

디지털트윈 기반 홈에너지관리시스템 프레임워크 개발

Development of a home energy management system framework based on digital twins

이충호, 도윤미, 허태욱

Chungho Lee, Yoonmee Doh, Tae-Wook Heo

(34129) 대전 유성구 가정로 218 한국전자통신연구원 산업에너지융합연구본부
{leech, ydoh, htw398}@etri.re.kr

요약

디지털트윈 기술은 제조업 분야에서 시작되어 스마트 시티, 에너지, 운송, 헬스 등 다양한 산업으로 빠르게 확산되고 있다. 이 기술은 여러 시스템과 조직 간의 데이터 통합을 향상시켜 더 정교한 모델링과 예측을 가능하게 하며, 이를 통해 운영 효율성을 높이고 의사 결정을 개선한다. 스마트홈 분야에도 디지털트윈 기술을 적용하는 연구가 시도되었으나 개념 실증 정도에 그치고 있으며, 실질적인 구현을 통한 검증 사례는 찾아볼 수 없다. 본 논문에서는 디지털트윈 기술을 스마트홈의 에너지 관리에 활용하여 에너지 효율화를 위한 디지털트윈 기반 홈 에너지 관리 시스템의 프레임워크를 제안한다. 제안된 프레임워크는 스마트홈의 다양한 서비스에 적용할 수 있는 다목적 프레임워크를 제공하는 것을 목표로 하며, 구축 비용을 절감하기 위해 오픈소스 소프트웨어 기반의 기술 스택을 활용하여 구현된다. 구현된 시스템은 실제 사용자가 거주하는 공동주택에 장기간 설치 및 운영함으로써, 시스템의 실행 가능성, 유용성, 확장성을 검증한다.

Abstract

Digital twin technology, which originated in the manufacturing sector, is rapidly expanding into various industries such as smart cities, energy, transportation, and healthcare. This technology enhances data integration across multiple systems and organizations, enabling more precise modeling and prediction, thereby improving operational efficiency and decision-making. Although research has been conducted to apply digital twin technology in the smart home sector, it has mostly been limited to conceptual demonstrations, with no substantial implementation and verification cases. This paper proposes a framework for a digital twin-based home energy management system aimed at improving energy efficiency by utilizing digital twin technology in smart home energy management. The proposed framework is designed to be a versatile platform applicable to various smart home services and is implemented using an open-source software-based technology stack to reduce construction costs. The system is tested and verified by installing and operating it over an extended period in a residential apartment where actual users live, thereby validating its feasibility, utility, and scalability.

키워드: 디지털트윈, 홈에너지관리시스템, 스마트홈, 에너지 효율 최적화

Keyword: Digital Twins, Home Energy Management System, Smart Home, Energy Efficiency Optimization

1. 서론

디지털트윈(Digital Twin)은 물리적 객체나 시스템의 디지털 복제본을 의미하며, 실제 세계의 객체나 시스템과 실시간으로 연동되어 데이터를 수집하고 분석하여 해당 객체나 시스템의 상태, 성능, 동작 등을 모니터링하고 예측 및 시뮬레이션할 수 있는 첨단 기술이다. 이 개념은 초기에는 주로 제조업, 항공우주 산업과 같은 고도의 정밀함을 요구하는 분야에서 발전했으나, 그 유용성과 혁신성 덕분에 다양한 산업 분야로 빠르게 확산되었다. 나아가 디지털트윈은 현실 세계와 가상의 세계를 연결함으로써, 복잡한 시스템의 설계, 운영 및 유지보수를 혁신적으로 개선할 수 있는 잠재력을 제공한다.

디지털트윈 기술은 Industry 4.0이라는 새로운 패러다임의 핵심 기술로 부상했으며, 이는 제조업 분야에서 시작되어 스마트 시티, 에너지, 운송, 헬스케어 등 다양한 산업으로 빠르게 확대되고 있다. 이러한 기술의 발전은 데이터 수집 및 분석 능력의 비약적 발전과 더불어 클라우드 컴퓨팅, 사물인터넷(IoT), 빅데이터 분석 등의 기술적 진보와 밀접하게 연관되어 있다. 디지털트윈은 여러 시스템과 조직 간의 데이터 통합을 향상시켜, 더욱 정교한 모델링과 예측을 가능하게 함으로써, 운영 효율성을 극대화하고 의사 결정을 개선하며, 궁극적으로 기업의 서비스 혁신을 촉진하는 데 기여한다. 이처럼 디지털트윈은 물리적 세계의 복잡성을 가상 세계에서 보다 정확하게 반영하여, 현실에서의 오류와 비용을 줄이고, 혁신적 결과를 도출할 수 있는 강력한 도구로 자리매김하고 있다.

최근 스마트홈 분야에도 디지털트윈 기술을 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있지만, 대부분 개념 실증 수준에 머무르고 있으며, 실질적인 구현을 통해 검증된 사례는 여전히 드문 상황이다[2].

스마트홈은 가정 내 다양한 기기와 시스템을 네트워크로 연결하고, 첨단 IT 기술을 활용하여 거주자가 더욱 편리하고 안전하게 생활할 수 있도록 다양한 서비스를 제공하는 기술이다. 이러한 스마트홈 시스템은 거주자의 편의를 위해 조명, 냉방, 난방, 엔터테인먼트, 가전제품과 같은 가정 내 장치를 모니터링하고 제어하는 홈 자동화(Home Automation) 서비스를 중심으로 발전해 왔다. 또한, 거주자의 안전을 보장하기 위한 CCTV 영상 감시 시스템이나 경보 시스템과 같은 홈 보안(Home Security) 서비스, 그리고 전기, 가스, 수도, 열에너지 등의 가정 내 자원을 효율적으로 관리하는 홈 에너지 관리 시스템(HEMS: Home Energy Management System) 서비스도 중요한 요소로 포함된다.

스마트홈 기술은 특히 최근 인공지능(AI) 기술의 발전과 결합하여 더욱더 지능적이고 편리한 거주 환경을 제공하며, 에너지 효율을 극대화하고 탄소 배출을 최소화하는 방향으로 진화하고 있다. 그러나 이러한 스마트홈에서의 에너지 관리는 여전히 많은 과제를 안고 있으며, 효율적인 에너지 사용을 위해서는 더욱 정교하고 통합된 관리시스템이 필요하다. 디지털트윈 기술은 이러한 요구를 충족시킬 수 있는 잠재력을 지니고 있으며, 이를 스마트홈 에너지 관리에 적용함으로써 기존 시스템의 한계를 극복하고, 더욱 효과적인 에너지 관리가 가능할 것으로 기대된다.

본 논문에서는 디지털트윈 기술을 스마트홈의 에너지 관리에 활용하여 에너지 효율화를 위한 디지털트윈 기반 홈 에너지 관리 시스템의 프레임워크를 제안한다. 제안된 프레임워크는 스마트홈의 다양한 서비스에 적용할 수 있는 다목적 프레임워크를 제공하는 것을 목표로 하며, 구축 비용을 절감하기 위해 오픈소스 소프트웨어 기반의 기술 스택을

활용하여 구현된다. 구현된 시스템은 실제 사용자가 거주하는 공동주택에 장기간 설치 및 운영함으로써, 시스템의 실행 가능성, 유용성, 확장성을 검증하게 된다.

본 논문이 기여하는 바는 다음과 같다.

- 공동주택의 냉방, 난방, 조명, 전자기기 등 에너지 설비와 환경 및 공간정보, 거주자 정보를 디지털트윈화하여 복합적인 디지털트윈 구성
- 3D 기반의 시각화 도구와 기계학습 기반의 예측 기능을 통합하여 스마트홈 에너지 관리의 방법론을 제시
- 대규모 공동주택에 적용 가능한 홈 에너지 관리 시스템(HEMS)을 위한 효율적인 시스템 구성 제공
- 냉방, 난방, 조명 및 전자기기의 에너지 최적화를 위한 서비스로 제안된 프레임워크의 실질적 검증 수행

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 관련 연구에 대해 논의하고, 3장에서는 제안된 프레임워크의 아키텍처와 구성 요소를 설계한다. 4장에서는 제안된 시스템의 구현에 대해 서술한다. 5장에서는 스마트홈 에너지 관련 서비스의 최적화 사례를 통해 프레임워크를 검증하고, 6장에서 결론 및 향후 연구 방향에 관해 기술한다.

2. 관련 연구

2.1 디지털트윈 구현시 주요 고려사항

디지털트윈을 구현할 때 주요 고려 사항으로 다음 같이 요약할 수 있다[7]. 첫 번째는 효율적인 데이터 통합이다. 즉 센서, 사물인터넷(IoT), 지리정보시스템(GIS) 등 여러 데이터 소스로부터 데이터를 효율적으로 통합하는 것이 필요하다. 이는 데이터 형식이 각각 다르고 여러 시스템과 플랫폼에 분산되어 있기에 통합이 용이하지 않으며 실시간 디지털 모델의 개발을 방해할 수 있다. 두 번째는 데이터의 개인정보 보호 및 보안 이슈이다. 물리적 객

체 및 시스템에 대한 세부 정보를 포함한 민감한 데이터는 잠재적인 데이터 유출과 사이버 공격에 대한 취약성이 포함된다. 수집 및 처리된 디지털트윈 데이터를 보호하려면 강력한 보안 솔루션을 제공하는 것이 중요하다. 세 번째는 디지털트윈 기술의 효율성과 성능이다. 효과적인 모델링과 시뮬레이션을 위해 디지털트윈은 대량의 데이터를 빠르게 처리할 수 있어야 한다. 디지털트윈 기술의 복잡성이 전체 시스템의 효과와 성능에 영향을 미치므로 최적의 성능을 유지할 수 있도록 최적화 과정이 요구된다. 마지막으로 디지털트윈 기술을 널리 확산 가능하도록 하기 위해서는 표준화된 상호운용성을 제공하고 초기 구축 비용과 유지 비용이 저렴해야 한다. 특히 스마트홈과 같이 대규모 디지털트윈 기술의 구현이 필요한 분야에서는 호환성과 원활한 시스템 통합을 보장하려면 명확한 표준과 강력한 상호 운용성이 중요하다.

2.2 디지털트윈 프레임워크

기존의 디지털트윈 프레임워크는 크게 상용 솔루션과 오픈소스 솔루션으로 나눌 수 있다. Siemens, Microsoft, Ansys, Dassault 등과 같은 주요 기업들은 디지털트윈의 구축과 활용을 위한 자체 솔루션을 개발해 왔다. 이러한 솔루션은 최적화된 성능과 효율성 향상 등을 위해 다양한 기술이 개발되고 있지만 폐쇄적인 구조와 상당히 높은 구축 및 운영 비용 때문에 폭넓은 활용 및 보급에 제한적이다 [9, 10, 11, 12]. 한편, 오픈소스 분야에서는 IoTwins2, DTOP, OpenTwins 등이 대표적인 예로 꼽힌다[1, 3, 4, 5, 6].

IoTwins2는 제조업 분야에서 디지털트윈을 제공하기 위한 빅데이터 플랫폼을 제공한다. 이 솔루션은 축구 경기장에서의 운영부터 풍력 터빈의 예측 유지 관리에 이르기까지 다양한 분야의 과제를 해결할 수 있도록 설계되었다. 또한, IoTwins2는 특정 IoT-에지클라우드 인프라 사용 사례에 맞춰 디지털트윈 정의를 위한 포괄적인 서비스를 제공한다.

DTOP는 영국의 DigiTwin 3 프로젝트와 연계된 디지털트윈 운영 플랫폼의 프로토타입으로, 모듈식, 오픈소스, 시스템 독립적 구조를 갖추고 있으며 Flask Python으로 완벽하게 작성되었다. 현재 DTOP는 디지털트윈의 분석 및 시뮬레이션에 주력하고 있으며, 제공된 데이터에 기반해 웹 인터페이스를 통해 사용자가 요청한 작업을 수행할 수 있는 도구 세트를 제공한다.

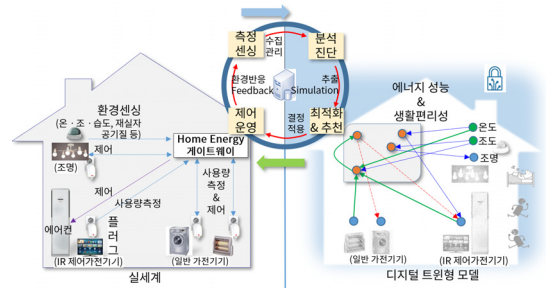
OpenTwins는 복잡한 시스템을 캡슐화하고 개별 엔터티나 하위 시스템의 디지털트윈 모음으로 구성된 고급 디지털트윈의 지속적인 개발 및 통합을 위한 오픈소스 아키텍처와 프레임워크를 제시한다. 이 구성은 디지털트윈 간의 데이터 관계를 설정하여 지식 공유를 가능하게 하고, 정보를 연결해 더 높은 수준의 디지털트윈을 형성할 수 있도록 한다. 또한, OpenTwins는 사용자가 필요에 맞게 디지털트윈을 정의할 수 있는 모듈식 통합 환경을 제공하며, 이는 석유화학 산업의 제조 사례를 통해 검증되었다.

3. 디지털트윈 기반 홈에너지관리시스템의 설계

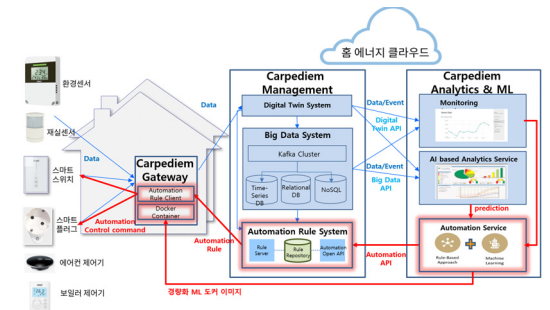
본 장에서는 디지털트윈형 모델링 및 인공지능/빅데이터 기반 분석으로 스마트홈의 자동화와 에너지 최적화 서비스를 통합적으로 제공하는 디지털트윈 기반 홈 에너지관리시스템(카르페디엠, CARPE-DIEM: Context-Aware, Realtime & Proactive Energy optimization using DIgital-twin Envisioned Management)을 제안한다. 제안된 시스템의 개념적 모델은 (그림 1)과 같다. 즉, 실세계의 가정 에너지 사용과 관련된 객체를 가상 세계의 디지털 모델(디지털트윈)로 복제하고, 실시간으로 상호 동기화하면서 ① 측정/센싱, ② 분석/진단, ③ 최적화/추천, ④ 제어/운영 과정이 순환적으로 이루어지도록 한다.

디지털트윈 기반 홈 에너지 관리 시스템(CARPE-DIEM)의 시스템 구조는 크게 세 가지 주요 부분으

로 나뉘어져 있으며, 이들 각각은 고유한 기능과 역할을 수행한다(그림 2). 첫 번째로, 공동주택 내 각 세대에 설치되어 실세계 상태를 실시간으로 수집하는 장치와 이를 처리하는 홈 게이트웨이로 구성된 '실세계 계층'이 있다. 이 계층은 각 세대의 물리적 환경 데이터를 감지하고, 이러한 데이터를 시스템으로 전송하는 역할을 담당한다. 실세계 계층의 구성 요소들은 공동주택 내에서 발생하는 다양한 데이터, 예를 들어 온도, 습도, 조명 상태, 전자기기 사용 상태 등을 지속해서 모니터링하며, 이를 기반으로 효율적인 에너지 관리가 가능하도록 지원한다.



(그림 1) CARPE-DIEM 개념적 모델



(그림 2) CARPE-DIEM 시스템 구조

두 번째로, 이렇게 수집된 데이터를 통합하여 디지털트윈을 구성하고, 나아가 대규모 데이터 처리와 저장을 담당하는 '데이터 관리 시스템'으로 이루어진 '데이터 계층'이 있습니다. 데이터 관리 시스템은 각 세대에서 수집된 다양한 데이터를 중앙 집중식으로 관리하며, 이를 바탕으로 실제 세계를 반영

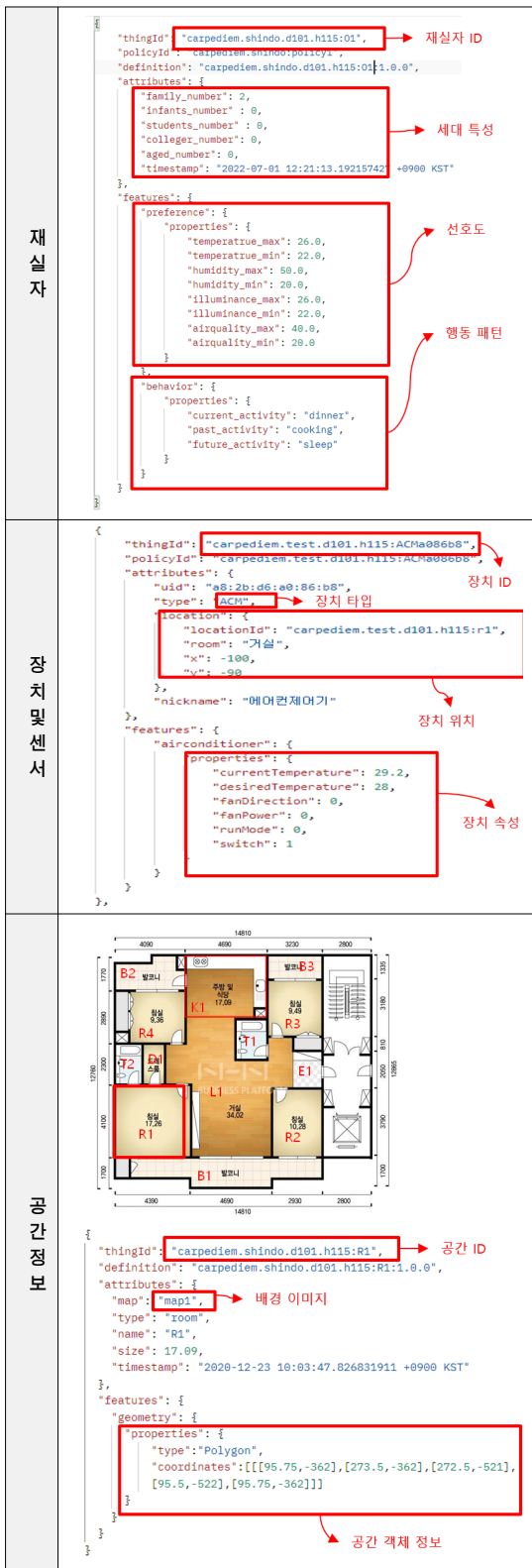
하는 디지털트윈 모델을 구축한다. 디지털트윈 모델은 실세계의 상태를 가상으로 재현함으로써, 더욱 정밀한 분석과 예측을 가능하게 한다. 또한, 데이터 관리 시스템은 빅데이터 처리를 통해 각종 데이터의 저장, 분류, 분석을 수행하며, 이를 통해 얻은 통찰을 바탕으로 시스템의 전반적인 성능을 향상시킨다.

마지막으로, ‘서비스 계층’에는 디지털트윈 데이터와 빅데이터를 기반으로 모니터링 서비스와 인공지능 기반 분석 서비스를 제공하는 ‘Analytics & ML 시스템’이 있다. 이 시스템은 재실자의 선호도 및 행동 패턴, 그리고 미래 상태에 대한 예측 데이터를 결합하여, 에너지 효율성을 극대화할 수 있는 자동제어 서비스를 제공한다. ‘Analytics & ML 시스템’은 데이터 계층에서 제공하는 Open API를 활용하여 디지털트윈 시스템, 빅데이터 시스템, 그리고 자동화 규칙 서버 시스템과 긴밀하게 연동되며, 이를 통해 다양한 분석 및 예측 작업을 수행한다.

전체 시스템의 부하를 효율적으로 분산시키기 위해, 홈 게이트웨이는 각 세대에 위치하고 ‘데이터 관리 시스템’과 ‘Analytics & ML 시스템’은 홈 에너지 클라우드로 구성된다. 클라우드 구조를 통해, 어디서든, 어떤 기기로부터 이용 가능한 데이터 접근성을 제공하고 높은 수준의 중앙화된 데이터 보안, 다수의 클라우드 컴퓨팅 자원을 이용한 높은 성능 및 가용성을 제공한다. 세대별로 맞춤형 자동화 서비스를 제공하기 위해, 자동제어 규칙과 경량화된 기계학습 학습 모델은 각 세대의 게이트웨이에 배치된다. 이를 통해, 냉방, 난방, 조명, 전자기기 등 다양한 장치에 실시간으로 로컬 제어 명령이 전달되며, 통신 지연 없이 즉각적인 실행이 가능하도록 한다. 세대 거주자는 보다 높은 수준의 편의성과 에너지 효율성을 경험할 수 있다.

본 시스템에서 실세계 객체에 대한 디지털트윈 모델링 방법으로 데이터 의존적인 모델(Data-Dependent Model) 방식을 사용하며, 디지털트윈 모델이 대상으로 하는 가정 내 실세계 객체와 정보 수집 방법에 대한 설명은 다음과 같다(그림 3).

- 냉난방 장치: 난방을 위한 가스보일러와 냉방을 위한 에어컨이 대상이며, 스마트 보일러조절기와 IR 제어기를 통해 데이터 수집 및 제어 제공
- 조명 장치: 각 방과 거실의 조명 장치로서, on/off 및 밝기 조절(디밍)을 지원하는 IoT 조명 스위치나 릴레이로 데이터 수집 및 제어 제공
- 가전 기기: TV, 세탁기/건조기, 냉장고 등 생활 가전으로서 가전기기에 연결되는 IoT 플러그를 통해 전력 사용량을 측정하고 IR 제어기를 통해 제어 제공
- 환경 센서: 온도/습도/조도/공기질 등 환경 정보와 재실자의 재실 정보를 수집하는 IoT 장치
- 전기/가스/수도 계량기: 가정 전체의 에너지(전기/가스/수도 등) 사용량을 측정하는 미터링 장치로서, 계량서버와 연동을 통해 데이터 수집 제공
- 홈게이트웨이: 지그비(Zigbee)와 와이파이(WiFi) 방식으로 연결된 가정 내 IoT 장치들에서 정보를 수집 및 통합하고 서버에 전달 제공
- 거주자(Occupier): 가정에서 생활하는 에너지 소비자 사용자의 세대(가족 구성) 특성 정보 및 선호도, 상태정보(외출, 재실 등), AI 기반 예측 정보 제공
- 공간: 가정 내 거주자가 생활하는 방/거실/주방/화장실 등의 개별 공간을 표현하는 BIM (Building Information Model) 정보로 2D와 3D로 제공

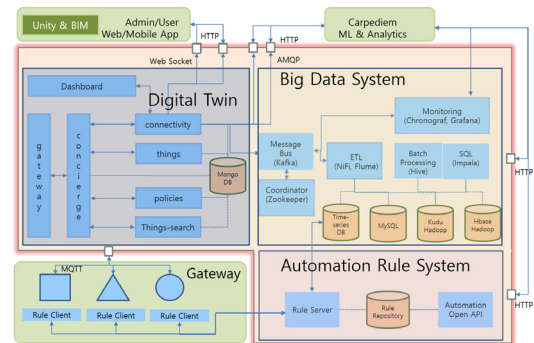


(그림 3) 디지털트윈 모델링

디지털트윈 모델의 개별 정보는 실시간 센서 데이터로부터 측정 및 수집되는 데이터와 여러 정보를 기반으로 기계학습을 통해 추론되는 예측 데이터로 구성된다.

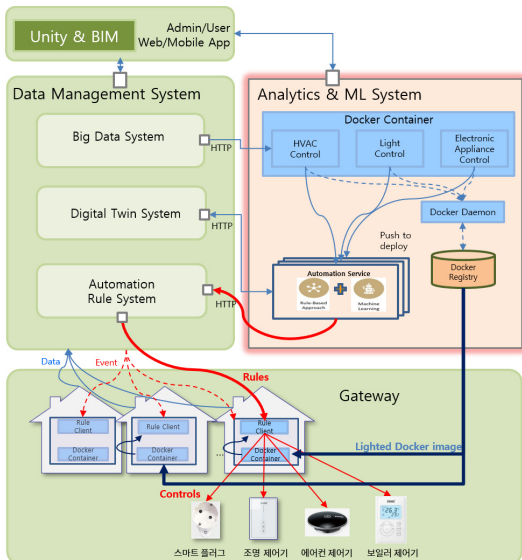
디지털트윈 모델 간 통합은 계층적인 방식 (Hierarchical Method)으로 세대별로 구성되며, 각 세대에는 여러 공간으로 나뉘고, 공간별로 장치가 대응되도록 한다.

제안된 카르페디엠은 초기 구축 비용과 운영 비용을 최소화하기 위하여 오픈소스 SW의 기술 스택을 사용하여 서버 시스템을 구성한다. (그림 4)의 CARPE-DIEM 데이터 관리 시스템의 세부 구성도를 보면, 디지털트윈은 Eclipse Ditto를 기반으로 하고, 빅데이터시스템은 Kafka의 메시지 버스와 Nifi/Flume의 ETL 도구, InfluxDB, MariaDB의 시계열/관계형 데이터베이스와 Kudu, HBase의 NoSQL로 구성한다. Eclipse Ditto는 IoT 플랫폼으로서 AMQP, MQTT, HTTP, Kafka 등 다양한 프로토콜의 연동을 지원하여 다양한 장치의 추가 및 삭제를 원활하게 제공한다. 자동화 제어를 위한 룰 시스템은 JSONLogic를 기반으로 사용자 정의 함수를 추가하여 다양한 규칙 기반 자동화를 제공할 수 있도록 한다. 자동화 규칙 시스템은 규칙의 생성 및 수정/삭제, 배포, 활성화/비활성화를 위한 REST API를 제공한다.

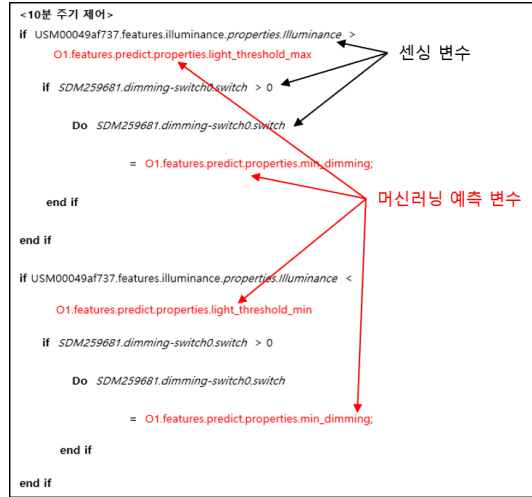


(그림 4) CARPE-DIEM 데이터 관리 시스템

(그림 5)는 ‘Analytics & ML 시스템’의 세부 구성도이다. 데이터 계층에서 제공하는 Open API를 활용하여 각 세대의 에너지 사용 데이터 및 환경 데이터를 기계학습 기반으로 예측 및 시뮬레이션을 수행하고, 모니터링과 분석 및 자동화 서비스를 생성하는 역할을 담당한다. 기계학습 기반의 자동화 서비스 생성 과정은 크게 두 단계로 구성되는데, 먼저 기계학습을 통해 도출된 정보를 디지털트윈의 예측 및 시뮬레이션 변수로 새로 생성하는 단계와 예측 및 시뮬레이션 변수와 실시간 데이터 변수를 조합하여 자동화 제어 서비스를 생성하는 단계로 구성된다. 기계학습 기반의 예측 및 시뮬레이션 변수를 생성하고 갱신하는 모듈은 도커 이미지를 만들어 도커 데몬을 통해 레지스트리에 저장하고, 각 세대의 게이트웨이에 있는 도커 컨테이너에 자동 배포된다. 자동제어 서비스의 생성은 자동화 규칙 시스템의 REST API를 이용하여 생성하고 각 세대의 게이트웨이에 있는 룰 클라이언트(Rule Client)에 배포되어 로컬에서 자동 동작하도록 한다.



(그림 5) CARPE-DIEM Analytics & ML 시스템



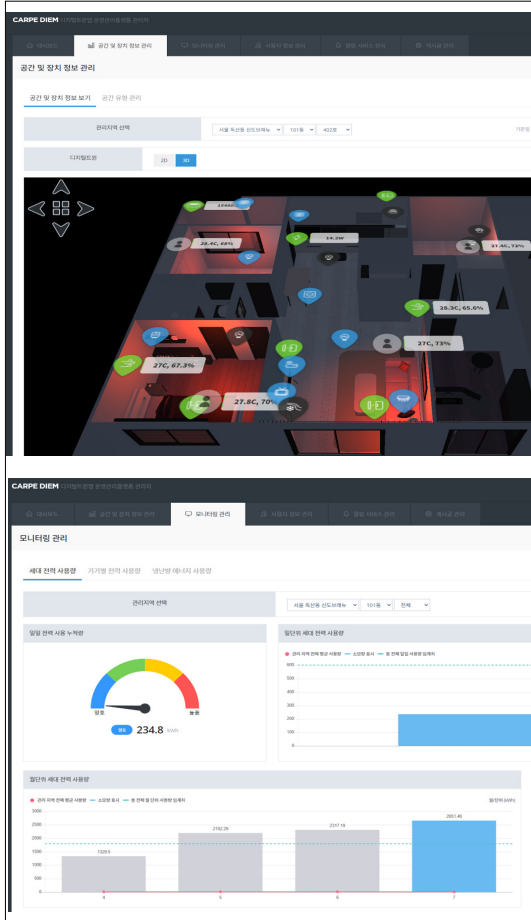
(그림 6) 기계학습 기반 자동화 서비스 예

(그림 6)은 조명 제어를 위해 기계학습 기반으로 학습을 통해 디지털트윈 시스템에 저장된 재실자(Occupier) 정보에 조명 선호도에 대한 예측 변수를 생성하고, 해당 예측 변수와 조명 장치(SDM), 환경센서 장치(USM)의 센싱변수를 조합하여 조명 자동제어를 수행하는 규칙의 예이다. 이때, 기계학습 모듈에서 모든 세대에 공통된 예측변수의 경우는 클라우드의 도커 컨테이너에서 동작하고, 세대별 맞춤이 필요한 예측변수는 경량화된 도커 이미지 모듈로 각 게이트웨이에 배포되어 로컬에서 수행되도록 한다.

4. 디지털트윈 기반 홈에너지관리시스템의 구현

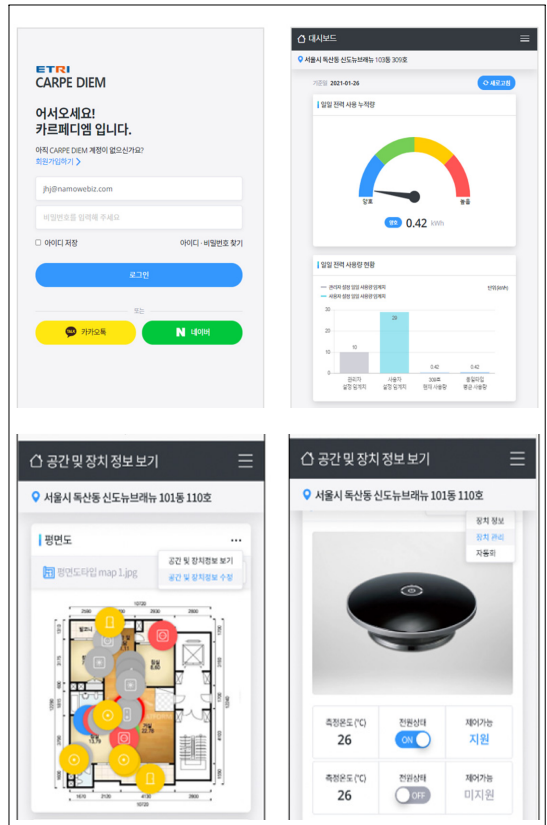
본 장에서는 공동주택 대상으로 스마트홈의 자동화와 냉방/난방/조명/전자기기의 에너지 최적화 서비스를 통합적으로 제공하는 디지털트윈 기반 홈에너지관리시스템을 구현한다. 구현된 시스템은 아파트 전체를 관리 운영하는 관리자 앱과 세대별 서비스를 제공하는 사용자 앱으로 구성된다(그림 7, 8). 관리자는 세대별 장치 및 센서/공간/재실자 등 실세계에 대한 3D 기반의 디지털트윈을 구성하고 실시

간 모니터링 및 세대별 맞춤형 자동화 서비스를 제공한다.

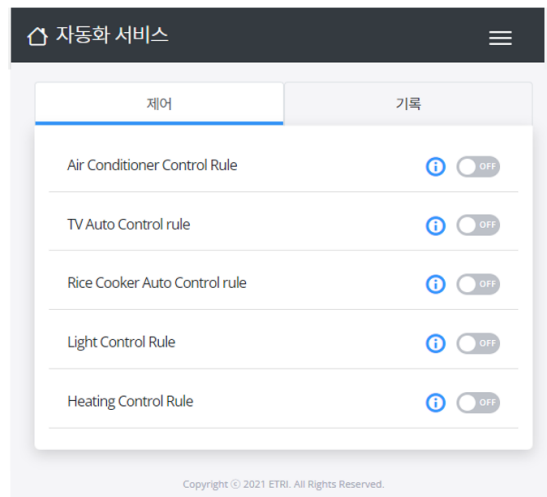


(그림 7) 모니터링 서비스 관리자 앱 화면(51세대)

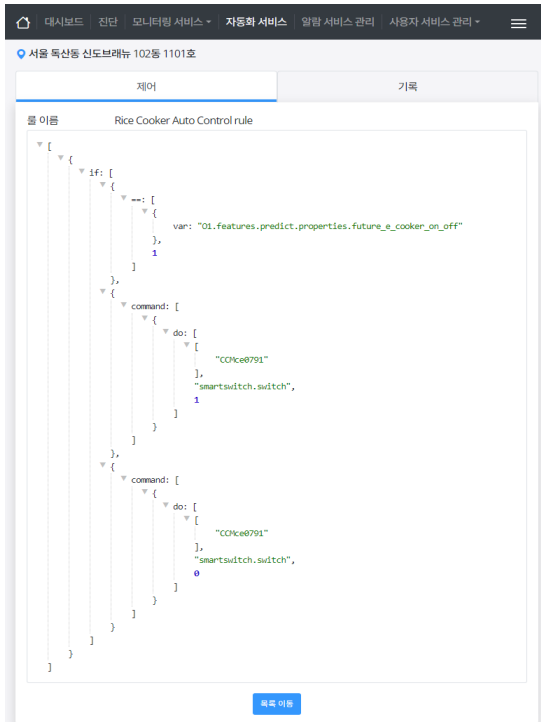
사용자 앱은 각 세대에 제공되는 맞춤형 자동 제어 서비스의 리스트를 보여주고 자동화 서비스를 선택적으로 활성화 또는 비활성화할 수 있으며(그림 9), 특정 서비스의 세부적인 동작 규칙을 확인할 수 있다(그림 10).



(그림 8) 세대별 사용자 앱 화면



(그림 9) 세대별 자동화 서비스 리스트



(그림 10) 세대별 자동화 서비스의 JSonLogic 상세 규칙 예

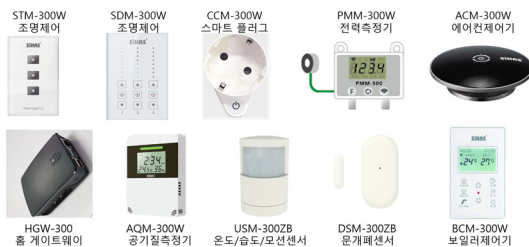
5.1 난방 제어 최적화 서비스

AI 기반 난방 자동제어 서비스는 세대별 아파트에 설치된 보일러제어기(BCM)를 통해 수집된 5가지 데이터(실내온도, 보일러 출수 온도, 난방 설정 온도, 보일러 가동 시간, 보일러 가스 사용량)를 기반으로 재실자의 선호 온도, 30분 후의 실내 온도, 보일러 출수 온도, 보일러 가스 사용량을 예측하는 기계학습 모듈과 규칙 기반 자동제어 모듈을 통합하여 구성된다[8]. 그림 12는 난방 자동제어 규칙의 예이며, 재실자 선호 온도(o1.predict.temperature), 보일러 바닥 온도 최대값(boiler.predict.temperaturefloor_max) 등 밑줄로 되어 있는 변수는 기계학습에 의해 도출되는 예측 변수이다. 보일러의 가스 소비량을 최소화하는 동시에 향후 30분 동안 실내 환경을 재실자가 선호하는 최소/최대 범위 안에서 선호 온도로 유지하는 최적 제어 전략을 사용한다. 즉, 보일러의 바닥 온도에 집중하여 바닥 구조체에 저장된 열을 활용하여 보일러에 불필요한 에너지 사용을 방지하고 열적으로 쾌적한 실내 환경을 유지한다.

5. 디지털트윈 기반 홈에너지관리시스템

검증 : 사용사례

본 논문에서 구현된 디지털트윈 기반 홈에너지관리시스템은 서울 금천구 독산동 A공동주택의 51세대(면적:96㎡, 102㎡)에 세대별로 AMI 전기/가스 전력량계와 40~60개의 IoT 센서 및 장치(그림 11)를 설치하고 약 26개월 (2021.11~2023.12) 동안 실제 시범 운영하면서 시스템의 기능성, 유용성, 확장성을 검증하였다.



(그림 11) 세대별 설치된 IoT 센서 및 장치

```

if boiler.currentTemperatureAir < o1.predict.temperature then
  if boiler.currentTemperatureFloor < boiler.
    predict.temperaturefloor_max then
    boiler.desiredTemperatureAir = o1.predict.temperature + 1
  else
    if boiler.currentTemperatureAir ≤
      o1.predict.temperature_max then
      boiler.desiredTemperatureAir = o1.predict.temperature + 1
    else
      boiler.desiredTemperatureAir = o1.predict.temperature
    endif
  endif
else
  if boiler.currentTemperatureFloor ≤
    boiler.predict.temperaturefloor_min then
    if boiler.currentTemperatureAir ≤
      o1.predict.temperature_max then
      boiler.desiredTemperatureAir = o1.predict.temperature + 1
    else
      boiler.desiredTemperatureAir = o1.predict.temperature - 1
    endif
  else
    boiler.desiredTemperatureAir = o1.predict.temperature - 1
  endif
endif

```

(그림 12) 난방 자동제어 알고리즘

위의 알고리즘은 공인 시험기관인 KBeT (Korea Institute of Building Energy Technology) 입회 하에 4일 동안(2023.1.15~2023.1.18일) 4개 세대에 직접 자동제어 서비스를 적용하여 그 효과를 확인하였다. 시험 결과에 의하면 기존 수동제어에 비해 보일러의 가스 소비량을 13.9~46.4% 줄일 수 있었다<표 1>.

<표 1> 난방 자동제어 적용 결과

세대 번호(면적)	베이스라인 [Nm ³]	실시간제어 [Nm ³]	절감율 [%]
H1(102m ²)	148.7	128.0	13.9
H2(96m ²)	97.9	58.1	40.7
H3(102m ²)	73.5	59.3	19.3
H4(102m ²)	149.1	79.9	46.4

5.2 난방 제어 최적화 서비스

난방 운전 최적화 서비스는 재실자의 쾌활지수를 고려하고 주택용 시간대별 요금제를 가정하여 최대 부하 시간대에 전력 사용을 최소화하면서 미래의 첨두전력을 예측하여 피크 시프트 제어를 하도록 한다. 난방 운전 최적화 서비스는 각 세대에 설치된 에어컨제어기(ACM)와 공기질측정기(AQM), 전력측정기(PMM), 스마트플러그(CCM), 재실센서(USM) 등에서 수집된 데이터로부터 재실자의 선호 온도 및 습도, 1시간 이후의 희망온도, 1시간 이후의 실내 온도를 예측하는 기계학습 모듈과 규칙 기반 자동제어 모듈을 통합하여 구성된다. 그림 14의 알고리즘에서 time_section은 특정 시간에 해당하는 시간대별 요금제 구간(경부하/중부하/최대부하)을 알려주는 함수이고, 재실자의 선호 온도(o1.predict.desiredTemperature), 선호 습도(o1.predict.humidity), 예측 온도(o1.predict.futureTemperature) 등 밀출로 되어 있는 변수는 기계학습으로 도출된 예측 변수이다(그림 13).

```
// 1. 재실자 쾌활지수 유지
if env.outdoorTemperature - aircon.currentTemperature <= 5
  and o1.predict.humidity < env.humidity then
    aircon.switch = on
else
  aircon.switch = off
endif

// 2. 1시간 이후의 온도와 최대부하구간 예측하여 선제적 제어
if o1.predict.desiredTemperature < o1.predict.futureTemperature
  and time_section(now+6) == high then
    aircon.switch = on
else
  aircon.switch = off
endif

// 3. 요금제 최대부하 구간의 설정 온도 제어
if time_section(now) == high then
  aircon.desiredTemperature += 1
endif

// 4. 현재 온도 기반 제어
if aircon.desiredTemperature < aircon.currentTemperature then
  aircon.switch = on
else
  aircon.switch = off
endif
```

(그림 13) 난방 자동제어 알고리즘

(그림 14)는 앞의 알고리즘을 JJsonLogic 기반의 규칙으로 생성하여 세대별 앱의 자동화 서비스에 등록된 예이다.



(그림 14) 난방 자동제어 JJsonLogic 규칙 예

본 서비스의 시험 대상 세대는 4세대이며, 공인 시험기관인 KTR(Korea Testing & Research Institute) 입회하여 시험 시간(2022.8.5~2022.8.12) 동안 냉방 자동제어 규칙에 따라 시험한 결과, 전력소비 절감률이 평균 24.627%임을 확인하였다. 베이스라인은 시험 기간 중 12시~14시, 자동제어는 15시~17시 설정하여 비교 수행하였다 <표 2>.

<표 2> 냉방 자동제어 적용 결과

세대 번호	베이스라인 전력사용 요금(원)	실시간 제어 전력사용 요금(원)	절감률 (%)
H1	74,295원	55,699원	25.030
H2	148,108원	114,194원	22.898
H3	66,163원	56,007원	15.350
H4	211,270원	150,840원	28.603
Total	499,836원	376,740원	24.627

5.3 조명 제어 최적화 서비스

주거 건물에서 조명의 제어를 통해, 작업 면의 조도를 적절한 수준으로 유지하며 조명 에너지를 절감할 수 있다. 본 연구에서는 세대별로 측정된 최소한의 데이터(USM 조도센서/모션센서, SDM 디밍 스위치)를 기반으로, 재실자의 선호 조도를 고려한 실시간 조명 디밍 제어를 제공할 수 있다. 본 서비스의 대상 세대는 6세대이며, 거실에서 측정된 수직면 조도 데이터와 거실 조명의 디밍률을 1년(2022.1.1~2022.12.31) 동안 수집하고, 자연 채광이 유입되는 시간만을 고려하기 위해 9시~16시 사이에 1분 단위로 측정된 데이터를 사용한다. 디밍 가능한 LED 등(150W)은 0% (off를 의미함) 100%까지 10% 단위로 제어가 가능하다. 각 세대 재실자의 불확실성을 반영하기 위해서 재실자의 선호 조도(최대/최소 범위)를, 기계학습을 통해 계속해서 갱신하면서 다음의 알고리즘으로 자동제어를 수행한다. 현재 조도가 선호 조도 범위에 있거나, 선호 조도보다 낮은 경우에는 현재 디밍율을 유지하도록 제어를 수행한다. 현재 조도가 선호 조도 범위를 초과하는 경우, 10~100% 사이의 디밍율을 탐

색하며, 선호 조도를 만족하며, 조명 에너지를 최소화하도록 제어한다.

```

if light.Dimming > 0 and
  env.Illuminance > o1.predict.illuminace_max then
  for dimming = light.Dimming to 0 do
    total_illuminance = env.Illuminance -
      light_illuminance(light.Dimming) + light_illuminance(dimming)
  if total_illuminance >= o1.predict.illuminace_min then
    light.Dimming = dimming
  endif
  dimming = dimming - 10
endfor
endif

```

(그림 15) 조명 자동제어 알고리즘

위의 알고리즘 기반의 실시간 조명제어 서비스는 공인 시험기관인 KBeT(Korea Institute of Building Energy Technology) 입회하여 적용한 결과, 6세대에 대해 약 26일 동안(2023.03.14~2023.04.09) 09:00~16:00 시간 중 약 21.1% 조명 에너지를 절감할 수 있음을 확인했다<표 3>. 베이스라인은 재실자가 조명을 켤 때의 디밍율을 조명을 끄기 전까지 동일한 디밍율을 유지함을 가정하여 조명 전력을 계산하였다.

<표 3> 조명 자동제어 적용 결과

세대 번호 (조명 사용시간)	베이스라인 [Wh]	실시간 제어 [Wh]	절감률 (%)
H1 (50 hours)	5,781	4,547	21.3
H2 (19 hours)	743	598	19.5
H3 (12 hours)	968	768	20.7
H4 (3 hours)	153	153	0
H5 (3 hours)	227	137	39.6
H6 (23 hours)	2,780	2,233	19.7
Total	10,680	8,436	21.1

6. 결론

본 논문은 디지털트윈 기술을 스마트홈 에너지 관리에 적용하여 에너지 효율화를 목표로 하는 프레임워크를 제안했다. 디지털트윈은 스마트홈 내 다양한 에너지 설비와 환경 정보를 디지털로 복제

하여 관리하고, 3D 시각화와 기계학습 기반 예측 기능을 통합하여 에너지 사용을 최적화할 수 있도록 설계되었다. 이 프레임워크는 냉방, 난방, 조명, 전자기기 등의 에너지 효율을 향상시키기 위해 공동주택에 적용되며, 장기간의 실제 운영을 통해 시스템의 실행 가능성과 유용성을 검증했다. 또한 오픈소스 소프트웨어를 활용하여 구축 비용을 절감하는 데 중점을 두었다.

본 논문은 여러 기여점을 제공한다. 첫째, 공동주택의 다양한 정보를 디지털트윈으로 구현하여 복합적인 에너지 관리가 가능하도록 한다. 둘째, 3D 기반 시각화 도구와 기계학습을 결합한 새로운 에너지 관리 방법론을 제시한다. 셋째, 대규모 공동주택에 적합한 효율적인 홈 에너지 관리 시스템(HEMS)의 구성 방안을 제안한다. 마지막으로, 냉방, 난방, 조명 등의 에너지를 최적화하는 서비스를 실제로 검증한다.

결론적으로, 이 논문은 디지털트윈 기술을 통해 스마트홈의 에너지 관리 문제를 해결하고, 향후 더 넓은 적용 가능성을 보여준다.

향후 연구로는 본 논문에서 제안된 디지털트윈 기반 에너지관리시스템을 공장 에너지관리시스템에 적용 가능하도록 확장하고 검증하고자 한다.

Acknowledgment

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20192010107290).

참고문헌

[1] A. Borghesi, G. Di Modica, P. Bellavista, V. Gowtham, A. Willner, D. Nehls, et al., "Iotwins: Design and implementation of a platform for the management of digital twins in industrial scenarios", 2021 IEEE/ACM 21st International Symposium on Cluster Cloud and Internet

Computing (CCGrid), pp. 625-633, 2021.

- [2] Alireza Asvadi(B), Andrei Mitrakov, Christophe Lohr and Panagiotis Papadaki, "Digital Twin Driven Smart Home:A Feasibility Study", ICOST 2022: Participative Urban Health and Healthy Aging in the Age of AI, pp.18 -29, June 2022.
- [3] Bonney, M.S., de Angelis, M., Wagg, D., Dal Borgo, M., "Digital twin operational platform for connectivity and accessibility using flask python", International ACM/IEEE Conference on Model-Driven Engineering Languages and Systems(MODELS), pp. 239 -243, 2021.
- [4] Christian Dalheim Øien1, Håkon Dahl1 and Sebastian Dransfeld, "A Digital Twin implementation for manufacturing based on open-source software and standard control systems", APMS 2021: Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems, pp. 284 -291, 2021.
- [5] J. Robles, C. Martín, M. Díaz, "Open twins: An open-source framework for the development of next-gen compositional digital twins", Computers in Industry 152, 2023.
- [6] Kamath, V., Morgan, J., Ali, M.I., "Industrial IoT and Digital Twins for a Smart Factory : An open source toolkit for application design and benchmarking", Global Internet of Things Summit (GIoTS). pp. 1 -6., 2020.
- [7] Mariana Segovia, Joaquin Garcia-Alfaro, "Design, modeling and implementation of digital twins". Sensors vol. 22, 2022.
- [8] Seongkwon Cho 1, Chungo Lee 2, Sangkeum Lee 2, Jin-Hong Kim 1, Yoonmee Doh 2, Cheol-Soo Park 1, "Integrated control of radiant floor heating system in residential

buildings”, Proceedings of Building Simulation 2023: 18th Conference of IBPSA, 2023.

[9] <https://www.sw.siemens.com/ko-KR/technology/digital-twin/>

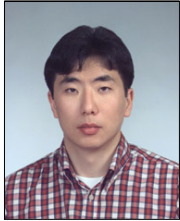
[10] <https://www.ansys.com/ko-kr>

[11] <https://azure.microsoft.com/ko-kr/products/digital-twins>

[12] <https://www.3ds.com/>

저자소개

◆ 이충호



- 2003년 인하대학교 컴퓨터공학과 공학박사
- 2003년~2004년 인하대학교 연구교수
- 2004년~ 한국전자통신연구원 책임연구원
- 관심분야: Big Data, Digital Twins, Energy Efficiency Optimization

◆ 도윤미



- U of Florida 컴퓨터공학과 공학박사
- 2000년~2003년 애리조나 State University 연구교수
- 2004년~ 한국전자통신연구원 책임연구원
- 관심분야: 에너지 AIoT & xEMS, 에너지 최적화 시스템

◆ 허태욱



- 2015년 충남대학교 컴퓨터공학과 공학박사
- 2001년~ 한국전자통신연구원 책임연구원, 실장
- 2024년~ 과학기술연합대학원대학교 ETRI 스쿨 인공지능 부교수
- 관심분야: 에너지 ICT, 환경 ICT, 에너지 최적화 기술