연구보고서

# 밀폐공간 사고예방을 위한 첨단기술 활용방안 연구

함승헌 • 강성규 • 박주홍 • 최원준 • 곽경민

산업재해예방
안전보건공단
산업안전보건연구원

# 제 출 문

산업안전보건연구원장 귀하

본 보고서를 “밀폐공간 사고예방을 위한 첨단기술 활용방안 연구”의 최종 연구결과 보고서로 제출합니다.

2018년 10월

연구기관 : 가천대학교 산학협력단

연구기간 : 2018.03.29 ~ 2018.10.31

연구책임자 : 함승헌(가천대학교 의과대학 교수)

공동연구원 : 강성규(가천대학교 의과대학 교수)

공동연구원 : 박주홍(포항공과대학교 창의융합IT공학과 교수)

공동연구원 : 최원준(가천대학교 의과대학 교수)

공동연구원 : 곽경민(가천대 길병원 교수)

연구보조원 : 이동우(포항공과대학교 창의융합IT공학과 연구원)

연구보조원 : 안종민(포항공과대학교 창의융합IT공학과 연구원)

연구보조원 : 이동훈(가천대 길병원 의사)

연구보조원 : 강덕윤(가천대 길병원 의사)

연구보조원 : 이준형(가천대 길병원 의사)

연구보조원 : 최순완(가천대 길병원 연구원)

연구보조원 : 강진모(가천대 길병원 연구원)

연구보조원 : 이미정(가천대 길병원 연구원)

연구보조원 : 강지현(가천대 길병원 연구원)

연구보조원 : 이수남(가천대 길병원 연구원)

# 요 약 문

**연구기간** 2018년 3월 ~ 2018년 10월

**핵심단어** 밀폐공간, 질식재해, 첨단기술, IoT

**연구과제명** 밀폐공간 사고예방을 위한 첨단기술 활용방안 연구

## 1. 연구배경

○ 밀폐공간 질식재해가 지속적으로 발생하고 있고, 4차 산업혁명 시대를 맞이하여 재해 예방을 위하여 첨단기술 접근성이 높아지고 있음.

○ 본 연구에서는 밀폐공간에서의 사고예방을 위하여 적용할 수 있는 기술 개발 현황, 밀폐공간의 특성, 적용방안 등에 대하여 조사하였음.

## 2. 주요 연구내용

### - 연구결과

○ 2011-2017년 자료를 이용하여 분석을 실시하였음. 밀폐공간 질식재해는 지속적으로 발생하고 있고, 총 241명의 재해자 중 127명이 사망(52.7%) 하였음. 원인물질은 산소결핍, 황화수소, 일산화탄소 순이었고, 계절에 따라 여름철에는 황화수소, 겨울에는 일산화탄소가 주원인임. 발생장소는 오폐수처리장, 저장용기, 건설현장, 맨홀 순 이었고, 건설업과 제조업에서 사망자의 73%를 차지하였음. 근속기간이 짧을수록 사망자 수가 증가하였고, 50인 미만의 소규모 사업장에서 사망자의 58%가 발생

하였음.

○ 4차 산업혁명은, IoT(사물인터넷), 빅데이터, 클라우드, 인공지능을 중심으로 발전하고 있음. 센서를 장착한 사물과 사용자를 연결해주는 초연결 사회로 변모하고 있고, 밀폐공간 질식재해의 예방에도 다양하게 이용 될 수 있음을 검토하였음. 밀폐공간 사고예방에는 센서 및 통신기술이 핵심 기술임.

○ 밀폐공간 작업에 따른 첨단기술 적용에 대해서는 현재 사업장에서 적용되고 있는 사례를 검토하였고, 실제로 다양한 분야(중화학, 건설, 오폐수처리장 등)에서 활용되고 있음.

○ 그러나 시판되고 있는 센서는 성능 검/인증 없이 유통 및 사용이 되고 있어 이에 대한 검/인증이 필요함.

○ 본 연구에서 개발한 측정기 시스템을 현장적용 평가를 실시하였음. 센서, 통신 방법을 쉽게 교체 할 수 있는 모듈형으로 개발하여 현장상황에 맞게 사용자가 선택할 수 있도록 하였음. 캐리어(이동체: 로봇, 드론 등)을 이용하여 고정형 측정시스템이 아닌 이동형 측정이 가능하게 개발하였음. 건설현장(산소, 일산화탄소)과 오폐수처리장(산소, 황화수소)에서 현장평가를 실시하였음.

○ 주요 밀폐공간을 분석한 TOP 7에 따라 통신의 경우 LTE, Wi-Fi, Bluetooth(BT)를 활용이 가능하고, 특히 공간을 이동하면서 작업을 하는 맨홀이나 배관의 경우에는 BT를 이용하여 중간에 연결된 Node와 함께 사용을 해야 먼 곳에서의 연결을 유지할 수 할 수 있음. 캐리어의 경우 정화조, 폭기조, 탱크, 반응기, 기계실, 지하실, 가마와 같은 경우 고정형 측정기, 로봇, 드론, 공 등을 이용하고, 맨홀, 배관, 건설현장 등에서는 로봇과, 드론과 같이 이동하면서 측정 할수 있는 캐리어를 사용할 수 있음.

- 시 사 점

○ 본 연구에서 개발한 시스템의 형태는 다양한 산업현장에서 실시간으로 측정을 하고 통신을 할 수 있어 관리에 있어 매우 유리함.

○ 다양한 밀폐공간 환경에서도 로봇이나 드론 등 캐리어를 어떻게 활용하느냐에 따라 다양한 환경에서의 측정이 가능함을 확인하였음.

○ 모든 측정에서의 센서의 신뢰도가 함께 수반되어야 함. 따라서 국가차원에서의 신뢰성 확보 방안마련이 필요하며, 특히 산업보건 측면에서 유해가스 센서에 대한 연구가 매우 필요함.

○ 그러나 현장평가 결과 다양한 문제점이 있음. 통신방법이 수직, 수평 위치에 따라 거리가 달라지고, 또한 지하로 가게 될 경우 통신 방법에 대한 충분한 테스트 후 적용을 해야 함. 따라서 통신에 대한 연구도 추후 심도 있는 연구가 매우 필요함.

○ 통계를 보면 밀폐공간 사고는 언제 어디서나 발생 할 수 있는 상황이기에 항상 작업 전/중 규정을 준수가 필수적이며, 측정방법에 대한 구체화가 필요하며, 산소결핍 외 유해가스 측정도 동시에 이루어져야 그 효과를 얻을 수 있음.

## 3. 연구 활용방안

- 제　　언

○ 시장이 작기 때문에 산업보건분야에서 사용할 수 있는 유해가스 센서 산업은 적극적인 개발이 이루어지지 않고 있음. 따라서 국가차원에서 다양한 작업환경에서 사용할 수 있는 센서 개발, 검/인증 등 역할이 필요함. 전 세계적으로 소방, 군의 경우 기술개발에 투자를 하여 다양한 분야에서 첨단기술을 활용하여 현장에서 활약을 하고 있음.

○ 측정방법(간격, 위치, 개수, 개인/지역 등), 자료분석(평균, 최댓값, 오차범위, 상관성 등), 직독식 측정 법제화 등 논의 필요

**- 개선방안 또는 정책방안**

○ 기술이 발전하게 되면 작업장의 유해물질에 대한 측정에 있어 직독식 측정제도(상시, 실시간 측정)도입을 고려해볼 수 있음.

**- 활 용**

○ 밀폐공간과 같이 급성중독이 발생할 수 있는 작업환경에 활용 가능.

○ 밀폐공간에 국한되지 않고 다양한 사업장에서 작업환경측정의 보완 또는 대체 방법으로 활용 가능. 작업환경 개선 시 즉시 효과 평가에 가능하며 적극적인 관리 가능.

## 4. 연락처

- 연구책임자 : 가천대학교 의과대학 직업환경의학과 교수 함승헌
- 연구상대역 : 산업안전보건연구원 직업환경연구실 박현희
  - ☎ 052) 7030-901
  - 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
   1) 밀폐공간 질식재해 문헌 고찰 ..... 5
   2) 밀폐공간 질식재해 예방을 위한 기술 조사 ..... 5
   3) 밀폐공간 작업별 첨단기술 활용에 관한 현장 적용성 검토 ..... 6
   4) 스마트폰 부착식 소형측정기, 발광(형광)측정기 등 개발방안 검토 7

## III. 연구결과 ..... 8

1. 문헌고찰 ..... 8
   1) 밀폐공간의 정의 ..... 8
   2) 밀폐공간재해특성 ..... 8
2. 밀폐공간 질식재해 예방을 위한 기술 조사 ..... 33
   1) 4차 산업혁명의 정의 ..... 33
   2) 기술 조사 ..... 39
3. 밀폐공간 작업별 첨단기술 활용에 관한 현장적용성 검토 ..... 70
   1) 현장 적용성 검토 ..... 70
   2) 현장평가 ..... 94
4. 스마트폰 부착식 소형측정기, 발광(형광)측정기 등 개발방안 검토 106

# IV. 결 론 ····· 114

1. 밀폐공간 질식재해 문헌 고찰 ····· 114
2. 밀폐공간 질식재해 예방을 위한 기술 조사 ····· 115
3. 밀폐공간 작업별 첨단기술 활용에 관한 현장적용성 검토 ····· 116
4. 스마트폰 부착식 소형측정기, 발광(형광)측정기 등 개발방안 검토 117

# V. 참고문헌 ····· 118

# <표 차례>

〈표 1〉 밀폐공간 사고와 측정제도의 현재와 미래 ·····3
〈표 2〉 2011-2017 연도별 질식재해 현황 ·····12
〈표 3〉 국내 기업에서 밀폐공간 질식재해 예방을 위한 첨단기술 도입 사례 ·····29
〈표 4〉 NIOSH에서 제안하고 있는 센서 개발 시 검토해야 할 사항 ··43
〈표 5〉 측정 목적에 따른 센서의 요구도 및 주요 사항 ·····45
〈표 6〉 산소센서 ·····52
〈표 7〉 황화수소 센서 ·····54
〈표 8〉 일산화탄소 센서 ·····55
〈표 9〉 각 통신 방식의 특징 ·····58
〈표 10〉 밀폐공간에 따른 최신 기술 적용 현황 (Botti et al., 2017) ····67
〈표 11〉 개발된 산소농도측정기 내장 센서 제원 ·····80
〈표 12〉 기존 방법과 첨단기술 활용 시 개발 방향 ·····90
〈표 13〉 건설현장에서 실시한 현장평가 결과 ·····97
〈표 14〉 오폐수처리장에서 실시한 현장평가 결과 ·····102
〈표 15〉 현장평가에 대한 요약 ·····105
〈표 16〉 스마트폰 연결 방식에 따른 장단점과 경제성 분석 ·····106

# <그림 차례>

[그림 1] IoT 밀폐공간 측정 시스템 개념도. ·····6
[그림 2] 연구진에서 최종적으로 개발 한 시스템 개념도 ·····7
[그림 3] 2011-2017 연도별 질식재해 발생자수 (사망, 부상) ·····13
[그림 4] 2011-2017 연도별 질식재해 재해 발생건수 (사망, 부상) ·····13
[그림 5] 재해원인 별 밀폐공간 질식재해 발생자수 ·····15
[그림 6] 재해원인 별 밀폐공간 질식재해 발생건수 ·····15
[그림 7] 월별 밀폐공간 질식재해 발생자수 ·····17
[그림 8] 월별 밀폐공간 질식재해 발생건수 ·····17
[그림 9] 발생장소별 재해 발생자수 ·····19
[그림 10] 발생장소별 재해 발생건수 ·····19
[그림 11] 업종별 재해 발생자수 ·····21
[그림 12] 업종별 재해 발생건수 ·····21
[그림 13] 근속기간 별 사망자수 ·····23
[그림 14] 근속기간 별 사망건수 ·····23
[그림 15] 사업장 규모 별 재해 발생자수 ·····25
[그림 16] 사업장 규모 별 사망자 수 ·····25
[그림 17] 요일에 따른 밀폐공간 질식재해 발생자수 ·····27
[그림 18] 요일에 따른 밀폐공간 질식재해 발생건수 ·····27
[그림 19] D사가 제공하는 IoT 헬멧의 개념도 ·····32
[그림 20] IoT 시스템의 개념도 ·····35
[그림 21] 센서의 기본구조 ·····42
[그림 22] 미국 NIOSH Center for Direct Reading and Sensor

Technologies의 실시간 기기 개발의 과정 ·····49
[그림 23] 산소센서의 일반 대기 중 기기간 상관성 분석 결과 ·····53
[그림 24] 전파 투과 특성 실험 장비 ·····59
[그림 25] 건축자재에 따른 투과특성 측정 결과 ·····60
[그림 26] 하드웨어 종류 ·····61
[그림 27] Modular Assembly Design의 예 ·····62
[그림 28] 분기별 세계 웨어러블 기기 출시량 ·····63
[그림 29] 안전모 부착형 센서, 통신, 카메라 ·····65
[그림 30] 한국전자통신연구원에서 개발 중인 고령자 건강 모니터링 시스템 ·····66
[그림 31] 휴대용 UV 모니터의 예 ·····66
[그림 32] 파이프 세척 및 검사 로봇 ·····68
[그림 33] 개인 휴대용 밀폐공간 질식재해 예방 시스템 개념도 ·····71
[그림 34] 중앙 통제 측정 밀폐공간 질식재해 예방 시스템 개념도 ···71
[그림 35] 밀폐공간 출입제어 시스템 개념도 ·····72
[그림 36] 센서와 측정기기의 일반적인 검증 단계 ·····74
[그림 37] 모듈화 시스템의 최종 개념도 ·····75
[그림 38] LoRa 통신모듈 테스트 ·····76
[그림 39] In-House PCB Circuit Design과 CNC PCB Fabrication 과정 77
[그림 40] Outsourcing PCB Circuit Design과 CNC PCB Fabrication 과정 ·····77
[그림 41] 본 연구에서 개발한 모듈조립디자인 밀폐공간측정 시스템 ·78
[그림 42] 각 현장에 맞게 모듈형태로 조립한 측정기 시스템 ·····79
[그림 43] 본 연구에서 개발한 산소 고정형/휴대용 모니터 ·····80
[그림 44] 본 연구에서 개발한 이동식 측정 시스템 ·····81

[그림 45] 본 연구에서 시도된 다양한 로봇 측정 시스템 ·····82
[그림 46] 독일 FESTO사의 미래 캐리어 개발 현황 ·····83
[그림 47] 본 연구에서 시도한 자유비행 캐리어 ·····84
[그림 48] 본 연구에서 시도한 공 형태의 캐리어 ·····85
[그림 49] 본 측정 시스템에서 산소농도변이 및 알람 농도 설정 ·····86
[그림 50] 본 측정 시스템에서 현장 및 타겟 물질의 농도를 확인 할 수 있는 화면 ·····87
[그림 51] 본 측정시스템에서 밀폐공간 관리 웹 화면 ·····88
[그림 52] TOP 7에 따른 발생장소, 작업, 원인과 유해물질, 통신, 캐리어 분류 ·····92
[그림 53] 현장평가를 실시한 건설현장 ·····95
[그림 54] 건설현장평가에 사용된 캐리어 및 측정기기 ·····96
[그림 55] 측정시각의 서울 기온 및 습도 ·····96
[그림 56] 건설현장 적용평가 ·····98
[그림 57] 오수처리장(상), 폐수처리장(하) 측정 시연 ·····100
[그림 58] 오수처리장에서의 황화수소 농도 변이 ·····101
[그림 59] 오수처리장에서의 볼, 드론 측정 시스템 ·····103
[그림 60] 스마트폰 부착식 소형 측정기 ·····107
[그림 61] 반도체 센서를 이용한 상용화 센서의 예 ·····108
[그림 62] 텅스텐과 구리를 이용하여 만든 황화수소 센서. ·····109
[그림 63] 그래핀을 이용하여 만든 황화수소 센서. ·····110
[그림 64] 형광물질을 이용하여 만든 황화수소 센서 ·····110
[그림 65] 황화수소 형광 센서의 원리 ·····111
[그림 66] 색 변화 센서의 종류 ·····112
[그림 67] 색 변화 센서의 기초 자료 ·····113

# Ⅰ. 서 론

## 1. 연구배경

밀폐공간은 근로자가 작업을 수행하는 작업환경 중 환기가 불충분한 상태에서 산소가 부족하거나, 유해가스로 인한 질식 등 건강장해와 인화성물질에 의한 폭발이나 화재 등의 위험이 있는 장소[1]를 말한다.

밀폐공간 질식재해는 다양한 원인으로 인하여 발생하고 있고, 2017년의 경우 14건의 밀폐공간 질식재해가 발생하여 18명이 사망하고 5명이 부상을 입었다.

근로자가 일을 하는 밀폐공간은 적정공기가 유지되어야 한다. 적정공기란 산소농도 범위가 18% 이상 23.5% 미만이면서, 황화수소의 농도가 10 ppm 미만이며 일산화탄소의 농도가 30 ppm 미만, 탄산가스의 농도가 1.5% 미만 수준의 공기를 말한다.

대표적인 밀폐공간으로는 맨홀, 정화조, 집수조, 침전조 터널, 우물, 수직갱, 잠함[2], 핏트[3], 암거[4], 탱크, 반응탑 등이 있다.

밀폐공간 질식재해예방 노력에도 불구하고 매년 지속적으로 산소결핍 및 유해가스에 의한 재해자가 발생하고 있다. 최근 5년간('12-'16년) 밀폐공간 질식재해자가 188명, 사망자가 94명이 발생하였고, 사망률이 50%로 일반 사고성 재해 사망률 1.3%에 비해 매우 높은 재해이다.

---

1) 산업안전보건기준에 관한 규칙 제618조
2) 지상에서 만들어 지하로 넣은 철근 콘크리트 통이나 상자 형태의 지하 구축물
3) 사각형 또는 원통 형상으로 된 콘크리트제의 통
4) 수면이 보이지 않도록 한 수로로서 지하에 매설되어 있거나, 지표에 있다면 복개를 한 것

그동안 밀폐공간 질식재해와 같은 고위험 산업재해에 대한 연구를 지속적으로 해왔고, 정부부처 합동으로 산업재해를 줄이기 위해 2018년 1월 “산업재해 사망사고 감소대책-고위험 분야 집중관리 및 안전우선 문화 확산-”[5] 안을 마련하였고, 안전기술을 활용하여 산업재해 발생을 원천적으로 방지할 수 있는 작업환경을 조성하고, 사회 전반적으로 안전을 최우선 시 하는 문화 확산 도모하려는 노력을 하고 있다.

산업안전보건연구원에서는 2008년[6]과 2017년[7] 두 번에 걸쳐 밀폐공간 사고와 관련된 연구를 하였다. 2008년 연구에서는 작업종류에 따른 질식재해 요인의 파악 및 예방대책 마련에 대한 연구를 수행하였고, 2017년 연구에서는 작업프로그램 매뉴얼을 작성하였다.

이러한 노력에도 불구하고 밀폐공간 질식재해 예방은 지속적으로 필요하기 때문에 기술적, 제도적 보완을 융합하여 예방 방법을 마련해야 한다. 최근 4차 산업혁명[8]과 더불어 공학의 발전으로 우리가 과거보다 쉽게 기술을 사용할 수 있게 되었다.

4차 산업혁명은 사물 인터넷(IoT), 클라우드(Cloud computing), 인공지능(AI), 빅데이터(Big data) 등 기술이 기존 산업과 융합되거나 로봇공학, 나노, 생명공학, 3D 프린팅 등 여러 분야의 새로운 기술과 융합되어 제품·서비스 간 네트워크로 연결하고 사물(Things)을 지능화하는 산업으로 정의하고 있다. 이러한 최신기술의 융합적 접근을 통하여 문제를 해결해나갈 수 있는 환경이 만들어지고 있고, 이를 산업보건 분야에서도 접목 시킬 필요성이 있다.

밀폐공간 사고가 과거에 비해서는 감소하였지만 일정 수준으로 유지중에 있다. 이를 낮추기 위해서는 획기적인 방안 마련이 시도되어야 하는 중요한 시점이다. 측정 측면에서 보면, 밀폐공간에서의 작업 전, 중에 측정을 하도록 되어 있지만 관리감독이 어려워 첨단기술을 이용하여

5) 산업재해 사망사고 감소대책: 고위험 분야 집중관리 (관계부처합동, 2018.1.23.)
6) 유계묵 등, 2007
7) 문찬석 등, 2017
8) 세계 경제 포럼(World Economic Forum)에서 2016년 언급

실시간 상시 감시 체계 운영을 통한 관리 감독 도입 필요하다. 기술측면에서 보면 지금도 직독식 측정기(산소, 일산화탄소, 황화수소 등)를 이용하게 되는데 주로 실시간 측정기기를 이용하고 있다고 알려져 있으나 이에 대한 정확한 통계와 같은 근거자료는 없는 실정이다.

특정 사업 또는 작업을 수행 시에는 의무적으로 측정기기를 구비하고 사용할 수 있도록 법제도를 바꿀 필요가 있으며 동시에 국가에서는 측정기기가 보급될 수 있도록 국민들이 쉽게 접근할 수 있는 문턱을 낮춰주는 노력을 해야 한다. 4차 산업혁명을 맞이하고 있는 현재 시점에 위와 같은 문제점을 해결 할 수 있는 방안을 마련하기 위한 기술적 검토가 필요하다.

따라서 첨단기술 도입을 통하여 밀폐공간 질식재해 예방대책 마련을 위한 연구가 필요하며, 기술적(센서, 통신, 해석, 활용) 발전현황과 밀폐공간 질식재해 예방을 위한 활용 방안에 대한 조사가 필요하다.

**<표 1> 밀폐공간 사고와 측정제도의 현재와 미래**

| | 현재 | 미래 |
|---|---|---|
| 사고현황 | 변화 없음 | 감소 목표 |
| 측정제도 | 측정(전/중) | 상시 관리 감독 |
| 기술 | 직독식<br>(검지관, 실시간 측정기) | 직독식<br>(검지관, 실시간<br>측정기-데이터 송수신가능) |

## 2. 연구목적

밀폐공간 질식재해를 예방하기 위하여 첨단기술을 도입하여 유해가스농도에 대한 위험인지를 쉽고 간편하게 확인할 수 있는 기술적 대응책을 마련하기 위하여 아래와 같은 연구목적을 수립하였다.

○ 밀폐공간 질식재해 통계를 분석하여 사고의 특성을 파악

○ 밀폐공간 질식재해 예방을 위해 적용할 수 있는 센서, 통신, 캐리어 등의 기술 조사를 통한 적용 가능성 검토

○ 밀폐공간 작업에 따른 첨단기술 활용에 관한 가능성 및 현장적용성 평가

○ 스마트폰 부착식 소형측정기, 발광(형광)측정기 등 개발방안 검토를 통한 향후 적용 방안 제안

# II. 연구 방법

## 1. 연구방법

### 1) 밀폐공간 질식재해 문헌 고찰

국내 밀폐공간 질식재해 사고사례를 분석하였다. 자료는 안전보건공단을 통하여 수집을 하였고, 2011년부터 2017년 까지 총 7년간의 자료를 이용하여 분석을 실시하였다. 이를 통하여 지난 7년간의 밀폐공간 질식재해 원인을 분석하여 첨단 기술 도입 방안 마련을 위한 기초자료로 활용을 하였다.

### 2) 밀폐공간 질식재해 예방을 위한 기술 조사

4차 산업의 정의, 역사, 종류에 대하여 기술조사를 하였고, 국내외 밀폐공간 재해예방 관련 첨단화 방법에 대한 사례, 정책, 제도에 관한 문헌 고찰을 하였다. 센서 및 측정방법에 대해서는 미국 NIOSH의 Center for Direct Reading and Sensor Technologies의 개설 목적, 활동범위, 벤치마킹 등에 대하여 검토하였다.

국내·외 밀폐공간 질식재해예방을 위한 첨단 기술 적용 사례와 센서에 대하여 조사하고, 센서-프로세서-통신-서버-사용자-중앙 간의 상호 연동기법에 대한 사례를 검토 하였다.

밀폐공간에 사용할 수 있는 센서의 최신 기술 현황과 시장 조사 ($O_2$,

$H_2S$, CO)를 하였다.

측정된 데이터를 외부(수신기)로 송수신할 수 있는 통신기술 활용방안 검토를 하였다. 활용가능 통신기술 문헌 고찰을 통하여 현황을 파악하고, Wi-Fi, Bluetooth(BT), LoRa-IoT 전용망 등의 특성을 구분하여 장단점을 파악하였다. 이를 통하여 밀폐공간 현장 특성에 맞는 통신망 조사 및 적용 가능성 검토 하였다.

센서와 통신을 통하여 얻어진 결과를 연산하고 처리할 수 있는 장치인 프로세서에 대한 고찰도 함께 수행 하였다.

### 3) 밀폐공간 작업별 첨단기술 활용에 관한 현장 적용성 검토

- 밀폐공간 작업별 첨단 기술 활용에 대하여 실제 시제품을 제작하였다. 센서에 따라, 장소에 따라 개발가능성을 검토해보고 실제 측정을 통하여 현장 적용 가능성에 대하여 검토하였다.

산소농도측정기를 중심으로 측정기 제작을 하였으며, 현장 적용을 실시하였다. 현장에 설치 및 캐리어(로봇, 드론 등) 이동체에 설치하여 $O_2$, $H_2S$, CO를 측정하고 실시간으로 작업자, 관리자, 중앙 까지 전달이 되어 상황을 판단 할 수 있는 시스템을 통합적으로 개발 하였다.

**[그림 1] IoT 밀폐공간 측정 시스템 개념도.**

- 로봇, 드론을 이용한 측정 가능성 검토
* 건설현장(콘크리트 양생장소)- $O_2$, CO: 1개소
* 오수처리장- $O_2$, $H_2S$: 1개소
* 폐수처리장- $O_2$, $H_2S$: 1개소

#### 4) 스마트폰 부착식 소형측정기, 발광(형광)측정기 등 개발방안 검토

- 현재 기술로 개발되어 있는 스마트폰 부착식 소형측정기, 발광 측정 방법에 대한 기술 조사를 문헌검색(논문, 보고서, 제조사 등)을 통하여 실시하였다.

- 최종적으로 본 연구에서 얻고자 하는 것은 밀폐공간에서의 감지와 모니터링, 이에 대한 관리가 잘 연동되어 밀폐공간 질식재해를 줄이는 것이 매우 중요하다고 판단된다.

**[그림 2] 연구진에서 최종적으로 개발 한 시스템 개념도**

# III. 연구결과

## 1. 문헌고찰

### 1) 밀폐공간의 정의

환기가 불충분한 상태에서 산소결핍[9]이나 유해가스[10]로 인하여 질식 등의 건강장해를 입거나 인화성물질에 의하여 화재나 폭발 등의 위험이 존재하는 장소이다 (고용노동부).

### 2) 밀폐공간재해특성

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 않아 산소가 부족해지거나, 유해가스가 발생하여 근로자가 작업하고 있는 공간의 공기가 적절하지 않은 상황이 발생하게 된다.

밀폐공간은 반드시 산소결핍 상태 및 유해가스가 존재하는 상태만을 의미하지 않고, 더 넓은 범위에서 근로자가 항상 거주하지 않는 공간이

9) 산소결핍이란 농도가 18% 미만인 상태를 말함.
10) 유해가스란 황화수소, 일산화탄소, 탄산가스등 기체로, 사람에게 유해한 영향을 줄 수 있는 물질을 말함.

더라도 환기가 충분하지 않은 곳이나, 유해가스나 불활성기체가 존재하거나 유입될 가능성이 있는 장소도 밀폐공간으로 분류하여 관리가 필요한 장소를 뜻한다[11].

근로자가 작업을 하기에 적합한 적정공기란 산소농도(18.5-23%), 황화수소(10 ppm미만), 일산화탄소(30 ppm미만), 탄산가스(1.5%미만)[12]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.

밀폐공간 특성상 다양한 유해요인이 있을 수 있음을 항상 간과해서는 안 된다. 산소는 생물 호흡의 필수 요소이기 때문에 산소농도 측정은 기본적으로 실시를 해야 하나, 밀폐공간에 대한 특성 검토 없이 산소농도만 우선적으로 측정하는 것은 잘못된 방법이다. 기본적으로 산소농도는 측정을 실시하고, 양수기 작동을 위하여 내연기관이 내부에 존재했다면 일산화탄소를 측정하고, 오수 맨홀이었다면 황화수소를 측정하는 등의 상황을 고려하여야 한다(유계묵 등, 2009). 예를 들어 조리시설에서의 일산화탄소 중독 사고가 매년 지속하여 발생하고 있다. 불완전 연소에 인한 일산화탄소 중독 사고를 예방하기 위하여 측정기를 설치하게 되면 측정치를 알 수 있는 모니터가 조리실 안에 설치된 경우가 대부분이다. 이 경우 사람이 반드시 내부로 들어가서 확인을 해야 하는 상황인데 이는 적합하지 않은 방법이라고 생각한다. 내부에서 확인이 가능한 것은 물론 외부에서도 수치를 확인하여 작업을 시작할 때부터 출입 여부를 결정할 수 있도록 해야 한다는 것이다. 이어서 만약 조리

11) 밀폐공간작업질식재해예방 종합매뉴얼, 안전보건공단, 2017
12) 산업안전보건기준에 관한 규칙 제 618조

시설 내부의 일산화탄소 농도가 높아서 위험한 경우 출입문이 밖에서는 열리지 않도록 설계를 한다면 근본적으로 사고를 예방할 수 있다. 맨홀의 경우에도 맨홀 내부에 상시 측정을 할 수 있도록 하고, 맨홀에서 작업이 필요시에는 충분한 환기 이후 작업 시작 등의 적절한 조치를 한 후 내부에 있는 측정기를 통하여 작업이 가능한 환경인지 확인 후 실시할 수 있도록 하고, 동시에 근로자에게 웨어러블 측정기 등을 지급하여 작업 중에도 실시간으로 환경을 측정하여 근로자 및 감독자에게 정보가 전달 될 수 있도록 하면 상당수의 밀폐공간 질식재해가 예방이 될 것으로 예상한다. 과거에는 이러한 기술에 접근하려면 경제적, 기술적으로 매우 어려운 것이 사실이었으나, 2018년 현재는 과거에 비하여 접근 할 수 있는 기술이 많아졌다. 따라서 기술적으로 해결이 가능 한 부분들에 대한 연구를 수행하는 것이 필요하다.

이러한 기술을 접목시키기 위해서는 사고의 원인을 정확히 파악을 해야 한다. 작업환경에 대한 상세한 정보와 원인을 파악해야만 그에 맞는 적합한 기술을 선택하여 적용할 수 있기 때문이다. 밀폐공간 질식재해의 원인은 다른 재해에 비하여 비교적 잘 알려져 있지만 예방이 잘 이루어지지 않고 있는 것이 현실이다. 일반사업장의 관리는 발생원의 제거-대체-격리-공학적대책-보호구 등과 같은 산업위생의 원리가 적용이 가능하지만, 밀폐공간의 경우에는 적용이 쉽지 않다.

밀폐공간 질식재해가 일반사업장 관리와 다른 첫 번째 이유는 대부분의 사고의 형태가 급성중독에 의한 것이라 상황에 노출되었을 때 즉시 질식하거나 질식으로 인한 추락, 낙상 등을 입어 2차 사고가 발생을 하는 경우가 많다. 또한 부상자 구조를 위하여 송기마스크 또는 SCBA(self-contained breathing apparatus)를 착용하지 않고 사고현장에 들어갔다가 추가 재해자가 발생하는 사례가 많이 있다.

두 번째 이유는 밀폐공간에 대한 파악이 잘 이루어지지 않고 있다. 밀폐공간은 개수가 많고 형태가 복잡하다는 특징을 가지고 있다. 다시 말해 관리가 어렵다는 뜻이다. 밀폐공간은 다양한 장소를 포함하는데

대표적으로 맨홀, 사업장내 창고, 각 건물의 오폐수 처리장, 농장의 분뇨처리시설 등 이 있다. 그밖에도 밀폐공간에 대한 정의가 모호하여 관리 선상에서 가려지게 되는 장소들로 인하여 의외의 공간에서의 예견된 사고가 발생하게 되는 것이다. 또한 소유의 형태가 매우 다양하다. 국유와 사유가 있고 소유와 공유가 뒤섞여서 관리가 되고 있는 현실이다. 대부분의 통신 맨홀과 같은 경우에는 소유권은 국가에서 가지고 있지만 공유를 하면서 사용을 하고 있고, 때로는 같은 통신 맨홀이라도 특정 회사가 소유권을 가지고 있으나 공유를 하는 등 다양한 형태의 작업이 이루어지고 있는 현실이다. 그만큼 복잡한 생태계를 가지고 있어 관리나 책임의 소재가 불분명한 경우가 많다.

세 번째 이유는 다양한 작업형태를 들 수 있다. 밀폐공간은 출입하는 횟수가 정기적이지 않다. 또한 작업의 형태가 다양하다는 특징이 있다. 다시 말하면 관리방법이 정형화되기 어렵다는 뜻이다.

종합해보면 밀폐공간 질식재해는 예방이 최우선이라고 할 수 있다. 밀폐공간 사고를 예방하기 위해서는 작업 전/작업 중 측정(상시 및 임시)을 통하여 밀폐공간 내 농도를 알 수 있고, 만약 재해자가 발생 하더라도 상시 측정 자료를 이용하여 구조를 하러 직접 들어가는 것이 아니라 구조 요청을 통하여 추가적인 재해를 예방 할 수 있도록 해야 한다. 그러나 현재 측정을 하는 시스템은 매우 소극적이고 수동적이고 기능이 잘 작동하지 않는 등의 이유로 측정이 잘 되지 않고 있는 현실이다. 또한 밀폐공간 여부를 명확히 정의하여 현재와 같이 제도적으로만 출입을 제한하는 것이 아니라 기술적으로 출입을 제한하고 허가에 의하여 출입을 할 수 있도록 하는 시스템을 구축 할 필요가 있다. 다양한 작업의 형태가 존재 하더라도 시스템적으로 예방을 하는 방법을 마련해야 한다.

센서, 통신, 데이터 분석 등 기술시장 측면에서 보면 산업보건분야는 수요와 공급 측면에서 일반 시장논리에 맡겨 기술개발이 어렵다고 판단된다. 수지타산이 맞지 않기 때문이다. 따라서 공공의 영역에서 기술개

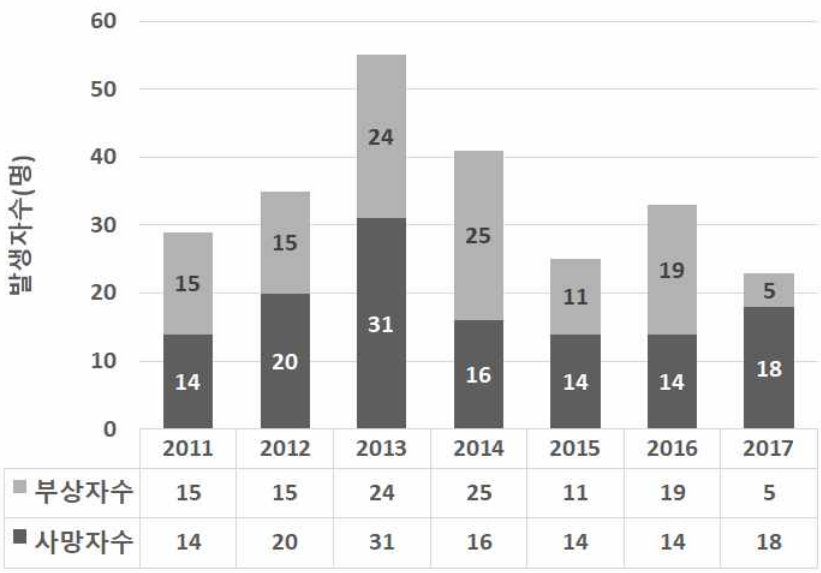
발을 통하여 현장 보급이 필요하다. 이와 같은 이유로 미국 산업안전보건연구원(US NIOSH)에서는 NIOSH Center for Direct Reading and Sensor Technologies를 만들어 실시간측정을 위한 기기와 센서 기술개발을 직접 수행하고 있다. 자세한 내용은 2. 밀폐공간 질식재해 예방을 위한 기술조사 - 2) 기술조사 부분에서 기술하도록 한다.

(1) 재해현황

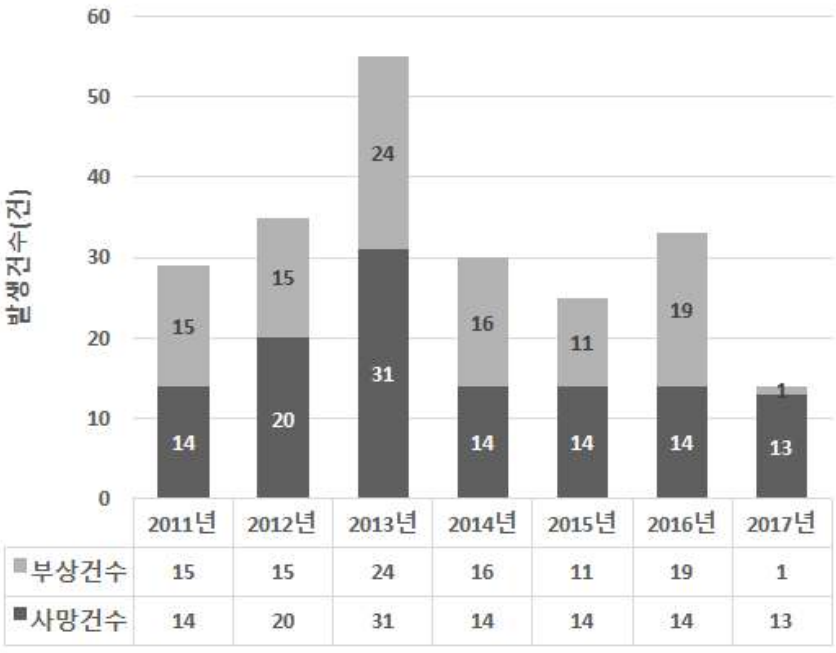
매년 지속적으로 산소결핍 및 유해가스에 의한 재해자가 발생하고 있다. 2011년부터 2017년 까지 7년간 질식재해자 수를 보면 전체 241명 중 사망자가 127명으로 사망률이 52.7%로 일반 사고성 재해 사망률인 1.3%보다 매우 높은 수치이다. 재해건 수를 보면 전체 221건 중 사망사고는 120건으로 54.3%이다. 이는 질식재해가 사망사고로 이어지는 비율이 매우 높다는 것을 보여주며, 따라서 이에 대한 관리가 매우 필요한 재해임을 나타낸다.

**<표 2> 2011-2017 연도별 질식재해 현황**

| | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 총합계 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **총재해건수** | 29 | 35 | 55 | 30 | 25 | 33 | 14 | 221 |
| 사망건수 | 14 | 20 | 31 | 14 | 14 | 14 | 13 | 120 |
| 부상건수 | 15 | 15 | 24 | 16 | 11 | 19 | 1 | 101 |
| **총재해자수** | 29 | 35 | 55 | 41 | 25 | 33 | 23 | 241 |
| 사망자수 | 14 | 20 | 31 | 16 | 14 | 14 | 18 | 127 |
| 부상자수 | 15 | 15 | 24 | 25 | 11 | 19 | 5 | 114 |




**[그림 3] 2011-2017 연도별 질식재해 발생자수 (사망, 부상)**



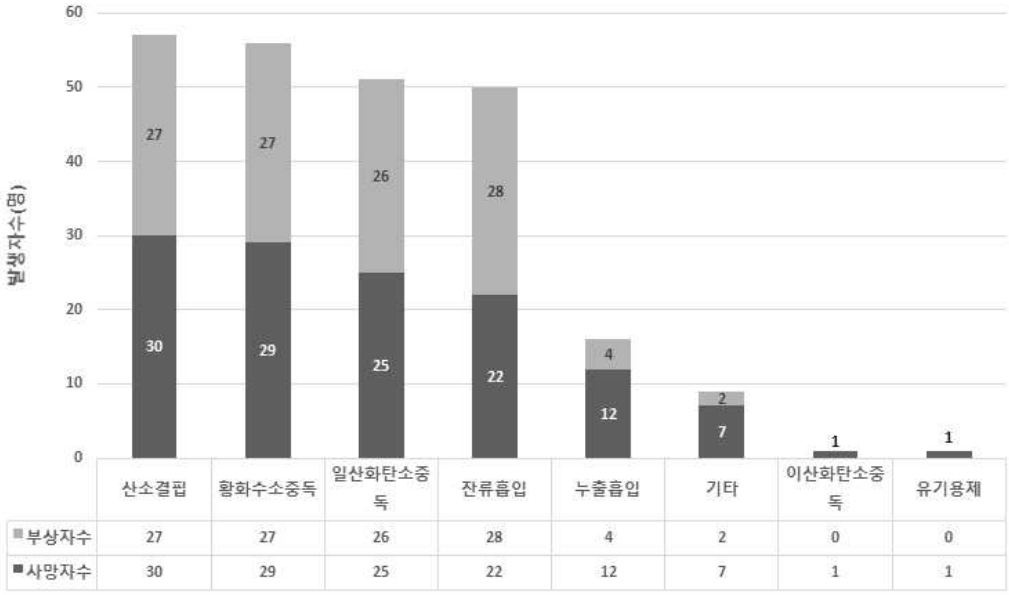

**[그림 4] 2011-2017 연도별 질식재해 재해 발생건수 (사망, 부상)**

재해원인 별로 보면 발생자수는 산소결핍, 황화수소 중독, 일산화탄소 중독, 잔류 흡입 순이었고, 발생건수는 황화수소 중독, 산소결핍, 잔류 흡입, 일산화탄소 중독 순이었다. 발생자수와 발생건수 순위가 일부 다르지만, 상위 4개의 발생원인은 유사한 비율이다.

헬륨/아르곤/질소/프레온/탄산가스/불활성기체와 같은 물질들의 경우 그 자체는 유해성이 없으나 공기 중 산소농도를 낮출 수 있는 물질이다. 주로 화재나 폭발 또는 설비보호를 위해 외부의 공기가 들어오지 못하도록 불활성가스를 사용하며(purge), 산소결핍으로 인한 질식재해의 위험이 있다.

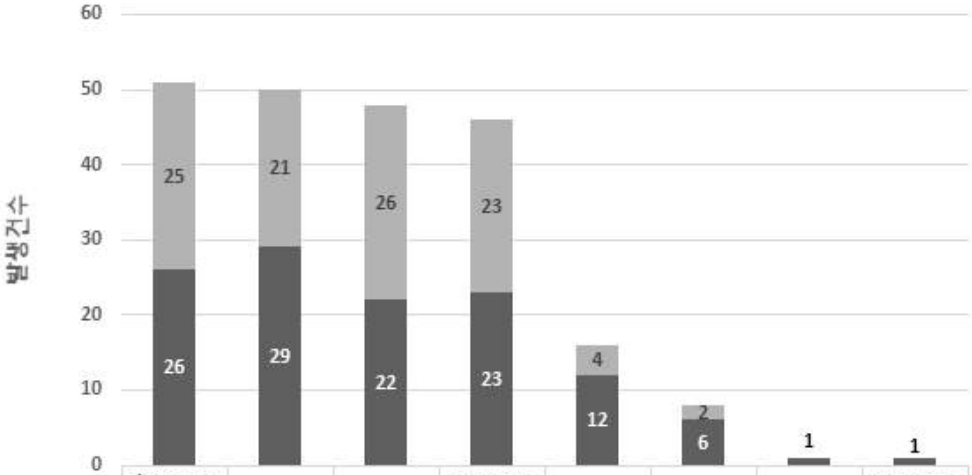
재해원인이 밀폐공간 질식재해 원인 분석에 매우 중요한 이유는 원인을 정확하게 파악하고 있어야 그에 대한 대책을 마련할 수 있기 때문이다.

예를 들면 안전보건공단에서 발행한 밀폐공간 매뉴얼 TOP 1에서는 정화조와 집수조에서 발생하는 황화수소에 대한 사례가 소개되어 있는데 황화수소는 폭기작업과 같이 폐수를 휘젓게 되면 폐수의 표층이 깨지면서 순간적으로 고농도로 발생시키는 성질을 가지고 있어 재해가 발생하기 쉽다. 일산화탄소 중독 재해의 대부분이 겨울철 콘크리트 양생작업 중 갈탄난로의 불완전연소로 인해 일산화탄소가 발생하여 재해가 발생한다 (이정완 등, 2016).




| | 산소결핍 | 황화수소중독 | 일산화탄소중독 | 잔류흡입 | 누출흡입 | 기타 | 이산화탄소중독 | 유기용제 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 부상자수 | 27 | 27 | 26 | 28 | 4 | 2 | 0 | 0 |
| 사망자수 | 30 | 29 | 25 | 22 | 12 | 7 | 1 | 1 |

**[그림 5] 재해원인 별 밀폐공간 질식재해 발생자수**




| | 황화수소중독 | 산소결핍 | 잔류흡입 | 일산화탄소중독 | 누출흡입 | 기타 | 유기용제 | 이산화탄소중독 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 부상건수 | 25 | 21 | 26 | 23 | 4 | 2 | 0 | 0 |
| 사망건수 | 26 | 29 | 22 | 23 | 12 | 6 | 1 | 1 |

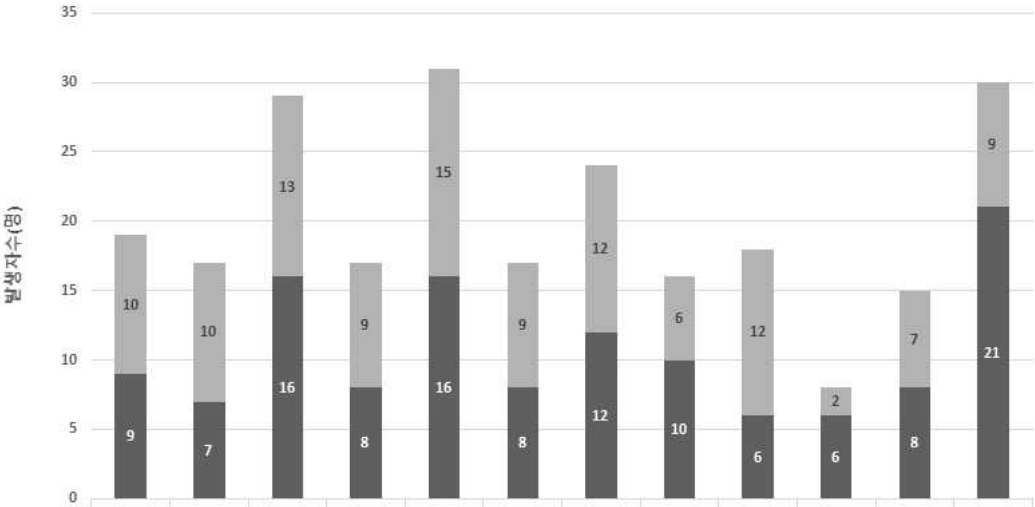
**[그림 6] 재해원인 별 밀폐공간 질식재해 발생건수**

계절에 따른 원인은 계절에 따라 큰 차이가 없이 수시로 발생하고 있다고 볼 수 있다.

일부 장소에서는 겨울철과 여름철에 집중적으로 발생하고 있다.

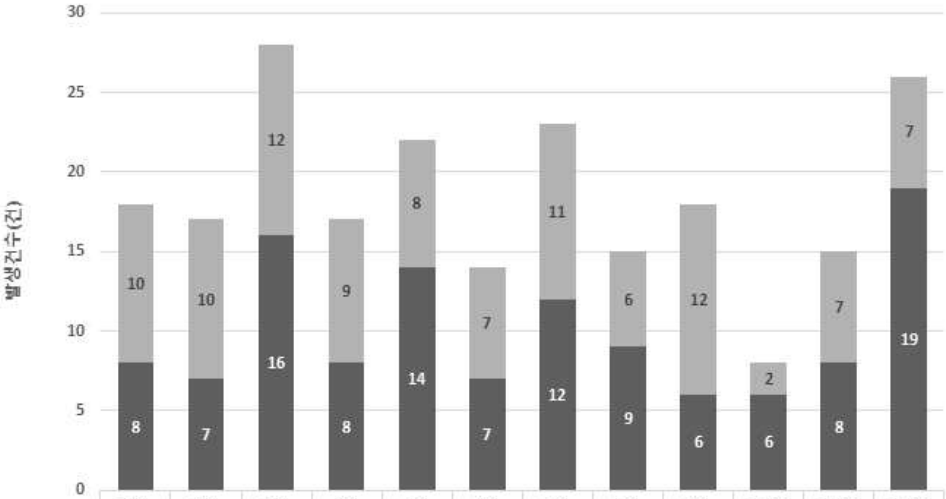
겨울철에는 콘크리트 양생작업 시 사용하는 갈탄에 의한 일산화탄소 중독이 많이 발생하였다. 일반적으로 연소에는 산소가 필요하다. 완전연소가 일어나면 물과 이산화탄소가 발생을 하는데 겨울에 건설현장에서 콘크리트 양생작업 시 일정한 온도를 유지 해주기 위해 갈탄을 태우게 되는데 천막 등으로 보양을 하여 초반에는 내부에 있던 산소가 소모가 되고 산소가 부족하게 되면 불완전연소를 일으키게 된다. 이때 일산화탄소가 발생하게 되는 것이다. 다음 작업을 하러 근로자가 진입 시 산소가 부족한 상태로 들어갔다가 사고가 발생하는 것이다.

여름철에는 축산분뇨 처리작업, 맨홀작업, 오폐수처리시설에서의 황화수소 중독이 많이 발생함을 알 수 있었다. 여름철에는 주로 온도가 높아 오폐수 분해 속도가 증가하면서 황화수소 농도가 높아지고 또한 밀폐공간 내부에 있는 미생물의 번식속도가 증가함에 따라 미생물의 번식 및 호흡에 따른 산소 소비량 증가로 밀폐공간 내에 산소 농도가 감소하여 산소 결핍이 발생하게 된다.




| | 1월 | 2월 | 3월 | 4월 | 5월 | 6월 | 7월 | 8월 | 9월 | 10월 | 11월 | 12월 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ■부상자수 | 10 | 10 | 13 | 9 | 15 | 9 | 12 | 6 | 12 | 2 | 7 | 9 |
| ■사망자수 | 9 | 7 | 16 | 8 | 16 | 8 | 12 | 10 | 6 | 6 | 8 | 21 |

**[그림 7] 월별 밀폐공간 질식재해 발생자수**




| | 1월 | 2월 | 3월 | 4월 | 5월 | 6월 | 7월 | 8월 | 9월 | 10월 | 11월 | 12월 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ■부상건수 | 10 | 10 | 12 | 9 | 8 | 7 | 11 | 6 | 12 | 2 | 7 | 7 |
| ■사망건수 | 8 | 7 | 16 | 8 | 14 | 7 | 12 | 9 | 6 | 6 | 8 | 19 |

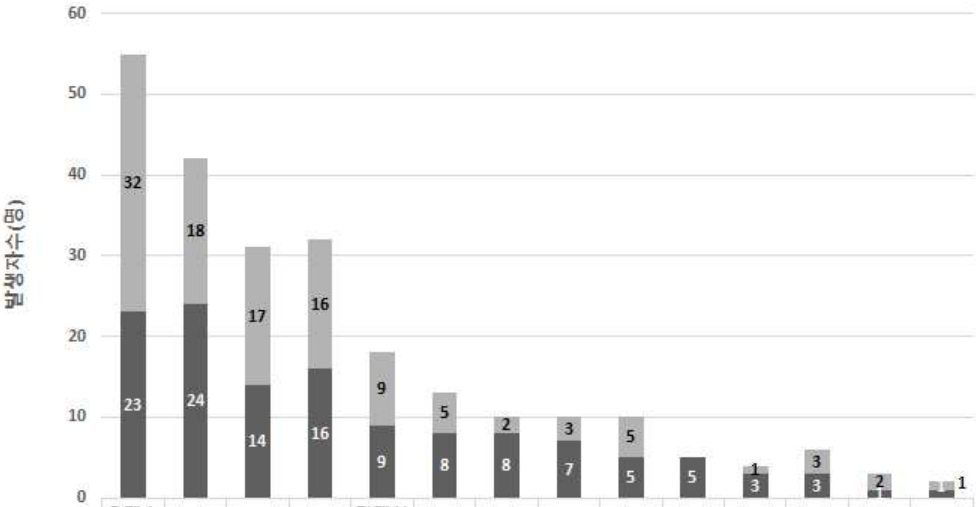
**[그림 8] 월별 밀폐공간 질식재해 발생건수**

발생장소에 따른 분류는 사망자수와 사망건수 모두 오폐수처리장/정화조에서 가장 많았고, 저장용기, 건설현장, 맨홀, 기계설비, 선박, 배관 내부, 축사 정화조, 전로, 기타, 반응기, 음식물처리장, 변전소, 숙소 순이었다.

저장용기는 챔버와 물탱크 등 항상 출입하는 곳이 아닌 매우 드물게 들어가는 장소이기 때문에 환기가 충분하지 못하여 발생한 것으로 추정되며, 오폐수처리장/정화조의 경우 유해가스 중 황화수소와 같은 화학적 질식제가 공기 중으로 발생하였을 것으로 추정되며, 건설현장에서는 콘크리트양생 시 갈탄의 불완전연소로 인하여 일산화탄소가 발생했을 것으로 판단된다. 건설현장에서는 유기용제 중독도 포함되어 있다.

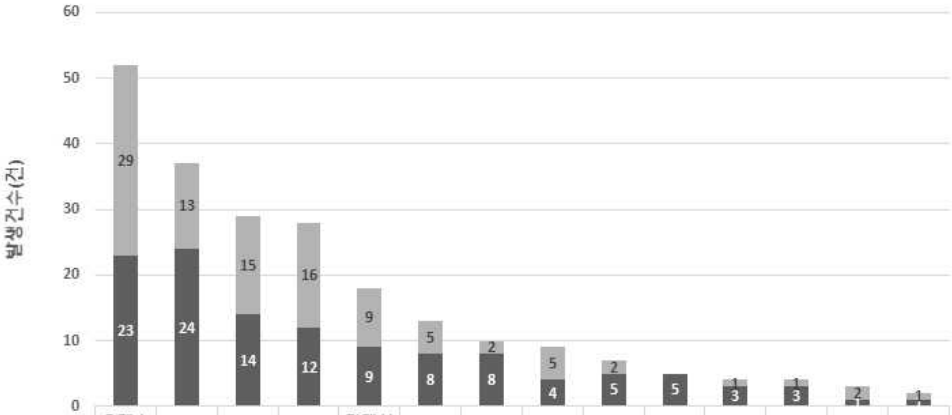
오폐수처리장, 건설현장의 경우에는 관리의 범위가 비교적 한정적이기 때문에 관리감독이 비교적 잘 되고 있으나 맨홀의 경우 작업공간이 매우 다양하여 관리감독이 잘 되지 않고 위급상황 발생 시 대응이 쉽지 않은 점이 있다.

또한 발생장소에 따라 질식재해가 발생하는 것은 빈도의 차이일 뿐 사망률이 매우 높은 산업재해이기 때문에 철저한 관리감독이 필요하다.




| | 오폐수처리장·정화조 | 저장용기 | 맨홀 | 건설현장 | 기계설비(보일러 등) | 선박 | 배관내부 | 축사정화조 | 기타 | 전로 | 음식물처리장 | 반응기 | 변전소 | 숙소 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ■부상자수 | 32 | 18 | 17 | 16 | 9 | 5 | 2 | 3 | 5 | 0 | 1 | 3 | 2 | 1 |
| ■사망자수 | 23 | 24 | 14 | 16 | 9 | 8 | 8 | 7 | 5 | 5 | 3 | 3 | 1 | 1 |

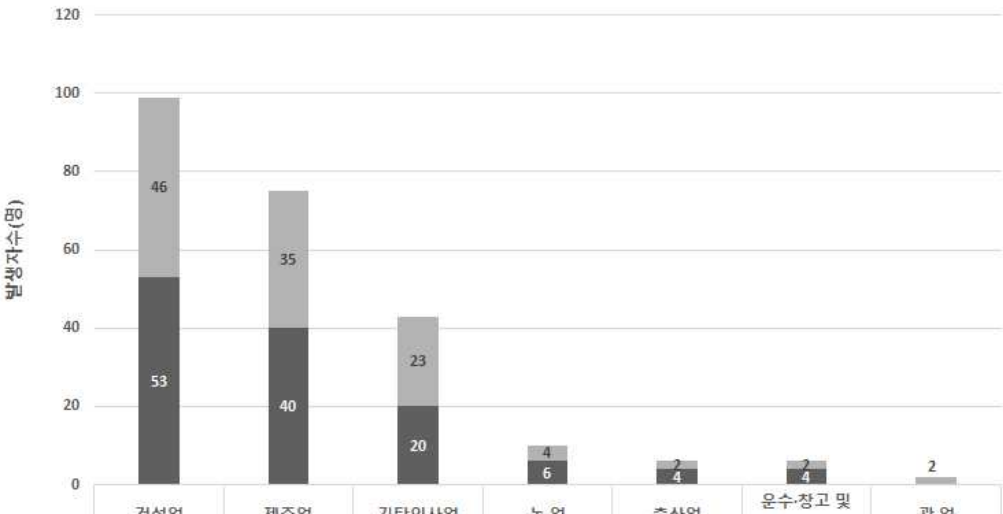
**[그림 9] 발생장소별 재해 발생자수**



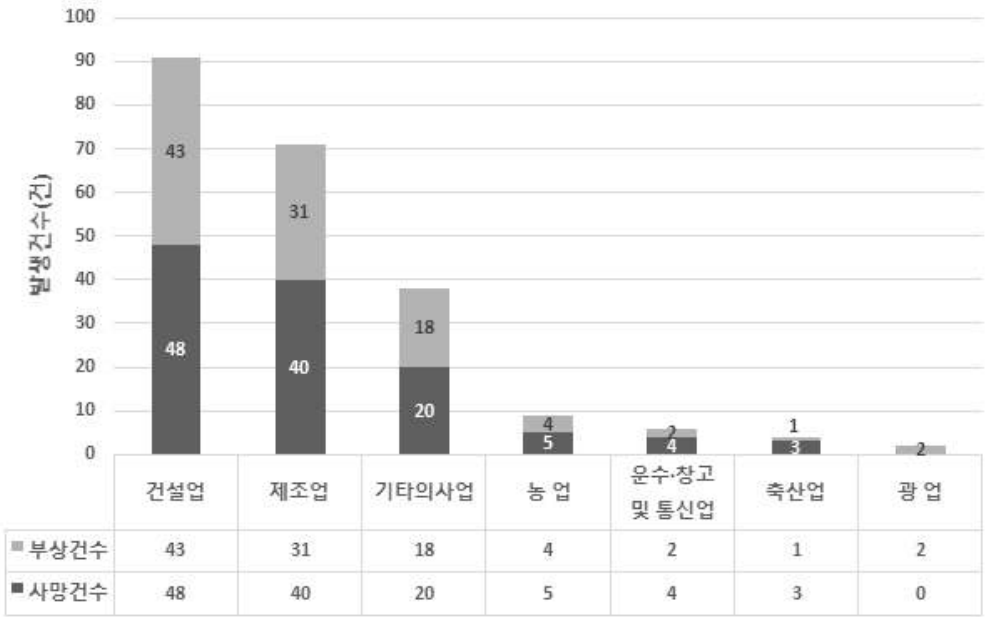

| | 오폐수처리장·정화조 | 저장용기 | 건설현장 | 맨홀 | 기계설비(보일러 등) | 선박 | 배관내부 | 기타 | 축사정화조 | 전로 | 음식물처리장 | 반응기 | 변전소 | 숙소 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ■부상건수 | 29 | 13 | 15 | 16 | 9 | 5 | 2 | 5 | 2 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| ■사망건수 | 23 | 24 | 14 | 12 | 9 | 8 | 8 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 1 | 1 |

**[그림 10] 발생장소별 재해 발생건수**

원인은 다양하게 있으나, 가스농도 측정 전 혼자 출입을 하거나, 이를 구조하러 갔을 때, 또한 의심이 되는 상황에서 이를 무시하고 작업을 할 때와 같이 기본 원칙을 지키지 않았을 때 주로 발생을 하는 것이다. 최근 들어 맨홀, 식품저장고 등과 같은 전통적인 밀폐공간 뿐 아니라 전자산업(디스플레이, 반도체 - 질소질식), 사업장 (잔류가스 폭발, 유독가스 중독, 유증기 폭발), 건축현장(갈탄 사용으로 인한 일산화탄소 중독, 방수작업) 등에서 잔류가스, 제조업(탱크 내부 용접, 청소, 보수작업) 에 의한 사고가 지속적으로 일어나고 있다. 건설업과 제조업에서 전체 사망자 및 사망건수의 73%를 차지할 정도로 건설업과 제조업에서의 밀폐공간 질식재해 예방 및 관리가 필요하다.

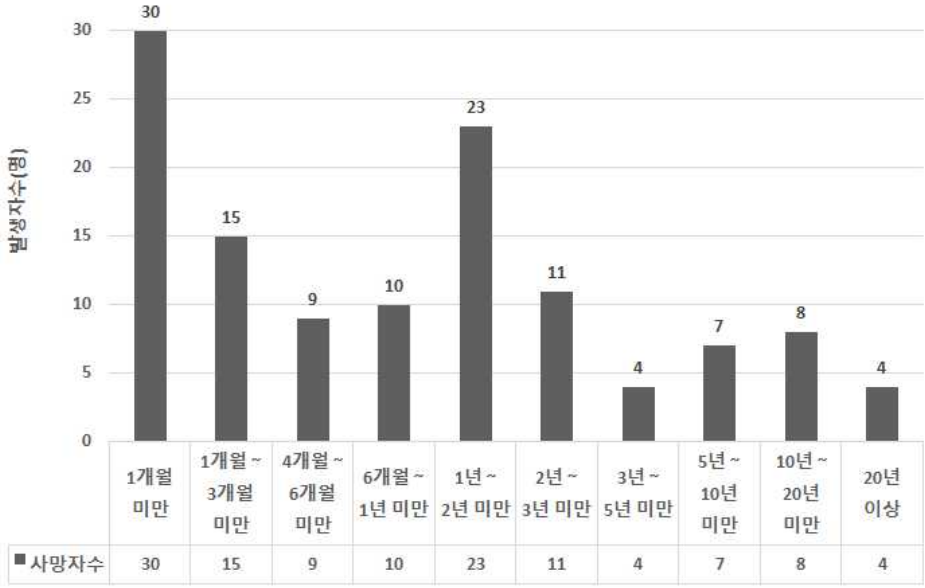



**[그림 11] 업종별 재해 발생자수**

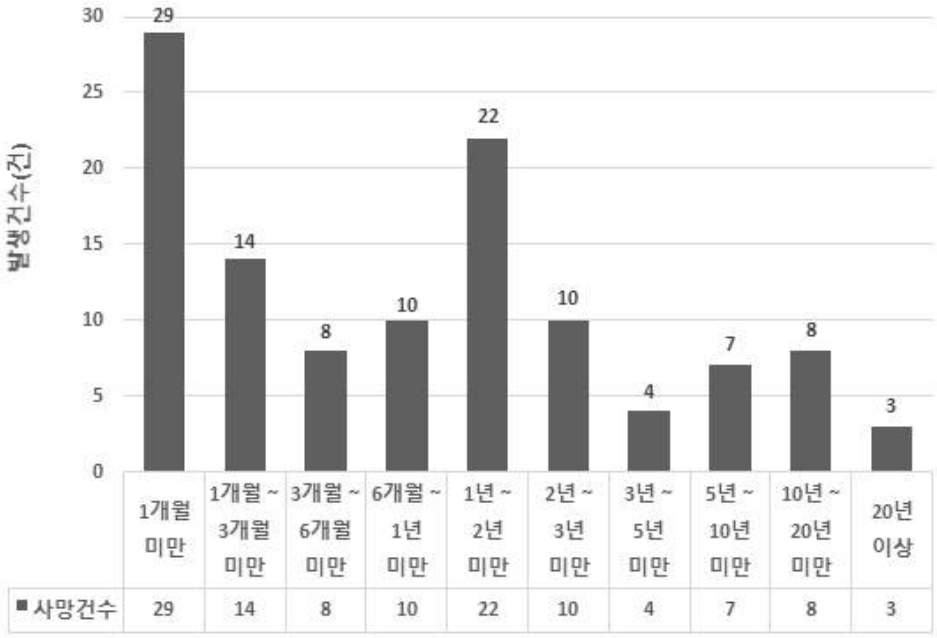



**[그림 12] 업종별 재해 발생건수**

근속기간에 따른 사망재해를 보면, 사망자수 기준으로 6개월 미만의 초심자가 54명으로 43%를 차지하고 있고 1년 미만이 64명으로 50%, 2년 미만이 87명으로 69%, 3년 미만이 77%이었다. 사망건수 기준으로도 6개월 미만이 51건으로 44%, 1년 미만이 61건으로 53%, 2년 미만이 83건으로 72%, 3년 미만이 93건으로 81%이었다. 대부분이 경험이 부족한 초심자에게서 발생하는 것으로 알 수 있었다. 따라서 시스템적으로 출입을 제한하거나 교육이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

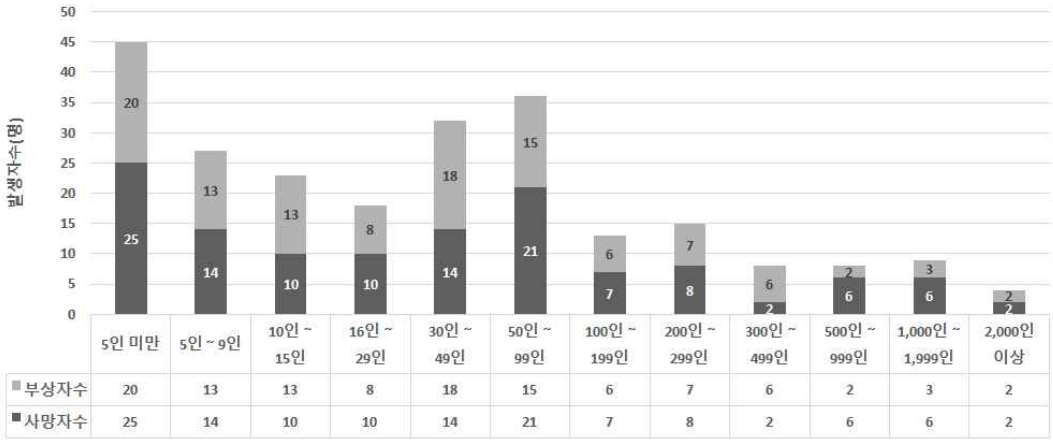



[그림 13] 근속기간 별 사망자수



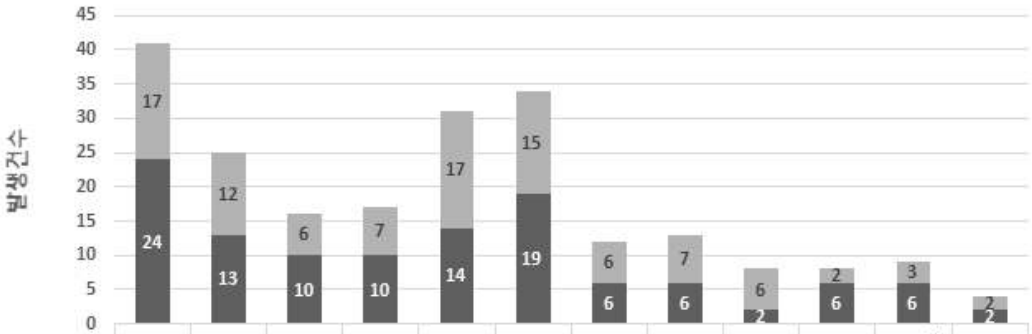

[그림 14] 근속기간 별 사망건수

규모에 있어서는 소규모 사업장에서 다수 발생함을 알 수 있었다. 사망자수 기준으로 5인 미만 사업장에서 25명으로 20%를 차지하였고, 50인 미만 사업장에서 73명으로 58%를 차지하였다. 사망건수 기준으로도 5인 미만 사업장에서 24건으로 20%를 차지하였고, 50인 미만 사업장에서 71건으로 60%를 차지하였다. 규모가 작은 사업장에서는 가스농도측정기 또는 환기시설을 구비하지 않거나, 감독자의 역할을 올바르게 수행하지 않아 발생한 것으로 추정된다.




| | 5인 미만 | 5인 ~ 9인 | 10인 ~ 15인 | 16인 ~ 29인 | 30인 ~ 49인 | 50인 ~ 99인 | 100인 ~ 199인 | 200인 ~ 299인 | 300인 ~ 499인 | 500인 ~ 999인 | 1,000인 ~ 1,999인 | 2,000인 이상 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 부상자수 | 20 | 13 | 13 | 8 | 18 | 15 | 6 | 7 | 6 | 2 | 3 | 2 |
| 사망자수 | 25 | 14 | 10 | 10 | 14 | 21 | 7 | 8 | 2 | 6 | 6 | 2 |

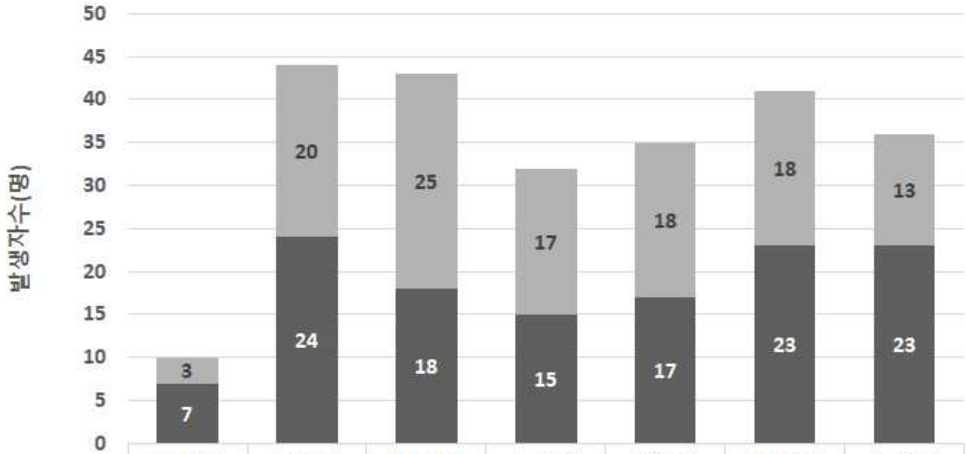
**[그림 15] 사업장 규모 별 재해 발생자수**



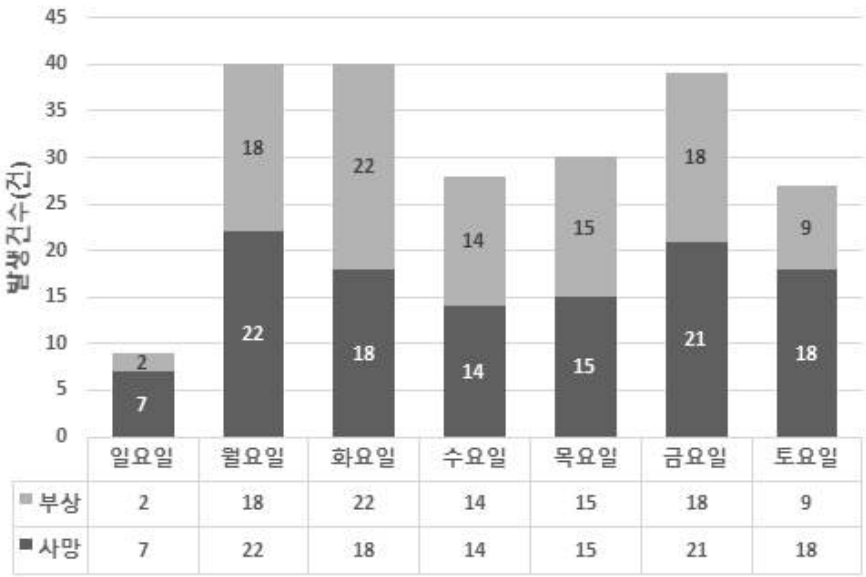

| | 5인 미만 | 5인 ~ 9인 | 10인 ~ 15인 | 16인 ~ 29인 | 30인 ~ 49인 | 50인 ~ 99인 | 100인 ~ 199인 | 200인 ~ 299인 | 300인 ~ 499인 | 500인 ~ 999인 | 1,000인 ~ 1,999인 | 2,000인 이상 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 부상건수 | 17 | 12 | 6 | 7 | 17 | 15 | 6 | 7 | 6 | 2 | 3 | 2 |
| 사망건수 | 24 | 13 | 10 | 10 | 14 | 19 | 6 | 6 | 2 | 6 | 6 | 2 |

**[그림 16] 사업장 규모 별 사망자 수**

요일별 결과를 보면 사망자가 월요일에 가장 많고 금요일, 토요일 순이었다. 월요일의 경우 모든 산업재해가 가장 많이 일어나는 요일로 알려져 있고, 월요일에 가장 많은 사망자가 발생 하였다. 주말 내내 밀폐되어 있던 공간에 충분한 환기 및 측정 없이 진입한 것이 원인으로 추정된다. 금요일과 토요일의 경우 한주가 마무리되는 상황에서 재해가 많이 발생한 것으로 추정되며 일요일의 경우 모수 자체가 매우 작아서 작게 발생한 것으로 추정된다.




[그림 17] 요일에 따른 밀폐공간 질식재해 발생자수




[그림 18] 요일에 따른 밀폐공간 질식재해 발생건수

현재 밀폐공간에서의 사고에 대한 장소 및 유해요인에 대한 유형화가 부족하다. 장소 및 유해요인에 따른 효율적인 대응방안의 수립에 어려움을 극복하고자 장소와 유해요인에 따라 인과관계를 연결고리(Linkage)로 유형화 하였다. 또한 밀폐공간의 질식발생 위험요인과 기인물 유형을 도출하였다(김진호, 2017).

총 71건의 재해를 시설물(23개 유형), 재해장소(35개 유형), 작업(29개 유형), 기인물(36개 유형), 유해환경(9개 유형)으로 분류하여 질식재해가 발생한 주요 6개 시설물에 따라 재해요소들의 연결 유형을 분석하였다.

유형에 따라 살펴보면, 맨홀이 가장 많은데, 장소, 기인물, 환경이 매우 다양함을 알 수 있다. 유해가스를 보면, 일산화탄소, 톨루엔, 산소결핍, 황화수소, 메탄 등으로 다양하다. 폐수처리장과 하수처리장의 경우 황화수소가 가장 큰 원인이 되는 유해가스이다.

우리가 여기서 알 수 있는 것은 산소농도 측정만큼 중요한 것이 기타 유해가스의 측정도 중요하다는 것이다. 기타 유해가스가 존재하는지는 해당 밀폐공간을 관리하는 책임자가 기타 유해가스 발생 여부를 정확하게 인지하고 있어야 한다고 생각한다. 이러한 정보가 없는 경우에는 작업을 해서는 안된다.

(2) 밀폐공간에서의 응용 사례

국내 기업에서 밀폐공간 사고를 예방하기 위하여 첨단기술을 도입하는 것은 최근 들어 시작이 되었다. 주로 사고가 발생한 이후 다양한 관리방안을 검토하였고 측정을 현장에서 실시간으로 할 수 있는 방법에 대한 사례가 있었다. 주로 대기업 중심으로 도입을 하였고, 대기업에서는 자체개발, 오폐수처리장에는 외국측정기 제조업체의 제품을 설치하여 사용 중에 있다.

**<표 3> 국내 기업에서 밀폐공간 질식재해 예방을 위한 첨단기술 도입 사례**

| 사업장 | A | B | C |
|---|---|---|---|
| 업종 | 중화학 | 제철 | 오폐수처리 |
| 유해인자 | 산소, 황화수소, 메탄, 일산화탄소, 가연성가스 | 산소결핍 | 산소, 황화수소, 메탄, 일산화탄소, 가연성가스, 암모니아, 염소, 아황산 |
| 통신방법 | LoRa | LTE | 무선 Mesh |
| 형태 | (지역)현장부착형 | (지역)현장부착형<br>(개인)안전모부착형 | (지역)현장부착형 |

가) A 사업장

A 사업장에서는 밀폐공간 유해가스 감지 서비스를 시범 적용 중에 있다. IoT 전용망인 LoRa 통신망을 이용하여 통신 하고 있다. 스마트 팩토리 솔루션을 기반으로 밀폐감지, 예지정비, Cloud, Smart 작업허가 등 다양한 시도를 하고 있다.

밀폐공간에서 가스모니터가 상시 작동을 하고 있고 실시간으로 현장

상황을 통합 모니터링하면서, 감독관과 작업자에게 알람을 주는 시스템이다. 무선감지기, 무선통신, 서비스로 나누어 볼 수 있는데, 무선감지기는 저장탱크 내부 또는 설비 내부에 가스감지기를 설치하고 IoT 전용망인 LoRa를 통하여 실시간으로 센서 정보를 수집하는 시스템이다.

가스 감지기에서 측정할 수 있는 물질은 산소, 황화수소, 메탄, 일산화탄소, 가연성가스이고, 배터리를 이용하여 사용하거나 전원을 인가하여 사용 할 수도 있다. 그러나 휴대용으로 사용하기에는 무게나 부피가 커서 현장에서는 불편할 수도 있다.

무선통신은 LoRa를 사용하는데 현재 전국망이 갖추어져 있다고 알려져 있다. 모니터링의 경우 측정 Data 모니터링, Trend 분석, 알람이력 관리, 감지기 제어 등 기능을 가지고 있다. 최초 1단계에서는 20개에 대하여 Sensing 프로세스 검증을 하였고, 2단계에서는 20개에 대하여 LoRa에 대한 통신 신뢰성 검증을 하고, 3단계에서는 실무 적용 서비스 활용성 검증을 통하여 개발 중에 있다. 이를 통하여 감지기 신뢰성 확보, 통신 안정성 확보, 작업절차 수립을 실시하고 있으며, 최종 목표는 인명사고 예방과 수작업 측정 업무 절감, 허가를 위한 작업지연 해소, 안전한 작업환경을 만드는데 있다.

나) B 사업장

B 사업장의 경우 밀폐공간 작업 허가서를 개정하고, IoT 기반의 잠재위험 인지, 밀폐공간 작업 프로그램 운영 등 다양한 활동을 하고 있다. 드론을 이용한 가스 검지 방법 도입을 검토 중에 있고 Smart 안전모를 이용한 안전사고 예측 예방 관리 시스템 구축을 시도 하고 있다. 안전모 위에 부착식으로 카메라, 센서, 마이크, 알람 시스템을 만들어 보급하고, 밀폐공간 진입 시 출입 시스템 확인 여부, 가스누출 위험지역 드론 좌표 지정 및 상시 자동측정과 연동, 스마트폰 자이로 센서를 이용한 추락사고 자동 신고 시스템등 다양한 기술을 도입할 예정이다. 또

한 로봇을 이용한 이동식 가스 검지기를 개발중에 있다.

다) C 사업장

C 사업장의 밀폐공간은 IoT를 이용하여 실제 운영 중에 있다. 하수처리장은 하/폐수, 분뇨, 처리를 한다. 본 사업장의 경우에도 2016년 9월 경 새벽에 시설물 야간 순찰 중 농축 및 가용화 설비동에서 황화수소에 중독되어 1명이 사망하고 3명이 부상한 중대 재해가 발생하였다. 원인은 급배기 설비의 비정상 가동으로 인한 환기 불충분으로 약품 용해조 급배기 농축 설비에서 확산된 고농도의 황화수소에 중독된 것이다. 이에 따라 C 사업장에서는 가스측정기를 국내 하수처리장 최초로 무선 측정 시스템을 도입하게 되었다. 무선 가스측정기는 가스측정기와 컨트롤러로 구성되어 있다. 측정 항목은 산소, 황화수소, 메탄, 일산화탄소, 가연성가스, 암모니아, 염소, 아황산이고, 통신은 기기 간 서로 RF로 연결을 하는 방식이라 초기 비용 외에는 비용이 발생하지 않는 장점이 있다. 공간이 작기 때문에 RF통신방법을 이용할 수 있다.

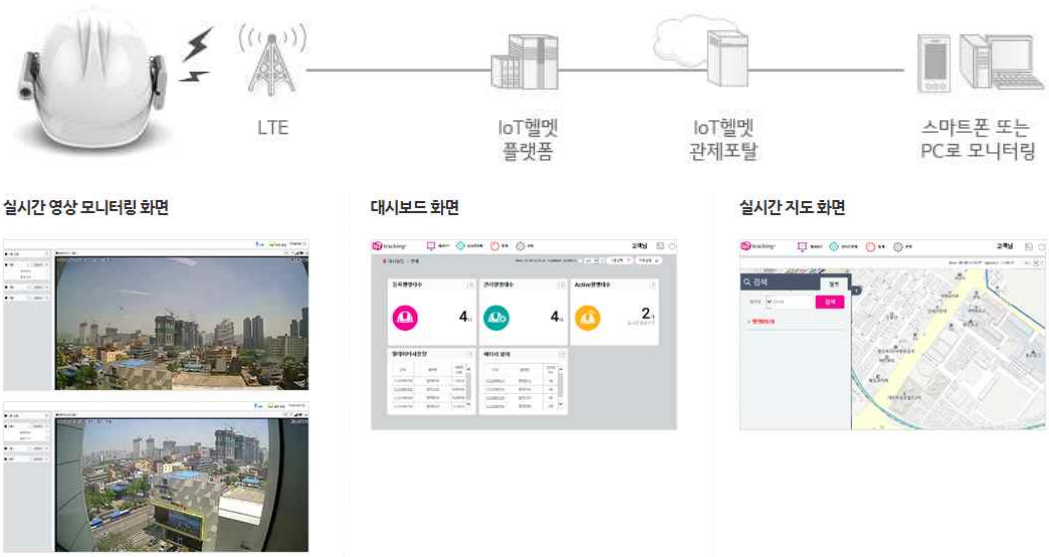
밀폐공간 작업 프로세스도 개정을 하였는데, 계획서 작성 이후 출입 전 보호구 착용 및 유해가스 현장 확인 및 통제실에서 무선컨트롤러를 이용하여 2차 확인을 실시하고 이상이 없다면 유해가스 측정 및 허가서를 발생하고 작업을 하도록 하고 있다. 급배기시설 작동 유무도 추가적으로 알람시스템을 가동하고 있어, 외부에서도 이중으로 확인을 하고 작업에 임할 수 있도록 하고 있다.

개선효과로는 동일한 사고를 예방하고 밀폐공간을 효율적으로 관리한다는 점이 있다. 또한 근로자의 안전 확보 및 심리적 안정감을 줄 수 있다고 하며 향후 방향에 있어서는 타 환경기초시설에도 보급 예정이다.

라) 기타 서비스 제공

밀폐공간 질식재해 예방을 위한 서비스를 제공하고 있지는 않으나 자체 통신망을 이용하여 산업용 IoT 서비스[13]를 제공하고 있다.

악취, 수위, 지진, 가스, 화재, 유량 등 다양한 분야에서 IoT를 이용한 모니터링을 하고 있다. 악취진단의 경우 악취를 실시간으로 감지해 발생 원인을 빠르게 확인할 수 있고, 수위진단의 경우 맨홀하단, 강, 호수 등의 수위를 측정해 범람에 사전 대응할 수 있도록 하며, 가스안전의 경우 산업현장에 가스센서를 설치하여 가스누출여부를 실시간으로 확인하고, 화재안전의 경우 화재발생 위험지역에 센서를 설치해 화재상황을 실시간으로 확인할 수 있는 서비스를 제공하고 있다.




**[그림 19] D사가 제공하는 IoT 헬멧의 개념도**

13) http://www.uplus.co.kr/biz/m2m/mmtom/InitBzIIMonitoring.hpi

## 2. 밀폐공간 질식재해 예방을 위한 기술 조사

### 1) 4차 산업혁명의 정의

4차 산업혁명에 대한 용어는 널리 퍼져있다. 하지만 이를 정확히 정의하지는 못하고 있다. 이에 우리나라 한국정보통신기술협회에서는 “사물인터넷, 인공지능, 빅데이터 등 첨단 정보통신기술이 사회/경제 전반에 걸쳐 융합되어 혁신적인 변화가 나타나는 산업혁명이다. 이와 같은 기술이 기존의 산업이나 서비스에 융합되거나 로봇공학, 3D 프린팅, 생명공학, 나노기술 등 다양한 분야의 새로운 기술과 결합되어 실세계 모든 서비스와 제품을 네트워크로 연결하고, 사물을 지능화하는 것”으로 정의하고 있다. 그러나 아직도 보편적인 상식을 가지고 이해하기에는 너무 어렵거나 모호하게 정의가 되어 있는 것이 현실이다.

(1) 역사

영국에서 시작된 산업혁명은 18세기 중반 제임스 와트 (James Watt)가 증기기관[14]을 만든 해를 원년으로 삼고 있다. 최초 산업혁명 이후 1870년경을 2차 산업혁명, 1960년경을 3차 산업혁명, 2016년을 4차 산업혁명으로 세분화하기 시작하였다.

크게 보면 1차 산업혁명은 증기기관을 통하여 사람이나 동물의 힘을 대신 할 수 있으며 이를 뛰어넘는 큰 힘을 만들고 제어 할 수 있는 시대이다. 즉, 공업화가 본격적으로 이루어지게 된 시기라고 할 수 있다.

14) 증기기관은 최초 그리스 수학자인 Heron에 의하여 아에올리스의 공(Aeolipile)으로 최초 발명되었고, 제임스 와트는 이에 응축기를 부착하여 효율을 높혀 힘을 쓸수 있도록 한 것이다.

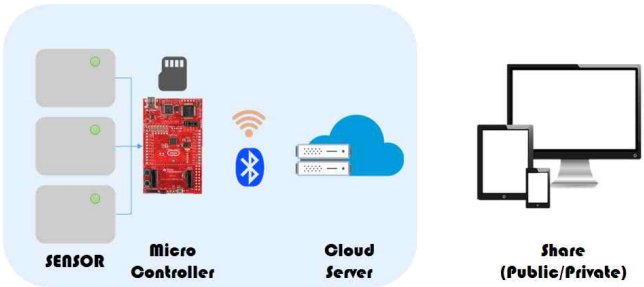
2차 산업혁명은 그 힘을 전기로 저장할 수 있게 되고, 석유 등을 사용하면서 공업화가 가속화되기 시작하였다. 이를 통하여 제조업의 생산 효율성이 급격히 증가하게 된 획일화를 통한 대량생산 (Mass production)이 가능해지고, 정해진 시간 동안의 노동과 휴식이 보장되는 시대의 막을 열게 되었다. 3차 산업혁명은 컴퓨터, 인터넷, 스마트폰 등 다양한 기술들이 혁신적으로 보급 된 것을 말한다. 컴퓨터를 통하여 자동화가 가능해졌고, 인터넷을 통하여 전세계가 하나로 연결되었으며, 스마트폰을 통하여 어디서든 그 정보들을 얻고 조작할 수 있게 되었다. 이를 통하여 그동안 구축되어 있던 정보의 소유나 체계들의 지각변동을 일으키며 국가간 장벽도 사라지게 되어 전세계의 정보를 얻는 것이 가능해졌다. 제조업의 생산 효율성을 최대화 하면서도 이 시기에는 플랫폼 중심의 산업을 강화하여 정보의 점유에 대한 가치가 함께 극대화 되는 시기가 되었다. 플랫폼이란 구글의 안드로이드, 애플의 iOS 등 산업의 중심역할을 하여 제조, 정보, 공유 등 새로운 형태의 생태계를 만드는 산업으로 설명 할 수 있다. 플랫폼을 장악한 기업은 앞으로의 방향을 결정하고 소비자들을 끌어들일 수 있는 능력을 가지게 된다. 이를 통하여 소프트웨어, 하드웨어, 판매자, 소비자 까지 자신의 지배 구도에 넣고 방향을 설정할 수 있게 된 것이다. 이에 따라 발생할 수 있는 문제는 플랫폼의 소유자는 다른 플랫폼과의 연계를 방해하게 되고 이로 인한 시너지 효과를 기대하기는 어려웠다. 어쩌면 이는 기존의 산업의 원동력으로 기술발전을 해온 것일 수 도 있다. 그래서 4차산업혁명 이전까지는 획일화, 플랫폼을 통한 중앙집중과 폐쇄적 독점이 기업의 성장 동력이었다면, 4차 산업혁명은 이들을 탈피하기 위하여 맞춤형, 플랫폼의 분권화 개방화가 그 핵심이라고 할 수 있다.

스마트 홈, 스마트 팩토리, 스마트 시티가 그 예가 될 수 있다. 가정내의 센서가 현재 집안을 센서로 데이터를 받아서 원하는 온습도로 맞추어 조정을 하고, 사물인터넷을 이용하여 각 기기들을 조종하고 클라우드와 빅데이터를 이용하여 이 데이터들을 저장하고 축적해둔 후 인공

지능을 통하여 거주자에게 편안한 공간을 제공하는 기술이 가능하게 된 것이다. 그동안에는 획일화된 시스템에서 맞춤형 시스템으로, 사용자가 마음대로 변경할 수 있는 플랫폼을 제공해주는 집중형에서 분권형, 독점에서 개방형으로 기술 보급이 진행 되고 있다.

(2) 사물인터넷 (Internet of Things: IoT)

전화와 인터넷은 사람과 사람을 연결해 주었다. 서로 음성과 문자를 통하여 정보를 연결해준 것이다. 사물인터넷은 사람과 사람 뿐 아니라 사람과 기계, 기계와 기계를 연결해주는 것을 이야기하며, 4차 산업혁명의 핵심 기술이라고 할 수 있다. 말 그대로 사물이 인터넷에 연결되는 기술을 사물인터넷이라고 할 수 있다. IoT 서비스의 전체 구조는 1) 하드웨어(센서, 장치 등), 2) 통신기술, 3) 클라우드 플랫폼으로 이루어 져 있다.




**[그림 20] IoT 시스템의 개념도**

스마트폰이 개발되면서 개인 인터넷이 보급되게 되고 SNS와 같은 앱을 통하여 개인이 컨텐츠를 생산해내는 시대를 맞이하고 있다. 더 나아가서는 IoT 시대가 펼쳐지면서 사물끼리 통신을 하며 명령자의 생활 패턴을 학습하여 스스로 통신을 하고 제어를 하여 인간에게 편리성을 제공하는 것을 목표로 기술 개발을 하고 있다.

우리나라는 IT 기술력이 매우 뛰어나고 통신망이 전세계적으로 최고 수준으로 보급되어 있기 때문에 무선 통신 기술을 도입하는데 최적의 환경을 보유하고 있다. 또한 반도체, 컴퓨터공학 등 다양한 기술도 보유하고 있어 본 연구를 하는데 있어 매우 유리한 환경을 보유하고 있다. 하지만 아직 산업보건 분야에서는 위의 기술과의 접목과 융합이 이루어지지 않고 있으나, 일부에서는 이에 대한 기술적, 학술적 연구를 시작하였다. 2017년 하계 산업보건학회에서 산업보건에서의 사물인터넷(IoT), 클라우드, 빅데이터의 응용과 적용: 미세먼지 측정기 개발 사례”라는 주제로 발표가 되었으며 이는 IoT, 센서, Big data를 접목시킨 산업보건 최초의 시도라고 할 수 있다. 하지만 아직 우리나라에서는 걸음마 단계이지만 무궁무진한 발전가능성을 가지고 있다고 판단된다.

가) IoT의 도전과제

여전히 IoT 분야에는 해결해나가야 할 문제들이 많이 있다. 대표적인 4가지는 1) 연결성, 2) 전력관리, 3) 보안, 4) 빠른 발전 등이 있다. 연결성의 문제는 무선통신 특성상 연결을 유지하는 것이 핵심 기술인데 아직 다양한 환경에서 사용을 할 수 있는 완벽한 무선통신 기술은 없다. 통신 연결 확인 등 다양한 목적에 의해 간헐적으로 여러 가지 이유로 통신이 끊어지는데 상시 통신이 연결되어야 하는 상황에서는 적합하지 않아 아직 유선 통신을 사용하고 있는 곳이 있다. 전력관리 면에서는 최근에는 무선 기술이 발달하면서 배터리를 이용하여 작동하는 장치들이 많이 개발되고 있다. 통신을 일정간격에 맞추어 하는지, 이벤트가 발생하여 필요할 때 하는지 등 다양한 목적에 따라 개발을 하게 되는데 이에 따라 전력 관리가 다르게 적용된다. 이에 따라 배터리 소모량이 달라지는데 휴대용 기기의 경우 전력관리가 매우 중요한 요소이다. 보안의 경우 해킹의 위험과 개인정보의 문제가 있으며, 빠른 발전에 의해 기기들간 호환성이 빠르게 무너지고 있는 점이 있어 표준화 된 프로토

콜의 개발과 호환성문제에 대한 고민을 함께 해야 하는 시점에 도달해 있는 것이 IoT 기술이 현재 당면해있는 과제이다.

나) 클라우드 (Cloud)

클라우드 시스템은 우리에게 익숙한 기술이다. 하늘에 구름이 떠있고 구름이 보이는 곳에서는 언제든 무한한 저장 공간을 언제 어디서든 사용할 수 있다는 개념 이다. 동시에 데이터의 분실/훼손 위험에서도 자유로워질 수 있다. 사물인터넷에 연결된 사물이 많아질수록 생성하는 데이터의 양은 기하급수적으로 늘고 있고 이를 저장하고 변환하고 분석하는 능력은 결국 클라우드의 역할이기 때문이다.

클라우드의 정보 저장 기능은 기본 요소 중 하나다. 저장하고 축적한 정보를 이용하여 현상을 분석할 수 있다. 물론 클라우드도 정보 저장에 비용이 발생하기 때문에 무제한으로 받아 저장할 수는 없다. 산업안전보건 분야에 클라우드를 사용하려면 비용과 기관 등 관련 조건에 합의해야 한다. 사업적 조건에 합의하더라도 기술적 조건을 만족해야 서비스를 이용할 수 있다. 기본적으로 상수 처리장과 연결되는 관 종류와 크기를 정하는 것과 같다고 보면 된다. 규정에 맞는 관만 연결할 수 있다. 상수 처리장이 받는 과 크기와 연결하는 샘의 관 크기가 다르면 물이 다 샐 것 이다. 클라우드에 연결하는 기기도 통신 방식과 언어를 포함한 조건을 맞춰야 연결할 수 있다. 쉽게 연결할 수 있도록 다양한 관 크기를 모두 받도록 만든 상수 처리장처럼 말이다. 그래도 100퍼센트 호환은 불가능 하니, 기술적 조건을 이해하고 맞추는 것이 필수적 이다.

클라우드 다음기능은 정보 변환이다. 현장에서 측정되어 생성된 데이터를 보내는 기기마다 생성한 종류와 형태가 다르다. 어떤 기기는 온습도, 어떤 기기는 산소농도 등 정보를 보낸다. 클라우드에 보낼 때는 각자의 데이터 형태로 보내게 되는데 이를 동일한 표현으로 표준화 하는는 작업이 필요하다. 쉽게 말해서, 다른 언어로 저장한 각각의 정보를

영어와 같이 비교적 많은 사람들이 사용하는 언어로 변역하는 과정이 필요하다. 이러한 과정을 거치면 누구나 다른 기기에서 보내온 정보를 혼선 없이 읽을 수 있다. 발생원이 다른 물이 상수처리장에 모여 섞이는 과정과 같다고 볼 수 있다.

마지막으로 분석 작업이 있다. 이 과정은 상수처리장에서 하는 정수처리와 같다. 정수처리를 하면 자연 상태 물이 먹을 수 있는 상태로 바뀐다. 클라우드도 시간적, 공간적 분석을 거쳐 정보에 가치를 부여한다. 이 과정에서 잘못 생성된 값에 해당하는 정보는 구분해 버리고 의미 있는 것만 남긴다. 단순 정보보다 이처럼 분석을 거친 정보의 가치와 의미가 커진다. 이를 기반으로 인공지능이 더 정확한 판단을 할 수 있기 때문이다.

다) 인공지능(Artificial Intelligence)

1980년 대에는 인공지능이라는 표현 보다는 전문가 시스템 (Expert System)이라는 용어로 존재해왔다. 인공지능의 첫 번째 성공사례라고 할 수 있는데, 다양한 지식을 축적해놓고 이를 기반으로 판단을 도와주는 시스템이다. 이후 기계의 고장진단, 의사결정 등 다양한 분야에 사용되었다. 그 이후 인공지능이라는 단어에서 인공신경망, 더 나아가서 딥러닝(Deep Learning)이라는 단어로 우리에게 다가왔다.

사물인터넷에 연결된 사물에서 보내는 데이터를 모아 클라우드에 모아 저장하고 변환하고 분석하여 최종 정보를 만들어 낸다. 처리된 정보를 바탕으로 상황을 판단하고 적합한 명령을 부여하는 것이 인공지능이라고 할 수 있다.

### 2) 기술 조사

본 연구에서는 밀폐공간 사고예방을 위한 첨단기술 활용방안에 대하여 조사를 하는 것이다. 우리가 첨단기술을 활용하기 위해서 어느 지점에 있으며, 앞으로 어떻게 나아가야 하는 지에 대한 기술 조사를 실시하였다.

#### (1) 직독식 측정

우리나라 작업환경측정제도에서는 대부분 평균(Integrated) 측정 또는 연속(Continuous) 측정을 실시하고 있다. 직독식(Direct reading) 측정 방법의 경우 산업보건분야 초기에 작업환경측정제도의 법적 근거가 없던 당시 행정관청이 지도차원에서 현장에서 즉시 노출량을 알 수 있는 방법이 필요하였다. 따라서 검지관, 소음측정기 등 측정이 용이한 장비를 활용 하였고, 그 이후 작업환경측정 제도가 도입되면서 직독식 기기들은 정확도가 낮다는 이유로 사용이 줄게 되었다 (정지연 등, 2017).

직독식 측정기의 대표적인 예가 검지관인데, 예비조사, 다른 방법이 없는 경우, 단일물질인 경우(자격자측정)에 대하여 고용노동부 작업환경측정 및 지정측정기관 평가 등에 관한 고시에 명시하고 있다. 고용노동부 사무실 작업환경 관리지침에는 일산화탄소(비분산적외선검출기 또는 전기화학검출기), 이산화탄소(비분산적외선검출기)는 측정을 할 수 있도록 하고 있다 (고용노동부, 2015).

소음의 경우에도 현재 소음누적측정기(Noise Dosimeter)로 측정하기까지 기술적, 법적 변천이 있었다. 최초에는 직독식으로 소음측정기(Sound Level Meter)를 이용하여 측정을 하였고, 이를 이용하여 사람이 일일이 기록을 하고 계산을 하였다. 물론 지금은 소음누적측정기를 이용하여 비교적 편리하게 측정을 하고 있다. 측정기기 측면에서 보았을

때 이는 각기 다른 측정 목적을 가지고 있지만 결론적으로는 사업장에서 작업환경을 평가하기 위한 유용한 데이터를 더욱 많이 얻어 작업환경 평가 시 큰 도움이 되게 된 발전적인 결정이었다.

그렇다면 밀폐공간 측정은 어떻게 이러한 과정을 거쳐야 하는가에 대하여 논의될 필요가 있다. 밀폐공간측정에 있어서는 산업안전보건법에 밀폐공간 작업 시 질식재해 예방을 위해 공기상태 측정을 하도록 하고 있다. 밀폐공간 특성상 측정방법에 대하여 장소별로 구체적으로 제도화하기는 어렵지만 측정방법에 대하여 지금의 측정방법을 보완할 필요가 있다. 일반적으로 가이드라인에는 적절한 측정기를 선택하여 구비하여야 하고, 유지/보수/관리를 통하여 정밀도/정확도를 유지하여야하고, 교정을 해야 하는 등 의 지침은 있으나, 실제 이것이 잘 이루어지고 있는지는 알 수가 없다.

예로, 자동차를 운행하는데 있어서 자동차검사는 운행 중인 자동차의 안전도 적합여부 및 배출가스 허용기준 준수여부 등을 확인하여 교통사고와 환경오염으로부터 국민의 귀중한 생명과 재산을 지키는 중요한 사업이라고 명시하고 있다. 자동차를 운영하려는 사람은 반드시 따라야하는 것이다. 이와 같은 맥락에서 밀폐공간에 국한해 보더라도 근로자가 일을 하는 밀폐공간의 적정공기 확인을 위하여 측정기기를 국가에 등록하고 이를 관리(교정 등) 여부를 국가가 확인하는 제도 도입이 매우 필요하다고 생각한다. 이것은 과잉규제가 아닌 그 사업을 하기 위한 매우 필수적인 과정이다.

국토지리정보원고시 공공측량 작업규정(2018년 3월 30일 시행)에 밀폐공간작업 안전장비를 명시하였다. 공공측량 시 발생할 수 있는 밀폐공간 사고예방을 위한 조치이다. 그러나 산소 및 유해가스농도측정기의 예를 소개하고 있는데 사용방법을 보면, 산소농도 측정기는 밀폐공간 내부로 진입 시 휴대하여 들어가서 측정을 하도록 되어 있고, 혼합가스농도 측정기(산소, 일산화탄소, 황화수소, 가연성가스) 는 밀폐공간 외부에서 호스를 이용하여 측정을 하도록 되어 있다. 이를 고시에 구체적으

로 명시 했다는 것은 매우 고무적인 대응임에는 분명하다. 하지만 산소농도측정기는 밀폐공간으로 지니고 들어가도록 하고, 혼합가스농도 측정기는 외부에서만 측정을 하는 것은 기술적으로 검토하여 혼합가스농도 측정기를 밀폐공간으로 휴대하여 들어가서 작업을 하는 것으로 제안한다.

미국 NIOSH에서는 몇 가지 유해물질에 대하여 직독식 기기를 이용한 측정을 인정하고 있다. 예를 들면 일산화탄소(NMAM 6604), 산소(NMAM 6601)의 경우 휴대용 직독식 기기를 이용하여 측정을 할 수 있고, 벤젠(NMAM 3700), TCE(크리클로로에틸렌)(NMAM 3701), EO(에틸렌옥사이드)(NMAM 3702)는 휴대용 가스크로마토그래피(Portable GC)를 이용하여 측정 할 수 있도록 하였다. 또한 실제로 활용되고 있는 직독식 실시간 측정기기는 광산 작업환경에서 호흡성분진을 실시간으로 측정하고 있다. 질량농도에 대하여 현재, 누적 등 실시간 자료를 생성해 낼 수 있다는 장점이 있다.

일본에서는 작업환경측정 특례제도에 따라 작업환경측정평가 결과 2년 동안 관리구분 1에 해당하는 사업장 중 노동기준국장에 허가를 받은 경우 분진과 유기용제에 대하여 분진은 직독식 장비를 사용하여 측정이 가능하고(1년 1회 이상 교정기기 한함), 유기용제의 경우 검지관을 이용하여 측정을 할 수 있도록 하고 있다.

(2) 센서(Sensor)

사람의 경우 감각기관(후각, 시각, 청각, 미각, 촉각)을 통하여 외부의 상태나 변화를 파악한다. 센서는 인간의 감각기관을 대신 할 수 있는 장치이다. 빛, 소리, 전기, 화학물질 등 다양한 대상을 감지 할 수 있고, 어떠한 입력 자극에 따라 출력 행동을 보이게 된다. 센서는 온도계와 같이 물리적 크기로 나타낼 수도 있고, 전류나 전압과 같이 전기적 신호가 될 수도 있고, 이들 둘을 병합하여 응용할 수도 있다. 어떠한 입력

자극의 종류와 크기를 알아내는 것이 센서의 기본 원리라고 할 수 있다.

**[그림 21] 센서의 기본구조**

센서의 현재 우리가 삶에서 접하고 있는 센서는 다양하다. 휴대폰 만해도 14개 이상의 센서가 있다. 중요한 것은 1) 소비전력을 낮추고 에너지 수확 2) 측정의 신뢰도를 확보 3) 편리해야 하고 측정항목은 늘리는 것이다. 이와 같이 센서기술은 다양한 분야에서 활용되고 있고 발전해왔지만 산업위생분야에서 활용할 수 있는 센서들은 한계가 있다.

센서가 갖추어야 하는 다양한 조건들을 만족시켜야 한다. 이러한 조건을 만족시키지 못하면 센서로서의 기능을 다하기에는 한계가 있다. 따라서 센서 능력에 대한 타당성 검토를 거쳐야 하는데 특정 유해가스에만 반응을 해야 하는 유해가스 특이성, 측정된 수치가 신뢰성이 있어야 하는 데이터의 신뢰성, 측정해낼 수 있는 가장 낮은 수치를 나타내는 검출한계, 측정이 가능한 범위, 참값에 가까운지를 파악하는 정확도와 반복적으로 측정을 해도 동일한 결과를 나타내는지를 확인하는 정밀도, 주기적으로 실시하는 보정과 유지보수에 대한 내용, 센서가 얼마나 빠르게 유해물질을 인식하고 수치를 나타낼 수 있는지에 대한 반응속도, 다양한 작업환경에서도 작동이 될 수 있는지에 대한 내구성과 품질보증, 방수를 위한 케이스, 사용성, 비용, 유지관리의 용이성 등 고려해야 할 점이 매우 다양하기 때문에 이에 대한 타당성 검증이 필요하다.

최종적으로 산업안전보건연구원 등을 통하여 센서의 신뢰성을 테스트하는 시험법에 대하여 타당성을 검증 받고 이에 따른 시험성적서를 확보하여 센서에 대한 신뢰성을 획득해야하는 것이 필수적이다.

**<표 4> NIOSH에서 제안하고 있는 센서 개발 시 검토해야 할 사항**

| | 센서 개발 시 검토해야 할 사항 |
|---|---|
| 1 | 유해가스 특이성 |
| 2 | 데이터의 신뢰성 |
| 3 | 검출한계 |
| 4 | 정확도와 정밀도 |
| 5 | 보정 |
| 6 | 반응속도 |
| 7 | 내구성과 품 |
| 8 | 방수를 위한 케이스 |
| 9 | 사용성 |
| 10 | 비용 |
| 11 | 유지관리의 용이성 등 |
| 12 | 신뢰도 테스트에 대한 정도관리 및 시험법 인증 |

센서는 그 목적에 따라 특성 및 요구도가 다르다. 사업장에서 센서를 다룬다고 하면, 첫 번째 규제를 위한 목적, 두 번째 관리를 위한 목적, 세 번째 대중에게 알려주기 위한 목적 등으로 나누어 볼 수 있다.

첫 번째, 규제를 목적으로 하는 센서는 농도의 관찰이 주된 목적이고, 운영주체가 정부나 사업장 등 분명하게 설정되어 있어야 한다. 정량평가를 하여 기준이나 다른 지점과 비교가 가능한 농도를 생산하게 되고 이때는 높은 수준의 자료의 질이 요구된다. 따라서 표준화 된 측정방법이 필요하다. 또한 주기적으로 인증된 보정시스템을 보유해야 하며, 이는 국내외적으로도 상호인증이 될 수 있도록 설계 되어야 한다. 밀폐공간에서 활용하게 된다면, 작업을 시작하기 전에 반드시 위에 설명한 대로 인증된 센서를 이용한 허가제도를 도입하여 정부나 사업장에서 책임을 가지고 있는 사람의 책임 하에 작업을 할 수 있도록 할 수 있다. 두 번째, 관리를 목적으로 하는 경우 마찬 가지로 규제를 목적으로 하

는 수준과 비슷한 정도의 자료의 질이 요구된다. 농도로 표현이 되어야 하지만, 그 목적이 의사결정 수단에 이용하게 된다. 예를 들면, 외부 공기 오염도가 높아 사업장 환기 시스템의 외기 비율을 조정한다던지 발생원을 찾는 등의 의사결정 등이 필요하다. 사업장 선에서의 운영주체가 필요하다. 정량 또는 정성평가가 될 수 있도록 하며, 보정 시스템이 필요하다. 밀폐공간에서는 현재 우리나라에서 사용되고 있는 수준이나 작동이 잘 되지 않고 있다. 세 번째, 대중에게 알리는 목적으로 하는 경우 농도의 관찰을 통하여 대중들이 인지 할 수 있도록 하는 목적이다. 예를 들면 도시에 전광판을 통하여 환경오염 지표를 알려주는 것이다. 교육의 목적과 대중과학(Citizen Science)에 활용 할 수 있다. 정량 또는 정성(좋음/보통/나쁨)자료로 표현 할 수 있다. 그러나 주의할 점은 규제나 관리 목적으로 생산하는 자료들과는 충돌 하지 않도록 잘 설계되어야 한다. 이처럼 다양한 측정목적에 따라 센서에 요구되는 특성이 매우 다양하기 때문에 센서의 선택은 매우 중요하다.

**<표 5> 측정 목적에 따른 센서의 요구도 및 주요 사항**

| 활용목적 | 측정, 목적, 사용자 | 측정 요구 | 주요 사항 |
|---|---|---|---|
| 규제 | - 농도의 관찰<br>- 운영 주체가 분명함 (정부, 사업장 등) | - 정량 평가<br>- 농도로 표현 (비교 가능한)<br>- 높은 수준의 자료<br>- 표준화된 측정방법<br>- 인증된 측정기기<br>- 인증된 보정 시스템 | - 보정<br>- 국내외 표준화된 측정방법 |
| 관리 | - 농도의 관찰<br>- 의사결정 수단 사용 (발생원 인지 등)<br>- 사업장 선에서의 운영주체 필요 | - 규제 목적과 비슷한 수준의 자료<br>- 정량 또는 정성 평가<br>- 보정 시스템<br>- 일정 수준의 자료 질 요구 | - 특정된 요구사항 없으나 최소한의 관리(보정)가 필요함 |
| 대중전파 | - 농도의 관찰<br>- 대중들의 인지<br>- 교육, 대중과학 등 | - 정량 또는 정성 평가<br>- 단위의 다양성 (과학단위 및 변경 가능)<br>- 규제나 관리 목적 자료들과 충돌을 피하도록 설계 필요 | |

밀폐공간 질식재해 예방을 위한 특정 가스 센서 개발을 위해서는 주요원인에 따른 센서를 도입해야 하며 현재 밀폐공간에서 실시간으로 측정이 가능한 주요 가스는 $O_2$, $H_2S$, CO, 가연성가스 등 이며, 추가적으로 상황에 맞는 센서 개발이 필요하다.

가) 센서의 종류

센서의 종류는 매우 다양하다. 전기화학식센서, 반도체센서, 광학식센서 등으로 나누어 볼 수 있다.

(가) 전기화학센서

전기화학센서는 전극봉(Electrode)과 전해질(Electrolyte)로 구성되어 있다(Guth, 2009). 일반적으로 확산(Diffusion)현상을 이용하게 된다. 센서에 부착된 멤브레인을 통하여 공기중에 있는 물질이 내부로 들어가게 되면, 전극봉을 통하여 산화나 환원 반응이 일어나게 되고 이에 따라 센서 내부의 전류가 변화하게 된다. 이러한 과정을 통하여 바로 전류를 보여주기도 하고 필요에 따라서는 증폭하여 농도로 환산하기도 한다. 현재 가장 대중적인 센서이지만, 고온이나 저온에서 그리고 습도에 따라서는 사용을 고려해볼 필요가 있다. 왜냐하면 내부의 전해질이 건조하거나 고온의 조건에서는 증발할 가능성이 높아지기 때문이고, 저온의 환경에서는 전해질이 얼게 되어 반응속도가 늦어진다. 또한 보정 주기도 6개월 이내로 권장되어 짧은 편이다. 다른 물질에 영향을 많이 받을 수 있기 때문에 센서 특성에 대한 고려를 충분히 한 후에 도입을 해야 한다.

(나) 반도체센서

반도체센서의 경우에도 크게 두 가지로 나누어 설명할 수 있다. 첫 번째는 전통적인 반도체 센서이다. 두 번째는 나노기술을 사용한 반도체 센서이다. 최근에는 대부분 센서가 나노기술을 사용한 반도체가 개발되고 있다. 반도체 센서는 기본적으로 발열체(Heater)가 있다. 백금

등으로 만들어져있고, 절연체와 가스상물질에 반응하는 필름으로 구성이 되어 있다. 일반적으로 해당 필름과 가스상물질과 반응하게 되면 전기전도도(Electrical Conductivity)가 변화하면서 농도를 표기하게 된다. 반도체센서의 경우 전기화학센서보다 더 높은 온도에서 사용이 가능하며 수명이 더 길다는 장점이 있다. 하지만 아직 해결해야 하는 점들이 있다. 대표적으로 느린 반응속도이다. 보통 120초 이상 지나야 반응을 하기 시작한다. 최근 들어 나노기술이 적용된 반도체 센서들이 활발히 개발 되고 있다. 특히 나노튜브 형태의 제조기술은 센서를 더욱 정교하고 대칭으로 정렬된 구조를 만들 수 있기 때문에 더 안정적으로 빠른 반응속도의 센서를 만들 수 있다.

(다) 광학식센서

광학식센서는 오래된 센서 기술이다. 다라서 다양한 분야에서 이미 사용이 되고 있다. 가스가 지나가면서 검출하는 방식이다. 센서는 신호의 변화를 기록하여 특정 가스의 농도를 표기하는 원리이다. 보통 휴대용 측정기 보다는 고정형 측정기에 사용을 하여 매우 안정적인 운영이 가능하고 보통 1년에 한번 보정을 실시하여 경제적이다.

나) 국외 기관 사례

(가) 미국 NIOSH

2014년부터 Center for Direct Reading and Sensor Technologies를 개설하여 센서를 개발하고 산업보건 관련 센서를 직접 제작하여 이를 보급하여 산업현장에 보급을 하고 있다. 센서는 개발, 시제품제작, 시험, 생산, 교육, 보정, 사용, 유지, 주기적 성능 테스트, 미션 완수 평가 과정을 통하여 센서를 개발하고 있다. 우리나라도 이와 같은 역할을 할 연

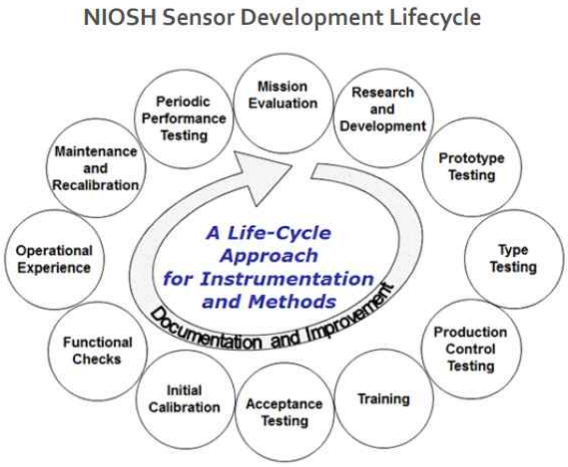
구자가 필요한 상황이다.

센터의 핵심 가치는 실시간 측정 방법과 센서 기술 개발을 국가적 의제로 추진하고 센서 및 기기의 검증과 작동 특성을 포함한 실시간 측정 기기의 사용 가이드 개발 이에 대한 교육 및 훈련 프로토콜 개발, NIOSH 가 주도하지만 단독으로는 해결해나가기 어렵기 때문에 파트너쉽을 통한 다양한 기관과의 협업 및 파일럿 수준에서의 프로젝트 지원 등으로 가지고 가고 있다.

센터의 기술적 목적은 측정기술을 발전시키는데 있다. 즉, 기기의 소형화, 스마트폰 기술의 활용 및 연동, 웨어러블 센서/ 내장형 센서 개발, 직독식 실시간 측정기기 사용의 법적 허용 근거 마련을 포함하고 있다.

또한 실질적으로 2012년 이후 NIOSH에서 개발한 센서 판매량은 2015년 까지 36,171건에서 2018년 45,000건으로 증가 할 것으로 예상하고 있다. 이처럼 선진국에서는 산업보건 활동에 필요한 센서 연구를 선제적으로 하고 있으며, 우리나라도 연구개발을 정부차원에서 시작할 때가 온 것으로 판단된다.

센터는 위에서 언급 했듯이 2014년에 설립 되었지만 필요성이 본격적으로 언급 된 것은 2008년부터이다. Direct-Reading Exposure Assessment Methods, 일명 DREAM 이라는 이름으로 전문가들이 모여 워크샵을 시작하였고 이때부터 본격적으로 지난 10년간 적극적인 지원을 하고 있다. 최초 워크샵의 목적은 노출평가와 관련된 다양한 이해관계자들이 모여 현실과 연구의 요구사항을 만들어 이를 모으는 것이었다. 현재 최신 기술이 어디까지 왔는지, 이슈가 무엇인지에 광범위한 부분에 대한 논의를 하였다. 법제도, 기술, 인증 등 다양한 이해관계자를 포함하였다. 또한 핵심 사항인 어떠한 물질을 직독식으로 측정 할것인지에 대한 논의도 함께 있었다(가스/증기, 에어로졸, 인간공학, 진동, 소음, 방사선, 표면샘플링, 생물학적모니터링)(NIOSH, 2008).




**[그림 22] 미국 NIOSH Center for Direct Reading and Sensor Technologies의 실시간 기기 개발의 과정**

이러한 추세를 보았을 때 우리나라에도 이와 같은 과정을 거쳐 유사한 역할을 할 수 있는 기관 설립이 매우 필요하다고 생각한다. 설립 주체는 산업안전보건연구원이 주도하면서 산업계, 학계, 연구계가 함께 뒷받침을 해주면서 발전을 해야 한다고 생각한다. 학문분야도 제한없이 모든 가능성을 열어두고 학문을 받아 들여 융합을 해야 한다고 생각한다. 분명한 것은 각 이해관계자들의 충분한 사회적 합의를 이루면서 설립을 해야 한다는 것이다. 만약 단계별로 차근차근 설립단계를 밟아나가지 않고, 센터를 먼저 세우고 그다음에 그 과정을 겪게 되면 분명히 이해관계자들의 이해상충이 발생할 것으로 판단된다.

그러나 해결해야 하는 점들은 많이 있다. 보안과 윤리, 목적에 맞는 기준, 기기의 측정능력과 특성, 그리고 검증 등이 필요하며, 데이터의 수집, 관리, 활용 등에 대한 논의가 함께 이루어져야 한다.

(나) 미국 NASA

미국 NASA에서는 스마트폰을 이용한 유해물질 측정기를 2007년부터 개발해 왔다(NASA, 2016). 다양한 가스와 물질에 대해 반응하는 기술은 가지고 있었고, NASA에서 Jing Li 연구팀에게 스마트폰과 연동하여 사용할 수 있는 기술 개발을 주문하기 시작하였다. 이때 Li 박사 팀에서는 스마트폰에 부착하는 기술 대신 외부에서 연결하는 방식을 택하였다. 이미 통신 기술이 충분히 뒷받침되었기 때문이다. Li 박사는 아래와 같이 언급을 하게 된다. “상당한 반복을 통하여 새로운 기술을 개발하게 되었고, 모듈형태와 같이 센서를 갈아 끼울 수 있는 방식은 기기의 향상에 도움이 된다.” 모듈형에 대한 긍정적인 부분을 언급하면서 동시에 휴대폰에 부착하게 되면 시스템의 복잡성과 파손의 위험을 가지고 가기 때문에 어려운 것을 인지하고 있었던 것이다.

최종적으로 엄지손가락 크기의 측정기를 개발(제품명: Node)하였고, 블루투스를 이용하여 스마트폰과 연결하여 사용할 수 있다. 현재는 일산화탄소, 황화수소, 이산화탄소, 산화질소, 조도, 온도, 습도, 압력 등에 대하여 각 1개씩 측정을 할 수 있게 되어 있다(NASA, 2018). 적극적으로 검토를 하고 있는 산업분야는 의약분야에서 배송시 발생할 수 있는 온습도 변화나 진동에 대한 감지 기록 등에 활용할 수 있고, 페인트 회사에서는 Chroma(색)센서를 이용하여 페인트의 품질관리에 활용할 수 있다.

다) 밀폐공간에서 사용할 수 있는 센서 검토

밀폐공간에서 사용할 수 있는 센서의 경우 밀폐공간에 대한 분석이 선행되어야 한다. 시중에 센서들을 쉽게 구매할 수 있는데 검증이 되지 않아 자체 검증 후 사용을 해야 하는 상황이다. 특히 제조사에서 다양한 제원(Specification)을 제공하고 있으나

(가) 산소센서

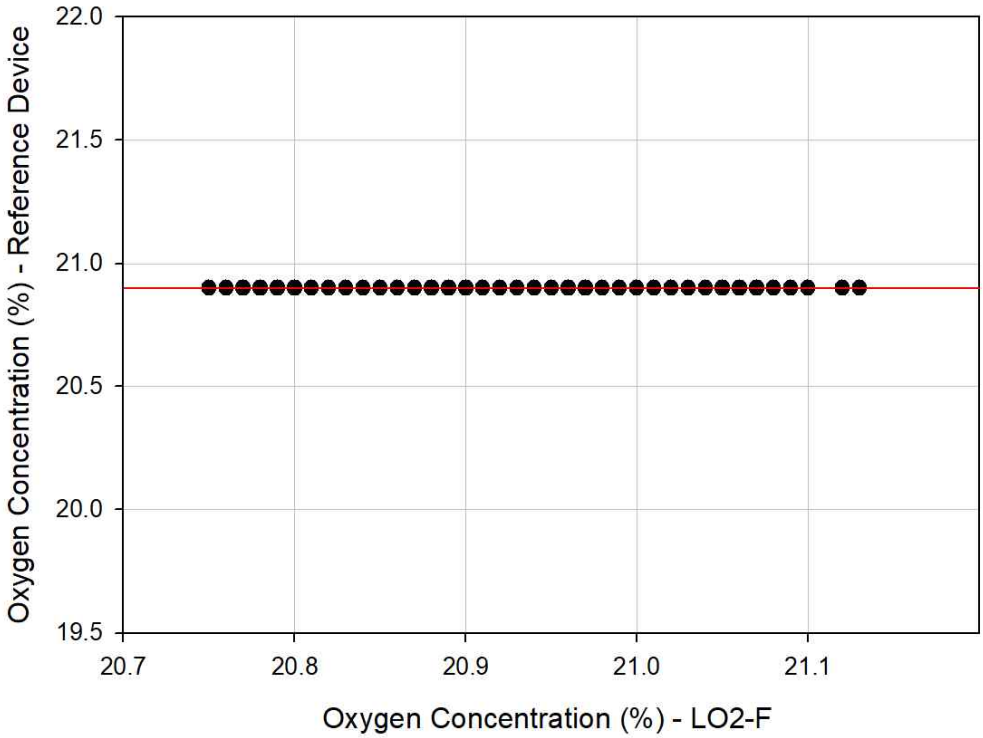
산소센서는 다양하게 출시되어있지만 실제 활용할 수 있는 정도의 품질을 가진 산소센서는 많지 않다. 본 연구에서 검토한 산소센서는 총 4종인데 측정범위, 사용기간(수명), 분해능, 원리, 사용온습도, 응답시간 등을 고려하였다. 가장 쉽게 활용할 수 있는 Grove gas sensor는 가장 일반적으로 사용되는 센서로 전기화학방식을 원리로 하고 있다. 그렇기 때문에 수명이 2년 이하로 사용 환경에 따라 그 범위가 크게 달라진다. 범위는 0-25%로 밀폐공간에서 측정하기에는 적합하다. 센서에 있어서 반응속도는 매우 중요한데 약 15초 이내로 되어 있다. 이는 밀폐공간에서 측정시 15초 이후의 결과를 값으로 확인해야 한다는 뜻이다. Lox-O2 센서는 가장 최근에 개발된 형태로 광전방식을 택하여 전기화학방식의 단점인 수명을 극복한 방식이다. 형광소광(Luminescence quenching)의 원리를 이용하여 산소분압을 측정하며, 온도 및 기압을 함께 보정을 하여 산소농도를 표현하는 방식이다. 총 3가지 형태가 있는데 F(Flow-through)형과 S(Surface)형과 일반형이 있다. 큰 차이는 반응속도를 낮추기 위한 노력으로 정리 할 수 있다. F형의 경우 튜브 등을 통하여 샘플링을 하게 되는데 빠르게 가스를 지나가게 하여 반응속도를 낮추는 방식이다.

**<표 6> 산소센서**

| 센서명 | Grove Gas Sensor | Lox O2 F | Lox O2 S | Lox O2 |
|---|---|---|---|---|
| 측정범위 | 0-25%vol | 0-25%vol | 0-25%vol | 0-25%vol |
| 사용기간 | 2년 | 5년 | 5년 | 5년 |
| 분해능 | 0.1% | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| 원리 | 전기화학식 | 광전방식 | 광전방식 | 광전방식 |
| 사용온도 | -20℃-+50℃ | -30℃-+60℃ | -30℃-+60℃ | -30℃-+60℃ |
| 응답시간 | ≤15sec | ≤10sec | ≤30sec | ≤30sec |
| 적정습도 | 0-99% | 0-99% | 0-99% | 0-99% |
| 기타 | 20분간의 예열시간 필요 | - | - | - |

산소의 경우 일반 대기 중에서 센서 평가를 하기 위하여 Lox-O2-Ft 센서와 일반적으로 산소농도 측정에 사용되는 기기(QRAE2/3, RAE systems, USA)와 함께 놓고 상관성 분석을 실시하였다. 상관성은 약 r=0.99로 매우 좋은 상관성을 보였고 최솟값은 20.75%, 최댓값은 21.13%를 나타낼 때 QRAE2와 QRAE3는 20.9%를 나타내었다. 오차범위는 약 ±1%로 사용하기에 적합하다고 판단하였다.

우리나라에서는 적정공기의 정의에서 산소농도를 18%에서 23.5%로 규정하고, 있고, 미국 OSHA에서는 유해대기(Hazardous Atmosphere) 중 산소가 19.5% 미만이거나, 23.5% 초과인 경우를 이야기 한다.




**[그림 23] 산소센서의 일반 대기 중 기기간 상관성 분석 결과**

(나) 황화수소 센서

황화수소센서의 경우 비교적 활발히 연구가 되고 있기 때문에 다양한 제품이 시중에 판매가 되고 있다. 황화수소의 경우 10 ppm가 넘지 않도록 해야 하기 때문에 측정범위가 넓은 것이 필요하다. 따라서 아래 본 연구에서 조사한 결과에 따르면 측정범위가 매우 다양하고, 사용기간이 상이하며, 분해능, 사용온도 등에서 큰 차이를 보였다. 일부 센서는 측정범위외의 데이터는 제공하지 않거나 부실하게 제공되어 있어 센서에 대한 신뢰성이 부족한 현실이다.

또 하나 중요한 부분은 응답시간이다. 주로 30초 이상이 지난 후에 응답을 하는 것이 특징인데 측정 시 이를 고려하여야 한다. 만약 측정을 신속하게 한다고 30초 이상이 지나지 않은 상태에서 측정결과를 받는다면 이는 큰 사고로 이어질 수 있다. 따라서 측정기 개발 시 30초 이후에 농도를 표시해주는 시스템을 만드는 것이 필요하다.

다른 센서들과 마찬가지로 교정이 매우 중요한데, 센서를 교정하는 것도 방법이지만, 가격을 낮추어 새로운 센서로 교체 하여 사용하는 방법도 있다.

**<표 7> 황화수소 센서**

| 센서명 | 968-036<br>DGS-H2S-10 | MQ136 | ME3-H2S |
|---|---|---|---|
| 측정범위 | 0-10ppm | 1-200ppm | 0-100ppm |
| 사용기간 | 5-10년 | - | 2년 |
| 분해능 | 10 ppb | - | 0.1ppm |
| 사용온도 | -20℃-+40℃ | | -20℃-+50℃ |
| 응답시간 | <30sec | - | ≤30sec |
| 적정습도 | 15-95% | - | 15-90% |
| 무게 | <2온스(56.7g) | - | - |

(다) 일산화탄소센서

일산화탄소센서의 경우 시중에 다양한 제품이 판매가 되고 있다, 주로 전기화학식(Electrochemical)센서인데, 측정범위는 0-1000 ppm이고, 사용기간은 2-5년이다. 사용온도는 영하 20도부터 영상 50도 까지로 되어 있어 우리나라 기후에서 사용하기에는 적합하다. 전기화학식의 경우 영하 20도 이하로 내려가면 전해질(electrolyte)이 얼게 되고 측정이 불가해진다. 밀폐공간 특성을 보면 갈탄을 이용하여 난방을 할 때에도 사용이 가능할 것으로 판단된다.

주요 이슈는 상대습도와 온도에 따라 농도에 영향을 받고, 상호 민감성(황화수소, 이산화황, 메타, 알콜류, 메탄 등)에 의하여 기타 가스들이 있으면 농도에 영향을 받고, 장기간 사용 시 에이징 및 드리프트현상 등이 발생하는 점이 있다 (Peltier, 2018). 따라서 1년에 한번 교정 또는 센서 교체를 통하여 관리를 해야 한다.

**<표 8> 일산화탄소 센서**

| 센서명 | ME3-CO | ME4-CO | ZE03-CO | ME2-CO |
|---|---|---|---|---|
| 측정범위 | 0-1,000ppm | 0-1,000ppm | 0-1,000ppm | 0-1,000ppm |
| 사용기간 | 3년 | 2년 | 2년 | 5년 |
| 분해능 | 0.5ppm | 1ppm | - | 0.5ppm |
| 사용온도 | -20℃-+50℃ | -20℃-+50℃ | -20℃-+50℃ | -20℃-+50℃ |
| 응답시간 | ≤20sec | ≤25sec | ≤20sec | ≤50sec |
| 적정습도 | 15-90% | 15-90% | 15-90% | 15-90% |

### (3) 통신(Communication)

거리가 멀어진 상태에서 특정 매체나 수단을 통하여 정보를 주고 받는 것을 의미한다. 최근 통신의 트렌드를 보면 데이터의 크기, 전력소모, 네트워크 비용, 디바이스 비용, 기술적 도달거리에 따라 사용하고자 하는 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 5요소는 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 나눌수 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

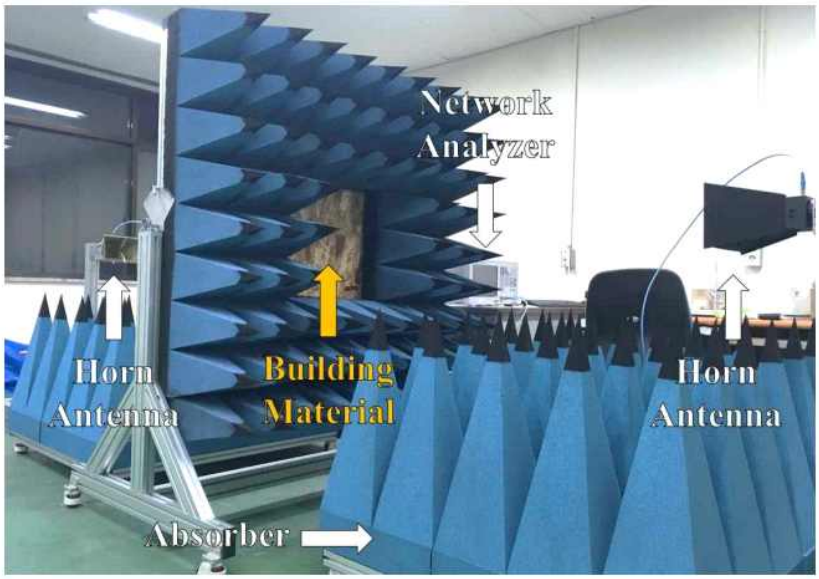
기 때문에 우리에게 익숙한 통신 방법이고 실제로 사용하기에도 빠르고, 품질이 안정적이고, 저전력 수명, 저비용 등 개발하기에 편리하게 되어 있어 본 연구에서 활용하기 적합한 방식이다. 하지만 기지국의 소유나 설치에 있어서 권한이 사용자에게 없기 때문에 사업자에게 의존적인 단점이 있다.

밀폐공간에서의 통신의 경우 일반 통신보다 더 주의를 기울여야 한다(김동현, 2017). 왜냐하면 통신인프라가 파괴되는 경우에 외부와의 통신이 단절되어 위험한 상황이 벌어질 수 있기 때문이다. 따라서 밀폐공간에 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.

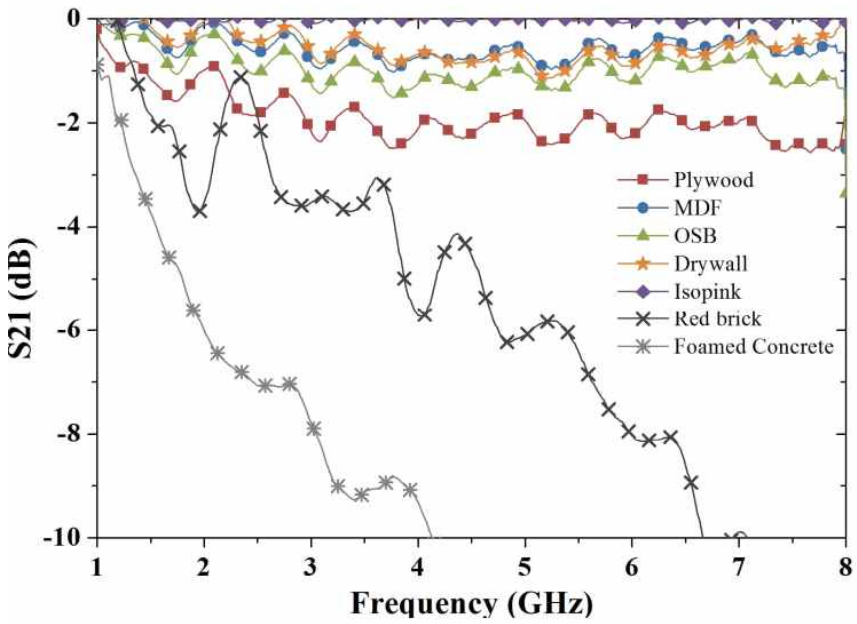
**<표 9> 각 통신 방식의 특징**

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

향후 통신에 대한 연구를 실시 할 경우 전파 투과 특성에 대한 측정을 실험실 수준에서 실시를 하여야 한 후에 현장에서 테스트를 해야 한다. 조성실 (2017)의 연구에 따르면 송수신기, 네트워크 분석기, 전파흡수재(방해 방지용) 등을 구성하여 해당 전파에 대한 분석을 실시 후 현장에 테스트 후 투입이 필요하다. Wi-Fi 중 2.4 GHz, 5 GHz에 대하여 실험을 실시하였다. 콘크리트, 붉은벽돌, 합판, MDF 등의 순으로 전파가 감소되는 것을 알 수 있었다.




**[그림 24] 전파 투과 특성 실험 장비**

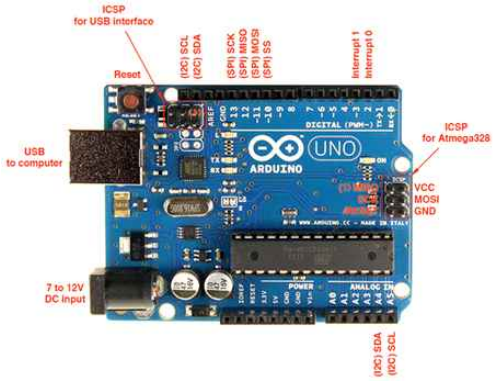



**[그림 25] 건축자재에 따른 투과특성 측정 결과**

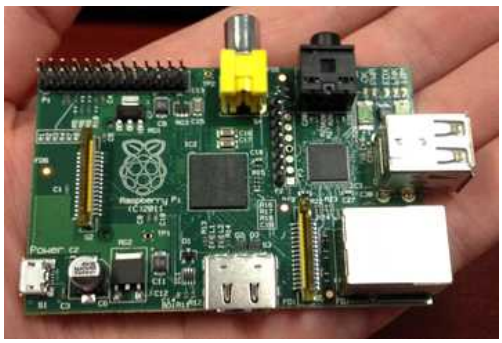
(4) 마이크로프로세서 (Microprocessor)

과거 하드웨어는 진입장벽이 매우 높았다. 왜냐하면 생산하기 위하여 장비와 기술이 매우 고가여서 누구나 할 수 있는 산업은 아니었다. 최근에는 하드웨어 개발이 누구나 할 수 있도록 소량생산도 가능하여 진입장벽이 매우 낮아졌다. 따라서 누구나 하드웨어 플랫폼을 만들어서 제공하여 많은 사용자를 확보하는 것이 기업의 경쟁력이 되고 있다. 대표적인 예로 Arduino Uno 보드와 Rasberry Pi 보드가 있다. 매우 저렴하게 하드웨어를 공급하면서 소프트웨어를 무료로 개방하여 사용자로 하여금 다양한 응용을 하고 이를 공유할 수 있는 플랫폼 생태계를 조성하여 현재 경쟁이 심화되고 있다. 왜냐하면 플랫폼을 선점하는 것이 곧 힘이 되기 때문이다. 본 연구에서도 대부분의 하드웨어를 Arduino로 사용하였다. Arduino는 초심자를 위해 교육용과 일반, 그리고 IoT용 등

다양한 제품라인업을 보유하고 판매하고 있다[15].




Arduino Uno



Raspberry Pi

Intel Gallieo

Latte Panda

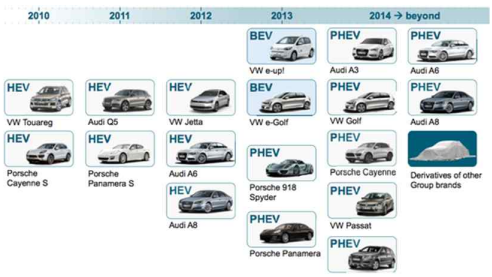
**[그림 26] 하드웨어 종류**

15) https://www.arduino.cc/en/Main/Products

### (5) 모듈조립디자인(Modular Assembly Design Approach)

최근 모듈조립디자인(Modular Assembly Design Approach)이 제품 개발 및 생산에 있어서 화두로 부상하고 있다. 그 예로 VW(폭스바겐그룹), 도요타, 구글폰, LG 휴대전화 등에서는 모듈 형태로 제작을 하여 다양한 조합을 통하여 맞춤형 시스템으로 개발을 하고 생산을 하고 있다.

핵심사항은 주요부품을 표준화 하여 다양한 모델에 사용을 할 수 있는 것이다. 과거에는 자동차의 뼈대를 디자인 한 후에 부품을 디자인 했다면, 지금은 부품을 디자인 한 후 뼈대를 디자인하는 방식인 것이다. 그에 따른 장점은 생산, 유통, A/S 에서 효율향상, 비용절감, 수익성 증대, 제품가격 절감 등이 있다. 따라서 본 연구에서도 상황에 맞는 센서, 통신 부품을 모듈형태로 만드는 것을 시도하였다.




VW그룹의 자동차 Modular Assembly 라인업

"Ara" Google + Motorola Modula Smartphone Project

**[그림 27] Modular Assembly Design의 예**

### (6) 웨어러블 디바이스 (Wearable Device)

워에러블(Wearable) 디바이스는 신체에 부착을 하거나, 신체의 한 뿐으로 결합하여 목적을 달성 할 수 있는 기기를 말한다. 자유롭게 이용이 가능하도록 옷이나 신체에 착용하여 활동 하면서도 불편이 없어야 한다는 중요한 전제조건이 있다.

자료 : IDC(International Data Corporation)

**[그림 28] 분기별 세계 웨어러블 기기 출시량 (한국무역협회, 2017)**

그러나 웨어러블 디바이스는 소비자의 수요 보다는 기술적 한계가 많이 있기 때문에 공급자가 주도하는 형태로 진행 되고 있다. 공급자들은 소비자들에게 전자기기를 지니고 다니는 것을 익숙하게 만드는 방향으로 유도하며 시장을 성장시켜 나가는 중이다. 초기에는 대부분의 웨어러블 디바이스는 손목에 착용하는 형태로 개발되었지만, 최근에는 귀에 착용하거나 스마트 의류 등 다양한 신체 부위를 활용하는 웨어러블 디바이스가 개발되고 있는 추세이다.

디바이스가 작동되는 기술적 측면에서 보면, 통신과 사용시간의 문제

가 가장 핵심이라고 할 수 있다. 통신에 있어서 초기 단계에서는 스마트폰과 연동하여 반드시 사용을 하도록 하여 데이터 송수신시 스마트폰을 거치도록 하였으나, 최근 경향은 LTE 등의 4G/5G 네트워크 등을 활용하여 기기 자체적으로 데이터 통신을 할 수 있도록 하면서 스마트폰에 알람을 울리는 등 역 제어를 하고 있는 등 웨어러블 디바이스의 독립화를 하는 추세이다. 추후에는 기기간의 연결이 더욱 강화되어 사물 간에도 연결을 통하여 초연결사회(Hyper Connect) 진입이 가속화 될 전망이다. 추후에는 웨어러블을 뛰어넘는 이머시블(Immersible) 디바이스까지 상용화가 될 것으로 기대 된다. 이머시블 디바이스는 사용자가 착용했는지 모를 정도로 소형화 되어 불편함을 전혀 느끼지 못하도록 하는 기술이다.

밀폐공간 측면에서 보면 측정기기를 직접 착용 또는 부착 웨어러블로 만들 것인지 고정 방식으로 만들 것인지에 대해서도 다양한 논의가 이루어 질 수 있다.

웨어러블로 측정을 하는 방식은 바로 사용자에게 현장의 환경에 대한 측정 정보를 알려줄 수 있고, 중앙에도 실시간으로 전송할 수 있어 현장의 상황을 제대로 평가 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 팔찌나 발찌, 안전모 부착 형태[16]로 개발을 하여 호흡기를 먼저 현장(맨홀 등)에 넣는 것이 아니라 팔이나 다리를 먼저 넣어 현장의 상황을 미리 파악한 후 작업에 임할 수 있도록 할 수 있는 장점도 있다.

단점은 작업에 영향을 주지 않도록 소형화해야 하고 작업시간 동안 신뢰성 있는 데이터 생산 및 송수신이 될 수 있도록 해야 하는데, 이 부분은 센서, 배터리 등 공학분야에서의 발전에 매우 종속적인 부분이기 때문에 이를 위해서는 산업안전보건연구원 등 공공의 영역에서의 연구개발이 더 필요한 상황이다.

16) 16) 2018 사물인터넷 국제전시회 소개 - LGU+ 부스

**[그림 29] 안전모 부착형 센서, 통신, 카메라 (LGU+)**

예를 들면, 웨어러블 측정기를 통한 고령자 건강 모니터링 서비스도 한국전자통신연구원(ETRI)에 의해 수년째 연구개발을 하고 있다. 고령자에게 웨어러블 디바이스를 팔에 차게 하고 센서정보를 받아 고령자에게도 정보를 제공하고, 중앙감시체계에도 정보를 전송하여 위급한 고령자는 자동으로 119에 신고가 되어 후속조치를 취하는 시스템[17]이다.

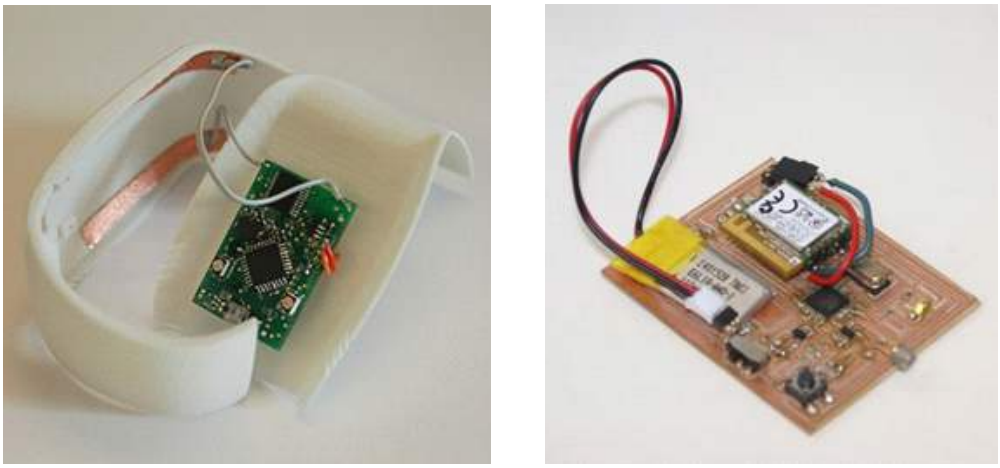
밀폐공간질식재해에 있어서도 이와 같은 시스템을 벤치마킹 할 필요가 있다고 생각한다. 서두에도 언급했듯이 밀폐공간 질식재해는 촌각을 다투는 매우 시급한 재해이기 때문에 웨어러블 측정기기를 응용하여 재해를 예방하는데 잘 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

공동연구진인 박주홍 교수 연구팀에서 개발한 휴대용 UV 모니터에 예를 들어보면, 팔찌 형태, 소형화 형태로 개발을 하고 있으나 센서, 통신, 배터리 등 기술적 한계에 의한 신뢰성의 제한점으로 밀폐공간 질식

17) 2018 사물인터넷 국제전시회 소개 - 한국전자통신연구원 부스

재해 예방에 적용하기에는 아직 이르지만, 향후에는 이와 같은 방향으로도 연결될 수 있다.

**[그림 30] 한국전자통신연구원에서 개발 중인 고령자 건강 모니터링 시스템**



Copyright POSTECH Prof. Park

**[그림 31] 휴대용 UV 모니터의 예**

(7) 캐리어(Carrier)- 이동체: 로봇과 드론

측정을 하기 위하여 사람을 대신하여 들어갈 수 있는 방법은 다양하게 개발 중에 있다(Botti et al., 2017).

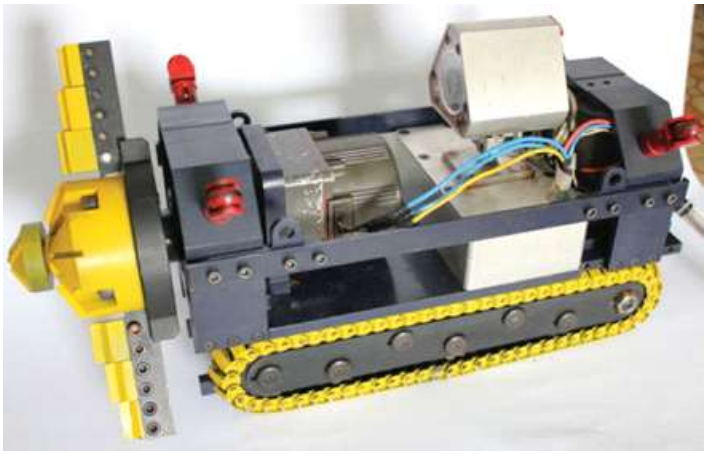
**<표 10> 밀폐공간에 따른 최신 기술 적용 현황 (Botti et al., 2017)**

| 밀폐공간 유형 | 세척 | 검사 | 유지 | 합계 |
|---|---|---|---|---|
| 저장소 | 8 | 17 | 5 | 30 |
| 조선, 탱크, 해군 | 2 | 8 | 3 | 13 |
| 하수도 및 파이프 | 4 | 11 | 1 | 16 |
| 합계 | 14 | 36 | 9 | 59 |

로봇 기술은 다양하게 활용되고 있으나, 산업보건에서는 많이 활용되고 있지 않다. 주로 위험한 일을 대신하여 할 수 있는 소방용, 군사용, 작업용 로봇이 상용화 되어 있고, 밀폐공간에서의 측정 및 작업을 대체할 수 있는 로봇이 필요하나 현재 단계에서는 측정을 목적으로 하는 로봇의 개발이 우선적으로 필요한 상황이다. 이 역시 적극적인 투자가 필요한 시점이라고 생각한다. 미국의 경우 GE(General Electric), 독일의 경우 Siemens 등에서 매우 적극적으로 위험한 일을 대신 하는 로봇 개발을 수십 년 전부터 해왔으나 우리나라의 경우 매우 제한적으로 소극적 투자가 이루어지고 있다.

로봇의 직무로 나누어 보면 검사(Park et al., 2002, Lee et al., 2008) 유지보수(Xuequin et al., 2009, Yi et al., 2009), 세척(Yamamoto et al., 2004, Zhang et al., 2005, Dandan et al., 2013, Truong-Thinh et al., 2011)등으로 구분되며, 활용 업종으로 나누어 보면 건축분야(Kovacic et al., 2010), 화학공장(Pack et al., 1997, Deng et al., 2010), 발전소

(Capuska et al., 2005), 조선소(Farina et al., 2009) 등에서 로봇이 활용되고 있다.



**[그림 32] 파이프 세척 및 검사 로봇**
**(Truong-Thinh et al., 2011)**

드론 기술의 경우에도 개별 기술은 많이 발전하였으나, 안전(시민 안전, 항공안전 등), 보안(군사지역) 문제로 인하여 규제가 되어 있고, 특히 도심지에서의 운항은 매우 위험하기 때문에 제한점이 많으나, 이를 극복하여 다양한 분야에 대한 적용이 가능할 것으로 예측하고 있다. 산업보건 분야에서도 마찬가지로 이를 접목 시킬 수 있는데, 건설현장이나 대형 사업장에서는 적용이 가능하고, 맨홀 등에서는 장애물감지기능을 적용한다면, 내부의 유해물질 농도를 측정할 수 있다고 판단된다.

드론을 적용하기 위해서는 법/제도, 기술이 함께 변화되어야 한다. 법/제도 면에서는 획일적인 규제로 인하여 드론 무게에 따라 규제기준이 적용되어 있어서 목적과 성능 수준에 맞게 규제를 변경해야 한다고 판단된다. 처벌기준도 매우 비현실적인데 비행지역, 목적, 성능이 고려되지 않고 무허가 비행에만 처벌을 하고 있다. 현재에는 국가인증체계가 미비 한 상황이다. 기체, 비행 안전성에 대한 최소한의 기준체계도

미확보 되어 있는 상황이다. 또한 개인정보보호 분야도 문제가 되고 있다. 이를 해결하기 위해서는 드론의 성능, 기술, 수준 별로 구분하여 규제를 만들고, 무허가 비행에 대하여 처벌 기준을 현실화하고, 안전성, 인증 제도를 마련하여야 하며, 의무책임보험과 개인정보보호 기준을 마련하는 등 법적 제도적 기틀을 시급히 마련해야 한다. 밀폐공간에서 사용 시에도 다양한 법적 제도적 기틀을 마련해야 하는 상황이다.

기술적으로는 안전성(추락, 해킹 등)문제와 자율비행/회피기술들이 필요하고, 자동이착륙시스템, 영상인식 및 처리기술 개발이 필요하다. 주로 시야를 벗어나는 경우가 많이 있기 때문에 자율비행 기술과 장애물 회피기술이 필요하고, 일상적인 이착륙을 포함하여 비상시에 자동이착륙에 대한 기술이 필요하다. 영상을 통신을 통하여 주고받으려면 영상의 압축, 전송에 대한 기술도 필요하다. 또한 가장 중요한 배터리 기술이 중요한데, 현재 기술로는 배터리 용량이 커지면 물리적으로도 커지는 상황이어서 기술적 한계를 보이고 있다. 하지만 향후 드론 기술에 상당한 자원을 투자하고 있기 때문에 다양한 기술적 한계는 극복이 가능할 것으로 전망되고, 이러한 제한점만 해결이 되면 과거에 밀폐공간의 카나리아와 같이 자유자재로 밀폐공간을 드나 들 수 있는 수준을 훨씬 뛰어넘어 산업위생전문가의 의사결정을 더욱 빠르고 정확하게 할 수 있도록 지원해주는 새로운 형태의 역할이 주어질 수 있는 캐리어가 될 수 있다.

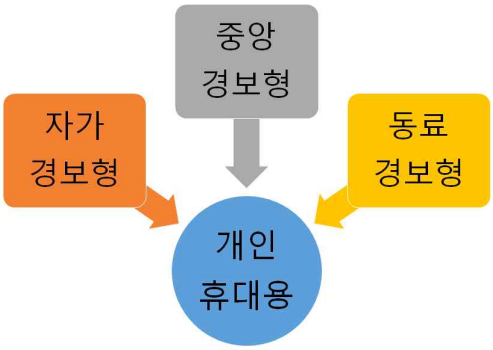
캐리어는 이동을 하는 수단이다. 따라서 사람이 조종을 하거나, 트랙을 만들어 항상 일정하게 정해진 길을 순찰 하거나(Li et al., 2010), 인공지능을 이용하여 다양한 상황에 맞추어 움직이는 방식(Grieco et al., 2014)이 필요하다. 사람이 직접 움직이는 방법은 전통적인 방법으로 실수 발생 시 즉각적인 대응이 가능하다. 트랙을 만들어 반 자율주행을 실시하게 되면 무인 측정이 필요한 곳에서 측정이 가능하게 된다. 마지막으로 인공지능을 이용하면 다양한 상황을 학습하여 캐리어 스스로 측정을 하기 위해 돌아다니는 효과를 사용할 수 있게 된다.

## 3. 밀폐공간 작업별 첨단기술 활용에 관한 현장적용성 검토

### 1) 현장 적용성 검토

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($H_2S$)와 암모니아($NH_3$), 케이블 맨홀 등에는 산소($O_2$)결핍 등 특성에 따른 유해공기를 파악하고 상시모니터링 및 알람 시스템을 통하여 관리할 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.



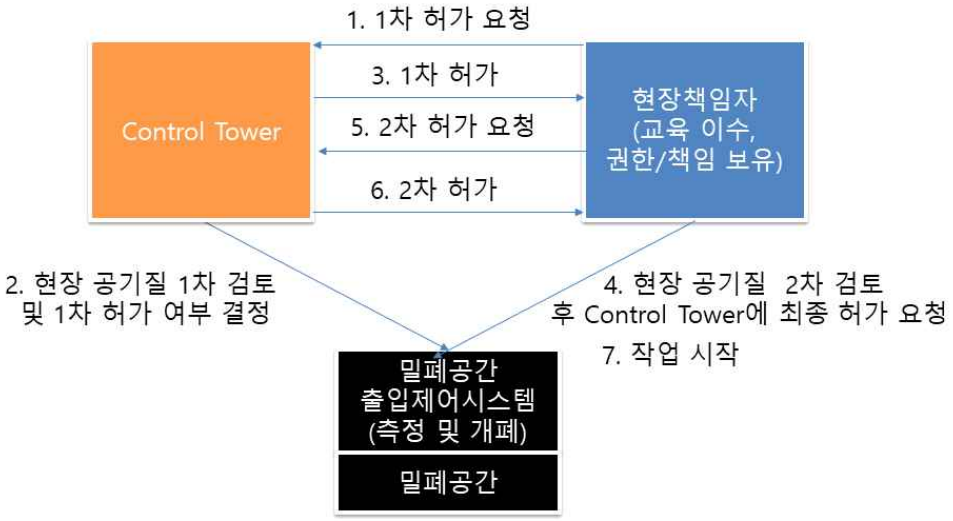

**[그림 33] 개인 휴대용 밀폐공간 질식재해 예방 시스템 개념도**

중앙 측정 장치는 Control Tower를 중심으로 하여 1) 개인, 2) 작업현장, 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 34] 중앙 통제 측정 밀폐공간 질식재해 예방 시스템 개념도**

(1) 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 35] 밀폐공간 출입제어 시스템 개념도**

(2) 밀폐공간에서 사용가능한 소형 IoT 기기 제작

본 연구에서는 실제로 밀폐공간에서 사용할 수 있는 소형 IoT 측정기기를 개발하였다. 2장에서 기술조사를 한 내용을 바탕으로 Pilot 수준에서 여러 가지를 고려하여 측정기기를 개발하였다.

주요 기술적 요소와 기능은 아래 요소들을 결정해야 한다.
- 센서 (선택)
- 측정 방법 (펌프형/확산형)
- 전원시스템 (배터리/전원형)
- 센서 신호 처리 (아날로그/디지털)
- 데이터 저장 (내장/웹)
- 데이터 통신 (Wi-Fi, LTE, LoRa, Bluetooth 등)
- 서버측 소프트웨어 (자체/업체)
- 제품 디자인 (3D 프린팅)
- 방수 여부 (방수/무방수)
- 고정형/이동형/웨어러블
- 이동형 (로봇/드론 등)
- 웨어러블 (팔목, 발목, 안전모 등)

본 연구에서는 확산형 산소센서를 중심으로 배터리를 이용하여 센서에서 값을 받아와서 시스템에도 저장을 하고 Wi-Fi 통신을 이용하여 실시간으로 웹으로 데이터를 올려주는 시스템을 구축하였다.

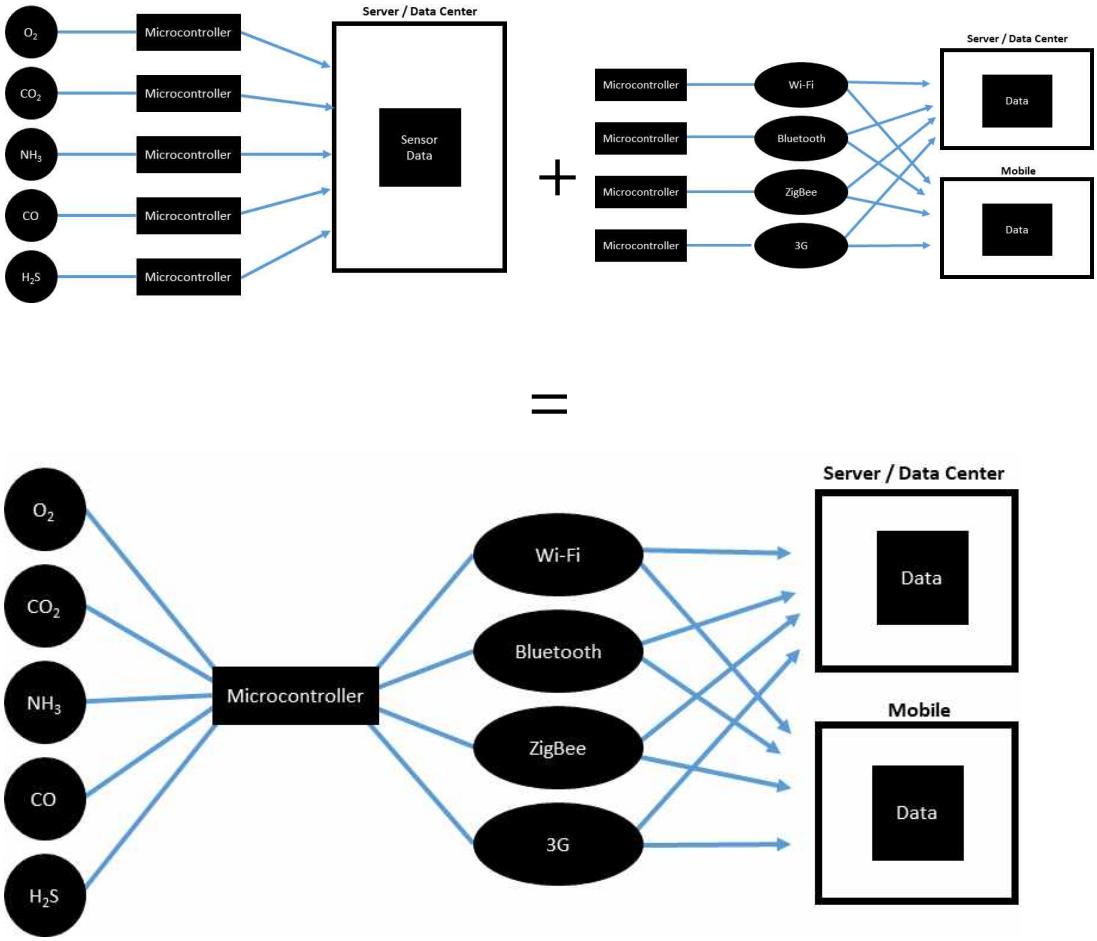
개발과정 이후에는 센서와 장비에 대한 검증을 해야 하는데 일반적인 검증과정은 아래와 같다.

비교, 동일성, 보정 단계를 거치게 되는데 비교의 경우 같은 센서나 기기를 여러개 놓고 기기간의 비교를 하는 것이다. 이때 확인해야 하는 주안점은 일정하게 그 측정값이 생성되는지 확인하는 것이다. 다음으로는 동일성이다. 이는 Gold Standard라고 할 수 있는 Reference 기기와의 비교를 뜻하는데 이때 센서를 검증할 수 있게 된다. 이 검증의 경우에는 특정한 측정 조건(챔버 등)을 맞추어 진행을 해야 한다. 그 후에는 보정을 실시하게 되는데 참값(기준치)과의 비교를 통하여 센서를 보정하게 된다. 이러한 일련의 과정은 단계를 거쳐 감에 따라 고도화가 된다는 점이 있다.

**[그림 36] 센서와 측정기기의 일반적인 검증 단계**

가) Sensor & Communication Module Rapid Prototyping Process

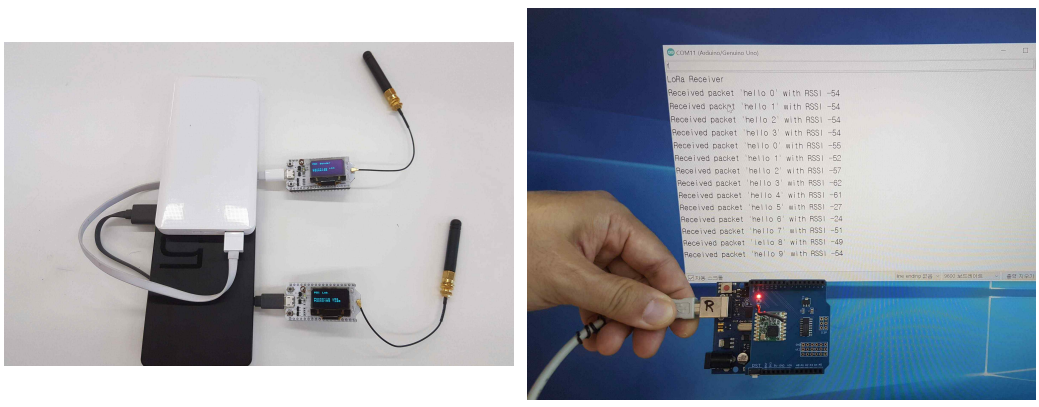
센서와 통신 방법을 모듈화 하여 측정하고자 하는 장소에 따라서 다양한 센서와 통신 방법의 조합을 하여 마이크로컨트롤러에 연결하고 이를 통하여 최종적으로 원하는 제품의 생산을 할 수 있게 된다.




**[그림 37] 모듈화 시스템의 최종 개념도**

(가) 통신모듈 테스트

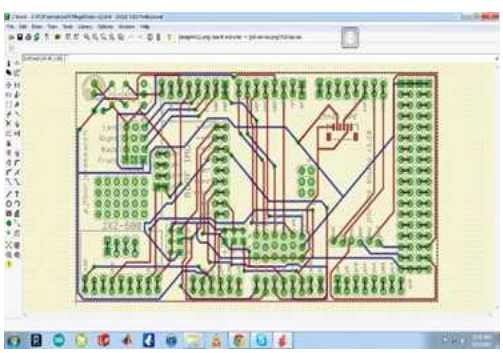
통신모듈에는 다양한 종류가 있다. 통신모듈 테스트는 송수신 가능여부와 거리가 중요한 요소이다. 송수신이 가능하다면, 그 다음부터는 거리를 연장하는 기술이 매우 중요하다. 본 연구에서는 Bluetooth, Wi-Fi, 라디오파(RF: Radio Frequency), Zigbee, LoRa 방식을 택하여 테스트를 해보았다. Bluetooth(BT), RF의 경우 콘크리트벽체만 지나가도 통신이 불가 하였지만, BT의 경우 거리를 연장할 수 있는 장치(Extender)를 함께 사용하면 활용이 가능할 것으로 판단된다. Wi-Fi와 Zigbee의 경우 앞에 두 가지 방법보다는 더 안정적인 송수신과 긴 통신 거리에서 통신이 가능하였고, 중간에 연결지점(Gateway)을 만들면 더 수신거리가 양호하였다. 최근에 IoT용으로 개발되고 있는 LoRa의 경우에 저전력을 이용하여 평지 기준 약 2 Km, 도시 기준 약 400 m 이내에서 통신이 가능함을 알 수 있었다. 지하로 내려가게 될 경우에도 중간에 Gateway를 설치하여 데이터를 전송해줄 수 있다.



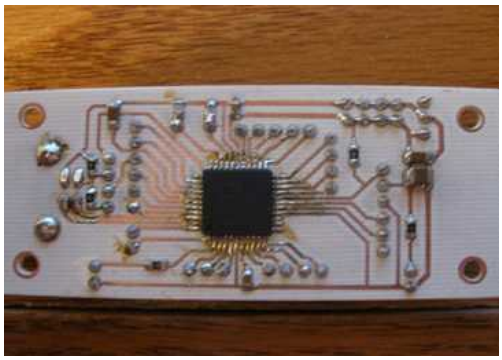

**[그림 38] LoRa 통신모듈 테스트**

나) Module Prototyping Process

이렇게 디자인된 시제품을 제작 시에는 자체적으로 제작하는 In-House 방법과 외주(Outsourcing)이 있는데, In-House 방법을 택할 경우 PCB Circuit Design과 CNC PCB Fabrication 과정이 필요하다. 장점은 생각한 것을 빠르게 구현할 수 있는 점이 있다. 소량을 만드는 시제품 개발단계에서는 매우 적합한 과정으로 볼 수 있다.



PCB Circuit Design



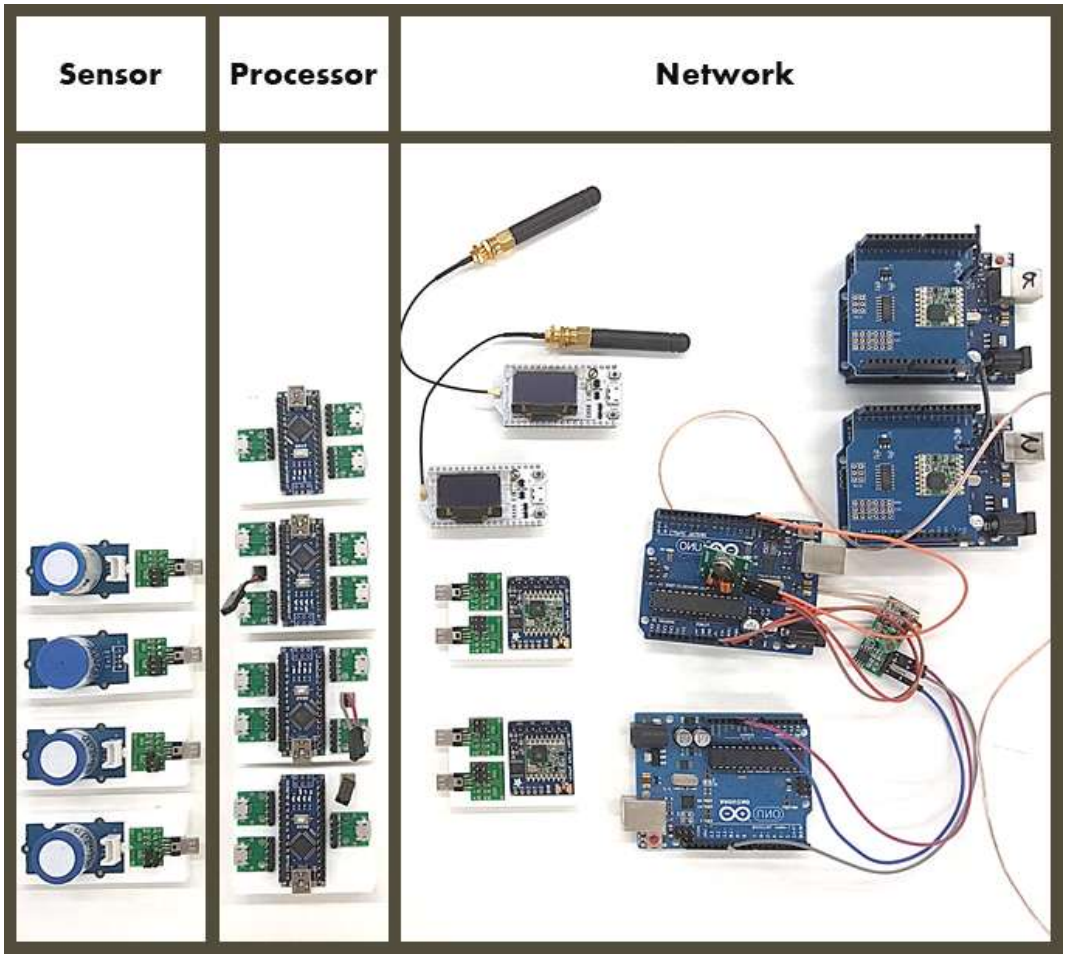
CNC PCB Fabrication

**[그림 39] In-House PCB Circuit Design과 CNC PCB Fabrication 과정**

외주 방법을 택하게 될 경우에는 고품질의 센서/보드를 제작할 수 있고, 대량 제작 시에 단가를 낮출 수 있는 장점이 있다.

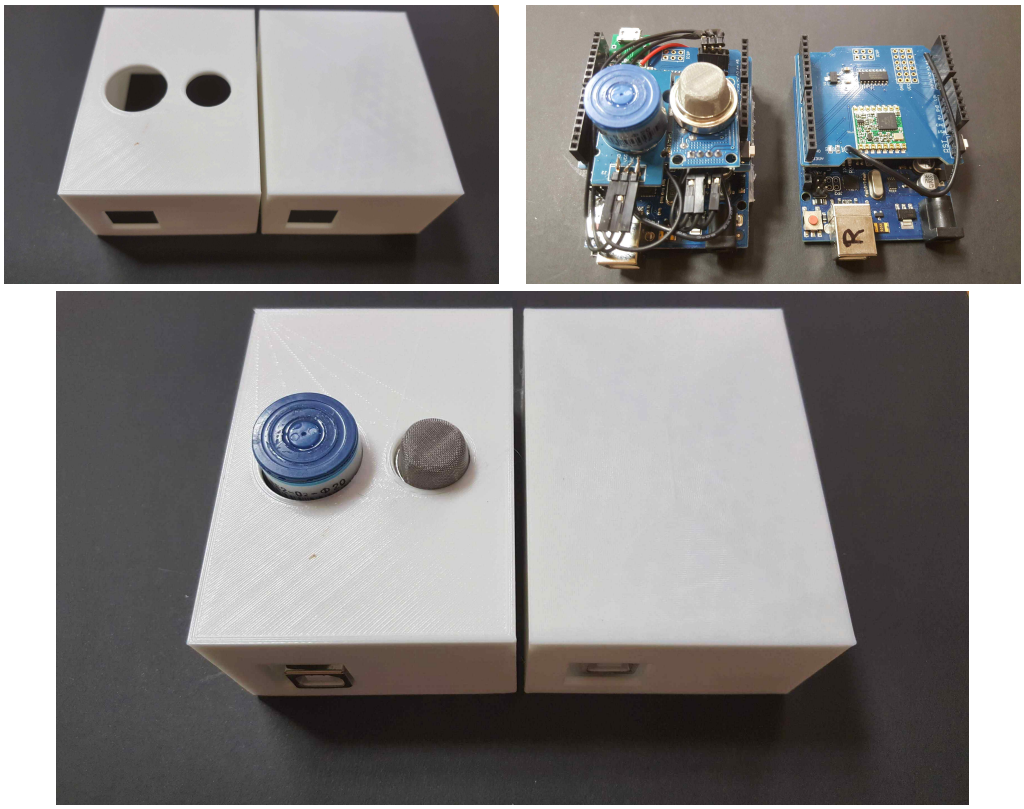
**[그림 40] Outsourcing PCB Circuit Design과 CNC PCB Fabrication 과정**

최종적으로 센서, 마이크로프로세서, 네트워크 모듈을 각 목적에 맞게 조합하여 사용할 수 있도록 하였다. 센서는 다양한 종류의 유해가스를 측정 할 수 있도록 하였고, 센서에서 온 데이터를 마이크로프로세서를 이용하여 받아서 네트워크 모듈을 이용하여 필요한 곳에 전송을 해주는 시스템이다.




**[그림 41] 본 연구에서 개발한 모듈조립디자인 밀폐공간측정 시스템**

모듈형태로 만들어진 측정기 시스템은 센서, 프로세서, 네트워크를 조립하여 3D 프린터로 제작한 최종 측정기로 조립되게 된다.



**[그림 42] 각 현장에 맞게 모듈형태로 조립한 측정기 시스템**

**[그림 43] 본 연구에서 개발한 산소 고정형/휴대용 모니터**

**<표 11> 개발된 산소농도측정기 내장 센서 제원**

| | |
|---|---|
| 측정범위 | 0-25%vol |
| 사용기간 | 5년 |
| 분해능 | 0.01% |
| 사용온도 | -30 ℃-+60 ℃ |
| 응답시간 | ≤15 sec |
| 적정습도 | 0-99% |

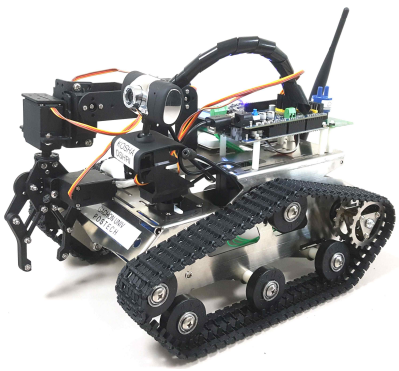
고정방식의 장점은 측정기기에 전원을 안정적으로 공급할 수 있고, 통신신호도 쉽게 연결 할 수 있기 때문에 안정적인 운영을 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 대부분의 현장에서는 고정식으로 측정기기를 설치하여 운영을 하고 있으나 공간 특성에 따라 적합하지 않은 경우도 있어 밀폐공간의 특성을 잘 이해 한 후에 사용해야 한다.

다) Movable Device

센서가 부착된 측정기가 완성이 되면 캐리어(이동체)는 이를 잘 부착하여 밀폐공간 특성에 맞게 이동을 할 수 있도록 하는 것에 목적을 두고 있다.

캐리어를 이용한 측정의 장점은 사람이 들어가기 전에 위험한 상황을 미리 인지 할 수 있어 경보를 알릴 수 있고, 사람이 진입하기 어려운 장소에 진입할 수 있는 장점이 있다.

로봇을 이용하면 다양한 지형지물과 장애물을 지나서 갈 수 있고 현장상황을 카메라로 확인할 수 있다. 드론을 이용하면 높은 곳에서 전체적으로 상황을 파악할 수 있고, 상세하게도 확인을 할 수 있는 장점이 있다. 이동식 측정기의 최대 제한점은 배터리로 구동이 되어 작업시간에 한계가 있다. 이는 바닥에서의 무선 충전, 배터리 교체식 시스템, 야외에서 응용하는 경우 태양광 등을 사용할 수 있다.



로봇을 이용한 측정기

드론을 이용한 측정기

**[그림 44] 본 연구에서 개발한 이동식 측정 시스템**

로봇을 이용한 측정은 가장 현실적인 캐리어라고 판단된다. 지상에서 움직이기 때문에 매우 안정적이며, 동시에 다른 캐리어들에 비해 가장 기술이 발달 되어 있는 분야이기도 하다. 본 연구에서도 다양한 로봇을 시도하였다.

**[그림 45] 본 연구에서 시도된 다양한 로봇 측정 시스템**

드론의 경우 체공시간이 배터리의 제한 때문에 길지 않으며 추락시 대형사고로 이어질 가능성이 높다. 따라서 비행선과 같은 가벼우면서도 본연의 기능을 할 수 있는 캐리어에 센서를 장착하는 방법도 가까운 미래에는 활용 할 수 있을 것으로 기대한다.

독일 공압센서 및 액추에이터 제조사인 FESTO에서는 다양한 생물의 움직임을 모사하는 생체모방공학(Biomimetics)을 이용하여 회사를 홍보하여 본 연구에서도 참고를 하였다. 나비나 잠자리와 같이 가볍게 날 수 있는 캐리어, 헬륨가스를 넣어 모터를 추가하여 추진을 하거나 헬륨가스를 넣은 돌고래 모양의 비행선을 넣어 이동을 가능하게 하는 등 다양한 시도를 하고 있다. 밀폐공간 질식재해에서도 이와 같이 자유로운 움직임을 가지는 캐리어를 상시 띄워놓고 측정을 하는 방법도 가능할 것으로 보인다.

**[그림 46] 독일 FESTO사의 미래 캐리어 개발 현황**

본 연구에서도 헬륨가스를 주입하여 이동이 가능한 캐리어 (가로 1.5 m, 세로 0.7 m)를 적용해보았으나, 측정기기의 무게를 견디기에는 부력이 부족하여 독일 FESTO사에서 시도한 것과 같은 초대형 헬륨풍선이 필요함을 알 수 있었다. 드론보다 추락시 안전하고 체공시간이 길어서 건설현장, 실내공간 등에서는 충분히 활용이 가능할 것으로 보인다. 다만 바람이 많이 부는 실외에서는 사용이 어렵다는 단점이 있다.

**[그림 47] 본 연구에서 시도한 자유비행 캐리어**

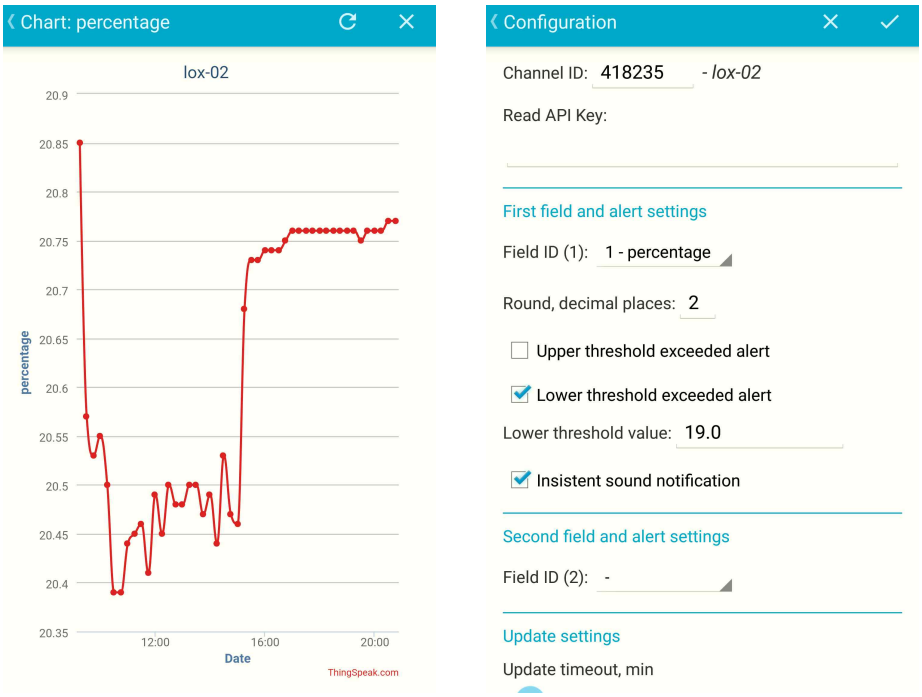
새로 도입 할 수 있는 캐리어는 공형태(Ball sensing system)이다. 공이 움직이면서 측정을 실시하고 색(파란색: 작업가능, 빨간색: 위험-작업불가)으로 상황 표현을 해주는 시스템이다. 일정한 궤도를 지정해 두면 그에 따라 이동을 하며 실시간으로 알려주는 시스템이다.

**[그림 48] 본 연구에서 시도한 공 형태의 캐리어**

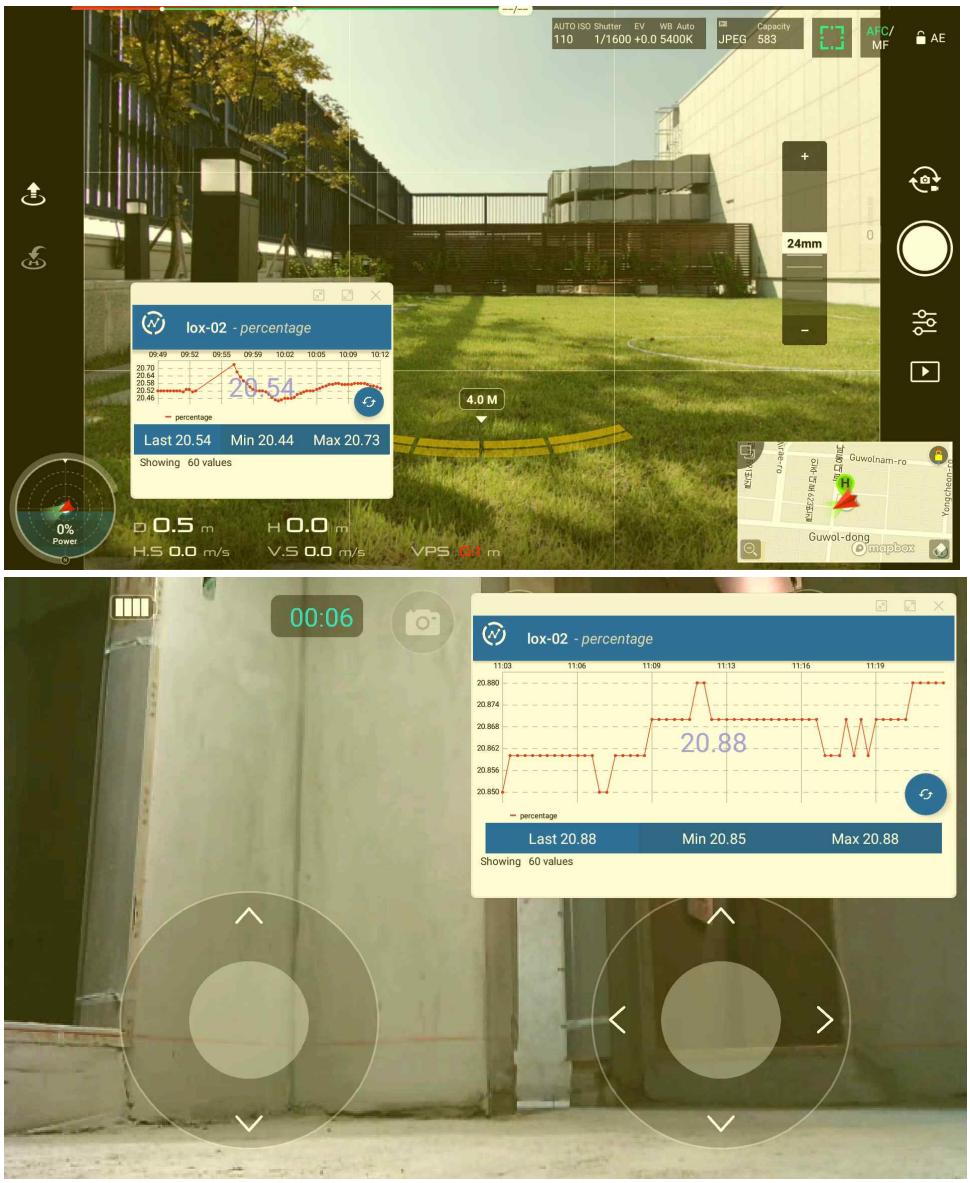
라) Software system

이렇게 만들어진 측정 시스템에서 수집/전달된 데이터를 받으면 데이터를 이용하여 분석/실행이 필요하다.

본 시스템에서는 캐리어(드론, 로봇)에 카메라를 설치하여 사람이 들어가지 않고도 주변환경을 확인 할 수 있고, 모니터에서 동시에 타겟한 물질의 농도를 확인하며, 미리 설정한 농도범위를 벗어나게 되면 알람이 울리도록 구성되어 있다.




**[그림 49] 본 측정 시스템에서 산소농도변이 및 알람 농도 설정**




**[그림 50] 본 측정 시스템에서 현장 및 타겟 물질의 농도를 확인할 수 있는 화면**

**[그림 51] 본 측정시스템에서 밀폐공간 관리 웹 화면**

마) 밀폐공간 유해요인 모니터링 장비의 개발 방향

지금까지 밀폐공간에서 유해요인을 모니터링 하기 위한 모니터링 장비 개발을 위한 요소들을 알아보고 실제 개발을 해보았다. 정리하면, 직독식 측정에 대한 법제도가 함께 수반이 되어야 함을 알 수 있었고, 센서-통신-마이크로프로세서를 조합하여 모니터링 장비를 만들 수 있다. 또한 모듈조립디자인을 통하여 상황에 맞는 센서, 통신 형태를 쉽게 변경해가며 사용할 수 있는 방법에 대하여 정리를 하였고, 이렇게 만들어진 모니터링 장비를 근로자가 웨어러블 디바이스로 착용하여 사용할 것인지 또는 캐리어를 이용하여 이동을 하면서 측정을 할 것인지를 결정하여 밀폐공간 특성에 맞추어 활용을 할 수 있다.

경제성 측면에서 보았을 때에는 여러 가지 해결해야 할 점이 있다. 시장 경제 원리에 따라 수요가 많아지면 센서를 포함한 측정기기에 필요한 부품들의 제작 단가가 낮아 질 것이고 이는 자연스럽게 전체 측정기기 제작에 필요한 비용이 낮아지는 효과를 얻을 수 있다. 일정 수준의 시장이 형성될 때까지에는 정부에서의 연구 개발에 대한 적극적인 지원이 필요하다고 판단된다.

사용성 및 편리성 측면에서 보았을 때에는 연구개발 단계이기 때문에 아직은 불편한 점이 있어 일정정도 교육을 받은 사람이 불편함 없이 사용을 할 수 있는 수준 까지는 도달 하였다고 판단된다. 이는 센서, 통신, 마이크로프로세서 등의 기술과 그 발전수준을 함께 하기 때문에 충분히 극복이 가능하다고 판단된다. 본 연구에서 개발된 측정기기는 스마트폰과 연동하여 개발 되었고, 배터리를 이용하여 측정을 할 수 있도록 만들어 그 가능성을 매우 높인 연구이다. 또한 데이터를 실시간으로 클라우드로 보내어 저장을 함과 동시에 자체 내장된 microSD 카드에 이중으로 기록이 되어 데이터 손실에 대비 하였다. 앞으로 이러한 경험을 바탕으로 산업안전보건연구원에서 지속적인 연구와 개발을 할 수 있는 환경을 만드는 것이 필요하다.

보급 가능성은 위에서 언급한 경제성, 사용성, 편리성이 함께 수반된다면 충분히 가능성이 있고, 밀폐공간 사고를 예방하는데 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대한다.

**<표 12> 기존 방법과 첨단기술 활용 시 개발 방향**

| 구분 | 기존 방법 | 첨단 기술 활용 |
|---|---|---|
| 경제성 | - 비교적 높은 가격대의 장비 구비 필요<br>- 일부(대기업 등)의 경우 측정기를 자체 보유하고 있지만, 대부분의 경우 그렇지 못함.<br>- 산업안전보건공단에서 대여를 해주고 있으나 많이 사용되지 못함. | - 대량생산 시 획기적으로 생산비용 낮출 수 있음<br>- 적정한 비용으로 쉽게 보급 가능 |
| 사용성 | -관리자만 확인이 가능하며 작업하는 동안에는 근로자와 관리자간의 통신으로만 측정결과 확인 가능(수동적) | - 실시간으로 측정결과를 주고받기 때문에 즉각적인 대응 가능.<br>- 스마트폰과 연동을 통하여 누구나 측정 및 확인을 할 수 있도록 함. |
| 보급가능성 | - 법/제도화 되지 않으면 보급 불가 판단 | - 법/제도화 하여 보급을 하여 관리 및 출입 허가 필요 |
| 관리 효용성 | - 검교정에 대한 관리되지 않고 있음. | - 주기적 검교정을 의무화 하도록 함<br>- 근본적으로는 센서 개발을 통하여 검교정 없이도 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 센서개발필요 |

그러나 예산이 많이 소요되므로 이에 대한 경제성은 고려를 해보아야 한다. 정확히 비교하기는 어렵지만 소방분야의 예를 들어보면 센서와 통신 분야에 있어서 소방관의 직무수행 중 위험요인 감지 네트워크 기반의 지능형 소방진압복 개발연구에는 4년간 35억원을 투자하여 센서 개발(1차년), 센서(3가지 유해가스) 플랫폼개발(2차년), 테스트(3차년), 진압복 부착(4차년)을 실시하였고, 캐리어 측면에서 보면 특수재난지역 최첨단 정찰 및 원격제어 시스템 개발 연구에는 약 3년간 20억원을 투자하여 작업환경분석 및 정찰 플랫폼 개발(1차년), 통신 및 소방관 탑승형 개발(2차년), 최종시제품제작(3차년)으로 개발을 하고 있다. 물론 소방분야와는 다르지만, 산업보건 분야도 소방 이상의 가치가 있다고 판단하며 내외적으로 적극적인 연구와 개발이 필요하다고 생각한다.

바) 밀폐공간 질식재해 사고 분석에 따른 현장 적용 가능성 평가

밀폐공간 질식재해를 세분화 하여 접근을 한다면 2017년도 산업안전보건공단의 밀폐공간작업 TOP 7 자료에는 아래와 같이 기술되어 있다.

1) 정화조, 침전조, 집수조, 탱크, 암거, 맨홀, 관 또는 피트 내부

2) 빗물, 하천의 유수 또는 용수가 있거나 있었던 통암거, 맨홀 또는 피트의 내부

3) 헬륨, 아르곤, 질소, 프레온, 탄산가스 또는 그 밖의 불활성 기체가 들어있거나 있었던 보일러, 탱크 또는 반응탑 등 시설의 내부

4) 장기간 밀폐된 강재의 보일러, 탱크, 반응탑이나 그 밖에 그 내벽이 산화하기 쉬운 시설내부

5) 화학물질이 들어있던 반응기 및 탱크의 내부

6) 갈탄, 목탄, 연탄난로를 사용하는 콘크리트 양생장소 및 가설숙소 내부

7) 기타중독 (일산화탄소, 이산화탄소)

| TOP | 발생장소 | 작업 | 원인 | 유해물질 (센서) | 통신 | 캐리어 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 정화조 집수조 | 슬러지 제거, 청소 | 황화수소 발생 | 산소결핍, 황화수소 | LTE, Wi-Fi | 고정, 로봇, 드론 |
| 1 | 정화조 집수조 | 배관작업, 펌프교체 | 황화수소 발생 | 산소결핍, 황화수소 | LTE, Wi-Fi | 고정, 로봇, 공 |
| 1, 2 | 맨홀 | 점검 및 보수 | 관로하수 황화수소 | 산소결핍, 황화수소 | LTE, Wi-Fi, BT | 로봇, 공 |
| 1,2 | 맨홀 | 펌프교체 | 관로하수 황화수소 | 산소결핍, 황화수소 | LTE, Wi-Fi, BT | 로봇, 공 |
| 1 | 폭기조 | 교반기 점검, 청소 | 황화수소 발생 | 산소결핍, 황화수소 | LTE, Wi-Fi | 고정, 로봇, 드론 |
| 1 | 배관 | 관로 누수점검 | 금속부식, 미생물호흡 | 산소결핍 | LTE, Wi-Fi, BT | 로봇, 공 |
| 3 | 배관 | 용접, 가스충진 | 불활성 기체 누출 | 산소결핍 | LTE, Wi-Fi, BT | 로봇, 공 |
| 3 | 탱크 | 용접, 검사 | 불활성 기체 누출 | 산소결핍 | LTE, Wi-Fi | 고정, 로봇 |
| 4 | 탱크 | 선박 검사, 양수작업 | 산화작용 금속부식 | 산소결핍 | LTE, Wi-Fi | 고정, 로봇 |
| 4 | 맨홀 | 선박 맨홀점검 관로 청소 | 산화작용 금속부식 | 산소결핍 | LTE, Wi-Fi, BT | 로봇, 공 |
| 5 | 탱크 | 탱크내 잔여 유기용제 | 불활성기체 및 유기용제 | 산소결핍, 유기용제 | LTE, Wi-Fi | 고정, 로봇, 공 |
| 5 | 반응기 | 반응기 내부 화학물질 | 불활성기체 및 유기용제 | 산소결핍 | LTE, Wi-Fi | 고정, 로봇, 공 |
| 6 | 기계실 | 콘크리트 타설 양생 중 | 갈탄 난로 | 일산화탄소 | LTE, Wi-Fi | 고정, 로봇, 공 |
| 6 | 지하실 | 지하 바닥 콘크리트 양생 | 갈탄 난로 | 일산화탄소 | LTE, Wi-Fi | 고정, 로봇, 공 |
| 6 | 건설현장 | 콘크리트 양생 | 갈탄 난로 | 일산화탄소 | LTE, Wi-Fi, BT | 로봇, 드론 |
| 7 | 가마 | 화로 작업, 한증막 불 | 숯의 불완전연소 | 일산화탄소 | LTE, Wi-Fi | 고정, 로봇, 공 |
| 7 | 맨홀 | 양수작업 | 엔진 펌프 연소 | 일산화탄소 | LTE, Wi-Fi, BT | 로봇, 공 |

- TOP 7을 기준으로 분류 하였음.
- 캐리어의 경우 고정식은 상시 부착형, 로봇은 트랙에 의한 자율주행을 포함함.
- 그 밖에도 다양한 조합이 가능함.

**[그림 52] TOP 7에 따른 발생장소, 작업, 원인과 유해물질, 통신, 캐리어 분류**

밀폐공간 질식재해 사고는 다양한 공간에서 발생을 하게 되지만, 주로 발생되는 공간을 TOP 7으로 지정하여 교육을 하고 있다. 그동안의 사고를 분석하여 정보를 제공하는 것으로 매우 유용한 자료이다. 이를 통하여 발생장소, 작업, 원인에 따라 첨단기술을 도입할 수 있는 경우의 수를 조사하였다.

기본적으로 중요한 것은 유해물질이다. 센서가 해당 유해물질을 측정할 수 있는지를 확인하고, 해당 사고 장소에 따라 통신 방법과 캐리어를 제안하였다. 주된 유해물질은 산소결핍, 황화수소, 일산화탄소, 유기용제 인데 이는 측정이 가능한 물질이다. 일부 유기용제에는 측정이 어려울 수도 있으나, Total VOC 측정이 가능한 센서가 있지만 고비용이기 때문에 충분한 검토를 통하여 센서의 선정이 가능하다. 통신의 경우에는 주로 LTE와 Wi-Fi를 이용하면 대부분의 공간에서 통신이 가능하다. 다만 이동을 많이 해야 하는 작업의 경우 BT(블루투스)를 이용한다면 더욱 신뢰성 있는 통신을 통하여 측정데이터를 받을 수 있게 된다. 캐리어는 상시 측정을 하여 데이터를 전송하는 방식의 고정식과 다양한 형태의 로봇, 드론, 공을 제안하였다. 다양한 형태의 로봇은 관리자 또는 근로자가 직접 조종을 할 수 있기도 하고, 궤도를 정하여 일정 시간 간격으로 돌아다니면서 측정을 할 수 도 있으며, 자율 주행으로 스스로 움직이는 형태가 될 수 도 있다. 드론의 경우에도 마찬가지로 장애물감지를 하면서 일정한 항로를 설정하여 다니면서 측정을 할 수도 있고 사용자가 직접 조종을 할 수 도 있다. 공의 경우에는 스스로 움직기도 하고 조종을 통하여 움직이기도 할 수 있는데 아직 개발이기 때문에 도입하기는 어려운 상황이다.

### 2) 현장평가

(1) 건설현장

가) 건설현장 밀폐공간의 이해

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 된다[18].

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 다라 영상의 온도로 현장 내부를 유지하여 콘크리트 양생이 잘 될 수 있도록 하고 있다.

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.

---

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

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.

**[그림 53] 현장평가를 실시한 건설현장**

나) 건설현장에서의 적용

건물개요
용도 : 공동주택(다세대주택)
대지면적 : 279.00㎡
건축면적 : 163.29㎡
연면적 : 549.80㎡
최고높이 : 14.50m

구조 : 철근콘크리트조
규모 : 지상5층

**[그림 54] 건설현장평가에 사용된 캐리어 및 측정기기**

건설현장을 방문한 9월 12일 서울의 평균기온은 22.8 ℃이며 평균 상대습도는 52%로, 갈탄을 태우는 시기가 아니었으나, 센서를 장착한 캐리어(로봇, 드론, 비행선)의 건설현장 적용 가능성을 시험해 볼 수 있었다.

| 지점 | 시간 | 기온(°C) | 습도(%) |
|---|---|---|---|
| 서울(108) | 2018-09-12 10:00 | 22.7 | 45 |
| 서울(108) | 2018-09-12 11:00 | 24.8 | 44 |
| 서울(108) | 2018-09-12 12:00 | 26.3 | 44 |
| 서울(108) | 2018-09-12 13:00 | 26.8 | 45 |

**[그림 55] 측정시각의 서울 기온 및 습도 (출처 : 기상청)**

다) 건설현장에서의 첨단기술 적용 제안

건설현장에서 측정 시에는 통신방법에 대한 고려가 반드시 필요하다. 본 연구에서 현장 적용 평가 시에는 도심에 있는 건설현장이기 때문에 LoRa, Wi-Fi 등 다양한 통신 방법이 가능하였으나, 개발을 하는 현장의 경우 통신 신호가 닿지 않는다면 이에 대한 기술적 보완이 동시에 진행이 되어야 한다.

**<표 13> 건설현장에서 실시한 현장평가 결과**

| 구분 | | 건설현장 | 설명 |
|---|---|---|---|
| 센서 | 물질 | $O_2$ / CO | 건설현장에서의 주요가스 |
| | $O_2$ | ◎ | 산소센서 적용가능 |
| | CO | △ | 일산화탄소센서 검증 필요 |
| 통신 | LoRa | ○ | 지상(1층-5층) 통신 원활 |
| | Wi-Fi | ○ | 지상(1층-5층) 통신 원활 |
| | Zigbee | △ | 검토 필요. Gateway 없으면 근거리 통신용 |
| | Bluetooth | △ | 검토 필요. Gateway 없으면 근거리 통신용이기는 하나 연장기술 가능 |
| | RF | X | 불가. 근거리 통신용 |
| 캐리어 | 로봇 | ○ | 현재 가장 현실적인 캐리어임. 트랙을 만들어 트랙을 따라 순찰은 현재 기술로도 가능함. 추후 인공지능 적용 검토 필요. |
| | 드론 | △ | 드론 조종자가 도면을 정확히 파악 시에 가능, 장애물 감지 기능 추가 시 더욱 활발한 사용 가능 |
| | 공 | △ | 새로운 개념이나 아직 캐리어와 센서부분의 결합이 필요한 기술 |
| | 비행선 | △ | 실내에서 사용하기 매우 적절하나 건설현장의 날카로운 돌출부에는 약한 소재로 만들어져있어 훼손 가능성 있음. |

◎: 즉시 현장 적용가능, ○: 적용 가능, △: 검토 필요, X: 불가

건설현장에서는 갈탄을 이용한 보온양생 시 발생하는 일산화탄소에 의한 중독이 주요 사망원인이 될 수 있다. 따라서 건축현장에서는 일산화탄소와 산소센서를 장착하여 측정을 실시하였다.

위에서 언급했듯이 동절기가 아니기 때문에 일산화탄소 발생원은 없었지만, 건설현장의 특성을 알아보기에는 매우 적합한 현장이었다. 건설현장은 다양한 장애물이 있어서 바닥을 통하여 이동하는 캐리어는 제한점이 있다고 판단하여, 고정형 측정기를 기본으로 하되, 비행선과 같은 이동체를 현장 내부로 들여보내어 측정을 실시하는 것을 제안한다.

**[그림 56] 건설현장 적용평가**

(2) 오폐수처리장

가) 오폐수처리장의 이해

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 있었다[19]. 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.

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 켠 상황을 모사하여 측정을 실시하였다.

측정 시 측정하는 연구원은 외부에서 측정기기를 제어하면서 안전하게 측정을 실시하였다.

19) 고용노동부 인천북부지청 자료

나) 오폐수처리장에 적용

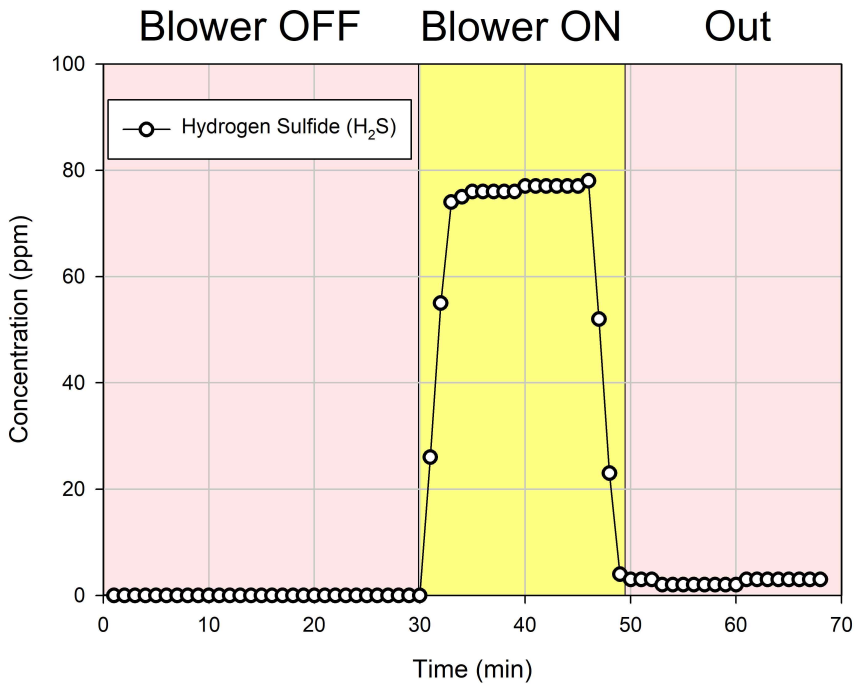
일시 : 2018년 9월 7일 (1차) / 9월 11일 (2차)
장소 : ○○건물 오폐수처리장

**[그림 57] 오수처리장(상), 폐수처리장(하) 측정 시연**

해당 오수처리장에서는 하루에 2회 30분씩 블로워를 타이머 설정을 하여 자동으로 가동하고 있었다. 급배기 시스템이 있었지만, 근로자가 내부에 있는 상황에서 갑자기 블로워가 작동되면 피할 시간도 없이 사망에 이를 수 있는 환경이다.

본 연구에서 사용한 측정기는 1분 평균으로 측정 하였고, 블로워 작동 전에는 황화수소 발생의 거의 없다가 블로워 작동을 시작하면서 황화수소 농도가 약 80 ppm 정도 유지되다가 오수 처리장 밖으로 나오면서 다시 농도가 급격히 낮아짐을 알 수 있었다.

만약 해당 오수 처리장에서 블로워 작업 시 근로자가 있었으면 사망사고로 이어질 수 있는 위험한 상황이었다. 따라서 오수처리장에서는 블로워 기능은 사람이 없는 것을 확인 하여야 한다.




**[그림 58] 오수처리장에서의 황화수소 농도 변이**

다) 오폐수처리장 첨단기술 적용 제안

오폐수처리장은 황화수소가 주된 유해가스이며, 악취민원으로 인하여 환기를 쉽게 할 수 없는 환경을 가지고 있다. 따라서 관리를 하는 근로자 입장에서는 매우 위험한 작업환경임에 틀림없다고 판단된다.

**<표 14> 오폐수처리장에서 실시한 현장평가 결과**

| 구분 | | 오폐수처리장 | 설명 |
|---|---|---|---|
| 센서 | 물질 | $O_2$ / $H_2S$ | 오폐수처리장 주요 물질 |
| | $O_2$ | ◎ | 산소센서 적용가능 |
| | $H_2S$ | △ | 황화수소센서 검증 필요 |
| 통신 | LoRa | △ | 지하 통신 검토 필요 |
| | Wi-Fi | ○ | 지하 통신 원활 |
| | Zigbee | △ | 검토 필요. Gateway 없으면 근거리 통신용 |
| | Bluetooth | △ | 검토 필요. Gateway 없으면 근거리 통신용이기는 하나 연장기술 가능 |
| | RF | X | 불가. 근거리 통신용 |
| 캐리어 | 로봇 | ○ | 현재 가장 현실적인 캐리어임. 트랙을 만들어 트랙을 따라 순찰은 현재 기술로도 가능함. 추후 인공지능 적용 검토 필요. |
| | 드론 | △ | 드론 조종자가 도면을 정확히 파악 시에 가능, 장애물 감지 기능 추가 시 더욱 활발한 사용 가능 |
| | 공 | △ | 새로운 개념이나 아직 캐리어와 센서 부분의 결합이 필요한 기술 |
| | 비행선 | △ | 실내에서 사용하기 매우 적절하나 오폐수가 처리되는 부분으로 떨어지지 않도록 천장에 고정하여 트랙을 만드는것도 고려 해볼 필요 있음. |

◎: 즉시 현장 적용가능, ○: 적용 가능, △: 검토 필요, X: 불가

오폐수처리장의 경우 출입시스템부터 첨단화가 필요하다. 적절한 내부공기가 유지되지 않으면 출입자체를 금지하는 시스템을 도입하여야 한다. 그렇게 하기 위해서는 내부에 IoT를 이용한 실시간 측정 시스템을 도입해야 한다. 근로자의 내부진입을 위해서는 출입시스템과 동시에 블로워 중단 기능을 통하여 근로자가 내부에 있을 때에는 블로워의 작동을 원천적으로 중단하여 갑자기 황화수소가 발생하는 상황을 피할 수 있도록 한다. 통신 측면에서 보면 지하이기 때문에 통신이 일반적으로 잘 이루어지지 않아 Wi-Fi를 이용하여 실험을 하였고 이를 제외한 나머지 통신방법은 적합하지 않았다.

캐리어 측면에서 보았을 때에는 로봇, 드론, 공, 비행선 등을 실험해 보았고, 적용이 가능하다고 판단된다. 최적의 캐리어는 로봇이 이동할 수 있는 트랙을 만들어 돌아다니면서 상시 측정을 하는 것이나 천장에 트랙을 만들어 이동하면서 측정을 하는 것을 제안한다. 동시에 고정형태의 측정기를 장착하여 다양한 방향에서의 농도를 측정하여 외부로 작업환경에 대한 정보를 제공 할 수 있는 유용한 시스템이라고 판단된다.

**[그림 59] 오수처리장에서의 볼, 드론 측정 시스템**

라) 현장평가에 대한 요약

현장평가를 실시한 결과를 요약하면 센서의 경우 산소센서는 매우 안정적으로 작동을 하여 지금도 사용이 가능할 것으로 판단된다. 다른 센서의 경우 추가적인 연구를 통하여 센서에 대한 검증이 필요하다. 통신의 경우에는 LoRa의 경우 본 연구에서 건설현장(5층 및 지하 없음)에서는 잘 작동하였으나 지하에 위치한 오폐수처리장에서는 원활하게 이루어지지는 않아 지하에서의 사용에 대한 연구는 검증이 필요한 부분이다. Wi-Fi는 신호가 있는 경우 건설현장 및 오폐수처리장에서 모두 잘 작동함을 알 수 있었다. Wi-Fi의 경우에는 반드시 유선랜을 통하거나 LTE 등의 통신망이 수반이 되어야 한다는 점이 있다. Zigbee의 경우에는 중간에 Gateway를 설치하면 가능할 것으로 판단된다. Bluetooth의 경우 일반적으로 10 m 이내의 공간에서만 사용이 가능하다고 알려져 있는데, 웨어러블 디바이스 등에 연결하고, 작업공간에 수신거리 연장기(Extender)를 설치하여 송수신거리를 연장 할 수 있다. RF의 경우 근거리 통신을 목적으로 개발된 바 밀폐공간 측정에는 적합하지 않은 것으로 나타났으나, 이 역시 근거리 알림에는 사용을 할 수 있다. 캐리어의 경우 밀폐공간에 따라 다르지만 공통적으로 로봇은 지금 바로 현장 적용이 가능하다는 점은 있지만, 장애물에 대한 한계점은 있다. 이는 근로자가 들어가더라도 같은 상황이기 때문에 사람이 들어갈 수 있는 장소라면 로봇은 충분히 그 역할을 해낼 수 있는 것으로 파악되었다. 드론의 경우 아직은 도입하기에 쉽지 않은 기술이기는 하나 현재 발전 속도를 보면 장애물 회피 기술이 지속적으로 추가되고 있어 가까운 미래에는 충분히 활용이 가능한 기술로 판단되며, 실제 현장평가에서도 그 가능성을 확인 할 수 있었다. 공방식의 경우 아직 측정기기와 이동부분에 대한 결합이 완벽하지 않아 적용하기는 어려우나 새로운 측정방법으로 충분히 가능성이 있다고 판단된다. 비행선의 경우 드론을 대체 할 수 있는 방법으로 실내에서는 매우 안정적으로 활용될 수 있으나

야외에서는 사용이 불가하다. 향후에는 인공지능을 통한 자율 이동에 대한 가능성도 함께 찾을 수 있었다.

**<표 15> 현장평가에 대한 요약**

| 현장명 | 구분 | 건설현장 | 오폐수처리장 |
|---|---|---|---|
| 센서 | 물질 | $O_2$ / CO | $O_2$ / $H_2S$ |
| | $O_2$ | ◎ | ◎ |
| | CO | △ | - |
| | $H_2S$ | - | △ |
| 통신 | LoRa | ○ | △ |
| | Wi-Fi | ○ | ○ |
| | Zigbee | △ | △ |
| | Bluetooth | △ | △ |
| | RF | X | X |
| 캐리어 | 로봇 | ○ | ○ |
| | 드론 | △ | △ |
| | 공 | △ | △ |
| | 비행선 | △ | △ |

◎: 즉시 현장 적용가능
○: 적용 가능
△: 검토 필요
X: 불가

## 4. 스마트폰 부착식 소형측정기, 발광(형광)측정기 등 개발방안 검토

결론적으로 사용자가 밀폐공간 사고를 예방하기 위해서는 위험을 인지할 수 있도록 해주는 것이 매우 중요한 요소이다. 위험을 알려줄 수 있는 자극은 다양하다. 시각(다양한 색의 불빛), 청각(알람, 사이렌 등), 촉각(진동), 후각 등이 있다. 또한 이러한 것을 어떠한 매체 또는 기기를 통하여 알려줄 수 있는지에 대한 논의도 함께 필요하다. 각 감각에 따라 장단점이 있으나 환경에 맞게 활용을 하게 된다. 시각적 알림의 경우 정량적 표시를 하게 되는데 이를 통하여 적절한 공기인지 아닌지 여부를 알 수 있게 된다.

**<표 16> 스마트폰 연결 방식에 따른 장단점과 경제성 분석**

| | 장점 | 단점 | 기타 (경제성 등) |
|---|---|---|---|
| 스마트폰 부착식 | - 연결 신뢰도 높음 | - 불편하며, 스마트폰과 센서 연결부위 파손가능성 높음<br>- 센서만 사용하기 어려움 | - 파손에 따른 수리비용 발생 등 |
| 스마트폰 무선연결식 | - 스마트폰과 센서 연결부위 파손가능성 없음<br>- 센서만 따로 원하는 장소에 두어 측정 가능<br>- 휴대성 좋음 | - 연결 신뢰도 낮음 | -높은 개발비용 (무선모듈) |

위에서 언급한 시각, 청각, 촉각 등을 아우를 수 있는 기기가 스마트폰이다. 정보통신정책연구원 2017년 통계에 따르면 스마트폰 보유율이 84.8%로 집계 되었다. 스마트폰에는 다양한 센서, 통신 기능을 보유하고 있기 때문에 측정 결과를 알려주는 매우 좋은 매개체가 될 수 있다.

스마트폰과 연결하여 사용하는 측정기의 경우 초창기에는 많이 활용이 되었다.

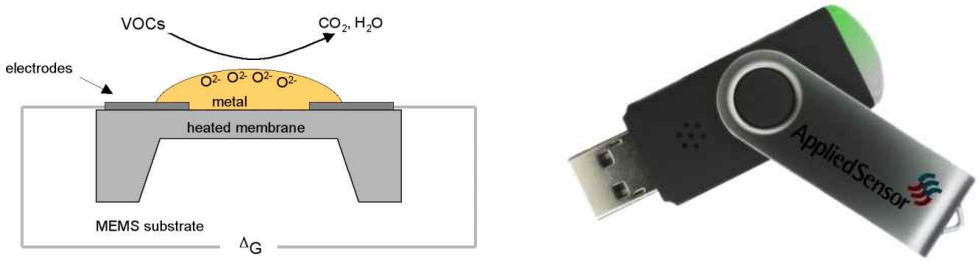
**[그림 60] 스마트폰 부착식 소형 측정기**

하지만 스마트폰 부착식 소형 측정기는 측정기와 스마트폰이 분리가 되지 않아 측정하고자하는데 제한점이 있어 부착식이 아닌 무선연결식을 사용하기 시작하였다. 마침 무선 연결을 위한 통신 방법에 대한 기술 개발이 활발히 이루어지고 있어 급속도로 발전중이다.

경제성이나 사용성 측면에서 보았을 때 리트머스 종이와 같은 것을 비행기로 접거나 구겨서 밀폐공간에 던지면, 환경에 따라 색이 변하거나 발광을 통하여 상황을 알려주는 시스템을 구현하는 것은 지금 당장은 어려울 것으로 보여지나, 기술이 발전하면서 추후에는 가능할 것으로 판단된다.

반도체 센서 및 유해가스 발광(형광) 패치 등이 개발되고 있는데 최근 센서는 대부분 반도체 센서를 이용하여 상용화되어 있어 사용자들이 적용하기 매우 편리하게 되어 있다.

반도체 센서의 경우 반도체기술이 발전하면서 다양한 응용을 하고 있다. 기존의 반도체 역할은 논리 연산이 주 였으나, 현재에는 NEMS(Nano/Micro electromechanical systems)기술로 다양한 센서를 만들어내고 있다. 물리량센서 및 화학 센서도 개발이 진행되고 있다. 가스 센서도 다양하게 개발이 되어 있다.[20] 황화수소의 경우 나노산화아연센서를 이용하여 황화수소를 측정하는 원리를 규명하였다 (Kim and Yong, 2011). 그밖에도 반도체 센서는 개발 목적에 맞추어 활용할 수 있기 때문에 장점이 있으며, 휴대용으로 만들기 위하여 저전력, 소형화에 큰 의미가 있는 분야이다.



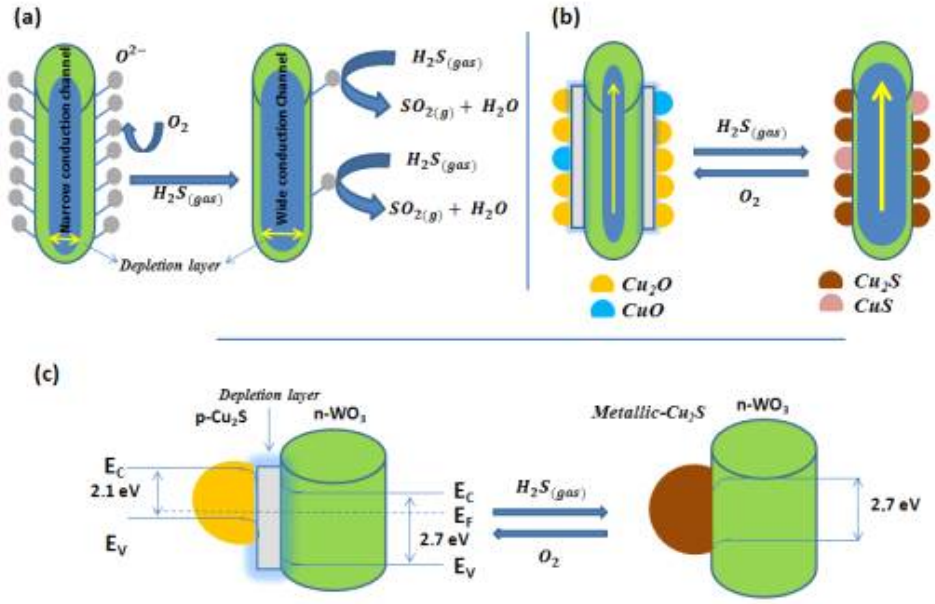

반도체 센서를 이용한 VOC 센서 USB 형태의 가스상 물질 측정기

**[그림 61] 반도체 센서를 이용한 상용화 센서의 예**

황화수소의 경우 반도체센서를 이용하기 위한 개발이 활발히 이루어지고 있다. 예를 들면, 텅스텐, 구리 등을 이용하여 황화수소와 반응하여 전류를 더 흐르게 하는 등의 방식으로 나노 크기의 센서를 만들고 있다(Annaouch et al., 2015),

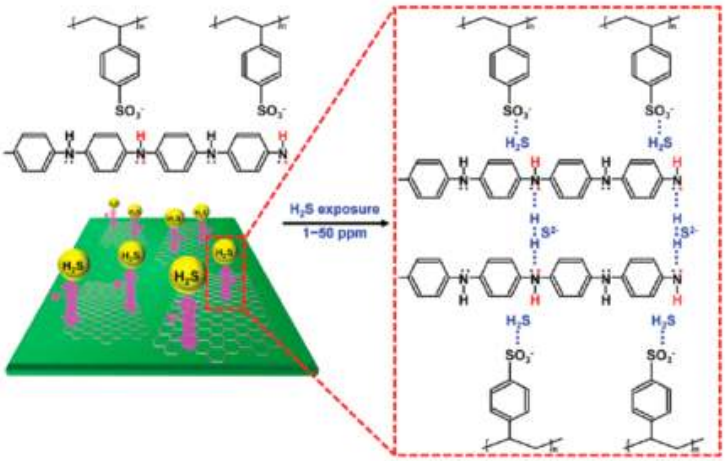
---

20) https://www.gesundheitsindustrie-bw.de/en/article/news/appliedsensor-gmbh-chemical-gas-sensors-to-detect-contaminants/



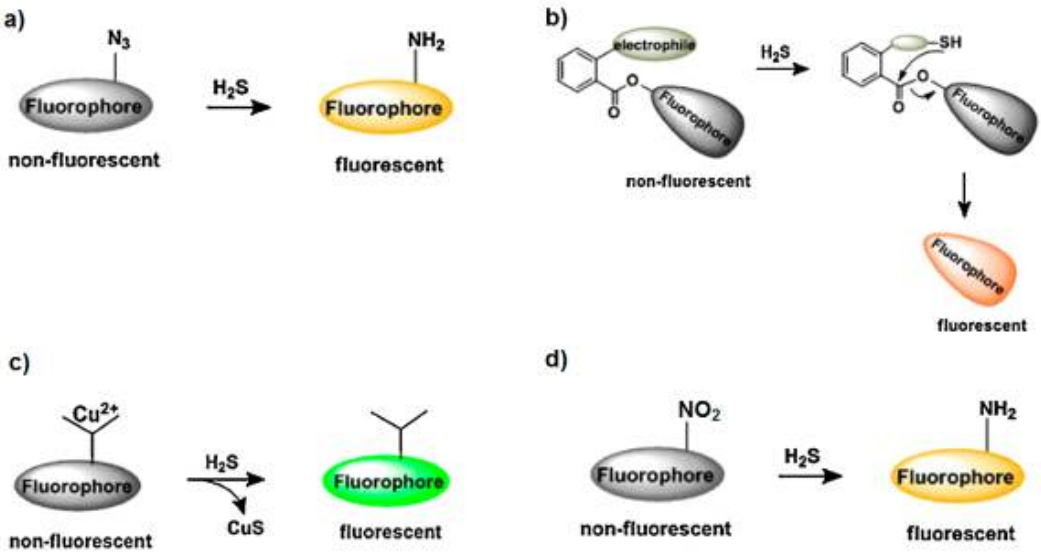

**[그림 62] 텅스텐과 구리를 이용하여 만든 황화수소 센서.**

또한 탄소계열의 신소재인 그래핀(Graphene)을 이용하여 전류량에 따라 황화수소 농도를 감지할 수 있는 센서를 개발하였다. 1-50 ppm 범위에서 측정이 가능하지만 아직 암모니아와의 특이성에 대한 연구가 이루어져야할 필요성이 있다고 보고하고 있다 (Cho et al., 2014). 그러나 반도체 센서의 경우 측정범위가 아직은 넓지 않다는 제한점을 가지고 있다. 향후에 이러한 제한점을 극복하면 현장에서 유용하게 사용할 수 있도록 보급이 가능하다.



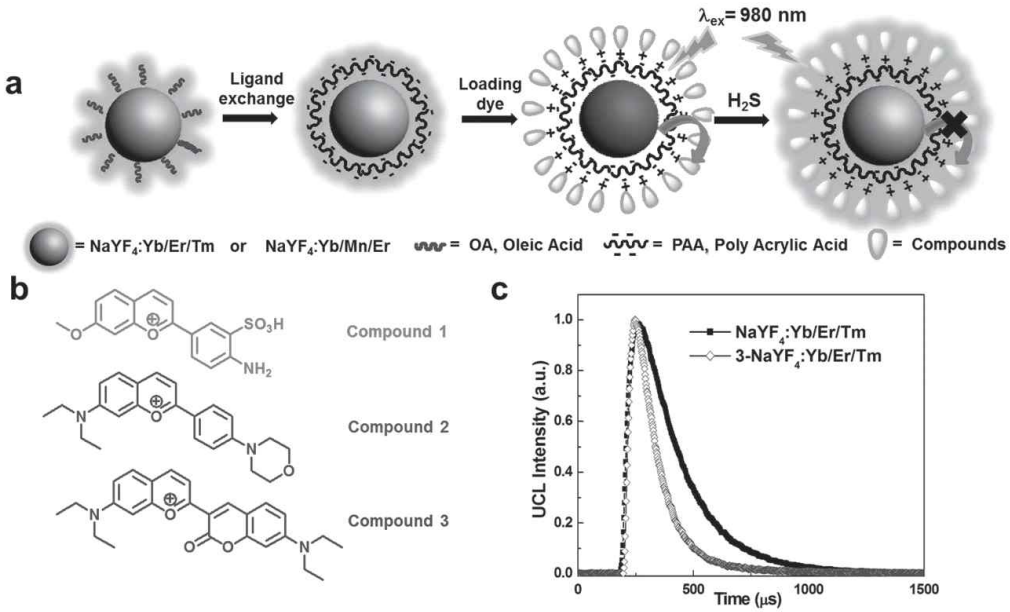

**[그림 63] 그래핀을 이용하여 만든 황화수소 센서.**

형광물질을 이용하여 황화수소와 반응하는 센서를 만들었다 (Kumar et al., 2013). 황화수소에만 반응하는 물질을 개발하여, 황화수소가 검출될 경우 색변화를 일으키는 센서이다.



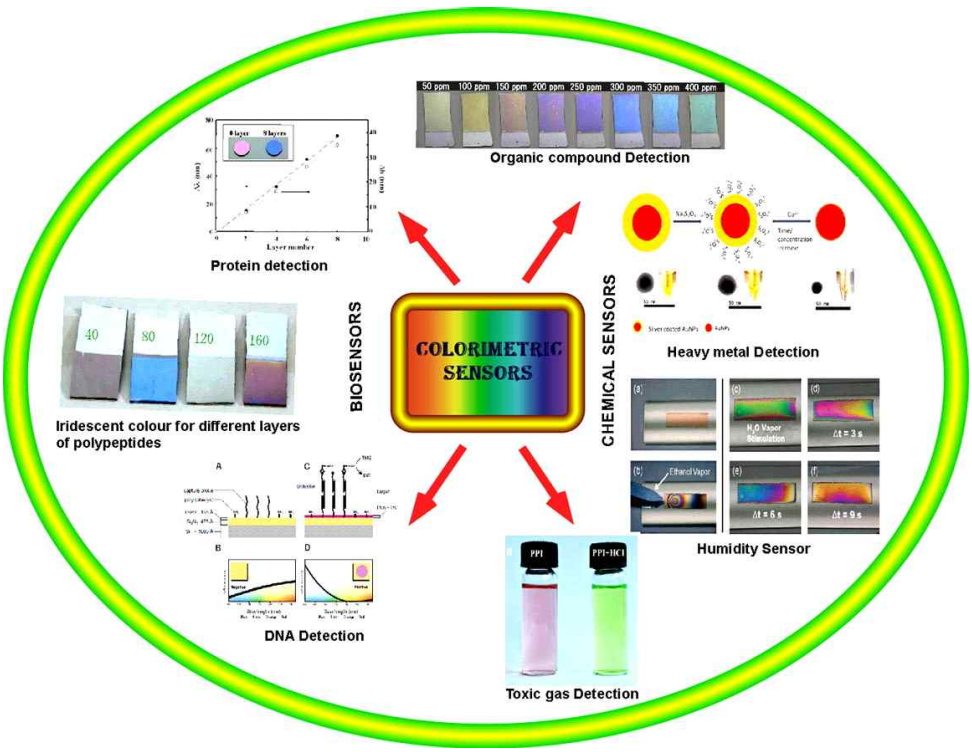

**[그림 64] 형광물질을 이용하여 만든 황화수소 센서**

가스상 외에도 다양한 시도가 이루어지고 있는데, 혈액 내에서 황화수소를 감지하는 센서를 형광기술을 이용하여 개발하였다 (Peng et al., 2016). 기본적으로 황화수소가 센서에 닿게 되면 형광을 발생시키는 원리이다. Ytterbium(Yb), Erbium(Er), Thulium(Tm) 등을 조합하여 황화수소에 반응하는 물질을 만들었다. 향후에는 이를 가스상 황화수소 측정에 적용할 수 있는 여지가 마련 된 것이다.

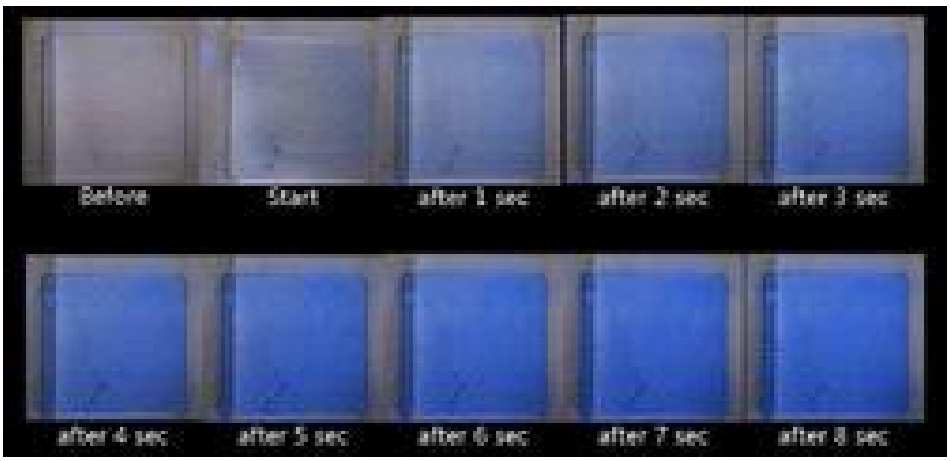



**[그림 65] 황화수소 형광 센서의 원리 (Peng et al., 2016)**

가장 직관적인 측정은 근로자가 바로 확인을 할 수 있는 색 변화 센서이다. 색 변화 센서의 핵심은 해당 물질에만 반응해야 하는 특이성과 주위 환경에 관계없이 측정이 되는 안정성이다. 국내에서도 유해물질 검지에 대한 색 변화 센서 연구가 진행되고 있다. 불산, 염산, 염소, 암모니아, 포름알데히드 농도에 따라 변하는 물질을 찾고 이를 검지하여 농도를 반-정량 (Semi-quantitative) 방식을 통하여 파악하고 이에 따라 관리를 하는 방법이 있다.




**[그림 66] 색 변화 센서의 종류(Joseph et al., 2017)**




| 기체 | 염료 | 색 변환에 대한 pH 범위 | |
|---|---|---|---|
| HF, 불산 | 브로모페놀 블루 | 3.0-4.6 | |
| | 브로모크레졸 그린 | 3.8-5.4 | |
| HCl, 염산 | 브로모페놀 블루 | 3.0-4.6 | |
| | 브로모크레졸 그린 | 3.8-5.4 | |
| $Cl_2$, 염소 | 클로로페놀 레드 | 4.8-6.4 | |
| $NH_3$, 암모니아 | 브로모페놀 블루 | 3.0-4.6 | |
| | 브로모크레졸 그린 | 3.8-5.4 | |
| HCHO, 포름알데히드 | 클로로페놀 레드 | 4.8-6.4 | |
| | 브로모크레졸 퍼플 | 5.2-6.8 | |

**[그림 67] 색 변화 센서의 기초 자료(성균관대학교 산학협력단, 2014)**

# IV. 결 론

본 연구에서는 밀폐공간 질식재해를 예방하기 위하여 첨단기술을 도입하여 유해가스농도에 대한 위험인지를 쉽고 간편하게 확인할 수 있는 기술적 대응책을 마련하기 위한 방법에 대하여 조사하였다. 밀폐공간 질식재해의 현황을 파악하여 밀폐공간 사고의 유형과 예방의 필요성을 파악하였고, 이에 따라 실제 사업장에서 활용되고 사례를 조사를 하였다. 기술 도입 가능성을 평가하기 위하여 첨단 기술에 대한 기술조사를 실시하였고, 이때 필수적인 기술은 센서, 통신, 마이크로프로세서, 캐리어(로봇, 드론 등) 등이 있다. 이러한 기술들을 뒷받침 할 수 있는 법/제도의 보완도 필수적이다. 기술조사를 통하여 밀폐공간에 적용할 수 있는 적절한 기술을 택하여 현장 적용성 검토를 실시 한 후 현장 평가를 실시하였다. 현장평가는 건설현장, 오폐수처리장에서 실시하였고, 센서, 통신, 캐리어로 구분하여 결과를 도출 하였다. 이를 바탕으로 향후 스마트폰을 이용하거나 발광(형광)등의 센서 개발 방안에 대한 개발 방향을 제안하였다.

밀폐공간 질식재해 예방을 위한 첨단기술 도입 연구의 결론은 다음과 같다.

## 1. 밀폐공간 질식재해 문헌 고찰

밀폐공간 질식재해는 예방이 매우 중요하다. 2011년부터 2017년 까지 총 7년간의 자료를 이용하여 분석한 결과, 총 241명의 재해자 중 127명이 사망(52.7%) 하였다. 주요 원인물질은 산소결핍, 황화수소, 일산화탄소 순이었고, 계절에 따라 여름철에는 황화수소, 겨울에는 일산화탄소가 원인을 크게 차지하였다. 장소로는 오폐수처리장, 저장용기, 건설현장, 맨홀 순 이었고, 건설업과 제조업에서 사망자의 73%를 차지하였다.

밀폐공간에서 발생하는 사고의 대부분의 원인은 기본적인 수칙을 지키지 않아서인데 주로 작업공간에서 측정을 하지 않거나 직접 구조를 하다가 사고가 발생하는 사례가 많았다. 기술적으로 밀폐공간의 작업환경이 적정공기가 아니면 출입이 불가하도록 해야 하는데, 이때 필수적인 것이 상시모니터링이다. 밀폐공간으로 지정을 함과 동시에 상시 모니터링을 할 수 있도록 하고, 이에 따라 책임을 가진 사람이 작업허가를 할 수 있도록 하는 법/제도 및 기술적 접근이 필요하며, 작업 중에도 언제든 관리자 및 근로자가 상황을 알 수 있도록 하는 시스템 구축이 밀폐공간 사고 예방에 방법 중 하나이다.

## 2. 밀폐공간 질식재해 예방을 위한 기술 조사

최근 4차산업혁명으로 다양한 기술의 발전속도가 가속을 받고 있다. 이러한 첨단기술을 도입하기 위해서는 경제성 평가, 현실성, 적용가능성 등 다양한 고려사항들이 필요하다. 필수적인 기술은 센서, 통신, 마이크로프로세서, 캐리어 등이 있는데, 센서는 매우 신뢰성이 높아야 하는 기술로 특히 밀폐공간 측정에 있어서는 기본적으로 높은 신뢰도가 수반되어야 한다. 그러나 현재 시판되는 센서는 검증이 되지 않은 센서가 대부분이지만 시장성의 이유로 밀폐공간에서 사용할 수 있는 센서는 매우 제한적으로 활용이 가능하다. 따라서 산업안전보건연구원에서 밀폐공간에서 사용할 수 있는 센서를 포함하여 산업위생에서 사용할 수 있는 다양한 센서의 개발 및 검/인증에 대한 역할을 해주는 것이 필요하다고 생각한다. 통신의 경우 다양한 조건에서의 실험이 필요한데, 본 연구에서도 지상에서의 측정은 문제없이 진행하였으나 지하의 경우 통신에 어려움이 있는 것으로 파악되었다. 그러나 밀폐공간의 경우 대부분 통신이 어려운 지점에서의 작업이 많기 때문에 이에 대한 추가 연구가 매우 필요하다. 희망적인 것은 현재 통신기술의 경우 적절한 조합과 환경에 맞는 통신기술을 택한다면 이에 대한 기술적 한계점은 충분히 극복 될

것으로 판단된다. 통신 기술 역시 추가 연구가 필요한 부분이며, 이는 소방, 군 분야에서 선행연구들이 있기 때문에 벤치마킹이 필요하다고 판단된다. 캐리어(로봇, 드론 등)의 경우 근로자가 직접 들어가기 어려운 위험한 공간 (밀폐공간 등)에 들어가서 상황을 파악하는 용도로 사용이 가능하다. 캐리어 역시 다양한 고려사항들이 있는데 장애물 탐지 및 회피 등의 기능이 필수적이다. 향후 자율주행, 인공지능 등이 추가된다면 더욱 활용하기에 유용할 것으로 판단된다.

## 3. 밀폐공간 작업별 첨단기술 활용에 관한 현장적용성 검토

실제 밀폐공간에 첨단기술을 적용할 수 있는 방법을 마련하였다. 센서와 통신방법의 선정, 시제품제작, 캐리어, 소프트웨어 등에 대한 고려를 통하여 측정기기를 개발 하였다. 개발된 측정기기를 건설현장(산소, 일산화탄소)과 오폐수처리장(산소, 황화수소)에서 실제 현장평가를 하였고, 현장에 맞도록 센서를 구성하였다. 통신방법 역시 최적화된 통신방법을 찾았고 현재 까지는 Wi-Fi가 가장 안정적인 통신방법이라고 제안하였다. 그밖에도 LTE, BT 등도 현장 상황에 따라 활용이 가능하다. 캐리어 부분에 있어서는 현재까지는 가장 오래된 캐리어인 로봇이 가장 안정적이었으며, 드론 역시 가까운 미래에 유용한 캐리어가 될 수 있다고 판단하였다. 덧붙여서 자율주행, 인공지능 기능까지 추가 된다면 근로자가 밀폐공간에서 작업 전 미리 들여보내어 적정공기를 미리 확인할 수 있는 현장에서 매우 유용한 예방방법이 될 것으로 판단된다. 그밖에도 공 형태로 던지고 공이 주행을 통하여 원하는 지점까지 가서 측정을 하고 오는 형태, 비행선 형태로 드론의 추락에 대한 제한점을 극복할 수 있는 캐리어 등에 대한 가능성도 함께 파악하여 캐리어 분야도 산업보건 분야에서 향후 추가 연구가 필요한 분야라는 것을 함께 도출 해낼 수 있었다.

### 4. 스마트폰 부착식 소형측정기, 발광(형광)측정기 등 개발방안 검토

측정된 결과를 쉽게 공유할 수 있도록 연결을 하여 보여주는 것이 중요한데, 최근에는 스마트폰에 부착하여 사용하는 것 보다는 스마트폰과 무선으로 연결하여 사용하는 측정 방식을 주로 사용하고 있다. 장점은 위험한 공간에 미리 놓고 나오거나 원하는 공간에서의 측정을 무선으로 하여 실시간으로 측정 결과를 알 수 있다는 점이고, 스마트폰과의 연결 부위의 파손의 우려도 없기 때문에 유용한 측정 방식이며, 향후 측정기의 개발방향은 스마트폰과 측정기가 무선으로 연결되어 상호 연결이 되어 작동되는 방향으로 갈 것으로 전망한다.

발광 및 형광 측정기 개발의 경우 다양한 분야에서 개발이 되고 있으나 공기 중에 있는 물질에 대해서는 개발이 매우 제한적이다. 경제성이나 사용성 측면에서 보았을 때 리트머스 종이와 같은 것을 비행기로 접거나 구겨서 밀폐공간에 던지면, 환경에 따라 색이 변하거나 발광을 통하여 상황을 알려주는 시스템을 구현하기에는 아직 무리가 있으나 반도체 센서 등이 개발 중에 있어 미래에는 가능할 것으로 전망한다.

# V. 참고문헌

강명구. 아무도 알려주지 않은 4차 산업혁명 이야기. 키출판사;2018

고용노동부, (2015) 사무실 공기관리 지침

김동현, 김충일. (2017). 소방활동을 위한 밀폐공간 UWB 무선통신 측위성능 평가. 한국화재소방학회 논문지, 31(5), 117-122.

김동훈, 장태정 (2004), 역청탄 적재된 화물창에서 발생한 산소결핍에 의한 질식사, 동국대학교 의과대학 병리학 교실

김동훈 등 , 목재가 선적된 선창에서 발생한 산소결핍에 의힌 질식사, Korea. J. Legal. Med, Vol 25, No. 1

김미경, 박연신, 정용(2000), VOCs 측정 및 VOCs가 인체에 미치는 영향, Analytical science & Technology

김진호, 건설 시설물에서 작업자의 질식발생과정의 유영화를 통한 질식방지 사전 점검 방안, 대한건축학회연합논문집; 2017

김형수 등 (2001), 혈중 및 호기 일산화탄소를 이용한 일산화탄소헤모글로빈농도간의 관련성 연구, 동아대학교

노병국, 스마트폰 기반 산소 결핍 모니터링 장치, 한국안전학회지, 2015

박충기 등 (1994), 단무지공장에서 발생한 질식 사고의 원인과 방사선학적 소견: 증례보고 및 가스분석 결과

산업안전보건연구원(2007), 산소결핍재해 예방을 위한 시스템적 접근, 한국산업안전공단

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

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

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

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

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

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

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

최진기. 한권으로 정리하는 4차 산업혁명. 이지퍼블리싱;2018

한국무역협회, 글로벌 웨어러블기기 시장, 2017

Annanouch, F. E., Haddi, Z., Vallejos, S., Umek, P., Guttmann, P., Bittencourt, C., & Llobet, E. (2015). Aerosol-assisted CVD-grown WO3 nanoneedles decorated with copper oxide nanoparticles for the selective and humidity-resilient detection of H2S. ACS applied materials & interfaces, 7(12), 6842-6851.

Botti, L., Ferrari, E., & Mora, C. (2017). Automated entry technologies for confined space work activities: A survey. Journal of occupational and environmental hygiene, 14(4), 271-284.

Capuska, S., Brecka, S., Kosnac, S., & Martinkovic, J. (2005). Manipulator robotics in use for decommissioning of a-1 nuclear power plant. In Advanced Robotics, 2005. ICAR'05. Proceedings., 12th International Conference on (pp. 123-128). IEEE.

Cho, S., Lee, J. S., Jun, J., Kim, S. G., & Jang, J. (2014). Fabrication of water-dispersible and highly conductive PSS-doped PANI/graphene nanocomposites using a high-molecular weight PSS dopant and their application in H 2 S detection. Nanoscale, 6(24), 15181-15195.

Dandan, K., Ananiev, A., Kalaykov, I. (2013, August). SIRO: The silos surface cleaning robot concept. In Mechatronics and Automation (ICMA), 2013 IEEE International Conference on (pp. 657-661). IEEE.

Deng, S., Xu, X., Li, C., Zhang, X. (2010). Research on the oil tank sludge cleaning robot system. In Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2010 International Conference on (pp. 5938-5942). IEEE.

Faina, A., Souto, D., Deibe, A., Lopez-Pena, F., Duro, R. J., Fernández, X. (2009). Development of a climbing robot for grit blasting operations in shipyards. In Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on (pp. 200-205). IEEE.

Grieco, L. A., Rizzo, A., Colucci, S., Sicari, S., Piro, G., Di Paola, D., Boggia, G. (2014). IoT-aided robotics applications: Technological implications, target domains and open issues. Computer Communications, 54, 32-47.

Guth, U., Vonau, W., Zosel, J. (2009). Recent developments in electrochemical sensor application and technology－a review. Measurement Science and Technology, 20(4), 042002.

Joseph, P., SCG, K. D., Lakshmanan, S., Kinoshita, T., & Muthusamy, S. (2017). Colorimetric sensors for rapid detection of various analytes. Materials Science and Engineering: C, 78, 1231-1245.

Klaus Schwab. 클라우스 슈밥의 제4차 산업혁명 THE NEXT. 새로운 현재; 2018

Kovacic, Z., Balac, B., Flegaric, S., Brkic, K., & Orsag, M. (2010). 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 (pp. 1-6). IEEE.

Kroll, A. V., Smorchkov, V., Nazarenko, A. Y. (1994). Electrochemical sensors for hydrogen and hydrogen sulfide determination. Sensors and Actuators B: Chemical, 21(2), 97-100.

Kolmakov, A., Zhang, Y., Cheng, G., & Moskovits, M. (2003). Detection of CO and O2 using tin oxide nanowire sensors. Advanced Materials, 15(12), 997-1000.

Kumar, N., Bhalla, V., Kumar, M. (2013). Recent developments of fluorescent probes for the detection of gasotransmitters (NO, CO and H2S). Coordination Chemistry Reviews, 257(15-16), 2335-2347.

Kim, J., & Yong, K. (2011). Mechanism study of ZnO nanorod-bundle sensors for H2S gas sensing. The Journal of Physical Chemistry C, 115(15), 7218-7224..

Lee, D., Lee, S., Ku, N., Lim, C., Lee, K. Y., Kim, T., & Kim, J. (2008, May). 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 (pp. 3985-3991). IEEE.

Li, Z., Ma, S., Li, B., Wang, M., & Wang, Y. (2010). 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 (pp. 1334-1339). IEEE.

Llobet, E. (2013). Gas sensors using carbon nanomaterials: A review. Sensors and Actuators B: Chemical, 179, 32-45.

Llobet, E., Brunet, J., Pauly, A., Ndiaye, A., Varenne, C. (2017). Nanomaterials for the selective detection of hydrogen sulfide in air. Sensors, 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. (1997). A rubbertuator-based structure-climbing inspection robot. In Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on (Vol. 3, pp. 1869-1874). IEEE.

Pandey, S. K., Kim, K. H., Tang, K. T. (2012). A review of sensor-based methods for monitoring hydrogen sulfide. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 32, 87-99.

Park, S., Jeong, H. D., & Lim, Z. S. (2002). 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 (Vol. 2, pp. 1880-1885). IEEE.

Peltier, R. Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications. World Meterological Organization

Peng, J., Teoh, C. L., Zeng, X. et al. (2016). Development of a highly selective, sensitive, and fast response upconversion luminescent platform for hydrogen sulfide detection. Advanced Functional Materials, 26(2), 191-199.

Singham, M. (1998). The canary in the mine. Phi Delta Kappan, 80(1), 8-15.

Truong-Thinh, N., Ngoc-Phuong, N., Phuoc-Tho, T. (2011, December). A study of pipe-cleaning and inspection robot. In Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2011 IEEE International Conference on (pp. 2593-2598). IEEE.

Xueqin, L., Rongfu, Q., Gang, L., & Fuzhen, H. (2009). The design of an inspection robot for boiler tubes inspection. In Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2009. AICI'09. International Conference on (Vol. 2, pp. 313-317). IEEE.

Yamamoto, M., Enatsu, Y., & Mohri, A. (2004). 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 (Vol. 5, pp. 4442-4447). IEEE.

Yi, Z., Gong, Y., Wang, Z., Wang, X. (2009). Development of a wall climbing robot for ship rust removal. In Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on (pp. 4610-4615). IEEE.

Zhang, H., Zhang, J., Liu, R., Wang, W., & Zong, G. (2005). Design of a climbing robot for cleaning spherical surfaces. In Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2005 IEEE International Conference on (pp. 375-380). IEEE.

# Abstract

Title: Research on cutting-edge technology to prevent accidents in confined spaces

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 $4^{th}$ 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) |
| | 곽 경 민 | (교 수, 의학석사, 가천대 길병원) |
| 연 구 원: | 이 동 우 | (연구원, 포항공과대학교) |
| | 안 종 민 | (연구원, 포항공과대학교) |
| | 이 동 훈 | (연구원, 가천대 길병원) |
| | 강 덕 윤 | (연구원, 가천대 길병원) |
| | 이 준 형 | (연구원, 가천대 길병원) |
| | 최 순 완 | (연구원, 가천대 길병원) |
| | 강 진 모 | (연구원, 가천대 길병원) |
| | 이 미 정 | (연구원, 가천대 길병원) |
| | 강 지 현 | (연구원, 가천대 길병원) |
| | 이 수 남 | (연구원, 가천대 길병원) |
| 연구상대역: | 박 현 희 | (연구위원, 산업안전보건연구원) |


## <<연 구 기 간>>

2018. 3 - 2018. 10


본 연구는 산업안전보건연구원의 2018년도 위탁연구 용역사업에 의한 것임

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

**산업안전보건연구원장**

# 밀폐공간 사고예방을 위한 첨단기술 활용방안 연구

(2018-연구원-800)


- 발 행 일 : 2018년 10월
- 발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 김장호
- 연구책임자 : 가천대학교 의과대학 함승헌
- 발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원
- 주 소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400
- 전 화 : (052) 7030-901
- F A X : 052-7030-337
- Homepage : http://oshri.kosha.or.kr