

Physical Internet 기반 군수 물자 관리를 위한 Edge AI 및 블록체인 추적 시스템

이승민¹, 이재민², 김동성^{*}

금오공과대학교 IT융복합공학과^{1,2,*}

{tmdals6164¹, ljmpaul², dskim^{*}}@kumoh.ac.kr

Edge AI and Blockchain Tracking System for Physical Internet-Based Military Logistics Asset Management

Seung-Min Lee¹, Jae-Min Lee² and Dong-Seong Kim^{*}

Kumoh National Institute of Technology Dept. of IT Convergence Eng.^{1,2,*}

요약

군수 물류는 전장 상황에서 자원을 적시에 공급하여 작전 지속 능력을 보장하는 핵심 요소이다. 그러나 현재 군수 물류 체계는 각 군이 독립적으로 운영되는 다단계 구조로 인해 정보 단절과 단일 실패 지점의 위험을 안고 있다. 이를 해결하기 위해 물류 자원을 표준화하고 공유하는 피지컬 인터넷(Physical Internet, PI) 기반 군수 물류 체계가 주목받고 있다. 그러나 PI 기반의 개방형 네트워크 환경은 데이터 위·변조 및 스푸핑 등 다양한 사이버 공격에 노출될 가능성이 높으며, 이는 잘못된 보급 의사결정을 유발하여 작전 실패로 이어질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 데이터의 무결성을 보장하는 블록체인 기술과 비정상 행위를 조기에 식별하는 Edge AI 기술을 결합하여 PI 기반 군수 물류 환경에 적합한 보안 추적 시스템을 제안한다.

I. 서론

현대 전쟁은 플랫폼 중심에서 네트워크 중심전으로 변화하며 전장 상황을 통합적으로 인식하고 신속하게 대응하는 능력이 핵심으로 대두되고 있다. 특히 이러한 환경에서 군수 지원 능력은 전투력 유지와 직결되며 전쟁의 승패를 좌우한다[1]. 그러나 현재 군수 물류 체계는 육·해·공군이 각각 독립적으로 운영되는 구조적 한계로 인해 자원의 효율적인 공유가 제한되며, 공급망 전 단계에서 지연과 중복, 비용 낭비와 같은 비효율이 발생하고 있다. 또한, 특정 거점에 의존하는 중앙 집중식 운영 방식은 평시에는 효율적일 수 있으나, 전시에는 특정 거점의 기능 상실이 전체 물류망 붕괴로 이어지는 단일 실패 지점의 취약성을 갖는다[2]. 이러한 한계를 극복하고 군수 자원의 효율적 운용을 위해 최근 국방 분야에서는 물류 자원을 표준화하고 네트워크를 통해 유연하게 공유하는 피지컬 인터넷(Physical Internet, PI) 개념이 주목받고 있다. PI는 디지털 인터넷의 패킷 전송 원리를 물류 시스템에 적용한 개념으로 자원을 표준화된 단위로 캡슐화하여 네트워크 전반에서 개방적이고 효율적인 자산 공유를 가능하게 한다. 이를 통해 물류 흐름의 가시성을 확보하고 자원 운용의 민첩성과 효율성을 높일 수 있다. 그러나 PI 기반 물류 체계는 IoT(Internet of Things), 블록체인, 인공지능 등 4차 산업혁명 기술이 융합된 개방형 네트워크로 구성되기 때문에 데이터 변조나 스푸핑 등 사이버 공격에 매우 취약하다[3]. 이는 자산의 위치나 상태 정보의 신뢰성을 훼손시켜 군수 의사결정의 정확성을 떨어뜨리고 군수 작전의 효율성을 저하한다.

따라서 본 논문에서는 PI 기반 군수 물류 환경에서 발생할 수 있는 사이버 공격에 대응하고 자산 상태를 신뢰성 있게 추적하기 위해 Pure Chain 블록체인 네트워크와 Edge AI 기반 이상 탐지 기술을 융합한 자산 추적 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 Edge AI 모델을 통해 IoT 센서 데이터의 이상 징후를 실시간으로 탐지하고 블록체인으로 자산의 상태 및 이동 정보를 분산원장에 안전하게 기록한다. 이를 통해 군수 물류의 데이터 보안성과 신뢰성을 강화하고, 중앙 집중식 구조의 단일 실패 지점 문제를 해소하여 국방 물류 체계의 안정성과 효율성을 향상한다.

II. 기존 Physical Internet 기반 물류 분석

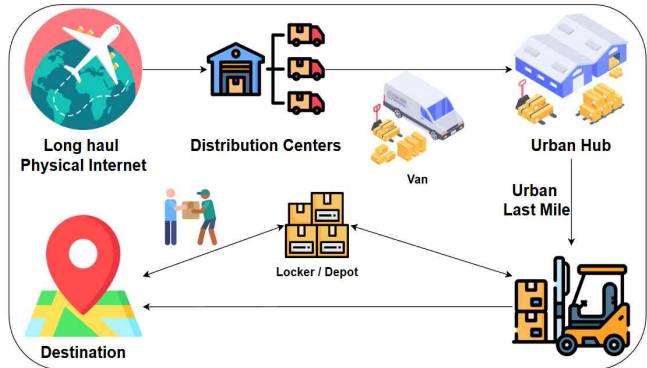


그림 1 민간 도시 물류에서의 Physical Internet을 적용한 URBANE 최근 유럽 연합에서는 이론적 논의를 넘어 PI 개념을 실제 도시 환경에 적용하기 위한 실증 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그중 URBANE 프로젝트는 유럽 연합의 Horizon Europe 프로그램 지원으로 추진 중인 대표적인 도시 물류 혁신 사업이다[4]. 2022년부터 2026년까지 12개 유럽 도시에서 진행 중이며, 도시 내 라스트마일 물류를 그림 1과 같이 상호 운용 가능한 PI 네트워크로 통합하여 친환경적이고 탄력적인 물류 구조로 전환하는 것을 핵심 목표로 한다. 이를 위해 라스트마일 구간의 효율화와 탄소 배출 저감을 위해 무공해 전기차와 소형 집화센터를 활용한다. 또한, 물리적 물류망과 가상 공간을 연결하는 디지털 트윈(Digital Twin) 기술을 활용하여 물류 흐름을 시뮬레이션하고 최적화한다. 특히 다수의 이해관계자가 참여하는 물류 생태계에서 블록체인 기반의 스마트 컨트랙트(Smart Contract)를 통해 신뢰성 있는 데이터 공유와 협업을 보장하고 있다. 그러나 해당 프로젝트는 몇 개 유럽 도시의 Living Lab 중심으로 운영되는 파일럿 형태의 실증 사업이기 때문에 다른 국가나 물류 구조에 일반화하기에는 한계가 있다. 또한, PI-Node, PI-Mover, IoT 센서, 블록체인 노드 등 다양한 구성 요소가 복합적으로 연결되면서 사이버 공격 표면이 확대되고 해킹이나 랜섬웨어와 같은 보안 위협에 취약한 구조적 한계를 보인다.

III. 제안하는 시스템

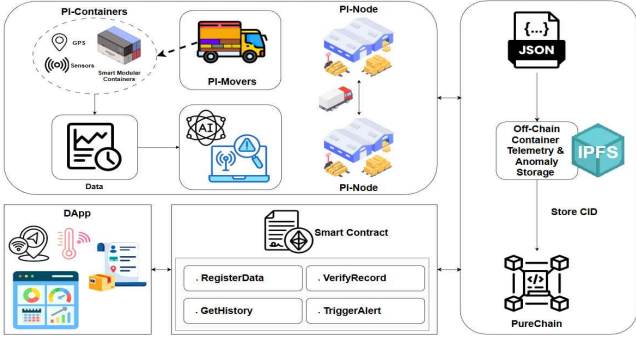


그림 2 제안하는 Edge AI 및 블록체인 기반 군수 자산 추적 시스템의 아키텍처

본 논문에서는 PI 기반 군수 물류 환경에서 발생할 수 있는 사이버 공격에 대응하고 자산 상태를 신뢰성 있게 추적하기 위해 Pure Chain 블록체인 네트워크와 Edge AI 기반 이상 탐지 기술을 융합한 자산 추적 시스템을 제안한다. 그림 2는 제안하는 군수 자산 추적 시스템의 아키텍처를 나타낸다. 각 PI-Container에 부착된 IoT 센서가 온도, 습도, 진동, 위치 정보 등 자산의 상태 데이터를 실시간으로 수집한다. 각 센서에서 수집된 데이터는 Edge 환경에서 운영되는 AI 기반 이상 탐지 모델을 통해 실시간으로 분석된다. 해당 모델은 정상 운송 패턴을 학습하여 온도 급변, 충격, 위치 이탈 등과 같은 비정상적인 변화나 이상 징후를 조기에 감지한다. 이상 탐지 결과는 JSON 형태로 구조화되어 IPFS(InterPlanetary File System)에 저장되며, 해당 파일의 CID(Content Identifier)는 Pure Chain 블록체인에 기록되어 데이터의 무결성과 추적성을 보장한다. 이를 통해 데이터 위·변조 및 단일 실패 지점 위험을 최소화하고, 전장 환경에서도 안정적인 정보 운용이 가능하다. 그림 3은 TCN(Temporal Convolutional Network)과 DAE(Denoising AutoEncoder)를 기반으로 구성된 Edge AI 이상 탐지 모델의 구조를 나타낸다. 제안하는 모델은 정상 시계열 데이터의 구조적 특성을 학습하고 입력 신호와 복원 신호 간의 재구성 오차에 기반하여 이상 여부를 판단한다. 모델은 시계열 센서 데이터의 시간적 패턴과 장기 의존성을 효율적으로 학습할 수 있도록 설계되었다. 입력 단계에서 IoT 센서로부터 수집된 데이터는 일정 수준의 가우시안 노이즈가 주입되며, 모델은 이를 복원하는 과정을 통해 정상 패턴의 구조적 특성을 학습한다. 인코더(Encoder)는 입력 데이터를 저차원 잠재 표현(Latent Representation)으로 압축하고, 디코더(Decoder)는 이를 다시 원래 신호 형태로 복원한다. 이후 입력값과 복원값 간의 차이를 기반으로 재구성 오차를 계산하며, 해당 오차가 사전에 정의된 임계값을 초과하는 경우 이상 상태로 판단한다. 그림 4는 제안하는 시스템의 DApp(Decentralized Application) 사용자 인터페이스 구조를 나타낸다. DApp는 Pure Chain 블록체인 네트워크와 연동되어 물류 상태, 센서 데이터, 이상 탐지 이력,

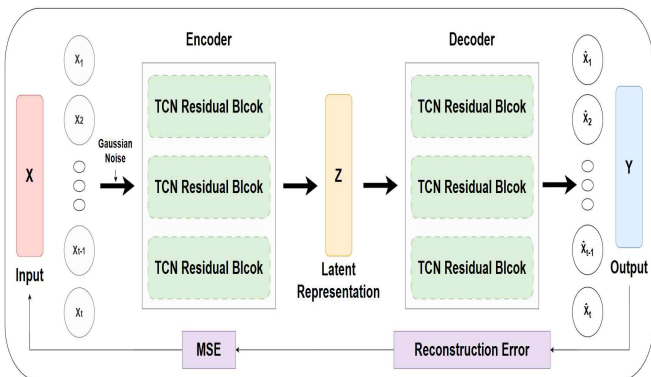


그림 3 제안하는 TCN-DAE 기반 이상 탐지 모델의 구조도

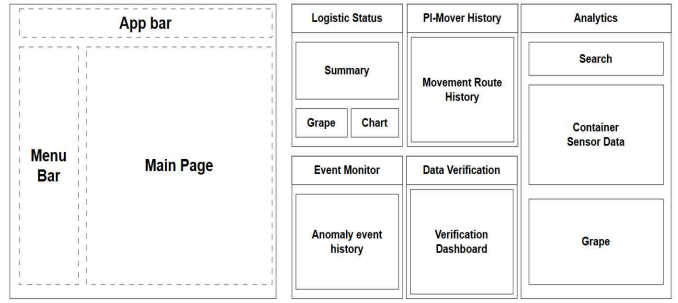


그림 4 DApp 유저 인터페이스의 구조

검증 현황 등을 실시간으로 제공한다. 좌측의 Menu Bar와 App Bar를 통해 주요 기능에 쉽게 접근할 수 있으며, 메인 화면에서는 물류 현황 요약, 이동 경로 추적, 이상 이벤트 모니터링, 데이터 검증 대시보드 등을 시각적으로 확인할 수 있다. 이를 통해 운용자는 군수 자산의 상태와 이상 탐지 결과를 통합적으로 모니터링하고 신뢰성 있는 정보를 기반으로 신속한 의사결정을 수행할 수 있다.

IV. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 PI 기반 군수 물류 환경에서 발생할 수 있는 사이버 공격에 대응하기 위해 Edge AI 기반 이상 탐지 기술과 Pure Chain 블록체인 네트워크를 융합한 자산 추적 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 TCN-DAE 기반 모델을 통해 IoT 센서 데이터의 이상 징후를 실시간으로 탐지하고 결과를 IPFS와 블록체인에 기록하여 데이터의 무결성과 추적성을 확보한다. 향후 연구에는 실제 군 운송장 환경에서의 실험을 통해 시스템의 확장성과 신뢰성을 검증하고, Explainable AI 기법을 적용하여 이상 탐지 결과의 해석 가능성과 신뢰성을 높일 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원·학석사연계 ICT핵심인재양성 지원을 받아 수행된 연구(IITP-2025-RS-2022-00156394, 25%)와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역기능화혁신인재양성사업(IITP-2025-RS-2020-H201612, 25%)과 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2018R1A6A1A03024003, 25%)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2025-RS-2024-0048430, 25%).

참 고 문 헌

- [1] H. Tran-Dang and D.-S. Kim, "Physical Internet for Military Logistics: Perspectives," 2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju, Korea, pp. 755-757, Oct. 2019.
- [2] H. Tran-Dang, N. Krommenacker, P. Charpentier and D.-S. Kim, "Toward the Internet of Things for Physical Internet: Perspectives and Challenges," IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, pp. 4711-4736, June. 2020.
- [3] H. Tran-Dang and D.-S. Kim, "The Physical Internet in the Era of Digital Transformation: Perspectives and Open Issues," IEEE Access, vol. 9, pp. 164613-164631, Nov. 2021.
- [4] R. Franklin et al., "The URBANE Innovation Transferability Platform: Learnings for Decarbonising Last-Mile Delivery Networks," 7th Conference on Sustainable Mobility 2024, Karditsa, Greece, pp. 389-400, Sep. 2024.