

# 모바일-엣지-클라우드에서 자원 할당과 경제 모델링: 최신 연구 동향

함동호, 곽정호\*  
대구경북과학기술원, \*고려대학교

dham97@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.

### 요약

최근에 서비스의 패러다임이 다중 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, 지역·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 연관하고 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-VII), 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 실가격 매핑이 제한적이다.

Jiang는 하나의 콘텐츠 제공자와 다수 엣지 단말이 '캐싱·공유' 여부를 결정하는 2 단계 Stackelberg 게임을 모델링하였다 [2]. 제공자는 수익 배분율( $\alpha$ )을, 단말은 공유 여부를 선택하며, 균형 분석을 통해  $\alpha$ 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 IoT-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 IoT-NSP 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, 자연이 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 QCQP로 완화해 준최적 해를 구했고, 해상도 1080p 기준 평균 자연 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 2025년도 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.