

자동차 이더넷의 신뢰성 확보를 위한 FRER 기반 TSN 이중화 기법 적용 및 성능 검증: Fail-Operational TSN 관점

김 현 우 · 박 부 식*

한국전자기술연구원 모빌리티플랫폼연구센터

Application and Performance Evaluation of FRER-based TSN Redundancy for Reliability in Automotive Ethernet: A Fail-Operational Perspective

Hyunwoo Kim · Pusik Park*

Korea Electronics Technology Institute (KETI)

Key words : Automotive Ethernet(자동차 이더넷), Time-Sensitive Networking(시간 결정론적 네트워킹), IEEE 802.1CB FRER(프레임 복제 및 제거), Fail-Operational(무중단 운용), Reliability(신뢰성), Low Latency(저지연), Fault Tolerance(결함 허용), Autonomous Vehicles(자율주행차량), Functional Safety(기능 안전), In-Vehicle Network(차량 내 네트워크)

* 교신저자, E-mail: pusik.park@keti.re.kr

SAE J3016에서 정의하는 레벨 4 및 레벨 5 자율주행 차량은 LiDAR, 카메라, 레이더 시스템으로부터 생성되는 고대역폭 센서 데이터를 실시간으로 수집하고 처리해야 한다. Automotive Ethernet은 현대 차량 E/E(Electrical/Electronic) 아키텍처에서 안전 필수(safety-critical) 데이터를 전송하기 위한 핵심 인프라로 부상하였다. 그러나 단일 경로 기반 네트워크는 링크 장애 및 스위치 오류에 취약하여, ISO 26262(기능 안전) 및 ISO/PAS 21448(SOTIF, 의도된 기능의 안전)에서 요구하는 Fail-Operational 특성을 충족하지 못한다.

본 연구는 차량 내부 네트워크(in-vehicle network)를 위한 IEEE 802.1CB FRER(Frame Replication and Elimination for Reliability) 기반 TSN 이중화 기법의 구현 방법론과 검증 체계를 제시한다. FRER은 송신 측에서 데이터 스트림을 물리적으로 독립적인 다중 경로로 복제하고, 수신 측에서는 시퀀스 번호를 기반으로 중복 프레임을 제거함으로써, 장애 상황에서도 제로 패킷 손실(zero packet loss)과 순차적 데이터 전달(sequential data delivery)을 보장한다. Microchip LAN9662 평가보드를 사용하여 4개의 스위치로 구성된 자동차 네트워크 토폴로지에 대한 포괄적인 FRER 구현 프레임워크를 설계하였다. 본 프레임워크는 VCAP(Versatile Content-Aware Processor) 규칙을 이용한 스트림 식별, 송신 스위치에서의 시퀀스 번호 생성 및 R-TAG 삽입, 다중 출력 포트로의 스트림 복제, 그리고 수신 스위치에서의 멤버 스트림 병합 및 중복 제거의 네 가지 핵심 단계로 구성된다. FRER 동작의 실제 검증은 Wireshark 패킷 분석을 통해 수행되었다. 캡처된 패킷 분석 결과, R-TAG 헤더가 정상적으로 삽입되었으며 EtherType 0xF1C1이 명확히 확인되었다. 시퀀스 번호는 0부터 시작하여 프레임마다 1씩 단조 증가하는 것이 관찰되었으며, 동일한 시퀀스 번호를 가진 프레임이 여러 물리 경로(포트)를 통해 동시에 수신되는 것을 확인함으로써 프레임 복제 기능이 정상 동작함을 검증하였다.

향후 연구에서는 RFC 2544(처리율, 지연, 프레임 손실률), RFC 2889(브리지 포워딩 성능), RFC 3918(멀티캐스트 성능) 표준 절차를 기반으로 정량적 성능 평가를 수행할 예정이다. 특히 다양한 장애 시나리오에서의 Fail-Operational 특성을 검증하기 위해, 4-스위치 토폴로지(S1-S2-S3-S4)에서 단일 링크 단선(S1-S2 경로), 스위치 노드 고장(S3 전체 장애), 다중 경로 동시 장애(S1-S2 및 S1-S3 경로) 등의 시나리오를 구성하여 각 조건에서의 패킷 손실률, 복구 시간, 지연 변동성을 측정할 계획이다.

FRER 기반 TSN 이중화 기법은 ISO 26262 및 SOTIF에서 요구하는 Fail-Operational 특성을 충족할 수 있는 실질적이고 표준화된 방안을 실증하였다. 본 연구에서 검증된 R-TAG 기반 시퀀스 관리 메커니즘과 하드웨어 가속 중복 제거 기능은 자율주행 레벨 4·5 차량의 인-비하클 네트워크(In-Vehicle Network, IVN) 설계에서 안전성과 신뢰성을 확보하기 위한 핵심 기반 기술로 활용될 수 있다.

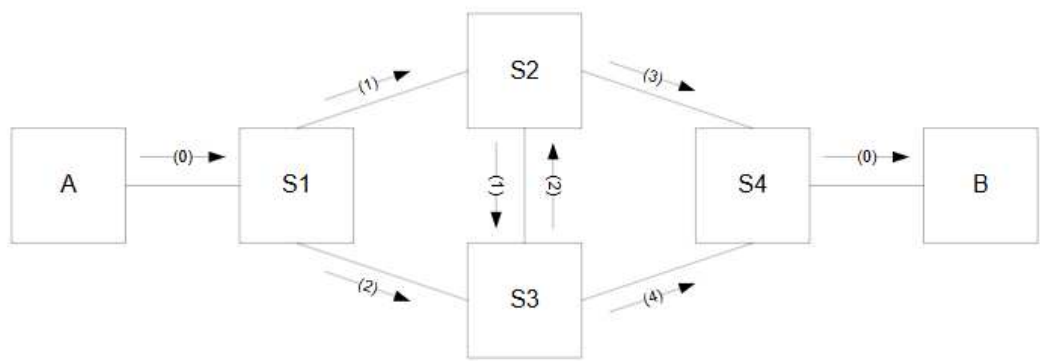


Fig. 1 FRER Overview

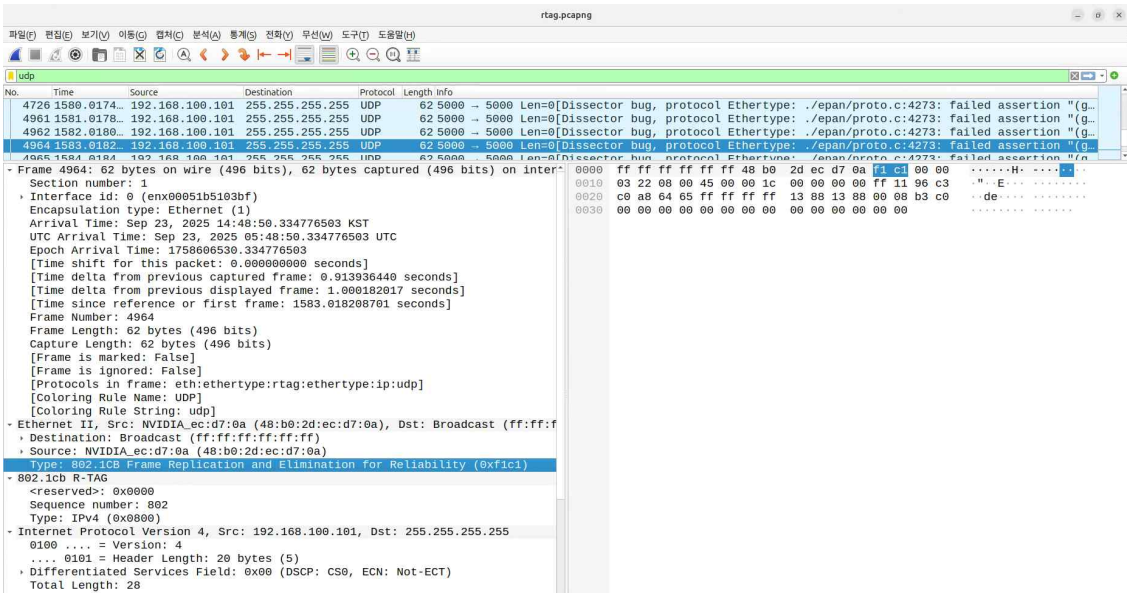


Photo. 1 R-TAG (EtherType 0xF1C1) and Sequence Number Verification in Wireshark Packet Capture