

5G K-SimNet: 5G 이동통신 시스템의 종단간 성능 검증을 위한 네트워크 시뮬레이터

최시영*, 송정환*, 김준석**, 강성준**, 권태경*, 최성현**, 박세웅**

5G K-SimNet: Network Simulator for Evaluating End-to-End Performance of 5G Cellular Systems

Siyoung Choi*, Junghwan Song*, Junseok Kim**, Seongjoon Kang**,
Ted Taekyoung Kwon*, Sunghyun Choi**, Saewoong Bahk**

요약

이 논문에서는 5G 이동통신 시스템의 종단간 성능 검증을 위한 네트워크 시뮬레이터인 5G K-SimNet을 소개한다. 5G K-SimNet은 5G NR 프로토콜, 채널 모델, LTE-NR multi-connectivity, SDN/NFV, 5G 핵심망 기능을 포함한다. 5G K-SimNet에 대한 이해를 돕기 위해 시뮬레이터의 구조, 스크래치 코드의 구성, 시뮬레이션 방법론, 시뮬레이션 결과 등을 설명한다.

Key Words : 5G, multi-connectivity, SDN, NFV, 5G core network, Network simulator

ABSTRACT

In this paper, we introduce the network simulator for evaluating end-to-end performance of 5G cellular systems named as 5G K-SimNet. 5G K-SimNet includes 5G NR protocol, channel model, LTE-NE multi-connectivity, SDN/NFV, and 5G core network. Specifically, we represent structure, scratch code, methodology of simulation, and simulation results to provide more information of 5G K-SimNet.

I. 서론

모바일 트래픽의 증가와 높은 속도의 데이터 통신에 대한 수요로 인해 5G로의 진화는 필수적이다. 2017년까지 3GPP 표준화 그룹은 5G Phase-1이라고 불리는 5G 이동통신 표준화의 첫 단계를 진행하였다.

5G 이동통신에서는 기존에 활용되었던 6GHz 이하의 주파수 대역뿐 아니라 6GHz 이상의 주파수 대역의 활용이 관심 받고 있다. 이를 위해 5G 이동통신을 위한 채널 모델에 대한 연구가 진행되었다^[1]. 5G new radio (NR)의 배치 방법론과 네트워크 기능 가상화에 대한 연구 역시 진행되었다^[2]. 5G NR의 non-

* 이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 '범부처 Giga KOREA 사업'의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. GK18S0400, 개방형 5G 표준 모델 개발)

° First and Corresponding Author: (ORCID:0000-0003-1678-6995)Department of Electrical and Computer Engineering, INMC, Seoul National University, sychoi@netlab.snu.ac.kr, 학생회원

* (ORCID:0000-0002-3477-857X;0000-0002-7795-0077)Department of Computer Science and Engineering, Seoul National University, jhsong@mmlab.snu.ac.kr; tkkwon@snu.ac.kr

** (ORCID:0000-0002-4869-6313; 0000-0003-4544-832X; 0000-0003-0279-445X; 0000-0002-4771-3927)Department of Electrical and Computer Engineering, INMC, Seoul National University, jskim14@mwnl.snu.ac.kr, 학생회원; sjkang@netlab.snu.ac.kr; schoi@snu.ac.kr, 중신회원; sbahk@snu.ac.kr, 중신회원

논문번호 : 201806-C-190-RN, Received June 29, 2018; Revised October 8, 2018; Accepted November 6, 2018

standalone 동작을 위해 LTE와 5G NR간 multi-connectivity 기술이 표준화되었으며^[3], SDN/NFV 기술이 네트워크 기능 가상화를 위해 유망한 기술로 주목받고 있다^[4].

이 논문에서는 5G 이동통신 시스템의 중단간 성능 검증을 위한 네트워크 시뮬레이터인 5G K-SimNet을 소개한다. 5G K-SimNet은 ns-3^[5] 기반으로 개발되었으며, 5G NR 프로토콜, 채널 모델, LTE-NR 듀얼 프로토콜, multi-connectivity에서 트래픽 관리 기법, SDN/NFV 기능이 포함되어있다. 5G K-SimNet은 국내 학술대회에서 여러 차례 시연을 거치며 여러 연구 개발자로부터 검증을 받으며 개발 진행 중 이다^[6,7].

2장에서는 5G K-SimNet에 구현된 5G의 핵심 요소인 5G NR, multi-connectivity, SDN/NFV, 5G 핵심망에 대해 설명한다. 3장에서는 5G K-SimNet의 구조, 스크래치 코드, 시뮬레이션 방법론에 대해 설명한다. 4장에서는 5G K-SimNet을 이용한 시뮬레이션 예제와 결과를 설명한다. 5장에서 결론을 정리하고 마무리한다.

II. 5G 핵심 요소

이 장에서는 5G K-SimNet에 개발된 5G의 핵심 요소에 대해 설명한다. 간략히 소개하면 기존 4G radio (LTE)와 차별화되는 5G NR, 5G NR의 배치를 위한 multi-connectivity, 네트워크 가상화를 위한 SDN/NFV 기술, 기존 4G core (EPC)와 차별화되는 5G 핵심망이 있다.

2.1 5G NR

5G NR의 핵심요소는 3가지로 요약할 수 있다. i) 6 GHz 이상 새로운 주파수 대역에서 동작, ii) 빔 기반의 multiple input multiple output (MIMO) 동작, 그리고 iii) 유연한 프레임 구조를 가지는 것이다.

3GPP는 새로운 주파수 대역에서 5G NR의 성능 평가를 위해서 0.5부터 100 GHz에 해당하는 채널 모델을 제공하고 있다^[1]. 본 모델에서는 밀리미터파의 특성을 반영하기 위해 장애물 모델을 포함하고 있으며, 이로 인해 신호세기의 감쇄가 더 심해지는 부분도 모델링 되어 있다.

LTE MIMO 기술이 진화함에 따라서 다수의 안테나를 이용한 massive MIMO 기술이 등장하였고, 수평방향뿐만 아니라 수직방향까지 포함한 빔을 생성시키는 full dimension-MIMO (FD-MIMO) 기술이 3GPP 표준에서 논의 되었다^[8]. FD-MIMO는 디지털

프리코딩과 아날로그 빔포밍 기술이 합쳐진 하이브리드 빔포밍 기술을 사용하고 있다. 그러므로 동일한 무선자원을 이용하여 다수의 사용자에게 데이터를 전송할 수 있는 multi user-MIMO (MU-MIMO) 기술을 사용할 수 있다. 5G NR에서는 밀리미터파의 특성에 따라서 기지국에 더 많은 수의 안테나를 설치할 수 있으며, 더 예리한 빔을 형성할 수 있다.

LTE 시스템에서는 부반송파 간격을 15 kHz로 고정하여, 1 ms 단위의 스케줄링을 통한 데이터 전송이 이루어졌다. 5G NR에서는 짧은 지연시간을 요구하는 서비스를 위해서 더 넓은 부반송파 간격을 사용할 수 있다 (예: 30, 60 kHz 등)^[9]. 이로 인해 스케줄링 단위인 슬롯 (slot)의 길이가 유연하게 변할 수 있는 특징을 가지고 있다.

2.2 Multi-Connectivity

LTE-NR 듀얼 라디오 모델은 LTE 프로토콜과 5G NR 프로토콜을 포함하고 있다. 각 프로토콜 엔티티는 UE와 eNB/gNB에 위치한다. 이 모델은 multi-connectivity에 기반하고 있으며, 5G NR non-standalone 시나리오를 지원하기 위해 4G LTE와 5G NR간 협력적인 네트워크 구조를 갖는다. 그림 1은 LTE-NR multi-connectivity 다운링크 시나리오에서 user-plane 프로토콜을 보여주는 블록도이다. LTE 기지국인 eNB가 control-plane의 앵커 역할을 하는데 multi-connectivity에서 master node (MN) 라고 부른다. 5G NR 기지국인 gNB는 사용자의 데이터 속도 증가나 네트워크 로드 밸런싱 등의 역할을 하는데 multi-connectivity에서 secondary node (SN) 이라고 부른다. 5G 단말인 UE는 LTE와 NR로부터 동시에 데이터 전송을 받을 수 있어야 하므로 LTE-NR 듀얼 프로토콜이 설치되어있다. Multi-connectivity를 활용하기 위해서는 MN에 트래픽 분할 기능이 있어야한다. 트래픽 분할 기능에 따라 다운링크 트래픽은 MN

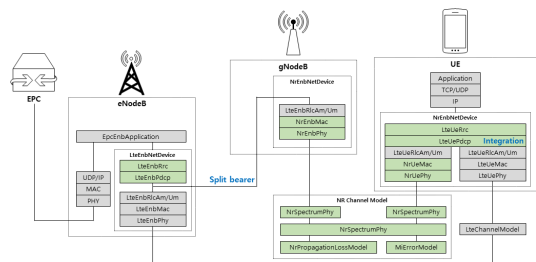


그림 1. Multi-connectivity 다운링크 상황에서 user-plane 프로토콜 구조
Fig. 1. User-plane protocol of multi-connectivity in downlink case

의 PDCP 엔티티에서 분기되어 MN의 RLC와 SN의 RLC로 전달된다. 여기서 트래픽 분할 엔티티는 모든 트래픽에 대해 각각 정의된다. 트래픽 분할 계층인 PDCP TX 엔티티는 PDCP RX 엔티티에서 수신 패킷 정렬을 수행할 수 있도록 패킷 헤더에 시퀀스 넘버를 입력해줘야 한다. 트래픽 통합 계층인 PDCP RX 엔티티에서는 IP 계층으로 순서대로 패킷을 전달하기 위해 패킷 재정렬을 수행해야 한다. 본 연구팀은 5G 단말의 LTE-NR 듀얼 프로토콜, PDCP TX/RX 엔티티의 패킷 시퀀싱/재정렬 기법, 트래픽 분할 알고리즘을 개발하였다. 위 기능을 개발하는데 LENA 프로젝트에서 개발한 LTE 모듈^[10]과 뉴욕주립대학교에서 개발한 밀리미터파 라디오 모듈^[11]을 활용하였다. 이 모델을 활용하여 우리는 트래픽 분할라우팅 기법, RLC 버퍼 관리 기법과 같은 기능의 성능을 검증할 수 있다. 시뮬레이션의 결과로는 TCP/UDP 수율, 패킷 왕복 시간, TCP congestion window 로그와 같은 중단간 성과 PDCP 패킷 drop rate, RLC 버퍼 로그, PHY SINR과 같은 특정 계층의 성능을 얻을 수 있다.

2.3 SDN/NFV

5G 핵심망은 network function virtualization (NFV) 및 software-defined networking (SDN) 기술을 활용할 것으로 기대되고 있다^[4].

NFV 기술은 네트워크 기능들을 소프트웨어화한 후 데이터 센터 등의 클라우드 플랫폼 위에 소프트웨어화된 네트워크 기능들을 설치하여 유연하게 관리하는 기술이다.

SDN 기술은 네트워크의 제어 평면과 사용자 평면을 분리하여, 제어 평면의 기능은 컨트롤러에게 부여하고 사용자 평면의 기능은 스위치에게 부여하여 컨트롤러를 통해 네트워크를 유지/관리하는 기술이다.

5G 시스템에서의 NFV 기술 및 SDN 기술을 활용 시나리오는 다음과 같다. 5G 핵심망을 네트워크 기능별로 정의하고 그에 따라 구성하고 각각을 소프트웨어화 한 후, 클라우드 플랫폼과 NFV 기술을 통해 5G 핵심망을 구성한다. 또한 핵심망 네트워크 기능들의 연결성 및 gNB와 핵심망의 연결을 SDN 기술을 통해 관리하여 핵심망 관리의 효율성을 극대화할 것으로 예상된다.

2.4 5G 핵심망

5G 핵심망은 상기 기술한 대로 NFV 기술이 적용됨에 따라 LTE의 EPC와는 구조상 차이점을 갖는다. LTE EPC는 MME, P-GW, S-GW 등 네트워크 요소

별로 정의가 되었으며 각각의 요소가 독립적인 하드웨어 상에서 동작하였다. 그러나 5G 핵심망의 경우, 네트워크 요소가 아닌 네트워크의 기능 별로 정의가 되며 클라우드 플랫폼을 기반으로 virtualized network function (VNF)의 형태로 구성된다.

또한 AMF, SMF, UPF 등 각각의 네트워크 기능들에도 변화가 있으며, 그림 2와 같이 가상화와 Network slicing을 지원하기 위해 LTE EPC에 비해 추가적인 네트워크 기능들, NSSF와 NEF 등이 추가로 정의되었다. 자세한 5G 핵심망의 네트워크 기능 정의는 3GPP TS 23.501에 정의되어 있다^[12].

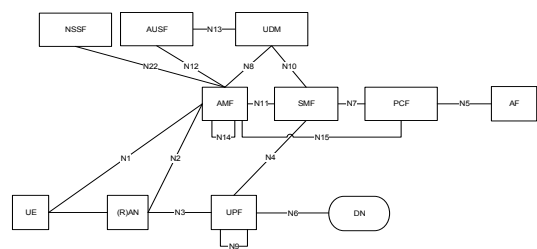


그림 2. 5G 핵심망의 구조
Fig. 2. Architecture of 5G Core

III. 5G K-SimNet

5G K-SimNet은 ns-3^[5]를 기반으로 개발되었다. ns-3는 discrete-event network simulator 로 기본적인 TCP/UDP 전송계층 프로토콜이 개발되어 있고, 4G 시스템의 성능 검증을 위해 LTE와 EPC의 프로토콜 및 인터페이스가 구현되어 있다. 본 연구팀은 기존 ns-3에 이전 장에서 설명한 5G NR, multi-connectivity, SDN/NFV, 5G 핵심망을 ns-3 시뮬레이션 모듈로 추가하였다. 간략히 설명하면, 기존 ns-3에서 제공하는 LTE 프로토콜과 코어망 EPC를 기반으로 위에서 언급한 5G features를 추가하였다. 구현에 대한 자세한 설명은 III-1 섹션에 기술한다.

이 장에서는 5G K-SimNet의 구조, 시뮬레이션을 위한 Scratch code 작성 요령, 마지막으로 시뮬레이션 방법론에 대하여 설명한다.

3.1 시뮬레이터 구조

5G K-SimNet 시뮬레이터의 기본적인 구조와 방법론은 ns-3를 따른다. 이를 그림으로 나타내면 그림 3과 같다.

5G K-SimNet의 구조는 크게 두 부분으로 나눌 수

있다. 그림 3의 Simulation Top, 그리고 그 이하의 소스 코드이다.

소스 코드는 시뮬레이션에 사용될 기능들을 구현한 부분이다. 네트워크 프로토콜 및 채널 모델, SDN/NFV 모듈 등의 구현이 이 부분에 포함된다. 5G K-SimNet의 소스 코드는 기존의 ns-3의 소스 코드를 포함하며 5G 시스템의 시뮬레이션을 위해 추가적으로 5G NR 관련 모듈, multi-connectivity 관련 프로토콜 모듈, SDN 관련 모듈, NFV 관련 모듈이 포함되어 있다. 각각의 모듈은 소스 코드 내에 폴더 별로 정의 및 구현되어 있다. 소스 코드의 직접적인 수정을 원하는 사용자는 여기에서 소스 코드를 수정함으로써 프로토콜 및 모델들을 변경할 수 있다.

Simulation Top은 실제로 시뮬레이션이 동작하는 시뮬레이션 공간이다. 시뮬레이션 공간에는 UE, eNB, gNB, 핵심망 요소 등의 노드가 존재하며 해당 노드들은 소스 코드로부터 각각의 노드가 필요로 하는 모듈 및 프로토콜들을 불러온다. 이렇게 시뮬레이션 노드들이 구성되면 시뮬레이션이 동작하며 사용자는 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있게 된다. Simulation top을 구성하기 위해서는 scratch code를 구성하여야 하는데 이는 다음 절에서 설명하도록 한다.

그림 3을 보면 Simulation top과 소스 코드 사이에 Helper라는 부분이 존재한다. 이 helper는 시뮬레이션 공간에 위치시킬 노드들이 소스 코드의 모듈을 불러올 때, 사용자로 하여금 편의성을 제공하는 역할을 한다. 즉, 사용자가 scratch code를 작성할 때 helper를 활용하여 노드에 프로토콜 및 모듈을 불러올 수 있다.

그림 3의 Channel model 모듈은 NR을 위한 채널 모델 문서^[11]를 바탕으로 구현되었다. Channel model은 크게 path loss 모듈과 fast fading 모듈로 구성되어 있다. 두 모듈 모두 3GPP에서 정의한 다양한 시나리

오를 지원할 수 있다. 특히 path loss 값을 구하기 위해서 gNB와 UE사이의 건물의 유무에 따른 line of sight (LOS) 와 non-LOS (NLOS)를 구분할 수 있다. Fast fading 채널 값은 2D 배열 안테나를 지원할 수 있다. 또한, co-polarized 안테나뿐만 아니라 cross-polarized 안테나를 위한 채널 값을 생성할 수 있다. gNB와 UE의 Antenna모듈은 massive MIMO를 지원하기 위해서 FD-MIMO^[8]를 기반으로 안테나 모델을 구현하였다. 우리는 수평 및 수직 안테나 소자의 숫자를 변수로 설정할 수 있도록 했다. 또한 빔 방향을 수직으로 만들기 위해 transceiver unit (TXRU) 가상화 모델 중 하나인 1D-full connection 모델을 구현하였다. 1D-full connection 모델뿐만 아니라 사용자가 원하는 모델을 추가할 수 있도록 구현되어있다. Multi-connectivity는 TS 37.340^[3] 문서를 기반으로 구현되었다. Multi-connectivity 시뮬레이션을 위해 LTE-NR 듀얼 프로토콜과 SN addition/change와 같은 표준에 근거한 시그널링 절차의 구현이 필요하다. 최초로 multi-connectivity set-up을 위하여 SN addition 절차가 필요한데 [3]의 10.2절에 정의된 절차를 NAS 모듈에 구현하였다. [3]의 4.2절에 정의된 바와 같이 PDCP TX 엔티티의 PDU가 분기되어 MN과 SN의 RLC TX 엔티티로 전달이 된다. 이를 위해 5G NR에서 새로이 정의된 split bearer를 구현하였다. 또한, 단말에서 multi-connectivity를 통한 데이터 송수신을 하기 위하여 LTE-NR 듀얼 프로토콜을 구현하였으며, PDCP RX 엔티티에서 분기된 트래픽이 통합되어 IP 계층으로 전달된다. 이를 위해 3GPP PDCP 표준에 근거하여 sequence numbering과 re-ordering을 구현하였다[13]. 추가적으로 multi-connectivity를 활용한 다중 경로 송수신을 수행할 수 있도록 MN의 PDCP에 traffic management 모듈을 추가 구현하였다. 단말의 이동성이나 채널환경의 변화에 대응하여 SN change의 기능이 지원되어야 하는데 이를 위한 절차는 [3]의 10.4절에 근거하여 NAS에 구현하였다.

OpenFlow 관련 모듈은 ns-3 의 외부 라이브러리인 ofswitch13^[14]을 기반으로 개발되었다. ofswitch13에 포함된 SDN controller 및 SDN switch들이 이동통신 핵심망 모듈 및 가상화 모듈들과 연결되고 동작할 수 있도록 구현하였다. OpenFlow 관련 모듈들을 통해 SDN network를 구성하고 SDN network 내의 traffic을 SDN controller application을 통해 제어하거나 라우팅을 변경할 수 있다. 가상화 관련 모듈은 CloudSim^[15] 시뮬레이터를 참고로 하여 자체 구현하였다. 크게 Configuration, Scaling, Delay 관련 모듈

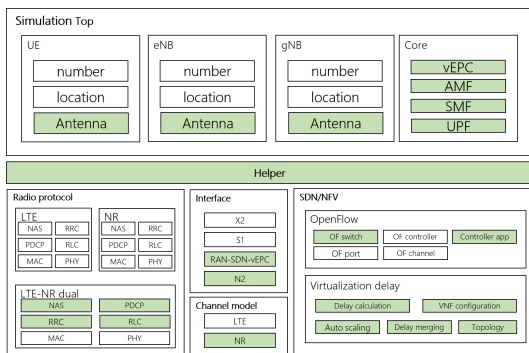


그림 3. 5G K-SimNet의 구조
Fig. 3. Structure of 5G K-SimNet

들로 구성되어 있다. Configuration 모듈은 시뮬레이션 topology와 VNF 관련 정보들을 사용자로부터 입력 받아 시뮬레이션 노드를 배치하고 가상화와 관련된 파라미터들을 시뮬레이션에 적용하는 역할을 한다. Scaling 모듈은 입력 받은 가상화 관련 파라미터인 VNF의 용량 및 부하를 바탕으로 VNF의 scaling in/out 여부를 판단한다. VNF에 걸리는 부하가 용량보다 크면 scaling out을 통해 VNF의 수를 늘려 부하를 처리하고, 반대로 부하가 용량보다 일정 수준 이상 낮을 경우 VNF 수를 줄여 자원을 절감한다. Delay 모듈은 이 때 걸리는 가상화 관련 delay를 계산하고, 이를 UE와 server간의 성능 지표에 적용하는 역할을 한다.

3.2 Scratch code

ns-3는 사용자가 원하는 토폴로지를 구성하고, 노드에 어플리케이션을 설치하여 시뮬레이션을 할 수 있다. 이를 위해서 scratch 폴더 아래에 실행 코드를 작성해야 한다. 코드의 순서는 다음과 같다.

- 파라미터 설정: 다양한 시뮬레이션을 할 때 필요한 입력 파라미터를 선언하고 설정하는 부분이다. 예를 들어, 어플리케이션의 패킷 생성 속도, 전송계층의 프로토콜 선택 등이 있다.
- 토폴로지 설정: 이 부분에서는 기지국과 단말의 초기 위치를 설정하고, 단말의 이동 경로를 설정할 수 있다. 또한 서버, 코어네트워크, 기지국까지 연결을 설정하고, IP를 할당한다.
- 프로토콜 설치: ns-3에서는 특정 노드에 프로토콜을

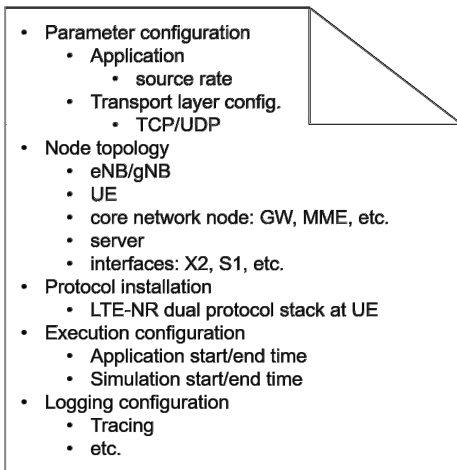


그림 4. 스크래치 코드의 구성
Fig. 4. Structure of scratch code

설치할 때, helper라는 클래스를 이용한다. 이 부분에서는 mmWaveHelper 클래스를 이용해서 단말과 기지국의 프로토콜을 설치하게 된다. 또한 단말과 기지국의 연결도 맺게 된다.

- 실행 설정: 단말 또는 기지국에 사용자가 원하는 어플리케이션을 설치한다. 어플리케이션의 시작 및 종료 시간을 설정하고, 시뮬레이션의 시작 및 종료 시간도 설정한다.
- 로그 설정: 로그 메시지 출력을 위한 설정을 할 수 있다.

3.3 시뮬레이션 방법론

시뮬레이션은 이전 장에서 설명한 스크래치 코드 실행을 통해 수행되는데 그림 5에 표현된 블록도와 같이 진행된다. 먼저 Topology Definition 단계에서 시뮬레이션 시나리오를 구성하는 서버, 기지국, 단말과 같은 네트워크 노드를 정의하고 배치한다. Model 단계에서는 각 네트워크 노드에 프로토콜을 설치하고 각 네트워크 노드 간 인터페이스를 정의한다. 예를 들면 eNB에는 단말과의 통신을 위한 LTE 프로토콜과 핵심망과 통신을 위한 GTP 프로토콜이 설치되고, gNB에는 NR 프로토콜이 설치된다. UE에는 eNB/gNB와 동시에 연결되어 데이터를 받기 위해 LTE-NR 듀얼 프로토콜이 설치된다. 여기서 eNB와 gNB는 X2 인터페이스로 연결되고 eNB와 serving gateway는 S1 인터페이스로 연결된다. Configuration 단계에서는 채널 모델, 단말의 이동성 모델, 각 계층에 해당하는 파라미터 설정 등을 수행한다. 예를 들면 3GPP에서 정의한 채널 모델과 뉴욕주립대학교에서 개발한 채널 모델을 선택적으로 사용할 수 있다. 또한, PDCP 재정렬을 위한 타이머 설정, RLC 버퍼 크기 등을 설정할 수 있다. Execution 단계에서는 이전 단계에서 정의된 설정을 바탕으로 시뮬레이션이 수행된다. 시뮬레이션 중에 원하는 성능 지표나 특정 계층의 로그를 저장할 수 있다. 로그는 텍스트 파일이나 Wireshark 파일로 저장할 수 있다. Output Analysis 단계에서는 추출된 로그를 바탕으로 결과 분석을 수

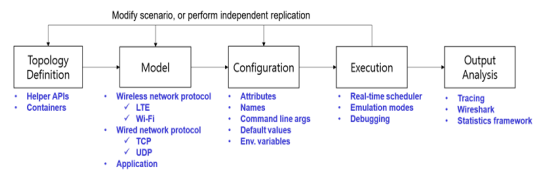


그림 5. 시뮬레이션 방법론
Fig. 5. Simulation methodology

행한다.

IV. 시뮬레이션 결과

이 장에서는 5G K-SimNet을 이용하여 2가지 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과를 설명한다. 첫 번째는 Multi-connectivity 환경에서 NR handover 시나리오, 두 번째는 NFV를 활용한 핵심망의 scaling in/out 시나리오이다.

4.1 SN Change in Multi-Connectivity

5G K-SimNet을 활용한 시뮬레이션 결과는 연구 결과 [6] 과 [7]에서도 확인할 수 있는데 LTE-NR multi-connectivity의 setup 과정과 트래픽 분할 알고리즘의 성능을 볼 수 있다. 이 논문에서는 단말이 움직이지 않는 정적인 시나리오를 다뤘던 이전 연구 결과와 달리 단말의 이동성을 고려한 Multi-connectivity에서 SN change 를 보여주하고자 한다. 이를 위해 [3]에 정의된 SN change 시그널링 절차를 설계하고 구현하였는데 그림 6과 같다. MN에서 SN change triggering 알고리즘을 바탕으로 SN change 절차를 시작한다. 먼저 MN에서 Source-SN (S-SN)으로 SN change request 메시지를 보낸다. 이 메시지에는 Target-SN (T-SN)에 대한 정보와 UE에 대한 정보가 포함되어 있다. SN change request 메시지를 받은 S-SN은 T-SN으로 SN change request 메시지를 보낸다. S-SN에서 T-SN으로 보낸 SN change request 메시지에는 MN에 대한 정보와 UE에 대한 정보가 포함되어 있다. SN change request 메시지를 받은 T-SN은 MN과 S-SN에 SN change request ACK 메시지를 보낸다. 이후 S-SN은 UE와 연결을 해제하고 남은 데이터를 T-SN으로 전달한다. MN은 UE에게 RRC connection reconfiguration 메시지를 보내고, 이를 바탕으로 UE는 T-SN과 연결을 형성하게 된다. 마지막으로 UE가 MN으로 RRC connection reconfiguration completed

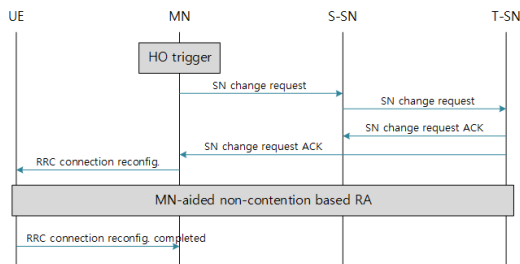


그림 6. SN Change 시그널링 절차 다이어그램
Fig. 6. Signaling procedure diagram of SN Change

메시지를 보내면 SN change 절차는 마무리 된다.

그림 7은 이동성 실험 시나리오를 보여준다. 여기서 eNB가 MN, gNB가 SN으로 배치된다. 그림 8은 UE의 이동에 따른 UE와 SN간 SINR을 나타낸다. UE의 이동으로 인해 시간에 따라 SINR이 가장 높은 SN이 다름을 알 수 있다. 이 실험에서는 SINR-based

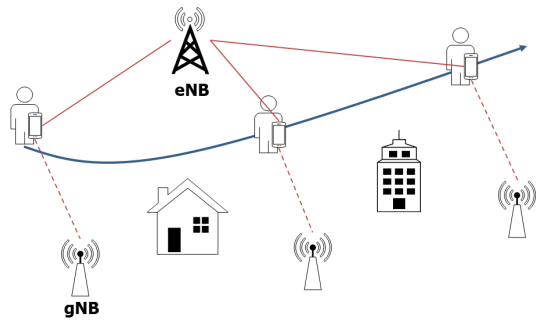


그림 7. 이동성 실험 시나리오
Fig. 7. Scenario for evaluating NR handover based on UE mobility

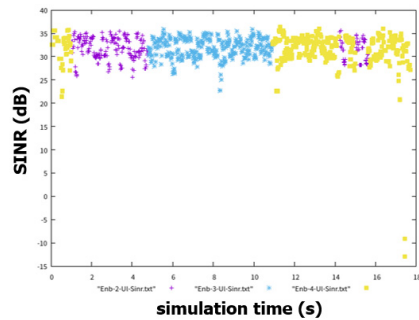


그림 8. 이동에 따른 UE-gNB SINR 변화
Fig. 8. SINR variation between UE and gNBs versus simulation time

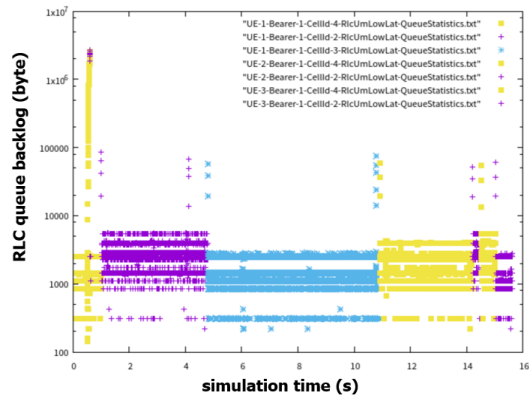


그림 9. gNB의 RLC 버퍼 백로그
Fig. 9. RLC queue backlog of gNBs

표 1. NR handover 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters of NR handover scenario.

Parameter	Value
Data rate	300Mbps
Transport layer protocol	UDP
RLC mode	RLC UM
LTE bandwidth	20MHz
NR bandwidth	1GHz
NR centerfrequency	28GHz
SN change triggering algorithm	SINR-based

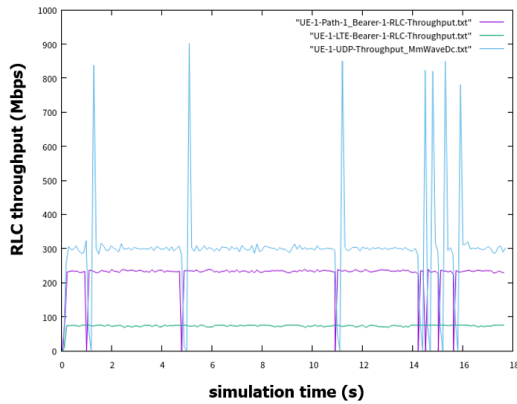


그림 10. 경로 별 RLC 수율
Fig. 10. Per-path RLC throughput

handover 알고리즘을 사용하는데 UE는 이동함에 따라 SINR이 가장 높은 gNB로 SN change 하게 된다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 1에 정리한다.

SN change가 잘 되었는지 확인하기 위해 각 SN의 시간에 따른 버퍼의 양과 UE에서 받은 RLC 데이터의 수율을 분석하였다. 그림 9는 각 SN의 RLC queue backlog를 보여주는데 그림 8의 SINR 변화와 거의 일치함을 확인할 수 있다. 이는 SN change가 잘 수행되었음을 보여준다. 마지막으로 그림 10은 UE의 RLC throughput을 보여주는데 SN change가 잘 수행되어 데이터 서비스를 잘 받고 있음을 알 수 있다.

4.2 NFV를 활용한 핵심망의 Scaling in/out

NFV 기능을 활용하는 대표적인 시나리오 중 하나인 네트워크 기능의 scaling in/out이 5G 핵심망에서 일어났을 때, 사용자 측면의 성능이 어떻게 변화하는가를 RTT를 통해 보고자 하였다¹⁶⁾.

시뮬레이션 환경은 그림 11과 같다. UE는 eNB를 통해 연결되어 있고, 핵심망이 가상화되어 있는 상태

에서 인터넷의 서버로부터 데이터를 받는다. 가상화된 핵심망에서는 네트워크 기능의 용량과 부하에 따라 scaling in/out이 일어난다. 각 네트워크 기능의 용량과 부하는 표 2와 같다.

그림 11과 표 2와 같은 시뮬레이션 환경에서 사용자 가 경험하는 RTT를 그림 12에 그래프로 나타내었다.

왼쪽 그래프가 약한 부하 시나리오이고 오른쪽 그래프가 강한 부하 시나리오이다. 네트워크 기능에 강

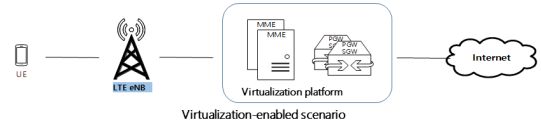


그림 11. NFV 시뮬레이션을 위한 토폴로지 구성
Fig. 11. Topology for NFV simulation

표 2. NFV 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters of NFV

Scenario	Core node	Resource	Capacity	Load
Heavy load	P/S GW	CPU	210(ea)	205
		Mem	916(MB)	910
		Disk	4000(GB)	3200
	MME	Bandwidth	10000(Mbps)	9500
		CPU	200	195
		Mem	512	505
Light load	P/S GW	Disk	3000	1900
		Bandwidth	10000	9500
		CPU	210	170
	MME	Mem	916	860
		Disk	4000	2400
		Bandwidth	10000	9500
Light load	MME	CPU	200	160
		Mem	512	460
		Disk	3000	1300
		Bandwidth	10000	9500

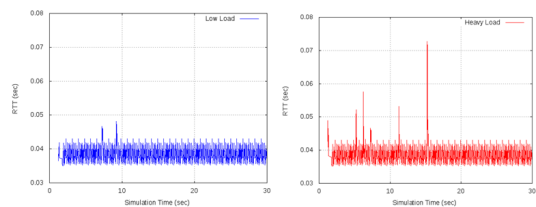


그림 12. NFV 시뮬레이션 결과
Fig. 12. Results of NFV simulation

한 부하가 걸릴 경우, scaling in/out이 빈번하게 발생하게 되어 네트워크 기능들이 패킷을 처리하지 못하는 시간이 발생하게 되고, 이에 따라 사용자의 RTT도 그림 12의 오른쪽 그래프와 같이 순간적으로 높아지는 현상이 발생한다. 반면 네트워크 기능에 걸리는 부하가 약할 경우는 scaling in/out의 빈도가 줄어들고 이에 따라 RTT는 그림 12의 왼쪽과 같이 순간적인 증가가 없게 된다.

V. 결 론

이 논문에서 5G 이동통신 시스템의 중단간 성능 평가를 할 수 있는 5G K-SimNet을 소개하였다. 5G K-SimNet은 5G NR 채널 모델, FD-MIMO, LTE-NR multi-connectivity, SDN/NFV, 5G 핵심망 등의 기능을 포함하고 있다. 시뮬레이터 사용의 접근성 향상을 위해 시뮬레이터의 구조와 스크래치 코드 작성에 대해 설명하였으며, 2가지 시뮬레이션 결과를 예제로 보여 주어 사용자들의 이해를 도왔다.

많은 연구·개발자들의 5G K-SimNet 사용 독려를 위해 최근 국내 여러 학술대회에서 5G K-SimNet 시연을 진행하였으며 추후에는 국제 학술대회에서 선보일 계획이다. 여러 사용자의 피드백과 5G 표준화 진행 상황을 반영하여 시뮬레이터의 지속적인 업데이트도 계획하고 있다.

References

- [1] 3GPP, "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz," 3rd Generation Partnership Project, TR 38.901 V14.0.0, Dec. 2017.
- [2] 3GPP, "Study on Architecture for Next Generation System," 3rd Generation Partnership Project, TR 23.799 V14.0.0, Dec. 2016.
- [3] 3GPP, "Multi-connectivity," 3rd Generation Partnership Project, TS 37.340 V15.0.0, Dec. 2017.
- [4] P. Agyapong, M. Iwamura, D. Staehle, W. Kiess, and A. Benjebbour, "Design considerations for a 5G network architecture," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52 no. 11, pp. 65-75, Nov. 2014.
- [5] ns-3 [online]. Available: <https://www.nsnam.org>
- [6] S. Choi, S. Jung, D. Woo, S. Kang, and S. Bahk, "Network simulator for end-to-end performance evaluation based on 5G standard technology," in *Proc. KICS Summer Conf. 2017*, pp. 144-145, Jeju Island, Korea, Jun. 2017.
- [7] S. Kang, S. Choi, and S. Bahk, "Network simulator for verification and evaluation of mmWave dual connectivity," in *Proc. KICS Winter Conf. 2018*, pp. 356-357, Jeongseon, Korea, Jan. 2018.
- [8] 3GPP, "Study on elevation beamforming / FD-MIMO for LTE," 3rd Generation Partnership Project, TR 36.897 V13.0.0, Jun. 2015.
- [9] 3GPP, "NR; Physical channels and modulation," 3rd Generation Partnership Project, TR 38.211 V15.1.0, Apr. 2018.
- [10] N. Baldo, "The ns-3 LTE module by the LENA project," 2011.
- [11] M. Zhang, et al., "Transport layer performance in 5G mmWave cellular," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pp. 730-735, Apr. 2016.
- [12] 3GPP, "System architecture for the 5G system," 3rd Generation Partnership Project, TS 23.501 V15.1.0., Mar. 2018.
- [13] 3GPP, "Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification," 3rd Generation Partnership Project, TS 36.323 V14.2.0, Mar. 2017.
- [14] ofswitch13 [online]. Available: <http://www.lrc.ic.unicamp.br/ofswitch13>
- [15] CloudSim [online]. Available: <http://www.cloudbus.org/cloudsim>
- [16] H. Lee, J. Song, and Ted T. Kwon, "Development of cellular core network enabling network function virtualization," in *Proc. JCCI 2018*, Yeosu, Korea, May 2018.

최 시 영 (Siyoung Choi)



2011년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학부 졸업
2013년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학부 석사
2013년 2월~2015년 7월 : 삼성
전자 무선사업부
2016년 3월~현재 : 서울대학교
전기정보공학부 박사과정

<관심분야> 5G 및 B5G 통신 시스템, 통신시스템
분석

권 태 경 (Ted Taekyoung Kwon)



1993년 : 서울대학교 공학사
1995년 : 서울대학교 공학석사
2000년 : 서울대학교 공학박사
2004년~현재 : 서울대학교 컴퓨
터공학부 교수
<관심분야> 센서네트워크, 멀
티미디어 스트리밍, 무선통
신기술융합, 모바일 컴퓨팅, 인터넷 보안

송 정 환 (Junghwan Song)



2012년 2월 : 고려대학교 정보
통신대학 졸업
2012년 3월~현재 : 서울대학교
컴퓨터공학부 석박사통합과
정
<관심분야> 5G 핵심망, NFV,
ICN, Congestion control

최 성 현 (Sunghyun Choi)



1992년 : KAIST 전기전자공학
과 공학사
1994년 : KAIST 전기전자공학
과 공학석사
1999년 : 미시간대학교 대학원
전기컴퓨터공학 박사
1999년~2002년 : 미국 필립스 연
구소 연구원

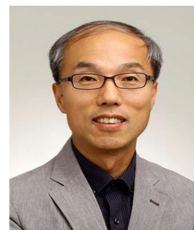
2002년~현재 : 서울대학교 전기정보공학부 교수
<관심분야> 4G/5G Wireless, 차세대 IEEE 802.11
무선랜, 음파통신

김 준 석 (Junseok Kim)



2011년 2월 : 중앙대학교 전자
전기공학부 졸업
2014년 3월~현재 : 서울대학교
전기정보공학부 석박사통합
과정
<관심분야> 5G 및 B5G 통신
시스템, Self Organizing
Network (SON)

박 세 응 (Saewoong Bahk)



1984년 : 서울대학교 공학사
1986년 : 서울대학교 공학석사
1991년 : University of Penn
sylvania 공학박사
1991년~1994년 : AT&T Bell
Lab. 연구원
1994년~현재 : 서울대학교 전기
정보공학부 교수

<관심분야> 스마트그리드, 통신시스템 분석, 네트워
크 보안, 5G

강 성 준 (Seongjoon Kang)



2017년 2월 : 서울대학교 전기
정보공학부 졸업
2017년 3월~현재 : 서울대학교
전기정보공학부 석사과정
<관심분야> 5G 및 B5G 통신
시스템