

Optimistic Rollup 기반 Layer 2 네트워크의 운영비용 절감을 위한 Rollup 최적화 방안 분석

구민재,^{1*} 이종희^{2†}
^{1,2}고려대학교 (대학원생, 교수)

Analysis of Rollup Optimization Strategies for Reducing Operational Costs in Optimistic Rollup-Based Layer 2 Networks

MinJae Koo,^{1*} Junghee Lee^{2†}
^{1,2}Korea University (Graduate student, Professor)

요약

이더리움의 확장성 문제를 해결하기 위한 중요한 솔루션으로 Optimistic Rollup 기반의 Layer 2 네트워크가 주목받고 있다. 그러나 이러한 네트워크의 운영비용 효율성은 지속 가능성과 확장성에 핵심적인 요소로, 개선이 필요하다. 이에 본 논문에서는 타이탄(Titan) 네트워크를 대상으로 Rollup 주기와 크기 조절을 통한 운영비용 절감 방안을 제안하고 실험적으로 검증하였다. 구체적으로, Transaction Batch와 State Root Batch의 Rollup 주기를 조정하는 실험을 수행하였다. 그 결과, Transaction Batch의 운영비용을 약 3.4%, State Root Batch의 운영비용을 약 64% 절감하여 총 약 36%의 운영비용 절감을 달성할 수 있었다. 이는 주로 State Root Batch의 오버헤드 가스비용 감소에 기인한다. 또한, Rollup 주기의 변경이 서비스 품질과 사용자 경험에 미치는 영향을 고려하여 최적의 균형점을 도출하였다. 본 연구는 Optimistic Rollup 네트워크의 운영 효율성 향상을 위한 실질적인 가이드 라인을 제공하며, 향후 네트워크 설계 및 운영에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

ABSTRACT

Optimistic Rollup-based Layer 2 networks have garnered attention as a significant solution to address Ethereum's scalability issues. However, the efficiency of operational costs acts as a critical factor for the sustainability and scalability of these networks. In this paper, we propose and experimentally validate a method to reduce operational costs by adjusting the rollup intervals and sizes in the Titan network. Specifically, we conducted experiments by modifying the rollup intervals of Transaction Batches and State Root Batches. The experimental results showed that we could reduce the operational costs of Transaction Batches by approximately 3.4% and State Root Batches by about 64%, achieving a total operational cost reduction of around 36%. This reduction was primarily due to the decrease in overhead gas costs associated with State Root Batches. Furthermore, we derived the optimal balance by considering the impact of rollup interval changes on service quality and user experience. This study provides practical guidelines for enhancing the operational efficiency of Optimistic Rollup networks and is expected to be valuable for future network design and operations.

Keywords: Ethereum, Scalability, Layer2, Optimistic Rollup, Optimization

I. 서 론

이더리움의 확장성 문제와 높은 거래 수수료는 네트워크의 대중적 채택에 큰 장애물이 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 Layer 2(L2) 솔루션 중 Optimistic Rollup은 이더리움의 보안성을 유지하면서 거래 처리 속도를 향상시키고 수수료를 절감할 수 있는 유망한 기술로 주목받고 있다 [1].

그러나 현재의 Optimistic Rollup 구현은 운영비용과 성능 최적화 측면에서 개선의 여지가 있다. 예를 들어, Rollup의 주기와 크기와 같은 파라미터가 최적화되지 않을 경우, 운영비용이 증가하고 네트워크 효율성이 저하될 수 있다. 불필요하게 빈번한 Rollup은 가스를 높이고, 과도하게 큰 Rollup은 데이터 처리의 복잡성을 증가시킬 수 있다.

본 연구의 목표는 Optimistic Rollup 기반 L2 네트워크의 운영비용을 절감하기 위한 Rollup 최적화 방안을 제시하는 것이다. 이를 통해 거래 처리 속도와 비용 사이의 균형을 맞추고, 사용자 경험을 개선하며, 이더리움 생태계의 확장성과 효율성을 향상시키고자 한다.

Optimistic Rollup의 최적화를 위해서는 다음과 같은 요소들을 고려해야한다:

- 네트워크 트래픽 패턴 분석: 트랜잭션 발생 빈도와 패턴을 파악하여 최적의 Rollup 주기와 크기를 결정한다.
- 보안성 유지: 챌린지 기간 등의 보안 메커니즘을 유지하면서 최적화를 진행하여 트랜잭션의 무결성과 네트워크의 신뢰성을 보장한다.
- 사용자 경험 향상: 거래 확정 시간과 수수료에 대한 사용자 요구를 고려하여 최적화 방안을 설계한다.

본 연구에서 제안하는 Rollup 최적화 방안의 기대효과는 다음과 같다:

- 운영비용 절감: 가스비 사용을 효율화하여 L2 네트워크의 운영비용을 감소시킨다.
- 네트워크 효율성 향상: 최적의 Rollup 주기와 크기를 통해 거래 처리 속도와 데이터 처리 효율을 향상시킨다.
- 생태계 발전 기여: 최적화된 L2 솔루션은 더 많은 DApp과 서비스의 도입을 촉진하여 이더리움 생태계의 발전에 기여한다.

본 논문의 주요 기여는 다음과 같다:

- Rollup 최적화 방안 제시: Optimistic Rollup 기반 L2 네트워크의 운영비용 절감을 위한 구체적인 Rollup 주기와 크기 조절 방안을 제안한다.
- 데이터 기반 분석 수행: 실제 네트워크 데이터를 기반으로 Rollup의 빈도, 비용, 주기, 크기를 분석하여 최적화의 필요성을 도출한다.
- 효과 검증: 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 최적화 방안의 유효성을 검증하고, 운영비용 절감 및 성능 향상 효과를 입증한다.
- 실용적 적용 가능성 제시: 본 연구의 결과는 실제 Optimistic Rollup 프로젝트에 적용 가능하며, L2 솔루션의 설계와 운영에 유용한 지침을 제공한다.

II. 배경지식

이더리움 블록체인은 2015년 비탈릭 부테린에 의해 개발된 분산형 블록체인으로, 스마트 계약(Smart Contract)과 분산 애플리케이션(DApps)을 실행할 수 있도록 설계되었다. 이더리움은 이더(ETH)라는 암호화폐를 사용하며, 스마트 계약을 통해 자동화된 거래와 조건부 거래를 가능하게 한다. 이더리움 네트워크는 탈중앙화되어 있어 중앙 권한 없이도 안전하고 투명하게 거래가 이루어진다[2].

그러나 이더리움은 높은 보안성과 탈중앙화를 제공하는 반면, 확장성 문제에 직면해 있다. 확장성 문제란 네트워크가 동시에 처리할 수 있는 거래 수에 한계가 있다는 것을 의미한다. 현재 이더리움은 초당 약 10~20건의 거래를 처리할 수 있는데, 이는 대규모 애플리케이션이나 대중적인 사용을 지원하기에는 충분하지 않다. 그 결과 거래 수수료가 상승하고 거래 속도가 느려져 사용자들이 불편을 겪고 있다[3].

이러한 문제를 해결하기 위해 L2(Layer 2) 솔루션이 고안되었다[4]. L2 솔루션은 메인체인 L1(Layer 1)에서 모든 거래를 처리하지 않고, 별도의 L2에서 거래를 처리한 후 그 결과를 요약하여 L1에 기록하는 방식이다. Rollup은 이러한 L2 솔루션 중 하나로, 다수의 거래를 L2에서 하나로 묶어 요약본만을 메인체인에 기록함으로써 거래 처리 속도를 향상시키고 수수료를 절감할 수 있다[5].

Rollup 방식은 크게 두 가지로 나뉜다. Optimistic Rollup과 ZK-Rollup이다[6]. 본 연

구는 Optimistic Rollup에 대한 연구를 진행한다. Optimistic Rollup은 트랜잭션을 처리할 때 별도의 증명을 요구하지 않고 낙관적으로 트랜잭션이 올바르게 처리되었다고 가정하는 방식이다. Rollup 체인에서 처리된 트랜잭션은 일괄 처리되어 메인체인에 기록되며, 이때 특별한 증명 없이 데이터가 기록된다 [7].

그러나 잘못된 트랜잭션이 있을 경우 이를 발견하고 수정할 수 있는 챌린지 기간(Challenge Period)을 도입하여 보안성을 강화한다. 이 기간 동안 네트워크 참여자들은 트랜잭션의 유효성에 이의를 제기할 수 있으며, 이의가 성공적으로 제기되면 해당 트랜잭션은 수정된다. 하지만 챌린지 기간 동안 거래 확정이 지연될 수 있어 사용자 경험에 영향을 줄 수 있다[8].

Optimistic Rollup은 현재까지도 지속적으로 발전하고 있으며, 다양한 프로젝트에서 채택되어 개발되고 있다. 초기에는 몇 개의 대형 Rollup 프로젝트만 존재했지만, 최근에는 이들을 기반으로 한 파생 Rollup들이 등장하여 약 70여 개 이상의 L2 솔루션이 개발되었다[9]. 따라서 L2 솔루션의 최적화에 대한 연구 필요성이 증대되고 있다.

III. 관련 연구

Optimistic Rollup 기술은 이더리움의 확장성 문제를 해결하기 위한 주요 솔루션 중 하나로, 여러 프로젝트에서 활발하게 연구되고 있다. 그중 오프체인랩스(Offchain Labs)는 아비트럼(Arbitrum) 네트워크를 통해 Optimistic Rollup 기술의 선두 주자로 인정받고 있으며, 관련 연구 결과들이 유의미한 성과를 보이고 있다.

오프체인랩스는 효과적인 Rollup 배치 게시 전략(Rollup Batch Posting Strategy)을 통해 네트워크 운영비용과 지연 시간을 감소시키는 연구를 수행하였다. 이들은 배치 처리 시 발생하는 비용과 지연 시간을 동일한 단위로 변환하여 합산함으로써 최적의 배치 처리 시점을 결정하는 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 기존의 즉시 배치 처리 방식에 비해 최대 29%의 비용 절감 효과를 나타내었으며, 이는 트랜잭션이 활발한 이더리움 기반 L2 프로젝트에 효과적으로 적용될 수 있음을 입증하였다[10].

또한, 오프체인랩스는 Rollup 기술에 대한 보안 취약점과 공격 가능성을 탐구하고 이에 대한 대응 방

안을 제시하는 연구도 수행하였다[11]. 이 연구는 Rollup 기술이 직면한 보안 위협을 분석하고, 네트워크의 안전성을 강화하기 위한 프로토콜 개선 방안을 제안함으로써 Rollup 네트워크의 신뢰성을 높이는 데 기여하였다.

그러나 이러한 연구들은 주로 트랜잭션이 활발한 대형 네트워크를 대상으로 하고 있으며, 신생 L2 솔루션이나 트랜잭션 규모가 상대적으로 적은 네트워크에서의 배치 처리 최적화에 관한 연구는 상대적으로 부족하다. 이러한 공백은 비용 효율성과 네트워크 지속 가능성 측면에서 중요한 문제로 대두되고 있다.

본 연구는 이와 같은 연구의 공백을 인식하고, 트랜잭션 규모가 적거나 신생 Optimistic Rollup 기반 네트워크를 위한 효율적인 배치 처리 최적화 방안을 제시하고자 한다. 이를 통해 운영비용을 절감하고, 네트워크의 지속 가능성을 높이며, 이더리움 생태계의 확장성 문제 해결에 기여할 것으로 기대된다.

IV. Rollup 분석

4.1 Optimistic Rollup 구조 분석

Optimistic Rollup은 이더리움의 확장성 문제를 해결하기 위한 Layer 2 솔루션으로, 거래 처리 속도를 향상시키고 수수료를 절감하는 데 목적이 있다. 이 구조는 크게 Transaction Batch와 State Root Batch로 구성된다.

4.1.1 Transaction Batch

Transaction Batch는 L2에서 처리된 다수의 트랜잭션을 모아 L1에 기록한다. 이때 트랜잭션 데이터는 Calldata 형태로 압축되어 저장되며, 이는 이더리움 네트워크에서 데이터 저장을 위한 비교적 저렴한 방법이다. 그러나 Calldata를 사용하기 때문에 Rollup 주기를 늘리더라도 압축된 L2 트랜잭션의 크기를 줄일 수 없으며, 단순히 Rollup 트랜잭션 수를 줄이는 효과만 있기 때문에 유의미한 운영비용 절감은 어렵다.

4.1.2 State Root Batch

State Root Batch는 L2의 상태 변화를 요약한 state root를 L1에 기록한다. 이때 가스비용은 다

음과 같다:

- State Root 당 가스비용: 2,121 Gas
- Batch 당 오버헤드 가스비용: 126,648 Gas

오버헤드 가스비용이 높기 때문에 한 번의 Rollup에서 더 많은 State Root를 포함할수록 Batch 당 가스비용이 상대적으로 절감된다. 따라서 State Root Batch의 효율적인 구성이 운영비용 절감에 중요한 요소로 작용한다.

Transaction Batch와 State Root Batch를 비교해보면 Table 1와 같다.

Table 1은 Transaction Batch와 State Root Batch의 주요 특징을 비교한 것이다. Transaction Batch는 L2에서 처리된 트랜잭션을 Calldata 형태로 압축하여 L1에 기록하며, 이는 트랜잭션 실행 자체에 대한 정보를 포함한다. 반면에 State Root Batch는 트랜잭션 처리 후의 L2 상태 변화를 나타내는 state root를 L1의 Storage에 저장한다.

Table 1. Comparison of between Transaction Batch and State Root Batch

Item	Transaction Batch	State Root Batch
Method	Calldata	Storage
Validation	Operation	Execution
Information	Transaction processed by L2	Information about state changes in L2 after transaction processing
Gas	-	2,121 Gas per State Root Overhead per Batch: 126,648 Gas
Optimization possibilities	Transaction batches are compressed and rolled up as calldata, which limits cost savings	Reduce gas cost per batch by including more state roots

4.2 기존 네트워크 분석

Optimistic Rollup을 구현한 주요 네트워크들의 운영 현황을 분석하여 Rollup 주기와 크기가 운

영비용과 성능에 미치는 영향을 파악하였다.

4.2.1 비용 분석

다음 표는 각 네트워크에서 초기 500 블록과 1,000 블록 기준으로 발생한 수익과 비용, 순이익을 나타낸다.

위의 표를 통해 알 수 있는 결과는 다음과 같다.

- Optimism: 수익과 비용이 균형을 이루며 소폭의 순이익을 보인다.
- Arbitrum: 높은 수익 대비 낮은 비용으로 인해 상당한 순이익을 기록한다.
- Boba: 수익에 비해 비용이 매우 높아 순손실이 발생한다.
- Titan: 수익 대비 비용이 높아 순손실이 나타난다.

위의 분석 결과를 통해 유사한 방식의 프로젝트들 사이에서도 운영비용에 상당한 차이가 발생할 수 있다. 이러한 차이는 주로 Rollup 주기나 크기 등의 요소에 기인한다.

이러한 결과는 네트워크마다 Rollup 주기, 트랜잭션 수, 가스비용 등이 운영비용과 수익성에 큰 영향을 미친다는 것을 보여준다.

Table 2. Four Network Cost Analysis Results Table(Unit: ETH)

Solution	500 Blocks	1,000 Blocks
Optimism	Revenue:0.745 Cost:0.677 Net:+0.068	Revenue:1.252 Cost:0.897 Net:+0.355
Arbitrum	Revenue:2.381 Cost:0.707 Net:+1.674	Revenue:3.462 Cost:1.084 Net:+2.378
Boba	Revenue:0.820 Cost:7.626 Net:-6.806	Revenue:1.784 Cost:10.380 Net:-8.596
Titan	Revenue:0.091 Cost:0.678 Net:-0.587	Revenue:0.197 Cost:1.368 Net:-1.171

4.2.2 Rollup 주기 및 크기 분석

각 네트워크의 Rollup 주기와 Batch 크기를 분석하여 운영 효율성을 평가하였다. 평가 결과는 다음 표와 같다.

Table 3. Four Network Rollup interval and batch size Table

Solution	Tx Batch interval	State Batch interval	Tx Batch per Txn(Estimate)	State Batch per Txn(Estimate)
Optimism	10 min	1 hour	About 150	About 1,000
Arbitrum	6 min	-	About 200	-
Boba	every 1 hour		fluctuating	
Titan	every 10 min		fluctuating	

위의 내용을 통해 각 네트워크가 Rollup 주기와 Batch 크기를 어떻게 조정하여 운영 효율성을 달성하는지 알 수 있다. 특히 Optimism과 Arbitrum은 비교적 짧은 주기로 Batch를 제출하여 트랜잭션 확정 시간을 단축하고자 한다. 반면 Boba와 Titan은 주기가 변동적이며, 이는 네트워크 상태나 운영 전략에 따라 조정되는 것으로 보인다.

Rollup 주기는 각 프로젝트별로 유동적으로 변경이 가능하기 때문에 위의 분석 결과와 현재 운영되는 방식에 차이가 있을 수 있다.

4.3 Rollup 주기와 크기에 따른 Trade-Off

위의 분석 결과를 통해 유사한 방식의 프로젝트들 사이에서도 운영비용에 상당한 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 주로 Rollup 주기나 크기 등의 요소에 기인한다. Table 4는 Rollup 주기에 따른 주요 Trade-Off를 정리한 것이다.

짧은 Rollup 주기를 선택하면 수수료(Fee)가 높아지고, 출금 기간(Withdrawal period)이 짧아지며, 보안성(Security)이 높아진다. 그러나 처리 효율성(Processing efficiency)은 낮아지는 경향이 있다. 이는 빈번한 Rollup으로 인해 오버헤드 가스

Table 4. Trade-offs for Rollup interval

Solution	Short interval	Long Interval
Fee	High	Low
Withdrawal period	Short	Long
Security	High	Low
Processing efficiency	Low	High

비용이 증가하고, 트랜잭션 처리량이 제한되기 때문이다.

반대로 긴 Rollup 주기를 선택하면 수수료가 낮아지고, 출금 기간이 길어지며, 보안성은 낮아질 수 있다. 하지만 처리 효율성은 향상된다. 이는 한 번의 Rollup에 더 많은 트랜잭션을 포함시켜 오버헤드 가스비용을 분산시키기 때문이다.

따라서 Rollup 주기와 크기를 최적화하는 것은 운영비용 절감과 네트워크 성능 향상에 있어 매우 중요하다. 네트워크의 특성과 목표에 따라 적절한 Rollup 주기를 선택함으로써 수수료 부담을 줄이고, 사용자 경험과 보안성을 균형 있게 유지할 수 있다. 이는 프로젝트의 재정적 지속가능성을 높이고, 장기적인 성장을 도모하는 데 필수적인 전략이다.

4.4 분석 결과 요약

- Transaction Batch의 한계: Calldata를 사용하기 때문에 Rollup 주기를 늘려도 트랜잭션 데이터의 크기를 줄일 수 없으며, 트랜잭션 수를 줄이는 것만으로는 운영비용 절감에 한계가 있다.
- State Root Batch의 중요성: 오버헤드 가스비용이 높지만, 한 번의 Rollup에서 더 많은 State Root를 포함하면 Batch 당 가스비용을 절감할 수 있다.
- 네트워크별 차이점: 네트워크마다 Rollup 주기와 크기가 상이하며, 이는 운영비용과 수익성에 큰 영향을 미친다.
- 최적화 필요성: Rollup 주기와 크기에 따른 수수료, 보안성, 처리 효율성 등의 상충 관계를 고려하여 적절한 균형점을 찾는 것이 필수적이다.

V. 최적화 방안 제안

Optimistic Rollup 기반의 Layer 2 네트워크에서 운영비용을 절감하기 위한 방안으로 Rollup 주기 조절과 Rollup 크기 조절을 제안한다. 네트워크의 특성과 트랜잭션 빈도에 따라 적절한 조절을 통해 비용 효율성을 극대화할 수 있다.

5.1 Rollup 주기 조절

Rollup 주기를 조절하는 것은 트랜잭션이 적거나

활발하지 않은 신생 네트워크에서 운영비용을 절감하고 프로젝트의 지속가능성을 유지하는 데 효과적이다.

5.1.1 고려사항

State Root Batch의 Rollup 주기를 조절하는 것은 운영비용 절감에 직접적인 영향을 미친다. Rollup 주기를 늘림으로써 하나의 배치에 더 많은 State Root를 포함할 수 있으며, 이는 오버헤드 가스비용을 여러 State Root로 분산시켜 배치 당 가스비용을 절감하는 효과를 가져온다. 이러한 비용 절감은 프로젝트의 재정적 부담을 완화하여 장기적인 운영과 개발에 긍정적인 영향을 미치며, 프로젝트의 지속가능성을 강화한다.

또한, Transaction Batch의 적절한 Rollup 주기 설정은 운영 데이터의 무결성을 유지하고 네트워크 신뢰성을 향상시키는 데 중요하다. 트랜잭션 데이터를 적절한 주기로 Rollup하여 L1에 기록함으로써 데이터의 무결성을 보장할 수 있다. 이는 정기적인 Transaction Batch의 제출을 통해 사용자들에게 안정적인 서비스를 제공하고, 네트워크에 대한 신뢰도를 높이는 데 기여한다.

5.1.2 주기 조절의 장단점

Rollup 주기 조절에는 여러 장단점이 존재한다. 주기를 늘리면 운영비용 절감, 네트워크 효율성 향상, 프로젝트의 재정적 지속가능성 강화 등의 이점이 있다. 그러나 Rollup 주기 증가로 인해 거래 확정 지연이 발생할 수 있으며, 이는 오류 감지 지연으로 이어져 보안성 저하의 가능성이 존재한다.

위의 내용을 통해 Rollup 주기를 최적화하는 것이 운영비용 절감과 네트워크 성능 향상에 있어 매우 중요함을 알 수 있다. 주기를 늘리면 비용 측면에서 이점이 있으나, 사용자 경험과 보안성에 부정적인 영

Table 5. Pros & Cons of increasing the rollup interval

Pros	Cons
Reduce operational costs & Enhance sustainability	Delayed transaction confirmation
Improve network efficiency	Potential for reduced security

향을 미칠 수 있으므로 균형 잡힌 접근이 필요하다.

5.2 Rollup 크기 조절

Rollup 크기 조절은 트랜잭션이 빈번하게 발생하거나 활발한 대형 네트워크에서 고려해야 할 사항이다. 이는 한 번의 Rollup에 포함되는 트랜잭션의 양을 조절하여 운영 효율성을 향상시킨다.

5.2.1 고려사항

이더리움 블록 사이즈 제한 준수 또한 중요한 고려 사항이다. Rollup의 크기가 이더리움 블록 사이즈를 초과하지 않도록 설계해야 하며, 이더리움 블록의 최대 가스 한도(Gas Limit)를 넘는 Rollup은 블록에 포함될 수 없다(12). 따라서 적절한 크기의 배치를 구성하여 이더리움 블록 내에 효율적으로 포함되도록 해야 한다. 과도한 배치 크기는 블록 포함 지연을 초래할 수 있으며, 이는 거래 확정 지연과 네트워크 혼잡을 유발할 수 있다. 또한, 큰 배치는 가스비가 낮은 시점에 포함되기를 기다려야 할 수 있어 가스비 변동성에 따른 추가적인 리스크를 초래한다.

5.2.2 크기 조절의 장단점

크기 조절에는 장단점이 공존한다. 배치 크기를 늘리면 처리 효율성이 향상되어 배치당 더 많은 트랜잭션을 처리할 수 있고, 오버헤드 비용을 분산시켜 가스비를 절감할 수 있다. 그러나 반대로 블록 포함 지연 위험과 네트워크 혼잡 시 처리 지연 가능성이 증가하는 단점이 있다.

위의 내용을 통해 배치 크기를 최적화하는 것이 운영 비용 절감과 네트워크 성능 향상에 있어 중요함을 알 수 있다. 배치 크기를 크게 설정하면 비용 효율성을 높일 수 있으나, 네트워크 상태와 가스 한도를 고려하여 블록 포함 지연을 최소화할 수 있는 적

Table 6. Pros & Cons of increasing the rollup size

Pros	Cons
Increase processing efficiency	Risk of delayed block inclusion
Spread the cost of overhead	Possible processing delays during network congestion

절한 크기를 선택해야 한다.

5.3 최적화 방안의 제안

네트워크 특성과 트랜잭션 패턴을 고려하여 Rollup 주기와 크기를 조절하는 것은 운영비용 절감과 네트워크 효율성 향상에 필수적이다. 신생 또는 트랜잭션이 적은 네트워크의 경우, 운영비용을 절감하기 위해 State Root Batch의 Rollup 주기를 늘리는 것이 효과적이다. 또한, 데이터 무결성과 사용자 경험을 고려하여 적절한 트랜잭션 배치 주기를 설정해야 한다. 반면에 트랜잭션이 활발한 대형 네트워크에서는 이더리움 블록 사이즈와 네트워크 상황을 고려하여 Rollup의 크기를 조절함으로써 배치 크기를 최적화할 수 있다. 추가로 네트워크 상태에 따라 배치 크기와 주기를 동적으로 조절하는 알고리즘을 도입하여 효율성을 극대화할 수 있다.

5.4 최적화 알고리즘

Rollup과 관련하여 최적화는 env 파일의 환경 설정을 통해 시도할 수 있다. 본 연구에서 참고한 파일은 ops/envs/batch-submitter.env을 통해 최적화를 진행했다.[13]

5.4.1 독립 변수와 종속 변수의 정의

독립 변수는 설정 변경이 가능한 변수이고, 종속 변수는 설정 변경이 불가능한 변수이다.

해당 설정파일의 독립 변수는 Batch 당 트랜잭션의 크기, Batch의 크기, State Root Batch의 개수, Batch 제출 주기, Transaction Batch와 State Root Batch의 분리 운영 여부 등이 있다.

종속 변수는 독립 변수에 의해 결정되는 결과로 운영 비용, 보안 수준, 사용자 경험 등이 있다.

5.4.2 보안과 출금 기간에 대한 고려사항

Optimistic Rollup에서 Fraud Proof 기간과 출금 기간은 보안성과 사용자 경험에 중요한 영향을 미치는 핵심 요소이다. Fraud Proof 기간은 L2에서 부정행위 거래나 상태 변경이 발생했을 때 이를 검증하고 도전할 수 있는 기간이며, 출금 기간은 일반적으로 Fraud Proof 기간과 동일하게 설정되어 사

용자가 자산을 안전하게 출금할 수 있도록 보장한다.

출금 기간과 보안성 사이에는 Trade-Off가 존재한다. 긴 출금 기간은 부정행위를 탐지하고 도전할 수 있는 충분한 시간을 제공하므로 보안성을 향상시킨다. 그러나 사용자가 자산을 출금하는 데 오랜 시간이 소요되어 사용자 경험이 저하될 수 있다. 반대로 짧은 출금 기간은 빠른 자산 출금을 가능하게 하여 사용자 만족도를 높일 수 있지만, 부정행위를 탐지하고 도전할 시간이 부족하여 보안성이 저하될 가능성이 있다.

Optimistic Rollup의 finalization period가 7일로 설정된 것은 이러한 보안성과 사용자 경험 사이의 균형을 고려한 결과이다. 이 기간은 Vitalik Buterin이 제안한 것[14]으로, 이더리움의 밸리데이터들이 L2 State Root 제출 트랜잭션을 극단적으로 검열하는 상황에서도 해당 트랜잭션이 블록에 포함될 수 있는 확률을 높이기 위함이다. 실제로 99.99%의 L1 밸리데이터들이 트랜잭션을 검열하더라도, 7일 이내에 L2 State Root 제출 트랜잭션이 포함될 확률은 약 99.36%에 달한다.

또한, 7일의 기간은 이더리움 네트워크가 51% 공격[15,16]을 받아 대다수의 밸리데이터들이 트랜잭션을 검열하는 강한 검열 상황에서 소셜 하드포크를 진행할 수 있는 시간을 확보하기 위한 것이다. 과거 The DAO 사건[17]에서도 소셜 하드포크를 진행하는 데 약 한 달이 소요되었으며, 7일의 기간은 이러한 대응을 위한 최소한의 버퍼 역할을 한다. 그러나 소셜 하드포크는 쉽지 않으며, 문제 인식부터 포크 진행까지의 과정을 신속하게 처리할 수 있는 도구와 프로토콜 개선이 필요하다.

한편, Rollup 주기와 보안성 사이에도 Trade-Off가 있다. 짧은 Rollup 주기는 상태를 빠르게 L1에 업데이트하여 부정행위를 신속하게 탐지할 수 있지만, 오버헤드 가스비용 증가로 운영 비용이 상승한다. 반대로 긴 롤업 주기는 운영 비용을 절감하지만, 상태 업데이트 지연으로 부정행위 탐지가 지연될 수 있다. 따라서 운영 비용, 보안성, 사용자 경험을 종합적으로 고려하여 적절한 Rollup 주기와 출금 기간을 설정하는 것이 중요하다.

5.4.3 최적화 문제의 수학적 모델링

독립 변수는 다음과 같다.

- Transaction Batch Rollup 주기(I_t):

- Transaction Batch를 L1에 제출하는 간격
- State Root Batch Rollup 주기(I_s): State Root Batch를 L1에 제출하는 간격
- Transaction Batch 크기(B_t): 한 번의 Rollup에 포함되는 Transaction 수
- State Root Batch 크기(B_s): 한 번의 Rollup에 포함되는 State Root 수

중속 변수는 다음과 같다.

- 운영비용(C_{op}): Rollup을 수행하는 데 드는 총 비용
- 보안 수준(S): 네트워크의 보안 정도, 출금 기간 등의 요소에 영향을 받는다.
- 사용자 경험(U): 트랜잭션 처리 속도나 확정성 등 사용자에게 직접적인 영향을 미치는 요소

5.4.4 최적화 목표와 제약 조건

Optimistic Rollup 기반 Layer 2 네트워크에서 운영비용을 최소화하면서도 보안성과 사용자 경험을 일정 수준 이상으로 유지하고자 한다. 이를 위해 Rollup의 주기와 크기를 조절하여 최적화를 진행한다.

본 연구의 주요 목적은 운영비용(C_{op})을 최소화하는 것으로 초점을 맞추어 진행했다.

$$\min_{I_t, I_s, B_t, B_s} C_{op}(I_t, I_s, B_t, B_s)$$

제약 조건으로는 보안 수준 유지와 사용자 경험 유지, Batch 크기 제한, 이더리움 블록 가스 한도 준수가 있다.

- 보안 수준 유지: 보안 수준 S 가 최소 보안 수준 S_{\min} 이상이어야 한다.

$$S(I_t, I_s) \geq S_{\min}$$

- 사용자 경험 유지: 사용자 경험 U 가 최소 수준 U_{\min} 이상이어야 한다.

$$U(I_t) \geq U_{\min}$$

- Batch 크기 제한: 배치 크기 B_t 와 B_s 가 최대 허용 크기 B_{\max} 를 초과하지 않아야 한다.

$$B_t \leq B_{\max}, B_s \leq B_{\max}$$

- 이더리움 블록 가스 한도 준수: 배치를 처리하는 데 필요한 가스 소비량이 이더리움 블록의 최대 가스 한도 Gas_{limit} 를 넘지 않아야 한다.

$$Gas(B_t, B_s) \leq Gas_{limit}$$

운영비용 계산 방법은 Transaction Batch 비용과 State Root Batch 비용의 합으로 다음과 같다.

$$C_{op} = N_t \times (C_{t,overhead} + B_t \times C_{t,per_tx}) + N_s \times (C_{s,overhead} + B_s \times C_{s,per_tx})$$

여기서 사용된 수식의 정의는 다음과 같다.

- $N_t = \frac{T}{I_t}$: 총 Transaction Batch 수(전체 기간 T 동안)
- $N_s = \frac{T}{I_s}$: 총 State Root Batch 수(전체 기간 T 동안)
- $C_{t,overhead}$: Transaction Batch 당 오버헤드 가스비용
- C_{t,per_tx} : Transaction 당 가스비용
- $C_{s,overhead}$: State Root Batch당 오버헤드 가스비용
- C_{s,per_tx} : State Root 당 가스비용

해당 알고리즘을 사용하여 균형을 찾는 것이 중요하다. 운영 비용을 줄이기 위해 Rollup 주기를 무작정 늘리면 보안성과 사용자 경험이 저하될 수 있으므로, 비용과 보안, 사용자 경험 사이의 균형점을 찾는 것이 필수적이다.

또한 반복적인 조정이 필요하다. 한 번의 시도로 최적의 값을 찾기 어렵기 때문에, 여러 번의 시도와 조정을 통해 최적해를 찾아야 한다. 이는 다양한 변수 조합을 시험하고 결과를 분석하는 과정을 포함한다.

VI. 실험

6.1 실험 개요

본 연구에서는 타이탄(Titan) 네트워크에서 Rollup 주기의 변화를 통한 운영비용 절감 효과를 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 실험은 실제 네트워크 환경의 데이터를 기반으로 진행되었다.

타이탄 네트워크에서 Rollup 주기의 변화를 통한 운영비용 절감 효과를 분석하였다. 기존 타이탄 네트워크는 Transaction Batch와 State Root Batch를 모두 10분 간격으로 Rollup하고 있었다. 본 연구에서는 각 batch의 다양한 Rollup 주기를 시뮬레이션하여 최적의 Rollup 주기를 도출하고, 이를 적용하여 운영비용의 변화를 관찰하였다.

6.2 실험 방법

실험은 타이탄 네트워크에서 실제 발생한 트랜잭션 데이터를 기반으로 진행되었다. 총 2,731개의 트랜잭션 데이터를 수집하였으며, Transaction Batch와 State Root Batch의 Rollup 주기에 따른 예상 비용을 분석하였다. Rollup 주기는 10분, 1시간, 6시간, 12시간, 18시간, 24시간 간격으로 설정하였다.

시뮬레이션 절차는 다음과 같다. 먼저, 각 Rollup 주기별로 트랜잭션을 분배하여 Batch를 구성하였다. 그런 다음, 이더리움 네트워크의 가스 가격은 20 Gwei를 기준으로 각 Batch에 대한 예상 가스비용을 계산하였다. 계산된 비용을 바탕으로 각 주기를 기준으로 한 비용 절감률을 산출하였다.

각 주기마다 발생하는 운영비용과 비용 절감 효과를 비교 분석하였다. 이를 통해 Rollup 주기의 변화가 운영비용에 미치는 영향을 평가하였다.

6.3 실험 결과

실험 결과, Rollup 주기를 늘릴수록 운영비용이 감소하는 경향을 보였다. 하지만 Transaction Batch의 경우 운영비용 절감 효과는 미미하였다. 아래는 각 Rollup 주기별 예상 가스비용과 비용 절감률을 정리한 표이다.

Table 7. Estimated gas cost and savings per Transaction Batch rollup interval

Rollup Interval	Total # of batches (L2 txn)	Estimate cost	Reduction percentage
10 min	1,043	2.34 ETH	-
1 hour	590	2.16 ETH	-4.42%
6 hours	347	2.06 ETH	-4.63%
12 hours	287	2.04 ETH	-0.97%
18 hours	235	2.02 ETH	-0.98%
24 hours	206	2.00 ETH	-0.99%

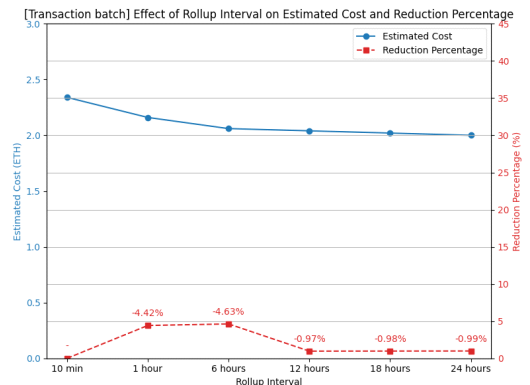


Fig. 1. Effect of Transaction Batch Rollup Interval on Estimated Cost and Reduction Percentage

위의 표와 그림은 Transaction Batch의 제출 주기를 조절함에 따라 예상되는 비용을 계산한 결과이다. Transaction Batch는 운영적인 데이터들을 담당하고 Batch의 오버헤드 비용이 크지 않아 유의미한 비용 절감을 실현하기에는 부족함이 있다.

Rollup 주기가 증가함에 따라 예상 가스비용은 소폭 감소하는 경향을 보였다. 그러나 감소 폭이 크지 않아 운영비용 절감 효과는 제한적이었다. 이는 Transaction Batch의 Batch당 오버헤드 가스비용이 낮기 때문에, 주기를 늘려도 Batch 수 감소에 따른 비용 절감 효과가 미미하기 때문이다.

Table 8. Estimated gas cost and savings per State Root Batch rollup interval

Rollup Interval	Total # of batches (L2 state root)	Estimate cost	Reduction percentage
10 min	1,043	2.74 ETH	-
1 hour	590	1.60 ETH	-41.61%
6 hours	347	0.98 ETH	-38.75%
12 hours	287	0.84 ETH	-14.29%
18 hours	235	0.70 ETH	-16.67%
24 hours	206	0.62 ETH	-11.43%

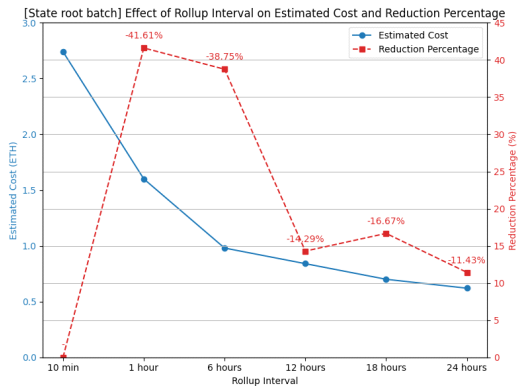


Fig. 2. Effect of State Root Batch Rollup Interval on Estimated Cost and Reduction Percentage

위의 표와 그림은 State Root Batch의 제출 주기를 조절함에 따라 예상되는 비용을 계산한 결과이며, State Root Batch는 Batch의 오버헤드 비용이 크기 때문에 제출 주기 조절을 통해 유의미한 운영 비용 절감이 가능했다.

Rollup 주기가 증가함에 따라 예상 가스비용이 급격히 감소하였다. 특히 10분에서 1시간으로 주기를 늘렸을 때 약 41.61%의 비용 절감 효과를 보였다. 이는 State Root Batch의 Batch당 오버헤드 가스비용이 높아, 주기 증가로 인한 Batch 수 감소가 운영비용 절감에 큰 영향을 미쳤기 때문이다.

6.4 결과 분석

본 연구에서는 Rollup 주기의 조절이 운영비용 절감에 미치는 영향을 분석하였다. Rollup 주기를

증가시킴에 따라 배치 당 포함되는 트랜잭션 수가 많아져 오버헤드 가스비용이 분산되었고, 그 결과 총 운영비용이 감소하였다. 이는 Rollup 주기의 조절이 운영 효율성에 중요한 역할을 함을 나타낸다.

시뮬레이션 결과를 기반으로 최적의 Rollup 주기를 선정하였다. Transaction Batch의 경우, 20분 주기가 비용 절감과 서비스 품질의 균형을 이루는 것으로 판단되어 채택되었다. State Root Batch는 6시간 주기가 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 이는 운영비용 절감에 크게 기여하였다.

Rollup 주기가 지나치게 길면 트랜잭션 처리 지연이 발생하여 사용자 경험에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 서비스 품질을 유지하기 위해 적절한 Rollup 주기를 선택하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 이러한 요소를 고려하여 Rollup 주기를 최적화하였다.

결과적으로, 기존 10분 주기에서 변경된 주기로 조정함으로써 약 36%의 운영비용 절감을 달성하였다. 이는 Rollup 주기의 조절이 운영비용 효율성 향상에 효과적임을 실증적으로 보여준다.

이러한 독립 변수의 최적화를 통해 얻을 수 있는 보안 수준과 사용자 경험은 다음 표와 같이 조절된다.

본 연구를 통해 Rollup 주기를 늘리면서 비용 효율적으로 최소 보안 수준을 유지하는 방안으로는 비용의 절감이 크지 않은 Transaction Batch의 주기를 줄여 운영적 측면에서 보안을 유지하는 방안을 고려할 수 있다.

Table 9. Changes in S and U According to Independent Variable Changes

Independent Variable Change	Security Level (S)	User Experience (U)
Increase Rollup Interval	Low	Low
Decrease Rollup Interval	High	High
Increase Batch Size	Medium	Medium
Decrease Batch Size	Medium	Medium

6.5 실험의 의의 및 한계

본 연구는 Rollup 주기의 조절을 통해 운영비용을 상당히 절감할 수 있음을 실험적으로 입증하였다. 이는 신생 네트워크나 트랜잭션 빈도가 낮은 네트워크에서 적용 가능한 Rollup 주기 최적화 전략을 제시하였다는 점에서 중요한 의의를 가진다. 또한, 운영비용 절감을 통해 프로젝트의 재정적 부담을 완화하고 장기적인 운영 가능성을 높여 프로젝트의 지속 가능성 향상에 기여하였다.

그러나 본 연구에는 몇 가지 한계가 존재한다. 첫째, 실험은 특정 기간 동안의 트랜잭션 데이터에 기반하였으므로 전체 네트워크 상황을 완전히 반영하지 못할 수 있다. 둘째, Rollup 주기 변경에 따른 트랜잭션 처리 지연이 사용자 만족도나 네트워크 사용률 변화에 미치는 영향에 대한 정량적 분석이 부족하다. 셋째, 이더리움 네트워크의 가스비 변동성을 고려하지 않아 실제 운영비용이 달라질 수 있다. 이러한 한계는 향후 연구를 통해 보완될 필요가 있다.

6.6 향후 연구 방향

향후 연구에서는 네트워크 상태와 트랜잭션 빈도에 따라 Rollup 주기를 동적으로 조절하는 실시간 최적화 알고리즘을 개발하여 운영 효율성을 극대화할 수 있을 것이다. 이는 네트워크의 부하 상황에 따라 Rollup 주기를 자동으로 조정함으로써 비용 절감과 서비스 품질을 동시에 향상시킬 수 있다.

또한, Rollup 주기 변경이 사용자 만족도와 네트워크 사용률에 미치는 영향을 심층적으로 연구하여 서비스 품질을 향상시킬 수 있다. 사용자 경험에 대한 정량적 분석을 통해 Rollup 주기의 최적 지점을 보다 정확하게 도출할 수 있을 것이다.

마지막으로, 이더리움 네트워크의 가스비 변동성을 반영한 비용 최적화 방안을 모색하여 더욱 현실적인 운영 전략을 수립할 필요가 있다. 가스비의 실시간 변동에 대응할 수 있는 Rollup 전략을 개발함으로써 운영비용을 추가적으로 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

VII. 결 론

본 연구에서는 Optimistic Rollup 기반 Layer 2 네트워크의 운영비용을 절감하기 위한 Rollup 주

기와 크기의 최적화 방안을 제시하고, Titan 네트워크에서의 실험을 통해 그 효과를 검증하였다. Rollup 주기와 크기의 조절을 통해 운영비용을 최대 36%까지 절감할 수 있음을 확인하였으며, 이는 신생 네트워크나 트랜잭션 빈도가 낮은 네트워크의 지속 가능성을 높이는 데 기여한다. 또한, 트랜잭션 처리 지연과 사용자 경험의 균형을 고려한 최적화를 통해 네트워크의 신뢰성과 효율성을 향상시킬 수 있음을 입증하였다.

본 연구의 결과는 네트워크의 설계와 운영에 직접 적용 가능하며, Rollup 주기 설정 최적화, Rollup 크기 조절 전략 수립, 동적 조절 메커니즘 도입 등을 통해 운영 효율성을 높이고 안정적인 서비스를 제공할 수 있다. 향후 연구에서는 가스비 변동성 반영, 사용자 경험의 정량화, 보안성 평가, 다양한 네트워크에의 적용성 검증 등이 필요하며, 이를 통해 제안된 방안을 더욱 발전시켜 이더리움 생태계의 확장성 문제 해결에 기여할 것으로 기대된다.

References

- [1] AAlchemy, "How do Optimistic Rollups work: The complete guide," <https://www.alchemy.com/overviews/optimistic-rollups>, Oct. 2024.
- [2] V. Buterin, "Ethereum Whitepaper: A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform," Github repository, vol. 1, pp. 22-23, Jan. 2013.
- [3] M. Bez, G. Fornari, and T. Vardanega, "The scalability challenge of Ethereum: An initial quantitative analysis," 2019 IEEE International Conference on Service-Oriented System Engineering, pp. 167-176, Apr. 2019.
- [4] C. Sguanci, R. Spatafora, and A. M. Vergani, "Layer 2 blockchain scaling: a survey," arXiv preprint, arXiv: 2107.10881, Jul. 2021.
- [5] Fidelity Digital Assets, "The Rise of Layer 2 Scaling on Ethereum," <https://www.fidelitydigitalassets.com/research-and-insights/rise-layer-2-scal>

- ing-ethereum, Oct. 2024.
- [6] L. T. Thibault, T. Sarry, and A. S. Hafid, "Blockchain scaling using rollups: A comprehensive survey," arXiv preprint, arXiv:2207.10406, Jul. 2022.
- [7] Ethereum Foundation, "Optimistic Rollups," <https://ethereum.org/en/developers/docs/scaling/optimistic-rollups/>, Oct. 2024.
- [8] L. Donno, "Optimistic and validity rollups: Analysis and comparison between Optimism and StarkNet," arXiv preprint, arXiv:2210.16610, Oct. 2022.
- [9] L2BEAT, "Ethereum Layer 2 scaling summary," <https://l2beat.com/scaling/summary>, Oct. 2024.
- [10] A. Mamagishvili and E. W. Felten, "Efficient rollup batch posting strategy on base layer," arXiv preprint, arXiv:2212.10337, Dec. 2022.
- [11] A. Koegl, Z. Meghji, D. Pellegrino, J. Gorzny, and M. Derka, "Attacks on rollups," In Proceedings of the 4th International Workshop on Distributed Infrastructure for the Common Good, pp. 25 - 30, Jan. 2024.
- [12] G. Wood, "Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger," Ethereum project yellow paper, pp. 1-32, 2014.
- [13] Github, "batch-submitter.env," <https://github.com/mantlenetworkio/mantle/blob/main/ops/envs/batch-submitter.env>, Oct. 2024.
- [14] V. Buterin, "An Incomplete Guide to Rollups," <https://vitalik.eth.limo/general/2021/01/05/rollup.html>, Oct. 2024.
- [15] S. Yan, "Analysis on Blockchain Consensus Mechanism Based on Proof of Work and Proof of Stake," arXiv preprint, arXiv:2209.11545, Sep. 2022.
- [16] S. Mahmood Babur, S. Ur Rehman Khan, J. Yang, Y. -L. Chen, C. Soon Ku and L. Yee Por, "Preventing 51% Attack by Using Consecutive Block Limits in Bitcoin," in IEEE Access, vol. 12, pp. 77852-77869, 2024.
- [17] M. I. Mehar, C. Shier, A. Giambattista, et al., "Understanding a Revolutionary and Flawed Grand Experiment in Blockchain: The DAO Attack," Journal of Cases on Information Technology, vol. 21, no. 1, pp. 19-32, Aug. 2017.

〈저자소개〉



구민재 (MinJae Koo) 정회원
2022년 9월~현재: 고려대학교 정보보호대학원 금융보안학과 석사과정
2023년 9월~현재: 온더 Blockchain Researcher
<관심분야> 블록체인, 정보보호



이중희 (Junghee Lee) 종신회원
2000년 2월: 서울대학교 컴퓨터공학과 공학학사
2003년 2월: 서울대학교 컴퓨터공학과 공학석사
2003년~2008년: 삼성전자, 연구원
2013년 2월: 조지아공과대학교 전자공학과 공학박사
2014년~2019년: University of Texas at San Antonio 교수
2019년~현재: 고려대학교 정보보호대학원 교수
<관심분야> 하드웨어 보안