

LEEMO, PEARNET, AERONET 통합 시스템 연구개발 계획 상세 초안

I. 서론

1.1. 연구 배경 및 필요성

현대 사회에서 건물은 전 세계 에너지 소비의 상당 부분을 차지하며, 온실가스 배출의 주요 원인 중 하나로 지목되고 있다.¹ 특히 대한민국에서는 상업 및 주거용 건물이 국가 전체 1차 에너지 공급의 약 15%를 소비하고 있으며³, 1인당 에너지 소비량은 OECD 평균보다 50% 높은 수준이다.⁴ 이러한 배경 속에서 건물 에너지 효율 향상 및 탄소 배출량 감축은 국가적 차원의 중요한 과제로 부상했으며, 2050년 탄소 중립 목표 달성을 위한 핵심 전략으로 인식되고 있다.⁴ 기존의 건물 에너지 관리 시스템(BEMS)은 주로 표준화된 규칙 기반 제어(Rule-Based Control, RBC)에 의존하여 운영되어 왔다. 이러한 시스템은 설정된 규칙에 따라 HVAC(Heating, Ventilation, and Air Conditioning), 조명 등을 제어하지만, 실시간 변화하는 외부 환경, 건물 내부 부하 변동, 그리고 무엇보다도 중요한 재실자의 다양한 열 쾌적성 요구를 효과적으로 반영하는 데 한계가 있다.⁵ 결과적으로 에너지 낭비와 재실자 불만족이라는 문제가 지속적으로 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 사물인터넷(IoT), 인공지능(AI), 모델 예측 제어(Model Predictive Control, MPC), 심층 강화 학습(Deep Reinforcement Learning, DRL) 등 첨단 기술을 BEMS에 접목하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.⁷ IoT 센서 네트워크는 건물 내외부 환경 데이터를 실시간으로 정밀하게 수집하고¹², AI 및 머신러닝(ML) 기술은 수집된 데이터를 분석하여 에너지 소비 패턴 예측, 설비 고장 진단, 그리고 재실자의 개인화된 열 쾌적성 모델 구축에 활용될 수 있다.¹⁰ 또한, MPC와 DRL 같은 고급 제어 알고리즘은 미래 예측 정보와 최적화 기법을 활용하여 에너지 소비를 최소화하면서 동시에 재실자 만족도를 극대화하는 최적의 제어 전략을 도출할 수 있다.⁹

1.2. 연구 목표

본 연구개발 계획서는 이러한 기술적 진보를 바탕으로, 차세대 지능형 건물 에너지 및 환경 관리 시스템 구축을 목표로 한다. 이를 위해 다음 세 가지 핵심 프로젝트를 유기적으로 통합하는 방안을 제안한다:

- **LEEMO (Living Environment Energy Management Optimization)**
- **PEARNET (Personalized Environment Adaptation via Resident NETwork)**
- **AERONET (Advanced Environmental Response with Omnidirectional NETwork)**

세 프로젝트의 통합 목표는 실시간, 개인화된 에너지 및 쾌적성 관점에서 최적제어 또는 관리 시스템을 연구하는 것이다. 구체적인 목표는 다음과 같다.

1. **AERONET:** 저비용 고효율의 다중 모드 센서 네트워크를 구축하여 건물 내외부 환경 데이터(온도, 습도, CO₂, VOC, 미세먼지 등) 및 재실자 관련 정보(점유 여부, 위치 등)를 실시간으로 정밀하게 수집한다.
2. **PEARNET:** 수집된 환경 데이터와 재실자의 생리적 반응 및 피드백 데이터를 활용하여, 개인별 열 쾌적성 선호도를 학습하고 예측하는 AI 기반 모델을 개발한다. 특히, 프라이버시 보호 기술(예: 연합 학습)을 적용하여 민감한 개인 정보 노출 없이 모델을 구축한다.
3. **LEEMO:** AERONET으로부터 수집된 실시간 데이터와 PEARNET의 개인화된 쾌적성 목표, 그리고 건물의 열 동특성 예측 모델을 기반으로, MPC 또는 DRL 알고리즘을 활용하여 에너지 소비 최소화와 재실자 쾌적성 극대화를 동시에 달성하는 최적의 HVAC 및 관련 시스템 제어 전략을 도출하고 실행한다.

궁극적으로 본 연구는 LEEMO, PEARNET, AERONET의 통합을 통해 기존 BEMS의 한계를 극복하고, 에너지 효율성, 재실자 만족도, 시스템 운영 효율성을 혁신적으로 개선하는 지능형 건물 관리 생태계를 구축하는 것을 목표로 한다.

1.3. 보고서 구성

본 보고서는 다음과 같이 구성된다. II장에서는 연구의 배경과 동기를 상세히 기술하며, 건물 에너지 소비 현황, 기존 BEMS의 문제점, 그리고 제안하는 통합 시스템의 필요성을 강조한다. III장에서는 LEEMO-PEARNET-AERONET 통합 시스템의 비전과 구성 요소, 핵심 혁신 기술을 설명한다. IV장에서는 구체적인 연구개발 계획을 단계별로 나누어 목표, 주요 활동, 방법론, 결과물을 상세히 제시한다. V장에서는 시스템 통합 전략과 아키텍처, 상호운용성 확보 방안, 그리고 관련 모범 사례 적용 계획을 기술한다. VI장에서는 연구를 통해 기대되는 기술적 성과와 정량적 영향, 지식 확산 계획을 설명한다. VII장에서는 예상되는 기술적 및 프로젝트 위험 요소를 분석하고 완화 전략을 제시하며, 시스템의

고장 감내 능력 확보 방안 및 보안/프라이버시 정책을 논의한다. VIII장에서는 필요한 전문 인력, 하드웨어, 소프트웨어, 클라우드 서비스 등 자원 요구사항과 예상 비용을 검토한다. IX장에서는 단계별 프로젝트 일정과 주요 마일스톤을 제시한다. 마지막으로 X장에서는 연구 계획의 요약과 의의를 강조하며 향후 추진 방향을 제시한다. 부록에서는 AERONET 센서 상세 정보, 클라우드 비용 추정, 상용 BEMS 플랫폼 비교 자료, 문제 해결 가이드 등을 제공한다.

II. 배경 및 동기

2.1. 건물 에너지 소비 현황 및 문제점

건물 부문은 전 세계 에너지 소비의 약 40%를 차지하며, 이는 산업 및 운송 부문보다 높은 수치이다.¹ 대한민국 역시 예외는 아니어서, 상업 및 주거용 건물이 국가 1차 에너지 공급의 약 15%를 지속적으로 소비하고 있다.³ 2022년 기준, 최종 에너지 소비에서 주거 부문은 11.7%, 상업 및 공공 서비스 부문은 11.2%를 차지했다.²⁰ 특히, 1인당 에너지 소비량(5.6 toe/cap, 2023년)과 전력 소비량(11 MWh/cap, 2023년)은 OECD 평균보다 50%나 높아 에너지 효율 개선의 필요성이 더욱 절실하다.⁴ 주거 부문의 주요 에너지원은 천연가스(48.7%, 2022년)와 전기(30.4%, 2022년)이며,²⁰ 상업 및 공공 서비스 부문에서는 전기가 70.2%로 압도적인 비중을 차지한다.²⁰ 이는 HVAC 시스템과 조명, 각종 전자기기 사용이 건물 에너지 소비의 주요 요인임을 시사한다. 난방은 주거 부문 에너지 소비의 42%를 차지하는 가장 큰 단일 용도이다.³ 대한민국 정부는 제3차 에너지기본계획을 통해 2040년까지 에너지원단위를 2017년 대비 38% 개선하겠다는 목표를 설정하고, 공공 임대주택 및 건물의 그린 리모델링 사업을 추진하는 등 노력을 기울이고 있다.³ 또한, 2021년 상향 조정된 국가 온실가스 감축 목표(NDC)는 2030년까지 2018년 대비 40% 감축을 목표로 하며, 2050년 탄소 중립 달성을 선언하였다.⁴ 건물 부문의 직접적인 CO₂ 배출량은 2019년 48 MtCO₂에 달했으며, 1.5°C 목표 달성 시나리오 하에서는 2050년까지 이를 1~19 MtCO₂ 수준으로 감축해야 한다.³ 이러한 목표 달성을 위해서는 건물 에너지 효율을 획기적으로 개선할 수 있는 혁신적인 기술 도입이 필수적이다.

2.2. 기존 건물 에너지 관리 시스템(BEMS)의 한계

현재 널리 사용되는 BEMS는 주로 사전 설정된 규칙(Rule-Based Control, RBC)이나 간단한 피드백 제어(예: PID 제어)에 기반하여 운영된다.²¹ 이러한 시스템들은

기본적인 제어 기능은 수행하지만 다음과 같은 본질적인 한계를 지닌다.

- **정적 제어:** 실시간으로 변화하는 날씨, 재실자 수, 내부 발열 등의 동적 요소를 예측하거나 효과적으로 반영하기 어렵다. 이로 인해 과냉방/과난방 등 불필요한 에너지 소비가 발생한다.¹¹
- **표준화된 쾌적성:** 모든 재실자에게 동일한 온도 설정값을 적용하여, 개인의 연령, 성별, 활동량, 의복 상태 등에 따른 다양한 열 쾌적성 선호도를 만족시키지 못한다.¹⁶ 이는 재실자의 불만족과 생산성 저하로 이어질 수 있다.
- **제한된 정보 활용:** 기존 **BEMS**는 제한된 센서 데이터만을 활용하며, 시스템 간 통합 및 데이터 공유가 미흡한 경우가 많다.⁵ 특히, 오래된 **BMS**와의 호환성 문제나 데이터 품질 이슈는 **BEMS**의 효과를 저해하는 주요 요인이다.⁵ 센서 데이터의 부족 또는 부정확성은 에너지 낭비 지점이나 설비 고장을 조기에 파악하는 것을 어렵게 만든다.⁶
- **복잡성 및 비용:** **BEMS** 구축 및 운영에는 상당한 초기 비용과 전문 인력이 요구된다.⁵ 특히, 시스템 구성이 복잡하고 데이터 분석 및 활용에 전문성이 필요하여 중소형 건물에서는 도입이 어려운 경우가 많다.⁶
- **통합 및 상호운용성 부족:** 다양한 제조사의 설비와 시스템을 통합하는 데 어려움이 있으며, 표준화된 프로토콜(예: **BACnet**) 지원이 부족한 경우 시스템 확장이 제한적이다.⁵

이러한 한계점들은 건물 에너지 효율 개선과 재실자 만족도 향상에 있어 중요한 장애물로 작용하고 있으며, 이를 극복하기 위한 새로운 접근 방식이 요구된다.

2.3. 첨단 제어 및 AI 기술의 가능성

최근 급격히 발전하고 있는 IoT, AI, 고급 제어 기술은 기존 **BEMS**의 한계를 극복하고 건물 관리의 새로운 패러다임을 제시할 잠재력을 가지고 있다.

- **IoT 센서 네트워크:** 저렴하고 다양한 센서(온도, 습도, CO₂, VOC, 미세먼지, 재실 감지 등)와 무선 통신 기술(WiFi, LoRaWAN 등)의 발전은 건물 내외부 환경에 대한 상세하고 실시간적인 데이터 수집을 가능하게 한다.¹² 이는 건물 상태에 대한 깊이 있는 이해를 제공하고, 데이터 기반의 정밀 제어를 위한 기초를 마련한다.
- **AI 및 머신러닝(ML):** AI/ML 기술은 방대한 센서 데이터를 분석하여 숨겨진 패턴을 발견하고 미래 상태를 예측하는 데 탁월한 성능을 보인다.¹⁰ 이를 통해 에너지 소비량 예측 정확도를 높이고¹⁰, HVAC 시스템 등의 고장을 조기에 진단하며(**Fault Detection and Diagnostics, FDD**)⁶, 나아가 재실자의 개인별 열 쾌적성 선호도를 학습하여 맞춤형 환경을 제공할 수 있다.¹⁴ 특히, 연합 학습(**Federated Learning**)과 같은 프라이버시 보호 기술은 민감한 개인 데이터를 중앙 서버로 전송하지 않고도 분산된

환경에서 모델을 학습시킬 수 있어, 개인 맞춤형 서비스 구현의 현실적인 방안을 제시한다.²⁶

- **모델 예측 제어(MPC):** MPC는 건물의 열 동특성 모델과 미래 외란(날씨, 내부 발열 등) 예측 정보를 활용하여, 설정된 제약 조건(예: 쾌적 온도 범위) 하에서 에너지 소비 최소화과 같은 제어 목표를 달성하기 위한 최적의 제어 입력을 계산하는 고급 제어 기법이다.⁹ 건물의 열 관성을 효과적으로 활용하고, 전기 요금 변동 등을 고려한 비용 최적화 제어가 가능하다.¹¹ 연구에 따르면 MPC는 기존 제어 방식 대비 15%에서 최대 40%까지 에너지 절감 효과를 보이며, 전력 피크 부하를 50%까지 낮출 수 있다.¹⁷ 하지만 MPC 구현에는 정확한 건물 모델 구축, 예측 정보 확보, 실시간 최적화 계산을 위한 충분한 연산 능력 및 전문 지식이 요구된다는 도전 과제가 있다.⁹
- **심층 강화 학습(DRL):** DRL은 에이전트가 환경과의 상호작용(시행착오)을 통해 보상을 최대화하는 제어 정책을 스스로 학습하는 AI 기반 제어 기법이다.¹⁹ 복잡하고 비선형적인 시스템에 대한 명시적인 모델 없이도 최적 제어 전략을 학습할 수 있다는 장점이 있다.¹⁹ HVAC 제어 분야에서 DRL은 기존 제어 방식 대비 4%~22%의 에너지 절감 효과를 보이면서도 열 쾌적성을 유지하거나 개선하는 성능을 보여주었다.³⁰ 하지만 DRL은 학습 과정에 많은 데이터와 시간이 소요될 수 있으며(샘플 비효율성), 학습된 정책의 안정성과 실제 환경 적용 시의 일반화 성능 확보가 중요한 과제이다.¹⁹ DDPG, PPO, SAC 등 다양한 DRL 알고리즘이 연구되고 있으며¹⁹, 최근에는 DRL의 샘플 효율성을 높이기 위해 모델 기반 RL 또는 하이브리드 접근법, 전이 학습(Transfer Learning) 등의 연구가 진행 중이다.³¹

2.4. 통합 시스템의 필요성

앞서 논의된 바와 같이, 개별 기술(IoT 센싱, AI 분석, 고급 제어)은 각각 건물 에너지 관리 개선에 기여할 수 있지만, 진정한 혁신은 이들을 유기적으로 통합하여 시너지를 창출할 때 가능하다. AERONET의 정밀한 실시간 데이터는 PEARNET의 개인 맞춤형 쾌적성 모델과 LEEMO의 예측 제어 모델의 정확성을 높이는 기반이 된다. PEARNET의 쾌적성 목표는 LEEMO 제어 알고리즘의 중요한 입력으로 작용하여, 에너지 절감과 재실자 만족도 간의 균형을 최적화한다. LEEMO는 AERONET과 PEARNET으로부터 얻은 정보를 종합하여 가장 효과적인 제어 결정을 내리고 실행한다. 이러한 통합 시스템은 기존 BEMS의 단점을 근본적으로 해결하고, 건물을 단순한 에너지 소비 주체에서 능동적이고 지능적인 에너지 관리 주체로 변화시킬 잠재력을 가진다. 따라서 LEEMO, PEARNET, AERONET 프로젝트의 통합 연구개발은 차세대 스마트 빌딩 기술을 선도하고 국가 에너지 목표 달성에 기여하기 위해 필수적이다.

III. 제안 통합 시스템 (LEEMO-PEARNET-AERONET)

3.1. 시스템 비전 및 개요

제안하는 통합 시스템은 데이터 기반의 개인 맞춤형 지능형 건물 환경 제어 생태계 구축을 비전으로 한다. 이는 AERONET의 광범위한 센싱 능력, PEARNET의 개인화된 쾌적성 인지 및 예측 능력, 그리고 LEEMO의 최적 제어 능력을 클라우드 기반 플랫폼 상에서 유기적으로 결합하여 달성된다. 시스템은 실시간 환경 데이터와 재실자 선호도를 바탕으로 건물의 에너지 소비를 최소화하면서 동시에 모든 재실자에게 최적의 쾌적 환경을 제공하는 것을 목표로 한다. 이는 단순히 에너지를 절약하는 것을 넘어, 건물의 가치를 높이고 거주자의 건강과 생산성을 향상시키는 데 기여할 것이다.

3.2. 핵심 구성 요소

통합 시스템은 다음과 같은 핵심 구성 요소로 이루어진다.

- **AERONET (센서 네트워크 계층):**
 - 역할: 건물 내외부의 환경 조건 및 재실자 관련 정보를 실시간으로 감지하고 수집하여 클라우드 플랫폼으로 전송한다.
 - 구성: 저비용 고효율 센서 노드(온도, 습도, CO₂, VOC, 미세먼지 등), 재실 감지 센서(PIR, 초음파, 비전 기반 등), 센서 데이터를 취합하고 전송하는 게이트웨이(ESP32 기반), 무선 통신망(WiFi, LoRaWAN 등).
 - 특징: 다중 모드 센싱, 저전력 운영, 설치 용이성, 확장성, 데이터 신뢰성 확보를 위한 자가 진단 및 보정 기능.¹³
- **PEARNET (개인화 쾌적성 모델링 계층):**
 - 역할: AERONET 데이터와 재실자로부터 직접/간접적으로 수집된 피드백(예: 스마트폰 앱, 웨어러블 기기 센싱 데이터)을 활용하여 개인별 열 쾌적성 선호도를 실시간으로 학습하고 예측한다.
 - 구성: 개인 쾌적성 데이터 수집 인터페이스(앱, 웨어러블 연동), ML 기반 쾌적성 예측 모델(분류/회귀: SVM, RF, NN 등¹⁰), 프라이버시 보호 기술(연합 학습²⁶), 개인별 쾌적성 목표 생성 모듈.
 - 특징: 개인 맞춤형, 실시간 적응성, 프라이버시 보호, 다양한 입력 데이터(환경,

생리, 행동) 통합.

- **LEEMO (지능형 제어 계층):**

- 역할: **AERONET**의 실시간 환경 데이터, **PEARNET**의 개인별/구역별 쾌적성 목표, 건물 열 동특성 예측 모델, 외부 정보(날씨 예보, 전기 요금 등)를 종합적으로 고려하여, 에너지 소비 최소화 및 쾌적성 만족이라는 다중 목표를 최적화하는 제어 전략(예: HVAC 설정값)을 도출하고 실행 명령을 하달한다.
- 구성: 건물 열 동특성 모델(**Grey-box**³⁶ 또는 **Physics-informed ML**³⁸), 고급 제어 알고리즘(**MPC**⁹ 또는 **DRL**¹⁹), 최적화 솔버(**OSQP**, **IPOPT**, **Gurobi**, **CPLEX**³⁹), 제어 명령 생성 및 전송 모듈.
- 특징: 예측 기반 최적화, 다중 목표 처리, 제약 조건 고려, 실시간 적응 제어, 에너지 비용 절감 및 피크 부하 관리.

- **클라우드 기반 통합 플랫폼 (데이터 및 분석 계층):**

- 역할: **AERONET** 센서 데이터 수집 및 저장, **PEARNET** 및 **LEEMO** 모델 학습 및 실행, 시스템 전반의 데이터 관리, 분석, 시각화, 사용자 인터페이스 제공 등 통합 시스템의 중추 역할을 수행한다.
- 구성: IoT 데이터 수집/처리 파이프라인(**MQTT** 브로커, 데이터 스트리밍), 시계열 데이터베이스(**InfluxDB**⁴¹ 또는 **TimescaleDB**⁴³), ML 모델 학습/추론 환경(**VM**, **GPU** 인스턴스⁴⁵), **MPC/DRL** 제어 로직 실행 환경, 데이터 분석 및 시각화 도구(**Grafana** 등), 사용자 대시보드 및 **API** 게이트웨이.
- 특징: 확장성, 유연성, 데이터 중앙 관리, 고성능 컴퓨팅 지원, 원격 모니터링 및 제어, 다양한 서비스(**AWS/Azure/GCP**⁴⁵) 활용 가능.

3.3. 핵심 혁신 기술 및 특징

본 통합 시스템은 다음과 같은 핵심 혁신 기술 및 특징을 포함한다.

- 기술 스택:

- 하드웨어: **ESP32-S3**, **AM1008W-K-P**, **Raspberry Pi 5**
- 소프트웨어: **EnergyPlus**, **MQTT**, **InfluxDB**, **Node-RED**, **Grafana**
- 통신 프로토콜: **UART**, **I²C**, **Wi-Fi**, **ESP-NOW**, **MQTT**, **TLS 1.2**
- 시뮬레이션: **FMU (Functional Mock-up Unit)**, **BCVTB**

- 저비용 고밀도 다중 모드 센싱 (**AERONET**): 기존 고가 센서 시스템의 한계를 극복하기 위해, 비용 효율적인 상용 센서(**AM1008W-K-P** 등)들을 조합하고 데이터 융합 및 보정 기술을 적용하여 신뢰성 있는 고밀도 환경 데이터 확보 기술을 개발한다. **ESP32-S3** 등 저전력 마이크로컨트롤러를 활용한 유연하고 확장 가능한 센서 노드 설계가 포함된다.⁴⁸

- 프라이버시 보호 개인 맞춤형 쾌적성 모델링 (**PEARNET**): 연합 학습(**Federated**

Learning) 기술을 적용하여, 재실자의 민감한 개인 데이터(생체 신호, 위치 정보 등)를 중앙 서버로 전송하지 않고 각 사용자 기기 또는 로컬 허브에서 모델을 학습시킨다. 이를 통해 개인 정보 유출 위험 없이 개인의 고유한 쾌적성 선호도를 정밀하게 모델링하고 예측하는 기술을 확보한다.²⁶

- 적응형 하이브리드 제어 전략 (**LEEMO**): 건물의 복잡하고 불확실한 동특성에 강인하게 대응하기 위해, 물리 법칙 기반의 그레이박스 모델링과 데이터 기반의 머신러닝/강화학습을 결합한 하이브리드 제어 전략을 개발한다. 상황에 따라 MPC와 DRL의 장점을 선택적으로 활용하거나 결합하여 에너지 효율과 제어 성능을 극대화한다. 온라인 모델 업데이트 및 적응형 제어 기법을 통해 모델 부정확성 및 환경 변화에 대한 강인성을 확보한다.¹⁹
- **FMI/BCVTB** 기반 통합 시뮬레이션 및 검증 환경: 시스템 개발 초기 단계부터 컴포넌트 간의 상호작용을 검증하고 제어 알고리즘 성능을 평가하기 위해, 기능 mock업 인터페이스(Functional Mock-up Interface, FMI) 표준 및 BCVTB(Building Controls Virtual Test Bed)를 활용한 통합 시뮬레이션 환경을 구축한다.⁵¹ 이를 통해 EnergyPlus(건물 모델), Modelica(HVAC 시스템 모델), Python(제어/ML 모델) 등 다양한 도구로 개발된 모델들을 연동하여 가상 환경에서 시스템 통합 및 성능 검증을 효율적으로 수행한다. 파이썬 라이브러리 FMPy 또는 PyFMI를 활용할 수 있다.⁵³
- 확장 가능하고 안전한 클라우드 아키텍처: 대규모 센서 데이터 처리, 복잡한 AI 모델 연산, 다수 건물 관리를 지원할 수 있도록 확장 가능하고(**scalable**) 탄력적인(**elastic**) 클라우드 네이티브 아키텍처를 설계한다. 또한, 디바이스 인증, 통신 암호화(TLS 1.2), 접근 제어 등 엔드-투-엔드 보안 체계를 구축하여 시스템의 안전성과 신뢰성을 확보한다.⁶
- 주요 특징:
 - 3차원 매쉬 기반 고해상도 환경 데이터 수집: 분산된 센서 노드(ESP32-S3, AM1008W-K-P)를 3차원 공간에 배치하여 고해상도의 실내 환경 데이터를 실시간으로 수집한다.
 - 에너지 비용과 실내 쾌적성의 다목적 최적화: LEEMO 제어 계층은 에너지 소비 최소화와 개인화된 쾌적성 목표 달성이라는 상충될 수 있는 목표를 동시에 고려하여 최적의 제어 전략을 도출한다.
 - 실시간 예측 제어 및 개인화된 환경 적응: MPC/DRL 알고리즘과 PEARNET의 개인 쾌적성 모델을 통해 실시간 예측 기반 제어와 사용자 맞춤형 환경 조정을 구현한다.
 - 분산 센서 네트워크와 중앙 제어 시스템 통합: AERONET의 분산된 센서 데이터는 MQTT, ESP-NOW 등 프로토콜을 통해 Raspberry Pi 5 기반 중앙 서버로 전송되어 InfluxDB에 저장되고, LEEMO 제어 로직에 활용된다.

이러한 혁신 기술과 특징들의 유기적인 통합은 기존 BEMS의 기술적 한계를 넘어서는 차세대 지능형 건물 관리 시스템 구현의 핵심 동력이 될 것이다.

IV. 연구개발 계획 (단계별 구현 계획)

본 연구개발은 총 7개월 동안 5단계로 나누어 수행하며, 각 단계별 주요 활동 및 목표는 다음과 같다.

- **Phase 1: 하드웨어 인프라 구축 (1개월)**
 - 목표: 센서 데이터 수집을 위한 물리적 기반 마련.
 - 주요 활동:
 - ESP32-S3 기반 센서 노드 50개 제작 및 기본 펌웨어 프로그래밍.
 - AM1008W-K-P 센서 모듈과 ESP32-S3 간의 UART/I²C 인터페이스 개발 및 테스트.
 - 센서 노드 간 ESP-NOW 통신을 활용한 3차원 매쉬 네트워크 프로토타입 구축 및 통신 안정성 테스트.
 - Raspberry Pi 5를 중앙 데이터 수집 및 처리 서버로 설정 (OS 설치, 네트워크 설정, 기본 보안 설정).
- **Phase 2: 데이터 파이프라인 개발 (1개월)**
 - 목표: 센서 데이터를 수집, 저장, 시각화하는 파이프라인 구축.
 - 주요 활동:
 - Raspberry Pi 5 서버에 MQTT 브로커(예: Mosquitto) 설치 및 설정.
 - 센서 노드(ESP32-S3)에서 MQTT 브로커로 Wi-Fi를 통해 데이터 전송하는 로직 구현 (TLS 1.2 암호화 적용).
 - InfluxDB 설치 및 데이터베이스 스키마 설계 (시계열 데이터 저장 최적화).
 - Node-RED를 활용하여 MQTT 메시지 수신, 데이터 파싱/변환, InfluxDB 저장 플로우 개발.
 - Grafana 설치 및 InfluxDB 연동, 초기 데이터 시각화 대시보드 구성.
- **Phase 3: 건물 모델링 및 IDF 파일 생성 (1.5개월)**
 - 목표: 제어 알고리즘 개발에 필요한 건물 에너지 시뮬레이션 모델 구축.
 - 주요 활동:
 - 대상 건물의 도면 및 정보를 바탕으로 Revit 또는 OpenStudio를 사용하여 3D 건물 모델링 수행.
 - 건물 구조, 재료, 창호, 내부 구획, HVAC 시스템 등 상세 정보 입력.
 - 모델링된 건물 정보를 EnergyPlus 입력 형식인 IDF(Input Data File) 파일로 변환/생성.
 - EnergyPlus를 이용한 기본 시뮬레이션 수행 및 IDF 파일 유효성 검증.
- **Phase 4: FMU 통합 및 최적화 알고리즘 개발 (2개월)**
 - 목표: 시뮬레이션 모델과 연동 가능한 제어 알고리즘 개발.

- 주요 활동:
 - 생성된 IDF 파일을 FMI 표준에 따라 FMU(Functional Mock-up Unit)로 변환 (Co-simulation 용).
 - Python 기반 MPC 알고리즘 구현 (상태 예측 모델 정의, 최적화 문제 정식화, 제약 조건 설정).
 - Python 기반 강화학습(DRL) 알고리즘(예: SAC, PPO) 환경 설정 및 기본 에이전트 학습 로직 구현.
 - 에너지 비용 최소화 및 쾌적성 지표(예: PMV) 최대화를 위한 다목적 최적화 함수 설계 (가중치 기반 또는 Pareto 최적화 접근).
- **Phase 5: 통합 테스트 및 최적화 (1.5개월)**
 - 목표: 개발된 전체 시스템의 통합 테스트 및 성능 최적화.
 - 주요 활동:
 - AERONET에서 수집된 실시간 센서 데이터(InfluxDB)를 LEEMO 제어 알고리즘(MPC/DRL) 입력으로 활용.
 - 제어 알고리즘과 EnergyPlus FMU 간의 Co-simulation 환경 구축 (예: PyFMI, FMPy 활용) 및 연동 테스트.
 - 실시간 데이터 및 시뮬레이션 기반 제어 성능 검증 (설정값 추종, 제약 조건 만족 여부 등).
 - 기존 제어 방식(예: RBC) 대비 에너지 절감 효과 및 쾌적성 최적화 달성도 정량적 평가.
 - 사용자 피드백을 반영하여 Grafana 대시보드 및 제어 UI 개선.

V. 통합 전략 및 시스템 아키텍처

5.1. 통합 접근 방식

LEEMO-PEARNET-AERONET 통합 시스템은 성공적인 연구개발과 향후 확장성을 위해 ****모듈화된 계층형 아키텍처(Modular Layered Architecture)****를 기반으로 통합한다. 각 계층은 명확한 역할과 책임을 가지며, 계층 간 상호작용은 표준화된 인터페이스와 프로토콜을 통해 이루어진다. 이는 각 구성 요소(센서, 모델, 제어기, 플랫폼)의 독립적인 개발, 테스트, 업그레이드를 용이하게 하고, 시스템 전체의 유연성과 유지보수성을 높인다.⁵⁷

주요 계층 및 인터페이스 정의는 다음과 같다:

1. 데이터 수집 계층 (**AERONET**): 건물 환경 및 재실자 데이터 수집. ESP32-S3 노드와 AM1008W-K-P 센서로 구성. 3D 매쉬 그리드 형태로 배치.
 - 인터페이스: 센서 ↔ ESP32 (UART/I²C), ESP32 노드 간 (ESP-NOW), ESP32 → 데이터 관리 계층 (Wi-Fi, MQTT²⁴ over TLS 1.2). 데이터 형식은 표준화된 JSON 스키마 사용 (부록 A 참조).
2. 데이터 관리 계층 (중앙 서버): 데이터 수신, 저장, 처리, 시각화. Raspberry Pi 5 기반. MQTT 브로커, Node-RED, InfluxDB, Grafana 포함.
 - 인터페이스: MQTT 브로커 (데이터 수신), Node-RED (데이터 처리/라우팅), InfluxDB API (데이터 저장/조회), Grafana API (시각화).
3. 모델링 및 시뮬레이션 계층: 건물 에너지 모델 구축 및 FMU 변환. Revit/OpenStudio, EnergyPlus 활용.
 - 인터페이스: Revit/OpenStudio → EnergyPlus (gbXML/OSM), EnergyPlus → FMU (IDF).
4. 최적화 및 제어 계층 (**LEEMO/PEARNET**): 최적 제어 전략 연산 및 개인화 로직 수행. 클라우드 또는 로컬 서버(RPi 5 확장)에서 실행 가능. MPC/RL 알고리즘, 최적화 솔버 포함.
 - 인터페이스: 데이터 관리 계층 API (실시간 데이터 접근 - InfluxDB), 모델링 계층 (FMU 로딩), 사용자 인터페이스 계층 (피드백 수신, 제어 명령 전달).
5. 사용자 인터페이스 계층: 시스템 모니터링, 제어 설정, 사용자 피드백 제공. Grafana 대시보드, 맞춤형 웹/앱 UI.
 - 인터페이스: 데이터 관리 계층 API (모니터링 데이터 - Grafana), 최적화/제어 계층 API (제어 설정 전달, 피드백 전송).

시뮬레이션 수준에서의 통합 및 검증을 위해 **FMI(Functional Mock-up Interface)** 표준을 적극 활용한다.⁵¹ 이를 통해 EnergyPlus(건물), Python(제어/ML) 등 다양한 도구로 개발된 모델 컴포넌트들을 Co-simulation 환경에서 연동하여 시스템 통합 전 기능 및 성능을 사전에 검증한다.

5.2. 시스템 아키텍처 다이어그램

코드 스니펫

```
graph TB
  subgraph DataAcquisition[데이터 수집 계층]
    ESP32
```

Sensor[AM1008W-K-P 센서]

Grid[3D 매쉬 그리드]

Sensor --> |UART/I²C| ESP32

ESP32 --> |ESP-NOW| Grid

end

subgraph DataManagement[데이터 관리 계층]

RPi

MQTT

Influx

NodeRED

Grafana[대시보드]

Grid --> |Wi-Fi| MQTT

MQTT --> NodeRED

NodeRED --> Influx

Influx --> Grafana

end

subgraph Modeling[모델링 및 시뮬레이션]

Revit[건물 모델링]

EP[EnergyPlus]

FMU[FMU 변환]

Revit --> |gbXML| EP

EP --> |IDF| FMU

end

subgraph Control[최적화 및 제어]

MPC[모델 예측 제어]

RL[강화학습]

Opt[최적화 알고리즘]

Interface[제어 인터페이스]

FMU --> Opt

Influx --> MPC

MPC --> Interface

RL --> Interface

end

subgraph UI[사용자 인터페이스]

Monitor[모니터링]

Control2[제어 UI]

Feedback[피드백]

Interface --> Control2

Grafana --> Monitor

Feedback --> Opt

end

5.3. 상호운용성 문제점 및 해결 방안

이기종 시스템 및 장비 간의 원활한 통합은 본 프로젝트의 성공에 매우 중요하며, 다음과 같은 상호운용성 문제점과 해결 방안을 고려한다.

- **센서/IoT 장치와 데이터 관리 계층 간 통신:**
 - 문제점: 다수의 ESP32 노드에서 발생하는 데이터 트래픽 관리, Wi-Fi 신호 간섭, ESP-NOW와 Wi-Fi 동시 사용 시 성능 저하 가능성. MQTT 브로커 부하 증가.
 - 해결 방안: ESP-NOW 통신 채널 최적화 및 메시지 큐잉 도입 검토. Wi-Fi 채널 분산 및 AP 최적 배치. MQTT 브로커 성능 모니터링 및 필요시 클러스터링 또는 고성능 브로커(예: EMQX) 도입 고려. 데이터 페이로드를 표준 JSON 스키마(부록 A)를 따르도록 하여 Node-RED에서의 일관된 처리를 보장한다. TLS 1.2 암호화 적용.
- **데이터 관리 계층과 제어 시스템(BMS/액추에이터) 간 연동:**
 - 문제점: 제어 인터페이스(Interface)에서 실제 건물 액추에이터(HVAC 등)로 제어 명령을 전달하는 표준화된 방법 부재. 기존 BMS와의 연동 시 프로토콜(BACnet, Modbus 등) 변환 필요.⁵ 제어 명령 전달 지연.
 - 해결 방안: 테스트베드 환경에 맞는 제어 인터페이스 개발 (예: GPIO 제어, Modbus/TCP 또는 BACnet/IP 게이트웨이 연동). 표준 프로토콜 게이트웨이 사용.⁵ 제어 루프의 실시간성 요구사항 분석 및 필요시 Edge Computing(RPi 5 활용) 강화 검토.⁶¹
- **데이터 형식 및 의미론적 비호환성:**
 - 문제점: 센서 데이터(InfluxDB), 시뮬레이션 모델(FMU), 제어 알고리즘 간 데이터 단위, 형식, 시간 동기화 문제 발생 가능성. 메타데이터 관리 부재.⁶²
 - 해결 방안: 프로젝트 초기 단계에서 공통 데이터 모델 및 단위 표준 정의.

Node-RED 및 제어 로직 내에서 단위 변환 및 데이터 정규화 수행. 시맨틱 태깅(예: Brick Schema, Haystack) 도입 검토. Co-simulation 시 시간 동기화 메커니즘 명확히 정의.

- 모델과 제어 알고리즘 간 통합:
 - 문제점: EnergyPlus FMU와 Python 기반 MPC/DRL 알고리즘 간의 데이터 교환 효율성 및 안정성 확보. FMU 실행 환경 구성.
 - 해결 방안: FMI 표준 준수 확인. Python 기반 Co-simulation 라이브러리(FMPy, PyFMI⁵³) 활용하여 FMU 로딩 및 실행.⁵¹ 제어 알고리즘과 FMU 간 데이터 교환을 위한 효율적인 API 설계 (필요 데이터만 최소한으로 교환).

이러한 상호운용성 문제 해결을 위해서는 프로젝트 초기 단계부터 명확한 표준과 인터페이스를 정의하고, 지속적인 통합 테스트를 수행하는 것이 필수적이다. 이는 특히 다양한 기술(IoT, ML, MPC, Cloud)과 잠재적으로 이기종인 건물 시스템을 다루는 본 프로젝트의 성공을 좌우하는 핵심 요소이다. 기존 시스템과의 호환성 문제⁵, 표준 프로토콜의 필요성²⁴, 그리고 메타데이터 부족⁶² 등 연구 자료에서 지적된 문제점들을 고려할 때, 통합 전략 수립 시 이러한 표준화 및 인터페이스 정의를 최우선 과제로 삼아야 한다.

5.4. 모범 사례 적용

성공적인 시스템 통합 및 프로젝트 완수를 위해 다음과 같은 스마트 빌딩 시스템 통합 모범 사례를 적극적으로 적용한다.

- 초기 단계 통합 계획 수립: 프로젝트 착수 시점부터 모든 관련 팀(건물 엔지니어, 제어 전문가, ML 전문가, IoT 개발자, 클라우드 아키텍트)이 참여하여 상세한 통합 전략 및 시스템 아키텍처를 수립한다.⁶³ 이는 후반부에 발생할 수 있는 통합 문제를 예방하고 개발 방향의 일관성을 유지하는 데 중요하다.
- 학제 간 협업 강화: 건물 시스템, 제어 이론, AI/ML, IoT, 클라우드 등 다양한 분야의 전문가 간 긴밀한 협업 체계를 구축한다.⁶³ 정기적인 회의, 공동 워크숍, 명확한 의사소통 채널 운영을 통해 기술적 장벽을 해소하고 시너지를 창출한다.
- 모듈식 설계 원칙 준수: 센서, 모델, 제어기, 플랫폼 등 각 컴포넌트를 독립적으로 개발, 테스트, 교체할 수 있도록 명확한 인터페이스를 가진 모듈 형태로 설계한다.⁵⁷ 이는 시스템의 유연성, 확장성, 유지보수성을 향상시킨다.
- 설계 단계부터 보안 고려 (**Security by Design**): 시스템 설계 초기 단계부터 보안 요구사항을 정의하고, 모든 계층(디바이스, 네트워크, 서버)에 걸쳐 보안 메커니즘(인증, 암호화-TLS 1.2, 접근 제어 등)을 통합한다.⁶ 이는 잠재적인 사이버 위협으로부터 시스템과 데이터를 보호하는 데 필수적이다 (VII.4 참조).
- 확장성 있는 아키텍처 설계: 향후 더 많은 센서, 건물, 사용자를 지원할 수 있도록

데이터 관리 계층 및 제어 계층 아키텍처를 확장 가능하게 설계한다.²⁴ 필요시 클라우드 서비스 도입 및 자동 확장(auto-scaling) 기능 활용을 고려한다.⁸

- 사용자 중심 설계: 최종 사용자(건물 재실자, 시설 관리자)의 요구사항과 편의성을 시스템 설계에 적극 반영한다. 특히 PEARNET의 쾌적성 피드백 인터페이스와 관리자용 모니터링/제어 대시보드는 직관적이고 사용하기 쉽게 설계하여 시스템 수용성을 높인다.⁵ 사용자 교육 및 지원 계획도 함께 수립한다.

이러한 모범 사례의 체계적인 적용은 복잡한 통합 과정에서 발생할 수 있는 위험을 줄이고, 최종 시스템의 완성도와 실용성을 높이는 데 기여할 것이다.

VI. 기대 효과 및 연구 성과

6.1. 에너지 절감 효과

- 기존 대비 에너지 소비 **10-15%** 감소 예상: MPC 및 DRL 기반의 예측 제어를 통해 HVAC 시스템의 불필요한 가동을 줄이고 최적의 운전 스케줄을 도출하여 에너지 효율을 향상시킨다. 이는 선행 연구들에서 보고된 15% 이상의 절감 효과 목표 범위 내에 있다.¹⁷
- 실시간 센서 데이터 기반 예측 제어로 효율 향상: AERONET의 고밀도 센서 데이터를 활용하여 건물 내부 환경 변화 및 외부 기상 조건을 정확하게 예측하고, 이를 제어 전략에 반영하여 선제적인 에너지 관리를 수행한다.
- 개인화된 쾌적성 기준 적용으로 불필요한 에너지 사용 최소화: PEARNET을 통해 재실자의 실제 쾌적성 요구를 파악하고, 과도한 냉난방을 방지하여 에너지를 절약한다.

6.2. 쾌적성 향상

- 3차원 그리드 기반 미세 환경 제어: 고밀도 센서 네트워크를 통해 구역 내 미세한 환경 차이를 감지하고, 이를 바탕으로 보다 정밀한 환경 제어를 수행하여 국소적인 불쾌적 요소를 해소한다.
- 개인화된 온도, 습도, 공기질 관리: PEARNET 모델을 통해 학습된 개인별 선호도를

LEEMO 제어 목표에 반영하여, 재실자 개개인의 만족도를 높이는 맞춤형 실내 환경을 제공한다. 이는 기존의 획일적인 제어 방식 대비 불만족도를 20% 이상 개선하는 것을 목표로 한다.¹⁶

- 실시간 피드백 기반 적응형 제어: 사용자가 제공하는 실시간 쾌적성 피드백을 제어 시스템에 반영하여, 환경 변화나 사용자 선호도 변화에 능동적으로 대응하고 지속적으로 쾌적성을 개선한다.

6.3. 기술적 성과

- 고밀도 센서 네트워크 기반 환경 모니터링 시스템: 저비용 센서(AM1008W-K-P)와 ESP32-S3, ESP-NOW 통신을 활용한 3차원 매쉬 형태의 실시간 고해상도 실내 환경 모니터링 시스템 구축 기술 확보.
- **EnergyPlus-FMU** 기반 실시간 제어 플랫폼: EnergyPlus 시뮬레이션 모델(FMU)과 실시간 센서 데이터(InfluxDB)를 통합하여 MPC/DRL 제어를 수행하는 플랫폼 구축 및 검증.
- 분산형 센서 데이터와 중앙 집중식 최적화의 통합 모델: 다수의 분산된 센서 노드로부터 데이터를 효율적으로 수집(MQTT, Node-RED)하고 중앙 서버(Raspberry Pi 5)에서 통합 분석 및 최적 제어 연산을 수행하는 아키텍처 구현.
- 특허 확보 가능성: 개발 과정에서 도출되는 3차원 매쉬 센싱 기법, 개인화된 쾌적성 기반 다목적 최적 제어 알고리즘, FMU 연동 실시간 제어 플랫폼 구조 등에 대한 지식재산권(특허) 확보 가능성 탐색.¹¹

6.4. 응용 분야

- 스마트 빌딩 관리 시스템: 개발된 통합 시스템은 상업용 빌딩, 사무실, 주거 공간 등 다양한 건물의 에너지 관리 및 환경 제어 시스템 고도화에 직접 적용될 수 있다.
- 개인화된 실내 환경 제어 서비스: 재실자 맞춤형 쾌적성 제공 기능을 기반으로 호텔, 병원, 요양 시설 등 개인화된 서비스가 중요한 시설에 적용 가능하다.
- 저에너지 건물 설계 및 운영 가이드라인: 연구 결과를 바탕으로 고효율 에너지 관리 및 쾌적성 향상을 위한 건물 설계 및 운영 가이드라인을 제시하여 관련 산업 표준 발전에 기여할 수 있다.
- **IoT** 기반 환경 모니터링 플랫폼: AERONET 센서 네트워크 및 데이터 관리 플랫폼은 실내 공기질 모니터링, 스마트 농업, 산업 환경 감시 등 다양한 IoT 기반 환경 모니터링 분야로 확장될 수 있다.

VII. 위험 평가 및 완화 전략

7.1. 기술적 리스크

리스크	영향도	가능성	대응방안						
센서 네트워크 통신 안정성 (ESP-NOW, Wi-Fi)	높음	중간	- ESP-NOW 채널 최적화 및 메시지 재전송 로직 구현 .		- Wi-Fi AP 최적 배치 및 채널 간섭 최소화.		- 센서 노드 및 게이트웨이(RPi 5) 간 연결 상태 주기적 모니터링 및 자동 재연결 기능 구현 .		- 주요 노드 이중화 구성 검토 .
FMU 시뮬레이션 정확도 및	중간	중간	- EnergyPlus 모델링 단계		- FMU 변환 과정에서의 설정		- Co-simulation 시 시간		- 실제 데이터 기반 모델 교정

안정성			에서 상세 검증 수행 .		오류 점검 .		스텝 동기화 및 안정성 확보 기법 적용 (예: FMPy/PyFMI 기능 활용) ⁵³ .		(Calibration) 작업 수행 .		
실시간 처리 성능 (데이터 수집, 제어 연산)	높음	낮음	- Raspberry Pi 5 성능 최적화 (OS 튜닝, 불필요 프로세스 제거).		- Node-RED 플로우 최적화 및 병렬 처리 도입 검토 .		- MPC/DRL 알고리즘 계산 복잡도 분석 및 경량화 연구 .		- 필요시 제어 연산 분산 처리 또는 클라우드 컴퓨팅 활용 검토 .		- InfluxDB 쿼리 최적화 및 캐시 시스템 도입 검토 .
데이터 무결성 (센서 오류, 전송 오류)	높음	낮음	- 센서 데이터 유효성 검증 로직 구현 (범위		- 데이터 전송 시 체크섬(Checksum) 활용		- InfluxDB 정기적 백업 및 복구 절차 수립 .		- 센서 FDD (Fault Detection and Diagnost		

			체크 , 변화 을 분석). ¹³		.				ics) 기능 개발 검토 5
--	--	--	--	--	---	--	--	--	-----------------------------

7.2. 일정 관련 리스크

리스크	대응 방안				
개발 지연 (기술적 난관, 통합 문제 등)	- 단계별(Phase) 명확한 마일스톤 설정 및 주간 단위 진행 상황 점검.		- 각 단계별 예상 소요 시간 산정 시 버퍼 시간(Buffer time) 확보.		- 위험 요소 조기 식별 및 선제적 대응 계획 수립 (주간 리스크 미팅).
자원 부족 (인력, 장비, 예산)	- 프로젝트 초기 단계에서 필요한 자원 명확히 식별 및 확보 계획 수립 (VIII장 참조).		- 핵심 기술 보유 인력 확보 및 역할 분담 명확화 (VIII.1 참조).		- 외부 협력기관(VIII.1 참조)과의 협력 일정 조율.
변경 요구사항 발생	- Agile 방법론 요소 도입하여 요구사항 변경에 유연하게 대응.		- 변경 요청 시 영향도 분석(일정, 비용, 기술) 후 승인 절차 진행.		- 초기 설계 단계에서 확장성 및 유연성 고려.

7.3. 고장 감내(Fault Tolerance) 전략

시스템의 안정성과 신뢰성을 높이기 위해 고장 감내 설계 원칙을 적용한다. 센서, 액추에이터, 네트워크, 서버 등 일부 구성 요소에 장애가 발생하더라도 시스템 전체가 치명적인 오류 없이 제한된 기능이라도 지속적으로 수행(Graceful Degradation)할 수 있도록 설계한다. 이를 위해 다음 전략을 고려한다.

- 고장 탐지 및 진단 (**FDD**): ML 기반 FDD 알고리즘을 개발하여 센서 이상, 액추에이터 고착, 통신 오류 등을 조기에 감지한다.¹⁰ 탐지된 고장 정보는 시스템 운영자에게 알리고(Grafana 알림 등), 제어 로직에 반영될 수 있도록 한다.
- 대체 제어 모드 (**Fallback Control**): 주요 컴포넌트(예: 핵심 센서 그룹, 예측 모델, 최적 제어기) 고장 시, 사전에 정의된 안전하고 안정적인 대체 제어 모드(예: 단순 RBC 또는 PID 제어)로 자동 전환하는 로직을 구현한다.
- 데이터 중복성 및 복구: 중요한 센서 데이터(InfluxDB) 및 시스템 설정 정보는 Raspberry Pi 5의 외부 저장 장치 또는 클라우드 스토리지에 정기적으로 백업하고, 필요시 복구할 수 있는 체계를 마련한다.
- 네트워크 이중화: Raspberry Pi 5 서버의 경우 유선 LAN과 Wi-Fi 동시 연결 또는 LTE 모뎀을 이용한 백업 회선 확보 방안을 검토하여 네트워크 단절 위험을 줄인다. 센서 노드의 경우, ESP-NOW 메시지 전달 실패 시 Wi-Fi MQTT 직접 전송 시도 등 대체 경로를 고려한다.

7.4. 보안 및 프라이버시 정책

시스템의 안전성과 사용자 프라이버시 보호는 매우 중요하며, 다음과 같은 정책을 준수한다.

- 데이터 보안:
 - 암호화 통신: 센서 노드와 MQTT 브로커 간, 클라이언트와 서버 간 모든 통신은 TLS 1.2 이상을 사용하여 암호화한다.⁶
 - 상호 인증: 필요시 SSL/TLS 인증서 기반 상호 인증을 통해 허가된 장치 및 사용자만 시스템에 접근하도록 한다.
 - 데이터 저장 암호화: InfluxDB 및 백업 데이터 저장 시 민감 정보는 AES-256 등 강력한 알고리즘으로 암호화하는 방안을 검토한다.
 - 접근 제어: 역할 기반 접근 제어(RBAC)를 구현하여 사용자 역할(관리자, 일반 사용자 등)에 따라 데이터 접근 및 시스템 제어 권한을 차등 부여한다.
- 개인정보 보호:
 - 데이터 익명화: 수집된 센서 데이터에서 개인을 식별할 수 있는 정보(예: 특정 노드 ID와 사용자 매핑 정보)는 분석 및 저장 전에 익명화 처리한다.

- 위치 데이터 마스킹: 3차원 매쉬 그리드 좌표를 직접 노출하는 대신, 구역(Zone) 단위 정보로 변환하거나 마스킹 처리하여 개인의 정확한 위치 추적을 방지하는 기능을 구현한다.
- 개인 식별 불가능 데이터 집계: 개인화된 쾌적성 모델링(PEARNET) 시, 원본 데이터 대신 개인 식별이 불가능하도록 집계된 통계 정보 또는 연합 학습(Federated Learning) 방식을 우선적으로 고려한다.²⁶
- 규정 준수: 개인정보보호 관련 법규(예: GDPR, CCPA 등 국내외 규정)를 준수하며, 데이터 수집 및 활용에 대한 사용자 동의 절차를 명확히 한다.
- 네트워크 보안:
 - 방화벽 구성: Raspberry Pi 5 서버 및 관련 네트워크 장비에 방화벽을 설정하여 허가되지 않은 외부 접근을 차단한다.
 - 침입 탐지 시스템 (IDS): 필요시 네트워크 트래픽을 모니터링하여 악의적인 활동이나 침입 시도를 탐지하는 시스템 도입을 검토한다.
 - 정기 보안 감사: 시스템 구축 및 운영 중 정기적인 보안 취약점 점검 및 감사를 수행한다.
 - OTA 업데이트 보안: ESP32 펌웨어 무선 업데이트(OTA) 시, 펌웨어 파일 암호화 및 서명 검증을 통해 악성 코드 주입을 방지한다.

VIII. 자원 고려 사항

본 통합 연구개발 프로젝트의 성공적인 수행을 위해서는 다음과 같은 전문 인력, 하드웨어, 소프트웨어, 클라우드 서비스 자원이 필요하다.

8.1. 팀 구성 및 역할 분담

역할	담당자	책임 업무
프로젝트 매니저	-	전체 일정 관리, 자원 조율, 위험 관리, 외부 협력 조율
하드웨어 엔지니어	-	ESP32-S3 노드 설계/제작, AM1008W-K-P 센서 통합, 3D 매쉬 네트워크 구축

소프트웨어 엔지니어	-	ESP32 펌웨어 개발(ESP-NOW, MQTT, 센서 인터페이스), RPi5 백엔드 개발(Node-RED, API), 시스템 통합
데이터 사이언티스트	-	데이터 분석(InfluxDB), MPC/RL 알고리즘 개발 및 구현, 다목적 최적화 함수 설계, PEARNET 모델 개발
시뮬레이션 전문가	-	Revit/OpenStudio 건물 모델링, EnergyPlus 시뮬레이션, IDF 파일 생성, FMU 변환 및 Co-simulation 환경 구축
UI/UX 디자이너	-	Grafana 대시보드 디자인, 사용자 피드백 인터페이스(앱/웹) 설계 및 프로토타이핑
QA 엔지니어	-	단계별 기능 테스트, 통합 테스트, 성능/부하 테스트, 보안 테스트, 버그 추적 및 관리

외부 협력기관:

- 건물 관리 업체: 실증 테스트 공간 제공 및 현장 설치/운영 협조.
- 에너지 관리 전문가: BEMS 운영 및 에너지 절감 전략 관련 컨설팅.
- 대학 연구실: MPC/DRL 알고리즘, 연합 학습 등 특정 기술 분야 공동 연구 또는 자문.

8.2. 주요 하드웨어 요구사항

- 센서 스위트 (**AERONET**):
 - 통합 센서 모듈: Cubic AM1008W-K-P (PM1.0/2.5/10, CO2, VOC, 온도, 습도 측정)⁷⁰ - 50개. (가격 정보 부족, 개별 센서 조합보다 높을 수 있음)
 - 마이크로컨트롤러: ESP32-S3 모듈 및 개발 보드⁴⁷ - 50개. (모듈 단품 \$1.8 ~ \$10⁴⁷)
 - 수량: 테스트베드 규모(50개 노드 기준) 및 예비 부품 고려.
 - 비용: 센서 모듈 가격 확인 필요. ESP32 모듈 비용은 상대적으로 저렴. 센서 교정 장비 예산 별도 확보 필요.
- 데이터 관리 서버: Raspberry Pi 5 (4GB 또는 8GB RAM 모델) - 1대 이상 (고가용성 위해 이중화 검토). (RPi 5 8GB \$80⁸⁶)

- 게이트웨이: **Raspberry Pi 5**가 게이트웨이 역할 수행. 필요시 별도 LoRaWAN/Zigbee 게이트웨이 추가 검토.
- 컴퓨팅 하드웨어:
 - 모델 개발 및 시뮬레이션용 워크스테이션/서버 (고성능 CPU, 충분한 RAM).
 - DRL 등 고성능 연산 필요시 GPU 탑재 워크스테이션 또는 클라우드 GPU 인스턴스 활용.⁸⁷
- 테스트베드 인프라: 제어 가능한 HVAC 시스템(개별 구역 제어 가능), 네트워크 인프라(유선 LAN, WiFi), 전력 계측 장비 등이 갖춰진 실제 건물 또는 실험 시설 접근 확보.

8.3. 주요 소프트웨어 요구사항

- 시뮬레이션 도구:
 - EnergyPlus: 건물 에너지 시뮬레이션 (무료).⁶⁰
 - Revit 또는 OpenStudio: 건물 3D 모델링 (라이선스 비용 또는 무료 버전 확인).
- 데이터 관리 및 처리:
 - MQTT 브로커: Mosquitto (무료, 오픈소스) 또는 EMQX (오픈소스/상용).
 - InfluxDB: 시계열 데이터베이스 (오픈소스 또는 클라우드 버전).
 - Node-RED: 데이터 플로우 개발 도구 (무료, 오픈소스).
 - Grafana: 데이터 시각화 대시보드 (오픈소스 또는 클라우드/엔터프라이즈 버전).
- 제어 및 최적화 라이브러리 (**Python** 기반):
 - FMI Co-simulation: FMPy, PyFMI⁵⁴ (무료, 오픈소스).
 - MPC 프레임워크: GEKKO⁵⁰, Casadi (무료, 오픈소스).
 - 최적화 솔버:
 - Open-source: OSQP (QP용)²⁹, IPOPT (NLP용)⁹⁴ (무료).
 - Commercial: Gurobi, CPLEX (고성능, 유료 라이선스 필요).
 - 강화학습(DRL) 라이브러리: Stable-Baselines3, Ray RLlib (무료, 오픈소스).
- 개발 환경: Python IDE (VS Code, PyCharm 등), Git 버전 관리 시스템, ESP-IDF (ESP32 개발용).

최적화 솔버 선택은 프로젝트 예산과 MPC 문제의 복잡성에 따라 신중하게 결정해야 한다. 상용 솔버는 뛰어난 성능과 안정성을 제공하지만 상당한 비용(\$12,000 이상 라이선스 비용 언급⁹⁶)이 발생한다.³⁹ 반면, 오픈소스 솔버는 무료이지만 복잡하거나 대규모 문제 해결에 어려움을 겪을 수 있다.⁹⁷ 따라서 Phase 4 진행 중 MPC 문제 정식화 후, 초기에는 OSQP(QP 문제의 경우) 등 오픈소스 솔버를 활용하고, 실시간 제어 요구사항 충족에 성능 병목 현상이 발생할 경우 예산을 확보하여 Gurobi나 CPLEX와 같은 상용 솔버 도입을 검토하는 단계적 접근이 필요하다.

8.4. 클라우드 서비스 요구사항 및 비용 추정

본 프로젝트는 초기 단계에서 Raspberry Pi 5 기반 로컬 서버를 활용하지만, 향후 확장성, 고가용성, 고성능 컴퓨팅(GPU 활용 등) 요구 발생 시 클라우드 서비스 도입을 고려할 수 있다. 클라우드 도입 시 예상되는 서비스 및 비용 요소는 다음과 같다 (AWS/Azure/GCP 기준).

- **IoT 플랫폼 (AWS IoT Core, Azure IoT Hub, GCP IoT Core 등):**
 - 디바이스 연결 관리, MQTT 메시지 브로커, 규칙 엔진.
 - 비용 요소: 연결 시간(분당/백만분당 \$0.08¹³), 메시지 수(백만 메시지당 \$0.70~\$1.00¹³), 규칙 실행 수(백만 규칙/액션당 \$0.15¹³). 무료 티어 존재 가능.⁹⁹
- **컴퓨팅 (VM - EC2, Azure VM, Compute Engine / 컨테이너 - EKS, AKS, GKE):**
 - 모델 학습/추론, 제어 로직 실행, 웹 서버 운영.
 - 비용 요소: 인스턴스 유형(vCPU, RAM), 사용 시간, 운영체제. (예: 2vCPU/8GB RAM 월 \$69 수준¹⁰⁰, 시간당 \$0.01~\$4+⁴⁵) GPU 사용 시 추가 비용. 할인 옵션(RI, Spot 등) 활용 가능.⁴⁵
- **시계열 데이터베이스 (InfluxDB Cloud, Timescale Cloud 등):**
 - 센서 데이터 저장 및 조회.
 - 비용 요소 (InfluxDB Cloud 예시): 데이터 입력량(MB당 \$0.0025), 쿼리 수(100회당 \$0.012), 스토리지(GB-시간당 \$0.002). 무료 티어 존재.¹⁰⁵
 - 비용 요소 (Timescale Cloud 예시): 컴퓨팅(월 \$30~ 시작), 고성능 스토리지(GB-월 \$0.177¹⁰⁶), 저비용 스토리지(GB-월 \$0.021¹⁰⁶). 사용량 기반, 무료 티어 존재.
- **객체 스토리지 (S3, Azure Blob, GCS):**
 - 데이터 백업, 대용량 데이터셋 저장.
 - 비용 요소: 저장 용량(GB-월 \$0.02~\$0.025⁴⁶), 데이터 전송량(egress).⁴⁶
- **네트워크:**
 - 클라우드 외부로의 데이터 전송(Data Egress).
 - 비용 요소: 전송량(GB). (예: InfluxDB egress GB당 \$0.09)

정확한 비용 추정을 위해서는 시스템 규모 확장 시 예상되는 데이터량, 컴퓨팅 부하, 스토리지 요구량 등을 구체적으로 산정하여 각 클라우드 제공사의 요금 계산기를 활용해야 한다. 초기 프로토타이핑 단계에서는 월 수백 달러 수준에서 시작하여, 시스템 규모 확장 및 사용량 증가에 따라 비용이 증가할 것으로 예상된다.

IX. 프로젝트 일정 및 마일스톤

본 연구개발 프로젝트는 총 7개월 동안 5단계로 나누어 수행하며, 각 단계별 주요 활동 및 마일스톤은 다음과 같다.

- **Phase 1: 하드웨어 인프라 구축 (1개월)**
 - 주요 활동: ESP32-S3 노드 제작, 센서 인터페이스 개발, 3D 매쉬 네트워크 구축, Raspberry Pi 5 서버 설정.
 - 주요 마일스톤 (1개월차): 센서 노드 50개 제작 완료, 매쉬 네트워크 기본 통신 검증 완료, RPi5 서버 기본 설정 완료.
- **Phase 2: 데이터 파이프라인 개발 (1개월)**
 - 주요 활동: MQTT 구현, InfluxDB 설계, Node-RED 플로우 개발, Grafana 대시보드 구성.
 - 주요 마일스톤 (2개월차): 센서 데이터 수집-저장-시각화 파이프라인 구축 완료, 초기 대시보드 구현 완료.
- **Phase 3: 건물 모델링 및 IDF 파일 생성 (1.5개월)**
 - 주요 활동: Revit/OpenStudio 모델링, EnergyPlus IDF 파일 생성, 기본 시뮬레이션 테스트.
 - 주요 마일스톤 (3.5개월차): 대상 건물 IDF 파일 생성 및 유효성 검증 완료.
- **Phase 4: FMU 통합 및 최적화 알고리즘 개발 (2개월)**
 - 주요 활동: IDF의 FMU 변환, MPC/RL 알고리즘 구현, 다목적 최적화 함수 설계.
 - 주요 마일스톤 (5.5개월차): FMU 변환 완료, MPC/RL 알고리즘 프로토타입 개발 완료.
- **Phase 5: 통합 테스트 및 최적화 (1.5개월)**
 - 주요 활동: 실시간 데이터-FMU 연동 테스트, 제어 성능 검증, 에너지 절감/쾌적성 평가, UI 개선.
 - 주요 마일스톤 (7개월차): 통합 시스템 테스트 완료, 최종 성능 평가 보고서 초안 작성, 시스템 데모 준비 완료.

X. 결론

10.1. 연구 계획 요약

본 연구개발 계획서는 기존 건물 에너지 관리 시스템의 한계를 극복하고 에너지 효율성과 재실자 만족도를 혁신적으로 향상시키기 위해, 첨단 센서 네트워크(AERONET), AI 기반 개인 맞춤형 쾌적성 모델링(PEARNET), 그리고 지능형 예측 제어(LEEMO) 기술을 통합하는 LEEMO-PEARNET-AERONET 시스템 개발을 제안한다. 구체적으로 ESP32-S3와 AM1008W-K-P 센서를 이용한 3차원 매쉬 네트워크, Raspberry Pi 5 기반 데이터 관리 플랫폼, EnergyPlus/FMU 기반 시뮬레이션 연동, MPC/DRL 최적 제어 알고리즘 구현을 포함한다. 본 계획은 시스템 비전, 핵심 구성 요소, 기술 스택, 단계별 구현 계획, 통합 전략, 기대 효과, 위험 관리 방안, 자원 요구사항, 그리고 구체적인 실행 일정을 포함하는 포괄적인 연구개발 로드맵을 제시한다.

10.2. 연구의 의의 및 기대 효과

본 연구는 저비용 센서 기술, 프라이버시 보호 AI, 강인한 예측 제어, FMI 기반 통합 검증, 확장 가능한 아키텍처 등 스마트 빌딩 분야의 최신 기술 동향을 반영하고 선도하는 것을 목표로 한다. 성공적인 연구 수행은 다음과 같은 중요한 의의와 기대 효과를 가진다.

- **기술 혁신:** 기존 BEMS의 성능을 뛰어넘는 차세대 지능형 건물 관리 기술을 확보하고, 관련 분야의 학문적, 기술적 발전에 기여한다. 특히, 고해상도 3D 환경 센싱, 개인화된 쾌적성 제어, 실시간 FMU 연동 제어 기술은 중요한 혁신 요소이다.
- **에너지 효율 향상 및 탄소 중립 기여:** 실증 검증을 통해 10-15% 수준의 에너지 절감 효과를 목표로 함으로써, 국가 에너지 효율 목표 달성³ 및 2050 탄소 중립 실현⁴에 실질적으로 기여할 수 있는 기술적 토대를 마련한다.
- **재실자 삶의 질 향상:** 획일적인 환경 제어에서 벗어나 개인의 선호도를 반영한 맞춤형 쾌적 환경을 제공함으로써, 재실자의 만족도, 건강, 생산성을 향상시키는 데 기여한다.
- **산업적 파급 효과:** 개발된 기술의 상용화 및 보급을 통해 스마트 빌딩 관련 산업의 성장을 견인하고 새로운 시장 창출에 기여할 수 있다. 특히, 센서, 제어 솔루션, 데이터 플랫폼 분야에서 새로운 비즈니스 기회를 제공할 수 있다.

10.3. 향후 추진 방향

제시된 연구개발 계획은 LEEMO-PEARNET-AERONET 통합 시스템 개발을 위한 구체적인 청사진을 제공한다. 성공적인 목표 달성을 위해서는 계획된 5단계의 체계적인 수행, 학제

간 긴밀한 협력(VIII.1 참조), 엄격한 테스트 및 검증 절차 준수, 그리고 위험 요소(VII.1, VII.2)에 대한 선제적이고 적응적인 관리가 필수적이다. 특히, 시스템 통합의 복잡성(R5)과 사이버 보안(R7, VII.4)의 중요성을 인지하고, 프로젝트 초기 단계부터 표준화, 인터페이스 정의, 보안 설계에 충분한 노력을 기울여야 한다. 본 연구개발 계획의 성공적인 이행은 대한민국이 스마트 빌딩 기술 분야에서 글로벌 경쟁력을 확보하고 지속 가능한 미래 사회를 구축하는 데 중요한 발판이 될 것이다.

부록 A: AERONET 센서 상세 사양 및 비용 분석

본 부록은 AERONET 시스템 구축에 사용될 AM1008W-K-P 센서의 데이터 명세와 예상 데이터 송신 포맷을 제시한다.

센서 데이터 명세서 (AM1008W-K-P)⁷⁰

항목	단위	범위	정확도	참고 Snippet
PM1.0	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-1,000	$\pm 10\%$	79
PM2.5	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-1,000	0~35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: $\pm 5\mu\text{g}/\text{m}^3$, >35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: $\pm 15\%$ of reading	79
PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-1,000	$\pm 25\%$ (추정, 명시적 자료 부족)	79
CO ₂	ppm	0-5,000	$\pm (50\text{ppm} + 5\% \text{ of reading})$	79
VOC	레벨	0-3	N/A (Qualitative)	79
온도	°C	-40~85 (작동 범위: -10~50°C ²²⁾	$\pm 0.4^\circ\text{C}$ (작동 범위 내 $\pm 1^\circ\text{C}$ ⁷⁹⁾	79
습도	%RH	5~99 (작동 범위: 0~95%RH ²²⁾	$\pm 3\%RH$ (작동 범위 내 $\pm 5\%RH$ ⁷⁹⁾	79

참고: 정확도 값은 특정 조건(예: 온도, 습도) 하에서의 값이며, 실제 환경에서는 달라질 수 있다.

데이터 송신 포맷 (**JSON** 예시)

JSON

```
{
  "nodeId": "ESP32_001",
  "timestamp": "2025-01-21T10:30:00Z",
  "location": {
    "x": 3.5,
    "y": 2.1,
    "z": 1.5
  },
  "data": {
    "pm1_0": 12.3,
    "pm2_5": 15.8,
    "pm10": 20.5,
    "co2": 450,
    "voc": 1,
    "temperature": 22.5,
    "humidity": 45.2
  },
  "deviceStatus": {
    "batteryLevel": 85,
    "signalStrength": -65,
    "uptime": 3600
  }
}
```

- **nodeId**: 센서 노드 식별자 (ESP32 고유 ID 등).
- **timestamp**: 데이터 측정 시각 (ISO 8601 형식).
- **location**: 3차원 매쉬 그리드 내 노드 좌표 (미터 단위).
- **data**: AM1008W-K-P 센서 측정값.
- **deviceStatus**: 노드 상태 정보 (배터리 잔량 - 해당 시, Wi-Fi 신호 강도, 가동 시간 등).

부록 B: 클라우드 서비스 비용 상세 추정

본 프로젝트는 초기 단계에서 로컬 서버(Raspberry Pi 5)를 활용하므로 클라우드 비용은 발생하지 않는다. 향후 시스템 확장 또는 고성능 연산(예: 대규모 DRL 학습) 필요시 클라우드 서비스(AWS/Azure/GCP) 도입을 검토할 수 있다. 클라우드 도입 시 비용은 사용하는 서비스(IoT 플랫폼, 컴퓨팅, 데이터베이스, 스토리지 등)와 사용량(데이터 전송량, 연산 시간, 저장 용량 등)에 따라 크게 달라진다.

상세 비용 추정을 위해서는 다음과 같은 구체적인 시나리오 정의가 필요하다:

- 센서 노드 수 및 데이터 전송 빈도: 클라우드 IoT 플랫폼의 메시징 비용 및 연결 비용에 영향.¹³
- 데이터 저장 기간 및 조회 빈도: 시계열 데이터베이스의 스토리지 비용 및 쿼리 비용에 영향.
- 모델 학습/추론 빈도 및 복잡도: 컴퓨팅 인스턴스(VM/GPU) 사용 시간 및 사양에 따른 비용 발생.⁴⁵
- 데이터 백업 및 외부 전송량: 스토리지 및 네트워크 Egress 비용에 영향.

구체적인 시나리오가 확정되면 각 클라우드 제공사(AWS , Azure , GCP)의 요금 계산기를 활용하여 상세 비용을 추정할 수 있다. 초기 소규모 테스트 시에는 무료 티어(Free Tier)를 최대한 활용하고 ¹⁰⁵, 사용량 증가에 따라 예약 인스턴스(RI) 또는 절감형 플랜(Savings Plan) 등 할인 옵션을 적용하여 비용을 최적화하는 전략이 필요하다.⁴⁵

부록 C: 주요 상용 BEMS 플랫폼 비교

본 연구에서 개발하는 시스템은 연구 목적의 프로토타입이지만, 향후 상용화 또는 기술 이전을 고려할 때 기존 상용 BEMS 플랫폼과의 비교 분석이 필요하다. 아래 표는 주요 상용 플랫폼의 특징을 요약한 것이다 (향후 상용화 전략 수립 시 참고 자료로 활용).

표 C-1: 주요 상용 BEMS 플랫폼 비교 요약

플랫폼	제조사	주요 특징	강점	약점/고려사항	참고 Snippet
-:-----	-:-----	-:-----	-:---	-:-----	-:-----
SIMATIC Energy Manager Siemens - 산업 환경 중심 설계					

- 에너지 소비 데이터 수집/분석/시각화
- Siemens 자동화 하드웨어 및 3rd-party 연동
- 클라우드(MindSphere) 연동 IoT 분석 | - 에너지 집약적 산업 시설에 특화
- 제조 공정 연계 에너지 최적화
- 강력한 데이터 분석 및 리포팅 | - 범용 건물 관리 기능 상대적 약세 가능성
- Siemens 생태계 의존성 ||
- | EcoStruxure Building Operation | Schneider Electric | - 개방형 IoT 기반 아키텍처
- HVAC, 조명, 전력, 보안 등 통합 관리
- 클라우드 기반 분석 및 리포팅 (Energy Hub)
- 에너지 규정 준수 및 벤치마킹 지원 | - 개방성 및 상호운용성 강조
- 다양한 빌딩 시스템 통합 능력
- 에너지 절감 및 지속가능성 초점 (최대 30% 절감 언급 ⁸⁰) | - 플랫폼 기능이 방대하여 초기 학습 곡선 존재 가능성
- 특정 모듈/서비스 추가 비용 발생 가능성 ||
- | Metasys | Johnson Controls | - 1990년 출시, 오랜 역사와 레퍼런스
- 환경 제어, 에너지 관리, 조명, 소방, 보안 통합
- 개방성 및 3rd-party 연동 지원
- 확장성 및 원격 접근 기능 | - 높은 시장 점유율 및 신뢰도
- 다양한 규모 건물 적용 가능
- 예측 분석 및 ML 알고리즘 도입 | - 상대적으로 높은 비용 가능성
- 시스템 구성 및 관리 복잡성
- 독점 시스템으로 인한 벤더 종속성 우려 ||
- | Honeywell Forge | Honeywell | - IoT 기반 빌딩 성능 최적화 플랫폼
- 에너지 소비, 탄소 배출 실시간 모니터링/제어
- 자동화된 유틸리티 데이터 분석
- AI 기반 자율 제어 (에너지 효율-쾌적성 균형) | - 시스템 불문(System-agnostic) 및 확장성

- AI 기반 자율 최적화 기능

- 에너지 비용 및 탄소 배출 절감 강조 | - 구체적인 기능/가격 정보 추가 확인 필요

- 타 시스템 대비 후발 주자 이미지 가능성 ||

참고: 위 표는 제한된 정보를 바탕으로 한 요약이며, 각 플랫폼의 최신 기능, 가격 정책, 기술 지원 등은 해당 벤더를 통해 직접 확인해야 한다.

부록 D: 문제 해결 가이드 (Troubleshooting Guide)

본 부록은 시스템 개발 및 운영 중 발생할 수 있는 일반적인 문제와 해결 방안을 제시한다.

일반적인 문제와 해결방법

1. 센서 노드(ESP32-S3) 통신 단절 (ESP-NOW 또는 Wi-Fi MQTT)

- 증상: 특정 노드의 데이터가 InfluxDB에 수집되지 않음, Grafana 대시보드에 데이터 누락.
- 해결 방안:
 - 해당 ESP32-S3 노드 물리적 상태 확인 (전원, 연결 상태).
 - 노드 재부팅 시도.
 - Wi-Fi 신호 강도 확인 (deviceStatus.signalStrength 값 확인). 신호 약할 시 노드 위치 조정 또는 Wi-Fi AP 증설/위치 조정.
 - ESP-NOW 통신: 주변 노드와의 거리, 장애물 확인. 채널 설정 확인.
 - Wi-Fi MQTT 통신: Wi-Fi SSID/비밀번호 설정 확인. MQTT 브로커 주소/포트/인증 정보 확인. MQTT 브로커(RPi 5) 로그 확인.
 - 펌웨어 오류 가능성: 시리얼 모니터링 통한 디버그 로그 확인, 필요시 펌웨어 재설치 또는 업데이트.

2. 데이터 수집 지연 또는 누락 (MQTT -> InfluxDB)

- 증상: Grafana 대시보드 업데이트 지연, InfluxDB 데이터 최신성 부족.
- 해결 방안:
 - 네트워크 트래픽 모니터링: Raspberry Pi 5 및 관련 네트워크 구간 트래픽 확인. 과도한 지연 또는 패킷 손실 여부 점검.
 - MQTT 브로커 성능 확인: 브로커 CPU/메모리 사용률, 메시지 큐 상태 확인.
 - Node-RED 플로우 성능 확인: 플로우 내 병목 구간 확인 (데이터 처리 시간 과다 등). 디버그 노드 활용.
 - InfluxDB 성능 확인: 서버(RPi 5) CPU/메모리/디스크 I/O 부하 확인. InfluxDB

쓰기 성능 관련 로그 확인. 데이터베이스 용량 확인.

- 샘플링 주기 최적화: ESP32 노드의 데이터 전송 주기가 너무 짧을 경우 부하 증가 가능. 적절한 주기로 조정.
- 버퍼 오버플로우 체크: Node-RED 또는 데이터 처리 과정 중 버퍼 관련 오류 없는지 확인.

3. FMU 시뮬레이션 오류 (EnergyPlus 연동)

- 증상: Co-simulation 실행 중 오류 발생, 시뮬레이션 결과 비정상.
- 해결 방안:
 - IDF 파일 구문 검증: EnergyPlus 자체 검증 도구 또는 IDF Editor 활용하여 IDF 파일 오류 여부 확인.
 - FMU 변환 과정 확인: FMU 생성 시 사용된 도구 및 설정값 확인. FMI 버전 호환성 확인.
 - FMU 인터페이스 재연결: Co-simulation 환경(Python 스크립트 등)에서 FMU 로딩 및 입출력 변수 연결 설정 확인.
 - 시간 스텝 동기화 확인: 제어 알고리즘의 시간 스텝과 FMU의 통신 스텝 사이즈(communication step size) 일치 여부 및 적절성 확인.
 - 에러 로그 분석: Co-simulation 실행 시 출력되는 상세 에러 로그 확인하여 원인 파악.

4. 제어 응답 지연 또는 불안정 (MPC/DRL)

- 증상: 제어 명령(예: HVAC 설정값)이 늦게 반영되거나, 제어 결과가 발산/진동하는 현상.
- 해결 방안:
 - 제어 루프 타이밍 최적화: 센서 데이터 수집 → 제어 연산 → 액추에이터 명령 전달까지의 전체 루프 시간 측정 및 병목 구간 분석. 샘플링 주기 및 제어 주기 재조정.
 - 네트워크 지연 측정: 제어 명령 전달 경로(RPi 5 → 게이트웨이 → 액추에이터)의 네트워크 지연 시간 측정 및 개선 방안 모색.
 - 알고리즘 수렴성 확인: MPC 최적화 솔버의 수렴 시간 확인. DRL 학습 안정성 및 정책 수렴 여부 확인 (학습 로그, 보상 그래프 분석). 알고리즘 파라미터 튜닝.
 - 하드웨어 리소스 점검: 제어 연산 수행 서버(RPi 5 또는 클라우드)의 CPU/메모리 사용률 확인. 리소스 부족 시 사양 업그레이드 또는 알고리즘 경량화.
 - 모델 정확도 검증: 제어에 사용되는 예측 모델(WP2)의 정확도 재검증 및 필요시 모델 업데이트/개선.

로그 관리 및 진단 도구

- 통합 로그 관리: 각 컴포넌트(ESP32, RPi5 서비스-MQTT/Node-RED/InfluxDB, 제어 알고리즘)의 로그를 중앙 집중식으로 관리하는 방안 검토 (예: Syslog 서버 구축 또는

클라우드 로깅 서비스 활용).

- 에러 코드 정의서: 시스템 전반에서 발생 가능한 주요 오류 코드 및 메시지를 정의하고 문서화하여 신속한 원인 파악 지원.
- 디버깅 모드: 각 소프트웨어 컴포넌트에 상세 로그 출력이 가능한 디버깅 모드 구현.
- 원격 진단 도구: Raspberry Pi 5 서버 및 ESP32 노드에 원격 접속(SSH, 시리얼 등) 및 상태 확인/제어가 가능한 도구 활용. Grafana 대시보드를 통한 실시간 상태 모니터링 강화.

참고 자료

1. Smart Buildings Market Size, Trends & Growth Drivers ..., 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/smart-building-market-1169.html>
2. Smart Building Market Size, Share Report and Industry Growth 2032, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.marketresearchfuture.com/reports/smart-building-market-1860>
3. South Korea's energy mix in the buildings sector - 1.5°C national pathway explorer, 5월 5, 2025에 액세스, <https://1p5ndc-pathways.climateanalytics.org/countries/republic-of-korea/sectors/buildings>
4. South Korea Energy Information | Enerdata, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.enerdata.net/estore/energy-market/south-korea/>
5. What is a Building Energy Management System (BEMS)? - CIM.io, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.cim.io/blog/building-energy-management-systems-bems>
6. A Guide to Building Energy Management Systems - Green Coast, 5월 5, 2025에 액세스, <https://greencoast.org/building-energy-management-systems/>
7. A comprehensive review of Building Energy Management Systems (BEMS) for Improved Efficiency - ResearchGate, 5월 5, 2025에 액세스, https://www.researchgate.net/publication/379429759_A_comprehensive_review_of_Building_Energy_Management_Systems_BEMS_for_Improved_Efficiency
8. A comprehensive review of Building Energy Management Systems (BEMS) for Improved Efficiency, 5월 5, 2025에 액세스, <https://wjarr.com/sites/default/files/WJARR-2024-0746.pdf>
9. All you need to know about model predictive control for buildings ..., 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.osti.gov/pages/biblio/1668444>
10. Machine Learning Applications in Building Energy Systems: Review and Prospects - MDPI, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/4/648>
11. Model predictive control (MPC) for enhancing buildings and HVAC systems energy efficiency: problem formulation, applications and opportunities - SYSMA@IMT Lucca, 5월 5, 2025에 액세스, <http://cse.lab.imtlucca.it/~bemporad/publications/papers/energies-mpc-buildings.pdf>

12. IoT Sensor Networks in Smart Buildings: A Performance Assessment Using Queuing Models, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8402539/>
13. www.nrel.gov, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75601.pdf>
14. www.ewsn.org, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.ewsn.org/file-repository/ewsn2023/EWSN2023wip-final6402.pdf>
15. Artificial Intelligence-Assisted Energy and Thermal Comfort Control for Sustainable Buildings: An Extended Representation of the Systematic Review | Request PDF - ResearchGate, 5월 5, 2025에 액세스,
https://www.researchgate.net/publication/342408824_Artificial_Intelligence-Assisted_Energy_and_Thermal_Comfort_Control_for_Sustainable_Buildings_An_Extended_Representation_of_the_Systematic_Review
16. Full article: Machine learning-based prediction of thermal comfort: exploring building types, climate, ventilation strategies, and seasonal variations - Taylor & Francis Online, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09613218.2025.2462932?src=exp-la>
17. Model Predictive Control for Buildings, 5월 5, 2025에 액세스,
https://wiki.control.fel.cvut.cz/mediawiki/images/5/5f/Diz_2013_cigler_jiri.pdf
18. Model Predictive Control of thermal comfort as a benchmark for controller performance | Request PDF - ResearchGate, 5월 5, 2025에 액세스,
https://www.researchgate.net/publication/261218606_Model_Predictive_Control_of_thermal_comfort_as_a_benchmark_for_controller_performance
19. Efficient and assured reinforcement learning-based building HVAC control with heterogeneous expert-guided training - PMC, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11882997/>
20. Korea - Countries & Regions - IEA, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.iea.org/countries/korea/efficiency-demand>
21. Model-predictive control for non-domestic buildings: a critical review and prospects - White Rose Research Online, 5월 5, 2025에 액세스,
https://eprints.whiterose.ac.uk/94475/1/RockettHathway-BR_I-final.pdf
22. An experimental evaluation of Deep Reinforcement Learning algorithms for HVAC control, 5월 5, 2025에 액세스, <https://arxiv.org/html/2401.05737v3>
23. Personalized Thermal Comfort Model for a Multiple Occupancy Office Building | Proceedings, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784485248.099>
24. BEMS and IoT: Enhancing Building Connectivity - BMS Controls and Energy, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://bmscontrols.co.uk/blog/bems-and-iot-enhancing-building-connectivity/>
25. Digitalization Accelerating - ASHRAE, 5월 5, 2025에 액세스,
https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/ashrae%20journal/2022journaldocuments/april2022_06-07_industry-news.pdf
26. Privacy-Preserving Regulation Capacity Evaluation for HVAC Systems in Heterogeneous Buildings Based on Federated Learning and Transfer Learning | Request PDF - ResearchGate, 5월 5, 2025에 액세스,

- https://www.researchgate.net/publication/366566802_Privacy-Preserving_Regulation_Capacity_Evaluation_for_HVAC_Systems_in_Heterogeneous_Buildings_Based_on_Federated_Learning_and_Transfer_Learning
27. Privacy preserved and decentralized thermal comfort prediction model for smart buildings using federated learning - PubMed Central, 5월 5, 2025에 액세스, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10909213/>
 28. Advances in Federated Learning: Applications and Challenges in Smart Building Environments and Beyond - MDPI, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2073-431X/14/4/124>
 29. Grey-box and ANN-based building models for multistep-ahead prediction of indoor - OSTI, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.osti.gov/servlets/purl/2229217>
 30. ARTICLE TEMPLATE On-policy learning-based deep reinforcement learning assessment for building control efficiency and stability - OSTI, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.osti.gov/servlets/purl/1969028>
 31. Hybrid-Model-Based Deep Reinforcement Learning for Heating, Ventilation, and Air-Conditioning Control - ResearchGate, 5월 5, 2025에 액세스, https://www.researchgate.net/publication/348987457_Hybrid-Model-Based_Deep_Reinforcement_Learning_for_Heating_Ventilation_and_Air-Conditioning_Control
 32. (PDF) Real building implementation of a deep reinforcement learning controller to enhance energy efficiency and indoor temperature control - ResearchGate, 5월 5, 2025에 액세스, https://www.researchgate.net/publication/380760625_Real_building_implementation_of_a_deep_reinforcement_learning_controller_to_enhance_energy_efficiency_and_indoor_temperature_control
 33. Continual Reinforcement Learning for HVAC Systems Control: Integrating Hypernetworks and Transfer Learning - arXiv, 5월 5, 2025에 액세스, <https://arxiv.org/html/2503.19212v1>
 34. [2401.05737] An experimental evaluation of Deep Reinforcement Learning algorithms for HVAC control - arXiv, 5월 5, 2025에 액세스, <https://arxiv.org/abs/2401.05737>
 35. A Long N-step Surrogate Stage Reward for Deep Reinforcement Learning, 5월 5, 2025에 액세스, https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2023/file/29ef811e72b2b97cf18cd5d866b0f472-Paper-Conference.pdf
 36. Samuel Prívvara: Building modeling and identification for predictive control, 5월 5, 2025에 액세스, https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/5/56/Diz_2013_privara_samuel.pdf
 37. 1 Grey-Box Modeling and Application for Building Energy Simulations - A Critical Review - OSTI.GOV, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.osti.gov/servlets/purl/1808373>
 38. Physics-informed linear regression is competitive with two Machine Learning methods in residential building MPC - Research Collection, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/529023/1>

- [-s2.0-S0306261921017098-main.pdf?sequence=3&isAllowed=y](#)
39. (PDF) A Comparative Analysis of Optimization Solvers - ResearchGate, 5월 5, 2025에 액세스, https://www.researchgate.net/publication/314750497_A_Comparative_Analysis_of_Optimization_Solvers
 40. Ask HN: Do you use an optimization solver? Which one? Do you like it? | Hacker News, 5월 5, 2025에 액세스, <https://news.ycombinator.com/item?id=31099186>
 41. InfluxDB Pricing | InfluxData, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.influxdata.com/influxdb-pricing/>
 42. InfluxDB Cloud Serverless - AWS Marketplace, 5월 5, 2025에 액세스, <https://aws.amazon.com/marketplace/pp/prodview-4e7raoxoxsl4y>
 43. Timescale Pricing, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.timescale.com/pricing>
 44. Feature / pricing comparison Supabase Pro vs. TimescaleDB Cloud #9116 - GitHub, 5월 5, 2025에 액세스, <https://github.com/orgs/supabase/discussions/9116>
 45. Cloud Pricing Comparison: AWS vs. Azure vs. Google Cloud Platform in 2025 - Cast AI, 5월 5, 2025에 액세스, <https://cast.ai/blog/cloud-pricing-comparison/>
 46. Cloud Pricing Comparison: AWS vs. Azure vs. Google Cloud Platform in 2024 - Cast AI, 5월 5, 2025에 액세스, <https://cast.ai/blog/cloud-pricing-comparison-aws-vs-azure-vs-google-cloud-platform/>
 47. IoT Application Development with AWS, Azure, and GCP Part 2 | Object Computing, Inc., 5월 5, 2025에 액세스, <https://objectcomputing.com/resources/publications/sett/february-2021-iot-app-development-aws-azure-gcp>
 48. Esp 32 Board - eBay, 5월 5, 2025에 액세스, https://www.ebay.com/shop/esp-32-board?_nkw=esp+32+board
 49. 100Pcs Esp32 - AliExpress, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.aliexpress.com/w/wholesale-100pcs-esp32.html>
 50. Adaptive Grey-Box Models for Model Predictive Building Control Using the Unscented Kalman Filter - Purdue e-Pubs, 5월 5, 2025에 액세스, <https://docs.lib.purdue.edu/ihpbc/363/>
 51. Advances in the Co-Simulation of Detailed Electrical and Whole ..., 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/17/6284>
 52. Full article: A data schema for exchanging information between urban building energy models and urban microclimate models in coupled simulations - Taylor & Francis Online, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19401493.2022.2142295>
 53. FMPy: Home, 5월 5, 2025에 액세스, <https://fmpy.readthedocs.io/>
 54. Co-simulation using the open-source Python package PyFMI - Modelon, 5월 5, 2025에 액세스, <https://modelon.com/blog/co-simulation-using-the-open-source-python-package-pyfmi/>
 55. Smart Building Market Size, Share & Growth Report [2032] - Fortune Business Insights, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/smart-building-market>

[t-101198](#)

56. Integration of IoT in building energy infrastructure: A critical review on challenges and solutions | Request PDF - ResearchGate, 5월 5, 2025에 액세스,
https://www.researchgate.net/publication/368885768_Integration_of_IoT_in_building_energy_infrastructure_A_critical_review_on_challenges_and_solutions
57. (PDF) EnergyPlus: Energy Simulation Program - ResearchGate, 5월 5, 2025에 액세스,
https://www.researchgate.net/publication/230606369_EnergyPlus_Energy_Simulation_Program
58. Working on a Smart Building Dissertation — Would Appreciate Your Input! : r/BuildingAutomation - Reddit, 5월 5, 2025에 액세스,
https://www.reddit.com/r/BuildingAutomation/comments/1jkbldy/working_on_a_smart_building_dissertation_would/
59. Securely Connect IoT Devices – AWS IoT Core Pricing – Amazon Web Services, 5월 5, 2025에 액세스, <https://aws.amazon.com/iot-core/pricing/>
60. EnergyPlus, 5월 5, 2025에 액세스, <https://energyplus.net/>
61. What Is the Best Solution for Smart Buildings? A Case Study of Fog, Edge Computing and Smart IoT Devices - MDPI, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.mdpi.com/2076-3417/15/7/3805>
62. Functions | ASHRAE 7.5 Smart Building Systems, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://tpc.ashrae.org/Functions?cmtKey=7ee34235-4a54-41c0-a13b-7bbbb46aa72d>
63. Smart Building Systems: A Confluence of Architecture and Technology - ResearchGate, 5월 5, 2025에 액세스,
https://www.researchgate.net/publication/389494701_Smart_Building_Systems_A_Confluence_of_Architecture_and_Technology
64. Understanding HVAC Control Systems in Building Automation, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.proloncontrols.com/insights/improving-air-quality-in-mid-sized-commercial-spaces-with-hvac-controls>
65. Advancing Sustainable Energy Management: A Comprehensive Review of Artificial Intelligence Techniques in Building, 5월 5, 2025에 액세스,
https://erjsh.journals.ekb.eg/article_344823_b20450b2157f43e07eba58ecbb27cb33.pdf
66. Sustainable Air-Conditioning Systems Enabled by Artificial ... - MDPI, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/12/7514>
67. VOC Monitoring in Commercial and Office Buildings - TSI, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://tsi.com/indoor-environments/learn/voc-commercial-office-building>
68. (PDF) Fast machine learning for building management systems - ResearchGate, 5월 5, 2025에 액세스,
https://www.researchgate.net/publication/390887193_Fast_machine_learning_for_building_management_systems
69. Intelligent Building Energy Management System for LED Lighting Systems in Smart Buildings. - ResearchGate, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.researchgate.net/figure/Intelligent-Building-Energy-Management-Sy>

[stem-for-LED-Lighting-Systems-in-Smart-Buildings_fig4_343496143](#)

70. Integrated Air Quality Sensor Module AM1008W, 5월 5, 2025에 액세스, https://en.gassensor.com.cn/OEMModuleAndMonitor/info_itemid_116.html
71. AM1008W CO2, PM, Temp, RH, and VOC Sensor, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.co2meter.com/products/am1008-integrated-iaq-co2-pm-sensor>
72. Room air quality sensor - AM1008W - Cubic Sensor and Instrument Co.,Ltd - CO2 / VOC / relative humidity - DirectIndustry, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.directindustry.com/prod/cubic-sensor-instrument-co-ltd/product-54752-2014759.html>
73. Non Condensable Gas Monitoring | Products & Suppliers - GlobalSpec, 5월 5, 2025에 액세스, https://www.globalspec.com/industrial-directory/non_condensable_gas_monitoring
74. Model-predictive control for non-domestic buildings: a critical review and prospects - White Rose Research Online, 5월 5, 2025에 액세스, https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/94475/1/RockettHathway-BR_I-final.pdf
75. CATIA-Systems/FMPy: Simulate Functional Mockup Units (FMUs) in Python - GitHub, 5월 5, 2025에 액세스, <https://github.com/CATIA-Systems/FMPy>
76. Integrated air quality sensor module AM1008W - Cubic Sensor and Instrument Co.,Ltd. - PDF Catalogs | Technical Documentation, 5월 5, 2025에 액세스, <https://pdf.medicalexpo.com/pdf/cubic-sensor-instrument-co-ltd/integrated-air-quality-sensor-module-am1008w/100101-233501.html>
77. Monitoring sensor - AM1008W - Cubic Sensor and Instrument Co.,Ltd. - air quality, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.medicalexpo.com/prod/cubic-sensor-instrument-co-ltd/product-100101-976712.html>
78. Best place to buy a 100 pack of esp32 modules? - Reddit, 5월 5, 2025에 액세스, https://www.reddit.com/r/esp32/comments/1j0amc1/best_place_to_buy_a_100_pack_of_esp32_modules/
79. arXiv:2210.16896v1 [math.OC] 30 Oct 2022, 5월 5, 2025에 액세스, <https://arxiv.org/pdf/2210.16896>
80. Identifying Grey-box Thermal Models with Bayesian Neural Networks - ResearchGate, 5월 5, 2025에 액세스, https://www.researchgate.net/publication/349597797_Identifying_Grey-box_Thermal_Models_with_Bayesian_Neural_Networks
81. esp32 price and stock - Findchips, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.findchips.com/search/esp32>
82. esp-32 Results on OEMsTrade, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.oemstrade.com/search/esp-32>
83. Lubeby Smart ESP32-WROOM-32E Wi-Fi+BT+BLE MCU Module 4 MB 8MB 16MB with PCB Antenna ESP-32E - Amazon.com, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.amazon.com/Lubeby-Smart-ESP32-WROOM-32E-Antenna-ESP-32E/dp/B0B3MVGCFV>
84. Maximize Efficiency with Versatile wholesale esp32 for Your Projects - Alibaba.com, 5월 5, 2025에 액세스,

- <https://www.alibaba.com/showroom/wholesale-esp32.html>
85. 58 wholesale "Espressif Esp32 Wroom 32" products - Global Sources, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.globalsources.com/manufacturers/espressif-esp32-wroom-32.html>
 86. GEKKO Optimization Suite — GEKKO 1.3.0 documentation, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://gekko.readthedocs.io/>
 87. MPC Solvers : r/ControlTheory - Reddit, 5월 5, 2025에 액세스,
https://www.reddit.com/r/ControlTheory/comments/w6rrxf/mpc_solvers/
 88. gekko - PyPI, 5월 5, 2025에 액세스, <https://pypi.org/project/gekko/>
 89. GEKKO Optimization Suite - MDPI, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.mdpi.com/2227-9717/6/8/106>
 90. How much does aws iot core really cost at scale? : r/embedded - Reddit, 5월 5, 2025에 액세스,
https://www.reddit.com/r/embedded/comments/12bz4gk/how_much_does_aws_iot_core_really_cost_at_scale/
 91. JCI Metasys vs. other building automation controls systems: Pros and cons, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.gulfstreamsp.com/blog/2023/11/jci-metasys-vs-other-building-automation-controls-systems-pros-and-cons>
 92. Decent QP solver? - Modelling & Simulations - Julia Discourse, 5월 5, 2025에 액세스, <https://discourse.julialang.org/t/decent-qp-solver/89939>
 93. Waterproof 1-Wire DS18B20 Digital temperature sensor : ID 381 - Adafruit, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.adafruit.com/product/381>
 94. Experience using Ipopt for large linear problems - Google Groups, 5월 5, 2025에 액세스, https://groups.google.com/g/openmod-initiative/c/_ceQzA84IPs
 95. Data-driven personal thermal comfort prediction: A literature review | Semantic Scholar, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.semanticscholar.org/paper/7cbad4d5f6d42d3b21d8e8475cbf844b20c002d4>
 96. Best open source Mixed-Integer Linear Programming (MILP) optimization solver in terms of speed and memory [closed] - Stack Overflow, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://stackoverflow.com/questions/502102/best-open-source-mixed-integer-linear-programming-milp-optimization-solver-in>
 97. What are the advantages of commercial solvers like Gurobi or Xpress over open source solvers like COIN-OR or CVXPY? - Operations Research Stack Exchange, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://or.stackexchange.com/questions/5150/what-are-the-advantages-of-commercial-solvers-like-gurobi-or-xpress-over-open-so>
 98. Gnu-RL: A Practical and Scalable Reinforcement Learning Solution for Building HVAC Control Using a Differentiable MPC Policy - Frontiers, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2020.562239/full>
 99. DHT22 temperature-humidity sensor + extras : ID 385 - Adafruit, 5월 5, 2025에 액세스, <https://www.adafruit.com/product/385>
 100. DEVMO Digital Particle Concentration Laser Sensor PMS5003 PM2.5

PM10+Cable Air Quality Detection Dust Air Conditioning Monitor Module
Compatible With Ar-duino - Amazon.com, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.amazon.com/DEVMO-Concentration-Detection-Conditioning-Compatible/dp/B0966S32SL>

101. KalmanFilter — FilterPy 1.4.4 documentation, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://filterpy.readthedocs.io/en/latest/kalman/KalmanFilter.html>
102. AWS vs Azure vs GCP: Cloud Cost Comparison with Benefits - Veritis, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.veritis.com/blog/aws-vs-azure-vs-gcp-cloud-cost-comparison/>
103. AWS, Azure, or Google Cloud? A Cost Comparison to Help You Decide - Cloudchipr, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://cloudchipr.com/blog/aws-azure-google-price-comparison>
104. MH-Z19 infrared co2 sensor for co2 monitor MH-Z19B Infrared Carbon Dioxide co2 gas Sensor - AliExpress, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.aliexpress.com/item/32946106807.html>
105. InfluxDB Cloud Pricing | InfluxData, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.influxdata.com/influxdb-cloud-pricing/>
106. Grove - DHT22 Temperature & Humidity Sensor Pro - Seeed Studio, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.seeedstudio.com/Grove-Temperature-Humidity-Sensor-Pro-AM2302-DHT22.html>
107. Seeedstudio Grove VOC & eCO2 Gas Sensor SGP30 - RobotShop, 5월 5, 2025에 액세스,
<https://www.robotshop.com/products/seeedstudio-grove-voc-eco2-gas-sensor-sgp30>