

하이퍼튜브 핵심설비 대상 디지털 트윈 플랫폼 설계

이승주¹, 최현준², 문건혁³, 김영석^{2*}

¹한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회, ²한국건설기술연구원 북방인프라특화팀, ³(주)유아이티

Design of Digital Twin Platform for Hypertube Core Facilities

Seungjoo Lee¹, Hyun-Jun Choi², Geon-Hyeok Moon³, YoungSeok Kim^{2*}

¹Korea Peninsula Infrastructure Special Committee, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Northern Infrastructure Specialized Team, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

³UIT Inc

요약 플랜트 시설의 건전성을 예지하고 진단하기 위한 디지털 트윈 기술의 활용은 매우 중요하다. 본 논문에서는 플랜트 시설의 디지털 트윈 구현을 목표로, 미래형 교통 시스템인 하이퍼튜브의 핵심설비인 진공펌프를 대상으로 디지털 트윈 플랫폼을 설계하고 구축하였다. 진공펌프는 하이퍼튜브 시스템의 연속적인 운영을 보장하는 데 필수적이며, 그 고장이나 성능 저하는 시스템의 작동 중단을 초래할 수 있기 때문에 디지털 트윈을 활용한 모니터링과 예지 보수는 필수적이다. 새롭게 구축한 디지털 트윈 플랫폼에서는 방대한 SCADA 데이터를 VBA로 전처리하여 메모리 사용량을 28.17% 줄였다. 또한, LSTM, SSM, FPM 등의 머신러닝 모듈을 활용해 시계열 데이터를 분석하여 RMSE는 0.1001, MAPE는 0.1120의 평가 점수를 얻었다. 현장의 실시간 데이터와 시뮬레이션 데이터를 RMS, Kurtosis 값과 별도의 위험도 복합 지표를 활용해 통합 분석함으로써, 진공펌프와 같은 핵심 설비의 문제를 신속하게 진단하여 실시간 모니터링 및 예지보전이 가능해져 디지털 트윈 플랫폼의 유효성과 효율성 및 사용자의 장치관리 편리성을 개선할 것으로 기대된다.

Abstract The use of digital twin technology to anticipate and diagnose the integrity of plant facilities is pivotal. This paper concentrates on implementing digital twins for plant facilities and crafting a digital twin platform tailored to the core equipment of the future transportation system, particularly the vacuum pump of a hypertube. The vacuum pump is indispensable for the uninterrupted operation of a hypertube, underscoring the necessity of monitoring and predictive maintenance utilizing digital twins to avert system downtime stemming from pump failure or performance degradation. In the newly established digital twin platform, a 28.17% reduction in memory usage was achieved by preprocessing extensive SCADA data using VBA. Furthermore, the application of machine learning modules, such as LSTM, SSM, and FPM, for analyzing time-series data yielded an RMSE of 0.1001 and MAPE of 0.1120. Integrated analysis of real-time field data and simulation data, combined with risk composite indicators, such as the RMS and Kurtosis values, enabled the rapid diagnosis of core equipment issues, such as the vacuum pump, enhancing the real-time monitoring and predictive maintenance effectiveness, efficiency, and user convenience for digital twin platform users.

Keywords : Digital Twin, Fault Diagnosis, Monitoring, Hypertube, Vacuum Pump

본 논문은 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) '오일 생산플랜트의 패키지화 설계 및 통합실증 기술개발(RS-2022-00143644)' 사업의 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : YoungSeok Kim(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

email: kimys@kict.re.kr

Received March 19, 2024

Revised April 29, 2024

Accepted June 7, 2024

Published June 30, 2024

1. 서론

디지털 트윈(digital twin) 용어는 처음으로 미시간 대학교(university of michigan)의 마이클 그리브스 교수와 연구팀에 의해 2001년 'Conceptual Ideal for PLM' 제안을 통해 유사한 개념으로 소개되었다[1]. 우주항공 분야에서 이 용어는 개념적 기반으로 채택되었으며, NASA는 기술 로드맵에서 VDFL(Virtual Digital Fleet Leader)와 같은 용어로 디지털 팀은 2011년에 PLM(Product Lifecycle Management) 개념을 확장하여 'Virtually Perfect : Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management'를 발표하면서 디지털 트윈이라는 용어가 널리 사용되기 시작했다. 이후, IoT(Internet of Thing)의 출현과 컴퓨팅 파워의 증가, 더불어 최근 인공지능 및 XR(eXtended Reality) 기술과의 융합을 통해 디지털 트윈 기술의 활용 사례가 증가하고 있다[2]. 디지털 트윈은 초기에 제조 분야에서 물리적 객체를 디지털로 복제해 제조 공정의 효율을 높이는 데 집중했으나, 이제는 제조업을 넘어 다양한 산업과 사회 문제를 해결하는 데 사용되며, 단순한 복제를 넘어 가상세계(virtual world)와 물리적세계(physical world)가 밀접하게 연결되어 상호 작용하는 방식으로 발전하고 있다.

국내의 경우, 2020년 7월, 정부가 발표한 '한국판 뉴딜 종합계획'에서 디지털 트윈을 10대 대표과제로 선정함으로써, 자율주행차, 드론 등 신산업 기반 조성 및 국토와 시설 관리를 위해 국가 사회기반시설(SOC: Social Overhead Capital, 이하 SOC)에서 디지털 트윈 기술의 본격적인 도입과 활용을 추진하기 시작했다[3]. 이 추세는 2021년 7월 발표된 '한국판 뉴딜 2.0'에서도 이어져, '디지털 초혁신(Hyper Innovation) 프로젝트' 내에 디지털 트윈을 주요 과제로 포함시켰다[4]. 2023년 4월, 디지털플랫폼정부위원회는 '디지털플랫폼정부 실현계획'을 발표하며, '디지털 트윈을 통한 AI·데이터 산업의 퀀텀 점프'를 중점과제로 설정했다. 이 계획은 초연결 디지털 트윈 구축, '디지털 트윈 코리아' 추진, 디지털 트윈 기반의 인허가 사전 진단 서비스 제공 등을 통해 디지털 플랫폼정부를 구현하겠다는 목표를 포함한다[5]. 더 나아가 2023년 6월, 국토교통부는 '제7차 국가공간 정보정책 기본계획'을 발표, '모든 데이터가 연결된 디지털 트윈 Korea' 실현을 비전으로 설정하고, 데이터 생산, 활용 및 유통, 인재양성, 기술개발, 정책기반 조성을 포함한 4대 전략을 제시했다[6]. 이렇게 디지털 트윈 기술은

빠르게 성장하고 있으며, 범부처 차원에서의 신속한 대응이 이루어지고 있음을 보여준다.

디지털 트윈과 관련하여 수행된 선행연구는 카메라 센서와 레이더 센서를 장착한 자동차와 유사한 도로 환경을 ML-Unity 디지털 트윈에서 구현하고 DQN(Deep Q-Network) 알고리즘을 활용하여 자율주행 차량의 속도와 조향 각도를 조절하는 방안을 제안하는 연구[7], Unity3D 엔진을 활용해 스마트 시티 구축을 위한 디지털 트윈 플랫폼 연구[8], 산업용 모터 구동 시스템의 건전성 관리 및 고장예지 기술을 위해 디지털 트윈 기술을 적용한 모니터링 시스템 제안 연구[9] 등이 있다. 건축, 제조, 도시 계획 등 여러 분야에 걸쳐 다양한 디지털 트윈 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 대부분의 연구는 디지털 트윈 기술의 적용 가능성을 탐색하며 실시간 데이터 분석 및 예측 모델링에 집중하고 있다. 예지·진단과 같은 시뮬레이션 관련 연구는 아직 초기단계라고 판단된다.

본 논문에서는 플랜트 시설에 대한 건전성 예지·진단을 하기 위한 디지털 트윈 구축을 목표로, 하이퍼튜브의 핵심 구성 설비인 진공 펌프를 대상으로 디지털 트윈 플랫폼을 설계하였다. 하이퍼튜브 시스템은 2013년 테슬라 모터스와 스페이스X의 창업자인 엘런 머스크가 발간한 'Hyperloop Alpha' 백서[10]를 통해 처음 소개된 후 국제적으로 큰 관심을 받았다. 이 시스템은 3가지 주요 핵심설비인 팻(pod), 튜브(tube), 그리고 진공 펌프(vacuum pump)로 구성되어 있다. 매우 낮은 기압 상태에서 팻이 튜브를 통해 고속으로 이동하는 원리로 동작하며, 이 과정에서 핵심설비인 진공 펌프는 하이퍼튜브 시스템의 연속적인 운영을 보장하는 데 필수적이며, 고장이나 성능 저하는 시스템의 작동 중단을 초래할 수 있기 때문에, 디지털 트윈을 활용한 모니터링과 예측적 유지보수는 필수적이다.

펌프의 상태진단 및 수명 예측을 위한 선행연구에서는 인공지능과 디지털 트윈을 기반으로 하여 Exponential Model, ROM(Reduced Order Model), 그리고 FMI(Functional Mock-up Interface) 같은 함수 모델들을 주로 활용되었다[11-13]. 이러한 모델들은 일반적으로 높은 정확도와 낮은 오차의 예측 결과를 제공하지만, 기계의 마모나 부품의 피로와 같은 시간에 따른 변화를 충분히 반영하지 못하고 중요한 정보가 누락되는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 시계열 데이터 분석에 적합한 LSTM(Long Short-Term Memory), SSM(State Space Model), FPM(Facebook Prophet Model) 모델을 디지털 트윈의 머신러닝 모듈

로 탑재하였으며, 복합지표를 사용한 판단 기준을 통해 예측값의 위험도를 분석하고, 그 결과를 레벨로 제시하는 방식을 제안하고자 한다.

새롭게 개발한 디지털 트윈 플랫폼은 런타임 환경의 설정과 동적 모델링 설계를 통해 시스템의 구축과 테스트를 지원함으로써, 오류와 결함을 최소화 하고자 하였다. 최종적으로는 하이퍼튜브 디지털 트윈을 사용하여 현장의 실시간 데이터와 시뮬레이션 데이터를 통합 분석함으로써, 실험장비의 핵심설비 관리를 위한 디지털 트윈 시스템의 유효성을 검증하고자 하였다.

2. 디지털 트윈 플랫폼 설계 및 구축

2.1 디지털 트윈 플랫폼 아키텍처 설계

디지털 트윈 플랫폼은 다양한 산업 분야에 따라 강조되는 기능이 조금씩 다르지만, 일반적으로는 데이터 링크, 커플링, 식별자, 보안, 데이터 저장소, 사용자 인터페이스, 시뮬레이션 모델, 분석, 인공지능, 계산과 같은 특징을 갖는다[14].

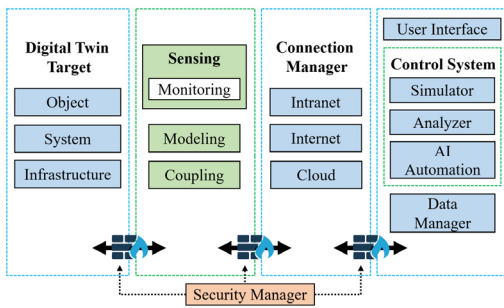


Fig. 1. The functional features of a digital twin, reconfiguration[14]

디지털 트윈 플랫폼에 대한 기능적 특징은 Fig. 1과 같다. 객체(장치, 시스템, 인프라 등)에 대한 센싱, 모델링, 커플링을 기반으로 하며, 커넥션 매니저를 통한 통합 관리 및 제어, 데이터 및 보안 관리 기능을 포함한다. 사용자는 다양한 사용자 인터페이스를 통해 시뮬레이터, 분석기, 인공지능 자동화 도구 등을 사용하여 대상 객체를 최적화하고 운용할 수 있다. 대상 객체의 정확한 정의와 세부 구성요소의 모델링은 필수적이며, 디지털 트윈의 응용에 따라 센싱, 모델링, 커플링의 범위가 달라진다. 응용 목적에 따라 대상 객체의 세부 구성요소 모델링

여부도 달라질 수 있다[14-18].

디지털 트윈에서의 센싱은 데이터 수집 과정을, 모델링은 객체의 3D 공간 표현을, 커플링은 실제와 가상 객체 간의 연결을 의미한다. 이러한 기능들은 다양한 데이터베이스 저장 방식, 데이터 링크를 위한 네트워크, 고도의 데이터 분석, 사이버보안, 그리고 사용자 맞춤형 인터페이스를 통합하여 제공한다. 이를 통해 사용자는 디지털 트윈 공간에서 시스템을 더욱 효율적이고 직관적으로 제어하고 관리할 수 있다. 특히, 실시간 데이터 수집 및 분석은 이러한 시스템의 핵심 요소 중 하나로, 기존 시스템을 통합하고 개선하는 방법을 통해 이를 달성할 수 있다. 이와 같은 포괄적인 기능을 통해 디지털 트윈 플랫폼은 복잡한 시스템의 실시간 분석, 예측, 그리고 최적화를 가능하게 함으로써 보다 나은 의사결정을 지원한다.

본 연구에서는 디지털 트윈의 중요한 요소인 실시간 데이터 수집 및 기능을 강화하기 위해, 기존의 단순 모니터링 시스템을 개선하고자 한다. 즉, 기존 설비에 대한 수정이나 변경 없이 통합할 수 있는 아키텍처의 구성에 초점을 맞추었다. 또한, 산업 공정의 감독 제어 및 데이터 수집을 위해 산업계에서 널리 사용되고 있는 SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) 시스템 [19]을 사용하였다. SCADA는 중앙 집중식으로 공장 상태를 모니터링하기 위해 개발되었다. 이를 통해 산업 기계나 공장의 단순화된 디지털 표현 개발이 용이해졌으며, 이는 시스템 상태를 시각화하는데 도움을 준다[20].

SCADA 시스템에서 생성되는 데이터에 접근할 수 있는 별도의 전처리 프로그램을 서버에 설치함으로써, 기존에 파일로만 관리되던 데이터를 데이터베이스 형태로 전환하여 데이터 활용성을 향상시켰다. 이렇게 데이터베이스화된 데이터는 네트워크 통신을 통해 디지털 트윈 시스템과 머신러닝 코어 프로그램에서 사용될 수 있다. Fig. 2는 SCADA를 사용한 디지털 트윈 플랫폼 소프트웨어 아키텍처를 나타내고 있다. SCADA에서 생성되는 데이터를 전처리하여, 데이터베이스에 업로드 한다. 렌더 프로그램은 데이터를 요청하여, 데이터베이스의 데이터의 정보를 모니터링 수행가능하게 구현하였으며, 렌더 프로그램에서 머신러닝에 필요한 모델 선택 및 입력 파라미터 명령하면 머신러닝 코어 프로그램은 수행에 필요한 기간의 데이터를 데이터베이스에서 요청하여 데이터를 사용하여, 학습 또는 예측하여 결과물을 렌더 프로그램으로 반환하는 구조이다.

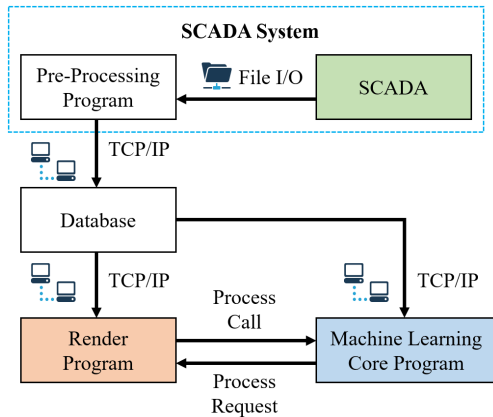


Fig. 2. Digital twin platform software architecture

2.2 데이터베이스 및 데이터 분석 환경 구축

전체 데이터를 전처리하고 분석하기 위해 MySQL(My Structured Query Language)을 사용하여 데이터베이스를 구축하였다. MySQL은 기본적으로 구조화된 데이터베이스의 데이터는 고정된 필드와 미리 정의된 데이터 길이가 있으며 숫자, 날짜, 시간, 주소, 통화 등과 같이 저장할 데이터의 유형을 정의한다. 데이터가 삽입되기 전에 구조가 이미 정의되어 있어 데이터가 어디에 머무를 수 있는지 명확하게 알 수 있다. 구조화된 데이터베이스를 사용하는 주요 이점은 데이터를 쉽게 저장, 조회 및 분석할 수 있다[21,22].

데이터베이스와 관련된 호환성 문제나 환경 설정의 일관성을 유지하기 위해, 도커(docker)를 활용하여 데이터베이스 및 관련 애플리케이션을 컨테이너화함으로써 환경을 추상화하고, 이를 통해 시스템 간의 충돌 가능성을 최소화하였다. 이 프로그램은 SCADA에서 수집된 원본 데이터 및 전처리된 데이터를 데이터베이스로 전송해 저장한다. SCADA 데이터를 매번 디지털 트윈 프로그램에서 데이터 시각화를 실행할 때마다 로딩>Loading)하는 대신, 진동과 소음의 평균값, 온도, 전류, 회전수, 위치별 압력 데이터 등을 VBA(Visual Basic for Application)를 사용하여 전처리(이상치 제거, 데이터 정규화)하였다. 이렇게 전처리하여 데이터베이스에 저장함으로써 디지털 트윈과 머신러닝 시스템이 데이터를 요청할 때, 사전 전처리된 데이터베이스에 저장된 데이터로 즉시 접근할 수 있게 하여 메모리 사용량을 기존의 50.4MB에서 36.2MB로 약 28.17% 감소시켰다.

Fig. 3은 하이퍼 튜브 진공펌프 디지털 트윈 시스템 구조를 나타내고 있다.

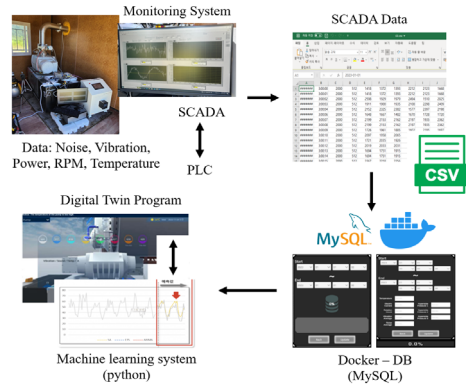


Fig. 3. Hypertube vacuum pump digital twin system structure

SCADA에서 생성되는 데이터는 CSV파일로 구성되어 있으며, SCADA 환경에서 가상화 플랫폼 도커를 구축하여, MySQL 기반 데이터베이스를 구성하였다. 데이터베이스는 디지털 트윈 프로그램과 머신러닝 시스템과 통신한다.

Fig. 4는 연천군에 위치한 한국건설기술연구원 SOC 실증연구센터에 있는 길이 4m, 길이 10m의 하이퍼튜브 실증실험 시설을 나타내고 있다. 컨테이너 내부의 진공 펌프와 연결된 파이프를 통해 내부 공기를 빨아들여 대기압의 '1000분의 1' 수준인 아진공 상태를 만들 수 있다.



Fig. 4. Hypertube of the SOC Demonstration Research Center (Yeoncheon)

가시화를 목적으로 한 3D 모델링은 SOC실증연구센터의 하이퍼튜브 센서 위치와 재원을 반영하여 Fig. 5에 나타난 바와 같이, 하이퍼튜브와 진공펌프의 3차원 모델을 3D Max 프로그램을 사용하여 구현하였다. 이 과정에서 모델링은 '.fbx'확장자를 가진 형태와 LOD의 모델을 기준으로 구성하였고, 독일 회사에서 제공받은 RUVAC / DRYVAC 건식 사전 진공 시스템 펌프 도면과 하이퍼 튜브에 대한 재원을 반영하였다.

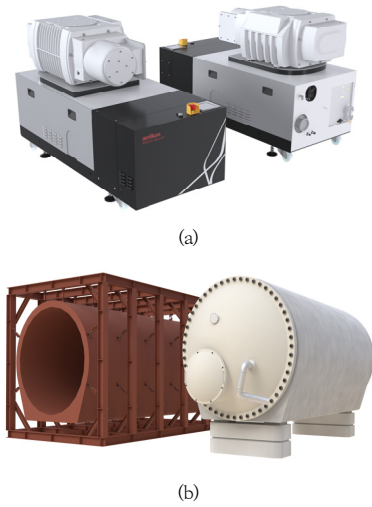


Fig. 5. 3D Modeling
(a) RUVAC / DRYVAC pump 3D-Model
(b) Hypertube 3D-Model

새롭게 구현된 3D 모델의 각 부품은 개별의 중심점 (Pivot)을 부여하여 글로벌 회전축에 영향을 받지 않도록 구성한다. 이 디지털 트윈 플랫폼은 실제 데이터를 수치화하고, 포인트의 불투명도와 기체 흐름 등을 통합하여 Fig. 6과 같이 시각화하였다. 기체 흐름의 시각화를 위해, 파이프 모델 내부를 빨간색으로 표시함으로써 기체의 압축 과정을 직관적으로 나타낼 수 있도록 하였다. 또한, 그림에서 볼 수 있듯이 하이퍼튜브의 진공 압력과 진공 진행 상태를 한눈에 확인할 수 있게 개발하였다.

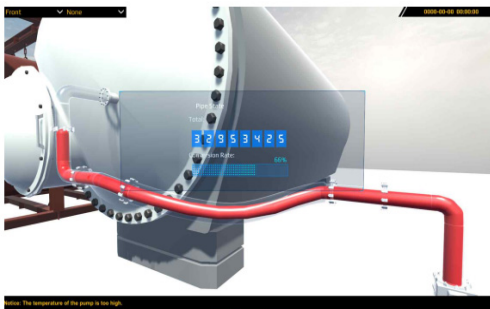


Fig. 6. Visualization of fluid flow based on actual data

Fig. 7은 하이퍼튜브 진공펌프의 데이터를 통합 분석하기 위한 시간 동기화 설정 인터페이스를 나타내고 있다. 이 설정을 통해, 구축된 데이터베이스와 연결하여 하이퍼튜브 진공펌프의 통합 분석을 위한 시간 동기화를 실행할 수 있다. 시간 동기화가 진행되면, Fig. 8에서 볼

수 있듯이, 설정한 기간 동안의 실제 데이터와 가공 데이터가 변동하며 화면에 표시되어 사용자가 데이터를 분석할 수 있게 한다.

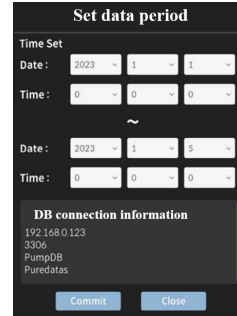


Fig. 7. Time synchronization setting interface

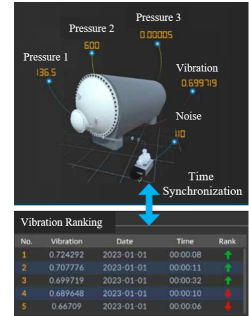


Fig. 8. Time synchronization for integrated analysis of hypertube vacuum pump data

2.3 머신러닝 코어 구성 및 구조 설계

디지털 트윈에서 모듈을 실행하더라도 데이터 가시화 등의 디지털 트윈의 기능이 작동할 수 있도록 파이썬 모듈이 백그라운드로 실행되도록 머신러닝 코어를 설계하였다. Fig. 9는 머신러닝 구조, Fig. 10은 플로우차트를 나타내고 있다. Unity를 활용하여 파이썬 머신러닝 모듈을 실행한다. 이 모듈은 실시간으로 데이터 준비 상태와 모듈의 작동 상태 등을 디지털 트윈 프로그램에 메시지로 전달하고, 머신러닝 과정이 완료되면 학습이 완료된 모델의 결과를 반환하고 모델을 저장한다. 머신러닝 결과의 평가는 MLOps(Machine Learning Operations)의 초기 단계에 따라 수동으로 이루어지며, 평가 결과가 좋으면 저장된 모델을 불러와 예측 작업을 수행한다.

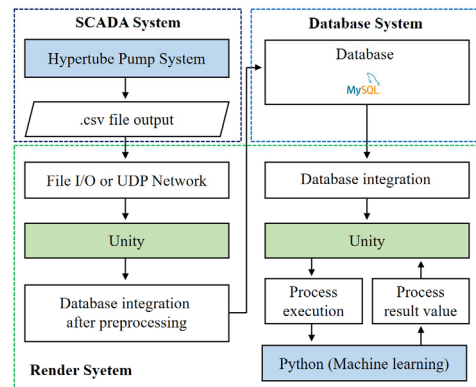


Fig. 9. Hypertube vacuum pump digital twin machine Learning function structure

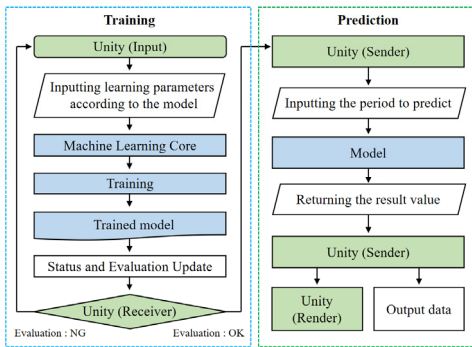


Fig. 10. Hypertube vacuum pump machine learning core flowchart

2.4 머신러닝 모듈 탑재

본 연구에서는 진동, 소음, 온도, 전류, 회전수, 압력 등과 같이 시계열 데이터 분석에 적합한 LSTM(Long Short-Term Memory), SSM(State Space Model), FPM(Facebook Prophet Model) 모델을 디지털 트윈의 머신러닝 모듈로 탑재하였다.

FPM 모델[23]은 추세, 계절성, 휴일 등 다양한 요소를 고려하여 예측을 수행하기 때문에, Prophet 객체에서도 이에 해당하는 파라미터를 설정한다.

SSM 모델[24-26]은 시계열 데이터의 추세와 계절성 같은 패턴을 모델링하기 위해 실제 상태와 관측값 사이의 동적 관계를 표현하며, 칼만 필터 기반의 필터링 알고리즘을 통해 예측을 진행한다. 모델을 구현할 때 사용되는 SARIMAX는 ARIMA 모델[24,27]에 계절성을 추가하여, 내부적으로 칼만 필터를 활용한 필터링으로 예측을 시도한다. ARIMA 모델과 마찬가지로 자기 회귀, 차분, 이동 평균 값에 더해 계절성에 관련된 파라미터들도 설정한다.

LSTM[28] 모델은 순환 신경망(recurrent neural networks, RNNs)의 장기 의존성 문제(long-term dependencies)를 해결하기 위해 셀 상태(cell state) 개념과 입력 게이트(input gate), 망각 게이트(forget gate), 출력 게이트(output gate)를 도입하여 중요 정보는 장기간 유지하고 불필요한 정보는 제거한다. LSTM을 사용할 때는 데이터의 입력과 출력 윈도우 크기, 학습 횟수, 활성화 함수 등을 설정해야 한다.

또한, 각각의 모델에 따라 필요한 파라미터가 다르기 때문에 동일한 데이터로 학습할 때, 각 모델의 특성에 맞게 필요한 파라미터를 고려해야 한다.

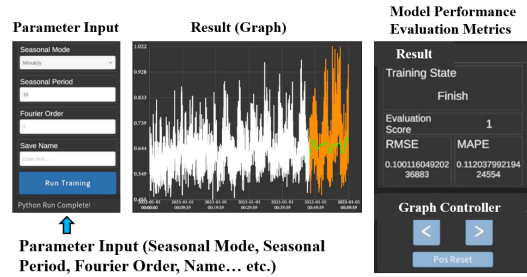


Fig. 11. Hypertube vacuum pump machine learning Training results (example with prophet model)

Fig. 11은 Prophet 모델을 사용해 학습 완료된 모델의 출력값을 시각화한 그래프와 플랫폼 화면을 나타내고 있다. 사용자는 화면에서 모듈을 선택하고 데이터, 상태 변수, 파라미터 등을 입력할 수 있다.

모듈 상태의 업데이트는 파이썬의 표준 출력 버퍼(standard output steam buffer)의 특성을 고려해 수동으로 이루어지며, 이러한 과정을 통해 상태 정보가 화면에 표시된다. 변환된 데이터는 디지털 트윈 플랫폼에서 그래프로 시각화되어 모델의 성능을 성능 지표 RMSE(Root Mean Squared Error), MAPE(Mean Absolute Percentage Error)를 통해 평가한다. 예측 결과, RMSE는 0.1001, MAPE는 0.1120의 평가 점수(evaluation score)를 얻었다. 해당 결과를 통해 모델의 정확도를 수동으로 확인할 수 있다. Fig. 12는 현장의 실시간 데이터와 시뮬레이션 데이터의 RMS(Root Mean Square) 결과값, Kurtosis 값과 별도의 위험도 지표를 사용한 판단 기준을 통해 예측값의 위험도를 분석하고, 그 결과를 레벨로 제시할 수 있는 복합지표를 나타내고 있다.

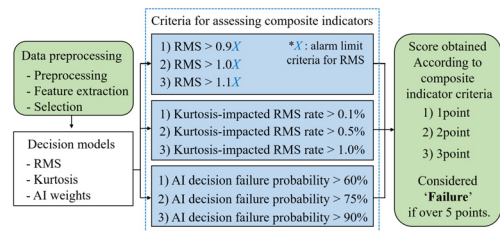


Fig. 12. Composite indicator operation flowchart

사용자가 지표, 한계치, 레벨 등을 직접 입력함으로써, 모델의 신뢰성 및 예측 결과의 정확도를 수동으로 평가할 수 있다.

2.5 실시간 시뮬레이션 검증

Fig. 13은 설계된 아키텍처를 바탕으로 런타임 환경을 구성하고 동적 모델링 설계를 통합하여 MATLAB-Simulink 워크플로어로 프로그램을 실행할 때 발생할 수 있는 오류나 결함을 최소화하는 방식을 나타내고 있다.

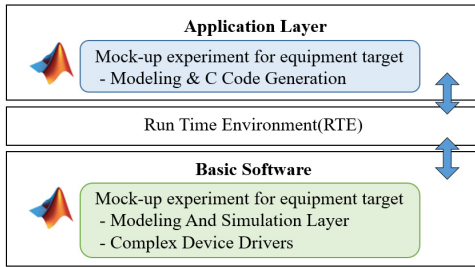


Fig. 13. Software real-time environment configuration architecture

MATLAB 소프트웨어와 연동하여 하이퍼튜브와 진공 펌프의 기능을 구현하였다. 진공펌프는 시스템에 영향을 주는 핵심 인자들(온도, 전류, 회전수, 압력, 진동, 소음)을 실제 시스템 구축 과정에서 수집한 데이터 범위를 기반으로 2가지 테스트 환경에서 검증하였다. 첫 번째 환경은 실제 시스템에서 수집된 인자들의 최소값과 최대값 범위 내에서 입력 파라미터를 설정하여 반복 테스트를 수행하였다. 두 번째 환경은 정해진 범위를 벗어나는 값을 입력 파라미터로 설정하여 테스트를 반복함으로써, 제어 로직이 두 가지 환경에서도 올바르게 작동하는지와 시스템의 오류가 제대로 검출되는지를 확인하였다.

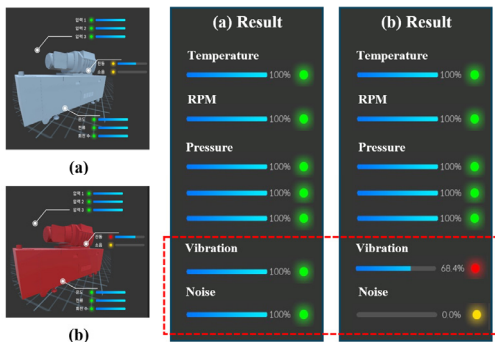


Fig. 14. Simulation running state HMI
(a) Normal Condition (b) Fault Condition

Fig. 14는 시뮬레이션의 실행 상태를 나타내는 HMI (Human Machine Interface)중 일부분을 나타내고 있

다. 순차적으로 진행되는 실행 과정을 시각화하며, 각 인자의 현재 상태는 Bar GUI(Graphical User Interface)를 통해 실시간으로 표현된다. 만약 결함이 발생할 경우, 사용자가 즉시 인지할 수 있도록 붉은색 GUI를 통해 경고한다. 또한, 개발된 디지털 트윈 플랫폼의 시뮬레이션 성능을 더욱 정밀하게 검증하고 현실 세계의 장비와의 상호 작용을 평가하기 위해, 추후 HILS(Hardware in the Loop Simulation) 검증을 통합하는 것이 중요하다고 판단된다. 이는 시뮬레이션과 실제 하드웨어 사이의 상호작용을 통해 시스템의 반응과 성능을 실시간으로 평가할 수 있게 함으로써, 디지털 트윈 플랫폼의 신뢰성과 효율성을 보다 깊이 있게 증명할 수 있다.

3. 결론

본 논문은 플랜트 시설의 디지털 트윈 구축을 하기 위하여 하이퍼튜브의 핵심 설비인 진공 펌프를 적용 대상으로 선정하여 플랫폼을 개발하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

1. MySQL을 사용한 데이터베이스 구축, Docker를 이용한 컨테이너화로 환경을 추상화하고 시스템 간 충돌을 최소화하였다. SCADA 시스템에서 수집된 데이터를 사전에 전처리하여 디지털 트윈과 머신러닝 시스템의 메모리 사용량을 기존대비 약 28.17% 줄임으로써, 데이터 접근성을 크게 향상시켰다.
2. Unity로 실행되는 파이썬 머신러닝 모듈은 실시간 데이터 준비와 모델 작동 상태를 전달하며, MLOps를 통해 모델 결과를 평가하였다. LSTM, SSM, FPM 모델을 탑재하여 진동, 소음, 온도 등의 데이터 분석을 수행하여 RMSE는 0.1001, MAPE는 0.1120의 평가 점수를 얻었다.
3. 모델 성능과 위험도를 평가하기 위해 현장의 실시간 데이터와 시뮬레이션 데이터를 RMS 결과값, Kurtosis 값과 함께 별도의 위험도 복합 지표를 사용한 판단 기준으로 예측값의 위험도를 분석하였으며, MATLAB-Simulink를 활용해 실시간 시뮬레이션 환경을 구축하여 시스템을 검증하였다.
4. 기계설비 관리를 위한 디지털 트윈 플랫폼을 통해 실제 하이퍼튜브 시스템의 운영 환경을 모사함으로써 진공펌프의 성능 저하나 고장에 대하여 사전

예측 및 대응이 가능하다. 또한, 런타임 환경 구성과 동적 모델링 설계를 통해 실시간 데이터와 시뮬레이션 데이터의 통합 분석으로, 진공펌프와 같은 핵심 설비의 문제를 신속하게 진단하여 실시간 모니터링 및 예지보전이 가능해져 하이퍼튜브 시스템의 안정성과 효율성 및 사용자의 장치관리의 편리성이 개선될 것으로 기대된다.

References

- [1] M. Grieves, J. Vickers, "Origins of the digital twin concept", *Florida Institute of Technology*, Vol.8, pp.3-20, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>
- [2] D. Y. Jeong, "The Technical Definition of Digital Twins and the Detailed Development 5 Level Model", *OSIA Standards & Technology Review*, Vol.34, No.1, pp.10-16, 2021.
- [3] Inter-ministerial Cooperation, "Korean New Deal Comprehensive Plan", Policy Report, Korea, 2020.
- [4] Inter-ministerial Cooperation, "Korean New Deal 2.0", Policy Report, Korea, 2021.
- [5] Digital Platform Government, "Digital Platform Government Implementation Plan", Policy Report, Korea, 2023.
- [6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "My7Second National Geospatial Information Policy Basic Plan(2023-2027)", Policy Report, Korea, 2023.
- [7] S. H. Kim, S. H. An, S. J. Yoo, "Autonomous Driving Control Using Deep Reinforcement Learning and Digital Twin Implementation with ML-Unity", *KICS Summer Conference 2022*, Vol.2022, No.6, pp.1721-1722, 2022.
- [8] J. Y. Baek, Y. H. Lee, "Development of a Digital Twin Platform for Smart City", *Information and Communications Magazine*, Vol.37, No.5, pp.11-19, 2020.
- [9] J. H. Park, Y. G. Kim, "Development of Sensor Equipped System Optimized for Plug Fan/Compressor for Reliability Monitoring", *Journal of Digital Contents Society*, Vol.24, No.1, pp.205-210, 2023.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2023.24.1.205>
- [10] E. Musk, "Hyperloop alpha", SpaceX: Hawthorne, CA, USA, 2013.
- [11] J. H. Jung, K. H. Sun, "Artificial Intelligence (AI) Based Fault Diagnosis and Prognosis for Centrifugal Pump", *KSME Annual Conferences*, Vol.2023, No.5, pp.50-51, 2023.
- [12] G. H. Kang, S. H. Kim, K. H. Cha, M. S. Lee, J. H. Kim, "Construction of a Reduced-Order Model based Digital Twin for Real-Time Performance Prediction of Vertical Centrifugal Pump System", *KSME Annual Conferences*, Vol.2023, No.11, pp.1696-1700, 2023.
- [13] G. H. Kang, S. H. Kim, K. H. Cha, J. H. Kim, M. S. Lee, J. S. LEE, "Real-Time Performance Prediction of a Physics-Based Pump System Simulation Using Bayesian Optimization", *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 29, No. 1, pp.113-129, 2024.
DOI: <http://dx.doi.org/10.6112/ksfce.2024.29.1.113>
- [14] J. S. Bang, Y. H. Lee, "Digital Twin Technology Trends for Smart City Realization", *Journal of The Korean Institute of Communication Sciences*, Vol.37, No.5, 2020.
- [15] S. P. A. Datta, "Emergence of digital twins", *arXiv*, preprint arXiv:1610.06467, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1610.06467>
- [16] K. M. Alam, A. El Saddik, "C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems", *IEEE access*, Vol.5, pp.2050-2062, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2657006>
- [17] H. Park, A. Easwaran, S. Andalarn, "Challenges in digital twin development for cyber-physical production systems", *Cyber Physical Systems. Model-Based Design*, pp.24-48, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.03341>
- [18] M. Eckhart, A. Ekelhart, "Towards security-aware virtual environments for digital twins", *Proceedings of the 4th ACM workshop on cyber-physical system security*, pp.61-72.
DOI: <https://doi.org/10.1145/3198458.3198464>
- [19] A. Daneels, W. Salter, "What is scada?", *International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems*, pp.339-343, 1999.
- [20] A. Abdelsattar, E. J. Park, A. Marzouk, "An OPC UA Client/Gateway-Based Digital Twin Architecture of a SCADA System with Embedded System Connections", *2022 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp.798-803, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1109/AIM52237.2022.9863367>
- [21] K. Appigatla, "MySQL 8 Cookbook: Over 150 recipes for high-performance database querying and administration", *Packt Publishing Ltd*, 2018.
- [22] D. H. Bae, *Analyzing the performance impact of disk IO improvements on MySQL architecture*, Master's thesis, Hansei University, 2020.
- [23] B. V. Vishwas, A. Patel, *Hands-on Time Series Analysis with Python*, Apress, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5992-4>
- [24] J. Durbin, S. J. Koopman, *Time series analysis by state space methods*. Vol. 38, OUP Oxford, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199641178.001.0001>
- [25] R. Hyndman, A. B. Koehler, J. K. Ord, R. D. Snyder, *Forecasting with exponential smoothing: the state space approach*, Springer Science & Business Media, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-71918-2>
- [26] M. W. Seeger, S. David, F. Valentin, "Bayesian intermittent demand forecasting for large inventories",

Advances in neural information processing systems, Vol.29, 2016.

- [27] G. E. Box, G. M. Jenkins, "Some recent advances in forecasting and control", *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, Vol.17, No.2, pp.91-109, 1968.
DOI: <https://doi.org/10.2307/2985674>
- [28] S. Hochreiter, J. Schmidhuber, "Long short-term memory", *Neural computation*, Vol.9, No.8, pp.1735-1780, 1997.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-24797-2_4

이 승 주(Seungjoo Lee)

[정회원]



- 2015년 8월 : 강원대학교 지역건설공학과 (공학사)
- 2016년 7월 ~ 2018년 7월 : (주)아이콘텍이엔씨 사원
- 2018년 10월 ~ 2023년 2월 : 주식회사스마트지오텍 과장
- 2023년 2월 : 강원대학교 지역건설공학과 (공학박사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 박사후연구원

<관심분야>

농공학, 지반방재공학, 디지털트윈

최 현 준(Hyun-Jun Choi)

[정회원]



- 2012년 8월 : 고려대학교 건축사 회환경공학과 (공학사)
- 2019년 8월 : 고려대학교 건축사 회환경공학과 (공학박사)
- 2018년 12월 ~ 2021년 12월 : (주)동명기술공단종합건축사사무소 대리
- 2022년 1월 ~ 2022년 12월 : 한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 박사후연구원
- 2022년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 수석연구원

<관심분야>

지반공학, 인공지능

문 건 혁(Geon-Hyeok Moon)

[정회원]



- 2019년 2월 : 동의대학교 게임영상공학과 (공학사)
- 2018년 9월 ~ 2023년 3월 : (주)유아이티 기업부설연구소 연구원
- 2023년 3월 ~ 현재 : (주)유아이티 기업부설연구소 연구소장

<관심분야>

정보통신, 데이터사이언스, 인공지능

김 영 석(YoungSeok Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 영남대학교 토목공학과 (공학사)
- 2002년 3월 : (일본) Osaka University 토목공학과 (공학석사)
- 2005년 3월 : (일본) Kyoto University 사회기반공학과 (공학박사)
- 2005년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 선임연구위원

<관심분야>

극한지공학, 융복합기술, 플랜트엔지니어링