

# 디지털 트윈 기반 안전 관제 플랫폼을 통한 작업자 안전 강화에 관한 연구

서원기, 임다혜, 오재식, 김황남\*  
넥스트코어테크놀로지, \*고려대학교

all@next-core.co.kr, limjosin@next-core.co.kr, moving33@next-core.co.kr, \*hnkim@korea.ac.kr

## Improving Worker Safety with Digital Twin-based Safty Control Platform

Won-Ki Seo, Da-Hye Lim, Jae-sik Oh, \*Hwang-Nam Kim  
Nextcore Technology, Korea University\*

### 요 약

본 연구는 안전사고가 빈번하게 발생하고 있는 개별 작업 현장에서 작업자 환경을 가상화하는 디지털 트윈을 구축하고 작업자의 위치를 실시간으로 측정하여 이를 가상화 환경에 매핑하며 작업자의 위치 및 작업 상황을 관제할 수 있는 플랫폼을 제시한다. 제안된 관제 시스템은 목표 제어 성능을 확인하기 위해 실제 발전소 현장에 구현되었으며, 이를 기반으로 다양한 작업환경에서 작업자의 안전을 모니터링하기 위한 표준 플랫폼으로 사용될 수 있음을 보여준다.

### I. 서 론

고용노동부가 발표한 2019년 산업안전사고 발생현황에 따르면 전체 재해자 수는 109,242명으로 전년대비 6,937명이 증가하였으며, 재해율은 0.58%로 역시 0.4% 증가한 것으로 나타났다. 산업안전사고로 인한 사망자는 2,020명이며 사망만일율은 1.08%를 기록하였다. 이에 정부에서는 2020년까지 산업재해 사고 사망자를 절반으로 감축하겠다는 정책 목표를 수립하고 이를 달성하기 위한 다양한 정책들을 추진하고 있다. 정부에서는 이를 제도적으로 뒷받침하기 위해 산재사고에 따른 산업안전보건법을 강화하여 도급작업, 수은·납·카드뮴의 제련, 주입 등을 하는 작업의 사내도급을 금지하였으며, 사업장의 작업장소, 시설·장비 등에 대하여 실질적 지배관리 권한을 가진 원청의 책임을 강화하였다. 또한, 원청이 안전·보건조치를 취해야 하는 장소 범위를 화재·폭발 등 22개 위험장소에서 원청 사업장 전체와 원청이 지정·제공한 장소 중 원청이 지배·관리 가능한 장소로서 대통령령으로 정하는 장소로 확대하였다.

이에 본 연구에서는 화력발전 분야에서 작업자의 안전관리를 위한 새로운 플랫폼을 제시하고, 작업자의 위치 정보를 기반으로 안전사고를 예방하고 사고 발생 시 즉각적으로 대처할 수 있는 디지털 트윈 기반 안전관리 플랫폼을 제안한다.

### II. 구축 기술

#### 2.1 작업자 측위

##### 1) 근로자 휴대 디바이스 설계 및 디바이스 개발

작업자 위치 Tag 하드웨어 설계를 수행하고 이를 기반으로 블루투스(Bluetooth) 5.0 코어를 내장한 Nordic 사의 NRF52840 모듈로 저전력 시스템 설계를 통해 9축(가속도+자이로) IMU(Inertial Measurement Unit) 센서를 통한 작업자의 움직임을 실시간으로 감지한다. 또한 MS5607 기압 센서 정보를 센싱하고 정밀 고도 측정을 사용한다. 저전력 칩 안테나 내장형 GPS 모듈(L96)을 통하여 실내·외 위치 데이터 수신을 통해 최대 RF 출력 8dBm 파워 데이터 송신을 기반으로 통신 거리 최대 100m까지 구현 가능하게 하였다. 최종적으로 구현된 작업자 Tag는 그림 1에 제시하였다.



[그림 1] 근로자 휴대 디바이스

##### 2) 측위 알고리즘 구현

본 연구에서 측위 기술은 발전소 내부 및 외부의 입출입 판별, 실내 측위, 실외 측위로 나누어지며 이를 통합하여 현재 작업자의 위치를 파악한다.

첫째, 기술작업자의 입·출입 여부 확인을 위해 발전소 내부 비계 구조에 총 5개의 BLE 비콘(Beacon)을 설치하고 블루투스 신호를 Broadcast 방식으로 발생시키며, 작업자가 내부에서 외부로 이동(출입구 통과)하는 상황 시 태그에서 수신되는 RSSI(Received Signal Strength Indicator) 신호의 강도를 분석하여 보일러 내부와 외부의 입출입을 판별한다.

둘째, 실내에서 작업자의 측위는 수평, 수직 측위로 나뉘어진다. 수평 측위는 작업자 태그에 내장된 관성(IMU) 센서를 기반으로 보행자 추측 방법(PDR)이 사용된다. 이는 발전소 내부에 설치된 비계의 경우 작업자가 한 방향으로 움직일 수 밖에 없는 협소한 통로와 정사각의 평면 구조로 이루어진 까닭으로 PDR을 이용하여 평면상에 위치를 측정하는 방식은 발전소 환경에 적합한 맞춤형 방식이다. 수직 측위는 비콘(Beacon) 기압 센서를 이용하여 기준이 되는 레퍼런스(Reference) 기압 값을 산출하고, 작업자 태그에 탑재된 기압 센서에서 산출된 기압 값과 비교하여 작업자의 수직 위치를 알아낸다.

마지막으로, 실외에서 작업자 위치 측위는 실내 측위와 유사하게 진행된다. 실외에서는 GPS 기능이 추가되는 특징이 있다. 수평측위는 IMU 센서(가속, 각속, 자자계)를 통하여 PDR(Pedestrian Dead Reckoning) 알고리즘을 통해 작업자의 걸음수, 걸음폭, 그리고 방향 추정이 가능하며 이 정보들은 맵 매핑 알고리즘을 통해 수평좌표계의 x값과 y값으로 표현한다. 수직 측위는 기압센서를 사용하여 추정하게 된다. 특정 지점에서 고정되어 있는 비콘(Beacon) 송신기의 기압 값들과 작업자에 부착되어 자유롭게 움직일 수 있는 단말기 내부의 기압센서를 이용해 수직측위(z 값)가 가능하게 되며 이러한 값을 이용해 맵 매핑 알고리즘을 통해 층 구분이 가능하게 된다.

### 3) 측위 정보 수집 인프라

작업자 태그는 발전소 내에 설치된 블루투스 유니트(BTU)에서 RSSI 정보와 PDR를 통해 작업자의 위치를 측위하고 측정된 위치정보를 게이트웨이로 송신한다. 게이트웨이에 송신된 각 작업자 태그 정보는 외부 셀룰라 망을 통해 발전소 관리자 서버에 전송되며, 이 정보를 작업자 안전관리 플랫폼 등 외부 서버 및 관리자 프로그램이 활용할 수 있고, 이를 통해 관리자는 실시간으로 작업자의 현재 위치, 작업 상황 및 안전 상황을 모니터링하고 관제할 수 있다. 작업자 태그로부터 최초 전송되어 안전관리 플랫폼에서 활용되는 측위 정보는 그림 2에 제시된 인프라를 통해 전달된다. 그림에서 측위 데이터처리를 위한 서버 시스템과 안전관리 플랫폼 사이의 운영 및 관리는 서버 보안 기능이 적용된 서버-클라이언트 형태로 구성한다.



[그림 2] 측위정보 수집인프라

## 2.2 디지털 트윈 기반 작업자 안전관리 플랫폼

### 1) 발전소 디지털 트윈

발전소 디지털 트윈은 우선 3D 모델링 표준 설계 및 위치 데이터 호환 설계를 반영해야 하는데 이는 현장 구조정보 및 사진촬영에 기반한 현장 실사, 발전소 내 시설물에 대한 실사를 통해 획득한 공간정보 및 시설물 현황화, 마지막으로 마감재, 각종 표지판, 시설물 정보를 적용한 3D 공간 정보 및 시설물 모델링을 과정을 통해 완성된다.

### 2) 측위 데이터 매핑

발전소 내 작업자의 안전관리 핵심은 안전 관리 플랫폼 상에 현장에 있는 작업자의 현재 위치를 파악하는 것이 우선적으로 실행되어야 한다. 이를 위해 발전소 디지털 트윈 내에서 태그 및 정보 수집 인프라를 통해 수집된 작업자 측위정보를 디지털 매핑을 통해 표시한다. 이 매핑 알고리즘은 광범위하게 사용되고 있는 Three.js를 활용한 WebGL 기반의 Potree를 사용하여 디지털 맵으로 구현된다.

### 3) 안전 관리 플랫폼

Real-Time Mapping 기술 및 PSM(Process Safety Management), MSDS(Material Safety Data Sheet)를 통해 발전소의 디지털 트윈을 생성한다. 또한 작업자 태그로부터 측정된 측위 정보는 IoT 게이트웨이를 거쳐 측위 정보 수집 인프라를 통해 수집되어 디지털 트윈 상에 표시된다. 디지털 트윈을 통해 실시간으로 파악된 작업자 위치 및 현장 상황에서 작업자의 위험 상황은 기계학습 프로그램을 통해 판단된다. 최종적으로 실시간 정보 전파, 공유 가능한 작업자, 작업물, 설비 등에 대한 종합적인 위치 파악 및 안전 상황 감지, 그리고 비상 상황에 대한 대응 관제가 가능한 안전관리 플랫폼을 완성하였다.

## III. 성능평가

웨어러블(Wearable) 센싱 및 엣지 컴퓨팅(Edge Computing) 기술을 적용

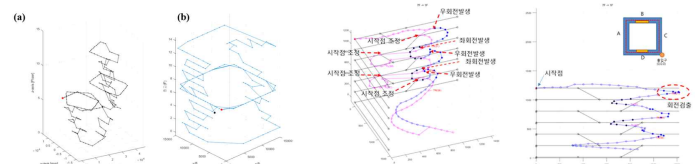
한 디지털 트윈 기반 IGCC 고위험지역 근로자 안전관리 플랫폼의 UI 운영 화면은 그림 3에 있다.



[그림 3] 근로자 안전관리 플랫폼 운영화면

추가로 그림 3에 예시된 플랫폼을 통해 실제 발전소 환경에서 작업자의 측위 성능을 두가지로 검증하였다.

첫 번째 검증은 발전소 입·출입 실증시험에 관한 것으로 입출입을 총 30회 진행하였고, 검증 결과 100%의 정확도를 도출하며 모든 작업자 입·출입 상황에 대해 정확한 결과를 확인했다. 두 번째 성능평가는 발전소 내부 작업자의 수평 및 수직 측위 정확도에 대한 평가이다. 그림 4에 제시된 것처럼 낮은 오차율로 작업자의 위치를 파악할 수 있었다.



[그림 4] 발전소 내 작업자 측위 정확도 평가

## IV. 결 론

본 논문에서는 웨어러블 센싱 및 엣지 컴퓨팅 기술을 적용하여 디지털 트윈에 기반한 IGCC 고위험지역 작업자 안전관리 플랫폼을 구축하였고, 해당 플랫폼을 실제 발전소에 적용하여 그 활용도를 확인하였으며 안전관리 플랫폼의 핵심 기술인 측위, 디지털 트윈 기반 가상화, 측위 정보 매핑 등 주요 기술이 정확하게 플랫폼에 구현되었음을 확인하였다.

본 플랫폼을 통해 개발된 기술은 발전소 이외에 다양한 실내의 작업 현장에서 작업자의 안전 관리 플랫폼으로 활용할 수 있으며 그 결과는 정부에서 추진하고 있는 산업재해 사고 감축 정책 실현에 활용될 수 있다.

## ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20206610100010, 화력발전소 위치기반 작업자 안전사고 예방 및 대응 모니터링 시스템 개발)

넥스트코어테크놀로지 대표이사(all@next-core.co.kr), 제1저자

\*고려대학교 공과대학 전기전자공학부 교수(hnkim@korea.ac.kr), 공동저자

넥스트코어테크놀로지 팀장(limjin@next-core.co.kr), 공동저자

넥스트코어테크놀로지 과장(moving33@next-core.co.kr), 공동저자

## 참 고 문 헌

고용노동부, 2020, 2019년 산업재해 발생현황

서원기, 김영진, 김태중(2021), “공정안전관리체계의 디지털 플랫폼 구축을 통한 개선방안 연구”, 경영컨설팅연구 21(4), 421-429

김영진, 서원기, 김태중(2020), “작업자 위치기반 안전사고 예방 플랫폼 사례 연구 논문, 한국경영컨설팅학회지