

## Passive-RTT 프로토콜을 활용한 실시간 5G NR V2X 통신 성능 측정 및 분석

서우창·우현·양은주·김봉섭\*·윤경수

지능형자동차부품진흥원 전략기획본부

### Real-Time Measurement and Analysis of 5G NR V2X Communication Performance Based on a Passive-RTT Protocol

Woochang Seo · Hyun Woo · Eunju Yang · Bongseob Kim\* · Kyungsu Yun

Strategic Planning Division, Korea Intelligent Automotive Parts Promotion Institute, Gukgasandanse-ro 201, Guji-myeon, Dalseong-gun, Daegu 43011, Republic of Korea

(Received 18 November 2025 / Revised 11 December 2025 / Accepted 13 December 2025)

**Abstract** : This paper presents a method of acquiring communication performance indicator data by continuously driving on both proving grounds (test road and real roads equipped with 5GNR-V2X communication infrastructure) using the Passive-RTT approach. While existing demonstration services typically measure communication range or Packet Error Rate (PER), the proposed method enables service-independent driving and simultaneously collects communication performance indicators for I2I, V2I, I2V, and V2V. This approach provides a means of measuring key vehicular communication performance for cooperative autonomous driving under diverse real-road environments. By conducting simple repetitive driving, the proposed method allows for essential performance evaluation while reducing the cost of demonstrations.

**Key words** : Fifth generation-new radio(5G NR), Vehicle to everything(V2X, 차량통신), Automated vehicle(자율주행), Round trip time(RTT, 패킷 왕복 시간), Ultra-low latency(초저지연)

#### 1. 서론

차량 통신(V2X, Vehicle to Everything)은 DSRC(Dedicated Short-Range Communications) 및 WAVE(Wireless Access in Vehicular Environments) 통신 기술을 기반으로 기존 ITS와 연계한 다양한 C-ITS(Cooperative Intelligent Transport System) 서비스의 시범 사업 및 실증 사업의 구축과 함께 본격적으로 주목받기 시작했다. C-ITS는 교통사고를 줄이고 운전자 및 보행자의 안전을 보장하는 것을 목표로 하였으며, 2012년 전후로 북미, 유럽, 한국 등 전 세계적으로 국가 차원의 사업으로 진행되었고, 이와 관련한 표준, 법규, 전파 기준 등이 활발히 개발되었다. 여러 가지 C-ITS 시범 서비스들이 실제 필드에서 운영되기 시작할 무렵 센서 정보만으로 인지·판단을 수행하던 자율주행 제어 방식에서 차량 통신 기술을 접목하여 센서 성능의 한계를 극복하고자 하는 시도가 시작되었으며,

교차로의 신호등 정보(현재 신호등 색상과 신호 유지 시간)(SPaT, Signal Phase and Timing)와 인접 차량 정보(BSM, Basic Safety Message)<sup>1)</sup>를 활용하는 것이 가장 대표적인 사례로서, 여러 실증을 통해 그 효율성이 충분히 검증되었다. 이후 여러 연구를 통해 자율주행과 차량 통신 기술을 융합한 자율협력주행 기술은 완전한 자율주행(레벨4 이상)<sup>2)</sup>의 상용화를 앞당기기 위해 선택이 아니라 필수적으로 갖추어야 하는 중요한 기술 요소로 자리매김 하였다.

기존의 차량 통신 방식은 안전을 위한 정보 제공을 지향했으므로 WAVE 또는 DSRC의 통신 성능(속도 및 대역폭)으로 충분한 서비스가 가능했지만,<sup>13)</sup> 자율협력주행 기술로 발전함에 따라 적용되어야 하는 서비스의 유스 케이스가 고도화되어 차량 통신 기술에 요구되는 통신 성능의 기준이 매우 높아지게 되었다. 2018년에 발표

\*Corresponding author, E-mail: bskim@kiapi.or.kr

<sup>1</sup>This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

된 3GPP TR 22.886<sup>3)</sup>은 군집주행, 원격제어, 센서 공유, 그리고 자율주행 서비스의 유스 케이스로 분류하고 있으며 이를 위한 통신 성능 요구사항인 Payload size(50 ~ 12,000 byte), Data rate(10 ~ 1,000 Mbps), Latency(3 ~ 100 ms), 전송주기(2 ~ 50 message/sec), 신뢰성(90 ~ 99.999 %) 및 통신 반경(50 ~ 1,000 m)으로 상세하게 정의하고 있다. 특히 센서 공유 서비스는 LiDAR의 PCD(Point Cloud Data), radar data, camera(image data) 등 다양한 센서들에 대한 원시 데이터 자체를 V2V(Vehicle to Vehicle)<sup>6)</sup> 또는 I2V(Infra to Vehicle)로 송수신해야 하므로 가장 높은 통신 성능을 요구한다.

이러한 통신 성능의 요구사항과 기술 발전에 기반하여 초고속(150 Mbps 이상), 초저지연(3 ms 이하), 그리고 고신뢰성(99.99 %)의 성능을 가지는 통신 기술의 표준(3GPP release 15/16/17)이 개발되었으며, 해당 기술이 적용된 국내외 상용 칩셋 및 통신 제품들이 출시를 앞두고 있다.<sup>12)</sup> 본 연구는 상용화를 앞두고 있는 5G NR V2X 통신기술(이하, 5G NR-V2X)<sup>7)</sup> 통신 칩셋(모듈) 및 통신 장치(차량 탑재 장치)가 실주행 환경(도심로/자동차전용도로)에서도 충분한 성능을 보장하는지 평가하고 검증하는 것을 목표로 하였으며, 특히 실시간으로 주요 성능 지표를 모니터링하고 분석할 수 있는 방법을 연구하였다.<sup>8)</sup>

기존의 선행 연구들은 주로 시뮬레이터나 정적으로 통제된 환경에서 패킷 에러율(PER) 및 통신 커버리지를 측정하는 데 집중해 왔다. 하지만 이는 동적인 실제 도로 환경에서 발생하는 음영 구역에 대한 성능 분석과 실제 차량이 주행하는 환경에서 초저지연 성능을 명확히 규명하기 어렵다. 더욱 일반적인 RTT(Round Trip Time) 방식으로 지연시간을 측정할 경우는 중단 장치의 전송에서 응답 시간에 소요되는 시간만 확인할 수 있어 통신 단계별 지연시간을 확인에 어려움이 발생한다.

본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 Passive-RTT 접근 방식을 제안하여 V2X 통신방식과 V2X 통신 전송 경로 내 포함하는 장치 별 소요 시간을 측정할 수 있도록 하였다. Passive-RTT 프로토콜이 적용된 5G NR-V2X 통신 환경을 실제 도로 환경에 구축하여 5,442시간의 장시간의 데이터를 확보하고 성능 결과를 도출함에 따라 시뮬레이션 연구와 차별화된 실증적 통신 성능 분석 결과를 제시한다는 점에서 의의가 있다.

차량 통신은 기존의 모바일 통신과 다르게 통신 장치(차량)가 고속으로 이동하는 특성이 있으므로 주변 환경(전파 장애물, 노면 구조물 등)이 급변하고 노면 기지국 간 핸드오버 역시 빠르게 이루어진다. 따라서 LOS(Line Of Sight)가 보장되는 환경에서 차량이 정지한

상황에서 통신 성능을 분석하는 것 뿐만 아니라, 다양한 주행 환경의 영향을 받는 실주행 환경에서 충분한 통신 성능을 보장하는지 시험하고 평가할 수 있어야 한다.<sup>9)</sup> 동일한 통신 환경 조건에서 일관성 · 재현성 · 반복성이 보장되는 주행 시험을 할 수 있는 시험도로 뿐만 아니라 곡선/경사/터널/고층건물/교통트래픽 밀집 구간 및 시간/고속 주행 구간 등 다양한 정적/동적 조건이 존재하는 실제 도로 환경에서도 자율협력주행을 위한 통신 성능의 요구사항을 만족하는지 측정하고 평가할 수 있어야 한다. 본 연구를 위해 5G NR-V2X 노면 통신 장치(이하, 5G NR-RSU) 16기를 구축하였으며, 그 중 3기는 시험도로에, 나머지 13기는 실도로에 구축하였으며, 차량 통신 장치(이하, 5G NR-OBU)를 탑재한 차량은 동시에 2~3대를 주행하며 시험하였다.<sup>9)</sup> 이 장치들로부터 통신 성능 평가 지표들을 실시간으로 수집하여 성능을 측정할 수 있는 프로토콜을 개발하였으며, 이를 적용한 실시간 5G NR-V2X 성능 측정 시스템은 현재까지 운영되고 있다.<sup>10)</sup>

본 논문의 2장에서는 실주행 환경에서 5G NR-V2X를 비롯한 차량 통신(V2X) 기술의 성능을 측정<sup>11)</sup>하기 위해 국내 최초로 실도로에 5G NR-RSU를 구축한 현황에 대해 다룬다. 그리고 구축된 환경을 기반으로 실시간 통신 성능 지표를 수집하고 측정하는 방법(Passive-RTT)과 통신 성능 분석 시험 및 결과에 대해 각각 3과 4장에서 상세하게 설명한다. 마지막으로 5장에서는 제안한 기술의 효과와 결론을 도출하고 향후 연구를 통한 고도화 계획을 제시하고자 한다.

## 2. 실험 장비 구축 현황

실도로의 주행환경에서 5G NR-V2X 통신 성능을 측정하기 위해 국내 최초로 5G NR-RSU 16기를 구축하고 운영하고 있으며, 해당 통신이 사용하는 주파수 대역은 5.850 ~ 5.925 GHz(5.9 GHz 대역) 중, 최상위 20 MHz(5.905 ~ 5.925 GHz)를 사용하며, 3GPP Release 16 규격까지 적용되어 있다.

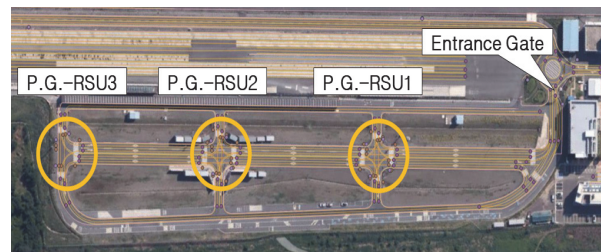


Fig. 1 Daegu proving ground - autonomous vehicle test road

### 2.1 시험도로 통신 인프라 시험 환경 구축

실주행 기반 통신 성능 검증을 시험하기 위해 Fig. 1과 같이 대구주행시험장(이하, KIAPI P.G.)의 자율주행시험로(382 m 구간) 내 교차로마다 5G NR-RSU를 구축(2023년 6월)하였다. 또한 고속 주행 환경에서의 통신 성능 평가를 위해 KIAPI P.G.의 고속주회로에 3기를 추가 구축하고 있다. 자율주행시험로는 2개의 4지 교차로와 1개의 3지 교차로로 구성되어 있으며, WAVE와 LTE-V2X RSU도 각 교차로마다 구축되어 다양한 자율협력주행 시험이 가능한 환경을 보유하고 있다.

또한, 각 교차로는 도심로 환경의 자율주행 시험이 가능하도록 신호등(신호제어기), LiDAR 노변 센서(돌발검지기), 영상 기반 노변 검지기 등도 구축되어 함께 운영되고 있다. 자율주행시험로의 출입구에서 가장 가까운 교차로의 RSU의 장비명은 P.G.-RSU1이고 가장 멀리 위치한 3지 교차로의 RSU는 P.G.-RSU3이다.

5G NR-RSU는 RF(Radio Frequency)부와 주제어부로 구성되며, Fig. 2와 같이 폴에 설치된 통신 장치가 RF부이고 지면과 가까운 곳에 설치된 합체가 주제어부이다. RF부는 지면으로부터 약 5 m 위치에 설치하였으며, 주제어부로부터 명령어 (또는 인터페이스 라이브러리)를 통해 무선 신호를 생성해서 송신하고, 수신한 신호를 주제어부에 전달한다. 또한 무선신호를 송수신하며 신호 송신/수신 시간, RSSI(Received Signal Strength Indicator), RCPI(Received Channel Power Indicator)과 같은 통신 성능 지표를 측정하여 주제어부에 전달한다. 주제어부는 KIAPI의 관제플랫폼(이하, 관제플랫폼)과 연계할 수 있도록 VPN(Virtual Private Network)과 망 설정을 수행하는 네트워크 제어부와 RF부가 신호를 송출하는 주기 및 메시지를 생성하는 통신 메인 컨트롤러로 구성된다. 주제어부는 RF부의 주요 제어를 담당할 뿐만 아니라 관제플랫폼(서버)에 실시간으로 수신한 정보를 전달하여 통신 성능 데이터를 데이터베이스에 수집하고 실시간으로 통신 성능 상태를 모니터링 할 수 있는 인터페이스를 제공한다.



Fig. 2 RSU construction at each intersection

### 2.2 실도로 통신 인프라 시험 환경 구축

시험도로 뿐만 아니라 다양한 통신 장애가 발생할 수 있는 실도로 주행 환경에서도 통신 성능을 측정할 수 있도록 Fig. 3과 같이 대구의 테크노폴리스로 ~ 수목원(15.3 km) 구간에 5G NR-RSU 13기를 구축하였다. RSU 2기는 제한속도 60 km/h인 2개의 도심로 교차로에 각각 설치하였고 나머지 11기는 제한속도 80 km/h인 자동차 전용도로에 설치하였다. 해당 구간은 여러 개의 산을 통과하는 구간으로 경사 구간과 다수의 곡선 구간이 존재하므로 다양한 지형적 요소 뿐만 아니라, 통신 음영 구간과 같은 악의적 환경 요소(6개의 터널 구간과 1개의 지하차도 구간이 존재)도 갖추고 있다.

이 중 터널 6구간과 지하차로 1구간이 존재하며 이는 전체 실증 구간의 약 44.01%(약 6.91 km)를 차지한다. 또한 여러 개의 산을 통과하는 구간으로 고도의 차이(완만한 경사 구간)가 있는 구간과 다수의 곡선 구간이 존재하므로 실도로 통신 성능을 평가하기 위한 다양한 지형적 요소와 더불어 악의적 환경 요소(통신 음영 구간)까지 갖추고 있다. 본 실도로 주행 구간은 유선 광통신망이 구축되어 있지 않으므로 5G NR-RSU를 통해 실시간 수집되는 통신 성능지표를 관제플랫폼의 데이터베이스 서버에 저장하기 위해 상용 이동통신망(Uplink/Downlink : 4 ~ 10 Mbps)을 사용하였으며 네트워크 구성의 보안을 위하여 VPN으로 구성하여 운영하고 있다.

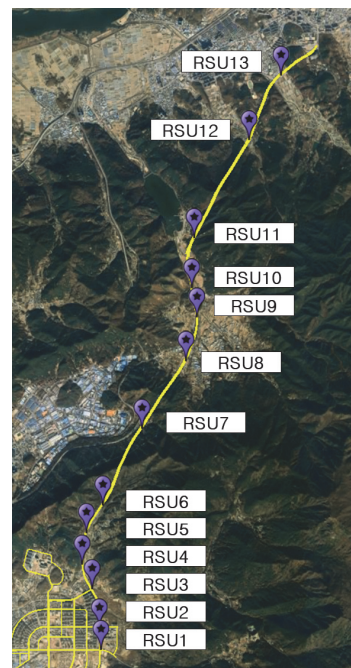


Fig. 3 Daegu demonstration road - connected vehicle test road



Fig. 4 RF unit and small main control unit

실도로의 5G NR-RSU도 Fig. 2와 같이 RF부와 제어부로 구성이 되지만 해당 도로는 산을 통과하므로 지형적 조건(노면 비탈 구간)에 의해 제어부의 표준함체를 설치할 수 없는 구간이 다수 존재하여 Fig. 4와 같이 소형함체를 제작하였으며, 구축한 13기 중 9기는 소형함체로 구성하였다.

이러한 실도로 환경을 고려하여 5G NR-RSU 운용하기 적합한 장소 선정하였다. RSU 1과 RSU 2는 일반적인 도심 환경에서 신호교차로에 따른 정차, 출발 상황과 차량 유동량에 따른 통신 성능을 확인하기 위한 장소로 선정하였다. RSU 3-13 구간은 자동차전용도로 구간에서 최대한 커버리지를 포함할 수 있도록 장소를 고려하였다. 5G NR-V2X는 GNSS(Global Navigation Satellite System) 신호를 이용한 시간동기가 송수신 장치에서 필수적이므로, GNSS 신호가 불가능한 터널 내부에서는 운용이 불가능하다. 따라서 터널 구간은 설치 장소에서 제외하였다. 터널 구간을 제외한 구간에서는 일반적인 RSU 운용 반경인 500 m 간격을 기준으로 5G NR-RSU의 최종 설치 위치를 Fig. 3과 같은 위치로 결정하였다. RSU 6과 RSU 7, RSU 7과 RSU 8, RSU 11과 RSU 12, RSU 12와 RSU 13 구간 사이는 모두 터널을 포함하고 있으며 터널 진출입로에서 통신이 가능하도록 거리와 LOS 조건이 적절한 위치로 선정하여 배치하였다. RSU 3은 지하차도를 진입 및 진출 시 통신이 가능하고 GNSS 수신에 문제없는 지하차도 상부에 설치하였으며, RSU 4, RSU 5, RSU 9, RSU 10 자동차전용도로 내 일반적인 통신 반경 간격을 기준으로 설치장소를 선정하였으며 RSU 9와 RSU 10 구간 사이 내 약 384 m의 짧은 터널이 존재하여 해당 터널 진출입 인근 장소를 선정하였다.

또한 주행 기반 통신 성능 지표 수집을 위해 Fig. 5와 같이 아이오닉5, 아반떼CN7, 아반떼AD 서로 다른 3대의 차량에 5G NR-OBU(On-Board Unit)를 장착하여 5G NR-RSU(Road Side Unit)와 통신하며 수집되는 통신성능 정보를 가공하고 이를 실시간으로 관계플랫폼으로 전달하여 데이터가 수집될 수 있도록 데이터 수집장치를 차량

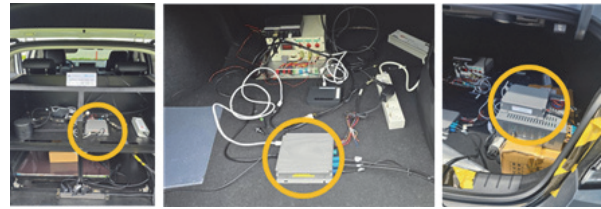


Fig. 5 Equipped OBU in vehicle (from left, Ioniq5, Avante-CN7, and Avante-AD)

Table 1 5G NR-V2X unit specifications

Specifications	OBU	RSU
V2X Radio	5G-V2X PC5 (3GPP Release 16)	5G-V2X PC5 (3GPP Release 16)
CPU	Cortex-A72/A53	Cortex-A72/A53
Memory	8 GB LPDDR4	8 GB LPDDR4
Ethernet	1 Port	1 Port
Antennas	5G NR-V2X 2 Port GNSS 1 Port	5G NR-V2X 2 Port GNSS 1 Port

에 구성하였으며 해당 차량을 시험도로에 주행하며 시험을 진행하였다. 시험에 사용된 5G NR-OBU와 5G NR-RSU의 사양은 Table 1과 같으며 사용환경에 따른 외형 차이가 존재하나 기본적인 내부 사양은 동일하다.

### 3. 통신 성능 실시간 측정 방법

#### 3.1 통신 성능 지표 수집 시스템

실주행을 하며 주요한 통신 성능 지표를 실시간 취득하고 모니터링하기 위해 Fig. 6과 같이 데이터를 수집하고 분석하는 서버와 자율주행제어 시스템과 연계하는 차량 내 시스템을 구성하였다. 서버 부분은 관계플랫폼에 포함되며 차량통신 데이터를 실시간 모니터링하는 백엔드 서버와 데이터베이스 서버, 그리고 데이터 분석 및 시각화 서버로 구성된다. 차량 내 탑재된 모든 시스템과 연계하는 ‘차량 데이터 수집 장치’만 백엔드 서버와 패킷을 송수신하도록 하여 데이터 수집 및 모니터링 성능의 일관성을 유지할 수 있도록 하였으며 이를 위한 전용 프로토콜과 모니터링 방법에 대해서는 다루지 않는다.

‘차량 데이터 수집 장치’는 자율주행 뿐만 아니라 차량 부품 시험을 위해 동적인 주행환경 정보를 수집하기 위한 장치로서 차량에 탑재된 센서, GNSS(Global Navigation Satellite System) 모듈, 통신 장치(WAVE, C-V2X 등), 서비스 응용프로그램 등으로부터 다양한 데이터를 취득하여 백엔드 서버로 전송한다. 이 장치는 기존 KIAPI의

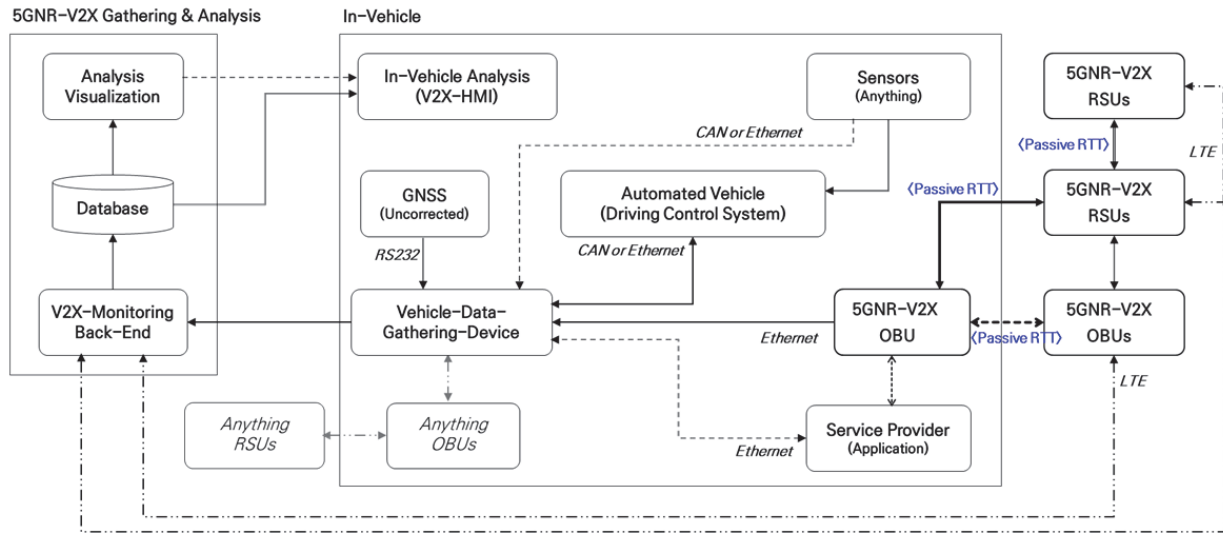


Fig. 6 Real-time communication performance indicator acquisition system

관제 플랫폼 중 차량 시스템에 해당하며 본 연구의 수행을 위해 5G NR-V2X 통신 성능 지표를 추가적으로 수집할 수 있도록 ‘Passive-RTT’ 프로토콜을 적용하여 고도화하였다.

### 3.2 Passive-RTT 기반 성능 측정 방법

기존 실주행 기반 통신 성능은 실도로에서 서비스 중인 C-ITS 메시지를 활용하여 통신 반경 또는 PER을 측정하는 것이 대부분이었다. 즉, 평균 100 msec 주기로 1,000 Byte 이하 패킷을 송수신하며 어느 정도의 통신 반경(몇 m)까지 PER 90 % 이상을 보장할 수 있는지 측정하는 것에 중점을 두었다. 그러나 해당 방식으로는 초저지연/초고속 통신 성능까지 검증하는 것은 거의 불가능하다.

또, RSU 또는 OBU가 패킷을 생성한 시간과 수신한 시간을 비교하여 송수신에 대한 지연 시간의 분석이 가능할 것 같지만 역시 신뢰성 있는 분석이 어렵다. 왜냐하면 서로 독립적으로 운영되는 시스템간 NTP(Network Time Protocol) 서버를 통해 시간 동기화를 수행 하더라도 평균  $\pm$ 수십 msec에서  $\pm$ 수백 msec까지 시간 오차가 발생하기 때문에 수 msec 이내의 초저지연 성능을 분석하는 방식으로는 적합하지 않다.

따라서 본 논문에서는 이러한 기존 통신 성능 측정 방식의 한계를 극복할 수 있는 Passive-RTT 방법을 제시한다. 일반적으로 RTT는 Unicast로 Destination address를 지정하여 측정하지만, 군집주행 및 긴급 차량 등과 관련한 특수한 서비스를 제외하고 차량 통신은 메시지를 송수신하는 대상을 특정하지 않고 Broadcast 하는 것을 기본으로 한다. 그러므로 기존의 RTT 방식으로 지연 시간

을 측정할 경우 매우 많은 트래픽이 발생할 수 밖에 없으므로 통신 모드별 RTT를 측정하는 Passive 방식을 제안한다. 즉, Fig. 7과 같이 I2V(RSUs to OBUs), V2I(OBUs to RSUs), V2V(OBUs to OBUs), 그리고 I2I(RSUs to RSUs)의 통신 모드별 각각에 대한 RTT를 측정할 수 있도록 프로토콜을 개발하였다. 예를 들어, I2V 모드에서는 RSU들만 RTT-Msg를 송출하도록 하고 RTT-Msg를 수신한 OBU에서 응답으로 RTT-Ack-Msg를 전송 및 RSU가 수신하여 RTT를 측정하도록 한다. 또한, V2I에 대한 Passive-RTT를 측정한다면, OBU들만 RTT-Msg를 송출되도록 한다. 즉 Broadcast 방식일 경우, RTT-Msg를 송출하는 장치 타입을 정하여 무선 상의 트래픽의 발생을 제한하고 각 모드의 특성(Uplink/Downlink)에 맞추어 통신 성능의 측정이 가능하도록 하였다. 또한 각 장치들은 측정된 RTT 데이터를 서버로 즉각 송출하도록 하여 성능 지표 데이터들이 실시간으로 모니터링 되도록 하였다.

NTP 서버를 통해 시스템간 시간 동기화를 하더라도 시간 오차가 발생할 수 밖에 없기 때문에 패킷을 송출한 장치와 동일한 장치가 응답을 받기까지의 시간인 RTT를 통해 통신 지연을 측정하고자 하였다. 다만 통신 계층간 또는 패킷을 처리하는 시스템에서 발생하는 지연이 포함되어 있을 수 있으므로 Fig. 8과 같이 각 장치 계층별 시간까지 측정이 가능하도록 하였다. 각 계층별 통신 성능 지표를 수집할 수 있는 계층은 5G NR-V2X 통신 연구에서 정의한 SSOV(Scalable Service Oriented V2X)를 기반으로 하며 모든 계층의 메시지 및 하위 데이터 프레임들은 T/L/V/C(Type/Length/Value/Checksum)으로 구성되

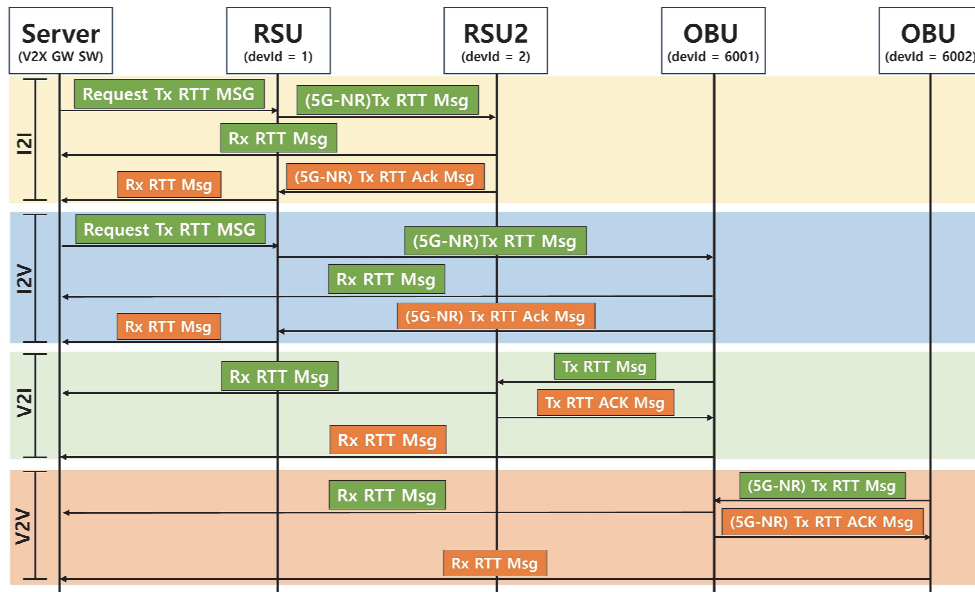


Fig. 7 Passive-RTT(Round Trip Time) protocol overview

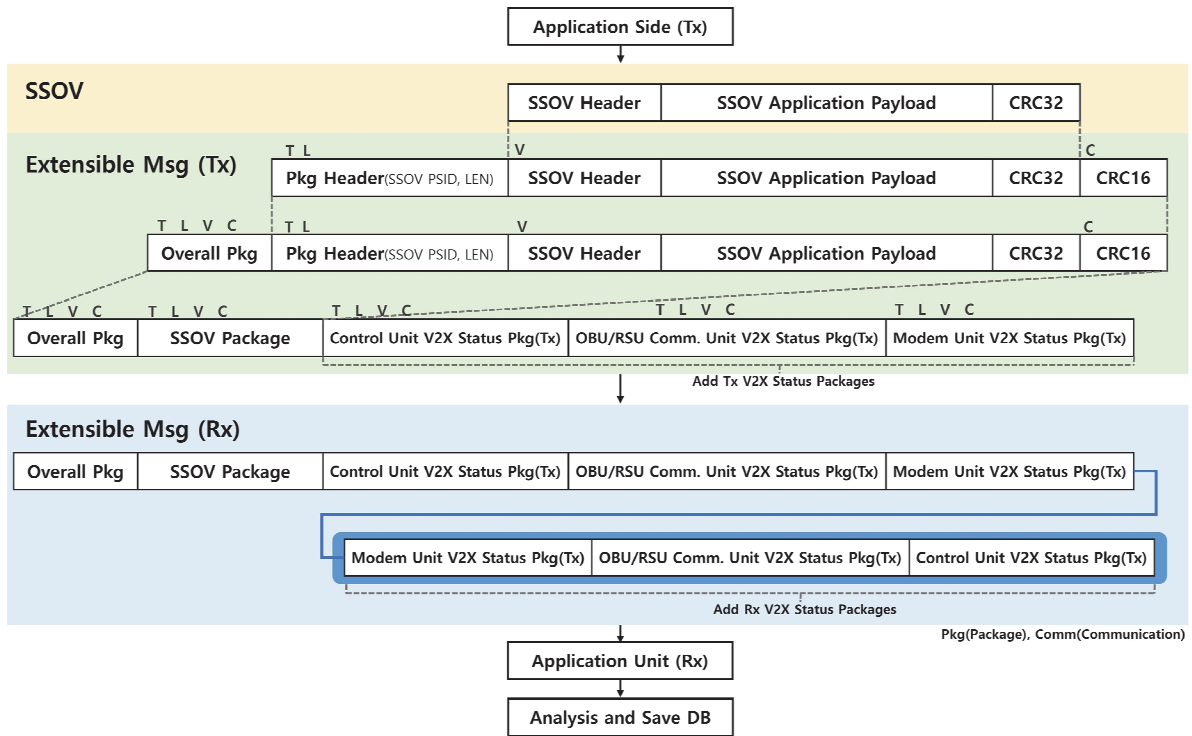


Fig. 8 Method for measuring Passive-RTT(Round Trip Time)

며 SSOV Application Payload로 전송 장치의 시간, 위치 정보가 포함된 RTT-Msg를 Extensible Msg(Tx)로 전송하며, RTT-Msg를 수신한 장치는 수신 시점의 시간과 수신 장치의 정보를 RTT-Ack-Msg를 Extensible Msg(Rx)로 구

성하여 전송한 장치로 응답 후, 이를 수신한 장치에서 총 도달 소요시간과 RF 무선 통신 간 지연시간을 측정할 수 있도록 구성하였다. 무선 구간(RF 간)의 통신 지연은 식 (1)과 같으며, Datarate를 도출하는 식은 (2)와 같다.

Throughput을 구하는 식은 (3)과 같다.

$$Latency_{(d_n)} = average \left( \sum_{i=0}^n (rx_i - tx_i) \right) \quad (1)$$

$$Datarate_{(d_n)} = \frac{packet\ size}{Latency_{(d_n)}} \quad (2)$$

$$Throughput_{(d_n)} = \frac{packetsize_{t+\Delta t}^{d_n} - packetsize_t^{d_n}}{\Delta t} \quad (3)$$

d는 장치의 타입을 의미하며 RSU 또는 OBU를 나타내고, a는 장치의 구분자(id 또는 장치의 번호)를 의미한다. i=0은 수신하기 시작한 첫 번째 패킷을 나타내고 n은 마지막 패킷을 의미하므로 성능을 측정하기 시작하고 종료하기까지 모든 패킷을 포함하는 것을 의미한다. 통신 지표를 취득하기 위한 방법은 시간 동기화 이슈를 배제하기 위해 RTT 방식을 도입했지만, 도출하는 지연 시간은 식 (1)과 같이 실제 무선 계층에서 측정된 Tx 시간과 Rx 시간의 차이로 구한다.

#### 4. 실주행 시험 기반 통신 성능 지표 분석

##### 4.1 시험도로 기반 주행 시험 및 결과

시험도로에서 실주행 기반 시험을 위해 5GNR-V2X의 RF 파라미터는 Table 2와 같이 설정하였다.

3GPP TS 38.306<sup>4)</sup> (5G NR uplink)의 규격에 의하면, 20 MHz bandwidth에서 Subcarrier spacing이 30 kHz인 경우, 최대 Throughput은 47.757 Mbps (통신 간섭이 없는 경우, 정차한 상태)으로 예측하였으며, Table 3과 같이 실주행

Table 2 RF Parameters setting

Parameter		Value
Tx power (dBm)		20
Frequency (MHz)		5,915
Subcarrier	Spacing (kHz)	30
	Start symbol	0
	Length symbol	14
Sub channel	Size (MHz)	10
	Number	5
	Start RB(Resource Block)	0
PSCCH (Physical Sidelink Control Channel)	Time resource	2
	Frequency resource	10
	MCS table	QAM64
	Index	19

측정 결과 22.321 ~ 33.694 Mbps로 주행 환경에서도 충분한 성능이 나오는 것을 확인하였다. 이 Throughput 측정을 위해 초당 4,000개의 패킷을 전송했으며, 한 패킷의 데이터 사이즈는 1,500 Byte가 되도록 하였다.

Table 3 Throughput by distance

Distance(m)	Throughput	Min. (Mbps)	Max. (Mbps)	Average (Mbps)
20	V2I	33.346	34.004	33.694
	I2V	24.732	30.589	27.847
100	V2I	33.235	33.918	33.650
	I2V	30.093	34.260	32.067
150	V2I	33.342	34.405	33.781
	I2V	30.554	31.368	33.927
250	V2I	33.543	34.243	33.745
	I2V	26.755	34.045	31.784
300	V2I	8.673	33.901	26.960
	I2V	5.856	31.383	22.321

통신 모드에 따른 송수신 지연 시간은 Table 4와 같으며, 이는 백엔드 서버에 데이터가 수집되는 시간까지 모두 포함하고 있다. 통신 모드 중 V2I가 통신 지연이 다소 낮게 측정되었으나, 이는 통신 모드에 의해 RSU에서 수신하는 통신 트래픽이 OBU보다 높은 경향인 것이 원인으로 파악된다. 평균 19.4 ~ 45.84 msec 이므로 기존 C-ITS 통신 표준보다는 통신 지연이 현저히 낮은 것으로 평가되었다.

Table 4 RTT by communication mode

V2X Mode		RTT	Min. (msec)	Max. (msec)	Average (msec)
I2I	RSU1-RSU2		10.790	239.032	34.025
	RSU1-RSU3		11.051	157.604	37.695
	RSU2-RSU3		11.016	225.698	45.840
I2V	RSU1		8.209	216.130	30.391
	RSU2		7.966	211.156	30.448
	RSU3		10.691	116.965	19.400
V2I	RSU1		8.222	112.585	20.908
	RSU2		9.000	148.716	23.659
	RSU3		8.137	125.461	31.164

통신 모드에 따른 RF 단의 수신 지연 시간은 Table 5와 같으며, 이는 RF 신호가 생성되어 수신되는 시간까지만을 포함한다. 평균 지연 시간은 2.828 ~ 3.108 msec 이며

Table 5 Latency by communication mode

V2X Mode		Latency	Min. (msec)	Max. (msec)	Average (msec)
I2I	RSU1-RSU2		1.520	10.760	2.846
	RSU1-RSU3		1.520	9.200	2.828
	RSU2-RSU3		1.510	8.580	2.581
I2V	RSU1		1.530	7.450	3.050
	RSU2		1.530	7.230	3.108
	RSU3		1.520	6.990	3.079
V2I	RSU1		1.710	8.580	2.870
	RSU2		1.750	8.980	2.937
	RSU3		1.780	9.360	2.987

로 통신 계층 간 또는 시스템 내부 처리 지연이 전체 RTT의 85.4 ~ 93.2 %를 차지하는 것을 알 수 있다. 또한 5G NR-V2X의 초저지연 성능인 3 msec 이내를 거의 만족하는 것으로 측정되었다.

RTT와 Latency를 측정하기 위해 초당 10개의 패킷을 송출했으며, 한 패킷의 사이즈는 1,619 Byte로 하였다. 이때 Datarate는 평균 약 1.867 ~ 3.939 Mbps으로 산출되었다.

Figs. 9 ~ 11은 통신 모드별 수집한 성능 지표를 기반으로 Datarate와 Latency를 그래프로 도출하였다. I2I, V2I, 그리고 I2V 모두 초저지연/대용량 데이터를 송수신 가능하다는 것을 알 수 있다. 특히 통신 모드뿐만 아니라 RSU별 측정된 통신 성능에 대해 그 측정값이 모두 유사

하다는 것을 확인할 수 있으므로 측정된 방법과 데이터의 일관성 및 신뢰성이 있음을 증명할 수 있었다. 제안한 방법을 기반으로 실주행을 하며 수집한 통신 지표들을 분석하여 다양한 통신 성능 요소를 도출하고 분석하는 것이 가능했으며, 특히 실제 주행 상황을 감안하면 충분히 통신 규격(표준)에 부합하는 성능을 가진다는 것을 확인할 수 있었다.

### 4.2 실도로 기반 주행 시험 및 결과

실도로의 RSU들도 시험도로와 동일하게 5G NR-V2X의 RF 파라미터를 설정하였으며, Table 2와 같다. 5G NR-RSU가 구축된 실도로에서는 2025년 3월부터 5월까지 주5일 정기적으로 주행하여 통신 성능 지표를 장시간 누적(약 5,442시간)하여 분석하였다. 차량 트래픽에 따른 통신 성능에 대한 분석을 하고자 오전첨두(6시 ~ 14시) 주행 1일, 오후첨두(13시 ~ 20시) 주행 1일, 그리고 일반 주행(10시 ~ 18시) 3일로 일정을 정하여 주행하였다. 또한 대부분의 RSU는 상행 도로변에 구축되어 있으므로 상행/하행 주행에 따른 통신 성능과 주행 속도에 따른 성능의 비교 분석도 함께 진행할 수 있도록 하였다. 4.1장에서 수집되는 통신 성능 지표와 그 방법은 모두 동일하지만, 실도로 주행 시험에서는 주행 환경에 따른 통신 성능의 차이에 대해 시공간적 요소를 추가하여 분석하였다.

Fig. 12는 RSU들과의 거리 및 주행 속도에 따른 RCPI 변화를 분석한 결과이다. 무선으로 수신하는 채널의 전력 강도를 나타내는 RCPI(Received Channel Power



Fig. 9 Chart of I2I datarate and latency by RSU

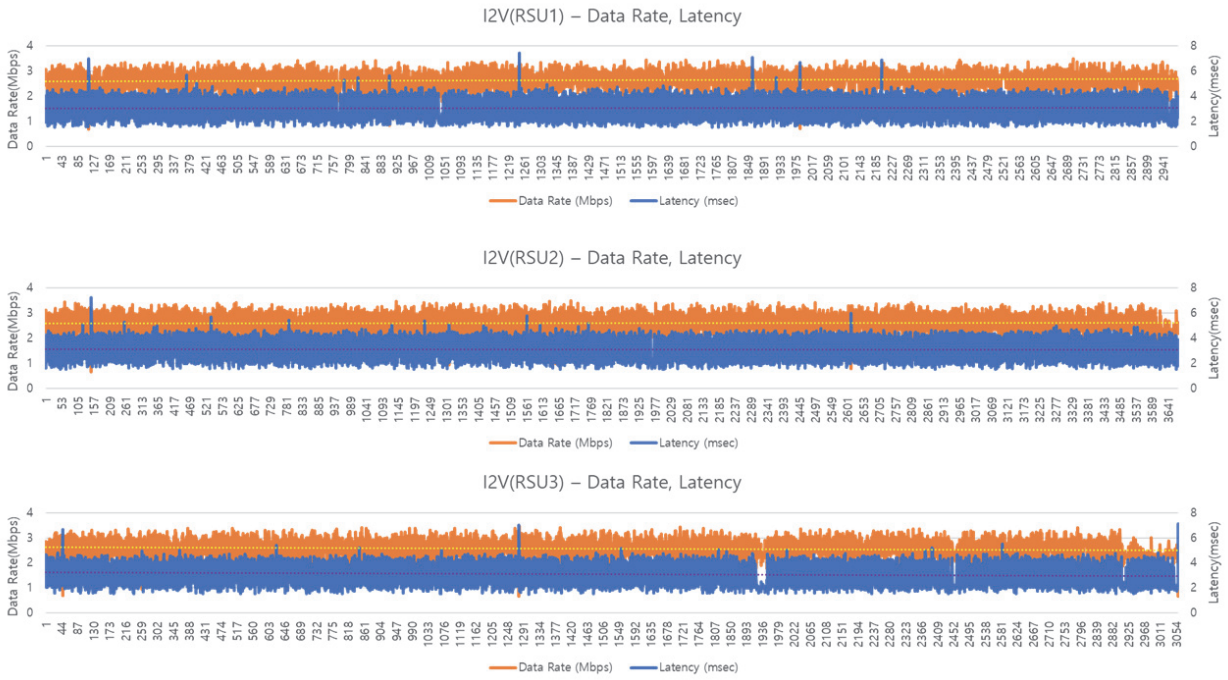


Fig. 10 Chart of I2V datarate and latency by RSU



Fig. 11 Chart of V2I datarate and latency by RSU

Indicator)는 OBU와 RSU의 거리가 멀어질수록 물리적 감쇠로 인해 감소하는 경향을 보이거나, 차량의 주행 속도는 신호 세기에 유의미한 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 RSU 또는 OBU가 RTT를 송신했으나 Ack를 수신하지 못한 구간을 지리적 조건을 함께 분석하기 위해 정밀도로 지도에 히트맵으로 나타내었다. 해당 조건은 정지 상태가 아닐 경우이므로 차량의 주행속도가 10

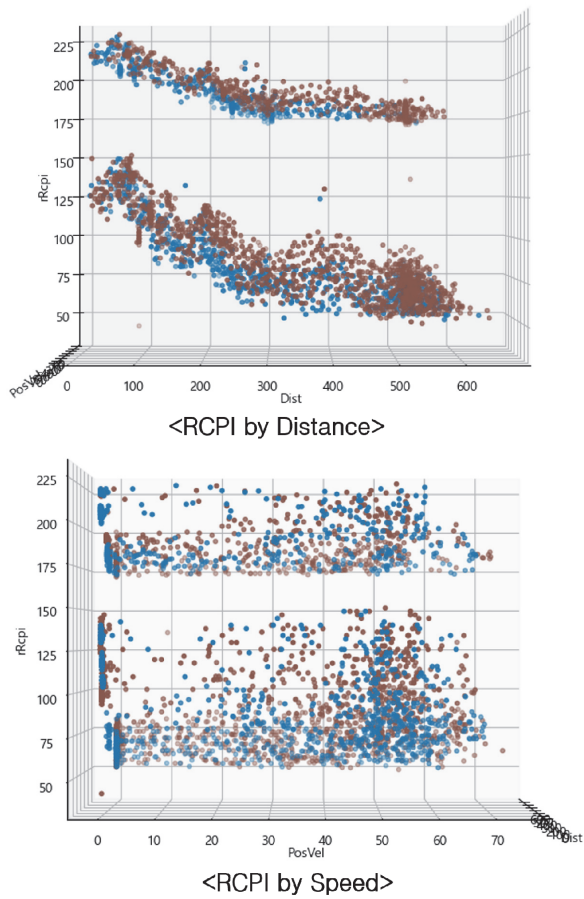


Fig. 12 RCPI by distance (top), RCPI by speed (bottom)

km/h 이상의 조건으로 분석하였다. 색상이 붉은 색일수록 Ack를 수신하지 못하는 구간이며 분석 결과 주로 지하차도 또는 터널로 진입하는 경우에 해당하는 것을 알 수 있다.

차량이 RSU와 가까워질 때와 멀어질 때 V2I와 I2V의 성능 차이(통신 반경)를 공간적으로 분석한 결과는 Fig. 14와 같다. 이 분석은 Fig. 13과 반대로 RTT를 위한 Tx를 전송한 후 Ack를 모두 수신한 경우에 대해서 통신 유효 범위로 판단하여 분석하였다. 이때 V2I와 I2V 모두 RSU에 접근할 때 통신 반경은 유사하지만, RSU를 벗어나는 경우는 V2I가 더 통신 반경이 넓은 것을 알 수 있다. RSU를 벗어나는 경우(Departure)가 접근하는 경우(Approach)보다 통신 반경이 넓게 측정되는 현상은 실험 구간의 지리적 특성인 터널 환경과 GNSS 수신 특성 간의 상관관계에 기인한다. Fig. 14의 해당 구간은 터널과 터널 사이에 RSU가 위치하는 환경으로, 차량이 터널을 통과하여 RSU에 접근할 때는 터널 내 GNSS 음영 구간을 벗어나 위성 신호를 재수신하고 시간 동기화를 완료하기까지 수 초(1 ~ 3초)의 지연이 발생한다. 이로 인해 물리적 거

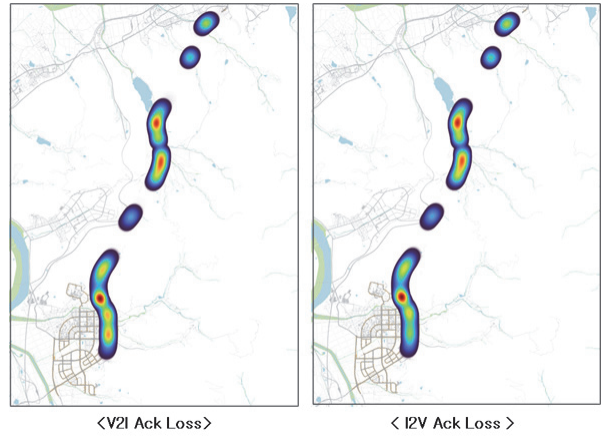


Fig. 13 ACK reception failure section at speeds greater than 10 km/h

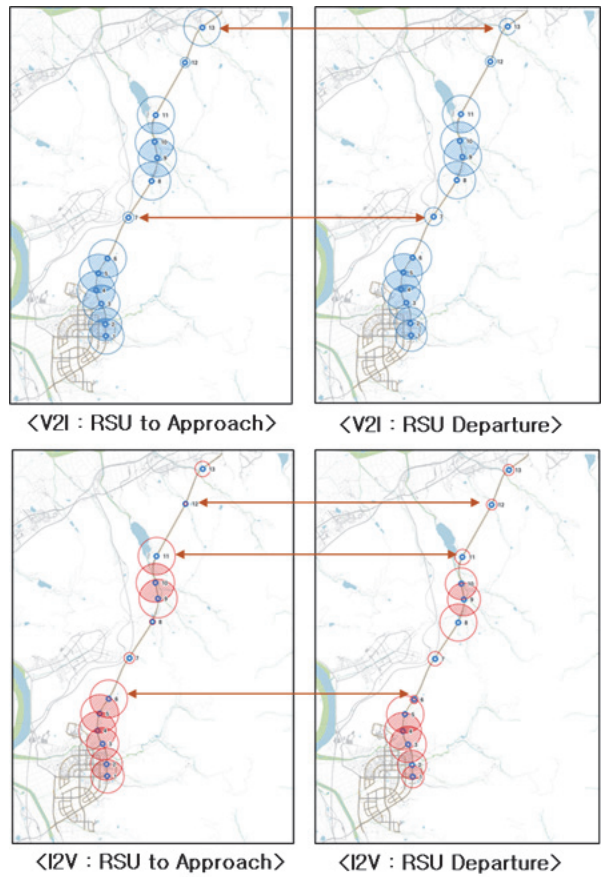


Fig. 14 ACK reception failure section at speeds greater than 10 km/h

리가 가까워졌음에도 불구하고 유효한 V2I 통신 시작 시점이 늦어지게 되어 통신 반경이 상대적으로 작게 측정된다. 반대로 차량이 RSU를 지나 터널로 진입하는 경우에는, GNSS 신호가 즉시 차단되지 않고 수신 상태가 일

정 시간 유지되거나 신호 소실 판정까지의 지연 시간이 존재하여, 터널 진입 후에도 잠시 동안 통신이 유지되는 경향을 보인다. 이에 따라 멀어지는 방향에서의 통신 환경이 상대적으로 넓게 나타나는 것으로 분석된다.

Passive-RTT 프로토콜을 통해 수집한 통신 성능 지표는 5G NR-V2X의 통신 성능 뿐만 아니라 주행과 관련한 여러 데이터를 연계하여 주행 환경에 기반하여 다양한 시공간 분석도 가능하다.

## 5. 결론

본 논문에서는 실제 도로 내에서 발생할 수 있는 요소 및 환경을 고려하여 실제 차량 내 통신 장치와 KIAPI 관제플랫폼을 적용하여 초고속(150 Mbps 이상), 초저지연(3 ms 이하), 고신뢰성(99.99 %) 요구사항을 갖춘 5G NR-V2X 통신 성능을 실제 도로에서 확인할 수 있도록 하기 위해 Passive-RTT 프로토콜을 제안하였다. 해당 Passive-RTT 프로토콜을 실제 차량에 적용하여 데이터를 수집하기 위해 KIAPI P.G.에 3기, 실도로 내 13기의 5G NR-RSU를 설치하였고 관제시스템으로 연동하여 주행하는 차량으로부터 데이터를 수집할 수 있는 환경을 갖추었다. 마찬가지로 차량 내 Passive-RTT 프로토콜을 처리하는 데이터 수집 장치와 5G NR-V2X 통신기술이 적용된 차량 통신 장치를 장착하고 KIAPI 관제시스템으로 수집된 통신 성능 정보를 Upload할 수 있는 차량 3대를 구성하였다.

구성된 통신 성능 지표 수집시스템을 3대의 차량으로 5G NR-RSU가 존재하는 도로를 주행하면서 차량과 차량(V2V), 차량과 노변장치(V2I), 노변장치와 차량(I2V), 노변장치와 노변장치(I2I) 통신 모드로 약 5,442시간의 데이터를 수집하였다. 여러 통신 성능에 영향을 줄 수 있는 외부 요소에 따라 수집된 데이터를 기반으로 성능 분석을 진행하였으며, 제안한 Passive-RTT를 통해 측정된 RTT 지연 시간은 19.4 ~ 45.84 msec로 확인되었다. 이 중 연계되는 통신 지연을 제외한 순수 RF 지연시간은 2.828 ~ 3.108 msec로 확인되어 실제 도로 환경에서도 통신 성능의 초저지연 요구사항 3 msec 이내를 만족함을 확인하였고, 적용한 RF parameter의 예상 Throughput과 유사하게 실도로 주행환경에서 최대 33.694 Mbps의 Throughput이 측정되어 초고속 요구사항도 유사하게 충족되는 것을 확인하였다. 추가로 실도로 환경의 지리적인 요소를 반영한 분석에도 차량의 속도 대비 통신 장치간의 거리와 장애물로 인한 LOS가 보장되지 않는 환경이 통신 성능에 높은 영향을 주는 것을 확인하였다.

향후 연구에서는 수집된 데이터를 심층 분석하여, 통신 성능에 영향을 미치는 도로 환경 요소를 구체적으로

규명할 계획이다. 아울러, 본 연구의 실험 환경보다 높은 차량 밀집도(Traffic density) 상황에서의 통신 부하 및 성능 변화를 검증하고, 시험 도로 내에 구축된 WAVE 및 LTE-V2X 시스템과의 정량적 비교 분석을 수행하여 5G NR-V2X의 고성능 특성과 차별성을 명확히 입증할 것이다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 수집 시스템을 고도화하여 차량 주행 중 실시간으로 통신 성능 미흡 구역을 모니터링할 수 있는 방안을 연구하고자 한다. 궁극적으로는 단순한 성능 요구사항 충족 여부 확인을 넘어, 실제 도로 인프라 구축 상태와 자율주행 통신 서비스의 적합성까지 판단할 수 있도록 연구를 확장할 예정이다.

## 후 기

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2022-0-00199, 커넥티드 자율주행을 위한 5G-NR-V2X 성능 검증).

## References

- 1) SAE International, "V2X Communications Message Set Dictionary," SAE J2735\_202409, 2024.
- 2) SAE International, "Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles," SAE J3016\_202104, 2021.
- 3) 3GPP, "Study on Enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services," 3GPP TR 22.886, 2018.
- 4) 3GPP, "NR; User Equipment (UE) Radio Access Capabilities," 3GPP TS 38.306, 2025.
- 5) J. Kim, T. Kim, W. Kim, D. Lee, T. Kim and S. Kwon, "A Study on the Integrated V2X Communication Data Collection for Data Storage System of Automated Driving," Transactions of KSAE, Vol.31, No.12, pp.1003-1010, 2023.
- 6) S. Kim, D. Kim, S. Lee, J. Shin, S. Cho, B. Moon and K. Park, "A Study on the Development Methodology of Functional Safety Evaluation Scenario for V2V Communication of Urban Cooperative Autonomous Driving System," Transactions of KSAE, Vol.29, No.5, pp.437-449, 2021.
- 7) J. Kim, Y. Yoon, H. Kang and K. Sung, "Performance Analysis of 5G NR V2X System for Autonomous Driving," KSAE 2024 Annual Spring Conference, pp.521-523, 2024.
- 8) S. Ji and C. Mun, "Design and Performance Analysis of 5G NR V2X-Based Sensor Data Sharing System," The Journal of Korean Institute of

- Information Technology, Vol.21, No.21, pp.129–135, 2023.
- 9) S. Jeong, S. Sung, S. Na and J. Il, “A Study on the V2X Terminal Location and Near OBU/RSU Status Monitoring System,” Proceedings of Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Sciences, pp.695–696, 2023.
  - 10) K. Seo, W. Seo, E. Yang, B. Kim and K. Yoon, “Method for Analyzing and Evaluating the 5G-NR Communication Performance of Roadside-Unit and Onboard-Unit Under Real-Road Driving,” Proceedings of Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Sciences, pp.365–366, 2025.
  - 11) K. Nam, “A Study on 5G V2X Capabilities for Vulnerable Road Users and Autonomous Shuttle Vehicles,” Journal of Information Technology Applications & Management, Vol.32, No.3, pp.19–34, 2025.
  - 12) D. Khan, S. Sawera and K. Chang, “Evolution in 5G NR V2X Technology – A Detailed Look at Enhancements in 3GPP Releases 17 and 18,” Proceedings of Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Sciences, pp.990–991, 2024.
  - 13) Y. Yun, “The Development and Practice of 5G/WAVE Hybrid V2X Communication,” Proceedings of Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Sciences, pp.613–614, 2022.