

지능형 데이터 오케스트레이션 및 무결성 검증을 지원하는 Trident Data Lakehouse 설계

임창현, 김종원*

광주과학기술원 AI융합학과

ich6648@smartx.kr, *jongwon@smartx.kr

Design of Trident Data Lakehouse Supporting Intelligent Data Orchestration and Integrity Verification

ChangHyeon Im, JongWon Kim*

Department of AI Convergence, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)

요 약

본 논문은 단일 클러스터의 물리적/논리적 한계를 극복하고 이기종 자원을 통합 관리하는 클라우드-네이티브 Scale-Across 인프라 환경에서 HPC/AI/HPDA 워크로드를 위한 대규모 멀티모달 데이터를 효율적으로 관리하는 Trident Data Lakehouse를 제안한다. 제안된 레이크하우스는 Data Plane과 Control Plane으로 계층화되어 구성되며, Data Plane은 Apache Iceberg 기반의 메타데이터 구조화, Redis 기반의 Iceberg 메타데이터 캐싱, AI 에이전트 및 Milvus 기반의 시맨틱 데이터 생성을 통해 지능형 데이터 풀을 구축하고, FUSE 인터페이스를 통해 HPC/AI 워크로드의 즉각적인 데이터 접근을 지원한다. Control Plane은 구축된 데이터 풀을 바탕으로 워크로드의 최적 테이블을 식별하고 데이터의 물리적 경로를 특정하며, Kubernetes 스케줄러와 연동하여 데이터 접근성 기반의 최적 워크로드 배치를 수행한다. 나아가, Nessie 카탈로그의 중앙 집중식 백엔드 데이터베이스가 갖는 무결성 한계를 극복하기 위해 Nessie 커밋 해시를 블록체인에 앵커링(Anchoring)하는 프레임워크를 제안한다. 이를 통해 Scale-Across 인프라 전반에서 데이터 관리의 성능과 신뢰성을 보장하는 데이터 관리 체계를 실현하고자 한다.

I. 서 론

최근 AI, 디지털 트윈, 자율주행 등 데이터 중심 워크로드가 급증함에 따라, 단일 클러스터의 한계를 넘어 파편화된 이기종 자원을 통합하는 Scale-Across 인프라가 차세대 대안으로 주목받고 있다. Scale-Across는 초고속 인터커넥트 기술로 분산된 자원을 하나의 거대한 리소스 풀로 연합하여 워크로드별 최적의 자원을 제공한다[1]. 그러나 이러한 광범위한 확장은 데이터 파악을 어렵게 만드는 데이터 스왑 현상을 초래할 수 있으며, 대규모 분산된 데이터를 직접 탐색하는 과정에서 발생하는 I/O 병목 현상은 전체 워크로드의 처리 속도를 저하시키는 결정적인 원인이 된다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 Apache Iceberg[2]와 Nessie Catalog[3]을 기반으로 한 Trident Data Lakehouse를 제안한다. 이는 AI 에이전트와 메타데이터 캐싱 기술을 통합하여 분산된 자원 간의 데이터 일관성과 효율적인 데이터 탐색을 보장한다.

Scale-Across 인프라에서 데이터 일관성을 보장하기 위해서는 카탈로그의 역할이 핵심적이다. Apache Polaris[4]가 REST 기반 오픈 카탈로그 표준으로서 주목받고 있으나, 구현 성숙도 및 쿼리 엔진과의 호환성 문제로 인해 멀티테이블 트랜잭션 지원은 아직 제한적이다. 반면, Project Nessie는 Git과 유사한 브랜칭 모델을 통해 여러 테이블의 변경 사항을 단일 커밋으로 처리하여 원자적 멀티테이블 트랜잭션을 지원한다. 그러나 Nessie 트랜잭션 관리 역시 메타데이터를 저장하는 백엔드 데이터베이스의 중앙 집중식 모델에 의존한다는 구조적 취약점을 지닌다. 만약 시스템 관리자 권한이 오용되거나 데이터베이스 서버가 침해될 경우, 과거의 커밋 히스토리를 조작하거나 WAP 패턴의 Audit 기록을 위조하는 것이 가능하여, 데이터의 무결성을 완전히 보장하기 어렵게 만든다.

이러한 중앙 집중식 모델의 보안 취약점을 해결하기 위해, 본 논문에서 제안하는 Trident Data Lakehouse는 클라우드-네이티브 인프라에서 블록체인을

통해 데이터 신뢰성을 확보하는 연구를 응용하여, Nessie의 커밋 해시를 블록체인에 앵커링하는 신뢰 보장 프레임워크를 포함한다. 결과적으로 Trident Data Lakehouse는 Scale-Across 환경에서 효율적인 데이터 탐색뿐만 아니라, 데이터 조작 가능성을 원천 차단하는 고신뢰 데이터 관리 체계를 구축한다.

II. Cloud-Native Trident Data Lakehouse 설계

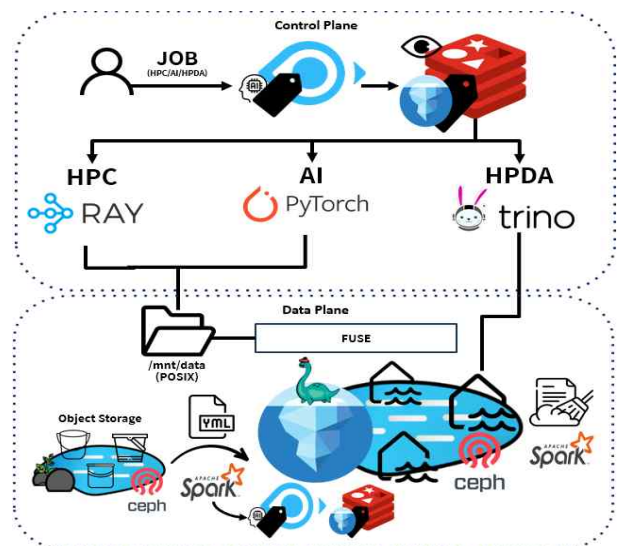


그림 1. Cloud-Native Trident Data Lakehouse

그림 1은 본 논문에서 제안하는 Cloud-Native Trident Data Lakehouse의 전체 구조를 보여준다. Scale-Across 인프라 내 분산된 멀티모달 데이터를 효율적으로 활용하기 위해, 데이터를 Apache Iceberg 포맷으로 구조화하고 의미를 부여하는 Data Plane과 정리된 정보를 바탕으로

최적의 접근 경로를 확정하는 Control Plane으로 계층화되어 설계되었다.

Data Plane은 원천데이터를 물리적 복제 없이 기존 저장소에 유지한 채, YAML 정의를 기반으로 Apache Iceberg 테이블에 등록하여 메타데이터를 생성한다. 이때 대규모 메타데이터 조회 시 발생하는 I/O 병목을 방지하기 위해, 생성된 메타데이터는 Redis에 캐싱하여 관리한다. 다음으로, AI 에이전트는 Iceberg 스키마와 YAML 내 데이터 설명을 분석하여 테이블의 의미를 생성하고, 이를 Milvus(Vector DB)[6]에 벡터화하여 저장한다. 이를 통해 데이터의 의미와 물리적 위치를 식별할 수 있는 지능형 데이터 풀이 구축된다. 또한, POSIX 호환 인터페이스 FUSE를 연동함으로써 AI/HPC 워크로드가 별도의 데이터 이동 없이 데이터 레이크하우스에 로컬 파일 시스템처럼 즉각 접근하여 처리할 수 있도록 지원한다.

Control Plane은 Data Plane에 정리된 정보를 활용하여 워크로드에 최적화된 접근 경로를 확정한다. 워크로드 Job이 제출되면 먼저 Data Plane의 Milvus를 통해 워크로드에 적합한 테이블을 식별하고, Redis 캐시(Iceberg Metadata)를 참조하여 해당 데이터의 구체적인 물리 경로를 신속하게 특정한다. 최종적으로 확정된 데이터 위치 정보는 Kubernetes 스케줄러와 연동되어, Pod를 데이터가 위치한 노드에 우선 배치함으로써 네트워크 오버헤드를 최소화하고 전체 워크로드의 실행 효율을 극대화한다.

III. Nessie-Blockchain 무결성 검증 프레임워크 설계

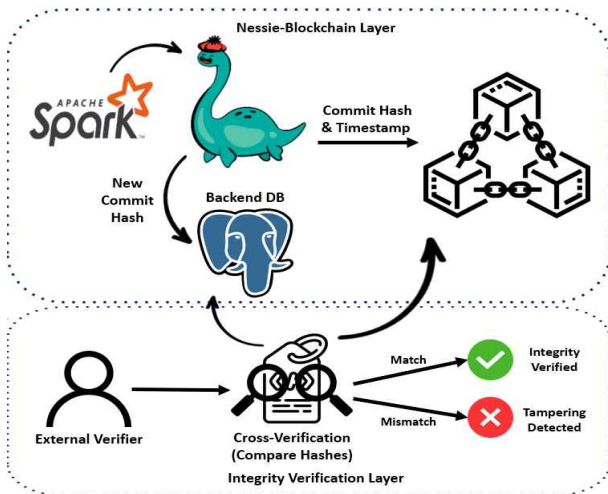


그림 2. Nessie-Blockchain 무결성 검증 프레임워크

그림 2는 Nessie 카탈로그와 블록체인을 결합한 무결성 검증 프레임워크의 상세 구조를 보여준다. 본 프레임워크는 Nessie가 생성하는 Git 방식의 커밋 해시를 블록체인 네트워크에 영구적으로 기록함으로써, 중앙 집중식 데이터베이스의 보안 한계를 극복하는 것을 목적으로 한다. Nessie는 데이터의 모든 상태 변화를 해시값으로 기록하여 이력을 관리하지만, 해당 메타데이터가 저장되는 백엔드 데이터베이스가 침해될 경우 과거의 커밋 기록을 임의로 수정하거나 특정 시점의 데이터 존재 여부를 왜곡할 수 있는 위험이 존재한다. 이에 본 연구에서는 이러한 카탈로그의 구조적 취약점을 해결하기 위해 앵커링 기술을 활용하여 Nessie의 커밋 해시를 블록체인에 동기화한다. 이를 통해 중앙 집중식 데이터베이스에 대한 사후 조작을 원천적으로 불가능하게 하여 데이터 무결성을 보장한다.

무결성 검증 프로세스는 Nessie 서버와 블록체인 서버 간의 동기화된 상호 검증 레이어를 통해 실현된다. 카탈로그에서 새로운 데이터 변경 커밋이 발생하면, 앵커링 모듈은 해당 해시값과 타임스탬프를 포함한 앵커링 데이터를 블록체인 네트워크에 전송한다. 이후 데이터의 신뢰성을 확인해야 하는 외부 검증기나 AI 에이전트는 Nessie DB에 기록된 커밋 히스토리를 블록체인에 저장

된 앵커링 데이터와 대조함으로써 데이터의 무결성을 독립적으로 검증한다. 이러한 설계는 중앙 집중식 데이터베이스에 대한 신뢰 가정을 배제하고, 블록체인을 기반으로 데이터 상태 변화의 불변성을 상시 검증할 수 있는 신뢰 계층을 제공한다. 결과적으로 본 프레임워크는 Scale-Across 인프라 전반에서 Trident Data Lakehouse가 제공하는 데이터 운영의 투명성을 극대화하며, 외부 검증이 가능한 고신뢰 데이터 관리 체계를 실현한다.

IV. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 차세대 클라우드-네이티브 환경인 Scale-Across 인프라에서 HPC/AI/HPDA 워크로드의 대규모 멀티모달 데이터 접근 효율과 신뢰성을 동시에 보장하기 위한 Trident Data Lakehouse 및 블록체인 기반 무결성 검증 프레임워크를 설계하였다. 제안된 Trident Data Lakehouse는 AI 에이전트와 Iceberg 메타데이터 캐싱을 결합한 지능형 데이터 오케스트레이션을 통해 데이터 스왑 현상을 방지하고 오브젝트 스토리지 I/O 병목을 해소한다. 또한, Nessie를 통한 다중 테이블 트랜잭션과 WAP 패턴을 통해 데이터 일관성과 품질 관리 체계를 확보한다. 나아가, Nessie의 중앙 집중식 백엔드 데이터 베이스가 가질 수 있는 보안 취약점을 극복하기 위해 커밋 해시를 블록체인에 앵커링하는 프레임워크를 제안함으로써, 데이터 및 자원이 분산된 Scale-Across 환경에서도 외부적인 독립 검증이 가능한 불변의 신뢰 계층을 실현한다. 향후 연구에서는 GPU 워크로드 처리 시 발생하는 FUSE 병목 현상을 해결하기 위해 SPDK 기반의 SSD 직접 제어 기술을 도입하여 커널 바이패스를 구현하고, RDMA 기반 GPU Direct Storage를 적용하여 데이터 전송 경로에서의 CPU 개입을 차단함으로써 I/O 성능을 극대화하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2026-RS-2021-II211835)과 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019-0-01842, 인공지능대학원지원(광주과학기술원)).

참고 문헌

- [1] NVIDIA, "NVIDIA Introduces Spectrum-XGS Ethernet to Connect Distributed Data Centers Into Giga-Scale AI Super-Factories," *NVIDIA Newsroom*, Aug. 22, 2025. [Online]. Available: <https://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-introduces-spectrum-xgs-ethernet-to-connect-distributed-data-centers-into-giga-scale-ai-super-factories> [Accessed: Jan. 2, 2026].
- [2] Apache Software Foundation, "Apache Iceberg: The Open Table Format for Huge Analytical Datasets," *Apache Iceberg*, 2025. [Online]. Available: <https://iceberg.apache.org/> [Accessed: Jan. 2, 2026].
- [3] Project Nessie, "Transactional Catalog for Data Lakes," *Project Nessie*, 2025. [Online]. Available: <https://projectnessie.org/> [Accessed: Jan. 2, 2026].
- [4] Apache Software Foundation, "Apache Polaris (Incubating): An Open Source Catalog for Apache Iceberg," *Apache Polaris*, 2025. [Online]. Available: <https://polaris.apache.org/> [Accessed: Jan. 2, 2026].
- [5] H. Zang, H. Kim, and J. Kim, "Blockchain-Based Decentralized Storage Design for Data Confidence Over Cloud-Native Edge Infrastructure," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 50083-50099, 2024.
- [6] Milvus Project, "Milvus: An Open-Source Vector Database for Scalable Similarity Search," *Milvus*, 2025. [Online]. Available: <https://milvus.io/> [Accessed: Jan. 2, 2026].