

고속 전송을 위한 TCP 개선 연구 분석

석우진

한국과학기술정보연구원 미래네트워크연구본부

wjseok@kisti.re.kr

Analysis of TCP Improvement Studies for High-Speed Transmission

Woojin seok

Div. of Network Future Technology Research

요 약

본 논문에서는 다양한 환경에서의 전송 성능을 높이기 위한 TCP 개선 기술을 살펴보고 분석하고자 한다. 웹 기반으로 전송되는 다량의 작은 파일들의 전송 성능을 높이기 위한 기술, 하나의 대용량 파일의 전송 성능을 높이기 위한 기술들에 대하여 TCP 기술들의 개선에 대하여 분석하고자 한다.

1. 서론

TCP는 인터넷에서 송신 서버와 수신 단말 사이에서 데이터 및 파일 전송에 있어, 손실없이 전송을 수행하는 핵심 프로토콜이다. 음성, 영상과 같은 멀티미디어 전송은 약간의 손실이 있더라도 정보전달에 큰 문제를 발생하지 않지만, 데이터 및 파일 전송은 1bit 손실이 발생하여도 해당 데이터 및 파일은 무의미한 전송이 되는 것이다. 그래서 음성, 영상과 같은 멀티미디어 전송은 UDP 프로토콜이 담당하고 데이터, 파일과 같은 전송은 TCP 프로토콜이 담당한다.

웹 파일을 전송하는 구글 크롬 웹 브라우저에서 동작하는 HTTP는 하부로 TCP 대신에 QUIC 이라는 새로운 형태의 전송프로토콜을 사용한다. 유튜브 멀티미디어 파일의 전송에도 TCP 대신에 BBR을 일부 사용한다. 또한 과학분야에서 특정 송수신자들 대상으로 전송되는 대용량 파일 전송에는 TCP 대신에 UDT 전송 프로토콜을 사용하는 연구가 있었으며, 그리고 TCP 연결세션을 분리하여 전송성능을 높이는 연구들도 시도되었다. 본 논문에서는 다양한 응용분야에서 기존 전송방식 TCP 단점을 개선하여 전송 성능을 극대화하기 위한 연구를 분석하고 또한 TCP 연결세션을 분리하는 방안을 제안하고자 한다.

2. 고속전송을 위한 TCP 성능개선 연구

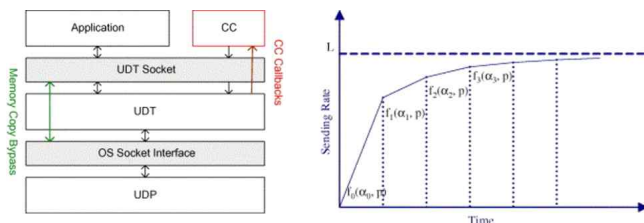
구글 크롬에서 사용되는 QUIC은 TCP 연결설정을

위한 지연 시간을 줄이고 또한 하나의 패킷손실 이후 후속적인 패킷전송 지연을 없애기 위한 것으로, 결국 웹 파일 특성상 다수의 작은 파일들의 전송에서의 성능을 높이하고자 하는 것이다. UDP 기반으로 TCP 기능을 대체하도록 구현하였다. TCP 3-way 핸드셰이크 없는 연결을 구현하여, 연결 설정으로 필요했던 RTT 소요시간을 제거함으로써, 송신 서버와 수신 단말간의 설정 시간이 기존 TCP에 비해 짧아졌으며, 과거에 연결된 이력이 있다면 한 번의 왕복 시간도 없이 데이터 전송 시작 가능하도록 하였다. 또한 헤드 오브 라인 블로킹(Head-of-Line Blocking) 방지하였는데, 이는 TCP 전송상에서(혹은 UDP 전송도 해당되는 사항으로) 하나의 전송경로에서 앞선 패킷이 진행되지 못할 경우, 후속의 많은 패킷들이 대기하여야 하는 문제를 없앴 것이다. 하나의 스트림이 지연되어도 다른 스트림에 영향 없이 병렬 데이터 전송을 가능하여 전송 성능을 극대화하였다.

구글 BBR은 손실기반 TCP의 단점을 개선하여 전송성능을 개선하고자 하였다. TCP는 전송성능을 높이기 위하여 $BDP(Bandwidth * Delay)$ 공식 기반으로 전송구간에 패킷을 채워나가는 방식이다. 이는 혼잡이 발생하면 다수의 패킷이 손실될 수 있는 여지가 있는 것으로, BBR은 이러한 손실기반 혼잡처리를 지양하고, Bandwidth 와 Delay 값을 지속적으로 측정하면서 이 값이 특정값을 넘지 않고 잘 유지하는 방식을 사용하였다. 손실 발생을 미연에 방지

하자는 의도인 것이다. 예측하지 못하여 패킷 손실이 발생할 수 있지만, 확률적으로 패킷손실 발생을 줄이고 또한 경로상의 네트워크를 패킷들로 완전 가득 채우지 않기 때문에 전송 지연시간도 개선되는 효과가 있다.

일리노이주립대학의 UDT(UDP-based data transfer for high-speed wide area networks)는 고속 광역 네트워크의 효율적 활용을 위해 설계되었다 [1]. 이는 특정 연결에 대한 원거리 대용량 파일 전송 성능을 높이기 위한 것이다. UDP를 기반으로 TCP를 구현하였고, QUIC과 마찬가지로 TCP 3-way 핸드셰이킹을 생략함으로써, RTT 시간을 줄일 수 있다.



[그림 1] UDT 전송 프로토콜

[Fig 1] UDT Transmission Protocol

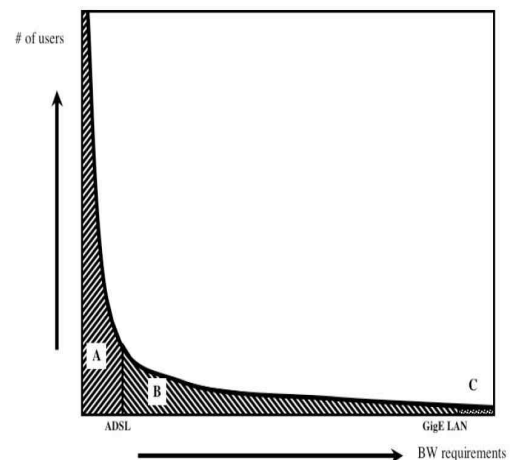
3. TCP 성능개선 분석 및 제안

TCP는 송신자와 수신자간의 연결설정을 위하여 3-way 핸드셰이킹을 실시하며, 이를 위하여, RTT 시간의 지연이 발생한다. HTTP 1.0에서 HTTP 1.1로 발전하면서, 복수개 연결을 동시에 가능하도록 하여 RTT 지연시간으로 인한 HTTP 성능을 개선하였지만, 웹에서 발생하는 수많은 전송 요구들이 대부분 크지 않은 다수 파일이기 때문에, TCP 3-way 핸드셰이킹을 요구하는 연결로 인한 성능저하가 여전히 많을 수 있다. UDP 기반의 QUIC은 이러한 성능저하 부분을 구조적으로 개선한 것이다.

또한, TCP가 손실 발생 없이 (lossless transmission) 전송하기 위해서는, 혼잡제어를 통해서 손실을 최소화해야 하며, 손실된 패킷은 재전송을 통해서 복원시키도록 한다. 혼잡제어는 경로상 구간을 실시간으로 예측해야 하는 것으로 정확도를 높이는 것이 기술적으로 어려운 부분이다. 또한 혼잡의 징후로 연속된 중복 ACK 메시지와 타임아웃을 사용하는데, 이는 대부분 손실 이후의 징후이다. 서버와 호스트의 거리가 전 지구적으로 분산된 상황에서, BDP 기반의 TCP는 혼잡으로 인한 손실이 다수의 패킷 손실을 유발할 수 있으며, 이는 유튜브

등의 멀티미디어 파일의 경우 큰 성능 저하를 유발할 수 있을 것이다. BBR은 이러한 손실 발생 이후 사후 처리를 구현한 TCP를 구조적으로 개선하여 손실 발생을 사전에 예방하고자 하는 기술이다. 멀티미디어 파일 전송의 특성상 재전송 대상 파일이 큰 경우는 손실 발생을 사전에 예방하는 방안이 상대적으로 효율적일 수 있을 것이다.

특정한 송수신자들 간의 원거리 대용량 파일의 경우, 범용성의 TCP를 대체하여 UDP를 기반으로 손실처리를 위한 기능을 추가한 UDT가 사용되기도 한다. 이는 전용망 기반의 과학빅데이터 전송을 대상으로 하며, 경쟁을 유발하는 다수의 트래픽이 존재하지 않을 때 성능을 높이기 위한 노력이다.



[그림 2] 타입B 사용형태: 고대역의 특수사용자[2]

[Fig 2] TypeB Use Case: High Bandwidth Users

과학분야에서 특정한 송수신자를 위한 전용망을 사용하여 대용량 데이터를 사용하는 경우, 그림에서 처럼 타입B 사용자에게 해당하는 경우가 될 것이고, 이에 대한 전송 성능을 극대화 하기 위하여 TCP 세션을 분리하여 전송처리하는 방법을 제안한다.

대용량의 데이터를 전송하기 위하여 다수의 연구가 제안되어 왔다. 초기 FTP는 대용량 파일 전송의 유일한 수단이었지만, 이후 병렬 전송(bbFTP, gridFTP, BDSS 등)과 직렬 전송(Phoebus, I-TCP 등) 방식으로 성능을 개선해왔다. 과학 빅데이터 전송 환경에서 최종 수신자가 위치한 엣지 네트워크는 혼잡도가 높고 대역폭이 낮아 패킷 손실율이 크다. TCP는 소량의 손실만 발생해도 재전송과 윈도우 회복 과정으로 인해 성능이 급격히 저하된다. Phoebus, I-TCP가 이를 해결하려 했으나, 중간 노드의 부하와 TCP 연결 관리 비용이 크다는 문제가 있었다.

제안하는 방식은, 중간노드를 추가로 설치하는 방식으로, 전송하고자 하는 대용량 파일을 중간서버에 저장되고, 이후 고대역·저손실 백본망을 통해 다시 전송하는 방식이다. 중간서버는 고속 네트워크 인터페이스, SSD 기반 스토리지, PCIe 지원으로 설계되며, 커널 및 TCP 버퍼 최적화(HTCP 혼잡 제어 알고리즘, 대규모 BDP 기반 버퍼 크기 조정)를 적용한다. 실험 결과, 최적화된 DTN 간 전송은 제공하는 전송최대 대역폭 대비 95%의 전송성능을 보여주었다.

TCP 연결을 고성능 구간과 저성능 구간으로 분리하고, 중간서버에서 저장 및 전달을 하고자 하는 것이다. 이는 에지 네트워크 손실의 영향을 전체 경로에서 격리시키고자 하는 것으로, 특히 국제망(예: 200ms RTT, 10Gbps 링크)의 경우 손실 회복 시간이 수 시간 이상 소요될 수 있는데, 중간서버 방식은 이를 효과적으로 완화하기 때문이다.

4. 결론

인터넷 사용이 다양하게 변화하는 환경에서 전송성능을 극대화하기 위한 연구가 실현되고 있다. 이는 TCP를 개선하거나 TCP를 대체하고 있다. 특히 전용망 형태로 전송되는 과학 분야 대용량 데이터의 경우 TCP 연결세션을 분리하고 중간서버를 두는 형태의 전송 성능 개선을 제안하였으며, 95% 성능을 보여주었다. 과학분야에서 선행적으로 실현되는 고성능 네트워킹 기술들이 민간으로 전이되어 클라우드 간 백업 등의 적용사례도 가능할 것으로 사려된다.

Acknowledge

이 논문은 2025년도 한국과학기술정보연구원(KISTI)의 기본사업으로 수행된 연구입니다. (국가 연구 인프라 기반 양자암호통신망 기술 개발, K-25-L05-M02-C02)

참고문헌

- [1] Robert L. Grossman, et al., "Data mining middleware for wide-area high-performance networks," International Journal of Future Generation Computer Systems. (2006), Vol. 22, No. 8, pp. 940~948.
- [2] Cees de Laat, et al., , "The rationale of the current optical networking initiatives", International Journal of Future Generation Computer Systems. (2003), Vol. 19, No. 6, pp. 999-1008.