

# 환자의 합병증 예측을 위한 Post-TAVR 디지털 트윈 추적 관리 플랫폼 설계<sup>☆</sup>

## Design of Post-TAVR Digital Twin Navigating Platform for Predicting Patient Complications

정 민 혁<sup>1</sup>                      이 강 윤<sup>1\*</sup>  
Min Hyuk Jung                KangYoon Lee

### 요 약

대동맥판막 협착증은 심장의 좌심실과 대동맥 사이에 위치하여 혈액의 역류를 막아주는 대동맥 판막이 석회화가 되어 제 기능을 하지 못해 발생하는 질병으로, 경피적 대동맥판막 치환술(TAVR)은 이러한 대동맥판막 협착증을 치료하기 위한 표준적인 비수술적 시술로 자리잡고 있다. 하지만 TAVR 시술 후의 환자에게는 여전히 합병증이 발생할 위험이 있으며, 이를 예측하고 관리하기 위한 체계적인 솔루션이 필요하다. 이 연구에서는 다양한 합병증 예측 모델들을 운용하여 환자의 합병증 위험도를 관리할 수 있는 플랫폼을 설계하였으며, Explainable AI를 이용하여 신뢰가능한 예측 모델과 솔루션을 구성하였다. 본 연구에서는 이러한 플랫폼을 구현하기 위하여 디지털 트윈을 활용하였으며, 실사용 데이터(RWD)를 바탕으로 구축한 환자의 디지털 트윈 모델을 통해 합병증을 예측하고 모니터링 하는 방안을 제안한다. 본 디지털 트윈 플랫폼은 쿠버네티스를 이용하여 마이크로 서비스 아키텍처로 구현되었으며 이를 통해 플랫폼의 유연성과 가용성을 강화하였다. 또한, 지속적인 예측 모델의 성능 향상과 TAVR 시술의 개선을 위한 피드백 시스템을 구성하여 지속 발전 가능 방안을 제시한다.

☞ 주제어: 경피적 대동맥판막 협착증 (Transcatheter Aortic Valve Replacement), 디지털 트윈, 마이크로 서비스 아키텍처

### ABSTRACT

Aortic valve stenosis is disease caused by the calcification of the aortic valve, which is located between the left ventricle of the heart and the aorta, preventing the backflow of blood. Transcatheter Aortic Valve Replacement (TAVR) has become the standard non-surgical procedure for treating aortic stenosis. However, patients who undergo TAVR are still face the risk of complication, which calls for a systematic solution for complication prediction and management. In this study, we designed a platform that manages patient complication risks using various prediction models, and we utilized explainable AI to ensure reliable prediction models and solutions. For the implementation of this platform, digital twin technology was employed, allowing for complication prediction and monitoring based on a patient's digital twin model constructed from Real-World Data (RWD). The digital twin platform has been developed with a microservice architecture using Kubernetes, enhancing the flexibility and availability of the platform. Additionally, we propose a feedback system for continuous improvement of prediction model performance and TAVR procedures to ensure ongoing development.'

☞ keyword : Transcatheter Aortic Valve Replacement, Digital Twin, Micro Service Architecture

## 1. 서 론

대동맥판막은 심장의 좌심실과 대동맥 사이에 위치하

여 대동맥으로 흐르는 혈액이 역류하는 것을 막아주는 판막이다. 대동맥판막 협착증은 이러한 대동맥 판막이 선천적인 이유 혹은 모종의 이유로 석회화가 진행되어 제 기능을 하지 못하는 질병으로, 심장 근육의 비후가 진행되면서 심장의 기능이 제 기능을 하지 못하게 되고 이를 방지할 경우 사망률은 기하급수적으로 증가하는 것으로 알려져 있다[1]. 경피적 대동맥판막 치환술(Transcatheter Aortic Valve Replacement, TAVR)은 환자의 대동맥으로 경도관을 삽입하여 기존의 대동맥판막을 인공 판막으로 치환하는 비수술적인 시술로, 특히 위험환자 군에서 그 효과가 입증되어 왔으며 기존의 개흉수술을 대체하는 표

<sup>1</sup> Dept. of Computer Engineering, Gachon University, Seongnam, 13120, Korea

\* Corresponding author: (keylee@gachon.ac.kr)

[Received 17 April 2024, Reviewed 28 May 2024(R2 04 August 2024), Accepted 16 August 2024]

☆ 본연구는 보건복지부의 재원으로 한국보건산업진흥원의 보건 의료기술연구개발사업(과제 : HI22C1651)과 한국연구재단의 기초연구사업(grant number: NRF-2022R1F1A1069069) 지원에 의하여 이루어진 것임

준적인 기술로 자리 잡고 있다.

하지만 TAVR 시술 후에는 환자에게 여러 합병증이 나타날 위험성이 있으며[2], 이에 따라 시술 후 환자를 지속적으로 모니터링하고 관리하여 합병증 예후를 관찰하는 것이 매우 중요하다. 오늘날 시술 후 합병증의 발생 원인과 예측 방법론에 대한 연구는 활발히 진행중이지만, 이러한 연구들은 합병증의 발생 원인 및 예측을 위한 방법을 제시할 뿐 이를 실제 환자 합병증 관리 솔루션으로 제시하기 위한 연구는 아직 미비하다. 따라서 본 논문에서는 Post-TAVR 환자 관리 및 합병증 예측을 위한 시스템적 솔루션인 'Post-TAVR Digital Twin Navigator'를 설계하였다.

하나의 솔루션으로써 Post-TAVR 환자 관리 및 합병증 예측 플랫폼을 구현하기 위해 실제 세계 개체를 디지털 상의 가상 공간으로 복제하는 디지털 트윈 기술을 적용하였으며, 수집되는 환자의 실사용데이터 (Real-World Data, RWD)를 바탕으로 환자의 디지털 트윈 모델을 구축하도록 하였다. 이렇게 구축된 디지털 트윈 모델을 바탕으로 환자를 모니터링 하는 기반을 마련하고 합병증을 예측할 수 있도록 다양한 합병증 예측 모델을 모듈화하여 플랫폼에서 운용할 수 있도록 하였으며, 예측 결과에 대한 분석을 진행할 수 있는 플랫폼을 구상하였다. 또한 유연성과 가용성 높은 디지털 트윈을 구축하기 위하여 마이크로 서비스 아키텍처를 채택하였으며, 디지털 트윈의 각 구성 요소를 컨테이너화 하도록 설계하였으며 컨테이너화 된 디지털 트윈의 구성 요소들을 컨테이너 오케스트레이션 플랫폼인 쿠버네티스를 이용하여 융합하였다. 본 연구에서는 다양한 합병증 예측 모델을 운용하여 Post-TAVR 환자의 합병증 위험 관리를 실질적으로 가능하게 하는 마이크로 서비스 아키텍처 기반의 디지털 트윈 플랫폼인 'Post-TAVR Digital Twin Navigator'를 제시한다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 TAVR 시술 후 합병증

자주 발병하는 TAVR 시술 후 주요 합병증으로는 전도장애, 판막주위누출, 뇌졸중, 급성 신부전 및 주요 혈관 및 출혈 합병증이 있으며, 이러한 합병증은 TAVR 시술 후 환자의 생존에 치명적으로 작용할 수 있다[2].

TAVR 시술 후 환자의 합병증 발생 가능성을 예측하기 위한 연구들은 활발히 진행되어 왔다.

Vien T. Truong MD 및 그 외 연구자들은 정확한 영구 심박조율기 이식이 필요할 위험성에 대한 예측 모델을 구성하기 위해 관련 매개변수를 통합하는 연구를 수행하였으며[3], Joshua D.Aymond 및 그 외 연구자들은 전도장애 관리 및 평가에 대한 방법에 관한 연구를 진행하였다 [4].

본 연구에서는 다음의 세 가지 합병증을 예측하는 인공지능 모델을 채택하여 플랫폼에서 운영하도록 설계하였다.

#### 2.1.1 영구적 심박조율기 삽입(Permanent Pacemaker Implantation, PPI)의 필요 가능성

심박조율기는 심장의 전기적 활동을 조절하여 심장 박동의 리듬이 유지되도록 돕는 장치이며, 이 장치는 특히 심장의 전기적 전도의 문제가 발생하여 심장 박동이 비정상적으로 느리거나 불규칙한 경우에 사용된다. TAVR 시술 후에는 여러 요인으로 인해 PPI가 필요할 수 있다. 이러한 요인에는 시술 후 전도장애 발생 및 시술자의 역량, 또한 인공 판막의 깊이 등이 포함된다[5]. 또한, 환자가 기존에 전도계 질환을 가지고 있을 경우 PPI가 필요할 가능성이 증가한다[5].

#### 2.1.2 전도장애 (Conduct Abnormality, CA)

전도장애는 심장의 전기 신호 전달이 방해받을 수 있는 상태를 의미하며, TAVR 시술 이후 발생하는 합병증 중 가장 흔한 합병증으로 남아 있다. TAVR 시술의 개선과 많은 시술 사례 축적은 시술 부위 주변 합병증의 큰 감소로 이어져 왔지만 여전히 전도 장애의 발생률은 상대적으로 높은 상태를 유지하고 있다[6]. 전도장애가 발병하는 요인에는 연령, 심장 구조, 이식된 판막 유형, 기존 이상 및 동반 질환 등 여러가지가 있으며, TAVR 시술이 점점 더 널리 보급됨에 따라 Post-TAVR 이후 전도 이상 발생의 위험 요인에 대해 환자를 주의 깊게 검사해야 할 필요가 있다[7].

#### 2.1.3 판막주위누출 (Paravalvular leakage, PVL)

PVL은 TAVR 시술 후 인공 판막 주변으로 누출이 생기는 합병증이다. 발생 빈도가 수술적 대동맥판막 치환술보다 더 자주 발생하는 것으로 보고되는 합병증으로 [8], 장기적인 이환율 및 사망률과 관련이 있다[9]. 시간

이 지남에 따라, TAVR 시술자들의 경험이 증가하고 기술이 개선됨에 따라 PVL의 발생률은 크게 감소했지만 여전히 중증도 이상의 PVL은 환자의 예후에 부정적인 영향을 끼칠 수 있으며 높은 사망률과 관련이 있다[10].

## 2.2 디지털 트윈

디지털 트윈은 실제 세계에 존재하는 물리적 자산 혹은 개체나 일련의 프로세스를 디지털 상의 가상의 공간으로 표현하는 기술로, 현재 여러 광범위한 산업 분야에 적용되어 커다란 산업 혁명을 일으켜 왔으며 여러 분야에서 적용을 위한 학술적 연구가 이루어지고 있다[11]. 실시간으로 수집되는 대상 개체의 데이터를 바탕으로 가상의 공간에서 실제 개체의 상황이나 상태를 반영하여 디지털 트윈 모델을 구축하며, 구축된 디지털 트윈을 통해 실제 대상을 모니터링 가능하며 디지털 트윈을 통한 시뮬레이션 및 예측을 통해 실제 개체에 일어날 수 있는 상황을 가상의 공간에서 적용 및 테스트가 가능하다. 이러한 모니터링과 시뮬레이션을 통하여 실제 세계 자산에 대해 사용되는 자원과 시간을 줄일 수 있으며, 일어날 수 있는 장애나 위험을 예측하고 예방 및 유지보수를 하는 데 기여를 할 수 있다.

디지털 트윈은 데이터 수집부터 모델 생성, 데이터 저장 및 시각화 등 여러 구성 요소들이 상호작용하여 구성이 되는데, 이러한 구성 요소들을 비슷한 관점으로 레이어를 구성하여 계층화 할 수 있다[12]. 계층화를 통하여 구축하고자 하는 디지털 트윈에 대한 다양한 관점을 제공하며, 복잡성을 줄이고 관점별 특화된 분석 및 효율성을 확보할 수 있다.

## 2.3 마이크로 서비스 아키텍처와 쿠버네티스

마이크로서비스 아키텍처는 애플리케이션의 구성 요소를 더 작고 관리하기 쉬운 작은 서비스들로 분해하는 설계 접근 방식이다. 이러한 아키텍처는 애플리케이션 구성 요소 간의 종속성을 최소화함으로써 독립성을 증진시킨다. 이러한 구조로 인해, 특정 마이크로 서비스에 문제가 발생해도 해당 서비스의 기능과 관련이 없는 다른 서비스들은 영향을 받지 않아 전체 서비스가 중단되는 일 없이 애플리케이션의 가용성을 유지할 수 있다[13]. 또한 각 서비스가 기능별로 모듈화되어 있기 때문에 특정 서비스에 대한 워크로드가 증가하더라도 해당 서비스만을 추가하여 시스템을 수평적으로 유연하게 확장할 수 있다[14].

쿠버네티스는 컨테이너 오케스트레이션 플랫폼으로, 컨테이너화된 애플리케이션의 배포와 확장 및 관리를 자동화 하며 업데이트, 롤백 및 자동화된 스케일링, 자기치유 등을 운영하도록 설계되었다. 쿠버네티스는 오늘날 컨테이너 오케스트레이션 도구의 표준으로 자리잡고 있으며, 마이크로 서비스 아키텍처의 배포와 운영을 쉽게 할 수 있도록 한다. 각 컨테이너는 파드라는 쿠버네티스 리소스 안에서 동작하여 관리되어 진다.

## 3. Post-TAVR 환자 관리 기능 설계

본 연구의 핵심은, 기존의 존재하던 TAVR 시술 환자의 합병증 위험도를 예측하는 연구들을 기반으로 구축된 다양한 합병증 예측 모델들을 운용 가능한 시스템적 솔루션을 구축하는 것에 있다. 본 논문에서는 합병증 예측 모델들을 컨테이너로 모듈화하여 다양한 예측 모델이 시술 후 환자를 관리하는 시술 전문가가 사용할 수 있도록 솔루션으로써 제공될 수 있는 Post-TAVR 환자 관리 플랫폼을 제시한다.

### 3.1 환자 RWD 저장 구조 및 정의

TAVR 시술 후 환자에게 시행되는 검사와 실시간으로 얻어지는 환자의 RWD를 수집 일시와 함께 저장한다. 환자의 데이터는 Pre-TAVR 시점에서의 데이터와 Post-TAVR 후 환자에게 시행되는 검사를 통해 지속적으로 얻어지는 데이터를 포함한다. RWD는 발생이 될 때마다 수집이 되며, 일시와 함께 저장된 환자의 데이터를 토대로 환자의 최근 상태와 과거의 데이터들을 비교함으로써 환자의 변화하는 상태 변화를 파악할 수 있다. 표 1은 본 연구에서 수집되는 환자의 데이터의 종류를 정의한 것이다. 플랫폼은 각 데이터의 구분 별로 데이터가 수집되는 일시를 데이터베이스에 저장하도록 설계하였다. 이렇게 수집되는 데이터를 토대로 본 연구에서는 디지털 트윈을 구축한다.

### 3.2 합병증 예측 모델 운용

본 플랫폼은 여러 합병증에 대한 예측을 하나의 시스템 안에서 운용할 수 있도록 설계되었다. 기존에 수집되었던 데이터들 뿐만 아니라 새로운 환자의 데이터가 수집이 되면 합병증 예측을 수행하도록 설계하였으며, 모든 합병증 예측 결과들은 시스템의 데이터베이스에 저장

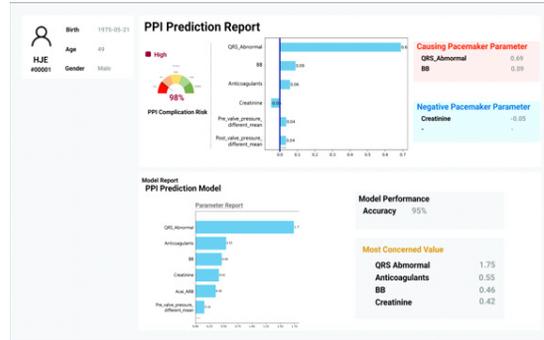
(표 1) 수집되는 환자의 데이터 종류  
(Table 1) Type of patient data collected

구분	구성
Clinical Data	Age Sex Height Weight BMI Smoking Status HTN DM CKD
Vital Sign	sBP / dBP PR RR
CT Data	LVOT_Inform SOV_Inform AAO_Inform Annulus_Inform
Echo Data	Valve_Inform LVEF
ECG	Post-ECG Pre-ECG PR_Interval QRS_Interval QRS_Abnormal First AV Block LBBB RBBB
Medicat	복용 약물 종류

한다. 이렇게 지속적으로 저장되어지는 합병증 예측 결과들은 환자의 합병증 위험도 변화를 지속적으로 모니터링 가능하게 한다.

각 합병증 예측 모델들은 컨테이너화를 통해 서로 종속적이지 않고 독립적으로 운영되며, 각 합병증 모델의 개발 및 유지보수, 관리의 복잡성을 획기적으로 줄여 합병증 예측 모델의 운용성을 보장한다. 이러한 구조는 추후 새로운 합병증 예측 모델을 손쉽게 추가할 수 있는 시스템의 확장성을 보장한다.

본 연구에서 제안하는 플랫폼에서는 TAVR 시술 후 발생할 수 있는 합병증 중 영구적 심박조율기 삽입의 필요 가능성(PPI), 전도장애(CA), 판막주위누출 (PVL) 세 가지 합병증을 예측하는 모델을 사용하였다.



(그림 1) XAI 리포트 대시보드 UI 예시  
(Figure 1) Example of XAI report dashboard UI

### 3.3 Explainable AI 예측 모델 및 예측결과의 근거 보고서

인공지능 모델들은 결과를 도출하는 과정을 알 수 없는 ‘블랙박스’가 존재한다는 문제점이 있다. 합병증 예측 모델의 설명 가능성과 투명성은 사용자가 합병증 예측 결과를 토대로 의료 진단을 하기 위해서 매우 중요하며 [15][16], 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 Explainable AI(XAI) 라이브러리인 SHAP와 LIME을 사용하였다. 그림 1은 가상의 PPI 삽입가능성 예측 결과를 XAI 라이브러리를 사용하여 시각화 하는 UI Dashboard의 예시를 나타낸 그림이며, 그림의 Prediction Report는 LIME, Model 리포트는 SHAP를 사용한다. 본 형식의 대시보드를 통하여 시스템 내부에서 운용되는 예측 모델이 합병증 예측을 수행하는 근거와 수행된 합병증 예측 결과에 영향을 미친 환자의 파라미터 중요도에 대한 보고서를 제공 가능하며 이는 시스템의 신뢰성을 높일 수 있다.[16].

#### 3.3.1 합병증 예측에 대한 환자의 변수 중요도 리포트

LIME 라이브러리를 사용하여 환자의 합병증 예측이 수행됐을 때 환자의 어떤 요소들이 예측 결과에 얼마나 중요하게 작용하였는지 분석한 보고서를 사용자에게 제공할 수 있도록 하였다[16]. 이를 통하여 사용자는 예측 결과에 큰 영향을 미친 환자의 요소를 파악할 수 있으며, 해당 요소에 중점을 두어 환자를 관리할 수 있도록 설계하였다.

#### 3.3.2 합병증 예측 모델의 예측 근거에 대한 보고서

SHAP 라이브러리를 사용하여 각 합병증 예측 모델이

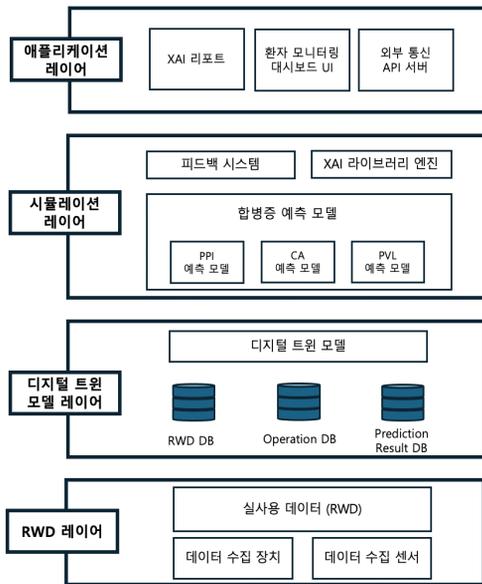
예측을 수행할 때 근거를 두는 환자의 요소별 중요도를 분석할 수 있으며[17], UI를 통하여 사용자에게 보고서로 제공 가능하다. 이 보고서를 통하여 사용자는 예측 모델이 적절한 요소를 기반으로 예측을 수행하고 있는지 확인하여 예측 결과를 의학적 판단에 참고할 수 있다. 만약 사용자는 예측 모델이 부적절한 요소에 중점을 두고 예측을 수행한다고 판단할 경우, 사용자가 개입하여 학습에 중점을 둘 요소를 직접 지정할 수 있도록 설계되었다.

#### 4. 4계층 디지털 트윈 플랫폼

본 연구에서는 디지털 트윈을 통한 TAVR 시술 후 환자관리 솔루션을 설계하였다. 환자의 RWD를 통하여 TAVR 시술을 받은 환자에 대한 디지털 트윈 모델을 구축하였으며, 이를 바탕으로 환자에 대한 모니터링 및 합병증 예측을 수행하는 디지털 트윈 플랫폼을 설계하였다.

##### 4.1 4개의 디지털 트윈 계층

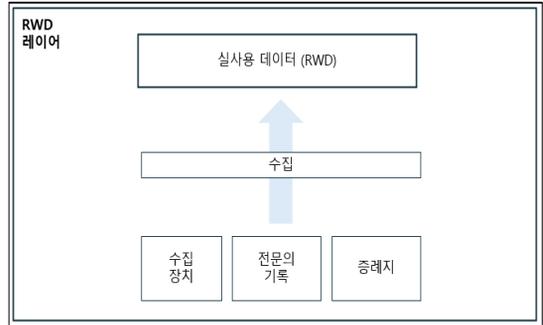
디지털 트윈 플랫폼의 역할과 관점에 대해 용이하게 접근하기 위하여 4개의 계층으로 추상화를 하였다. 기능에 따른 관점으로 구분된 각 계층은 다양한 관점으로 플랫폼을 접근하여 플랫폼의 각 구성요소를 더욱 명확하게



(그림 2) 4계층 디지털 트윈 구조와 구성요소

(Figure 2) 4-layered digital twin structure and components

하여 디지털 트윈 설계와 구축 시의 복잡성을 줄여 구축 시간을 단축시킬 수 있다. 그림 2는 디지털 트윈 플랫폼의 구성요소를 동일한 관점으로 묶은 4계층과 각 계층에 포함되는 플랫폼의 구성요소를 나타낸다.



(그림 3) RWD 레이어 구성도

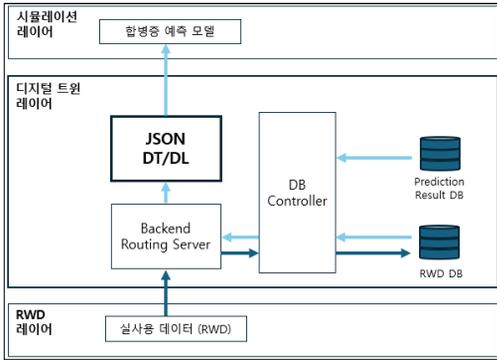
(Figure 3) Block diagram of RWD Layer

##### 4.2 첫 번째 계층: RWD 레이어

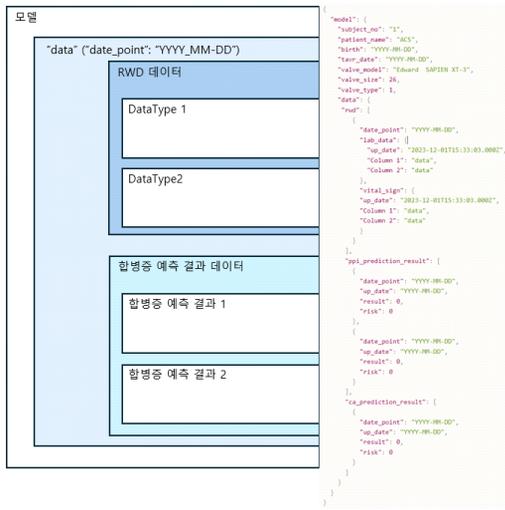
그림 3은 RWD 레이어의 구성도이다. Real-World Data(RWD) 레이어는 환자의 데이터 수집 관점으로 구성된 레이어로, 실제 환자를 디지털 트윈으로 투영하기 위하여 데이터를 수집하고 RWD로 가공하는 기능을 수행한다. 이 레이어에는 환자에 대해 시행되는 검사나 데이터를 수집하기 위한 각종 디바이스가 포함될 수 있으며, 환자에게서 얻어지는 RWD가 이 레이어에 포함이 된다. 본 레이어에서 수집되는 RWD는 디지털 트윈을 구성하는 데이터가 된다.

##### 4.3 두 번째 계층: 디지털 트윈 레이어

그림 4는 디지털 트윈 레이어의 구성도를 나타낸다. 디지털 트윈 레이어는 실질적으로 디지털 트윈의 데이터와 디지털 트윈 모델을 관리하는 레이어이다. 이 레이어에서는 RWD 레이어로부터 수집된 환자의 RWD를 저장 및 관리한다. RWD를 수집 시점과 함께 저장하는 RWD 데이터베이스가 존재하며, RWD 뿐만 아니라 디지털 트윈 프레임워크를 운영하기 위한 운영 데이터베이스, 합병증 예측 결과를 저장 관리하는 데이터베이스가 이 레이어에 존재한다. 디지털 트윈 모델은 이렇게 데이터베이스에 저장된 데이터들을 기반으로 JSON 형태로 정의된다. 이렇게 정의된 디지털 트윈 모델로 프레임워크 내부에서 모니터링과 합병증 예측이 수행되어 지고 계층



(그림 4) 디지털 트윈레이어 구성도  
(Figure 4) Block diagram of Digital Twin Layer



(그림 5) JSON DT/DL의 구조와 예시  
(Figure 5) Structure of JSON DT/DL and example

간의 상호작용 시 DTO(Digital Transfer Object)로써 기능하여 계층 간 원활한 상호 작용과 데이터 교류를 가능하게 한다.

#### 4.3.1 JSON DT/DL

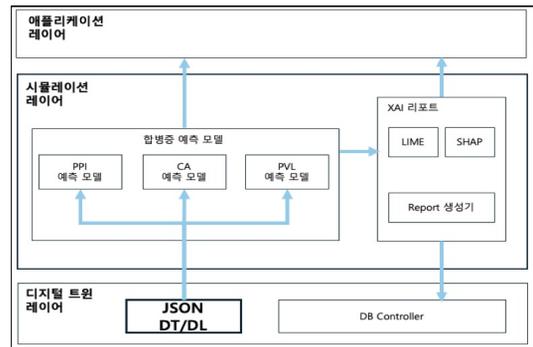
디지털 트윈을 정의하기 위하여 JSON 형식의 DT/DL(Digital Twin Definition Language)의 구조를 정의하였으며, 그림 5는 JSON DT/DL의 구조와 그 예시를 나타낸다. 데이터베이스로부터 환자의 RWD 데이터와 합병증 예측 결과 데이터들을 불러와 DT/DL을 구성하여 디지털 트윈을 정의하며, 이를 기반으로 디지털 트윈에 대한 모

니터링과 합병증 예측이 진행된다. 플랫폼 내부에서 본 JSON DT/DL으로 디지털 트윈 구성요소 및 계층 간 데이터 통신을 수행하여 플랫폼 내에서 DTO(Data Transfer Object)의 역할을 수행한다.

#### 4.3.2 데이터베이스 컨트롤러와 Backend Routing Server

데이터베이스 컨트롤러는 데이터베이스에 접근하여 조작을 수행하며, 플랫폼에서는 데이터베이스에 본 데이터베이스 컨트롤러만 접근을 허용하여 데이터의 보안을 높인다.

Backend Routing Server는 외부에서부터 들어오는 데이터 입력 등의 요청을 처리하고 정의된 디지털 트윈 모델이 알맞은 서비스로 갈 수 있도록 Backend Server 서버와 라우팅의 역할을 수행한다.

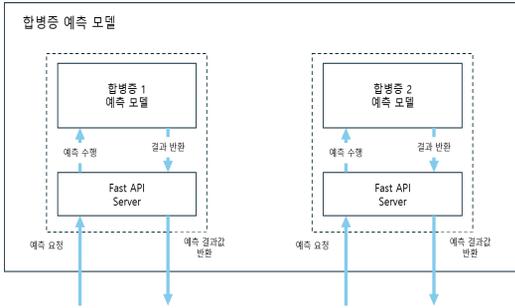


(그림 6) 시뮬레이션 레이어 구조도  
(Figure 6) Block diagram of Digital Twin Simulation Layer

#### 4.4 세번째계층 디지털 트윈시뮬레이션 레이어

그림 6은 시뮬레이션 레이어의 구조도를 나타낸 그림이다. 시뮬레이션 레이어에서는 인공지능 알고리즘으로 구축된 합병증 예측 모델을 활용하여 합병증을 예측하고 피드백 시스템을 구현한다.

디지털 트윈 레이어에서 생성된 디지털 트윈 모델로 합병증 예측을 수행하며 예측 결과는 다시 디지털 트윈 레이어로 전송되어 저장된다. XAI 라이브러리를 활용한 분석 및 보고서 제작과 피드백 시스템을 통한 분석 및 피드백도 본 레이어에서 이루어진다. 피드백 시스템에 대한 자세한 내용은 5장 ‘기술 및 예측 피드백 시스템’에서 다룬다.

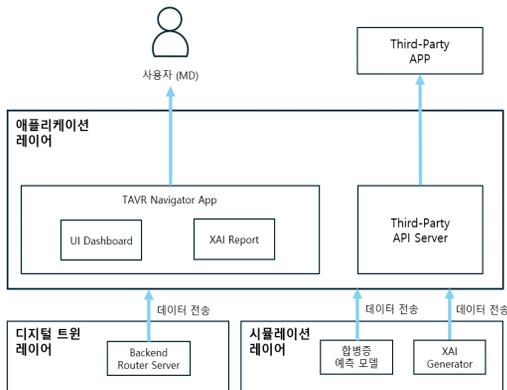


(그림 7) 시뮬레이션 레이어 구조도

(Figure 7) Block diagram of Digital Twin Simulation Layer

#### 4.4.1 합병증 모델 모듈화 구조

그림 7은 플랫폼 내에서 운용되는 합병증 예측 모델의 구조를 나타낸 것이다. 합병증 예측 모델은 각각 하나의 작은 API 서버로 합병증 예측을 수행하는 서비스를 제공하는 형태의 구조를 가지며, 서로 의존성이 없는 완전히 분리된 환경으로 구성되어 있다. 이러한 구조로 인해 각 합병증 예측 모델은 다른 모델과의 간섭 없이 개발, 유지 보수 및 관리될 수 있으며, 각 합병증 예측 모델에 대한 버전관리 등을 수월하게 할 수 있다. 각 합병증 예측 모델은 각 모델을 위한 Fast API 서버를 통하여 다른 서비스와 상호작용 한다. 다른 서비스에서 API로 JSON DT/DL을 통해 합병증에 대한 예측을 요청하면, 합병증 예측 모델은 예측을 수행한 후 이에 대한 결과를 반환하는 구조를 가진다.



(그림 8) 애플리케이션 레이어 구조도

(Figure 8) Block diagram of Application Layer

#### 4.5 네 번째 계층: 애플리케이션 레이어

그림 8은 애플리케이션 레이어의 구조도를 나타낸 것이다. 애플리케이션 레이어는 Post-TAVR 디지털 트윈 시스템에서 직접 사용자 혹은 서드파티 애플리케이션과 상호작용 하는 레이어이다. 이 레이어에서 사용자는 UI 대시보드를 통하여 환자의 디지털 트윈을 모니터링 할 수 있으며, 시뮬레이션 레이어에서 수행되는 분석과 예측의 결과들을 확인할 수 있다. 또한 본 디지털 트윈을 사용하는 외부의 서드파티 애플리케이션이 생길 경우 해당 애플리케이션을 위한 API 서버 등의 외부 통신 방법도 이 레이어에 포함될 수 있다.

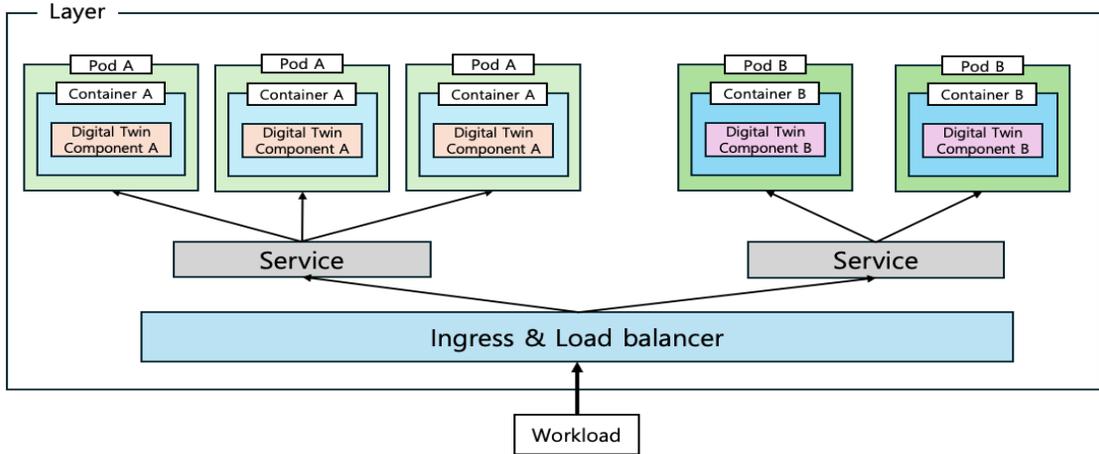
#### 4.6 마이크로 서비스 아키텍처

본 디지털 트윈은 마이크로 서비스 아키텍처로 구성된다. 디지털 트윈 구성요소 간의 상호작용으로 인해 발생하는 복잡성은 디지털 트윈을 구축할 때 해결해야 하는 과제이며[18], 이를 위하여 본 논문에서는 디지털 트윈의 각 구성요소들을 컨테이너화된 마이크로 서비스로 분리하여 각 구성요소들 간의 의존성을 줄이고 독립성을 향상시켜 디지털 트윈의 신뢰성과 구축 속도, 유지보수성을 향상시키는 방법을 고안한다. 각 디지털 트윈 구성요소 간의 독립성으로 인해 각 구성요소의 관리 및 개발, 유지보수를 할 때 다른 구성요소의 영향을 줄일 수 있으며, 한 구성요소에 변화에 대한 영향이 다른 구성요소에 미치는 것을 최소화 할 수 있다. 이는 디지털 트윈 시스템 내의 한 구성요소에 장애가 발생해도 다른 무관한 구성요소들은 정상적으로 작동할 수 있게 하여, 전체 프레임워크의 장애로 번지는 확산되는 것을 방지함으로써 프레임워크의 가용성을 증가시킨다.

또한 마이크로 서비스 아키텍처를 채택함으로써 새로운 기능을 위한 요소를 추가할 때 해당 요소만을 개발하고 컨테이너화 한 후 디지털 트윈에 통합하여 손쉽게 확장할 수 있으며, 특정 기능에 대한 워크로드가 급격히 발생하면 그에 맞게 해당 기능의 컨테이너의 개수를 조절함으로써 디지털 트윈의 확장성과 유연성을 보장할 수 있다.

#### 4.7 쿠버네티스를 통한 MSA 플랫폼 설계

마이크로 서비스 아키텍처 디지털 트윈을 구축하기 위하여 분리되고 컨테이너화 된 디지털 트윈 구성요소들을 쿠버네티스를 사용하여 오케스트레이션 하였다. 그



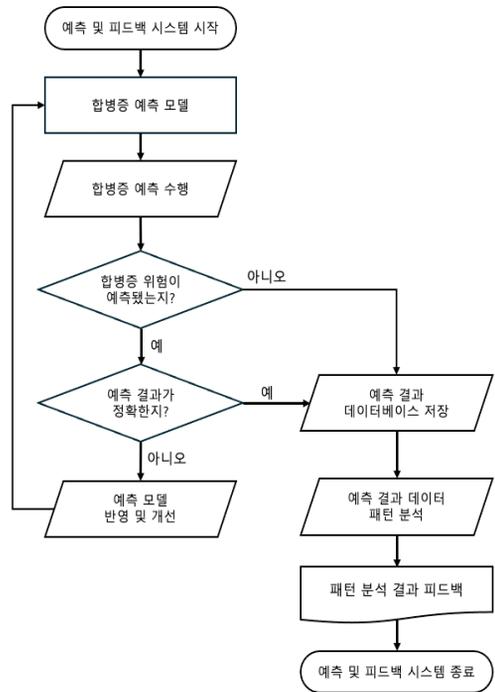
(그림 9) 쿠버네티스 내의 디지털 트윈 컴포넌트에 대한 리소스 구성  
(Figure 9) The resource configuration for Digital Twin components within Kubernetes

림 9은 쿠버네티스 상에서 구현한 마이크로 서비스 아키텍처의 디지털 트윈 구조를 표현한 것이다. 각 레이어 앞에 배치된 인그레스 리소스 혹은 로드 밸런서를 통하여 쿠버네티스 리소스인 서비스(쿠버네티스의 리소스로, 마이크로 서비스와는 다름)를 통해 워크로드는 적절한 리소스로 전송된다. 쿠버네티스를 통해 각 파드들의 상태를 감시하고, 장애가 발생한 파드들에 대한 자가 치유를 통해 플랫폼의 가용성을 확보할 수 있다. 쿠버네티스는 수요에 따라 파드의 레플리카의 수를 조절함으로써 스케일링을 수행한다.

### 5. 기술 및 예측 피드백 시스템

본 연구에서는 시스템의 지속적인 발전을 위해 피드백 시스템을 제시한다. 그림 10은 제시하는 피드백 시스템의 순서도를 나타낸다. 제시하는 피드백 시스템을 통하여 지속적으로 수집되는 환자의 합병증 예측 결과 중 합병증이 발생되었다는 결과들을 분석하여 패턴을 도출해내고, 이러한 분석 결과를 피드백으로 제공함으로써 합병증이 발생했던 기술 방법의 개선점을 분석할 수 있도록 지원할 수 있다. 또한, 피드백 시스템을 통해 합병증 예측 모델이 잘못된 예측 결과를 도출해냈다고 판단이 되거나 시스템을 사용하는 사용자가 예측 결과에 대한 의문을 제기할 경우, 이를 수용하고 분석함으로써 예측 모델의 지속적인 개선을 도모할 수 있는 방안을 마련할 수 있다. 이러한 방법으로 본 시스템은 TAVR 기술의

발전과 예측 모델의 지속적인 업데이트를 위한 피드백 메커니즘을 통해 TAVR 기술에 대한 합병증 가능성을 점진적으로 감소시킬 수 있다.



(그림 10) 피드백 시스템 순서도  
(Figure 10) Feedback System Flow Chart

## 6. 결 론

본 논문에서는 기존에 시행된 Post-TAVR 합병증 연구 결과들을 하나의 솔루션으로 제공될 수 있도록 다양한 인공지능 합병증 예측 모델을 운용가능한 디지털 트윈 플랫폼을 설계하였다. 환자의 RWD를 기반으로 구축한 디지털 트윈 모델을 통한 합병증 예측 수행 및 모니터링 가능한 신뢰도 높은 솔루션을 제공하는 방안을 제시하며, 제시하는 본 플랫폼을 통하여 TAVR 수술을 받은 환자를 관리하는 전문가가 환자에게 발생 가능한 위험과 합병증을 조기 감지하여 환자 관리를 효율적으로 진행할 수 있는 방안을 제공한다. 본 솔루션을 위하여 디지털 트윈 플랫폼의 기능별 관점으로 구성요소를 묶어 플랫폼 추상화 및 구현의 접근 방안을 제시하였다. 쿠버네티스를 통한 MSA로 디지털 트윈 구성요소 간의 종속성을 제거하여 복잡성을 낮추는 방안을 제시하였으며, 다양한 합병증 예측 모델을 컨테이너화하여 운용하는 구조를 제시하여 각 합병증 예측 모델 구현 및 관리와 추후 플랫폼에 새로운 합병증 모델 추가의 복잡성을 줄이는 합병증 모듈화 방안을 제시하였다. 또한 본 솔루션은 피드백 시스템을 제시하여 TAVR 수술과 합병증 예측 모델을 지속적으로 개선하여 합병증 발생 가능성을 점진적으로 줄여나가는 방안을 제시한다.

## References

- [ 1 ] Kitai T, Honda S, Okada Y, et al, "Clinical Outcomes in non-surgically managed patients with very severe versus severe aortic stenosis," *Heart*, Vol. 97, Issue 24, pp. 2029-2032, 2011.  
<https://heart.bmj.com/content/97/24/2029.short>
- [ 2 ] Grube, E, Sinning, J. "The "Big Five" Complications After Transcatheter Aortic Valve Replacement: Do We Still Have to Be Afraid of Them?," *JACC: Cardiovascular Interventions*, Vol. 12, Issue 4, pp. 362-369, Feb. 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcin.2018.12.019>
- [ 3 ] Vien T.Truong MD, Daniel Beyerbach MD, et al, "Machine learning method for predicting pacemaker implantation following transcatheter aortic valve replacement," *PACE*, Vol. 44, 2021.  
<https://doi.org/10.1111/pace.14163>
- [ 4 ] Joshua D. Aymond, Francis Benn, et al, "Epidemiology, evaluation, and management of conduction disturbances after transcatheter aortic valve replacement," *Progress in Cardiovascular Diseases*, Vol. 66, pp. 37-45, Jun. 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.pcad.2021.06.004>
- [ 5 ] Huang HD, Mansour M. "Pacemaker Implantation After Transcatheter Aortic Valve Replacement: A Necessary Evil Perhaps But Are We Making Progress?," *Journal of the American Heart Association*, Vol. 9, May 2020.  
<https://doi.org/10.1161/JAHA.120.016700>
- [ 6 ] Vincent Auffret, Rishi Puri, et al, "Conduction Disturbances After Transcatheter Aortic Valve Replacement," *Circulation*, Vol. 136, No. 11, Sep. 2017.  
<https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.117.028352>
- [ 7 ] Karyofillis P, Kostopoulou A, et al, "Conduction abnormalities after transcatheter aortic valve implantation," *J Geriatr Cardiol*, Vol. 15(1), pp. 105-112, Jan. 2018.  
<https://doi.org/10.11909/j.issn.1671-5411.2018.01.004>
- [ 8 ] Sá MP, Jacquemyn X, Van den Eynde J, et al, "Impact of Paravalvular Leak on Outcomes After Transcatheter Aortic Valve Implantation: Meta-Analysis of Kaplan-Meier-derived Individual Patient Data," *Structural Heart*, Vol. 7(2), Mar. 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.shj.2022.100118>
- [ 9 ] Cilingiroglu M, Paixao A, "PVL closure after TAVR: Yes, we can do it," *Catheterization Cardiovascular Interventions*, vol. 90, Issue 5, pp. 878, Nov. 1, 2017.  
<https://doi.org/10.1002/ccd.27365>
- [ 10 ] Bernard Cosyns, "Paravalvular Leak Assessment After TAVR: Can You Please Ask the Echocardiographer to Get Out of the Catheterization Laboratory?," *JACC Cardiovascular Interventions*, Vol. 13(11), pp. 1312-1313, Jun. 2020.  
<https://www.jacc.org/doi/full/10.1016/j.jcin.2020.03.046>
- [ 11 ] F. Tao, Bin Xiao, et al, "Digital Twin Modeling," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 64, pp. 372-389, Jul. 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.015>

- [12] D. -Y. Jeong et al., "Digital Twin: Technology Evolution Stages and Implementation Layers With Technology Elements," IEEE Access, Vol. 10, pp. 52609-52620, 2022.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174220>
- [13] G. Blinowski, A. Ojdowska and A. Przybyłek, "Monolithic vs. Microservice Architecture: A Performance and Scalability Evaluation," IEEE Access, Vol. 10, pp. 20357-20374, 2022.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3152803>
- [14] Florian Auer, Valentina Lenarduzzi, et al, "From monolithic systems to Microservices: An assessment framework," Information and Software Technology, Vol. 137, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.infsof.2021.106600>
- [15] Xu F, Uszkoreit H, "Explainable AI: A Brief Survey on History, Research Areas, Approaches and Challenges," Natural Language Processing and Chinese Computing, Vol. 11839, 2019.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-32236-6\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32236-6_51)
- [16] Seunghee Lee, Suehyun Lee, et al, "Explainable Artificial Intelligence for Patient Safety: A Review of Application in Pharmacovigilance," IEEE Access, Vol. 11, pp. 50830-50840, 2024.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3271635>
- [17] Minje Seok, Wooseong Kim, et al, "Machine Learning for Sarcopenia Prediction in the Elderly Using Socioeconomic, Infrastructure, and Quality-of-Life Data," Healthcare, Vol. 11(21), 2881, 2023.  
<https://doi.org/10.3390/healthcare11212881>
- [18] F. Tao, Q. Qinglin, "Make more Digital Twins," Nature, 573, pp. 490-491, 2019.  
<https://doi.org/10.1038/d41586-019-02849-1>

## ◎ 저 자 소 개 ◎



### 정 민 혁 (Min Hyuk Jung)

2023년 가천대학교 컴퓨터공학과 (공학사)  
2023년~현재 가천대학교 컴퓨터공학과 (석사과정)  
관심분야 : 인공지능, IoT, 빅데이터 분석, 디지털 트윈, 클라우드  
E-mail : bvm0121@gachon.ac.kr



### 이 강 윤 (KangYoon Lee)

1986년 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1996년 연세대학교 전자계산학과 (공학석사)  
2010년 숭실대학교 IT정책경영 (공학박사)  
2016년~현재 가천대학교 컴퓨터공학과 교수  
관심분야 : 인공지능, IoT, 빅데이터 활용, 솔루션, 디지털 트윈  
E-mail : keylee@gachon.ac.kr