

VRU 사고 예방을 위한 근거리 차량통신 기술 분석

박주환, 김수, 김성현, 양하이산, 듀셈바예바디에나, 김동균

경북대학교

{drosis, kimsu, sunghyunkim, yanghs158, diana, dongkyun}@knu.ac.kr

Analysis of Short Range Vehicle Communication Technology for Prevention of VRU Accidents

Joohwan Park, Su Kim, Sunghyun Kim, Haishan Yang, Diana Dyussembayeva, Dongkyun Kim

Kyungpook National University

요 약

최근 ITS(Intelligent Transport System)에서 취약 도로 사용자(Vulnerable Road User, VRU)와 차량 간 사고 예측을 위해 VRU와 차량의 위치, 이동 방향, 속도 등의 주행 정보를 전달하는 근거리 통신 방법에 관한 많은 연구가 진행 중이다. 특히, 주행 정보를 주기적으로 교환하기 위해 스마트폰 기반 Bluetooth, Cellular 및 Wi-Fi Direct 등 VRU 단말의 통신 인터페이스 활용이 제안되고 있다. 그러나 각 통신 인터페이스는 설계 목적과 통신 구조가 상이하여, 메시지 전송 시 End-to-End 지연 시간 특성의 많은 변동이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 스마트폰에 탑재된 Bluetooth, Cellular 및 Wi-Fi Direct 통신 인터페이스를 대상으로 LoS(Line-of-Sight) 환경에서 0m~100m 구간 동안 CAM(Cooperative Awareness Message) 메시지를 주기적으로 전송하여, 거리의 변화에 따른 지연 시간 특성을 실측하고 비교·분석하였다.

I. 서론

최근 많은 연구가 이루어지고 있는 ITS 시스템의 도로 교통 주체 중 VRU는 보행자나 자전거, 이륜차, 개인용 이동 수단(Personal Mobility, PM) 이용자를 의미한다. 특히, VRU는 교통사고 발생 시 제한적인 물리적 보호 수단으로 인해 차량 운전자보다 피해가 큰 것으로 나타난다[1]. 그림 1과 같이 변칙적인 VRU의 교통사고 발생을 감소시키기 위해 교통 안전 분야에서 무선 통신 기반의 사고 예측 기법이 제안되고 있다[2].

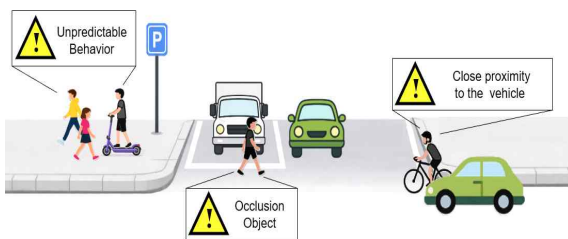


그림 1. VRU 도로 교통 위험 시나리오

VRU의 사고 예방을 위한 무선 통신 기반 사고 예측 기법에서는 VRU와 차량의 위치, 이동 특성과 같은 정보를 포함한 메시지인 CAM, DENM(Decentralized Environmental Notification Message), BSM(Basic Safety message)과 같은 표준화된 메시지를 통해 사고 예측을 위한 정보를 교환한다[3].

사고 예방 메시지를 전송하기 위한 무선 통신 기술에는 스마트폰에 탑재된 Bluetooth, Cellular 및 Wi-Fi Direct 통신 인터페이스를 사용할 수 있다. 근거리 통신 기술인 Bluetooth는 저전력으로 동작하고 단말 간 직접 통신이 가능하여 스마트폰, 웨어러블 디바이스와 같은 단말에 탑재되어 사용된다[4]. 인프라 기반 통신인 Cellular는 기지국 인프라를 통해 넓은 통신 범위를 제공할 수 있으나, 기지국과의 연결 유지, 제어 신호 교환, 핸드오버가 필요한 구조로 인해 통신 지연 시간이 기지국과의 거리에 따라 영향받을 수 있다. Wi-Fi Direct는 별도의 AP 없이 직접 통신이 가능한 Wi-Fi 기반 통신 방식으로, 근거리 환경에서 단말 간 메시지 교환을 수행할 수 있다[5].

Bluetooth, Cellular, Wi-Fi Direct 통신 인터페이스는 스마트폰에 기본으로 탑재되어 있으나 상이한 설계 목적으로 인해 메시지 전달 시 서로 다른 전송 성능을 보일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 각 통신 인터페이스 간 지연 시간 특성을 비교·분석하고자 한다.

II. 본론

Bluetooth, Cellular 및 Wi-Fi Direct 통신 인터페이스 간 메시지 전송 지연 시간 특성을 비교하기 위해 표준화된 메시지인 CAM, DENM, BSM 메시지 중 주기적 전송 특성을 가지며 다양한 교통 주체를 명시할 수 있는 CAM 메시지를 사용하였다.

DENM 메시지는 이벤트 기반 전송 구조를 가지므로 주기적 전송 환경에서 지연 시간 특성을 측정하는 데 한계가 있으며, BSM 메시지는 차량 중심으로 정의되어 VRU를 명시하지 못한다. 이에 비해 CAM 메시지는 차량과 VRU를 포함한 교통 주체를 명시할 수 있고 주기적으로 전송할 수 있다. 따라서 차량 통신 환경에서 VRU와 차량 간 주기적 메시지 교환을 통해 통신 인터페이스의 지연 시간 특성을 비교하는 데 적합하다.

Bluetooth 환경에서는 RFCOMM 프로토콜을 활용하여 시리얼 데이터 전송 환경을 구성하였다. Cellular 환경은 기지국 인프라를 통해 통신이 이루어지므로 종단 간 연결 상태 유지를 위해 WebSocket을 사용하고, TCP 기반으로 메시지를 전송하도록 구성하였다. Wi-Fi 환경에서는 Wi-Fi Direct 기술을 이용하여 UDP 기반으로 메시지를 전송하고, 해당 전송 과정에서의 지연 시간 특성을 측정하였다.

2-1. 실험 환경

실험은 그림 2와 같이 LoS 환경의 경북대학교 교내 보행로에서 진행하였다. 송수신 노드의 로컬 시간은 스마트폰의 내장된 GPS에서 제공하는 시간을 기준으로 지연 시간 특성을 측정하였다. 송신 노드는 1초당 10회 주기로 타임스탬프를 포함한 100개의 CAM 메시지를 전송한다. 수신 노드가 위치한 0m 지점부터 100m까지 5m 간격으로 송신 노드를 이동한 뒤 지연 시간 특성을 측정한다.



그림 2. 실험 환경 구성

실험에 사용된 송수신 노드의 구성은 표 1과 같다. Bluetooth, Cellular 및 Wi-Fi Direct는 Android 15 환경의 스마트폰에 탑재된 Bluetooth v5.0, 5G 이동 통신 서비스, Wi-Fi 6 통신 모듈을 사용한다. 각 통신 인터페이스는 RFCOMM 및 Wi-Fi Direct를 이용한 단말 간 직접 통신 방식과, WebSocket 서버를 경유하는 Cellular 통신 방식으로 구성하였다.

표 1. VRU 송수신 노드 구성표

구분	Bluetooth	Cellular	Wi-Fi Direct
주파수 대역	2.4Ghz	3.9Ghz	5Ghz
전송 프로토콜	RFCOMM	TCP	UDP
통신 구조	직접 통신	인프라 기반 통신	직접 통신
통신 모듈	Bluetooth 5.0	5G NR	Wi-Fi 6

2-2. 실험 결과

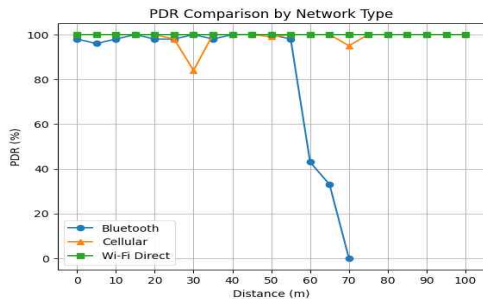


그림 3. 통신 인터페이스별 패킷 전달 비율 비교

그림 3은 0m부터 100m 구간 동안 Bluetooth, Cellular, Wi-Fi Direct의 메시지 전송 PDR 결과이다. Bluetooth는 55m 지점 이후 PDR이 감소하여 70m 지점에서 PDR 0%로 하락하였다. Cellular는 30m 구간을 제외하고 모든 구간에서 PDR 98%~99%를 보였으며 거리 변화와 무관한 PDR 변동을 보였다. Wi-Fi Direct는 PDR 100%를 유지하는 모습을 보였다.

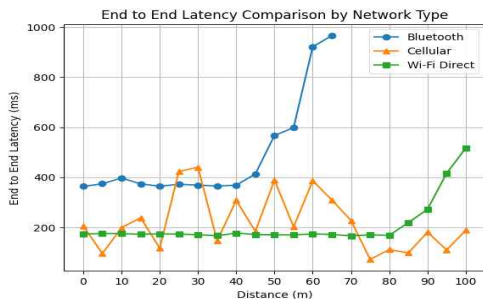


그림 4. 통신 인터페이스별 End-to-End 지연 시간 비교

그림 4는 통신 인터페이스별 지연 시간 특성을 비교한 결과이다. 단말 간 직접 통신 구조를 가지는 Bluetooth는 40m까지 10ms 내외의 지연 시간 변동 폭을 보였으나, 이후 지점에서 지연 시간이 증가하여 65m 지점에

서는 약 1,000ms까지 증가하였다. 인프라 기반 통신 구조인 Cellular는 일부 지점에서 Bluetooth와 Wi-Fi Direct보다 지연 시간이 낮은 지점이 있었으나, 기지국 및 네트워크 경로 변동 등 Cellular의 통신 특성으로 인해 72ms~440ms에 이르는 지연 시간 변동 폭을 보였다. Bluetooth와 마찬가지로 단말 간 직접 통신 구조를 가지는 Wi-Fi Direct는 80m까지 200ms 이하의 지연 시간과 10ms 내외의 지연 시간 변동 폭을 보였으며, 이후 지점에서는 지연 시간이 약 500ms까지 점진적으로 증가하였다.

III. 결론

본 논문에서는 무선 통신 기반 사고 예측에 필요한 정보를 전송하기 위해 스마트폰에 기본 탑재된 통신 인터페이스를 대상으로 지연 시간 특성을 실측하였다. LoS 환경에서 송신 노드를 수신 노드가 위치한 지점으로부터 5m 간격으로 이동한 뒤 CAM 메시지를 전송하여 100m까지의 지연 시간 특성을 비교하였다. 실험 결과, Bluetooth는 60m 지점부터 PDR이 떨어지고 50m 지점부터 지연 시간이 증가하는 모습을 보였다. Cellular는 Bluetooth에 비해 안정적으로 메시지를 전송하였으나, 통신 특성으로 인해 지연 시간이 불규칙하게 변동하는 모습이 나타났다. Wi-Fi Direct는 전 구간에서 메시지 전송을 안정적으로 수행하였으며, 80 m 지점까지 지연 시간의 변동 폭이 크지 않고 일정하게 유지되는 특성을 보였다.

결과적으로, 신뢰성과 실시간 정보 전달이 보장되어야 하는 차량과 VRU 간 사고 예측을 위해 100m 이내 근거리 통신 환경에 부합하는 특성을 지닌 Wi-Fi Direct 통신 인터페이스가 우수한 성능을 보였다. 향후 연구에서는 본 실험 결과를 바탕으로, Wi-Fi Direct의 메시지 크기와 전송 주기, 주변 무선 간섭 환경을 고려한 추가적인 실증을 통해 차량과 VRU 간 사고 예측에 적합한 통신 방식의 설계 기준을 확립하고자 한다.

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-2018R1A6A1A03025109, and supported by the Regional Innovation System & Education(RISE) Glocal 30 program through the Daegu RISE Center, funded by the Ministry of Education(MOE) and the Daegu, Republic of Korea.(2025-RISE-03-001)

참 고 문 헌

- [1] 경찰청, 「경찰접수교통사고현황」, 2024, 2025.12.30, 사고유형별 가해자 차종별 교통사고 (https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=132&tblId=DT_V_MOT_A_015&conn_path=I2).
- [2] Kabil, Ahmad, et al. "Vehicle to pedestrian systems: Survey, challenges and recent trends." IEEE Access 10 (2022): 123981-123994.
- [3] Clancy, Joseph, et al. "Wireless access for V2X communications: Research, challenges and opportunities." IEEE Communications Surveys & Tutorials 26.3 (2024): 2082-2119.
- [4] Gelbal, Sukru Yaren, Bilin Aksun-Guvenc, and Levent Guvenc. "Vulnerable road user safety using mobile phones with vehicle-to-vru communication." Electronics 13.2 (2024): 331.
- [5] Malar, A. Christy Jeba, et al. "An infrastructure-less communication platform for android smartphones using Wi-Fi direct." International Conference on IoT, Intelligent Computing and Security: Select Proceedings of IICS 2021. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023.