**연구계획서(프로포절)**

제목(가제): 응용 시나리오별 엣지 컴퓨팅 아키텍처 비교 평가: 저지연·대역폭·오케스트레이션 관점의 정량적 분석

소속/성명/이메일: (작성)

제출일: (작성)

**Summary**

We summarize a comparative study of three edge architectures—Cloudlet/MEC, Heterogeneous Edge/Fog (with device cooperation), and Edge–Cloud Federation—evaluated across four representative application scenarios: mobile cloud gaming/AR, V2X, city-scale video analytics, and remote healthcare. The study defines shared KPIs (end-to-end latency/jitter, backhaul reduction, throughput, energy, orchestration delay/recovery, and session continuity) and uses a factorial design controlling virtualization (bare-metal/container/VM), offloading partition, and SDN/NFV orchestration. A reproducible testbed generates measurements under mobility and failure injection (live migration, edge handover). Statistical analysis (mixed-effects, ANOVA, survival models) and queueing-based latency formulations generalize the results into scenario-conditioned recommendations and tuning guidelines.

**Research Goals (No more than 500 words)**

* Establish a taxonomy mapping three edge architectures to four application scenarios with common KPIs.
* Build a reproducible testbed spanning Wi‑Fi 6/6E and 5G SA; support live migration, edge handover, and failure injection.
* Quantify the impact of virtualization choices (bare-metal/container/VM) and offloading partitions on E2E latency/jitter and throughput.
* Model latency as L = L\_proc + L\_play + RTT, and fit mixed-effects and queueing models to generalize beyond the testbed.
* Deliver scenario-conditioned design guidelines: optimal architecture/virtualization pairings, tuning knobs (encoder presets, split points, migration triggers).

**Research Description (No more than 1000 words)**

Architectures & Scenarios: We evaluate A1 Cloudlet/MEC, A2 Heterogeneous Edge/Fog (including device cooperation), and A3 Edge–Cloud Federation. Four scenarios stress different requirements: S1 mobile cloud gaming/AR (sub‑70 ms latency, low jitter), S2 V2X (ms-scale deadlines, mobility), S3 multi-camera city surveillance (near-source filtering and privacy), S4 remote healthcare (reliability/energy/privacy).

Testbed & Controls: Wireless access via Wi‑Fi 6/6E and 5G SA (virtual core). Edge nodes include campus co-located cloudlets, heterogeneous mini-clusters (router/AP/RPi) with device cooperation, and public/private clouds under federation. Virtualization spans bare-metal, containers, and KVM VMs with GPU passthrough/sharing. Orchestration uses Kubernetes(+KubeVirt), SDN (ONOS/OVS), and NFV MANO-like components.

Workloads & Traffic: Gaming/AR pipeline with encoder latency visibility; V2X event processing with synthetic and trace-driven inputs; multi-camera analytics with on-device privacy filters; wearable streaming with event detection. We inject mobility (edge handover) and failures, and emulate RTT/loss/jitter conditions.

Metrics & Analysis: KPIs include E2E latency, jitter, frame loss/PSNR(VMAF), backhaul reduction, CPU/GPU/power, orchestration delay/retries, and recovery times. We apply mixed-effects models (random effects: session/node), ANOVA/post-hoc tests, survival analysis for session continuity, and queueing-based latency formulations. Sensitivity analysis varies distance, offloading split, and encoder presets.

Reproducibility & Artifacts: We publish scripts, container images, and datasets; CI automates repeated measurements and result regeneration.

**Expected Research Outcomes (No more than 500 words)**

* Scenario-conditioned recommendations mapping requirements to architecture/virtualization choices and tuning knobs.
* Quantitative models predicting latency/backhaul trade-offs as a function of distance, wireless quality, and offloading splits.
* Operational guidance for SDN/NFV orchestration under mobility and bursty demand: scaling policies, migration triggers, and path control.
* Open artifacts (testbed scripts, configs, datasets) enabling third-party reproduction and extension.

**Key Words**

Edge Computing; MEC; Fog; Federation; Offloading; SDN/NFV; Low Latency; Bandwidth Reduction; Mobility; Video Analytics.

1) 연구 제목(가제)

“응용 시나리오별 엣지 컴퓨팅 아키텍처 비교 평가: 저지연·대역폭·오케스트레이션 관점의 정량적 분석”

2) 배경 및 필요성

기존 연구는 엣지 컴퓨팅의 필요성(특히 초저지연 인터랙티브 서비스)을 실험적으로 보였으나(모바일 게임 사례), 아키텍처 유형별(Cloudlet/MEC, Heterogeneous Fog/단말협력, Edge–Cloud Federation) 성능 차이를 시나리오별로 체계적으로 비교·일반화하지는 못했습니다.

본 연구는 애플리케이션 요구(지연·지터·대역폭·이동성·프라이버시), 인프라 제약(배치/운영비·전력·이기종), 오케스트레이션(NFV/SDN/가상화) 축을 교차시켜 아키텍처–시나리오 매트릭스를 만들고, 정량 실험+분석 모델로 추천 가이드라인을 제시합니다.

3) 연구 목표

분류 체계 정립: 3대 엣지 아키텍처(① Cloudlet/MEC, ② Heterogeneous Edge/Fog, ③ Edge–Cloud Federation)의 기능·운영 특성 재정의(가상화/오프로딩/연합·캐싱/오케스트레이션).

시나리오 세트 정의: 저지연/대역폭/이동성/프라이버시 요구가 상이한 4개 대표 응용 선정.

지표·측정 설계: E2E 응답지연(= 처리+재생+네트워크), 지터, 유효 대역폭/백홀 절감율, 처리량, 에너지(단말/엣지), 오케스트레이션 비용, 서비스 연속성(마이그레이션 성공/중단시간) 등 공통 KPI 확정.

실험·모델 결합 평가: 재현 가능한 테스트베드에서 실험 후, 혼합효과모형/회귀·큐잉 모델로 일반화.

권고안 제시: “시나리오 조건 → 최적/차선 아키텍처 + 운영 파라미터”로 이어지는 의사결정 표/룰셋 도출.

4) 비교 대상 응용 시나리오(대표 4종)

S1 모바일 클라우드 게이밍/AR: 70 ms 미만의 응답지연·낮은 지터·고화질 인코딩 파이프라인(인코딩 지연 이슈 포함).

S2 V2X/스마트교통(충돌회피·RSU 연산): 초저지연(수 ms–수십 ms), 지리적 분산, 이동성-마이그레이션 요구.

S3 공공안전/도시감시(비디오 분석): 대역폭 집약(근원지 전처리·필터링로 백홀 절감), 프라이버시 전처리.

S4 원격 헬스/웨어러블 스트리밍: 낮은 지연·신뢰성, 개인정보 보호/규제, 에너지 효율.

필요 시 부가 시나리오(스마트 팩토리 제어, 창고 로보틱스 등)를 부록으로 확장.

5) 비교할 아키텍처 프로파일(3종)

A1 Cloudlet/MEC(Access-edge 서버 상자형, Micro-DC): RAN/AP 공위치, 링크 상태 노출, 짧은 RTT, 확장 비용 고려.

A2 Heterogeneous Edge/Fog(라우터·AP·STB·단말 협력/로컬 클라우드): 이기종/가변성·신뢰/가용성 이슈 vs 배치 유연성/근접성.

A3 Edge–Cloud Federation(연합·미러링·분산 실행존): 엣지·센터 동적 분할, 데이터 이동/일관성·정책/오케스트레이션 복잡도.

6) 핵심 기술 축(통제 변수)

가상화: 베어메탈/컨테이너/VM(라이브 마이그레이션, GPU/하드웨어 오프로딩). 컨테이너는 베어메탈에 근접, VM은 PD 오버헤드가 의미 있게 큼(기존 실험 인사이트).

오프로딩: 연산·인코딩 분할(엣지 vs 단말/클라우드), 파이프라인 지연(특히 인코딩) 최적화.

NFV/SDN 오케스트레이션: 수요 급증 시 VNF 자동 배치, 경로/정책 제어, 세션 지속성.

7) 연구 질문(RQ) & 가설(H)

RQ1: 시나리오별 KPI 관점에서 A1/A2/A3 중 누가 우월한가?

H1: 초저지연(AR/게이밍, V2X)은 A1이 우세(짧은 RTT), 대역폭 집약·프라이버시는 A2/A3가 유리(근원지 전처리·연합 분산).

RQ2: 가상화 선택(컨테이너/VM)이 응답지연·지터에 미치는 영향은?

H2: 컨테이너는 베어메탈에 근접, VM은 +지연·지터 → 30 FPS/FHD 목표 달성률 하락.

RQ3: 추가 연산자원(GPU 확장)이 원거리 RTT를 상쇄할 수 있는가?

H3: 인코딩 지연 비중이 커 ND 우위 미상쇄, 근접 배치 효과가 지배적.

RQ4: 이동성 상황에서 마이그레이션 정책(트리거/경로/상태동기)이 QoE에 미치는 영향은?

H4: A1/A3 + 라이브 마이그레이션 + SDN 경로 최적화가 세션 연속성 최대화.

8) 방법론

8.1 테스트베드/플랫폼

무선접속: Wi-Fi 6/6E, 5G SA(가상 코어), 셀/RSU 에지.

엣지 노드:

A1: 기지국/캠퍼스 AP 공위치 Cloudlet/MEC 서버(GPU, NIC 오프로딩).

A2: 라우터·AP·Raspberry Pi 클러스터 + 단말 협력 로컬 클라우드.

A3: A1/A2 + 퍼블릭/프라이빗 클라우드 연합(OpenStack/K8s + Federation/Service Mesh).

가상화: Bare-metal vs Container(Docker/Containerd) vs VM(KVM), GPU 패스스루/공유.

오케스트레이션: Kubernetes + KubeVirt + NFV MANO(ONAP/OSM 유사), SDN 컨트롤러(ONOS/OVS).

워크로드:

S1: 클라우드 게이밍 파이프라인(GamingAnywhere 계열), AR 추론(단말/엣지 분할).

S2: V2X 시뮬 + 실측(소형 자율주행 키트/시뮬레이터) 이벤트 처리.

S3: 다중 카메라 스트림 분석(객체검출/요약), 프라이버시 필터(얼굴 블러).

S4: 웨어러블 연속 신호 스트리밍 + 이벤트 검출.

트래픽/이동성 생성기: RTT/손실·지터 에뮬레이션, 엣지 핸드오버/라이브 마이그레이션 시나리오 주입.

8.2 측정 지표(KPI)

응답지연(RD) = PD(서버 처리/인코딩)+OD(클라이언트 재생)+ND(RTT), 지터, 프레임 손실/PSNR(or VMAF), 백홀 트래픽 절감율, CPU/GPU/전력, 오케스트레이션 지연/재시도, 장애·스케일 아웃 복구시간.

8.3 실험 설계

요인설계: {아키텍처 3}×{시나리오 4}×{가상화 3}×{무선 2}×{해상도/비트레이트} 반복 측정.

분석: 혼합효과모형(랜덤효과=세션/노드), ANOVA/사후검정, 생존분석(세션 지속성), 큐잉 기반 지연 모델 적합, 민감도 분석(거리·오프로딩 분할율·인코더 preset).

재현성: 실험 스크립트/컨피그·이미지·데이터셋 공개, CI로 반복측정 자동화.

9) 기대 결과 및 기여

정량 가이드라인: “조건별 최적 아키텍처/가상화 조합”과 튜닝 파라미터(예: 인코더 preset, 분할 추론 지점, 마이그레이션 트리거).

일반화 모델: 거리·무선상태·오프로딩 비율에 따른 환산 지연 예측식과 백홀 절감–지연 상충곡선.

운영 가이드: NFV/SDN 오케스트레이션 정책(스케일·경로·QoS)과 비용–성능 트레이드오프 문서화.

참고 문헌

Edge Computing for the Internet of Things (원문). (세부 서지정보 기입 예정)

Edge Computing for the Internet of Things — 한국어 번역본. (세부 서지정보 기입 예정)

관련 선행연구 A/B/C. (세부 서지정보 기입 예정)