

하드웨어 기반 프로그래밍 가능 데이터 평면의 연구 동향

조세빈, 박태준*

전남대학교, *전남대학교

030331c@jnu.ac.kr, *taejune.park@jnu.ac.kr

A survey of Hardware-based programmable data plane

Sebin Jo, Taejune Park*

Chonnam National Univ., *Chonnam National Univ.

요약

소프트웨어 정의 네트워크(Software-Defined Networking, SDN)의 등장으로 중앙 집중화된 제어 평면을 통해 다수의 데이터 평면을 제어함으로써 네트워크 운영의 편의성과 유연성이 향상되었다. 그러나 데이터 평면--특히 하드웨어 기반--의 경우 그 경직성으로 인해 지원 가능한 기능의 수가 여전히 고정적이므로, 네트워크 환경 변화에 따른 새로운 프로토콜이나 기능의 추가가 상당히 어려워 비효율적인 네트워크 운영이 강제되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 프로그래밍 가능한 데이터 평면(Programmable Data plane, PDP)이 제시되었다. 본 논문에서는 여러 유형의 프로그래밍 가능한 데이터 평면에 관해 기술들의 특성과 각각의 활용 방안에 대해서 알아보고 연구 동향을 정리하고자 한다.

I. 서론

기존의 전통적인 네트워크 구조에서는 장치 내부의 제어 평면과 데이터 평면이 같이 존재하는 형태로 대규모 네트워크, 동적인 네트워크 환경에서의 관리 및 운영에 있어서 많은 어려움이 있었다. 이를 해결하고자 Software-Defined Networking(SDN)을 통해서 네트워크 운영의 효율성을 증대하는 방안이 새롭게 등장하였다. SDN은 네트워크의 제어 평면과 데이터 평면을 분리하여 네트워크를 효율적으로 제어하는 기술로 중앙화된 제어 평면을 통해 네트워크 트래픽 관리와 일관된 정책 적용 등이 가능해지면서 네트워크 운영의 유연성과 효율성을 향상시킬 수 있었다.

그러나 데이터 평면, 특히 하드웨어 기반의 경우 그 기능의 추가나 확장이 상당히 어려워 네트워크 운영의 유연성을 크게 떨어뜨리는 한 가지 요인이다. 특히, 오늘날 사물 인터넷(Internet of Things, IoT), 클라우드, 모빌리티 등 네트워크에 보다 다양한 요구 사항들을 필요로 하는 기술의 등장으로 데이터 평면에 새로운 기능들을 즉각적으로 반영할 수 있는 유연함이 요구되고 있다. 이러한 요구사항을 만족시키기 위해, 새로운 기능의 확장이 용이한 프로그래밍 가능 데이터 평면(Programmable Data Plane, PDP)이 대두되고 있다. 본 논문에서는 PDP가 어떤 것인지 알아보고, PDP 구현을 위한 하드웨어 기술들을 설명한다. 이후, 관련 연구 동향을 검토함으로써 향후 연구 방향을 살펴보고자 한다.

II. 본론

2.1 Programmable Date Plane(PDP)

데이터 평면을 프로그래밍한다는 것은 네트워크 장치에서 데이터 패킷 처리 방식을 사용자가 필요로 하는 형태로 구현한다는 것을 의미한다. 데이터 평면을 프로그래밍하여 구성할 수 있는 요소는 다음과 같다: 1)패킷 파싱, 2)패킷 처리, 3)상태 관리, 4)동작 실행. 우선, 패킷이 장비로 들어오면 이를 분석해서 필요한 정보만을 추출한다. 이후 사용자 정의 규칙대로 패킷을 어떻게 처리할지 결정하고 트래픽의 상태를 모니터링하면서 앞 단

계에서 결정된 패킷 처리를 실질적으로 실행한다. PDP는 각각의 단계에서 사용자가 임의로 그 동작을 지정할 수 있게 함으로써 패킷이 네트워크 상에서 어떻게 처리될 수 있을지를 네트워크 요구에 맞게 맞춤화할 수 있다. 예를 들어, 트래픽 모니터링과 분석을 더욱 세밀하게 하여 네트워크 측정 및 네트워크 보안을 향상시켜 전반적인 성능을 개선할 수 있다.

프로그래밍 가능한 형태의 데이터 평면을 위해 다양한 PDP 장치와 프로그래밍 언어가 활용된다. 장치에는 FPGA, SmartNIC, network processor, 프로그래밍 언어에는 주로 P4 언어가 사용된다.

2.2 Field-Programmable Gate Arrays(FPGAs)

Field-Programmable Gate Array(FPGA)는 설계 가능한 논리 소자와 프로그래밍 가능한 회로가 포함된 반도체 소자로서 프로그래밍 가능하다는 점에서 다음과 같은 특성을 지닌다: 1)병렬성, 2)유연성, 3)확장성. FPGA는 병렬 처리가 가능하여 동일한 작업의 반복 수행을 줄여 불필요한 리소스 낭비를 방지한다. 하드웨어 제작 후 프로그래밍을 통한 재구성이 가능하므로 소프트웨어 업데이트만으로 새로운 프로토콜이나 서비스의 빠른 적용이 가능하고, 확장성에 있어서도 ASIC보다 활용 가능성이 뛰어나다.

이러한 특성상 FPGA는 고성능 네트워킹이나 데이터 고속 처리 등 네트워크 처리 성능을 보장함과 동시에 PDP에 많은 구현 가능성을 제공한다 [3]. FPGA 기반의 고성능 프로그래밍 가능 데이터 평면은 네트워크 상태 정보를 계산하여 포워딩을 맞춤화할 수 있다. 이를 통해 로드 밸런싱과 혼잡 제어, AQM(Active Queue Management) 등을 구현하여 네트워크 서비스의 질을 보장하며 효과적으로 패킷을 분류할 수 있다 [3]. 그 외에도 고속 네트워크 트래픽을 실시간으로 분석하여 악성 패킷을 필터링하는 기능을 구현하여 보안 기능을 보충할 수 있다. 이처럼 다양한 기능을 수행하는 PDP를 구성하여 데이터 센터나 5G 네트워크 등에 적용한다면 높은 처리 속도와 짧은 레이턴시를 실현하며 트래픽을 효율적으로 관리할 수 있게 된다.

2.3 SmartNIC

SmartNIC은 기존의 NIC에 데이터 처리나 트래픽 관리를 위한 프로세싱 기능을 수행하는 데이터 처리 유닛(NPU, FPGAs 등)이 추가된 장치로, 일반적인 NIC의 경우 패킷을 송수신하는 기본 네트워크 인터페이스 기능만 수행했지만, SmartNIC은 데이터 처리나 네트워크 관리 등 다른 기능도 같이 수행할 수 있다.

SmartNIC의 핵심 기능은 오프로드(offroad) 기능인데, 이 기능은 특정 작업이나 프로세스를 호스트 컴퓨터의 CPU를 대신해서 네트워크 카드로 실행하는 것이다. 오프로드로 인해 생긴 유휴 CPU 코어는 다른 프로세스 구동에 쓰일 수 있으므로 CPU의 부하를 줄일 수 있다. CPU 클럭을 확보함으로써 전체적인 시스템 성능이 향상되고 비용을 절감할 수 있다. 네트워크 장치가 이미 데이터 경로에 위치하므로 추가 기능을 오프로드 하면 잠재적으로 비용이 소모되는 추가 데이터 이동의 필요성을 줄일 수 있고 중단 간의 프로세싱 레이턴시도 감소시킬 수 있다.

방화벽, L7 gateways, 하이퍼바이저 기반의 로드 밸런싱과 같은 호스트 기반 서비스를 오프로드 하여 그 효과를 더욱 극대화할 수 있다 [7]. 데이터 평면 오프로딩의 또 다른 예로는 네트워크 원격 측정, 모니터링, 진단 등 많은 것들이 포함될 수 있다. 이외에도 네트워크 내 계산(In-network computation)을 통해서 다양한 도메인의 애플리케이션도 오프로드 하여 네트워크 트래픽의 양을 줄일 수 있다. 오프로딩으로 구현한 PDP의 기능은 불가능했거나 비용이 많이 들었던 애플리케이션을 세분화해서 실현 가능하게 한다 [7].

2.4 P4(Programming Protocol-independent Packet Processors)

P4(Programming Protocol-independent Packet Processors)는 프로토콜 독립적으로 패킷 처리 방식을 정의하는 네트워크 프로그래밍 언어이다. SDN에서 주로 쓰이던 OpenFlow는 데이터 평면에서 지원하는 프로토콜이 한정적이고 변경 사항을 적용하기엔 다소 정적인 한계가 있었다. 이러한 한계를 해결하고 프로토콜 종속성을 벗어나 데이터 평면의 동작을 정의하는 언어로 P4가 등장하였다. 네트워크 패킷의 헤더 구조를 정의하고 어떤 조건에 의해 해당 패킷을 어떻게 처리할 것인지 상세한 규칙을 정의한다. 이러한 과정을 거쳐 라우팅, 필터링, 로드밸런싱 등의 로직을 구성하여 PDP를 구현하는 데에 활용된다. TCP처럼 표준화되어 있는 프로토콜 외에도 사용자가 새롭게 정의하고자 하는 다른 프로토콜을 사용하여 다양한 요구 사항에 맞게 패킷 처리 로직을 구성하고 유연하게 네트워크 정책을 적용할 수 있다.

2.5 연구 동향

최근 PDP에 관한 연구는 주로 하드웨어 가속화 기술 구현을 위해 FPGA 기술을 활용하는 경우가 많다. 그중 한 예인 NIDS에 FPGA를 적용하여 대량의 데이터를 빠르게 처리하고 패킷 처리 방식을 효율적으로 구성하는 연구도 진행 과정에 있다. 관련 연구에서는 DPI(Deep Packet Inspection)를 통해 패턴 매칭을 최적화된 방식으로 처리하는 것을 목표로 한다 [9,10]. 이를 달성하여 사용자 정의 규칙에 따라 유연하게 패킷 필터링을 구성하고 IDS의 처리 속도를 높여 효율성을 증대시킬 수 있다. 이외에도 PDP의 확장성 구현을 위해 국내외에서는 PDP 구현 기술 연구를 통해 네트워크 리소스를 유연하게 관리하는 방법에 관한 연구도 여럿 진행되고 있다 [4,5,6]. 실시간 대규모 데이터 처리나 저지연 통신, 5G 네트워킹 등 여러 연구에서도 PDP가 핵심 기반이 되고 있다. 추가로, PDP를 가상화하는 기술도 hyper4, hyperV 등의 초기 연구에서부터 시작하여 계속 진행되어 오고 있다 [5].

III. 결론

PDP는 하드웨어의 성능과 소프트웨어의 유연성을 동시에 제공함으로써 성능을 극대화하면서도 SDN 환경에 맞는 유연성을 확보할 수 있다. 그러나 PDP를 효과적으로 활용하기 위해서는 PDP에 적합한 패킷 처리 방식이 연구되어야 한다. 패킷 처리 정책 정의를 포함해서 패킷 파싱, 스케줄링, 큐잉 시스템 체계를 통틀어서 다양한 요구사항에 맞게 신속하게 변경할 수 있도록 프로그래밍 가능성을 구축해 나가야 한다. 추가로 런타임 단에서 데이터 평면 동작을 변경하는 등의 최적화 기능 구현도 연구와 개발이 필요한 영역이다. 본문에서 언급한 하드웨어의 특성들은 아직 미해결인, 최적화되지 않은 네트워크의 흐름을 찾는 데에 있어 충분한 밑바탕이 되어 네트워크 최적화 설계에 좋은 영향을 미칠 것이라고 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국인터넷진흥원(KISA)-정보보안 특성화대학 지원사업 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2022R1C1C1006967).

참고 문헌

- [1] 최홍록, 한술, 장석원, 백상현. "네트워크 기능 오프로딩 지원을 위한 데이터 평면 프로그래밍 기술 동향." 한국통신학회 학술대회논문집 (2018): 476-477.
- [2] Huang, X.; Guo, Z.; Song, M.; Guo, Y. AccelSDP: A Reconfigurable Accelerator for Software Data Plane Based on FPGA SmartNIC. *Electronics* 2021, 10, 1927.
- [3] Zhao P, Cheng G, Zhao DY. Survey on FPGA-based High-performance Programmable Data Plane. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2023, 34(11): 5330-5354 (in Chinese).
- [4] 배찬빈, 김희원, 정현재, 차인호, 백상현. "URLLC를 위한 프로그래머블 데이터 평면으로의 5G User Plane Function 오프로딩 연구 동향." 한국통신학회 학술대회논문집 (2023): 1562-1563.
- [5] S. Han, S. Jang, H. Choi, H. Lee and S. Pack, "Virtualization in Programmable Data Plane: A Survey and Open Challenges," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 527-534, 2020.
- [6] 장석원, 한술, 백상현. "프로그래밍 가능한 데이터 평면 기술 연구 동향." 한국통신학회지(정보와통신) 34, no. 12 (2017): 35-42.
- [7] Oliver Michel, Roberto Bifulco, Gábor Rétvári, and Stefan Schmid. 2021. *The Programmable Data Plane: Abstractions, Architectures, Algorithms, and Applications*. *ACM Comput. Surv.* 54, 4, Article 82 (May 2022), 36 pages.
- [8] S. Kianpisheh and T. Taleb, "A Survey on In-Network Computing: Programmable Data Plane and Technology Specific Applications," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 1, pp. 701-761, Firstquarter 2023, doi: 10.1109/COMST.2022.3213237.
- [9] 서병석, 김은원. (2022). 네트워크 침입 탐지 시스템을 위한 효율적인 정규표현식 패턴 매칭 프로세서 구조. *전자공학회논문지*, 59(9), 121-126. -126, 10.5573/ieie.2022.59.9.121
- [10] Andreas Becher, Stefan Wildermann, and Jürgen Teich. 2018. Optimistic regular expression matching on FPGAs for near-data processing. In *Proceedings of the 14th International Workshop on Data Management on New Hardware (DAMON '18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 4, 1-3.