

전기차 활용 탄소배출권 생성과 위변조 검증을 위한 생성형 Smart Contract 설계 및 구현

이민선¹, 이재민², 김동성*

금오공과대학교 IT융복합공학과^{1,2,*}

{2025210696¹, ljmpaul², dskim^{*}}@kumoh.ac.kr

Design and Implementation of Generative Smart Contract for Carbon Credit Generation and Tamper-proof Verification Using Electric Vehicles

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

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

요약

자발적 탄소시장은 다양한 민간 참여자가 자발적으로 탄소배출권을 거래하는 공간으로, 최근 하위 감축 성과 문제로 인해 투명성과 신뢰성 향상이 핵심 과제로 부상하고 있다. 이를 해결하기 위한 여러 탄소 배출권 플랫폼과 기술이 연구되고 있으나, 기존 블록체인 기반 시스템은 주로 거래 기록의 투명성 강화에만 집중되어 있어, 실시간 데이터 처리, 배출권 생성 자동화 및 검증 기능의 부족이라는 한계를 가지고 있다. 특히 하위 또는 과장된 감축 성과를 효과적으로 탐지하거나 검증하는 데 어려움이 존재하는 구조적 문제도 지적된다. 이에 본 논문에서는 전기차 충전 데이터를 활용한 탄소배출권 생성 및 위변조 검증을 위한 블록체인 기반 생성형 스마트 계약을 설계하고 구현하였다. 제안된 시스템은 예상 주행 거리와 CO₂ 감축량을 실시간으로 계산하고, 이를 토대로 투명하고 신뢰성 높은 탄소 감축 인증서를 자동으로 발급한다. 또한, 생성된 인증서의 위변조 여부를 스마트 계약 내에서 자동 검증하여 시스템의 무결성과 신뢰성을 확보한다. PureChain 네트워크 환경에서 스마트 계약을 성공적으로 배포하였으며, 인증서 생성과 검증 트랜잭션이 안정적으로 처리됨을 확인하였다.

I. 서론

기후 변화 대응에서 온실가스 감축은 가장 중요한 과제이며, 탄소 배출권 거래제도는 이를 위한 핵심 시장 메커니즘이다[1]. 그러나 기존 탄소 배출권 시스템은 생성과 검증 과정의 불투명성, 중앙 집중형 관리로 인한 위변조 및 신뢰성 문제를 안고 있다. 블록체인 기술은 분산 원장 기반으로 데이터의 투명성과 불변성을 보장해, 탄소 배출권 시스템의 신뢰성을 높일 수 있다. 그러나 기존 연구들은 주로 거래에 집중되어 있고, 배출권 생성과 실시간 검증에 관한 연구는 부족한 상황이다[2]. 특히, 허위 또는 과장된 감축 성과가 탄소 배출권 발급에 포함될 위험성은 제도의 근본적 신뢰도를 저해하며, 이는 자발적 탄소시장(Voluntary Carbon Market, VCM)의 발전을 가로막는 주요 장애 요인으로 작용하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 블록체인 기술이 탄소 배출권 시스템에 접목되어 데이터의 투명성, 불변성, 그리고 분산형 관리가 가능하게 하는 연구가 활발히 진행되고 있다[2]. 블록체인은 탈중앙화된 분산 원장 기술로서, 모든 거래 내역을 네트워크 참여자에게 공개하고 변경 불가능한 형태로 기록함으로써 데이터 조작을 근본적으로 방지한다. 그 결과, 탄소 배출권 거래의 신뢰성과 투명성을 획기적으로 향상할 수 있다는 기대를 모으고 있다. 그러나 대부분의 선행 연구는 거래 기록의 투명성 확보에 중점을 두고 있어, 배출권의 생성 단계 및 생성된 배출권의 실시간 검증과 관련된 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다[3]. 특히 운송 부문은 전체 온실가스 배출의 25%를 차지하며, 전기자동차의 보급 확대는 운송 분야의 탈탄소화 전략에서 중요한 역할을 담당한다.

이에 본 논문에서는 전기차 충전 데이터를 활용하여 탄소 배출권의 위변조 방지와 신뢰성 향상을 위해 블록체인 기반의 생성형 Smart Contract 설계 및 구현하고자 한다. 제안하는 생성형 Smart Contract는 EV 충전 데이터를 활용하여, 예상 주행 거리와 CO₂ 감축량을 실시간으로 계산하고, 이를 바탕으로 탄소 배출권 인증서를 자동 생성한다. 또한, 생성된 인증서는 블록체인 기반의 생성형 Smart Contract를 통해 탄소 배출권 거래를 지원하는 시스템에 등록된다.

증서의 위변조 여부를 실시간으로 검증하는 기능도 통합되어 있어, 불일치가 발생하면 위변조 가능성을 즉시 감지하여 시스템 신뢰성을 극대화한다.

II. 전기차 활용 탄소 배출권 생성과 위변조 검증을 위한 생성형 Smart Contract

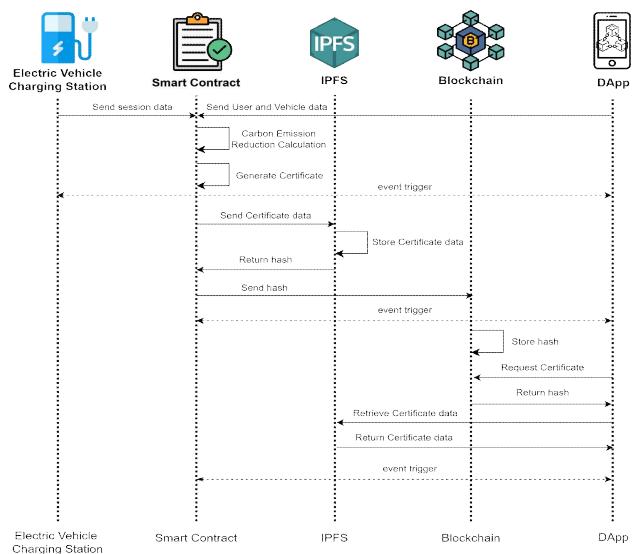


그림 1 탄소 배출권 생성 시퀀스 다이어그램

본 시스템은 전기자동차(EV)의 충전 데이터를 기반으로 탄소 감축량을 정량적으로 산출하여, EV 사용의 환경적 기여도를 객관적으로 평가한다. 전기차는 동일한 주행 거리에서 내연기관 차량 대비 약 58% 적은 CO₂를 배출하는 특성을 가지므로, 이 차이를 활용하여 탄소 감축량을 산출

한다. 예상 주행 거리 계산과 CO₂ 감축량 계산 데이터를 바탕으로 탄소 감축 인증서를 생성하는 과정은 그림1과 같이 전기차 충전소, Smart Contract, IPFS, 블록체인 네트워크, DApp 간의 유기적인 상호작용을 통해 이루어진다. 먼저, 전기차 충전소는 사용자의 충전 세션 데이터(session data)를 수집하며, DApp은 사용자 정보, 차량 정보, 충전소 정보를 스마트 계약에 전송한다. 스마트 계약은 이를 입력 데이터를 활용하여, 충전된 전력량과 차량 연비를 기반으로 예상 주행 거리(estimated distance)와 이에 따른 CO₂ 감축량을 자동 계산한다. 이를 통해 전기차가 내연기관 차량 대비 감축한 CO₂ 배출량을 정량화할 수 있다. 인증서 생성 단계에서는 사용자 이름, 차량 번호, 충전소 정보, 블록체인 트랜잭션 ID, 계산된 CO₂ 감축량, 발급 일자 등의 필수 정보를 포함하는 인증서가 스마트 계약 내에 생성 및 저장된다. 동시에, 인증서 관련 데이터는 IPFS에 업로드되어 분산 저장되며, 해당 데이터의 해시값은 블록체인에 기록된다. 인증서 생성이 완료되면 스마트 계약은 관련 이벤트를 발생시켜 이를 DApp에 통지하고, DApp은 사용자 인터페이스에 인증서 생성 사실과 세부 정보를 실시간으로 표시한다. 이를 통해 사용자는 자신의 탄소 감축 기여도를 직관적으로 확인할 수 있으며, 동시에 위변조할 수 없는 신뢰성 높은 탄소 감축 인증서를 발급받게 된다.

Algorithm1 : Certificate Tampering Verification

```

Input : userName, vehicleID, co2ReductionMetricTons, ipfsHash, certificateID,
chargingStationInfo, transactionID, issueDate
procedure
do
    cert = GetCertificate(userName)
    if keccak256(userName) != keccak256(userName) then
        return "User Name does not match"
    end if
    if keccak256(vehicleID) != keccak256(vehicleID) then
        return "Vehicle ID does not match"
    end if
    if cert.co2ReductionMetricTons != co2ReductionMetricTons then
        return "CO2 Reduction Amount does not match"
    end if
    if keccak256(ipfsHash) != keccak256(ipfsHash) then
        return "IPFS Hash does not match"
    end if
    if keccak256(certificateID) != keccak256(certificateID) then
        return "Certificate ID does not match"
    end if
    if keccak256(chargingStationInfo) != keccak256(chargingStationInfo) then
        return "Charging Station Info does not match"
    end if
    if keccak256(transactionID) != keccak256(transactionID) then
        return "Transaction ID does not match"
    end if
    if cert.issueDate != issueDate then
        return "Issue Date does not match"
    end if
    return "Certificate is valid"
End procedure

```

그림 2 제안하는 시스템 위변조 검증 알고리즘

사용자는 DApp를 통해 인증서 검증을 요청할 수 있으며, 스마트 계약은 블록체인에 저장된 메타데이터와 IPFS에 분산 저장된 원본 데이터를 기반으로 제출된 인증서 정보를 필드별로 비교한다. 비교 대상에는 사용자 이름, 차량 번호, CO₂ 감축량, IPFS 해시, 인증서 고유 ID, 충전소 정보, 블록체인 트랜잭션 ID, 발급 날짜 등이 포함된다. 그림 2와 같이 필드 간 일치 여부를 정밀하게 확인하여, 단 하나라도 일치하지 않는 값이 발견되면 해당 필드에 대한 오류 메시지를 반환함으로써 위변조 가능성을 즉시 감지한다. 반대로 모든 필드가 완벽히 일치하면 'Certificate is Valid'라는 메시지를 반환하여 인증서의 무결성과 신뢰성을 확증한다. 이와 같은 검증 절차는 스마트 계약 내에서 자동화되어 수행되며, 사용자는 DApp을 통해 신속하고 정확한 인증서 위변조 검증 결과를 확인할 수 있다. 제안하는 시스템은 데이터 조작을 원천적으로 차단함으로써, 탄소 배출권 관리에 대한 신뢰성을 향상하고 자발적 탄소시장 참여자의 투명한 환경 기여를 보장한다.

III. 구현 결과

그림 3을 통해 MetaMask와 연결된 PureChain[4] 네트워크 환경에서 제안한 Smart Contract가 성공적으로 배포되었으며, 이를 통해 인증서의

생성과 검증 트랜잭션이 정상적으로 처리되었음을 확인할 수 있다.

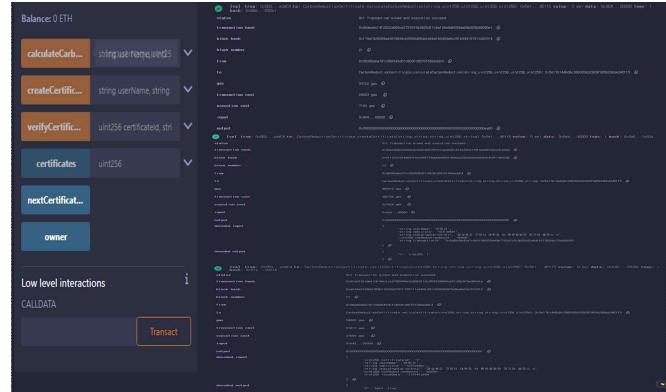


그림 3 smart contract 배포 결과(좌), 트랜잭션 결과(우)

IV. 결론

본 논문에서는 전기차 충전 데이터를 활용하여 탄소 배출권 생성 및 위변조 검증을 위한 블록체인 기반 생성형 Smart Contract를 설계하고 구현하였다. 제안한 시스템은 각 구성 요소의 상호작용을 통해 탄소 감축 인증서 생성 및 검증 과정을 자동화하였다. 구현 결과, MetaMask를 통해 PureChain 네트워크에 스마트 계약이 성공적으로 배포되었으며, 인증서 생성 및 검증과 관련된 트랜잭션이 정상적으로 처리됨을 확인하였다. 향후 연구로는 다양한 친환경 에너지 데이터와의 통합을 통해 시스템 적용 범위를 확대하고, NFT(Non-Fungible Token) 기반의 탄소 배출권 거래 및 보유 이력 관리 기법을 연구하여 탄소시장 내 거래의 고유성과 무결성 향상 방안을 탐구할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-학·석사연계 ICT핵심인재양성 지원을 받아 수행된 연구(IITP-2025-RS-2022-00156394, 25%)와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업(IITP-2025-RS-2020-II201612, 25%)과 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2018R1A6A1A03024003, 25%)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2025-RS-2024-00438430, 25%)

참 고 문 헌

- [1] M.-S. Lee, J.-M. Lee, D.-S. Kim, "Design and Implementation of Blockchain-Based Carbon Credit Generation and Verification Technique for Electric Vehicle Utilization", 2025년도 한국통신학회 동계종합학술발표회, pp. 760 - 761, 2025.
- [2] L. Che, E. Li, H. Xin, J. Zhang, C. Xu, Q. Li, and L. Li, "A Carbon Emissions Verification Mechanism Based on Blockchain and Reverse Auction", 2023 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Blockchain Technology (AIBT), pp. 71-75, 2023.
- [3] M. Su, R. Zhao, J. Jiang, J. Zhao, M. Wang, D. Zha, and C. Li, "A blockchain system supporting cross-border data protection and consistency verification in unified global carbon emissions trading framework," Journal of Cleaner Production, Vol. 448, pp. 141693, 2024.
- [4] NSLAB, CO., Ltd, Purechain : Blockchain Ecosystem, https://nslab.tech/bbs/board.php?bo_table=publication&wr_id=54, 2023..