

인터넷 서비스 향상을 위한 Google의 연구 개발 분석

김 평 수*

An Analysis of Google's Research and Development Works for Improving Internet Service

Pyung Soo Kim*

요 약

본 논문에서는 인터넷 서비스 향상을 위한 Google의 웹페이지 반응속도 및 전송 계층 개선 관련 연구 개발 내용을 분석한다. 먼저, 웹페이지 반응속도 향상을 위해 개발되었으며 HTTP/2의 기반 기술이라 할 수 있는 응용계층 프로토콜인 SPDY를 분석한다. 이후, 전송계층에서 연구개발을 진행하고 있는 TFO(TCP Fast Open), QUIC(Quick UDP Internet Connections), BBR(Bottleneck Bandwidth and RTT)을 분석한다. 아울러, 최근 들어 모바일 웹페이지 로딩 시간 단축을 위한 사실상 표준으로 간주되고 있는 모바일 콘텐츠 최적화를 위한 오픈소스 라이브러리 AMP(Accelerated Mobile Pages)를 분석한다. 마지막으로, 연구개발 내용들의 핵심내용 및 실제 개선 사례를 정리하고, 시장 중심의 사실상 표준화 연계 전략을 기술한다.

Key Words : Google, Internet Service, Page loading Time, Standardization, Transport layer.

ABSTRACT

This paper analyzes Google's research and development works to improve webpage loading time and transport layer. First, SPDY, an application layer protocol, is briefly analyzed, which was developed to improve webpage loading time and a basic technology for the HTTP/2. Then, TFO(TCP Fast Open), QUIC(Quick UDP Internet Connections) and BBR (Bottleneck Bandwidth and RTT) under development in the transport layer are analyzed. In addition, Accelerated Mobile Pages (AMP) is analyzed, which is an open source library for mobile content optimization and is deemed as the de facto standard for shortening the mobile web page loading time. Finally, research and development works, improvement cases, standardization works and strategies in markets are summarized and analyzed.

I. 서 론

최근 들어, 스마트폰(4G 및 5G) 사용자의 폭발적인 증가, 엄청난 숫자의 인터넷 디바이스가 연결되는 사물인터넷(IoT)의 빠른 성장세와 서비스 사업자의 지속적인 네트워크 속도 개선으로 다양한 모바일 멀티미디어 동영상 소비로 인해 향후 급격한 모바일 데

이터 트래픽 증가가 예상된다. 하지만, 이러한 급격한 데이터 트래픽 증가 속도에 모바일 네트워크 접속 속도가 미치지 못할 것으로 예상되기 때문에 사용자가 체감하는 인터넷 속도에 대한 만족감은 점차 하락할 수 있다¹⁾. 모바일 데이터 트래픽의 증가 속도를 통신 속도가 따라가지 못하는 한계를 극복하기 위해서는 인터넷 상에서 움직이는 수많은 패킷들이 효율적으로

* First Author : (ORCID:000-0002-9589-446X)Korea Polytechnic University, Department of Electronic Engineering, pskim@kpu.ac.kr, 중신회원

논문번호 : 201811-366-B-RE, Received November 17, 2018; Revised January 3, 2019; Accepted January 11, 2019

전달되도록 관리하고 조절하는 데서 그 해결책을 찾을 수 있다. 이러한 역할을 위해 현재까지 가장 널리 사용되고 있는 전송계층 프로토콜이 1970년에 개발된 TCP이며, 국제표준화 기구인 IETF(Internet Engineering Task Force)의 발표에 따르면 인터넷 트래픽의 약 90% 이상이 TCP를 이용하여 전송되고 있다²⁾. 하지만, 네트워크의 속도가 지속적으로 고속화되는 반면에 기존의 TCP 혼잡 윈도우 크기 조절을 통한 패킷 전송 방식은 네트워크 자원을 충분하게 활용하지 못하는 것으로 밝혀지게 되었다. 이 때문에, 지난 수십 년간 많은 연구 개발을 통해 TCP의 속도를 향상시키기 위한 다양한 노력이 진행되었다³⁾⁴⁾.

한편, 최근 스웨덴의 웹사이트 모니터링 기관 핑덤은 인터넷을 사용할 때 어떤 웹페이지는 콘텐츠를 읽는 시간 즉 ‘페이지 로딩 시간(Page Loading Time, PLT)’이 길어질수록 웹 콘텐츠를 서비스 받기 위해서 수 초 혹은 그 이상을 기다려야 하는 상황에서 기다리기보다 차라리 웹 콘텐츠 소비를 포기하고 그 즉시 웹사이트를 나가거나 다른 웹페이지에 접속할 가능성을 의미하는 ‘반송률 혹은 이탈률(Average bounce rate)’이 증가할 수 있다는 조사 결과를 공개했다⁸⁾. 반송률이 높은 웹사이트는 접속자가 있어도 그 안에서 클릭을 유발해 제품 구매 등으로 이어질 가능성이 적다는 것을 의미한다. Google은 최근 PC 기반에 이어 모바일 기반에서도 페이지 로딩 속도가 느린 웹사이트에 대해서 검색 순위를 낮추겠다고 발표를 하기도 했다⁹⁾. 이렇듯, 웹페이지 반응속도는 인터넷 서비스 향상을 위한 중요한 지표라 할 수 있다. 최근 들어 웹콘텐츠의 크기가 점차 커지고 있는 상황에서 웹페이지 로딩 시간을 어느 수준까지 빠르게 개선 시켜야 할지 정하는 것이 더 중요해질 것으로 예상된다.

따라서, 전송 계층 개선은 물론 웹페이지 반응속도 개선과 같은 인터넷 서비스 향상 이슈가 매우 중요하다고 할 수 있다. Google은 인터넷 서비스 향상을 위해 웹페이지 반응속도 및 전송계층 개선에 관한 다양한 연구개발을 진행하는 대표적인 기업이라 할 수 있다. Google은 연구 초기에 ‘Make the Web Faster’이라는 계획을 세우고 웹페이지들의 반응속도를 향상시킬 수 있는 프로토콜을 연구개발 하였다. 웹에서 사용하는 프로토콜은 HTTP와 TCP이다. TCP가 전송계층 프로토콜인 반면 HTTP는 응용 계층 프로토콜로써 기본적인 요청/응답의 시맨틱스를 제공한다. 원래 Google은 전송계층에서 웹페이지 반응속도를 개선할 가능성이 더 높다고 생각하지만, 연구개발 초기에는 응용계층 HTTP를 중점적으로 면밀히 분석을 했다.

Google은 HTTP/1.1의 문제점을 해결하고자 2009년 SPDY라는 새로운 실험 프로토콜을 발표하였고, 이는 IETF로 하여금 HTTP/2 표준화를 완성하는데 큰 자국제 역할을 하였다. 이후, Google은 인터넷 서비스 향상을 위해서 웹페이지 반응속도 개선을 전송계층에서 처리하는 연구개발을 시작하였고, 자사의 대표적 인터넷 서비스 관련 기술인 Google 검색 엔진, 유튜브(Youtube), 크롬(Chrome)을 기반으로 실제 서비스를 통해 검증까지 완료된 결과물을 발표하였다. 최근 Google에서 개발한 인터넷 서비스 관련 기술들이 높은 시장 점유율을 보이고 있는데 주요 원인에는 여러 가지가 있겠지만, Google의 인터넷 서비스 향상을 위한 다양한 연구 개발이 중요한 역할을 했을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 인터넷 서비스 향상을 위한 Google의 웹페이지 반응속도 및 전송 계층 개선 관련 연구 개발 내용을 분석한다. 첫 번째로, 웹페이지 반응속도 향상을 위해 개발되었으며 HTTP/2의 기반 기술이라 할 수 있는 응용계층 프로토콜인 SPDY를 분석한다. 두 번째로, 전송계층에서의 연구개발 기술인 TFO(TCP Fast Open), QUIC(Quick UDP Internet Connections), BBR(Bottleneck Bandwidth and RTT)을 분석한다. 아울러, 최근 들어 모바일 웹페이지 로딩 시간 단축을 위한 사실상 표준으로 간주되고 있는 모바일 콘텐츠 최적화를 위한 오픈소스 라이브러리 AMP(Accelerated Mobile Pages)를 분석한다. 마지막으로, 연구개발 내용들의 핵심내용 및 실제 적용에서의 개선 사례를 정리하고, 표준화 활동을 통한 결과물과 시장 중심의 표준화 연계 전략을 기술한다.

II. 인터넷 서비스 향상을 위한 Google의 연구 개발

Google의 대표적인 인터넷 서비스 관련 기술로는 검색 엔진인 Google, 동영상 플랫폼인 유튜브, 웹브라우저인 크롬 등이 있다. 최근 시장 조사기관들의 조사 결과에 따르면, 이 세 가지 서비스는 매우 높은 세계 시장 점유율을 차지하고 있다.

검색 엔진 시장의 경우, 시장 조사기관인 스탯카운터(StatCounter)에 따르면, 전체 디바이스 환경을 고려할 때 Google이 92.3%의 점유율을 차지하며, 스마트폰 환경에서는 무려 95%에 육박하는 시장 점유율로 거의 독점 서비스 수준이다. 경쟁이 극심해지는 동영상 플랫폼의 경우 전 세계는 물론 우리나라에서도 시장지배자적인 점유율을 확보하고 있는 것은 유튜브

이다. 세계 시장의 경우, 시장조사기관 Datanyze Universe에 따르면, 유튜브는 77.4%의 점유율을 차지하고 있다. 국내 시장의 경우, 시장조사기관 닐슨코리아 클릭 조사 결과에 따르면, 유튜브가 국내의 온라인 동영상 시장에서 74.9%의 점유율을 차지하고 이르는 것으로 나타나고 있다. 국내 인터넷 방송의 선구자라 할 수 있는 아프리카TV의 경우는 4%, 포털 사이트의 동영상 서비스의 경우는 무의미한 수준의 점유율을 보이고 있다. 다시 말해서, 유튜브를 벤치마킹하여 시작된 다른 동영상 서비스 플랫폼들은 유튜브가 점유하고 있는 시장을 차지하지 못하고 있는 상황이며, 향후에도 유튜브의 영향력은 더욱 커질 것으로 전망하고 있다. 과거에는 점유율 100퍼센트라는 말이 과언이 아닐 정도로 대부분의 컴퓨터 사용자들이 마이크로소프트사의 인터넷 익스플로러를 사용했다. 하지만, 그 이후 Google의 크롬이나 파이어폭스(Firefox), 사파리(Safari) 등 다양한 웹 브라우저가 등장하였고 다양한 환경에 맞게 사용되고 있다. 일반 PC 외에 스마트 단말에서의 웹브라우저의 점유율 경쟁이 매우 치열해졌고, 그 중에서도 크롬 브라우저가 높은 점유율을 기록하고 있다. 최근 시장조사기관 넷마켓쉐어(Netmarketshare) 및 스탯카운터에 따르면, 일반 PC는 물론 모바일 디바이스 환경에서 60% 이상의 점유율을 보이고 있을 정도이다.

이러한 매우 높은 시장 점유율의 원인에는 여러 가지가 있겠지만, Google의 인터넷 서비스 향상을 위한 다양한 연구 개발이 중요한 역할을 했을 것으로 판단된다. 다음에서 인터넷 서비스 향상을 위한 Google의 웹페이지 반응속도 및 TCP 성능 개선 관련 연구 개발 내용을 소개한다.

2.1 HTTP/2 표준화를 이끈 실험 프로토콜 SPDY

HTTP/2는 2015년 IETF가 표준화한 프로토콜로서, 주요 목표는 웹페이지 로딩 시간(Page Loading Time, PLT)을 줄이는 것이며 이를 위해 요청 및 응답 다중화(Multiplexed Stream)를 지원하고, HTTP 헤더 필드의 효율적 압축(Header Compression)을 통해 프로토콜 오버헤드를 최소화하고, 요청 우선순위 지정(Stream Prioritization) 및 서버 푸시를 지원한다. 이러한 HTTP/2의 기반이 되는 기술이 Google의 SPDY('speedy'라는 단어를 기반으로 Google이 만든 조어)이다^{110,111}. IETF가 1996년에 발표한 HTTP/1.0과 1999년에 발표한 HTTP/1.1은 반응속도에 대해 특별히 고려된 프로토콜이 아니었다. HTTP/1.1는 기본적으로 하나의 연결(Connection)당 하나의 요청을 처

리 하도록 설계 되어 있었다. 이 때문에 동시전송이 불가능하고 요청과 응답이 순차적으로 이루어지다 보니 웹 문서 안에 포함되어 있는 이미지, CSS, 스크립트 등 여러 가지 다양한 자원을 처리하려면 요청할 리소스 개수에 비례해서 대기 시간(Latency)이 길어지게 되었다. HTTP/1.1에서 하나의 연결당 하나의 요청을 처리하는 문제를 개선할 수 있는 기법 중 파이프라이닝(Pipelining)이 존재하는데 이것은 하나의 연결을 통해서 다수개의 파일을 요청/응답 받을 수 있는 기법을 의미한다. 이 기법을 통해서 어느 정도의 성능 향상을 얻을 수 있었으나 큰 문제점이 발생하였는데 바로 HOL 차단(Head-of-line block)이며 속도 문제를 일으키는 주요 원인이었다. HTTP/1.1의 HOL 차단 문제는 HTTP/2가 TCP 상에서 멀티플렉싱을 허용함으로써 문제를 해결했으며, 많은 HTTP 요청과 응답은 응용 프로그램 프로토콜을 차단하지 않고 동시에 처리될 수 있다.

이렇듯, HTTP/1.1 표준이 발표되었던 1999년 이후 10년 동안 네트워크 상에서 전송되는 웹페이지들은 1999년 당시 웹페이지들과는 많이 달라졌고, 이에 따라 HTTP/1.1을 개발하던 시절에 예상할 수 없었던 개선이 필요하게 되었다. HTTP/1.1의 문제점 해결을 위해 노력한 곳은 IETF HTTP Working Group(HTTP WG)이 아닌 Google이었으며, Google이 자신들의 'Make the Web Faster' 노력의 시작으로 2009년 새로운 실험 프로토콜인 SPDY를 발표하였다. 전통적인 TCP/IP 계층 모델과 비교하여 SPDY의 계층을 표현하면 <그림 1>과 같다.

SPDY는 초창기 인터넷 환경에서 고안된 HTTP/1.1의 단점들을 보완하기 위해 HTTP의 데이터 전송 포맷과 연결 관리 부분을 수정하여 TCP 연결을 보다 효율적으로 사용할 수 있도록 만든 것이다. 결국, SPDY의 궁극적인 목표는 HTTP/1.1의 성능 제한을 해결하여 웹페이지의 로딩 시간을 50%로 줄이는 것이다. 이를 실현하기 위한 SPDY의 핵심 기술은 새 바

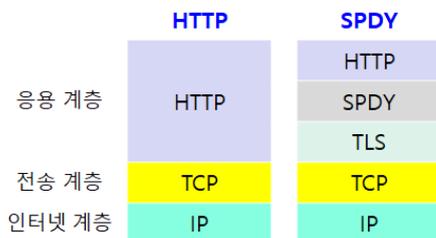


그림 1. SPDY 계층 표현
Fig. 1. SPDY Protocol Layer

이더리 프레이밍 계층을 도입하여 하나의 커넥션으로 동시에 여러개의 메시지를 주고 받을 수 있는 요청/응답의 다중화를 지원한다. 또한, 특정 자원의 수신이 늦어질 경우, 의존성 있는 자원도 렌더링이 늦어지는 문제가 발생할 수 있는데 이러한 문제를 해결하기 위해 자원간 의존관계를 설정하는 우선순위 지정을 지원하며, HTTP 특성상 헤더가 중복적으로 전송하는 경우가 많은데 여러 요청에 대해 중복값이 존재하는 경우 성능향상을 위한 헤더 압축을 지원함으로써 기본 TCP 연결을 보다 더 효율적으로 사용할 수 있도록 했다.

최초 발표 후 Google은 새로운 SPDY 프로토콜의 실험적 구현 결과물, 문서 및 소스 코드를 공개했다. SPDY를 실험실 조건에서 테스트한 결과, 상위 25개 웹사이트를 다운로드할 때 성능이 상당히 개선되었으며 웹페이지가 최대 55% 더 빨리 로드되었다. 2012년에 이르러 SPDY 프로토콜은 대표적인 웹브라우저인 크롬, 파이어폭스 및 오페라(Opera)에서 지원되었으며, SPDY 프로토콜을 자사 인프라 내에 배포하는 Google, Twitter, Facebook과 같은 대규모 웹사이트는 물론 소규모 웹사이트의 수가 급격히 늘어났다. SPDY 프로토콜은 표준화가 이루어지기 전에 시장에서 더 많이 채택 되면서 사실상 표준이 되어 가고 있었다.

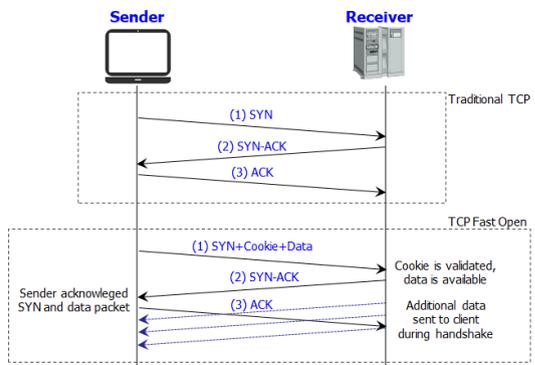
이러한 상황을 주시하고 있던 IETF HTTP WG은 SPDY로부터 동기부여를 받아 더 나은 프로토콜을 개선하여 정식적으로 HTTP/2 표준을 선보이려는 노력을 새로 시작했다. WG에서 새로운 초안을 작성하고, HTTP/2 제안에 대한 공개적인 요청을 받아들였으며, WG 내의 수많은 토론을 통해 SPDY 프로토콜 사양을 새로운 HTTP/2 프로토콜의 시작점으로 결정하였다. 이후 몇 년 동안 SPDY와 HTTP/2는 서로 함께 함께 발전해 왔으며, 특히 SPDY는 HTTP/2 표준의 새로운 기능과 제안에 대해서 테스트 및 검증을 위한 구현 수단으로 사용되었다. SPDY는 여러 가지 제안들이 HTTP/2 표준에 포함되기 전에 이 제안을 테스트하고 검증하는 도구가 되었다. 2012년 3월 HTTP/2 제안 요청을 시작으로 2015년 5월 RFC 7540(HTTP/2) 및 RFC 7541(HPACK) 발행까지 약 3년의 시간이 걸렸다. 이렇듯, SPDY와 HTTP/2가 함께 발전해 오면서 서버, 브라우저 및 사이트 개발자들은 새로운 프로토콜임에도 불구하고 개발과 동시에 실제적인 구현을 경험 할 수 있었다. 결과적으로, HTTP/2 표준은 가장 광범위하게 테스트를 거친 최고의 표준 중 하나이다. 실제로, 최종 표준이 승인된 후

불과 몇 주 만에 여러 인기 브라우저 및 많은 웹사이트가 HTTP/2를 완벽하게 지원함에 따라 상당수 사용자들이 이 프로토콜의 장점을 이미 누리게 되었다.

2.2 웹 콘텐츠를 빠르게 전송하기 위한 TFO

TCP Fast Open(TFO) 기술의 연구개발은 Google이 2011년 자사의 크롬 브라우저와 검색 엔진 Google 서버간의 통신 상태를 약 한달 동안 분석하면서 시작되었다^[2]. 파일을 읽고 쓰는 것보다 파일을 열고 닫는 것이 자원이 많이 드는 것처럼 네트워크 소켓을 열고 닫는 부분에 대해서도 비슷한 현상이 있다. TCP 연결을 여는 것은 자원을 소비하기 때문에 근본적으로 성능상의 제약을 발생시킨다. Google의 2011년 분석 결과, 비록 그 당시에도 TCP 연결 횟수를 줄이고자 HTTP/1.1의 경우 영속적인 연결(Persistent Connection)을 위한 Keep-Alive 기법을 사용하고 있었지만, 크롬에서 발생한 HTTP 연결의 33%정도가 여전히 새로운 TCP 연결을 요청하는, 즉 단기적 연결을 사용하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 그 당시 웹 브라우저는 서버당 연결 개수를 높여 빠르게 웹페이지를 로딩하려고 하고 있었는데 이는 TCP 연결 재사용을 제한하였다.

<그림 2>와 같이 전통적인 TCP에서는 3-Way Handshake(SYN, SYN-ACK, ACK) 과정이 완료되어야 송신자(클라이언트)와 수신자(서버)가 모두 실제 데이터 교환을 시작할 수 있다. 하지만, 이러한 과정 때문에 네트워크 대기 시간이 늘어나며 전반적인 웹 페이지 로드 속도가 감소한다. 또한, TCP의 3-Way Handshake 방식은 연결할 때마다 이루어지기 때문에 송수신자 모두에게 부하를 준다. 반면에, TFO 기술은



(참조) TCP Fast Open, keycdn.com, October 2018

그림 2. 기존 TCP와 TCP Fast Open의 동작 과정
Fig. 2. Operation Procedures for Traditional TCP and TCP Fast Open

TCP의 3-Way Handshake 방식으로 발생하는 전송왕복시간(RTT, Round Trip Time) 및 지연(Latency)의 한계를 극복하려는 노력으로 TCP SYN 과정 중에 데이터를 담아 전달함으로써 보다 빠르게 웹 콘텐츠를 전송하기 위한 기술이다. <그림 2>과 같이 TFO는 송신자가 SYN 패킷을 수신자에게 전송할 뿐만 아니라 쿠키 요청을 전송하기 때문에 정상적인 TCP 3-Way Handshake가 발생하면 작동한다. 송신자와 수신자 사이의 TFO 과정의 첫 단계에서 송신자가 쿠키 요청과 함께 SYN 패킷을 보낸다. 그러면, 수신자는 요청된 쿠키를 생성한 후 쿠키와 함께 SYN-ACK를 송신자에게 보낸다. 송신자가 특정 수신자의 IP에 대한 쿠키를 캐시 한다. 송신자가 수신자에 의해 생성된 쿠키를 캐시 했으므로 그 이후 송수신자의 TFO 과정은 다음과 같다. 송신자가 SYN, TFO 쿠키 및 데이터가 포함된 패킷을 보낸다. 그러면, 수신자는 TFO 쿠키의 유효성을 검사하고 응용 프로그램에서 데이터를 사용할 수 있다. 수신자는 SYN-ACK을 되돌려 보내고 송신자로 더 많은 데이터 패킷을 계속 전송한다. 그 다음 송신자가 수신자에게 ACK를 다시 보낸다. 이와 같은 과정이 완료되면 TCP가 정상적으로 계속되며 이를 통해 송신자가 즉시 데이터를 전송할 수 있고 통신을 더 일찍 시작할 수 있다. 기존 TCP의 혼잡제어(Congestion Control)는 따로 수정할 필요가 없으며 기존의 sendto, sendmsg와 같은 시스템 호출을 활용하여 쉽게 쓸 수 있게 했다.

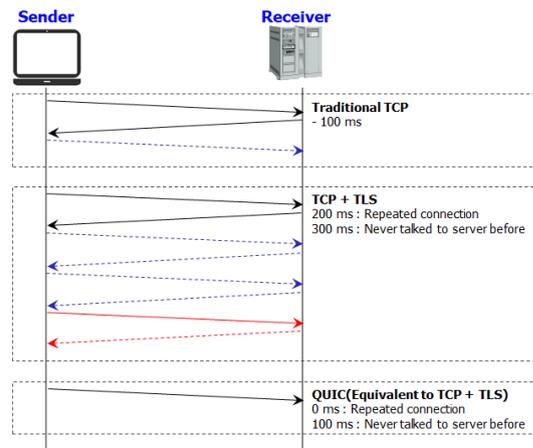
TFO 기술을 아마존(amazon.com), 뉴욕타임즈(nytimes.com), 월스트리트저널(wsj.com) 등에 적용하여 실험한 결과, 평균 PLT에 대해서 약 4~10% 정도의 향상을 보였으며, RTT가 늦은 경우 최대 41% 까지 향상됨을 확인할 수 있었다. TFO 기술은 2014년 TCPM(TCP Maintenance and Minor Extensions) WG에서 RFC 7413로 표준화되었다^[13]. 또한, IETF MPTCP WG에서는 TFO 기술을 Multipath TCP에 적용하는 연구 “TFO support for Multipath TCP(draft-barre-mptcp-tfo-04)”가 애플 등이 참여하여 진행되고 있다^[14]. MPTCP는 2013년 RFC 6824로 표준화된 기술로 TCP 프로토콜을 확장하여 클라이언트와 서버간에 다중의 TCP 경로를 구성하고 동시에 데이터를 송수신하는 기술이다.

2.3 전송 계층 프로토콜의 대안 기술 QUIC

이미 앞서 Google의 SPDY를 통해 HTTP/2.0 표준화를 이끌었다고 소개하였다. 또한, TFO를 통해 기존의 TCP 3-Way Handshake를 확장하여 데이터 전송

개시를 앞당김으로써 PLT를 줄였다. QUIC(Quick UDP Internet Connections)은 SPDY와 TFO의 연장 선상에 있는 기술이라 할 수 있으며 웹페이지 로딩 속도 개선은 물론 혼잡 제어와 손실 복구를 향상시키기 위한 기술이라 할 수 있다. QUIC은 HTTP/2.0에서 TCP+TLS 과정에 해당하며, 보안 및 향상된 성능을 제공하는 UDP 기반 전송 계층 프로토콜이다. 다시 말해서, Google에서 SPDY-over-QUIC로 시작했던 연구개발 내용을 HTTP/2.0-over-QUIC로 연구개발하고 있다고 보면 된다. QUIC은 상당히 가볍고 성능과 보안성을 모두 고려해서 설계되었으며, 암호화된 전송을 통해 다중화된 스트림을 제공한다^{[15]-[17]}. QUIC는 독립적인 TCP 연결과 거의 같지만 대기 시간이 훨씬 단축되어 클라이언트 연결 초기화 시간을 줄일 수 있고, TCP의 HOL 차단 현상을 제거할 수 있으며, 클라이언트 IP 주소 변경 시 연결 이전을 지원한다.

이미 TFO에서 설명했듯이, 일반적인 TCP 기반 통신에서는 실제 데이터 통신 전에 기본적으로 연결 수립을 위해 일련의 과정인 TCP 3-Way Handshake가 필요하다. 신뢰성 있는 통신을 제공하기 위해 TCP와 SSL/TLS 암호화 통신을 적용하면 TLS 연결을 위한 Handshake 과정이 필요하여 연결이 설정되기 위해서는 약 4.5 RTT의 시간이 필요하다. 반면, <그림 3>와 같이 QUIC은 UDP 프로토콜 기반에서 동작하기 때문에 기본적으로 Zero-RTT이 원칙이며, 따라서 당연히 연결 수립을 위한 오버헤드가 획기적으로 감소한다. 즉, QUIC은 클라이언트가 해당 서버와 연결을 한 경험이 있으면 심지어 이동 중 핸드오버가 발생하



(참조) Michael Behr, Ian Swett, "Introducing QUIC support for HTTPS load balancing", Google Cloud Platform Blog, June 2018

그림 3. 기존 TCP+TLS와 QUIC의 비교
Fig. 3. Comparison of TCP+TLS and QUIC

나 IP 주소가 변경되어도 연결 과정, 즉 RTT 없이 데이터 전송을 시작할 수 있도록 한다. 이 때문에 웹서비스 같은 경우 페이지 로딩 속도가 더 빨라진다. 또한 혼잡 제어와 손실 복구를 향상하며, 패킷 재전송시 패킷 시퀀스 수를 절대 재사용하지 않아 패킷이 수신되었는지에 여부에 관한 호호성을 제거하고 재전송 타임아웃을 방지한다.

HTTP/1.1의 단점인 HTTP의 HOL 차단과 유사하게 TCP에서도 HOL 차단 현상이 발생할 수 있다. 쉽게 말해서, TCP상에서 패킷을 보낼 경우 먼저 보내 패킷이 손실되면 차단이 되는 것이다. HTTP의 HOL 차단 문제는 HTTP/2가 TCP 상에서 멀티플렉싱을 허용함으로써 문제를 해결했으나 HTTP에서 HOL 차단을 수정하면 전송 계층에 노출된다. 패킷이 손실되면 멀티플렉싱된 HTTP와 같은 응용프로그램이 버퍼링된 일부 데이터를 사용할 수 있는 경우임에도 TCP는 후속 패킷을 성공적으로 재전송 할 때까지 버퍼링한다. 실제로, HTTP/2의 일부 적용에서, 특히 비디오의 경우, 손실 연결 때문에 성능이 저하되는 것으로 나타났다. Google은 UDP 상에서 독자적으로 TCP의 재전송 제어 구조를 만드는 QUIC 프로토콜을 이용하여 이러한 통신과정에서 지연문제 및 패킷 손실에 따른 TCP의 HOL 차단 현상 방지하고자 추진 중이다. QUIC는 HTTP/2의 스트림 모델을 가져 와서 전송 계층에 포함시킴으로써 다른 스트림의 데이터가 포함된 패킷이 손실 되더라도 단일 연결이 스트림에서 진행될 수 있기 때문에 전송 계층뿐만 아니라 응용 프로그램 계층에서 HOL 차단 문제가 완화된다. 많은 사람들은 SCTP가 이미 전송 프로토콜에서 멀티플렉싱을 제공하고 있다고 언급했다. 그러나 개방형 인터넷에 SCTP를 적용하는 것은 어렵다. 왜냐하면 많은 네트워크가 이를 차단하기 때문이다. 이 때문에 QUIC는 UDP 상에서 동작되도록 한 것이다. 비록, 멀티플렉싱이 QUIC 프로토콜의 고유한 특성이라고 할 수는 없지만, 더 향상된 멀티플렉싱 기능을 제공한다고 할 수 있다.

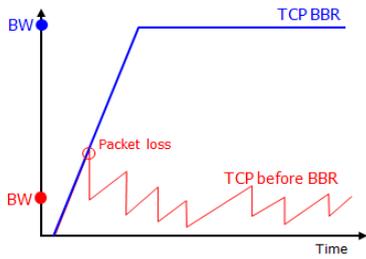
Google은 크롬 브라우저와 Google 서비스의 일부에 QUIC을 이미 적용하여 서비스를 하고 있다. 단말의 경우 약 10억 개의 단말에 QUIC이 사용되고 있으며 검색 엔진 쇼단(Shodan)의 QUIC 설치 동향을 보면 전 세계적으로 약 20만 개의 서버에 QUIC 서버 모듈이 구동되고 있다. 국내의 경우 네이버 및 일부 게임 회사에서 QUIC을 이용한 실시간 트래픽 전송 테스트 중이다. Google에 따르면, QUIC을 통한 Google 검색에서 평균 PLT가 약 8% 개선됨을 보였

으며, 일부 지역에서는 13% 이상 향상된 것으로 조사되었다. 작은 수치처럼 보이겠지만 Google 검색이 이미 최대한 최적화되어 있는 것을 감안한다면 무시할 수 없는 개선이라고 볼 수 있다. 특히, 대기시간이 긴 웹 애플리케이션의 경우 더 큰 개선이 전망된다. 자사 동영상 서비스인 유튜브에 QUIC을 통해 접속한 사용자는 유튜브 시청 중 재 버퍼링 발생이 약 30% 감소되었다고 밝혔다. 아울러, QUIC의 개선된 혼잡제어 및 UDP 손실 복구를 통해 매우 느린 연결의 사용자가 QUIC 기반 PLT를 개선할 수 있었다. CDN 성능 조사 업체인 Cedexis에 따르면 QUIC을 적용한 이후 Google의 Cloud CDN 성능이 향상됨을 확인하였다^[17].

Google은 SPDY를 통해 IETF에서 HTTP/2를 표준화를 이끌었듯이, QUIC 역시 IETF QUIC WG에서 “QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport”란 주제로 표준화를 진행중이다^[16]. 또한, 한참 동안 “HTTP over QUIC”로 불리던 프로토콜은 최근 버전부터 이름이 바뀌어 공식적으로 “Hypertext Transfer Protocol Version 3(HTTP/3)”이 되었다^[18]. Google이 HTTP/2에 이어서 HTTP/3 표준화를 이끌게 된 것이다. 아울러, 웹 표준을 개발하는 사실상 표준화기구인 W3C의 WebRTC에서도 QUIC 적용을 고려하고 있다.

2.4 인터넷 속도 향상을 위한 BBR

BBR(Bottleneck Bandwidth and RTT)은 병목(Bottleneck), 대역폭(Bandwidth)과 RTT에서 각각의 첫 알파벳에서 따온 것으로, Google이 새롭게 자체 개발한 혼잡제어 알고리즘이며 네트워크 속도를 향상시킬 수 있는 기술이다^{[19][21]}. 기존 TCP에서 전통적으로 사용해 왔던 혼잡제어 알고리즘은 인터넷 사용자가 갑자기 증가하거나 대규모 다운로드 및 업로드 등 네트워크 트래픽이 갑자기 발생하는 경우 패킷손실이 발생하면 자동적으로 네트워크 전송속도를 절반으로 줄여 혼잡제어를 수행하고 이를 통해 패킷손실을 방지하게 된다. 다시 말해서, 기존의 이진 증가 혼잡제어인 BIC나 리노(Reno)는 패킷 손실을 이용하여 혼잡 여부를 판단하는 것이다. 반면, BBR 알고리즘은 여러 라우터에 걸쳐 쓰루풋과 트래픽 처리시간을 지속적으로 체크한다. 즉, 손실될 패킷의 현재 위치와 이동 경로를 미리 예측하여 네트워크에 트래픽이 갑자기 증가하더라도 전송 속도가 느려지는 것을 방지할 수 있다. 이를 기반으로 패킷이 네트워크를 통해 전송되는데 걸리는 시간을 계산하고 네트워크가 감당



(참조) TCP BBR congestion control comes to GCP, July 2018
 그림 4. TCP BBR과 기존 TCP와의 비교
 Fig. 4. Comparison of Original TCP and TCP BBR

할 수 있는 트래픽 전송 속도를 조절한다. 이와 같은 방식으로 <그림 4>과 같이 기존 TCP 혼잡제어보다 더 효과적인 성능을 얻는다. 결국, BBR은 패킷 손실과 상관없이 데이터 패킷을 전송하는 최적 경로를 결정하기 위해 트래픽 속도를 실제로 측정하는 유일한 TCP 알고리즘이라 할 수 있다. BBR은 IRTF ICC(Internet Congestion Control) RG에서 “BBR congestion control”이란 주제로 연구중이다^[21].

Google은 BBR 알고리즘을 유튜브에 적용했으며 전세계적으로 약 4%의 속도(Throughput)가 증가되는 효과를 확인한 것으로 알려졌다으며, 일부 국가에서는 14% 이상 향상된 것으로 조사되었다. BBR은 RTT를 33%까지 단축 할 수 있어 웹 브라우징, 게임 및 채팅과 같은 대기 시간에 민감한 응용 프로그램에서 응답 시간이 단축되고 지연을 줄일 수 있음을 보였다. 또한, 약 11% 향상된 재버퍼링간 평균 시간을 제공한다. Google 서비스를 사용하는 몇몇 기업들은 이미 BBR의 효과를 체험하고 있다고 조사되었다. Google 클라우드에서 웹사이트 50만 개를 호스팅하는 워드프레스의 경우 BBR을 이용했을 때 기존의 패킷손실 기반 혼잡제어 기법과 비교할 때 쓰루풋이 약 2,700배 향상되었다고 조사되었다^[2]. 또한, 큐잉 지연(Queuing Delay) 역시 약 25배 줄어들었다. 특히, BBR은 앞서 설명한 전송 프로토콜인 QUIC와 호환된다. Google의 최종적인 목표는 현재 IRTF ICC RG에서 연구중인 BBR 기술을 IETF의 표준으로 만드는 것이다.

2.5 모바일 콘텐츠 최적화를 위한 오픈소스 라이브러리 AMP HTML

스웨덴에 있는 웹사이트 모니터링 기관 핑덤은 2018년 1월 발표를 통해 웹사이트의 로딩 시간이 길어질수록 웹사이트 로딩을 더 기다리지 않고 그 즉시 웹사이트를 나가거나 다른 웹페이지에 접속하는 가능성을 의미하는 반송률(Average bounce rate)의 증가

를 나타내는 조사 결과를 공개했다^[8]. 핑덤의 조사에 따르면, PLT가 2초가 될 때 반송률 9%에 불과했지만 3초를 넘자 급격히 늘어, 5초가 되자 38%까지 증가했다. PLT가 10초가 될 경우 이탈률은 무려 58%까지 증가했다. 이는 PLT를 2~3초 안으로 억제하면 접속자들을 해당 웹페이지 안에 머물게 하는 효과가 있음을 의미한다. 하지만 현재 웹페이지의 평균 접속 시간은 3.21초로, 반송률이 증가하기 시작하는 경계 시간대에 머물러 있다고 조사되었다. Google은 최근 PC에 이어 모바일에서도 웹페이지 로딩 속도가 느린 웹사이트의 검색 순위를 낮추겠다고 발표를 하기도 했다. 또한, 웹사이트의 평균 크기는 2016년 2469kB에서 2017년 900kB 늘어 3422kB까지 증가했다^[9]. 이렇듯, 웹콘텐츠의 크기가 점차 커지고 있는 상황에서 웹페이지 반응속도는 인터넷 서비스 향상을 위한 중요한 지표라 할 수 있다.

Google의 AMP(Accelerated Mobile Pages) 프로젝트는 2015년 10월부터 전세계 유수의 매체 및 기술 파트너들과 함께 발표한 오픈소스 이니셔티브다^[22-24]. 이후, AMP는 수천명의 개발자, 게시자 및 웹사이트, 유통 플랫폼 및 기술 업체와의 긴밀한 협력으로 계속 발전하고 있다. 현재까지 15억 이상의 AMP 웹페이지가 게시되었으며 100개 이상의 주요 분석, 광고 기술 및 CMS(Content Management System) 제공 업체가 AMP 포맷을 지원한다. AMP의 생태계에는 출판, 광고, 전자상거래, 현지 및 중소기업 등에 걸친 2,500만 개의 도메인, 100개 이상의 기술 제공업체 및 주요 플랫폼이 포함되어 있다. AMP의 핵심은 모바일 PLT 단축으로 거의 즉시 로딩 되도록 만들 수 있도록 하는 오픈소스 라이브러리이다. 모바일 웹은 PC 기반의 웹과 달리 운영체제, 디바이스 및 플랫폼의 성능, 통신 네트워크 구축 정도에 따라 PLT에 큰 차이가 있을 수 있다. 최근 들어 많은 사용자가 모바일 환경에서 콘텐츠를 소비하고 있다는 현실도 AMP 프로젝트 배경에 깔려 있다.

AMP HTML은 기존 모바일 최적화 웹페이지 HTML과 동일하지만, 몇 가지 기능이 포함돼 있다는 점이 다르다. AMP HTML을 사용하면 웹사이트에서 표준 웹페이지보다 가벼운 형태의 웹페이지를 구축할 수 있음은 물론 서식이 많은 웹페이지와 스마트 광고도 신속하게 로딩할 수 있다. 게다가, 다양한 플랫폼, 앱, 웹브라우저, 기기에 걸쳐 동일한 코드 작업을 할 수 있다는 장점도 있다. AMP의 작동 원리는 다음과 같이 단순화, 최적화, 그리고 캐싱이라는 3단계로 나뉘는데 그 중에 핵심은 ‘캐싱(Caching)’이라 할 수 있

표 1. Google 연구개발 및 표준화 분석
Table 1. Analysis of Google's R&D and standardization works

기술	핵심 내용	개발 후 발표 당시 개선 사례	주요 표준 문서	표준화 연계 전략
SPDY	HTTP/1.1에 대한 PLT 개선	상위 25개 웹사이트 대상 실험에서 웹페이지가 최대 55% 더 빨리 로딩됨	Hypertext Transfer Protocol Version 2(HTTP/2)(RFC 7540), HPACK: Header Compression for HTTP/2(RFC 7541)	(표준 기술 동기 부여) IETF HTTP WG에 동기부여, 표준화 작업 참여, HTTP/2.0 표준화 완료 후 SPDY 개발 중단
TFO	HTTP 과정 중 TCP 연결을 위한 3-Way Handshake 과정 중에 데이터 전송하여 PLT 개선	아마존, 뉴욕타임즈, 월스트리트저널지 등에 적용한 결과 결과, 평균 PLT에 대해서 약 4~10% 정도의 향상을 보였으며, RTT가 낮은 경우 최대 41%까지 향상됨	TCP Fast Open(RFC 7413), TFO support for Multipath TCP(draft-barre-mptcp-tfo-04)	(표준 기술 주도) IETF TCPM WG에서 표준화 주도적 추진, 기존 TCP Socket 연결 과정 확장
QUIC	기존 TCP+TLS를 대신하는 보안과 성능을 모두 갖춘 UDP 기반 연결 프로토콜로써, Zero-RTT이며 실험, PLT 개선 및 혼잡 제어와 손실 복구를 향상 SPDY-over-QUIC → HTTP/2-over-QUIC(HTTP/3)	Google 검색에서 평균 PLT가 약 8% 개선되었고, 일부 지역에서는 13% 이상 향상되었음. Google 검색이 이미 최대한 최적화되어 있는 것을 감안한다면 무시할 수 없는 개선이라고 볼 수 있음. 특히, 대기시간이 긴 웹 애플리케이션의 경우 더 큰 개선이 전망됨. 유튜브에 QUIC을 통해 접속하는 경우 재버퍼링 발생이 약 30% 감소되었음	QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport(draft-ietf-quic-transport-18), Hypertext Transfer Protocol Version 3(HTTP/3)(draft-ietf-quic-http-18), QUIC Loss Detection and Congestion Control(draft-ietf-quic-recovery-18)	(표준화 WG 주도) IETF QUIC WG 구성 및 주요 표준화 주도적 추진, 기존의 TCP기반 연결 대신 UDP 기반 연결로 변경하는 다소 획기적인 수정, HTTP/2에 이어 HTTP/3를 이끌어 냄
BBR	기존 TCP 혼잡 제어 개선 알고리즘으로 여러 라우터에 걸쳐 지속적으로 쓰루풋과 트래픽 처리시간을 체크 (전송 최적 경로를 결정)	유튜브 적용결과 전세계적으로 약 4%의 속도가 증가되었으며, 일부 국가에서는 14% 이상 향상되었음. RTT를 33%까지 단축 할 수 있어 웹 브라우징, 게임 및 채팅과 같은 대기 시간에 민감한 응용 프로그램에서 응답 시간이 단축되고 지연을 줄일 수 있음을 확인함. 약 11% 향상된 재버퍼링 시간 평균 시간을 제공	BBR Congestion Control (draft-cardwell-iccr-g-br-congestion-control-00)	(연구 이슈의 표준화 추진) IRTF ICC RG연구주제로 최종 목표는 IETF 표준화 추진
AMP	실시간 PLT 단축 구현을 위한 오픈소스 라이브러리	기존 일반 모바일 최적화 웹페이지 대비 로딩 시간은 4배 개선되면서도 데이터 사용량은 1/8 수준. 기존 모바일 최적화 웹페이지 대비 AMP에서 2배 이상 머무르고 있으며, 평균보다 3배 높은 클릭률을 보이고, 이로 인해서 평균보다 2~3배 높은 수익을 올리고 있음	기존 표준 HTML 문서 기반으로 하되 AMP 콘텐츠 페이지를 식별하기 위해서 최상위 <html > 태그를 혹은 <html amp>를 사용	(다소 강제적인 시장 중심의 사실상 표준화) 시장을 주도하는 사실상 표준PLT와 검색순위 연동 발표

다. Google은 AMP를 적용한 뉴스 데이터를 자신들이 제공하는 AMP 캐시에 저장(캐싱)한다. 사용자가 뉴스를 읽기 위해 요청하면, 언론사의 서버로부터가 아닌 미리 캐싱한 데이터를 보여줌으로써 PLT를 획기적으로 줄인다^{22,23)}.

<그림 5>는 Google을 통해 특정 문구를 검색한 결과이다. 붉은 색 별 모양으로 강조했듯이 AMP 웹페

이지 검색 결과에 작은 번개 모양이 표시되어 있음을 확인할 수 있다. AMP를 따르지 않는 일반적인 기존 모바일 최적화 웹페이지에는 번개 모양이 표시되지 않음을 확인할 수 있다. 실제로 이 두 웹사이트를 클릭하면 PLT에 확인한 차이가 있음을 확인할 수 있다. 웹사이트에서 속도를 느리게 만드는 요소들에 제약을 가하기 때문에 속도는 당연히 빨라질 수 밖에 없으며

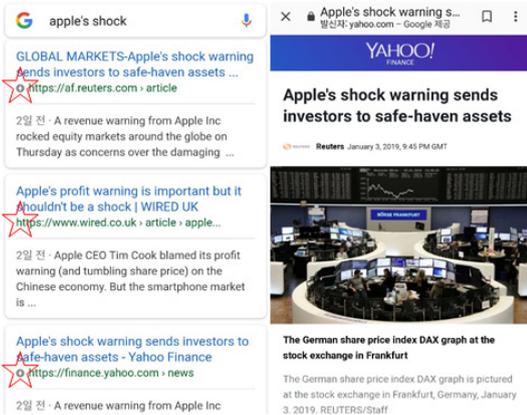


그림 5. Google 검색 결과에서 AMP 웹페이지 예
Fig. 5. AMP webpage in Google search

클릭과 거의 동시에 콘텐츠를 볼 수 있다. 또한, 여러 가지 동적인 요소들을 제거했기 때문에 데이터 소비량도 적다. iOS와 안드로이드 앱에서 AMP를 테스트하고 있는 핀터레스트(Pinterest)는 AMP 웹페이지가 기존 일반 모바일 최적화 웹페이지와 비교한 결과 PLT가 4배 개선되면서도 데이터 사용량은 1/8 수준이라고 밝혔다. 기존 모바일 최적화 웹페이지 대비 효과를 살펴보면, AMP에서 2배 이상 머물고 있으며, 평균보다 3배 높은 클릭률을 보이고, 이로 인해서 평균보다 2~3배 높은 수익을 올리고 있다²⁴⁾.

III. 연구개발 주요 핵심 내용 및 표준화 연계 전략

본 논문에서 소개한 Google의 웹페이지 반응속도 및 TCP 성능 개선 관련 5가지 연구 개발 기술인 SPDY, TFO, QUIC, BBR, AMP의 주요 핵심 내용과 실제 적용 사례를 통한 개선 내용, 그리고 Google의 연구개발과 관련이 있는 표준문서와 표준화 연계 전략을 <표 1>에 정리하였다. SPDY의 경우는 IETF HTTP WG으로 하여금 HTTP/2 표준화의 동기를 부여하고 관련 표준화에 참여했다면, TFO나 QUIC의 경우는 주도적으로 표준화를 추진하였다. 다만, TFO의 경우 TCP의 동작에 대한 적은 범위 내에서의 수정 및 확장 이슈를 다루는 IETF TCPM WG에서 기존 TCP 3-Way Handshake를 확장하는 표준화를 진행했다면, QUIC의 경우는 별도의 워킹그룹인 IETF QUIC WG를 만들어 주도적으로 표준화를 진행했다는 점에서 차이가 있다. BBR의 경우 현재는 표준화가 가능한 이슈를 다루는 연구그룹인 IRTF ICC RG에서 논의되고 있지만, 궁극적으로 기존 TCP 혼잡제어를

개선하기 위한 표준화를 목표로 하고 있다. 한편, AMP는 국제표준화 기구에서 다루지고 있지 않지만, 이미 시장에서 사실상 표준으로 여겨지는 수준으로 매우 광범위한 AMP 생태계가 조성되고 있다.

이렇듯, Google은 표준화 기구에서 점점 더 그 영향력을 키워가고 있으며, 그 영향력을 기반으로 기존의 표준기술을 개선하려고 추진하고 있다. 또한, Google의 표준화 전략의 가장 큰 특징은, 인터넷 서비스 향상을 위한 연구개발 결과들에 대해서 국제 표준화를 진행하기 전부터 세계 시장에서 높은 점유율을 차지하고 있는 자사 인터넷 서비스 기술인 검색 엔진, 유튜브, 크롬 등을 통해 실제 서비스를 운영하고 이로부터 개선된 결과를 제시하면서 자신들이 기술이 검증된 결과임을 보이고 있다는 것이다. 결국, 시장에서 검증된 서비스 결과를 가지고 자기들의 표준 기술에 대한 우수성을 주장하고 있으며 이를 통해 다시 시장경쟁력을 강화하는 순환구조를 갖는다고 할 수 있다.

ICT 산업의 잘 알려진 특징 중 하나로 직접적으로는 어떤 제품 혹은 서비스 이용자가 증가하면 증가할 수록 개별 이용자가 제품 혹은 서비스부터 얻는 편익이 증가하는 네트워크 외부효과(Network Externality)라는 것이 있다. 네트워크형 산업에서는 지배적 표준을 획득한 기업이 이러한 네트워크 외부효과를 통해 보다 더 많은 소비자를 획득하게 되는 스스로 증식되는 메커니즘이 작동하여 거대한 네트워크를 지배할 수 있는 힘을 얻게 된다. 결국 시장 중심의 사실상 표준을 획득한 기업은 해당 산업을 장악(Winner takes All)하게 된다. 최근 Google의 행보가 이러하다고 할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 인터넷 서비스 향상을 위한 Google의 웹페이지 반응속도 및 전송 계층 개선 관련 연구개발 내용을 분석하였다. 첫 번째로, 웹페이지 반응속도 향상을 위해 개발되었으며 HTTP/2의 기반 기술이라 할 수 있는 응용계층 프로토콜인 SPDY를 분석하였다. 두 번째로, 전송계층에서 연구개발을 진행하고 있는 TFO, QUIC, BBR을 분석하였다. 아울러, 최근 들어 모바일 웹페이지 로딩 시간 단축을 위한 사실상 표준으로 간주되고 있는 모바일 콘텐츠 최적화를 위한 오픈소스 라이브러리 AMP를 분석하였다. 마지막으로, 연구개발 내용들의 핵심내용 및 실제 적용에서의 개선 사례를 정리하였고, 표준화 활동을 통한 결과물과 시장 중심의 표준화 연계 전략을 기술하였다.

향후 5G 및 사물인터넷 시대를 고려하면 발생하는 인터넷 트래픽의 양은 지금보다 더욱 폭발적으로 증가할 것으로 예상된다. 이러한 환경에 대응하기 위한 다양한 인터넷 서비스 향상을 위한 연구 이슈가 많이 등장할 것으로 예상되며, 특히 Google은 향후 여러 가지 검증된 인터넷 서비스 향상 관련 기술을 지속적으로 발표하는 동시에 표준화를 병행할 것으로 예상되며, 이를 통해 시장점유율을 계속 확대할 것으로 보인다.

References

- [1] *The Zettabyte Era: Trends and Analysis*, Cisco, Jun. 2017.
- [2] B. Butler, "How google is speeding up the internet," *Network World*, Aug. 2017. (CIO 번역 기사: www.ciokorea.com/news/35292)
- [3] J. Widmer, R. Denda, and M. Mauve, "A survey on TCP-friendly congestion control," in *IEEE Network*, vol. 15, no. 3, pp. 28-37, May-Jun. 2001.
- [4] G. A. Abed, M. Ismail, and K. Jumari, "Exploration and evaluation of traditional TCP congestion control techniques," *J. King Saud University - Comput. and Inf. Sci.*, vol. 24, no. 2, pp. 145-155, 2012.
- [5] J. Luo, J. Jin, and F. Shan, "Standardization of low-latency TCP with explicit congestion notification: A survey," in *IEEE Internet Computing*, vol. 21, no. 1, pp. 48-55, Jan.-Feb. 2017.
- [6] L. D. Cicco, G. Carlucci, and S. Mascolo, "Congestion control for WebRTC: Standardization status and open issues," *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 1, no. 2, pp. 22-27, Jul. 2017.
- [7] P. S. Kim, "Standardization trend of IETF and IRTF for internet efficiency improvement," *OSIA Standards & Technol. Rev.*, vol. 31, no. 3, pp. 21-26, Sep. 2018.
- [8] Does page load time really affect bounce rate?, *Data & Analysis*, Pingdom, Jan. 2018.
- [9] *The speed update is now rolling out for all users*, Google Webmaster Central Blog, Jul. 2018.
- [10] I. Grigorik, *High performance browser networking*, O'Reilly Media, Sep. 2013.
- [11] I. Grigorik and Surma, "*HTTP/2 introduction*," *Web Fundamentals*, Google, Jul. 2018.
- [12] S. Radhakrishnan, Y. Cheng, J. Chu, A. Jain, and B. Raghavan, "TCP fast open," in *Proc. CoNEXT '11*, Tokyo, Japan, Dec. 2011.
- [13] Y. Cheng, J. Chu, S. Radhakrishnan, and A. Jain, "TCP Fast Open," IETF RFC 7413, Dec. 2014.
- [14] S. Barre, et al., "TFO support for Multipath TCP," IETF Internet Draft, Nov. 2018.
- [15] S. Jero, "QUIC: Performance and Security at the transport layer," *IETF J.*, vol. 12, no. 2, Nov. 2016.
- [16] J. Iyengar, et al., "QUIC: A UDP-based multiplexed and secure transport," IETF WG Draft, draft-ietf-quic-transport-18, Jan. 2019.
- [17] M. Behr and I. Swett, "Introducing QUIC support for HTTPS load balancing," *Google Cloud Platform Blog*, Jun. 2018.
- [18] M. Bishop, et al., "Hypertext transfer protocol version 3 (HTTP/3)," IETF WG Draft, draft-ietf-quic-http-18, Jan. 2019.
- [19] N. Cardwell, Y. Cheng, C. S. Gunn, S. H. Yeganeh, and V. Jacobson, "BBR: Congestion-based congestion control," *Queue - Network Congestion*, vol. 14, no. 5, pp. 20-53, 2016.
- [20] V. Jain, V. Mittal, and M. P. Tahiliani, "Design and implementation of TCP BBR in ns-3," in *Proc. 10th Workshop on ns-3*, pp. 16-22, 2018.
- [21] N. Cardwell, et al., *BBR congestion control*, IRTF Internet Draft, Jul. 2017.
- [22] Google AMP, *Bloter*, <http://www.bloter.net/archives/255539>, May 2016.
- [23] AMP HTML Specification, <https://www.ampproject.org/docs/fundamentals/spec>
- [24] AMP: Over the past two years focusing on user-centric web pages, <https://korea.googleblog.com/2017/10/google-AMP.html>, Oct. 2017.

김 평 수 (Pyung Soo Kim)



1994년 2월 : 인하대학교 전기
공학과 졸업

1996년 2월 : 서울대학교 제어
계측공학과 석사

2001년 2월 : 서울대학교 전기
컴퓨터공학부 박사

2001년 3월~2005년 2월 : 삼성
전자 디지털미디어연구소 책임연구원

2012년 2월~2013년 1월 : UC Irvine, CECS,
Visiting Research Scholar

2005년 3월~현재 : 한국산업기술대학교 전자공학부
교수

<관심분야> 시스템 소프트웨어, 최적 추정론, 신호
처리, 유무선 컴퓨터 네트워크 시스템 등