

고효율 히트펌프 운전 최적화를 위한 TWIN-X 기반 제어·관제 플랫폼 설계 및 기능 콘텐츠 도출

장여주*, 이상민*, 진훈*, 송승찬*

*(주)엠펠

e-mail: yjjang@mpole.co.kr

Design and Functional Content Derivation of a TWIN-X Based Control and Monitoring Platform for Optimal Operation of High-Efficiency Heat Pumps

Yeo-ju Jang*, Sang-Min Lee*, Hoon Jin*, Seung-Chan Song*

*MPOLE Co., Ltd.

요 약

본 연구에서는 히트펌프 운전 효율 향상과 배출 저감을 달성하기 위하여 디지털트윈 기반 통합관제·제어 플랫폼의 설계 및 기능 콘텐츠를 제안하였다. 이를 위해 국내외 선행연구와 플랫폼 사례를 분석하여 요구사항을 기능적·비기능적 측면에서 도출하고, 데이터 수집-처리-분석-시물레이션-제어-시각화로 구성된 4계층 아키텍처를 설계하였다. 또한, 보유한 디지털트윈 기반 플랫폼(TWIN-X)을 활용하여 대시보드, 경보·알림, 제어, 이력 조회 화면 등 사용자 중심 UI/UX를 구현함으로써 효율적 운영과 직관적 의사결정을 지원하도록 하였다. 제안된 플랫폼은 기존 모니터링 중심 시스템의 한계를 보완할 수 있으며, 향후 실증을 통한 성능 검증과 AI 기반 고도화를 통해 분산형 집단 냉난방 및 산업단지 에너지 관리로 확장이 가능할 것으로 기대된다.

1. 서론

히트펌프는 냉난방에 필요한 주요 기술로, 최근의 탄소중립 및 에너지 전환 정책과 관련하여 ATW(Air-to-Water) 히트펌프 보급이 가속화되고 있으며, 개별 건물 수준을 넘어 분산형 집단 냉난방 및 산업단지 적용으로 확장되고 있다[1]. 그러나 실제 운전 현장에서는 계절·부하 변동에 따른 효율 저하, 저온 환경에서의 성능 한계, 그리고 운전 인자간 복잡한 상호작용으로 인한 배출 증가 등의 문제가 여전히 발생하고 있다[2]. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 단순 기계적 개선을 넘어, 통합 관제 및 제어 기술을 적용한 정밀하고 최적화된 운전이 요구된다. 본 연구에서는 히트펌프의 효율 향상과 배출 저감을 달성하기 위하여 디지털트윈 기반의 통합관제·제어 플랫폼을 개발하고자 하였으며, 이를 위하여 플랫폼 설계 수행 및 기능 콘텐츠를 도출하였다.

2. 연구 방법

2.1 통합관제플랫폼 개발을 위한 선행연구 분석

본 연구에서는 통합관제플랫폼의 설계에 앞서 국내외 선행 연구와 기술 동향을 체계적으로 조사·분석하고자 하였다. 조사 범위는 디지털트윈, IoT 센서 및 통신, 제어 로직·시물레이터,

UI/UX 및 데이터 시각화 등 핵심 기술 요소를 포함하며, 스마트 시티, 산업안전, 에너지 관리, 건물 자동화 등 다양한 적용 사례를 포괄하였다. 또한, 국내외 대표 플랫폼 사례(스마트시티 관제, 공장·플랜트, 에너지 관리 시스템)를 검토하여 구조와 기능을 비교·분석하고, 성공 및 실패 요인을 도출하였다. 이를 통해 현존 시스템의 한계(데이터 표준화 부족, 예측·제어 기능 미흡, 사용자 중심 UI 부재 등)를 파악하고, 본 플랫폼이 확보해야 할 필수 기능과 개발 방향성을 정의하였다. 이러한 선행연구 분석은 향후 요구사항 정의, 아키텍처 설계, 실증 적용 단계에서 기술적 리스크를 최소화하고, 실효성을 확보하기 위한 기반으로 활용되었다.

2.2 통합관제플랫폼 개발을 위한 설계 및 콘텐츠 도출 정의

본 연구에서는 히트펌프 운전 효율 최적화와 배출 저감을 동시에 지원할 수 있는 디지털트윈 기반 통합관제플랫폼을 개발하기 위하여, 설계 방향과 정의를 다음과 같이 정의하였다. 첫째, 시스템 아키텍처 정의는 데이터 수집(IoT 센서 및 엣지 디바이스), 데이터 처리 및 분석, 운영 및 제어(제어 인터페이스 및 시물레이터), 시각화 및 플랫폼 표출(디지털트윈 표출 및 관제 대시보드) 등 4계층 구조를 기본 틀로 설정하였다. 둘째, 데이터 연계 정의는 운전 인자(온도, 압력, 유량, 전력)와 배출 인자(NO_x , CO 등)의 실시간 수집·정합화를 통해, 디지털트윈 모델이 현장 상태를

즉시 반영 및 표출하는 것을 목표로 하였다. 셋째, 시뮬레이션 및 제어 정의는 시나리오 기반 시뮬레이터와 제어 알고리즘을 결합하여 다양한 운전 조건을 가정하고, 효율(COP) 및 배출 특성을 예측·최적화하는 기능을 포함하고자 하였다. 넷째, UI/UX 정의는 운영자가 직관적으로 상태를 인지하고 대응할 수 있도록 다계층 시각화, 이상 알림, 원격제어 기능을 기본 요소로 설정하였다. 마지막으로, 확장성 정의는 모듈화·호환성을 전제로 하여, 향후 AI 고도화, 외부기관 시스템 연계 및 현장 대응 기능으로 발전 가능한 구조로 설계 방향을 확립하였다.

3. 연구 결과

본 연구에서 제안된 통합관제플랫폼 설계는 요구사항 정의, 화면 정의 및 시스템 아키텍처 설계의 단계적 과정을 통해 체계적으로 도출되었으며, 이를 통해 플랫폼의 실효성과 확장성을 확보하기 위한 기반을 제공하고자 하였다.

3.1 요구사항 정의

선행연구 분석을 바탕으로, 통합관제플랫폼 설계를 위한 기능적·비기능적 요구사항을 상위 수준에서 도출하였다.

3.1.1 기능적 요구사항 정의

① IoT 센서를 통한 히트펌프 운전·배출 데이터의 실시간 수집 및 저장, ② 디지털트윈 기반 설비·배관 시각화, ③ 이상징후 탐지 및 경고 제공, ④ 시뮬레이터 및 제어 로직을 통한 최적 운전 조건 분석, ⑤ 원격 제어 및 이력 관리 기능

3.1.2 비기능적 요구사항 정의

① 데이터 표준화 및 이기종 장비 간 호환성 확보, ② 모듈화·확장성 기반 계층형 아키텍처, ③ 저지연·고신뢰성 데이터 처리, ④ 운영자 친화적 UI/UX, ⑤ 외부 기관 시스템과의 연계 가능성 확보

이러한 요구사항 정의는 기존 관제시스템의 한계(모니터링 중심, 제어 및 예측 기능 부족, 데이터 정합성 미흡 등)를 보완하고, 통합적이고 실효성 있는 플랫폼 개발을 위한 기준으로 활용되었다.

3.2 시스템 아키텍처 설계

각종 설비 및 제어모델과의 연계를 위하여 계층형 아키텍처 형태로 설계하였다.

- 데이터 수집 계층: IoT 센서 및 엣지 디바이스를 통해 온도, 압력, 유량, 전력, 배출가스 데이터를 실시간 획득
- 데이터 처리 계층: 로컬 서버 환경에서 데이터 정합성 확보, 전처리, 분석 수행
- 운영 및 제어 계층: 시뮬레이터 및 제어 모듈을 통합하여 운

전 효율 및 배출 특성 최적화

- 시각화 및 플랫폼 계층: 디지털트윈 모델 표출, 플랫폼 대시보드를 통해 운영자에게 통합 관제 및 알림 기능 제공
- 아키텍처는 확장성과 호환성을 고려하였으며, 향후 AI모델 확대 고도화와 외부 시스템 연계에도 유연하게 대응할 수 있을 것으로 사료된다.

3.3 기능 콘텐츠 도출

플랫폼의 UI/UX는 운영자가 직관적으로 상태를 파악하고 즉각 대응할 수 있도록 설계하였다. 또한, 본 연구에서는 보유한 디지털트윈 기반 통합관제 플랫폼(TWIN-X)를 활용하여 실시간 데이터 수집·분석, 시뮬레이터 기반 최적화, 사용자 중심 UI/UX를 핵심 기능 콘텐츠로 도출하였다.

- 대시보드 화면: 히트펌프 운전 상태(온도, 압력, 유량, 소비전력)와 배출 지표(NO_x , CO 등)를 실시간으로 시각화
- 경고·알림 화면: 기준치를 벗어난 운전 조건이나 이상 상태를 색상·팝업·로그 형태로 제공
- 제어 화면: 운전 모드 전환, 부하 조정 등 제어 명령을 원격으로 수행하고, 결과를 피드백
- 이력 조회 화면: 과거 운전·배출 데이터를 기간별로 조회하고 시뮬레이션 결과와 비교 가능

화면 정의를 통하여 사용자 중심의 효율적 운영과 직관적 의사결정을 지원하는 것을 목표로 하였다.

4. 논의 및 결론

본 연구에서는 히트펌프 효율 향상과 배출 저감을 위해 디지털트윈 기반 통합관제·제어 플랫폼의 설계 및 기능 콘텐츠를 제안하였다. 제안된 플랫폼은 실시간 데이터 수집·처리·분석·시뮬레이션·제어·시각화로 이어지는 4계층 아키텍처를 기반으로 기존 모니터링 중심 시스템의 한계를 보완하고자 하였다.

IoT와 디지털트윈 연계를 통한 운전·배출 인자의 실시간 정합화 및 예측·제어를 위하여, 요구사항 정의와 아키텍처 설계를 통해 데이터 표준화, 모듈화·확장성, 저지연·고신뢰성 처리 등 핵심 요소를 반영하였다. 또한, 운영자 친화적 UI/UX 및 화면 정의(대시보드, 경고·알림, 제어, 이력 조회)를 통해 사용자 중심의 효율적 운영과 직관적 의사결정 지원 기능을 확보하고자 하였다.

향후 단계에서는 플랫폼 개발 및 실증 적용을 통한 성능 검증을 수행할 계획이다.

Acknowledgement

이 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원-

에너지기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호:
RS-2025-02313376).

참고문헌

- [1] 이권재, 권영철, 전종균, 박삼진, 권정태, 허철, “공기열원 히트펌프의 난방 성능특성에 관한 실험적 연구”, 설비공학논문집, 23권 6호, 2011년.
- [2] 이호성, 조중원, 전한별, 김정민, 이원석, 남광우, “저온 히트펌프 성능 확보를 위한 가스인젝션 기술 실험적 연구”, 대한기계학회 춘추학술대회, 2022년.