

논문 2026-3-7 <http://dx.doi.org/10.29056/jsf.2026.09.07>

Web3.0 저작권 생태계를 위한 DAO 기반 기여-보상 정산 및 분배 모델

홍두표*, 장성일*, 조용준*, 신동명*†

A DAO-based Contribution-Reward Settlement and Distribution Model for Web3.0 Copyright Ecosystems

Du-Pyo Hong*, Sung-Il Jang*, Yong-Joon Joe*, Dong-Myung Shin*†

요 약

Web 3.0 기반의 콘텐츠 생태계에서 원저작물은 방송과 클립 등 여러 N차 저작물로 파생되지만, 현행 저작권료 정산은 계약 당사자 간 확정 분배에 머물러 가치 창출에 기여한 참여자가 배제되고, 복수 원저작물의 분배 조건이 충돌하면 이용자에게 남는 재원이 사라진다. 본 논문은 계약과 사전 합의된 규칙만으로 정해지는 정산 확정 지분과 커뮤니티가 조정하는 기여 보상 분배를 분리한 2단계 정산 모델을 제안하고, 비례 감액과 개인 상한 기반 재분배 알고리즘, 소울바운드 토큰 기반 듀얼 토큰 DAO 거버넌스를 설계하였다. 대표 시나리오의 분배 산출은 수기 계산 기대값과 일치하였고, 임의 계약서 1,000건에서 불변식 위반이 없었다. 보상 상한을 잔여 분배분의 10%로 낮추면 지니 계수가 0.398에서 0.258로 완화되면서 기여-보상 순위 상관성이 0.999 이상으로 유지되어, 집중 완화와 기여 유인의 절충을 거버넌스가 선택할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In Web3.0-based content ecosystems, an original work spawns many derivative works, yet royalty settlement stays within contracting parties: value-creating participants are excluded, and conflicting distribution conditions leave no residual share for the downstream creator. This paper proposes a two-stage model separating settled shares, fixed only by contracts and pre-agreed rules, from community-adjusted contribution rewards, with pro-rata abatement, cap-based redistribution, and soulbound-based dual-token DAO governance. Distributions matched hand-calculated expectations, and no invariant was violated across 1,000 generated contracts. Lowering the reward cap to 10% cut the Gini coefficient from 0.398 to 0.258 while rank correlation stayed above 0.999, letting governance tune the concentration-incentive trade-off.

한글키워드 : DAO, 저작권료 정산, 기여-보상, N차 저작물, 소울바운드 토큰

keywords : DAO, Copyright Royalty Settlement, Contribution-Reward, Nth-order Derivative Works, Soulbound Token

1. 서 론

Web3.0은 블록체인 위에서 소유권과 거래 기

록을 참여자가 직접 검증하고, 플랫폼이 아닌 커뮤니티가 규칙을 정하는 탈중앙 환경을 뜻한다. 이 환경에서 원저작물은 방송, 클립, 리믹스 등

* 엘에스웨어(주) 소프트웨어연구소 연구개발본부

† 교신저자: 신동명(email: roland@lsware.co.kr)

접수일자: 2026.09.01. 심사완료: 2026.09.11.

게재확정: 2026.09.20.

다양한 N차 저작물로 파생되며, 파생 단계마다 새로운 수익과 기여자가 생긴다. 그러나 현행 저작권료 정산 체계는 다음 세 가지 한계를 갖는다.

첫째, 각 단계별로 기여하는 기여자의 배제 문제이다. 현행 정산은 게임사와 스트리머처럼 이용 계약을 맺은 당사자끼리 계약 비율대로 수익을 나누는 데서 끝난다. 그러나 클립을 만든 편집자, 콘텐츠를 확산시킨 커뮤니티, 시청과 후원으로 매출을 일으킨 시청자도 수익 형성에 기여함에도 불구하고 계약 당사자가 아니라는 이유로 정산에서 제외된다. 기여가 보상으로 이어지지 않으면 참여 유인이 약해지고 생태계의 가치 창출 기반이 위축된다.

둘째, 정산 조건 충돌 문제이다. 게임 방송은 게임과 음원 등 복수의 원저작물을 함께 이용하는 경우가 많다. 그런데 각 저작물의 분배 비율은 개별 계약에서 따로 정해지므로 요구 지분의 합이 커지는 것을 막을 장치가 없다. 게임 3종이 각각 매출의 30%를, 음원이 10%를 요구하면 합이 100%에 달해 방송을 제작한 스트리머에게 남는 재원이 없다. 이런 계약 조합은 산술적으로 모순은 아니지만 경제적으로 유지될 수 없으므로, 초과와 고갈을 조정하는 규칙이 계약 단계에서 합의되어 있어야 정산이 성립한다.

셋째, 저작권료 누적과 과도한 수수료 발생이다. 파생 저작물마다 정산을 개별 트랜잭션으로 처리하면 저작권료와 수수료가 저작물 수에 비례해 누적되어, 체인이 깊어질수록 정산의 경제성이 떨어진다.

이러한 한계는 실제 분쟁으로 이어지고 있다. 미국의 정산 단체 SoundExchange는 2023년 SiriusXM이 약 1억 5천만 달러의 저작권료를 지급하지 않았다고 소송을 제기하였고[1], 같은 해 주요 NFT 마켓플레이스들이 창작자 로열티 강제 적용을 중단하자 주간 로열티 총액이 약 380만 달러로 2년 만에 최저 수준까지 떨어졌다[2][3]. 계약과 플랫폼 정책만으로는 기여 보상이

계속 보장되지 않으므로, 보상 규칙을 정산 구조 안에 내장하고 이행을 검증할 수 있어야 한다.

첫 번째와 두 번째 문제는 서로 얽혀 있다. 기여자에게 보상하려면 확정 지분을 정산하고 남은 재원이 필요하고, 그 재원은 조건 충돌이 정해진 규칙에 따라 조정되어야 확보된다.

한편 계약상 확정 지분은 법적 구속력을 갖는 불변 조건이므로, 커뮤니티가 조정하는 기여 보상 규칙과 하나의 계산으로 섞으면 규칙 변경이 저작권자의 권리를 침해할 수 있다. 세 번째는 계약과 플랫폼 정책만으로는 기여 보상이 계속 보장되지 않으므로, 보상 규칙을 정산 구조 안에 내장하고 이행을 검증할 수 있어야 한다.

이에 본 논문은 확정 지분 정산(1단계)과 잔여분 기반 기여 보상 분배(2단계)를 분리하여 순차 수행하는 구조를 제안하고, 분배 규칙의 결정과 변경을 탈중앙화 자율 조직(Decentralized Autonomous Organization)의 의결에 결속한다. 기여 보상을 위한 핵심 사항은 2단계 정산 구조(C1)와 듀얼 토큰 DAO 거버넌스(C2), 충돌 조정 알고리즘(C3)에 있다. 2단계 정산 구조는 계약 조건의 불변성을 지키면서 계약 밖 기여자를 정산에 편입하고, 파생 체인 전체를 일괄 정산하여 비용 누적을 완화하는 사항이고, 듀얼 토큰 DAO 거버넌스는 양도할 수 없는 소울바운드 거버넌스 토큰(GOV)과 정산 토큰(SETL)을 분리하여 분배 규칙의 의결권을 독점하지 못하게 하는 데 있다. 마지막으로 충돌 조정 알고리즘은 분배 합 상한 초과와 기여 보상 상한 초과를 각각 조정하고 모든 조정을 감사 이벤트로 기록하는 데 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구의 한계로부터 본 연구의 필요성을 도출한다. 3장에서는 요구사항을 정의하고 제안하는 2단계 정산 구조와 알고리즘, 시스템 아키텍처와 API 설계를 기술한다. 4장에서는 평가 항목 정의 및 선정 근거를 제시하고 실험 결과를 분석하며,

5장에서 결론과 향후 연구를 제시한다.

2. 관련 연구

2.1 블록체인 기반 저작권료 정산

블록체인 기반 저작권 보호와 저작권료 정산 연구는 스마트 컨트랙트로 로열티 분배를 자동화하는 데 초점을 맞춰 왔으며[4][5][6], 최근 서베이는 이 분야가 수익 투명성과 창작자 권리 강화 방향으로 발전하는 한편 실용 구현과 실험적 검증이 부족함을 지적한다[7][8]. 또한 기존 연구 대부분은 원저작물-이용자 간 2차 관계를 전제하므로, N차 파생 체인 전체에 걸친 정산과 복수 원저작물 간 조건 충돌 조정을 다루지 않으며, 매 정산을 개별 트랜잭션으로 처리할 경우 블록체인 수수료와 지연이 저작물 수에 비례하여 누적되므로 N차 구조에서 비효율적이다.

2.2 공정 분배와 기여 배분 이론

복수의 청구가 한정된 재원을 초과할 때 어떻게 나눌 것인가는 공정 분배 이론에서 파산 문제로 오래 연구되어 왔으며, 청구액에 비례해 감액하는 비례 규칙이 대표적 해법이다[9][10][11]. 기여에 따른 배분의 이론적 기준으로는 Shapley 값이 있으나[12][13], 참여자의 모든 부분집합에 대해 계산해야 하므로 참여자가 많아지면 실시간 정산에 쓰기 어렵다.

2.3 DAO 거버넌스와 토큰 설계

DAO는 참여자 의결로 자원 배분을 결정하는 조직 형태이다[14][15]. 그러나 거버넌스 토큰을 자유롭게 거래 가능한 ERC-20으로 두거나 AMM 기반으로 유동성을 공급하는 방식은 자본에 의한 의결권 쏠림을 유발하며, 주요 DAO의 투표력 분석에서도 의결권이 소수 보유자에게 집중되어 있음이 보고되었다[16][17]. 분배 규칙을 의결로 정

하는 본 모델에서 의결권이 매수 가능하다면 분배 규칙 자체가 자본에 종속되는 문제가 있다.

2.4 기여-보상 체계 및 시빌 저항

기여-보상 체계는 일반적으로 기여 기록, 검증, 점수화, 토큰 보상의 4단계로 구성되며 큐레이션·창작·검증 기여를 보상한다. 그러나 기존 연구는 단일 플랫폼 내부의 활동 보상에 국한되어, 저작권료 정산 그래프와 결합된 기여 보상, 즉 계약상 정산 확정 지분과 충돌하지 않으면서 기여 보상을 지급하는 문제를 다루지 않는다. 또한 기여 지표는 허위 계정을 동원한 시빌(sybil) 공격과 사전 활동에 취약하므로 조작 방지 수단이 보상 체계와 함께 설계되어야 한다. 이러한 조작을 막기 위한 연구로 인간 증명(Proof of Personhood)이 있다. 이는 한 사람에게 자격을 하나만 발급함으로써 계정 수를 늘리는 공격을 원천적으로 차단하는 접근이며 본 논문이 채택한 양도 불가능한 참여 자격도 여기에 해당한다[18][19].

2.5 기존 연구와의 차별성

표 1은 기존 접근과 제안 모델을 계약 보존, 충돌 처리, 기여 보상, 검증의 관점에서 비교한 것이다. 제안 모델은 사전 합의된 규칙으로 계약 지분을 보존하면서 과다 청구를 비례 감액으로 처리하고, 계약 밖 기여자를 2단계 분배로 편입하며, 예산 균형 같은 성질을 정의하고 실험으로 검증한다는 점에서 차별화된다.

3. 제안 모델

3.1 설계 요구사항

제안 모델은 실제 금전의 분배 지분을 산출하기 위해 다음 다섯 가지 요구사항을 정의한다.

표 1. 기존 접근과 제안 모델의 비교
Table 1. Comparison of Existing Approaches and the Proposed Model

구분	블록체인 정산[7]	DAO 거버넌스	제안 모델
N차 파생 체인 정산	부분 지원	해당 없음	정산 그래프
과다 청구 처리	미지원	해당 없음	비례 감액, 충돌 상태
비계약 기여자 보상	미지원	제한적	2단계 분배
예산 균형 보장	미지원	해당 없음	성질 정의, 실험 검증
계약 지분 보존	지원	해당 없음	사전 합의 규칙

- **R1(정산 확정 지분 불가침):** 정산 확정 지분은 계약에 명시된 요구 지분과 계약이 사전에 합의한 충돌 해결 규칙에 의해서만 결정되어야 하며, 기여 점수나 DAO의 사후 의결로 변경되지 않아야 한다. 계약의 법적 구속력을 보호하기 위한 요구사항으로, 위반되면 저작권자가 모델을 신뢰할 수 없게 된다.
- **R2(보존성):** 분배 총액은 계약과 DAO 규칙이 미리 승인한 공동 기금인 트레저리(Treasury) 이월분을 포함하여 정산 재원과 정확히 일치해야 한다. 위반은 자금의 증발 또는 이중 지출을 의미한다.
- **R3(결정성):** 동일한 입력에 대해 항상 동일한 출력을 산출해야 한다. 탈중앙 환경에서 참여자들이 정산 결과를 독립적으로 재계산·검증하기 위한 전제 조건이다.
- **R4(감사 가능성):** 분배 지분이 조정되는 모든 경로는 경고 코드와 감사 이벤트 식별자를 남겨야 한다. 특히 경고 없는 권리자 지분 축소를 금지한다.
- **R5(기여 비례성):** 잔여 분배분은 기여가 큰 참여자에게 더 많이 분배하되, 소수의 독식은 상한으로 완화해야 한다. 기여 유인의 보존과

분배 형평의 절충을 요구하는 항목이다. 위 요구사항들은 4장에서 평가 항목을 선정하는 근거가 되며, 위반 여부를 계산 결과에서 직접 검사할 수 있는 형태로 정의하였다.

3.2 2단계 정산 파이프라인

제안 모델은 그림 1과 같이 정산 그래프에서 계약상 정산 확정 지분을 먼저 정산하고, 남은 잔여 분배분을 기여 점수에 비례해 분배한 뒤, 정산 실행 후보(SettlementIntent)를 생성하는 파이프라인으로 구성된다. 정산 확정 지분은 계약과 사전 합의 규칙으로 정해지는 불변 조건이고, 기여 보상 규칙은 커뮤니티가 상황에 따라 조정할 수 있는 정책이다. 두 단계를 분리하면 요구사항 R1이 보장되면서 2단계의 유연성이 확보된다. 모든 단계는 감사 이벤트 식별자를 남겨 요구사항 R4를 충족한다.

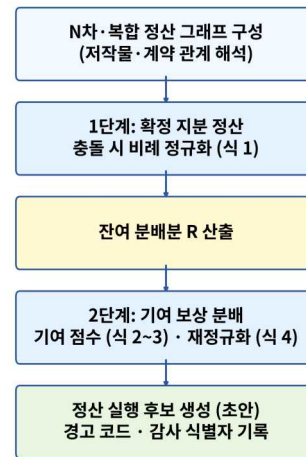


그림 1. 확정 지분-기여 보상 2단계 정산 파이프라인
Fig. 1. Two-stage Settlement Pipeline of Fixed Shares and Contribution Rewards

3.3 N차 정산 그래프와 충돌 정규화

저작물 간 파생 관계는 방향성 그래프 $G=(V, E)$ 로 표현한다. V 는 원저작물과 파생 저

작물의 집합이고, E 는 하위 저작물 수익이 상위 저작물로 분배되는 정산 의무이다. 노드 v 의 수익을 $R(v)$, 간선 e 로 상위 권리자에게 청구되는 비율을 요구 지분 $q(e)$, 계약 정산에 쓸 수 있는 가용 재원을 $B(v)$ 라 한다. 그림 2는 원저작물(게임 G), 2차 저작물(대회 방송 S1), 3차 저작물(클럽 E1·E2)로 이어지는 체인의 예시이다. 그래프는 위상 정렬 순서로 각 노드를 한 번씩 방문하며, 정산 기준 금액은 계약이 정한 기준에 따라 매출액 또는 상위 지급액을 뺀 수익액으로 노드마다 갱신된다. 순환 참조는 오류로 거부하고, 금액은 정수 최소 단위로 계산하며 반올림 잔여는 트레저리로 귀속한다.

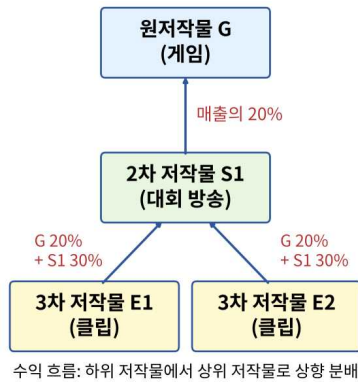


그림 2. N차 저작물 정산 그래프 예시
Fig. 2. Example of an Nth-order Settlement Graph

복수 원저작물의 요구 지분 합이 계약 가용 한도 $S_{contract}$ 를 초과하면 각 요구 지분을 식 (1)과 같이 비례 감액하여 정산 확정 지분을 얻는다.

$$s'_j = q_j \cdot \frac{S_{contract}}{\sum_m q_m}, \quad \left(\sum_m q_m > S_{contract} \right) \quad (1)$$

이 비례 감액을 이하 정규화라 하고, 정규화 전의 계약 청구값을 요구 지분, 충돌 해결 규칙을 적용해 확정된 값을 정산 확정 지분이라 부른

다. 충돌 조정 방식으로 비례 감액을 채택한 이유는 다음과 같다. 초과분을 특정 계약에 전가하는 방식은 계약 간 우선순위라는 별도의 합의를 요구하지만, 비례 감액은 모든 요구 지분을 같은 비율로 축소하므로 계약 간 상대적 비율을 보존하고, 축소 비율이 입력으로부터 하나로 정해져 요구사항 R3을 만족한다. 이 조정이 계약 위반이 되지 않도록 모든 계약은 동일한 마스터 정산 규칙을 참조하고, 가용 한도 초과 시 동순위로 비례 감액한다는 조항에 각 권리자가 계약 체결 시점에 동의하며, DAO는 이미 체결된 계약의 감액 규칙을 사후에 변경할 수 없다. 사전 동의가 없는 계약 조합에서 요구 지분 합이 한도를 초과하면 자동 조정하지 않고 충돌 상태로 전환하여 재협상 전까지 집행을 보류한다. 정규화가 적용되면 충돌 조정 경고와 감사 이벤트 식별자를 기록하여 R4를 충족한다.

3.4 기여 점수와 보상 분배

2단계 분배의 입력은 참여자별 기여 점수이다. 기여는 파생 창작(방송·클럽 제작), 전파(시청·도달·후원), 검증(준수 신고·검수) 활동으로 분류되며, 참여자 i 의 기여 점수 $C(i)$ 는 식 (2)와 같이 유형별 지표를 정규화한 값에 가중치를 곱해 합산한다. 정규화는 관측 기간 안의 최소-최대 방식을 기본으로 하고, 모든 지표는 값이 클수록 기여가 큰 방향으로 정의하며, 가중치는 0 이상이고 합이 1이다. 가중치는 DAO 의결로 조정하는 거버넌스 파라미터로 두어 생태계가 어떤 기여를 중시할지 스스로 정하게 한다. 정산 후 잔여 분배분 R 은 식 (3)과 같이 기여 점수에 비례해 분배된다. 식 (3)은 모든 참여자의 기여 점수 합이 0보다 클 때 적용하며, 합이 0이면 분배할 근거가 없으므로 모든 보상을 0으로 두고 잔여 분배분 전액을 트레저리로 이월한다. 이 경우에도 요구사항 R2의 총액 보존은 유지된다. 이로써

계약 밖 기여자가 정산 구조에 편입된다(C1).

$$C(i) = \sum_k w_k \cdot \text{norm}(x_{i,k}), \quad \sum_k w_k = 1 \quad (2)$$

$$\text{reward}(i) = \begin{cases} R \cdot \frac{C(i)}{\sum_j C(j)}, & \sum_j C(j) > 0 \\ 0, & \sum_j C(j) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

3.5 보상 상한 및 재정규화

기여 지표는 통상 소수 상위 참여자에게 집중되는 치우친 분포를 보이므로, 식 (3)만으로는 잔여 분배분의 대부분이 최상위 기여자에게 쏠릴 수 있다. 이를 완화하기 위해 참여자별 개인 보상 상한 c_{reward} 를 둔다. 식 (4)와 같이 각 참여자에게는 기여 점수에 배율 λ 를 곱한 금액을 주되, 그 금액이 개인 상한을 넘으면 상한까지만 준다. 배율 λ 는 이렇게 정한 보상의 합이 잔여 채원과 같아지도록 정하며, 상한을 모두 더한 값이 잔여 채원보다 작으면 그 값까지만 배분한다. 이 절차는 상한 임계값을 정렬해 유한 단계에 끝나고 같은 입력에 같은 출력을 내므로 요구사항 R3을 만족하며, 모든 보상이 상한을 넘지 않음이 구조에서 보장되어 요구사항 R5를 충족한다.

$$r_i = \min(c_{reward}, \lambda C(i)),$$

$$\sum_i r_i = \min\left(R, \sum_i c_{reward}\right) \quad (4)$$

초과분을 한 차례만 재분배하는 단순한 방식은 재분배 과정에서 새로 상한을 넘는 참여자가 생길 수 있으나, 식 (4)의 절차는 그런 경우가 없다. 남은 금액은 상한을 모두 더한 값이 잔여 채원보다 작을 때만 생기며, 이 금액은 트래저리로 이월하여 요구사항 R2를 유지한다. 재분배를 적

용할 때는 재정규화 경고와 감사 이벤트 식별자를 기록한다. 이 계산은 정렬이 필요해 참여자가 늘면 온체인 실행 비용이 커지므로, 오프체인에서 계산하고 온체인에는 결과를 기록하는 구조를 택하는 근거가 된다.

3.6 정산 확정 지분 불가침성

제안 모델의 핵심 요구사항 R1은 식 (5)와 같이 정의된다. 정산 확정 지분은 요구 지분과 사전 합의된 충돌 해결 규칙만의 함수이며, 기여 점수, 개인 상한, 배율 등 2단계의 어떤 계산과도 독립이다. 재분배는 잔여 분배분 안에서만 수행되고 정산 확정 지분에는 소급되지 않는다.

$$s_j^{\text{settled}} = f_{\text{rule}}(q_j, S_{\text{contract}}) \quad (5)$$

3.7 DAO 거버넌스 결합

분배 규칙 가운데 DAO가 의결로 조정할 수 있는 것은 2단계 기여 보상에 관한 파라미터, 곧 그룹별 비율, 정족수, 투표 기간, 개인 보상 상한 c_{reward} , 기여 가중치이다. 1단계 계약 가용 한도 S_{contract} 는 계약에 사전 합의된 값으로 DAO가 변경할 수 없고, 조정은 장래의 배분부터 적용되며 이미 확정된 정산에는 소급되지 않는다. 참여자 자격은 영지식 기반 통합 인증(ZK-SSO)으로 검증한다. 참여자는 자격 발급 기관이 서명해 발급한 자격을 보유하고 있음을 개인정보 공개 없이 영지식 증명으로 입증하고, 같은 자격의 중복 사용은 증명마다 남은 고유 무효화 값으로 차단하며, 취소된 자격은 발급 기관의 취소 목록으로 확인한다. 검증된 참여자에게는 양도할 수 없는 소울바운드 거버넌스 토큰을 발행한다[20][21][22]. 토큰을 사고팔 수 없으므로 단기 토큰 매집에 의한 의결권 이동은 제한되지만, 복수 자격 발급, 자격 대여, 담합과 위임 집중은 양도 불가능성만

으로 해결되지 않으므로 별도의 신원·거버넌스 통제가 필요하다. 기여 점수 산정 결과는 정산 실행 후보의 분배 지분 산출 근거로 감사 이벤트에 기록된다.

3.8 제안 모델의 아키텍처

시스템은 그림 3과 같이 콘솔, 게이트웨이 (Backend for Frontend, BFF), 코어, 컨트랙트의 5계층으로 구성되며, 계약 조건 서명부터 온체인 기록과 지금까지의 데이터 흐름과 신뢰 경계를 함께 나타낸다.

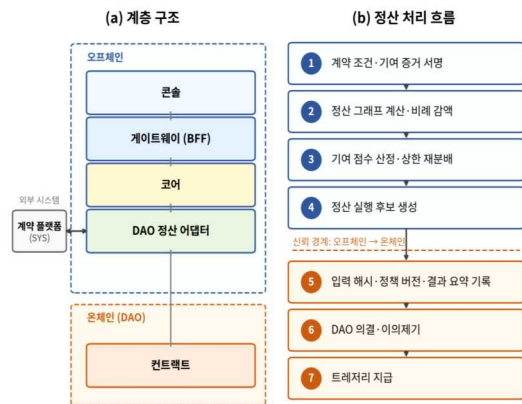


그림 3. 시스템 구조 및 정산 데이터 흐름
Fig. 3. System Architecture and Settlement Data Flow

분배 규칙 계산과 정산 그래프 처리는 오프체인 코어에서 수행하고 온체인에는 의결·집행 기록과 토큰 상태만 둔다. 정산 계산 자체는 중앙 서버로도 가능하지만 온체인 기록은 다음을 보장한다. 서로 다른 관리자와 기여자가 분배 정책의 버전에 공동으로 동의하고, 정산의 입력 해시와 정책 버전, 결과 요약이 블록에 고정되어 사후 변조를 검증할 수 있으며, 정책 변경이 과거 정산에 소급되지 않고, 특정 운영자가 결과를 임의로 수정할 수 없으며, 분쟁 시 제3자가 같은 입력으로 같은 결과를 재계산할 수 있다. 오프체인 코어에

대한 신뢰는 공개 명세와 참조 구현, 이의제기 절차, 검증 가능한 증명, 복수 실행자의 결과 대조로 완화할 수 있으며, 본 구현은 공개 명세와 참조 구현 방식을 따른다. 계약 플랫폼(SYS)과 DAO 정산 기능은 DAO 정산 어댑터를 통해서만 연동하여 두 시스템의 경계를 타입 안전한 인터페이스로 고정한다.

분배 시뮬레이션 API는 정산 결과를 입력받아 원래 지분, 조정된 지분, 경고, 감사 이벤트 식별자를 포함하는 정산 실행 후보를 생성하며, 주요 API 및 구현 범위는 표 2와 같다.

표 2. 주요 API 및 구현 범위
Table 2. API and Implementation Scope

API	기능	구현 범위
POST /intents/simulate	정규화, 경고 포함 정산 실행 후보 생성	구현(핵심)
POST /scores/compute	기여 점수 (C-score) 산정	구현(핵심)
POST /rewards/simulate	기여 비례 보상, 재정규화 분배	구현(핵심)
POST /proposals, /votes	분배 규칙 의결	구현
POST /intents/{id}/execute	실결제 실행	예약(비활성)

계산 결과를 즉시 집행하지 않고 실행 후보라는 별도 객체로 분리한 것은 분배 실행이 DAO 의결을 거쳐야 하는 거버넌스 대상이기 때문이다. 정산 실행 후보는 초안, 검증 완료, 승인, 집행의 네 단계 생명 주기를 가지며, 본 구현에서는 실결제와 토큰 이체를 수행하는 집행 단계를 비활성화하고 시뮬레이션과 후보 생성까지를 범위로 한다. 따라서 본 시스템은 정산의 완성 구현이 아니라 정산 후보를 산출하고 검증하는 개념 검증 프로토타입이다.

3.9 구현 환경

스마트 컨트랙트는 Solidity 기반 GOV(ERC-721 Votes/ERC-5192), SETL(ERC-20), Governor, TimelockController, Treasury로 구성하며 로컬 체인에서 배포하여 동작을 확인한다. 정산 코어와 API는 파이썬으로 구현하고, 금액 계산은 부동소수 반올림 오차를 방지하기 위해 정수 최소 단위의 십진 연산을 사용한다. 영지식 증명은 circom/Groth16(bn128)/snarkjs 스택[23][24][25]을 재사용한다.

4. 실험 및 평가

4.1 평가 목표 및 실험 설계

실험의 목적은 3장의 설계 주장을 실증하는 것이다. 즉 모델이 요구사항 R1~R5를 실제로 만족하는지, 그리고 기여 항목 C1~C3이 주장하는 효과가 실제로 발생하는지를 확인해야 한다. 이를 위해 검증 대상을 세 가지 평가 항목으로 나누고 각 항목에 하나의 실험을 대응시키며, 그 대응 관계는 표 3과 같다. 금전 분배 시스템은 우선 계산이 정확해야 하고, 정확하더라도 분배 결과가 기여자에게 실익을 주지 못하면 제안의 의미가 없으며, 기여 지표 조작이라는 고유한 위험에도 견뎌야 한다.

표 3. 평가 항목과 실험의 대응

Table 3. Mapping between Evaluation and Experiments

실험 및 평가 항목	검증 대상 (성질·기여점)	비교 기준
E1-정확성	R1, R2, C3 (식 (1)~(5))	수기 계산
E2-공정성	R5, C1	균등분배, 수익비례
E3-조작 저항성	C2(자격 검증 연계)	필터 미적용

정확성, 공정성, 조작 저항성의 세 항목은 이 요구를 순서대로 반영한 것이다.

- E1(정확성): 구현이 식 (1)~(5)의 정의대로 계산하는가, 어떤 입력에도 R1·R2를 위반하지 않는가를 검증한다. 정확성은 이후 모든 실험 수치의 신뢰 전제이다.
- E2(공정성): 기여자 편입(C1)이 보상 집중을 실제로 완화하면서 기여한 만큼 받는다는 유인을 보존하는지 측정한다.
- E3(조작 저항성): 기여 지표를 조작하는 시빌 공격이 정상 참여자 보상에 입히는 피해와 자격 검증 필터의 방어 효과를 측정한다.

대규모 그래프에서의 처리 성능 및 일괄 정산의 온체인 비용에 대한 정량 평가는 실결제를 포함한 완전 구현을 다룰 후속 연구에서 실험할 계획이다.

4.2 평가 지표 정의

각 실험에서 사용하는 지표를 정의하고 선정 이유를 밝히며, 전체 지표는 표 4에 요약한다.

표 4. 평가 지표 요약

Table 4. Summary of Evaluation Metrics

지표	정의	판정 방향	실험
일치율	수기 계산 기댓값과 일치한 사례 비율	100%	E1
불변식 위반 건수	R1, R2 검증에 실패한 횟수	0건	E1
지니 계수	보상 분포의 불평등도 (식 (6), 0~1)	낮을수록 균등	E2
스피어만 상관	기여-보상 순위 일치도 (-1~1)	1에 가까울수록	E2
보상 감소율	공격 전 대비 정상 참여자 보상이 줄어든 비율	0%(보상 보장)	E3

일치율은 구현이 산출한 분배액이 수기 계산 기댓값과 일치한 사례의 비율이고, 불변식 위반 건수는 확정 지분 불변과 총액 보존 검증에 실패한 횟수이다. 두 지표는 정확성의 직접 측정치이다.

지니(Gini) 계수는 분포의 불평등도를 0과 1 사이로 나타내는 지표로, 0은 완전 균등, 1은 한 참여자가 전부를 수취하는 완전 집중을 의미한다. 정의는 식 (6)과 같다. 참여자를 보상이 적은 순서로 세운 뒤 참여자 누적 비율에 대한 보상 누적 비율을 그린 곡선이 로렌츠 곡선이며, 지니 계수는 기하적으로 이 곡선과 완전 균등선 사이 면적의 두 배에 해당한다. 보상 집중이 얼마나 완화되었는지를 수치로 나타내기 위해 사용한다.

$$G = \frac{\sum_i \sum_j |r_i - r_j|}{2n \sum_i r_i} \quad (6)$$

스피어만 순위 상관은 기여 점수 순위와 보상 순위가 얼마나 일치하는지를 -1에서 1 사이로 나타낸 값으로, 1이면 기여 순위가 보상 순위에 그대로 보존됨을 뜻한다. 이 지표가 필요한 이유는 지니 계수만으로는 공정성을 평가할 수 없기 때문이다. 지니 계수만 보면 균등 분배가 0으로 항상 최선이지만, 균등 분배는 보상을 기여와 무관하게 만들어 기여 유인을 없앤다. 따라서 공정하다고 말하려면 지니 계수가 낮아져 집중이 완화되는 동시에 순위 상관이 유지되어 비례성이 지켜져야 하며, 두 지표를 쌍으로 보고한다.

보상 감소율은 공격 전과 비교해 공격 후 정상 참여자 보상이 줄어든 비율로, 값이 0%이면 공격에도 불구하고 정상 참여자의 보상이 온전히 보장되었음을 뜻한다.

4.3 실험 환경 및 데이터셋

실험은 자동화된 실험 환경(AMD Ryzen 9 5950X 16코어/32스레드, 128GB RAM, NVMe SSD, Ubuntu 24.04 LTS)에서 수행하였다. 모든 확률적 실험은 시드를 42로 고정하고 설정마다 30회 반복하여 평균과 표준편차를 보고하며, 금

액은 정수 최소 단위의 십진 연산으로 계산하여 반올림 오차를 배제한다. 난수 시드와 설정 파일을 포함한 재현 정보는 요청 시 제공한다. 모든 실험은 식 (4)의 재분배 절차를 구현한 동일한 코드로 수행하였다.

데이터셋은 세 종류를 사용한다. 첫 번째는 게임 3종을 원저작물로 하는 e스포츠 대회 방송 시나리오로, 요구 지분 합이 상한을 초과하여 정규화가 발동하는 대표 사례이다. 두 번째는 방송·클럽 수익이 결합된 N차 체인 시나리오로, 재정규화의 경계 조건을 검증한다. 세 번째는 파라미터화된 생성기로 임의 생성한 계약서 집합으로, 저작물 수, 그래프 깊이, 요구 분배 지분 분포를 변화시켜 특정 시나리오에 편향되지 않은 성질 검증 수행한다.

4.4 정확성 평가 (E1)

금전 분배 시스템에서 계산 오류는 곧 참여자의 금전 손실이며, 정확성이 확인되지 않으면 나머지 실험의 수치도 신뢰할 수 없다. 본 실험은 구현이 수식의 정의를 정확히 재현하는지, 그리고 정상 입력뿐 아니라 임의의 입력에 대해서도 확정 지분 불가침과 총액 보존이 유지되는지를 확인한다.

방법은 세 가지이다. 첫째, 대표 시나리오에서 정규화 산출을 수기 기대값과 비교한다. 이 시나리오는 원저작물 3건이 각각 30%를, 음원이 10%를 요구하고 총수익이 1,000만 원, 분배 합 상한이 80%인 경우이다. 둘째, 잔여 분배분이 550만 원인 N차 체인 시나리오에서 참여자 상한을 잔여 분배분의 40%로 두어 재정규화를 의도적으로 발동시키고, 보상 합의 보존과 경고 및 감사 식별자 기록을 확인한다. 셋째, 임의로 생성한 계약서 1,000건 전체에 대해 불변식 위반 여부를 검사한다.

실험 결과, 표 5의 대표 시나리오에서 정규화 산출액은 계약 조건으로부터 손으로 계산한 기대값과 100% 일치하였다. 구체적으로 게임사는 각

240만 원, 음원 저작권자는 80만 원을 지급받고 잔여 재원은 200만 원이 남았다. N차 체인 시나리오에서는 최상위 기여자에서 상한 220만 원이 발동하여 초과분 55만 원이 상한에 도달하지 않은 참여자에게 기여 점수 비례로 재분배되었다. 두 편집자는 각각 165만 원과 99만 원, 시청자 그룹은 66만 원을 지급받았고, 보상 합은 잔여 분배분과 정확히 일치하였으며 재정규화 경고와 감사 식별자가 기록되었다. 임의 계약서 1,000건 전체에서 정산 확정 지분 불가침과 보존 법칙 위반은 없었고, 집행 단계로 진입한 사례도 없었다.

표 5. 대표 시나리오의 요구 지분 감액 결과
Table 5. Provisional-claim Normalization Result

수취자	요구 지분	정규화 후	금액 (KRW)	비고
게임사 A, B, C (각)	30%	24%	2,400,000	비례 정규화
음원 저작권자	10%	8%	800,000	비례 정규화
잔여 (기여-보상 풀)	-	20%	2,000,000	R(잔여 분배분)
합계	100%	100%	10,000,000	보존 확인

4.5 공정성 평가 (E2)

제안 모델의 목적은 계약 밖 기여자를 정산에 편입하는 것이다. 그러나 편입한 결과가 수익비례 분배와 사실상 같다면 2단계 구조를 도입할 실익이 없고, 반대로 균등분배에 가까워지면 기여한 만큼 받는다는 유인이 사라진다. 본 실험은 제안 모델의 분배가 기여-보상 비례성을 유지하면서 소수 상위 참여자에 대한 보상 집중을 얼마나 완화하는지를 측정한다. 비교 기준은 두 가지이다. 균등분배는 모든 참여자에게 같은 금액을 주므로 지니 계수가 0으로 가장 낮지만 기여한 만큼 받는다는 유인이 없다. 수익비례는 기여자를 편입하지 않고 수익 지분대로만 나누는 현행 관행이다. 제안 모델이 이 두 극단 사이 어디에 위치하는지 확인한다.

소수 참여자에게 기여가 집중된 치우친 분포를 공통 입력으로 하여 세 방식의 보상을 산출하고, 각 방식의 지니 계수(식 (6))와 기여-보상 스피어만 상관을 30회 반복 측정하였다. 두 방식이 같은 시드의 같은 기여 분포를 공유하는 점을 이용해, 수익비례의 지니 계수에서 제안 모델의 지니 계수를 뺀 시드별 차이 Δ 지니를 쌓으로 분석하였다. 유의성은 Wilcoxon 부호순위 검정으로 확인하였다. 이 검정은 짝지어진 두 측정값의 차이가 0을 중심으로 대칭인지를 차이의 크기 순위로 판정하는 비모수 검정으로, 차이 값이 정규분포를 따르지 않거나 표본이 작아도 쓸 수 있다. 본 논문에서는 같은 시드에서 얻은 수익비례와 제안 모델의 지니 계수 차이 30개가 0과 다른지를 판정하는 데 사용하며, p값이 0.05보다 작으면 제안 모델이 보상 집중을 유의하게 완화한 것으로 본다. 신뢰구간은 10,000회 부트스트랩으로 구하였으며, 참여자 수를 20명, 100명, 500명으로, 상한 비율을 잔여 분배분의 10%에서 40%까지 바꾸어 가며 효과의 강건성을 확인하였다.

쌍체 분석 결과는 표 6과 같다. 기본 상한인 잔여 분배분의 40%에서 참여자가 20명일 때 Δ 지니는 0.013 ± 0.039 였다. Wilcoxon 검정의 p값은 0.028로 통계적으로는 유의하지만, 상한이 발동한 시드가 전체의 20%에 그쳐 효과 크기가 작다. 참여자가 100명이면 Δ 지니가 0.001로 줄고 p값이 0.317로 유의하지 않으며, 500명에서는 모든 시드에서 차이가 0이어서 검정 자체를 수행할 수 없었다. 즉 기본 상한을 적용한 제안 모델은 수익비례와 사실상 같은 분배를 산출하므로, 상한의 존재만으로 보상 집중이 자동으로 완화된다고 주장할 수는 없다. 균등분배는 지니 계수가 0으로 가장 균등하지만 보상이 기여와 무관해져 순위 상관이 정의되지 않으므로 표 6에서는 제외하였다.

반면 상한 비율을 낮추면 뚜렷한 절충이 나타난다. 표 7과 같이 상한을 잔여 분배분의 40%에

서 10%로 낮추면 지니 계수는 0.398에서 0.258로 약 35% 완화되고, 기여-보상 스피어만 상관은 0.999 이상으로 유지되어 비례성 훼손이 거의 없다. 상한이 낮을수록 상한 발동 참여자는 평균 0.2명에서 1.7명으로 늘어난다. 상한을 모두 더한 값이 잔여 배분보다 커서 배율만 조정해도 재원이 전부 배분되므로, 트레저리 이월은 전 구간에서 없었다.

표 6. 공정성 쌍체 분석
Table 6. Paired Fairness Analysis

참여 자 수	지니(수 익비례)	지니 (제안)	Δ 지니	p	스피어 만 상관 (제안)
20	0.411 ± 0.146	0.398 ± 0.125	0.013 ± 0.039	0.028	1.00
100	0.440 ± 0.074	0.439 ± 0.072	0.001 ± 0.004	0.317	1.00
500	0.479 ± 0.060	0.479 ± 0.060	0.000 ± 0.000	-	1.00

표 7. 상한 비율 민감도
Table 7. Cap-ratio Sensitivity

상한 비율	지니 계수	스피어 만 상관	상한 발동 수(평균)	트레저 리 이월
10%	0.258	0.999	1.73	0
15%	0.326	1.000	1.03	0
20%	0.358	1.000	0.57	0
30%	0.384	1.000	0.27	0
40%	0.398	1.000	0.20	0

그림 4의 로렌츠 곡선과 그림 5의 절충 곡선이 이를 보여준다. 따라서 제안 모델의 실질적 기여는 집중 완화와 기여 유인 사이의 절충점을 DAO 거버넌스가 상한 파라미터로 직접 선택할 수 있게 한 데 있다.

4.6 조작 저항성 평가 (E3)

기여 기반 분배는 기여 지표를 부풀리면 곧 더 많은 금전을 수취하는 구조이므로 조작 유인이 내재한다. 본 실험은 공격을 세 유형으로 나눈다.

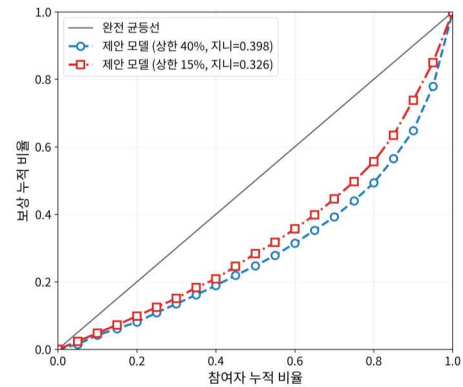


그림 4. 로렌츠 곡선 비교
Fig. 4. Lorenz Curves

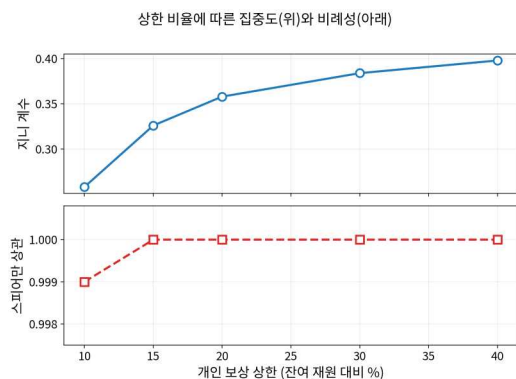


그림 5. 상한 비율에 따른 집중도-비례성
Fig. 5. Concentration-Proportionality by Cap Ratio

신원 위조 공격(A1)은 자격 검증을 통과하지 못한 허위 계정을 대량 생성하는 공격이고, 검증 우회 공격(A2)은 자격 대여나 도용으로 일부 시빌 계정이 검증을 통과한 공격이며, 내부 조작 공격(A3)은 정상적으로 검증을 통과한 계정이 자신의 시청·도달 지표를 자전 시청이나 봇으로 부풀리는 공격이다. 공격 계정을 전체의 10%,

30%, 50%씩 주입하고, 필터를 적용하지 않은 경우, 중복 제거만 적용한 경우, 자격 검증 제외만 적용한 경우, 둘을 병행한 경우의 네 조건으로 나누어, 필터를 적용한 뒤에도 남는 정상 참여자의 보상 감소율을 측정하였다.

본 실험은 공격을 세 유형으로 나눈다. 신원 위조 공격 A1은 자격 검증을 통과하지 못한 허위 계정을 대량 생성하는 공격이고, 검증 우회 공격 A2는 자격 대여나 도용으로 일부 시빌 계정이 검증을 통과한 공격이며, 내부 조작 공격 A3은 정상적으로 검증을 통과한 계정이 자신의 시청·도달 지표를 자전 시청이나 봇으로 부풀리는 공격이다. 공격 계정을 전체의 10%, 30%, 50%씩 주입하고 필터를 네 조건으로 나누어 측정하였으며, 주입 비율 30% 기준의 결과는 표 8과 같다. 필터가 없으면 정상 참여자 보상이 42.3% 감소하여, 조작 방지 수단이 없는 기여 기반 분배가 실질적인 금전 피해에 노출됨을 확인하였다. 신원 위조 공격 A1은 자격 검증 필터가 완전히 차단하여 보상 감소가 없었고, 정상 참여자는 공격 이전과 같은 보상을 지급받았다.

반면 검증 우회 공격 A2는 우회한 계정만큼 보상 감소가 남아, 우회율 30%에서는 두 필터를 병행해도 18.4%의 감소가 발생하였다. 내부 조작 공격 A3은 공격자가 모두 정상적으로 검증을 통

과한 계정이므로 자격 검증 필터가 효과를 내지 못한다. 시청 지표를 5배로 부풀린 조건에서 보상 감소율은 16.2%로 그대로 남았고, 도달 지표에 상한을 두는 중복 제거 필터는 정상적인 고도달 참여자까지 함께 억제하여 감소율을 19.9%로 오히려 키웠다. 주입 비율에 따른 추이는 그림 6과 같다. 요컨대 자격 검증은 신원 기반 공격에 대해 정상 참여자의 보상을 보장하는 유효한 수단이지만, 자격의 정당성만으로 행위의 진정성까지 보장할 수는 없다.

4.7 논의 및 한계

실험 결과를 종합하면 정확성 실험 E1은 뚜렷하게 검증되었고, 공정성 실험 E2와 조작 저항성 실험 E3은 각각 쌍체 분석과 공격 유형 확장을 통해 효과가 성립하는 조건과 한계를 정량적으로 확인하였다.

첫째, 공정성 효과는 상한 파라미터에 달려 있다. 기본 상한에서는 개선이 미미하고 참여자 규모가 커지면 사라진다. 따라서 제안 모델이 공정성에 기여하는 바는 어떤 설정에서 저절로 개선이 일어나는 데 있지 않고, 집중도와 비례성 사이의 절충을 상한으로 조절할 수 있게 하는 데 있다. 실험한 10%에서 40% 구간에서는 비례성 훼손이 관측되지 않았으나 그보다 낮은 상한은 실험하지 않았으며, 상한을 더 낮추면 비례성이 훼손될 수

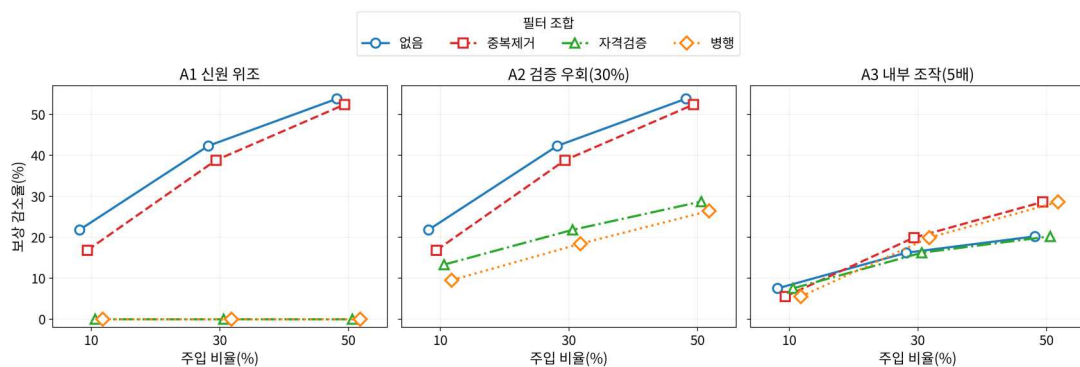


그림 6. 공격 유형·필터 조합·주입 비율에 따른 정상 참여자 보상 감소율
Fig. 6. Residual Reward Reduction by Attack Type, Filter, and Injection Ratio

있으므로, 실서비스에서는 커뮤니티가 받아들일 수 있는 비례성의 하한을 먼저 정하고 그 범위 안에서 상한을 의결하는 운영이 타당하다.

표 8. 공격 유형, 필터 조합별 정상 참여자 보상 감소율
Table 8. Residual Reward Reduction of Honest Participants by Attack Type and Filter Combination

공격 유형	필터 없음	중복 제거	자격 검증	병행
A1 신원 위조	42.3%	38.8%	0.0%	0.0%
A2 검증 우회 (우회율 10%)	42.3%	38.8%	13.3%	10.5%
A2 검증 우회 (우회율 30%)	42.3%	38.8%	21.8%	18.4%
A3 내부 조작(2배)	8.5%	9.6%	8.5%	9.6%
A3 내부 조작(5배)	16.2%	19.9%	16.2%	19.9%

둘째, 조작 저항성에는 신원 기반 필터로 막을 수 없는 위협이 남는다. 주입 30% 기준으로 검증 우회 공격에서는 자격 검증만 적용해도 21.8%의 보상 감소가 남고, 내부 조작 공격에서는 자격 검증만 적용한 경우 16.2%, 중복 제거를 병행한 경우 19.9%의 감소가 남으며, 주입 비율이 커지면 더 늘어난다. 이는 자격이 정당한지만 확인하는 자격 검증의 구조적 한계에서 비롯된다. 따라서 시청 시간의 패턴이나 참여자 간 상호작용 구조를 분석해 비정상 행위를 찾아내는 탐지 기법을 결합하는 것이 향후 과제이다.

셋째, 제안 모델은 시뮬레이션과 개념 검증 수준으로 실험결과와 메인넷 배포를 범위에서 제외한다. 대규모 그래프에서의 처리 성능과 온체인 정산 비용의 정량 실험, 기여 가중치의 실패데이터 기반 보정, 영지식 회로의 공개 시그널 정의 확정은 후속 연구로 남긴다.

5. 결 론

본 논문은 Web3.0 저작권 생태계의 두 구조적 문제, 즉 가치 창출 기여자의 정산 배제와 복수 원저작물 간 정산 조건 충돌을 해결하기 위해, 계약과 사전 합의 규칙으로 정해지는 정산 확정 지분과 기여 기반 보상 분배를 분리하는 DAO 기반 2단계 정산·분배 모델을 제안하였다. 모델이 만족해야 할 다섯 가지 요구사항을 정의하고 실험으로 검증한 결과, 임의 계약서 1,000건 전체에서 불변식 위반이 없는 정확성을 확인하였다. 또한 보상 상한 파라미터로 보상 집중도와 기여 비례성 사이의 절충을 거버넌스가 직접 통제할 수 있음을 보였고, 모의 신원 위조 시나리오에서 자격 검증 필터가 정상 참여자의 보상을 보장함을 확인하였다. 다만 검증을 우회한 계정과 정상 계정의 지표 부풀리기에 대해서는 자격 검증만으로 피해를 막을 수 없음도 함께 확인하였다.

향후 연구로는 제안 모델의 구현과 함께 대규모 정산 그래프에서의 처리 성능 및 일괄 정산의 온체인 비용에 대한 정량 실험, 검증 우회와 내부 조작 공격에 대응하는 행위 기반 이상 탐지, 실패데이터 기반 기여 가중치 보정, 기여 점수의 온체인 검증, 실험결과를 포함하는 후속 연구로의 확장을 계획한다.

본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원 부설 한국문화기술기획평가원의 2026년도 신기술 융합 저작권 기술개발 사업으로 수행되었음 (과제명 : Web3.0 탈중앙화 환경에서 창작자간의 저작권 이용허락 거래 자동화 기술 개발, 과제번호 : RS-2024-00441360, 기여율 : 100%)

참 고 문 헌

- [1] SoundExchange, “SoundExchange Sues SiriusXM Over Underpayment of Digital Streaming Royalties,” Press Release, Aug. 2023.

- <https://www.soundexchange.com/news/soundexchange-sues-siriusxm-over-underpayment-of-digital-streaming-royalties/>
- [2] CoinDesk, "NFT Creator Royalty Payments Hit Two-Year Low: Nansen," Jul. 2023.
<https://www.coindesk.com/web3/2023/07/05/nft-creator-royalty-payments-hit-two-year-low-nansen>
- [3] M. M. Tunc, H. Cavusoglu, and Z. E. Zheng, "Resale Royalty in Non-fungible Token Marketplaces: Blessing or Burden for Creators and Platforms?," *Information Systems Research*, Vol. 36, No. 3, pp. 1543-1564, 2025.
DOI : 10.1287/isre.2023.0035
- [4] Choi Chang Jun, YoungJoon Joe and Dong-Myung Shin. Design of a Blockchain-based KRW Transfer System for Settlement and Distribution of Digital Content Copyright Fees. *Journal of Software Forensics*, 19(2), 21-30. 2023.
DOI : 10.29056/jsav.2023.06.03
- [5] ChangHyun Roh and Dong-Myung Shin. A Study on Cross-Chain Bridge Technology for NFT-based Digital Content Licensing Agreements. *Journal of Software Forensics*, 20(4), 257-267. 2024.
DOI : 10.29056/jsav.2024.12.26
- [6] Won-Bin Kim, Kyung-Yeob Park, Yong-Joon Joe and Dong-Myung Shin. A study on digital holographic printing technology market and copyright protection technology trends. *Journal of Software Forensics*, 19(1), 19-29. 2023.
DOI : 10.29056/jsav.2023.3.03
- [7] P. A. D. S. N. Wijesekara, "A Survey on Blockchain-driven Music Industry: Trends, Gaps, and Future Directions," *Science, Engineering and Technology*, Vol. 5, No. 2, pp. 116-148, 2025.
DOI : 10.54327/set2025/v5.i2.223
- [8] Q. Shi and Y. Zhou, "Application of Blockchain Technology in Digital Music Copyright Management: A Case Study of VNT Chain Platform," *Frontiers in Blockchain*, Vol. 7, 1388832, 2025.
DOI : 10.3389/fbloc.2024.1388832
- [9] B. Dietzenbacher, A. Estevez-Fernandez, P. Borm, and R. Hendrickx, "Proportionality, Equality, and Duality in Bankruptcy Problems with Nontransferable Utility," *Annals of Operations Research*, Vol. 301, No. 1, pp. 65-80, 2021.
DOI : 10.1007/s10479-020-03643-3
- [10] W. Thomson, "Axiomatic and Game-theoretic Analysis of Bankruptcy and Taxation Problems: An Update," *Mathematical Social Sciences*, Vol. 74, pp. 41-59, 2015.
DOI : 10.1016/j.mathsocsci.2014.09.002
- [11] J. C. Acosta-Vega, E. Algaba, and J. Sanchez-Soriano, "Design of Water Quality Policies Based on Proportionality in Multi-issue Problems with Crossed Claims," *European Journal of Operational Research*, Vol. 311, No. 2, pp. 777-788, 2023.
DOI : 10.1016/j.ejor.2023.05.029
- [12] B. Rozemberczki, L. Watson, P. Bayer, H. T. Yang, O. Kiss, S. Nilsson, and R. Sarkar, "The Shapley Value in Machine Learning," *Proc. 31st International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, pp. 5572-5579, 2022.
DOI : 10.24963/ijcai.2022/778
- [13] G. Chalkiadakis, E. Elkind, and M. Wooldridge, "Computational Aspects of Cooperative Game Theory," *Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning*, Morgan & Claypool, 2011.
DOI : 10.2200/S00355ED1V01Y201107AIM016
- [14] OpenZeppelin, "Governor and TimelockController," *OpenZeppelin Contracts Documentation*, 2023.
<https://docs.openzeppelin.com/contracts/4.x/governance>
- [15] M. Jungnickel, F. O. Sonmez, C. Mulligan, and W. J. Knottenbelt, "DAO Governance: Voting Power, Participation, and Controversy - A Review and an Empirical Analysis,"

- Distributed Ledger Technologies: Research and Practice, Vol. 5, No. 4, 2026.
DOI : 10.1145/3777416
- [16] R. Fritsch, M. Muller, and R. Wattenhofer, "Analyzing Voting Power in Decentralized Governance: Who Controls DAOs?," Blockchain: Research and Applications, Vol. 5, No. 3, 100208, 2024, DOI : 10.1016/j.bcr.2024.100208
- [17] S. Tamai and S. Kasahara, "DAO Voting Mechanism Resistant to Whale and Collusion Problems," Frontiers in Blockchain, Vol. 7, 1405516, 2024, DOI : 10.3389/fbloc.2024.1405516
- [18] M. Platt and P. McBurney, "Sybil in the Haystack: A Comprehensive Review of Blockchain Consensus Mechanisms in Search of Strong Sybil Attack Resistance," Algorithms, Vol. 16, No. 1, 34, 2023, DOI : 10.3390/a16010034
- [19] D. Siddarth, S. Ivliev, S. Siri, and P. Berman, "Who Watches the Watchmen? A Review of Subjective Approaches for Sybil-resistance in Proof of Personhood Protocols," Frontiers in Blockchain, Vol. 3, 590171, 2020, DOI : 10.3389/fbloc.2020.590171
- [20] Entriken, W., Shirley, D., Evans, J., & Sachs, N. "ERC-721: Non-Fungible Token Standard." 2018. Ethereum. org, Ethereum Improvement Proposals.
<https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-721>
- [21] Daubenschutz, T., & Anders, A. T. "ERC-5192: Minimal Soulbound NFTs." 2022. Ethereum Improvement Proposals.
<https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-5192>
- [22] E. G. Weyl, P. Ohlhaver, and V. Buterin, "Decentralized Society: Finding Web3's Soul," SSRN Working Paper No. 4105763, 2022, DOI : 10.2139/ssrn.4105763
- [23] Belles-Munoz, M., Isabel, M., Munoz-Tapia, J. L., Rubio, A., & Baylina, J, "Circom: A Circuit Description Language for Building Zero-Knowledge Applications," IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, Vol. 20, No. 6, pp. 4733-4751, 2023, DOI : 10.1109/TDSC.2022.3232813
- [24] J. Groth, "On the Size of Pairing-based Non-interactive Arguments," Proc. EUROCRYPT, pp. 305-326, 2016, DOI : 10.1007/978-3-662-49896-5_11
- [25] K. Gurkan, W. J. Koh, and B. Whitehat, "Semaphore: Zero-Knowledge Signaling on Ethereum," ZKProof Community Proposal, 2020. <https://docs.zkproof.org/pages/standards/accepted-workshop3/proposal-semaphore.pdf>

저 자 소 개



홍두표(Du-Pyo Hong)

2024.2 숭실대학교 컴퓨터학과 석사
2024.1-현재 : 엘에스웨어(주) 주임연구원
<주관심분야> 빅데이터, 분산 컴퓨팅, 블록체인



장성일(Sung-II Jang)

2019.8 숭실대학교 컴퓨터학과 석사
2021.8 숭실대학교 소프트웨어학과 박사수료
2021.9-현재 : 엘에스웨어(주) 수석연구원
<주관심분야> 시스템 프로그래밍, 분산 컴퓨팅, 블록체인



조용준(Yong-Joon Joe)

2011.03 큐슈대학교 전기정보공학과 학사
2013.03 큐슈대학교 정보학부 석사
2016.03 큐슈대학교 정보학부 박사 수료
2013.04-2016.03 일본 학술진흥원 특별연구원
2016.04-현재 : 엘에스웨어(주) 소프트웨어연구소
연구개발본부 기술이사
<주관심분야> 오픈소스, 저작권, 병렬·분산
컴퓨팅, 게임이론, 분산 제약 최적화 문제



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