

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2024.24.6.151>

JIIBC 2024-6-22

# 지하공동구 디지털 트윈을 위한 센서 데이터 유효성 검증

## Validation of Sensor Data for Digital Twin of Underground Utility Tunnel

정기숙\*, 정우석\*\*

Ki-Sook Chung\*, Woo-Sug Jung\*\*

**요약** 지하공동구는 상하수, 전력, 통신 등과 같은 도시의 라이프라인을 수용하여 관리하는 기반 시설로 화재, 지진, 침수 등과 같은 재난으로부터 피해를 입는 경우 도시 전체가 마비될 수 있는 도시기반시설이다. 따라서 재난으로부터 공동구의 안전을 보장하는 것이 매우 중요하다. 지하공동구의 재난안전 관리를 위해 디지털 트윈 기술을 활용하여 사전에 위험을 감지하여 예방 및 대응을 위한 연구가 진행 중이다. 지하공동구 내 다양한 센서 장치를 설치하고 수집된 환경 및 상황 데이터를 모니터링 및 분석하여 이상 상황을 감지하고 의사결정 지원을 위한 추론을 수행하는 것이 재난안전을 위한 지하공동구 디지털 트윈 구축 과정의 핵심 요소라고 할 수 있다. 지하공동구 디지털 트윈 구축의 가장 기본이 되는 데이터를 수집하는 센서는 불안정한 전원 공급, 물리적인 충격, 습도, 먼지 등과 같은 요소에 의해 일시적으로 혹은 영구적으로 오동작할 수 있으므로 센서 데이터에 대한 유효성 검증을 통해 오동작 여부를 판단하여 유지보수를 해야 한다. 본 논문에서는 지하공동구 디지털 트윈을 위한 센서 데이터 유효성 검증을 통해 센서 오동작 여부를 판단하는 방법에 대해 소개한다.

**Abstract** The underground utility tunnel is an infrastructure facility that accommodates and manages the city's lifelines such as water supply, sewage, power, and communications, and is an urban infrastructure that can paralyze the entire city if it is damaged by disasters such as fire, earthquake, or flooding. Therefore, it is very important to ensure the safety of the underground utility tunnel from disasters. For disaster safety management of underground tunnels, research is underway to detect risks in advance and prevent and respond using digital twin technology. Installing various sensor devices within the underground tunnel, monitoring and analyzing the collected environmental and situational data, detecting abnormal situations, and performing inference to support decision-making are key elements in the process of building a digital twin of the underground tunnel for disaster safety. Sensors that collect the most basic data for constructing underground tunnel digital twins can malfunction temporarily or permanently due to factors such as unstable power supply, physical shock, humidity, dust, etc., so maintenance must be performed by determining malfunction through validation of sensor data. In this paper, we introduce a method to determine whether a sensor is malfunctioning through sensor data validation for an underground tunnel digital twin.

**Key Words** : digital twin, disaster management, sensor data, underground utility tunnel, validation

\*정희원, 한국전자통신연구원(교신저자)

\*\*정희원, 한국전자통신연구원

접수일자 2024년 8월 19일, 수정완료 2024년 11월 19일

게재확정일자 2024년 12월 6일

Received: 19 August, 2024 / Revised: 19 November, 2024 /

Accepted: 6 December, 2024

\*Corresponding Author: kschung@etri.re.kr

Principal Researcher, Digital Convergence Laboratory,  
Electronics and Telecommunications Research Institute, Korea

## I. 서 론

지하공동구는 상하수, 전력, 통신 등과 같은 도시의 라이프라인을 수용하여 관리하는 기반 시설로 화재, 지진, 침수 등과 같은 재난으로부터 피해를 입는 경우 도시 전체가 마비될 수 있는 도시기반시설이다. 따라서 재난으로부터 공동구의 안전을 보장하는 것이 매우 중요하다.

화재, 침수, 지진 등과 같은 재난에 대비하여 이를 조기에 탐지하고 대응하기 위해 지하공동구를 대상으로 디지털트윈 기술을 적용한 연구가 진행되고 있다<sup>1)~6)</sup>. 지하공동구 내의 환경 및 상황을 수집하기 위해 구간마다 다양한 종류의 센서를 설치하고 데이터를 수집하여 지하공동구 디지털트윈에 반영하고 이를 기반으로 이상상황 감지 및 위험도 판단, 그리고 의사결정 지원정보를 주론하게 된다. 지하공동구 내에서 발생 가능한 재난은 화재, 침수, 지진 등이 있으며, 재난에 대한 전조 증상을 센서 데이터를 상시 분석하여 발견할 수 있다. 따라서 센서 데이터가 디지털트윈 시스템으로 오류없이 전달되어야 하며, 데이터에 대한 신뢰성도 보장되어야 한다.

센서는 온습도, 먼지, 전자기 간섭 등과 같은 환경적인 요인이나 불안한 전원 공급, 배선 문제 그리고 센서의 노화 등과 같은 다양한 원인으로 인해 순간적으로 또는 영구적으로 오동작할 수 있으므로 센서 장치에 대한 정기적인 점검 및 관리가 필요하다. 본 논문에서는 센서로부터 수집되는 데이터의 유효성을 주기적으로 검증하여 센서 데이터에 대한 신뢰성을 높이고 센서 장치에 대한 오류 여부를 판단하기 위한 방법에 대해 고찰해 본다. 지하공동구 디지털트윈을 위해 수집하는 센서의 종류 및 특성을 알아보고 센서 데이터에 대한 유효성을 검증하는 방식, 그리고 센서 데이터 유효성 결과를 토대로 센서 장치의 오류 여부를 판단하여 관리하는 방법을 살펴보기로 한다.

## II. 센서 데이터 유효성 검증

### 1. 지하공동구 환경 센서

#### 가. 센서의 종류 및 특성

화재, 침수, 지진과 같은 재난의 전조 증상을 모니터링하고 대처하기 위해 수집하는 센서 값의 종류는 표 1과 같으며 센서의 세부 사양은 물리적인 센서 제품 종류에 따라 차이가 있을 수 있다. 단일 종류의 센서에 대해

지하공동구 구간에 커버리지를 고려하여 일정 간격(예 -10m)을 두고 설치하게 되면 수십에서 수백 개의 센서 값을 동시에 수집하여 분석하게 된다. 센서 사양 별로 측정 가능한 범위 외의 값을 발생하는 센서도 있으며 다양한 원인에 의해 순간적인 오동작으로 전송주기에 센서값을 누락시키는 경우도 발생할 수 있다. 이와 같이 센서의 순간적인 혹은 영구적인 오동작 여부를 판단하고 유지보수하기 위해 본 논문에서는 센서가 전송한 센서 데이터를 기반으로 하여 유효성 검사를 실시하여 센서의 오동작 여부를 판단한다.

표 1. 재난 전조 증상 감지를 위한 센서 사양(예)  
Table 1. Specification of Sensors

센서	단위	측정 가능 범위	용도
온도	℃	-40 ~ 125	화재 감지
습도	%RH	0~100	화재 감지
산소	%	0~25	화재 감지
일산화탄소	ppm	0~1000	화재 감지
이산화탄소	ppm	0~5000	화재 감지
이산화질소	ppm	0~20	화재 시 발생하는 유해가스
황화수소	ppm	0~100	화재 시 폭발위험
연기센서	ug/m3	0~5000	화재 감지
진동	g	±4.0	지진 감지
열화상카메라	℃	-20~120	화재 감지
불빛	pA	0~4,032	화재 감지
침수	cm	0~185	침수 감지

#### 나. 센서 데이터 저장 형식

각 센서는 다양한 샘플링 주기를 가지고 있으나 효과적인 분석을 위해 시간 동기화 처리를 통해 일정한 주기(예-1초)마다 게이트웨이를 거쳐 디지털트윈 시스템으로 전송되어 저장된다. 센서 데이터는 각각 (센서 ID, 센서 종류, 수집데이터, 수집시각)의 형태로 데이터베이스에 저장된다.

### 2. 센서 데이터 유효성 검증 방법

#### 가. 센서 데이터 저장

##### (1) 데이터 구조

각 센서로부터 주기적으로 수집한 데이터는 중간 단계의 게이트웨이를 거쳐 동기화하고 표2와 같은 형식으로 데이터베이스로 저장된다. 지하공동구의 재난안전 관리를 위해 신속한 전조 증상 탐지를 위한 센서 주기(예-2초)를 설정하여 비슷한 종류의 환경 센서에 대해서는 일

정한 간격으로 동시에 저장된다. 센서 데이터는 디지털 트윈 아카이브의 지정 장소에 일정 기간 이중화되어 저장 보관된다<sup>[6]</sup>.

표 2. 센서 데이터 저장 형식

Table 2. Sensor data storage format

칼럼명	설명
sensor_id	센서 ID
sensor_type	센서 유형
sensor_value	센싱 데이터
gw_id	게이트웨이 ID
sensor_dt	수집 시각
status	상태

### 나. 센서 데이터 유효성 검증

#### (1) 유효성 검증 방법 및 동작 주기

표2와 같이 저장된 센서 데이터에 대한 유효성 검증은 매시간 주기 또는 매일 주기로 한번씩 수행하게 되며 센서 종류 별로 그림 1과 같이 실 데이터 수집 주기 및 데이터 값에 대해 검사를 실시한다.

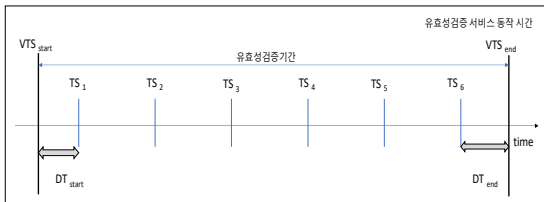


그림 1. 센서 데이터 유효성 검증 개념도

Fig. 1. Validation of sensor data

- VTS(validation time stamp): 유효성 검증 수행 시작 시각과 종료 시각을 나타냄
- TS(Timestamp): 센서 수집 시각으로 sensor\_dt에 해당함
- V(value): 실제 수집한 센싱 데이터
- DT(Difference time): 유효성 검증 시각과 센서 수집 시각과의 차이, DTstart는 유효성 검증 시작 시각과 최초 센서데이터 수집 시각을 의미함

유효성 검증 기간에 해당하는 각 센서 데이터에 대해 예상된 주기에 유효 범위 내의 센서 데이터가 수집되어 있는지 확인하게 되며 표3과 같은 오류 코드로 오류를 판별하게 된다.

#### (2) 유효성 검증 오류 코드

센서 데이터는 표1에서와 같이 측정 가능 범위 안에 있어야 하며 일정한 주기로 수집되어야 한다. 측정 가능 범위 외의 데이터 값에 대해서는 오류코드 1을 부여하고 이전 데이터 값 대비 증감율이 일정 범위를 넘어서는 경우에는 오류 2를 부여한다. 오류 3,4,5는 일정한 주기에 데이터가 들어오지 않고 누락되거나 지연이 생긴 경우에 해당한다.

표 3. 센서 데이터 유효성 검증 오류 코드

Table 3. Error code for sensor data validation

오류코드	오류내용
0	센싱 데이터 값이 null
1	센싱 데이터 값이 유효값 범위를 벗어난 경우
2	이전 시간대의 센싱 데이터 값과 차이가 일정 범위를 벗어난 경우
3	이전 시간과 센싱 데이터 수집 시간 차이가 일정 범위를 벗어난 경우
4	유효성 검증 시작 시간과 첫번째 레코드 센싱 시간 차이가 일정 범위를 벗어난 경우
5	마지막 레코드 센싱 시간과 유효성 검증 종료 시간과 차이가 일정 범위를 벗어난 경우
6	유효성 검증 기간에 대해서 레코드 개수가 0인 경우

#### (3) 센서 오류 판단

오류라고 판단되는 경우, 표4의 센서 관리 테이블에 오류 횟수를 누적하며, 최대 허용 오류 횟수를 초과하게 되면 센서 장치에 오류가 있다고 판단하여 관제 모듈로 센서 오류로 인한 교체 권고 메시지를 전송한다.

표 4. 센서 오류 관리 테이블

Table 4. Sensor error management table

칼럼명	설명
sensor_id	센서 ID
sensor_type	센서 유형
sensor_cycle	센싱 주기
sensor_range	센싱 값 범위
sensor_distance	유효 센싱 거리
sensor_trans	최소 유효값 전송 주기
sensor_address	위치 좌표
install_dt	설치/교체 일시
repl_cnt	교체 회수
err_cnt	설치 후 이상 동작 횟수
max_err_cnt	이상 동작 최대 허용 횟수
expire_dt	사용 연한 일시
description	센서 관련 코멘트

관제 모듈로 보내는 교체 알림 메시지는 그림 2와 같은 파라미터를 포함한다. 관제 모듈을 통해 센서의 오류를 확인하고 교체하면 센서 교체 및 오류 정보를 초기화한다.

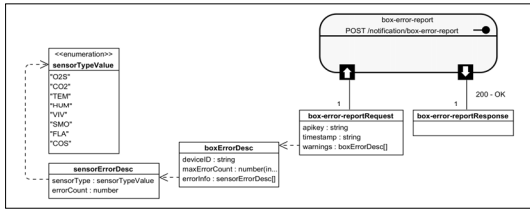


그림 2. 센서 오류 알림 메시지  
Fig. 2. Sensor exchange message

### III. 결 론

화재, 지진, 침수와 같은 재난으로부터 지하공동구 시설 물을 보호하기 위해서 각종 재난의 전조 증상을 신속하게 파악하고 판단하여 대응하는 것이 필수적이다. 이를 위해 지하공동구 전반에 여러 센서를 설치하고 이들로부터 일정한 주기에 맞춰 환경 데이터를 수집하고 분석해야 하는데, 여러 가지 원인에 의해서 센서의 일시적인 혹은 영구적인 오동작으로 유효하지 않은 센서 데이터가 발생한다.

본 논문에서는 재난안전 관리의 기본이라고 할 수 있는 센서 장치의 오동작을 파악하기 위해 센서 데이터에 대한 유효성을 검증하는 방법과 필요한 데이터 구조에 대해 살펴 보았다. 통계적인 방법의 하나로 저장된 센서 데이터에 대하여 수집 주기 및 수집 데이터에 대해 검증하고 오류 허용 횟수를 초과하는 경우 관제 모듈로 알림 메시지를 전송하여 교체할 수 있도록 하였다.

센서 데이터 유효성 검증을 통해 센서 장치에 대한 신뢰성을 높일 수 있으며 효율적인 관리가 가능하다. 추후 머신러닝 기법을 도입하면 센서 데이터의 유효성 검증에 대한 효율성을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

### References

[1] Mi-Suk Lee, Woo-Sug Jung, Eun-sol Kim, "A study on digital twin-based underground utility tunnel disaster safety management methods.", Korean Institute of Information Scientists and Engineers, Vol. 39 No. 02, pp. 16-24. Feb 2021

[2] Lee, Byung-Jin, Mi-Suk Lee, and Woo-Sug Jung. "Acoustic Based Fire Event Detection System in Underground Utility Tunnels" Fire, Vol. 6, no. 5, May

2023 DOI: <https://doi.org/10.3390/fire6050211>

[3] J. Kim, S. Park, C. Hong, S. Park, and J. Lee, "Development of AI Detection Model based on CCTV Image for Underground Utility Tunnel," Journal of the Society of Disaster Information, vol. 18, no. 2, pp. 364-373, Jun. 2022.

[4] Shahrour, Isam, Hanbing Bian, Xiongyao Xie, and Zixin Zhang. 2020. "Use of Smart Technology to Improve Management of Utility Tunnels" Applied Sciences, Vol. 10, No. 2, Jan 2020  
DOI: <https://doi.org/10.3390/app10020711>

[5] Zhang, Z. J., Z. X. Liu, H. Zhang, S. B. Meng, J. H. Shi, J. W. Zhao, and C. Q. Wu. "Spatial distribution and machine learning-based prediction model of natural gas explosion loads in a utility tunnel.", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 140, October 2023, DOI :10.1016/j.tust.2023.105272.

[6] Ki-Sook Chung, and Woo-Sug Jung. "A Study on the Dataset Structure of Digital Twin for Disaster and Safety Management." The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication 23, no. 5, pp. 89-95, Oct 2023. doi:10.7236/JIIBC.2023.23.5.89.

### 저 자 소 개

#### 정 기 숙(정회원)



- 1995년 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과
- 1995년 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사)
- 1997년 : 한국과학기술원 전산학과 졸업(석사)
- 1997년 ~ 2001년 : (구)테이콤 종합 연구소 연구원
- 2001년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원
- 주관심분야 : Intelligence Network, Blockchain, Digital Twin

#### 정 우 석(정회원)



- 1987년 3월 ~ 1992년 2월 : 명지대학교 전자공학과 졸업(학사)
- 1992년 3월 ~ 1994년 2월 : 명지대학교 전자공학과 대학원 졸업(석사)
- 2002년 3월 ~ 2009년 8월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 대학원 졸업(박사)
- 1994년 2월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 재난안전지능융합센터 센터장
- 주관심분야 : PS-LTE, IoT, Digital Twin, 메타버스, 재난안전 응용서비스

※ This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government(MSIT, MOIS, MOLIT, MOTIE) (No. 2020-0-00061, Development of integrated platform technology for fire and disaster management in underground utility tunnel based on digital twin)