

SDN 기반 전송망 통합을 위한 6G 모바일 네트워크 구조 설계 및 구현

남대현*, 김응수, 조효준, 문수빈, 조용진, 전형준, 이재욱

국립부경대학교 정보통신공학전공

(namdh01*, oloae, dhkdlfemqh, subin23, whdydwls77, jun04292569)@pukyong.ac.kr, jlee0315@pknu.ac.kr

Design and Implementation of 6G Mobile Network Architecture for SDN-based Transport Network Integration

Daehyeon Nam*, Eungsu Kim, Hyojun Jo, Subin Moon, Yongjin Jo, Hyeongjun Jeon, Jaewook Lee

Dept Information and Communications Eng., Pukyong National University

요약

본 논문은 5G-Advanced/6G 시대의 전송망 고도화 요구에 대비하여, 5G 코어 네트워크와 SDN 기반 전송망을 통합한 테스트베드를 설계·구현하였다. 제안 구조는 코어 구간의 사용자 평면 트래픽을 전송망으로 연동하기 위해 GTP 기반 터널 종단과 라우팅 구성을 포함하며, 전송망 구간에서는 OpenFlow 기반 경로 제어가 가능하도록 구성하였다. 가상화 환경에서 단말 등록 및 PDU 세션 수립을 확인하고, End-to-End 데이터 전송 실험을 통해 통합 구조의 정상 동작과 실현 가능성을 검증하였다.

I. 서 론

현재 5G 코어 네트워크는 GTP 터널링을 통해 논리적 경로를 관리하고 있으며, 이는 전송망의 물리적 경로와 분리되어 운영되고 있다.[1] ITU는 6G 네트워크의 비전과 요구사항을 정의하고 있고[2], 차세대 네트워크에서는 URLLC 등 저지연·고신뢰 서비스 요구가 강화되고 있다. 관련 연구에서는 1ms 수준의 지연과 99.999% 신뢰도 목표가 논의되고 있으며[3], 이러한 요구를 충족하기 위해 무선 구간뿐 아니라 전송망의 성능 향상도 필요하다. 또한 5G 백홀 네트워크는 소규모 셀의 고밀도 배치와 수백 Gbps급 트래픽 처리를 위해 높은 용량, 낮은 지연, 비용 효율적인 확장성이 동시에 요구되고 있다.[4] 따라서 증가하는 트래픽과 다양한 서비스 요구사항을 효율적으로 처리하기 위해서는 코어 네트워크와 전송망 간의 통합적 연동이 필요하다.

이러한 배경에서 SDN 기술은 제어 평면과 데이터 평면을 분리하여 중앙 집중식 제어를 가능하게 한다.[5] 또한 OpenFlow 프로토콜을 통해 스위치의 플로우 테이블을 중앙에서 제어할 수 있다.[6] 본 논문에서는 SDN 기반 전송망 제어를 5G 코어 네트워크와 연동하는 통합 구조를 설계하고, 오픈소스 플랫폼(Open5GS, UERANSIM, ONOS, Mininet)을 활용한 테스트베드 구현을 통해 실현 가능성성을 제시한다.

II. 테스트베드구성

제안하는 통합 네트워크 구조는 그림 1과 같이 5개의 가상머신(Ubuntu 20.04, VirtualBox 7.0)으로 구성된다. VM1(10.56.0.11)은 UERANSIM을 사용하여 UE로 동작하고, VM2(10.56.0.10)는 gNB로 동작한다. VM3(10.56.0.254, 10.57.0.254)는 L3 라우터 및 Mininet 기반 네트워크 어플레이터로, UE/gNB 구간(10.56.0.0/24)과 Core 구간(10.57.0.0/24)을 연결하며 구간별 네트워크 자연 특성을 부여할 수 있다. VM4(10.57.0.10)는 Open5GS 기반 5G 코어 네트워크를 담당하고, VM5(10.57.0.11, 10.58.0.254)는 ONOS 컨트롤러(10.57.0.11:6653)와 Mininet 기반 백홀 토폴로지를 구동하며 물질적 네트워크(10.58.0.0/24)와 연결된다.

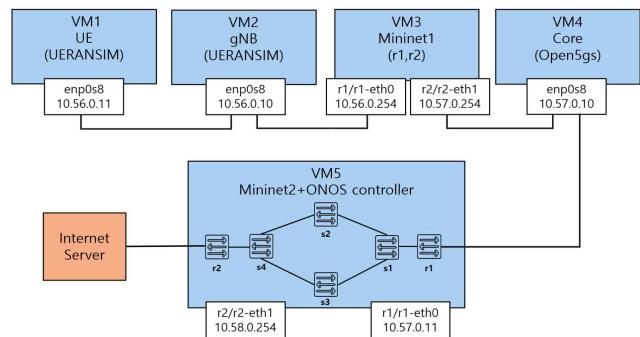


그림 1. 테스트베드 구성도

데이터 흐름은 UE에서 시작하여 gNB를 거쳐 VM3 네트워크 에뮬레이터를 통과한 후 5G 코어의 UPF에 도달한다. gNB와 UPF 간 트래픽은 GTP 터널로 캡슐화되며, UPF의 ogstun 인터페이스에서 터널이 종료되고 내부 IP 패킷이 추출된다. 추출된 패킷은 VM5로 전달되어 다이아몬드 구조의 SDN 백홀 토플로지(s1-s4)를 거쳐 최종 목적지로 전달된다. SDN 백홀의 각 스위치는 ONOS 컨트롤러에 연결되어 동적 경로 제어가 가능하다. 그림 2는 ONOS 웹 인터페이스를 통해 확인한 백홀 토플로지를 나타내며, 4개의 스위치가 다이아몬드 구조로 연결되어 있음을 확인할 수 있다. 이러한 구조는 다중 경로를 제공하여 트래픽 분산 및 동적 경로 제어를 지원한다.



그림 2. ONOS 백홀 토플로지

III. 소프트웨어 구성 및 통합 연동 설정

Open5GS는 3GPP Release 16 기반 5G 코어로 구성되며, PLMN 999/70, DNN internet으로 설정하였고, UE 가입자 정보는 Open5GS WebUI를 통해 사전 등록하였다. UERANSIM은 3GPP 표준을 준수하는 UE 및 gNB 시뮬레이터로서 Open5GS와 연동하여 동작한다. ONOS는 fwd 및 openflow 앱을 활성화하여 스위치 관리 및 플로우 설치 기능을 제공하며, 백홀 구간의 제어 평면을 담당한다. VM5의 Mininet은 4개의 OpenFlow 스위치를 생성하여 ONOS 컨트롤러에 OpenFlow 1.3 프로토콜로 연결된다.

VM 간 연결은 VirtualBox 내부 네트워크 구성으로 통해 외부 네트워크와 격리된 독립 테스트 환경을 제공한다. 또한 구간 간 통신을 위해 각 VM에 정적 라우팅을 설정하고, VM3와 VM5에서는 IP 포워딩을 활성화하여 패킷 중계 기능이 동작하도록 구성하였다. 정적 라우팅은 10.56.0.0/24, 10.57.0.0/24, 10.58.0.0/24 대역 간 경로를 명시하는 방식으로 적용되었다.

IV. 동작 검증

```
nam@nam-VirtualBox:~$ ping -I uesimtun0 10.58.0.254
PING 10.58.0.254 (10.58.0.254) 10.45.0.5 uesimtun0 에서: 56(84) bytes of data.
64 바이트 (10.58.0.254에서): icmp_seq=1 ttl=62 시간=14.2 ms
64 바이트 (10.58.0.254에서): icmp_seq=2 ttl=62 시간=6.60 ms
64 바이트 (10.58.0.254에서): icmp_seq=3 ttl=62 시간=3.25 ms
^C
--- 10.58.0.254 Ping 통계 ---
3 패킷이 전송되었습니다, 3 수신되었습니다, 0% 패킷 손실, 시간 2005ms
rtt 최소/평균/최대/표준편차 = 3.247/8.030/14.247/4.603 ms
```

그림 3. Ping 기반 End-to-End 연결 검증

구축한 테스트 베드의 동작을 검증하기 위해 Open5GS에 사전 등록된 UERANSIM UE를 구동하여 5G 코어 접속을 수행하였다. 인증 및 PDU 세션 수립을 통해 UE에 사용자 평면 IP 주소(10.45.0.5)가 할당되었으며, 데이터 평면 경로가 설정되었다. 목적지 서버로 ping 테스트 결과, 그림 3과 같이 5G 코어와 SDN 백홀을 경유한 패킷이 손실 없이 정상 응답하여 End-to-End 전송이 정상 동작함을 확인하였다.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
20	4.011231218	10.45.0.4	10.58.0.254	ICMP	98	Echo (ping) request
21	4.011231181	10.58.0.254	10.45.0.4	ICMP	98	Echo (ping) reply
22	4.0112311964	10.58.0.254	10.45.0.4	GTP <1..	142	Echo (ping) reply
23	5.013266633	10.45.0.4	10.58.0.254	GTP <1..	142	Echo (ping) request
24	5.013384628	10.45.0.4	10.58.0.254	ICMP	98	Echo (ping) request

Frame 3: 142 bytes on wire (1136 bits), 142 bytes captured (1136 bits) on interface enp0s8, id 9
Ethernet II, Src: PcsCompu_79:at:74 (08:90:27:78:af:74), Dst: PcsCompu_4b:84:95 (08:00:27:4b:84:95)
Internet Protocol Version 4, Src: 10.56.0.10, Dst: 10.57.0.10
User Datagram Protocol, Src Port: 2152, Dst Port: 2152
GPRS Tunneling Protocol

Flags: 0x34
Message type: T-PDU (0xff)
Length: 92
TEID: 0x0000e0dd (59606)
Next extension header type: PDU Session container (0x85)
Extension header
Internet Protocol Version 4, Src: 10.45.0.4, Dst: 10.58.0.254
Internet Control Message Protocol

그림 4-1. gNB-UPF 구간 GTP 캡슐화 패킷 분석 결과

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
20	9.021605756	10.58.0.254	10.45.0.4	ICMP	84	Echo (ping) reply
21	10.024786437	10.45.0.4	10.58.0.254	ICMP	84	Echo (ping) request
22	10.025885695	10.58.0.254	10.45.0.4	ICMP	84	Echo (ping) reply
23	11.025608363	10.45.0.4	10.58.0.254	ICMP	84	Echo (ping) request
24	11.026326672	10.58.0.254	10.45.0.4	ICMP	84	Echo (ping) reply

Frame 1: 84 bytes on wire (672 bits), 84 bytes captured (672 bits) on interface ogstun, id 8
Raw packet data
Internet Protocol Version 4, Src: 10.45.0.4, Dst: 10.58.0.254
Internet Control Message Protocol

그림 4-2. UPF ogstun 인터페이스 터널 종료 패킷 분석 결과

패킷 흐름의 상세 검증을 위해 Wireshark를 통한 패킷 캡처를 수행하였다. 그림 4-1은 N3 인터페이스(gNB-UPF 구간)에서 캡처한 결과로, GTP-U 프로토콜로 캡슐화된 패킷과 TEID를 통한 터널 식별을 보여준다. 그림 4-2는 UPF의 ogstun 인터페이스에서 캡처한 결과로, GTP 헤더가 제거된 순수 IP 패킷만 관찰되어 터널 종료를 확인할 수 있다. 이를 통해 5G 코어에서 SDN 백홀로의 트래픽 전달이 정상적으로 동작함을 검증하였다.

V. 결론

본 논문에서는 5G-Advanced/6G 시대를 대비하여 5G 코어 네트워크와 SDN 기반 전송망을 통합한 구조를 설계하고 오픈소스 기반 테스트베드로 구현하였다. Open5GS, UERANSIM, ONOS, Mininet을 활용하여 5개 VM으로 구성된 통합 환경을 구축하였으며, GTP 터널 종단, 계층적 라우팅, OpenFlow 기반 경로 제어를 통해 5G 코어와 SDN 백홀의 연동을 실현하였다. 또한 UE 등록 및 PDU 세션 수립과 End-to-End 데이터 전송 실험을 통해 제안 구조의 정상 동작이 검증되었다. 본 연구는 오픈소스만으로 코어-전송망 통합 구조의 실현 가능성을 입증하였으며, 차세대 네트워크의 전송망 연구 기반을 제공할 것으로 기대된다.

향후 연구로는 상용 5G 장비와의 연동, 대규모 네트워크 환경으로의 확장, 그리고 전송망 상태 기반 동적 경로 최적화 메커니즘 개발을 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. RS-2025-00558169)

참고 문헌

- [1] 3GPP, "System Architecture for the 5G System (5GS)," 3GPP TS 23.501 (Release 17), V17.5.0, Jul. 2022.
- [2] ITU-R, "Framework and overall objectives of the future development of IMT-2030," Recommendation ITU-R M.2160-0, Nov. 2023.
- [3] 3GPP, "Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies," 3GPP TR 38.913 (Release 18), V18.0.0, May 2024.
- [4] H. Saarnisaari et al., "Wireless Terrestrial Backhaul for 6G Remote Access," Frontiers in Communications and Networks, vol. 2, Article 710781, 2021.
- [5] Open Networking Foundation (ONF), "SDN Architecture," ONF TR-521, Issue 1.1, 2016.
- [6] Open Networking Foundation (ONF), "OpenFlow Switch Specification," Version 1.3.0, 2012.