

VRU 안전 지원 스마트폰 애플리케이션을 위한 HTTP/2와 QUIC 통신 프로토콜 성능 비교

김수, 조의리, 양하이산, 압둘하미드이드리스, 김동균
경북대학교

{kimsu, joeuri0402, yanghs158, iaabdulhameed, dongkyun}@knu.ac.kr

Comparison of HTTP/2 and QUIC Communication Protocol Performance for VRU Safety Smartphone Applications

Su Kim, Euri Jo, Haishan Yang, Abdulhameed Idris, Dongkyun Kim

Kyungpook National Univ.

요 약

Vulnerable Road User(VRU) 안전 메시징은 교통사고 위험에 빠르게 대처하기 위해 저지연·고신뢰 통신이 요구된다. 기존 스마트폰 기반 솔루션은 TCP 기반 HTTP/2를 사용하여 헤드-오브-라인 블로킹과 다중 핸드셰이크로 인한 지연이 발생한다. 본 논문은 이러한 제약을 해결하기 위해 UDP 기반 QUIC(HTTP/3) 프로토콜을 제안한다. QUIC은 스트림 독립 멀티플렉싱, 통합된 TLS 1.3 핸드셰이크, 그리고 0-Round Trip Time(RTT) 재연결 기능을 통해 초기 연결 지연 및 Head-Of-Line(HoL) 블로킹을 해소한다. 실험을 통해 QUIC 기반 통신이 HTTP/2 대비 응답 지연을 줄이고 데이터 전송 효율이 향상됨을 검증하였으며, VRU 안전 메시징에 적합한 기술임을 확인하였다.

I. 서 론

보행자, 자전거 이용자와 같은 VRU는 차량 이용자에 비해 상대적으로 교통사고 위험에 취약하다. 미 연방 고속도로 교통안전국에 따르면 매년 6,000명 이상의 보행자가 교통사고로 사망하는 것으로 보고되었다[1]. 또한 도로 위 카메라, 레이더, 라이더와 같은 센서는 비 가시조건이나 장애물로 인해 VRU를 감지하지 못하는 한계가 있다[2]. 따라서, 다른 차량 및 도로 인프라에 VRU의 존재와 충돌 위험 정보를 빠르게 전달하기 위한 통신 수단이 필요하다.

유럽전기통신표준협회(ETSI)에서는 위험 상황 경고를 위한 메시지의 형식으로 Cooperated Awareness Message (CAM)과 Decentralized Environmental Notification Basic Service messages (DENM)을 정의하고 있는데, 본 연구에서는 DENM 형식의 JSON 메시지를 VRU 경고용 데이터로 사용한다. 기존 연구는 도로 인프라 혹은 차량 단말이 직접 VRU를 탐지하여 정보를 방송하는 방안[3]이 검토되었다. 그러나 최근 연구에서는 VRU 개인이 스마트폰을 통해 자신의 위치나 속도 정보를 전송하고, 이를 서버에서 처리하여 차량에 전달하는 접근이 증가하고 있다. 예를 들어, 최신 스마트폰은 Bluetooth Low Energy(BLE) 5.0을 지원하여 VRU가 스마트폰으로 자신의 정보를 저전력으로 Broadcast 할 수 있다. 이를 이용하여 Road Side Unit(RSU)에서 VRU의 정보를 중앙 서버로 전달하는 것이 가능하다.

VRU 안전 지원 스마트폰 애플리케이션에서는 주로 VRU 안전 메시지의 전송을 위해 HTTP 기반 통신이 사용된다. 그러나 HTTP/2는 TCP 위에서 동작하면서 패킷 손실 발생 시 순차 전송하여 HOL 블로킹이 발생할 수 있다. 또한 TCP 3-way 핸드셰이크와 별도의 TLS 암호화 핸드셰이크로 인한 초기 연결 지연이 존재한다. 반면 차세대 전송 프로토콜인 QUIC는 UDP 기반으로 다중 스트림 독립 전송을 지원하며, TLS 1.3을 전송 계층과 통합하여 0-RTT 연결을 통해 초기 연결 지연을 최소화할 수 있다.

본 논문에서는 VRU 안전 메시징에 적합한 통신 프로토콜을 확인하기 위

해 HTTP/2와 QUIC의 성능을 비교·분석한다. 이를 위해 HTTP/2와 QUIC을 동일 네트워크 조건에서 비교 실험하고, 처리량과 전송 완료 시간 등을 측정하여 VRU 안전 메시징 프로토콜로 QUIC의 적합성을 검증한다.

II. 본 론

HTTP/2는 TCP 전송 계층 위에서 하나의 커넥션을 통해 다수의 스트림을 멀티플렉싱하여 데이터를 전송한다. 이 방식은 요청·응답 병렬 처리를 가능하게 하나, 단일 연결에 의존하므로 패킷 손실 시 연결 전체가 복구를 위한 재전송에 대해 대기하게 되고 이 과정에서 전송 지연과 처리를 저하가 발생한다. TCP는 혼잡 제어와 흐름 제어가 세그먼트 단위로 동작하기 때문에, 네트워크 환경이 불안정할 경우 전체 연결 성능이 급격히 떨어지는 한계가 있다. 하지만, QUIC은 UDP 기반 전송 계층 위에 커넥션 레벨 혼잡 제어와 스트림 레벨 흐름 제어를 분리 구현함으로써, 각 스트림에 독립적인 순서 제어 및 재전송 로직을 적용한다. 스트림 A에서 패킷 손실이 발생해도 스트림 B는 전송을 계속할 수 있으므로, 손실이 발생하는 환경에서도 병렬 스트림 처리 효율을 유지하고 애플리케이션 처리를 저하를 방지한다. 또한 ACK 지연과 재전송 타이머를 애플리케이션 수준에서 조정할 수 있어 복구 반응성을 조절할 수 있다.[4]

연결 설정 과정에서 HTTP/2는 TCP 핸드셰이크(3-way) 후 TLS 핸드셰이크를 별도로 수행해야 한다. TLS 1.2는 2 RTT, TLS 1.3은 3 RTT가 필요하므로, 초기 연결에 총 2~3 RTT의 지연이 발생한다. QUIC은 TLS 1.3 암호화 핸드셰이크를 전송 계층 프로토콜에 통합해 첫 연결을 1 RTT 내에 완료하며, 세션 티켓을 활용한 0-RTT 재연결[5]을 지원해 재접속 시점에는 핸드셰이크 없이 바로 애플리케이션 데이터를 전송할 수 있다. 이로써 반복적 연결 환경에서 초기 지연 오버헤드를 줄인다.

보안 구성 측면에서 HTTP/2는 기본적으로 TCP 위에 별도의 TLS 계층을 적용하여 데이터를 암호화하지만, QUIC은 프로토콜에서 TLS 1.3을 통합하여 모든 패킷 헤더와 페이로드를 암호화 상태로 전송한다. 이러한

통합 설계는 TCP/TLS/HTTP의 분리된 3계층 구조를 단일 프로토콜로 통합하고, 보안 협상 오버헤드를 제거하며 애플리케이션 수준에서 암호화를 제공한다. 또한 암호화된 메타데이터까지 보호하여 중간자 공격 및 패킷 분석으로부터 보안을 유지한다.

QUIC의 스트림 독립 제어, TLS 1.3 통합 핸드셰이크, 0-RTT 연결 재개 및 전 패킷 암호화 기능은 HTTP/2 대비 전송 지연을 감소시키고 처리율을 향상시킨다. 이로 인해 VRU 안전 메시징과 같은 지연 민감형 애플리케이션에서 요구되는 응답 시간 및 서비스 신뢰성 기준을 충족하며, 네트워크 상태가 불안정할 때에도 일관된 통신 품질을 유지할 수 있다.

III. 실험 환경 및 성능 분석

본 논문에서는 표 1과 같은 환경을 이용해 HTTP/2와 QUIC의 성능을 비교 평가하였다.

표 1. 시뮬레이션 환경

항목	설정 값
사용 S/W	mininet, nghttpd, quic-go
링크 대역폭	50 Mbps
네트워크 지연	10 ms
패킷 손실률	0.3 %
전송 데이터	355 B 크기의 DENM 메시지 10회
평가 지표	전송 완료 시간, 왕복 지연(RTT), 처리율

본 시뮬레이션에서는 QUIC 서버로 quic-go[6]를, HTTP/2 서버는 nghttpd를 구동하여 두 프로토콜의 성능을 비교 분석하였다.

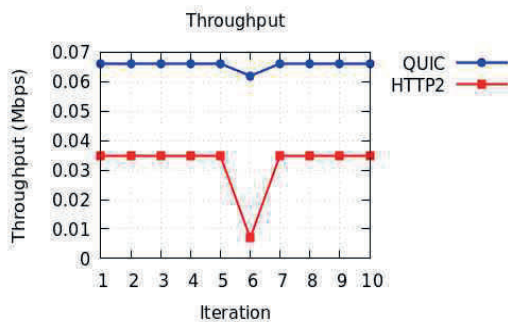


그림 1. 전송 회차별 Throughput 비교

그림 1에서 볼 수 있듯이, 동일 환경에서 QUIC의 처리율이 HTTP/2 대비 높게 측정되었다. 전체 데이터 전송 동안의 평균 처리율이 HTTP/2에서는 약 0.22Mbps인 반면 QUIC에서는 약 0.28Mbps로 나타나 약 27% 증가한 값을 보였다.

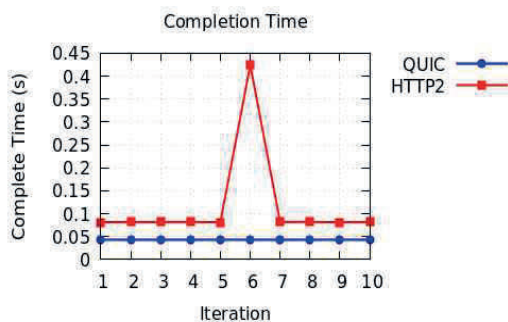


그림 2. 전송 완료 시간 비교

그림 2는 10회 전송의 완료 시간을 비교한 결과다. HTTP/2의 경우 총 완료 시간이 약 130ms인 데 비해 QUIC는 약 110ms로 측정되었다. 즉,

QUIC은 HTTP/2 대비 약 15% 빠른 전송 속도를 달성했다. 특히 QUIC 세션에서는 첫 번째 연결 설정 이후부터 0-RTT 전송을 활용하여 후속 메시지의 전송 지연을 추가로 줄였다. RTT 관점에서도, QUIC은 재연결 시 0-RTT를 사용함에 따라 초기에 소요되는 왕복 횟수를 최소화했으며, 패킷 손실율이 0.3% 수준인 조건에서도 지연 재전송에 의한 영향이 상대적으로 적게 나타났다. 이러한 결과는 QUIC의 빠른 연결 수립과 다중 스트림 전송이 실제 VRU 안전 메시징 상황에서 지연 감소와 처리율 향상에 기여함을 보여준다.

IV. 결론

본 연구에서는 VRU 안전 메시징을 위한 통신 프로토콜로 HTTP/2와 QUIC을 비교 평가하였다. TCP 기반 HTTP/2는 손실 복구 과정에서 HOL 블로킹이 발생하고, TCP/TLS 핸드셰이크에 의한 지연이 존재하는 반면, QUIC은 UDP 기반으로 다중 스트림의 독립 전송을 통해 HOL 블로킹 문제를 해결하고, TLS1.3 핸드셰이크를 통합하여 0-RTT를 지원한다. 실험 결과, QUIC의 구조적 이점이 네트워크 성능을 향상시키면서 주어진 조건에서 QUIC이 HTTP/2보다 높은 처리율과 낮은 전송 완료 시간을 기록하였다.

QUIC은 반복 전송 시 0-RTT 전송을 통해 연결 수립 오버헤드를 제거하여 VRU 경고 메시지의 실시간성을 만족시켰다. 결과적으로, QUIC이 VRU 안전 지원 애플리케이션을 위한 최적의 통신 프로토콜임을 입증하였다. 이는 스마트폰 기반 VRU 경고 시스템이나 중앙 서버를 통한 VRU 정보 전달시 QUIC을 활용해 더 빠른 경고 정보 제공이 가능함을 시사한다. 향후 연구에서는 실제 무선 환경 및 다수 VRU 동시 접속 상황에서 성능을 검증하고 평가할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education under Grant NRF-RS-2018-NR031059.

참 고 문 헌

- [1] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), "Traffic Safety Facts – Pedestrians," 2023.
- [2] S. A. Beigi and B. B. Park, "Impact of Critical Situations on Autonomous Vehicles and Strategies for Improvement," *Future Transportation*, vol. 5, no. 2, art. 39, 2025.
- [3] S. Y. Gelbal, B. Aksun-Güvenç, L. Güvenç, "Vulnerable Road User Safety Using Mobile Phones with Vehicle-to-VRU Communication," *Electronics*, vol. 13, no. 2, 2024.
- [4] Catchpoint, "HTTP/2 vs. HTTP/3: Head-of-Line Blocking and Stream Independence," Catchpoint Technologies, 2022.
- [5] A. Ghedini, "Even faster connection establishment with QUIC 0-RTT resumption," *Cloudflare Blog*, Nov. 20, 2019.
- [6] "quic-go/quic-go: A QUIC implementation in pure Go," GitHub, 2025.