# Project PAI의 예상 해시 기능과 하이브리드 합의

저자:

Mark Harvilla, PhD<sup>1</sup>
Jincheng Du<sup>2</sup>

동료 평가가:
Thomas Vidick,
PhD³
Bhaskar Krishnamachari, PhD⁴
Muhammad Naveed, PhD⁵

# 개요

PAI코인의 작업증명 (PoW) 합의는 비트코인 코어에서 사용하는 것과 동일한 합의인 SHA-256 해싱 프로토콜을 사용합니다. 호환성이 뛰어난 고전적인 비트코인식의 채굴은, PAI 코인 채굴에 대한 진입장벽이 낮으므로 PAI 코인 네트워크를 소위 51 % 공격에 취약하게 만듭니다. 이러한 위험을 줄이기 위해 본 백서에서는 하이브리드 작업증명과 지분증명의 합의를 제안하고 PAI 코인 네트워크의고유한 취약성에 대해 그러한 합의가 어떻게 성공적으로 대응하는지에 대한 상세한 기술적 분석을 제공합니다. 또한, 독립적으로 사용되거나 하이브리드 모델의 맥락에서의 사용되었을 때의 장단점을 포함한, 블록체인 기반 작업증명과 지분증명 합의에 대한 자세한 기술 개요가 제공됩니다. 하이브리드기반의 PAI 코인 네트워크 공격에 대한 경제적 분석이 제시되고, PAI 코인 합의의 향후 개발을 위한 최종 권장 사항이 제시됩니다.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>ObEN, Inc.의 수석 엔지니어

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>ObEN, Inc.의 블록체인 연구원

<sup>3</sup> 캘리포니아 공과대학 컴퓨터 공과 및 수학 교수

<sup>4</sup>캘리포니아 남가주대학 전산 및 수학 교수

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>A캘리포니아 남가주대학 컴퓨터 공과 대학 조교수

# 감사의 말

이 보고서는 캘리포니아 공과 대학 (California Institute of Technology)의 컴퓨터 공학 및 수학 공학 교수인 Thomas Vidick과 캘리포니아 남가주 대학교 (University of Southern California)의 컴퓨터 과학 조교수 Muhammad Naveed가 검토 및 승인을 한 것입니다. 이 보고서는 남가주 대학교의 전기 공학 교수인 Bhaskar Krishnamachari 의 제안을 반영합니다. 저자는 이 보고서에 기고한 P19 Inc.의 Ryan Straus 사장에게도 감사를 표합니다.

추가 기여자

ObEN, Inc.의 블록체인 연구원, Dan Fang 박사, LA Blockchain Lab의 공동창업자, 최고운영책임자 Eman Safadi

# 용어 해설

- PoW *Proof of Work*; 블록을 채굴할 가능성이 채굴자의 작업에 의존하여 체결되는 합의 체계
- PoS *Proof of Stake*; 블록을 채굴 할 확률이, 보유하고 있는 암호화폐의 양에 의해 결정되는 합의 방식
- ASIC Application-Specific Integrated Circuit; 특정한 용도를 위해 별도로 설계된 집적회로, 예를 들면 암호화폐 채굴이 있음. 특성화된 디자인은 퍼포먼스를 향상시킴.
- DCR Decred: 하이브리드 PoW/PoS 합의 체계를 사용한 암호화폐
- KYC Know Your Customer, 잠재적인 고객의 신분과 비즈니스의 의도를 검증하는 과정
- Dapps Decentralized Applications; 단일 지점에서의 장애를 피하기 위해 설계된 신뢰되지 않은 프로토콜을 사용하는 탈중앙화 네트워크에서 많은 사용자가 실행하는 애플리케이션 [2].
- UTXO Unspent Transaction Output(소비되지 않은 거래의 출력 값); 사용되지 않은 블록체인 거래의 출력. 따라서 새로운 거래의 입력으로서 사용이 가능함. [25].
- P2P Peer-to-peer; 피어(동료)간의 작업 또는 작업 부하를 나누는 분산형 애플리케이션 아키텍처. 피어(동료)는 애플리케이션 안에서 동등한 특권을 가지며, 동등한 참여권을 부여받습니다.[3].
- DDoS Distributed Denial-of-Service; 여러 소스에서 접속 통신량 (트래픽)을 한꺼번에 일으켜 대상 시스템 또는 네트워크의 서비스가 중단되는 공격.

# 목록

소개	5
섹션 1 — 실용적인 합의 메커니즘	6
1.1 작업 증명 Proof of Work (PoW)	6
1.1.1 장점	6
1.1.2 공격 벡터와 취약점	7
주요 공격	7
예시	7
Strip Mining	8
Sybil 공격	8
1.2 지분 증명Proof of Stake (PoS)	8
1.2.1 장점	8
1.2.2 공격 벡터와 취약점	9
Nothing-at-Stake Attack	9
1.3 하이브리드 Proof of Work & Proof of Stake (PoW/PoS)	10
1.3.1 개요	10
스테이킹(Staking) 메커니즘 예시	11
1.3.2 기술적 파라미터	12
1.3.3 공격 벡터와 취약점	12
주요 공격	12
Nothing-at-Stake Attack	14
Stakepool	14
1.3.4 다른 이익	15
Section 2 — 작업 증명의 해시 함수	15
2.1 ASIC 저항(Resistance)	16
Section 3 — 권장 사항 & 향후 작업	17
3.1 전반적인 권장 사항	17
3.2 향후 작업	17
부록 A — 주요 공격 수학적 증명법	18
부록 B — 주요 공격 비용 분석	19
부록 C — 암호화폐 해시 알고리즘	22
참고 문헌	23

## 소개

PAI 코인 [4]은 비트코인 코어의 코드 포크 (fork)로 생성된 UTXO 기반의 작업 증명 Proof-of-Work (PoW) 기반 암호화폐입니다. PAI 코인은 분산된 데이터 공유와 같은 추가 기능을 비트코인에 추가해 도입합니다 [5]. PAI 코인 프로토콜을 사용하는 응용 프로그램에는 ObEN Inc.의 개인인공지능( Personal AI) [6]에 대한 인증이 포함됩니다. PAI 코인은 PAI 생태계의 거래 매체 역할도 합니다.

비트코인 코어의 코드 포크인 PAI 코인의 작업 증명 Proof-of-Work 일치 메커니즘은 이중 SHA-256 해싱 프로토콜을 사용합니다. 따라서 PAI 코인은 비트코인 스타일의 채굴과 완벽하게 호환되며 실제로 비트코인을 채굴할 수 있는 채굴 소프트웨어 또는 장치로 PAI 코인을 채굴 할수도 있습니다. 존재하는 비트코인 호환 해시 전력은 상당량이기 때문에 (예 : 노후화로 인해 가동되지 않는 상태임) [7] -PAI 코인은 현재 상태에서 51 %의 공격 및 스트립 마이닝(Strip mining)과 같은 잠재적으로 치명적인 공격 벡터에 취약합니다.

Project PAI에 기여하고 있는 개발자는, 항상 이 상황을 인식하고 있습니다. 잠정적인 해결책으로, PAI코인은 현재 프로토콜 수준에서 코인 베이스 주소 화이트 리스트 (coinbase address whitelist)를 구현합니다. 즉, 채굴자가 **CheckBlock()**에서 수행한 표준 블록 유효성 검증 이외에 새 블록을 제출하면 지정된 코인베이스 지불 주소가 채굴 주소 화이트 리스트[9]에 있는 것과 일치해야 합니다. 이렇게함으로써, 화이트 리스트에 등록된 주소에 권한이 없는 채굴자가 블록 보상을 얻지 못하도록 차단하며, 위에서 언급한 공격 벡터를 소멸시킬 수 있습니다.

Project PAI에 기여하고 있는 개발자들은 Project PAI가 프로젝트의 현재 요구 사항을 충족시키기위해 발전하였고 그래서 [i]f"대안"이 상당히 유익한 것으로 실험적으로 입증되어 초기 기본 기술에 더해 적용될 것이라고 예측하였습니다. [4] 보다 더 광범위하고 공공 채굴에 대한 요구에 부응하여, Project PAI는 코인 베이스 주소의 화이트 리스트를 안전하게 제거하기 위한 솔루션을 식별하기 위해 노력해왔습니다. 이러한 목적을 위하여, 현재 분야의 기술 진보에 부분적으로 유래된, 하이브리드 작업 증명(Proof-of-Work), 지분 증명 (Proof-of-Stake) 합의 프로토콜을 제안합니다.

이 제안을 채택하면 공개 및 접근 가능한 채굴, 더 큰 지방 분권화, 코인 스테이킹을 통한 에너지 효율성 향상, 코인 유통 확대,보다 안전한 P2P 네트워크 및 보다 견고한 생태계 등 다양한 개선이 이루어질 것입니다.

이 보고서의 나머지 부분은 다음과 같이 구성되어 있습니다. 대중적인 합의 메커니즘의 이점과 단점은 섹션 1 에 요약되어 있습니다. 제안된 하이브리드 합의 메커니즘에 대한 신중한 검토는 1.3 에 나와 있습니다. 작업 증명(Proof of Work) 알고리즘의 중추인 후보 해시 함수는 2 에서 검토합니다. 마지막으로 3 에서는 합의 변경에 대한 전반적인 권장 사항과 통합 및 배포 계획에 대해 설명합니다.

# 섹션 1 — 실용적인 합의 메커니즘

## 1.1 작업 증명 Proof of Work (PoW)

표준적이고 가장 공통적인 합의 메커니즘은 작업 증명 (Proof of Work, PoW)입니다.

작업증명(PoW)에서 유효한 블록을 만들려면 채굴자가 계산하기가 어렵지만 검증하기 쉬운 수학 문제에 답을 제공하여 작업을 말 그대로 증명하는 것입니다. 일반적으로 주어진 채굴자가 새로운 블록을 블록체인에 추가할 확률은 접속할 수 있는 계산 능력의 양에 비례합니다.

작업증명(PoW)의 단점 중 하나는 점점 더 많은 물리적 자원 사용 / 비용이 증가하고 시간이 지남에 따라 점점 더 중앙 집중화된 해시 전력으로 인해 사용자 참여가 감소하는 것입니다.

#### 1.1.1 장점

#### 잘 알려진 작업 증명(PoW)의 장점으로는 [10]:

- 디도스(DDoS) 공격에 대한 저항력
  - 작업 증명에는 상당한 노력이 필요하므로 작업 증명은 참가자의 행동에 일정한 제한을 가합니다. 효과적인 공격은 대개 엄청난 계산 자원을 필요로 하므로 경제적인 측면에서 방지할 수가 있습니다.
- 코인 홀딩에 있어서 낮은 영향력
  - 위에서도 언급한 것처럼, 새로운 블록을 형성하는 것은 얼마나 많은 지분을 보유하고 있는 지와는 관계없이 전산 자원에만 의존합니다. 따라서 대량의 코인을 보유한 사람은 전체 네트워크에 대한 결정권을 직접 부여 받지 않습니다.

#### 1.1.2 공격 벡터와 취약점

#### 대다수 공격

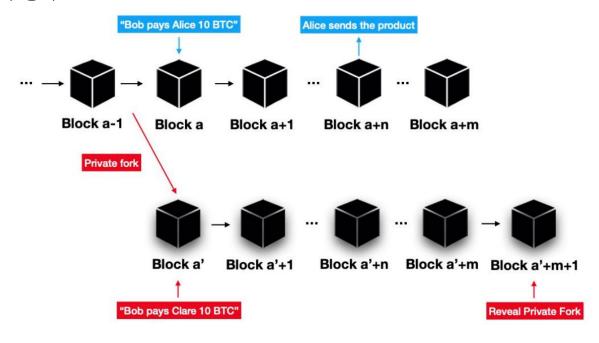


그림 1. 이중 지불 공격 (Double Spend Attack)

네트워크 참여자가 네트워크 해시 비율의 50 % 이상을 제어하면 다수 공격 (51 % 공격)이 발생할수 있습니다. 다른 모든 네트워크 참여자보다 더 많은 해시 전력을 결합함으로써 공격자는 평균적으로 나머지 네트워크보다 블록을 빠르게 생성하고 검증 할 수 있습니다. 이것은 가장 긴체인 규칙(the longest chain rule) [24]과 함께 공격자가 불법적인 거래를 블록에 주입한 다음, 이를 검증 할 수 있게 합니다. 대다수 공격의 달성 가능한 성과 중 하나는 아래에 예시로 열거된 이중 지불 공격입니다.

#### 예시

그림 1에서 나타내는 것처럼, 공격자 Bob은 판매자 Alice에게 거래를 제출하여 상품을 구매합니다. 이 거래는 블록 a에 포함됩니다. a는 정수 인덱스입니다. Bob은 부정한 이중 지불거래가 블록 a에 포함된 대체 블록체인 포크를 채굴합니다. n개의 확인을 기다린 후, 즉 a + n블록이 채굴될 때, 상인인 Alice는 제품을 Bob에게 보냅니다. Bob이 네트워크 해시의 50%이상을 제어할 경우, 이것은 정직한 네트워크에 의해 구축된 지점보다 길어질 때까지 사적인 사기성 블록체인을 계속 채굴할 수가 있게됩니다. 블록 a '+ m + 1, 일부 정수 m> n. 에

대해 채굴이 수행되면 Bob은 허위로 만들어진 사기 포크를 공공연하게 개방할 수 있고 가장 긴체인 규칙(the longest chain rule)으로 인해 유효한 블록체인으로 인식됩니다.

#### Strip Mining<sup>6</sup>

안정된 평균 블록 시간<sup>8</sup>을 달성하기 위해, 네트워크의 난이도는 일정 수의 블록<sup>7</sup> 후에 조정됩니다. 상당한 양의 사용되지 않는 상태의 네트워크 해시 파워를 제어하고 있는 공격자는, 굉장히 빠르게 새로운 블록을 생성할 가능성이 있습니다. 정해진 재조정 난이도에 도달하면 네트워크 난이도가 크게 높아집니다<sup>9</sup>. 그렇게 되면 다른 채굴자가 채굴을 할 수 없을 정도로 높아질 수도 있습니다. 또한 공격자가 난이도의 재조정 후 갑자기 채굴을 종료하면, 블록 시간이 급격하게 줄어들고 네트워크가 실질적으로 정지되어 미확인 거래 풀이 대량으로 발생하게 됩니다.

#### Sybil 공격

공격자는 많은 수의 익명 ID를 위조하여 P2P 네트워크에서 과도하게 불균형적으로 큰 영향력을 얻을 수 있습니다. 일부 노드는 공격 노드에만 연결할 수 있으며 정직한 네트워크와 격리 될 수 있습니다. 이것은 다음과 같은 방법으로 더 악용 될 수 있습니다 [11].

공격자는 다음과 같은 일을 할 수 있습니다:

- 1. 블록과 거래를 중계하지 않습니다.
- 2. 자신의 블록만 중계하고 네트워크에서 정직한 노드를 분리합니다.
- 3. 일부 트랜잭션을 아예 컨펌하지 않아 필터링하여 제거합니다, 예를 들면 이중 지불 공격을 실행하기 위해서
- 4. 블록체인 전송의 낮은 대기 시간 암호화 / 익명화를 손상시키기 위하여, 정직한 노드의 전송을 관찰하고 실행 시간을 분석하여 타이밍 공격을 실행합니다.

# 1.2 지분 증명 Proof of Stake (PoS)

지분 증명은 새로운 블록을 만들 가능성이 있는 채굴자 (예:Staker 스테이커)의 확률이 그가 제시하는 지분의 가치에 비례하는 또 다른 대중적인 합의 메커니즘입니다.지분 증명( PoS)은 일반적인 개념이며 다른 구현 방법들이 있습니다. 예를 들어, 지분은 문제의 블록체인 (예 : Peercoin, Cardano)에서 처리되는 것과 동일한 암호 해독 토큰으로 구성되거나, 지분의 투표권 (예 : Decred)으로도 구성 될 수 있습니다. 일부 구현 방식의 예시에서, 모든 토큰은 블록체인 (예를 들어, NXT, NEM)의 생성시 발행됩니다; 다른 경우에는 그렇지 않습니다 (예 : Decred, Peercoin, NEO, Cardano).

#### 1.2.1 장점

PoS는 고비용, 에너지 비효율 및 중앙 집중화에 대한 취약성을 포함한 PoW의 단점을 해결하기 위한 것입니다.

6 저자는 PoW 기반 블록 체인의 취약성을 평가한 Alex Waters와 Jonathan Silverman에게 감사드립니다

- <sup>7</sup>난이도는 PAI 코인의 2,016 블록마다 재조정합니다.
- <sup>8</sup> PAI 코인 대상 블록 시간은 10 분입니다.
- <sup>9</sup>PAI 코인의 네트워크 난이도는 주어진 시간에 한번에 4 배 이상까지 변하지 않습니다.

엄청난 양의 처리 능력 대신에, PoS는 참여자에게 네트워크 규칙을 따르도록 장려하기 위해 보안 보증금을 사용하고자 합니다. 참가자는 암호화폐 코인의 보증금을 처음 제출하지 않으면 블록을 제안하거나 검증할 수 없습니다. 참가자가 네트워크를 속이려고 하면 보안 보증금의 일부 또는 전부를 잃게됩니다. PoS는 전산 자원의 필요성을 제거함으로써 에너지 소비를 획기적으로 줄이면서도 네트워크 보안을 유지할 수 있습니다.

PoS 기반 블록체인에서 보안은 계산 퍼즐의 어려움에 의존하지 않기 때문에 블록 시간은 PoW 기반 블록체인보다 훨씬 낮은 수준으로 설정할 수 있습니다<sup>10</sup>. 블록 시간을 줄임으로써 PoS 기반 블록 체인은 확인 대기 시간을 줄이고 초당 더 많은 수의 거래를 지원할 수 있습니다.

PoS 기반 블록체인에서 스테이커 블록이 블록체인에 추가 될 확률은 사용자가 보유하는 암호화폐 코인의 양에 비례합니다. PoS는 (a) 트랜잭션 확인을 위한 계산 자원에 대한 의존성이 낮고 (b) 진입 장벽이 낮을수록 중앙 집중화에 대한 저항력이 높아서 더 효율적이고 덜 낭비하므로 그래서 (c) 궁극적으로 PoW보다 지속 가능한 지방 분권의 영향을 더 잘 반영하는 솔루션을 제공한다는 주장이 있습니다.

#### 1.2.2 공격 벡터와 취약점

#### Nothing-at-Stake Attack

작업증명(PoW)에서 채굴자는 [여러 체인을 동시에 채굴하는] 계산 비용이 비싸기 때문에 하나의 단일 (가장 긴 the longest chain) 체인에서 채굴에 따른 인센티브를 받습니다. 반대로 지분 증명(PoS)의 경우 채굴의 계산 비용은 없는 것이나 다름없는 정도로 소소하게 듭니다. 따라서 여러 포크가 있는 경우, 하나의 최적의 전략은 모든 포크에 동시에 투표하게 해서 포크의 결과에 관계없이 선택된 검증자(validator)가 보상을 받도록 하는 것입니다.

이 공격은 모든 채굴자들이 모든 포크에 참여하여 자신의 욕심을 따라 행동한다고 가정하므로 다른 사람을 배려한 전략은 아닙니다. 이러한 가정하에 전체 지분의 1 %만으로도 모든 사람들이 두 가지 모두에 지분을 걸 때 공격자의 이중 지불 포크가 우세합니다. 네트워크에 이타적인, 다른 이를 배려하는 채굴자가 있는 경우 공격자는 더 많은 지분을 사거나 다른 검증자에게 뇌물을 주어야하지만 작업증명(PoW)보다 Nothing-at-Stake를 통해 이중 지불 공격을 하는 것이 상대적으로 더 간단합니다.

Nothing-at-Stake 공격을 완화하기 위한 몇 가지 접근:

- Ethereum Slasher 1.0은 보안 보증금 기반 PoS 알고리즘을 사용합니다. 채굴자가 여러 포크에서 투표를 받는 경우 보안 보증금이 없어집니다 [12].
- Ethereum Slasher 2.0은 "잘못된 포크"에 투표하는 유권자에게 불이익을 주지만 두 번 투표하는 유권자에게는 불이익을 주지 않습니다 [1].

<sup>10</sup> 이더리움의 블록생성 시간은 15초이며, 비트코인의 블록생성 시간은 10분입니다.

- 피어 코인 (Peercoin) [26]은 소비된 코인 연령이 가장 높은 체인을 사용하는데, 그것은 각 블록에서 걸린 코인의 총 수량과 그 코인을 거는데 소비된 시간의 곱으로 정의됩니다.
- NXT [27]는 블록 보상을 제거하여 거래 수수료로 과정을 결정합니다.
- EOS의 Delegated Proof of Stake (dPoS)¹¹에서 주주들은 블록 생산자를 위한 투표권을 행사합니다. 검증자의 수는 고정되어 있으며 순서는 매 회마다 결정됩니다.
- Algorand [28]에서, 계정 / 노드는 코인 보유에 비례하는 확률로 무작위로 선택되며, 위원회를 구성하기 위한 암호 분류 과정을 통해 이루어집니다. 그리고 위원회는 블록을 생산하기 위해 BFT 합의 방법을 사용합니다.
- 하이브리드 PoW / PoS 합의는 PoW와 PoS의 단점을, 둘을 서로 묶어 단독적으로 제거하는 것을 시도합니다.

# 1.3 하이브리드 작업 증명 Proof of Work & 지분 증명 Proof of Stake (PoW/PoS)

PoW와 PoS의 단점은 우리가 체인상의(on-chain) 합의에 대한, 보다 안전한 대안을 모색하도록 동기를 부여합니다. 하이브리드 PoW / PoS의 속성은 그것을 잠재적인 후보로 합니다. 예를 들어, 하이브리드 PoW / PoS는 다음을 제공합니다:

- PoW 채굴자와 PoS 검증자(validator)가 서로 의존하도록 하여 대다수 공격에 대한 보호 기능을 강화합니다.
- 네트워크 참여를 위한 진입 장벽이 낮습니다.
- 더 나은 에너지 효율성.
- 항상 온라인인 노드를 유지하기 위한 인센티브 등, 부수적인 이점을 통하여 네트워크의 안정성을 잠재적으로 크게 향상시킴

하이브리드 PoW / PoS에는 다양한 구현 방법이 있습니다. 우리는 Decred [14] (DCR)의 Proof of Activity [15]에서 영감을 얻은 다음과 같은 디자인을 제안합니다.

#### 1.3.1 개요

이름에서 알 수 있듯이, 하이브리드 PoW / PoS 합의 메커니즘에는 두 가지 주요 구성 요소가 있습니다 : 작업 증명(Proof-of-Work) 채굴 및 지분 증명(Proof-of-Stake) 블록 투표. 작업 증명(PoW) 채굴자들은 새로운 후보 블록을 생산하고 제출하는 일을 담당합니다. PoS 이해 관계자는 투표로 후보 블록을 블록체인에 추가해야하는지 결정합니다. 네트워크 노드는 PoW 채굴자, PoS 이해 관계자 또는 동시에 둘 다 될 수 있습니다.

PoW 채굴은 고전적인 나카모토(Nakamoto) 스타일로 수행됩니다. 채굴자는 이전 블록 해시 및 현재 블록의 머클루트(merkle root)와 같은 데이터와 함께 논스(nonces)값을 영구 생성하여 동적으로 계산된 임계 값 (즉, 목표)보다 낮은 것이 발견될 때까지 다른 해시를 만듭니다.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>2013년에 Dan Larimer에 의해 발명된 것. DPoS를 이용하는 현재의 블록체인:EOS, BitShares, Steem, Golos, Ark, Lisk, PeerPlays, Nano(이전 Raiblocks), Tezos DPoS를 기반으로 한:Cosmos / Tendetmint、Cardano [13]

PoS 구성 요소에서 이해 관계자가 무작위로 선택되고 후보 블록의 유효성에 대해 투표할 기회가 주어집니다. 일단 스테이크 홀더 코인이 특정 기간, 즉 스테이킹 기간 동안 잠기면, 스테이크 홀더는 새로운 블록에 대한 잠재적인 검증자가 됩니다. 각 블록 높이에서, m 명의 이해 관계자 그룹이 모든 잠재적 검증자로부터 무작위로 선택되며, 확률은 암호화폐 코인 수에 비례합니다. 이러한 이해 관계자는 n-of-m 투표를 통해 새 블록의 유효성을 결정합니다. 대다수가 새로운 블록의 유효성을 확인하면 블록이 블록체인에 추가됩니다. 이 블록에는 스테이킹 인보이스 목록 외에 모든 이해 관계자의 투표가 포함됩니다. 각 스테이킹 인보이스는 스테이크 홀더의<sup>12</sup> 스테이킹 금액, 지불한 스테이킹 수수료 및 반송 주소가 기재되어 있습니다. 그것은 현재 블록 높이에서의 스테이킹 활동의 확인 역할을 합니다. 투표 이해 관계자의 투표권을 확인하기 위해 모든 이해 관계자의 투표는 블록의 높이가 작기 이전의 스테이킹 인보이스에 연결됩니다.

블록 보상은 블록을 생산한 PoW 채굴자, 블록을 검증한 이해 관계자 및 / 또는 다른 당사자들에게 분배됩니다. 분배 매개 변수는 조정 가능합니다. 예를 들어 Decred에서는 60%가 PoW 채굴자에게 할당되고 30 % 가 5 명의 이해 관계자 (각 6 %), 그리고 공헌 개발자에게 10 %가 할당됩니다.만약 PoW 채굴자가 모든 m 투표를 얻지 못하면, 누락된 투표마다 그들의 보조금이 1/m 씩 감소합니다.

#### 스테이킹(Staking) 메커니즘 예시

Alice가 그녀의 암호화폐 코인 중 일부를 블록 검증에 투표하고자 하는 PoS 이해 관계자라고 가정합니다

- 1. Alice는 일정 양의 암호화폐 코인을 걸기 위해(staking) 수수료를 지불할 의사가 있음을 네트워크에 알립니다.
- 2. PoW 채굴자 (Bob)는 블록 높이 h에 새로운 블록을 만들고 Alice의 스테이킹 활동 정보를 스테이 킹 인보이스에 포함시킵니다. 스테이킹 수수료는 Bob에게 지급되며 환불이 불가합니다. Alice가 걸은 암호화폐 코인은 잠겨 있습니다.
- 3. Alice는 h + 256 블록에서 시작하여 h + 256 + W 블록에서 끝나는 시간이 만료되기 전에 투표할 수 있는 자격이 주어집니다. PoW 채굴자에 의해 생성된 각 후보 블록에 대해, m명의 스테이크 홀더가 자신들이 스테이크 중인 양에 비례하는 확를로 무작위로 선택되어 후보 블록을 확인합니다.
- 4. 만료 시간 창의 너비 W는 전체 네트워크 지분에 따라 달라지므로 만료 시간대내에서는 Alice가 검증자로 선택될 확률이 높습니다.
- 5. Alice라면 시간이 만료되기 전 창안에서
  - a. 검증자로 선택되어 블록에 투표
  - b. 검증자로 선택되었지만, 오프라인으로 투표 기회를 놓침 (즉, 노드 오프라인)
  - c. 검증자로 선택되지 않음

그녀의 자금 (걸은 금액(stake), 해당되는 경우의 보수(보상금), 걸은 금액(stake) 수수료를 뺀보상금)은 다음 256 블록동안 잠긴 채로 남아있게되며, 그 이후에 사용가능하도록 됩니다.

<sup>12</sup> 투표 이해관계자인 경우도 있으며 그렇지 않은 경우도 있음

#### 1.3.2 기술적 파라미터

현재의 PoW 기반 Project PAI와 하이브리드 PoW / PoS Decred 블록체인의 기술적 매개 변수 비교는 다음 표와 같습니다 :

	현재 Project PAI	Decred
해시 알고리즘	SHA-256	BLAKE-256
총 공급	2,100,000,000	21,000,000
목표 블록 생성 시간	10 분	5 분
난이도 목표 조정 간격	2,016 블록 (2 주)	144 blocks (1.25 일)
블록 보상 감소 비율	50/100	100/101
블록 보상 감소 간격	210,000 블록 (4 년)	6,144 blocks (21일, 8시간)
블록 보상 분배	100% PoW 채굴자에게	60% 는 PoW 채굴자에게 + 30% 는 이해관계자에게 (각각 6% ) + 10% 는 개발팀에게
런칭 날짜	2/23/2018	2/8/2016
예상 채굴 수명	Until 2154	Until 2120
최초 채굴 이후 초기 블록 보상	1,500	31.19582664

표 1. Project PAI & Decred 기술적 파라미터 비교 표

Decred는 하이브리드 Proof-of-Work / Stake-of-Stake 블록체인의 예입니다. PAI 코인 기여 개발자는 제안된 하이브리드 합의 메커니즘에 대해 최적의 매개 변수를 조사중에 있습니다.

### 1.3.3 공격 벡터와 취약점

#### 주요 공격

섹션 1.1.2에서 설명한대로 대다수 공격은 공격자가 나머지 네트워크보다 빠르게 유효한 블록을 만들수 있다는 것을 의미합니다. PoW에서는 네트워크 해시 비율의 50 % 이상을 제어하면 이러한 이점을 얻을 수 있습니다. 그러나 하이브리드 PoW / PoS에서 공격은 네트워크 해시 비율뿐만 아니라 네트워크 총 지분의 일부를 제어해야 합니다.

각 유효한 블록은 PoS 이해 관계자의 투표를 포함해야 합니다. 네트워크 해시 파워의 대부분을 제어하는 공격자는 후보 블록을 다른 것보다 빠르게 생성할 수 있습니다. 그러나 이 더 긴 개인 채인(the longer private chain)이 게시되면 PoS 이해 관계자는 이 더 긴 사설 체인(the longer private chain)의 상단 대신 포크가 시작된 블록을 확인하고 투표를 시작합니다. 투표 이해 관계자는 지분의 양에 비례하여 무작위로 선택되기 때문에 이론적으로 PoW 채굴자는 알 수가 없습니다. 따라서 공격자가 네트워크 해시 파워와 총 지분의 많은 부분을 제어하지 않는 이상, 대다수 공격은 발생할 확률이 낮습니다.

클레임: 3/5 PoS 투표 방식에서, 이점을 얻기 위해선, 티켓의 일부만을 가진 공격자  $f_s$ 는 네트워크의 해시 파워의

$$\frac{6(1-f_s)^5-15(1-f_s)^4+10(1-f_s)^3}{6f_s^5-15f_s^4+10f_s^3}$$

배가 필요합니다. 증명은 부록 A를 참고해 주세요. 일반적인 투표 방식의 분석에 대한 정보는 [15]를 참고해 주세요.

attacker's stake<br/>network total stakeattacker's hashpower<br/>honest network hashpower\(\text{NOID 관계는 그림 2.에 있습니다.}\)예를 들어, 공격자가 지분의 약 50 %를 가지고 있다면 정직한 체인을 유지하기 위해 정직한<br/>해시파워의 100 %가 필요합니다.

\_ attacker's stake일반적으로,network total stake의 비율이 클수록, 대다수 공격을 위해서

### attacker's hashpower

honest network hashpower 의 비율이 작아야 합니다. 코인 공금의 상당 부분을 매매하는 것은 문제가 될 수 있으나, 스테이킹 참가가 감소할 경우 (예를 들어, 큰 스테이킹 풀의 실패 또는 채굴되는 모든 토큰으로 인한 문제), 대다수 공격이 우려 될 수 있습니다. 일반적으로는, 하이브리드 시스템이 지분 참여를 높게 유지하는 것이 중요합니다. 하이브리드 합의 시스템하에서 Project PAI에 대한 대다수 공격 비용 분석에 대해서는 부록 B를 참조해 주세요.[17]

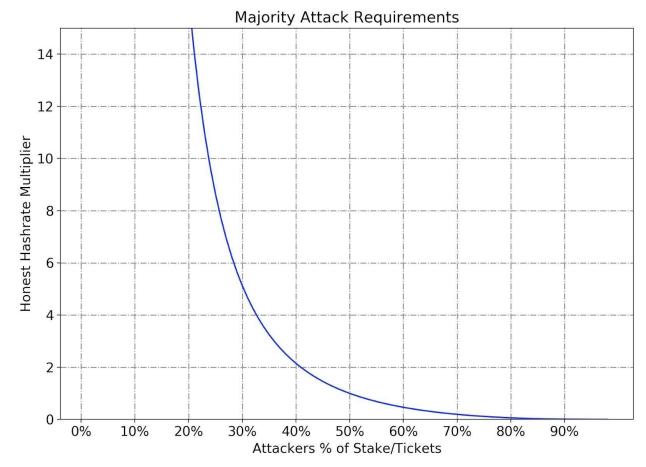


그림 2. 정직한 체인을 유지하기 위하여 필요한 PoW와 PoS의 비율

#### Nothing-at-Stake Attack

PoW 채굴자가 포크 시도에서 악성 블록을 채굴하면 PoS 검사자들은 블록을 거부할 수 있습니다. 악의적인 블록을 채굴하면 계산 비용이 발생하기 때문에 PoW 채굴자는 유효성 검사자에 의해 거부 될 가능성이 있는 블록을 채굴하는 것을 피하게 됩니다. 이와 유사하게, 이해 관계자는 선거권을 미리 지불하기 때문에 다른 포크에 선거 기회를 낭비하는 대신, 장래에 다른 사람이 투표할 것으로 예상하는 방식 (즉, 블록 보상을 생성 할 가능성이 가장 높은, 가장 긴체인) 으로 투표하는 경향이 있습니다.

#### Stakepool

하이브리드 시스템의 PoS 투표에 참여하려면 유효성 검사자의 지갑 소프트웨어가 지속적으로 실행되어야 합니다. 지갑을 온라인에 연결해야 투표할 수 있습니다. 지갑을 사용할 수 없으면 투표 기회를 놓치고 스테이커는 블록 보상을 받지 못합니다 [19]. 지갑을 지속적으로 온라인 상태로 유지할 수 없는 이해 관계자를 수용하기 위해 투표를 Stakepools에 위임할 수 있습니다. 1/2 multisig를 통해 Stakepool은 사용자가 스테이크에 대한 접속 권한을 부여하지 않고 Stakepool이 자신을 대신해 투표할 수있는 권한을 부여 할 수 있습니다.

그러나 안타깝게도, 중앙집중화 된 Stakepool은 중앙 실패 지점을 야기합니다. 너무 많은 스테이크를 위임한 Stakepool이 투표를 안팎으로 강요할 가능성이 있습니다. 또한 대형 Stakepool이 오프라인 상태가 되면 많은 득표 수가 누락되어 투표 없이 공개 할 수 있습니다 [20]. 따라서 일반적으로 작은 지분을 활용하는 것이 좋습니다.

#### 1.3.4 다른 이익

언급하였듯이 하이브리드 시스템의 PoS 메커니즘은 지갑 소프트웨어가 지속적으로 실행되어 이해 관계자의 투표 기회를 놓치지 않도록 합니다. 또한, 블록 보상이 PoW 채굴자와 PoS 이해 관계자에게 분산되기 때문에 하이브리드 PoW 채굴은 일반적으로 순수 PoW 채굴보다 수익성이 떨어집니다. 따라서 참여 노드는 해시파워를 얻는데 더 적은 투자를하는 경향이 있으므로 새로운 PoW 채굴자에 대한 진입 장벽을 낮춥니다. 이 두 가지 요인 모두 네트워크 참여를 증진시키는 데 도움이 됩니다. 마지막으로 해시 전력에 대한 총 투자가 감소할 수 있기 때문에 네트워크의 에너지 소비량은 순수 PoW보다 상대적으로 낮을 수 있습니다.

고전적인 PoW에서는 채굴자가 블록을 획득할 수 있는 가능성을 높이기 위해 중앙 집중식 풀을 형성합니다. 마이닝 풀이 더 많은 해시 파워를 보유할 수록 풀이 블록 보상을 획득 할 가능성이 높아지고 풀에 가입할 노드가 더 많아집니다 (즉, 매튜 효과 Matthew Effect [30]). 반대로, 하이브리드 PoW / PoS에서 stakepool은 온라인으로 위임을 유지하기 위해 존재하기 때문에 유효성 검사자는 투표 기회를 놓치지 않습니다. stakepool의 크기는 선택의 기회에 아무런 영향을 미치지 않습니다. 하이브리드 PoW / PoS는 여전히 대규모 중앙 마이닝 풀의 형성을 할 수 있지만 PoS 계층이 제공하는 추가 보안으로 인해 영향을 상대적으로 덜 받습니다. 일반적으로 하이브리드 PoW / PoS의 집중도는 고전적인 PoW의 집중도보다 낮을 것으로 예상됩니다.

# 섹션 2 — 작업 증명(Proof of Work)의 해시 함수

Proof-of-Work 해시 기능을 선택하는 목적은 자연스러운 공정한 공개 채굴을 통해 진정한 분권화를 촉진하는 것입니다<sup>13</sup>. 이상적인 후보 암호 해시 함수는 다음과 같은 특성을 갖습니다 [21].

- 1. 결정성- 동일한 입력 메시지가 항상 동일한 출력 해시를 생성합니다.
- 2. 효율성 주어진 입력 메시지의 출력 해시 계산 속도가 빠름
- 3. 보안 무차별 대입(brute force)을 제외하고 출력 해시에서 입력 메시지를 생성하는 것은 불가능합니다

<sup>13</sup> 저자는 Tarnover LLC의 Jascha Wanger에게 네트워크 보안, 성능 및 채택에 대한 여러 가지 합의 메커니즘의 함축적인 개요를 제공해주신 것에 감사드립니다.

- 4. 무작위성 입력 메시지에 대한 작은 변화는 출력 해시에 대한 큰, 그러나 상관성이 없는. 변경이 발생합니다.
- 5. 유일성 동일한 출력 해시를 가진 두 개의 다른 입력 메시지를 찾는 것은 불가능합니다.

위의 기준을 만족하는 해시 함수는 암호학적으로 안전한 것으로 간주됩니다. 또한, 많은 경우 기본 해시 함수가 *ASIC 저항*을 갖는 경우, 즉, 특정 용도의 집적 회로 (ASIC)에 알고리즘을 구현하여 계산 속도가 크게 향상되지 않으면 CPU 기반 구현 [22]에 비교하여 블록체인에 이상적인것으로 간주됩니다. ASIC 저항이 이상적이지만, 장기간에 달성하는 것은 사실상 불가능합니다(자세한 내용은 "ASIC 저항"섹션 참조).

다른 암호화폐에서 채택한 해시 함수의 테이블에 대해서는 부록 C를 참조해 주세요.

SHA-3 [31] 해쉬 함수군은 14를 포함한 유리한 점을 갖고 있습니다 :

- MD 구조 해시 알고리즘 (MD5, SHA-1, SHA-2)과 비교하여 더 나은 시간 효율성
- 더 나은 에너지 효율성 : 동일한 수준의 난이도에 대해 계산에 의해 소비되는 에너지
   (열)가 줄어듦
- 암호 보안 : 가까운 장래에 SHA-3 (또는 SHA-2)에서 모든 고전적 또는 양자적 공격이 발견 될 가능성은 거의 없음
- ASIC 저항: ASIC는 현재 널리 사용 가능하지 않음

문제의 하이브리드 PoW / PoS 합의 메커니즘의 PoW 구성 요소에 대해, 이 제안은 SHA3-256 및 SHAKE-256 [31]이라고 불리는 SHA-3의 변형을 고려할 것을 권장합니다. 비슷한 보안성을 가지고 있지만 더 효율적이며 조정이 가능한 출력 길이를 제공합니다.

## 2.1 ASIC 저항 (Resistance)

부록 C에 언급된 해시 알고리즘 중 일부는 의도적으로 ASIC 저항을 위해 설계되었습니다. Scrypt와 Cryptonight는 메모리 공간이 크기 때문에 ASIC 채굴과 CPU / GPU 채굴간의 갭을 줄여줍니다. X11은 열 한개의 과학 해시 알고리즘을 사용하여 ASIC 채굴기를 만들기 위해 필요한 연구 개발 비용을 증가시킵니다. X16R은 또한 해시 알고리즘 시퀀스를 사용하여 해시 알고리즘의 순서를 규칙적으로 중단시킵니다. 이러한 조치에도 불구하고 ASIC은 시장에서 충분한 경제적 인센티브가 있는 한, 이상적인 ASIC 저항 해시 알고리즘 (예 : Scrypt 및 Cryptonight)에 대해 출현하는 경향이 있습니다.

사실, 100 % ASIC 증명 해시 알고리즘에 대한 의문이 없는 것은 아닙니다 <sup>15</sup>. 또한, ASIC에 대항하여 싸울 필요성에 대한 논쟁이 있습니다 [23]. 최소한의 취약점으로 공개 채굴에 대한 보다합리적인 접근법은, 만약에 존재한다면 하이브리드 PoW/PoS 와 함께, 기존의 ASIC 채굴자가거의 없는 해시 함수를 검색하는 것입니다.

암호화폐는 이러한 해시 함수가 암호화폐의 주류가 되도록 돕는 공개 채굴의 개시단계에서, ASIC 채굴자에게 더 취약합니다. 그 후, 하이브리드 Hybrid PoW / PoS는 ASIC가 널리 보급되어도 장기간 보안을 유지하는 데 도움이 됩니다. SHA-3 계열의 해시 함수는 이 조건을 충족시킵니다. 캘리포니아 공과대학(Caltech)의 Thomas Vidick 교수는, "독립형 PoW의 일부가 아닌 PoS와 같은 다른 접근법과 결합하여 51 %의 공격 가능성을 줄이기 위해 SHA-3를 사용할것을 강력히 권고합니다." 라고 하였습니다.

# 섹션 3 — **권장 사항 & 향후 작업**

#### 3.1 전반적인 권장 사항

- SHA-3의 유리한 특성은 하이브리드 PoW / PoS 합의 메커니즘의 작업 증명(Proof-of-Work) 구성 요소에 적합합니다. SHA3-256 및 SHA-3의 변형,SHAKE-256을 권장합니다.
  - 장기간의 ASIC 저항성이 해시 기능을 선택하는 데 어려움을 겪을 수 있지만, PAI 코인의 현재 SHA-256 메커니즘을 ASIC 채굴자가 이미 존재하지 않는 알고리즘으로 대체하는 것은 단기간의 보호를 제공합니다. SHA-3는 이 조건을 만족합니다.
- SHA-3 변형을 하이브리드 PoS / PoW 알고리즘과 페어링하여 51 % 공격에 대한 장기간의 보호를 실현할 수 있습니다. 섹션 1.3 에서 개략적으로 설명된 접근법은 PoW 채굴자와 PoS 유효성 검사자가 서로 의존하도록 요구함으로써 PoW와 PoS의 단점을 해결합니다.
- 앞서 언급한 최첨단 연구 및 검토 결과에 따르면 Project PAI가 하이브리드 PoW / PoS 합의 메커니즘을 채택하는 것이 전반적인 권장 사항입니다. 이 메커니즘은 섹션 1.3에 요약된 하이브리드 합의 메커니즘과 함께 SHA-3 변종을 활용해야 합니다.

#### 3.2 향후 작업

PAI 코인에 있어서, 개발자들은 이 접근법에 대한 연구 개발을 계속하며 PAI 코인 코드베이스 통합 및 출시에 대한 기술적 세부 사항을 발표할 것입니다.

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> 저자는 캘리포니아 공과대학(Caltech)의 Thomas Vidick 교수가 여기에서 고려한 많은 해시 함수 중 평가 및 요약과 전반적인 권장 사항을 제공 해준 것에 깊은 감사를 드립니다.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Monero (XMR)는 해싱 알고리즘을 (매년 2 회) 정기적으로 변경하여 기존 ASIC을 무효화할 것을 제안합니다.

# 부록 A — 주요 공격 수학적 증명법

티켓의 일부를 가진 공격자 fs 는, 이점을 얻기 위해서,  $\frac{6(1-f_s)^5-15(1-f_s)^4+10(1-f_s)^3}{6f_s^5-15f_s^4+10f_s^3}$  배의 해시 파워를

가져야 합니다.

#### 증명:

- 1.  $E_1$  = {3 또는 더 많은 표는 공격자의 통제 하에 있음};  $E_2$  = {3 또는 더 많은 표는 정직한 이해 관계자의 통제 하에 있음};  $E_3$  = {5 명의 투표자가 온라인에 있음};
- **2.**  $Pr[E_1 | E_3] = C_5^5 * f_s^5 + C_5^4 * f_s^4 * (1-f_s) + C_5^3 * f_s^3 * (1-f_s)^2 = 6f_s^5 15f_s^4 + 10f_s^3$
- 3.  $Pr[E_2 \mid E_3] = 6(1-f_s)^5 15(1-f_s)^4 + 10(1-f_s)^3 P$ 4. 평균적으로, 공격자는  $\frac{1}{Pr[E_1 \mid E_3]}$  논스(Nonce) 시도 후에 블럭을 만듭니다; 정직한 네트워크는  $\frac{1}{P r[E_2|E_3]}$  시도가 필요합니다.
- 5. 만약 공격자가 정직한 네트워크의 한번의 논스(Nonce) 시도마다  $\frac{P[E_2|E_3]}{P[E_1|E_3]}$  번의 논스(Nonce) 시도가 가능할 정도로 빠르다면, 공격자는 네트워크의 나머지만큼 빠른 평균속도로 블럭들을 생성할 수 있습니다.

# 부록 B — 주요 공격 비용 분석

Project PAI 하이브리드 합의를 공격하기 위해 드는 비용은 두 가지 부분으로 나누어서 견적을 정의할수 있습니다 : (1) PoS에 스테이킹하기 위하여 코인을 구입하는 데 드는 비용, 그리고 (2) PoW에서의 해시를 위한 GPU 획득 비용을 다음과 같이 정의합니다:

스테이크 비율 = <u>attacker's stake</u> network total stake

정직한 해시 비율 배수 =

attacker's hashpower honest network hashpower

우리는 정직한 채굴자들은 100 NVIDIA TESLA V100 GPU (각각 \$6,369 USD [29], 2018년 12월 17일 기준)들을 소유하고 있을 것이라고 가정합니다. 이 것은 가장 작은 정직한 해쉬 파워입니다. 표 2 는 2018년 12월 17일 기준 통계로 공격 비용을 보여줍니다:

PAI 코인의 가치: \$0.052201 Total

코인 총량: 1,563,172,500

공개된 코인 총량: 735,000,000

스테이크 비율 (%)	공개된 코인 비율 (%)	코인 구입 비용 (\$ 백만 USD)	정직한 해쉬 비율 배수	GPU 구입 비용 (\$ 백만 USD)	총 공격 비용 (\$ 백만 USD)
18.93	40.25	15.44	19	12.09	27.54
24.66	52.45	20.13	9	5.73	25.86
28.99	61.66	23.66	5.67	3.6	27.26
32.66	69.46	26.65	4	2.55	29.2
35.94	76.44	29.33	3	1.91	31.24
38.98	82.91	31.81	2.33	1.48	33.29
41.86	89.02	34.16	1.86	1.18	35.33
44.63	94.91	36.41	1.5	0.95	37.36
47.33	100.66	38.62	1.22	0.78	39.4

50	106.34	40.8	1	0.64	41.44

52.67	112.02	42.98	0.82	0.52	43.5
55.37	117.77	45.19	0.67	0.42	45.61
58.14	123.66	47.44	0.54	0.34	47.78
61.02	129.77	49.79	0.43	0.27	50.06
64.06	136.23	52.27	0.33	0.21	52.48
67.34	143.22	54.95	0.25	0.16	55.11
71.01	151.02	57.94	0.18	0.11	58.05
75.34	160.22	61.47	0.11	0.07	61.54
81.07	172.43	66.16	0.05	0.03	66.19

표 2. 공격 비용 표

각 열에서 공개된 코인 공급의 퍼센테이지가 100%보다 큰 것은 대다수 공격이 불가능함을 의미합니다.

\$0.05 PAI 코인 가격에선, 총 공격 비용 -- 필요한 스테이크 비율을 얻기 위한 공개된 코인의 충분한양 -- 이 \$25,860,000 에서 \$66,190,000 에 달하며 이 것은 공격자가 5% 에서 95%의 네트워크 해쉬 파워를 제어할 수 있는 것을 의미합니다.

전적으로 PoW 기반인 PAI 코인 공격 비용과 하이브리드 PoW/PoS 기반 네트워크의 비교는 그림 3에 있습니다.

코인 구입 비용은 PAI 코인의 가치에 비례해서 증가합니다. 18.93%의 스테이크 비율과 95% 네트워크 해쉬 파워를 이용한 대다수 공격의 총 비용은 PAI 코인의 가치를 \$0.25 이라고 할때 \$86,050,000 이고 PAI 코인의 가치를 \$1 이라고 할때 \$307,930,000 입니다.

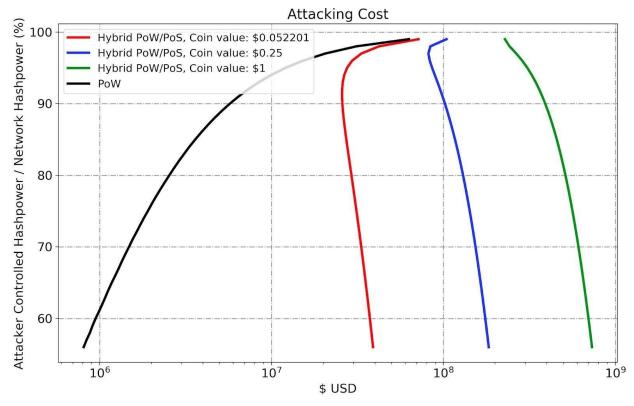


그림 3. PoW와 하이브리드 PoW / PoS의 공격 비용

# 부록 C — 암호화폐 해시 알고리즘

해시 알고리즘	해시 레이트	암호화폐	현존하는 ASIC 채굴기
SHA-256	GH/s	Bitcoin Cash (BCH), Bitcoin (BTC), 21Coin (21), Peercoin (PPC), Namecoin (NMC), Unobtanium (UNO), Betacoin (BET), Bytecoin (BTE), Joulecoin (XJO), Devcoin (DVC), Ixcoin (IXC), Terracoin (TRC), Battlecoin (BCX), Takeicoin (TAK), PetroDollar (P\$), Benjamins (BEN), Globe (GLB), Unicoin (UNIC), Snowcoin (SNC), Zetacoin (ZET), Titcoin (TIT)	Antminer S9, Antminer T9
Scrypt	KH/s	Litecoin (LTC), Dogecoin (DOGE), Novacoin (NVC), WorldCoin (WDC), Latium (LAT), FeatherCoin (FRC), Bitmark (BTM), TagCoin (TAG), Ekrona (KRN), MidasCoin (MID), DigitalCoin (DGC), Elacoin (ELC), Anoncoin (ANC), PandaCoins (PND), GoldCoin (GLD)	Antminer L3
Cryptonight	H/s	Monero (XMR), Bytecoin (BCN), Boolberry (BBR), Dashcoin (DSH), DigitalNote (XDN), DarkNetCoin (DNC), FantomCoin (FCN), Pebblecoin (XPB), Quazarcoin (QCN)	Antminer X3
Dagger Hashimoto (Ethash)	MH/s	Ethereum (ETH), Ethereum Classic (ETC), Expanse (EXP)	Antminer E3
Equihash	MH/s	Zcash	Antminer Z9
X11 (X13, X15, X17)	MH/s	Dash (DASH), CannabisCoin (CANN), StartCoin (START), MonetaryUnit (MUE), Karmacoin (Karma), XCurrency (XC)	Antminer D3
X16R		Ravencoin, Motion(XMN)	
BLAKE-256 (BLAKE2s)		Decred	iBeLink DSM 6T, iBeLink DSM 7.2T, Innosilicon D9, Ffminer DS 19
SHA-3 (Keccak)		MaxCoin (MAX), Slothcoin (SLOTH), Cryptometh (METH), NEM	

## 참조

- [1] Foundation, Ethereum. "Proof of Stake: How I Learned to Love Weak Subjectivity." Ethereum Blog, blog.ethereum.org/2014/11/25/proof-stake-learned-love-weak-subjectivity/.
- [2] "Decentralized Application." Wikipedia, Wikimedia Foundation, 2 Dec.

2018, en.wikipedia.org/wiki/Decentralized\_application.

- [3] "Peer-to-Peer." Wikipedia, Wikimedia Foundation, 13 Dec.
- 2018, en.wikipedia.org/wiki/Peer-to-peer.
- [4] "Whitepaper." Project PAI, 13 Nov. 2018, projectpai.com/assets/files/whitepaper/whitepaper-tech.pdf
- [5] Projectpai. "Projectpai/Pdps." GitHub, github.com/projectpai/pdps/blob/master/pdp-0002.mediawiki.
- [6] "About | ObEN, Inc." ObEN Inc, oben.me/about-us-3/.
- [7] "S2 Server Manual." BITMAIN, file.bitmain.com/shop-bitmain/download/Antminer%20S2%20Manual\_EN.pdf.
- [8] Projectpai. "Projectpai/Paicoin." GitHub, github.com/projectpai/paicoin/blob/master/src/coinbase\_addresses.h
- [9] Projectpai. "Projectpai/Paicoin." GitHub, github.com/projectpai/paicoin/blob/master/src/validation.cpp#L2793
- [10] AndrewMarshall. "Proof-of-Work (PoW). All about Cryptocurrency Bitcoin Wiki." . What Is Blockchain Technology? Bitcoin Wiki, Bitcoin Wiki, 22 Oct. 2018, en.bitcoinwiki.org/wiki/Proof-of-work#The\_advantages\_of\_PoW.
- [11] "Weaknesses." B-Money Bitcoin Wiki, en.bitcoin.it/wiki/Weaknesses#Sybil\_attack.
- [12] Foundation, Ethereum. "Slasher: A Punitive Proof-of-Stake Algorithm." Ethereum Blog, blog.ethereum.org/2014/01/15/slasher-a-punitive-proof-of-stake-algorithm/.
- [13] Myles Snider, Kyle Samani, and Tushar Jain. "Delegated Proof of Stake: Features & Tradeoffs." Multicoin Capital, multicoin.capital/wp-content/uploads/2018/03/DPoS -Features-and-Tradeoffs.pdf
- [14] "Decred Autonomous Digital Currency." Decred Autonomous Digital Currency, www.decred.org/.
- [15] Bentov, Iddo, et al. "Proof of Activity." ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, vol. 42, no. 3, Aug. 2014, pp. 34–37., doi:10.1145/2695533.2695545.
- [16] Decred. "Decred/Dcps." GitHub, github.com/decred/dcps/blob/master/dcp-0001/dcp-0001.mediawiki.
- [17] Zia, Zubair. "Decred's Hybrid Protocol, a Superior Deterrent to Majority Attacks." Medium.com, Medium, 4 July 2018, medium.com/decred/decreds-hybrid-protocol-a-superior-deterrent-to-majority-attacks-9421bf486

292.

[18] "Defence Against Early Stage Botnet Attack?" Decred Forum,

forum.decred.org/threads/defence-against-early-stage-botnet-attack.84/

.

[19] "How to Stake/Vote." Decred Documentation, docs.decred.org/mining/how-to-stake/.

[20] "Voting Service Providers." Decred

Documentation,

docs.decred.org/faq/proof-of-stake/stake-pools/.

[21] "Cryptographic Hash Function." Wikipedia, Wikimedia Foundation, 9 Nov.

2018, en.wikipedia.org/wiki/Cryptographic\_hash\_function.

[22] "What Does It Mean for a Cryptocurrency to Be ASIC-Resistant?" Bitcoin Stack Exchange,

bitcoin.stackexchange.com/questions/29975/what-does-it-mean-for-a-cryptocurrency-to-be-asic-resistant.

[23] Hsue, Derek. "Is The War Against ASICs Worth Fighting? – Token Economy."

Token Economy, Token Economy, 4 Apr. 2018,

tokeneconomy.co/is-the-war-against-asics-worth-fighting-b12c6a714bed.

[24] Dexter, Shawn. "Understanding Longest Chain – A Simple Analogy." Mango

Research, 9 Sept. 2018, www.mangoresearch.co/understanding-longest-chain-rule/.

[25] "Unspent Transaction Output, UTXO." FAQ -

Bitcoin,

bitcoin.org/en/glossary/unspent-transaction-output.

[26] Sunny King, Scott Nadal. "PPCoin: Peer-to-Peer Crypto-Currency with

Proof-of-Stake." peercoin.net/assets/paper/peercoin-paper.pdf.

[27] Nxt Community. "Nxt Whitepaper."

dropbox.com/s/cbuwrorf672c0yy/NxtWhitepaper v122 rev4.pdf.

[28] "Whitepapers." Algorand, algorand.com/docs/whitepapers/.

[29] "Nvidia Tesla v100 16GB." Amazon, Amazon,

www.amazon.com/PNY-TCSV100MPCIE-PB-Nvidia-Tesla-v100/dp/B076P84525.

[30] "Matthew Effect." Wikipedia, Wikimedia Foundation, 21 Nov.

2018, en.wikipedia.org/wiki/Matthew effect.

[31] SHA, NIST. "standard: Permutation-based hash and extendable-output functions, 2015." (3).