

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)

요 약

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-U와 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 eBPF를 활용하여 NGAP, PFCP, GTP-U를 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 활용하여 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-U와 같은 프로토콜을 효과적으로 다루기 어렵다. 루프백 인터페이스나 멀티 NIC 구조를 포함하는 복잡한 네트워크 토폴로지에 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

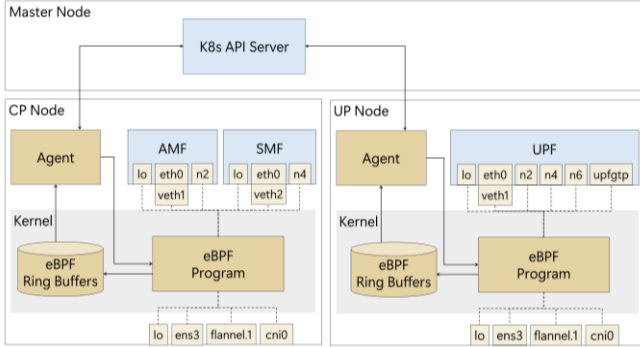
NGAP(NG Application Protocol)은 AMF(Access and Mobility Management Function)와 gNB(기지국) 간 N2 인터페이스에서 사용되는 신호 프로토콜이다 [2]. UE(사용자 단말)의 등록, 세션 설정, 핸드오버 등 핵심 절차가 NGAP를 통해 처리되며, 접근 네트워크와 코어 네트워크 사이의 시그널링 연동이 이루어진다. 이 프로토콜은 기지국과 코어망의 통합 운영에 중요한 역할을 담당한다.

GTP-U(GPRS Tunneling Protocol - User Plane)는 사용자 평면 트래픽을 캡슐화하기 위한 프로토콜로, gNB와 UPF(User Plane Function) 간, 또는 UPF 간 N3 인터페이스에서 사용된다 [3]. UE에서 발생한 IP 패킷은 GTP-U를 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]. UPF 에 대한 트래픽 분류, QoS 정책 설정, 포워딩 규칙 적용 등을 담당하며, 5G 코어 네트워크에서 사용자 세션을 생성, 삭제, 수정하는 절차 전반을 제어한다. PFCP 는 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 나타난 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 에이전트로 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.

```

2025/04/06 03:50:42 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.250:34712, Dst: 10.100.50.248:3222, Length: 134, ProcedureCode: NGSetup]
2025/04/06 03:50:42 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.250:34712, Dst: 10.100.50.248:3222, Length: 134, ProcedureCode: NGSetup]
2025/04/06 03:50:42 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.248:3222, Dst: 10.100.50.250:34712, Length: 118, ProcedureCode: NGSetup]
2025/04/06 03:50:42 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.248:3222, Dst: 10.100.50.250:34712, Length: 118, ProcedureCode: NGSetup]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.250:34712, Dst: 10.100.50.248:3222, Length: 138, ProcedureCode: InitialUEMessage]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.250:34712, Dst: 10.100.50.248:3222, Length: 138, ProcedureCode: InitialUEMessage]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.248:3222, Dst: 10.100.50.250:34712, Length: 146, ProcedureCode: DownlinkNASTransport]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.248:3222, Dst: 10.100.50.250:34712, Length: 146, ProcedureCode: DownlinkNASTransport]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.250:34712, Dst: 10.100.50.248:3222, Length: 146, ProcedureCode: UplinkNASTransport]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.250:34712, Dst: 10.100.50.248:3222, Length: 146, ProcedureCode: UplinkNASTransport]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.248:3222, Dst: 10.100.50.250:34712, Length: 126, ProcedureCode: DownlinkNASTransport]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.248:3222, Dst: 10.100.50.250:34712, Length: 126, ProcedureCode: DownlinkNASTransport]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.250:34712, Dst: 10.100.50.248:3222, Length: 242, ProcedureCode: InitialContextSetup]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.250:34712, Dst: 10.100.50.248:3222, Length: 98, ProcedureCode: InitialContextSetup]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.248:3222, Dst: 10.100.50.250:34712, Length: 242, ProcedureCode: UplinkNASTransport]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.250:34712, Dst: 10.100.50.248:3222, Length: 242, ProcedureCode: UplinkNASTransport]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.248:3222, Dst: 10.100.50.250:34712, Length: 236, ProcedureCode: PDUSessionResourceSetup]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.248:3222, Dst: 10.100.50.250:34712, Length: 236, ProcedureCode: PDUSessionResourceSetup]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.250:34712, Dst: 10.100.50.248:3222, Length: 118, ProcedureCode: PDUSessionResourceSetup]
2025/04/06 03:50:43 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: NGAP, Src: 10.100.50.250:34712, Dst: 10.100.50.248:3222, Length: 118, ProcedureCode: PDUSessionResourceSetup]

```

(그림 2) NGAP 프로토콜 관측 로그

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).

```

2025/04/06 03:25:26 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: PFCP, Src: 10.100.50.244:8805, Dst: 10.100.50.241:8805, Length: 58, MagType: PFCP Session Deletion Request]
2025/04/06 03:25:26 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: PFCP, Src: 10.100.50.244:8805, Dst: 10.100.50.241:8805, Length: 58, MagType: PFCP Session Deletion Request]
2025/04/06 03:25:26 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: PFCP, Src: 10.100.50.241:8805, Dst: 10.100.50.244:8805, Length: 63, MagType: PFCP Session Deletion Response]
2025/04/06 03:25:26 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: PFCP, Src: 10.100.50.241:8805, Dst: 10.100.50.244:8805, Length: 63, MagType: PFCP Session Deletion Response]
2025/04/06 03:25:26 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: PFCP, Src: 10.100.50.244:8805, Dst: 10.100.50.241:8805, Length: 373, MagType: PFCP Session Establishment Request]
2025/04/06 03:25:26 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: PFCP, Src: 10.100.50.244:8805, Dst: 10.100.50.241:8805, Length: 373, MagType: PFCP Session Establishment Request]
2025/04/06 03:25:26 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: PFCP, Src: 10.100.50.241:8805, Dst: 10.100.50.244:8805, Length: 89, MagType: PFCP Session Establishment Response]
2025/04/06 03:25:26 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: PFCP, Src: 10.100.50.241:8805, Dst: 10.100.50.244:8805, Length: 89, MagType: PFCP Session Establishment Response]
2025/04/06 03:25:26 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: PFCP, Src: 10.100.50.244:8805, Dst: 10.100.50.241:8805, Length: 188, MagType: PFCP Session Modification Request]
2025/04/06 03:25:26 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: PFCP, Src: 10.100.50.244:8805, Dst: 10.100.50.241:8805, Length: 188, MagType: PFCP Session Modification Request]
2025/04/06 03:25:26 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: PFCP, Src: 10.100.50.241:8805, Dst: 10.100.50.244:8805, Length: 63, MagType: PFCP Session Modification Response]
2025/04/06 03:25:26 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: PFCP, Src: 10.100.50.241:8805, Dst: 10.100.50.244:8805, Length: 63, MagType: PFCP Session Modification Response]
2025/04/06 03:25:53 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: GTP-U, Src: 10.1.0.28, Dst: 172.217.161.206, (ICMP 84 Bytes), Tunnel: 10.100.50.236 + 10.100.50.233, TotalLen: 142]
2025/04/06 03:25:53 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: GTP-U, Src: 10.1.0.28, Dst: 172.217.161.206, (ICMP 84 Bytes), Tunnel: 10.100.50.236 + 10.100.50.233, TotalLen: 142]
2025/04/06 03:25:53 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: GTP-U, Src: 10.1.0.28, Dst: 172.217.161.206, (ICMP 84 Bytes), Tunnel: 10.100.50.236 + 10.100.50.233, TotalLen: 142]
2025/04/06 03:25:53 [INFO][tree-go][ens3][egress] [Protocol: GTP-U, Src: 172.217.161.206, Dst: 10.1.0.28, (ICMP 84 Bytes), Tunnel: 10.100.50.233 + 10.100.50.236, TotalLen: 142]

```

(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 분석할 수 있음을 관찰하였다 (그림 3). 마지막으로 UE 가 외부 네트워크(예: google.com)에 ICMP 메시지를 전송할 때 생성되는 GTP-U 터널링 트래픽을 추적하였다. 그 결과, 사용자가 전송하는 IP 패킷이 GTP-U 헤더에 캡슐화되어 UPF 를 통해 인터넷으로 전달되는 과정을 중단 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 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. RS-2024-00398379, (총괄 4-세부 2) 텔코용 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; Tunneling 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.