

저궤도 초소형 위성 IoT 기술

Technologies for LEO Satellite IoT

오미경 (M.K. Oh, ohmik@etri.re.kr)

이상재 (S.J. Lee, leestrike@etri.re.kr)

홍태철 (T.C. Hong, taechori@etri.re.kr)

김희욱 (H.W. Kim, prince304@etri.re.kr)

김명순 (M.S. Kim, mskim75@etri.re.kr)

차지훈 (J.H. Cha, charge@etri.re.kr)

유준규 (J.G. Ryu, jgryurt@etri.re.kr)

위성통신인프라연구실 책임연구원

위성통신인프라연구실 책임연구원

위성통신인프라연구실 책임연구원

위성통신인프라연구실 책임연구원

위성통신인프라연구실 책임연구원

위성통신인프라연구실 연구원

위성통신인프라연구실 책임연구원/실장

ABSTRACT

Low Earth orbit (LEO) satellite-based Internet of Things (IoT) technologies have emerged as key enablers for global connectivity, offering wide-area service coverage, cost-efficient deployment, and flexible expansion of network capacity through the incremental addition of LEO satellites. This study provides an overview of the fundamental technologies and application domains of LEO satellite-enabled IoT services, with particular emphasis on two major approaches that extend terrestrial low power wide area (LPWA) systems into the space environment: LoRa-based non-terrestrial network (NTN) operation in unlicensed bands and 3GPP-standardized NB-IoT for licensed spectra. These technologies are designed to support low-power, low-cost, and wide-area communication capabilities under the constraints of LEO environments. Furthermore, this paper presents an LEO satellite-based IoT system recently developed by ETRI and introduces ETRISat, a CubeSat designed for deployment on the fourth KSLV-II mission to validate IoT communication technologies under real LEO operational conditions.

KEYWORDS ETRISat, IoT-NTN, 위성 IoT, 저궤도 위성

I. 서론

사물인터넷(IoT: Internet of Things)은 지능형 센서와 무선 통신 기술의 발전을 기반으로 다양한 사물들이 네트워크에 연결되어 데이터를 수집·전송·

분석하는 기술로, 일상생활뿐만 아니라 산업 전반에서 핵심적인 역할을 수행하고 있다. 특히 스마트농업, 공공 인프라 관리 및 컨테이너 추적 등과 같은 응용 분야에서는 원격 자산에 대한 모니터링을 통해 운영 비용 절감, 안전성 향상, 생산성 증대에 이

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2025.J.410104>

* 이 논문은 한국전자통신연구원 연구운영비지원사업의 일환으로 수행되었음[25ZH1110, 초공간 입체통신 핵심원천기술 개발/초소형 위성 기반 6G IoT-NTN 기술 개발].

바지하고 있다. 이러한 특성으로 인해 IoT 기술은 향후 무선 통신 기술 발전 과정에서도 중요한 위치를 지속적으로 차지할 것으로 전망된다[1].

현재 지상 기반 IoT 서비스는 면허 대역에서 3GPP (3rd Generation Partnership Project) 표준 기반의 NB-IoT를 중심으로, 비면허 대역에서는 LoRa, Sigfox, Ingenu와 같은 저전력 광역 통신 네트워크(LPWAN: Low Power Wide Area Networks)를 중심으로 제공되고 있다. 그러나 지상 통신 인프라는 산악지역, 사막, 해양, 극지 등과 같이 인프라 구축이 어렵거나 경제적 타당성이 부족한 지역에서는 적용에 근본적 한계를 가진다. 이러한 한계로 인해 전 지구적 커버리지를 제공할 수 있는 대안으로 저궤도(LEO: Low Earth Orbit) 위성을 활용한 IoT 기술의 필요성이 급증하고 있다[2,3].

기후변화 심화와 자연재해의 증가 또한 위성 IoT의 중요성을 부각시키고 있다. 예를 들어, 기상 관측 분야에서는 급격한 환경 변화와 해양 감시 요구 증가에도 불구하고 지상망 기반 통신의 한계와 고비용 문제로 인해 관측 범위 축소가 발생하고 있다. 해양 부이 관측의 경우, 선박을 활용한 자료 수집 방식은 실시간성이 낮고 운영비가 높다는 문제가 제기되었다. 이에 따라 언제 어디서나 연결 가능한 초광역 통신 기술, 즉 지상 인프라에 구애받지 않는 위성 기반 IoT 기술이 절실히 필요하다[2].

한편, 3GPP Release 17 이후 NTN(Non-Terrestrial Network) 표준화가 본격화되면서 위성 통신망은 지상 5G/6G와 연동되는 통합 네트워크 생태계로 발전하고 있다. 이러한 흐름 속에서 위성 IoT 기술은 군사·국방 분야 및 국가 재난 대응 등 국가 전략적 차원에서의 핵심 기술로도 그 중요성이 확대되고 있다[3].

특히 저궤도 위성 IoT는 광범위한 지역에 서비스 제공이 가능하고, 비교적 저비용으로 구축할 수 있

다는 점에서 경쟁력이 높다. 또한, 필요에 따라 새로운 위성을 추가 배치함으로써 네트워크 용량과 커버리지를 유연하게 확장할 수 있어, 전 지구적 연결성을 확보하기 위한 핵심 기술로 평가된다. 그러나 저궤도 위성은 궤도를 유지하기 위하여 고속으로 지구를 공전하기 때문에 도플러 효과로 인한 주파수 천이가 크게 발생하고, 넓은 범 커버리지로 인해 다수 단말의 동시 접속 간섭 문제가 발생하여 이는 반드시 해결해야 할 주요 기술적 과제로 지적된다[1].

본고에서는 저궤도 초소형 위성을 기반으로 글로벌 IoT 서비스를 제공하기 위한 위성 IoT 기술 및 그 활용 분야에 대해 알아보고, 최근 ETRI에서 개발한 저궤도 위성 IoT 시스템과 누리호 4차 발사를 통해 실제 저궤도 위성 환경에서 운용하기 위해 개발된 초소형 위성인 ETRISat에 대해 살펴보고자 한다.

II. 저궤도 위성 IoT 기술 개요

1. 기술 정의 및 시스템 구성

저궤도 위성 IoT 기술은 고도 약 160~2,000km 범위에 배치된 저궤도 위성을 활용하여 지상의 저전력 IoT 단말과 직접 통신을 수행하는 차세대 무선 통신 기술로 정의된다. 기존 지상망(셀룰러, LoRa LPWAN 등)으로 커버하기 어려운 지역까지 연결성을 확장할 수 있다는 점에서 크게 주목받고 있다. LEO 위성은 지표면과 근접성이 높기 때문에 지연이 상대적으로 짧고, 링크 버짓 측면에서도 유리해 소형·저전력 IoT 단말에서도 직접 위성과 통신이 가능하여 기존의 정지궤도(GEO: Geosynchronous Earth Orbit) 기반 위성 시스템보다 비용과 효율 면에서 우수하다.

저궤도 위성 IoT 시스템은 지상의 저전력 IoT 단말이 직접 위성과 통신하는 구조를 기반으로 하며,

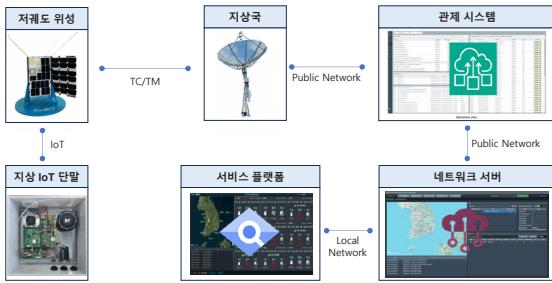


그림 1 저궤도 위성 IoT 시스템 구성도

그림 1과 같이 크게 1) 저궤도 위성 및 페이로드, 2) 지상 IoT 단말, 3) 지상국 및 관제 시스템, 4) 네트워크 서버 및 서비스 플랫폼으로 구성된다. 위성은 기지국 역할을 하며 궤도를 따라 이동하면서 IoT 단말과 직접 RF 링크를 형성한다. 지상국은 위성에서 수신된 데이터를 인터넷망이나 클라우드로 전달하며, 서비스 플랫폼에서는 위치·센서 데이터 관리, 장비제어, 분석 서비스를 제공한다.

2. 주요 활용 분야

저궤도 위성 IoT 기술은 지상 통신 인프라가 부족하거나 구축 비용이 과도한 지역, 그리고 이동성이 중요한 응용 분야에서 활용도가 매우 높다. 이러한 환경에서는 기존 지상망 기반 서비스의 한계가 뚜렷하게 나타나기 때문에, 저궤도 위성의 광범위 연결성과 단말 직접 연결 기능이 원격 모니터링, 환경 관측, 해양·극지 운용, 물류·자산 추적 등 다양한 분야에서 효율적이고 안정적인 통신 인프라로서 중요한 역할을 수행한다[1-3].

2.1 해양·원양 모니터링

지상 네트워크가 닿지 않는 바다 한가운데에서도 작은 IoT 단말을 통해 위치, 속력, 수온, 어군 탐지 센서 정보를 저궤도 위성으로 전송한다. 또한, 컨테이너 내부 온도·습도·진동 상태를 저궤도 위성을

통해 실시간 모니터링하여 냉동 컨테이너의 품질 유지에도 활용될 수 있다.

2.2 에너지 유트리티 인프라 모니터링

산악·사막·오지에 위치한 장거리 배관의 압력·온도·센서를 저궤도 위성을 통해 압력 하락과 같은 이상 징후를 조기에 탐지하여 사고를 예방하거나, 외딴 지역의 발전소 발전량·진동·기계 이상 데이터를 위성을 통해 본사나 운영센터로 전송해 상태 기반 유지·보수를 수행하는 데 활용될 수 있다.

2.3 도시 외곽 재난·안전 분야

산림 지대에 초소형 온도·연기 센서를 대량 배치하고 저궤도 위성으로 연결해 조기 화재 감시를 수행할 수 있고 지상망 부재 지역에서도 즉시 알림을 제공할 수 있다. 하천 수위 센서, 산사태 가능 지점의 가속도 토질 센서를 저궤도 위성으로 연결해 지방자치단체 관제센터로 전송할 수 있는 홍수 지반 위험 감시 시스템에도 활용될 수 있다.

2.4 물류 유통 운송

컨테이너 같은 고가 자산에 IoT 모듈을 부착해 전 세계 어디서나 실시간 위치를 확인할 수 있는 글로벌 자산 관리 시스템이나, 국경을 넘나드는 지역에서 지상 통신이 불규칙한 구간의 열차 상태·속도·제어 정보를 위성 IoT로 백업 전송하는 철도 운행 데이터 관리 시스템에도 활용될 수 있다.

2.5 공공 국방 분야

군사 감시 장비, 소형레이더, 견고형 센서 등을 저궤도 위성으로 연결해 인프라 구축이 어려운 지역에서 감시망을 유지할 수 있고, 지진·태풍 이후 지상 통신이 붕괴된 지역에서 위성을 통해 센서/배터

리 기반 임시 IoT 네트워크를 구축하여 구조팀에 실시간 상황을 공유할 수 있다.

III. 위성 IoT 통신 기술 현황

현재 저궤도 기반 위성 IoT 통신 기술은 크게 두 가지 기술 유형을 중심으로 활발히 개발되고 있다. 첫 번째는 비면허 대역 저전력 장거리 통신 기술인 LoRa 기반 위성 IoT 기술이며, 두 번째는 3GPP에서 정의한 NB-IoT 표준 기반의 위성 IoT 기술이다. 이 두 기술은 각각 지상에서 이미 상용화된 LPWA 통신 기술을 저궤도 위성 환경으로 확장한 형태로, 저전력 · 저비용 · 광역 커버리지 확보라는 공통된 목표를 지닌다[3-5].

그러나 저궤도 위성 환경은 빠른 도플러 편이, 짧은 가시 시간, 링크 마진 확보의 어려움과 같은 특수한 제약 조건을 갖고 있어, 두 기술 모두 지상에서의 동작 방식만으로는 위성 환경에서 안정적인 성능을 제공하기 어렵다. 이에 따라 현재 각각의 기술이 갖는 단점을 해결하기 위한 기술적 보완 연구가 활발히 진행되고 있다. 여기서는 위성 IoT 분야에서 주요하게 다루어지고 있는 이 두 기술에 대해 간략하게 살펴보고 표준 동향에 대해 알아본다.

1. LoRa 기반 위성 IoT 통신 기술

LoRa(Long Range)는 저전력 · 장거리 통신을 위해 설계된 LPWAN 기술로, 지상 IoT 환경에서 널리 사용되고 있다. 최근에는 저전력 특성과 긴 통신 거리, 단순한 단말 구조를 활용해 저궤도 위성을 통한 글로벌 IoT 서비스로 확장하는 기술이 빠르게 발전하고 있다[4].

LoRa 기반 위성 IoT 기술은 저전력 센서 단말이 지상 게이트웨이 없이 직접 저궤도 위성과 통신하

도록 설계된 기술이다. 기존 LoRaWAN은 지상 게이트웨이 간의 스타 토플로지 구조를 기반으로 하지만, 위성 IoT에서는 LEO 위성이 이동하는 게이트웨이 역할을 수행하며 대규모 단말의 분산적 접속을 수용하도록 하고 있다. 이러한 구조는 지상 인프라 구축이 곤란한 사막 · 해양 · 극지 · 산악지대 등에서 매우 효율적이다.

LoRa 기반 위성 통신의 기술적 특징은 크게 세 가지로 요약된다. 첫째, 협대역 변조인 Chirp Spread Spectrum(CSS) 기술을 활용해 높은 수신감도를 확보하여 수백 km 이상 거리에서의 단말-위성 간 링크 형성이 가능하다. 둘째, 장시간 배터리 동작을 위해 저전력 단말 설계가 가능하며, 이는 장기 관측 센서나 환경 모니터링 장비에서 활용성을 높인다. 셋째, LoRaWAN MAC 프로토콜을 위성 환경에 적합하도록 수정한 Random Access 방식이 적용되어 단말의 비동기적 전송에도 안정적인 패킷 수신율을 보장한다. 최근에는 Lacuna Space, EchoStar Mobile 등의 기업들이 LoRa 기반 위성 IoT 네트워크를 상용화하고 있다.

2. NB-IoT 기반 위성 IoT 통신 기술

NB-IoT는 3GPP가 정의한 저전력 광역 통신 기술로, 저속 · 저전력 · 광범위 연결을 위한 셀룰러 기반 표준이다. 최근에는 지상 인프라가 닿기 어려운 지역에서 IoT 단말을 연결하기 위해 지상망이 아닌 위성망, 특히 저궤도 위성을 활용한 NTN 설계가 주목받고 있다[3,5].

NB-IoT 기반 위성 IoT 기술은 3GPP에서 정의한 비지상 네트워크(NTN) 아키텍처를 기반으로 하며, 지상 셀룰러 NB-IoT 표준을 위성 환경에 적용한 기술로 정의된다. NB-IoT NTN은 표준화된 물리계 층인 SC-FDMA 업링크와 OFDMA 하향링크 기술

을 그대로 사용하되, 위성 이동에 따른 도플러 보정, 장거리 지연 대응, 단말-위성 가시성을 고려한 링크 적응 기술 등을 추가로 포함한다. 이는 기존 셀룰러 생태계를 활용하면서도 글로벌 커버리지 확보가 가능하다는 점에서 높은 산업적 파급력을 가진다.

기술적으로 NB-IoT 기반 위성 IoT 기술은 다음과 같은 특징을 가진다. 첫째, 3GPP Rel-17에서 NTN NB-IoT 규격이 본격적으로 정의되면서 단말 레벨에서의 위성 직접 접속이 가능해졌으며, Rel-18에서는 저전력 단말의 도플러 보정 랜덤 액세스 절차 최적화 기술이 추가되었다. 둘째, 단말 제조사들은 기존 NB-IoT 모듈의 펌웨어 수정만으로 위성 호환성을 확보할 수 있어 대량 확산이 용이하다. 셋째, NB-IoT는 협대역 구조(180kHz)를 사용하므로 링크 버짓 효율이 높으며, 빌딩 내부, 원거리 단말의 수신 성능이 우수해 환경 센서나 산업용 측정 장치에서 활용성이 크다.

3GPP Rel-17 이후, NB-IoT NTN 기반 단말이 상용화되며 일반 스마트미터, 추적기, 환경 센서 등이 기존 지상 NB-IoT 모듈 그대로 저궤도 위성과 연결되는 사례가 증가하고 있다. Sateliot, OQ Technology 등의 기업이 NB-IoT 단말과 LEO 위성 간 직접 연동 서비스를 상용화하여 IoT 장비 제조사들이 별도 위성용 모듈 없이 글로벌 커버리지를 확보하기 용이해졌다.

3. 기술 비교 및 표준 동향

현재 LoRa 기반과 NB-IoT 기반 위성 IoT 기술은 각각의 장단점을 보유하며 상호 보완적 발전 경로를 보인다. LoRa 기반 기술은 저전력 · 저비용 단말을 대량으로 연결하는 데 적합하며, 단순 메시지 기반의 센서 데이터 전송에 강점이 있다. 반면, NB-IoT 기반 기술은 셀룰러 표준에 기반한 호환성과 보

안성, QoS 관리 기능을 제공하여 산업, 공공 인프라 분야에 더 적합한 구조를 가진다. 글로벌 시장에서는 LoRa 기반 위성 IoT가 초기 확산 단계에서 비용 경쟁력으로 빠르게 도입되고 있으며, NB-IoT 기반 위성 IoT는 3GPP 표준화 진전에 따라 대규모 단말 생태계와 연동을 통해 장기적으로 시장을 선도할 것으로 전망된다.

표준과 관련하여서 LoRa 기반 기술은 국제 LoRa Alliance를 중심으로 위성 LoRaWAN 표준화 활동이 진행되고 있다. 지상 LoRaWAN 생태계를 저궤도 위성으로 확장하여 전 지구적 저전력 IoT 서비스를 실현하기 위한 표준으로 도플러 보정, LR-FHSS(Frequency Hopping Spread Spectrum) 적용, 수신 윈도우 최적화, 단일 글로벌 주파수 모델 등 다양한 기술 요소를 포함하고 있다.

3GPP에서는 위성을 통한 IoT 서비스 제공을 위한 표준화를 Rel-17 표준화부터 진행해오고 있다. 3GPP Rel-17에서는 NB-IoT의 NTN 확장을 위한 최초의 표준 규격이 마련되었으며, 긴 왕복지연과 높은 도플러 보상, 임의접속 및 스케줄링 절차의 적응화 등 위성 환경 대응 기술이 정의되었다. Rel-18에서는 IoT-NTN의 성능 · 운용 효율 개선을 목표로 HARQ(Hybrid Automatic Repeat Request) 동작의 NTN 적응화, 불연속 커버리지 대응 등 위성 환경 특화 단말 절차 개선에 초점을 두었다. Rel-19에서는 재생형 위성 탑재체가 고려되었으며, Store and Forward 전송, TDD 모드 운용 등 더욱 실제 위성 운용에 가까운 기능들이 도입되었다. 현재 진행 중인 Rel-20에서는 GEO 위성 기반 IoT-NTN에서의 음성(VoIP) 서비스 지원을 위한 표준화가 활발히 진행 중이며, 향후 6G 시대에는 IoT 및 스마트폰 등 다양한 디바이스들을 지원하는 TN과 NTN이 완전히 통합된 무선접속망 구현을 위한 표준화가 진행될 것으로 전망되고 있다[6].

IV. ETRI 연구개발 현황

ETRI에서는 지난 2020년부터 저궤도 초소형위성 기반 글로벌 IoT 서비스를 위한 위성 IoT 핵심 기술을 개발해 오고 있다. 특히 해양 기후변화 분석 및 예측에 활용하는 해양 기상 정보를 저궤도 위성을 통해 주기적으로 수집할 수 있는 위성 IoT 시스템을 개발했다[7].

이 기술을 바탕으로 2025년 11월 4차 누리호 발사를 통해 실제 저궤도 위성 운용 환경에서 성능 검증을 수행하기 위한 큐브위성인 ETRISat을 개발했다. 또한, 검증된 위성 IoT 전송 기술을 바탕으로 3GPP 표준화 대응을 추진할 예정이며 2026년부터는 본격적으로 6G IoT-NTN 표준기반 기술을 개발하여 2030년에 6G 표준기반 IoT-NTN 검증 위성을 올릴 예정이다.

여기서는 ETRI가 지난 2020년 이후부터 연구 개발해 온 저궤도 위성 IoT 핵심 기술과 이를 실제 운용 환경에서 검증할 수 있는 큐브위성인 ETRISat 연구개발 현황에 대해 살펴보고자 한다.

1. 저궤도 위성 IoT 핵심 기술 개발

위성 IoT 통신 시스템의 물리 계층과 매체 접근 제어 계층 기술은 지상 네트워크와 구별되는 고유한 특성을 가진다. 물리 계층에서는 수백 km 이상의 긴 통신거리, 위성 링크의 긴 전파 지연 시간과 저궤도 위성 이동성으로 인한 도플러 효과를 고려한 신호 처리 기법이 요구된다. 이러한 요구사항을 반영하기 위해 처프 확산 스펙트럼(CSS: Chirp Spread Spectrum) 전송 기술이 개발되었다. CSS 기술은 LoRa에서 사용하는 물리계층 기술로, 이 CSS 기술을 사용하여 도플러 효과 특히 도플러 드리프트에 강인하도록 패킷 구조를 재구성하고 낮은 SNR

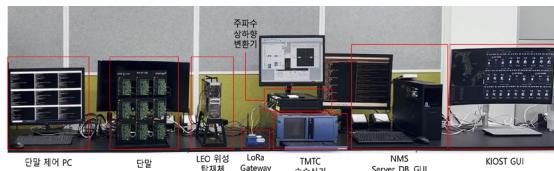
상황에서도 성능을 보장할 수 있는 동기부 알고리즘을 새롭게 개발하여 저궤도 위성 환경에 적합하게 하였다.

저궤도 위성을 이용한 위성 IoT 시스템 구축을 위한 주요 규격은, 고도 600km 궤도에서 고속으로 이동하는 위성과 900MHz 주파수 대역에서 통신하기 위해 ±23kHz 범위의 도플러 주파수 변동을 견뎌야 하며, 최대 1.2Kbps급 데이터 전송률을 지원해야 한다. 또한, 극한 위성 통신환경에서도 정상적인 데이터 수신이 가능하도록 동작 SNR -25dB를 만족해야 한다.

매체 접근 제어 계층에서는 다수의 IoT 디바이스가 공유하는 위성 채널의 효율적 사용을 위해 시간 분할 다중 접속(TDMA: Time Division Multiple Access)과 같은 채널 접근 방식이 적용된다. 또한, 제한된 위성 링크 대역폭을 고려하여 간헐적 데이터 전송이나 필수 데이터만을 전송하는 방식 등 전력 효율성을 향상시키는 기법이 병행된다.

그림 2는 지상 IoT 단말로부터 저궤도 위성 탑재체, 네트워크 관리 시스템(NMS: Network Management System), 그리고 AI 기반 기후 분석 및 예측 시스템에 이르기까지 통합된 전체 시스템을 보여준다.

지상 IoT 단말은 저전력 특성을 확보하기 위하여 IoT 송수신 기술을 주문형 반도체 집적회로(ASIC: Application Specific Integrated Circuit) 칩 형태로 개발하여 구성하였다. 그림 3에서 보여주는 단말 구성은



출처 Reprinted from 한국전자통신연구원, “저궤도 초소형위성(10kg급) 기반 글로벌 IoT 서비스를 위한 저전력 위성다중액세스 핵심기술개발 최종보고서,” 2024. 12.

그림 2 위성 IoT 검증용 통합 시스템



출처 Reprinted from 한국전자통신연구원, “저궤도 초소형위성(10kg급) 기반 글로벌 IoT 서비스를 위한 저전력 위성다중액세스 핵심기술개발 최종보고서,” 2024. 12.

그림 3 IoT 단말 셋 및 단말용 ASIC 칩

가상의 9개 부이에 설치되는 IoT 단말을 모사한 것으로, 각 단말에는 단말용 ASIC 칩이 탑재되어 있으며 수온, 파고 등과 같은 실제 해양 센서 데이터를 사전에 입력하여 위성 탑재체로 전송하도록 설정하였다.

위성 탑재체는 수집된 데이터를 TM/TC 송수신 기기를 통해 지상국 NMS로 전달하며, NMS와 연동된 AI 기반 기후 분석 및 예측 시스템에서는 실시간 수집 데이터를 기반으로 예측 결과를 분석 및 가시화한다. 이를 통해 본 연구에서 개발한 위성 IoT 핵심 기술을 종합적으로 검증하였다.

개발된 CSS 기반 IoT 송수신 기술을 검증하기 위해서는 위성 환경을 모사할 수 있는 위성 에뮬레이터 장비를 활용하였다. 위성 에뮬레이터는 위성 고도 600km 및 916MHz 운용 주파수를 설정하면, 지평선 상승에서 천정 통과를 거쳐 지평선 하강에 이르는 위성의 이동 프로파일을 생성하며, 이에 수반되는 도플러 변동, 경로 감쇠 변화, 전파 지연 등의 채널 특성을 실시간으로 재현한다. 에뮬레이터에서 생성된 실제 RF 신호를 위성 탑재체용 송수신 모뎀과 지상 단말용 송수신 모뎀 사이에 삽입하여 연동 함으로써 개발한 CSS 기반 IoT 송수신 기술이 위성

통신 환경에서도 안정적으로 동작함을 실험적으로 검증하였다.

2. 누리호 부탑재체 ETRISat 개발

개발된 저궤도 위성 IoT 시스템의 기능 및 성능을 실제 운용 환경에서 검증하기 위하여, 누리호 4차 발사체의 부탑재체인 ETRISat 큐브위성을 개발하였으며, 이에 연동되는 지상국, 해양 서비스용 IoT 단말, NMS, 그리고 응용 서비스 플랫폼을 실제 운용 시나리오에 맞추어 구축하였다. 그림 4는 전체 시스템 구성을 도시한 것으로, 앞서 그림 2에서 설명한 위성 IoT 검증용 통합 시스템을 실제 운용 환경에 적합하도록 구현한 결과라 볼 수 있다.

2.1 ETRISat

실제 위성 환경에서 위성 IoT 서비스를 운용하기 위해서는 위성 IoT 탑재체 기능을 포함한 전용 위성체의 제작이 필수적이다. 본 개발에서는 위성 IoT 임무의 요구사항을 고려하여 무게 10kg 이하, 전력 소모 30W급의 6U 큐브위성으로 설계·개발되었으며, 해당 위성은 ETRISat으로 명명하였다. 그림 5는 ETRISat 위성체와 위성체 내에 위성 IoT 송수신 기술 및 응용 기술을 구현한 SDR(Software-Defined



출처 Reprinted from 한국전자통신연구원, “저궤도 초소형위성(10kg급) 기반 글로벌 IoT 서비스를 위한 저전력 위성다중액세스 핵심기술개발 최종보고서,” 2024. 12.

그림 4 ETRISat 기반 위성 IoT 운용 시스템

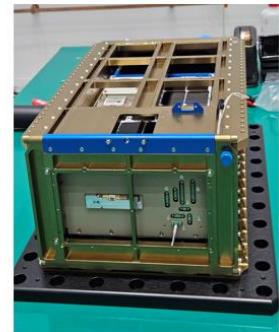


그림 5 ETRISat 위성체와 SDR 페이로드

Radio) 페이로드를 보여준다.

ETRISat 큐브위성은 우주 환경에서의 신뢰성을 확보하기 위해 진동시험, 열진공시험 등 다양한 환경시험을 수행하였다. 진동시험은 누리호 4차 한국형 발사체의 요구 진동 규격에 따라 시험 항목을 정의하고 이를 기반으로 시험을 진행하였다. X, Y, Z 축 방향의 랜덤 진동 및 정현파 진동 시험을 수행하고, 시험 전후의 고유진동수를 비교함으로써 구조적 손상 여부를 평가하였다. 또한, 진동시험 전후로 기능 점검, 외관 검사, 배터리 전원 차단 여부 확인 등을 통하여 위성체의 건전성을 검증하였다.

열진공시험은 궤도 열 해석 결과를 기반으로 구성품별 예상 온도 범위를 도출한 후, 각 구성품의 생존 및 작동 온도 조건에 따라 시험 온도 범위를 결정하였다. 시험 초기에는 베이크아웃(Bake-Out)을 통해 조립된 위성체의 탈기(Outgassing)를 수행하였으며, 이후 고온 및 저온 조건을 일정 시간 유지하면서 구성품별 기능 점검을 실시하였다. 또한, 열진공 시험 초기 동안 저온 및 고온에서 반복적인 기능 시험을 시행하여 시스템의 정상 동작 여부를 확인하였다.

발사체 인터페이스 시험에서는 ETRISat이 장착되는 FM Pod의 도어(Door)가 정상적으로 개방되는지 확인하였으며, 위성체와 동일한 조건에서 수행된

그림 6 ETRISat의 FM Pod 장착 모습

진동 및 열진공 시험을 모두 통과하였다. ETRISat은 2025년 11월 27일 누리호 4차 발사 일정에 맞추어 Health Check을 완료하고 FM Pod에 장착되었으며, 그림 6은 ETRISat 본체와 이를 FM Pod에 장착한 상태를 나타낸 것으로, 이는 발사체 조립 이전의 최종 모습을 보여준다.

ETRISat은 4차 누리호의 성공적 발사를 통해 목표 궤도 600km 상공에서 정상적으로 사출되었으며, 11월 27일 새벽 2시 36분경 스발바르 위성 기지국에서 첫 교신에 성공했다. 이후 추가적인 LEOP (Launch & Early Orbit Phase: 초기궤도 운용 단계) 및 Commissioning(위성시험 운용단계)이 끝나면 실제 위성 IoT 임무를 수행할 예정이다.

2.2 해양 서비스용 IoT 단말기

지상 IoT 단말은 그림 7과 같이 해양 환경에서의 장기적 운용을 고려하여 방수 케이스 형태로 설계·개발되었다.

2.3 지상국

ETRISat 위성 운용을 위한 지상국은 그림 8과 같아, 지름 3m 및 이득 37.5dBi의 지상국 안테나와 S-band TM/TC 송수신 기능을 갖춘 지상국 장비로 구성되어 있다. 안테나는 ETRI 건물 옥상에 설치하



그림 7 해양 서비스용 IoT 단말기

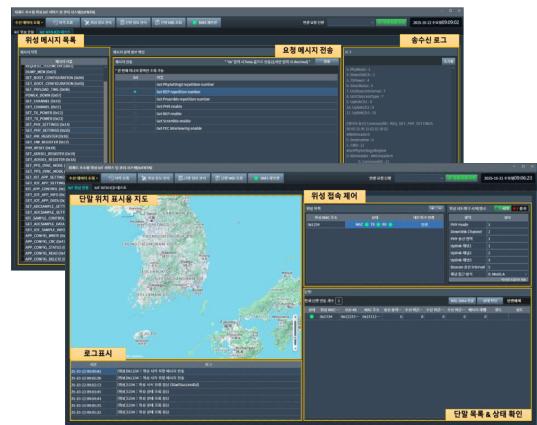


그림 9 NMS의 GUI 화면

였으며, 지상국 장비는 실내 실험실에 구축하여 연동 시험을 시행하였다. 또한, 지상국은 클라우드 기반 MCS(Mission Control Software)와 연결되어 TM/TC 인터페이스를 통해 ETRISat의 운용 및 상태 관리를 수행할 수 있도록 구성하였다.

2.4 네트워크 관리 시스템(NMS)

네트워크 관리 시스템인 NMS는 MCS와 연동하여 위성 IoT 페이로드와의 통신을 담당하며, 위성 IoT 프로토콜에 따라 메시지를 송수신한다. 또한, 위성 및 IoT 단말 정보관리, TM/TC 메시지 송수신, 위성 · 단말 메시지의 데이터베이스 저장, 위성 · 단말 이력 데이터의 관리 기능을 수행하며, 해양 기후 예측 플랫폼과의 데이터 연동 기능도 제공



그림 8 지상국 안테나와 운용 SW

한다. 그림 9는 NMS의 GUI 화면을 도시한 것이다.

2.5 AI 기반 해양 기후 예측 시스템

그림 10은 해양 기후 예측 딥러닝 모델을 이용하여 실측 데이터를 기반으로 예측 데이터를 생성하는 AI 기반 해양 기후 예측 시스템의 GUI 화면을 나타낸다. 본 시스템은 NMS로부터 전달받은 IoT 센서 데이터(수온, 풍속, 파고 등)를 기반으로 해양 기후를 예측하고 그 결과를 GUI 상에 시각적으로 표시되어 해양 환경의 현재 상태와 변화를 종합적으로



출처 Reprinted from 한국전자통신연구원, “저궤도 초소형위성(10kg급) 기반 글로벌 IoT 서비스를 위한 저전력 위성다중액세스 핵심기술개발 최종보고서,” 2024. 12.

그림 10 AI 기반 해양 기후 예측 시스템

파악할 수 있다. 이러한 구조는 해양 기후 변화의 조기 탐지 및 의사결정 지원에 효과적으로 활용될 수 있다.

V. 결론

본고에서는 글로벌 서비스를 지향하는 저궤도 초소형 위성 기반 IoT 기술에 대해 살펴보고, ETRI에서 개발한 저궤도 위성 IoT 시스템과 실제 위성 운용을 위해 개발된 ETRISat을 중심으로 AI 기반 해양 기후 예측 시스템을 살펴보았다. 이를 통해 위성 IoT 기술이 지상 인프라가 갖는 공간적·환경적 한계를 보완하며, 전 지구적 커버리지 확보 측면에서 중요한 역할을 수행함을 확인하였다.

특히, 이러한 기술적 중요성에 기반하여 6G 표준

기반 위성 IoT 핵심 기술 개발이 추진되고 있으며, 2030년경 6G IoT-NTN 통신 위성 발사 및 운용 계획이 수립되었다. 관련 연구 개발은 2026년부터 본격적으로 착수될 예정으로, 이는 국내 위성 IoT 기술 경쟁력을 한 단계 도약시키는 기반이 될 것이다.

또한, 글로벌 기술 패권 경쟁이 심화되는 현시점에서, 우주 기술과 차세대 통신 기술의 결합 영역인 저궤도 위성 IoT 기술 분야는 국가 차원의 전략적 투자와 지속적 연구개발이 요구되는 핵심 분야임을 재확인하였다. 향후 국내 연구기관, 산업계, 학계 간의 유기적 협력 체계와 기술 생태계가 공고히 구축된다면, 우리나라는 IoT 단말과 스마트폰 등 다양한 디바이스를 포괄적으로 지원하는 지상(TN)-비지상(NTN) 완전 통합 기반의 차세대 6G 시대를 주도할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] S.Y. Jung et al., "LR-FHSS Transceiver for Direct-to-Satellite IoT Communications: Design, Implementation, and Verification," IEEE Open J. Veh. Technol., vol. 6, 2025, pp. 1920-1942.
- [2] e경제정보리뷰, "차세대 통신 인프라, 저궤도 위성통신," 2025-01호 좌담.
- [3] 신재승 외, "셀룰러 기반 저궤도 위성통신 기술 동향," 전자통신동향분석 제38권 제2호, 2023, pp. 1-11.
- [4] A. Traspadini et al., "Performance evaluation of LoRa for IoT applications in Non-terrestrial networks via ns-3," in Proc. IEEE Glob. Commun. Conf., (Taipei, Taiwan), Dec. 2025.
- [5] T. Hong et al., "Narrowband internet of things via low earth orbit satellite networks: an efficient coverage enhancement mechanism based on stochastic geometry approach," Sensors, vol. 24, no. 6, 2004.
- [6] I. Shayea et al., "Integration of 5G, 6G and IoT with Low Earth Orbit (LEO) networks: Opportunity, challenges and future trends," Results Eng., vol. 23, 2024.
- [7] 한국전자통신연구원, "저궤도 초소형위성(10kg급) 기반 글로벌 IoT 서비스를 위한 저전력 위성다중액세스 핵심기술개발 최종보고서," 2024. 12.