



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

밀폐공간 사고예방을 위한  
IoT 센서 적용 방안에 관한 연구



HANSUNG  
2025년  
UNIVERSITY

한 성 대 학 교 대 학 원

기계시스템공학과

산업위생공학전공

김 태 형



석사학위논문  
지도교수 박두용

# 밀폐공간 사고예방을 위한 IoT 센서 적용 방안에 관한 연구

A Study on the Feasibility of Applying IoT Sensors  
for Accident Prevention in Confined Spaces



HANSUNG  
UNIVERSITY

2025년 6월 일

한 성 대 학 교 대 학 원

기계시스템공학과

산업위생공학전공

김 태 형

석사학위논문  
지도교수 박두용

# 밀폐공간 사고예방을 위한 IoT 센서 적용 방안에 관한 연구

A Study on the Feasibility of Applying IoT Sensors  
for Accident Prevention in Confined Spaces

위 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2025년 6월 일

한 성 대 학 교 대 학 원

기계시스템공학과

산업위생공학전공

김 태 형

김태형의 공학 석사학위 논문을 인준함

2025년 6월 일



심사위원장 윤 주 일 (인)

심 사 위 원 황 규 석 (인)

심 사 위 원 박 두 용 (인)

# 국 문 초 록

## 밀폐공간 사고예방을 위한 IoT 센서 적용 방안에 관한 연구

한 성 대 학 교    대 학 원  
기 계 시 스템 공 학 과  
산 업 위 생 공 학 전 공  
김            태            형

본 연구는 밀폐공간의 안전관리를 위해 실시간 측정센서와 무선통신 기능을 결합한 IoT 기반 측정·감시 시스템의 적용 가능성과 효과를 검증하고자 수행되었다. 측정장비는 리켄케이코리아(주)의 GX-3R Pro 모델을 사용하여 산소, 황화수소, 일산화탄소, 메탄, 이산화탄소 등의 가스를 실시간으로 측정할 수 있도록 하였고, 이를 원격 감시가 가능한 시스템으로 구성하였다. 대상 공간은 전자산업의 전형적인 밀폐공간인 폐수처리조 (집수조; LWH 15m × 5m × 10m)를 선정하였다.

연구방법으로는 황화수소가 발생하는 시나리오를 설정하고 CFD(전산유체역학) 시뮬레이션을 실시하여 공간 내 농도구배의 존재 여부를 확인하였다. 그 결과, 황화수소가 고농도(500 mg/s)로 발생하는 조건에서, 환기를 수행하더라도 지점에 따라 농도 차이가 뚜렷하게 나타났으며, 특히 발

생지점에서 10~12.5m 떨어진 지점에서는 10.3~16.2 ppm 수준으로 높게 관측되었다. 이는 밀폐공간 내부에서 유해가스 농도가 작업 위치와 시간에 따라 달라질 수 있음을 보여주며, 실시간 측정의 필요성을 시사한다. 반면, 저농도 조건(0.05 mg/s)에서는 전체적으로 0.37 ppm 이하의 낮은 농도를 유지했지만, 여전히 발생 지점 인근에서는 상대적으로 높은 수치를 보였다.

한편, 실제 폐수처리조에서 밀폐공간 작업자에게 IoT 기반 측정시스템을 착용하도록 하여 산소 및 유해가스를 실시간으로 측정한 결과, 산소 농도와 순간적으로 발생한 황화수소 농도(2.7~3.2 ppm)가 안정적으로 측정되었고, 실시간으로 측정데이터가 오류 없이 연속적으로 전송되었다. 따라서 산소 및 복합가스센서와 통신 기능이 결합된 IoT 시스템은 향후 밀폐공간 안전관리에 유용한 도구로 활용될 수 있음을 확인하였다.

【주요어】 밀폐공간, 황화수소, 실시간 측정, 전산유체역학(CFD), 사물인터넷(IoT)

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구의 배경 .....	1
제 2 절 연구의 목적 .....	2
제 2 장 연구대상 및 방법 .....	3
제 1 절 연구 대상 .....	3
1) 밀폐공간 작업의 위험성 .....	3
2) 밀폐 공간작업 (폐수처리장 내 저수조) .....	3
3) 사물인터넷 (IoT) .....	4
4) 황화수소 (H <sub>2</sub> S) .....	4
제 2 절 연구 방법 .....	5
1) 연구 개요 .....	5
2) 사고사례 조사 및 선행연구 .....	5
3) CFD(Computational Fluid Dynamics) 시뮬레이션 .....	5
4) CFD 모델 및 조건 설정 .....	6
5) IoT 기반 측정 실험 개요 .....	7
6) 정량적 분석 기준 .....	8
제 3 장 연구결과 .....	9
제 1 절 밀폐공간 사고 현황 및 원인 .....	9

1) 밀폐공간 사고발생 현황 .....	9
2) 주요 사고사례 .....	12
3) 사고의 원인 .....	13
제 2 절 선행연구 분석 결과 .....	14
1) IoT 및 밀폐공간 연구 문헌 .....	14
2) 연구 문헌의 공통점 및 방향 .....	16
3) 연구 문헌의 적용 가능성 및 한계점 .....	16
제 3 절 CFD 시뮬레이션 결과 .....	17
1) 황화수소 저농도 발생 조건(0.05 mg/s) .....	17
2) 황화수소 고농도 발생 조건(500 mg/s) .....	19
3) 황화수소 고농도 발생시 누적 농도에 따른 위치별 차이 .....	20
제 4 절 IoT 기반 실측 결과 .....	22
1) 복합가스 측정기를 활용한 현장 반복 테스트 결과 .....	22
2) IoT 기반 테스트 결과 .....	25
제 4 장 결 론 .....	27
참 고 문 헌 .....	29
ABSTRACT .....	33

## 표 목 차

〈표 1〉 IoT 감지 센서 사양 .....	8
〈표 2〉 IoT 네트워크 사양 .....	8
〈표 3〉 2014~2023년 10년간 작업별 질식사고 발생 현황 .....	9
〈표 4〉 2014~2023년 10년간 계절별 질식사고 발생 현황 .....	11
〈표 5〉 각 연구방법의 장점 및 한계점 .....	17
〈표 6〉 황화수소 저농도 발생시 CFD 시뮬레이션 결과 .....	18
〈표 7〉 황화수소 고농도 발생시 CFD 시뮬레이션 결과 .....	19
〈표 8〉 위치별 황화수소의 상대 농도 비율 및 농도 .....	22
〈표 9〉 폐수처리장 내 밀폐공간 작업 시 가스농도 측정결과 .....	23
〈표 10〉 작업 전·중·후 과정의 황화수소 농도변화 .....	24
〈표 11〉 IoT를 이용한 실측된 평균결과 .....	26

# 그림 목 차

[그림 1] CFD해석 대상 공간 및 황화수소 발생 조건 개요 .....	6
[그림 2] 황화수소 0.05 mg/s 발생 시 CFD 결과 .....	18
[그림 3] 황화수소 500 mg/s 발생 시 CFD 결과 .....	20
[그림 4] 위치별 황화수소 농도 비율 비교 .....	21
[그림 5] 작업 전·중·후 과정의 황화수소 농도변화 .....	25
[그림 6] IoT 실측 실시간 모니터링 5회차 결과 .....	26
[그림 7] 휴대기기용 실시간 모니터링 결과 .....	26



HANSUNG  
UNIVERSITY

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구의 배경

밀폐공간 재해는 단일 사고 발생 시 치명률이 매우 높은 고위험 작업유형으로, 반복적으로 중대재해로 이어지고 있다. 고용노동부와 한국산업안전보건공단의 통계에 따르면, 2014년부터 2023년까지 발생한 밀폐공간 사고의 사망률은 약 50%에 달하며, 이는 전체 산업재해 유형 중에서도 매우 높은 수치에 해당한다.

이러한 위험성을 반영하여 「산업안전보건기준에 관한 규칙」 제10장에서는 밀폐공간 작업에 따른 건강장해 예방을 별도로 규정하고 있으며, 별표 18에서는 밀폐공간의 정의와 적용 대상 등을 명시하고 있다. 또한, 한국산업안전보건공단은 ‘밀폐공간 작업 프로그램’, ‘KOSHA CODE H-55-2020’, ‘KOSHA GUIDE H-80-2021’ 등을 통해 작업 전 가스농도 측정, 환기, 보호구 착용 등 필수적인 절차와 기술지침을 제공하고 있다.

그러나 실제 산업현장에서는 이러한 지침이 형식적으로만 이행되거나 작업 환경에 따라 실질적인 위험을 반영하지 못하는 경우가 많다. 예를 들어, 「KOSHA GUIDE H-80-2021」에서는 산소 및 유해가스 농도를 수직 및 수평 방향으로 3개 지점 이상에서 측정할 것을 권고하고 있으나, 이는 고정된 측정지점을 전제로 하므로 작업자의 이동, 유해가스의 불균일한 분포, 공기 흐름에 따른 농도 변화를 실시간으로 반영하기 어렵다.

밀폐공간 내부는 구조적 특성상 공기 흐름이 제한되고 유해가스가 특정 지점에 축적되기 쉬운 환경이다. 특히, 황화수소( $H_2S$ )나 산소 결핍 등의 유해요인은 눈으로 확인하기 어렵고, 공간 내부에서 국지적으로 높은 농도로 존재할 수 있어, 단순한 사전 측정만으로는 사고를 예방하기에 한계가 있다.

따라서 밀폐공간의 구조적, 물리·화학적 복합 위험요인을 효과적으로 관리하기 위해서는 작업자의 실제 위치와 시간에 따라 실시간으로 가스농도 변화

를 감지하고, 위험정보를 즉시 전달할 수 있는 감시체계가 필요하다. 이는 측정의 기술적 정확도뿐만 아니라, 데이터의 실시간 연속성, 원격 감시 가능성, 작동 안정성을 함께 고려해야 하는 문제이다.

최근 IoT 기술과 초소형 멀티가스 센서의 발전은 이러한 요구에 대한 현실적인 대안을 제시하고 있다. 특히, 센서와 통신 모듈을 통합한 시스템은 작업자의 착용 위치에서 실시간으로 유해가스를 감지하고, 이를 원격지점에서 즉시 모니터링 할 수 있는 환경을 제공할 수 있다.

## 제 2 절 연구의 목적

본 연구는 밀폐공간에서의 중대재해를 예방하기 위한 실효성 있는 안전관리 기술 방안을 제시하고자, IoT 기반 실시간 측정·감시 시스템의 적용 가능성과 효과를 검증하고자 실시하였다. 이를 위해 황화수소와 같은 유해가스가 비균일하게 분포할 수 있는 밀폐공간 내부에서, 농도 구배의 존재 여부를 CFD 시뮬레이션으로 검토하고, 실제 현장에서 가스센서와 무선통신이 결합된 시스템을 통해 실시간 측정 및 원격 감시 기능의 안정성과 정확성을 실험적으로 확인하고자 하였다. 본 연구는 기존의 고정지점 중심 측정 방식의 한계를 극복하고, 작업자 중심의 능동형 감시체계의 기술적 타당성을 제시함으로써, 향후 밀폐공간 안전관리체계의 고도화와 스마트화에 기여할 목적으로 실시하였다.

## 제 2 장 연구대상 및 방법

### 제 1 절 연구 대상

#### 1) 밀폐공간 작업의 위험성

밀폐공간은 자연적으로 환기가 잘되지 않는 산소 결핍이나 유해가스 농축으로 사고 발생 위험이 높은 작업장소이다. 이와 같은 공간적 특성으로 인해 질식, 중독, 화재, 폭발 등의 중대재해가 발생할 가능성이 높은 장소이며, 특히 사고 발생 시 작업자의 접근과 구조가 어려워 사망사고와 같은 중대재해로 발생하는 경우가 많다.

밀폐공간 작업을 실시할 때는 이러한 밀폐공간의 위험성을 고려하여 사전 위험성 평가 및 유해가스 측정과 충분한 환기의 실시, 적합한 보호구 착용 등의 다양한 안전관리 실시가 필요하다. 그러나 작업 시 이러한 조치가 충분히 이행되지 않아 사고가 반복해서 발생하고 있다.

본 연구에서는 밀폐공간 작업 중 지속적으로 발생하는 중대재해, 특히 질식 및 유해가스 중독 사고의 원인을 분석하고, 이와 연관된 위험성과 대응 방안을 제시하고자 한다.

#### 2) 밀폐 공간작업 (폐수처리장 내 저수조)

다양한 유형의 밀폐공간 중에서도 질식 및 유해가스 중독 사고의 발생 빈도가 높은 폐수처리장을 본 연구의 대상으로 선정하였다. 특히 폐수처리 과정에서 비교적 체적이 큰 저수조를 연구대상으로 하여 현장 테스트 및 IoT 시스템의 적용 가능성을 검증하였다.

연구대상으로 선정한 저수조의 크기는 가로 10m, 세로 10m, 높이 10m이며, 160 CMM의 송풍기 2대를 가동하여 환기를 실시하였고, 오염원은 폐수

처리장에서 쉽게 발생하는 황화수소( $H_2S$ )를 선정하여 실험하였다.

### 3) 사물인터넷 (IoT)

사물인터넷(IoT)은 센서, 통신기술 및 데이터 처리 기술을 통해 실시간으로 유해가스를 모니터링하고 작업현장을 감시할 수 있는 시스템으로, 최근 산업 안전관리 분야에서 활용되고 있다.

본 연구에서는 이동형 IoT 센서를 적용하여 실제 현장에서 데이터를 수집하고, 데이터 전송의 안정성과 통신 지연, 장애물로 인한 신호 간섭 등 기술적 제약 요인을 함께 분석하였다. 설계 과정에서 시스템의 실시간 데이터의 수집과 전송 방식 뿐만 아니라 설치 및 통신 방법, 검교정 절차 등 시스템 구축에 필요한 항목들을 종합적으로 고려하였다.

### 4) 황화수소 ( $H_2S$ )

황화수소(Hydrogen Sulfide,  $H_2S$ )는 밀폐공간 내 유해가스 중 대표적인 위험물질로, 유기물 분해 과정에서 자연적으로 발생하며, 특히 폐수처리장과 같은 산업시설에서는 슬러지와 침전물 등에 의해 쉽게 생성된다.

$H_2S$ 는 10ppm 이하의 낮은 농도에서도 후각 마비, 두통, 구토 등과 같은 건강장해를 일으킬 수 있으며, 100ppm 이상에서는 단시간 내 치명적인 중독 증상이 나타난다. 특히 일정 농도 이상에 노출될 경우 후각 피로 (olfactory fatigue) 현상으로 인해 특유의 악취를 감지하지 못하게 되어, 사람의 감각만으로는 위험을 판단하기 어렵다.

이러한 위험성 때문에  $H_2S$ 는 「산업안전보건기준에 관한 규칙」 별표 12에서 작업 전·중·후 반드시 측정해야 하는 유해가스로 지정되어 있으며, 실제 산업현장에서 발생한 사망사고의 주요 원인으로 확인되고 있다.

이에 본 연구에서는 황화수소를 주요 발생 물질로 설정하고, CFD 시뮬레이션 및 IoT 기반 측정 실험을 통해 시간적·공간적 농도 변화를 정량적으로 분석하였다.

## 제 2 절 연구 방법

### 1) 연구 개요

본 연구는 밀폐공간 작업 중 반복적으로 발생하는 유해가스 중독 및 질식사고의 위험성을 분석하고, 황화수소( $H_2S$ )의 농도 분포 특성을 평가하였다. 사물인터넷(IoT) 기반의 실시간 유해가스 모니터링 시스템을 적용하여, 정밀하고 체계적인 안전관리 방안을 제시하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 CFD (Computational Fluid Dynamics) 유체역학 시뮬레이션을 통해 황화수소 농도의 확산 및 기류를 확인하고, IoT 센서 활용 가능성을 검증하여 작업 시 정밀한 측정이 가능토록 하는데 목적이 있다.

### 2) 사고사례 조사 및 선행연구

밀폐공간 사고를 조사하기 위해 고용노동부 및 산업안전보건공단에서 발표한 2014년부터 2023년까지의 질식사고 발생현황을 확인하였고, 2014년부터 2024년까지 온라인 뉴스 포털에서 ‘밀폐공간’, ‘폐수처리장’, ‘질식 사고’ 등의 키워드를 활용하여 관련 사고 사례를 조사하였다.

또한, 고용노동부와 산업안전보건공단이 발간한 『밀폐공간 질식재해예방 안전작업 가이드』(2024)를 참고하였으며, 학술정보관 및 논문검색을 통해 ‘밀폐공간’, ‘IoT’, ‘Confined space’, ‘센서’ 등의 키워드로 국내외 연구 논문을 검색하였다. 각 논문의 연구대상, 연구방법 및 연구방향 등을 종합적으로 검토하였다.

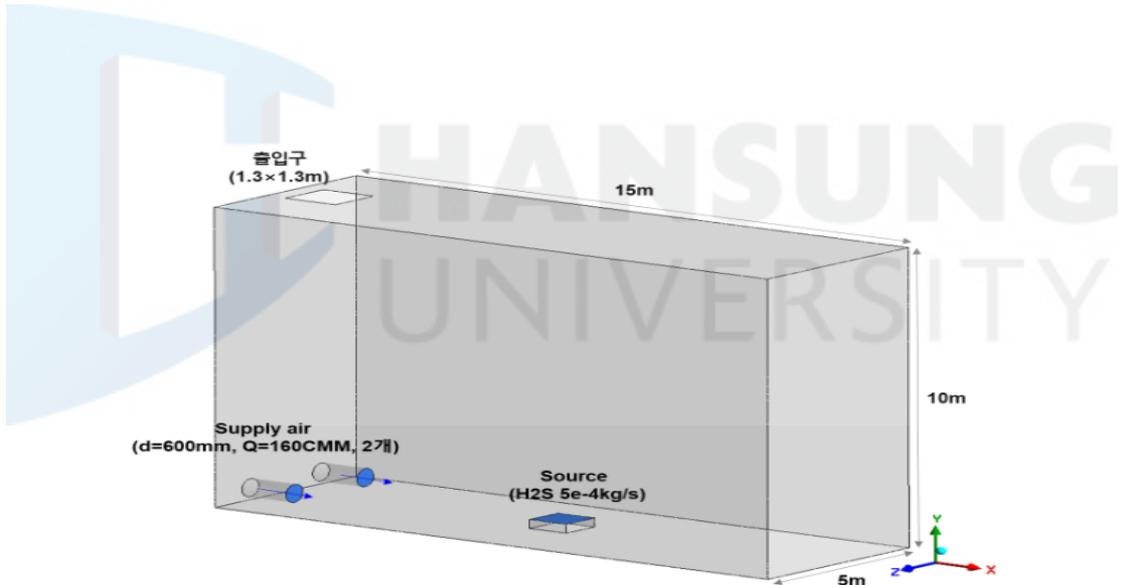
### 3) CFD(Computational Fluid Dynamics) 시뮬레이션

CFD 해석은 ANSYS Fluent 2024를 사용하여 수행하였으며, 해석 대상은 가로 15m, 세로 5m, 높이 10m의 밀폐된 직육면체 공간이다. 해당 공간은

밀폐공간 작업 현장을 가정하여 구성되었으며, 내부에는 송풍기 2대를 통해 총 320 CMM(Cubic Meter per Minute)의 송풍이 이루어지는 조건을 설정하였다.

황화수소의 발생 조건은 두 가지로 나누어 설정하였다. 첫 번째는 일반적인 작업 환경에서 발생할 수 있는 저농도로 0.05 mg/s 수준으로 설정했고, 두 번째는 환기와 체적의 영향, 위치에 따른 영향성을 확인하기 위해 가상으로 고농도인 500 mg/s 수준으로 설정하였다.

황화수소의 발생 위치는 바닥 중심을 기준으로 가로 방향 7.5m 지점에 Point Source 방식으로 설정하였다. 이때, 황화수소 농도 측정은 작업자의 호흡기 위치에 해당하는 지면으로부터 1.6m 높이(Z축 방향)에서 실시하였다. 해석 대상 형상과 주요 조건은 아래 [그림 1]과 같이 구성하였다.



[그림 1] CFD해석 대상 공간 및 황화수소 발생 조건 개요.

#### 4) CFD 모델 및 조건 설정

해석은 3차원 정상상태(Steady State) 조건으로 진행하였으며, 주요 설정 값은 다음과 같다.

- 유동 모델: Realizable  $k-\epsilon$  난류 모델
- 유해가스 확산: Species Transport Model 활성화
- 격자 수(Mesh): 약 1,200,000개 비정형 격자 사용

CFD 조건은 아래와 같이 진행하였으며, 시뮬레이션 결과는 등농도면, 유선도(Streamline), 특정 위치의 농도 수치(ppm)를 통해 분석하였다.

- 입구(Inlet): Velocity Inlet (유량 기준 160 CMM × 2대)
- 출구(Outlet): Pressure Outlet
- 벽면: No-slip 조건, 열전달 무시
- 수렴 기준: 모든 변수의 수렴 잔차(Residual)  $1e-4$  이하

## 5) IoT 기반 측정 실험 개요

현장 테스트는 복합가스측정기를 이용한 현장 테스트 10회와 IoT를 이용한 테스트 5회를 각 실시하였다. 대상은 동일하게 사업장 내 가로 10m 세로 10m 높이 10m의 폐수처리장 내 저수조에서 실시하였고, 2가지 방법으로 진행한 이유는 복합가스측정기와 IoT 센서의 실측간 차이를 확인해보기 위해서였다.

유해가스 측정 센서는 동일하게 황화수소, 산소, 일산화탄소, 이산화탄소, 메탄 총 5종을 대상으로 했다. IoT 측정시에는 네트워크 장비가 필수이기 때문에 비교적 통신 거리가 긴 LoRa 방식을 사용했다.

IoT 실측 테스트를 하기 위해 사용한 제품의 사양은 <표 1>, <표 2>와 같다.

<표 1> IoT 감지 센서 사양

	모델	GX-3R Pro
	측정가스	O <sub>2</sub> ,CO,CO <sub>2</sub> ,CH <sub>4</sub> ,H <sub>2</sub> S
	가스알람	점멸/부저/진동
	부저크기	95dB
	Output	Bluetooth(BLE Low Energy)
	보호등급	IP68
	방폭등급	내압방폭구조(Ex d ia IIC T4)
크기/무게	73(W) X 65(H) X 26(D)mm/120g	

<표 2> IoT 네트워크 사양

	모델	GX-3R Pro
	보호등급	IP67
	방폭등급	내압방폭구조(Ex d ia IIC T4)
	무선기능	LoRa (KC인증)
	크기/무게	49(W) X 55(H) X 20(D)mm/60g

## 6) 정량적 분석 기준

정량적 평가는 다음과 같은 기준으로 수행하였다. CFD 결과는 발생 지점 인근 및 대기 영역의 최대, 최소, 평균 농도 분석했고, 농도 분포의 공간적 변화와 와류 발생 여부 확인하였다.

IoT 실측 테스트 결과는 측정값의 평균, 최고, 최저값 기록 (단위: PPM, %) 수신된 데이터의 누락율, 지연시간 등 확인하였다. 또한 측정 결과는 실시간 시각화 시스템을 통해 관제 PC와 모바일 기기에서 동시에 확인 가능한 지 여부를 검토하였다. 이상의 결과를 기반으로 CFD 시뮬레이션과 IoT 실증 실험 간의 정합성 및 시스템의 실효성을 평가하였다.

## 제 3 장 연구결과

### 제 1 절 밀폐공간 사고 현황 및 원인

#### 1) 밀폐공간 사고발생 현황

밀폐공간은 작업 특성상 질식, 중독, 산소 결핍 등 중대재해 발생 가능성이 높은 장소로 분류된다. 고용노동부 보도자료(2024.5.26)에 따르면, 2014년부터 2023년까지 10년간 밀폐공간 작업에서 발생했던 질식과 관련한 사고는 총 174건이었으며, 이 중 338명이 재해를 입고, 136명(40.2%)이 사망하였다. 이는 전체 재해자 대비 사망률이 40%를 넘는 치명적인 수치로, 같은 기간 전체 사고성 재해 사망률(0.98%)에 비해 약 40배 높은 수치이다.

〈표 3〉 2014~2023년 10년간 작업별 질식사고 발생 현황

밀폐 공간작업	사고 건수	사망 자수	부상 자수	재해 자수
오폐수처리시설, 정화조, 축산분뇨 처리시설 등	46	39	47	86
빗물, 하천, 용수 등이 있던 관거, 맨홀, 집수정, 탱크 등	19	21	15	36
환기가 불충분 공간에서 양수기 가동(배기가스)	18	7	31	38
갈탄 등을 사용하는 콘크리트 양생작업	18	11	31	42
이산화탄소 소화설비	5	7	22	29
불활성가스 취급설비(탱크, 반응기, 로, 챔버 등)	9	12	11	23
화학물질이 있던 탱크, 반응기 등	11	9	9	18
환기가 부족한 장소에서 유기용제 취급	9	0	14	14

밀폐 공간작업	사고 건수	사망 자수	부상 자수	재해 자수
아르곤 가스 등을 이용한 배관, 탱크 용접	11	10	1	11
각종 설비작업 중 유해가스 누출	5	4	4	8
발효시설, 설비	3	3	3	6
석탄 등이 있던 선창, 호퍼 등	3	4	2	6
기타 산소농도 18% 미만인 탱크, 호퍼 등	3	1	2	3
선박(탱크)	3	1	2	3
유해가스가 있던 배관 등 내부	1	1	0	1
기타	10	6	8	14
계	174	136	202	338

\* 출처: 고용노동부 보도자료 인용(24.5.26)

위 사고 중 가장 많이 발생한 사고의 유형은 오폐수처리시설과 정화조 등에서의 작업으로, 총 46건의 사고와 39명의 사망자가 발생하였다. 이러한 공간에서 유기물이 잘 부패하여 황화수소(H<sub>2</sub>S)와 메탄(CH<sub>4</sub>)이 발생하기 좋은 여건이 마련되어 밀폐공간 내에서도 위험한 장소로 확인된다.

또한, 밀폐공간 작업의 위험성은 계절적에 따라서도 변화한다. 특히 여름철은 미생물의 활동이 빈번해지고 유기물 부패가 활발해져 황화수소와 메탄 등 유해가스의 발생이 더욱 높아진다. 실제 보도된 통계에서도 여름철에 발생한 사고가 52건으로 전체 기간 중 가장 높은 수치를 기록하였다.

<표 4> 2014~2023년 10년간 계절별 질식사고 발생 현황

밀폐 공간작업	봄	여름	가을	겨울
오폐수처리시설, 정화조, 축산분뇨 처리시설 등	12	19	10	5
빗물, 하천, 용수 등이 있던 관거, 맨홀, 집수정, 탱크 등	5	8	4	2
환기가 불충분 공간에서 양수기 가동(배기가스)	7	6	4	1
갈탄 등을 사용하는 콘크리트 양생작업	1		1	16
이산화탄소 소화설비	1	3	1	
불활성가스 취급설비(탱크, 반응기, 로, 챔버 등)	4	1	1	3
화학물질이 있던 탱크, 반응기 등	3	4	0	4
환기가 부족한 장소에서 유기용제 취급	2	2	3	2
아르곤 가스 등을 이용한 배관, 탱크 용접	3	2	4	2
각종 설비작업 중 유해가스 누출	1	2	1	1
발효시설, 설비		2	1	
석탄 등이 있던 선창, 호퍼 등	2			1
기타 산소농도 18% 미만인 탱크, 호퍼 등	1		2	
선박(탱크)	1		1	1
유해가스가 있던 배관 등 내부			1	
기타	3	3	1	3
계	46	52	35	41

\* 출처: 고용노동부 보도자료 인용(24.5.26)

이러한 계절적 경향은 여름철에 사고 위험이 크다는 것을 알 수 있지만, 봄·가을·겨울에도 일정 수준의 사고가 지속적으로 발생하고 있다.

## 2) 주요 사고사례

폐수처리장 내 밀폐공간 작업 시 발생한 실제 사고를 확인하기 위해 고용노동부 및 산업안전보건공단 통계자료와 함께, 2014년부터 2024년까지 주요 뉴스 기사를 조사하였다. 고용노동부 통계에 따르면, 해당 기간 동안 밀폐공간에서 총 174건의 질식·중독 사고가 발생하였으며, 이로 인해 총 338명의 산업재해가 발생하고 그 중 136명이 사망하였다. 반면, ‘밀폐공간’, ‘폐수처리장’, ‘질식사고’ 등의 키워드로 검색 사이트를 통해 확인된 사고 사례는 10건 내외로, 실제 사고 발생 건수에 비해 언론에 보도된 사례는 제한적인 것으로 나타났다. 아래는 보도되었던 10건 중 폐수처리장에서 발생한 사고 사례 5건을 정리한 것이다.

### 가) 2018년 2월, 제주 하수 펌프장 질식 사고

제주도 제주시의 한 하수 펌프장 밸브실에서 장비 교체 작업 중이던 작업자 5명이 유해가스를 흡입해 질식하였다. 암모니아 및 일산화탄소가 축적된 공간에서 가스 측정 및 환기 미실시가 원인으로 지목되었다.

(출처: 한겨레, 2018.2.20)

### 나) 2020년 4월, 부산 하수관로 공사장 질식 사고

부산의 하수관로 공사 현장에서 맨홀 내부 작업 중 일산화탄소와 황화수소를 흡입한 작업자 3명이 중독되어 사망하였다. 맨홀 진입 전 유해가스 측정 및 환기 작업이 이루어지지 않은 점이 지적되었다.

(출처: 연합뉴스, 2020.4.13)

### 다) 2021년 2월, 인천 도급업체 폐수처리시설 질식 사고

인천의 도급업체에서 폐수처리장 슬러지를 제거하던 중, 황화수소 중독으로 작업자 2명이 사망하였다. 보호구 미착용, 작업계획 미수립 등 안전관리 부실이 사고의 원인으로 확인되었다.

(출처: KBS 뉴스, 2021.2.19)

라) 2021년 7월, 대구 저류조 질식 사고

대구 정수사업소 배출수 처리시설 저류조 청소 중 황화수소에 노출되어 작업자 1명이 사망하였다. 현장조사 결과 산소 및 유해가스 측정 미실시, 환기 부재, 보호구 미착용 등 안전조치가 전반적으로 이행되지 않았던 것으로 드러났다.

(출처: 매일신문, 2021.7.22)

마) 2024년 2월, 인천 제철 회사 폐수처리시설 질식 사고

인천 소재 제철공장의 폐수처리 수조 청소 중, 7명의 작업자가 황화수소에 노출되어 3명이 사망하고 4명이 병원 치료를 받았다. 사고 당시 작업자들은 일반 마스크를 착용하고 있었으며, 안전관리 부재와 비상조치 미흡이 사망자수를 증가시킨 것으로 보도되었다.

(출처: 국민일보, 2024.2.8)

### 3) 사고의 원인

위 사고 사례들과 함께 고용노동부 및 산업안전보건공단에서 발간한 『밀폐공간 질식재해예방 안전작업 가이드』(2024)의 내용을 종합해보면 사고의 원인을 아래와 같이 확인해 볼 수 있다.

- 첫째, 가스 측정의 미실시 또는 오측정
- 둘째, 환기 부족
- 셋째, 보호구 미착용 또는 부적절한 착용
- 넷째, 작업자 교육 및 작업계획의 부재
- 다섯째, 위험인지 부족과 경각심 결여

무엇보다 중요한 점은, 이 다섯 가지 원인이 각각의 독립된 문제가 아니라, 작업 전 기본수칙을 제대로 이행했는지 여부와 밀접하게 연관되어 있다는 점이다. 사고의 대부분은 새로운 위험이나 예외적인 변수 때문이 아니라,

유해가스 농도측정, 충분한 환기 실시, 적합한 보호구 착용, 교육, 작업계획 수립과 같은 기초적인 안전관리 미준수에서 발생 되었다.

이렇게 기본적인 안전관리만으로도 충분히 사고를 예방할 수 있다. 본 연구에서도 이러한 기본적인 안전관리의 준수를 전제로 하여 IoT 기술을 활용한 정밀하고 효과적인 안전관리 방안을 제시하고자 한다.

## 제 2 절 선행연구 분석 결과

### 1) IoT 및 밀폐공간 연구 문헌

‘밀폐공간’, ‘IoT’, ‘Confined Space’, ‘Sensor’ 등의 키워드를 활용하여 교내 학술정보관 및 논문 검색 시스템을 통해 국내외 총 23편의 학술논문을 수집하고 분석하였다.

총 23편의 학술논문 중에서 석유화학 플랜트를 대상 밀폐공간과 관련된 논문이 6편으로 가장 많았다. 예를 들어, 「석유화학플랜트 내 밀폐공간 작업장의 IoT기술 기반 안전모니터링 시스템 개발」, 「석유화학 플랜트 밀폐공간 작업 안전관리 모니터링 시스템 설계 및 구축」은 실제 플랜트 작업 환경에서 IoT 기반 스마트 안전 시스템을 구현하고, 그 성능을 검증하고자 하였다. 특히, Choi, S. & Lee, J.(2020)는 석유화학 플랜트에서 IoT 기반 안전관리 시스템의 도입 방안을 제안하면서, 고위험 작업장에서 실시간 모니터링의 중요성을 강조하였다.

보편적인 밀폐공간을 대상으로 실시한 연구는 5편으로 확인되었으며, 이들 대부분은 위험요소에 대한 감지와 알람 송신 기능을 중심으로 시스템 설계 방법을 제시하였다.

하수처리장 및 상수도관과 같은 지하 기반시설을 대상으로 한 연구도 다수 확인되었다. 「환경시설 내 지하 밀폐공간의 사물인터넷 기반 유해가스 모니터링 시스템 평가」는 하수처리장 내부에서 장기 데이터 수집 및 클라우드 기반의 모니터링 효과를 검토하였고, 「노후 상수도관 내 밀폐공

간 공사에서 스마트 안전기술 적용 인식도 연구」는 현장 근로자의 기술 수용성에 대한 분석을 발표하였다.

건설현장 및 기타 산업 공간에서는 IoT 기반 통합 안전관리 개념을 다룬 「Improving Indoor Well-Being Through IoT」와 고압 수소 누출에 따른 위험 평가를 CFD로 검토한 「수소 센서를 이용한 밀폐공간의 수소 누출 시 환기성능에 대한 실험 및 CFD 시뮬레이션」 등이 있었다. Ahmed, A. & Zhao, L.(2024)의 연구는 IoT 기반 가스 누출 감지 시스템의 설계 및 적용 가능성을 평가하였고, 가정 및 소규모 작업장에서도 적용할 수 있는 모듈형 시스템을 소개하였다.

연구의 방법적인 측면으로는 전체 23편 중 실제 연구를 기반으로 실증 평가한 논문이 8편으로 가장 많았다. IoT 기반 시스템을 실제 산업현장에 적용하여 효과를 검증하고자 했다. 「석유화학 플랜트 밀폐공간 작업 안전관리 모니터링 시스템 설계 및 구축」과 같은 논문은 센서, CCTV, AI 등을 복합적으로 활용하여 실시간 경고 시스템을 구축하였다. 반면, 기술의 구조와 알고리즘, 네트워크 구성 등을 분석한 분석연구는 7편, 최신 기술 동향 및 이슈를 종합한 고찰연구는 8편이었다.

기술적으로는 대부분의 연구가 센서 및 유해가스 감지 기술을 중심으로 연구했으며, LoRa, 표면파, Wi-Fi 등 네트워크 전송 기술과 AI 기반의 인공지능 시스템, 모듈형 감지기 설계 등을 결합한 실시간 모니터링과 알람 송출 기능을 연구하였다. 「밀폐 공간 안전을 위한 IoT 공기질 모니터링 시스템 개발」은 LoRa 통신 기반의 센서 데이터를 통해 공기질을 실시간 분석하였고, 「Design of Rule-based Inference Engine for the Monitoring of Harmful Environments」는 Jess 엔진 기반의 자동 판단 알고리즘을 강조했다.

## 2) 연구 문헌의 공통점 및 방향

위의 연구들은 공통적으로 센서를 활용하여 밀폐공간 내 위험 상황을 실시간으로 모니터링하고, 즉각적으로 대응할 수 있는 IoT 기반 시스템

구축을 목표로 하고 있었다. 이러한 시스템들은 체계적인 안전관리 프로세스를 통해 현장에 위험 신호를 실시간으로 제공하고, 위험 상황을 즉각 인지하여 사고를 예방하는 데 중점을 두고 있었다.

또한, 단순한 모니터링 기능에 그치지 않고, 수집된 데이터를 기반으로 사고 인지 및 예측 기능을 강화하여 보다 정교하고 안전한 관리체계를 구현하기 위한 가능성도 연구되고 있었다.

### 3) 연구 문헌의 적용 가능성 및 한계점

연구방법에 따라 장점과 한계점을 <표 5>와 같이 분류하였다. 분석 결과는 각 연구에서 대상과 기술에 따라 각기 다른 방식으로 연구를 실시했으며 이에 따라 각기 장점과 한계점이 모두 있었다.

특히, 실증연구는 실제 현장에 기술을 적용하여 IoT 시스템의 효과를 검증하고 실효성을 확보할 수 있는 장점이 있었으나, 특정 산업에 국한되어 적용되어 다른 산업 및 장소에 확대적용하는 데는 한계가 있었다. 반면, 분석 연구 방법은 기술을 구현하기 위한 구조와 논리를 구체적으로 설계하여 기술적으로 가능성을 확보하였으나, 실제 현장에서 적용할 수 있는지에 대한 피드백이 부족하다는 한계점이 있었다.

고찰연구의 경우, 최신 기술에 대해 폭넓게 검토하고 다양한 기술의 융합 가능성을 제시한 장점이 있었지만, 구체적인 효과 분석에는 한계가 있었다.

〈표 5〉 각 연구방법의 장점 및 한계점

구 분	장점	한계점
실증연구 (8편)	실제 현장에 기술을 적용함으로써 효과 검증 및 실용성 확보	적용 사례가 특정 산업에 국한되어 있으며, 범용성 한계
분석연구 (7편)	기술 구현에 필요한 구조와 논리를 설계하고, 기술적 타당성 확보	실제 적용에 대한 검증자료 부재
고찰연구 (8편)	최신 기술 동향을 폭넓게 검토하고, 다양한 기술의 융합 가능성 제시	구체적인 효과 분석에 한계

본 연구도 앞서 연구되었던 실증연구들과 유사한 장점과 한계점을 가지고 있다. 현재는 연구대상으로만 적용해야 하는 한계점을 가지고 있지만 이러한 실증연구들이 지속적으로 축적된다면, 향후 보편적으로 활용 가능한 안전관리 체계로 발전할 수 있을 것으로 기대한다.

### 제 3 절 CFD 시뮬레이션 결과

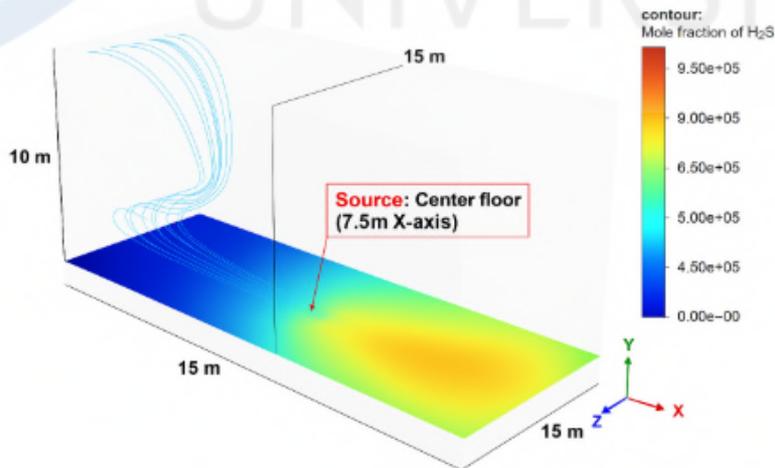
#### 1) 황화수소 저농도 발생 조건(0.05 mg/s)

일반적인 작업 환경 수준인 0.05 mg/s로 황화수소가 발생하는 조건에서는 전체 공간 내 황화수소 농도가 기준치인 10 ppm미만으로 유지되었으며, 송풍기 위치로부터의 거리별 농도 분포는 〈표 6〉과 같다. 이 때 최대 농도는 약 0.37 ppm, 평균 농도는 약 0.12 ppm, 최소 농도는 0.01 ppm 수준이었다. 송풍기의 방향성이 일정하여 전반적으로 안정된 기류가 형성되었고, 공간 내 유해가스 농도 분포의 편차도 크지 않았다.

〈표 6〉 황화수소 저농도 발생시 CFD 시뮬레이션 결과

송풍기 위치로부터 거리(m)	농도(ppm)
2.5	0.01
5.0	0.08
7.5(황화수소 발생지점)	0.37
10.0	0.18
12.5	0.14
15.0	0.09

이러한 결과는 일반적인 작업 환경에서 황화수소가 저농도로 발생하는 경우, 적절한 환기 설비만으로도 공간 내 황화수소의 농도를 안전 기준 이하로 유지할 수 있음을 보여준다. 이는 밀폐공간 작업 시 작업자의 안전관리에 기본적인 환기 시스템이 중요하다는 것을 확인할 수 있는 결과이다.



[그림 2] 황화수소 0.05mg/s 발생 시 CFD 결과.

## 2) 황화수소 고농도 발생 조건(500 mg/s)

시뮬레이션 조건을 변경하여 황화수소의 농도가 고농도로 발생하고 있다면 동일한 작업환경에서 황화수소의 농도가 어떻게 변화하는지를 확인하고자 하였다.

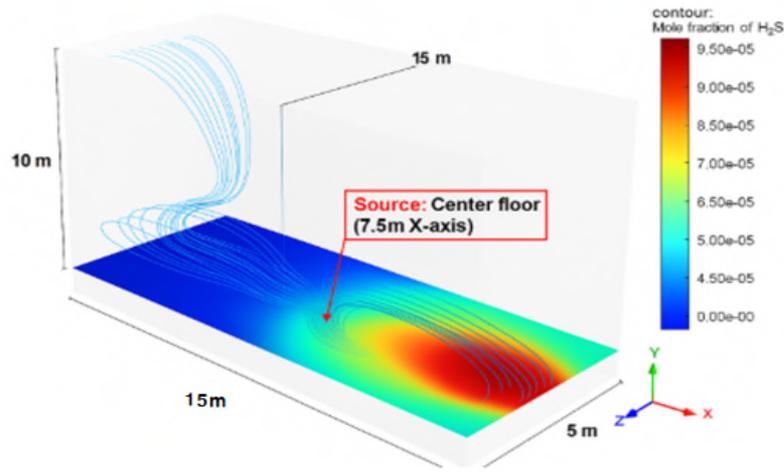
황화수소가 500 mg/s로 지속적으로 발생하는 고농도 조건에서의 시뮬레이션 결과, 작업자 호흡기 위치(지면으로부터 1.6 m)에서 측정된 최고 농도는 발생지점(7.5 m)에서 약 24.7 ppm으로 나타났다.

반면, 송풍기 방향의 기류가 반대편 벽에 부딪힌 후 되돌아 나오는 흐름에 의해 와류가 형성되는 10.0~12.5 m 구간에서도 16.2~10.3 ppm 수준의 고농도가 정체되는 것을 확인했고, 이는 밀폐공간 내 특정 지점에서 기류가 정체될 때 유해가스가 함께 잔류하여 위험성이 커질 수 있음을 알 수 있다.

〈표 7〉 황화수소 고농도 발생시 CFD 시뮬레이션 결과

송풍기 위치로부터 거리(m)	농도(ppm)
2.5	2.1
5.0	8.5
7.5(황화수소 발생지점)	24.7
10.0	16.2
12.5	10.3
15.0	5.4

[그림 3]은 연속된 공간에서 누적된 농도 분포를 시각적으로 나타내었다. 〈표 7〉에서는 황화수소의 발생지점에서 농도가 가장 높은 것으로 나타났지만, 이는 순간적으로 발생하는 농도이며, [그림 3]에서와 같이 누적된 농도에서는 공기가 정체되는 구간에서 황화수소의 농도 분포가 더욱 진하게 나타난다.



[그림 3] 황화수소 500mg/s 발생 시 CFD 결과.

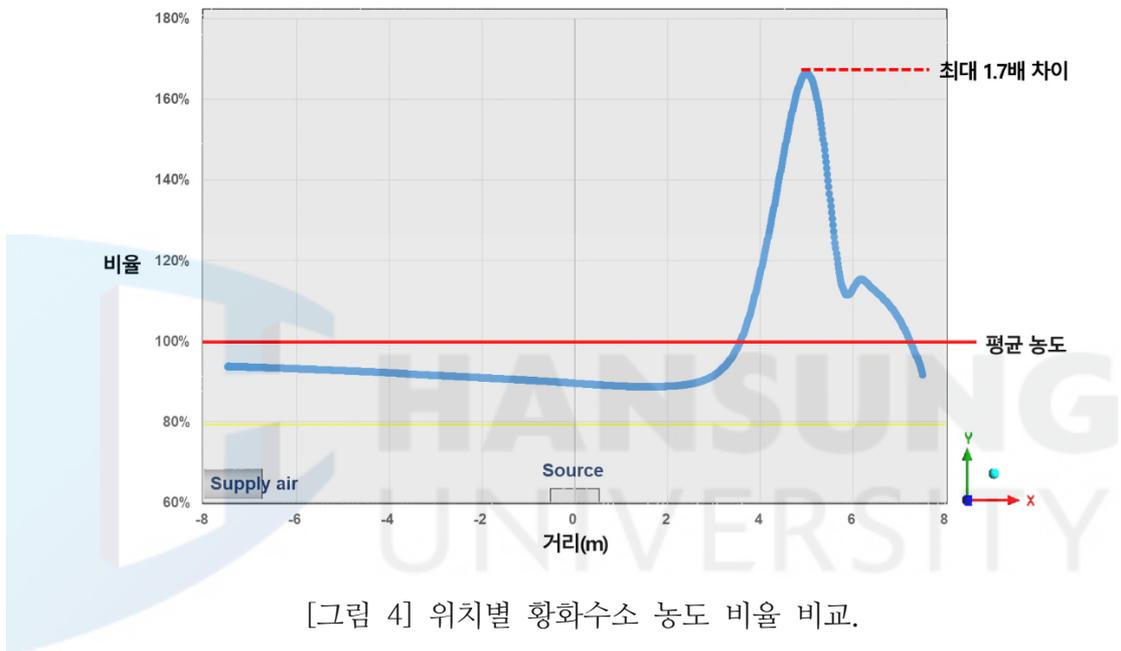
### 3) 황화수소 고농도 발생시 누적 농도에 따른 위치별 차이

황화수소가 고농도로 발생할 때, 순간적인 농도가 아닌 공간에 누적된 농도의 차이를 확인하기 위해, 공간 전체의 평균 농도인 11.2ppm을 비율로 계산하여 [그림 4]와 같이 그래프로 표현하였다.

[그림 4]에서는 작업 공간 내 위치별 농도가 80% 수준에서 최대 약 170% 까지 차이를 보였다. 특히, 황화수소 발생원을 지나 송풍기와 멀어지는 지점에서 최대 1.7배의 고농도 정체 구간이 형성되었다. 이러한 결과는 고농도에서는 단일 지점 측정 방식으로는 실제 위험 수준이 과소평가 될 수 있다는 문제점을 확인할 수 있다.

### 3) 거리에 따른 H2S 농도 (y=1.6m\_작업자 호흡기 위치)

- 밀폐공간 위치에 따라 농도 차이 발생
  - 위치별 평균 농도 대비 최대 1.7배 차이 발생 (y=1.6m)
- Volume 전체 평균 농도 대비 최대 농도 차이 : 4.4배



[그림 4] 위치별 황화수소 농도 비율 비교.

〈표 8〉은 위치별 황화수소의 상대 농도 비율 및 평가된 농도(ppm) 이다. 황화수소 발생원에 비해 공기가 정체되는 구간에서 최고인 19.0 ppm이 기록되었다.

〈표 8〉 위치별 황화수소의 상대 농도 비율 및 농도

Source로 부터 거리(m)	비율(%)	농도(ppm)	비고
-6.0	82.1	9.2	송풍기 인근
-3.0	87.4	9.8	
0(Source)	94.2	10.6	황화수소 발생원
+2.5	101.7	11.4	
+5.2	169.8	19.0	최고점(기류정체)
+6.0	128.5	14.4	
+7.5	92.6	10.4	

#### 제 4 절 IoT 기반 실측 결과

##### 1) 복합가스 측정기를 활용한 현장 반복 테스트 결과

사업장에서 2024년 7월 1일부터 7월 12일까지 폐수처리장에서 실시된 일부 밀폐공간 작업에서 산소 및 유해가스 농도를 측정했던 데이터는 〈표 9〉와 같다. 작업은 주로 세정, 유지보수, 가설물 설치작업 등으로 다양했지만 측정했던 농도는 적정공기 기준을 모두 만족하였다. 다만, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, CO의 농도는 기준치 이하로만 표기되어, 법 기준 만족 여부만 기록되었으며, CO<sub>2</sub> 농도는 250~600 ppm, O<sub>2</sub>는 모두 20.9% 였다.

〈표 9〉 폐수처리장 내 밀폐공간 작업 시 가스농도 측정결과

작업일	작업명	매 30분 측정결과 (평균값)				
		CH4(%)	H2S(ppm)	CO(ppm)	CO2(ppm)	O2(%)
'24.7.1	세정작업	0.1 <	0.01 <	1 <	500	20.9
'24.7.1	유지보수	0.1 <	0.01 <	1 <	350	20.9
'24.7.2	유지보수	0.1 <	0.01 <	1 <	400	20.9
'24.7.3	가설물 설치	0.1 <	0.01 <	1 <	400	20.9
'24.7.3	세정작업	0.1 <	0.01 <	1 <	450	20.9
'24.7.4	세정작업	0.1 <	0.01 <	1 <	600	20.9
'24.7.4	유지보수	0.1 <	0.01 <	1 <	450	20.9
24.7.5	유지보수	0.1 <	0.01 <	1 <	500	20.9
'24.7.8	가설물 설치	0.1 <	0.01 <	1 <	350	20.9
'24.7.8	세정작업	0.1 <	0.01 <	1 <	400	20.9
'24.7.9	가설물 설치	0.1 <	0.01 <	1 <	300	20.9
'24.7.10	가동전 점검	0.1 <	0.01 <	1 <	250	20.9
'24.7.10	가설물 설치	0.1 <	0.01 <	1 <	350	20.9
'24.7.11	유지보수	0.1 <	0.01 <	1 <	400	20.9
'24.7.11	세정작업	0.1 <	0.01 <	1 <	450	20.9
'24.7.12	유지보수	0.1 <	0.01 <	1 <	500	20.9
'24.7.12	세정작업	0.1 <	0.01 <	1 <	600	20.9

기존의 데이터에는 황화수소(H<sub>2</sub>S)의 실측농도가 기준치 이하로만 표기되었다. 이에, IoT 적용 전 실제 작업 시 황화수소의 농도변화를 확인하기 위해, 폐수처리장 내 저수조(가로 10m, 세로 10m, 높이 10m)를 대상으로 실측 테스트를 진행하였으며, 작업 전·중·후에 걸쳐 황화수소의 농도를 측정하였다. 반복적인 실험을 위해 동일한 크기의 저수조 10곳을 선정하였으며, 각 실험은 30분 간격으로 총 240분간 진행되었다.

동일한 테스트를 반복하기 위해서 같은 크기의 저수조를 선정하여 진행했지만, 각 폐수처리장의 저수조의 위치가 다르고, 저수조 별 유지보수 기간이

달라 완벽하게 동일한 조건은 아니었다. 10번의 테스트 결과는 <표 10>과 같다.

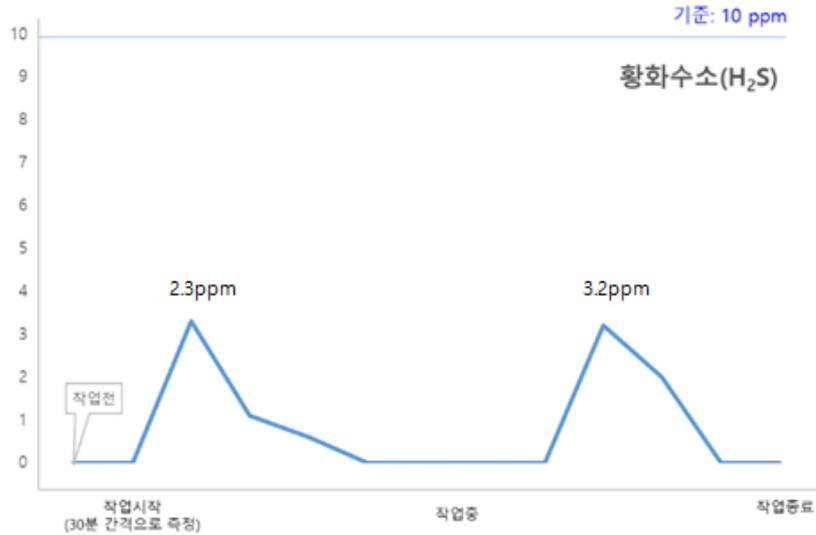
<표 10> 작업 전·중·후 과정의 황화수소 농도변화 (30분 간격 측정)

테스트 No.	30분 간격 황화수소 농도 (ppm)								
	0	+30	+60	+90	+120	+150	+180	+210	+240
1	0.00	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.01
2	0.00	0.00	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.00
3	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.02	0.04	0.05	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01
6	0.00	2.70	1.30	0.50	0.03	3.20	2.60	0.40	0.02
7	0.00	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.04	0.03	0.02
8	0.00	0.01	0.01	0.0	0.0	0.01	0.01	0.01	0.00
9	0.00	0.04	0.05	0.05	0.06	0.05	0.04	0.02	0.02
10	0.00	0.03	0.03	0.03	0.05	0.06	0.05	0.04	0.03

총 10번의 테스트에서 9번은 황화수소의 농도가 대부분 0.00~0.06 ppm으로 검출되어 차이가 없었으나, 6번째 측정에서는 황화수소의 농도 변화가 있었다. 작업 전 0.00 ppm 이었으나, 작업 시작 후 30분이 경과되었을 때 2.70 ppm이 검출되었고 이후 농도가 감소하다가 150분 경과 시점에 다시 농도가 변화하는 모습이였다. [그림 5]는 6번째 테스트 결과를 시간에 따른 농도변화에 대한 그래프이다.

작업 후 30분, 150분 경과 시점에 각 황화수소의 농도가 일시적으로 상승한 이유는 바닥에 정체되어 있는 황화수소가 유지보수 작업을 하면서 바닥을 휘젓거나 변화가 생기면서 일시적으로 발생한 것으로 추정된다.

발생 농도는 최고 3.20 ppm으로 기준치인 10.0 ppm 이하 수준이었지만, 유지보수 기간, 계절별 요인, 화학물질 사용량 등에 따라 고농도로 발생할 수 있는 리스크도 존재함을 알 수 있다.



[그림 5] 작업 전·중·후 과정의 황화수소 농도변화.

## 2) IoT 기반 테스트 결과

사업장의 폐수처리장 내 저수조에서 IoT 센서를 활용하여 유해가스 농도 실측 테스트를 5회 진행하였다. 측정 대상 가스는 황화수소(H<sub>2</sub>S), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 산소(O<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 메탄(CH<sub>4</sub>) 총 5종이었다.

IoT를 기반으로 한 테스트인 만큼 실제 데이터 전송이 잘 되는지를 확인하는 것이 중요했고, 실제 테스트에서도 통신 지연 및 장애물에 의한 간헐적 신호 손실, 데이터 전송 지연, 노이즈 간섭 등으로 5회 반복 실험을 하였다.

테스트 결과는 <표 11>과 같다. 황화수소(H<sub>2</sub>S)는 0.0~0.1ppm으로, 기준치(10ppm) 이하로 확인되었다. 다만 소수점 첫 자리까지만 표기되어 정밀한 수치확인 어려웠다. 이 외 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 산소(O<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 메탄(CH<sub>4</sub>) 모두 정상적으로 수치가 확인되었고, 향후 기록보관 시 정확한 데이터를 확보할 수 있게 되었다.

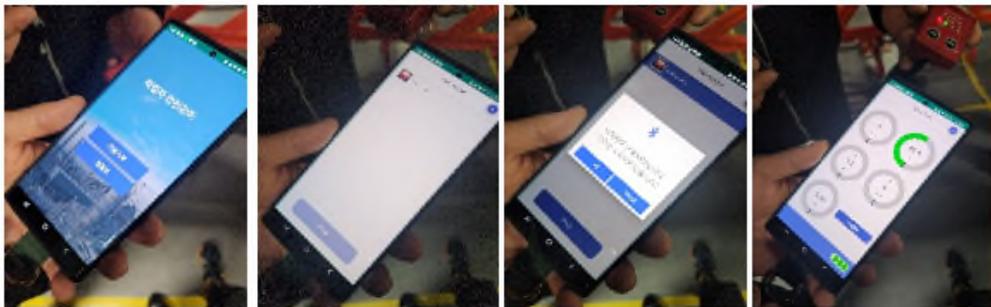
〈표 11〉 IoT를 이용한 실측된 평균결과(단위:ppm, 단 산소는 %)

회차	H2S	CO2	O2	CO	CH4
1회	0.0	490	20.7	2.5	0.1
2회	0.1	488	20.8	2.9	0.1
3회	0.0	505	20.7	3.1	0.1
4회	0.1	495	20.9	2.6	0.1
5회	0.0	513	20.2	2.7	0.1

사업장에 적용했던, CCTV를 활용한 작업화면과 RFID를 이용한 작업자의 정보 등도 [그림 6]와 같이 정상 작동되었고, 작업안전관리자가 현장에서 휴대기기를 이용하여 실측된 결과를 모니터링 할 수 있는지도 [그림 7]과 같이 문제없이 작동하였다.



[그림 6] IoT 실측 실시간 모니터링 5회차 결과.



[그림 7] 휴대기기용 실시간 모니터링 결과.

## 제 4 장 결 론

본 연구는 밀폐공간의 안전관리에 실시간 측정센서와 통신기를 결합한 실시간 측정관리 시스템의 타당성을 검증하기 위해 수행되었다. 측정센서로는 산소, 황화수소, 일산화탄소, 메탄, 이산화탄소 등을 측정할 수 있는 가스센서(리켄케이키코리아(주)사, 모델 GX-3R Pro)를 사용하였고, 무선통신 기능을 결합하여 원격으로 실시간 농도분포 감시가 가능한 안전관리 시스템을 구축했다. 연구대상은 전자산업에서의 전형적인 밀폐공간 중의 하나인 폐수처리조(집수조; LWH: 15m x 5m x 10m)를 선정하였으며, 연구방법은 황화수소가 발생하는 상황을 가정한 CFD(전산유체역학) 시뮬레이션을 실시하여, 내부 공간에 농도구배가 나타나는지 검증하였고, 내부 농도가 높은 지점에서 실시간 측정과 원격장소에서 실시간 감시가 가능한지 실험을 통해 확인하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 폐수처리조 중앙지점에서 황화수소가 고농도(500 mg/s)로 발생하는 조건에서 폐수처리장의 한쪽 방면 하부에서 급기하고 상부로 배기할 경우, CFD 시뮬레이션 결과, 밀폐공간 내부의 황화수소 농도는 지점별로 크게 다르게 나타남을 확인하였다. 급기가 이루어지는 벽면에서 7.5m 떨어진 중앙지점에서 발생한 황화수소는 10.0m 및 12.5m 지점에서 10.3~16.2 ppm 수준으로 높게 나타났다. 따라서 폐수 등에 용해된 황화수소가 작업 중에 공기 중으로 발생할 경우, 실시간 측정이 필요함을 확인할 수 있었다. 한편 황화수소 발생률이 낮은 조건(0.05 mg/s)에서는 0.37 ppm 이하의 낮은 농도로 유지되었고, 발생지점 근처에서는 상대적으로 농도가 높게 나타났다. 이것은 발생지점에서 멀어질수록 황화수소 농도가 희석되었기 때문일 것으로 추정되었다. 어느 경우든 밀폐공간 내부는 환기를 시키더라도 지점별로 작업시간별로 황화수소 농도가 달라질 수 있음을 의미한다. 따라서 실시간 측정을 통한 밀폐공간 안전관리 시스템의 필요성과 중요성을 확인할 수 있었다.

실제 폐수처리조에서 센서와 통신이 결합된 IoT 시스템으로 산소 및 유해 가스 농도를 측정할 결과, 산소농도와 순간적으로 발생한 2.7~3.2 ppm수준

의 황화수소가 측정되었고, 측정결과는 오류없이 실시간 연속적으로 안정적인 전송이 됨을 확인하였다. 따라서 이러한 시스템으로 원격지점에서 밀폐공간 내부의 산소 및 유해가스 농도의 감시가 가능한 것으로 나타났다.



# 참 고 문 헌

## 1. 국내문헌

- 백빛나. (2021). 밀폐공간 형상 및 내부 공기 조성에 따른 필요 환기량에 관한 연구.
- 최유정, 최훈. (2018). IoT 기술을 활용한 밀폐공간에서의 사고 예방 연구 한 국정보통신학회논문지.
- 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원. (2018). 밀폐공간 사고예방을 위한 첨단기술 활용 방안 연구. 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원.
- 고용노동부. 산업안전보건기준에 관한 규칙 제10장, 별표18.
- 박종혁, 권미아, 김현지, 최병태. (2015). 기화된 액체질소에 의한 산소결핍 질식. 한국법의학회지, 39
- 한국산업안전보건공단. (2021). 밀폐공간 작업 프로그램 수립 및 시행에 관한 기술지침 KOSHA GUIDE (H-80-2021).
- 이정완, 김태형, 하현철, 박승욱, 안광석. (2016). 밀폐공간 질식재해 자료 분석을 통한 질식재해 요인분석 (2005-2015). 한국산업보건학회지, 26.
- 임진석. (2018). 안전기술 향상을 위한 ICT 융·복합 연구. 산업안전보건연구원 연구보고서.
- 성윤희, 정기호. (2019). 4차 산업혁명을 위한 ICT 기술의 산업안전보건적용 사례분석. 대한안전경영과학학회지, 21.
- 박민호. (2023). 무선통신과 모바일 응용 소프트웨어를 활용한 밀폐공간 스마트 안전관리 시스템 구현. 한국컴퓨터종합학술대회.
- 권기원, 이해연. (2022). LoRa 통신망을 이용한 스마트 IoT 플랫폼 개발. 한국정보기술학회지, 20.

- 고용노동부, 한국산업안전보건공단. (2024). 밀폐공간 질식재해예방 안전 작업 가이드. 고용노동부.
- 김지은, 송한나. (2022). 밀폐공간 안전사고 예방을 위한 IoT 기반 가스 센서 모니터링 시스템 개발. 한국안전학회지, 37(4), 122-130.
- 박영훈, 김도현. (2023). 환경시설 밀폐공간 내 유해가스 실시간 감지 및 클라우드 기반 관리방안 연구. 한국환경안전학회지, 29(1), 45-52.
- 정우철, 이해림. (2022). IoT 기반 공기질 모니터링 시스템의 설계 및 구현. 한국산업기술학회논문지, 38(3), 211-220.
- 강호정. (2021). 이산화탄소 소화설비에서 누출로 인한 질식사고의 원인 분석과 대책에 관한 연구. 부경대학교.
- 김철수, 이영희. (2020). 석유화학플랜트 내 밀폐공간 작업장의 IoT기술 기반 안전모니터링 시스템 개발. 한국안전학회지.
- 박지훈, 최연우. (2021). 석유화학 플랜트 밀폐공간 작업 안전관리 모니터링 시스템 설계 및 구축. 한국산업안전보건연구지.
- 조민수, 한지윤. (2022). IoT 기반 밀폐공간 안전관리 시스템. 한국정보통신학회논문지.
- 김지훈. (2023). 노후 상수도관 내 밀폐공간 공사에서 스마트 안전기술 적용 인식도 연구. 한국토목학회논문지.
- 이현수. (2024). 수소 센서를 이용한 밀폐공간의 수소 누출 시 환기성능에 대한 실험 및 CFD 시뮬레이션. 연세대학교 석사학위논문.
- 박상현. (2024). 밀폐 공간 안전을 위한 IoT 공기질 모니터링 시스템 개발. 한국산업안전보건학회지.
- 이은지, 박철수, 김영훈. (2022). 환경시설 내 지하 밀폐공간의 사물인터넷 기반 유해가스 모니터링 시스템 평가. 한국환경안전학회지, 28(3), 245-253.

## 2. 국외문헌

- OSHA. (2015). Confined Spaces in Construction – Final Rule. United States Department of Labor.
- HSE (Health and Safety Executive). (2013). Confined Spaces: A Brief Guide to Working Safely. INDG258 (rev2), UK.
- Choi, S. & Lee, J. (2020). IoT-based Modular Gas Leak Detection and Protection System for Enhanced Household Safety. *International Journal of Embedded Systems*, 12(3), 145–158.
- Park, H. & Kim, T. (2021). Design of Rule-based Inference Engine for Monitoring Harmful Environments in Workplace. *Safety Science*, 133, 105–112.
- Johnson, L. & Patel, R. (2023). Improving Indoor Well-Being Through IoT: A Methodology for User Safety in Confined Spaces. *Journal of Industrial Safety*, 27(2), 221–238.
- Ahmed, A. & Zhao, L. (2024). Experimental and CFD Simulation of Hydrogen Leakage in Confined Spaces. *Journal of Hazardous Materials*, 453, 130045.
- Zhang, W. & Liu, P. (2022). Wireless Monitoring System for Confined Spaces Using IoT Sensors. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(1), 33–42.
- Smith, R. & Cooper, A. (2023). Risk Assessment of Confined Spaces Using IoT and AI Technologies. *Safety and Health at Work*, 14(4), 398–407.
- Brown, T. & Singh, V. (2022). Surface Wave Communication in Ships: Applications for Confined Spaces. *Journal of Marine Engineering*,

41(5), 55–64.

Chen, X. & Wang, Y. (2024). Advanced IoT-based Air Quality Monitoring for Confined Workspaces. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(1), 87–102.

Martinez, D. & Lopez, H. (2023). Sensor-based Safety Systems for Confined Spaces in Wastewater Treatment Plants. *Water Science & Technology*, 88(2), 390–399.



# ABSTRACT

## A Study on the Feasibility of Applying IoT Sensors for Accident Prevention in Confined Spaces

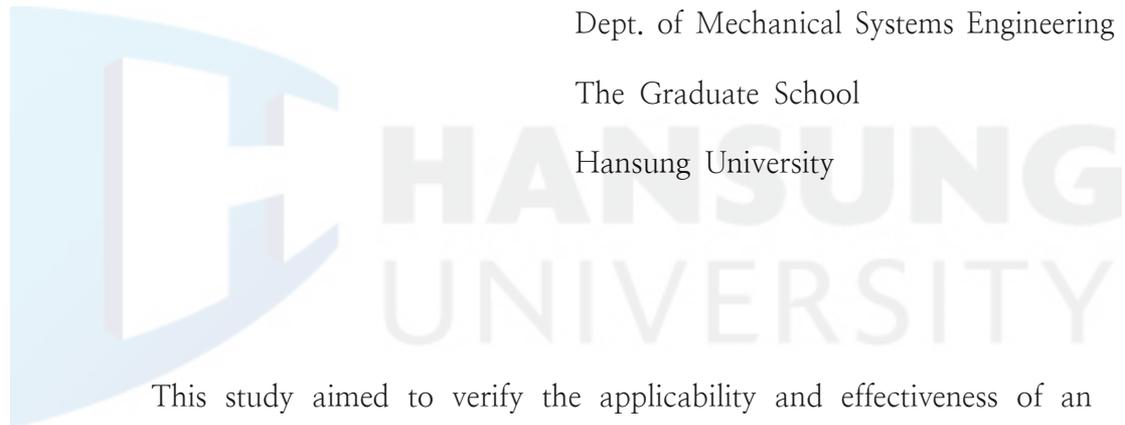
Kim, Tai-Hyoung

Major in Industrial Hygiene Engineering

Dept. of Mechanical Systems Engineering

The Graduate School

Hansung University



This study aimed to verify the applicability and effectiveness of an IoT-based real-time monitoring system that combines gas sensors and wireless communication functions for the safety management of confined spaces. The system utilized the GX-3R Pro model from Riken Keiki Korea Co., Ltd., which is capable of continuously measuring multiple gases, including oxygen (O<sub>2</sub>), hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S), carbon monoxide (CO), methane (CH<sub>4</sub>), and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). A typical confined space in the electronics industry—a wastewater treatment pit (15 m × 5 m × 10 m)—was selected as the test site.

A computational fluid dynamics (CFD) simulation was conducted under a high-concentration hydrogen sulfide emission scenario (500 mg/s) to examine the presence of concentration gradients within the

space. The results showed that, even with mechanical ventilation, gas concentrations varied significantly by location. In particular, concentrations of 10.3 to 16.2 ppm were observed at points 10–12.5 meters away from the H<sub>2</sub>S emission source, indicating that harmful gas levels in confined spaces may fluctuate depending on position and time of work, thereby highlighting the necessity of real-time monitoring. Under a low-concentration condition (0.05 mg/s), the overall H<sub>2</sub>S levels remained below 0.37 ppm, but relatively higher concentrations were still observed near the emission source.

In an actual field test, the IoT-based monitoring system was worn by workers inside the wastewater pit to measure oxygen and toxic gases in real time. The results confirmed that both oxygen levels and short-term spikes of H<sub>2</sub>S (2.7–3.2 ppm) were reliably detected and that sensor data were transmitted continuously and accurately to remote monitoring stations without error. These findings demonstrate that an IoT system integrating gas sensors and wireless communication can serve as a practical and reliable tool for confined space safety management in the future.

**【Keywords】** Confined Space, Real-time monitoring, IoT Sensor, Computational Fluid Dynamics (CFD), Hydrogen Sulfide