

디지털 트윈 아키텍처를 활용한 무기체계 성능시험 지원체계 설계

김응수¹⁾ · 류기열^{*2)}

¹⁾ 아주대학교 국방디지털융합학과

²⁾ 아주대학교 소프트웨어학과

Design for Weapon Live Test Decision Support System Using Digital Twin Architecture

Eungsu Kim¹⁾ · Kiyeol Ryu^{*2)}

¹⁾ *Military Digital Convergence, Ajou University, Korea*

²⁾ *Department of Software and Computer Engineering, Ajou University, Korea*

(Received 7 June 2022 / Revised 4 August 2022 / Accepted 30 September 2022)

Abstract

The purpose of the weapon live test during the phase of development is to provide essential information to decision makers that verify and validate the performance capabilities of weapons. Due to varying allocation and high variance of test resources with an increase in the weapon system's capability, the test environment can get highly complex, which can lead to a decrease in the reliability of test results. This issue can be addressed by applying a decision support system that provides various timely information collected by resources during the test process. The decision support system can be designed by applying the concept of digital twins, that are defined as digital replicas of components, systems and processes. This paper describes a design methodology of the decision support system that consists of digital models and service functions using digital twin architecture. A case study illustrates the feasibility of the proposed methodology in supporting the weapon live test process.

Key Words : Weapon Live Test(무기체계 성능시험), Digital Twin(디지털 트윈), Decision Support(결심지원)

1. 서론

화포, 탄약, 유도무기, 특수무기 등으로 분류되는 화

력무기체계는 주변국 및 경쟁국과의 군사력 우위를 위하여 장사정/고위력 타격능력과 스텔스/초고속 비행 능력을 갖춘 첨단 무기체계와, 고출력 전자기 펄스 무기체계와 같은 신개념 무기체계의 개발에 힘쓰고 있다. 이러한 화력무기체계의 전력화 과정은 Fig. 1과 같은 무기체계 획득 수명주기의 단계로 진행된다. 개

* Corresponding author, E-mail: kryu@ajou.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

발단계(Engineering and Manufacturing Development)에서 개발 체계의 기술상, 운용상 요구사항을 만족하는지 판단하기 위한 평가(evaluation) 과정은 실 시험(live test)을 통해 평가에 필요한 기초자료를 수집하는 과정인 성능시험 과정이 선행되어야 하며, 구성품 성능시험, 부체계 성능시험 및 통합체계 성능시험 순으로 실시한다^[1,2].

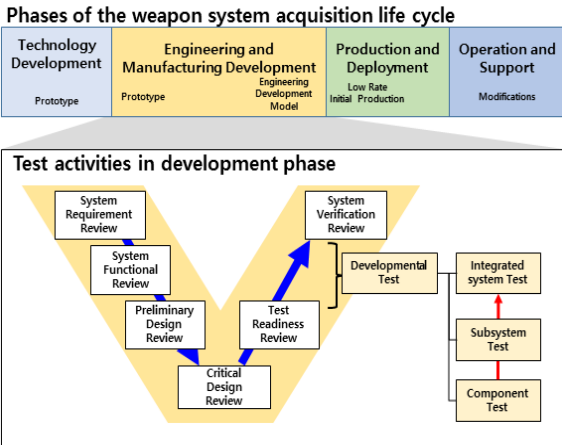


Fig. 1. Test activities in weapon system development phase

성능시험 환경의 복잡화 및 광역화는 안전한 시험 수행을 위한 안전조치 프로세스 적용과 체계적인 시험설계 등이 요구되고 있으며, 시험 전 과정에서의 신뢰성 향상을 위한 연구가 진행되고 있다. 기존 연구에서는 모델 기반의 안전조치 및 시험 운용절차 설계 연구를 통해 시험 수행 과정의 성숙도를 향상시키는 방법을 제안하고 있으며^[3-5], 시험요구사항 정의, 준비, 수행, 결과의 4단계 프로세스에 대하여 모델을 개발하고 시험 성숙도를 향상시키는 연구를 통해 시험결과에 대한 신뢰성 향상방법을 제안하고 있다^[6]. 시험 프로세스의 신뢰성 향상을 위한 이러한 연구들은 체계공학 관점으로 접근하여 수행 과정의 표준화에 중점을 두고 있다.

본 논문은 무기체계 성능시험 수행과정의 투명성 및 시험결과에 대한 신뢰성 향상을 위하여 시험 프로세스 내 주요 의사결정을 지원할 수 있는 데이터 기반 성능시험 지원체계의 설계방법을 제안하였으며, 디지털 트윈 컨셉 아키텍처인 5D(5 Dimension)-DT(Digital Twin) 모델과 Industry 4.0 프레임워크인 RAMI(Reference

Architecture Model Industrie) 4.0 참조모델을 활용하여 4단계 설계방법을 기술하고 있다. 4차 산업혁명을 선도하는 정보통신 기술의 지속적인 발전으로 무기체계 성능 시험분야 또한 수집된 다량의 정보를 신속하게 융합·분석하고 자동화 영역이 확대되는 환경으로 변화될 것으로 예측되며, 이에 부합하는 성능시험 지원체계의 설계와 시험 수행 프로세스의 신뢰성 향상 측면을 고려하였다.

본 논문에서 제안하고 있는 설계방법의 기여도는 다음과 같다. 1) 시험 프로세스 전 과정에서 주요 의사결정을 지원하는 정보 제공이 가능하며, 2) 시험자원의 변동에 따른 모델의 재사용 및 확장성, 서비스 구현을 위한 설계 유연성을 제공함으로써 체계의 재설계가 용이하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안하는 설계의 핵심이 되는 디지털 트윈 아키텍처와 관련된 개념 및 연구동향을 기술하였으며, 3장에서는 제안하는 체계의 설계방법에 대하여 상세히 설명하고자 한다. 4장은 제안하는 방법에 대한 실현 타당성(feasibility) 검증을 사례연구 결과로 제시하고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 이론적 배경

디지털 트윈의 용어는 2003년 미시간 대학교의 M. Grieves가 PLM(Product Life cycle Management) 강의에서 “현실 공간의 제품과 동일한 가상공간의 디지털 제품”의 개념으로 처음 소개되었으며, 2014년 white paper를 통해 현실 공간의 “물리적 제품”, 가상 공간의 “가상 제품”, 둘 사이의 데이터와 정보의 “연결”로 이루어진 개념 모델을 발표하였다^[7]. 디지털 트윈의 응용은 2016년 독일의 제조업 성장전략인 Industry 4.0에 따라 지멘스에서 지능형 공장으로서 진화시키기 위해 디지털 트윈을 적용하였으며, 미국(신미국혁신전략), 일본(일본재흥전략), 중국(중국제조 2025) 등 주요국가에서 혁신 전략을 수립하여 다양한 산업분야에 디지털 트윈을 적용하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다^[8]. 학술연구 결과를 기준으로 살펴보면, 스마트공장, 제품개발, 항공산업 등 제조분야에서 66 %로 압도적이며, 그 뒤로는 스마트시티(19 %), 헬스케어(15 %) 순이다^[9]. 제조분야는 생산력 극대화 노력 및 소량의 다품종 생산 프로세스에 대한 복잡화에 대응하는 신

속(agile)하고 유연(flexible)한 스마트 제조환경을 구축하기 위하여 IoT(Internet of Things), Big Data, Cloud, AI(Artificial Intelligence) 등의 정보통신 기술을 적용한 디지털 트윈을 연구하고 있다.

제조분야의 디지털 트윈 아키텍처 컨셉 모델의 대표적인 연구사례는 Table 1과 같다. M. Grieves et al.^[7]에서 컴포넌트 기반의 3D(3 Dimension)-DT 모델이 최초 제안되었으며, F. Tao et al.^[10]은 기존 3D-DT 모델 요소 외에 디지털 트윈을 통해 제공되는 “서비스”와 물리 개체, 가상모델 그리고 서비스를 통해 얻어지는 “디지털 트윈 데이터”를 추가하여 적용분야를 확대시킬 수 있는 5D-DT 모델을 제안하였다. K. Kruger et al.^[11]에서는 적용 체계가 대형화됨에 따라 다수의 디지털 트윈을 연결하고 종합하기 위한 6 Layer-DT 모델도 제안하는 등 디지털 트윈을 적용하기 위한 영역이 지속적으로 확대되고 있다.

Table 1. Study case of digital twin architecture concept model in manufacturing

Name	Structures	Main parts
3D-DT ^[7]	Component-based	3 components
5D-DT ^[10]	Component-based	5 components
6Layer-DT ^[11]	Layer-based	6 layers

제조 분야의 디지털 트윈 참조모델의 표준화는 Table 2와 같이, ISO(International Organization for Standardization) TC(Technical Committee) 184에서 표준화를 추진하는 ISO 23247과 독일의 Industry 4.0 추진을 위해 개발된 RAMI4.0 표준을 기반으로 IEC(International Electrotechnical Commission) TC 65에서 표준화하고 있는 IEC PAS(Publicly Available Specification) 63088이 대표적이다. ISO23247은 실시간 제어, 오프라인 분석, 제조자원의 안전성 확인, 예지보전 등을 위하여 프레임워크 참조구조 정의와 제조요소를 디지털로 표현하기 위한 디지털 모델링 속성정보 정의 그리고 참조 아키텍처 내에서 개체 간 정보 교환을 위한 방법을 정의하였다^[12]. IEC PAS 63088은 참조 아키텍처 모델 구조를 제품의 개발부터 서비스까지 생애주기 및 가치흐름에 대한 “수평적 통합 모델”과 제품, 생산공장, 통합 연결된 세계 순으로 물리적인 구성을 나타내는 “수직적 계층 모델”, 그리고 정보통신 기술

을 축으로 물리적 자산을 가상모델로 구현하여 서비스를 제공하는 “기능적 계층 모델”을 제시한다^[13]. 특히, 기능적 계층 모델(RAMI 4.0 layers)은 OSI(Open System Interconnection) 참조 모델 형태와 유사하게 6개의 레이어로 구성되며, 디지털트윈의 요소 및 기능을 표현하는 표준화된 프레임워크로서 상호운용성, 확장성, 복잡성을 관리하기 위한 최소한의 규칙을 정의하였다. Table 1의 디지털 트윈 컨셉 아키텍처를 특정 분야에 적용하기 위해서는 이러한 기능적 계층별로 기능 및 구조를 정의해야 하며, 세부적인 모델 설계 및 구현 순으로 연구되어야 한다.

Table 2. Digital twin reference architecture in manufacturing

Name	Organization	Structures
ISO 23247 ^[12]	ISO TC 184	5 components-based
IEC PAS 63088 ^[13]	IEC TC65	3 hierarchy models-based

Table 3. Study case of modeling and implementation methodology in application domain

Name	Method	Approach
[14]	MBSE based	Model representation and relationship description
[15]	SDLC based	Planning, requirement and analysis, design, development, testing
[16]	5 step approach	System and process definition, determining the model parameters, connection, service representation

디지털트윈 모델 설계 및 체계 구현방법에 대한 대표적인 연구사례는 Table 3과 같다. M. Glatt et al.^[14]은 복잡하고 대규모의 체계 개발에 적용하는 MBSE(Model Based System Engineering) 기반으로 모델링 과정에서 생성되는 수많은 구성요소들과 요소들 간의 다양한 관계성을 기술하는 방법을 제안하였으며, Y. Qamsane et al.^[15]은 계획, 요구사항 분석, 설계, 개발, 실험 과정으로 이루어진 SDLC(System Development Life Cycle)를 기반으로 디지털 트윈 모델을 설계하고

구현하는 방법론을 제안하였다. M. Resman et al.^[16]은 적용 체계의 정의, 프로세스 절차 정의, 디지털 모델 파라미터 정의 및 개발, 물리개체-디지털 모델 간 연결, 사용자를 위한 디지털 트윈 서비스 표현으로 접근하는 5단계 개발방법론을 제안하였다.

모델링은 물리적 개체(entity)를 컴퓨터에 의해 처리, 분석, 관리될 수 있는 디지털 형태로 표현하는 과정으로, 정보 표현방법을 제공하는 디지털 트윈의 핵심요소에 해당된다. 디지털 트윈 모델의 형태는 기하학적 모델(geometric model), 물리적 모델(physical model), 행동 모델(behavioral model) 그리고 규칙 모델(rule model)로 구분할 수 있다^[8]. 기하학적 모델은 물리 개체에 대하여 컴퓨터상에서 정보를 변환하고 처리할 수 있는 자료구조를 가진 기하학적 모양 및 외형 측면을 기술함으로서 표현되는 모델이며, 물리적 모델은 물리개체에 대하여 기하학적 모델에서 표현하지 않은 속성(attribute)과 제약 조건(constraint)을 기술함으로서 표현된다. 행동 모델은 물리 개체의 기능 수행, 변화 대응 활동, 다른 요소 간 상호작용, 건전성 관리 등 다양한 행동을 기술함으로서 표현되며, 규칙 모델은 과거 자료, 전문적 지식 그리고 사전 정의된 논리를 통해 추출된 규칙을 기술함으로서 논리적 사고, 판단, 평가, 최적화 및 예측 능력을 갖는 가상모델로서 표현된다.

3. 성능시험 지원체계의 설계방법

본 절에서는 5D-DT 모델을 활용하여, 체계역할 정의, 아키텍처 컨셉 및 기능 정의, 모델 설계, 서비스 기술 단계로 개발하는 4단계의 무기체계 성능시험 지원체계의 설계방법을 제안하고 있다. Table 3의 기존 디지털 트윈 구현 방법은 제한된 공간과 반복 임무를 수행하는 제조환경에서 범용으로 적용할 수 있는 자원의 모델링 방법^[14]과 디지털트윈 개발방법론^[15,16]을 제안하였다. 이러한 연구결과는 국방 분야와 같은 다른 운용 환경에 적용할 경우, 특성을 반영하지 못하여 적용성이 낮아지는 한계를 가지고 있어, 무기체계 성능시험 환경을 고려한 구체적인 설계 방법을 제안하고자 한다. 시험요구조건에 따라 무기체계 성능시험에 투입되는 시험자원의 수 및 종류가 변경되는 특성을 고려하여, 디지털트윈 모델의 재사용 및 확장성, 설계 유연성을 제공할 수 있는 객체지향 모델링 방법을 적용하고, 이를 토대로 모델 간 연계를 통한 서비스를 제공하는 서비스 기술방법을 제안하고자 한다. 시험 프로세스 과정에서 요구되는 세부적인 서비스의 기술 방법은 MBSE의 모델링 언어 중 하나인 UML(Unified Modeling Language)을 사용하여 서비스를 구성하는 모델의 표현과 관계성을 기술하였다.

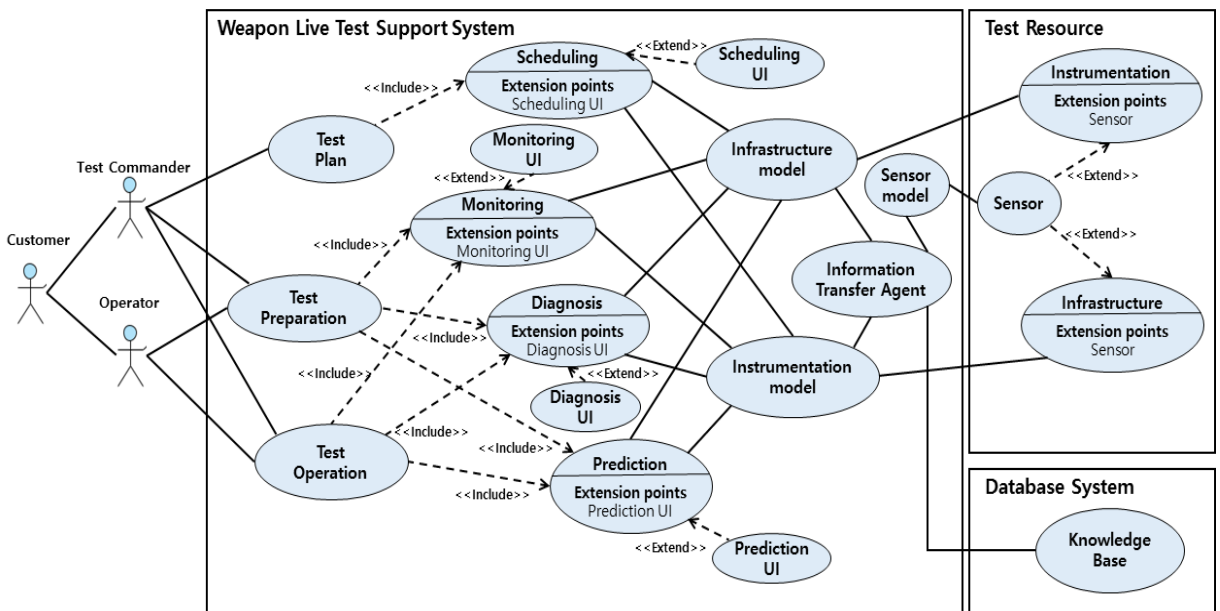


Fig. 2. Use case diagram of roles of weapon live test support system

3.1 체계역할 정의

성능시험 지원체계 설계의 첫 번째 단계는 체계의 역할 정의이다. 요구되는 성능시험 지원체계의 역할은 Fig. 2의 유스 케이스 다이어그램(use case diagram)으로 표현하였다. 성능시험 지원체계는 각 시험 프로세스에서 역할을 수행하도록 정의되며, 시험 프로세스는 시험 계획(test plan), 시험 준비(test preparation), 시험 수행(test operation) 순으로 구성된다. 시험 계획단계에서의 체계의 역할은 투입되는 시험자원의 운용 일정 수립, 계측 장비의 배치 일정수립, 시험대상 체계의 준비 일정수립 등 각 자원별 계획된 일정을 시뮬레이션하여 요구사항 변화에 따른 최적의 계획을 투명성 있고 신속하게 결정할 수 있도록 지원하는 것이다. 시험 준비 단계에서는 시험 대상체계의 저장 현황 등의 준비 상태를 모니터링하고, 투입되는 시험자원에 대하여 운용 신뢰성 및 안정성을 사전에 확인하기 위하여 건전성 진단 및 예측 서비스를 지원한다. 시험 수행단계에서는 실시간으로 획득되는 데이터를 기반으로 상황 모니터링 및 상태 진단, 예측 서비스를 제공하여 최적의 시험 상태를 유지하기 위한 주요 결심사항을 지원한다.

3.2 체계 아키텍처 컨셉 및 기능정의

체계 설계의 두 번째 단계는 체계 아키텍처 컨셉 및 기능의 정의이다. 3.1절에서 정의한 역할을 수행할 수 있는 체계의 설계를 위한 아키텍처 컨셉 정의는 5D-DT 모델을 기반으로 Fig. 3과 같이 정의하였다. Table 1의 대표적인 아키텍처 컨셉 모델에서, 단순 디지털 모델의 개념을 표현한 3D-DT와 네트워크 환경에서의 정보 연결 및 통합 관점에서 표현한 6Layer-DT 아키텍처 컨셉은 정의된 체계의 역할을 수행하는 기능을 표현할 수 없으므로, 디지털 트윈 모델을 이용한 서비스 기능 요소를 갖는 5D-DT를 활용하여 무기체계 성능지원 지원체계의 아키텍처 컨셉을 정의하였다. 시험에 투입되는 시설, 장비 및 프로세스 등의 물리 개체를 물리적 세계의 시험자원 영역으로 정의하고, 이에 각각 대응하는 가상 세계의 모델을 개체 모델(entity model), 프로세스 모델(process model)로 구성되는 디지털 트윈 모델 영역으로 정의하였다. 물리적 세계의 시험자원을 통해 획득되는 데이터 및 정보 그리고 데이터베이스 형태로 저장된 규칙, 기준 자료 등의 기반 지식정보 등을 데이터 영역으로 정의하고, 데이터 영역의 정보를 기반으로 설계된 모델과 모델 간 연관관계를 기술함으로써 의사결정 지원에 필요한 각

각의 서비스 기능을 서비스 영역으로 구성되도록 컨셉을 정의하였다.

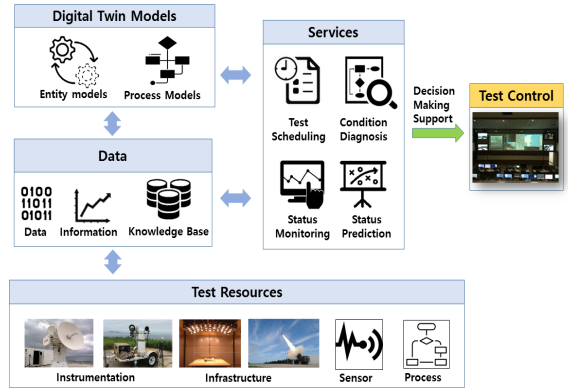


Fig. 3. System architecture concept based on 5D-DT structure

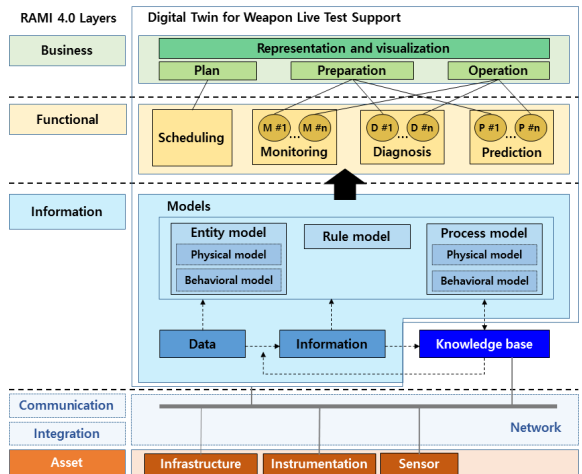


Fig. 4. Detailed relationships between domains based on RAMI 4.0 layers

체계 아키텍처 컨셉을 기반으로 성능시험 지원체계를 설계하기 위한 세부 기능 정의는 Fig. 4와 같다. RAMI 4.0 디지털 트윈 참조 아키텍처 모델의 정보통신기술 기반 수직적 계층구조를 참조하여 시험지원체계의 계층별 기능 정의 및 구조를 세부적으로 기술하였다. 물리적 세계의 시험자원은 네트워크를 통해 성능시험 지원체계와 연결되며, 성능시험 지원체계의 정보 계층에서 네트워크를 통해 교환되는 데이터를 기반으로 정보 생성 및 저장 기능을 수행한다. 또한 물

리적 세계의 시험자원을 디지털 모델로 표현한 개체 모델과 시험 프로세스에 대한 디지털 모델인 프로세스 모델이 물리적 모델과 행동 모델의 조합으로 생성된다. 시험지원체계의 기능계층에서는 서비스의 역할에 따라 정보계층의 디지털 모델들의 연관관계를 기술하여 서비스 기능을 구현한다. 비즈니스 계층은 시험 프로세스의 각 단계로 구성되며, 단계별로 연계되는 기능 계층의 서비스를 이용한다. 동일 서비스 일지라도 시험 단계에 따라 모델 간 연관관계가 다르게 설계되어야 하므로 다수의 하위 서비스가 구성된다.

3.3 모델 설계

세 번째 단계는 시험자원의 디지털 트윈 모델을 설계하는 과정으로, 본 논문에서는 객체지향 방법론을 적용하여 모델링한다. Fig. 5는 시험자원의 디지털 트윈 모델의 추상적인 구조를 클래스 다이어그램(class diagram)으로 표현하였다. 시험자원의 디지털 트윈 모델은 자원의 종류에 따라서 Infrastructure, Instrumentation, Sensor, Process 모델 클래스로 구성된다. Infrastructure, Instrumentation, Sensor 모델 클래스는 개체 모델로서 Fig. 4에서 정의한 바와 같이 공통의 물리적 모델과 행동 모델을 정의하여 디지털 모델로 생성된다. Process 모델 클래스는 프로세스 모델로서 시험 프로세스의 속성을 담은 물리적 모델과 행동 모델을 정의하여 생성된다. 시험에 실제 투입되는 시험자원의 디지털 모델은 해당 모델 클래스의 서브 클래스로서 구체화된 개

체 모델로 정의되며, 해당 시험에 대한 프로세스 모델 또한 프로세스 모델 클래스의 서브 클래스로서 구체화된 디지털 모델로 정의된다. 이러한 방법은 객체지향 방법론의 추상화 개념에 부합하도록 클래스와 서브클래스의 관계를 상속(inheritance) 또는 결합(aggregation)으로 계층화함으로써, 객체지향 소프트웨어를 이용한 구현단계에서 모델의 재사용 및 시스템 확장이 용이하게 한다. 또한 시험에 투입되는 자원이 대형의 복합체계(system of systems)로 이루어진 경우, 모듈화를 통해 설계를 단순화함으로써 신속히 구현이 가능하며, 기능 개선이 필요한 경우, 설계 유연성을 제공하는 장점이 있다.

3.4 서비스 기술

마지막 단계는 3.1절의 체계 역할 정의에서 기술한 서비스(scheduling, monitoring, diagnosis, prediction)를 구현하기 위한 모델의 관계성을 표현하는 서비스 기술이다. 본 논문에서 표현한 서비스 기술은 클래스 다이어그램(class diagram), 액티비티 다이어그램(activity diagram), 시퀀스 다이어그램(sequence diagram)으로 표현하였으며, 구조적 모델링을 표현한 클래스 다이어그램은 네 개의 서비스를 통합하여 기술하였다. 서비스의 행동 모델링은 액티비티 다이어그램이나 시퀀스 다이어그램으로 표현하는데, 일정수립 서비스는 액티비티 다이어그램으로 표현하고, 모니터링, 진단, 예측 서비스는 시퀀스 다이어그램으로 표현하였다.

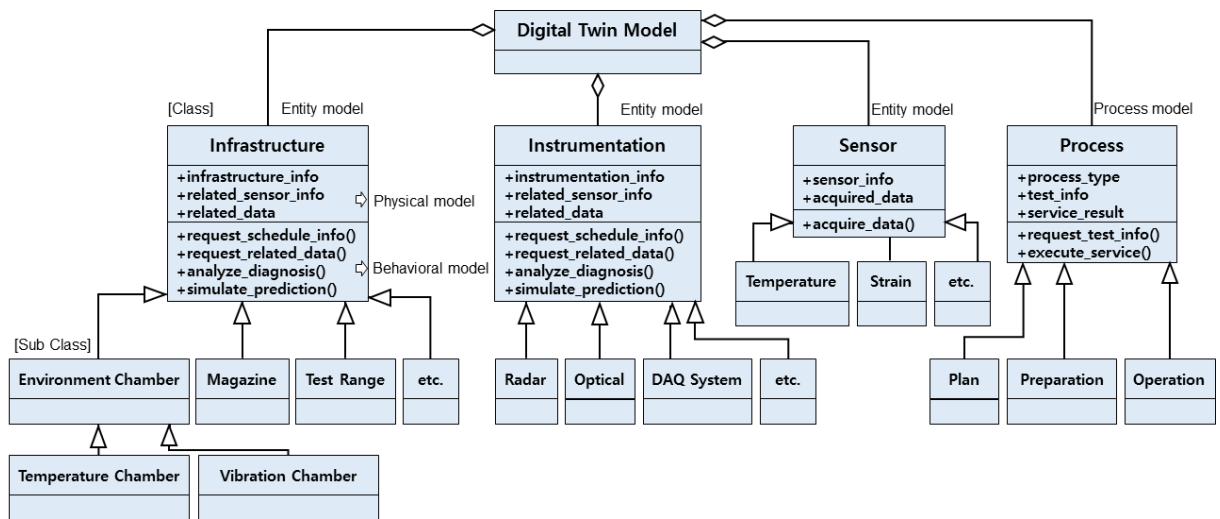


Fig. 5. Abstracted overview of class diagram for digital twin

서비스 구현을 위한 구조적 모델링 기술 결과는 Fig. 6과 같다. 서비스에 기술되는 모델은 시험자원에 해당되는 Infrastructure, Instrumentation, Sensor, Process 디지털 트윈 모델과 KB(Knowledge Base) 데이터베이스와의 연계를 위한 ITA(Information Transfer Agent) 모델로 구성된다. Process 모델은 시험 계획, 시험 준비, 시험 수행 중 하나의 프로세스가 되며, 각 시험자원에 대해 필요로 하는 정보를 요청하여 서비스가 구현되도록 행동 모델이 기술된다. Process 모델에서 요청한 정보의 제공을 위한 시험자원(Infrastructure, Instrumentation) 모델의 행동은 ITA 모델을 통해 KB에 저장된 정보를 획득하여 분석 또는 시뮬레이션 활동을 수행하거나, Sensor 모델로부터 수집되어 전달되는 데이터를 모니터링 정보로 변환하는 활동을 수행한다.

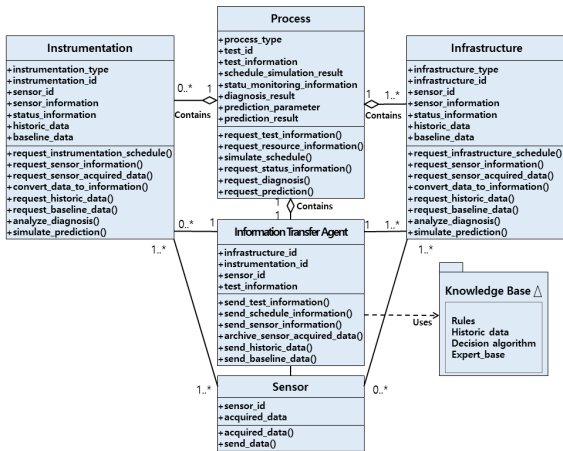


Fig. 6. Class diagram for structure description of service functions

일정수립 서비스는 시험 계획단계에서 수행되며, 투입되는 시험자원의 중요도 및 우선순위에 따라 시험 수행계획 및 자원의 투입계획을 재조정하는 시뮬레이션 서비스를 지원한다. 서비스를 구성하는 디지털 트윈 모델은 Plan Process 모델과 시험자원 모델, 그리고 ITA 모델로 구성된다. Fig. 7은 액티비티 다이어그램으로 기술한 일정수립 서비스의 행동 모델링 결과를 보여준다. 먼저 Plan Process 모델에서 ITA 모델에 일정수립을 위해 필요한 각 시험별 정보를 요청하고, KB로부터 시험 우선순위, 시험일, 준비일, 투입 자원 등의 정보를 담고 있는 시험정보가 전달된다. 각각의 시험에 대한 투입 자원이 식별되면, 투입 자원에 대한

정보를 해당 시험자원 모델에 요청하고, 시험자원 모델은 시뮬레이션에 필요한 각 자원의 정량적 요소 및 데이터를 ITA 모델에 요청하여 수집한다. 시뮬레이션의 수행은 시험 수행단계에서 중요도가 높은 자원 순으로 실시하며, 시험 우선순위 정보를 기반으로 자원의 투입 가능성을 분석하여 시험 및 자원투입 일정을 재조정한다. 서비스의 실행은 최초 시험 계획 또는 확정된 시험 계획에 대한 긴급 조정이 필요한 시점에 실행하여, 신속한 의사결정을 위하여 시뮬레이션 결과를 제공한다.

Fig. 8은 모니터링, 진단, 예측 서비스의 행동 모델링 결과를 시퀀스 다이어그램으로 기술한 결과이다. 모니터링 서비스는 시험 준비단계에서 시험자원의 현상태와 시험 수행단계에서 시험 상황에 대한 모니터링 정보를 표현하는 서비스를 지원한다. 이 서비스의 구현을 위해 연계된 모델은 Preparation 또는 Operation Process 모델, 시험자원 모델, ITA 모델, Sensor 모델로 구성된다. 시험자원 모델은 자원의 상태 데이터를 획득하는 센서 체계를 모델화 한 Sensor 모델과 연계되며, KB로부터 획득한 감도데이터 등의 센서 정보를 통해 센서 모델로부터 획득되는 데이터를 모니터링 정보로 변환한다. 모니터링 서비스는 실시간 상태 정보 제공을 통하여 시험환경의 신뢰성을 유지하기 위한 주요 의사결정을 지원한다.

진단 서비스는 시험 준비단계에서 시험자원의 건전성과 시험 수행단계에서의 상태를 진단하는 서비스를 지원한다. 이 서비스를 구현하기 위해 연계된 모델은 모니터링 서비스의 시험자원 디지털 모델과 동일하나, 진단 서비스와 관련된 모델 내부의 다른 물리적 모델 및 행동 모델이 연관된다. 진단 서비스는 수집된 정보를 기반으로 진단의 기준의 되는 규칙 및 전문 정보를 비교하여 상태를 진단하는 서비스로서, 진단 대상이 되는 시험자원의 디지털 모델에서 분석이 실행된다.

예측 서비스는 진단 서비스와 연계하여 시험 준비 단계에서 시험자원의 건전성 예측과 시험 수행단계에서의 상태 예측 서비스를 지원한다. 이 서비스의 구현을 위해 연계된 모델은 진단 서비스의 시험자원 디지털 모델과 동일하나, 예측 서비스와 관련된 모델 내부의 물리적 모델 및 행동 모델이 연관된다. 예측 서비스는 대상이 되는 시험자원의 디지털 모델에서 예측 시작 시점까지의 수집 정보를 기반으로 시계열 분석 인공지능 알고리즘, 회귀분석 통계 등을 이용하여 시뮬레이션을 실행한다.

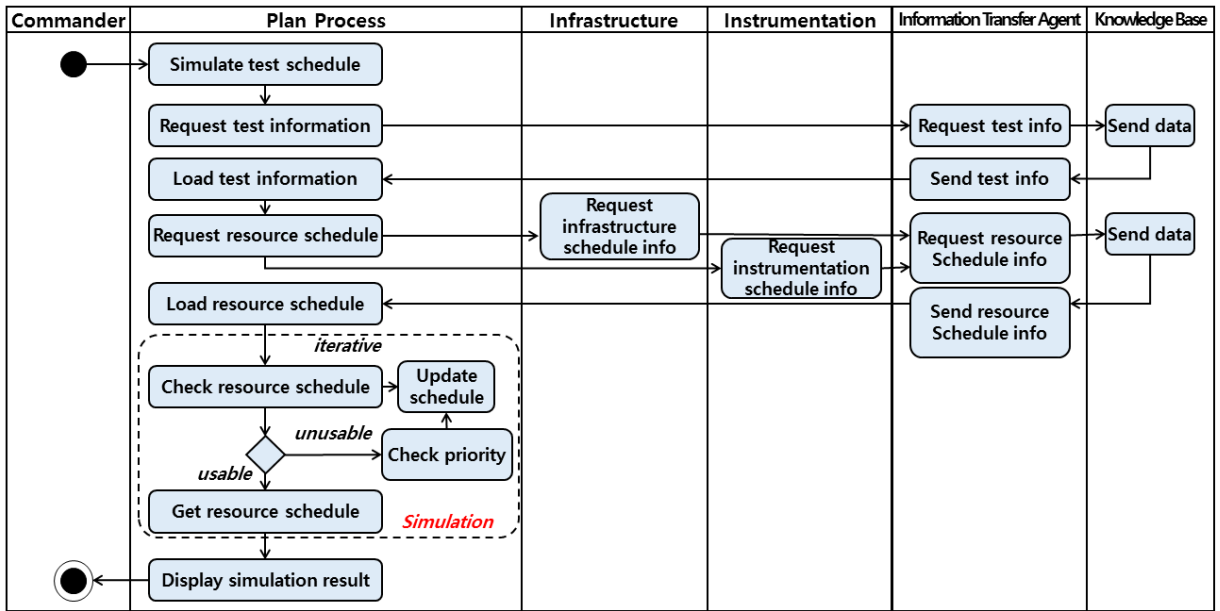


Fig. 7. Activity diagram for behavior description of scheduling service

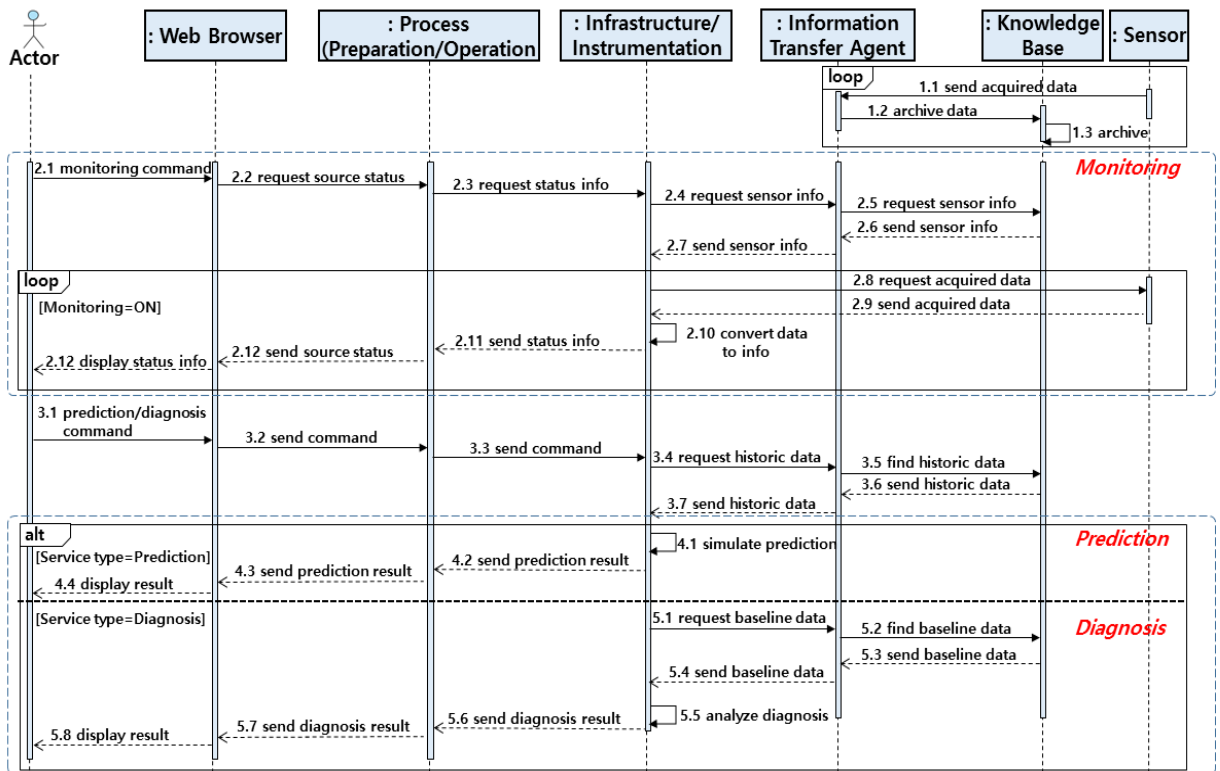


Fig. 8. Sequence diagram for behavior description of monitoring/diagnosis/prediction service

4. 사례연구

화력무기체계 성능시험 중, 환경시험을 대상으로 사례연구를 실시하였으며, 제안한 설계방법의 실현 타당성을 검증하기 위해 설정된 시나리오 상황에서의 일정수립, 상태 모니터링, 상태 예측 서비스를 구현하고 시뮬레이션을 실시하였다.

시험 종류 및 투입되는 시험자원 그리고 체계의 역할정의는 Table 4와 같다. 환경시험 중, 온도 시험을 대상으로 선정하였으며, 투입 자원은 시험대상을 저장하는 저장고, 시험을 수행하는 온도 챔버, 그리고 온도 데이터를 획득하는 센서 체계로 구성된다. 환경시험을 지원하는 체계의 역할은 시험 계획 단계에서 1개월 동안의 시험 계획을 시뮬레이션하는 서비스와 시험 수행단계에서 온도 챔버의 상태를 모니터링하는 서비스, 그리고 최대 30분 이후까지 온도 프로파일을 예측하는 서비스로 정의하였다.

Operation 프로세스 모델은 Process 모델 클래스로부터 공통 속성을 상속받아 서브 클래스로서 물리 및 행동 모델을 상세히 설계하였다.

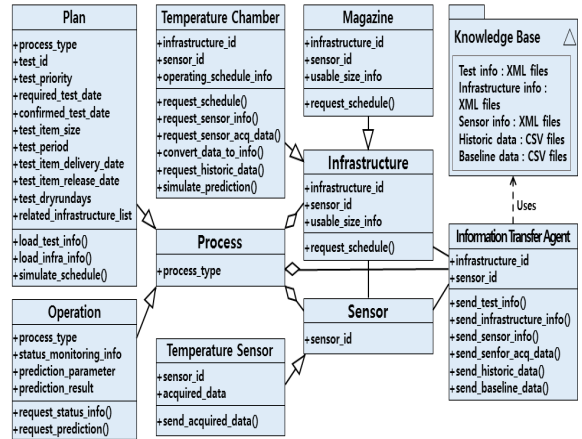


Fig. 9. Model design result

Table 4. Definition of System's roles

Name	Approach
Test type	Environmental Test - Temperature
Test Resources	Magazine, Temperature chamber, Sensor signal acquisition system
System's role	Supporting processes : Plan, Operation 3 services - Scheduling : Tests schedule simulation for 1 month - Monitoring : Temperature condition of temperature chamber - Prediction : Prediction of temperature condition after 30 minute

서비스 구현을 위한 모델 설계는 3.3.절에서 제안한 모델링 방법을 적용하였다. Fig. 9는 화력무기체계 환경시험 지원체계의 역할 구현을 위해 설계한 모델이다. Magazine과 Temperature chamber 모델은 Infrastructure 모델 클래스로부터 공통 속성을 상속받아 서브 클래스로서 세부적인 물리 및 행동 모델을 설계하였으며, Temperature Sensor 모델 또한 Sensor 모델 클래스로부터 상속되어 서브 클래스로 설계하였다. Plan과

서비스의 구현은 본 논문에서 제안한 서비스 기술 결과를 쉽게 구현할 수 있는 Python 객체지향 개발언어를 사용하였으며, 디지털 트윈 모델을 구성하는 4개의 모델을 클래스로 구현하고, 이를 상속하는 서브 클래스로서 투입되는 자원의 모델을 구현하였다.

시험 계획단계의 일정수립 서비스 구현은 Fig. 7의 행동 모델링 기술 결과를 기반으로 모델 간 데이터의 요구 및 전달 순서를 구현하였다. 일정 재조정 시뮬레이션 기능은 기존에 반영된 1개월 시험일정 중, test_id=2인 시험의 일정 변동 시나리오가 설정된 상황에서 최적의 새로운 일정을 제시하도록 구현하였다. 자원 별 시뮬레이션 순서는 중요도가 높은 온도 챔버를 우선적으로 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 반영하여 저장고의 가용 저장량을 기준으로 시험 대상체의 입·출고일에 대한 시뮬레이션을 실시한다. 온도 챔버 투입 일정에 충돌이 발생할 경우, 재조정을 위한 알고리즘의 슈도코드(pseudocode)는 Algorithm 1과 같다. KB에 저장된 XML 파일 형식의 시험 별 시험 정보와 각 시험에 투입된 자원의 정보를 기반으로 기존 시험일정과 변동이 요구되는 시험일정 각각이 생성되며, 시험 정보에 포함되는 시험의 중요도(priority)를 기준으로 시뮬레이션을 수행한다. Fig. 10은 일정 재조정에 대한 시뮬레이션 결과로서, 충돌이 발생하는 일정이 조정되었음을 보여준다.

Algorithm 1: Temperature chamber scheduling

input : original_schedule_list, required_schedule_list, test_information

output : simulated_schedule

```

while (length(simulated_schedule) ≤ 1 month)
  test_id=required_schedule_list[day]
  load the comparison_period[day+1:day+test_period]
  for comparison_period[i]
    append test_id at test_1
    append '0' at buffer
    if collision detected
      test_2=original_schedule_list[day+i]
      break
  if priority of test_1 > priority of test_2
    if collision detected to original_schedule
      append test_id at simulated_schedule
    else
      append buffer at simulated_schedule
  else
    append the test2 at simulated_schedule
do
  
```

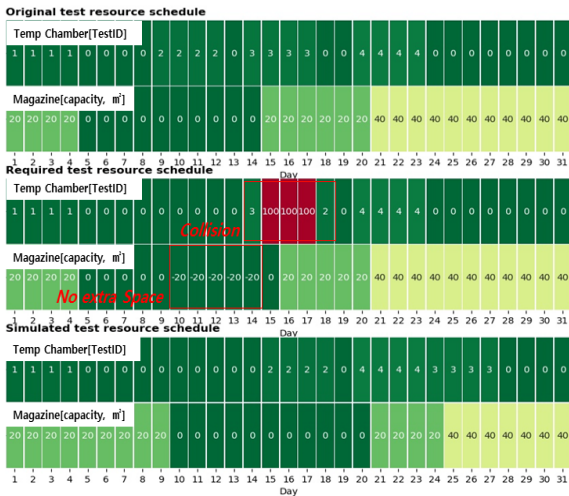


Fig. 10. Implementation result of scheduling service

시험 수행단계에서의 모니터링 서비스는 Fig. 8의 행동 모델링 기술 결과를 기반으로 구현하였다. 챔버의 온도 프로파일 상태를 모니터링하기 위하여 챔버 내부의 온도상태를 실시간 모니터링하고, 시험 대상체의 평가 부위에 대한 온도의 전달 상태를 함께 모니

터링하도록 구현하였다. 온도 챔버 모델에서는 시험 요구사항에서 정의된 기준 온도 프로파일 및 허용범위 정보를 KB에 저장된 기준 프로파일 정보(CSV 파일)를 요청하여 획득한다. 해당 온도 센서의 감도 정보 또한 KB에 저장된 XML 파일 형식의 센서 정보로부터 계산되고, 센서로부터 획득된 데이터를 물리 정보로 변환하여 시험 수행 프로세스 모델에 전달된다. 프로세스 모델에서는 온도 챔버 모델로부터 전달받은 정보를 기반으로 실시간 상태 정보를 제공하여, 장비의 제어를 통해 요구되는 온도 프로파일 조건을 유지하도록 서비스를 지원한다. Fig. 11이 모니터링 서비스 구현결과 화면이며, Algorithm 2는 상태 모니터링에서 허용범위를 초과하는 경우를 감지하는 알고리즘의 슈도코드이다.

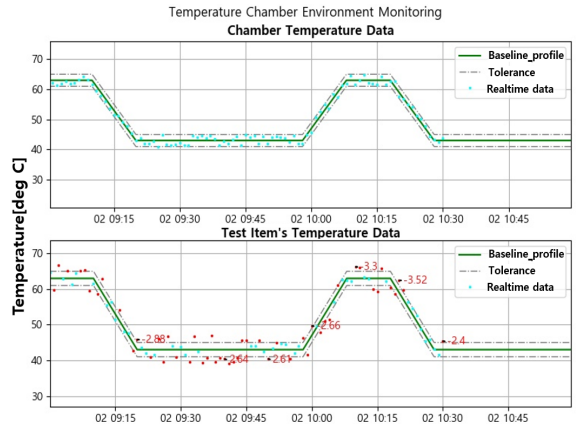


Fig. 11. Implementation result of monitoring service

Algorithm 2: Status monitoring service

input : real_time_sensor_data, baseline_profile_data, sensor_information

output : status_monitoring_data

sensitivity=linear_regression(volt, degC)

```

while (monitoring ON)
  x_t=sensitivity * real_time_sensor_data at t
  baseline_t=baseline_profile_data at t
  x_t_tol=required tolerance of x_t
  display x_t, baseline_t, x_t_tol
  if |x_t - baseline_t| > x_t_tol
    set alarm to ON
  
```

do

시험 수행단계에서의 예측 서비스는 고온에서 저온 영역으로 전환되는 과정에서 30분 이후까지의 온도 프로파일을 예측하는 서비스를 딥러닝(deep learning) 인공지능 모델을 적용하여 구현하였다. 온도 챔버 모델에서 수행하는 예측 시뮬레이션의 수행은 KB에 저장된 시뮬레이션 시작시점까지의 온도 데이터(CSV 파일)를 요청하고, 학습데이터로 가공하여 학습과정을 우선 수행한다. 예측모델은 시계열 예측 RNN(Recurrent Neural Network) 모델 중 하나인 LSTM(Long Short Term Memory)을 적용하여 모델을 설계하고 학습을 실시하였다. 학습결과를 반영한 예측 모델에 의한 예측 결과는 Fig. 12와 같으며, 최대 30분 이후 시점까지의 예측값과 실제값 간 차이는 Table 5에서 보여주는 것처럼 최대 1.6 °C의 차이를 보였다. 예측 시뮬레이션을 수행하여 생성된 예측 정보는 시험 수행 프로세스 모델을 통해 온도 챔버 운용자에게 제공되며, 시험 요구조건을 유지할 수 있도록 장비를 제어하기 위한 의사결정 지원기능의 실현 가능성을 검증하였다.

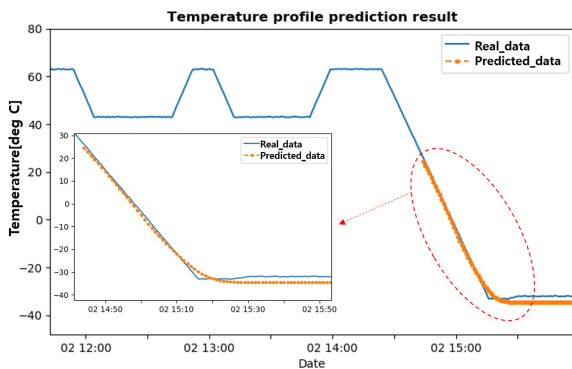


Fig. 12. Implementation result of prediction service

Table 5. Prediction result after 30 minutes

Elapsed time [min]	Real data [°C]	Predicted data [°C]	Difference [°C]
5	18.75	17.65	1.10
10	9.44	8.54	0.90
15	0.04	-1.16	1.20
20	-9.1	-10.70	1.60
25	-18.36	-19.09	0.73
30	-27.39	-26.25	-1.14

5. 결론

본 연구는 국방분야 중, 화력무기체계 성능시험에서 시험 과정의 투명성 및 결과의 신뢰성을 향상시키기 위하여 수행하였다. 의사결정이 필요한 시험 프로세스에서 시험자원으로부터 획득된 데이터를 기반으로 분석, 예측된 정보를 신속히 제공하는 체계의 적용을 방안으로 제안하였으며, 스마트 제조환경 구축에 적용하는 디지털 트윈 아키텍처를 활용하여 4단계로 이루어진 체계 설계방법을 제안하였다.

설계방법의 제안에 앞서 아키텍처 및 모델 설계를 위해 활용되는 디지털 트윈의 개념 및 표준 아키텍처, 개발방법론 등의 연구동향을 논하였으며, 제안하는 체계의 역할 정의, 디지털 트윈 아키텍처를 활용한 체계 컨셉 및 기능 정의, 디지털 트윈 모델 설계, 체계 서비스 기술 순으로 제안하였다. 특히, 시험요구조건에 따라 투입되는 시험자원의 변동성이 높은 무기체계 성능시험 환경에서 체계의 재설계가 용이하도록 모델의 재사용 및 유연성, 확장성을 고려한 객체지향 방법론이 적용되었다.

제안한 설계방법에 대한 실현 타당성 검증은 환경 시험을 대상으로 설정된 시나리오 상황에서의 일정 수립, 상태 모니터링, 상태 예측 서비스를 구현하여, 정의된 성능시험 지원체계의 역할 수행 가능성을 확인하였다. 일정 재수립 서비스의 제공은 시험 계획 단계에서 의사결정의 신속성 및 투명성 향상, 상태 모니터링 및 예측 서비스의 제공은 시험과정과 결과에 대한 신뢰성 향상을 도모할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 실시한 사례연구는 다소 단순한 시험 프로세스를 갖는 시나리오를 선정하여 제안하는 설계방법을 검증하였다. 추후 연구에서 다수의 시험자원이 상호 연계된 복합 환경에서 운용되는 무기체계 성능 시험 지원체계의 구현 연구를 통해 모델 설계방법의 구체화와 교환 데이터 표준화 등이 필요하며, 예측서비스 대상에 따라 적용되는 예측 모델에 대한 사례연구를 실시하여 서비스 구현방법을 고도화하고자 한다.

References

- [1] Technical Guide for Test and Evaluation of Weapons System, DAPA, pp. 24-35, 2013.
- [2] Test & Evaluation Management Guide 6th Edition,

- Defense Acquisition University, U.S.A, pp. 12-28, 2012.
- [3] S. H. Ye and J. C. Lee, "Model-Based Architecture Design of the Range Safety Process for Live Fire Test with Enhanced Safety," *Journal of the Korea Safety Management & Science*, Vol. 16, No. 2, pp. 43-52, 2014.
- [4] W. Park and J. C. Lee, "Model-Based Approach to Flight Test System Development to Cope with Demand for Simultaneous Guided Missile Flight Tests," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 20, No. 1, pp. 268-277, 2019.
- [5] W. Park and J. C. Lee, "Model-Based Design and Enhancement of Operational Procedure for Guided Missile Flight Test System," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 20, No. 4, pp. 479-488, 2019.
- [6] B. J. Yoo et. al., "Systems Engineering based Live Fire Test of Weapon Systems," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 28-35, 2012.
- [7] M. Grieves, "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication," *White Paper*, Vol. 1, pp. 1-7, 2014.
- [8] Q. Qi et. al., "Enabling Technologies and Tools for Digital Twin," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 58, pp. 3-21, 2021.
- [9] A. Fuller et. al., "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," *IEEE access*, Vol. 8, pp. 108952-108971, 2020.
- [10] F. Tao et. al., "Five Dimension Digital Twin Model and Its Ten Applications," *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 25, No. 1, pp. 1-18, 2019.
- [11] K. Kruger et. al., "A Six-Layer Architecture for Digital Twins with Aggregation," *SOHOMA 2019*, SCI 853, pp. 171-182, 2020.
- [12] ISO DIS 23247, ISO TC 184/SC 4/WG 15, 2019.
- [13] IEC PAS 63088 - Smart Manufacturing Reference Architecture Model Industry 4.0(RAMI4.0), IEC TC 65, 2017.
- [14] M. Glatt et. al., "Modeling and Implementation of a Digital Twin of Material Flows based on Physics Simulation," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 58, pp. 231-245, 2021.
- [15] Y. Qamsane et. al., "A Methodology to Develop and Implement Digital Twin Solutions for Manufacturing Systems," *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 44247-44265, 2021.
- [16] M. Resman et. al., "A Five-Step Approach to Planning Data-Driven Digital Twins for Discrete Manufacturing Systems," *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 8, pp. 1-25, 2021.