

석사학위논문

플래시 라이더를 활용한
Army TIGER 전투체계 발전방안

- 다목적 무인차량(MUGV)을 중심으로 -

2026년

한성대학교 국방과학대학원

국 방 전 력 학 과

국 방 사 업 관 리 전 공

장 동 준

석사학위논문
지도교수 김두형

플래시 라이다를 활용한
Army TIGER 전투체계 발전방안
- 다목적 무인차량(MUGV)을 중심으로 -

Development Plan for the Army TIGER Combat System Using Flash LiDAR
-Focused on Multipurpose Unmanned Ground Vehicles (MUGV)-

2025년 12월 일

한성대학교 국방과학대학원

국방전력학과

국방사업관리전공

장 동 준

석사학위논문
지도교수 김두형

플래시 라이다를 활용한
Army TIGER 전투체계 발전방안
- 다목적 무인차량(MUGV)을 중심으로 -

Development Plan for the Army TIGER Combat System Using Flash LiDAR
-Focused on Multipurpose Unmanned Ground Vehicles (MUGV)-

위 논문을 국방전력학 석사학위 논문으로 제출함

2025년 12월 일

한성대학교 국방과학대학원

국 방 전 력 학 과

국 방 사 업 관 리 전 공

장 동 준

장동준의 국방전력학 석사학위 논문을 인준함

2025년 12월 일

심사위원장 김 홍 빈 (인)

심사위원 김 두 형 (인)

심사위원 김 형 석 (인)

국 문 초 록

플래시 라이다를 활용한 Army TIGER 전투체계 발전방안

- 다목적 무인차량(MUGV)을 중심으로 -

한성대학교 국방과학대학원
국 방 전 력 학 과
국 방 사 업 관 리 전 공
장 동 준

본 연구는 Army TIGER 전투체계의 핵심장비인 다목적 무인차량(MUGV)에 적용된 회전식 스캐닝 라이다의 기술적 한계를 분석하고 플래시 라이다(Flash LiDAR)를 대안으로 제시하여 그 적용 가능성과 발전 방향을 도출하는 데 목적이 있다. 한반도 안보환경은 북한의 핵·미사일 위협 고도화와 저출산에 따른 병역자원 감소로 기존 병력 중심의 전력 구조 유지가 어려워지고 있다. 이에 국방부는 「국방혁신 4.0 기본계획」을 통해 AI 과학기술 강군 육성과 유·무인 복합전투체계 구축을 핵심과제로 설정하였으며 육군의 Army TIGER 전투체계는 지능화·기동화·네트워크화를 특징으로 2040년까지 전군 확대를 목표로 추진되고 있다.

본 연구는 라이다 기술의 기본원리와 발전 추세를 검토하여 회전식 스캐닝 라이다와 플래시 라이다의 구조적 특성을 비교 분석하였다. 회전식 스캐닝 라이다는 360도 전방위 환경 인식과 장거리 탐지 능력을 제공하지만 기계식 회전 부품으로 인한 내구성 취약과 레이저의 지속 발산으로 인한 피탐 위험 증가, 핵심

부품의 높은 해외 의존도로 인한 유지보수 제약 등의 한계가 군 운용성 시험과 시범부대 운용 과정에서 확인되었다. 반면 플래시 라이다는 VCSEL 어레이와 SPAD 기반 검출기를 활용하여 기계적 회전 부품 없이 마이크로초 단위의 고속 측정과 높은 내구성을 구현할 수 있으며 소형화 및 경량화로 선택적으로 레이저 펄스의 순간적 발산이 가능하여 피탐 위험을 현저히 낮출 수 있다.

또한 연구 결과 플래시 라이다는 순간적 3차원 정보 취득 능력, 고속 데이터 처리 구조, 극한 환경에서의 안정성, GPS 거부 환경에서의 항법 보조 성능 등에서 기존 라이다 대비 유의미한 우위를 보였다. 특히 인공지능 기반 판독 알고리즘과 결합할 경우 표적 인식 정확도 향상, 자율주행 안전성 제고, 플랫폼 생존성 증대 등 Army TIGER 체계의 핵심 임무에 직결되는 효과를 제공할 수 있음을 확인하였다. 그리고 에스오에스랩, LG이노텍 등 국내 업체들이 핵심 부품 제작 기술을 보유하고 있어 국산화를 통한 공급망 안정성 확보가 가능함도 확인하였다.

본 연구는 플래시 라이다 적용을 위해 단기(2027년), 중기(2027~2035년), 장기(2035~2040년)의 3단계 전력화 로드맵을 제시하였다. 단기에는 전투실험을 통한 야지 환경 적합성 검증, 중기에는 정찰·감시 임무부터 우선 적용 및 양산 체제 전환, 장기에는 전군 확대 적용과 차세대 기술 도입 방안을 제시하였다. 또한 NATO STANAG 4586 등 국제표준에 부합하는 표준화 및 상호운용성 확보와 함께 핵심부품의 국방전략부품 지정, 복수경쟁형 연구개발 제도 활용, 군·산·학·연 협력체계 구축 등 정책적 제언을 제시하였다.

본 연구는 플래시 라이다의 기술적 특성과 임무수행 활용 가능성을 동시 검토하고 Army TIGER 체계 발전과 연계하여 기술·운용·정책 측면에서 통합적 발전 방향을 제시하였다는 점에서 학술적, 실무적 의의를 가진다.

다만 플래시 라이다가 아직 우리 군에서 실제로 운용된 사례가 없어 상당 부분을 문헌에 의존하였다. 이에 향후에는 시범운용을 통한 정량적 성능 검증과 비용·효과 분석 등 후속 연구가 요구된다.

【주요어】 : 플래시 라이다, 회전식 스캐닝 라이다, Army TIGER, 다목적 무인차량

목 차

제 1장 서론	1
제 1절 연구 배경 및 목적	1
제 2절 연구의 범위 및 방법	12
제 3절 연구 분야별 선행연구	14
제 2장 라이다 기술 및 발전 추세	20
제 1절 라이다 기술 개요	20
제 2절 회전식 스캐닝 라이다 구조와 업체 기술 동향	50
제 3절 플래시 라이다 구조와 업체 기술 동향	59
제 3장 육군 Army TIGER 전투체계 추진 현황	69
제 1절 국방혁신 4.0과 유·무인복합전투체계 구축	69
제 2절 Army TIGER 전투체계 구성 및 추진	84
제 3절 다목적 무인전투차량의 역할 및 편제	95
제 4장 다목적 무인차량의 플래시 라이다 적용 방안	108
제 1절 다목적 무인차량 개발 및 운용개념	108
제 2절 주요 기술 및 라이다의 역할	114
제 3절 플래시 라이다 적용 방안	126
제 4절 플래시 라이다 적용의 시사점 및 전력화 추진 전략	140
제 5장 결론 및 정책 제언	151
제 1절 결론	151
제 2절 정책 제언	154
참 고 문 헌	163
ABSTRACT	183

표 목차

[표 1-1] 주변국(미국, 중국, 러시아)의 유·무인 복합전투체계 개발 현황	3
[표 1-2] 연구 범위	12
[표 1-3] 선행연구 분야별 주요 활용자료	19
[표 2-1] 라이다의 거리측정 방식 비교표	23
[표 2-2] 미세거울 구동 방식 비교	43
[표 2-3] 라이다 작동 방식별 분류 및 특징 비교표	49
[표 2-4] 회전식 스캐닝 라이다 구조 및 특징	52
[표 2-5] 해외 회전식 스캐닝 라이다 제작업체 현황	55
[표 2-6] 국내 회전식 스캐닝 라이다 제작업체 현황	57
[표 2-7] 플래시 라이다 구조 및 특징	61
[표 2-8] 해외 플래시 라이다 제작업체 현황	64
[표 2-9] 국내 플래시 라이다 제작업체 현황	66
[표 3-10] 공군 기술개발 및 핵심능력 발전 목표	81
[표 3-11] 각 군의 유·무인 복합전투체계 비교	84
[표 3-12] Army TIGER 전투체계 주요 장비(7종) 명명 결과	89
[표 3-13] Army TIGER 전투체계 단계별 전력화 추진계획	94
[표 3-14] 무인차량 자율성 수준과 Army TIGER 전투체계 수준	96
[표 3-15] 무인차량의 분류	97
[표 3-16] 미 DOD의 무인차량 자율성 수준 분류	98
[표 3-17] 다목적 무인차량 기본 구성	103
[표 4-1] NATO STANAG 4586에서 정의하는 무인차량 자율성 수준	113
[표 4-2] 다목적 무인차량의 주요 기술	120
[표 4-3] 단기(~2027년) 전투실험 단계별 세부 실행 계획	129
[표 4-4] 중기(2027~2035년) 부대 임무별 전력화 실행 계획	134
[표 4-5] 장기(2035~2040년) 전면 전력화 및 차세대 기술 적용계획	139
[표 4-6] 플래시 라이다의 군 전력화를 위한 추진 전략	150
[표 5-1] 정책제언과 관련된 장·절	161

그림 목차

[그림 1-1] 북한 화성 18호 ICBM 사거리	1
[그림 1-2] 핵 탄두와 다탄두개별기동재진입체(8종)	2
[그림 1-3] 2023년 인구 동향 조사	4
[그림 1-4] 5년간 초급간부 충원 현황	5
[그림 1-5] 5년간 중견간부 이탈 현황	5
[그림 1-6] 국방혁신 4.0 기본계획	6
[그림 1-7] 각 군의 유·무인복합전투체계 추진 현황	7
[그림 1-8] 육군 Army TIGER 전투체계 운용개념	8
[그림 1-9] 환경인식 센서 감지 범위	9
[그림 1-10] 환경인식 센서 성능 비교	9
[그림 1-11] 회전식 스캐닝 라이다와 플래시 라이다 운용방식 비교도	10
[그림 2-1] 라이다 운용 모습	20
[그림 2-2] 라이다의 TOF 거리측정 방식	21
[그림 2-3] 라이다의 FMCW 거리측정 방식	22
[그림 2-4] 라이다의 Coherent Detection 거리측정 방식	23
[그림 2-5] 환경인식 센서별 성능 비교	24
[그림 2-6] 아폴로 11호 Lunar Laser Ranging(LLR) 실험의 역반사경	25
[그림 2-7] 라이다 기술 발전도	28
[그림 2-8] 세계 라이다 시장 전망	28
[그림 2-9] 세계 라이다 시장 분야별 한국 점유율(2016년, 2020년)	28
[그림 2-10] 회전식 스캐닝 라이다 작동 원리(1)	29
[그림 2-11] 회전식 스캐닝 라이다 작동 원리(2)	30
[그림 2-12] 3차원 포인트 클라우드 생성	30
[그림 2-13] 회전식 스캐닝 라이다를 장착한 자율주행 차량	31
[그림 2-14] 회전식 스캐닝 라이다를 장착한 항공측량 드론	31
[그림 2-15] 회전식 스캐닝 라이다를 장착한 대형 항만시설	32
[그림 2-16] 회전식 스캐닝 라이다를 장착한 3D 이동식 안전측량 시스템	32
[그림 2-17] 플래시 라이다 작동 원리(1)	34
[그림 2-18] 플래시 라이다 작동 원리(2)	34
[그림 2-19] 플래시 라이다를 장착한 애플 iPad 프로의 라이다 모듈	36
[그림 2-20] 플래시 라이다를 장착한 근거리 자율주행 차량	36
[그림 2-21] 플래시 라이다를 장착한 표면 결함 탐지 및 도난방지 시스템	37
[그림 2-22] 플래시 라이다를 장착한 실내 공간 3D 정밀 계측 시스템	38
[그림 2-23] 플래시 라이다를 장착한 산업현장 안전관리 시스템	38

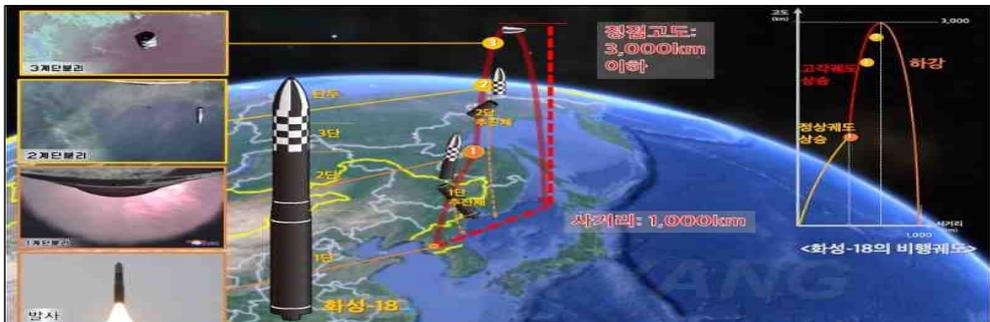
[그림 2-24] 타이탄 탐사 간 활용된 오셀루스 3D 플래시 라이다	39
[그림 2-25] MEMS 라이다 작동 원리(1)	40
[그림 2-26] MEMS 라이다 작동 원리(2)	40
[그림 2-27] MEMS 기반 라이다 탐지 화면	43
[그림 2-28] 자율주행차량에 장착된 MEMS 라이다	44
[그림 2-29] MEMS 라이다를 장착한 드론	45
[그림 2-30] MEMS 기반 라이다 항공 촬영(좌 : 항공사진, 우 : 라이다)	45
[그림 2-31] OPA 라이다 작동원리 (1)	47
[그림 2-32] OPA 라이다 작동원리 (2)	47
[그림 3-1] 유·무인 복합전투체계 발전 방안	70
[그림 3-2] 유·무인 복합전투체계 발전단계	72
[그림 3-3] 우리 군의 유·무인복합전투체계 분야별 기술수준 평가 결과	73
[그림 3-4] 다목적 무인차량의 협동기반의 핵심기술 운용도	74
[그림 3-5] 해군 NAVY SEA GHOST 운용 개념도	75
[그림 3-6] 해군 NAVY SEA GHOST 로고	76
[그림 3-7] 공군 AIR FORCE QUANTM 5.0의 5대 플러그칩 프로젝트	80
[그림 3-8] 해병대 유·무인 복합전투체계의 핵심이 되는 마린온	83
[그림 3-9] 각 군의 유·무인 복합전투체계와 시범 부대	83
[그림 3-10] 인공지능 기반 Army TIGER 전투체계 핵심개념	85
[그림 3-11] 인공지능 기반 Army TIGER 전투체계 운용도	86
[그림 3-12] 워리워 플랫폼	87
[그림 3-13] 창설식에서 파이팅을 외치는 드론봇전투단 장병들	88
[그림 3-14] 육군의 초연결·초지능 육군 운영 개념도	90
[그림 3-15] 육군의 유·무인 복합전투체계(UGV) 발전 계획도	97
[그림 3-16] 다목적 무인차량 구성도	102
[그림 3-17] 다목적 무인차량 모드별 임무장비 모듈 장착도	102
[그림 4-1] 웨이포인트 기반 가상 경로계획 (예)	116
[그림 4-2] 다목적 무인차량의 객체 인식, 판단, 제어 과정	117
[그림 4-3] 다목적 무인차량의 TICN 및 5G 기반 MANET 기술	119
[그림 4-4] 다목적 무인차량의 기본 플랫폼과 개발된 임무장비 모듈	120
[그림 4-5] 임무수행 인원을 중속주행하는 다목적 무인차량	122
[그림 4-6] PointNet을 활용한 객체 분류(탐지 / 식별)	123
[그림 4-7] VoxelNet을 활용한 객체 분류(탐지 / 식별)	124
[그림 4-8] GPS가 단절된 지하터널의 정밀지도 제작	125
[그림 4-9] 기존 플래시 라이다(좌)와 다중분광 플래시 라이다(우) 비교	137
[그림 4-10] 기존 플래시 라이다(위)와 자능형 플래시 라이다(아래) 비교	137

제 1장 서론

제 1절 연구 배경 및 목적

1) 연구 배경

21세기 우리의 안보환경은 대외·대내적으로 다양하게 도전을 받고 있다. 대외적으로는 7차례의 핵실험과 화성 19호 탄도미사일 발사 등 군사 도발을 통해 북한이 군사 위협을 가하고 있으며 미 트럼프 행정부 등장 이후 가시화 되고 있는 미국과 중국 간 패권 경쟁은 한반도 및 주변지역의 안보 불안정성을 높이고 있다. 특히 북한은 2021년 제 8차 당대회에서 발표한 국방과학 발전 및 무기체계 개발 5개년 계획을 통해 극초음속 미사일 개발, 핵잠수함 및 수중발사 핵 전략무기 보유, 초대형 핵탄두 생산, 15,000km 사정권 내 타격 명중률 제고 등을 전략무기 부문 5대 최우선 과업으로 제시하였다. 이후 미사일 능력의 고도화와 함께 다탄두개별기동재진입체¹⁾ 기술 개발에 주력하여[71] 2024년에는 중·장거리탄도미사일에 MIRV를 탑재하여 170~200km 사거리에서 3개 표적에 대한 분리기동시험을 실시하고, 사거리 1,001.2km, 최대 정점고도 7,687.5km의 능력을 갖추고 있는 화성-19형 ICBM을 발사하는 등[34] 사전 연료 주입없이 미국 본토를 기습적으로 타격할 수 있는 능력을 갖추게 되었다.



[그림 1-1] 북한 화성 18호 ICBM 사거리 [34]

- 1) 다탄두개별기동재진입체(MIRV: Multiple Independently targetable Reentry Vehicle)는 하나의 탄도미사일에 여러 개의 탄두를 탑재하여, 대기권 재진입 후 각 탄두가 서로 다른 목표를 향해 독립적으로 기동·공격할 수 있도록 설계된 전략 무기체계를 의미한다.



[그림 1-2] 핵 탄두와 다탄두개별기동재진입체(8종) [34]

북한은 2024년 9월 우라늄 농축시설의 대외 공개를 통해 핵무기 생산 능력을 과시하면서 핵무기 생산능력을 확대하려는 의지를 보여줬다.[14] 이렇게 북한의 확대되어 가는 핵 위협은 미·중 전략경쟁의 심화와 함께 한반도 안보환경에 구조적 변화를 초래하고 있다.

2025년 동북아 지역은 미·중 패권 경쟁의 역학 구도 속에서 각국이 생존할 수 있는 전략을 모색해야 하는 복합적 상황에 직면하게 되었다. 미국 트럼프 2기 행정부는 미국 우선주의에 기반한 대외정책을 공세적으로 추진하면서 중국 전체 수입품에 엄청난 관세를 부과하겠다는 정책을 발표하는 등 경제 분야의 對 중국 견제를 강화하고 있으며 이에 대응하여 중국도 군사력을 증강하는 등 동북아 지역의 영향력 확대를 꾀하고 있다[10]. 이러한 상황은 한반도 안보에 직접적인 파급력이 되어 21세기 동북아지역 안보 연구의 핵심 주제로 다뤄지고 있으며 국제질서 힘의 구조적 변화로 나타나게 되는 국가 간의 대응방향이 주요 관심사가 되고 있다. 이처럼 변화하는 한반도의 위협 환경은 기존 대량 병력 중심의 전력 구조로는 효과적인 억제와 대응이 한계가 있다는 것을 알려주고 있다.

한편 현대전 양상도 강하고 빠르게 변화하면서 첨단기술 적용도 빨라지고 있다. 실시간 위성 감시체계, 무인전투기, 스텔스 항공기 등 과거 상상에 그쳤던 기술들이 우리에게 현실로 다가오면서 전장 환경은 기존과는 다른 차원으로 변화하고 있다.

특히 위성과 첨단 감시 수단으로 그물망처럼 전장을 관측할 수 있게 되면서 공격의 정확도는 증가하고 지속적인 과학기술의 발전으로 빠르면서 파괴력과 방호력이 높은 무인항공기, 레이저 무기 등의 미래 첨단 무기들의 단계적인 개발 및 전력화가 이루어지고 있다[5]. 그러나 주변국의 군사기술 발전 고도화로 우리 군이 보유하고 있는 군사 과학기술과의 격차가 벌어지고 있다. 특히 미국, 중국, 러시아는 우리 군의 연구가 아직 미흡한 인공지능, 자율주행, 센서융합 분야 등의 첨단기술을 무기체계에 통합하고 실전에도 투입하면서 유·무인 복합전투체계 개발을 실질적으로 추진하고 있는데 이는 우리 군과의 전력 불균형을 심각하게 초래할 수 있다.

[표 1-1] 주변국(미국, 중국, 러시아)의 유·무인 복합전투체계 개발 현황 [5]

국가	영역	체계명	개발	센서 및 핵심기술	비고
미국	지상	자율지상차량	2018년	다중 센서 융합 자율주행 센서 장애물 감지 센서	공동 라이브러리 기반 상호운용성 확보
	해양	무인수상정 / 잠수정	2022년	자율운항 센서 수중 탐지 센서 통신 중계 장비	표준화된 모듈식 아키텍처 적용
	공중	STANAG 4586 호환 무인기	2004년	EO / IR 카메라 SAR 레이더 통신중계 장비	NATO 표준 LOI 레벨 1~5 ²⁾
중국	지상	99식 전차 기반 무인차량	2019년	영상정보 전송 원격제어 통신 상황인식 센서	칭하이-티벳고원 훈련 실시
	해양	군집 소형 무인 수상정	2018년	군집 항법 센서 장애물 회피 센서 통신 네트워크	56대 군집 운용 시험
	공중	J-20S(스텔스)	2021년	고급 레이더 센서 융합 시스템 무인기 통제 링크	Loyal Wingman ³⁾ 개념 적용
러시아	지상	우란-9 무인 지상차량	2018년	영상 감시 센서 원격제어 시스템 사격통제 센서	피아식별, 통신 불안정 문제 노출
	해양	미식별	-	-	-
	공중	S-70 오호츠키 20톤급 무인전투기	2019년	스텔스 센서 다중 센서 융합 Su-57 데이터 링크	유인기(Su-57)와 협동 시험

2) NATO STANAG 4586에서 정의한 무인항공시스템의 상호운용성 수준
 1. 임무장비 데이터 간접수신, 2. 임무장비 데이터 직접수신, 3. 임무장비 통제,
 4. 비행체통제(이착륙 제외), 5 비행체 완전통제 등이 있음

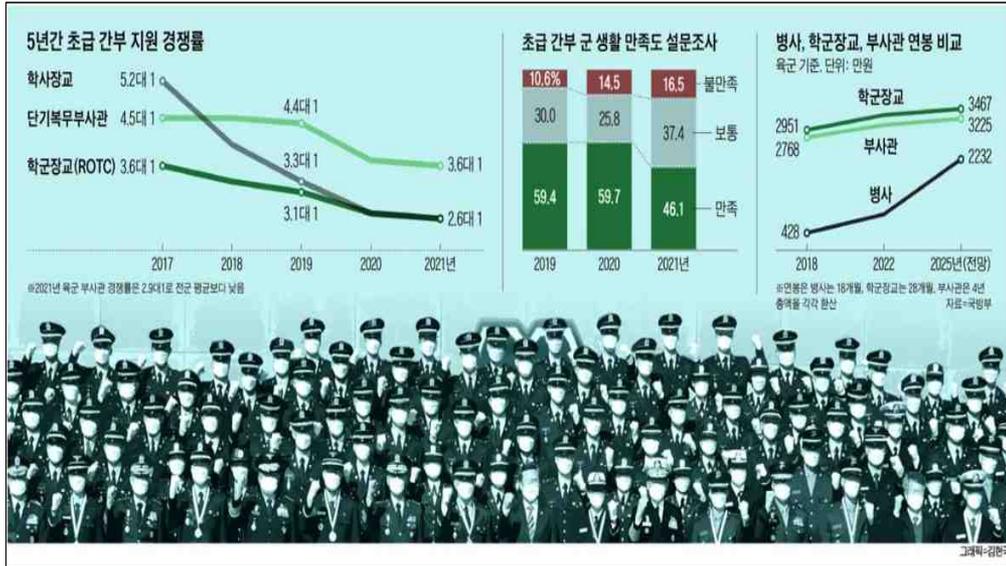
우리 군의 내부적인 구조적 문제도 심각하다. 저출산으로 인한 병역자원의 급격한 감소는 병력 중심의 전력 유지수준을 위협한다. 통계청이 발표한 ‘2023년 인구동향조사’에 따르면 출생아 수는 230,028명으로 전년 대비 19,200명(7.7%) 감소하여 통계 작성 이래 최저치를 기록하였고 합계 출산율은 0.72명으로 OECD 국가 중 최하위 수준을 보여[76] 향후 20년간 병역자원의 급격한 감소가 불가피한 전망이다.



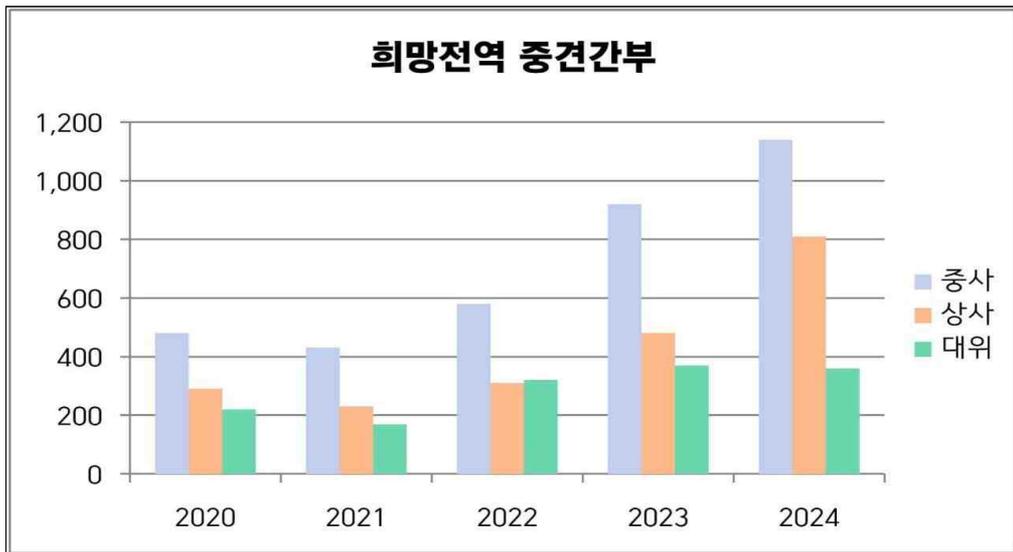
[그림 1-3] 2023년 인구 동향 조사 [11]

또한 군 초급간부 충원률의 저하와 숙련된 중견간부의 급격한 전역률의 증가는 우리 군의 전문성과 임무 수행의 지속성 유지 차원에서도 심각한 우려가 되고 있다. 초급간부 충원 현황을 분석하면 2017년 5,261명에서 2021년 2,821명으로 지속 감소하고 있지만[38] 중견간부의 이탈은 더욱 가속화되어 2020년에는 중사 471명, 상사 243명, 대위 135명에서 2024년 중사 1,178명, 상사 842명, 대위 326명이 전역하는 등[52] 군 전력이 붕괴될 수도 있다는 심각한 우려를 낳고 있다.

3) 유인 전투기를 보조하는 무인 전투기의 개념을 뜻함.



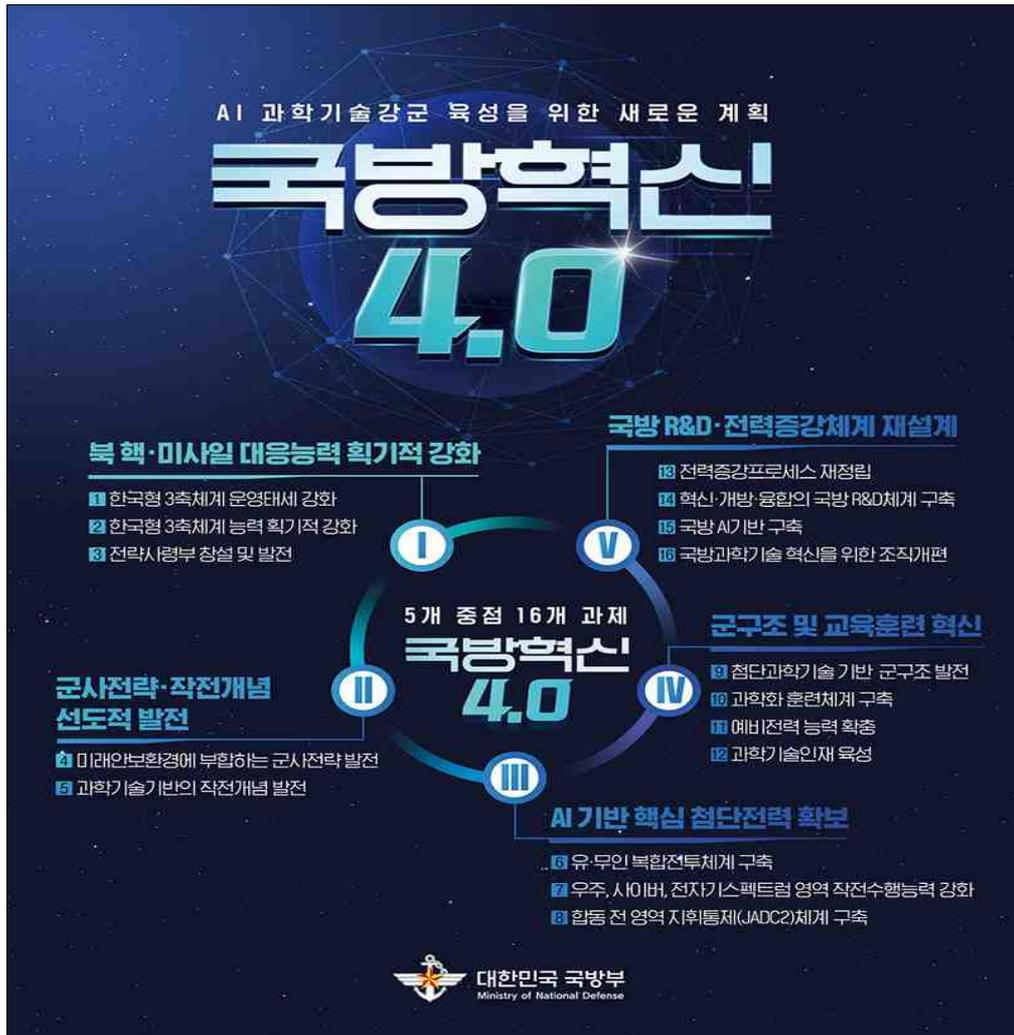
[그림 1-4] 5년간 초급간부 충원 현황 [52]



[그림 1-5] 5년간 종견간부 이탈 현황 [52]

이와 더불어 우리 사회의 인명중시 사상이 확산되면서 임무수행 간 생존성 보장을 최우선 요소로 고려하게 되었다. 이에 따라 인적 자원에 의한 전투력 창출 개념은 집약된 인력에서 전투력이 창출된다는 개념에서 벗어나 소수정예의 첨단 전력을 통해 전투력 승수효과를 내야 한다는 개념으로 변화하였다. 국방부는 이와 관련하여 2023년 3월 국방혁신 4.0 기본계획을 발표하였다. 국방혁신

4.0 기본계획은 4차 산업혁명 기술 기반으로 인공지능 과학기술 강군 육성이 라는 전략적 비전을 제시하면서 4차 산업혁명의 첨단 과학기술 적용이라는 기술적 차원과 국방 분야 패러다임 전환을 위한 4차 혁신계획이라는 정책적 차원을 동시에 대응한다는 국방부 의지를 담고 있다[62].



[그림 1-6] 국방혁신 4.0 기본계획 [1]

국방혁신 4.0은 5대 중점과제와 16개의 세부 과제로 구성되어 있다. 이중 인공지능 기반 핵심 첨단전력 확보 분야에서 유·무인 복합전투체계(Manned-Unmanned Teaming, MUM-T) 구축을 전략적 핵심과제로 설정하고 있다. 이는 인공지능, 빅데이터, 자율주행, 센서융합, 양자기술 등 첨단기술을 군사작전의 전 영역에

적용함으로써 전투력의 혁신적 증강을 추구한다는 의지이다. 특히 육군은 Army TIGER, 해군은 ‘Navy Sea GHOST’, 공군은 ‘Kill Web(AIR FORCE QUANTUM 5.0)’, 해병대는 ‘마린온(Marine-On) 기반 유·무인 복합전투체계’ 등 각 군은 국방혁신 4.0 기본계획에 따라 고유한 작전환경과 임무 특성에 최적화된 군사력을 선발하여 첨단 과학기술과 체계적으로 접목하면서 미래 전투체계를 구축하고 있다[65].



[그림 1-7] 각 군의 유·무인복합전투체계 추진 현황 [65]

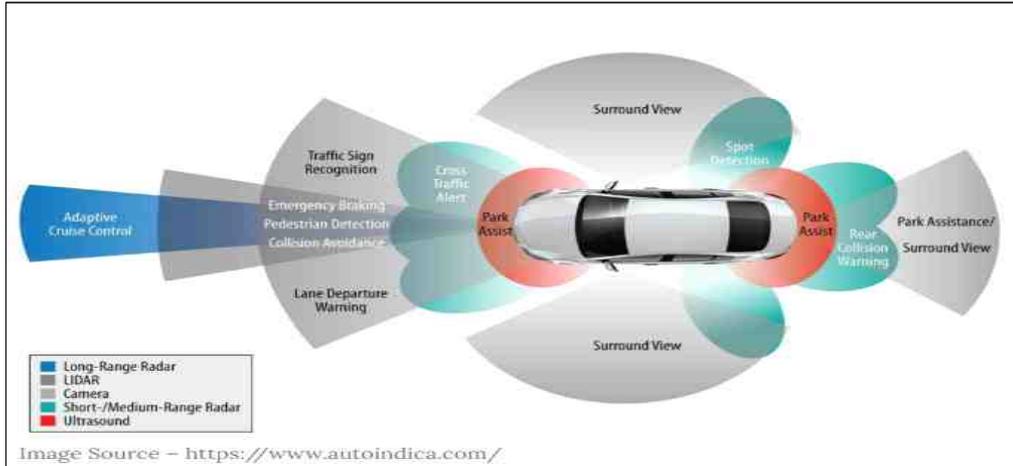
육군의 Army TIGER(Transformative Innovation of Ground forces Enhanced by the 4th industrial Revolution technology) 전투체계는 드론봇 전투체계와 워리어플랫폼을 첨단 과학기술과 접목한 미래 육군의 전투체계이다. Army TIGER 전투체계는 인공지능 기반 초지능 의사결정체계를 통해 상황판단과 결심을 지원하는 지능화, 차륜형 장갑차와 소형전술차량 등 기동플랫폼으로 전 세대가 신속하게 기동하는 기동화, 전투원과 드론봇 전투체계, 워리어플랫폼 등 모든 전투체계가 네트워크로 연결되는 네트워크화의 특징을 갖고 있다[46].



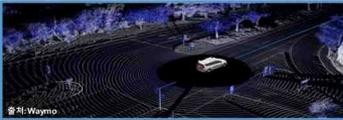
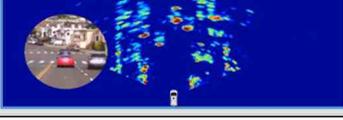
[그림 1-8] 육군 Army TIGER 전투체계 운용개념 [46]

이러한 Army TIGER 전투체계에서 다목적 무인차량(Multi-purpose Unmanned Ground Vehicle, MUGV)은 중대급 이하 창끝 전투의 핵심 임무 수행 장비로서 정찰, 수송, 통신중계, 전투지원 등 다양한 임무를 수행한다. 현재 육군 00사단에 편성된 아미타이거 시범여단 전투단에서 다양한 유·무인 복합전투체계와 통합적인 전투실험을 실시하여 유·무인 복합전투수행 능력을 검증하고 있다[17].

다목적 무인차량의 자율주행 및 임무수행을 위해서는 주변 환경을 정밀하게 인식할 수 있는 고성능 센서 체계는 반드시 필요하다. 이러한 주변 환경 인식을 위한 다목적 무인차량의 고성능 핵심 센서는 EO / IR 카메라 및 레이더와 함께 라이다(Light Detection and Ranging, LiDAR) 센서가 많이 쓰인다. 라이다는 무인차량의 눈이 되어 레이저 기반 거리측정 기술로 주변 환경을 3차원 공간정보로 획득해 준다. 라이다는 자율주행으로 레이저 펄스의 반사 시간을 측정하여 목표물까지의 정확한 거리 정보를 획득하고, 이를 토대로 장애물 탐지 및 회피, 표적 탐지 및 식별을 수행할 수 있게 해준다. 라이다는 다른 센서인 카메라나 레이더와 다르게 기상조건 등 주변 조명에 영향을 적게 받는다[65].



[그림 1-9] 환경인식 센서 감지 범위 [80]

LIDAR (Light Detection And Ranging) 빛을 이용한 거리 측정 센서		거리 정보	속도 정보	해상도	저조도 환경	활용 범위
LIDAR 라이다 		제공 (정확도 높음)	조건부 가능	높음	매우 좋음	고해상도 3D 객체 식별
5 Camera 카메라 		조건부 가능	불가능	매우 높음	나쁨	고해상도 2D 객체 식별
Radar 레이더 		제공 (정확도 낮음)	제공	낮음	매우 좋음	객체 감지

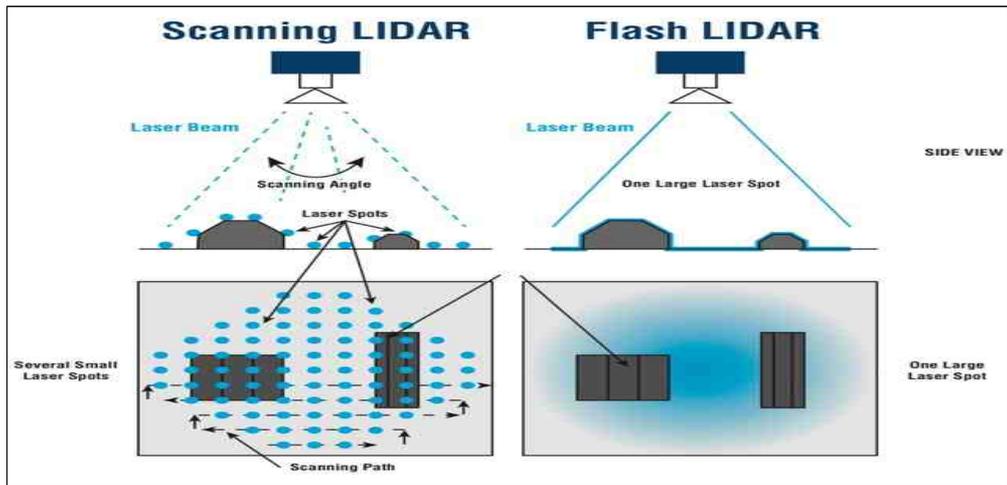
[그림 1-10] 환경인식 센서 성능 비교 [64]

현재 다목적 무인차량은 회전식 스캐닝 라이다를 적용한다. 하지만 회전식 스캐닝 라이다는 다음과 같은 문제점이 있다. 첫번째는 복잡한 기계식 회전 구조로 인한 내구성이 취약하다. 정밀한 기계부품을 지속적으로 회전시키면 진동, 충격, 먼지 등이 발생하는 험준하고 열악한 작전환경에서 라이다 부품의 마모와 고장을 유발하고 안정적 장비 사용이 제한된다. 두번째는 핵심 부품의 수입 의존도가 높아 전시 및 긴급 상황 시 부품의 적기 공급을 제한받을 수 있고 해외에서 수입하는 과정 중 발생하게 되는 높은 유지보수 비용으로 경제적 부담도 발생한다[40]. 세번째는 지속적 레이저 발산과 회전 운동을 위해 돌출된 회전식 스캐닝 라이다의 형상은 적으로부터 피탐 위험을 높여서 전술적인 운용 간

생존성의 위협으로 작용된다. 이런 문제점으로 회전식 스캐닝 라이다의 대안으로 플래시 라이다 연구가 필요하다.

플래시 라이다는 레이저 펄스를 회전시키지 않고 디지털 카메라로 대상을 촬영하듯 스캔 대상 지역을 레이저 펄스로 한번에 비추고 거리계산 및 3D 이미지를 생성하는 구조로 되어 있다. 구체적으로는 VCSEL(Vertial Cavity Surface Emitting Laser)⁴⁾ 어레이를 통해 장면 전체에 레이저 펄스를 조사하고, SPAD(Single-Photon Avalanche Diode)⁵⁾ 기반의 2차원 이미지 센서에서 반사 신호를 일괄적으로 수신하는 픽셀 단위의 깊이 정보를 획득하는 구조이다[103].

플래시 라이다의 부품이 회전하지 않고 레이저를 발산하여 스캔하는 구조는 기계적인 마모가 발생하지 않아 높은 내구성과 신뢰성이 보장되면서 마이크로초 단위의 고속 측정이 가능하다. 또한 주요 부품제작 기술을 국내 업체들이 보유하고 있어 부품국산화를 통한 유지보수 비용 및 기간 절약이 가능하다. 마지막으로 소형·경량화로 차량 내부 부착이 가능하고 순간적·선택적 레이저 펄스를 발산할 수 있어 적으로부터 임무수행 장비와 인원에 대한 노출 가능성을 현저하게 낮출 수 있다.



[그림 1-11] 회전식 스캐닝 라이다와 플래시 라이다 운용방식 비교도 [64]

4) VCSEL(Vertial Cavity Surface Emitting Laser, 수직 공진기 표면 발광 레이저)
: 칩 표면 방향으로 빛을 발산하는 반도체 레이저로, 소형·저비용·대량 집적이 가능하다.

5) SPAD(Single-Photon Avalanche Diode, 단일광자 눈사태 다이오드) : 단 하나의 광자도 감지할 수 있는 초고감도 광센서로, 라이다·양자통신·의료영상 등에서 활용된다

2) 연구 목적

본 연구의 목적은 Army TIGER 전투체계의 핵심장비인 다목적 무인차량에 적용된 회전식 스캐닝 라이다의 기술적 한계를 분석하고 이를 극복하기 위한 대안으로 플래시 라이다의 적용 방안과 전력화 추진 전략을 제시하는 것이다.

다목적 무인차량은 2018년 군 운용성 시험을 거쳐 2022년부터 육군 ○○사단 시범여단전투단에서 운용되고 있다. 그러나 2022년부터 이어진 실제 운용 과정과 2025년 구매시험평가 과정에서 탑재된 회전식 스캐닝 라이다는 다음과 같은 기술적 한계를 드러냈다. 구조적 측면에서는 기계식 회전 부품으로 인한 내구성 취약 문제가 드러났고 기능적 측면에서는 지속적 레이저 발산과 돌출 형태로 인한 생존성 위협이 드러났다. 또한 경제적 측면에서는 핵심 부품의 높은 해외 의존도로 인한 유지보수 제한사항이 발생하였다. 이러한 기술적 한계들은 임무수행의 신뢰성을 떨어뜨리고 전력화 추진에 부정적 영향을 미치고 있다. 이에 본 연구는 기계식 회전 부품이 없어 내구성이 우수하고, 순간 촬영 방식으로 은밀성을 확보할 수 있으며 국내 기술 개발이 가능한 플래시 라이다를 대안으로 검토하였다.

본 연구는 다음과 같은 목적으로 추진한다. 첫째, 회전식 스캐닝 라이다와 플래시 라이다의 기술적 특성을 비교 분석하여 플래시 라이다의 우수성을 검증한다. 둘째, 플래시 라이다의 다목적 무인차량 적용을 위한 작전운용성능을 설정하고 상호운용성 확보 방안을 제시한다. 셋째, 단계별(단기·중기·장기) 전력화 로드맵을 수립하고 각 단계별 구체적 추진 방안을 제시한다. 넷째, 플래시 라이다의 전력화를 성공적으로 추진하기 위해 기술개발 지원, 군·산·학·연 협력체계 구축, 제도적 혁신 등 종합적 추진 전략을 제안한다.

본 연구의 목적을 달성하기 위해 본 연구자는 플래시 라이다 기술의 체계적 적용 방안을 제시함으로써 Army TIGER 전투체계의 다목적 무인차량의 전력 완성도를 높이고 국방 핵심기술의 자립화에 기여하고자 한다.

제 2절 연구의 범위 및 방법

1) 연구 범위

본 연구는 공간적 범위, 기술적 범위, 시간적 범위로 접근한다. 공간적 범위는 육군의 Army TIGER 전투체계로 한정하며 특히 체계 내에서 운용되는 다목적 무인차량을 주요 연구 대상으로 설정한다. 해군의 Navy Sea GHOST, 공군의 Kill Web, 해병대의 마린온 기반 유·무인 복합전투체계 등 타군의 사례는 유무인 복합전투체계 발전방향 검토를 위한 단순 참고 자료로만 활용한다.

기술적 범위는 현재 주로 쓰이는 기술인 회전식 스캐닝 라이다와 차세대 기술인 플래시 라이다에 집중한다. MEMS 기반 라이다, OPA(Optical Phased Array) 기반 라이다 기술은 동향 파악 수준만 다룬다.

시간적 범위는 2018년부터 2025년까지 발간된 문헌을 토대로 Army TIGER 전투체계 개념 도입부터 현재까지의 개발 및 운용 현황과 장기(2025~2040년) 전력화 계획을 중심으로 연구한다. 특히 2040년까지 완성 예정인 Army TIGER 전투체계 전면 확대 계획을 고려하여 중·장기적 관점에서의 적용 방안을 모색한다.

[표 1-2] 연구 범위 ⁶⁾

구분	내용	비고
공간적 범위	· 육군 Army TIGER 전투체계 다목적 무인차량	타군 유·무인 복합전체계는 참고자료 활용
기술적 범위	· 회전식 스캐닝 라이다와 플래시 라이다	MEMS 기반 라이다 OPA 기반 기술은 동향만 파악
시간적 범위	· 2018년~2025년까지 발간된 문헌	개발 및 현재 운용 현황 중·장기적 관점 적용 방안 모색

6) 본문 내용으로 저자 재구성

2) 연구 방법

본 연구는 문헌연구, 해외사례 분석, 시범부대 운용결과 분석, 현장조사를 병행한다. 문헌연구에서는 선행연구와 본 연구를 위해 국내외 학술논문, 정부 정책문서, 국방부 및 육군 공식자료, 기술동향 보고서 등을 종합적으로 연구한다. 특히 국방혁신 4.0 기본계획 등 군의 정책문서와 Army TIGER 관련 공식 발표 자료를 중심으로 정책적 배경과 기술적 요구사항을 파악한다. 라이다 기술과 관련해서 IEEE, Nature, MDPI 등 주요 학술지에 게재된 논문과 기술보고서로 심층깊게 연구한다.

해외사례 분석에서는 미국, 이스라엘 등 군사 선진국의 유·무인 복합전투 체계 개발 및 운용 경험을 분석하여 시사점을 도출한다. 특히 라이다 기술 적용 방식과 성과, 그리고 관련 정책적 고려사항을 중심으로 연구하며 미국, 중국, 러시아 등 유·무인 복합전투체계 개발 및 운용 사례도 확인한다.

시범부대 운용결과 분석에서는 육군 00사단 Army TIGER 시범여단 전투단의 다목적 무인차량 운용결과를 분석한다. 시범여단의 전투실험 및 훈련 결과, 육군 시험평가단의 다목적 무인차량 군 운용성 결과, 다목적 무인차량 구매 시험평가 결과서 등을 통해 현재 적용중인 회전식 스캐닝 라이다 기술의 장점과 단점을 분석한다. 특히 2018년 군 운용성 시험, 2025년 구매시험평가, 2022년부터 현재까지 00사단 운용과정을 중점 연구한다.

현장조사는 국방 관련 연구기관, 방산업체, 라이다 기술 개발업체를 대상으로 실시한다. 관련기관 및 업체 전문가들과의 면담을 통해 최신 기술동향과 국내 업체의 라이다 개발 수준과 미래적용 가능성 등을 확인한다.⁷⁾

이렇듯 본 연구는 다양한 연구방법 등을 활용해 Army TIGER 전투체계의 핵심 장비인 플래시 라이다를 다목적 무인차량에 적용하기 위한 이론 및 실증적인 근거를 도출하고 구체적인 실현 방안을 제시한다.

7) 저자는 2025년 7월부터 11월까지 관련 기관들의 동의를 얻어 현장조사를 실시함.

* 대상 : 한화에어로스페이스, 한화 시스템, 현대로템, SOSLAB, 아이탑오토모티브, 옵시스, 육군 시험평가단, 육군 교육사, 카이스트 무인화연구실, 성균관대학교 인공지능융합원

제 3절 연구 분야별 선행연구

1) 분야별 연구 자료 범위 및 활용

본 연구자는 다목적 무인차량 중심의 연구로 플래시 라이다를 활용한 Army TIGER 체계의 발전 방안을 도출하고자 노력했다. 이와 관련해서 연구 분야별 특성에 맞게 국내·외 학술논문, 정부 정책문서, 국방부 및 육군 공식자료, 기술동향 보고서 등의 문헌을 활용하였다. 특히 기술적인 내용은 IEEE, MDPI, Nature 등 주요 학술지에 게재된 논문과 자료 등이 연구에 큰 도움이 되었다.

본 논문은 공개 문헌과 더불어 국방부 및 방위사업청, 육군의 일부 비공개 내부자료를 참고하였다. 군의 비공개 자료는 연구자가 군 복무 중 직무상 접근 권한 범위내에서만 활용하였으며 논문에는 보안상 문제가 되지 않는 수준으로 요약 및 재구성된 정보만을 간접적으로 인용하였다.

비공개 자료로 활용된 문헌은 『국방혁신 4.0 기본계획(비공개)』 [61], 『다목적 무인차량 군 운용성 결과(비공개)』 [66], 『다목적 무인차량 구매시험평가결과(비공개)』 [67], 『유·무인 복합체계 발전방안 연구(비공개)』 [68], 『Army TIGER 보병여단 전력의 지능화를 위한 요구능력 발전방향』 [72] 등이 있다. 이러한 비공개 자료들은 Army TIGER 전투체계의 실제 운용 현황과 다목적 무인차량의 성능 평가, 그리고 유·무인 복합전투체계 발전 방향을 이해하는 데 필수 정보를 제공하여 본 연구의 근거를 뒷받침하였다.

2) 분야별 선행연구 : 라이다 기술

라이다 기술의 선행연구를 위해 국내·외 문헌자료를 폭넓게 검토하였다. 특히 이중 이규택 외(2016)의 『라이다 기술동향과 산업전망』과 김기섭 (2024)의 『자율주행의 눈, 라이다 센서 기술 및 산업계 적용사례』는 라이다의 기본 원리와 발전 단계를 체계적으로 정리하고 있었다. 그래서 본 연구를 위한

라이다 기술의 전반적인 흐름을 이해하고[39] TOF 방식, FMCW 방식, 간섭 검출 방식 등 거리 측정 방식별 특징을 비교하고, 회전식 스캐닝 라이다와 플래시 라이다의 작동 원리 및 장·단점을 명확히 제시할 수 있었다[64].

이런 방식은 제2장 라이다 기술 분류 체계를 작성하는 데 큰 도움이 되었다. 또한 조기춘(2022)의 『라이다 포인트 클라우드 처리 및 응용』은 라이다로 획득한 3차원 공간정보를 처리하는 알고리즘과 이를 활용한 다양한 응용 사례를 소개하여[78] 본 연구자가 다목적 무인차량의 자율주행 및 장애물 인식 기술을 이해하는 데 유용하였다.

플래시 라이다의 기술적 특성을 파악하기 위해 본 연구자는 국내 업체의 개발 사례와 해외 학술 연구 사례도 종합적으로 검토하였다. 이중 반승훈(2025)의 『아이탑오토모티브 기업소개 소개자료』와 2025년 8월 진행하였던 국내 라이다 제조업체의 현장방문은 국내 플래시 라이다 제조업체인 아이탑오토모티브와 SOS LAB이 개발한 플래시 라이다의 기술적 특징과 상용화 가능성을 분석할 수 있었던 기회로 국내 기술 수준을 파악하는 데 도움이 되었다.

특히 신일범(2024)의 연구는 에스오에스랩의 라이다 기술 경쟁력도 평가하고 있어[32] 본 연구에서 국내 플래시 라이다 제조업체들의 기술력을 가늠하는 기초자료로 활용될 수 있었다. 또한 해외 연구로는 Aull 외(2018)의 『Large-Format Geiger-Mode Avalanche Photodiode Arrays and Readout Circuits』를 통해 플래시 라이다의 핵심 부품인 SPAD(Single-Photon Avalanche Diode) 기반 검출기의 성능 향상 방안을 확인할 수 있었다[85]. 특히 Chen 외(2023)의 『Design of an Adaptive Lightweight LiDAR to Decouple Robot-Camera Geometry』는 무인체계에 적합한 경량화된 라이다 설계 방안도 제시하고 있어[87] 다목적 무인차량에 최적화된 플래시 라이다 사양을 확인하는데 도움이 되었다.

3) 분야별 선행연구 : 유·무인 복합전투체계

유·무인 복합전투체계의 발전 동향을 파악하기 위해 본 연구자는 국방

기술지원기관인 국방기술진흥연구소의 연구 성과를 중점적으로 확인하였다. 국방기술진흥연구소는 김대원·이재국(2023)의 『AI 기반의 유·무인 복합전투체계 발전을 위한 제언』을 통해 인공지능 기술을 활용한 유·무인 복합전투체계의 발전 방향을 제시하고 있었다[5].

방사청과 공동연구한 『24-38 국방 기술기획서(일반본)』을 통해 미국, 중국, 러시아 등 주변국의 개발 현황을 상세히 비교·분석하고 있어 본 연구가 우리 군과 선진국 간의 기술 격차를 이해하고 발전 방향을 모색하는 데 중요한 시사점을 얻을 수 있었다[69]. 특히 정현종 외(2022)의 『유무인 협업(MUM-T) 체계 기술 수준평가』는 우리 군의 유·무인 복합전투체계 분야별 기술 수준을 객관적으로 평가하고 있어[50] 본 연구자가 플래시 라이다 적용이 필요한 기술 분야를 식별하는 데 유용하였다.

또한 방위사업청(2019)의 『유·무인 복합체계 발전방안 연구(비공개)』[68]는 각 군의 유·무인 복합전투체계 구축 전략과 상호운용성 확보 방안을 다루고 있어 본 연구의 표준화 설계 개념을 수립하는 데 중요한 지침이 되었다.

다목적 무인차량의 개발 동향과 기술적 요구사항을 파악하기 위해서는 한국자동차연구원과 육군 미래혁신연구센터, 그리고 업체 홍보자료 등을 주로 활용하였다. 이 중 정상빈(2022)의 『군용 지상무인차량 개발동향』과 여현구 등(2024)의 『Army TIGER 보병여단 전력의 지능화를 위한 요구능력 발전방향』 그리고 방사청과 업체 관련 기사를 참고하였다.

정상빈(2022)과 여현구 등(2024)의 연구는 국내외 무인지상차량(UGV)의 개발 현황과 기술적 특징을 분석하면서 자율성 수준(Levels of Autonomy)에 따른 무인차량의 분류 체계를 명확히 정리하고 있어[48] [72] 본 연구가 다목적 무인차량의 자율성 수준을 평가하고 발전 방향을 설정하는 데 이론적 틀을 제공하였다.

또한 김명섭 외(2015)의 『군 표준차량의 플랫폼 표준화를 통한 전력지원체계 강화연구』는 군용 차량의 표준화가 정비 및 군수지원 효율성에 미치는 영향을 실증적으로 분석하고 있어[8] 본 연구자가 다목적 무인차량의 모듈식 설계와 표준화 전략을 수립하는 데 도움을 받을 수 있었다.

4) 분야별 선행연구 : Army TIGER 전투체계

Army TIGER 전투체계의 정책적 배경과 운용 개념을 이해하기 위해 정부 정책문서와 육군 공식자료를 중심으로 관련 문헌을 검토하였다. 특히 국방부(2023)의 『국방혁신 4.0 기본계획』은 AI 과학기술 강군 육성이라는 전략적 비전을 제시하고 유·무인 복합전투체계 구축을 전략적 핵심과제로 설정하고 있어[61] 본 연구가 Army TIGER 전투체계의 정책적 중요성과 발전 방향을 인식하는 데 큰 역할을 하였다.

또한 여현구 외(2024)의 『Army TIGER 보병여단 전력의 지능화를 위한 요구능력 발전방향』은 Army TIGER 전투체계의 핵심 임무와 요구능력을 체계적으로 분석하고 드론봇 전투체계와 워리어 플랫폼의 통합 운용 방안을 제시하고 있어[72] 본 연구자가 다목적 무인차량의 임무 범위와 성능 요구사항을 구체화하는 근거로 활용하였다. 또한 김두형(2025)의 『국방무인체계 강의를』은 Army TIGER 전투체계의 운용 개념과 각 군의 유·무인 복합전투체계의 개념과 장비의 특징을 잘 정리하고 있어[65] 전투체계 전반을 이해하고 연구 방향을 설정하는 데 유용하였다.

다목적 무인차량의 실제 운용 성능과 기술적 한계를 파악하기 위해서는 주로 육군 시험평가단의 평가 결과를 중점적으로 분석하였다. 김상규(2021)의 『다목적 무인차량 군 운용성 결과(비공개)』 [66]와 김상규·김성학·김기조(2025)의 『다목적 무인차량 구매시험평가결과(비공개)』 [67]는 다목적 무인차량의 자율 주행 성능, 장애물 회피 능력, 통신 안정성, 센서 융합 성능 등을 실증적으로 평가하고 있어 본 연구자가 현장의 문제점을 정확히 파악하는 자료가 되었다.

특히 이들 연구에서 언급된 회전식 스캐닝 라이다의 기술적 한계와 개선 필요성은 본 연구자가 플래시 라이다 적용 방안을 제시하게 된 근거가 되었으며 연구의 필요성을 명확히 하는 역할을 하였다.

5) 선행연구의 한계와 본 연구의 차별성

선행연구를 실시하면서 기존 연구들이 라이더 기술의 발전 동향, 유·무인 복합전투체계의 개념과 발전 방향, Army TIGER 전투체계의 운용 현황 등을 개별적으로 다루고 있으나 플래시 라이더를 다목적 무인차량에 적용하기 위한 구체적이고 통합적인 발전 방안을 제시한 연구는 찾아보기 어렵다는 것을 확인하였다.

기존 연구들은 회전식 스캐닝 라이더의 기술적 한계를 언급하면서도 대안 기술로서 플래시 라이더의 군사적 활용 가능성을 심도있게 구체적으로 다루지 않았으며 작전환경 적합성, 국산화 가능성, 비용 효율성, 상호운용성 확보 방안 등을 종합적으로 검토하지 못하였다. 또한 플래시 라이더의 전력화를 위한 단계별 전략과 정책적 지원 방안에 대한 연구도 미흡하다는 한계점을 식별하였다. 따라서 이러한 선행연구의 한계를 극복하기 위해 다음과 같이 접근하였다.

첫째. 선행연구들에서 단편적으로 언급된 회전식 스캐닝 라이더의 문제점들을 구조적 측면 등 다각도로 분석하고 시범부대 운용 결과를 토대로 검증하였다. 둘째. 선행연구들이 제시한 플래시 라이더의 기술적 우위를 바탕으로 다목적 무인차량에 실제 적용하기 위한 작전운용성능 설정 기준, 상호운용성 확보 방안, 단계별 전력화 로드맵을 구체적으로 제시하였다. 셋째. 선행연구들에서 다루지 않던 정책적 지원 방안으로 기술개발 지원체계 강화, 복수경쟁형 연구개발 제도 활용, 군·산·학·연 협력체계 구축, 업체주도형 신속획득 패러다임 확립, 통합사업관리팀 운영 패러다임 전환 등을 제시하였다. 하지만 불비한 환경적 요인으로 플래시 라이더를 통한 실증적 검증은 실시하지 못했다.

따라서 축적된 이론적 기반 위에서 실무적 적용 방안을 구체화하고 우리 군 전체의 유·무인 복합전투체계 발전에도 기여하는 것은 일부 가능하다는 의의가 있으나 향후 연구 신뢰성을 높이기 위해서는 플래시 라이더를 통한 실증적 검증은 필요하다.

[표 1-3] 선행연구 분야별 주요 활용자료 ⁸⁾

구 분	연구자	주요 내용
라이다 기 술	· 이규택 외(2016), 김기섭(2024)	· 회전식 스캐닝 및 플래시 라이다 작동원리
	· 조기춘(2022)	· 포인트 클라우드 처리 알고리즘 · 자율주행 및 장애물 인식 메커니즘
	· 반승훈(2025), 신일범(2024)	· 국내 플래시 라이다 제조업체 기술력
	· Aull외(2018), chen외(2023)	· APD, SPAD 기반 검출기 성능 등
유·무인 복 합 전 투 체 계	· 김대원, 이재국(2023) · 방사청, 국기연(2019)	· 인공지능 기술 발전방향 · 주변국의 개발현황 및 기술격차 분석
	· 정현종 외(2022) · 김두형(2025)	· 분야별 기술 수준평가 · 각 군의 유·무인 복합전투체계 구축 전략
	· 정상빈(2022), 여현구 등(2024)	· 무인차량 개발현황, 자율성 수준별 분류
Army TIGER 체 계	· 국방부(2023)	· 인공지능 기반 과학기술 육성 과제
	· 여현구 외(2024), 김두형(2025)	· 핵심임무 및 운용개념, 요구 능력 정리
	· 김상규(2021) · 김상규, 김성학 외(2025)	· 다목적 무인차량 시험평가 결과

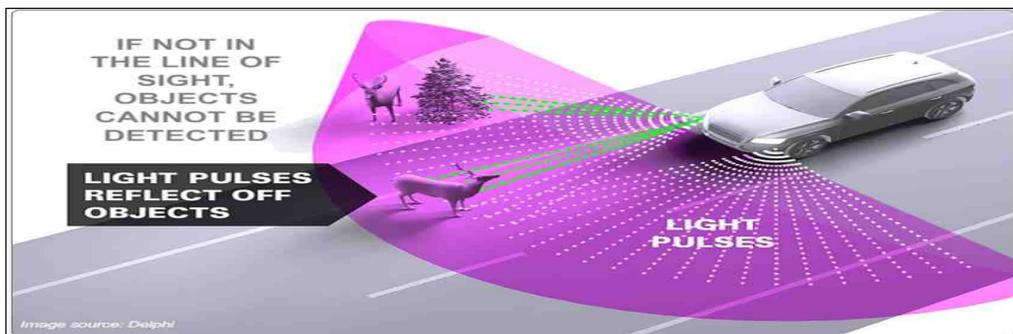
8) 본문 내용으로 저자 재구성

제 2장 라이다 기술 및 발전 추세

제 1절 라이다 기술 개요

1) 라이다 기본 원리 및 발전 단계

라이다(LiDAR : Light Detection and Ranging)는 레이저 광원을 이용하여 물체까지의 거리를 측정하는 원격 감지 기술로서, 현대 무인체계의 대표적인 환경 인식 센서 중 하나이다. 유사 환경 인식 센서인 레이더와 비교하면 레이저는 전자기파를 활용해 목표물을 탐지하고 거리와 속도를 측정하지만 라이다는 레이저 광(빛)을 이용해 물체와의 거리를 측정하고 주변 환경을 3차원으로 인식한다. 그런 이유로 라이다를 Laser Radar 또는 Optical Radar로도 부르기도 한다. 라이다는 능동형 센서(Active Sensor)로서 자체 광원을 발산하여 목표물을 조명하고 반사되어 돌아오는 신호를 분석하여 3차원 공간정보를 획득하는데 이러한 시스템은 주간과 야간환경 모두 밀리라디안(mrad)⁹⁾ 각도의 해상도와 센티미터급 오차 범위의 정확한 거리 정보를 제공한다. 또한 비가시성의 나노미터¹⁰⁾ 레이저(주로 905nm 또는 1550nm 파장)를 사용하여 은밀한 군사 작전에도 운용할 수 있다[97].



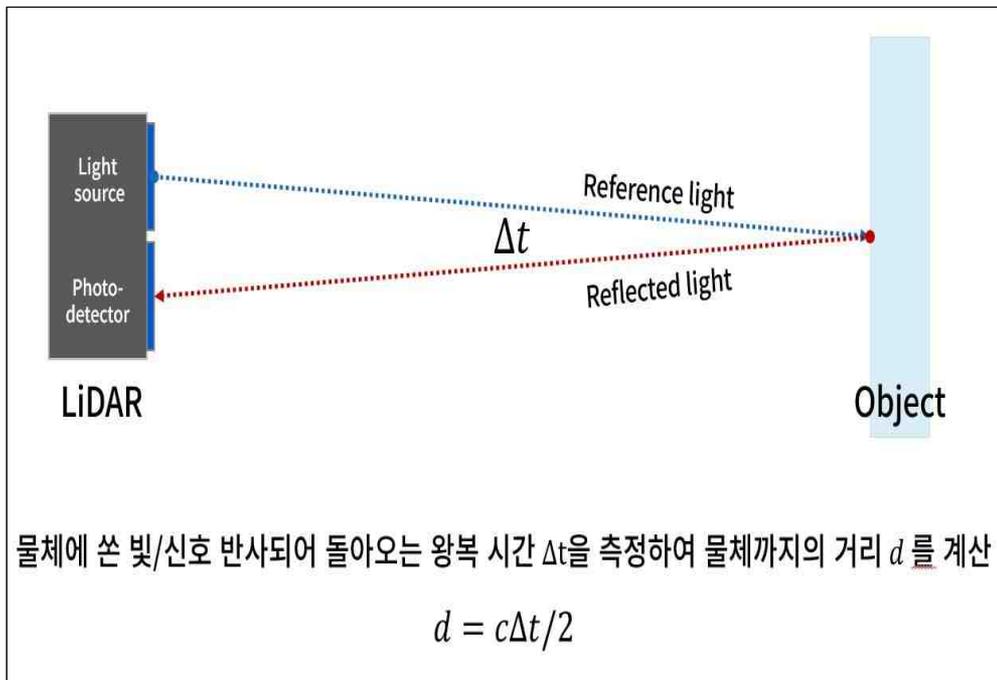
[그림 2-1] 라이다 운용 모습 [64]

9) 밀리라디안(milliradian, mrad)은 라디안의 1/1000에 해당하는 각 단위로 약 0.0573도이며, 라디안(radian, rad)은 원의 호의 길이가 반지름과 같을 때의 중심각을 1로 정의하는 각 단위(약 57.3도)이다

10) 나노미터(nm)는 1미터의 10억분의 1(10^{-9} m)로, 원자 및 분자의 크기를 측정할 때 사용하는 단위이다.

라이다 거리 측정 방식은 기술적 구현 방법에 따라 세가지 방식이 있다. 첫번째는 Time-of-Flight(TOF : 비행시간)방식으로 레이저 펄스의 왕복 시간을 측정하여 거리를 산출하는 방법이다. 이 방법은 1960년 시어도어 마이먼¹¹⁾이 발명한 루비레이저로 1969년 아폴로 11호에서 지구에서 달까지의 거리를 측정하는데 활용되었고 1970년대부터 본격적으로 실용화 되었다[107].

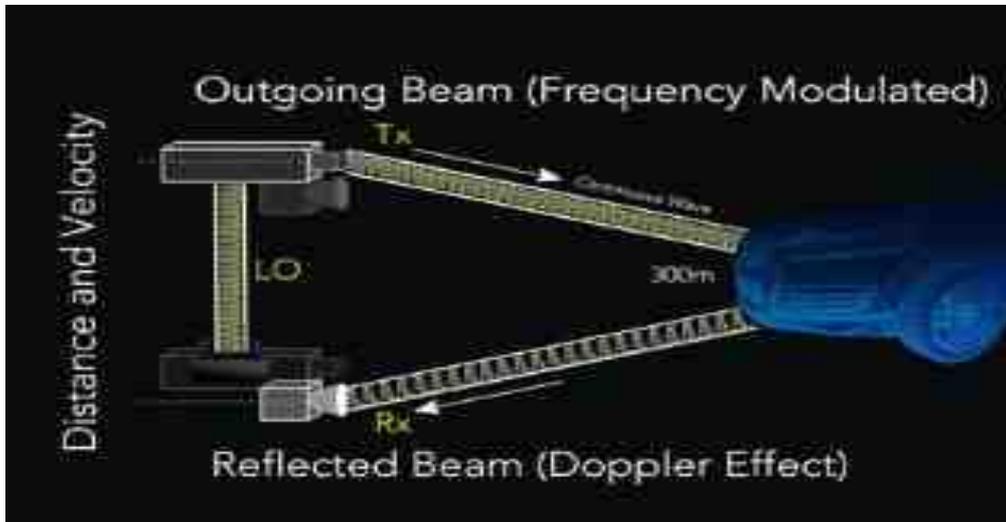
그림 [2-2]처럼 라이다 시스템의 거리 측정 기본 공식은 $D = (c \times t) / 2$ 의 수식으로 표현된다. 여기서 D는 목표물까지의 거리, c는 빛의 속도(약 3×10^8 m/s), t는 레이저 펄스의 왕복 시간을 의미한다. 이 공식에서 2로 나누는 이유는 레이저가 목표물까지 갔다가 다시 돌아오는 왕복 거리를 측정하기 때문이다. TOF 방식은 방법이 상대적으로 간단하고 비용이 저렴하면서도 센티미터급 단위로 오차 정밀도를 달성할 수 있다. 이 때문에 현재 대부분은 라이다 측정 방식을 TOF 방식으로 활용하고 있다[64].



[그림 2-2] 라이다의 TOF 거리측정 방식 [64]

11) 시어도어 마이먼(Theodore Maiman, 1927-2007)은 미국의 물리학자로, 1960년 5월 16일 세계 최초의 작동하는 레이저인 루비 레이저를 성공적으로 개발했다. 그는 합성 루비 결정을 이용해 694.3nm 파장의 붉은색 레이저 광을 발생시켰는데 이는 레이저 기술 발전의 시초로 평가되고 있다.

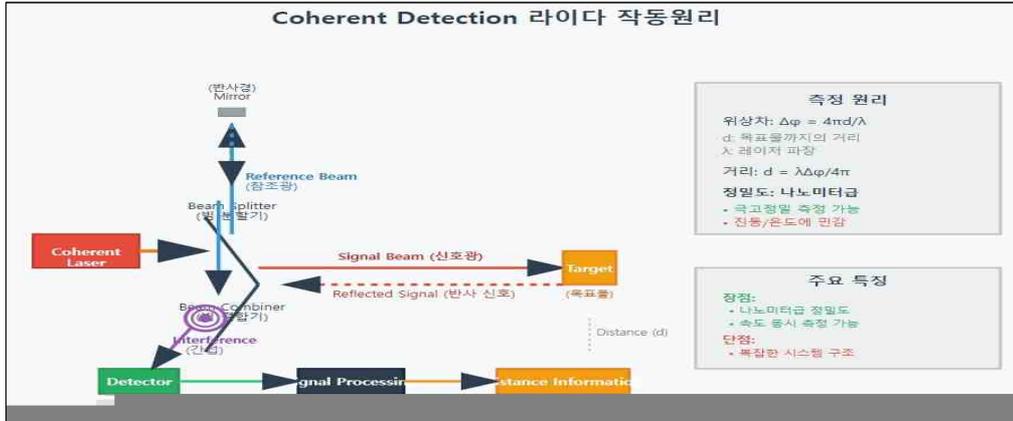
두번째는 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave : 주파수 변조 연속파 방식) 방식이다. 이 방식은 연속 발산하는 레이저 주파수를 시간대별로 변조하여 발생하는 송신 주파수와 수신 주파수 차이로 거리와 속도를 동시에 측정하는 방식이다. 1960년대 MIT 링컨 연구소에서 개발되어 현재는 주로 정밀 계측 및 항공우주 분야에서 주로 활용되고 있다[93]. FMCW 방식은 목표물의 상대 속도를 정확하게 산출할 수 있으나 신호처리 방법이 복잡하고 고가의 하드웨어가 필요하다는 단점이 있다[149].



[그림 2-3] 라이다의 FMCW 거리측정 방식 [149]

세번째는 Coherent Detection(간섭검출) 방식이다. 이 방식은 최초에는 1980년대 초 MIT 링컨연구소에서 대기 관측용으로 개발하였다. 초기 MIT 링컨 연구소에서 대기 난류로 인한 광학위상 왜곡을 보정하기 위한 연구를 진행하여 위상시프트 간섭계와 적응 광학기법을 활용하여 송신과 수신신호 간의 위상차¹²⁾를 정밀 분석하여 파면의 변화를 측정하고자 하였다[93]. 그 과정에서 라이다로 파면의 변화 측정이 가능하다는 사실이 알려지면서 개발되었다. 라이다의 간섭검출 방식은 나노미터 단위로 정밀하게 위상 측정이 가능하지만 복잡한 시스템과 높은 비용, 그리고 진동이나 온도 변화에 민감하여 현재는 주로 연구와 실험적 목적에만 활용되고 있다.

12) 위상차란 두 빛 신호가 “얼마만큼 어긋나서 도착했는가”를 나타내는 차이로, 마치 파도끼 서로 다른 타이밍에 밀려오는 정도를 비교하듯 빛의 도착 시점 차이를 의미한다.



[그림 2-4] 라이다의 Coherent Detection 거리측정 방식 ¹³⁾

[표 2-1] 라이다의 거리측정 방식 비교표 ¹⁴⁾

구분	TOF (비행시간 방식)	FMCW (주파수변조 연속파 방식)	Coherent Detection (간섭 검출 방식)
개발시기	· 1960년대 초반	· 1960년대 후반	· 1980년 초반
측정원리	· 레이저펄스의 왕복 시간 측정	· 연속파 레이저의 주파수를 시간에 따라 선형 변조하여 송수신 신호간 주파수 차이 분석	· 송신신호와 수신신호간 위상차를 간섭계 원리로 분석
측정대상	· 거리	· 거리와 속도	· 거리
측정정밀도	· 센티미터	· 밀리미터~센티미터	· 나노미터급으로 정밀
주요 특징	· 직관적이고 구현 간단, 저비용 · 시스템 구성 간단 · 시간 측정 정밀도에 비례한 안정된 성능 · 속도와 정보는 제한적 획득	· 도플러 효과 활용 · 속도와 거리정보 동시 획득 · 높은 측정 정확도 · 고가의 하드웨어 필요 · 복잡한 신호처리 · 시스템 구현의 난이도 높음	· 위상 시프트 간섭계 활용 · 극고정밀 측정 가능 · 최고 수준의 정밀도 · 시스템 매우 복잡
주요 응용분야	· 자율주행, 지질측량, 3D 스캐닝 분야 등	· 정밀계측, 항공우주분야 등	· 대기관측
기술성숙도	TRL 9 (양산 및 상용)	TRL 7~8 (시스템 검증 및 제한적 상용)	TRL 4~5 (실험실 검증 단계)

13) 본문 내용으로 저자 구성

14) 본문 내용으로 저자 구성

라이더는 카메라, 레이더 등 다른 환경인식 센서와 비교하여 고유한 기술적 특징을 가진다. 카메라는 풍부한 시각 정보(색상, 텍스처, 패턴 등)를 제공할 수 있지만 거리 정보를 직접적으로 획득할 수 없고 외부의 조명에 크게 의존하여 야간, 역광, 그림자 등의 조명지원이 어려운 환경에서는 성능이 크게 저하된다. 하지만 라이더는 정확한 3차원 거리 정보를 제공하는 능동형 센서로서 조명 지원이 어려운 환경에서도 안정적으로 성능 지원이 가능하다. 다만 카메라처럼 색상이나 질감 정보는 제공하지 못한다[127].

레이더는 전파를 사용하기 때문에 안개, 비, 눈 등 기상 조건에 라이더보다 영향을 작게 받으며 장거리 탐지에 유리하다. 반면 공간 해상도가 낮아 소형 물체나 미세한 형상 정보를 정밀하게 식별하는 데에는 일부 제한된다. 반면 라이더는 레이저 펄스 기반의 센서로 밀리라디안(mrad) 수준의 높은 각해상도를 확보할 수 있어 형상 인식 및 3차원 구조 파악에 강하지만 빛의 산란·흡수 영향으로 인해 안개, 비, 눈 등의 기상 환경에는 레이더보다 상대적으로 더 민감하여 왜곡된 정보가 발생할 수 있다[89].

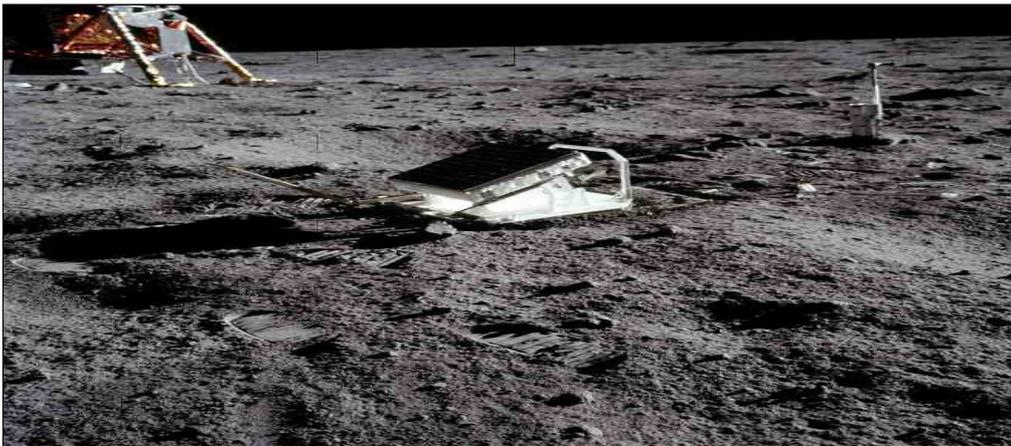
성능 지표	LiDAR	Radar	Camera
측정 범위	장거리	장거리	장거리
거리 정보	제공	제공	조건부 가능
속도 정보	조건부 가능	제공	불가능
거리 정확도	매우 높음	낮음	낮음
속도 정확도	보통	매우 높음	낮음
화각 (Field-of-View)	넓음	좁음	보통
해상도	높음	낮음	매우 높음
3차원 형상 정보	매우 좋음	나쁨	조건부 가능(보통)
물체 식별	좋음	나쁨	매우 좋음
색상 인지	불가능	불가능	가능
텍스처 인지	조건부 가능	불가능	가능
눈, 비, 안개, 먼지 강건성	가변	매우 좋음	가변
저조도 환경	매우 좋음	매우 좋음	나쁨
도심 환경	좋음	나쁨	좋음
고속도로 환경	좋음	좋음	좋음
센서 크기	Small to Mid	Small to Mid	Small to Mid
상용화 수준	보통	높음	높음
가격	보통	낮음	낮음

[그림 2-5] 환경인식 센서별 성능 비교 [64]

라이더 기술은 세 단계에 걸쳐 발전하였다. 1930년대부터 1970년대는 초기 개발 단계로 1930년대 대기 상층부의 공기밀도 분포를 측정하기 위해 라이더를 연구하기 시작하였다. 당시 연구자들은 탐조등에서 발산된 광원을 대기 중으로 조사하고 대기 입자에 의한 빛의 산란 강도를 측정하여 공기밀도를 분석하는 방법을 고안하였다. 이는 산란된 빛의 세기가 대기밀도와 상관관계를 가지는

원리에 기반한 것으로 라이다의 기본 개념을 확립할 수 있었던 기초 연구로 평가되고 있다. 1960년대에는 시어도어 마이먼이 개발한 루비레이저를 활용해 라이다에 대한 본격적인 연구가 추진되었고, 이후 1970년대에는 위성, 항공기 등의 분야로 활용 범위가 확산되기 시작했다.[108] 특히 시어도어 마이먼이 발명한 루비레이저는 고강도, 고집속성의 빛으로 거리 측정이 가능하다는 사실을 발견하고 1969년 아폴로 11호 미션의 Lunar Laser Ranging(LLR) 실험¹⁵⁾에도 활용되었다[86].

이 실험은 닐 암스트롱과 버즈 올드린이 달 표면에 설치한 코너 큐브 반사경을 향해 지구에서 레이저를 발사하고, 반사되어 돌아오는 레이저 신호를 측정하여 지구와 달 사이의 정확한 거리를 측정하는 실험이었다. 이 실험에서 루비레이저를 활용해서 나사의 과학자들은 38만 4천킬로미터 떨어진 달의 거리를 센티미터 단위의 오차범위로 정밀하게 측정할 수 있었다. 이 실험으로 라이다 기술은 극한의 거리와 환경에서도 정상적으로 작동되는 유용한 기술이라는 것을 입증하였지만 당시 라이다 활용을 위해 쓰이는 기계들이 너무 크고 고가라는 단점 때문에 다양한 분야에 대중적으로 사용되지 못하고 주로 연구기관에서 대기입자 분포를 측정하거나 대기 오염도를 모니터링하는 대기 과학의 분야에 한정적으로 사용되었다[88].



[그림 2-6] 아폴로 11호 Lunar Laser Ranging(LLR) 실험의 역반사경 [81]

15) Lunar Laser Ranging(LLR) 실험은 1969년 아폴로 11호가 달 표면에 설치한 반사경에 레이저를 조사하여 반사시간을 측정함으로써 지구-달 간 거리를 센티미터 수준으로 정밀 측정하는 실험으로 일반상대성 이론의 검증과, 지구-달 시스템의 역학연구가 목적이었다.

1980년대부터 2000년대까지는 주로 연구용으로만 쓰이던 라이다가 상용화로의 전환이 이루어진 시기였다. 1980년대에 들어서면서 세계 레이저를 활용한 반도체 제작 기술과 GPS, IMU¹⁶⁾ 기술은 발전하였고 이를 융합하는 솔루션과 컴퓨터 처리 능력도 획기적으로 향상되었다. 그 영향으로 라이다 활용을 위해 쓰이던 기계들은 많은 부분이 현실화(소형화 및 경량화, 가격 하락 등)되었고 이러한 변화로 라이다 기술은 다양한 연구를 통해 협소한 연구실에서 실생활의 영역으로 활용 범위를 넓히게 되었다[134].

이 당시 대표적인 사례는 1980년대 중반 캐나다의 넬슨¹⁷⁾과 크라벨¹⁸⁾의 연구에서 처음 실효성이 입증된 항공기 탑재용 라이다를 지형측량과 지도를 제작하는 용도로 활용한 연구였다[108]. 이 연구에서 항공 라이다를 통해 그때 당시에는 불가능하던 산림 지역의 나뭇잎과 줄기로 가려진 뒷부분을 라이다의 레이저 펄스로 관통하여 직접 측정에 성공하였고 이 기술은 1990년대 후반까지 발전을 거듭하여 측량 업계의 대표 표준 기술이 되었다[96]. 항공측량 부분에서의 성공은 지상분야에도 확산되어 1990년대부터 2000년대 초반부터 지상 분야의 건축물 측량, 문화재 보존, 산업 시설 점검 등에 활용되기 시작하였다.

복잡한 구조의 건축물이나 외부 환경에 민감한 역사적 유물 등에 대해서 3차원 정밀 스캔을 가능하였고[112] 일명 윈드 라이다인 대기 관측용 라이다 기술도 발전시켜 지상에서의 디지털 보존, 복원 작업 기반의 측량, 엔지니어링, 건설 분야와[135] 공항 내 윈드시어¹⁹⁾ 탐지, 대기 난류 예측, 풍력 발전소의 바람 평가 등도 가능케 하였다[111]. 이렇게 라이다는 1980년대부터 2000년대를 거치면서 연구분야에서 우리 삶이 체감할 수 있는 실생활의 영역까지 활용

-
- 16) Inertial Measurement Unit : 차량의 가속도와 각속도를 측정하는 관성측정장치로 GPS가 끊긴 환경에서도 위치를 추정할 수 있어 자율주행 무인체계의 항법 성능을 보완하는 핵심 센서이다. 3축 가속도계와 3축 자이로스코프로 구성된다.
- 17) 로스 넬슨은 1979년부터 현재까지 45년 이상을 NASA에서 근무한 라이다 기술 전문가로 항공레이저를 이용한 산림 분석연구를 1984년과 1986년에 실시하였다.
- 18) 윌리엄 크라벨은 NASA에서 근무하는 항공 레이저고도계 및 지형측정 전문가로 로스 넬슨과 산림 분석연구를 진행하였다.
- 19) 윈드시어는 공기의 이동 속도나 방향이 짧은 거리 안에서 갑자기 변하는 현상으로 마치 한 구역에서는 바람이 약한데 바로 옆에서는 갑자기 세게 부는 것처럼 ‘바람의 급격한 차이’를 의미한다.

범위가 확장되었다[134].

2000년 후반 이후 현재까지는 대중화 단계로 라이다는 자율주행차 기술 발전과 함께 새로운 전환점을 구가하고 있다. 2009년 라이다는 미 구글이 자율주행차 프로젝트를 추진하기 위해 벨루다인(이후 오스타로 합병) HDL-64E 라이다를 차량 상부에 탑재하면서부터 연구용 장비에서 상용장비로 본격적인 전환이 이루어졌다[123].

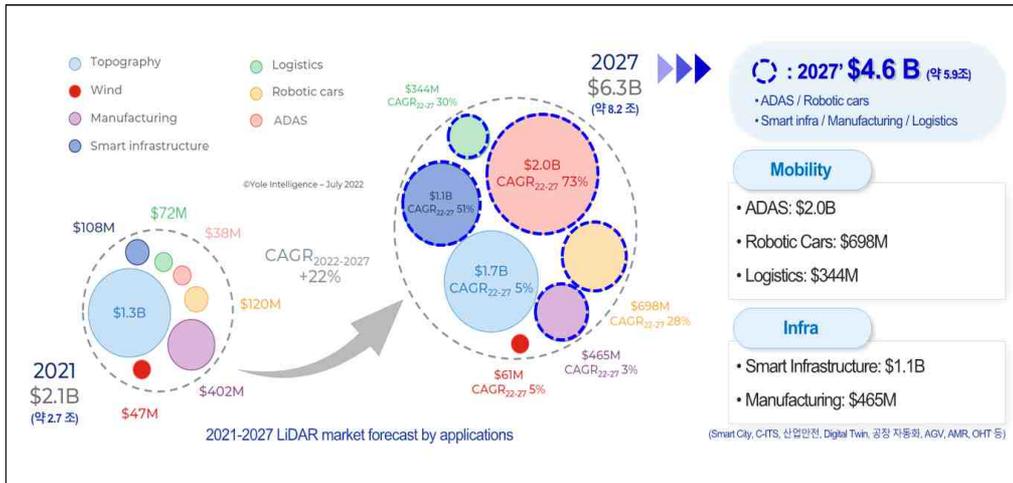
당시 64개 채널의 레이저를 회전시켜 360도 전방위 환경을 인식하는 이 시스템은 약 7만 5천 달러의 고가지만 자율주행에 필요한 정밀한 3차원 환경 인식 능력을 제공하였고[142] 이후 구글 자율주행차 프로젝트가 2012년 5월 네바다주에서 세계 최초의 자율주행 면허를 획득한 후 2012년 8월까지 30만 마일 이상의 자율주행을 기록할 때까지 지속적으로 쓰이면서 환경인식 성능의 우수성을 입증하였다[94]. 그 결과 우버, 지엠 쿠르즈, 아르고 인공지능 등의 주요 자율주행 업체들은 라이다 기반 자율주행 환경인식 시스템을 채택하게 되었다.

소형화와 경량화가 되어있는 플래시 라이다를 활용해서 모바일 기기 분야로의 상용화 확대도 이루어 졌다[137]. 2020년 3월 18일 미국 애플은 아이패드 프로에 라이다 스캐너를 탑재한다고 발표하고 같은 해 플래시 라이다를 탑재한 최신 아이폰 기종을 출시하여 모바일을 통해 라이다로 증강현실(ARKit), 카메라 자동 초점, 저조도 촬영 보정 등의 기능을 지원하게 하였는데[121] 이는 플래시 라이다를 처음 사용하는 운전자들에게 기술적 혁신을 체험하게 해주었다.

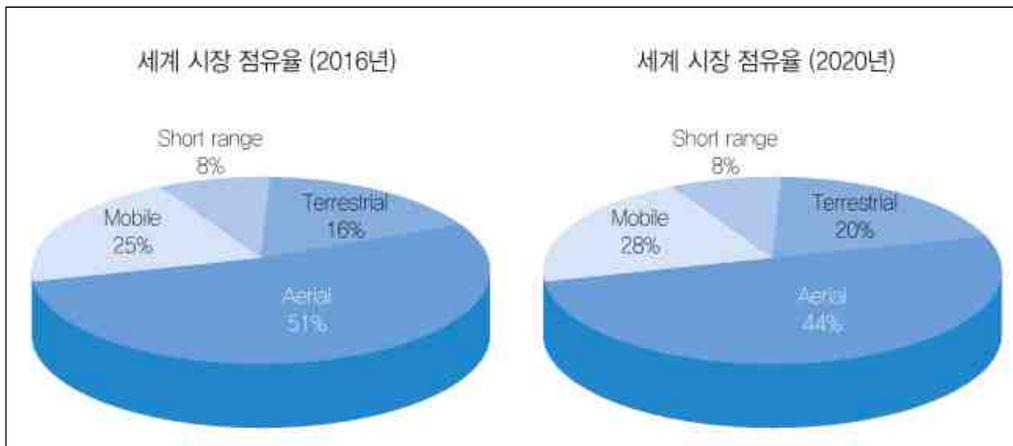
이렇게 라이다는 초기 1960년대에서는 과학 연구용 장비로 시작하였지만 현재는 대중적 실용 기술로 변모하였다. 라이다는 조사기관에 따라 그 규모와 범위에 다소 차이가 있으나 1960년 이래로 연 평균 16.3%의 성장률을 보이면서 2027년의 라이다 세계시장 규모는 약 8.2조원 수준에 이를 것으로 예상된다[135].

	1930년대	1950년대	1980년대	1990년대	2000년대	현재
주요 이슈 사항	<ul style="list-style-type: none"> 탐조등 빛의 산란세기를 통한 공기 밀도 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 레이저 발명 본격적 개발 진행 	<ul style="list-style-type: none"> 레이저 고도계 시스템 개발 NASA에서 이를 이용한 제품 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 거리 측정용 레이저 시스템의 본격 상용화 	<ul style="list-style-type: none"> 카메라 기능을 보완 할 수 있을 정도의 기술력 	<ul style="list-style-type: none"> 레이저 스캐너 및 3D 영상 카메라 핵심 기술로 활용
적용 분야 및 제품	<ul style="list-style-type: none"> 공기 밀도 분석을 위한 목적으로 처음 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 위성, 해양 및 대기 관측용으로 사용됨 	<ul style="list-style-type: none"> 대기 해양 라이더 (ACL, NASA) 공수 지형 매핑 (ATM, NASA) 	<ul style="list-style-type: none"> 항공기, 위성 등에 탑재 정밀한 대기 분석, 지구 환경 관측에 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 우주선 및 로봇에 적용 원거리 측정, 자동차 속도 위반 단속에 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 3D reverse engineering 자율주행 및 무인 자동차에 적용

[그림 2-7] 라이더 기술 발전도 [39]



[그림 2-8] 세계 라이더 시장 전망 [64]

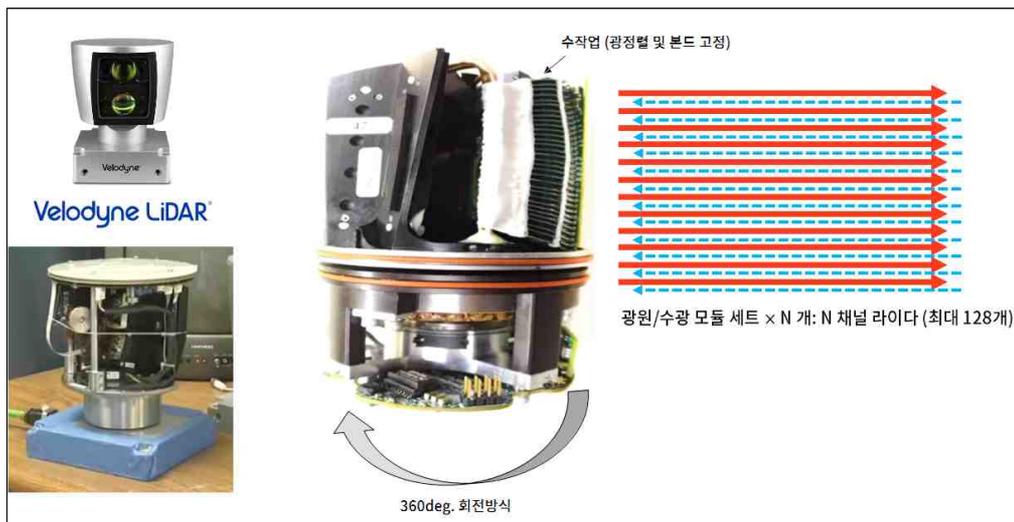


[그림 2-9] 세계 라이더 시장 분야별 한국 점유율(2016년, 2020년) [39]

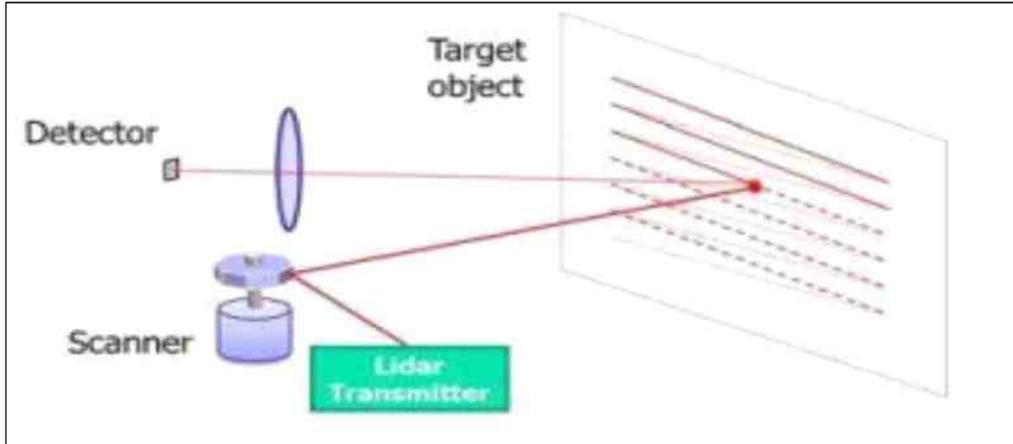
2) 라이다의 작동 원리에 따른 분류와 미래 기술발전 추세

라이다는 레이저 펄스 조향 및 스캔 방식에 따라 네가지 방식으로 분류된다. 본 절에서는 라이다를 작동 원리에 따라 회전식 스캐닝 라이다, 플래시 라이다, MEMS 기반 라이다, OPA 기반 라이다로 분류하고 이에 대한 작동 원리와 장점 및 단점, 활용 분야 및 기술 발전 추세를 분석했다.

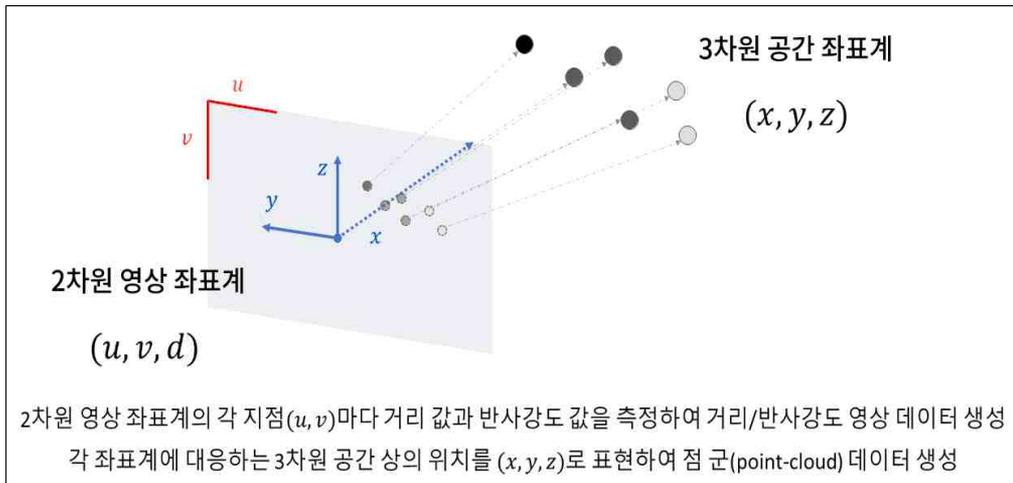
회전식 스캐닝 라이다는 다수의 레이저 송신기와 수신기를 수직으로 배열하고 이를 회전모터로 360도 회전시키며 주변 환경을 순차적으로 스캔하는 라이다 방식이다. 회전식 스캐닝 라이다는 최소 수십개의 채널에서 수백개의 채널의 레이저를 1분당 수백에서 수천 회의 속도로 회전하면서 레이저 펄스를 발산한다. 발산된 레이저 펄스는 주변 물체와 접촉 이후 반사되면서 회전식 스캐닝 라이다의 수신 렌즈를 통과하고 이후 검출기를 통해 지리적 공간정보를 형성할 수 있는 2차원 영상 좌표계 데이터(u, v, d)가 생성된다. 이러한 과정의 반복으로 생성 및 축적되는 2차원 영상 좌표계 데이터(u, v, d)들은 각 지점의 깊이 정보와 결합시켜 3차원 공간상의 점으로 재구성될 수 있고, 재구성되는 점들의 집합으로 3차원 포인트 클라우드가 생성되면서 레이저 펄스로 스캔된 주변 환경은 3차원 지도로 만들어진다[117].



[그림 2-10] 회전식 스캐닝 라이다 작동 원리(1) [64]



[그림 2-11] 회전식 스캐닝 라이다 작동 원리(2) [70]



[그림 2-12] 3차원 포인트 클라우드 생성 [64]

회전식 스캐닝 라이다는 전방위 360도 스캔과 300m 이상 장거리 탐지거리 능력으로 전방위 탐지 범위와 높은 공간 해상도를 동시에 제공한다. 이러한 특성으로 고속도로와 개방된 도로 환경 등 대규모 환경 인식이 요구되는 장거리 자율주행 분야에서 자주 활용되고 있다. 이는 최대 300m의 탐지거리와 초당 수백만 개의 포인트를 생성시키는 기술적 특성으로 차량이 고속주행을 하면서도 충분한 제동거리 확보를 가능하게 되고[106] 복잡한 도로 환경에서도 차량들의 고속도로 합류 상황이나 다차선 환경에서 주변 차량과 사람, 기타 객체들의 움직임을 파악하여 안전하게 주행할 수 있는 환경 조성이 가능하기 때문이다[47].



[그림 2-13] 회전식 스캐닝 라이다를 장착한 자율주행 차량 [47] [53]

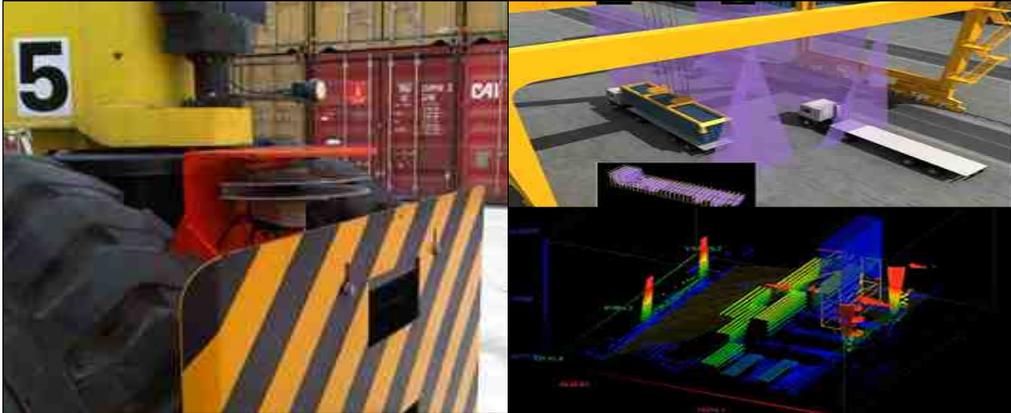
항공측량 및 대규모 매핑 분야에서는 드론에 탑재하여 대규모 지형 측량에 활용하고 있다[43]. 회전식 스캐닝 라이다는 5-20Hz의 회전율로 넓은 지역을 전방위 360도로 스캔하고, 팬 스타일 레이저 구성²⁰⁾을 통해 고도와 비행 속도가 고려된 데이터 밀도를 계산이 가능하다[101]. 이러한 기술로 도시계획, 재해 모니터링, 산림 관리 등 광대역의 필요한 지형정보를 획득한다[104].



[그림 2-14] 회전식 스캐닝 라이다를 장착한 항공측량 드론 [23] [22]

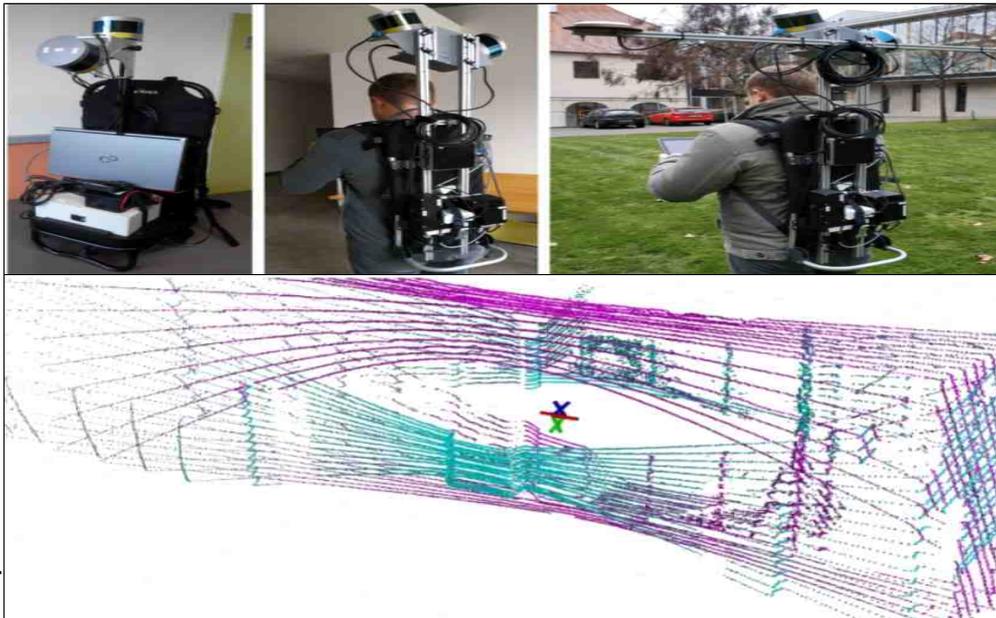
해양 및 대형 항만 자동화 분야에서는 회전식 스캐닝 라이다를 컨테이너 운반 시설물과 운반 차량에 장착되어 장거리 장애물 탐지와 정밀 위치 제어에 활용한다. 특히 자동화된 컨테이너 운반 차량에 설치된 회전식 스캐닝 라이다는 조명 조건의 변화, 안개, 비, 바람 등의 변덕스런 기상환경을 극복 가능하다. 이러한 기술적 특성으로 복잡한 항만 환경에서도 크레인 붐, 스프레더, 컨테이너 등의 위치를 정확하게 파악하여 복잡하고 협소한 지형에서도 안전한 자율 주행을 보장하고 있다[100].

20) 팬 스타일 레이저 구성 : 회전식 라이다에서 여러 개의 레이저 송수신기가 수직으로 부채꼴 모양으로 배열된 구조



[그림 2-15] 회전식 스캐닝 라이다를 장착한 대형 항만시설 [64]

건설 및 산업현장 안전측량 분야에서는 정밀 측량을 위한 상황 모니터링에 회전식 스캐닝 라이다가 활용되고 있다[112]. 회전식 스캐닝 라이다 두 대를 조합한 백팩 형태의 이동식 3D 안전측량 시스템은 복잡한 건설 현장이나 대규모 산업 시설의 구체적인 공간정보 수집이 가능하다. 수집된 공간정보는 설계도면과 실제 시공 상태에 대한 비교와 분석이 가능하여 구조물 치수를 밀리미터 단위급의 정확도로 검증하고 품질 관리와 안전 점검에 필요한 정보를 제공한다[124].



[그림 2-16] 회전식 스캐닝 라이다를 장착한 3D 이동식 안전측량 시스템 [124]

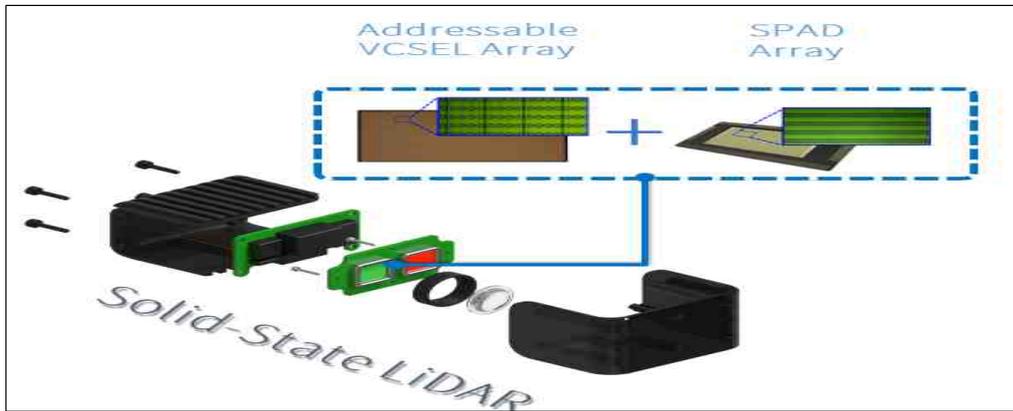
회전식 스캐닝 라이다의 미래 기술 발전 추세는 장거리 탐지와 전방위 360도 스캔이라는 고유 장점을 유지하면서도 내구성과 비용 효율성을 개선하는 방향으로 진행되고 있다. 특히 채널 수의 지속적인 증가를 통한 해상도 향상, 인공지능 기반 실시간 포인트 클라우드 처리 알고리즘 통합 등이 추진되고 있다[39]. 회전식 스캐닝 라이다는 자율주행 로봇택시와 자율주행 트럭의 상용화에 힘입어 시장에서의 수요가 확대되고 있고 스마트시티 인프라 구축을 위한 라이다 설치도 증가하고 있다. 그러나 MEMS 기반 라이다와 플래시 라이다 등 차세대 라이다 기술의 발전으로 전체 라이다 시장 점유율은 감소하고 있다[115].

특히 군 운용 분야에서는 정밀 매핑과 장거리 탐지라는 기술적 장점이 있지만 기계적으로 부품을 회전하게 해주는 구동부 부분은 야지 기동 간에 발생하는 외부 충격과 진동, 분진 환경에 취약하여 안정적인 임무 수행을 보장하기 어렵다는 단점이 있다. 또한 회전식 스캐닝 라이다를 구성하고 있는 핵심 부품들은 주로 해외업체에서 제작하여 전시에 적기 조달이 어렵고 높은 비용을 발생시키고 [40] 주변 환경 스캔을 위해 지속적으로 발산시키는 레이저 펄스가 적에게 탐지될 위험을 높이는 등의 단점이 존재한다. 따라서 이러한 단점들을 고려하여 회전식 스캐닝 라이다는 내구성과 은밀성 향상을 중점으로 성능개량을 추진할 것이다. 만약 성능개량이 제한된다면 플래시 라이다로 전환되거나 하이브리드 형태의 융합활용도 예상된다.

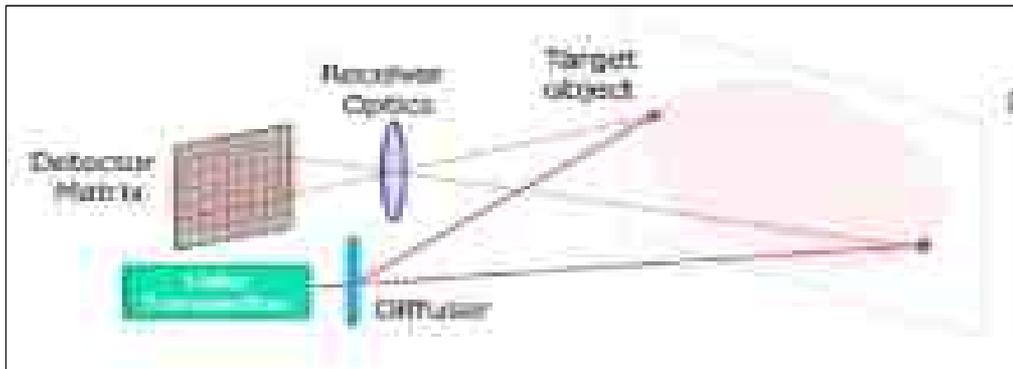
플래시 라이다는 회전식 스캐닝 라이다의 작동 방식과는 다르게 주요 부품의 회전 없이 VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser : 수직 공진 표면 발광 레이저) 어레이로 대상 장면 전체를 레이저 펄스로 동시에 조사하고 SPAD(Single-Photon Avalanche Diode : 단일광자 애벌런치 다이오드) 기반의 2차원 dToF(Direct Time-of-Flight : 직접 비행시간 측정) 이미지 센서에서 반사 신호를 일괄적으로 수신하는 라이다 방식이다[103]. 즉 마치 카메라의 플래시 셔터가 순간적으로 전체 장면을 조명하여 픽셀 단위의 깊이 정보를 동시에 획득하는 것과 같은 방식이다.

플래시 라이다는 부품이 움직이지 않고 레이저 펄스를 발산하기 때문에 회전식 스캐닝 라이다처럼 기계적인 회전에서 야기될 수 있는 부품 마모를 방지하고, 마이크로초 단위의 고속 측정이 가능해 높은 신뢰성과 내구성을 구현할 수 있다[122].

플래시 라이다의 구체적인 작동 원리는 레이저 펄스가 발산하면서 DOE²¹⁾를 통해 하나의 큰 레이저 스팟으로 범위가 확산된 레이저 펄스는 목표물을 동시에 도달할 수 있도록 시야각 전체로 한 번에 조명이 된다. 이후 조명된 물체로부터 반사된 레이저 펄스 신호는 수신 광학계(Receiver Optics)를 통과하여 검출기 매트릭스(Detector Matrix)에 도달하게 되는데 이후 검출기를 통해 각 픽셀의 독립적인 시간 측정이 가능해진다. 이를 통해 실시간 프로세서(Real Processor)로 거리 정보(Range Information)를 생성할 수 있는데 이러한 방식은 전체 시야를 동시에 인식하므로 모션 블러²²⁾가 발생없이 높은 일관성을 제공한다.



[그림 2-17] 플래시 라이다 작동 원리(1) [64]



[그림 2-18] 플래시 라이다 작동 원리(2) [70]

21) DOE(Diffractive Optical Element) 회절 광학 소자로 빛이 지나갈 때 회절을 이용해 원하는 모양으로 빛의 세기나 방향을 정밀하게 바꾸는 소자로, 작은 패턴을 통해 렌즈처럼 빛을 굴절시키는 대신 ‘빛을 미세하게 조각해 제어하는 기술’이다.

22) 모션블러 : 물체나 센서의 움직임으로 인한 발생하게 되는 이미지 왜곡 현상

플래시 라이더의 부품들은 높은 내구성을 지닌다. 이는 회전식 스캐닝 라이더와는 다르게 부품 회전이 없기 때문에 열악한 험지에서 발생하는 진동, 충격 등에 의한 고장 위험이 현저하게 낮은 까닭이다[102]. 또한 핵심 부품의 국산화율도 높아 VCSEL 어레이, 광학 렌즈, 패키징 부품제작 기술을 가진 국내업체가 다수 존재한다. 그렇기 때문에 국내 공급망을 통해 필요 부품을 신속하게 확보 가능하다. 이는 해외 기술 의존도가 높아 주요 부품을 수입하여야 하는 회전식 스캐닝 라이더와는 다르게 유지보수 비용을 절감하고 안정적으로 공급망 형성에 기여할 수 있다[69].

또한 플래시 라이더는 선택적으로 레이저 펄스를 순간 발산할 수 있기 때문에 레이저 펄스를 지속적으로 발산해야 하는 회전식 스캐닝 라이더와는 다르게 위험지역에서의 적 탐지장비 등에 의한 노출 가능성을 현저하게 낮출 수 있고 이로 인해 임무수행 중인 장비와 인원들에 대한 생존성을 보장할 수 있다. 특히 플래시 라이더는 소형화와 경량화도 가능한데 이를 통해 내부 매립도 가능하여 다목적 무인무량의 공기역학적 설계를 해치지 않고, 장비 노출 위험을 크게 감소시킨다[119].

한편 플래시 라이더는 회전식 스캐닝 라이더 대비 제한적인 시야각과 탐지거리가 짧다는 단점을 갖고 있다[120]. 그 이유는 플래시 라이더의 수평 시야각은 120도 이내로 구성되어 있기 때문이다. 그래서 회전식 스캐닝 라이더의 전방위 360도 스캔범위에 비해서는 환경 인식의 범위가 제한된다. 또한 동일한 레이저 출력을 전체 시야각에 분산시켜야 하는 플래시 라이더의 기술적 특성상 단위 면적당 에너지 밀도가 회전식 스캐닝 라이더보다 상대적으로 낮게 되어 장거리 탐지 성능도 낮아지게 된다.²³⁾

플래시 라이더는 근거리 환경 인식 분야를 중심으로 다양하게 활용된다. 특히 모바일 플랫폼 분야에서 2020년 애플은 iPad 프로 모델에 플래시 라이더를 탑재하여 스마트폰과 태블릿에 탑재되어 제공되는 증강현실(AR), 3차원 스캔, 카메라 자동 초점 제공 등의 기능을 구현하였다[121].

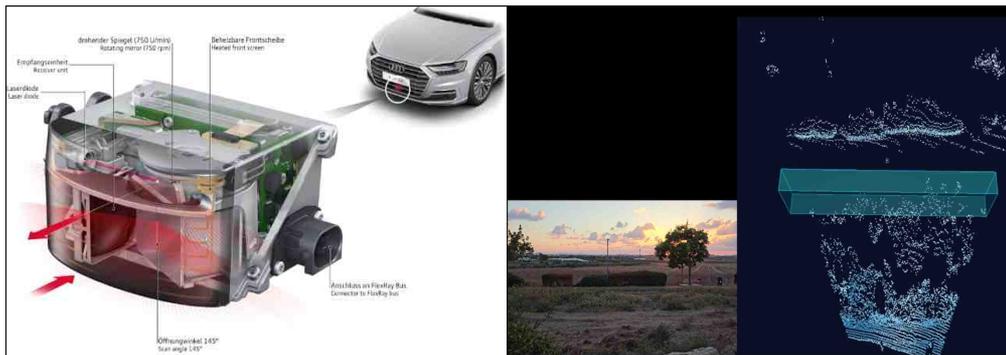
23) 저자의 SOS LAB 및 아이탐모티브사 현장 인터뷰 내용(2025. 8. 4~5)



iPad Pro 2020 Lidar Scanner

[그림 2-19] 플래시 라이다를 장착한 애플 iPad 프로의 라이더 모듈 [137]

근거리 자율주행 및 ADAS 분야에서는 도심지 보행자 및 환경 장애물 인식에 많이 활용된다. 특히 플래시 라이더는 동시 병렬적으로 환경을 측정하고 인식하는 구조인데 높은 프레임 속도에서 다수의 포인트 클라우드를 생성하여 예기치 못하는 돌발상황에도 실시간 환경인식 처리가 가능하다[123].



[그림 2-20] 플래시 라이다를 장착한 근거리 자율주행 차량 [64]

로보틱스 및 서비스 로봇 분야에서는 물류 로봇, 실내 자율주행 로봇, 드론 등의 실시간 환경 인식 센서로 활용되고 있다. 플래시 라이더는 단일 광원과 수신 어레이를 통해 고속 거리 정보를 획득하며, 소형화 및 경량화, 저전력

운용이 가능하여 이동 로봇에 탑재하고 장기간 운용이 용이하다. 이러한 장점으로 로봇을 활용한 실내 내비게이션, 장애물 회피에 활용된다[155]. 제조업 서비스 분야에서는 플래시 라이더의 주변 환경을 순간 측정하는 기술적 특성을 활용하여 고속으로 이동하는 부품에 대한 치수 검사와 표면 결함 탐지, 중요 전시물에 대한 도난방지 시스템에 활용된다[156].



[그림 2-21] 플래시 라이더를 장착한 표면 결함 탐지 및 도난방지 시스템 [64]

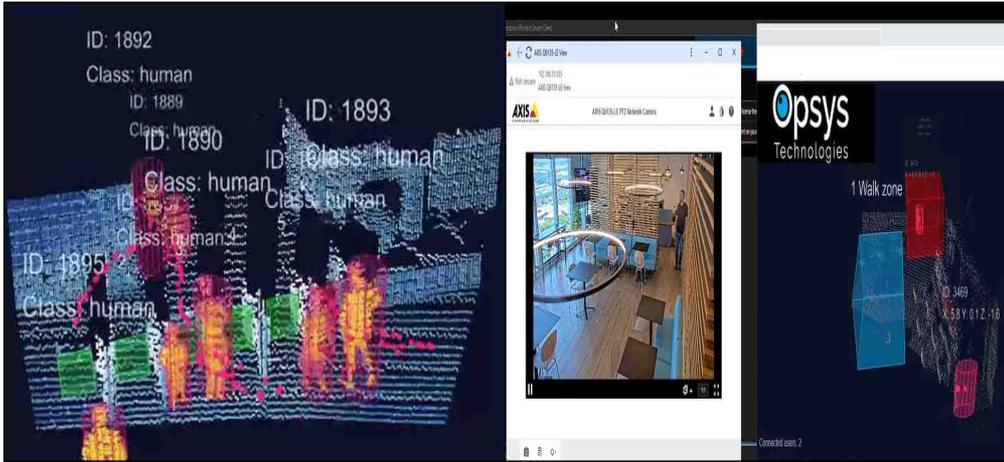
3D 정밀계측 분야에서는 밀리미터 단위급의 정확도로 안면 인식, 제스처 인식, 실내 공간 매핑 등에 활용된다. 플래시 라이더는 제어시스템을 통해 DOE 소자 또는 메타서피스(metasurface)²⁴⁾ 소자 등 나노광학 소자와 결합하여 원하는 패턴 또는 위상분포를 생성한다. 그리고 생성된 패턴 또는 위상분포로 레이저 펄스의 발산 각 및 발산 각도를 조정 및 제어하거나 다중 레이저 펄스 발산을 통해서 고밀도 포인트 클라우드를 더 짧은 시간 내에 취득하게 된다.

특히 VCSEL 영역과 메타서피스의 모노리식 통합²⁵⁾ 또는 DOE 소자를 통한 위상 조절 기능을 이용하면 개별 발광 요소의 레이저 펄스의 발산 방향 또는 레이저 펄스의 형태까지도 제어가 가능하다. 이러한 기술적 특성은 플래시 라이더는 안면인식, 제스처 인식, 공간 매핑 같은 정밀 3D 정밀계측 분야에 높은 정확도를 보장한다.

24) 메타서피스 (Metasurface) : 나노미터 수준의 주기적 구조를 갖는 2차원 인공 표면으로 전자기파의 위상·진폭·편광을 원하는 방식으로 정밀하게 제어할 수 있는 광학 소자.

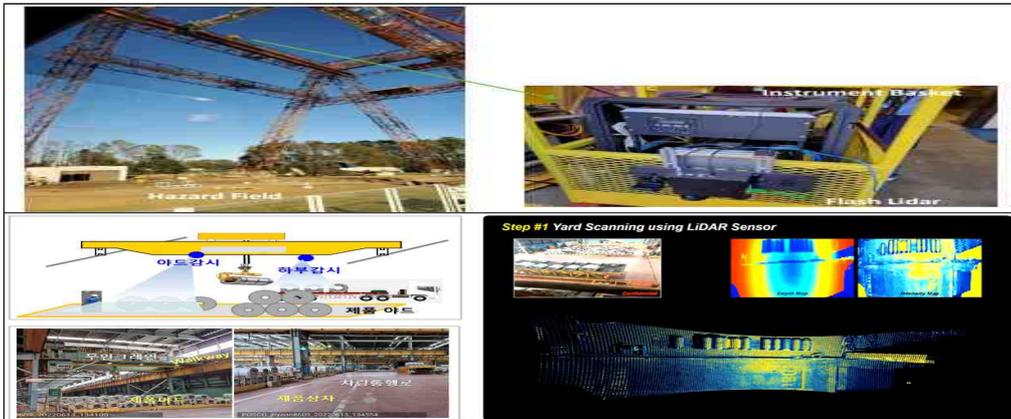
기존 굴절 / 반사 광학계의 한계를 극복하며 초박형·집적형 광학 시스템 구현에 사용된다.

25) 모노리식 통합 (Monolithic Integration) : 단일 기판(wafer) 위에 서로 다른 기능을 가진 소자(예: 레이저, 검출기, 회로 등)를 한 번의 제조 공정 또는 연속된 공정으로 집적하는 방식. 이로써 소자의 정렬 오차를 줄이고, 소형화·안정성·대량생산성을 높일 수 있다.



[그림 2-22] 플래시 라이다를 장착한 실내 공간 3D 정밀 계측 시스템 [64]

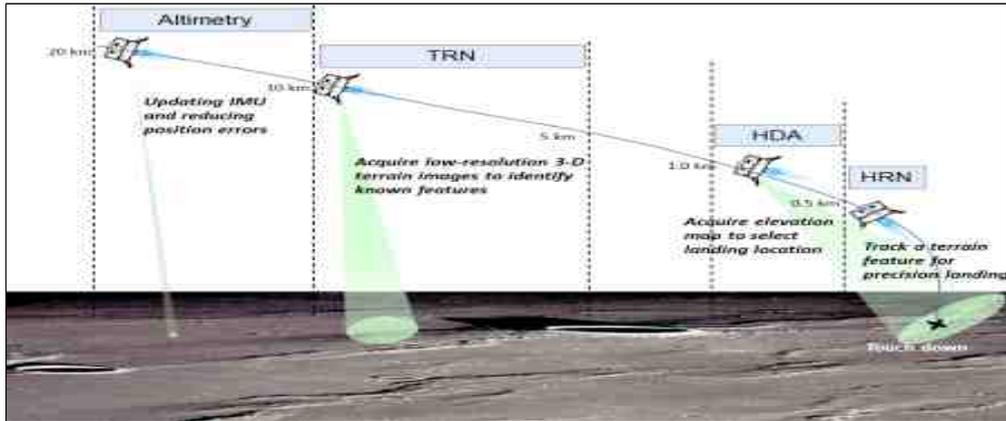
제조업 및 산업 현장에서는 로봇 비전시스템과 결합하여 조립 상태 확인 및 품질 관리시스템에 활용된다. 제조업에서는 초당 수십~수백 프레임의 3D 스캔을 통해 공장 내에서 이동하는 부품의 치수를 실시간으로 계측하고 마이크로미터 수준의 정밀도로 표면 결함, 조립 오차, 위치 편차를 검출한다. 품질관리 시스템에서는 차체패널의 형상 정합성과 용접부 품질 상태를 비접촉 방식으로 검사할 수 있으며 이상 징후를 발생 시 신속하게 포착하여 관련정보를 사용자에게 실시간으로 제공한다[90].



[그림 2-23] 플래시 라이다를 장착한 산업현장 안전관리 시스템 [64]

항공우주 분야에서는 NASA의 우주선 착륙시스템에 플래시 라이다가 활용된다. 대표적 사례로 오셀루스 3D 플래시 라이다가 있다. 오셀로스 3D 플래시

라이다는 타이탄 탐사를 위해 발사된 탐사위성의 로트콥터가 타이탄 지표면에 안전 착륙을 위해서 활용되었다. 당시 오셀루스 3D 플래시 라이다는 타이탄 지표면으로부터 약 200m 이하의 고도부터 플래시 라이다를 통해 레이저 펄스를 순간적으로 조사하여 타이탄 지표면의 지형정보를 고해상도 이미지로 획득하였고 면밀한 지형평가를 가능하게 된 탐사선은 무사히 지표면에 착륙할 수 있었다[143].



[그림 2-24] 타이탄 탐사 간 활용된 오셀루스 3D 플래시 라이다 [143]

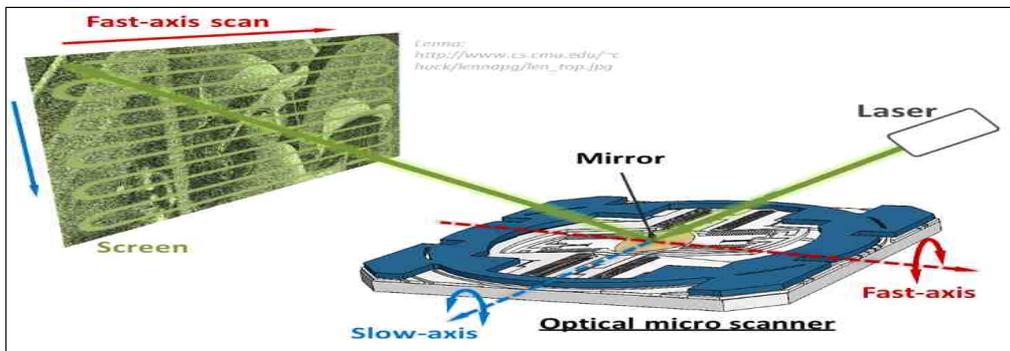
플래시 라이다의 미래 기술발전 추세로는 제한적 시야각(120도)과 탐지거리 (300m) 한계를 극복하기 위한 기술 발전이 이루어질 것이다. 특히 회절광학 소자와 인공 나노구조 표면 등 초미세 광학 부품과의 결합은 레이저 펄스의 방향을 정밀하게 조절하고 여러 개의 레이저 펄스를 동시에 생성시켜 플래시 라이다 시야각의 확장과 더욱 정밀한 3차원 점 데이터 생성이 가능할 것이다.

모바일 분야에서는 2020년 애플 ‘iPad Pro’ 탑재 이후 스마트폰과 태블릿 시장에서의 성공적 검증을 바탕으로 증강현실, 3차원 스캔, 손동작 인식 등 소비자 전자기기 시장이 지속 확대될 것으로 예상된다. 특히 NASA의 타이탄 착륙 사례처럼 극한 환경에서의 활용성이 입증된 플래시 라이다는 험한 지형과 충격, 진동 등의 극한 환경이 지속적으로 계속되는 국방분야로의 활용 범위를 확산시킬 것이다.

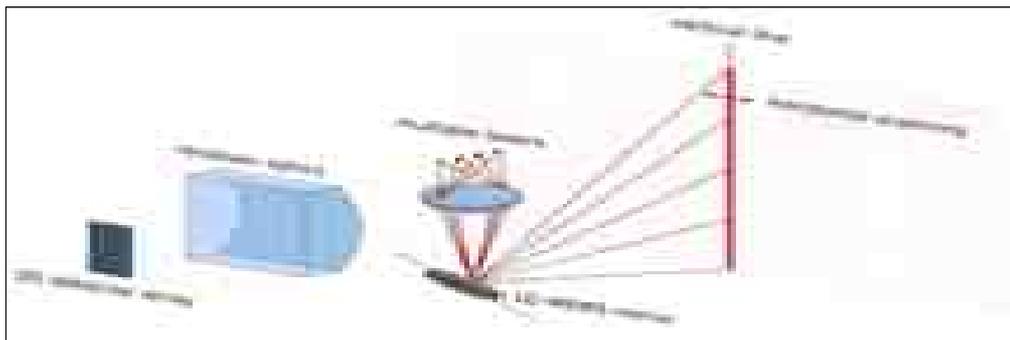
이와 더불어 국내 플래시 라이다의 제작 기술을 가진 업체들을 중심으로 레이저 배열, 광학 렌즈, 부품 조립 기술 등의 국산화율을 높여 부품 공급의 안정성과 유지보수 비용 절감 실현을 추진할 것이다. 또한 중·장기적으로는 MEMS나

OPA 방식 등 여러 방식을 결합한 복합 센서 개발을 통해 시야각과 탐지거리 한계를 보완하면서도 장점을 극대화하는 방향으로 발전할 것이다.

MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems : 미세 전자기계 시스템) 기반 라이더는 마이크로미터 단위의 미세 거울을 활용하여 발산되는 레이저 펄스를 움직여서 주변 환경을 스캔하는 라이더 방식이다[125]. 이 방식은 미세한 평면 거울이 세로와 가로로 움직이면서 고정된 상태에서 발산되는 레이저 펄스를 주변으로 반사시켜 주변 환경을 스캔하는 방식으로 미세거울과 부품 등 주요 부품들의 크기가 작아 경량화와 소형화가 가능하다[128].



[그림 2-25] MEMS 라이더 작동 원리(1) [64]



[그림 2-26] MEMS 라이더 작동 원리(2) [70]

MEMS 기반 라이더에서 미세거울을 구동하는 방식은 정전기, 전열, 전자기, 압전 등의 네가지 방식으로 구분된다. 정전기 구동 방식은 미세거울과 고정된 전극 사이에 전압을 인가시켜 발생하는 정전기의 힘으로 미세거울을 끌어당기거나 밀어내는 방식이다. 응답 속도가 높고 전력 소비가 낮다는 장점이

있지만 정전기를 발생시키기 위해서는 구동시켜야 하는 전압이 높아야 한다는 단점이 있다.

전열 구동 방식은 전기소자를 미세하게 가열할 때 발생하는 소자의 열 팽창 현상을 이용하여 미세거울의 위치를 변형시키는 방식으로 움직이는 각도가 크고 정전기 방식에 비해서는 구동 전압이 낮다는 장점이 있으나 열이 소자를 팽창시키는 시간이 필요해 다른 방식에 비해서 높은 전력과 주변 환경을 스캔하는 시간이 수 밀리초로 다소 느리다는 단점을 갖는다.

전자기 구동 방식은 자석 또는 전자석이 생성하는 자기장과 미세거울에 흐르는 전류 간의 로렌츠²⁶⁾ 힘을 이용하는 방식으로 주변 환경에 대한 스캔이 빠르다는 장점이 있지만 외부 자석을 장착해야 하기 때문에 시스템의 크기가 증가하고 높은 전력이 필요한 단점이 있다. 압전 구동 방식은 압전 재료에 전압을 가할 때 발생하는 기계적 변형을 이용하여 미세거울을 구동하는 방식으로 위치 제어와 주변 환경 스캔에 대한 정밀도는 우수하지만 구동 전압이 높고 제작공정 또한 복잡하다는 단점이 있다[84].

미세거울을 사용하는 MEMS 기반 라이더는 미세거울을 구동하는 방식과 관계없이 공통적으로 수평 및 수직축에서 진동하여 레이저 반사각을 변화시킨다. 포인트 투 포인트 방식의 스캐닝을 통해 확보되는 높은 환경 인식률을 바탕으로 같은 각도와 위치로 미세거울을 조향시킨다면 반복 작업에서도 같은 정밀도를 확보할 수 있다. 또한 반도체 기반의 집적화된 대량 생산방식과 라이더의 경량화 및 소형화 기술로 장비 내부 탑재도 가능하다. 특히 미세 거울의 제조도 포토리소그래피²⁷⁾ 생산 기법을 사용하여 최고의 정밀도를 유지한 상태에서 대량 생산도 가능하다.

고도로 자동화된 공정에서 표준 실리콘 웨이퍼가 동시에 수백 개의 MEMS 기반 라이더의 부품으로 변환되는데 이는 수십년간 반도체 산업에서 적용되고 최적화된 방법으로 기존 회전식 스캐닝 라이더와 비교하여 MEMS

26) 로렌츠 힘(Lorentz Force): 전류가 흐르는 도체가 자기장 내에 있을 때 받는 힘으로, 전류의 방향과 자기장의 방향에 수직인 방향으로 작용한다. MEMS 전자기 구동에서는 이 원리를 이용하여 미러에 설치된 코일과 자기장의 상호작용으로 미러를 움직인다.

27) Photolithography : 반도체 제조 공정에서 사용되는 미세 패턴 형성 기술

기반 라이더는 크기, 스캔 속도, 비용 측면에서 우수한 성능 제공이 가능하다. 이러한 특성으로 전체 라이더 시스템의 크기와 무게가 소형화 및 경량화된 상태로 소형 드론, 지상 정찰 로봇, 휴대용 감시 장비 등에 내부 탑재되어 유용하게 쓸 수 있다. 또한 반도체 공정을 활용한 저비용 대량 생산이 가능한 MEMS 기반 라이더는 기존 회전식 스캐닝 라이더 보다 제조 단가를 크게 낮출 수 있다. 그러나 MEMS 기반 라이더는 미세거울의 느린 움직임으로 순차적으로 주변 환경을 스캔하기 때문에 스캔을 위한 시간은 0.1초 이상 소요된다[128].

MEMS 기반 라이더의 상용화는 상당히 진행되어 있다. 중국은 2020년 500~1,100달러 가격대의 제품을 양산하고 MEMS 기반 라이더가 주축이 되어 회전식 스캐닝 라이더와 결합한 하이브리드형 라이더도 출시하면서 연간 10만대의 대규모 생산라인을 구축했다[141]. 독일은 2019년부터 상용 제품을 시장에 출시하고 있으며 미국의 기존 회전식 스캐닝 라이더 업체들도 500달러 목표의 가격으로 2021년부터 대량 생산에 돌입하는 등 많은 국가에서 관심을 보이고 있다.

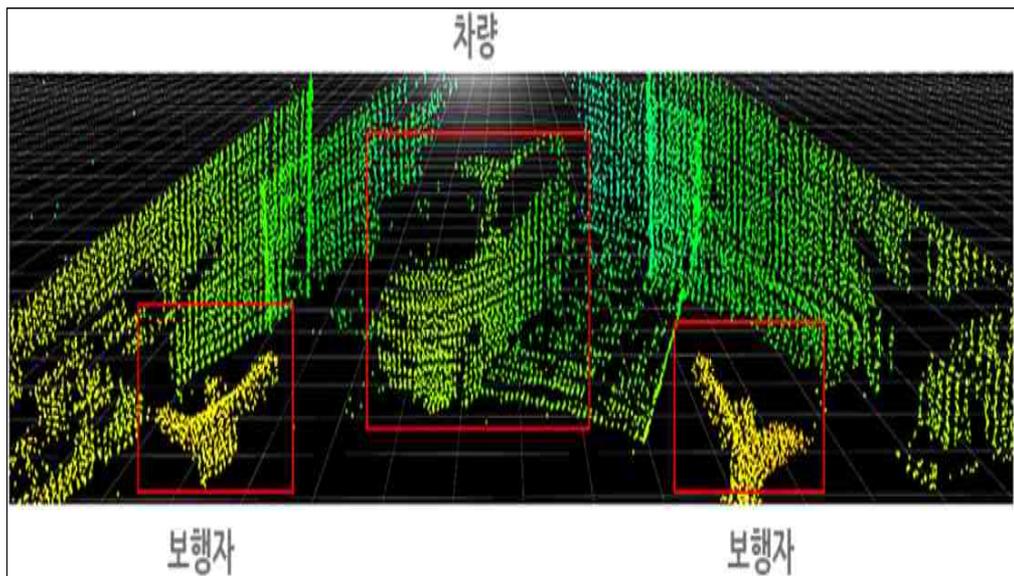
하지만 라이더 시장에서의 이러한 긍정적 신호에도 불구하고 MEMS 기반 라이더는 진동 및 온도 변화에 민감한 미세거울의 취약성과 회전식 스캐닝 라이더 대비 상대적으로 짧은 탐지거리 등의 기술적 단점으로 근거리 라이더 시장을 중심으로 발전하고 있다[146].

MEMS 기반 라이더는 자율주행 분야에서 주변환경의 인식과 장애물 탐지를 지원하고 있다. 중국은 세계 최초로 MEMS 기반 라이더를 탑재한 자율주행차를 양산하였으며, 독일 프리미엄 자동차 브랜드도 이스라엘 업체와 파트너십을 통해 전기 SUV에 MEMS 기반 라이더를 탑재했다[146]. 또한 일본은 MEMS 기반 라이더를 이용해 ADAS 시스템을 적용한다고 발표했다[23].

이렇듯 MEMS 기반 라이더는 자동차 분야에서 적응형 순항제어, 차선 유지 보조, 자동 응급 제동 등의 고급 고속도로 ADAS 기능을 지원할 수 있도록 발전하고 있는데. 일반적으로 120도 수평, 16도 수직의 시야각을 통해 근거리의 지상과 공중의 물체를 정밀하게 탐지할 수 있어 곡선 및 경사진 도로에서도 효과적인 작동이 가능하다.

[표 2-2] 미세거울 구동 방식 비교 ²⁸⁾

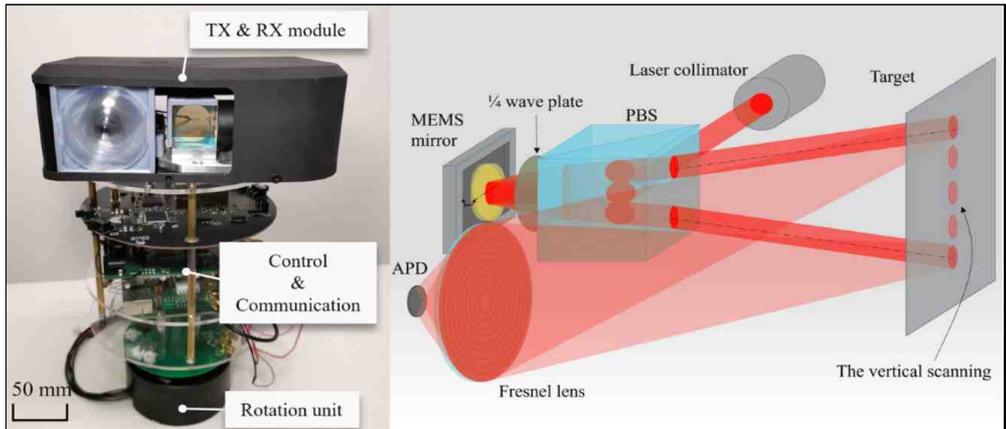
구분	구동원리	장점	단점
정전기 구동	· 미세거울과 고정전극 사이에 전압을 인가하여 발생한 정전기력으로 미세거울을 끌어당기거나 밀어냄	· 응답 속도가 빠름 · 전력 소비가 낮음	· 높은 구동 전압 필요
전열 구동	· 전기소자를 가열하여 생기는 열 팽창으로 미세거울의 각도를 움직임	· 큰 각도 조절 가능 · 구동 전압이 낮음	· 전력 소모가 큼 · 열 팽창까지의 시간 필요(수밀리초)
전자기 구동	· 로렌츠(자석 또는 전자석이 만든 자기장) 힘 속에서 코일에 전류를 흘려 미세거울을 이동	· 주변 환경 스캔 속도가 빠름	· 외부 자석 장착필요 → 시스템 크기 증가 · 높은 전력 필요
압전 구동	· 압전 재료에 전압을 가하면 발생하는 기계적 변형으로 미세거울을 움직임	· 위치 제어와 주변환경 스캔 정밀도 우수	· 높은 구동 전압 필요 · 제작공정이 복잡함



[그림 2-27] MEMS 기반 라이다 탐지 화면 [23]

28) Khan et al. (2024) 「MEMS Micromirror Actuation Techniques : A Comprehensive Review of Trends, Innovations, and Future Prospects」 MDPI Sensors의 내용 재구성

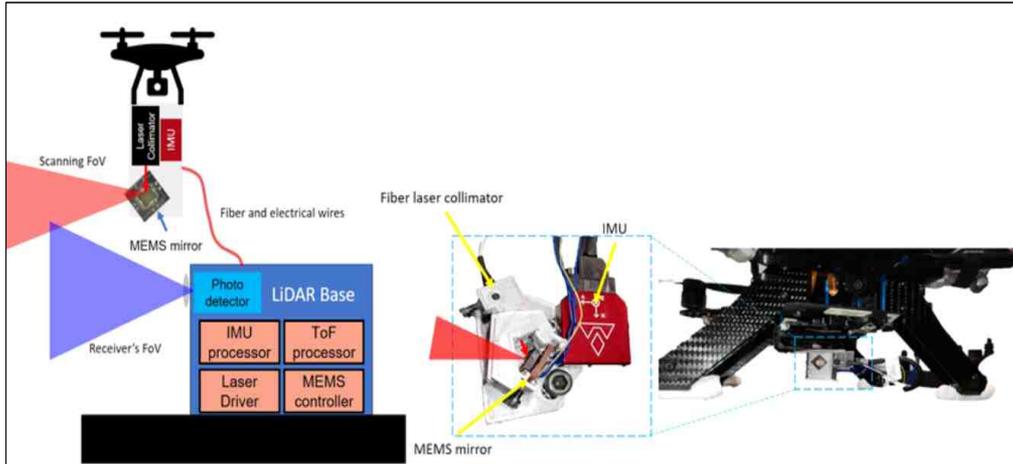
로보틱스 및 모빌리티 분야에서는 자율이동 로봇, 물류 장비 서비스 로봇 등에 활용된다. 중국에서는 MEMS 거울을 이용해 빛의 방향을 조절할 때 기계적 모터로 움직이는 방위각 조절 장치를 함께 사용하도록 하여 사용자가 의도하는 대로 주변환경 인식 패턴을 바꿀 수 있는 시스템을 개발하였다. 또한 반복적인 패턴과 비반복적인 패턴을 번갈아 사용함으로써, 로봇이 주변을 스스로 인식하고 장애물을 피해 이동할 수 있는 내비게이션 기능을 가진 로봇도 개발하였다[130].



[그림 2-28] 자율주행차량에 장착된 MEMS 라이다 [130]

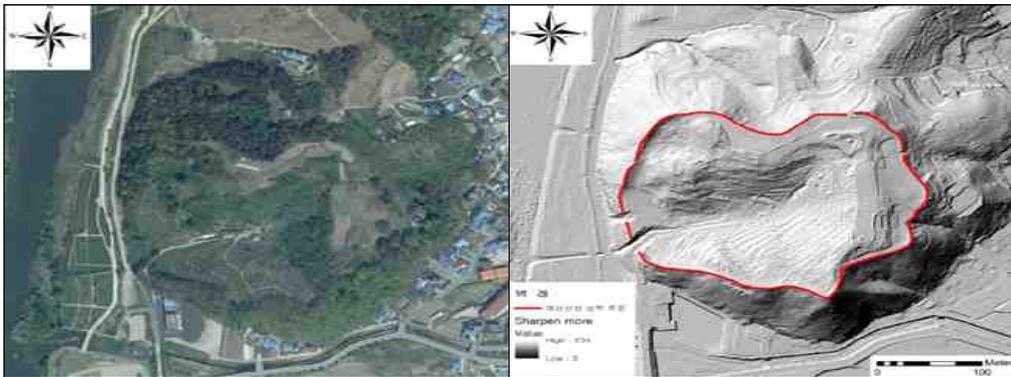
산업 현장 분야에서는 재고 관리, 보안 감시, 교통 및 폐기물 관리 등의 업무에서 시범적으로 MEMS 기반 라이다가 활용되고 있다. 유럽 일부 국가는 5G 네트워크와 라이다를 연계한 재고 및 자재 관리시스템을 시범으로 적용하고 있으며, 시멘트 생산 공정에서 정확한 이산화탄소 배출량 산정과 세금 계산을 위한 저장고 측정에 활용하고 있다. 최근에는 건물·지역·물체 보안을 위한 위협 탐지 및 경보 시스템, 인구 밀도 분석 및 이동 패턴 모니터링 등으로 응용 범위가 확장되고 있는 추세이다.

제조업 분야에서는 MEMS 기반 라이다에 쓰이는 미세 거울의 소형화 및 경량화, 저전력으로도 사용이 가능하다는 특성을 활용해 주로 내시경 이미징, 라이다, 디스플레이 제작, 광통신 응용 분야에서 활용되고 있다. 최근에는 MEMS 기반 라이다를 탑재한 드론을 활용한 라이다 대형 구조물의 검사 및 유지보수 자동화 작업을 통해 기존 수동 검사 방식에 비해 시간과 비용을 크게 절감하고 있다[99].



[그림 2-29] MEMS 라이다를 장착한 드론 [87]

고고학 및 항공측량 분야에서는 MEMS 기반 라이다를 통해 지리정보시스템과 연동하여 도시 통계 및 계획, 고고학적 유적지 탐색에 일부 사용하고 있다. 특히 MEMS 라이다를 통해 획득되는 데이터들은 DB 형식으로 빠르고 저렴하게 구축이 유용하여 시간과 예산을 절감하는 장점으로 그 활용 범위와 빈도가 늘어나고 있다.



[그림 2-30] MEMS 기반 라이다 항공 촬영(좌 : 항공사진, 우 : 라이다) [31]

국방 분야에서는 저전력 기반의 소형화가 가능한 MEMS 기반 라이다의 장점을 살려 소형 드론, 지상 정찰 로봇, 휴대용 감시 장비 등 주로 소형화된 유·무인 복합전투체계에서의 활용을 시도하고 있다. 하지만 아직까지 MEMS 기반 라이다가 갖고 있는 탐지거리의 한계, 험준한 야지에서 발생하는 충격과 진동과 관련된 미세거울의 내구성 문제 등으로 MEMS 기반 라이다의 군사 분야 활용은 아직 연구개발 및 시범 적용 단계 수준에 그치고 있다.

MEMS 기반 라이다의 미래 기술 발전 추세로는 미세거울을 활용한 스캔 속도 향상, 미세거울 등의 내구성 강화를 위한 신소재 적용 등의 연구가 이루어질 것이다. 그 이유는 최근 라이다 시장 측면에서는 중저가 자율주행차와 ADAS 시장에서 수요의 증가와 물류 자동화 로봇과 실내 서비스 로봇 분야의 성장으로 MEMS 라이다의 채택을 확대하고 있기 때문이다. 다만 국방 분야로의 진입은 시간이 상당히 소요될 것으로 판단된다. 본 저자는 본 연구의 목적을 고려하여 MEMS 기반 라이다에 대해서는 기본적인 작동 원리와 활용 현황 소개 수준만 언급한다.

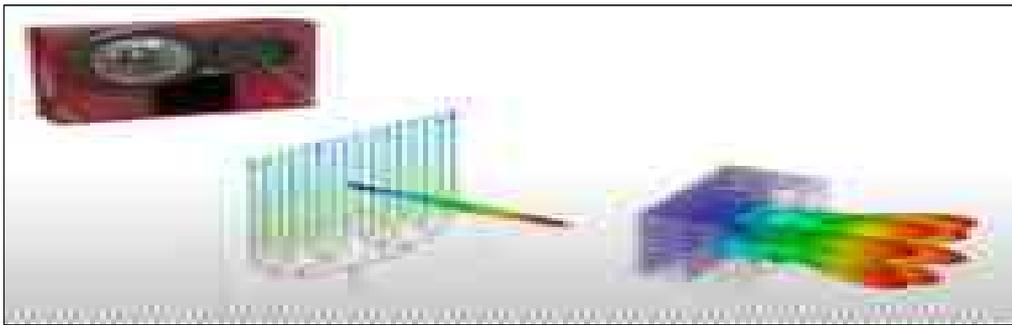
OPA(Optical Phased Array) 기반 라이다는 다수의 발광 소자를 배열 형태로 집적한 후, 각 발광 소자의 위상(phase)을 전자적으로 제어하여 레이저 펄스를 원하는 방향으로 발산하는 작동 방식의 라이다이다. OPA 기반 라이다는 위상차 조절을 통해 전자적인 레이저 펄스의 조향이 가능하기 때문에 회전식 스캐닝 라이다, MEMS 기반 라이다와는 다르게 기계적인 부품 회전 없이 주변 환경을 스캔할 수 있는 라이다 방식이다[131].

OPA 기반 라이다의 세부적인 작동 방식은 레이더에서 사용되던 위상 배열(phased array) 기술을 광학 주파수 대역에 맞추어 구현한 것으로 레이더용 위상 배열과 같은 원리로 작동하는데, 다수의 나노포토닉 안테나 발광 소자를 1열 또는 2열로 배치하고, 각 발광 소자의 위상과 진폭을 개별 단위로 제어함으로써 원하는 방향으로 레이저 펄스를 발산하는 방식이다. 이론적으로는 다량의 안테나를 사용할 경우 별도의 시스템이 없이도 임의의 레이저 펄스를 생성하고 2중으로 가능하지만, 실제로는 설계의 복잡성, 전력 소모, 비용 문제 등으로 인해 위상 변조기와 안테나 소자의 수가 제한되어 한정된 수의 안테나를 활용한다[120].

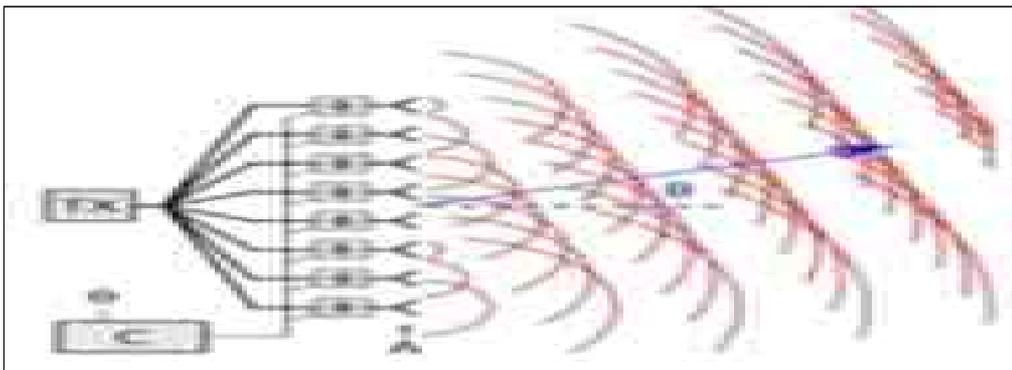
OPA 송신기의 기본 구성은 레이저 광원, 전력 분할기, 위상 변조기, 그리고 방사 소자 배열 등으로 이루어진다. 레이저 출력은 전력 분할기 트리를 통해 다중 경로로 분할되며 각 경로는 조정 가능한 위상 변조기를 거쳐 나노 포토닉 안테나로 전달되어 자유공간으로 발산된다. 이때 각 소자에서 발산된 빛은 원거리에서 간섭을 통해 합성되면서 소자 간 상대적 위상차 조절을 통해 레이저 펄스의 발산과 조향이 이루어진다[126].

OPA 기반 라이더는 실리콘 포토닉²⁹⁾ 기반의 CMOS 호환 공정을 통해 저비용 대량 생산이 가능하다. 그러나 OPA 기반 라이더 상용화 전망은 매우 비관적이다. OPA 기반 라이더를 상용화하여 양산할 수 있는 기술력은 미국의 콰네르지 시스템이 유일하였다.

콰네르지 시스템은 2017년 캘리포니아 선니베일에 OPA 라이더 생산 공장을 설립하여 세계 최초로 OPA 기반 3D 라이더 센서의 양산 체제를 선언하지만 [139] 2022년 파산되어 2023년 2월 자산이 매각되면서 OPA 라이더 사업을 더 이상 진행하지 못하게 되었다. 미국과 중국의 다른 라이더 업체도 OPA 라이더 제작에 도전하였으나 OPA 기반 라이더를 생산할 때 필수적인 발광 소자의 균일성, 위상 교정 및 장기 신뢰성 문제 등을 극복하지 못하고 있다[129].



[그림 2-31] OPA 라이더 작동원리 (1) [64]



[그림 2-32] OPA 라이더 작동원리 (2) [70]

29) 실리콘 포토닉(Silicon Photonics) : 실리콘 기판 위에 광학 소자와 전자 회로를 함께 집적하여 빛을 이용해 정보를 처리하고 전송하는 기술이다. 기존 반도체 CMOS 공정을 활용할 수 있어 대량생산이 가능하고 비용 효율적이며, 전자 회로와 광학 회로를 하나의 칩에 통합할 수 있어 소형화와 고성능을 동시에 달성할 수 있다

OPA 기반 라이더는 부품의 내구성 보장과 주변환경 스캔 속도가 빠르다. 전자적인 제어 방식으로 라이더를 조향해 기계적인 움직임이 전혀 없고, 마이크로초 단위의 초고속 레이저 펄스를 발산 및 조향하여 기존 회전식 스캐닝 라이더, 플래시 라이더, MEMS 기반 라이더보다 주변 환경인식을 위한 스캔 속도가 빠르다. 또한 반도체 칩 수준의 부품 집적화는 극소형화를 가능하게 해주어 반도체 제조 공정을 통한 대량 생산도 가능하다. 하지만 OPA 라이더는 탐지 거리가 불과 수십미터 수준 밖에 되지 않고 나노급의 정밀 제어가 이루어지는 까닭에 제조를 위한 고도의 기술이 요구된다.

이러한 이유로 OPA 기반 라이더의 활용은 아직 시범 적용 및 연구 단계에 머물러 있다. 물론 자율주행 분야에서는 미국의 콰네르기 시스템이 2021년 전기차 업체 미국 ZEV와 협력하여 자율주행 환경에서 OPA 라이더의 적용 가능성을 시연하면서 OPA 라이더를 장착한 차량이 밝은 햇빛 환경에서도 반사율 10%의 저반사율 표적에 대해서도 100m 거리에서 탐지를 성공하고 객체에 대한 종속주행과 100,000시간 이상의 평균 고장 간격을 달성했다고 발표하였지만[129] 콰네르기 시스템이 2022년 12월 파산한 이후 라이더 업계는 제품에 대한 상용화 및 양산을 위한 의지와 여력을 상실하여 뚜렷한 개발 움직임은 보이지 않고 있다[132].

OPA 기반 라이더의 미래 기술 발전 추세는 실리콘 포토닉 기술의 성숙도 향상, 위상 제어 알고리즘 고도화, 대면적 어레이 제작 기술 개발 등이 중심이 되어 활발한 연구가 진행될 것으로 예상되고 있으나 기술적 난제로 실용화 시점을 예측하기 어렵다[129]. 본 연구에서는 목적을 고려하여 OPA 라이더의 기본적인 작동 원리와 활용 현황 소개 수준만 언급한다.

[표 2-3] 라이다 작동 방식별 분류 및 특징 비교표 ³⁰⁾

구분	회전식 스캐닝 라이다	플래시 라이다	MEMS 기반 라이다	OPA 기반 라이다
작 동 원 리	<ul style="list-style-type: none"> · 모터를 활용 레이저 펄스 송·수신부를 360도 회전시켜 주변환경 스캔 	<ul style="list-style-type: none"> · 센서 어레이로 레이저 펄스를 동시에 발사하고 반사된 레이저 펄스를 수신, 카메라 플래시처럼 순간적으로 주변환경 스캔 	<ul style="list-style-type: none"> · 미세거울 활용 레이저 펄스를 미세한 각도 조절로 주변환경 스캔 	<ul style="list-style-type: none"> · 광학 위상 배열 기술로 레이저 펄스를 전자적 제어 / 조향 주변환경 스캔
활 용 분 야	<ul style="list-style-type: none"> · 장거리 자율주행 · 항공 측량 · 해양 및 대형 항만 시스템 · 건설 및 산업현장 측량 및 매핑 	<ul style="list-style-type: none"> · 모바일 플랫폼 · 근거리 자율주행 및 ADAS · 로봇틱스 및 서비스 로봇 · 3D 정밀계측 · 제조업 및 산업 자동화 · 우주 착륙 	<ul style="list-style-type: none"> · 자율주행 및 ADAS 분야 · 로봇틱스 및 모빌리티 · 산업 자동화 및 스마트시티 · 항공 측량 · 국방 분야 (소형 무인기 등) 	<ul style="list-style-type: none"> · 연구단계 응용 (자율주행)
장 점	<ul style="list-style-type: none"> · 전방위 360도 스캔 · 높은 해상도와 정확도 · 긴 탐지거리 (300m 이상) 	<ul style="list-style-type: none"> · 높은 내구성 · 소형 및 경량화 · 국산화 가능 · 피탐 위험 낮음 (선택적 순간 노출) 	<ul style="list-style-type: none"> · 소형 및 경량화 · 생산비용 효율화 가능 · 저전력 · 긴 탐지거리 	<ul style="list-style-type: none"> · 높은 내구성 · 전자제어로 고정밀 정확, 초스피드 스캔
단 점	<ul style="list-style-type: none"> · 부피가 크고 고중량 · 내구성 취약 · 수입의존도 높음 · 노출 취약 	<ul style="list-style-type: none"> · 제한된 시야각 (일반적으로 300m) · 짧은 탐지거리 	<ul style="list-style-type: none"> · 느린 스캔시간 (0.1초 이상) · 움직이는 물체 왜곡 가능 · 내구성 취약 	<ul style="list-style-type: none"> · 기술성숙도 미흡 · 짧은 탐지거리 (수십미터)
미 래 전 추 세	<ul style="list-style-type: none"> · 전체 시장점유율 점진적 감소 · 고정밀 원거리 감지분야는 지속활용 · 내구성과 비용 효율성을 위한 개선노력 진행 	<ul style="list-style-type: none"> · 제한된 시야각과 짧은 탐지거리 극복 노력 진행 · 국산화로 공급 안정성과 유지보수 비용 절감 실현 · 국방 분야로의 확산 전망 	<ul style="list-style-type: none"> · 지속적인 성능개선으로 시장 점유율 확대 예상 · 야지에서의 내구성으로 국방쪽으로는 부적합 전망 	<ul style="list-style-type: none"> · 실리콘 포토닉 기술의 기술 성숙도 고도화를 추진하나 기술적 난제로 인한 상용화는 불투명 전망

30) 본문 내용으로 저자 재구성

제 2절 회전식 스캐닝 라이더 구조와 업체 기술 동향

1) 기술적 구조

회전식 스캐닝 라이더는 기계적인 회전 방식을 활용하여 전방위 360도의 환경 인식을 실현할 수 있는 3차원 계측 라이더이다. 회전식 스캐닝 라이더의 구성은 회전 구동부, 다중 레이저 채널, 수광부, 광학계, 데이터 처리부 등으로 다섯 부분으로 이루어져 있다.

회전 구동부는 정밀한 360도 스캔을 위한 구성요소로 서보모터 시스템, 광학 로터리 인코더, 베어링 시스템, 슬립링 어셈블리로 이루어진다. 고정밀 모터가 송수신 모듈을 포함한 상부 헤드를 분당 최대 1,000여회의 속도로 연속 회전시키며 각 속도 정밀도는 $\pm 0.1\%$ 이내로 제어된다. 회전각 마다 위치의 정밀측정을 위해 고해상도의 광학 인코더가 사용되는데, 최소 0.0003° 의 각도 해석 능력을 갖고 있어 방위각 측정의 정밀함을 확보한다. 장기간 연속 동작을 위해 일반적으로 수명이 10,000시간 이상이 되는 고정밀 볼베어링 또는 에어베어링이 사용되는데. 회전 구동부와 고정부 간의 전력 및 신호 전달을 위해 고신뢰성 슬립링이 결합된다[115].

다중 레이저 채널은 수직 해상도와 측정 밀도를 결정하는 역할을 한다. 수직 배열된 다수의 채널들은 각각 다른 고도각으로 배치되며 근적외선 영역의 905nm 파장 또는 장파장 적외선 영역의 1550nm 파장을 사용하여 레이저를 발산한다. 각 채널은 센티미터급 거리 정밀도를 달성하고 레이저 펄스의 반복 주파수를 회전 속도와 요구되는 포인트 밀도에 따라 최적화 시킨다. 다중 채널의 정확한 정렬은 정밀한 광학 패키징 기술에 따라 좌우되고 채널 수가 증가할수록 포인트 클라우드의 밀도가 향상된다[92].

수광부는 미약하게 반사되어 돌아오는 레이저의 반사 신호를 확인하고 반사된 레이저의 도착시간을 계산하여 거리 측정을 수행한다. 물체에서 반사되어 돌아오는 매우 약한 레이저 펄스 신호는 두가지 고성능 포토다이오드 기술³¹⁾을

31) 포토다이오드 기술 : 빛의 밝기를 측정해서 전기 신호로 알려주는 센서. 빛의 강·약에 따라 전기신호의 세기를 조절해서 얼마나 많은 빛이 들어왔는지 알 수 있게 해주는 기술

활용한다. 먼저 APD 기술³²⁾은 약한 레이저 펄스 신호를 50~200배까지 증폭시켜 감지하며 들어온 빛의 평균 80% 이상을 전기신호로 변환하고 1나노초라는 빠른 응답 속도를 제공한다. APD 기술보다 더욱 진보된 기술인 SPAD 기술³³⁾은 단일 광자의 미약한 신호만으로도 충분한 감지가 가능하며 들어온 광자의 평균 40% 이상을 감지하여 타이밍 측정 오차가 50피코초³⁴⁾ 이하로 정확한 측정이 가능하다. 수광부 내부에 있어 신호 증폭, 필터링, 임계값 판별을 수행하는 신호처리 회로는 80dB 이상의 동적 범위를 제공하며 환경광 억제 기능으로 태양광 조건에서도 안정적으로 동작한다. 특히 최신 회전식 스캐닝 라이더는 $\pm 2\sim 3\text{cm}$ 수준의 거리 정확도와 1mm 수준의 정밀도를 제공한다[85].

광학계는 레이저 펄스를 형성하여 외부로 내보내고 반사되어 돌아온 신호를 수집한다. 송신 광학계는 비구면 렌즈나 복합 렌즈로 레이저 발산각을 약 0.1~0.3mrad 수준으로 좁혀 멀리 있는 물체까지 안정적으로 도달하게 조정한다. 레이저 펄스 출력 시에는 사용자의 안전을 고려 인체 안전규격(IEC 60825-1)³⁵⁾의 기준을 충족하도록 펄스 직경과 발산각을 조절하며 필요시 원형이나 타원형으로 펄스를 성형하여 거리의 측정 정밀도를 높인다. 반면 수신 광학계는 협대역 필터³⁶⁾를 통해 라이더가 원하는 파장대 신호만 통과시켜 배경 잡음을 억제하고 신호대잡음비를 개선하고 직경 50~150mm에 이르는 대구경 집광 렌즈를 사용하여 25도의 시야각 범위에서 반사되어 들어오는 레이저 펄스를 효율적

32) APD(Avalanche Photodiode)는 반도체 기반의 광검출 소자로 광자가 입사하면 생성된 전자-정공 쌍이 전기장 내에서 가속되며 ‘눈사태(Avalanche)’ 현상을 일으켜 전류를 수십~수백 배까지 증폭시키는 기술이다. 이 특성 덕분에 미약한 반사광 신호를 감지해야 하는 라이더 수광부에 주로 사용되며, 특히 회전식 스캐닝 라이더에서 장거리 탐지 성능을 향상시키는 핵심기술로 활용된다.

33) SPAD(Single Photon Avalanche Diode)는 단일 광자(single photon) 수준의 미세한 빛 신호를 감지할 수 있는 고감도 포토다이오드로 전기적 눈사태 증폭 원리를 이용하여 매우 약한 반사광도 검출할 수 있다. APD보다 높은 감도와 빠른 응답속도를 가지고 있다.

34) 피코초 : 1조분의 1초

35) IEC 60825-1(Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements)은 국제전기기술위원회(IEC)에서 제정한 레이저 제품의 안전성에 관한 국제 표준이다. 이 규격은 레이저를 Class 1(완전 안전)부터 Class 4(고위험)까지 7개 등급으로 분류하며 각 등급별 최대 허용 출력, 안전 표시, 보호 장치 등의 요구사항을 규정한다.

36) 특정 파장 대역만 통과시키는 광학 필터로 넓은 스펙트럼 중 좁은 범위만 선택적으로 투과시킨다.

으로 수집한다.

데이터 처리부는 회전식 스캐닝 라이다에서 발생하는 대량의 포인트 클라우드 데이터를 처리하여 3차원 맵핑을 가능하게 해준다. 라이다 센서는 매초 수십만 ~수백만 개의 거리 측정점을 생성하고 이러한 데이터는 좌표화 과정과 정렬, 그리고 필터링을 거치면서 3차원 맵으로 만들어진다[78]. 이렇게 만들어진 3차원 맵은 자율주행 차량이나 임무를 수행하고 있는 유·무인 복합전투체계에 제공되어 주변 환경을 인식하고 충돌 회피나 자율경로 탐색 같은 중요한 결정을 지원하는 의사판단 자료로 활용된다.

[표 2-4] 회전식 스캐닝 라이다 구조 및 특징 ³⁷⁾

구분	핵심 기능	주요 사항	특 징
회 전 구동부	· 전방위 360도 스캔을 위한 기계적 회전 매커니즘 제공	· 회전속도 : ~1200RPM · 각도해석능력 : 0.03mrad · 수명 : 10,000시간 이상	· 서브모터, 로터리 인코더, 고정밀 베어링, 슬립링으로 구성 · 회전 간 기계적 마모 발생
다 중 레이저 채널	· 수직 방향 동시 측정을 통한 고밀도 3D 데이터 생성	· 채널 수 : 수십~수백개 · 펄스폭 : 통상 3~5나노초	· 각 채널이 다른 고도각으로 배치되어 수직 해상도 결정, 채널 수가 많을수록 포인트 밀도 향상
수광부	· 반사 신호 검출 및 정밀시간 측정	· APD 증폭률 : 50~200배 · SPAD 타이밍 : 50피코초	· APD 또는 SPAD 기반 고감도 포토다이오드 사용 · 환경광 억제 기능
광학계	· 레이저 펄스 성형 및 반사 신호 집광	· 수평 시야각 : 25도 · 협대역 필터대역폭 : 10nm	· 25도 시야각 범위에서 반사광 수집 · 협대역 필터로 원하는 파장대의 신호만 통과시켜 배경잡음 억제 신호대잡음비 개선
데이터 처리부	· 포인트 클라우드 실시간 생성 및 처리	· 처리 속도 : 초당 수백만 점 · 거리 정밀도 : 1mm	· 고속신호처리로 3D 맵을 실시간으로 생성 · 자율주행의 의사결정 자료 지원

37) 참고문헌 79, 86, 93, 116번의 내용으로 저자 재구성

2) 해외 업체 기술 동향

회전식 스캐닝 라이다는 기계식으로 회전하는 구조로 전방위 360도의 범위로 환경을 인식한다. 이러한 기술적 특성으로 자율주행 분야의 초기 단계부터 현재까지도 가장 중요한 센서로 활용되고 있다. 회전식 스캐닝 라이다를 제작하는 주요 업체들은 미국 벨루다인과 오스타, 중국 로보센세 등으로 다양한 제품군을 통해 정밀 매핑, 로봇틱스, 산업용 응용에서 경쟁력의 확보를 선점하기 위해 노력하면서 고성능과 저원가를 추구하는 이중 전략으로 라이다 시장 점유율 확대를 시도하고 있다.

벨루다인은 1983년 미국 캘리포니아에서 설립된 이후 2005년 DARPA Grand Challenge를 계기로 세계 최초의 실시간 3D 회전식 라이다 센서인 HDL-64E를 상용화하였다[92]. 이 제품은 다중 채널과 360도 수평 시야각을 제공하여 자율주행차의 표준 센서로 자리 잡았다. 이후 2017년에는 128채널의 레이저 펄스 기반의 VLS-128 모델을 공개하면서 장거리·고해상도의 환경인식 성능을 확보하였고[116] 2020년에는 초소형·저가형 라이다 벨라빔을 발표하며 대량생산 기반의 원가 절감 전략을 제시하였다.[139] 비록 2023년에 Ouster와의 합병으로 벨루다인이라는 이름은 사라졌지만 제품 브랜드명을 유지하면서 명맥을 이어가고 있다[147].

오스타는 2015년 샌프란시스코에서 설립되어 2017년 고해상도 3D 회전식 스캐닝 라이다 OS1모델 시리즈를 발표하며 주목을 받았다. 이후 단거리 환경 인식에 특화된 OS0 모델과 장거리 환경인식에 특화된 OS2 모델을 선보이며 기존 사업영역을 자율주행차량에서 로봇틱스, 보안, 물류 등 다양한 분야로 확장하였다. 오스타는 2023년 2월에 경쟁업체인 벨루다인을 흡수 합병하면서 세계 850개 이상 고객을 확보한 회전식 스캐닝 라이다의 세계시장 1위의 점유율 업체가 되었다[147]. 최근에는 회전식 스캐닝 라이다의 대표적 문제인 내구성 문제에 대한 기술적 보완과 비용 부담을 낮추려는 움직임을 보이고 있다.

로보센세는 2014년 중국 선전에서 설립되어 2016년부터 RS-LiDAR-16등의 대표모델을 개발한 업체이다. 로보센세의 RS-LiDAR 모델 시리즈는 자율주행차,

로봇, 드론, 스마트시티 인프라 등의 분야에서의 사업범위 확장을 위해 기존 회전식 스캐닝 라이더 모델보다 소형화와 경량화된 회전식 스캐닝 라이더 모델 생산을 추진하고 있다[154].

헤사이는 2014년 중국 상하이에서 설립되어 매핑과 로봇틱스 분야에서 주로 활용되고 있는 Pandar40 / 64 모델의 회전식 스캐닝 라이더를 양산하고 있다[147]. 또한 ADAS 시장을 겨냥한 AT128·ATX와 같은 비회전식 하이브리드 제품군을 대량 양산하면서 현재는 세계 자동차 라이더 시장에서 1위 공급업체를 위협하는 핵심업체로 부상하였고 2024년 이후 글로벌 OEM³⁸⁾ 시장에서 가격 경쟁력을 크게 높이고 있다[113].

루미니아는 2012년 미국 올랜도에서 설립되어 자율주행차에 특화된 아이리스라는 모델의 고성능 회전식 스캐닝 라이더를 개발했고 대중형 전기 SUV인 Volvo EX90에 장착하여 자동차 품질기준을 통과하여 기술성숙도와 대규모의 생산능력을 세계적으로 인증받은 바 있다. 루미니아는 또한 차세대 플랫폼인 Halo 모델을 발표하면서 기존 모델의 크기에 비해 1/3로 소형화되고 성능은 4배로 향상 시키겠다는 목표를 제시하였다[142].

38) OEM(Original Equipment Manufacturer) 시장은 완성차 업체와 같은 원제조사가 자사 브랜드로 판매하기 위해 부품·모듈을 공급받는 산업 영역을 의미한다. 주로 자동차 산업에서 tier-1(완성차업체에 직접 부품을 납품하는 1차 협력업체), tier-(1차 협력업체에 부품을 납품하는 2차 협력업체) 등의 협력업체와 연계된 공급망 구조로 형성된다.

[표 2-5] 해외 회전식 스캐닝 라이다 제작업체 현황 ³⁹⁾

업체명	설립년도	핵심전략 및 특징	현황
벨루다인	· 1983년 미국 캘리포니아	· 세계 최초 실시간 3D 라이다 상용화 · 128채널, 장거리, 고해상도 모델 출시 · 합병 이후 라이다의 고성능 소형화, 저가형 대량생산 기조	· 2023년 오스타와 합병 (오스타 브랜드로 존속)
오스타	· 2015년 미국 샌프란시스코	· 내구성, 비용 효율성 개선으로 자율주행에서 로보틱스, 보안, 물류 등 다양한 분야로 확장 중	· 2023년 벨루다인과 합병 · 글로벌 850개 이상 고객 확보
로보센세	· 2014년 중국 선전	· 소형화, 경량화 라이다 개발 · 고성능 장거리 모델과 경량 저가형 모델을 활용한 이원화 전략으로 라이다 시장 공략	· 자율주행, 로봇, 드론, 스마트 시티 분야로 확대 추진
헤사이	· 2014년 중국 상하이	· 비회전식을 일부 적용한 하이브리드형 모델 개발 중 · 맵핑, 로보틱스, ADAS 시장 동시 공략 중	· 글로벌 자동차 라이다 시장 점유율 1위
루미니어	· 2012년 미국 올란도	· 자율주행차 특화 고성능 모델 개발 성공 · 차세대 플랫폼 크기 1/3로 축소, 성능 4배 향상을 목표로 개발 중	· 자율주행자동차의 품질기준 통과로 기술성숙도, 양산 능력 검증

39) 본문 내용으로 저자 재구성

3) 국내 업체 기술 동향

국내 업체들은 라이더 센서 자체를 생산하지는 않는다. 국내에서 회전식 스캐닝 라이더를 다루는 업체들은 대표적으로 카네비컴, 오토엘, 서울 로보틱스 등이 있지만 아직은 회전식 스캐닝 라이더 시제품 생산 단계 또는 연구 단계에 머물러 있다. 향후 회전식 스캐닝 라이더는 3D 정밀매핑, 산업로봇 및 스마트 인프라 분야에서 핵심적인 역할을 수행하겠지만 국내 업체들의 미흡한 기술성숙도로 대부분의 특히 핵심 광학부품(레이저 다이오드, 포토디텍터), 정밀기계 부품, 신호처리 칩 등에 대해서는 해외 의존도가 더욱더 높아지면서 원가 경쟁력과 공급망 안정성에 취약점이 심해질 전망이다.

카네비컴은 2001년 인천에서 설립되어 2000년대 중반부터 차량용 전장 분야를 연구하였다. 그러던 중 2015년경에는 한국전자기술연구원(KETI)과 협력하여 광학엔진 플랫폼을 개발하고 상용화를 추진하였으나[29] 아직 양산 단계에는 이르지 못했다.

오토엘은 2021년 현대차그룹 사내벤처에서 분사하여 판교에서 설립된 업체이다[45]. MEMS 기반 라이더와 회전식 스캐닝 라이더의 하이브리드형인 G32 · G192 모델을 개발하였다. 이 모델들은 미세거울 회전 구조와 SiPM⁴⁰⁾ 기반 수신기를 적용하여 높은 성능을 구현하였으며 현재는 차량 탑재 시연 단계에 있다.⁴¹⁾

HL만도는 1962년 설립되어 자동차 부품을 제작하다가 2019년부터 자회사인 HL 켈리무브를 통해 자율주행 센서 연구개발을 진행하고 있으며 2021년부터는 카네비컴, 서울로보틱스 등과 컨소시엄을 구성하여 산업통상자원부의 국책과제인 라이더 개발 사업을 수행하고 있다[24]. 하지만 라이더 제작 기술 수준과 자금력 부족으로 아직 회전식 스캐닝 라이더 양산을 이루지 못하고 있다.

서울로보틱스는 2017년 서울에서 설립된 업체이다. 이 업체는 회전식 스캐닝 라이더를 자체적으로는 생산하지 않고 있지만 회전식 스캐닝 라이더를 포함한

40) SiPM (Silicon Photomultiplier) : 반도체 기반 광센서로, 매우 약한 빛(광자, photon)을 검출하기 위해 설계된 소자로 iPM은 고감도, 저노이즈, 고속 응답 특성 덕분에 먼 거리 물체 탐지, 야간 및 악천후 환경의 안정적 성능 확보에 유리함

41) 저자의 아이탑모티브사 현장 인터뷰 내용(2025. 8. 5)

각종 센서를 인지하고 제어할 수 있는 소프트웨어 시리즈를 개발하고 있다. 이러한 회전식 스캐닝 라이다의 제어시스템은 독일 BMW에 도입되어 무인자율 운항으로 이뤄지는 차량 출고부터 선적까지의 전 과정을 실현시켰다. 이러한 서울로보틱스의 사례는 회전식 스캐닝 라이다의 시스템 통합과 소프트웨어를 통해 글로벌 상용화 성과를 거둔 대표적 사례로 평가되고 있다[136].

[표 2-6] 국내 회전식 스캐닝 라이다 제작업체 현황 ⁴²⁾

업체명	설립년도	핵심전략 및 특징	현황
카네비컴	· 2001년 인천	· 2000년대 중반부터 차량 전장 분야 연구 · 2015년 한국전자기술연구원과 협력하여 거울회전 기반 광학엔진 플랫폼을 개발하고 일부 시제품화 및 상용화 추진	· 현재 시제품 단계만 제작가능 (양산체계 미도달)
오토엘	· 2021년 판교	· 반사거울 회전구조의 회전식 스캐닝 라이다 개발 중	· 차량 탑재하 시험 및 시연단계 시제품만 제작
HL 만도	· 1962년 서울	· 2019년 자율주행 센서 개발 시작 · 2021년 카네비컴, 서울로보틱스 등과 컨소시엄 구성 후 라이다 개발 중	· 기술수준 자금력 부족으로 시제품만 제작
서울 로보틱스	· 2017년 서울	· 자체 라이다 센서는 제작은 안함 · 라이다에 적용되는 다중센서, 지각, 제어용 소프트웨어 개발 · 시스템 통합 소프트웨어 중심 전략 추구	· 독일 BMW사와 차량 출고, 선적 무인화 등 달성하고자 노력 중

42) 본문 내용으로 저자 재구성

4) 군사적 운용 측면에서 회전식 스캐닝 라이다가 주는 시사점

회전식 스캐닝 라이다는 전방위 360도 환경 인식을 위해 정밀한 기계 회전 구조로 되어있다. 고정밀 서보모터, 광학 인코더, 베어링, 슬립링으로 구성된 회전 구동부는 분당 수백에서 최대 1,000여회까지 회전하면서 초당 최대 수백만 개의 포인트 클라우드를 생성한다. 그러나 회전식 구조는 험준한 야지에서심각한 내구성 취약성을 보인다. 강한 진동과 충격, 먼지 유입, 극한 온도 변화는 베어링 마모와 광학 소자 정렬에 영향을 주게되어 불량정렬을 발생시킬 수 있다. 특히 우리 군의 주요 임무수행 지역인 한반도의 특성상 70%가 산악지형임을 고려한다면 이러한 현상이 발생할 빈도는 커진다.

생존성 측면에서는 360도 스캔을 위해 이루어지는 지속적인 레이저 펄스의 발산은 적의 레이저 경보 수신기와 전자광학 감시체계에 노출될 수 있는 위험을 현저하게 높인다. 또한 차량 상부에 돌출 장착되는 원통형 하우스도 차량 노출 범위를 증가시켜 임무수행 장비와 인원들의 생존을 위협하게 된다. 더욱이 다중 채널을 운용하는 과정에서 꼭 필요한 고전력은 배터리 중심의 전력이 공급되는 다목적 무인차량 등의 유·무인 복합전투체계에게는 상당한 부담으로 작용된다[67].

정비 및 유지보수 측면에서는 주요 부품의 해외 의존도가 높은 회전식 스캐닝 라이다의 특성상 현장 정비부대에 의한 자체적인 정비가 어렵다. 만약 정비 소요가 발생한다면 해외 제조사에 의한 외주정비에 의존할 수밖에 없는데 이러한 해외 외주정비 체계는 두 가지 문제를 야기한다. 첫째, 전시 상황에서 해외 외주정비는 정비시설 및 장비가 위치한 지역과의 물리적 이격거리로 인해 신속한 복구가 곤란하며, 해외 조달비용 증가로 전시 예산에 상당한 부담을 초래할 가능성이 높다. 둘째, 해외 제조사로부터 정비가 완료될 때까지 전력 운용 공백이 불가피하게 발생한다. 더욱이 현재 회전식 스캐닝 라이다 시장은 Ouster, Hesai, Luminar 등 해외 제작업체가 사실상 독점하고 있어, 해당 국가의 수출 규제와 같은 외부 변수가 발생할 경우 핵심 부품 조달이 중단될 가능성이 존재한다. 이는 단순한 정비 지연의 문제가 아니라, 국가 안보와 직결되는 전력 운용 지속성을 위협하는 중대한 취약 요인이 된다.

종합하면 회전식 스캐닝 라이더는 전방위 360도 범위로 고해상도 환경인식은 가능하지만 충격 및 진동에 지속적으로 노출되는 회전 구동부 부품들의 내구성 문제와 임무 수행하는 장비와 인원들의 생존성을 위협하는 레이저 펄스의 지속적인 발산, 외부 돌출 형태, 전시 정비소요 발생 시 해외에서만 조달 가능한 핵심 부품들로 인해 야기되는 높은 해외 정비비용과 전력화 공백의 연장 등의 문제가 있었다. 이런 문제는 전시에 회전식 스캐닝 라이더가 장착된 다목적 무인차량의 임무수행 간 제약사항으로 작용할 것이다.

제 3절 플래시 라이더 구조와 업체 기술 동향

1) 기술적 구조

플래시 라이더는 전체 시야를 레이저 펄스로 동시에 조명하여 3차원으로 거리정보를 획득하는 방식의 라이더이다. 이는 회전식 스캐닝 라이더 보다 빠른 응답 속도와 높은 프레임 일관성을 제공한다[122]. 이러한 플래시 라이더는 송신부와 수신부, 광학계로 구성되어 있다.

송신부는 VCSEL 어레이와 LD 어레이가 사용되는 부분으로 근적외선 파장인 940nm 및 적외선 파장인 1550nm 파장에서 레이저 펄스를 발산하도록 설계되었다. 레이저 펄스의 광원의 출력은 마이크로렌즈, 회절광학소자, 홀로그래픽 광학소자 등을 통해 수십도의 시야각으로 발산된다. 특히 고출력 레이저 펄스에서 기인할 수 있는 실명, 화상 등의 안전사고 피해 방지를 위해 IEC 60825-1의 국제 안전규격을 준수하도록 레이저 펄스의 출력을 제어한다. 송신부 기술적 목표는 넓은 조명 영역을 균일하게 커버하면서도 충분한 레이저 펄스의 빛 에너지를 목표 거리까지 전달하는 것이다[122].

수신부는 SPAD 어레이와 APD 어레이가 사용되는 부분으로 송신부에서 발산된 레이저 펄스가 목표물에 반사되어 돌아오는 신호를 검출 및 전기신호로 변환하도록 설계되었다. 반사된 광신호는 수신 렌즈와 광학 필터를 거쳐 2D 어레이 형태로 배열된 광검출기에 도달하며, 이때 밴드패스 필터⁴³⁾를 통해

태양광 등의 배경광 노이즈를 제거하고 목표 파장(940nm 또는 1550nm)의 신호만 선택적으로 통과시킨다. 각 픽셀은 독립적으로 반사광을 검출하며 다채널 동시 수신 구조를 통해 전체 시야의 거리 정보를 병렬적으로 획득한다. 검출된 신호는 ToF 방식으로 처리되어 레이저 펄스의 송신 시간과 수신 시간차를 픽셀별로 계산하여 나노초 단위의 빠른 시간에 정밀한 3차원 거리 정보를 산출한다. 수신부 기술적 목표는 원거리에서 반사되는 미세한 광신호를 높은 감도로 검출하면서도 강한 배경광 환경에서 우수한 신호 대 잡음비를 확보하는 것이다[122].

광학계는 대구경 렌즈와 헤파역필터를 활용하여 잡음을 억제하며 송신부 및 수신부에서 레이저 펄스의 굴절과 확산과정에서 발생할 수 있는 시야 가장자리 왜곡을 보정하여 준다. 수신 광학계의 대구경 렌즈의 직경은 일반적으로 30~100mm 범위이며 시야각은 최대 120도 수준으로 플래시 라이다를 활용하는 분야의 특성을 고려 조절이 가능하다. 헤파역필터는 레이저 파장을 중심으로 최대 10nm 이내의 좁은 대역만을 통과시켜 태양광과 같은 라이다 빛을 인지할 수 있는 방해물을 효과적으로 차단한다. 전체적인 시스템은 FPGA⁴⁴⁾·ASIC⁴⁵⁾ 기반의 신호처리가 픽셀 단위의 데이터를 처리하고 TCXO⁴⁶⁾·OCXO⁴⁷⁾ 기반 동기화 모듈이 나노초 단위의 정밀도를 확보하면서 안정적인 라이다의 동작을

43) 밴드패스 필터(Bandpass Filter)는 특정 파장 대역의 광신호만 선택적으로 통과시키고 나머지 파장 대역은 차단하는 광학 필터이다.

44) FPGA (Field Programmable Gate Array): 현장에서 프로그래밍이 가능한 반도체 칩으로 사용자가 하드웨어 회로 구조를 재구성할 수 있는 특징을 가진다. 개발 기간이 짧고 설계 변경이 용이하여 프로토타입 개발이나 소량 생산에 적합하며 플래시 라이다에서는 신호처리 알고리즘의 실시간 병렬처리에 활용된다.

45) ASIC (Application Specific Integrated Circuit): 특정 응용 목적을 위해 맞춤 설계된 주문형 반도체 칩이다. 대량 생산 시 단가가 낮고 전력 소비가 적으며 처리 속도가 빠른 장점이 있어 플래시 라이다의 양산 단계에서 ToF 연산 및 데이터 처리를 위한 전용 칩으로 사용된다.

46) TCXO(Temperature Compensated Crystal Oscillator): 온도 보상형 수정 발진기로 온도 변화에 따른 발진 주파수의 변동을 보정하여 $\pm 0.5 \sim 2.5$ ppm 수준의 안정도를 제공한다. 소형·저전력 특성이 요구되는 이동형 장비나 통신 기기에 주로 사용된다

47) OCXO(Oven Controlled Crystal Oscillator): 오븐 제어형 수정 발진기로 수정 진동자를 일정 온도로 유지하는 히터 회로를 내장하여 ± 0.01 ppm 이하의 매우 높은 주파수 안정도를 제공한다. 다만 전력 소모와 부피가 커서 항공우주, 레이더, 정밀 계측장비 등에 활용된다.

보장하는 것이다[95].

[표 2-7] 플래시 라이다 구조 및 특징 ⁴⁸⁾

구분	핵심 기능	주요 사항	특징
송신부	· 광원 생성 및 조사	· 펄스 형태의 레이저 광출 · 전체 시야각 동시 조사	· 회전식 스캐닝 불필요 · 단일 펄스로 전체영역 커버 · 높은 출력이 순간적 필요
수신부	· 반사광 검출 및 신호변환	· 2D 어레이 검출기 · 다채널 동시 수신 · 비행기법(TOF)기반 방법으로 거리 측정	· 픽셀별 독립적 거리 측정 · 높은 감도 요구 · 병렬처리 구조로 이루어짐
광학계	· 광 전달 및 집광	· 송신 렌즈에 균일하게 조명을 분포되도록 레이저 조사 · 수신렌즈는 반사광을 집광하면서 배경광 제거	· 넓은 시야각 확보 · 광학 효율 최적화 · 소형화 가능
신호 처리부	· 거리 계산 및 영상 재생	· 비행기법 기반 거리 측정 후 3D 포인트 클라우드 생성, 실시간 처리	· 프레임 단위 데이터 획득 · 빠른 프레임으로 동적 물체 추적 용이

플래시 라이다는 레이저 펄스를 발산하는 과정에서 기계적으로 회전하거나 움직이는 부품이 거의 없어 야지에서의 진동과 충격으로부터 내구성이 보장된다. 또한 주변 환경에 레이저 펄스를 동시에 발산하여 거리를 측정하는 특성으로 마이크로초 단위의 매우 빠른 촬영과 측정 속도를 활용해서 빠르게 움직이는 물체의 감지나 돌발 상황 대응에 유리하다. 소형화와 경량화도 가능하여 내부 탑재가 가능하기 때문에 드론이나 소형 로봇과 같이 무게와 크기 제약이 큰 응용 분야에 적합하다.

하지만 플래시 라이다는 주변 환경을 대상으로 동시에 전체적인 레이저 펄스 발산을 위해서 레이저 에너지가 넓은 영역에 분산되기 때문에 센서 어

48) 본문 내용으로 저자 재구성

레이의 제한되는 픽셀 수로는 각도 해상도가 스캐닝 라이다보다 낮아 먼 거리의 작은 물체 구분이나 정밀한 3D 모델링에 한계가 발생한다. 또한 넓은 수광 영역을 가진 특성상 태양광이나 강한 주변 조명에 취약하여 야외 환경에서 배경 잡음 증가로 신호 대 잡음비가 저하되고 측정 정확도가 감소한다. 그렇기 때문에 고감도 센서 어레이와 정밀 광학 시스템이 필수적으로 갖추어야 하지만 아직은 플래시 라이다의 고감도 센서어레이와 정밀 광학시스템은 제조 비용이 높고 광학 설계의 한계로 360도와 같은 매우 넓은 시야각 구현이 어렵다는 기술적 한계가 존재하고 있어 많은 플래시 라이다 업체들이 한계를 극복하고자 노력하고 있다.

2) 해외업체 기술 동향

플래시 라이다를 제작하는 해외업체들은 대부분 글로벌 자동차 시장의 성장을 지켜보면서 이에 대한 수익효과를 누리기 위해 자동차 제조사들과 협업을 강화하고 있다. 그런 이유로 자동차 제조회사들이 자율주행차를 제작할 때 필요한 플래시 라이다 기술(주로 3D 적층 집적, 광학 최적화, VCSEL 기반 저비용 솔루션, 차량 램프 통합형 패키징 등)을 중심으로 먼저 발전하고 있으며 이러한 기술 발전을 발판으로 라이다의 주요 분야로 인식되던 ADAS 및 자율주행차 분야를 넘어 산업용 협동 로봇, 물류 자동화 로봇, 드론 기반 정밀 매핑 및 감시, 스마트시티 인프라 관리 등의 다양한 분야로 플래시 라이다 업체들이 영향력을 넓히게 하는 원동력이 되고 있다.

레다테크은 2007년 캐나다 퀘벡에서 설립되어 레다엔지니어 모듈 기반 하드웨어 라이다 제품을 선보인 업체이다. 초기에는 자율주행 및 산업용 센싱 분야로 진출하였다가 최근에는 하드웨어 중심에서 벗어나 플래시 라이다 기반 ADAS·자율주행 인지 소프트웨어 분야까지 범위를 확장하고 있다. 향후 ADAS 솔루션 제공을 중심으로 비용 효율성과 시장 경쟁력을 확보하는 것을 목표로 두고 있다[151].

콘티넨털은 1871년 독일에서 설립된 글로벌 자동차 부품업체로 출발하였다.

그러다가 2016년부터 미국 ASC와 협력하여 플래시 라이더 개발을 시작하였고 고해상도 3D 플래시 라이더를 양산하면서 120도×30도의 시야각과 50m 근거리 탐지 성능을 제시하였다. 현재는 AEye와의 협력을 통해 플래시 라이더의 장거리 탐지까지 기술 발전을 추진하고 있다[109].

어드밴스드 사이언티픽 컨셉츠(ASC)는 1987년 캘리포니아에서 설립된 업체로 대표적인 제품인 TigerEye 3D Flash LiDAR는 128×128 픽셀 어레이와 차별화된 레이저 조명 방식을 적용하여 실시간으로 3차원 영상 생성을 제공하고 있다. 이 업체는 군사 및 항공우주 분야로 활용범위 확장을 추진하고 있다[90].

소니 반도체 솔루션은 2015년에 일본 아츠기에서 설립되었다. 이미지 센서 기술을 기반으로 개발한 SPAD 라이더 센서로 자동차용 라이더 시장에 본격 진입하였다. 이미지 센서 기술을 기반으로 개발한 SPAD 라이더 센서는 10 μ m 크기의 픽셀을 적용한 SPAD 어레이로 약 110,000 유효 픽셀(189×600 배열)의 고해상도를 구현하며, 최대 300m 거리까지 15cm 수준의 정밀도를 제공한다. 또한 22%에 달하는 높은 광자 검출 효율(PDE)을 확보하여 강한 태양광 조건에서도 안정적으로 동작할 수 있다. 이러한 장점으로 최근 자동차용 신뢰성 규격인 AEC-Q100 Grade 2 인증을 획득하였다[119].

옵시스는 2016년 이스라엘 홀론에서 설립된 차세대 라이더 개발 기업이다. 옵시스는 주로 VCSEL 어레이와 단일 칩 CMOS SPAD 어레이를 결합한 반도체 기반 라이더 솔루션을 제공하면서 지능형 플래시 라이더도 개발하고 있다.

옵시스가 개발한 지능형 플래시 라이더는 전체 시야각(FOV)을 격자 형태로 세분화하고 이를 마이크로미터 단위로 분할하여 순차적으로 조사하는 플래시 라이더로 플래시 라이더의 저비용성과 내환경성, 그리고 회전식 스캐닝 라이더의 장거리 및 고해상도 특성을 동시에 구현할 수 있는 하이브리드형 라이더이다. 지능형 플래시 라이더는 동일 레이저 펄스 에너지를 기존 대비 약 1/1000 수준의 미세 픽셀 영역에 집중하는 설계를 통해 약 4배 향상된 탐지거리 성능을 보장하고 반사율 10% 대상 물체를 최대 300m 거리에서 탐지할 수 있으며, 0.1도×0.1도 공간 해상도와 1000fps⁴⁹⁾ 수준의 고속 스캐닝 성능을 보유하고 있다.

49) Frames Per Second, 초당 프레임 수

옵시스는 이러한 지능형 플래시 라이다에 대해서 2024년 양산 체제를 구축하였다. 현재는 국내 자동차 조명 분야의 전문성이 증빙된 SL 코퍼레이션과 협력하여 차세대 스마트 라이다를 개발하고 있다[150].

[표 2-8] 해외 플래시 라이다 제작업체 현황 ⁵⁰⁾

업체명	설립년도	핵심전략 및 특징	현황
레다테크	· 2007년 캐나다 퀘벡	· 초기 레아엔진니어 모듈 기반 하드웨어 제품에 주력했으나 소프트웨어 중심 제품으로 범위 확장 중	· ADAS 솔루션 중심 전략으로 성장 중
콘티넨탈	· 1871년 독일	· 2016년부터 ASC와 협력하여 플래시 라이다 개발 · 도심환경 단거리 인지 강화 목적으로 AEye와 기술협력 중 이후 장거리 라이다까지 확장 하려고 노력하고 있음.	· 고해상도 3D 라이다 양산 시작
어드밴스드 사이언티픽 컨셉츠	· 1987년 캘리포니아	· 플래시 라이다의 레이저 조명 방식, 3차원 영상 생성 기술 선도	· 자율주행에서 군사·항공 우주분야로의 확장 추진 중
소니 반도체 솔루션	· 2015년 일본 아츠기	· SPAD기반 깊이 센서 개발, 강한 태양광 조건에도 안정적으로 작동하는 모델 개발	· AEC-Q100 Grade2 인증 통과
옵시스	· 2016년 이스라엘 홀론	· 스캐닝 마이크로 플래시 라이다 기술의 하이브리드형 플래시 라이다 개발 중	· 국내 SL 코퍼레이션과 협력하여 차세대 스마트 라이다 개발 추진

50) 본문 내용으로 저자 재구성

3) 국내업체 기술 동향

국내에는 SOSLAB과 LG이노텍 등의 업체가 대규모 투자와 기술 개발을 통해 플래시 라이더의 기술 국산화를 선도하고 있다. 따라서 플래시 라이더는 전시 공급망 안정성과 비용 절감 측면에서 크게 기여할 것으로 판단된다. 결과적으로 이는 민간 자율주행 시장뿐 아니라 방위산업 분야에서도 전략적 자립성을 높이는 핵심 요인이 될 것이다. 다만 이러한 이점이 희석되지 않도록 중장기적으로 정부 지원하에 플래시 라이더의 지속적인 기술 역량 강화가 필요하다.

에스오에스랩은 2016년 전라도 광주에서 설립된 업체이다. 최초 SPAD 기반 플래시 라이더 시제품을 개발한 후 2024년에는 차량용 램프 일체형 라이더를 선보여 국제적 주목을 받았다[41]. 특히 2024년 5월 코스닥에 상장되고 플래시 라이더에 대한 양산 체제를 구축하였다. 현재는 양산체제를 발판으로 세계의 자동차 업체들과의 협력을 확대하여 저비용·소형화된 플래시 라이더를 제공하고 있다[32].

LG이노텍은 1970년 금성 정밀기기로 서울에서 설립되었다. 처음에는 전자 부품 및 카메라 모듈 분야에서 세계적 경쟁력을 확보하였으며 2021년부터 플래시 라이더 모듈 개발에 착수하면서 라이더 시장에 진입하였다. LG 이노텍은 단파 적외선기술을 활용한 탐지거리 250m의 고성능 라이더를 개발하였다. 2025년 7월에는 미국 Aeva와 전략적 파트너십을 체결하고 5천만 달러를 투자하여 FMCW 라이더 공동 개발에 참여하고 있다[60].

아이탑스오토모티브는 2011년 현대자동차 사내벤처로 출발하여 경기도 수원에서 설립된 업체이다. 국내 최초의 보행자 보호 시스템인 액티브 후드 리프트 시스템을 개발하여 양산 공급한 경험을 바탕으로 2020년부터 플래시 라이더 시장에 진출했다. 근적외선 파장대를 이용한 플래시 라이더를 개발하여 회전식 스캐닝 라이더, MEMS 라이더 대비 고내구성, 저비용을 장점으로 내세우고 있다[11]. 2022년에는 7m급과 25m급 제품을 개발 완료하여 로보월드에서 시연하였고 최근에는 자율주행차, AMR / AGV, 로봇, 보안 분야로의 시장 진출을 추진하고 있다[22].

[표 2-9] 국내 플래시 라이다 제작업체 현황 ⁵¹⁾

업체명	설립년도	핵심전략 및 특징	현황
SOS LAB	· 2016년 전라도 광주	· 플래시 라이다 시제품을 개발하여 2024년 차량용 램프일체형 라이다 제작 시작 · 저비용 소형화 솔루션 제작 · ADAS 시장 진입	· 2024년 5월 코스닥 상장 · 양산체제 구축 · 글로벌 OEM 협력 확대 중
LG 이노텍	· 1970년 서울	· 2021년부터 플래시 라이다 모듈 개발 시작 · 250m 탐지, 단파적외선 기술 활용 모델 개발	· 2025년 7월 Aeva와 라이다 공동 개발협력
아이탑 오토 모티브	· 2011 경기도 수원	· 2020년부터 플래시 라이다 제작 · 소형화, 고내구성, 저비용의 라이다 생산과 설계, 생산 품질관리 역량 보유	· 2022년 로보월드 시연 · 자율주행부문에서 보안 및 로보틱스 분야로 시장 진출 추진 중

4) 군사적 운용 측면에서 플래시 라이다가 주는 시사점

플래시 라이다는 회전하는 부품 없이 레이저 펄스를 발산하기 때문에 충격과 진동으로부터 파생될 수 있는 부품의 마모와 파손의 가능성이 적다. 이는 한반도의 험준한 산악지형에서 발생하는 진동과 충격을 견디면서 안정적으로 장시간 동안 임무수행을 할 수 있는 가능성을 높혀 준다.

생존성 측면에서는 소형화, 경량화가 가능한 플래시 라이다는 유·무인 복합 전투체계 장비의 내부로 장착할 수 있고 레이저 펄스를 필요시에만 선택적으로 발산할 수 있기 때문에 차량의 노출 부위를 감소시키고, 적의 레이저 경보 수신기와 전자광학 감시체계에 피탐되는 위험을 획기적으로 줄일 수 있다. 특히 선택적으로 발산하는 레이저 펄스는 한정되어 있는 무인차량에 전력 부담을 줄여주고 장기간 임무 수행을 보장해 준다.

51) 본문 내용으로 저자 재구성

정비·유지보수 측면에서는 핵심 부품의 국산화율이 높아 전시 및 긴급 상황에도 국내업체의 신속하고 정확한 정비지원이 가능하다. 이러한 점은 정비 소요 시간과 인력에 의한 노력을 대폭 절감시켜 장비 가동률 저하를 완화하고 장기간의 전력 공백을 방지한다. 결론적으로 국가 안보와 직결된 핵심 전력을 장기간 안정적으로 활용할 수 있는 원동력이 된다.

하지만 플래시 라이더는 기존 회전식 스캐닝 라이더 대비 짧은 탐지거리와 좁은 시야각을 가져 장거리 정찰이나 광역 감시 임무 수행에 제한을 줄 수 있다. 이러한 단점을 극복하고자 2개 이상의 플래시 라이더를 복수로 배치하기도 하는데 이럴 경우 시스템의 복잡성을 증가시키고 센서 간 통합 처리의 부담을 가지고 오게 된다. 또한 플래시 라이더는 또한 강한 배경광 조건에서는 신호 대 잡음비 저하로 인한 성능 감소가 발생할 수 있다. 따라서 악천후나 강렬한 햇빛 환경에서 운용 신뢰성 검증을 포함해서 충분한 실전 검증데이터가 필요하다.

결론적으로 플래시 라이더는 레이저 펄스를 발산할 때 선택적으로 발산되기 때문에 야지 환경에서 발생하는 진동과 충격에서도 뛰어난 안정성을 보장받아 부품의 마모나 고장의 우려가 회전식 스캐닝 라이더에 비해 적고 적으로부터의 탐지 위험을 현저하게 줄일 수 있다. 또한 플래시 라이더의 주요 부품 등을 생산할 수 있는 국내업체들의 존재도 향후 기술 자립과 전시 안정적인 부품 공급의 지속성을 보장할 수 있다.

비록 플래시 라이더의 짧은 탐지거리와 제한된 시야각으로 회전식 스캐닝 라이더처럼 전방위 360도 범위를 장거리로 환경을 인식하는 것은 기술적으로 극복해야 할 숙제가 있지만 플래시 라이더는 군 전력체계의 효율성과 생존성을 강화하기 위해 반드시 검토되고 적용되어야 할 센서 체계라 할 수 있다. 따라서 플래시 라이더는 향후 기술 보완을 전제로 하더라도 군의 임무수행 운용 환경을 고려하여 지속적으로 고려되어야 할 중요한 기술로 판단된다.

한편 플래시 라이더의 군사적 활용을 위해서는 국내 플래시 라이더 기술의 자립화가 선행되어야 한다. 앞서 살펴본 바와 같이 국내 업체들(에스오에스랩, LG이노텍, 아이탑스오토모티브 등)은 이미 상당한 수준의 플래시 라이더 제작 역량을 보유하고 있다. 그러나 이러한 민간 영역의 기술력이 군사용으로 성숙

되기 위해서는 정부 차원의 체계적인 지원이 필요하다. 특히 플래시 라이더의 성능을 결정짓는 SPAD 및 APD 검출기, 송신부 광학 모듈, 신호처리 ASIC 등의 핵심 부품에 대해서는 국방 전략부품으로 지정하여 장기적인 연구개발 투자를 확대하고 국내 업체의 기술 내재화를 촉진하는 제도적 기반을 마련해야 할 것이다. 이러한 기술 자립화 노력은 플래시 라이더의 전시 공급망 안정성을 확보하고 기술 종속에서 벗어나 독자적인 무기체계 발전을 가능하게 하는 필수 과제이다.

제 3장 육군 Army TIGER 전투체계 추진 현황

제 1절 국방혁신 4.0과 유·무인복합전투체계 구축

1) 국방혁신 4.0 추진 개념

국방혁신 4.0은 4차 산업혁명의 첨단 과학기술을 국방분야에 적용하여 AI 과학기술 강군을 육성하자는 국방부의 혁신 계획이다. 2023년 3월 발표된 「국방혁신 4.0 기본계획」에서는 4차 산업혁명의 첨단과학기술 적용의 기술적 노력과 국방 분야 패러다임 전환을 위한 제4차 혁신계획이라는 정책적 노력을 동시에 포함한다. [62] 국방혁신 4.0 기본계획의 전략적 목표는 북한의 핵·미사일과 같은 비대칭 위협에 압도적으로 대응하고 미래 전장환경에서 싸워 이길 수 있는 전투형 강군으로 거듭나는 것이다.

이를 위해 국방부는 AI 과학기술 강군 육성을 비전으로 제시하고 5대 중점과제로 ① AI 기반 핵심 첨단전력 확보(유·무인 복합전투체계 구축, 드론봇 전투체계 개발), ② 첨단과학기술 기반 방위산업 육성(민·군 기술협력 강화, 방산수출 지원), ③ 국방 디지털 전환 가속화(클라우드 기반 국방정보체계 구축), ④ 혁신적 국방운영체계 구축(국방인사·교육훈련 혁신), ⑤ 미래지향적 국방문화 조성(장병 복지 향상, 병영문화 개선) 등으로 구체화 하였다[2]. 또한 4차 산업혁명 기술 발전과 병력 감소에 대비해 육·해·공 전 영역에 걸쳐 유·무인 복합전투체계(MUM-T : Manned-Unmanned Teaming) 구축사업을 추진하여 2027년까지 각 군의 대표 무기체계별로 인공지능(AI) 유·무인 복합체계의 시범 운용이 가능하도록 핵심기술 개발 사업을 추진하고 있다[27].

국방혁신 4.0 기본계획은 유·무인 복합전투체계의 단계적 개발 방안을 3단계로 설정하여 제시하고 있다. 1단계는 초기 자율단계로 운용자의 원격통제로 직접 유·무인 복합전투체계를 제어하고 센서 인식지능을 활용해 감시정찰 체계를 구축하는 단계이다. 2단계는 반자율형 단계로 유·무인 복합전투체계가 운용자 감독 아래 자율적으로 임무를 수행하되 중요한 의사결정이 필요하면 운용자가

직접 개입하는 단계이다. 3단계는 완전 자율단계로 유·무인 복합전투체계가 운용자의 개입 없이 완전한 자율성으로 임무를 수행하여, 지능형 지휘결심 지원체계와 연동되어 AI 기반 초연결 전투체계를 완성하는 단계이다. 국방부는 국방혁신 4.0 기본계획을 통해 단계별 유·무인 복합전투체계 개발 후 군에 전력화하겠다는 의지를 천명하였다.



[그림 3-1] 유·무인 복합전투체계 발전 방안 [65]

국방혁신 4.0 기본계획은 유·무인 복합전투체계의 전력화 관련 획득 제도적 변화를 추진하고 있다. 기존 적 위협에 대응할 수 있는 무기체계부터 우선 개발하고자 하였던 위협기반 소요기획 방식은 복잡하고 경직된 의사결정 절차로 인해 소요결정부터 전력화까지 장기간이 소요되었다. 이 때문에 국내·외의 기술 발전 속도를 적시에 반영 못해서 신규 무기체계가 실전 배치되는 시점에는 이미 기술의 진부화 소요결정 간에 도입을 추진하였던 기술은 빈번하게 사장되거나 노후화되고 말았다. 군은 이러한 문제점 극복을 위해 군이 확보해야 할 우리 군이 필요한 핵심 능력부터 먼저 정의하고 이미 개발된 첨단기술을 신속하게 도입하여 전력화 하는 능력기반 소요기획으로의 전환을 추진하고 있으며 이를 위해 능력기반의 소요기획의 성과 가시화를 위해 신속획득제도와 통합소요 기획제도 등을 도입하는 등 첨단기술의 실용화를 가속화하고 전력화 소요 시기를 단축하기 위해 노력을 하고 있다.

2) 각 군의 유·무인 복합전투체계 개념

국방혁신 4.0 기본계획에 따라 각 군은 고유한 작전환경과 임무특성에 최적화된 유·무인 복합전투체계를 구축하고 있다. 유·무인 복합전투체계는 유인 플랫폼과 무인 플랫폼을 네트워크로 연결하여 상호 협력적으로 작전을 수행하는 미래 전투개념이다. 국방부는 이러한 유·무인 복합전투체계를 인공지능 등의 첨단기술과 네트워크 기술을 통하여 유인 전투체계와 무인 전투체계를 통합적으로 운용하여 작전수행 능력을 극대화하는 체계로 정의하였다[5]. 유·무인 복합전투체계에서 ‘무인화’란 인공지능과 자율주행 기술을 기반으로 인간의 직접 조종없이 사전에 설정된 임무를 수행하거나 원격 제어를 통해 작전을 수행하는 것을 의미한다.

무인화의 핵심은 단순히 사람이 탑승하거나 조종하지 않는 것을 넘어서 센서를 통한 환경 인식, 인공지능 기반 의사결정, 자율 항법 및 기동, 그리고 네트워크를 통한 유·무인 전투체계간의 통합된 협력이 가능한 지능형 체계를 구현하는 것이다[5]. 유·무인 복합전투체계의 역할은 무인전투체계의 기술 성숙도와 운용 목적에 따라 세가지 발전단계로 구분된다. 이는 국방혁신 4.0 계획에서 3단계로 제시한 유·무인 복합전투체계 발전방향과도 상호 연결된다.

첫번째 발전단계는 작전 도구형이다. 작전 도구형은 유·무인 복합전투체계가 폭발물 처리나 수색정찰 같은 임무수행을 수행할 때 운용자의 통제하 임무수행을 지원하는 단계이다. 이때는 주도적인 유·무인 복합전투체계의 통제권한을 운용자가 가지고 있으며 운용자의 판단과 명령에 의해 유·무인 복합전투체계의 행동이 결정된다[114].

두번째 발전단계는 독립 운용형이다. 독립 운용형은 유·무인 복합전투체계의 자율성 향상을 고려하여 유·무인 복합전투체계가 부여된 임무를 운용자의 일부 통제를 받아 수행하는 단계이다. 운용자는 중요한 결정이 필요할 때만 개입하고 판단이 필요 없거나 일상적인 판단 등은 유·무인 복합전투체계 스스로 행동을 결정한다. 이 단계에서는 주도적인 통제권한은 유·무인 복합전투체계가 가지고 있으나 임무수행에 결정적인 영향을 미치는 판단의 주도권은 운용자가 갖고

있어 운용자의 판단과 명령에 의해 유·무인 복합전투체계의 행동이 결정된다. 이 단계에서는 무인체계와 유인체계의 협업이 제한적으로 이루어진다[114].

세번째 발전단계는 팀원형이다. 팀원형은 유·무인 복합전투체계가 고도화된 인공지능과 자율운용 능력을 기반으로 운용자와 완전히 독립되어 전장 인식 영역의 임무 수행을 유·무인 복합전투체계가 완전히 단독적으로 수행할 수 있는 가장 발전된 단계이다. 이 단계는 유·무인 복합전투체계가 운용자에 의해 판단과 명령에 대한 지원을 받지 않고 임무 수행팀의 일원으로서 의사결정을 실시한다. 이 단계에서 판단의 주도권은 유·무인 복합 전투체계가 갖고 있다[114].



[그림 3-2] 유·무인 복합전투체계 발전단계 [5]

국방기술진흥연구소(2022)의 조사 결과에 따르면 우리 군의 무인체계 기술은 초기 자율 단계에서는 선진국과 근소한 차이를 보이나 반자율 및 완전자율 단계로 갈수록 기술 격차가 점차 확대되고 있다. 초기 자율단계에서는 미국 대비 86.1%의 기술 수준으로 1.9년의 격차에 불과하지만 반자율단계에서는 77.3%(3.9년), 완전 자율단계에서는 66.7%(4.5년)의 기술 격차가 존재하였다. 이러한 결과는 우리나라의 지상 유·무인 복합전투체계 기초 기술은 이미 상당한 수준에 도달했으나 고도화·자율화 단계로 갈수록 핵심 인공지능, 센서 융합, 통신 네트워크 등의 기술 경쟁력이 부족하다는 것을 의미한다.

즉 해당 현상은 MUM-T(Manned-Unmanned Teaming) 체계 발전의 방향을 단순한 플랫폼 중심이 아니라 자율 의사결정, 실시간 정보 융합, 네트워크 기반 통제 기술의 내재화에 초점을 두어 추진해야 한다는 것을 보여준다[50].

구분	레이더도	기술수준		
		분야	분야별 수준	종합수준
1단계 (~'23년)		지상	86.1%	84.1%
		해양	78.4%	
		공중	86.1%	
2단계 ('24년~'27년)		지상	77.3%	73.9%
		해양	67.1%	
		공중	75.5%	
3단계 ('28년~)		지상	66.7%	65.8%
		해양	61.6%	
		공중	67.9%	

* 범례 : — 지상 — 해양 — 공중

[그림 3-3] 우리 군의 유·무인복합전투체계 분야별 기술수준 평가 결과 [5]

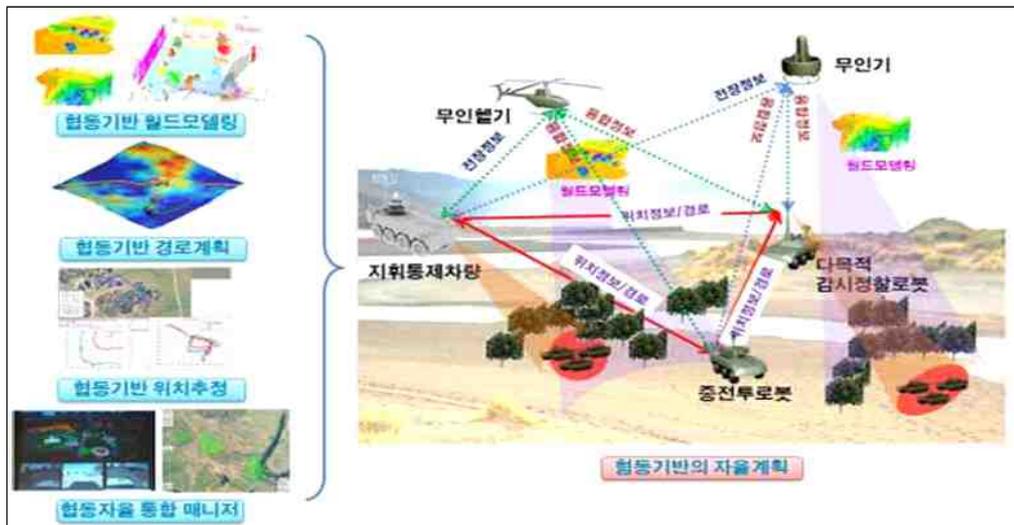
육군은 Army TIGER 전투체계(Transformative Innovation of Ground forces Enhanced by the 4th industrial Revolution technology)를 통해 4차 산업혁명 기술을 접목한 미래 지상전투체계를 구축하고 있다. Army TIGER 전투체계는 지능화, 기동화, 네트워크화의 세가지 특징을 기반으로 드론봇 전투체계, 워리어플랫폼, 기동플랫폼, 초연결 네트워크를 통합한 유·무인 복합 전투체계이다[46]. Army TIGER 전투체계는 현용 전력과 통합된 드론과 로봇을

융합하여 아군의 전투 피해를 최소화하면서 능력 보완을 통해 전투를 지원하는 체계로 발전을 추구하고 있다.

Army TIGER 전투체계의 주요임무수행 장비들은 무인지상차량, 자동화 로봇체계, 유인체계의 무인화 등의 형태로 기갑 및 보병부대, 기지 및 주요시설 방호를 위해 복합적으로 운용되며, 수색정찰, 차장경계, 화력 지원 등의 임무 수행 시행을 계획하고 있다[61]. 육군에서는 현재 무인수색차량, 폭발물 탐지 로봇, 다목적 무인차량 등의 장비들을 통해 유·무인 복합전투체계를 구축하고 있으며, 유인체계와의 상호 적용방안에 대한 연구도 같이 진행하고 있다.

이중 연구개발 방식으로 추진되고 있는 무인수색차량은 플랫폼, 비포장 도로에서의 자율주행, 주·야간 다중표적 탐지, 단일표적 정밀추적 등의 핵심 기술들을 탐색개발 단계에서 확보하였고 현재는 체계개발 단계에서의 시험 평가를 준비하고 있다. 또한 다목적 무인차량은 방사청과 방산업체 주도로 원격통제 공통 아키텍처, 자율주행, 협동기반의 무인체계간 임무수행 등의 핵심기술 고도화 개발을 추진하고 있다[30].

Army TIGER 전투체계는 단계적인 전력화를 추진하여 2040년까지 육군 전 제대로 확대 및 운용할 예정이다. Army TIGER 전투체계의 구성요소와 구체적인 추진 방안은 본장의 제 2절에서 구체적으로 다룬다.



[그림 3-4] 다목적 무인차량의 협동기반의 핵심기술 운용도 [30]

해군은 Navy Sea GHOST(Guardian Harmonized with Operating manned Systems and Technology based unmanned systems)를 통해 해양 작전환경에 특화된 유·무인 복합전투체계를 구축하고 있다[36]. 해군은 2022년 11월 해군 창설 77주년 기념식에서 해군참모총장이 Navy Sea GHOST 개념을 공식적으로 발표하였고 이는 유인체계와 기술 기반 무인체계가 조화된 해양의 수호자라는 의미를 담고 있다[42].



[그림 3-5] 해군 NAVY SEA GHOST 운용 개념도 [42]

해양 유·무인 복합전투체계는 무인잠수정 등의 형태로 대함전, 대잠전, 기뢰전, 상륙작전, 항만방호 등의 임무로 운용되며, 무인수상정, 무인함대 등의 형태로 공격 및 방호, 연안 및 항만 감시정찰, 통신 중계 및 항법 지원, 해상 운송 지원, 해양 환경 조사 등에 활용된다. 무인수상정은 대함전, 연안 및 항만 감시정찰, 통신 중계, 해상 운송 지원 등의 임무를 수행한다. 임무기반 운항제어, 자동 경로생성, 자율운항관제, 다중센서 기반 장애물 탐지·추적·회피 기술 등이 핵심 기술이며 고장진단 및 자율복귀 기능을 갖춘다. 해군은 2023년 6월 부산 국제 해양방위산업전(MADEX)에서 Navy Sea GHOST를 적용한 상륙작전 시연을 공개 하였다. 이 시연에서 무인수상정과 드론 편대가 돌격대로 나서 적 해안의 소형

함정을 격파하고 상륙 병력의 교두보를 확보한 후, 무인지휘함이 다수의 군집 무인수상정과 헬기형 무인항공기를 통제하며 진입하고, 최종적으로 상륙기동 헬기와 고속상륙정 등 유인전력이 마무리하는 단계적 상륙작전 개념을 선보였다[6].



[그림 3-6] 해군 NAVY SEA GHOST 로고 [42]

이와 관련하여 해군은 Navy Sea GHOST 개념을 실제작전에 적용하기 위해 2023년부터 시범부대를 해군 2함대 소속 5기뢰상륙전단으로 지정하였다. 해군 시범부대는 무인수상정과 무인항공기를 활용한 연안 감시정찰 및 대함 작전능력을 실제 임무수행환경에서 무인체계의 운용성과 유·무인 협업 절차로 평가하며 이를 통해 도출된 운용개념과 교훈을 전 함대로 확산시키는 역할을 수행하고 있다. 시범부대 운용은 무인수상정의 자율항해 능력, 장애물 회피 성능, 유인함정과의 통신 연동성 등을 실전적 환경에서의 검증은 목적으로 두고 진행하고 있는데 이 과정에서 도출되고 있는 야간 및 악천후 조건에서의 무인체계 운용한계와 개선사항 등은 후속 사업 반영을 추진하고 있다.

이와 더불어 시범부대 운용을 통해 도출되는 교훈과 개선사항 등은 무인체계 운용 교범과 정비 매뉴얼 내용에 반영하고 승조원 교육훈련 체계를 구축하기 위해 필요사항을 염출하는 등 제도적 분야의 기반 마련에도 힘쓰고 있다[26]. 한편 국내 주요업체들은 자율운항, 장애물 충돌 회피 등 기능을 탑재한 무인수상정을 개발하고 군집 항법, 군집제어 알고리즘 등 군집 무인수상정 운용기술을 개발하고 있다. 해군은 이와 연계해 2023년 9월 카이스트에서 2023 네이비 씨 고스트 발전 콘퍼런스를 개최하여 해양 군집 유·무인 복합전투체계 구축과 완전자율 무인체계 기술을 주제로 산·학·연 협력체계를 강화하고 있다[36].

해군은 전력화 계획을 단계적으로 수립하여 해양 유·무인 복합전투체계 구현을 추진하고 있다. 현재 해군은 헬리콥터형 무인항공기(S-100)를 정보함에 탑재하여 정찰·감시 임무에 운용하고 있으며 2020년대 중반까지 기뢰전 수행능력 고도화를 위해 소해함에 수중 자율기뢰탐색체와 무인기뢰처리기를 탑재하고자 노력 중이다. 2020년대 후반에는 정찰용 무인수상정을 전력화시키고 2030년대 초반에는 정찰용 무인잠수정을 도입함으로써 공중·수상·수중 영역 전반에 걸친 유·무인 복합작전체계를 완성하겠다는 계획이다. 또한 해군은 기존의 3개 함대사령부 체계를 2040년대에 2개로 재편하면서 무인수상함전대, 무인잠수정전대, 무인항공기전대 등으로 구성된 해양무인전력사령부 창설을 추진하고 있다.

단기적으로 해양무인체계발전전대를 창설하고 중기적으로는 무인수상정대와 무인항공기대를 각각 창설한 이후에 장기적으로는 통합 지휘체계를 갖춘 해양 무인전력사령부로 발전시키는 방향의 전력구조 개편을 통해 현재 해군 전체 전력의 약 1% 수준에 불과한 유·무인 복합전투체계 전력 비중을 2020년대 중반에는 9%로 올리고 2030년대 중반 28%로 높인 이후 2040년대에는 약 45% 수준까지 끌어올리겠다는 의지를 비치고 있다[30].

공군은 공군비전 2050을 수립하고 첨단기술을 바탕으로 기술집약형 소수 정예 공군을 지향하고 있다. 기존 용사 중심의 병력체계를 간부 중심의 병력 구조로 개편하면서 인공지능과 빅데이터 등의 첨단 기술이 중심이 되는 군수 관리체계의 고도화를 추진하고 있다. 특히 추가로 발생할 미래 우주분야의 병력

소요도 고려하면서 2030년 이후 병력자원 감소에 대비한 SMART 부대로의 구조개편, 인력구조 및 양성계획을 수립하고 있는 공군은 국방혁신 4.0 기본 계획과 연계된 연구를 내실있게 추진하고 있다[73].

공군은 공군비전 2050의 실현을 위해 Kill Web과 에어포스 퀀텀 5.0이라는 두가지 전략 개념을 추진하고 있다. 이는 다영역 작전환경에서 네트워크 중심전 기반의 통합 작전수행 능력을 구축하고 과학기술 기반의 질적 우세를 확보하려는 전략적 구상에서 나온 노력이다.

Kill Web은 다영역 센서와 타격 자산을 실시간 네트워크로 연결하여 표적 탐지에서 타격까지의 시간을 최소화하는 네트워크 중심의 작전체계이다. 이는 인공지능 기반의 망상형(그물망) 지휘통제체계를 구축하여 최적의 타격 수단으로 북한의 핵·미사일 위협에 대응할수 있는 의사결정 지원체계이다[19]. Kill Web의 특성은 기존의 선형적인 구조의 킬 체인과 달리 그물망 구조의 다중 분산형 표적처리 절차를 구축하는데 있다. 기존 킬체인은 탐지와 공격 결정, 실제 타격이 수직 및 순차적으로 진행되었으나 Kill Web에서는 다양한 탐지 및 타격 자산들이 수평적·병렬적으로 연결되어 운용된다. 따라서 Kill Web이 완전히 구현되면 유·무인 전투비행체계, 우주자산, 작전사령부 등이 병렬로 연결되는 다층·다중의 네트워크 지휘통제체계 구축도 가능해진다[20].

이를 통해 타격할 표적이 식별되면 무력화하기에 가장 적합한 타격수단을 판단하고 만약 대응수단을 변경할 필요가 있으면 임무수행이 진행되는 중에도 신속하게 전환할 수 있는 작전 가용성을 확보할 수 있다. 또한 이러한 체계는 다양한 표적에 동시 적용이 가능하므로 합동참모본부와 육·해·공군 및 해병대 등 각 군 간의 합동성을 극대화할 수 있다[19].

한편 공군은 2050년까지의 에어포스 퀀텀 5.0라는 장기 비전을 수립하고 5대 핵심능력 발전 방향도 제시하고 있다. 퀀텀은 퀀텀이란 용어의 의미처럼 양자역학적 도약의 의미를 내포하고 있으며 과학기술 발전에 따른 공군력 발전을 위한 2050년까지의 비전과 공군의 미래 핵심능력발전 분야를 5가지로 집약한 5대 플래그십⁵²⁾ 프로젝트로 구성되어 있다. 이는 공군력의 근본적이고

52) 플래그 쉽(FlagShip) 옛날에는 기함을 뜻하나 현대에는 회사나 조직의 대표 사업을 뜻함

불연속적인 변혁을 추구한다는 전략적 비전을 표현하고 있다. 최종적으로 공군은 2050년에 모자이크전이 가능하도록 단계적으로 영역별로 역량을 강화하고 인공지능, 네트워크, 양자통신 등의 기술 개발을 위한 전략을 구현하고자 노력하고 있다[30].

에어포스 퀀텀 5.0의 첫번째 플래그십 프로젝트인 스페이스 오디세이 프로젝트는 우주 영역의 전략적 중요성을 고려하여 감시정찰, 위치·항법·시간정보, 미사일 정보 등 우주 기반 능력을 확보하고 우주우세를 달성하기 위한 계획이다. 이 프로젝트는 독자적인 정찰위성 체계 구축, 우주 상황인식 능력 확보, 우주 기반 통신 네트워크 구축 등을 포함하고 있으며, 우주분야 병력소요 증가에 대응하는 조직 구조를 마련하고 있다.

두번째 플래그십 프로젝트인 디지털 매트릭스 프로젝트는 사이버 및 전자기파 영역에서의 탐지·분석·대응 통합체계를 구축하여 지휘통제 우세 역량을 확보하고자 한다. 이는 사이버 공격 탐지 및 대응 체계, 전자전 능력 강화, 전자기 스펙트럼 관리체계 등을 포함한다.

세번째 플래그십 프로젝트인 폴라리스 프로젝트는 미래 전 영역 작전 수행을 위한 지휘통제체계의 발전계획으로서 모자이크전 지휘통제체계 역량 구비를 목표로 한다. 이는 Kill Web의 기술적 기반이 되는 프로젝트로서 인공지능 기반 의사결정 지원, 양자통신 기술 적용, 분산형 지휘통제 체계 구축 등을 추진하고 있으며 단계적으로 영역별 역량을 강화하는 전략을 채택하고 있다.

네번째 플래그십 프로젝트인 에이스 프로젝트는 정보·감시·정찰(ISR), 타격, 미사일 방어, 공중기동 무기체계를 복합체 개념으로 통합하여 모자이크 전투 능력을 구축하고자 한다. 이 프로젝트는 유·무인 복합전투체계 구축, 다영역 센서 통합, 네트워크화된 타격 체계 등을 포함한다.

다섯번째 플래그십 프로젝트인 에이프로젝트는 공군의 핵심능력 발전을 위한 기술집약형 인재양성과 조직 혁신 전략을 담고 있다. 이는 인공지능·빅데이터·양자기술 등 첨단 과학기술 분야의 전문인력 양성, 메타버스 기반 훈련 체계 구축, 데이터 기반 의사결정 문화 정착 등을 추진하고 있으며, 기술집약형 소수 정예군으로 전환을 위한 인력 구조개편과 양성계획을 포함하고 있다[30].

공군은 이러한 Kill Web과 에어포스 퀀텀 5.0의 개념을 실제 작전환경에서 검증하고 운용 절차 정립을 위해 제 11전투비행단을 시범부대로 지정하였다. 시범부대는 KF-21 스텔스 전투기를 중심으로 네트워크 중심전 개념체계를 발전시키고 있다. KF-21는 첨단 센서 융합능력과 데이터링크 체계를 통해 다영역 정보를 통합하고 실시간으로 공유할 수 있는 Kill Web 구현의 핵심 전력으로 평가받고 있는 전력이다.

시범부대는 첨단 센서체계로 수집된 표적정보를 인공지능 기반 지휘통제 체계에서 통합·분석하고 최적의 타격자산을 실시간으로 배정하는 절차를 유인 체계와의 실전적 훈련 환경속에서 반복 검증하고 있으며 특히 유인 전투기와 무인체계의 협업 운용, 우주자산으로부터의 정보 수신 및 활용, 사이버·전자전 자산과의 통합 운용 등의 다양하고 복합적인 작전 시나리오를 구성해 체계의 실효성을 실전적으로 평가하고 있다[21].



[그림 3-7] 공군 AIR FORCE QUANTM 5.0의 5대 플러그쉽 프로젝트 [30]

[표 3-10] 공군 기술개발 및 핵심능력 발전 목표 [30]

중점 과제	1단계(~2030년)	2단계(~2040년)	3단계(~2050년)
과학 기술	<ul style="list-style-type: none"> · 협업형 인공지능 및 빅데이터 · 초연결, 광대역 통합망 · 초실감 전장 가시화 	<ul style="list-style-type: none"> · 진화형 인공지능 · 군집기술 · 전장데이터 클라우드 · 양자통신 · 극초음속 기술 	<ul style="list-style-type: none"> · 완전자율 인공지능 · 그물망 네트워크 · 양자컴퓨터 · 지향성 에너지 합성바이오
목표 역량	<ul style="list-style-type: none"> · 우주사이버·전자기파 개별 역량 · 정보우세 역량 · 미사일 방어 통합방공 역량 	<ul style="list-style-type: none"> · 공중·우주통합 작전역량 · 공군기지 생존역량 	<ul style="list-style-type: none"> · 선별적 우주우세 역량 · 모자이크전 가능한 전 영역작전 역량

공군은 시범운용 경험을 바탕으로 Kill Web 운용교범을 작성하고 조종사 및 작전요원에 대한 교육훈련방법을 개발하여 전력화 기반을 구축하고 있다. 또한 네트워크 두절 시 대체 절차, 사이버 공격에 대한 방호 능력 강화, 운용 인력의 임무수행 숙련도 향상 등의 보완과제를 식별하고 개선 방안을 마련하고 있다. 공중 무인체계는 무인정찰기, 무인전투기, 무인중계기, 무인회전익기 등 다양한 플랫폼으로 구현되며 공대공, 공대지 및 지상 임무 등 복합적인 임무 유형에 따라 운용된다[77].

이러한 무인체계들은 통신 중계 및 항법 지원, 전자전, 정보감시정찰, 침투 공격, 호위, 기만 및 교란 등의 임무에 활용된다. 특히 공군은 유인 전투기 1대가 다수의 무인기를 지휘통제하는 유·무인 복합 전술편대 개념을 발전시키고 있으며 이를 위한 핵심기술로 무인기 자율비행 기술, 유·무인 간 고속 데이터링크 기술, 인공지능 기반 임무분배 알고리즘 등을 연구하고 있다[69]. Kill Web의 실현을 위해서는 한국형 합동 전영역 지휘통제 체계⁵³⁾ 구축이 선행되어야 한다.

한편 한국형 합동 전영역 지휘통제체계는 4차 산업혁명의 초연결·초융합·초지능 기술이 집약된 차세대 지휘통제체계로서 미군이 2019년부터 전력화에 추진하고 있는 인공지능 기반 체계이다. 우리 군은 합참과 각 군의 C4I 데이터를

53) K-JADC2S(Korea Joint All-Domain Command and Control System)

저장·분류·처리·통합하는 등 C4I 체계를 유기적으로 연결하여 한반도의 전영역에 대한 지휘통제체계를 구축할 계획이다. 이를 위해 합참 주도로 통합 데이터 플랫폼 구축, 표준화된 데이터 체계 개발, 인공지능 기반 의사결정 지원 알고리즘 개발 등이 추진되고 있으며 단계적으로 운용능력을 확보해 나갈 예정이다[61].

해병대는 상륙기동헬기인 마린온을 기반으로 한 유·무인 복합전투체계 구축을 추진하고 있다[65]. 해병대는 유무인복합 상륙플랫폼을 바탕으로 인공지능 유·무인 복합전투체계 구축을 추진하면서 상륙기동헬기인 마린온 기반의 드론 운용 최적화 기술 적용방안의 연구용역을 발주하였다. 마린온은 한국형 기동헬기인 수리온을 기반으로 개발된 상륙기동헬기로 상륙함에서 병력과 장비를 수송하는 상륙작전은 물론이고 지상작전 지원을 위한 공중 강습, 도서 지역 국지 도발 대응 등의 임무를 수행할 수 있는 전천후 수송 플랫폼이다.

해병대는 이러한 마린온을 활용하여 유·무인 복합체계를 구축을 추진하고 있으며 전투 드론을 운용하는 MUM-T 개념을 적극적으로 적용할 계획이다. 이는 해병대에서 우크라이나 전쟁 등 최근 전장 환경에서 유·무인 복합전투 체계의 중요성이 부각되면서 위험지역에 대한 선제적 정찰과 타격 능력 확보가 필수적이라는 판단에 근거한 것이다. 마린온에서의 전투 드론 운용이 실현되면 감시, 정찰, 공격 등 위험 임무를 무인기가 분담함으로써 마린온 헬기 본체의 생존 가능성을 높이고 임무 수행 능력도 향상될 수 있을 것이다. 해병대는 이에 추가하여 무인체계와 통합된 공중 돌격 수행 개념을 재정립하여 유·무인 복합 전투체계 임무 분담, 헬기에서의 2대 이상의 군집드론 조종과 통제 방식 등을 포함한 새로운 작전 개념을 수립할 계획이다[68].

해병대는 유·무인 복합전투체계의 조직적 기반을 마련하기 위해 2021년 12월 경북 포항 해병대 제1사단에 해병대 항공단을 창설하였다. 창설된 해병대 항공단은 2018년에 해병대에 전력화되기 시작한 마린온 30대를 주전력으로 운용하는 기동헬기 대대와 공격헬기 대대 등으로 구성되었고 마린온 기반 MUM-T 체계 전력화를 선도할 부대로 시범부대로 지정되었다. 시범부대는 헬기-전투드론 간 통신체계, 임무 분담 절차, 조종사 훈련 프로그램 등을 실전적인 환경에서 검증하고 교훈을 도출하여 미흡사항은 향후 보완한다는

계획이다. 이 과정에서 축적되는 데이터와 운용 노하우는 향후 해병대 전체의 전술 교리 발전과 훈련 체계 구축에 큰 자산이 될 것으로 기대된다. 해병대는 2023년 6월 부산작전기지에서 실시한 해군·해병대 합동 유·무인 복합전투체계 상륙작전의 전투 시연을 통해 시범을 보였다[54].



[그림 3-8] 해병대 유·무인 복합전투체계의 핵심이 되는 마린온



[그림 3-9] 각 군의 유·무인 복합전투체계와 시범 부대 [55]

[표 3-11] 각 군의 유·무인 복합전투체계 비교 ⁵⁴⁾

구 분	육군 Army TIGER	해군 Navy Sea GHOST	공군 Kill Web	해병대 마린온 기반 MUM-T
핵심개념	· 지능화 · 기동화 · 네트워크화	· 해양영역 유무인 통합운용	· 네트워크 중심 작전체계	· 상륙작전 항공 MUM-T
주요무기체계	· 드론봇 · 다목적 무인차량 · 무인수색차량	· 무인수상정 · 무인잠수정 · 무인항공기	· 무인정찰 / 전투기 · 무인중계기 · 군집드론	· 전투드론 · 군집드론 · 마린온 탑재 무인기
핵심기술	· AI 의사결정지원 · 5G 초연결 네트워크 · 자율주행	· 자율운항제어 · 군집항법 · 수중장기체류	· 실시간 네트워크 · AI 표적처리 · 합동 C4I	· 공중 드론운용 · 헬기 드론 협업 · 군집제어
주요임무	· 지상전투 · 기지방호 · 수색정찰	· 대함전, 대잠전 · 기뢰전 · 상륙작전지원	· 공대공 · 공대지 · 정보수집 · 타격	· 해양상륙작전 · 공중강습 · 화력지원
전력화 목표	· 2040년 전군확대	· 2027년 단계적 배치	· 한국형 JADC2 연계 구축	· 2025년 연구 완료 후 적용

제 2절 Army TIGER 전투체계 구성 및 추진

1) Army TIGER 전투체계 추진 개념

Army TIGER 전투체계는 지능화, 기동화, 네트워크화의 3대 핵심 개념이 상호유기적으로 연결되면서 미래 육군의 모습을 변화시키고 있다. 첫번째 지능화의 개념은 인공지능 기반 초지능 의사결정체계가 상황을 판단하고 결심과정에서 의사결정을 지원하는 것이다. 예를 들면 인공지능 기술을 활용하여 정찰드론 영상을 실시간으로 분석하여 적 위치가 분석됨과 동시에 적의 위협 수준을 판단하고 최적의 대응 방안을 지휘관에게 제시하는 것이다[17]. 육군은 지능화

54) 각군 공개자료를 바탕으로 저자 재구성

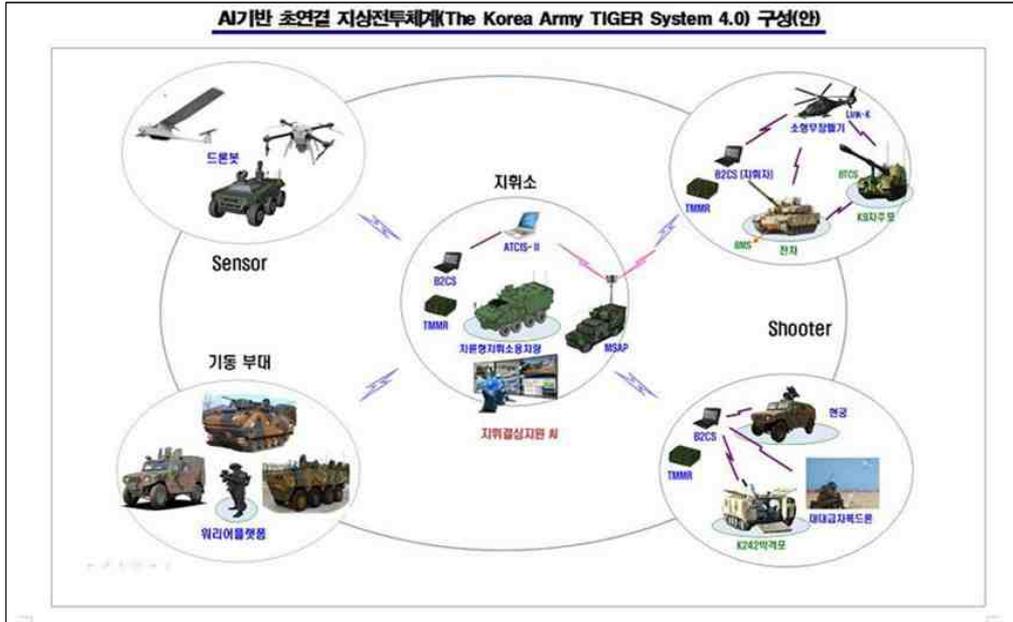
개념을 구현하기 위해 2019년부터 과학화전투훈련단에서 Army TIGER 전투 체계 전투실험을 매년 실시하고 있다. 그 결과 육군은 전투실험을 통해 정찰 드론 영상을 실시간 분석하여 지능화된 정보를 제공하고 공격드론을 활용해 적을 제압하는 일련의 과정을 일부 구현할 수 있었다[16].

두번째 기동화의 개념은 차륜형장갑차와 소형전술차량 등 기동플랫폼을 활용해 전 제대가 빠르게 전장을 누비는 것을 의미한다. 보병부대의 가장 작은 단위인 분대부터 장갑차와 소형전술차량을 통해 기동하여 빠른 작전 템포를 가지겠다는 의지이다. 이는 기존 보병부대 작전으로 통칭되던 도보 부대 중심의 보병작전 개념에서 과감하게 탈피하여 전 제대 전투부대의 신속성을 보장하는 체계로의 전환을 의미한다. 기동화가 이루어지면 부대는 적의 예상을 뒤엎는 신속한 기동으로 전술적 우위를 확보하고 전투원의 체력 소모를 최소화하면서 전투력을 온전히 유지하게 된다[16].

세번째 네트워크화의 개념은 전투원과 드론봇 전투체계, 워리어플랫폼 등 모든 전투체계를 유기적으로 연결하는 것을 의미한다. 5G 기반의 초고속·초연결 네트워크는 전장 정보를 지휘소와 개별 전투원이 동일하게 상황인식이 가능하도록 실시간 공유를 유지하여 신속한 의사결정과 협동작전을 수행하게 한다[17]. 네트워크를 통한 전장정보 공유와 인공지능의 판단 보좌가 결합되는 네트워크화의 개념은 전투실험 시연을 통해 각 전투체계와 지휘소, 개인 전투원이 모든 상황을 실시간으로 공유하는 네트워크 체계를 일부 구현하였다[16].



[그림 3-10] 인공지능 기반 Army TIGER 전투체계 핵심개념 [25]



[그림 3-11] 인공지능 기반 Army TIGER 전투체계 운용도 [9]

2) Army TIGER 전투체계 구성요소

Army TIGER 전투체계는 웨어러플랫폼, 드론봇 전투체계, 기동플랫폼, 초연결 네트워크의 4대 구성요소로 이루어져 있다. 이들 4대 구성요소는 각각 독립적인 전투체계의 기능을 갖으면서도 상호 유기적으로 연결되어 통합전투력을 발휘 하는데 기여한다. 웨어러플랫폼은 전투원의 생존성과 전투력을 극대화할 수 있는 개인 전투체계로 전투피복, 방호장비, 개인화기, 통신장비를 하나의 통합 체계로 구성한다.

각 구성요소는 개별적으로 기능하면서도 유기적으로 연계되어 전투원의 전투 수행능력을 극대화한다. 특히 첨단 조준장비가 통합된 개인화기와 통신 장비의 결합은 전투원의 타격 능력과 상황인식 능력을 동시에 향상시키는 핵심 요소로 작용한다. 또한 네트워크를 기반으로 타 전투체계와 연동되어 작전을 수행할 수 있는데 전투원 개개인을 하나의 네트워크 노드로 연결하여 기존 육안사격 방식에서 벗어나 첨단 조준 장비를 통해 사격에 대한 명중률을

향상시킨다[17].

특히 2021년 9월 과학화전투훈련단에서 실시한 전투실험은 개별 전투원이 전장 상황을 공유받고 자신의 위치와 상태를 지휘소에 전송할 수 있는 능력을 갖춰 전투실험에서는 전 제대가 하나의 통합된 전투체계로 기능한다.



[그림 3-12] 워리워 플랫폼 [9]

드론봇 전투체계는 드론과 로봇을 복합 운용하여 정찰, 타격, 수송 등 다목적 운용을 가능하게 하는 체계이다. 육군은 드론봇 체계를 구현하기 위해 2018년 9월 드론봇전투단을 발족시켰으며 2020~2024년 국방중기계획에 드론봇 전력화 내용을 반영하여 2019년 대대급 드론봇 전투실험, 2020년 이후에는 여단급 드론봇 전투실험을 실시하였다[35]. 드론봇 전투체계는 위험한 정찰 임무와 반복적인 경계임무를 담당하여 인명 손실을 최소화하면서 임무수행에 집중할 수 있도록 여건을 마련한다[4].



[그림 3-13] 창설식에서 파이팅을 외치는 드론봇전투단 장병들 [4]

기동플랫폼은 차륜형 장갑차와 소형전술차량, 다목적 무인차량을 활용하여 전 제대의 신속한 기동 능력을 확보하게 해준다. 육군은 2022년 1월 00사단 00여단을 Army TIGER 시범여단전투단으로 지정하고 2022년 6월 신규 무기 체계에 대한 명명식을 하여 소형 전술차량, 차륜형장갑차 등 주요 무기체계 7종에 대한 이름을 발표했다[56].

다목적 무인차량은 Army TIGER 전투체계에 포함되는 중대급 이하 제대의 핵심 전투장비지만 전력화가 이루어지지 않은 관계로 명명식에서는 제외되었다. 하지만 이와는 별개로 육군은 다목적 무인차량을 통해 정찰·감시, 통신중계, 보급수송 등 다양한 임무를 수행이 가능하도록 전력화를 단계적으로 추진해 나갈 계획이다. 다목적 무인차량의 역할과 편제는 본 장 제 3절을 통해 언급한다.

[표 3-12] Army TIGER 전투체계 주요 장비(7종) 명명 결과 [56]

장비명	명 칭	명칭 의미	주요 제원
소형전술차량	현마	빛처럼 빠르게 기동하는 전술차량의 기동성 강조	<ul style="list-style-type: none"> · 속도 : 100km / h · 탑승인원 : 8명 · 총 적재중량 : 5.7톤 · 등판능력 중 60% 횡 40% · 전술타이어⁵⁵⁾ 적용
차륜형장갑차	백호	영험하고 신비로운 흰 호랑이와 용맹한 백두산 호랑이를 중의적으로 표현	<ul style="list-style-type: none"> · 속도 : 100km / h(수상 8km / h) · 탑승인원 : 11명 · 주무장 : K-4, K-6 · 항속거리 : 600km · 전술타이어 적용
120mm 자주박격포	비격	하늘에서 떨어지는 천둥	<ul style="list-style-type: none"> · 사거리 : 8km(RAP 탄 : 13km) · 탑승인원 : 4명 · 복합항법시스템, 자동사격통제, 반자동방열시스템 구축 · 초탄 1분이내 발사가능
105mm 자주곡사포	풍익	故 김풍익중령 정신 계승	<ul style="list-style-type: none"> · 총 중량 : 18톤 · 사거리 : 11.3km · 탑승인원 : 5명 · 탄약적재 : 60발 · 부무장 : 12.7mm 기관총 · 복합항법시스템, 자동사격통제, 자동방열시스템 구축
장애물개척전차	코뿔소	전투시 장애물을 신속히 탐지 및 개척할 수 있는 공병전차의 역동적인 모습 표현	<ul style="list-style-type: none"> · 차체 : K-1전차(1200마력) · 주무장 : 12.7mm 기관총 · 탑승인원 : 2명 · 지뢰제거쟁기, 지뢰무능화장비, 통로표식장비, 굴삭팔
30mm 차륜형대공포	천호	30mm 대공포(비호)와의 계열성을 고려 기동 타격능력이 향상된 대공포를 표현	<ul style="list-style-type: none"> · 총 중량 : 26.5톤 · 유효사거리 : 3km · 탑승인원 : 3명 · 표적 추적거리 : 7km · 발사속도 : 분당 1200발
대포병 탐지레이더-Ⅱ	천경Ⅱ	하늘의 거울로 대포와 미사일로켓 등 적 화력 무기체계 발사 시 이를 탐지하는 거울이라는 뜻	<ul style="list-style-type: none"> · 총 중량 : 28톤 · 표적처리능력 : 분당 100개 · 탐지거리 : 로켓 70km, 야포 40km · 타격수단과 연계한 대화력전 가능

초연결 네트워크는 5G 기반 실시간 정보공유와 인공지능 기반 의사결정 지원체계를 통해 전 플랫폼을 통합하는 네트워크를 구축하는 체계이다. 육군은 초고속 및 초연결 네트워크를 구축하여 데이터 전송용량 부족과 클라우드 컴퓨팅 환경 구축 문제를 해결하기 위한 지능정보센터를 조기 구축할 계획이다. 지능정보센터는 인공지능 모델을 발전시키고 학습용 데이터셋을 구축하는 통합 허브역할을 한다. 육군은 지능정보센터를 권역별로 설립하여 초연결·초지능 육군 운영을 가능하게 할 계획이다[18].



[그림 3-14] 육군의 초연결·초지능 육군 운영 개념도 [18]

육군은 이를 위해 인공지능이 전술적 지휘결심을 지원하는 인공지능 기반 전술제대 지휘결심지원시스템 시범사업을 추진하고 있다. 시범사업의 목표는 인공지능의 활용성을 가시화하고 핵심 능력 확보에 필요한 기반 기술을 성숙시키는 것이다. 이를 위해 육군은 초연결 네트워크로 웨리어플랫폼, 드론봇 전투체계, 기동플랫폼을 하나의 통합된 전투체계로 연결하고 클라우드 컴퓨터

55) 피탄시 시속 48km로 1시간 이내 주행 가능

환경 개선을 통해 각 플랫폼의 데이터를 실시간 공유를 가능하게 위해 노력하고 있다. 초연결 네트워크를 위해서 육군은 특히 2019년부터 약 69억원의 예산을 투입하여 과학화전투훈련단에서 드론, 로봇 등 Army TIGER 전투체계 전력의 80% 수준을 장착하여 실제 전장을 방불케하는 시나리오를 바탕으로 전투실험을 실시하였다. 전투실험을 통해 육군은 실제 전장 환경을 모의하고 기동화·네트워크화·지능화된 육군의 전장 지배 방안에 대한 보병대대 전투수행 개념을 도출하면서 초연결 네트워크의 중요성을 확인하였다[18].

3) Army TIGER 전투체계 발전 로드맵

육군은 Army TIGER 전투체계를 최초 시범운용 부대를 통해 전력화 가능성을 검증하고 단계적으로 전군에 확대하는 방식으로 Army TIGER 전투체계를 단계적으로 발전시키기 위한 로드맵을 수립하였다.

1단계는 2017년부터 2022년까지 진행되었다. Army TIGER 전투체계의 기본 개념은 2017년에 태동하였다. 육군은 적의 위협과 미래 과학기술 발전 추세를 고려하여 미래전에 대비한 5대 게임체인저(① 미사일전력, ② 기동군단, ③ 특수임무여단, ④드론봇전투단, ⑤위리어플랫폼)를 선정하였다. 2018년 3월에는 국회에서 육군과 미래안보포럼 단체가 공동주관한 5대 게임체인저 개인 전투체계 발전 전시회를 개최하여 미래 전투체계에 대한 개념을 구체화하였다. 당시 육군참모총장과 국회 국방위 간사 등 주요 관계자들이 참석한 이 행사는 2022년까지 육군 장병들에게 적용하게 될 개인·피복·무기 등 3개 분야의 시제품들을 실물로 전시하고[37] 이후 같은 달에 개최한 드론봇 전투발전 콘퍼런스를 통해 드론을 중심으로 한 미래 전장 전투체계 개념과 나아갈 방향을 소개하면서 정찰드론, 무장드론, 전자전드론, 정찰 및 다목적로봇 등의 유·무인 복합전투체계 전력화의 필요성을 역설하였다[15].

이런 강력한 의지를 바탕으로 2022년 10월 계룡대에서 열린 육군은 국정 감사를 통해 업무보고를 보고하였다. 기존의 보병부대를 기동화·네트워크화·지능화하는 것을 주요 내용으로 담은 육군은 백두산 호랑이체계를 최초로 공개하기도 하였다[49]. 그리고 육군은 이러한 노력과 병행하여 2019년 제 00

보병사단 00여단 1개 대대를 Army TIGER 시범대대로 지정하여 전투실험을 하였다. 과학화전투훈련단에서 실시된 전투실험에서는 기본적인 유·무인 복합 전투개념을 정립하고 유·무인 복합전투체계의 운용성과 전투효과를 평가하였다.

전투실험에는 드론, 로봇 등 Army TIGER 전투체계의 전력수준으로 80% 수준으로 장착하고 실제 임무수행 환경이 고려된 여러가지 시나리오를 기반으로 모의하였고 전투실험 결과 워리어플랫폼을 장착한 전투원의 주·야간 전투를 치른 소대급 부대의 생존율과 승률이 기존 보병대대급의 평균 수치보다 크게 높아지는 것을 확인할 수 있었다[44].

2단계는 2022년부터 2025년까지 진행되는 시범여단 확대운용 단계이다. 육군은 2022년 1월 10일 경기도 양주 00사단에서 Army TIGER 시범여단 전투단 선포식을 개최하였다. 육군참모총장 주관으로 열린 행사에서 제 00사단 00여단을 Army TIGER 전투체계 시범여단으로 지정하고 행사에 참석한 주한무관단, 국회의원, 육군 주요 직위자, 국방부, 합참, 방사청, 국방과학연구소, 방산업체 등에게 육군이 Army TIGER 전투체계의 우수성을 홍보하고 국방혁신 4.0 기본 계획을 선도하겠다는 의지를 표명하였다[25]. 시범여단 전투단 선포식은 시범 부대의 규모를 단순히 대대에서 여단으로 확장만한 것이 아니라 여단급 단위 부대에서도 유·무인 복합전투체계를 편제하여 운용하기 시작하였다는 점에서 의의가 있다.

이와 연계하여 여단 규모가 약 3,000여명으로 확대되었고 여단 직할부대에 무인체계 운용대대가 신설되고 각 보병대대마다 무인체계 운용소대가 배치되는 등 조직 차원에서 유·무인 복합전투체계를 운용할 수 있는 구조적인 기반과 배경이 마련되었다. 또한 시범여단에서 편제된 다목적 무인차량은 정찰형 차량에 고해상도 전자공학 및 열화상 센서가 탑재되면서 장시간 장거리 정찰임무가 가능해졌으며 전투지원형 임무장비 모듈을 통한 임무수행에서는 통신중계 및 전자전 장비가 장착되어 네트워크 중심전 수행능력 제공도 가능하게 되었다.⁵⁶⁾

이러한 편성 효과는 2022년 10월 육군의 주관으로 실시한 KCTC 여단급 전투실험을 통해서 검증되었다. 여단급 전투실험은 제 00보병사단 제 00여단

56) 저자의 00사단 00여단 0대대 현장방문 및 인터뷰(2023년 7월) 재구성

전 병력이 참여하여 KCTC 훈련장에서 실시되었으며 유·무인 복합전투체계가 대규모 임무수행 과정에 통합 운용될 때의 전투효율성을 검증하는데 목적을 두고 시행되었다. 전투실험 결과 유·무인 복합 전투체계들은 기존 일반 보병 대대의 표적 식별건수 11건 표적 식별률 25%를 상회하는 47건을 식별하여 표적 식별률 95%를 기록하고 유·무인 복합전투체계와 연계된 화력 운용은 기존 일반 여단급 부대의 평균 165명 제거 수치를 훨씬 능가한 344명을 기록하였다.

또한 통신중계 기능의 효과적인 운용은 지휘통제 네트워크의 안정성을 대폭 강화시켜 유·무인 복합전투체계의 협동작전 개념이 실제 전투환경에서도 실현 가능하다는 것을 입증했다[44]. 이후 2024년에는 대통령 직속 국방혁신위원회와 국방부 소속 국방혁신특별자문위원회 위원들이 Army TIGER 시범여단을 방문하면서 국방혁신 4.0 추진 현장을 확인하고 보완 및 발전사항에 대한 공감대를 형성하면서 전투실험의 효과를 이어나갔다[51].

현재 육군은 현재 시범여단의 전략·전술, 부대구조·편성, 전력발전을 위한 테스트베드 역할을 담당하며 지속적인 전투실험과 운용개념 발전을 추진하고 있다. 특히 육군 미래혁신연구센터에서는 Army TIGER 시범여단 성과확대를 위해서 민간 방산업체와 함께 Army TIGER 부스트 프로젝트를 진행하면서 K 방산 신기술을 육군에 적용할 수 있는 방안을 모색하고 있다[7].

3단계는 2026년부터 2035년까지 계획되어 있는 사단급 전력화 단계이다. 이 단계는 Army TIGER 시범여단의 운용 결과를 분석 및 보완하여 Army TIGER 전투체계를 기존 여단급 부대규모에서 사단급 부대 규모로 시범적용을 확대하는 단계로 2040년 전군 확대를 하기 위한 교량역할을 하는 단계이다. 육군은 드론 및 무인 차량 등의 기반을 구축하고 전력화는 확대 및 가속화하면서 Army TIGER 보병사단에 편성 및 전력화한 이후 점진적으로 비중을 늘려가면서 초연결 네트워크 전투체계를 완성할 계획이라고 밝혔다[44]. 3단계는 2027년까지 시범부대를 대상으로 전투실험을 진행하여 보병 사·여단 부대 구조 및 편성을 정립하고 다수 무기체계를 전력화할 예정이다[7].

4단계는 2035년부터 2040년까지 진행되는 전군 규모의 전력화 확대 단계이다.

육군은 2023년 10월 국회 국방위원회 국정감사에서 2040년까지 모든 전투부대를 Army TIGER 전투체계로 탈바꿈시키겠다는 계획을 밝혔으며 이를 통해 모든 전투여단과 각급 전투부대뿐만 아니라 통신, 공병, 군수 등 전투지원 및 근무지원 부대까지 Army TIGER 전투체계 부대로 전환하여 육군 전체의 군사혁신을 완성한다는 목표를 제시하였다. 순차적으로 계획이 진행된다면 2040년에는 기동화·네트워크화·지능화가 완벽하게 구현되어 첨단 과학기술로 무장된 선전, 선결, 선타 능력을 갖춘 다영역 동시통합작전이 가능한 육군으로 탈바꿈한다[7]. 또한 우주·사이버·전자기 등 새로운 영역을 주도할 수 있는 인공지능 기반 지휘 결심 및 통제 체계가 구축이 가능하다.

[표 3-13] Army TIGER 전투체계 단계별 전력화 추진계획 ⁵⁷⁾

단 계	기 간	추진 내용	규 모	주요 활동
1단계	2017년 ~2022년	· 개념 연구 · 대대급 시범 운용	00사단 00여단 1개 대대	· Army TIGER 전투체계 개념 정립 · 대대급으로 전투실험 실시
2단계	2022년 ~2025년	· 시범운용 여단급으로 시범 확대	00사단 1개 여단	· 시범여단 전투단 선포 및 장비 명명식 · KCTC 여단급 전투실험으로 운용개념 발전
3단계	2026년 ~2035년	· 시범운용 사단급으로 시범 확대	1개 사단	· 사단급으로 시범부대 확대 적용 · 대규모 부대 적용을 위한 체계 안정화
4단계	2035년 ~2040년	· 전군 확대	사단급 전 부대	· 전 전투부대 전력화 · 지능형 유·무인 전투체계 완성

57) 본문 내용으로 저자 재구성

제 3절 다목적 무인전투차량의 역할 및 편제

1) 다목적 무인차량의 정의 및 구성요소

다목적 무인차량을 정의하기전에 무인차량의 개념을 먼저 살펴보면 ‘NATO STANAG 4586 무인기 연동 프로토콜’의 정의에는 ‘무인차량은 사람이 탑승하지 않고 원격조종 또는 자율주행을 통해 지상에서 다양한 임무를 수행할 수 있는 로봇시스템’으로 명시되어 있다[145]. 무인차량은 대표적으로 조종방식과 크기 및 중량, 임무유형 등으로 분류할 수 있다. 세부적으로는 살펴보면 조종 방식으로는 원격조종, 감독제어, 완전자율방식으로 분류되고 크기 및 중량으로는 소형(500kg 이하), 중형(500kg~5톤 미만), 대형(5톤 이상)으로 분류되며 임무 유형으로는 정찰 및 감시, 보급수송, 전투지원 등으로 분류된다.

조종방식별 분류에서 원격조종 방식은 인간 조작자가 차량의 모든 동작을 제어하는 방식으로 대표적인 사례는 육군에 전력화된 폭발물처리 로봇이나 원격정찰 로봇 등이 있다. 원격조종 방식은 인간 조작자의 직관과 경험에 의존하여 높은 상황 적응력을 보이지만 통신의존성이 높고 인간 조작자의 조종 부담이 크며 통신 두절 시 임무 수행이 불가능하다는 단점이 존재한다.

감독제어 방식은 자율기능은 기본적으로 보유하되 인간 조작자가 중요한 의사 결정을 담당하는 조작 방식이며 대표적으로는 현재 전력화를 추진하고 있는 Army TIGER 전투체계의 다목적 무인차량과 무인수색차량이 있다. 감독제어 방식은 평상시 사전에 설정된 경로를 따라 자율적으로 이동하지만 예상치 못한 상황이나 복잡한 상황으로 긴급하고 영향력이 큰 판단이 필요한 경우 인간 조작자의 개입을 요청하게 된다.

완전자율 방식은 인간 조작자의 어떠한 개입도 없이 인공지능의 기술력을 기반으로 유·무인 복합전투체계가 스스로 판단하고 행동하는 최고 수준의 조작 방식이다. 다만 아직은 기술적, 윤리적 한계로 인해 인공지능 기반의 완전자율 방식의 실용화는 도달하지 못하고 있다. 완전자율 방식은 복잡한 환경인식, 동작 경로계획, 위협상황 대응에 필요한 판단을 모두 인공지능 기반의 모델에

판단에 의해 부여된 임무를 독자적으로 수행한다.

미국은 미 국방부가 유·무인 복합전투체계의 개발 로드맵을 수립하고 유·무인 복합전투체계의 자율성을 10단계로 세분화하여 레벨 1~2 수준을 완전 원격 조종, 레벨 3~4 수준은 부분 자동화, 레벨 5~6 수준은 감독제어 레벨 7~8은 높은 자율성, 레벨 9~10을 완전 자율로 구분하였다[152]. 현재 우리 Army TIGER 전투체계는 이러한 미 국방부 기준의 레벨 5~6 감독제어 수준을 2025년까지 달성하고 2035년까지는 레벨 7~8의 높은 자율성을 확보하면서 장기적으로 레벨 9~10의 완전자율의 수준 도달을 목표로 하고 있다[72].

[표 3-14] 무인차량 자율성 수준과 Army TIGER 전투체계 수준 ⁵⁸⁾

자율성 레벨	분류	인간 개입도	주요 특징	Army TIGER 전투체계 수준
1~2	완전 원격조종	매우 높음	· 인간 조작자가 모든 동작을 직접 제어	달성
3~4	부분 자동화	높음	· 특정 기능의 자동화	달성
5~6	감독 제어	중간	· 정상적인 상황은 자율, 중요상황 인간 개입	2025년
7~8	높은 자율성	낮음	· 대부분 상황을 자율처리	2025년-2035년
9~10	완전 자율	없음	· 완전 독립적 임무수행	2035년 이후

58) 미 국방부, (2007) 「무인시스템 로드맵」의 내용으로 저자 재구성



[그림 3-15] 육군의 유·무인 복합전투체계(UGV) 발전 계획도 [3]

[표 3-15] 무인차량의 분류 59)

분류기준		특성	주요용도	기술 적용수준
조 방 식	원격조종	· 인간 조작자 제어	· 폭발물처리, · 위험지역 정찰	· 일부 전력화
	감독제어	· 기본자율+인간감독	· 수송, · 순찰 및 경계	· 전력화 준비 중 (시험평가 중)
	완전자율	· 독립적 임무수행 (인간감독 X)	· 장거리 정찰, · 지속감시	· 연구 개발 초기
크 기 / 중 량	소형	· 휴대성 우수, · 분대급 운용	· 분대급 자원, · 근접정찰	· 시범부대 적용
	중형	· 다목적 활용, · 중대급 이하 운용	· 중대급 이하 · 다목적 임무	· 전력화 준비 중 (시험평가 중)
	대형	· 전투차량급, · 여단급 운용	· 직접 전투지원	· 연구 개발 초기
임 무 유 형	정찰 및 감시	· 센서 중심 구성	· 상황정보 수집	· 일부 전력화
	보급 및 수송	· 화물 적재 중심	· 인원 및 · 물자 수송	· 전력화 준비 중 (시험평가 중)
	전투지원	· 무장체계 탑재	· 화력 지원	· 연구 개발 초기

59) NATO STANAG 4586(2017)의 내용으로 저자 재구성

[표 3-16] 미 DOD의 무인차량 자율성 수준 분류 [72]

레벨	감지	계획	실행	내 용
1 수동	인간	인간	인간	감각, 환경, 계획수립 등 인간이 모든 과업을 수행한다.
2 원격조종	인간 /로봇	인간	인간 /로봇	행동상황을 로봇이 보조한다. 하지만 감지와 계획은 사람에게 의해 할당된다.
3 보조 원격조종	인간 /로봇	인간	인간 /로봇	사람이 과업의 모든면을 보조한다. 로봇은 환경을 느끼고 과업을 조정한다.
4 일괄처리	인간 /로봇	인간	로봇	사람과 로봇이 환경을 감지하고 감시한다. 사람은 과업의 목표와 계획을 결정한다.
5 결정지원	인간 /로봇	인간 /로봇	로봇	사람과 로봇이 환경을 감지하고 과업계획을 수립한다. 사람은 과업을 수행하기 위한 계획을 선택하여 로봇이 수행하도록 한다.
6 인간 계획하 협업통제	인간 /로봇	인간 /로봇	로봇	로봇이 자동적으로 환경을 감지하고 계획과 목표를 계획하며 행동으로 실행한다. 사람은 로봇의 행동을 모니터링하고 새로운 목표 또는 계획을 부여한다.
7 로봇 계획하 협업통제	인간 /로봇	인간 /로봇	로봇	로봇이 감지, 계획, 행동 모든 것을 수행한다. 다만 로봇이 어려움에 처해 있을때는 사람이 보조한다.
8 인간 목표하 자율	로봇	인간 /로봇	로봇	사람은 추상적인 고차원의 목표를 부여하고, 로봇은 이를 수행한다.
9 모니터링하 자율	인간 /로봇	로봇	로봇	로봇이 과업의 모든면을 수행하고 사람은 이를 지속적으로 모니터링한다.
10 완전자율	로봇	로봇	로봇	사람의 간섭없이 로봇 과업의 모든 면을 수행한다

다목적 무인차량에 대한 군에서의 정확한 정의는 아직은 없다. 하지만 NATO에서 정의내린 무인차량의 경우를 비추어서 기준한다면 다목적 무인차량은 단일 기본 플랫폼에 다양한 임무장비를 탑재시켜 복수의 임무를 수행할 수 있는 무인차량으로 정의된다. 다목적 무인차량은 단일 임무를 수행하는 기존 유·무인 복합전투체계와는 다르게 모듈화된 임무장비를 교체하여 작전 상황에 따라 부여되는 다양한 임무를 수행한다는 점에서 차별화 된다. 그런 이유로 다목적 임무장비 모듈화와 계열화된 플랫폼이 다목적 무인차량의 핵심구성이라고 할 수 있다. 임무장비 모듈화는 기본 플랫폼과 임무 모듈을 분리하여 설계함으로써 임무에 따라 필요한 장비를 신속하게 교체할 수 있게 하는 설계 방식으로 이는 NATO의 상호운용성 개념을 준수하여 표준화된 인터페이스를 통해 다양한 임무장비를 플러그 앤 플레이⁶⁰⁾ 방식으로 통합될 수 있도록 설계되었다.

임무장비를 모듈화하면서 생기는 장점은 크게 세가지로 요약된다. 첫번째는 운용의 유연성 측면에서 표준화된 인터페이스를 통한 신속한 임무 전환이 가능하다. 임무장비 모듈의 교체는 특별한 공구나 전문기술이 없어도 2명의 병력이 30분 이내에 가능하여 돌발적인 상황에 신속하게 대응할 수 있다.⁶¹⁾

두번째는 비용과 정비의 효율성 측면에서 규모의 경제 실현이 가능하여 예산을 절감한다. 임무장비 모듈화는 표준화된 기본 플랫폼을 기반으로 임무장비 모듈을 교체하는 것이기 때문에 기반이 되는 기본 플랫폼을 대량으로 생산 가능하다. 그렇게 되면 규모의 경제 실현도 가능해지는데 예를 들면정찰, 수송, 통신중계 임무를 위해 각각 별도의 전용 차량을 구매할 경우에는 3대 분량의 예산이 소요되지만 다목적 무인차량은 1대의 플랫폼에 3종의 모듈을 구비할 경우 1대의 플랫폼 예산으로 3대를 운용하는 것과 같은 효과를 낼 수 있기 때문에 60%의 비용으로 달성할 수 있는 절감 효과를 누리게 된다[8].

세번째는 임무장비 모듈화를 활용하면 정비 편의성 측면에서 공통 정비부품을 사용하면서 정비부담을 경감한다. 또한 표준화된 기본 플랫폼의 핵심 부품(엔진,

60) 플러그 앤 플레이 방식(Plug and Play Method)은 장비를 연결하면 별도의 설정 없이 자동으로 인식·구동되는 기술로 센서나 모듈 교체 시 시스템 재설정 없이 즉시 운용이 가능하여 운용의 유연성과 실시간 대응성을 향상시킬 수 있다.

61) 저자 현대로템 및 한화 에어로스페이스 인터뷰('25. 3월) 및 업체별 구매시험평가 자체 Q&A 자료(비공개) 내용 반영

구동계, 전장품 등)이 공통화되어 있다면 부품 조달이 단순해지면서 저장공간도 확보되고 정비요원에 대한 교육훈련의 단순화 되는 등의 추가적인 효과도 얻게 된다[8].

플랫폼의 다기능성은 중대급 이하 소부대 작전환경에 최적화된 임무수행 능력을 만들 수 있다. 소부대급 제대의 전투 상황은 예측 불가능한 변화가 많고 동일한 작전 중에도 임무의 우선순위가 수시로 바뀔 수 있다. 다목적 무인차량은 이러한 상황을 적시적인 임무장비 모듈의 교체로 신속 대응이 가능하다. 예를 들어 정찰 임무를 수행하던 중 긴급한 보급 요구가 발생하면 수송모듈로 교체하여 즉시 보급 임무로 전환하고 통신 음영지역이 예상치 못하게 확대되면 통신중계 모듈로 교체하여 중계 임무를 수행한다. 이러한 모듈을 통해 구현되는 다기능성은 전장의 불확실성에서 제한된 병력과 장비로 운용해야 하는 소부대의 중요한 임무수행 능력이 된다.

중대급 이하 제대는 보유할 수 있는 장비의 수량이 제한적인데 하나의 플랫폼이 복수의 역할을 수행할 수 있어 적은 수량으로도 다양한 임무 수행이 가능하다. 이러한 이유로 다목적 무인차량은 기본 플랫폼과 임무장비 모듈의 이원적 구조로 설계되고 있다. 기본 플랫폼은 모든 임무에 공통으로 필요한 구동, 통신, 전원공급, 센서, 제어시스템 등으로 구성되고 임무장비 모듈은 작전 환경과 목적에 따라 다양한 기능 장비를 신속히 탑재 및 교체할 수 있다. 이러한 구조는 NATO STANAG 4754 차량 탑재 시스템의 개방형 표준 아키텍처 및 미 육군 UGV IOP⁶²⁾에서 규정하는 개방형 차량 아키텍처⁶³⁾의 기본 개념과도 부합된다[144].

기본 플랫폼 중 차체는 무인차량의 기본 골격으로 샤시, 프레임, 현가장치 등으로 구성된다. 다양한 임무장비 모듈을 장착할 수 있도록 적재 하중 및 외부 충격을 흡수할 수 있는 기본 구조물로 표준 제작된다. 차체는 다양한 임무장비 모듈을 신속하게 결합이 가능하도록 제작되며 군 운용환경의 극한성을 고려하여 등판능력 30도 이상, IP 등급 00적용, 연속 72시간 이상 무정비 운용 등이 가능

62) Interoperability Profile로 미 육군이 다양한 제조사, 플랫폼의 무인지상차량이 상호호환되도록 만들기 위해 정의한 표준화된 하드웨어 및 소프트웨어 인터페이스 체계임

63) MOSA라고 하며 Modular Open System Architecture,의 약자이다 MOSA는 무기체계나 플랫폼을 여러 모듈로 나누어 개방형 표준에 따라 설계·통합하는 방식으로, 부품 교체 업그레이드·타입체 기술 연동을 쉽게 해주는 개방형 구조 개념이다.

하도록 개발된다[67].

구동체계는 전기구동 기반의 6륜 독립 구동 방식으로 개발되었다. 각 바퀴는 개별적으로 제어가 되어 주행 중 1~2개의 바퀴가 외부 충격이나 공격 등으로 손상되어도 나머지 바퀴의 힘으로 구동을 지속할 수 있는 특성을 갖고 있다[57]. 또한 타이어 휠 내부에 모터를 장착한 인휠모터 시스템을 적용하여 360도 제자리 회전과 험지 주행 중에도 펑크 없이 일정 시간 동안 안정적으로 임무를 수행할 수 있도록 에어리스 타이어 장착하여 다목적 무인차량의 주행능력을 제고한다[58].

전원체계는 수냉식 배터리 시스템과 통합 열관리 기술을 적용하여 사계절 전천후 운용이 가능하도록 리튬 배터리 기반의 전동화 시스템으로 개발되었다. 특히 차량 내 OBC⁶⁴⁾가 기본적으로 장착되어[57] 외부 전기 콘센트를 통한 완속 충전과 외부 장치를 이용한 고속충전이 모두 가능하다.

센서체계는 자율주행과 장애물 인식을 위한 핵심 구성요소로 라이다, 다중 카메라, GPS / IMU 기반의 복합항법장치로 구성된다. 라이다는 주변 환경을 3D로 스캔하여 3차원으로 지도로 인식시키고, 카메라는 주·야간 영상정보를 제공하여 원격조종 및 상황인식이 가능하다. GPS / IMU 기반 복합항법 장치는 GPS 신호가 차단된 환경에서도 안정적인 위치정보를 제공하여 통신이나 외부신호가 끊겨도 연속성 있는 상황 인식과 자율성이 유지된다.

제어시스템은 인공지능 기반 경로계획 S/W, 장애물 회피 알고리즘 등을 통해 다양하게 지원되는 운용모드(원격주행, 종속주행, 경로점 자율주행 등) 통제를 지원한다. 이 과정에서 조작자의 부담을 줄이고 작전 효율성을 높인다. 특히 제어시스템의 주요 기능인 긴급 제동 기능, 차선 유지 기능 등의 최신 자율주행 기술 등을 개발하여 군 운용환경에 맞도록 경제성과 신뢰성을 제고하고 있다[66].

통신체계는 Army TIGER 전투체계의 초연결 네트워크와 연동하여 실시간 데이터 송·수신을 지원한다. 데이터 송·수신은 5G 기반 통신체계와 전송데이터 링크를 통해 지휘통제소 및 타 유·무인 복합전투체계 플랫폼과 대용량 영상

64) On Board Charger : 차량 탑재형 충전기

정보의 실시간 전송과 교환이 가능하다. 특히 보조 통신 중계 기능도 있어 산악지형 등의 통신 음영지역에서도 전파 방해 없이 임무를 수행할 수 있다.

임무장비 모듈은 표준화된 기본플랫폼 위에 임무 목적에 따라 유연하게 모듈을 설치하거나 해제할수 있다. 대표적인 모듈로는 정찰용 모듈, 수송용 화물칸, 통신중계용 안테나, 원격무장장치 등이 있다[57]. 이러한 임무장비 모듈은 최소 2인으로도 단시간 내 교체 가능하여 1분 1초가 아까운 급변하는 전장 환경에서 작전 효율성과 생존성을 높여준다[7].



[그림 3-16] 다목적 무인차량 구성도 ⁶⁵⁾



[그림 3-17] 다목적 무인차량 모드별 임무장비 모듈 장착도 [28]

65) 한화 및 현대로템의 자료의 내용으로 저자 재구성

[표 3-17] 다목적 무인차량 기본 구성 ⁶⁶⁾

구 분	세부 구성요소	주요 기능 및 특징
기본 플랫폼	차체	<ul style="list-style-type: none"> · 세시, 프레임, 현가장치, 포함 표준화된 인터페이스 제공 · 등판능력 30도 이상 · 연속 72시간 이상 무정비 운용
	구동체계	<ul style="list-style-type: none"> · 전기구동 기반 독립구동 · 인휠 모터 시스템 적용 · 360도 제자리 회전가능 · 에어리스 타이어 적용
	전원체계	<ul style="list-style-type: none"> · 리튬배터리, 연료전지 · 전력관리장치 · 수냉식 배터리 시스템 · 차량 탑재형 충전기
	센서체계	<ul style="list-style-type: none"> · 3D 360EH 전방위 3차원 스캔 라이다 · GPS / IMU 복합항법장치 · 주·야간 영상정보 제공 카메라 · GPS 차단시에서도 위치 제공가능한 레이더
	제어시스템	<ul style="list-style-type: none"> · 인공지능 기반 경로계획 S/W 알고리즘 · 장애물 회피 S/W 알고리즘 · 고장 자가진단 기능 · 원격주행, 종속주행, 경로점 자율주행 모드 선택 가능
	통신체계	<ul style="list-style-type: none"> · 전술통신, 데이터 링크, 위성통신 · 대용량 영상정보 실시간 전송 · 지휘통제소 및 타 플랫폼 정보 공유
임무 장비모듈		<ul style="list-style-type: none"> · 정찰용 모듈 · 수송용 화물칸 · 통신 중계용 안테나 · 원격무장장치

66) 육군 시험평가단 『다목적 무인차량 구매시험평가 결과』 문서와 제작업체 자료 내용을 바탕으로 저자 재구성

2) 다목적 무인차량의 역할

다목적 무인차량은 중대급 이하 제대에서 기존 병력 중심의 임무수행 방식에서 탈피하여 유·무인 복합작전 구현을 가능하게 하는 핵심 장비이다. 소부대 작전을 위해 정찰·감시, 통신중계, 보급 수송 등의 다양한 임무 수행이 가능하다. 정찰·감시 임무를 수행할 때는 고해상도 카메라, 열상카메라, 라이다 등의 다양한 환경인식 센서들을 활용하여 위험지역의 수색정찰 및 복합적인 감시가 가능하고 통신중계 임무에서는 산악지형이나 시가지 등의 통신 난청 지역에서 중계기 역할을 수행하여 부대 간 지휘통제의 연속성을 보장해 준다. 또한 보급수송 임무에서는 고중량의 화물 및 인원 적재가 가능하여 탄약, 식수, 의약품, 그리고 부상병 등을 원하는 지역으로 신속하게 이동시킬 수 있다[67].

다목적 무인차량은 변화하는 전장환경과 임무수행을 위해 신속한 모듈 전환이 가능하다. 표준화된 인터페이스로 제작된 다목적 무인차량은 임무장비 모듈을 별도의 장비도 없이 2인이 30분 이내로 교체가 가능하며 임무수행 중 갑작스런 임무 변경에도 즉각적인 대응이 가능하다. 장비의 수량은 제한적이지만 기본 플랫폼이 기반이 되어 상황에 맞는 임무장비 모듈을 사용할 수 있기 때문에 제한사항을 극복할 수 있다[66].

3) 다목적 무인차량의 현 편제 및 운용 현황

육군은 무인체계 중심의 전력운용 개념을 검증하고 미래전에 대비한 부대 혁신을 위해 00보병사단 00여단을 Army TIGER 전투체계 시범운용부대로 지정하였다. Army TIGER 전투체계 시범여단은 다목적 무인차량을 중대급 이하 제대의 편제에 반영하여 핵심장비로 배치하여 기존 보병부대 편제와는 구별된 실험적인 조직 구조를 갖추게 되었다. 이는 유·무인 복합전투체계의 운영 개념을 전술세대부터 실전적으로 검증하려는 Army TIGER 전투체계의 발전을 위한 육군의 의지가 반영된 결과이다. 다목적 무인차량의 배치는 시범 여단의 직할부대와 각 보병대대를 중심으로 이루어지고 있다. 여단 직할부대에 배치된 다목적 무인차량은 여단 차원의 광역 정찰·감시 및 화력지원 임무를

담당하며 보병대대에 배치된 차량은 대대 작전지역 내 근접 감시정찰, 전투물자 수송, 통신중계 등 전술적 임무를 수행한다. 이러한 배치는 무인체계가 전략적·작전적·전술적 차원에서 통합적으로 운용할 수 있는 기반이 된다. 하지만 본 연구에서는 보안 관계상 세부적인 배치 규모와 수량은 언급하지 않는다[68].

Army TIGER 전투체계 시범여단은 2022년과 2024년 육군 과학화전투훈련단에서 실시된 여단급 전투실험을 통해 다목적 무인차량의 임무수행별 운용 개념과 편제의 적절성에 대해 검증하였다. 여단급 전투실험의 목적은 유·무인 복합 전투체계가 기존 보병부대와 합동임무를 수행할 경우 어떠한 전투효과가 발생하는지를 확인하고 수치적으로 평가하는 것으로 기존 여단급 부대의 전투실험 평균적인 결과와 유·무인 복합전투체계로 증강된 시범부대의 전투실험 결과를 비교 및 분석하였다[7].

Army TIGER 전투체계 시범여단의 여단급 전투실험은 다목적 무인차량의 정찰형 임무장비 모듈과 무인항공기를 연계한 감시정찰 작전, 수송형 임무장비 모듈을 활용한 보급작전, 통신중계형 임무장비 모듈을 통한 네트워크 연결성 강화 등 다목적 무인차량이 수행할 수 있는 전 영역의 임무 분야에 대해서 종합적인 평가가 이루어졌다. 여단급 전투실험 결과 정찰형 임무장비 모듈과 무인항공기를 연계한 감시정찰에서는 표적식별 능력이 현저히 향상되어 기존 편제된 여단급 부대의 평균 표적식별 건수인 11건보다 시범부대는 4.3배 많은 47건을 식별하였다. 또한 GPS 신호가 차단된 환경에서도 IMU 기반 복합 항법장치를 통해 안정적으로 제공된 위치정보로 통신 음영지역에서도 정찰 임무 수행이 가능하였다. 이는 3D 라이다, GPS / IMU 복합 항법장치, 주야간 카메라 등의 첨단 센서가 제공하는 장거리 감시 능력과 실시간 정보전달 체계를 갖춘 시범 부대의 임무수행 능력이 기존 여단급 부대의 임무수행 능력보가 월등히 높았음을 알 수 있다[44].

화력 운용에서는 다목적 무인차량과 유·무인 복합전투체계의 통합 운용이 이루어져 화력 유도의 소요 시간이 절감되면서도 화력 효과는 극대화되었다. 전투실험간 정찰형 임무장비 모듈이 제공하는 실시간 표적정보는 전술데이터 링크를 통해 신속하게 포병 및 정밀 타격자산과 연결되었고 적시적인 화력유도가

가능했다. 그 결과 화력에 의한 표적 제거는 기존 여단급 부대의 평균 165건에서 약 2.1배 증가한 344건을 성공하였다[44].

기동·수송에서도 수송형 임무장비 모듈을 활용하여 다목적 무인차량에 의한 부대 기동성과 보급지원 능력이 제고되었다. 전투실험 결과 기존 일반 여단급 부대와 보병대대급 부대의 평균 기동 속도가 시속 0.5km에 그쳤던 것에 비해 다목적 무인차량과 유·무인 복합전투체계가 도입된 Army TIGER 시범부대의 여단급과 대대급 부대의 기동 속도는 평균 20배가 빠른 시속 11.9km로 나타났다 이러한 결과는 다목적 무인차량이 지니고 있는 전기구동 기반의 6륜 독립구동 방식, 인휠시스템, 에어리스 타이어 등의 구동체계 기술로 험준한 산악 지형과 야지에서의 기동을 안정적으로 장시간 기동할 수 있는 능력을 보장했기 때문이었다.

또한 수송형 임무장비 모듈은 위험지역 통과 시에는 인명손실 위험을 최소화하면서도 신속한 부대 재배치에 기여하였다. 이는 적 화력에 노출된 위험 지역에서의 보급 임무를 유·무인 복합전투체계로 대체하는 것이 임무수행 병력과 장비의 생존성을 확보하면서도 지속지원 능력을 안정적으로 유지하는데 효과 있음이 입증된 것이다[44].

통신중계에서는 통신중계형 임무장비 모듈을 통해 전장 내 정보를 실시간으로 공유하여 지휘통제의 연속성 보장이 가능하였다. 산악지형이나 시가지 등의 통신 음영지역에서 이동형 중계소 역할을 담당하면서 제대 간 전술데이터링크 연결성을 강화하고 Army TIGER 전투체계의 네트워크 구현이 가능하였다.

또한 다목적 무인차량의 통신중계형 임무장비 모듈은 유·무인 복합전투체계로 대표되는 드론과 무인항공기의 네트워크와 지상의 타 유·무인 복합전투체계의 연동이 가능하여 정찰 범위를 확장하고 신속하게 표적정보를 지휘통제소 및 다른 유·무인 복합전투체계에 전달해주어 공중과 지상 통합 네트워크 기반의 입체적인 감시체계 구축에 기여하였다[74].

개별전투원의 운용 측면에서는 다목적 무인차량의 통신중계형 임무장비 모듈이 제공하는 정보지원과 개인 웨어플랫폼 체계가 연동되어 교전 승률과 생존율이 향상되었다. 특히 웨어플랫폼을 장착한 전투원의 경우, 일반 장병에

비해 일대일 전투 승률이 3.7배, 소대급 부대 생존율이 3.9배가 높았는데 이는 정밀조준기, 야간투시경 등 첨단 개인화기와 무인체계가 제공하는 실시간 위협 정보의 시너지 효과였다[44].

이와 같이 Army TIGER 전투체계 시범여단의 전투실험은 다목적 무인차량이 미래 전장환경에서 전술적 유용성과 작전적 실효성을 갖춘 탁월한 장비라는 것을 전투실험의 각 분야별로 도출된 정량적인 실험데이터로 입증할 수 있었다. 다만 Army TIGER 전투체계 시범여단을 운용하는 지금 이시기는 우리 군의 유·무인 복합전투체계가 전력화되기 위한 과도기이다. 따라서 Army TIGER 전투체계 시범여단은 제한되어 있는 여단급 시범부대로서 다목적 무인차량의 전투효과를 확인하고 그에 맞는 전·평시 운용교리를 개발하는 역할을 수행해야 할 것이다.

특히 Army TIGER 전투체계 시범여단의 4차례에 걸친 전투실험 성과와 교훈은 향후 전 육군의 유·무인 복합전투체계 전력화를 위한 기초자료로 활용이 가능하다. 육군은 2040년까지 모든 전투여단을 Army TIGER 전투체계로 전환한다는 장기적인 계획을 수립한 만큼 시범여단의 산물(중대급 이하 제대에서의 다목적 무인차량 운용 개념 정립, 임무장비 모듈화 설계의 실전적 검증, 유·무인 복합전투 수행개념 발전 등)은 다층적 차원에서 우리 군의 임무수행 능력 향상에 크게 기여하게 될 것이다.

제 4장 다목적 무인차량의 플래시 라이다 적용 방안

제 1절 다목적 무인차량 개발 및 운용개념

1) 개발 추진 과정

우리 군의 미래 유·무인 복합전투체계의 성공적인 전력화 여부는 육군에 처음 전력화되는 다목적 무인차량의 성공에 달려있다. 모든 것이 육군의 첫 사례이기 때문에 유·무인 복합전투체계 개발과 구축에 이정표가 될 수밖에 없다. 그런 까닭에 현재 다목적 무인차량 개발은 군은 물론이고 국가적으로도 많은 관심을 받고 있다. 25년 3월 시험평가를 마친 다목적 무인차량은 성공적인 전력화를 위해 전장 환경 인식과 자율 임무 수행이라는 도전적인 기술과의 싸움을 계속 하고 있다. 이러한 맥락에서 현재 적용 중인 회전식 스캐닝 라이다의 한계를 극복하고 플래시 라이다로의 전환 필요성을 검토하기 위해 먼저 다목적 무인차량의 개발과정부터 살펴본다.

다목적 무인차량은 국방과학연구소가 2015년 유·무인 복합전투체계의 핵심기술을 개발하면서 시작되었다. 당시 국방과학연구소는 급격한 저출산과 병력 감축이라는 국방 환경 변화에 대응하기 위해 핵심기술 연구를 시작했고 한반도 특유의 산악지형과 극한, 극서의 특성을 가진 4계절의 작전 환경을 고려하여 단순한 해외 기술 도입이 아닌 한국형 무인차량을 개발하기 위한 개념 정립에 집중하였다. 미군의 소형 로봇부터 러시아의 중무장 전투로봇까지 다양한 해외 사례를 분석하되 우리 군의 실정에 맞는 독자적인 요구사항 도출에 주력하였다.

초기 선행연구 단계에서는 자율주행, 원격통제, 임무장비 통합, 통신 및 보안기술 등 무인차량을 구성하는 핵심 기능들에 대한 기초 연구를 체계적으로 수행하면서 한반도의 복잡한 지형 특성을 고려하여 국토의 70%를 차지하는 산악 지형에서의 장비 운용, 여름철 고온다습 및 폭우, 겨울철 혹한 및 폭설 등의 극한 기후 조건에서도 안정적으로 작동할 수 있는 장비 설계에 중점을

두고 진행했다. 초기 선행연구 단계에서는 미군의 팩봇과 타일론 같은 소형 정찰로봇의 운용 경험, 이라크와 아프가니스탄에서의 실전 데이터, 러시아군의 우란 시리즈와 같은 중형 전투로봇의 화력 운용 개념 등을 종합적으로 분석하면서 우리 군의 독자적인 운용 개념을 정립하고자 노력했다.

이러한 선행연구 단계를 거쳐 2017년부터는 현대로템과 한화에어로스페이스(舊 한화디펜스) 같은 민간의 대규모 방산업체가 참여하는 체계개발 단계로 전환되었다. 체계개발 단계에서는 국방과학연구소가 보유한 자율주행 알고리즘, 센서융합 기술, 무인체계 통제 기술 등의 핵심 원천기술과 민간 업체의 차량 플랫폼 설계 능력, 양산 경험, 품질관리 노하우가 맞물리면서 본격적으로 개발이 진행되었다[48]. 특히 체계개발 단계에서 민간 대규모 방산업체로부터 다목적 무인차량의 범용성 설계가 필요하다는 의견이 접수되어 국방과학연구소와 민간 방산업체는 차륜형과 궤도형 두가지 플랫폼을 동시에 개발하는 전략을 채택한다. 두가지 기본 플랫폼 중 차륜형은 포장도로와 평지에서의 고속 기동에 유리하고, 궤도형은 험준한 산악지형과 연약지반에서의 안정적 기동을 보장할 수 있었다. 또한 공통적으로는 전기구동 시스템을 적용하여 소음과 열 발산을 최소화하여 은밀성을 높이고, 동시에 연료 보급의 부담을 줄여 작전 지속성을 향상시킬 수 있는 장점이 있었다.

2019년에는 6륜구동 방식의 시제품을 만들어서 다양한 임무 수행 능력을 입증하였다. 개발된 시제품은 정찰용 감시 장비, 원격사격통제체계(RCWS), 병력 및 물자 수송용 적재함 등 다양한 임무 모듈을 탑재할 수 있도록 설계되었다. 또한 GPS 기반의 경로점 항법과 같은 초기 단계의 자율주행 기술이 성공적으로 구현하였는데 이는 향후 고도화된 자율주행 시스템으로 발전하기 위한 중요한 기술적 토대가 되었다.

2021년 육군 시험평가단 주관으로 실시한 군 성능평가는 이론과 실전의 간극을 메울 수 있는 소중한 기회였다. GOP와 DMZ 같은 실제 작전지형을 모의할 수 있는 다락대 훈련장과 박승일 전차훈련장에서 군 운용 무인차량의 실전운용 가능성을 종합적으로 확인한 군 운용성 시험은 당시 코로나 19 라는 세계적인 악조건 속에서도 열정적인 시험평가요원과 업체의 적극적인 업무추진으로

기본 주행성능뿐만 아니라 원격통제 능력, 장애물 극복 능력, 자율주행 기술 수준 등을 종합적인 평가가 이루어졌다[66]. 3개월간의 군 성능확인 과정에서 도출된 개선사항⁶⁷⁾들은 후속 개발에 반영되었다. 통신 음영지역에서의 연결 불안정 문제는 다중 통신 경로 확보와 자율복귀 기능 강화로 해결했고 야지 주행 시 승차감 문제는 서스펜션 시스템 개선으로 보완했다. 특히 라이다 센서의 얇은 옹덩이를 극복할 수 없는 장애물로 인식하는 수면 반사 오류와 디지털 무늬가 표시된 차량을 전투원으로 인식하는 객체 인식오류에 대해서는 딥러닝 기반의 인공지능 알고리즘 융합구축으로 대응하였다.

2024년부터 10월부터 2025년 2월까지 진행된 구매시험평가는 실제 임무 수행 환경에서 다목적 무인차량의 군사적 실용성을 다각도로 검증하였다. 구매시험평가를 통해서 다목적 무인차량은 구매시험평가를 통해 혹한기와 혹서기 등의 극한 환경에서 72시간 동안 정비없이 연속 운용이 가능하고 또한 MIL-STD-810 또는 이와 비슷한 수준의 내구성과 IP 00 등급의 방진 방수를 견딜 수 있는 내환경성 능력을 확인하였다. 그리고 다목적 무인차량을 야지 기동시험 이후 다음 주요 구성품들은 성능 저하, 부품 마모가 발생하지 않았고 전자파 적합성 시험을 통해 다목적 무인차량을 운용하는 도중에 다른 전자장비와 간섭이 발생하지 않았다.

이처럼 실전적 운용환경에서 요구되는 신뢰성과 내구성, 상호운용성 등을 검증하는 시험항목을 통해 다목적 무인차량의 기술력을 입증할 수 있었다. 다만 제한된 평가 기간과 특정 훈련장 지형에 국한되어 있는 시험 환경 등은 다목적 무인차량의 성능을 종합적으로 검증하기에는 무리가 있다[7]. 따라서 향후 실시간 데이터 처리 및 인식정확도 향상을 위한 인공지능 기반 센서융합 기술, 그리고 회전식 스캐닝 라이다의 한계를 보완할 수 있는 플래시 라이다 적용 연구가 병행되어야 한다 또한 연속성 있는 사고를 견지하여 양산 이후 진행되는 야전운용시험(FT)⁶⁸⁾과 전력화 평가(IOC)⁶⁹⁾에 반영시킬 필요가 있다.

67) 군 성능시험간 개선 및 보완사항은 11건, 추가 검토사항은 8건이 도출되었고, 25년 구매시험평가 간 모두 해소되었음.

68) 야전운용시험(Field Test, FT)은 최초 배치되는 무기체계가 실제 야전 운용에서 제한사항이 없는지를 조기에 확인하기 위해 실시하는 시험이다. 운용상 문제, 성능 발휘 여부, 정비·지원 요소 등 실무대 사용과 관련된 사항을 종합적으로 점검하여

2) 운용개념

다목적 무인차량의 운용개념은 인간 조작자와의 유기적인 협업을 통한 임무수행 능력 향상을 중점으로 두고 개발되면서 Army TIGER 전투체계 내에서 유·무인 복합전투의 핵심 플랫폼으로 중대급 이하 최일선 부대에서 전투 방식을 혁신하는 변혁의 도구로 활용을 준비하고 있다.

다목적 무인차량의 기본적인 임무는 분·소대급의 근접전투지원이다. 다목적 무인차량은 4명에서 6명으로 구성된 소규모 전투단위인 분·소대급 제대와 함께 다양한 임무를 수행하며, 전투원이 직접 수행하기에는 위험하거나 부담스러운 3D⁷⁰⁾(Dangerous, Dull, Dirty) 임무를 대신한다. 급조폭발물의 위협이 존재하는 위험지역 선두 정찰도 무인차량의 대표적 임무 중 하나다. 다목적 무인차량은 전투원보다 앞서 위험지역을 정찰하여 전장에 대한 환경 정보를 수집하고 임무수행 간 발생할 수 있는 위협을 식별하여 전투원의 피해를 방지한다.

다목적 무인차량은 최대 500kg의 적재 능력을 활용하여 약 40kg에 육박하는 임무수행 장비와 전투원의 군장을 휴대하거나 추가 탄약, 식수, 의료 장비 등을 임무지역으로 수송하여 임무수행하는 장비와 인원들에 대한 체력적 부담을 획기적으로 줄여준다. 다목적 무인차량의 이러한 역할은 전투원의 체력을 보존하여 임무수행에 역량을 집중할 수 있게 해준다. 만약 임무수행 중 부상자가 발생하면 최소 2~4명의 전투원이 후송을 위해 전투에서 이탈이 불가피하여 전투력의 공백을 발생시킬 수 있지만 다목적 무인차량은 추가 병력 없이도 홀로 부상자를 탑승시켜 적의 화력을 피피하면서 비전투지역으로 신속하게 이송할 수 있기 때문에 원격 의료 장비를 활용한 응급처치도 가능하다. 이는 부상자의 생존율을 높이는 동시에 전투 지속 능력을 유지시킨다.

다목적 무인차량의 전장에서의 역할은 운용개념은 위험지역 선두정찰, 전투물자

전력의 완전성을 확보하는 것을 목표로 한다.

69) 전력화평가(Initial Operational Capability, IOC)는 배치된 무기체계가 운용개념과 작전운용성능을 어느 수준까지 충족하는지를 분석·평가하여 전력 발휘의 완전성을 확인하는 절차이다.

70) 3D는 위험하고 지루하고 더러운 임무 즉 Dangerous, Dull, Dirty를 의미한다

및 장비 수송, 부상자 후송 등의 임무를 수행하면서 전투원의 생존성을 보장하고 부대 전투력을 유지하는 것이다. 이러한 다목적 무인차량의 운용개념은 단순히 인간 전투원을 보조하는 작전 도구형의 수준을 넘어서서 위험하고 지루하며 더러운 3D 임무를 능동적으로 대체하는 독립 운용형 또는 팀원 형의 수준을 지향한다. 특히 분·소대급과 같은 최일선 소규모 전투단위에서는 제한된 병력 자원의 효율적 운용과 전투력 보존이 절실하기 때문에 다목적 무인차량의 운용은 더욱 필요하다. 다만 이러한 임무수행의 성공을 위해서는 복잡한 전장 환경에서 다목적 무인차량에 대한 인간 조작자의 최소한의 개입이 이루어지고 평상시의 판단은 유·무인 복합전투체계가 주도적으로 실시할 수 있는 반자율 기술 적용은 필수적이다.

예를 들면 급조폭발물이 산재한 위험지역을 선두정찰을 안전하게 하기 위해서는 신속한 지형 분석과 위협 식별 능력과 험준한 산악지형이나 평지에서 고정 또는 이동 장애물, 폭발물 등을 회피하면서 임무지역까지 최적 경로를 생성하는 능력이 필요하다. 또한 여기에는 우리 군이 맞닥뜨릴 도심지 전투, 지하시설 작전, 전자전 환경 등 점차 복잡하고 불확실성이 높은 환경에서 발생할 수 있는 통신 두절이나 GPS 신호 차단과 같은 상황의 발생도 같이 고려되어야 한다. 그렇기 때문에 다목적 무인차량은 정밀한 환경 인식, 신속한 상황 판단, 자율적인 의사결정이 연속적으로 이어져야 하고 외부 통제에 의존하지 않고 스스로 판단하여 임무를 수행하는 능력을 갖추어야 한다.

국제자동차 기술자협회(SAE)⁷¹⁾가 정의한 ‘NATO STANAG 4586’에는 자율주행의 수준을 5가지 기준으로 분류하고 있다. 현재 다목적 무인차량의 조건부 자율주행기술 수준은 레벨 3 수준의 기술을 구현하고 있다. 레벨 3 수준은 특정 조건에서 차량이 스스로 조향과 속도를 제어하며, 시스템이 요청할 때만 운용자가 개입하는 단계로 다목적 무인차량의 선두 차량을 종속해서 자율주행하는 기능과 경로점을 미리 선정한 후 자율로 이동하는 기능이 구현되는 수준이다. 향후 목표는 고등 자율주행 수준인 레벨 4 수준 달성이다. 레벨

71) 국제자동차기술자협회(SAE, Society of Automotive Engineers)는 1905년 미국 펜실베이니아주에서 설립된 비영리 기술표준화 단체이다. 자동차·항공·방위 분야의 국제 기술표준을 제정하고 연구·인증·교육 활동을 수행한다.

4 수준이 달성되면 복잡한 전장 환경에서 인간 조작자의 개입 없이 차량 스스로 경로를 설정하고 장애물을 회피하며 임무를 수행할 수 있다[145].

예를 들면 갑작스러운 포격이나 도로 유실 같은 예측 불가능한 상황, 통신이 두절된 상황에서도 무인차량이 스스로 안전한 우회로를 찾아 임무를 지속한다. 또한 군집으로 운용시에도 고등 자율주행이 1대의 다목적 무인차량이 5~10대의 다목적 무인차량 또는 타 유·무인 복합전투체계를 동시에 통제해서 정찰 임무 시 다수의 무인차량이 일정 대형 또는 간격을 유지하면서 넓은 임무수행 지역을 동시에 수색하고 수집된 정보를 실시간으로 통합하여 전장 상황을 입체적으로 파악할 수도 있다. 이러한 자율성 향상의 핵심은 정확한 환경 인식 기술에 달려있으며 이는 곧 고성능 라이다의 필요성으로 귀결된다[144].

[표 4-1] NATO STANAG 4586에서 정의하는 무인차량 자율성 수준 [145]

자율성 레벨	감지	처리	행동	주요 특징
1	원격 센서 데이터 수신	데이터 표시	-	운용자가 모든 것을 판단하고 원격조종
2	다중 센서 데이터 통합	객체분류 및 상태 평가	단일 행동 수행	장애물 발견 시 정지 등 단일행동 수행
3	환경모델 생성	단기적 경로계획	제한된 조건하 자율주행	사전에 계획된 경로를 따라 자율주행
4	동작 환경 변화 예측	복합 임무 계획 수립	복잡한 환경에서 자율임무 수행	장애물 회피 및 경로 재설정 등 자율임무 수행
5	인간수준의 상황 이해	전략적 임무재계획	완전 자율 임무 수행	인간의 개입없이 모든 상황에서 임무수행

제 2절 주요 기술 및 라이다 역할

1) 핵심 기술요소

다목적 무인차량의 운용개념을 구현하기 위해서 플랫폼, 자율주행, 통신 네트워크, 임무모듈화라는 네가지 핵심기술을 유기적으로 통합한다. 이들 요소들은 마치 인체의 각 기관처럼 상호보완적 관계를 형성하며 전체 시스템의 성능에 영향을 미친다.

플랫폼 기술은 무인차량의 기본적인 하드웨어로 기동성과 생존성을 결정하는 물리적인 기반이 된다. 다목적 무인차량은 작전 환경에 따라 차륜형 플랫폼과 궤도형 플랫폼으로 선택하여 운용할 수 있게 제작되었다. 특히 6륜 독립구동을 적용하는 차륜형 플랫폼은 도심지나 포장도로가 많은 환경에서 최고 시속 40km와 우수한 연비를 나타내고 궤도형 플랫폼은 험준한 산악지형이나 야지, 연약한 지반에서도 최대 60% 경사도 등판이 가능하다.

공통적으로 기본 골격인 차체는 경량화와 방호력의 균형을 맞추기 위해 탄소 섬유 복합재료와 특수 장갑판을 조합하여 제작되어 소총탄과 파편에 대한 방호력을 제공하면서도 전체 중량은 최소화되어 신속한 기동성능 발휘에 제한을 주지 않도록 만들어졌다. 또한 차량 하부는 지뢰나 급조폭발물(IED)의 폭발시에도 충격을 흡수하고 분산시킬 수 있게 V자형 차체설계를 적용하였으며 MIL-STD-810 규격에서 명시하고 있는 진동, 충격, 고온·저온, 습도 조건과 IP72)에서 명시하고 있는 방진, 방수 조건을 IP 00 시험을 모두 통과하여 극한의 환경 속에서의 내환경성을 입증하였다.

플랫폼의 전기구동 시스템은 각 바퀴에 장착되어 있는 독립적인 인휠모터는 기존 군용 차량들에 비해 소음을 90% 이상 감소시켜 악천후 험준한 지역에서도 은밀한 임무수행 활동을 보장하였고 열화상 장비에 탐지될 수 있는 열 발산을 최소화하는 제자리 회전 기능을 추가하여 협소한 공간에서도 자유로운 방향 전환을 보장하였다. 리튬이온 방식의 배터리는 1회 충전시 8시간 이상 운용이

72) Ingress Protection 침입보호등급의 약자로 국제 표준 IEC 60529 에 따른 방진(0~6등급) 방수(0~9등급) 등급 의미.

가능하도록 제작하여 장기간 임무 수행을 보장하였다. 이와 같이 차륜형과 궤도형 이중 플랫폼으로 설계 및 제작된 다목적 무인차량은 우리 군의 다양한 임무수행 환경과 상황에서도 임무수행 중인 장비와 인원들의 생존성 확보가 가능하다[67].

자율주행 기술은 다목적 무인차량의 두뇌에 해당하는 소프트웨어 핵심 기술로 인식, 판단, 제어의 세가지 단계로 구성된다. 먼저 인식 단계는 라이다, 레이더, 카메라 등의 다양한 환경 인식 센서로 주변 환경에 대한 정보를 수집한다. 인식 단계의 핵심은 두가지 이상의 센서에서 수집되는 환경인식 데이터를 통합하여 신뢰성 높은 환경 인식 지도를 생성하는 것이다. 각 환경 인식의 센서는 기술적 특성에 따라 장점과 단점을 가지고 있어 서로 상호 보완이 필요하다.

예를 들면 카메라는 색상과 질감 정보에 강하지만 악천후에 취약하고 라이다는 정밀한 3D 거리 측정에 강하지만 색상 정보가 없으며, 레이더는 악천후에 강하지만 해상도가 낮다. 이러한 각 센서의 장점과 단점을 상호 보완하여야만 모든 환경에서도 안정적으로 인식 성능을 확보하고 필요한 환경인식 데이터를 수집 및 생성할 수 있다.

이를 위해 센서 퓨전기술은 필수적이다. 센서 퓨전의 방법으로는 칼만 필터 기반 확률적 접근법⁷³⁾이 주로 사용되는데 칼만 필터 기반의 확률적 접근법은 각 센서 측정값에 대한 신뢰도를 계산하고 시간에 따른 변화를 추적하여 노이즈를 제거하고 정확도를 높이는 방법이다. 예를 들자면 라이다를 통해 주변환경 인식을 하면 가시성이 떨어지는 단순 흑백의 3D 포인트 클라우드 데이터 지도를 생성하지만 이를 카메라 영상 이미지와 퓨전하면 라이다의 흑백 3D 포인트 클라우드를 카메라 영상의 컬러를 입혀 가시성 있는 컬러 지도로 주변 환경을 나타낼 수 있는 것이다. 이러한 센서퓨전 방법을 통해서 운용자는 단순한 형상 정보뿐만 아니라 도로 표지판, 신호등, 위장된 적군 등을 정확하게 식별할 수 있게 되어 정확한 환경 정보 획득이 가능하다.

판단 단계는 인식된 환경 정보를 바탕으로 차량의 행동을 결정하는 과정이다.

73) 칼만 필터 기반의 확률적 접근법은 불확실성이 존재하는 동적 시스템의 상태를 확률적으로 추정하는 수학적 방법론으로 예측단계와 갱신단계를 반복하면서 오차를 확률분포로 모델링하고, 최적의 추정치를 산출하는 대표적인 센서퓨전 알고리즘이다.

판단 단계에서는 딥러닝 기반의 인공지능 알고리즘이 핵심 역할을 한다. 흔히 YOLO⁷⁴⁾, SSD⁷⁵⁾ 같은 객체 탐지 알고리즘을 활용하게 되는데 이러한 알고리즘들은 실시간으로 사람, 차량, 건물, 도로 등을 식별하고 선도 차량과 인원을 대상으로 종속주행도 가능하다. 그런 이유로 군 운용적인 측면에서도 중요한 위장된 적군, 매복 지점, 지뢰 설치 의심 지역 등을 집중 탐지하기 위한 다목적 무인차량에 탑재되는 인공지능 알고리즘의 꾸준한 개발이 필요하다.

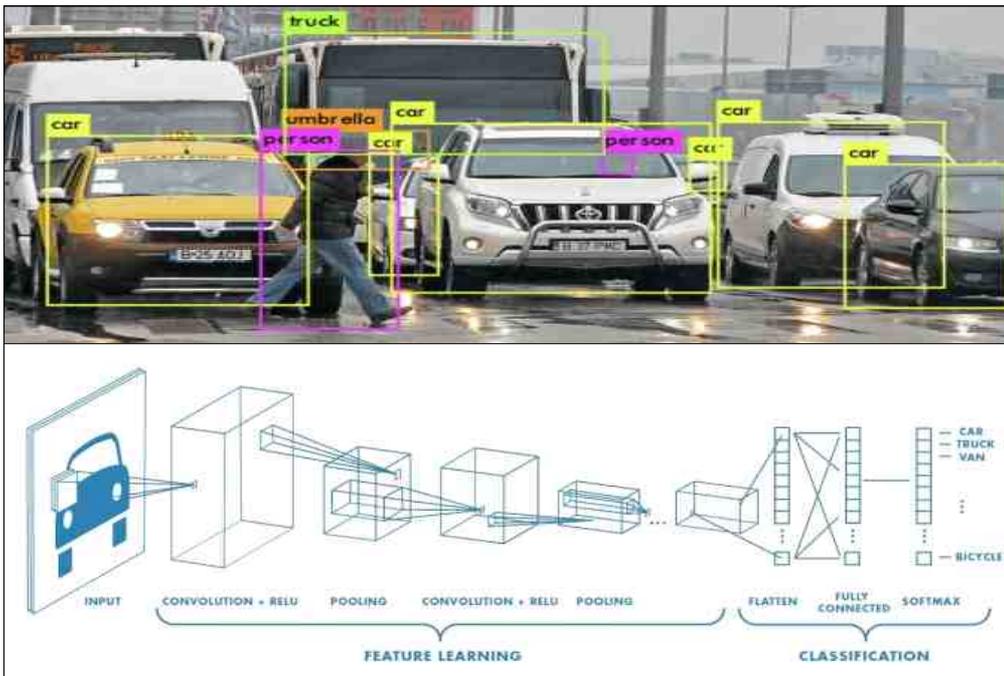
현재 인공지능 알고리즘은 딥러닝 기반과 강화학습을 기반으로 일반적인 자율주행차와는 차별화된 군에 특화된 상황인식 능력을 보유하기 위한 학습과 평가를 위해 군의 지정된 데이터랩⁷⁶⁾에서 수만 시간의 군사용 사진이나 영상 등을 집중 학습하고 있으며 인공지능 알고리즘의 학습용과 평가용 데이터를 제작하여 인공지능 알고리즘의 성능을 향상시키고 있다. 이와 더불어 경로 계획은 웨이포인트 기반 알고리즘을 활용하여 지형의 험준도, 은폐 및 엄폐 가능 지역, 적의 예상 사격 지역 등으로 예측되는 군사적 지형정보를 바탕으로 고정 및 이동 장애물의 위치를 예측하고 최적의 경로계획을 수립하여 충돌을 회피하는 제어기능도 구현해 나가고 있다.



[그림 4-1] 웨이포인트 기반 가상 경로계획 (예) ⁷⁷⁾

- 74) You Only Look Once의 약자로 실시간 객체 탐지를 위해 개발된 딥러닝 기반 알고리즘으로 입력 이미지를 한 번에 처리하여 객체의 위치와 종류를 동시에 예측한다. 네트워크를 한 번만 통과해 결과를 얻는 방식이므로 빠른 속도와 실시간 처리에 강점을 지닌다.
- 75) Single Shot Detector의 약자로 이미지에서 다중 스케일의 특징 맵(feature map)을 활용해 객체를 탐지하는 딥러닝 기반 알고리즘으로 별도의 후보영역 생성 과정 없이 한 번의 연산으로 위치와 클래스를 동시에 예측한다. 정확도와 속도 간의 균형이 우수해 실시간 응용에 자주 사용된다.
- 76) 육군에서 공식적으로 지정한 전문데이터 랩은 없으나 육군 교육사의 판교 데이터랩과 대전 데이터랩이 업체의 군 전용 데이터 학습장소로 주로 쓰이고 있다.

제어 단계는 판단 단계에서 결정된 행동을 실제로 수행하는 과정이다. 다목적 무인차량은 차량 동역학을 고려된 정밀 제어 알고리즘을 통해 사전에 계획되어 있는 경로를 안정되게 이동하거나 사전에 추종하게 되어 있는 선도 차량이나 사람을 인식하고 종속주행을 실시한다. 주행 간에는 이동로에 있는 도로 폭, 도로재질 등의 정보 등을 확인하여 PID 제어⁷⁸⁾나 모델 예측 제어⁷⁹⁾ 등의 기법을 활용하여 조향각과 속도를 제어한다. 특히 야지주행 시에는 노면의 상태에 따라 각 바퀴의 움직임을 개별적으로 조절하는 각 독립된 바퀴 제어 기술이 작동하여 미끄러짐을 방지하고 안정성을 확보한다.



[그림 4-2] 다목적 무인차량의 객체 인식, 판단, 제어 과정 ⁸⁰⁾

77) 본문 내용으로 저자 재구성

78) Proportional-Integral-Derivative 제어의 약자로 PID 제어는 가장 널리 사용되는 제어 방식으로, 오차에 비례(Proportional), 적분(Integral), 미분(Derivative) 항을 조합하여 제어 명령을 생성한다. 현재 오차를 즉각적으로 보정하고, 누적 오차를 제거하며 미래의 변화 추세를 예측함으로써 안정적이고 빠른 응답을 가능하게 한다.

79) Model Predictive Control 모델 예측 제어의 약자로 시스템의 수학적 모델을 기반으로 미래의 상태를 예측하고 일정한 시간 구간 동안의 성능을 최적화하여 현재의 제어 입력을 결정하는 방식이다. 제약조건을 고려한 최적화가 가능해 복잡한 시스템에서도 정밀하고 안정적인 제어가 가능하다는 장점이 있다.

통신 네트워크 기술은 다목적 무인차량과 운용자, 그리고 다른 유·무인 복합전투체계들과 연결하는 신경망 역할을 한다. 다목적 무인차량은 군 전술 정보통신체계(TICN)⁸¹⁾와 상용 5G 이동통신을 융합한 하이브리드 통신 체계를 운용하면서 임무수행 지역에서는 암호화된 TICN을 통해 보안이 요구되는 핵심 임무수행 정보를 교환한다. TICN은 암호화와 주파수 도약 기술을 적용하여 적의 도청과 전파 교란에 대응하고, 비임무수행 지역이나 군사기지 내에서는 상용 5G 네트워크를 활용하여 대용량 데이터를 신속하게 전송하는 역할을 한다.

다목적 무인차량은 예상치 못한 통신두절에 대비한 자율복귀 기능도 통신 네트워크 기술을 통해 구현한다. 다목적 무인차량과 지휘통제소 또는 임무수행 부대의 지휘관은 일정시간 통신이 두절된다면 다목적 무인차량은 통신두절 상황임을 인지하고 사전 지정되어 있는 집결지로 복귀하게 된다. 이때 집결지로 복귀하는 다목적 무인차량은 내부 장착된 관성항법장치(INS)⁸²⁾를 통해 현장에서 인식되는 지형과 사전 학습한 지형과 비교하고 GPS 신호 없이도 위치를 추정하고 경로를 찾아간다[68].

군집 운용 시에는 MANET(Mobile Ad-hoc Network) 기술⁸³⁾로 차량 간 자율적 네트워크를 형성하는데 이때는 각 차량이 라우터 역할을 수행하여 통신 범위를 확장하고 일부 차량의 통신이 두절되어도 다른 차량을 경유하여 네트워크를 유지하기 때문이다[33].

80) 본문 내용으로 저자 재구성

81) TICN(Tactical Information Communication Network)은 육군 전술지휘·통신체계를 디지털 기반으로 고도화하기 위해 구축된 차세대 전술정보통신망으로 전장의 지휘통제·전술데이터·음성·영상 정보를 통합적으로 전송·공유하는 체계이다.

82) 관성항법장치(INS, Inertial Navigation System)는 가속도계와 자이로스코프를 이용해 외부 신호 없이 물체의 위치·속도·자세를 자율적으로 계산하는 항법 시스템으로, 항공기·우주선·무인차량 등에 널리 사용된다.

83) MANET(Mobile Ad-hoc Network)은 중앙 기지국 없이 이동 단말들이 자율적으로 연결되어 형성되는 무선 네트워크 기술이다. 각 노드가 동시에 송·수신기이자 라우터 역할을 수행하여, 동적 환경에서도 실시간 데이터 전송과 네트워크 확장이 가능하다.



[그림 4-3] 다목적 무인차량의 TICN 및 5G 기반 MANET 기술 [78]

임무장비 모듈화 기술은 다목적 무인차량이라는 기본 플랫폼을 기반으로 임무별 특화된 모듈을 장착하여 적시적인 활용을 하는 기술이다. 임무장비 모듈화 기술은 NATO STANAG 4854 범용 차량 아키텍처 표준으로 준수한 표준화된 인터페이스를 구성하고[144] 다목적 무인차량의 기계적인 인터페이스 구조는 표준 마운팅 포인트⁸⁴⁾와 퀵 릴리즈 메커니즘⁸⁵⁾을 적용하여[8] 30분 이내로 원하는 임무장비 모듈로 교체가 가능하다. 또한 전기적인 인터페이스 구조 특성은 전원 공급과 제어 신호가 통합된 단일 커넥터 형식으로 플러그 앤 플레이 방식의 작동이 가능하다.

84) 표준 마운팅 포인트(Standard Mounting Point)는 센서, 카메라, 무장 등의 장비를 차량 또는 플랫폼에 안정적으로 부착하기 위한 규격화된 장착 지점으로, NATO STANAG 또는 MIL-STD 규격에 따라 호환성을 확보한다. 이를 통해 장비 간 교체성 및 유지보수 효율성을 높일 수 있다.

85) 퀵 릴리즈 메커니즘(Quick Release Mechanism)은 장비를 도구 없이 신속하게 탈착 및 부착할 수 있도록 설계된 장착 구조로, 전장 환경에서 장비교체 및 정비시간을 단축시킬 수 있다. 일반적으로 스프링 핀, 레버락 구조를 활용한다.

임무장비 모듈 중 정찰·감시 임무장비 모듈은 주간 EO / IR 카메라, 열화상 카메라, 레이저 거리측정기를 통합해 주간과 야간 전천후 감시가 가능하고 화력지원 임무장비 모듈은 5.56mm 기관총이나 40mm 유탄발사기를 탑재한 원격사격이 가능하다. 또한 수송 임무장비 모듈은 500kg까지 적재 가능한 화물칸과 부상자 수송을 위한 의료 장비를 포함하여 치료가 가능하다. 이 외에도 통신중계 임무장비 모듈, 지뢰탐지 임무장비 모듈, 화학탐지 임무장비 모듈, 전자전 임무장비 모듈 등 특수한 상황에 적시적으로 대처할 수 있는 임무장비 모듈도 연구 및 개발되었다.



[그림 4-4] 다목적 무인차량의 기본 플랫폼과 개발된 임무장비 모듈 [82]

[표 4-2] 다목적 무인차량의 주요 기술 ⁸⁶⁾

기술 요소	세부 내용	주요 기능 및 역할
플랫폼	차륜형 / 궤도형, 인휠모터 MIL-STD-810H 충족	· 작전 환경별 기동성 / 생존성 최적화 · 저소음 / 저발열, 방호력 강화
자율주행	센서 퓨전(라이다, 카메라, 레이더), 인공지능(딥러닝 알고리즘) 기반 경로계획	· 3D 환경인식, 객체 탐지 및 분류 · 최적 행동결정 및 정밀 제어 기능
통신 네트워크	TICN / 5G 융합, MANET, 자율복귀	· 보안성과 효율성이 최적화된 하이브리드 방식의 통신 · 군집 운용 가능
임무 모듈화	플러그 앤 플러그 방식의 교체 NATO 범용 차량 아키텍처 적용	· 표준 인터페이스 기반 신속한 임무전환 가능

86) 본문 내용으로 저자 재구성

2) 라이다의 핵심 역할

다목적 무인차량의 4가지 핵심 기술요소들이 제 기능을 발휘하기 위해서는 정확한 환경인식이 필요하다. 다목적 무인차량의 라이다는 레이저 펄스를 활용하여 주변 환경을 극도로 정밀한 3차원 포인트 클라우드 데이터로 변환시키는 자율주행과 임무수행의 성패를 좌우한다. 따라서 다목적 무인차량에서 활용되는 라이다는 무기체계의 신뢰성을 검증하는 시험평가 과정에서 라이다의 성능 검증은 정밀하고 구체적으로 이루어져야 한다.

다목적 무인차량에서 라이다는 네가지의 중요한 역할을 수행한다. 라이다의 첫번째 역할은 정밀한 3D 환경 인식이다. 라이다는 905nm 또는 1550nm 파장대의 레이저 펄스를 초당 수십만에서 수백만개를 발산하면서 각 레이저 펄스가 물체에 반사되어 돌아오는 시간을 측정하고 소요되는 시간을 계산한다. 이후 센티미터 단위 오차의 정밀도로 거리를 계산하고 3D 포인트 클라우드를 생성하여 이를 바탕으로 환경 인식 지도를 만든다. 이때 라이다는 주어진 임무 수행에 활용이 가능하도록 주간과 야간의 구분 없이, 카메라를 무력화할 수 있는 역광이나 안개, 먼지, 연막 같은 악조건에서도 경계, 노면 상태, 주변 지형의 높낮이, 초목의 밀도 등을 정밀하게 분석한 3D 지도를 만들어 지휘관 또는 임무수행 요원들에게 올바른 의사결정 자료를 제공한다.

라이다의 두번째 역할은 다목적 무인차량의 종속주행과 군집주행 구현을 위한 환경인식 정보 제공이다. 다목적 무인차량은 주행 방식에 따라 경로기반 주행, 종속주행, 원격주행이 가능한데 이중 다목적 무인차량의 종속주행 기능은 단일 운용자가 복수의 무인차량을 효율적으로 통제할 수 있게 하여 운용 인력을 절감하고 보급 수송 임무 및 임무수행 지원 작전에서 전투 효율성을 제고한다. 라이다는 종속주행 모드에서 라이다는 선행하는 종속대상물(차량 또는 인원)을 실시간으로 3차원 스캔하여 종속대상물의 위치, 속도, 이동 방향 등의 기하학적 특성이 담긴 포인트 클라우드 데이터를 생성하고 다목적 무인차량 인공지능 기반 추적 알고리즘에 정보를 제공한다. 라이다를 통해서 정보를 제공받은 다목적 무인차량 내부에 탑재된 인공지능 기반 추적 알고리즘은 이를 분석하여 추적을 시작하며 이후 라이다에서 지속적으로 수집되는 종속대상물의 정보를 통해서

종속대상물(차량 또는 인원)의 형상을 연속 인식하면서 종속대상물의 정보를 바탕으로 종속 안전거리를 유지하며 이동하게 된다. 특히 종속주행에서의 라이다 역할은 특히 이동하는 객체에 대한 우발 상황 대응 측면에서도 중요하다. 앞서가던 종속대상물(차량 또는 사람)이 급제동하거나 장애물 회피를 위한 긴급 기동간에 종속주행 중인 다목적 무인차량은 라이다를 통해 앞의 종속 대상 객체물의 움직임 변화를 즉각 감지하게 되면서 다목적 무인차량의 인공지능 기반 제어시스템은 동일하게 유지되던 종속주행의 성격을 변화시켜 연쇄 충돌을 예방하고 대열의 안정성을 유지할 수 있기 때문이다.

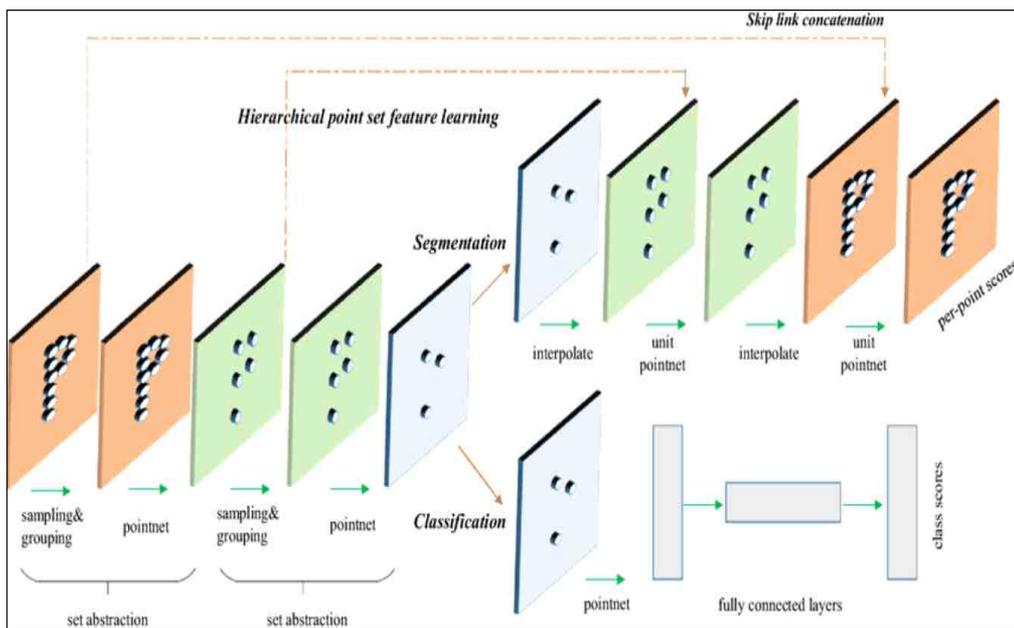


[그림 4-5] 임무수행 인원을 종속주행하는 다목적 무인차량 [58]

라이다의 세번째 역할은 다목적 무인차량 소프트웨어에 탑재된 인공지능 기반 알고리즘과 결합하여 임무수행을 위해 중요한 핵심 표적을 탐지·식별하고 이를 학습 및 평가용 데이터로 제공하는 것이다. 라이다는 단순한 거리 측정이나 장애물 감지 등의 협소한 역할에 국한되지 않고 전장에 위치해 있는 인원, 차량, 시설물 등의 다양한 객체들을 3차원 포인트 클라우드로 변환하여 주요 형상 정보를 인공지능 모델에 입력하게 된다. 이때 다목적 무인차량에 탑재된 인공지능 기반의 알고리즘은 라이다가 보내준 정보를 학습과 평가에 필요한 형태 및

운동학적인 정보로 파악하고 스스로 평가할 수 있는 능력을 향상시킬 수 있도록 훈련하게 된다.

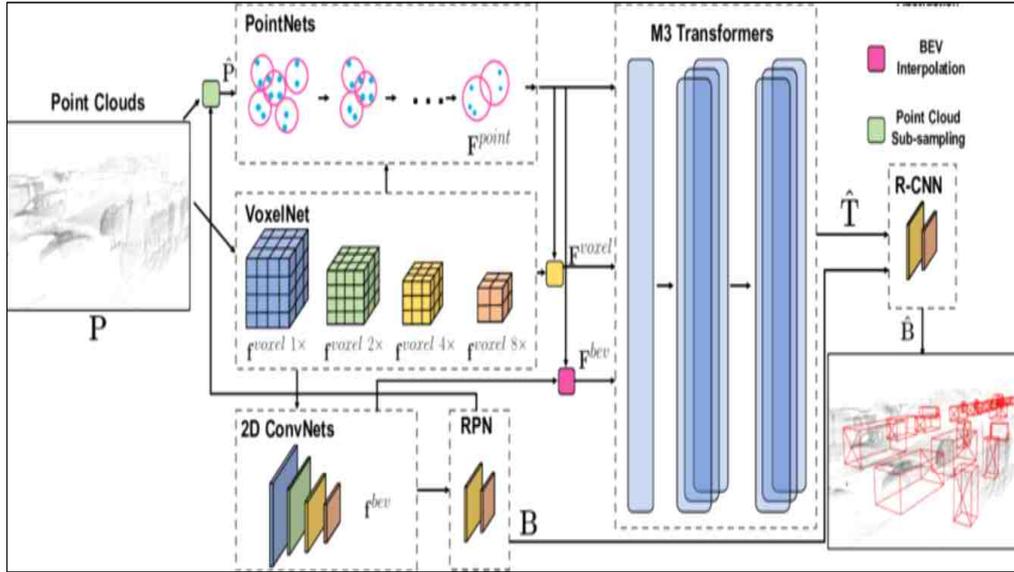
PointNet⁸⁷⁾, VoxelNet⁸⁸⁾ 등과 같은 최신 인공지능 알고리즘은 라이다로부터 제공을 받은 정보를 실시간으로 처리하여 객체의 특성을 세밀하게 분류하고 식별 정확도를 높인다. 이러한 표적 인식 과정으로 다목적 무인차량 자율적인 판단 능력을 강화할 수 있고 정찰 감시와 표적 결심 등의 임무 수행의 신뢰성을 높인다. 이러한 라이다 정보는 열 화상, 음향, 레이더 등과 같은 다른 환경 인식 센서와 융합도 가능하다. 예를 들어, 라이다가 숲속에서 차량 형태를 탐지하고 동시에 열화상 센서가 엔진 열원을 포착하면 인공지능은 해당 표적은 은폐된 적 장비로 판별할 수 있지만 형태는 존재하지만 열 신호가 없을 경우 폐기 차량이나 기만 표적으로 재분류하는 것이다.



[그림 4-6] PointNet을 활용한 객체 분류(탐지 / 식별) [110]

87) 2017년 스탠퍼드 대학이 발표한 모델로 3차원 포인트 클라우드(Point Cloud) 데이터를 직접 입력받아 객체를 인식·분류하거나 세분화(segmentation)할 수 있도록 설계된 신경망 일반적인 CNN이 격자(grid) 형태의 데이터를 다루는 반면, PointNet은 순서가 없는 점들의 집합을 효과적으로 처리한다.

88) 2018년 발표된 3D 객체 인식 모델로 포인트 클라우드를 복셀(voxel, 3차원 격자) 단위로 변환하여 CNN을 적용할 수 있게 만든 구조로 PointNet과 달리 공간 구조를 보존하면서 3D 공간패턴을 학습한다.



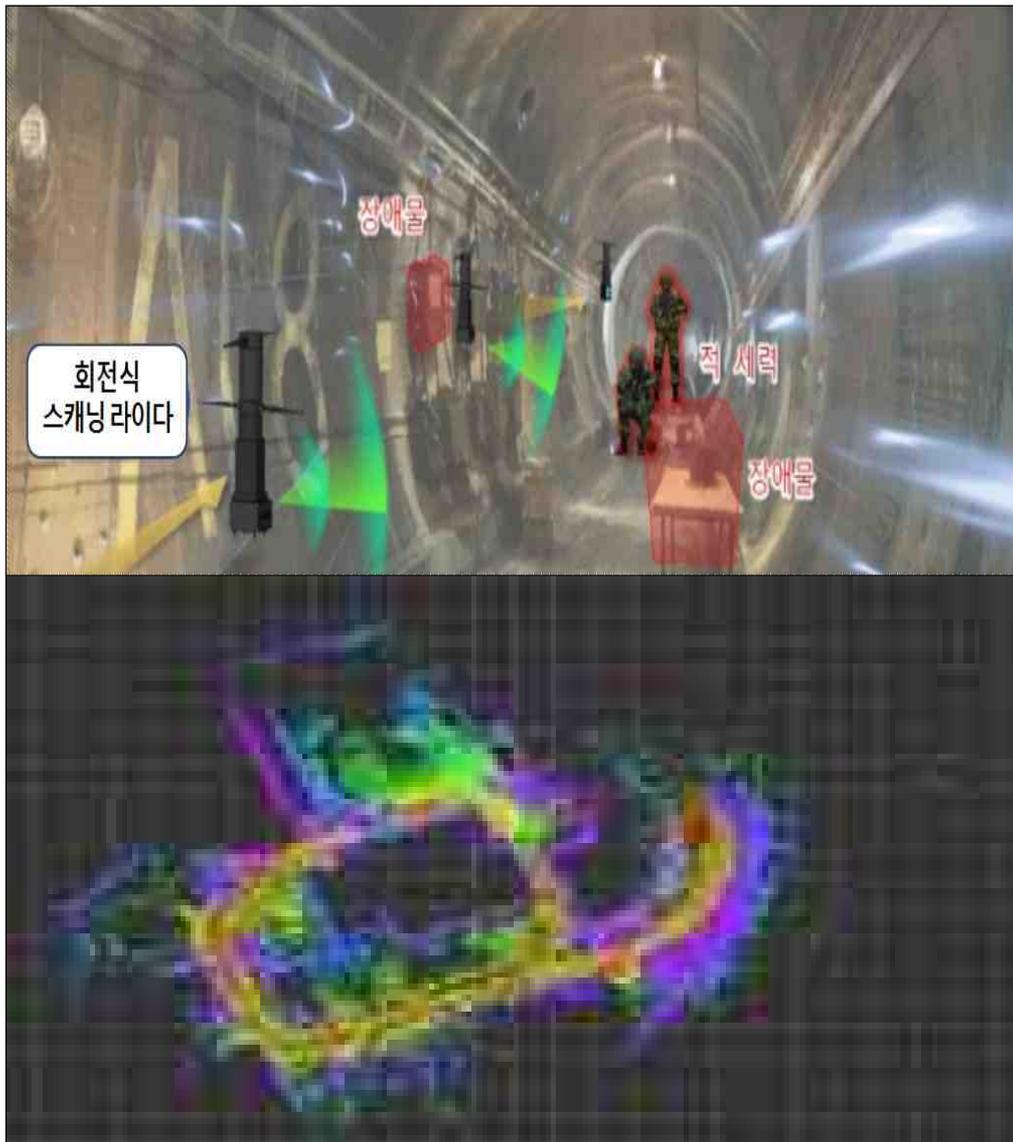
[그림 4-7] VoxelNet을 활용한 객체 분류(탐지 / 식별) [133]

라이다의 네번째 역할은 GPS가 거부되는 환경에서 SLAM 기술을 활용하여 자율항법 기능 지원이다. 현대전에서는 적의 전자공격 능력의 강화로 GPS 교란은 전장의 상시적 위협이 되었으며 러시아-우크라이나 전쟁 사례에서도 지하시설, 터널, 복합건물 내부와 같은 밀폐 공간은 GPS 신호가 차단되기 쉽지만 임무수행 간 적극적으로 활용할 수밖에 없는 필수적인 공간이 되었다. 이러한 상황에서 다목적 무인차량은 라이다를 활용한 SLAM⁸⁹⁾ 기술로 외부 위성항법의 의존 없이도 자체적으로 위치를 추정하고 동시에 주변 환경의 3차원 지도를 신속하게 생성한다.

SLAM 과정에서 라이다는 주행 중 획득한 연속 스캔 데이터를 정합하여 이동거리와 회전 각도를 계산하고 이를 토대로 차량의 정확한 상대 위치와 이동 궤적을 산출한다. 라이다는 GPS가 차단된 환경에서도 자율적 임무수행 중인 다목적 무인차량의 위치를 추정하면서 주변 환경을 3D 지도로 정밀하게 제작한다. 이렇게 생성된 3차원 정밀지도는 지휘통제소의 C4I 체계로 실시간으로 다른 임무수행 제대에도 공유된다. 예를 들면 도시지역이나 밀폐공간에서 임무

89) SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)은 이동체가 외부 위치정보 없이 주행하면서 자기 위치를 추정(Localization)하고 동시에 주변 환경의 지도를 생성(Mapping)하는 기술을 말한다. 주로 라이다, 카메라, 레이더 등의 센서를 활용하여 자율주행 및 로봇 항법의 핵심 기반으로 사용된다.

수행 중인 다목적 무인차량이 라이다를 활용해서 SLAM을 진행하여 건물 내부 구조, 출입구, 장애물 위치 등을 정밀하게 탐지 및 정밀지도를 제작하면서 다른 제대에 정보를 공유하는 것으로 이를 통해 다른 임무수행 부대의 수색정찰, 폭발물 탐지, 기동 등에도 생존성을 보장하면서 임무수행 성공률을 높여는데 기여하는 것이다.



[그림 4-8] GPS가 단절된 지하터널의 정밀지도 제작⁹⁰⁾

90) 본문 내용으로 저자 재구성

제 3절 플래시 라이더 적용 방안

1) 단기(~2027년) : 시범부대 운용을 통한 점진적 도입 및 검증

현재 다목적 무인차량에 적용한 기존 회전식 스캐닝 라이더의 한계를 극복하기 위해서 플래시 라이더를 도입하는 것은 신중하고 체계적인 접근이 필요하다. 단기적으로는 기존 회전식 스캐닝 라이더를 즉시 대체보다는 병행 운용을 하면서 실증적 검증에 집중해야 한다. 검증되지 않은 플래시 라이더의 성급한 도입과 교체는 자칫 부작용을 일으켜 다목적 무인차량의 전력 공백의 문제를 야기하고 임무수행 능력을 저하될 수 있기 때문이다. 따라서 부작용을 최소화하면서도 플래시 라이더의 장점을 실전 환경에서 확인할 수 있도록 전투실험을 통한 개발업체와의 실시간 정보 공유를 바탕으로 신속하게 개선하는 프로세스도 같이 구축하고 내실있는 검증이 필요하다.

전투실험은 경직성이 있는 시험평가와는 다르게 실제 부대의 임무수행 환경에서 유연하게 수행될 수 있다. 선정된 시범 운용 부대에 전력화된 다목적 무인차량 중 일부 차량에 플래시 라이더를 장착하고 기존 회전식 스캐닝 라이더가 장착된 다목적 무인차량과 함께 동일한 임무를 수행하면서 실질적인 성능과 효과를 비교한다. 전체적으로 운용되는 다목적 무인차량 중 적절한 비율의 차량에 플래시 라이더를 장착하여 병행 운용한다면 실제 임무수행 시나리오를 기반으로 한 다양한 임무 상황에서 두 시스템의 차이를 확인할 수 있게 된다.

전투실험의 핵심은 실전과 유사한 환경에서 플래시 라이더의 실용성과 효과를 확인하는 것으로 정찰, 경계, 수송, 표적 탐지 등 실제 부대가 수행하는 다양한 임무 시나리오를 기반으로 실험을 설계한 후 각 임무별로 플래시 라이더를 장착한 다목적 무인차량과 기존 회전식 스캐닝 라이더가 장착된 다목적 무인차량의 성능을 비교한다. 복잡한 기술 사양보다는 실제로 임무 수행에 도움이 되는가에 중점을 두고 주간과 야간, 맑은 날씨와 악천후, 평지와 험지 등의 다양한 조건에서의 유사한 실험을 반복하면서 임무 완수 시간, 목표 달성률, 안전성, 운용 효율성 등 실질적인 작전 효과 지표를 중심으로 평가를 진행해 플래시 라이더의 강점과 약점을 파악하는 것이다.

특히 기존 회전식 스캐닝 라이다가 취약했던 환경(야간, 안개, 먼지 등)에서 플래시 라이다가 실제로 얼마만큼의 성능 우위를 보이는지 그 차이가 임무 수행의 결과에 얼마나 기여하는지 확인한다. 그러면 어떤 상황에서 플래시 라이다가 유리하고 어떤 상황에서 기존 회전식 스캐닝 라이다가 효과적인지 등의 운용 특성을 파악할 수 있게 될 것이다. 한편 전투실험은 운용자 관점의 평가가 핵심임을 간과하지 말고 실제로 라이다와 다목적 무인차량을 사용하는 운용자들의 의견(데이터의 가독성과 직관성, 시스템의 반응 속도, 사용 편의성, 임무 수행 시 느끼는 신뢰도 등 운용자 경험 등)과 피드백을 체계적으로 수집하여 상세히 기록한다. 이러한 과정으로 운용자들은 어느 라이다 센서를 사용하였을 때 편의성이 향상되었는가, 어떤 상황에서 어느 라이다 센서를 선호하는가, 실제 임무에서 체감하는 성능 차이는 무엇인가 등의 질문에 대한 답변을 도출하면서 기술 사양으로는 드러나지 않는 실용적 가치를 평가할 수 있게 된다.

전투실험 기간 동안 축적되는 결과 데이터는 향후 의사결정의 중요한 근거가 될 것이므로 다목적 무인차량의 임무 수행 결과, 센서 데이터, 운용자 로그 등을 체계적으로 수집하고 저장한다. 또한 결과 데이터를 분석하여 플래시 라이다와 기존 회전식 스캐닝 라이다의 성능을 정량적으로 비교하고 통계적으로 유의미한 차이가 있는지도 확인한다. 단순히 개별 사례가 아닌 충분한 양의 데이터를 기반으로 객관적인 결론을 도출할 수 있도록 한다. 비용 대 효과 측면의 검토도 실시한다. 플래시 라이다의 도입 및 운용에 소요되는 추가 비용이 성능 향상으로 인한 효과를 정당화 할 수 있는지도 평가한다. 임무성공률 향상, 작전 시간 단축, 안전성 증대 등의 효과를 비용으로 환산하여 투자 가치를 판단한다. 이는 향후 전면 도입 시 소요될 예산을 산정하고, 예산 확보를 위한 근거 자료가 된다.

또한 전투실험 과정에서 발견되는 문제점과 개선사항은 즉각적으로 반영한다. 경직성이 있는 시험평가와 달리 전투실험은 유연한 접근이 가능하다. 따라서 실험 중 발견된 문제점을 제조사와 협의하여 신속히 개선하고 다시 실험할 수 있다. 그러므로 전투실험은 소프트웨어 업데이트, 설정 변경, 운용 방법 개선 등을 통해 시스템을 지속적으로 최적화할 수 있다.

이러한 전투실험은 운용자 및 정비인력에 대한 교육도 전투실험과 병행해서 실시되어야 한다. 그래야 플래시 라이다의 작동 원리, 특성, 장점과 단점을 명확하게 이해하고 효과적으로 활용하는 방법을 현장에서 실습을 통해 습득하고 운용자들은 두 라이다 센서에 대한 차이를 체득하고 상황에 따라 적절히 활용하는 능력을 획득할 수 있기 때문이다

더욱이 정비 인력은 기본적인 점검과 간단한 문제 해결 방법을 익히며 필요한 정비 지원 수준을 파악할 수 있게 된다. 전술 및 운용기법 개발도 전투 실험의 중요한 산물이다. 플래시 라이다의 특성을 최대한 활용하는 운용 방법, 기존 회전식 스캐닝 라이다와의 상호보완적 활용 방안, 임무 유형별 최적 센서 선택 기준 등을 실험을 통해 도출한다. 현장에서 발견된 우수 사례와 교훈을 정리하여 초기 형태의 운용 지침을 작성하고 이를 부대와 공유한다. 이러한 현장 중심의 개발 활동들은 향후 다목적 무인차량을 운용하는데 필요한 운용 교범이나 기술교범을 작성하는데 중요한 기초자료로 쓰이게 된다.

전투실험 종료 후에는 종합적인 결과 분석과 평가를 실시한다. 전투실험 간 수집되었던 데이터, 운용자 피드백, 관찰 결과 등을 종합하면서 플래시 라이다의 실전 적합성을 판단한다. 플래시 라이다가 기존 회전식 스캐닝 라이다의 성능 대비 명확하게 제공하는 장점이 무엇인가 추가 비용을 정당화할 만한 효과가 있는가 전면 도입 간 예상되는 문제점은 무엇인가 등의 예상 질문을 만들어 놓고 그에 맞는 답안을 도출할 수 있게 한다. 만약 전투실험의 결과가 긍정적이라면 플래시 라이다 전투실험에 참여한 시범부대를 시작으로 다른 부대로 점진적으로 전격화 확대를 추진한다.

이러한 확대 과정을 통해 다양한 부대 특성과 작전 환경에서의 적용 가능성을 검증하고 전면 전격화를 위한 준비를 갖춘다면 전투실험을 통해 검증된 실전 효과와 축적된 운용 경험은 중·장기적인 전면 도입 결정의 핵심 근거가 될 것이고 전환의 기반을 성공적으로 마련할 수 있을 것이다.

[표 4-3] 단기(~2027년) 전투실험 단계별 세부 실행 계획 ⁹¹⁾

단 계	추진 내용	세부 활동
1단계	전투실험 계획 수립 및 준비	<ul style="list-style-type: none"> · 실험 목표 및 범위 설정 · 시범 부대 선정 및 협의 · 임무별 실험 시나리오 설계 · 환경별 실험 조건 설정 · 데이터 수집 계획 및 양식 개발 · 평가 기준 및 절차 수립
2단계	장비 준비기 및 기초교육	<ul style="list-style-type: none"> · 플래시 라이다 장착 및 시스템 통합 · 운전자 기초 교육(이론 / 실습) · 정비 인력 기초교육 · 실험절차 사전 숙지 및 점검
3단계	다양한 조건에서 반복 실험 수행	<ul style="list-style-type: none"> · 임무별 성능 비교실험(임무장비 모듈별) · 환경별 성능 비교 실험(주·야간, 악천후, 평지, 험지) · 동일임무 반복수행을 통한 신뢰성 확보 · 운전자 의견 실시간 수렴 · 전투실험 교훈 기록
4단계	수집 데이터 종합 분석 및 평가	<ul style="list-style-type: none"> · 정략적 성능데이터 통계 분석 · 실전 적합성 평가
5단계	운용기법 및 전술정립	<ul style="list-style-type: none"> · 플래시 라이다 최적 활용기술 개발 · 환경별 운용지침 / 초기 운용지침 수립
6단계	전투실험 결과 종합 평가 및 확대 적용 계획 수립	<ul style="list-style-type: none"> · 전투실험 결과 종합분석 · 플래시 라이다 효과 최종 분석 · 플래시 라이다와 회전식 스캐닝 라이다 결과 비교분석(비용 대비 효과도 포함) · 플래시 라이다 전면도입 시 예상 문제점 · 중장기 도입 계획 수립
7단계	확대 적용 및 지속개선	<ul style="list-style-type: none"> · 유사 임무 수행 부대로 점진적 확대 · 각 단계별 모니터링 및 운전자 의견 수집하여 다양한 작전환경에서 적용가능성 검증

91) 본문 내용으로 저자 재구성

2) 중기(2027년~2035년) : 부대 임무별 확대 적용

단기적인 전투실험을 통해 플래시 라이다의 실전 효과와 운용 적합성을 검증하였다면 중기 단계에서는 플래시 라이다의 적용 범위를 임무별로 판단하여 점진적으로 확대한다. 중기 단계의 핵심은 모든 다목적 무인차량을 플래시 라이다로 일괄 전환하는 것이 아니라, 플래시 라이다의 장점이 가장 잘 발휘될 수 있는 특정 임무분야부터 선택적으로 적용하여 성공 사례를 만드는 것이다.

우선 적용 대상은 다목적 무인차량의 눈 역할인 라이다의 성능과 은밀성이 핵심이 되는 정찰 및 감시의 임무분야부터 적용한다. 이때 첨단 센서 기술의 특성을 반영한 작전운용성능 재정립도 같이 실시한다. 현재 우리가 마주하고 있는 대부분의 유·무인 복합전투체계의 작전운용성능은 회전식 스캐닝 라이다나 카메라 등의 기존 탐지체계를 바탕으로 설정되어 있다. 이는 레이저 펄스로 전체 시야각 내의 3차원 공간 정보를 일시에 획득하는 플래시 라이다의 고유한 기술적 우수성과 잠재력을 온전하게 반영하기 어렵다. 새로운 기술을 '기존 기술에 적합하게 맞추어진 평가의 틀'에 억지로 맞추었다면 새로운 기술의 핵심 내용과 도입하려는 목적을 훼손하고 그 효용성을 떨치는데 방해가 된다. 따라서 기존 정량적 지표를 그대로 적용하는 것보다 플래시 라이다의 기술도 포함할 수 있는 포괄적인 성능 지표를 작전운용성능으로 제시하여야 한다.

첫째 지표는 저피탐 및 생존성 지표이다. 이 지표는 라이다가 발산하는 레이저 펄스에 대해서 적에게 탐지될 가능성을 최소화하고 적의 전파 방해가 이루어지는 환경에서도 얼마만큼 운용할 수 있는지를 정량화 해준다.

두번째 지표는 인공지능 기반 알고리즘에 의한 데이터 처리 지표이다. 다목적 무인차량 또는 유·무인 복합전투체계를 통제하는 인공지능 기반 알고리즘이 라이다로부터 수집된 대용량 포인트 클라우드 데이터를 얼마나 신속하게 처리하고 자체 학습을 통해 객체의 성질을 자동 분류하는 정확도를 측정하는 지표이다.

세번째 지표는 항법 지속성 지표이다. 위성항법시스템(GPS) 거부 환경에서 관성측정장치(IMU) 및 라이다-SLAM 기술을 활용하여 누적위치의 오차를

최소화하며 항법 성능을 유지하는 능력을 평가하는 지표이다. 이러한 라이다에 관한 작전운용성능의 재설정은 국내 방위산업 전반에 대한 기술 개발 방향성을 제시하는 이정표가 될 것이고 궁극적으로 우리 군이 미래에 요구하는 능력을 충족할 수 있는 미래 무기체계를 확보하도록 유도해 주는 나침반 역할을 할 것이다.

기존 회전식 스캐닝 라이다는 전방위 360도를 지속적으로 스캔하며 레이저 펄스를 발산하기 때문에 적 탐지 장비에 노출될 위험이 크다. 하지만 플래시 라이다는 특정 방향으로 필요한 순간에만 극히 짧게 레이저 펄스를 발산하므로 피탐 확률은 현저히 적다. 또한 레이저 펄스를 발산할 때 이동하는 부품이 없어 플래시 라이다의 작동 소음이 발생하지 않고 소형화 및 경량화의 이점을 살려 내부 장착이 가능하여 물리적 피격 가능성도 최소화할 수 있다.

플래시 라이다의 최대 120도로 제한된 감시영역의 범위를 극복하기 위해 2~3대 이상의 플래시 라이다를 조합(전방 감시용 플래시 라이다, 주변 경계용 플래시 라이다 등) 하여 전방위 360도 환경인식을 가능하게 한다.

중기 단계에서는 실제 임무수행 부대로 플래시 라이다의 전력화 확대를 추진한다. 전력화 대상 부대들은 플래시 라이다의 전력화를 확대할 때 최초 단계부터 전투실험에 참여했던 시범부대를 포함하여 정찰 임무수행 부대들을 구성하고 각 부대의 임무 특성과 환경에 맞춰 플래시 라이다 구성을 최적화하고 그 과정에서 발견되는 문제점을 지속적으로 개선해 나간다. 또한 부대별 운용 경험과 우수 사례를 수집하여 표준 운용 절차를 발전시키고 다목적 무인차량 전력화와 연계하여 다양한 임무수행 시나리오안에서의 적합도 등을 검증한다.

이러한 검증 활동으로 적진 후방 침투 정찰, 주요 시설 감시, 이동 표적 추적, 전투피해 평가 등 다양한 임무에서 플래시 라이다의 활용도를 확인하면서 야간 작전, 악천후 작전, 복잡한 지형에서의 작전 등의 조건에서의 플래시 라이다가 장착된 다목적 무인차량의 운용 범위와 기술적 한계를 명확히 파악할 수 있게 된다.

한편 중기 단계의 중요한 과제로 임무장비 모듈과 플래시 라이다의 통합도

필요하다. 다목적 무인차량의 정찰·감시장비 임무장비 모듈은 광학 및 적외선 카메라와 플래시 라이다의 환경 인식 데이터를 융합하여 표적의 식별에 대한 정확도를 향상시킨다. 또한 화력지원 임무장비 모듈의 사격통제시스템과 연동하여 표적 좌표를 자동으로 계산하여 표적 대상물을 조준하며 통신중계 임무장비 모듈과 연계하여 수집된 정보를 실시간으로 상급 및 인접부대에 전송 가능하도록 통합한다. 이러한 임무 장비별 특성에 맞는 최적화된 통합이 이루어지면 플래시 라이다는 다목적 무인차량의 단순한 환경인식 센서가 아닌 임무수행을 위한 핵심 구성요소로 변화하게 된다.

국내 생산체계 확대 및 양산 안정화도 중기 단계의 중요한 과제다. 업체들은 초기 단계에서의 전투실험으로 확인된 사실을 바탕으로 군의 요구사항에 맞는 최적화된 제품을 양산할 수 있도록 생산 라인을 확대하고 품질관리 체계가 강화되어야 한다. 특히 군 운용 제품은 민수용보다 높은 내구성과 신뢰성이 요구되므로 국방 규격에 맞는 환경시험과 내구성 시험을 거쳐 품질을 보장해야 한다.

한편 안정적인 부품 공급망 구축도 중요하다. 국내에서 부품 조달은 기본적으로 국산화를 유지하되 국내 제작이 어려운 일부 특수부품이 있을 경우 해외의 복수 공급선을 확보하여 공급 차질에 대비하여야 한다. 이와 관련하여 반도체, 광학, 정밀기계 분야의 국내 중견 및 중소기업체들과 협력 네트워크를 구축하여 전시 및 비상 상황에서도 안정적으로 생산이 가능하도록 해야 한다. 다행히 플래시 라이다는 회전식 스캐닝 라이다와 달리 국내 기술 자립도가 높은 편으로 국내 업체들은 이미 플래시 라이다의 핵심 부품들의 자체 생산이 가능할 정도로 기술력을 상당히 확보하고 있다.

또한 자체적으로 컨소시엄을 구성해서 소형 무인기나 로봇 등 민수 분야의 상용화를 위한 활발한 활동을 펼치고 있다. 이 같은 활동은 군 운용을 위한 견고한 기반이 될 뿐더러 소량의 시범적인 생산에서 대량의 양산 체제로의 전환을 위한 중요한 역량이 될 것이며 전시 또는 긴급상황에서 활용되는 다목적 무인차량의 성능적인 부분에서 빛어질 수 있는 전력 공백을 최소화 시킨다.

정부 차원의 지원도 필요하다. 군수품 인증 절차 간소화, 양산 초기 물량

보장, 연구개발 세제 혜택 등을 통해 국내 업체들이 적극적으로 투자하고 생산 능력을 확대할 수 있도록 지원해야 한다. 특히 자금력이 약한 중소기업, 벤처업체 등이 방산 시장에 안정적으로 진입하고 성장할 수 있는 환경을 조성하는 것도 중요하다.

표준화 작업도 중기 단계에서 추진해야 할 중요한 과제다. 플래시 라이더의 데이터 형식, 통신 프로토콜, 물리적 인터페이스 등을 국방규격으로 제정하여 NATO 기준에 맞는 상호운용성을 확보하고 이를 통해 다양한 제조사의 제품을 혼용한다면 향후 기술 발전에 따른 업그레이드도 용이할 것이다. 이러한 플래시 라이더의 개발 초기단계부터 표준화 및 상호운용성 확보가 최우선적으로 이루어져야 한다.

미래 유·무인 복합전투체계의 성공은 각기 다른 유·무인 복합전투체계들과 정보를 얼마나 많이 공유하고 협력하느냐에 달려있다. 만약 다목적 무인차량, K-2 전차, 소형 드론 등에 탑재된 라이더의 데이터 규격이 제각각이라면 시스템 통합에 막대한 비용과 시간이 소요되고 결국 비효율적인 무기체계로 전락하여 활용성이 떨어질 것이다. 이를 방지하기 위해 플래시 라이더의 하드웨어 인터페이스(장착 규격, 커넥터 등)와 소프트웨어 인터페이스(데이터 포맷, 통신 프로토콜 등)에 대한 명확한 국방 표준을 제정해야 한다. 특히, 미군 및 NATO와의 연합작전 능력 보장을 고려하여 NATO STANAG 4754 「NATO Generic Vehicle Architecture (NGVA) for Land Systems」와 같은 국제 표준과의 호환성은 반드시 고려되어야 한다. 이러한 표준화 노력을 통해 중복 투자는 방지시키고 후속 군수지원의 효율성은 높일 수 있을 것이며 궁극적으로는 우리 군의 모든 유·무인 자산이 하나의 네트워크로 연결되어 전투력을 극대화하는 핵심 기반이 될 수 있다.

중기 단계에서 추진해야 할 과제는 운용 교리 및 교육체계 정립도 있다. 단기적 전투실험에서 도출된 운용 기법과 교훈을 바탕으로 정식 교범을 작성하고 체계적인 교육 프로그램을 개발하여야 한다. 또한 플래시 라이더의 특성을 최대한 활용하는 전술적 운용 방법, 임무 유형별 활용 지침, 기존 레이더와 카메라 센서 등과 상호보완적 운용 방안 등을 구체화 해야 한다. 교육기관에

표준 교육과정을 개설하고 운용자와 정비 인력을 체계적으로 양성한다.

이와 더불어 정비지원 체계도 중기 단계에서 완성되어야 한다. 정비지원체계는 군의 정비지원체계와 동일하게 부대 정비반에서 시행되는 1, 2단계의 부대 정비체계, 야전 정비 부대에서의 3, 4단계의 직·간접 야전 정비체계, 산업체와 동등한 수준에서 이루어지는 5단계 창 정비체계 등의 단계별 플래시 라이더의 정비 체계를 구축해야 한다. 그리고 이와 관련된 필요 정비도구 및 장비 그리고 시험 장비를 확보하고 예비 부품 재고를 적정한 수준으로 유지하면서 정비 매뉴얼과 고장 진단 가이드를 개발하여 정비 인력 업무도 발전시켜야 한다.

[표 4-4] 중기(2027~2035년) 부대 임무별 전력화 실행 계획 ⁹²⁾

구 분	추진 내용	세부 활동
1	중요 임무 분야 적용	<ul style="list-style-type: none"> · 정찰 감시임무 수행 부대부터 전력화 · 전방 감시용 플래시 라이더와 주변 경계용 플래시 라이더 조합 구성 · 작전 시나리오별 효율성 검증과 운용부대의 플래시 라이더 사용 경험 및 우수사례 수집
2	임무 장비 모듈 통합	<ul style="list-style-type: none"> · 정찰감시 모듈 : EO / IR 카메라 데이터와 융합 · 화력지원 모듈 : 사격통제시스템과 연동 · 통신중계 모듈 : 실시간 정보전송체계 구축 · 표준화 : 모듈별 표준화된 인터페이스 구축
3	양산체계 전환 및 표준화 추진	<ul style="list-style-type: none"> · 생산 라인 확대 및 품질관리체계 강화 · 안정적인 부품 공급망 구축 · 플래시 라이더의 국방규격화 추진 · 정부지원 활용 및 중소기업 지원 확대
4	교육 및 정비체계 구축	<ul style="list-style-type: none"> · 운용자 및 기술 교범 작성 · 운용자 및 정비인력 교육 프로그램 개발 · 5단계(부대정비, 야전정비, 창 정비) 정비체계 구축
5	타분야 확대 및 장기계획 수립	<ul style="list-style-type: none"> · 정찰 감시 임무적용 결과 종합평가 · 타 임무분야로의 확대와 적용 타당성 검토 · 장기적인 차원에서 전면 전력화 계획 수립 · 예산 소요 산정 및 미래 기술발전 동향 확인

92) 본문 내용으로 저자 재구성

3) 장기(2035년~2040년) : 전면 전력화 및 차세대 플래시 라이더 적용

중기 단계에서 임무별 선택적 적용계획이 성공적으로 추진되고 국내 안정적 대량 생산 능력이 확보된다면 장기 단계에서는 플래시 라이더를 우리 군에 전력화되는 모든 다목적 무인차량에 기본 라이더로 탑재하면 된다. 이 시점은 우리 군의 다목적 무인차량 전력화 확대 시기와 맞물리기도 하는 시기라서 플래시 라이더의 전력화를 다목적 무인차량의 전력화와 같이 추진할 수 있는 시기이기도 하다.

2035년부터는 다목적 무인차량의 전면 전력화가 전 육군 부대를 대상으로 추진된다. 기존 Army TIGER 시범부대에서만 운용되던 다목적 무인차량이 일반 보병사단, 기계화사단, 기갑여단 등 전군 단위로 배치가 시작되는 것이다. 이러한 전군 범위의 전력화는 전방 사단과 주요 기동 부대부터 배치를 시작하여 후방 및 예비 부대의 순으로 단계적으로 확대한다.

이러한 상황과 맞물려 2035년부터 신규 생산되는 다목적 무인차량에는 플래시 라이더를 기본 센서로 탑재하여 생산 단계부터 플래시 라이더를 기본 사양으로 통합하여야 한다. 2035년 이전에 운용 중인 다목적 무인차량에 대해서는 단계적인 라이더 개조계획을 수립하여 추진하는데 중기 단계에서 플래시 라이더를 장착한 다목적 무인차량은 이미 검증된 상태이므로 별도의 성능개량 계획은 필요없지만 만약 플래시 라이더의 성능이 추후 개량되어 버전 등이 맞지 않는다면 성능 개량형 플래시 라이더로의 교체를 추진한다. 또한 기존에 회전식 스캐닝 라이더만을 장착한 차량들도 정비 주기와 연계하여 순차적으로 플래시 라이더로 교체한다.

전력화 확대 과정에서는 다목적 무인차량의 통제시스템과의 통합 최적화를 중점에 두고 추진하여야 한다. 플래시 라이더를 중심으로 레이더, 카메라, 소프트웨어 체계 융합 방안을 판단하여 중복성을 제거하고 성능의 시너지 효과가 나타날 수 있도록 한다. 예를 들어 플래시 라이더의 고해상도 3D 데이터로 일부 카메라 기능을 대체하거나 근거리 센서를 통합하는 등의 노력으로 기존 다목적 무인차량의 환경인식 센서 및 제어 소프트웨어의 복잡도는 줄이면서도

전체적인 성능을 향상시키는 것이다.

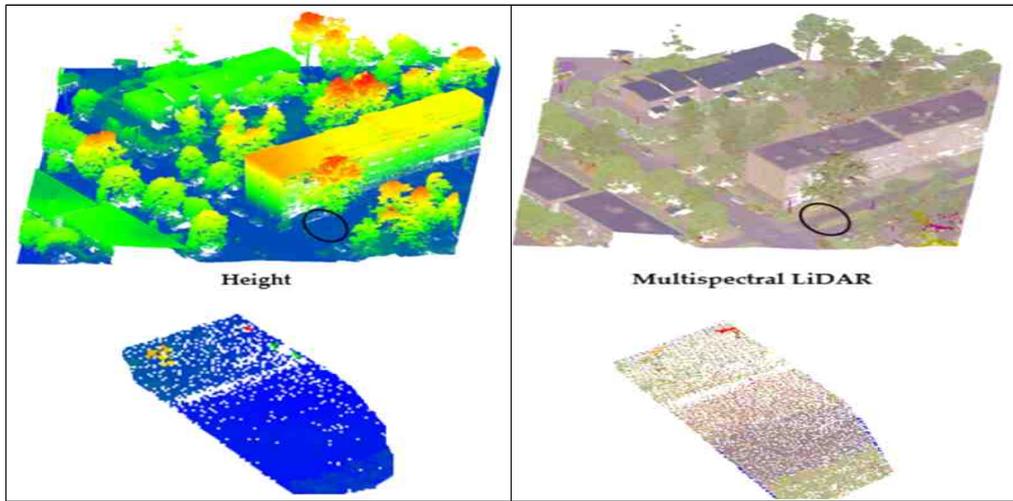
또한 전력화 확대 과정은 부대가 수행하는 임무의 중요도와 우선순위를 고려하여 최전방 부대와 주요 기동 타격 부대에 우선 배치하고 이후 일반 작전 부대와 후방지역 부대로 확대해 나가야 한다. 이와 더불어 각 부대의 배치 시기에 맞춰 운용 인력 교육과 정비 지원 체계를 선형 구축하여 전력화 즉시 완전한 작전 수행 능력을 발휘할 수 있도록 하여야 한다.

장기적으로는 다목적 무인차량의 지속적인 기술 발전과 연계되어 차세대 지능형 플래시 라이더의 개발도 추진되어야 한다. 다목적 무인차량은 2018년 업체가 자체적으로 시제품을 개발한 것을 시작으로 2021년 신속시범획득 사업을 통한 군 성능시험 시제품을 거쳐 2025년 구매시험평가를 위한 시제품 제작에 이르는 발전 과정을 거쳐 왔다. 이러한 7년 이상의 연구개발은 인공지능, 자율주행, 무인화 등의 첨단 기술들을 지속적으로 고도화시켰다. 이러한 추세를 볼 때 2035년 이후 다목적 무인차량이 전군으로 확대되면서도 기술 발전은 계속되어 지금보다 훨씬 진화한 차세대 다목적 무인차량이 등장할 것이다.

이러한 다목적 무인차량의 기술발전 추세에 맞추어서 플래시 라이더 역시 지속적인 성능 개량은 필수적이다. 초기 전력화 모델에 탑재되는 플래시 라이더는 검증된 기본 성능을 중심으로 안정적 운용에 우선순위를 두겠지만 차량의 자율주행 능력이 고도화되고 인공지능 기반 의사결정 시스템이 발전되면 이에 견줄 수 있는 차세대 플래시 라이더 개발도 이루어져야 할 것이다.

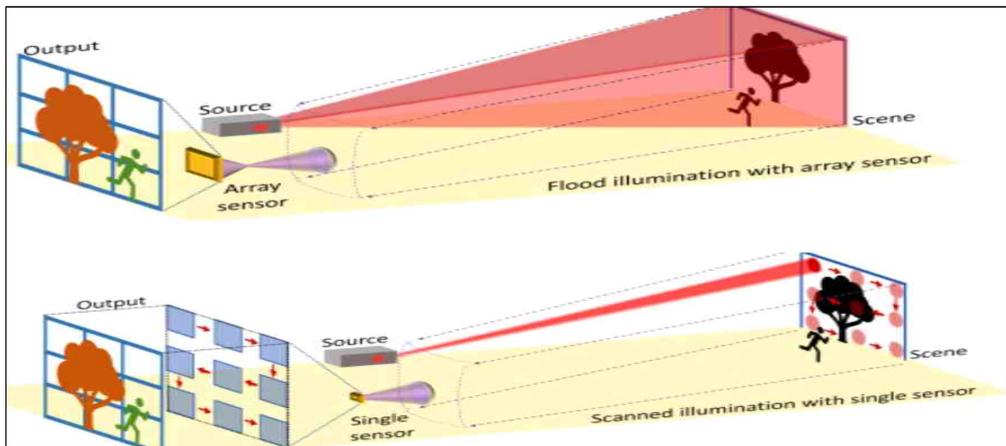
대표적인 차세대 플래시 라이더 기술로는 다중분광 플래시 라이더가 있다. 이 기술은 서로 다른 파장의 레이저 펄스를 활용하여 기존 라이더에서 얻게 되는 거리 정보뿐만 아니라 물체의 재질, 표면 특성 등을 면밀하게 분석할 수 있는 기술이다. 이를 통해 위장된 표적을 정확히 식별하고 은닉된 위협을 탐지하는 능력 향상이 가능하다. 다중분광 기술은 다양한 파장을 활용하여 식생투과, 재질 구분 등이 가능하고 이러한 다중분광 기술이 다목적 무인차량의 인공지능 기반의 알고리즘과 통합될 경우 복잡한 전장 환경에서도 상황 판단의 정확성이 높아질 것으로 기대된다. 따라서 장기적 관점에서 다중분광 플래시 라이더 기술의 개발과 적용은 차세대 다목적 무인차량의 전투효율성 향상을 위한 핵심기술 과제로

개발이 추진되어야 한다[91].



[그림 4-9] 기존 플래시 라이다(좌)와 다중분광 플래시 라이다(우) 비교 [91]

또한 상황에 따라 스캔 패턴과 해상도를 자동으로 조절하는 지능형 플래시 라이다도 개발이 필요하다. 평상시에는 넓은 영역을 효율적으로 스캔하다가 의심 물체를 발견하면 해당 영역만 고해상도로 집중 스캔한다. 이를 통해 전력 소비는 최소화하면서도 탐지 성능을 극대화할 수 있다. 또한 적의 탐지시스템을 회피하기 위해 불규칙한 패턴으로 작동하는 스텔스 모드도 구현 가능하다. 이러한 라이다 기술이 추가된다면 다목적 무인차량은 담당할 임무와 전장의 위협 수준에 따라 생존성과 임무 수행 효율성이라는 두가지 목적을 동시에 달성할 수 있다[118].



[그림 4-10] 기존 플래시 라이다(위)와 지능형 플래시 라이다(아래) 비교 [118]

다른 무기체계로의 확대 적용도 고려해야 한다. 육군의 기존 무기체계인 전차, 장갑차의 능동방호시스템 표적 탐지 능력을 향상을 위해 플래시 라이다를 장착시키고, 카메라 및 레이더 등의 다른 환경인식 센서와의 데이터 공유를 통한 협업 작전 능력을 구현한다. 해군은 수상·수중 장애물 회피와 표적 탐지 능력을 강화하기 위해 무인수상정과 무인잠수정에 적용해본다. 공군은 장애물 회피와 표적 탐지 성능을 개선을 위해 무인기에 탑재하여 저고도 비행을 실시한다.

필요시에는 대규모 유·무인 복합전투체계의 군집운용을 위해 플래시 라이다를 장착한 다수의 유·무인 복합전투체계 장비들과 협력하여 인공지능 기반 알고리즘과 통신 능력이 기반이 되어 광대한 지역을 효율적으로 감시 및 통제할 수 있는 분산 모니터링 체계를 구축한다.

필요시 국제 협력과 기술 교류도 장기 계획에 포함하여 추진한다. 우리 군이 개발한 군용 플래시 라이다 기술을 군사 보안이 위배되지 않는 범위에서 동맹국들과 공유하고 공동개발 프로젝트를 추진한다. 우방국과의 기술 협력을 강화하면서 글로벌 시장에서의 경쟁력을 확보한다.

만약 우리 군의 다목적 무인차량이 우방국으로 수출된다면 플래시 라이다의 성능에 따라 기본성능의 플래시 라이다와 성능이 개량된 플래시 라이다를 분류하여 수입을 하려는 국가의 요구와 예산에 맞춰 선택할 수 있도록 한다.

[표 4-5] 장기(2035~2040년) 전면 전력화 및 차세대 기술 적용계획⁹³⁾

구 분	추진 내용	세부 활동
1	다목적 무인차량 전력화와 연계한 플래시 라이다 전력화	<ul style="list-style-type: none"> · 전방부대 우선적 배치 후 후방 예비부대로 순차적 확대 · 부대별 운용 및 정비 인력 지원체계 구축 · 신규 생산 차량은 플래시 라이다를 기본적으로 탑재하고 기존 다목적 무인차량 중 성능 개량추진 · 회전식 스캐닝 라이다 차량은 정비주기와 연계하여 라이다 교체
2	플래시 라이다 중심 환경인식 센서와 인공지능 기반 알고리즘 융합	<ul style="list-style-type: none"> · 환경인식 센서의 기능 중복성 제거 및 효율성 극대화를 위한 시스템 복잡도 감소 · 전체 성능 향상 및 표준 센서 개발
3	차세대 기술개발과 연계한 플래시 라이다 성능 개량	<ul style="list-style-type: none"> · 차세대 기술 개발과 연계한 다중분광 플래시 라이다와 지능형 플래시 라이다 개발
4	타 무기체계 적용 및 군집작전 능력 구현	<ul style="list-style-type: none"> · 플래시 라이다 타 무기체계로 확대 적용 · 군집 운용모델 최적화를 위한 플래시 라이다 기술에 상호운용성 보장 및 검증 활동
5	국제 표준화	<ul style="list-style-type: none"> · 동맹국과 기술 공유 및 공동 기술개발 · 다목적 무인차량 수출과 연계한 선택적인 플래시 라이다 선택 패키지 제공

93) 본문 내용으로 저자 재구성

제 4절 플래시 라이다 적용의 시사점 및 전력화 추진 전략

1) 플래시 라이다 적용의 시사점

플래시 라이다의 시기별 발전은 우리 군의 Army TIGER 전투체계와 다목적 무인차량의 발전방향과 연계되어 발전할 것이다. 다만 발전과정에서 몇가지 시사점이 있다. 첫째, 플래시 라이다로의 전환은 기술적 우월성과 함께 다목적 무인차량을 운용하는 부대의 임무 수행과 작전환경에 대한 깊은 이해가 선행되어야 한다.

다목적 무인차량 개발 과정에서 확인되었듯 2021년 군 운용성시험과 2024~2025년 구매시험평가를 통해 도출된 개선사항들은 단순한 기술적인 결함이 아니라 실제 임무수행 환경에서 부딪히는 현실적인 제한사항이 대다수를 차지하였다. 그중 수면 반사로 인한 평범한 물 웅덩이를 장애물로 인식하여 정지하던 사례와 디지털 무늬의 차량을 사람으로 인식하는 객체 인식 오류 사례는 실험실 환경에서는 발견하기 어려울 뿐더러 라이다의 물리적 특성과 우리 군이 임무 수행하는 한반도의 환경이 상호작용하면서 발생하기 때문에 라이다의 성능이 높다고 마냥 해결되는 문제도 아니다.

특히 웅덩이 수면이 레이저 펄스를 반사하여 깊이를 정확히 측정하지 못하는 현상은 한반도의 빈번한 강수현상(장마)과 관련이 있으며, 디지털 무늬의 차량을 사람으로 인식한 오류는 한국군 고유의 피복 패턴과 연관되어 있다[66]. 따라서 플래시 라이다 도입 시에도 단계적 운용으로 군의 임무수행 환경에서 발생할 수 있는 다양한 문제점을 사전에 식별하고 해결하는 과정이 필요하다. 따라서 단기단계에서 제시한 전방 시범부대 우선 적용과 실전 운용 경험 축적을 통해 시범부대에서 최소 1년 이상의 운용을 통해 사계절 전체를 포괄하는 환경 인식 데이터를 축적하여 우리 군의 임무수행 조건에서 발생하는 라이다의 성능 한계를 인식하고 성능개량을 추진해야 한다.

물론 이 과정에서 수집된 데이터는 인공지능 기반 알고리즘 학습에 활용되기 때문에 다른 유·무인 복합전투체계의 향상에 기여도 가능하다.

둘째. 플래시 라이다의 전력화를 위해서는 기술 개발과 제도적 지원은 같이 이루어져야 한다. 중기적용 단계에서는 의견으로 제시했던 국방규격 제정, 교육체계 구축, 정비지원 체계 준비는 단순한 행정적 절차가 아니라 전력화를 위한 필수 조건이다. 아무리 우수한 센서 기술이라도 표준화된 인터페이스가 없다면 상호운용성 문제로 효율성이 저하되고 체계적인 교육 없이는 운용자가 성능을 제대로 발휘할 수 없으며 정비지원 체계가 미비하면 고장 시 장기간 운용 불능 상태에 빠진다.

실제로 초기 다목적 무인차량 시제품은 우수한 기술력이 있었음에도 불구하고 특정 부품의 고장이 발생하였을 때 어떤 증상이 나타나는지 어떤 순서로 점검해야 하는지에 대한 체계적인 정비 가이드가 없었기 때문에 정비 매뉴얼과 고장 진단 절차가 확립되지 않았고 현장에서 발생하는 고장 상황을 대응하는데 많은 어려움을 겪었다[66]. 이러한 문제는 제도와 시스템 미비에서 비롯된 것으로 동일 시행착오를 방지하기 위해서는 국방과학연구소의 기술 개발, 방산업체의 양산 역량, 군의 운용 경험이 유기적으로 결합되어야 한다.

특히 국방규격 제정은 단순한 기술문서 작성이 아니라 향후 수십 년간 사용될 표준을 정립하는 작업이므로 충분한 시간을 들여 신중하게 접근해야 한다. 데이터 형식 하나 통신 프로토콜 하나가 잘못 정의되면 향후 시스템 통합과 업그레이드에 막대한 비용과 시간이 소요될 수 있기 때문이다.

셋째. 플래시 라이다는 다목적 무인차량의 단계적인 전력화와 맥을 같이하여 한가지 방향으로 발전해야 한다. 장기 단계에서 제시한 차세대 라이다 기술 도입은 플래시 라이다 자체의 독립적인 기술 연구가 아니고 다목적 무인차량 전체의 발전과 궤도를 같이해야 한다. 다목적 무인차량의 자율주행 능력이 레벨 3 수준에서 레벨 4수준으로 고도화되면 환경인식 센서 역시 더 빠른 프레임율과 더 높은 해상도, 그리고 더 정교한 객체 분류 능력을 제공할 수 있어야 하고 다목적 무인차량의 인공지능 기반의 알고리즘이 발전하면 인공지능 기반의 알고리즘에게 거리 정보뿐만이 아니라 재질, 표면 특성, 움직임 패턴 등 고차원적 정보도 제공되어야 한다. 라이다는 다목적 무인차량의 눈 역할을 하기 때문에 라이다의 성능 향상은 다목적 무인차량의 성능을 향상시키는 것이고 다목적

무인차량의 성능 향상은 라이다의 성능 향상에 필연적으로 영향을 미치게 된다.

2035년 다목적 무인차량이 전군으로 전력화되는 시점에 탑재되는 플래시 라이다는 검증된 기본적인 성능을 중심으로 전력화를 추진하되 2040년대에는 다중분광 플래시 라이다, 지능형 플래시 라이다 등의 성능이 구현될 수 있는 차세대 플래시 라이다로 발전도 염두해 두어야 한다. 이러한 다목적 무인차량의 발전방안과 궤를 같이하는 플래시 라이다의 단계적인 발전 방안은 급격한 기술 변화로 인한 부작용을 최소화하면서도 임무수행 능력 향상을 보장하게 된다.

넷째, 플래시 라이다의 파급효과는 다목적 무인차량 뿐만이 아닌 전체 유·무인 복합전투체계로 확대될 것이다. 장기 단계에서 제시한 각 군의 다른 유·무인 복합전투체계로의 확대 적용은 우리 군 전체의 라이다 체계를 변화시키는 혁신의 과정으로 다목적 무인차량에서 검증된 기술과 운용 노하우는 육군의 전차와 장갑차의 능동방호시스템, 해군의 무인수상정, 공군의 무인기 등에 순차적으로 적용된다면 전군의 전투력 상승을 일으킬 수 있다.

예를 들면 전차의 능동방호시스템은 현재 레이더를 주 탐지 센서로 활용하여 대전차미사일을 탐지하지만 플래시 라이다를 추가로 탑재하면 더 정확한 위치 추적과 요격이 가능해 질 것이다. 해군의 무인수상정은 플래시 라이다를 활용하여 야간, 악천후에서도 장애물을 정확히 감지하여 암초나 기뢰, 해상 장애물과의 충돌을 방지할 수 있고, 공군의 무인기는 플래시 라이다를 활용하여 저고도 비행 시 전선이나 나뭇가지 같은 미세 장애물까지 회피하는 능력도 갖출수 있게 된다. 특히 플래시 라이다를 활용한 군집운용은 다수의 플래시 라이다 장착 유·무인 복합전투체계들이 협력하면서 분산 통제체계를 구성하고 광활한 전장 인식 능력도 갖춘다. 10대의 다목적 무인차량이 1km 간격으로 배치되어 10km 전방을 실시간으로 감시하고 각 차량이 수집한 데이터를 통합하여 3차원 전장 지도를 생성하며 인공지능 기반의 알고리즘이 적의 이동 패턴을 분석하여 매복 지점과 공격 시기를 예측하는 영화 같은 시나리오도 이제 현실이 될 수도 있다.

다섯째, 플래시 라이다의 부품국산화와 양산 능력 확보는 기술 주권을 해결할 수 있는 해결책이다[67]. 현재 다목적 무인차량의 라이다로 쓰이는 회전식 스캐닝

라이다는 높은 해외 의존도로 기술의 종속과 조달 비용 부담이라는 이중적인 위협이 우려된다. 회전식 스캐닝 라이다를 제작하는 오스타 같은 해외 업체의 제품을 수입하면서 라이다 1대당 고가의 비용을 지불하게 되고 기술사양 변경이나 간단한 정비 활동도 해외 업체의 일정에 끌려가듯 따라가야 하는 제한사항이 있다.

반면 국내 플래시 라이다 기술은 중소·중견업체를 중심으로 상당한 수준에 도달해 있고, 중기 단계에서 제시한 양산체제 전환과 정부 지원 확대가 이루어진다면 주요 부품의 완전한 국산화도 가능하다. 이는 좁게는 비용 절감의 효과를 얻지만 넓게는 플래시 라이다 기술 발전의 세계적으로 주도권을 확보하고 동맹국 수출을 통한 우리나라의 방위산업 경쟁력 강화로도 이어질 수 있다. 다목적 무인차량이 우리 군의 요구사항을 반영하여 독자 개발된 것처럼 플래시 라이다도 우리 군의 운용 환경과 전장 특성에 맞는 국내 독자기술로 개발할 필요가 있다. 특히 우리 군의 주 전장인 해외의 표준규격으로는 대응이 어려운 한반도의 험준한 산악 지형, 4계절 기후 변화 등은 국내 업체가 주도하는 맞춤형 기술개발(라이다 레이저 펄스 폭 조정, 내환경성 및 인공지능 기반 신호처리 및 물체 인식 능력 등)을 토대로 플래시 라이다를 발전시켜야 한다. 이러한 기술 발전은 우리 군에서의 원활한 운용을 보장하고 K 방산의 또 다른 경쟁력이 되어 국내 방산산업의 수출 경쟁력 강화에도 기여할 것이다.

2) 플래시 라이다의 전력화 추진 전략

플래시 라이다의 성공적인 전력화를 위해서는 기술개발, 제도 정비, 인력 양성이라는 세 가지 축의 균형 발전이 필요하다. 플래시 라이다의 기술 자립 여부는 다목적 무인차량을 포함한 유·무인 복합전투체계의 작전 지속성, 성능 완성도, 국가 차원의 기술주권 확보와 직결되는 국가적 중요 과제이다. 현재 국내 플래시 라이다 기술은 연구개발 단계에서 시제품 생산 단계로 전환하는 중요한 시점에 있다. 민수용 자율주행 분야에서 개발된 플래시 라이다 기술을 군사용으로 전환하는 과정에서는 내구성 및 환경적응성 강화, 전자파 대책, 생존성 향상 등의 기술 개발 및 고도화는 필수이며 이를 위한 국가적 지원도 당연히 이루어져야 한다. 앞서 제시한 단계별 적용 방안이 실질적인 성과로

이어지기 위해 필요한 추진 전략을 아래와 같이 제시한다.

첫째, 플래시 라이다와 관련 핵심 부품을 국방 전략부품으로 지정하고 선택과 집중에 기반하여 국가 연구개발 투자를 확대해야 한다. 특히 플래시 라이다의 성능을 결정짓는 SPAD 및 APD 검출기, 송신부 광학 모듈, 신호처리 ASIC 등의 핵심 부품 제작 기술은 국내 단종을 방지하고 국내 업체의 기술 내재화를 촉진하기 위해 장기간에 걸친 연구개발 사업을 추진하여 기술을 축적해야 한다.

구체적으로 하나의 예를 들면 국방과학연구소가 선행연구 과제를 편성하여 기초 원천기술 개발을 지원하고, 방위사업청은 신속획득 사업을 통해 기술 검증 기간을 단축하여 우수 기술의 신속한 전력화를 추진해야 한다. 또한 국방기술 품질원의 국방규격 제정 지원과 한국산업기술평가관리원의 민군기술협력사업을 연계하고, 방위사업청의 핵심기술 연구개발 예산을 배정하여 업체들이 안정적으로 기술 개발에 집중할 수 있는 환경을 조성해야 한다. 아울러 국방부와 방위사업청은 개발 성공 시 일정 물량을 보장하는 보상 중심의 조달환경을 조성하기 위해 성과기반군수지원 및 성과연동형 계약 제도⁹⁴⁾를 적용해야 한다[63]. 이러한 제도적 안전장치가 적용되면 민간 기업이 초기 투자비용과 상용화까지 불확실성을 감수해야 하는 지금의 사업 위험을 완화시키고 국내 생산·공급망 구축을 안정적으로 추진하는 효과를 낼 것이다.

둘째, 도전적이고 혁신적인 기술 개발을 촉진하는 복수경쟁형 연구개발 제도를 적극적으로 활용해야 한다. 국방전력발전업무훈령에는 복수경쟁형 연구개발 제도가 명시되어 있으나 실질적으로는 대부분 단일업체를 선정하여 단일업체 연구개발 방식으로 추진하고 있다.

단일업체 연구개발 방식은 업체의 사업실패에 대한 부담을 완화시킬 수 있으나, 높은 수준의 신기술 개발 역량을 보유하고 있음에도 군이 요구하는 최소한의 수준에만 맞추려는 도덕적 해이를 유발한다. 따라서 복수경쟁형 연구

94) 성과연동형 계약 제도는 방위산업 분야에서 개발·양산 성과에 따라 정부가 보상 수준이나 조달 물량을 차등 지급하는 방식으로, 기업의 기술개발 동기를 강화하고 조달의 예측 가능성을 높이기 위한 제도이다. 개발 성공 시 일정 물량을 보장함으로써 초기 투자 위험을 완화하고 장기적인 산업 기반을 확보하는 효과가 있다.

개발 제도를 통해 복수 업체 또는 컨소시엄으로 구성된 연구개발 주관기관들이 군이 요구하는 목표를 향해 각기 다른 기술적 접근 방식으로 개발을 추진하도록 유도해야 한다. 여기에 일정 단계마다 성과를 평가하여 가장 우수하거나 실효성이 높은 기술을 채택하는 경쟁적 프로토타이핑 방식을 반영한다면[79] 건전한 기술 경쟁을 유도하여 개발 비용을 절감하고 잠재력 있는 혁신적인 아이디어가 사장될 위험을 줄일 수 있다. 비록 최종적으로 채택되지 않더라도 일정 수준의 기술적 성취를 달성한 업체에는 차기 유사 사업 참여 시 가점을 부여하거나 투입된 연구개발비의 일부를 보상하는 방안 등으로 그 연구 성과와 노력을 인정하는 보상 체계를 마련해야 한다.

셋째, 기술력 있는 중소·벤처업체의 국방시장 진입 장벽을 과감히 낮추어야 한다. 현재의 대기업 중심 방위산업 생태계에서는 혁신적인 기술을 보유한 중소 및 중견업체가 아이디어를 실현하고 상용화하기가 매우 어렵다. 따라서 국방 기술품질원 주관으로 라이더 기술성능을 확인할 수 있는 테스트베드를 구축하고 중소·중견업체가 개발한 시제품의 성능을 군의 기준에 따라 객관적으로 시험하고 인증하는 제도를 마련해야 한다. 이 인증을 통과한 기술에 대해서는 군 시범운용 참여 기회를 우선 부여하고, 신속시범획득사업과 연계하여 빠르게 군에 도입될 수 있는 패스트트랙을 제공해야 한다. 또한 자금력이 취약한 중소기업에 대해서는 기술신용보증 한도 확대, 정책자금 우선 지원, 세제 혜택 등 금융 지원책도 함께 마련해야 한다. 이러한 지원이 이루어진다면 대기업은 물론 중소 및 중견기업들의 혁신적인 기술이 군에 기여할 수 있는 방산기술 생태계가 조성되고, K-방산의 기술 저변은 더욱 확대될 것이다.

플래시 라이더와 같은 국방 과학기술은 어느 한 주체의 노력만으로는 군에 최적의 기술 수준으로 적용하기가 어렵다. 플래시 라이더에 대한 군의 운용경험, 기술력을 갖춘 업체의 양산 기술, 대학 및 연구소의 창의적인 아이디어와 원천 기술이 유기적으로 결합될 때 비로소 폭발적인 시너지를 창출할 수 있다. 따라서 현재 개별적으로 운영되고 있는 협력 모델을 넘어 실질적인 성과 창출을 목표로 하는 강력하고 유기적인 군·산·학·연 협력체계를 구축해야 한다. 다목적 무인 차량을 개발하기 위해 국방과학연구소, 방산업체, 한국자동차연구원 등이 컨소시엄을 구성하여 협력한 것처럼 플래시 라이더의 개발에도 컨소시엄 등의 협력 모델을

적용해야 한다. 또한 육군 시험평가단이 주관하는 성능시험과 구매시험평가 과정에서 도출된 개선 사항들이 후속 개발에 반영되었듯이, 플래시 라이다 역시 다목적 무인차량을 운용하는 부대로부터 피드백을 받아 향후 기술 발전에 기여할 수 있는 체계를 구축해야 한다.

이를 위해 본 연구는 국방부, 방위사업청, 국방과학연구소, 국방기술진흥연구소가 중심이 되어 국내 주요 방산업체(현대로템, 한화에어로스페이스 등), 라이다 전문업체(에스오에스랩 등), 그리고 관련 분야 최고 연구 역량을 보유한 대학(카이스트 등) 및 연구기관(ETRI 등)이 모두 참여하는 가칭 '무인체계 플래시 라이다 기술협의체'의 구성을 제안한다. 이 협의체는 단순한 기술 교류의 장을 넘어 세계 기술 발전 추세와 미래 전장 환경 변화를 분석하여 향후 10년, 20년을 내다보는 무인체계에 대한 플래시 라이다 기술 발전 로드맵을 공동으로 수립하고 각 주체의 강점을 기반으로 명확한 역할 분담 체계를 구축하는 컨트롤 타워 역할을 수행한다.

역할분담의 예를 들면 대학과 연구소는 기술성숙도 레벨 1~3 수준의 기초 원천기술 연구에 집중하고 업체들은 이를 이어받아 탐색개발 단계인 기술 성숙도 레벨 4 수준 이상의 무기체계 적용 및 양산 기술을 개발한다. 그리고 군은 탐색개발 단계부터 참여하여 소요를 제기하고 운용성 입증 및 검증을 담당한다.

이와 더불어 정기적인 기술 교류 및 시험평가 세미나 등을 연 1회 이상 실시하고 컨소시엄 내 각 주체 간의 소통 창구를 개설하여 지속적으로 유지해야 한다. 특히 대학과 연구기관의 참여를 확대하여 최신 학술연구 성과가 즉시 기술 개발에 반영될 수 있도록 해야 한다. 서울대, KAIST 등 주요 대학의 라이다 및 자율주행 연구실과 공동연구 과제를 수행하고 연구 인력의 방산업체 파견 근무나 방산업체 연구원의 대학원 위탁교육 등 인적 교류 프로그램도 활성화해야 한다. 이러한 협력은 향후 플래시 라이다 분야 전문 인력을 양성하는 기반이 되며 산업 생태계 전체의 역량을 강화하는 효과가 있다.

아울러 군 시범운용 등에서 획득된 방대한 양의 라이다 데이터를 빅데이터로 구축함으로써 군 인공지능 기반 알고리즘 개발 역량을 향상시키는 귀중한 자산으로

활용해야 한다.

단계별 전력화 방안의 체계적 이행도 중요하다. 단기 단계(2027년)에서는 전방 시범부대를 대상으로 실전 검증에 우선 집중해야 한다. 다목적 무인차량 또는 라이다를 적용하는 유·무인 복합전투체계의 시험평가를 통해 실제 임무 수행 지형에서의 3계절 시험평가를 통해 플래시 라이다의 실질적인 임무수행 지역에서의 성능을 철저히 검증해야 한다.

예를 들어 영하 20도 이하의 혹한기에는 배터리 성능 저하와 광학계 결빙 문제, 영상 35도 이상의 혹서기에는 열 왜곡과 전자부품 과열 문제 등을 분석하고 장마철에는 빗물에 의한 신호 감쇄와 수면 반사 문제, 겨울철 적설 환경에서의 탐지 성능 문제를 분석해야 한다. 중기 단계(2027~2035년)에서는 임무수행 유형별로 임무장비 모듈을 선택적으로 적용하기 위한 점진적 확대가 중요하다. 정찰·감시 임무처럼 플래시 라이다의 장점이 극대화되는 분야부터 우선 적용하고 성공 사례를 바탕으로 타 임무 분야로 확산하는 전략이 필요하다. 다목적 무인차량의 단계적 전력화 계획과 연계하여 플래시 라이다 장착은 초기에는 정찰·감시 임무장비 모듈을 우선 전력화하고 2년간의 운용 경험을 바탕으로 화력지원 임무 차량, 다음은 수송·보급 임무차량으로 순차적으로 확대하는 단계적 접근이 필요하다.

이와 함께 국방규격 제정, 교육체계 구축, 정비지원체계 완비를 병행 추진한다면 장기 단계에서의 전면 전력화도 내실 있게 진행될 수 있을 것이다. 장기 단계(2035~2040년)에서는 다목적 무인차량의 전군 전력화와 연계하여 플래시 라이다를 표준 센서로 확립하고, 차세대 기술 개발을 통한 지속적인 성능 향상도 추진해야 한다.

표준화 및 상호운용성 확보도 장기적인 전력획득 관점에서 중요하다. 플래시 라이다의 데이터 형식, 통신 프로토콜, 물리적 인터페이스 등을 국방규격으로 제정하여 다양한 제조사의 제품을 혼용할 수 있게 해야 한다. 이는 특정 업체에 대한 기술 종속을 방지하고, 경쟁을 통한 기술 발전을 촉진하며, 향후 성능 개량을 용이하게 한다. 특히 NATO STANAG 4586과 같은 국제 표준과의 호환성도 고려하여 동맹국과의 연합작전 시에도 정보 공유가 가능하도록 해야

한다. 다목적 무인차량이 다양한 임무장비 모듈들을 플러그 앤 플레이 방식으로 통합하여 운용하듯이, 플래시 라이더 역시 표준화된 인터페이스를 통해 다양한 플랫폼에 쉽게 적용될 수 있어야 한다. 이를 위해 국방기술품질원 주관으로 방산업체·군·연구기관 등이 참여하여 호환성이 고려된 국방규격을 제정해야 한다.

마지막으로 제도적 지원방안이 뒷받침되어야 한다. 기술 개발과 단계별 전력화 전략이 성공적으로 추진되기 위해서는 이를 뒷받침할 수 있는 유연하고 효율적인 제도적 지원이 병행되어야 한다. 4차 산업혁명 시대의 기술 발전속도는 기존의 경직된 국방 획득 제도가 따라가기 어렵다. 수년에 걸친 복잡한 절차를 거쳐 무기체계를 개발하고 나면 이미 해당 기술이 진부화되는 '획득의 역설'이 종종 발생하고 있다. 따라서 플래시 라이더와 같은 첨단기술을 적시에 군에 도입하고 그 효과를 극대화하기 위한 제도적 혁신이 필요하다.

첫번째로 업체주도형 신속획득 패러다임을 확립하여 상향식 혁신을 이룰 수 있는 방산생태계를 조성해야 한다. 최근 도입된 통합소요기획은 선행연구와 소요검증을 동시에 진행하여 획득 기간 단축을 목표로 하는 의미 있는 진전이다. 그러나 이 제도는 본질적으로 합동참모본부가 주도하는 하향식 기획 특성을 유지하고 있다. 즉 군의 예측된 소요를 기반으로 과제를 기획하고 관리하는 데 중점을 두므로 민간 영역에서 자생적으로 발현되는 예측 불가능한 파괴적 혁신 기술을 선제적으로 발굴하고 수용하는 데는 구조적 한계가 있다. 따라서 통합소요기획의 잠재적 한계를 보완하고 상호 시너지 효과를 창출하기 위해 상향식 접근법, 즉 업체주도형 신속획득 제도를 과감하게 운용해야 한다. 이는 기술력 있는 업체가 개발한 혁신 기술을 군이 먼저 제시받아 신속하게 시범 운용하고 그 군사적 효용성이 입증되면 통합소요기획 체계와 연동하여 신속하게 소요를 결정하고 전력화하는 '선 성능확인 후 기획' 방식이다.

두번째로 통합사업관리팀의 운영 패러다임을 전환하여 전력화지원요소(전투발전지원요소·통합체계지원요소)와 주장비 개발을 동시에 추진하는 획득 체계를 구축해야 한다. 첨단 무기체계의 성공적 전력화는 장비 자체의 성능뿐 아니라 이를 실질적으로 뒷받침하는 운용·정비·교육·지속지원 체계의 준비에

따라 좌우된다. 그럼에도 불구하고 현행 획득 방식의 관행은 하드웨어 개발 일정에 과도하게 집중되는 경향이 강해 전력화지원요소의 일정 및 예산 확보가 후순위로 밀리는 문제가 지속적으로 발생하고 있다.

특히 정밀 광학센서와 고도화된 소프트웨어가 결합된 플래시 라이다와 같은 첨단 장비의 경우, 군사교리·편제·운용절차 등의 전투발전지원요소와 기술 교범·정비장비·정비시설 등의 통합체계지원요소 확보가 지연되면 야전 배치 초기 단계부터 장비 성능이 충분히 발휘되지 못하는 요인이 된다. 이는 결국 전력화 초기에 운용 공백을 유발하고 장기 정비 병목과 예산 낭비 등 구조적 비효율로 이어져 첨단 무기체계 도입 효과를 약화시키는 결과를 초래한다.

따라서 통합사업관리팀은 주장비 개발 초기 단계부터 전력화지원요소 확보 계획을 통합적으로 수립하고 교리·편제·훈련체계·정비체계 등 각 요소 간 상호 연계성을 평가하여 병행 개발이 가능하도록 사업관리 구조를 재편성해야 한다. 또한 통합사업관리팀은 플래시 라이다의 특성에 맞추어 신속한 고장 진단 및 모듈 교체가 가능하도록 모듈식 정비개념을 체계설계단계에서 이루어지는 기본설계토의나 상세설계토의 등에 필수적으로 반영해야 한다. 이는 최근 군에서 강조하는 한국형 모듈식 개방형 시스템 아키텍처(K-MOSA)의 철학을 구현하는 방향이기도 하다.

이상에서 제시한 기술개발 지원, 군·산·학·연 협력체계 구축, 단계별 전력화 방안의 체계적 이행, 표준화 및 상호운용성 확보, 그리고 제도적 혁신 방안이 유기적으로 연계되어 추진된다면, 플래시 라이다 기술 개발의 불확실성을 줄이고 개발 속도를 높일 수 있을 것이다. 이를 통해 우리 군은 세계 군사 선진 국가와의 격차를 좁혀 가는 현재의 추격자에서 그들을 추월하고 앞서 나가는 미래의 선도자로 도약하는 발판을 마련할 수 있을 것이다.

구 분	주요 내용	추진 방안
기술개발 지원	핵심 부품 국산화 및 기업 지원	<ul style="list-style-type: none"> • 핵심 부품(검출기, 광학 모듈 등)의 국방 전략부품 지정 • 복수 업체 경쟁 개발 유도 • 중소기업 진입 장벽 완화 및 금융 지원
협력체계 구축	군, 산, 학, 연 통합협업체 운영	<ul style="list-style-type: none"> • 국방부, 방산업체, 대학, 연구소 참여 • 역할 분담: 대학(기초연구) → 업체(양산) → 군(검증) • 정기 기술 교류 및 데이터 공유
단계별 전력화	시범 → 확대 → 전군 적용	<ul style="list-style-type: none"> • 단기(~2027) : 시범부대 실전 검증 • 중기(~2035) : 임무별 순차 확대 • 장기(~2040) : 전군 표준 센서 확립
표준화 및 상호운용성 확보	국방규격 제정 및 호환성 확보	<ul style="list-style-type: none"> • 데이터·통신 규격 표준화 • 국제 표준(NATO) 호환 • 업체 종속 방지
제도개선	신속·유연한 획득 체계 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 업체 주도 신속획득 제도 활성화 • 장비와 교육·정비 체계 동시 개발 • 모듈식 정비 개념 도입

[표 4-6] 플래시 라이더의 군 전력화를 위한 추진 전략 ⁹⁵⁾

95) 본문 내용으로 저자 재구성

제 5장 결론 및 정책 제언

제 1절 결론

1) 플래시 라이다 연구 결과 요약

본 연구의 목적은 Army TIGER 전투체계의 핵심장비인 다목적 무인차량에 적용하는 회전식 스캐닝 라이다의 기술적 한계를 분석하고, 대안으로 플래시 라이다 적용을 제시하는 것이었다. 이를 위해 먼저 현재 다목적 무인차량에 적용된 회전식 스캐닝 라이다의 한계를 구조적, 기능적, 경제적 측면에서 분석하고 다음에는 플래시 라이다의 실질적 적용 방안을 작전운용성능 설정, 상호 운용성 확보, 단계별 전력화 로드맵 차원으로 제시하였다.

먼저 회전식 스캐닝 라이다는 2018년 군 운용성 시험, 2025년 구매시험 평가, 2022년부터 현재까지 이어진 육군 ○○사단 시범여단전투단의 운용 과정 간 다음과 같은 한계를 보였다.

구조적 측면에서는 기계식 부품 회전으로 내구성이 취약하였다. 특히 산악 지형과 험지에서의 충격과 진동은 구동부 마모와 부품 손실 빈도를 높여 임무 수행 환경에서 지속적인 운용을 저해하였다.

기능적 측면에서는 전방위 환경 인식을 위해 지속적으로 발산하는 레이저 펄스와 차량 상부에 돌출된 라이다의 형태는 적 탐지 장비로부터 노출위험을 증가시켜 생존성을 위협하였다.

경제적 측면에서는 핵심 부품의 높은 해외 의존도는 유지보수에 상당한 제약을 주었다. 대다수 핵심 광학부품과 정밀부품 제작과 조달을 해외업체 기술력에 의존하였는데 이는 전시 또는 유사 상황 발생 시 적기 조달을 위한 시간과 예산 소요를 증가시키고 기술사양 변경이나 간단한 정비 활동이 해외 업체의 일정에 종속되게 만들었다.

이러한 회전식 스캐닝 라이다의 기술적 한계들은 다목적 무인차량의 핵심

임무인 정찰·감시 결과의 신뢰성을 저해하고 임무수행에 투입되는 인원과 장비의 생존성을 위협하여 다목적 무인차량 활용에 부정적인 영향을 미치게 되었다. 따라서 실제 작전 환경에서 지속적 운용이 가능하며 생존성과 신뢰성을 확보할 수 있는 다른 기술적 대안으로 플래시 라이다로의 전환을 검토하였다.

플래시 라이다의 회전식 스캐닝 라이다의 한계를 극복하는 기술적 장점이 다음과 같이 있었다. 첫째 레이저 펄스를 회전시키지 않고 디지털 카메라로 대상을 촬영하듯 스캔 대상 지역을 레이저 펄스로 단번에 비춰 거리계산 및 3D 이미지를 생성하기 때문에 기계적인 마모가 발생하지 않아 높은 내구성과 신뢰성이 보장되었다. 둘째 마이크로초 단위의 고속 측정이 가능하여 동시 병렬적으로 환경을 측정하고 인식하기 때문에 높은 프레임 속도에서 다수의 포인트 클라우드를 생성하여 예기치 못하는 돌발상황에도 실시간 환경인식 처리가 가능하였다. 셋째 주요 부품제작 기술을 국내 업체들이 보유하고 있어 부품 국산화를 통한 유지보수 비용 및 기간 절약이 가능하였다. 넷째 플래시 라이다는 소형화·경량화가 가능하여 차량 내부로 부착하여 다목적 무인차량의 공기역학적 설계를 해치지 않고 장비 노출 위험을 크게 감소시킬 수 있었다. 또한 순간적·선택적으로 레이저 펄스를 발산할 수 있어 지속적으로 레이저 펄스를 발산해야 하는 회전식 스캐닝 라이다와는 다르게 위험지역에서의 적 탐지장비 등에 의한 노출 가능성을 현저하게 낮추고 임무수행 중인 장비와 인원들에 대한 생존성을 보장할 수 있었다. 본 연구자는 이러한 기술적 장점을 바탕으로 플래시 라이다의 적용 방안을 다각도로 검토하여 다음과 같은 구체적 방안을 도출하고 제시하였다.

플래시 라이다는 작전운용성능 측면에서 순간적인 3차원 환경인식 정보 수집 능력과 극한(혹서·혹한 등) 환경에서의 안정성 부분, 또한 GPS 거부 환경에서의 보조항법이 가능하다는 장점이 있었다. 이러한 기술적 특성은 인공지능 기반 판독 알고리즘과 결합될 때 표적 인식 정확도 향상, 자율주행 안전성 제고, 다목적 무인차량의 생존성 증대로 이어져 Army TIGER 체계의 작전 개념을 지능형·자율형 중심으로 전환시킬 수 있는 기반이 된다. 특히 플래시 라이다가 갖는 충격과 진동에 대한 강인성, 순간적 레이저 펄스 조사를 통한 은밀성 확보 능력은 우리 군의 작전환경에 최적화된 특성이었다. 국토의 약 70%를 차지하는

산지와 도심화가 진행된 복합지형, 그리고 중대급 이하 근접전투 운용개념에서 요구되는 실시간 상황인식과 신속한 의사결정을 지원할 수 있는 기술적 기반을 제공할 수 있기 때문이다.

그러나 이러한 장점들을 실제 전장 환경에서 입증하기 위해서는 보다 엄격한 검증 절차가 필요하였다. 제한된 검증시간과 검증공간의 한계로 인해 실험실 환경의 개발시험평가나 통제된 환경에서 실시되는 운용시험평가만으로는 실전에서 발생 가능한 복잡성과 돌발 변수들을 충분히 확인하기 어렵기 때문이다. 따라서 플래시 라이다의 실질적 효용성을 검증하기 위해서는 실전적 환경에서의 장기적 운용성 검증이 반드시 병행되어야 한다.

상호운용성 확보 방안으로는 플래시 라이다의 데이터 형식, 통신 프로토콜, 물리적 인터페이스를 국방규격으로 제정하고 NATO STANAG 4586과 같은 국제 표준과의 기준을 충족시켜 다양한 제조사의 제품을 혼용하고 향후 성능 개량을 용이하게 하는 방안이 제시되었다. 이는 특정 업체에 대한 기술 종속을 방지하고 경쟁을 통한 기술 발전을 촉진하는 효과를 가져올 것으로 기대되었다. 더욱이 다목적 무인차량은 다양한 임무장비 모듈들을 플러그 앤 플레이 방식으로 통합운용되는 것을 고려한다면 플래시 라이다 역시 표준화된 인터페이스를 통해 다양한 플랫폼에 쉽게 적용될 수 있도록 하는 것은 필수적으로 요구되었다.

단계별 전력화 로드맵은 단기(~2027년), 중기(2027~2035년), 장기(2035~2040년)로 구분하여 제시하였다. 단기단계에는 시범부대를 대상으로 전투실험을 실시하여 점진적 도입 및 검증을 추진하였다. 중기단계에는 전투실험 결과를 토대로 임무수행 중 정찰·감시 임무분야부터 우선적으로 적용하여 점차 다른 임무로의 확대 적용을 추진하였다. 장기단계에는 다목적 무인차량의 전군 전력화 계획과 연계하여 플래시 라이다를 표준 센서로 확립할수 있도록하는 방안을 제시하였다. 이러한 단계별 접근은 급격한 기술 변화로 인한 부작용을 최소화하면서도 임무수행 능력 향상을 보장하는 현실적 방안으로 평가할 수 있었다.

정책적 지원방안으로는 국내 플래시 라이다 제조업체 육성과 연구개발 투자 확대, 군·산·학·연 협력체계 구축, 국방규격 제정 및 표준화 추진, 교육 및 군 정비 지원체계 구축, 신속획득제도 활용 등이 도출되었다. 특히 우리 군의

후방 집중형 정비·보급 체계를 고려하여 정비체계 구축과 예비 부품 재고 관리, 정비 매뉴얼 및 고장 진단 가이드 개발 등 구체적인 지원방안이 제시되었다. 이러한 분석을 통해 연구는 플래시 라이다 기술이 군사적 효용을 가지기 위해서는 단순 기능 구현을 넘어 기술 성숙도 관리, 데이터 표준화, 상호운용성 확보, 군·산·학·연 협력체계 구축이 함께 이루어져야 한다는 정책적 시사점을 제시하였다.

본 연구는 플래시 라이다의 군사적 적용 가능성을 종합적으로 분석하였으나 몇가지 한계를 갖는다. 우선 플래시 라이다는 아직 우리 군에서 실제로 배치·운용된 사례가 없어 분석의 상당 부분을 문헌과 이론적 검토로 진행했다. 이로 인해 실제 전장 환경에서의 성능이나 운용절차와 관련된 부분은 완전한 실증이 되지 않는다는 한계가 존재한다. 또한 플래시 라이다 기술은 전 세계적으로 발전 속도가 매우 빠른 분야이기 때문에 본 연구에서 제시한 성능 기준과 전력화 개념 역시 향후 기술 변화에 따라 지속적인 보완과 갱신이 필요하다. 더불어 비용 대비 효과 분석, 기상·지형 조건별 성능 비교와 같은 정량적·실증적 분석이 포함되지 못한 점도 본 연구의 범위적 한계로 남아 있다. 이러한 부분들은 향후 시범운용 데이터와 실측 자료가 확보되는 시점에 보다 구체적으로 후속 연구를 통해 보완할 필요가 있다.

제 2절 정책 제언

1) 정책제언의 기본 방향

본 연구는 Army TIGER 전투체계를 대표하여 다목적 무인차량에 탑재된 회전식 스캐닝 라이다의 기술적 한계를 확인하였다. 그 결과 기계식 회전 부품으로 인한 내구성 취약, 지속적 레이저 발산과 돌출 형태로 인한 생존성 위협, 핵심 부품의 높은 해외 의존도로 인한 유지보수 제약 등을 확인하였다.

이러한 한계 극복을 위해 본 연구에서는 플래시 라이다를 대안으로 제시하였다. 플래시 라이다는 회전이 없는 상태에서 레이저 펄스를 발산하기 때문에 회전식 스캐닝 라이다보다는 상대적으로 내구성이 우수하였고 전체 대상화면을

순간적으로 촬영하는 방식으로 은밀한 임무수행에 많은 기여를 하였다. 또한 국내 업체들의 높은 기술성숙도로 라이다 기술의 자립도를 높일 수 있는 장점이 있었다. 그러나 플래시 라이다의 성공적인 전력화를 위해서는 단순히 센서 기술을 교체하는 차원을 넘어 기술개발, 제도 정비, 인력 양성 등의 노력이 필요하였다.

플래시 라이다의 기술 자립 여부는 다목적 무인차량을 포함한 유·무인 복합전투체계의 작전 지속성, 성능 완성도, 국가 차원의 기술주권 확보와 직결되는 국가적 중요 과제로 사료된다. 현재 국내 플래시 라이다 기술은 연구 개발 단계에서 시제품 생산 단계로 전환하는 중요한 시점에 있으며 이에따라 내구성 및 환경적응성 강화, 전자파 대책, 생존성 향상 등의 기술 개발 및 고도화는 필수적으로 요구된다. 하지만 4차 산업혁명 시대의 빠른 기술 발전 속도는 우리 군이 갖고 있는 기존의 경직된 국방 획득 제도로는 따라가기 어려운 수준이다.

수년에 걸친 복잡한 절차를 거쳐 무기체계를 개발하고 나면 이미 해당 기술이 진부화되는 '획득의 역설'⁹⁶⁾이 종종 발생하고 있다. 따라서 플래시 라이다와 같은 첨단기술을 적시에 군에 도입하고 그 효과를 극대화하기 위해서는 기술 개발 지원, 협력체계 구축, 단계별 전력화, 표준화, 제도 혁신이 유기적으로 연계된 통합적 접근은 반드시 필요하다.

2) 플래시 라이다 핵심기술의 자립화 및 단계적 기술 지원 체계 구축

플래시 라이다의 성능은 SPAD 및 APD 검출기, 광학 송신부, 신호처리 ASIC 등 핵심부품에서 결정된다. 이러한 핵심 부품의 성능은 플래시 라이다의 탐지거리, 해상도 등의 작전운용성능을 결정짓게 된다. 그리고 다목적 무인차량의 임무수행 능력도 결정짓는다. 따라서 해당 부품을 국방 전략부품으로 지정하고 장기·다년도 R&D 방식으로 기술 자립화를 체계적으로 추진해야 한다.

구체적인 예를 들면 국방과학연구소는 선행연구 과제를 편성하여 기초 원천 기술 개발을 지원하고, 방위사업청은 신속획득 사업을 통해 기술 검증 기간을

96) 획득의 역설(Acquisition Paradox)은 무기체계 획득 과정이 장기화되면서 개발 완료 시점에는 이미 해당 기술이 구식화되거나 작전환경 변화로 인해 요구성능이 달라져 당초 목표했던 전력화 효과를 충분히 달성하지 못하는 현상을 의미한다.

단축하여 우수 기술의 신속한 전력화를 추진해야 한다. 또한 국방기술품질원의 국방규격 제정 지원과 한국산업기술평가관리원의 민군기술협력사업을 연계하고 방위사업청의 핵심기술 연구개발 예산을 배정하여 업체들이 안정적으로 기술 개발에 집중할 수 있는 환경을 조성해야 한다. 특히 개발 성공 시 일정 물량을 보장하는 성과연동형 계약 방식은 업체의 기술 내재화를 촉진하고 국내 공급망 안정성을 확보하는 효과가 있다.

성과연동형 계약 제도는 개발·양산 성과에 따라 정부가 보상 수준이나 조달 물량을 차등 지급하는 방식으로, 기업의 기술개발 동기를 강화하고 조달의 예측 가능성을 높이는 제도이다. 이러한 제도적 안전장치가 적용되면 민간 기업이 초기 투자비용과 상용화까지의 불확실성을 감수해야 하는 사업 위험을 완화시키고 국내 생산·공급망 구축을 안정적으로 추진하는 효과를 낼 것이다. 기술 리스크가 높은 분야일수록 이러한 제도적 안전망은 필수적이며, 플래시 라이다와 같이 국내 기술이 연구개발 단계에서 시제품 생산 단계로 전환하는 중요한 시점에 있는 기술에는 더욱 절실하다.

3) 혁신 촉진을 위한 복수경쟁형 R&D 및 경쟁적 프로토타이핑 도입

플래시 라이다는 기술 격차가 크고 다양한 접근 방식이 존재하므로 단일 업체 중심 개발은 혁신을 제한할 수 있다. 국방전력발전업무훈령에는 복수 경쟁형 연구개발 제도가 명시되어 있으나 실질적으로는 사업기본추진전략이나 구매계획서부터 대부분 단일업체를 선정하여 단일업체 연구개발 방법을 명시하여 추진하고 있다. 단일업체 연구개발 방식은 업체의 사업실패에 대한 부담은 완화시킬 수 있으나 업체가 높은 수준의 신기술 개발 역량을 보유하고 있음에도 군이 요구하는 최소한의 수준에만 맞추려는 도덕적 해이를 유발하게 된다.

따라서 복수의 연구개발 주체 또는 컨소시엄이 각기 다른 기술 경로를 제시하고 평가 단계별로 우수 기술을 선택하는 경쟁적 프로토타이핑 방식은 기술 창의성과 성공 가능성을 높일 수 있다. 복수경쟁형 연구개발 제도를 통해 복수 업체 또는 컨소시엄으로 구성된 연구개발 주관기관들이 군이 요구하는 목표를 향해 각기 다른 기술적 접근 방식으로 개발을 추진하도록 유도해야 한다. 주요

일정 단계마다 성과를 평가하여 가장 우수하거나 실효성이 높은 기술을 채택하는 경쟁적 프로토타이핑 방식을 반영한다면 건전한 기술 경쟁을 유도하여 개발 비용을 절감하고 잠재력 있는 혁신적인 아이디어가 사장될 위험을 줄일 수 있다. 다만 일정 수준 이상의 연구성과를 달성한 업체에는 연구비 보상, 차기 사업 우대 등 실질적 보상체계를 마련하여 기술 도전 문화를 조성해야 한다. 또한 비록 최종적으로 채택되지 않더라도 일정 수준의 기술적 성취를 달성한 업체에는 차기 유사 사업 참여 시 가점을 부여하거나 투입된 연구개발비의 일부를 보상하는 방안 등으로 그 연구 성과와 노력을 인정하는 보상체계를 마련해야 한다. 이는 기업들이 적극적으로 혁신적 기술 개발에 도전할 수 있는 환경을 조성하고 장기적으로 국방 기술 생태계 전반의 역량을 강화하는 효과를 가져올 것이다.

4) 군·산·학·연 통합 협력체계 구축과 테스트베드 제공

플래시 라이더의 상용화와 전력화를 위해서는 군의 운용경험, 산업계의 양산기술, 대학·연구기관의 원천기술도 유기적으로 연결되어야 한다. 플래시 라이더와 같은 국방 과학기술은 어느 한 주체의 노력만으로는 군에 최적의 기술 수준으로 적용하기가 어렵다. 플래시 라이더에 대한 군의 운용경험, 기술력을 갖춘 업체의 양산 기술, 대학 및 연구소의 창의적인 아이디어와 원천기술이 유기적으로 결합될 때 비로소 폭발적인 시너지를 창출할 수 있다.

이를 위해 국방부·방위사업청·국방과학연구소·국방기술진흥연구소, 주요 방산업체(현대로템, 한화에어로스페이스 등)와 라이더 전문기업(에스오에스랩 등), 대학(KAIST 등) 및 연구기관(ETRI 등)이 참여하는 '무인체계 플래시 라이더 기술협의체' 구성을 제안한다. 이 협의체는 단순한 기술 교류의 장을 넘어 세계 기술 발전 추세와 미래 전장 환경 변화를 분석하여 향후 10년, 20년을 내다보는 무인체계에 대한 플래시 라이더 기술 발전 로드맵을 공동으로 수립하고 각 주체의 강점을 기반으로 명확한 역할 분담 체계를 구축하는 컨트롤 타워 역할을 수행한다.

역할분담의 예를 들면 대학과 연구소는 기술성숙도 레벨 1~3 수준의 기초

원천기술 연구에 집중하고, 업체들은 이를 이어받아 탐색개발 단계인 기술성숙도 레벨 4 수준 이상의 무기체계 적용 및 양산 기술을 개발한다. 그리고 군은 탐색개발 단계부터 참여하여 소요를 제기하고 운용성 입증 및 검증을 담당한다. 이와 더불어 정기적인 기술 교류 및 시험평가 세미나 등을 연 1회 이상 실시하고, 컨소시엄 내 각 주체 간의 소통 창구를 개설하여 지속적으로 유지해야 한다. 또한 국방기술품질원 주관의 통합 테스트베드를 구축하여 중소·벤처 기업도 군 기준에 기반한 공정한 검증을 받을 수 있도록 해야 한다. 현재의 대기업 중심 방위산업 생태계에서는 혁신적인 기술을 보유한 중소 및 중견업체가 아이디어를 실현하고 상용화하기가 매우 어렵다. 따라서 중소·중견업체가 개발한 시제품의 성능을 군의 기준에 따라 객관적으로 시험하고 인증하는 제도를 마련해야 한다. 이 인증을 통과한 기술에 대해서는 군 시범운용 참여 기회를 우선 부여하고, 신속시범획득사업과 연계하여 빠르게 군에 도입될 수 있는 패스트트랙을 제공해야 한다. 또한 자금력이 취약한 중소기업에 대해서는 기술신용보증 한도 확대, 정책자금 우선 지원, 세제 혜택 등 금융지원책도 함께 마련해야 한다.

5) 실증 기반의 단계별 전력화 전략 수립

새로운 기술을 충분한 운용 검증 없이 대규모로 도입될 경우 조직적 반발, 전술 부적합, 예산 낭비 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 플래시 라이더는 TIGER 시범여단의 특정 부대를 대상으로 최소 1년 이상 집중 운용하여 성능 데이터, 정비 소요, 전술적 활용 가능성을 종합적으로 평가해야 한다. 이렇게 축적되는 데이터는 기술 개선뿐 아니라 향후 운용개념 발전과 교리 정립의 핵심 기반이 된다.

단기 단계(~2027년)에서는 전방 시범부대를 대상으로 실전 검증에 우선 집중해야 한다. 다목적 무인차량 또는 라이더를 적용하는 유·무인 복합전투체계 시험평가로 실제 임무수행 지형에서의 3계절에서 방위되는 성능을 검증해야 한다. 예를 들어 영하 20도 이하의 혹한기에는 배터리 성능 저하와 광학계 결빙 문제, 영상 35도 이상의 혹서기에는 열 왜곡과 전자부품 과열 문제 등을

분석하고 장마철에는 빗물에 의한 신호 감쇄와 수면 반사 문제, 겨울철 적설 환경에서의 탐지 성능 문제를 분석해야 한다.

중기 단계(2027~2035년)에서는 임무수행 유형별로 임무장비 모듈을 선택적으로 적용하기 위한 점진적 확대가 중요하다. 정찰·감시 임무처럼 플래시 라이더의 장점이 극대화되는 분야부터 우선 적용하고, 성공 사례를 바탕으로 타 임무 분야로 확산하는 전략이 필요하다. 다목적 무인차량의 단계적 전력화 계획과 연계하여 플래시 라이더 장착은 초기에는 정찰·감시 임무장비 모듈을 우선 전력화하고, 2년간의 운용 경험을 바탕으로 화력지원 임무 차량, 다음은 수송·보급 임무차량으로 순차적으로 확대하는 단계적 접근이 필요하다.

장기 단계(2035~2040년)에서는 다목적 무인차량의 전군 전력화와 연계하여 플래시 라이더를 표준 센서로 확립하고 차세대 기술 개발을 통한 지속적인 성능 향상도 추진해야 한다. 또한 플래시 라이더의 특성을 반영한 새로운 작전운용성능(ROC) 정립도 필요하다. 본 연구가 제시한 저피탐성 및 생존성, 인공지능 기반의 데이터 처리능력, 항법 지속성 지표는 미래 지능형 무인체계에 적합한 평가 기준으로 활용될 수 있다. 기존의 회전식 스캐닝 라이더 중심의 성능 평가 기준을 벗어나 플래시 라이더의 고유한 장점을 반영한 새로운 성능 지표를 개발하고 이를 통해 기술의 실질적 기여도를 정확하게 평가할 수 있어야 한다.

6) 표준화와 상호운용성 기반의 획득체계 혁신

플래시 라이더는 유·무인 복합전투체계 전체가 데이터를 공유하며 운용되는 네트워크 중심전 환경에서 사용되므로 하드웨어 인터페이스와 데이터 포맷의 국방 표준화 확립이 필요하다. 플래시 라이더의 데이터 형식, 통신 프로토콜, 물리적 인터페이스 등을 국방규격으로 제정하여 다양한 제조사의 제품을 혼용할 수 있게 해야 한다. 이는 특정 국가와 특정업체에 의한 기술 종속을 방지하고 경쟁을 통한 기술 발전을 촉진시킬며 향후 성능개량을 용이하게 한다.

특히 NATO STANAG 4586 등 국제 표준과의 호환성을 고려해야 연합

작전 및 장기 군수지원 측면에서 효율성이 확보된다. 다목적 무인차량이 다양한 임무장비 모듈들을 플러그 앤 플레이 방식으로 통합하여 운용하듯이 플래시 라이다 역시 표준화된 인터페이스를 통해 다양한 플랫폼에 쉽게 적용될 수 있어야 한다. 이를 위해 국방기술품질원 주관으로 방산업체·군·연구기관 등이 참여하여 호환성이 고려된 국방규격을 제정해야 한다. 동시에 획득체계 또한 상향식(업체개발 기술→군 시범 적용→소요 결정) 신속획득 패러다임으로 개편하여 기술 발전 속도에 발맞춘 적시 도입을 가능하게 해야 한다.

최근 도입된 통합소요기획은 선행연구와 소요검증을 동시에 진행하여 획득 기간 단축을 목표로 하는 의미있는 진전이다. 그러나 이 제도는 본질적으로 합동참모본부가 주도하는 하향식 기획 특성을 유지하고 있다. 즉 군의 예측된 소요를 기반으로 과제를 기획하고 관리하는 데 중점을 두므로, 민간 영역에서 자생적으로 발현되는 예측 불가능한 파괴적 혁신 기술을 선제적으로 발굴하고 수용하는 데는 한계가 있다.

따라서 통합소요기획의 잠재적 한계를 보완하고 상호 시너지 효과를 창출하기 위해 상향식 접근법, 즉 업체주도형 신속획득 제도를 과감하게 운용해야 한다. 이는 기술력 있는 업체가 개발한 혁신 기술을 군이 먼저 제시받아 신속하게 시범 운용하고 그 군사적 효용성이 입증되면 통합소요기획 체계와 연동하여 신속히 소요를 결정하고 전력화하는 '선 성능확인 후 기획' 방식이 필요하다.

통합사업관리팀은 주장비와 전력화 지원요소(교리·정비·교육 등)의 동시 개발을 기본 원칙으로 삼아야 하며 이는 K-MOSA 철학과도 부합한다. 첨단 무기체계의 성공적 전력화는 장비 자체의 성능뿐 아니라 이를 실질적으로 뒷받침하는 운용·정비·교육·지속지원 체계의 준비에 따라 좌우된다. 그럼에도 불구하고 현행 획득 방식의 관행은 하드웨어 개발 일정에 과도하게 집중되는 경향이 강해 전력화지원요소의 일정 및 예산 확보가 후순위로 밀리는 문제가 발생하고 있다.

특히 정밀 광학센서와 고도화된 소프트웨어가 결합된 플래시 라이다와 같은 첨단 장비의 경우, 군사교리·편제·운용절차 등의 전투발전지원요소와 기술교범·정비장비·정비시설 등의 통합체계지원요소 확보가 지연되면 야전 배치 초기 단계부터 장비 성능이 충분히 발휘되지 못하는 요인이 된다. 따라서 통합사업

관리팀은 주장비 개발 초기 단계부터 전력화지원요소 확보 계획을 통합적으로 수립하고 교리·편제·훈련체계·정비체계 등 각 요소 간 상호 연계성을 평가하여 병행 개발이 가능하도록 사업관리 구조를 재편성해야 한다.

[표 5-1] 정책제언과 관련된 장·절 ⁹⁷⁾

구 분	주요 내용	비 고
핵심 기술의 자립화 및 단계적 기술 지원 체계 구축	· 핵심부품을 국방 전략부품으로 지정	2장 2절 1), 2) 2장 3절 1), 2) 3장 1절 1)
	· 국과연 · 방사청·업체 연계 연구개발 투자 확대	3장 1절 1) 4장 4절 2)
	· 성과연동형 계약제도 적용	4장 4절 2)
복수 경쟁형 연구개발 및 경쟁적 프로타이핑 도입	· 복수업체 / 컨소시엄 간 기술경쟁 유도	3장 1절 1), 2)
	· 단계별 성과평가로 우수기술 선정	4장 4절 2)
	· 기술 미채택 업체 보상체계 마련	4장 4절 2)
군·산·학·연 통합 협력체계 구축과 테스트베드 제공	· 무인체계 플래시 라이다 기술협의체 구성	3장 1절 3) 4장 1절 1) 4장 4절 2)
	· 국방기술품질원 주관 테스트베드 구축	4장 4절 2)
	· 중소기업 진입지원	4장 4절 2)
단계별 전력화 계획 수립	· 단기(~2027년) 시범부대 실전 검증, 3계절 환경시험 실시	4장 1절 1) 4장 3절 1)
	· 중기(2027년~2035년) 정찰·감시 임무 우선 적용 이후 화력지원, 수송·보급 순으로 순차적 확대	4장 3절 2)
	· 장기(2035년~2040년) 새로운 ROC 지표 정립, 표준기준 정립	4장 3절 2), 3) 4장 4절 2)
표준화와 상호운용성 확보	· 국방규격 제정	3장 2절 1), 2), 3)
	· NATO STANAG 4586 호환성 확보	4장 3절 4 4장 4절 2)

97) 5장 2절의 각 정책제언은 핵심내용(개조식)과 그 주장의 근거가 되는 논문내 жал정을 매칭함

이상에서 살펴본 바와 같이 다목적 무인차량에 플래시 라이다를 적용하는 방안은 기존 회전식 스캐닝 라이다를 단순히 다른 방식의 센서로 교체하는 수준에 머무르지 않는다. 이는 Army TIGER 전투체계의 미래 전장 환경을 대비하기 위한 운용 개념의 재정립과 더불어 감시·정찰체계의 신뢰성 강화, 플랫폼 생존성 제고, 공급망 안정성 확보 등 전력 운용 전반의 구조적 혁신을 요구하는 전환이다. 따라서 플래시 라이다 적용은 단순한 기술적인 선택이 아닌 Army TIGER 체계가 지향하는 미래 국방 패러다임 전환의 핵심 변화를 실질적으로 뒷받침할 수 있는 의미 있는 도전임을 확인하게 되었다.

본 논문은 Army TIGER 다목적 무인차량에 플래시 라이다를 적용하는 방안을 기술적·운용적·정책적 차원에서 종합적으로 분석하고 구체적인 발전 방향을 제시한 최초의 시도라는 점에서 학술적 의의를 찾을 수 있겠다.

다만 플래시 라이다를 통한 실증적 검증은 실시하지 못했다. 그런 이유로 축적된 이론적 기반 위에서 실무적 적용 방안을 구체화하긴 했어도 플래시 라이다를 통한 실증적 검증이 필요하다. 향후 연구에서 플래시 라이다를 활용한 실증적 검증이 같이 이루어진다면 특정한 라이다 기술의 군사적 효과를 입증하는 데 그치지 않고 향후 첨단 과학기술 정책 연구에도 새로운 방향성을 제공할 것이다.

참 고 문 헌

1. 국내문헌

1) 연속간행물

- [1] 강경일, 윤현달. (2023. 3. 7) "국방부, 국방혁신 4.0 기본계획 발표. AI 과학기술 강군 육성" 『대한민국 정책브리핑』 서울 : 국방부
- [2] 국방부. (2023. 3. 7) "국방부, 국방혁신 4.0 기본계획 발표" 『대한민국 정책브리핑』 서울 : 국방부 <https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156555632> (검색일 : 2025. 9. 17)
- [3] 김관용. (2020. 8. 10) "국방중기계획 무인 무기체계 전력화, 고위험 임무서 전투원 보호" 서울 : 이데일리 <https://www.edaily.co.kr/news/read?newsId=02624006625866008> (검색일 : 2025. 10. 15)
- [4] 김당. (2018, 9, 28) "드론 전투시대 열렸다...육군 드론봇 전투단 창설" KPI 뉴스 <https://www.kpinews.kr/newsView/1065589713347130> (검색일 : 2025. 10. 11)
- [5] 김대원, 이재국. (2023. 10. 31) "AI 기반의 유·무인 복합전투체계 발전을 위한 제언" 『KRIT 이슈페이퍼』 경남 진주 : 국방기술진흥연구소
- [6] 김동현. (2023. 9. 21) "해군 완전자율 유·무인 복합전투체계로 미래 전장 대비" 서울 : 한국경제 <https://www.hankyung.com/article/2023092163621> (검색일 : 2025. 10. 11)
- [7] 김동현. (2024. 9. 26) "육군 유·무인 복합 아미타이거 전투체계로 전환한다" 서울 : 한국경제 <https://www.hankyung.com/article/2024092687121> (검색일 : 2025. 10. 14)
- [8] 김명섭, 김기택, 정도현. (2015) "군 표준차량의 플랫폼 표준화를 통한 전력지원체계 강화연구" 『한국자동차학회논문집 3권』 서울 : 한국자동차공학회
- [9] 김민석. (2018, 10. 7) "밀덕텔링, 알보병 없는 미래 육군 아미타이거 4.0이

- 성공하려면" 서울 : 비즈한국 <https://www.bizhankook.com/bk/articlePrint/16361> (검색일 : 2025. 10. 11)
- [10] 김백영. (2025. 1. 6) "2025년 격동의 동북아시아를 전망하며" 『아시아 브리프』 (5권 1호) 서울 : 서울대학교 아시아연구소
- [11] 김원정. (2021. 12. 14) "아이탑스오토모티브(주), 플래시 타입 라이다로 근 · 중거리 감지 분야 선점할 터" 서울 : 산업일보 <https://kidd.co.kr/news/225203> (검색일 : 2025. 10. 9)
- [12] 김태현. (2023. 2. 22) "작년 합계출산율 0.78명...OECD 평균 절반 못미쳐" 서울 : 뉴시스 <https://www.newsverse.kr/news/>(검색일 : 2025. 9. 3)
- [13] 남승현. (2023. 2. 6) "유오케이, 2023 드론쇼코리아서 라이다 센서 및 관련 플랫폼 선보인다...자율주행차 및 스마트 시티 구축에 이바지할 것" 서울 : AVING <https://kr.aving.net/news/articleView.html?idxno=1776157> (검색일 : 2025, 9, 19)
- [14] 대한뉴스. (2024. 9. 12) "북한 우라늄 농축시설 첫 공개..정부 강력히 규탄" 서울 : KTV <https://www.yna.co.kr/view/MYH20240913008600641> (검색일 : 2025. 9. 3)
- [15] 더 사이언스 타임즈. (2018. 4. 3) "드론이 떴로 날아가 폭탄 투하?... 육군 드론봇 전투체계 개념화" 서울 : 더 사이언스 타임즈 <https://www.sciencetimes.co.kr/nscvrg/view/menu/249?searchCategory=221&nscvrgSn=175848> (검색일 : 2025. 10. 11)
- [16] 류현주. (2021. 9. 22) "뉴시스 Pic 육군, 첨단기술 접목한 최상위 전투체계 Army TIGER 4.0 공개" 서울 : 뉴시스 https://www.newsis.com/view/NISX20210917_0001588140 (검색일 : 2025. 10. 11)
- [17] 박대로. (2021. 9. 22) "육군, 첨단기술의 최상위 전투체계 Army TIGER 4.0 전투실험 현장 공개" 서울 : 파이낸셜뉴스 <https://www.fnnews.com/news/202109221236092291> (검색일 : 2025. 9. 5)
- [18] 박미영. (2019 6, 12) "4차 산업 신기술 기반, 미래 전투체계 구축한다" 서울 : 보안뉴스 <https://m.boannews.com/html/detail.html?idx=>

80318 (검색일 : 2025. 10. 11)

- [19] 박응진. (2023. 3. 5) "軍 '킬웹' 적용해 北 효과적 타격... AI가 최적 수단 실시간 파악" 서울 : 뉴스1 <https://www.news1.kr/diplomacy/defense-diplomacy/4970996> (검색일 : 2025. 10. 11)
- [20] 박은경. (2023. 3. 3) "군, '킬웹'으로 킬체인 강화...북한의 핵·미사일 위협 대응" 서울 : 경향신문 <https://www.khan.co.kr/article/202303031607001> (검색일 : 2025. 10. 11)
- [21] 박진우. (2024. 9. 16) "무인전쟁 ② 조종사 암호하고 공격까지...유·무인 전투체계 킬웹" 서울 : 조선일보 <https://biz.chosun.com/industry/company/2024/09/16/AOTA6YWRZNC2PJYMBH62Y5QFFI/> (검색일 : 2025. 10. 11)
- [22] 박진형. (2021. 12. 14) " 김구현 아이탑스 대표 플래시 라이다로 모빌리티 시장 공략" 서울 : 전자신문 <https://www.etnews.com/20211213000034> (검색일 : 2025. 10. 9)
- [23] 박현진. (2020. 3. 15) "미쓰비시 전기, 2D MEMS 미러 스캐닝 기술 적용한 라이다 개발" 서울 : 인공지능 신문
- [24] 박형진. (2021, 4, 27) "만도 컨소시엄, 라이다 수행사업 따냈다." 서울 : 전자신문 <https://www.etnews.com/20210427000230#>: (검색일 : 2025. 10. 7)
- [25] 배준우. (2022. 6. 1) "AI 무장 아미타이거 전격 출범...박정환 육군총장 주관" 서울 : SBS 뉴스 https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1006781814(검색일 : 2025. 10. 11)
- [26] 배지열. (2024. 5. 9) "해군 5전단 유·무인 체계 발전방안 논의" 서울 : 국방일보 <https://www.hankyung.com/article/2023092163621> (검색일 : 2025. 10. 11)
- [27] 방위사업청. (2024. 3. 7) "2024 방위사업청 주요 정책 추진계획" 『대한민국 정책브리핑』 경기 과천- 방위사업청 <https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148926713> (검색일 : 2025. 10. 10)
- [28] 방위사업청 공식 블로그. (2016. 12. 26) "방위사업청, 미래 보병부대

- 무인체계 보병용 다목적 무인차량 군 시범운용 착수" 서울 : 방위사업청
<https://m.blog.naver.com/dapapr/220895102775>(검색일 : 2025. 10. 20)
- [29] 비전시스템. (2016, 2, 29) "KETI, 스캐닝 라이다 광학엔진 플랫폼 개발"
 경기 부천 : 비전시스템 https://visionsystem.kr/technical-info?tpf=board/view&board_code=1&code=460 (검색일 : 2025 10. 7)
- [30] 손소영, 김한솔, 손성현. (2024. 11. 18) "병역자원 감소 대응을 위한
 국방과학기술 현황 분석" 『KRIT 이슈페이퍼』 경남 진주 : 국방
 과학진흥연구소
- [31] 심현철. (2023. 12월) "라이다 측량기법을 활용한 고분분포 현황 조사"
 『2023 문화재』 (56권) 대전 : 국립 문화유산연구원
- [32] 신일범. (2024, 6, 26) "코스닥 첫 라이다 기업 에스오에스 랩 경쟁력은?"
 서울 : 더일렉 <https://www.thelec.kr/news/articleView.html?idxno=28748> (검색일 : 2025. 10. 9)
- [33] 셸든의 밀리터리. (2021. 6. 6) "한화디펜스 지능형 다목적 무인차량"
<https://maily.so/sheldon/posts/lxyowd40z28> (검색일 : 2025. 10. 22)
- [34] 양욱. (2023. 6. 29) "북한의 핵무기 개발현황 : 핵그림자를 드리우는
 북한의 인지전 시도" 『이슈브리프』 서울 : 아산정책연구원
- [35] 오동준. (2022. 6. 10) "위리워플랫폼 입은 아미타이거 드론봇과 2025년
 미래전 이끈다." 서울 : 국방신문 <https://www.gukbangnews.com/news/articleView.html?idxno=4146> (검색일 : 2025. 10. 11)
- [36] 오상현. (2023. 10. 24) "해군, 완전자율 유무인 복합전투체계 논의 본격화"
 서울 : 헤럴드경제 <https://biz.heraldcorp.com/article/3212609>
 (검색일 : 2025. 10. 11)
- [37] 오세진. (2018. 3. 13) "육군, 현대전에 적합한 위리어 플랫폼 공개
 전시회 개최" 서울 : 뉴데일리 <https://www.newdaily.co.kr/site/data/html/2018/03/13/2018031300035.html> (검색일 : 2025. 10. 11)
- [38] 유용원. (2022. 11. 9) "군 초급간부 지원율, 만족도 추락...애국페이만
 강요할 때 아니다" 서울 : 조선일보 <https://www.chosun.com/opinion/2022/11/09/E73TH5DY45D33DHLH74BM4V744/> (검색일 :

2025. 9. 3)

- [39] 이규택, 이진재, 문연국. (2016. 5. 16) "라이다 기술동향과 산업전망" 『KEIT PD Issue Report』 (p. 59) 대구 : 한국산업기술평가관리원
- [40] 이석진. (2025. 4. 7) "현대차, 자율주행차 라이다에서 카메라로 급선회" 서울 : 더일렉 <https://www.thelec.kr/news/articleView.html?idxno=34494> (검색일 : 2025. 9. 10)
- [41] 이승환. (2024. 1. 12) "SOSLAB Demonstrates Global LiDAR Prowess at CES 2024" 서울 : Business Wire <https://www.businesswire.com/news/home/20240111981980/en/SOSLAB-Demonstrates-Global-LiDAR-Prowess-at-CES-2024> (검색일 : 2025. 9. 23)
- [42] 이주호. (2022. 11. 17) "South Korea Reveals New Unmanned Navy Sea GHOST Concept" 『한화오션』 서울 : Naval news <https://www.navalnews.com/naval-news/2022/11/south-korear-eveals-new-navy-sea-ghost-concept/> (검색일 : 2022. 11. 15)
- [43] 이현일. (2018. 2. 28) "서울시, 자율주행차의 눈 라이다 항공매핑에 적용" 서울 : 뉴스1 <https://www.news1.kr/society/general-society/3247490> (검색일 : 2025. 9. 19)
- [44] 이현호. (2023. 6. 27) "드론·로봇으로 적 섬멸...육군 아미타이거 사단급 확대 추진" 서울 : 서울경제 <https://sedaily.com/NewsView/29R0NXCYN1> (검색일 : 2025. 10. 14)
- [45] 장길수. (2021, 7, 4) "현대차그룹, 라이다 센서 개발 사내 벤처 오토엘 분사" 서울 : 로봇신문 <https://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=25492> (검색일 : 2025. 10. 7)
- [46] 장은지. (2020. 6. 19) "AI 기반 미래 전투체계 Army Tiger 4.0" 『M 프렌즈』 국방부 공식블로그 <https://m.blog.naver.com/mnd9090/222005709209> (검색일 : 2025. 9. 5)
- [47] 전미준. (2022. 5. 11) "현대자동차, 레벨 4 자율주행 기술 영상 공개... 자율주행 시대 고객 비전 담았다" 서울 : AI 신문 <https://www.aitimes.kr/news/articleView.html?idxno=25004> (검색일 : 2025. 9. 19)

- [48] 정상빈. (2022. 7. 11) "군용 지상무인차량 개발동향" 『산업동향』 (VOL. 97) 충남 천안 : 한국자동차연구원
- [49] 정새배. (2018. 10. 18) "육군, 2030년까지 백두산 호랑이 체계 도입... 모든 부대 차량화" 서울 : KBS 뉴스 <https://news.kbs.co.kr/news/pc/view/view.do?ncd=4054174> (검색일 : 2025. 10. 11)
- [50] 정현중, 정태경, 김정훈, 백예진, 전우영. (2022. 11. 2) "유무인 협업 (MUM-T) 체계 기술 수준평가" 『KRIT 이슈페이퍼』 경남 진주 : 국방기술진흥연구소
- [51] 조문정. (2024. 5. 23) "국방혁신위·국방혁신특별자문위, 육군 아미타이거 방문" 서울 : 뉴데일리 <https://www.newdaily.co.kr/site/data/html/2024/05/23/2024052300290.html> (검색일 : 2025. 10. 14)
- [52] 조주형. (2025. 2. 2) "국군, 초급간부 이어 중간급 간부 이탈 심화" 서울 : 에팸코리아 <https://www.fmkorea.com/7974249471> (검색일 : 2025. 9. 5)
- [53] 차종환. (2018. 6. 20) "[기획]고정밀 센서 라이다 자율주행, 도시측량 핵심기술 각광" 서울 : 정보통신신문 <https://www.koit.co.kr/news/articleView.html?idxno=73379> (검색일 : 2025. 9. 19)
- [54] 최한솔. (2023 6. 8) "전투도 무인으로...해군 유무인 복합 전투 첫 선" 서울 : KNN <https://news.knn.co.kr/news/article/141091> (검색일 : 2025. 10. 11)
- [55] 파이낸셜뉴스. (2023. 1. 11) "군 북 전역 감시능력 강화...선제타격 전력 조속 확보" 서울 : 파이낸셜 뉴스 <https://www.fnnews.com/news/202301111358230962> (검색일 : 2025. 10. 11)
- [56] 한원석. (2022. 1. 10) "육군, Army TIGER 여단급 시범부대 출범" 서울 : 대한뉴스 <https://www.daehannews.kr/mobile/article.html?no=499766> (검색일 : 2025. 10. 11)
- [57] 현대로템 공식 블로그. (2024. 6. 18) 『4세대 HR-세르파 최초 공개』 경기 의왕 : 현대로템 <https://blog.hyundai-rottem.co.kr/985> (검색일 : 2025. 10. 16)

- [58] 현대로템 블로그. (2022. 1. 10) "현대로템, 국내 첫 다목적 무인차량 시범운용 완료", 경기 의왕 : 현대로템 <https://blog.hyundai-rotem.co.kr/656> (검색일 : 2025. 11. 1)
- [59] 황성훈. (2024. 10. 29) 『Monthly Focus ③ 인간을 대신해 전쟁하는 무인 지상 차량(UGV)의 군사적 활용』 서울 : 산업뉴스 <https://news.yeogie.com/entry/271831> (검색일 : 2025. 10. 20)
- [60] The Korea Herald. (2025, 7, 29) "LG Innotek Teams Up with U.S. LiDAR Company Aeva" 서울 : 코리아 헤럴드 https://www.koreaherald.com/article/10542529?utm_source (검색일 : 2025. 10. 9)

2) 비연속간행물

- [61] 국방부. (2023. 3. 3) 『국방혁신 4.0 기본계획(비공개)』 서울 : 국방부
- [62] 국방부. (2023. 3. 13) 『국방혁신 4.0 기본계획』 서울 : 국방부
- [63] 국방부 장비관리과. (2025. 2. 4) 『성과기반군수지원 훈령』 서울 : 국방부
- [64] 김기섭. (2024. 10. 14.) "자율주행의 눈, 라이다 센서 기술 및 산업계 적용사례(PPT)" 경기 판교 : SOS Lab
- [65] 김두형. (2025. 4. 12) "국방무인체계 강의록" 서울 : 한성대학교
- [66] 김상규. (2021) 『다목적 무인차량 군 운용성 결과(비공개)』 충남 계룡 : 육군 시험평가단
- [67] 김상규, 김성학, 김기조. (2025. 2월) 『다목적 무인차량 구매시험평가 결과(비공개)』 충남 계룡 : 육군 시험평가단
- [68] 방위사업청. (2019. 11월) 『유·무인 복합체계 발전방안 연구(비공개)』 경기 과천- 방위사업청
- [69] 방위사업청, 국방진흥연구소 (2024. 7. 8) 『'24-38 국방기술기획서(일반본)』 경기 과천 : 방위사업청, 경남 진주 : 국방진흥기술연구소
- [70] 반승훈. (2025. 8. 5) "아이탑오토모티브 라이다 소개 자료(PPT)" 수원 : 아이탑오토모티브
- [71] 양욱. (2025. 1. 20) 『북한의 2024년 군사동향과 2025년의 선택』

서울 : 아산정책연구원

- [72] 여현구, 조보현, 이기철, 김성태, 박토정. (2024. 1. 19) 『Army TIGER 보병여단 전력의 지능화를 위한 요구능력 발전방향』 대전 : 육군 미래혁신연구센터
- [73] 윤여설. (2022. 12. 8) 「공군비전 2050 동영상」 『한국공군』 월간공군 인터넷 홈페이지 <https://yys1019.tistory.com/16154239> (검색일 : 2025. 10. 11)
- [74] 유튜브. (2022. 3. 13) "미래 육군의 전투체계를 미리 만나다 육군과 학화 전투훈련단 아미타이저 4.0 전투실험(동영상)" 서울 : KFN 뉴스 <https://youtu.be/ZVvmJ4E4UVI> (검색일 : 2025. 10. 21)
- [75] 이상현. (2023. 10) 『국방 핵심부품 국산화의 경제적 효과 및 정책 제언』 세종 : 산업연구원(KIET)
- [76] 임영일, 강현영. (2024. 3월) "2023년 출생통계(확정)" 『인구동향조사 보도자료』 서울 : 통계청
- [77] 임용진, 이선현 외. (2022. 1. 25) 『미래국방기술전략 2030(요약본)』 경남 진주 : 국방기술진흥연구소
- [78] 조기춘. (2022. 2. 10) 『라이다 포인트 클라우드 처리 및 응용』 서울 : 건국대학교
- [79] 미래창조과학부. (2014, 2. 27) 『경쟁적 R&D 추진가이드라인(안)』 경기 과천시 : 미래창조과학부
- [80] 인터넷 첨단운전자 지원시스템 교육 블로그 https://expertateverything.in/advanced-driver-assistance-systems-adas-technology/#google_vignette. (검색일 : 2025. 9. 10)
- [81] https://yoda.wiki/wiki/Lunar_Laser_Ranging_experiments#google_vignette (검색일 : 2025. 9. 10)
- [82] 현대자동차그룹 인터넷 홈페이지 <https://www.hyundaimotorgroup.com/ko/story/CONT0000000000002016> (검색일 : 2025. 10. 22)
- [83] HOMEFAN. (2025. 3월) 『국방개혁 기본계획 2025 AI 스마트 강군 발전계획』 <https://home.8949ok.kr/%EA%B5%AD%EB%B0%A9%EA>

%B0%9C%ED%98%81-%EA%B8%B0%EB%B3%B8%EA
%B3%84%ED%9A%8D-2025-ai-%EB%AC%B4%EC%9D%B8
%ED%99%94-%EC%8A%A4%EB%A7%88%ED%8A%B8%EA
%B0%95%EA%B5%B0/ (검색일 : 2025. 10. 10)

2. 국외문헌

1) 연속간행물

- [84] Ahmad, M, Bahri, M, & Sawan, M. (2024. 9. 30). "MEMS Micromirror Actuation Techniques : A Comprehensive Review of Trends, Innovations, and Future Prospects" 『Micromachines』 (Vol. 15, No. 10, Article 1233) Basel, Switzerland : MDPI Aktiengesellschaft <https://www.mdpi.com/2072-666X/15/10/1233> (검색일 : 2025. 9. 6)
- [85] Aull, B. F, Duerr, E. K., Frechette, J. P, McIntosh, K. A., Schuette, D. R, & Younger, R. D. (2018. 3. 4) "Large-Format Geiger-Mode Avalanche Photodiode Arrays and Readout Circuits" 『IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics』 (Vol. 24, No. 2, Article 3800510) Piscataway, New Jersey, USA : IEEE <https://ieeexplore.ieee.org/document/8007179> (검색일 : 2025. 10. 4)
- [86] Bender, P. L, Faller, J. E. & Kaula, W. M. (1970. 4. 3) "The Lunar Laser Ranging Experiment" 『Science』 (Vol. 168 No. 3930. pp 123-128) Washington, D.C. USA : American Association for the Advancement of Science
- [87] Chen, Y, Wang, D, Thomas, L, Dantu, K, & Koppal, S. J. (2023. 2. 9). "Design of an Adaptive Lightweight LiDAR to Decouple Robot-Camera Geometry" 『IEEE Transactions on Robotics』 (Vol. 40, No. 6, pp. 2254-2271) Piscataway, New

- Jersey. USA : IEEE Geoscience and Remote Sensing Society
<https://ieeexplore.ieee.org/document/10453967> (검색일 : 2025. 9. 17)
- [88] Collis, R. T. H. (1970. 1. 12) "Lidar : A New Atmospheric Probe" 『Applied Optics』 (Vol. 9, No. 8, pp 1782-1788) Washington, D.C. USA : Optica Publishing Group
- [89] Dimitrievski, M, Jacobs, L, Grujic, I, Talavera, E, Mohan, N, Shahid, A. & Moerman, I. (2022) "Comparative Analysis of Radar and Lidar Technologies for Automotive Applications" 『IEEE Transactions on Vehicular Technology』 (pp. 5-13) Piscataway, New Jersey. USA : IEEE
- [90] Gaer, J, Stack, R., & Weidner, R. (2010. 4. 19) "Compact 3D Flash Lidar Video Cameras and Applications. In R. Stettner (Ed.), Proceedings of SPIE 7684 - Laser Radar Technology and Applications" (Vol. 7684) Bellingham, Washington, USA
<https://doi.org/10.1117/12.857606> (검색일 2025. 10. 9)
- [91] Georgopoulos, M, et al. (2023, Jan. 22) "Above-Ground Forest Biomass Estimation using Multispectral LiDAR Data in a Multilayered Coniferous Forest" 『Geographic Information Forum』 (Vol. 1, pp. 22-33) Vienna, Austria : Austrian Academy of Sciences Press.
- [92] Glennie, C, & Lichti, D. D. (2010. 6.22) "Static Calibration and Analysis of the Velodyne HDL-64E S2 for High Accuracy Mobile Scanning" 『Remote Sensing』 (Vol. 2, No. 6, pp. 1610-1624) Basel, Switzerland : MDPI Aktiengesellschaft
<https://www.mdpi.com/2072-4292/2/6/1610> (검색일 : 2025. 10. 2)
- [93] Gschwendtner, A. B. & Keicher, W. E. (2000) "Development of Coherent Laser Radar at Lincoln Laboratory" 『MIT Lincoln Laboratory Journal』 (Vol. 12, No. 2. pp. 201-214) Lexington, Massachusetts. USA : MIT Lincoln Laboratory

- [94] Harris, M. (2014. 9. 11) "How Google's Autonomous Car Passed the First U.S State Self-Driving Test" 『IEEE Spectrum』 New Jersey. USA : IEEE
- [95] Hutchings, S. W, Johnston, N, Gyongy, I., Al Abbas, T, Dutton, N. A. W, Tyler, M, Chan, S, Leach, J, & Henderson, R. K. (2019. 11) "A Reconfigurable 3-D-Stacked SPAD Imager With In-Pixel Histogramming for Flash LIDAR or High-Speed Time-of-Flight Imaging" 『IEEE Journal of Solid-State Circuits』 (Vol. 54, No. 11, pp. 2947–2956) Piscataway, New Jersey. USA <https://ieeexplore.ieee.org/document/8848491> (검색일 : 2025. 10. 7)
- [96] Hyypä, J, Kelle, O, Lehtinen, M. & Inkinen, M. (2001) "A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3D tree height models produced by laser scanners" IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing』 (Vol. 39, No. 5, pp. 969–975) Piscataway, New Jersey. USA : IEEE Geoscience and Remote Sensing Society
- [97] IEEE. (2019) "Transactions on Geoscience and Remote Sensing" 『Browse Journals & Magazines』 Piscataway, New Jersey. USA : IEEE Geoscience and Remote Sensing Society
- [98] Kavaya, M. J. et al. (2014. 4) "The Doppler Aerosol Wind (DAWN) Airborne, Wind-Profiling Coherent-Detection Lidar System : Overview and Preliminary Flight Results" 『Journal of Atmospheric and Oceanic Technology』 (pp. 826–842) Boston, Massachusetts, USA : American Meteorological Society
- [99] Khan, A, Ahmad, M, & Sawan, M. (2024. 5. 9). "MEMS Micromirror Actuation Techniques : A Comprehensive Review of Trends, Innovations, and Future Prospects" 『Sensors』 (Vol. 24, No. 5, Article 1234) Basel, Switzerland : MDPI

Aktiengesellschaft

- [100] Lars Ambrosy, Jörg Spiegelhalter, Alois Recktenwald, Jost Daemmgen, Frank Spitzer (2023. 12. 18) 『Laser Technology in Ports and Terminals—A PEMA Information Paper (IP08A)』 (pp. 3–29) Brussels, Belgium : PEMA.
- [101] Lassiter, H. A. Whitley, T. Wilkinson, B. Abd-Elrahman, A. (2020) "Scan Pattern Characterization of Velodyne VLP-16 LiDAR Sensor for UAS Laser Scanning" (Vol. 20, No. 24, Article 7351) 『Sensors』 Basel, Switzerland : MDPI Aktiengesellschaft
- [102] Li, N. Ho, C. P. Xue, J. Lim, L. W. Chen, G. Fu, Y. H. Lee, L. Y. T. (2022) "A Progress Review on Solid-State LiDAR and Nanophotonics-Based LiDAR Sensors." 『Laser & Photonics Reviews』 (Vol. 16, No. 11, Article 2100511) Berlin, Germany : Wiley-VCH
- [103] Liang, D, Zhang, C, Zhang, P, Liu, S, Li, H, Niu, S, Rao, R. Z, Zhao, L, Chen, X, Li, H, Huo, Y. (2024. 9. 3) "Evolution of laser technology for automotive LiDAR, an industrial viewpoint" 『Nature Communications』 (Vol. 15, Article No. 7660), London, United Kingdom : Nature Portfolio.
- [104] Lim, K, Treitz, P, Wulder, M, St-Onge, B. Flood, M. (2003) "LiDAR Remote Sensing of Forest Structure." 『Progress in Physical Geography』 (Vol. 27, No. 1, pp. 88–106) London, United Kingdom : SAGE Publications.
- [105] Lincoln Laboratory. (1992) 『Lincoln Laboratory Journal』 (Vol. 5, No. 1) Lexington, Massachusetts. USA : MIT Lincoln Laboratory
- [106] Lopac, N. Jurdana, I. Brnelić, A. Krljan, T. (2022) "Application of Laser Systems for Detection and Ranging in the Modern Road Transportation and Maritime Sector" 『Sensors』 (Vol. 22,

- No. 16, Article 5946) Basel, Switzerland : MDPI Aktiengesellschaft
- [107] Maiman, T. H. (1960) 「Stimulated Optical Radiation in Ruby」
『Nature』 (Vol. 187 pp. 493–494) London, United Kingdom
: Nature Portfolio
- [108] Nelson, R, Krabill, W. & Maclean, G. (1984) "Determining
forest canopy characteristics using airborne laser data"
『Remote Sensing of Environment』 (Vol. 15, No. 3, pp. 201–212)
Amsterdam, Netherlands : Elsevier
- [109] Pinkow, S. (2020. 10. 27) "Continental Expands LiDAR
Technology Portfolio by Investing in AEye" 『Press Release』
Hanover, Germany : Continental Aktiengesellschaft <https://www.continental.com/en/press/press-releases/continental-expands-lidar-technology-portfolio>
(검색일 : 2025. 9. 23)
- [110] Qi, C. R., Su, H., Mo, K., & Guibas, L. J. (2017. 7. 21).
『PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and
Segmentation』 Honolulu, Hawaii, USA : IEEE CVPR(2017)
https://arxiv.org/abs/1612.00593?utm_source (검색일 : 2025. 11. 4)
- [111] Reitebuch, O, Lemmerz, C, Nagel, E, Paffrath, U, Durand, Y,
Endemann, M, Fabre, F. & Chaloupy, M. (2009) "The
Airborne Demonstrator for the Direct-Detection Doppler
Wind Lidar ALADIN on ADM-Aeolus. Part I : Instrument
Design and Comparison to Satellite Instrument," 『Journal of
Atmospheric and Oceanic Technology』 (Vol. 26, No. 12, pp.
2501–2515) Boston, Massachusetts, USA : American Meteorological
Society
- [112] Remondino, F. & Rizzi, A. (2010) "Reality-based 3D
documentation of natural and cultural heritage sites –
Techniques, problems and examples" 『Applied Geomatics』
(Vol. 2, No. 3, 2010, pp. 85–100) Berlin, Germany :

- [113] Reuters. (2024. 11. 27). "Hesai to Halve Lidar Prices" London, United Kingdom : Thomson Reuters <https://www.reuters.com/technology/hesai-halve-lidar-prices2024-11-27> (검색일 : 2025. 10. 7)
- [114] Rogers, P. D. (2014 12월). 『Army Technology Magazine』 (Vol. 2, No. 6, November / December 2014) Detroit Arsenal, Michigan, USA : U.S. Army Tank Automotive Research, Development and Engineering Center https://api.army.mil/e2/c/downloads/370368.pdf?utm_source (검색일 : 2025. 10. 11)
- [115] Roriz, R, Cabral, J, & Gomes, T. (2021) "Automotive LiDAR Technology: A Survey" 『IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems』 (Vol. 23, No. 7, pp. 6282–6297) New Jersey, USA : IEEE <https://ieeexplore.ieee.org/document/9455394> (검색일 : 2025. 10. 2)
- [116] Ross, P. E. (2017. 12. 20) "Velodyne Unveils Monster Lidar With 128 Laser Beams" 『IEEE Spectrum.』 New York, USA : IEEE Spectrum. <https://spectrum.ieee.org/velodyne-unveils-monster-lidar-with-128-laser-beams> (검색일 : 2025. 10. 4)
- [117] Schwarz, B. (2020), "A Survey on LiDAR Scanning Mechanisms" 『Electronics』 (Vol. 9, No. 5, Article 741) Basel, Switzerland : MDPI Aktiengesellschaft
- [118] Shoouri, S., Tavakoli Taba, M., & Kim, H.-S. (2025. 8. 3). 『Adaptive LiDAR Scanning : Harnessing Temporal Cues for Efficient 3D Object Detection via Multi-Modal Fusion』 New York, USA : University of Michigan https://arxiv.org/abs/2508.01562?utm_source (검색일 : 2025. 11. 4)
- [119] Sony Semiconductor Solutions Corporation. (2025. 6. 10) "Sony Semiconductor Solutions to Release Stacked SPAD Depth Sensor for Automotive LiDAR Applications" Tokyo, Japan :

- Sony Semiconductor Solutions Corporation. https://www.sony.co.uk/presscentre/sony-semiconductor-solutionsto-release-stacked-spad-depth-sensor-for-automotive-lidarapplications-delivering-high-resolution-high-speed-performance?utm_source (검색일 : 2025. 10. 9)
- [120] Sun, X, Zhang, L, Zhang, Q., & Zhang, W. (2019. 10. 10) "Si Photonics for Practical LiDAR Solutions" 『Applied Sciences』 (Vol. 9, No. 20, Article 4225) Basel, Switzerland : MDPI Aktiengesellschaft
- [121] Thompson, K. Luetzenburg, G. Kroon, A. Bjørk, A. A. (2021. 11. 15) "Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences." 『Scientific Reports』 (Vol. 11, Article 2222) London, United Kingdom : Springer Nature.
- [122] Tontini, A., Gasparini, L., & Perenzoni, M. (2020) "Numerical Model of SPAD-Based Direct Time-of-Flight Flash LiDAR CMOS Image" 『Sensors. Sensors』 Vol. 20, No. 18, Article 5203. Basel, Switzerland : MDPI Aktiengesellschaft <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/18/5203> (검색일 : 2025. 10. 7)
- [123] Urmson, C. & Thrun, S. (2011. 10. 18) "How Google's Self-Driving Car Works" 『IEEE Spectrum』 Piscataway, New Jersey. USA : IEEE
- [124] Velas, M. Spanel, M. Slezniak, T. Habrovec, J. Herout, A. (2019. 9. 12) "Indoor and Outdoor Backpack Mapping with Calibrated Pair of Velodyne LiDARs." (Vol. 19, No. 18, Article 3944) 『Sensors』 Basel, Switzerland : MDPI Aktiengesellschaft
- [125] Wang, D, Watkins, C, & Xie, H. (2020. 4. 27) "MEMS Mirrors for LiDAR : A Review" 『Micromachines』 (Vol. 11, No. 5, Article 456) Basel, Switzerland : MDPI Aktiengesellschaft

- [126] Wang, J, Song, R., Li, X, Yue, W, Cai, , Wang, S, & Yu, M. (2024). "Beam Steering Technology of Optical Phased Array Based on Silicon Photonic Integrated Chip" 『Micromachines』 (Vol. 15, No. 3, Article 322) Basel, Switzerland : MDPI Aktiengesellschaft <https://www.mdpi.com/2072-666X/15/3/322> (검색일 : 2025. 9. 16)
- [127] Wang, P. (2021) "Research on Comparison of LiDAR and Camera in Autonomous Driving" 『Journal of Physics : Conference Series』 Bristol, United Kingdom : IOP Publishing
- [128] Xie et a, (2022. 7. 15) "MEMS mirror based omnidirectional scanning for lidar optical systems" 『Optics Express』 : Washington, D.C, USA : Optica Publishing Group
- [129] Xu, W, Yuan, Q, Yang, Y, Lu, L, Chen, J, & Zhou, L. (2025. 5. 8). "Progress and prospects for LiDAR-oriented optical phased arrays based on photonic integrated circuits" 『Nature npj Nanophotonics』 (Vol. 2, Article 14) London, United Kingdom : Nature Portfolio. <https://www.nature.com/articles/s44310-025-00059-4> (검색일 : 2025. 9. 29)
- [130] Yang, D, Liu, Y, Chen, Q, Chen, M, Zhan, S, Cheung, N. K, Chan, H. Y, Wang, Z, & Li, W. J. (2023. 1. 27) "Development of the high angular resolution 360° LiDAR based on scanning MEMS mirror" 『Scientific Reports』 (Vol. 13, Article 1540) London, United Kingdom : Nature Portfolio <https://www.nature.com/articles/s41598-022-26394-6> (검색일 : 2025. 9. 20)
- [131] Yu, H, Xue, C, Guo, Q, & Dai, D. (2021. 8. 19) "Why Optical Phased Array Is the Future Lidar for Autonomous Vehicles" 『LIDAR Magazine』 (Vol. 11, No. 4, pp. 48-53) Fort Collins. Colorado. USA : GeoSpatial Publications.

- [132] Yu, T, Xue, C, Guo, Q, & Dai, D. (2021. 3. 3) "Quanergy Optimizes Optical Phased Array LiDAR" 『EE Times』 San Francisco, California, USA : AspenCore Media. https://www.eetimes.com/quanergy-optimizes-optical-phased-array-lidar/?utm_source (검색일 : 2025. 10. 1)
- [133] Zhou, Y, & Tuzel, O. (2018. 6. 18) 『VoxelNet: End-to-End Learning for Point Cloud Based 3D Object Detection』 Salt Lake City, Utah, USA : IEEE CVPR(2018) https://arxiv.org/abs/1711.06396?utm_source (검색일 : 2025. 11. 4)

2) 비연속간행물

- [134] BCC Research. (2025. 5. 19) 『Brief History of LiDAR, Its Evolution and Market Definition』 Cambridge, Massachusetts, USA : BCC Research
- [135] Blue Falcon Aerial. internet Home. (2023. 5. 7) 『The History of Lidar : Advancements, Applications, and Future Possibilities』 Edmond, Oklahoma, USA : Blue Falcon Aerial
- [136] BMW Group Press Release. (2022. 7. 19) "Pilot Project : Cars Manoeuvre in Production Without Drivers" Munich, Bavaria, Germany : BMW Group. <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0389231EN/pilot-project-cars-manoeuvre-in-productionwithout-drivers> (검색일 : 2025. 10. 7)
- [137] Bowman, A., Franklin, C. (2020. 3. 18) "Apple Unveils New iPad Pro with LiDAR Scanner and Trackpad Support in iPadOS." 『Apple Newsroom』 San Francisco, California, USA : Business Wire <https://www.businesswire.com/news/home/20200318005341/en/Apple-Unveils-New-iPad-Pro-with-Breakthrough-LiDAR-Scanner-and-Brings-Trackpad-Support-to->

iPadOS (검색일 : 2025. 9. 23)

- [138] Business Wire. (2017. 12. 20) 『Quanergy Opens Automated Factory to Mass Produce Solid State LiDAR Sensors』 Sunnyvale, California, USA : Business Wire. <https://www.businesswire.com/newsroom> (검색일 : 2025. 9. 16)
- [139] Business Wire. (2020. 1. 7) 『Velodyne Introduces Velabit』 California, USA : Business Wire <https://www.businesswire.com/news/home/20200107005849/en/Velodyne-Lidar-Introduces-Velabit> (검색일 : 2025. 10. 4)
- [140] Hall, D. (2009) "Velodyne HDL-64E : A High Definition LiDAR Sensor for 3D Applications" 『Velodyne Technical Paper』 San Jose, California, USA : Velodyne
- [141] Hesai Group (2024. 12. 26) "Road towards scalable intelligent driving starts from here; initiate at BUY" 『CMB INTERNATIONAL』 HongKong : CMB International Global Markets Limited https://www.cmbi.com.hk/upload/202412/20241226711948.pdf?utm_source (검색일 : 2025. 9. 6)
- [142] Luminar Technologies. (2024. 4. 23) 『Luminar Achieves Start of Production for Volvo Cars』 Sunnyvale, California, USA : Luminar Technologies, Inc. <https://www.businesswire.com/news/home/20240423096714/en/Luminar-Day-A-New-Era-Luminar-Achieves-Global-Start-of-Production-for-Volvo-Cars> (검색일 : 2025. 10. 7)
- [143] NASA Technology Transfer Program. (2021) "3D Lidar for Autonomous Landing Site Selection" (GSC-TOPS-353) Maryland : National Aeronautics and Space
- [144] NATO Standardization Office. (2020) 『STANAG 4754 : NATO Generic Vehicle Architecture (NGVA) for Land Systems』 Brussels, Belgium : NATO Standardization Office.
- [145] NATO Standardization Office. (2017) 『STANAG 4586 Edition 4 :

- Standard Interfaces of UAV Control System (UCS) for NATO UAV Interoperability』 Brussels, Belgium : NATO Standardization Office.
- [146] Neuvition. (2022. 7. 7) 『Top 20 LiDAR Suppliers in the World』 Shenzhen, China : Neuvition Inc https://www.neuvition.com/media/lidar-suppliers.html?utm_source (검색일 : 2025. 9. 10)
- [147] Ouster, Inc. (2023. 2. 13) 『Ouster and Velodyne Complete Merger of Equals to Accelerate LiDAR Adoption』 San Francisco, California, USA : Ouster, Inc. https://investors.ouster.com/news-releases/news-release-details/ouster-and-velodyne-complete-merger-equals-accelerate-lidar?utm_source (검색일 : 2025. 10. 5)
- [148] Ouster, Inc. (2023). 『University Research with Ouster Lidar』 San Francisco, California, USA: Ouster, Inc. <https://ouster.com/insights/blog/university-research-with-ousterlidar?cacheBuster=1763348816201> (검색일 : 2025. 10. 6)
- [149] PALOMAR technologies. 인터넷 홈페이지 FMCW LiDAR – The hottest topic in the current photonics industry <https://www.palomartechnologies.com/blog/fmcw-lidar-the-hottest-topic-in-the-current-photonics-industry> (검색일 : 2025. 9. 12)
- [150] PR Newswire. (2022. 2. 9) "Opsys Tech to supply LiDAR sensors to auto supplier Huayu Automotive Systems Co" San Jose, California, USA : PR Newswire. https://www.prnewswire.com/news-releases/opsys-tech-to-supply-lidar-sensors-to-auto-supplier-huayu-automotive-systems-co-ltd-hasco-adas-business-unit-301478191.html?utm_source (검색일 : 2025. 10. 9)
- [151] PR Newswire. (2024. 1. 4) "Catch the Future in Action : LeddarTech Unveils Its Award-Winning LeddarVision ADAS Products and Technology at CES Las Vegas" San Jose, California, USA : PR Newswire. <https://www.prnewswire.com/news-releases/catch-the-future-inaction-leddartechn-unveils-its>

- award-winning-leddarvision-adasproducts-and-technology-at-ces-las-vegas2024-302026383.html?utm_source (검색일 : 2026. 10. 9)
- [152] U.S. Department of Defense. (2017) 『Unmanned Systems Integrated Roadmap FY 2017–2042』 Washington, D.C, USA : Office of the Secretary of Defense
- [153] Wollenberg, M., et al. (2022). 『Benchmarking of Various LiDAR Sensors for Use in Self-Driving Vehicles in Real-World Environments』
- [154] Yole Intelligence. (2022) 『LiDAR 2022 – Focus on Automotive and Industrial』 Paris, France : Yole Intelligence
- [155] 오스트리아 AMS OSRAM 홈페이지. <https://ams-osram.com/> (검색일 : 2025. 9. 26)
- [156] 미국 Neuvition 홈페이지 <https://www.neuvition.com/> (검색일 : 2025. 9. 26)

ABSTRACT

Development Plan for the Army TIGER Combat System Using Flash LiDAR
–Focused on Multipurpose Unmanned Ground Vehicles (MUGV)–

Jang, Dong–Joon

Major in Defence Project Management

Dept. of Defence Force Power

Graduate School of National Defense Science

Hansung University

This study aims to analyze the technical limitations of rotating scanning LiDAR currently applied to Multipurpose Unmanned Ground Vehicles (MUGV), a core component of the Army TIGER combat system, and to propose Flash LiDAR as an alternative while deriving its applicability and development directions. The security environment on the Korean Peninsula faces increasing challenges due to North Korea's advancing nuclear and missile threats, coupled with a declining military–age population resulting from low birth rates, making it difficult to maintain the traditional manpower–centric force structure. In response, the Ministry of National Defense has established AI–based scientific and technological military advancement and the construction of manned–unmanned teaming (MUM–T) combat systems as key objectives through the "Defense Innovation 4.0

Master Plan." The Army TIGER combat system, characterized by intelligence, mobility, and network-centricity, is being promoted with the goal of full-scale deployment across all forces by 2040.

This study reviewed the fundamental principles and developmental trends of LiDAR technology, conducting a comparative analysis of the structural characteristics between rotating scanning LiDAR and Flash LiDAR. While rotating scanning LiDAR provides 360-degree omnidirectional environmental awareness and long-range detection capabilities, its limitations were identified during military operational tests and pilot unit operations, including vulnerability in durability due to mechanical rotating components, increased detection risk from continuous laser emission, and maintenance constraints resulting from high dependence on foreign suppliers for core components. In contrast, Flash LiDAR utilizes VCSEL arrays and SPAD-based detectors to achieve microsecond-level high-speed measurement and enhanced durability without mechanical rotating parts. Furthermore, its compact and lightweight design enables selective and instantaneous laser pulse emission, significantly reducing the risk of detection.

The research findings demonstrate that Flash LiDAR exhibits significant advantages over conventional LiDAR in terms of instantaneous three-dimensional information acquisition capability, high-speed data processing architecture, stability in extreme environments, and navigation assistance performance in GPS-denied environments. Particularly, when integrated with artificial intelligence-based recognition algorithms, it was confirmed that Flash LiDAR can provide effects directly related to the core missions of the Army TIGER system, including improved target recognition accuracy, enhanced autonomous navigation safety, and increased platform survivability. Additionally, it was verified that domestic companies such as SOS LAB and LG Innotek possess the manufacturing technology for core components, enabling supply chain stability through localization.

This study proposes a three-phase force development roadmap for Flash LiDAR application: short-term (by 2027), mid-term (2027–2035), and long-term (2035–2040). The short-term phase involves verification of field environment suitability through combat experimentation ; the mid-term phase prioritizes application to reconnaissance and surveillance missions with transition to mass production systems; and the long-term phase presents plans for full-scale deployment across all forces and introduction of next-generation technologies. Furthermore, policy recommendations were presented, including standardization and interoperability assurance in compliance with international standards such as NATO STANAG 4586, designation of core components as strategic defense items, utilization of competitive R&D systems, and establishment of military-industry-academia-research collaboration frameworks.

This study holds academic and practical significance in that it simultaneously examines the technical characteristics and mission application potential of Flash LiDAR, presenting an integrated development direction encompassing technological, operational, and policy aspects in connection with the advancement of the Army TIGER system.

However, as Flash LiDAR has not yet been actually deployed in the Republic of Korea Armed Forces, a substantial portion of this study relied on literature review. Accordingly, follow-up research is required, including quantitative performance verification through pilot operations and cost-effectiveness analysis.

【Keywords】 : Flash LiDAR, Rotating Scanning LiDAR, Army TIGER, Multipurpose Unmanned Ground Vehicle (MUGV)