

AI/ML 워크플로우를 중심으로 한 O-RAN R1 인터페이스 표준화 구현 및 검증 연구

신주희, 유현민, 홍인기

경희대학교

{odong3094, yhm1620, ekhong}@khu.ac.kr

Implementation and Validation Study of O-RAN R1 Interface Standardization Focusing on AI/ML Workflow

Juhee Shin, Hyunmin Yoo, Eenkee Hong
Kyunghee University

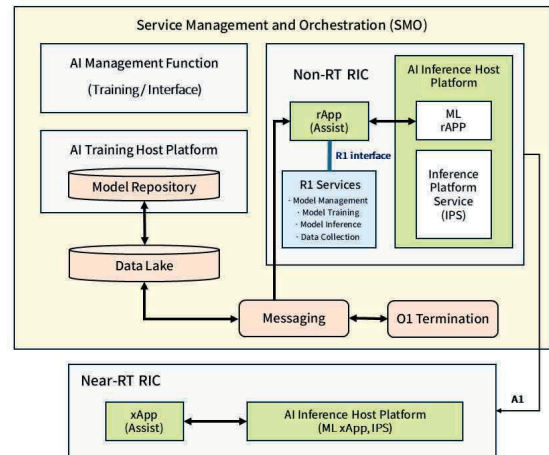
요약

Open Radio Access Network (O-RAN) 아키텍처에서 R1 인터페이스는 Non-RT RIC과 rApp 간의 핵심 통신 채널로, AI/ML 워크플로우 구현의 중요 요소이다. 본 연구는 오픈소스 프로젝트(aiml-fw-awmf-modelmgmtservice)를 활용하여 네이밍 일관성, RFC 7807 ProblemDetails 적용, 스키마 구조 개선 등의 표준 준수 사항을 구현·검증하였다. 표준화 구현을 통해 테스트 통과율 100% 달성 및 멀티 벤더 환경 상호운용성을 확보하였으며, O-RAN R1 인터페이스 구현 시 실용적 가이드라인을 제시한다.

I. 서론

O-RAN 아키텍처는 개방형 무선 접속망 구현을 통해 네트워크의 상호 운용성과 혁신성을 증대시키고자 하는 차세대 이동통신 기술이다 [1,2]. 이 중 R1 인터페이스는 Service Management and Orchestration (SMO) 프레임워크 내의 Non-RT RIC과 rApp 간의 논리적 인터페이스로서, AI/ML 기반 네트워크 최적화의 핵심 역할을 수행한다 [1,2].

R1 인터페이스는 다양한 서비스를 제공하는데, 특히 AI/ML 워크플로우와 관련된 모델 등록, 모델 관리, 데이터 수집 및 전달 등의 기능을 담당한다 [3,4]. 하지만 실제 구현 과정에서는 O-RAN 표준 문서와 RFC 표준 간의 정합성 문제, 네이밍 규칙의 일관성 문제 등이 발생할 수 있다. 본 연구는 AI/ML 워크플로우 중심의 R1 인터페이스 표준화 구현을 통해 이러한 문제점들을 해결하고, 검증된 구현 사례를 제시하는 것을 목적으로 한다.



[그림 1] AI/ML 워크플로우 구성도

II. R1 인터페이스와 AI/ML 워크플로우

O-RAN 아키텍처는 계층적 RAN Intelligent Controller (RIC) 구조를 통해 지능형 네트워크 제어를 실현하며, Non-RT RIC은 SMO 프레임워크 내에서 1초 이상의 비실시간 AI/ML 기반 최적화를 담당한다 [5]. [그림 1]은 O-RAN 아키텍처 내 R1 인터페이스의 위치와 주요 구성요소를 나타낸다. R1 interface는 Non-RT RIC framework와 rApp 간의 서비스 기반 인터페이스로, AI/ML 워크플로우 전체 생명주기를 지원한다 [2].

[그림 1]에서 보듯이, R1 인터페이스의 AI/ML 워크플로우 서비스는 크게 네 가지로 구성된다. 첫째, 모델 관리 서비스는 AI/ML 모델의 등록, 검색, 버전 관리 기능을 제공하며, 모델 식별자와 메타데이터를 통해 체계적인 모델 관리를 가능하게 한다 [1,2]. 둘째, 모델 학습 서비스는 rApp의 학습 요청에 따라 학습 작업을 생성하고 상태를 관리한다 [1,4]. 셋째, 모델 배포 및 추론 서비스는 학습된 모델의 배포와 실시간 추론을 지원한다 [1,2]. 넷째, 데이터 관리 및 노출 서비스는 O1 인터페이스로부터 수집된 RAN 데이터를 rApp에 제공한다 [4,5].

멀티 벤더 환경에서의 상호운용성 확보를 위해서는 RESTful API 명세, JSON 기반 데이터 스키마, HTTP 에러 처리 방식 등의 표준 준수가 필수적이다 [1,2]. 그러나 실제 구현 과정에서는 O-RAN 표준 문서 내 명세의 모호함, RFC 표준과의 정합성 문제, 네이밍 규칙의 불일치 등 다양한 표

준 준수 문제가 발생한다 [3,6]. 특히 AI/ML 모델 등록 API의 경우, attribute 네이밍 규칙, 에러 응답 형식, 스키마 필드 정의 등에서 표준 요구사항과 실제 구현 간 불일치가 빈번히 발견된다. 이러한 문제들은 시스템 통합 단계에서 상호운용성 저하를 초래하며, 체계적인 표준화 구현 및 검증이 요구된다.

III. O-RAN R1 인터페이스 표준화 구현

본 연구에서는 O-RAN R1 인터페이스의 실제 구현에서 발생하는 표준 준수성 문제를 체계적으로 분석하고, 이에 대한 해결 방법론을 제시한다. 분석 대상으로는 O-RAN Software Community의 공식 오픈소스 프로젝트인 aiml-fw-awmf-modelmgmtservice를 선정하였으며, 표준 문서 분석을 통해 도출된 요구사항과 실제 구현체 간의 정합성을 검증하였다.

III-1. 네이밍 일관성 분석 및 표준화 방안

O-RAN R1 표준 명세서 Section 10.1.8.1.3 및 Section 10.3.8.1.2에서는 모든 속성명이 camelCase 표기법을 준수하도록 규정하고 있다 [1]. 본 연구는 기존 구현체에 대한 정적 분석을 수행하여 다음과 같은 네이밍 불일

치 패턴을 식별하였다.

첫째, URL 경로 파라미터 {modelRegistrationId}와 내부 파라미터명 id 간의 네이밍 일관성이 결여되어 API 문서의 모호성을 증가시켰다. 둘째, ModelId와 같이 약어를 대문자로 표기하는 방식이 O-RAN 표준의 camelCase 규칙과 상충하여 ModelId로 정규화를 수행하였다. 이를 통해 modelId, trainingConfig, modelLocation 등 주요 API 구성요소에 일관된 네이밍 체계를 확립하였다.

III-2. 에러 처리 메커니즘의 표준화

기존 구현체는 단순 문자열 기반의 비구조화된 에러 메시지를 반환하여 RFC 7807 표준 [7] 및 O-RAN R1 표준 Section 10.3.5.2.3.1-2의 요구사항 [1]과 부합하지 않았다.

본 연구는 RFC 7807 표준에 기반한 구조화된 에러 응답 메커니즘을 제안한다. 제안 방식은 HTTP 상태 코드(400, 404, 409, 500 등)에 대응하는 기계 판독 가능한 에러 정보 객체를 생성하며, type, title, detail, status, instance의 다섯 가지 핵심 속성으로 구성된다. [그림 2]는 409 Conflict 상황에 대한 표준화된 에러 응답 구조를 예시한다.

```
{
  "type": "https://o-ran.org/problems/invalid-model-format",
  "title": "Conflict",
  "detail": "model name and version combination already present",
  "status": 409,
  "instance": "/ai-ml-model-registration/v1/model-registrations/invalid-model-123"
}
```

[그림 2] RFC 7807 기반 에러 응답 구조

III-3. 스키마 구조 개선 및 테스트 환경 정비

O-RAN R1 표준 명세서의 완전한 구현을 위해 데이터 스키마의 확장성 분석을 수행하였다. 분석 결과, ModelId 스키마의 artifactVersion 필드 부재, Metadata 스키마의 owner 필드 누락 [1], ModelInformation의 입출력 데이터 타입이 단일 문자열로 정의되어 다중 데이터 타입 처리가 불가능한 문제가 식별되었다. 이에 해당 속성을 배열 타입으로 확장하여 복합 AI/ML 모델 지원 기능을 구현하였다.

표준화 과정에서 RFC 7807 기반 에러 응답 형식 전환에 따른 테스트 케이스 불일치가 발견되었다. 예를 들어, 409 Conflict 테스트의 경우 기존 비구조화된 에러 응답 검증에서 RFC 7807 표준 구조를 검증하도록 수정하였다. 또한 PostgreSQL mock 객체를 실제 데이터베이스 에러 시나리오에 근접하도록 개선하여 전체 테스트 스위트 통과율 100%를 달성하였다.

IV. 표준 준수성 검증 및 상호운용성 평가

IV-1. 오픈소스 생태계 기반 검증 프레임워크

본 연구는 O-RAN Software Community의 aiml-fw-awmf-modelmgmtservice 저장소를 실험 환경으로 선정하였다 [6]. 검증 프로세스는 (1) Jira 기반 이슈 추적, (2) Gerrit 코드 리뷰, (3) GitHub CI/CD 파이프라인, (4) Jenkins 회귀 테스트의 네 단계로 구성되며, 이는 실제 배포 환경에서의 표준 적합성 평가를 가능하게 한다.

IV-2. 표준 준수성 평가 결과 및 시스템 메트릭 분석

구현된 시스템에 대한 정량적 평가 결과, O-RAN 표준 준수 요구사항의 완전한 충족이 확인되었다. [표 1]은 네 가지 범주별 평가 결과를 요약한다.

검증 결과, RESTful 아키텍처 원칙과 O-RAN 표준의 동시 충족, RFC 7807 기반 에러 처리, camelCase 네이밍 규칙 완전 준수가 달성되었다. 특히 전체 테스트 통과율 100%는 표준 준수 작업이 기존 기능의 퇴행을 발생시키지 않았음을 입증하며, 다중 벤더 환경에서의 상호운용성을 확인하였다.

[표 1] 표준 준수성 평가 결과

| 평가 범주 | 검증 결과 |
|-----------|--|
| API 명세 준수 | HTTP 201 Created + Location 헤더, 필수/선택 속성 완전 지원 |
| 스키마 완전성 | artifactVersion, owner 필드 구현, array 타입 확장 |
| 에러 처리 표준화 | RFC 7807 준수율 100% (5개 필수 필드) |
| 네이밍 일관성 | camelCase 규칙 검증 100% 통과 |
| 테스트 커버리지 | 유닛 테스트 100% 통과 (regression 없음) |
| 상호운용성 | 멀티 벤더 호환, API 문서-구현 일치 검증 완료 |

V. 결론

본 연구에서는 O-RAN R1 인터페이스의 AI/ML 워크플로우 측면에서 실제적인 표준화 구현 및 검증을 수행하였다. 오픈소스 프로젝트를 기반으로 한 실증적 접근을 통해 네이밍 일관성, RFC 7807 ProblemDetails 적용, 스키마 구조 개선 등의 핵심 표준 준수 사항들을 성공적으로 구현하였다. 특히 구현 과정에서 발견된 유닛 테스트 빌드 오류를 해결함으로써, 표준화 과정에서 발생할 수 있는 실제적인 문제점들과 그 해결 방안을 제시하였다. 이러한 결과는 향후 O-RAN R1 인터페이스의 실제 구현 시 발생할 수 있는 표준 준수 문제들을 예방하고 해결하는 데 실용적인 가이드라인을 제공한다.

향후 연구에서는 본 연구에서 구현된 표준화 방안을 바탕으로 대규모 멀티 벤더 환경에서의 상호운용성 검증과 성능 평가를 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

“이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. No.RS-2024-00395824, (총괄1-세부2) Upper-mid Band를 지원하는 Cloud virtualized RAN (vRAN) 시스템 기술 개발, 50%)”

참 고 문 헌

- [1] O-RAN Alliance. (2025). O-RAN R1 interface: Application Protocols for R1 Services 8.0. O-RAN.WG2.TS.R1AP-R004-v08.00.
- [2] O-RAN Alliance. (2025). R1 interface: General Aspects and Principles. O-RAN.WG2.TS.R1GAP-R004-v011.00.
- [3] Silva, I., Fernandez, E. M., Moya, K., Sharma, S., & Dhakal, P. (2021). O-RAN AI/ML workflow implementation of personalized network optimization via reinforcement learning. In 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) (pp. 1-6). IEEE.
- [4] ETSI. (2024). Publicly Available Specification (PAS): O-RAN AI/ML workflow description and requirements. ETSI TS 103 983 V3.1.0.
- [5] O-RAN Alliance. (2024). O-RAN Architecture Description v11.0. O-RAN.WG1.OAD-R004-v11.00.
- [6] Polese, M., Bonati, L., D'Oro, S., Basavanthappa, S., & Melodia, T. (2022). OpenRAN Gyn: AI/ML development, data collection, and testing for O-RAN on PAWR platforms. Computer Networks, 220, 109464.
- [7] Postel, J., & Reynolds, J. (1985). RFC 7807: Problem Details for HTTP APIs. Internet Engineering Task Force.