



Received: 2025/11/24
Revised: 2025/12/05
Accepted: 2026/03/25
Published: 2026/03/31

*Corresponding Author:

Geon-hee Kim
Room 404, 125 n13-dong, Dongseo-daero,
Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea
Tel: +82-42-939-4700
Fax: +82-42-828-8889
E-mail: ghkim@hanbat.ac.kr

SWIR 초분광 위성기술을 활용한 차세대 미사일 조기탐지기술의 글로벌 동향 분석

Review of Global Trends in Next-Generation Missile Early Warning with SWIR Hyperspectral Satellites

김건희^{1,2*}, 이행복¹, 김서현¹, 김윤중³, 이연경⁴, 최용석⁴, 구기태⁴

¹국립한밭대학교 우주국방연구소 교수

²주식회사 아스텍 대표

³한국천문연구원 책임연구원

⁴국립한밭대학교 우주국방연구소 연구원

Geon-hee Kim^{1,2*}, Haeng-bok Lee¹, Seo Hyun Kim¹, Yun-jong Kim³,
Yeon-kyung Lee⁴, Yong Seog Choi⁴, Ki-tae Koo⁴

¹Professor, Institute of Space Defense Research, Hanbat National University

²CEO, ASTech Co., Ltd.

³Principal researcher, Korea Astronomy and Space Science Institute

⁴Researcher, Institute of Space Defense Research, Hanbat National University

Abstract

최근 세계적 안보 불확실성의 심화로 미사일 발사 조기탐지 기술이 국가 방위체계의 핵심으로 부상하고 있다. 단파장 적외선(SWIR) 초분광 위성기술은 높은 분광 해상도와 정밀 신호 분석을 통해 미사일 플룸의 화학·열적 특성을 실시간 파악할 수 있는 차세대 조기경보 기술로 주목된다. SWIR 초분광 센서 시장은 2025년 약 150~200억 달러에서 2030년 800억 달러 규모로 성장할 전망이다(CAGR 13~15%), 기술성숙도(TRL)는 미국이 선도하고 한국은 초기 단계에 머물러 있어 연구개발 투자가 시급하다. 본 연구에서는 SWIR 초분광 센서 기술과 위성 적용 전략, 산업 동향 및 AI 융합 방향을 분석하여 한국형 독자적 조기경보 체계 구축을 위한 전략적 시사점을 제시한다.

Amid increasing global security uncertainties, early detection technologies for missile launches have become essential to national defense systems. Short-wave infrared (SWIR) hyperspectral satellite technology enables real-time monitoring of the chemical and thermal signatures of missile plumes through high spectral resolution and advanced signal processing, making it a promising next-generation early-warning solution. The global SWIR hyperspectral sensor market is projected to expand from USD 15~20 billion in 2025 to nearly USD 80 billion by 2030 (CAGR 13~15%). The United States leads in technology readiness (TRL 7~8), while Korea remains at TRL 2~3, emphasizing the need for focused R&D investment. This study examines core technologies, satellite platform applications, industry trends, and AI integration strategies, providing strategic guidance for developing an independent Korean early-warning system.

Keywords

초분광 이미징 기술(Hyperspectral Imaging), 미사일 조기경보(Missile Early Warning), 위성(Satellite), 단파장 적외선(SWIR), 인공지능(AI)

Acknowledgement

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 대전광역시 지원으로 대전RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2025-RISE-06-002).

1. 미사일 조기 탐지 환경 변화와 SWIR의 부상

1.1 미사일 조기 탐지 기술의 중요성

미사일 조기 탐지 기술은 미사일 발사 직후 수 초 이내에 발생하는 열적·화학적 신호를 감지하여 위협을 식별·분류하는 국가 방위체계의 핵심 요소이다. 그러나 최근 극초음속 비행체(HGV)와 다단로켓 등 저관측 특성(low-observable)을 갖는 신형 미사일이 빠르게 개발되면서, 기존 감시체계만으로는 탐지 지연과 오경보 가능성이 동시에 증가하는 구조적 한계가 드러나고 있다. 이는 곧 조기 대응 시간의 축소로 이어져 방어체계 전반의 실효성을 약화시키는 중대한 위협요인으로 작용한다.

이러한 기술적 패러다임 전환은 미국 우주개발청(SDA)이 추진 중인 PWSA tracking layer 체계에서도 명확히 나타난다. 해당 체계는 저궤도 위성군 기반의 분산 감시구조를 통해 극초음속 미사

일을 포함한 첨단 위협에 대해 저지연·실시간 탐지 능력을 확보함으로써 기존 정지궤도 중심 감시체계의 한계를 보완하고 있다[1].

특히 북한은 2025년 한 해 동안 극초음속 미사일, 잠수함발사탄도미사일(SLBM), 고체연료 대륙간탄도미사일(ICBM) 등을 20여 회 시험 발사하며 위협 수준을 실전 배치 단계로 고도화하고 있다. 이러한 군사적 환경 변화는 기존 탐지체계의 성능 한계를 극복할 수 있는 차세대 감시기술 확보가 더 이상 선택이 아닌 필수적 과제를 시사한다.

1.2 SWIR 초분광 위성기술의 강점

최근 미국과 유럽을 중심으로 SWIR(short-wave infrared, 0.9~2.5 μm) 대역을 활용한 초분광 위성 감시 기술이 차세대 미사일 조기경보 수단으로 빠르게 확산되고 있다. SWIR 대역은 태양 반사광과 미약한 열복사를 동시에 활용할 수 있어 주야간 구분 없이 연속적인 감시가 가능하여 기존 센서 대비 양호한 시간적 커버리지를 제공한다. 또한 구름, 연기, 수증기 등 대기 요소에 대한 민감도가 상대적으로 적어 대기 투과성이 우수하며 이로 인해 복잡한 기상 조건에서도 안정적인 관측이 이루어질 수 있다. SWIR 대역은 중파장 적외선(MWIR) 및 장파장 적외선(LWIR) 센서에서 가지는 열 포화 현상을 효과적으로 보완할 수 있는 장점을 가진다. 특히 고온의 미사일 플룸(plume)을 포화 없이 안정적으로 관측할 수 있어 감시 효율을 크게 향상시킨다. Fig. 1은 SBIRS 및 차세대 감시 체계

가 가시광선, MWIR, LWIR, SWIR 대역을 활용하여 미사일 발사 단계부터 미드코스 구간까지 플룸을 단계적으로 탐지·추적하는 개념을 보여준다[2].

초분광 이미징(hyperspectral imaging, HSI)은 수백 개의 좁은 파장 대역(5~10 nm 해상도)으로 데이터를 수집하여, 각 픽셀이 고유한 스펙트럼 signature를 갖게 한다. 이를 통해 미사일 플룸을 구성하는 CO₂(2.0~2.2 μm), CO(2.3~2.4 μm), CH₄(1.66 μm) 등의 미약한 분자 스펙트럼 검출을 정밀하게 분석하여 위협을 정확하게 분류할 수 있다[3]. SWIR 초분광 위성기술이 기존 미사일 경보체계를 보완하는 역할은 마치 일반 야간 투시경(MWIR/LWIR)에 화학 성분 분석기를 결합하는 것과 유사하다. 기존 센서는 밝고 고온의 물체, 즉 미사일 플룸의 존재 여부를 신속히 탐지하는 데 중점을 두었다. 반면 SWIR 초분광 센서는 열 신호에 포함된 CO₂, CO 등 플룸 가스의 고유 분광 특성을 분석하여 화학적 시그니처를 분류할 수 있다. 비록 분자 농도의 정량적 분석에는 한계가 있으나, 이러한 분광 정보는 탐지 대상이 단순한 구름 반사가 아닌 실제 미사일임을 보다 신속하고 정확하게 식별할 수 있도록 한다[4-6]. SWIR 초분광 기술은 미사일 발사 초기의 고온 플룸을 높은 분광 해상도로 식별함으로써 기존 MWIR/LWIR 기반의 SBIRS 체계를 보완하는 차세대 수단으로 주목받고 있다. 이러한 기술은 극초음속 비행체와 다단로켓 감시에 특히 유리하다.

1.3 한국의 현주소와 핵심 과제

한국은 현재 독자적인 조기경보 위성망이 부재하여 미국의 우주 기반 적외선 감시 시스템(SBIRS; space-based infrared system)에 의존하고 있다. 그러나 SBIRS 체계는 주로 MWIR/LWIR staring sensor 중심이며, 북한의 신형 미사일 위협에 대해 결정적인 30~60초의 경고 지연이 발생하면 치명적인 패배로 이어진다.

따라서 초분광 센서 원천기술의 내재화와 국산 위성 탑재 실증은 향후 방위산업의 핵심 과제로 대두된다. 한국은 현재 핵심 소자(InGaAs, QD 검출기) 및 광학계 국산화 수준이 TRL 2~4 수준으로 낮다. 향후 5년 내 집중적인 민·군 융합 R&D와 AI 엿지 추론, 소형 위성 군집 기술 확보를 통해 2030년대 초 독자적인

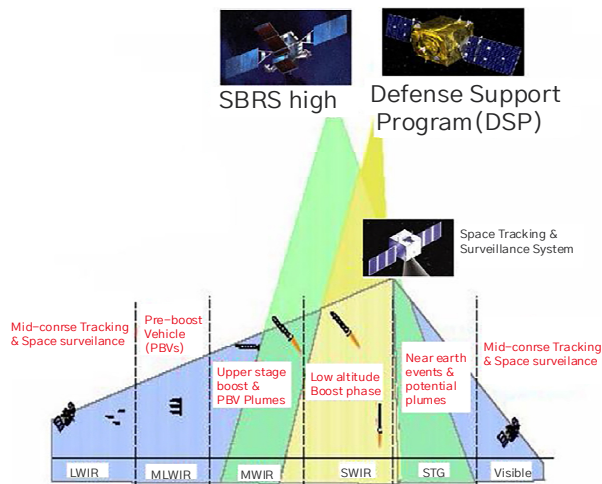


Fig. 1. Utilization of SBIRS infrared sensors in the LWIR, MWIR, and SWIR bands, including the visible band

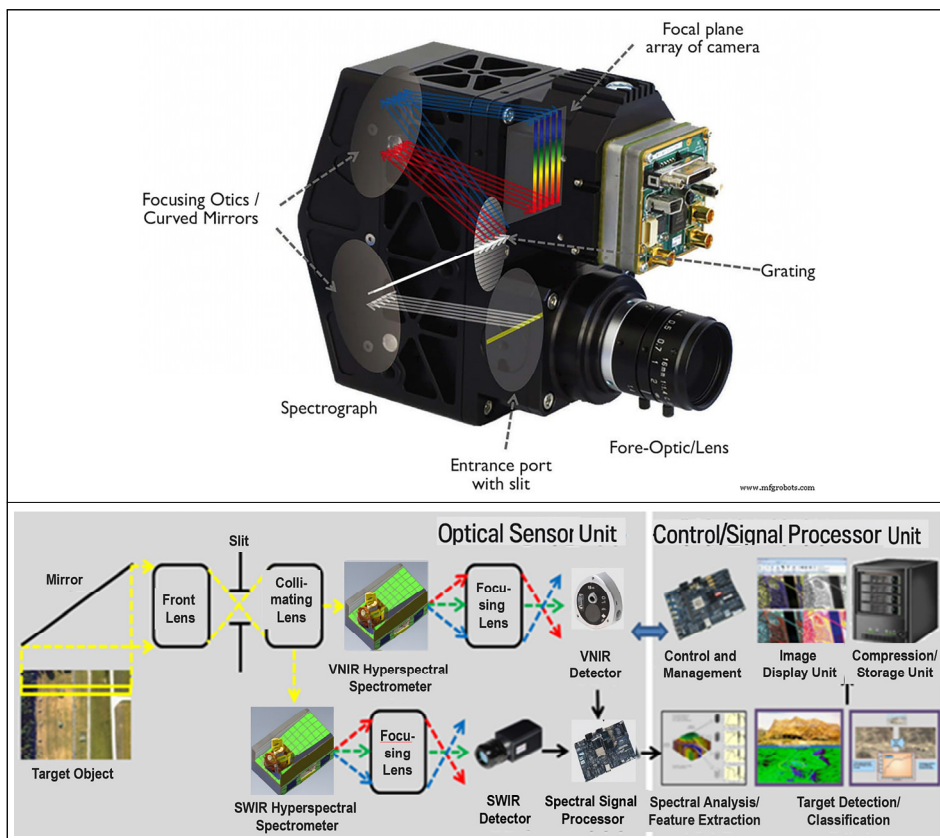


Fig. 2. Spectroscopic principle of hyperspectral imaging sensors

실시간 미사일 조기경보 체계 구축이 가능할 것이다.

2. 핵심 기술 요소: SWIR 초분광 센서의 구성

SWIR 초분광 위성기술은 크게 광학계, 검출기 및 신호처리, AI 알고리즘, 그리고 검·보정 체계의 네 가지 핵심 요소로 구성된다. Fig. 2는 offner형 분광기를 기반으로 한 초분광 영상센서의 광학 원리와 주요 구성요소(슬릿, 콜리메이터, 그리팅, 포커싱 미러, 검출기)를 도식화한 구조도이다[5].

2.1 초분광 광학계 및 설계 기술

초분광 광학계는 빛을 파장별로 정밀하게 분리하고 이미지를 형성하는 장치로, 파장 분리 정확도와 기계적 안정성이 핵심이다. 이러한 핵심 사항을 충족하려면 수차(aberration)와 인접 스펙트럼 간 간섭(crosstalk)을 최소화하는 구조가 필요하며, offner 리플렉터 형식이 위성 탑재용 초분광 광학계에서 최적 구조로 평가된다. 광학 소재는 저분산 특성을 갖는 CaF_2 , $ZnSe$ 와

같은 저분산 소재를 사용하여 설계되며, 요구되는 성능 지표는 파면 오차 $\lambda/20$ 이하, 분광 해상도 5~10 nm 이하이다. 더불어 우주 환경에서의 장기 운용을 위해 반사경 표면에는 DLC(diamond-like carbon) 코팅을 적용하여 방사선·미세입자 등에 대한 내구성을 강화하고, 반사 방지(AR) 코팅과 고반사 금속막을 적절히 조합하여 광학계 전체의 투과 효율 및 내열성을 모두 확보하도록 설계된다.

2.2 광학소자 가공 및 평가 기술

SWIR 광학소자는 수십 나노미터 이하의 표면조도와 $\lambda/20$ 이하의 파면 오차가 요구되므로 나노 단위의 정밀 가공 기술이 필수적이다. 이를 위해서는 초정밀 다이아몬드 선삭과 이온빔 가공, 그리고 표면 연마 기술이 결합되어 사용된다. 가공이 완료된 소자에는 AR(anti-reflection) 코팅과 DLC(diamond-like carbon) 복합 코팅을 적용하여, 투과율 95% 이상, 반사율 2% 이하를 달성한다. 현재 일본과 독일이 이 분야의 기술적 선도를 유지하고 있으며, 한국은 부품 자

립화를 위한 기술을 개발 중이다.

2.3 초분광 검출기 및 신호처리 기술

SWIR 초분광 검출기는 미사일 플룸에서 방출되는 미세 복사에너지를 스펙트럼 단위로 분리하여 분자 조성과 연소 단계 정보를 추출하는 핵심 장치이다. 검출기 소자는 현재 MCT(mercury cadmium telluride, HgCdTe)와 InSb(indium antimonide) 계열이 주류이나, 양자점 QD(quantum dot) 기반 비냉각형 센서가 다크 커런트 감소와 SNR(signal-to-noise ratio) 향상 측면에서 신기술로 주목받고 있다. QD(quantum dot) 기반 센서는 또한 검출기의 소형화와 단가 하락을 촉진하여 큐브위성 탑재를 가속화하는 요인이다.

신호처리부는 FPGA(field programmable gate array) 기반 병렬처리 회로를 활용하여 초당 약 200~300 프레임의 데이터를 실시간으로 처리할 수 있다. 알고리즘 측면에서는 합성곱 신경망(CNN, convolutional neural network) 기반의 스펙트럴 각도 매핑(SAM, spectral angle mapper) 기법을 활용하여 CO, CO₂, CH₄ 등 고온 가스의 분광 시그니처를 효과적으로 인식할 수 있다. 특히 SAM-CNN 결합 구조는 다양한 연구에서 배경 잡음 감소와 허위 경보율 저감에 유의미한 효과가 보고되었다. 다만 실제 성능 개선 폭은 센서 특성 및 관측 장면 조건에 따라 달라질 수 있다.

2.4 AI 기반 탐지 및 초고해상도화 알고리즘

수백 개의 밴드로 구성된 SWIR 데이터를 실시간

으로 분석하고 미사일 위협을 예측하기 위해 AI 기반 초고해상도화 및 예측 알고리즘이 필요하다. Table 1은 미사일 플룸 탐지를 위한 주요 AI 알고리즘(CNN-LSTM, PCA, ESRGAN, SAM+CNN 등)의 세부 기술, 내용, 성능 지표를 정리한 표이다.

2.5 센서 검·보정 및 성능 평가 체계

정확한 검·보정은 위성 감시 데이터 신뢰성의 근간이다. 이는 실험실, 조립 단계, 궤도상의 3단계 보정을 거치며, 국제 표준(ISO/IEEE)을 준수한다.

핵심 기술로는 automatic temperature calibration(ATC)과 radiometric re-calibration(RRC) 기술이 사용되어 온도편차 ±0.5°C, 복사 편차 ±1% 이내를 유지한다. 이러한 정확도는 국가 간 위성 데이터 교차 보정의 기반이 된다.

3. 위성 플랫폼별 적용 및 글로벌 동향

SWIR 초분광 기술은 위성의 크기와 궤도에 따라 다르게 적용되며, 최근에는 하이브리드 체계 구축이 주류를 이룬다.

3.1 궤도 전략: GEO vs. LEO 하이브리드

최근에는 GEO 위성으로 정밀 감시를 수행하고, LEO 위성으로 반복 감시를 수행하는 하이브리드 궤도 전략이 채택되고 있다. 미국은 Next-Gen OPIR(GEO)과 SDA 추적층(LEO)을 통해 이러한 하이브리드 체계를 실전 배치 단계에 근접시키고 있다(TRL 8~9 수준). Table 2는 대형 정지궤도(GEO)와 소형 저궤도

Table 1. AI-based detection and super-resolution algorithms

Technology domain	Technique / model	Main description and performance metrics	Performance improvement
Spatiotemporal pattern prediction	CNN-LSTM Hybrid	Learns spatial patterns and temporal changes jointly to track missile trajectories; useful for detecting the short boost phase of hypersonic missiles.	Detection accuracy 93%, response time 0.8 s
Dimensionality reduction / noise removal	PCA, AutoEncoder	Compresses and reconstructs the data to remove noise such as atmospheric noise and sensor dark current.	SNR improved by a factor of 10
Super-resolution reconstruction	ESRGAN	Upscales low-resolution data by 4-8× while minimizing spectral distortion.	Spatial resolution ×2, SNR improved by 10-20 dB
Spectral classification	SAM + CNN	Compares with known plume signatures (CO ₂ , CO, etc.) and viewing angles; achieves 92-97% accuracy when combined with CNN.	Band-center matching, 85% accuracy

Table 2. Comparison of GEO and small LEO/CubeSat platforms

Platform	Characteristics	Advantages	Limitations	Application strategy
Large geostationary orbit (GEO)	Altitude 36,000 km, continuous coverage	Global early-warning coverage, suitable for detecting short thermal signals	High cost, limited maneuverability	Precision monitoring (Next-Gen OPIR)
Small low Earth orbit (LEO) / CubeSat	Low orbit, operated as a constellation	Low cost, fast revisit cycle, high temporal resolution	Limited sensor performance and thermal control	Repeated monitoring, distributed intelligent surveillance network

(LEO)/큐브위성 플랫폼의 특징·장단점 및 최적 적용 전략을 비교한 표이다.

3.2 대형 위성 시스템의 현황

대형 GEO 위성은 전 지구적 조기경보 체계의 핵심 자산이다. Lockheed Martin의 Next-Gen OPIR 위성은 고도 약 36,000 km 상공에서 MWIR/LWIR 중심의 고속 staring sensor를 탑재하여 미사일 발사 징후를 정밀 감시한다. 또한 SWIR 센서는 보조적으로 활용되어 지표 식별 능력과 배경 구분 성능을 향상시킨다. Next-Gen OPIR GEO 1호기는 2026년 발사가 예정되어 있으며, 온보드 AI를 통해 1초 이내에 위협 패턴을 분류하는 것을 목표로 한다.

3.3 소형·초소형 위성의 혁신 및 분산 지능형 감시망

큐브위성(CubeSat)은 낮은 비용과 빠른 궤도 갱신 주기를 바탕으로 감시망의 시간 해상도를 혁신하고

있다. 경량화된 QD(quantum dot) 기반 SWIR 센서가 적용되면서 6U 크기의 큐브위성에서도 약 100개 분광 밴드를 탑재하여 운용하는 구성이 가능해졌다. 소형위성들은 위성 간 레이저 링크를 통해 데이터를 교환하고, 지상의 AI 클라우드에서 통합 처리하는 분산 지능형 감시망을 구성한다. 이는 단일 위성이 아닌 네트워크 전체가 하나의 지능화된 센서 역할을 수행하는 패러다임 전환을 의미한다. 이러한 LEO 군집, 레이저 링크, 엣지 AI의 결합은 중복관측을 70% 낮추고 대역폭 병목 현상을 해소한다. 또한 AI 기반 데이터 압축(CBDA; compress-before-downlink) 기술을 통해 전송 효율을 2.3배 높인다.

4. 글로벌 산업 및 시장 분석

4.1 글로벌 시장 구조 변화 및 규모

SWIR 산업의 경쟁 초점은 단순히 센서 제조에서 데이터 해석력과 AI 응용력으로 이동하고 있다. 글로벌 초

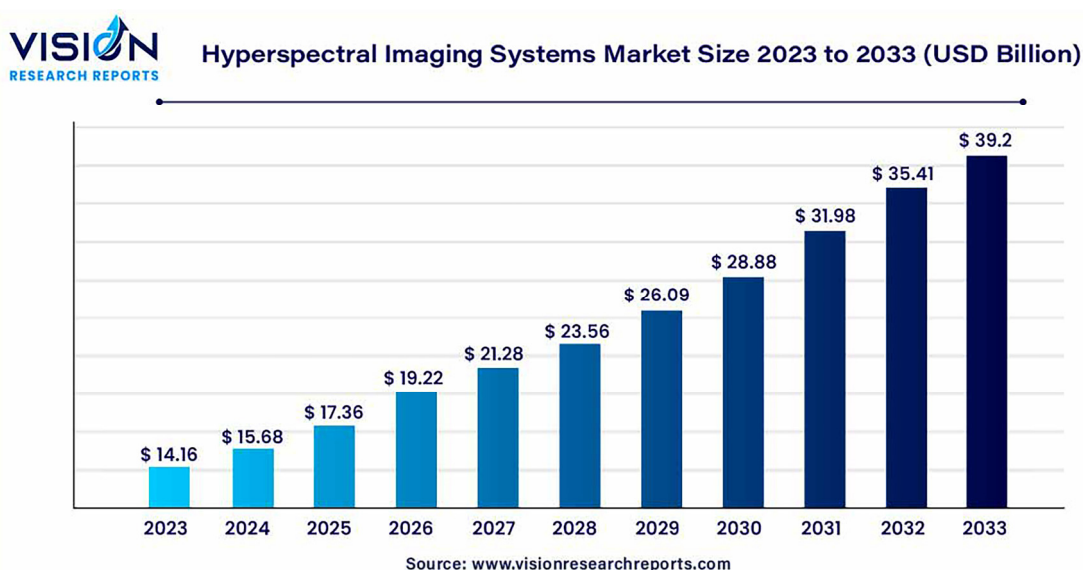


Fig. 3. Global market for hyperspectral imaging systems

분광 이미징 시장은 Fig. 3에 보인 바와 같이 2024~2025년 기준 약 150억~200억 달러 규모이며, 2030년~2033년에는 500억~800억 달러 수준으로 성장할 전망이다. 연평균 성장률은 CAGR(compound annual growth rate) 13~15%로 예측된다[7].

성장 동력은 군사용 조기경보를 중심으로 산업 검사와 환경 모니터링 수요가 동반 성장하고 있다. 양자점 QD(quantum dot) 기반 비냉각 센서의 상용화는 단가 하락과 소형화를 촉진하여 큐브위성 탑재를 가속화하고, 시장의 가치 사슬을 센서 판매에서 데이터 해석/경보 서비스로 전환하고 있다. 큐브위성 시장은 2024년 4억 2,383만 달러에서 2033년 15억 달러로 성장할 것으로 예상되며, 이 기간의 연평균 성장률은 약 15.1%의 고성장이 예상된다.

4.2 국가별 기술 성숙도(TRL) 및 투자 현황

SWIR 초분광 조기경보 기술의 성숙도는 국가별로 큰 차이를 보인다. 한국은 핵심 소자(InGaAs, QD 검출기) 및 광학계 국산화 수준이 TRL 2~4 정도로 낮아, 집중적인 투자가 필요한 상황이다. Table 3는 2025년 기준 미국·유럽·일본·중국·한국의 SWIR 초분광 조기경보 기술 TRL 수준과 주요 목표·전략을 정리한 표이다.

Table 3. National technology maturity, key goals, and strategies

Country	TRL level (as of 2025)	Key goals and strategies
United States	7-8	Hybrid GEO-LEO early-warning network with a target warning latency of 0.8 s; deployment of Next-Gen OPIR and SDA tracking layer
Europe	6-7	Focus on dual-use (environment and security) applications and expansion of small-satellite constellations (PRISMA, EnMAP)
Japan	5-6	Operation of civil-military hyperspectral satellites (HISUI)
China	4-5	Operation of civil-military hyperspectral satellites (GF-5B AHSI)
Korea	2-3	Priority on TRL improvement and domestic production of key components and optical systems

4.3 국내 기술 생태계와 발전 목표

한국형 SWIR 기술의 본질은 민군 융합형 데이터 자립 생태계 구축에 있다. 3대 핵심 전략은 검출기 국산화, 광학계 정밀화, AI 클라우드 융합이다[8].

이를 뒷받침하기 위해 ETRI는 탑재체를, ADD는 플랫폼을, KT와 SKT는 데이터 통신망을 담당하는 삼각 협력 체계를 구축하였다. 기술 발전 목표는 2025년까지 InGaAs(indium gallium arsenide) 및 QD(quantum dot) 센서의 TRL(technology readiness level)을 5 수준으로 끌어올리고, 광학소자 자립률을 50% 수준까지 향상시키는 것을 목표로 한다. 민간 주도 모델을 지향하여 한화시스템, LIG넥스원, KAIST 등 민간과 학계가 QD-SWIR(quantum dot short-wave infrared) 센서와 엣지 AI(edge artificial intelligence) 알고리즘을 연계한 실증을 진행 중이다.

5. 현장 적용 사례 및 AI 융합 심화

5.1 미사일 플룸 탐지에서의 SWIR 역할

미사일 플룸(plume)은 발사 초기 2,000~3,500 K의 고온 연소 가스(CO₂, CO, H₂O, HCl 등)로 인해 강한 적외선(IR) 방출을 보인다.

플룸의 주요 시그니처 대역은 주로 중파장 적외선 MWIR(3~5 μm)과 장파장 적외선 LWIR(long-wave infrared, 8~12 μm) 영역에 집중된다. 이에 비해 SWIR(0.9~2.5 μm) 대역은 상대적으로 약한 방사·약열 시그니처를 포착하여 MWIR/LWIR 센서를 보완하는 역할을 수행한다. 이는 부스트 단계 후반이나 미드코스 식별, 또는 배경 판별 향상에 기여한다.

2025년 현재, 실전 우주 기반 미사일 플룸 탐지는 SBIRS/Next-Gen OPIR 같은 MWIR/LWIR 중심의 staring IR 센서가 담당하고 있다. SWIR 초분광은 주로 항공기 탑재 실험이나 환경 모니터링 분야에서 실증 단계(TRL 5~6)에 머물러 있으며, 위성 기반 실전 사례는 거의 공개되지 않았다. Table 4는 SBIRS/Next-Gen OPIR, PRISMA/EnMAP, GF-5B AHSI, SDA tracking layer 등 주요 국가·시스템의 위성 기반 미사일/플룸 탐지 실증 사례를 대역·센서·결과 중심으로 비교한 표이다[9-12].

Table 4. Satellite-based detection cases in major countries

Case / system	Bands and sensors	Main description and outcomes
SBIRS / Next-Gen OPIR	MWIR/LWIR-centric (supplementary SWIR)	Real-time detection of hundreds of Iranian missiles launched during the attack on Israel and support for interception (2024); warning issued within 1-2 s (not hyperspectral).
Europe PRISMA / EnMAP	SWIR hyperspectral (200+ bands)	Detection of industrial plumes (methane / CO ₂); ongoing research on boost-phase missile discrimination as a military dual-use application.
China GF-5B AHSI satellite	SWIR hyperspectral (300+ bands)	Demonstration of quantitative methane point-source emissions; applied to missile plume simulation (open-literature studies).
SDA Tracking Layer (PWSA)	MWIR-centric (partial prototype SWIR support)	Demonstration of hypersonic glide vehicle (HGV) plume tracking; Tranche-2 deployment planned for 2025 (no hyperspectral component)

5.2 활용 분야 및 국제 협력

SWIR 초분광 기술은 열 및 물질 정보를 동시에 제공하므로 국방(조기경보) 외에도 산업(연료 누출 검사), 환경(메탄/산불 감시), 재난 대응 등 다양한 분야를 단일 데이터 파이프라인으로 커버할 수 있다. 권장되는 데이터 처리 워크플로는 우선 미사일 플룸이나 메탄, 연료 누출 등 관심 대상에 민감한 핵심 밴드를 선택한 이후, 스펙트럼 매칭과 CNN(convoluntional neural network) 기반 특징 추출을 수행한 뒤, LSTM(long short-term memory) 기반 시계열 추적을 통해 시간에 따른 변화 양상을 분석하는 순서로 구성된다. 이어서 초고해상도화 처리로 공간·분광 해상도를 보정·향상하고, 마지막으로 경보 엔진이 위험 수준이나 이상 징후를 판단해 경보를 발생시킨다. 또한, 국제 협력 관점에서 전체 지구를 대상으로 24시간 경보체계를 구축하려면 국제적인 교차보정, 공통 메타데이터 체계, 지상 표준원 공유가 필수이고, 임무 간 데이터 편차를 ±1% 이내로 유지하는 것이 중요하다.

5.3 AI-초분광 융합의 핵심 및 엣지 AI

초분광 이미징(hyperspectral imaging, HSI)은 공간×공간×스펙트럼으로 구성된 데이터 큐브 형태의 고차원·대용량 데이터를 생성하므로, 이를 실시간으로 처리하기 위해서는 인공지능(AI) 기술과의 융합이 필수적이다. 특히 엣지 AI 기반의 위성 온보드 추론 기술이 적용되지 않을 경우, 저지연 조기경보체계(latency < 1 s) 구현은 사실상 어렵다 [13].

엣지 AI 아키텍처에 기반한 온보드 실시간 처리 시스템은 FPGA(SAMD, ACE), NVIDIA Jetson Orin Nano, 방사선 강화 AI 반도체 등 다양한 고성능 연산장치를 통해 구현된다. 이러한 시스템은 초당 200~500 프레임의 초분광 데이터를 처리할 수 있으며, 전송 전 데이터 압축(compress-before-down-link)을 통해 데이터 용량을 약 70~90%까지 감소시킨다. 그 결과, 전송 효율은 약 2.3배 향상되고 대역폭 병목 현상이 완화되어 전체 시스템 지연 시간을 1초 미만으로 단축하는 것을 목표로 한다.

Table 5. Core aspects of AI-hyperspectral integration and edge AI

Technology category	Representative AI algorithms and techniques	Role and performance	Suitability for on-board (edge AI) implementation
Dimensionality reduction / denoising	AutoEncoder, PCA + Deep AE	Compresses high-dimensional data while improving SNR by approximately a factor of 8-15; very effective for noise suppression	High (can process more than 100 frames per second on FPGA/GPU platforms)
Spectral classification / matching	SAM + CNN, 1D-CNN	Compares angular distance to known plume signatures; achieves classification accuracy of about 92-97%	Medium (CNN models require lightweight / compressed implementation)
Spatio-temporal pattern prediction	CNN-LSTM Hybrid, ConvLSTM	Predicts plume spread and trajectory in temporally continuous image frames	High (FPGA-based implementation examples have already been demonstrated)
Anomaly detection / unmixing	Isolation Forest + Deep AE	Automatically detects spectral anomalies (plumes) that differ from the background and quantifies material mixing ratios	High (multiple CubeSat on-orbit demonstration cases have been reported)

Table 5는 초분광 데이터의 실시간 처리를 위해 적용 가능한 주요 엣지 AI 알고리즘(AutoEncoder, SAM+CNN, CNN-LSTM, Isolation Forest 등)의 기능, 처리 성능, 그리고 온보드 적용 가능성을 비교·정리한 것이다.

6. 결론

6.1 SWIR 초분광 기술의 전략적 가치

한국의 독자적 조기경보 체계 구축 전략으로 SWIR(0.9~2.5 μm) 초분광 위성기술은 미사일 발사 초기 플룸의 고온 시그니처(2.0~2.4 μm 대역)를 정밀 분석하여 기존 MWIR/LWIR 중심의 SBIRS-Next-Gen OPIR 체계를 효과적으로 보완할 수 있는 차세대 조기탐지 수단으로 평가된다. SWIR 대역은 높은 대기 투과율과 주야간 연속 감시 능력 덕분에 저 관측 특성을 가진 극초음속 활공체(HGV)나 다탄두(ICBM) 탐지에 유리하다. 그러나 현재 운용 중인 실전 우주 기반 미사일 조기경보 시스템은 여전히 MWIR/LWIR starting sensor 중심이며, SWIR 초분광은 아직 실증 단계에 머물러 있음을 정확히 인지해야 한다. 최근의 지정학적 갈등 사례를 통해 볼 때, 상업 초분광 위성 수요의 증가와 기술 발전이 군사적 조기탐지 분야의 성숙도를 간접적으로 가속화할 수 있음을 확인할 수 있다.

6.2 한국의 위협과 긴급 과제

2025년 11월 기준으로 한국은 ‘군사위성-I 프로젝트’를 통해 세계 최고 수준의 영상 정보·감시·정찰 능력을 확보했으나, 여전히 실시간 적외선 미사일 조기경보 위성은 없다. 북한의 고도화된 미사일 위협 앞에서 한국이 미국 Next-Gen OPIR 데이터에만 의존할 경우, 실제 교전 시 결정적 30~60초의 경보 지연이 발생하여 치명적인 결과로 이어질 수 있다. 따라서 한국은 지금 기술 격차를 줄이고 독자적인 방어 능력을 확보해야 하는 마지막 기회에 놓여 있으며, 단파장 적외선 초분광 위성기술 확보는 단순한 기술 트렌드가 아니라 국가 생존과 직결되는 전략 과제이다.

6.3 중장기 로드맵 및 투자 제언

우선적으로, 핵심 소재인 인듐·갈륨·비소 계열 검출

기와 양자점 기반 검출기, 그리고 광학계와 인공지능 실시간 처리 기술의 기술 성숙도(TRL)를 2028년까지 7 이상으로 끌어올려야 한다. 또한 2030년~2035년까지 독자적인 SWIR/MWIR 복합 초분광 조기경보 군집(LEO 20~30기 규모)을 배치해야 한다. 이 체계 구축에는 약 5조~7조 원의 예산과 7~8년의 시간이 소요될 것으로 예상된다. 이러한 목표 달성을 위해서는 정부, 산업계, 학계가 협력하여 원천기술 내재화와 실증 위성 발사를 서둘러야 한다. 이미 민간에서 기술 실증이 진행 중이므로, 정부의 집중 투자만 뒷받침된다면 2030년대 초 독자적인 한국형 킬 체인 완성이 가능할 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] R. K. Bhan & V. Dhar, ‘Recent Infrared Detector Technologies, Applications, Trends and Development of HgCdTe Based Cooled Infrared Focal Plane Arrays and Their Characterization,’ Opto-Electronics Review, VOL. 27, NO. 2, 2019, pp. 174-193.
- [2] Dimitris G. Manolakis, M. Marden, & G. W. Shaw, ‘Hyperspectral Imaging for Long-Range Missile Plume Detection in SWIR Bands,’ Lincoln Laboratory Journal, VOL. 25, NO. 1, 2023, pp. 45-68.
- [3] Michael T. Eismann, Hyperspectral Remote Sensing (2nd ed.), SPIE Press, 2022.
- [4] Alexander F. H. Goetz, ‘Three Decades of Hyperspectral Remote Sensing of the Earth: A Personal View,’ Remote Sensing of Environment, VOL. 113, SUPPL. 1, 2009, pp. S5-S16.
- [5] 헬튼의 밀리터리 국방소식, ‘초분광 영상 기반 표적식별 기술 개발,’ 2022. 1. 9.
- [6] U.S. Space Development Agency, Proliferated Warfighter Space Architecture (PWSA) Tracking Layer Tranche 2 Requirements Document, 2025.
- [7] Yole Développement, Hyperspectral Imaging & Sensing 2024-2033: Technology, Market and Players, Market & Technology Report, 2024.
- [8] G.-H. Kim, S.-H. Lee, S.-J. Park, J.-H. Choi, W.-J. Jung, S.-H. Han, & S.-J. Park, ‘Feasibility Study of QD-Based SWIR Detectors for Korean Missile Early Warning Satellites,’ Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, VOL. 28, NO. 2, 2025.
- [9] European Space Agency, ‘PRISMA and EnMAP Mission Status and Dual-Use Applications,’ ESA Earth Observation Quarterly, NO. 112, 2024.
- [10] Chinese Academy of Sciences, GF-5B AHSI Hyperspectral Satellite: Methane and CO2 Plume Quantification Results, National Remote Sensing Bulletin,

2023.

[11] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Achieving Integrated Missile Warning/Missile Defense with Proliferated LEO Architectures*, The National Academies Press, 2023.

[12] U.S. Space Force, *Next-Generation Overhead Persistent*

Infrared (Next-Gen OPIR) Program Overview, 2024.

[13] Shen-En Qian, Ying Zhang, Seyed Ali Ahmadi, & Aijun An, 'On-Orbit AI Processing for Hyperspectral Data Cubes: Edge Computing Approaches,' *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024.