

SmartNIC Offloading 을 통한 Cilium CNI 의 성능 향상과 자원 소모 최적화

손성혜, 주형우, 최종인, 김영한*

*숭실대학교

bono1130z@dcn.ssu.ac.kr, wnguddn1234@dcn.ssu.ac.kr, jonginchoi99@dcn.ssu.ac.kr,

*younghak@ssu.ac.kr

Performance Enhancement and Resource Optimization of Cilium CNI through SmartNIC Offloading

Son Sung Hye, Ju Hyeong Woo, Choi Jong In, Kim Young Han*

*Soongsil Univ.

요 약

클라우드 환경에서 네트워크 성능에 관한 활발한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 대표적인 CNI 플러그인 Cilium 과 하드웨어 단계에서 네트워킹을 향상시킬 수 있는 SmartNIC 을 활용하여 네트워크 성능을 벤치마킹하였다. XDP offload 를 통해 CPU 사용량을 절감할 수 있음을 검증하고, Cilium 에서 XDP 를 더욱 가속화하기 위한 향후 연구 방향에 대해서도 논의한다.

I. 서론

클라우드 네이티브 응용 프로그램 환경에서의 네트워크 보안과 성능은 현대의 네트워크 환경에서 매우 중요한 문제 중 하나이다. 이러한 환경에서는 네트워크 인프라의 복잡성과 빠른 변화로 인해 적극적인 관리와 연구가 필요하다.

iptables 은 Linux 시스템에서 많이 사용되는 네트워크 패킷 처리 방법 중 하나이지만, 고속 네트워크에서 발생하는 대량의 패킷을 처리할 때는 성능이 저하되는 문제가 있다. [1] 이러한 한계를 극복하기 위해 eBPF (Extended Berkeley Packet Filter)와 XDP(eXpress Data Path)를 활용하는 방안이 제시되고 있다.

Cilium 은 최신의 eBPF(extended Berkeley Packet Filter)를 기반으로 한 CNI 플러그인이다. 전통적인 네트워크 패킷 처리 방식에서는 커널 영역(kernel space)과 사용자 영역(user space)을 CPU 가 계속해서 넘나드는 과정에서 context switching 이 발생하며, 이로 인해 속도 저하와 overloading 이 발생한다. 이런 문제를 해결하기 위한 다양한 방법 중 하나로 제안된 것이 eBPF 기술로, 커널 영역에서 사용자 정의된 코드를 샌드박스 프로그램으로 실행해 네트워크 패킷을 처리하는 방법이다. 이를 통해 속도 증가뿐 아니라 네트워크 보안 및 보안 정책을 효율적으로 관리할 수 있다. [2]

SmartNIC 은 네트워크 기능을 CPU 가 처리할 네트워킹 작업을 NIC(Network Interface Card)에서 일정 부분 처리하는 기술이다. CPU 자원의 사용량을 줄여 부하를 분산시키고 네트워크 패킷을 NIC 에서 바로 처리할 수 있어 네트워크 처리량과 성능을 향상시킨다.

본 논문에서는 Cilium 과 SmartNIC 을 이용하여 클라우드 네이티브 응용 프로그램 환경에서의 네트워크 성능 향상을 실험적으로 검증하고, 그 적합성과 잠재적인 적용 가능성을 평가한다. 이를 위해 Cilium 과 SmartNIC 을 결합하여 네트워크 성능을 측정하고 벤치마킹하는 것을 목표로 하며, 이를 통해 클라우드 네이티브 응용 프로그램 환경에서 네트워크 성능을 향상시키는 방안을 제시하고자 한다.

II. 본론

eBPF 프로그램은 사용자가 정의한 코드의 eBPF hook 을 통해 이벤트가 발생하고 정의된 동작을 수행하게 된다. 네트워크를 처리하는 데 있어 사용되는 대표적인 hook 이 XDP 이다. [3] XDP 는 네트워크 인터페이스 카드(NIC)에서 패킷을 수신하는 즉시 처리하는 방식으로 기존의 네트워크 패킷 처리 방식보다 빠르고 효율적이다. 이러한 eBPF/XDP 모드는 generic, native 그리고 hardware offload 를 지원한다. generic 모드는 수신된 패킷의 소켓 버퍼를 할당 후 동작하고 XDP 를 지원하지 않는 하드웨어에서도 사용이 가능하다는 장점이 있다. native 모드는 패킷을 NIC 의 디바이스 드라이버에서 처리한다. 따라서 장치 드라이버의 지원이 필수적이다. [4]hardware offload 모드는 eBPF 프로그램을 호스트 CPU 에서 실행하는 대신 SmartNIC 의 프로세서에서 패킷을 처리한다. 이는 하드웨어 자체적으로 네트워크 패킷을 처리할 수 있어야 하므로 이런 기능을 지원하는 하드웨어에서만 동작할 수 있다. 본 논문에서 진행한 실험은 세 가지 모드에서 설명된 자원의 사용량과 네트워크 성능을 비교 분석하였다.

1. 실험 환경

본 논문의 실험은 Packet loss 가 없을 때의 네트워크 속도 및 CPU 사용률을 측정하기 위해 Cisco 의 DPDK(Data Plane Development Kit)를 활용한 트래픽 생성기인 Trex 를 이용하였다. 물리적인 서버 두 개를 L2 스위치를 통해 연결하고 각각 Node 로서 동작하게 했다. master node 와 worker node 로 동작하며 worker node 에 eBPF/XDP offload 를 지원하는 NIC 인 SmartNIC 을 설치했다. 최대 링크 속도가 40G 가 되도록 서버 당 2 개의 40G 광케이블을 사용했다. Trex 실험을 진행할 때 master node 를 트래픽 생성기 서버로 두고 worker node 를 DUT 로 두고 실험을 진행하였다. DUT 에서는 간단한 라우터 동작만 하도록 하였다.

Kubernetes	v1.28.4
Cilium	v1.14.5
Ubuntu kernel	v5.15.0
Netronome firmware	Agilio eBPF 2.0.6

표 1. 소프트웨어 규격

CPU	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2697 v4
SmartNIC	Intel Ethernet Controller XL710 40G Netronome Agilio CX SmartNIC 40G
Switch	DELL EMC S4048-ON

표 2. 하드웨어 규격

2. Cilium 과 SmartNIC 을 통한 CPU 부하 감소 실험

본 논문의 실험 1 은 Cilium 환경에서 XDP 가속화를 지원하는 SmartNIC 을 사용하여 트래픽에 따른 CPU 자원 소모량을 비교 분석하였다. 이를 위해, 다양한 네트워크 트래픽을 생성하고, SmartNIC 과 일반적인 네트워크 카드(NIC)를 각각 사용하여 CPU 자원 소모량을 측정하였다. 실험 결과, master node 와 worker node 의 파드가 서로 통신할 때 링크 속도의 25% 정도인 10Gbit/s 만 나오는 문제가 발생하였다. 이는 SmartNIC 의 펌웨어 문제로 추정되며, 해당 문제를 해결하기 위해 펌웨어 업데이트 등의 조치를 취할 필요가 있다.

3. XDP 유형별 CPU 자원 소모량 실험

본 논문의 실험 2 는 hardware offload, generic, native 모드에서의 CPU 자원 소모량을 비교 분석했다. 먼저 XDP 가 hook 으로 동작해 eBPF 를 통해 네트워크 패킷이 처리될 수 있도록 XDP 모드를 네트워크 패킷이 들어오는 링크에 적용한다. 많은 트래픽 부하를 발생시키기 위해 netperf 를 병렬로 10 개 실행해 트래픽을 전송했다. 네트워크 패킷이 처리되는 과정에서의 CPU 사용률을 비교하기 위해 htop 프로그램을 이용했다. 각각의 모드에서 CPU 자원 소모량은 아래의 [그림 1]에서 확인할 수 있다. hardware offload 모드일 때 CPU 자원 소모량은 native, generic 모드일 때에 비해 약 2.4 배, 2.7 배 낮다. 하드웨어 오프로딩을 통해 CPU 자원을 2 배 이상 절약할 수 있다.

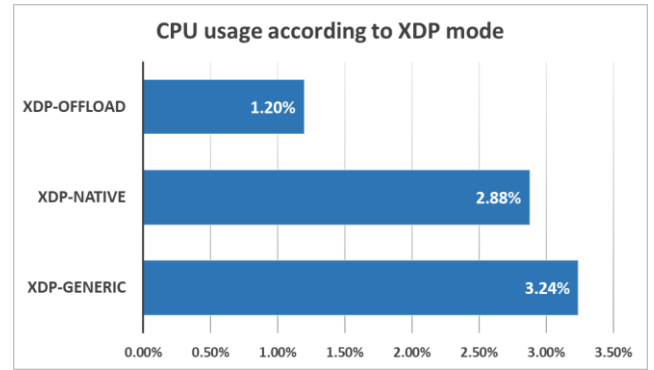


그림 1. 실험 2 XDP 모드에 따른 CPU 사용률

III. 결론

본 논문에서는 Cisco 의 Trex 오픈 소스 도구를 사용하여 링크 속도와 최대한 가깝게 벤치마킹하는 방법과 XDP offload 를 통해 CPU 사용량을 절감하는 방법을 살펴보았다.

Trex 를 사용하여 링크 속도와 최대한 가깝게 벤치마킹하는 방법을 구현하였고, 이를 통해 네트워크 성능을 측정할 수 있었다. XDP offloading 를 통해 CPU 사용량을 절감할 수 있다는 것을 확인하였다.

추후 Netronome SmartNIC 의 펌웨어 문제를 해결하여 pod 간의 벤치마킹이 가능하게 하여 Cilium 에서의 XDP 가속화를 연구할 예정이다. 이를 통해, 더욱 효율적인 네트워크 관리를 가능하게 할 것으로 기대된다.

본 논문에서 제안한 기술들은 클라우드 환경에서의 네트워크 성능 향상과 효율적인 네트워크 관리에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

"본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP-2023-RS-2023-00258649)

참고 문헌

- [1] YoungEun Choe, Jun-Sik Shin, JongWon Ki(2023). Performance Comparison of eBPF/XDP Packet Filtering for Linux Firewall in Hypervisor-virtualized Machines. 한국정보통신학회논문지, 37(2), 123-132.
- [2] 신용운, 신지수, 박철휘, 박종근(2023). 클라우드 네이티브 환경에서 네트워킹 및 보안을 위한 eBPF 기술 동향. 한국정보통신학회논문지, 37(2), 6-15.
- [3] Cilium(2023). Cilium Documentation. <https://docs.cilium.io/en/latest/bpf/>
- [4] S. Miano, M. Bertrone, F. Risso, and M. Tumolo, "Creating complex network service with eBPF: Experience and lessons learned," in Proc. IEEE High Perform. Switching Routing (HPSR), 2018, pp. 5