

5G 환경을 위한 eBPF 기반 관측 시스템 설계 및 구현

윤석민¹, 김채호², 남재현³

¹단국대학교 컴퓨터공학과 학부생

²단국대학교 인공지능융합학과 석사과정

³단국대학교 컴퓨터공학과 교수

ysm3221@dankook.ac.kr, boanchkim@dankook.ac.kr, namjh@dankook.ac.kr

eBPF-based Observability System for 5G Networks

Seok-Min Yoon¹, Chaeho Kim², Jaehyun Nam³

¹Dept. of Computer Engineering, Dankook University (Undergraduate Student)

²Dept. of AI-based Convergence, Dankook University (Graduate Student)

³Dept. of Computer Engineering, Dankook University (Professor)

요약

5G 코어 네트워크는 컨테이너 기반 마이크로서비스 아키텍처와 쿠버네티스 오케스트레이션을 통해 유연하고 확장 가능한 구조를 구현하였다. 그러나 멀티 클러스터 및 Multus CNI 기반의 다중 인터페이스 환경에서는 NGAP, PFCP, GTP-U 와 같은 5G 특화 프로토콜이 복합적으로 운용되며, 종단 간 트래픽을 효과적으로 관측하기 어렵다. 기존의 사이드카 기반 서비스 메시 솔루션은 HTTP 트래픽 중심으로 설계되어 이러한 구조를 충분히 지원하지 못하는 한계가 있다. 본 연구에서는 eBPF 를 활용하여 NGAP, PFCP, GTP-U 를 포함한 모든 인터페이스의 5G 트래픽을 실시간으로 추적할 수 있는 관측 시스템을 제안하고, free5GC 기반 실험을 통해 그 효과를 검증하였다.

1. 서론

5G 코어 네트워크는 마이크로서비스 아키텍처를 기반으로 각 네트워크 기능(NF)을 컨테이너 단위로 분리하고, 쿠버네티스(Kubernetes)를 통해 탄력적인 확장성과 자동화된 배포 및 운영을 실현하고 있다. 이러한 클라우드 네이티브 접근은 네트워크 구성 요소의 유연한 관리를 가능하게 하지만, 동시에 다양한 인터페이스와 프로토콜이 복합적으로 상호작용하는 구조로 인해 종단 간 관측이 더 어려워지고 있다.

특히 멀티 클러스터 환경에서 Multus CNI 등을 활용해 여러 네트워크 인터페이스를 병행 운영하는 사례가 증가함에 따라, 기존의 쿠버네티스 및 서비스 메시 기반 관측 솔루션의 한계가 뚜렷하게 나타나고 있다. 사이드카 방식의 서비스 메시 솔루션은 주로 HTTP(S) 기반 트래픽을 대상으로 설계되어 있어 [1], 5G 네트워크에서 핵심적으로 사용되는 NGAP, PFCP, GTP-U 와 같은 프로토콜을 효과적으로 다루기 어렵다. 루프백 인터페이스나 멀티 NIC 구조를 포함하는 복잡한 네트워크 토플로지에 대한 지원도 제한적이어서, 전체 세션 흐름을 정밀하게 추적하기 어렵다.

본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 eBPF(extended Berkeley Packet Filter)를 기반으로 하는

관측 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 NGAP, GTP-U, PFCP 등 5G 특화 프로토콜을 실시간으로 관측할 수 있으며, 멀티 클러스터 및 멀티 인터페이스 환경에서 발생하는 다양한 5G 트래픽을 종단 간으로 추적할 수 있는 구조를 제공한다.

2. 주요 5G 네트워크 프로토콜

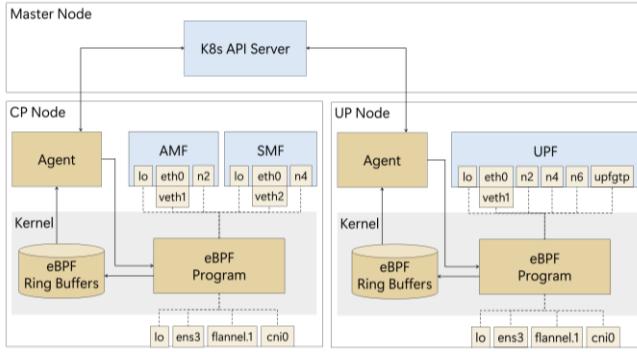
NGAP(NG Application Protocol)은 AMF(Access and Mobility Management Function)와 gNB(기지국) 간 N2 인터페이스에서 사용되는 신호 프로토콜이다 [2]. UE(사용자 단말)의 등록, 세션 설정, 핸드오버 등 핵심 절차가 NGAP 를 통해 처리되며, 접근 네트워크와 코어 네트워크 사이의 시그널링 연동이 이루어진다. 이 프로토콜은 기지국과 코어망의 통합 운영에 중요한 역할을 담당한다.

GTP-U(GPRS Tunneling Protocol - User Plane)는 사용자 평면 트래픽을 캡슐화하기 위한 프로토콜로, gNB 와 UPF(User Plane Function) 간, 또는 UPF 간 N3 인터페이스에서 사용된다 [3]. UE에서 발생한 IP 패킷은 GTP-U 를 통해 터널링되어 코어망을 지나는 구조를 취하며, TEID(Tunnel Endpoint Identifier)를 사용하여 각 트래픽 흐름을 구분한다. 이로써 고속 데이터 처리와 무선망-코어망 간 트래픽 분리를 가능하게 한다.

PFCP(Packet Forwarding Control Protocol)는 SMF (Session Management Function)와 UPF 간 N4 인터페이

스에서 사용되는 제어 프로토콜이다 [4]. UPF에 대한 트래픽 분류, QoS 정책 설정, 포워딩 규칙 적용 등을 담당하며, 5G 코어 네트워크에서 사용자 세션을 생성, 삭제, 수정하는 절차 전반을 제어한다. PFCP는 제어 평면과 사용자 평면의 분리 구조를 구현하기 위한 필수 요소로 인식되고 있다.

3. eBPF 기반 관측 시스템 설계



(그림 1) 제안 시스템 전체 구조

본 시스템은 쿠버네티스 클러스터와 통합되며, 멀티 클러스터 및 Multus CNI 환경을 지원한다. (그림 1)에 나타낸 바와 같이, 각 노드에 데몬셋 형태로 배포되는 사용자 공간의 에이전트와 커널 공간의 eBPF 프로그램으로 구성된다. 에이전트는 쿠버네티스 API 서버로부터 노드 및 파드 정보 수집하고, 이를 바탕으로 멀티 인터페이스 정보도 수집한다. 커널 공간에서는 각 인터페이스에 로드된 eBPF 프로그램이 TC(Traffic Control) 계층에서 동작하며, NGAP, GTP-U, PFCP 등의 패킷을 분석하고, 링 버퍼를 통해 사용자 공간 에어전트로 데이터를 전달한다. 이러한 구조는 사이드카리스(Sidecar-less) 환경에서도 모든 인터페이스 트래픽과 5G 특화 프로토콜 트래픽까지 포괄하는 고도화된 관측이 가능해진다.

4. 실험 및 결과

실험은 쿠버네티스 환경에서 free5GC 를 배포하여 CP(Control Plane), UP(User Plane), AN(Access Network) 노드로 구성된 5G 코어망을 시뮬레이션하였으며, CP 노드에는 16 vCPU 와 16GB 메모리를, 나머지 노드에는 각각 8 vCPU 와 8GB 메모리를 할당하고 Multus CNI 를 적용하였다.

실험은 UE 등록 절차를 기반으로 진행하였다. 우선, UE 가 5G 코어망에 접속하면서 AMF 와 gNB 간 NGAP 시그널링 교환이 이루어지고, NAS 메시지와 함께 PDU 세션 설정 절차가 순차적으로 진행된다. 이때 제안된 eBPF 관측 시스템이 NGAP 트래픽을 정상적으로 캡처하는지를 확인하였다 (그림 2).

(그림 3) PFCP 및 GTP-U 프로토콜 관측 로그

이후 PFCP 메시지를 통해 PDU 세션 생성, 수정, 삭제 등 다양한 시나리오를 시뮬레이션하였으며, eBPF 가 해당 메시지를 실시간으로 필터링하고 분석 할 수 있음을 관찰하였다 (그림 3). 마지막으로 UE 가 외부 네트워크(예: google.com)에 ICMP 메시지를 전송 할 때 생성되는 GTP-U 터널링 트래픽을 추적하였다. 그 결과, 사용자가 전송하는 IP 패킷이 GTP-U 헤더에 캡슐화되어 UPF 를 통해 인터넷으로 전달되는 과정을 종단 간으로 추적하는 데 성공하였다.

5. 결론

본 논문에서는 멀티 클러스터와 Multus CNI 등으로 복잡해진 5G 코어 환경에서, 기존 관측 솔루션의 한계를 극복하기 위해 eBPF 기반 관측 시스템을 제안하였으며, 실험을 통해 NGAP, PFCP, GTP-U 등 5G 특화 프로토콜에 대한 실시간 모니터링과 루프백 인터페이스를 포함한 모든 트래픽을 효과적으로 추적할 수 있음을 확인하였다. 향후에는 지원 프로토콜 확대와 메시지 상관관계 분석 기능을 추가하여, 대규모 환경에서도 다양한 5G 절차를 실시간으로 추적할 수 있는 시스템으로 발전시키고자 한다.

Acknowledgement

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. RS-2024-00398379, (총괄 4-세부 2) 텔 쿠용 고성능/고가용성 6G 크로스-클라우드 인프라 기술개발)

참고문헌

- [1] E. Song, et al., “Canal Mesh: A Cloud-Scale Sidecar-Free Multi-Tenant Service Mesh Architecture.”, SIGCOMM, ACM, 2024.
 - [2] ETSI, “3GPP, NG-RAN; NG Application Protocol (ETSI TS 138 413 V16.7.0)”, 2021.
 - [3] ETSI, “3GPP, GPRS; Tunnelling Protocol User Plane (ETSI TS 129 281 V17.2.0)”, 2022.
 - [4] ETSI, “3GPP, Interface between the Control Plane and the User Plane nodes (ETSI TS 129 244 V16.5.0)”, 2020.

(그림 2) NGAP 프로토콜 관측 로그