택할 행동을 가치함수 기반으로 순위 화하는 역할을 수행한다(예를 들어, 인공지능 드론이 계속 물체를 추적하는 것이 더 좋은 보상을 주는지, 아니면 현장을 이탈하는 것이 더 많은 보상값을 주는지 등).

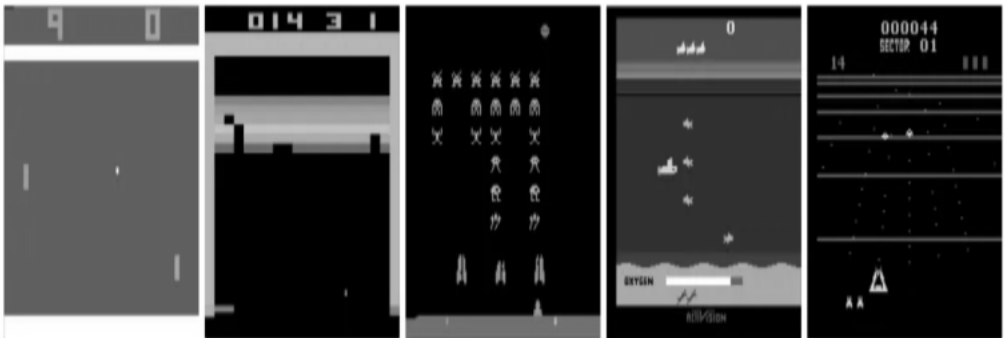


<그림 2-3> 지도학습과 강화학습의 차이점 (신경망 결과값)

DRL의 어려움은 0과 1처럼 단순하게 라벨링된 데이터를 판별하는 지도학습과 다르게 수치화된 보상값을 출력값으로 다루어야 하는 데서 발생한다. 이는 피드백 루프의 잡음(Noise)을 증가시키며, 따라서 더 정교하게 구성된 알고리즘(이를테면 Q-함수를 다르게 정의해야 하는 등)을 필요로 하게 된다. 일반적으로, DRL에서의 Q-함수는 이전의 그것과 동일하지만 신경망의 파라미터를 결정변수로 추가하여 다룬다.

DRL의 또 다른 어려움은 신경망의 목적함수 값을 최소화하는 과정에서 발생한다. 지도학습에서는 파라미터가 결정변수이고 정답이 상수로 존재한다. 반면, DRL에서는 이 정답이 존재하지 않기 때문에 학습 단계에서 이 값이 수시로 변할 수 있다. 예를 들어, 지도학습의 경우 영상으로 보는 물체가 전차인지 일반 차량인지 답이 정해져 있지만, 강화학습에서는 추적을 계속하는 것이 좋은지, 또는 현장을 이탈하는 것이 좋은지에 대한 정답이 존재하지 않거나 알기 어렵다. 이 경우 참조할 수 있는 ‘정답지’를 미리 준비해 두고 업데이트를 차등적으로 수행하는 방법(예를 들어, DDQN³⁾)을 사용할 수 있는데, 중요한 것은, 이 방법을 이해하는 것 보다, 이처럼 발생한 어려움을 해결하기 위해 연구들이 지속적으로 이루어지고 있다는 사실을 아는 것이다.

〈그림 2-4〉는 2013년 DeepMind에서 DRL을 이용하여 학습에 성공한 아타리(Atari) 게임들의 모습이다. 에이전트는 명시적인 규칙을 배우지 않고(예를 들어, 내려오는 공을 따라 움직여야 한다는 등) 영상 정보를 주 입력 값으로 하여 학습에 성공하였다. DRL의 선구적인 연구에 해당하는 이 사례를 기점으로, 지금은 더 복잡하고 다양한 문제를 DRL로 해결하기 위한 연구가 진행되고 있다.



〈그림 2-4〉 DRL의 학습 사례 : Atari 2600의 게임들

3) Double Deep Q Network

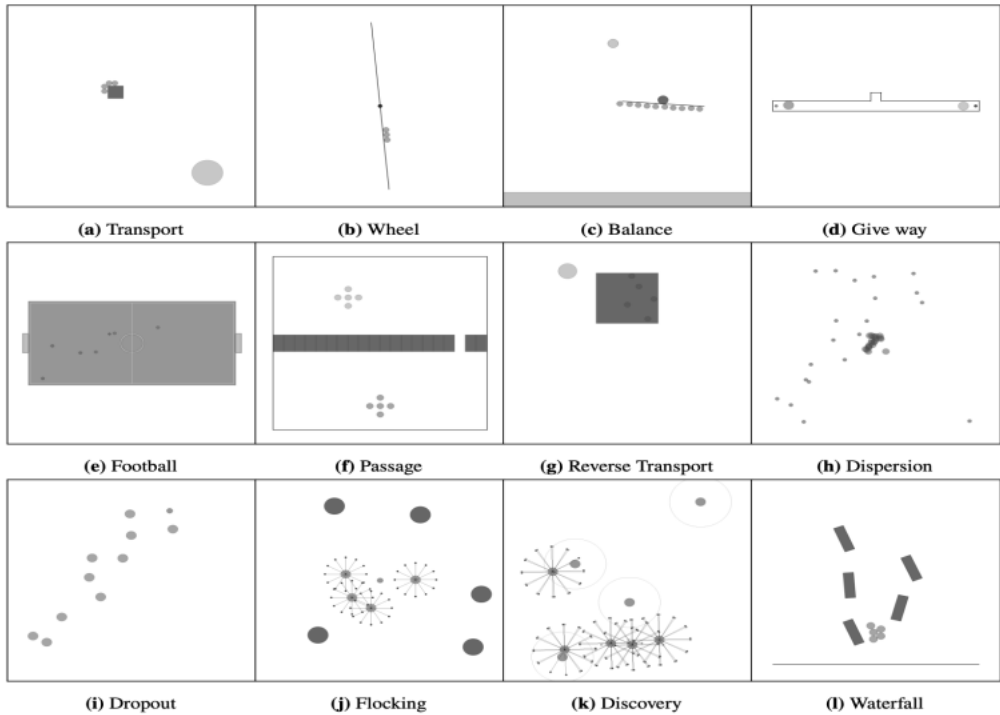
나. MARL(Multi Agent Reinforcement Learning)

다음으로 살펴볼 최신 강화학습 연구 분야는 다수의 에이전트를 학습시켜야 하는 멀티 에이전트(Multi Agent) 강화학습이다 (이하, MARL). 예를 들어, 바둑 게임을 하는 어떤 인공지능 에이전트 플레이어를 학습하는 것이 Single Agent 강화학습이라고 한다면, 서로 대결을 펼치는 두 명의 플레이어를 모두 학습시키는 것이 MARL이다. 여기에서 다수는 둘 이상이 될 수 있는데, 예를 들어 축구 게임을 하는 열한 명의 플레이어를 모두 학습시킬 수도 있는 것이다. 이러한 개념을 바탕으로 MARL을 정의하자면, 공통된(공유된) 환경에서 행동하는 다수의 에이전트들의 연속된 의사결정을 학습시키는 것이며 이때 각 에이전트는 서로 상호작용(interaction)을 하는 것으로 가정한다(Zhang et al.).

MARL의 환경은 다시 ①협동(cooperative) 또는 ②경쟁(competitive), 또는 이 두 가지의 혼합된 환경으로 정의된다. 먼저, 협동 환경에서는 에이전트들이 공통의 보상 값을 최대화하기 위해 협동 행동을 배운다. 예를 들어, 축구를 학습하는 인공지능 팀의 구성원 중 공격수와 골키퍼는 서로 다른 행동을 학습해야 하지만 팀으로서 점수를 내고 상대팀이 점수를 내는 것을 막아야 하는 공통된 목표를 위해(또는 거기에서 발생하는 보상을 얻기 위해) ‘협동’이라는 행동을 배우게 된다. 사회적인 행동을 할 수 있는 인간에게는 너무나 당연한 행동인 협동이 인공지능 에이전트에게는 이해하기 어려운 학습 행동이 될 수도 있다. 협동 환경에서는 각 에이전트가 보상 규칙을 똑같이 가질 수도 있고, 또는 팀-단위로 리워드를 별도로 관리할 수도 있다.

반면, MARL의 환경이 경쟁(competitive)인 경우는 에이전트들의 보상이 합의 0이 되는 경우(zero-sum)가 많다. 예를 들어, 축구를 하는 공격수와 골키퍼를 훈련하는 경우 공격수의 성공(골인)은 곧 골키퍼에게는 실패(실점)가 되기 때문이다. 이 아이디어를 조금 확장하면 가장 강력한 바둑 인공지능인 알파고 제로(AlphaGo Zero)의 훈련 방법인 Self-Play(자기 자신과 계속 대결을 진행하면서 자신의 성능을 향상시키는 방법)의 아이디어와도 유사함을 알 수 있다.

지금까지 설명한 협동 또는 경쟁의 환경이 혼합해서 정의되는 경우도 많이 발생한다. 예를 들어, 서로 적대적인 두 개의 팀을 훈련시킬 경우 팀과 팀은 경쟁 환경에 있지만, 각 팀 안에서는 에이전트가 협동을 해야 하기 때문이다. <그림 2-5>는 여러 개의 로봇이 다양한 목표를 달성하기 위해 명시적인 행동 규칙을 부여받지 않고 협동 행위를 학습하는 모습을 보여준다.



〈그림 2-5〉 다양한 MARL 환경에서 다수의 로봇이 협동하는 모습

(출처 : Matteo Bettini et al.)

MARL 연구는 다양하게 진행되고 있으며, 본 절에서는 대표적인 몇 가지 연구를 소개한다. 먼저, Tan(1993)은 10 by 10으로 구성된 격자 공간(grid world)에서 임의로 출현하는 먹이를 사냥하는 2명의 헌터를 강화학습 하였다. 한 실험에서는 2명의 헌터가 서로 협동을 하고, 다른 실험에서는 2명의 헌터가 각자 서로의 도움 없이 개별 행동을 한다. 이 실험은 “독립적으로 행동하는 n명의 에이전트보다 협동을 하는 n명의 에이전트가 항상 좋은 성과를 낼 것인가?”에 대한 질문을 해결하기 위함인데, 여러 실험을 통해 협동을 하는 것이 유리하다는 유의미한 결과를 도출하였다.

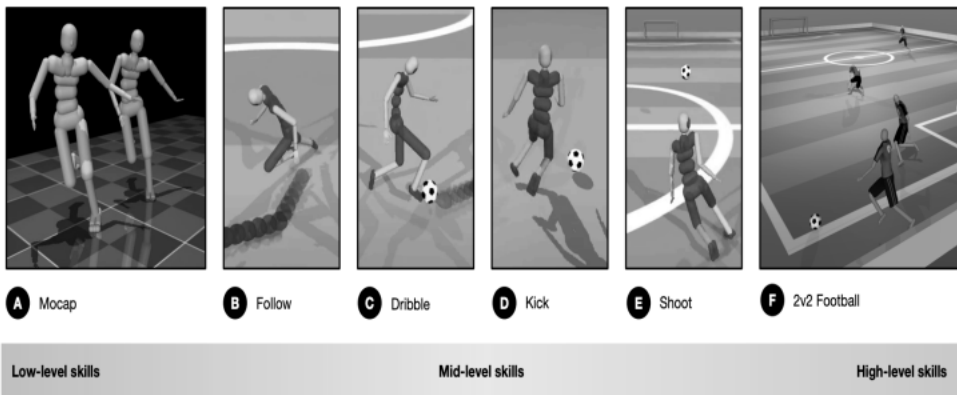
Tan은 인공지능 에이전트의 협동이 ① 획득한 정보의 교환, ② 사냥을 실시한 경험의 공유⁴⁾ ③ 그동안 획득한 지식의 공유와 같은 대표적인 세 가지 행동으로 표출되었다고 보고한다. 다만, 이렇게 에이전트 간 정보의 교환이 많아질수록 계산을 위한 자원이 필연적으로 증가할 수밖에 없다는 제한 사항도 도출되었다.

MARL은 여러 개의 인공지능(에이전트)을 동시에 훈련시켜야 하기 때문에 어떤 에

4) 보고서의 목적상 의미를 한 표현이며, 학술적으로는 에피소드(episodic experience)를 공유하는 것

이전트가 당장 눈앞에 있는 보상만을 보는 것이 아니라 먼 시간 후의 궁극적인 보상을 얻는 방법을 배우는 것이 중요한데, 여기서 ‘먼 시간’이라는 지극히 추상적인 시간의 개념을 계산하기 위한 방법도 중요한 연구 분야이다(Kim et al).

MARL에서 협동은 통상적으로 고차원의 행동으로 인식된다. 예를 들어, <그림 2-6>에서 보는 것처럼 축구를 배우는 에이전트는 축구에서 가장 기본이 되는(인간에서도 그리고 인공지능에게도) 드리블과 킥과 같은 행동을 먼저 개인별로 학습하고, 협동이 필요한 패스, 위치 선정, 또는 수비와 같은 행동을 그 다음에 학습하게 된다. (Lui et al.)



<그림 2-6> 축구 에이전트가 드리블부터 패스까지 학습하는 모습
(출처 : Lui et al.)

MARL 역시 연구에 많은 어려움이 따르는데 그 이유는 다음과 같다.

1) 다양한 에이전트가 각자의 추구하는 목표가 있기 때문에, 문제의 차원이 증가하고, 모두를 만족시킬 수 있는 균형점(equilibrium)을 찾는 것이 어려워진다. 2) 계산 복잡도 측면에서 볼 때, 정보의 교환을 포함한 협동 행위를 효율적으로 하는 것이 요구된다. 3) 에이전트들은 자기 자신만의 이익을 위한 행동을 할 수 있기 때문에 non-stationary 상태(마르코프 가정에서는 지금의 보상 값과 상태는 오직 직전 상태에서만 영향을 받아야 하는데, MARL에서는 다른 에이전트의 어떤 행동이 나의 보상이나 상태에 변화를 줄 수 있다)가 종종 발생할 수 있다. (Papoudakis et al, Zhang et al.) 4) 에이전트가 접하는 정보는 완전한 것이 아니고 로컬(Local) 정보만을 보고 있기 때문에, 부분해(sub-optimal)의 문제가 생길 수 있다. 이러한 이론적인 어려움에도 불구하고, MARL은 DRL과 함께 가장 중요한 강화학습의 연구 분야이며 활발한 연구가 진행되고 있다.

다. Safe Reinforcement Learning

Safe RL(Safe Reinforcement Learning)은 강화학습 에이전트 행동의 결과가 큰 위험을 초래할 수 있는 경우에 이를 다루기 위한 연구 분야이다. 예를 들어, 자율주행차의 인공지능은 탑승자의 안전을 해칠 수 있기 때문에 Safe RL에 해당하며, 사람과 함께 행동하는 로봇의 인공지능에도 적용이 되어야 한다. 사람의 목숨 또는 건강을 직접적으로 위협하는 것만이 위험한 환경에 해당하지는 않는다. 금융, 헬스케어, 통신, 인공위성, 화학 공정 등 다양한 분야에서 그 결정이 사회적으로 큰 영향을 끼칠 수 있는, 또는 인공지능의 행동이 사회가 규정한 어떤 규칙을 위반하는 경우가 생기는 경우 등 거의 모든 분야에서 Safe RL이 적용된다고 보는 것이 타당하다. 특히, Safe RL이 주목을 받는 이유는 현재는 실험실 수준에서 진행되고 있는 많은 강화학습 연구들이 조금씩 현실에서의 실제 적용을 시도하고 있기 때문이다. 자율주행차가 시뮬레이션 안에서 주차하는 법을 배우는 동안 많은 시행착오를 겪더라도 재산의 피해나 인명 피해를 초래하지 않지만 이 인공지능이 실험실을 벗어나는 순간 안전이 가장 중요한 요소로 자리 잡게 되는 것이다.



〈그림 2-7〉 2018년 3월 미국에서 발생한 테슬라 모델 X의 사고

지금까지 논의한 강화학습의 개념에 따르면 에이전트는 자신의 보상을 극대화하기 위한 행동을 취한다. 여기에서 ‘안전’의 개념이 보상으로 주어지지 않는 한 인공지능은 그것을 전혀 고려하지 않는다. 예를 들어, 목적지로 빠르게 주행을 하는 것만이 목표가

되어 버린 자율주행차는 횡단보도와 같이 감속이 필요한 구간에서도 속도를 줄이지 않게 될 것이다. 따라서, Safe RL은 기존에 설정되어 있는 보상의 값을 극대화하는 목표에 추가하여 안전 제약(Safety Constraints)을 함께 고려하도록 설정한다. 여기서 제약이라고 하는 개념은 그것을 반드시 지켜야 하는 것이기 때문에 인공지능의 학습 과정에서 중요한 요소로 간주된다. 이러한 제약은 사람의 직관 등을 반영하여 임의로 설정되거나 또는 학습 과정에서 일종의 시범 행동(demonstration)으로도 설정이 가능하다. 또 다른 방법으로는, 제약을 수학적 형태로 표현할 수 있는데, 이 경우에는 최적화 이론이 중요한 기반이 된다. 공학자들은 이렇게 인공지능에게 ‘해서는 안 되는 제약’들을 학습시키는 구체적인 기술(방법)에 대해 연구를 진행하고 있다. 가장 기본이 되는 이론은 에이전트가 보상함수를 최대화함과 동시에 안전 제약식도 만족하도록 하는 것이며, 제약을 철저히 할 것인지 아니면 어느 정도의 제약 위반을 허용하고 일종의 비용으로 볼 것인지에 따라 다양한 방법으로 접근이 가능하다. (Gu et al.)

Safe RL 연구의 도전 요소는 다음과 같다.

1) 결국 강화학습 에이전트는 사람이 정의한 보상을 추종하게 되는데 인간이 의도하지 않게 인간의 관점에서 정의한 ‘선호(preference)’가 예상하지 못한 방향으로 실현될 수 있다. 예를 들어, 2016년 마이크로소프트에서 발표한 챗봇(Chatbot) 테이(Tay)는 일부 사용자의 의도된 나쁜 사상의 학습으로 16시간 만에 욕설, 인종차별, 성차별 등을 학습하였고 결국 서비스를 중단하게 되었다. 이후, 2018년에는 아마존의 인공지능 면접 시스템의 인종차별 문제가 나타났고, 2019년에는 애플의 신용카드 알고리즘에 성차별 문제가 다시 나타나기도 하였다. 2) 다양한 논쟁이 펼쳐 있고 있는 인공지능의 윤리 문제(예를 들어, 한쪽 길에는 여러 명의 사람이, 다른 길에는 한사람이 있는 경우 어디로 주행해야 하는가의 문제)는 Safe RL과 관련이 깊다. 더불어 인공지능에 대한 기술적 표준이 부재하다는 점, 그리고 법적 제도가 미비하다는 점(예를 들어, 안전사고가 발생하였을 때 책임이 누구에게 있는가의 문제) 역시 Safe RL의 주요 고려 사항이다. 3) 안전을 위협하는 인공지능의 행동은 우리가 사전에 예측하지 않은 범위에서 나타날 가능성이 크기 때문에, 학습 간 다루어야 할 행동이나 상태 정보가 매우 광범위하게 정의되고(예를 들어, 경험해 보지 않고 임의로 제약을 없애는 것이 어렵다) 따라서 인공지능 학습에 필요한 계산에 많은 어려움이 따를 수밖에 없다. 특히, 에이전트가 다수인 경우 각자의 안전 제약식이 다양하게 정의되기 때문에 상황을 더 어렵게 만들 수 있다. 이처럼, 기술적인 어려움이 존재하지만, Safe RL은 강화학습의 현실 적용이 본격적으로 시작되는 시점에 매우 중요한 토픽이 될 것으로 예상된다.

제2절 인공지능 강화학습 기술의 국내·외 최신 적용사례

1. 개요

제1절에서는 강화학습에 대한 기초 지식을 살펴보고 역사와 함께 최신 연구 사례를 설명하였다. 앞 절에서의 논의가 학술적인 영역에 대한 것이었다면, 본 절에서는 실용적인 측면에서 강화학습 기술이 어떻게 활용되고 있는 지에 대해 논의하고자 한다. 이를 위해, 먼저 강화학습이 기술로서 가진 장점을 설명한 후 강화학습의 적용분야를 나열한다.

2. 강화학습의 장점

강화학습을 그 방법론으로 채택하고 있는 분야에서 강화학습만이 유일한 대안이 아닌 경우가 많다. 예를 들어, 로봇 팔을 제어하는 경우 지금은 강화학습으로 학습을 시키고 있지만 이전에는 규칙 기반 방법이 더 효율적인 방법으로 간주되었을 수 있다. 그렇다면, 강화학습이 뛰어난 인공지능 방법론으로 인정받고 있으며 앞으로도 활용 분야가 급속하게 확대되리라 예상하는 이유가 무엇인지를 살펴볼 필요가 있다.

먼저, 강화학습은 복잡한 문제를 해결하기에 적합하다. 현실에서 풀어야 하는 문제가 점점 더 복잡해지고(complex), 변화의 속도가 커지면서(Dynamic) 기존의 의사결정 방법(예를 들어, 규칙 기반 방법(Rule-Based) 등)이 큰 역할을 하지 못하게 되었다. 규칙 기반 방법은 과업의 수행 절차를 “if-then” 으로 표현할 수 있으며, 따라서, 직관적으로 이해하기 쉽고 그것을 구현하는 것도 어렵지 않지만, 환경이 복잡해지면 정의해야 하는 규칙의 수가 폭발적으로 증가하고 구현의 난이도도 증가하는 어려움이 있다. 반면, 강화학습은 ‘Trial-and-Error’를 통해 학습이 진행되는, 본질적으로 보면 간단하다고 할 수 있는 학습 메커니즘을 가지고 있다.

또한, 규칙 기반 방법으로 도출된 과업의 ‘질(quality)’은 사전에 정의한 규칙의 질에 따라 품질의 한계가 존재하는 반면, 강화학습은 그렇지 않다는 점도 장점으로 볼 수 있다. 다음으로, 규칙 기반 방법은 자세하고 세밀한 규칙이 적용될수록 적응력(새로운 문제에 대응하는 능력)이 감소하는 편이며 따라서 도메인에서 조금 벗어난 문제는 풀 수 없게 된다. 강화학습도 엄밀하게는 도메인 내의 문제만을 풀 수 있도록 학습되지만 범용성을 가진 “강(strong) 강화학습” 연구가 지속되고 있기 때문에 미래의 강화학습 알고리즘은 지금보다 일반성이 강화될 것으로 예상된다.

규칙 기반 방법론에서 규칙을 정의하기 위해서는 도메인 전문가(인간)의 지식을 필

요로 한다. 반면, 드론 또는 지상 무인체계와 같이 이전에 전투에서 사용된 바 없는 신 무기체계의 규칙을 만드는 경우 또는 새로운 절차를 학습하는 경우에는 참조할 수 있는 도메인 지식이 없을 수도 있다. 그리고 문제가 복잡해지면서 인간 전문가의 능력을 초과하는 룰의 정의가 요구될 수 있으며, 기계와 다르게 인간은 이 과정에서 실수를 할 가능성 또한 커진다. 반면, 강화학습은 도메인 전문가의 지식이 부족하더라도 많은 Trial-Error 경험을 축적하면서 학습이 가능하다.

마지막으로, 강화학습은 다른 머신러닝 기술보다 다음의 측면에서 장점이 존재한다. 먼저, 다른 인공지능 기술인 지도학습의 경우 많은 데이터를 필요로 하기 때문에 데이터가 없거나 부족한 경우 기술의 적용이 어려운 상황이 다수 존재한다. 반면, 강화학습은 훈련(training)데이터를 사전에 준비할 필요 없이 에이전트가 실시간으로 경험을 하면서 동시에 데이터를 생성해 내는 개념이기 때문에 데이터에 의존하지 않을 수 있게 된다. 이는 일반적으로 데이터가 부족한 국방/안보 영역에서 강화학습이 강력한 방법론이 될 수 있음을 시사한다.

일반적으로는 각 방법론이 잘 풀 수 있는 문제의 유형이 알려져 있다. 예를 들어, 지도학습은 Regression, Classification 문제에 적합하고 강화학습은 보상이 명확한 일련의 절차가 있는 문제에 유리하다고 알려져 있다. 하지만, 강화학습은 복잡하고 다이내믹한 환경에서도 강건하게 작동할 수 있는 강력한 기술로 인정받으면서 범용성을 높여가고 있다.

3. 적용분야

본 절에서는 강화학습 기술이 실제 현실에서 어떻게 활용되고 있는지를 대표적인 분야를 중심으로 나열한다.

가. 자율주행 (Autonomous Driving)

자율주행 기술에서 강화학습이 차지하는 비중은 매우 크다. 주행(Driving)이라고 하는 과업은 다음의 특성으로 인해 상당히 복잡한 문제로 간주된다. ① 가능한 시나리오의 수와 크기, 즉 일어날 수 있는 환경의 폭이 매우 방대하다. ② 주행자, 도로의 상태, 신호, 인접 차량의 상태 등 자율주행차량 주변의 환경이 상당히 복잡하며 또 실시간으로 계속 변화한다. ③ 단순하게 차량을 ‘움직이는’ 기능을 구현해야 하는 것이 아니고, 주행자의 안락함(comfort) 뿐만 아니라 안정성 등 고려해야 할 목표가 매우 다양하다.

위에서 설명한 특성들로 인해, 자율주행이라는 과업은 매우 복잡한 문제로 분류되

며, 그래서 강화학습 기술이 거의 유일한 대안으로 채택되어 활용되고 있다. 대표적으로는, 테슬라(Tesla)의 오토파일럿(Autopilot) 기능이 강화학습 기술을 활용하고 있다. 물론, 강화학습이 오토파일럿에서 사용하는 유일한 기술은 아니지만, 핵심 기술에 해당하는 것은 사실이다. 오토파일럿은 강화학습을 활용하면서 앞서 논의한 강화학습의 장점을 고스란히 가져간다. 먼저, 자율주행차량의 학습을 위해 방대한 데이터를 수집하는 것은 안전의 이유, 비용적인 측면에서 비효율적이기 때문에 끊임없이 그리고 빠르게 자체적으로 생산하는 데이터로 학습되는 강화학습이 유리하다. 21년 AI-Day에 테슬라에서 공개한 영상에 의하면, 오토파일럿 알고리즘은 <그림 2-8>과 같이 현실과 구분이 어려운 시뮬레이션⁵⁾ 환경 안에서 학습이 되는 것으로 확인된다. 이 시뮬레이션이 유용한 이유는 수없이 많은 시나리오를 안전하게 그리고 빠르게 테스트할 수 있다는 이유와 함께, 현실에서는 거의 일어나기 어려운 상황도 만들어서 오토파일럿의 훈련에 반영할 수 있다는 점이다. 한편으로는, 이미 전 세계적으로, 테슬라의 보급이 성공적으로 이루어졌기 때문에⁶⁾ 실제 환경 데이터를 수집하는 것도 어려운 일은 아닐 것으로 예측되지만, 테슬라의 CEO인 일론 머스크는 현실의 데이터가 빠른 속도로 수집되고 있지만, 여전히 오토파일럿(또는 FSD, Full Self Driving 소프트웨어)의 강화학습에는 시뮬레이션 환경을 필요로 한다고 밝힌 바 있다.⁷⁾



<그림 2-8> 시뮬레이션 환경에서 학습하는 테슬라의 오토파일럿
(출처 : 테슬라 AI-Day 발표 자료)

강화학습 기술을 자율주행차량에 적용한 것은 테슬라만이 아니다. Wayve는 우수

5) 언리얼(Unreal) 엔진이라는 플랫폼으로 개발

6) 23년 3월 기준으로 400,000개의 SW가 도로 위를 달리고 있다.

7) 23년 4월 4일. 일론 머스크의 트위터.

한 딥러닝 기술을 강점으로 자율주행에 거의 필수적으로 요구되는 HD-Map⁸⁾이나, 사람이 정의한 규칙 없이 자율주행을 안정적으로 할 수 있다고 주장한다. 이들의 접근법의 핵심은 기존의 자율주행 프레임워크(인지, 의사결정, 차량 컨트롤을 전부 각기 다른 모듈로 인식)를 “Sense-Plan-Act”로 단순화 할 수 있다는 것이며, ‘절차’ 보다는 충분한 ‘데이터’의 학습에 초점을 두고 있다⁹⁾. (Hawke et al.) 이 외에도, Waabi, Autobrains 같은 인공지능 스타트업 회사에서도 조금씩 다른 아이디어를 활용한 인공지능 연구를 진행하고 있지만 모두 강화학습을 기반으로 한다는 공통점을 가지고 있다.

나. Robotics(로봇)

로봇도 강화학습이 사용되는 대표적인 분야이다. 4차산업혁명으로 포괄되는 첨단 기술의 발전과 함께 로봇 기술도 성장하고 있다. 여기에는 안정적인 하드웨어를 제작하는 것을 포함하여 로봇을 제어하는 고성능의 알고리즘 제작도 포함된다. 알고리즘 측면에서, 로봇을 제어(Control)하는 다양한 방법들이 기존에도 존재해 왔지만¹⁰⁾, 강화학습의 적용을 통해 효율성(Stability or Efficiency)이 비약적으로 향상되거나 풀지 못했던 복잡한 로봇의 문제를 해결하고 있다. 대표적으로는, 잡기(Grasping)¹¹⁾, Navigation, Manipulation 등의 과업을 강화학습으로 훈련할 수 있다. 물론, 로봇의 제어에 강화학습이 사용되기 시작한 것은 최근의 일은 아니다. 1992년에는 바퀴를 단 OBELIX 로봇이 물체를 미는 행위를 학습하였고, 1994년에는 Zebra Zero 로봇이 ‘구멍에 물건 넣기’를 성공적으로 학습하였다¹²⁾. 1996년에는 Sarcos라는 휴머노이드 로봇이 ‘Pole-balancing(막대 세우기)’ 과업을 학습한다. 중요한 점은, 이 로봇들은 모두 강화학습을 기반으로 한 알고리즘으로 행동을 성공적으로 학습했다는 데 있다. 최근 주목할 만한 연구 결과로는, 미국 버클리 대학의 연구진이 개발한 DayDreamer 라는 강화학습 알고리즘으로 4족 보행 로봇의 걸음걸이를 1시간 만에 학습시킨 성과이다. 이 알고리즘은 앞 절에서 논의하였던 DRL(Deep Reinforcement Learning) 기술을 기반으로 환경을 근사한다. 이 알고리즘의 우수성, 범용성, 안정성 등을 평가하는 것보다는 강화학습이 기존의 전통적인 제어 시스템을 뒤흔들 수 있는 획기적인 프레임워크로 변모하고

8) 자율주행을 위해 특별하게 제작된 고정밀 지도

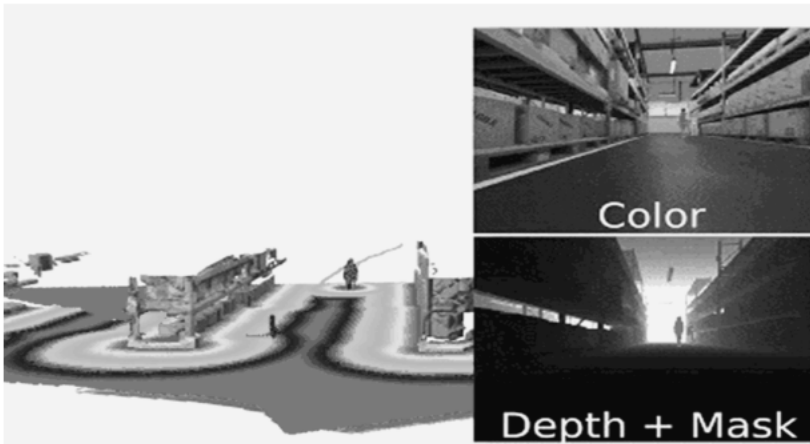
9) 이렇게, ‘입력’이 그대로 ‘출력’으로 이어지는 것을 End-to-End 방법이라고 부른다.

10) 휴리스틱(Pre-defined Heuristic) 등 경험을 바탕으로 제작

11) Morrison, Douglas, Peter Corke, and Jürgen Leitner. "Closing the loop for robotic grasping: A real-time, generative grasp synthesis approach." arXiv preprint arXiv:1804.05172 (2018).

12) Kober, J., Bagnell, J. A., & Peters, J. (2013). Reinforcement learning in robotics: A survey. The International Journal of Robotics Research, 32(11), 1238-1274.

있다는 사실에 주목할 필요가 있다. 엔비디아 사는 아이작 짐(Isaac Gym)이라는 강화 학습 물리 시뮬레이터를 개발한 후 자사의 GPU 등으로 학습을 진행할 수 있도록 지원하고 있다. 아이작 짐은 어떤 객체의 인공지능을 학습시키는 프레임워크로서 활용되고 있는데, 22년 12월에는 로봇 손을 훈련시키는 프로그램을 개발하여 약 32시간 만에 좋은 정책을 학습시켰다고 발표하였다. 흥미로운 점은 실제 세계에서 이 로봇이 동일한 경험을 얻으려면 42년의 시간이 소요되어야 한다는 것이다. 엔비디아의 아이작 짐과 같이 강화학습 에이전트를 시뮬레이션 환경에서 훈련시키는 것은 먼저 테슬라 자율주행차량의 사례에서도 소개한바 있다. 이렇게 가상 환경에서 강화학습을 시도하는 것은 로봇틱스 분야에서는 매우 흔한데, 문제는 시뮬레이션에서 훈련이 완료된 로봇이 현실에서도 배운 행동을 제대로 수행해야 한다는데 있다. 이를 위해서는, 가상 환경과 현실 세계가 최대한 유사해야 하는데, 시뮬레이션을 아무리 정교하게 구성하더라도 존재할 수밖에 없는 환경적인 오류가 존재하며, 가상 환경 안에서 모델링된 에이전트 자체에도 오류가 존재할 수밖에 없다. 이러한 이슈를 다루는 분야를 Sim2Real 라고 부르며 가상 환경을 최대한 정밀하게 만드는 작업과 함께(이 부분에는 분명 한계가 존재한다), 에이전트가 다이내믹한 환경에서도 과업을 수행할 수 있도록 강건하게 만드는 작업을 함께 해야 한다. 이러한 강건성을 위해 시뮬레이션 환경과 관련된 에이전트의 행동을 무작위로 바꿔 가면서 훈련을 시키는 방법이 활용될 수 있다(장수영 등).



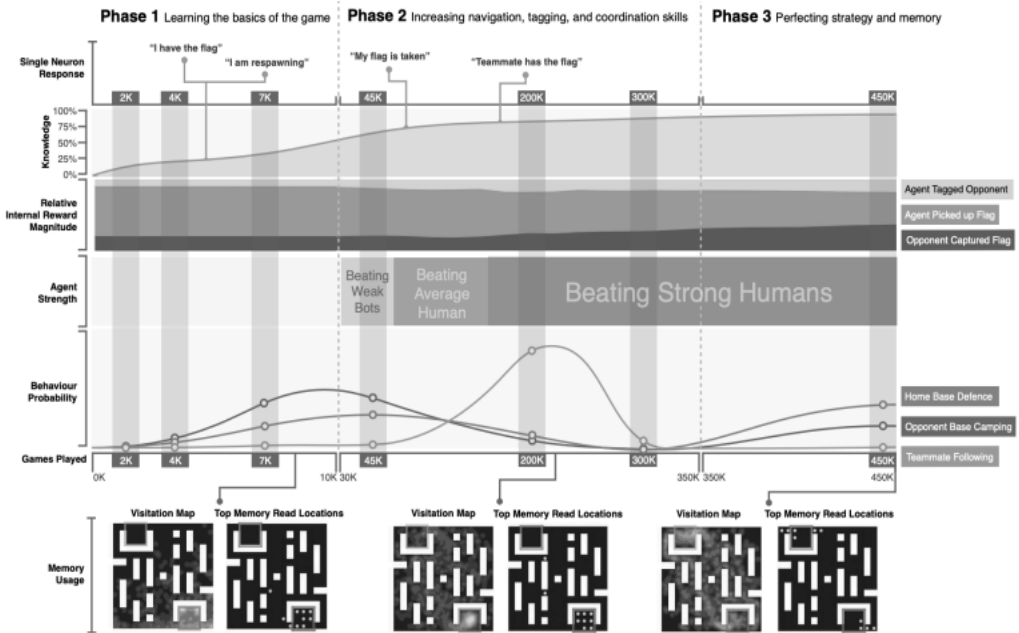
〈그림 2-9〉 엔비디아의 아이작 짐을 이용한 시뮬레이션과 현실의 조합
(출처 : 엔비디아 홈페이지)

다. 게임 분야

강화학습 이론과 응용 분야 연구는 Atari와 같은 고전 게임 플랫폼과 OpenAI, Gym,

Mujoco와 같은 다목적 플랫폼을 적극적으로 활용해 왔다. 즉, 게임 분야에서의 강화 학습의 활용은 목적이 아니라 수단으로서 그 역할을 해 왔다고 보는 것이 타당하다. 다시 설명하면, 강화학습 알고리즘을 개발하고 그 성능을 테스트하기 위해 게임이라는 수단을 활용한 것이다.

앞서, DRL 이론을 설명하면서 DeepMind에서 개발한 아타리 게임을 배우는 인공지능을 소개하였다. 아타리의 게임들은 발표가 된지 오래된 고전 게임이고, 플레이어의 동작이나 게임의 구성 등이 매우 단순한 것은 사실이다. 하지만, 이제 강화학습은 스타 크래프트와 같은 실시간 전략게임과 카운터 스트라이크 같은 FPS(1인칭 슈터 게임) 게임을 배울 수 있게 되었다. 여기에 대한 기술적 논의는 다음 장에서 이어간다.



〈그림 2-10〉 훈련이 거듭될수록 에이전트의 실력이 상승하는 모습 (DeepMind, 2019)

반면, 강화학습 기술을 게임 산업에서 활용하는 사례가 증가하고 있다. 이는 게임 속 유닛이나 NPC(Non-Player Character)의 행동 등에 적용되어 게임의 콘텐츠를 지능화할 수 있다는 기대감을 주고 있다. 예를 들어, 게이머들이 FPS 게임을 할 때, 컴퓨터가 컨트롤하는 인공지능 유닛은 실력이 부족하기 때문에 온라인에서 다른 인간 플레이어들과의 대결을 즐겨 했는데, 이제는 강화학습으로 학습된 인공지능이 사람만

컴 또는 사람을 초월하는 실력으로 게이머들을 상대할 수 있게 된다는 것이다. NPC에 인공지능을 적용한 대표적인 예는 너티독이라는 게임 회사에서 개발한 ‘라스트 오브 어스’라는 게임을 들 수 있다. 게임 제작 플랫폼인 유니티(Unity)에서는 게임 개발자들이 게임 환경을 구성할 때부터 인공지능을 적용할 수 있도록 패키지를 지원한다. 예를 들어, 포커 게임을 만든다고 할 때 이전에는 사용자(사람)의 행동에 따른 컴퓨터의 행동을 규칙으로 부여해야 했지만, 이제는 강화학습으로 훈련된 인공지능이 사람을 상대할 수 있도록 애초에 강화학습 툴을 제작자들에게 지원하는 것이다.

이러한 산업 트렌드가 가속화될 것으로 보는 이유 중 하나는 다른 인공지능 개발과는 다르게 게임에서 강화학습을 시키는 것은 ‘실’은 거의 없고 ‘득’만 가질 수 있기 때문이다. 예를 들어, 자율주행차량의 인공지능 학습은 그것이 실패했을 때 인명 피해가 생길 수 있다는 위험부담이 있는데, 게임에서는 그런 위험부담이 적은 반면 인공지능 도입으로 사용자에게 흥미를 배가시키며 매출 상승 등 얻을 수 있는 이익이 크다는 것이다. 게임 산업의 예만 들었지만, 이를 엔터테인먼트 산업 전체로 확장할 수도 있는데, 23년 여름에 이미 시나리오, 영상, 음성에 이어 자막까지 모두 인공지능 기술을 이용한 영화가 국내에서 공개되기도 하였다.¹³⁾

라. 기타 분야

먼저, 강화학습은 잘 알려진 인공지능 모델인 GPT(Generative Pretrained Model)와 같은 대화형 인공지능 모델의 튜닝에 사용되기도 한다. 기본적으로 GPT는 신경망 구조를 사용하기 때문에 지도학습 기술로 개발이 되어 있고, 이미 방대한 양의 데이터를 학습한 상태이다. 강화학습은 이 기본 모델에 인간의 피드백을 학습시키는데 사용되는데, 이를 Fine Tuning 이라고 부른다. 기술적으로 보면, 강화학습을 구성할 때 에이전트는 GPT, 환경은 사용자의 입력값, 행동은 GPT의 답변으로 구성되고, 마지막으로 리워드는 GPT의 답을 점수화해서 평가하는 것이다. <그림 2-11>에서 보는 것처럼 튜닝이 된 GPT(i.e., InstructGPT)가 지도학습만으로 학습된 GPT에 비해 더 진실하고, 해롭지 않으며, 고객에게 더 도움이 되는 방향으로 진화했음을 보여준다.

13) AI타임스(<https://www.aitimes.com>) “생성 AI가 영화판도 장악하나”

Dataset RealToxicity		Dataset TruthfulQA	
GPT	0.233	GPT	0.224
Supervised Fine-Tuning	0.199	Supervised Fine-Tuning	0.206
InstructGPT	0.196	InstructGPT	0.413
API Dataset Hallucinations		API Dataset Customer Assistant Appropriate	
GPT	0.414	GPT	0.811
Supervised Fine-Tuning	0.078	Supervised Fine-Tuning	0.880
InstructGPT	0.172	InstructGPT	0.902

〈그림 2-11〉 GPT의 강화학습 튜닝 결과

(출처 : OpenAI)

강화학습은 주식과 같은 트레이딩(Trading) 모델 개발에서도 활용되고 있다. 전문적인 투자회사에서 제공하는 인공지능 ‘봇’이 넘쳐 나며, 트레이딩에 참여하는 개인도 자신만의 모델을 개발 사례가 증가하고 있다. 워낙 다양한 전략으로 모델을 구성하기 때문에, 일반화할 수는 없으나 상태 변수로는 시가, 종가, 이동 평균값과 같은 기본 데이터를 포함하여 다양한 기술분석 지표들을 설정하고, 행동은 매수, 매도, 보유로 설정할 수 있다.

또 다른 응용 영역으로는, 헬스케어 분야를 들 수 있는데, 고객 맞춤형 서비스 제공, 의료진 결정에 필요한 정보 제공, X-Ray나 CT와 같은 영상판독, 신약 개발, 의료자원 할당 최적화, 로봇을 활용한 치료 및 수술, 재활 등 거의 전 영역에서 강화학습 기술이 활용되고 있다.

이 외에도, 넷플릭스와 같은 서비스에서 콘텐츠를 추천하는 추천시스템(Recommended Systems), 맞춤형 교육 지원, 에너지 모니터링 및 관리, 농업 분야까지 사회 전체적으로 강화학습의 활용이 광범위해지고 있다.

제3절 강화학습의 국방에서의 적용분야 탐색

1. 개요

앞 절에서 강화학습이 우리 사회 전반에 걸쳐 어떻게 활용되고 있는지를 살펴보았다. 본 절에서는 강화학습을 국방 및 안보 영역에서 어떻게 활용할 수 있을지를 논의한다. 이를 위해, 먼저 강화학습의 적용 측면에서 민간과 국방이 가진 다른 특성을 설명하고, 이어서, 강화학습의 국방적용 가능 분야를 나열한다.

2. 강화학습 측면에서 국방의 특성

강화학습의 적용 측면에서 민간과 국방이 가진 다른 특성은 다음과 같다.

가. 목적(Objectives) : 민간에서는 비용 절감, 효율성 향상, 고객의 만족도 증가 등 다양한 요소를 강화학습의 목표로 설정할 수 있다. 국방에서도 강화학습을 구상할 때 다양한 목표가 존재할 수 있는 것은 사실이지만, ‘임무(Mission)의 달성’이라고 하는 절대적인 그리고 민간의 것과 성격이 다른 목적이 존재한다.

나. 보안(Data Availability) : 강화학습은 수없이 많은 시도를 통해 학습하는 메커니즘이기 때문에 지도학습 등 다른 머신러닝 기술과 다르게 빅데이터의 필요성이 시급하지 않은 것이 사실이다. 그럼에도 불구하고, 국방 분야의 데이터 접근성 문제는 강화학습의 큰 제한 사항이 된다. 특히, 국방에서의 강화학습은 에이전트를 훈련시킬 환경의 구성 자체가 어려울 수 있다. 예를 들어, 강화학습 알고리즘이 지원되는 특정 프로그램(패키지)을 사용하여 학습을 해야 하는 경우, 국방망과 인터넷망의 전환 등 불편함과 어려움이 따르는 것이 사실이다. 즉, 데이터는 내부망에 존재하고, 모델은 외부망에 존재하는 일이 자주 발생한다.

다. 윤리적 문제(Ethical Consideration) : 강화학습의 국방적용을 가로막는 가장 큰 요인으로 윤리적 논쟁(문제)을 들 수 있다. 급격한 인공지능 기술의 발전과 함께, 인공지능의 무기화, 킬러 로봇, Human-In-the-Loop 원칙의 필요성 등 이 문제와 관련된 다양한 담론이 형성되어 있으며, 특정한 집단에서는 인공지능의 국방적용을 아예 배척하고자 하는 움직임도 관측된다.

라. 복잡성(Complexity) : 데이터 접근성 측면과도 연계되며, 민간의 경우 환경이 정적인 반면(예를 들어, 공장에서 가동하는 로봇의 제어) 군의 경우 상당히 많은 변수가 존재한다. 예를 들어, 민간의 드론이 장애물을 피해 목적지를 찾아가는 지능을 학습했다고 하더라도, 이를 그대로 군에 적용하기는 어려운데, 아군 드론의 정찰 활동에 대한 다양한 거부 활동이 수반될 수 있기 때문이다. 예를 들어, 소극적인 거부로는 적의 은폐/엄폐/위장 등이 있을 수 있고 적극적인 거부 활동으로는 직접 요격을 시도할 수 있으며, 아예 알고리즘 자체에 대한 적대적 공격도 가능하다.

이처럼, 강화학습의 국방적용 분야를 도출하기 위해서는, 기술을 이해하는 것과 함께 국방 영역의 특성을 이해하는 것도 중요하다.

3. 강화학습의 국방적용 분야

강화학습 기술을 국방에서 활용할 수 있는 분야를 활용 가능성과 중요도 순서로 다음과 같이 제시하고자 한다.

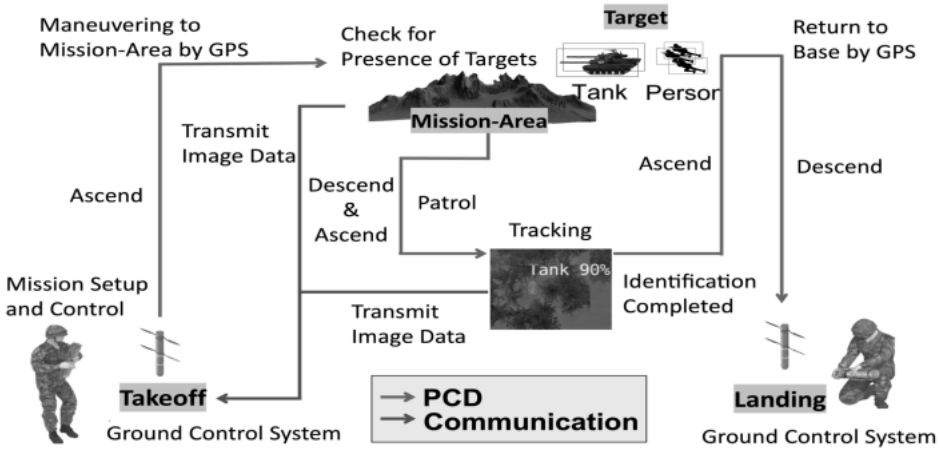
가. 드론 등 공중 자산의 다양한 임무 수행

러시아-우크라이나 전쟁에서 드론의 다양한 활약(직접 공격, 사격 유도, 정보 수집, 촬영 등)과 그 이전에 벌어졌던 아르메니아-아제르바이잔 충돌(Nagorno-Karabakh conflict)에서 드론의 활약¹⁴⁾으로 전장에서 드론의 활용은 완전한 상수로 받아들여지고 있다. 지금까지 드론을 운용하는 모습은 운용요원(Operator) 또는 지상국이라 부르는 운용 기관이 존재하며, 따라서 드론을 완전 무인화 하여 운용하고 있지는 않다¹⁵⁾. 무인화에 대한 비기술적 논의를 차치하면¹⁶⁾, 드론의 저비용 다량 투입 특성을 활용하여 미래 전장에서는 드론이 운용자의 간섭이 없이도 단독 작전을 수행할 수 있어야 한다는 것이 많은 군사 전문가들의 의견이다. 그리고, 드론을 무인화 하기 위해서는 드론의 지능화가 선행되어야 하며, 바로 이 지점에서 강화학습 기술이 활용될 수 있다. 구체적으로는, 드론의 경로계획(path-planning), 장애물 회피(obstacle avoidance), 기타 공격 등 필요 임무 행동에서 강화학습이 활용될 수 있으며, 특히 주어진 환경이 가장 복잡하다고 할 수 있는 군집드론(Swarms)의 임무 계획에서 필요성이 부각되고 있다. 반면, 드론이 지능화되었을 때, 강화학습으로 드론의 모든 행동을 학습시키는 것은 상당히 어려울 수 있으며, 불필요하기도 하다. <그림 2-12>는 정찰 드론의 정찰 작전에서 강화학습이 활용되는 예를 보여주고 있다.

14) 국방비 지출이 60위에 그치는 아제르바이잔이 성공적인 드론 사용으로 전차 120, 장갑차 53, 견인포 143대 등을 무력화 한 것으로 보고

15) 예를 들어, 미 공군의 MQ-9 리퍼의 작전을 위해 30여명의 운용 요원을 필요로 하는 것으로 분석된다. (참고 자료 : Reaper Paradox, 조남석, 국방혁신세미나 발표 자료)

16) 예를 들어, Human-In-the-Loop 의 당위성, 윤리적 논의 등



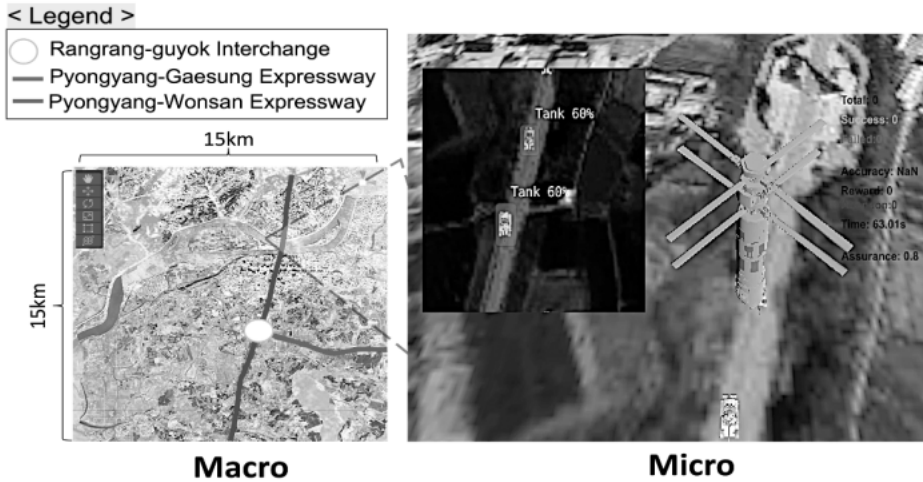
〈그림 2-12〉 정찰 드론의 강화학습 개념도¹⁷⁾

본 연구에 따르면 정찰드론은 부여된 임무 지역으로 계획된 비행을 할 때는 단순한 내비게이션 기술을 활용한다. 비행 간 발생할 수 있는 각 종 우발 상황에 대해서는 규칙기반(Rule-Based) 방법론으로 조치를 취한다. 예를 들어, 적의 공격이 예측될 때는 우회하고 적의 공격이 있을 때는 신속히 현장을 이탈하는 등 비교적 간단한 규칙으로 행동을 정의할 수 있다. 반면, 드론이 임무 지역(정찰 지역)에 도착해서는 운용자의 간섭 없이 정찰 활동을 실시해야 하는데 여기에서 강화학습이 적용된다. 드론은 자율주행 차량과 다르게 여러 가지 센서(라이다 등)를 장착하지 않고 있지만, 하방을 관찰할 수 있는 카메라를 장착하고 있다. 따라서, 카메라의 영상 정보를 바탕으로 지형, 적, 그리고 내가 처해진 상황을 정확히 인식하고 최선의 행동을 선택할 수 있어야 한다. 본 보고서 1절에서 논의한 DRL 기술이 적용되는 것이다. 〈그림 2-13〉은 강화학습을 한 정찰드론이 적 전차를 인식 및 식별하고 계속 전차를 추적하는 행동을 성공적으로 학습했음을 보여준다. 이 연구는 시뮬레이션 환경 안에서 수행되었기 때문에, 여전히 Sim2Real 의 과제가 남아 있지만 정찰 드론의 지능화 가능성을 보여주었다.

드론의 지능화를 위해 해결해야 하는 과제들은 다음과 같다. 먼저, 시뮬레이션 환경에서 이루어진 강화학습이 현실에서 어떻게 적용되는지 실증 사례를 제시할 필요가 있다. 로보틱스 분야에서 이미 많은 사례로 그 실현 가능성은 입증되었지만 드론의 정찰 처럼 복잡한 환경에서 Sim2Real이 실증된 사례는 없다. 두 번째로, 국방에서의 특성을 고려하여, 복잡하고 다이내믹한 환경에서 임무가 가능한 강화학습 사례가 실험되어야

17) 권오정 등, 풍산-카이스트 연구보고서 “정찰 드론의 강화학습 적용 방안 연구”

한다. 예를 들어, <그림 2-13>의 환경에서 만약 적 전차가 나무 아래로 은폐를 하고 있을 경우 강화학습 에이전트가 어떤 행동을 취할 수 있는가에 대한 것이다. 마지막으로, MARL의 관점에서 드론의 군집운용을 강화학습 하는 방안을 연구해야 한다. 지금 진행되고 있는 드론의 강화학습 연구는 결국 군집드론 연구로 가기 위한 단계라고 해도 무방할 정도로, 중요한 연구 분야라고 할 수 있다.



<그림 2-13> 강화학습 드론이 정찰을 실시하는 시뮬레이션 케이스 스터디¹⁸⁾

나. 위협분석과 표적할당

앞에서 논의한 드론을 포함하여 일반적인 무인 무기체계의 자율행동 구현을 위해 강화학습이 활용될 수 있는데, 특히, 무인체계의 자율행동 중 위협분석과 표적할당에 강화학습이 적극적으로 활용될 수 있다. 위협분석과 표적할당은 더 세부적으로 보면 위협을 인지 및 식별(recognize, identify)하고 표적에 대한 우선순위를 결정한 후 내 자원을 관리 및 할당하는 단계를 포함한다고 볼 수 있다. 따라서 어느 한 국면에서만 강화학습 기술이 적용되는 것이 아니라 모든 단계에서 활용될 것으로 예상된다. 따라서, 실제로는 위협분석과 표적할당이 온전히 다른 분야이지만, 본 절에서는 위협분석과 표적할당을 구분하지 않고 ‘위협분석’이라는 용어로 통합하여 기술한다.

위협분석 단계에서 강화학습이 필요한 이유는 인간 전투원의 부담(workload)을 대폭 줄여 줄 수 있다는 점과 최신 눈부신 속도로 발달하고 있는 인공지능 기술을 활용하

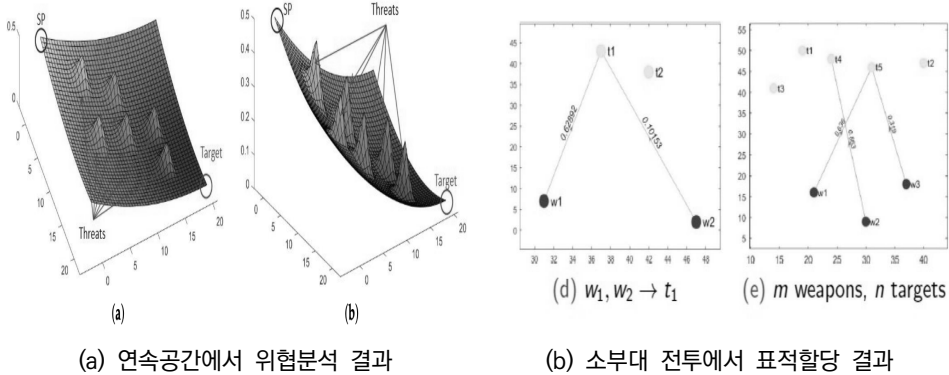
18) 변재현 등, 자율무기체계 지능화를 위한 시뮬레이션 기반 강화학습, 한국시뮬레이션학회지, 2023.

지 않을 이유가 없다는 기술적 당위성을 제시할 수 있다. 위협분석 강화학습을 위해서는 환경 정보 구성이 선행되어야 하는데 다음과 같은 정보들이 사전에 정의되거나 제공되어야 한다. 하지만, 이러한 정보 중에 어떤 것을 취하여 어떤 방법으로 위협을 정의할 것인지는 상당히 ‘술’의 영역에 있는 것이 사실이며, 따라서 ‘일반적인’ 방법론을 만드는 것이 상당히 어렵다.

〈표 2-1〉 위협분석을 위해 필요한 정보의 예시¹⁹⁾

분류	항목	설명
지형	GIS 정보	VITD(Vector Interim Terrain Data), DEM(Data Elevation Models)과 같은 지형에 대한 표준 데이터 예) 고도, 경사도, 식생도, 차폐도 등
지형	LOS (Line of Sight)	두 지점이 주어졌을 때, 두 지점 간의 시계 확보 여부를 제공
적	무기체계 사양 (Specification)	적 무기체계의 기계적 특성 예) 사거리, 폭, 발사속도 등
적	군사적 용도 (Military Use)	적 무기체계의 종류 또는 군사적 용도 *적의 의도를 나타내는 Intention으로 생각할 수도 있음. 예) 정찰용, 공격용 등
아군	대응자산 (Countermeasure)	적 위협에 대한 대응자산의 가용성 예) 對 UAV 제밍 시스템
아군	위협 노출 자산 (Affected Target)	적 위협에 노출되는 중요한 아군의 시설이나 장비
아군	임무와 과업 (Mission and Tasks)	상급부대 또는 염출된 임무와 과업 예) 과업으로 부여된 지역에 대한 위협 가중치 부여 등
아군	교리(Doctrine) 또는 기타 정성적 요소	정량적 평가 요소 외 교리적으로 고려할 요소 예) 적의 의도적인 지연 장애물에 대한 위협 수준 조정 등
기타	항목 간 상호작용	적 무기체계와 아군 자산 또는 적 무기체계와 지형 등 다양한 상호작용을 나타내는 정보로 여러 가지 형태로 구성 가능 예) 아 자산과 적 무기체계의 근접도(Proximity) 파라미터 등을 포함

19) 참조 자료 : 차도완, 조남석 등, 생존성맵 생성/분석 기법 및 효과도 분석 연구



〈그림2-14〉 위협분석과 표적할당의 예시

그러다 보니, 위협분석에서 강화학습을 사용하기 위한 구체적인 기술이나 연구가 많이 존재하지 않는다. 몇 가지 연구를 소개하자면, Elliott et al.은 위협분석을 담당하는 오퍼레이터(부서나 인원)가 여러 가지 정보를 효율적으로 관리하기 위해 그 정보들을 어떻게 전시(display)해야 하는지를 강화학습 할 수 있다고 제안하였다. 여기서, 에이전트의 행동은 공통상황판(COP)과 같은 상황판을 구성하는 여러 가지 방법 중 하나를 선택하는 것이며, 보상의 기준 위협분석에 소요되는 시간이 될 수 있다. He et al.은 공중 드론의 위협분석을 위하여 교전 시 생존확률²⁰⁾, 진입 각도, 무기의 사거리 등을 고려한 보상함수를 정의하고, 표적 결정, 교전 여부 등을 행동으로 반영하여 드론 에이전트를 강화학습 한 결과를 제시하였다. 앞의 선행 연구가 존재하지만, 일반적으로 강화학습으로 위협분석을 하기 어려운 이유 중 하나는 보상을 정의하기 어렵기 때문이다. 물론, 위협분석의 단계를 포함한 전투의 형태를 모두 갖추고 있는 스타크래프트 게임에서 에이전트를 강화 학습한 사례가 존재한다. DeepMind는 2019년에 네이처지에 발표한 논문을 통해 인공지능 알파스타(AlphaStar)가 프로게이머의 실력을 월등히 능가하는 플레이를 할 수 있게 되었다고 발표한다. 여기서 우리가 주목해야 할 점은 스타크래프트의 전체 플레이 속에 분명 위협을 분석하고 표적을 할당하는 절차가 추상적으로나마 포함되어 있다고 보는 것이 타당하고, 알파스타가 성공적으로 구현됨이 증명되었으니, 이는 곧 위협분석을 강화학습 할 수 있다는 결론에 이르게 된다는 점이다. 비슷한 예로 FPS 게임인 카운터 스트라이크에서도 강화학습이 구현되었는데 이 게임 플레이 속에서도 위협분석의 절차가 추상화되어 있다고 볼 수 있다.(Pearce et al., 2022)

20) 최적화 Weapon Target Assignment 문제에서 주로 사용하는 함수



a. 스타크래프트



b. 카운터 스트라이크

〈그림 2-15〉 강화학습으로 구현된 고차원 게임 플레이

하지만, 이러한 기술이 현 시점에서 실제 군 작전의 위협분석으로 바로 이어지기는 어려운데, 그것은 강화학습의 환경이 되는 모델(Model)이 존재하지 않기 때문이다. 예를 들어, 알파스타의 경우 에이전트가 가장 위협이 되는 적을 식별하고 공격을 하는 행위를 했을 때, 게임 속에서 코딩이 된 규칙에 따라 교전 결과가 계산되고 그것이 아군 유닛의 에너지 감소 또는 적의 에너지 감소와 같은 명시적인 아웃풋으로 보일 수 있다. 다시 말해, 비록 보상이 지연되어(delayed) 발생하기는 하지만 그 값이 정확하게 계산되기 때문에 명확한 모델이 존재한다고 볼 수 있다. 반면, 위협분석과 표적할당을 강화학습하기 위한 모델은 존재하지 않는다. 물론, 위협분석은 다른 방법론(수학식에 의한 계산, 시뮬레이션 등)으로 구현할 수 있고 표적할당 또한 최적화 방법론 등으로 훌륭한 해를 계산할 수 있다. 또한, 강화학습에서도 모델을 정확히 정의하기 어려울 때 사용할 수 있는 모델프리(Model-Free) 방법²¹⁾도 존재한다. 다만, 이 경우에는 모델은 존재하지만 그것을 알기 어려운 경우에 사용하는 방법이고 위에서 설명한 것처럼 전혀 모델이 존재하지 않는다면 활용할 수 없다.

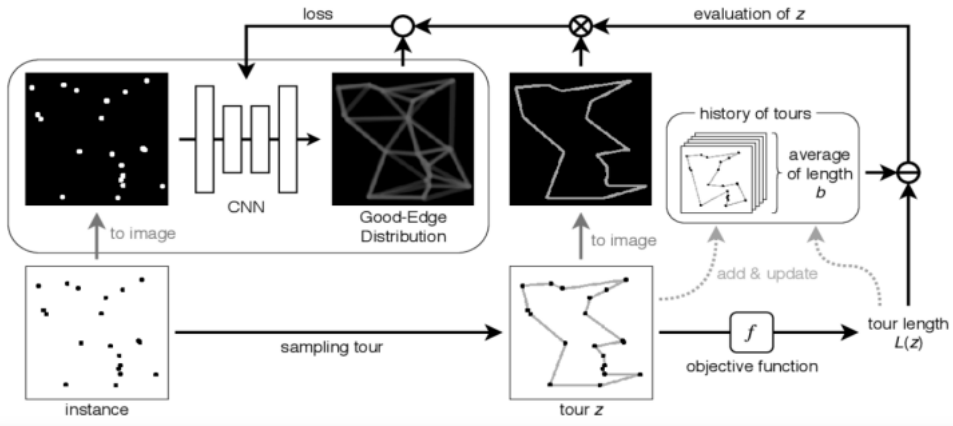
정리하자면, 위협분석 및 표적할당은 향후 무인체계의 활용성을 고려했을 때 반드시 연구 및 실전 적용이 되어야 할 분야가 분명하지만 현재 구체적으로 진행된 강화학습(위에서 밝힌 바와 같이 다른 방법론은 존재한다) 연구는 없는 실정이다.

다. 자원관리(Resource Management)

국방 자원관리는 대표적이면서 고전적인 연구 영역으로 이미 시뮬레이션, 최적화,

21) 예를 들어, 정확한 모델의 작동 원리를 모르더라도 그 결과값(샘플)을 많이 얻어낸 후 추정하는 몬테카를로 강화학습이 가능하다.

또는 다른 분석평가 방법 등으로 효율성을 추구하는 시스템이 갖추어져 있다. 그럼에도 불구하고, 강화학습을 이용하여 대표적으로 어려운 문제를 해결하려는 시도가 증가하고 있다. 예를 들어, 고전적이지만 잘 알려진 어려운 문제인 외판원 문제(TSP, Travel Salesman Problem)를 강화학습으로 구현²²⁾하거나 또 다른 대표적인 문제인 배낭 문제(Knapsack Problem)를 DRL 이론을 이용하여 푸는 것이다. 이것이 뜻하는 중요한 시사점은 이전까지 ‘어렵다’라고 알려진 문제들을 효과적으로 풀 수 있는 길이 열리는 것이다. 예를 들어, 인류가(현재 가진 컴퓨팅 능력으로) 해결할 수 있는 가장 큰 TSP 문제는 8만 여개의 도시를 연결하는 것인데, 강화학습을 적용하면서 더 큰 사이즈의 문제들도 빠르게 해결이 될 가능성을 갖게 되는 것이다.



〈그림 2-16〉 강화학습(DRL)으로 TSP의 해를 개선하는 연구²³⁾

라. 의사결정(Decision Making)

국방 인공지능의 주요 적용분야로 빈번하게 언급되는 ‘인공지능 지휘관’, ‘인공지능 참모’는 복잡한 전투 현장에서 지휘관, 즉 인간이 최선의 의사결정을 할 수 있도록 돕거나 인간을 대신하여 결정을 내리는 것을 의미한다. 많은 군사전략 전문가들이 미래 전장의 모습에 이 의사결정 자동화를 반드시 포함시키고 있지만, 이 분야의 연구는 다음

22) Ottoni, André LC, et al. "Reinforcement learning for the traveling salesman problem with refueling." Complex & Intelligent Systems 8.3 (2022): 2001-2015.

23) Miki, Shoma et al. "Applying Deep Learning and Reinforcement Learning to Traveling Salesman Problem." 2018 International Conference on Computing, Electronics & Communications Engineering (icCECE) (2018): 65-70.

과 같은 이유로(강화학습의 관점에서) 상당히 도전적으로 인식된다.

1) 전투에서 어떤 의사결정이 즉각 결과로 이어지지 않기 때문에(far-reaching impact), 행동에서 보상으로 이어지는 체계의 정의가 어려울 수 있다. 다만, 이것은 강화학습의 다른 응용 분야에서도 나타나는 특성으로 이를 다루기 위한 이론적 배경이 존재하지만, 전투의 의사결정은 심지어 그 결과를 알지 못할 가능성도 크기 때문에 이 특성이 가장 극대화된 경우라고 볼 수 있다.

2) 전투에서의 결정이 술(art)적인 측면이 강하기 때문에 '최선'이라고 부를 수 있는 행동의 정의가 어려울 수 있다. 예를 들어, 전투력 집중과 같은 '원칙'을 따르는 것이 양의 보상을 주는 행동인지, 자신의 교전 결과에 따라서 보상을 주는 것이 맞는지, 상급 부대에 기여한 것을 보상으로 반영해야 하는지, 그렇다면 기여를 어떻게 점수화할 수 있는지 등에 대한 것들이 강화학습 구현을 위해 명확하게 정리가 되어야 하는 것이다.

이와 같은 어려움으로, 전투 의사결정에 대한 기존의 연구들이 주로 2대 2의 정도의 소규모 전투를 대상으로 하거나(Lovlid et al.), 전투기의 공중전을 대상(Toubman et al.)으로만 이루어진 것은 우연이 아니다.



〈그림 2-17〉 공중전을 학습한 인공지능과 조종사의 공중전 대결 모습

반면, 강화학습이 의사결정 문제 해결에 유일한 대안이 될 가능성도 조심스럽게 제안할 수 있다. 먼저 앞으로의 강화학습은 사람의 지식이나 데이터(Human Knowledge) 없이도 스스로 학습할 수 있도록 진화하고 있다. 2017년에 소개된 알파고 제로(AlphaGo Zero)는 이미 전 세상을 놀라게 한 알파고의 후속 인공지능 모델로서 알파고가 사람의 지식을 학습했다는 한계를 뛰어넘어 스스로 자기 자신과의 대결을 통해(Self-Play) 훈련을 할 수 있게 되었으며, 알파고와의 100번 대결에서 100번 모두 승리하는 성능을 보여준 바 있다 (Silver et al.). 이는 곧, '정답'이 존재하지 않고 그것을 정의하는 것이

매우 어려운 전투에서의 의사결정 문제를 어쩌면 기계가 사람이 생각하기 어려운 방향으로 학습할 수 있을지 모른다는 기대감을 갖게 한다.

이와 비슷하게, Sutton 등은 'Reward is Enough'라는 논문에서 보상을 최대화 시키고자 하는 행동으로 지능화의 많은 것들을 설명할 수 있는데, 어쩌면 범용인공지능(AGI, Artificial General Intelligence)까지도 도달할 수 있게 될 것으로 전망하고 있다(Silver et al.). 예를 들어, AlphaZero의 경우 바둑에서 이기면 +1점을 주고, 지면 -1점을 주는 간단한 보상 체계를 통해 온갖 지능적인 트릭(예를 들어, 방심하지 않기, 패턴 인식하기, 기습적인 플레이 등)들을 사용하는 것으로 밝혀졌다. 이러한 범용 인공지능의 가능성은 지금은 어렵게 인식되는 전투 의사결정 인공지능도 실현될 수 있다는 생각을 주는 것이다.

마. 워게임 CGF 자동화

워게임 CGF란 Computer Generated Forces의 약자로 워게임 안에서 전투를 하는 객체를 의미한다. 예를 들어, 대대전투지휘훈련을 할 때 단대부호로 표기되는 전투전초 또는 소대, 분대 등이 모두 CGF라고 할 수 있고, 또는 전차 시뮬레이션에서 나타나는 적 전차 역시 CGF이다. CGF는 일반적으로 대항군이라고 부르는 훈련 부대가 아닌 게이머에 의해 조작이 되거나 또는 정해진 규칙에 따라 일부 자동으로 운용되기도 한다.

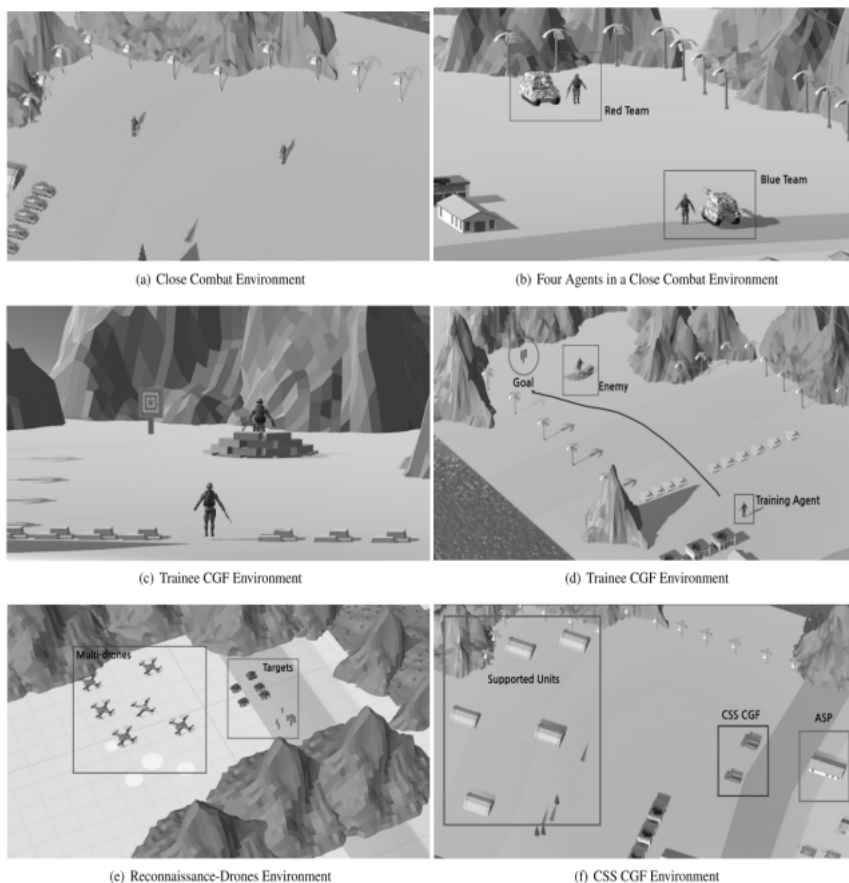
최근, 이 CGF의 자동 모의가 중요한 토픽으로 떠오르고 있는데, 이는 병역 자원 감소에 따른 비전투 병력의 감소, 훈련의 효율성 증대 등 워게임에서 지능화 에이전트를 구현해야 할 필요성이 커지고 있기 때문이다²⁴). CGF를 자동화 모의하기 위한 방법은 다양한데, 규칙기반(Rule-Based), 에이전트 기반, 그리고 강화학습으로 구현이 가능하다. 각 방법론에 대한 장단점과 구현 방법 등은 Cho et al. (2020)을 참조하기 바란다. 결론적으로, 워게임 CGF 자동화를 위해 강화학습의 사용은 필수적인데, 이는 강화학습이 훈련 몰입도 측면, 훈련 계획 및 통제 측면, 기술 연구의 필요성 등에서 우수하기 때문이다.

워게임에서 이루어지는 강화학습 연구가 중요한 또 하나의 이유는, 워게임이라는 하나의 시뮬레이션 환경이 전투의 모델로서 그 역할을 할 수 있기 때문이다. 앞서 위협분석 과업을 강화학습으로 구현하는 것이 어려운 이유로 모델이 존재하지 않기 때문

24) Cho, N., Moon, H., & Pyun, J. J. (2020). The Study on CGF Behavior Modeling Methodologies for Defense M&S: Focusing on Survey and Future Direction. Journal of the Korea Society for Simulation, 29(2), 35-47. <https://doi.org/10.9709/JKSS.2020.29.2.035>

이라고 설명한 바 있다. 이 논의를 이어가면, 워게임은 에이전트의 어떤 행동이 전투로 이어지고 전투의 결과가 결과 값으로 도출이 되기 때문에 강화학습 보상 설계의 요소가 될 수 있다. 게다가, 군에서 활용하는 워게임은 적 장비 파라미터와 같은 데이터들이 현실의 그것을 최대한 유사하게 구현이 되어 있기 때문에 신뢰성 있는 모델 환경을 제공할 수 있다.

〈그림 2-18〉은 시뮬레이션 환경에서 지상군 소부대 전투행위가 강화학습으로 학습이 되는지를 실험 해본 연구 결과이다. 이 연구는 MARL 환경에서 구현되었고, 전투에서 승리하기 위해 같은 종류(병과)의 전투원끼리 협동을 하고, 무기체계의 특성을 이해하여 그것을 활용할 줄 알며(예를 들어, 곡사화기는 뒤로 물러나면서 화력전투를 실시), 탄약 재보급과 같은 단순한 전투지원기능을 수행할 수 있음을 실증하였다. 이러한 기능들이 모듈화 된다면, 지능화 CGF의 성공적인 구현 및 적용도 빠른 시간 안에 이뤄질 수 있을 것으로 판단된다.



〈그림 2-18〉 강화학습으로 구현된 CGF의 모습 25)

제4절 정책적 제언

1. 개요

지금까지 강화학습의 기본 원리를 살펴보았고, 강화학습의 최신 연구 동향과 적용 사례를 설명하였다. 그리고 이를 바탕으로 강화학습의 국방에서의 적용 방안을 제안하였다. 본 절에서는 지금까지 논의한 여러 가지 제안들을 실현하기 위해 어떤 정책적인 고려가 필요한지에 대해 논의하고자 한다.

본 연구 결과는 국방혁신 4.0의 핵심인 인공지능 기반 핵심 첨단 전력 확보 과업에 참여하는 국방부, 합참, 각 군, 연구 기관, 학교 기관 등에서의 활용을 전제로 하고 있으며, 따라서 정책적 제언 역시 해당 수요층을 대상으로 한다.

2. 정책 제언

가. 싸우는 개념과 기술의 동시 발전

군사전략이 먼저인지, 과학기술이 먼저인지와 같은 담론은 더 이상 무의미한데, 그것은 때로는 군사전략이 과학기술을 선도해야 할 필요가 있고, 어떤 파트에서는 앞서가는 과학기술을 따라 싸우는 방법이 구체화되어야 하기 때문이다. 또한, 과학기술은 그 안에 수 없이 많은 다양한 기술을 포함하고 있기 때문에, 어떤 의미를 가지는 하나의 대명사로 사용하는 것은 마땅하지 않다. 예를 들어, 민간의 멀티콥터 드론 시장이 폭발적인 성장을 보이면 군은 그 드론을 어떻게 내 전투에 활용할 수 있을까를 고민해야 한다. 처음 구상했던 싸우는 방법에는 그러한 개념이 없더라도 추가적으로 반영을 해야만 하는 것이다.

소요군으로 대표되는 군사전략가와 방산 업체 또는 학교 및 연구 기관으로 대표되는 기술자들의 간극은 생각보다 크다. 기술자들은 소요군의 '요구사항'이 없이는 구체적인 기술을 연구할 수 없다고 한다. 반면, 소요군은 기술을 잘 알지 못하여 실현 가능성이 없거나 또는 기술 발전 추세와 어울리지 않는 밑그림을 그리는 실정이다.

예를 들어, 어떤 차세대 지상무인로봇 A에 탑재되어 활용되는 인공지능 소프트웨어를 개발한다고 가정하자. 이 인공지능이 만들어지기 위해 요구 사항이 어느 정도로 구

25) Choi, M., Moon, H., Han, S., Choi, Y., Lee, M., & Cho, N. (2022). Experimental and Computational Study on the Ground Forces CGF Automation of Wargame Models Using Reinforcement Learning. IEEE Access, 10, 128970-128982.

체화 되어야 할까? 다음의 표를 보고 논의를 이어간다.

〈표 2-2〉 무인체계 요구사항의 예시

분류	질문	영향
목적	1. 전투원(인간)을 완전히 대체하는 것인가? 즉, 완전 무인화가 요구되는가?	과업
임무	2. 로봇 A는 정찰용인가? 필요 시 교전을 하는가?	행동벡터
정보	3. 단일체계 A의 정보 획득 경로는 무엇인가? (센서, 카메라 기반 영상 정보, 성능 등)	DRL
연결	4. 단일체계 A는 다른 체계들과 어떻게 어느 정도로 소통하는가?	MARL
활용	5. 체계 A는 전투기술 측면에서 어떻게 활용되는가? (저비용 대량 투입이 가능한 것인가?)	계산능력
중요도	6. 체계 A는 상급 부대 작전에 어느 정도로 기여하는가?	통신

〈표 2-2〉는 가능한 요구사항의 일부를 담고 있다. 이러한 질문들은, 답변이 무엇인지에 따라, 기술 개발에 큰 영향을 미치게 된다. 예를 들어, 1번 질문의 답이 완전 무인화를 필요로 하는 것이 아니라면 필요한 부분 과업에 대해서만 강화학습을 진행하면 된다. 만약, 2번 질문에서 필요 시 교전을 해야 한다면, 그 만큼 강화학습 행동 변수가 크게 정의가 되어야 하고, 전혀 다른 난이도의 알고리즘이 만들어져야 할 것이다. 3번 질문에서 체계 A가 정보를 획득하는 소스에 따라 강화학습의 세부 기술이 달라질 수 있다. 4번 질문에서, 체계 A가 다른 체계들과 협업을 해야 한다면 강화학습은 MARL 영역으로 넘어가게 되고, 사용하는 알고리즘 등 많은 것이 다르게 정의된다. 5번 질문의 답이 저비용 체계로 활용하는 것이라면, 체계에 탑재(onboard)되어야 하는 GPU가 최소한의 성능을 가져야 하고, 온라인 계산 능력이 현저하게 줄어들 수밖에 없다. 6번 질문에 따라 체계 A가 정보를 취합하여 선택적으로 전송을 해야 하는 상황이 발생할 수 있으므로 강화학습 시 이를 반영해야 한다.

이처럼, 기술이 세부적으로 들어갈수록 요구사항의 명징성이 중요해 지기 때문에, 소요군과 기술자는 균형 있게 함께 개념을 발전시킬 필요가 있는 것이다. 물론, 구체적인 요구사항이 없이도 기초 연구를 진행하는 것에는 제한이 없겠지만, 연구의 성과물이 현장의 요구사항과 떨어져 갈 수 있음을 고려해야 한다.

나. 강화학습을 위한 환경 확보

강화학습은 다른 인공지능 알고리즘과 유사하게 학습을 위한 연산량이 방대해 높은 사양의 서버 자원(리소스)을 요구한다. 물론, 필요한 연산량은 강화학습 과업의 종류, 강화학습 알고리즘의 종류, 신경망의 구조, 병렬 계산 유무, 하이퍼 파라미터의 선택 등에 따라 크게 달라질 수 있지만, 일반적으로는, 개인용 컴퓨터의 CPU로는 감당하기 어려운 경우가 많다. OpenAI의 2018년 보고에 따르면²⁶⁾, 가장 강력한 인공지능을 훈련시키는데 필요한 컴퓨팅 성능은 3-4달마다 두 배씩 증가한다고 보고되었다.

앞서 테슬라의 자율주행 인공지능인 FSD(Full Self Driving)를 설명하였는데, 이 인공지능의 학습을 위해 테슬라가 자체적으로 제작한 슈퍼컴퓨터 Dojo는 4백만 대 이상의 테슬라 차량에서 보내오는 백만 테라바이트 이상의 영상 정보를 처리할 수 있는 것으로 알려졌다. 마이크로소프트는 OpenAI의 ChatGPT 성능 향상을 위해 수백만 달러를 투자해 슈퍼컴퓨터를 지원한다. 이 슈퍼컴퓨터는 엔비디아의 GPU를 수천 개 연결하여 구현되는 것으로 보고되었다. 이처럼, 거대한 기업 뿐 아니라 학교 기관의 연구실 또는 연구소에서도 강화학습을 위한 기본적인 서버는 보유하고 있으며 관련 지원을 아끼지 않는 것이 사실이다. 반면, 국방 관련 연구 기관의 실험 환경은 매우 열악하다. 물론, 최근 수년간 각 군 차원에서 4차 산업혁명의 도래와 함께 많은 예산을 투자해 서버를 구입하고, 또 이미 높은 컴퓨팅 능력을 가진 기관과의 협력 체계를 구축해 온 것도 사실이다. 하지만, 강화학습을 조금 더 공학적으로 파헤쳐 보면 학습에 사용되는 플랫폼, 프로그래밍 언어, 시뮬레이션 환경, 코드의 작동 환경 등이 통일되어 있지 않고 버전 관리 등이 엄격하게 요구되어 소위, 이른바 테스크(Task) 단위로 서버를 공유하는 것은 매우 어려운 일이다. 더구나, 모든 군 기관은 엄격한 보안 규정을 가지고 있어 자료의 송수신이 어렵고, 이는 강화학습 환경 구성을 더 어렵게 만든다.



〈그림 2-19〉 ‘구글 클라우드 넥스트 2023’ 행사에서 인공지능 클라우드 소개

26) IEEE Spectrum

따라서, 강화학습의 연구가 필요한 군 관련 기관에는 독립적으로 사용이 가능한 서버급 장비를 보안에 저촉이 되지 않는 장소에 갖추는 것이 가장 현실적인 대안이다. 인터넷의 자유로운 사용은 필수적이다. 또한, 인공지능 환경을 클라우드의 형태로 이용하는 것도 가능한 방안이다. 아마존웹서비스, 마이크로소프트에 이어 구글 클라우드도 엔비디아와의 협력을 통해 클라우드 시장에 합류하는 등 클라우드 구독 서비스 시장이 커지고 있기 때문이다.

다. 효과적인 거버넌스 구축

마지막으로 제안할 정책은 인공지능 정책을 담당하는 거버넌스의 구축에 관한 것이다. 이미 논의한 바와 같이, 싸우는 방법을 모르면 기술이 구체화되기 어렵고 반대로 기술을 모르면 싸우는 방법의 실현이 어려워진다. 따라서, 기획 단계에서부터 과학자의 참여가 필요하다. 반면, 과학기술이 워낙 빠르게 변하기 때문에 기술의 변화를 온전히 따라잡는 것은 개인이 할 수 없는 일이다. 따라서, 과학자들의 참여는 거버넌스의 형태(또는 시스템) 하는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 역할과 위상이 조금씩 다른 다양한 조직을 활용할 필요가 있으며, 이들이 정책 담당자를 쉽게 도와줄 수 있는 여건이 마련될 필요가 있다.

앞서 논의한 바와 같이, 과학기술은 매우 빠르게 바뀐다. 그 만큼 그 기술을 따라잡는 것이 어렵다는 것이다. 강화학습 관련 새로운 연구들이 매일 수편에서 몇 십 편씩 발표가 되고 있다. 이처럼, 급변하는 과학기술을 따라가기 위해서는 전문적으로 기술을 찾고 조사하는 군 자체 기능이 보강되어야 한다. 지금도 각 군에는 이러한 기능을 수행하는 조직이 있지만, 미 육군은 이러한 헤드헌터 기능을 위해 3성급이 지휘하는 Army Futures Command 조직을 가지고 있음을 벤치마킹할 필요가 있다.

제3장 과학적 분석평가 방법론

제1절 일반적인 과제·과업의 분석평가 방법론

1. 개요

가. 프로젝트는 단일 목표하에 부여된 작업을 완성하기 위해 일정한 순서에 의해 상호 연결되어 수행되는 활동들의 조합이다. PMBOK(Project Management Body

Of Knowledge)에서는 프로젝트를 ‘고유한 제품, 서비스 또는 결과물을 창출하기 위해 한시적으로 투입하는 노력’으로 정의하고 있다.²⁷⁾

나. 프로젝트 활동은 시간과 자원이 투입되므로 완성될 수 있는 하나의 세부작업으로서 일정한 순서하에 진행되며, 순서를 무시하고 작업을 수행할 수 없다.

다. 프로젝트는 성격·규모·복잡성·평가방법·기간 등 내·외부적인 환경에 따라 매우 다양하기 때문에 프로젝트와 과제 및 과업의 분석평가 방법론은 매우 많다. 프로젝트의 효율적 수행 및 통제관리를 위해 개발된 최초의 관리기법은 간트차트(Gantt Bar Chart)이다. 간트차트는 시간이라는 일직선 위에 각 활동의 착수시간과 완료시간을 나타내면서 계획 대비 현재 활동의 진척상황을 표시할 수 있는 기법이다. 간트차트는 작성이 쉽고 작업의 진척도를 그래프로 알기 쉽게 보여줄 수는 있었지만 서로 다른 작업들간의 관계나 상호의존성을 표시할 수는 없었다.

라. 따라서 프로젝트가 점점 거대해지고 복잡해지면서 활동 상호간의 연관성을 중심으로 보다 효율적으로 프로젝트를 관리할 수 있는 기법이 필요하게 되었다. 이에따라 프로젝트 관리 표준인 PMBOK이 등장했다. PMBOK은 단일 프로젝트의 관리 표준을 포함하고 있지만, 거의 모든 프로젝트에 효과적으로 적용할 수 있다. 그러나 모든 프로젝트에 동일한 기준을 적용할 필요는 없으며, 프로젝트 상황에 맞게 수정·보완해서 적용한다.

마. 본 장에서는 대표적으로 활용되고 있는 일반적인 과제 및 과업의 분석평가 방법론 중 PM(Project Management) 기반 분석평가 방법, 목표비용 기반 분석평가 방법, 성과기반 분석평가 방법을 중심으로 기술한다.

2. 프로젝트 관리 기반 과제·과업의 분석평가 방법

가. 프로젝트 관리(Project Management : PM)는 과제 및 과업의 목표를 달성하기 위해 프로젝트를 계획·조정·실행·평가 및 완료하는 성과관리 기법이다.

1) PM은 목표 관리, 범위 관리, 일정 관리, 원가 관리, 품질 관리, 인적자원 관리, 의사소통 관리, 위험 관리, 조달 관리의 9개 요소로 구분하여 과제 및 과업을 분석평가한다. 이 요소들은 효과적인 프로젝트 수행을 위해 필수적으로 고려되어야 하는 핵심 요소이다.

2) 목표 관리 : 프로젝트 목적에 대한 이해, 구체적인 목표와 기대효과 설정 등 관리

27) 김병호, 정승원, PM+P 개정5판, 2010.

- 3) 범위 관리 : 프로젝트 범위 정의, 범위 변경 절차 적절성 등 관리
- 4) 일정 관리 : 일정 계획, 수행 계획 따른 일정 추적·조정 등 관리
- 5) 원가 관리 : 예산 계획, 예산 분배, 비용 추적, 예산 초과 조치 등 관리
- 6) 품질 관리 : 프로젝트 결과물의 품질 요구사항 정의, 품질 표준 수립, 품질 검증 및 품질 제어 등 관리
- 7) 인적자원 관리 : 프로젝트 팀원들 간의 역할과 책임 정의, 팀 내 의사소통 활성화 위한 방법 등 관리
- 8) 의사소통 관리 : 프로젝트 수행과 관련된 정보와 의견 등에 대한 팀원과 이해관계자들 대상 의사소통 적절성, 의사결정 수행, 의사결정 결과 문서화, 의사결정에 대한 의사소통 등 관리
- 9) 위험 관리 : 프로젝트에서 발생할 수 있는 위험 예측, 위험 분석, 위험 대응 전략 수립, 위험 감시 및 제어 등 관리
- 10) 의사 결정: 하는 것이 필요합니다.에 대한 관리
- 11) 조달 관리 : 필요 자원 식별, 조달계획 수립, 조달 수행 등 관리

〈표 3-1〉 프로젝트 관리 주요 요소

분 야	내 용
목표 관리	프로젝트 목적 이해, 목표 중심 결과물 개발, 계획 수립 등
범위 관리	작업 내용 이해, 우선순위 결정, 작업 범위 변경 요청 관리 등
일정 관리	작업 기간 추정, 일정계획 수립, 진행상황 관리 등
원가 관리	비용추정, 비용 통제 전략 개발, 비용 변경 관리 등
품질 관리	품질 요구사항 식별, 품질 검증 및 보증, 품질 문제 대응 등
인적자원 관리	인원 선발/배치, 인력개발 및 관리 전략 수립 등
의사소통 관리	정보 공유를 통해 프로젝트 계획 조정 등
위험 관리	위험 식별·분석·대응계획 수립·추적 및 관리 등
조달 관리	필요 자원 식별, 조달계획 수립, 조달 수행 등

나. 국방개혁은 복잡하고 다양한 과업으로 구성되어 있다. 따라서 상기에서 기술한 PM 관리 요소를 활용하여 다음의 절차를 따라 국방개혁의 수준과 진도를 평가하는 것은 효과적인 분석평가 절차이다.

1) 국방개혁 목표와 기대효과 확인 : 국방개혁의 목표와 기대효과를 정확히 이해하고, 이를 구체적인 목표와 KPI로 설정

2) 국방개혁의 하위 프로젝트별로 PM 요소 적용 : 국방개혁의 각 프로젝트에 대해 목표 설정, 범위 정의, 일정 계획, 예산 관리, 위험 관리, 팀 조직, 품질 관리, 의사

결정, 감사 및 검토, 의사소통 관리 등 PM 요소 적용

3) 국방개혁의 하위 프로젝트별로 평가지표 설정 : 각 프로젝트의 목표와 기대효과를 바탕으로 평가지표를 설정하여 성과 측정

4) 국방개혁 성과에 대한 종합 평가 : 각 프로젝트별로 측정된 성과를 종합하여 전체 국방개혁의 성과 평가. 이를 통해 국방개혁의 수준과 진도를 파악하고, 문제점을 발견하여 개선방안 수립

3. 목표비용 기반 과제·과업의 분석평가 방법

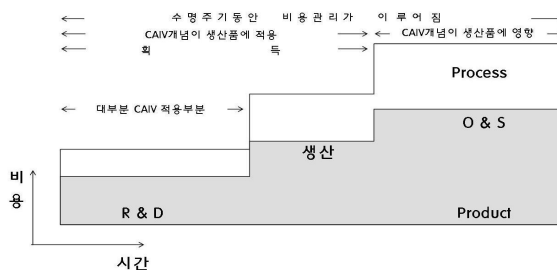
가. CAIV(Cost As an Independent Variable)는 비용 독립변수로 과제·과업을 관리 및 평가하는 방법이다. 즉 비용과 성능에 대한 절충효과를 판단하여 과제·과업 관리의 의사결정에 활용하는 것이다. CAIV는 프로젝트 초기 단계부터 프로젝트 총 비용을 추정하여 프로젝트 관리에 활용하고, 프로젝트 추진 과정에서 대안에 대해 초기단계부터 비용 추정하여 상호 비교한다.

나. CAIV는 국방 분야에서 대형 프로젝트에 해당하는 무기체계 획득 시 과거와는 달리 성능보다는 비용에 중점을 두고 성과를 분석평가하는 접근방법에서 출발했다. 신규 무기체계 획득 시 총수명주기비용을 절감하기 위한 목표비용을 설정하고 이를 달성하기 위해 프로젝트 전 기간 동안 성과와 비용을 관리한다.

다. CAIV 적용범위는 무기체계 개발 프로젝트의 예를 들면 <그림 3-1>과 같이 프로젝트 수명 전체 단계에서 이루어진다.

1) CAIV는 일반적으로 프로젝트 초기 단계인 개발 및 생산단계에 집중적으로 적용된다.

2) CAIV에 의한 무체계 획득 전략은 기존의 획득방법보다 유연하다. CAIV 개념 하에서는 무기체계 획득 초기 단계부터 비용목표를 설정하여 목표달성을 위해 노력한다. 무기체계 개발 사업 과정에서 설정된 비용목표 달성이 곤란할 경우 군 요구성능을 조정하거나 비용절감 방안을 모색하여 목표비용에 맞추는 노력을 한다. 두 가지 모두 불가능할 경우 프로젝트 예산을 추가할당하여 비용목표를 조정할 수 있다.



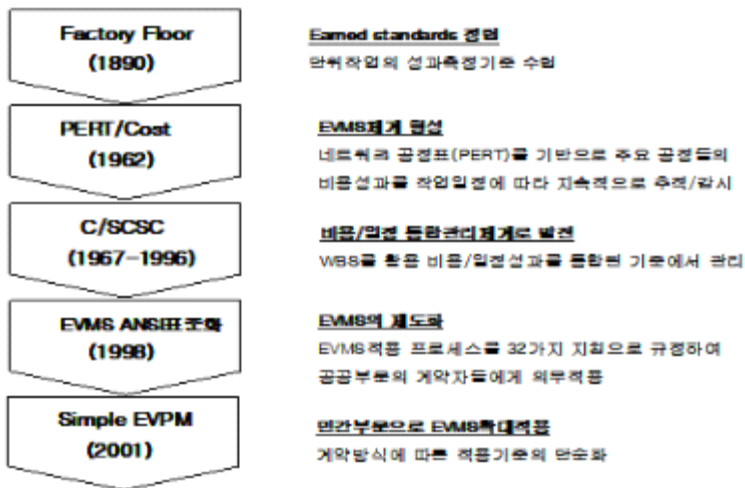
<그림 3-1> CAIV 적용범위²⁸⁾

라. 프로젝트 관리자는 다음과 같이 CAIV 개념을 적용하여 비용·성능·일정 간에 적절한 절충(Trade-Off) 방안을 분석평가할 수 있다.

- 1) 프로젝트 초기단계에서 비용목표 설정
- 2) 비용과 성능의 절충영역(Trade Space)을 설정하여 최적 대안 식별
- 3) 비용·일정·성능 목표 달성을 위한 위험관리
- 4) 프로젝트 이해관계자들에게 동기를 부여하여 비용목표 달성 유도
- 5) 비용목표 달성을 위한 측정기준을 개발하여 프로젝트 관리 및 분석평가

4. 성과 기반 과제·과업의 분석평가 방법

가. 성과관리체계(EVMS: Earned Value Management System)는 1967년 미국방부에서 신규사업의 자원조달 및 예산집행관리를 위해 비용·일정관리체계 기준을 개발 운영하면서 발전된 개념²⁹⁾이다.



〈그림 3-2〉 EVMS 발전과정

나. EVM에 대해 미국 예산관리처(OMB: Office of Management and Budget)는 '사업의 비용·일정·목표의 기준설정과 성과측정을 위한 성과위주 관리체계'³⁰⁾라고

28) 강성진, 비용추정론, 두남, 2010.

29) DSMC, "Earned Value Management Textbook," 2000. p. 17.

30) OMB, Principles of Budgeting for Capital Asset Acquisition, Office of Management and Budget, US Government Printing Office, Washington D.C., USA, 1997. p. 343.

정의하고 있으며, Fleming과 Koppelman은 '상세히 작성된 작업계획에 대한 실제 작업을 계속적으로 추정하여 사업의 최종비용과 일정을 예측할 수 있는 관리방법'으로 정의하고 있다. 즉, EVMS는 성과가치 측정방법을 이용하여 성과·일정·비용 목표를 조정·통제하는 통합된 관리체계를 구축하고 적용하는 개념이다.

다. EVMS는 일정과 비용을 통합하여 계획예산(PV : Planned Value)을 수립하고, 계획계산을 기준으로 사용한 실제비용(AC : Actual Cost)과 성과(EV : Earned Value)를 비교하여 프로젝트 성과를 측정하는 방법이다. EVMS에 의한 과제·과업 분석평가는 비용과 일정을 정확하게 예측하기 위해 계획에 대한 성과를 정량적으로 측정한다. 이를 통해 사업의 계획대로 진행 여부, 계획된 시간과 예산범위에서 사업 종료 여부, 추가 예산과 일정에 대한 예측과 관리가 가능하다.

라. EVMS는 비용과 일정 성과를 EV(Earned Value)라는 기준으로 평가한다. 실질적 수행한 작업의 가치를 비용으로 환산한 것을 의미하는 Earned Value³¹⁾를 통해 작업에 소요된 비용이 계획보다 많거나 적은지 여부와 프로젝트 진행 정도를 분석할 수 있다. EV는 사업진도의 측정이며, 프로젝트의 하부요소 및 전체 진도를 평가하는 단위, 프로젝트 진도와 성과를 분석하기 위한 지표, 프로젝트 비용 성과 분석의 기초로서의 특성이 있다.

마. EVMS는 <표 3-2>에서처럼 계획요소, 측정요소, 분석요소로 구분되어 있다.³²⁾ EVMS 구성요소들은 상호 관련이 되어 있어서 PV가 수립되고 EV와 AC가 측정되면 성과분석 및 미래예측이 가능하다.

<표 3-2> EVMS의 계획, 측정 및 분석 요소³³⁾

구분	약어	용어	의미	산출방법
계획 요소	WBS	Work Breakdown Structure	작업분할구조	
	CA	Control Account	통제계정	
	PV	Planned Value	계획예산	
	PMB	Performance Measurement Baseline	성과관리기준선	
	BAC	Budget At Completion	목표사업예산	Σ PV
측정 요소	AC	Actual Cost	실비용	
	EV	Earned Value	성과	

31) Value는 사전적으로 어떤 일을 수행하기 위해 계획된 금액(시간)을 의미한다.

32) 강성진, 비용추정론, 두남, 2010.

33) 강성진, 비용추정론, 두남, 2010.

분석 요소	SV	Schedule Variance	일정편차	EV - PV
	CV	Cost Variance	비용편차	EV - AC
	SPI	Schedule Performance Index	일정성과지수	EV / PV
	CPI	Cost Performance Index	비용성과지수	EV / AC
	EAC	Estimate At Completion	최종사업비추정액	BAC/성과지수
	ETC	Estimate To Completion	잔여사업비추정액	(BAC-EV)/성과지수
	VAC	Variance At Completion	최종사업비 편차	BAC - EAC

1) 계획요소는 프로젝트의 업무를 정의하는 작업분할구조(WBS), 분할된 구조를 담당 부서에 할당하는 통제계정(CA), 계획예산(PV), 성과관리기준선(PMB), 목표사업 예산(BAC)이다. 성과관리기준선(PMB)을 기준으로 성과를 관리하고 최종 상태를 예측함으로써 프로젝트 추진 결과의 성공·실패·단축·지연 등을 판단한다.

가) 작업분할구조(WBS) : 프로젝트의 모든 작업을 계층구조적으로 분류하여 프로젝트의 일정과 비용에 대한 실적을 측정하기 위한 계층도

나) 관리계정(CA) : WBS에서 임의의 특정 계층이다. 비용·일정 통합 및 성과측정을 위한 기본단위로서 프로젝트의 규모·난이도 등 특성에 따라 구체화 수준 결정

다) 성과측정기준선(PMB) : CA 구성항목별로 비용을 일정에 따라 배분하여 표기한 누적곡선으로서 계획과 실적을 비교하여 관리

2) 측정요소는 프로젝트 진행과정에서 주기적으로 성과를 측정하는 요소로서 프로젝트 추진간 집행한 실제 비용과 달성한 성과이다.

가) 계획예산(BCWS) : 최초 계획을 기준으로 성과평가 기준 시점까지 완료해야 할 업무에 할당된 예산으로서 실적치의 비교 기준

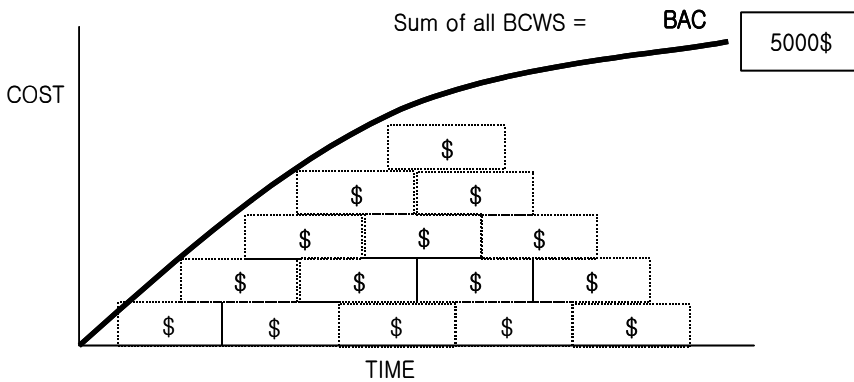
나) 실적가(BCWP) : 현재까지 투입된 비용이 획득한 가치인 EV로서 성과평가 기준 시점까지 완료한 업무의 가치를 비용으로 환산

다) 투입비용(ACWP) : 성과평가 기준 시점까지 완료한 업무에 실제로 투입한 비용으로서 ACWP의 추세를 통해 예산 초과 여부를 추정

3) 분석요소는 성과평가 시점에서 계획 및 측정요소를 이용하여 프로젝트의 성과를 분석하고, 프로젝트의 일정과 비용에 미칠 영향을 예측하는 요소이다. 프로젝트 진행간 일정성과지수(SPI)와 비용성과지수(CPI)를 이용해서 비용 및 일정 측면에서 프로젝트의 성과를 평가한다. 분석요소를 통해서 최종 프로젝트 비용 또는 잔여 프로젝트 비용을 추정할 수 있고, 프로젝트의 정상적인 진행 여부를 평가할 수 있다.

가) 일정편차(SV) : 성과평가 기준 시점에서 BCWS와 BCWP의 차이

- $SV = BCWP - BCWS$
- $SV < 0$: 일정 지연, $SV > 0$: 일정 초과, $SV = 0$: 일정 정상
- 나) 일정성과지수(SPI) : BCWP를 BCWS로 나눈 값
 - $SPI < 1$: 계획 대비 일정 지연
 - $SPI > 1$: 계획 대비 일정 초과
- 다) 비용편차(CV) : 성과평가 기준 시점에서 BCWP와 ACWP의 차이
 - $CV = BCWP - ACWP$
 - $CV < 0$: 비용 초과, $CV > 0$: 비용 절감
- 라) 비용성과지수(CPI) : BCWP를 ACWP로 나눈 값
 - $CPI < 1$: 계획 대비 비용 초과
 - $CPI > 1$: 계획 대비 비용 절감
- 마) 목표사업예산(BAC) : BCWS를 누계한 금액으로 성과측정기준선(PMB)³⁴⁾



〈그림 3-3〉 BAC 개념

바) 잔여사업비추정비용(ETC) : 성과측정 기준일 이후 사업 종료시까지 투입될 추정 비용

- $ETC = (BAC - BCWP) / CPI$

사) 최종사업비추정비용(EAC) : 사업 착수에서부터 성과평가로 추정된 예상 완료일까지 투입될 추정 비용

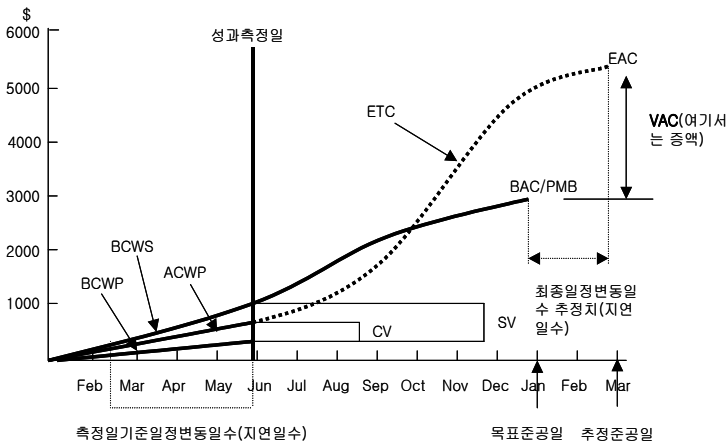
- $EAC = ACWP + (잔여 BAC = BAC - BCWP)$

34) 강성진, 비용추정론, 두남, 2010.

- 진도율 25%이하인 프로젝트에 주로 적용
 - $EAC = ACWP + (Remaining\ BAC = (BAC - BCWP) / CPI)$
 - $EAC = BAC / CPI$, 기준예산을 현 집행추세로 재평가
 - 진도율 25%이상인 프로젝트에 주로 적용
 - $EAC = ACWP + ETC$
 - 잔여업무는 현 추세이나 기준예산과 다른 것으로 판단
- 아) 최종사업비편차추정액(VAC) : BAC와 EAC의 차이

바. EVMS를 적용한 과제·과업에 대한 분석평가 절차는 다음과 같다.

- 1) WBS 설정 : 프로젝트 범위와 모든 업무를 계층적으로 정의하는 WBS를 구축한다. WBS를 기준으로 업무를 수행할 조직분할구조(OBS)를 작성하여 WBS와 통합한다. WBS와 OBS가 교차하는 관리계정(CA)으로 비용과 일정에 대한 성과를 측정한다.
- 2) 일정계획 작성 및 예산 배분 : WBS에 정의된 업무의 일정을 계획하고, 각 업무에 소요되는 예산을 배분하여 관리계정에 대한 PMB를 설정하는 기준선을 작성한다.
- 3) 실적 데이터 집계와 관리 : 관리계정별로 비용정보가 파악될 수 있도록 비용관리체계를 구축하여 관리한다.
- 4) 비용/일정 성과분석 및 예측 : 일정과 비용에 대해 계획 대비 성과를 분석하여 향후 일정과 비용을 추정한다.
- 5) 변경 관리 : 프로젝트 수행과정에서 발생하는 변경사항을 성과측정기준선에 반영한다.



<그림 3-4> EVMS에 의한 성과측정 주요지표

제2절 단일 과제·과업에 대한 평가지표 선정 및 추진진도 평가 방법론

1. 단일과제 추진진도 평가 방법론의 이해

가. 단일 과제와 과업의 추진진도 평가를 위한 대표적인 방법은 PERT(Program Evaluation and Review Technique), CPM(Critical Path Method), GERT(Graphical Evaluation and Review Technique), Monte Carlo Simulation에 의한 변동관리 방법 등이 있다.

나. 본 장에서는 PERT, CPM, GERT를 중심으로 각 방법론의 장·단점 등을 조사한다.

다. PERT와 CPM은 프로젝트 활동간의 관련성을 고려하면서 프로젝트를 계획하고 통제하는 효율적인 프로젝트 관리기법이다. PERT와 CPM은 거의 동시에 서로 다른 곳에서 개발되었다. PERT는 미 해군의 요청으로 폴라리스 미사일 개발 프로젝트의 효과적 수행을 위해 필요한 연구개발의 기획·통제 목적으로 고안되었고, CPM은 듀폰사에 의해 건설공사를 관리할 목적으로 개발되었다.

라. PERT는 프로젝트 일정 관리를 위한 기법이다. PERT는 일반적으로 활동의 예상 기간을 계산하기 위해 3가지 값(최소 기간, 최대 기간, 예상 기간)을 사용한다. PERT는 불확실한 프로젝트에서 일정 계획 수립 및 관리에 유용하고, 각 과업의 일정 변경이 전체 프로젝트 일정에 미치는 영향에 대한 예측이 가능하다. PERT의 일반적인 수행절차는 다음과 같다.

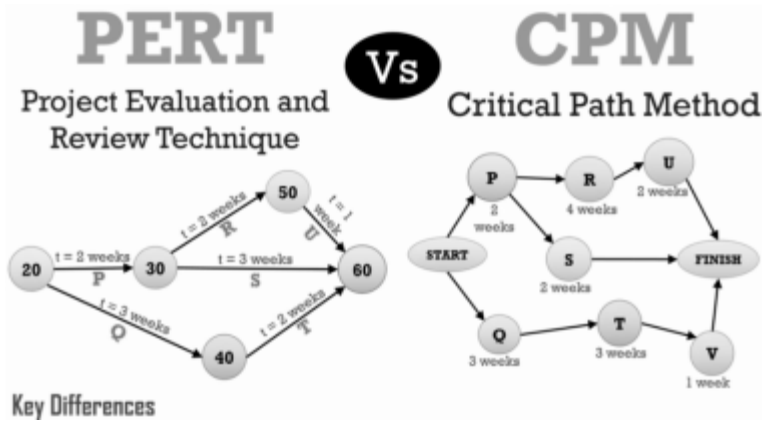
- ① 각 활동별 최소 기간, 최대 기간, 예상 기간 추정
- ② 활동 간 선후 관계를 파악하여 활동들을 네트워크로 구현
- ③ 각 활동의 최소 기간, 최대 기간, 예상 기간을 바탕으로 전체 프로젝트의 최소 기간, 최대 기간, 예상 기간 계산
- ④ 각 활동의 예상 기간, 최소 기간, 최대 기간을 바탕으로 일정의 분산 계산
- ⑤ 예상 기간과 분산도를 최적화하기 위한 일정 계획 수립

마. CPM은 프로젝트 관리에서 과업을 논리적으로 연결하여 과업의 선후 관계와 소요 기간을 고려한 프로젝트 전체 일정을 계획하는 방법론이다. CPM은 프로젝트 일정을 예측하고, 계획한 일정을 실제 일정과 비교하고, 일정을 추적하고 제어하는데 사용한다. CPM의 일반적인 수행절차는 다음과 같다.

- ① 과업 식별
- ② 과업 간 선후 관계 네트워크 작성
- ③ 과업 기간 추정

- ④ 최장 경로 식별
- ⑤ 일정 계획
- ⑤ 일정 추적

바. PERT와 CPM의 거의 유사한 방법이다. PERT는 일의 순서를 계획하기 위해 확률값을 이용하여 활동의 소요시간을 추정하지만, CPM은 가장 오래 걸리는 경로를 기준으로 일정을 관리하기 위해 확정값을 이용하여 활동의 소요시간을 추정한다.³⁵⁾ 현재에는 두 방법을 구분하지 않고 PERT/CPM이라고 부르며 프로젝트 관리를 위해 사용하고 있다.



〈그림 3-5〉 PERT와 CPM의 개념 차이

사. PERT/CPM에 의한 프로젝트 관리는 기획, 일정계획, 통제 단계로 나누어 수행한다.

1) 기획단계에서는 프로젝트를 여러 개의 구별된 활동으로 구분하여 이들 활동을 완료하는데 소요되는 시간을 예측하고 작업순서를 정한 후 이들을 서로 연결시켜 네트워크를 작성한다. 네트워크에서 개별적인 활동들은 가지(Arc)로 표현되고, 하나의 활동과 다른 활동의 연결은 마디(Node)로 표현한다.

2) 일정수립 단계에서는 작업 순서를 고려하여 각 활동별 착수시간과 완료시간을 나타내는 시간표를 만들고 해당 프로젝트가 주어진 시간 내에 완료되기 위해서 중점적으로 관리해야 할 주활동(Critical Activities)을 식별한다.

3) 통제단계에서는 주기적으로 네트워크와 시간표를 중심으로 프로젝트의 진행상

35) <https://itwiki.kr/w/PERT/CPM>

황을 나타내는 진척도를 이용해서 기존 일정을 수정하거나 새로운 일정을 추가한다.

아. PERT-CPM은 다양한 종류의 프로젝트 관리에서 사용할 수 있다. 교량·도로·건물 등 건설공사, 신제품 개발, 복잡하고 규모가 큰 무기체계나 시설의 유지 및 관리에 사용할 수 있다. 또한 가시적인 형상이 있는 시설의 유지 및 관리를 포함하여 국방혁신 4.0과 같은 조직 내부의 프로젝트 관리에도 이용될 수 있다.

자. GERT(Graphical Evaluation and Review Technique)는 PERT/CPM에서 사용되는 네트워크 분석 기법을 발전시킨 방법이다. PERT/CPM에서는 확률변수와 산술평균, 표준편차를 이용하여 일정을 산출하는데, 이러한 기법들은 일정과 관련된 모든 변수가 정규분포를 따른다는 가정이 필요하다.

1) GERT는 확률적인 모델링 방법을 사용하여 일정의 변동을 추적하고, 여러 가지 가능성을 고려하여 일정을 산출한다. GERT는 PERT/CPM에서 사용하는 단순한 화살표 대신 다양한 종류의 화살표를 사용하여 위험 요소와 불확실성을 표현한다.

2) GERT에서는 일정 관련 변수가 정규분포를 따르지 않거나, 이전 과업의 완료 여부, 과업의 성격, 자원의 가용성 등과 같은 요소에 의해 발생하는 다양한 위험과 불확실성이 존재할 때 사용한다. GERT를 통해 일정에 대한 위험과 불확실성을 파악하고, 이를 관리하여 프로젝트를 성공적으로 완료할 수 있다.

3) GERT에서는 일반적으로 프로젝트의 시작을 의미하는 시작 노드(Start node), 프로젝트의 종료를 의미하는 종료 노드(End node), 과업의 시작과 종료를 의미하는 과업 노드(Task node)의 세 종류의 노드를 사용한다. 이러한 노드들은 선행 과업(Preceding task)의 완료와 같은 다양한 종류의 화살표로 연결된다.

4) GERT는 PERT/CPM과 유사하지만, 순환(Looping), 조건분기(Branching)로 다수프로젝트의 결과를 동시에 표현할 수 있는 장점이 있다.

제 3 절 성격이 다른 과제·과업에 대한 그룹화 및 평가지표 선정 방법론

1. 개요

가. 성격이 다른 과제 및 과업을 다수 포함한 추진계획에 대한 그룹화 방법론 및 평가지표 선정 방법은 평가결과의 정량화 가능성에 따라 정량·정성적 분석방법으로 분류하는 방법, Delphi, 프로젝트 관련자 의견 수렴, 설문조사 등 전문가 의견수렴방법이 있다.³⁶⁾

36) Delphi 방법은 프로젝트 전문가들이 과업 유형을 그룹화하는 방법이다. 이 방법은 전문가들의 지식과 경험을

나. 전문가 의견수렴에 의한 평가지표 선정 방법 중에서 정량적인 측면에서 가장 발전된 방법은 제4절에서 다룬 AHP 방법이다. 따라서 내용이 중복되므로 본 장에서는 분석방법에 의한 그룹화 및 평가지표 선정 방법을 중심으로 간략하게 기술한다.

2. 분석방법에 의한 그룹화 및 평가지표 선정 방법

가 분석방법에 의한 그룹화 및 평가지표 선정 방법은 과업 평가 기준과 각 과업에 대한 데이터를 분석 가능성을 평가하여 정량적 과업과 정성적 과업, 정량 및 정성적 방법, 기타 방법이 혼합된 그룹으로 분류하는 방법이다.

1) 정량적 과업 유형은 전력 증강·부대 개편 등 과업의 목표와 완료 기준이 가시적이고, 사업추진 절차가 국방기획관리체계를 준용할 수 있는 과업이다.

예를 들어, 국방혁신 4.0에서 '㉠-① 북 핵·WMD·미사일 조기 무력화를 위한 감시 및 타격능력 확보'는 세부과업이 무기체계 전력화·확보·강화 등 정량적 과업 유형에 해당되기 때문에 정량적 과업으로 분류할 수 있다. 정량적 과업 유형의 완료 기준은 목표가 물리적 또는 구조적인지 여부로 구분할 수 있다. 전력 증강과 같이 물리적 목표가 명확한 과업은 '사업 종료', 부대구조 개편과 같이 구조적 목표 과업은 '개편'이 완료 기준이 될 수 있다.

2) 정성적 과업 유형은 전략·작전개념 발전, 법령·업무 수행체계 개선 등 과업의 목표와 완료 기준이 개념적이고, 사업추진 절차가 일반적인 보고체계 또는 교리발간 절차를 준용할 수 있는 과업이다.

예를 들어, 국방혁신 4.0에서 '㉠-② 전략사령부의 진화적 발전'은 세부과업이 작전개념 발전·정립·보완 등 정성적 과업 유형에 해당되기 때문에 정성적 과업으로 분류할 수 있다. 정성적 과업 유형은 사업추진 절차가 정성적이므로 성격이 다른 과제·과업으로 구성된 대형 프로젝트의 전체 성과를 정량적으로 평가할 수 있는 완료 기준이 필요하다. 따라서 이러한 과업의 완료 기준은 사업이 정상적으로 추진되어 실제 현실에서 반영되고 있는 상태인 '시행'이 될 수 있다.

3) 정량 및 정성 병행 과업 유형은 과업의 하위 업무인 세부과업들이 단일 유형이 아닌 정량과 정성 유형이 혼합된 과업이다.

기반으로 하기 때문에 상대적으로 주관적이다. 프로젝트 관련자 의견 수렴방법은 프로젝트 팀 또는 이해관계자들의 의견을 수렴하여 그룹화하는 방법이다. 이 방법은 이해관계자들의 관점을 반영하기 때문에 상대적으로 객관적이다. 설문조사 방법은 프로젝트 팀 또는 이해관계자들에 대한 설문조사를 통해 그룹화하는 방법이다. 이 방법은 인원이 많고 범위가 큰 대규모 프로젝트에서 의견 수렴에 적합하고, 상대적으로 객관적이다.

예를 들어, 국방혁신 4.0에서 'Ⅲ-① 전략적 억제·대응을 위한 전략사령부 창설'은 세부과업이 정량적 유형인 부대 개편과 정성적 유형인 운용계획 마련 및 합동 및 연합 연습 시행 등이 혼합 되기 때문에 정량 및 정성 병행 과업 과업으로 분류할 수 있다. 정량 및 정성 병행 과업은 과제 유형이 복합되어 있기 때문에 세부 과업을 정량 또는 정성으로 분류할 수 있을 때까지 세분화한 상태에서 완료 기준을 상기에서 기술한 정량 또는 정성 과업 유형과 같은 형식으로 설정할 수 있다.

4) 별도 과업 유형은 과업별 성과평가 지표가 각각 다르게 구성되어 정량·정성·정량 및 정성 병행 유형에 속하지 않는 과업이다.

예를 들어, 국방혁신 4.0에서 'Ⅳ-① 운영개념 및 작전수행체계 발전' 과업은 정량 또는 정성적 과업 유형과 다르게 성과지표가 기초연구, 운영개념(초안) 정립, 전문가 검토 및 보완, 타당성 평가, 운영개념서 작성으로 구성되기 때문에 별도 과업으로 분류한다. 별도 과업은 과업 추진팀(부서)별 고유한 완료 기준을 설정한다. 단, 이때에도 전체 프로젝트의 성과를 정량적으로 관리해야하므로 프로젝트 관리 측면에서 평가지표가 정량적으로 관리되어야 한다.

나. 분석방법에 의한 과업 그룹화 예시는 다음과 같다.

〈표 3-3〉 과업 유형 분류 및 세부 유형

과업 유형	완료 기준	세부 유형
정량적 과업	물리적 목표	전력증강, 훈련체계(장) 확보 등
	구조적 목표	부대 구조 개편, 병력구조 개편 등
정성적 과업	개념 / 계획발전	군사전략 발전, 작전개념 발전 등
	제도 개선	법령체계 개정, 업무 수행체계 개선 등
정량 및 정성 병행 과업	정량 또는 정성적 과업과 동일	세부 과업이 정량 또는 정성적 유형으로 혼재
별도 과업	별도 지정 (정량화)	과업 추진팀(부서)별 지정

제 4 절 성격이 다른 과제·과업에 대한 그룹 단위 및 전체 종합평가 방법론

1. 복합과제 종합평가 방법론의 이해

가. 성격이 다른 과제 및 과업을 다수 포함한 추진계획에 대한 그룹 단위 및 전체 과제 및 과업에 대한 종합평가는 각 그룹에 대해 가중치를 부여한 뒤 평가하는 방법이 일반적이다.

나. 가중치를 부여하는 방법은 ‘AHP(Analytic Hierarchy Process, 분석적 계층 과정)’, ‘ANP(Analytic Network Process, 분석적 네트워크 과정)’가 있다.

1) AHP는 계층 요소 간을 상호비교하는 쌍대비교(Pair-wise Comparison)를 통해 전문가의 지식과 경험 및 직관을 정량적으로 포착하기 위한 방법이다. AHP를 통해 성격이 다른 과제 및 과업에 대해 상대적 중요도를 정량화하여 유형이 다른 세부 과업으로 구성된 전체 과제를 종합적으로 평가할 수 있다.

2) ANP는 네트워크 구조에서 의사결정 문제를 해결하는 AHP의 일반화된 형태로 2000년도에 들어서면서부터 본격적으로 연구되기 시작했다. ANP는 AHP와 유사하지만, 각 요소의 독립을 가정하는 계층(Hierarchy) 구조 대신 구성요소들 간의 상호작용(Interaction)을 고려하는 네트워크(Network) 구조를 사용한다. ANP는 AHP보다 복잡한 추진계획에서 과업의 가중치를 부여할 수 있다.

다. 전체 과제 및 과업에 대한 종합평가 방법은 상기에서 기술한 AHP, ANP를 통해 도출한 가중치를 전체 계층구조의 요소로 활용해서 종합하는 방법과 일정과 비용 관리에 초점을 둔 EVMS 방법, 균형 스코어카드 방법이 대표적이다.

3) EVMS(Earned Value Management System)

가) EVM(Earned Value Management)은 프로젝트의 성과를 측정하고 예산과 일정을 추적하는 프로젝트 관리방법이다. EVM은 프로젝트 일정, 비용 및 기타 요인을 평가하여 프로젝트의 성과를 수치화함으로써 비용과 예산을 최적화할 수 있다.

나) EVM은 계획가치(Planned Value, PV), 사용예산(Actual Cost, AC), 획득가치(Earned Value, EV)의 세 가지 요소로 구성됨. PV는 프로젝트를 완료하기 위해 계획된 과업의 예산이고, AC는 프로젝트를 수행하기 위해 사용한 비용이며, EV는 프로젝트에서 완료한 과업의 예산을 의미한다.

다) EVMS에서는 프로젝트의 일정과 비용성적을 시각적으로 표현하는 방법으로 프로젝트의 상태를 일정성과지수(SPI : Schedule Performance Index)와 비용성과지수(CPI : Cost Performance Index)를 사용한다.

- SPI는 계획 대비 성과($SPI = \text{성과} \div \text{계획한 일정}$)로 계산
- CPI는 사용한 비용 대비 성과($CPI = \text{성과} \div \text{사용한 비용}$)로 계산
- SPI, CPI는 1을 기준으로 1보다 크면 성과가 좋고, 1보다 작으면 성과가 낮으며, 1이면 정상

〈표 3-4〉 SPI, CPI 개념

SPI > 1 계획한 일정 대비 성과 우수	CPI > 1, 사용한 비용 대비 성과 우수
SPI < 1 계획한 일정 대비 성과 미흡	CPI < 1 사용한 비용 대비 성과 미흡
SPI = 1 계획한 일정과 성과 동일	CPI = 1 사용한 비용과 성과 동일

4) 균형 스코어카드(Balanced Scorecard) 방법

가) 균형 스코어카드는 기업이나 조직의 전략적 목표를 성과지표와 연결하여 종합적으로 측정하는 방법론이다. 균형 스코어카드는 프로젝트의 성과를 재정·고객·프로세스·학습 및 성장 관점에서 성과를 측정하기 때문에 세부 과업의 유형이 다른 프로젝트에서 종합적인 성과를 평가할 수 있다.

나) 균형 스코어카드는 방법은 성과지표 정의, 성과지표에 가중치 부여, 스코어 부여체계 개발, 스코어 합산의 방법의 5단계로 진행된다.

- 성과지표 정의 : 각 작업에 대한 관련 성과지표(PI)를 결정한다. 여기에는 정량적 요소와 정성적 요소가 모두 포함된다. 예를 들어, 정량적 지표에는 일정, 예산, 제정 또는 개정 완료 등이 포함되고, 정성적 지표에는 이해관계자 만족도 및 인식 제고 활동의 효율성 등이 포함된다.

- 성과지표에 가중치 부여 : 프로젝트 작업의 전반적인 성과를 결정하는 데 있어 중요도에 따라 각 PI에 가중치를 할당한다. 예를 들어, 일정과 예산에 높은 가중치를 부여하고, 정성적 지표는 낮은 가중치를 부여한다. 각 작업의 모든 PI에 대한 가중치 합계는 1이다.

- 스코어 부여체계 개발 : 1에서 5까지의 척도 또는 백분율과 같이 각 PI에 대한 스코어 부여체계를 개발하고, 각 PI에 대한 정상·지연·불량 성능에 대한 임계값을 결정한다.

- 스코어 합산 : 각 PI의 점수에 할당된 가중치를 곱하고 합산하여 각 작업에 대

한 점수의 가중 평균을 계산하여 전체 스코어를 합산한다.

〈표 3-5〉 균형 스코어 방법 예시

프로젝트	작업	PI (가중치)	스코어	가중 스코어
계	-	1.0	100	100
1	1	계획 (0.4)	4	1.6
		예산 (0.4)	3	1.2
		정책홍보 (0.2)	5	1.0
	2	...	...	...
2	3	...	...	...
...

라. 균형 스코어 방법은 각 작업의 가중치에 따라 전체 프로젝트의 성과 변동이 크다. 그러나 이 방법은 가중치 결정 과정이 정량화되어 있지 않기 때문에 이견(異見)의 여지가 많다. 따라서 본 장에서는 성격이 다른 과제·과업에 대한 정량화 절차가 이론적으로 검증된 AHP 방법과 ANP 방법에 대해서 자세하게 다룬다.

2. AHP

가. AHP는 1971년 Tomas Saaty가 개발한 방법으로 불확실한 조건 또는 대형 프로젝트 평가 등을 위한 다양한 평가 기준이 필요할 때 사용하는 의사결정 기법이다. AHP는 의사결정 문제를 분석할 때 주관적 판단과 체계적인 접근을 잘 융합한 방법 중의 하나로서 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 1) 기하학적 평가방법을 통해 인간의 주관 또는 느낌을 정량화할 수 있다.
- 2) 다수의 목적과 평가기준을 종합적으로 고려할 수 있다.
- 3) 불확실한 조건을 명확하게 설명할 수 있다.
- 4) 사용하기에 편리하기 때문에 빠른 의사결정이 가능하다.

나. 위의 네 가지 특징에 의해 AHP는 경제문제나 경영문제를 비롯해 국방, 에너지 문제, 의료와 건강, 국제관계, 인사평가, 프로젝트선정 등의 다양한 의사결정에 널리 쓰이고 있다.

다. AHP에서는 문제의 요소를 목표 → 평가기준 → 평가기준별 가중치의 관계로 구성한 계층구조를 만든다. 목표에 대한 평가기준의 가중치를 결정하고, 평가기준 각각

에 대한 가중치를 결정한다. 다수 계층의 평가기준에 대한 가중치를 Bottom-up 방식으로 종합하여 목표에 대한 대안의 중요도를 평가한다.

라. 본 연구에서 최종목표는 "국방혁신 4.0 목표 및 최종상태 달성"이고, 평가 기준은 "국방환경 도전요인을 해소하고, 국방혁신 4.0 목표 및 최종상태 달성을 위한 성과를 평가할 수 있는 항목에 대해 본 연구간 연구진, 국방부의 토의를 거쳐 확정된 평가항목"이며, "평가항목별 가중치"는 전문가 설문을 통해서 결정한다. AHP는 다음 3가지 단계를 거친다.

1) 제 1 단계(문제의 계층화) : 먼저 문제를 계층구조로 분해한다. 단, 계층의 최상층에는 1개의 요소가 존재하며, 최종목표(Goal)이다. 계층의 중간층은 평가 기준이며, 의사결정자에 의해 평가 기준의 종속관계를 계층화한다.

계층의 수는 얼마든지 상관없으나, 각 계층 내 비교 소의 수는 쌍대비교(Pairwise Comparison) 관점에서 7 ± 2 정도이다. 계층별 평가항목과 관련된 복수의 평가항목이 하위 계층에 배치되어, 전체 계층구조를 형성한다.

2) 제 2 단계(요소의 쌍대비교와 중요도 선정) : 계층별 요소 간의 중요도를 설정한다. 이를 위하여 먼저, 어떤 한 계층에 있는 요소 간 짝(pair)을 이루어 그 위에 계층에 있는 관계요소를 평가 기준으로 하여 일대일 상대평가를 한다.

예를 들어, 평가요소가 A, B, C, 3가지인 경우 3번의 비교를 독립적으로 수행한다. 즉, A vs. B, A vs. C, B vs. C에 대해서 비교한다. 쌍대비교에서는 아래 표에 나타나 있는 홀수값을 쌍대비교치로 사용한다. 이때, 평가가 중간인 경우에는 홀수값 사이의 짝수를 사용할 수 있다.

〈표 3-6〉 AHP의 척도 개념

의 미	척 도
A가 B보다 절대 중요	9
A가 B보다 매우 중요	7
A가 B보다 중요	5
A가 B보다 약간 중요	3
A와 B의 중요도가 동등	1

가) 여기서 비교요소의 수가 n개인 경우 $n(n-1)/2$ 번의 쌍대비교를 한다.

나) 쌍대비교 결과로 각 계층별 요소 간 중요도를 계산한다. 모든 쌍대비교의 결과를 행렬로 표현하고, 최대 고유치에 대응하는 고유벡터가 중요도이다.

다) 쌍대비교의 일관성 지수(CI : Consistency Index)를 계산한다. CI가 좋지 않은 경우(일반적으로 0.1 이상) 쌍대비교에 대한 응답자의 설문결과가 일관성이 부족하다는 것을 나타낸다.

라) AHP에서 고유벡터와 일관성 지수를 계산하는 대표적인 2가지 방법은 고유치법, 간이계산법이 있다.

마) 고유치법 : 쌍대비교 행렬에서 구한 고유벡터를 가중치로 설정하여 일관성 정도를 계산한다. 즉, 쌍비교행렬 A 가 주어졌을 때 $Ax = \lambda x$ 를 만족하는 x 와 λ 를 구한다. x 는 고유벡터(eigenvector), λ 는 고유치(eigenvalue)이다. 고유벡터내의 원소들의 합이 1이 되도록 표준화하여 가중치로 사용한다.

바) 일관성 지수는 고유치로부터 $CI = (\lambda - n)/(n - 1)$ 을 계산하여 얻는다. n 은 쌍비교행렬 A 의 열 또는 행의 개수이다.

사) 간이계산법 : 비교요소의 수가 많아질수록 고유치법에 의한 방법이 계산이 어렵고 계산 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 여기서는 간이계산법에 의해 고유벡터(가중치)를 구하는 방법을 알아본다. 먼저, $n \times n$ 크기의 쌍비교행렬 A 가 주어졌다고 가정하고, a_{ij} 를 A 의 i 행 j 열 원소라고 할 때 간이계산법은 다음과 같다.

- 간이계산법을 이용한 가중치 계산 방법

STEP 1 : A 의 각 열의 합(A_j)을 계산한다. 즉 $A_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}, j = 1, \dots, n$

STEP 2 : A 의 j 열의 각 원소(a_{ij})를 열의 합(A_j)으로 나눈다.

STEP 3 : STEP 2에서 구한 각 원소의 계산 결과를 가지고 각 행의 평균 계산하며, 이때 얻어진 각 행의 평균이 고유벡터 원소이다.

- 간이계산법을 이용한 일관성 지수 계산 방법

STEP 1 : A 에 간이계산법으로 구한 고유벡터를 곱한다.

STEP 2 : STEP 1에서 구한 결과의 각 원소를 간이계산법으로 구한 고유벡터의 각 원소로 나눈다.

STEP 3 : STEP 2에서 구한 각 원소의 계산 결과를 가지고 평균을 계산하며, 이 값이 일관성 지수이다.

※ 상기 절차를 사례로 설명하면 다음과 같다.

① 어떤 인원이 설문한 결과는 다음과 같다.

기준 항목	절대 중요	매우 중요	중요	약간 중요	같다	약간 중요	중요	매우 중요	절대 중요	비교 항목
A	⑨	⑦	⑤	③	①	③	⑤	⑦	⑨	B
						V				
	⑨	⑦	⑤	③	①	③	⑤	⑦	⑨	C
				V						
B	⑨	⑦	⑤	③	①	③	⑤	⑦	⑨	C
			V							

② 설문결과를 쌍대비교행렬 변환하면 아래 표와 같다.

	A	B	C
A	1	1/3	3
B	3	1	5
C	1/3	1/5	1

③ 획득된 쌍대비교행렬은 Excel에 입력하여 간이계산법으로 가중치를 계산한다.

STEP 1 : A의 각 열의 합(A_j) 계산, 즉 $A_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}, j = 1, \dots, n$

	A	B	C
A	1	1/3	3
B	3	1	5
C	1/3	1/5	1
	↓	↓	↓
열의 합	4.333	1.533	9.000

STEP 2 : A의 j열의 각 원소(a_{ij})를 열의 합(A_j)으로 나눈다.

	A	B	C
--	---	---	---

A	1÷4.333	1/3÷1.533	3÷9.000
B	3÷4.333	1÷1.533	5÷9.000
C	1/3÷4.333	1/5÷1.533	1÷9.000

	A	B	C
A	0.231	0.217	0.333
B	0.692	0.652	0.556
C	0.077	0.130	0.111

STEP 3 : STEP 2에서 구한 각 원소의 계산 결과를 가지고 각 행의 평균을 계산한다. 가중치 산출결과 B, A, C순으로 중요한 것으로 나타났다.

	A	B	C		가중치
A	0.231	0.217	0.333	⇒	0.260
B	0.692	0.652	0.556	⇒	0.633
C	0.077	0.130	0.111	⇒	0.106

STEP 4 : 쌍대비교행렬에 간이계산법으로 구한 가중치(고유벡터)를 곱한다.

	A	B	C		가중치		
A	1	1/3	3	×	0.260	=	0.790
B	3	1	5		0.633		1.946
C	1/3	1/5	1		0.106		0.320

STEP 5 : STEP 4에서 구한 결과의 각 원소를 가중치의 각 원소로 나눈다.

0.790÷0.260	⇒	3.033
1.946÷0.633	⇒	3.072
0.320÷0.106	⇒	3.011

STEP 6 : STEP5에서 구한 각 원소의 평균으로 CI를 계산한다. 일관성 지수(CI)가 0.1보다 작은 값이 나왔으므로 설문 응답이 충분히 일관성이 있는 것으로 판단할 수

있다.

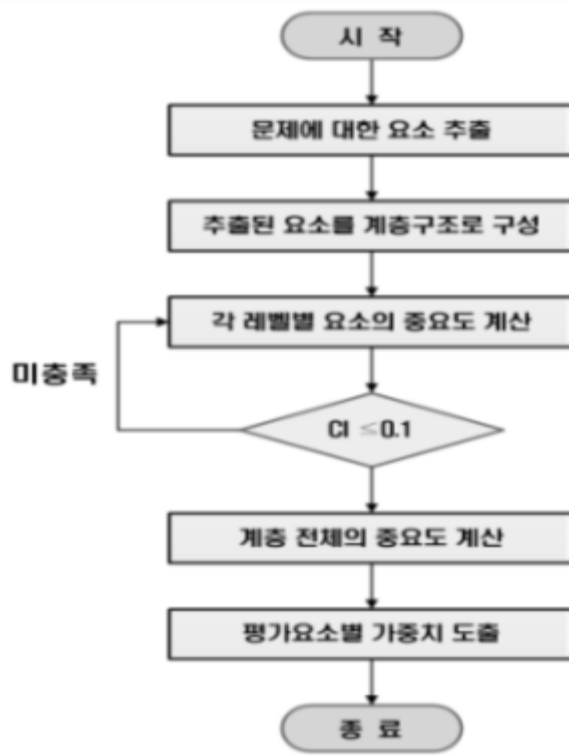
$$CI = \{(3.033 + 3.072 + 3.011) / 3 - 3\} / (3 - 1) = 0.019$$

④ <표 3-7>은 25명의 가중치 및 일관성지수(CI) 결과와 이들의 평균값을 요약한 예시이다. 마지막에서 "평균"은 25명 중 항목별 일관성을 충족(CI가 0.1 이하)한 인원 으로 한정하여 가중치를 평균한 결과이다. "상위 평가요소 가중치"는 해당 문항의 상위 평가요소가 갖는 가중치로서 이 경우는 상위 평가요소가 없기 때문에 공란으로 두었다. "환산된 가중치"는 상위 평가요소의 가중치에 A, B, C의 가중치를 곱한 값이지만, 이 경우에는 상위 평가요소가 없기 때문에 단순히 A, B, C의 가중치를 백분율로 환산한 값으로서 A=31.78%, B=45.37%, C=22.85%이다.

<표 3-7> AHP에 의한 가중치 도출 예시

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0.333	0.216	0.221	0.286	0.333	0.232	0.200	0.633	0.574
B	0.333	0.055	0.051	0.140	0.333	0.697	0.600	0.106	0.286
C	0.333	0.729	0.727	0.574	0.333	0.072	0.200	0.260	0.140
CI	0.000	0.175	0.314	0.069	0.000	0.094	0.000	0.019	0.069
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A	0.106	0.106	0.061	0.429	0.658	0.260	0.669	0.675	0.429
B	0.633	0.633	0.723	0.429	0.253	0.633	0.243	0.259	0.143
C	0.260	0.260	0.216	0.143	0.089	0.106	0.088	0.065	0.429
CI	0.019	0.019	0.060	0.000	0.154	0.019	0.004	0.154	0.000
	19	20	21	22	23	24	25	-	-
A	0.587	0.216	0.658	0.607	0.106	0.216	0.140	-	-
B	0.332	0.055	0.253	0.303	0.633	0.723	0.574	-	-
C	0.081	0.729	0.089	0.090	0.260	0.061	0.286	-	-
CI	0.120	0.175	0.154	0.154	0.019	0.060	0.069	-	-
	평균			상위 평가요소 가중치			환산된 가중치(%)		
A	0.318			100.00			31.78		
B	0.454						45.37		
C	0.229						22.85		

3) 제 3 단계(중요도 계산) : 제2단계에서 구한 계층별 요소의 중요도를 계층구조에 따라 집계한 것이 평가요소별 중요도(가중치)이다. <그림 3-6>은 AHP의 적용절차를 나타낸 순서도이다.³⁷⁾



<그림 3-6> AHP 절차

마. AHP를 이용한 가중치 조사를 위한 질문, 설문응답 결과의 일관성 유지를 위한 유의사항, 결과 예시는 다음과 같다.

1) 질문 사례

문1. 국방혁신 4.0의 최종상태를 달성하여 ‘AI과학기술 강군 육성’ 목표에 기여하는 정도를 평가하는 중요성 측면에서 ‘ 북 핵·미사일 대응 능력 획기적 강화’와 나머지 4개 분야 중 어떤 것이 상대적으로 중요하다고 생각하십니까?

37) 이용복, 서열척도를 이용한 AHP 그룹의사결정 방법, 2006.

〈 국방혁신 4.0 추진 중점 5개 분야 〉

- ① 북 핵 · 미사일 대응능력 획기적 강화 ② 선도적 군사전략 · 작전개념 발전
- ③ AI기반 핵심 첨단전력 확보 ④ 군구조 및 교육훈련 혁신
- ⑤ 국방 R&D · 전력증강체계 재설계

기준 항목	절대 중요	매우 중요	중요	약간 중요	같다	약간 중요	중요	매우 중요	절대 중요	비교 항목
① 북 핵 · 미사일 대응능력 획기적 강화	⑨	⑦	⑤	③	①	③	⑤	⑦	⑨	② 선도적 군사전략 · 작전개념 발전
	⑨	⑦	⑤	③	①	③	⑤	⑦	⑨	③ AI 기반 핵심 첨단 전력 확보
	⑨	⑦	⑤	③	①	③	⑤	⑦	⑨	④ 군구조 및 교육훈련 혁신
	⑨	⑦	⑤	③	①	③	⑤	⑦	⑨	⑤ 국방 R&D · 전력증강체계 재설계
	⑨	⑦	⑤	③	①	③	⑤	⑦	⑨	

2) 설문 결과의 일관성 유지를 위한 유의사항 제공 사례

설문 작성방법은 좌측의 <기준항목>과 우측의 <비교항목>을 비교하여 상대적으로 중요하다고 생각하는 척도 아래 “V”로 표시하시면 됩니다.

※ 아래 표는 A.중요성과 B.긴급성의 상대적 중요도에 대한 평가로 B.긴급성이 더 중요하다고 판단되어 오른쪽 약간 중요(③)에 체크하였고, A.중요성과 C.효과성의 상대적 중요도에 대한 평가로 A.중요성이 더 중요하다고 판단되어 왼쪽 약간 중요(③)에 체크하였으며, B.긴급성과 C.효과성의 상대적 중요도에 대한 평가로 C.효과성이 더 중요하다고 판단되어 오른쪽 약간 중요(③)에 체크한 예시입니다.

기준 항목	절대 중요	매우 중요	중요	약간 중요	같다	약간 중요	중요	매우 중요	절대 중요	비교 항목
A. 중요성	⑨	⑦	⑤	③	①	③	⑤	⑦	⑨	B. 긴급성
						V				
	⑨	⑦	⑤	③	①	③	⑤	⑦	⑨	C. 효과성
				V						
B. 긴급성	⑨	⑦	⑤	③	①	③	⑤	⑦	⑨	C. 효과성
						V	오류			

- 평가결과에 의하면 B가 A보다 더 중요(A<B)하고, A가 C보다 더 중요(C<A)하기 때문에 B가 C보다 더 중요(C<B)해야 3개의 대안에 대한 중요도의 차이가 일관성을 유지(C<A<B)한다고 할 수 있습니다. 그런데 C가 B보다 효과적(B<C)이라고 평가한다면 모순이 됩니다.
- 일관성 있는 평가를 위해서는 A.중요성↔B.긴급성, A.중요성↔C.효과성을 위와 같이 평가했다면 B.긴급성↔C.효과성에 대한 평가는 B.긴급성이 C.효과성보다 더 중요하다(B>C)인 음영 표시 부분)의 범위에서 체크를 해야 합니다.

3) 결과 예시

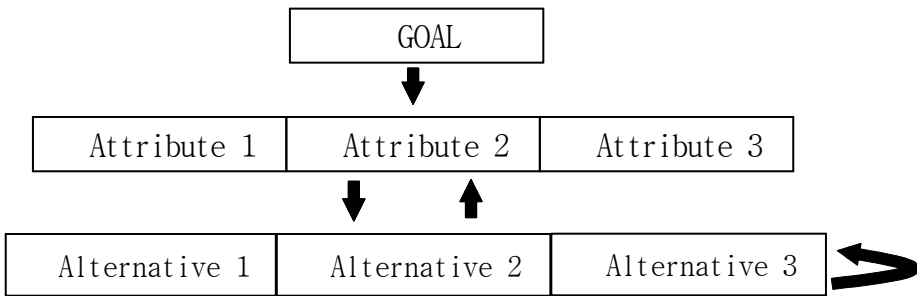
구분	중요성	긴급성	효과성	구분	중요성	긴급성	효과성	가중치
중요성	1	7	0.142857143	중요성	0.122807018	0.411764706	0.113924051	0.216165258
긴급성	0.142857143	1	0.111111111	긴급성	0.0175438598	0.0588235294	0.0886075949	0.0549916613
효과성	7	9	1	효과성	0.859649123	0.529411765	0.797468354	0.728843081
열합계	8.142857143	17	1.253968254					

CI Step 1				CI Step 2			
구분	중요성	긴급성	효과성	구분	중요성	긴급성	효과성
중요성	0.216165258	0.384941629	0.10412044	중요성	3.262445288		λ
긴급성	0.0308807511	0.0549916613	0.0809825645	긴급성	3.034186874		
효과성	1.513156806	0.494924952	0.728843081	효과성	3.75516337		CI
							0.175299255

3. ANP

가. ANP는 2000년도에 들어서면서부터 본격적으로 연구되기 시작했다. ANP는 AHP와 동일하게 여러가지 요소를 다중 기준(Multi Criteria)으로 평가하여 가중치를 결정하는 방법이다. ANP는 AHP의 일반화된 형태로서 네트워크 구조에서 의사결정 문제를 효과적으로 해결할 수 있도록 고안된 방법론이다. 즉, 의사결정 문제를 구성하는 각 계층, 계층의 구성요소, 대안 또는 같은 계층 안에서 발생하는 상호의존성 또는 계층 및 구성요소 간에 존재하는 피드백(Feedback)이 이루어지는 의사결정 환경에서 AHP보다 현실 세계에 근접한 접근으로 최적 해를 제공할 수 있다.

나. ANP는 AHP와 유사하지만, 각 요소의 독립을 가정하는 계층구조 대신 요소들 간의 상호작용을 고려할 수 있는 네트워크 구조를 사용한다. AHP가 기준과 대안들 간의 상호독립성과 피드백이 없는 한 방향(one-way hierarchial arcs)흐름으로 각 계층 간의 종속성을 표현했던 것과는 달리, ANP는 네트워크를 구성하는 쌍방향의 화살표(two-way arcs)를 사용하여 각 계층이나 혹은 동일 계층 내의 의존성(Inner-dependence)과 외부 종속성(Outer-dependence)에 대한 표현을 허용하기 때문에 ANP는 AHP보다 더 복잡한 의사결정 문제를 다룰 수 있다.³⁸⁾



〈그림 3-7〉 ANP 네트워크의 표현

다. ANP는 일반적으로 다음의 5단계를 거쳐 진행된다(Mead와 Sarkis, 2002).

1) 의사결정 요소들 간의 관계를 표현하는 의사결정 네트워크를 작성한다. 즉, 의사결정 문제를 목적, 대안, 평가자, 기준, 관계 등을 고려하여 구조화하고, 통제계층(Control hierarchies)을 구성한 뒤 계층과 계층별 구성요소 간의 내·외부적 종속을 고려한 관계를 결정하여 재배열 및 상호관계를 설정한다.

38) 이용복 등, ANP를 이용한 고객지향적 마케팅 의사결정 방법 설계, 2006.

제 5 절 사례 적용 결과

1. 개요

가. 국방개혁은 복잡하고 다양한 요소들이 관련되어 있기 때문에 정량적 접근과 정성적 접근을 적절히 활용하여 합리적으로 평가하는 것이 중요하다.

나. 그동안 국방개혁 관련 연구는 특정 분야 또는 이슈를 중심으로 이루어졌으며, 특히 정량적 평가보다 정성적 평가 관점에서 접근한 사례가 많았다. 본 연구와 관련된 몇 가지 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 국방개혁 2020의 추진 방향을 공중전력을 중심으로 외국의 국방개혁과 비교 분석하고 발전방향 제시(2006년)⁴⁰⁾

2) 국방개혁 2.0에 대해 역대 국방개혁 기본계획 내용과 전체적인 관점에서 비교, 국방개혁 2.0의 주요 성과평가를 통해 추진과제 제시(2020년)⁴¹⁾

3) 국방개혁 2.0 성과진단을 통해 발전방향을 제시, 특히 국방개혁 추진에 대한 객관적인 평가체계 부재에 따라 평가체계 구축 필요성 제시(2021)⁴²⁾

다. 현재 국방부에서 추진하고 있는 국방혁신 4.0은 기존 국방개혁과 개념이 같으며, 앞에서 기술한 여러 과제가 혼합된 대형 프로젝트와 성격이 같다.

라. 따라서 본 절에서는 국방혁신 4.0에 대해 과학적 분석평가 방법을 적용한 사례를 제시한다. 주요 내용은 다음과 같다.

- 1) 국방혁신 4.0 일반사항
- 2) 국방혁신 4.0에 대해 성과평가 지표 선정 방법 적용 결과
- 3) 국방혁신 4.0 과제·과업에 대해 그룹화 방법 적용 결과
- 4) 국방혁신 4.0 분야·과제에 대해 가중치 결정 방법 적용 결과
- 5) 국방혁신 4.0 과업에 대해 가중치 결정 방법 적용 결과
- 6) 국방혁신 4.0 전체 과제·과업에 대해 성과평가 방법 적용 결과

2. 국방혁신 4.0 일반사항

가. 국방개혁은 2005년에 '국방개혁 2020' 발표 이후에 2018년에 '국방개혁 2.0'

40) 김상범, 국방개혁의 추진에 따른 공중전력 발전과제와 방향, 국방정책연구, 2006.

41) 형혁규, 국방개혁 2.0의 평가와 향후과제, 국회입법조사처, 2020.

42) 이상철, 국방개혁 2.0 진단과 발전방향, 한국군사문제연구원, 2021.

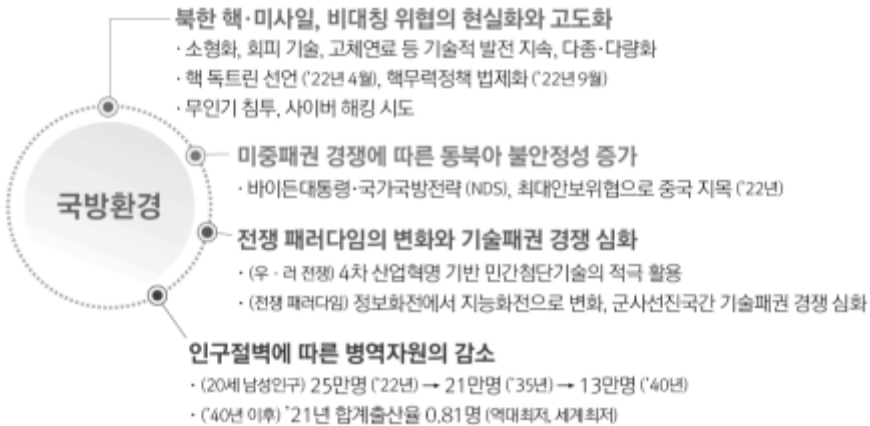
발표까지 3회에 걸쳐 업데이트되었다.

나. 2023년에 발표한 국방혁신 4.0은 유례없는 도전에 직면한 국방 현실과 기존의 개혁방식으로는 이러한 도전에 대응하기에는 한계가 있다는 국방 전략환경에 대한 평가를 통해 다음과 같이 혁신적인 변화를 추구하는 것이 목표이다.⁴³⁾

미래 국방의 도전을 극복하고 싸워 이기는 강군을 육성하기 위해, 우리의 강점인 '4차 산업혁명 과학기술'을 기회로 활용하여 혁신적인 변화를 추구하는 것

다. 추진 배경

1) 국방환경은 크게 1. 북 핵·미사일 위협의 현실화와 고도화, 2. 미·중 패권 경쟁에 따른 동북아 불안정성 심화, 3. 전쟁 패러다임의 변화와 기술패권 경쟁 격화, 4. 인구절벽에 따른 병역자원 감소의 4가지 도전요인에 직면해 있다.



〈그림 3-9〉 국방환경 도전요인⁴⁴⁾

2) 한편 우리나라는 2020년 기준 국가과학기술 수준이 미국의 81.1%, 2022년 기준 AI 기술수준이 미국·중국·유럽에 이은 4위, 2021년 기준 국방과학기술수준은 9위로서 우리의 강점이 첨단과학기술 발전을 통해 1. 전 영역 통합작전 구현, 2. 한국형 3축체계 능력 획기적 강화, 3. 병역자원의 감소 해결 및 전시 인명손실 최소화를 달성

43) 국방부, 국방혁신 4.0 브로슈어, 2023. 2. 28.

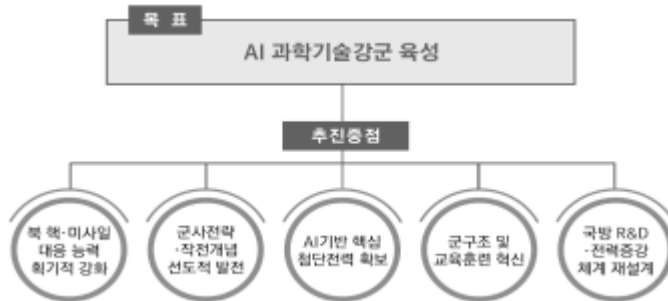
44) 국방부, 국방혁신 4.0 브로슈어, 2023. 2. 28.

할 수 있는 기회요인이 있다.



〈그림 3-10〉 국방환경 기회요인⁴⁵⁾

라. 국방혁신 4.0은 'AI 과학기술강군 육성'을 목표로 1. 핵·미사일 대응능력 획기적 강화, 2. 선도적 군사전략·작전개념 발전, 3. AI 기반 핵심 첨단전력 확보, 4. 군구조 및 교육훈련 혁신, 5. 국방 R&D·전력증강체계 재설계의 5개 추진중점으로 구성되어 있다.



〈그림 3-11〉 국방혁신 4.0 목표 및 추진중점

마. 최종 상태

- 북한 핵·미사일 위협에 대한 대응능력을 획기적으로 강화함으로써 대북 억제 달성
- AI·무인·로봇 등 첨단과학기술 기반 경쟁우위의 작전수행능력 구비

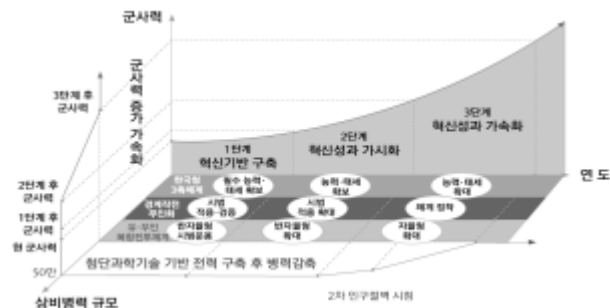
바. 국방혁신 4.0은 2040년까지 도전요인 해소, 기회요인 활용의 우선순위를 고려하여 다음과 같은 기조로 추진된다.

- 1) 북핵·미사일 대응능력 확보, 첨단과학기술 전투체계와 이를 뒷받침하는 기반 구

45) 국방부, 국방혁신 4.0 브로슈어, 2023. 2. 28.

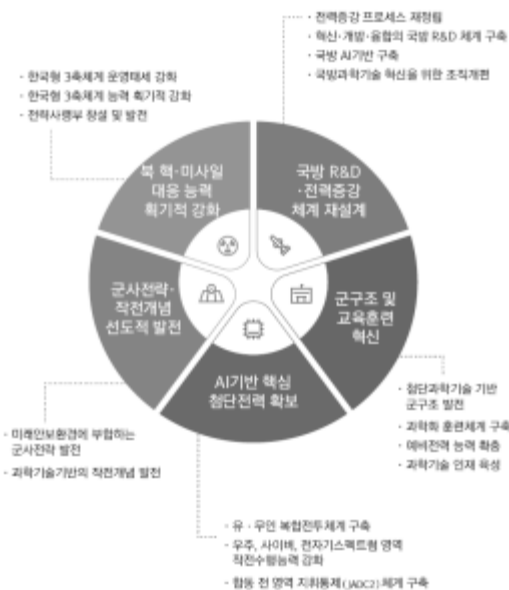
축에 집중 등 본질적 변화가 필요한 핵심분야 위주로 추진

- 2) 야전 제대에서 실제 체감할 수 있는 발전적 변화 추구
- 3) 법률(제도), 조직 등을 병행 혁신하여 성과창출과 가속화 견인
- 4) 지휘구조·병력구조 등은 동감·합의·검증을통해 안정적으로 추진
- 5) 단계화 추진 : 1단계(혁신기반 구축), 2단계(혁신성과 가시화), 3단계(혁신성과 가속화)



〈그림 3-12〉 국방혁신 4.0 추진기조46)

사. 국방혁신 4.0은 미래 군의 변화를 이끌어갈 다양하고 성격이 다른 추진계획들이 〈그림 3-13〉과 같이 5개 추진 중점(분야), 16개 과제 및 44개의 과업으로 구성되어 있다.



〈그림 3-13〉 국방혁신 4.0 중점 및 과제47)

46) 국방부, 국방혁신 4.0 브로슈어, 2023. 2. 28.

아. 국방혁신 4.0은 2040년까지 1단계에서는 혁신기반을 구축하고, 2단계에서는 혁신성과를 가시화하며, 3단계에서는 혁신성과를 가속화하는 3단계로 추진한다. 단계별 추진중점은 <그림 3-14>와 같다.

추진중점		국방혁신 기반구축	국방혁신 가시화	국방혁신 가속화
복합·미사일 대응능력 획기적 강화	한국형 3축체계	한국형 3축체계 필수 능력·태세 확보	한·미 연합작전 주도 한국형 3축체계 능력·태세 확보	전방위 한국형 3축체계 능력·태세 확대
	전략사	전략적 억제·대응 가능한 전략사령부 창설	전략적 능력 확충과 연계한 전략사령부 발전	
군사전략·작전개념 선도적 발전	군사전략·작전개념	대북 압도적 억제·대응 및 주변국에 대응할 수 있는 군사전략과 전 영역 통합 작전개념 발전	인보환경 변화와 신무기체계 발전을 선도할 수 있는 군사전략·작전개념 발전	
	경계작전	미래 경계작전 개념 정립 및 무인화 시범 적용·검증	미래 경계작전 개념발전 및 무인화 시범 적용 확대	무인화 경계작전체계 정착
AI 기반 핵심 첨단전력 확보	유·무인	유·무인 복합전투체계 빈자율형 시범운용	유·무인 복합전투체계 빈자율형 확대	유·무인 복합전투체계 자율형 확대
	신영역	신영역 전략·작전개념 발전 및 기반 마련	신영역 작전수행을 위한 전력 구축	신영역 작전수행 고도화를 위한 전력 확충
	JADC2	차기 국방광역통합망(M-BcN망) 구축	M-BcN망에 C4I체계 연결, C4I 데이터 통합체계 구축	Next KJCCS 전력화
군구조 및 교육훈련 혁신	군구조	미래 군구조(안) 정립 및 개편준비	선 전력증강 및 1단계 개편	상비병력 감축 연계, 2단계 개편
	교육훈련 체계	합성훈련환경(STE) 플랫폼 시범구축	과학화훈련장(군·사단급) 및 국방교육훈련관리체계 구축	대규모 국방합성훈련장 구축
국방 R&D·전력증강 체계 재설계	획득체계	기존 획득절차 획기적 단축, 새로운 획득절차 도입	신개념의 획득절차 발전	
	국방 R&D	국방전략기술 발전(단기)	국방전략기술 발전(중기)	국방전략기술 발전(장기)
	국방 AI기반	국방AI 총괄 및 기반구축을 위한 조직신설과 국방 지능형 플랫폼 구축	전군 국방 5G 구축 및 서비스 발전과 국방 지능형 플랫폼 고도화	

<그림 3-14> 국방혁신 4.0 단계별 추진중점⁴⁸⁾

47) 국방부, 국방혁신 4.0 브로슈어, 2023. 2. 28.

3. 국방혁신 4.0에 대해 성과평가 지표 선정 방법 적용 결과

가. 국방개혁 평가요소는 국방개혁을 추진하는 시점에서의 안보상황, 지정학적 상황, 국방개혁 추진 증점 등에 따라 매우 다양하기 때문에 표준적인 요소로 한정하는 것은 곤란하다.

나. 기존 문헌 등에서 일반적으로 사용한 주요 평가요소는 다음과 같이 국방력 강화·군사력 증강·전략적 안보 유지·국방관리 체계 효율성 향상 등이 있다.

- 1) 국방력의 강화 : 국방개혁의 가장 큰 목표로서 군사력, 정보화, 인적자원 등
- 2) 군사력 증강 : 국방력 강화의 핵심 요소 중 하나로서 전투능력, 무기체계, 병력 배치 등
- 3) 전략적 안보 유지 : 국가의 전략적 안보를 유지하기 위한 국방 정책의 안정성, 위기 대천 및 관리 능력 등
- 4) 국방관리 체계 효율성 향상 : 국방개혁 추진을 위한 예산 사용 효율성, 인력 운용 효율성, 기술력 등

다. 국방개혁을 평가할 수 있는 방법은 정량적인 접근과 정성적인 접근으로 구분할 수 있다.

라. 정량적인 평가를 위해서는 목표를 구체화하고 다음과 같은 방법 중에서 평가 목적을 고려하여 적절한 지표를 선택하는 것이 필요하다.

- 1) KPI(Key Performance Indicator)에 의한 방법 : 국방개혁의 목표와 성과를 구체화하여 최초 설정한 예산 대비 집행의 효율성, 병력의 전투능력, 군수품의 효율적인 운용 등
- 2) 비교 대조 방법 : 다른 국가·기업·기준에 수행했던 국방개혁 성과와 비교 대조
- 3) 예산 성과 분석 방법 : 국방개혁의 예산을 분석하고, 예산 사용의 효율성을 분석을 위한 예산 획득·분배·사용 성과 등
- 4) 데이터 분석에 의한 방법 : 국방개혁 관련 데이터를 수집하고 분석하여 전력자원의 변화, 군사력 증강에 따른 군사적 성과 등

48) 국방부, 국방혁신 4.0 브로슈어, 2023. 2. 28.

마. 정성적인 접근은 다음과 같은 방법을 사용할 수 있다.

- 1) 인터뷰와 설문 조사 : 국방개혁 관련 인원과 국민을 대상으로 인터뷰와 설문조사를 실시하여 개혁에 대한 성과와 국방개혁에 대한 인식·만족도·개혁의 영향 등 평가
- 2) 피드백 : 국방개혁에 직접 참여한 인원에게 대한 인터뷰를 통해 국방개혁 분야별 실질적인 효과 평가, 국방개혁의 문제점 파악, 해결방안 모색 등
- 3) 사례 연구 : 국방개혁 분야별 성공한 사례와 실패한 사례를 연구하여 개혁의 성과 평가

바. 그러나 국방개혁의 정량적 평가를 위해 사용할 수 있는 평가지표 역시 평가 목적에 따라 매우 다양하기 때문에 표준화할 수 없지만, 문헌에서 주로 사용한 일반적인 평가지표는 다음과 같다.

- 1) 병력 수 및 비율 적절성 : 현재와 미래 안보 위협을 고려한 적정 병력 수, 현재와 미래의 전체 인구 대비 병력 비율 적절성, 병무제도 적절성 등
- 2) 국방 예산 적절성 : 예산에 기초한 국방력 수준, 국방력 강화 노력 등
- 3) 군사력 증강 성과 : 무기체계 개발 성과, 군사력 증강의 정도 등
- 4) 국방기술 수준 변화 : 국방기술 수준 변화를 통한 국방력 향상 노력 등
- 5) 위기 대응 및 전투 능력 변화 : 재난 및 테러 대응능력 변화, 전투지휘 능력 변화, 병력의 전투능력 변화 등

사. AHP를 통해 다음과 같이 국방개혁에 중요한 영향을 미치는 요소들의 가중치를 산정하여 국방개혁의 다양한 측면을 고려하면서 종합적으로 평가할 수 있다.

- 1) 전략적 목표(Strategic objectives)
- 2) 예산 효율성(Budget efficiency)
- 3) 인력 효율성(Personnel efficiency)
- 4) 기술력(Technological capability)
- 5) 민군협력(Utilization of private sector technology)
- 6) 미래 전투 환경 대응력(Capability to respond to future battlefield environments)
- 7) 대응 능력(Operational readiness)
- 8) 비용 절감 효과(Cost-saving effects)
- 9) 정보보호 능력(Information security capability)
- 10) 병영 문화 개선(Improvement of military culture)

아. 국방혁신 4.0 전체에 대한 성과평가 항목은 상기 문헌을 고찰하고, 국방혁신 4.0 관계자 인터뷰 결과 등을 통해 국방혁신 4.0 목표 및 최종상태 달성을 위한 성과를 평가할 수 있는 성과평가 항목을 중요성·긴급성·효과성으로 선정하였다.

'중요성'과 '긴급성'은 시간 관리 분야의 고전인 '아이젠하워 원칙⁴⁹⁾'으로부터 도출했고, '효과성'은 분야·과제의 이행결과가 국방환경 도전요인을 해소하여 국방혁신 4.0 목표와 최종상태 달성에 대한 기여 효과를 평가를 위해 선정했다. 평가 항목별 정의는 다음과 같다.

1) 중요성(Importance) : 국방혁신 4.0 최종상태 달성과 'AI 과학기술강군 육성' 목표 달성에 중요한 정도

2) 긴급성(Urgency) : 국방환경 도전요인의 해소와 국방혁신 4.0 목표 및 최종상태 달성을 위해 우선 추진해야 하는 정도

3) 효과성(Effectiveness) : 국방환경이 직면한 도전요인을 해소하고, 국방혁신 4.0 최종상태와 목표 달성에 효과적으로 기여하는 정도

자. 국방혁신 4.0 과업별 성과평가 항목은 프로젝트 관리 주요 요소와 국방혁신 4.0 정책효과에 대한 성과를 평가할 수 있는 항목을 선정했다. 프로젝트 관리 주요 요소 9개에서 국방혁신 4.0 특성을 고려하여 직접 적용이 곤란한 '품질 관리'를 제외한 8개를 선정했고, 국방혁신 4.0 추진의 균형성 및 통합성 유지와 정책효과를 평가하기 위해 '구체적 성과 발생'과 '상위목표 달성에 기여' 항목을 추가했다. 과업별 성과평가 항목 선정 결과는 <표 3-8>과 같다.

<표 3-8> 과업별 성과평가 항목

성과평가 항목		내 용
프로젝트 관리	목표 관리	① 과업의 목표(완료 조건)가 정의되었는가?
	범위 관리	① 과업의 세부업무별 우선순위가 부여되었는가? ② 과업의 범위가 구체적으로 정의되었는가?
	일정 관리	① 과업 추진을 위한 마스터플랜이 수립되었는가? ② 과업 추진 진도관리가 되었는가?
	원가 관리	① 계획된 예산 범위에서 과업을 수행할 수 있는가?

49) 업무를 긴급성(Urgency)을 가로축, 중요성(Importance)을 세로축으로 4등분한 그룹으로 분류하여 처리순서를 결정하고, 위임과 직접 수행 등의 중요도를 부여하는 아이젠하워의 업무처리 방식에서 기원한 원칙

	인적자원 관리	① 과업의 세부업무별 인원의 전문성은 유지되고 있는가?
	의사소통 관리	① 내·외부 유관부서와 소통하고 있는가?
	위험 관리	① 과업의 위험요소에 대한 대응계획이 수립되었는가? ② 위험요소에 대해 적절하게 대응하고 있는가?
	조달 관리	① 과업 추진을 위한 예산 확보 계획은 수립되었는가? ② 과업 추진간 예산이 확보되었는가?
정책 효과 과	구체적 성과 발생	① 과업 추진결과가 실제 시행되고 있는가?
	상위목표 달성에 기여	① 과업 추진현황이 과제의 목표 및 최종상태, 국방혁신 4.0 목표 및 최종상태 달성에 기여했는가?

차. 과업별 성과평가 항목은 10% 단위 구간으로 표시된다. 따라서 10% 내에서의 구간별 진도율은 평가지표 달성 시 구간별 최대 진도율을 부여하고, 미달성 시 다음과 같은 방법으로 '0% 초과 ~ 10% 미만'으로 부여했다.

1) 정량적 평가지표에서 '세부 과업 식별'이 완료되면 10%를 부여하고, 완료하지 못하면 과업별 세부 성과평가 결과로 0% 이상 10% 미만 사이 값을 부여했다. <표 3-9>는 진도율 7.8%를 부여한 사례이다.

<표 3-9> 과업별 세부 성과평가 사례

세부 성과평가 항목		가중치 (%)	평가 결과 (적절 0.9, 보통 0.5, 미흡 0.1)	진도율 (×10%)
프로젝트 관리	목표	10	0.9	0.9
	범위	10	0.5	0.5
	일정	20	0.9	1.8
	원가	10	0.9	0.9
	인적자원	10	0.9	0.9
	의사소통	10	0.9	0.9
	위험	5	0.9	0.45
	조달	10	0.1	0.1
정책 효과	구체적 성과 발생	10	0.9	0.9
	상위목표 달성에 기여	5	0.9	0.45
계		100	-	7.8

4. 국방혁신 4.0 과제·과업에 대해 그룹화 방법 적용 결과

가. 과업 평가 기준과 각 과업에 대한 데이터 분석 가능성을 평가하여 정량적 과업과 정성적 과업, 정량 및 정성적 과업, 별도 과업 유형으로 분류한 결과와 예시는 <표 3-10>과 같다.

<표 3-10> 과업 유형 분류 결과

계	정량적 유형	정성적 유형	정량·정성 병행 유형	별도 유형
44개	13개	13개	7개	11개

<과업 유형 분류 결과 예시>

중점·과제·과업		과업 유형			
		정량	정성	병행	별도
V.	국방 R&D-전력증강체계 재설계				
㉓	전력증강 프로세스 재정립				
	① 신속·효율적 국방획득체계 개선		○		
	② 각 군 주도 하 맞춤형 연구개발사업 신설			○	
	③ 국방부 정책기능 강화 및 거버넌스 구축		○		
㉔	혁신·개방·융합의 국방 R&D 체계 구축				
	① 혁신·개방·융합의 국방 R&D 체계 정립		○		
	② 한·미 국방과학기술 협력 강화		○		
	③ 국방 R&D 예산 확대			○	
㉕	국방 AI 기반 구축				
	① 양질의 국방데이터 구축·관리			○	
	② 초고속·초연결 네트워크 구축	○			
	③ 국방 AI 센터 창설 및 발전 여건 구축		○		
	④ AI 기반 군수혁신 및 인재관리		○		
㉖	국방과학기술 혁신을 위한 조직개편				
	① 국방과학기술 혁신을 위한 조직개편		○		

5. 국방혁신 4.0 분야·과제에 대해 가중치 결정 방법 적용 결과

가. 전문가의 주관적인 의견을 정량화할 수 있는 전문가 설문기법인 AHP 설문으로

국방혁신 4.0 분야·과제에 대한 성과평가 항목의 가중치를 결정했다.

나. 가중치 결정을 위해 국방혁신 4.0 성과평가 항목을 계층 1, 추진 중점(분야)을 계층 2, 과제를 계층 3으로 다음과 같이 구조화하였다.

1) 계층 1 : 성과평가 항목(3개)

가) 구성 요소 : 중요성, 긴급성, 효과성

나) 평가 관점 : 국방혁신 4.0 목표 및 최종상태 달성 측면에서 성과평가 항목의 상대적 중요도 평가

2) 계층 2 : 국방혁신 4.0 추진 중점(5개)

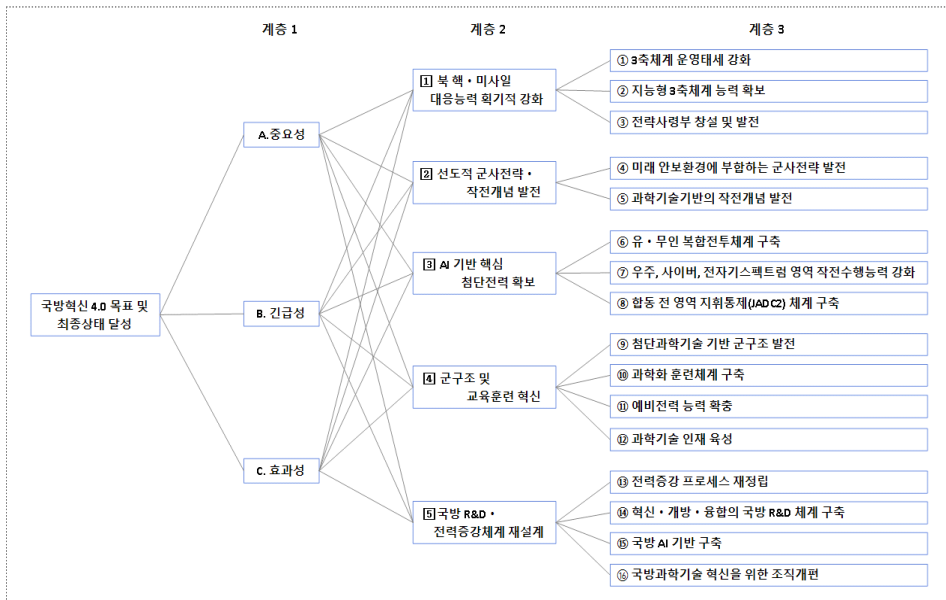
가) 구성 요소 : 북핵·미사일 대응능력 획기적 강화, 선도적 군사전략·작전개념 발전, AI 기반 핵심 첨단전력 확보, 군구조 및 교육훈련 혁신, 국방 R&D·전력증강체계 재설계

나) 평가 관점 : 성과평가 항목 측면에서 국방혁신 4.0 추진 중점의 상대적 중요도 평가

3) 계층 3 : 국방혁신 4.0 과제(16개)

가) 구성 요소 : '㉑ 3축체계 운영태세 강화' 등 16개

나) 평가 관점 : 추진 중점 각각의 측면에서 하위 과제의 상대적 중요도 평가
다. 국방혁신 4.0 성과평가 가중치 결정 모형은 <그림 3-15>와 같다.



<그림 3-15> 국방혁신 4.0 성과평가 가중치 결정 모형

라. 가중치 결정 모형에 따라 AHP 설문지를 구성하여 국방혁신 4.0 군 내·외부 전문가 39명을 대상으로 의견을 수렴하여 가중치를 결정했다.

마. 분야·과제별 가중치는 Bottom-up 개념에 의해 하위에서 상위 계층으로 종합된다. 예를 들어, 계층 2에서 5개 분야의 가중치는 <표 3-11>에서처럼 상위요소인 '중요성' 가중치가 적용된 상대적 중요도로 환산된다.

<표 3-11> 과제별 가중치 계산 예시

과 제 명	가중치	중요성 가중치(%)	환산된 가중치 (%)
㉠번 북핵·미사일 대응능력 획기적 강화	0.322	31.780	10.230
㉡번 선도적 군사전략·작전개념 발전	0.149		4.720
㉢번 AI 기반 핵심 첨단전력 확보	0.211		6.670
㉣번 군구조 및 교육훈련 혁신	0.141		4.490
㉤번 국방 R&D·전력증강체계 재설계	0.178		5.670
계	1.000	-	31.780

바. 상기 개념에 의해 결정된 성과평가 항목과 분야·과제별 가중치는 <표 3-12>, <표 3-13>과 같다.

1) 성과평가 항목 가중치

<표 3-12> 성과평가 항목의 가중치

구 분	계	중 요 성	긴 급 성	효 과 성
가중치(%)	100.00	31.78	45.37	22.85

2) 분야·과제별 가중치

<표 3-13> 분야·과제별 가중치

분 야	가중치 (%)	과 제	가중치 (%)
1. 북 핵·미사일 대응능력 획기적	31.33	㉠ 한국형 3축 체계 운영태세 강화	13.16

강화		㉒ 한국형 3축 체계 능력 획기적 강화	12.30
		㉓ 전략사령부 창설 및 발전	5.87
2. 군사전략·작전개념 선도적 발전	16.92	㉔ 미래 안보환경에 부합하는 군사전략 발전	9.24
		㉕ 과학기술기반의 작전개념 발전	7.69
3. AI 기반 핵심 첨단전력 확보	19.42	㉖ 유·무인 복합전투체계 구축	8.81
		㉗ 우주·사이버·전자기스펙트럼 영역 작전수행 능력 강화	5.63
		㉘ 합동 전 영역 지휘통제(JADC2) 체계 구축	4.97
4. 군구조 및 교육훈련 혁신	13.88	㉙ 첨단과학기술 기반 군구조 발전	6.07
		㉚ 과학화 훈련체계 구축	1.90
		㉛ 예비전력 능력 확충	2.80
		㉜ 과학기술 인재 육성	3.11
5. 국방 R&D·전력증강체계 재설계	18.45	㉝ 전력 증강 프로세스 재정립	5.75
		㉞ 혁신·개방·융합의 국방 R&D 체계 구축	3.61
		㉟ 국방 AI 기반 구축	5.91
		㊱ 국방과학기술 혁신을 위한 조직 개편	3.18
계	100.00	계	100.00

6. 국방혁신 4.0 과업에 대해 가중치 결정 방법 적용 결과

가. 과업별 가중치는 과제 관점에서 평가한 과업의 중요도를 과업별 가중치를 활용했다. 예를 들어, 예를 들어, '㉒ 3축체계 운영태세 점검' 과제의 2개 과업 '㉑ 운영개념 및 작전수행체계 발전'과 '㉒ 연습·훈련 발전 및 전문인력 육성'은 과제 관점에서 100%를 기준으로 50% : 50%, 30% : 70% 등의 비율로 중요도를 판단했다.

나. 중요도는 다음과 같은 절차로 판단했다.

1) 성과평가 항목인 '중요성', '긴급성', '효과성'에 대해 과제 관점에서 중요도를 평가하여 과업의 가중치 결정

2) 중요도는 상대적 평가를 위해 평가결과의 합을 10점으로 고정

* Σ 중요성 = 10, Σ 긴급성 = 10, Σ 효과성 = 10 * 척도 : 1~10점

3) 과제별 가중치 합을 1로 정규화하여 과업 점수의 상대적 크기로 결정
 예) <표 3-14>에서 Ⅱ번 과제는 Ⅱ-① 18점, Ⅱ-② 12점을 30(18+12)으로 나누면 Ⅱ-① : Ⅱ-② = 0.6 : 0.4로 계산

〈표 3-14〉 과업별 가중치 결정 예시

과업 번호	분야·과제·과업	가중치	계	중요성	긴급성	효과성
I. 북 핵·미사일 대응능력 획기적 강화						
Ⅰ 3축체계 운영태세 강화						
1	① 운영개념 및 작전수행체계 발전	0.60	18	6	6	6
2	② 연습·훈련 발전 및 전문인력 육성	0.40	12	4	4	4
Ⅱ 지능형 3축체계 능력 확보						
3	① 북 핵·WMD·미사일 조기 무력화를 위한 감시 및 타격능력 확보	0.37	11	4	4	3
4	② 복합·다층 미사일 방어체계 구축	0.33	10	4	3	3
5	③ 압도적 대량응징보복 능력 강화	0.30	9	2	3	4
Ⅲ 전략사령부 창설 및 발전						
6	① 전략적 억제·대응을 위한 전략사령부 창설	...	...	...	...	...
7	② 전략사령부의 진화적 발전	...	...	...	...	...

7. 국방혁신 4.0 전체 과제·과업에 대해 성과평가 방법 적용 결과

가. 국방혁신 4.0 성과평가를 위한 계층구조는 현재 추진 중인 국방혁신 4.0과 동일하게 5개 분야·16개 과제·44개 과업으로 구성했다.

나. 44개 과업은 사업추진 방법을 고려한 정량적 과업, 정성적 과업, 정량 및 정성적 병행 과업, 별도 과업의 3개 유형으로 구분해서 평가했다.

다. 국방혁신 4.0 전체 성과는 Bottom-up 방개념에 의해 과업별 성과가 과제별 성과에 합산되고, 이 결과가 분야별 성과에 합산되어 최종적으로 국방혁신 4.0의 성과에 종합되도록 했다.

라. 모든 성과평가 결과는 과업 유형과 무관하게 정량화된 진도율(%)로 종합했다.

마. 추진성과와 예산사용 현황은 직관적으로 확인할 수 있도록 EVMS 방법의 시각화 방법인 Bull's Eye Chart 기법을 활용해서 시각화했다.

1) Bull's Eye Chart는 EVMS에서 프로젝트의 일정과 비용 성과를 시각적으로 표현하는 방법으로 프로젝트의 상태를 일정 성과지수(SPI : Schedule Performance Index)와 비용성과지수(CPI : Cost Performance Index)로 표현한다.

2) Bull's Eye Chart는 SPI, CPI를 4사분면 정사각형으로 구분하여 프로젝트의 전체 상태와 과업별 상태를 도식한다. <그림 3-17>에서 일정 성과지수와 비용 성과지수가 모두 정확히 정상인 상태가 4사분면을 구분하는 + 지점이다. 따라서 정상 추진 중인 과업은 녹색 영역, 관심 과업은 노란색 영역, 주의 과업은 빨간색 영역에 위치한다.

3) 과업별 상태는 중앙에 가까울수록 성과가 좋고, 멀어질수록 미흡한 것을 의미하기 때문에 시각화를 통해 프로젝트의 전체적인 성과와 과업별 문제를 조기에 식별하여 개선하는데 효과적으로 활용할 수 있다.

4) Bull's Eye Chart를 본 연구에 적용하기 위한 조건 및 가정사항은 다음과 같다.

가) 과업별 계획 일정 계획 대비 추진현황을 지수화한 일정성과지수(SPI)를 정의하고, 과업별 예산 소요 대비 획득 현황을 지수화한 예산성과지수(CPI)를 정의했다.

나) 단, 국방 예산은 획득되면 정상적으로 집행되고, 집행 상태를 지속적으로 관리·감사하는 특성이 있기 때문에 예산 획득 후 예산 사용의 적절성·효율성 등 집행 성과는 고려하지 않았다.

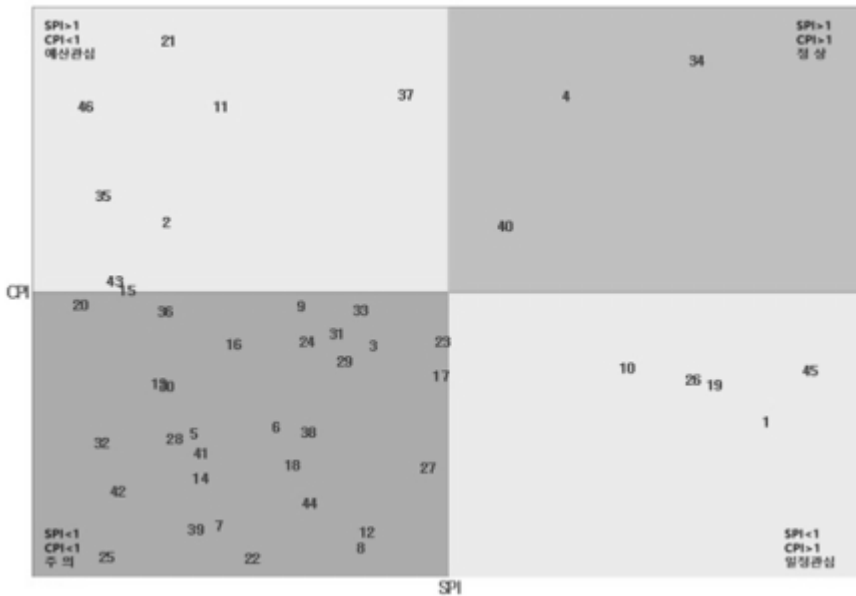
<표 3-15> SPI, CPI 판단 기준

SPI > 1 일정 계획 대비 성과 우수	CPI > 1 예산 소요 대비 초과 획득
SPI < 1 일정 계획 대비 성과 미흡	CPI < 1 예산 소요 대비 적게 획득
SPI = 1 일정 계획대로 진행	CPI = 1 예산 소요만큼 획득

바. Bull's Eye Chart를 이용한 과업별 성과평가 결과 예시는 <그림 3-16>과 <그림 3-17>과 같다.

구분	과업번호	과업	CPI	SPI	과업별 성과 계획
과제1	1	운영개념 및 작전수명체계 발전	1.763	0.506	52%
	2	연속훈련발전 및 전문인력 육성	0.300	1.245	55%
	3	핵 핵 WMD 미사일 조기 무력화를 위한 감시 및 표적 타격능력 확보	0.816	0.789	94%
과제2	4	복합 다중 미사일 방어체계 구축	1.279	1.710	75%
	5	압도적 대량공격보복 능력 강화	0.365	0.465	24%
	6	전략적 억제 대응을 위한 전략사령부 장설	0.581	0.487	66%
과제3	7	전략사령부의 진화적 발전	0.444	0.127	70%
과제4	8	미래 안보환경에 부합하는 군사전략 발전	0.786	0.043	92%
과제5	9	첨단무기 및 유무인 복합중심의 '전역적 통합작전' 개념 발전	0.643	0.936	78%
	10	새로운 경제작전개념 발전	1.426	0.705	82%
	11	유무인 복합전투체계 단계적 전환	0.450	1.673	13%
과제6	12	유무인 복합 경제시스템 구축	0.801	0.101	73%
	13	네트워크 연동표준 구축	0.301	0.647	73%
	14	소요 주파수 확보 및 활용기술 개발	0.401	0.300	45%
	15	보안-압도체계 구축	0.225	0.991	94%
	16	드론 통합관제체계 구축	0.481	0.795	55%
과제7	17	합동성에 기반한 국방우주력 발전	0.979	0.679	66%
	18	사이버작전 수행 고도화를 위한 개념 발전 및 전력 구축	0.621	0.347	71%
	19	전자기작전 수행을 위한 개념 발전 및 전력 구축	1.635	0.645	10%
	20	합동 전 영역 지휘통제(JADC2) 개념연구 및 기반체계 구축	0.113	0.941	39%
과제8	21	인공지능(AI) 기반 지휘통제체계 발전	0.325	1.916	43%
	22	지속적으로 추진 가능한 전문조직 발전	0.526	0.007	6%
	23	미래 연합방위 및 전 영역 통합작전을 고려한 지휘구조 발전	0.984	0.802	96%
과제9	24	AI 기반 유무인 복합전투체계 중심의 부대구조 발전	0.657	0.804	31%
	25	미래 상비병력 규모 판단 및 국방인력 구조 발전	0.175	0.010	51%
	26	첨단과학기술 기반의 전력구조 발전	1.587	0.665	18%
	27	실전적 훈련을 위한 첨단훈련체계 구축	0.949	0.337	27%
과제10	28	과학화훈련장 개선 및 국방융합훈련장 구축	0.338	0.443	37%
	29	지역방위사단 개편과 연계한 예비군 구조 재설계 및 제도 개선	0.746	0.730	72%
	30	훈련장 과학화 및 예비군훈련체계 개선	0.318	0.640	10%

〈그림 3-16〉 과업별 SPI, CPI



〈그림 3-17〉 Bull's Eye Chart

1) 〈그림 3-17〉을 수평적으로 보면 일정관리 측면에서 해석할 수 있다. 위쪽은 일정이 정상 추진되거나 빠르게 추진되고 있는 상태이고, 아래쪽은 반대이다.

2) 한편 수직적으로 보면 예산관리 측면에서 해석할 수 있다. 오른쪽은 예산이 소요에 대해 정상적으로 획득되거나 충분히 획득된 상태이고, 왼쪽은 반대이다.

3) 해석상에서 유의할 것은 일정과 예산관리에서 정상적인 상태인 녹색 영역에 있는 과업 4, 34, 40번도 모두 가운데 +선 방향으로 올 수 있도록 관리해야 한다. 예를 들어, 일정이 매우 빠르고 예산이 초과집행된다는 것은 전체 국방혁신 4.0에서 특정 과제에 관심이 집중되기 때문에 주의 영역에 있는 과제들과 전체적인 조화를 이루지 못하고 있음을 의미하기 때문이다.

제 6 절 기대효과

가. 그동안 국방개혁 관련 연구는 추진계획을 효율적으로 관리할 수 있는 관점보다는 특정 분야 또는 이슈를 중점으로 이루어졌으며, 특히 정량적 평가보다 정성적 평가 관점에서 접근한 사례가 많았다.

나. 국방개혁은 복잡하고 다양한 요소들이 관련되어 있기 때문에 정량적 접근과 정성적 접근을 적절히 활용하여 합리적으로 평가하는 것이 중요하다. 또한 국방혁신 4.0은 기존 수행한 국방개혁과 성격이 유사하며, 여러 과제가 혼합된 대형 프로젝트와 성격이 같다.

다. 본 연구는 국방혁신 4.0과 같은 대규모 프로젝트의 추진 진도 및 성과 산출 방법론 구축하는 방법론과 사례를 보였다. 본 연구결과는 국방부, 합참, 각 군에서 활용할 수 있는 분석평가 방법과 사례를 제시함으로써 국방부 및 각 군의 중요 추진계획에 대한 진도평가 및 성과 측정에 활용이 가능하다.

참 고 문 헌

1. 국내문헌

- [1] 국방부, 국방혁신 4.0 리플릿, 2023. 2. 28.
- [2] 국방부, 국방혁신 4.0 브로슈어, 2023. 2. 28.
- [3] 국방부, 2023년 국방부 연두 업무보고(튼튼한 국방, 과학기술 강군' 건설로 '힘에 의한 평화' 구현), 2023.1.11.
- [4] 박성철, 정태균, 이현진, 공공기관 프로젝트 성과평가에 관한 연구: 중앙부처 사례를 중심으로, 한국행정학보, 2017.
- [5] 심영란, 김영국, 장해령, 수출입 은행의 신규 사업 추진 평가 모형: AHP 기반의 다중 평가기준 적용, 한국산학기술학회논문지, 2012.
- [6] 윤덕균, 이성기(1998), "Median Rank를 이용한 연구인력 평가 시스템", 공업경영학회지, 제 21권.
- [7] 이상철, 국방개혁 2.0 진단과 발전방향, 한국군사문제연구원, 2021.
- [8] 이용복, 서열척도를 이용한 AHP 그룹의사결정 방법-무기체계 획득 과정을 중심으로, 한양대학교, 2006.
- [9] 이재원, 박원규, 정승환, 설계·건설 사업의 성과평가를 위한 선정요인 및 가중치 산정에 관한 연구, 한국건설관리학회논문집, 2016.
- [10] 이재원, 정승환, 박원규, 프로젝트 성과평가를 위한 과업별 가중치 산정에 관한 연구, 한국산학기술학회논문지, 2014.
- [11] 장수영, 윤현진, 박노삼, 윤재관, & 손영성. (2019). 심층 강화학습 기술 동향. [ETRI] 전자통신동향분석, 34(4), 1-14.
- [12] 장순철, 홍석기, 프로젝트 성과평가에 대한 실증분석: 과업별 가중치 적용을 중심으로, 한국프로젝트관리학회논문집, 2013.
- [13] 조근태, 조용근, 강현수(2003), 앞서가는 리더들의 계층 분석적 의사결정, 동현출판사.
- [14] 조근태, 조용근, 강현수, 「계층분석적 의사결정」, 동현출판사, 2003.
- [15] 차두현, 국방개혁 2.0의 의미와 과제 : 설득력이 부족한 2.0으로의 변신, 아산정책연구원, 2018.
- [16] 최병욱, 국방개혁 추진, 어떻게 해야하나? : 탈냉전시대 미 육군의 개혁사례와 교훈, 국방정책연구, 2019
- [17] 형혁규, 국방개혁 2.0의 평가와 향후과제, 국회입법조사처, 2020.
- [18] 황규승(1989), "AHP기법의 신뢰성에 관한 연구", 경영논총, 32집, p. 88.
- [19] 황규승(1984), "계층분석 과정에 의한 의사결정", 경영연구, 18권 1호, pp. 92-93.

2. 해외문헌

- [1] Arulkumaran, K., Deisenroth, M. P., Brundage, M., & Bharath, A. A. (2017). A brief survey of deep reinforcement learning. arXiv preprint arXiv:1708.05866.
- [2] A. T. Nguyen, M. A. Hsieh, and R. Gupta, "Reinforcement learning for autonomous systems: challenges and opportunities," in Proceedings of the IEEE, vol. 108, no. 9, pp. 1401-1423, 2020.
- [3] Bettini, Matteo; Kortvelesy, Ryan; Blumenkamp, Jan; Prorok, Amanda (2022). "VMAS: A Vectorized Multi-Agent Simulator for Collective Robot Learning". The 16th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems. Springer. arXiv:2207.03530
- [4] Cho, N., Moon, H., & Pyun, J. J. (2020). The Study on CGF Behavior Modeling Methodologies for Defense M&S: Focusing on Survey and Future Direction. Journal of the Korea Society for Simulation, 29(2), 35-47. <https://doi.org/10.9709/ JKSS.2020.29.2.035>
- [5] Choi, M., Moon, H., Han, S., Choi, Y., Lee, M., & Cho, N. (2022). Experimental and Computational Study on the Ground Forces CGF Automation of Wargame Models Using Reinforcement Learning. IEEE Access, 10, 128970-128982.
- [6] Toly Chen, Chin-Shan Lu, and Hsu-Tung Yao, An Integrated Fuzzy AHP and Grey Relational Analysis for Evaluating Project Performance, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2013.
- [7] Jui-Sheng Chou and Pei-Hsuan Tsai, Project Evaluation and Selection Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Zero-One Goal Programming: A Case Study of Highway Construction, Journal of Infrastructure Systems, 2015.
- [8] Fornell, Claes(1992),"A National Customer Satisfaction Barometer", Journal of Marketing, 56 (January), pp. 6-21.
- [9] Gu, S., Yang, L., Du, Y., Chen, G., Walter, F., Wang, J., ... & Knoll, A. (2022). A review of safe reinforcement learning: Methods, theory and applications. arXiv preprint arXiv:2205.10330
- [10] Hamalainen, R. P. and Steppinen, T. O.(1986), "The Analytic Network Process in Energy Polish Planing", Socio-Economic Planing Sciences, 20, PP. 99-405.
- [11] Hawke, J., Badrinarayanan, V., & Kendall, A. (2021). Reimagining an autonomous vehicle. arXiv preprint arXiv:2108.05805.
- [12] He, J., & Yang, J. (2021, June). Dynamic gain military game algorithm based on episodic memory. In 2021 International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA) (pp. 30-36). IEEE.

- [13] J. J. Michael and J. P. Bigus, "Applications of reinforcement learning in the military domain," in Proceedings of the 12th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2013.
- [14] Kim, D. K., Riemer, M., Liu, M., Foerster, J., Everett, M., Sun, C., ... & How, J. P. (2022). Influencing long-term behavior in multiagent reinforcement learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 35, 18808-18821.
- [15] S. S. Ke and H. T. Lin, Project evaluation and selection using a fuzzy multicriteria decision-making approach, *International Journal of Production Research*, 2009.
- [16] Kober, J., Bagnell, J. A., & Peters, J. (2013). Reinforcement learning in robotics: A survey. *The International Journal of Robotics Research*, 32(11), 1238-1274.
- [17] Duygu Koc and Coskun Ozkan, A multiple criteria decision making approach for project evaluation and selection with intuitionistic fuzzy sets, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2018.
- [18] Hsien-Chang Kuo, Yi-Hsin Lin, and Shih-Cheng Hu, A weighting method for project evaluation based on the Analytic Hierarchy Process, *International Journal of Project Management*, 2009.
- [19] Liu, S., Lever, G., Wang, Z., Merel, J., Eslami, S. M., Hennes, D., ... & Heess, N. (2021). From motor control to team play in simulated humanoid football. *arXiv preprint arXiv:2105.12196*.
- [20] Mead, L., Sarkis, J.(1999), "Analyzing Organizational Project Alternatives for Agile Manufacturing Process: An Analytical Network Approach", *International Journal of Production and Research*, vol 37, no 2, pp. 241-261.
- [21] Mead, L., Sarkis, J.(2002), "A Conceptual Model for Selection and Evaluating Third-party Reverse Logistics Provider", *Supply Chain Management: An international Journal*, vol 7, no 5, pp. 283-295.
- [22] Miki, Shoma et al. "Applying Deep Learning and Reinforcement Learning to Traveling Salesman Problem." 2018 International Conference on Computing, Electronics & Communications Engineering (iCCECE) (2018): 65-70.
- [23] Morrison, Douglas, Peter Corke, and Jürgen Leitner. "Closing the loop for robotic grasping: A real-time, generative grasp synthesis approach." *arXiv preprint arXiv:1804.05172* (2018).
- [24] Narver, J. C. & Slater, S. F.(1990), "The Effect of Market Orientation on Business Profitability", *Journal of Marketing*, 54, pp. 20-35.

- [25] Ottoni, André LC, et al. "Reinforcement learning for the traveling salesman problem with refueling." *Complex & Intelligent Systems* 8.3 (2022): 2001-2015.
- [26] Papoudakis, G., Christianos, F., Rahman, A., & Albrecht, S. V. (2019). Dealing with non-stationarity in multi-agent deep reinforcement learning. arXiv preprint arXiv:1906.04737.
- [27] Pearce, T., & Zhu, J. (2022, August). Counter-strike deathmatch with large-scale behavioural cloning. In *2022 IEEE Conference on Games (CoG)* (pp. 104-111). IEEE.
- [28] Pierotti, J., Kronmueller, M., Alonso-Mora, J., van Essen, J. T., & Böhmer, W. (2021). Reinforcement Learning for the Knapsack Problem. In *Optimization and Data Science: Trends and Applications: 5th AIROYoung Workshop and AIRO PhD School 2021 Joint Event* (pp. 3-13). Springer International Publishing..
- [29] C. Ranganathan and P. R. Kannan, Weighted Project Evaluation Technique(WPET): A multi-attribute project selection and evaluation approach, *International Journal of Production Economics*, 2004.
- [30] Saaty, T. L.(1980), *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York, NY.
- [31] Saaty, T. L.(1996), "Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process", RWS Publications, Pittsburgh, PA.
- [32] Salo, A. A., Hamalainen, R. P.(1997), "On the Measurement of Preferences in the Analytic Hierarchy Process", *Journal of Multi-criteria Decision Analysis*, vol 6, pp. 309-319.
- [33] Shu-Hsing Chung, A. H. I. Lee and W. L. Pearn(2004), "Analytic Network Process(ANP) Approach for Product Mix Planning in Semiconductor Fabricator", *International Journal of Production Economics*, In press, Corrected Proof.
- [34] Silver, D., Schrittwieser, J., Simonyan, K., Antonoglou, I., Huang, A., Guez, A., ... & Hassabis, D. (2017). Mastering the game of go without human knowledge. *nature*, 550(7676), 354-359.
- [35] Silver, D., Singh, S., Precup, D., & Sutton, R. S. (2021). Reward is enough. *Artificial Intelligence*, 299, 103535.
- [36] Tan, M. (1993). Multi-agent reinforcement learning: Independent vs. cooperative agents. In *Proceedings of the tenth international conference on machine learning* (pp. 330-337).
- [37] The Regents of the University of Michigan(2001), *American Customer Satisfaction Index(ACSI) Methodology Report*.

- [38] Tyler Elliott, Chi-Hong Cheung, and Rahim Jassemi-Zargani, (2021). Artificial Intelligence Tools for Threat Assessment. DRDC - Ottawa Research Centre
- [39] Zahedi, F.(1986), “The Analytic Hierarchy Process - A Survey of the Method and its Applications”, Interfaces, 16, pp. 96-108.
- [40] Zhang, K., Yang, Z., & Başar, T. (2021). Multi-agent reinforcement learning: A selective overview of theories and algorithms. Handbook of reinforcement learning and control, 321-384.

3. 웹사이트

- [1] <https://medium.com/analytics-vidhya/reinforcement-learning-with-skinner-deacef0a281a>
- [2] <https://www.zucisystems.com/blog/the-conundrum-of-using-rule-based-vs-machine-learning-systems/>
- [3] <http://m.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=30268>

전장에서 포병화력 살상효과 모델링 분석 및 무인체계 실시간 제어 기법 연구

육군사관학교 기계·시스템 공학과 부교수 김 종 환

육군사관학교 기계·시스템 공학과 부교수 백 승 원

배재대학교 드론 철도건설 공학과 교수 차 도 완

- I. 연구 개요
- II. 연구 내용(세부#1)
- III. 연구 내용(세부#2)

I. 연구 개요

1. 개요

- 연구제목: 전장에서 포병화력 살상효과 모델링 분석 및 무인체계 실시간 제어 기법 연구
- 연구기간: 2023. 6. 7. ~ 11. 6. (5개월)
- 연구기관: 육군사관학교 산학협력단
- 연구비용: 14,250,000원
- 연구원: 김종환, 백승원, 차도완(배재대학교)

2. 연구배경

1) '러시아-우크라이나' 전쟁 양상

1년 넘게 지속되고 있는 러시아-우크라이나 전쟁(2022)은 전쟁초기의 러시아군의

예측과는 사뭇 다르게 진행되고 있다. 절대적인 열세라고 평가받은 우크라이나 군은 주변국가들의 우려에도 불구하고 러시아군을 상대로 상당히 선전하고 있으며, 서방국가들의 첨단 무기체계의 지원에 힘입어 러시아의 공격기세를 저하시키고 수세에서 공세로 이전함으로써 러시아에게 빼앗겼던 영토를 수복하고 있다. 이러한 우크라이나 선전에는 지도층의 리더십, 국민들의 항전의지, 기상 및 지형조건, 경제·사회 기반 시스템 등 여러 가지 이유가 존재하겠으나, 서방국가들로부터 지원받은 화력무기체계 등이 중요한 역할을 하였음은 부인할 수 없다. ‘러시아-우크라이나’ 전쟁간 우크라이나는 서방국가들의 도움으로 하이마스 (HIMARS), 재블린(FGM-148 Javelin), 차세대 대전차 무기로 불리는 NLAW(Next Generation Light Anty Tank Weapon) 등의 화력무기 체계를 비롯하여, 화력체계와 연동되는 지휘통신체계, 무인전투체계의 다양한 무기체계를 운용하였다. 이러한 무기체계들은 전쟁간 대화력전, 대포병사격전을 수행하면서 기계화 및 보병부대의 전투력 저하를 강요하였지만, 재래식 무기의 한계로 인해 막대한 부수적 피해(Collateral Damage)를 발생시켰다.

2) 4차 산업혁명 기술과 무인체계의 가속화

4차 산업혁명 기술은 인공지능 기반 지능형 로봇의 발전을 가속화 하였으며 이러한 지능형 로봇의 모습은 국방 분야에서, 지상에서는 차륜형, 궤도형, 다족형 등의 지상 무인체계로 공중에서는 멀티콥터 드론, 고정익 무인항공기, 생체모방 곤충형 등의 공중 무인체계로, 해양에서는 무인 수상정, 무인 잠수정, 생체모방 물고기 로봇 등의 해양 무인체계로 나타났다. 미국, 러시아, 중국 등 세계 주요 군사 강대국들은 이러한 무인체계를 통한 유인과 무인체계의 협동전투능력을 구비하고자 노력하고 있으며, 특히 최근 우크라이나 전에서는 드론, 고정익 무인 항공기 등의 전투효과가 확실히 드러나고 있다. 그러나, 이러한 무인체계는 무인체계가 병력의 부족현상을 대체하기 위한 목적이 있음에도 불구하고 조종기를 이용한 무인체계를 운용하기 위해서는 별도의 인력이 필요한 상황이며 오히려, 편제가 확장되어야 하는 현상이 발생하고 있다. 따라서, 병력의 부족현상이 심화되는 오늘날, 무인체계를 운용함에 있어서 기존 편제를 유지하거나 편제를 축소할 수 있으며 실시간 무인체계를 제어할 수 있는 기술적 방안에 대한 연구가 필요한 실정이다.

3. 연구목적

본 연구는 ‘러시아-우크라이나’ 전쟁에 운용된 다양한 포병화력 및 무인전투체계를 조사하여, 시뮬레이션 기반의 살상효과 모델링 분석 및 무인체계 실시간 제어(통제) 기법을 분석하는 것이다.

4. 연구범위 및 방법

본 연구의 범위 및 방법은 제안요청서에 제시된 과업 지시사항의 주요 연구내용을 기초로, 다음과 같이 두가지 내용으로 구분하여 제시한다.

(세부 #1) ‘러시아-우크라이나’ 전쟁에서 운용된 포병화력에 대한 시뮬레이션 기반의 살상효과 모델링 분석 연구

- 러시아-우크라이나 전쟁에 사용된 주요 포병화력무기체계 현황조사
- 조사된 무기체계들을 대상으로 탄약 제원 조사
 - * 탄두중량, 탄피중량, 장약중량, TNT/RDX 비율 등
- 포병화력에 대한 살상효과를 확률기반의 모델링 수행
 - * 폭압효과, 파편효과, 열효과를 고려한 공학적 모델링
- 모델링을 기반으로 한 전장의 불확실성을 반영한 시뮬레이션 구축
- 러시아-우크라이나 전쟁에서 운용된 포병화력에 대한 시뮬레이션 기반의 살상효과 모델링 분석
 - * 중첩살상효과를 적용한 사격발수에 따른 살상효과 분석

(세부 #2) 전장에서의 무인체계 실시간 제어(통제) 기법에 관한 연구

- 무인체계(국방로봇)의 정의 및 분류, 중요기술 현황 분석
- 전장에서의 무인체계 활용사례 및 주요국 정책동향 분석
- 무인체계를 실시간 제어하기 위한 기술조사 및 주요 연구동향 분석
- 무인체계 실시간 제어에 따른 운영개념 제시
 - ※ 지상, 해양, 공중 대표적 운영개념 각각 1개 제시

II. 연구내용(세부 #1)

과제명: '러시아-우크라이나' 전쟁에서 운용된 포병화력에 대한 시뮬레이션 기반의 살상 효과 모델링 분석 연구

1. 포병화력 무기체계 현황조사

가. '러시아-우크라이나' 전쟁에 운용된 포병화력 무기체계 현황조사

2022년 발발한 '러시아-우크라이나' 전쟁에 사용되고 운용되며, 유럽국가와 미국 등의 국가들이 지원한 포병화력 무기체계 현황을 문헌조사를 진행하였다. 이번 전쟁에는 미국, 영국을 비롯한 NATO에 속한 여러 서방국가와 러시아 등의 공산국가의 첨단 무기체계의 각축장이 되어 있었다. 이에 본 연구는 전장에서 주요하게 운용된 포병화력 무기체계를 종합하여 심도있는 분석을 도출하였다. 특히, 러시아의 BM-21 화력무기체계, 영국의 M777, 그리고 미국의 M142 HIMARS의 다양한 화력무기체계가 분석되었다.



곡사포, 로켓런처
* BM-21

곡사포, 견인포
* M777

정밀유도로켓시스템
* M142 HIMARS

그림 1. '러시아-우크라이나' 전쟁에 운용된 화력무기체계 예

1) BM-21 화력무기체계의 9M22U탄

BM-21은 소련에서 제작된 다중로켓 발사기 시스템이다. 이 차량은 6×6 우랄 트럭에 장착된 40개의 로켓 튜브로 구성되어 있으며, 1960년대 초에 개발되었다. 40개의 로켓튜브는 초당 2개씩 발사될 수 있어 신속한 타격 및 높은 살상효과를 제공할 수 있지만, 재장전 시간은 약 10분이 소요되는 기술적 단점이 존재한다. 이로 인하여, BM

-21은 발사 위치 설정 및 이탈 시간이 각각 2분 30초와 2분으로 추정되며, 생존성 향상을 위하여 이 시간은 반드시 보장될 필요가 있다. 이 화력무기체계는 러시아와 우크라이나가 운용하고 있으며, ‘러시아-우크라이나’ 전쟁 초기에 러시아군에서 운용 중인 수는 약 1,700대로, 우크라이나군에서는 185대로 추정된다. BM-21 화력무기체계는 전 세계에서 가장 많이 생산되고 사용되는 것 중 하나인 9M22U 비유도 고폭 로켓탄을 주로 운용한다. 9M22U탄은 점화 후 3초 후에 최대 700m/s의 속도에 도달하고, 중량은 66.5kg이며, 6.6kg의 A-IX-9 폭발물이 채워진 전탄을 실어 최대 20km까지 타격이 가능하다. 로켓의 비유도성과 높은 발사율로 인한 흔들림으로 인한 편차와 고도 각도에서의 높은 부정확성을 고려할 때, BM-21은 단일 목표가 아닌 넓은 지역에 피해를 입히기 위해 고안된 광역 화력무기체계로 볼 수 있다.



그림 2. BM-21 화력무기체계

2) M777 화력무기체계의 M109탄

M777은 BAE Systems Global Combat Systems 사의 제조한 155mm 영국의 견인포이다. 이 화력무기체계는 포, 발사 장비, 트럭에 견인될 수 있는 수레로 구성되어 있고, 무거운 중량으로 인해 도수운반에 의한 이동이 불가능하기 때문에 트럭에 견인되어 운용된다. 이 화력무기체계의 장치 설치 시간은 약 6분, 이동 시간은 6분 30초, 그리고 최대 발사 속도는 분당 6발로 알려져 있다. 미 육군은 약 1,000기의 포를 운용하고 있고, 탄두의 종류도 다양하다. 본 연구는 미국의 표준 고폭탄인 43kg 중량의 M107탄을 시뮬레이션에 사용할 포탄으로 설정하였다. 이 포탄의 초기 속도는 827m/s로 최대 25km 떨어진 지점까지 타격이 가능한 것으로 알려져 있다. 우크라이나는 이 무기체계를 136대 보유하고 있으며, 이 중 108대는 미국으로부터 M107 포탄과 함께 제공

받은 바 있다.¹⁾



그림 3. M777 화력무기체계

3) M142 HIMARS의 M31탄

HIMARS (High Mobility Artillery Rocket System)은 미 육군이 90년대 후반에 개발한 다중로켓 발사기 시스템이다. HIMARS는 중형 트럭 새시를 기반으로 하며, 두 종류의 로켓을 운반할 수 있다. GMLRS(Guided Multiple Launch Rocket System) 로켓 6개 또는 ATACMS 미사일 1개를 장착할 수 있다. 본 연구는 미국이 우크라이나에 16대의 HIMARS와 함께 제공한 GMLRS 로켓을 고려하였다. GMLRS 로켓은 최대 90km 사거리에서 10m의 정확도를 갖는 GPS 유도 로켓이다. 중량은 91kg로 장약은 23kg의 PBX-109 (RDX 64%, 알루미늄 20%), 쉘의 중량은 68kg로 추정된다. M142 화력무기체계는 상대적으로 고비용의 탄약을 사용하여 목표에 대한 높은 타격 정확도를 가지고 있다.

2. 화력무기체계 탄약제원 조사




앞 절에서 ‘러시아-우크라이나’ 전쟁에서 운용된 화력무기체계를 살펴보았다. 이들의 화력무기체계는 탄을 제공하는 타격수단이고, 실제 살상효과를 발휘하는 것은 각

1) OVE S., FULMER Kenton, JENZEN-JONES N.R. et al., Indirect Fire: A technical analysis of the employment, accuracy, and effects of indirect-fire artillery weapons, Perth, Armament Research Services (ARES), 2017.

체계에서 운용하는 탄약이다. 하나의 화력무기체계는 다양한 탄을 운용한다. 본 연구에서는 다양한 탄을 분석하기에는 그 범위가 너무 넓기 때문에 실제 ‘러시아-우크라이나’ 전쟁에서 주로 운용된 탄약과 대표되는 탄약에 한정하였으며, 인터넷 등에 공개된 제원이 있는 경우에 한하여 분석하였다. 이에, BM-21 화력무기체계의 경우 9M22U탄으로, M777의 경우 M107탄으로, 그리고 M142의 경우 M31로 설정하여 탄약제원을 조사하였다.

포병화력 무기체계의 살상효과를 분석하기 위해서는 기본적으로 수집되어야 하는 탄약제원이 존재하고, 이러한 제원수집을 통해 살상효과를 현실적인 값으로 도출할 수 있는 공학적 모델링이 필요하다. 이를 위해 수집된 각 탄약제원은 아래 표에 제시되었다.

표 1. ‘러시아-우크라이나’ 전쟁에 사용된 포병화력체계의 유형별 제원

구분	9M22U	M107	M31
장약무게 (kg)	6.6	6.98	23
장약 유형	A-IX-2 (73% RDX, 23% aluminium powder)	Composition B (63% RDX, 36% TNT)	PBX-109 (64% RDX, 20% Aluminum)
셸 무게 (kg)	11.8	35	68
형상			

3. 공학 모델링을 위한 개념 설정

가. 정밀도와 정확도에 대한 개념 설정

비유도 간접사격(포병 화력무기체계) 유도체와 로켓은 발사되면 탄약충전물 혹은 로켓 모터와 총열 및 발사체 혹은 로켓의 물리적 특성에 의해 영향을 받아 탄도곡선에 의해 추진된다. 이러한 특징을 갖는 간접화력(포병 화력무기체계) 시스템의 정확도는 이러한 탄도 매개변수와 환경 요인의 조합에 의해 영향을 받는다. 정확도에 대해선 국

가별로 다를 수 있는 다양한 구체적인 용어들이 사용될 수 있으며, 때로는 이러한 용어들이 국가별이나 다른 환경에서 다를 수도 있다. 본 연구는 다음과 용어들에 명확한 정의 및 개념을 설정한 다음 구체적인 모델링을 진행하였다.

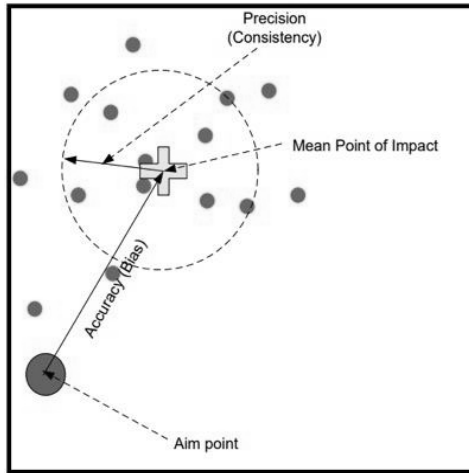


그림 4. 정확도, 정밀도, 평균타격지점 예

- 정확도(Accuracy) : 목표 지점에서의 평균 타격 지점 (MPI) 편차의 측정
- 조준 지점(Aim Point) : 원하는 타격 지점.
- 편향(Bias) : 실제 MPI와 원하는 MPI 사이의 거리 부정확도 및 방향.
- 오차(Error) : 편향 또는 불명확성의 원인으로, 포 사격 허용오차, 탄약 변동, 기상 조건에 의한 요소들을 포함.
 - 누적 오차(Error Budget) : 누적된 총 예상 오차.
 - 평균 타격 지점 (Mean Point of Impact) : 여러 발사체의 평균적인 타격 위치.
 - 정밀도(Precision) : MPI 일관성 또는 "분산"의 측정.

나. 정밀도(Precision)

보통 포병 화력무기체계의 능력을 결정하기 위해서는 화포를 실제로 발사하거나 외부 매개변수를 고려한 모의를 실행하여 일정 고도각에서의 최대사거리등의 주요요소를 분석한다. 이러한 성능들은 각 무기체계별 및 탄종별 사표로 제공되며 양식은 서로 상이한 편이다. 사표에 제시된 데이터를 기초로 해당 무기체계가 갖는 주요 성능을 추정할 수 있다. 특히, 화력무기체계의 정밀도를 측정하는 한 가지 방법은 원형공산오차(CEP)²⁾

로 표현된다. 무기 시스템의 CEP를 결정하는 실제 계산은 복잡하며 모델링, 현장 실험 및 알려진 조건 하에서 사격 데이터의 통계 분석을 필요로 한다. 그러나 CEP는 다음과 같이 근사될 수 있다.

아래 그림은 MPI를 중심으로 하는 원의 반경으로 CEP의 분포를 개념적으로 보여주고 있다. 해당 원의 경계에는 해당하는 탄약의 50%의 충격 지점이 포함될 것으로 예상된다. CEP가 가우시안 분포에 의해 시뮬레이션 된다는 것을 감안하면, 대상을 향해 발사된 탄약의 절반은 무기 시스템의 CEP 내에 떨어질 것이며, 93.7%는 2 CEP 내에 떨어지며, 99.8%는 CEP 반경의 최대 3배까지 떨어질 것으로 판단된다. 이러한 특징을 기초해 볼때 CEP는 화력무기체계의 정밀도에 대한 불확실성을 의미한다고 볼 수 있다.

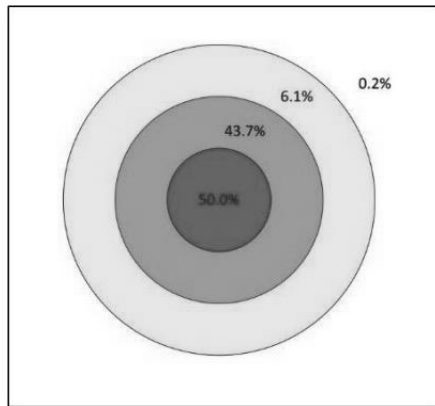


그림 5. CEP 분포 개념도

이러한 설정을 기초로 CEP에 다음과 같은 종류의 무작위 오차를 고려하였다.

- 양등오차 : 발사 중에 총열의 높이가 순간적으로 올라가거나 혹은 이전 발사의 총열 진동으로 영향으로 연속발사간 양등으로 인한 오차는 나타날 수 있으며, 이 값은 일정적이지 않고 넓은 편차를 갖는다.

- 완전연소오차 : 탄약의 질량은 개별적으로 또는 생산 배치 간에 변동할 수 있으며 화학 조성도 상이할 수 있어, 실제 사격간 100% 완전연소가 되지 않고 일부의 불완전 연소가 발생할 수 있다.

- 탄환 중량오차 : 탄환은 일반적으로 공정을 통해 생산되며, 이 과정간 탄환의 치수와 중량은 일관되지 않을 수 있다. 따라서 0.5 kg의 질량 변화는 가능하고 이로 인하

2) 원형공산오차(CEP, Circular Error Probability): 화력무기체계의 탄약의 정확도와 관련된 개념으로 목표지점으로부터 평균적인 타격 위치의 분산을 나타내는 지표

여 20m/s까지의 초속 변동을 유발할 수 있다.

- 보조 추진의 오차 : 로켓 보조 또는 베이스 블리드 보조 추진 시스템과 같은 일부 대포 탄약에서 사용된다. 모든 추진제와 마찰의 특성은 추진제 질량과 주변 온도에 따라 변동된다. 또한 발화와 소멸 시간도 변동될 수 있어 무작위 오차가 발생할 수 있다.

- 기상 및 우발요인 오차 : 한 번에 발사되는 탄약의 수는 짧은 시간 동안 발생하므로 온도와 압력은 큰 편차를 갖지 않을 것이고, 그 미세한 영향은 우발 오차로 고려된다. 또한, 저고도에서 생성되는 바람은 방향과 속도가 일정하지 않을 수 있어 무작위 오차로 나타날 수 있다.

GPS 유도 탄약은 목표 지점으로 지속적으로 탄약을 재지정하여 몇 미터 정밀도를 달성하도록 설계되었다. 분산은 MPI를 중심으로 한 정규 분포 법칙을 통해 다음 절에서 모델링 방안이 제공될 것이다. 또한, 산탄의 50%가 CEP 내에 떨어져야 하므로, 정규 분포 법칙의 표준 편차를 적용할 필요가 있어, 아래 식과 같이 오차와 CEP의 관계를 도출하였다.

$$\sigma = 0.68 \times CEP \tag{1}$$

결과적으로 15km 사거리에서 CEP와 각 탄종이 가지고 있는 표준편차의 연관성을 고려할 때 다음과 같은 표를 도출하였다.

표 2. 각 탄종별 CEP 및 표준편차

	9M22U	M107	M31
CEP (m)	162	95	10
σ (m)	110.15	64.6	6.8

다. 정확도(Accuracy)

정확도를 설명하기 전에 편향에 대해서 살펴보자. 편향은 화력무기체계의 각 발사 시 누적된 오차와 연관성이 있다. 이것은 화력무기체계가 연속적인 발사과정에서 한쪽으로 치우치는 특정한 경향이 발생하거나 혹은 어떠한 치우치는 경향없이 산포적으로 오차가 발생하는 경우이다. 화력무기체계의 MPI의 편향을 지속적으로 모니터링하고

각 값들을 측정하는 다음, 이 정보를 기초로, 탄도 계산 또는 수동 포격을 통해 탄도를 업데이트하여 보다 더 높은 정확도를 달성할 수 있다. 그러나 이러한 오차는 무작위적으로 발생하는 오차와 혼동될 수 있기 때문에 면밀한 데이터 관찰이 요구된다. 정확도 판단하는 요소는 다음과 같은 여러 범주로 분류할 수 있다.

- **조준 오차** : 간접 사격을 제공하는 부대는 목표 지역을 직접 시야에 두지 않기 때문에 조준 오차가 발생할 수 있다. 작전 요원은 전방 관측병에 의해 전달되거나 지도에서 추출된 목표 좌표와 자신의 위치를 매우 정확하게 파악해야 한다. 일부 군에서는 GPS나 레이저 거리 측정과 같은 현대 위치 기술을 사용하여 위치를 훨씬 정확하게 결정할 수 있다. 그러나 위치 데이터의 정확성이 직접 발사 단위의 정확성과 정밀성으로 이어지는 것은 제한되고, GPS만으로 해수면 위고를 결정하는 것은 여전히 높은 기술적 제한이 존재한다.

- **기상 오차** : 탄도 기상 보고서는 탄도 궤적의 예측된 꼭대기까지의 고도 간격에서 대기 조건을 결정하기 위해 수행될 수 있다. 이 데이터는 발사 표나 탄도 컴퓨터에 의해 결정된 방위와 고도를 변경하는 데 사용된다. 이러한 기상 조사는 장비, 인력 및 시간의 가용성에 따라 다르다. 상대 습도, 온도, 기압, 풍속 및 풍향이 각 대기 층마다 필요하며, 탄약이 통과하는 모든 대기층에 대한 데이터가 요구된다.

- **모델 오차** : 발사체의 개념 단계에서 시뮬레이션 선택 사항은 발사체가 생산 단계에 진입할 때 시스템적 오류를 초래할 수 있습니다.

아래의 그림은 각 요소들의 영향정도를 보여준다.

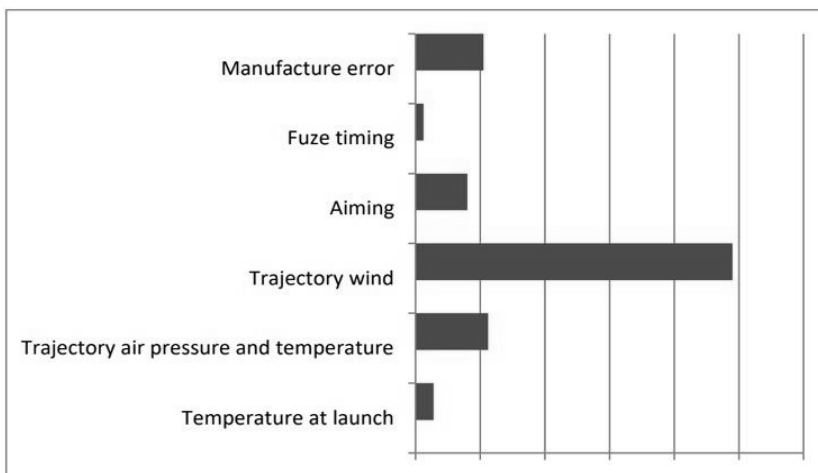


그림 6. 화력무기체계에 발생하는 오차의 주요요인과 그 비중

라. 정밀도와 정확도의 발생 유형

전체 누적 오차에 의해 발생하는 편향과 불명확성은 사실상 예측하기가 매우 어렵다. 그러나 현실적으로 예측 가능한 것은 누적오차의 분포이며, 범위 및 기타 매개변수에 따라 5가지의 유형으로 분류가 가능하다. 이러한 세부적인 사항은 아래 그림에 자세히 제시되었다.

우선 두 가지 종류의 오류에 대해서 살펴보자. 이 두가지는 시스템적 오류와 무작위 오류이다. 시스템적 오류는 편향(정확도에 영향)을 초래하며, 무작위 오류는 불명확성을 초래한다. 시스템적 오류는 발사체마다 반복되어 발생하며, 조준 지점에서 벗어난 평균 타격 지점을 초래한다. 시간이 허용된다면 타격 지점을 관찰하여 연속적인 탄포에서 발사 매개변수를 조정함으로써 이러한 오류를 대부분 보상할 수 있다. 두 번째 무작위 오류는 발사마다 무작위로 발생하는 오류이다. 이것들은 주로 발사체나 로켓 또는 무기 시스템의 변동과 관련되지만 바람 조건의 단기적 변동도 중요하다 (Cross 등, 2016).

시스템적 및 무작위 오류 간의 관계는 중요하며, 분산 개념은 화력무기체계의 효과에 중대한 역할을 할 수 있다. 이상적인 누적오차는 무작위 오류에 의해 지배될 것이다. 아래 그림의 (1)을 살펴보면, 중요한 시스템적 오류는 낮은 정확도를 초래하며, 충분히 높은 무작위 오류는 타격 영역에 제한된 영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있다. 아래 그림 (5)을 살펴보면, 이상적인 시나리오는 예측 가능한 무작위 오류가 타격 지점의 분산을 초래하여 원하는 효과를 타격 영역에 제공하며, 높은 정확도를 유지시키는 최소한의 시스템적 오류가 발생하는 것이다. 그림 (2)에서는 무작위 오류가 허용 가능하지만 시스템적 오류가 고려되지 않은 경우이다. 이 그림에서는 원하는 평균 타격 지점은 높은 정밀도로 놓치게 됨을 확인할 수 있다. 그림 (3)은 누적오차보다 많은 무작위 오류와 낮은 시스템적 오류로 인해 불명확성이 높아져 높은 정확도에도 불구하고 목표에 원하는 효과를 제공하는 타격이 몇 발만 된 경우이다. 그림 (4)는 누적오차보다 적은 무작위 오류와 낮은 시스템적 오류로 인해 타격 지점의 분산이 원하는 대로 전체 타격 영역에 영향을 미치지 못할 수 있는 경우이다.

정확도와/또는 정밀도의 중요성은 화력무기체계, 발사체 유형, 참전 규칙, 부차적 피해 추정, 환경, 지리 및 기타 요인에 따라 크게 달라질 수 있다. 원하는 목표를 달성하기 위한 정확도와 정밀도의 관계는 화력무기체계별 및 탄종별 상이할 수 있기 때문에 보다 높은 효과를 얻기 위해선 지속적으로 연구될 필요가 있다.

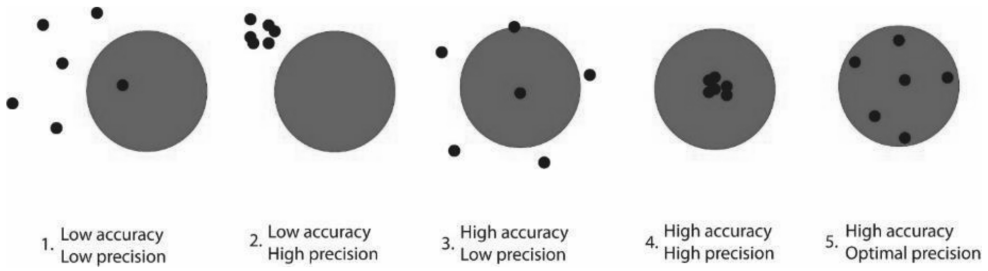


그림 7. 시스템오류와 무작위오류에 따른 정밀도와 정확도의 결과

4. 살상효과 분석을 위한 모델링

가. 개요

포병화력 무기체계의 효과를 분석하기 위해서는 화력체계의 가장 중요한 요소, 즉 살상효과에 대한 정의를 선행하고, 이에 대한 공학적 모델링을 추진하였다. 살상효과에 대한 이론적 배경은 아래 그림과 같이 탄착지점으로부터 특정 범위내를 살상영역이라 정의하고, 표적과의 수직 및 수평 거리를 통해 확률로서 살상효과를 산출하는 것이 기본적인데, 이러한 기본적인 모델링 외에 추가적인 요소(폭압, 파편, 열의 효과)를 본 연구에서 고려하였다.

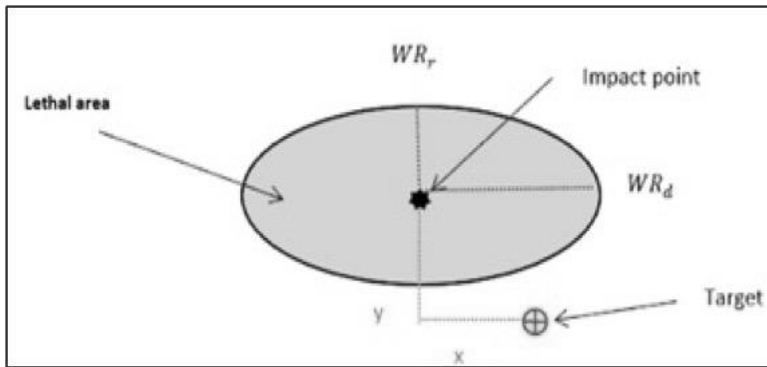


그림 8. 살상효과, 살상범위, 탄착지점에 대한 정의

무기체계의 피해유형이 상이하기 때문에 살상효과를 기초로 피해유형을 정의할 필요성이 존재한다. 피해유형은 크게 완파(completed destroyed), 중파(heavy destroyed), 경파(light destroyed), 무피해(no damaged)로 구분하고 피해유형은 전장의 불확실

성을 적용하기 위해 정규분포 혹은 균등분포의 확률분포를 고려하여 난수를 생성하여 도출하였다.

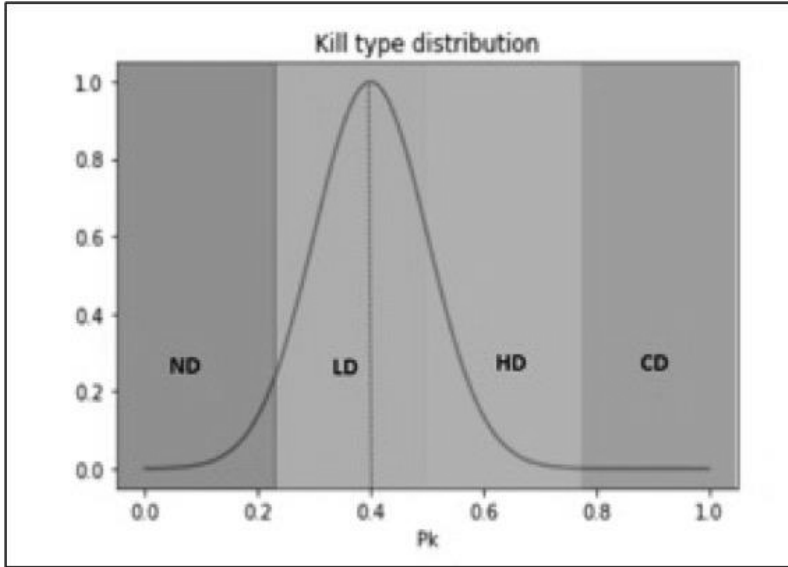


그림 9. 피해유형에 대한 정의

또한, 살상효과를 도출할시 폭압, 파편, 열에 의한 공학적인 모델링을 진행하고, 각 효과요소에 대한 확률적인 도출을 할 수 있는 공학 모델링을 도출하며, 이를 통해 최종 살상효과를 산출하는 모델을 구축하였다. 최초, 단발에 대한 살상효과를 완성하고, 이를 기초로 다중 발수에 따른 누적된/중첩된 살상효과를 도출하는 모델링을 진행하였다. 아래 식은 일반적으로 사용되는 살상효과 모델식이다.

$$f(x) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}(\sigma + \tau)} \left[e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{(x-m)^2}{2\tau^2}} \right] \quad (2)$$

이러한 공학 모델을 기초로 다음단계에 진행되는 시뮬레이션에 적합한 효과분석을 위한 공학적 모델 도출이 요구된다. 본 연구에서 제안하는 살상효과는 폭압효과, 파편효과, 열효과로 구분하여 아래 그림과 같이 구성하였다. 본 연구는 '러시아-우크라이나' 전에 사용된 탄을 기초로 이들의 폭압, 파편, 열 효과를 고려하여 최종적으로 살상효과를 추정하였다.

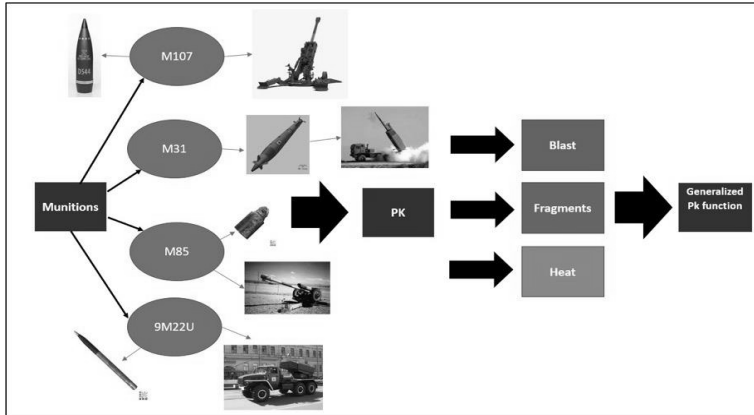


그림 10. 살상효과 아키텍처

나. 폭발효과 (Blast Effectiveness)

살상효과의 주요소인 폭발(Blast)은 포탄이 폭발할 때 나타나는 효과로, 폭발시 짧은 시간내에 발생하는 충격파의 고에너지로 인한 물리적 효과를 의미한다. 폭발시 발생하는 폭발은 공기의 압력이 급격하게 변화하여 인체의 폐, 귀, 다른 장기에 손상을 주며, 폭발에 의해 나타나는 충격파는 강력한 바람을 생성하여 신체손상, 물체의 이동 및 장갑의 구속적인 손상을 일으킬 수 있다.

폭발효과를 모델링 하기 위해서 충격파에 의한 강한 압력의 영향을 주로 고려하였다. 아래 그림에 나타난 바와 같이, 폭발에 의한 압력의 효과는 시간과 거리에 따라 상이하게 나타남을 확인할 수 있다. 이 점은 모델링간 고려되었다.

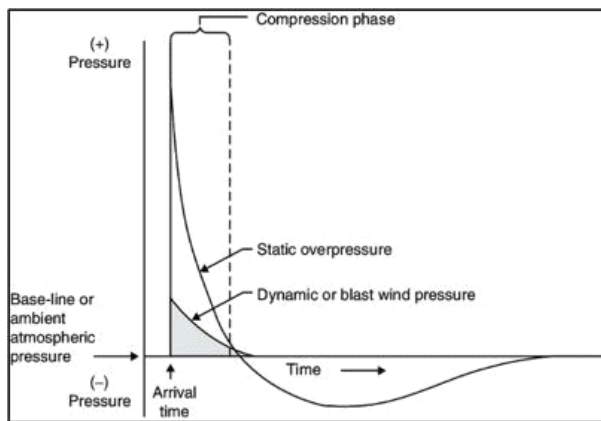


그림 11. 포탄 폭발시 시간에 따른 폭발의 변화

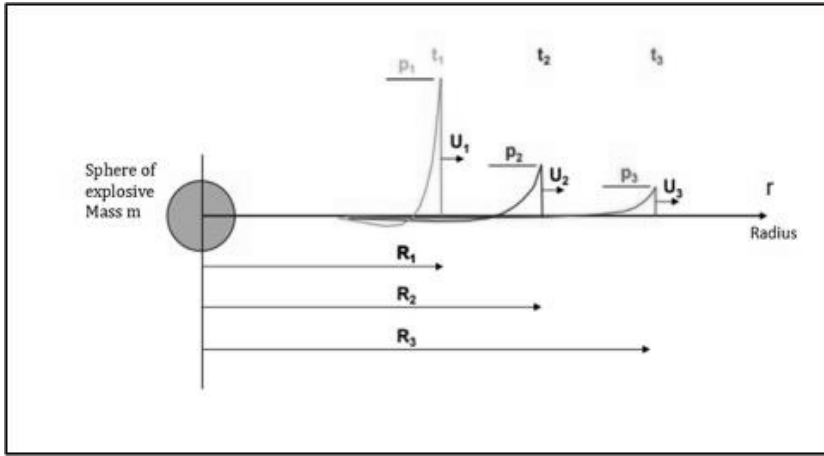


그림 12. 포탄 폭발시 거리에 따른 폭발의 변화

폭압효과를 모델링 하기 위해서 본 연구에서 중점을 둔 요인은 압력값의 최고값과 그 변화였다. 최고 압력은 인체나 물체 혹은 무기체계에 강한 손상을 유발한다. 2022년 Jenzen의 연구에 따르면, 압력의 최고값의 크기에 따라 사람과 구조물에 상이한 영향을 준다고 한다. 이러한 영향관계에 대한 세부내용은 아래 표에 제시되었으며, 세부적인 내용은 보완 및 발전시킬 소요는 존재한다. 인체영향정도의 치사율과 부상율은 연구 결과를 기초로 작성되었으며, 괄호 안에 있는 부상률 및 치사율은 저자에 의해 선형적으로 표현되었다.

표 3. 폭발 최고값과 인체 및 구조물 영향

폭압 최고값	최대 바람속도	인체 영향정도	구조물 영향정도
7kPa	17 m/s	가벼운 상처 (부상률 10% 이하)	유리창 파손 가능
14kPa	31 m/s	일정부위 경증부상 발생 (부상률 30% 이하)	목조 구조물 피해발생
21kPa	46 m/s	중증부상 발생 (부상률 50%) 인체기능상실 발생가능 (치사율 25% 이하)	주거용 구조물 피해발생
34.5kPa	73 m/s	전반적인 부상발생 부상률 90% 이상 인체기능 상실발생 (치사율 50%)	대부분의 콘크리트 구조물 피해발생

69kPa	131 m/s	대부분의 인체기능 상실 (치사율 75% 이상)	강화 구조물 피해발생 및 파괴
138kPa	224 m/s	완전한 인체기능 상실 (치사율 100%)	대부분의 구조물 심각한 피해발생 및 파괴

폭압의 크기는 TNT 등의 장약의 양과 비례한다. 이에 거리를 기초로 TNT양의 따라 폭압의 크기가 어떻게 변화하는 살펴볼 필요가 있다. 아래 그래프는 정규화 단위에 따른 켈니-그라함(Kinney-Graham)의 TNT 차트이다. 이 차트는 폭압의 최대값과 TNT 질량의 관계를 도출할 수 있으며, 이를 기초로 140, 70, 35, 20 kPa는 TNT의 질량이 각각 2.5, 3, 4.5, 그리고 6 m/kg^{1/3} 임을 확인할 수 있다. 따라서, 아래 식을 적용하면 TNT양을 기준으로 폭압에 의한 살상효과의 거리를 도출할 수 있다.

$$d = (W_{TNT})^{1/3} Z \tag{3}$$

여기서 d는 폭압중심으로부터 거리를 의미하고, WTNT는 TNT의 중량을, Z는 정규화된 거리를 의미한다.

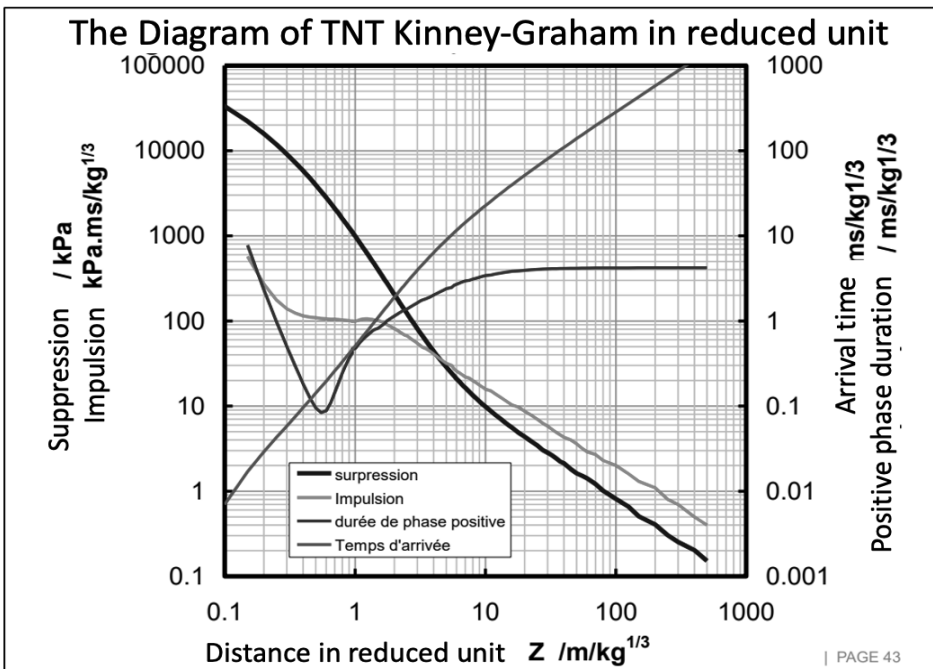


그림 13. Kinney-Graham에 의해 실험적으로 산출된 정규화된 거리별 폭압

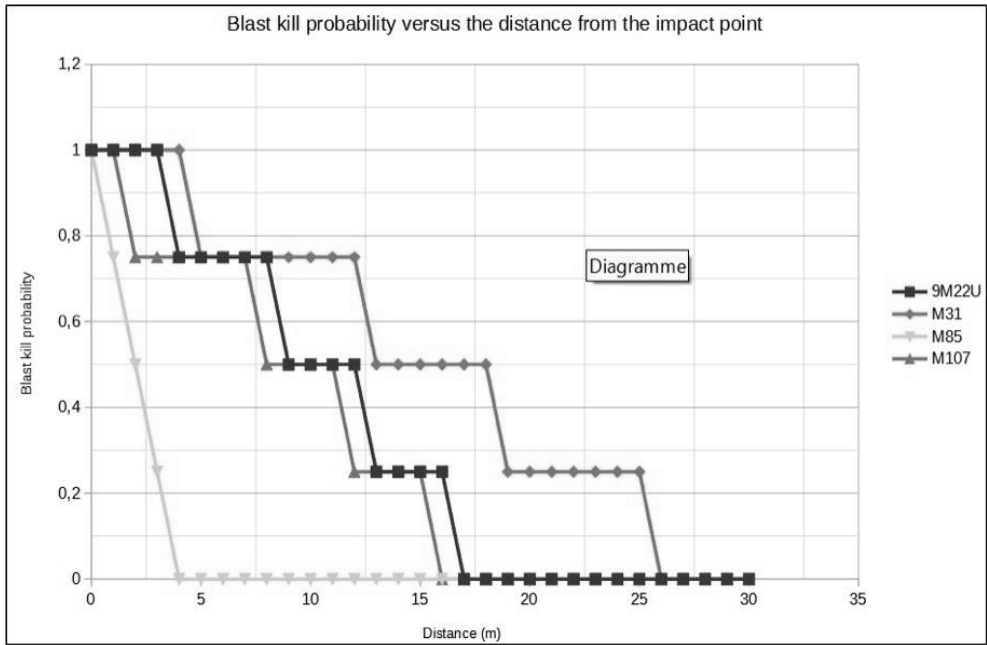


그림 14. 탄종유형별 거리에 따른 폭압효과

다. 파편효과정확도(Accuracy)

파편효과는 폭탄이 폭발할 경우 발생하는 파편에 의한 살상정도가 어떻게 나타나는지에 대한 효과를 의미한다. 파편효과를 모델링할 때 중점을 두었던 사항은 모든 파편의 평균 중량 및 평균 비행속도이다. 이러한 파편효과의 기초가 되는 파편의 초기속도는 아래 식에 의해서 유도될 수 있다.

$$v = \frac{\sqrt{2E_g}}{\sqrt{\frac{M}{C} + \sqrt{\frac{1}{2}}}} \quad (4)$$

여기서 v 는 파편의 초기속도, E_g 는 Gurney 에너지 상수, M 은 포탄의 정규화된 셸(케이스) 중량(kg/m), C 는 포탄의 정규화된 장약중량(kg/m)을 의미한다. 이때 포탄의 셸을 실린더 형태로 가정하였을 경우 정규화된 장약중량 대비 정규화된 셸 중량은 장약중량 대비 셸 중량과 같다고 볼 수 있다. 이러한 점을 고려하여, 앞서 제시된 ‘러시아-우크라이나’ 전쟁에서 사용된 탄종별 장약중량과 케이스 중량은 아래 표에 제시되었다.

표 4. '러시아-우크라이나' 전쟁에 사용된 탄종별 장약 및 쉘 중량

구 분	9M22U	M107	M31
장약무게 (kg)	6.6	6.98	23
셸 무게 (kg)	11.8	35	68

이번에는 파편의 평균 중량을 Gurney가 제안한 방법을 적용하여 산출하였다. 아래의 식을 통해 산출될 수 있다. 이때 파편의 평균중량을 결정짓는 α , β 는 장약의 유형별 상이하며, RDX와 TNT 비율에 따라 상이하다. 세부적인 값은 아래 표를 통해서 확인할 수 있다.

$$\bar{m} = \left(\frac{\alpha}{\sqrt{2Eg}} + \beta \right) \left(\frac{m}{c} + \frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

표 5. 장약유형별 상수비

구 분	α	β
TNT	2.173	0.898
RDX	1.436	0.922
RDX/TNT(60:40)	3.159	0.489

이러한 장약유형별 상수비 α , β 를 기초로 '러시아-우크라이나' 전쟁에 사용된 3가지 유형의 탄의 α , β 를 산출하였다. 그 결과는 아래 표에 제시되었다.

표 6. '러시아-우크라이나' 전쟁 포병탄약별 상수비

구 분	α	β
9M22U	1.435	0.922
M109	3.159	0.489
M31	1.435	0.922

위의 표에 제시된 포병탄약별 장약무게, 쉘중량, 상수비를 고려하여, 아래와 같은 평균 파편중량, 평균 파편속도를 산출하였다. 세부적인 결과는 아래 표에 제시되었다.

표 7. '러시아-우크라이나' 전쟁에 사용된 탄종별 평균 파편 중량 및 속도

구 분	9M22U	M107	M31
평균 파편중량 (g)	2.2	3.8	2.6
평균 파편속도 (m/s)	1,870	1,168	1,559

한 개 파편에 대한 지면 및 높이의 2차원적인 효과를 모델링하기 위하여, 뉴턴의 운동방정식을 기초로 아래와 같은 식을 도출하였다.

$$\frac{dV_x}{dt} = -\frac{\rho ACV_x \sqrt{V_x^2 + V_y^2}}{2m} \quad (6)$$

$$\frac{dV_y}{dt} = -\frac{\rho ACV_y \sqrt{V_x^2 + V_y^2}}{2m} - g \quad (7)$$

여기서 V_x 및 V_y 는 x 축 및 y 축 방향의 속도를 의미하고, g 는 중력가속도, ρ 는 공기밀도, A 는 파편표면에 적용되는 항력, C 는 파편표면의 항력계수, 그리고 m 은 파편중량을 나타낸다. 파편의 효과를 보다 정확하게 모의하기 위해서 2차원 기반의 시간 및 거리에 따른 파편 비행경로를 추정하였고, 이에 y 축 방향에는 중력에 의한 처짐을 고려하여 반영하였으며, 세부적인 경로는 아래 그림에 제시되었다.

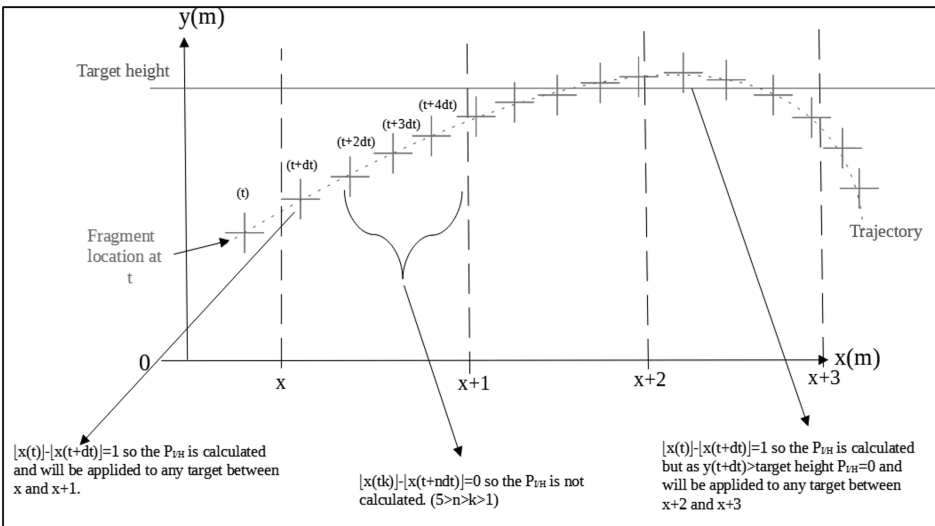


그림 15. 2차원 기반의 거리에 따른 파편 비행경로

이러한 결과를 기초로, Sperrazza and Kokinakis Method³⁾를 적용하여 아래 식과 같은 살상효과에 대한 모델링을 수행하였다.

$$P_{k/h} = 1 - e^{-a(\bar{m}V^{3/2}) - b)^n} \quad (8)$$

여기서 살상확률($P_{k/h}$)은 0과 1사이의 확률값으로, 파편효과에 대한 살상확률을 표현하기 위하여, 두가지 상수를 고려하였다. a 와 n 은 병사의 몸의 취약성과 장비의 보호 그리고 상해 기준을 나타내기 위해 조절할 수 있는 값을 의미한다. 또한, b 는 Sperrazza 에너지($mV^{3/2}$)를 의미한다. Sperrazza와 Kokinakis 방법은 여러 가지 피해 기준을 제시하였다. 특히 병사의 전술적 임무수행 기능을 고려하여 30초 방어, 5분 공격, 12시간 지원 등으로 구분이 된다. 30초 방어는 병사가 부상을 당하였을 경우 30초 동안 방어 임무수행이 가능하다는 것을 의미하고, 5분 공격은 병사가 부상을 당하였어도 5분 동안 공격 임무수행이 가능하다는 것을 의미하며, 12시간 지원은 병사가 부상을 당한 후 12시간 동안 지원 임무수행이 가능함을 의미한다. 본 연구에서는 30초 방어 기준을 적용하였으며, 이것을 기초로 위 식에서 제시된 a , b , 그리고 n 의 값은 아래 표에 제시되었다.

표 8. '러시아-우크라이나' 전쟁에 사용된 탄종별 평균 파편 중량 및 속도

구분	a	b	n
값	8.88×10^{-4}	31,400	0.45

결과적으로 위에서 산출된 파라미터 값을 적용하여 '러시아-우크라이나' 전쟁에서 사용된 포병탄에 대한 거리별 파편효과는 다음 그림과 같이 산출된다.

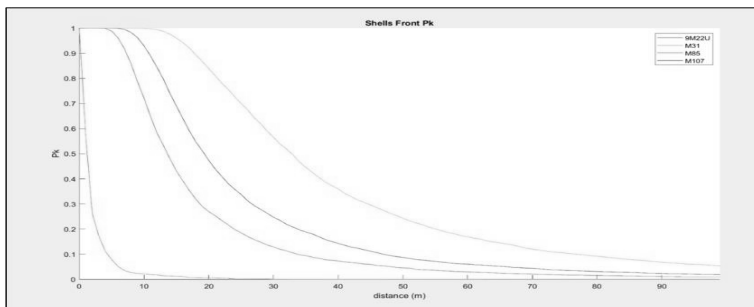


그림 16. 포탄의 유형별 거리에 따른 파편효과

3) DRIELS Morris R., Weaponering Conventional Weapon System Effectiveness, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, SCHETZ Joseph A., 2013.

라. 열효과

앞서 포탄에 의한 폭발효과, 파편효과에 대해서 살펴보았다. 이번에는 포탄에 의한 열효과에 대한 모델링 관련 방법론을 제시하고자 한다. 포탄에 의한 폭발시 강력한 열이 발생하고 이로 인해 인체의 화상을 유발한다. 이러한 열에 의한 피해는 경화상으로부터 사망까지 다양하게 나타날 수 있다. 이에 포탄에 의해 방출되는 열과 그로인한 피해에 대한 공학적인 관계를 도출하는 것이 본 열효과 모델링의 핵심이라 볼 수 있다. 열효과에 대한 인체의 피해를 정량화 하기 위하여, 2022년 Safege에 의한 연구보고서를 참고하였다. 이 보고서를 따르면 열에 의한 열량과 인체의 피해정도에 대한 선형적인 관계가 있음을 보여주고 있다. 열에 의한 열량과 인체 피해정도에 대한 선형적인 관계와 이를 기초로 추정된 살상확률 값은 아래 표에 제시되었다.

표 9. 열에 의한 열량과 인체 피해 및 살상확률

인체 피해 정도	열에 의한 열량 임계치 (kW/m ³) ^{4/3}	살상확률 (Pk)
경상	1,000	0.1
중상	1,800	0.3
심각한 중상	3,600	0.6
사망	4,000	0.9

2004년 게재된 Ministère de l'écologie et du développement의 논문을 살펴보면, 열에 의한 열량은 열에너지와 그 지속시간에 의해 결정되며 세부적인 관계는 아래 식과 같이 제시되었다.

$$I = Q^{4/3} T^{-7/12} \quad (9)$$

$$Q = 4184mf_{TNT} \quad (10)$$

여기서, Q는 장약에 의해 발생하는 열에너지를 의미하고 T는 열에너지의 지속시간을 의미한다. 또한, m은 장약의 중량(kg)을 나타내고, f_{TNT}는 장약중량 TNT 동등비를 의미하며, 4184는 TNT 1kg당 열에너지 비율을 의미한다. 또한 열에 의한 열량은 확산하며, 그 정도는 거리가 증가할수록 감소하게 된다. 이를 산술적으로 표현하기 위하여, 거리에 의한 열량의 확산정도를 고려하여 아래의 식을 도출하였다.

$$R = \left(\frac{3 \times 4184 m f_{TNT} V_b}{2\pi} \right)^{4/3} T^{-7/48} I^{-1/4} \quad (11)$$

여기서, V_b 는 일반적인 사람의 부피를 의미한다. 본 연구에서는 이 값을 일반적인 사람의 평균 부피인 $0.0075m^3$ 으로 설정하였다. 위에서 제시한 장약의 중량과 그 중량을 TNT와 동등하게 변화시키고, 열에너지를 산출하여 열에 의한 열량을 산출하였다. 그 열량은 거리에 따라 변화하게 되고, 인체의 평균 부피값을 적용하여 거리와의 관계를 도출하였다. 그 결과 아래와 같은 거리에 따른 열효과를 도출하였다.

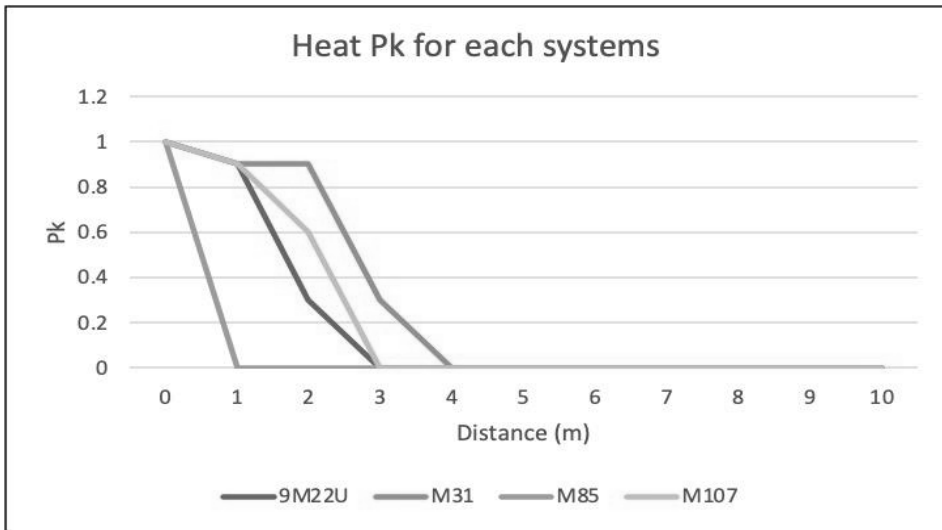


그림 17. 포탄 유형별 거리에 따른 열효과

마. 폭압효과, 파편효과, 열 효과를 고려한 통합 살상효과

포탄이 폭발을 하는 경우 탄착지점 주변은 폭압, 파편, 그리고 열에 의한 피해가 발생한다. 이러한 피해는 인체뿐만 아니라 구조물 등에서 발생하지만 본 연구는 인체에 대한 피해만을 고려하였다. 이러한 폭압, 파편 그리고 열 효과에 의한 살상효과를 도출하기 위하여 앞 절에서는 각각의 효과를 살펴보고 수학적으로 모델링을 하였으며, 거리에 따른 그 효과를 도출하고 가시화하였다. 본 절에서는 이 세 가지 효과를 확률적으로 통합하여 하나의 확률로 표현되는 살상효과를 제시하고자 한다.

이러한 세 가지 효과를 고려한 확률로 표현되는 살상효과를 산출하기 위해서 아래의 생존이론에 기초한 확률 모델을 적용하였다. 거리에 따른 세 가지의 효과값을 아래

의 식에 적용하여 통합하면 아래 그림과 같은 거리에 따른 통합살상효과가 나타난다.

$$P_k^f = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - P_k^j) \quad (12)$$

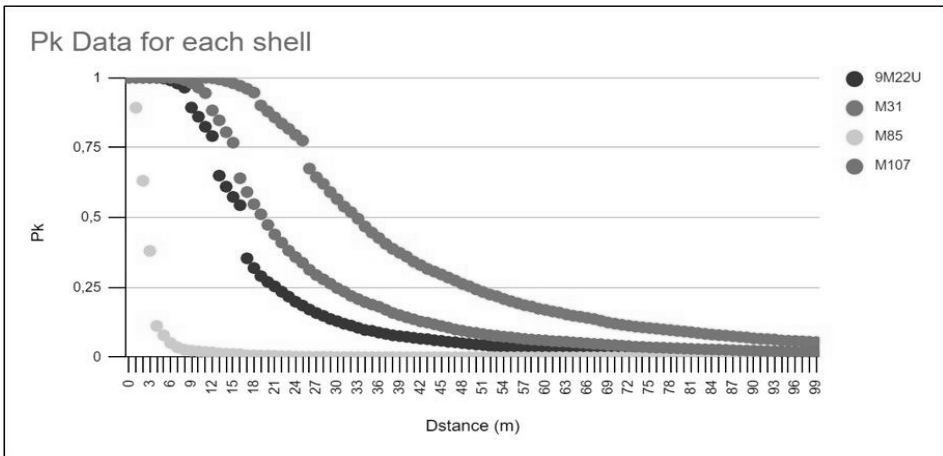


그림 18. 폭압, 파편, 그리고 열 효과를 고려한 포탄 유형별 거리에 따른 살상효과

각 포탄 유형별 상이한 장약중량, 장약의 유형, 셸의 중량 등의 특징들을 고려하여 아래와 같은 지수함수를 적용하여 일반적으로 표현이 가능한 피해함수 식을 도출하였다. 이때 피해함수는 거리와 포탄유형에 따라 파라미터인 a, b값이 상이하게 나타난다. 포탄 유형별 각각의 피해함수의 파라미터 a 및 b의 값은 아래 표에 제시되었다.

$$f(x) = e^{-ax^2} \quad (13)$$

표 10. 탄종유형별 거리에 따른 피해함수

구분	9M22U	M107	M31
피해함수	e^{-1551d^2}	e^{-1916d^2}	e^{-3037d^2}

5. 몬테칼로 시뮬레이션 기반의 살상효과분석

가. 개요

전장의 불확실성을 모의에 반영하기 위해, 몬테칼로 시뮬레이션을 진행하였다. 몬

테칼로 시뮬레이션은 몬테카를로 방법(Monte Carlo method)은 반복된 무작위(random) 난수를 추출하여 복잡한 확률적 결과값을 실험적으로 산출된 수치로 근사하는 수치해석 알고리즘이다(Binder 등, 1993 ; Bortz 등, 1975). 본 연구에서는 몬테카를로 방법을 통해 각 화력무기체계의 고유한 특성에서 기인하는 불확실성을 실험결과로 산출하여(무작위성을 따르는 발사체 탄착지점), 실험결과를 토대로 표적의 피해확률과 요망 피해효과 달성에 필요한 사격발수를 정량화할 것이며, 이 수치는 화력 무기체계의 효과성 및 효율성을 분석하였다. 아래의 그림은 몬테칼로 시뮬레이션의 진행의 아키텍처이다.



그림 19. 몬테칼로 시뮬레이션 아키텍처

이러한 몬테칼로 시뮬레이션을 통해, 전장의 불확실성을 고려한 살상효과 시뮬레이션을 진행하였다. 가상의 지형에서 가상의 적 포병무기체계를 위치하고, 본 연구를 통해 수립된 살상효과 모델과 다중 중첩살상효과 모델을 적용하고 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 보다 현실적인 살상효과 분석을 진행하였다. 아래 그림은 살상효과 안을 제시하였다.

나. 피해유형 추정

살상효과는 타격수단에 의해 결정되는 반면에, 피해유형은 표적에 의해 결정된다. 전장의 불확실성을 본 모의에 적용하기 위하여 살상효과와 피해유형을 구분하고 난수를 생성함으로써 위의 두 요소를 결정하였다. 본 논문은 단발이 아닌 다량의 사격발수에 따른 중첩된 살상효과를 구현하기 위하여 무기체계 효과분석에 적용되는 생존이론(Driels, 2004 ; Fager, 2007)⁴⁾을 적용하였다. 아래식에 제시된 단발에 대한 살상효과

를 고려하여, 다수의 n 사격발수가 있을 경우 x, y 위치의 표적에 적용되는 살상확률, $P_k(x, y)$ 를 도출하였다.

$$P_k(x, y) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{ki}) \quad (14)$$

이러한 살상확률을 기초로 표적에 대한 피해유형을 결정하기 위하여, 두 개의 균등 분포 기반의 난수 q_1 및 q_2 를 생성하였다. 이때 $q_1 \leq P_k$ 일 경우 피해가 존재한 것으로, 그렇지 않은 경우는 피해가 없는 것으로 설정하였다. 피해가 존재할 경우는 Table 1에 제시된 바와 같이 난수 q_2 에 의해 피해유형이 결정되도록 하였다. 피해유형의 범위는 무피해는 $0 \sim 0.1$, 경피해의 경우는 $0.1 \sim 0.4$, 중피해의 경우는 $0.4 \sim 0.8$, 그리고 완전파괴의 경우는 $0.8 \sim 1$ 로 설정하였다. 예를 들어, P_k 가 0.6 일 때 q_1 이 0.52가 나올 경우 피해가 존재하게 되고, q_2 가 0.67인 경우에는 피해유형은 중피해로 표현 된다.

표 11. 살상효과 범위별 피해유형

Damage Types	No Damage	Light Damage	Heavy Damage	Destroy
Ranges	$0 \leq q_2 \leq 0.1$	$0.1 < q_2 \leq 0.4$	$0.4 < q_2 \leq 0.8$	$0.8 < q_2 \leq 1$

다. 모의 환경 설정

본 연구는 ‘러시아-우크라이나’ 전쟁에 사용된 포병탄약의 살상효과를 비교분석하기 위하여, 실제 전장환경을 우크라이나 키이우 북쪽 지역 2곳으로 설정하였다. 대부분의 전장은 평야지대이고, 지형에 의한 살상효과와 차단 혹은 반감 효과는 거의 없는 것으로 분석되었다. 또한, 본 연구의 표적은 ‘러시아-우크라이나’ 전쟁에서 결정적인 국면에 해당되는 기계화부대로 설정하였다. 타격은 본 연구 초반에 분석하였던 러시아의 9M22U, 영국의 M107, 미국의 M31탄으로 설정하였다. 이때 각 탄의 살상효과를 비교하기 위하여, 탄도효과분석에 적용되는 탄도오차, 우발오차, 원형공산오차 등은 동일한 값이 적용되도록 하였다. 아울러, 본 분석을 진행하기 위해 총 4가지의 시나리오를 고려하였다. 이때 시나리오는 적 기계화 부대의 수, 포탄의 유형, 그리고 표적당 사격발

4) DRIELS Morris R., Weaponering Conventional Weapon System Effectiveness, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, SCHETZ Joseph A., 2013.

수로 설정하였으며, 세부적인 시나리오는 아래 표에 제시되었다.

표 12. 시나리오

구 분	적 기계화 유닛 수	포탄 유형	비 고
시나리오 #1	3	9M22U M107 M31	표적당 3발
시나리오 #2	3		표적당 6발
시나리오 #3	6		표적당 3발
시나리오 #4	6		표적당 6발

라. 결과 분석

본 연구는 포탄의 폭발시 발생하는 폭압효과, 파편효과, 그리고 열효과를 고려한 통합 살상효과를 도출하였다. 이러한 통합 살상효과 결과의 결과는 아래 그림과 같이 제시된다. 아래 그림의 청색 사각형은 적 기계화 부대를 의미하고, 적색 십자가는 탄착지점을, 타원형태의 적색분포는 살상효과를 그리고 표적의 색깔에 따라 피해유형을 보여준다. 피해유형은 무피해(No Damage)는 청색, 경파(Light Damage)는 초록색, 중파(Heavy Damage)는 노란색, 그리고 완파(Complete Destroyed)는 흑색으로 표시된다. 표적 위의 확률값은 살상확률을 나타내며, 이 값과 피해유형은 전장의 불확실성을 적용하였기 때문에 비선형관계로 설정되어 살상확률이 높아도 경파가 발생하는 경우가 발생한다.

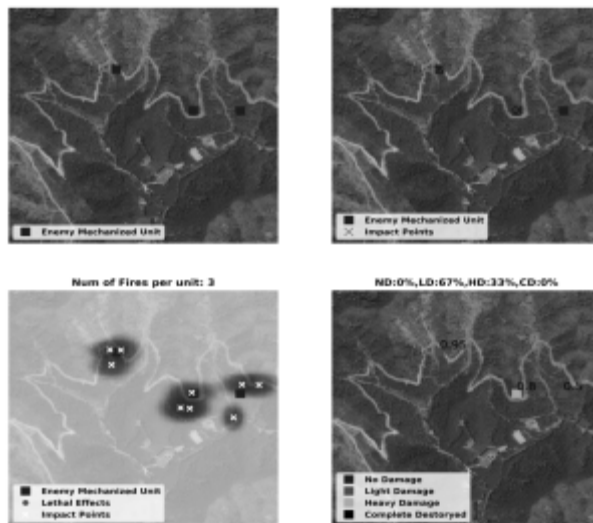


그림 20. 살상효과 결과분석 예

마. 시나리오 #1 결과 분석

시나리오 #1은 적 기계화부대 3대에 대하여 동일한 오차를 적용하고 표적당 3발을 타격하도록 설정을 수립하여 시뮬레이션을 진행하였다. 9M22U, M107, M31의 총 3가지의 포탄을 적용하였으며, 그 결과는 아래 그림에 제시되었다. 평균 살상효과(Pk)의 결과는 9M22U의 경우 0.51, M107의 경우 0.55, 그리고 M31의 경우 0.67이 나타났다. 가장 높은 살상효과를 보여준 M31을 기준으로 타 포탄과 그 비율을 비교하면, M31의 살상범위는 9M22U에 비해 약 2배, M107에 비해 약 1.6배가 나타났고, M31의 살상효과는 9M22U에 비해 약 1.31배, M107에 비해 약 1.22배가 나타났다.

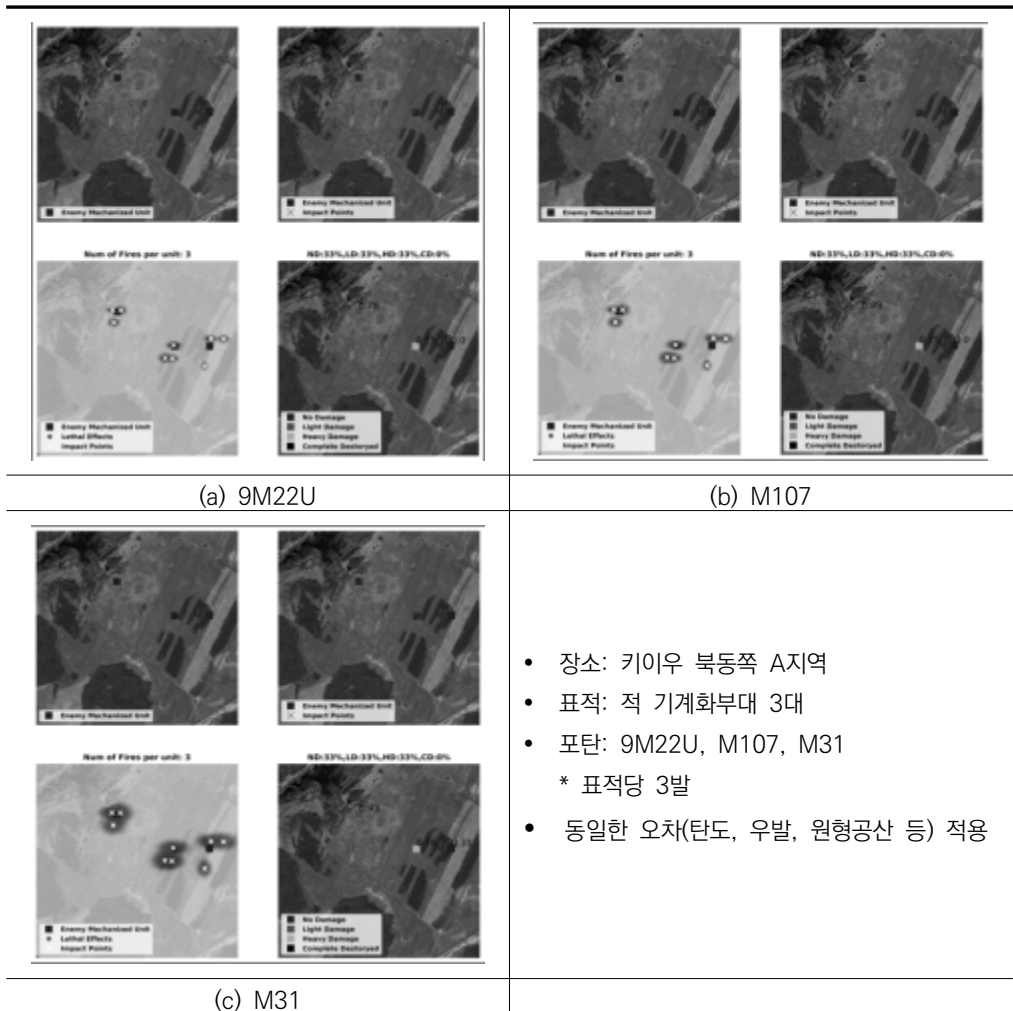


그림 21. 시나리오 #1 살상효과 결과

바. 시나리오 #2 결과 분석

시나리오 #2는 적 기계화부대 3대에 대하여 동일한 오차를 적용하고 표적당 6발을 타격하도록 설정을 수립하여 시뮬레이션을 진행하였다. 9M22U, M107, M31의 총 3가지의 포탄을 적용하였으며, 그 결과는 아래 그림에 제시되었다. 평균 살상효과(Pk)의 결과는 9M22U의 경우 0.58, M107의 경우 0.77, 그리고 M31의 경우 0.96이 나타났다. 가장 높은 살상효과를 보여준 M31을 기준으로 타 포탄과 그 비율을 비교하면, M31의 살상범위는 9M22U에 비해 약 2배, M107에 비해 약 1.6배가 나타났고, M31의 살상효과는 9M22U에 비해 약 1.66배, M107에 비해 약 1.25배가 나타났다.

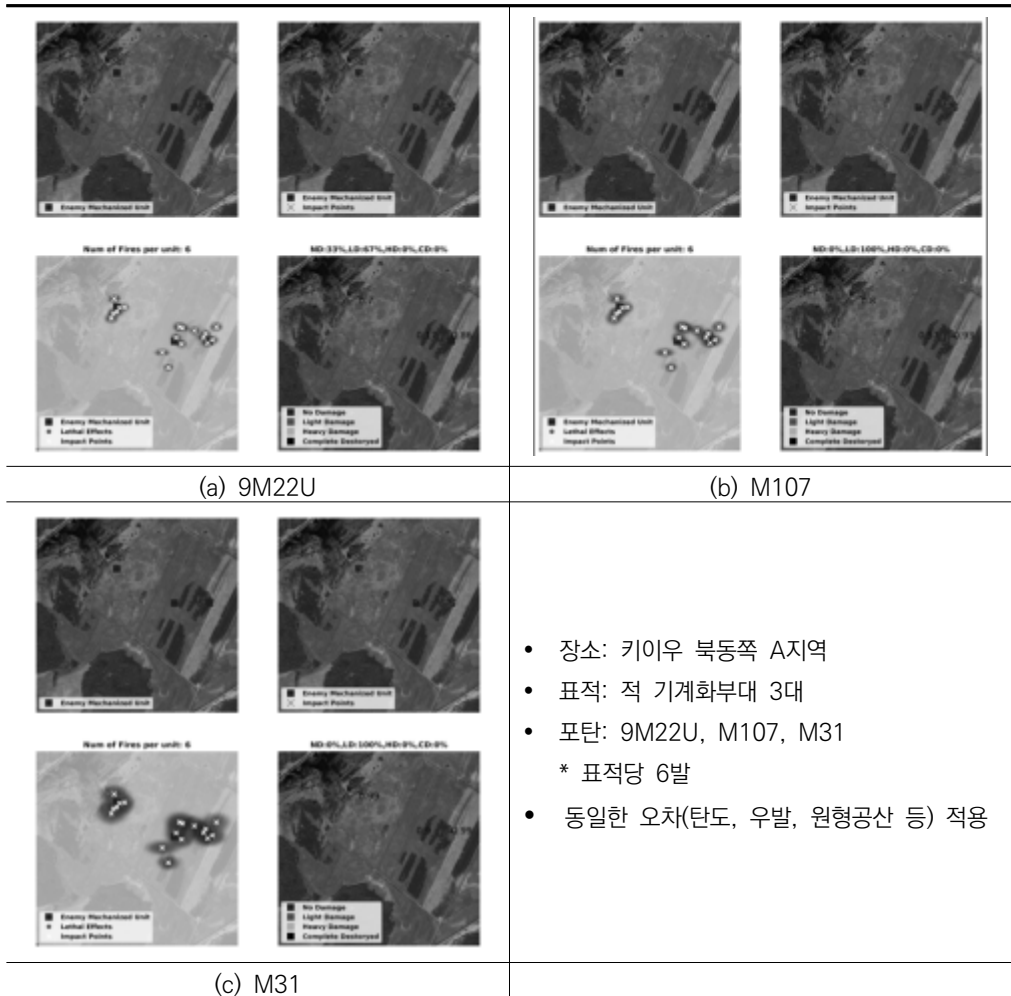


그림 22. 시나리오 #2 살상효과 결과

사. 시나리오 #3 결과 분석

시나리오 #3은 적 기계화부대 6대에 대하여 동일한 오차를 적용하고 표적당 3발을 타격하도록 설정을 수립하여 시뮬레이션을 진행하였다. 9M22U, M107, M31의 총 3가지의 포탄을 적용하였으며, 그 결과는 아래 그림에 제시되었다. 평균 살상효과(Pk)의 결과는 9M22U의 경우 0.34, M107의 경우 0.48, 그리고 M31의 경우 0.61이 나타났다. 가장 높은 살상효과를 보여준 M31을 기준으로 타 포탄과 그 비율을 비교하면, M31의 살상범위는 9M22U에 비해 약 2배, M107에 비해 약 1.6배가 나타났고, M31의 살상효과는 9M22U에 비해 약 1.79배, M107에 비해 약 1.27배가 나타났다.

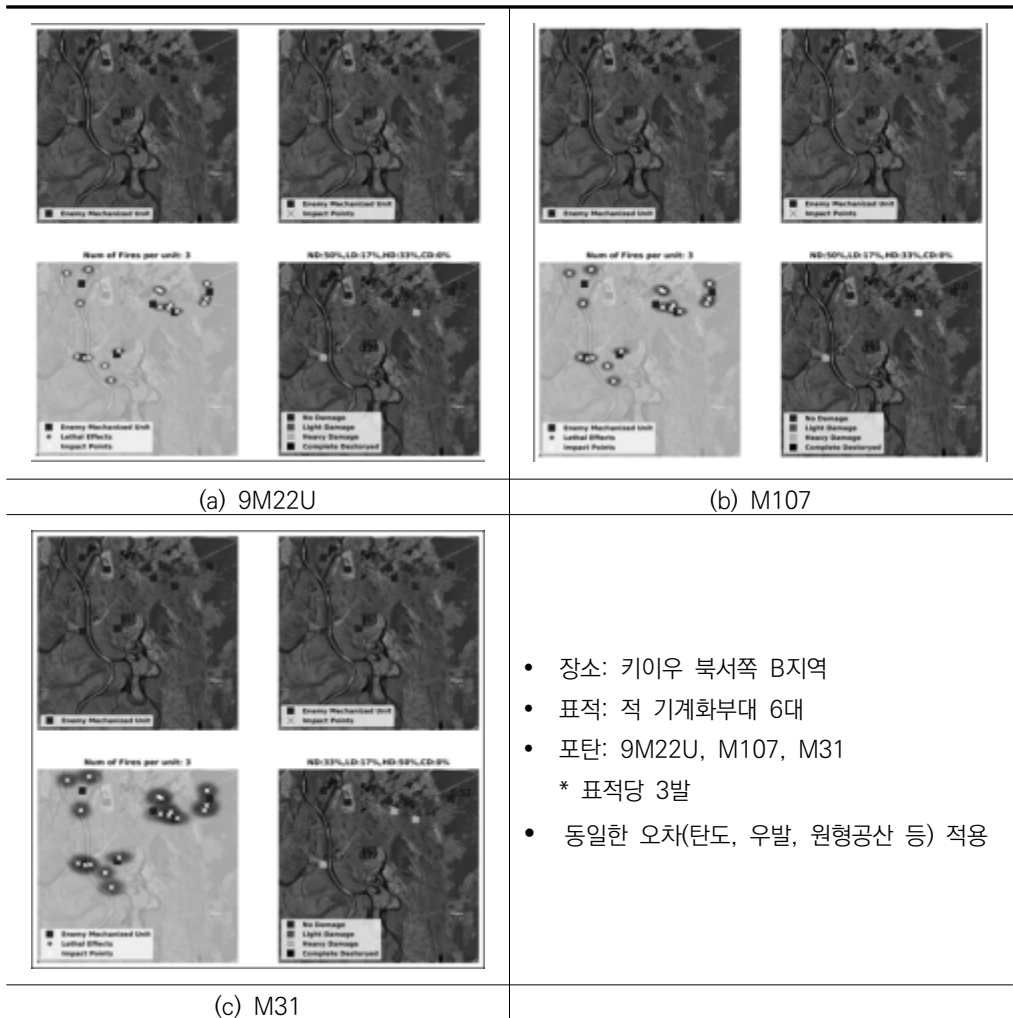


그림 23. 시나리오 #3 살상효과 결과

아. 시나리오 #4 결과 분석

시나리오 #4는 적 기계화부대 6대에 대하여 동일한 오차를 적용하고 표적당 6발을 타격하도록 설정을 수립하여 시뮬레이션을 진행하였다. 9M22U, M107, M31의 총 3가지의 포탄을 적용하였으며, 그 결과는 아래 그림에 제시되었다. 평균 살상효과(Pk)의 결과는 9M22U의 경우 0.55, M107의 경우 0.71, 그리고 M31의 경우 0.91이 나타났다. 가장 높은 살상효과를 보여준 M31을 기준으로 타 포탄과 그 비율을 비교하면, M31의 살상범위는 9M22U에 비해 약 2배, M107에 비해 약 1.6배가 나타났고, M31의 살상효과는 9M22U에 비해 약 1.65배, M107에 비해 약 1.28배가 나타났다.

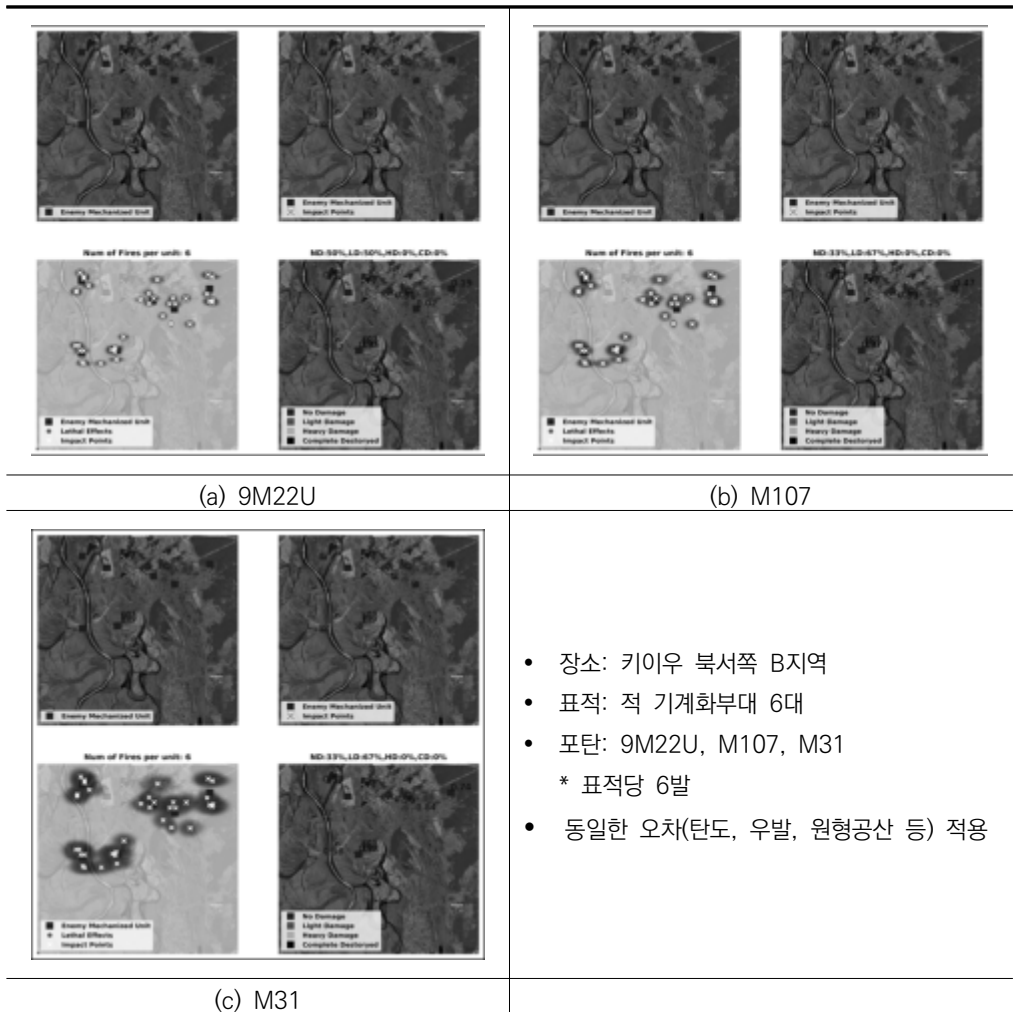
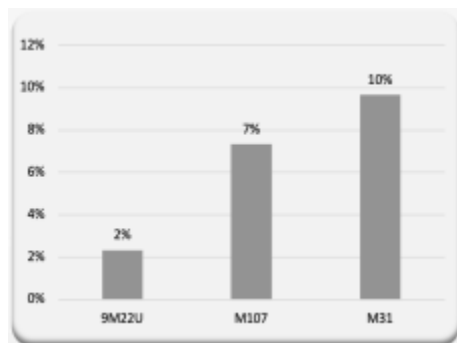
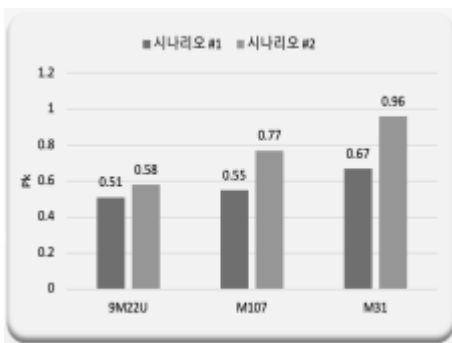


그림 24. 시나리오 #4 살상효과 결과

자. 사격발수 증가에 따른 살상효과 분석

시나리오 #1과 #2는 동일한 환경과 설정에서 사격발수를 3발에서 6발로 2배 향상시켰을 때의 살상효과를 보여준다. 이때 포탄의 유형별로 사격발수의 증가에 따라 살상 확률 증가량이 상이하였으며, 이는 곧 포탄의 단위 사격발수당 살상확률 향상율을 통해 비교분석을 진행하였다. 아래 그림에 제시된 바와 같이, 9M22U의 경우 사격발수가 2배 증가할 때 살상확률은 0.51에서 0.58로 7.0% 증가하였고, M107의 경우 약 22.0% 그리고 M31의 경우 약 29.0%의 향상이 나타났다. 이것을 기초로, 단위 사격발수 당 Pk의 향상률을 분석하였다. 9M22U의 경우 단위 사격발수 당 Pk 향상율은 2.3% 증가하였고, M107의 경우 약 7.0% 그리고 M31의 경우 약 10.0%의 향상이 나타났다. 이것을 기초할 때 러시아의 9M22U탄의 살상효율이 가장 낮은 것을 알수 있고, 동일한 효과를 달성하기 위해서는 보다 더 많은 탄을 소모해야함을 확인할 수 있었다.



(a) 시나리오 #1 및 #2 Pk 비교

(b) 단위 사격발수 당 Pk 향상율

그림 25. 시나리오 #1 및 #2의 사격발사 증가에 따른 Pk 분석

시나리오 #3과 #4는 동일한 환경과 설정에서 사격발수를 3발에서 6발로 2배 향상시켰을 때의 살상효과를 보여준다. 이때 포탄의 유형별로 사격발수의 증가에 따라 살상 확률 증가량이 상이하였으며, 이는 곧 포탄의 단위 사격발수당 살상확률 향상율을 통해 비교분석을 진행하였다. 아래 그림에 제시된 바와 같이, 9M22U의 경우 사격발수가 2배 증가할 때 살상확률은 0.34에서 0.55로 21.0% 증가하였고, M107의 경우 약 23.0% 그리고 M31의 경우 약 30.0%의 향상이 나타났다. 이것을 기초로, 단위 사격발수 당 Pk의 향상률을 분석하였다. 9M22U의 경우 단위 사격발수 당 Pk 향상율은 7% 증가하였고, M107의 경우 약 8.0% 그리고 M31의 경우 약 10.0%의 향상이 나타났다.

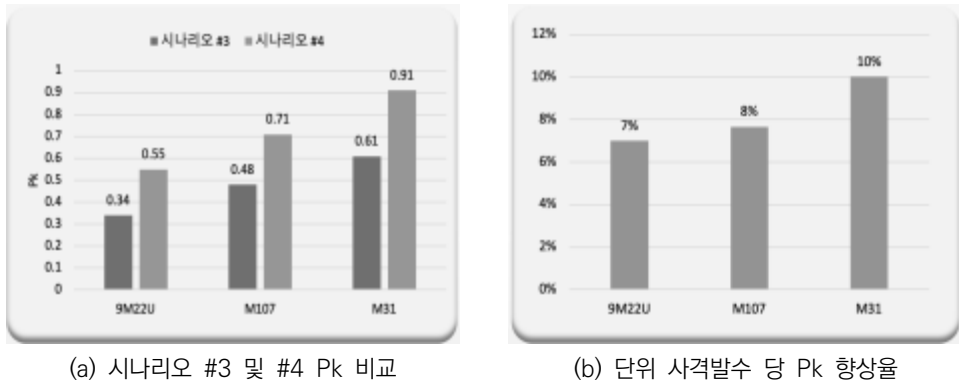


그림 26. 시나리오 #3 및 #4의 사격발사 증가에 따른 Pk 분석

6. 소결론

본 연구는 ‘러시아-우크라이나’ 전쟁에 사용된 주요 포병화력무기체계의 현황을 조사하고, 조사된 무기체계들을 대상으로 주요 포탄의 탄두중량, 탄피중량, 장약중량, 장약 유형, TNT/RDX 비율 등의 탄약 제원을 조사하였다. 또한, 포병화력에 대한 살상효과를 확률기반으로 모델링을 진행하였으며, 이때 포탄이 폭발시 나타나는 3가지의 효과인 폭발효과, 파편효과 그리고 열효과를 고려하여 공학적으로 모델링을 수행하였다. 아울러, 전장에서 나타나는 불확실성을 반영하기 위해 탄도공학에 적용되는 오차와, 몬테칼로 시뮬레이션을 적용하였으며, 최종적으로 중첩살상효과를 고려한 다수 사격발수에 따른 살상효과를 분석하였다.

그 결과 러시아의 9M22U탄의 경우 살상효과가 낮고 살상효율이 상대적으로 낮아 요망하는 효과를 달성하기 위해선 보다 더 많은 포탄이 필요함을 확인할 수 있었으며, 미국의 M31탄은 살상효과가 다른 탄들에 비해서 상당히 우수하고 살상반경이 넓어 가장 적은 수의 포탄으로도 요망하는 효과를 달성함을 확인할 수 있었다.

이러한 연구결과는 포탄의 장약중량과 쉘 중량을 통해 살상효과에 대한 정확한 예측이 가능하고, 예측된 표적의 살상효과를 기초로 요구되는 사격발수를 정량적으로 판단할 수 있으며 결과적으로 그 피해를 예측하여 무고한 민간인에 대한 피해를 줄일 수 있음을 확인하였다. 이 점은 추후 대화력전 및 대포병전을 수행하기전에 사격발수에 대한 정확한 분석과 민간인에 대한 부수적 피해를 줄이는 분석에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

III. 연구내용(세부 #2)

과제명: 전장에서의 무인체계 실시간 제어(통제) 기법에 관한 연구

1. 무인체계의 정의 및 분류, 중요기술 현황 분석

가. 무인체계 정의 및 분류 개념의 필요성

1) 무인체계 정의

국방기술품질원에서 발간하는 국방과학기술 용어사전에 무인체계는 “무인 장비들을 통합하여 운용하는 시스템의 통칭. 민간분야에서는 무인 생산체계, 무인제어체계, 무인관리체계로 구분된다. 군사 분야에 활용되는 무인 체계는 무인 전투체계라 한다. 이동 또는 고정이 가능하며, 무인 지상 차량, 무인 항공기, 무인 잠수함, 무인 선박, 무인 물자, 무인 지상 센서 등이 포함된다.”라고 소개하고 있다.⁵⁾ 무인체계에 대한 관심은 육군, 해군, 공군을 구분하지 않고 매우 지대하게 증가하고 있으며, 각 군의 특성에 따라 자체적인 기준으로 드론, 로봇, 드론봇, 무인항공기, 수상드론, 수중드론, 무인 차량 등을 정의하고 분류하고 있었다. 국방부에서는 이러한 혼재된 용어를 포괄하기 위해 위에 소개한 “무인체계”라는 용어를 도입하였으나, 단순히 무인항공기, 드론, 로봇 등을 포괄하는 개념으로 사용되고 있다.

2) 무인체계 분류 개념의 필요성

그에 따라 본 과업에서는 각 군이 무인체계를 어떻게 분류하고 있는지 현재 상황을 분석하고 각 분류체계의 문제점과 한계점을 도출하고자 한다. 또한 기존 분류체계의 문제점과 한계점을 해결하고 무인체계라는 개념이 육해공군의 주요 무인체계 기술들을 효과적으로 분류할 수 있는 분류 개념을 소개하고자 한다. 그리고 마지막으로 무인체계 개념에 대해 국내외에서 개발되고 있는 주요 기술들의 개발현황과 선진화된 연구개발 기술 내용을 소개하고자 한다.

5) 국방과학기술용어사전, 국방과학기술진흥연구소, 2019

나. 무인체계 분류

1) 육·해·공군의 무인체계 분류

육군의 무인체계는 크게 드론과 로봇으로 분류된다. 단순히 공중환경에서 활용하면 드론, 지상환경에서 활용하면 로봇으로 정의하고, 운용목적에 따라 정찰용, 공격용, 지원용으로 분류한다. 추가로, 정찰용 및 공격용은 무기체계, 지원용은 전력지원체계로 분류한다.

해군은 가장 우선적으로 무기체계와 전력지원체계로 구분하고, 체계 분류에 따라 명명하는 방식이 완전히 구분된다. 무기체계로 분류되는 경우, 무인항공기(UAV), 무인수상정(USV), 무인 잠수정(UUV) 등으로 불리지만, 전력지원체계로 분류되는 경우에는 수상드론, 수중드론, 공중드론과 같이 드론이라는 용어를 사용한다. 같은 플랫폼인데도 불구하고 운용 방식에 따라 명칭이 바뀌므로 다른 군과의 소통 과정에서 혼란을 유발할 수 있다.

해병대의 분류방식의 해군과 유사하게 우선적으로 무기체계와 전력지원체계로 구분하지만 드론, 무인항공기, 로봇, 무인 차량 등의 용어가 무기체계와 전력지원체계 상관없이 사용된다.

공군의 경우 별도의 분류 방식을 설정하지 않고 있다. 가장 대표적으로 활용하는 '무인항공기'라는 기존 체계가 있으므로 그대로 사용하되, 최대 이륙 중량 25kg 이하의 비행체는 '소형급 무인항공기'로 명명한다. 이들은 군사적 용도에 따라 무기체계가 될 수도 있고 전력지원체계가 될 수도 있다.

2) 분류체계의 문제점과 한계점

이와 같이 각 군의 무인체계 분류 방법이 다른 상황에서 각 군이 모여 소통하기가 매우 어렵다. 특히 공통 플랫폼에 기반한 기술기획을 수행하기가 매우 어렵기 때문에 국방부 차원의 총괄적인 정책을 수립하기 위해서는 개념과 용어를 명확히 하고 이에 기초한 분류체계 마련이 필요하다.

먼저, 육군에서 드론/로봇으로 분류하는 방식에서 '로봇'이라는 용어의 모호성에 문제가 있다. 일반적으로 로봇은 '어떤 작업이나 조작을 자동적으로 하는 기계장치'를 말한다. 위 로봇의 정의에 따르면 인간을 대신해 자율적으로 임무를 수행하는 공중환경의 드론에도 적용된다. 실제로 미국이 운용 중인 MQ-1 프레데터도 Flying 로봇으로 분류된다. 즉, 드론과 로봇을 운용 환경에 따라 구분하기에는 무리가 있음을 의미한다.

드론이라는 용어에도 문제가 있다. 육군에서 드론은 공중의 무인체계를 지칭하고

있으나, 해군에서는 이미 수상드론, 수중드론 등으로 해양 환경에서 작전을 지원하는 드론의 개념을 도입하고 있다. 드론이라는 용어 자체가 단순히 공중에서 사용하는 용어로 국한되어 있지 않은 상황이다. 실제로 드론이라는 단어의 기원을 살펴보면, 의성어인 ‘수벌이 웅웅거리는 소리’에 불과하다는 점에서 해양환경에 적용하는 것이 큰 잘못은 아니다.⁶⁾

3) 새롭게 제안된 분류 개념

위와 같은 문제에 따라 2022년 한국국방연구원에서 국방 무인체계에 대해 총괄적인 분류방안을 제안한 바가 있다.⁷⁾ 각 군이 사용하는 드론, 로봇, 무인항공기, 무인차량, 무인수상정 등 기존의 전력명칭은 유지하되 전장 환경에 따라 “공중형”, “지상형”, “수상형”, “수중형”으로 분류한다.

공중형은 공중환경 운영체제로 무인항공기, 무인비행장치, 드론 등을 포함한다. 지상형은 지상환경 운영체제로 차량, 지상로봇, AI기반 지상경계시스템 등을 포함한다. 수상형은 수상환경 운영체제로 무인수상정 등을 포함한다. 수중형은 수중환경 운영체제로 무인잠수정, 수중자율기뢰탐색체 등을 포함한다. 이외에도 복합 운용환경에 대응하는 무인체계의 경우 다음과 같이 추가로 분류할 수 있다. 예를 들어 공중환경과 지상환경에서 모두 활용하는 “스마트무인방공시스템”의 경우 “공중형/지상형”으로 분류할 수 있고, “해양스마트 감시체계”는 지상환경과 해양환경에서 모두 활용하는 복합체계로서 “지상형/수상형”으로 분류할 수 있다. 또한 “해양경계감시군집UAV-USV체계”는 공중환경과 해양환경의 복합체계로서 “공중형/수상형”으로 분류할 수 있다.

다. 무인체계 주요 기술들에 대한 연구개발 분석

1) 공중형 무인체계

미국, 러시아, 유럽 등의 국가에서는 저피탐 무인기를 비롯한 다양한 목적의 무인기를 개발 및 운용하고 있다. Table 1는 운용고도에 따른 분류기준을 보여주며, 미국 및 나토(NATO) 기준을 통합한 것과 국내 기준인 국가표준(KSW9000, 무인 항공기 시스템 제1부 : 분류 및 용어)의 내용을 병기하였다.

6) 김성진. (2020. 7. 20). “드론이 가리키는 대상을 어디까지로 봐야하나?”, 국방논단 . 한국국방연구원.
7) 김성진. (2022. 11. 10). “국방 무인체계 개념 정의와 분류방안”, 국방논단 . 한국국방연구원.

표 13. 무인기 분류 기준

Classification	Ascent limit (km)	
	US/NATO	KS9000
Low altitude	~6	~0.15
Medium altitude	~13.7	~14
High altitude	~17	~20
Stratospheric	~50	~50

항공 분야에서 세계 최고의 기술을 보유한 미국은 고고도 드론부터 초소형 드론까지 민수·군수 산업 등 다양한 분야에서 활용하고 있다. 미국 무인기 개발의 특징은 시스템 통합 기술과 서브시스템을 이용하여 대형 장기체공 무인기부터 초소형 무인기, 고정익, 회전익, 수직이착륙 무인기에 이르기까지 전 분야에 걸쳐 개발 운영되고 있다는 점이다.

미국 글로벌호크는 성층권까지 비행할 수 있는 고고도 무인기로 CCD센서, 적외선 센서, 합성개구레이더(SAR)를 이용해 0.3m 해상도로 약 7,600㎡ 면적을 24시간 포착할 수 있다. 또한 RQ-170 센티넬은 오사마 빈 라덴 감시 목적의 저시정 드론으로 사용되었으나 2011년 12월 이란 동부 영공 스푸핑 공격으로 이란에 나포됐다.



그림 27. 미국의 Global Hawk

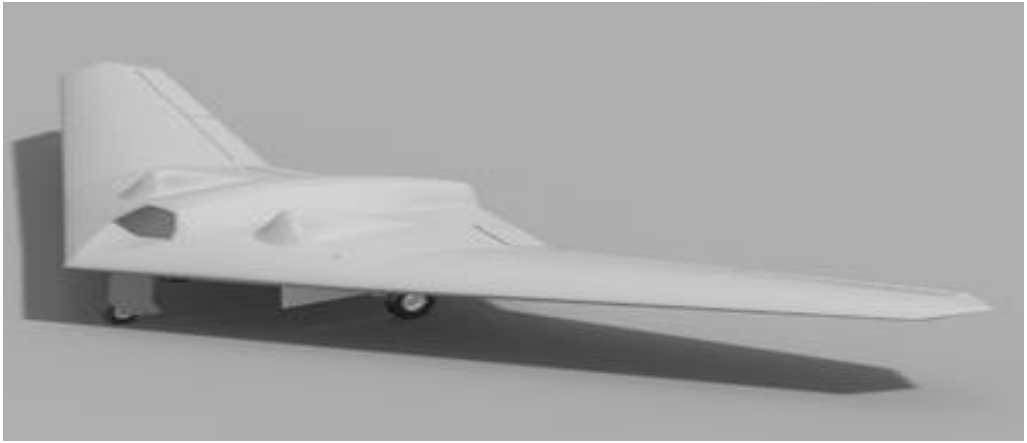


그림 28. 미국의 RQ-170 센티넬

이스라엘은 다년간의 중동전쟁 경험을 바탕으로 전술드론 분야에서 세계 최고의 기술을 보유하고 있다. 또한 UAV 제조사인 IAI와 Elbit를 필두로 미국을 비롯한 42개국 이상에 UAV 관련 기술과 완성품을 수출하는 등 UAV 시장에서 영향력을 발휘하고 있다. 이스라엘 UAV는 주로 중저고도용으로 개발·운용되고 있으며, 스텔스 소재 국제 평화연구소에 따르면 2001~2011년 전 세계 UAV 수출의 41%를 이스라엘 기업이 차지했다. 이스라엘은 수출 주도형 방위산업 육성 전략을 추진해 여러 나라와 무인항공기 연구개발(R&D) 사업을 진행하고 있으며, 스테디셀러를 양산하고 있다.



그림 29. 이스라엘의 Hermes 900

프랑스에서는 시스템 통합업체(EADS, Sagem, Dassault, Altec, Alcore 등)와 항공전자업체(Aerospatial, Thales 등)가 무인항공기 분야에서 협업하고 임무장비 분야에서 우수한 개발능력을 보유하고 있다. 이 밖에도 중고도 장기체공 드론 '이글-1(Eagle-1)', EU와 공동 개발 중인 공격용 무인기 'nEUROn' 개발을 주도하는 등 UAV 개발에 적극 나서고 있다.

독일은 1990년대 초부터 드론 운용 경험과 임무 장비 개발에 독자적인 역량을 보유하고 있으며, 실전 경험을 바탕으로 기술 개발을 지속하고 있다. 특히 전술급 군용 무인기(KZO/Luna 등)를 개발해 운용하고 있으며 최근 글로벌호크를 도입해 EADS와 유로호크를 공동개발했다. 영국은 다양한 장기 R&D 프로그램을 운영하고 있으며 자체 기체, 엔진 및 임무 탑재 장비 기술을 보유하고 있다. 최근에는 태양광을 이용한 장기 체공 무인기인 제퍼(Zepher)가 개발됐다. 전술급 UAV인 Phoenix를 개발 운용하고 있으며 현재 저색소 UAV인 Taranis와 중고도 장기체공 UAV인 Mantis를 개발하고 있다.



그림 30. 영국의 Zepher

대한민국은 1970년대 대공화력 무인표적을 개발한 이후 2002년 실전배치된 송골매가 운용되고 있다. 이후 북한의 장거리 포병 및 탄도미사일 발사, 사단급 무인기(KUS-9), MUAV, 후속 무인기 부재로 인한 차세대 무인기 개발사업 등으로 무인기의 필요성이 대두됐다. 송골매에 이어 전력화가 이루어진 무인항공기는 대대급 무인항공기인 리모아이(RemoEye)로, 야전대대에서 약 100대가 운용 중이며, 2명의 운용자가 편성돼 있다. 최근에는 저음 드론(스팅레이-X)을 개발 중이다. 저착색 무인기는 현재 스텔스 형상, 도장 등 핵심 기술을 확보하고 탑재 엔진을 개발하고 있다.⁸⁾

2) 지상형 무인체계

UGV(Unmanned Ground Vehicle)는 사람이 탑승하지 않은 채 지상에서 이동하는 차량으로 주로 사람이 수행하기 쉽지 않은 높은 수준의 작업을 담당한다. 군사용으로는 인명피해 감소, 방어력/기동성 강화로 고가의 유인전투차량 획득 비용 절감, 유/무인 복합전투체계 활용 가능성 등의 장점이 있다. 작동 방식은 원격지에서 영상이나 센서 정보를 기반으로 사람이 제어하는 방식과 인공지능 기술을 기반으로 움직이는 자율주행 방식으로 나뉜다.

글로벌 지상 무인이동체 시장은 2021년 31억 달러(약 4조원)에서 2030년 56억 달러(약 7조3000억원)로 확대될 것으로 예상되며, 자율주행 기술도 함께 적용된다. 특히 군용 자율주행 무인차량은 획일화된 도로가 아닌 개방된 지면에서 주로 사용되기 때문에 상용 자율주행 기술과 상호보완적으로 발전할 수 있어 그 가치가 높다.

미 육군은 분대 다목적 지원 차량(SMET), 로봇 전투 차량(RCV-L, M, H) 및 수송 차량을 위한 리더-팔로워 시스템을 테스트하고 있다. 다목적형인 SMET(Squad Multi-Purpose Equipment Transport)는 2018년부터 10산악사단에서 시범 운용되며 일반 수송, 보병전투, 대전차, 공병용으로 통합된다. 전투용 RCV(Robot Combat Vehicle)-L(10톤 미만)은 이미 시험평가를 마쳤으며, RCV-M(20톤 미만)과 RCV-H(30톤 미만)는 시험평가 중이다. Leader-Follower 시스템은 무인차량 3대에 유인차량 1대를 연결해 이동하며, 자율주행을 위한 AMAS(Autonomous Mobility Applique System)를 적용해 2027년까지 전력화를 완료할 예정이다.



그림 31. 미국의 RCV-L

8) 국내외 군사용 무인기 개발 동향 분석 및 북한 무인기 대응 방안 제언, Journal of Convergence for Information Technology Vol. 11. No. 12, pp. 97-105, 2021

호주 육군은 수송 차량에 의존하는 운전을 위한 Leader-Follower 시스템, OCCV (Optionally Crewed Combat Vehicle) 및 4족 보행 로봇을 개발하고 있다.

이스라엘군은 국경감시로봇인 과르디움(Guardium)을 비롯해 다수의 지상 무인차량을 운용하고 있으며, 최근에는 AI기반 자율형 무인차량 '루크(ROOK)'를 공개하기도 했다.



그림 32. 이스라엘의 Guardium

Rheinmetall사는 독일에서 Mission Master 자율 무인 차량을 위한 정찰 및 화력 지원 임무를 위한 구조화된 차량을 개발하고 있다.

러시아는 전투로봇 URAN-9, 정찰로봇 네레크타 등 다수의 지상 무인차량을 시험하고 있으며 특히 자율형 무인전차 마커를 시험하고 있다.



그림 33. 러시아의 URAN-9

우리나라 육군은 Army TIGER 4.0 개념과 함께 육군 부대를 지능적으로 연결하고 동원할 다양한 지상 무인 차량을 개발하고 있다. 2040년까지 드론, 로봇, 전투 차량이 통합된 육군 Army TIGER 시범 여단 1개를 운영하고 모든 보병 여단을 육군 Army TIGER 4.0 부대로 전환한다.

국방과학연구소(ADD)와 한화에어로스페이스가 개발해 장갑수색부대에서 운용할 예정인 무인탐색차량은 2021년 탐색·개발을 종료하고 시스템 개발을 진행 중이다. 현대로템이 개발한 다목적 무인차량은 2023년 시범운행을 마친 뒤 실전 배치될 예정이다. 현재 한화에어로스페이스가 개발한 지능형 다목적 무인이동체를 테스트 중이다. 국방과학연구소는 미국 GVSC(Ground Vehicle System Center)와의 공동연구를 통해 지형정보가 없는 지역에서도 작전이 가능한 자율탐사로봇을 개발하고 있다.⁹⁾

3) 수상형 무인체계

무인수상선(USV)은 해상에서 원격조종이나 자율항해가 가능한 소형 선박을 말한다. 무인선박의 운용목적은 위험한 해상환경에서 사람이 직접 수행하여 작업의 속도를 높이거나 경제성을 높이는 것이며 소형선박이기 때문에 비용면에서 매우 효율적이다. 또한 넓은 해상 영역에서 뛰어난 연속성으로 작동하며, 위험한 상황에서 인간의 개입을 배제하고 거의 단독으로 임무를 수행함으로써 해상 안전을 도모한다. 한편, 무인선박은 뱃, 하천, 수중지형의 수중오염조사, 연안감시, 해저침몰탐사, 항만감시 등에 활용되고 있으며, 국방 등 관련 분야에 적용하여 해양방위력을 크게 향상시킬 수 있다. 전 세계적으로 무인수상차량(USV)은 제2차 세계대전 이후 개발되어 운용되고 있으며, 주로 군사용으로 개발되어 왔다. 제2차 세계 대전에서 무인 함정은 해군 포격(COMOX)과 노르망디 상륙을 위한 지뢰 및 장애물 통로(Demolition Rocket Craft) 지원을 담당했다. 1946년 원자폭탄 실험 이후 방사능 해수 시료 채취에도 사용됐으며, 1954년에는 원격지뢰탐지용 드론에도 사용됐다. 1960년대에는 베트남 해변의 기뢰 제거, 특수목적보트, 미사일 목표물에 대한 군사지원(드론보트) 등에 활용됐고, 1990년부터는 R/C Dyads, Moss, Aliss, 자율항법(RMS) 등 인간 혼자서 수행하기 어려운 업무를 담당하고 있다.

무인수상선 개발은 해양선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있으며, 미국, 이스라엘, 캐나다 등 선도국을 중심으로 무인수상선의 상용화 및 해외 판매를 추진하고 있다. 미국 시장조사기관 비전게인에 따르면 2019년까지 세계 무인정 시장 규모는 약 8,300만달러(1,000억원)에 이를 것으로 예상되며, 이 중 미국 시장이 세계 시장의 약 51%를

9) 군용 지상무인차량 개발 동향, 한국자동차연구원, 정상빈, 2022년

차지할 것으로 예상된다. 우리나라의 무인 수상정 설계 및 개발 기술은 그동안 국방과 학연구소와 선박해양플랜트연구소에서 선행연구 형태로 진행되어 왔으며, 대부분 해양 탐사 및 해양감시용으로 개발되었다. 최근 국방분야 무인수상함 도입의 시급성이 제기되고 있으며, 2017년 민군기술적용사업을 통해 해상감시정찰 및 수중탐사용 무인수상함인 해검을 개발하였다. 지능화되고 첨단화된 무인시스템 기술을 기반으로 한 해양무인시스템 구축을 통해 국방력과 해양안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대되며, 정부 주도로 개발이 진행되고 있다.¹⁰⁾



그림 34. 국산 무인수상정 '해검'

국방에서 무인 수상정의 주요 임무는 기뢰 소해, 잠수함 수색, 보안 및 정찰이다. 무인수상정은 기뢰를 찾는 센서를 탑재할 수 있으며, 선체가 가벼워 기뢰가 폭발하지 않는다. 무인 선박이 기뢰를 탐지하면 무인 잠수정이 출동해 폭탄을 제거한다. 또한 센서를 장착해 잠수함을 찾거나 끌고 다닐 수 있으며 헬리콥터보다 훨씬 저렴하고 소프트웨어로 제어할 수 있어 수색 작업을 자동화할 수 있다. 또한 자살 보트 및 해상 교통 모니터링에도 적합하다. 테러리스트의 해상 공격을 탐지하거나 항만 보안을 유지하는데 유용하며 1척 이상의 무인 선박을 제어할 수 있다. 무인선박 이용 시 선원을 위협에 노출시킬 필요가 없고, 선체가 작기 때문에 쉽게 탐지되지 않아 정보수집에 최적화되어

10) H. G. Hwang, H. W. Kim, B. S. Kim, Y. T. Woo, I. S. Shin, J.H. Shin, Y. J. Lee, B. W. Choi, A Development of Integrated Control System for Platform Equipments of Unmanned Surface Vehicle(USV), Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, vol. 21, 2017.8, p.1611~1618

있다. 또한 사진, 음파 탐지기를 통한 데이터 수집 및 전자 도청을 위한 가볍고 강력한 최신 센서가 장착되어 있다.

미국 국방부와 싱가포르 정부가 공동 개발한 스파르탄 스카우트는 싱가포르 말라카 해협에서 기뢰 탐지, 감시, 해적 수색 및 퇴치 등 해군 임무 수행을 목적으로 2003년 개발됐다. 미 해군에서는 이미 개발된 다양한 무인수상정을 전술적, 전략적으로 활용하기 위한 심도 있는 연구가 진행되고 있다. 상업용 무인정찰함을 개발하는 HWT는 2007년 6월 해상실험을 통해 HWT X-1의 성능을 입증했으며, 현재는 스텔스 기능이 있는 무인정찰함 HWT X-3을 개발 중이다. HWT X-3은 미리 입력된 목표 지점을 스스로 찾아가서 반경 50km의 레이더, 영상 신호 등 각종 정보를 육상으로 실시간 전송할 수 있다.



그림 35. HWT X-1

이스라엘은 미국에 이어 활발한 연구를 진행하며 무인수상정을 상용화하고 있다. Rafael's Protector는 스텔스 기능을 갖춘 세계 최초이자 최고의 대테러 무인 전투선이다. 원격조작으로 이동하며 '미니타이퐁', 적외선 광학카메라, 실시간 영상전송시스템, GPS 등을 탑재하고 있다. Protector는 스피커와 마이크가 장착돼 수상한 선박에 접근해 정지를 명령할 수 있고, 상대방의 목소리를 들으면서 운항 허가나 신분증을 요구할 수 있다. 또한 망원렌즈 카메라로 근접하여 신분증의 진위 여부를 판단할 수 있어 검사, 수색 등 다양한 분야에 활용되고 있다.



그림 36. Protector

4) 수중형 무인체계¹¹⁾

무인잠수정(UUV)이 가장 대표적인 수중형 무인체계라고 할 수 있다. 기존의 잠수함이나 전투함정의 작전이 어려운 연안지역 및 분쟁지역에 은밀한 정보/감시/정찰 임무를 수행하며, 적 연안에서 은밀히 침투하여 기뢰 탐색 작전을 수행하거나 잠수함 탐색을 위한 대잠전(Anti-Submarine Warfare)임무수행 그리고, 네트워크 정보 중계기로 운용될 수 있다.

미국은 무인 잠수정 분야에서 가장 많은 연구를 주도하고 있다. 실제 전투에 투입된 최초의 무인 잠수정으로 알려진 미국의 CURV(Cable Controlled Underwater Research Vehicle)는 잃어버린 수소폭탄을 회수하기 위해 1966년 스페인 팔로마레스 해역에 처음 투입됐다. 1980년대까지 CURV와 같은 무인잠수정은 무인잠수정과 모선을 케이블로 연결하여 기뢰탐색 등의 임무를 수행하는 형태로 운용되었다. 그러나 1990년대 이후 케이블 없이 자율항행이 가능한 자율조종 무인잠수정이 활발히 개발되면서 무인잠수정의 개발은 보다 체계적으로 이루어졌다. 특히 미국은 군용 무인잠수정 계획을 바탕으로 무인잠수정의 주요 임무와 우선순위를 체계적으로 할당한 후 각 임무에 적합한

11) 이지은, "무인 잠수정 연구 개발 동향 분석 및 발전 방안." 한국산학기술학회 논문지 20.9 (2019): 233-239.

무인잠수정을 분류하고 주요 임무를 부여한 UUV 마스터플랜을 발표하였다. 우선 무인 잠수정의 주요 임무를 감시·정찰(ISR), 대기뢰전(MCM), 대잠전(ASW), 탐지·식별, 해양 조사, 통신·네트워크, 운송, 정보작전 등으로 분류하였다. 그리고 임무의 우선순위를 할당한 후, 이에 적합한 무인 잠수정을 무게에 따라 분류하였다. 그에 따르면 무인잠수정 중 10~50kg(약 25~100lb)급 무인잠수정은 휴대용, 220kg(약 500lb)급 무인잠수정은 경량, 1300kg(약 3000lb)급, 9000kg(약 20,000lb)급 이상 무인잠수정은 대형으로 분류됐다.

이를 바탕으로 각 카테고리에 해당하는 대표적인 해외 무인잠수정의 개발현황을 살펴보면 우선 1인 또는 2인이 인양할 수 있는 휴대용급 무인잠수정이 있다. 휴대용급 무인 잠수정은 특수 목적의 감시정찰, 천해역 지뢰해제, 대테러, 시설방호, 통신망 등에 활용된다. 대표적인 휴대용급 무인잠수정으로는 미국의 Riptide Micro UUV가 있다. Riptide Micro UUV의 운용 수심은 300m이며, 알카라인, 충전식 리튬 이온 전지, 알루미늄 해수 전지 등 다양한 소스의 에너지원을 선택·장착하여 사용할 수 있도록 설계되었다. 장착하는 에너지원에 따라 짧게는 30시간에서 해수 전지의 경우 최대 400시간 까지 운용이 가능하며 무게는 탑재 모듈에 따라 10~50kg의 무게를 가진다.



그림 37. Riptide Micro-UUV(Riptide Autonomous Solutions)

경량급 무인잠수정은 항만 감시 정찰, 작전 해역의 기뢰제거, 특수 목적의 해양조사, 네트워크 공격, 이동형 통신노드 제공 등의 목적으로 운용된다. 대표적인 경량급 무인잠수정으로는 미국 Bluefin-12 무인 잠수정이 있다. Bluefin-12 무인 잠수정은 모듈러 타입의 무인잠수정으로 대기뢰전, 항만 감시정찰 등의 임무를 수행할 수 있도록 설계되었다. 다양한 Bluefin-12계열 무인잠수정 중 Bluefin-12D는 운용 수심이 1500미터에

이르고 무게는 약 260kg에 달하는 경량급 무인잠수정이다. 에너지원으로는 리튬 폴리머 전지를 사용하며, 운용시간은 3노트 기준으로 30시간의 운용시간을 제공한다.



그림 38. Bluefin-12 UUV(Bluefin Robotics Corporation)

중량급 무인잠수정은 전술용 감시정찰, 은밀 정찰, 잠수함 기만, 연안 접근 기반 해양 조사 등의 목적으로 운용된다. 대표적인 중량급 무인잠수정으로는 스웨덴 사브사의 AUV62-MR 무인 잠수정이 있다. AUV62-MR 무인 잠수정은 운용 수심이 500미터이고 무게는 탑재 장비에 따라 800~1500kg에 달한다. 운용 시간은 3노트 기준으로 24시간 운용이 가능하며 최대 운항 속도는 20노트에 달한다. 탑재된 HTP 엔진의 HTP 추진체는 증기 발생기 내부에서 파라핀과 함께 화학 반응하여 추진력을 발생시키며 이를 통하여 주된 에너지를 공급받는다.



그림 39. AUV62-MR(Saab Dynamics AB)

대형급 무인잠수정은 지속적인 감시정찰, 매복형 대잠전, 장거리 해양조사, 특수작전용 이송 등의 목적으로 운용된다. 대표적인 대형급 무인잠수정은 보잉사의 Echo Voyager 무인잠수정이 있다. Echo Voyager 무인잠수정은 대형급 무인잠수정 중에서도 초대형급 무인잠수정으로 무게는 45,360kg에 이르고, 운용 수심은 3,000m, 운용시간은 3개월 이상의 장시간 운용이 가능하다. Echo Voyager 무인 잠수정은 리튬 이온 또는 은아연 배터리와 디젤 발전기로 구동되며 디젤 발전기를 사용하여 배터리를 충전한다.



그림 40. Echo Voyager(The Boeing Company)



그림 41. OKPO-6000 UUV(DSME Co., Ltd. & IMTP)

휴대용급 무인잠수정부터 대형 무인잠수정까지 임무에 따라 다양한 연구개발이 진행된 해외 사례와 달리 경량급 이하 무인잠수정이 대부분 국내에서 개발됐다. 1996년 대우조선해양(DSME Co., Ltd.)과 러시아의 IMPT(Institute of Marine Technology Problems)사가 공동으로 국내 최초로 알려진 무인 잠수정인 OKPO-6000 무인잠수정을 개발하였다. OKPO-6000 무인잠수정은 해양 탐사를 목적으로 개발되었으며 수심 6000m에서 운용되는 것으로 알려졌다. 길이 3.8m, 직경은 0.7m, 무게는 980kg 내외로 경량급 이하이며, 주요 탑재 센서로는 2개의 사이드 스캔 소나, 회피 소나, TV 카메라, 스틸 카메라 등을 탑재하였다. 운용 시간은 3노트 기준 10시간 내외로 알려져 있으며, 4개의 쓰러스터(Thruster) 추진, AgZn 충전식 전지를 사용한 것으로 알려졌다.



그림 42. SAUV (Daeyang Electric Co., Ltd. & Etc.)



그림 43. HW200 UUV (HanWha Co., Ltd.)

1998년 12월부터 2003년 5월까지 해양전기산업, 한국해양과학기술원(현 한국해양과학기술원), 한국과학기술원이 민군겸용(응용/시험) 개발사업에서 SAUV(Semi Automatic Undervehicle)를 개발하였다. 운용 수심 400m로 알려져 있으며, 운용시간은 6시간 내외이며 연속 전지를 활용하였다. 탑재 센서는 CCD타입의 TV 카메라, 사이드 스캔 소나 등이 탑재되었다. 이 외에도 2009년 해양탐사용으로 한국해양연구원(현한국

해양과학기술원(KIOST) 선박해양플랜트연구소(KRISO))에서 개발한 이십이-100이나 2012년 국방 신개념 기술 시범사업(ACTD)을 통하여 확보된 무인 기뢰처리기용 무인 잠수정을 개발하였다.

또한 한화는 2014년 신개념 방위기술사업(ACTD)으로 수중탐사용 자율무인잠수함을 개발했습니다. HW200은 수중에서 고속으로 주행하면서 해저의 정밀탐사를 목적으로 개발되었으며, 선미와 4개의 제어반에 설치된 펌프제트 추진력을 바탕으로 제어가 이루어진다. 해저면 조사를 위하여 좌우 측면에 측면주사 소나를 장착하고, 전방 감시를 위한 멀티빔 소나, 장애물 회피 소나, 광학 카메라 등이 선수부에 탑재되었다.

국내 주요 연구개발 사례에서 볼 수 있듯이 국내에서는 휴대용 및 경량 무인잠수함이 대부분 개발되어 왔으나, 최근에는 활용 임무가 점차 다양해지면서 중·대형 무인잠수함 개발의 필요성이 대두되고 있다. 그러나 이러한 중대형 무인 잠수정을 개발하기 위해서는 수중에서의 장기체류 및 목적에 따른 장기체류를 위한 자율제어 기술 확보가 필수적이다. 또한 무겁고 큰 무인 잠수정에 실을 수 있는 무게가 늘어나고 임무가 다양해짐에 따라 탑재되는 센서도 다양해지고 정교해져야 한다. 이러한 요구에 따라 2017년부터 2022년까지 대규모 무인잠수정에 필요한 자율제어기술, 에너지원기술, 센서기술을 개발하여 국내 무인잠수정 임무 다양화를 위해 노력하고 있다.

2. 전장에서의 무인체계 활용사례 및 주요국 정책동향 분석

가. 전장에서의 무인체계 활용사례 분석

1) 아랍 - 이스라엘 전쟁 (제4차 중동전쟁)¹²⁾

이스라엘 방위군은 1973년 10월 제4차 중동전에서 처음으로 드론을 활용하였다. 이 전쟁은 정보의 중요성을 아주 잘 보여준 전쟁으로 이 전쟁에서 이스라엘 공군은 아랍 군대에 대한 공중공격의 제 1제파로 드론을 활용하였다. 제1제파 공격 시 드론을 편성하여 지대공 유도탄과 대공포들의 공격을 유도하고 적 방공기지의 위치 노출을 강요하였으며, 2제파 공격제대가 적의 지대공 유도탄과 대공포들이 재장전하는 동안 확인된 표적에 공격함으로써 정확하게 목표물을 파괴할 수 있었다. 이는 감시정찰 수단으로서 드론의 효용성을 입증한 것으로 정확한 표적위치 정보의 획득이 적으로 하여금 대량 피해를 감수토록 하는 결정적인 역할을 한 것이다.

결과적으로 무인기의 손실만으로도 매우 성공적으로 임무를 완수할 수 있었으며,

12) 서일수, 김용우, '드론봇전투체계 발전방안', 2021

고가의 항공기와 조종사들의 생명을 구할 수 있다는 가능성을 발견하게 되었다. 이러한 경험에 근거하여 이스라엘은 드론의 활용에 높은 가치를 두고 지속적으로 드론을 개발하게 되었다. 제4차 중동전쟁에서 드론을 성공적으로 사용한 경험은 이스라엘 군 내부에서 드론을 더욱 심층적으로 연구를 진행하는데 매우 큰 역할을 하였다. 이러한 이스라엘의 연구는 1982년 이스라엘과 시리아 간의 ‘레바논 분쟁’이 발발했을 때 그 성과를 재차 증명하였다.

2) 이라크 연합군 - IS 전쟁 (모술 탈환 작전)¹³⁾



그림 44. 이라크 전쟁에 투입된 전투로봇

현대 전쟁에서는 최초로 극단주의 무장단체인 IS와의 전투에서 무인지상차량 (UGV, Unmanned Ground Vehicle)이 동원되었다. 마더보드(Motherboard), 바그다드 포스트 등 외신에 따르면 이라크 민병대(PMU) 대변인은 “이라크 군이 모술(Mosul) 진입 전투에서 이 무인체계를 사용하였다”고 밝혔다. 2016년 11월 1일, 이라크 군을 주축으로 한 연합군은 IS의 최대 거점인 이라크 북부 모술(Mosul) 시내에 진입했다. 이는 이라크 정부가 IS에 모술을 빼앗긴 지 2년 4개월 만인데, 이라크 제2도시인 모술은 IS 수장인 아부 바크르 알바그다디가 ‘국가’ 수립을 선포한 곳이다. 바로 이 전투에서 이라

13) 인터넷 기사, The Science Times, “무인 전투로봇, IS전쟁에 첫 투입”, 2016

<https://www.sciencetimes.co.kr/news/%EB%AC%B4%EC%9D%B8-%EC%A0%84%ED%88%AC%EB%A1%9C%EB%B4%87-is%EC%A0%84%EC%9F%81%EC%97%90-%EC%B2%AB-%ED%88%AC%EC%9E%85/>

크 군은 실전에서는 처음으로 UGV를 사용해서 큰 성과를 거뒀다. 이라크 군이 사용한 무인체계는 바퀴가 6개 달린 소형차 크기로 적외선 카메라, 12.7mm 기관총, 러시아제 70mm 로켓포를 장착하고 주로 야간수색작전과 주간전투 및 정찰 등의 임무를 수행한다. 이러한 무인체계는 2명이 조종하는데 한 명은 차량의 이동을 맡고 다른 한 명은 무기 조종을 담당한다. 전투로봇 조종은 노트북으로 통제 가능하여 간편하게 운용할 수 있으며, 로봇에 장착된 로켓포탄은 3km 떨어진 곳도 폭격할 수 있다. 나아가 이라크 군은 전차를 공격할 수 있는 유도미사일을 장착할 계획을 밝힌 바 있다.

3) 아르메니아 - 아제르바이잔 전쟁¹⁴⁾



그림 45. Baykar社의 TB-2 무인기

가) 「High-Low Mix」 개념을 적용한 드론 전투체계 구축

아제르바이잔군은 2016년 분쟁 이후 터키 Baykar社의 TB-2 무인기를 도입했다. 하지만 아르메니아군은 2016년 분쟁 당시 상당수의 아제르바이잔군의 드론을 격추했던 경험에 사로잡혀 지상군 위주의 제병협동전투를 준비했다. 이로 인해, 아제르바이잔군이 저고도 공중영역을 주요 전투공간으로 활용할 것이라는 예측을 하지 못했다. 실제

14) 인터넷 기사, “아르메니아-아제르바이잔 전쟁의 드론 전투”, 2020
https://bemil.chosun.com/site/data/html_dir/2020/12/09/2020120901074.html

로 아르메니아군은 보전협동전투에 대비하기 위해 사주방어가 가능한 진지, 교통호, 장비호 등을 정밀하게 구축했다. 이것들은 아제르바이잔 TB-2를 포함한 정찰드론에 의해 고스란히 촬영되어 SNS에 공개됐다. 이와 함께, 아제르바이잔군은 2016년 분쟁 이전 이스라엘 항공산업(Israel Aerospace Industries)으로부터 하롭(Harop)을 도입했다. TB-2가 중거리 타격체계라면, 하롭은 정찰드론이 식별한 적의 주요 전투장비 주변을 선회(Loitering)하다 급강하하여 정밀타격하는 자폭형 드론이다. 주·야간 고정 및 이동표적을 정확하게 타격하는 하롭은 아르메니아군에게 전장 공포를 확산시켰다. 특히, 2차 세계대전 당시 독일군의 슈투카(Stuka)처럼 급강하 시 발생하는 하롭의 독특한 소음은 전장 공포를 확산시켰다. 아제르바이잔군이 이런 하롭의 모습을 영상에 담아 SNS를 통해 공개하자 아르메니아군 전투원들의 집중력은 분산되었고, 이들의 전장 스트레스도 가중되었다. 이뿐만 아니라, 아제르바이잔군은 보유하고 있던 An-2기를 무인기로 개조하여 정찰용으로 운용했다. An-2기는 소련연방 시기에 도입된 것으로서 현대전에 걸맞지 않은 재래식 무기체계였다. 하지만 아제르바이잔군은 An-2기에 원격 조종기술을 덧입혀 새로운 무기체제로 발전시키는 기지를 발휘하였다. 무인기로 개조된 An-2기는 주로 아르메니아군 방공체계의 정확한 위치를 식별하기 위해 운용됐다. 이것은 정찰 및 TB-2와 같은 공격드론의 생존성을 보장하기 위한 전술적 조치였다. 즉, An-2기는 적 방공망 제압(SEAD: Suppression of Enemy Air Defense)을 위한 표적 식별용 미끼(Dummy)인 것이다. 이처럼 아제르바이잔군 2016년 분쟁 이후 TB-2, 하롭, 무인 An-2기 등 고가의 첨단드론부터 기존 무기체계를 개조하여 만든 저가의 급조드론까지 다양한 형태의 드론을 전력화했다. 즉, 아제르바이잔군은 「High-Low Mix」 개념을 적용한 드론전투체계를 구축하여 2020년 분쟁에 돌입한 것이다.

나) 드론과 정밀화력체계를 연계한 비대칭 드론전술 구사

아제르바이잔군은 2016년 분쟁 당시 정찰드론과 지상의 정밀화력체계를 연결하여 수행한 전투 사례를 철저히 분석했다. 다음으로, 형제국인 터키가 리비아와 시리아 내전을 수행하면서 터득한 전투드론 운용개념을 발전시켰다. 당시 터키는 드론을 활용한 정찰·감시로 획득한 표적 정보를 전술 네트워크를 통해 실시간 공유한 후, 곧바로 지상 및 공중(TB-2·하롭)의 정밀화력체계로 타격하는 '선견-선결-선타'의 전투개념을 정립했다. 끝으로, 아제르바이잔군은 2016년 전투 경험에 터키의 전투개념을 가미하여 자신들만의 전술을 다음과 같이 발전시켰다.

표 14. 아제르바이잔군의 드론전투 개념

전투행동 순서	목적
① An-2 무인기 투입	• 아르메니아군의 방공체계 위치 식별
② 포병화력 집중(야포, 단거리 미사일 등)	• 아르메니아군 대공위협 제거
③ 정찰드론(TB-2 포함) 투입	• 주요 표적 정보 획득 및 공유
④ 전술 네트워크를 통한 표적 정보공유	• 실시간 표적 분배로 전투 효율성 극대화
⑤ TB-2, 하롭, 포병 등 표적 타격	• 지휘소, 전투장비, 군수시설 등 파괴
⑥ 정찰드론(TB-2 포함) 재투입	• 전투피해평가(Battle Damage Assessment)
⑦ TB-2, 하롭, 포병 등 표적 재타격	• 표적 격멸 또는 완전 무력화

이처럼 아제르바이잔군은 드론전투를 위해 드론만 사용한 것이 아니다. 정밀도가 높은 야포나 단거리 미사일과 제병협동으로 드론의 전투 효과를 배가시켰다. 기존 재래식 전력과 최첨단 전력을 배합한 하이브리드(Hybrid) 전투와 지상과 공중 전력을 융합한 다영역전투(Multi-Domain Battle)를 전술적 수준에서 위와 같이 수행한 것이다. 아제르바이잔군은 이와 같은 새로운 전술을 적용하여 상당한 성과를 거두었다. 아래와 같이 TB-2는 나고르노-카라바흐 지역에 투입되어 24일 동안 아르메니아군 전차 114대, 장갑차 43대, 야포(MLRS) 141대, 지대공미사일과 레이더 탑재 차량 42대 등 총 633대를 무력화했다. 확인되지 않는 하롭의 성과까지 더한다면 아르메니아군의 피해는 상당할 것으로 판단된다.



그림 46. 아제르바이잔군 TB2가 24일 동안 거둔 성과

이 과정에서 아제르바이잔군은 드론을 활용한 고도의 전술을 선보였다. 아제르바이잔군은 TB-2를 이용하여 아르메니아군의 선두와 후미를 공격한 후, 정지 및 고립된 차량을 자폭드론과 정밀화력체계로 타격했다. 아제르바이잔군은 전투이탈이 불가능한 산악지역의 협로에서 주간뿐만 아니라 야간에도 이와 같은 전술을 적용했다. 아제르바이잔군은 이와 같은 드론전투의 전술적 성과를 SNS를 활용하여 전략적으로 승화시켰다. 특히, 이들은 드론을 활용하여 아르메니아군의 주요 전력을 파괴하는 전투영상을 집중적으로 방영했다. 이를 통해, 아제르바이잔 국민은 전투에서 승리하는 모습을 보면서 결속을 다질 수 있었다. 반면, 아르메니아군은 드론의 효과와 위력으로 공포에 휩싸였고, 국제사회는 수세에 몰린 아르메니아를 쉽사리 지지할 수 없게 되었다. 즉, 아제르바이잔군은 이 세 가지 목적을 달성하기 위해 드론전투의 성과를 정보·심리작전과 연계시켜 자국민, 적국 및 국제사회의 인식을 드론전투를 통해 사로잡았다.

4) 러시아 - 우크라이나 전쟁¹⁵⁾



그림 47. 러시아군의 완전 자율살상용 로봇 마커와 전투원

러시아-우크라이나 전쟁이 장기화하면서 드론(무인 항공기)에 이어 조종사 없이도 인간을 살상할 수 있는 완전 자율 전투로봇의 전장 투입이 현실화되었다. 현대차증권 소속 로버트 칙(Robert Cheek) 연구원은 "러시아가 자율 전투 로봇 마커(Marker)를 우크라이나에 투입할 것이라고 발표하였고, 이는 무게가 3t 안팎으로 다양한 무기를 장착할 수 있다"고 밝혔다. 러시아의 연구기관 '안드로이드나야 테크니카'가 개발한 마커 플랫폼에 대한 연구와 최종 테스트는 지난해 2022년 1월에 완료됐다. 마커는 세계 최초의 인간에게 해를 끼칠 수 있는 완전 자율 전투 로봇으로 인간의 개입 없이 살상이 가능하다. 이는 이라크군과 IS간 전쟁 시 투입되었던 UGV와는 달리 전적으로 스스로의 판단에 따라 적군을 살상할 수 있는 전투로봇이다. 지난 2002년 7월 아프가니스탄 전쟁 당시 미국은 헤르메스 로봇을 수색작업에 투입했다. 현재까지 로봇과 드론은 원격 조작되거나 반자율적으로 작동하는 방식이었다. 하지만 마커는 완전 자율로 적군을 죽일 수 있도록 설계됐다. 칙 연구원은 "마커는 약 15km 떨어진 곳에서 목표물을 찾는 것은 물론 전투 임무를 수행하기 위해 자율적으로 행동할 수 있다"며 "탐재돼 있는 무기로 목표물을 정확하게 찾아내어 발사하는 방식"이라고 설명했다. 제네바 회의에서 체결된 전시국제법에 따르면, 군사작전은 교전자만을 상대로 하며 교전자가 아닌 민간인이나 포로, 부상자 등은 전쟁 중에도 공격 대상이 될 수 없다. 따라서 의료기관이나

15) 인터넷 기사, "러시아軍, 우크라에 세계 최초 인간 살상용 로봇 마커 투입", 2023
<https://www.womaneconomy.co.kr/news/articleView.html?idxno=215047>

민간인 부지를 공격하는 것은 전쟁법에 위배된다. 이와 관련 올레그 마르타노프 러시아 고등연구프로젝트재단 국립기술 및 로봇 기본요소 개발센터장은 "마커는 민간인과 군인을 구별해 '직접적인 위협'을 가하는 사람들을 겨냥할 수 있다"고 설명했다"고 직원들은 전했다. 러시아는 우크라이나를 침공하기 전인 2021년 10월 경 이미 5대의 '마커 로봇'으로 군집 테스트를 진행했다. 3대의 바퀴형 로봇, 2대의 궤도형 로봇 등 총 5대의 마커 로봇엔 대구경 기관총, 바주카포 등 다양한 무기가 장착됐다. 테스트 결과 마커 로봇은 사람의 수동적 개입 없이도 집단 표적 할당을 완수하고, 최고의 화력을 낼 수 있는 위치로 이동해 급변하는 전투 상황에 자율적으로 대처하거나 표적 지시를 교환했다. 또한 2023년 2월 경 러시아는 우크라이나에 공급되는 독일제 레오파드2 전차에 대응하기 위한 신형전투 로봇 4대를 전장에 배치하였다. '23년 2월 2일, 러시아 우주국 로스코스모스의 전 최고경영자 드리트리 로고진은 "처음 4대의 마커가 제 시간에 해당지역에 도착했다"면서 "표적 이미지를 다운로드하고 전투로봇 그룹의 일원으로 전쟁 알고리즘을 개발하였으며, 강력한 대전차 무기를 설치하기 시작했다"고 밝히며 "마커가 레오파드2 전차의 사냥꾼이 될 것"이라고 언급한 바 있다.



그림 48. 러시아 군이 도입한 전투로봇 마커 사진

마커 전투로봇은 7.62mm 기관총과 대전차 미사일로 무장한 전차형 로봇이다. 지난 2018년부터 러시아 '로봇기술개발센터'와 '안드로이드 기술연구소'가 개발해 왔으며 우크라이나 전쟁 개시 이후 실전 투입을 위해 시스템 개량 작업을 진행해 왔다. 러시아

군은 마커가 레오파드2와 M1 레이브럼스 전차는 물론 공중 표적까지 파괴할 수 있다고 밝혔으나, 공식적으로 검증되진 않았다.

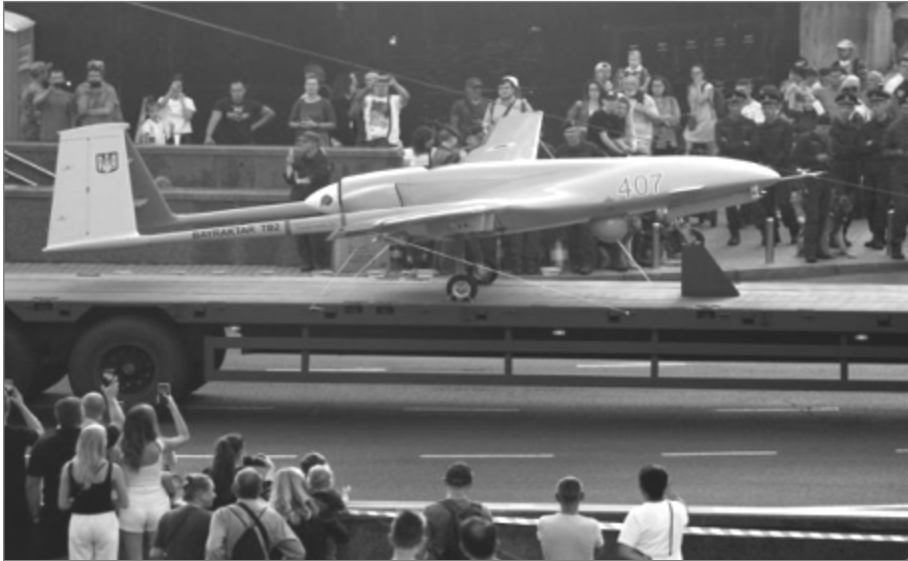


그림 49. 터키산 바이락타르 TB-2 드론

한편, 지상 무인체계 외에도 우크라이나 전쟁에서는 전투기, 탱크, 장갑차, 미사일, 드론, 제브린, 스팅어 등 다양한 무기가 사용되었다. 특히, 러시아-우크라이나 전쟁에서는 드론의 활용성과 효용성이 꾸준히 주목받고 있다. 전쟁에서 활용되는 드론은 소형 배회탄에서 미사일을 발사할 수 있는 대형 공격 드론까지, 그 스펙트럼 사이에 다양한 종류가 있다. 주로 감시와 정찰기능을 수행하는 드론은 중형에 속한다. 러시아는 드론을 개발하고 시리아, 우크라이나 등 전장에서 전술적으로 활용한 경험을 축적한 드론 강국이라고 할 수 있다. 러시아는 올란-10, 엘론-3, 자스타바, 포포스트, 오리온, 잘라 등을 보유하고 있다. 우크라이나는 2014년 크림전쟁이 종료된 후 드론에 관심을 가지기 시작했다. 우크라이나의 주력 드론은 터키로부터 구매한 바이락타르 TB-2이며 자체생산한 A1-SM 퓨리와 레레카-100 등을 활용하고 있다. 최근에는 미국으로부터 스위치블레이드라는 일종의 배회탄을 지원받고 있다. 전반적으로 드론전쟁에서 우크라이나가 우세했으나 러시아가 만회를 시도하고 있는 형국이다. 러시아는 드론을 사용하는데 소극적이어서 적은 수량의 드론을 3월 초부터 투입했다. 반면에 우크라이나는 개전 초기부터 드론을 적극적으로 활용했다. 우크라이나는 바이락타르로 장갑차량, 지대공 미사일, 지휘소, 견인포 등을 파괴하였다.

5) 시사점

대표적인 무인체계로 일컬어지는 무인항공기(UAV)는 수십 년 동안 사용되어 왔다. 무선 B-24폭격기는 2차 세계대전 당시 독일 폭격 임무를 수행했고, 베트남전쟁에서 미군은 원격 조종 정찰기로 적진의 사진을 촬영했다. 드론전쟁의 획기적 발전은 1995년 Gnat(나중에 Predator로 명칭 변경) 개발부터 시작되었다. Gnat는 15m 날개를 가진 미국산 UAV로, 최대 12시간 동안 표적 위에 떠 있으며 실시간 영상을 촬영, 수백 마일 떨어진 곳에 주둔한 조종사에게 전송할 수 있다. 2001년 10월 7일, 아프가니스탄에서 전투기의 원격 표적 공격을 성공시켰다. 무인항공기 프레더터가 탈레반 지도자 몰라 오마르가 거처하는 건물을 포착해 정보를 보냈고 미국은 헬파이어 미사일을 발사했다. 결과적으로 오마르는 놓쳤지만 근처 차량을 파괴하고 여러 명의 경호원을 살상했다. 미국의 드론전쟁 기술은 아프가니스탄, 이라크, 파키스탄에서 전쟁을 치르며 꾸준히 향상됐고 2014년까지 공군은 비행기 조종사보다 더 많은 드론 조종사를 훈련시켜왔다. 현재 약 20개국이 무인항공기(UAV)를 보유하고 있다. 이러한 드론은 정기적으로 연료를 보급해야 하고 조종사의 피로도가 큰 전투기와 달리 정찰을 수행하거나 공중망 감시, 적절한 표적 대기 등을 수행하기 위해 최대 24시간 동안 공중에서 선회할 수 있어 전장에서의 게임체인저로서 그 입지를 다져가고 있다. 이러한 국방 드론 시장은 전 세계적으로 치열한 경쟁을 보이고 있으나 명실공히 최고의 수출국 자리는 수 년째 중국이 꿰차고 있는 실정이다. 나이지리아와 아랍에미레이트를 포함한 최소 10개국이 중국산 무인항공기(UAV)를 사용해 전투를 치렀고, 최근 터키도 드론 강국으로 부상했다. 4개의 레이저 유도 미사일로 무장한 6.4미터 길이의 UAV인 TB2는 무인체계의 군사적 활용이 얼마나 치명적이고 효과적인지 증명하였고, 지난 2020년 2월 시리아 공습에서 국제적 관심을 받았다. 시리아 정부의 공습으로 터키군 36명이 사망한 후 터키는 레이더에도 포착되지 않는 TB2 편대를 이용, 러시아가 만든 공군기지를 폭파하고 수백 명 이상의 시리아 군을 폭사시켰다. 한편, 2020년 아제르바이잔 내 아르메니아 민족 거주지를 둘러싼 양국의 분쟁은 드론이 전쟁의 본질을 어떻게 변화시키고 있는지를 가장 극명하게 보여준 사례다. 전쟁이 시작될 때 아제르바이잔은 드론으로 개조된 소련제 구형 전투기를 보내 아르메니아 대공망의 발사를 유도했다. 이후 아제르바이잔은 TB2와 이스라엘제 카미카제 드론을 활용, 최소 106개의 아르메니아 탱크, 146개의 포대 및 기타 차량을 파괴했다. 다탘머스 대학 군사기술 전문가 제이슨 라이올은 "오랜 기간의 지정학적 마찰을 해소하려는 나라들에게 저비용의 무장 드론은 유혹적인 기회를 제공한다"고 말한다. 미국, 중국, 러시아 및 인도는 수십 또는 수백 개의 무인항공기(UAV)가 일상불란하게 적을 제압하는 AI(인공지능) 드론단을 실험하고 있다. 이러한 활용성

과 효용성, 그리고 위협은 비단 드론에만 국한되지 않고 무인체계 전반으로 확산되어 가고 있다. 일부 인권 단체와 AI연구원들은 드론의 확산은 위험하다며 살상용 로봇의 활용 금지를 요구할 정도로 그 영향력은 급속도로 확장 중이다.

현재 전쟁에서 무인체계의 군사적 활용은 ‘지상 로봇, 무인항공기, 드론’ 등에 국한되지만 기술발전 속도에 비추어 볼 때 지해공 전 영역에서 무인체계가 활용될 것이고 유무인복합전투체계 기술의 발전은 유무인 복합의 전 영역 동시 통합작전을 이끌어낼 수 있을 것으로 판단된다. 현대 전쟁사례에서 입증된 무인체계의 효과성은 미국, 러시아, 중국 등 세계 주요 군사 강대국들로 하여금 무인체계 및 유무인복합전투체계 기술 개발 경쟁을 야기하고 있다. 하지만 무인체계의 기술발전 속도에 비추어 볼 때 AI 기반의 완전자율형 무인체계가 전장에 나타나기까지는 오랜 시간이 걸릴 것으로 판단된다. 따라서 조종자(Operator)의 실시간 원격제어를 통한 유무인복합형 전투를 할 수 있는 기술과 운용개념이 필요하다. 최근에는 유무인복합전투체계에 기반한 전투수행개념을 정립하는 한편, 이를 human-on-the-loop 상태에서 온전히 운용·통제하기 위한 다양한 방안을 구상 중에 있다. 이렇듯 AI 기반 무인체계를 실시간 제어·통제하기 위해서는 ‘기술·정책·법률’적 검토가 함께 이루어져야 한다. 이에 다음 절에서는 무인체계 관련 주요국의 정책동향을 분석하고 우리나라의 향후 행보와 수행해야 할 핵심과제를 도출하고자 한다.

나. 무인체계 관련 주요국 정책동향 분석

1) 개요

미국은 2010년 이전부터 각 군의 특정임무 수행을 위한 무인체계 개발에 경쟁적으로 집중하였다. 이에 따라 2010년에 과학기술개발 우선순위에 무인화 기술을 선정하였고, 무인체계 개발에 대한 체계적인 접근의 일환으로 유무인복합작전개념을 도입하였다. 나아가 2012년에 들어서면서 무인체계 정책을 체계화하기 시작하였다.

표 15. 이라크 전쟁에 투입된 전투로봇

연 도	정책 내용
2012	· 무인체계의 효율적·체계적 개발방향 제시
2013	· 자율시스템의 신뢰성 검증을 위한 V&V 중요성 인식 * V&V : Verification and Validation

2014	· 국방 자율 시스템 통합 개발을 위한 COI 결성 * DoD Autonomy Community of Interest(COI)
2015	· 인간-로봇 상호작용(HRI), 시험평가(T&E), 검증·확인(V&V) 중요성 제기 * HRI (Human/Robot Integration), T&E (Test and Evaluation)
2016	· 차세대 수중 무인체계 획득방향 제시
2018	· 무인화 기술 발전 동력 및 핵심기술 제시 · 중·장기 무인체계 로드맵 제시

한편, 중국은 제조업 중심의 산업구조를 첨단 디지털 경제 위주로 전환하기 위하여 당·정부 중심의 강력한 리더십을 발휘하고 있으며, 특히, ‘무인경제’라는 신개념을 만들어내며 이를 육성하기 위한 관련 정책을 수립하는 등 적극적인 활동을 보이고 있다.

표 16. 중국정부의 ‘무인경제’ 관련 정책

시기	발표기관	정책 / 활동	주요 내용
2016.11	국무원	오프라인 소매경영방식전환의견 (推动实体零售创新转型的意见)	새롭게 개발된 기술을 통해 생산력이 높아지는 취지의 의견으로서, 특히 인터넷, 빅데이터 및 인공지능 기술을 이용해 전통 산업을 새로운 스마트 발전모드로 전환 촉구
2017.06	상무부	중국편의점경기지표보고 (中国便利店景气指数报告)	최초로 ‘무인소매업’의 개념을 제시. 이러한 경영방식은 경제발전에 긍정적인 효과를 가져다 준다고 주장함
2017.10	중국백화상업협회	중국무인상점업무경영지도규격 (中国无人店业务经营指导规范)	무인상점에 대한 첫 번째 규격으로써 무인 상점의 배치, 경영, 재고관리, 물류 등 부분에 대해 구체적인 규정을 발표함
2019.10	민용항공관리국	특정드론시범운전허가서 (特定类无人机试运行批准函) 및 <트론배송경영허가>(无人机物流配送经营许可)	항저우 ‘송바’(送吧) 물류과학기술유한 회사는 민용항공관리국에서 특정드론 시범운전 및 드론물류배송 경영허가를 획득. 전 세계 처음으로 도시에서 드론 물류배송을 시행함

2020.02	상무부	무역진흥 및 외자유치소비촉진 온라인 설명회 (稳外贸稳外资促销费网上政策吹风会)	5G, 인공지능, 빅 데이터, 블록체인 등 기술을 널리 응용하고 온라인교육, 온라인 의료, 원격근무 등 신형 산업을 진흥시키며 '무인소매업' 등 새로운 경영모드로 꾸준히 모니터링 하여 관련 지원정책을 보완하도록 함
2020.04	교통운수부	자율운전에 맞춘 도로공사 기술규격 (公路工程适应自动驾驶附属设施总体技术规范)	최초로 국가적 측면에서 자율운전 산업화를 목적으로 자율운전에 대한 기술규격을 제시
2020.04	국가우정국 공업정보부	택배 및 제조업 융합 심화 의견 (关于推进快递业与制造业深度融合发展的意见)	5G, 인공지능, 빅 데이터, 클라우드, 블록체인 등 기술과 제조업과의 융합을 촉진하며 인프라, 설비 및 작업시스템의 자동화 및 스마트화로 업그레이드 하는데에 도움을 줌
2020.07	국가발전 개혁위 등 13개 부서	신형산업 발전 및 소비시장 진흥으로 취업률 확대 (关于支持新业态新模式健康发展激活消费市场带动扩大就业的意见)	신형기술을 바탕으로 생산, 유통 및 서비스의 비용을 절감시키고 '무인경제'를 더욱 발전시키자는 취지의 촉구

이렇듯 무인체계는 '미-중 경쟁'의 핵심요소로 자리잡아가며 기술패권경쟁의 주요 무대가 되었다. 이에 따라 유럽, 일본을 비롯한 우리나라 또한 무인체계에 대한 정책을 앞다투어 수립하고 있는 실정이다. 우리나라는 과기부와 국방부가 협업한 다부처 무인 이동체 발전 로드맵을 작성하는 한편, 국방 무인이동체 발전 전략이라는 국방 분야에 특화된 정책적 요소를 발 빠르게 수립하고 있다.

2) 미국¹⁶⁾

가) 무인체계 개발 방향

미 국방성 국방과학위원회는 '군에서의 무인화 역할 연구보고서'를 통하여 무인체

16) 박동선, 오경원, '미국의 무인체계 정책 분석을 통한 한국의 무인체계 발전에 관한 연구', 2021

계의 체계적인 개발과 개발 과정의 효율성 제고를 위한 지침을 다음과 같이 마련하였다. 첫째, 무인체계 개발 및 획득을 위한 새로운 획득절차 도입이다. 무인체계에 대한 개발 및 획득은 기존의 절차를 준수하기에는 한계점이 있으므로 새로운 제도를 만들어야 한다는 것이었다. 무인화·자율화 목표수준에 대한 불필요한 논의로 개발과 획득이 지연될 수 있으므로 현재의 기술수준으로 개발한 후 기술성숙도를 고려하여 성능개량으로 무인체계를 발전시킨다는 것이다. 둘째, 무인체계 획득 개발 시 소요군과 밀접한 협력 프로그램을 운용해야 한다. 소요군의 운용 경험과 진화하는 요구조건을 반영하기 위한 조치이다. 셋째, 무인체계 S/W를 플랫폼에서 분리하여 획득한다. 이것은 운용인력 감소, 향상된 성능, 미래임무 적응을 위한 ‘개방형 S/W’ 개발을 위한 것이었다. 넷째, 무인체계 특성을 반영한 고유의 개발 및 운용 시험평가 기술개발이 필요하다. 다섯째, 군사교육, 워게임 및 훈련에 무인체계 운용 분야를 반영한다. 최근 실전에서 무인체계 운용 중 도출된 경험 및 교훈을 공유하고, 무인체계를 활용한 상호 교전상황을 모의훈련함으로써 발전방향을 모색하기 위함이다.

나) 무인체계 획득 방향

미 국방과학위원회는 차세대 수중 무인체계에 대한 연구를 통하여 무인체계 개발과 관련하여 문제점을 식별하였다. 먼저 다수의 무인체계 개발사업이 일관성 없이 진행되고 있어 예산이 과다하게 낭비되고 있음을 확인하였다. 각각의 사업별로 진행되는 기술개발의 중복성과 기능구현의 일관성이 결여되었다. 다음으로 수중 무인체계를 ‘잠수함’의 일종으로 인식하여 과도한 성능요구가 있었다. 유인 잠수함 수준의 성능구현을 요구함에 따라 기술소요가 과다하였다. 즉, 복합 임무 달성을 위한 높은 수준의 성능(자율성, 은밀성 등) 요구로 개발비용 증가, 사업완료 지연 등 다수의 무인체계 개발사업이 실패하였다. 따라서 무인체계의 개발획득을 위한 새로운 지침이 제시되었다. 첫째, 무인체계의 창의적 활용을 통해 새로운 능력을 제공한다. 즉, ‘다중 복합임무’ 수행 무인체계 개발에서 ‘단순임무’용 저비용 다량의 무인체계를 개발하는 것이다. 둘째, 무인체계 획득개발에 대한 새로운 접근법을 적용한다. 상용제품의 적용을 확대하고, 무인체계가 임무수행이 가능한 수준에 맞는 능력으로 기술개발 요구를 완화하는 것이다.

다) 무인화 기술 발전 동력 및 핵심기술

미 국방성 무인화위원회는 무인화 대한 정의를 ‘인간-로봇 간의 효과적인 상호작용이 이루어지는 가운데, 인간의 간섭이 최소화된 상태에서 복잡한 임무를 도전적 환경에서 수행할 수 있는 지적인 행위를 위한 연산능력’으로 정의했다. 그리고 이러한 무인

화 기술의 발전동력으로 인적 운용의 최소화, 즉각반응 및 상시 대기능력, 가혹하고 예측 불가한 환경, 새로운 요구능력, 의료적 응용능력, 군수지원 능력 등을 제시했다. 이와 관련하여 아래 그림25와 같이 무인화 기술을 네 가지로 분류하였다. 첫째, 기반 인공지능(MPRI : Machine Perception, Reasoning, Intelligence) 기술이다. 이는 전투원과 효율적인 작전을 수행하고 무인체계에 대한 인간의 간섭을 최소화하기 위한 지각, 추론, 학습능력을 말한다. 둘째, 군집협력(STAS : Scalable Teaming of Autonomous Systems) 기술이다. 이는 동형 또는 이형 무인체 (집단) 통합을 위한 임무의 및 수행의 고유 그리고 분권 및 협력 기술을 포함한다. 셋째, 인간 무인 융합 및 협동(HASIC : Human-Autonomous System Interaction and Collaboration) 기술이다. 이는 신뢰성, 이해의 공유, 자연적 상호작용, 소통 및 학습을 바탕으로 한 효과적인 인간과 기계 간의 협업을 위한 기술이다. 넷째, 시험평가 인증(TEVV : Test, Evaluation, Validation & Verification) 기술이다. 이는 단일 알고리즘 부터 군집 체계 단위까지 검증된 무인 체계 배치를 위한 새로운 시험평가 및 검증과 확인할 수 있는 기술을 말한다.

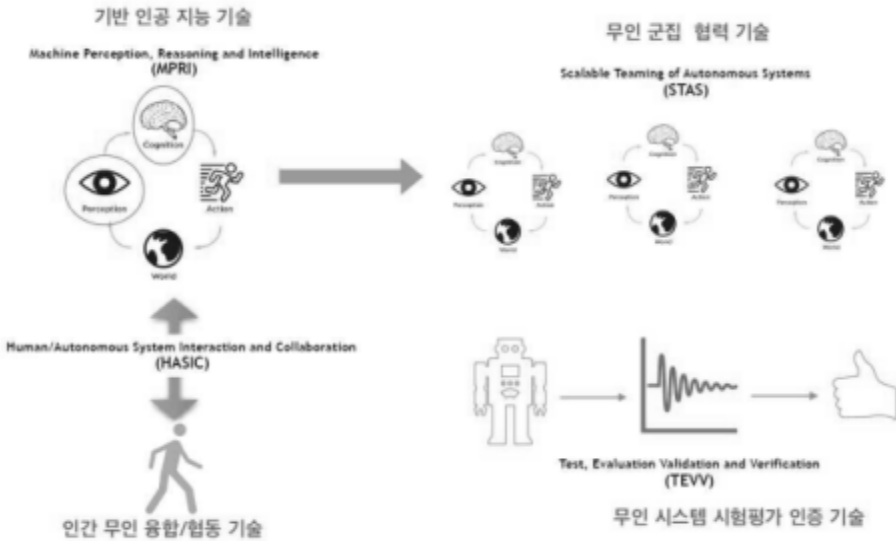


그림 50. Key Technologies in Autonomy COI

라) 무인체계 로드맵

미 국방성은 2018년에 무인체계 중장기 발전계획 세부 발전과제를 제시했다. 이는 중장기 로드맵 형태로 구체화되어 있어 향후 핵심기술 개발사업의 기준으로 활용되며, 세부내용을 정리하면 아래 표와 같다.

표 17. Goals & Development Tasks for Core Technology

구분	목표 및 과제
상호운용성 (Interoperability)	· 목표 : 유무인 체계 개방/공통 구조 활용을 통한 시너지 달성 · 과제 : 공통/개방 구조, 모듈화, 부품, 호환성, 시험평가등
자율성 (Autonomy)	· 목표 : 무인체계 운용 효율성 및 효과 극대화 · 과제 : 인공지능, 머신러닝, 효과/효율성 향상, 신뢰도 등
네트워크 보안성 (Network Security)	· 목표 : 네트워크 취약성 해결을 통한 작전 완전성 보장 · 과제 : 사이버 작전, 정보보증, 전자기영역, 전자전 등
인간-기계 협동성 (Human-Machine Collaboration)	· 목표 : 인간과 무인체계 간 통합작전 수행 · 과제 : 인간-기계 인터페이스, 인간-기계 팀 구성 등

마) 국방 무인체계 정책 동향

미국은 2011년 6월 오바마 대통령이 발표한 첨단제조파트너십(Advanced Manufacturing Partnership) 계획에 따라 국가로봇계획(National Robotics Initiative)을 추진 중이다.¹⁷⁾ 국가로봇계획은 로봇의 기초연구 및 개발로부터 제조, 확산까지의 전 주기간 생태계 조성을 목표로 추진 중이다. 특히, 동 계획에서는 국방 로봇, 원천기술력을 활용한 협업로봇(Co-Robot) 개발에도 중점을 두어 추진 중이다. 아울러 로봇자문위원회(Robotics Caucus Advisory Committee)를 구성, 6개 분야 로봇 개발 로드맵 계획을 발표한 바 있다. 미국 국방 로봇 획득 법령을 보면 다음과 같다. 2000년에 미국의 플로이드 디 스펠스 하원의원은 국방 로봇 획득을 활성화하기 위해 유인 전투장비의 1/3을 국방 로봇으로 전환하는 내용을 골자로 하는 관련 법안을 발의하였다. 이 법안은 2000년 10월 30일 클린턴 대통령이 서명을 함으로써 법률로서 효력을 발휘하게 되었다.¹⁸⁾ 이를 통해, 사용자 요구에 부합되는 국방 로봇의 수요를 창출하고 경제적·효율적으로 개발이 가능하며, 나아가 성공적인 시험평가와 장비 획득에 기여하였다. 미 의회에서 2000년에 국방 로봇관련 법령을 제정하자, 국방부에서는 국방 로봇에 대해 전투실험을 통한 소요 기획과 핵심기술 확보, 획득 로드맵 수립, 시험평가계획 수립 등의 후속조치를 실시하였다. 미국방위고등연구계획국(Defence Advanced Research Projects Agency, DARPA)에서는 특히 지상로봇의 핵심기술인 자율주행 기술을 활용

17) 정만태, 「세계 지능형 로봇산업의 최근 동향과 시사점」, 산업연구원, 2016.12.

18) U.S. Department of Defense, Unmanned Systems Roadmap 2007-2032 (the Office of the Secretary of Defense, 2007), Chapter1 Introduction p.6.

하기 위하여 예하 부서인 전술기술실(TTO: Tactical Technology Office)로 하여금 2004년부터 2007년까지 소정의 상금을 내걸고 미국과 전 세계의 산·학·연이 참여하는 Grand Challenge와 Urban Challenge라는 전투실험을 실시하여 이 기술을 신속하고 경제적으로 개발하였다. 또한 합참의 합동로봇체계사업실(RSJPO)에서는 미 육군 교육사령부의 전투실험 결과와 미래전투체계¹⁹⁾(Future Combat System) 여단의 국방 로봇 소요, DARPA의 Grand Challenge와 Urban Challenge를 통해 지상로봇의 핵심기술인 자율주행기술을 개발한 결과와 해병대의 지상로봇 소요를 참고하여 2009년부터 격년제로 향후 10년 동안 지상로봇 획득로드맵을 발간하기 시작하였다. 미 국방부에서도 합동참모본부와 국방획득기술군수실이 주관이 되어 육군, 해군, 공군, 해병대가 필요로 하는 지상로봇, 해양로봇, 공중로봇을 망라하여 2007년부터 격년제로 무인체계 획득로드맵을 발간하고 있다. 미국은 국방 로봇의 성공적인 개발 및 시험평가가 가능하도록 미 육군교육사령부 전투실험 조직과 미 육군 시험평가사령부에 국방 로봇 시험평가 조직을 운영하고 있다. 미 육군시험평가사령부는 미 본토, 하와이, 알래스카를 포함한 미 전역의 17개주 29개소에 분포되어 있다. 기타 미국의 국방 로봇(지상로봇) 관련 조직으로는 산·학·연에서 국방 로봇을 잘 개발하도록 예산지원 조직, 기술지원 조직 그리고 육군과 해병대가 공용으로 사용하는 지상로봇 소요기획 전담조직 등이 있다.

바) 미국의 무인체계 정책 분석 결과

미 국방성은 유·무인체계 동시운용을 위한 통합 전투성능 및 운용성 극대화를 위해 다음과 같이 획득 및 개발전략을 체계화하였음을 알 수 있다. 첫째, 정책-개발-운용자간 협업을 위해 시스템공학 기법 및 전문인력을 강화하였다. 정책수립 시 요구조건과 기술융합을 고려하였으며, 지속적인 운용 경험과 현장 요구사항을 적극 반영하였다. 그리고 임무와 기능 그리고 기술성숙도를 고려하여 진화적 개발(단순→복잡 임무, 독립→군집 운용 등)을 적용하였다. 또 무인체계 전문인력 양성 및 관리에 집중하였다. 둘째, 무인체계 특성에 맞는 고유의 획득·개발체계를 도입하고, 시험평가 및 검증기술과 절차를 개발하였다. 셋째, 유·무인체계 운용 및 작전수행 개념을 구체화하여 반영하였다. 이를 위하여 유·무인체계의 전투공간과 시간 분리 또는 통합운용, 지휘통제 개념을 발전

19) 미래전투체계 프로그램의 개념 및 방향은 미래의 모든 군사작전 영역에서 어떤 위협에도 대응할 수 있도록 다양한 수단과 능력을 보유하고 전 세계 어느 곳이든지 여단은 96시간, 사단은 120시간 이내에 전개하여 고립된 상태에서도 3~7일간 독자적인 작전이 가능하도록 하는 것이며, 유인체계를 무인체제로 대체하여 경제적 전투운용 및 병사의 생존성 향상이 가능토록 하였다. 김진오, 엄홍섭, 장상국, 김윤희 공저, 「미래전의 희망 국방 로봇」, 2018.10 참조.

시켰다. 넷째, S/W를 중심으로 무인체계의 자율수준을 향상시켰다. 구체적으로 인간-무인체계(군집) 간 상호작용을 극대화하되, 간섭을 최소화하였다. 또 무인화 S/W를 플랫폼에서 분리하여 별도 개발 추진함으로써 연구개발의 효과성을 증진시켰다. 다섯째, 개방형·공통구조(H/W, S/W), 상용기술(COTS : Commercial Off-The Shelf)을 적용하였다. 이는 획득·개발 비용절감 및 기간을 단축시키고, 상호운용성 및 후속 군수지원능력을 향상시키기 위한 목적의 정책적 조치라고 할 수 있다.

3) EU²⁰⁾

EU는 무인체계 중 로봇 산업을 차세대 핵심 전략 산업으로 선정하고, 세계에서 가장 큰 규모의 로봇 업 연구 및 혁신 프로그램인 SPARC를 통한 투자 및 연구를 진행하여, 차세대 로봇 기술 개발과 핵심 요소 기술 확보에 중점을 둔 인프라 구축을 추진 중이다. 2018 'Horizon Europe('21-'27)'을 통해 인공지능 및 로봇이 포함된 분야에 대해 150억 유로의 예산을 배정하며, 미션 지향적인 연구 혁신과 산업계의 역할 강화 및 핵심 유망기술 육성을 추진하였다. 또한 ICARUS('12~'16년), 육상·해양·공중 무인이동체 통합 운영시스템 프로젝트, 무인 수색 및 구조를 위한 프로젝트 등을 통해 인명 감지 센서가 장착된 보조 무인 항공, 육상, 해상 차량을 이용하여 생존자를 찾고 구조 작업을 처리하는데 도움이 되는 통합 구성 요소를 개발하였다. 나아가 최적의 인간-로봇 간 협업을 위해 C4I(Command, Control, Communications, Computers, and Intelligence : 명령, 제어, 통신, 컴퓨터, 및 인텔리전스) 요소의 완벽한 통합을 위한 노력을 기울이고 있다. 이렇듯 ICARUS는 아래 표와 같이 8가지의 프로젝트 목적을 가지고 추진 중이다.

표 18. ICARUS의 8가지 프로젝트 목적

구 분	주요 내용
탐지 및 인식	· 사람을 감지할 수 있는 광센서 개발
무인이동체 개발	· 무인 SAR(Search And Rescue)를 위한 UAS(Unmanned Aerial System) 개발
	· 무인 SAR를 위한 UGV(Unmanned Ground Vehicle) 개발
	· 무인 SAR를 위한 USV(Unmanned Surface Vehicle) 개발

20) 최미옥, '혁신성장동력 분야별 기술·산업·정책 동향 조사', 2020

통신	· 네트워크 상호운용성을 보장하는 자체 구성 무선 통신 네트워크 개발
시스템 통합	· 무인 수색 및 구조 도구의 C4I 시스템 통합
인간-이동체 인터페이스	· 무인 수색장치와 구조 장치 간의 로봇 협업
	· 개발된 무인 수색 및 구조 팀에 대한 훈련 지원 및 지원시스템 개발

4) 독일²¹⁾

2018년 ‘하이테크전략 2025(Hightech-Strategie 2025)’를 통해 일상생활에서 사용하는 로봇 등 인간-기계-상호작용에 기반한 새로운 솔루션 연구에 집중적으로 지원 중이다. 한편, 독일은 미국의 경우처럼 국방 무인체계 중 로봇 획득과 관련한 법령은 없으나, 제2차 세계대전부터 현재에 이르기까지 국방 로봇을 포함한 신기술 개발과 시험평가에 대한 정부 지도자들의 관심은 매우 높은 것으로 나타났다. 독일은 유럽 내에서 가장 활발하게 지상 로봇에 관한 연구가 추진 중이다. 2008년에 유럽 최초로 군사 로봇 전시회를 개최하였고, 2년마다 지속적으로 추진하고 있다.

특히, 2010년에 독일 육군보병학교에서 국방 로봇의 소요기획을 위해 개최된 국방 로봇 전투실험시 당시 육군참모총장, 방위기술조달청장, 장관, 언론, 산·학·연 관계자 다수가 참석하여 신기술 개발과 시험평가에 지대한 관심을 보였다. 독일의 국방 로봇 소요 기획과 획득 조직의 주요 기능은 다음과 같다. 독일 정부는 아프칸전 발발 이후에 국방 로봇을 개발하는 산·학·연이 증가하고, 독일군에서 국방 로봇의 소요가 증대하면서, 국방 로봇 소요기획 전담요원을 각군 본부에 편성하고 국방부 군비총국(BWB: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung) 예하에 국방 로봇 획득 전담조직(Team U5.5)을 편성·운영하고 있다. 육군본부와 국방부 군비총국은 국내외에 산재된 국방 로봇기술 수준을 확인하고 소요를 기획하기 위해 공동으로 2006년부터 격년제로 2010년까지 독일과 유럽의 산·학·연 을 대상으로 국제규모의 전투실험을 수행하였다. 육군본부 국방 로봇 소요기획 전담요원은 독일 육군이 필요로 하는 차륜형 다목적 전투로봇(감시·정찰·폭발물처리·화생방탐지)과 차륜형 분대급 보급수송용 로봇의 요구성능(ROC)을 2004년에 산·학·연 에 제시하고, 2006년부터 격년제로 전투실험을 통해 육군의 요구성능을 육군보병 학교에서 전투실험을 통해 확인하였다. 한편 국방부 군비총국 예하의 국방 로봇 획득 전담요원은 전투실험을 통과한 산·학·연 의 국방로봇 개발을 지원하고

21) 최미옥, ‘혁신성장동력 분야별 기술·산업·정책 동향 조사’, 2020

있다.²²⁾

독일 육군본부 예하 '육군청의 육군발전부와 전력부'에서는 미래 독일 육군 건설에 필요한 개념발전과 함께, 전투실험 개념을 발전시키고 있다. 독일의 경우 국방 로봇을 포함한 신기술을 군에서 획득 시 시험평가는 크게 3차로 구분하여 진행된다. 1차는 소요기획을 위해 육군 관련 병과학교 주관하에 전투실험을 수행하고, 2차는 체계개발 단계에서 국방부 군비 총국 예하 각 기능별 시험센터 주관으로 개발시험 평가를 수행한다. 끝으로 3차는 개발시험평가 후 육군관련 병과학교 주관하에 야전부대에서 운용 시험평가를 수행하고 있다.

5) 영국²³⁾

2018년 Innovate UK를 통해 수립된 '5대 실행 전략(5-point plan)'에서 로봇공학을 핵심 분야로 선정하고, 로봇 공학 및 자율 시스템과 관련된 분야에 1,600만 파운드 투자를 추진하였다. 또한 RAS 2020(2012), SIG(Special Interest Group)에서 영국의 경제 성장을 위한 산업 전략으로 로봇 공학 및 자율 시스템 관련 미래전략을 수립하였다. 주요 내용으로는 실생활에서 유용한 작업을 수행하여 역량 확장, 생산성 높이고 위험성 감소를 전망하며, RAS(Robotics and Autonomous Systems) 기술이 삶의 거의 모든 측면(고령화, 안전한 운송, 효율적인 건강 관리, 생산적인 제조 및 안전한 에너지 등)을 향상시킬 것이라고 예측하였다. 이러한 RAS는 영국의 산업 전략에 활력을 줄 수 있는 기술로 항공 우주, 농업, 자동차, 에너지, 건강, 제조, 해양 등 광범위한 산업에 적용 가능하다. 영국은 RAS 생태계를 강화하여 기술개발, 글로벌 경쟁사보다 앞서 시장에서 아이디어와 혁신을 만들고 테스트할 수 있도록 하는 것을 목표로 하고 있다.

표 19. RAS를 활용할 수 있는 7가지 산업

구분	주요 내용
무인 항공	· 충돌감지 및 방지 등 UAS (Unmanned Aircraft Systems) 기술로 비행 안전 향상 · 충돌 감지, 회피 시스템이 최우선 과제, 후속 과제로 자율성 중요
자율 해상 로봇	· 해저 인프라의 검사 및 조사를 위한 기술로, 자율성을 향상하여 로봇의 유지 보수에 적극적인 역할 수행 · 해저 검사, 수리 및 유지 보수, 항공기 블랙박스 검색 및 복구에 대한 혁신 촉진

22) Bundeswehr, M-ELROB 2010(WTD 51 AF110-Koblenz, 2010), pp.1~11.

23) 최미옥, '혁신성장동력 분야별 기술·산업·정책 동향 조사', 2020

핵 로봇	<ul style="list-style-type: none"> · 원전 폐기 비용이 20%가 되는 RAS 기술에 사용 · 핵분열 및 핵융합 수명주기의 모든 단계에는 RAS Tool과 기술이 요구 · 에너지 및 건설 부문의 지상 인프라(석유화학 시설, 풍력터빈 및 광업 등)에 광범위하게 적용 가능
자율 주행 자동차	<ul style="list-style-type: none"> · 유인 자동차와 안전하게 상호작용하고, 도로를 효율적으로 사용하여 시간 절약 · 향후 20년 동안 수송에 RAS를 사용할 경우 국가 비용 측면에서 피할 수 있는 경제적 이익은 약 1조 파운드 정도로 추산
미래 농장	<ul style="list-style-type: none"> · RAS를 농장에 적용하면 시간을 줄여 수확량과 품질에 유리한 경제적 영향을 주고, 효과적 에너지 사용, 비료 및 살충제 사용의 감소, 효과적인 토지 사용, 환경 영향 감소 및 작물 재배 시스템에 대한 이점 제공
우주 산업	<ul style="list-style-type: none"> · 최소한의 전력을 사용하여 극한 환경에서 작동하는 안정적인 자율 로봇 필요 · 까다로운 우주 과학 임무에 대한 RAS 적용은 지상 기술에 적용할 수 있는 첨단 기술을 개발할 수 있는 좋은 기회 제공
심부 채광	<ul style="list-style-type: none"> · 광물의 표면 채광이 빠르게 고갈되어 심층 채굴, 해저 채굴 및 재활용에 대한 의존도 상승 · 광산 심부 온도가 100°C가 넘어가는 조건에서 인간을 지원하는 비용은 총 채굴 비용의 60% 이상을 차지할 것으로 예상

6) 중국²⁴⁾

중국은 주로 공업용 로봇, 서비스 로봇 등의 연구개발을 통한 상품화와 응용 확대를 목표로 한 정책을 추진 중이다. 2015년 국무원은 ‘중국제조 2025(中国制造2025)’에서 로봇 분야 육성을 위한 계획을 발표하였다. 이는 자동차, 기계, 전자, 위험물 제조, 국방 군수, 화학 공업, 경공업 등 공업 로봇과 의료, 가사, 교육, 오락 등의 특수용 로봇의 연구개발을 다루고 있으며, 로봇의 표준화 및 모듈화 발전을 추진하고, 응용 시장의 확대를 목표로 하고 있다. 최근에는 로봇 본체, 감속기, 서브 모터, 제어기, 센서, 구동기 등 핵심 부품 및 시스템 통합 설계 제조 등의 기술적인 장애 극복을 위한 연구개발 중이 있다. 2016년 국무원은 ‘제13차 5개년 과학기술 혁신 계획에 관한 통지(十三五国家科技创新规划的通知)’에서 차세대 로봇 기술, 인간-컴퓨터 간의 협업 등의 기술을 연구개발 중이며, 공업 로봇의 산업화, 서비스 로봇의 상품화, 전문 서비스 로봇의 대량

24) 최미옥, ‘혁신성장동력 분야별 기술·산업·정책 동향 조사’, 2020

응용을 실현하기 위한 계획을 발표하였다.

표 20. 중국의 지능형 로봇 로드맵

		2020년	2025년	2030년	
목표		지식재산권을 보유한 공업로봇 및 관련 부품의 국내시장 50% 공급역 확보	지식재산권을 보유한 공업로봇 및 관련 부품의 국내시장 70% 공급역 확보		
		상용생산군 고장 간격(MTBF) 8만 시간 달성	세계 5위 안에 드는 1-2개 기업 육성		
		5개 이상 국제경쟁력을 갖춘 선도기업 육성, 5-8개의 로봇 지원산업군 육성			
중점상품	공업용 로봇	국산 중점기계를 자동차, 공업기계, 선박, 석유화학, 농기계, 신에너지 등 다양한 분야에서 대규모 적용	국산 공업로봇의 유연동작과 충돌 테스트 실험 및 로봇협업작업 시험, 로봇의 소형화, 유연화 실현	국산 로봇 연구개발 기술 보전 적용	
		국산 공업로봇, 자동도공반차(AGV)를 자동차, 가전, 의약, 물류 등 다양한면에서 대규모 적용	국산 도장로봇을 자동차, 가구, 선박, 항공 등 다양한면에서 대규모 적용		
		국산 가공로봇을 항공, 자동차, 목재용, 플라스틱 제품, 식품 등 다양한면에서 적용	제조업 공칭 중 연대, 판매, 도입 등 작업에서 국산 스마트 가공로봇 광범위하게 적용		
		자동차, 전기전자 등 영역에서 국산 조립로봇 시장 점유율 30% 달성	국산 조립로봇 항공, 직조기기 제조 등 업계에서 시장 점유율 60% 달성		
		로봇에, 병행 디스플레이 영역에서 국산 청소로봇 국내시장 점유율 70% 달성	국산 청소로봇과 조립 생산라인 국내 시장 점유율 이상 달성		
	서비스 로봇	가정 서비스 로봇 실내환경 인식, 자동이동, 온라인 상담 및 스마트 가전과 결합, 지시언어 이해 등 기능 탑재	가정 서비스 로봇 이동, 다기능분할, 안전작업, 자가학습, 초보 자연언어이해 등 기능 탑재, 비교적 핵심한 가사 노동 대체		가정 서비스 로봇 연건과 비순환 조작, 인간과의 공통 도구, 인간과의 자연교류(언어) 등 기능 탑재
		스마트 휠체어, 향상 등 노약자, 장애인 보조로봇의 상용화 및 시장 적용 실현	다가는 알과 스마트 휠체어, 향상 등 과 결합		안전한 행동모드, 의도이해, 인간과의 자연교류 등 기능 실현, 노인과 장애인 보조로봇 산업화

표 21. 중국의 드론 관련 주요 정책

구분	관계 부처	정책
2009	민용항공국	· 민용 드론 관리문제 관련 잠정 규정
2009	민용항공국	· 민용 드론 공중교통 관리방법
2010	민용항공국	· 일반항공 발전 가속화 관련 조치
2010	민용항공국	· 일반항공 민간공항 수수료표준 발표 관련 통지
2010	국무원	· 국무원의 전략적 신흥산업 육성 및 발전 가속화 관련 결정
2010	국무원	· 국가 12차 5개년 발전계획
2010	중앙군위공중교통관리위원회	· 중국 저공 공역 관리개혁 심화 관련 의견
2011	민용항공국	· 민간항공 발전 12차 5개년 발전계획
2011	민용항공국	· 중국민용항공국 규정 입법 후 평가 규정
2012	공업정보화부	· 첨단장비제조업 12차 5개년 발전계획

2012	국무원	· 12차 5개년 국가 전략적 신흥산업 발전계획
2012	국무원	· 민간항공업 발전 촉진 관련 일부 의견
2012	민용항공국	· 일반항공 발전 전문프로젝트 자금관리 잠정방법
2013	국무원	· 민간항공업 발전 촉진 중점사업 분업방안
2013	국무원	· 민간 무인조종 항공기시스템 조종사 관리 잠정규정
2014	민용항공국	· 민용무인조종항공기시스템 조종사 자격관리 문제 관련 통지
2014	민용항공국	· 저공 공역 사용관리 규정(시행)
2015	민용항공국	· 경량형 드론 운행(시행) 규정
2016	국무원	· 일반항공업 발전 촉진 관련 지도 의견

또한, 13차 5개년 국가과학기술혁신계획(‘16~’20)에서 중국 경제발전 목표와 방향성을 제시하였다. 이는 중국 제조업 업그레이드, 전략적 신흥산업 육성, 서비스업 발전 등을 주요 주제로 하고 있으며, 12대 전략적 신흥산업으로 로봇을 선정하여 기술 상용화(공업용, 수출용, 군용 로봇을 적극 개발, 정밀 감속기, 고속·고성능 제어기 등 부품 자율화) 추진을 주요 목표로 하고 있다. 나아가 미래 지향적 인간-로봇-사물 융합의 정보과학 등 국가 중대 전략 임무에 초점을 맞추고 있다. 한편, 중국은 민수용 드론에 대한 기술과 품질 표준 부재로 민수용 드론에 대한 경쟁 기준과 성능보장 저하에 따른 드론산업 육성정책을 시행하였다. 2009년 이전에는 드론에 대한 감독규제가 전혀 없는 상태로, 2009년부터 자격증을 받는 비행단계에 진입하기 시작하였다. 그 후로 2009년 ‘민수용 드론 공중교통 관리방법’, 2013년 ‘민수용 무인조종 항공기시스템 조종사 관리 잠정규정’, 2016년 ‘일반항공업 발전 촉진 관련 지도의견’ 등을 발표하여 드론산업의 육성을 도모하고 있다.

6) 일본²⁵⁾

일본은 국방 무인체계 중 지능형 로봇에 대한 연구개발부터 상용화까지 전주기에 대한 지원, 인프라 구축, 연구개발 지원을 추진 중이다. 2017년 ‘AI 산업화 로드맵’에서 AI 로봇 관련한 로드맵을 수립하여 기술개발부터 상용화까지 전주기에 해당하는 계획 수립 및 ‘인공지능에 관한 글로벌 연구 거점 정비사업’을 통해 로봇 관련 연구개발 투자 계획을 공표하였다. 또한 실제공간을 재현한 실험 환경을 연구자 및 기업에 제공하고

25) 최미옥, ‘혁신성장동력 분야별 기술·산업·정책 동향 조사’, 2020

영상 데이터, 센서정보, 기계 학습 및 강화 학습 등을 AI 기술로 해석하도록 약 130~140억 엔을 투자한 바 있다.

표 22. 일본의 미래투자전략 5대 신성장 전략 중 이동혁명 실현

구 분	주요 내용
선도적 실증	<ul style="list-style-type: none"> · 트럭 대열 자율주행 실현 (2020년 고속도로에 무인으로 대열주행 실현, 2022년에 상업화 목표) · 지역에 무인자동주행에 의한 이동서비스 실현(2020년 실현을 목표로 전국 10개소 이상의 지역에서 실증) · 소형무인기(드론)에 의한 물품배송의 실현
데이터의 전략적 수집·활용, 협조영역의 확대	<ul style="list-style-type: none"> · 고도 정밀 3차원 지도 작성(25cm 단위)을 위한 사양 및 시스템 책정 · 5G의 실현, 자율주행 등에 활용 · 사이버 테러 대응을 위한 차량 보안 강화
국제적 제도 경쟁을 위한 제도 정비	<ul style="list-style-type: none"> · 레벨 3이상 자율주행에 대한 지도정비의 방침 책정(시스템에 의한 운전, 도로교통법, 책임관계 등)



그림 51. 일본의 AI 산업화 로드맵 중 생산성 분야로드맵

또한 '제5기 과학기술기본계획('16~'20)을 통해 일본 문부과학성은 과학기술 진흥에 관한 기본계획을 발표하였고, '초 스마트 사회'실현을 향한 공통기반기술과 인재 강화(IoT, 빅데이터 해석, AI, 사이버 시큐리티, 센서, 로봇 등) '미래투자전략 2017('16)',

미래성장동력을 위한 '미래투자회의'의 신설을 비롯하여 이동혁명실현을 신성장 전략으로 육성하기 위한 추진계획을 발표하였다.

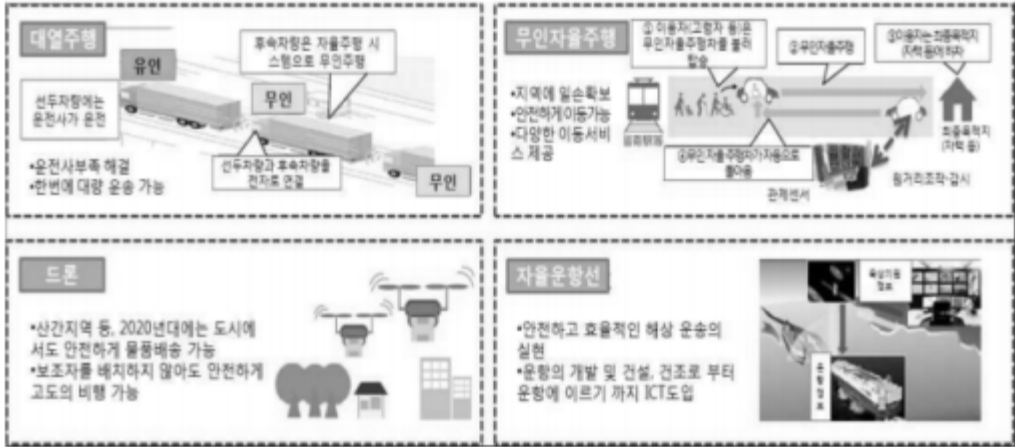


그림 52. 일본의 이동혁명의 실현

8) 이스라엘

이스라엘은 세계에서 가장 구체적인 국방 로봇 운용개념을 설정하고 기획단계에서부터 군의 요구능력에 맞춰서 동일 플랫폼에서 구동방식 및 탑재장비를 구체화하고 있는 것으로 나타났다. 2025년까지 전위부대는 무장로봇을, 전투주력은 유인체계로 운용하고, 무인수송대를 운용하는 개념의 로봇운용 교리를 정립함으로써 가장 실질적인 로봇운용 개념과 개발계획을 추진하고 있는 것으로 나타났다.²⁶⁾ 이스라엘은 미국의 경우처럼 국방 로봇 획득과 관련한 법령이 없으나, 다음과 같은 이유로 인하여 국방 로봇 획득이 활성화되고 있다.

첫째, 로봇 경쟁 업체끼리도 국가이익을 위해 긴밀한 협조를 하고 있다. 대표적인 사례로 이스라엘 대기업 방산업체인 Elbit System과 IMI(Israel Military Industry)사 및 이스라엘 항공우주산업(IAI : Israel Aerospace Industries)을 중심으로 이스라엘 방위사업부의 지원 아래 산·학·연·관의 조인트 벤처 G-NiUS를 설립하였다. 동 사는 2008년에 국경선 감시 로봇인 'Guardium'을 개발하여 이스라엘군과 텔아비브 공항에 납품하였고, 2016년에 다목적 로봇인 'Border protector'를 이스라엘군에 납품하였다.

둘째, 이스라엘의 로봇 개발자들은 저가의 국방 로봇 개발에도 심혈을 기울이고 있

26) 김진오, 엄홍섭, 장상국, 김울희 공저, 「미래전의 희망 국방 로봇」, 2018.10 참조.

다. 이스라엘은 대부분의 방산 장비와 부품을 국내에서 개발하고 있지만, 오랜 개발 기간과 고가의 개발비용이 소요될 경우는 외국의 상용 장비와 부품을 활용하여, 군의 사용자 요구인 작전요구성능 충족, 신속 개발, 저가 개발 등을 충족시키고 있다. 대표적인 사례가 국경선 감시 로봇인 ‘Guardi-um’ 개발 시 플랫폼은 이미 산악과 모래 지역에서 신속한 기동이 검증된 미국산 스포츠카를 사용하였고, G-NiUS사에서는 이를 무인화하고 자국산 센서들을 사용하였으며, 자국에 없는 기술은 이스라엘 대학과 협조하여 개발을 하고, 소프트웨어는 사용자 요구에 맞게 개발하여 시스템을 통합시켜 단기간에 저가로 개발하였다.

셋째, 이스라엘 로봇 개발자들은 도전정신과 창업정신이 매우 강하다. 이스라엘 공과대학 졸업자들의 80~90%가 창업에 도전을 하고, 교수의 절반이 투잡(two job)을 가질 정도로 도전정신이 뛰어나다.²⁷⁾ 이스라엘 정부는 1995년 국방부에 무인기(UAV)과, 지상로봇(UGV)과, 무인기동(UMV)과 편성을 승인하고, 이들로 하여금 국방 로봇의 소요기획과 획득을 전담하도록 하고 있다. 지상로봇(UGV)과에서는 국방 로봇을 개발할 산·학·연을 미리 지정하고, 당해 연도부터 향후 10년 간을 대상기간으로 하는 UGV 로드맵을 매년 작성한다. 이스라엘의 국방 로봇 시험평가는 대부분 군 훈련장에서 수행하지만, 실전에서의 시험평가를 더욱 중시하고 있다. 예를 들면 2008년에 국경선 감시 로봇인 ‘Guardium’을 획득하기 전에 실제 국경선에서 개발 및 운용시험 평가를 통합하여 2015년까지 약 7년간 동안 6만 시간을 국경선 감시 임무를 수행하면서 제기된 성능개량 소요를 반영하여 ‘Border Protector’를 개발하였다.

9) 국내²⁸⁾

최근 국방부는 2023년 ‘국방 무인체계 발전계획’을 통해 일련의 추진계획을 발표하였다. 동 계획은 일원화된 무인체계 발전을 위해 각 군 및 기관별 추진사항을 통합하고, 조정·통제하기 위한 국방부의 컨트롤 타워 역할이 필요하다는 배경에서 수립되었다. 또한 유·무인 복합 전투체계 운용의 핵심인 지·해·공 무인체계 간 협업임무 수행, 합동성 보장 등 효과적인 운용을 위해 기반체계(상호운용성, 주파수, 보안, 통합관제 등) 구축은 필수요소로 보고 있다. 나아가 개방·융합형 기술개발체계 확립 및 선택과 집중을 통해 빠른 기술발전 속도에 대응한 핵심기술 개발을 추진하고, 미래 전장을 주도할 신개념 무기체계의 신속한 전력화를 위해 시범부대운용, 획득제도 개선 및 민·군 협력 추진이 필요하다고 밝혔다.

27) 중앙일보, “이스라엘 공대생 80~90% 창업도전, 교수도 절반이 투잡”, 2012.02.08.

28) 최미옥, ‘혁신성장동력 분야별 기술·산업·정책 동향 조사’, 2020

국방부는 동 계획을 토해 국방 무인체계 발전을 위한 비전과 계획을 제시하였다. 국방 무인체계 발전을 통한 AI 과학기술강군 육성이라는 비전 아래 미래 전장의 핵심 전력으로 국방 무인체계발전 기반 조성을 핵심 목표로 삼았다. 이를 위한 중점 추진과제는 ① 기반체계구축 (6개 세부과제, 18개 과업), ② 기술개발 및 표준화 추진 (3개 세부과제, 6개 과업), ③ 전력화 추진 (3개 세부과제, 6개 과업) 등 3개 분야, 12개 과제, 30개의 과업을 제시하였다.

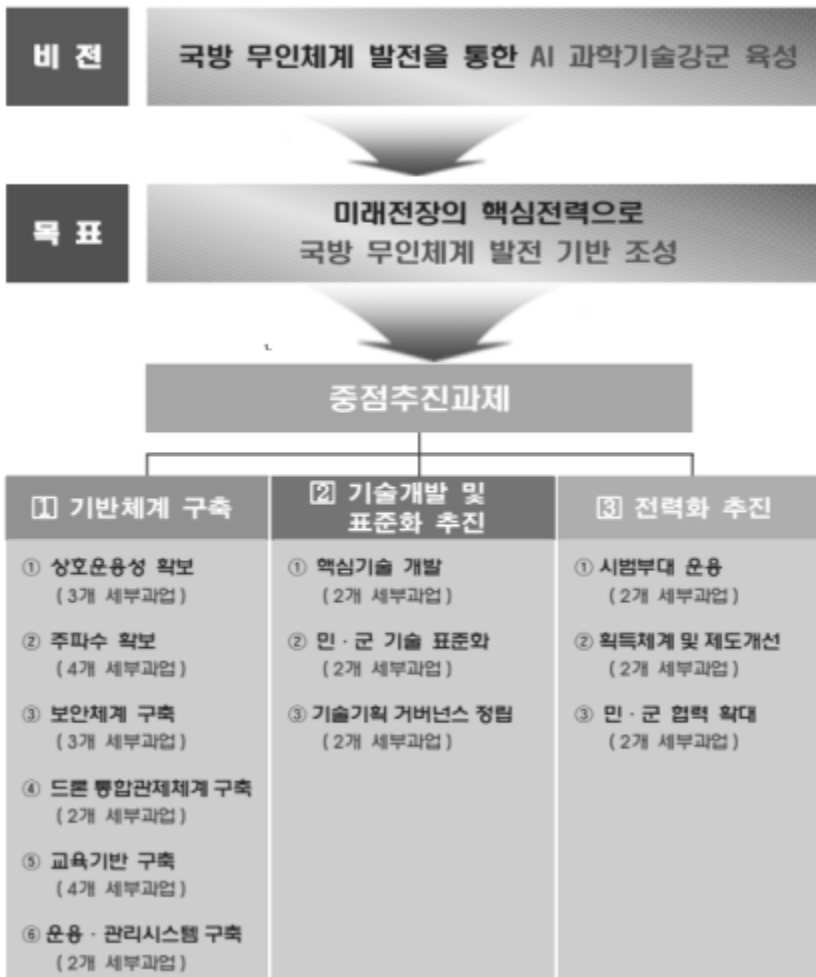


그림 53. 국방 무인체계 비전 및 발전계획

국방 무인체계 중 본 연구과제와 가장 밀접한 지상 로봇에 대한 정책동향을 세부적으로 살펴보았다. 우리나라 로봇산업 지원정책은 2009년 지능형 로봇개발 및 보급 촉진법에 기초를 두고 있다. 이를 기초로 2009년과 2014년에 각각 지능형 로봇 기본계획

획을 수립하여 오늘에 이르고 있다. 크게 연구개발과 수요확산, 성장기반 구축의 3개 분야를 중심으로 로봇관련 핵심공통기술 및 제품기술 개발 지원, 로봇 시범보급사업, 상설 전시회, 체험관 등을 통한 수요견인 및 신시장 창출 그리고 로봇산업진흥원 설립(2010. 6)을 통한 정책지원 제도화와 인력양성, 인증제도 등 산업 활성화 인프라 조성에 노력해 오고 있다. 국방 분야에서 우리나라는 미국과 같은 국방 로봇관련 법령은 없지만 국방 로봇의 연구개발을 지원하는 민·군 겸용기술사업촉진법을 기초로 관련기술 개발 과제를 수행하여 왔다.

우리나라 군의 국방 로봇에 대한 연구는 2003년 국방부 기술혁신단이 국방 로봇 종합계획을 국방과학연구소로 의뢰하면서 관심을 갖게 되었다.²⁹⁾ 2013년 국방 로봇 분야가 국정과제의 하나로 선정되면서 본격적으로 투자가 확대되었다. ‘무인로봇을 활용한 신무기체계 투자 확대’를 목표로 국방과학 과 민간과학의 융합을 적극 추진 중이다. 같은 해 9월에는 합참에서 국방 로봇 3개 과제가 중장기 소요로 확정되어 본격적인 국방 연구개발 사업으로 추진되고 있다. 서울대학교에 ‘생체모방 자율 로봇’³⁰⁾ 국방특화연구센터가 설립되는 등 준비가 본격화되고 있다. 생체모방로봇³¹⁾은 국방이 가장 큰 수요처로서 현재 민간부처에서 진행하고 있는 기초·원천 기술을 이용하여 국방 분야에서 국방 임무에 맞는 플랫폼을 개발할 필요가 있다. 향후 국방 로봇이 우리 군에 확대·보급되고 외국에 수출하기 위해서는 국방 로봇관련 법령을 제정하고 조직을 구비하는 것이 중요하다. 주요 국가별 국방 로봇 관련 법령과 조직을 비교해 보면, 선진국의 경우는 정부에서 국방 로봇을 처음 군에 도입할 때 해외구매가 아닌 국내에서 개발한 국방 로봇을 획득하는 정책을 수립하였다. 특히 미국은 국방 로봇 획득과 수출 활성화에 필요한 관련 법령을 제정하였다. 그리고 관련 법령이 없는 국가라도 국방 로봇은 반드시 국내에서 개발하여 자국 군에 보급하겠다는 의지가 강하다고 평가된다. 그동안 우리 군에서 운용 중인 국방 지상 로봇들은 선진국에 비해 극히 소량이고, 그나마 대부분의 로봇을 외국에서 수입하였다. 외국에서 수입한 국방 로봇들의 경우 물량이 소량이고, 또한 이 로봇들도 일부는 군 납품 전에 전투실험을 통한 사용자 요구의 충족 여부에 대한 사전검증이 없었기에 사용자들로부터 외면을 당하여 국방 로봇시장이 형성되지 못한 결과를 초래하였다.

29) 김진오, 엄홍섭, 장상국, 김윤희 공저, 「미래전의 희망 국방 로봇」, 2018.10 참조.

30) 생체모방로봇은 신기술로 세계시장은(의료부문 제외) 2029년까지 약 70억 달러 규모에 달할 것으로 전망됨. Persistent Market research, Non Medical Biomimetric Robot Market, 2018.

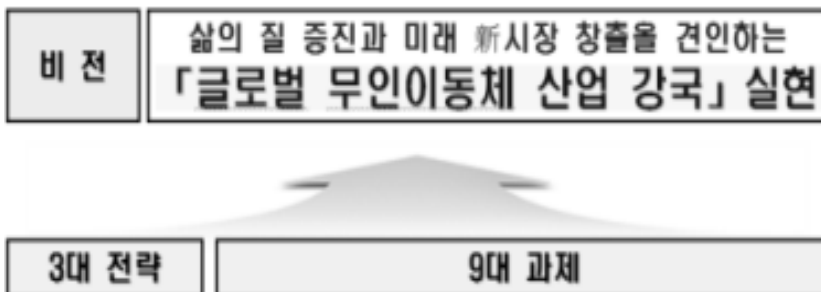
31) 기술이 성숙되기까지 10~15년이 소요되므로 국방 분야에서 기술로드맵을 세워 민군협력하에 장기적으로 개발하는 것이 바람직하다고 판단됨.

방위사업청(2017)에 따르면, 국방 로봇과 관련한 체계개발 사업은 무인수색차량, 폭발물 탐지·제거로봇 사업 등이 진행 중이며, 향후 무인수상정 등 다양한 사업이 진행될 예정이다. 주목해야 할 연구개발 사업으로는 민군기술협력 사업을 통한 무인수상정 시범운용 사업을 들 수 있다. 이는 국방 로봇관련 민수 또는 국방에서 기 성숙된 기술을 활용한 시제품을 제작하여 일정기간 소요군의 시범운용 및 시연(demonstration)을 통한 운용개념 정립 및 소요창출 등을 위해 추진된 점에서 유용한 방식으로 평가된다. 특히, 미국의 업체자체 R&D 프로그램인 IR&D 사업 방식과 유사하여 업체의 자체 R&D 투자를 유도, 정부 예산 효율화에도 기여할 수 있으며, 해외 수출을 고려한 제품개발 등도 보다 유연하게 추진할 수 있다는 점에서 주목할 만하다고 판단된다. 우리 군에서 활용 가능한 국내 로봇제품들은 전력화 이후에 까다로운 4계절 전투실험과 체계개발 이후 좀더 까다로운 시험평가를 받으면서 최종적으로 우리 군에 납품되므로 대상과 수량이 제한될 수도 있다. 그러나 국내개발 국방 로봇이 우리 군에 납품을 하면, 동남아를 포함한 외국에 수출이 용이하므로 2020년 이전에 서서히 국내 국방 로봇시장이 형성될 수 있다고 사료된다. 다음은 국방 무인체계 발전 전략과 연계한 정부부처의 행보를 정리하였다.

가) 무인이동체 기술개발 및 산업성장 전략 (‘15.5. 과기자문회의)

무인이동체를 ‘외부환경을 인식하고 스스로 상황을 판단하여 이동하거나 필요시 원격조정으로 동작이 가능한 이동체’라는 최초의 정의를 포함한 전략으로 급성장하는 시장에 선제적으로 대응하기 위해 기술 제도 인프라를 아울러 마련한 최초의 전략이다. 동 전략에서는 전략제품 시장경쟁력 강화, 미래선도 기술력 확보, 성장지원 제도·인프라 구축을 포함한 3대 전략 및 9대 과제를 포함하고 있다.

표 23. 무인이동체 기술개발 및 산업성장 (비전·전략)



전략제품 시장경쟁력 강화	① 무인기 시장 성장동력 확충
	② 자율주행자동차 글로벌 경쟁력 강화
	③ 무인 농업·해양건설 산업화 촉진
미래선도 기술력 확보	① 무인이동체 공동기술개발
	② 차세대 무인이동체 원천기술개발
성장지원 제도·인프라 구축	① 법·제도 정비 및 확충
	② 실증 및 테스트 지원
	③ 주파수 분배 및 기준 마련
	④ 범국가적 추진체계 구축

무인이동체는 기술특성상 기업들이 모든 것들을 다 개발할 수 없는 만큼, 정부가 공동기술·미래기술을 개발하고 다양한 융복합 서비스를 발굴하여 지원해야 하고, 출연연과 부품기업이 협력하여 기술을 개발하고 중소 드론기업에 대한 기술이전 및 지원이 필요하다. 이러한 무인이동체는 육상, 항공, 해양 등 다양한 분야를 포괄하고 있다.

표 25. 무인이동체 구분

구분	항목	주요내용
육상	자율주행자동차	 - 인위적 조작 없이 목표지점까지 스스로 주행환경을 인식·운행할 수 있는 자동차
	무인 농기계	 - 무인트랙터, 무인 제초·수확기 등 농업에 활용되는 무인이동체
	PM (Personal Mobility Vehicle)	 - 미래 개인맞춤형 이동수단 - 교통약자, 단거리 이동
	AGV (Automated Guided Vehicle)	 - 실내에서 물류, 공장 자동화 등에 활용
	기타	 - 건설·임업·경비·군용 자율·작업차량 등
항공	군용 무인기(드론)	 - 군사 정찰, 공격, 수송 등에 사용하는 무인항공기
	민수용 무인기(드론)	 - 공중촬영, 농업용, 물품수송 등에 활용되는 무인항공기
	취미용 무인기(드론)	 - 개인오락용, 인물촬영용 등에 활용되는 소형 무인항공기
해양	USV (Unmanned Surface Vehicles)	 - 해양 감시정찰, 조사, 구난방재 및 군사용에 사용되는 무인선박
	수중 무인체(UUV*) * Unmanned Underwater Vehicles	 - 건안중로 위치조정, 전력공급, 통신 등 원격 조정하는 잠수정(ROV*) * Remote Operated Vehicles
		 - 무인자율잠수정(AUV*) * Autonomous Underwater Vehicles

무인이동체의 구현기술은 ‘지능화 기술’과 ‘네트워크 운영기술’로 구분되며, 일반적으로 지능화 기술은 인지, 판단 및 제어를 포함하고, 운영기술은 통신·보안을 의미한다.

표 26. 무인이동체 구현 기술

구분		주요내용
지능화	인지	주위환경 정보를 전기적 신호로 전달해 주는 기술 * 예) 위성·관성항법, 센서(레이더, 라이더, 영상센서 등)
	판단 및 제어	인식된 정보를 바탕으로 목적수행을 위한 판단을 자율적으로 하고 이를 정확하고 효율적으로 수행하는 기술 * 예) 연산제어 전자회로, 탐지 및 회피가감속 SW 알고리즘, 자세제어 부품, HVI(Human-Vehicle Interface) 모듈 등
운영	통신·보안	무인이동체와 관제센터 간, 무인이동체 간, 유·무인이동체 간 정보교환을 빠르고 안전하게 수행할 수 있는 기술 * 예) 지상위성 제어용 통신, V2V(이동체간) 통신, SW 보안 프로토콜 설계 등

나) 무인이동체 발전 5개년 계획 (‘16.6. 국가과학기술심의회)

「무인이동체 기술개발 및 산업성장 전략」의 후속조치로 관계부처 합동으로 향후 5년간(‘16~’20)의 세부 추진계획을 수립하여 체계적인 정부 투자 및 지원체계를 마련하였다. 동 계획에서 제시한 국내 무인이동체 산업에 대한 SWOT 분석결과에 따르면, ‘강점’은 ① 무인기 선도 기술 확보(항우연 틸트로터1) 세계 2번째 개발), ② 완성차 분야에서 세계적인 대기업 및 경쟁력 보유, ‘약점’은 ① 분야별(육해공)로 개별적으로 개발, ② 핵심부품기업과 전문중소 기업의 부재 및 영세성, ③ 다양한 관련 규제 존재, ‘기회’는 ① 무인이동체 민수시장2)의 활용분야 확대, ② 발전된 ICT 기술, 5G 기반 인프라, ‘위협’은 ① 중국기업의 저가 취미용 무인기시장 공세, ② 실증 인프라 부족으로 기업 제품개발에 한계라고 밝혔다. 나아가 무인이동체에 대한 통합적 접근, 분야별 생태계 조성을 통한 시장경쟁력 제고, 효율적 추진체계 구축 등의 3대 전략과 11개 세부과제를 제시하였다.

표 27. 무인이동체 발전 5개년 계획 (비전·전략)

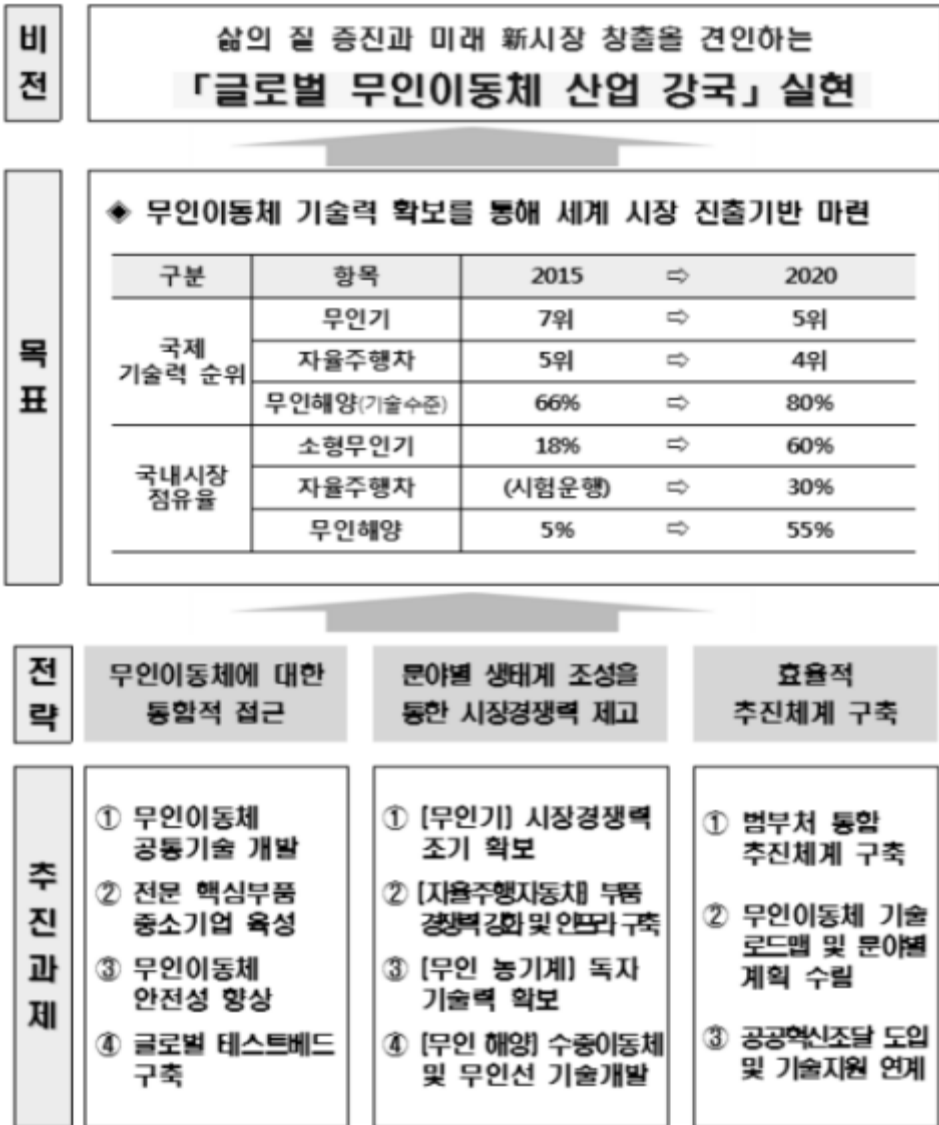


표 28. 관계부처 무인이동체 정책 과제

□ 미래부

- 무인이동체 미래선도 핵심기술개발사업(미래부)
- 무인이동체 원천기술 개발사업(미래부, 예타)
- 무인이동체사업단 운영(미래부)

- 가이드라인 마련(미래부)
- 무인이동체 통합 테스트베드 구축 계획 수립(미래부)
- 무선데이터 통신용 비면허 주파수 추가분배(미래부)
- 무인기제어전용주파수(위성)(미래부)
- IT·SW융합산업원천기술개발사업(미래부)

□ 산업부

- 항공우주부품 기술개발사업, 안전편의 서비스용 스마트드론 기술개발 사업(산업부)
- 자율주행자동차 핵심기술개발사업 추진(산업부)
- 자동차융합 얼라이언스 운영(자율주행자동차)(산업부)
- 정책자금가이드라인제정(미래부/산업부)
- 유망 분야 무인기 실증·확산 사업(산업부)
- 안전·편의서비스용 스마트드론 활용기술 기반구축사업(산업부)
- 로봇항공기 경연대회(산업부)
- '드론쇼 코리아' 전시회 및 컨퍼런스(산업부)
- 자동차산업 핵심기술 개발사업(산업부)
- 대구주행시험장 첨단운전자지원 테스트베드 구축(산업부)
- 110kW급 자율주행 트랙터 개발(산업부)
- 다목적 농작업이 가능한 자율 농기계 플랫폼 및 실증 모델 개발(산업부)
- 고속수직이착륙 무인항공기 핵심기술개발(산업부, 예타)

□ 국토부

- 자율주행차 안전성 평가기술 개발(국토부)
- 안전관리 대상 완화(국토부)
- 앱 서비스 추가개발(국토부)
- 드론 길을 위한 3차원 정밀지도 구축(국토부)
- 교통물류연구사업(첨단교통분야)(국토부)
- 스마트 자율협력주행 도로시스템 개발(국토부)
- 도심지 교차로 혼잡해소를 위한 지능형 신호시스템 개발(국토부)
- 클라우드 기반 통합 모빌리티 실증기술 개발(국토부)
- 자율주행자동차 실험도시(K-City) 구축(국토부)
- 국가기본도 수정갱신 및 제작사업(국토부)
- 무인비행장치 활용 신사업 분야 안전성 검증 시범사업(국토부)

□ **농식품부**

- 무인제초기 실용화사업(농식품부/농진청)
- 무인기 영상기반 농경지 관측 및 작황평가 기술 개발(농진청)
- 정밀농업 구현을 위한 한국형 농업로봇시스템 개발(농식품부, 농진청)
- 농업생산 무인자동화 연구센터(농식품부)
- 첨단농기계 작업 검정기준 마련(농식품부)

□ **해수부**

- 해양개발용 수중건설로봇 개발사업(해수부)
- 수중로봇 개발 다각화 및 수중건설로봇 실용화 사업(해수부)
- 다목적 지능형 무인선 국산화 개발 (해수부)
- 무인선, 무인 수중로봇 운용 지원용선박 구축(해수부)

□ **방사청**

- 복합임무 무인수상정 개발(방사청)

□ **관계부처 합동**

- 국민안전감시 및 대응 무인항공기 융합시스템 구축 및 운용(안전처, 산업부, 미래부, 경찰청)
- 고신뢰성 다중 무인이동체 통합운영체계 구축(국토부, 미래부, 해수부)
- 저고도 드론(무인비행장치) 교통관리체계 개발 및 실증(국토부, 미래부, 경찰청)
- 농업용 무인기 개발(농식품부, 산업부)
- 국가 종합 비행성능 인프라 구축사업(산업부, 국토부)
- 자율주행자동차 법·제도 개선(미래부, 산업부, 국토부 등)
- 성능시험평가 테스트 베드 구축(해수부, 산업부)
- 무인선용 통신 주파수 할당 추진 및 운용계획 수립(해수부, 미래부)

다) 무인이동체 기술혁신과 성장 10개년 로드맵 ('18. 과학기술정보통신부)

차세대 무인이동체분야 기술개발 설계도로써 향후 10년간의 R&D 추진방향을 제시하였다. 로드맵에 따르면 국내 기업 대부분 영세한 중소·벤처기업으로 '16년 세계시장 점유율은 2.7%에 불과하고 원천기술력은 세계 최고 수준대비 60%, 고부가가치 핵심제품은 전량 해외수입에 의존하고 있음을 밝혔다. 따라서 육해공의 상이한 운용환경과 다양함 임무영역에도 불구하고 탐지, 통신, 지능화 등 무인이동체에 공통으로 필요한 핵심기능(공통 요소기술) 개발의 필요성을 강조하였다.

표 29. 무인이동체 6대 핵심기술

구분	주요내용	관련부품 및 기술
탐지·인식 (Sensing and Perception)	이동체 위치, 운동 상태와 지형, 장애물을 탐지해 인식하는 기술	-항법센터(영상, GPS, INS, 초음파) -임무센서(영상, IR, LIDAR, RADAR) -인식알고리즘 및 SW
자율기능 (Autonomy)	인식된 상황, 환경을 바탕으로 스스로 이동하여 임무 수행	-상태진단 및 예측 -임무계획 수행 및 자율판단 -자율(비행, 운항, 항행) 제어 및 항법 -다중개체 협력 -인공지능을 통한 사물/지형/개체 분류 -디지털 맵 생성 및 태깅(Tagging)
인간기계 교감 (Human-machine Interface)	무인이동체를 조종하고 활용하기 위한 장비 및 관련 기술	-원격조종(지상콘트롤, 가상증강현실) -시뮬레이터(개발, 조종, 훈련) -무인체 활용기술(문화)
통신·네트워크 (Connectivity)	무인이동체 간 통신기술 무인이동체와 보안 네트워크 연결	-통신장비(모뎀, 송수신기) -통신 인프라 -통신·네트워크 보안기술
동력원·이동 (Mobility&Power)	이동에 필요한 에너지원, 동력장치, 구동장치 및 작업장치 및 관련기술	-에너지 저장(배터리, 연료전지) -동력장치(모터, 엔진) -구동장치(헬, 프로펠러, 스크류) -작업장치(짐벌, 매니퓰레이터)
시스템통합 (System Integration)	무인이동체 통합에 필요한 HW, SW 체계, 설계 개발, 시험평가 기술	-운영체계(OS) 및 S/W 아키텍처 -모듈 부품, 공통 부품, 상호운용성 -설계 최적화, 시험평가

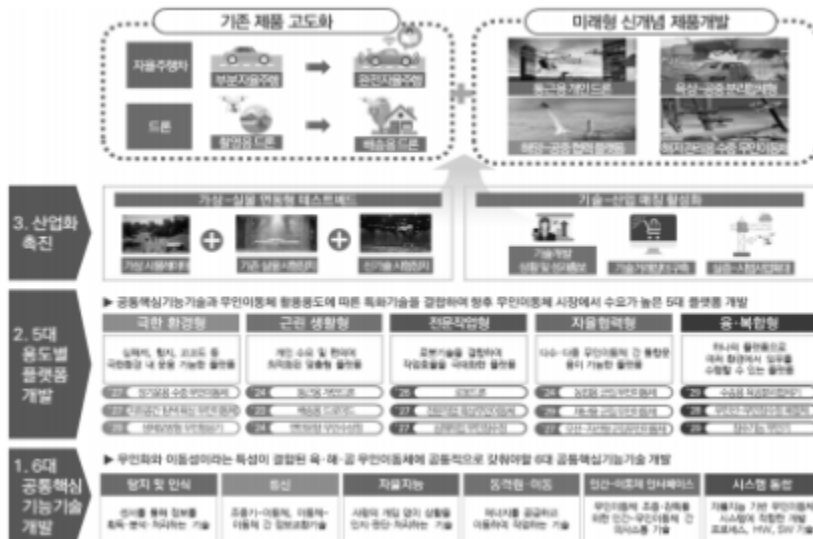


그림 54. 무인이동체 기술혁신과 성장 10개년 로드맵

라) 4차 산업혁명 대응계획 (17. 관계부처 합동)

무인이동체 차세대 시장 선점을 위한 원천기술 개발과 초기 시장 창출 지원을 주요 골자로 하고 있는 계획으로 주로 무인이동체와 관련한 구체적인 기술개발 목표를 담고 있다. 먼저, 육·해·공 무인이동체 6대 공통원천기술(① 탐지 및 인식, ② 통신, ③ 자율지능, ④ 동력원 및 이동, ⑤ 인간-이동체간 인터페이스, ⑥ 시스템 통합) 및 차세대 플랫폼 개발을 위한 원천 기술개발 예타 기획('18~)을 추진하였고, 국내 무인이동체 기업의 초기판로 개척 추진의 일환으로 공공혁신조달 연계를 위한 기술개발 시제품의 우수조달품목 인증 등을 추진('18~)하였다.

한편, 자율주행 차량 기술개발과 상용화를 위해 2020년 고속도로 준자율주행차 상용화를 목표로 삼아 고령자·장애인 등 교통약자 배려 및 자동차 신시장 선도를 비전으로 밝혔다. 이를 위해 첫째, 고해상도 카메라·레이더·라이다 등 9대 핵심부품, 자율주행 SW, 통신 및 보안 등 자율주행차 핵심기술 개발('17~'22)을 추진하였고, 둘째, 테스트베드 'K-City(경기 화성에 32만㎡규모로 고속도로, 도심, 교외 등 5개 실제 환경을 재현한 실험도시)' 조기 구축('18) 및 첨단도로시스템 'C-ITS(자율주행 안전 및 효율성 향상을 위한 자율협력주행 도로시스템)', 정밀도로 지도, 정밀GPS 등 종합적 인프라 구축('16~)을 추진하였다.

드론 분야에 있어서는 국내 드론 산업의 경쟁력 확보를 위해 생애주기 맞춤형 지원을 내세워 비행 안정성, 장시간 비행, 탑재장비 등 핵심 요소기술 조기 확보 및 정밀 농업, 에너지 등 인프라 점검 등 융합형 실용화 기술 개발 계획을 밝혔다. 이를 위해 첫째, 교통관리체계(~'21), 미래형 자율비행항공기 개발(~'22), GPS 보정시스템(~'22) 등 시장 선도 기술 개발(~'22)을 추진하였고, 거점별 드론 비행시험장*(~'17~'22), 국가 종합비행시험장(고흥, '21) 등 선진국 수준의 시험·인증 인프라 확충(~'22)을 추진하였다. 또한 공공수요 창출(5년간 3천여 대), 야간·가시권 밖 비행 허용을 위한 특별승인제 및 공익·긴급목적의 드론 비행 특례 등 하위법령을 정비('17.11)하였다.

스마트 선박 분야는 항로로 항해하는 자율운항선박의 조기도입 기반 조성을 목표로 하여 안전운항(충돌회피)·경제운항(최적항로) 등 핵심시스템('19~'21)과 친환경·스마트 관련 핵심기자재('19~'22) 개발 및 테스트베드 구축('21~'22)을 추진하였고, 제어·관리시스템 개발 등 항만 플랫폼 고도화('19~'20) 및 보안체계 구축('21~'22), 관련 법제도 개선(~'22)을 진행하였다.

10) 소결론

우리나라는 무인체계에 대한 기술개발과 상용화를 추진하기 위해 지속적으로 다양

한 노력을 기울여왔다. 기술개발은 대부분 정부주도의 전략 및 계획 공사와 함께 R&D 사업을 통해 이루어졌고, 단기간 내 우수한 성과를 선보였다. 이는 주요 선진국들이 ‘민간 주도 - 정부 지원’의 구조를 띠는 반면, 우리나라는 ‘정부 주도 - 민간 참여’의 형태로 추진되는 정부 정책의 차이에서 기인된 것으로 판단된다. 앞서 밝힌 바와 같이 단기간 내 급격한 성과를 낼 수 있다는 장점이 명확하지만 이로 인한 부작용도 적지 않다. 먼저, 하드웨어 위주의 무인체계 기술개발 의존도가 높아 정작 이를 운용하기 위한 소프트웨어와 아키텍처는 미진한 상황이다. 이를 군사적 관점에서 바라보면, 체계통합과 체계 간 상호운용성, 그리고 합동작전 및 유무인복합전투를 하기 위한 공통 소프트웨어 및 아키텍처가 마땅치 않아 작전적 효용성을 달성하기 어려운 실정이라고 바꿔말할 수 있다. 둘째, 정부 주도 R&D 사업의 한계점으로 사업기간이 종료되면 추동력이 잃어버린다는 점이다. 전 세계적으로 무인체계에 대한 기술은 급진적으로 진보하고 이를 운용하기 위한 인재양성, 그리고 진화적 R&D 등 사후관리가 중요한 요소이나 온전히 이루어지고 있지 않은 실정이다. 셋째, 국내 대부분의 군사용 무인체계는 국방 R&D를 통해 이루어지는 것보다 민간에서 개발이 이루어진 체계를 군으로 도입되는 형태로 이루어져 왔다. 특히, 무인체계의 소형화 추세에 따라 이러한 행태는 가속화되고 있다. 드론을 대표적인 예로 들 수 있는데 전력지원체계의 대부분은 상용품 구매 후 전력화라고 해도 과언이 아닐 정도다. 물론, 민간의 우수한 기술을 신속하게 도입하여 전력화할 수 있다는 크나큰 장점이 있지만 결국 국방 자체 역량 확충의 관점에서는 불안함이 상존하는 것 또한 사실이다.

본 연구가 목표로 하는 ‘전장에서 무인체계 실시간 제어(통제)기법 연구’도 이러한 현실을 피할 수 없다. 전장에서 활용되는 무인체계 대부분이 앞선 문제점들을 내포하고 있기 때문에 이를 온전히 제어·통제하기 위한 기법 또한 기술·정책적 한계를 동반할 수 밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 단순히 실시간 제어·통제를 위한 기술적 기법만이 아닌 통섭적 관점에서 해결해야 할 과제와 함께 정책적 대응방안까지 논의하고자 한다.

3. 무인체계를 실시간 제어하기 위한 기술조사 및 주요 연구동향 분석

가. 텔레오퍼레이션(Tele-operation) 기술 개요

텔레오퍼레이션 시스템은 인간 운영자가 원격 환경과 상호작용하는 시스템으로 정의되며, 무인체계 실시간 제어의 핵심 분야이다. 텔레오퍼레이션이란 ‘tele’와 ‘operation’이라는 두 개의 그리스어 단어로 이루어져 있으며 ‘tele’는 ‘거리’를 의미하고 ‘operation’은 ‘작업을 수행하다’라는 의미를 가지고 있다. 이는 인간 운영자가 원격 위치에서 로봇과

같은 무인체계를 제어하는 경우처럼 물리적인 거리를 의미하기도 하며, 또한 외과 의사가 마이크로 수준의 수술을 수행하는 경우처럼 규모의 변화를 의미하기도 한다. 텔레오퍼레이션은 원격 지점에서 단순한 감시와는 달리 운영자가 원격 지점의 무인체계와 실제로 상호작용할 수 있어야 한다는 점이 중요하다. 즉, 운영자와 무인체계는 명령과 원격 지점에서의 상호 피드백을 통해 이루어지며, 이런 방식은 복잡한 상황에서도 인간이 환경 변화를 인지하고 적응할 수 있어 무인체계를 더 잘 제어하는 데 매우 중요한 요소가 된다.

그림 33은 텔레오퍼레이션 프로세스를 설명한다. 그림에서 로컬 환경의 운영자가 명령을 내리고, 이 명령들은 통신 데이터 링크를 통해 원격지의 무인체계로 전송되는데 원격지에 도착하면 무인체계의 컨트롤러가 이를 해석하여 운영자가 원하는 대로 각종 액추에이터를 제어하게 된다. 이 때 로봇에 탑재된 센서 시스템은 여러 가지 피드백을 운영자에게 제공하는데 가장 중요한 피드백은 시각적 정보로 운영자가 로봇의 환경을 쉽게 이해할 수 있도록 도와주게 된다. 그 외에도 햅틱 또는 거리 피드백 등의 요소가 있을 수 있다. 그러나, 센서 신호는 외부 환경에서 노이즈에 영향을 많이 받을 수 있기 때문에 운영자가 원활한 무인체계 제어에 어려움을 겪을 수 있다. 이런 경우에는 센서 융합, 다중 뷰 사용 또는 가상 모델 등을 활용하여 운영자에게 제공되는 노이즈를 감소시킬 수 있다.

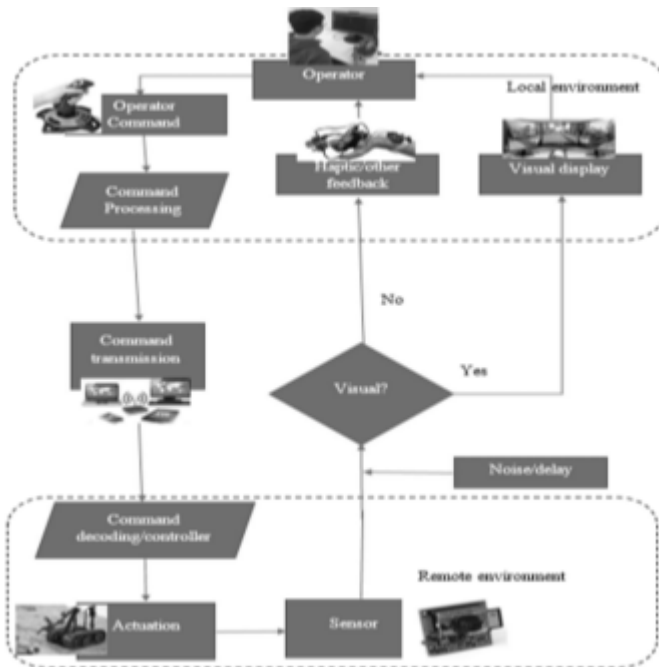


그림 55. 텔레오퍼레이션의 프로세스

나. 텔레오퍼레이션 아키텍처 및 구성 기술

텔레오퍼레이션의 아키텍처는 시스템이 효과적으로 작동할 수 있도록 다양한 구성 요소와 제어 알고리즘으로 이루어져 있다. 이 구성요소는 실행 인프라(프로세서를 포함하는 부분), 통신 인프라(로봇과 운영자 간의 연결을 생성하는 부분), 다양한 종류의 센서(속도, 시각, 위치 등), 다양한 알고리즘, 그리고 액추에이터 등으로 구성된다. 이것을 다시 그림 34에서처럼 크게 세 가지 요소로 구분하면 첫째로는 무인(로봇) 시스템, 둘째로는 통신 채널, 그리고 셋째로는 운용자 스테이션이다.

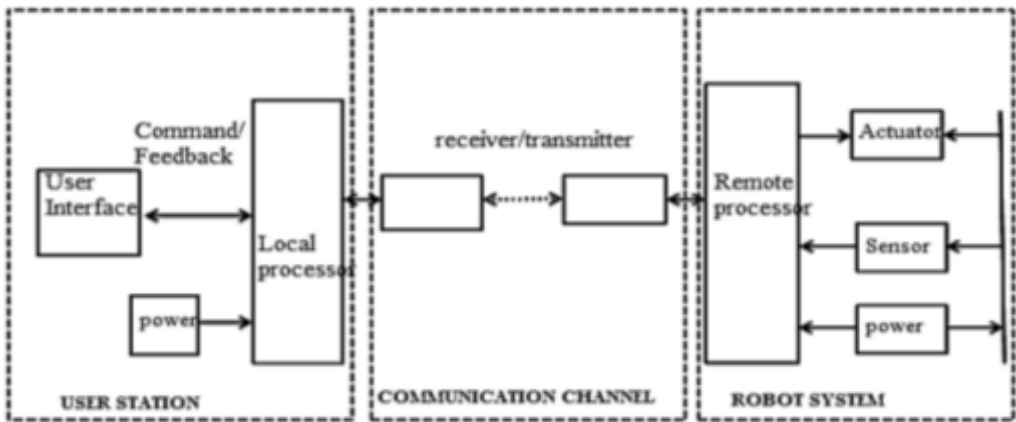


그림 56. 텔레오퍼레이션의 아키텍처

첫째, 무인(로봇) 시스템은 제어/프로세서 시스템(MCU 또는 산업용 컴퓨터), 액추에이터, 센서, 엔코더, 기본 차량 등 여러 구성요소들로 이루어져 있다. 무인 시스템의 통합과 제어를 위한 전기적 아키텍처 설계와 개발은 매우 도전적인 기술이며, 제어 시스템 내의 모든 부품이나 센서들은 상호 데이터를 받거나 피드백 정보를 전송하며 연결성을 유지해야만 한다. 이를 통해 연결성이 보장된 아키텍처를 도입함으로써 데이터 충돌을 줄이고 컨트롤러와 연결된 장치들, 원격 운영자 사이의 원활한 소통을 보장할 수 있게 된다. 또한, 과거에 사용되던 중앙집중식 제어 시스템은 분산 제어 시스템으로 대체되고 있으며, 시스템이 상대적으로 복잡해지지만, 신뢰성이 높고 유지보수가 쉽다는 장점이 있다. 반면에 중앙집중식 시스템은 지연, 데이터 패킷 손실, 그리고 대역폭 제한 등의 문제가 발생할 수 있다.

최근 CAN(Controller Area Network) 프로토콜 기반의 분산 기술은 개발 비용이 낮아 자동차 분야에서 ECU 등 내장된 전자부품에 대한 높은 수용성으로 인해 선호되

고 있다. 최근에는 CAN 프로토콜을 활용하여 이동형 농업 로봇을 위한 텔레오퍼레이션 아키텍처가 구현되기도 했다. 해당 연구는 원격 조작을 위한 무선 통신 시스템, 그리고 CAN 프로토콜과 ISO11783을 기반으로 한 분산 제어에 초점을 두었다. 실험 결과에 따르면, CAN 프로토콜을 기반으로 한 ISO11783 표준 적용은 분산 제어 시스템을 효율적으로 개발하는 데 유용한 플랫폼을 제공했으며, 전자 제어 장치(ECU)의 사용은 산업용 컴퓨터의 계산 부담을 줄이고 로봇의 주요 장치들 사이의 데이터 통신 부담을 줄이는 데 도움을 주었다고 한다. 그림35는 이동형 지상 로봇에 대한 분산 제어의 다이어그램으로 시스템 사용자는 수동 명령을 보내거나 미리 정의된 명령을 사용하여 원격으로 무인시스템을 운영하게 된다. 이때 운영자가 보낸 명령은 무선 링크를 통해 이동형 로봇으로 전송되고, 산업용 컴퓨터를 게이트웨이로 활용하여 운영자로부터 전송된 모든 정보가 원활하게 제어 메시지로 전달되도록 하여 명령을 실행하고, 텔레오퍼레이션 스테이션으로 피드백을 보낼 수 있도록 구성하였다.

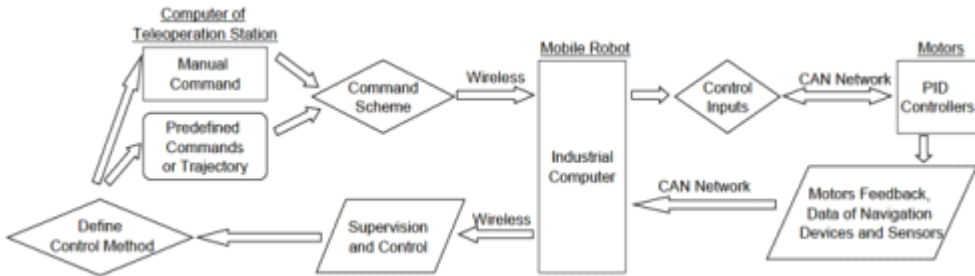


그림 57. CAN 기반의 무인체계 텔레오퍼레이션 제어 다이어그램

또한, 무인 시스템에 있어 안전성은 매우 중요한 요소로 무인체계 구성요소의 손상은 텔레오퍼레이션 제어 목표의 실패를 유발할 수 있다. 따라서, 무인체계 제어 시스템은 자율화 알고리즘과 장애물 감지, 각종 오작동으로 인한 시스템 손상을 방지하기 위해 자동 비상 정지 기능 등을 갖추어야 한다. 이러한 안전성을 위해 다양한 센서들이 무인체계에 활용되며, 그 중에서도 인간이 원격으로 조작할 때는 주로 시각 센서가 사용되게 된다. 이 때 시각센서(Vision sensor)들은 운영자에게 로봇 환경에 대한 다양한 정보를 제공한다. CCD 카메라(Charge-coupled device)와 CMOS(Complementary metal oxide semiconductor) 카메라를 사용하여 로봇 작업 공간에 대한 정보를 얻는 경우가 가장 보편적이며, 스테레오 비전(Stereo vision)을 활용하여 운영자가 장애물과의 거리를 추정하고 안전한 회피 동작을 수행할 수 있도록 돕기도 한다. 다른 센서들로는 음파 센서, LiDAR, 레이저 스캐너, 그리고 센서 퓨전(Sensor fusion) 등이 사

용되며, 이들은 로봇의 안전성과 효율성을 향상시킨다. 특히, 최근에는 각 센서의 단점들을 보완하는 센서 퓨전 방법론이 주로 활용되고 있다.

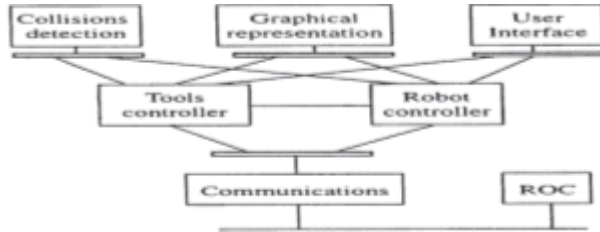


그림 58. 장애물 회피 무인시스템의 상위 레벨 텔레오퍼레이션 아키텍처

두 번째, 구성요소는 통신채널로 운용자와 무인체계 사이의 원활한 연결을 위해 중요한 부분이다. 이 부분이 없으면 운용자와 로봇 사이에 연결이 끊어지며 텔레오퍼레이션이 이루어지지 않게 된다. 효과적인 통신은 연결성, 라우팅, 그리고 서비스 품질(QoS)을 고려해야 하며, 일반적으로 힘-피드백(Force feedback) 텔레오퍼레이션 시스템에서 시스템 지연과 불안정성은 주로 통신 채널의 단절로 인해 발생되게 된다. 이에 통신 채널은 대역폭, 지연시간, 신뢰성과 같은 QoS 요구 사항을 충족할 수 있어야 하며, 동시에 표준 네트워크 자원을 이용해야 한다. 무인체계간의 거리나 무인체계와 센서간의 거리에 따라 네트워크의 성능도 영향을 받으며, 텔레오퍼레이션은 실시간 피드백이 필요하므로 최소한의 지연시간을 가지는 피드백 릴레이를 달성할 수 있는 적합한 프로토콜이 요구된다. 그림37은 무인 로봇 시스템의 텔레오퍼레이션 구현을 위한 각 구성요소간 통신 구성도를 보여준다.

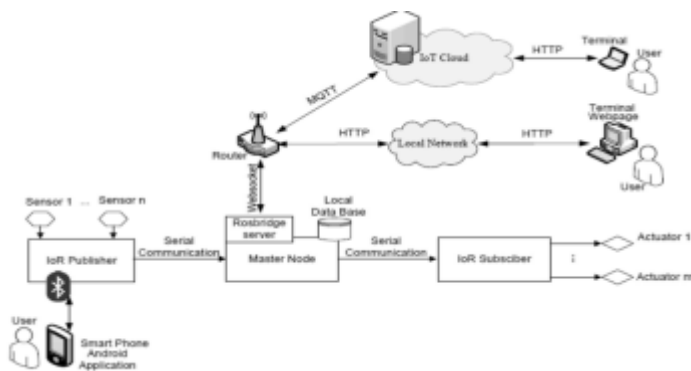


그림 59. 무인로봇 시스템의 텔레오퍼레이션 통신 구성도 예시

텔레오퍼레이션에서는 인터넷, 광섬유, 라디오파, 적외선 및 무선 채널 등 다양한 통신 채널을 적용할 수 있다. 최근 대다수의 연구자들은 무선 기술을 사용하여 무인체계를 제어하고 있다. 예를 들어, 모바일 기기와 이동 로봇 사이의 명령 및 데이터 교환을 위해 블루투스 통신을 사용하였으나, 블루투스의 제한된 동작범위 때문에 무인로봇이 특정 운영 환경 내에만 운용되었다는 단점이 발생했다. 이에 분산형 이동 로봇을 위한 통신 및 제어 인프라가 적용되었는데 해당 시스템은 무선 로컬 영역 네트워크(WLAN) 기술과 인터넷 프로토콜을 이용하여 로컬과 원격 스테이션 사이를 연결했다. 무선 통신은 상대적으로 저렴하고 쉽게 설치할 수 있는 장점이 있지만, 최근 인터넷 통신에 비해 점차 뒤로 밀리고 있다. 이는 인터넷 통신의 신뢰성과 범용성에 기인하며, 어디서든 웹에 액세스하여 무인체계를 제어할 수 있는 능력, 그리고 마스터와 슬레이브 사이의 가시거리(LOS) 고려가 필요하지 않다는 장점이 있기 때문이다. 그러나, 이러한 장점들도 불구하고 인터넷 통신은 통신 지연, 패킷 손실, 연결 끊김 등의 문제가 발생할 수 있다. 데이터 전송을 위한 가장 일반적인 인터넷 프로토콜로는 Transmission Control Protocol (TCP), User Datagram Protocol (UDP) 및 Real-time Transport Protocol (RTP) 등이 있다. TCP 프로토콜은 사용자의 로그인 데이터와 같이 고도의 신뢰성이 필요한 데이터의 전송에 사용되는 신뢰성 중심의 프로토콜이다. TCP 프로토콜은 인터넷 통신 시스템에서 손상된 데이터, 손실된 데이터, 중복된 데이터 또는 순서가 바뀐 데이터를 복구해준다. 실패한 패킷의 재전송을 통해 데이터 전달을 보장하고, 이를 통해 신뢰성 있는 통신을 제공해준다. 그러나, 실시간 전송에는 상대적으로 더 오랜 시간이 걸린다는 단점이 존재한다. UDP는 네트워크 상태를 고려하지 않고 가능한 빠르게 운용자와 원격 시스템 사이에서 데이터를 전송하는 것으로, UDP는 실시간 전송 지향 프로토콜로 단일 데이터 교환을 위해 설계되었으며 상대적으로 신속한 네트워크 접근을 제공한다. RTP는 멀티미디어 데이터를 실시간으로 전달하기 위한 표준으로 이 프로토콜은 지터 보상 메커니즘과 데이터의 비순차적 전송을 감지하는 방법을 제공한다. 그러나, 이 프로토콜은 실시간 전송에서 데이터를 버퍼링하는데 걸리는 시간으로 인해 일부 지연이 발생할 수 있다. 이는 패킷 손실과 지연으로 원격 조종 시스템 전체의 불안정성을 초래할 수 있다.

또한, 최근 다수의 연구자들이 블루투스와 모바일 네트워크 등의 기술보다는 와이파이(Wifi)를 사용하여 로봇과 인터넷 사이의 연결을 구현하고 있다. 이는 블루투스와 비교하여 더 넓은 운용범위 때문이다. 물론 모바일 네트워크가 와이파이보다 훨씬 더 넓은 범위를 가지지만 환경설정, 유지보수, 에너지 소비와 같은 다른 요소들과의 균형을 유지해야 한다는 측면에서 모바일 네트워크 대신 와이파이 기술을 선택하고 있다.

표 30. 통신 채널 관련 기술 비교표

	NFC	RFID	Blue-tooth®	Blue-tooth® LE	ANT	Proprietary (Sub-GHz & 2.4 GHz)	Wi-Fi®	ZigBee®	Z-wave	KNX	Wireless HART	6LoWPAN	WIMAX	2.5-3.5 G
Network	PAN	PAN	PAN	PAN	PAN	LAN	LAN	LAN	LAN	LAN	LAN	LAN	MAN	WAN
Topology	POP	POP	Star	Star	POP, Star, Tree, Mesh	Star, Mesh	Star	Mesh, Star, Tree	Mesh	Mesh, Star, Tree	Mesh, Star	Mesh, Star	Mesh	Mesh
Power	Very Low	Very Low	Low	Very Low	Very Low	Very Low to Low	Low-High	Very Low	Very Low	Very Low	Very Low	Very Low	High	High
Speed	400 Kbs	400 Kbs	700 Kbs	1 Mbs	1 Mbs	250 Kbs	11-100 Mbs	250 Kbs	40 Kbs	1.2 Kbps	250 Kbs	250 Kbs	11-100 Mbs	1.8-7.2 Mbs
Range	<10 cm	<3 m	<30 m	5-10 m	1-30 m	10-70 m	4-20 m	10-300 m	30 m	800 m	200 m	800 m (Sub-GHz)	50 km	Cellular network
Application	Pay, get access, share, make service, easy setup	Item tracking	Network for data exchanges, headset	Health and fitness	Sports and fitness	Point to point connectivity	Internet, multimedia	Sensor networks, building and industrial automation	Residential lighting and automation	Building automation	Industrial sensing networks	Sensor networks, building and industrial automation	Metro area broadband Internet connectivity	Cellular phones and telemetry
Cost Adder	Low	Low	Low	Low	Low	Medium	Medium	Medium	Low	Medium	Medium	Medium	High	High

세 번째 구성요소는 운용자 스테이션(User Station)이다. 운용자 스테이션은 무인 체계를 원격으로 조종하는 장치이며, 사용자 워크스테이션 또는 기지국이라고도 불린다. 운용자는 로봇을 제어하기 위해 다양한 디바이스를 사용하는데 주로 풋 페달, 조향 휠, 조이스틱, 컴퓨터 키보드 또는 터치 디바이스 등이 활용된다. 무인체계와 운용자 사이의 거리는 가깝게는 운용자의 시야 내에 있을 수도 있고 아예 운용자의 시야 밖에 있는 때도 있다. 후자의 경우, 운용자는 로봇의 움직임을 직접 볼 수 없으므로 원격 환경으로부터 전달되는 시각적 또는 물리적인 피드백에 의존해야 한다. 동시에 운용자는 피드백을 쉽게 받아들이고 제어 명령을 내릴 수 있는 편리한 인터페이스가 필요하게 된다. 특히 원격 조작에서는 시각적 시스템이 가장 중요한 피드백 요소로 사용되며, 하나 또는 다수의 카메라로 구성될 수 있다. 무인체계에 탑재된 카메라로부터 촬영된 이미지는 운용자 스테이션의 스크린에 표시되며, 이때 로봇의 속도, 배터리 수준, GPS 데이터를 포함하여 추가 정보가 함께 표시된다.

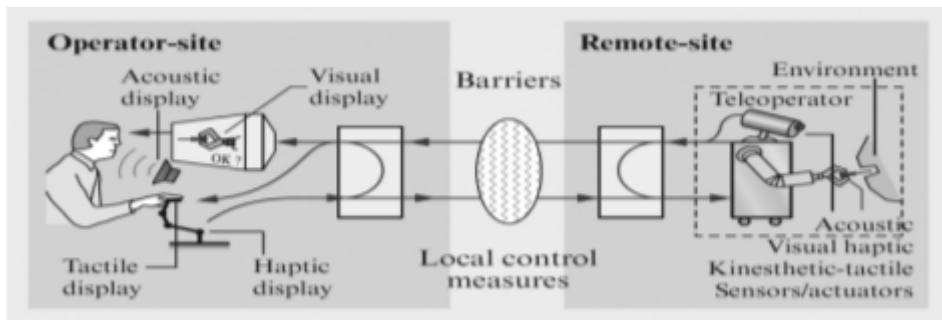


그림 60. 원격조정의 구성요소

단안 비전센서는 복잡도가 적고 비교적 저렴하며 계산 시간도 적게 소모되는 특징이 있고, 스테레오 비전은 가격이 상대적으로 비싸고 연산시간이 많지만, 이미지내 개별 객체의 깊이(거리)에 대한 추가 정보를 제공된다는 장점이 있다. 최근에는 센서 융합(Sensor fusion)과 웹 기반 도구를 활용하여 무인체계 환경을 효과적으로 표시하는 혁신적인 텔레오퍼레이션 모델이 개발되고 있다. 해당 인터페이스를 통해 운용자는 무인체계에게 명령을 내리는 것뿐만 아니라 무인체계와 대화하고 질문에 대한 답변을 받을 수 있는 방식이다. 운용자-무인체계간 대화와 센서 융합 데이터 표시를 활용한 텔레오퍼레이션은 텔레오퍼레이션 경험이 없는 초보자들도 쉽게 시스템을 조작할 수 있다는 이점을 제공한다. 또한, 제스처를 이용한 가상 상호작용, 개인 디지털 어시스턴트(PDA)를 활용하여 무인차량의 텔레오퍼레이션을 강화한 연구도 진행되었다. 개발된 원격 주행 도구들은 사용자 친화적이고 적응적이며 교육소요가 적고, 시스템이 웹 기반이었기 때문에 사용자가 인터넷에 접속하고 시스템을 사용할 권한이 있으면 어디서든 사용이 가능하다.

무인체계의 텔레오퍼레이션에서 편리한 원격조종을 위해서는 운용자가 무인체계 주변환경에 시각적으로 몰입할 수 있는 충분한 영상정보 피드백을 받아야 한다. 일부 연구자들은 HMD(헤드 마운티드 디스플레이) 장치를 사용하여 시각적 몰입의 개념을 구현했다. HMD는 운용자의 시각적 지각을 향상시키고, 깊이(거리) 감각을 크게 향상시켜 주었다. 이렇게 함으로써 원격 운용자는 스테레오 비디오 스트림을 기반으로 상황 판단을 하고 로봇을 효과적으로 제어할 수 있었다. 이 장치의 이중 디스플레이 기능은 스테레오 비전을 통해 운용자에게 깊이 감각을 제공하고 원격 환경 속에서의 존재감을 향상시켜 주었다. 그러나, 카메라와 HMD의 비동기적인 움직임은 사용자에게 부정확한 정보를 제공하여 원격 환경의 명확한 인식을 저해할 수 있다. 이는 디바이스의 요(Yaw)와 틸트 각도가 동기화되어야 함을 의미하는데 HMD의 좋은 성능에도 불구하고, 때로는 머리의 방향 변화와 실제 팬-틸트 메커니즘의 움직임, 비디오 프레임 업데이트 사이의 지연으로 인해 운동 질환, 불편함, 그리고 운용자의 인지력 저하가 발생하는 경우가 발생할 수 있다. 게다가 HMD는 운용자에게 무거워 불편할 수 있으며 감각 충돌로 시각-운동 성능이 저하될 수도 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 비몰입형 디바이스를 사용하여 운용자의 머리 방향을 통해 로봇 움직임과 카메라 방향 제어에 대한 새로운 방법을 개발되었는데, 결과는 비몰입형 머리 방향 제어를 통한 카메라 제어가 초보 사용자를 포함한 로봇 텔레오퍼레이션 인터페이스의 직관성을 향상시킬 수 있는 잠재력이 있음을 보여주었다. 그림 40, 41은 HMD와 터치 글러브 등을 활용한 로봇 제어 예시를 보여준다.

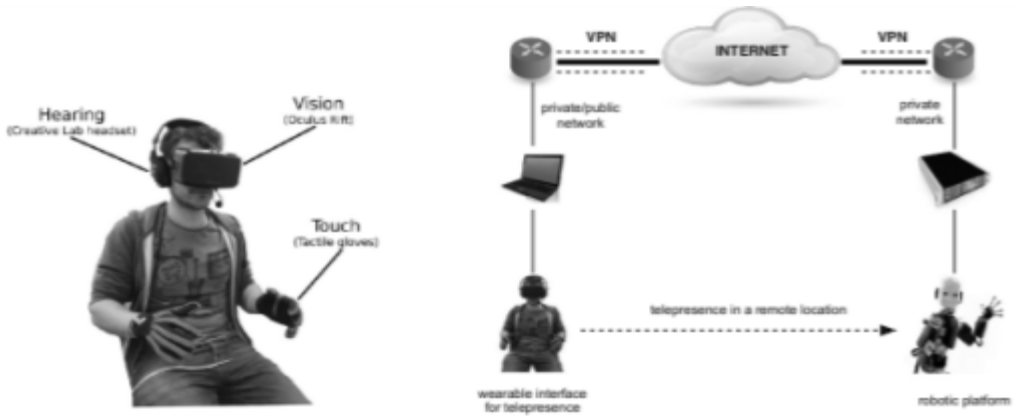


그림 61. HMD 기반의 텔레오퍼레이션 기술 예시

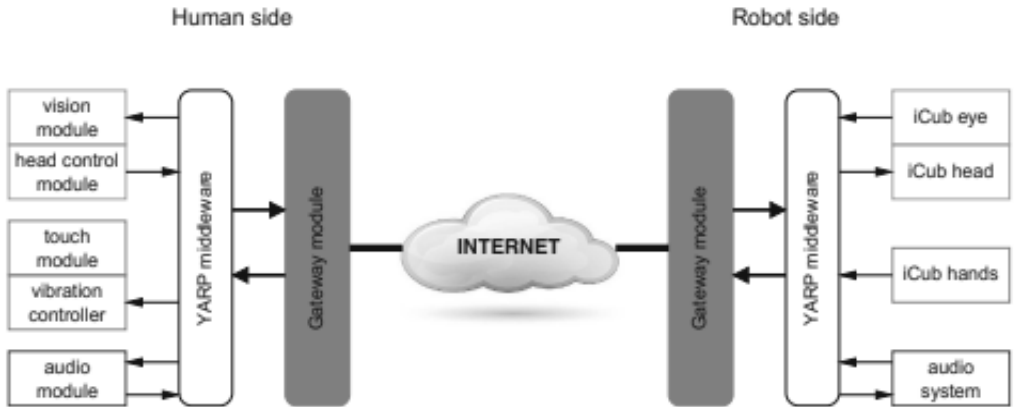


그림 62. HMD 기반의 텔레오퍼레이션 아키텍처 및 통신 구성도 예시

다. 텔레오퍼레이션의 최신기술 동향 및 유즈케이스(Usecase)

현재 무인체계의 텔레오퍼레이션 연구개발은 운용자가 무인체계 운용환경에서 실질적으로 존재하는 듯한 느낌을 얻을 수 있도록 하는 데 초점이 맞추어져 있다. 텔레오퍼레이션 작업을 수행하는 동안 운용자가 상황 인식이 부족하거나 다양한 정보 소스로부터 너무 많은 인지적 부담을 받는 것은 로봇 실시간 제어에 부정적인 영향을 미치게 된다. 정보를 단일 시각으로 통합하고 무인체계에 대한 상세한 공간 정보를 제공하는 것은 운용자의 정신적 피로를 최소화할 수 있고, 또한 단일 감각보다 다중 감각 입력이 몰입감을 형성하는데 긍정적인 효과를 발생시킨다. 예를 들어 시각, 청각, 촉각 피드백의 조합은 단일 시각 피드백만 있는 것보다 더 좋은 실감효과와 몰입감을 제공하게 된

다. 몇몇 연구자들은 내외부 로봇을 위해 햅틱, 시각 및 청각 피드백을 사용하여 운용자의 상황인식과 텔레프레즌스를 향상시키는 몰입형 인터페이스를 제안하기도 했다. 텔레오퍼레이션의 효율성은 두 가지 측면에 달려 있는데 운용자의 로봇 환경에 대한 상황 인식과 통신 지연의 관리이다. 본장에서는 힘 피드백, 가상 현실, 증강 현실 및 혼합 현실 기술 등을 사용하여 원격 장소에서 몰입감을 실현하고, 전송 지연의 영향을 완화하기 위한 기술동향과 유즈케이스를 제시하였다.

가상현실(VR, Virtual reality)은 사용자가 어떤 각도에서든 가상 환경을 볼 수 있고, 그 환경을 구성하는 객체들과 상호작용할 수 있는 기술이다. 텔레오퍼레이션의 효율성은 운용자와 원격 환경 사이의 가상적인 접촉에 크게 영향을 받는데 운용자가 무인체계 주변 환경에 대한 자세한 정보에 쉽게 접근하게 되면 의사결정 능력이 향상된다. 가상현실 기반 텔레오퍼레이션은 운용자가 가상 환경에서 3D 형태의 가상 로봇을 조작하여 실제 로봇을 제어하는 것으로 이루어진다. 이를 통해 운용자는 상황 인식을 크게 향상시키고, 통신 지연의 영향을 줄이거나 완전히 제거하여 텔레오퍼레이션의 효율성을 유지할 수 있는 것이다. 실제로 가상제어는 직접 제어보다 시간적으로 피드백 지연에 덜 민감하므로 큰 시간지연을 보상할 수가 있다.

텔레오퍼레이션 시스템에서 무인체계 주변환경에 대한 주요 정보원은 원격 무인체계에 장착된 카메라와 같은 센서들이다. 다양한 센서나 카메라를 장착하는 것은 운용자에게 운용환경에 대한 인식을 증가시키는 장점이 있지만, 이에 따라 프로세서의 연산부하가 증가하고 시스템의 비용이 높아지게 된다는 단점 역시 존재한다. 또한, 운용자는 실시간 피드백이 필요하므로 많은 양의 센서 정보가 제한된 대역폭과 네트워크 지연으로 인해 패킷 손실을 겪을 수 있다. 이를 보완하기 위해 연구자들은 스테레오 비전과 가상현실을 사용하여 2D 카메라 뷰 대신 운용자에게 원격 환경의 깊이(거리정보) 정보를 느낄 수 있게 하는 방법을 제안하고 있다. 이러한 깊이 정보는 무인체계 주변 환경의 상황 인식뿐만 아니라 인지적 부담이 줄어들어 신속하고 쉬운 결정을 내리는데 도움을 준다.

가상현실 기술은 통신 지연 문제를 긍정적으로 해결할 수 있는 기술로 이런 장점을 활용하여 모바일 로봇의 텔레오퍼레이션에서 효율성을 더욱 높이기 위한 방향으로 연구가 진행되고 있다. Visual C++ 및 OpenGL을 사용하여 가상 환경을 만들어 운용자의 몰입감을 증진시키고, 원격 무인체계와의 상호작용을 강화시켰으며, 비디오 전송속도를 향상시키기 위해 다중 버퍼 및 멀티스레드 기술을 도입하기도 했다. 이 기술은 이미지 전환을 부드럽게 하여 비디오 품질을 개선한 연구로 운용자에게 3D 모델로부터 무인체계를 직접 제어할 수 있는 플랫폼을 제공하여 운용환경에 영향을 미칠 수 있

는 모든 종류의 작업을 예측하는 데 도움을 주었다.

최근 텔레오퍼레이션에서 Oculus Rift, Sony PlayStation VR, HTC Vive와 같은 HMD의 도입이 확대되고 있다. 가상현실 장치에 부착된 스테레오 비전 카메라의 입체 이미지는 복잡한 작업 조작을 가능하게 해주는데 이때 적절한 3D 렌더링 기술이 요구된다. 몰입형 제어를 위해서는 원격 무인체계에 장착된 센서를 적절하게 활용하고 운용자에게 몰입적 시각화를 제공할 수 있어야 한다. 이를 위해서 로봇 환경 맵을 가상현실 장치에 포인트 클라우드 데이터로 시각화하는 시스템이 개발되었으며, 로봇 운영 시스템(ROS)을 사용하여 로봇 제어 알고리즘 구현 및 ROS의 사용으로 로봇과 사용자(VR 장치) 사이의 통신을 무선으로 그림42와 같이 구현하였다.

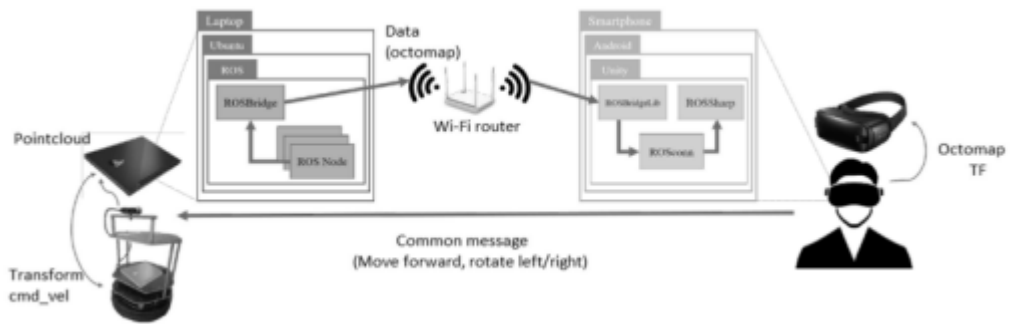


그림 63. VR 기반 텔레오퍼레이션 시스템의 HW/SW 아키텍처

증강현실(Augmented Reality, AR)은 실제 세계 환경 위에 디지털 콘텐츠를 오버레이하는 기술이다. 증강현실은 실제 세계에 가상으로 생성된 객체를 보강하여 동일한 공간에 공존하는 것처럼 보정하는 시스템으로 정의할 수 있다. 일반적으로 운용자의 작업을 디지털 그래픽이나 텍스트로 오버레이하여 원래 정보를 어떤 방식으로든 보완함으로써 작업을 보다 쉽고 원활하게 하는데 그 목적이 있다. 여기에는 가상 또는 디지털 객체 형태로 이미지, 비디오 또는 기타 인터랙티브 데이터를 포함하게 된다. 가상현실이 사용자에게 디지털 객체만 제시하는 반면, 증강현실은 사용자에게 환경을 명확하게 이해할 수 있게 해주는 추가적인 콘텐츠를 제공한다.

특히 무인로봇 분야에서는 텔레오퍼레이션을 위해 이 방법을 적용하여 원격 환경에 대한 실감도를 높이기도 한다. 증강현실을 사용하는 고급 텔레워크를 가능하게 하는 인간-기계 인터페이스(MMI) 시스템의 주요 특성은 지각 모드와 상호작용 모드 두 가지로 구분된다. 지각 모드는 운용자에게 존재감을 제공하는 스테레오 비디오와 현실을

보정하는 증강을 제공하는 대형 스크린을 통해 이루어진다. 상호작용 모드는 광학 추적 시스템을 사용하여 운용자가 원격 로봇과 자유롭게 상호작용할 수 있도록 해준다.

증강현실 시스템에서 스테레오 비전(Stereo vision)은 운용자가 원격 환경의 구조와 주변 장애물과의 근사 거리에 대한 존재감을 개선하는데 도움을 준다. 반면 단일 비전 센서의 경우는 공간위치 결정 오류, 원격 물체의 크기와 모양 미식별, 로봇으로부터 물체까지의 거리 미계산 등의 제한이 발생할 수 있다. 이러한 오차는 로봇에 잘못된 명령을 내리게 하여 텔레오퍼레이션의 정확도를 저하시킬 수 있다. 또한 레이저 거리(Laser range) 센서 기반 증강현실 기술을 적용하면 운용자는 증강된 이미지에서 장애물 근접도를 직관적으로 확인하고, 짧은 시간 내에 정확하게 반응할 수 있으며, 거리 예측에 대한 인지적 부담이 없어지는 장점을 가지게 된다. 그림 43은 해당 시스템의 이미지 증강 예시를 보여준다.

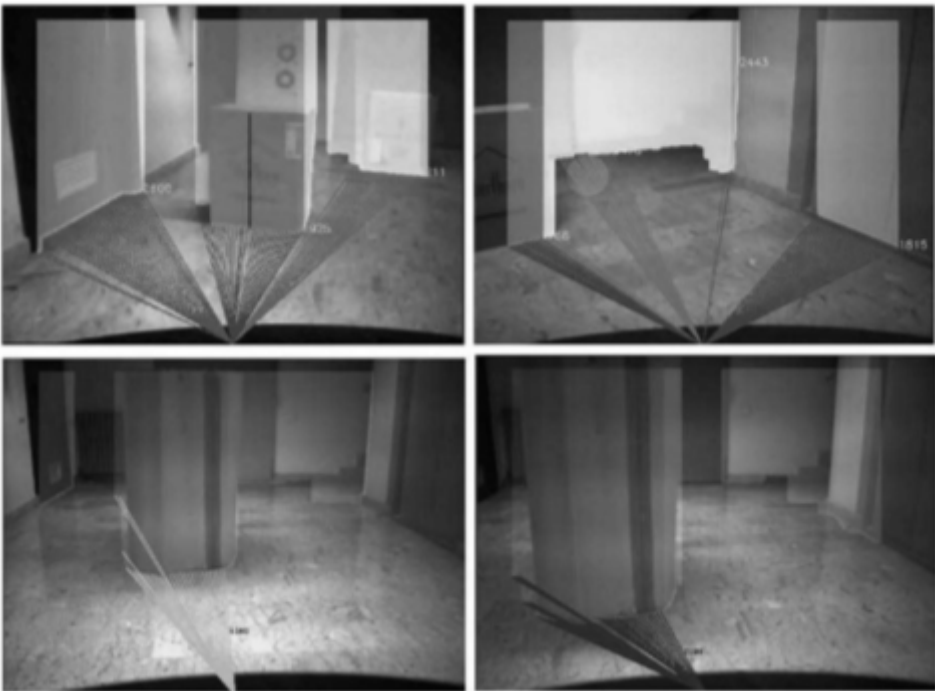


그림 64. 레이저 거리 센서 기반의 증강현실 이미지

혼합현실(MR, Mixed reality)은 실제 세계와 가상 세계의 객체가 하나의 디스플레이 내에서 합쳐지고 제시되는 환경을 말한다. 증강현실에서는 가상 환경이 실제 세계 위에 오버레이 되지만, 혼합현실에서는 가상 환경이 실제 세계에 고정되고 운용자가

가상 환경과 상호작용할 수 있다. 최근 GPU 등 컴퓨터의 그래픽 연산능력의 향상으로 혼합현실 시스템의 응용이 크게 증가하는 중이다. 그림44는 가상 차량의 테두리와 바퀴 이미지를 원격 환경에 전송하여 이미지에 오버레이한 후 HMD를 통해 표시하는 기술을 보여준다. 가상 경계의 제공으로 운용자는 차량의 정확한 위치를 인식할 수 있었으며, HMD는 몰입형 경험을 만들어 운용자가 좁은 통로를 효과적으로 제어할 수 있도록 개선하였다.

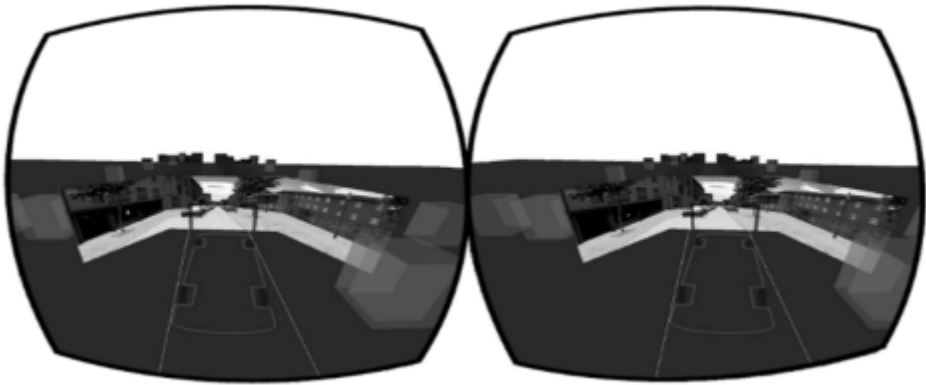


그림 65. 혼합현실과 HMD를 활용한 자동차의 좁은 통로 통과 예시

무인체계에 장착된 센서로부터 제공되는 정보에 추가하여 무인체계에 정보를 제공하는 인터페이스는 중요하다. 텔레오퍼레이션에 있어 탑재센서 정보에 과도한 의존은 시스템에서 심각한 불안정성을 일으킬 수 있기 때문이다. 예측적 디스플레이는 이러한 부분을 다루는 효과적인 방안을 제공했다. 예측적 디스플레이를 통해 인공 시야(Artificial exocentric view)를 제공하여 텔레오퍼레이션 시나리오에서 운용자의 상황 인식 능력을 증진시키게 된다. 이 아이디어는 실제 로봇에 설치된 카메라가 캡처한 원격 환경의 실제 이미지 위에 가상 마스터 로봇을 오버레이하고, 가상 마스터에게 명령을 내림으로써 로봇에 대한 경로가 생성되어 일정 시간 후에 물리적 로봇에 의해 실행되도록 하였다. 이로써 운용자는 명령 실행 전에 로봇의 방향과 위치를 예측하게 되어 장애물을 피하고 효과적으로 작업을 수행할 수 있었다.

일본의 NTT 도코모와 토요타는 VR헤드셋을 착용한 사용자가 5G 통신망에 연결된 휴머노이드 로봇 T-HR3를 원격으로 제어하였다. 로봇의 관절과 연동할 수 있도록 센서를 부착한 웨어러블 컨트롤러와 HMD를 착용하고 로봇에 부착된 카메라를 통해 주변을 보면서 행동하는 방식이다. 그러면 로봇은 조작자의 움직임에 즉각 반응하며 운용자와 동일하게 움직이게 된다. 일본의 로봇 벤처인 텔레이그지스텐스(Telexistence)는

VR 기반의 텔레오퍼레이션 기술을 접목하여 편의점에 원격 제어 로봇 개발하였다. 해당 로봇은 HMD와 VR 컨트롤러를 통해 원격으로 제어되며, 조작자가 원하는 대로 이동하거나 페트병과 라면 등 30개 품목을 검사, 진열할 수 있다.



그림 66. (좌) 토요타의 T-HR3, (우) 텔레이그지스턴스(Telexistence)

AR과 VR 기술이 텔레오퍼레이션과 함께 융합되어 원격 운전자 상호작용에 활용되기도 한다. MS가 공개한 텔레프레즌스 시스템 VROOM(Virtual Robot Overlay for Online Meetings)은 이동형 로봇에 실물 크기의 AR 아바타를 오버레이함으로써 원격의 사용자가 서로 같은 공간에 존재하는 것과 같은 효과를 보여주었다. 그림 46과 같이 원격의 사용자는 자세와 머리 움직임을 추적할 수 있는 VR HMD와 손과 팔 동작을 추적하는 컨트롤러를 착용하고 원격의 텔레프레즌스 로봇이 촬영하는 360도 영상을 실시간으로 보며 현장과 상호작용하게 된다. 현장 사용자는 홀로렌즈와 같은 AR 기기를 착용하고 원격 작업자와 움직임을 모사하는 아바타가 오버레이된 텔레프레즌스 로봇과 상호작용함으로써 마치 같은 장소에 있는 것처럼 느낄 수 있다.

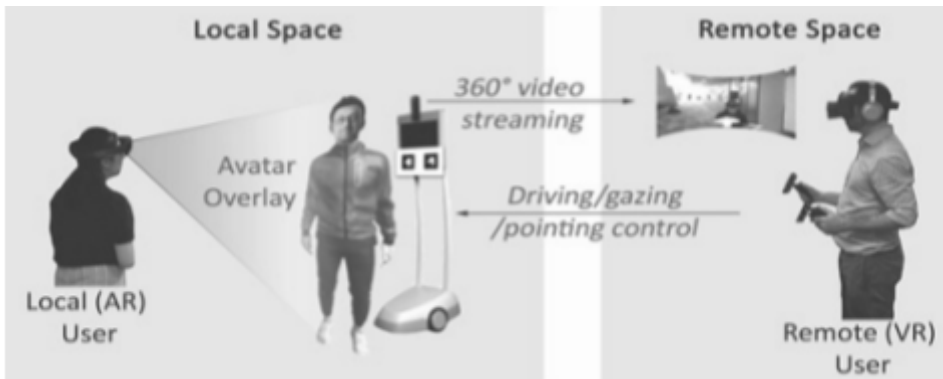


그림 67. MS의 AR/VR 로봇 융합형 텔레오퍼레이션(VROOM)

원격의 운용자를 대신하여 고도로 정밀한 작업을 처리해야 하는 텔레오퍼레이션 시스템에게는 원격 운용자의 정밀한 손동작 추적이 중요하다. 이를 텔레오퍼레이션을 위한 손동작 및 제스처 정밀 추적 기술이라 하며 단순한 손의 이동경로를 추적하는 전통적인 VR 컨트롤러 형태를 벗어나 최근에는 AI 기반의 영상인식 기술이나 RF 레이더 장치 등을 활용함으로써 운용자 손가락 하나하나의 정밀한 움직임을 추적하기 위한 기술을 개발하고 있다. 캐나다의 핸드 제스처 인식 솔루션 기업인 모션 제스처(Motion Gestures)는 카메라 영상 분석을 통해 실시간 제스처 인터페이스를 구현하는 솔루션을 상용화하였다. 해당 솔루션은 손의 마디와 관절을 스물한 개의 포인트로 구분하여 모양과 움직임을 분석하고, 머신러닝 기반 학습 알고리즘을 통해 사용자의 패턴을 파악하여 손 제스처에 의한 명령을 인지할 수 있다. 구글은 손가락이나 손 모양의 미세한 제스처 변화를 감지해 기기를 제어할 수 있는 레이더 기반 모션센서를 개발하는 프로젝트 솔리(Soli)를 공개하였다. 손톱보다 작은 크기의 해당 센서는 밀리미터파 레이더를 활용해 기기에서 동작을 인식할 수 있어 사용자는 기기에 손을 대지 않고 허공에서 손가락을 움직이기만 해도 기기를 제어할 수 있다. 구글은 해당 기술을 스마트워치 기술 특허에 포함시켜 스마트워치를 제스처로 제어하기 위한 핵심 센서로 활용할 계획이다. 오쿨러스도 최근 글러브나 손에 부착 가능한 무선 밀리미터파 송수신기와 이를 활용하는 손동작 추적 기술 특허를 출원하여 기존 컨트롤러 대비 손 위치와 동작을 더욱 정확하게 인식하기 위한 연구를 진행하고 있다.³²⁾ 센서를 활용한 글러브 타입의 컨트롤러도 발전하고 있다. 네덜란드의 VR 개발사 마누스(Manus)는 개별 손가락의 움직임을 정밀하게 추적할 수 있는 글러브형 가상현실 컨트롤러를 상용화했다. 손가락마다 가속도, 회전, 지자계 정보 측정이 가능한 IMU센서를 탑재하여 손가락 두 관절의 움직임을 각각 추적할 수 있으며, 산업용 플렉스 센서를 탑재하여 손가락의 굽힘 정도 또한 정밀히 측정할 수 있다. 또한, 유니티, 언리얼엔진, 모션빌더 등의 AR/VR 개발 툴 지원 플러그인을 제공하여 기존 VR 제품과 응용 서비스에 적용이 용이하다.

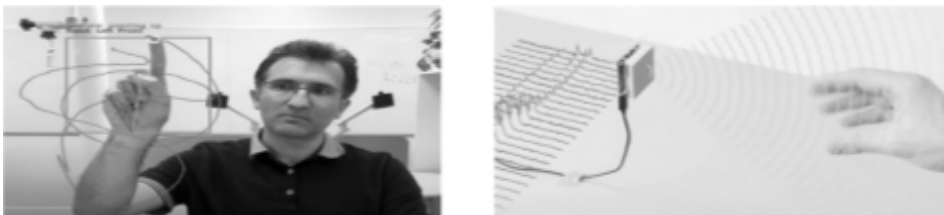


그림 68. (좌) 모션제스처의 AI 기반 제스처 인식, (우) 구글의 레이더 기반 손동작 인식

32) Facebook Tech., “Millimeter wave hand tracking,” US Patent 10451707, 2019

또한, 햅틱 기술이란 기기와 접촉할 때 사람의 촉감을 자극해 실물을 만지고 있는 느낌을 전달하는 실감 전달 기술이다. AR, VR, 텔레오퍼레이션 등과 같이 실제의 기기나 인터페이스에 접촉하지 않는 가상환경에서는 현실의 기기를 다루는 듯한 느낌을 제공하기 위해 높은 수준의 햅틱 기술이 요구되며, 최근 이를 위한 기술개발이 활발하게 이루어지고 있다.

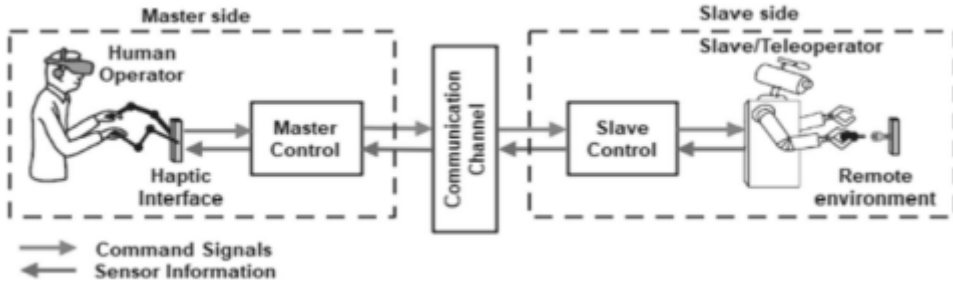


그림 69. 햅틱기술 적용 아키텍처

미국의 햅트엑스(HaptX)는 정교한 사용자 손동작을 추적하면서도 촉각 피드백 기능을 제공하는 글러브형 컨트롤러를 공개하였다. 햅트엑스는 영국의 로봇 팔/손 전문 개발사 쉐도우 로봇(Shadow Robot), 생체 모방 촉각 센서 개발사 신터치(SynTouch)와 협업하여 아마존이 주관한 ‘re:MARS’ 로봇 컨퍼런스에서 햅틱 글러브를 낀 사람의 손동작을 따라하는 텔레오퍼레이션 로봇 시스템을 시연했다. 이 시스템은 루빅스 큐브 맞추기, 종이컵 쌓기, 병뚜껑 여닫기 등 사람의 손재주가 필요한 작업을 정교하게 모사할 뿐만 아니라 키보드 타이핑에 따른 손끝의 입력감을 로봇손에 부착된 촉각 센서를 통해 측정하고 햅틱 글러브를 통해 충실히 재현하였다. 햅틱 피드백은 모터에 의한 진동으로 주로 발생되기 때문에 물체의 형상을 전달하는데 적합하지 않다. 이를 해결하기 위해 한국전자통신연구원은 위치에 따라 다양한 진동을 느낄 수 있도록 해주는 촉감을 생성해 주는 LED 필름형 햅틱 기술을 공개하였다. 해당 햅틱 필름은 그림49(좌)과 같이 광-열 변환층과 열-탄성 변환층으로 이루어진 특수 필름과 다수의 소형 LED로 구성되며, LED를 켜면 빛을 흡수한 특수 필름이 가열되어 팽창하고 LED를 끄면 냉각되면서 복원되는데 팽창과 복원을 초당 수백 번 반복하면 특수 필름 표면에서 사람이 느낄 수 있는 진동이 만들어지는 원리를 가지고 있다. 이러한 필름을 다수의 구역으로 나누어 LED를 각각 배치하면 구역마다 다른 진동이 전달될 수 있어 사람 손이나 글러브에 필름을 부착하면 다양한 촉감 피드백 제공이 가능해진다.³³⁾ 촉감 피드백의 입력

33) I. Hwang, H. Kim, S. Mun, S. Yun and T. Kang, “A Light-Driven Vibrotactile Actuator with a

정보, 즉 촉각 정보 측정 센서 기술도 중요하다. 영국 브리스톨 대학은 카메라가 내장된 핑거팁을 이용하여 영상인식 기술 기반의 로봇 손용 촉각센서를 공개했다.³⁴⁾ 제안된 센서는 손가락 끝에 광각렌즈를 내장한 HD카메라와 조명용 LED, 변화 인지를 위한 다수의 마커 패턴을 내장한 소형 장치로 구현되었다. 촉각 센서의 원리는 물체가 접촉되면 손가락 끝에 압력이 가해지고, 이에 따른 마커 패턴 형상 변화를 분석하여 센서 표면의 3차원적인 변형을 추정하고 그림49(우)와 같이 각 손가락 접촉점의 분포와 힘의 크기 등을 결정하게 되는 것이다.



그림 70. (좌) 스마트 글러브(마누스), (우) 촉각 피드백 글러브(햅텍스)

4. 무인체계 실시간 제어에 따른 운영개념 제시

가. 무인체계 운영 개요

국방 무인체계는 무기체계 개발 시 소요군의 운용개념이 미확정되거나 기술수준(TRL) 및 기술성숙도가 미흡하여 무인체계의 소요기획 및 전력화 소요 반영이 원활히 이루어지지 않고 있다. 이러한 무인체계는 미군의 미래 전투체계(Future Combat System)에서 보듯이 네트워크 중심전(NCW)으로의 전장 환경변화 등 무인체계의 통신 및 소프트웨어(System of Systems Common Operating Environment)의 중요성은 더욱 커지고 있다. 한편, 전 세계적으로 국방 무인체계는 시장확산 분야로 인식되고 있어, 그 중요성이 부각되고 있음과 동시에 경제발전의 견인차 역할수행이 기대되는 핵심분야로 각광받고 있다. 나아가 무인체계 연구개발 및 전력화가 가속화됨에 따라 이를 온전히 운영하기 위한 교리 개발과 함께 전략·작전·전술적 운영개념의 필요성은 지속 요구되고 있다. 이에 육군의 드론봇 전투체계 운영개념, AAM 운영개념서와 같이 소요

Polymer Bimorph Film for Localized Haptic Rendering,” ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol.13, No.5, 2021. pp.6597-6605.

34) N. Pestell, L. Cramphorn, F. Papadopoulos and N. F. Lepora, “A Sense of Touch for the Shadow Modular Grasper,” IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.4, No.2, 2019, pp.2220-2226.

군별 무인체계에 대한 운영개념 설정을 위한 노력이 추진함과 동시에, 쏘 전장 동시통합작전 수행을 위한 통합 운영개념 설정이 지속 요구되고 있는 실정이다.

1) 무인체계의 실시간 제어 - 지상 무인·로봇체계

지상 무인체계는 전술 C4I체계와의 연동을 통해 위성, 레이더, 항공기, 헬기 등 광역 감시수단으로부터 전장정보를 공유하고, 소형무인기, 감시정찰 로봇, 개인전투체계 등의 감시수단으로부터 작전지역내 전장정보를 전술네트워크 기반에서 실시간 인식한다. 이를 통해 전 전장 동시통합작전을 수행하고, 네트워크 수단에 의해 무인-무인, 무인-유인 등으로 상호 네트워킹 및 지휘통제 플랫폼에 연계 운용되어 유인 전투수단과 함께 지상 무인전투체계가 운용된다.



그림 71. 국방 무인·로봇의 주요 목표 기술

지상 무인체계의 실시간 제어를 위한 자율제어 중 원격제어 단계는 무선 혹은 유선 기반으로 원격의 운용자가 무인체계를 가시권 및 비가시권에서 제어하는 단계를 의미하고, 반자율단계는 정해진 경로를 주행하는 경로주행, 비교적 지역경로 범위를 보다면 곳의 기동점 기반으로 주행하는 기동점 주행, 정해진 경로가 없는 상태에서 임무 기동점을 주행하는 목표점 주행으로 세분화 됨. 자율단계 및 협동/협력단계는 기술의 난이도가 높은 도전적 단계로 '실시간 제어'가 지향하는 최종 목표에 가깝다고 볼 수 있다.

미군의 사례에 따르면, 실시간 제어를 위해서는 무인체계의 자율적인 통제 및 임무 수행, 통합 상황인식, 계획 및 준비, 정보관리의 최적 수행 조건이 필요함. 이는 공통

운용환경을 통한 통합 운용/제어 기술, 근접 지상작전이나 특수작전 시 영상 제어기술이 요구된다.

2) 무인체계의 실시간 제어 - 해양 무인·로봇체계

해양 무인·로봇체계는 무인잠수정(UUV), 무인수상정(USV) 등으로 세분화하여 운용된다. 해양 무인·로봇체계의 실시간 제어를 위해 UUV의 정찰감시(ISR), 대기뢰전(MCM), 대잠전(ASW) 등의 다양한 임무를 자율적으로 수행하기 위한 자율제어 기술이 활발히 연구되고 있다.. 美 MRUUV의 경우에도 자율제어 8 수준으로 개발되어 도킹 및 회수를 위한 UUV간 유체력 상호간섭에 따른 안정영역 규명과 함께 수중에서 정밀한 도킹기술이 필요하다. 또한 도킹 후 잠수사의 지원 없이 잠수함의 어뢰발사관으로 회수하기 위해서 로봇팔 또는 소형 ROV를 이용하는 자동화 기술도 요구된다. 추진장치는 저속으로 기동 시 양호한 조종성 및 제어특성을 갖도록 제어판을 고속추진기 후류에 설치하여 제어판 타효(Effectiveness)를 극대화한 일체형 추진장치(IMP, Integrated Motro & Propulsor)가 필요하다. 항법기술은 UUV가 장시간 운행 시 현재의 위치를 정확히 파악하기 위해 기존의 EM-로거(Electro-Magnetic Logger) 대신에 도플러 속도 로거(Doppler Velocity Logger)를 사용하여 조류에 따른 오차를 최소화하고, 필요 시 부상하여 GPS로 보정하는 이른바 소형 고정밀 수중종합항법기술이 요구된다.

3) 무인체계의 실시간 제어 - 공중 무인·로봇체계

공중 무인·로봇체계는 UAV, UCAV 등으로 구분하여 운용되며, 타 무인체계 대비 가장 활발히 연구개발 및 도입되어 전력화 운용이 활발한 체계이다. 공중 무인·로봇체계의 실시간 제어를 위해서는 먼저, 비행체와 이격된 임무통제소에서 다수의 무인기를 동시에 운용할 수 있도록 무인기 상호 간 위치 및 시간 간격에 대한 자율제어를 통해 편대 구성, 표적 동시타격으로 공격효과를 높이기 위한 동시 운용기술이 필요하다. 또한 편대 내 무인전투기 사이나, 유인기와의 협동 운용 또는 민간공역 진입 시 공중충돌 자동회피기술, 그리고 각 무인전투기가 수집한 정보를 융합, 처리하여 정보의 정확도를 높이고 상황을 인지하는 기술이 요구된다. 그 밖에 인지된 상황에 자율적으로 비행경로 및 임무계획을 재수립하는 기술, 실시간 변화하는 전술 환경 및 편대 구성 하에서 지속적인 정보교환을 위한 동기화 네트워크 구성 기술, 활주로 상에서의 운용 및 자동 이착륙 기술 등이 추가적으로 요구된다.

나. 무인체계 실시간 제어 관련 신기술* 분석

1) 개요

국방기술진흥연구소의 『첨단무기체계를 선도하는 미래 신기술 예측, 2022』에 따르면, 사람 수준의 촉질감을 감지하는 고해상도 센서와 획득한 촉질감 정보를 재현하는 액추에이터를 이용하여 멀리 떨어진 병력 또는 무인체계와 실시간으로 촉질감을 공유 또는 제어하는 기술을 소개하였다. 이는 시청각 기반의 정보전달이 어려운 작전환경이나 극도의 보안을 요하는 상황, 사람이 작전을 수행할 수 없는 환경에서 촉질감을 통한 작전지시·통제 및 감각 추출, 증강을 통한 효율적 위험물 식별 및 제거 등 스마트 원격작전이 수행 가능하기에 본 연구와 접목하기에 가장 적합한 신기술이라 할 수 있다.

2) 무인체계 실시간 제어를 위한 신기술 적용의 필요성 및 기대효과

미래전장은 사람이 직접 전투하지 않고 자율적으로 행동하는 무기체계가 사람의 역할을 대신하여 작전을 수행하고 사람은 지휘통제 및 전투를 지원할 것으로 전망하고 있다. 이에 육군은 ‘육군비전 2050’에서 게임체인저로 지능형 자율전투 로봇을 꼽았으며, 특히 지능형 휴머노이드 전투로봇을 미래전장 지상전투의 핵심전력으로 미래의 전장에서 인간을 대체하는 가장 효과적인 무기체계라고 밝혔다. 본 연구에서는 지능형 휴머노이드 로봇 수준이 아닌 전장에서 작전수행이 가능한 지상 로봇형 무인체계의 실시간 제어 기법을 다루지만 기반 기술은 동일할 것으로 판단된다. 이러한 지상 로봇형 무인체계는 인간 전투원의 지휘 하에 위험지역에 대한 수색과 제한된 전투 등 다양한 작전을 수행할 수 있도록 보안성이 높고 빠르게 통신하며 다양한 동작을 제어할 수 있는 기술이 필요하다. 특히 원격으로 전장에서 노획한 장비를 활용하거나 미확인 물체를 식별·제거, 적 위협이 잔존하는 상황에서 응급처치 및 정비 등 고도의 임무 수행을 위해서는 사람 수준의 촉질감을 획득하는 고감도 센서와 촉질감을 재현하는 기술이 필요하다.

3) 기술적 원리

먼저, ① 사람/로봇의 피부에 부착하거나 착용이 용이한 형태로 구현하기 위해 센서-액추에이터 어레이 모듈을 유연한 형태로 집적하고 패널화 하고, ② 진동, 압력, 온도 등을 감지하는 센서를 이용하여 물체의 촉질감 정보를 수집하고 액추에이터의 주파수, 진폭, 온도 등을 변화시켜 사람의 촉질감을 재현하며, ③ 센서에서 획득한 각 픽셀별 촉질감 정보를 빠르게 전달할 수 있도록 데이터를 압축하고, 촉질감 정보를 암호화하여 고보안·저지연 통신이 가능토록 한다. 이후 ④ 인공지능을 이용하여 센서에서 획득한 촉질감 패턴을 학습/분석하고 특정 감각패턴을 추출하거나 증강하여 정밀제어, 미확인 물체 식별 등 고도의 임무수행을 가능케 한다.



그림 72. 감각 네트워크 기반 능동제어 기술

4) 연구동향 및 기술수준

우리나라는 대부분 착용형 또는 부착형 햅틱 장치를 활용하여 시청각 콘텐츠와 연동된 햅틱 피드백 기술을 위주로 연구하고 있다. 최근 차세대 텔레햅틱 기술과 관련한 디바이스 연구를 최초로 시도하여 가능성을 검증하기도 하였다.



그림 73. 비햅틱스의 촉각슈트 TactSuit 시리즈

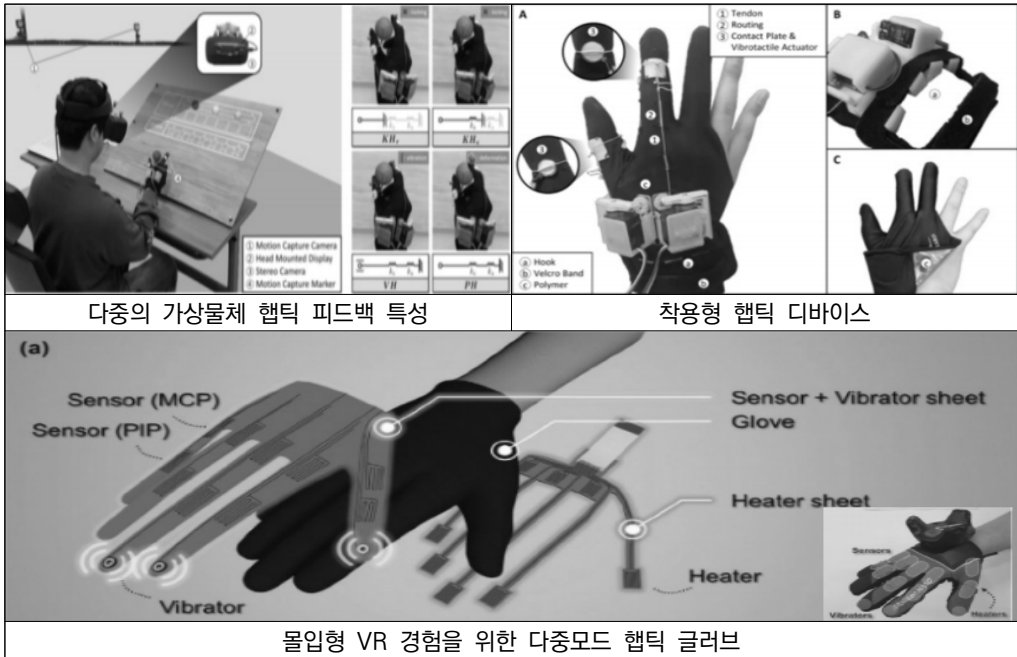


그림 74. 비햅틱스의 촉각슈트 TactSuit 시리즈

구체적으로 살펴보면, 먼저 전남대학교는 광섬유, 압전체 및 가속도계를 통해 전투기의 날개 변형 형상 및 충격위치를 센싱하여 조종사의 팔에 촉감으로 전달하는 스마트링 무선 햅틱 인터페이스 과제를 국제공동기초연구로 수행하였다. 연합정밀(주)은 촉감, 근감각, 마찰력을 재현하는 액추에이터를 사용자 손 끝에 부착하여 가상환경의 위치에 따라 발생하는 촉감을 사용자에게 제공하여 실제 항공기의 조정을 수행하는 효과를 내는 촉감제시장치를 개발하였다. 한국전자통신연구원(ETRI)에서 원거리에서도 촉감으로 의사소통을 할 수 있는 압전소재 기반의 센서 및 액추에이터를 이용한 차세대 텔레햅틱 기술을 개발하였다. ㈜비햅틱스는 콘텐츠와 착용형 촉각슈트(TactSuit X)의 연동을 통해 사용자가 경험하는 모든 것을 피드백으로 재현하여 전달하는 기술을 선보였고, 서울대학교는 햅틱 렌더링 기술개발을 통해 가상물체의 역감, 탄성, 촉질감 등을 피드백하는 착용형 햅틱 시스템을 개발하였다.

한편, 글로벌 동향 살펴보면 먼저, ① 미국은 다량의 특허를 기반으로 여러 형태의 웨어러블 햅틱기기를 개발하여 다양한 분야의 적용을 앞두고 있지만 프로토타입 수준이거나 기기가 벌키(Bulky)하여 특수목적만을 제외한 상용화에는 제한적이라는 단점을 안고 있다. 다만, 햅트엑스社에서는 한 손에 133개의 액추에이터를 구성하여 물체의 모양, 움직임, 질감과 같은 촉각 피드백을 제공하는 햅틱 글로브를 개발하였으며, 장거

리에서 로봇 손을 제어하고, 로봇이 만지는 촉감을 실시간으로 착용한 사용자가 느끼는 햅틱 커뮤니케이션 데모를 선보여 제어 기술 현시의 가능성을 보여주었다. ② 중국은 대학연구기관을 중심으로 햅틱 장치에 대한 연구가 진행되고 있으며, 피부 부착형 소자 연구를 기반으로 원격지의 로봇을 운영할 수 있도록 하거나 수술용 시뮬레이터에 활용하기 위한 연구를 진행하고 있음. 또한 VR/AR에 활용이 가능한 다중 복합 감각 인터페이스에 관한 연구 또한 활발히 연구되고 있다. ③ 일본은 대학과 벤처기업을 중심으로 착용형과 부착형 장치를 이용한 텔레햅틱 기술이 연구되고 있으며, 신호처리와 통신, 프로세스 플로우 최적화를 통한 지연속도 단축 기술이 활발히 연구되고 있다. 도쿄대학교에서는 원격으로 로봇이 느끼는 시각, 청각, 촉각을 느낄 수 있는 텔레이그지스턴스(Teleexistence) 시스템 “TELESAR V”를 개발하여 로봇이 물체를 만질 때 발생하는 힘, 진동, 온도를 실시간으로 재현하는 시스템을 구현하였다. ④ EU는 의료 산업, 자동차 분야, 소비자 기기 등 햅틱 기술의 채택 증가로 유럽의 경우 각 국가별 연구기관에서 착용형 햅틱 기술이 제안되고 있으나 상용화보다는 문헌위주로 기술이 소개되고 있다. 특히, 네덜란드 MANUS社는 독자적 기술의 유연 센서, 9축 IMU, 선형 구동 액추에이터를 각 손가락 부위마다 집적하여 높은 정확도의 실시간 손가락 동작 모니터링과 햅틱 신호의 강약 및 진동 조절이 가능한 햅틱 글로브를 개발하였으며, 고해상도의 터치와 그립감을 연출하고 햅틱 글로브 무선연동을 통해 가상현실에서의 물질 종류나 힘에 따라 다양한 햅틱 신호를 제공할 수 있다.



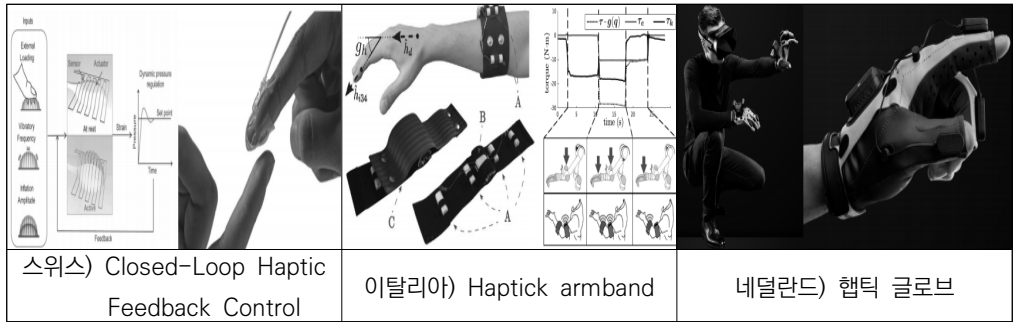


그림 75. 주요 국가별 연구개발 및 기술 동향

5) 현 기술수준 분석 및 시사점

국방기술진흥연구소에 따르면 감각센서 네트워킹 기반 능동제어(햅틱) 기술은 미국-EU-중국-일본-한국 순으로 5개국 중에서는 한국의 기술수준이 가장 낮은 것으로 조사되었다.

표 31. 주요국 기술수준, 연구단계 역량 및 연구개발 활동 경험

국가	기술수준		연구단계 역량			연구개발 활동경향 (점수3)
	수준(%)	격차(년)	그룹 (점수1)	기초 (점수2)	응용연구 (점수2)	
미국	100.0	0.0	최고 (4)	탁월 (4.6)	탁월 (4.8)	상승 (3.2)
EU	94.9	0.9	선도 (3.8)	탁월 (4.6)	우수 (4.2)	상승 (2.8)
일본	86.5	2.0	추격 (3)	우수 (4.4)	보통 (3.2)	상승 (2.6)
한국	81.4	2.8	추격 (3)	우수 (3.6)	보통 (3.2)	상승 (3.2)
중국	67.1	4.5	후발 (2)	보통 (2.8)	미흡 (2)	유지 (2.4)

1) 기술수준 그룹(4그룹)을 선도/최고(4점), 추격(3점), 후발(2점), 낙후(1점)로 하여 평균값을 계산함
 2) 연구단계별 역량 구간(5구간)을 탁월(5점), 우수(4점), 보통(3점), 미흡(2점), 부족(1점)으로 하여 평균값을 계산함
 3) 연구개발 활동경향 구간(4구간)을 급상승(4점), 상승(3점), 유지(2점), 하강(1점)으로 하여 평균값을 계산함

우리나라는 촉각획득 센서 기술은 대학/연구소를 중심으로 일정수준의 기술력은 확보하였으나, 촉감을 재생/전달하는 햅틱 기술(HW, SW) 및 통합시스템에 대한 수준은 낮은 것으로 판단되어 ① '센서-액추에이터 모듈화 기술' 구현이 시급하다. 미국, EU 등은 국방 활용을 목적으로 센서/액추에이터 기술뿐만 아니라 햅틱 글러브, 햅틱 슈트 등 착용 가능한 패널 형태의 다양한 응용 기술을 개발하는 등 ② 국방적용(착용/부착

등을 위한 ‘폼팩터 패널화 기술’에 집중하고 있다. 또한, EU에서는 우주 비행사를 대신할 원격로봇, 햅틱 피드백을 통한 원격제어 EOD(폭발물제거용)로봇 등 고차원 기술수준을 목표로 입체촉각(고정밀/복합질감) 센싱, AI 기반 감각 보조 기술 등에 개발이 집중되고 있어 ③ ‘다차원 입체촉각 센싱 및 무선연동 기술’, ‘AI 기반 감각패턴 분석 및 증강 기술’ 개발에 노력을 쏟고 있다. 한편, 미국에서는 군을 중심으로 오랜 기간 연구를 수행하여 세계최고수준의 감각센서 및 액추에이터 기술을 보유하고 있으며, 군사작전 활용을 고려 신속/효율적 정보전달

기술 및 데이터에 대한 압축/암호화 기술에 대한 연구 즉, ④ ‘데이터 압축 및 암호화 기술’ 개발에 매진하고 있다. 이렇듯 각 국가별 햅틱 기술을 활용한 무인체계의 실시간 제어 구현을 위해 다양한 노력을 기울이고 있다. 국가별 기술분야별 목표달성을 위한 세부과제는 아래 표와 같이 정리할 수 있다.

표 32. 기술분야별 목표달성을 위한 세부과제

복합 촉질감 획득/ 재현을 위한 다차원 광대역 입체촉각 센서- 액추에이터 모듈화 기술	· 사람 수준의 다차원 광대역 복합 촉질감을 획득하기 위해 정압센서, 동압센서, 온도센서 등 인간피부의 공간분해능력 이상으로 집적한 센서 패널과 센서에서 획득한 다차원 고해상도 입체촉각 정보를 실시간/원격으로 액추에이터에 전송하여 재현할 수 있는 고집적형 센서-액추에이터 모듈 기술
착용/부착을 위한 유연 폼팩터 패널화 기술	· 사람/로봇의 피부에 부착하거나 착용이 용이한 형태로 구현하기 위해 다채널 센서-액추에이터 어레이 모듈을 유연한 형태로 집적하고 패널화하는 유연 기판/배선 설계 및 제작 기술
다차원 입체촉각 센싱 신호처리 및 양방향 무선연동 플랫폼 기술	· 센서에서 획득한 각 픽셀별 다차원 입체촉각 정보를 지능형 알고리즘을 통해 고정밀/고정확 복합 촉질감으로 보상 신호처리하고, 이를 실시간으로 액추에이터에 무선으로 전송하여 사실적인 촉질감을 재현하거나 양방향 촉질감/패턴 인터랙션을 제공하는 기술
AI 기반 감각패턴 분석 및 증강 기술	· 센서에서 획득된 복합 촉감 정보를 이용하여 AI 기반 감각패턴을 학습/분석하고 특정 감각의 패턴을 추출하거나 증강하여 물체를 식별·탐지하는 지능형 데이터 처리 기술
고보안·저지연 통신을 위한 촉질감 데이터 압축 및 암호화 기술	· 시청각 제약환경에 구애받지 않고 신속하고 효율적으로 정보전달 및 작전수행이 가능하도록 센서에서 획득한 복합 촉질감 데이터를 압축 처리하고 암호화하는 기술

국방기술진흥연구소는 감각센서 네트워킹 기반 능동제어 기술의 실현 예상시기를 ‘중기, 장기, 장기 이후’로 구분하여 제시하고 있다.

표 33. 감각센서 네트워킹 기반 능동제어 기술 실현 예측

기술명세	<ul style="list-style-type: none"> • 사람 수준의 촉질감을 획득할 수 있는 고해상도 센서와 획득한 촉질감 정보를 재현하는 액추에이터를 이용하여 전장에 있는 병력 또는 무인로봇과 촉질감 정보를 공유 또는 제어함으로써, 기존의 시청각 통신 대비 높은 보안성의 작전 지시 및 신속한 상황인지, 원격제어를 지원하는 기술 				
개략적 목표성능	<ul style="list-style-type: none"> • 중기 : 초정밀 감각링크 기술 • 장기 : 지능형 감각증강 기술 • 장기 이후 : 초공간 감각센서 네트워킹 기술 				
세부 미래기술과제	<ul style="list-style-type: none"> • 복합 촉질감 정보 획득 및 재현을 위한 다차원 광대역 입체촉각 센서-액추에이터 모듈화 기술 • 착용/부착을 위한 유연 폼팩터 패널화 기술 • 다차원 입체촉각 센싱 신호처리 및 양방향 무선연동 플랫폼 기술 • AI 기반 감각정보 분석 및 증강 기술 • 고보안·저지연 통신을 위한 촉질감 데이터 압축 및 암호화 기술 				
적용 분야 (무기체계 유형)	미래무기 구현기능	실현 예상시기	구현기능 세부설명(시나리오)		
첨단센서 (지휘통제)	전장 상황 공유를 위한 감각통신	중기 (F+3 ~ F+7)	시청각 기반 정보전달이 어려운 환경에서 개별 또는 다수의 병력들에게 촉각을 통해 전장 상황을 공유하여 상황 판단과 지휘결심 지원		
첨단센서 (자상무인)	감각증강 기반 지능형 로봇 원격제어 기술	장기 (F+8 ~ F+17)	센서로 획득한 촉질감 정보의 감각패턴을 분석하고 증강하여 위험물 탐사·식별·제거 등 고정밀 로봇제어 기능		
첨단센서 (자상무인)	극한환경 임무수행을 위한 초공간 능동제어 기술	장기 이후 (F+18~)	해저, 우주 등 사람이 임무를 수행할 수 없는 극한 환경에서 고정밀 원격제어 로봇을 이용한 고도의 임무수행 지원		
8대 미래 분야 (방위사업청)	-	10대 핵심기술 (합참)	첨단센서	확보방안	국방 핵심기술

전장 상황 공유를 위한 감각통신은 중기(F+3 ~ F+7), 감각증강 기반 지능형 로봇 원격제어 기술은 장기(F+8 ~ F+17), 극한환경 임무수행을 위한 초공간 능동제어 기술은 장기 이후 (F+18 ~)로 제시하고 있어 가까운 미래에 실현될 가능성은 극히 낮은 기술이라고 할 수 있다. 하지만 개발될 기술은 결국 어디에, 어떻게 활용되느냐가 기술의 가치를 결정할 뿐만 아니라 운용의 효과성을 보장할 수 있기에 다음 절에서는 앞선 신기술을 적용하여 무인체계에 대한 실시간 제어가 가능할 경우 운영개념을 분석 / 제시하고자 한다.

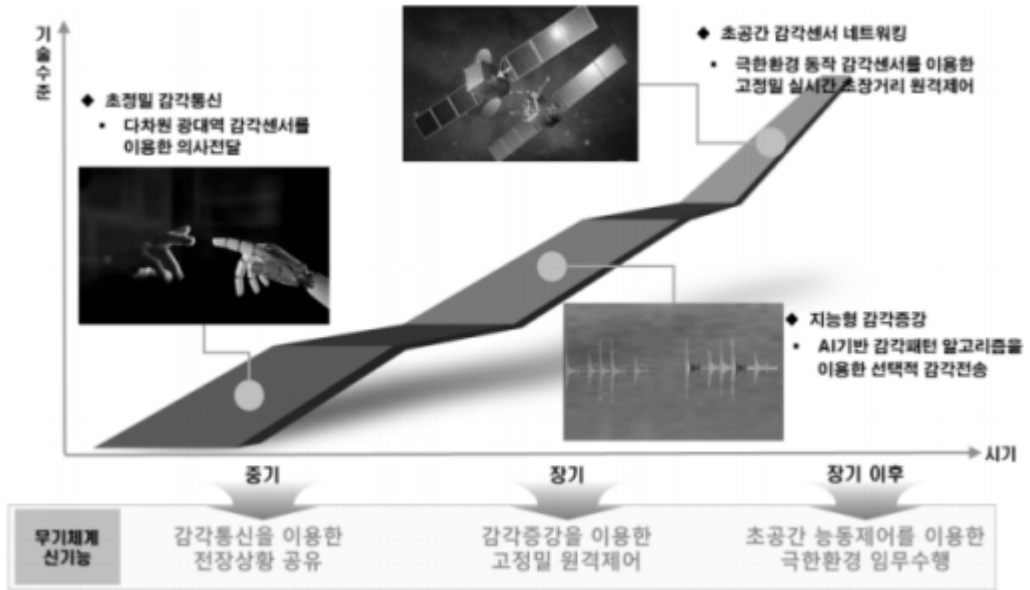


그림 76. 기술발전추세 및 무기체계 신기능

다. 무인체계 실시간 제어에 따른 운영개념 도출 경과

무인체계 실시간 제어에 따른 운영개념은 아래 [그림 71]과 같이 ‘문헌조사, 개략안 수립, 군사적 타당성 검토/보완, 델파이, 수정·보완’ 등 크게 5단계의 과정을 따라 도출하였다. ‘가’항에서 제시한 바와 같이 문헌조사를 바탕으로 지상, 해양, 공중에 대한 운영개념 개략 안을 수립하였다. ① 지상에서는 전투원에 의한 UGV, 드론 원격 제어 ② 해상에서는 함정에 의한 USV, UUV 원격 제어 ③ 공중에서는 유인전투기에 의한 무인전투기, UAV 원격 제어하는 방식의 개략적인 운영개념을 설정하였다.

다만, 본 연구과제에서 정의한 ‘무인체계 실시간 제어’에 대한 개념을 고찰할 필요가 있다. 해상 및 공중에서의 무인체계 운영개념은 함정 또는 유인전투기에 의한 제어로서 운용자(Operator)가 무인체계를 직접 제어하는 것이 아닌 함정 및 유인전투기를 거쳐 제어하는 상대적 간접제어의 형태로 이루어진다. 이에 연구진은 발주기관(국방대학교)과의 협의를 통해 ‘소부대의 전투원이 직접 무인체계를 원격으로 실시간 제어’하는 기술과 운영개념을 도출하기로 합의하여, 효과적인 실시간 원격제어 기술을 감각 네트워크 기반 능동제어 기술로 한정하여 운영개념을 도출·제시하였다.

연구진은 보다 신뢰성 높은 운영개념을 도출하기 위해 “감각 네트워크 기반 능동제어 기술 적용하였을 경우 지·해·공 영역별 효율·효과적인 운영개념 제시가 가능한

가?”라는 핵심 질문을 통해 군사적 타당성을 검토하였다. ‘작전 운영개념의 효율·효과성, 전술적 부합성, 교리적 부합성, 소요군의 고유특성’ 등을 지표로 검토한 결과 [전장 영역별] ① 지상에서의 적용은 UGV 등 완전히 타당하고 ② 공중에서의 적용은 드론의 운용 등 부분적으로 타당하며 ③ 해상에서의 적용은 타당성이 없는 것으로 나타났다. [소요군별] ① 육군 & 해병대에서의 운용은 타당하나, ② 해·공군에서의 운용은 크게 타당성이 없는 것으로 1차 결론을 도출하였다.

이를 기초로 군사전문가들의 의견을 수렴·분석한 결과 “감각 네트워크 기반 능동 제어 기술을 적용한 무인체계 실시간 제어는 육군이 지상 및 공중 무인체계를 함께 운영하는 것이 가장 효과적이고 타당함. 해·공군도 필요시 부분적으로 활용가능하나, 대부분 기지방호용에 국한될 가능성이 높으며 실제 전장에서 무인체계를 직접적으로(directly) 실시간 원격 제어할 가능성은 거의 없을 것”이라는 군사적 검토 내용을 확인하였다. 이에 육군이 지상 및 공중 무인체계를 함께 또는 동시에 운영하는 무인체계 실시간 제어에 따른 운영개념을 제시하였다.

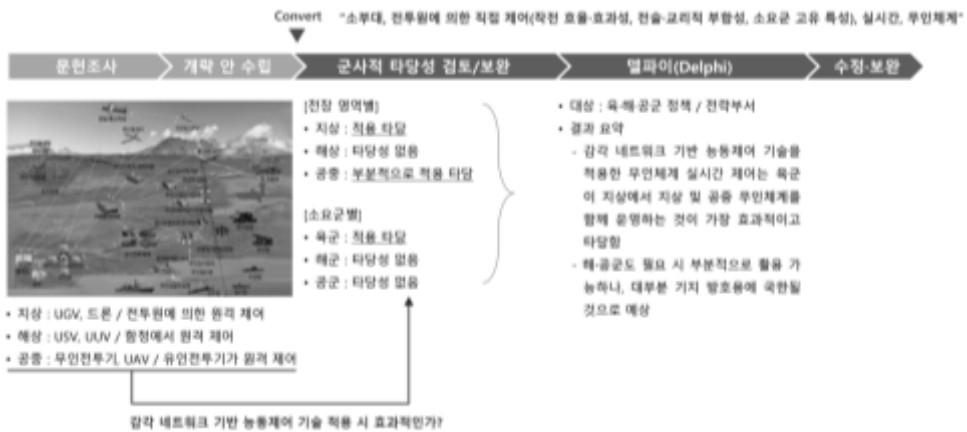


그림 77. 무인체계 실시간 제어에 따른 운영개념 도출 경과

라. 무인체계 실시간 제어에 따른 운영개념

1) 개요

지상체계는 전술 C4I체계와의 연동을 통해 위성, 레이더, 항공기, 헬기 등 광역 감시수단으로부터의 전장정보를 공유하고, 소형 무인기, 감시정찰 로봇, 개인 전투체계 등의 감시수단으로부터 작전지역 내 전장정보를 전술 네트워크 기반에서 실시간 인식함으로써, 전 전장 동시 통합작전을 수행하고, 네트워크 수단에 의해 ‘무인-무인’, ‘무인

-유인' 등으로 상호 네트워킹과 지휘통제 플랫폼에 연계 운용되어 유·무인 전투수단과 네트워크 기반 인간중심의 지휘통제 아래 지상 무인전투체계를 운용한다. 자주포 등 원거리 타격체계는 위성, 무인기로부터의 표적정보를 이용하여 자동으로 사격제원을 산출하고, 인공지능탄을 보다 원거리에서 발사하며, 표적 손상정도를 영상이미지탄으로부터 전송받아 판단하는 효과중심의 능동적 사격임무를 수행함으로써, 적 중심공격, 대화력전, 보병부대 직접지원의 임무 수행이 가능하다.

인명피해를 최소화하면서 최대효과를 달성할 수 있도록 운용하며, 협소지역 정찰 등 인간이 임무를 수행하기에는 매우 제한된 분야에 휴대용, 초소형 및 생체모방형 무인장비를 투입하여 운용하는 등 인간의 기능과 능력을 병행 대체 운용한다. 이를 통해 신뢰성 유지 및 시너지 효과를 추구하고, 소형 무인기, 감시정찰 로봇 등 감시정찰 수단을 최선단에 배치하여 적 정보를 입수하며 전술 네트워크를 통해 공유하여, 작전지역 내 지상/항공 감시정찰, 정밀타격의 Sensor-to-Shooter 임무 수행으로 자주포 등 원거리 타격체계와의 통합 기반 전투를 수행한다. 미래의 지상 무인전투체계 기반 무기체계는 네트워크로 결합하여 감시정찰 기능을 가지는 공중의 무인기와 지상의 감시정찰 로봇이 전투선단에서 표적을 획득하고, 후방의 안전한 곳에는 지휘통제 차량이 위치하며 전투선단에는 직사탄·미사일 사격이 가능한 중 전투로봇과 비교적 안전한 곳에는 직사/곡사/미사일/소모성 무인기까지 포함한 다목적 탄 발사가 가능한 다목적 화력로봇이 위치하여 운영될 것으로 예상된다. 시가전·테러전을 포함한 특수전에도 지상 무인전투체계가 활용될 것으로 예상되며, 개인 혹은 소대의 감시정찰을 위해 공중에서는 수직이착륙 무인기를 운용하고 지상에서는 근거리 감시정찰 로봇을 운용하며, 개인병사가 휴대하면서 특수지역을 감시·정찰하는 휴대형 감시·정찰 로봇, 중화기 발사가 가능한 경전투 로봇 등 다양한 무인체계가 운영될 것으로 예상된다. 또한 지뢰는 적 기동차량의 이동로에 차량 또는 수동으로 지상에 지뢰를 설치하여 원격 무선통신으로 운영될 것이다.

2) 무인체계 실시간 제어에 따른 운영개념

무인체계 실시간 제어 기술조사 및 본 장에서 다루었던 감각 네트워크 기반 능동제어 기술에 따르면 결국 운용자(Operator)가 직접적인 전투 또는 전투지원 행위를 하는 것이 아니라 로봇을 실시간 제어함으로써 전투 또는 전투지원 행위의 목적을 달성해야 한다. 따라서 본 연구에서는 아래 그림과 같이 지해공 영역별 운영개념 및 통합 운영개념까지 다루지 않고, 육군 및 해병대에서 소부대 전투원에 의한 직접적인(directly) 무인체계 실시간 운영개념을 제시하였다.



그림 78. 지해공 무인체계 통합전투 운용개념도

앞선 기술분석 결과를 기초로 무인체계를 실시간 제어하기 위해 필요한 기술은 크게 3가지로 구분할 수 있다.



그림 79. 무인체계 실시간 제어 아키텍처

먼저, 햅틱 기술을 예로 들 수 있다. 손에 착용형 또는 부착형으로 무인체계를 제어할 수 있는 제어장치를 통해 운용자의 손을 통해 로봇의 행동을 제어하고, 로봇이 센서를 통해 획득하는 일련의 정보들을 시각, 청각, 촉각 등의 감각으로 변환하여 실시간 공유할 수 있는 기술이다. 다음은 컨트롤러로 실시간 무인체계를 원격 제어할 수 있다는 점은 햅틱 기술과 동일하나 시각, 청각, 촉각 등의 감각 정보를 공유할 수 없다는 점과 손이 아닌 별도의 컨트롤러를 통해 제어·조작해야 한다는 점을 차이점으로 들 수 있다. 끝으로 뇌-기계 인터페이스(Brain-Machine Interface, BMI) 기술은 말 그대로 뇌와 기계를 연결해 뇌의 작용(생각)만으로 무인체계를 조작하는 인터페이스 기술을 말한다. 이는 특정 생각을 했을 때 발생하는 신호를 전극을 이용해 계속하고, 계속

한 데이터에서 잡음을 제거하고 뇌 활동 데이터만 선별해서 증폭한다. 이후 해당 데이터를 디지털 데이터로 변환 후 알고리즘을 이용해 어떠한 뇌의 활동인지 판단한다. 판단 결과가 담긴 데이터를 무인체계에 전달하면 입력된 데이터대로 무인체계가 작동하는 메커니즘을 갖고 있다. 이러한 3가지 기술을 기초로 실시간 무인체계 제어 아키텍처를 도식화 하면 아래와 같다.

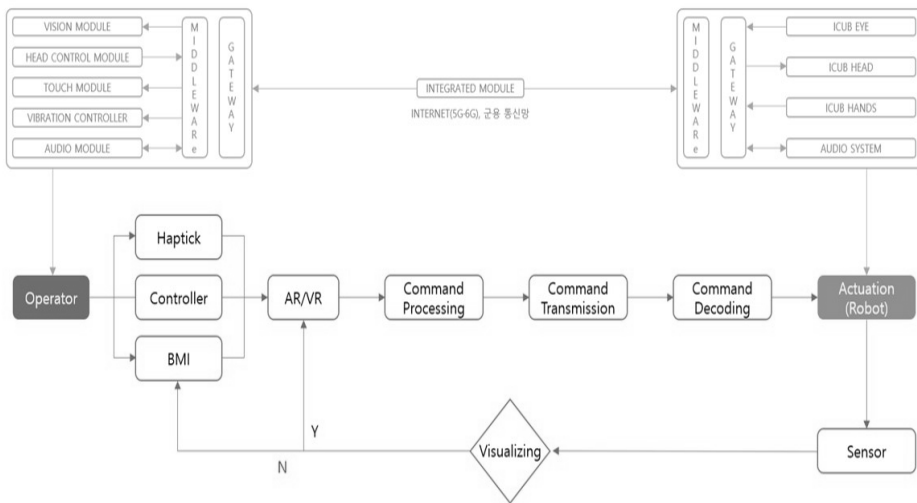


그림 80. 무인체계 실시간 제어 아키텍처

운용자(Operator)가 햅틱, 컨트롤러, BMI 중 하나의 기술을 적용하여 제어 명령을 하달하게 되면 데이터 처리와 암호화 과정을 거쳐 무인체계로 전달되고 무인체계가 작전현장에서 수집하는 데이터를 실시간으로 공유받게 되고 이는 VR/AR 장비와 결합할 경우 보다 현실적인 시각화가 가능하게 된다. 그리고 이러한 모든 과정은 실시간으로 이루어진다. 이때, 운용자와 무인체계 간에는 상용 또는 군용 통신 환경하에서(선택적 적용) 게이트웨이와 미들웨어를 통해 시각, 청각, 촉각의 감각 정보로 실시간 공유받게 되어 실시간 제어가 가능하다. 이렇듯 무인체계의 실시간 제어는 운용자가 원격으로 직접 무인체계를 제어하여 운용한다는 운용 특성을 고려하여 후방에 있는 지휘관(자)에서 운용하기 보다 주로 전투현장에 적용하는 것이 효과적이라 할 수 있다. 따라서 분대 규모를 기준으로 전투원(Operator)이 UGV(Unmanned Ground Vehicle)와 드론을 원격으로 제어하는 운용개념을 제시하고자 한다.

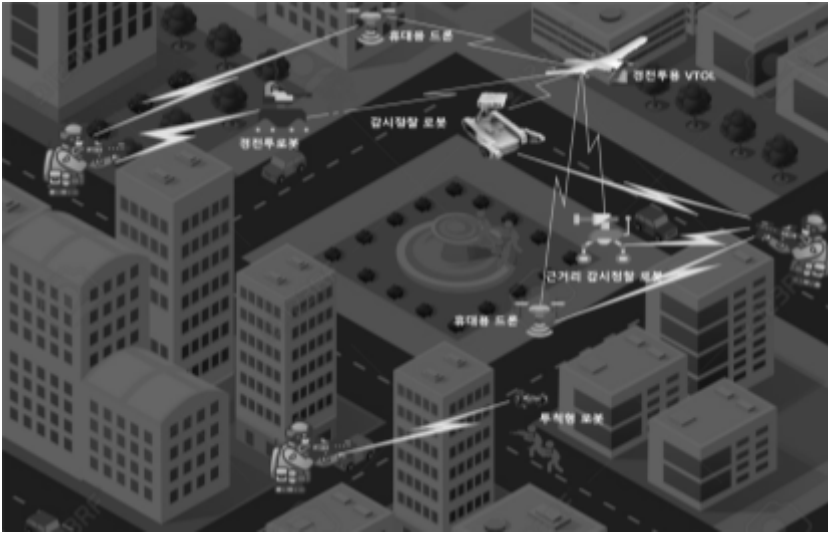


그림 81. 무인체계 실시간 운영개념

지상에서 전투원이 지상 및 공중 무인체계(UGV, 드론)을 실시간 원격 제어하는 운영개념을 알기 쉽고 가시적으로 표현하기 위해 도시지역에서의 작전수행을 예로 제시하고자 한다. 먼저, ① 경전투용 VTOL 및 UAV를 통해 작전수행 전반에 대한 광역감시정보를 제공한다. 이때 제공되는 정보는 전투원에게도 공유되지만, 작전지역 내 운용되는 모든 무인체계에 대한 실시간 정보 공유가 중요하다. ② 전투원(Operator)은 순차 또는 동시적으로 ‘햅틱, 컨트롤러, BMI(BCI)’ 등의 감각 네트워크 기반 능동 제어기술을 활용하여 공중 무인체계와 지상 무인체계를 운영한다. 이때 운용가능한 무인체계는 현용 및 미래 전력소요에 반영된 드론, 로봇(경전투, 감시정찰, 근거리감시정찰, 투척형)이 될 것이다. 이를 도심지역내 은거 중인 적을 수색·정찰하여 소탕하는 작전에 적용해보면 아래와 같은 시나리오 형태로 작전이 운영될 것으로 판단된다.

표 34. 실시간 무인체계 운영 시나리오

상 황
· M (임무) : 도심내 은거 중인 적 색출 / 소탕
· E (적) : 소화기로 무장한 1개 분대 규모, 00지역내 은거 중
· T (아군부대) : 소화기, 개인전투체계, 지상·공중 무인체계로 무장한 1개 분대규모
· T (지형 및 기상) : 고층 빌딩이 산재한 도심지역
· T (가용시간) : 2hr
· C (민간요소) : 작전에 미치는 영향요소 없음

시나리오

- [VTOL] 도심지역내 적 규모, 위치, 무장상태 등 정보 수집·공유 (↔지상·공중 무인체계, 전투원)
- [A팀] 전투원 3명, BMI(BCI) 기술을 활용하여 드론 및 감시정찰 로봇 제어 / 은거 중인 적 3명 식별
- [B팀] 전투원 3명, 식별된 적 은거지역 일대로 이동 후 컨트롤러를 활용하여 경전투로봇 운용 / 적 2명 사살, 1명 도주
- [C팀] 전투원 4명, BMI(BCI) 기술을 활용한 드론 원격 제어로 도주 중인 적 1명 추적 / 전투원에 의한 격멸
- [투척형 로봇] 남동측 건물사이에서 은밀히 이동 중인 적 2명 식별 / 실시간 정보 공유 (↔지상·공중 무인체계, 전투원)
- [A팀] 전투원 3명, BMI(BCI) 기술을 활용하여 경전투로봇 제어 / 이동 중인 적 2명 식별 / 사살
- [B팀] 전투원 3명, 컨트롤러를 활용하여 SAR 센서가 장착된 근거리 감시정찰로봇 운용 / IED로 추정되는 미상 물체 발견
- [EOD] 전투원 3명, 햅틱 기술을 활용한 폭발물 제거 로봇을 운용하여 IED 제거

참 고 문 헌

1. 김상배, '미래전의 진화와 국제정치의 변환', 2021
2. 박동선, 오경원, '미국의 무인체계 정책 분석을 통한 한국의 무인체계 발전에 관한 연구', 2021
3. 서일수, 김용우, '드론봇 전투체계 발전방안 연구', 2021
4. 경기도 경제과학진흥원, 『경기도 무인이동체 산업 육성 기본계획』, 2020
5. 국방기술진흥연구소, 『첨단무기체계를 선도하는 미래 신기술 예측』, 2022
6. 국방과학기술용어사전, 국방과학기술진흥연구소, 2019
7. 김성진. (2020. 7. 20). “드론이 가리키는 대상을 어디까지로 봐야하나?”, 국방논단. 한국국방연구원
8. 김성진. (2022. 11. 10). “국방 무인체계 개념 정의와 분류방안”, 국방논단. 한국국방연구원.
9. 국내외 군사용 무인기 개발 동향 분석 및 북한 무인기 대응 방안 제언, Journal of Convergence for Information Technology Vol. 11. No. 12, pp. 97-105, 2021
10. 군용 지상무인차량 개발 동향, 한국자동차연구원, 정상빈, 2022년
11. 국방부, 『AI 과학기술강군 육성을 위한 국방 무인체계 발전계획』, 2023
12. H. G. Hwang, H. W. Kim, B. S. Kim, Y. T. Woo, I. S. Shin, J.H. Shin, Y. J, Lee, B. W. Choi, A Development of Integrated Control System for Platform Equipments of Unmanned Surface Vehicle(USV), Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, vol. 21, 2017.8, p.1611~1618
13. 이지은. "무인 잠수정 연구 개발 동향 분석 및 발전 방안." 한국산학기술학회 논문지 20.9 (2019): 233-239.
14. Samwel Opiyo et. "A Review on Teleoperation of Mobile Ground Robots: Architecture and Situation Awareness", International Journal of Control, Automation and Systems 19(3) (2021) 1384-140.
15. nal Journal of Control, Automation and Systems 19(3) (2021) 1384-140.
16. S. Han and J. Lee, "Tele-operation of a mobile robot using a force reflection joystick with a single hall sensor," Proc. of RO-MAN, The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp. 206-211, 2007.
17. S. H. Kenyon, D. Creary, D. Thi, and J. Maynard, "A small, cheap, and portable reconnaissance robot," Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense IV, vol. 5778, pp. 434-443, 2005.

1. J. Zhao, J. Zhang, Y. Feng, and J. Guo, "The study and application of the IoT technology in agriculture," Proc. of 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology, vol. 2, pp. 462-465, 2010
2. B. S. Thomas, Telerobotics, Automation, And Human Supervisory Control , MIT press, 1992.
3. U. Martinez-Hernandez, M. Szollosy, L. W. Boorman, H. Kerdegari, and T. J. Prescott, "Towards a wearable interface for immersive telepresence in robotics," Interactivity, Game Creation, Design, Learning, and Innovation, Springer, pp. 65-73, 2016.
4. J. Liu, Y. Wang, B. Li, and S. Ma, "Current research, key performances and future development of search and rescue robots," Frontiers of Mechanical Engineering in China, vol. 2, no. 4, pp. 404-416, 2007.
5. M. Daily, Y. Cho, K. Martin, and D. Payton, "World embedded interfaces for human-robot interaction," Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, p. 6, 2003.vol. 2, no. 4, pp. 404-416, 2007
6. M. Sauer, M. Hess, and K. Schilling, "Towards a predictive mixed reality user interface for mobile robot teleoperation," IFAC Proceedings Volumes, vol. 42, no. 22, pp.91-96, 2009\
7. R. Bernhaupt, F. Mueller, D. Verweij, J. Andres, "VROOM: Virtual Robot Overlay for Online Meetings," in Proc. of ACM CHI EA, 2020, pp.1-10
8. Facebook Tech., "Millimeter wave hand tracking," US Patent 10451707, 2019
9. 최진철 등, "VR/AR 기반 텔레오퍼레이션 기술 동향", ETRI 주간기술동향, 2021.6.30.
10. Passenberg, C., Peer, A., Buss, M.: A survey of environment-, operator-, and task-adapted controllers for teleoperation systems. Mechatronics 20(7), 787-801 (2010).
11. I. Hwang, H. Kim, S. Mun, S. Yun and T. Kang, "A Light-Driven Vibrotactile Actuator with a Polymer Bimorph Film for Localized Haptic Rendering," ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol.13, No.5, 2021. pp.6597-6605.
12. N. Pestell, L. Cramphorn, F. Papadopoulos and N. F. Lepora, "A Sense of Touch for the Shadow Modular Grasper," IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.4, No.2, 2019, pp.2220-2226.
13. 박현섭 등, "원격조종로봇 및 원격제어기술과 응용분야", KEIT PD Issue Report, 2013
14. Syeda Nadiyah Fatima Nahri et al. "A Review on Haptic Bilateral Teleoperation Systems", Journal of Intelligent & Robotic Systems (2022) 104: 13