

블록체인 Layer 2 스케일링 솔루션의 기술 동향 분석

김성빈*, 김도훈**

요약

블록체인 기술이 발전됨에 따라서 확장성의 보장과 향상을 위한 다양한 기술이 연구 및 개발되고 있다. 기존에는 Layer 1에서의 확장성을 주로 연구하는 추세였지만, 현재 Layer 2의 등장으로 인하여, 보다 빠르고 효율적으로 트랜잭션을 처리 및 기록하고, 더 낮은 거래 비용을 제공하는 기술로 발전하였다. 따라서 본 논문에서는 Layer 2 스케일링 솔루션의 최신 동향을 조사하고 현재 기술 개발 사례를 탐색한다. 예를 들어 스테이트 채널, 사이드 체인, 롤업 등을 분석하고, 각 기술의 장단점과 특성을 검토한다. 또한, 이러한 솔루션들이 현재 활용되고 있는 상태와 향후 블록체인 네트워크에서 어떤 역할을 할 수 있는지에 대해 논의한다. 본 논문은 블록체인 네트워크의 확장성과 성능 향상을 위한 접근 방법과 기술적 한계점을 탐색함으로써, 블록체인 기술의 발전 방향과 관련하여 심도있는 이해를 제공한다.

I. 서론

기존 블록체인[1] 기술은 비트코인[2]같은 암호화폐 [3]를 운용하기 위한 플랫폼으로 사용되어왔으며, 이더리움[4]의 등장으로 인하여 전자 계약을 제공하는 형태로 발전하였다. 블록체인은 분산된 노드들이 모두 동일한 원장을 공유하고 있는 분산 원장을 기반으로 구성되며, 이를 통해 무결성과 신뢰성, 보안성 등을 보장할 수 있는 기술로 활용되었다. 또한, 급속도로 발전하는 블록체인 기술은 기존 금융 시스템, 계약, 데이터 관리 등 다양한 영역에서 중요한 역할을 하고 있다. 하지만 블록체인의 본질적인 구조로 인하여 확장성이라는 중요한 문제를 해결해야 한다.

블록체인 기술의 초기 모델에서는 네트워크의 모든 참여자가 각 트랜잭션을 검증하고 기록함으로써 높은 수준의 신뢰성과 보안을 보장했다. 그러나 이 과정에서 발생하는 데이터 처리의 중복성은 트랜잭션 처리 속도를 현저히 감소시키고, 네트워크의 확장성에 한계를 가져왔다. 특히 비트코인과 이더리움과 같은 초기 블록체인 네트워크는 이러한 확장성의 문제로 인해 트랜잭션 처리량과 속도 면에서 제약을 받게 되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 Layer 1 스케일링 솔루션[5]과 Layer 2 스케일링 솔루션[6]이 연구 및 개발되어 왔다.

Layer 1 스케일링은 블록체인 자체의 기본적인 구조를 변경하여 확장성을 개선하는 방법이다. 이에 비해 Layer 2 스케일링 솔루션은 기존의 블록체인 기반 위에 추가적인 계층을 구성하여 본질적으로 블록체인의 확장성을 증가시키기 위한 새로운 방법이다. Layer 2 솔루션은 블록체인의 기본적인 안정성과 탈중앙화를 유지하면서도 트랜잭션의 처리량을 크게 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 이러한 Layer 2 스케일링 솔루션의 기술적 동향을 분석하고 간단한 사례를 기반으로 향후 발전 가능성을 탐구한다. 특히, 스테이트 채널 [7], 사이드 체인[8], 롤업[9] 등의 다양한 Layer 2 스케일링 솔루션을 조사하고, 각 솔루션의 장단점과 기술적 특성을 비교한다.

본 논문의 2장에서는 블록체인 스케일링 솔루션의 기본적인 구조와 등장 배경을 설명하고, 3장에서는 Layer 2 스케일링 솔루션의 구체적인 분석을 수행한다. 4장에서는 현재와 미래에 Layer 2 스케일링 솔루션의 적용과 발전 가능성을 논의하고, 마지막 5장에서는 요약과 향후 연구 방향을 제시한다.

II. 블록체인 스케일링의 기본 이해

블록체인 네트워크는 분산된 노드들이 동일한 원장을 공유하는 분산 원장으로, 블록체인에 기록된 모든

* 경기대학교 컴퓨터과학과 (대학원생, beensk@kyonggi.ac.kr)

** 경기대학교 AI컴퓨터공학부 (교수, karmy01@kyonggi.ac.kr)

트랜잭션을 네트워크 참여자들 사이에서 공유하고 검증한다. 초기 블록체인은 신뢰성과 보안성에 중점을 두었으나, 이로 인해 트랜잭션을 처리하는 속도와 용량이 제한되어 확장성을 보장하지 못하는 문제점이 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 다양한 스케일링 솔루션이 제안되었으며, 크게 Layer 1과 Layer 2 스케일링 솔루션으로 분류할 수 있다.

2.1. Layer 1 스케일링 솔루션의 개요

블록체인 자체에 대한 확장성을 보장하기 위해서 Layer 1 스케일링 솔루션은 블록체인에서 사용하는 프로토콜 자체를 개선하여 네트워크의 처리 능력을 증가시키는 접근 방식이다. 이 솔루션들은 주로 블록체인의 기본 구조와 합의 매커니즘을 변경하여 트랜잭션의 처리 성능을 향상시켜 확장성을 보장하고자 하였다. 예를 들어, 블록체인에 기록된 트랜잭션을 블록으로 생성하는 과정에서 블록 자체의 크기를 늘리거나, 블록 생성시간을 단축시키는 방식을 도입하는 것이다.

대표적인 예시로, Proof-of-Work (PoW)[2]의 성능을 개선하기 위해서 개발된 Proof-of-Stake (PoS)[4]가 있다. PoS는 PoW와 다르게 하드웨어 리소스의 소모량을 감소시켰으며, 트랜잭션의 처리와 블록 생성 속도를 개선하여 확장성을 보장하고자 하였다. 이외에도 합의 매커니즘 자체를 개선하여 블록체인이 지닌 확장성 문제를 해결하고자 하는 다양한 시도들이 존재하였다. 이와 같이 합의 매커니즘 등의 블록체인 자체 프로토콜을 변경하려는 연구가 현재도 진행중이지만, 최근 활발히 진행되는 연구는 Layer 2 스케일링 솔루션이라고 볼 수 있다.

2.2. Layer 2 스케일링 솔루션의 등장 배경

기존 Layer 1 스케일링 솔루션은 블록체인 자체의 프로토콜을 개선하려는 연구였다면, Layer 2 스케일링 솔루션은 기존 블록체인 계층에서 상위 계층을 새롭게 추가하여 추가적인 프로토콜이나 솔루션을 구현하여 확장성 문제를 해결하는 방법이다. 이러한 솔루션은 블록체인의 주요 네트워크 부하를 줄이고, 트랜잭션의 처리 속도를 높이기 위해 설계되었다. Layer 2 스케일링 솔루션의 주요 목적은 Layer 1의 안정성과 보안성을 유지하면서 트랜잭션의 처리량과 효율성을 개선하

는 것이다. 즉, 목적은 Layer 1과 Layer 2 스케일링 솔루션이 동일함을 확인할 수 있다.

하지만 목적을 달성하기 위한 방법에서는 큰 차이점이 존재한다. Layer 2 스케일링 솔루션은 기존 블록체인 계층에서 새로운 계층을 추가하는 방법을 사용하기 때문에 기존 블록체인 계층인 Layer 1을 수정하지 않아도 된다는 특징이 있다. 또한, Layer 2에서 새로운 프로토콜을 통해 다양한 서비스를 제공하기 위한 원천 기술을 새롭게 개발하여 적용할 수 있다는 점에서도 장점이 존재한다.

Ⅲ. Layer 2 스케일링 솔루션의 분석

3장에서는 대표적인 Layer 2 스케일링 솔루션의 개념을 소개하고, 해당 솔루션들을 비교 및 분석한다. 주요 목표는 각 솔루션의 구조적인 특징을 살펴보고 활용 사례를 이해하고, 이러한 솔루션이 블록체인 네트워크의 확장성 향상에 어떻게 기여할 수 있는지를 탐구하는 것이다.

3.1. Layer 2 스케일링 솔루션의 개념 및 유형

Layer 2 스케일링 솔루션은 기본적인 블록체인의 한계를 극복하고 트랜잭션 처리량과 속도를 향상시키기 위해 개발된 다양한 기술들을 포함한다. 이러한 솔루션들은 기존 블록체인 네트워크의 처리량 부담을 경감시키고, 보다 효율적인 트랜잭션 처리를 가능하게 한다. 즉, Layer 2 스케일링 솔루션의 등장은 기존 블록체인의 구조를 변경하지 않으면서도 네트워크의 처리량과 속도를 향상시킬 수 있는 새로운 접근 방식을 제공했다. 이 방식은 기본 레이어(즉 Layer 1) 위에 추가적인 프로세스나 네트워크를 구축함으로써, 블록체인의 주 네트워크 부담을 줄이고 트랜잭션 처리 속도를 개선한다.

예를 들어, 스테이트 채널은 트랜잭션을 블록체인 외부에서 처리하고, 최종 결과만 블록체인에 기록함으로써 처리량을 증가시킨다. 사이드 체인은 주 블록체인과 별도로 운영되며, 롤업 기술은 여러 트랜잭션을 하나의 데이터로 압축하여 블록체인에 기록한다.

3.1.1. 스테이트 채널의 구조 및 특징

스테이트 채널은 블록체인의 주 네트워크와 별개로 운영되는 사설 통신 채널이다. 이 채널은 참여자 간에 개설되며, 참여자들은 채널 내에서 여러 거래를 진행할 수 있다. 거래가 시작될 때, 참여자들은 일정량의 자산을 예치하고, 이후 채널 내에서 발생하는 모든 거래는 블록체인에 기록되지 않고 채널 내에서만 유효하다. 최종적으로 채널이 닫힐 때, 거래의 최종 상태가 블록체인에 기록된다.

이러한 구조를 통해서 스테이트 채널은 주로 실시간 거래 처리가 요구되는 상황에서 활용된다. 예를 들어, 라이트닝 네트워크(Lightning Network)[10]는 비트코인의 스테이트 채널 응용 예로, 실시간 마이크로 페이먼트를 가능하게 한다. 실제 서비스 적용 가능 영역에는 실시간 결제 시스템, 온라인 게임, 디지털 자산의 실시간 거래 등이 있다. 즉, 스테이트 채널은 블록체인 네트워크의 부하를 줄이고, 거래 비용을 절감하며, 거래 속도를 높이는 효과가 있다.

이러한 스테이트 채널의 문제점은 참여자들이 자금을 채널에 미리 예치해야 하기 때문에 대규모 거래에 있어서는 유동성 문제를 야기할 수 있다. 또한 채널을 개설, 유지, 종료하는 과정이 복잡할 수 있으며, 참여자 간의 협력이 필수적이다. 이로 인해서 사용성 저하가 나타날 수 있으며, 채널 내에서 발생하는 거래는 블록체인 네트워크의 보안 매커니즘을 우회하기 때문에 보안 취약점이 발생할 수 있다.

3.1.2. 사이드 체인의 구조 및 특징

사이드 체인은 기존 블록체인 Layer 1과 병행하여 운영되는 독립된 블록체인이다. 블록체인 Layer 1과의 연결은 특정한 ‘브릿지’[11] 매커니즘을 통해 이루어진다. 이 브릿지를 통해 자산이나 데이터가 주 블록체인과 사이드 체인 간에 이동할 수 있다. 사이드 체인은 주 블록체인의 제약으로부터 자유롭기 때문에, 다양한 실험적 기능이나 특화된 애플리케이션을 실행할 수 있다.

사이드 체인은 블록체인 Layer 1의 부담을 줄이면서도 다양한 기능을 탐구하고 구현할 수 있는 공간을 제공한다. 예를 들어, 고속 거래 처리, 개인정보 보호, 특정 애플리케이션에 최적화된 스마트 컨트랙트 개발

등에 활용될 수 있다. 이를 통해 블록체인 생태계의 다양성과 유연성을 향상시킬 수 있다. 폴리곤(Polygon)[12]은 사이드 체인의 대표적인 예로, 이더리움 네트워크의 확장성 문제를 해결하는 데 기여하고 있다.

그러나 사이드 체인은 블록체인 Layer 1만큼의 보안을 갖추지 못할 수도 있다. 사이드 체인의 보안이 약화됨에 따라서 연결된 Layer 1에도 영향을 미칠 가능성이 높다. 또한 사이드 체인과 블록체인 Layer 1 간의 브릿지는 취약점이 될 수 있으며, 이를 통한 공격이 발생하는 것을 막기 위한 연구도 활발하게 진행 중이다. 마지막으로 다양한 사이드 체인 간의 통합 및 상호 운용성을 확보하는 것은 사이드 체인의 적용 가능성을 향상시키기 위한 바탕이 될 것이다.

3.1.3. 롤업 기술의 구조 및 특징

롤업 기술은 여러 개의 트랜잭션을 하나의 데이터 블록으로 묶어(롤업) 처리한 후, 이를 블록체인에 기록한다. 이 기술은 주로 두 가지 유형으로 나뉜다: Optimistic-Rollup(옵티미스틱 롤업)[13]과 ZK-Rollup(영지식 증명 롤업)[14]. 옵티미스틱 롤업은 트랜잭션의 유효성을 가정하고 나중에 이를 검증하는 반면, 영지식 증명 롤업은 수학적 증명을 사용하여 트랜잭션의 유효성을 즉시 검증한다.

롤업 기술은 특히 대규모 트랜잭션 처리가 필요한 블록체인 네트워크에서 중요하다. 이 기술은 블록체인의 처리 속도를 높이고, 트랜잭션 비용을 줄이며, 확장성을 개선하는 데 기여한다. 롤업은 이더리움과 같은 대형 블록체인 네트워크에서의 확장성 문제 해결에 핵심적인 역할을 하고 있다.

롤업은 기술적으로 복잡하며, 이를 구현하고 유지하기 위해서는 상당한 노력과 전문 지식이 요구된다. 특히 옵티미스틱 롤업은 데이터 가용성 문제가 발생할 수 있으며, 이는 블록체인 네트워크 자체의 효율성을 감소시킬 수 있다. 추가적으로 옵티미스틱 롤업의 경우에는 블록체인에 기록되기 전에 검증과정을 거치게 되는데, 이 과정에서 지연이 발생할 수 있다. 영지식 증명 롤업의 경우에는 복잡한 수학적 증명과 관련된 실행 환경에 대한 신뢰가 필요하며, 옵티미스틱 롤업은 행위에 따른 보안 리스크가 존재한다는 문제점이 있다.

3.2. Layer 2 스케일링 솔루션 간의 비교 및 분석

3.1에서 설명한 각 Layer 2 스케일링 솔루션의 개념들을 바탕으로 비교 및 분석을 수행하면 표 1과 같다. 각 솔루션의 특징을 장점과 단점으로 분류하고, 적절한 활용 사례를 예시로 설명하여 명확하게 요약한다.

스테이트 채널은 빠른 트랜잭션 처리와 낮은 비용을 제공하는 것이 큰 장점이다. 이는 실시간 거래가 필요한 온라인 게임이나 디지털 자산 거래 같은 분야에서 유용하게 활용될 수 있다. 그러나 유동성 문제와 복잡한 채널 관리, 보안 취약점은 이 솔루션의 주요 단점으로 작용한다.

사이드 체인은 주 블록체인의 부담을 감소시키고, 특화된 기능을 구현할 수 있는 능력을 가진다. 이는 고속 거래 처리나 개인정보 보호, 특정 애플리케이션에 최적화된 스마트 컨트랙트 개발 등에 적합하다. 하지만 보안 문제, 브릿지 취약성, 상호 운용성 문제 등이 단점으로 지적된다.

롤업 기술은 트랜잭션 처리 속도와 확장성을 개선하고 데이터 처리량을 효율적으로 관리하는 데 탁월하다. 이는 특히 대규모 트랜잭션 처리가 요구되는 이더리움 네트워크와 같은 시스템에서 중요한 역할을 한다. 그러나 기술적 복잡성, 데이터 가용성 문제, 검증 지연과 같은 단점도 존재한다.

이러한 비교 및 분석 결과는 주요 특징을 기반으로 설명한 것이기 때문에, 추가적인 장단점과 활용 사례가 존재할 수 있다. 본 논문의 목적은 현재 Layer 2 스케일링 솔루션의 특징을 설명하여 향후 발전 가능성을 토의하는 것이다.

(표 1) Layer 2 스케일링 솔루션의 비교 및 분석 표

Layer 2 솔루션	장점	단점	활용 사례 예시
스테이트 채널	빠른 트랜잭션 처리 낮은 처리 비용 실시간 거래 가능	유동성 문제 복잡한 채널 관리 보안 취약점	실시간 결제 시스템 온라인 게임 디지털 자산 거래
사이드 체인	주 블록체인의 부담 감소 특화된 기능 구현 가능 빠른 트랜잭션 처리	보안 문제 브릿지 취약성 상호 운용성 문제	고속 거래 처리 개인정보 보호 특정 애플리케이션 최적화
롤업	트랜잭션 처리 속도 및 확장성 개선 데이터 처리량 관리	기술적 복잡성 데이터 가용성 문제 검증 처리 지연	대규모 트랜잭션 처리 이더리움 네트워크 확장성 개선

IV. 현재와 미래의 활용 사례

4장에서는 현재 각 Layer 2 스케일링 솔루션이 활용되는 사례를 분석한다. 표 1에서 제시한 각 활용 사례의 예시를 참고하여 실제로 어떠한 서비스가 제공되는지를 기술적인 방법과 제공하는 장점을 기준으로 설명한다. 또한 향후 발전 가능성과 방향에 대해서 토의하여 앞으로의 Layer 2 스케일링 솔루션이 시사하는 점을 설명한다.

4.1. Layer 2 스케일링 솔루션의 현재 적용 사례

4.1.1. 스테이트 채널: 라이트닝 네트워크

라이트닝 네트워크는 블록체인 Layer 1에서 발생할 수 있는 수많은 트랜잭션들을 별도의 채널로 이동시킨다. 사용자들은 서로 간에 개인적인 지불 채널을 만들고, 이 채널 안에서 여러 거래를 진행한 후 최종 상태를 블록체인에 기록한다. 거래가 끝난 후에 최종 잔액만이 주 블록체인에 기록되며, 이 과정은 트랜잭션의 개수에 상관없이 블록체인에 단 한 번만 기록되어 처리 비용을 크게 줄인다. 이렇게 하면 각 거래가 블록체인에 직접 기록되는 것보다 훨씬 빠르고 효율적으로 처리된다. 따라서 이 방식은 특히 마이크로페이먼트에 유용하며, 사용자들은 낮은 수수료와 빠른 거래 속도를 경험할 수 있다. 예를 들어, 사용자는 커피를 구매할 때 매우 낮은 수수료로 거래를 처리할 수 있다. 이는 특히 마이크로페이먼트가 필요한 온라인 플랫폼, 스트리밍 서비스, 게임 등에서 유용하게 적용되고 있다.

4.1.2. 사이드 체인: 폴리곤 (Matic)

폴리곤은 이더리움 블록체인과 병렬로 작동하는 사이드 체인이다. 이더리움과의 자산 교환은 특별한 브릿지를 통해 이루어진다. 폴리곤은 자체적인 블록 생성 알고리즘을 사용하여 더 빠른 트랜잭션 처리와 더 낮은 수수료를 제공한다. 또한 사용자는 이더리움의 주 네트워크와 폴리곤 사이에서 자산을 이동할 수 있다. 디앱(dApp) 개발자들은 폴리곤을 사용하여 이더리움의 확장성 문제를 우회하고, 더 효율적인 사용자 경험을 제공할 수 있다. 예를 들어, 디센트럴랜드 (Decentraland)[15]와 같은 대규모 가상 부동산 플랫폼은 폴리곤을 사용하여 빠르고 효율적인 거래를 가능하게 한다. 이는 특히 NFT(Non-Fungible Token)[16] 거래, 디앱 개발 등에서 큰 이점을 제공한다.

4.1.3. 롤업: 옵티미스틱 롤업과 영지식 증명 롤업

옵티미스틱 롤업은 트랜잭션을 일시적으로 가정하고 처리한 후, 나중에 오류가 없음을 확인하는 방식으로 작동한다. 반면, ZK 롤업은 수학적 증명을 사용하여 트랜잭션의 유효성을 즉각적으로 검증한다. 이 두 방식 모두 트랜잭션을 묶어서 주 블록체인에 제출함으로써 처리 효율을 높인다. 이 기술들은 이더리움 네트워크의 트랜잭션 처리량을 증가시키고, 거래 수수료를 감소시키며, 전반적인 네트워크 효율성을 향상시킨다. 이는 특히 탈중앙화 금융(DeFi)[17] 및 대규모 디앱의 확장성 문제에 대한 해결책으로 주목받고 있다. 예를 들어, Uniswap과 같은 DeFi 플랫폼은 이들 롤업 기술을 통해 더 많은 사용자와 거래를 처리할 수 있게 되었다. 이는 DeFi 애플리케이션의 확장성과 접근성을 크게 향상시키고 있다.

4.2. 향후 발전 가능성 및 시사점

4.2.1. 스테이트 채널

스테이트 채널은 IoT(Internet of Things)[18] 환경과 같은 실시간 데이터 처리가 중요한 분야에서 크게 발전할 가능성이 있다. 예를 들어, 스마트 홈, 스마트 시티, 자율 주행 차량 등에서 소규모, 실시간 거래가 필요한 경우 스테이트 채널이 중요한 역할을 할 수 있

다. 스테이트 채널은 블록체인 기술을 일상생활에 더욱 밀접하게 통합하는 데 기여할 수 있다. 예를 들어, 자동차가 주차비를 자동으로 결제하거나, 가전제품이 에너지 사용을 최적화하기 위해 실시간으로 거래하는 등의 시나리오가 가능해진다.

4.2.2. 사이드 체인

사이드 체인은 NFT, 게임, 가상 현실과 같은 분야에서 더욱 확장될 수 있다. 특히, 고유한 특성을 가진 애플리케이션을 위한 맞춤형 블록체인 환경을 제공함으로써 새로운 형태의 디지털 상호작용과 경제를 창출할 수 있다. 사이드 체인은 블록체인의 다양성과 유연성을 증대시키며, 새로운 형태의 디지털 자산과 서비스를 가능하게 한다. 이는 디지털 경제의 발전에 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

4.2.3. 롤업

롤업 기술은 대규모 데이터를 처리해야 하는 금융, 물류, 데이터 분석 등의 분야에서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 이 기술의 발전은 블록체인 네트워크의 처리량과 효율성을 대폭 향상시킬 수 있다. 롤업은 블록체인의 메인스트림 채택을 가속화하며, 대규모 기업 및 조직에서의 블록체인 적용을 용이하게 한다. 예를 들어, 복잡한 금융 거래, 대용량의 데이터 관리, 공급망 최적화 등에서 블록체인의 효율적인 활용이 가능해질 것이다.

V. 결론

본 논문에서는 블록체인 기술의 확장성 문제를 해결하기 위한 Layer 1과 Layer 2 스케일링 솔루션들에 대해 살펴보았다. Layer 1 스케일링 솔루션은 기존 블록체인의 프로토콜을 변경하여 확장성을 개선하고자 하는 방법이며, Layer 2 스케일링 솔루션은 별도의 계층을 구성하여 확장성을 개선하고자 하였다. Layer 2 스케일링 솔루션에는 스테이트 채널, 사이드 체인, 롤업 등의 다양한 방법들이 존재하며, 각각 독특한 방식으로 블록체인 네트워크의 성능과 확장성을 향상시키고 있다.

스테이트 채널은 실시간 거래 처리와 낮은 비용의 이점을 제공하며, IoT 기기와 같은 분야에서의 활용이

기대된다. 사이드 체인은 주 블록체인의 부담을 줄이면서 다양한 실험적 기능과 특화된 애플리케이션 개발에 유용하다. 롤업 기술은 특히 대규모 네트워크에서 트랜잭션 처리량과 효율성을 크게 향상시키는 역할을 하고 있다. 하지만 각 스케일링 솔루션에는 현재까지 지속적으로 연구되고 있는 문제점도 존재하기 때문에 앞으로의 향후 기술에 주목하는 것이 중요하다. 또한, 기존의 암호학이나 보안 관련 기술들을 블록체인에 적용하여 문제점을 해결하고 확장성을 개선하고자 하는 시도들이 계속해서 이루어지고 있는 현황이다.

이러한 Layer 2 솔루션들은 블록체인 기술의 주요 발전 방향을 제시하며, 다양한 분야에서 혁신적인 변화를 가져오고 있다. 향후 이 기술들은 블록체인의 적용 범위를 넓히고, 다양한 산업 분야에서의 블록체인 기반의 서비스와 애플리케이션 개발을 촉진할 것으로 기대된다. 이를 통해 블록체인 기술은 단순한 암호화폐에서 더욱 복잡하고 다양한 실용적 적용으로 나아가고 있으며, 이는 블록체인 기술의 미래에 대한 깊은 이해와 더욱 풍부한 활용 가능성을 제시한다.

참 고 문 헌

- [1] Zheng, Zibin, et al. "Blockchain challenges and opportunities: A survey." *International journal of web and grid services* 14.4 (2018): 352-375.
- [2] Nakamoto, Satoshi. "Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system." *Decentralized business review* (2008).
- [3] Mukhopadhyay, Ujan, et al. "A brief survey of cryptocurrency systems." 2016 14th annual conference on privacy, security and trust (PST). IEEE, 2016.
- [4] Wood, Gavin. "Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger." *Ethereum project yellow paper* 151.2014 (2014): 1-32.
- [5] Kaur, Gagandeep, and Charu Gandhi. "Scalability in blockchain: Challenges and solutions." *Handbook of Research on Blockchain Technology*. Academic Press, 2020. 373-406.
- [6] Zhou, Qiheng, et al. "Solutions to scalability of blockchain: A survey." *Ieee Access* 8 (2020): 16440-16455.
- [7] Dziembowski, Stefan, Sebastian Faust, and Kristina Hostáková. "General state channel networks." *Proceedings of the 2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. 2018.
- [8] Singh, Amritraj, et al. "Sidechain technologies in blockchain networks: An examination and state-of-the-art review." *Journal of Network and Computer Applications* 149 (2020): 102471.
- [9] Thibault, Louis Tremblay, Tom Sarry, and Abdelhakim Senhaji Hafid. "Blockchain scaling using rollups: A comprehensive survey." *IEEE Access* (2022).
- [10] Poon, Joseph, and Thaddeus Dryja. "The bitcoin lightning network: Scalable off-chain instant payments." (2016): 1-59.
- [11] Stone, Drew. "Trustless, privacy-preserving blockchain bridges." *arXiv preprint arXiv:2102.04660* (2021).
- [12] Rana, Sumit K., et al. "Decentralized model to protect digital evidence via smart contracts using layer 2 polygon blockchain." *IEEE Access* (2023).
- [13] Pandey, Anova Ajay, et al. "Maintaining scalability in blockchain." *International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [14] Lavour, Thomas, Jérôme Lacan, and Caroline PC Chanel. "Enabling blockchain services for IoE with Zk-Rollups." *Sensors* 22.17 (2022): 6493.
- [15] Goanta, Catalina. "Selling LAND in Decentraland: The regime of non-fungible tokens on the Ethereum blockchain under the digital content directive." *Disruptive technology, legal innovation, and the future of real estate* (2020): 139-154.
- [16] Wang, Qin, et al. "Non-fungible token (NFT): Overview, evaluation, opportunities and challenges." *arXiv preprint arXiv:2105.07447* (2021).
- [17] Harvey, Campbell R., Ashwin Ramachandran, and Joey Santoro. *DeFi and the Future of Finance*.

John Wiley & Sons, 2021.

- [18] Madakam, Somayya, et al. "Internet of Things (IoT): A literature review." *Journal of Computer and Communications* 3.05 (2015): 164.

<저자 소개>

김 성 빈 (Sungbeen Kim)



2022년 2월: 경기대학교 컴퓨터공학부 공학사
 2022년 2월~현재: 경기대학교 컴퓨터과학과 석사과정
 <관심분야> 블록체인, 정보보호, 분산 네트워크, 암호화폐

김 도 훈 (Dohoon Kim)



2005년: 고려대학교 수학과/컴퓨터학과 (이중전공) 공학사
 2007년: 고려대학교 컴퓨터학과(전산학) 공학석사
 2012년: 고려대학교 컴퓨터·전파통신학과 (컴퓨터학) 공학박사
 2012년~2018년: 국방과학연구소 선임연구원
 2018년~현재: 경기대학교 AI컴퓨터공학부 컴퓨터공학전공 교수
 <관심분야> 사이버보안, 블록체인, 악성코드분석

