

모바일-엣지-클라우드에서 자원 할당과 경제 모델링: 최신 연구 동향

함동호, 곽정호*

대구경북과학기술원, *고려대학교

dhham97@dgist.ac.kr, *jeonghokwak@korea.ac.kr

A survey on the resource allocation and economics in mobile-edge-cloud architecture

Dongho Ham, Jeongho Kwak*

DGIST, *Korea Univ.

요 약

최근에 서비스의 패러다임이 다층 클라우드·엣지·단말·블록체인·메타버스까지 확장됨에 따라, 자원 할당 문제는 경제적 인센티브 설계와 불가분의 관계가 되었다. 본 논문에서는 여러 종류의 자원 할당과 경제적 인센티브를 동시에 다룬 최신 연구들의 동향을 심층적으로 비교·분석한다. 각 논문은 가격·보상 메커니즘을 적용해 중개 효율, 수익 배분, 시장 구조, 지연·수익 트레이드오프 등을 최적화하고, Stackelberg 게임·연속 경매·다목적 최적화 등 다양한 분석 도구를 활용한다. 비교 결과, 전략적 가격 설계가 자원 효율과 참여자 후생을 동시에 개선할 수 있음을 확인했지만 현실 단가·수요 변동·다중 플랫폼 경쟁이 충분히 반영되지 않은 한계가 드러났다. 본 논문은 이러한 격차를 해소하기 위한 연구 과제로 현실기반 가격 데이터 통합, 멀티 클라우드 경쟁 모델 등을 제시한다.

I. 서론

클라우드·엣지 컴퓨팅, 블록체인, 사물인터넷(IoT), 메타버스 게임 등 분산형 서비스가 급격히 확산되면서 자원 할당 문제는 단순 성능 최적화가 아닌 경제적 인센티브 설계와 긴밀히 엮이고 있다. 각 플랫폼이 이용료, 수수료, 토큰 보상 등 다양한 가격 장치를 도입함에 따라 이해관계자(서비스 사업자·중개자·최종 사용자)의 전략적 행동이 시스템 효율성에 직접적인 영향을 미치기 때문이다.

본 서베이는 최근 발표된 연구 중 경제 모델과 자원 할당을 통합적으로 다룬 네 편—① Broker2Earn(B2E), ② Edge Device Peer Content Sharing(ED-PCS) 경제 분석, ③ 수직·수평 상호작용 구조별 최적 가격(IoT-VHI), ④ Play-to-Earn 메타버스 MEC 최적화(ME-P2E)—을 선정하였다. 네 논문은 각각 블록체인 크로스샤드 거래, 엣지 단말 간 자원 공유, 다계층 IoT 시장, 메타버스 영상 전송이라는 상이한 시나리오에서 가격·보상 체계를 활용해 자원 배분 효율을 추구한다. 이를 통해 자원·경제 연계 연구의 주요 통찰과 한계를 도출하고, 후속 과제를 제안한다.

II. 본론

Chen et al.은 샤딩 블록체인에 서 cross-shard transaction 지연 문제를 해결하기 위해, 사용자에게

중개자 역할을 인센티브로 유도하는 Broker2Earn 프로토콜 설계하였다 [1]. 브로커는 담보를 예치한 뒤 거래 검증·중계로 수수료를 획득하며, 시스템은 연속 경매 메커니즘을 통해 브로커 간 경쟁을 유발한다. 분석 결과, 제안 프로토콜은 불성실 브로커를 경제적으로 패널티하고 평균 확정 시간을 50% 이상 단축한다. 다만 현실 수수료·담보 수준은 정규화되어 실가액 매핑이 제한적이다.

Jiang 는 하나의 콘텐츠 제공자와 다수 엣지 단말이 ‘캐싱·공유’ 여부를 결정하는 2 단계 Stackelberg 게임을 모델링하였다 [2]. 제공자는 수익 배분율(α)을, 단말은 공유 여부를 선택하며, 균형 분석을 통해 α 의 증가는 전송비 절감과 인센티브 비용 증가 사이에서 최적점을 형성함을 밝혔다. 실험에서는 $\alpha \approx 0.3$ 에서 제공자 이익이 최대화되고 단말 총후생도 40% 상승했다. 비용·단가는 정규화 값이므로 실물 기반 정책 제안에는 추가 취합이 요구된다는 한계점이 존재한다.

Ding et al.은 IoTSP- NSP- CSP 3 계층 시장을 (통합·수직 분리·수평 분리)로 구분하여, 두 단계를 가진 Stackelberg 게임(상위 계층)과 비협조 게임(동일 계층)을 결합했다. 분석 결과, 수직 분리는 이중마진 효과로 사용자 가격이 높아졌고, 수평 협력은 IoTSP 간 조정 비용이 낮을 때 거의 통합 구조 수준의 사회후생을 달성한다. 연구는 시장 구조가 자원 가격·수요·플랫폼 이익에 미치는 정량적 영향을 최초로 비교했으나, 수요 변동과 동적 자원 스케일링은 고려하지 않았다.

Liu et al.은 메타버스 기반 P2E (play to earn) 게임에서 사용자는 고해상도 스트리밍을 통해 토큰 수익을 얻지만, 지연이 커질수록 게임 경험이 악화된다는 아이디어에 착안하여, 사용자-서버 연합, 전송 전력, 영상 해상도를 동시에 최적화하는 다목적 모델을 제시하였다. 이때, MOS(Mean Opinion Score) 및 EOS(Experience Opinion Score) 데이터셋으로 수익-품질 함수를 학습했다. 최적화 문제는 QCQP 로 완화해 준최적 해를 구했고, 해상도 1080p 기준 평균 지연 35% 감소, 토큰 수익 22% 증가를 보고했다. 그러나, 실제 토큰 경제 변동성은 모델에 반영되지 않았다.

네 논문은 모두 가격·보상 메커니즘을 통해 자원 할당의 효율성과 참여자 유인을 동시에 모색했다. Stackelberg 구도, 수익 배분율, 중개 마크업 등 리더-팔로어 관계를 활용했으며, 네트워크 외부성(ED-PCS)·이중마진(IoT-VHI)·지연 민감도(ME-P2E) 등 경제학적 현상을 정량 분석했다. 그러나 현실 단가·수수료·토큰 변동을 직접 삽입한 사례는 드물어 현실적인 정책의 실효성 평가가 어렵다.

III. 결론

자원 할당 문제에 경제 모델을 결합한 연구는 블록체인, 엣지, IoT, 메타버스 전 영역에서 빠르게 확장 중이다. 본 서베이가 살펴본 네 편은 중개 인센티브, 수익 배분, 시장 구조, 토큰 기반 보상 등을 활용해 자원 효율과 사용자 후생을 동시에 증진할 수 있음을 입증했다. 앞으로는 실가격 데이터·다중 플랫폼 경쟁·동적 수요를 통합한 모델과 함께, 경제적 공격·보안 위협까지 고려한 포괄적 인센티브 설계가 요구된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.RS-2022-II220704, 초고속 이동체 지원을 위한 3D-NET 핵심 기술 개발), (RS-2024-00398157)

참 고 문 헌

- [1] Q. Chen, H. Huang, Z. Yin, G. Ye, and Q. Yang, "Broker2Earn: Towards maximizing broker revenue and system liquidity for sharded blockchains," in Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. (INFOCOM), 2024, pp. 251– 260.
- [2] C. Jiang, "Economic analysis of joint mobile edge caching and peer content sharing," in Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. (INFOCOM), 2023, pp. 1– 10.
- [3] N. Ding, L. Gao, J. Huang, X. Li, and X. Chen, "Optimal pricing under vertical and horizontal interaction

structures for IoT networks," in Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. (INFOCOM), 2022, pp. 870– 879.

- [4] C. Liu, T. J. Chua, and J. Zhao, "Optimization for the metaverse over mobile edge computing with play to earn," in Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. (INFOCOM), 2024, pp. 2269– 2278.