

TAO에서 dTAO로: Bittensor 네트워크의 토크노믹스 전환과 구조적 분석

이윤구, 오진우, 김승민, 이홍노

광주과학기술원

youngulee@gm.gist.ac.kr, jnohseol@gm.gist.ac.kr, seungminkim@gm.gist.ac.kr, heungno@gist.ac.kr

From TAO to dTAO:

Structural Analysis of Tokenomics Transition in the Bittensor Network

Youn-Gu Lee, Jinwoo Oh, Seungmin Kim, Heung-No Lee

Gwangju Institute of Science and Technology

요약

Bittensor는 여러 사용자가 다수의 인공지능 모델을 함께 구축하고, 기여에 비례하여 보상을 받도록 설계된 탈중앙 AI 네트워크이다. Bittensor는 검증자들이 인공지능 모델을 평가하고 투표하여 모델당 보상 비중을 결정한다. 그러나 AI 모델의 수가 증가하면 검증자가 이를 모두 평가하기 어려워지는 문제가 발생한다. 이를 보완하기 위해 Bittensor는 보상 배분 기준을 사람들이 관심과 자원을 배분하는 흐름에 더 가깝게 반영하고자 Dynamic TAO (dTAO)를 도입하였다. dTAO 도입 이후에는 서브넷에 대한 자본과 풀(Pool) 상태로부터 형성되는 시장 신호가 보상 배분에 반영되어 보상 결정의 근거가 검증자 재량 중심에서 규칙 기반의 시장 메커니즘으로 변화하였다. 다만, 시장 기반 구조는 가격 변동성, 단기 투기 유인, 가격 조작 가능성 같은 위험을 동반할 수 있다. 본 논문은 dTAO의 도입 전후 보상 구조 변화 비교, 기대 효과와 리스크 분석 후 보완 및 개선 방향을 제시한다.

I. 서론

탈중앙 인공지능 네트워크인 Bittensor는 루트(root) 네트워크 하에 다양한 서브넷이 제공하는 모델과 서비스를 개방형 환경에서 경쟁하도록 설계되었으며, 자체 토큰 TAO를 통해 자원 제공자와 검증자에게 보상을 분배한다. 초기 프로토콜은 루트 네트워크 검증자가 서브넷의 기여도를 평가하고 보상 비중을 조정하는 구조를 채택하였다. 그러나 서브넷 수가 증가함에 따라 이러한 평가 방식은 평가 부담과 정보 비대칭을 심화시킬 수 있고, 보상 결정 영향력의 집중에 대한 우려로 이어질 여지가 있다.

이를 보완하기 위해 도입된 dTAO는 서브넷별 자체 알파 토큰과 TAO 간 유동성 풀을 구성하고, 알파 토큰의 시장 가격과 유동성 상태를 기반으로 보상 분배를 자동 조정한다. 이는 평가 중심 구조에서 시장 참여자의 자본 배분 결정을 신호로 활용하는 구조로의 전환이며, 서브넷 가치 평가를 보다 분산된 방식으로 수행하려는 시도로 해석될 수 있다. 다만, 가격 변동성, 가격 조작 가능성, 단기 투기 성향 강화 등 시장 기반 구조의 리스크를 수반할 여지도 존재한다.

본 논문은 TAO 기반 보상 구조에서 dTAO로의 전환이 가져온 토크노믹스 설계 변화를 서술하고 구조적 장단점을 분석한다. 이를 바탕으로 시장 기반 보상 구조의 기대 효과와 잠재적 리스크를 논의하고, 보완 및 향후 개선 방향을 제시한다. 이러한 분석은 추후 타 AI 네트워크에서 시장 기반 인센티브 메커니즘을 설계하는 데 기여할 수 있다.

II. 본론

II-1. 기존 TAO 기반 보상 구조와 구조적 한계

그림 1은 2025-01-15(UTC) 중 대표 블록(0xbab5b40c2...)에서 관측된 상위 10개 루트 검증자의 emission(보상 배출) 비중을 예시로 시각화한 것이다. Bittensor의 초기 TAO 기반 보상 구조에서는 루트 네트워크가 서브넷 간 emission 비중을 결정한다. 구체적으로 루트 검증자는 서브넷에 대해 가중치를 설정하고, 이 값이 서브넷별 인센티브 배분에 반영되는 형태로 이해할 수 있다. 이때 루트 레이어의 의사결정 영향력은 루트 검증

자가 루트 네트워크에 스테이킹 한 TAO의 집중도와 결합할 수 있어, 서브넷 수가 증가할수록 확장성과 공정성 측면에서 구조적 병목이 발생할 가능성이 있다. 2025-01-15(UTC) 하루 동안 60분 간격으로 샘플링 한 24개 블록을 분석한 결과, 전체 64개 루트 검증자 중 상위 10개 루트 검증자는 평균적으로 전체 스테이크 된 총량의 83.52%(표준편차 0.07%)를 점유했으며, 평균 42.18개(표준편차 0.09%)의 서브넷에만 투표를 진행하는 것으로 관측되었다. 즉, 루트 스테이크와 가중치 배분이 소수 상위 검증자 및 제한된 서브넷 범위에 집중되는 경향이 나타난다.

이 관측은 다음과 같은 구조적 한계를 시사한다. 첫째, 서브넷 수가 증가할수록 루트 검증자의 전수 평가가 어려워져 가중치가 일부 서브넷에 편중될 수 있다. 둘째, 제한된 서브넷에만 가중치가 배분되면 신규·롱테일 서브넷의 성과 반영이 지연되고 관심 비대칭이 고착될 수 있다. 셋째, 스테이크와 의사결정 영향력이 상위 참여자에게 집중되면 가중치 조정이 전체 보상에 미치는 영향이 커져 담합·조작 위험과 거버넌스 정당성 논쟁이 확대될 수 있다.

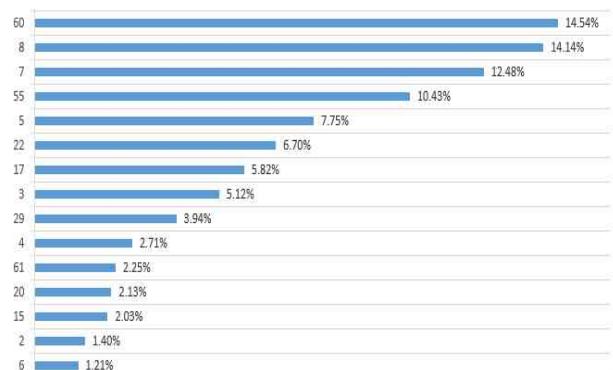


그림 1. 2025-01-15 상위 10개 루트 검증자의 emission 비중

II-2. dTAO의 핵심 설계 원리

dTAO의 핵심 설계는 서브넷 가치 산정 권한을 소수 검증자의 주관적 평가에서 시장의 '가격 발견(price discovery)' 기능으로 이전하는 데 있다. 이는 보상 배분 의사결정을 자본 흐름과 풀 상태에 근거한 시장 논리에 위임함으로써, 기준 구조의 확장성 한계와 거버넌스 불투명성을 탈중앙화된 시장 경제 체제로 해결하려는 시도이다.

1) 풀 준비금(reserves) 비율로부터의 가격 신호

서브넷 i 의 알파 토큰 가격 $P_{\alpha,i}$ 는 풀 준비금 R 비율로 정의된다:

$$P_{\alpha,i} = \frac{R_{\tau,i}}{R_{\alpha,i}}. \quad (1)$$

여기서 $R_{\tau,i}$ 는 TAO 준비금, $R_{\alpha,i}$ 는 알파 토큰 준비금이다. 이 체제에서 가치는 특정 주체의 점수가 아닌, 분산된 참여자들이 각자의 정보를 바탕으로 실행하는 실질적 자본 투입 경쟁을 통해 결정된다. 이는 가치 신호 생성 과정을 탈중앙화하여 서브넷 증가에 따른 전수 평가의 부담(확장성 병목)을 제거한다. 또한, 보상 근거가 조작 불가능한 온체인 풀 데이터로부터 도출되므로 절차적 투명성이 극대화된다.

2) 자본 흐름의 누적과 규칙 기반 emission 배분

dTAO는 시장 신호를 신뢰하되, 단기 노이즈를 제어하기 위해 서브넷 i 에 대한 순유입을 누적한 상태변수 $S_{i,t}$ 와 서브넷별 emission 비중 E_i 를 도입한다. 현재 순유입의 반영 비율을 λ , 보상을 받기 위한 최소 점수 임계값을 L , E_i 에 반영되는 집중도를 p 라고 할 때, $S_{i,t}$ 와 E_i 는 다음과 같이 정의된다:

$$S_{i,t} = (1 - \lambda)S_{i,(t-1)} + \lambda(Infow_{i,t} - Outflow_{i,t}), \quad (2)$$

$$E_i = \frac{MAX(S_i - L, 0)^p}{\sum_j MAX(S_j - L, 0)^p}. \quad (3)$$

여기서 L 과 p 는 저품질 서브넷 차단 및 보상 집중도를 조절하는 정책적 레버로 작동한다. 배분 결정이 검증자의 재량권이 아닌 '시장의 선택'과 '명시된 규칙'에 의해 수행됨으로써 주관적 개입에 따른 거버넌스 정당성 논쟁을 완화하고 시스템의 예측 가능성을 높인다. 나아가 배분된 보상이 유동성 공급과 스테이킹 수익으로 환원되는 재귀적 인센티브 구조는 우수한 서브넷이 더 많은 자본을 흡수하고 경제적 기초체력을 강화하게 만드는 선순환을 일으킨다. 이는 서브넷을 단순한 평가 대상에서 독립적인 경제 주체로 격상시키며, 네트워크 전체를 자본 효율성 중심의 시장 경제 생태계로 재편한다.

dTAO의 전환점은 서브넷 가치 판단이 검증자 소수의 점수/가중치 설정에서 벗어나 참여자들이 어느 서브넷에 자본을 배치했는지에 기반한 시장 신호로 이동했다는 것이다. 따라서 dTAO 이후의 탈중앙화 정도는 검증자 권리 집중이 아닌 가격 발견에 영향을 주는 자본 배분 주체의 집중도로 점검하는 것이 타당하다.

그림 2는 2025-12-15(UTC) 하루 동안의 온체인 위임/해제 이벤트로부터, 사용자 계정의 소유권을 증명하는 가장 상위 단계의 마스터 키인 콜드 키(coldkey)별 순 변동을 계산하고, 그 절댓값 기준 상위 10개 콜드키 비중을 나타낸다. 분석 결과 상위 10개 콜드키가 전체 순 변동의 24.80%를 차지하며, 단일 최대 비중은 5.58%이다. 이는 가치 신호와 배분 근거가 특정 검증자의 재량이 아닌 온체인에서 판측되는 자본 이동과 풀 상태에 의해 규칙적으로 결정되는 메커니즘에 의해 형성됨을 시사한다.

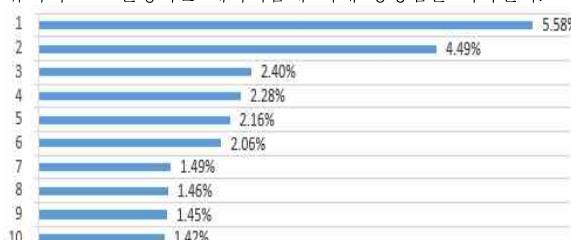


그림2. 2025-12-15 상위 10개 자본의 순 변동 비중

II-3. 시장 기반 보상 구조의 리스크

dTAO는 알파 토큰 가격 신호를 보상 배분에 반영함으로써 평가 중심 구조를 시장 기반 구조로 전환한다. 그러나 가격 신호는 시장 미시구조와 전략적 행위에 의해 왜곡될 수 있어, 가격 신호에는 다음과 같은 리스크가 내재한다.

첫째, 스마트 계약을 통해 유동성 풀의 자산 비율에 따라 거래 가격을 자동으로 결정하는 AMM(Automated Market Maker) 풀에서는 유동성이 낮을 경우 소규모 거래에도 가격 변동성이 커져, 보상 배분이 장기적인 성과보다는 단기적인 주문 흐름에 더 민감해질 수 있다. 특히 신규 서브넷은 초기 유동성 부족으로 불리할 수 있다.

둘째, 보상이 가격에 연동되면 전략적 거래 유인이 발생하고, 추가 보상 기댓값이 거래 비용을 상회할 경우 가격 조작 및 투기 위험이 커질 수 있다. 이 과정에서 가격 신호가 성과의 프록시라는 전제가 약화될 수 있고, 서브넷 운영이 품질 개선보다 단기 가격 관리에 치우칠 여지도 존재한다. 셋째, 가격 상승이 보상 증가를 낳고 다시 자본 유입을 촉진하는 자기강화 루프가 형성될 경우 상위 서브넷으로 보상과 유동성이 집중되어 양극화가 심화되거나, 하락 국면에서는 악순환이 발생할 수 있다.

II-4. 보완 및 향후 개선 방향

시장 기반 보상 구조의 장점을 유지하려면 가격 신호의 불안정성과 전략적 거래 조작, 그리고 보상·유동성의 쟁탈을 동시에 완화하는 보완이 필요하다. 이를 위해 본 논문은 다음의 세 가지 개선 방향을 제안한다.

첫째, 신호 안정화 관점에서 자본 흐름 신호를 단일 시점 값이 아닌 일정 구간 평균으로 반영하고, 서브넷별 emission 비중의 변화율에 상한을 두어 단기 변동이 보상 배분에 과도하게 전이되는 것을 줄여야 한다.

둘째, 조작 저감을 위해 유동성이 얕은 구간에서 신호 왜곡 가능성성이 커진다는 점을 고려하여, 준비금·슬리피피지·거래량 등 유동성 지표가 임계치 이하일 때 가격/flow 신호의 반영 가중치를 자동으로 축소하거나 급격한 변동 구간의 보상 반영을 지연시켜 조작 기대 수익을 낮출 필요가 있다.

셋째, 쟁탈 완화 및 신규 서브넷 보호를 위해 자기강화 루프에 따른 상위 서브넷 집중을 완충할 수 있는 장치가 요구된다. 구체적으로 신규·롱테일 서브넷에 대해 시장 신호 반영 비율을 단계적으로 높이는 램프업 정책을 적용하거나, 최소 가동률·최소 성과 기준과 결합한 조건부 보상 바닥 도입으로 초기 유동성 부족에 따른 불리함과 과도한 양극화를 완화할 수 있다.

III. 결론

본 글은 Bittensor의 TAO 기반 보상 구조와 dTAO 도입 이후의 시장 기반 보상 구조를 비교하여, 토크노믹스 설계 변화와 구조적 합의를 정리하였다. 기존 구조는 루트 레이어의 스테이크 및 의사결정 영향력 집중과 제한된 가중치 커버리지로 인해, 서브넷 확장 국면에서 확장성과 거버넌스 정당성 측면의 리스크가 발생할 수 있음을 확인하였다. dTAO는 서브넷별 AMM 풀과 알파 토큰 가격 신호를 활용해 보상 배분의 의사결정 기반을 분산시키려는 설계로 해석되나, 유동성 제약, 가격 조작 및 투기 유인, 자기강화 루프에 따른 집중 등 리스크를 수반할 수 있다. 따라서 향후에는 가격 신호의 시간적 완충과 저유동성 구간에서의 신호 영향력 제한, 신규·롱테일 서브넷에 대한 초기 조건 설계 등을 통해 시장 기반 분배의 효율성과 안정성 간 균형을 확보하는 방향이 요구된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2026-RS-2021-II211835) 그리고 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (RS-2025-22932973)

참 고 문 헌

- [1] Bittensor, "Dynamic TAO (dTAO) Whitepaper," Accessed: 2025-01-15. [Online]. Available: <https://bittensor.com/dtao-whitepaper>