

Bluefield-3 기반 NFV 구현 방법론 연구

이수현¹, 박태준²¹전남대학교 정보보안융합학과 석사과정²전남대학교 인공지능학부 교수

dltngus02@jnu.ac.kr, taejune.park@jnu.ac.kr

A Study on NFV Implementation Methodology
Based on Bluefield-3Su-Hyeon Lee¹, Tea-June Park²¹Dept. of Information Security Convergence, Chonnam National University²Dept. of Artificial Intelligence, Chonnam National University

요 약

스마트닉은 고성능 네트워크 처리를 가능케 하는 차세대 네트워크 인터페이스로, 클라우드 및 데이터센터 환경에서 그 활용도가 빠르게 증가하고 있다. 본 논문에서는 NVIDIA의 BlueField-3 스마트닉을 활용하여, 컨테이너 기반 NFV(Network Function Virtualization) 환경을 구성하는 방법론을 제시한다. 특히 SF(Scalable Function) 및 VF(Virtual Function)를 이용한 인터페이스 구성과, 이를 Docker 컨테이너와 연동하는 방식을 중심으로 논의하였다.

1. 서론

스마트닉은 차세대 네트워크 인터페이스 카드로, 높은 대역폭과 낮은 지연이 요구되는 클라우드 컴퓨팅 및 대규모 네트워크 환경에서 주목받고 있다 [1]. 전통적인 NIC과 달리, 스마트닉은 독립적인 연산 코어와 전용 메모리, 그리고 네트워크 처리에 특화된 하드웨어 가속기를 탑재하여 호스트 CPU의 개입 없이 네트워크 기능을 자체적으로 수행할 수 있다 [2]. 이러한 구조는 단순한 패킷 전달을 넘어 내부에서 직접 패킷을 처리함으로써 대역폭 활용 효율을 높이고 지연 시간을 줄이는 데 유리하다.

이러한 특성을 바탕으로, 본 논문에서는 BlueField-3 상에서의 NFV 구현 방안을 논의한다. 특히 기존 네트워크 기능을 수정하지 않고도 활용할 수 있도록 Docker 기반 컨테이너 실행 환경을 적용하였다. 또한 SR-IOV 기술을 활용하여 컨테이너별로 독립적인 네트워크 흐름을 제공하도록 구성하였다. 이를 통해 BlueField-3 기반 NFV 구현 방안을 체계적으로 분석하고, 해당 접근 방식의 확장성과 향후 응용 가능성에 대해 논의하고자 한다. 그리하여 본 연구는 BlueField-3 기반 NFV의 실현 가능성을 실증적으로 보여주고, 차세대 네트워크 아키텍처 설계에 대한 새로운 방향을 제시하고자 한다.

2. 본론

1) BlueField-3

BlueField-3 [3]는 NVIDIA에서 개발한 최신 스마트닉으로, 상용 데이터센터는 물론 학술 연구 분야에서도 활발히 활용되고 있는 고성능 네트워크 인터페이스 장치이다. 이 장치는 16개의 ARM A78 연산 코어와 32GB DDR5 전용 메모리, 그리고 고속 네트워크 처리를 위한 다양한 하드웨어 가속기를 탑재하고 있다. 주요 가속기로는 SR-IOV 기반 가상화 지원, 암호화 전용 가속기, 페이로드 분석용 정규표현식(RegEx) 가속기, 그리고 E-Switch 등이 있으며, 이러한 구성을 통해 병렬 네트워크 처리와 고부하 작업에 최적화된 구조를 제공한다.

BlueField-3는 DOCA(Data-Center-Infrastructure-on-a-Chip Architecture) SDK를 지원하여, 하드웨어 자원을 소프트웨어적으로 손쉽게 제어할 수 있어 높은 수준의 확장성과 개발 편의성을 제공한다. 이를 바탕으로 DPI와 같은 네트워크 보안 처리, 스토리지 오프로딩, AI 기반 네트워크 분석 등 다양한 응용 환경에서의 활용 가능성을 크게 확장할 수 있다. 즉, NFV의 유연성과 확장성에 BlueField-3의 하드웨어 가속 성능을 결합함으로써, 기존 CPU 기반 NFV의 성능 한계를 극복하고 보다 효율적인 네트워크 기능

가상화를 구현할 수 있다. 또한 BlueField-3는 Off-Path 구조를 채택한 스마트닉으로, 네트워크 경로상에서 독립적으로 패킷을 처리할 수 있다. 이는 호스트 CPU의 부담 없이도 낮은 지연과 높은 처리량을 확보할 수 있다는 점에서 NFV 실행에 적합하다.

이에 본 연구에서는 BlueField-3의 이점과 DOCA SDK의 유연성을 바탕으로 NFV 구현 방법론을 고찰하고자 하며, Docker 컨테이너 기반의 다양한 응용 가능성도 탐색하고자 한다.

2) NFV

NFV(Network Function Virtualization) [4]는 전통적으로 하드웨어 기반 전용 장비에서 수행되던 방화벽, 라우터, DPI(Deep Packet Inspection), 로드 밸런서 등과 같은 네트워크 기능들을 소프트웨어로 구현하여 범용 서버상에서 구동하는 기술이다. NFV는 네트워크 기능을 가상화함으로써, 서비스 배포의 유연성과 확장성을 크게 향상시키며, 하드웨어 비용 절감과 운영 효율성 증대를 동시에 가능케 한다. 이를 통해 새로운 서비스의 출시 시간을 단축시키고, 네트워크 인프라의 유연한 발전 가능성을 제공한다.

그러나 기존 NFV는 범용 CPU 기반의 소프트웨어 처리를 기반으로 하기 때문에, 고속 트래픽 처리 환경에서는 성능 저하나 CPU 과부하 등의 문제가 발생할 수 있다. 이에 따라 최근에는 스마트닉과 같은 하드웨어 가속 기반 장치를 활용하여 NFV를 구현하려는 시도가 활발히 이루어지고 있으며, 본 연구 또한 이러한 흐름의 일환으로 BlueField-3 기반 NFV 구현 방법론에 관한 연구를 수행하였다.

3) SF/VF 기반의 컨테이너 네트워크 구성 방법

BlueField-3 상에서 NFV를 구현하고, 특히 Docker 컨테이너 기반의 네트워크 서비스를 구성하기 위해서는 우선 SF(Scalable Function) 및 VF(Virtual Function)의 생성이 선행되어야 한다. SF는 NVIDIA가 제안한 확장 기능으로, SR-IOV 기반의 VF와 유사한 구조를 가지면서도 자체 전용 큐(txq, rxq)와 고유 기능을 지닌 경량화된 가상 네트워크 기능이다. SF는 BlueField-3 내부에서 다수의 네트워크 서비스를 동시에 실행할 수 있도록 설계되어 있으며, BlueField-3 내부의 네트워크 흐름을 구성하는 데 주로 활용된다 [5].

한편, VF는 PCIe 기반의 SR-IOV(Single Root I/O Virtualization) 기술을 바탕으로 구현된 가상 인터페이스로, 단일 물리 PCIe 장치를 다수의 논리 인터페이스로 분할하여 각 가상 머신 혹은 컨테이너에 독립적으로 할당할 수 있도록 한다. 그리하여 VF는 호스트와

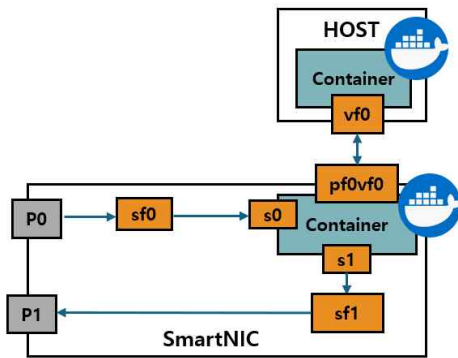
BlueField-3 간의 고속 통신 채널 역할을 수행하여 호스트의 네트워크 기능과 BlueField-3의 오프로드 기능이 효율적으로 연계될 수 있다. 이는 곧 물리 리소스의 효율적 활용과 트래픽 경로의 분리, 성능 격리 측면에서 큰 이점을 제공한다. 따라서 BlueField-3 기반의 NFV 구성에서는 SF를 통해 내부 네트워크 처리를 구성하고, VF를 통해 호스트와의 통신 경로를 확보함으로써, 분리된 실행 환경에서 유연하고 확장가능한 네트워크 서비스를 구현할 수 있다. 이를 위해, SF와 VF는 Open vSwitch를 통해 브리지를 구성하며, 인터페이스 간의 트래픽 경로를 정밀하게 제어할 수 있다.

특히, `ovs-vsctl set Open_vSwitch . other_config:hw-offload=true` 명령어를 통해 하드웨어 오프로드 기능을 활성화하면, 설정된 flow 룰이 ARM 코어에서 E-Switch로 오프로드되어 커널 네트워크 스택을 거치지 않고 처리된다. 이는 트래픽 처리 시 호스트 CPU 개입을 줄이고, 패킷 지연을 감소시키며, 전반적인 처리량을 향상시키는데 기여한다. 이를 통해 다양한 네트워크 기능을 컨테이너 간 또는 컨테이너와 호스트 간에 유연하게 연결할 수 있으며, 서비스 체이닝과 같은 구조도 손쉽게 구성 가능하여 고성능 NFV 환경을 구성하는데 있어 핵심적인 요소로 작용한다.

본 연구에서는 BlueField-3 상에서 생성된 SF 인터페이스를 Docker 컨테이너의 네트워크 네임스페이스로 이동시켜, 각 컨테이너가 독립적으로 네트워크 인터페이스를 직접 바인딩하고 제어할 수 있도록 구성하였다. 이를 위해 먼저 컨테이너를 `--pid=host` 및 `--network=none` 옵션과 함께 실행하여, 호스트와 PID 네임스페이스는 함께 사용되되, 네트워크 네임스페이스는 분리된 상태로 설정하였다. 그 후, `ip link set <인터페이스명> netns <PID>` 명령어를 사용하여 해당 인터페이스를 컨테이너의 네트워크 네임스페이스로 이동시켰다. 이 과정을 통해 인터페이스가 컨테이너에 연결되면, 컨테이너 내부에서는 해당 SF 인터페이스를 마치 물리 인터페이스처럼 인식하고 사용할 수 있다. 이를 기반으로 각 컨테이너는 전용 인터페이스를 활용한 독립적인 네트워크 서비스 환경을 구성할 수 있어 특정 트래픽만을 수신하고 처리할 수 있다. 이러한 구조는 NF 간의 성능 간섭을 방지하고, 네트워크 보안성을 효과적으로 강화하는 데 기여한다.

또한, BlueField-3은 호스트에 비해 상대적으로 제한된 자원을 지니고 있어 일부 고성능 처리나 복잡한 연산의 경우에는 호스트의 지원이 필연적으로 요구될 수 있다. 이러한 상황에서는 VF를 활용하여, 호스트 상에서 실행되는 컨테이너에 동일한 방식으로 연결함으로써 BlueField-3과의 연동을 구성할 수 있다.

<그림 1> NFV 예시 구조



VF를 호스트 컨테이너에 연결하면, BlueField-3과 호스트 간에 전용 통신 경로와 유사한 고속 데이터 전송 경로를 형성할 수 있으며, 이를 통해 처리 병목을 최소화하고 전체 시스템의 연산 자원을 효율적으로 활용할 수 있다. 이러한 연동 방식의 예시는 <그림 1>에 나타난 구조에서 확인할 수 있으며, BlueField-3과 호스트 간 트래픽 흐름을 명확히 분리할 수 있을 뿐 아니라, 컨테이너 단위의 정밀한 네트워크 제어를 가능하게 하여 NFV 환경에서의 유연성과 확장성을 더욱 향상시킬 수 있다.

4) 응용 방안

BlueField-3 기반 NFV 구조는 다양한 환경에서 효과적으로 활용될 수 있으며, 특히 다음과 같은 응용 시나리오에서 그 가능성을 기대할 수 있다.

첫째, 멀티테넌시 환경에서 각 사용자 또는 서비스 단위로 SF와 VF를 분리하여 구성함으로써, 네트워크 자원을 논리적으로 격리하고 성능 간섭을 최소화할 수 있다. 이를 통해 사용자별 요구에 따라 네트워크 기능을 유연하게 배치할 수 있을 뿐만 아니라 독립적인 성능 보장 또한 가능하다 [6].

둘째, 방화벽과 DPI 등 다양한 네트워크 기능을 순차적 또는 병렬적으로 연결하여 서비스 체인을 구성할 수 있다. 각 NF는 SF 기반 인터페이스에 분리된 형태로 배치되며, BlueField-3 내부의 트래픽 흐름은 소프트웨어적으로 정밀하게 제어된다. 이를 통해 다단계에 걸친 트래픽 처리와 고도화된 패킷 분석이 가능한 구조를 구현할 수 있으며, 서비스 간의 유연한 조합과 확장성 또한 확보할 수 있다.

셋째, DOCA 프레임워크를 활용하면 BlueField-3에 탑재된 하드웨어 가속기와 NFV 서비스를 효과적으로 연계할 수 있다. 예를 들어, DOCA DPI, DOCA Crypto, DOCA Flow와 같은 가속 라이브러리를 활용하면 NFV 환경에서도 복잡한 네트워크 기능을 고

속으로 처리할 수 있다. 이를 통해 NFV 서비스는 단순한 소프트웨어 구성 요소를 넘어, BlueField-3의 하드웨어 자원을 적극 활용하는 고성능 네트워크 기능으로 확장될 수 있다.

이처럼 BlueField-3 기반 NFV 구조는 다양한 기술 요소들과의 결합을 통해, 성능, 보안, 확장성 측면에서 기존 네트워크 아키텍처를 획기적으로 개선할 수 있는 잠재력을 지닌다.

3. 결론

BlueField-3에 NFV를 배치하는 것은 여러 네트워크 기능을 고성능으로 처리할 수 있는 기반을 제공하며, 이를 통해 폭넓은 응용 가능성을 확보할 수 있다. 특히 기존 애플리케이션을 수정하지 않고 컨테이너 형태로 손쉽게 배포할 수 있다는 점은, 개발과 운영 측면에서 높은 유연성과 확장성을 제공하는 큰 장점이다. 또한, SF와 VF는 BlueField-3 내부에서 고속 데이터 경로와 기능 간 통신을 지원하는 핵심 인프라로 활용되어, 전체 시스템의 처리 효율을 높일 수 있다. 향후 이러한 NFV 배치 구조를 하드웨어 가속기와 연계하여 설계한다면 이러한 점으로 미루어 보아, BlueField-3 기반 NFV는 차세대 네트워크 아키텍처의 핵심 기술로 자리매김할 가능성이 크다. 아울러, 추후 제안한 구조를 기존의 레거시 NFV 구조와 성능 및 보안 측면에서 정량적으로 비교·분석한다면, BlueField-3 기반 NFV의 실질적인 성능 이점을 보다 명확히 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의
인공지능융합혁신인재양성사업
(IITP-2023-RS-2023-00256629) 및
대학ICT연구센터사업(IITP-2024-RS-2024-00437718)의
연구결과로 수행되었음.

참고문헌

- [1] Guo, Zerui, et al. "Lognic: A high-level performance model for smartnics." Proceedings of the 56th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture. 2023.
- [2] developer.nvidia.com. 2025. NVIDIA DOCA Software Framework
<https://developer.nvidia.com/networking/doca>
- [3] developer.nvidia.com. 2025. NVIDIA BlueField

Networking Platform,

<https://www.nvidia.com/en-us/networking/products/data-processing-unit/>

[4] Herrera, Juliver Gil, and Juan Felipe Botero. "Resource allocation in NFV: A comprehensive survey." *IEEE Transactions on Network and Service Management* 13.3 (2016): 518-532.

[5] docs.nvidia.com. 2025. DOCA Documentation v1.1
<https://docs.nvidia.com/doca/archive/doca-v1.1/scalable-functions/index.html>

[6] Grant, Stewart, et al. "Smartnic performance isolation with fairnic: Programmable networking for the cloud." *Proceedings of the Annual conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*. 2020.