

3GPP 코어 네트워크 시뮬레이터 기술 동향

Survey on 3GPP Core Network Simulator

신승재 (S.J. Shin, sjshin0505@etri.re.kr)	지능네트워크연구실 선임연구원
이도영 (D.Y. Lee, dylee90@etri.re.kr)	지능네트워크연구실 선임연구원
나태흠 (T.H. Na, taeheum@etri.re.kr)	지능네트워크연구실 선임기술원
이창식 (C.S. Lee, cslee2624@etri.re.kr)	지능네트워크연구실 선임연구원
김태연 (T.Y. Kim, tykim@etri.re.kr)	지능네트워크연구실 책임연구원/실장

ABSTRACT

The 3GPP (3rd Generation Partnership Project) mobile communication standard has emerged as a leading standard in the market over the past 20 years, driving continuous development in protocol stacks and libraries that support the standard within simulation software for communication network research. We summarize and analyze seven communication network simulators that support the 3GPP standard specifications related to core network technologies. Through comparisons, we aim to offer valuable insights for researchers and engineers engaged into research and development related to mobile communication networks based on 3GPP standards. Our findings can provide assistance for making informed decisions on simulator selection.

KEYWORDS 3GPP, 시뮬레이터, 코어 네트워크

1. 서론

현재 3GPP 이동통신 표준기술은 1998년 개발 시작 이래, 전 세계 상용 이동통신 시스템의 사실상 유력 표준으로 인정받고 있다. 3GPP 이동통신 시스템(System)을 구성하는 도메인(Domain) 구성 요소 중 코어(Core)는 UE와 인접한 접속망인 RAN을 제어 및 관리하고 다른 통신망(예: LAN, RAN,

WLAN 등)과 상호연결되게 하는 핵심 인프라(Infra) 역할을 한다[1].

3GPP 코어 표준기술은 통화 서비스(Service)를 위한 회선 교환기(Circuit Switch)와 데이터(Data) 서비스를 위한 패킷(Packet) 교환기들을 코어 인프라에서 일괄 관리하는 3G를 시작으로, 음성 및 데이터 트래픽(Traffic)이 All-IP 기반 아키텍처(Architecture)를 통해 통합 처리되는 4G를 거쳐, 최근에는

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2024.J.390208>

* 공동 제1저자 신승재, 이도영

* 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신·방송 연구개발 사업의 일환으로 수행하였음[2022-0-00862, 지능형 6G 모바일 코어 네트워크 기술 개발].



SDN/NFV, 마이크로서비스(Micro-service) 아키텍처, 지능제어 등의 개념을 도입하여 유연성, 효율성 및 확장성의 향상을 꾀하는 5G 순으로 진화해 오고 있다.

3GPP 이동통신 표준규격이 지난 20여 년간 시장을 주도하는 유력 표준으로 발전함에 따라, 통신 및 네트워크(Network) 연구개발을 위한 시뮬레이터(Simulator) SW상에서도 해당 표준을 지원하기 위한 프로토콜 스택(Protocol Stack) 및 라이브러리(Library)의 개발이 지속적으로 이루어지고 있다.

본고에서는 3GPP 코어 표준규격을 지원하는 통신 및 네트워크 시뮬레이터 SW 7종을 요약 및 분석하고, 이들의 특징을 비교함으로써 3GPP 표준 기반 이동통신망 관련 연구개발에 사용할 시뮬레이터 선택 시 참고할 만한 유용한 정보를 제시하고자 한다.

II. 3GPP 코어 기술 개관

3GPP 시스템은 RAN, 코어, OAM 등의 하부도메인으로 이루어져 있으며, 각 도메인은 전송용량(Capacity), 지연시간(Delay), 오류율(Error Ratio) 등과 같은 기저 성능지표는 물론, QoS, 확장성 및 응용지원성을 향상시키는 방향으로 병행 발전해왔다.

3GPP 표준규격의 기술 수준은 출시(Release) 번호로 구분할 수 있는데, 대체로 2000년 출시된 Rel-99부터 3G, 2011년 출시된 Rel-10부터 4G, 2018년 출시된 Rel-15부터 지금까지의 규격을 5G로 분류한다. 현재,¹⁾ Rel-18까지 출시된 상태이며, Rel-19 규격 설계를 위한 초기 단계 논의가 진행 중이다. 학계 및 산업계에서는 Rel-20 이후 6G 규격이 등장할 것으로 전망하고 있다.

1) 본고에서 현재는 2024년 2월을 의미한다.

1. 3G 코어

3G 코어의 표준화 작업은 UMTS 규격의 첫 출시본인 Rel-99부터 LTE 규격이 논의되는 Rel-8 이전까지 활발하게 진행되었다.²⁾

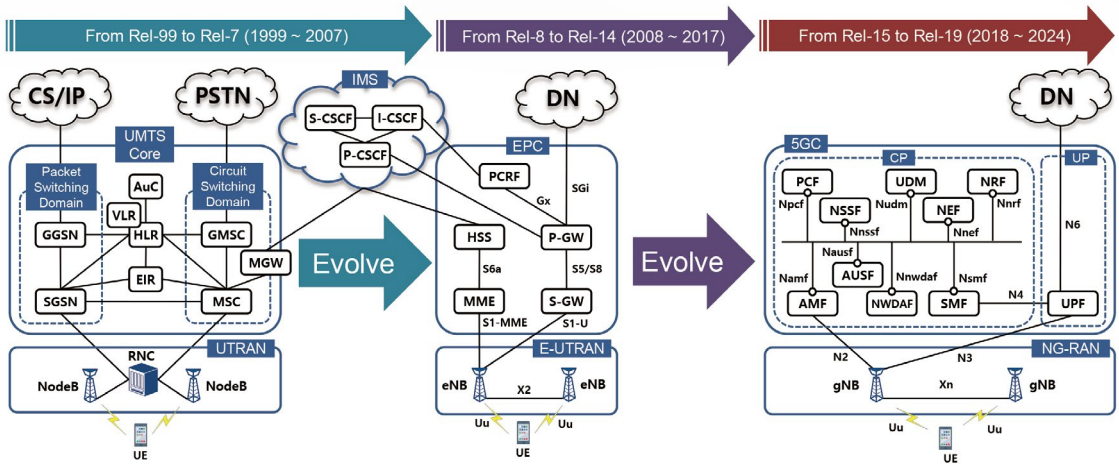
3G 코어는 기존에 2G 기술인 GSM에서 따로 처리되던 통화 서비스와 데이터 서비스를 모두 처리하는 통합된 인프라의 형태로 설계되었다.

그림 1의 좌측에 UMTS, 즉 3G 코어의 구조를 간략히 도시하였다. 주요 구성요소(Element)는 다음과 같다.

- **MSC:** 이동전화 교환국으로 가입자 위치 관리, 호(Call)의 연결 및 교환 등을 수행
- **GMSC:** 서빙 네트워크(Serving Network)³⁾ 내부에서 발신한 음성 트래픽을 PSTN으로 전달하거나, 외부에서 발신한 음성 트래픽을 PSTN으로부터 수신하는 게이트웨이(Gateway) 교환국
- **SGSN:** GPRS 데이터 트래픽 지원 노드(Node)로 패킷 라우팅(Routing) 및 전송(Transport) 등을 수행
- **GGSN:** 현 서빙 네트워크 내부에서 송신한 데이터 트래픽을 IP/CS 망으로 전달하거나, 외부에서 송신한 데이터 트래픽을 IP/CS 망으로부터 수신하는 게이트웨이 노드
- **AuC:** 인증국으로 가입자 인증, 암호화를 포함한 보안 서비스 제공
- **HLR:** 가입자 위치 등록기로 가입자 정보(위치, 인증, 서비스, 권한, 과금 등) 관리
- **VLR:** 방문자 위치 등록기로 다른 서빙 네트워크로부터 이동해 온 가입자의 정보를 일시적으

2) Rel-8 이후에도 3G 규격의 표준화 작업은 계속 진행되었으나, 유지보수(Maintenance)의 성격이 강하며, 다음 세대 규격의 표준화에 더 중점을 두게 된다. 이는 4G 및 5G의 경우에도 마찬가지이다.

3) 현재 단말에 연결되어 트래픽 송수신을 처리해주는 RAN 및 코어를 지칭한다.



출처 Reproduced with permission from [47,48].

그림 1 3GPP 코어 네트워크 진화과정

로 관리

- **EIR**: 기기 식별 등록기로 가입자 인증에 사용할 단말기 식별 정보 관리

3G 코어에서 서빙 네트워크는 통화 서비스 처리를 위한 회선 교환(Switching) 도메인과 데이터 서비스(예: GPRS) 처리를 위한 패킷 교환 도메인으로 나뉘는데, MSC 및 GMSC는 회선 교환 도메인에, SGSN 및 GGSN은 패킷 교환 도메인에 속한다.⁴⁾ AuC, HLR, VLR 및 EIR은 회선 및 패킷 교환 도메인에서 공통으로 사용되는 구성요소이다. 이를 통해 3G 코어규격이 통화 및 데이터 트래픽의 처리 영역이 분리되어 있더라도, 가입자 관련 제어 영역(예: 식별, 인증, 위치 관리 등)은 통합시키는 방향으로 발전했음을 알 수 있다.

Rel-99 이후 3G 코어규격은 Rel-4(~2001년), Rel-5(~2002년), Rel-6(~2004년) 및 Rel-7(~2007년)을 거치면서, 다음에 열거한 내용들을 실현하는 방향으로

로 발전하였다.

- 기존 MSC에서 전달망(Bearer Network) 및 전송 자원(Transmission Resource) 제어를 분리하여 CS-MGW가 전달하도록 함으로써 전달망 제어와 코어 제어의 독립성 보장
- 정책제어 및 과금 처리 고도화를 위한 PCRF 및 PCEF 제안
- 음성, 영상 및 텍스트 데이터의 동시 전송이 가능한 All-IP 기반 멀티미디어(Multi-media) 응용(예: 화상회의, IPTV, 메신저(Messenger) 등) 지원을 위한 IMS 제안
- RAN에서 제공하는 향상된 WCDMA 기반 데이터 서비스 표준규격인 HSDPA(Rel-5), HSUPA(Rel-6), HSPA+(Rel-7) 등을 IMS에 연동함으로써, 멀티미디어 응용 지원성 개선
- WLAN-UMTS 연동, 트래픽 부하분산(Load Balancing), 종단간(End-to-End) QoS, PoC⁵⁾ 등의 향상된 기능 추가

4) 3GPP 규격은 상술한 서빙 네트워크 외에 홈(Home) 네트워크와 중계(Transit) 네트워크를 코어의 구성요소로 정의하고 있으나, 서빙 네트워크가 사실상의 핵심 구성요소로 인식된다.

5) 이동통신 시스템에서 빌트인(Built-in) 형태로 제공하는 무전기 통신 서비스로 공공, 안전, 레저스포츠(Leisure Sports) 등 다양한 목적으로 활용 가능하다.

- 다중 사용자 멀티미디어 응용 지원을 위한 MBMS 제안
- 코어에서 제공하는 각종 기능들을 OSA API 형태로 제공함으로써 응용 지원성 향상

상기 열거한 내용 중 IMS는 Rel-5에서 처음 논의된 이래, All-IP 기반 패킷 교환 도메인상에서 통화 및 데이터 서비스의 융합을 촉진시키는(Enabler) 주요 기술로 평가받고 있다.⁶⁾ 상술한 바와 같이 초기 3G 코어에서 음성 트래픽은 PSTN으로 연결된 회선 교환 도메인에 의해 처리되는 것에 반해, IMS 이후에는 음성 트래픽도 패킷 교환 도메인 및 IP/CS 망을 통해 처리된다. IMS는 통화 서비스에서 요구하는 실시간성, 즉 지연시간(Delay/Latency), RTT 및 지연변이(Jitter) 관련 QoS의 보장을 위해 실시간 전송 프로토콜인 RTP와 호 제어 프로토콜인 SIP를 기반으로 동작한다. 그림 1의 중간에 IMS의 구조를 간략히 도시하였다. IMS의 주요 구성요소는 다음과 같다.

- S-CSCF: 서빙 네트워크 CSCF(호 세션(Session) 제어 기능부)로 세션의 전반적인 제어 및 관리(전송률 제어, 음성-영상 모드 전환, 응용서버 접속 등)를 총괄
- P-CSCF: 단말의 호 요청을 수신하는 프록시(Proxy) CSCF
- I-CSCF: 서빙 네트워크 외부 단말, 즉 다른 IMS에서 송신한 호를 현 서빙 네트워크 내의 수신 단말에게 연결해주는 접속 CSCF로 필요시 방화벽 역할도 수행

상술한 3G 코어의 진화 과정에서 제안된 발전적

개념들(예: IMS, MBMS, PCRF, PCEF 등)은 이후 진행된 4G 코어 표준화에서도 계승되어 발전하였다.

2. 4G 코어

3G 표준규격이 성숙함에 따라 4G 이동통신 시스템에 대한 각종 요구조건 및 KPI는 비약적으로 향상되었다. 결국 시스템 전체를 장기적인 안목으로 전면 재설계(Clean-slate Design)하는 필요성(Needs)이 대두됨에 따라 등장한 것이 LTE 규격이다. EPC, 즉 4G 코어규격의 표준화 작업은 LTE가 처음 논의된 Rel-8부터 5G 규격이 논의되는 Rel-15 이전까지 활발하게 진행되었다.⁷⁾

3G 및 4G 코어는 통화 및 데이터 서비스를 통합 처리하는 단일 인프라를 지향한다는 점에서 설계 철학이 동일하지만, 기존 3G 코어 내부에서 음성 트래픽은 회선 교환 도메인으로, 데이터 트래픽은 패킷 교환 도메인으로 분리되어 처리된다는 한계가 있었다. 반면 EPC는 회선 교환 도메인 없이, 모든 트래픽이 All-IP 기반 패킷 교환 방식으로 처리된다는 점에서 구조적으로 진화된 형태로 볼 수 있다.⁸⁾

그림 1의 중간에 EPC의 구조를 간략히 도시하였다. 주요 구성요소는 다음과 같다.

- MME: 이동성 관리 개체로 UMTS 코어의 SGSN에서 제어에 관련된 기능들이 진화된 개념으로 볼 수 있으며, 가입자 관리, 권한 관리, 인증, 단말 위치의 페이징(Paging) 등 각종 제어 총괄
- S-GW: 서빙 네트워크 게이트웨이로 UMTS 코

6) IMS는 표준화 초기에는 코어의 일부로 인식되었으나, 4G 및 5G에서는 코어와 협업하는 별개의 시스템으로 보는 추세이다. 이 절에서는 이를 고려하여 IMS를 3G 코어의 일부로 기술하였다.

7) Rel-10부터 등장한 LTE-Adv 규격부터 4G로 분류하는 경우가 많으나, 코어 도메인으로 한정하는 경우 LTE 규격이 LTE-Adv 규격으로 이어지기 때문에, Rel-8을 시작으로 보는 것이 적합할 것이다.

8) All-IP 기반 통화 서비스 처리는 3G 후기 표준규격에 기술된 IMS가 중요한 역할을 한다. 즉, All-IP 기반 음성 및 데이터 트래픽 통합처리하는 3G 후기 규격에서 상당 부분 실현된 것으로 볼 수 있다.

어의 SGSN에서 트래픽 처리 관련 기능들을 중심으로 진화된 개념으로 볼 수 있으며, 통화 관리, 트래픽 전달, eNB 간 이동성 관리, 과금 및 모니터링(Monitoring) 등을 수행

- P-GW: PDN 게이트웨이로 UMTS 코어의 GGSN이 진화된 개념으로 볼 수 있으며, 단말의 이동으로 인한 서빙 네트워크 전환 시 전환될 서빙 네트워크의 연결점(Anchor) 역할을 수행
- HSS: 홈 가입자 서버(Server)로 UMTS 코어의 HLR에서 진화된 개념으로 볼 수 있으며, 가입자 관리, 권한 관리, 위치 관리, 인증, 호 전달, 과금 등에 필요한 각종 정보를 저장 및 관리

EPC 규격 표준화에서 보이는 발전적 양상 중의 하나는 PRM 및 CUPS 개념을 도입하여 코어를 제어 목적 프로토콜들의 평면(Plane)인 CP와 사용자 트래픽 전송 목적 프로토콜들의 평면인 UP로 분할하여 설계하기 시작했다는 것이다. 상기 구성요소 중 MME는 CP에 속하며, S-GW 및 P-GW는 CP와 UP에 속하는 기능들을 함께 포함하고 있다. Rel-14(~2017년)에 이르러 S-GW 및 P-GW를 CP(S-GW-C 및 P-GW-C) 및 UP(S-GW-U 및 P-GW-U)로 분할한 규격이 등장하게 된다. 이는 연관성이 높은 프로토콜들은 같은 평면에서 상호작용하도록 하고, 연관성이 없는 프로토콜 간에는 불필요한 종속성을 제거함으로써 다음과 같은 장점을 가져온다[2].

- 기성품(Commodity) HW 조합을 통한 코어 구축이 용이하여 비용 절감 가능
- 코어 제어 시 통합적 및 전략적 정책 결정 용이
- 코어 재구성 난이도 개선 및 비용 절감(예: 지연 시간 개선을 위해 GW-U의 위치만 변경, 처리용량 개선을 위해 GW-U만 독립적으로 증설)
- CP 및 UP 기능 각각의 독립적 설계 및 진화 가능

상술한 CUPS 개념은 이후 진행된 5G 표준화에서도 계승되어 발전한다.

또한 EPC는 3G 후기 기술인 IMS를 충실히 지원하며, 이를 통해 빌트인 형태의 음성 및 영상 통화 서비스(VoLTE)를 제공한다.

3. 5G 코어

5G 이동통신 시스템은 ITU-R에서 개발한 목표 서비스 및 요구 성능, 즉 비전(Vision) 중심의 표준규격인 IMT-2020 프레임워크(Framework)로 정의될 수 있다.⁹⁾ IMT-2020에서는 eMBB, mMTC, URLLC 등 기존 대비 도전적인 목적 시나리오(Scenario) 및 KPI를 제시하였고, 코어 네트워크의 효율화를 위한 SDN/NFV, 마이크로서비스 아키텍처, MEC 등의 개념을 도입하는 계기가 되었다.

5G 표준규격이 처음 논의된 Rel-15(~2018년)에서는 SBA를 바탕으로 코어의 구조를 새롭게 정의하였다[3,4]. SBA는 5G 코어의 CP에 속하는 각 구성요소들이 단일 인터페이스(Interface)를 통해 각각이 제공하는 서비스를 인증된 가입자에게 제공하는 개념이다. 이는 4G 대비 진보된 구조로써 새로운 서비스의 확장 및 제삼자(3rd Party) 네트워크와의 연동을 용이하게 하는 핵심 기술이다[5]. 또한, 5G 코어는 망의 구성요소를 가상화된 VM 또는 컨테이너(Container) SW로 구현하고 이들을 COTS HW 및 클라우드 환경에서 실행시킴으로써 망의 구축 및 재구성 난이도 및 비용 절감을 꾀하고 있다.

그림 1의 우측에 5G 코어의 구조를 간략히 도시

9) 세대(Generation)별 이동통신 시스템의 표준화는 공공기구인 ITU가 목표 및 요구조건을 정의한 프레임워크 표준을 개발하면, 3GPP 등의 민간단체에서 해당 요구조건을 충족하기 위한 기술표준을 개발하고, ITU의 승인을 획득하는 형태로 진행된다. ITU-R의 IMT-2000, IMT-Advanced 및 IMT-2020 프레임워크는 각각 3G, 4G 및 5G에 대응된다.

하였다. 주요 구성요소는 다음과 같다.

- **AMF**: MME의 이동성 관리 기능이 분리되어 진화된 개념으로, 단말 접속을 위한 NAS 시그널링(Signaling) 메시지 처리, 단말 위치 등록, 단말 식별, 인증 및 페이징 등의 서비스 제공
- **SMF**: 단말과 데이터 네트워크 간 트래픽 전송을 위한 PDU 세션 제어, 단말 IP 할당 등의 서비스 제공
- **UPF**: 단말과 데이터 네트워크를 연결하는 노드로서 라우팅, QoS 제어, 과금 정보 수집 등의 트래픽 처리 관련 서비스 제공
- **AUSF**: AMF, UDM 등과 연동하여 단말의 3GPP 및 Non-3GPP 접속에 대한 인증 서비스 제공
- **UDM**: 4G 코어의 HSS가 진화된 개념으로 볼 수 있으며, 가입자 및 인증 정보 관리 서비스 수행
- **PCF**: PCRF에서 발전한 개념으로 각 구성요소에 적용할 정책명령(Policy Rule)의 생성 및 업데이트(Update) 서비스 제공

5G 코어 표준규격에는 상술한 NF 외에 다른 구성요소 인스턴스(Instance)의 정보를 관리하는 NRF, 코어 내 서비스를 외부 응용에게 공개 및 전달하는 NEF, 요구조건에 맞는 NFV 기반 망 슬라이스(Slice) 선택을 수행하는 NSSF, 데이터 분석 기반 망 제어 서비스를 위한 NWDAF 등이 정의되어 있다.

Rel-15 이후 5G 코어규격은 Rel-16(~2020년), Rel-17(~2022년), Rel-18(~2023년) 및 Rel-19(현재 진행 중)를 거치면서, 다음에 열거한 내용들을 실현하는 방향으로 발전하였다.

- SCP, 서비스 집합, 서비스 상황정보 전달(Context Transfer) 등의 향상된 개념을 SBA 내에 추가하여 효율성 및 결합 허용성 강화[5]
- NWDAF를 AI/ML 모델(Model)을 훈련시키

기 위한 MTLF와 훈련된 모델의 활용을 위한 AnLF로 세분화하여 인공지능 및 기계학습 기반의 네트워크 분석 및 제어 기능 강화[6]

- NPN 및 LAN 관련 규격의 추가 및 개선을 통해 사업자 특화망 수요 부응

4. 6G 코어

현재 학계 및 산업계에서는 6G 표준규격의 등장 시점을 Rel-20 이후로 전망하고 있으며, 6G 시스템에 대한 기술적 기여 및 우위를 달성하기 위한 다양한 프로젝트들을 진행해오고 있다. 특히, ITU-R에서 6G의 목표 서비스 및 요구 성능을 정의한 IMT-2030 프레임워크 개발이 완료됨에 따라 3GPP에서도 현 5G 규격에서 계승할 부분과 재설계할 부분에 대한 구체화된 논의가 이루어질 것으로 예상된다.

한국전자통신연구원 네트워크연구본부에서는 향후 예상되는 6G 코어 기술 연구방향을 다음과 같이 예상한 바 있다[7].

- 경량 코어들을 RAN에 밀착된 MEC 노드에 전진배치하고 이들을 초분산 네트워크 형태로 연결하여 종단간 초저지연 서비스 제공이 가능한 대규모 인프라 실현
- 이기종 무선망, 저궤도 위성 통신망 및 유선망에 대한 포괄적 연동을 지원함으로써 확장된 형태의 FMC 실현
- 라우팅 또는 경로제어 시 접속망 및 전달망의 특성이 반영될 수 있는 구조적 혁신을 통해 초정밀 QoS 실현
- 망 슬라이스의 초정밀 제어를 통해 서비스 다양성 실현
- 다양한 AI/ML 모델들을 코어 인프라 곳곳에 내재시켜 구성요소 각각이 자율적인 지능제어 및 협업을 수행할 수 있도록 지원

- CP 및 UP의 기능적 혁신으로 이동 셀(Moving Cell), 셀리스(Cell-less) 및 셀프리(Cell-free) 등 진화된 형태의 RAN 지원

III. 3GPP 코어 네트워크 시뮬레이터

1. 분석기준

이 절에서는 3GPP 코어 네트워크 시뮬레이터들을 분석하기 위한 기준들을 제시한다. 해당 기준들은 주로 시뮬레이터와 연구개발 프로젝트(Project) 간의 적합성에 중점을 두었다.

- **목표 및 지향점:** 제작자들이 명시한 시뮬레이터의 목표 및 지향점은 해당 시뮬레이터와 프로젝트 간 적합성을 가늠하는 데 필요한 기초적인 정보가 된다.
- **개발 지속성:** 시뮬레이터의 유지, 보수 및 추가 개발의 지속 여부는 향후 3GPP 표준규격의 진화를 반영할 수 있겠는가를 추정하는 기준으로 활용할 수 있다.
- **표준규격 지원성:** 시뮬레이터에서 다양한 표준규격 구성요소들을 지원하면, 연구개발 시 다양한 시나리오를 용이하게 모사할 수 있다. 만약, 시뮬레이터가 목적 시나리오에서 가정하는 표준규격상 구성요소를 지원하지 않으면, 이를 보완하기 위한 추가개발이 불가피하다. 즉, 표준규격 지원성은 시뮬레이터와 프로젝트 간의 적합성을 가늠하는 중요한 기준으로 볼 수 있다.
- **개발 편의성:** 시뮬레이터 활용 또는 추가개발 시 구현 복잡도가 높거나, 충분한 문서화(Documentation)가 수반되지 않는 경우 시뮬레이터 활용법의 습득을 위한 시간적 비용이 증가한다. 따라서 개발 편의성은 프로젝트의 시간 및 인적 자원의 제약성이 높은 경우 중요한 기준으로 고려될 것이다.

- **외부 연동성:** 프로젝트의 성격에 따라 외부에서 별도로 구현된 시스템(예: 트래픽 에뮬레이터(Emulator), 테스트베드(Test-bed) 망, SDN 컨트롤러(Controller) 등)이나 알고리즘(예: AI/ML 기반 정책제어)과의 연동이 필요할 수도 있다. 이 경우, 외부 연동을 위한 API 지원 여부가 중요한 기준으로 고려될 것이다.
- **비용:** 프로젝트 예산이 충분하지 않은 경우, 라이선스(License) 구매가 필요한 상용 시뮬레이터에 비해 무료 사용이 가능한 공개 시뮬레이터가 선호될 것이다.

2. 3GPP 코어 네트워크 시뮬레이터 일람

이 절에서는 현존하는 3GPP 코어 기술을 지원하는 네트워크 시뮬레이터 7종을 선택하여 상기 제시한 기준으로 요약 및 분석한다.

가. EXata Network Modeling

EXata Network Modeling[8]은 KeySight 사에서 제공하는 네트워크 모델링 플랫폼(Platform)으로 실시간 에뮬레이션(Emulation)과 DES를 모두 지원한다. EXata의 기원은 1998년 UCLA에서 개발한 공개형 DES 시뮬레이터인 GloMoSim[9]으로 거슬러 올라간다. 2000년 Scalable Network 사에서 이를 상용 전환한 QualNet을 출시하였다. QualNet은 멀티코어 병렬화(Multi-core Parallelism) 기술을 적용한 빠른 실행과 강력한 GUI 기반 유틸리티(Utility)가 장점으로 알려져 있으며, 약 20여 년 동안 대표적인 상용 DES 네트워크 시뮬레이터로 널리 사용되었다. 이후, Scalable Network 사는 QualNet에 SVN 기반 실시간 에뮬레이션 기능을 추가한 EXata를 출시하여[10],¹⁰⁾ 두 솔루션(Solution)을 병

10) EXata는 QualNet과 동일한 멀티코어 병렬화 엔진으로 동작하되, 실제 망과 연동한 에뮬레이션을 지원한다.

행 개발 및 판매하였고,¹¹⁾ 2019년 각각 v9.3과 v7.1까지 출시하였다. 제작사 측은 망의 초기 설계단계에서 QualNet을 활용한 DES로 타당성을 검증하고, 망의 실제 구축 및 유지보수 단계에서 EXata를 활용한 에뮬레이션으로 최적화를 수행하는 것을 권장하였다 [10]. 2021년 Scalable Network 사가 Keysight 사에 인수 합병되면서, EXata로 통합하여 개발이 진행되고 있으며, 현재 v8.1.1까지 출시된 상태이다[11].

EXata는 Linux 및 Windows(7 이상)에서 모두 사용이 가능하며, 내부 프로토콜들은 C/C++로 구현되어 있다. 또한, 추가개발 및 디버깅(Debugging)에 사용할 자체 IDE를 제공하는 것으로 추정된다.

3GPP 표준규격은 GSM, UMTS, LTE 및 5G의 지원을 명시하고 있다. 해당 기술들은 DES의 경우, Cellular, UMTS, LTE 라이브러리를 통해 제공하며[12], 에뮬레이터의 경우, EXata Network Modeling-5G[13] 솔루션¹²⁾에서 제공한다. 코어규격 지원 현황은 다음과 같다.

- 3G 코어의 경우, Rel-7 기반의 GGSN, HLR, SSGN, VLR 제공 및 GPRS, MBMS, 이동성 관리 지원
- 4G 코어의 경우, Rel-9 기반의 MME, S-GW 및 P-GW 제공 및 GTP-U, GTP-C, X2, S1, S5 인터페이스 지원
- 5G 코어의 경우, AUSF, AMF, SMF, UDM, UPF 제공 및 가입자 초기 접속(Initial Registration), AKA, X2 핸드오버(Handover), 망 슬라이싱(Slicing)¹³⁾ 지원

11) EXata는 QualNet을 부분집합으로 포함하되, QualNet만 따로 구입 및 사용이 가능하였다.

12) 참고문헌 [14]에 의하면, 기본 SW에, Multi-domain Networks, Critical Infra, 5G, Cyber의 라이브러리 4종을 추가 판매한다.

13) eMBB, URLLC, MIoT 및 V2X 응용별로 특화된 슬라이스의 생성이 가능하다.

EXata는 현존하는 네트워크 시뮬레이터 중 3GPP 코어 지원 수준이 가장 높은 것으로 추정되며, 편리한 시각화 및 분석 유틸리티, 준수한 사용자 안내서 등을 제공한다는 점에서 우수한 수준의 개발 편의성을 지닌 것으로 판단된다.

EXata는 플랫폼 외부에서 동작하는 응용 프로그램과의 연동을 위한 인터페이스도 제공한다. DES의 경우 소켓(Socket) 기반의 API로 응용 프로그램 간 데이터 교환을 구현하며, 에뮬레이션의 경우, EXata 내 가상망과 실제망 간의 연동이 가능하도록 한 스위칭 패브릭(Fabric)을 지원한다.

EXata상에서 구현된 3GPP 기반 기술을 모두 활용하기 위해서는 기본 SW 및 5G 라이브러리의 구입이 필요하며 1인 사용자의 연간 라이선스 비용이 14만여 달러(USD) 이상으로 추정된다[14].

나. LTE-Sim

LTE-Sim[15]은 2011년 이탈리아(Italy) 바리(Bari) 공대에서 개발한 공개 SW LTE 네트워크 시뮬레이터로 DES 형태로 동작한다[16]. 2010년 v0.99 출시 이래, 2013년 v5.0을 끝으로 개발이 종료되었다.

동작 OS로 Linux 및 Mac OS를 지원하며, 내부 프로토콜들은 C++로 구현되어 있어, C++ 지원 IDE인 경우 별도 제약사항 없이 추가개발 및 디버깅이 가능하다.

이름에서 유추되는 바와 같이, 4G 및 5G는 지원하지 않는 LTE 시스템에 특화된 시뮬레이터로, OFDMA, AMC 등의 기반기술, UE, eNB 등의 구성요소, PHY, MAC, RLC, PDCP 등의 프로토콜 모음이 구현된 E-UTRAN과 MME, S-GW 및 P-GW를 MME/GW라는 단일 구성요소로 통합하여 구현한 EPC의 동작을 모사한다.

LTE-Sim은 시각화 및 분석 도구, 외부 응용 프로그램 연동을 위한 별도의 API 또는 유틸리티가 개발

되어 있지 않으며, 활용 편의성을 돕기 위한 안내서도 제공하지 않는다. 하지만, 타 시뮬레이터 대비 소규모로 구현되어 소스코드(Source Code)에 대한 습득, 분석 및 추가개발이 용이하고, 공개 SW라는 점에서, LTE 시스템을 목적 환경으로 고려하는 개념연구 단계에서는 활용 수요가 있을 것으로 판단된다.

다. NetSim

NetSim[17]은 인도의 TETCOS 사에서 개발한 상용 DES 네트워크 시뮬레이터로 2005년 v1.0이 출시된 이래, 현재 v13.3까지 출시되는 등 지속적인 업데이트가 이루어지고 있다. 제작사 측은 30여 개국 500여 기관에서 NetSim이 활용되는 것으로 추산하고 있다.

제작사 측은 다양한 통신 네트워크 프로토콜 지원, 빠른 개발 속도, GUI 기반 시각화 및 분석 기능 제공, 최대 10,000개 노드 규모의 시스템을 모사하는 확장성 등을 장점으로 명시하고 있다.

동작 OS는 Windows 8 이상으로 명시되어 있으며, 내부 프로토콜들은 C언어로 구현되어 있다. 추가개발 및 디버깅 시 Visual Studio[18]의 사용을 명시하고 있다.¹⁴⁾

3GPP 표준규격은 GSM, LTE, LTE-Adv 및 5G NR의 지원을 명시하고 있다. CDMA, OFDMA, AMC, HARQ, MIMO, Beamforming, mmWave 등의 기반기술, UE, eNB, gNB 등의 구성요소, PHY, MAC, RLC, PDCP 등의 프로토콜 모음이 비교적 상세하게 구현된 RAN에 비해, 코어는 일부 규격만 지원하는 상태이다. 참고문헌 [17]의 분석을 통해 추정된 3GPP 코어규격 지원현황은 다음과 같다.

- 3G 코어에 대한 지원 언급 없음

- 4G 코어의 경우, MME, S-GW, P-GW를 단일 구성요소로 표현한 EPC 제공
- 5G 코어의 경우, Rel-15 기반의 AMF, SMF, UPF를 제공하고 각 구성요소 간 인터페이스들 중 N1, N2, N3, N4, N6, N11 및 XN 지원

NetSim은 기 언급한 EXata Network Modeling 다음으로 3GPP 코어 지원 수준이 가장 높은 것으로 추정되며, 편리한 시각화 및 분석 플러그인(Plug-in), 준수한 사용자 안내서 및 100여 종의 예제를 제공한다는 점에서 우수한 수준의 개발 편의성을 지닌 것으로 판단된다. 또한, 프로페셔널(Professional) 배포판을 구매한 경우, 제작사 측에서 AI/ML 기술 연동, 실제 망의 시뮬레이터상 재연, 신규 프로토콜 추가, 트래픽 데이터 합성 등에 관한 컨설팅(Consulting)을 제공하는 점도 개발 편의성 및 생산성 면에서 긍정적인 요소로 생각된다.

NetSim은 시뮬레이터 외부에서 제작된 응용 프로그램과의 연동을 위한 API도 제공한다. 현재 연동이 가능한 유형은 다음과 같다.

- MATLAB 응용 프로그램
- Python 응용 프로그램
- 패킷 모니터링 SW인 Wireshark
- 도로교통 시뮬레이터인 SUMO

NetSim은 아카데미(Academic), 스탠다드(Standard), 프로페셔널의 세 가지 등급의 배포판이 있으며, 등급이 높아질수록 제공되는 기능 및 서비스의 종류가 증가한다. 가장 높은 등급인 프로페셔널의 경우 1인 사용자의 연간 라이선스 비용이 1만여 달러 이상인 것으로 추정된다.

라. ns-3

ns-3[19]는 UC Berkeley 산하의 LBNL에서 1995

14) v8 이후에는 Visual Studio 2010, v10 이후에는 2015, v12 이후에는 2019 이상을 사용해야 한다.

년부터 1997년까지 개발한 공개 SW DES 시뮬레이터인 ns-1을 시초로 한다. 1997년 ns-2 개발이 시작된 이후, 다양한 기관, 법인 및 단체들이 참여하여, 통신 네트워크 연구개발을 위한 공개 DES SW의 주류 솔루션으로 자리 잡게 된다.

2006년 ns-2를 전면적으로 재설계한 ns-3의 개발이 시작되었고, 이후 ns-2와 ns-3가 병행 개발되면서 공존하다가, 2010년 이후 ns-3가 시장에 안착하는 형태로 점진적인 발전이 이루어졌다. ns-3는 2008년 v3.1 발표 이래, 매년 2~4회의 지속적인 업데이트를 거쳐, 현재 v3.40이 배포되고 있다.

ns-3는 사용자 및 기여자들이 적극적으로 참여하는 커뮤니티(Community)를 바탕으로 기능 개선 및 추가개발이 활발하게 지속되고 있으며, 현존하는 공개 SW 네트워크 시뮬레이터 중 가장 높은 수준의 구현 충실도를 제공하는 것으로 알려져 있다[20].

ns-3는 확장성과 재사용성을 극대화하기 위한 모듈 기반(Modular) 구조로 설계되었으며, 새로운 프로토콜의 추가개발 및 결합이 용이하다. 준수한 안내서, 예제가 제공되며, 시각화 및 분석을 위한 각종 유틸리티도 존재한다. 또한, 사용자 커뮤니티를 통해 풍부한 정보를 획득할 수 있다는 점에서 상당한 수준의 개발 편의성을 지닌 것으로 사료된다.

Linux 및 Mac OS상에서 동작하며, 시뮬레이션 엔진 및 프로토콜은 C++로 구현하되, 실험을 위한 망 구성 및 시나리오는 Python을 사용하여 명세한다. IDE로는 Eclipse[21], NetBeans[22] 및 Qt Creator[23]의 사용을 권장하고 있다[24].

3GPP 표준규격은 LTE 및 5G NR의 지원을 명시하고 있다. LTE는 기본 모델 라이브러리에 포함되어 있으며[25], 추가 설치 가능한 플러그인 라이브러리인 5G-LENA[26]를 통해 Rel-15 규격 기반의 5G-NR을 지원한다. RAN 영역에서는 OFDMA, HARQ, AMC, MIMO, mmWave, Beamforming 등

의 기반기술, RRC, PDCP, RLC, MAC, PHY 등의 프로토콜 및 UE, gNB 등의 구성요소가 상세하게 구현되어 있는 것에 비해, 코어는 EPC까지만 지원하는 상태이다.

- 3G 코어 및 5G 코어 지원 언급 없음
- 4G 코어의 경우, MME, S-GW, P-GW를 제공하고 종단 간 연결을 위한 UP, CP 프로토콜 및 S1, S1-U, S11, S5, SGi 인터페이스 지원

ns-3는 시뮬레이션 외부 테스트베드 또는 VM 환경과 연동할 수 있는 NetDevice 인터페이스를 제공한다. 해당 인터페이스 유형은 다음과 같다[27].

- Raw 소켓 연동을 위한 FdNetDevice
- Ethernet 디바이스 드라이버(Device Driver) 연동을 위한 NetmapNetDevice
- DPDK 연동을 위한 DpdkNetDevice
- 원격 호스트(Remote Host)와의 연동을 위한 Tap-Bridge NetDevice

마. OMNeT++

OMNeT++[28]은 1997년 헝가리(Hungary) 부다페스트(Budapest) 기술경제대에서 처음 개발된 공개 SW DES 시뮬레이터로, 2003년부터 OpenSim 사에서 지속적으로 업데이트를 진행하고 있으며,¹⁵⁾ 현재 v6.0.2까지 발표되었다[29].

개발진들은 OMNeT++의 특징을 확장성, 모듈화, 컴포넌트(Component) 기반의 C++ 시뮬레이션 라이브러리로 설명하고 있으며, OpenSim 측에서 시뮬레이션 커널(Kernel), GUI 및 유틸리티 등을 개발하면, 학계 및 산업계에서 OMNeT++ 위에서 동작할 수 있는 응용 도메인 라이브러리를 개별 프로

15) OMNeT++은 APL을 따르는 공개 SW이나 OpenSim 사에서는 이를 강화한 상용 시뮬레이터인 OMNEST[29]를 판매하고 있다.

젝트로 구현하는 형태로 개발되고 있다. 즉 시뮬레이터 엔진과 응용 도메인 라이브러리 간 종속성이 없어, 다양한 영역에서 활용 가능하다는 것은 상당한 장점으로 볼 수 있다.

현재 참고문헌 [28]에 등록된 응용 도메인 라이브러리는 140여 개에 달하며, 대표적인 라이브러리로 TCP/IP 프로토콜 모음이 구현된 INET Framework, 3GPP 망이 구현된 SimuLTE 및 Simu5G, P2P 및 분산 파일 시스템 연구를 위한 OverSim, 무선 차량망 연구를 위한 Veins 및 Artery 등을 들 수 있다.

OMNeT++은 Windows, Linux 및 Mac OS상에서 모두 동작하며, 시뮬레이션 엔진 및 프로토콜은 C++로 구현하되, 실험을 위한 망 구성 및 시나리오는 자체 정의한 스크립트(Script) 언어인 NED를 사용하여 명세한다. IDE로는 Eclipse[21]의 사용을 권장하고 있다.

3GPP 표준규격은 GSM, SimuLTE 및 Simu5G 등의 응용 도메인 라이브러리에서 지원하며, OFDMA, AMC, HARQ, MIMO, CA 등의 기반기술, UE, eNB, gNB 등의 구성요소, PHY, MAC, RLC, PDCP 등의 프로토콜 모음이 구현된 RAN에 비해 코어는 거의 지원되지 않는 상태이다. 참고문헌 [30,31]의 분석을 통해 추정된 3GPP 코어규격 지원 현황은 다음과 같다.

- 3G 및 4G 코어에 대한 지원 언급 없음
- 5G 코어의 경우 UPF를 간략한 형태로 제공

OMNeT++은 ns-3와 마찬가지로 3GPP 표준규격은 RAN 위주로 구현된 것으로 보이며, 준수한 사용자 안내서, 강력한 유틸리티 및 140여 개에 달하는 응용 도메인 프로젝트가 존재한다는 점에서 우수한 수준의 개발 편의성을 지닌 것으로 판단된다. 또한, 응용 도메인 라이브러리를 통해 다음과 같은 외부 연동 기능도 활용할 수 있다.

- Python 응용 연동[32]
- SUMO 연동[33]
- AI/ML 연동[34]
- 실제 망과의 연동 및 에뮬레이션[35]

바. OpenAirInterface

OpenAirInterface[36]는 공개형 3GPP 이동통신망 프로토콜 스택 SW로 2000년 프랑스 EURECOM에서 개발이 시작되어, 2014년부터 비영리 단체인 OSA(OAI Software Alliance)의 주도로 개발이 이루어지고 있다.

엄밀하게 말해서, OpenAirInterface는 시뮬레이터가 아닌 실제 망의 구현을 위한 SW 기술에 속하지만, 본고에서는 다음의 특징들을 고려하여 시뮬레이터 기술 중의 하나로 소개하였다.

- NFV 기반의 가상화 네트워크로 구현되어, 시뮬레이터와 유사한 동작 가능
- SW 패키지에 시뮬레이션/에뮬레이션 컴포넌트 포함

OpenAirInterface는 RAN, 코어, OAM 및 CI/CD의 4개 영역을 담당하는 하부 프로젝트들로 구성된다. 각 프로젝트는 4G 및 5G 각각의 구현을 위한 서브프로젝트(Sub-project)들로 다시 세분화된다. 현재 4G 코어는 v1.2.0, 5G 코어는 v1.5.1까지 출시된 상태이다.

동작 OS는 Linux를 명시하고 있으며, 내부 프로토콜들은 C/C++로 구현되어 있다. COTS 서버에 직접 설치하는 것은 물론, VM 및 컨테이너 형태로 클라우드 환경에서 실행하는 것도 가능하며, 이를 위한 준수한 사용자 안내서가 제공되고 있다.

3GPP 표준규격은 LTE, LTE-Adv 및 5G 지원을 명시하고 있으며, 3GPP 코어규격 지원현황은 다음과 같다[37,38].

- 3G 코어 지원 언급 없음
- 4G 코어의 경우 MME, HSS, SPGW(S-GW + P-GW) 지원
- 5G 코어의 경우 AMF, SMF, UPF, NRF, AUSF, UDM, UDR, NSSF, NEF, PCF의 10개 NF 지원[38]

OpenAirInterface는 기 언급한 공개 시뮬레이터 대비 4G/5G 코어 기술 구현 수준이 가장 충실한 것으로 판단되며, 외부에 구현된 실제 네트워크, 시뮬레이터 또는 응용 프로그램과 연동이 용이하다. 실제로, OpenAirInterface 5G 코어는 상용 gNB[39,40] 및 공개 RAN 에뮬레이터[41-43]와 연동이 이루어진 바 있다.

OSA의 관리하에 체계적인 유지보수가 이루어지고 있는 점도 긍정적인 요소로 판단된다. OSA는 OpenAirInterface의 현재 구현 상황 및 향후 계획을 로드맵(Roadmap)으로 제시하고 있으며, 5G 코어의 경우 2024년 상반기까지 NWDAF, UDSF 추가 및 코어 네트워크 기능 설정용 API 구현을 목표로 제시하고 있다.

사. Riverbed Modeler

Riverbed Modeler[44]는 1987년 출시된 상용 DES 네트워크 시뮬레이터인 OPNET Modeler[45]를 기반으로 한다. 2012년 Riverbed 사가 OPNET 사를 인수하면서 Riverbed Modeler로 명칭이 변경되었으며, 현재 v18.10까지 출시된 상태이다.

Riverbed Modeler는 GUI 환경에서 노드, 링크, 서브넷 등으로 구성된 토폴로지를 명세하는 네트워크 모델, 호스트의 특성(예: 인터페이스 종류, 규모 및 처리량)을 명세하는 노드 모델 및 프로토콜을 명세하는 프로세스(Process) 모델을 도식화(Schematic) 기법을 통해 조합하는 형태로 간편하게 시뮬레이션을 구

성할 수 있으며, 프로토콜 수정 및 추가개발을 위한 C/C++ 프로그래밍 라이브러리도 제공하고 있다.

Linux 및 Windows상에서 동작하며, 추가개발 및 디버깅에 사용할 자체 IDE, 시각화 유틸리티 및 안내서를 제공한다. 또한, Riverbed 사에서 구매 시 시뮬레이터 활용에 대한 교육 컨설팅을 제공한다는 점이 개발 편의성 측면에서 긍정적 요소로 생각된다.

3GPP 표준규격은 UMTS(Rel-99, Rel-4 및 Rel-5) 및 LTE(Rel-8 및 Rel-9)를 지원한다[46]. 코어규격 지원현황은 다음과 같다.

- 3G 코어는 GGSN 및 SGSN 지원
- 4G 코어는 MME, S-GW, P-GW 기능을 지원하는 EPC 노드 모델 제공
- 5G 코어 지원 언급 없음

외부 연동성 측면에서는, 실제망 또는 응용 프로그램을 시뮬레이션과 연동하기 위한 인터페이스인 SITL 모듈(Module)을 제공하고 있다.

Riverbed Modeler는 반드시 포함되어야 하는 필수 모듈과 선택적으로 추가 가능한 애드온(Add-on) 모듈로 구성되어 있다. 현재 Riverbed Modeler상에서 구현된 3GPP 관련 기술을 모두 활용하기 위해서는 1인 사용자의 영구 라이선스 비용이 30만여 달러 이상으로 추정된다.

3. 시뮬레이터 간 비교분석

표 1은 이전 절에서 제시한 7종의 3GPP 코어 네트워크 시뮬레이터를 개발정보, 표준규격 지원성, 개발 편의성, 외부 연동성 및 비용 측면에서 비교한 표이다. 연구개발 프로젝트 기획 시 적합한 시뮬레이터의 선택은 해당 프로젝트의 성격에 따라 달라진다. 이를 예시하면 다음과 같다.

- DES상에서 5G 코어의 지원 여부가 중요하고,

표 1 3GPP 코어 네트워크 시뮬레이터 비교

라이브러리	개발정보	3GPP 코어 표준규격 지원성	개발 편의성 제공	외부 연동성 지원	공개 여부 및 비용
EXata Network Modeling	v8.1.1 (2023.08) 개발 지속	• 3G는 GGSN, HLR, SSGN 및 VLR 지원 • 4G는 MME, S-GW 및 P-GW 지원 • 5G는 AUSF, AMF, SMF, UDM, UPF의 5개 NF 지원	안내서, API 문서, 예제, 튜토리얼(Tutorial) 및 시각화 도구	소켓 API 기반 외부 프로그램 연동 지원, HW 연동 위한 스위칭 패브릭 지원	상용 SW 1인당 연간 140,000 USD 이상 추정
LTE-Sim	v5.0 (2013.04) 개발 종료	• 3G/5G 지원 언급 없음 • 4G는 MME, GW 기능을 단일화한 MME/GW 노드 지원	안내서, 예제, 튜토리얼	지원하지 않음	공개 SW(GNU GPLv3)
NetSim	v13.3 (2023.02) 개발 지속	• 3G 지원 언급 없음 • 4G는 MME, S-GW, P-GW를 단일화한 요소인 EPC 지원 • 5G는 AMF, SMF, UPF 지원	안내서, API 문서, 예제, 튜토리얼 및 시각화 도구	Python, MATLAB, Wireshark 및 SUMO 연동 지원	상용 SW 1인당 연간 10,000 USD 이상 추정
ns-3	v3.40 (2023.09) 개발 지속	• 3G/5G 지원 언급 없음 • 4G는 MME, S-GW 및 P-GW 지원	안내서, API 문서, 예제, 튜토리얼 및 시각화 도구	실제 망 연동 에뮬레이션 지원	공개 SW(GNU GPLv2)
OMNeT++	v6.0.2 (2023.10) 개발 지속	• 3G/4G 지원 언급 없음 • 5G는 단순한 형태의 UPF 지원	안내서, API 문서, 예제, 튜토리얼 및 시각화 도구	Python, SUMO, TensorFlow, Keras 및 OpenAI Gym 연동 지원, 실제 망 연동 에뮬레이션 지원	공개 SW 기관 사용자의 경우 상용제품인 OMNEST 필요
Open Air Interface	v1.5.1 (2023.05) 개발 지속	• 3G 지원 언급 없음 • 4G는 MME, HSS, S-GW 및 P-GW 지원 • 5G는 AMF, SMF, UPF, NRF, AUSF, UDM, UDR, NSSF, NEF, PCF의 10개 NF 지원	안내서, API 문서, 예제 및 튜토리얼	시뮬레이션 및 실제 망 연동 에뮬레이션 지원	공개 SW(OAI License v1.1)
Riverbed Modeler	v18.10 (2022.05) 개발 지속	• 3G는 GGSN, SGSN 지원 • 4G는 MME, S-GW, P-GW를 단일화한 요소인 EPC 지원 • 5G 지원 언급 없음	안내서, API 문서, 예제, 튜토리얼 및 시각화 도구	실제 망 연동 에뮬레이션 지원	상용 SW 1인 연구사용 시 300,000 USD 이상 추정

프로젝트 예산이 충분한 경우, EXata(QualNet) 나 NetSim이 적합한 선택이 될 수 있다.

- DES상에서 RAN의 성능 분석이 주 목적이고, 프로젝트 예산이 충분하지 않은 경우, ns-3나 OMNeT++이 적합한 선택이 될 수 있다.
- 실제 망과의 연동 및 에뮬레이션에 중점을 두고, 프로젝트 예산이 충분하지 않은 경우, Open AirInterface가 적합한 선택이 될 수 있다.

IV. 결론

3GPP 이동통신 표준규격이 시장을 주도하는 유력 표준으로 발전함에 따라, 통신 및 네트워크 연구 개발을 위한 시뮬레이터 SW상에서도 해당 표준을

지원하기 위한 애드온 및 플러그인 라이브러리 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 다만, 대부분의 시뮬레이터에서 RAN에 비해 코어의 최신규격 반영 정도가 미진한 양상을 보이고 있다. 이는 코어보다는 RAN 영역에서 최신 기술을 적극적으로 도입 및 구축하는 산업계의 경향이 반영된 것으로 볼 수 있다.

본고에서는 3GPP 코어의 구조 및 발전과정을 개괄적으로 소개하고, 3GPP 코어가 구현된 통신 및 네트워크 시뮬레이터들을 연구개발 프로젝트와의 적합성 관점에서 요약 및 분석하였다. 주어진 프로젝트에 대한 시뮬레이터와의 적합성은 목표 및 지향점, 개발 지속성, 표준규격 지원성, 개발 편의성, 외부 연동성 및 비용 등으로 추정해 볼 수 있으며, 이를 바탕으로 가장 적합한 시뮬레이터를 선택하는 것

은 프로젝트의 성공적 수행을 위해 꼭 필요한 과정이라고 생각된다. 본고에서 소개한 시뮬레이터 및 분석기준이 독자들의 3GPP 코어의 구현 및 성능 검증이 필요한 연구개발 프로젝트의 기획 및 시작 단계에서 소정의 참고자료로 활용될 것을 기대한다.

용어해설

게이트웨이 이기종 통신망의 상호 접속을 위한 프로토콜 변환을 제공하여 통신망 간 데이터 교환이 가능하게 하는 기능부 또는 장치

도메인 컴퓨터 또는 통신망 시스템에서 공통의 제어 또는 규칙에 따라 동작하는 일부 구성요소들의 집합을 지칭할 때 사용

라이브러리 컴퓨터 프로그램 작성 시 미리 작성되어 부품 역할을 하는 프로그램 모듈들을 모아놓은 집합. 일반적으로 목적에 따라 그룹화된 API 및 안내서를 제공

소켓 컴퓨팅 또는 통신망 시스템상에서 동작하는 두 프로세스 간의 통신을 데이터 송수신을 위한 추상화된 입출력 단자로 표현할 때 사용

마이크로서비스 소규모 단위 기능을 단독 배포 및 실행이 가능한 API 서비스 형태로 구현한 소프트웨어 모듈을 가리킴. 레고 블록들을 조립하여 하나의 완성된 작품을 만드는 것과 유사하게, 여러 개의 마이크로서비스를 결합하여 원하는 시스템을 구성하는 개발 방식을 마이크로서비스 아키텍처로 지칭

아키텍처 컴퓨팅 또는 통신망 시스템을 구성하는 요소들과 해당 요소들의 상호작용을 통칭

패브릭 여러 개의 회선 또는 연결 링크가 그물처럼 얽힌 기판 또는 구조를 실이 엮여져 만들어진 직물에 비유하는 표현

패킷 통신망에서 전송 데이터를 수납한 단위 묶음을 지칭. 전송 데이터는 단위 크기로 분할되어 여러 개의 패킷에 나누어져 전송됨. 패킷에는 전송 데이터 외에 송수신 주소 및 각종 제어 정보도 포함

프로토콜 컴퓨터 또는 통신망 시스템에서 두 개체 간에 데이터를 교환하기 위한 각종 절차/규범/규정/규약/규칙을 통칭

프로토콜 스택 컴퓨터 또는 통신망 시스템을 구성하는 계층화된 프로토콜들을 구현한 소프트웨어 모음

트래픽 통신망 시스템에서 전송되는 호, 패킷의 집합을 교통수단의 흐름으로 비유한 표현

약어 정리

4G	4th Generation
5G	5th Generation
AI	Artificial Intelligence
AKA	Authentication and Key Management

AMC	Adaptive Modulation and Coding
AMF	Access and Mobility Management Function
AnLF	Analytics Logical Function
APL	Academic Public License
ARQ	Automatic Repeat Request
AuC	Authentication Center
AUSF	Authentication Server Function
BTS	Base Transceiver Station
CA	Carrier Aggregation
CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Core Network
COTS	Commercial Off-the-Shelf
CP	Control Plane
CS	Client-Server
CSCF	Call State Control Function
CS-MGW	Circuit-Switched Media GW
CUPS	Control and User Plane Separation
DES	Discrete Event Simulation
DPDK	Data Plane Development Kit
EIR	Equipment Identity Register
eMBB	Enhanced MBB
eNB	Evolved NB
EPC	Evolved Packet Core
E-UTRAN	Evolved UTRAN
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FMC	Fixed Mobile Convergence
GMSC	Gateway MSC
gNB	Next Generation NB
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
GTP	GPRS Tunneling Protocol
GTP-C	GTP Control Plane
GTP-U	GTP User Plane
GUI	Graphical User Interface
GW	Gateway
GW-C	GW Control Plane
GW-U	GW User Plane
HARQ	Hybrid ARQ
HLR	Home Location Register

HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access	NWDAF	Network Data Analytics Function
HSPA	High-Speed Packet Access	OAI	OpenAirInterface
HSS	Home Subscriber Server	OAM	Operation, Administration, Maintenance
HSUPA	High-Speed Uplink Packet Access	OFDMA	Orthogonal FDMA
I-CSCF	Interrogating CSCF	OSA	Open Service Access
IDE	Integrated Development Environment	P2P	Peer-to-Peer
IMS	IP Multimedia CN Subsystem	PCEF	Policy Control and Enforcement Function
IMT	International Mobile Telecommunications	PCF	Policy Control Function
IoT	Internet of Thing	PCRF	Policy Control and Rule Function
IP	Internet Protocol	PDCP	Packet Data Convergence Protocol
IPTV	IP Television	PDN	Packet Data Network
ITU	International Telecommunication Union	PDU	Protocol Data Unit
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector	PHY	Physical Layer
KPI	Key Performance Indicator	PoC	PTT over Cellular
LAN	Local Area Network	PRM	Protocol Reference Model
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory	PSTN	Public Switched Telephone Network
LTE	Long-Term Evolution	PTT	Push-To-Talk
LTE-Adv	LTE-Advanced	P-CSCF	Proxy CSCF
MAC	Medium Access Control	P-GW	PDN GW
MBMS	Multi-media Broadcast Multicast Service	QoS	Quality-of-Service
MBB	Mobile Broadband	RAN	Radio Access Network
MEC	Multi-access Edge Computing	Rel	Release
MIMO	Multi-Input-Multi-Output	RLC	Radio Link Control
MIoT	Massive IoT	RTP	Realtime Transport Protocol
ML	Machine Learning	RTT	Round Trip Time
MME	Mobility Management Entity	SBA	Service-based Architecture
mmWave	millimeter Wave	SCP	Service Communication Proxy
mMTC	massive Machine Type Communication	SDN	Software Defined Network
MSC	Mobile Switching Center	SGSN	Serving GPRS Support Node
MTLF	Model Training logical function	SIP	Session Initiation Protocol
NAS	Non-Access Stratum	SITL	System-In-The-Loop
NB	Node BTS	SMF	Session Management Function
NED	Network Description	SUMO	Simulation of Urban Mobility
NEF	Network Exposure Function	SVN	Software Virtual Network
NF	Network Function	S-CSCF	Serving CSCF
NFV	NF Virtualization	S-GW	Serving GW
NPN	Non-Public Network	TCP	Transport Control Protocol
NR	New Radio	UDM	Unified Data Management
NRF	Network Repository Function	UDR	Unified Data Repository
NSSF	Network Slice Selection Function	UDSF	Unstructured Data Storage Function

UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UP	User Plane
UPF	User Plane Function
URLLC	Ultra-Reliable and Low Latency Communication
USD	United State Dollar
UTRAN	UMTS Terrestrial RAN
V2X	Vehicle-to-X
VLR	Visitor Location Register
VM	Virtual Machine
VoLTE	Voice over LTE
WCDMA	Wide-band Code Division Multiple Access
WLAN	Wireless LAN

참고문헌

- [1] <http://terms.tta.or.kr/dictionary/dictionaryView.do?subject=%ED%95%B5%EC%8B%AC%EB%A7%9D>
- [2] <https://netmanias.com/ko/?m=view&id=oneshot&no=14453>
- [3] 3GPP TS 23.501, System Architecture for the 5G System (Release 15), 2017. 12.
- [4] 3GPP TS 23.502, Procedures for the 5G System (Release 15), 2017. 12.
- [5] 신명기 외, "5G 네트워크/시스템(5GS) 표준기술 동향," TTA 저널, 184호, 2019, pp. 40-49.
- [6] 3GPP TS 23.288, Architecture enhancements for 5G System (5GS) to support network data analytics services (Release 18), 2023. 9.
- [7] 고남석 외, "6G 모바일 코어 네트워크 기술 동향 및 연구 방향," 전자통신동향분석, 제36권 제4호, 2021, pp. 1-12.
- [8] <https://www.keysight.com/us/en/products/network-test/network-modeling.html>
- [9] X. Zeng et al., "GloMoSim: A library for parallel simulation of large-scale wireless networks," in Proc. PADS, (Banff, Canada), May 1998.
- [10] https://www.superinst.com/docs/snt/SNT_EXata_Family.pdf
- [11] <https://www.keysight.com/us/en/lib/software-detail/computer-software/exata-network-modeling.html>
- [12] <https://www.keysight.com/us/en/assets/3122-1395/technical-overviews/QualNet-Network-Simulator.pdf>
- [13] <https://www.keysight.com/us/en/product/SN100VGLA/exata-network-modeling-5g.html>
- [14] <https://www.keysight.com/us/en/catalog/key-47937/network-modeling.html>
- [15] <http://telematics.poliba.it/LTE-Sim>
- [16] G. Piro et al., "Simulating LTE cellular systems: An open-source framework," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 60, no. 2, 2011, pp. 498-513.
- [17] <https://www.tetcos.com/index.html>
- [18] <https://visualstudio.microsoft.com/ko>
- [19] <https://www.nsnam.org>
- [20] L. Campanile et al., "Computer network simulation with ns-3: A systematic literature review," Electronics, vol. 9, no. 2, 2020.
- [21] <https://www.eclipse.org>
- [22] <https://netbeans.apache.org/front/main>
- [23] <https://www.qt.io/ko-kr/product/development-tools>
- [24] <https://www.nsnam.org/wiki/Installation>
- [25] <https://www.nsnam.org/docs/release/3.40/models/html/lte-design.html>
- [26] <https://5g-lena.cttc.es>
- [27] <https://www.nsnam.org/docs/models/html/emulation-overview.html>
- [28] <https://omnetpp.org>
- [29] <https://www.omnest.com>
- [30] <https://simulte.com>
- [31] <http://simu5g.org>
- [32] <https://github.com/mmodenesi/omnetpy>
- [33] <https://veins.car2x.org>
- [34] <https://github.com/ComNetsHH/omnetpp-ml>
- [35] <https://inet.omnetpp.org/docs/users-guide/ch-emulation.html>
- [36] <https://openairinterface.org>
- [37] <https://github.com/OPENAIRINTERFACE/openair-epc-fed>
- [38] <https://gitlab.eurecom.fr/oai/cn5g/oai-cn5g-fed>
- [39] <https://www.amarisoft.com/products/custom-projects>
- [40] <https://na.baicells.com/>
- [41] <https://github.com/aligungr/UERANSIM>
- [42] <https://github.com/omec-project/gnbsim>
- [43] <https://github.com/my5G/my5G-RANTester>
- [44] <https://www.riverbed.com/products/riverbed-modeler>
- [45] 김철 외, OPNET 기초다지기, 홍릉과학출판사, 2008.
- [46] <https://www.riverbed.com/riverbed-wp-content/uploads/2022/12/modeler-protocol-list.pdf>
- [47] <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/3g-umts/network-architecture.php>
- [48] <https://medium.com/@sarpkoksai/core-network-evolution-3g-vs-4g-vs-5g-7738267503c7>