

ATW 히트펌프 시스템 내재화를 위한 디지털 트윈 기반 지능형 제어 플랫폼 설계

이상민*, 장여주*, 진훈*, 송승찬*

*(주)엠펠 기업부설연구소

e-mail: smlee@mpole.co.kr, yjjang@mpole.co.kr, hjin@mpole.co.kr, scsong@mpole.co.kr

Design of a Digital Twin-Based Intelligent Control Platform for the Localization of ATW Heat Pump Systems

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

*MPOLE Co., Ltd. R&D Institute.

요 약

In this study, we propose a digital twin-based control platform for an environmentally friendly, ultra-high-efficiency air-to-water (ATW) heat pump system. The research is motivated by the urgent need to mitigate climate change and achieve carbon neutrality. To address the high greenhouse gas emissions of fossil fuel-based systems, the proposed platform aims to improve system performance and reduce energy consumption through intelligent control using real-time data.

The platform integrates predictive maintenance algorithms that analyze sensor data to evaluate equipment conditions and anticipate potential failures. It also generates optimal operation scenarios automatically to maximize energy efficiency. This approach is expected to advance heat pumps from conventional heating and cooling devices into intelligent systems capable of interpreting data and making autonomous decisions. Finally, the system will be validated in an actual building environment to establish efficiency standards and supporting institutional frameworks, thereby laying the foundation for future expansion into the B2C market, including residential applications.

1. 서론

기후 변화와 탄소 중립 목표를 달성하려면 건물의 에너지 효율을 높이는 것이 필수적이다. 기존의 화석연료 기반 난방 시스템은 온실가스를 다량 배출하여 지속 가능한 해결책이 될 수 없다. 세계 각국은 2050년까지 탄소중립 사회를 실현하는 목표를 제시하여 산업 전반에서 다양한 에너지 전환을 추진 중에 있다. 이에 보일러를 대체하는 친환경 냉매를 사용하는 공기열원(ATW) 히트펌프 시스템이 차세대 에너지 설비로 주목받고 있다.

본 논문은 초고효율 ATW 히트펌프 시스템에 디지털 트윈 기술을 접목해, 단순 운용을 넘어 지능형 예측, 제어, 최적화가 가능한 시스템을 설계하는 것을 목표로 한다.

이 시스템은 실시간 데이터를 기반으로 설비의 성능을 극대화하여 건물의 에너지 소비를 획기적으로 줄이고 온실가스 감축에 기여할 것이다. 나아가, 본 연구는 개발된 시스템을 효율관리제도에 포함시킬 수 있는 제도적 기반을 마련함으로써 전기 기반 고효율 난방 시스템의 시장을 확대하는 초석을 다지고자 한다.

2. 기술 구현 배경과 개발 전략

디지털 트윈 기술은 물리적 객체를 가상 공간에 구현하여 다양한 시뮬레이션과 실시간 분석을 가능하게 하는 차세대 기술이다. 기존의 에너지 관리 시스템이 주로 정적인 데이터 분석에 의존한 것과 달리, 디지털 트윈은 설비 운전 상태와 환경 변수 등 실시간 데이터를 기반으로 동적 상태를 모니터링하고 예측할 수 있다. 이러한 특성은 에너지 설비의 성능 관리, 고장 예측, 최적 운전 시나리오 도출에 있어 혁신적인 전환을 가능하게 한다.

관련 선행연구를 살펴보면, 김안수 외(2022)는 건물 공조 시스템을 위한 디지털 트윈 기반 에너지 관리 시스템 연구에서 건물 공조 시스템에 디지털 트윈을 적용하여 에너지 소비를 약 15% 절감할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 제시하였다. 그러나 해당 연구가 시뮬레이션 중심이었다면, 본 연구는 실시간 운전 데이터를 활용한 예지보전 및 지능형 제어에 초점을 둔다. 또한 이병호와 박준영(2021)은 사물인터넷과 기계학습 기반 냉동기 시스템의 고장 진단 및 예측 연구에서 IoT 센서 데이터를 활용한 냉동기 고장 예측 알고리즘을 제안하였다.

본 연구는 이와 유사한 예지보전 기능을 ATW 히트펌프에 특화하여 내재화하는 동시에, 고장 예측을 넘어 에너지 효율 최적화

기능까지 통합적으로 제공한다는 점에서 차별성을 지닌다. 아울러 최철민 외(2023)는 디지털 트윈과 스마트 홈 에너지 관리 시스템의 통합에 관한 연구를 통해 주거 환경에서 디지털 트윈 기반 에너지 관리 시스템의 구현 사례를 보고하였다.

본 연구는 이러한 B2C 환경으로의 확장 가능성을 고려함과 동시에, 히트펌프 설비 자체에 지능을 부여하는 내재화 기술 개발을 핵심 목표로 한다.

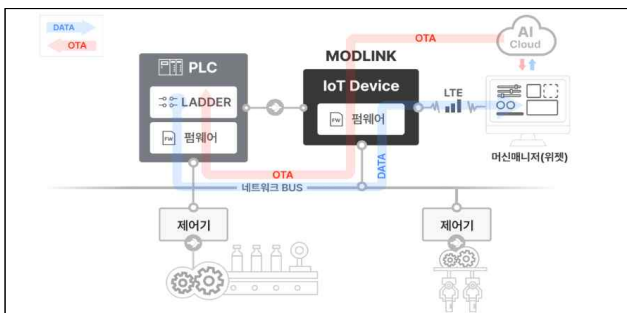
ATW 히트펌프는 대기 중의 열을 활용하여 냉난방과 온수를 공급하는 고효율 시스템이지만, 외부 환경 조건 변화에 따라 성능 변동성이 크다는 한계를 지닌다. 따라서 이를 효율적으로 운용하기 위해서는 실시간 운전 상태를 정확히 파악하고 최적 운전 조건을 도출할 수 있는 지능형 제어 기술이 요구된다.

본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해 ATW 히트펌프에 디지털 트윈 기술을 직접 내재화함으로써, 설비가 스스로 데이터를 해석하고 판단하는 ‘지능형 설비’로 진화할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

3. 관제플랫폼 설계 및 구현 계획

3.1 디지털 트윈 기반 지능형 관제 플랫폼 설계

지능형 관제 플랫폼은 히트펌프 설비와 연동되는 소프트웨어 모듈을 기반으로 설계된다. 이 플랫폼은 건물 내 네트워크를 통해 온도, 습도, 냉매 압력 등 설비의 핵심 데이터를 실시간으로 수집 및 분석한다.



[그림 1] 설비데이터 수집 IoT 연동 프로토콜 설계



[그림 2] 디지털 트윈 기반 지능형 관제 플랫폼 화면 설계
수집된 데이터는 가상 모델에 반영되어 3D로 시각화되며, 사용자는 이를 통해 설비의 현재 운전 상태를 직관적으로 파악할 수 있다.

3.2 핵심 기능 및 최적화 운전 알고리즘 제안

본 시스템의 핵심 기능은 단순한 모니터링을 넘어선 지능형 제어 기술에 중점을 둔다. 이를 위해 다음의 두 가지 핵심 기능을 제안하고자 한다.

3.2.1 예지보전 기능

운전 데이터에서 미세한 이상 징후를 조기에 감지하여 고장을 사전에 예측하는 것을 목표로 한다. 센서 데이터의 패턴 변화, 비정상적인 값의 출현 등을 머신러닝 알고리즘으로 분석함으로써 설비 고장 가능성에 대한 경고를 제공한다.

3.2.2 최적 운전 시나리오 도출 알고리즘

과거 운전 데이터와 실시간 데이터를 종합적으로 분석하여 에너지 효율을 극대화할 수 있는 운전 시나리오를 자동으로 제안한다. 이 알고리즘은 외부 기온, 습도, 건물 내부의 부하량 등 다양한 변수를 고려하여 에너지 소비를 최소화하는 운전 계획을 수립하는 데 활용된다.

3.3 관제플랫폼 확장성 확보 계획

본 연구를 통해 개발된 시스템은 실제 건물 환경에서 실증을 거쳐 효용성을 검증할 계획이다. 이 과정을 통해 시스템의 성능 기준을 명확히 하고, 효율관리제도에 편입될 수 있는 제도적 근거를 마련할 것이다.

나아가, B2C 시장으로의 확대를 고려하여 모바일 기반의 설비 제어 기술을 함께 개발한다. 이는 공동주택, 스마트홈, 숙박시설 등 다양한 환경에서 사용자가 히트펌프를 손쉽게 제어하고 관리할 수 있도록 하기 위함이다.

4. 기대효과 및 결론

본 연구를 통해 개발될 디지털 트윈 내재화 ATW 히트펌프 시스템은 예지보전 알고리즘을 활용하여 설비의 고장을 사전에 예측하고 대응함으로써 유지보수 비용과 가동 중단 시간을 최소화할 수 있으며, 실시간 데이터 기반의 최적 운전 시나리오를 통해 에너지 소비를 줄이고 궁극적으로 탄소 중립 목표 달성에 기여하는 한편, 냉난방 설비를 스스로 판단하고 제어하는 지능형 시스템으로 발전시킴으로써 관련 시장을 확대하고 기술적 발전을 선도할 것이다.

결론적으로, 본 연구는 친환경 초고효율 ATW 히트펌프 시스템에 디지털 트윈 기술을 융합함으로써 단순히 에너지 절감에 그치지 않고 예측, 최적화, 지능형 제어가 가능한 혁신적인 시스템을 제안한다. 이는 향후 건물의 에너지 시스템이 나아갈 방향을 제시하고, 지속 가능한 사회를 만드는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

본 연구는 산업통상자원부 에너지수요관리핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구(RS-2025-02313376)이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김안수, 이승훈, 조현우, “건물 공조 시스템을 위한 디지털 트윈 기반 에너지 관리 시스템,” 건축공학저널 (Journal of Building Engineering), 제45권, pp. 103–115, 2022년.
- [2] 이병호, 박준영, “사물인터넷과 기계학습 기반 냉동기 시스템의 고장 진단 및 예측,” 에너지리포트 (Energy Reports), 제7권, pp. 2501–2514, 2021년.
- [3] 최철민, 김도현, 한지수, “디지털 트윈과 스마트 홈 에너지 관리 시스템의 통합에 관한 연구,” 응용에너지 (Applied Energy), 제340권, pp. 120–132, 2023년.