

석유화학플랜트 내 밀폐공간 작업장의 IoT기술 기반 안전모니터링시스템 개발

송한식¹, 김준호², 전진우^{1*}

¹송실대학교 안전융합대학원 스마트산업안전공학과, ²한화시스템 솔루션사업부

Development of a Safety Monitoring System based on IoT Technology for Confined Space Workplaces in Petrochemical Plants

Han-Sik Song¹, Joon-Ho Kim², Jin-Woo Jun^{1*}

¹Department of Smart Industrial Safety Engineering, Graduate School of Soongsil University

²Division of Solution, Hanwha Systems

요약 본 논문은 석유화학 플랜트에서의 밀폐공간 작업장의 IoT 기술 기반 안전모니터링시스템의 설계 및 구현에 관한 연구이다. 밀폐공간 작업 관련 질식 재해는 최근 10년간 감소하지 않고 지속적으로 발생하고 있으며, 총 196건의 사고 발생에 따른 치명율은 47.4%로 나타났다. 특히 석유화학 플랜트는 반응기, 반응탑, 저장탱크, 화학물질이 포함된 폐수처리시설 등 밀폐공간 작업 시 많은 위험 요소를 포함하고 있어 효과적이고 안정적인 안전 작업 관리시스템의 도입이 요구되어진다. 따라서, 제안된 시스템은 IoT 센서, 유무선 복합 통신 네트워크, 이동형 CCTV 및 AI 영상분석 기술 등을 활용하여 밀폐된 공간 내의 작업 조건을 모니터링하고 분석하고자 한다. 본 시스템은 밀폐공간 작업 시 유해 가스 감지, 작업자 위험 행동 등 이상 상황 발생 시 즉시 알람을 발령하고, 안전관리자 및 감독자가 신속히 대응할 수 있도록 지원한다. 본 연구에서 개발한 IoT 기반의 안전모니터링시스템은 석유화학 플랜트 현장을 대상으로 한 스마트 안전 기술 모델로서 재해 예방에 기여할 것으로 기대한다.

Abstract This paper presents the design and implementation of an IoT-based safety monitoring system for confined spaces in petrochemical plants. Confined space-related asphyxiation has persisted over the past decade, with a total of 196 incidents resulting in a fatality rate of 47.4%. Petrochemical plants in particular contain numerous hazards in confined spaces, including reactors, reaction towers, storage tanks, and chemical-laden wastewater treatment facilities, necessitating the introduction of an effective and reliable safety management system. The proposed system employs IoT sensors, a hybrid wired/wireless communications network, mobile CCTV, and AI video analysis technology to monitor and analyze working conditions within confined spaces. The system promptly issues alerts during abnormal situations such as the detection of hazardous gases or risky worker behavior, thereby helping safety managers and supervisors respond swiftly. The IoT-based safety monitoring system developed in this study is expected to contribute a smart safety technology model to use in petrochemical plant sites for disaster prevention.

Keywords : Smart Disaster Management, Confined Space, Monitoring System, IoT

*Corresponding Author : Jin-Woo Jun(Soongsil Univ.)

email: jzinu73@ssu.ac.kr

Received April 19, 2024

Accepted July 5, 2024

Revised May 30, 2024

Published July 31, 2024

1. 서론

밀폐공간 질식 사고는 최근 10년간('12 ~ '21년) 총 196건 발생하였으며, 이로 인해 발생한 사상자 348명 중, 165명이 사망한 것으로 조사되었다. 전체 사상자의 약 47.4%가 사망할 만큼 매우 치명적인 재해이다. Table 1의 사고 유형별 조사 결과를 살펴보면, 불활성가스인 질소, 아르곤가스 등을 다루는 설비작업과 화학물질이 들어있는 탱크, 반응기 등 작업에서 발생한 사고가 전체 사고 196건 중 13.8%(27건)를 차지하는 것으로 나타났다[1].

이러한 밀폐공간 내에서는 근로자의 작업 위험성이 높기 때문에 그동안 안전을 강화하기 위한 저감 대책에 관한 연구와 현장 노력이 지속되어 왔다. 특히, 사물인터넷 플랫폼을 적용한 원격 개념의 밀폐공간 안전관리 시스템 구축에 대한 시도가 이루어져 왔는데, IoT 기술과 무선 통신기술 등을 근간으로 밀폐공간 내 유해위험요인을 탐지하거나 근로자의 불안전 행동 등을 원격으로 모니터링하는 형태가 다수였다.

그동안 건설 현장, 일반적 제조공정 내 밀폐공간을 대상으로 안전관리시스템을 구축한 사례는 많았지만, 방폭 등의 특성을 고려해야하는 석유화학 플랜트의 밀폐공간을 대상으로 하는 모니터링 시스템 연구는 찾기 어려웠다.

석유화학 플랜트의 일반적인 밀폐공간으로 반응기, 반응탑, 저장탱크, 화학물질이 포함된 폐수처리 시설 등이 있다. 이들 설비의 유지보수 작업은 질식사를 방지하기 위한 작업 전 충분한 환기가 기본으로 잔존하는 메탄, 휘발성 유기용제 등 인화성, 가연성가스의 폭발 사고 방지를 위해 질소와 같은 불활성가스 치환 작업이 이뤄지기도 한다. 지난 2015년 울산 석유화학단지 폐수처리장에서 발생한 폭발 사고도 내부의 잔류 메탄가스에 용접 불뚝이 튀면서 폭발한 사고였다. 석유화학 플랜트에서 밀폐공간 작업 시, 정해진 작업 절차 메뉴얼에 따라 작업을 진행하지만, 정기적 가스 측정, 환기 조치 등의 기존의 현장 안전관리자, 관리감독자 등에 의존한 안전관리 방법만으로는 지속적으로 발생하고 있는 사고를 예방하기에 한계가 있는 것도 사실이다.

이에 본 연구에서는 석유화학 플랜트 밀폐공간이 가진 인화, 폭발 등의 유해위험요소를 관찰할 수 있는 IoT 기반 안전 모니터링 시스템에 필요한 안전 요구사항을 도출하고 이에 대응하는 요소 기술들로 해당 공간에 특화된 안전관리 시스템을 구축하는 데 목적이 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 기존 밀

폐공간 작업 시 위험과 사고 사례 등을 살펴보고, IoT 기술을 활용한 실증 연구를 확인하였다. 3장에서는 제안 시스템의 구성 및 기술 요구사항을 기술하였다. 4장에서는 시스템 실증에 관한 구축 결과를 보여주며, 5장에서는 본 연구를 통한 기대효과 및 향후 추가 연구를 제안함으로써 석유화학 플랜트에서의 밀폐공간 안전모니터링 시스템 연구에 관한 방향성을 제시하고자 한다.

Table 1. Incidence of different types of asphyxiation accidents over the past decade (2012–2021)

No.	The types of confined space work according to risk level	Number of accident
1	Wastewater treatment facilities, livestock manure treatment facilities, settling tanks, etc.	52
2	Equipment for handling inert gases, tanks and reactors containing chemicals	27
3	concrete curing work using lignite	19
4	Argon gas tank, pipe welding work	14
5	Works inside various pipes, manholes, collection, and tanks	17
6	Water pump operation in insufficient ventilation space	16
7	Coal-storing dock, hopper, etc	6
8	Carbon dioxide fire suppression system, etc	24
TOTAL		196

2. 선행 연구 고찰

2.1 밀폐공간 위험에 관한 연구

밀폐공간 작업 시 발생하는 위험에 관한 연구는 유해가스, 산소 농도 등에 대한 탐지·측정에 관한 연구가 있었다. 유현철(2023)은 맨홀 작업 시 질식 재해 예방을 위해 맨홀 내 질식사고 유형 분석, 유사 시스템 운영 사례 분석을 통해 맨홀 관리시스템 필요성에 관한 연구를 하였고 [2], 임대성(2022)은 질식 재해 현황과 사고 분석을 통해 질식 재해 예방을 위한 정책 방향에 관해 제안하였다[3].

최유정(2018)은 밀폐공간의 위험성과 사고 발생 원인을 분석하고 사물인터넷 기술을 활용한 밀폐공간 사고 예방 활용 가능성을 주장하였다[4]. 조완수(2018)는 폭발 피해 예측 전용 해석 프로그램인 FLACS를 활용하여 밀폐공간 내 질식 가스 유입경로와 사망 시간 추정 등의 시뮬레이션 해석을 수행하였다[5]. 신영호(2017)는 작업 전 위험성 평가 미실시와 유해 가스 및 산소 농도측정 미실시가 주요 사고 원인으로 분석하였다[6]. 이정원(2016)

은 밀폐공간 질식 재해에 관한 자료 분석을 통해 기인물 질별로 일산화탄소 26%, 황화수소 22%, 산소 결핍에 의한 질식사고가 21% 순으로 발생함을 확인하였다[7]. 밀폐공간 작업 시 발생하는 재해는 질식사고가 대부분으로 유해 가스에 의한 중독, 산소부족 사고이며, 밀폐공간 작업 전 혹은 작업 과정에서 반드시 유해 가스 및 산소 농도측정이 필요한 것으로 나타났다. 이에 따라, KOSHA GUIDE(2017)는 화학 플랜트 개·보수 공사 시, 반드시 산소 및 유해 가스의 농도측정을 올바른 측정 장비에 대한 조작과 정확한 측정 결과에 대한 해석이 가능한 자격 요건을 갖춘 사람이 실시하도록 하고 있다[8].

2.2 IoT 기술을 이용한 실증 연구

국내 대부분의 제조 및 건설 현장에서는 이동형 디지털 가스측정기를 이용해 작업자가 직접 산소 및 유해 가스 농도를 측정하여 기록하고 있으나, 최근에는 IoT 기술을 적용한 밀폐공간 관리시스템 연구가 진행되고 있다. 특히, 일부 대형 건설 현장이나, 제조업 작업장을 중심으로 사물인터넷(IoT) 기반의 밀폐공간 모니터링 시스템을 도입하는 추세이다.

한상배(2021)는 Lab chamber 실험을 통해 가스 감지 센서 이외에 온습도 센서를 추가하고, 라즈베리파이, 지그비 통신을 활용한 유해 가스 검출 원격 계측 시스템에 관한 연구를 진행하였다[9].

정태희(2021)는 노후화된 상수도관 내 안전관리를 위해 환경 센서와 공간 스캐너, 작업자 안전모 태그 부착 방식을 조합한 가스 및 작업자 위치 파악 측정시스템 구축 연구를 하였고[10], 정민승(2019)은 조선 및 선박 내부에서 재난 발생 시 빠른 대응으로 피해를 축소하기 위해 LoRa 네트워크를 활용하여 표준 행동 절차 기반한 실시간 작업환경 감시가 가능한 지능형 통합안전 시스템 구축에 관한 연구를 수행하였다[11].

김광배(2019)는 건설 현장 내 위험 작업장에서 근로자 위치 확인, 밀폐공간관리, 타워크레인 등 중장비에 관한 현장의 통합 안전관리 시스템 구축에 대한 실증 연구를 추진하였으며[12], 유대승 등(2016)은 저전력 광역통신망을 이용하여 밀폐공간 내부의 가스를 센서로 측정하고 동 데이터를 수집 및 전송하는 안전관리 시스템을 실증하였다[13].

또한 지난 2020년 고용노동부의 안전보건 활동 우수 사례로 선정된 남부발전의 경우, 안전사각지대 해소를 위해 P-LTE 통신망을 적용한 이동형 CCTV, 스마트폰 단말기 등을 활용하여 IoT 기반의 스마트 안전플랫폼을

단계별로 고도화하고 있다[14]. 그러나, 석유화학 플랜트의 주요 밀폐공간 작업 장소인 반응탑, 반응기, 위험물 저장탱크 등 가연성, 인화성 유해 가스가 잔존할 수 있는 환경 요소를 고려한 방폭형(Explosion Proof Type) 무선 IoT 센서 기술 적용과 AI 영상 분석 기술을 연계한 실증 연구 사례는 부족한 것으로 나타났다.

3. 시스템 요구사항 및 설계

3.1 시스템 개요

본 연구의 대상 공간인 석유화학 플랜트 사업장은 CA(Caustic Soda), PO(Polyolefin), PVC(Polyvinyl Chloride Resin), 석유 수지 등의 유해 제품을 주로 생산하고 있으며, 제품 원재료와 생산 제품의 저장 및 제조 과정에서 유해 가스 등이 배관, 저장탱크 및 반응설비의 내부에 유해 위험요인으로 잔류할 수 있는 특성이 있다.

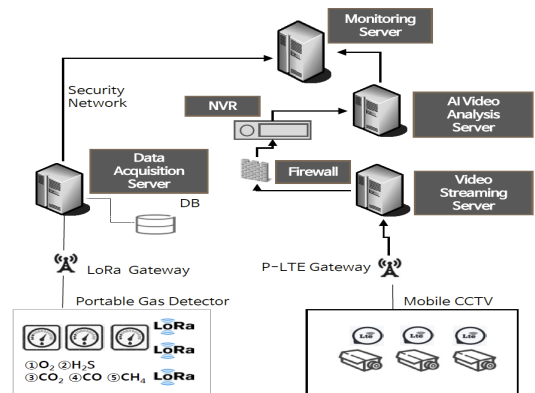


Fig. 1. The structure of Work monitoring system

따라서, 이러한 유해 위험요인을 예측 모니터링 할 수 있는 무선 복합가스 감지기가 필요하며, 유해 위험 상황을 체크할 수 있는 이동형 CCTV 등과 같은 센서부 구성이 요구된다. 또한, 현장으로부터 수집한 가스 측정 데이터와 영상신호 간 송수신할 수 있는 적정 네트워크가 필요하며, 수집 서버, 영상 스트리밍 서버, AI 영상분석 서버, 밀폐공간 모니터링 서버, 가스 모니터링 설정치를 변경·저장할 수 있는 관리용 WEB 서버가 요구된다. 마지막으로 이들 정보를 관리자가 직관적, 체계적으로 모니터링할 수 있는 관제 기능이 요구되고 있으며, Fig. 1은 현장 요구사항을 반영한 주요 시스템 구성 요소와 시스템 구성을 보여주는 개념도이다.

3.2 가스 감지 센서

석유화학 플랜트 내, 밀폐공간 작업장은 가연성 및 폭발 위험성이 있는 제품 생산 관리라는 산업적 특성을 고려할 때 방폭 인증(Ex db IIB T4 Gb 이상)을 획득한 무선 가스 감지 센서가 요구된다.

Table 2. The Specification of Gas Detector

Item	Specification				
Gas	O ₂	H ₂ S	CO	CO ₂	CH ₄
Range	0~30%vol	0~100ppm	0~200ppm	0~3%vol	0~3%LEL
Display	Digital LCD Display/Back light, LED Indicator				
Certification	Ex db IIB T4 Gb				
Battery Type	Lithium Polymer Battery, 3,000mA, 3.7 VDC, Min 48Hr Operating Time				
Power Supply	DC 5V / 1A				
Trans. Speed	36 ~ 683 Byte/Sec				
Communication	LoRa 917.3 ~ 923.3Mhz/10Kkm				

Table 2는 무선 가스 감지 센서의 주요 요구사항으로 산업안전보건법에서 밀폐공간 작업 시 의무 측정 대상으로 지정된 O₂, H₂S, CO, CO₂ 등 4종의 가스와 석유화학 플랜트에서 많이 발생하는 가연성가스 CH₄를 포함한 5종을 대상으로 한다.

검출된 값은 현장에서 즉시 수치 확인 가능한 LED 표시 외관 기능이 제공되어야 하며, 측정값은 실시간으로 데이터 전송이 가능하여야 한다. 현장 운영 상황을 고려하여 1회 충전 시 사용 시간은 최소 48시간 이상이 요구되며, 저용량 데이터라는 특징을 고려하여 무선 LoRa 통신 모듈을 채택하도록 한다.

3.3 영상 센서

밀폐공간 작업장은 기존 고정형 CCTV로 촬영하기 어려운 사각지대에 위치한 경우가 많다. 따라서, 작업 상황 등에 따라 설치 및 수거가 용이한 무선방식의 이동형 CCTV가 요구되었다. Table 3은 영상 센서인 이동형 CCTV에 요구되는 성능 사항이다.

Table 3. The Specification of Mobil CCTV

Item	Specification
Image Sensor	200M Pixel CMOS
Zoom	X12 Optical Zoom
Network	1:N Video Streaming via LTE Router
GPS	Support

카메라는 피사체의 정확한 식별과 영상분석이 용이하도록 200만 화소 이상 Full HD급 성능이 요구되며, 현장 사건 상황에 대한 관측이 용이하도록 12배 이상의 광학 줌이 필요하였다. 측정된 영상 데이터는 1:N 영상 스트리밍 전송이 가능하여야 한다. 또한, 관제실에서 밀폐공간 작업 장소에 관한 위치가 식별될 수 있도록 이동형 CCTV의 설치 위치에 대한 GPS 기반 위치 추적 기능이 요구된다.

3.4 통신 네트워크

실증 공간의 전송 거리, 발생 데이터 특성, 합리적 통신 비용, 보안 대상 설비 등을 고려하여 유무선 복합망 형태로 통신 네트워크 구축이 필요하다. 무선 가스감지기에서 측정된 데이터의 용량은 적지만, 주변 배관이나 기계장치에 의한 통신장애가 적어야 하고, 중장거리 통신이 가능해야 하므로 LoRa망을 활용하는 것이 적절하였다.

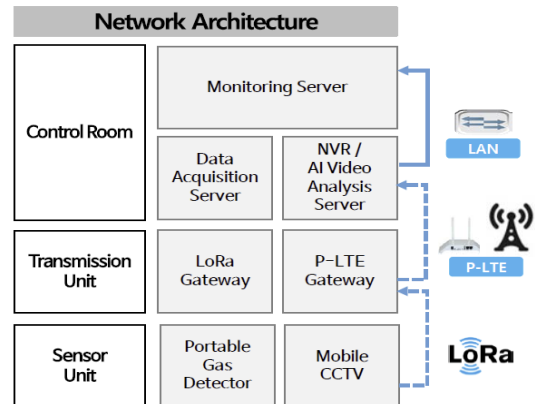


Fig. 2. Network Architecture

Fig. 2는 통신 네트워크 아키텍처로서 작업장별로 특성에 따라 필요한 통신망 적용 개념도이다.

이동형 CCTV 영상은 대용량의 음성, 영상 값을 끊임 없이 안정적으로 송수신해야 하므로 LTE 통신 방식이 적절하다. 특히, 실증 현장의 설비 및 공정 정보에 대한 보안을 고려하여 보편적으로 활용되고 있는 Private-LTE 방식을 채택하였다. 네트워크 설치 과정에 통신 감도 테스트를 하여 신호가 약한 장소는 중계기를 추가 설치하여 안정적 통신 감도를 확보하고자 하였다.

2종의 무선망을 통해 서버로 전송된 데이터 정보들은 유선 LAN망을 통해 컨트롤룸의 모니터링 서버로 보내지도록 하였다. 이는 현장으로부터 수신한 중요한 가스 측

정 데이터 및 영상 정보들이 안정적으로 모니터링 서버에 저장, 분석되고, 실시간 작업 모니터링이 지속해서 이뤄져야 하기 때문이다. 충분한 전송을 확보를 위해 1 Gigabit 이상의 유선 LAN 망이 요구된다.

3.5 서버

서버는 복합 통신망이 필요함에 따라 전송된 가스측정값 및 영상 정보 데이터를 각각 수집하고 분석할 수 있도록 가스 감지 서버, 비디오 스트리밍 수집 서버, 시나리오 기반 AI 영상분석 서버를 별도로 설치할 필요가 있다. Table 4는 각각의 서버 구축에 요구되는 성능 사양을 정리한 것이다.

Table 4. The Specification of Server

Item	Specification
Gas Detection Server	Intel Xeon 2.0GHz, 8GB RAM, 100GB HDD, Windows 10 Pro-64bit
Video Streaming Server	Intel Core i7 10700F, 8GB RAM, 250GB SSD, 2TB HDD, GTX 1050TI D4 4GB, Windows 10 Pro-64bit
Scenario-based AI Image Analysis Server	Intel Xeon Gold 6228R, 128GB RAM, 250GB SSD, 4TB HDD, Nvidia RTX3080, Windows 10 Pro-64bit
Confined Space Monitoring Servers	Intel Xeon-S 2.1Ghz * 8Core, 64GB RAM, 600GB * 2 HDD, Power Redundant, Windows 10 Pro-64bit

3.6 관제 시스템

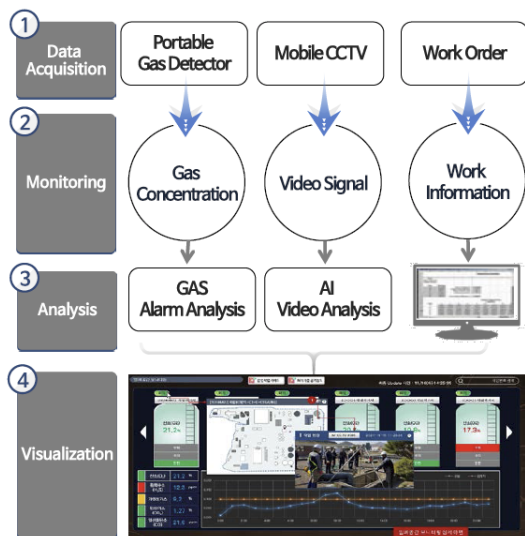


Fig. 3. Design of Monitoring System for confined space work

관제 시스템의 구성은 무선 가스감지센서를 통해 전송된 밀폐공간 내부의 유해 가스, 산소 농도 측정값 및 AI 기반 영상분석 결과가 화면 시각화되어 표출될 수 있어야 한다. 또한, 작업장 내 작업 정보에 대해 알 수 있도록 시각화되어야 한다.

Fig. 3은 관제 시스템의 데이터 흐름과 기본 구성 요구사항을 보여준다. 밀폐공간 작업장소로부터 ①Data 수집, ②모니터링, ③분석, ④시각화 순서로 구성된다.

4. 시스템 구현 결과

4.1 가스 감지 센서 구축

본 연구에서는 석유화학 플랜트 내 대표적 밀폐공간인 반응탑 하부 칼럼 내부에 가스 감지 센서를 설치하였고, 현장 실증 테스트로 사용한 반응탑은 Fig. 4와 같은 구조로 되어있다.



Fig. 4. Installation of the Gas Detector

측정에 사용한 가스 감지 센서는 Table 1에서 요구한 사항들을 모두 만족하는 복합가스 감지 센서를 선정하여 설치하였다. 특히 KOSHA GUIDE에 따라 인증된 제품을 다시 1차 검·교정을 실시하여 안전을 고려하였다. 또한, 실증 테스트가 이루어지는 밀폐공간에 대해 입조 전 세척 및 N₂ 플러싱을 실시하여 유해 가스 등이 잔류하지 않도록 조치하였다.

Table 5. Measurement Result of the Gas Detectors

Gas	Calibration Range	Before	After	Result
H ₂ S	0~100ppm	0	0	Good
O ₂	0~30%vol	20.9	20.9	Good
CO	0~500ppm	0	0	Good
LEL	0~100%LEL	0	0	Good
CO ₂	0~30,000ppm	0	0	Good

*Temp: 19.0 ± 1 ℃ / Humidity: 25 ± 1%

O₂, H₂S, CO, CO₂, CH₄ 등 5개 가스를 대상으로 3 시간 동안 측정하였고, 측정 결과 O₂ 농도는 20.9%로 측정되었고, 잔여 H₂S, CO, CO₂, CH₄ 등 4개 가스는 검출되지 않았다. 다만, 현장 여건을 고려하여 테스트 가스를 이용하지 않고 실제 플랜트 운영 환경에서 측정을 진행하였다. 측정 결과는 Table 5와 같이 측정 전후 값을 확인하여 작동됨을 확인하였다.

4.2 영상 센서 구축

이동형 CCTV는 영상 정보 무선 송신을 위해 LTE 모듈을 탑재하여 실시간으로 스트리밍 서버를 통해 영상 정보가 송출 가능함을 확인하였다. 이동형 CCTV에는 실시간 이동 경로 및 설비 위치를 추적할 수 있도록 Fig. 5과 같이 GPS 모듈을 장착하여, 관제센터에서 밀폐공간의 어디에서 작업이 이루어지는지 위치 확인이 가능한 기능이 구현되도록 하였다.

AI 영상분석 솔루션은 안전 시나리오 기반으로 이동형 CCTV로부터 수신한 영상 정보를 판단하여, 쓰러짐, 안전 장비 미착용, 연기, 불꽃, 비인가자 침입 등 시나리오별로 지정한 이벤트를 발생시키는지 확인하였다.



Fig. 5. Mobile CCTV Monitoring Module

영상분석 서버에 안전 시나리오 데이터를 구축하기 위해 사전 현장 23개소에서 필요한 영상을 '수집 → 정제 → 학습 → 평가 → 배포' 과정을 거쳤다.

Fig. 6과 같이 제안된 작업공간 내 시나리오에 따른 비인가자 된 근로자가 출입할 경우, CCTV 영상이 수집되고, AI 영상분석 서버는 실시간 영상분석 후 '비인가자 침입'을 이벤트 알람으로 보여주게 된다.



Fig. 6. Location of Mobile CCTV

4.3 통신 네트워크 구축

가스 감지 데이터 전송을 위한 LoRa망은 전송이 용이한 건물 옥상 3개소에 이동식 LoRa 안테나 및 모니터링 장비를 설치하였다. 석유화학 플랜트 내 밀폐공간 작업장 13개소를 지정하여 통신 테스트를 실시하였다.

적용된 LoRa 게이트웨이와 모듈은 Fig. 7과 같이 구성하였다. LoRaWAN 표준에 따라 각각의 다른 비면허 대역 주파수마다 Data Rate(DR) 모드를 정의하고, 각 모드는 정해진 Spreading Factor(SF)와 대역폭을 가진다. SF는 7~12, 대역폭(Bandwidth)은 125kHz, 250kHz, 500kHz 중 하나를 선택하도록 정해져 있으며, Coding Rate(CR)은 4/5, 4/6, 4/7, 4/8 중 선택 가능하다[15]. 현장 통신 테스트는 CR 4/5, 대역폭은 125kHz, SF 7로 설정하였다. 통신 테스트는 각 지정 장소별 수신신호강

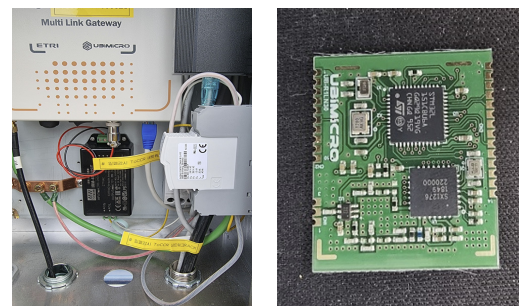


Fig. 7. LoRa Gateway and Module

도(RSSI: Received Signal Strength Indication)를 측정하였다.

Table 6과 같이 SF 7에서 대역폭 125kHz 일 경우, 수신 감도는 -123 dBm 수준의 신호를 수신해야 프레임 수신할 수 있다[15].

Table 6. Receive sensitivity of each bandwidth when Spread Factor is 7 (SX1276 Datasheets) [16]

Bandwidth(kHz)	Receive Sensitivity(dBm)
125	-123
250	-120
500	-116

통신 테스트 결과, 3개의 게이트웨이 설치 시 13개 설치 장소에 대해 LoRa 통신망이 완벽히 구현되었으나, 일부 장소의 건물 내부 및 탱크 내부에서 음영지역이 발생하였고, 이는 중계기를 설치하여 이를 해소하였다. Table 7은 1st Gateway에서 측정한 수신신호강도(RSSI: Received Signal Strength Indication)값 예시이다.

Table 7. Communication Performance Results for LoRa

Location	Value (dBm)	GPS data
1 st Gateway		34.821xx, 127.6xxx
Point-01	-117	34.820xx, 127.6xxxx
Point-02	-107	34.818xx, 127.6xxxx
Point-03	-115	34.822xx, 127.6xxxx

이동형 CCTV로부터 영상신호를 전송하기 위한 P-LTE망은 공장 내부의 도로를 따라 기존 LTE 중계기의 신호 강도를 측정하였고, 신호 품질이 떨어지는 장소를 파악하였다. LTE 통신망의 RSPR (Referene Signal Received Power)를 측정하여, -114 ~ -104 dBm(L통신사의 품질보증기준) 이하의 대역대가 측정되는지 확인하였다.

공장 외곽에 이미 설치된 3개의 LTE 지상 중계기 외에 공장 내부의 P-LTE 신호 품질을 개선하기 위해 지상 중계기 2개를 사업장 내부에 추가 설치하여 LTE 품질을 높였다. Fig. 8은 추가 중계기 설치 전후의 통신 품질에 대한 개선 결과를 보여준다.

유선망은 이미 구축된 사내 보안망을 사용하고 있어, 통신 기능 테스트에서 제외하였다.

4.4 서버 구축

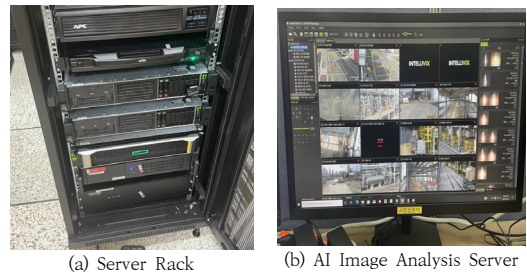


Fig. 9. Servers for monitoring work in confined space

가스 감지 서버, 비디오 스트리밍 서버, AI 영상분석

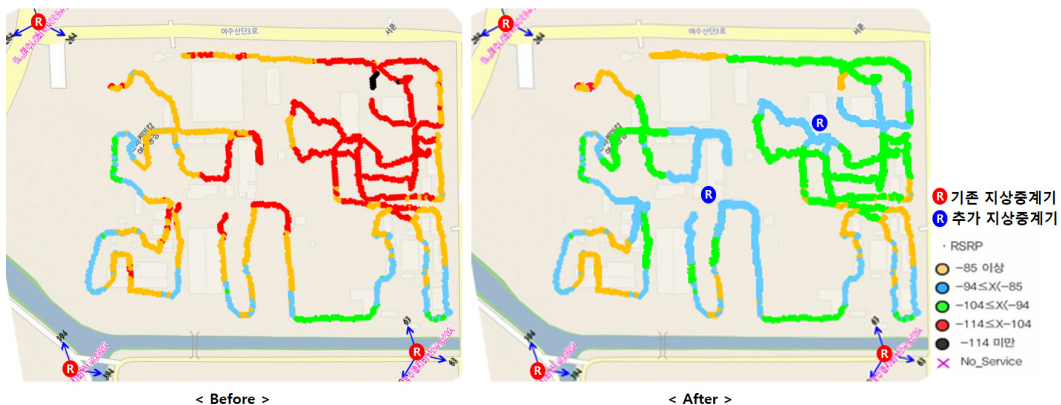


Fig. 8. Communication Performance Results for P-LTE



Fig. 10. Overview of Monitoring System

서버 및 밀폐공간 모니터링 서버는 관제실 내부의 서버 룸에 SERVER RACK을 구성하여 설치하였다. 각 서버는 내부 전산시스템 구축 절차에 따라 개별 서버의 동작 상태 및 기능 테스트한 후 시스템 연계를 위한 통합 테스트를 통해 구축 시스템에 대한 성능을 확인하였다. Fig. 9는 관제센터 내부에 설치된 서버랙과 AI 영상분석 서버의 동작을 보여주고 있다.

4.5 관제 시스템 구축

관제 시스템 사용자 화면(Fig. 10)은 작업허가 통지번호를 선택 시 작업 구분, 작업장소 등을 파악할 수 있도록 하였으며, 가용 중인 이동식 CCTV 장비에서 수집된 영상이 출력될 수 있도록 하였다.

또한, 특정 밀폐공간 작업장소의 실시간 측정된 가스 농도를 볼 수 있고, 위험수치를 넘어선 측정값 발생 시에는 즉시 알람이 울리도록 하였다.

작업장별 안전관리 특성을 고려하여 Table 8에서 제시한 정상범위 운전 가이드 내에서 작업 종류 및 현장 조건에 따라 모니터링 알람이 이뤄질 수 있도록 조정하는 기능을 개발하였다.

Table 8. Set Point of Monitoring Range

Gas	Normal Range
O ₂	greater than or equal to 18%, less than 23.5%
H ₂ S	less than 10 ppm
CO	less than 1.5 %
CH ₄	less than 10 %
CO ₂	less than 30 ppm

5. 결론

본 연구는 석유화학 플랜트의 유지보수 작업 중 밀폐 공간 작업 시 발생할 수 있는 위험 요소를 효과적으로 관리하기 위해 IoT 기반의 방폭형 무선 가스 감지기와 AI 영상분석 기술을 결합한 안전 모니터링 시스템을 개발하고 실증하였다. 무선 LoRa망을 이용하여 적정 가스 및 유해 가스 농도를 실시간으로 모니터링하고, P-LTE 기술을 적용하여 이동형 CCTV로부터 촬영한 영상을 AI 기술로 분석하여 작업자의 안전 장비 착용 여부, 작업 중 쓰러짐, 화재 등을 감지하였다.

이를 통해 가연성, 독성을 가진 유해화학물질이 있던 반응탑, 반응기, 저장탱크 등의 내부에서 불활성가스(질소, 아르곤) 등을 취급하는 설비를 이용한 작업 조건에서 무선 IoT 센서를 이용한 가스 (O₂, H₂S, CO, CO₂, CH₄) 검측 데이터의 실시간 모니터링이 가능하게 하였고, 밀폐공간 내 작업장소에서 일어나는 작업자 행동 및 주변 환경에 대한 AI 영상분석 기술을 연계한 연구를 통해 기존의 사고 발생 후 대응하는 방식에서 벗어나 사전 감지 및 예측을 통한 새로운 스마트 안전 모니터링 시스템 연구를 시도한 의의가 있었다.

하지만 본 시스템은 석유화학 플랜트 현장에 적용한 초기적 형태이기 때문에 장기적 운영을 통한 유용성과 안정성을 검증할 필요가 있다. 또한, 화학물질관리 시스템, 안전작업허가(Work Permit) 시스템, 안전교육 시스템 및 환경안전보건 시스템 등과 연계하여 통합 안전관리 플랫폼으로 발전시킨다면, 종합적이고 효율적인 안전관리가 가능할 것으로 본다.

본 연구에서 제시한 시스템은 석유화학 플랜트의 밀폐

공간 안전 작업을 위한 스마트 안전 기술로써 모델 역할을 할 것이며, 궁극적으로 재해 예방에 기여를 할 것으로 기대한다. 아울러 향후 다양한 현장에서의 실증을 통해 시스템의 완성도를 높이고, 지속적인 연구를 통해 더욱 고도화된 안전 관리 체계를 구축할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] Status of Asphyxiation Disaster during confined Space Work in the Last 10 Years, Policy data, Ministry of Employment and Labor, Korea, https://www.moel.go.kr/news/enews/report/enewsView.do?news_seq=13572, (accessed Mar. 14, 2024)
- [2] H. C. Ryoo, S. H. Kim, G. S. Cho. "A Study on the Necessity of Manhole Management System for the Prevention of Asphyxiation Disaster", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.24(6), pp.80-89, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.6.80>
- [3] D. S. Lim, S. K. Lee, "Suggestions for domestic policy directions through comparison of the status of domestic and foreign suffocation accidents", *korean journal of safety culture*, Vol.- No.15, pp.63-73, 2022.
- [4] Y. J. Choi, H. Choi, "Accident Prevention in Confined Space Using IoT Technology", *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol.22(9), pp.1159-1164, Sep 2018.
<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07538573>
- [5] W. S. Cho, E. S. Kim, "An Estimation of the Consequence Analysis for Asphyxiation Accident in Confined Space using C.F.D", *Journal of the Korean Society of Safety*, vol. 33, no. 5, pp.28-34, Oct. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2018.33.5.28>
- [6] Y. H. Shin, "A study on the incident causes of confined space and management measure : based on asphyxiation, fire and explosion cases of construction work", Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology, pp.36-51, 2017.
- [7] J. W. Lee, T. H. Kim, H. C. Ha, X. P. Cheng, K. S. Ahn, "Analysis of Suffocating Accidents in Confined Spaces in the Past 10 Years (2005-2015)", *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, Vol.26(4), pp.436-444, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2016.26.4.436>
- [8] KOSHA GUIDE C-109-2017, Technical Guidelines for Chemical Plant Maintenance Work Safety and Health Work, Korea Occupational Safety & Health Agency, pp.1-15, 2017.
- [9] S. B. Han, "A Study on the Remote Measurement System for the Detection of Harmful Gases in Enclosed Space", Master's thesis, Bukyung University, pp.26-36, 2021.
- [10] T. H. Jung, H. S. So, K. D. Seo, J. I. Jin, K. S. Park, Case study on Smart Safety Technology Application To Confined Space, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, v.31 no.4, Dec 2021.
DOI: <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2021.31.4.503>
- [11] M. S. Jung, C. S. Lee, W. H. Cho, "Design of Integrated Safety System for Sealed Places", *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 23, no. 1, pp.97-102, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.6109/ikiice.2019.23.1.97>
- [12] K. B. Kim, "A Study on IoT based Smart Safety Management System in a Construction Site", Master's thesis, Sungsil University, pp.22-36, 2020.
- [13] D. S. Yoo, B. T. Jang, "IoT Based Safety Management System in Closed Space", *KICS Summer Conference 2016*, The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Jeju, Korea, Vol.60, pp.1114-1115, Jun. 2016.
- [14] Y. S. Jeon, "Southern Power, operates a public safe power plant by combining new digital technologies". *Journal of Lawissue*, 2020,
https://www.lawissue.co.kr/view.php?ud=20201209214532207f4ab64559d_12 (accessed Mar. 14, 2024)
- [15] D. H. Yi, S. C. Kim, "Analysis of Computer Simulated and Field Experimental Results of LoRa Considering Path Loss under LoS and NLoS Environment", *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 42, no. 2, pp. 444-452, Feb 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.2.444>
- [16] D. H. Kim, J. H. Huh, C. H. Lee, K. D. Kim, "Design and Implementation of Ultra-Long-Range LoRa Communication Module", *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 26, no. 2, pp. 230-238, Feb 2022.
DOI: <https://doi.org/10.6109/ikiice.2022.26.2.230>

송 한 식(Han-Sik Song)

[정회원]



- 2000년 3월 ~ 2007년 3월 : 케이씨씨 PE(Project Engineer)
- 2007년 4월 ~ 2018년 7월 : 한화 S&C PM(Project Manager)
- 2018년 8월 ~ 현재 : 한화시스템 부장
- 2024년 2월 : 숭실대학교 안전융합대학원 (공학석사)

〈관심분야〉

스마트안전, 스마트팩토리, 공정안전

김 준 호(Joon-Ho Kim)

[정회원]



- 2003년 2월 ~ 2018년 7월 : 한화 S&C PM(Project Manager)
- 2018년 8월 ~ 현재 : 한화시스템 부장
- 2002년 2월 : 강릉원주대학교 생물학, 교육학, 컴퓨터과학부전공

〈관심분야〉

스마트안전, 스마트빌딩, 산업용네트워크

전 진 우(Jin-Woo Jun)

[정회원]



- 2020년 2월 : 숭실대학교 대학원 안전보건융합공학과(공학박사)
- 2001년 4월 ~ 2009년 8월 : 산업기술연구회(NST) 평가팀장
- 2010년 7월 ~ 현재 : 한국로봇산업진흥원 수석연구원
- 2021년 3월 ~ 현재 : 숭실대학교 안전융합대학원 겸임교수

〈관심분야〉

스마트안전, 로봇안전표준, 위험성평가