

# 제로에너지 빌딩을 위한 AIoT기반 지능형에너지 디지털트윈 플랫폼 기술 연구

한기준<sup>1</sup>, 이동연<sup>1</sup>, 권민석<sup>1</sup>, 박지민<sup>1</sup>, 김종환<sup>1</sup>, 최정호<sup>1</sup>, 배수연<sup>1</sup>, 고종원<sup>1</sup>, 박상민<sup>2\*</sup>  
<sup>1</sup>한국성서대학교 AI융합학부 학생, <sup>2</sup>한국성서대학교 AI융합학부 교수

## Research on AIoT-Based Intelligent Energy Digital Twin Platform for Zero-Energy Building

Gijun Han<sup>1</sup>, Dongyeon Lee<sup>1</sup>, Minseok Kwon<sup>1</sup>, Jimin Park<sup>1</sup>, Jonghwan Kim<sup>1</sup>,  
Jeongho Choi<sup>1</sup>, Suyeon Bae<sup>1</sup>, Jongwon Ko<sup>1</sup>, Sangmin Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Student, School of AI Convergence, Korea Bible University

<sup>2</sup>Assistant Professor, School of AI Convergence, Korea Bible University

**요약** 전 세계적인 전력 수요 증가와 기후위기 대응 요구로 인해, 건물 부문의 에너지 효율 향상과 탄소 저감을 위한 지능형 에너지 관리 기술이 중요한 과제로 부상하고 있다. 특히 건축물 운영 단계에서 발생하는 에너지 소비를 효과적으로 관리하기 위해서는 실시간 데이터 기반의 수요 분석과 운영 제어 기술이 필수적이다. 본 논문에서는 이러한 요구에 대응하기 위해, AIoT(AI + Internet of Things) 기반의 지능형 에너지 디지털트윈 플랫폼을 제안한다. 제안하는 시스템은 센서 계층, 엣지 계층, 데이터 관리 및 서비스 계층으로 구성된 3계층 아키텍처를 기반으로 하며, 건물 내·외부의 환경 및 재실 데이터를 실시간으로 수집·처리한다. 특히 엣지 모듈에 YOLO 기반 객체 탐지 모델을 적용하여 카메라 영상으로부터 재실 인원을 실시간으로 인식하고, 이를 환경 센서 데이터와 연계함으로써 공간별 에너지 사용 특성을 보다 정밀하게 반영하였다. 또한 디지털트윈 기반의 에너지 모델을 구축하여 건물의 에너지 사용 패턴과 운영 특성을 가상 공간에 재현하고, 예측 데이터를 활용한 규칙기반 에너지 절감 가이드라인을 도출하였다. 본 연구에서 제안한 플랫폼은 향후 신재생에너지 및 외부 에너지 시스템과의 연계를 고려한 확장 가능한 구조를 가지며, 건물 단위 에너지 최적화와 스마트 캠퍼스 및 스마트시티로의 확장에 기여할 수 있다.

**주제어** : AIoT, 에너지최적화, 인공지능, 스마트에너지, 엣지 컴퓨팅, 디지털트윈, 탄소중립

**Abstract** With the global increase in electricity demand and growing concerns over climate change, improving energy efficiency and reducing carbon emissions in buildings have become critical challenges. Effective energy management during the building operation phase requires real-time, data-driven analysis and control. This paper proposes an AIoT (Artificial Intelligence of Things)-based intelligent energy digital twin platform to address these needs. The proposed system adopts a three-layer architecture consisting of a sensor layer, an edge layer, and a data management and service layer, enabling real-time acquisition and processing of environmental and occupancy data. A YOLO-based object detection model is deployed on edge devices to estimate occupancy from camera streams, which is integrated with environmental sensor data to accurately reflect space-level energy usage characteristics. In addition, a digital twin-based energy model is developed to replicate building energy consumption patterns in a virtual environment and derive rule-based energy-saving guidelines. The proposed platform provides a scalable framework that can be extended to renewable energy and external energy systems, contributing to building-level energy optimization and future smart campus and smart city applications.

**Key Words** : AIoT, Energy Optimization, AI, Smart Energy, Edge Computing, Digital Twin, Carbon Neutrality

이 논문은 2025학년도 한국성서대학교 대학혁신지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

\*교신저자 : 박상민(smpark@bible.ac.kr)

접수일 2026년 01월 02일 수정일 2026년 03월 09일 심사완료일 2026년 04월 07일

## 1. 서론

국제에너지기구(IEA)는 Electricity Mid-Year Update 2025에서 세계 전력 수요가 2025년 약 3.3%, 2026년 약 3.7% 증가하며, 2027년까지도 총 에너지 수요보다 빠른 증가세를 보이는 '전기의 시대(Age of Electricity)'가 지속될 것으로 전망하였다[1]. 경제성장, 전기화 확대, 폭염과 같은 기후 요소가 복합적으로 작용하면서 전력 수요는 빠르게 증가하고 있으며, 이에 따라 안정적이고 효율적인 전력 관리 기술의 필요성은 그 어느 때보다 커지고 있다[2]. 이러한 상황에서 전 세계 탄소배출량의 약 36~39%를 차지하는 건설 산업의 환경적 영향 또한 중요한 이슈로 대두되고 있다[3]. 특히 건축물의 탄소배출은 대부분 운영 과정에서 발생하기 때문에 건물의 에너지 효율화와 이를 지원할 수 있는 기술적 혁신이 필수적이다[4]. 에너지 관리의 핵심은 수요와 공급을 정확하게 예측하고 이를 효율적으로 제어하는 데 있다. 에너지 수요 예측은 특정 시점에서 얼마나 많은 에너지가 필요할지를 판단하는 기술이며, 공급 예측은 특히 태양광과 같은 신재생에너지의 변동성을 고려하여 실제 사용할 수 있는 에너지소비량을 예측하는 기술이다. 신재생에너지는 기상 조건, 계절, 시간대 등 다양한 변수의 영향을 받기 때문에 안정적인 에너지 운영을 위해서는 이러한 불확실성을 최소화할 수 있는 AI 기반 예측 기술의 도입이 필수적이다[5].

### 1.1 AIoT기반 지능형에너지 기술

전 세계적으로 에너지 수요는 꾸준히 증가하고 있으며, 특히 도시와 캠퍼스와 같은 복합 건물 공간에서는 다양한 패턴의 에너지 사용이 동시에 발생한다[6]. 기후위기 대응과 탄소중립 실현이 국가적·국제적 과제가 되면서, 건물 단위에서의 효율적인 에너지 관리 기술은 필수가 되고 있다. 또한 태양광 등 신재생에너지의 확대는 지속가능한 에너지 체계를 구축하는 데 중요한 역할을 하지만, 기상 변화 등 외부 환경에 좌우되는 특성 때문에 안정적인 운영을 위해서는 정교한 데이터 분석과 예측 기술이 필요하다. 이러한 흐름 속에서 디지털트윈과 IoT, 인공지능 기반의 데이터 분석 기술을 통합한 AIoT 기반의 지능형에너지 최적화 연구가 중요한 연구 분야로 부상하고 있다[3].

이를 위해 건물 내·외부의 환경정보센서로부터 온도, 습도, 조도, 전력 사용량 등의 데이터를 실시간으로 수집하고, 재실 인원 및 사용자 이동·행동 패턴을 파악할 수

있는 사용자 감지 기술이 필수적이다[7]. 이러한 다차원 데이터 수집은 에너지 사용 특성을 정밀하게 반영하고, 공간별·시간대별 에너지 수요를 정확히 예측하는 기반이 된다.

### 1.2 제로에너지를 위한 에너지엠티플랫폼

본 논문에서는 엠티 기반 ASUS Tinker Edge R 모듈을 활용하여 에너지 IoT 시스템을 구현하였다. Tinker Edge R은 엠티 AI 환경에서 저전력 연산을 지원하는 싱글보드 컴퓨터로, Rockchip RK3399Pro 프로세서와 NPU(Neural Processing Unit)를 탑재하고 있다. 이를 통해 머신러닝 추론을 CPU나 GPU 중심의 연산 방식보다 효율적으로 수행할 수 있으며, 동일한 연산에 대해 전력 소모 최소화 가능하다. 이러한 특성으로 인해 본 모듈은 실시간 AI 처리가 요구되는 IoT 디바이스, 스마트 센서 및 산업용 시스템에 적합하다[8].

또한 LPDDR4 메모리와 NPU 전용 메모리를 사용하고, 넓은 전원 입력 범위를 지원하는 등 하드웨어 설계 전반에서 에너지 효율을 고려하였다. 데이터 처리를 로컬에서 수행하고 필요한 결과만 중앙 서버로 전송하는 구조는 네트워크 통신에 따른 불필요한 전력 소모를 감소시키는 데 기여한다. 연산 방식이나 시스템 구성에 따라 전력 절감 효과는 상이할 수 있으므로, 워크로드 특성과 운용 환경을 고려한 시스템 설계가 필요하다. 이러한 점에서 Tinker Edge R은 엠티 AI 환경에서 효율적이고 안정적인 전력 운영을 지원할 수 있는 디바이스로 평가된다. 나아가 엠티 AI 기술은 데이터 생성 지점에서 연산과 분석을 수행함으로써 클라우드 의존도를 낮추고, 전력 효율과 실시간 처리 성능을 동시에 향상시키는 장점을 제공한다[9].

### 1.3 제로에너지 디지털트윈 플랫폼

건물의 에너지 최적화를 위해서는 물리적 환경과 운영 데이터를 디지털 공간에 반영하는 디지털트윈 기반 접근이 효과적으로 활용될 수 있다[10]. 디지털트윈은 건물의 에너지 흐름을 실시간으로 파악하고, 다양한 운영 시나리오를 분석함으로써 효율적인 에너지 관리 전략 수립을 지원한다. 특히 친환경 에너지 운영 환경에서는 에너지 수요와 공급을 통합적으로 관리하는 도구로서 활용 가치가 높다[11].

신뢰성 있는 에너지 관리를 위해서는 정확한 데이터 확보가 필수적이며, 이는 디지털트윈 구축을 고려한 IoT 시스템 설계와 밀접하게 연관된다. 건물 특성과 에너지

사용 패턴을 반영한 센서 배치를 통해 수집된 데이터는 실제 건물의 에너지 상태를 디지털 공간에 정밀하게 재현하는 디지털트윈의 핵심 입력값이 된다. 이러한 데이터는 에너지 소비 분석, 실시간 제어 및 예측 모델 개발의 기반으로 활용된다. 또한 공간별 사용 스케줄과 점유 특성을 디지털트윈에 반영한 빌딩 스케줄링 분석은 조명, 냉난방, 환기 설비의 가동을 최적화하여 불필요한 에너지 사용을 줄이고, 운영 단계에서의 에너지 절감 효과를 효과적으로 도출할 수 있다[12].

본 연구에서는 디지털트윈 기반 에너지 최적화 모델과 IoT 센서 네트워크를 구축하고, 빌딩 스케줄링 및 예측 데이터를 활용한 에너지 절감 기법을 적용하여 친환경 지능형 에너지 관리 플랫폼을 제안한다. 본 연구의 결과는 건물 에너지 효율화는 물론, 스마트 캠퍼스 및 스마트 시티로의 확장 가능성을 제시한다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 온디바이스 AIoT 인프라 관점

최근 에너지 관리 시스템은 데이터가 생성되는 지점에서 분석과 판단을 수행하는 온디바이스 AIoT 인프라로 점차 전환되고 있다. 이러한 구조는 센서, 엣지 디바이스, 경량화된 인공지능 모델을 결합함으로써 중앙 서버와의 데이터 전송을 최소화하고, 지연 시간과 전력 소모를 동시에 줄일 수 있다는 장점을 가진다[13]. 특히 스마트 빌딩이나 캠퍼스와 같이 다수의 센서가 분산된 환경에서는 엣지 단에서 에너지 데이터를 처리하는 방식이 시스템 효율성과 안정성 측면에서 효과적인 대안으로 보고되고 있다[14].

기존 연구에서는 엣지 AI 기반 에너지 IoT 인프라가 실시간 제어 성능을 향상시키는 동시에 네트워크 부하를 감소시키고, 시스템 확장성과 개인정보 보호 측면에서도 유리함을 보인다고 분석하였다[15]. 또한 스마트 그리드 및 건물 에너지 관리 분야에서는 엣지 컴퓨팅을 활용한 분산형 구조가 에너지 효율 향상에 기여할 수 있음을 실증적으로 제시하고 있다[16]. 이러한 연구 흐름은 온디바이스 AIoT 인프라가 지능형 에너지 관리 시스템의 핵심 구성 요소로 자리 잡고 있음을 보여준다.

### 2.2 디지털트윈 에너지최적화 관점

디지털트윈은 실제 건물의 물리적 구조와 운영 상태를

디지털 공간에 정밀하게 재현하여 에너지 흐름을 분석하고 최적화할 수 있도록 지원하는 기술이다. IoT 센서로부터 수집된 전력 사용량과 환경 데이터는 디지털트윈 모델의 핵심 입력값으로 활용되며, 이를 통해 건물의 에너지 소비 특성을 실시간으로 파악할 수 있다[17].

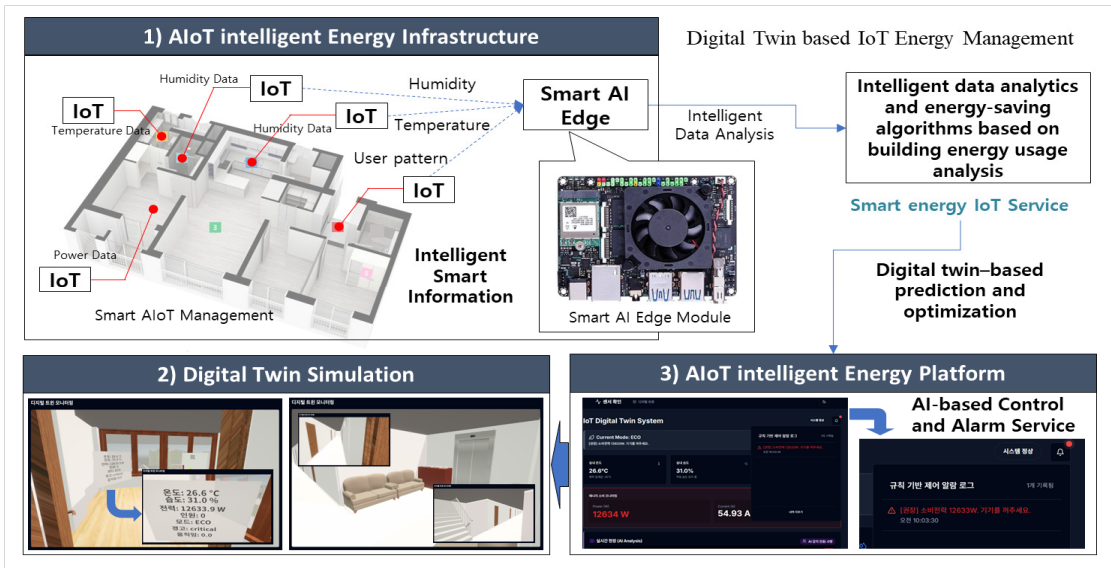
다수의 선행 연구에서는 디지털트윈을 활용한 에너지 관리가 다양한 운영 시나리오를 가상 환경에서 사전에 검증할 수 있다는 점에서 효율적인 의사결정을 지원한다고 보고하였다[18]. 특히 인공지능 기반 예측 모델과 디지털트윈을 결합한 연구들은 에너지 수요 예측 정확도를 향상시키고, 냉난방 및 환기 설비의 운영을 최적화하는데 효과적임을 보여주고 있다[19]. 최근에는 물리 기반 모델과 신경망을 결합한 하이브리드 디지털트윈 접근법도 제안되며, 건물 에너지 최적화 연구가 더욱 고도화되는 추세이다. 이 과정을 통해 제안된 모델의 성능을 분석하고, 실제 환경에서의 활용 가능성을 검증한다.

### 2.3 인공지능 기반 에너지서비스 관점

인공지능 기반 에너지 서비스는 기존의 단순 모니터링 중심 에너지 관리 시스템을 넘어, 예측과 의사결정을 지원하는 지능형 서비스로 확장되고 있다. 머신러닝과 딥러닝 기술은 에너지 수요 예측, 이상 상태 탐지, 설비 제어 최적화 등 다양한 영역에서 활용되며, 에너지 운영의 효율성과 안정성을 동시에 향상시키는 데 기여하고 있다[5]. 특히 스마트 빌딩 및 캠퍼스 환경에서는 사용자 점유 패턴과 외부 기상 조건이 복합적으로 작용하기 때문에, AI 기반 에너지 서비스의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 최근 연구들은 디지털트윈 및 IoT 인프라와 결합된 인공지능 기반 에너지 서비스가 실시간 제어와 장기적인 에너지 절감 전략 수립에 효과적임을 보고하고 있으며, 이러한 통합적 접근은 지속가능한 에너지 관리 체계를 구축하는 핵심 요소로 평가되고 있다.

## 3. 시스템 구성

[Fig. 1]과 같이 본 연구에서 제안하는 시스템은 AIoT 기반 지능형 에너지 인프라, AIoT 에너지 데이터 플랫폼, 그리고 스마트 에너지 디지털트윈의 세 가지 핵심 구조로 구성되며, 에너지 데이터의 수집·처리·분석과 디지털트윈 기반 예측 및 최적화를 유기적으로 연계한 통합 에너지 관리 프레임워크를 제공한다.



[Fig. 1] Overall Architecture of the Proposed System

### 3.1 AIoT기반 지능형에너지 인프라 모델

본 연구에서는 스마트 빌딩 환경에서의 에너지 효율 향상과 실시간 운영 최적화를 목표로, AIoT(AI + Internet of Things) 기반의 지능형 에너지 인프라 모델을 설계하였다. 제안 모델은 센서 계층, 엣지 계층, 데이터 관리 및 서비스 계층으로 구성된 계층 구조를 가지며, [Fig. 1]의 1) AIoT intelligent Energy Infrastructure 파트에서 보는 것과 같이 센서단에서 수집되는 온도, 재실, 전력 데이터를 엣지 컴퓨팅 기반으로 처리함으로써 데이터 전송 지연과 중앙 서버 의존도를 최소화한다. 센서 계층에서는 온도 및 재실 정보, 전력 데이터 등을 포함한 실내 환경 데이터를 주기적으로 수집하고, 지그비 기반 무선 센서 네트워크를 통해 이를 엣지 디바이스로 전달한다. 엣지 계층은 저전력 환경에서도 인공지능 추론이 가능한 AI 가속 하드웨어를 활용하여, 실시간 데이터 수집·저장과 함께 향후 에너지 소비 예측 및 이상 감지와 같은 지능형 분석 기능 수행이 가능하도록 설계되었다. 수집된 데이터는 클라우드 데이터베이스에 구조화된 형태로 저장되어 이력 관리와 데이터 무결성을 보장하며, 상위 서비스 계층에서는 RESTful API 기반의 데이터 제공 메커니즘을 통해 웹 기반 모니터링 대시보드 및 외부 분석 시스템과 연동된다. 이러한 AIoT 기반 지능형 에너지 인프라 모델은 디지털 트윈 환경과의 연계를 통해 에너지 수요·공급 상태를 정확하게 반영할 수 있으며, 향후 건물 단위의 에너지 최적화 제어 및 탄소 저감 전략 수립을 위한

핵심 기반 기술로 활용 가능하다.

### 3.2 스마트에너지 디지털트윈 모델

본 연구에서는 AIoT 기반 에너지 인프라와 에너지 데이터 플랫폼으로부터 수집된 정보를 활용하여, 건물 단위의 스마트 에너지 디지털트윈을 구축하였다. [Fig. 1]의 2) Digital Twin Simulation 파트에서 보는 것과 같이 제안된 디지털트윈은 실제 건물의 에너지 사용 상태와 운영 환경을 디지털 공간에 반영함으로써, 에너지 흐름을 직관적으로 파악하고 효율적인 에너지 관리를 지원하는 것을 목표로 한다. 디지털트윈 모델은 전력 사용량, 실내 환경 데이터, 재실 정보 등 핵심 에너지 데이터를 기반으로 구성되며, 시간대별·공간별 에너지의 소비 특성을 분석할 수 있도록 설계되었다. 이를 통해 빌딩 운영 조건 변화에 따른 에너지 수요를 가상 환경에서 검토하고, 운영 전략 수립에 활용할 수 있다. 또한 본 연구의 디지털트윈은 예측 데이터 및 에너지 최적화 기법과 연계되어, 건물 에너지 효율 향상과 지속가능한 운영을 지원하는 기반 기술로 활용 가능하다.

### 3.3 AIoT 에너지데이터 플랫폼

[Fig. 1]의 3) AIoT intelligent Energy Platform 파트에서 보는 것과 같이 본 연구에서는 AIoT 기반 지능형 에너지 디지털 트윈 플랫폼의 효과적인 데이터 수집 및 모니터링을 위해 웹 기반 에너지 데이터 플랫폼을 구축

하였다. 제안하는 플랫폼은 IoT 엷지 디바이스에서 수집된 환경 및 재실 데이터를 실시간으로 사용자 인터페이스에 전달하는 구조로 설계되었으며, 엷지 단에서 제공되는 데이터를 RESTful API 형태로 서비스 계층에 연동한다. 웹 플랫폼은 서버 사이드 렌더링을 지원하는 프레임워크를 기반으로 구현하여 초기 로딩 성능과 확장성을 확보하였고, 보안 및 접근 제어를 강화하기 위해 서버를 경유하는 프록시 구조를 적용하였다. 이를 통해 클라이언트가 IoT 디바이스에 직접 접근하지 않고도 안정적으로 센서 데이터를 조회할 수 있도록 하였다. 수집된 에너지 및 환경 데이터는 실시간 모니터링 대시보드와 시계열 기반의 시각화 형태로 제공되어, 사용자가 건물 내부 상태 변화를 직관적으로 파악할 수 있도록 지원한다. 이러한 AIoT 에너지 데이터 플랫폼은 디지털 트윈 환경에서의 실시간 상태 반영과 분석의 기반을 제공하며, 향후 에너지 소비 패턴 분석, 운영 최적화 및 지능형 제어 기능 확장을 위한 핵심 인터페이스로 활용될 수 있다.

### 3.4 시스템 아키텍처

[Fig. 2]는 지능형 에너지 관리 플랫폼의 전체 아키텍처를 나타내며, 시스템은 인프라 계층(Infra Layer), 플랫폼 계층(Platform Layer), 가상 계층(Virtual Layer)의 3개 계층으로 구성된다. 먼저 인프라 계층(Infra Layer)은 에너지 관리 시스템을 구성하는 물리적 장치와 데이터 수집 센서으로 이루어진다. 본 계층은 전력, 온도, 습도 등 환경 정보를 수집하는 IoT 센서 인프라, 카메라와 AI 모델을 활용한 사용자 감지 디바이스, 그리고 로컬 데이터 처리를 수행하는 엷지 디바이스로 구성된다. 특히

엷지 기반 AI 모듈을 통해 사용자 감지 및 실시간 추론을 로컬에서 수행함으로써 네트워크 부하와 전력 소모를 줄이고, 실시간성이 요구되는 에너지 관리 환경에 적합한 데이터 처리 구조를 제공한다. 플랫폼 계층(Platform Layer)은 수집된 데이터를 기반으로 에너지 관리 및 최적화를 수행하는 핵심 계층이다. 본 계층에서는 IoT 및 사용자 데이터를 통합 분석하는 AIoT 정보 분석기와 AI 기반 에너지 최적화 알고리즘이 동작한다. 이를 통해 에너지 데이터 수집, 전처리, 분석 및 최적화 기능이 유기적으로 수행되며, 건물 운영 환경과 사용자 특성을 고려한 지능형 에너지 관리가 가능하다. 마지막으로 가상 계층(Virtual Layer)은 디지털트윈 기반의 에너지 시뮬레이션과 가상 관리를 담당하는 계층이다. 본 계층에서는 실제 환경에서 수집된 데이터를 디지털 공간에 실시간으로 동기화하여 디지털트윈 모델을 구성하고, 수요·공급 최적화 및 분산 에너지 관리를 수행한다. 또한 예측 및 시나리오 기반 시뮬레이션을 통해 다양한 에너지 운영 조건을 사전에 분석함으로써, 에너지 절감 효과와 운영 효율을 극대화할 수 있다. 이를 통해 제안된 시스템은 현실 환경과 가상 환경을 연계한 지능형 에너지 관리 체계를 구현한다.

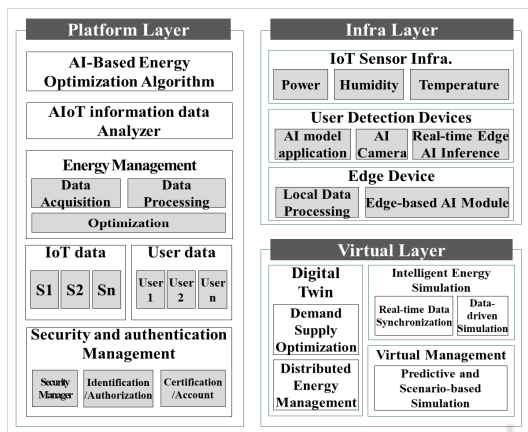
이와 같은 3계층 구조를 통해 제안된 플랫폼은 데이터 수집부터 분석, 최적화, 시뮬레이션에 이르기까지 통합적인 에너지 관리 기능을 제공하며, 스마트 빌딩 및 스마트 캠퍼스 환경으로의 확장 가능성을 제시한다.

## 4. 시스템 구현

본 장에서는 제안한 시스템의 구현을 위해 온디바이스 AIoT 인프라 구축, 스마트 에너지 디지털 트윈 구축, AIoT 에너지 데이터 플랫폼 구현, 그리고 AI 기반 에너지 절감 최적화 알고리즘을 중심으로 구성된 네 개의 세부 절을 다룬다. 각 절은 각각 4.1 온디바이스 AIoT 인프라 구축, 4.2 스마트 에너지 디지털 트윈 구축, 4.3 AIoT 에너지 데이터 플랫폼 구현, 4.4 AI 기반 에너지 절감 최적화 알고리즘으로 구성된다.

### 4.1 온디바이스 AIoT 인프라 구축

본 절에서는 제로에너지 빌딩을 위한 지능형 에너지 디지털 트윈 플랫폼의 물리적 기반이 되는 AIoT 엷지 디바이스의 하드웨어 구성과 센서 데이터 수집 인프라에 대해 기술한다.



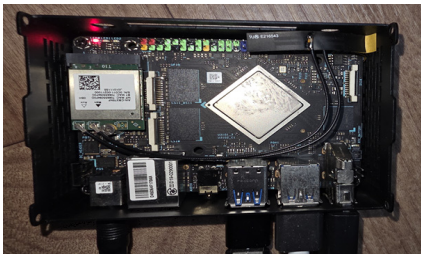
[Fig. 2] System Architecture

### 4.1.1 엣지 AI 디바이스 선정 및 구성

본 연구에서는 건물 내 방대한 센서 데이터의 실시간 처리와 딥러닝 추론 모델 탑재를 위해 ASUS Tinker Edge R을 메인 엣지 디바이스로 선정하였다. 해당 디바이스는 Rockchip RK3399Pro 헥사코어(Hexa-core) 프로세서를 기반으로 하며, 특히 3.0 TOPS(Tera Operations Per Second) 성능의 NPU(Neural Processing Unit)가 내장되어 있어 저전력 환경에서도 고속 머신러닝 추론이 가능하다. 엣지 디바이스의 상세 사양은 <Table 1>, 관련 사진은 [Fig. 3]에서 보여준다.

<Table 1> Specification of Edge Device

|         |                                      |
|---------|--------------------------------------|
| CPU     | ▪Rockchip RK3399Pro (Hexa-core)      |
| NPU     | ▪Neural Network Processor (3.0 TOPS) |
| RAM     | ▪4GB LPDDR4                          |
| OS      | ▪Debian 10 (Mendel Linux)            |
| Network | ▪802.11ac Wi-Fi / Gigabit Ethernet   |



[Fig. 3] Photograph of the Edge Device

이러한 하드웨어 구성은 클라우드 서버로 데이터를 전송하지 않고 로컬에서 연산을 수행함으로써 네트워크 대역폭을 절약하고, 데이터 보안을 강화하는 온디바이스 AI(On-device AI) 환경 구축에 최적화되어 있다. 운영 체제(OS)는 안정적인 데이터 입출력(I/O) 및 하드웨어 제어를 위해 Debian 10 기반의 Mendel Linux를 탑재하였다. 본 시스템의 핵심 소프트웨어 구성 요소는 Python으로 작성되었으며, 데이터 수집 미들웨어, 웹 API 서버, NPU용 객체 탐지 모델, 그리고 센서 데이터베이스로 구성된다.

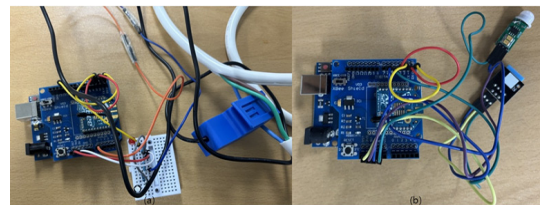
### 4.1.2 Zigbee 기반 무선 센서 인프라 구축

센서 네트워크는 데이터 송수신의 안정성과 확장성을 고려하여 엣지 디바이스 중심의 스타 토폴로지(Star

Topology)로 구성되었다. 데이터 수집의 중추인 코디네이터(Coordinator)는 ASUS Tinker Edge R과 Nero XBee Explorer를 결합하여 구현하였으며, 이를 통해 별도의 복잡한 유선 배선 없이 다수의 센서 노드로부터 데이터를 수집한다. 엔드 디바이스(End Device)인 센서 노드는 설치 위치의 최적화를 위해 기능별로 분리된 두 개의 독립적인 Arduino Uno 모듈로 구축되었다. 우선 실내 환경 데이터의 대표성을 확보하기 위해 환경 센싱 노드(Environmental Node)를 연구실 중앙(Main Activity Zone)에 배치하고, DHT11 온습도 센서와 HC-SR505 PIR 센서를 연결하여 쾌적 지표와 재실 여부를 감지하도록 하였다. 이와 별도로 에너지 센싱 노드(Energy Node)는 전원 공급 장치 인근에 배치하였으며, 비침습적 방식의 SCT-013 전류 센서를 단독으로 연결하여 물리적 간섭 없이 전력 부하를 정밀하게 측정할 수 있도록 설계하였다. <Table 2>는 IoT 디바이스 스펙을 보여주며 [Fig. 4]는 본 연구에서 제작한 IoT 디바이스 사진을 보여준다.

<Table 2> Specification of IoT Devices

| Sensor Type            | Model         | Measurement Items        | Sampling Interval (s) |
|------------------------|---------------|--------------------------|-----------------------|
| Temperature & Humidity | DHT11         | Temperature, Humidity    | 2.0                   |
| PIR                    | HC-SR505      | Motion Detection         | 1.0                   |
| Power Sensor           | SCT-013       | Current, Power           | 1.0                   |
| Webcam                 | Logitech C270 | Occupancy (People Count) | Event-based           |



[Fig. 4] Implementation of Distributed Sensor Nodes: (a) Environmental Node, (b) Energy Node

### 4.1.3 이기종 데이터 통합 및 전송 프로토콜

센서 노드의 펌웨어는 실시간 모니터링의 정확성과 전력 효율성을 고려하여 2초 주기로 데이터를 샘플링하도록 설계되었다. 수집된 이기종 데이터는 네트워크 대역폭 효율을 위해 CSV(Comma-Separated Values) 형식의 문자열로 직렬화되며, 노드 유형에 따라 상이한 패킷 구조를 갖는다. 환경 센싱 노드는 별도의 헤더 없이 온

도, 습도, 움직임 데이터를 순차적으로 나열한 형식(예: "26.00, 31.00, 0")을 사용하며, 에너지 센싱 노드는 데이터 식별을 위해 "S2" 헤더를 포함하여 전류 및 전력 데이터를 전송하는 형식(예: "S2, 33.16, 7627.33")을 채택하였다. 이러한 패킷 구조는 엣지 디바이스의 수신부에서 데이터의 출처를 명확히 구분하고 파싱 복잡도를 낮추는 데 기여한다.

#### 4.1.4 이벤트 기반 하이브리드 센싱 및 카메라 제어

시각적 데이터 분석을 위해 엣지 디바이스에는 Logitech C270 HD 웹캠을 연결하였다. 그러나 상시적인 영상 스트리밍과 AI 추론은 엣지 디바이스의 연산 부하를 증가시키고 불필요한 전력 소모를 유발한다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 물리 센서와 비전 센서를 상호 연동한 이벤트 기반 활성화(Event-driven Activation) 메커니즘을 제안하고 이를 미들웨어 단계 구현하였다. 구현된 미들웨어는 Zigbee 네트워크를 통해 수신되는 PIR 센서의 움직임 신호(m)를 트리거로 활용한다. 평상시(m=0)에는 웹캠을 비활성화 상태로 유지하여 대기 전력을 최소화하며, 움직임이 감지되는 시점(m=1)에만 즉각적으로 카메라를 활성화하고 NPU 기반 객체 탐지 알고리즘을 수행한다. 분석이 완료된 이후에는 매 주기마다 수집되는 온도(t), 습도(h), 움직임(m), 전류(c) 데이터와 함께 재실 인원 정보를 타임스탬프와 연계하여 데이터베이스에 기록한다. 이러한 하이브리드 센싱 방식은 기존의 상시 감시 방식 대비 데이터 스토리지 사용량을 절감하고, 시스템 전체의 에너지 효율을 효과적으로 향상시키는 장점을 제공한다. [Fig. 5]는 엣지 디바이스와 연결된 웹캠의 사진을 보여준다.



[Fig. 5] Web Camera connected to the ASUS Tinker Edge R edge device

#### 4.1.5 데이터 수집 미들웨어 및 데이터베이스

본 연구에서는 엣지 디바이스 환경에서 다중 센서 데이터를 안정적으로 처리하기 위해 경량 데이터 수집 미들웨어와 로컬 데이터베이스 기반 구조를 설계하였다.

데이터 수집 과정은 수신-파싱-저장의 단계로 구성되며, 외부 서버 의존 없이 온디바이스 환경에서 실시간 데이터 처리가 가능하도록 하였다. 임베디드 환경에 적합한 경량 데이터베이스를 적용하여 시스템 자원 사용을 최소화하였으며, 센서 측정값과 함께 타임스탬프를 기록함으로써 시계열 분석 및 향후 AI 학습 데이터로 활용할 수 있도록 설계하였다. 구체적인 미들웨어 구현 및 데이터베이스 스키마는 4.3절에서 상세히 기술한다.

#### 4.1.6 NPU 가속 기반 객체 탐지 시스템

기존 PIR 센서 기반 재실 감지의 한계를 보완하기 위해, 본 연구에서는 NPU 가속 기반 영상 재실 인식 아키텍처를 설계하였다. 해당 시스템은 영상 입력부터 객체 인식까지의 전 과정을 엣지 디바이스 내부에서 수행하는 온디바이스 AI 구조를 기반으로 하여, 네트워크 지연 및 개인정보 유출 위험을 최소화한다.

영상 기반 재실 인식 결과는 센서 데이터와 결합되어 에너지 제어 로직과 디지털 트윈 시스템의 핵심 입력 데이터로 활용된다. 사용된 딥러닝 모델과 추론 파이프라인의 구체적인 구현 내용은 4.3.3절에서 설명한다.

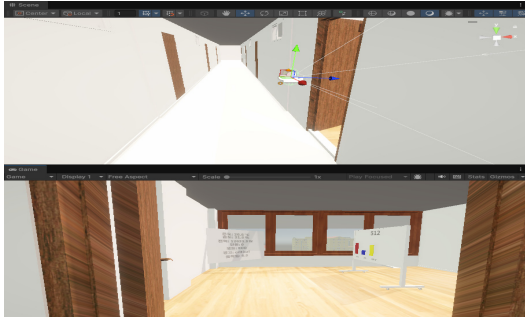
## 4.2 스마트에너지 디지털트윈 구축

본 절에서는 지능형 에너지 디지털 트윈을 구현하기 위해 실제 건물의 물리적 환경을 디지털 공간에 반영하는 디지털 트윈 적용에 대한 내용을 기술한다[10].

### 4.2.1 3D모델 Import 및 유저 인터랙션 설계

본 연구에서는 SweetHome 3D로 제작한 실제 건물(적용 공간 : 한국성서대학교 복음관 5층 교수 연구실) 모델(obj)을 Unity 엔진으로 가져와, 1인칭 시점 탐색이 가능한 디지털 트윈 환경을 구축하였다. 구축된 시스템은 가상 건물의 시각화, 사용자 이동 및 충돌 처리, 환경 상태 시각화 UI를 포함하며, REST API 기반 IoT 센서 데이터와 실시간으로 연동되어 상태 정보가 자동 갱신되는 구조로 구현되었다. 이를 통해 단순 시각화 단계를 넘어, 실제 환경 변화를 즉시 반영하는 디지털 트윈 시스템을 구현하였다. 실제 건물 구조를 가상 환경에 반영하기 위해 SweetHome 3D로 건물 요소를 모델링하고, 이를 .obj 형식으로 Unity에 Import하여 하나의 프리팹으로 구성하였다. 실제 공간과의 일치를 위해 스케일과 회전을 정규화하고, Collider를 적용해 벽·바다·가구의 충돌 판정을 구현하였다. 또한 CharacterController 기반의

1인칭 이동 시스템을 적용하여 키보드와 마우스를 통해 이동 및 시점 제어가 가능하도록 하였으며, 충돌 처리와 바닥 Collider를 통해 비현실적인 이동과 낙하를 방지함으로써 실제 건물과 유사한 이동 경험을 구현하였다. 아래 [Fig. 6]은 SweetHome 3D 기반 건물 모델을 Unity로 Import하여 구성한 디지털 트윈 공간에서의 실제 구현 시뮬레이션 모습을 보여준다.



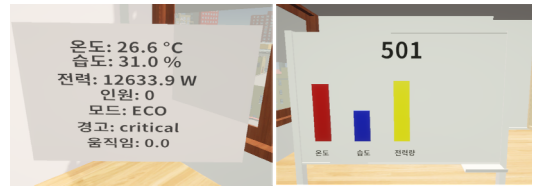
[Fig. 6] Digital twin space constructed from a SweetHome 3D building model in Unity

#### 4.2.2 IoT 데이터 연동 UI 구성

본 디지털트윈에서는 실내 환경 정보를 직관적으로 확인할 수 있도록 Unity의 Canvas와 TextMeshPro를 활용한 환경 상태창 UI를 구현하고, IoT 플랫폼에서 제공하는 REST API와 연동하여 실시간 데이터 동기화를 수행하였다. UI는 World Space 모드의 Canvas로 구성되어 가상 건물 내부 벽면에 배치되었으며, 반투명 패널 위에 주요 환경 정보를 텍스트 및 상태 막대 형태로 시각화하였다. 환경 상태창에는 온도(Temperature), 습도(Humidity), 전력 사용량(Power), 재실 인원(People Count), 시스템 모드(System Mode), 경고 단계(Alert Level), 움직임 감지(Motion) 등의 정보가 표시되며, 실제 IoT 센서로부터 수집된 데이터가 실시간으로 반영된다. IoT 플랫폼과의 연동은 REST API 기반으로 이루어졌으며, UnityWebRequest를 통해 JSON 형식의 센서 데이터를 주기적으로 수신하도록 구현하였다. 수신된 데이터는 즉시 텍스트와 상태 막대 UI에 반영되며, 센서 값의 변화가 감지된 경우에만 UI를 갱신하도록 설계하여 값의 변동이 없을 때 발생할 수 있는 시각적 흔들림 현상을 방지하였다. 실시간 데이터가 Unity 디지털트윈 환경으로 전달되어 표 <Table 3>에 제시된 항목으로 표현되며 [Fig. 7]는 스마트에너지 데이터 연동 UI를 보여준다.

<Table 3> Data Integration UI Description

| Category                  | Item                 | Description  |
|---------------------------|----------------------|--|
| UI Configuration          | Canvas Mode          | World Space canvas attached to building walls            |
|                           | UI Layout            | Environmental data displayed on a semi-transparent panel |
| Displayed Information     | Temperature          | Indoor air temperature                                   |
|                           | Humidity             | Indoor relative humidity                                 |
|                           | Power                | Real-time power consumption                              |
|                           | People Count         | Number of detected occupants                             |
|                           | System Mode          | Current system operation mode                            |
|                           | Alert Level          | System alert status                                      |
| Real-Time API Integration | Motion               | Motion sensor activity level                             |
|                           | Communication Method | Data retrieval via UnityWebRequest                       |
|                           | Data Acquisition     | Periodic JSON data reception from API                    |
| (4) Data Format           | UI Update            | Real-time UI updates                                     |
|                           | Data Source          | IoT platform REST API                                    |
|                           | Data Fields          | Environmental and system parameters                      |
|                           | JSON                 | Structured JSON sensor data                              |



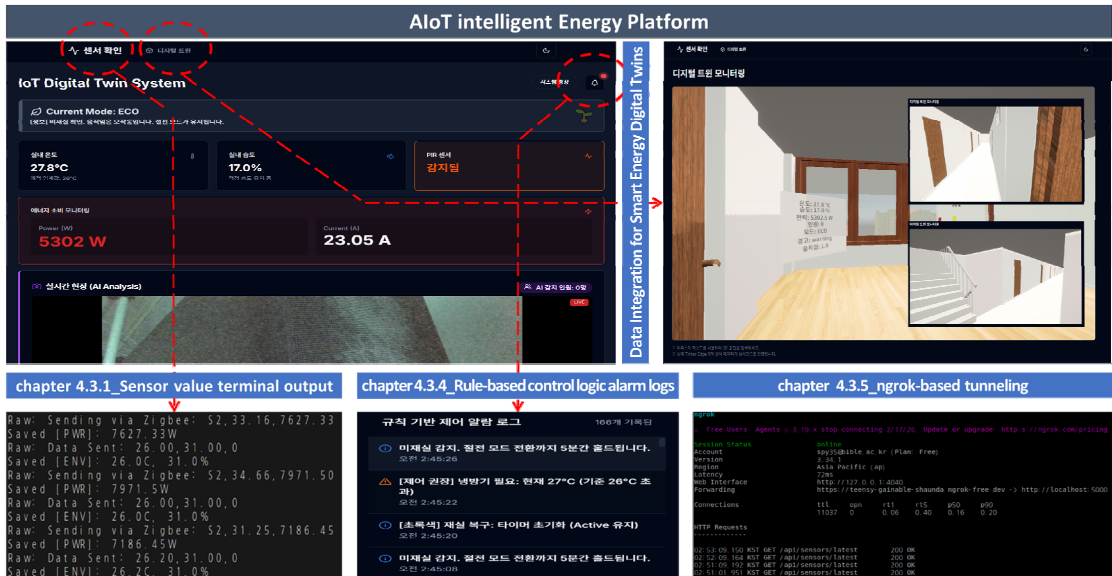
[Fig. 7] Environment status UI with real-time IoT data integration in Digital Twin

### 4.3 AIoT 에너지데이터 플랫폼 구현

본 절에서는 AIoT 에너지 데이터 플랫폼 구현을 위해 하드웨어 구성과 네트워크 토폴로지, 미들웨어 및 데이터베이스 설계, NPU 기반 엣지 AI 객체 탐지 시스템, 규칙 기반 제어 로직과 상태 머신, 그리고 RESTful API 및 웹 모니터링 플랫폼에 대해 기술한다[20].

#### 4.3.1 하드웨어 구성 및 네트워크 토폴로지

본 연구에서 제안하는 데이터 수집 플랫폼은 엣지 컴퓨팅을 위한 ASUS Tinker Edge R 보드를 메인 서버로 하고, 분산된 센서 노드 간의 통신을 위해 저전력 무선 통신 기술인 Zigbee(XBee S2C) 모듈을 적용하였다. 센서 노드는 아두이노 우노(Arduino Uno)를 기반으로 두 가지 타입으로 구성하였다. 첫 번째 노드는 실내 환경 정보를 수집하기 위해 온도습도 센서(DHT11)와 재실 감지를 위한 PIR 모션 센서를 탑재하였으며, 두 번째 노드는 전력 소비량을 모니터링하기 위해 비침습식 전류 센서



[Fig. 8] Overall implementation interface of an AIoT energy data platform integrating digital twins, rule-based control logic, state machine-based alarm functions, and sensor data connectivity

(SCT-013)를 연결하였다. 각 센서 노드에서 수집된 데이터는 XBee 모듈을 통해 무선으로 전송되며, Tinker Edge R의 시리얼 포트(/dev/ttyUSB0)에 연결된 코디네이터 노드가 이를 수신한다. 또한, 시각적 재실 감지를 위해 Logitech C270 HD 웹캠을 Tinker Edge R의 USB 인터페이스에 연결하여 실시간 영상 데이터를 획득하도록 구성하였다. 아래 [Fig. 8]은 본 논문에서 개발한 지능형 에너지 디지털 트윈 통합 플랫폼의 구현 화면을 나타내며, 디지털 트윈 환경과 규칙 기반 제어 로직, 상태 머신 기반 알람 기능, 그리고 센서 데이터 연동 기능을 통합적으로 지원하는 AIoT 에너지 데이터 플랫폼을 보여준다[21].

4.3.2 미들웨어 및 데이터베이스 설계

센서 데이터의 안정적인 수집과 저장을 위해 Python 기반의 비동기 데이터 로거(data\_logger.py)를 구현하였다. 미들웨어는 pyserial 라이브러리를 이용하여 9600bps의 속도로 시리얼 데이터를 수신하며, 수신된 원시 데이터(Raw Data)는 문자열 파싱 과정을 거쳐 노이즈 및 디버그 메시지를 필터링한다. 데이터 저장소로는 임베디드 환경에 최적화된 경량 데이터베이스 엔진인 SQLite3를 채택하였다. 데이터베이스 스키마(sensors.db)는 시계열 데이터 관리를 위해 타임스탬프(timestamp)를 기본 키로 하고, 노드 타입(node\_type), 온도, 습도, 모션, 전

류, 전력 필드를 포함하는 readings 테이블로 설계하였다. 미들웨어는 수신된 패킷의 헤더(예: 'S2'는 전력 데이터, 숫자는 환경 데이터)를 분석하여 해당 테이블에 데이터를 실시간으로 적재(INSERT)한다. 특히 motion 컬럼을 별도로 두어 PIR 센서의 감지 이력을 저장함으로써, 향후 시계열 분석 및 재실 패턴 예측 알고리즘의 학습 데이터로 활용할 수 있도록 구현하였다.

4.3.3 NPU 기반 엣지 AI 객체 탐지 시스템

단순 PIR 센서의 오작동 한계를 보완하고 정밀한 재실 인원 파악을 위해, 본 연구에서는 NPU 가속 기반의 CCTV 영상 분석 시스템을 구축하였다[22]. 엣지 디바이스로는 Rockchip RK3399Pro 프로세서가 탑재된 플랫폼을 사용하였으며, 내장된 NPU(Neural Processing Unit)를 활용하여 실시간 객체탐지를 수행한다.

객체 탐지 모델로는 엣지 환경의 제한된 연산 자원을 고려하여 경량화된 YOLOv5s 모델을 적용하였고, 이를 RKNN(Rockchip Neural Network) 툴킷을 이용해 전용 포맷(.rknn)으로 변환하여 추론 성능을 최적화하였다[22]. 영상 처리 파이프라인은 OpenCV와 rknnlite API를 기반으로 구성되며, 웹캠으로부터 입력된 실시간 프레임은 640×640 해상도로 리사이징된 후 NPU에 입력된다. 추론 결과는 후처리(Post-processing) 단계를 통해 신뢰도(Confidence Score) 0.25 이상인 객체 중

‘Person’ 클래스만을 필터링하고, 비최대 억제(NMS, Non-Maximum Suppression) 알고리즘을 적용하여 중복 검출된 바운딩 박스를 제거함으로써 정확한 실시간 재실 인원수(people\_count)를 산출한다. 해당 영상 분석 과정은 별도의 스레드로 병렬 처리되어 메인 시스템의 부하를 최소화하도록 설계되었다.

<Table 4> Performance Evaluation Results

| Category                     | Item                      | Result            |
|------------------------------|---------------------------|-------------------|
| Object Detection Performance | Precision                 | 0.7309            |
|                              | Recall                    | 0.6568            |
|                              | F1-Score                  | 0.6919            |
| People Counting Performance  | MAE (Mean Absolute Error) | 1.2553 persons    |
| Processing Latency           | Pre-process Latency       | 17.40 ms          |
|                              | NPU Inference Latency     | 152.51 ms         |
|                              | Post-process Latency      | 130.99 ms         |
| Overall System Performance   | Total Latency             | 300.89 ms / frame |
| Processing Speed             | FPS (Frames Per Second)   | 3.32 FPS          |
| System Throughput            | Throughput                | 3.32 Frames/sec   |

제안된 시스템의 성능 평가 결과는 객체 탐지 정확도와 시스템 처리 성능 측면에서 분석되었다. 객체 탐지 성능은 Precision 0.7309, Recall 0.6568, F1-Score 0.6919로 나타나 모델이 탐지한 객체 중 실제 객체의 비율과 실제 객체를 탐지하는 비율 사이에서 비교적 균형을 보였다. 또한 인원수 추정 정확도를 평가하기 위한 지표인 MAE(평균 절대 오차)는 1.2553명으로 나타나, 실제 인원수와 예측 인원수 사이의 평균 오차가 약 1.26명 수준임을 확인하였다. 시스템 처리 성능 측면에서는 전처리 지연시간이 17.40 ms, NPU 기반 추론 지연시간이 152.51 ms, 후처리 지연시간이 130.99 ms로 측정되었으며, 전체 총 지연시간은 프레임당 300.89 ms로 나타났다. 이에 따라 시스템의 처리 속도는 3.32 FPS(Frames Per Second)이며, 연속 처리량 또한 3.32 Frames/sec 수준으로 확인되었다. 이러한 결과는 제안된 시스템이 NPU 기반 객체 탐지를 통해 실시간에 가까운 인원수 추정 및 처리 성능을 제공할 수 있음을 보여준다.

#### 4.3.4 규칙 기반 제어 로직 및 상태 머신

수집된 데이터(센서 값, 재실 인원)를 기반으로 공간의 상태를 판단하고 제어하기 위해 규칙 기반(Rule-based) 제어 로직 스레드를 구현하였다. 시스템 상태는 크게

Active(재실), Hold(대기), Eco(절전)의 3단계 상태 머신(State Machine)으로 동작한다.

- Active 모드: PIR 센서의 모션 감지 또는 YOLOv5를 통해 1명 이상의 인원이 감지될 경우 활성화되며, 쾌적한 환경 유지를 위한 알람을 생성
- Hold 모드: 재실 인원이 감지되지 않을 경우 즉시 전원을 차단하지 않고 5분(300초)의 유예 시간을 부여하는 대기 상태
- Eco 모드: 5분 이상 움직임이나 재실 인원이 감지되지 않을 경우 자동으로 전환되며, 에너지 절감을 위한 경고 메시지를 송출한다. 특히, Eco 모드에서는 '검증(Verifying)' 및 '쿨다운(Cooldown)' 하위 상태를 두어 센서 오작동으로 인한 빈번한 모드 전환을 방지하는 히스테리시스(Hysteresis) 로직 적용

경고 알람 메시지 관련 그림은 [Fig. 8]의 chapter 4.3.4\_Rule-based control logic alarm logs에서 확인할 수 있다.

#### 4.3.5 RESTful API 및 웹 모니터링 플랫폼

사용자에게 실시간 모니터링 및 제어 인터페이스를 제공하기 위해 Flask 프레임워크를 기반으로 웹 서버를 구축하고 클라이언트 및 외부 시스템(Digital Twin)과의 데이터 연동을 위해 RESTful API 엔드포인트(/api/sensors/latest)를 설계하였다. 그리고 JSON 포맷으로 최신 센서 데이터, 재실 인원, 현재 시스템 모드 및 알람 메시지를 반환하도록 구현하였다. 또한, 외부 네트워크에서의 접근성을 확보하기 위해 ngrok을 이용한 터널링 기술을 적용하여, 로컬 네트워크 밖에서도 안전하게 실시간 영상 스트리밍(MJPEG)과 센서 데이터를 확인할 수 있는 환경을 구축하였다. 이 데이터는 Unity 3D로 구현된 디지털 트윈 환경으로 실시간 전송되어, 가상 공간 내에서 실제 공간의 물리적 상태를 3D로 시각화하는 데 활용된다. ngrok을 이용한 터널링 관련 그림은 [Fig. 8]의 chapter 4.3.5 ngrok-based tunneling에서 확인할 수 있다.

#### 4.4 AI기반 에너지 절감 최적화 알고리즘

본 절에서는 AI 기반 에너지 절감 최적화를 목적으로 옛지 AI 객체 인식, 이벤트 기반 하이브리드 센싱, 그리고 상황 인식 기반 규칙 제어 알고리즘을 중심으로 설명한다[23].

4.4.1 엣지 NPU 가속 기반 객체 인식 모델

본 연구에서는 기존 PIR(Passive Infrared) 센서의 오작동 문제를 해결하기 위해 1단계 객체 탐지 모델인 YOLOv5s(You Only Look Once version 5 small)를 도입하였다. ASUS Tinker Edge R의 하드웨어 자원을 효율적으로 활용하기 위해, 학습된 PyTorch 모델을 RKNN(Rockchip Neural Network) 포맷으로 양자화 및 변환하여 탑재하였다. 이를 통해 CPU 점유율을 최소화하며 실시간 추론 성능을 확보하였다. 추론 과정에서는 검출된 객체 중 신뢰도(Confidence Score) 0.25 이상의 '사람(Person)' 클래스만을 유효한 재실 신호로 필터링하여 감지의 민감도를 높였다.

4.4.2 이벤트기반 하이브리드센싱 알고리즘

비전 AI는 높은 정확도를 제공하지만, 상시 가동 시 전력 소비와 발열 문제가 발생한다. 이에 본 연구에서는 물리 센서와 비전 센서를 상호보완적으로 결합한 '이벤트 기반 하이브리드 센싱(Event-driven Hybrid Sensing)' 알고리즘을 적용하였다. 알고리즘이 동작 절차는 다음과 같다. 첫째, 시스템은 평상시 저전력 대기 모드를 유지하며 PIR 센서만이 실내 움직임을 모니터링한다. 둘째, 움직임이 감지되면(Trigger), 엣지 디바이스는 즉시 웹캠을 활성화하고 NPU에 YOLOv5s 모델을 로드하여 추론을 수행한다. 셋째, 추론 결과 사람이 식별될 경우에만 최종 '재실' 상태로 확정하고 에너지 제어 로직을 수행한다. 이러한 구조는 고성능 연산을 필요한 시점에만 수행함으로써(On-demand), 상시 가동 방식 대비 시스템 소비 전력을 획기적으로 절감한다.

4.4.3 상황인식 기반 규칙 제어 알고리즘

본 절에서는 6.2절에서 도출된 재실 상태(O\_status)와 환경 센서 데이터(T\_curr, H\_curr)를 기반으로 즉각적인 에너지 제어를 수행하는 규칙 기반(Rule-based) 알고리즘을 정의한다. 제어 로직은 크게 '쾌적 모드(Active Mode)'와 '절전 모드(Eco Mode)'로 구분되며, 급한 기기 점멸로 인한 전력 낭비와 기기 수명 단축을 방지하기 위해 지연 타이머 기법을 적용하였다.

4.4.4 제어 모드 정의

시스템은 재실 여부에 따라 목표 온도(T\_target)와 조명 상태(L\_state)를 동적으로 변경한다. 첫째, 쾌적 모드는 O\_status = 1(재실)일 때 활성화된다. 실내 온도가

설정된 임계값(예: 26°C)을 초과할 경우 냉방기를 가동하고 조명을 켜서 업무 효율과 쾌적성을 보장한다.

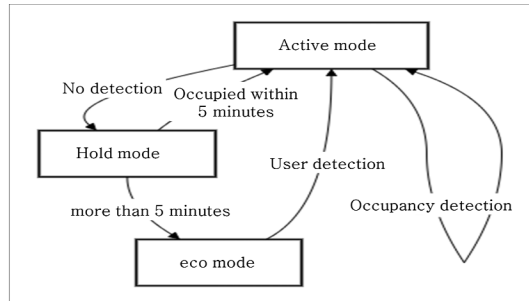
둘째, 절전 모드는 O\_status = 0(비재실)일 때 활성화된다. 불필요한 조명을 끄고, 냉방기 설정 온도를 상향 조정(예: 28°C)하거나 전원을 차단하여 대기 전력을 최소화한다.

4.4.5 지연 타이머(Hysteresis) 적용

센서의 일시적인 미감지나 사용자의 짧은 이석으로 인해 시스템이 즉각적으로 Off 되는 것을 방지하기 위해 지연 시간(T\_delay)을 설정하였다. 비재실 상태로 전환 되더라도 T\_delay(예: 5분) 동안은 기존 쾌적 모드를 유지하며, 해당 시간 내에 재실 신호가 다시 발생하지 않을 경우 최종적으로 절전 모드로 진입한다.

<Table 5> Rule-based Control Logic Specification

| State  | Condition                                    | Action (Lighting) | Action (HVAC)                |
|--------|--|-------------------|------------------------------|
| Active | Occupied (O_status = 1)                      | ON                | Set T_target = 24°C          |
| Hold   | Unoccupied (O_status = 0) AND Time < T_delay | Keep State        | Keep State                   |
| Eco    | Unoccupied (O_status = 0) AND Time > T_delay | OFF               | Set T_target = 28°C (or OFF) |



[Fig. 9] State Machine Transition Diagram

4.4.6 알고리즘 구현 상세

1) 3단계 상태 머신 구현

수집된 복합 데이터(센서 값, 재실 인원)를 기반으로 공간의 상태를 판단하고 제어하기 위해 규칙 기반 제어 로직 스텝드를 구현하였다. 시스템 상태는 크게 'Active(재실)', 'Hold(대기)', 'Eco(절전)'의 3단계 상태 머신으로 동작한다.

- Active 모드: PIR 센서의 모션 감지 또는 YOLOv5s를 통해 1명 이상의 인원이 감지될 경우 활성화되

며, 쾌적한 환경 유지를 위한 알람을 생성한다.

- Hold 모드: 재실 인원이 감지되지 않을 경우 즉시 전원을 차단하지 않고 5분(300초)의 유예 시간을 부여하는 3대기 상태이다.
- Eco 모드: 5분 이상 움직임이나 재실 인원이 감지되지 않을 경우 자동으로 전환되며, 에너지 절감을 위한 경고 메시지를 송출한다. 특히, Eco 모드에서는 '검증(Verifying)' 및 '쿨다운(Cooldown)' 하위 상태를 두어 센서 오작동으로 인한 빈번한 모드 전환을 방지하는 히스테리시스(Hysteresis) 로직을 적용하였다.

2) 실시간 제어 로직

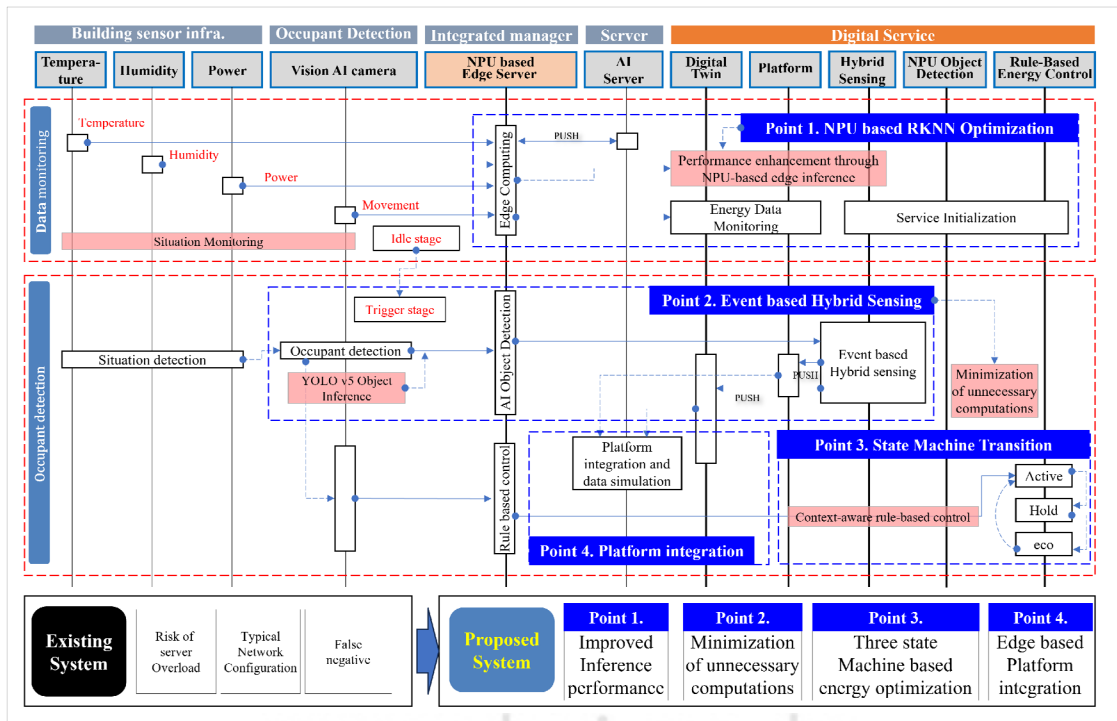
실제 구현에서는 센서 데이터와 객체 탐지 결과를 통합하여 실시간으로 상태를 판단한다[20]. PIR 센서의 움직임 감지와 YOLOv5s 기반 사람 탐지 결과를 결합하여 재실 상태를 확정하며, 이 정보는 HVAC 및 조명 시스템의 제어에 직접 활용된다.

4.4.7 알고리즘 통합 및 운영

본 연구에서 제안하는 알고리즘은 엣지 디바이스에서

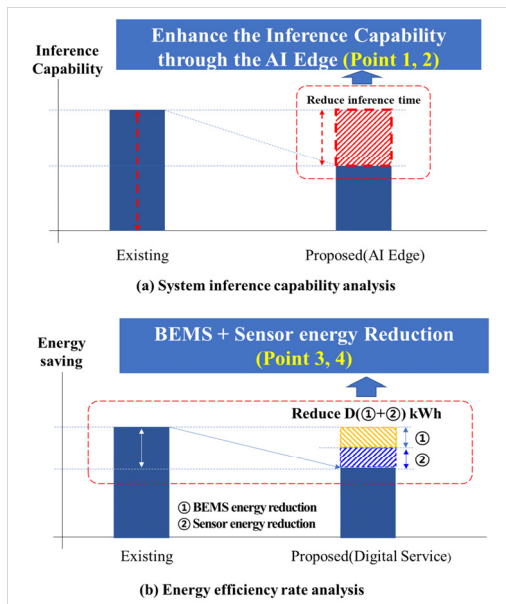
독립적으로 실행되며, 센서 데이터 수집, 객체 탐지, 상태 판단, 제어 명령 생성의 전체 프로세스를 실시간으로 처리한다. 알고리즘의 결정은 RESTful API를 통해 외부 시스템에 전달되며, 웹 모니터링 플랫폼과 Unity 3D 디지털트윈 환경에서 실시간으로 시각화된다. 알고리즘의 운영 안정성을 위해 예외 처리 메커니즘을 구현하였으며, 센서 데이터 손실이나 추론 오류 발생 시 기본 안전 모드로 전환하여 시스템의 신뢰성을 보장한다. [Fig. 10]은 센서 구성 및 데이터 수집 등을 보여주는 전체 시스템 플로우 차트를 보여준다. 해당 그림은 제안된 시스템의 핵심 구성 요소와 운영 흐름을 통합적으로 나타내고 있으며 NPU 기반 RKNN 최적화를 통한 객체 인식 모델의 추론 성능 향상, 이벤트 기반 하이브리드 센싱을 통한 불필요한 연산 최소화, 3단계 상태 머신(State Machine) 기반 에너지 최적화 제어, 그리고 엣지 기반 플랫폼 통합을 통한 시스템 운영 구조의 네 가지 핵심 요소로 구성된다. 이를 통해 객체 인식 기반 환경 분석, 센서 데이터 처리, 에너지 제어 알고리즘, 그리고 플랫폼 서비스가 유기적으로 연계되는 전체 시스템의 운영 구조를 보여준다..

[Fig. 11]은 제안된 시스템의 추론 성능과 에너지 효율성 분석 결과를 나타낸다. [Fig. 11]의 (a)는 시스템의



[Fig. 10] Algorithm Integration and Platform Operation Flowchart

추론 능력 분석(System inference capability analysis)을 보여주며, AI Edge 기반 처리 구조를 통해 실시간 추론 처리 능력이 고도화되는 과정을 보여주고 있다. 특히 Point 1과 Point 2는 AI Edge를 활용하여 NPU 기반 객체 탐지 모델을 적용함에 따라 안정적인 객체 탐지 성능과 인원수 추정 정확도를 확보하였으며, 프레임당 300.89 ms의 처리 시간과 3.32 FPS의 처리 속도를 통해 실제 환경에서 적용 가능한 처리 성능을 보였다.



[Fig. 11] System Performance and Energy Reduction Analysis

이러한 결과는 제안된 시스템이 기존 방식 대비 효율적인 인원수 추정 및 객체 탐지 기반 환경 분석이 가능함을 나타낸다. 한편 [Fig. 11]의 (b)는 에너지 효율 분석(Energy efficiency rate analysis)을 나타내며, 건물에서 발생하는 에너지 절감(① BEMS energy reduction)과 더불어 환경 센서 자체 에너지 절감(② Sensor energy reduction) 효과를 분석한 결과를 보여준다. 즉, 센서 시스템 자체의 에너지 절감과 건물 에너지 사용량 절감을 통해 전체적인 에너지 효율이 향상될 가능성이 있음을 나타낸다.

## 5. 결론

본 연구는 제로에너지 빌딩의 실현을 위한 AIoT 기반 지능형 에너지 디지털트윈 플랫폼을 제안하였다. 제안

시스템은 3계층 아키텍처(센서, 엣지, 서비스)를 기반으로 하며, 실내 환경 데이터와 재실 정보를 실시간으로 수집·처리·분석하여 에너지 효율을 극대화한다.

주요 기술적 기여는 다음과 같다. 첫째, ASUS Tinker Edge R 엣지 디바이스와 NPU를 활용하여 YOLOv5s 기반 객체 탐지 모델을 실시간으로 실행함으로써, 기존 PIR 센서 단독 사용 시 발생하는 오작동 문제를 해결하였다. 둘째, PIR 센서와 비전 AI를 결합한 이벤트 기반 하이브리드 센싱 알고리즘을 도입하여, 시스템의 전력 소모를 최소화하면서도 재실 감지 정확도를 향상시켰다. 셋째, 3단계 상태 머신(Active, Hold, Eco)과 지연 타이머를 적용한 규칙 기반 제어 알고리즘을 설계하여, 사용자 쾌적성과 에너지 절감을 균형 있게 달성하였다. 넷째, Flask 기반 RESTful API와 Unity 3D 디지털트윈을 연동하여 실시간 모니터링 및 가시화 시스템을 구축하였다.

본 연구에서 제안한 플랫폼은 단일 건물 차원의 에너지 최적화를 넘어, 향후 스마트 캠퍼스 및 스마트시티로의 확장 가능성을 내포한다. 특히 국내 제로에너지 빌딩 정책 및 탄소중립 목표에 부합하는 기술적 기반을 제공한다는 점에서 실용적 가치가 있다. 시스템의 모듈식 설계는 신재생에너지 연계, 수요반응(DR) 참여, 예측 유지 보수 등 추가 기능의 통합을 용이하게 한다. 향후 연구과제로는 실제 건물 환경에서의 장기 성능 검증, 계절별 에너지 절감 효과 분석, 다양한 건물 유형에 대한 적용성 평가 등이 있다. 또한, 에너지 예측 모델과의 연계를 통한 사전적 제어 알고리즘 개발이 필요하다.

본 연구가 AIoT와 디지털트윈 기술을 활용한 지능형 에너지 관리 시스템의 발전에 기여하며, 국내외 제로에너지 빌딩 구현을 위한 실질적인 솔루션으로 자리매김할 수 있기를 기대한다.

## REFERENCES

- [1] International Energy Agency (IEA), "Electricity Mid-Year Update 2025," IEA, Paris, France, pp. 1-70, 2025. [https://www.iea.org/reports/electricity-mid-year-update-2025?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.iea.org/reports/electricity-mid-year-update-2025?utm_source=chatgpt.com)
- [2] S. Asadi, H. K. Naeini, D. Hassanlou, A. Pishahang, S. A. Najafabadi, A. Sharifi and M. Ahmadi, "AI-Powered Digital Twin Frameworks for Smart Grid Optimization and Real-Time Energy Management in Smart Buildings: A Survey," *Comput. Model. Eng. Sci.*, Vol. 145, No. 2, pp. 1259-1301, 2025.
- [3] L. Chen, L. Huang, J. Hua, Z. Chen, L. Wei, A. I.

- Osman, S. Fawzy, D. W. Rooney and L. Dong, "Green construction for low-carbon cities: a review," *Environ. Chem. Lett.*, Vol. 21, No. 3, pp. 1627-1657, 2023.
- [4] S. Asadi, H. Kazemi Naeini, A. Pishahang, D. Hassanlou, et al., "AI and AI-powered digital twins for smart, green, and zero-energy buildings: A systematic review of leading-edge solutions for advancing environmental sustainability goals," *Environmental science and ecotechnology*, v.28, pp.100628-100669, 2025.
- [5] L. U. G. Ekanayaka Gunasena, A. Alazab and M. A. Talukder, "Artificial intelligence for energy optimization in smart buildings: A systematic review and meta-analysis," *Energy informatics*, v.8, no.1, pp.135-158, 2025.
- [6] S. Manokeaw, P. Khuwuthyakorn, Y.-C. Chan, N. Tengtrairat, M. Jintapitak, O. Thinnukool, C. Buachart, T. Sinthamrongruk, T. Kridakorn Na Ayutthaya, N. Suriyanon, S. Kanangkaew and D. Rinchumphu, "A Dynamic Digital Twin Framework for Sustainable Facility Management in a Smart Campus: A Case Study of Chiang Mai University," *Technologies*, Vol. 13, No. 10, pp. 439-466, 2025.
- [7] A. Z. Abidin, I. K. A. Enriko, A. A. Pramudita, "Leveraging IoT, digital twin and machine learning for smart energy audit in office building: a systematic literature review and recommendations", *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, v.14, pp. 101124-101140, 2025
- [8] J.-W. Kwon, A. Rubab, W.-T. Kim, "A Novel Energy Control Digital Twin System with a Resource Aware Optimal Forecasting Model Selection Scheme", *Applied sciences*, v.15, no.14, pp.7738-7759, 2025
- [9] B. S. Patrick, J. Anshul, C. Mohak, G. Michael, "DeepEdgeBench: Benchmarking Deep Neural Networks on Edge Devices", *Cloud Engineering (IC2E)*, 2021 IEEE International Conference on 2021 Oct, pp.20 - 30 , 2021
- [10] H. Li, T. Hong, "A digital twin platform for building performance monitoring and optimization: Performance simulation and case studies", *Building simulation*, v.18, no.6, pp.1561-1579, 2025
- [11] M. Boukaf, F. Fadli, N. Meskin, "A Comprehensive Review of Digital Twin Technology in Building Energy Consumption Forecasting", *IEEE access : practical research, open solutions*, v.12, pp.187778-187799, 2024
- [12] A. Almadhor, S. Alsubai, N. Kryvinska, N. Ghazouani, B. Bouallegue, A. A. Hejaili, G. A. Sampedro , "A synergistic approach using digital twins and statistical machine learning for intelligent residential energy modelling", *Scientific reports*, v.15, no.1, pp.26088-26115, 2025
- [13] F. Yıldırım, Y. Yalman, K. Ç. Bayındır, E. Terciyanlı, "Comprehensive Review of Edge Computing for Power Systems: State of the Art. Architecture, and Applications", *Applied sciences*, v.15, no.8, pp.4592-4636, 2025
- [14] N. A. Tuan, A. Yonghan, "Edge AI for Smart Energy Systems: A Comprehensive Review", *Edge Computing-Latest Advancements, Challenges, and Applications*, 2025
- [15] Q. N. Minh, V.-H. Nguyen, V. K. Quy, L. A. Ngoc, A. Chehri, G. Jeon, "Edge Computing for IoT-Enabled Smart Grid: The Future of Energy", *Energies*, v.15, no.17, pp.6140-6156, 2022
- [16] Y. Liu, C. Yang, L. Jiang, S. Xie, Y. Zhang, "Intelligent Edge Computing for IoT-Based Energy Management in Smart Cities", *IEEE network*, v.33, no.2, pp.111-117, 2019
- [17] Z. Ni, C. Zhang, M. Karlsson, S. Gong, "Leveraging Deep Learning and Digital Twins to Improve Energy Performance of Buildings", *IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES)*, pp. 1-6, 2023
- [18] A. Sghiri, M. Gallab, S. Merzouk, S. Assoul, "Leveraging Digital Twins for Enhancing Building Energy Efficiency: A Literature Review of Applications, Technologies, and Challenges", *Buildings*, v.15, no.3, pp.498-527, 2025
- [19] A. Ghaemi, Y. Rezgui, I. Petri, T. Beach, A. Ghoroghi, "AI and Digital Twin Applications in Building Energy Management: A State-of-the-Art Review", *IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation*, 2025
- [20] F. Islam, I. Ahmed, L. M.-Popa, "Development and testing of an IoT platform with smart algorithms for building energy management systems", *Energy and buildings*, v.344, pp.115970-115991, 2025
- [21] H. Jaemin, K. Jiwon, Y. Sungmin, "DT-BEMS: Digital twin-enabled building energy management system for information fusion and energy efficiency", *Energy : technologies, resources, reserves, demands, impact, conservation, management, policy*, v.326, pp.136162, 2025
- [22] S. Zhou, W. Zhang, P. W. Tien, J. Calautit, "Evaluating single-shot and two-stage vision-based detection of occupancy activity in energy-efficient buildings", *Energy and buildings*, v.345, pp.116017-116036, 2025
- [23] X. Wang, P. Wang, R. Huang, X. Zhu, J. Arroyo, N. Li, "Safe deep reinforcement learning for building energy management", *Applied energy*, v.377 pt.A, pp.124328, 2025

한 기 준(Gijun Han)

[준회원]



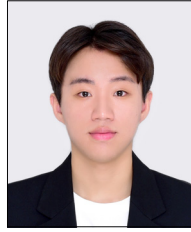
■ 2024년 3월 ~ 현재 : 한국성서대학교 AI융합학부 컴퓨터소프트웨어 /인공지능 전공 학부생

<관심분야>

인공지능 시스템, 스마트 IoT, 임베디드 시스템, 데이터 분석 및 처리

박 지 민(Jimin Park)

[준회원]



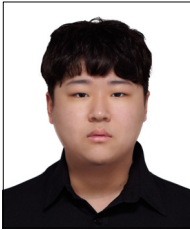
■ 2021년 3월 ~ 현재 : 한국성서대학교 AI융합학부 컴퓨터소프트웨어 전공 학부생

<관심분야>

스마트 IoT, 인공지능 시스템, 블록체인

이 동 연(Dongyeon Lee)

[준회원]



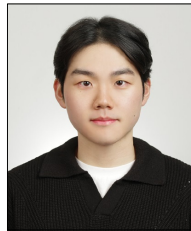
■ 2024년 3월 ~ 현재 : 한국성서대학교 AI융합학부 컴퓨터소프트웨어 전공 학부생

<관심분야>

인공지능 시스템, 스마트 IoT, 하드웨어, 컴퓨터소프트웨어

김 중 환(jonghwan Kim)

[준회원]



■ 2024년 3월 ~ 현재 : 한국성서대학교 AI융합학부 컴퓨터소프트웨어 전공 학부생

<관심분야>

웹서비스, 백엔드, 스마트 IoT

권 민 석(Minseok Kwon)

[준회원]



■ 2025년 3월 ~ 현재 : 한국성서대학교 AI융합학부 컴퓨터소프트웨어 전공 학부생

<관심분야>

디지털트윈, Unity engine, Unreal engine, 스마트 IoT,

최 정 호(Jeongho Choi)

[준회원]



■ 2024년 3월 ~ 현재 : 한국성서대학교 AI융합학부 컴퓨터소프트웨어 전공 학부생

<관심분야>

인공지능 시스템, Unity, 스마트 IoT,

배 수 연(Suyeon Bae)

[준회원]



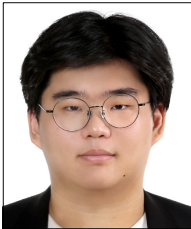
- 2025년 3월 ~ 현재 : 한국성서대학교 AI 융합학부 인공지능 전공 학부생

<관심분야>

인공지능 시스템, 스마트 IoT, 데이터 분석 및 처리

고 종 원(Jongwon Ko)

[준회원]



- 2025년 3월 ~ 현재 : 한국성서대학교 AI 융합학부 컴퓨터소프트웨어 전공 학부생

<관심분야>

인공지능 시스템, 스마트 IoT, 백엔드

박 상 민(Sangmin Park)

[정회원]



- 2011년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부 임베디드소프트웨어공학 (공학석사)
- 2016년 8월 : 중앙대학교 전자전기공학부 임베디드소프트웨어공학 (공학박사)

- 2018년 5월 ~ 2024년 8월 : 중앙대학교 연구처 연구전담 교수
- 2024년 9월 ~ 현재 : 한국성서대학교 AI 융합학부 조교수

<관심분야>

스마트 IoT, 지능형에너지, 신재생에너지, 지능형 수요/공급 최적화, 지능형화재관리, 이미지딥러닝