

LoRa 연동 SDN 기반 MCTP의 채널 전환 환경 세션 연속성 검증

박호민, 정우성, 강세훈, 유대승*

한국전자통신연구원

hominpark@etri.re.kr, woosung@etri.re.kr, skang@etri.re.kr *ooseyds@etri.re.kr

LoRa-Integrated SDN-Based MCTP: Session Continuity Verification under Channel Transition

Ho-Min Park, Woo-Sung Jung, Saehoon Kang, and Dae Seung Yoo*

Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

해상 통신 환경의 불안정성 속에서 서비스 연속성 확보를 위해 SDN 기반 MCTP를 활용한 다중 통신망 동적 제어 기술을 제안한다. MCTP는 ACK/NACK 메커니즘을 통해 데이터 신뢰성을 보장하며, SDN 컨트롤러는 5-Tuple 기반 정책 및 실시간 채널 통계를 활용하여 최적의 채널을 할당한다. 본 연구는 기존 시스템에 LoRa 채널을 통합하고, 저대역폭 링크 특성을 고려한 전용 정책 프로파일을 적용하여 센서 데이터 전송을 지원한다. CLI 명령을 통한 실시간 정책 변경 시 트래픽이 이기종 통신망 사이를 동적으로 이동하는 것을 확인하였다. 특히, UDP 플로우에서 발생했던 타임아웃 이슈를 가변 타임아웃 및 히스 테리시스 정책을 적용하여 성공적으로 해결하였다. 이 개선을 통해 채널 전환 및 중복 전송 환경에서도 TCP/UDP 기반 세션의 연속성이 끊김 없이 유지됨을 검증하며 시스템의 안정성을 확보하였다. 이러한 모든 기능은 NS-3 기반의 실가상 연동 테스트베드 환경에서 검증되었다.

I. 서론

해상 디지털 장비 및 서비스 증가에 따라, 선박과 육상 간의 복합통신 기술 개발이 필수적이나, 통신 환경 변화 시 서비스 연결 단절 문제가 빈번히 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 기존의 MPTCP(Multi-Path TCP) 기술은 L4, 전송 계층에서 동작하며 TCP 기반 서비스에만 적용이 제한되고, 기존 TCP의 혼잡 제어를 차용하여 손실 후 회복 속도가 느려 해상 무선 통신과 같은 극한 환경에 적용하기에 부적합하다.

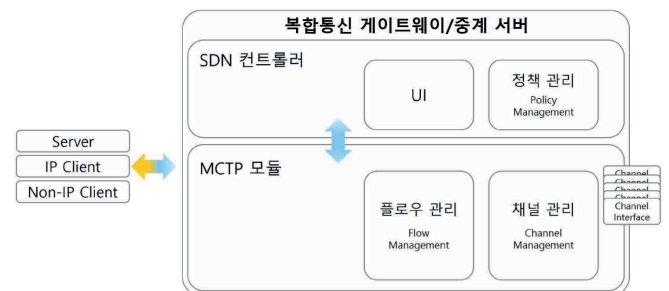
본 연구는 이러한 한계를 극복하고자 L2, 데이터 링크 계층에서 동작하며 UDP, LoRa 등 다양한 프로토콜을 지원하고 자체 Block ACK 기반 재전송 방식을 사용하는 MCTP(Multi-Channel Tunneling Protocol)를 개발하였다. 이전 연구[2]가 LTE/WiFi 터널링에 집중하여 해상 센서 네트워크용 LoRa 통신망을 포함하지 못한 한계가 있었으므로, 본 연구는 LoRa를 통합한 다중 통신망 환경에서 SDN(Software Defined Network) 기반 MCTP를 통해 트래픽을 효율적으로 관리하는 기술을 개발하였다.

본 연구의 주요 기여는 다음과 같다. 첫째, LoRa 채널 통합 및 전용 정책 기반 제어 능력을 확보하였다. 둘째, CLI 명령을 통한 실시간 정책 변경으로 트래픽이 이기종 통신망 사이를 동적으로 이동하는 동적 채널 제어 능력을 확보하였다. 셋째, 채널 전환 시 발생하는 안정성 문제를 해결하고 iperf 시연을 통해 통신 안정성 및 세션 연속성을 확보하였다.

II. 본론

SDN 기반의 MCTP는 이기종 해상 통신 환경에서 서비스 연속성을 보장하기 위한 핵심 기술이다. MCTP는 LTE와 WiFi 채널 등 다중 채널 환경에서 터널링을 지원하기 위해 UDP 프로토콜을 기반으로 설계되었으며, TCP와 달리 특정 채널에 의존하지 않고 독립적으로 동작한다. MCTP는 터널 생성(CONN_REQ/RES), 플로우 생성(FLOW_REQ/RES), 데이터 전송(DATA)을 포함한 10가지 타입의 패킷을 정의한다. 특히, UDP의 비

연결성 문제를 보완하기 위해 Sequence Number와 ACK/NACK 패킷을 사용하여 애플리케이션 데이터의 손실 여부를 확인하고 재전송을 수행하여 데이터 신뢰성을 확보한다. 해상 복합통신 시스템은 그림 1과 같이 복합통신 게이트웨이와 중계 서버의 MCTP 모듈 상위에 SDN 컨트롤러를 배치하여 통신망을 중앙 집중식으로 관리한다. 이 컨트롤러는 5-Tuple 기반 정책과 게이트웨이가 주기적으로 측정한 채널 상태 통계(latency, ACK/NACK statistics) 값을 활용하여 MCTP 플로우에 할당할 최적의 채널을 결정한다.

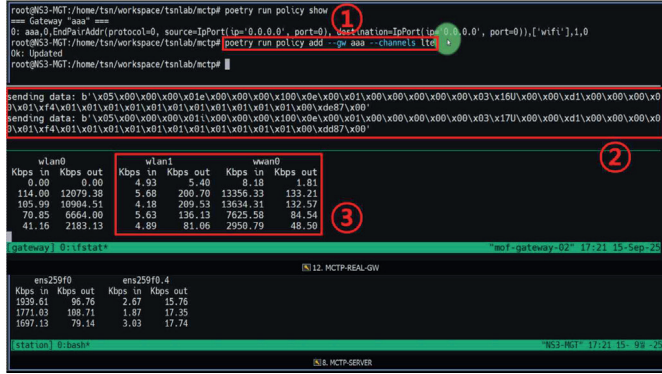


[그림 1] 해상 복합통신 시스템의 구조

본 연구의 핵심 확장 기능인 LoRa 채널은 기존의 LTE/WiFi 복합 통신 시스템에 저대역폭 센서 데이터 전송을 위해 성공적으로 통합되었다. LoRa 통신은 기본 트래픽 처리에 사용되지 않으며, 게이트웨이에서 서버로 센서 데이터를 전송할 때 목적지로 전송되는 트래픽에 대해서만 LoRa 채널을 사용하도록 전용 정책을 설정하였다. 이 정책 기반 제어는 다양한 통신 환경에서 각 채널의 특성에 맞는 트래픽을 분리하여 처리할 수 있도록 보장한다. 실제로 서버 화면에는 그림 2의 ②와 같이 LoRa 경로를 통해 전송된 가스 센서 값이 실시간으로 업데이트되는 것을 확인하였다.

SDN 컨트롤러의 동적 채널 제어 능력은 CLI 명령을 통해 검증되었다. 초기 정책이 복합통신 중계 서버와 복합통신 실물 게이트웨이 간의 WiFi

통신으로 설정된 상태에서, CLI를 통해 그림 2의 ①과 같이 *policy add -gw “게이트웨이 명” --channels lte* 명령어를 입력하면 ③과 같이 기존 정책이 즉시 LTE 사용 정책으로 자동 업데이트된다. 이 과정은 컨트롤러가 Flow 관리 매니저를 통해 Flow DB의 채널 할당 정보를 실시간으로 변경하여 트래픽이 이기종 통신망 사이를 끊김 없이 동적으로 이동할 수 있음을 입증한다.



[그림 2] 정책 기반 동적 채널 전환 및 트래픽 이동 실험 화면

그리고 통신 신뢰도를 극대화하기 위해 기본 정책을 정의하였다. 정책 테이블에 Flow 또는 채널별 명시적인 정책이 존재하지 않더라도, 가장 낮은 우선순위로 모든 패킷에 대해 LTE와 WiFi를 함께 사용하여 동일한 데이터를 복사하여 전송하는 정책을 항상 포함하도록 구현하였다. 또한 본 연구의 핵심 확장 기능인 LoRa 채널 통합 역시 SDN 정책 기반으로 이루어진다. LoRa 통신은 저대역폭 센서 데이터 전송을 위해 전용으로 활용되며, 이를 위한 전용 정책을 설정하였다. 이러한 정책 기반 제어를 통해 LoRa 채널은 장주기·저대역폭 링크의 특성을 고려한 지연차과 재전송 윈도우를 별도 프로파일로 운용하며, 다기종 링크 묶음 내에서 LoRa를 보조 경로로 활용하도록 구성하였다. 표 1은 MCTP 프로토콜이 이러한 복잡한 터널링 및 플로우 관리를 수행하는 데 사용되는 핵심 패킷 종류를 보인다.

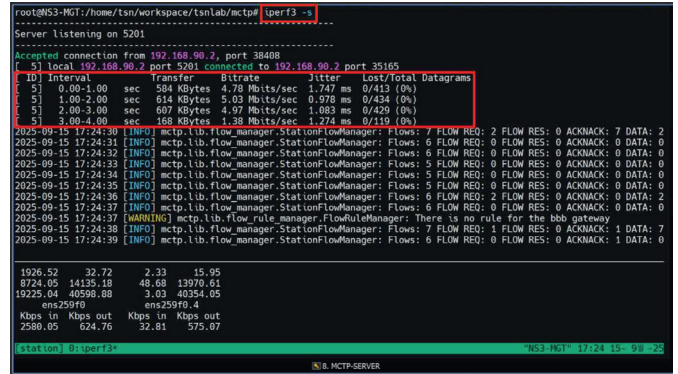
번호	패킷 명	설명
1	CONN_REQ	GW→SV, 연결 및 터널 생성 요청
2	CONN_RES	SV→GW, GW 정보 저장 및 터널 생성 완료
3	FLOW_REQ	GW→SV, 플로우 생성 요청
4	FLOW_RES	SV→GW, 플로우 생성 완료
5	DATA	양방향, 플로우 내 데이터 전송 시
6	ACK/NACK	양방향, 플로우 생성 시 데이터 손실 여부 파악용
7	HELLO_REQ	양방향, 각 채널의 지연시간 분석용
8	HELLO_RES	양방향, HELLO_REQ 응답
9	DISCONNECT	양방향, 연결 및 터널 제거
10	FLOW_CLOSED	양방향, 터널 내의 플로우, 세션 종료

※ GW: 복합통신 게이트웨이, SV: 복합통신 중계 서버

[표 1] MCTP 패킷 종류 및 설명

마지막으로, MCTP 터널 내 통신 안정성 및 세션 연속성 확보를 최우선 목표로 시스템을 재설계하였다. 기존 시스템에서 UDP 기반의 플로우가 3초 동안 유힬 상태일 경우 강제로 종료되는 타임아웃 이슈가 발생하여 세션 단절이 유발되었다. 본 연구에서는 유힬판정과 플로우 종료 조건을 분리한 가변 타임아웃·히스테리시스(hysteresis) 정책을 적용하여 이 문제를 해결하였다. 제어면(control plane)의 ACK/KeepAlive 통계를 기반

으로 FLOW_CREATED 상태를 보호하고, 스케줄러가 채널 상태 지표를 반영해 LTE/WiFi 간 전환 또는 중복 전송 정책을 사용 시에도 세션 단절 없이 패킷 경로를 유지하도록 구성하였다. 그 결과, 그림 3과 같이 TCP 뿐 아니라 종로 신호가 없는 UDP 트래픽에서도 iperf 기반 세션의 연속성 확보와 채널 환경 변화에 대한 복원력 향상을 확인하였다.



[그림 3] 채널 전환 환경에서의 세션 연속성 실험 화면

III. 결론

본 논문은 해상 환경의 불안정성 극복 및 서비스 연속성 확보를 목표로 SDN 기반 MCTP 통신을 활용한 이기종 통신망 동적 제어 기술을 구현하고 검증하였다. 시스템은 MCTP의 신뢰성 메커니즘을 바탕으로, SDN 컨트롤러가 5-Tuple 정책 및 채널 통계를 활용하여 LTE, WiFi, LoRa 다중 채널을 중앙 집중식으로 관리한다.

주요 성과는 다음과 같다. 첫 번째, LoRa 채널 통합을 통해 저대역폭 센서 데이터 전송을 지원하며, 장주기·저대역폭 링크 특성을 고려한 전용 정책 프로파일을 적용하여 운용성을 확보하였다. 두 번째, CLI 명령을 통한 정책 변경 시 트래픽이 이기종 통신망 사이를 동적으로 이동하는 것을 시연하여, SDN 기반 채널 제어 능력을 입증하였다. 세 번째, UDP 기반 플로우의 타임아웃 이슈를 가변 타임아웃 및 히스테리시스 정책을 적용하여 해결하였다. 이로써 채널 전환 및 중복 전송 환경에서도 세션 연속성이 끊김 없이 유지됨을 검증하였다.

향후 연구에서는 시스템의 유연성 강화를 위해 초기 정책 설정 자동화를 구현하고, 각 모듈을 분리 배치하는 등 실증 환경을 개선하여 성능 검증의 신뢰도를 더욱 강화할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2025년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20220544, 실해역 성능검증 기반기술 개발).

참고 문헌

- [1] S. Kang, W.-S. Jung, and D. S. Yoo., “A Consideration of the Integrated Ship-to-Shore Communications”, in Korea Information and Communication Society (KICS) Fall Conference, Nov. 2022.
- [2] H.-M. Park, W.-S. Jung, S. Kang, S. Kim, and D. S. Yoo., “Development of a converging real-virtual testbed for maritime complex communication”, in Korea Information and Communication Society (KICS) Summer Conference, Jun. 2024.