

블록체인 P2P 네트워크의 신뢰성과 확장성을 위한 커널 오버헤드에 강건한 근접성 인지 프레임워크에 관한 연구

김기석, 유태훈, 김석민, 김황남
고려대학교 전기전자공학

kisuk528@korea.ac.kr, yth921@korea.ac.kr, slartler17@korea.ac.kr, hncim@korea.ac.kr

Kernel-Overhead-Resilient Proximity-Aware Framework for Reliable and Scalable Blockchain P2P Networks

Kiseok Kim, Taehoon Yoo, Seok Min Kim, Hwangnam Kim
school of electrical engineering, Korea University.

요 약

본 논문은 중단 간 사용자 애플리케이션 기반의 물리 네트워크 계층 방식이 구조적 한계로 인해 관측 정보의 왜곡을 초래함을 분석하였다. 이러한 계층 왜곡이 블록체인 P2P 네트워크에서 실제 물리적 근접성을 정확히 반영하지 못하게 만드는 주요 원인임을 규명하였다. 아울러, 이를 극복하기 위한 차세대 블록체인 P2P 네트워크 아키텍처를 제안하였다. 제안 기술은 보다 정밀한 네트워크 관측을 가능하게 함으로써 비효율적인 피어 선택을 완화한다. 그 결과, 블록 전파 지연을 감소시키고 전체 합의 효율성을 향상시킬 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

I. 서 론

본 논문에서는 애플리케이션 계층의 중단 간 근접성(Proximity) 관측 과정에서 발생하는 시스템 오버헤드가 물리 네트워크 계층 정보를 왜곡하는 현상을 분석하고, 이를 해결하기 위한 정밀 관측 아키텍처를 제안함으로써 강건한(Robust) 블록체인 P2P 네트워크 환경 구축에 기여하고자 한다.

블록체인은 전역적 합의(Consensus)를 위해 데이터 전파와 네트워크 상태 유지를 위한 제어 메시지 교환이 빈번하게 일어나는 네트워크 집약적(Network-intensive) 구조를 가진다. 이러한 시스템이 안정성을 유지하기 위해서는 일정 수준 이상의 처리량(Throughput)과 강건한 물리 네트워크 품질이 필수적이다. 하지만 대부분의 블록체인 P2P 네트워크는 물리적 토폴로지를 고려하지 않은 채 노드 ID 간의 논리적 거리에 의존하여 형성되는 오버레이 네트워크(Overlay Network)이므로, 시시각각 변하는 하부(Underlay) 물리 네트워크 상황에 동적으로 대응하기 어려우며, 이는 결과적으로 블록 전파 지연을 초래한다. 이러한 지연은 스테일(Stale) 블록 및 체인 분기(Fork)를 초래하여 시스템 전체의 합의 효율을 저하시킨다.

이러한 문제를 해결하기 위해 기존 연구들은 논리적 거리(노드 ID 유사성)뿐만 아니라 물리적 근접성 정보를 활용하는 다양한 방식을 제안해 왔다. PNS(Proximity Neighbor Selection)을 통해 블록체인 노드가 이웃 피어를 선택할 때 RTT(Round-Trip Time)를 기반으로 지리적으로 인접한 노드들을 우선 연결함에 따라 전체 합의 처리량을 유의미하게 향상시켰으며[1], 유사하지만 RTT가 아닌 물리 네트워크의 홉(Hop) 수를 고려하여 라우팅 지연시간을 극복하고자 하는 시도를 하였으며[2], SDN(Software Defined Networking)을 활용하여 중앙 집중화된 컨트롤러가 물리 네트워크의 뷰(View)를 토대로 오버레이 경로를 가이드하는 연구를 통해 계층 간 정보 불일치를 해소하려는 시도가 있었다[3].

하지만 이러한 근접성 기반 기술들이 의도한 성능을 발휘하기 위해서는 정밀한 물리 네트워크 관측이 전제되

어야 한다. 관측값의 품질이 기술의 유효성을 결정하기 때문이다. 현재 대부분의 오버레이 네트워크는 근접성 정보를 애플리케이션 계층에서 중단 간 처리 방식으로 수집한다. 이 과정에서 패킷은 시스템 콜, 컨텍스트 스위칭, 메모리 복사 등 다수의 커널 스택 단계를 경유하게 되며, 이때 발생하는 시스템 오버헤드와 CPU 스케줄링 지연은 순수한 네트워크 지연 시간에 상당한 계층 노이즈를 추가한다. 결과적으로 이러한 계층 오차는 근접성 기반 알고리즘이 실제와 다른 물리적 거리를 산출하게 만들며, 기술의 성능이 기대치에 미치지 못하거나 심한 경우 설계 의도와 상반되는 결과를 초래하여 전체 네트워크의 효율성을 저하시키는 원인이 된다[4].

II. 본론

본 섹션에서는 애플리케이션 계층에서 수행되는 블록체인 노드 간 근접성 측정 방식에서 구조적으로 수반되는 시스템 오버헤드로 인한 처리 지연을 완화함으로써, 블록체인 P2P 네트워크가 물리 네트워크에 대한 보다 정밀한 관측 정보를 기반으로 정확한 피어 선택 및 라우팅 테이블 생성을 수행할 수 있도록 하는 진보된 시스템 아키텍처를 제시한다.

일반적으로 다수의 커널 스택 경유 과정에서 발생하는 오버헤드와 응답 노드의 태스크 과부하에 따른 스케줄링 지연을 해결하기 위해서는, 불필요한 스택 통과를 최소화하거나 애플리케이션 계층에 도달하기 전 네트워크 하부 스택(Kernel Level)에서 요청을 즉각적으로 처리하는 메커니즘이 요구된다. 그러나 이 과정에서 커널 소스를 직접 수정할 경우, 개발 비용의 급격한 상승과 배포 및 관리의 비효율성이 초래될 뿐만 아니라, 시스템 보안과 안정성에 치명적인 결함을 유발할 수 있다. 따라서 커널의 무결성을 유지하면서도 성능 문제를 해결하기 위한 방안으로 다음 두 가지 기술 패러다임을 검토할 수 있다.

1. Kernel Bypass

전통적인 커널 스택의 한계를 극복하기 위한 시도로서, 커널 스택을 완전히 우회(Kernel Bypass)하는 구조를 채택하는 것이다. 방식은 일반적으로 커널의 일부 기능을

대체하는 사용자 정의 프로그램을 유저 공간(User Space)에 구현하며, 이를 통해 네트워크 패킷이나 데이터 입출력(I/O) 처리를 커널을 거치지 않고 직접 수행한다(ex. DPDK, SPDK 등).

이와 같은 구조는 커널 스택을 경유하지 않음에 따라 시스템 콜(System Call), 컨텍스트 스위칭(Context Switching), 메모리 복사(Memory Copy) 등 성능 저하를 유발하는 주요 원인들을 근본적으로 차단한다. 특히 처리 과정에서 커널의 인터럽트 방식 대신 전용 자원을 활용하므로, 로컬 노드의 작업 부하와 관계없이 결정론적이고 일정한 처리 성능을 유지할 수 있다는 강점이 있다. 또한 기존 커널 자체를 수정하지 않고도 사용자 영역의 프로그램 교체만으로 기술 구현이 가능하다는 이점이 있다.

2. 프로그래머블(Programmable) 네트워크 스택

Kernel Bypass가 커널 스택을 완전히 배제하여 성능을 극대화한다면, 대안으로 제시되는 또 다른 방안은 커널의 무결성을 유지하면서도 내부 네트워크 스택에 사용자 정의 로직을 동적으로 삽입하는 방식(ex. eBPF 등)이다.

이 방식은 사용자 영역(User Space)에서 작성한 코드를 커널 내의 샌드박스 가상 머신에서 실행함으로써, 서비스 중단 없이 커널의 모든 시스템 콜(System Call)이나 함수 호출에 후크(Hook) 형태로 기능을 추가하거나 업데이트할 수 있는 유연성을 제공한다. 이와 같은 구조는 패킷이 상위 애플리케이션 계층으로 전달되기 전인 네트워크 스택 최하단(ex. XDP 등)에서 요청을 즉각적으로 처리하는 것을 가능하게 한다.

III. 평가

본 논문에서는 기존 애플리케이션 계층의 구조적 한계로 인한 계층 오차를 극복하기 위해, 커널 최하위 스택에서 요청을 직접 처리하거나 불필요한 스택을 완전히 우회하는 고정밀 네트워크 관측 방안과 이를 구현하기 위한 기술 패러다임을 제시한다.

제안하는 기술은 [그림 1]에서 확인할 수 있듯이, 두 노드 간의 요청-응답 과정에서 네트워크 스택의 최하위 레벨(Kernel-level)을 통해 패킷을 즉각 처리함에 따라, 로컬 노드들의 작업 부하와 관계없이 꾸준히 물리 네트워크 지연에 대한 정밀 측정이 가능하다는 사실을 알 수 있다.

그에 반해, 기존 애플리케이션 계층 기반의 유저 프로세스 간 근접성 측정 방식은 다수의 커널 스택 경유에 따른 시스템 오버헤드(Stress Intensity 0%) 및 CPU 부하 가중에 의한 스케줄링 지연(Stress Intensity 50 ~ 100%) 등 시스템 내부 요인으로 인한 왜곡된 측정이 이루어지는 사실을 확인할 수 있다. 이러한 계층 오차는 물리적 근접성을 반영하고자 하는 P2P 오버레이 네트워크가 비최적화된 이웃 집합을 생성하도록 유도하며, 이로 인해 발생하는 지연 시간은 [그림 2]와 같이 전체 네트워크의 효율성을 저해하는 결과로 이어진다.

IV. 결론

본 논문에서는 중단 간 사용자 애플리케이션 기반의 물리 네트워크 계층 방식이 구조적 한계로 인해 관측 정보 왜곡을 초래함을 분석하고, 이를 극복하기 위한 차세대 블록체인 P2P 네트워크 아키텍처를 제안한다.

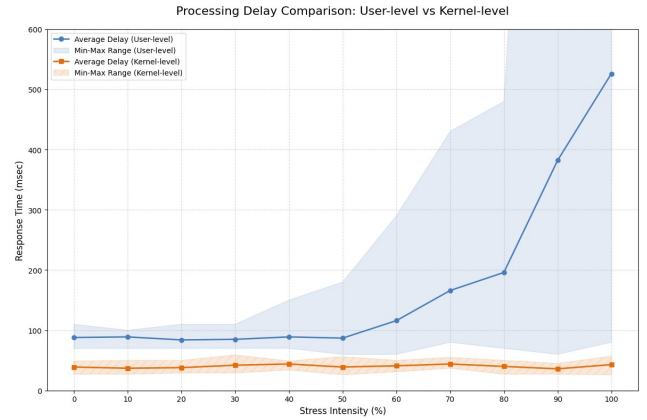


그림 1. 시스템 부하에 따른 응답 지연 시간 비교

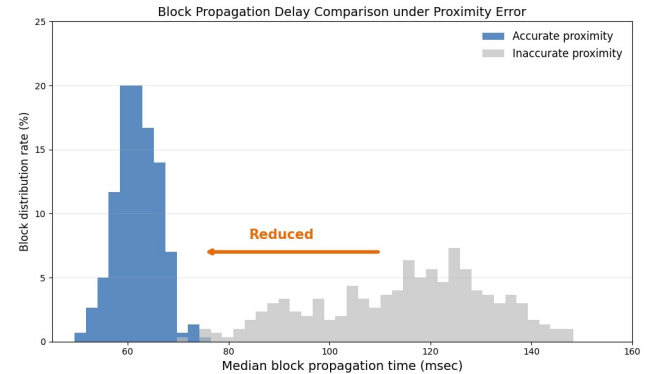


그림 2. 근접성 오차에 따른 블록 전파 지연 분포

기존 방식은 시스템 부하 증가에 따라 계층 노이즈가 지연 시간에 혼입되어 실제 물리적 근접성을 정확히 반영하지 못하며, 이는 비효율적인 이웃 노드 선택과 블록 전파 지연, 체인 분기 확률 증가로 이어짐을 실험적으로 확인하였다. 이에 본 연구에서는 Kernel Bypass 및 프로그래머블 네트워크 스택을 활용하여 네트워크 스택 하단에서 패킷을 직접 처리함으로써 블록 전파 지연을 완화하고 합의 효율성을 향상시킬 수 있음을 입증한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2025-RS-2021-II211835)

참 고 문 헌

- [1] Mao, Yifan, et al. "Perigee: Efficient peer-to-peer network design for blockchains." Proceedings of the 39th Symposium on Principles of Distributed Computing. 2020.
- [2] Zhao, Ben Y., et al. "Tapestry: A resilient global-scale overlay for service deployment." IEEE Journal on selected areas in communications 22.1 (2004): 41-53.
- [3] Yoo, Taehoon, Kiseok Kim, and Hwangnam Kim. "Trust-Defined Network: A panoramic P2P framework for distributed ledger systems." Computer Communications (2025): 108311.
- [4] Tang, Weizhao, et al. "Strategic latency reduction in blockchain peer-to-peer networks." Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems 7.2 (2023): 1-33.