

JSON 스키마를 활용한 O-RAN A1 인터페이스 메시지 경량 검증 기법 설계

류원재, 이재민, 김동성

국립금오공과대학교

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

Lightweight Validation Method for O-RAN A1 Interface Messages Using JSON Schema

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

Kumoh National Institute of Technology

요약

O-RAN(Open Radio Access Network) 아키텍처에서 A1 인터페이스는 non-RT RIC과 near-RT RIC 간 정책 전달 및 인공지능/머신러닝(ML) 모델 관리에 핵심적인 역할을 수행한다. 그러나 A1 메시지는 JSON 형식으로 정의되어 있으며, 실제 운용 환경에서 메시지 구조나 데이터 유형 오류가 발생할 경우 네트워크의 안정성과 신뢰성에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 본 논문에서는 JSON Schema를 활용하여 A1 인터페이스 메시지를 경량으로 검증하는 방법을 제안한다. 특히 O-RAN Software Community에서 제공하는 A1 Mediator 환경을 기반으로, Non-RT RIC이 생성한 정책 및 모델 메시지가 표준 규격에 부합하는지를 자동 검증하는 경량화 기법을 구현하였다. 제안하는 방법은 복잡한 파서(parser)나 무거운 검증 도구를 사용하지 않고도 메시지 형식과 제약 조건을 신속히 확인할 수 있도록 설계한다. 이를 통해 표준 준수 여부를 효율적으로 확인하고, 메시지 처리 과정에서 발생할 수 있는 오류를 사전에 차단할 수 있다. O-RAN RIC 환경에서 실시간 정책 관리와 서비스 신뢰성을 향상시키는 데 기여할 수 있음을 알 수 있다.

I. 서론

5G와 그 이후 세대 이동통신 환경에서 무선 접속 네트워크(Radio Access Network, RAN)의 개방성과 지능화는 핵심적인 발전 방향으로 주목받고 있다. 특히, O-RAN(Open Radio Access Network) 아키텍처는 벤더 종속성을 탈피하고 지능형 무선 네트워크 운용을 가능하게 하는 개방형 구조를 제시함으로써 연구 및 산업계에서 빠르게 확산되고 있다. 이 중 A1 인터페이스는 non-RT RIC(Radio Intelligent Controller)과 near-RT RIC 간의 정책 전달, 인공지능/머신러닝 모델 관리, 성능 피드백 교환을 담당하는 핵심 구성 요소로, O-RAN 표준 준수와 안정적인 네트워크 동작을 위해 정확한 메시지 교환이 필수적이다[1,2]. 그러나 A1 인터페이스에서 교환되는 메시지는 JSON(JavaScript Object Notation) 형식으로 정의되며, 메시지 구조나 데이터 값의 오류가 발생할 경우 정책 적용 실패, 모델 업데이트 지연, 시스템 불안정성 등 심각한 문제가 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 메시지 유효성 검증이 필요하지만, 기존의 복잡한 검증 도구나 파서 기반 접근법은 높은 연산 비용과 지연을 초래하여 실제 RIC 환경에서의 적용에 한계가 존재한다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 JSON Schema를 활용한 경량 검증 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 메시지 구조 및 데이터 타입을 사전에 정의된 스키마와 비교하여 신속하면서도 표준에 부합하는 검증을 수행한다. 이를 통해 불필요한 시스템 오버헤드를 줄이고, 실시간성이 중요한 O-RAN 운용 환경에서 안정적이고 효율적인 메시지 교환을 보장할 수 있다. 본 논문의 기여는 다음과 같다. O-RAN A1 인터페이스 메시지의 특성과 표준 요구사항을 분석하고, JSON Schema를 적용한 경량 검증 방법을 설계한다. 이를 통해 본 연구는 O-RAN 기반 무선 네트워크에서의 지능형 RIC 운용 신뢰성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

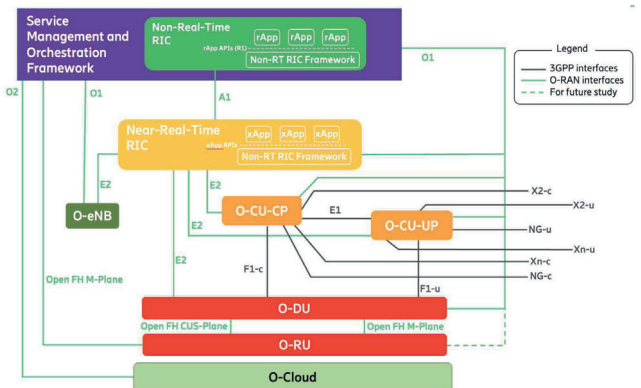


그림 1 O-RAN 구조

II. 본론

그림1의 O-RAN 구조에서 나타내는 것과 같이 O-RAN Alliance는 A1 인터페이스를 통해 non-RT RIC과 near-RT RIC 간 정책(Policy) 전달, AI/ML 모델 관리(Model Management), 성능 피드백 교환(Feedback)을 정의한다. 이러한 메시지는 JSON 기반으로 작성되며, 표준 문서에서 구조적 일관성, 필수 필드 존재, 데이터 타입 일치 등을 엄격하게 요구한다. 그러나 실제 운용 환경에서는 메시지 구조 오류, 데이터 불일치, 파라미터 누락 등이 빈번하게 발생할 수 있으며, 이는 RIC 간 정책 적용 실패, 모델 업데이트 지연, 네트워크 불안정성으로 이어질 수 있다. 이러한 문제를 완화하기 위해 O-RAN은 A1 Mediator를 정의하였다[3]. A1 Mediator는 non-RT RIC과 near-RT RIC 사이의 메시지 교환을 중재하며, 메시지 전달 전후 단계에서 형식적(validity) 검증과 에러 처리를 수행해야 한다. 따라서 A1 Mediator의

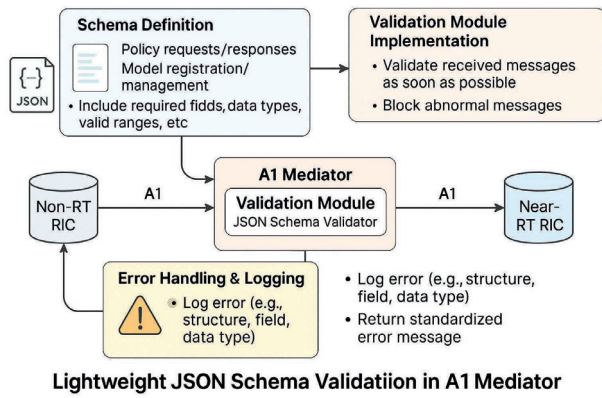


그림 2 A1 인터페이스 메시지 경량 검증 과정

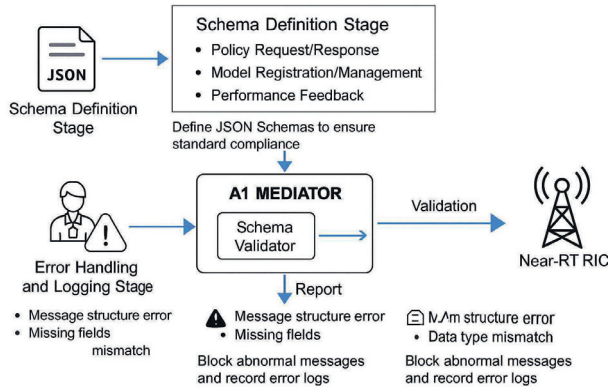


그림 3 A1 Mediator 기반 메시지 실시간 검증 절차
lightweight validation 성능은 O-RAN 전체 신뢰성과 직결된다.

본 연구에서는 A1 Mediator 내에서 메시지를 실시간으로 검증하기 위해 JSON Schema 기반 경량 검증 기법을 설계하였다. 그림2와 3에 나타난 제안 기법의 주요 특징은 다음과 같다. 스키마 정의 단계에서는 O-RAN

표 1 A1 Mediator 기능 비교표

구분	기존 A1 Mediator (O-RAN SC 기본)	JSON Schema 확장 Mediator (제안 기법)
주요 역할	Non-RT RIC ↔ Near-RT RIC 간 메시지 중재 (Policy/EI/Model 전달)	중재 + 메시지 실시간 경량 검증 (Policy/EI/Model 전달)
메시지 포맷	OpenAPI/Swagger 기반 JSON	JSON Schema 기반 상세 정의 (RFC 8259, draft-07 준수)
검증 범위	- 필수 필드 존재 여부- 자료형 불일치(예: string vs int)- REST API 경로 유효성	필수 필드/자료형 검증, 값 범위 제한 (예: latency < 10ms), 필드 간 제약 관계, O-RAN Release별 확장 필드까지 검증
오류 처리	- 잘못된 요청 시 HTTP 400 반환- 상세 오류 정보 부족	메시지 차단 (Near-RT RIC 전달 전), 세부 오류 코드/위치 리포트, 관리자/Non-RT RIC에 표준화된 에러 반환
로그 관리	기본 서버 로그에 단순 기록	상세 로그 (오류 유형, 필드, 값)을 영자용 모니터링/분석 활용 가능
성능 특성	경량 (중재 위주)검증은 최소 수준	경량 구조 유지추가 연산은 JSON Schema Validator 수준 (낮은 오버헤드)
의의	A1 인터페이스 참조 구현체 (메시지 전달 중심)	Mediator를 Lightweight Validator로 확장 → 표준 준수성 확보 및 신뢰성 강화

A1 표준 명세를 기반으로 정책 요청/응답, 모델 등록/관리, 성능 피드백 메시지에 대한 JSON Schema를 정의한다. 각 메시지 타입별 필수 필드, 데이터 타입, 허용 값 범위를 포함하여 표준 준수 여부를 자동 판별할 수 있도록 설계한다. Mediator 내 검증 모듈 구현 단계에서는 Mediator가 메시지를 수신하면 JSON Schema Validator를 통해 즉시 형식 검증을 수행한다. 비정상 메시지는 near-RT RIC에 전달되기 전에 차단되며, 오류 코드와 함께 관리자 또는 non-RT RIC에 리포트된다. 오류 처리 및 로깅 단계에서는 메시지 구조 오류, 필드 누락, 데이터 타입 불일치가 탐지되면 Mediator는 오류 로그를 기록하고, 표준화된 에러 메시지를 반환하여 빠른 복구가 가능하도록 한다. 표1의 비교를 통해 이 방식은 Mediator가 단순한 메시지 중재를 넘어서, 가벼운 구조의 실시간 검증기(lightweight validator) 역할을 수행하도록 한다는 점을 알 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 O-RAN 아키텍처에서 핵심적인 역할을 수행하는 A1 인터페이스 메시지의 안정성과 신뢰성을 확보하기 위해, A1 Mediator 내 JSON Schema 기반 경량 검증 기법을 제안하였다. 제안한 기법은 기존 파서 기반 검증 방식의 복잡성과 높은 연산 자원 소모 문제를 해결하면서도, 표준 명세에 부합하는 유효성 검증을 수행할 수 있도록 설계되었다. 이를 통해 O-RAN 환경에서 실시간 정책 전달, 모델 관리, 성능 피드백 과정의 안정성과 효율성을 동시에 달성할 수 있음을 파악할 수 있다. 본 연구의 기여는 다음과 같이 요약된다. O-RAN A1 인터페이스 메시지 구조와 표준 요구사항을 분석하고 Mediator 기반 검증의 필요성을 명확히 하였다. JSON Schema를 활용하여 경량화된 메시지 검증 기법을 설계하고 A1 Mediator에 통합하였다. 향후 연구에서는 본 연구에서 제안한 경량 검증 기법을 확장하여, 메시지의 보안성 검증(예: 위·변조 탐지, 인증 메커니즘 연계) 및 RIC 테스트베드 적용 검증을 수행할 계획이다. 또한, AI/ML 모델 업데이트와 정책 최적화 과정에서 발생하는 동적 요구사항을 반영할 수 있는 적응형(validation-aware) Mediator 아키텍처를 개발하는 것이 향후 과제로 남아 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2018R1A6A1A03024003, 25%), 이 논문은 과학기술정보통신부 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2020-II201612, 25%), 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2025-RS-2024-00438430, 25%). 본 연구는 과학기술정보통신부 및 한국지능정보사회진흥원의 오픈랜 상용화 실증단지 조성 사업의 연구결과로 수행되었음 (25%).

참고 문헌

- [1] M. Polese, L. Bonati, S. D'Oro, S. Basagni and T. Melodia, "Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 25, no. 2, pp. 1376-1411, 2023.
- [2] 류원재, 권영준, 신희재, 이재민, 김동성, "ORAN 네트워크에서 간섭 및 QoS xApp 간 충돌해결을 위한 심층 강화 학습 활용 RIC 연구," 2024 한국통신학회 추계학술대회, 2024.
- [3] K. Thimmaraju, A. Shaik, S. Flück, P. J. F. Mora, C. Werling, and J.-P. Seifert, "Security testing the O-RAN near-real time RIC & A1 interface," in Proc. 17th ACM Conf. Security Privacy Wireless Mobile Netw., 2024, pp. 277 - 287.