

사물인터넷 융복합 기반 아동 놀이·돌봄 플랫폼 연구

이근호*
백석대학교 컴퓨터공학부 교수

A Study on an IoT-Converged Platform for Children's Play and Care

Keun-Ho Lee*
Professor, Division of Computer Engineering, Baek-Seok University

요약 본 연구는 아동 주도 놀이와 가족참여형 돌봄에 사물인터넷 기술을 융합한 데이터 기반 운영 모델을 제안한다. 과도한 사교육 참여와 놀이시간 감소, 돌봄 격차 확대 등 아동·가족이 직면한 문제를 해결하기 위해, 아동의 권리(자율성·안전·참여)를 중심 가치로 삼아 서비스 체계를 설계하였다. 제안 모델은 실내외 공간·안전·보건 상태를 상시 측정하는 IoT 센서 네트워크, 콘텐츠 이용과 행동 데이터를 수집·정제·분석하는 파이프라인, 발달 단계와 가족 유형·선호에 맞춘 놀이·돌봄 맞춤 추천 엔진, 안전·참여·효율 지표를 실시간으로 가시화하는 운영 거버넌스 대시보드로 구성된다. 개인정보 보호와 아동 권리 증진을 위해 최소수집·가명처리·보호자 동의·목적 제한 등 Privacy by Design 원칙을 반영하였다. 또한 단계적 구축 로드맵과 핵심성과지표를 제시하여 실현 가능성과 확장성을 검증한다.

주제어 : 사물인터넷, 아동 주도 놀이, 가족참여 돌봄, 개인정보 보호, 데이터 기반 운영

Abstract This study proposes a data-driven operational model that integrates Internet of Things (IoT) technologies into child-led play and family-participatory care. To address challenges faced by children and families—such as excessive private education, reduced playtime, and widening care gaps—the service framework is designed around children's rights to autonomy, safety, and participation. The proposed model comprises: an IoT sensor network that continuously measures indoor/outdoor environmental, safety, and health conditions; a pipeline for collecting, cleansing, and analyzing content-usage and behavioral data; a personalized recommendation engine that tailors play and care activities to developmental stages as well as family types and preferences; and an operational governance dashboard that visualizes safety, engagement, and efficiency indicators in real time. To protect personal data and enhance children's rights, the design adopts Privacy by Design principles, including data minimization, pseudonymization, guardian consent, and purpose limitation. A phased deployment roadmap and key performance indicators are also presented to validate feasibility and scalability.

Key Words : IoT, child-led play, family-engaged care, personal information protection, data-driven operations

1. 서론

디지털 전환이 가속화되는 환경에서 아동의 일상도 가정·학교·지역사회의 경계를 넘나드는 복합적 영향을 받는다. 한편으로는 사교육 의존과 놀이시간 감소, 돌봄 격차 확대가 지속되고, 다른 한편으로는 센서·네트워크·클라우드를 대표하는 사물인터넷이 생활공간 전반으로 침투하고 있다. 이러한 상반된 흐름 속에서 아동의 권리(자율성·안전·참여)를 회복·확대하면서도, 돌봄과 놀이 서비스를 정밀하고 효율적으로 제공하기 위한 데이터 기반 운영 체계의 필요성은 그 어느 때보다 뚜렷하다. 특히 아동의 권리는 국제 규범에서 보편적 기준으로 확인되어 왔으며[1], 디지털 환경에서의 아동 권리 보장을 위한 구체적인 지침이 제시되고 있다[2]. 그럼에도 불구하고 현장에서는 공간 안전·환경 건강성, 프로그램 참여 경험, 가족 이용 패턴을 종합적으로 관찰·학습·개선하는 순환 구조가 충분히 정착되지 못하고 있다.

기존 연구와 실무는 일부 기능을 부분적으로 다뤄 왔다. 예컨대 실내 공기질·혼잡도 모니터링이나 출입·위치 기반 안전관리, 놀이 콘텐츠의 디지털화, 보호자 안내 시스템 등은 개별적으로 도입되어 왔지만, 센싱—수집—분석—개입—평가의 전 주기를 아동 놀이·돌봄 맥락에 최적화하여 통합한 사례는 제한적이다. 실내 위치추적과 점유 감지, 공기질 모니터링 등 핵심 기술들은 기술적 성숙도가 높아졌음에도[11-13], 이를 건물/공간 운영 KPI와 연결해 실시간 의사결정으로 귀결시키는 엔드투엔드 통합은 아직 초기 단계다[14-17]. 더 나아가 아동 발달 단계와 가족 특성을 동시에 고려하는 개인화 추천 로직을 놀이·돌봄 설계에 적용하는 시도는 추천시스템 일반 이론의 풍부함에도 불구하고[18], 도메인 적합성·설계가능성·편향 최소화 관점에서 체계가 미흡하다.

IoT 융복합 환경에서 프라이버시와 보안은 전제 조건이다. GDPR은 기본 설계 단계에서부터 데이터 보호를 내재화할 것을 요구하며[3], Privacy by Design의 7대 원칙은 공공·민간 시스템 설계의 보편 규범으로 자리 잡았다[4]. 또한 설계 및 기본값에 의한 보호에 대한 감독 기구의 해석 지침[5]과 DPIA 수행 가이드라인은[6] 실무 적용을 구체화한다. IoT 특유의 광범위한 센싱과 네트워크 연결성은 보안·프라이버시 위험의 표면적을 넓히므로, 기기·서비스·조직 차원의 통합된 위험관리와 베이스라인 수립이 요구된다[7]. 이를 위해 기기 보안 역량 코어 베이스라인과 같은 표준화된 권고가 제시되어 왔다[8]. 본 연구는 이러한 규범·가이드라인을 아동 놀이·돌봄이라는

특수 맥락에 맞게 설계 원칙과 운영 절차로 구체화한다.

아동 발달과 건강의 관점에서도 데이터 기반 운영의 필요성은 분명하다. 세계보건기구(WHO)는 연령대별 신체활동·좌식행동 가이드라인을 통해 놀이·운동의 질과 양을 동시에 강조하고[9], 아동·청소년 대상 근거요약을 통해 관련 지표와 실천 전략을 제시한다[10]. IoT 센싱을 통한 실내외 환경지표(예: CO₂, PM, 온·습도, 조도, 소음)와 혼잡·동선 데이터는 놀이의 질과 안전·건강성을 정량화하고, 프로그램 설계·운영의 개선근거로 활용될 수 있다[14-17]. 동시에 실내 위치·점유 기술과의 결합은 위험 상황 조기 탐지, 군집도 기반 분산 안내, 환기·소음 제어 등 능동적 개입을 가능하게 한다[11-13].

이러한 배경을 바탕으로 본 논문은 아동 주도 놀이와 가족참여형 돌봄에 IoT를 융합한 데이터 기반 운영 모델을 제안한다. 제안 모델은 실내외 환경·안전·보건 상태를 상시 측정하는 IoT 센서 네트워크[14-17], 콘텐츠 이용 및 행동 데이터를 수집·정제·분석하는 데이터 파이프라인, 발달 단계·가족 유형·개인 선호에 맞춘 놀이·돌봄 활동을 제안하는 개인화 추천 엔진[18], 안전·참여·효율 핵심지표(KPI)를 실시간 제공하는 운영 거버넌스 대시보드로 구성된다. 설계·구현 전 과정은 아동의 권리 프레임[1][2]과 데이터 보호 규범[3-6], IoT 보안·프라이버시 리스크 관리 권고[7,8]를 준수하며, 데이터 최소 수집·가명처리·보호자 동의·목적 제한 등의 원칙을 내재화한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구와 기술 배경을 요약하고[1-13, 18], 3장에서는 요구 분석과 설계 원칙을 제시하고, 4장은 제안 아키텍처와 핵심 구성요소를 기술하며[14-17], 5장은 KPI 정의와 데이터 수집·분석·피드백 루프를 연결한 평가 프레임워크를 제안하고, 6장은 결론과 향후 과제를 정리한다.

2. 관련 연구 및 기술배경

2.1 아동 권리와 디지털 환경

아동의 자율적 놀이·참여·안전은 국제 규범에서 보편적 권리로 확립되어 왔다[1]. 특히 디지털 환경에서의 개인정보 보호, 안전한 이용, 아동의 의견 반영 및 참여권 보장을 위한 구체 지침이 제시되어 있으며, 서비스 설계 단계부터 이를 고려할 것을 요구한다[2].

2.2 데이터 보호와 Privacy by Design

GDPR은 '설계 및 기본값에 의한 데이터 보호'(Art.25)를 법적 의무로 규정하며, 최소수집·목적 제한·가명처리 등 원칙을 명문화한다[3]. Cavoukian이 정리한 Privacy by Design 7원칙은 공공·민간 시스템 설계의 표준적 준거로 사용되고 있다[4]. 감독기구의 해석 가이드라인[5]과 DPIA 수행지침[6]은 현장 적용 절차를 구체화한다.

2.3 IoT 보안·프라이버시 권고

IoT 환경은 광범위 센싱·연결성으로 인해 공격면이 커지므로, 자산 식별, 취약점 관리, 소프트웨어 업데이트, 로깅·상태보고, 데이터 보호 등 통합적 위험관리 체계가 요구된다[7]. 기기 보안 역량 코어 베이스라인은 제조사·운영자·소비자 책임 분담을 포함한 실무 기준을 제시한다[8].

2.4 실내 위치·점유·환경 모니터링

실내 위치(IPS) 기술은 Wi-Fi, BLE 비콘, UWB, 자이로/가속도 융합 등으로 고도화되었고[11-13], 점유·혼잡 감지를 위해 영상·적외선·CO₂ 기반 추정 등의 방식이 실증되고 있다[14,15]. 공기질(IAQ) 관리에서는 CO₂/PM/온·습도·소음 등의 다변량 지표를 대시보드로 통합하여 의사결정에 활용하는 사례가 증가한다[16,17].

2.5 추천 시스템과 맥락 인지

발달 단계, 가족 유형, 이용 맥락(시간·공간·동반자)을 반영하는 맥락 인지 추천은 이용 만족·재방문에 유의미한 영향을 준다[18]. 아동 도메인 적용 시 설명가능성, 편향 최소화, 보호자 통제(옵트인/옵트아웃)가 필수다[2-4].

아동·보호자·운영자(정책 주체)의 핵심 요구를 간명히 정리하면 표1과 같다. 본 연구가 대상으로 하는 아동 놀이·돌봄 환경에서 핵심 요구는 아동의 자율성과 안전, 그리고 건강한 몰입 경험의 보장이다. 서비스는 아동이 스스로 활동을 선택·조절할 수 있도록 발달 단계에 적합한 난이도와 자극을 제공해야 하며, 과밀·소음·공기질 악화 등 환경 위험을 선제적으로 탐지하고 신속히 완화할 수 있어야 한다. 동시에 얼굴인식과 같이 직접 식별을 전제로 한 과도한 감시는 지양하고, 데이터 수집 목적과 보존 기간, 활용 범위를 명확히 안내하는 투명성이 요구된다.

보호자에게는 예측가능성과 통제가능성이 중요하다. 안전 이벤트, 혼잡 분산, 환기·휴식 권고에 관한 알림은 실시간으로 제공되어야 하며, 자녀의 서비스 이용 데이터에 대해서는 열람·정정·삭제·이용중지 등 권리 행사가 손쉽게 신속하게 이뤄져야 한다. 추천되는 놀이·돌봄 활동은 선정 근거와 기대 효과가 이해 가능한 형태로 제시되어야 하고, 보호자는 알림 채널과 빈도, 추천 범위를 스스로 설정할 수 있어야 한다.

운영자와 정책 주체의 요구는 효율성과 책임성에 있다. 운영자는 구역별 혼잡을 분산하고 안전사고 위험을 낮추며 프로그램 효과를 정량적으로 평가할 수 있는 지표 체계를 필요로 한다. 개인정보보호와 정보보호는 설계 단계에서 기본값으로 내재화되어야 하며, 접근 로그와 감사 절차를 통해 사후 책임 추적이 가능해야 한다. 시스템 차원에서는 기기 인증, 안전한 업데이트, 취약점 관리, 장애 대응 및 복구 등 회복탄력성이 확보되어야 한다. 데이터 거버넌스 측면에서 수집 항목은 안전 확보, 혼잡 완화, 건강·참여 증진, 운영 최적화라는 핵심 목적 달성에 필요한 최소 범위로 한정한다. 개인 식별자와 행동·센서 로그는 논리·물리적으로 분리 보관하고, 재식별 위험을 정기적으로 점검한다. 개별 로그는 단기 보존하되, 의사결정과 평가에 필요한 통계적·비식별 집계 데이터만 장기 보관한다. 외부 공급업체와 연계 시에는 보안·프라이버시 조항, 패치·취약점 대응 SLA, 키펀리 요건을 계약에 의무화한다.

3. 요구 분석과 설계의 원칙

3.1 요구 분석

〈Table 1〉 Stakeholder Requirements

Stakeholder	Key Needs	Success Criteria
Children	Autonomous choice and healthy engagement; safety (mitigation of overcrowding, noise, and IAQ issues); privacy	Hazard response time < 60 s; higher IAQ compliance; reduced overcrowding time
Parents/Guardians	Real-time safety/operational alerts; data subject rights (access, rectification, erasure, restriction); explainable recommendations	Timely/accurate alerts; SLA-compliant processing of rights requests; clear disclosure of recommendation rationale
Operators/Policy Makers	Crowd dispersion and incident prevention; quantitative performance assessment; compliance, auditability, and resilience	KPI attainment; successful audits; reduced MTTR and increased system availability/uptime

성능·운영 요구는 경보형 이벤트의 중단 지연을 수초 단위로 관리하고, 센서·토픽 증가에도 수평 확장이 가능하도록 하는 것이다. 또한 고가용성 구성을 통해 연속 운영을 보장하고, 장애 시 자동 절제와 오프라인 버퍼링·자동 재전송을 통해 데이터 유실을 최소화한다.

3.2 설계의 원칙

표2는 설계에 대한 원칙의 기준안을 제안하고 각 내용은 다음과 같다.

첫째, 개인정보보호의 설계 내재화를 구현한다. 데이터 최소화집, 목적 제한, 가명·비식별 처리, 기본값 보호를 시스템 생명주기 전 단계(요구 정의-설계-구현-운영-폐기)에 일관되게 적용하며, 영상·고위험 생체정보 등 재식별 위험이 높은 데이터는 수집·보존을 원칙적으로 제한한다.

둘째, 엔드투엔드 관측성과 페루프 운영을 확립한다. 센싱→수집→분석→개입→평가의 전 과정을 지표·로그 설계에 반영하고, 실시간 대시보드와 경보 체계를 통해 즉시 개입하며, 개입 결과를 정책과 모델에 되먹임하여 안전 대응시간 단축, 과밀 시간 감소, 공기질 준수를 향상 등 핵심 성과의 지속적 개선을 달성한다.

셋째, 설명가능하고 통제가능한 추천을 제공한다. 추천 엔진은 발달 단계, 동반자 유형, 시공간 맥락, 혼잡 환경 상태, 과거 선호를 입력으로 활용하되, 각 추천에 선택 근거와 기대 효과를 함께 제시한다. 보호자는 알림 채널·빈도·범주와 민감 콘텐츠 제외 여부를 직접 설정할 수 있고, 시스템은 이러한 선택을 정책으로 준수·기록한다.

넷째, 개방형 표준과 상호운용성을 우선한다. 디바이스-게이트웨이-플랫폼 간 통신은 표준 프로토콜과 일관된 토픽·스키마를 채택하고, 시계열 데이터와 이벤트 로그의 성격에 적합한 저장 구조를 사용한다. 외부 복지·교육·보건 시스템과의 연동은 공개 API·웹훅 기반으로 설계하여 공급업체 종속을 최소화하고 확장성을 확보한다.

다섯째, 안전 임계와 윤리 가드레일을 명시한다. 과밀·소음·CO₂ 등의 경계값과 지속시간 기준을 정책으로 고정하고, 임계 초과 시 자동으로 분산 안내·환기 권고 등 개입이 발동되도록 한다. 아동에게 부적합하거나 민감한 콘텐츠는 기본 차단하며, 긴급 상황에서는 보호자와 운영자가 즉시 개입·중단할 수 있는 오프아웃 경로를 상시 제공한다.

여섯째, 보안과 회복탄력성의 기본값 설정을 원칙으로 한다. 전 구간 전송·저장 암호화, 상호 인증, 안전 부팅과 서명 기반 업데이트, 키 롤오버, 취약점 관리 및 침해 대응 훈련을 표준 절차로 운영한다. 브로커·데이터베이스·분석 엔진의 이중화와 엣지 단 버퍼링을 통해 장애 상황에서도 핵심 서비스가 지속되도록 한다.

마지막으로, 지표 중심의 관리와 검증 가능한 책임성을 확립한다. 안전 대응시간, 공기질 준수율, 과밀 시간 비중, 재방문율, 센서 가동률, MTTR/MTBF 등 운영·안전·참여 KPI를 설계 단계에서 정의하고 대시보드와 정기 보고 체계에 통합한다. 아울러 권리행사 처리율, 경보 정확도, 추천 설명가능성 만족도 등 책임·윤리 지표를 함께 관리하여 기술적 효율성과 아동 권리 보호의 양립을 보장한다.

<Table 2> Design Principles and Implementation Checkpoints

Principle	Core Content	Implementation Checkpoints
Privacy by Design (PbD) by default	Minimize data collection; purpose limitation; pseudonymization/de-identification; privacy-protective defaults	Pre-collection review; avoid high-risk data (e.g., facial/biometric); if unavoidable, apply strong technical/organizational controls (encryption, access scoping, DPIA)
End-to-End observability and closed-loop operation	Instrument the full pipeline (sensing → ingestion → analytics → intervention → evaluation) and feed outcomes back into policy/models	Define metrics/logs at design time; real-time dashboards and alerts; automatic policy/model updates based on outcomes (e.g., response times, congestion reduction, IAQ compliance)
Explainable and controllable recommendations	Provide rationale and expected effects for each recommendation; honor user/guardian controls	Expose reason codes and alternatives; UI to set channels/frequency/categories; support exclusion of sensitive content; persist and audit preference policies
Open standards and interoperability	Use standard protocols and schemas across devices, gateways, and platforms; modular data stores fit for purpose	MQTT/AMQP with consistent topic/schema; separate time-series vs. event logs; documented OpenAPI/Webhooks; versioning and backward compatibility
Safety thresholds and ethical guardrails	Policy-bound limits for crowding, noise, CO ₂ and durations; automatic interventions; child-appropriate content defaults	Trigger dispersion/ventilation when thresholds are exceeded; log all actions; default block for sensitive content; emergency opt-out/override paths
Security and resilience by default	End-to-end encryption and mutual auth; secure boot and signed updates; key rollover; HA/DR readiness	TLS everywhere; device certificates; at-rest encryption; vulnerability management SLA; broker/DB redundancy; edge buffering and auto-replay; incident response drills

4. 제안 아키텍처

본 장은 아동 놀이·돌봄 환경에 적합한 엔드투엔드 IoT 융복합 아키텍처를 제안한다. 아키텍처는 센싱, 엣지·수집, 데이터 저장·분석, 서비스, 거버넌스의 다층 구조로 구성되며, 안전·참여·효율 향상을 위한 페루프 운영(센싱→분석→개입→평가)을 기본 원리로 한다. 제안 아키텍처는 표준화된 수집·분석 파이프라인과 설명가능 추천, 대시보드·알림 서비스를 프라이버시·보안·감사 체계와 결합하여, 아동 놀이·돌봄 환경에서 안전성·효율성·개별화를 동시 향상시키는 검증 가능한 페루프 운영을 구현한다. 그림 1은 제안 시스템이 공간 유형 → 정책 프로파일 → 데이터/모델 → 개입·피드백으로 이어지는 페루프 동작함을 요약한다. 각 실내 공간(어린이집·아동센터·체육시설·노서공간)의 특성이 중앙의 정책 프로파일(환경·점유·알림·프라이버시)로 매핑되고, 이 프로파일이 우측의 데이터·모델 계층(시계열/이벤트 저장소, CEP·변칙 탐지, 맥락 추천)의 파라미터로 주입된다. 하단에서는 대시보드와 알림을 통해 환기·분산·추천 등 개입이 실행되며, 결과 KPI가 다시 정책·모델에 반영되어 자동으로 조정된다. 즉, 공간별 이질성을 프로파일로 표준화해 동일 파이프라인에서 처리하고, KPI 기반 피드백으로 안전성·효율성·개별화를 동시에 개선하는 구조를 시각화한 것이다.



Fig. 1. Mapping: Space Type Policy Profile Data/Model Intervention & Feedback

4.1 아키텍처 개요

제안 시스템은 실내의 환경(공기질, 온·습도, 소음)과 안전(출입, 비상), 위치·점유(BLE/UWB 등)를 다원적 센서로 수집한 뒤, 엣지 게이트웨이에서 정합성 검사와 암호화를 수행하고 메시지 브로커(MQTT/AMQP)를 통해 전송한다. 수집된 데이터는 시계열 저장소와 이벤트 로그 저장소로 분리 적재되며, 스트림 처리 및 변칙 탐지를 통해 임계 초과·이상 징후를 실시간 판단한다. 분석 결과

는 운영 대시보드와 알림/추천 API로 노출되어 현장 개입을 유도하고, 개입 결과는 다시 지표·정책에 반영되어 성능을 지속 개선한다.

4.2 센싱 및 엣지·수집 계층

센싱 계층은 CO₂/PM/온·습도/소음 센서, 출입 게이트·비상 버튼, BLE 비콘·UWB 태그로 구성된다. 각 디바이스는 장치 인증과 안전 부팅, 서명 기반 업데이트를 지원하며, 네트워크 구간은 TLS로 보호된다. 엣지 게이트웨이는 시간 동기화(NTP), 데이터 정합성 검사, 압축·암호화, 오프라인 버퍼링을 수행한 후, 일관된 토폴·스키마(예: tenant/site/zone/type/deviceId)로 브로커에 송신한다. QoS는 최소 1 이상을 적용하여 전송 신뢰성을 보장한다.

4.3 데이터 저장 및 분석 계층

데이터 계층은 시계열 DB(환경·점유)와 이벤트/감사 DB(알림, 조치, 접근·정책 로그)로 이원화한다. 스트림 처리(CEP)는 과밀·공기질 악화·이상 체류의 규칙/지속시간을 실시간 평가하고, 변칙 탐지는 계절성·시간대 베이즈라인 대비 급격한 변동을 식별한다. 특징화 단계에서는 밀도·체류·동선 엔트로피를 결합한 혼잡지수, 다변량 표준화 가중합으로 구성한 IAQ 지수, 규칙+모델 하이브리드의 안전 리스크 점수를 산출한다. 추천 모듈은 발달 단계, 동반자 유형, 시공간 맥락, 혼잡·환경 상태, 과거 선호를 입력으로 맥락 인지 추천을 제공하며, 각 추천에는 “혼잡 낮음/발달 적합/유사 선호” 등 설명 메타데이터를 포함한다.

4.4 서비스 계층: 대시보드·알림·추천

서비스 계층은 운영 대시보드, 알림/분산 안내, 놀이·돌봄 추천으로 구성된다. 대시보드는 구역별 혼잡 히트맵, IAQ 추이, 알림·조치 이력과 SLA 준수 현황을 실시간 제공한다. 알림 서비스는 임계 초과 또는 이상 탐지 시 보호자·교사 단말에 위험도·영향 구역·권장 조치를 전송하며, 필요 시 대체 구역 안내·환기 권고를 자동 제안한다. 추천 서비스는 보호자 설정(알림 채널·빈도·민감도·콘텐츠 제외)을 엄격히 준수하며, 정책 엔진을 통해 시스템 전반에 강제된다.

4.5 거버넌스 계층: 보안·프라이버시·감사

거버넌스 계층은 개인정보보호를 설계 기본값으로 채

택한다. 수집 항목은 목적에 필요한 최소 범위로 제한하고, 식별자와 행동/센서 로그를 논리·물리적으로 분리해 가명 처리한다. 데이터 보존은 “단기 원시 로그-장기 통계 집계” 원칙을 적용하고, 접근은 역할기반 권한과 세분화된 스코프를 따른다. 모든 접근·조치·정책 변경은 감사 로그로 기록되며, 정기 영향평가와 취약점 관리, 키 롤오버, 서명 업데이트가 운영 표준으로 시행된다.

4.6 KPI 연계 페루프 운영

아키텍처는 KPI 중심의 페루프로 운영된다. 안전·환경 영역에서는 알람 평균 대응시간, IAQ 준수율, 과밀 시간 비중을, 참여·경험 영역에서는 재방문율, 평균 체류·활동 다양성을, 운영·자원 영역에서는 센서 가동률, MTTR/MTBF, 알람 정확도를 핵심 지표로 삼는다. 대시보드는 KPI의 실시간 추세와 SLA 위반 구간을 표시하며, 결과는 규칙 임계치·모델 파라미터·운영 정책에 자동 반영되어 성능을 지속적으로 개선한다.

4.7 성능·가용성 및 확장성

시스템은 저지연·고가용을 목표로 한다. 이벤트 감지부터 알람 전송까지의 종단 지연은 통상 수초 이내로 관리하며, 브로커/DB 이중화(활성-대기 또는 활성-활성), 엣지 오프라인 버퍼링, 자동 재전송으로 데이터 유실을 최소화한다. 센서 수와 토픽이 증가해도 수평 확장이 가능하도록 브로커 클러스터와 파티셔닝, 시계열 DB 샤딩 전략을 채택한다.

4.8 통합 운영 시나리오

예컨대, 특정 구역에서 CO₂가 15분 이상 1,200ppm을 상회하고 혼잡지수가 임계를 초과하면, CEP가 환기 필요+분산 안내 규칙을 발화한다. 대시보드에는 경보와 권장 조치가 표시되고, 보호자·교사 단말에 대체 구역 추천과 휴식 권고가 즉시 전송된다. 10분 내 과밀이 해소되고 CO₂가 정상화되면, 대응시간·과밀 시간 등 KPI가 자동 갱신되며, 모든 이벤트·조치·접근 내역은 감사 로그에 저장된다.

5. 평가 프레임과 측정 방법

본 평가는 안전성·참여경험·운영자원·책임윤리 4축으로 설계되며, 모든 지표는 운영 의사결정과 직접 연동된

다. 핵심 KPI는 (안전/환경) 평균 대응시간(<60초), IAQ 준수율, 과밀 시간 비중; (참여/경험) 재방문율(4주), 평균 체류시간, 활동 다양성(엔트로피); (운영/자원) 센서 가동률, MTTR/MTBF, 알람 정확도; (책임/윤리) 권리행사 처리율(SLA), 설명가능성 만족도로 정의하며, 각 KPI는 산식·데이터 원천·집계 주기(실시간/일/주/월)·목표치를 고정한다.

데이터는 센서(IAQ·출입/비상·BLE/UWB), 행동/콘텐츠 로그, 운영 로그(경보·조치·SLA), 거버넌스 로그(접근·정책·권리행사)로 수집하고, 이중 타임스탬프·QoS≥1·결측/이상치 처리·캘리브레이션 기록·오프라인 버퍼링/재전송으로 무결성을 보장한다. 효과 검증은 사전-사후, 중단시계열(ITS), A/B 테스트를 병행하고, 기준선은 직전 4-8주로 설정한다. 분석은 기술통계→가설검정(t/Wilcoxon, χ^2)→모형화(ITS·혼합효과 회귀) 순으로 진행하며, 분류형 지표는 정밀도·재현율·F1·PR-AUC, 효과크기는 절대/상대 변화·코헨 d로 보고하고 FDR로 다중검정을 통제한다.

신뢰도는 정기 교정·교차검증·시간 동기 관리로, 타당도는 공변량 통제·준실험 매칭·다중 사이트 확장으로 확보한다. 프라이버시·윤리는 최소수집·가명처리를 기본으로, KPI 산출 후 개별 로그 단기 보존·주기적 파기, 권리행사 SLA 공개, 민감 콘텐츠 기본 차단·비상 옵트아웃을 적용한다. 보고·피드백은 실시간 대시보드와 주/월 리포트로 수행하며, 결과는 임계치·알람 규칙·추천 파라미터에 자동/반자동 반영되고 모든 변경은 감사 로그에 기록한다.

재방문율은 관측 기간에 방문한 고유 가명 사용자 중에서 첫 방문 후 4주(28일) 이내에 다시 방문한 사용자 비율을 뜻하고, 같은 날의 반복 입장은 한 번으로 보고, 다음 날이나 다음 세션부터 재방문으로 계산한다. 평균 체류시간은 각 사용자의 세션 체류시간(퇴장-입장)을 먼저 사용자별로 평균낸 뒤, 그 값들을 다시 전체 사용자 평균으로 산출한 값입니다. 0분·비정상적으로 긴 세션은 미리 정한 기준으로 제외하거나 절단해 과대·과소 추정을 막는다.

- 재방문율(4주)

$$\bar{D} = \frac{1}{|U|} \sum_{u \in U} \frac{1}{n_u} \sum_{j=1}^{n_u} (t_{u,j}^{out} - t_{u,j}^{in})$$

- 평균체류시간(분)

$$RR_{4w} = \frac{|\{u : 4\text{주 내 재방문}\}|}{|\{u : 기간 내 고유 가명ID\}|}$$

6. 결론

본 논문은 아동 주도 놀이·가족참여 돌봄에 IoT를 융복합한 데이터 기반 운영 모델과 이를 구현하는 엔드투엔드 아키텍처, KPI 중심 평가 프레임을 제시하였다. 제안 모델은 센싱-수집-분석-개입-평가의 페루프를 통해 안전(대응시간, IAQ), 참여(재방문, 체류·다양성), 운영(가동률, MTTR/MTBF), 책임(권리행사, 설명가능성)을 동시에 개선하도록 설계되었다. 전 과정에 Privacy by Design과 보안·회복탄력성 기본값을 내재화해 기술 효율성과 아동 권리 보호의 양립을 구현했다. 실무적으로는 표준화된 수집·분석 파이프라인과 대시보드/알림/설명가능 추천을 통해 운영 투명성과 정책 피드백 자동화를 가능하게 한다. 또한 개방형 표준을 채택해 상호운용성과 확장성을 확보하였다. 한계로는 장기 종단 데이터 기반의 건강·발달 성과 인과 검증과 다양한 시설·연령·문화 맥락에서의 외적 타당성 보완이 필요하다.

향후 과제는 다기관 장기 추적을 통한 효과 지속성·인과 분석, 강화학습 등 정책·입계치 자동 튜닝, 설명가능 인터랙션과 프라이버시 보존 학습의 실증이다. 본 연구는 아동 놀이·돌봄 분야의 안전성·효율성·개별화·책임성을 함께 끌어올리는 참조 모델을 제시하고, 현장 도입 가능한 설계·거버넌스·평가 체계를 제공하였다.

REFERENCES

- [1] United Nations, "Convention on the Rights of the Child," UN, 1989.
- [2] UN Committee on the Rights of the Child, "General Comment No.25 on children's rights in relation to the digital environment," OHCHR, 2021.
- [3] European Union, "Regulation (EU) 2016/679: General Data Protection Regulation," Official Journal of the European Union, L119, pp.1-88, 2016.
- [4] A.Cavoukian, "Privacy by Design: The 7 Foundational Principles," Information and Privacy Commissioner of Ontario, pp.1-18, 2011.
- [5] European Data Protection Board, "Guidelines 4/2019 on Article 25 Data protection by design and by default (Version 2.0)," EDPB, 2020.
- [6] UK Information Commissioner's Office, "Data protection impact assessments (DPIAs): Guidance," ICO, 2023.
- [7] K.Boeckl, M.Fagan, K.Kim, B.Nadeau, et al., "Considerations for Managing Internet of Things (IoT) Cybersecurity and Privacy Risks," NISTIR 8228, NIST, 2019.

- [8] M.Fagan, K.Megas, K.Scarfone, and M.Smith, "IoT Device Cybersecurity Capability Core Baseline," NISTIR 8259A, NIST, pp.1-54, 2020.
- [9] World Health Organization, "WHO Guidelines on Physical Activity and Sedentary Behaviour," WHO, 2020.
- [10] J.-P.Chaput, S.Willumsen, F.Bull, F.Chou, et al., "2020 WHO guidelines on physical activity and sedentary behaviour for children and adolescents: summary of the evidence," International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity, Vol.17, No.141, pp.1-10, 2020.
- [11] F.Zafari, A.Gkelias, and K.K.Leung, "A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.21, No.3, pp.2568-2599, 2019.
- [12] P.Davidson and R.Piché, "A Survey of Selected Indoor Positioning Methods for Smartphones," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.19, No.2, pp.1347-1370, 2017.
- [13] S.J.Hayward, P.Chandra, A.H.Sayed, and M.Rabbat, "A Survey of Indoor Location Technologies, Techniques and Applications," Array, Vol.14, pp.100171, 2022.
- [14] P.F.Karjou, M.Kharghani, and S.S.Kia, "Practical Design and Implementation of IoT-Based Occupancy Monitoring Systems for Office Buildings: A Case Study," Energy and Buildings, Vol.316, pp.113118, 2024.
- [15] E.A.Metwally, M.A.Elnashar, and S.H.A.Hassan, "Development of IoT Occupant-Centric Metrics and KPIs for Building Operations," Energy and AI, Vol.17, pp.100470, 2024.
- [16] F.Shoukry, M.Elshaer, and M.Abdelrahman, "Enhanced Indoor Air Quality Dashboard Framework and Classroom Index for HE Facilities," Buildings, Vol.14, No.6, pp.1640, 2024.
- [17] A.Mota, J.Silva, and P.Gil, "Implementation of an IoT Architecture to Monitor Indoor Air Quality Using MQTT and InfluxDB," Sensors, Vol.25, No.6, pp.1683, 2025.
- [18] G.Adomavicius, B.Mobasher, F.Ricci, and A.Tuzhilin, "Context-Aware Recommender Systems," AI Magazine, Vol.32, No.3, pp.67-80, 2011.

이근호(Keun-Ho Lee)

[종신회원]



- 2006년 8월 : 고려대학교 컴퓨터학과(이학박사)
- 2006년 9월 ~ 2010년 2월 : 삼성전자 DMC연구소 기술전략팀 과장
- 2010년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 컴퓨터공학부 교수

<관심분야>

융합보안, 블록체인, 개인정보보호, 이동통신 보안