

시뮬레이션 데이터의 전주기 신뢰성 확보를 위한 블록체인 기반 관리 플랫폼

장민희¹, 이재민², 김동성^{*}

국립금오공과대학교 IT융복합공학과^{1,2,*}

{jmhee¹, ljmpaul², dskim^{*}}@kumoh.ac.kr

A Blockchain-Based Management Platform for Ensuring End-to-End Reliability of Simulation Data

Min-Hui Jang¹, Jae-Min Lee², Dong-Seong Kim^{*}

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

요약

모델링 및 시뮬레이션(Modeling and Simulation, M&S)은 복잡한 시스템의 동작을 분석하고 다양한 운용 시나리오를 사전에 검증하기 위해 활용되고 있다. 그러나 기존의 시뮬레이션 데이터 관리 방식은 결과 중심의 사후 검증에 한정되어 있어, 시뮬레이션 수행 과정 전반에 대한 신뢰성 확보에는 한계가 있다. 특히 Verification, Validation, and Accreditation(VV&A) 관점에서는 시뮬레이션 결과가 어떠한 입력 데이터와 실행 과정을 기반으로 생성되었는지에 대한 절차적 연관성 확보가 중요하다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 IPFS와 블록체인을 결합한 시뮬레이션 데이터 관리 플랫폼을 제안한다. 제안하는 시스템은 시뮬레이션 입력 데이터와 결과 데이터를 오프체인 저장소와 온체인 메타데이터 관리 구조로 연계하여 관리하며, 스마트컨트랙트를 상태기계로 모델링하여 입력 단계와 결과 단계 간의 절차적 연관성을 시스템 차원에서 강제한다. 이를 통해 시뮬레이션 데이터의 무결성, 추적성, 재현성을 확보하며, 구현 및 평가 결과를 통해 VV&A 요구사항을 효과적으로 지원함을 확인하였다.

I. 서론

현대 시스템은 컴퓨팅 성능의 향상과 네트워크 기반 환경의 확산으로 규모와 구조적 복잡성이 증가하고 있으며 이에 따라 다양한 운용 조건을 고려한 분석이 요구되고 있다. 이러한 환경을 직접 구축하거나 반복 시험하는 데에는 비용과 시간 측면의 제약이 존재하므로 복잡한 시스템의 동작을 분석하고 운용 시나리오를 사전에 검증하기 위해 M&S가 활용되고 있다. M&S는 시스템의 구조와 동작을 추상화하여 설계 및 분석 단계에서 사용된다. 이로 인해 M&S 환경에서는 시뮬레이션의 신뢰성 확보가 필수적이며 이를 위해 VV&A 절차가 수행된다. VV&A는 시뮬레이션 모델과 데이터, 실행 과정 및 산출물이 의도한 목적에 적합한지 평가하는 절차이다. 시뮬레이션의 신뢰성을 확보하기 위해서는 수행 과정에서 생성되는 데이터와 산출물의 생성 이력과 근거를 체계적으로 관리·검증할 수 있는 데이터 관리 체계가 요구된다[1]. 이에 따라 시뮬레이션 모델과 결과 데이터의 해시값을 블록체인에 기록하는 관리 방식이 제안되었다[2]. 그러나 해시값 기반 관리 방식의 특성상 데이터 손상이나 삭제 시 복원이 불가능하다. 또한 입력 조건과 실행 과정에 대한 추적이 어려워 VV&A 관점에서 결과 신뢰성 확보에 한계가 존재한다.

따라서 본 논문에서는 InterPlanetary File System(IPFS)과 블록체인을 결합한 시뮬레이션 데이터 관리 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 스마트컨트랙트를 상태기계(state machine)를 기반으로 모델링하여 시뮬레이션 데이터를 전 주기적으로 관리하여 M&S와 VV&A 요구사항에 부합하는 데이터 무결성, 추적성, 재현성을 확보하고자 한다.

II. 기존 연구의 문제점 분석

[2]는 그림 1과 같이 물류 시뮬레이션 환경에서 블록체인을 활용하여 시뮬레이션 모델과 실험 결과 데이터를 관리·검증하는 방안을 제안하였다. 해당 연구는 시뮬레이션 모델 파일과 실험 결과 데이터의 해시값을 블

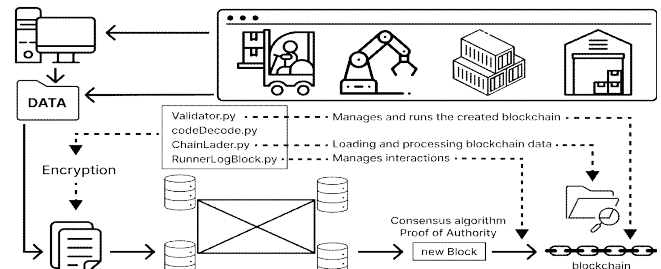


그림 1 블록체인 기반 물류 시뮬레이션 데이터 관리 시스템 구성도

록체인에 기록하여 시뮬레이션 데이터의 무결성과 변경 이력 추적을 수행한다. 이러한 방식은 시뮬레이션 데이터의 사후 위·변조 여부의 검증이 가능하다는 점에서 의미가 있다[3]. 그러나 블록체인에 기록되는 정보가 해시값으로 한정되어 있어 시뮬레이션 데이터의 무결성을 절차적, 환경적 관점에서 체계적으로 관리하는 것에는 한계가 존재한다. M&S 및 VV&A 관점에서는 시뮬레이션 결과가 어떠한 입력 데이터와 모델 설정, 실행 환경을 기반으로 생성되었는지에 대한 절차적 신뢰성이 함께 보장되어야 한다[1]. 또한 해시값 기반 관리 방식은 파일의 변경 여부를 확인에는 유효하지만, 원본 데이터의 내용 확인이나 복원은 지원하지 않는다. 이는 데이터 손상 또는 삭제가 발생할 때 원본 데이터의 복원이나 재생성을 지원하지 않아 결과의 재현성과 장기적 데이터 보존 측면에서 제약이 존재한다.

III. 제안하는 시스템 설계

본 논문에서 제안하는 블록체인 기반 시뮬레이션 데이터 관리 플랫폼은 시뮬레이션 수행 과정에서 생성되는 입력 데이터와 결과 데이터를 IPFS와 블록체인을 기반으로 안전하게 관리하도록 설계하였다. 그림 2는 제안하는 시스템의 구성도로 M&S를 수행하는 DApp, IPFS, 블록체인으로 구성된다. 제안하는 시스템은 온체인-오프체인 연계 구조를 통해 시뮬레이션 각 단계에서 생성되는 산출물의 메타데이터와 상태 정보를 블록체

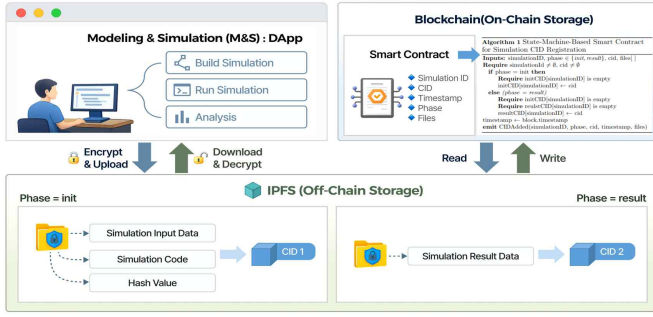


그림 2 제안하는 시스템 구성도 및 상태기계 기반 스마트컨트랙트 모델
 인에 기록하여 입력 데이터와 결과 데이터 간의 연관성을 구조적으로 보
 장한다. 이를 위해 본 논문에서는 Algorithm 1과 같이 상태기계 기반 스
 마트 컨트랙트 모델을 적용하였다. 각 시뮬레이션은 고유한 simulationID
 로 관리되며, 상태는 입력(init)과 결과(result) 단계로 정의되고 init에서
 result로의 단일 전이만 허용된다. 이를 통해 시뮬레이션 결과가 사전에
 정의된 입력 데이터에 기반하여 생성되었음을 시스템 차원에서 보장한다.
 시뮬레이션 데이터의 등록은 DApp을 통해 수행되며 산출물을 IPFS에 저
 장한 후 해당 메타데이터가 블록체인에 기록된다. 이때 result 단계는 init
 단계가 선행되지 않을 경우 등록이 제한되고 각 단계는 최대 1회만 기록
 될 수 있도록 제어된다. 이러한 상태기계 기반 제약을 통해 중복 기록과
 순서 위반을 방지하고 원본 데이터는 IPFS에 저장하고 블록체인에는 CID
 와 최소한의 메타데이터만 기록하여 저장비용과 정보 노출을 최소화한다.
 이를 통해 시뮬레이션 입력 데이터와 결과 데이터 간의 논리적 연관성을
 유지하며 시뮬레이션 전주기의 추적성과 재현성을 함께 확보할 수 있다.

IV. 구현 및 성능 평가

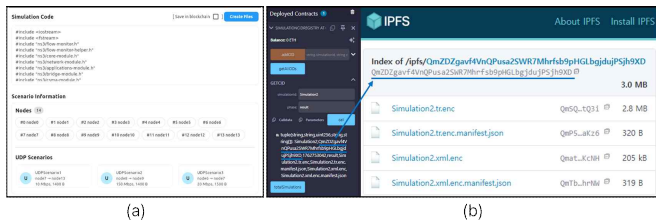


그림 3 (a) DApp 인터페이스 (b) IPFS 업로드 및 스마트컨트랙트 기록 결과

본 논문에서 제안하는 시스템은 3절에서 제시한 구성도를 기반으로
 Purechain 프레임워크를 활용한 프라이빗 블록체인 환경으로 구축하였
 다. 시스템은 블록체인 계층, 오프라인 저장 계층, 애플리케이션 계층으로
 구분할 수 있다. 애플리케이션 계층은 시뮬레이션 모델링, 실행, 암호화,
 복호화, 분석하는 DApp으로 구성된다. 그림 3의 (a)는 시뮬레이션 코드
 와 입력 데이터를 생성한 결과를 보여준다. 사용자가 시뮬레이션 입력용
 리 정의하면 관련 정보는 JSON 기반 입력 데이터 모델로 변환되어 암호
 화된 후 IPFS에 저장되고 CID가 생성된다. 생성된 CID와 메타데이터는
 스마트컨트랙트를 통해 블록체인에 phase = init 상태로 기록된다. 이후
 사용자는 블록체인에 기록된 init으로 기록된 simulationID, CID, 타임스
 탬프 정보를 기반으로 데이터를 불러와 복호화 및 실행할 수 있다. 시뮬레
 이션 실행 결과는 그림 3의 (b)와 같이 동일한 절차로 암호화되어 IPFS에
 저장되며, 생성된 CID 및 메타데이터는 스마트컨트랙트를 통해 phase =
 result 상태로 기록된다. 이러한 구현 결과는 제안하는 시스템이 IPFS 기
 반 시뮬레이션 데이터 저장과 온체인 메타데이터 관리 구조를 DApp을 통
 해 end-to-end로 통합 구현되었음을 보여준다.

표 1은 본 논문에서는 제안하는 플랫폼이 시뮬레이션 전 주기에 대해
 신뢰성, 무결성, 추적성, 재현성을 충족하는지 기존 연구와 함께 평가하였
 다. 평가 기준은 M&S 환경에서 요구되는 데이터 신뢰성 요소와 VV&A

표 1 시뮬레이션 데이터 신뢰성 관점의 비교 분석

구분	기존 연구[2]	제안하는 시스템
무결성	✓ 파일 해시 기반 무결성	✓입력, 코드, 결과 전주기 무결성
추적성	✓ 파일 변경 이력	✓입력-실행-결과 전주기 이력
재현성	✗ 재현 불가	✓ 동일 입력, 코드, 환경 재현
절차 연관성	✗입력, 결과 간 연계 없음	✓ init-result 연관성 보장
복원 가능성	✗ 원본 파일 복원 불가	✓ IPFS 기반 복원

관점의 요구사항을 기반으로 정의하였다[1]. 시뮬레이션 결과의 신뢰성
 을 확보하기 위해서는 결과 생성에 사용된 입력 데이터와 실행 조건에 대
 한 정보가 함께 고려되어야 하며, 해당 정보는 위·변조 없이 보존되고 동
 일 조건에서 결과를 재확인할 수 있어야 한다. 이에 따라 본 논문에서는
 무결성, 추적성, 재현성을 기본 평가 기준으로 설정하고 입력-결과 간 절
 차적 연관성과 산출물 복원 가능성을 추가 기준으로 포함하였다. 기존 연
 구는 시뮬레이션 모델과 산출물의 해시값을 블록체인에 기록하여 무결성
 과 변경 이력 추적 기능을 제공한다. 그러나 해시값 기반 관리 방식의 특
 성상 산출물의 재현성이나 복원, 전주기 연계 관리에는 한계가 있다. 반면
 제안하는 시스템은 시뮬레이션 입력 데이터, 실행 코드, 결과 데이터를
 IPFS 기반 오프체인 저장소와 블록체인 기반 온체인 관리 구조로 연계하
 여 관리함으로써 전 주기에 대한 무결성과 추적성을 확보한다. 또한 IPFS
 CID를 활용한 산출물의 복원 및 재사용을 통해 재현성과 장기적 데이터
 보존을 지원한다.

V. 결론

본 논문에서는 시뮬레이션 데이터의 신뢰성 확보를 위한 블록체인 기
 반 데이터 관리 시스템을 제안하였다. 기존 M&S 환경에서의 결과 중심
 데이터 관리 방식이 VV&A 관점에서 가지는 한계를 극복하기 위해 IPFS
 와 블록체인을 결합한 온체인-오프체인 연계 구조와 상태기계 기반 스마
 트컨트랙트를 적용하여 입력 단계와 결과 단계 간의 절차적 연관성을 시
 스템 차원에서 보장하였다. 이를 통해 시뮬레이션 데이터의 무결성, 추적
 성, 재현성을 함께 확보할 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 예플레
 이터 기반 환경으로의 확장과 시뮬레이션 환경에 적합한 합의 알고리즘
 설계를 통해 성능과 확장성을 개선할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원
 을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업 (IITP-2025-RS-2020-II201612,
 33%)과 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된
 기초연구사업 (2018R1A6A1A03024003, 33%)과 과학기술정보통신부 및 정보
 통신기획평가원의 대학CT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2025
 -RS-2024-00438430, 34%).

참 고 문 헌

- [1] "DoD Instruction 5000.61: DoD Modeling and Simulation Verification, Validation, and Accreditation," pp.1-12, 2024.
- [2] G. Fedorko, M. Kostovcik, N. Mikusova, H. Neradilova, V. Molnar, and M. Duriska, "Using blockchain technology in the computer simulation of logistics processes," Simulation Modeling Practice and Theory, Vol. 142, pp. 1-17, 2025.
- [3] J. H. Cha, J. M. Lee and D.-S. Kim, "Design and Implementation of a Hybrid Blockchain for Preventing Forgery and Tampering of Defense Test and Evaluation Report," Information and Communications Magazine, Vol. 41, pp. 43-52, 2024.