

논문 2025-4-10 <http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2025.12.10>

# 온체인 대용량 처리 관점에서의 Ethereum과 IOTA 성능 비교

임호정\*, 신동명\*\*

## Performance Comparison of Ethereum and IOTA for Large-Scale On-Chain Data Processing

Hojung Lim\*, Dong-Myung Shin\*\*

### 요 약

본 연구는 휴머노이드 센서 스트림(2.77 TPS)과 일 10 GB 규모의 모델 아티팩트를 온체인에 영속적으로 저장한다는 가정 하에, Ethereum(PoA)과 IOTA Tangle, 프라이빗 네트워크들의 처리 능력을 시뮬레이션으로 비교·분석하였다. Ethereum은 블록-가스 상한 때문에 쓰기 대역폭이 수 KB/s 수준으로 제한되고, 대형 개체는 조각 수에 비례해 지연이 선형 증가하여 최대 수 시간까지 늘어난다. 반면 IOTA는 MPS(메시지/초) 스케줄링과 DAG 동시성 덕분에 동일 부하에서 처리량이 네트워크 대역폭(100 Mbps)에 의해 결정되고 확인 지연은 거의 일정(수 초 미만)으로 유지된다. 이러한 결과를 종합하면 휴머노이드 환경에서는 IOTA를 온체인 저장 계층으로 채택하는 것이 합리적이며, Ethereum은 제어·정산·거버넌스와 같은 로직 계층의 보조 레이어로 사용하는 것이 바람직하다.

### Abstract

Assuming persistent on-chain storage of humanoid sensor streams (2.77 TPS) and daily 10 GB model artifacts, this study conducts simulation-based performance comparisons of Ethereum (PoA) and IOTA Tangle in private network environments. The results show that Ethereum's block-gas limit restricts sustained write throughput to only a few KB/s, and large objects suffer linearly increasing latency proportional to the number of chunks, reaching several hours in extreme cases. In contrast, IOTA leverages MPS scheduling and DAG-based concurrency so that, under the same workload, throughput is primarily bounded by network bandwidth (100 Mbps) while confirmation latency remains nearly constant (under a few seconds). Taken together, these findings indicate that IOTA is technically suitable as the storage layer in humanoid-robot environments, whereas Ethereum is better confined to an auxiliary layer for control, settlement, and governance logic.

**한글키워드** : 블록체인 성능 평가, 온체인 데이터 저장, 이더리움, IOTA 탱글, 휴머노이드 센서 네트워크  
**keywords** : Blockchain Performance Evaluation, On-chain Data Storage, Ethereum, IOTA Tangle, Humanoid Sensor Network

\* 한국전자기술연구원 지능융합SW연구센터

접수일자: 2025.11.26. 심사완료: 2025.12.02.

\*\* 엘에스웨어㈜

게재확정: 2025.12.20.

## 1. 서론

휴머노이드 로봇은 센싱, 판단, 제어가 실시간으로 융합되는 복합 CPS(Cyber-Physical System)이며, 각 로봇은 고주파·고해상도 센서로부터 대량의 데이터를 생산한다. 이러한 데이터는 로봇의 자율 제어, 안전성 검증, 사고 분석, 규제 준수, 디지털 포렌식 등 다양한 목적에 활용되므로 신뢰할 수 있는 데이터 관리 체계가 요구된다. 특히 다수의 로봇이 분산 환경에서 활동하는 경우 각 엔티티로부터 수집되는 데이터의 영속적 보관과 변조 불가능성을 확보하는 것은 필수 요건이다. 이에 따라 블록체인 및 분산원장 기술(DLT)은 로봇 데이터의 영속성, 추적성, 무결성을 보장하는 기반기술로 주목받아 왔다[2]. 특히 IoT·로봇 환경에서의 신뢰성 문제 해결 관점에서도 중요성이 강조된다. 그러나 기존 블록체인은 트랜잭션 처리량(TPS), 블록-가스 제한, 저장 비용, 직렬화된 상태 저장 구조 등 여러 성능적 제약을 가지고 있어 대규모 바이너리 파일을 지속적으로 기록하는 데 어려움이 있다[4][6].

본 연구는 대규모 온체인 저장 시나리오를 휴머노이드 로봇 환경 수준에서 현실적으로 모델링하고, Ethereum과 IOTA의 구조적 병목이 실제 부하에서 어떻게 드러나는지 정량적으로 규명한다. 특히 393 KB/s 수준의 지속 쓰기량을 기준선으로 설정하여 두 플랫폼의 이론적 상한과 실측 성능을 모두 고려해 적합성을 평가한다. 이는 기존 연구들이 주로 소형 트랜잭션 중심으로 진행된 것과 달리, 대용량 모델 파일을 포함한 실제 IoT/CPS 환경의 데이터 특성을 반영한다는 점에서 의의가 있다.

능을 중심으로 발달해 왔으나, 저장형 트랜잭션은 높은 가스 비용과 블록-가스 한계로 인해 처리량과 확장성 측면에서 구조적 제약을 가진다는 점이 여러 연구에서 보고되었다[4],[6],[7]. 특히 Li와 Liu는 상태 쓰기 비용이 구조적으로 높은 설계임을 정량적으로 제시하였고, 최근 연구[7]에서는 다양한 Ethereum 데이터 관리 방식에 대해 저장 비용과 조회 지연의 상관관계를 체계적으로 분석하였다. 블록 내부의 상태 쓰기(SSTORE)는 32B당 20,000 gas의 비용을 가지며, PoA 기반 Ethereum에서도 이러한 비용 구조는 동일하게 적용된다.

반면 IOTA Tangle은 DAG 기반의 메시지 병렬 첨부 구조를 채택하여 블록 개념을 제거하고, 합의를 MPS(Message Per Second) 기반 스케줄링으로 관리함으로써 높은 처리량과 낮은 지연을 제공하는 플랫폼으로 평가받아 왔다[1],[5],[8]. 특히 IoT·로봇 환경처럼 다량의 마이크로 메시지를 처리하는 경우 DAG 기반 합의가 블록 기반 합의보다 효율적이라는 연구가 다수 존재하며 [8],[9],[10], 대규모 IoT 데이터의 전송·저장 과정에서 발생하는 대역폭·에너지 자원 관리 문제 또한 주요 병목으로 다루어져 왔다[3].

그러나 기존 문헌의 대부분은 센서 이벤트와 같은 소형 메시지를 대상으로 한 처리량 평가에 집중하고 있으며, 본 연구와 같이 수백 MB 단위의 모델 아티팩트를 대량으로 온체인에 기록하는 시나리오를 정량적으로 분석한 사례는 부족하다. 본 연구는 이러한 공백을 메우기 위해 실제 산업 환경에서 발생 가능한 부하를 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2. 관련 연구

Ethereum은 스마트 컨트랙트와 상태 저장 기

## 3. 실험 환경 및 방법

실험 환경은 프라이빗 DLT 네트워크에서 구

성되었으며 네트워크 링크는 100 Mbps, 노드 구성은 10노드 및 100노드 두 가지 조건을 포함하였다. 휴머노이드 로봇 1,000대는 각기 100 KB의 센서 이벤트를 시간당 10회 생성하는 것으로 모델링하였으며, 이는 약 2.77 TPS, 277 KB/s(≈ 2.2 Mb/s)의 지속적인 센서 기록 부하에 해당한다. 또한 연구소 10곳이 일 평균 1 GB씩 모델 아티팩트를 배포하는 것으로 설정하여 총 10 GB의 일일 모델 파일이 발생하는 것으로 가정하였다.

모델 파일은 실험에서 1 - 16 MB 및 16 - 512 MB 구간으로 단편화(fragmentation)하여 시뮬레이터에 입력하였다. 모델 기록으로 인한 평균 지속 쓰기량은 약 115 - 122 KB/s로 산정되었으며, 센서 스트림과 함께 총 393 KB/s의 지속 쓰기 부하를 구성한다. 이 값은 이후 플랫폼의 이론적 상한 및 실측 성능과 비교하는 기준이 된다.

표 1. 실험항목별 작업량(워크로드)와 기본 파생량  
Table 1. Workload Items and Derived Metrics

항목	가정/수치	파생량(설명)
센서 스트림	1,000대 × 100 KB × 시간당 10회	2.77 TPS, ≈277KB/s(≈ 2.2Mb/s)
모델 배포	10곳 × 1 GB/일 (실험은 1 - 16 MB, 16 - 512 MB 구간으로 스케일링)	평균 115 - 122KB/s
총 지속 쓰기 목표	센서 + 모델	≈393 KB/s(≈3.1 Mb/s)
네트워크 /토폴로지	100 Mbps, 10/100 노드	전파 지연 ~ log(N), 전송시간 ~ size/bw

Ethereum 설정은 블록-가스 상한 30M gas, SSTORE 비용 20,000 gas/32B, calldata 비용 16 gas/B를 적용하였고, IOTA는 MPS=1000, 100 Mbps 링크를 적용하여 프라이빗 Tangle 환경을

구성하였다. 각 실험에서 측정된 지표는 평균 지연(latency), 처리량(TPS), 총 처리시간(makespan), 실패 트랜잭션 수 등이다.

### 3.1 실험 지표 및 용어 정의

- Latency(지연): 개체가 생성된 시점부터 네트워크에서 확정(finality)에 도달하기까지의 시간.
- TPS(Throughput): 단위 시간 동안 처리된 트랜잭션 또는 메시지 수.
- Makespan: 특정 실험 배치 전체가 종료되기까지의 총 소요 시간으로, 실패 건수·드레인 시간·작업량에 영향을 받는다.
- MPS(Message Per Second): IOTA Tangle 스케줄러가 단위 시간 내에 처리하도록 허용하는 메시지 상한.
- Permanode: IOTA에서 장기적으로 데이터를 보존하는 전용 노드.

## 4. 플랫폼의 이론적 저장 한계 분석

Ethereum의 상태 저장 아키텍처는 블록-가스 제한에 의해 본질적인 저장 한계를 가진다.

SSTORE 기준으로 30M gas 블록에서 약 1,500개의 쓰기 단위(32B)가 저장될 수 있으며 이는 블록당 약 48 KB의 상태 쓰기 용량을 의미한다. 12초 블록 시간 기준 지속 쓰기 대역폭은 약 4 KB/s로, 목표 쓰기량 393 KB/s의 약 1/100에 불과하다. Calldata 사용 시 블록당 최대 1.875 MB까지 수용 가능하지만 지속 쓰기 기준은 약 156 KB/s로 여전히 요구치를 충족하지 못한다.

반면 IOTA는 블록 및 가스 개념이 없으므로 상한을 네트워크 대역폭과 MPS 조정에 따라 설정할 수 있다. 100 Mbps 환경에서 1 GB 파일 전송에 필요한 시간은 프로토콜 오버헤드를 포함하

표 2. 플랫폼별 지속 쓰기 상한(간단 모델)  
Table 2. Sustained Write Throughput Limits by Platform (Simplified Model)

플랫폼	상한 근거	블록/슬롯당 페이로드	지속 쓰기 대역폭(12s 블록/슬롯 가정)	1 GB 예상 시간
Ethereum(상태 저장)	SSTORE 20k gas/32B, 블록 가스 30M	약 48KB	~4 KB/s	~75 시간
Ethereum(calldata 취급)	16 gas/B, 30M gas	~1.875 MB	~156 KB/s	~1.9 시간
IOTA(Tangle)	블록 가스 없음, 스케줄링, 100 Mbps	-	네트워크 지배(≤12.5 MB/s)	전송만 ~80-86 초

여 약 80-86초로 계산되어, 이론적으로 Ethereum 대비 수백 배 높은 처리량을 지원한다.

#### 4.1 이론적 저장 상한의 상세 계산식

(1) Ethereum 상태 저장 트랜잭션 지속 대역폭 블록 가스 한계 30M gas와 SSTORE 비용(20,000 gas/32B)을 적용하면, bytes/block = (30,000,000 / 20,000) × 32 ≈ 49 KB, 12초 블록 간격을 적용하면 지속 쓰기 가능 대역폭은 49 KB / 12 ≈ 4 KB/s. 따라서 1GB를 기록하는 데 필요한 시간은 T\_1GB ≈ 1,073,741,824 / 4,000 ≈ 75시간이다.

(2) Ethereum calldata 기반 쓰기 대역폭 calldata 비용(16 gas/B)을 사용하면 블록당 30M gas / 16 gas ≈ 1.875 MB. 따라서 지속 쓰기 대역폭은 1.875 MB / 12 ≈ 156 KB/s. 목표 부하 393 KB/s에는 미달한다.

#### (3) IOTA의 네트워크 상한

프라이빗 Tangle은 MPS·대역폭이 상한을 결정한다. 100 Mbps 링크에서 1 GB 파일을 전송하는 시간은 1 GB ≈ 8,000 Mb, 8,000 / 100 ≈

80초 (오버헤드 포함 80-86초). 따라서 네트워크 개선에 따라 선형 확장이 가능하다.

## 5. 실험 결과

### 5.1 대시보드 요약

본 실험 결과 Ethereum은 평균 지연 1755.22초, makespan 6737.78초, 실패 트랜잭션 10건을 기록하였으며, IOTA는 평균 지연 2959.25초, makespan 7964.09초, 실패 0건을 보였다. 지연 수치만 보면 IOTA가 더 큰 것처럼 보이나, 이는 IOTA가 실패 없이 더 많은 데이터를 실제로 처리했기 때문이며, 플랫폼의 근본적 성능 비교는 추세 그래프 분석을 기반으로 수행해야 한다.

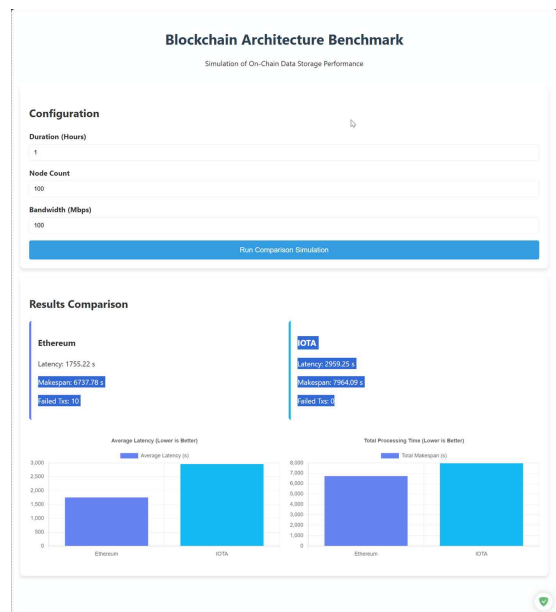


그림 1. Blockchain Architecture Benchmark 대시보드 스냅샷

Fig. 1. Snapshot of the Blockchain Architecture Benchmark Dashboard

그림 1은 실험 구성(Duration=1h, Node=100, Bandwidth=100Mbps)과 단일 런 결과를 요약한

것이다. 결과 카드에서 Ethereum은 Latency = 1755.22s, Makespan = 6737.78s, Failed Tx=10, IOTA는 Latency = 2959.25s, Makespan = 7964.09s, Failed Tx=0으로 나타난다.

평균 지연이 IOTA에서 더 길게 보이는 것은 IOTA가 실패 없이 더 많은 더 큰 단편을 끝까지 처리했기 때문이며, 집계 방식·작업량 차이가 반영된 값이다.

따라서 스냅샷 하나만으로 플랫폼 성능을 해석하기에는 부적절하며, 실패율(0 vs 10)은 중요한 신뢰성 지표이므로 추세 그래프(그림 2-5)와 함께 해석해야 한다. 또한 IOTA의 평균 지연 수치가 높아 보이는 것은 플랫폼 구조적 한계를 의미하는 것이 아니라, IOTA가 실패 없이 더 많은 단편을 실제로 처리했기 때문에 집계 평균이 높아진 결과이다. 따라서 플랫폼의 근본적 스케일링 특성 비교는 스냅샷 지표가 아니라 그림 2-5의 추세를 기준으로 해석해야 한다.

### 5.2 소형 모델 구간

그림 2와 그림 3은 소형 모델(1 - 16 MB)에 대해 평균 지연과 처리량(TPS)의 변화를 함께 보여준다. Ethereum의 평균 지연은 model\_size=1 MB에서 약 1,800초 수준이며, 16 MB에서는 약 2,600초까지 증가하여 소형 모델임에도 30 - 40분 단위의 지연을 기록한다. 이는 모델이 여러 개의 조각으로 분할되고, 각 조각이 블록-가스 상한 때문에 여러 블록에 나누어 포함되면서 블록 대기열이 누적되기 때문이다. 동일 구간에서 Ethereum의 처리량은 약 1.46 TPS에서 1.33 TPS로 완만하게 감소하여, 센서 스트림(2.77 TPS)을 단독으로 수용하기에도 부족한 수준임을 보여준다.

반면 IOTA는 전 범위에서 지연이 수 초 미만으로 축 하단에 거의 고정되어 있고 처리량은 약 3.0 - 3.1 TPS로 평탄하게 유지된다. 이는 DAG 기반 병렬 첨부와 MPS 스케줄링으로 단편을 파

이프라인 처리할 수 있기 때문에, 모델 크기(조각 수)가 증가하더라도 확인 지연과 TPS가 거의 변하지 않음을 의미한다.

그림 2는 이러한 경향을 요약 수준의 축 범위로 제시한 개략 그림이고, 그림 3은 동일 데이터를 더 세밀한 축 간격과 레이블로 재도식한 고해상도 버전이다. 두 그림의 곡선 모양과 수치 범위가 거의 동일하다는 점이 중요하며, 그림 3을 통해 Ethereum 곡선의 점진적인 기울기(지연 증가, TPS 감소)와 IOTA 곡선의 평탄성을 정량적으로 확인할 수 있다. 즉, 소형 구간에서도 이미 Ethereum은 구조적 병목으로 인해 시간 단위 지연을 보이는 반면, IOTA는 모델 크기에 거의 무관한 온체인 저장 성능을 제공한다.

하단 패널에서도 IOTA는 전 구간에서 안정적인 TPS를 유지하는 반면, Ethereum은 센서 스트림 요구 수준에 미치지 못하는 낮은 TPS 범위에 머문다.

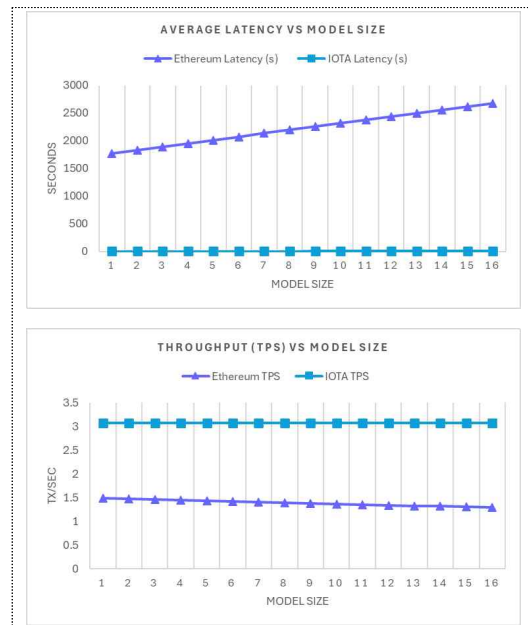


그림 2. Performance Trends - 소형 구간(1 - 16 MB) 요약  
Fig. 2. Performance Trends - Summary for the Small-Size Range (1 - 16 MB)

센서 스트림(2.77 TPS)을 고려하면 Ethereum은 소형 구간에서도 이미 포화 상태이며, IOTA만이 지속 가능한 처리량을 확보한다.

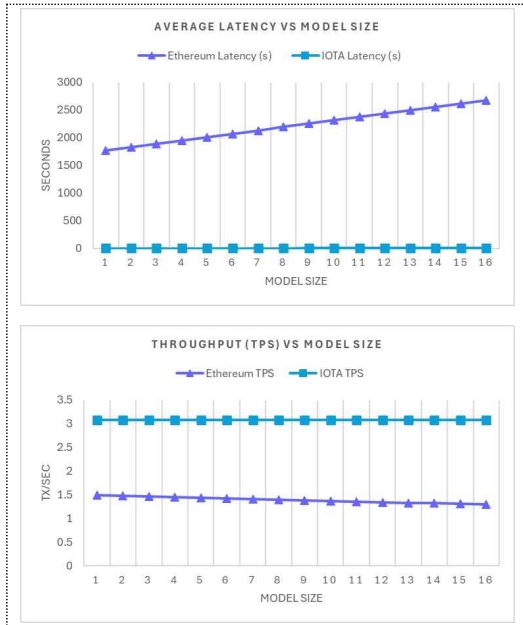


그림 3. Performance Trends - 소형 구간(1 - 16)  
Fig. 3. Performance Trends - Small-Size Range

그림 3은 그림 2를 고해상도로 재현하여 Ethereum의 지연 증가 기울기와 TPS 감소 양상을 더욱 명확히 드러내며 IOTA는 크기 변화에 둔감한 평탄 동작을 보인다. Ethereum은 소형 범위에서도 지연이 1,800초에서 2,650초에 이르며 시간 단위의 지연을 보인다. 반면 IOTA는 TPS ≈3, 지연≈0을 유지하여 크기 변화와 거의 무관한 동작 특성을 나타낸다.

### 5.3 대형 모델 구간

그림 4와 그림 5는 대형 모델(16 - 496 MB)에 대해 Ethereum과 IOTA의 평균 지연과 처리량(TPS)을 비교한 결과를 보여준다. Ethereum의 평균 지연은 16 MB에서 약 3,000초 수준에서 시작하여 496 MB에서는 약  $3.3 \times 10^4$  초(약 9시간)

까지 거의 선형적으로 증가한다. 이는 모델 크기가 커질수록 필요한 조각 수가 비례해 증가하고, 각 조각이 블록-가스 상한 때문에 여러 블록에 나누어 포함되면서 블록 대기열이 누적되기 때문이다. 이에 따라 처리량은 약 1.2 TPS에서 0.2 - 0.3 TPS 수준으로 급감하며, 센서 스트림(2.77 TPS)을 전혀 감당할 수 없는 상태가 된다.

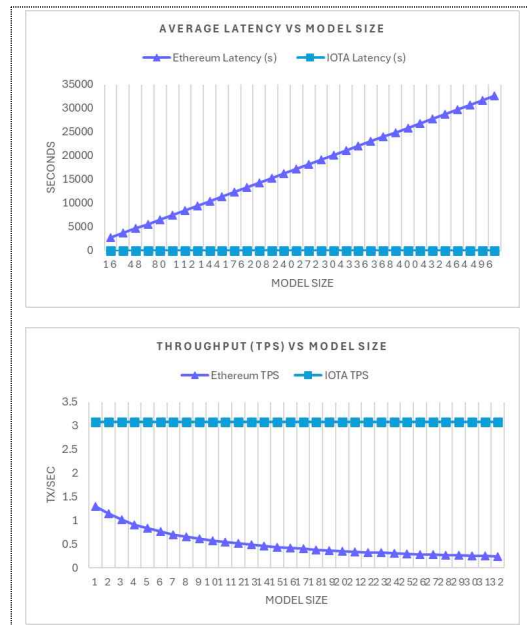


그림 4. Performance Trends - 대형 구간(16 - 496) #1  
Fig. 4. Performance Trends - Large-Size Range (16 - 496) #1

반면 IOTA는 동일 구간에서 평균 지연이 여전히 수 초 수준에 머물고, 처리량도 약 3 TPS로 거의 평탄하게 유지된다. 이는 합의 과정이 병목이 아니라 네트워크 대역폭과 MPS 설정이 상한을 결정하는 대역폭 지배형 구조임을 의미한다.

그림 4는 기본 설정(예: 특정 노드 수와 MPS 값)에서의 결과를 제시하고, 그림 5는 노드 수(10 ↔ 100)나 스케줄러 파라미터 등 일부 설정을 변경한 재현 실험 결과를 나타낸다. 두 그림에서 각 플랫폼(Ethereum, IOTA)의 곡선이 거의 완전

히 겹친다는 사실이 중요하다. 즉, 노드 수나 세부 파라미터를 다소 변화시키더라도 Ethereum의 지연 선형 증가 및 TPS 붕괴, IOTA의 지연·TPS 평탄성이라는 구조적 패턴은 변하지 않는다. 이를 통해 Ethereum의 병목이 스케줄러 구현 세부나 전파 지연이 아니라 블록-가스 상한과 직렬 포장 구조에서 비롯된 근본적 제약임을 확인할 수 있다. 반면 IOTA는 동일 조건에서도 지연 $\approx 0$ , TPS $\approx 3$ 을 지속적으로 유지하며 네트워크 대역폭이 시스템 상한을 결정하는 대역폭 지배형 플랫폼 특성을 나타낸다.

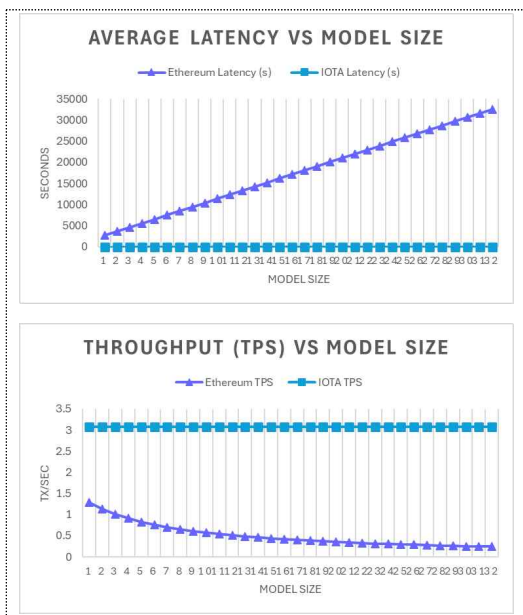


그림 5. Performance Trends - 대형 구간(16 - 496) #2 (재현/다른 설정 변형)  
 Fig. 5. Performance Trends - Large-Size Range (16 - 496) #2 (Replication / Alternative Configuration)

그림 1에서 살펴본 단일 런 스냅샷은 평균 지연과 makespan이 집계 방식과 실패율에 민감함을 보여주며, 플랫폼 비교는 그림 2-5의 추세 분석을 통해 보완해야 한다.

표 3. 대표 구간 요약 통계(관측값 범위)  
 Table 3. Summary Statistics for Representative Ranges (Observed Values)

구간	플랫폼	평균 지연(초)	처리량 (TPS)	해석 요지
1 - 16 MB	Ethereum	1,750	1.5	조각 수가 늘수록 블록 대기열 형성되어 지연 증가 시작
		-	→	
16 - 512 MB	Ethereum	2,600	1.3	단편 파이프라이닝으로 크기와 거의 무관한 지연
		수 초 미만(측에서 0 근처)	-	
16 - 512 MB	IOTA	10,000 - 3,000	0.8	큐 적체가 지배하여 지연이 개체 크기에 선형 증가
		3,000	→	
16 - 512 MB	IOTA	수 초 수준 유지	≈3.0	네트워크 지배로 처리량·지연이 안정적으로 유지
			→	

IOTA의 TPS가 전 범위에서 거의 완전히 수평으로 유지되는 것은 합의 과정이 병목이 아님을 의미하며, 시스템 상한이 네트워크 대역폭에 의해 결정된다는 점을 명확히 보여준다.

그림 1~5 전체를 종합하면 다음이 명확하다.

- (1) Ethereum의 지연 곡선은 '조각 수 증가 → 블록 대기열 증가'의 합성 효과로 선형 상승한다.
- (2) IOTA의 TPS 평탄성은 시스템 상한이 합의가 아니라 네트워크 대역폭임을 의미한다.
- (3) 스냅샷 기반 평균 지연·makespan은 집계·실패율에 민감하므로, 추세 분석과 함께 해석해야 한다.

#### 5.4 “Makespan” 값이 직관과 다르게 보일 수 있는 이유

일부 실험 스냅샷에서는 Ethereum의 평균 지연이 더 낮고 makespan이 더 짧아 보일 수 있다 (예: ETH  $\approx 6,738s$ , IOTA  $\approx 7,964s$ ). Makespan은 개별 단편의 평균 지연이 아니라 전체 실험 배치가 완료되기까지의 총 벽시계 시간을 의미한다. IOTA는 실패 없이 더 많은 단편을 완전히 처리하므로 작업량 증가로 makespan이

더 길게 측정될 수 있다. 따라서 플랫폼 비교에서는 스냅샷 기반 makespan보다 단위 작업 지연, 지속 처리 TPS, 실패율과 같은 구조적 지표를 중심으로 해석하는 것이 타당하다. 특히 스냅샷 지표는 집계 방식과 배치별 작업량 차이에 민감하므로, 플랫폼의 본질적 스케일링 특성은 반드시 그림 2-5의 추세 기반 분석과 결합하여 평가해야 한다.

### 5.5 민감도 분석

네트워크·시스템 레버를 변화시켰을 때 Ethereum과 IOTA가 받는 영향은 구조적으로 다르다. Ethereum은 블록-가스 예산이 절대적 병목이므로 네트워크 개선이나 노드 수 확대가 의미 있는 성능 개선으로 이어지지 않는다.

반면 IOTA는 대역폭 및 MPS가 성능 상한을 결정하므로, 네트워크 확장은 처리시간 단축으로 직결된다. MPS를 과도하게 낮추면 단편 큐 형성으로 인해 병목이 발생할 수 있으며, 모델 파일이 여러 지점에서 동시에 릴리스되는 경우 QoS 조정과 버스트 관리를 통해 링크 포화를 완화할 수 있다.

표 4. 주요 레버별 영향  
Table 4. Impact of Key Levers

레버	변화	Ethereum 영향	IOTA 영향	해설
네트워크 대역폭	100 → 200 Mbps	거의 무의미(가스 병목)	백시계 절반에 수렴	IOTA는 네트워크 지배
노드 수	10 → 100	미미	미미	log(N) 전파항 < 큐잉/전송항 너무 낮추면 단편 대기열 형성
MPS	1000 → 낮춤	해당 없음	큐 병목 위험	IOTA는 QoS/버스트 관리로 완화 가능
모델 동시 릴리스	10곳 동시	대기열 폭증	링크 포화(일시)	

## 6. 분석 및 논의

Ethereum의 병목은 완전히 구조적이다. 저장형 트랜잭션은 SSTORE 기반 비용 구조와 블록-가스 상한에 의해 제한되며, 직렬 포장(serialization)된 조각은 블록 대기열(queue)을 형성하여 지연을 선형적으로 증가시킨다. 노드 수가 증가하더라도 log(N) 수준의 전파 지연만 증가하고 블록 대기열이 지배적이므로 확장성 개선 효과가 미미하다. 따라서 Ethereum은 센서 스트림만으로도 처리량이 포화되며, 대규모 모델 파일을 지속적으로 기록하는 요구를 충족하는 데 근본적 한계를 가진다.

반면 IOTA는 블록이 없고 메시지를 DAG에 병렬로 첨부할 수 있으므로 큐잉 병목이 발생하지 않는다. 전송 지연이 파일 크기와 링크 대역폭의 비율(size/bw)에 의해 결정되며, MPS 스케줄링에 의해 조절되기 때문에 모델 단편의 크기와 개수는 지연에 거의 영향을 주지 않는다. 이러한 구조는 CPS·IoT 기반 로봇 환경에서 필요한 대규모 데이터 처리에 적합하다. 특히 멀티로봇 시스템과 로봇 보안 관점에서 블록체인 활용 가능성을 논의한 선행연구[9],[10]를 고려하면, 본 연구에서 제안한 저장 계층 설계 가이드는 로봇 협업·규제 준수·신뢰 기반 제어체계까지 확장 가능한 설계 방향임을 시사한다.

## 7. 저장 계층 설계 가이드

대용량 온체인 저장이 요구되는 환경에서는 다음과 같은 설계 원칙을 적용해야 한다. 첫째, 저장 계층은 IOTA Tangle 기반 프라이빗 네트워크로 구성하고 MPS를 1000 이상으로 설정한다. 둘째, 대형 모델 파일은 32-128 KB 단편으로 고정하여 파이프라인 처리 효율을 높이고,

Merkle Root 기반 매니페스트를 온체인에 기록하여 무결성과 부분 재전송 기능을 보장한다. 셋째, 센서 이벤트는 롤링 해시 및 시퀀스 번호를 사용하여 정렬 구조로 정리하고, 네트워크 QoS 기능을 통해 제어·센서 트래픽을 모델 트래픽보다 우선 처리한다. 마지막으로 접근 제어는 응용계층 암호화와 릴리스 시점 키 롤링을 통해 강화하고, 지연·유입률·재조립 지연 등을 관측할 수 있는 대시보드를 구축하여 운영 안정성을 높인다.

### 8. 위험 분석

저장량 증가로 Permanode에 데이터가 장기적으로 누적될 수 있으므로 계층형 스토리지 구조나 중복제거 기법을 적용해야 한다. 영구 보존 데이터의 키 관리의 규제 및 감사에서도 중요 요소이므로 HSM 기반 키 관리 및 접근 로그를 사용해야 한다. 모델 릴리스가 동시에 10곳에서 발생하는 경우 일시적으로 링크가 포화될 수 있으나 MPS 상황과 QoS 조정으로 완화 가능하다. 단편 손상은 Merkle 증명 및 부분 재전송으로 복원할 수 있다. 본 연구는 시뮬레이터 기반 실험으로 스케줄러와 팁 선택 알고리즘이 단순화되었으나, 추후 PoC 환경에서 파라미터를 조정하여 보다 정교한 모델링이 필요하다.

### 9. 결론

본 연구는 휴머노이드 로봇 환경에서 발생하는 지속적 데이터 스트림과 대규모 모델 파일을 온체인에 영속 저장한다는 시나리오를 기반으로 Ethereum(PoA)과 IOTA Tangle의 저장 성능을 종합적으로 분석하였다. Ethereum은 블록-가스

표 5. 리스크 매트릭스

Table 5. Risk Matrix

위험	설명	완화
보존량 무한 증가	Permanode는 데이터가 누적	계층형 스토리지, 중복제거/에서 코딩
규제/감사	영구 가용 데이터의 키 관리	HSM·키 에스스로·접근 로그
트래픽 피크	10곳 동시 1 GB 업로드	릴리스 원도분산 일시적 MPS·가중치 상황
모델 단편 손상	일부 조각 누락/손상	머클 증명·부분 재전송·검증 파이프라인
시뮬레이션 단순화	스케줄러/팁 선택 세부 단순화	PoC 단기 실측으로 파라미터 보정

상한으로 인해 지속 가능한 저장 대역폭이 수 KB/s에 불과하며, 대형 개체의 경우 지연이 선형적으로 증가하여 최대 수 시간에 이르는 병목을 보였다. 반면 IOTA는 네트워크 중심 아키텍처를 기반으로 모델 크기와 무관하게 일정한 지연과 안정적인 처리량을 유지하여, 대규모 온체인 저장이 요구되는 로봇 환경에 적합한 플랫폼으로 평가되었다.

따라서 저장 계층은 IOTA 기반으로 구성하되, Ethereum은 대규모 데이터 저장이 아닌 액세스 제어·상태 관리·정산 로직·서명 검증과 같은 경량적 스마트 컨트랙트 기능을 담당하는 보조 레이어로 사용하는 것이 기술적·비용적 관점에서 가장 타당하다. 이는 CPS-IoT 기반 대규모 시스템에서 DLT 기반 데이터 관리 구조를 설계할 때 중요한 인사이트를 제공한다.

이 논문은 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2025-08742968, 양자 보안과 블록체인 기반 일반인공지능 사이버 보안 시스템)

참고 문헌

[1] S. Popov, The Tangle, IOTA Foundation, 2018.

[2] P. Ferraro, C. King, and R. Shorten, "Distributed Ledger Technology for IoT: Parasite Chain Attacks", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 1, pp. 349 - 364, 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2868950.

[3] Z. Xiong, S. Feng, D. Niyato, P. Wang, and Z. Han, "Optimal Pricing-Based Edge Computing Resource Management in IoT", IEEE Trans. Industrial Informatics, vol. 17, no. 3, pp. 1743 - 1755, 2021, doi: 10.1109/TII.2020.3001275.

[4] J. Bonneau et al., "Research Perspectives on Bitcoin and Second-Generation Cryptocurrencies", IEEE S&P, pp. 104 - 121, 2015, doi: 10.1109/SP.2015.14.

[5] E. Cambria, S. Poria, R. Bajpai, and B. Schuller, "Neural - Symbolic IOTA for IoT Data Integrity", IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 10, pp. 10091 - 10101, 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2970932.

[6] D. Li and J. Liu, "Storage Overhead Analysis of Smart-Contract Platforms", ACM Distributed Ledger Technologies Workshop, 2020, doi: 10.1145/3366615.3366632.

[7] P. Kostamis, K. Sotiropoulos, and A. Chatzigeorgiou, "Data Management in Ethereum DApps: A Cost and Performance Perspective", Future Generation Computer Systems, vol. 154, pp. 1 - 15, 2024. ScienceDirect

[8] C. Fan, S. Leng, Y. Zhang, and S. Maharjan, "Performance Analysis of the IOTA DAG-Based Distributed Ledger", ACM Proc., 2021. ACM Digital Library

[9] M. Dorigo, A. Pacheco, A. Reina, and V. Strobel, "Blockchain Technology for Mobile Multi-Robot Systems", Nature

Reviews Electrical Engineering, 2024. Giovanni Reina

[10] E. C. Ferrer, "If Blockchain Is the Solution, Robot Security Is the Problem", Frontiers in Blockchain, vol. 6, 2023.

저자 소개



임호정(Hojung Lim)

2004.08 : 시라큐스대학교 컴퓨터과학 박사  
 2004-현재 : 한국전자기술연구원(KETI)  
 지능융합SW센터 책임연구원  
 2020-2023 : 산업통상자원R&D전략기획단  
 전문위원 파견  
 <주관심분야> 인공지능 윤리, 인공지능 보  
 안, 빅데이터 분석, 미래기술 설계 및 예측



신동명(Dong-Myung Shin)

2003.08 : 대전대학교 컴퓨터공학과 박사  
 2001-2006 : 한국정보보호진흥원(KISA)  
 응용기술팀 선임연구원  
 2006-2014 : 한국저작권위원회  
 저작권기술팀 팀장  
 2014-2016 : 한국스마트그리드사업단  
 보안인증팀 팀장  
 2016-현재 : 엘에스웨어(주) 소프트웨어연구소  
 연구개발본부 연구소장/전무이사  
 <주관심분야> 오픈소스 라이선스, 저작권 기술,  
 시스템/네트워크 보안, SW 취약점 분석·감정, 블  
 록체인 기술