

# 블록체인 기반 군수 DIL 환경에서 임무 지속성 강화를 위한 LCZ 확정 기법

엄준상<sup>1</sup>, 이재민<sup>2</sup>, 김동성\*

국립금오공과대학교 전자공학부

{20210688<sup>1</sup>, ljmpaul<sup>2</sup>, dskim\*}@kumoh.ac.kr

## LCZ Finalization Technique for Enhancing Mission Continuity in Blockchain-Enabled Logistics DIL Environments

Eom Jun Sang<sup>1</sup>, Jae-Min Lee<sup>2</sup>, and Dong-Seong Kim\*

Kumoh National Institute of Technology School of Electronic Eng.<sup>1,2,\*</sup>

### 요약

본 논문은 이동성과 전파 방해, 보안 정책 등으로 통신이 단절되거나 지연되는 군수 DIL(Disconnected, Intermittent, Limited) 환경에서 임무 지속성 강화를 위해 블록체인 기반 LCZ(Local Confirmation Zone) 확정 기법을 제안한다. 단절 구간에서 일부 기록이 누락되거나 확정 지연이 과도해 임무 운용에 불리해진다. 이를 보완하기 위해 DIL 구간에서 블록체인을 기반으로 한 LCZ 확정 기법을 제안하고, SimPy 이산 이벤트 시뮬레이션으로 레거시 대비 최종 확정률과 꼬리 지연을 비교한다. 결과적으로 단절이 심한 조건에서 LCZ는 최종 확정률을 높이면서 꼬리 지연을 유의미하게 낮출 수 있음을 확인하였다.

### I. 서론

오늘날 군수 환경은 빠르게 변화하고 있으며, 이에 따라 디지털 기술의 역할이 점점 더 중요해지고 있다[1]. 군수 환경에서 최신 디지털 기술을 도입해야 하는 이유는 효율성, 신뢰성, 실시간 정보 처리가 필요하기 때문이다. 또한 군수 환경에서 다기관 다계층 참여자 간 데이터 공유가 필수이며, 위변조 방지와 책임 추적성, 가시성 확보가 핵심 요구로 제시된다[2]. 블록체인 기술은 그 특성상 데이터를 변경할 수 없도록 보장하고, 실시간으로 발생하는 정보를 기록할 수 있어서, 데이터의 무결성과 투명성 확보는 군수 관리 시스템에서 위변조 방지와 책임 추적성을 보장할 수 있다. 그러나 군수 환경에서는 이동, 지형, 전파 방해 등의 영향으로 통신 품질이 급격히 저하되며 DIL(Disconnected, Intermittent, Limited) 조건이 반복적으로 발생한다. 일반적인 블록체인 운용은 공유 체인에서의 합의와 커밋을 통해 최종 확정을 달성하는 흐름을 전제로 하므로, DIL 구간에서는 노드 간 메시지 교환이 끊기거나 블록 반영이 지체되면서 임무 기록이 누락되거나 늦게 확정될 수 있다. 이에 따라 군수 환경의 실시간 데이터와 정확한 정보가 지연되면, 군수 기록이 불완전해지거나 중복되고 기초 데이터가 부족해지는 등 다양한 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 임무 지속성을 보장하는 기술이 필요하다.

이에 따라 본 논문은 DIL 환경에서 정책 변수에 따른 로컬 검증을 통해 조건부 수용을 받아 버퍼에 저장하고 최종적으로 재연결 시에 최종 확정이 이루어질 수 있는 블록체인 기반 LCZ(Local Confirmation Zone) 확정 기법을 제안하였다. 또한 DIL 환경을 전제로 하여 최종 확정률과 꼬리 지연으로 지표를 설정하고, 버퍼 용량, TTL(Time To Live) 같은 정책 변수가 지표에 미치는 영향을 SimPy 이산 시뮬레이션을 통해 구현하고 분석하였다.

### II. 관련 연구 및 문제점 분석

관련 연구로 단절·지연이 반복되는 환경에서 데이터 전달 지속성을 높이기 위한 DTN(Delay Tolerant Network) 기반 접근과, 네트워크 파티션 상황에서 블록체인 노드 간의 합의 유지 및 데이터 무결성을 고려하는

파티션 대응 기법이 제안된다. DTN 연구는 접촉 기반 전달 및 지연 허용 라우팅을 통해 최종 목적지까지 데이터 도달률을 높이고 평균 지연 특성을 완화하며, 최근에는 학습 기반 예측 라우팅 기법까지 제시되었다[3]. DTN의 Store-and-Forward 방식은 단절 구간에서 생성된 메시지를 저장·전달하는 구조로, 이는 연결이 회복될 때 backlog가 집중되어 트랜잭션 처리의 꼬리 지연을 증가시킨다. 하지만, DTN 연구의 평가는 데이터의 전달 성공 여부 및 지연 분포에 머물러 분산 원장 환경에서 커밋을 거쳐 최종 확정에 이르는 성능을 설명하고 최적화하는데 한계가 있다. 한편, 블록체인의 파티션 대응 연구들은 주로 체인의 분기·병합 규칙 및 기본 안전성 유지를 중심으로 하기에, 군수 DIL 환경에서 임무 지속성을 강화하기 위해 최종 확정률과 꼬리 지연을 운용 정책으로 비교·평가하는 구성을 만족시키기 어렵다[4]. 특히, 재연결 시 누적 기록의 동기화 주기, 배치 크기, 플러시 상한과 같은 운용 정책 변수는 DIL 환경에서 최종 확정 성능을 좌우하는 중요한 요소임에도 불구하고, 이에 대한 분석은 미비하다.

### III. 제안하는 블록체인 기반 LCZ 확정 기법

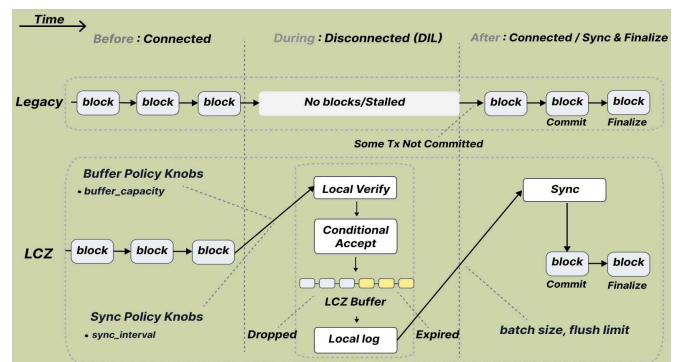


그림 1. DIL 환경에서 블록체인 기반 LCZ 확정 기법의 시간 흐름 개요

그림 1은 DIL 환경에서 블록체인 기반 기록이 최종 확정으로 흘러가는 과정에서 어떻게 지연되거나 누락될 수 있는지 레거시 단계로 보여주고, 동일한 조건에서 제안하는 블록체인 기반 LCZ 확정 기법이 기록을 유지하

먼저 최종 확정까지의 시간 흐름을 비교 관점에서 보여준다. 먼저 레거시 단계에서는 공유 체인에서의 합의와 블록 커밋이 전제되므로, DIL 구간에서는 노드 간 메시지 교환이 제한되고 블록 생성 및 반영이 정제되면서 일부 트랜잭션이 처리 대기 상태로 지속되거나 최종 확정이 지연될 수 있다. 반면 LCZ 제안 구조는 DIL 환경에서 기록이 통신 단절로 인해 손실이 발생하지 않도록 한다. 먼저 트랜잭션이 로컬 구역에 도달하면 TTL 값을 검사하여 데이터의 유효성을 판단하고, 버퍼 용량 정책에 따라 수용 가능성을 확인하는 검증을 수행한 뒤 조건부로 수용하고, 로컬 버퍼에 누적시킨다. 이때 LCZ에서 로컬 수용은 최종 확정과 동일한 의미가 아닌 재연결 시 동기화 전 공유 체인 반영을 위한 임시 상태로 정의하며, 이후 중복, 검증 실패, 만료와 같은 사유로 일부 항목이 정책에 따라 정리될 수 있다. LCZ 로컬 처리 단계에서는 생성된 트랜잭션이 로컬 검증을 통과하면 버퍼에 저장되어 DIL 구간 동안 지속적으로 축적되며, 버퍼 기반 운용에서 발생이 가능한 과부하와 한계를 관리하기 위해 버퍼 용량과 유효시간을 운용 정책 변수로 설정한다. 버퍼 용량을 초과하면 추가 기록을 수용하지 못하므로 드랍으로 처리하고, 유효시간을 초과하면 만료로 처리하여 통신 단절이 장기화되는 조건에서 무제한으로 기록이 누적되는 것을 방지한다. 또한 용량과 시간제한을 적용함으로써 악의적 노드의 대량 전송에 의한 시도를 완화할 수 있다. 즉, 로컬 버퍼는 저장소이면서 용량과 시간 제약을 갖춘 제어 지점으로 동작한다. 재연결 시 제안 구조는 로컬에 누적된 기록을 공유 체인으로 일괄 전송하는 것이 아닌, 동기화 주기와 배치 크기에 따라 전송을 분할하고 플러시 상환을 두는 동기화 절차를 수행한다. 또한 전송 과정에서 손실 가능성을 고려하여 실패 시 재시도를 허용하되, 재시도 한계를 초과하거나 유효시간을 넘을 때는 실패 또는 만료되도록 설계하여, 재전송이 무한히 반복되는 상태를 방지한다. 이렇게 동기화에 성공한 항목은 공유 체인의 처리로 넘어가며, 블록 생성 주기와 블록 용량 제약 아래 항목을 블록에 포함하고, 이후 커밋과 최종 확정 상태가 된다. 결과적으로 제안 구조는 DIL 환경에서 조건부 수용 및 버퍼링, 재연결 시 정책 변수에 의해 제어되는 동기화, 공유 체인에서의 커밋과 최종 확정으로 임무 지속성을 강화하는 흐름으로 구성된다.

#### IV. 시뮬레이션 설계 및 결과

본 논문은 군수 환경에서 통신 단절이 반복되는 조건으로 설계되어야 하므로, SimPy 기반 이산 이벤트 시뮬레이션으로 네트워크 연결/단절(C/D) 상태 전이와 요청, 로컬 처리, 동기화 및 전역 커밋을 모델링하였다. 비교 대상은 (1) 레거시 모드: 전역 확정 기준으로만 처리하는 방식과 (2) LCZ 모드: 단절 시 로컬 수용·버퍼링 후 연결 회복 시 동기화하는 방식이다. 평가 지표는 기록이 최종 상태로 수렴하는 정도를 나타내는 최종 확정률, 일부 기록이 늦게 확정되는 현상을 설명하기 위해 꼬리 지연(p95)을 사용한다. 단절 강도는 평균 단절 시간 D를 변화시키는 방식으로 구성하며, 동일한 연결 평균 조건에서 D를 증가시켜 더 자주/더 오래 끊기는 상황을 묘사한다. 이때 LCZ의 정책 변수(버퍼 용량, 동기화 주기, 배치 크기, 블록 생성 주기/용량 등)는 고정된 채 단절 강도 변화에 따른 차이를 비교한다.

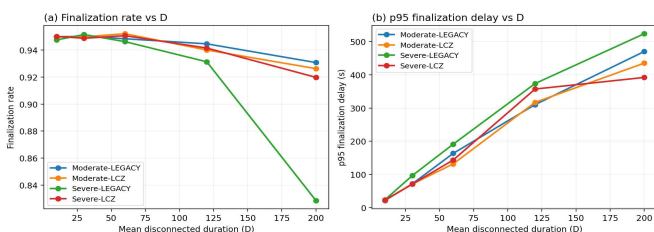


그림 2. 단절 강도(D) 변화에 따른 성능 비교 : (a)최종 확정률 (b)꼬리 지연

[그림 2(a)]는 평균 단절 시간 D 변화에 따른 최종 확정률을 비교한 결과이다. 단절이 심한 조건에서 LCZ는 레거시 대비 최종 확정률이 증가하는 경향을 보였으며, 특히 Severe 조건에서 D=200일 때 최종 확정률이 0.828에서 0.920으로 상승하였다. 또한 TTL 기준 만료 비율은 0.104에서 0.006으로 감소하여, 로컬 수용을 통해 누적된 기록이 연결 회복 이후에 안정적으로 반영되는 효과를 확인하였다. [그림 2(b)]는 꼬리 지연 p95를 비교한 결과이다. Severe 조건에서 D=200일 때 p95 지연은 523.5에서 391.9로 감소하였고, 평균 최종 확정 지연도 224.5에서 127.0으로 감소하였다. 이는 레거시 방식이 단절 구간 동안 확정을 거의 수행하지 못해 재연결 이후에도 지연이 길게 누적되는 현상이 나타나지만, LCZ는 단절 구간에서도 로컬 처리로 흐름을 유지해 재연결 시 동기화와 최종 확정을 정책적으로 제어하며 꼬리 지연을 완화한 것으로 해석된다.

#### V. 결론 및 향후 계획

본 논문은 군수 DIL 환경에서 블록체인 기반 LCZ 확정 기법으로 로컬 검증과 조건부 수용을 통해 버퍼에 누적시키고 통신 연결 복구 시에 동기화하여 최종 확정으로 이어지는 기법을 제안하였다. 또한 SimPy 이산 이벤트 시뮬레이션을 통해 레거시 대비 최종 확정률과 꼬리 지연을 비교하고 단절이 심한 조건에서 LCZ는 최종 확정률을 개선하면서 꼬리 지연을 감소시키는 효과를 확인하였다.

향후 연구에서는 제안된 LCZ 구조를 실제 블록체인 프레임워크로 확장하여, DIL 환경에서 버퍼에 저장된 트랜잭션이 블록 생성 주기와 합의 절차, 복구·재동기화 과정에서 어떻게 진행되는지 시뮬레이션을 돌릴 계획이다. 또한 DIL 환경에서 최종 확정률과 꼬리 지연을 중심으로 LCZ 운용 정책이 시스템 성능에 미치는 영향을 실증적으로 평가한다.

#### ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역진흥혁신인재양성사업(IITP-2025-RS-2020-II201612, 33%)과 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2018R1A6A1A03024003, 33%)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2025-RS-2024-0048430, 34%)

#### 참고 문헌

- [1] D.-S. Kim, "Environmental Development and Recommendations for Expanding ICT Convergence Technologies in National Defense Logistics," The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, vol. 41, pp. 3-11, Jan. 2024.
- [2] N. Kumar, K. Kumar, A. Aeron and F. Verre, "Blockchain technology in supply chain management: Innovations, applications, and challenges," Telematics and Informatics Reports, vol. 18, pp. 1-9, Jun. 2025.
- [3] V. Negrelli, R. Cherini, and J. A. Fraire, "Deep Reinforcement Learning for Routing in Uncertain DTNs with Graph Neural Networks," in 2025 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE), pp. 1-6, Oct. 2025.
- [4] J. Fang, "Improving Blockchain Resilience to Network Partitioning by Sharding," in 2025 26th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM), pp. 213-215, Jun. 2025.