

현재 운용 중인 인터넷 서버들의 TCP Congestion Control Algorithm 식별 방안

이준석, 김병철*, 이재용

충남대학교 전과정보통신공학과

wnstjr3678@cnu.ac.kr, *byckim@cnu.ac.kr, jyl@cnu.ac.kr

Identification Method for the Current Operating TCP Congestion Control Algorithms in Internet Servers

Lee Jun Seok, Kim Byung Chul*, Lee Jae Yong

Department of Radio and Information Comm. Eng. Chungnam National Univ.

요 약

인터넷에서의 방대한 데이터 전송의 대부분은 TCP를 기반으로 이루어지며, 이는 신뢰성 있는 데이터 전달과 흐름 제어, 혼잡 완화를 가능하게 한다. TCP 송신 측은 네트워크 환경에 따라 혼잡 제어 알고리즘(CCA, Congestion Control Algorithm)을 적용하여 안정적 통신을 보장하고, 가용 대역폭을 효율적으로 활용한다. 본 논문에서는 국내외 주요 웹사이트와 로컬 테스트베드를 대상으로 BiF(Bytes in Flight) 기반 CCA 분석 도구인 Nebby를 활용하여 각 사이트에서 실제로 사용 중인 혼잡 제어 알고리즘을 식별하고 특성을 분석하였다. 이를 통해 국내외 사이트에서의 CCA 사용 현황을 정량적으로 조사하고, TCP 혼잡 제어 알고리즘의 실제 적용 사례와 특성을 확인하였다.

I. 서 론

현재 인터넷에서는 TCP Cubic[1], BBR[2], Reno[3] 등 여러 CCA가 활용되고 있으나, 실제 서비스 환경에서의 채택 현황은 제한된 관측에 의존하고 있어 보다 정밀한 실험과 분석이 요구된다. 특히, 웹 서비스의 특성과 네트워크 조건에 따라 CCA의 동작 양상과 성능은 크게 달라질 수 있으므로 이에 대한 정량적 분석이 필요하다.

본 논문에서는 대표적인 알고리즘인 BBR을 비롯한 여러 CCA를 실제 국내외 웹 환경에서의 사용현황을 조사하고 로컬 테스트베드에서 비교·분석하였다. 이를 위해 Nebby[4]라는 최신 분석 도구를 활용하여 TCP 흐름에서 발생하는 BiF(Bytes in Flight) 데이터를 기반으로 각 CCA를 식별하고 평가하였다. 이를 통해 실제 국내외의 인터넷 환경에서 사용되는 CCA의 유형과 분포를 파악하고 BiF 기반 분석 방법론이 갖는 정확성의 검증목표를 한다.

II. 기존 연구 동향

최근 인터넷 환경에서의 CCA는 BBR의 도입으로 급격히 진화하고 있으며, 따라서 운영 중인 CCA의 실태를 정확히 파악하는 것은 필수적 과제로 부각 된다. 기존 연구들은 주로 웹사이트 트래픽을 관측하고 네트워크 환경별 CCA 동작을 계량화하며 알고리즘의 분포와 특성을 평가하였다[5][6].

그러나 기존 식별 도구들은 주로 혼잡 윈도우(cwnd) 변화를 측정하는 방식에 의존하였는데, 속도 기반(rate-based) CCA는 cwnd를 실제 동작 지표로 사용하지 않기 때문에 이러한 접근만으로는 알고리즘을 정확히 구분하기 어렵다는 한계를 지닌다.

이에 제안된 Nebby[4]는 BiF를 핵심 지표로 활용하여, 클라이언트 측 인위 지연을 통해 병목 구간을 더 넓게 관찰하며 이를 통한 BiF의 주기적 진동 패턴을 기반으로 CCA를 분류한다. 이러한 특징으로 인해 Nebby는 속도 기반 알고리즘을 포함한 다양한 CCA를 효과적으로 식별한다.

III. Nebby를 활용한 운용 중인 CCA 조사 실험 방법



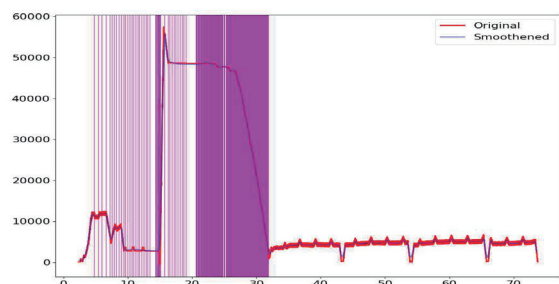
<그림 1> 실험1의 로컬 테스트베드 환경 구성



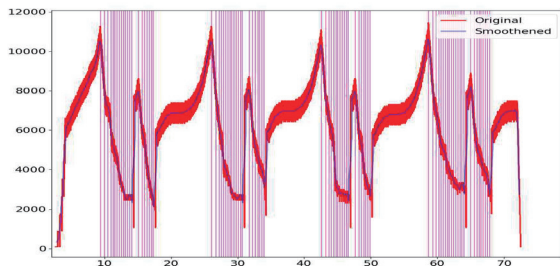
<그림 2> 실험2의 실제 웹 실험 환경 구성

본 논문에서는 Ubuntu 20.04 LTS, Iperf3[7], Nebby를 활용하여 실험을 수행하였다. <그림 1>은 Nebby[4]의 CCA 분석 정확도 평가를 위한 실험 1의 로컬 테스트베드를 나타낸다. Server와 Client 사이에 대역폭 200Kbps, 버퍼의 크기를 2BDP, delay는 100ms로 설정하여 iperf3로 BBR, Cubic, Reno를 각각 적용하여 발생시킨 60초간의 트래픽을 Nebby로 분석하였다. <그림 2>는 실제 웹 환경 실험을 위한 실험2의 구성으로 실제 웹사이트의 Server에서 송신되는 네트워크 트래픽을 대역폭 200Kbps, 버퍼의 크기를 2BDP, delay 100, 150, 200ms의 세 조건으로 측정된 뒤 Nebby로 분석하였다.

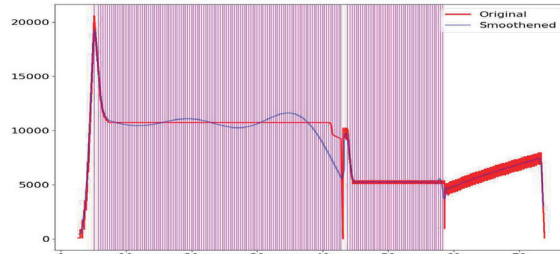
IV. 실험 및 평가



<그림 3> BBR의 BiF 그래프

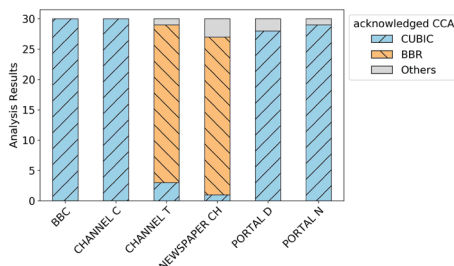


<그림 4> Cubic의 BiF 그래프

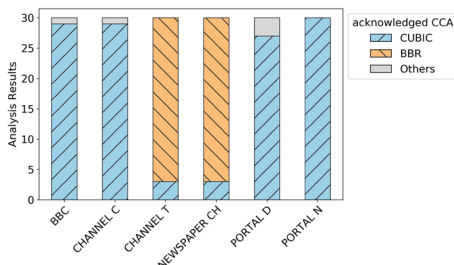


<그림 5> Reno의 BiF 그래프

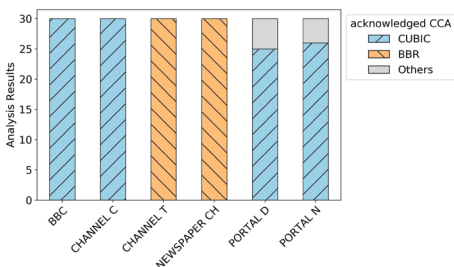
<그림 3, 4, 5>는 실험1에서 Nebby[4]를 통해 분석된 BBR, Cubic, Reno의 BiF 그래프를 보여준다. BBR[2]의 BiF는 probe_bw 단계에서의 주기적인 상승과 하강, rtt 안정화 구간이 뚜렷하게 나타나며 특유의 탐색적 패턴을 보인다. Cubic[1]은 세제곱 함수 형태(x^3)에 따른 완만한 증가와 급격한 가속 후 포화 구간이 드러나, 그래프 전반에 걸쳐 곡선적인 특징이 뚜렷하다. Reno[3]는 선형적 증가와 갑작스러운 감소가 반복되는 전형적인 AIMD(Additive Increase Multiplicative Decrease) 패턴을 보여준다. 이처럼 각 알고리즘의 BiF 그래프는 고유한 형태적 특성을 분명히 나타내며, Nebby가 이런 혼잡 제어 알고리즘의 동작을 정밀하게 포착할 수 있음을 보여준다.



<그림 6> Delay 100ms에서의 CCA 분석 결과



<그림 7> Delay 150ms에서의 CCA 분석 결과



<그림 8> Delay 200ms에서의 CCA 분석 결과

<그림 6, 7, 8>은 실험2에서 국외 2개 사이트(bbc.com, Channel C)와 국내 4개 사이트의 네트워크 트래픽을 30회 반복 측정된 후 Nebby를 통해 분석한 결과를 보여준다.

측정 결과, Nebby는 각 사이트에서 사용되는 혼잡제어 알고리즘을 일관되게 식별하였으며, CUBIC과 BBR이 주로 사용되는 패턴이 확인되었다. 반복 실험과 BiF 기반 분석을 통해 사이트별 CCA의 유형과 분포를 명확히 평가할 수 있었으며, Nebby의 분석 정확성과 실험 신뢰성을 동시에 확인할 수 있었다. 또한 분석 과정에서 각 사이트의 BiF 변화 패턴을 비교한 결과, CUBIC과 BBR은 명확한 특징을 보였다.

이러한 패턴 분석을 통해 각 사이트에서 사용되는 CCA의 동작 양상과 상대적 특성을 보다 구체적으로 이해할 수 있었으며, 사이트별 트래픽 흐름에서 나타나는 알고리즘 간 차이와 공통적 특징을 시각적으로 확인하였다.

다만, 실험에 적합한 사이트를 선정하는 데에는 제약이 존재하였다. Nebby가 CCA를 안정적으로 식별하기 위해서는 최소 400KB 이상의 전송 크기와 16초 이상의 측정 시간이 요구되었으며, 이와 같은 제약은 실험 대상 선정 과정에서 일정한 한계로 작용하였다.

V. 결론

본 연구에서는 Nebby[4]를 활용하여 실제 웹 환경과 로컬 테스트베드에서 BBR, CUBIC, Reno 등의 혼잡제어 알고리즘(CCA)의 동작 특성을 분석하였다.

실험 결과, Nebby는 각 알고리즘을 높은 정확도로 식별하였으며, BiF(Bytes in Flight) 기반 분석을 통해 알고리즘별 고유 패턴과 시간적 변화를 정밀하게 포착할 수 있음을 확인하였다. 국내외 6개 사이트 분석에서는 CUBIC과 BBR이 주로 사용되는 패턴이 관찰되었으며, 이를 통해 실제 웹 환경에서 널리 사용되는 CCA 유형을 파악하였다. 실제 웹 트래픽에서 CCA의 분포와 특성을 체계적으로 파악함으로써, BiF 기반 분석 도구 Nebby의 실용성과 신뢰성을 검증하였으며, 향후 네트워크 성능 평가와 혼잡 제어 연구를 위한 기초 자료로 활용될 수 있음을 보여준다.

참 고 문 헌

- [1] Ha, S., Rhee, I., and Xu, L., "CUBIC: A new TCP-friendly high-speed TCP variant," ACM SIGOPS Operating Systems Review, 42(5), pp. 64-74, Jul. 2008
- [2] Cardwell, N., Cheng, Y., Gunn, C. S., Yeganeh, S. H., and Jacobson, V., "BBR: Congestion-Based Congestion Control," ACM Queue, 14(5), pp. 20-53, Oct. 2016.
- [3] Jacobson, V., "Congestion Avoidance and Control," ACM SIGCOMM computer communication review, 18(4), pp. 314-329, Aug. 1988
- [4] A. Mishra, L. Rastogi, R. Joshi, and B. Leong, "Keeping an eye on congestion control in the wild with Nebby," ACM Meas. Anal. Comput. Syst., vol. 3, no. 3, Article 45, Dec. 2024.
- [5] anysha Ware, "Battle for Bandwidth: On the Deployability of New Congestion Control Algorithms," Carnegie Mellon Univ., Aug. 2024.
- [6] Ayush Mishra, Xiangpeng Sun, Atishya Jain, Sameer Pande, Raj Joshi, and Ben Leong, "The Great Internet TCP Congestion Control Census," ACM Meas. Anal. Comput. Syst., vol. 3, no. 3, Article 45, Dec. 2019.
- [7] Iperf - The TCP, UDP And SCTP Network Bandwidth Measurement Tool, [Online], Available: <https://iperf.fr/>.