

# 6G O-RAN RIC 보안 및 디지털 자산 보호를 위한 블록체인 기반 제로 트러스트 기술 동향 연구

류원재, 이재민, 김동성

국립금오공과대학교

{wj0828, ljmpaul, dskim}@kumoh.ac.kr

## A Study on Blockchain-Based Zero-Trust Technology Trends for 6G O-RAN RIC Security and Digital Asset Protection

Won Jae Ryu, Jae-Min Lee, Dong-Seong Kim

Kumoh National Institute of Technology

### 요 약

현대 통신 네트워크가 소프트웨어 중심의 개방형 구조인 O-RAN(Open-Radio Access Network)으로 급격히 진화함에 따라, 다중 벤더 환경에서의 보안 위협과 신뢰 구축이 핵심 과제로 부상하고 있다. 본 연구는 O-RAN의 구조적 취약점을 보완하기 위한 기술적 대안으로 블록체인을 결합한 B-RAN(Blockchain-enabled RAN) 아키텍처의 적용 동향을 분석한다. 본문에서는 블록체인의 활용 방안을 네 가지 핵심 영역으로 구분하여 고찰한다. 첫째, 탈중앙화 신원증명(DID)을 통한 제로 트러스트 보안 체계 구축, 둘째, 연합 학습(FL)의 신뢰성 확보를 위한 평판 시스템 도입, 셋째, 스마트 컨트랙트 기반의 동적 스펙트럼 공유 및 네트워크 슬라이싱 마켓플레이스 운영, 넷째, NFT 기반의 xApp/rApp 지적 재산권 관리 방안을 제시한다. 분석 결과, 블록체인은 O-RAN 환경에서 명시적 검증 기반의 보안 패러다임 전환, AI 모델 및 데이터의 무결성 보장, 개방형 인터페이스 중심의 통신 경제 생태계 창출이라는 세 가지 전략적 가치를 제공함을 확인하였다. 결론적으로 B-RAN은 6G 시대의 초연결 네트워크를 지탱할 핵심 인프라로 자리 잡을 것이며, 향후 실용화를 위해서는 트랜잭션 지연 최소화 및 표준 인터페이스 간의 상호 운용성 확보를 위한 지속적인 연구가 요구된다.

### I. 서 론

현대 통신 네트워크는 하드웨어 중심의 폐쇄적 구조에서 소프트웨어 기반의 개방형 지능형 네트워크인 O-RAN(Open-Radio Access Network)으로 진화하고 있다[1]. 이는 벤더 종속성 탈피와 비용 절감, AI 기반 최적화라는 이점을 제공하나, 구성 요소의 분해로 인해 공격 표면이 확대되고 신뢰 구축이 어려워지는 보안 취약점을 동반한다. 기존 RAN이 단일 벤더 내부의 '암묵적 신뢰'에 의존했다면, O-RU/DU/CU와 RIC, 그리고 서드 파티 애플리케이션(xApp/rApp)이 공존하는 O-RAN은 '제로 트러스트(Zero Trust)' 환경을 전제로 한다[2]. 특히 중앙집중식 인증 방식은 단일 실패 지점(SPoF)의 위험과 가상화 네트워크의 유연한 관리 부족이라는 한계를 지닌다. 이에 따라 탈중앙화된 신뢰 앵커로서 블록체인을 결합한 B-RAN(Blockchain-enabled RAN)이 대안으로 제시되고 있다[3]. B-RAN은 무선 자원, 컴퓨팅 파워, 스펙트럼, AI 모델 등을 '토큰화'하여 다중 벤더 및 개체 간에 안전하게 거래하고 공유할 수 있는 아키텍처를 지향한다.

결론적으로 블록체인은 O-RAN의 보안을 강화하는 동시에, 사업자 간 인프라 실시간 임대나 P2P 대역폭 거래와 같은 경제적 모델 혁신을 가능하게 한다. 이는 6G 시대의 초연결·초지능 네트워크를 지탱하는 핵심 보안 및 관리 인프라로 자리 잡을 전망이다. 본 연구에서는 이러한 B-RAN의 실질적인 구현 가능성을 검토하기 위해 제로 트러스트 보안 및 탈중앙화 신원증명(Decentralized Identifier, DID) 기술, 연합 학습의 신뢰성 확보, 동적 스펙트럼 공유, 그리고 xApp/rApp 기반의 경제 생태계 구축이라는 네 가지 관점에서 블록체인의 구체적인 활용 방안을 심층 분석한다.

### II. 본론

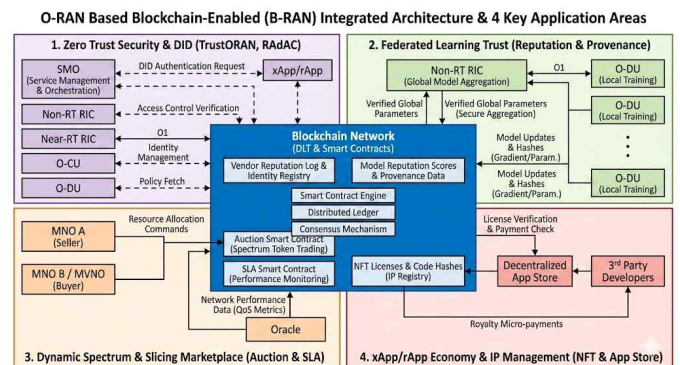


그림 1 B-RAN 통합 아키텍처 및 4대 핵심 서비스 시나리오. 본 장에서는 O-RAN 아키텍처 내 블록체인 기술의 구체적인 활용 방안을 보안, 지능화, 자원 관리, 경제 생태계의 네 가지 관점에서 범주화하였으며 그림 1을 통해 관점들을 요약하여 볼 수 있다.

#### 1. 제로 트러스트 아키텍처와 탈중앙화 신원증명(DID)

O-RAN 얼라이언스 WG11은 차세대 보안 목표로 제로 트러스트 아키텍처를 설정하고 블록체인을 핵심 연구 항목으로 선정했다.

- TrustORAN 및 탈중앙화 신원증명(DID): xApp 등 서드파티 앱의 변조를 방지하기 위해 DID를 활용한다. 벤더가 앱의 메타데이터와 서명을 블록체인에 등록하면, SMO나 RIC는 배포 시 원장을 조회하여 앱의 무결성과 벤더 평판을 즉각 검증한다. 이는 중앙 서버 장애 시에도 인증의 연속성을 보장한다[4].

- 리스크 적응형 접근 제어(RAdAC): 스마트 컨트랙트를 통해 정적 접근 제어(ACL)를 동적 모델로 진화시킨다. 실시간 행위 로그 분석을 통해 비

정상 패턴이 감지될 경우, 스마트 컨트랙트가 해당 앱의 접근 토큰을 즉시 무효화하는 자동화된 방어 체계를 구축한다[5].

## 2. 연합 학습(Federated Learning)과 AI 모델의 무결성

O-RAN의 지능화는 RIC 내 AI/ML 모델에 의존하며, 프라이버시 보호를 위해 연합 학습(FL)이 활용된다. 그러나 이는 악의적인 파라미터를 전송하는 포이즈닝 공격에 취약하다는 한계가 있다.

- 블록체인 기반 평판 시스템: 각 노드(O-DU)의 학습 기여도를 블록체인에 기록하고 스마트 컨트랙트로 품질을 평가한다. 일정 수준 이상의 평판을 가진 노드의 파라미터만을 글로벌 모델에 병합함으로써 공격을 원천 차단한다[6].
- 데이터 출처(Provenance) 증명: 학습 데이터의 생성 및 가공 이력을 온체인에 기록하여 데이터 신뢰성을 확보한다. 이는 AI의 의사결정에 대한 책임 소재를 규명하는 설명 가능한 AI(XAI) 구현의 법적·윤리적 토대가 된다[7].

## 3. 동적 스펙트럼 공유와 네트워크 슬라이싱 마켓플레이스

5G 및 6G 네트워크의 핵심 기능인 '네트워크 슬라이싱'은 물리적 네트워크를 다수의 논리적 네트워크로 분할하여 제공한다. 블록체인은 이 슬라이스 자원을 동적으로 거래하고 관리하는 마켓플레이스의 인프라로 연구되고 있다[8].

- 스펙트럼 경매 및 브로커리지: 연구 문헌은 블록체인 기반의 스펙트럼 경매 메커니즘을 상세히 다룬다. 예를 들어, 특정 시간대에 트래픽이 폭주하는 MVNO(가상이동통신사업자)가 잉여 대역폭을 가진 MNO(이동통신사업자)로부터 스펙트럼을 임대하고자 할 때, 중개자 없이 스마트 컨트랙트를 통해 실시간 경매를 진행할 수 있다.
- 스마트 컨트랙트의 역할: 입찰 가격 검증, 낙찰자 선정, 대금 결제, 그리고 최종적으로 O-RAN 제어기(SMO)에 자원 할당 명령 전달까지의 과정을 자동화한다.

## 4. xApp/rApp 경제 생태계와 지적 재산권(IP) 관리

스마트폰의 앱 스토어와 유사하게, O-RAN 생태계의 활성화는 다양한 서드파티 개발자들이 우수한 xApp/rApp을 공급하는 데 달려 있다. 블록체인은 이들의 지적 재산권을 보호하고 수익을 투명하게 분배하는 플랫폼을 제공해야 한다.

- 스마트 컨트랙트 기반의 인증 및 권한 부여: 벤더는 접근 제어 컨트랙트(ACC, Access Control Contract)를 블록체인에 배포하여 자사 xApp에 대한 접근 권한을 관리한다. 스마트 컨트랙트는 사전 정의된 규칙에 따라 xApp을 검증하고 인증된 주체에게만 자원 접근 권한을 부여함으로써 악성 xApp의 무단 접근을 원천 차단하는 연구가 가능하다[4,9].

## III. 결론

본 연구는 O-RAN의 구조적 취약점을 보완하고 다중 벤더 환경에서 신뢰를 구축하기 위한 블록체인 기술의 적용 동향을 분석한다. 블록체인은 단순한 보안 도구를 넘어 O-RAN 아키텍처의 필수적인 관리 평면 인프라로서 다음과 같은 세 가지 전략적 가치를 제공한다. 첫째, 명시적 검증 기반의 제로 트러스트(Zero Trust) 구현이다. DID와 스마트 컨트랙트를 통해 다중 벤더 구성 요소의 신원을 자동 검증함으로써 단일 실패 지점(SPoF) 문제를 해결하고 공격 표면을 효과적으로 제한한다. 둘째, AI 모델 및 데이터의 무결성 보장이다. 연합 학습 시 평판 시스템으로 포이즈닝 공격을 차단하고 데이터 출처(Provenance)의 불변성을 확보하여, 향후 6G의 핵심 요건인 설명 가능한 AI(XAI)의 토대를 마련한다. 셋째, 개방형 인터페이스 기반의 통신 경제 생태계 창출이다. 자원 토큰화를 통해 동적 스펙트럼 공유와 실시간 슬라이싱 거래를 지원하며, NFT 기반 라이선스

관리로 투명한 xApp/rApp 마켓플레이스 형성을 견인한다. 요컨대 블록체인이 결합된 B-RAN(Blockchain-enabled RAN)은 6G의 핵심 아키텍처가 될 것이다. 다만 실용화를 위해서는 트랜잭션 지연(Latency) 최적화와 표준 인터페이스 간의 상호운용성 확보가 향후 연구의 핵심 과제가 될 것으로 보인다.

## ACKNOWLEDGMENT

This work was partly supported by the IITP(Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation)-ITRC(Information Technology Research Center) grant funded by the Korea government(Ministry of Science and ICT)(IITP-2025-RS-2024-00438430, 40%), the Priority Research Centers Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2018R1A6A1A03024003, 30%), This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(RS-2025-25431637, 30%)

## 참 고 문 헌

- [1] M. Wani, M. Kretschmer, B. Schröder, A. Grebe and M. Rademacher, "Open RAN: A Concise Overview," in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 6, pp. 13-28, 2025
- [2] A. Ayub Khan et al., "ORAN-B5G: A Next-Generation Open Radio Access Network Architecture With Machine Learning for Beyond 5G in Industrial 5.0," in IEEE Transactions on Green Communications and Networking, vol. 8, no. 3, pp. 1026-1036, Sept. 2024.
- [3] H. Xu, Z. Zhou, L. Zhang, Y. Sun and C. -L. I, "BE-RAN: Blockchain-enabled Open RAN for 6G with DID and Privacy-Preserving Communication," 2024 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Cape Town, South Africa, 2024.
- [4] Z. A. El Houda, H. Moudoud and L. Khoukhi, "Blockchain Meets O-RAN: A Decentralized Zero-Trust Framework for Secure and Resilient O-RAN in 6G and Beyond," IEEE INFOCOM 2024 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Vancouver, BC, Canada, 2024, pp. 1-6.
- [5] A. Mehrban, Z. Abou El Houda, H. Moudoud and L. Bao Le, "Integrating Zero Trust Architecture in O-RAN: A Comprehensive Survey and Analysis," in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 6, pp. 10465-10495, 2025.
- [6] F. Javed, J. Mangues-Bafalluy, E. Zeydan and L. Blanco, "Trustworthy Reputation for Federated Learning in O-RAN Using Blockchain and Smart Contracts," in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 6, pp. 1343-1362, 2025
- [7] L. Ridwan, "Intelligent Data Provenance Tracking: Blockchain-Enabled Trust Framework for MLOps Pipelines," 2025.
- [8] L. Giupponi and F. Wilhelm, "Blockchain-Enabled Network Sharing for O-RAN in 5G and Beyond," in IEEE Network, vol. 36, no. 4, pp. 218-225, July/August 2022.
- [9] P. Rodgers and P. Harvey, "The xApp Store: A Framework for xApp Onboarding and Deployment in O-RAN," arXiv preprint arXiv:2512.02297, 2025.