

지하공동구 디지털 트윈 체계 및 요구기능 설계에 관한 연구

A Study on the Design of Digital Twin System and Required Function for Underground Lifelines

정민우, 이희석, 신동빈
안양대학교 도시정보공학과

Min-Woo Jeong(jmw1045@gmail.com), Hee-Seok Lee(lhshrk4@gmail.com),
Dong-Bin Shin(dbshin@anyang.ac.kr)

요약

지하공동구의 도시 생명선 기능유지를 위해서는 24시간 모니터링을 수행해야 하며 부족한 인력을 대체하기 위한 기술개발이 필요하다. 일반적인 관리방법으로는 지하 공간 특성을 반영하기 어려워 본 연구에서는 지하 공동구를 대상으로 공간정보 기반의 디지털 트윈 시스템 요구사항을 도출하였다. 물리적 공간과 가상공간으로 구분하였으며, 물리적 공간은 멀티모달 영상센서 체계 구축의 기반이 되는 센서의 종류와 배치도를, 가상공간은 지하공동구에 대한 시스템 아키텍처를 구성하였다. 그리고 업무에 따른 시스템 기능을 제시하였다. 지하공동구 디지털 트윈을 통해 재난을 예방하고, 조기에 대응하여 도시 생명선의 기능유지에 효과적일 것으로 예상된다.

■ 중심어 : | 디지털 트윈 | 지하공동구 | 공간정보 | 모니터링 |

Abstract

24-hour monitoring is required to maintain the city's lifeline function in the underground facility for public utilities. And it is necessary to develop technology to exchange the shortage of human resources. It is difficult to reflect the specificity of underground space management in general management methods. This study proposes underground facility for public utilities digital twin system requirements. The concept of space is divided into physical space and virtual space, and the physical space constitutes the type and layout of the sensor that is the basis for the construction of the multimodal image sensor system, and the virtual space constitutes the system architecture. It also suggested system functions according to the task. It will be effective in preventing disasters and maintaining the lifeline function of the city through the digital twins.

■ keyword : | Digital twins | Underground Lifelines | Spatial Information | Monitoring |

* 이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부, 행정안전부, 국토교통부, 산업통상자원부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020-0-00061, 디지털트윈 기반의 지하공동구 화재-재난 지원 통합플랫폼 기술개발)

접수일자 : 2021년 03월 26일

심사완료일 : 2021년 04월 29일

수정일자 : 2021년 04월 29일

교신저자 : 정민우, e-mail : jmw1045@gmail.com

I. 서론

지하공동구는 전력, 통신, 수도, 난방 시설과 같은 도시 생명선(life line)을 지하의 일정 공간에 공동으로 수용하고 관리하는 도시기반시설물이다. 이러한 지하공동구를 통해 지하시설물 유지관리를 위한 반복굴착과 지하 공간의 무분별한 사용을 피할 수 있으며, 도시 미관 개선, 재해 예방, 도로 구조의 보전 및 교통의 원활한 소통 등을 확보할 수 있다[1].

지하공동구는 시민 생활과 직결되는 도시 생명선을 담고 있어, 지하공동구에 재난재해가 발생하면 지하공동구는 물론 함께 연결된 지상 영역까지 피해가 확산하여 큰 혼란을 초래할 수 있다. 지하공동구에서 관리하는 도시 생명선의 기능유지를 위해서는 24시간 모니터링과 점검 체계 등의 시설물 관리 기법이 필요하다.

시설물 관리 기법은 순찰자의 육안관찰을 통한 외관 조사 및 CCTV를 통한 감시 수준에 머물러 있어 신뢰도가 낮을 뿐 아니라 넓은 면적의 시설물을 모두 점검하기에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 다양한 센서를 설치하여 시설물 관리에 활용하고 있는데, 실시간으로 현장을 관리하고 현장 데이터를 분석하여 화재나 재난 상황을 예측하여 대응할 수 있도록 다양한 기술이 개발되고 있다. 그중 디지털 트윈(digital twin)은 물리적(physical) 공간과 동일한 디지털(digital) 쌍둥이 공간을 구현하는 것을 의미한다. 일반적으로 다양한 센서를 통해 아날로그 형태의 자료를 수집하고 이를 디지털 데이터로 1:1 변환 저장하는 것을 정적인 디지털 모델이라 한다면, 디지털 트윈은 1개의 데이터가 N개의 지식과 솔루션을 만들고 물리적 자산의 최적화를 위해 실시간으로 피드백하는 동적인 모델을 말한다[2]. 또 다른 연구에서는 디지털 트윈은 물리적 자산이나 프로세스를 디지털로 복제(modeling)한 것으로, 물리적 자산으로부터 생산되는 데이터와 상시 연계되어있는 살아 있는 시스템을 구현한 것으로 정의한다[3]. 따라서 디지털 트윈은 3차원 좌표가 포함된 공간정보를 바탕으로 현실과 유사한 가상공간을 구축하고, 다양한 분석과 시뮬레이션 통해 분석 결과를 현실 공간에 피드백(feedback)하는 데 목적이 있다.

일반적으로 제시되고 있는 디지털 트윈의 시설관리

방법을 살펴보면, 구축된 3차원 공간정보 위에 순찰 기록, 점검사항, 이동 경로, 시설 제어 등에만 활용이 치중되어 있다. 그러나 지하공동구 특수성 때문에 시설물에 대한 3차원 모델링 정보의 변화탐지 및 갱신을 할 수 있어야 하고, 일반적인 시설물에 잘 설치되지 않는 가스, 온도, 소리 센서 등을 통해 다각도의 이상 상황을 탐지하여 지하공동구 관리업무를 확실하게 보조할 수 있는 센서와 공간정보 기반의 통합관리 시스템이 필요하다.

이러한 배경에서 본 연구는 지하공동구의 디지털 트윈 시스템 요구사항 및 기능 도출이 목적이다. 이를 위해 지하공동구 특성을 고려하여 디지털 트윈 체계에 대한 방향성을 정립한다. 그리고 지하공동구와 관련된 업무 관계자를 대상으로 심층 인터뷰를 진행하여 지하공동구 관리의 주요 이슈와 요구사항을 도출한다. 도출된 이슈를 기반으로 지하공동구 디지털 트윈 구축을 위한 물리적 공간과 가상공간 설계 방안을 제시하고, 마지막으로 다양한 이상 상황에 대한 시나리오를 적용하여 지하공동구 업무지원을 위한 시스템 요구기능을 제시한다.

II. 지하공동구와 디지털 트윈 현황

1. 지하공동구 데이터 구축 현황

현재 지하 공간에 대한 3차원 공간정보는 지하공간통합지도 사업을 통해 구축되고 있다. 지하공간통합지도는 지하 공간을 개발·이용·관리함에 있어 기본이 되는 지하시설물(상수도, 하수도, 전기, 통신, 가스, 난방), 지하구조물(지하철, 지하보도, 지하차도, 지하상가, 지하주차장, 공동구), 지반(시추, 관정, 지질) 등 15종의 지하정보를 3D 기반으로 통합·연계하는 공간정보를 구축하고 있다[4]. 지하공간통합지도는 제작·작업규정에 따라 제작된다[5]. 작업규정에 따르면 지하시설물 중 관로형 세밀도는 제작기준 LOD(level of detail) 4에서 3차원 실사모델, 관로 연결부 처리, 형태 및 재질 구분, 실사 영상 텍스처만으로 구축하며, 구조물의 경우에도 LOD4에서 3차원 실사모델, 실사 영상 텍스처로 구축하여 객체 단위의 세밀도가 부족하다. 그중 공동구의 구축 방법은 출입구는 미개방 상태이며 내벽도 미구축

하고 있다. 테이블 설계서를 살펴보면 공동구의 깊이, 면적, 연장 및 속성정보 등 단순 정보만으로 구성되어 있으며, 또한 시설물 내에 다른 수용시설에 대한 정보도 구축되어 있지 않다.

이러한 지하공간통합지도는 객체 단위에 대한 정밀도와 세밀도가 지하공동구 디지털 트윈에서 활용하기에 적합하지 않기 때문에 지하공간통합지도에서 생산된 공간정보를 이용하여 지하공동구의 디지털 트윈을 제작하는 것은 한계가 있다. 지하공동구 디지털 트윈 구축을 위해 기본적인 공간정보는 현실 세계와 가상세계를 연결할 수 있도록 더욱 정밀한 데이터로 설계할 필요가 있다. 따라서 디지털 트윈 선행연구에서 모델링에 활용한 CityGML과 BIM IFC 표준을 검토하였다.

2. 디지털 트윈 관련 연구 현황

디지털 트윈에서 일반적으로 사용하는 공간정보 표준으로는 크게 CityGML과 BIM이 있다. CityGML은 3차원 도시 및 조경모델의 국제적인 정보교환을 목적으로 OGC(open geospatial consortium)가 개발, 현재 3.0 버전의 개선이 진행 중이다. 3차원 모형 생성, 데이터 수집, 시설물 관리와 같은 여러 분야에서 광범위하게 사용되고 있으며, 명칭에서 알 수 있듯이 GML(geographic markup language)의 응용 스키마이다. 5개의 LOD 구성을 통해 SW나 사용자의 요구에 맞춰 사용된다[6]. 디지털 트윈에 적용하기 위해서는 높은 수준의 정밀도가 필요하다.

다음으로 BIM(building information modeling) 표준이 있는데, 가장 대표적인 국제표준인 IFC(industry foundation classes)는 건물을 구성하는 오브젝트의 시스템적인 표현 방법의 사양을 정의, 응용 프로그램에서 사용하는 프로젝트 모델 데이터 구조도 함께 제공하는 건설 분야 국제표준 형식이다[7].

위와 같은 공간정보 표준들은 개별적이고 활용도가 다르지만 디지털 트윈 구축을 위해 다양하게 활용되고 있다. 디지털 트윈 구현을 위해 BIM 정보를 다루는 프레임워크를 도시정보 수준까지 확장해 현재까지 실용화된 BIM 기술을 기반으로 GIS 정보의 통합 활용을 위해 CityGML과 IFC를 연계하는 프레임워크도 제시되었다[8]. OGC에서 제안되고 있는 CityGML 3.0

Conceptual Model에서는 BIM 데이터셋과 같은 외부 리소스에 대해 도시 객체를 연결하여 손쉬운 통합이 되도록 제안하고 있다[9]. 방재 분야에서는 소방정보와 공간정보를 결합하기 위한 기반으로 CityGML을 확장하여 표준에 적합한 건물 방재 모델을 제안하였다[10].

디지털 트윈과 관련된 연구 현황을 살펴보면 디지털 트윈 구축 시 모델링 측면에서 CityGML과 IFC 등 데이터를 확장하여 구축하는 데 초점이 맞춰져 있다. 하지만 본 연구에서는 디지털 트윈 본연의 기능을 중심으로 현실을 반영하는 가상세계를 구현하기 위해 물리적 세계를 반영하기 위한 물리적 센서 설계를 통해 제시하고자 한다.

3. 지하공동구 관계자 인터뷰

지하공동구의 특징을 살펴보면 보안 시설이기 때문에 관계자 외에 외부인의 출입을 금지하고 있으며, 이동이 없는 정적인 공간으로 지하공동구의 효율적인 유지관리와 업무지원을 위한 심층 인터뷰를 진행하여 지하공동구의 관리 측면에서 이슈를 도출하였다.

인터뷰는 청주시 시설관리공단 환경사업부 공동구 팀 5인을 대상으로 2020년 8월 26일에 공동구 재난관리 DT연구단에서 진행하였다. 인터뷰 주요 내용으로는 관리 및 운영방식, 이벤트 사례, 이벤트 대응 방식, 공동구 문제점 및 개선 요구사항 등이 있다.

오창 공동구의 업무 관계자 인터뷰를 통해 도출된 지하공동구의 디지털 트윈 구축을 위한 이슈는 다음과 같다. 첫째, 가상세계를 통한 현실의 시설물 운영상태를 파악하기 위해서는 다양한 센서를 통해 관리되어야 하며, 이러한 센서 데이터는 지하공동구의 전 구간 사각지대 없이 제어할 수 있도록 물리적 공간 설계가 필요하다. 둘째, 지하공동구의 3차원 공간정보는 지상의 공간정보와 연계할 수 있도록 3차원 절대 좌표가 포함되어야 하며, 관리자의 요구사항인 상수도 연결관 나사 풀림, 내부 벽면의 미세 크랙 등 미세한 부분에서 이상이 발생하기 때문에 이를 통합적으로 관리할 수 있는 수준의 표현이 가능한 데이터 모델과 LOD를 적용해야 한다. 셋째, 물리적 공간에서 수집되는 센서 데이터와 가상공간을 통해 지하공동구의 관계자에 의사결정을 지원하기 위한 분석을 함에 있어 이벤트에 따른 상황별

데이터 분류작업이 필요하다. 마지막으로 지하공동구의 시설물에 이상 상황 발생 시 사고유형별 비상대응을 위한 시스템의 기능 및 연계 방안이 필요하다.

4. 소결

디지털 트윈 구축을 위해서는 대상 객체에 대한 현실 세계와 가상세계를 동시에 고려하여 설계해야 한다. 전력, 통신, 난방 등 주요 도시 생명선이 집중된 지하공동구는 인력을 통한 점검이 이루어지며, 24시간 인력을 통해 모니터링하고 있다, 그리고 수용시설, CCTV, 환풍기, 배수펌프 등 관리시설이 노후화되어 현재 재난에 취약한 상황이고, 밀폐된 공간의 특성으로 급속한 화재 확산 및 내부 온도의 상승, 고농도 연무 및 유독가스 발생할 수 있다. 또한, 재난 위치파악과 진입로 확보가 어려워 인명 피해를 비롯하여 대처가 늦어져 전 구간으로 피해가 확산할 수 있다.

본 연구에서는 지하공동구의 이러한 특수성과 업무 담당자 인터뷰를 고려하여 다음과 같이 지하공동구 디지털 트윈 구현을 위한 기본 방향을 설정하였다.

지하공동구의 디지털 트윈은 지하공동구 관리를 위해 다음과 같은 기능을 제공할 수 있어야 한다. 우선 지하공동구 관리에 필요한 현실의 정보를 CityGML과 BIM 모델 등을 통해 디지털 트윈에 반영해야 한다. 그리고 공간정보를 이용하여 지하공동구의 끊김 없는(seamless) 정보 연결이 가능해야 한다. 또한, 센서로 연동된 가상공간에서 AI 등 과학적인 분석을 수행하여, 현실의 위험을 사전에 예측하고 감지할 수 있는 고부가가치의 정보를 생산할 수 있어야 한다.

디지털 트윈 현황 및 지하공동구 특성과 요구사항을 반영한 지하공동구 디지털 트윈 컨셉은 [그림 1]과 같다. 지하공동구 디지털 트윈에서는 현실 공간의 센서에서 수집된 정보를 인지하고 이상 상황을 판단할 수 있는 AI 학습 기술을 적용해야 한다. AI 학습 시스템은 지하공동구에서 발생 가능한 위험 상황을 예측하고, 조기 이상 징후를 탐지해 안전사고 예방을 할 수 있는 지하공동구 디지털 트윈의 핵심 기술이라 할 수 있다. 그리고 기존의 디지털 트윈에서는 거론되지 않는 정보의 갱신 방안이 필요하다. 멀티모달 센서를 통해 변화가 생긴 공간정보를 빠르게 갱신하여 관리자가 대응할 수 있

도록 데이터를 구축해야 한다.

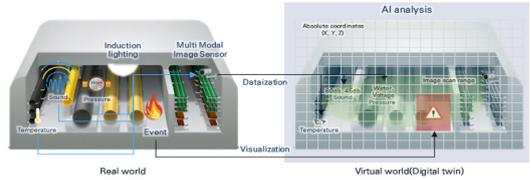


그림 1. 지하공동구 디지털트윈 컨셉

설계한 지하공동구 디지털 트윈 시스템이 활용되는 것을 가정한 시나리오를 작성하고 시나리오를 기반으로 업무지원을 위한 요구사항을 도출하여 지하공동구 업무지원을 위한 시스템 최소 기능을 도출해야 한다.

III. 지하공동구 디지털 트윈 체계 설계

1. 디지털 트윈 물리적 공간 설계

본 연구에서는 기존 연구와는 달리 지하공동구의 특수성과 현실세계를 정확하게 반영할 수 있는 디지털 트윈 구축을 위해 우선적으로 물리적 공간을 설계하였다. 현실을 반영하기 위해 [그림 2]와 같이 멀티모달 영상 센서를 설치한 환경을 지하공동구의 디지털 트윈 구현을 위한 물리적 환경으로 제안한다. 멀티모달 영상센서는 광, 소리, 가스 등의 개별 센서 데이터를 영상 기반으로 융·복합하여, 상황 분석에 대한 확실성을 높이기 위한 센서를 말한다.

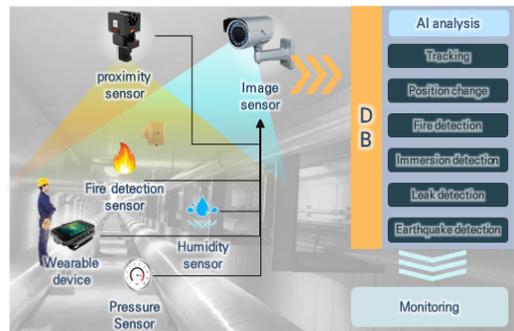


그림 2. 멀티모달 영상센서

지하공동구 관련 업무를 지원하기 위해 물리적 공간을 가상공간에 반영할 필요가 있으며, 이를 위해 3차원 공간정보

뿐만 아니라 현실의 정보를 데이터화하는 센서 정보가 추가되어야 한다. 멀티모달 영상센서는 CCTV(closed-circuit television) 영상과 개별 시설물에 설치된 각종 센서정보를 융합하는 센서로서, 개별 센서에서 생산된 모든 정보를 CCTV를 기준으로 융복합하여 데이터로 구축해야 한다.

지하공동구는 기존 운영설비의 노후화와 공동구 내에서의 이상 상황을 감지하기 위한 센서가 미비하여 다양한 센서를 설치할 필요가 있다. 지하공동구에서 모니터링이 필요한 이상 상황은 화재, 시설물 파손, 침수, 지진, 침입감지, 작업자 안전 확보 등이 있으며, 기본적으로 시설물 관리를 위해 설치하는 센서와 매칭 하여 다음 [그림 3]과 같이 도출하였다.

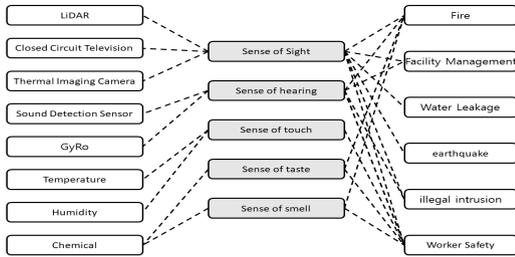


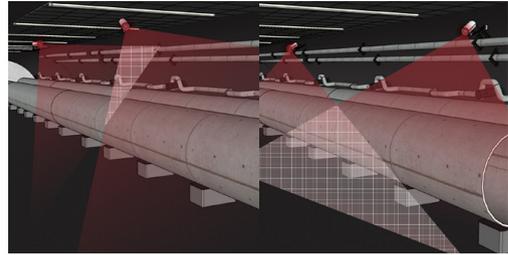
그림 3. 지하공동구 디지털 트윈 센서와 감지항목

가상공간에서 지하공동구 위험 상황을 예측하고 인지하기 위해서는 현실 세계의 시설물에 대한 실시간 운영상태를 나타내는 센싱 데이터가 필요하다. 지하공동구에는 적외선, 음향, 온도, 압력, CO, CO2센서 등과 같은 다양한 센싱 데이터가 생산된다. 하지만 CCTV를 비롯한 각각의 센서에서 생산된 데이터를 개별적으로 처리하면 분석 결과에 대한 불확실성이 높아질 수 있으며, 이에 기초한 의사결정은 잘못된 판단으로까지 연결될 수 있다[11].

먼저, CCTV는 관련 법령이나 규정이 미비하여 설치 목적과 제품에 따라 일관성 없이 설치되어왔다. 지하공동구 내에서의 CCTV는 공동구 본체 형태상 너비가 최대 3800mm인 한정된 공간임을 고려하여 사각지대를 최소화하고 시설물에 의한 시야 방해를 고려하여 위치를 선정한다. 설치 위치는 공동구 본체의 모서리, 옆면, 중앙의 위치를 고려해볼 수 있다.

CCTV를 그림 4와 같이 코너와 벽면 설치를 했을 경우 수용시설에 따라 음영 구역이 다수 발생하고 설치

대수 또한 중앙 설치보다 증가하여 유지 보수에 어려움이 발생할 수 있어 CCTV 영상센서의 경우 공동구 본체 중앙에 설치해야 한다.



Center Side
그림 4. 영상센서 설치 위치에 따른 감지 예상 범위

화학 센서의 경우 측정하려는 기체의 무게에 따라 설치 높이를 고려하여야 한다. 일산화탄소의 경우 산소보다 가벼우므로 상단에 이산화탄소의 경우 산소보다 무거우므로 하단에 배치한다. 습도 센서의 경우 상수관 파손과 우수 유입의 상황 파악을 위해 설치하므로 센서로 감지할 대상의 주변에 설치해야 한다. 설치 센서는 [표 1]과 같이 정리할 수 있다.

표 1. 센서 설치 고려사항

센서		고려사항
시각	LiDAR	유동성
	CCTV	음영 영역 최소화 사각 지대 최소화
	열화상	
청각	소리감지	영향이 없는 위치
	자이로	
촉감	온도	영향이 없는 위치
	습도	수도관 주변 배수구 주변
미각	화학	가연성 물질 주변
후각		케이블 주변
		기체 증량

멀티모달 영상센서 체계 구축을 위해 기반이 되는 센서의 배치는 순찰자가 수행하던 시설물 관리업무를 일부 대체할 수 있어야 한다. 공동구 공간별로 수용시설 및 부대시설을 고려한 센서 배치는 다음 [그림 5]와 같다.

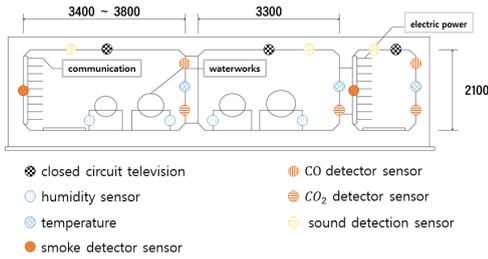


그림 5. 물리적 공간 설계 방안

2. 디지털 트윈 아키텍처 설계

지하공동구에 대한 공간정보기반의 효율적인 운영 및 관리, 업무지원을 위한 시스템 아키텍처를 [그림 6]과 같이 데이터, 분석, 서비스 3개의 레이어로 설계하였다.

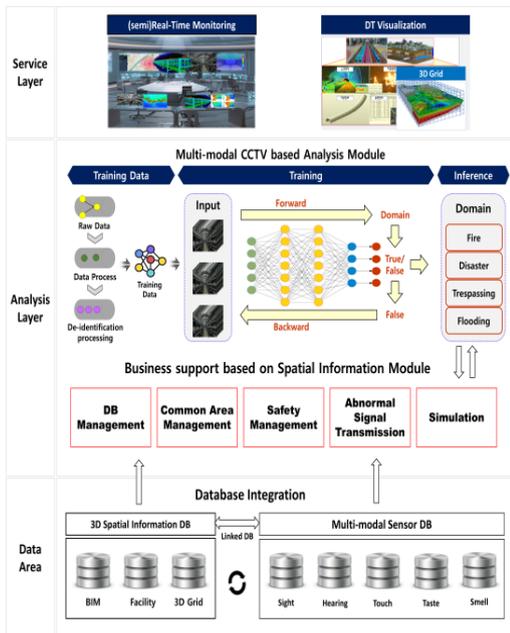


그림 6. 지하공동구 디지털 트윈 아키텍처

데이터 레이어는 지하공동구의 효율적인 업무지원을 위해 3차원 공간정보 DB와 센서 DB로 구성하였다. 3차원 공간정보 DB는 시설물의 위치와 형상 및 속성을 나타내는 BIM 기반의 3차원 공간정보 DB와 지하공동구의 시설물 속성정보를 저장 관리하는 시설물 DB, 지상과 지하를 연계하여 입체적인 공간을 분할하는 3차원 격자 DB는 [표 2]와 같이 분류하였다.

표 2. 지하공동구 관리를 위한 공간정보 분류

DB		내용
BIM	수용시설	전력, 통신, 상하수도, 냉난방 시설, 쓰레기 수송 관, 가스 시설
	부대시설	기계
		전기 장비
		소방 시설
제어 감지 시설	자동차 제어 시설	
시설	영상정보	시설 전면 및 측면, 주요 결합, 공사 전후 사진 등
	품질 관리 관련 정보	재료 인증서, 품질 테스트 기록, 관리 및 선택 테스트 기록 등
	수리, 보강 및 이력	유지 보강 공정, 적용 공법, 적용 범위, 기간, 시행자 등
	사고이력	날짜, 장소, 사고 원인, 조치 사항, 사고 당시 사진 등
	검사에 필요한 사항	특수 장비 목록, 시설별 운영 계획, 특별 조치 기록, 점검시주의 사항, 사용 제한 계획 등
	시설관리장부	날짜, 담당자, 관련 문서 갱신 기록 등
	측정 기록 및 통계 데이터	측정이 필요한 시설의 주요 구조 부분 측정 관련 데이터
3차원 격자	Raster	측정이 필요한 시설의 주요 구조 부분 측정과 관련된 데이터
	Vector	3 차원 모델 데이터, 완전한 3 차원 벡터 데이터, 그리드 크기 형식의 다중 모달 데이터
	Spatial	2 차원 데이터를 기반으로 한 상승 된 데이터를 2.5D라고도합니다.

BIM 기반의 3차원 공간정보를 통해 지하공동구의 세부적인 상태에 대한 시설물 객체를 체계적으로 관리하기 위해 시설물 관리 분야의 국제 산업 표준인 IFC 표준을 사용하는 것이 적합하다[12]. BIM은 다차원 가상 세계에서 시설물의 기획, 설계, 시공 및 유지관리 등과 같은 전 생애주기 동안 단계별로 생성되는 디지털 정보를 하나의 통합 모델로 활용할 수 있다. BIM에서 주요 업무 내용과 모델의 상세수준을 구분하기 위해 LOD는 100-500단계로 구성된다. LOD 100은 개념설계, LOD 200은 기본설계, LOD 300은 실시설계, LOD 400은 시공 상세 또는 조립에 준하는 세부적인 모델 표현 수준이다. LOD 500은 준공 모델링으로서 유지관리에 해당하는 표현 수준으로 객체 수가 다양하고 복잡한 기계, 배관, 배선 등과 같은 MEP(mechanical

electrical plumbing) 모델 정보의 표현이 가능하다 [13]. 시설물 유지관리 측면에서 BIM 기반 공간정보의 상세수준은 LOD 500을 기준으로 구축한다.

지하공동구와 같은 대형 시설물은 세부 객체로 구성된 부재 단위로 관리되고 객체 기반의 BIM 모델 특성과 연계하여 정보 매개체로 활용되어야 하며, BIM 기반의 시설물 유지관리를 위한 각각의 객체는 목적에 따라 다양한 관련 속성정보를 포함해야 한다[14]. 시설물 관련 속성정보는 모델의 특정 응용목적에 맞게 분석 및 처리하거나 3D 모델 외 객체의 특성을 추가로 기술하기 위해 사용되는 데이터 집합을 의미한다. 이에 따라 지하공동구의 통합관리를 위한 BIM 적용을 위한 As-Built 모델을 표현하는 시설물의 정보구성체계를 기존 업무지원 시스템에 맞추어 정리하였다. 따라서 시설물의 유지/관리를 위한 속성정보를 별도의 DB로 관리함으로써 점검, 진단, 예방 및 계획 업무 등 업무 관계자를 위한 효율적인 업무처리를 위한 정보의 제공이 가능하다.

지하공동구의 유지 및 관리하기 위한 가상공간에서 물리적 공간을 제어하기 위해 센서 DB를 시각, 청각, 촉각, 미각, 후각 5가지 기능으로 [표 3]과 같이 구분하였다.

표 3. 멀티모달 센서 분류

	센서	Cycle	타입
시각	LiDAR	5~20 FPS	Integer
	CCTV	5min	Video
	열화상	5min	Video
청각	소리감지	5min	Boolean
	자이로	5min	Boolean
촉감	온도	5min	Integer
	습도	5min	Integer
미각	화학	5min	Boolean
후각			

지하공동구에 설치된 멀티모달 영상센서로부터 수집되는 실시간 정보는 인간의 오감과 같은 기능으로 사람을 대신하여 시설물을 통합 관리하는데 최적화되어 있다. 멀티모달 영상센서로부터 수집되는 센서 값은 대부분 boolean, integer 값이며, 물리적 공간을 모니터링하고 위치정보를 추출하기 위한 시각과 같은 기능을 하

는 시각 데이터는 video 값으로 수집된다.

분석 레이어는 멀티모달 영상센서에서 수집된 데이터를 AI 학습을 통해 이상 상황을 추론하는 멀티모달 영상센서 기반의 분석 모듈과 지하공동구 유지관리의 의사결정을 지원하는 공간정보 기반의 업무지원시스템으로 구성된다.

멀티모달 영상센서 기반의 분석 모듈은 지하공동구를 관리하는 주요 점검 항목에 따라 학습데이터를 구축하고 학습데이터를 기반으로 AI 학습을 통해 이상 상황을 추론 및 예측하는 시스템으로 [그림 7]과 같이 처리한다.

이러한 지하공동구의 효과적인 업무지원을 위한 인공지능 기술을 적용한 멀티모달 영상센서 데이터의 분석을 통한 상황 패턴을 파악하고 이상 상황을 추론하기 위해 학습데이터의 품질이 중요하다.

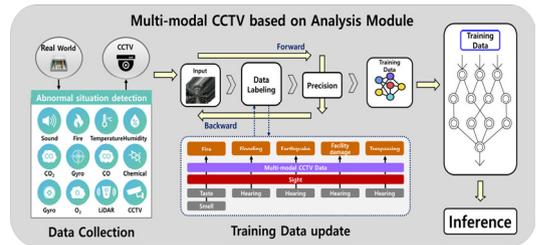


그림 7. 영상 기반의 분석 모듈 프로세스

학습데이터는 AI 학습을 진행하기 위한 목적에 따라 다양하게 변동 가능하며, 지하공동구의 이상 상황을 추론하기 위해서는 상황에 맞는 적절한 분류기준이 필요하다. 학습데이터 구축과정은 멀티모달 영상 데이터의 추출, 정제, 변환 등 전처리 과정을 거치고 데이터 라벨링(data labeling) 과정을 통해 AI 학습 목적에 맞는 적절한 분류기준으로 라벨링 된 데이터(labeled data)를 적재한다. 앞서 살펴본 요구사항에서 도출된 지하공동구의 센서를 통해 인지하여 점검하는 항목인 화재, 시설물 파손, 불법 침입, 지진을 기준으로 분류하고 전처리 과정을 거쳐 멀티모달 영상정보를 고품질의 학습데이터를 구축한다. 구축된 학습데이터는 AI 학습 모듈을 통해 지하공동구에서 발생할 수 있는 이상 상황에 대해 멀티모달 영상센서 데이터를 통해 분석과정을 수행하여 점검 항목에 대한 관측이 가능하다.

서비스 레이어는 지하공동구의 객체 단위의 관리 및

상태정보를 점검하고 갱신하기 위한 실시간 모니터링, 멀티모달 영상센서에서 수집된 데이터의 직관적인 공간표출을 위한 가시화 서비스로 구성하였다.

준 실시간 모니터링 서비스는 지하공동구의 유지/관리 측면에서 유형별 요구사항에 맞춰 업무 관계자에게 효율적인 업무처리를 위한 서비스를 의미한다. 지하공동구의 상시 모니터링을 수행하여 상태, 이상 점검, 이상 상황 정보 등의 정보를 AI 학습을 통해 도출하여 시설물의 안전관리에 있어 공간의 분포와 패턴을 파악하고 사전에 예측할 수 있다. 도출된 지하공동구의 상황 정보는 상황별 대응 시나리오와 연계하여 신속한 대응을 위한 서비스를 제공할 수 있다.

가시화 서비스는 물리적 공간에 설치된 멀티모달 영상센서로부터 수집된 각종 센서 정보와 지하공동구의 공간정보를 연계하여 입체적으로 표출하는 서비스를 의미한다. 또한, 격자체계를 통해 지하공동구의 객체와 실시간으로 수집되는 멀티모달 영상센서 정보가 연결되어 표현되며, 실시간 분석, 경고 기능을 포함한 시물레이션을 통해 관계자에게 지하공동구의 정보전달과 이해, 의사결정을 도울 수 있다. 이와 같은 서비스는 지하공동구의 기본적인 업무분류, 이벤트에 대한 유형별 상황에 따라 시나리오와 연계되어 신속한 대응을 위한 서비스를 제공하기 위한 기능이다.

IV. 지하공동구 디지털 트윈 요구사항 및 기능 도출

본 연구에서는 지하공동구의 모니터링을 위해 물리적 공간의 환경을 멀티모달 영상센서 기반으로 수집하여 디지털 트윈 환경을 구현하고 현실과 가상공간을 연결하여 효과적으로 지하공동구 관리업무에 활용할 수 있는 디지털 트윈 체계를 제시하였다.

지하공동구 디지털 트윈의 각 기능에 대해 효과적으로 활용하기 위해 관리실 근무자와 현장 근무자로 구분하여 6단계 상황에 따른 근무자의 요구사항을 충족해야 한다.

1. 관리실 근무자를 위한 시스템 요구사항

관리실 근무자 시나리오는 디지털 트윈을 활용하여 24시간 관리실에서 모니터링 진행 시 이벤트가 발생한 것에 대한 시나리오로 구성하였다. 상황에 대한 시나리오에 따라 관리실 근무자 행동에 맞춘 시스템 요구사항으로 시간 흐름 및 이벤트 상황에 따라 작성하였다.

첫 번째, “디지털 트윈 관리실 지원 업무”, 이는 이전 교대 근무자 근무시간에 이상 상황이 발생하였는지 인수인계를 하면서 시스템적으로 점검을 하는 절차로 시스템 요구사항으로는 관리 이력 조회를 통해 이벤트 상황에 대한 시간, 위치, 이벤트 내용, 현재 상황 등을 다음 근무자에게 쉽고 빠르게 전파하기 위한 기능이 필요하다.

두 번째, “지하공동구 모니터링” 기본적인 업무로 멀티모달 영상센서를 통해 수집되는 정보를 바탕으로 시설물에 대한 이상 점검을 하고, 현장 근무자 순찰 시 현장 근무자에 대한 안전관리를 진행할 수 있어야 한다. 시스템적으로는 현장 시설물에 있는 센서들이 연결상태가 올바른지 점검을 하고, 멀티모달 영상센서 정보 분석을 통해 이상 정보를 도출하여 알려주는 기능이 필요하다.

세 번째, “이벤트 발생” 이벤트 발생 상황 시 관리실 근무자는 이벤트 발생 위치 확인 및 어떤 상황인지 빠르게 파악할 필요가 있으며, 이를 현장 근무자에게 급히 전달할 필요가 있다. 시스템에서는 이벤트 지역에 대한 센서 정보가 빠르게 갱신되어야 하며, 현장 근무자에게 이벤트 상황을 전파하고, 현장으로 이동하도록 지원할 수 있어야 한다.

네 번째, “상황 대응” 이상 상황이 발생하고 외부 인력이 필요하다고 판단되면 관리실 근무자는 유관기관에 이벤트에 관해 설명하고, 대응을 요청해야 한다. 이때 시스템에서는 멀티모달 영상센서를 통해 수집되는 이미지 및 속성정보를 시각화하여 현재 상황에 대해 빠르게 인식할 수 있는 환경을 마련해야 한다.

다섯 번째, “소방시설 운영” 이벤트 상황이 초동대응으로 대처가 어려울 때 유관기관에 연락하여 소방시설을 운용한다. 이때 관리실 근무자는 현장 상황에 대처하기 위한 의사소통을 각 기관 및 현장 근무자와 진행하며, 시스템에서는 이벤트 위치 및 센서 정보를 통한

피해 상황을 모니터링 할 수 있어야 한다.

마지막으로 “상황 종료 및 복구” 상황이 종료되고 유관기관 및 상부에 보고할 보고 자료를 작성하기 위한 업무를 지원한다. 분석된 자료를 통해 피해 범위를 산정하고 이벤트 상황에 대한 전반적인 자료에 대한 기록을 조회하고 출력하기 위한 기능이 필요하다.

2. 현장 근무자를 위한 시스템 요구사항

현장 근무자 시나리오는 실제 지하공동구 순찰하는 업무 진행 시 이벤트가 발생 시의 시나리오로 구성하였다. 현장 근무자 시나리오 및 시스템 요구사항은 다음과 같다.

첫 번째, “디지털 트윈 관리실 지원 업무” 현장 근무자가 근무교대를 하기 위해 관리실로 와서 이전 교대자에게 이상을 확인하고, 시설물 관리 이력을 조회할 수 있는 기능과 현장 순찰 시 주의해야 할 구간에 대해 전달받기 위한 인수인계 기능이 필요하다.

두 번째, “지하공동구 모니터링” 현장 근무자의 모니터링 업무는 실제 순찰상황으로 위치 정보를 확인할 수 있어야 한다. 시스템에서는 격자체계를 통한 위상 관계 정립 및 안전을 위한 현장 근무자 위치를 추적하는 기능이 필요하다.

세 번째, “이벤트 발생” 상황이 발생하면 현장 근무자는 이벤트 장소로 이동하며, 매뉴얼에 따른 초기대응을 안 위험한 선에서 수행해야 한다. 상황 발생지역에 대한 정보를 지속적으로 받아야 하며, 초동대응을 수행하고 대응 절차를 체계적으로 확인할 수 있어야 한다.

네 번째, “상황 대응” 현장 근무자가 현장에 도착하고 현장 세부 사항을 상황실에 보고할 때 이미지 및 속성 정보 시각화를 통해 실제 현장 정보를 전달할 수 있어야 한다.

다섯 번째, “소방시설 운영” 소방시설이 운영되면 현장 근무자는 빠르게 안전한 지역으로 대피할 필요가 있다. 이때 시스템에서는 비상구 또는 대피로 경로를 알려주어 현장 근무자가 신속히 대피할 수 있도록 지원하기 위한 기능이 필요하다.

마지막으로 “상황 종료 및 복구” 현장 근무자는 상황 종료 후 관리 기록을 통해 이벤트가 발생한 지역에 대한 특징을 파악하고, 이벤트 원인에 대해 파악한다. 시

스템은 이를 지원하기 위해 다양한 기록을 조회/출력할 수 있도록 해야한다.

3. 디지털트윈 최소 기능 도출

상황실 근무자 및 현장 근무자의 시나리오를 바탕으로 지하공동구 디지털 트윈 시스템을 활용할 때에 시나리오에 따른 지하공동구 디지털 트윈 시스템 요구기능을 도출하였으며, 도출된 기능 중 중복되는 기능과 시스템에서 요구하는 기능을 추가하여 정리하면 [표 4]와 같다. 디지털 트윈 기능을 시스템 분류를 위해 구분하면 DB 관리 및 데이터 전송, 공동구 관리, 안전관리, 이상 신호 전송, 시뮬레이션 5가지로 분류할 수 있다.

지하공동구 업무담당자 요구사항 및 시나리오에 따른 시스템 최소 요구기능을 바탕으로 구성하였으며, 지하공동구 디지털 트윈 시스템 구축 시 최소 요구사항 활용이 가능하다.

표 4. 디지털 트윈 기능 요구사항

업무	내용
DB 관리	수집
	저장 및 관리
	변환
	전송
	통계 분석
	센서 정보 업데이트
시설 관리	관리 시설 현황 조회
	수용 시설 현황 조회
	관리 시설 순찰 및 검사
	수용 시설 순찰 및 점검
	관리 시설 연결 상태 표시
	관리 시설 상태 정보 표시
	수용 시설 연계 현황 표현
	수용 시설 현황 정보 표시
	소방 시설 관제 자료 조회 / 출력
	CCTV 제어
현장 상황 접수	
작업자 위치 조회	
현장 근무자의 위치 전달	
안전 관리	이상 유무 확인
	관리대장 작성
	상황 전파 기록 조회 / 출력
	재난 대응 조직에 상황 전파
	현장 지원 요청

이상 신호 전송	이상 상황 확인 및 표현
	이상 상황 별 데이터 확인 기능
	상황 전파 기능
시뮬레이션	대피경로 안내
	재난 확산 통제
	피해 확산 예측 및 추론
	분석결과 가시화

V. 결론

본 연구에서는 지하공동구의 특성을 반영한 디지털 트윈 구축 방안을 제시하였다. 지하공동구 업무담당자를 대상으로 인터뷰를 진행하여 방향성을 도출하였으며, 지하공동구 디지털 트윈은 현실 물리적 공간에 배치되는 센서와 가상공간을 구현하는 시스템으로 구분하였다. 물리적 공간은 시설물 관리업무를 일부 대체할 수 있도록 멀티모달 영상센서 체계 구축의 기반이 되는 센서의 종류와 배치도를 구성하였다. 가상공간에서 지하공동구에 대한 공간정보기반의 효율적인 운영 및 관리, 업무지원을 위한 시스템을 데이터, 분석, 서비스 3개의 레이어로 디지털 트윈 아키텍처로 구성하였다. 데이터 레이어는 지하공동구의 효율적인 업무지원을 위해 3차원 공간정보 DB와 센서 DB로 구분하였고, 분석 레이어는 멀티모달 영상센서에서 수집된 데이터를 AI 학습을 통해 이상상황을 추론하는 멀티모달 영상센서 기반의 분석 모듈과 의사결정을 지원하기 위한 업무지원시스템으로 구성하였으며, 서비스 레이어는 준 실시간 모니터링과 가시화 서비스로 크게 분류하였다. 마지막으로 지하공동구 디지털 트윈 요구사항을 관리실 근무자와 현장 근무자로 구분하여 지하공동구 디지털 트윈 기능 요구사항을 제시하였다. 지하공동구 특징과 업무 요구사항을 고려하여 효율적인 디지털 트윈 시스템 기능을 제시하였으며, 이는 지하공동구 모니터링 및 시설 관리를 위해서 실용적으로 활용할 수 있을 것으로 사료 된다.

본 연구는 초기 단계로 향후 연구에서는 지하공동구 디지털 트윈 데이터 형태와 IFC 표준을 적용한 디지털 트윈과 실제 현실정보를 반영하기 위한 센서 정보 등 구성요소에 관한 세부적인 연구, 실제 디지털 트윈 구현 이후 지하공동구 관리에 효과적인지 실질적인 검증과정이 필요하다. 향후 지속적인 연구를 통해 분야별

특성을 고려한 디지털 트윈 구축 방안을 제시하고 타 시스템 및 표준과 연계할 수 있도록 지속적으로 연구한다면 스마트시티 구현에도 이바지할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] 오원준, 조중연, 이민재, “지하공동구 활성화를 위한 관련규정 체계 개선에 관한 연구,” 한국산학기술학회 논문지, 제21권, 제8호, pp.563-571, 2020.
- [2] 김영훈, *디지털 트윈 어떻게 전개될 것인가?*, POSRI 이슈리포트, pp.1-12, 2018.
- [3] 사공호상, 임시영, “4차 산업혁명을 견인하는 ‘디지털 트윈 공간(DTS)’ 구축 전략,” 국토정책Brief, No.661, pp.1-6, 2018.
- [4] 김재명, 한승희, “3차원 공간정보데이터를 이용한 지하공간통합지도 구축 및 활용 방안,” 대한공간정보학회 학술대회, pp.89-92, 2019.
- [5] 국토교통부, *지하공간통합지도 제작 작업규정*, 2018.
- [6] 강태욱, 최현상, 황정래, 홍창희, “IFC에서 CityGML로 속성 맵핑을 위한 메타 데이터에 관한 연구,” 한국측량학회지, 제30권, 제6호, pp.559-565, 2012.
- [7] 서종철, 김인한, “건축 설계 단계에서 설계지침정보의 공유 및 교환을 위한 IFC 확장모델의 개발,” 한국CDE학회 논문집, 제13권, 제5호, pp.352-361, 2008.
- [8] 박소현, 한지수, 최림, 조찬원, “디지털트윈 구현을 위한 BIM 프레임워크 활용 방안,” 한국CDE학회 논문집, 제24권, 제4호, pp.361-372, 2019.
- [9] <https://www.ogc.org/standards/requests/219>
- [10] 황병주, 김장욱, 김태훈, “건물 방재 분야 정보의 상호 운용성을 위한 데이터모델 개발에 관한 기초연구,” 한국콘텐츠학회논문지, 제19권, 제4호, pp.30-40, 2019.
- [11] 김동순, 김병수, 박현문, 이병욱, 김우현, 정윤호, 김현석, 이광기, 김용국, “멀티모달 융합센서 기술 현황과 발전 방향,” KEIT PD 이슈리포트, 제11호, pp.162-181, 2017.
- [12] 구교진, 박상현, 조동현, “BIM 기반 건축물 스마트 유지관리 지원 COBie 문서 프로토타입,” 한국산학기술학회 논문지, 제20권, 제12호, pp.60-68, 2019.
- [13] 김지윤, *발주단체에서 SLA를 활용한 BIM 서비스 적용 수준 설정 기준에 관한 연구*, 경상대학교, 석사학위논문, 2016.
- [14] 김지은, 최현상, 강태욱, “BIM 기반 도시시설물 유지관리 시스템 요구사항 도출 및 프레임워크 구축,” 한국콘

텐츠학회논문지, 제14권, 제4호, pp.397-406, 2014.

저 자 소 개

정 민 우(Min-Woo Jeong)

정회원



- 2015년 2월 : 안양대학교 도시정보공학과(공학사)
- 2017년 2월 : 안양대학교 도시정보공학과(공학석사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 안양대학교 도시정보공학과 박사과정

〈관심분야〉 : 공간정보, 디지털 트윈

이 희 석(Hee-Seok Lee)

준회원



- 2019년 2월 : 안양대학교 도시정보공학과(공학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 안양대학교 도시정보공학과 석사과정

〈관심분야〉 : 공간정보, 디지털 트윈

신 동 빈(Dong-Bin Shin)

정회원



- 1987년 2월 : 연세대학교 토목공학과(공학사)
- 1989년 2월 : 연세대학교 토목공학과(공학석사)
- 1999년 2월 : 연세대학교 토목공학과(공학박사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 안양대학교

도시정보공학과 교수

〈관심분야〉 : 공간정보, 빅데이터, 디지털 트윈