

차세대 모바일 네트워크를 위한 에너지 절감 방안 연구: O-RAN/AI-RAN을 중심으로

권재빈, 임정섭, 유현민, 홍인기

경희대학교

{kckwun, daniel9456, yhm1620, ekhong}@khu.ac.kr

Energy Saving Strategies for Next-Generation Mobile Networks: Focusing on O-RAN/AI-RAN

Jae-Bin Kwon, Kyung-Seop Lim, Hyun-Min Yoo, Een-Kee Hong

Kyung Hee University

요약

차세대 이동통신 환경에서는 모바일 트래픽 증가와 기지국 밀도 증가로 인해 radio access network (RAN)의 에너지 소비가 네트워크 운영에 있어 핵심적인 제약 요소로 부각되고 있다. 이에 따라 3GPP와 O-RAN Alliance에서는 다양한 에너지 절감을 위한 표준과 사용 사례를 정의하고 있으며, AI-RAN Alliance에서는 AI를 활용하여 본 표준의 실제 네트워크에서의 적용을 논의하고 있다. 본 논문에서는 이러한 표준과 기술 동향을 중심으로 RAN의 에너지 효율 향상 방안을 정리한다. 또한 제시된 기법 중 하나인 cell on/off 에너지 절감 기법을 O-RAN의 개방형 인터페이스를 지원하는 환경에서 시뮬레이션을 통해 검증함으로써, O-RAN에서 정의하는 closed-loop 방식의 에너지 절감 효과를 실증적으로 확인한다.

I. 서론

차세대 이동통신 환경에서는 모바일 트래픽 및 기지국 밀도가 증가하면서, radio access network (RAN)의 에너지 소비가 네트워크의 운영의 핵심 제약으로 부각되고 있다. 이를 해결하기 위해 표준화 기구 3GPP와 O-RAN Alliance에서는 높은 에너지 소비에 의한 탄소 배출량의 증가와 운영 비용 문제를 완화하기 위한 다양한 사용 사례를 제시하고 있다. 또한, AI-RAN Alliance에서는 제정된 표준에 AI를 접목하여 실제 현장과 상용급 시뮬레이터를 활용하여 에너지 절감 효과를 정량적으로 검증하고 있다. 본 논문에서는 RAN의 에너지 효율을 향상시키기 위한 대표적인 에너지 절감 기법으로 트래픽의 변화에 따라 cell의 운용 상태를 동적으로 조절하는 cell on/off, 특정 시간 구간에서 cell의 송수신 동작을 주기적으로 제한함으로써 전력 소모를 줄이는 cell dtx/drx, O-RAN 클라우드 환경에서 에너지 효율을 개선하는 O-Cloud 기반 에너지 절감을 중심으로 표준 기반 기술 동향을 정리한다. 나아가 본 논문에 제시된 기법의 실효성을 확인하기 위해 cell on/off 기능을 O-RAN 환경에서 구현하고, 시뮬레이션 결과를 통해 cell on/off 제어가 에너지 소비를 감소시킬 수 있음을 검증한다. 이를 통해 O-RAN에서 정의하는 사용 사례 기반의 제어 방식이 실제 환경에서도 유의미한 에너지 절감 효과를 제공함을 보인다.

II. 본론

본 장에서는 차세대 이동통신 환경에서 네트워크 에너지 효율 향상을 위해 제안된 주요 에너지 절감 기법들을 사용 사례 중심으로 정리한다.

1. Carrier 및 cell switch on/off 기반 에너지 절감

Carrier 및 cell switch on/off는 비실시간 스케일에서 동작하는 대표적인 RAN 에너지 절감 기법으로, 트래픽 부하가 낮은 시간대에 특정 주파수 carrier 또는 셀 전체를 비활성화함으로써 전력 소모를 줄이는 방식이다. 이 방식은 LTE 및 5G 초기부터 3GPP 표준을 통해 정의되어 왔으며, 기존에는 주로 수동 설정이나 self-organizing network (SON) 기능을 통해 적용되었다.

O-RAN 환경에서는 이 기능이 RAN intelligent controller (RIC) 중심으로 고도화된다. 특히 비실시간 RIC은 장시간에 걸쳐 수집된 트래픽 통계, 셀 부하, quality of service (QoS) 정보를 기반으로 AI/ML 모델을 활용하여 carrier 또는 cell의 on/off 시점을 자동으로 결정한다. 이때 에너지 절감 효과뿐만 아니라 사용자 QoS 저하를 최소화하기 위해, on/off 동작은 반드시 트래픽 스티어링 및 핸드오버 절차와 연계되어 수행된다. 즉, 셀이나 carrier를 비활성화하기 전에 사용자 단말은 인접 셀 또는 다른 carrier로 이동되며, 이를 통해 서비스 연속성이 보장된다.

구현 측면에서 비실시간 RIC은 O1 인터페이스를 통해 O-CU 및 O-DU의 설정을 제어하고, service management and orchestration (SMO)를 경유한 open fronthaul M-plane을 통해 O-RU의 carrier 또는 cell on/off를 수행한다. carrier switch off는 전력 증폭기를 최소 전류 상태로 유지하는 hibernate 모드와 완전 전원 차단 방식인 complete switch off로 구분될 수 있다. 이러한 방식은 네트워크 커버리지가 비교적 안정적이고 트래픽 변동이 예측 가능한 환경에서 큰 에너지 절감 효과를 제공한다.

2. Cell dtx/drx 기반 에너지 절감

Cell dtx/drx는 차세대 이동통신 시스템에서 기지국(gNB) 단위의 에너지 절감을 목적으로 제안된 시간 영역 기반 절전 기법이다. 기존의 dtx/drx가 주로 user equipment (UE) 배터리 절감을 목표로 개별 단말의 송수신 동작을 제어하는 반면, cell dtx/drx는 기지국 전체에 공통으로 적용되는 활성(active) 및 비활성(non-active) 시간 패턴을 정의함으로써 기지국의 하향링크 송신 및 상향링크 수신 동작을 제한한다.

Cell dtx/drx에서는 하나의 기지국에 대해 주기적인 패턴이 설정되며, 해당 기능이 활성화된 UE들은 동일한 패턴을 공유한다. 이 패턴은 활성 시간(active duration)과 cycle로 정의되며, 활성 시간 동안에는 physical downlink control channel (PDCCH) 감시, 상·하향링크 스케줄링 절차, 그리고 채널 상태 보고와 같은 주요 제어 및 데이터 전송 관련 기능이 제한 없이 수행된다. 반면 비활성 시간 동안에는 UE의 제어 채널 감시 및 상향링크 전송이 제한되어, 트래픽이 낮은 시간대의 불필요한 전력 소모를 효과적으로 감소시킬 수 있다.

또한 UE의 connected mode drx on-duration과 cell dtx/drx의 활성 시간이 시간적으로 중첩되도록 설계함으로써, UE와 기지국 간의 활성 시간이 어긋나는 상황을 방지하고 안정적인 통신을 보장한다. 이를 통해 통신 신뢰성을 유지하면서도 에너지 절감 효과를 달성할 수 있다.

3. O-Cloud 기반 에너지 절감

O-Cloud 기반 에너지 절감은 전통적인 RAN 단의 RF 제어와 달리, 클라우드 인프라 상에서 실행되는 네트워크 기능 containerized/virtual network function (CNF/VNF)의 배치, 운용, 자원 할당을 최적화함으로써 에너지 소비를 줄이는 방식이다. 이는 O-RAN 환경에서 RAN 기능이 가상화·컨테이너화되어 O-Cloud 위에서 동작한다는 점을 전제로 하며, 에너지 절감을 네트워크 기능 운용 정책의 핵심 요소로 포함시킨다는 점에서 기존 기법들과 차별점을 가진다.

O-RAN Alliance에서 정의하는 O-Cloud 기반 에너지 절감의 핵심은 SMO를 중심으로 한 지능형 에너지 관리 및 오케스트레이션이다. SMO는 네트워크 전반에서 수집된 트래픽 부하, 자원 사용률, 에너지 소비 정보를 기반으로 CNF/VNF의 배치 및 스케일링을 제어하며, 이를 통해 불필요한 자원 점유와 에너지 낭비를 최소화한다. 특히 비실시간 워크로드 환경에서는 서버 통합(host consolidation)을 통해 실제 사용률이 낮은 서버의 워크로드를 집약하고, 유휴 서버를 비활성화함으로써 에너지 소비와 운영 비용을 동시에 절감할 수 있다.

또한, O-Cloud 상에서 동작하는 네트워크 기능 자체의 설계 역시 에너지 절감에 중요한 요소로 작용한다. CPU 부하가 불규칙적으로 변화하는 실시간 RAN 기능의 경우 유휴 구간에서 저전력 상태(C-state)를 활용한 전력 절감이 효과적이며, 지속적인 부하를 가지는 패킷 처리 기능의 경우 부하 수준에 따라 동적으로 전력을 조절하는 성능 상태(P-state) 기반 제어가 유리하다. 더 나아가, 하드웨어 가속기를 필요 시에만 선택적으로 활용할 수 있도록 하는 acceleration abstraction layer (AAL)을 통해, 고성능 연산 자원의 상시 사용으로 인한 불필요한 전력 소모를 줄일 수 있다.

종합하면, O-Cloud 기반 에너지 절감은 무선 동작 제어 중심의 기존 RAN 에너지 절감 기법을 보완하여, 클라우드 인프라, 네트워크 기능, 그리고 운영 정책을 통합적으로 고려하는 새로운 차원의 에너지 절감 접근 방식으로 볼 수 있다. 이는 O-RAN의 개방형 아키텍처와 SMO 기반 제어 구조를 통해 실현 가능하며, 향후 AI 기반 예측 및 정책 제어와 결합될 경우 더욱 높은 에너지 절감 효과를 제공할 것으로 기대된다.

III. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 FlexRIC 기반 O-RAN 테스트베드에 구현된 cell on/off 기능을 활용하여, 간단한 시뮬레이션 환경에서 에너지 절감 효과를 검증한다 [4]. 본 실험에서는 O-RAN 구조에서 제공되는 cell on/off 제어 기능이 실제 시뮬레이션 환경에서 어느 정도의 에너지 절감 효과를 제공할 수 있는지를 확인한다.

시뮬레이션은 ns-3와 FlexRIC을 연동한 환경에서 수행하였다. 무선 데이터 평면은 ns-3에서 구성되며, 제어 평면은 실시간 RIC 상에서 동작하는 FlexRIC 기반 xApp을 통해 구현된다. cell 구성은 중앙에 1개의 LTE cell과 그 주변에 4개의 5G cell을 배치한 총 5개 cell 구조로 설정하였으며, UE는 각 cell 영역에 무작위로 분포되어 이동성을 가지도록 구성하였다. 본 실험에서는 총 5개의 UE를 사용하였다.

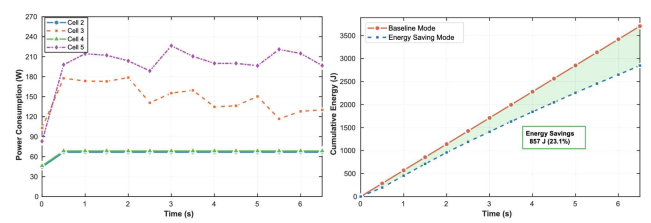


Fig. 1. 동적 셀 제어에 따른 셀 전력 소비 및 에너지 절감 효과

Cell on/off 제어는 FlexRIC에 구현된 에너지 절감 기능을 기반으로 수행된다. xApp은 O-RAN KPM 서비스를 이용해 UE의 무선 품질 상태를 모니터링하며, 해당 정보를 바탕으로 UE를 적절한 cell로 재배치한다. 이후 UE가 더 이상 연결되지 않은 cell을 대상으로 cell off 제어를 수행한다. 이러한 제어는 E2 인터페이스를 통한 표준화된 제어 메시지를 통해 이루어지며, O-RAN 구조에서의 실제 제어 흐름을 단순화한 형태로 구현된다.

시뮬레이션 결과, FlexRIC 기반 cell on/off 기능을 적용한 경우, 모든 cell을 항상 활성화하는 기존 방식과 비교하여 평균 23.1%의 에너지 절감 효과를 확인하였다. 이는 O-RAN 테스트베드에 구현된 cell on/off 기능이 단순한 시뮬레이션 환경에서도 실질적인 에너지 절감 효과를 제공할 수 있음을 보여준다.

IV. 결론

본 논문에서는 O-RAN 및 3GPP 표준에서 정의된 에너지 절감 사례를 중심으로, RAN의 에너지 효율 향상을 위한 주요 기술 방안들을 체계적으로 정리하였다. 아울러, FlexRIC 기반 O-RAN 테스트베드에 구현된 간단한 시뮬레이션 환경에서 구현된 cell on/off 기능을 활용하여 에너지 절감 성능을 정량적으로 평가하였다. 이러한 분석을 통해, O-RAN 표준의 에너지 절감 전략들은 향후 6G 및 AI-RAN 환경에서 지능적·자율적 네트워크 운용의 중요한 구성 요소가 될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

“이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원·대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2026-2021-0-02046)“

참 고 문 헌

- [1] O-RAN Alliance, “O-RAN WG1 Use Cases Analysis Report,” O-RAN.WG1.TR.Use-Cases-Analysis-Report-R004-v17.00, Technical Report, 2025.
- [2] O-RAN Alliance, “Potential Energy Savings Features in O-RAN,” O-RAN.WP.Potential Energy Savings-v01.00, White Paper, Jan. 2025.
- [3] A. Lacava, M. Bordin, M. Polese, R. Sivaraj, T. Zugno, F. Cuomo, and T. Melodia, “ns-O-RAN: Simulating O-RAN 5G Systems in ns-3,” in Proc. of the 2023 Workshop on ns-3 (WNS3 '23), Arlington, VA, USA, Jun. 2023, pp. 35–44. ACM. DOI: 10.1145/3592149.3592161
- [4] R. Schmidt, M. Irazabal, and N. Nikaein, “FlexRIC: An SDK for Next-Generation SD-RANs,” in Proc. of the 17th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies (CoNEXT '21), Munich, Germany, Dec. 2021, pp. 411–425. ACM. DOI: 10.1145/3485983.3494841