

연구보고서

첨단센서기술을 이용한 밀폐공간 유해가스 측정장치 개발 연구

함승헌 • 강성규 • 박주홍 • 최원준 • 이완형

산업재해예방
안전보건공단
산업안전보건연구원



제 출 문

산업안전보건연구원장 귀하

본 보고서를 “첨단센서기술을 이용한 밀폐공간 유해
가스 측정장치 개발 연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2019년 10월

연구기관 : 가천대학교 산학협력단

연구기간 : 2019.04.09 ~ 2019.10.31

연구책임자 : 함승현(가천대학교 의과대학 교수)

공동연구원 : 강성규(가천대학교 의과대학 교수)

공동연구원 : 박주홍(포항공과대학교 창의융합IT공학과 교수)

공동연구원 : 최원준(가천대학교 의과대학 교수)

공동연구원 : 이완형(가천대학교 의과대학 교수)

연구보조원 : 김해연(포항공과대학교 창의융합IT공학과 연구원)

연구보조원 : 홍성주(포항공과대학교 창의융합IT공학과 연구원)

연구보조원 : 강덕윤(가천대 길병원 의사)

연구보조원 : 이상하(가천대 길병원 의사)

연구보조원 : 이준형(가천대 길병원 의사)

연구보조원 : 김의진(가천대 길병원 의사)

연구보조원 : 최순완(가천대 길병원 연구원)

연구보조원 : 이수남(가천대 길병원 연구원)

연구보조원 : 박혜숙(가천대 길병원 연구원)

연구보조원 : 김동건(가천대 길병원 연구원)

연구보조원 : 김은수(가천대학교 보건대학원 석사과정)

연구보조원 : 이은이(가천대학교 산학협력단 연구원)

요 약 문

연구기간

2019년 4월 ~ 2019년 10월

핵심 단어

밀폐공간, 유해가스, 측정장치, 침단센서기술, IoT

연구과제명

침단센서기술을 이용한 밀폐공간
유해가스 측정장치 개발 연구

1. 연구배경

- 밀폐공간에서 질식사고가 지속적으로 발생하고 있음. 이번 연구에서는 밀폐공간에서의 질식사고 예방을 위해 침단기술을 도입하여 위험인지를 쉽고 간편하게 할 수 있는 기술적 대응책 및 침단기술 도입에 따른 제도적 보완방안 마련하고, 시제품 개발 및 캐리어(이동체: 케이블, 레일, 공, 로봇, 드론 등)에 대한 현장 적용성 평가를 실시하는 것임.

2. 주요 연구내용

- 연구결과

- 밀폐공간 질식재해는 지속적으로 발생하고 있고, 이번 연구에서 2011년부터 2018년까지 분석한 결과 256명의 재해자 중 136명이 사망(53.1%) 하였음.
- 유해가스 우선순위를 선정하기 위하여 밀폐공간 질식사고 원인 물질을 분석한 결과 산소결핍, 황화수소, 일산화탄소 순이었고, 계절에 따라 여름에는 황화수소, 겨울에는 일산화탄소가 주원인임. 따라서 산소를 기본으로 황화수소, 일산화탄소 관련 사고를 예방했을 때 상당부분 예방이 가능할 것으로 판단함.
- 밀폐공간은 급성중독사고가 주로 발생하기 때문에 현장의 농도

를 측정하여 실시간으로 전달 할 수 있는 IoT(Internet of Things) 기술이 다른 실시간 측정보다 더 유용하게 사용될 수 있는 분야임.

- 첨단기술을 활용하여 밀폐공간 작업에서 사용할 수 있는 다양한 환경을 검토하였음. 실제 발생원의 특성을 파악하기 위하여 오페수처리장에서의 황화수소의 발생특성과 건설현장에서의 일산화탄소 발생특성을 확인하였음.
- 유해가스 측정장치 개발을 하였고, 센서, 통신 방법을 쉽게 교체 할 수 있는 모듈형으로 맞춤 개발하였음. 오페수처리장에서 활용할 수 있는 산소와 황화수소 측정기, 건설현장에서 활용할 수 있는 산소와 일산화탄소 측정기를 개발하였음.
- 센서는 유지, 보수가 쉬운 제품을 선정하였고, 최소 2년 이상 사용할 수 있도록 하였음. 통신은 WiFi를 이용하였고, WiFi 신호가 없는 곳에서는 LTE gateway를 사용할 수 있도록 하였음. 거리를 연장 할 수 있는 리피터를 함께 개발 하여 거리를 늘릴 수 있는 시스템으로 구성하였음. 센서와 통신에 대한 연구는 향후에도 지속될 필요가 있음.
- 캐리어를 이용하여 고정형 측정시스템이 아닌 이동형 측정이 가능하게 개발하였음.
- 무선 측정방식은 법제도가 뒷받침이 되지 않으면 현장에서 사용하기 어렵기 때문에 이에 대한 행정적 지원(법제도, 인증 등)이 필요함.

- 시 사 점

- 근로자, 관리자 등 다수에게 농도정보에 대한 인지를 쉽고 간편하게 할 수 있도록 하여 밀폐공간 관리에 있어 매우 유용함. 이를 토대로 다른 유해물질에 대한 IoT 측정장치 개발의 기초

연구가 될 수 있음.

- 다양한 밀폐공간에서 캐리어 활용에 따른 측정 기능을 확인함.
- 기술적 접근도 중요하지만 근로자, 관리자의 인식개선이 동시에 이루어져야 함. 작업환경개선에 대한 인식이 가장 중요하며, 측정장치, 보호구에 대한 인식 개선이 동시에 이루어져야 실질적인 밀폐공간 질식사고가 감소할 것으로 판단됨.

3. 연구 활용방안

- 개선방안 또는 정책방안

- 기술발전에 따라 해당 정부에서는 법적, 제도적 뒷받침을 통해 기술이 활용될 수 있도록 지원이 필요하고, 이번 연구에서와 같이 고용노동부-산업안전보건연구원-학계가 함께 지속적인 협력을 통하여 행정과 기술이 함께 발전하여 직업병과 사고예방이라는 최종 목표를 달성하는 것이 필요함.

- 활 용

- 오폐수처리장, 건설현장에서 사용할 수 있는 첨단기술을 활용한 측정장치를 개발하여, 근로자, 관리자 등이 쉽고 빠르게 확인할 수 있음.
- 이번에 개발된 기술은 밀폐공간 뿐 아니라 다양한 특성을 가진 사업장에서 작업환경관리의 보완 방법으로 활용이 가능함.

4. 연락처

- 연구책임자 : 가천대학교 의과대학 직업환경의학과 교수 함승헌
- 연구상대역 : 산업안전보건연구원 직업환경연구실 박현희
 - ☎ 052) 7030-883
 - E-mail bioaerosol@kosha.or.kr

<차 례>

I. 서 론	1
1. 연구배경	1
2. 연구목적	4
 II. 연구 방법	 5
1. 연구방법	5
2. 밀폐공간 질식재해 선행 연구 및 통계분석을 통한 측정장치 개발 우선순위 선정	6
3. 밀폐공간 특성을 반영한 유해가스 측정장치(시제품) 개발	6
4. 직독식 측정장비 자료분석 및 밀폐공간 유해가스 모니터링	11
5. 외국 센서기술 안전보건규정/안전성/인증조직 사례 검토	12
 III. 연구결과	 13
1. 밀폐공간 질식재해 선행 연구 및 통계분석을 통한 측정장치 개발 우선순위 선정	13
2. 밀폐공간 특성을 반영한 유해가스 측정장치(시제품) 개발	32
3. 직독식 측정장비 자료분석 및 밀폐공간 유해가스 모니터링	91
4. 외국 센서기술 안전보건규정/안전성/인증조직 사례 검토	96

IV. 결 론 101

1. 밀폐공간 질식재해 선행 연구 및 통계분석을 통한 측정장치 개발
우선순위 선정101
2. 밀폐공간 특성을 반영한 유해가스 측정장치(시제품) 개발101
3. 직독식 측정장비 자료분석 및 밀폐공간 유해가스 모니터링102
4. 외국 센서기술 안전보건규정/안전성/인증조직 사례 검토103

V. 참고문헌 105

〈표 차례〉

〈표 1〉 밀폐공간에서 사용하는 측정장치에 대한 인식	16
〈표 2〉 밀폐공간에서 사용하는 보호구에 대한 인식	19
〈표 3〉 국내외 밀폐공간에서 관리하는 유해가스 농도	26
〈표 4〉 국외 밀폐공간에서 관리하는 유해가스 농도	28
〈표 5〉 2011-2018 연도별 질식재해 현황	29
〈표 6〉 밀폐공간에서 사용하는 연료별 특성	34
〈표 7〉 산소센서의 검토 결과	41
〈표 8〉 일산화탄소 센서의 검토 결과	42
〈표 9〉 황화수소 센서의 검토 결과	44
〈표 10〉 각 통신 방식의 특징	52
〈표 11〉 현장 평가 대상 건설현장 정보	72
〈표 12〉 현장 평가 대상 하수처리장 정보	78
〈표 13〉 로봇, 드론 캐리어 활용 및 가능성 여부	82
〈표 14〉 다양한 캐리어 활용 및 가능성 여부	83
〈표 15〉 미국, 영국, 우리나라의 밀폐공간에 대한 안전보건규정 비교	97

<그림 차례>

[그림 1] IoT 시스템의 개념도	2
[그림 2] 연구내용 및 범위	5
[그림 3] 연구에서 사용할 유해가스 센서 검증 개념도	9
[그림 4] 미국 Monnit사에서 출시한 다양한 IoT 측정장비	20
[그림 5] 미국 Honeywell사에서 출시한 일산화탄소 측정기	21
[그림 6] 저가형 일산화탄소 측정기	22
[그림 7] 국내에서 시판중인 양생작업용 가스측정 시스템.	24
[그림 8] 측정장치 개발을 위한 유해가스 우선순위 선정 개념.	28
[그림 9] 2011-2018 연도별 질식재해 발생자수 (사망, 부상)	30
[그림 10] 재해원인 별 밀폐공간 질식재해 발생자수	31
[그림 11] 실제 실험을 실시한 장소의 외부와 내부	35
[그림 12] 메탄올겔을 이용한 연소 실험 결과	36
[그림 13] 썬탄을 이용한 연소실험 결과	37
[그림 14] 갈탄을 이용한 연소실험 결과 (재실험 필요)	38
[그림 15] 실험이 진행된 오폐수처리장 환경	40
[그림 16] 오폐수처리장에서 실험한 황화수소와 산소 측정 결과.	40
[그림 17] 일산화탄소 센서의 안정화 단계	43
[그림 18] 황화수소 센서의 안정화 단계	44
[그림 19] 실험에 사용된 Chamber	45
[그림 20] 기준기기의 산소센서 측정농도와 개발된 측정장치 산소센서 의 산소농도의 상관성	46
[그림 21] 기준기기의 일산화탄소센서 측정농도와 개발된 측정장치 일 산화탄소센서의 산소농도의 상관성	47

[그림 22] 기준기기의 황화수소센서 측정농도와 개발된 측정장치 황화수소센서의 산소농도의 상관성	48
[그림 23] 개발된 측정장치의 Schematic diagram	53
[그림 24] 개발된 밀폐공간 유해가스 측정장치	54
[그림 25] 2차 개발에서 완성된 PCB 기판	55
[그림 26] 3차 개발에서 완성된 PCB 기판	56
[그림 27] 유지보수가 편리하도록 제작된 측정장치	57
[그림 28] 측정장치의 무선 충전 모듈	58
[그림 29] 실제 작동되는 무선 충전 모듈	58
[그림 30] 개발된 측정장치의 외관 모델링(좌), 실물(우)	59
[그림 31] 최종적으로 사용되는 디스플레이와 측정기 세트	60
[그림 32] 거리를 연장해줄 수 있는 중계기	61
[그림 33] 실시간으로 지역과 농도를 알 수 있는 앱 화면	62
[그림 34] 실시간으로 물질의 농도와 알람 구간을 확인하는 앱 화면	63
[그림 35] 실시간으로 물질의 농도를 그래프로 확인하는 앱 화면	64
[그림 36] 개발된 웨어러블 표시 장치	65
[그림 37] 이번 연구에서 사용된 웹 모니터링 사이트	66
[그림 38] 본 연구에서 개발하고자 하는 밀폐공간 유해물질 측정 장비 개발 개념도	67
[그림 39] 개인 휴대용 밀폐공간 질식재해 예방 시스템 개념도	69
[그림 40] 중앙 통제 측정 밀폐공간 질식재해 예방 시스템 개념도	69
[그림 41] 밀폐공간 출입제어 시스템 개념도	70
[그림 42] 기존 상용화된 기기와 개발중인 기기의 그래프 분포 비교	71
[그림 43] 건설현장 A에서의 현장 평가 전경	73
[그림 44] 건설현장 A에서의 신호 도달범위	74

[그림 45] 건설현장 B에서의 현장 평가 전경	76
[그림 46] 건설현장 B에서의 신호 도달범위	77
[그림 47] 하수처리장 A	78
[그림 48] 하수처리장 B	79
[그림 49] 하수처리장 C	80
[그림 50] 개발된 측정장치를 레일 캐리어에 장착.	84
[그림 51] 개발된 측정장치를 케이블 캐리어에 장착.	85
[그림 52] 하수처리장 현장평가	86
[그림 53] 개발된 공 형태의 캐리어와 제어 앱	87
[그림 54] 하수처리장에서의 현장 평가	88
[그림 55] 건설현장에서의 현장 평가	89
[그림 56] 공형태의 활용방법인 레일 식 측정 캐리어 (안)	90
[그림 57] 시간별로 데이터를 가공하도록 개발된 Software	91
[그림 58] Isolation Forest를 활용한 이상치 분석	92
[그림 59] Dbscan을 이용한 이상치 분석	93
[그림 60] 고용노동부의 질의 회시	95
[그림 61] 우리나라 한국인터넷진흥원의 IoT 보안인증제도 체계.	100

I. 서 론

1. 연구배경

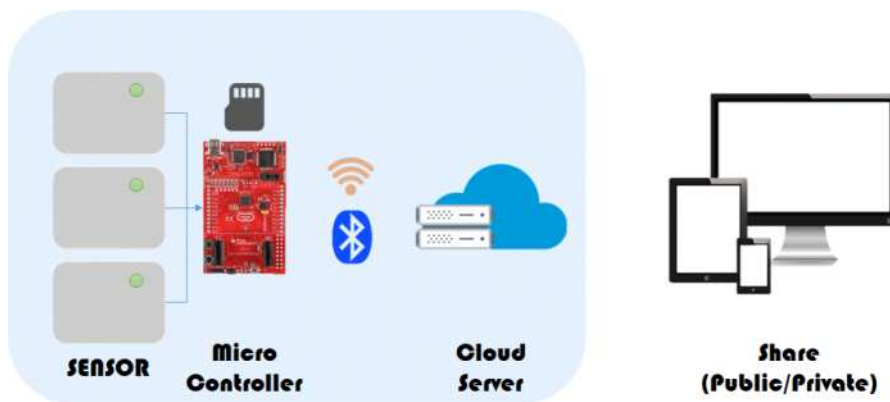
밀폐공간이란 근로자가 작업을 수행할 수 있는 공간으로 환기가 불충분한 상태에서 산소결핍, 유해가스로 인한 건강장애와 인화성 물질에 의한 화재·폭발 등의 위험이 있는 장소를 말하며 질식으로 인한 위험성도 함께 포함을 한다. 일반적으로 우물, 수직갱, 터널, 잠함, 핏트, 암거, 맨홀, 탱크, 반응탑, 정화조, 침전조, 집수조 등을 밀폐공간이라고 하고 있다.

밀폐공간 질식재해예방 노력에도 불구하고 매년 지속적으로 산소결핍 및 유해가스에 의한 재해자가 발생하고 있다. 최근 8년간('11-'18년) 밀폐공간 질식재해자가 256명이었고 그 중 사망자가 136명이 발생하였고, 사망률이 53.1%로 일반 사고성 재해 사망률 1.3%에 비해 매우 높은 재해이다. 밀폐공간 질식사고건 수를 보면 전체 228건 중 사망사고가 125건으로 54.8%이다.

2018년 1월에는 정부부처 합동으로 산업재해를 줄이기 위해“산업재해 사망사고 감소대책-고위험 분야 집중관리 및 안전우선 문화 확산-”안을 마련하였다. 그중 한 분야가 밀폐공간 질식재해 인데, 산업안전보건연구원에서는 2018년 밀폐공간 사고예방을 위한 첨단기술 활용방안연구를 수행하였고, 2008년, 2017년 2차례 밀폐공간 질식재해에 대한 연구를 수행 하였다.

최근 4차 산업혁명과 더불어 공학의 발전으로 우리가 과거보다 쉽게 기술을 사용할 수 있게 되었다. IoT, 클라우드, 빅데이터 뿐 아니라 공학적으로도 센서, 통신이 발전하게 되어 다양한 방법을 시도해볼 수 있는 환경이 만들어 졌다. 2018년에는 첨단기술을 이용한 밀폐공간 질

식재해 예방에 대한 다양한 기술도입 검토를 위한 기초연구를 실시하였다. 해당 연구를 통하여 현재 우리나라 및 국외에서 이용되고 있는 센서, 통신, 측정장치 등에 대한 다양한 연구를 하였고, 밀폐공간에 대한 무인, 무선 측정에 대한 가능성을 평가하는 연구로 사물인터넷 IoT (Internet of Things)의 도입을 추진하게 되는 계기가 되었다. 이러한 노력에도 불구하고 밀폐공간 질식재해 예방은 지속적으로 필요하기 때문에 기술적, 제도적 보완을 융합하여 예방 방법을 마련해야 한다.



[그림 1] IoT 시스템의 개념도

밀폐공간에서의 사고 특성상 급성중독을 일으키는 유해가스가 주요 원인이 되고 있다. 이때 사용할 수 있는 특히 건설현장에서의 일산화탄소 중독, 하수처리장에서의 황화수소 중독이 전체 사고의 50%이상을 차지하고 있기 때문에 이에 대한 해결책 마련이 급선무이고, 기본적으로 산소의 측정은 동시에 실시되어야 할 필요가 있다. 따라서 이와 같이 밀폐공간의 특성을 반영한 첨단기술 활용 유해가스 측정장치의 개발이 필요하다. 추가로 급성중독을 예방하기 위해서는 사람이 들어가지 않고도 측정이 가능할 수 있도록 기본적으로 무선시스템을 활용하여 측정을 해야 하고, 로봇이나 드론 등 다양한 캐리어를 활용하여 고정형에서 이동형 까지 다양한 형태의 측정장치를 만들 수 있다.

기술은 빠르게 발전하고 있으나, 이를 적절한 곳에서 사용할 수 있도록 응용하는 하드웨어, 소프트웨어 및 제도적 장치들의 지원이 부족한 실정이다.

첨단 기술을 이용한 직독식 측정기를 이용하면 1분간 측정을 하여도 수많은 농도자료가 생성된다. 기존의 산업위생 측면에서의 6시간이상 측정을 하는 가중평균법 (TWA)과는 다르게 수많은 자료를 얻게 된 것이다. 이때 자료를 모니터링하고 분석할 수 있는 방법은 현재 잘 구축되어 있지 않아 직독식 기기에서 측정된 데이터의 자료 분석과 모니터링에 대한 연구도 필요하다.

우리나라 및 국외에서 직독식 장비를 어떻게 사용하고 있고, 이에 따라 안전보건규정이 어떻게 이루어져 있는지 검토가 필요하다. 만약 측정장비의 결과로 법을 준수하고 집행한다면, 책임 소재를 가릴 수 있어야 하는데 이러한 문제를 해결하기 위한 선진국의 사례가 있다면 고찰 해볼 필요가 있는 부분이다. 또한 최근 사례를 보면, 배터리가 포함된 기기 (S사의 휴대폰, 전자담배 등)에서 발화가 일어나 사용자가 화상을 입거나 사망하는 사례도 나오고 있기 때문에 안전성 검토 및 인증에 대한 사례와 조직에 대한 검토도 함께 필요하다.

2. 연구목적

연구의 목적은 크게 두 가지로 나눌 수 있다.

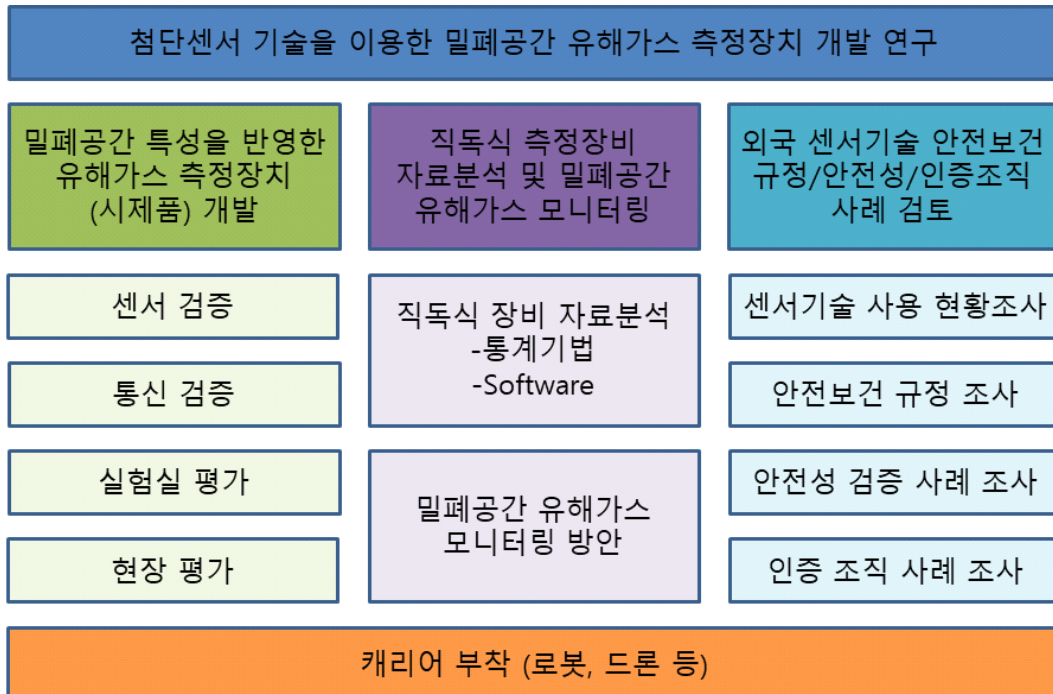
첫째, 밀폐공간 질식재해를 예방하기 위해 첨단기술을 도입하여 유해가스농도에 대한 위험인지를 쉽고 간편하게 확인할 수 있는 기술적 대응책 및 첨단기술 도입에 따른 제도적 보완방안을 마련하는 것이다.

둘째, 2018년 연구수행 결과에 따라 제안된 로봇, 드론 등 캐리어에 밀폐공간 유해가스 측정센서 및 통신장비를 부착한 시제품을 개발하고 현장적용성 평가를 실시하는 것이다.

II. 연구 방법

1. 연구방법 (총괄)

첨단센서 기술을 이용한 밀폐공간 유해가스 측정장치 개발 연구의 연구방법은 그림 2와 같다.



[그림 2] 연구내용 및 범위

2. 밀폐공간 질식재해 선행 연구 및 통계분석을 통한 측정장치 개발 우선순위 선정

1) 밀폐공간 질식사고 통계 분석을 통한 가스 측정 장치 우선순위 도출

(1) 밀폐공간 질식재해 사고 분석

2011년부터 2018년까지 총 8년간의 밀폐공간 사고를 분석하여 현재 우리나라 밀폐공간 질식재해 예방에 필요한 유해물질 선정의 기초자료로 활용하였다. 주로 밀폐공간 질식재해의 원인 분석을 통하여 원인물질, 원인장소를 면밀히 분석하여 우선순위를 결정하였다.

(2) 밀폐공간 질식사고 특성에 맞는 측정장치 개발현황 파악

가) 국내외 사례 검토

국내외에서 개발한 밀폐공간 질식사고 측정장치 개발현황과 사례 그리고 실제 현장 적용 사례를 검토하였다.

3. 밀폐공간 특성을 반영한 유해가스 측정장치(시제품) 개발

1) 현장 특성 정밀 조사

현장 특성을 반영하여 실효성 있는 밀폐공간 유해가스 측정장치 개발을 위해서는 현장을 정밀 조사하는 것이 필요하다. 산업보건학적으로

가장 먼저 이루어 져야 하는 것은 발생원에 대한 확인이다. 건설현장, 하수처리장 등에서 발생하는 유해가스에 대한 발생특성을 파악하고, 이에 대한 실험을 통하여 확인 한다.

(1) 건설현장

- 발생원 조사, 확인 (현재 산소결핍 및 일산화탄소)
- 발생원 실험 (다양한 고체 연료 실험)
- 사고 상황 환경 인자 조사 (실험실 평가 시 필요사항)

(2) 하수처리장

- 발생원 조사, 확인 (현재 산소결핍 및 황화수소)
- 발생원 실험 또는 현장 조사/실험
- 사고 상황 환경 인자 조사

2) 센서 선정 및 검증

(1) 센서 선정

- 센서 조사

원리(전기화학, 광학, 반도체 등), 분해능, 반응속도, 수명, 폐기, 교정 등

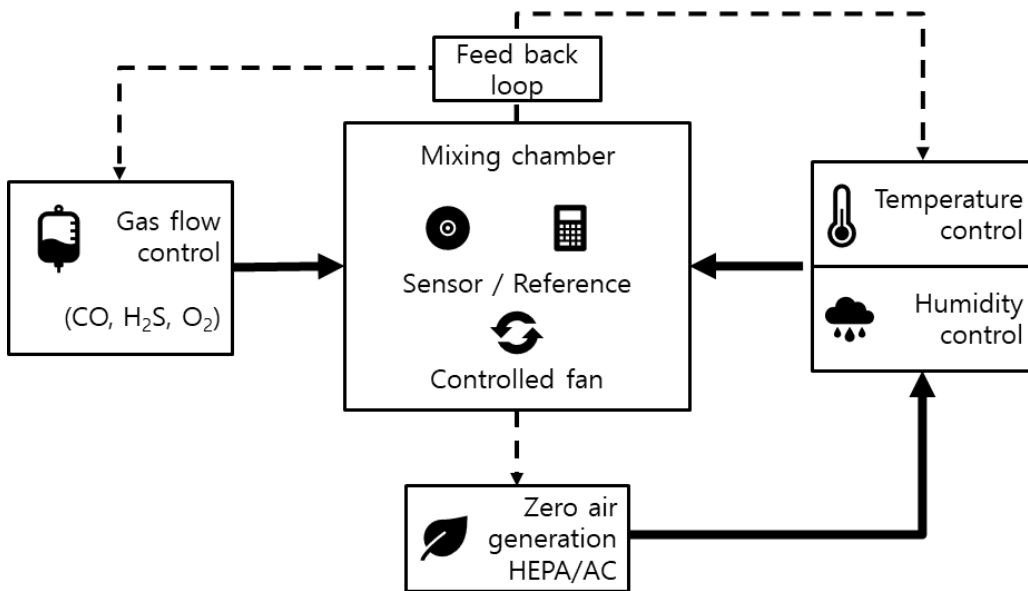
- 주요 3종 가스센서(산소, 일산화탄소, 황화수소)
- 비교, 동일성검증 보정 단계를 거치면서 센서의 고도화가 진행 됨.

- 비교의 경우 같은 공장에서 만들어 졌더라도 센서간 차이가 있을 수 있기 때문에, 전기 신호 등으로 센서간 차이를 확인하고, 이때 일정성 등을 함께 확인함.
- 동일성의 경우 Gold standard와 비교하여 값을 맞추는 과정이며, 이때 Lab chamber에서 Test를 진행하게 됨.
- 보정과정을 통하여 참값을 비교하게 되고 이에 따라 센서를 보정하여 최종적으로 센서 검증을 완료하게 됨.

(2) Lab Chamber 실험을 통한 센서 검증

Mixing Chamber내에 센서를 투입하여 기준이 되는 Reference 측정기(검교정 완료기기)와 비교를 통하여 2차 교정, Chamber 내에는 공기의 균일화 및 풍속 조절을 위하여 순환팬이 설치되어 작동하도록 하였다.

국가 교정기관 Korea Laboratory Accreditation Scheme (KOLAS) 인증기관에서 교정(901화학분석-90103-가스분석기)하는 방식과 같이 2점 보정을 통하여 기기 교정을 실시하였다. HEPA필터 및 활성탄 필터를 지난 깨끗한 공기의 온습도 조절을 하여 원하는 실험 환경 조성을 하였다.



[그림 3] 연구에서 사용할 유해가스 센서 검증 개념도

3) 통신방법 선정

- (1) 다양한 통신방법 검토 및 현장 적용성 평가 (거리 및 투과 등)
- (2) 현장 환경에 적합한 통신 형태 (중앙집중형, 개인형 등) 결정

4) 통합기기 제작

- 선정된 센서와 통신 방법을 적용한 측정장치를 제작함.
- 측정장치는 소규모 사업장에서도 사용될 수 있도록 고려하여 제작함.

5) 현장평가

(1) 건설현장

- 건설현장에서는 동절기에 주로 고체연료(갈탄 등)을 연소시키기 때문에 현실적으로 연구기간에 현장평가를 하는 것은 어려움.
- 따라서 현장과 비슷한 상황을 재현하여 센서는 농도별 확인을 실시하고, 통신 방법은 콘크리트 양생이 진행되고 있는 건설현장에서 실시.

(2) 하수처리장

- 7-8월에 황화수소로 인하여 주로 발생하기 때문에 하수처리장에서는 센서 및 통신에 대한 연구가 진행되었음.
- 3개소 이상의 하수처리장에서 측정하였음.

(3) 로봇, 드론 등 캐리어 활용 방안

- 개발된 직독식 측정장치를 로봇이나 드론, 그밖에 고려중인 캐리어에 장착하여 현장 테스트 실시
- 건설현장 및 하수처리장 활용
- 시제품 현장 테스트 이후 결과를 정리하여 향후 연구 제안
- 로봇 및 드론을 활용할 때 고려해야 하는 지점 조사
- 측정 주체 및 교육훈련 등 방안 마련
- 허가 및 보험 사항 조사

4. 직독식 측정장비 자료분석 및 밀폐공간 유해가스 모니터링

1) 직독식으로 측정된 유해가스 농도의 자료분석 방안

(1) 통계기법 조사

- 측정 간격에 대한 조사
- 밀폐공간 내에서 측정하는 적정 간격에 대하여 다양한 각도에서 분석
- 통계기법 조사
- 밀폐공간 유해가스 측정장치에서 생성되는 자료를 이용한 통계기법은 기술통계와 비교 또는 이상치 검증이 주된 내용이다. 밀폐공간의 경우 급성중독이 문제가 되기 때문에 최대 농도가 가장 중요한 지표가 될 것이다. 따라서 다양한 통계기법을 통하여 밀폐공간 내 유해가스를 적절히 표현할 수 있는 방법을 찾을 계획임.

(2) Software 조사

- Software는 최대한 개발 보다는 안정적으로 상용화된 프로그램 사용을 권장하나, 이번 연구에서는 현장에서 사용할 수 있는 앱을 중점적으로 개발 하고, 웹의 경우에는 추후 연구에서 상세히 개발 가능성 도출.

2) 직독식 측정장비를 활용한 밀폐공간 유해가스 모니터링 방안

(1) 직독식 측정장비 모니터링 방안 조사

- 측정자격에 대한 규제 조사

(2) 상시 모니터링 방안 검토

- 상시 모니터링을 할 때 데이터를 인정 여부에 대한 검토

5. 외국 센서기술 안전보건규정/안전성/인증조직 사례 검토

1) 외국의 센서기술 관련 안전보건규정 검토

(1) 외국 안전보건 규정 조사

- 미국 OSHA
- 영국 HSE

(2) 국내 산업안전보건규칙 검토

2) 외국 산업안전보건규정 내 측정 책임 소재 현황 검토

(1) 드론, 로봇, 무선 측정 데이터 인정 등 조사

(2) 안전성 검토 규정 조사

(3) 인증 조직 사례 조사

III. 연구결과

1. 밀폐공간 질식재해 선행 연구 및 통계분석을 통한 측정장치 개발 우선순위 선정

1) 밀폐공간의 정의

환기가 불충분한 상태에서 산소결핍¹⁾이나 유해가스²⁾로 인하여 질식 등의 건강장해를 입거나 인화성물질에 의하여 화재나 폭발 등의 위험이 존재하는 장소이다(고용노동부, 2019).

우리나라는 18개의 장소(근로자가 상주하지 않는 공간으로 출입이 제한되어 있는 장소의 내부도 포함)를 정하였고, 몇 가지(산소, 일산화탄소, 황화수소, 탄산가스, LEL)가스에 국한되어 규정되어 있다.

영국 HSE³⁾에서 밀폐공간의 정의는 우리나라에 비해 넓은 의미를 가지고 있고, 예측이 가능한 특정한 위험(reasonably foreseeable specified risk)이 있는 챔버, 탱크 등과 비슷한 장소 등으로 규정하고 있다. 영국 HSE에 따르면 밀폐공간은 두 가지 조건을 만족해야 한다. 첫째, 닫혀있는 공간(항상 닫혀있지 않더라도)이어야 한다. 둘째, 동시에

1) 산소결핍이란 농도가 18% 미만인 상태를 말함.

2) 유해가스란 황화수소, 일산화탄소, 탄산가스등 기체로, 사람에게 유해한 영향을 줄 수 있는 물질을 말함.

3) <http://www.hse.gov.uk/pubns/priced/l101.pdf>

한 개 이상의 특정한 위험(가스)이 존재하는 공간으로 규정 되어 있다.

몇 가지 예를 통하여 밀폐공간이 반드시 갖추지 않아도 되는 공간을 설명하고 있다. 1) 반드시 모든 면이 막혀있지 않아도 밀폐공간이 될 수 있다. 2) 작은 공간이거나 일하기 어려운 공간이 아니더라도 밀폐공간이 될 수 있다. 3) 출입이 어렵지 않아도 밀폐공간일 수 있다. 4) 사람이 상시 일하지 않아도 밀폐공간일 수 있다. 이와 같이 사람들이 일반적으로 밀폐공간이 아닌 것으로 오해할 수 있는 공간 까지 설명을 하고 있으며, 우리나라와 다른 점은 산소는 규정이 되어 있지만 측정을 해야 하는 기타 유해가스를 특정하지 않고 있다는 점이다. 이와 같이 영국에서 규정하는 것은 과거 오랜 기간 동안 밀폐공간에 대한 관리를 하면서 시행착오를 겪은 것으로 해석 할 수 있다.

미국 OSHA⁴⁾에서는 밀폐공간을 근로자가 작업을 할 수 있는 좁은 공간으로 규정하고, 출입구가 제한되어 있거나, 근로자가 상주하지 않고 있는 공간으로 규정하고 있다. 미국도 영국과 같이 산소를 제외한 다른 유해가스들은 OSHA PEL에 의해 관리하도록 하고 NIOSH IDLH(Immediately Dangerous to Life or Health, 즉시건강위험: 생명 또는 건강에 즉각적으로 위험을 초래하는 농도이며, 그 이상의 농도에서 30분간 노출되면 사망 또는 회복 불가능한 건강장해를 일으킬 수 있는 농도)로 관리하도록 하고 있다.

모든 규정과 지침에서의 공통점은 작업을 하기 전에 안전하게 측정을 하여 안전한 환경에서 측정을 할 수 있도록 하는 것이 마련되어 있다.

따라서 우리나라에서도 지금과 같은 밀폐공간의 정의를 유지할 것인지에 대한 논의가 필요하고, 밀폐공간을 목록으로 지정하는 것 보다는 산업위생 전문가에게 컨설팅을 받고 정부에서 인증을 해주는 방식으로 밀폐공간을 지정하여 관리하는 방식과 같은 기존과는 다른 제도적 접근이 필요한 시점이라고 생각한다.

4) <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.146>

2) 밀폐공간 특성에 맞는 유해가스 측정장치 개발의 필요성

(1) 문헌 고찰

과거에는 유해물질을 측정하는 기기에 장착되고 사용되는 센서의 가격이 높아서 측정기를 구매하여 사용하는 입장에서 경제적 부담이 높았다. 그러나 기술의 발전으로 최근에는 상대적으로 가격이 낮으면서도 성능이 비슷한 저가형 센서가 개발이 되어 사용자 및 개발에 있어 진입장벽이 낮아졌다.

그동안 조사된 연구에 따르면 측정장치 및 보호구 착용에 대한 현장의 의견이 밀폐공간 질식사고에 어떠한 영향을 주고 있는지에 대해서 알 수 있다 (산업안전보건연구원, 2017)

기존 연구에 따르면 사람들의 측정에 대한 생각을 알 수 있는데, 주로 측정장치는 신뢰할 수 없고, 고가이기 때문에 충분한 설비를 갖추기 어렵고, 불편하고, 공단에서 대여하기가 까다롭다는 인식으로 사용이 잘 되지 않고 있다.

또한 가스를 측정하는 간격에 대한 어려운 점도 함께 언급 하고 있다. 이러한 이유로 실제 사용하는 방법을 살펴보면 급히 들어가서 교체를 한다든지 현실적으로 어렵다는 이유로 사용을 하지 않거나 측정장치에 접근을 하지 못함을 알 수 있다(산업안전보건연구원, 2017).

따라서 신뢰할 수 있고, 가격이 저렴하고, 공단에서 대여하지 않고 사업장에서에서 보유 할 수 있으며 관리자가 쉽게 결과를 알 수 있게 실시간으로 현장상황을 측정할 수 있는 측정기의 개발이 필요함을 알 수 있다.

<표 1> 밀폐공간에서 사용하는 측정장치에 대한 인식

밀폐공간	측정장치에 대한 인식
피트 내부	유해가스 측정기는 기계이기 때문에 100% 신뢰할 수 없어 근로자 간에 수시로 대화를 주고받으면서 안전한 작업에 유의하고 있음.
지하탱크 내부	▪ 가스농도를 측정하는 측정기, 배기를 하는 배풍기, 송기를 하는 송풍기는 무겁고, 고가여서 충분한 설비를 갖추는데 경제적으로 어려움. ▪ 측정기를 들고 작업을 하러 들어갈 때 일산화탄소, 산소 등은 명칭이 정해져 있어 측정기를 사용할 수 있지만, 다른 가스는 상당히 다양한데 이에 대한 어떻게 대응해야 하는지 어려움.
진***	▪ 작업할 때 많이 불편해서 효율성이 떨어짐.
***학 울산공장	밀폐공간의 가스측정 항목이 5가지로 많아 측정기를 구비하는데 어려움. 국내에 없는 가스도 있음. ▪ 출입시스템은 출입기록(Log sheet)를 사용하며, 이름 및 출입시간을 기록관리. ▪ 가스 측정은 출입 전, 후와 2시간에 한 번 측정하거나, 작업 장소에서 측정을 하도록 전원 인가 후 비치해두는 방식으로 시행중. ▪ 관리자가 산소농도를 확인하고, 비상상황에 대비하기 위해 무전기와 캔으로 된 산소를 가지고 관리자의 지도하에 작업공간으로 들어감. 사업장 특성상 현실적으로 작업시작(작업장 부피의 5배 이상)환기를 실시하면 양생작업 및 공정의 의미가 없어 실행할 수 없음.
탱크제조	▪ 밀폐공간 질식재해에 대한 교육도 받았고 잘 알고 있는데 단시간 단일작업은 매우 짧은 시간(2~3 분) 작업을 위해 그 모든 작업절차를 진행하기는 실질적으로 어려움. 또한 규모가 작은 사업장은 고가의 장비를 구비하기 어려움. 안전보건공단 대여는 너무 까다로워 실질적으로 대여에 어려운 점이 있음.

밀폐공간	측정장치에 대한 인식
** 건설	건설회사에서 콘크리트 양생작업이 끝나고 나서 자연환기를 시키고 있음. 보양을 한 천막을 열거나 바람이 자연스럽게 흐르도록 방치함. 갈탄을 교체 하는 것이 아니라 불이 꺼지지 않게 새벽과 같은 중간에 보충을 해주는 것이고 이때, 일산화탄소 농도가 높음. 따라서 급하게 들어가서 교체하고 나옴.

<표 2> 밀폐공간에서 사용하는 보호구에 대한 인식

밀폐공간	보호구에 대한 인식
피트 내부	맨홀의 규격에 대한 표준화가 필요함. 맨홀에서의 작업은 공간이 매우 협소해서 일반적으로 1명밖에 못 들어가는데 (송기마스크를 착용한다고 가정하면) 공간이 좁아서 작업하기 힘든 점이 있음. 따라서 맨홀을 처음 만들 때부터 1명이상 들어가서 작업을 할 수 있도록 규격화 할 필요가 있음.
지하탱크 내부	▪ 공기호흡기는 충전이 어려움. 공식적으로 공기탱크를 충전할 수 있는 곳이 없음. 공기탱크의 관리가 힘들고 무거워서 착용하고 작업하기 어려움. ▪ 밀폐공간에서의 작업시간은 실질적으로 5분도 되지 않는데 필요한 장비들을 모두 지참하여 들어가는 것이 작업보다 더 많은 일이라 감시자 동행하여 빠르게 작업을 하고 나오는 경우가 있음.
진***	▪ 보조 장비를 착용하는 것이 무겁고 커서 착용이 실질적으로 어려움
조목스크린	보호구인 공기호흡기와 송기마스크의 관리가 어려움. 안전한 작업을 위해서 무조건 착용해야하는 것을 교육하고 있으나, 근로자들이 위험함에도 불구하고 착용을 잘 안하려고 해서 관리가 어려움. 공기중 유해물질 농도 측정 및 감시자의 운영은 하고 있으나 근로자들의 태도가 관리가 어려움.
**테크	▪ 송기팬과 환기팬을 사용한다고 해도 공간에 따라 적절하지 않은 경우가 있음. 예를 들어 좁은 공간인 경우 송기마스크의 사용은 부적절하고 편의성이 매우 떨어짐.
**자재	▪ 근로자들에게 생명줄을 채우고 들어가서 작업을 하도록 하는 것이 어려운데 그 이유는 근로자들이 제한된 공간에서 생명줄을 차고 일하는 것이 너무 힘들다고 함.
**주조	실제 현장에서는 잠시 밀폐공간에 들어갈 경우에 무전기나 적절한 보호구를 하지 않는 경우가 더 많음.

그렇다면 이미 내부가 예측된 위험인 상황임을 인지하고도 밀폐공간 내부에 들어가서 작업을 할 때 근로자를 보호해줄 수 있는 최후의 수단은 보호구 착용이다. 그러나 보호구 역시 가스측정기와 같이 사용되지 않고 있는데 인식을 살펴보면 아래와 같다.

보호구를 착용하고 들어가면 공기통이 걸려서 작업하기가 어려운 점, 무거운점, 공기를 사용 하고나면 충전이 어려운 점, 관리가 어려운 점, 근로자의 비협조적인 태도 등이 보호구 착용이 잘 이루어지지 않고 있는 이유로 조사결과 알 수 있었다(산업안전보건연구원, 2017).

또한 언론에서도 밀폐공간에서는 송기마스크나 공기호흡기를 착용을 해야 하는데 국립과학수사연구소, 소방청 등에서도 조사를 할 때 방진, 방독마스크를 착용하는 모습이 국민들에게 노출되면서 호흡보호구를 잘못 선택하고 있는 것을 여과 없이 보여주고 있는 실정이다.

이러한 여러 가지 이유로 밀폐공간 작업을 할 때 적절한 보호구착용이 이루어지지 않고 있고, 지속적으로 사고가 발생을 하고 있다.

(2) 국내외 첨단센서 기술을 이용한 측정장치 개발 사례 검토

- 미국 Monnit 사

미국 Monnit사는 IoT 전문 기업으로 부동산관리에 초점이 맞추어져서 제품을 개발 및 공급하고 있다. 밀폐공간에 특화되어 개발하는 것은 아니지만, 일부 기기(황화수소, 일산화탄소, 오존 등)에 대하여 제작하여 보급을 하고 있다.

그러나 실제 테스트 결과 라디오주파수(RF: Radio Frequency)방식을 사용하는 기기 특성상 거리에 제한이 크고 목적 자체가 사업장용으로 출시된 것이라 응용은 할 수 있지만 밀폐공간에서 실제 사용에는 적합하지 않다고 판단된다.

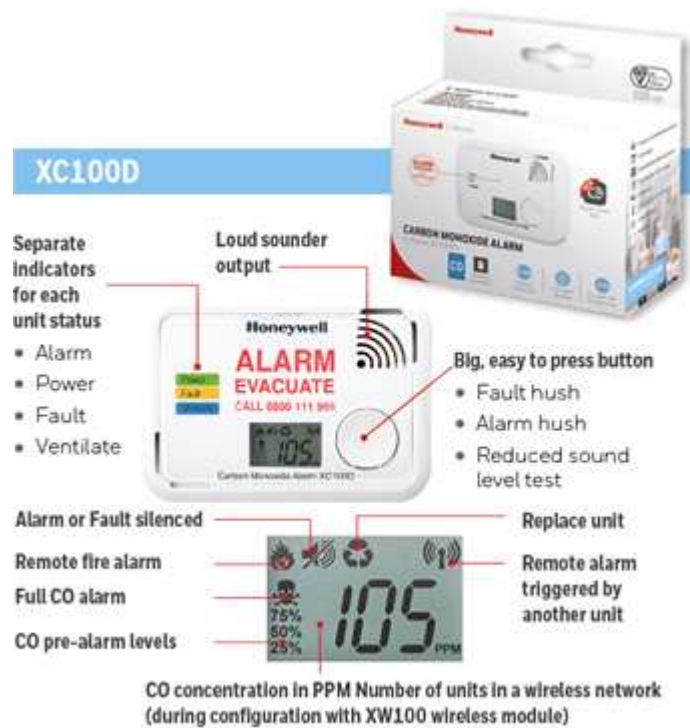
주로 밀폐공간 등 사업장은 다양한 환경을 가지고 있기 때문에 위험한 환경이 있는 경우는 사용하지 말도록 하고 있다(Other places where similar hazardous conditions exist). 국외 제품 뿐 아니라 우리나라에서도 인증문제가 해결이 되지 않으면 실제 사용이 어렵다는 한계가 있다.



[그림 4] 미국 Monnit사에서 출시한 다양한 IoT 측정장비

- 미국 Honeywell 사

미국 Honeywell 사에서는 사업장에서 사용하는 전문적인 측정장비 외에도 가정에서 일산화탄소 측정이 가능한 IoT 기기를 출시하였으나 현재는 판매가 중지되어 있다.



**[그림 5] 미국 Honeywell 사에서 출시한
일산화탄소 측정기**

(3) 국내 사례 검토

국내에서 밀폐공간 측정 관련 기기는 인증 및 판매에 있어서 제도가 정립이 되어 있지 않다. 국내에서는 인증을 받지 않아도 판매가 가능하기 때문이다.

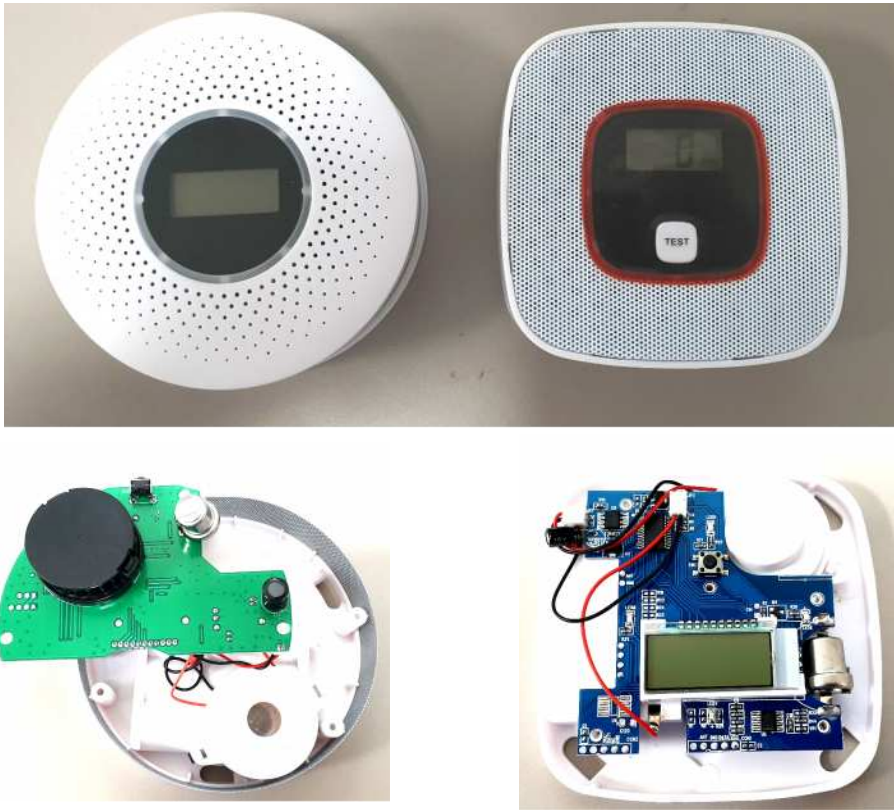
황화수소 측정기는 실제 판매되고 있는 것 중 저가형은 없었다. 모두 고가의 장비로 영세업체에서 구매하기에는 높은 가격대가 형성되어 있었다. 황화수소의 경우 50 ppm 까지 측정이 가능하면 충분히 건강상 영향이 있는 수준은 확인이 가능할 것으로 판단된다.

일산화탄소 측정기는 시중에도 낮은 가격에 판매가 되고 있고 성능은 보증되기 어려운 상황이다. 사업장에서 사용이 가능한 수준의 측정기는 가격이 높다.

쉽게 구매할 수 있는 측정기는 약 1만원 내외로 구매가 가능하고 측정범위는 0-999 ppm, 분해능은 5 ppm으로 제작되어 있고, 오차율은 $\pm 10\%$ 로 되어 있다. 작동 온도는 0-50 $^{\circ}\text{C}$, 작동 습도는 10-95% 이다. 제품은 가로, 세로 각각 약 10 cm 이고, 알람이 울리도록 설정되어 있었다. 인증이 되어 있는 것은 아니지만 유럽연합의 표준(EN50291)에 따라 알람설정이 되도록 제작되어 있었다.

알람은 50 ppm 수준이 60분에서 90분간 지속되거나, 100 ppm이 10분에서 40분간 지속되거나, 300 ppm이 3분간 지속되거나, 400 ppm에서는 즉시 울리도록 설계되어 있었다.

저가형이 아닌 산업용 일산화탄소 측정기는 고가에 판매가 되고 있고, 국내인증은 없는 상황이다.



[그림 6] 저가형 일산화탄소 측정기

IoT를 이용하여 측정기를 개발한 사례가 있다. 국내 업체에서 개발을 하였고 실제로 일부 현장에서 사용을 하고 있다. 산소와 일산화탄소에 대하여 가스는 지역측정을 하고 BLE(블루투스 계열의 근거리 통신)을 통하여 게이트웨이에 전송하여 LoRa를 이용하여 데이터를 전송하는 시스템이다. 개인장치는 가스를 측정하지는 못하고 넘어짐 등을 감지하는 시스템이고 작업장 내 근로자에게 주의를 주는 경고를 할 수 있도록 하고 있다. 그러나 영세업체에서 사용하기에는 매우 고가의 장비로 현재에도 대형건설사 일부에서 도입을 하여 사용을 하고 있다.

작업 환경 이상 주의

밀폐작업장 또는 양생작업장 등에서 지속적으로 CO, O₂ 를 측정하여 외부로 데이터를 전송하며, 기준치를 초과한 이상 발생시 주의를 전파하여 사고 예방



[그림 7] 국내에서 시판중인 양생작업용 가스측정 시스템.

3) 밀폐공간에서의 재해특성 파악

모든 물질을 측정할 수 있는 측정기를 구비하기에는 매우 어렵다. 우리나라의 사고 형태를 조사하여 우선순위를 도출해야 한다. 우선순위를 도출하기 위해서는 우리나라의 밀폐공간에서 발생하는 재해의 특성을 파악하는 것이 필요하다.

밀폐공간에서의 작업환경은 여러 가지 측면에서 일반 작업환경과는 다르다. 작업이 정형화 되어있지 않고, 비좁고 작업자세가 불편한 작업이 많다. 무엇보다도 환기가 잘 되지 않아 공기의 순환이 원활히 이루어지지 않기 때문에 산소가 부족해지거나, 유해가스가 발생하여 근로자가 작업하고 있는 공간의 공기가 적절하지 않은 상황이 발생하게 된다.

그리고 우리가 짚고 넘어가야 하는 부분은 밀폐공간에서의 질식사고의 특징은 근로자의 사고 뿐 아니라 구하러 들어간 근로자에 대한 통계도 포함이 되어 있다.

우리나라에서는 근로자가 작업을 하기에 적합한 밀폐공간 내 적정공기란 산소농도(18-23.5%), 황화수소(10 ppm미만), 일산화탄소(30 ppm미만), 탄산가스(1.5%미만)⁵⁾을 이야기하고, 작업 하는 도중 유해가스 또는 불활성가스의 유입/누출/발생 가능성이 있는 경우 공기 중 측정을 수시로 해야 한다. 그리고 밀폐공간 내 농도측정은 점심시간, 휴식시간 등 일정시간 밀폐공간을 벗어나 있다가 재 출입을 하는 경우에도 반드시 산소농도와 유해가스농도 측정 등 작업환경의 공기상태를 재확인하고 출입해야 하는데 이마저도 잘 지켜지지 않아 상당수 예방 가능한 밀폐공간 질식재해가 발생하고 있다.

미국 OSHA에서는 산소농도를 제외한 나머지 유해가스에 대해서는 따로 규정하고 있지 않고 PEL(Permissible Exposure Limit)을 따르도록 하고 있고, California 주에서는 중앙정부와는 다르게 관리를 하고

5) 산업안전보건기준에 관한 규칙 제 618조

있는데 더 엄격한 기준을 2019년 3월 29일부터 운영하고 있다.

영국 HSE의 경우에도 산소농도를 19%이상으로 유지하는 것 외에는 나머지 유해물질에 대해서는 따로 관리하고 있지 않고 WEL (Workplace Exposure Limit)을 따르도록 하고 있다.

우리나라와의 유사점은 산소농도에 대한 규정을 가지고 있다는 점이고, 다른점은 우리나라 규정에서는 황화수소, 일산화탄소, 탄산가스를 정하여서 관리를 한다는 점이고, 미국, 영국에서는 따로 정하지 않고 현 장상황에 맞게 측정을 하도록 하고 있다는 점이다.

이와 같은 이유로 밀폐공간을 관리하기 위해서 어떠한 측정장치를 개발해야 하는지에 대한 논의가 필요하다. 모든 물질을 측정하는 휴대용 기기를 개발하는 것은 불가능하기 때문에 우선순위를 정하여 개발이 필요하다.

<표 3> 국내외 밀폐공간에서 관리하는 유해가스 농도

물 질 명	산업안전 보건법	OSHA PEL ⁶⁾	Cal/OSHA PEL	U.K. HSE WEL ⁷⁾
산소	18%-23.5%	19.5-23.5%	19.5-23.5%	19% 이상*
황화 수소	10 ppm, 15 ppm STEL	20 ppm Ceiling, 50 ppm 10 min.	10 ppm, 15 ppm STEL, 50 ppm Ceiling	5 ppm, 10 ppm STEL.

6) <https://www.osha.gov/dsg/annotated-pels/tablez-2.html>

7) <http://www.hse.gov.uk/coshh/basics/exposurelimits.htm>

물 질 명	산업안전 보건법	OSHA PEL ⁶⁾	Cal/OSHA PEL	U.K. HSE WEL ⁷⁾
일산화 탄소	30 ppm, 200 ppm STEL,	50 ppm	25 ppm, 200 ppm Ceiling [^]	20 ppm, 100 ppm STEL 30 ppm, 200 ppm STEL ^{**}
탄산 가스	1.5%미만 노출기준: 5,000 ppm, 30,000 ppm STEL	5000 ppm	5,000 ppm, 30,000 ppm STEL	5,000 ppm, 15,000 ppm STEL

[^] 2019년 3월 29일부터 시행

*산소농도는 대기압에 따라 달라지므로 정상은 20.8%로 하고 달라질 수 있음을 이해하도록 함.

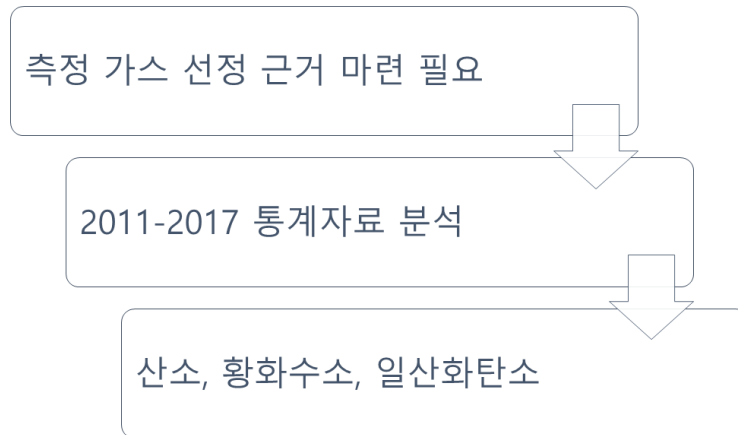
**2021년 8월 23일 까지 한시적으로 광산과 터널 산업에 대하여 제한적으로 적용

또 한가지 특이한 점은 미국에서는 IDLH로 관리하고 있다는 점이다. 우리나라에서 관리하고 있는 밀폐공간 유해가스와 비교를 해보면 아래와 같다.

<표 4> 국외 밀폐공간에서 관리하는 유해가스 농도

물질명	미국 NIOSH IDLH
황화수소	100 ppm
일산화탄소	1200 ppm
탄산가스	40,000 ppm

이번 연구에서는 유해가스 측정에 있어서 선정은 통계자료를 토대로 산소, 황화수소, 일산화탄소를 선정하였다. 선정을 위한 자세한 과정은 아래와 같다.

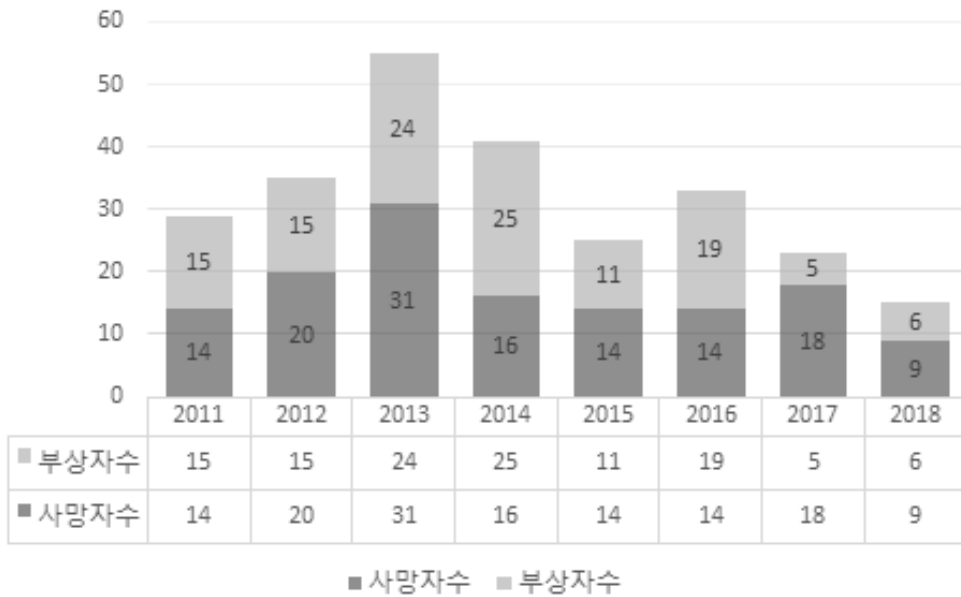


[그림 8] 측정장치 개발을 위한 유해가스 우선순위 선정 개념.

밀폐공간 질식사고의 통계를 조사해보면 사망률이 매우 높은 것을 알 수 있다. 매년 지속적으로 산소결핍 및 유해가스에 의한 재해자가 발생하고 있다. 2011년부터 2018년 까지 8년간 밀폐공간에서 발생한 질식 사고를 분석해 보면 전체 재해자인 256명 중 사망자가 136명으로 사망률이 53.1%이다. 이는 일반 사고성 재해 사망률인 1.3%보다 매우 높은 수치이다. 밀폐공간 질식사고건 수를 보면 전체 228건 중 사망사고가 125건으로 54.8%이다. 이는 질식재해가 사망사고로 이어지는 비율이 매우 높다는 것을 보여주며, 따라서 밀폐공간에서의 질식사고에 대한 관리는 매우 시급하다고 할 수 있다.

<표 5> 2011-2018 연도별 질식재해 현황

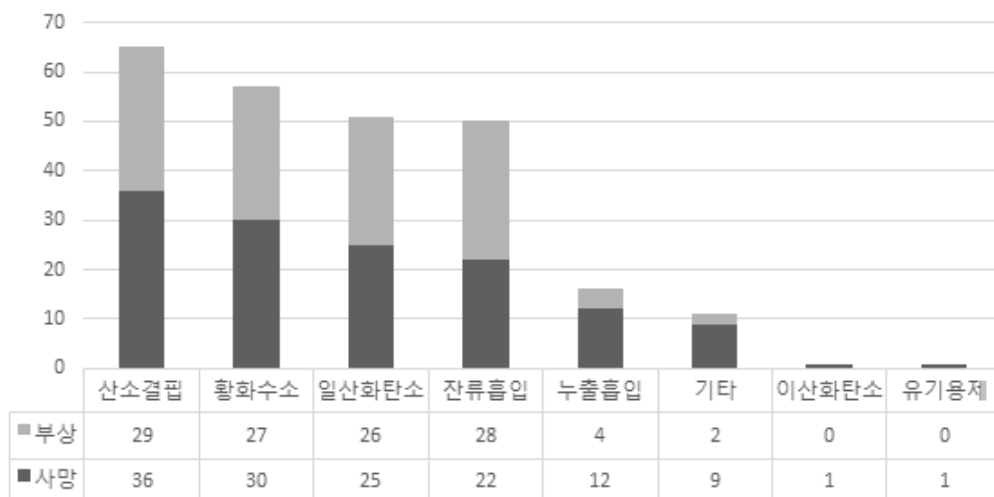
	11'	12'	13'	14'	15'	16'	17'	18'	총합계
총재해건수	29	35	55	30	25	33	14	7	228
사망건수	14	20	31	14	14	14	13	5	125
부상건수	15	15	24	16	11	19	1	2	103
총재해자수	29	35	55	41	25	33	23	15	256
사망자수	14	20	31	16	14	14	18	9	136
부상자수	15	15	24	25	11	19	5	6	120



[그림 9] 2011-2018 연도별 질식재해 발생자수 (사망, 부상)

밀폐공간 질식재해의 원인 분석에 매우 중요한 이유는 원인을 정확하게 파악하고 있어야 그에 대한 대책을 마련할 수 있기 때문이다. 재해원인 별로 보면 재해발생건수와 사망자, 부상자를 고려해보면 산소결핍, 황화수소 중독, 일산화탄소 중독 순이었다. 밀폐공간 유해가스 측정장치를 선정하기 위한 우선순위를 도출함에 있어서 위에서 언급한 가스의 종류를 후보군으로 설정하는 것이 필요하다. 후보군으로 선정을 한 이후에는 기술적으로 개발이 가능한지, 소규모사업장에 적합한지 등에 대한 검토가 필요하다.

탄산가스/헬륨/아르곤/질소/프레온/불활성기체와 같은 물질들의 경우에 그 가스가 가지고 있는 고유한 특성은 유해성이 없으나 공기 중 산소농도를 낮출 수 있는 물질이기 때문에 측정을 해야 마땅하나 현행법상으로는 탄산가스만 측정을 하고 다른 가스들은 산소가 해당 가스로 치환되었을 때 산소농도 하강으로 인한 산소 측정으로 대체를 하는 중이다.



[그림 10] 재해원인 별 밀폐공간 질식재해 발생자수

2. 밀폐공간 특성을 반영한 유해가스 측정장치(시제품) 개발

1) 현장 특성 정밀 조사

(1) 건설현장

가) 건설현장 밀폐공간의 이해

(가) 발생원 조사, 확인 (현재 산소결핍 및 일산화탄소로 추정)

건설현장의 경우 콘크리트 타설 후 양생기간이 필요하다. 하루의 평균기온이 영상 4℃로 떨어지는 늦가을, 겨울, 초봄의 경우 기온이 낮기 때문에 응결경화반응이 지연되게 되어, 밤중이나 새벽뿐 아니라 동절기 낮에도 콘크리트가 동결되어 콘크리트 양생이 올바르게 되지 않아 구조물이 완성된 후 콘크리트의 강도가 계획한 것과는 다르게 완성되어 구조물의 안전에 큰 영향을 줄 수 있게 된다⁸⁾.

기온이 영상 0에서 4℃에서는 적절한 보온을 하여 시공을 하고, 영하 3에서 0℃에서는 물 또는 물과 골재 가열이 필요하며, 적절한 보온이 동시에 필요하다. 영하 3℃ 이하에서는 물과 골재를 함께 가열하여 콘크리트의 온도를 높이고, 양생 시 필요에 따라 적절한 보온과 급열을 하게 된다.

따라서 일반적으로 보양천막을 건설현장 외부에 설치하고 그 안에서 갈탄을 피워 온도를 상승시킴으로서 콘크리트의 두께에 따라 영상의 온도로 현장 내부를 유지하여 콘크리트 양생이 잘 될 수 있도록 하고 있

8) 한(寒)중콘크리트시방서 - <http://www.howeng.co.kr/tec/topics/11.htm>

다.

이때 사용된 급열 보양의 경우 갈탄 또는 석유난로와 같은 열원을 사용하게 되는데 갈탄이 완전연소가 될 경우 최종적으로 이산화탄소와 물이 발생하게 되지만, 보양천막을 설치해 놓은 건설현장의 경우 산소가 부족하게 되고, 이는 불완전연소로 이어져 이산화탄소와 물이 아닌 일산화탄소가 발생하게 되는 것이다.

건설현장 전문가의 말에 따르면 보통 6시간 간격으로 갈탄을 갈아주게 되는데 보통 새벽에 일을 시작하기 전 불이 다 꺼진 갈탄을 교체하게 될 때가 가장 위험하다고 알려져 있다. 그때가 산소농도도 가장 낮고, 일산화탄소가 발생했다면 가장 높은 때라고 판단된다.

따라서 건설현장에서 밀폐공간 질식재해 예방을 위해서는 산소와 일산화탄소가 가장 중요하게 다루어야 할 측정대상 물질이다.

그리고 건설관계자 인터뷰를 통하여 알게 된 것은 갈탄의 경우 실제로는 교체를 하러 들어갔을 때 사고가 발생하는 것 보다는 겨울에 춥기 때문에 내부에서 쉬거나 취침을 할 때 사고가 많이 발생한다는 증언도 있었다. 따라서 농도를 측정하는 센서 뿐 아니라 인체감지센서, 출입센서 등을 활용하는 방법도 함께 고려해야 한다.

(나) 발생원 실험

발생원 실험을 하기 위해서 총 3종의 연료를 이용하여 연소 실험을 실시하였다. 실제로 건설현장에서 주로 사용하고 있는 연료를 선정하였다. 메탄올겔, 썸탄, 갈탄 이렇게 3종의 연료이다.

메탄올겔은 고체연료⁹⁾의 사용이 금지된 도심지역에서 주로 사용을

9) 고체연료 사용금지지역(「대기환경보전법 시행령」 제42조제1항 및 별표11의2))

-서울시, 부산광역시, 대구광역시, 인천광역시, 광주광역시, 대전광역시, 울산광역시

-경기도 수원시, 부천시, 과천시, 성남시, 광명시, 안양시, 의정부시, 안산시, 의왕시, 군포시, 시흥시, 구리시, 남양주시

하고 있고, 썸탄의 경우 갈탄의 대체 연료로 사용이 되고 있다. 갈탄의 경우에도 고체연료가 금지되어 있는 지역에서도 지속적으로 사용이 되고 있어서 실험 대상에 포함되었다.

<표 6> 밀폐공간에서 사용하는 연료별 특성

	메탄올겔	썸탄	갈탄
형상	겔	고체	고체
주원료	메탄올	야자성형탄	갈탄
착화제	필요없음	에탄올액체	메탄올겔

실제
사용된
제품



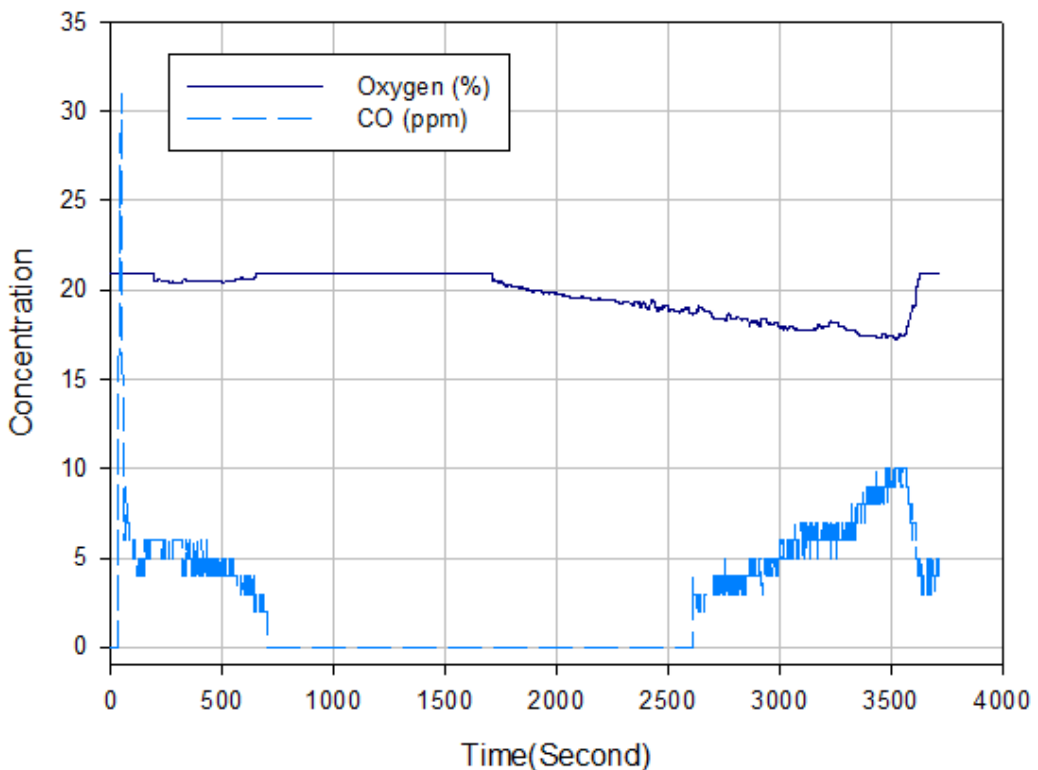
실험은 안전을 위하여 서울시 소방본부의 협조를 받아 안전하게 실험을 하였다. 실험에 사용된 가건물은 가로 2.5 m 세로 2.5 m 높이 2.5 m의 크기로 내부에는 연소를 할 수 있는 공간이 있다.



[그림 11] 실제 실험을 실시한 장소의 외부와 내부

메탄올젤을 이용한 실험에서는 일산화탄소는 최대 31 ppm 까지 올라갔다가 다시 내려가는 양상을 보였고, 산소농도가 약 17%까지 떨어지는 현상을 볼 수 있었다. 이는 타는 물질이 주로 완전연소를 하여 산소는 소모를 하고 불완전연소에 의한 일산화탄소 발생이 적다는 뜻으로 해석할 수 있다.

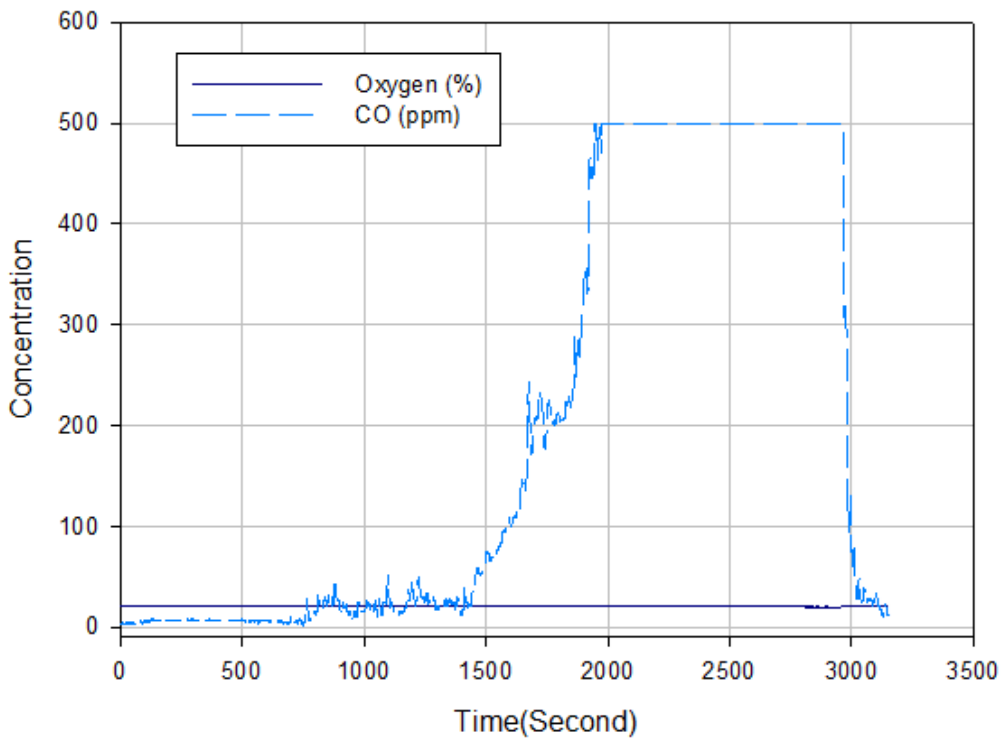
메탄올젤을 광고할 때 유해가스 발생이 되지 않는다고 광고를 하는 것은 옳지 않고, 많은 건설현장에서 사용을 하는 제품이기 때문에 KOSHA Alert 등을 통하여 위험성을 알리는 것이 필요하다.



[그림 12] 메탄올젤을 이용한 연소 실험 결과

썸탄을 이용한 실험결과에서는 일산화탄소는 사용한 측정기의 최대 농도인 500 ppm을 초과하는 시간이 있다는 것이다. 반면 산소농도는 20% 내외로 유지가 되는 것을 알 수 있었다.

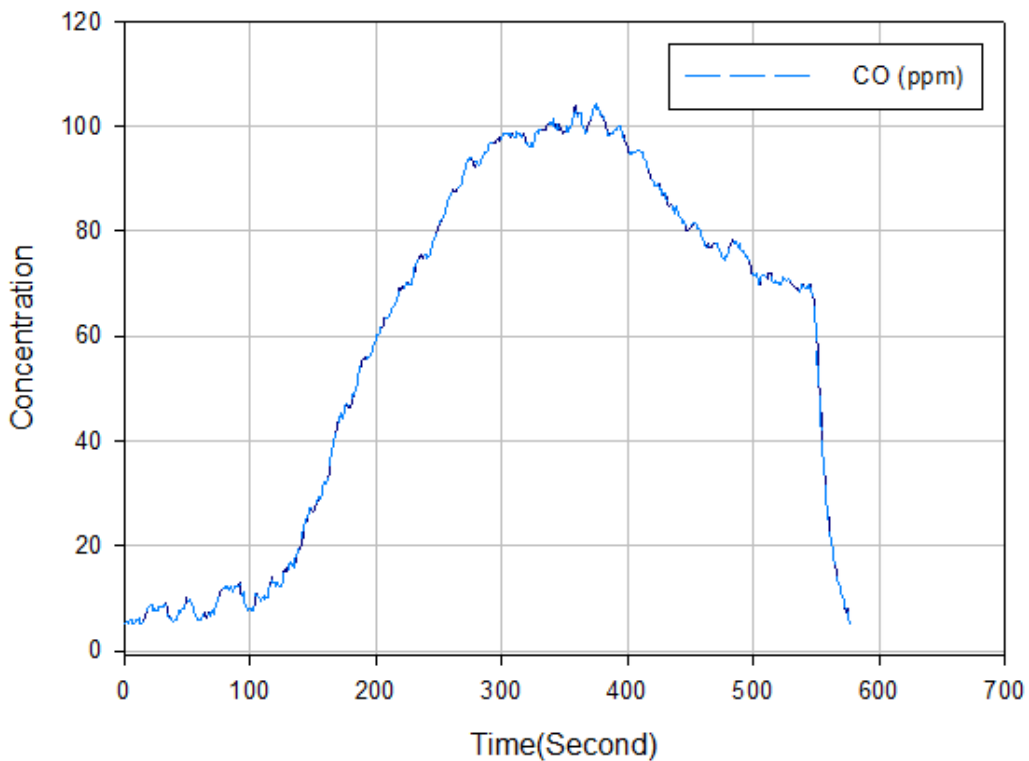
썸탄은 불완전연소가 주로 일어나기 때문에 일산화탄소가 발생을 하는 것인데 메탄올겔과 같이 유해가스가 발생하지 않는 것으로 광고를 하며, 다양한 환경에서 사용되고 있다.



[그림 13] 썸탄을 이용한 연소실험 결과

갈탄을 이용한 실험결과에서는 재실험이 필요한데, 그 이유는 갈탄의 경우 굉장히 오랫동안 불을 지펴야 착화가 가능한데 모든 탄에 착화가 되지 못하오 일부에만 착화가 된 상태에서 실험을 실시하였다.

따라서 재실험이 필요하다. 하지만 이 시험에서 알 수 있는 것은 갈탄 역시 불완전연소가 일어나면서 일산화탄소의 발생이 있다는 것이다.



[그림 14] 갈탄을 이용한 연소실험 결과 (재실험 필요)

(2) 하수처리장

가) 하수처리장 밀폐공간의 이해

(가) 발생원 조사, 확인 (현재 산소결핍 및 황화수소로 추정)

오폐수 처리는 산업, 가정 또는 지표수와 상업 부지에서 배출되는 물에서의 오염물을 제거하는 처리 공정이다. 이때 발생할 수 있는 유해가스는 주로 황화수소와 산소결핍이다. 2011년 인천에서도 한 상가 건물 오수처리시설 설비 점검을 위하여 근로자가 현장에서 대기하던 중 화재경보기가 울리게 되어 오수처리시설에 그냥 진입하였다가 황화수소 중독에 의해 사망을 하게 된 사례가 있었다¹⁰⁾. 오폐수조에 공기를 공급하기 위한 블로워(Blower)는 주기적으로 작동을 하게 되는데 본 사고에서도 블로워가 작동되고 얼마 안 되어 재해가 일어난 것으로 추정하고 있다. 모사를 한 결과에 따르면 블로워 미작동시 10 ppm 이었던 황화수소가 블로워 작동 30분 후 입구에서 측정한 농도가 120 ppm인 것을 확인 하였다. 120 ppm에 근로자가 노출되면 사망에 이를 수 있는 농도이기 때문에 이와 같은 상황에서는 측정기기의 설치가 필수적이다.

현장마다 특성이 있으나 인터뷰와 조사를 통하여 내린 결론은 하수처리 시설 작동 중에는 사람이 들어가면 안 된다는 것이다.

역시 기존의 측정 시스템은 들어가기 전에 입구에서 확인을 하는 시스템으로 농도를 측정하기 위해서는 누군가 최소한 출입구 까지는 가서 측정을 해야 하는 시스템이다. 따라서 현장 평가에서는 블로워를 켜지 않은 상황, 블로워를 켜 상황을 모사하여 측정을 실시하였다.

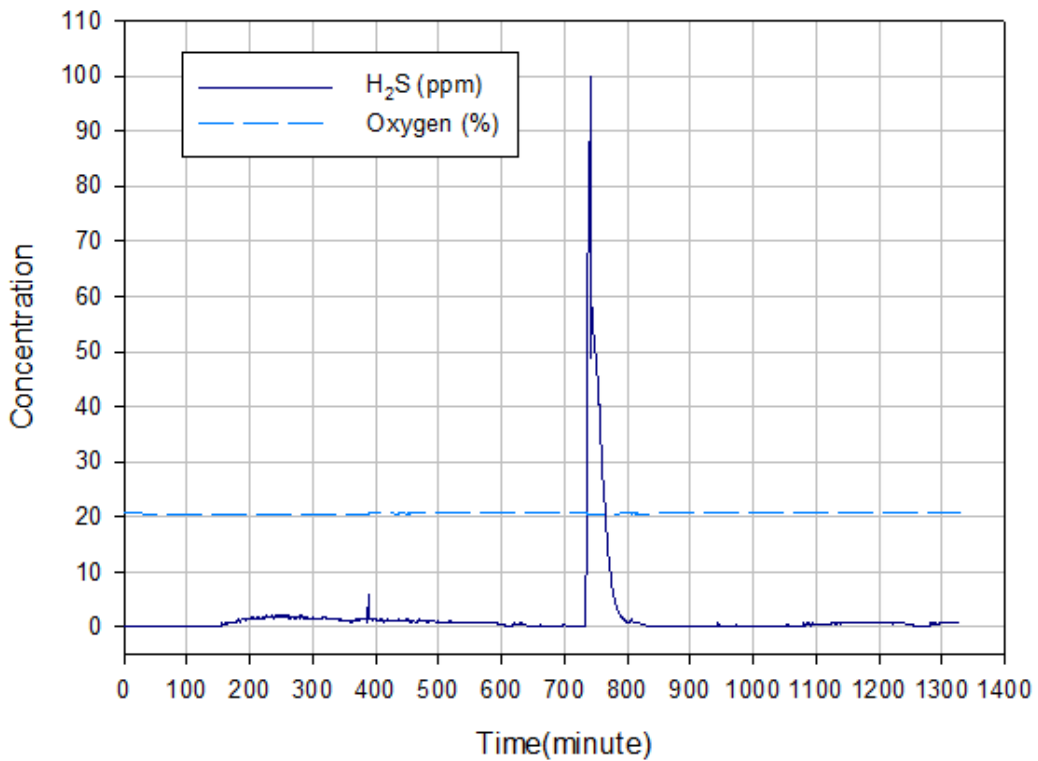
측정 시 측정하는 연구원은 외부에서 측정장치를 제어하면서 안전하게 측정을 실시하였다.

10) 고용노동부 인천북부지청 자료

(나) 발생원 실험 또는 현장 조사/실험



[그림 15] 실험이 진행된 오폐수처리장 환경



[그림 16] 오폐수처리장에서 실험한 황화수소와 산소 측정 결과.

2) 센서 선정 및 검증

(1) 센서 선정

센서는 측정장비 개발 연구에서의 핵심 부품으로 쉽고 빠르고 정확한 측정에 사용할 수 있는 센서 선정이 필수적이다. 또한 소규모사업장에서도 사용될 수 있도록 경제성도 함께 고려하는 것이 필요하다.

가) 산소센서

산소농도 측정을 위하여 활용이 가능한 다양한 센서를 검토하였다.

<표 7> 산소 센서의 검토 결과

센서명	요구조건	Lox O2 F	Lox O2 S	Lox O2	Grove Gas Sensor
측정범위	18-23.5%	0-25%vol	0-25%vol	0-25%vol	0-25%vol
사용기간	1년 이상	5년	5년	5년	2년
분해능	0.1% 이하	0.01%	0.01%	0.01%	0.1%
원리	납 등 유해물질 포함되지 않아야 함.	광전방식	광전방식	광전방식	전기화학식 (납 포함)
사용온도	-20℃~+40℃	-30℃~+60℃	-30℃~+60℃	-30℃~+60℃	-20℃~+50℃
응답시간	<1 min (짧을수록 좋음)	≤10sec	≤30sec	≤30sec	≤15sec
적정습도	20-80%	0-99%	0-99%	0-99%	0-99%

이번 연구에서 선정된 산소센서는 Lox 센서이다. 측정범위, 사용기간(수명), 분해능, 사용온도, 응답시간 등을 고려했을 때 적합하였다.

나) 일산화탄소 센서

일산화탄소농도 측정을 위하여 활용이 가능한 다양한 센서를 검토하였다.

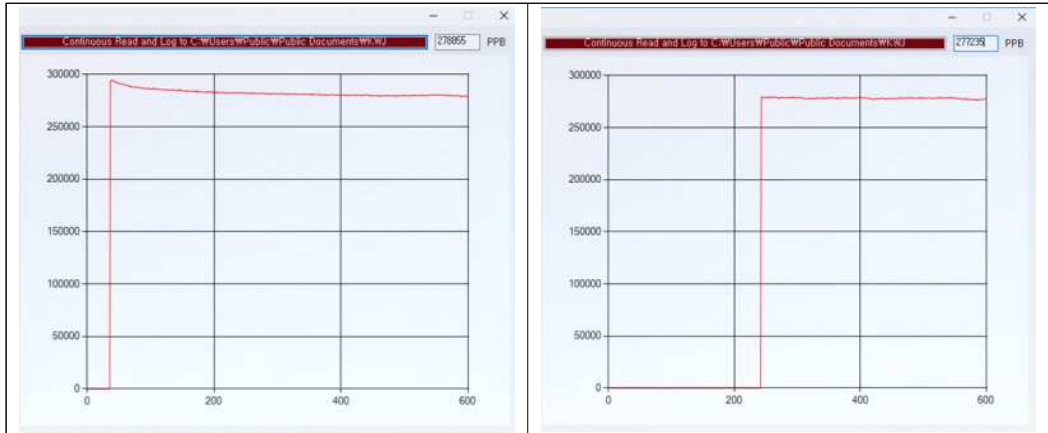
<표 8> 일산화탄소 센서의 검토 결과

센서명	요구조건	ULPSM-CO 968-001	ME3-CO	ZE03-CO
측정범위	0-30 ppm	0-500 ppm	0-1,000ppm	0-1,000ppm
Low Detection Limit	3 ppm 이하	2 ppm	-	-
사용기간	1년 이상	2년	3년	1년 이상
분해능	1 ppm	1 ppm	0.5ppm	-
사용온도	-20℃--+40℃	-20℃--+40℃	-20℃--+50℃	-20℃--+50℃
응답시간	<1 min	<30sec	≤20sec	≤20sec
안정화시간	15 min	15 min	15-90%	15-90%
정확도	< ± 5% of reading	< ± 3 % of reading	-	-
적정습도	20-80%	15-95%	-	20-90%
무게	가벼울수록	< 2온스(56.7g)	-	-

이번연구에서 선정된 센서는 ULPSM-CO이다. 미국에서 개발한 센서로 가격이 합리적이고 성능도 충분하다고 판단이 되어 실제 개발을 시작하였다.

센서의 안정화 단계는 매우 중요하다. 센서가 안정화가 되어 해당가스가 없는 상황에서 0을 가리키고 알고 있는 농도를 정확하게 읽을 수 있도록 하는 것이 중요하다.

아래 그림은 일산화탄소 센서에 대한 안정화 단계이다. 왼쪽 그림과 같이 센서는 전원이 인가되면 바로 반응을 보이기 시작하나 안정화되기 까지에는 시간이 소요된다. 이러한 소요시간이 짧을수록 측정 대기시간이 짧아지기 때문에 이를 짧게 만드는 것이 매우 중요한 기술이다.



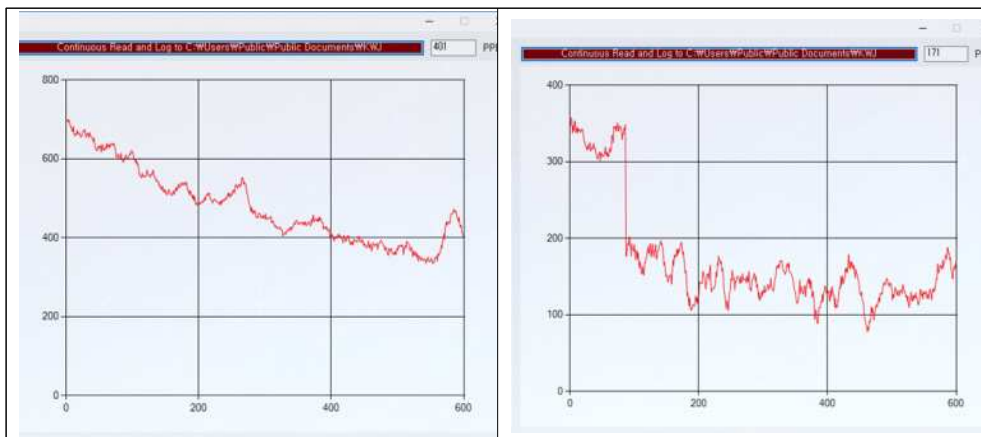
[그림 17] 일산화탄소 센서의 안정화 단계

다) 황화수소 센서

황화수소농도 측정을 위하여 활용이 가능한 다양한 센서를 검토하였다.

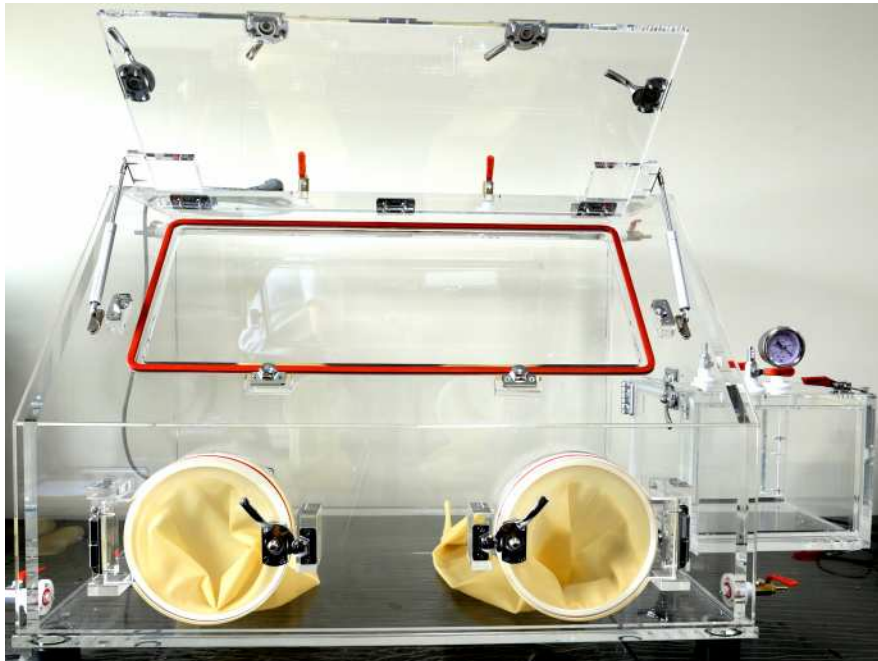
<표 9> 황화수소 센서의 검토 결과

센서명	요구조건	ULPSM-H2S 968-003	ME3-H2S
측정범위	0-15 ppm	0-50ppm	0-100ppm
Low detection Limit	0.5 ppm	0.3 ppm	0.1 ppm
사용기간	1년	5-10년	2년
분해능	0.5 ppm	0.15 ppm	0.1ppm
사용온도	-20℃ ~ +40℃	-20℃ ~ +40℃	-20℃ ~ +50℃
응답시간	<1 min	<30sec	≤30sec
안정화시간	15 min	60 min	
정확도	< ± 5% of reading	< ± 2 % of reading	
적정습도	20-80%	15-95%	15-90%
무게	가벼울수록	<2온스(56.7g)	-

**[그림 18] 황화수소 센서의 안정화 단계**

(2) Lab Chamber 실험을 통한 센서 검증

실험에 사용된 Chamber의 규격은 두께가 15T로 가로 0.9m, 세로 0.6 m, 높이 0.6 m이고 측면에 0.25 m, 0.2 m, 0.2 m의 패스박스를 만들어 실험 중에 가스의 치환을 최소화 하여 필요한 기기의 전달이 가능하다. 실험 중에 내부에서 작업을 할 수 있도록 Glove box 형태로 구성하였다.

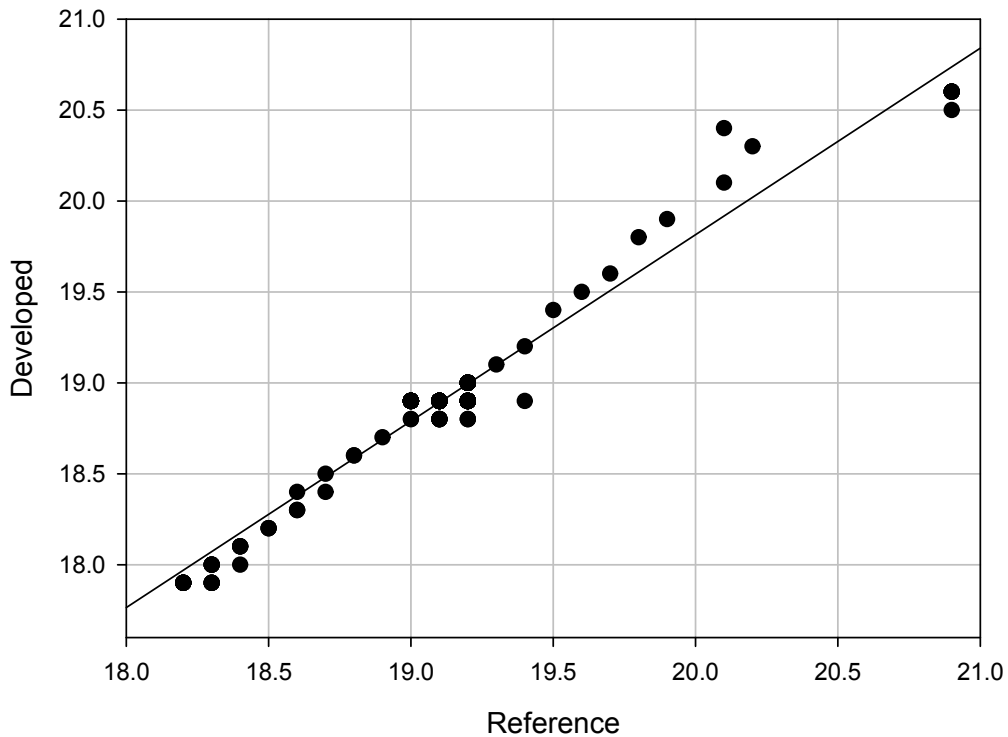


[그림 19] 실험에 사용된 Chamber

실험조건은 온도는 20 ± 2 °C, 습도 $67 \pm 20\%$ 및 기압 $1,000 \pm 5$ hPa로 한다.

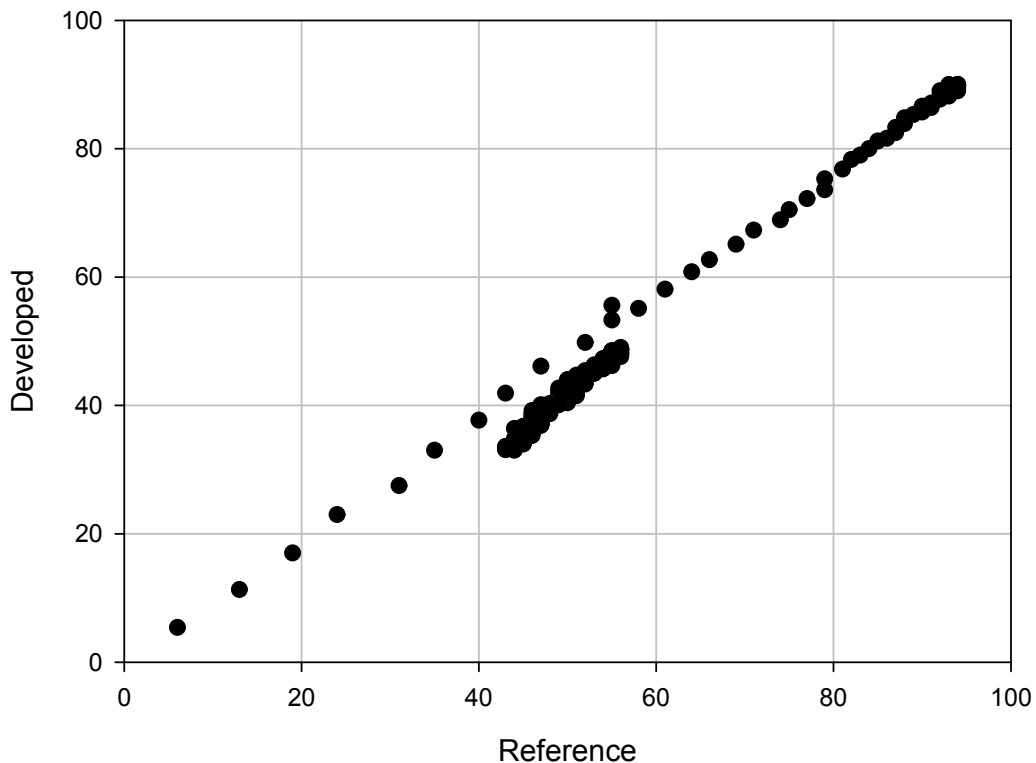
Lab 실험에 있어서는 산소, 일산화탄소, 황화수소에 대하여 실시하였다. 산소는 18%-20.9% 사이를 반복하며 실험하였고, 일산화탄소는 0 ppm-100 ppm, 황화수소는 0-25 ppm을 반복하며 실험을 진행 하였다.

산소의 경우 $y=x*1.022+0.957$, $r^2=0.93(p<0.01)$ 로 매우 높게 나타났다.



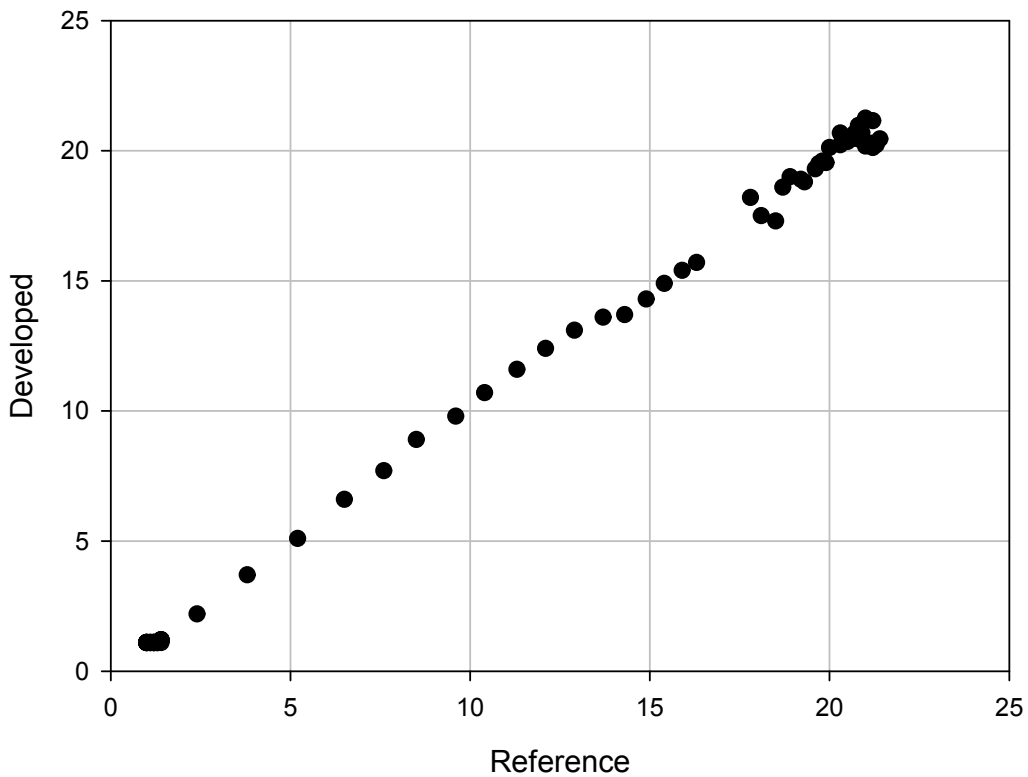
**[그림 20] 기준기기의 산소센서 측정농도와 개발된 측정장치
산소센서의 산소농도의 상관성**

일산화탄소의 경우 0 ppm-100 ppm 구간에서 실험을 한 결과, $y=x*11.919+0.906$, $r^2=0.98(p<0.01)$ 로 두 기기간의 상관성이 매우 높게 나타났다. 그러나 40 ppm - 60 ppm 구간에서는 개발된 기기에서 과소 평가가 되는 것이 발견되었고 기술적으로 해결이 필요한 부분이다.



[그림 21] 기준기기의 일산화탄소센서 측정농도와 개발된 측정장치 일산화탄소센서의 산소농도의 상관성

황화수소의 경우 0-25 ppm구간에서 실험을 한 결과, $y=x*0.0987+0.995$, $r^2=0.99$ ($p<0.01$)로 두 기기간의 상관성이 매우 높게 나타났다.



**[그림 22] 기준기기의 황화수소센서 측정농도와 개발된 측정장치
황화수소센서의 산소농도의 상관성**

3) 통신방법 선정

거리가 떨어진 상태에서 특정 매체나 수단을 통하여 정보를 주고 받는 것을 의미한다. 최근 통신의 트렌드를 보면 데이터의 크기, 전력소모, 네트워크 비용, 디바이스 비용, 기술적 도달거리에 따라 사용하고자는 방식이 달라진다.

효과적인 데이터 통신 시스템의 기본특성은 1) 전달(Delivery): 정확하게 목적지에 전달되어야 하고, 2) 정확성(Accuracy): 전송 하는 동안 누락이 없이 정확하게 전달되어야 하고, 3) 적시성(Timeliness): 원하는 시간 내에 데이터를 전달해야 한다. 데이터 통신 시스템에서의 필수 5 요소는 통신의 대상인 데이터, 데이터를 보내는 송신자(Sender), 데이터를 받는 수신자(Receiver), 전송자와 수신자를 연결하는 물리적 경로 전송매체(Medium), 데이터 통신 규칙인 프로토콜(Protocol)로 구성되어 있다. 데이터는 문자나 숫자, ASCII 등 다양한 형태로 존재하게 된다. 데이터의 흐름은 한쪽으로만 전송이 가능한 단방향 방식(Simplex), 무전기와 같이 어떠한 신호를 줄 때 한쪽으로만 전송이 가능한 반-이중 방식(Half-duplex), 동시에 양방향 송수신이 가능한 양방향 방식(Duplex)등이 있다.

데이터의 크기는 센서에서 보내오는 정보의 양에 따라 달라진다. 센서에서 보내오는 정보는 영상정보와 같이 매우 큰 데이터가 아니라 주로 숫자 등의 매우 작은 크기이기 때문에 현재 기술로는 처리하기 매우 용이한 점을 가지고 있다. 하지만 그 정보가 오는 장소나 양이 많아 질 때에는 데이터의 크기가 매우 중요한 요소가 될 수 있다. 전력소모의 경우 하드웨어 부분에서 언급 했듯이 상시 전원이 아니라 배터리를 이용하는 경우가 대부분이기 때문에 정보를 주고받는 동안 사용자가 원하는 만큼의 능력을 확보하는 것이 중요하다. 특히 웨어러블 기기의 경우 전력소모는 더욱 중요하다고 볼 수 있다. 네트워크 비용은 앞에서 보내온 데이터의 양과 하드웨어에 개수에 비례한다. 기존의 통신망을 이용

하게 되면 비용이 과하게 지출되고 있고, 현재 본 연구에서는 LTE망을 이용하여 Wi-Fi로 바꾸거나 Wi-Fi를 이용하여 주로 연구 진행 중에 있다. SKT LoRa (Long Range), KT NB(Narrow Band)-IoT, LG NB(Narrow Band)-IoT에서 IoT 전용망을 내세워 서비스를 시작하였다. 하지만 서두에도 플랫폼을 선점하는 기업이 추후 IoT 생태계를 지배할 수 있는 구조이다 보니 매우 폐쇄적이고 접근하기가 쉽지 않아 앞으로 활용하기에는 쉽지 않을 것으로 예상되는 바이다.

디바이스 비용의 경우 그 목적에 따라 보급하는 만큼 정보를 얻을 수 있게 되고, 그에 따라 비용이 증가 하여, 효율적으로 분배하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

따라서 위와 같은 통신과 관련된 요소들이 최초 설계 단계부터 반영되어야 최종적으로 우리가 원하는 방향을 잘 반영하여 목적과 효율성을 동시에 달성 할 수 있다.

우리나라 IoT 통신망 (SK, KT, LG)의 전망을 부정적으로 바라보았으나 앞으로 긍정적인 방향으로 바뀌어나가길 바란다. 왜냐하면 향후에는 IoT 기기가 더 많아 질 것이고 소량의 데이터와 낮은 전력의 경우 IoT 망이 반드시 필요하기 때문이다. 기존 통신망 대비 적은 양의 데이터를 사용하기 때문에 낮은 통신비용과 장기간 사용할 수 있는 환경의 저전력 및 에너지 효율성 확보, 그리고 밀폐공간 등에서 매우 중요한 효율적인 전파 도달거리 (침투력) 확보가 필요하다 (김진수, 2018).

IoT 통신망은 근거리 통신과 원거리 통신으로 나눌 수 있다. 근거리 통신은 Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee 등이 있고, 원거리 통신은 3G/4G/5G, LTE, NB-IoT 등이 있다. 근거리 통신망은 1 Mbps 이하의 낮은 속도와 100 m 이내의 거리에서 기기간의 통신이 가능하다. 원거리 통신망의 경우에는 10 km 내외의 거리에서 통신하는 IoT 전용망과 일반 이동통신망으로 구분이 가능하다.

2018년 현재 우리나라의 통신망 기술은 무선의 경우 5G와 유선의 경우 Giga를 중심으로 발전을 하고 있다. 이 두 가지는 가장 사용자가 많

기 때문에 우리에게 익숙한 통신 방법이고 실제로 사용하기에도 빠르고, 품질이 안정적이고, 저전력 수명, 저비용 등 개발하기에 편리하게 되어 있어 본 연구에서 활용하기 적합한 방식이다. 하지만 기지국의 소유나 설치에 있어서 권한이 사용자에게 없기 때문에 사업자에게 의존적인 단점이 있다.

밀폐공간에서의 통신의 경우 일반 통신보다 더 주의를 기울여야 한다(김동현, 2017). 왜냐하면 통신 인프라가 파괴되는 경우에 외부와의 통신이 단절되어 위험한 상황이 벌어질 수 있기 때문이다. 따라서 밀폐 공간에 특화된 통신방법을 찾는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. 밀폐공간의 정의가 일부 상이할 수 있지만 소방 분야에서는 소방관이 구조활동을 하러 화재 현장에 진입 할 때의 통신에 대한 연구를 하고 있다 (산업안전보건연구원, 2018).

<표 10> 각 통신 방식의 특징

	Wi-fi	4G/5G	Bluetooth	ZigBee	LoRa	NB-IoT
적용 우선순위	1	2	3	4	5	6
거리	50 m	휴대전화	-100 m	-30 m	도심 5 km	15 km
확장	가능	가능	가능	자동확장	가능	가능
전송속도	-54 Mbps	-7.2 Mbps	1 Mbps	250 Kbps	300 Kbps	100 kbps
주파수대역	2.4 GHz	다양	2.4 GHz	2.4 GHz 등	500 KHz	LTE대역
연결속도	3 s 이내	3 s 이내	10 s 이내	3 s 이내	3 s 이내	3 s 이내
초기비용	높음	높음	중간	낮음	중간	중간
장점	빠른 속도, 낮은가격, 검증된 통신/보안	커버리지, 이동성	스마트폰 연동, 저전력, 낮은가격, 보급성	저전력, 낮은가격, 메쉬망라우팅 지원	저렴한 이용비용	저렴한 이용비용
단점	짧은 통신 범위, 혼선 우려	높은 유지비용, 고가 통신칩	네트워킹 개량	프로파일 복잡	짧은 통신 범위, 상용화 미흡	상용화 미흡

4) 통합기기 제작

(1) 밀폐공간 특성에 맞는 측정장치 제작을 위한 표준 검토

센서와 통신방법을 선정 한 후 밀폐공간에 특화된 측정장치 개발을 하였다. 이번 연구에서 개발한 밀폐공간의 유해가스를 측정하는 장치는 산소, 일산화탄소, 황화수소, 온도, 습도를 측정할 수 있도록 하였다.

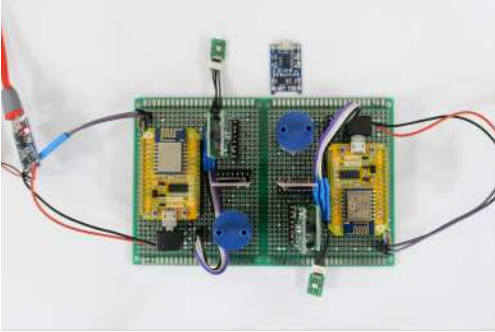
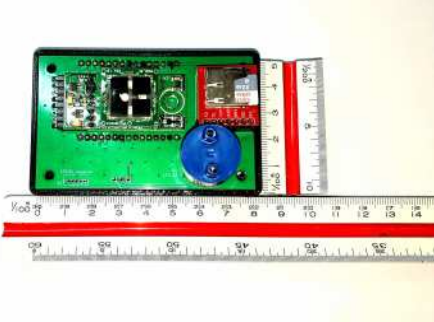
통신방법은 Wi-Fi를 기본으로 하고 Wi-Fi 신호를 만들 수 있는 LTE 라우터를 사용하여 통신 가동범위를 제한 없이 할 수 있도록 하였다. 측정된 데이터는 클라우드에 저장되고 이는 데이터 저장, 분석 등 다양하게 이용할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

응용 단계	밀폐공간
관리 단계	보안 / 사용자 인증 / 데이터 관리
	클라우드 영역 데이터 분석 / 데이터 저장 / 서비스
통신 단계	무선통신 LTE / Wi-Fi
인지 단계	센서 산소 / 일산화탄소 / 황화수소 / 온도 / 습도

[그림 23] 개발된 측정장치의 Schematic diagram

각 센서는 사용장소에 따라 건설현장에서는 산소와 일산화탄소, 온도, 습도를 측정할 수 있도록 구성하였고, 하수처리장에서는 산소와 황화수소, 온도, 습도를 측정할 수 있도록 하였다.

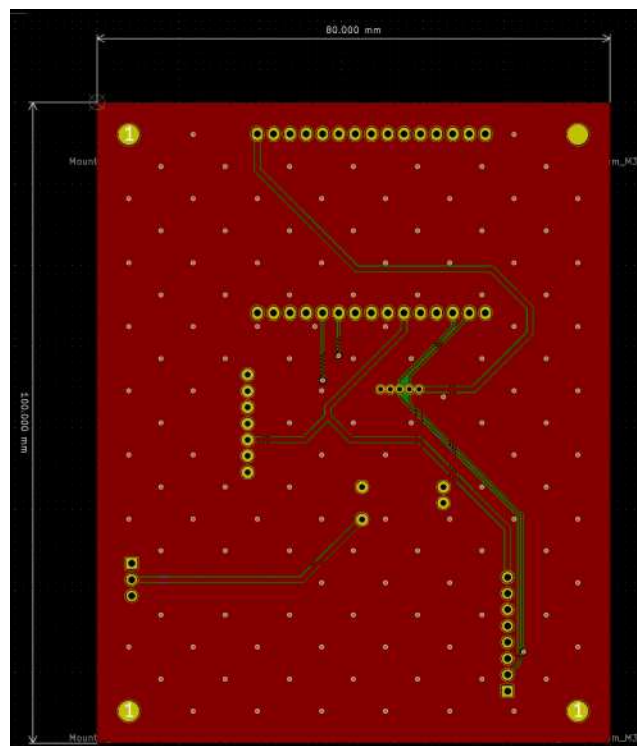
고정형도 있지만 개인노출평가도 실시를 해야 하며, 특히 캐리어에 장착할 경우 무게와 부피가 중요한 요소이기 때문에 크기를 줄였고, 또한 배터리소모가 있기 때문에 다양한 센서를 하나의 측정장치에 두는 것은 바람직하지 않다.

개발 차수	사진	사양	크기
1차 개발		산소/일산화탄소 산소/황화수소 온습도 외장형	가로*세로*높이 160*50*50 (mm)
2차 개발		산소/일산화탄소 산소/황화수소 온습도 내장형	160*50*50 (mm)
3차 개발		산소/일산화탄소 산소/황화수소 온습도 내장형	80*50*50 (mm)

[그림 24] 개발 된 밀폐공간 유해가스 측정장치

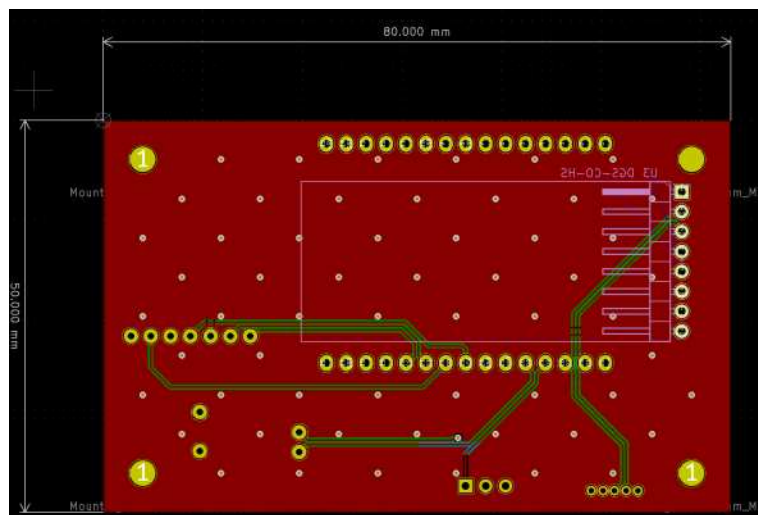
1차 개발 단계에서는 테스트를 위하여 다양한 시도를 하였고, 기본적으로 환경에 대한 측정 결과가 필요하여 가스센서 이외에 온도와 습도 센서도 함께 고려하였다. 최초에는 온도와 습도 센서를 외부에 추가로 설치하여 값을 받아왔으나 배터리 소모가 많아져서 가스센서 내부에 있는 기능을 활성화 하여 사용하였으나 단점으로는 소수점 아래로는 표기가 안되는 점이 있으나 이번 측정장치에서 온도와 습도는 보조적인 역할이 기 때문에 이와 같이 결정하게 되었다.

2차 개발 단계에서는 PCB를 제작하여 외관 및 유지 보수까지 고려하여 개발하였다. 2차 개발단계에서는 원활한 성능으로 만들기 위하여 PCB의 크기를 가로 160 mm, 세로 50 mm로 만들어서 평가를 실시하였고, 계획했던 성능을 만족하였다.



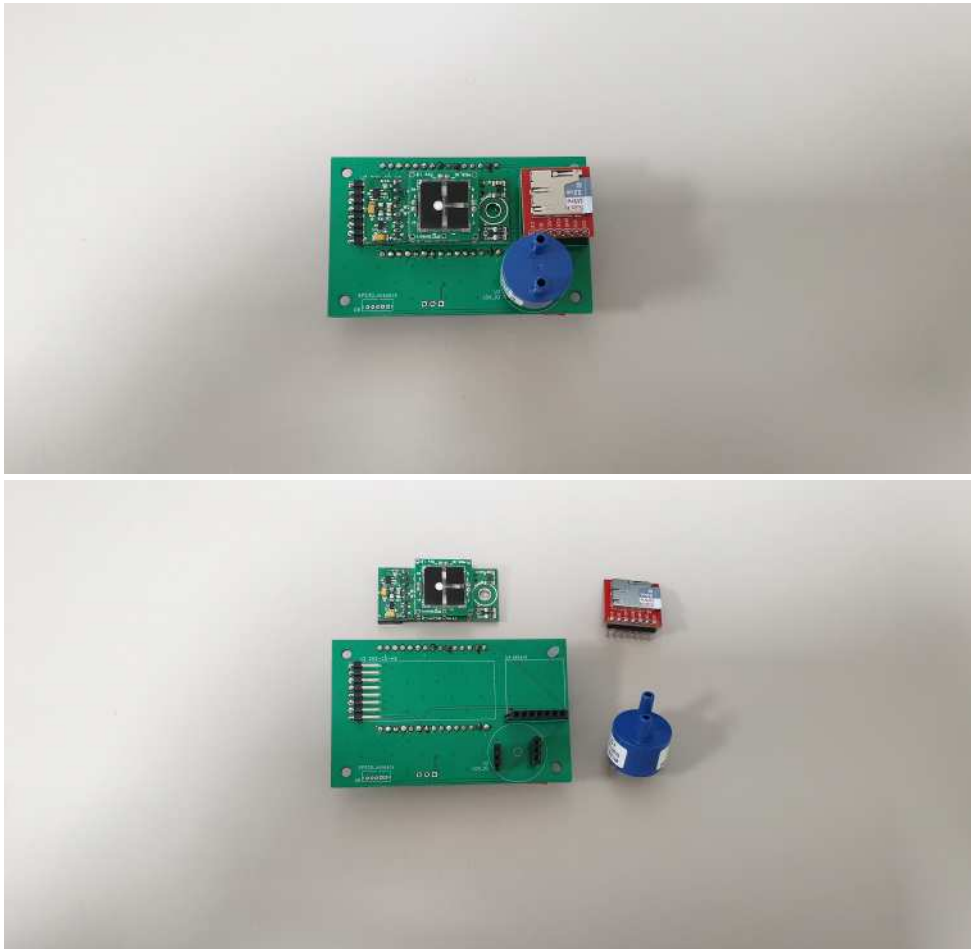
[그림 25] 2차 개발에서 완성된 PCB 기판

3차 개발 단계에서는 근로자가 착용을 하고 다닐 수 있도록 2차 개발 단계에서보다 가로 길이의 50%를 줄이는데 성공하였다. 일반적으로 전자제품의 크기를 반(가로 80 mm, 세로 50 mm)으로 줄이는데 비용이 4배 이상 소요가 되는데 비용의 증가 없이 성공적으로 모든 성능을 만족하는 측정기를 개발 하였다. 향후에는 크기를 더 줄이는 연구가 필요하다고 생각된다.



[그림 26] 3차 개발에서 완성된 PCB 기판

각 센서들은 유지보수를 할 때 쉽게 교체가 가능하도록 설계되었고, 주기에 맞추어 보정을 하기 보다는 합리적인 금액으로 교체를 할 수 있도록 설계를 하였다.



[그림 27] 유지보수가 편리하도록 제작된 측정장치

무선충전시스템을 탑재하여 사용자가 선택한 방법으로 충전을 할 수 있도록 하였고, 캐리어에 탑재하였을 때에도 손쉽게 무인 충전이 가능하도록 설계하였다. 충전이 될 때는 빨간색 LED가 표시가 되고, 충전 모듈은 전원이 연결되어 있어야 한다.

특히 캐리어에 탑재했을 때에는 필수적인 장치로 사람이 직접 충전 케이블을 연결하여 운영하는 것이 아니라 자동적으로 해당 충전지점에 도달하여 직접 충전을 하는 시스템을 갖출 수 있도록 하였다.



[그림 28] 측정장치의 무선 충전 모듈



[그림 29] 실제 작동되는 무선 충전 모듈

이와같은 특징을 가진 측정장치를 아래와 같은 케이스에 담아 프로토타입의 개발을 완료 하였다. 지금은 3D 모델링 후 3D 프린팅을 통하여 제품을 제작하였다. 센서에 공기가 잘 닿아야 하기 때문에 미세한 구멍을 만들어 공기의 평형을 만들 수 있는 구조로 만들었고, 무선충전이 가능한 소재로 추후 관리가 쉽도록 기구설계를 완료 하였다.



[그림 30] 개발된 측정장치의 외관 모델링(좌), 실물(우)

개발된 측정기기가 사용될 때 이동을 편리 하게 하기 위하여 방수, 방진 가방에 구성을 하였다.

가방을 열면 상부에는 디스플레이를 위한 태블릿 PC가 설치되어 있고 이를 통하여 현황을 파악할 수 있으며, 개인 스마트폰에도 확인할 수 있는 권한을 부여하면 모니터링 할 수 개인은 무한정 증가하게 된다.



[그림 31] 최종적으로 사용되는 디스플레이와 측정기 세트

또한 게이트웨이에서 도달하기 어려운 지점에서의 통신이 필요할 경우를 대비하여 중계기를 추가 하였다. 게이트웨이를 여러대 놓고 사용을 하면 센서에서 보내는 데이터를 웹서버로 안정적으로 업로드 할 수 있지만 비용이 높아지므로 중계기를 함께 활용할 수 있도록 하였다.

중계기 역시 여러 개를 연장하면 거리가 무한정 늘어 날 수 있는 장점이 있다. 이러한 방식은 열악한 작업환경조건에서 측정결과를 전달하는데 중요한 역할을 한다.



[그림 32] 거리를 연장해줄 수 있는 중계기

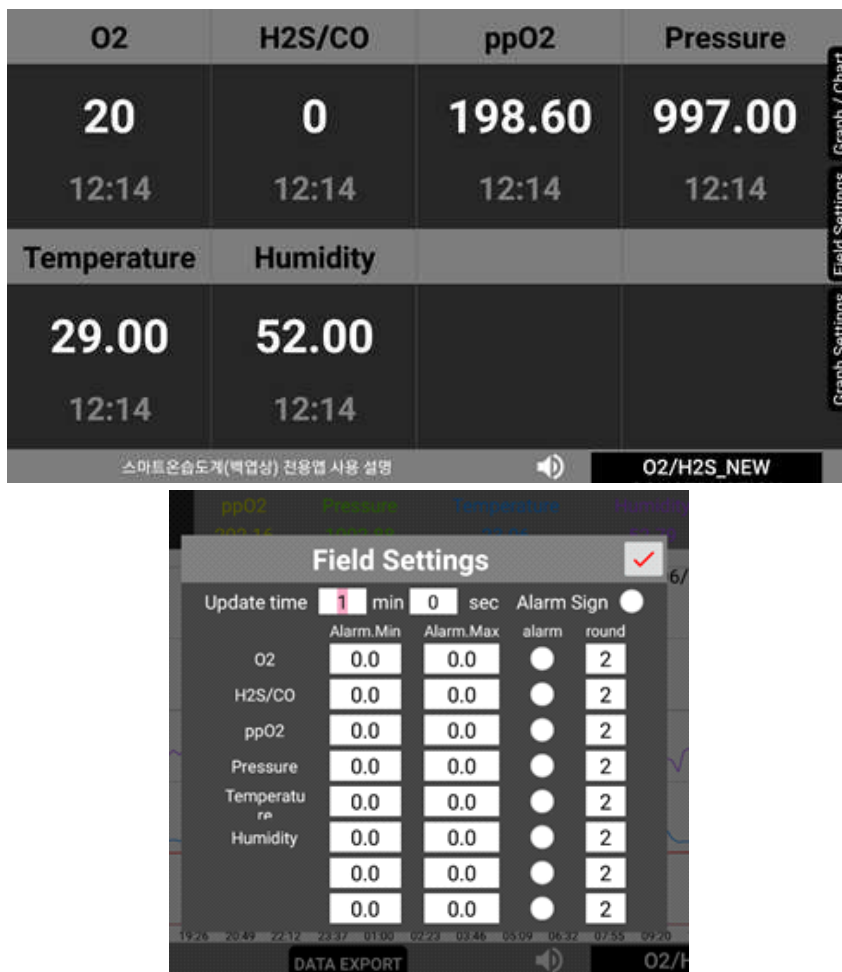
(2) 모바일 앱(Mobile Application)

센서가 전송한 자료는 앱을 통하여 관리자, 근로자가 볼 수 있고 서버에 저장이 된다. 전세계 지도에 표기가 되며, 한 지역에 많을 경우 워터마크처럼 파란색 숫자로 측정장치의 개수가 표현이 되고, 더 깊이 들어가면 빨간색으로 위치와 해당 물질의 농도가 함께 표기가 된다.



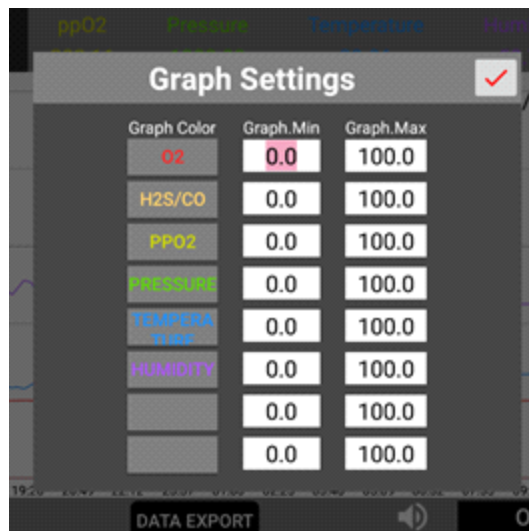
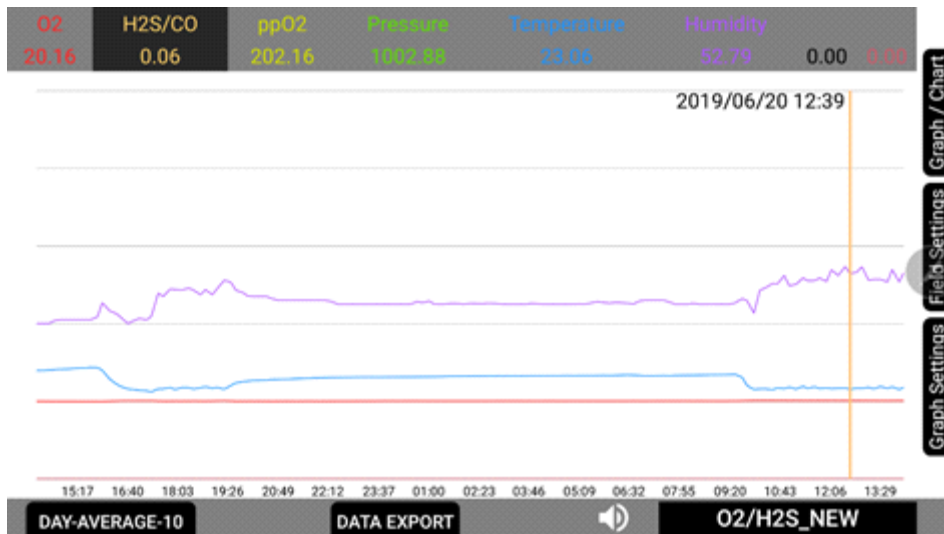
[그림 33] 실시간으로 지역과 농도를 알 수 있는 앱 화면

앱에 등록된 측정장치는 다양한 센서에서 보내온 정보를 확인 할 수 있도록 구성을 하였다. 예로 보여주고 있는 화면은 산소와 황화수소 또는 일산화탄소의 농도를 보여주고 있고, 기본적으로 온도와 습도를 함께 표현해주고 있다. 앱은 또한 알람기능도 가지고 있다. 원하는 구간의 최솟값과 최댓값을 입력하면 진동과 소리를 통하여 알람이 울리게 되고, 데이터를 전송받는 시간간격도 함께 설정이 가능하다.



[그림 34] 실시간으로 물질의 농도와 알람 구간을 확인하는 앱 화면

전송된 데이터를 그래프로 표현을 할 수 있고, 저장된 데이터를 원하는 시간간격(1분 간격, 10분 간격, 1시간 간격 등)으로 계산하는 기능도 탑재되어 있다. Y축의 범위를 설정하여 그래프를 확인 할 수도 있다.



[그림 35] 실시간으로 물질의 농도를 그래프로 확인하는 앱 화면

또한 사용자가 손쉽게 볼 수 있도록 웨어러블 기기에 표시가 될 수 있도록 하였다. 장점은 범용성이 좋아 밀폐공간에서의 유해가스 측정에 대한 사용 뿐 아니라 향후에는 내장된 센서를 활용하여 추락, 넘어짐, 심박수 전송, 위치 파악 등 다양한 활용이 가능하다. 하지만 구매 및 유지관리 비용이 높다는 점이 한계이다.

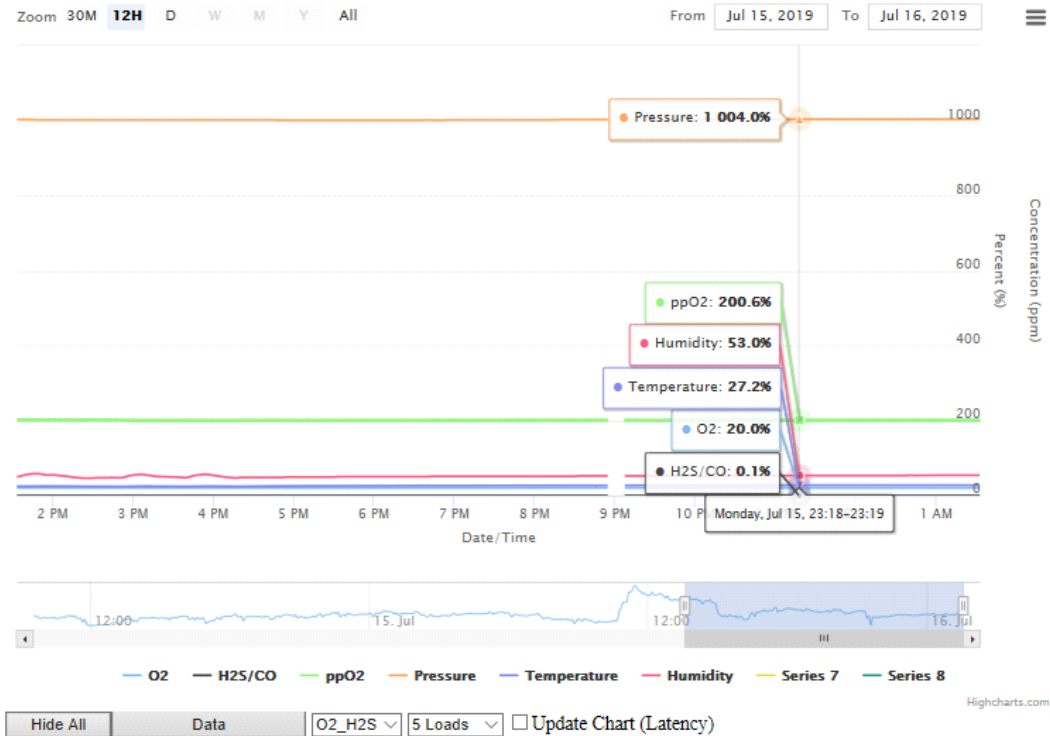


[그림 36] 개발된 웨어러블 표시 장치

(3) 웹 모니터링(Web Monitoring)

웹 모니터링은 중앙집중형 감시체계에서 활용이 가능하다. 운용할 수 있는 인력이 필요하고, 중앙관제센터가 필요하다. 웹페이지는 활용할 때 왼쪽 최상단과 같이 지난 30분, 12시간, 1일, 1주, 1월, 1년 단위로 데이터를 확인 할 수 있고, 날짜 구간을 정할 수도 있다.

그리고 원하는 구간을 설정하여 확인을 하기도 하며, 실시간으로 업데이트를 자동으로 하여 그래프를 구할 수도 있다.

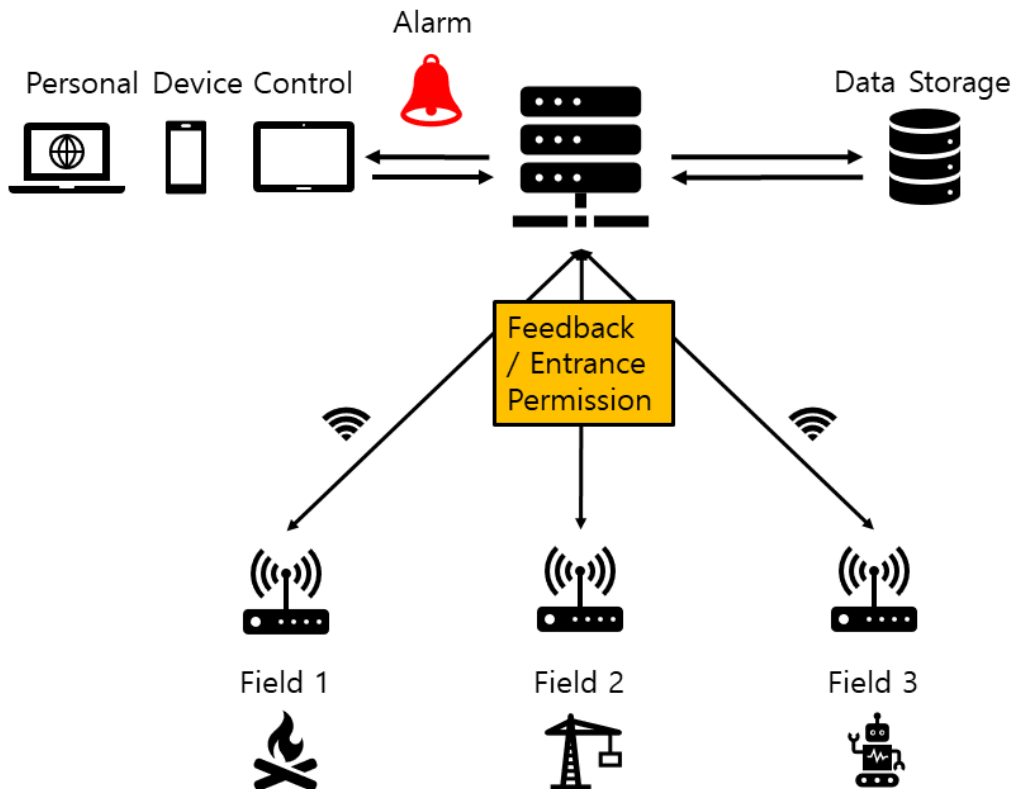


[그림 37] 이번 연구에서 사용된 웹 모니터링 사이트

5) 현장 환경에 적합한 통신방법 선정을 위하여 효과성 검증

(1) 다양한 통신방법 검토 및 현장 적용성 평가

다양한 통신방법을 검토 하였고, 최종적으로 Wi-Fi를 선택하였다. Wi-Fi는 현장에서 접근이 매우 용이하고, 라우터를 이용하여 언제든지 LTE신호를 Wi-Fi 신호로 변환할 수 있기 때문에 현장에서 사용하기 매우 용이하다.

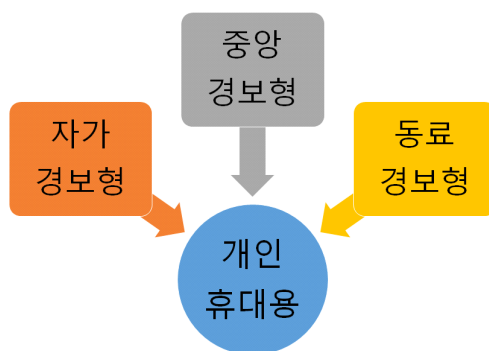


[그림 38] 본 연구에서 개발하고자 하는 밀폐공간 유해물질 측정 장비 개발 개념도

(2) 현장 환경에 적합한 통신 형태 (중앙집중형, 개인형 등) 결정

밀폐공간은 각 작업별 특성이 매우 다양하여 하나의 도구로 문제를 해결하기는 어렵다. 따라서 발생특성에 맞는 문제 해결을 해야 하는데, 건설현장에서는 일산화탄소(CO)가, 오폐수처리장 등에서는 황화수소(H_2S), 케이블 맨홀 등에는 산소(O_2)결핍 등 특성에 따른 유해공기를 파악하고 상시모니터링 및 알람 시스템을 통하여 관리 할 수 있는 방안을 마련하였다.

개인 휴대용 측정 장치와 중앙 측정 장치로 구분할 수 있고, 개인 휴대용 측정장치의 경우에도 1) 자가경보형, 2) 중앙경보형, 3) 동료경보형 등으로 구분하여 방안을 제시한다. 1) 자가경보형의 경우에는 작업자가 스스로 측정하고 위험 상황을 인지 할 수 있도록 최 일선에서 재해 예방을 하는 시스템이다. 빛, 소리나 진동을 통하여 알려주게 되고, 이를 중앙에 알리는 형태의 시스템이다. 2) 중앙경보형은 중앙에서 미리 위험 상황을 인지하고 조치를 취하는 시스템이다. 3) 동료경보형은 주위 사람들에게도 서로 연결이 되어 있어 누가 어떠한 상황에 처해 있는지 알 수 있는 시스템이다. 이와 같이 3개의 시스템을 첨단기술을 이용하여 연결시킬 수 있는 통합 시스템에 대한 기술적 검토가 필요하다.



**[그림 39] 개인 휴대용 밀폐공간
질식재해 예방 시스템 개념도**

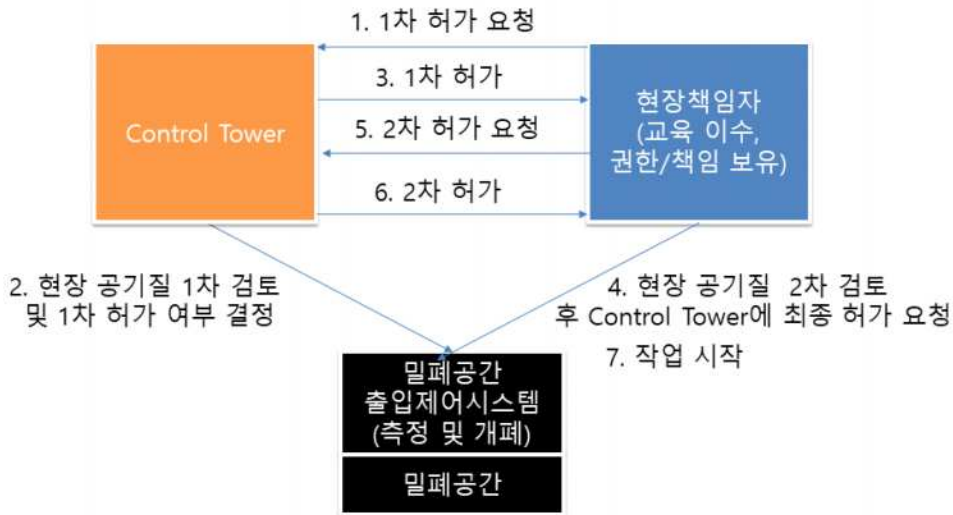
중앙 측정 장치는 Control Tower를 중심으로 하여 1) 개인, 2) 작업 현장, 3) 공단지역 등으로 구분을 하여 관리가 가능한 시스템이다. 1)개인측정의 경우 중앙에서 각 근로자의 현재 상황을 파악하여 행동지침을 내릴 수 있는 시스템이며, 이를 이용하여 출입여부 결정, 적정 호흡보호구 선택 여부 확인 등이 가능한 시스템이다. 2) 작업현장마다 특성을 가지고 있고, 발생이 가능한 측정 센서를 구비하여 이를 통제하는 시스템이다. 3) 공단지역의 경우 수시로 모니터링을 할 수 있는 시스템을 구비하여 상시 모니터링을 할 수 있도록 한다.



**[그림 40] 중앙 통제 측정 밀폐공간
질식재해 예방 시스템 개념도**

(3) 측정 외 방법들에 대한 검토

지금까지는 측정방법에 대한 검토를 하였는데, 측정도 매우 중요하지만 산업보건의 다양한 부분에도 첨단 기술을 이용할 수 있을 것으로 보인다. 현재 본 연구에서 개발하고 있는 사용자 허가형 개폐 시스템 (가칭)을 통하여 중앙에서 밀폐공간 내부 상시 모니터링 결과를 확인 후 교육을 받고 자격이 주어진 사람에게 문을 열수 있는 권한을 부여하고 그 이후 웨어러블/포터블 측정기로 다시 측정 후 작업을 할 수 있는 시스템 구축이 필요하다.



[그림 41] 밀폐공간 출입제어 시스템 개념도

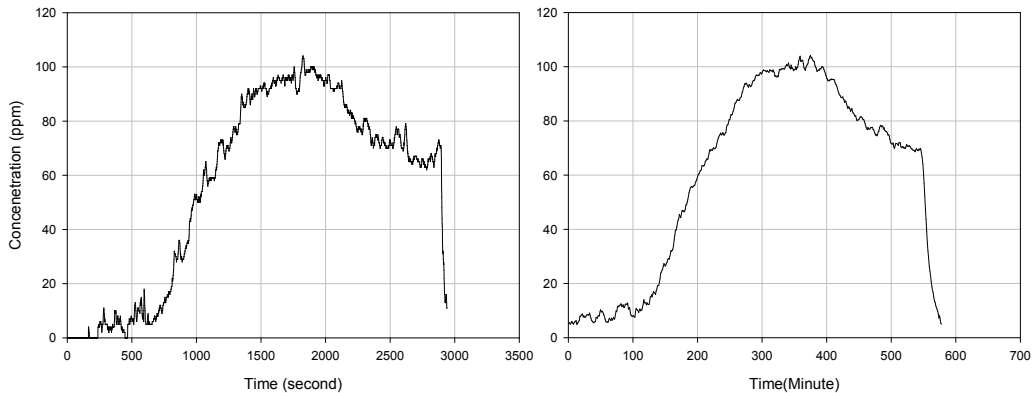
6) 현장평가

(1) 건설현장

건설현장에서의 현장평가는 동절기에 갈탄 등의 고체연료를 연소하는 환경이 만들어져야 하는데 연구기간과 일치하지 않아 실제 현장에서 평가하는 것은 어려웠다.

이를 대신하기 위하여 갈탄, 썬탄, 메탄올젤을 이용하여 발생원에 대한 평가를 발생원평가에서 실시하였고, 추가적으로 측정장치의 개발 이후 실험실 평가가 완료되어 실제 현장에서의 측정은 산소, 온습도의 통신으로 대체 하였다.

아래 그림에서 왼쪽은 상용화된 기기의 측정 결과이고 오른쪽은 이번 연구에서 개발하고 있는 측정기의 결과이다.



[그림 42] 기존 상용화된 기기와 개발중인 기기의 그래프 분포 비교

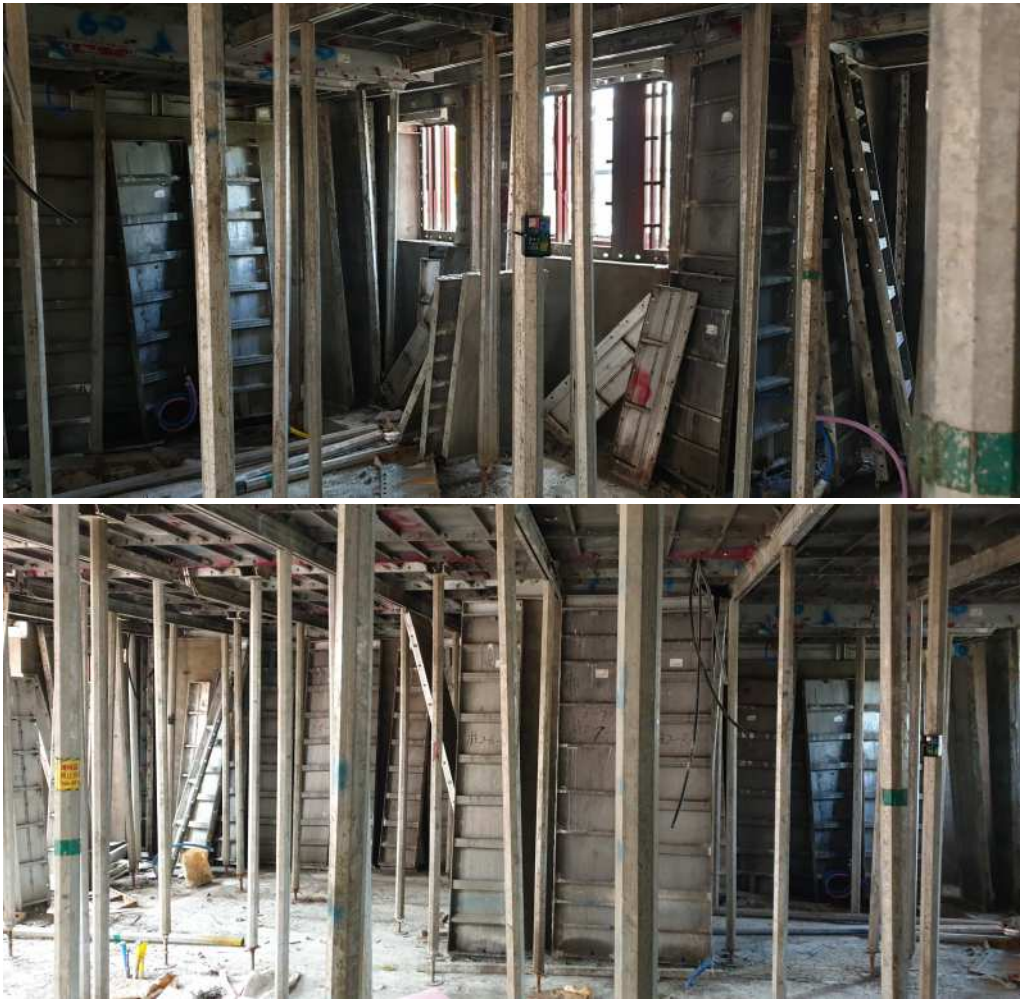
실제 건설현장에서 통신 평가와 측정 평가를 실시하였다.

<표 11> 현장 평가 대상 건설현장 정보

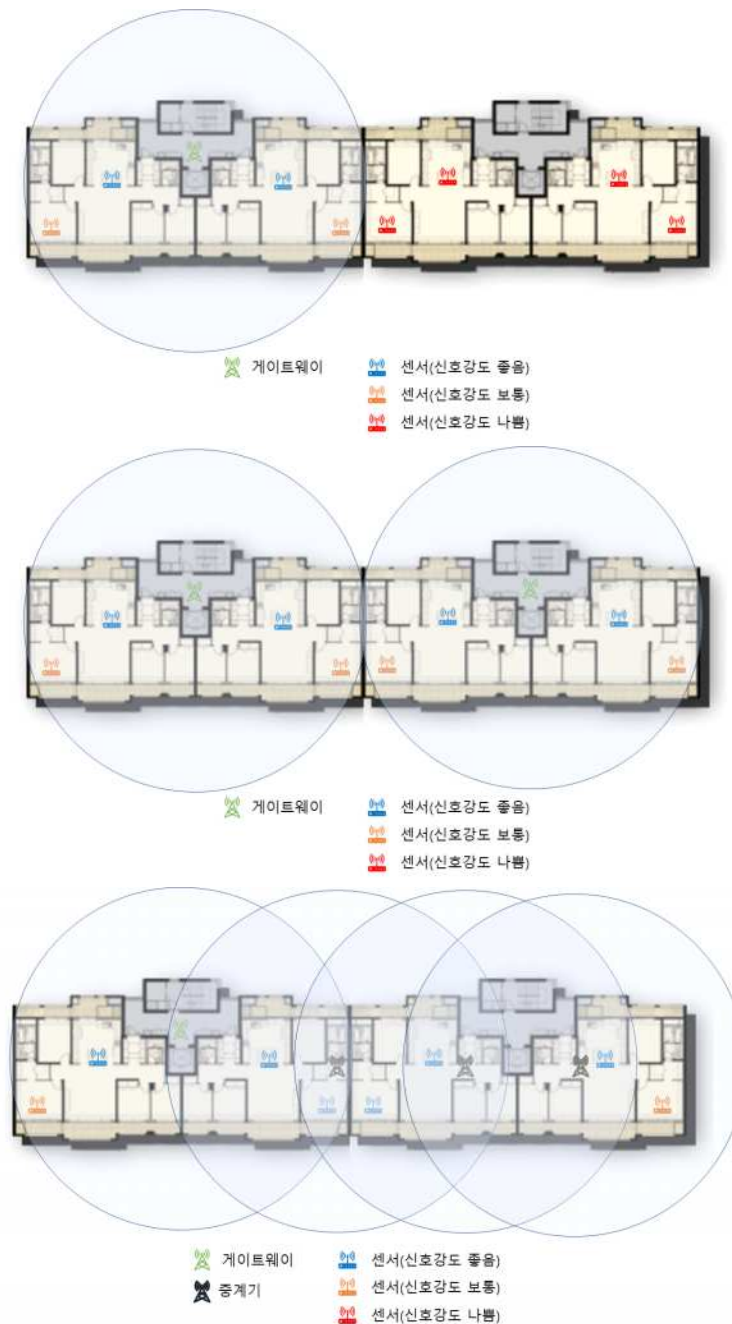
건설현장	A	B
용도	아파트	아파트
형태	관상형	타워형
평형	34 평	34 평

가) 건설현장 A

건설현장 A는 관상형 아파트이다. 개발된 측정기기를 평가하기 위하여 양 쪽 세대에 중심인 승강기 앞에 게이트웨이를 놓고 신호에 대한 평가를 하였다. 그 결과 이론상으로는 반경 50 m 까지 신호가 도달하지만, 실제 현장에서는 절반 수준인 약 25 m 까지 신호가 도달하였다. 가까운 쪽에서는 신호가 좋지만, 멀어지면 보통까지 가지만 사용하는데 문제는 없다. 이러한 문제는 일자형 아파트현장과 같이 거리가 먼 곳에서는 시공은 같이 하기 때문에 신호가 도달하지 못하여 신호강도가 나빠게 나올 수 있다. 이러한 경우 센서가 측정결과를 보내주지 못한다. 이때는 방법이 두 가지이다. 하나는 게이트웨이를 추가하거나, 다른 하나는 중계기를 설치하는 것이다. 게이트웨이는 유지비용이 발생하기 때문에 중계기를 사용하는 방법이 더 경제적이라고 할 수 있다.



[그림 43] 건설현장 A에서의 현장 평가 전경



[그림 44] 건설현장 A에서의 신호 도달범위

나) 건설현장 B

건설현장 B는 타워형 아파트이다. 건설현장 A와 마찬가지로 개발된 측정기기를 평가하기 위하여 세 개의 세대에 중심인 승강기 앞에 게이트웨이를 놓고 신호에 대한 평가를 하였다. 그 결과 이론상으로는 반경 50 m 까지 신호가 도달하지만, 실제 현장에서는 절반 수준인 약 25 m 까지 신호가 도달하였다. 가까운 쪽에서는 신호가 좋지만, 멀어지면 보통까지 가지만 사용하는데 문제는 없다. 판상형 아파트 보다는 거리가 멀지 않기 때문에 오히려 사용하기가 편리한 점이 있었다. 다만 거리가 멀어질수록 신호가 보통 이하로 줄어 들기 때문에 판상형 아파트 건설현장과 같은 방법으로 게이트웨이를 추가하거나, 중계기를 설치하는 것이다. 게이트웨이는 유지비용이 발생하기 때문에 중계기를 사용하는 방법이 더 경제적이라고 할 수 있다.



[그림 45] 건설현장 B에서의 현장 평가 전경



- | | |
|---|---|
|  게이트웨이 |  센서(신호강도 좋음) |
| |  센서(신호강도 보통) |
| |  센서(신호강도 나쁨) |



- | | |
|---|---|
|  게이트웨이 |  센서(신호강도 좋음) |
|  중계기 |  센서(신호강도 보통) |
| |  센서(신호강도 나쁨) |

[그림 46] 건설현장 B에서의 신호 도달범위

(2) 하수처리장

하수처리장의 경우에는 3곳에서의 현장평가를 실시하였다.

<표 12> 현장 평가 대상 하수처리장 정보

하수처리장	A	B	C
용도	오 폐수	오 폐수	오 폐수

가) 하수처리장 A

하수처리장 A는 오수와 폐수를 처리하는 공간이 함께 있었다. 최근 방수에 대한 보수공사를 하였으나, 황화수소가 발생하는 공정에 대해서는 보수를 하지 않아 밀폐공간으로서의 위험은 그대로 존재하였다.



[그림 47] 하수처리장 A

나) 하수처리장 B

하수처리장 B는 오수와 폐수를 동시에 처리하나 오수 처리의 기능을 주로 담당하는 공간이다. 바닥에는 다양한 파이프들이 지나가도록 설계가 되어 있었다.

가장 재래적이고 전통적인 오폐수처리장으로 되어 관리가 매우 필요한 밀폐공간이었고, 밀폐공간으로서 높은 위험성을 가지고 있는 공간이었다.



[그림 48] 하수처리장 B

다) 하수처리장 C

하수처리장 C는 오수와 폐수를 동시에 처리하나 2017년 완공되어 운영되고 있어 대부분 밀폐공정으로 되어 있었으나 근로자가 주기적으로 점검하고 활동하는 공간으로서 밀폐공간의 위험성을 가지고 있는 공간이었다.



[그림 49] 하수처리장 C

7) 로봇, 드론 등 캐리어 활용 방안

(1) 로봇, 드론 활용 방안

로봇과 드론을 활용하여 캐리어를 현장에 투입할 경우 이동성이 좋아지기 때문에 다양한 활동을 할 수 있다. 로봇과 드론에 부착된 측정 장치는 건설현장, 하수처리장 등 다양한 환경에서 이동하면서 측정을 하며, 측정된 자료를 실시간으로 근로자와 관리자에게 전송하여 현장상황을 알 수 있도록 해줄 수 있다.

로봇과 드론의 단점은 크게 두 가지로 볼 수 있는데 한 가지는 배터리의 문제이다. 배터리는 일장일단이 있다. 로봇이나 드론의 작동시간을 증가시키기 위해서는 더 높은 용량의 배터리가 필요하고 이는 배터리무게의 증가로 이어진다. 그렇게 되면 로봇이나 드론의 무게가 늘어나서 모터에 하중이 실리게 되고 다시 작동시간 감소라는 결과로 나타난다. 따라서 최적의 무게와 작동시간을 찾는 것도 매우 중요한 도전이다.

다른 한 가지는 장애물이 있을 때 피하여 지나갈 수 없는 경우이다. 현장에 로봇이나 드론을 투입할 때에는 현장 상황을 고려하여 재원을 만들고 돌아다니는 경로를 미리 정하고 운용을 하게 된다. 그러나 예기치 않은 경로에 들어선다던지, 갑작스러운 현장에 변화가 발생하면 드론이나 로봇은 운영이 되기 어렵다는 단점이 있다.

이와 같은 이유로 현장에서는 가급적 고정형 장치를 이용하는 것이 바람직하다고 생각하고, 현장 특성상 고정형 설치가 어려운 경우에는 로봇이나 드론 또는 그밖에 캐리어를 사용하는 것을 추천한다.

이에 따라 본 연구에서는 로봇과 드론과 다른 캐리어의 활용방안에 대하여 조사 및 연구를 해보았다.

<표 13> 로봇, 드론 캐리어 활용 및 가능성 여부

항목	로봇	드론
이동성	적합	적합
기술	가능	가능
통신	가능	가능
비용	높음	높음
하수처리장	적합	부적합
건설현장	보통	부적합

(2) 다른 방식의 캐리어 활용방안

위에서 언급한 로봇과 드론은 이동성면에서는 매우 활용도가 좋지만, 안정성 측면에서는 약점을 가지고 있다. 이를 극복하기 위한 방법으로 천장에 있는 레일을 이용한 캐리어나 케이블을 이용한 캐리어 도입을 검토 하였다. 그리고 2018년 연구에서 언급되었던 공형태의 측정로봇에 대한 개발 시도를 하였다.

레일이나 케이블을 이용한 캐리어의 경우 정해진 경로만 움직일 수 있다는 점이 있으나 그자체로 장점이 되어 다양한 환경에 안정적으로 활용할 수 있다. 로봇과 드론의 단점인 배터리와 장애물을 극복 할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 현장에서 실질적으로 활용이 가능하다. 레일이나 케이블의 경우에는 이미 현장이 고정되어 있는 하수처리장 등에서 활용이 가능하다. 건설현장의 경우에는 활용하기에는 어려운

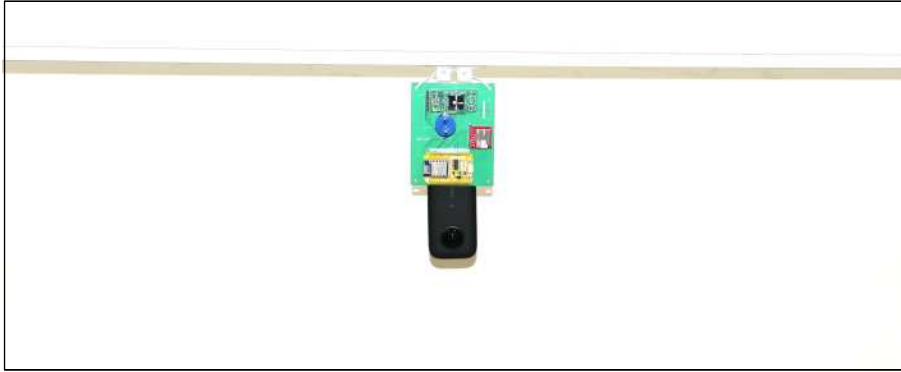
점이 있다.

<표 14> 다양한 캐리어 활용 및 가능성 여부

항목	천장형 레일	케이블	공
이동성	적합	적합	부적합
기술	가능	가능	가능
통신	가능	가능	가능
비용	높음	높음	매우 높음
하수처리장	적합	부적합	적합 (레일적용 시)
건설현장*	부적합	부적합	부적합
*건설현장은 고정형이 적합			

가) 천정 레일을 이용한 캐리어

레일을 이용한 캐리어는 레일을 미리 고정하여 측정하고자 하는 지점이 정해져있는 경우에 활용이 가능하다.



[그림 50] 개발된 측정장치를 레일 캐리어에 장착.

미리 설정해놓은 레일 상의 경로를 따라 움직이면서, 해당 지점의 농도를 측정하여 근로자 및 관리자에게 전송할 수 있다는 장점이 있다. 추가적으로 360도를 확인 할 수 있는 카메라를 설치하여 현장 상황을 360도로 확인할 수 있는 기능도 추가하였다.

나) 케이블을 이용한 캐리어

케이블을 이용한 캐리어는 레일을 이용한 캐리어보다는 유연한 설치를 할 수 있기 때문에 건설현장에서도 사용이 가능하다고 생각한다. 레일을 이용한 캐리어는 레일을 미리 고정하여 측정하고자 하는 지점이 정해져있는 경우에만 사용이 가능하나, 케이블을 이용하면 언제 어디서든 설치와 분해가 쉽고 빠르게 진행될 수 있다는 장점을 가지고 있다.

마찬가지로 360도 카메라를 설치하여 현장에 대한 상황 확인을 실시간으로 할 수 있다는 장점을 가지고 있다.



[그림 51] 개발된 측정장치를 케이블 캐리어에 장착.

개발된 케이블을 이용한 캐리어의 경우 최장 50 m 까지 확장할 수 있기 때문에 다양한 환경에서의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

더욱 다양한 환경에서의 현장평가가 필요하겠으나 이번연구에서 총 3개의 하수처리장에서 현장평가를 해본 결과 케이블 캐리어는 하수처리장과 같이 정형화되어 있지 않은 장소에 적합하며, 언제든지 설치와 철수가 가능한 공간에 적합한 것으로 결론지었다.

하수처리장	전경
A	
B	
C	

[그림 52] 하수처리장 현장평가

다) 공 로봇을 이용한 캐리어와 바닥 레일

현장에서 돌아다니는 공을 이용한 캐리어를 개발 하였다. 2018년에 개발된 공 형태의 캐리어 보다 움직임과 기능이 향상되었다. 밀폐공간 유해가스 측정장치를 탑재하고, 카메라를 설치하여 실시간으로 현황을 파악하고, 농도에 따라 색상이 변하는 것을 구현할 수 있도록 개발 되었다.



[그림 53] 개발된 공 형태의 캐리어와 제어 앱

현장에서 공형태의 캐리어에 대하여 이동성 테스트를 실시하였다. 하수처리장 A에서는 바닥이 미끄러워 공이 굴러다니기에 적합하였다. 하지만 하수처리장 B의 경우 바닥 표면이 매끄럽지 않아서 직선으로 움직이기가 어려웠고, 파이프들이 설치가 되어 있어 이동범위에 한계가 있었다. 하수처리장 C의 경우에는 바닥 표면은 매우 미끄러워서 이동하는 데는 문제가 없었으나 하수처리장 B와 마찬가지로 중간에 파이프와 맨홀 뚜껑 등이 자리 잡고 있어서 이동을 하는데 어려움이 있었다.

하수처리장 A	하수처리장 B	하수처리장 C
		
		

[그림 54] 하수처리장에서의 현장 평가

건설현장에서 공형태의 캐리어에 대하여 이동성 테스트를 실시하였다. 건설현장도 매우 다양한 바닥형태를 가지고 있었다. 건설현장 A에서는 콘크리트 양생 중인 현장인데 중간 서포트가 설치되어 있고 자재들과 폐기물들이 곳곳에 자리 잡고 있고 비가 온 다음에 배수가 되지 않은 상태여서 캐리어가 손상될 위험이 있었다. 또한 곳곳에 자재들이 있어 이동하기가 쉽지 않은 환경이었다.

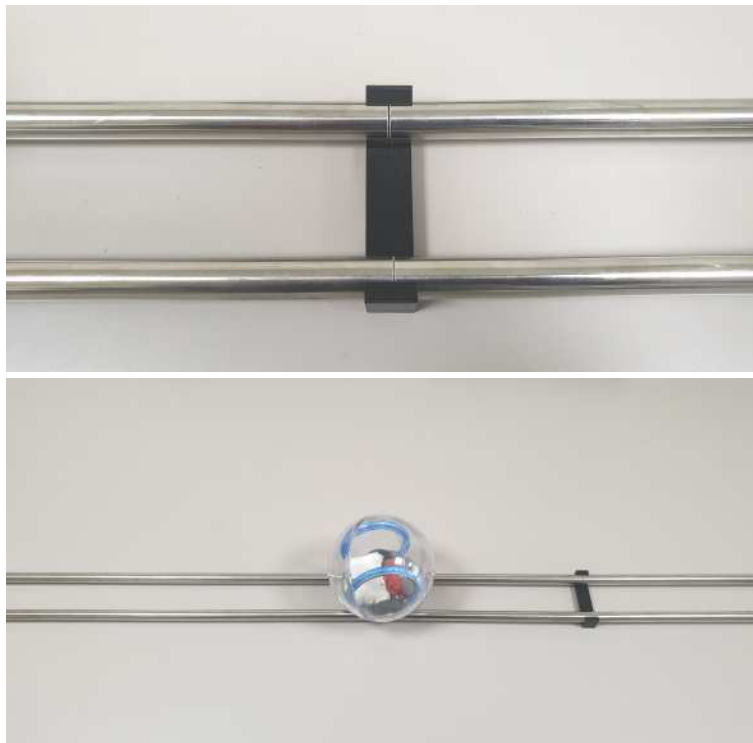
건설현장 B에서는 콘크리트 양생 중인 현장인데 중간 서포트가 설치되어 있고 자재들과 폐기물들이 곳곳에 자리 잡고 있어 이동이 매우 어려운 환경임을 확인 하였다.



[그림 55] 건설현장에서의 현장 평가

공형태는 움직임이 자유롭다는 장점이 있다. 하지만 방수가 되지 않는다는 측면에서는 측정장치에 손상이 갈 수도 있다는 점이 있다.

대안은 레일을 설치하여 정해진 루트를 돌아다니는 것을 추천한다. 건설현장의 경우 설치를 하는데 공간도 매우 협소할 뿐 더러 설치가 어려운 장소도 많이 있기 때문에 추천하지 않고, 하수처리장의 경우에는 미리 레일을 설치하면 충분히 가능성이 있다고 판단된다.



[그림 56] 공형태의 활용방법인 레일 식 측정 캐리어 (안)

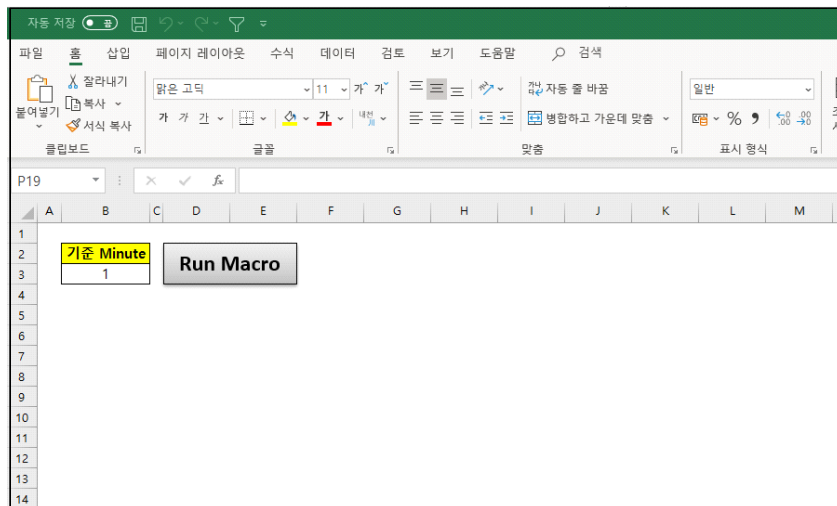
3. 직독식 측정장비 자료분석 및 밀폐공간 유해가스 모니터링

1) 자료분석

(1) 통계분석

- 측정 간격에 대한 조사

밀폐공간 내에서 측정하는 적정 간격에 대하여 다양한 각도에서 분석을 하였다. 현재 측정장치는 1초에 한 번씩 데이터를 수집하고 있는데 데이터의 양이 많아 질 경우 분석할 때에도 Microsoft사의 Excel에서는 파일을 여는데 한계가 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서 측정은 1초에 한 번씩 하고 측정시간을 조절하거나 전용 소프트웨어를 개발하는 것이 필요하다고 판단된다.



[그림 57] 시간별로 데이터를 가공하도록 개발된 Software

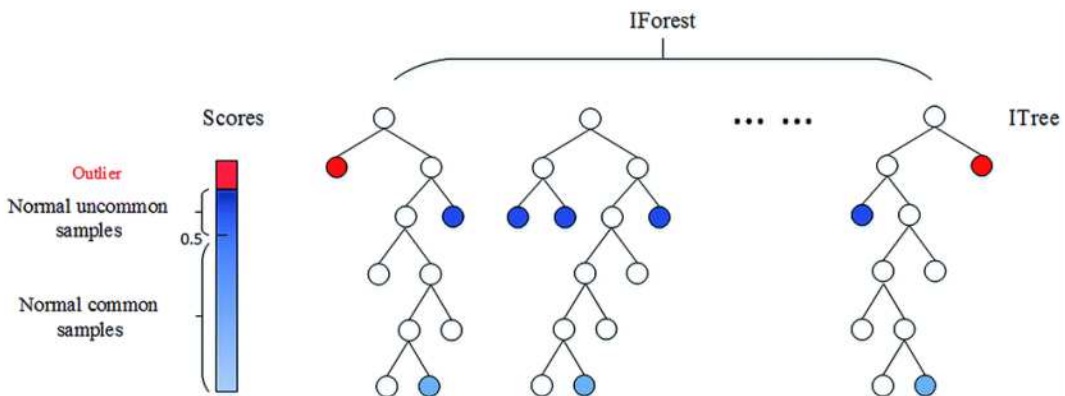
- 통계기법 조사

밀폐공간 유해가스 측정장치에서 생성되는 자료를 이용한 통계기법은 기술통계와 비교 또는 이상치 검증이 주된 내용이다. 밀폐공간의 경우 급성중독이 문제가 되기 때문에 최대 농도가 가장 중요한 지표가 될 것이다. 따라서 다양한 통계기법을 통하여 밀폐공간 내 유해가스를 적절히 표현할 수 있는 방법은 최대농도를 표기 하는 방법이다.

데이터를 처음 받으면 기본적으로 기술통계 분석을 할 수 있도록 한다. 최소, 최대, 평균, TWA, STEL을 확인하고 이에 따라 업무 매뉴얼을 만들어 행동지침을 개발 할 필요가 있다.

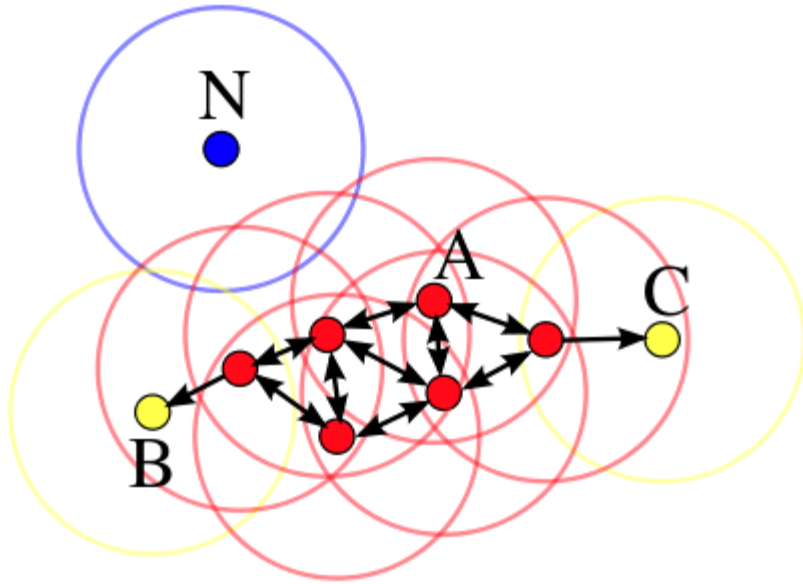
위에서 언급했던 것과 같이 밀폐공간에서는 최대 농도가 매우 중요하기 때문에 이를 잘 구분할 필요가 있고, 혹시 이상치가 발견되었을 때에는 해당 농도가 실제 값인지 아니면 오류에 의한 것인지 반드시 확인을 할 수 있도록 한다.

도입할 수 있는 방법 중 하나는 Isolation Forest 이론이다. 다양한 환경에 따라 이상치를 검증하는 방법으로 밀폐공간에서 발생한 유해가스의 농도와 다양한 환경요소를 입력하여 분석에 활용하는 방법이다.



[그림 58] Isolation Forest을 활용한 이상치 분석

Dbscan(Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise)방법을 활용할 수도 있다. 주로 발생할 수 있는 농도를 클러스터링 하여 이상치가 발생시 이에 따른 경고를 줄 수 있는 이론이다.



[그림 59] Dbscan을 이용한 이상치 분석

2) 직독식 측정장비를 활용한 밀폐공간 유해가스 모니터링 방안

(1) 직독식 측정장비 모니터링 방안 조사

측정자격에 대한 규제 조사가 필요하다. 현재는 산업안전보건기준에 관한 규칙 제619조의2(산소 및 유해가스 농도의 측정) ① 사업주는 밀폐공간에서 근로자에게 작업을 하도록 하는 경우 미리 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 자로 하여금 해당 밀폐공간의 산소 및 유해가스 농도를 측정하여 적정공기가 유지되고 있는지를 평가하도록 하여야 한다.

1. 관리감독자
2. 법 제15조제1항에 따른 안전관리자 또는 법 제16조제1항에 따른 보건관리자
3. 법 제15조제4항에 따른 안전관리전문기관
4. 법 제16조제3항에 따라 준용되는 법 제15조제4항에 따른 보건관리전문기관
5. 법 제42조제4항에 따른 지정측정기관

② 사업주는 제1항에 따라 산소 및 유해가스 농도를 측정한 결과 적정공기가 유지되고 있지 아니하다고 평가된 경우에는 작업장을 환기시키거나, 근로자에게 공기호흡기 또는 송기마스크를 지급하여 착용하도록 하는 등 근로자의 건강장해 예방을 위하여 필요한 조치를 하여야 한다.

라고 하고 있다. 하지만 이번 연구에서 개발중인 측정기를 현장에 도입할 때에는 이에 대한 책임소재를 법적으로 확인이 필요하다.

상시 모니터링을 할 때 데이터를 인정해줄 것인지에 대한 검토도 필요하다.

우리나라 고용노동부에서는 최근 질의회시를 통하여 무선 측정자료를 인정할 것인지에 대한 논의가 있었다. 여기서의 쟁점은 직접 측정을 하였는지에 있다. 그러나 직접측정이라는 것이 해석하기에 따라 다른데 앞에서 언급한 자격이 있는 사람이 측정을 하는 것인데 현장에 가서 하느냐 아니면 사무실에서 원격으로 하느냐에 차이에 있다.

장단점이 있겠지만 측정장치가 신뢰성이 있다면 충분히 가능하고, 최근 고용노동부의 해석도 측정장치가 잘 작동된다는 가정만 있으면, 어떠한 방식으로 측정을 하더라도 그 수치를 확인하는 사람은 자격이 있는 사람이 할 것이고 이것은 법적으로 문제는 없다 라는 것이다.

이는 매우 고무적인 해석으로 물론 여러 가지 담보가 된다는 조건이 있어야겠지만, 향후 기술발전에 큰 도움이 되는 행정적 결정이라고 판단된다.

<답변내용>

안전보건규칙 제619조의2 규정은 단순히 특정한 사람을 통해 측정을 하도록 하는 규정이 아니라 관리감독자나 안전보건관리자 등 권한과 전문성을 가진 자로 하여금 유해가스 측정 시스템을 유지, 관리하여 신뢰할 만한 측정이 이뤄지도록 하고 이를 통해 실효성 있는 통제를 할 수 있도록 하는 것이 핵심이라 할 것입니다.

따라서 안전보건규칙 제619조의2 각호의 사람들에 의해 ①무인 가스측정시스템의 센서, 통신설비 등이 적절히 유지·관리되고, ②측정 결과값에 따라 효과적인 작업통제가 이뤄지는 체계가 구축·시행된다면 위 규정에 부합한다고 할 수 있겠습니다.

[그림 60] 고용노동부의 질의 회시

하지만 여전히, 오작동, 판단 오류 등 다양한 위험요소가 존재하는 것은 여전히 우려스럽다.

4. 외국 센서기술 안전보건규정/안전성/인증조직 사례 검토

1) 외국 안전보건 규정 조사

미국, 영국, 우리나라의 안전보건 규정을 검토하였다. 미국은 OSHA에서 Occupational Safety and Health Standards 1910.146에서 허가가 필요한 밀폐공간(Permit-required confined spaces)이라는 규정으로 밀폐공간 출입을 허가 받는 상황에 대하여 규정을 하고 있다. 측정 가스는 산소는 기본적으로 측정을 하고 다른 가스들은 상황에 맞게 측정하도록 하고 있다. 영국 HSE에서는 The Confined Spaces Regulations 1997을 통하여 밀폐공간에 대하여 관리를 하고 있다. 미국과 마찬가지로 산소농도를 기본으로 측정을 하고 상황에 맞게 다른 가스들은 측정을 하도록 하고 있다. 우리나라에서는 산업안전보건법(산업안전보건기준에 관한 규칙)에서 관리를 하고 있는데 산소농도와 황화수소, 일산화탄소, 탄산가스와 같이 가스를 규정하고 있다.

미국과 영국제도의 공통점은 산소농도를 제외한 나머지 측정은 전문가의 판단에 맡긴다는 것이다. 따라서 매우 유연한 적용이 가능하다. 하지만 사고가 발생했을 때 큰 책임을 지우게 된다. 우리나라에서는 정해진 물질만 측정을 하도록 하고 있는데, 이는 전문가가 개입할 여지를 매우 좁히는 제도라고 생각한다. 하지만 미국과 영국과의 차이는 법의 체계의 다르기 때문에 발생하는 차이라고 할 수 있다.

미국과 우리나라제도의 공통점은 밀폐공간 내부에 들어가서 일을 할 수 있도록 허가를 받는 시스템이고, 영국의 경우 기본적으로 내부에 들어가서 일을 하지 못하게 하고, 하게 되었을 때 보호구를 완벽히 착용하고 작업을 하도록 하는 것이 가장 큰 차이점이라고 할 수 있다.

<표 15> 미국, 영국, 우리나라의 밀폐공간에 대한 안전보건규정 비교

	US.OSHA	U.K.HSE	우리나라
법률	Occupational Safety and Health Standards 1910.146	The Confined Spaces Regulations 1997	산업안전보건법/ 산업안전보건기준 에 관한 규칙
규정된 가스	산소 및 상황에 맞게	산소 및 상황에 맞게	산소, 일산화탄소, 황화수소, 탄산가스, 가연성가스

영국법을 보면 밀폐공간에 들어가지 사람이 들어가지 못하도록 금지를 하는 표현을 사용하고 있다(No person at work **shall** enter a confined space to carry out work for any purpose unless it is not reasonably practicable to achieve that purpose without such entry). 영국법에서는 ‘shall’이라는 표현을 통해 특정 행위에 의무를 부여 하도 명령어(imperative language)를 사용하고 있다. 하지만 합당한 방법을 강구하면 들어갈 수 있도록 하고 있다. ‘shall not’ 같은 법적으로 특정한 행위를 하지 못하도록한 금지어(prohibitive language)와는 구분을 하고 있다(Bowers, 1989). 하지만 여전히 영국법의 shall, 미국법의 shall, 또한 해석하는 학자들 간에도 shall에 대한 표현은 다르지만 최근에 권고되고 있는 ABC rule (Preferred)에 따르면 과거 영국에서 has a duty to 라는 표현 보다는 is required to 라는 표현에 가깝게 해석을 하고 있다(유정주, 2015).

2) 드론, 로봇, 무선 측정 데이터 인정 등 조사

드론, 로봇 등이 측정한 데이터를 인정하는지에 대한 논란은 아직 진행형이다. 왜냐하면 책임소재가 불분명하기 때문이다. 따라서 아직 어느 나라에서도 드론, 로봇, 무선측정에 대한 데이터 인정을 하지 않고 있다. 하지만 위험한 공간이나 신뢰도 있는 측정에 대해서는 참고용, 보조 수단으로 충분히 사용이 가능할 것으로 판단된다.

이러한 무선측정시스템에 대한 인증을 살펴보면 다양한 인증이 필요함을 알 수 있다¹¹⁾. 특히 전파에 대한 인증이 필수적인데 우리나라에서는 전파법에 대한 인증이 필요하다. 적합성인증제도로 이를 관리하고 있다. 적합인증, 적합등록, 잠정인증으로 나누어져 있으며, 적합인증은 전파 혼·간섭 위해, 인명안전과 인체 등에 유해한 영향을 주거나, 통신망의 안전 및 서비스에 영향을 주는 기저재에 해당되며 이를 고려하여 지정시험기관에서 시험을 한 결과를 정부에서 심사인증을 해주는 형태이고, 적합등록은 범용기기(컴퓨터, 주변기기, 방송수신기, 전기용품 등)에 대하여 지정시험기관이 시험을 하여 결과를 등록하거나, 산업 및 측정용 기기(계측기, 산업용기기, 콘넥터 등)는 제조사 자체시험결과를 등록하여 하도록 하고 있다. 이는 제조사와 공급사의 시험비용 부담을 줄이고 시장경쟁력을 위하여 규제를 완화해준 것으로 보여진다. 이때 중요한 것은 혼/간섭 영향이나 통신망의 위해 정도가 낮은 기저재에 대하여 해당된다. 잠정인증은 적합성평가기준이 마련되지 않은 신규개발기기에 대하여 해당이 된다.

필요에 따라서는 적합성평가 면제를 받기도 한다. 면제 대상은 총 14가지 조건 중 하나만 만족을 해도 가능하다.

1. 적합성평가를 위한 시험, 제품의 품질·성능 검사 등에 사용하기 위한 기저재(10대)

11) 권중원, 김희식, 사물인터넷(IoT) 디바이스 국내 적합성평가 동향 및 사례, 전자공학회지, 2014.8

2. 제품 및 방송통신서비스의 연구 및 기술개발 등에 사용하기 위한 기자재(100대)
3. 판매를 목적으로 하지 않고 신제품 홍보 등을 위한 전시회 등에 진열하기 위한 기자재(수량 미정)
4. 판매를 목적으로 하지 않고 국제회의 및 국제경기대회 등에 직접 사용하기 위한 기자재(수량 미정)
5. 판매를 목적으로 하지 않고 국내 시장 조사를 목적으로 수입하는 견본품용 기자재(3대)
6. 외국의 기술자가 국내산업체 등의 필요에 따라 일정기간 내에 반출하는 조건으로 반입하는 기자재(수량 미정)
7. 적합성평가를 받은 기자재의 유지·보수를 위해 제조 또는 수입되는 동일한 구성품 또는 부품(수량 미정)
8. 군용으로 사용할 목적으로 제조하거나 수입하는 기자재(수량 미정)
9. 판매를 목적으로 하지 않고 개인이 사용하기 위해 반입하는 기자재(1대)
10. 그 밖에 전과환경 및 방송통신환경에 미치는 영향 등을 고려하여 적합성평가의 면제가 필요한 것으로 미래창조과학부장관이 인정하여 고시하는 기자재(수량 미정)
11. 국내에서 제조하여 외국에 전량 수출할 목적으로 제조하는 기자재
12. 외국에 재수출하거나 외국에 납품할 목적으로 국내 반입하는 기자재
13. 외국에 수출한 제품으로서 수리 또는 보수를 위해 반출을 조건으로 국내에 반입되는 기자재
14. 국외에서만 사용할 목적으로 제조하거나 수입하는 기자재

추가적으로 우리나라에는 IoT 보안인증(IoT-SAP)을 한국인터넷진흥원(KISA)에서 실시하고 있다. 사물인터넷(IoT) 제품과 연동 모바일 앱에 대하여 일정한 수준의 보안을 갖추었는지를 시험하여 기준에 충족하면 인증서를 발급해 주는 서비스이다. 사물인터넷 제품의 다양한 유형 및 인증 수요를 반영하여 3개의 등급(Lite, Basic, Standard)으로 구분하여 시행중에 있다. 인증은 무료로 이루어지고 있으며, 국외인증과 상호인정이 아직은 이루어지지 않지만, 향후 가능성을 고려하여 국제적 요구도에 맞추어 진행중에 있다. 따라서 향후에는 안전보건 측면에서도 이러한 제도를 벤치마킹하여 안을 개발해야할 필요가 있다고 판단된다.



[그림 61] 우리나라 한국인터넷진흥원의 IoT 보안인증제도 체계.

국외에서도 아직 IoT에 대한 인증을 하지 않고 있다. 그러나 각 국가마다 우리나라와 같이 전파인증 등을 통하여 이를 대신하고 있다.

IV. 결 론

이번 연구에서는 밀폐공간 질식재해를 예방하기 위하여 침단센서를 이용하여 유해가스 측정장치를 개발 하였다.

1. 밀폐공간 질식재해 선행 연구 및 통계분석을 통한 측정장치 개발 우선순위 선정

2011년부터 2017년 까지 밀폐공간에서 발생한 사고를 분석해보면, 건설현장에서의 일산화탄소중독과 하수(오, 폐수)처리장에서의 황화수소중독이 사고의 50%이상을 차지하였다. 추가적으로 산소농도를 측정하는 것은 기본적으로 갖추어야 하기 때문에 동시에 측정 할 수 있도록 하였다. 이에 따라 측정장치 개발의 우선순위를 산소와 일산화탄소, 그리고 산소와 황화수소를 측정하는 장치 개발에 초점을 두고 개발을 하였다.

2. 밀폐공간 특성을 반영한 유해가스 측정장치(시제품) 개발

측정장치는 센서에서 가스를 감지하고 통신을 통하여 데이터를 전송하고 이를 근로자나 관리자가 볼 수 있도록 한다.

센서는 측정범위, 사용기간(수명), 분해능, 사용온도, 응답시간, 안정화시간 등 다양한 요소들을 고려하여 선정하였다. 통신은 가장 안정적으로 운용할 수 있는 Wi-Fi를 이용하여 시스템을 구축하였다.

근로자나 관리자가 볼 수 있는 모바일 앱과 웹을 함께 제작하여 중

양에서의 관리 및 개인 단위에서의 경보가 함께 이루어지도록 하였다. 개인단위에서는 웨어러블 장치를 통하여 표시가 가능하도록 구성 하였다.

최종적으로 밀폐공간에서 산소와 일산화탄소, 또는 산소와 황화수소를 측정하는 측정장치를 개발하였고, 현장에서 평가를 실시하였다.

캐리어는 로봇과 드론에 시스템화 하는 부분을 검토 하였고, 새로운 레일과 케이블, 공로봇 시스템을 도입하여 실제 현장에 투입을 할 수 있도록 현장평가를 실시하였다.

밀폐공간은 다양한 환경을 가지고 있어 정형화된 현장이 없기 때문에 정형화된 캐리어의 개발은 매우 어렵다. 하지만 현장에 맞는 캐리어를 이번연구에서 다양한 관점으로 평가하여 제안 하였다.

건설현장에서는 고정형을 추천한다. 왜냐하면 콘크리트 양생 작업 특성상 바닥이나 천장에 장애물이 많이 있기 때문에 설치가 어렵고, 대신에 고정형으로 양생 전에 설치를 하고 양생 후에 수거를 하는 방식을 제안한다.

오폐수처리장의 경우에는 이미 기구물이 설치가 되어 있는 상태이기 때문에 천장에 레일을 달거나 케이블을 설치하는 것이 적합하다. 케이블을 더 선호하는 이유는 설치비용이 낮고 언제든지 위치 이동이 가능하다는 장점이 있기 때문에 케이블 방식을 제안한다.

이번 연구에서는 건설현장에서의 산소, 일산화탄소, 오폐수처리장에서의 산소, 황화수소를 특정하여 적용 가능성을 검증하였고, 향후에는 양돈, 음식물 발효, 처리 등 다양한 발생원에서의 검증이 필요하다.

공형태의 측정기는 단점을 보완한다면 새로운 형태의 측정기로 활용이 될 수 있다고 판단된다. 로봇이나 드론은 아직은 기술적 한계로 인하여 활용이 어려우나 향후 산업안전보건연구원에서의 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

3. 직독식 측정장비 자료분석 및 밀폐공간 유해가스 모니터링

자료분석 및 통계분석에 있어서는 이번연구에서는 Software를 직접 개발하여 시간간격에 대한 해석을 용이하게 하였다. 다양한 기기에서 생성되는 측정자료를 분석할 때 시간간격 조정을 쉽고 정확하게 할 수 있도록 하였다. 사용하고자 하는 통계는 기술통계로 최대, 최소, 평균, TWA, STEL 값을 사용하여 현황을 파악하는 것이 필요하다.

이상치의 경우에는 기본적으로 실제 이상치 여부를 확인하는 것이 중요하고, 다양한 이론을 도입해볼 필요가 있다고 판단된다.

산업보건 분야에서 직독식 측정기기에 대한 도입 역사가 길지 않기 때문에 지속적 연구가 필요한 부분이다.

직독식 측정장비를 이용하여 측정하였을 때 자격에 대한 부분을 검토하였다. 현재는 1. 관리감독자, 2. 안전관리자 또는 보건관리자, 3. 안전관리전문기관, 4. 보건관리전문기관, 5. 지정측정기관으로 되어 있는데, 이번 연구에서 개발된 측정장비는 어떻게 법적으로 인정을 받을 수 있는지에 대한 검토를 하고 있다.

최근 고용노동부에서는 질의회시를 통하여 무선측정자료를 인정할 것인지에 대한 답변이 있었다. 결론적으로 측정장치가 신뢰성이 있다면 충분히 인정이 가능하고, 어떠한 방식으로 측정을 하더라도 자격자가 그 수치를 확인한다면 법적으로 문제는 없다라는 해석을 내놓았다.

이는 조심스럽지만 매우 고무적인 해석으로 향후 산업보건 분야에서 무선측정이나 기술발전에 큰 도움이 되는 행정적, 제도적 진일보라고 판단된다. 하지만 여전히, 오작동, 판단 오류 등 다양한 위험요소가 존재하는 것에 대한 연구는 필요하다.

4. 외국 센서기술 안전보건규정/안전성/인증조직 사례 검토

외국에서 센서기술에 대한 안전보건규정은 아직 없다. 미국과 영국의 경우 법을 제정함에 있어 매우 보수적으로 접근을 하기 때문에 아직 우리나라에 비해 이러한 연구도 많이 진행되지 않고 있다. 또한 배경에는 밀폐공간에 대한 관리를 우리나라보다 먼저 시작을 하였고, 상당히 많은 부분에서 해결이 되어 우리나라와 같이 관심을 가지고 있지 않는다. 따라서 밀폐공간 유해가스 측정장치 개발부분에 있어서는 우리나라가 전 세계적으로 앞서가는 부분이라고 할 수 있다. 측정장치에 대한 안전보건분야에 인증도 아직 어느 나라에서도 하지 않고 있기 때문에 센서는 기존의 측정기 인증에 준하여 진행을 해야 한다.

V. 참고문헌

- 강명구. 아무도 알려주지 않은 4차 산업혁명 이야기. 키출판사 2018
- 고용노동부. 사무실 공기관리 지침. 2015
- 김동현, 김충일. 소방활동을 위한 밀폐공간 UWB 무선통신 측위성
능 평가. 한국화재소방학회. 2017;31(5):117-122
- 김동훈, 장태정. 역청탄 적재된 화물창에서 발생한 산소결핍에 의
한 질식사, 동국대학교 의과대학 병리학 교실. 2004
- 김동훈, 김기권, 장태정 등. 목재가 선적된 선창에서 발생한 산소
결핍에 의한 질식사. Korea. J. Legal. Med, 2001
- 김미경, 박연신, 정용. VOCs 측정 및 VOCs가 인체에 미치는 영
향, Analytical science & Technology, 2001
- 김진호, 건설 시설물에서 작업자의 질식발생과정의 유형화를 통한
질식방지 사전 점검 방안, 대한건축학회연합논문집 2017
- 김형수 등. 혈중 및 호기 일산화탄소를 이용한 일산화탄소 헤모글
로빈농도간의 관련성 연구, 동아대학교, 2001
- 노병국, 스마트폰 기반 산소 결핍 모니터링 장치, 한국안전학회지,
2015
- 박충기 등. 단무지공장에서 발생한 질식 사고의 원인과 방사선학
적 소견: 증례보고 및 가스분석 결과, 1994

산업안전보건연구원, 산소결핍재해 예방을 위한 시스템적 접근, 한국산업안전공단, 2007

산업안전보건연구원, 밀폐공간 작업종류별 질식재해 요인 파악 및 예방대책 연구, 한국산업안전공단, 2008

안무정. 4차산업혁명을 주도할 6가지 코드(코딩과 디자인으로 미래를 설계하는 법). 나비의활주로;2018

유계목, 박현희, 정광재. 밀폐공간 질식재해 통계현황 분석, 한국산업보건학회지. 2009;19(4):363-369.

이미향, 김창기. 쉽게 따라하는 IoT 서비스 만들기. 정보문화사;2018

정지연, 강태선, 이승길, 박해동, 김기연. 사업장 무작위 선정 및 불시측정 방식을 통한 작업환경측정제도 신뢰성 제고 방안. 한국산업보건학회지, 2017;27(2):105-114.

조성실, & 홍익표. 다양한 건축 자재에 대한 전파 투과특성 측정. 한국통신학회 학술대회논문집, 2017;816-817.

최재규, 이준혁. 아두이노 상상을 현실로 만드는 프로젝트. 영진닷컴;2018

최진기. 한권으로 정리하는 4차 산업혁명. 이지퍼블리싱. 2018

한국무역협회, 글로벌 웨어러블기기 시장. 2017

유정주. 한국 법령 번역에서 ‘shall’의 사용에 대한 고찰: 비교 코퍼스 분석 결과를 중심으로, T&I review. 2015

- Bowers, F. Linguistic Aspects of Legislative Expression. Vancouver: University of British Columbia Press. 1989
- Annanouch, F. E., Haddi, Z., Vallejos, S., Umek, P., Guttman, P., Bittencourt, C., & Llobet, E. Aerosol-assisted CVD-grown WO_3 nanoneedles decorated with copper oxide nanoparticles for the selective and humidity-resilient detection of H_2S . ACS applied materials & interfaces, 2015;7(12):6842-6851.
- Botti, L., Ferrari, E., & Mora, C. Automated entry technologies for confined space work activities: A survey. Journal of occupational and environmental hygiene, 2017;14(4):271-284.
- Capuska, S., Brecka, S., Kosnac, S., & Martinkovic, J. Manipulator robotics in use for decommissioning of a-1 nuclear power plant. In Advanced Robotics, 2005. ICAR'05. Proceedings., 12th International Conference on IEEE.
- Cho, S., Lee, J. S., Jun, J., Kim, S. G., & Jang, J. Fabrication of water-dispersible and highly conductive PSS-doped PANI/graphene nanocomposites using a high-molecular weight PSS dopant and their application in H_2S detection. Nanoscale, 2014;6(24):15181-15195.

- Dandan, K., Ananiev, A., Kalaykov, I. SIRO: The silos surface cleaning robot concept. In Mechatronics and Automation (ICMA), 2013 IEEE International Conference on IEEE.
- Deng, S., Xu, X., Li, C., Zhang, X. Research on the oil tank sludge cleaning robot system. In Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2010 International Conference on IEEE.
- Faina, A., Souto, D., Deibe, A., Lopez-Pena, F., Duro, R. J., Fernández, X. Development of a climbing robot for grit blasting operations in shipyards. In Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on IEEE.
- Grieco, L. A., Rizzo, A., Colucci, S., Sicari, S., Piro, G., Di Paola, D., Boggia, G. IoT-aided robotics applications: Technological implications, target domains and open issues. Computer Communications, 2014;54:32-47.
- Guth, U., Vonau, W., Zosel, J. Recent developments in electrochemical sensor application and technology – a review. Measurement Science and Technology, 2009;20(4):042002.

- Joseph, P., SCG, K. D., Lakshmanan, S., Kinoshita, T., & Muthusamy, S. Colorimetric sensors for rapid detection of various analytes. *Materials Science and Engineering: C*, 2017;78:1231-1245.
- Klaus Schwab. 클라우드 슈밥의 제4차 산업혁명 THE NEXT. 새로운 현재; 2018
- Kovacic, Z., Balac, B., Flegaric, S., Brkic, K., & Orsag, M. Light-weight mobile robot for hydrodynamic treatment of concrete and metal surfaces. In *Applied Robotics for the Power Industry (CARPI)*, 2010 1st International Conference on IEEE.
- Kroll, A. V., Smorchkov, V., Nazarenko, A. Y. Electrochemical sensors for hydrogen and hydrogen sulfide determination. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1994;21(2):97-100.
- Kolmakov, A., Zhang, Y., Cheng, G., & Moskovits, M. Detection of CO and O₂ using tin oxide nanowire sensors. *Advanced Materials*, 2003;15(12):997-1000.
- Kumar, N., Bhalla, V., Kumar, M. Recent developments of fluorescent probes for the detection of gasotransmitters (NO, CO and H₂S). *Coordination Chemistry Reviews*, 2013;257(15-16):2335-2347.

- Kim, J., & Yong, K. Mechanism study of ZnO nanorod-bundle sensors for H₂S gas sensing. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2011;115(15):7218-7224.
- Lee, D., Lee, S., Ku, N., Lim, C., Lee, K. Y., Kim, T., & Kim, J. Development and application of a novel rail runner mechanism for double hull structures of ships. In *Robotics and Automation*, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on IEEE.
- Li, Z., Ma, S., Li, B., Wang, M., & Wang, Y. Design and basic experiments of a transformable wheel-track robot with self-adaptive mobile mechanism. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2010 IEEE/RSJ International Conference on IEEE.
- Llobet, E. Gas sensors using carbon nanomaterials: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013;179:32-45.
- Llobet, E., Brunet, J., Pauly, A., Ndiaye, A., Varenne, C. Nanomaterials for the selective detection of hydrogen sulfide in air. *Sensors*, 2017;17(2):391.
- NASA, (2016), Turn Your Smartphone into Any Kind of Sensor URL:<https://www.nasa.gov/offices/oct/feature/turn-your-smartphone-into-any-kind-of-sensor>

- NASA, (2018), NODE+ Platform Integrates Sensors with Smartphones URL: https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2016/cg_1.html
- NIOSH, (2008) Direct-Reading Exposure Assessment Methods (D.R.E.A.M.) Workshop URL: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-133/presentations.html>
- Pack, R. T., Christopher, J. L., Kawamura, K. A rubbertuator-based structure-climbing inspection robot. In Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on IEEE.
- Pandey, S. K., Kim, K. H., Tang, K. T. A review of sensor-based methods for monitoring hydrogen sulfide. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2012;32:87-99.
- Park, S., Jeong, H. D., & Lim, Z. S. Development of mobile robot systems for automatic diagnosis of boiler tubes in fossil power plants and large size pipelines. In Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on IEEE.

- Peltier, R. Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications. World Meteorological Organization
- Peng, J., Teoh, C. L., Zeng, X. et al. Development of a highly selective, sensitive, and fast response upconversion luminescent platform for hydrogen sulfide detection. *Advanced Functional Materials*, 2016;26(2):191-199.
- Singham, M. (1998). The canary in the mine. *Phi Delta Kappan*, 1998;80(1):8-15.
- Truong-Thinh, N., Ngoc-Phuong, N., Phuoc-Tho, T. A study of pipe-cleaning and inspection robot. In *Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2011 IEEE International Conference on IEEE.
- Xueqin, L., Rongfu, Q., Gang, L., & Fuzhen, H. The design of an inspection robot for boiler tubes inspection. In *Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, 2009. AICI'09. International Conference on IEEE.

- Yamamoto, M., Enatsu, Y., & Mohri, A. Motion analysis of a cleaner robot for vertical type air conditioning duct. In Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on IEEE.
- Yi, Z., Gong, Y., Wang, Z., Wang, X. Development of a wall climbing robot for ship rust removal. In Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on IEEE.
- Zhang, H., Zhang, J., Liu, R., Wang, W., & Zong, G. Design of a climbing robot for cleaning spherical surfaces. In Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2005 IEEE International Conference on IEEE.

Abstract

Title: Development of gas detector for confined space using state of art sensor technology

Objectives: To investigate and utilize cutting-edge technology to prevent accidents in confined spaces

Methods: Descriptive data analysis was performed to define the characteristics of the accident in confined spaces. Literature review was conducted to summarize the technology including 4th Industrial revolution, sensors, communication, microprocessor. Portable device was developed to measure the oxygen concentration at the confined space in wireless and tested in the field.

Results: Accident in confined space still occurred. The most common cause of accidents is that worker did not follow the standards of work procedures. Applying state-of-the-art technology including IoT allows you to measure the air quality in real time and technically reduce the number of accidents. Also, it can manage the entry of confined space remotely. Developed IoT confined space measurement device can measure the air

condition with robot or drone instead of entry of worker. Still, there are many limitation of the sensor, communication and regulations. Nevertheless, IoT device could be one of the effective method to measure the hazardous pollutant and needs to debate.

Conclusion: This study found that cutting-edge technology is not far from our lives. Further research is required to develop and expand the knowledge and application for preventing accident at confined space.

Key words: Internet of Things (IoT), Confined Space, Oxygen, gases, Cutting-edge technology

<<연 구 진>>

연 구 기 관 : 가천대학교 의과대학

연구책임자:	함 승 헌	(교 수, 보건학박사, 가천대학교)
공동연구원:	강 성 규	(교 수, 의학박사, 가천대학교)
	박 주 홍	(교 수, 공학박사, 포항공과대학교)
	최 원 준	(교 수, 의학박사, 가천대학교)
	이 완 형	(교 수, 보건학박사, 가천대학교)
연 구 원:	김 해 연	(연구원, 포항공과대학교)
	홍 성 주	(연구원, 포항공과대학교)
	강 덕 윤	(연구원, 가천대 길병원)
	이 상 하	(연구원, 가천대 길병원)
	이 준 형	(연구원, 가천대 길병원)
	김 의 진	(연구원, 가천대 길병원)
	최 순 완	(연구원, 가천대 길병원)
	이 수 남	(연구원, 가천대 길병원)
	박 혜 숙	(연구원, 가천대 길병원)
	김 동 건	(연구원, 가천대 길병원)
	김 은 수	(연구원, 가천대 보건대학원)
	이 은 이	(연구원, 가천대학교 산학협력단)
연구상대역:	박 현 희	(연구위원, 산업안전보건연구원)

<<연 구 기 간>>

2019. 4 - 2019. 10

본 연구는 산업안전보건연구원의 2019년도 위탁연구 용역사업에 의한 것임

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며, 우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

첨단센서기술을 이용한 밀폐공간 유해가스 측정장치 개발 연구

(2019-연구원-1427)

-
- 발 행 일 : 2019년 10월
 - 발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 고재철
 - 연구책임자 : 가천대학교 함승헌
 - 발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원
 - 주 소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400
 - 전 화 : (052) 7030-883
 - F A X : 052-7030-337
 - Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>
-