Mininet을 활용한 BitTorrent 기반 응용의 Multipath TCP 전환 가능성 평가

전병현, 노희준, 백승혜*, 이원준†
인하대학교, *LG U+, †고려대학교

asdf@inha.edu, hjroh@inha.ac.kr, * shpaik@lguplus.co.kr, †wlee@korea.ac.kr

Feasibility of Adopting Multipath TCP to BitTorrent-based Applications with Mininet

Byeonghyeon Jeon, Heejun Roh, Seunghye Paik *, Wonjun Lee †
Inha University, *LG U+, †Korea University

요 약

통상적으로 다중경로 사용이 어려운 인터넷에서 다중경로를 동시에 사용할 수 있게 하는 TCP 확장인 Multipath TCP는 최근 공식 리눅스 커널에 포함되면서 확산될 것으로 기대되고 있다. 하지만 Peer-to-Peer 모델을 따르는 여러 응용에서 MPTCP가 처리율(throughput) 증대와 같은 이득이 기대됨에도 이에 대한 연구가 충분히 이루어지지 않은 상황이다. 따라서 본고에서는 대표적인 Peer-to-Peer 응용인 BitTorrent 구현에 Multipath TCP를 적용여부에 따른 성능 측정 실험을 가상 네트워크 에뮬레이터인 Mininet을 활용해 수행하여 Peer-to-Peer 응용의 전송 계층을 Multipath TCP로 전환할 가능성을 평가한다.

Ⅰ. 서론

Multipath TCP (MPTCP)는 2020년 RFC 8684[1]로 발표된 하나의 전송 계층 연결로 다중경로를 동시에 사용할 수 있게 하는 TCP 확장이다. MPTCP를 사용하면, 종단 호스트 쌍이 서로 다른 네트워크에 접속한 네트워크 인터페이스를 가지고 있을 때 타 계층 또는 타 기기의 수정 없이 다중경로를 활용할 수 있다. 이를 통해 전송 계층을 MPTCP로 전환한 응용은 신뢰성, 처리율(throughput), 전환에 따른 배포 비용 측면에서 나아질 가능성이 있다[2]. 2019년 중순까지는 인터넷에서 MPTCPv0[3,4]의 트래픽 비중은 매우 낮았으나, 최근에 점진적으로 증가하고 있는 추세이다[5]. 특히 2020년 출시된 리눅스 커널 5.6부터는 MPTCPv1[1]이 포함[6]되면서 더 많은 사용이 기대된다.

한편, BitTorrent[7]는 컨텐츠 공유를 위한, Peer-to-Peer(P2P) 아키텍처 기반의 응용 프로토콜로, 개방성과 단순성으로 인해 수많은 피어(peer)와 트래커(tracker)로 구성된 BitTorrent 생태계[8]를 구축하고 있다. 전통적인 BitTorrent에서 트래커는 컨텐츠 공유에 참여하고 있는 피어 목록을 유지하는 서버이다. 신규 피어는 트래커가 기재된 .torrent 파일을 다운로드 받아 트래커에 접속해 피어 목록을 확보하여 컨텐츠 공유에 참여한다. 피어는 컨텐츠 전체를 갖고 있어 업로드만 하는 Seeder와 일부만을 갖고 있어 업로드와 다운로드를 병행하는 Leecher로 구분된다. 피어는 트래커와의 통신을 위해 UDP를, 피어 간 통신을 위해 TCP (또는 uTP over TCP)를 사용한다.

BitTorrent는 주로 대용량 파일 공유에 사용되기 때문에, 피어 간 연결 사이에 여러 경로가 있는 경우 MPTCP를 도입하여 대역폭 자원 공유화(resource pooling)[9]를 실현할 경우 보다 빠르게 컨텐츠 배포를 할 것이라 쉽게 예상할 수 있다. 하지만 [4]에서 포트 번호를 기준으로 MPTCP를 사용한 응용을 분석한 바에 따르면 HTTPS가 99% 이상을 차지하고, HTTP, ident, SMB, Siri, RDP와 같은 클라이언트-서버 아키텍처 기반의 응용만이 관찰되었다. 즉, P2P 아키텍처에서의 MPTCP의 성능 향상 가능성 및 개선된 MPTCP 사용성에도 불구하고 관련 연구가 아직 충분히 이루어지지 않은 상황이다.

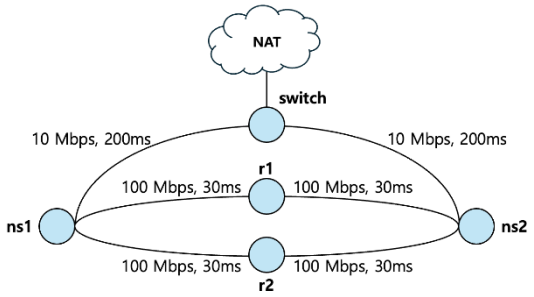

그림 1. BitTorrent 를 위한 MPTCP 테스트베드

.

따라서 본고에서는 리눅스 환경에서의 가상 네트워크 에뮬레이터인 Mininet[10]을 활용, MPTCP 테스트베드를 구축하고, 그 위에서 BitTorrent 기반 응용을 구동하여 MPTCP를 사용 여부에 따른 성능을 측정하는 실험을 수행해 전환 가능성을 평가한다.

Ⅱ. MPTCP 테스트베드 및 iperf3를 통한 사전 실험

테스트베드는 16코어를 가진 Intel i7-13700 프로세서를 장착한 데스크탑 PC에서 Oracle VirtualBox 7.0.18로 4코어 및 10GB RAM을 할당한 가상 머신 인스턴스에서 구축하였다. 가상 머신 상의 운영체제는 Ubuntu Desktop 24.04 LTS(리눅스 커널 6.8.0-31)을 설치하였다. 그림 1과 같이 두 개의 호스트 ns1, ns2와 실질적으로 호스트 간 전송에 사용할 두 경로를 구성하는 라우터 r1, r2로 이루어진 가상 네트워크를 구성하였고, 글로벌 인터넷을 통해 트래커 서버에 접속하는 상황을 상정하기 위해 Network Address Translation(NAT)이 활성화된 라우터가 설치된 별도의 네트워크를 구성하고 이 라우터를 각 호스트의 디폴트 게이트웨이로 설정하였다.

본격적인 실험에 앞서, 테스트베드에서 MPTCP가 처리율 증대를 가져올 수 있는가를 확인하기 위해 iperf3[11]를 이용해 평균 처리율을 측정하는 실험을 수행하였다. 각 호스트는 네트워크 인터페이스별로 서로 다른 네트워크에 접속하여 있으므로, 초기에 TCP 연결에 사용하는 IP 주소

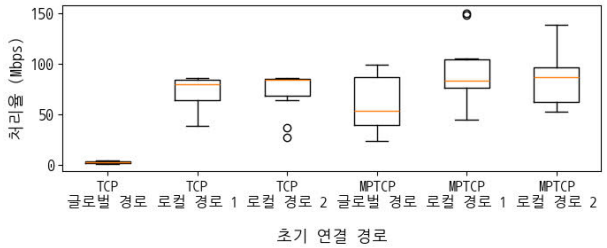

그림 2. MPTCP 테스트베드에서의 iperf3 처리율 비교

및 포트 조합 (즉, 두 엔드포인트로 인해 정해지는 경로)에 따라 처리율이 달라질 수 있다. 그림 2는 TCP와 MPTCP에 대해 초기 연결 경로를 다르게 하여 각각 10회 성능 테스트를 시행한 결과를 박스 플롯(box plot)으로 나타낸 것이다. 대역폭과 지연시간이 긴 글로벌 경로를 사용하는 경우 TCP와 MPTCP 모두 처리율이 낮은 것을 볼 수 있으며, MPTCP가 모든 초기 연결 경로에 대해 TCP보다 나은 처리율을 보임을 알 수 있다.

Ⅲ. BitTorrent 기반 응용의 MPTCP 전환가능성 실험

본 실험에서는 그림 1의 가상 네트워크에서 호스트 ns1, ns2가 각각 Seeder, Leecher로 동작할 때, 100 MiB 크기의 컨텐츠 파일을 공유하는 BitTorrent 기반 응용의 MPTCP 사용 여부에 따른 평균 처리율을 측정하였다. 또한, 트래커가 (낮은 대역폭과 긴 지연의) 글로벌 인터넷 또는 로컬 네트워크에 위치했는가에 따른 처리율 또한 측정하였다. 트래커의 위치를 바꾸어 실험하는 이유는 트래커가 피어에게 제공하게 되는 타 피어의 IP 주소가 달라지면서 초기 연결 경로가 달라지고, 사전 실험에 따라 성능에 영향이 있을 것으로 판단되기 때문이다.

본 실험에서, BitTorrent 트래커는 Node.js 기반 구현인 bittorrent-tracker[12]를 사용하였다. BitTorrent 기반 응용으로는 Command-Line Interface(CLI)를 사용하는 Mininet의 특성 상 CLI를 지원하는 Node.js 기반 구현인 webtorrent-cli [13]를 채택하였다. 사실 WebTorrent는 피어 간 통신에 TCP보다 WebRTC를 우선하여 사용하기에 대표성이 낮을 수 있으나, webtorrent-cli는 WebRTC를 지원하지 않는 WebTorrent의 변종이라 대표성 문제가 없다. 더불어, 피어 탐색을 위해 트래커 뿐만 아니라 Distributed Hash Table(DHT), ut_pex를 지원하므로 최신 BitTorrent 기반 응용으로서의 대표성을 가진다.

그림 3(a)는 트래커가 로컬 네트워크 내의 호스트 ns1에 위치하였을 때 TCP와 MPTCP의 처리율을 보여주고 있으며, MPTCP가 다중 경로를 활용하여 더 빨리 다운로드 함을 보여준다. 반면 그림 3(b)는 트래커가 글로벌 인터넷에 위치하였을 때 TCP와 MPTCP의 처리율을 보여주고 있다. 역시 MPTCP가 처리율을 개선함을 보여주지만, TCP와 MPTCP 모두 초기 연결 경로가 글로벌 경로인 점에 영향을 받아 로컬 경로에 충분한 대역폭이 있음에도 매우 낮은 처리율을 보여줌을 알 수 있다. 이러한 결과는 BitTorrent 기반 응용에서 MPTCP가 초기 연결 경로에 따라 성능이 너무 크게 좌우됨을 나타낸다.

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 BitTorrent 기반 응용의 전송 계층 프로토콜을 TCP에서 MPTCP로 전환할 경우 처리율이 향상될 수 있음을 확인한 반면, MPTCP가 TCP와 마찬가지로 초기 연결 경로에 따라 성능이 크게 좌우됨을 확인하였다. 따라서 이러한 의존성을 개선하는 후속 연구가 이루어질 필요가 있다.

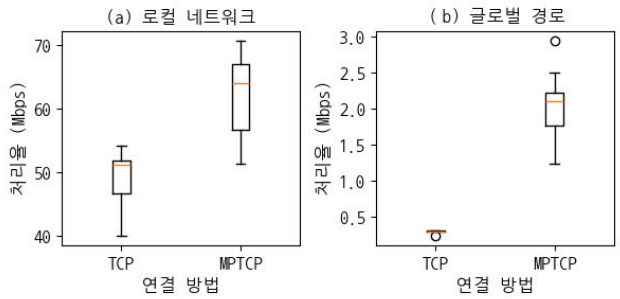

그림 3. MPTCP 여부에 따른 webtorrent-cli 의 처리율

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. RS-2023-00234719, (SW스타랩) 서비스 연속형 지향 에지 Continuum SW 프레임워크)과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00338786). 본 논문의 교신저자는 노희준(hjroh@inha.ac.kr)이다.

참 고 문 헌

[1] A. Ford *et al.*, "TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses," IETF RFC 8684, March 2020.

[2] G. Noh, H. Park, H. Roh, and W. Lee, "Secure and Lightweight Subflow Establishment of Multipath TCP," *IEEE Access*, Vol. 7, December 2019.

[3] A. Ford, C. Raiciu, M. Handley, O. Bonaventure, "TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses," IETF RFC 6824, January 2013.

[4] C. Raiciu *et al.*, "How Hard Can It Be? Designing and Implementing a Deployable Multipath TCP," in *Proc. of USENIX NSDI*, April 2012.

[5] F. Aschenbrenner *et al.*, "From Single Lane to Highways: Analyzing the Adoption of Multipath TCP in the Internet," in *Proc. of IFIP Networking*, June 2021.

[6] M. Martineau and O. Othman, "Using Upstream MPTCP in Linux System," in *Proc. of Netdev 0x14*, July 2020.

[7] B. Cohen, "Incentives Build Robustness in BitTorrent," in *Proc. of P2P Econ*, May 2003.

[8] M. Kryczka *et al.*, "Measuring the BitTorrent Ecosystem: Techniques, Tips, and Tricks," *IEEE Communications Magazine*, September 2011.

[9] D. Wischik *et al.*, "The Resource Pooling Principle," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 38, No. 5, October 2008.

[10] N. Handigol *et al.*, "Reproducible Network Experiments Using Container-Based Emulation," in *Proc. of ACM CoNEXT*, December 2012.

[11] https://software.es.net/iperf/

[12] https://www.npmjs.com/package/bittorrent-tracker

[13] https://www.npmjs.com/package/webtorrent-cli