

사물인터넷 기술을 이용한 가스상 물질 측정용 스마트센서 개발과 향후과제

김욱 · 김영교¹ · 유연선¹ · 정기효² · 최원준³ · 이완형³ · 강성규³ · 함승헌^{3*}

안전보건공단 중앙사고조사단, ¹안전보건공단 미래전문기술원,

²울산대학교 산업경영공학부, ³가천대학교 의과대학 길병원 직업환경의학과

Development of an IoT Smart Sensor for Detecting Gaseous Materials

Wook Kim · Yongkyo Kim¹ · Yunsun You¹ · Kihyo Jung² ·

Won-Jun Choi³ · Wanhyung Lee³ · Seong-Kyu Kang³ · Seunghon Ham^{3*}

Accident Investigation Board, Korea Occupational Safety and Health Agency

¹*Occupational Safety and Health Future Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency*

²*School of Industrial Engineering, University of Ulsan*

³*Department of Occupational and Environmental Medicine, Gil Medical Center,
College of Medicine, Gachon University*

ABSTRACT

Objectives: To develop the smart sensor to protect worker's health from chemical exposure by adopting ICT (Information and Communications Technology) technologies.


Methods: To develop real-time chemical exposure monitoring system, IoT (Internet of Things) sensor technology and regulations were reviewed. We developed and produced smart sensor. A smart sensor is a system consisting of a sensor unit, a communication unit, and a platform. To verify the performance of smart sensors, each sensor has been certified by the Korea Laboratory Accreditation Scheme (KOLAS).


Results: Chemicals (TVOC; Total Volatile Organic Compounds, Cl₂: Chlorine, HF: Hydrogen fluoride and HCN: Hydrogen cyanide) were selected according to a priority logic (KOSHA Alert, acute poisoning statistics, literature review). Notifications were set according to OEL (occupational exposure limit). Sensors were selected based on OEL and the capabilities of the sensors. Communication is designed to use LTE (Long Term Evolution) and Wi-Fi at the same time for convenience. Electronic platform were applied to build this monitoring system.


Conclusions: Real-time monitoring system for OEL of hazardous chemicals in workplace was developed. Smart sensor can detect chemicals to complement monitoring of traditional workplace environmental monitoring such as short term and peak exposure. Further research is needed to expand the scope of application, improve reliability, and systematically application.


Key words: Chemical exposure monitoring, IoT, sensor, poisoning


*Corresponding author: Seunghon Ham, Tel: 032-458-2634, E-mail: shham@gachon.ac.kr,
Department of Occupational and Environmental Medicine, Gachon University Gil Medical Center, 21, Nadongdaero
774-gil, Namdong-gu, Incheon, 21565, Republic of Korea
Received: March 8, 2022, Revised: March 17, 2022, Accepted: March 28, 2022


 Wook Kim <https://orcid.org/0000-0003-3393-1648>


 Yunsun Yoo <https://orcid.org/0000-0003-2295-2814>


 Won-Jun Choi <https://orcid.org/0000-0001-8096-7542>

 Seong-Kyu Kang <https://orcid.org/0000-0002-3205-2708>

 Yongkyo Kim <https://orcid.org/0000-0002-2300-8019>

 Kihyo Jung <https://orcid.org/0000-0003-3316-2762>

 Wanhyung Lee <https://orcid.org/0000-0001-6408-7668>

 Seunghon Ham <https://orcid.org/0000-0002-5167-9661>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

우리나라 사업장에서는 n-헥산(n-hexane), 2-브로모프로판(2-bromopropane), 메탄올(methanol) 등 화학물질로 인한 직업병이 지속적으로 발생되었고, 산업보건 전문가들이 그 원인을 분석하고 예방방안을 제시하여 왔다(Kim et al., 2001; Kang, 2005; Kim, 2009, Kim, 2016; Lee et al., 2017). 이러한 직업병 문제의 해결을 위해 근로자가 호흡하는 공기 중의 유해물질 종류 및 농도를 파악하고 해당 작업장에서 일하는 동안 건강장해가 유발될 가능성 여부를 평가하여 작업환경 개선의 필요성 판단을 위해 작업환경측정이 시행되고 있다. 작업환경측정제도는 1983년 시작된 이후 약 40여 년 동안 지속적으로 발전해왔음에도 불구하고 산업과 기술의 발전에는 발을 맞추지는 못한 것이 사실이다. 현재 사업장에서 작업환경측정 대상 유해인자인 191종만 측정을 하고 있고, 그밖에 유해인자들은 측정을 하지 않고 있다. 또한 현재 6시간 이상 측정을 하고 있는데 측정시간이 전체 업무시간을 반영하는지에 대한 논의도 지속적으로 이루어지고 있다. 기존의 작업환경측정이 그동안 업무상 재해 예방에 기여한 것은 자명하나, 그 한계는 분명히 존재한다.

2022년 1월 27일부터 시행된 중대재해처벌법 제2조 및 동법 시행령 제2조(별표1)에 해당하는 질병 24개를 명시하고 있다(MoEL, 2021). 기존의 작업환경측정제도로 명시된 질병을 예방하기 위한 측정과 평가를 할 수 있는지 고민이 필요하다. 중대재해처벌법에 해당하는 원인물질인 일산화탄소(CO), 트리클로로에틸렌(TCE), 황화수소(H_2S), 시안화수소(HCN), 염소(Cl_2), 불화수소(HF)만 놓고 보았을 때 급성중독을 일으키는 물질들이고 대부분 시간가중평균농도(Time Weighted Average, TWA)와 단시간노출기준(Short Term Exposure Level, STEL) 또는 최고노출기준(Ceiling, C)이 설정되어 있는 물질이다. 급성중독을 고려하여 STEL과 C를 측정하도록 하고 있지만 언제 어떻게 이를 측정하고 그 시간을 선정할 것인지에 대한 논의는 전혀 이루어지지 않고 있다. 단시간 고농도 노출이 발생 할 수 있는 상황을 찾기 위해서는 기존의 작업환경측정 방법으로는 상당한 비용과 노력이 소모된다. 그럼에도 불구하고 본 작업환경측정을 시작하기 전에 이러한 예비조사과정은 필요하나 대부분의 사업주는 제도적, 법적의무를 넘어서는 수준의 작업환경측정을 선택하지 않는 것이 일반적이다. 그렇기 때문에 유해인자

발생정도, 빈도, 기간, 간격, 정도 등의 특성을 근로자나 사업주의 진술을 통해서만 반영을 하여 실제상황은 완전히 이해하지 못한 상황에서 작업환경측정을 하고 그 결과를 놓고 평가를 하는 것이 문제이다.

이러한 한계를 극복하기 위한 기술적 노력이 필요하다. 최근에는 사물인터넷(internet of things, IoT), 클라우드, 빅데이터 등 4차 산업과 연계된 기술들이 보편화되면서 산업보건분야에서도 과거에 비해 활용할 수 있게 되었다. 이러한 기술들을 사용하여 얻을 수 있는 장점은 첫째, 실시간으로 결과를 알 수 있기 때문에 노출의 현황을 바로 파악할 수 있는 것이고, 둘째, 사람이 현장에 들어가지 않고도 측정이 가능하여 측정방식에 따른 위험요인을 줄일 수 있다. 셋째, 이 결과를 가지고 사업주나 근로자는 예방과 관련된 활동을 할 수 있는 시간적 공간적 여유를 가지며 유해인자를 관리하며 사용할 수 있다는 점이 있다. 예를 들어 급성중독 물질을 매일 단시간 사용하는 사업장에서의 노출 특성을 파악할 수도 있고 밀폐공간의 경우 위험공간의 화학물질 농도를 실시간으로 파악할 수 있고, 사람이 들어가서 측정을 하지 않더라도 위험수준을 알 수 있다. 그럼으로써 위험공간에 대해 환기를 충분히 하여 근로자가 작업을 건강하고 안전하게 할 수 있도록 조치를 취할 수 있을 것이다.

이러한 연구는 국내에서도 최근에 이루어졌는데 밀폐공간 질식재해를 예방하기 위한 사물인터넷 측정장치와 그 이동장치에 대한 연구(OSHRI, 2018; OSHRI, 2019)와 전자산업에서의 중소규모 전자사업장 화학물질 상시 모니터링 시스템 구축(OSHFTI, 2019)에 대한 연구가 그동안 이루어 졌다. 이러한 연구들을 기반으로 산업보건에 4차 산업기술을 도입하는 것에 대한 가능성을 볼 수 있었고, 이러한 점들을 고려하여 실제로 현장에서 사용할 수 있는 화학물질 상시 모니터링시스템을 개발하여 화학물질을 많이 취급하는 사업장에 적용할 필요가 있다.

화학물질 상시 모니터링 시스템은 스마트센서를 이용하여 작업장의 화학물질 수준을 실시간으로 감지하고 사업주 또는 근로자에게 노출수준을 알려거나 위험수준을 경고하여 사업장에서 환기, 국소배기, 작업조절 등 스스로 작업환경을 관리 할 수 있도록 지원하는 시스템이다. 안전보건공단은 화학물질 취급 작업자의 건강보호를 위한 상시 모니터링 시스템 구축을 추진하고 있으며 스마트센서는 시스템의 핵심요소 중 하나이다. 스마

트센서는 분진 등 복합 유해인자가 존재하는 작업환경 중의 대상 화학물질 노출 수준을 정확하게 감지할 수 있어야 하는 등 정확성과 내구성이 필요하다. 또한 변화하는 기술을 적용시킬 수 있는 기술 적용성 및 많은 사업장에 보급하기 위한 경제성 등이 필요하다.

따라서 이 연구의 목적은 기존의 작업환경측정제도의 한계를 보완하여 사업장의 자율보건관리를 지원할 수 있는 스마트센서개발과정에 대해 설명하고 향후 과제에 대하여 고찰하는 것이다.

II. 스마트센서의 개요

1. 기술과 제도 동향

사물인터넷을 이용한 유해인자측정 시스템은 기본적으로 유해인자를 측정할 수 있는 센서부, 얻어진 데이터를 송수신하는 통신부, 이를 받아주는 서버(클라우드 또는 물리적), 그리고 이를 관제하고 데이터 처리를 하는 플랫폼으로 구성되어 있다. 이 플랫폼에는 권한을 다르게 하여 관리자와, 기타 접근권한이 부여된 기관(해당사업장)/개인(해당근로자)이 해당 자료를 함께 공유할 수 있도록 하는 것이다. 개발된 각 부분이 유기적으로 연결되고 실시간으로 정보를 주고받을 수 있어야 한다. 또한 산업보건분야에서의 측정은 개인시료측정과 지역시료측정도 함께 고려를 해야 한다.

환경보건분야에서는 그 시장규모가 확대되고 있다. 특히 학교보건법 제4조의3(공기정화설비 등 설치)에는 학교의 장은 교사 안에서의 공기 질 관리를 위하여 교육부령으로 정하는 바에 따라 각 교실에 공기를 정화하는 설비 및 미세먼지를 측정하는 기기를 설치하여야 한다고 2019년 4월 개정되어 각 학교에는 미세먼지를 측정하는 장비를 설치하여 사용하고 있고 IoT 기능을 탑재하고 설치가 된 제품들이 출시되어 사용되고 있다.

산업보건분야에서는 2018년 밀폐공간 사고예방을 위한 첨단기술 활용방안 연구(OSHRI, 2018)를 시작으로 근로자가 들어가지 않고도 밀폐공간 내의 유해가스를 측정할 수 있는 다양한 시스템에 대한 연구를 시작하여 당시 최신 기술의 고찰과 시작품 수준의 IoT 밀폐공간에 특화된 측정장비를 만드는 계기가 되었다. 2019년 첨단센서기술을 이용한 밀폐공간 유해가스 측정장치 개발 연구(OSHRI, 2019)에서는 2018년 연구를 바탕으로 IoT 밀폐공간 측정장치 개발을 포함하여 밀폐공간의 특성상 사람이 들어가지 않고도 밀폐공간에 진입하

여 측정을 하고 그 결과를 실시간으로 외부에 있는 근로자에게 알려주는 캐리어(드론, 로봇, 케이블, 레일, 공 형태 등)시스템을 구현하고 실증을 하는 연구를 수행하였다. 2020년에는 전자산업에서의 중소규모 전자사업장 화학물질 상시 모니터링 시스템 구축(OSHFTI, 2020)을 통해 IoT 기술을 이용한 총휘발성유기화합물(total volatile organic compounds, TVOC) 측정장비를 사업장에 설치하여 현장 적용성에 대한 가능성을 평가하였다.

이러한 연구를 바탕으로 밀폐공간에서의 산소 및 유해가스 농도 측정에 있어서는 산업안전보건기준에 관한 규칙 제619조의2(산소 및 유해가스 농도의 측정) 제1항 「사업주는 밀폐공간에서 근로자에게 작업을 하도록 하는 경우 작업을 시작(작업을 일시 중단하였다가 다시 시작하는 경우를 포함한다)하기 전 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 자로 하여금 해당 밀폐공간의 산소 및 유해가스 농도를 측정(「전파법」 제2조 제1항 제5호·제5호의2에 따른 무선설비 또는 무선통신을 이용한 원격 측정을 포함한다. 이하 제629조, 제638조 및 제641조에서 같다)하여 적정공기가 유지되고 있는지를 평가하도록 해야 한다」로 개정되는 제도의 뒷받침도 함께 이루어지고 있다.

2. 각 기술별 핵심기술

센서는 어떤 대상의 정보를 수집하여, 기계가 취급할 수 있는 신호로 치환하는 소자 및 장치를 말한다. 산업보건분야에서는 대표적으로 소음을 측정하는 센서가 있다. 소음의 정도를 측정하여 이를 숫자로 표시해주는 센서이다. 최초에는 기록이 되지 않는 소음측정기(sound pressure level meter)를 도입하여 사용하다가 누적소음노출량측정기(noise dosimeter)가 도입되어 근로자가 일하는 시간동안의 소음수준을 평가할 수 있게 되었다. 화학물질을 측정하는 센서는 지금은 밀폐공간에 대해서는 산소, 일산화탄소, 황화수소, 폭발하한치(Lower Explosive Limit, LEL) 측정을 위한 센서를 사용하고 있다.

현재 화학물질측정을 위한 센서가 시중에 개발이 되어 판매가 되고 있다. 주로 영국, 독일, 미국 제품의 앞서 있으며, 우리나라 센서의 수준은 아직 걸음마 단계이다. 센서의 신뢰성은 인명피해와도 연결되어 있기 때문에 대부분의 센서는 해외 의존도가 매우 높은 실정이다. 화학물질센서의 경우 측정가능물질과 원리는 다양

하다. 따라서 센서를 선정할 때에는 해당 화학물질을 측정가능여부, 측정범위, 반응속도, 작동온도, 작동습도, 수명, 보증기간 등을 고려해야한다.

통신은 거리가 떨어진 상태에서 특정 매체나 수단을 통하여 정보를 주고받는 것이다. 목적에 따라 통신방법을 선택 할 수 있다. 블루투스, LTE(Long Term Evolution), Wi-Fi 등 다양한 통신방법이 있다. 거리, 전송속도, 주파수대역, 연결속도, 확장성, 비용 등을 고려해야 한다. 통신부는 센서에서 감지한 데이터를 클라우드 또는 플랫폼으로 전송해주는 역할을 한다.

플랫폼은 다양한 의미를 포함할 수 있다. 통신을 통하여 전송된 데이터를 받아서 저장하는 서버(클라우드, 물리 등)가 있고 이 데이터들을 의미 있는 정보가 될 수 있도록 가공하여 보여주는 관리용 웹이나 앱이 있을 수 있다. 또한 이 데이터에 범위를 정하여 관리자나 근로자에게 알람을 주거나 다른 장비(환기장치 등)에 연동시킬 수도 있다.

III. 스마트센서의 개발

1. 대상 화학물질의 선정

대상 화학물질을 선정하기 위해서는 다양한 요소를 고려해야 한다. 우선순위는 현재 산업보건분야에 필요한 물질을 우선순위에 따라 선정을 해야 한다. 그 우선순위가 결정되면 기술적으로 가능여부를 판단한다. 총 네 가지의 자료를 통하여 우선순위를 선정하였다. 첫째, KOSHA Alert (2008-2020), 둘째, 과거 재해사례 분석 (2009-2019), 셋째, 직업성 중독질환 감시체계 연구용 역보고서 (2017-2020), 넷째, 과거 KOSHA 연구보고서 추천물질(중소규모 전자사업장 화학물질 상시 모니터링 시스템 구축)을 참고하여 우선순위를 선정하였다.

우선순위에 따라 총 10종의 1차 대상 화학물질을 선정하였다. 총휘발성유기화합물, 염소, 불화수소, 시안화수소, 일산화탄소, 황화수소, 산소(O_2), 황산(H_2SO_4), 일산화질소(NO), 암모니아(NH_3)가 선정되었다. 2차 대상 화학물질은 기술적으로 가능한지 검토를 하여 2차 대상 화학물질로 선정결과 4종의 가스상물질을 선정하였다. 총휘발성유기화합물, 염소, 불화수소, 시안화수소이다. 총휘발성유기화합물은 유기용제로 인한 중독사고가 빈번하고 KOSHA Alert 발생 빈도와 세척 등 사업장에서의 사용도가 매우 높은 물질이다. 염소는 전자산업(반도체, 디스플레이)에서 주로 사용하고 있으며 선

행연구에서 후보로 선정된 물질이며 공정안전관리(process safety management, PSM) 대상 물질이었다. 불화수소도 전자산업에서 주로 사용하며 PSM 대상 물질이다. 시안화수소는 도금산업에서 주로 사용하였고 KOSHA Alert 물질이며 PSM 대상물질이었다. 최종적으로 전문가 자문을 통하여 최종 선정을 하였다.

2. 알람기준 선정

기존의 작업환경측정방법을 이용하여 측정을 한 것이 아니기 때문에 고용노동부의 화학물질 및 물리적인자의 노출기준을 단순 적용하기는 아직 연구가 더 필요하기 때문에 이를 참고하여 준용하였다.

급성중독 물질과 만성중독물질의 알람기준을 별도로 고려하였다. 산업안전보건법에 준하여 TWA, STEL, C를 활용하였다. C는 노출기준 등을 고려하여 넘지 않도록 하고 물질에 따라 알람기준을 다르게 하였다. STEL은 지속적으로 15분간의 노출량을 환산하여 이에 따른 알람기준 설정을 하였다. TWA는 1시간 평균, 8시간 평균 이렇게 두 가지로 환산을 하여 관리자로 하여금 다양한 지표를 이용하여 관리를 할 수 있도록 하였다. 또한 정상(노출기준의 50% 미만), 주의(노출기준의 50% 이상 100% 미만), 경고(노출기준의 100% 이상)로 나누어 각각 초록, 노랑, 빨강으로 색상으로 표시하도록 하였다.

기존의 작업환경측정을 통해서는 약 15분 이상 측정을 하도록 하고 있고 이를 분석하여 결과를 얻기까지에는 상당한 시간이 걸리기 때문에 특히 급성중독 물질에는 대응을 하지 못하였는데 실시간으로 측정을 해서 평가 결과에 따라 조치를 취할 수 있다는 점이 중요하다.

3. 스마트센서의 구조 및 주요성능

스마트 센서는 측정장치(센서), 네트워크(통신), 플랫폼(관리 및 응용)으로 구성이 되어 있다. 각 기능은 유기적으로 연동이 될 수 있도록 설계를 하였다.

스마트센서의 센서는 주요 필수 기능 구현을 위하여 몇 가지 주요 기능 및 제원을 갖출 수 있도록 하였다. 통신이 되지 않더라도 기록과 저장이 가능한 microSD 카드, 현장에서 바로알람 상황, 농도, 통신, 배터리 수준을 파악 할 수 있는 디스플레이, 조작을 위한 외부 입력키 3개 (UP, Down, Enter), 전원 키, 가스상 물질이 센서에 맞닿을 수 있도록 설계된 벤트홀, 전기공급 및 충전의 편의성을 위한 C-type 타입 전원 공급 포트, 통

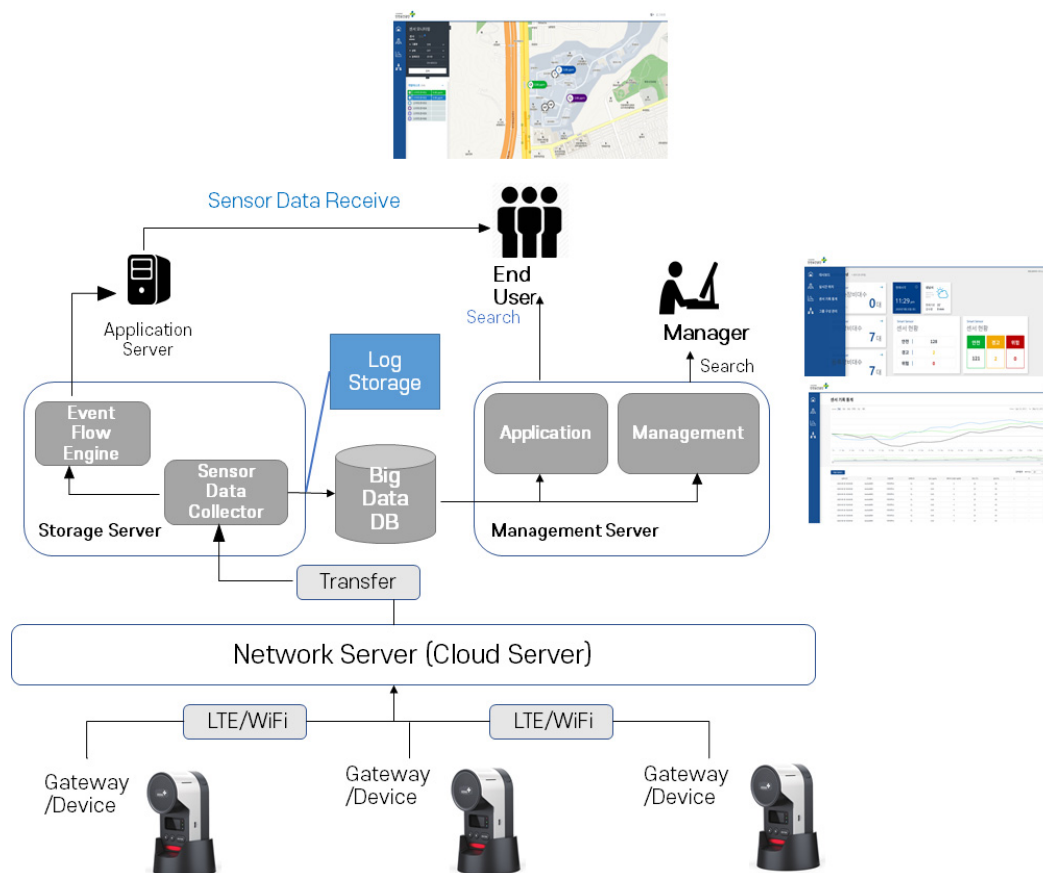


Figure 1. Conceptual design of smart sensor detecting system.

신을 위한 내장 Wi-Fi기능, 2700 mAh 배터리, 직관적 표현을 위한 LED 4개 (가스상태 LED 3개, Wi-Fi 접속 상태 LED 1개), 벽면 거치를 위한 거치대, LTE 라우터 거치를 위한 기구설계, 알람을 줄 수 있는 부저 등 최소한 갖춰야 하는 기능을 정의하였다.

센서는 이미 개발되어 검증된 제품을 사용하였고, 총 휘발성유기화합물(photoionization detector, PID방식), 염소, 시안화수소 센서는 영국 Alphasense사, 불화수소센서는 독일 City Technology Sensoric사의 센서를 사용하였고 관리하고자하는 농도 범위 수준을 포함하는 센서를 선정하였다. 총휘발성유기화합물센서의 경우에는 반응계수(response factor, RF) 또는 제조사에 따라 보정계수(correction factor, CF) 등의 용어를 사용하여 환산해주는 계수를 가지고 있어 특정 물질에 대해서는 추정할 수 있도록 하고 있다. 통신은 Wi-Fi를 이용하여 LTE 라우터에 연결하는 방식을 선택하였다. Wi-Fi가 가능한 사업장에서는 비용을 줄일 수 있고, LTE 라우터가 필요한 사업장에서는 라우터를

도입하며 분리형으로 제작하여 그 활용도를 최대한으로 확대하였다. 물론 통신이 되지 않는 상황에서도 스마트 센서는 스스로 작동하여 설정한 농도에 따라 근로자에게 알람을 현장에서 소리와 빛을 이용하여 알려주는 기능을 탑재하였다.

이렇게 얻어진 데이터는 플랫폼으로 전달되어 클라우드 서버에 저장되고, 플랫폼에서 등록된 사업장 관리와 근로자에게 알려주는 기능을 가지고 있으며, SMS를 이용하여 선택된 사람들에게 추가적으로 알람을 주는 기능을 가지고 있다.

4. 스마트센서의 개발과정

1) 센서의 검정

현재 우리나라에 실시간 측정 장비의 정도관리 제도가 없기 때문에 기준농도 이상일 때의 알람여부 시험은 표준가스를 이용하여 진행하였다. 한국인정기구(Korea Laboratory Accreditation Scheme, KOLAS)에서 인정한 공인시험검사기관에서 센서의 능력을 검증하였

Table 1. Characteristics of smart sensor system

Category	TVOC*	Cl ₂ [†]	HF [‡]	HCN [§]
Occupational Exposure Limit (ppm)	Depends on the substance	TWA 0.5 STEL [¶] 1	TWA 0.5 C ^{**} 3	C 4.7
Range (ppm)	0-6,000	0-20	0-10	0-100
Resolution (ppm)	0.05	0.02	0.15	0.05
Response time T90	Within 3 sec.	Within 60 sec.	Within 90 sec.	Within 70 sec.
Operation temp. (°C)	-40 to 65	-20 to 50	-20 to 40	-30 to 50
Operation humid. (%)	0 to 95	15 to 90	15 to 90	15 to 90
Operating life	5 years	24 months (80% ability)	18 months	12 months (80% ability)
Warranty	2 years or 5,000 hours	24 months	12 months	12 months

*Total volatile organic compounds

†Chlorine

‡Hydrogen fluoride

§Hydrogen cyanide

||Time Weighted Average

¶Short Term Exposure Limit

**Ceiling

다. 총휘발성유기화합물은 측정범위가 0-6,000 ppm 이고 일반적으로 이소부틸렌(isobutylene) 100 ppm (KOLAS)을 이용하여 교정을 한다. 염소, 시안화수소, 불산은 교정이 아닌 시험으로 진행을 하였다. 염소는 10 ppm, 시안화수소는 10 ppm, 불화수소는 5 ppm 의 표준가스로 시험을 하고 KOLAS 기관에서 교정성적서 및 시험성적서를 발급받았다. 이를 통과한 센서를 이용하여 스마트센서의 개발을 진행하여 인쇄 회로 기판(printed circuit board, PCB)를 설계하고 제작하였다. 또한 다양한 센서를 향후 접목 할 수 있도록 센서 소켓부위를 별도로 구성하여 확장성을 높였다.

2) 디자인설계

정의했던 기능을 구현하기 위하여 다양한 형태와 모양의 디자인을 통하여 디자인 후보를 만들었고 이를 목적에 맞게 디자인을 하고 실제 생산을 하여 현장에 두었을 때를 고려하여 최종 디자인을 완성하였다. 디자인이 완성 된 이후에는 색상을 결정하게 되는데 이번에는 스마트센서가 어디에 위치하더라도 눈에 잘 보일 수 있도록 하였다. Fig. 2(a)와 같이 개념 디자인(concept design)을 통하여 필요한 기능에 대하여 개념적으로 정의를 하였고, Fig. 2(b)와 같이 실제 필요한 기능을 기

술적으로 가능한지 여부를 파악하며 기능정의를 통하여 구현할 수 있도록 디자인 하였다.

3) 기능설계, 기구설계, 3D 프린팅, 목업(Mock up)

Fig. 3(a)와 같이 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)를 이용하여 Fan을 장착했을 때와 장착하지 않았을 때의 유체의 흐름을 확인하여 Fan을 장착하는 것이 센서의 정확도를 상승시킨다는 판단을 할 수 있었다. Fig. 3(b)는 스마트센서 셋트가 생산이 되었을 때의 스마트센서의 움직임과 기능에 대하여 다시 확인을 하고 조립이 제대로 이루어질지를 확인하기 위하여 기구설계를 하였다. 또한 목업(mock-up)과정을 통하여 시제품을 만들어서 사출을 하여 대량생산을 했을 때 발생할 수 있는 다양한 문제에 대하여 확인을 하는 과정을 거쳤다. Fig. 3(c), (d)와 같은 과정을 통하여 최종적으로 금형을 만들고 대량 사출을 통하여 제품을 생산 하였다.

4) 모니터링 플랫폼 설계

모니터링 플랫폼은 중소기업에서도 비용부담 없이 사용할 수 있도록 안전보건공단 미래전문기술원에서 서버를 운용 하고 있으며, 계정을 등록하면 사용할 수

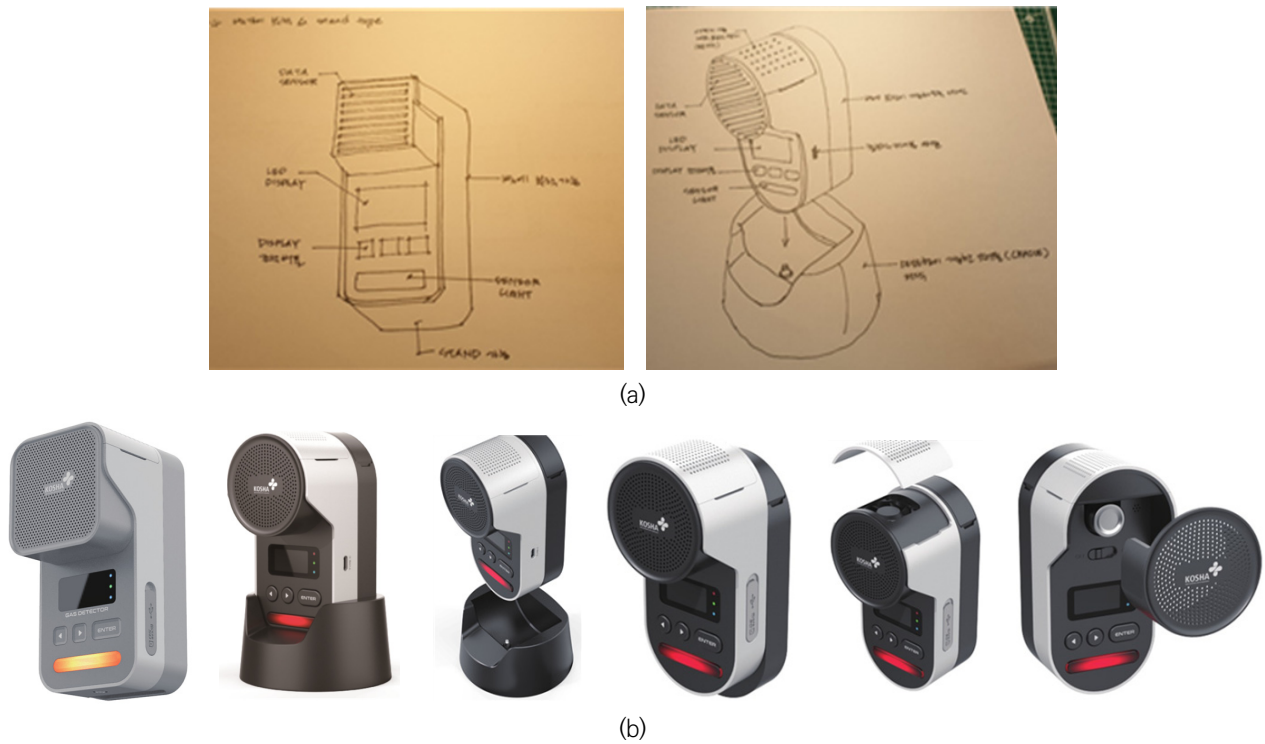


Figure 2. Design process of smart sensor system (a) conceptual sketch design, (b) functional design

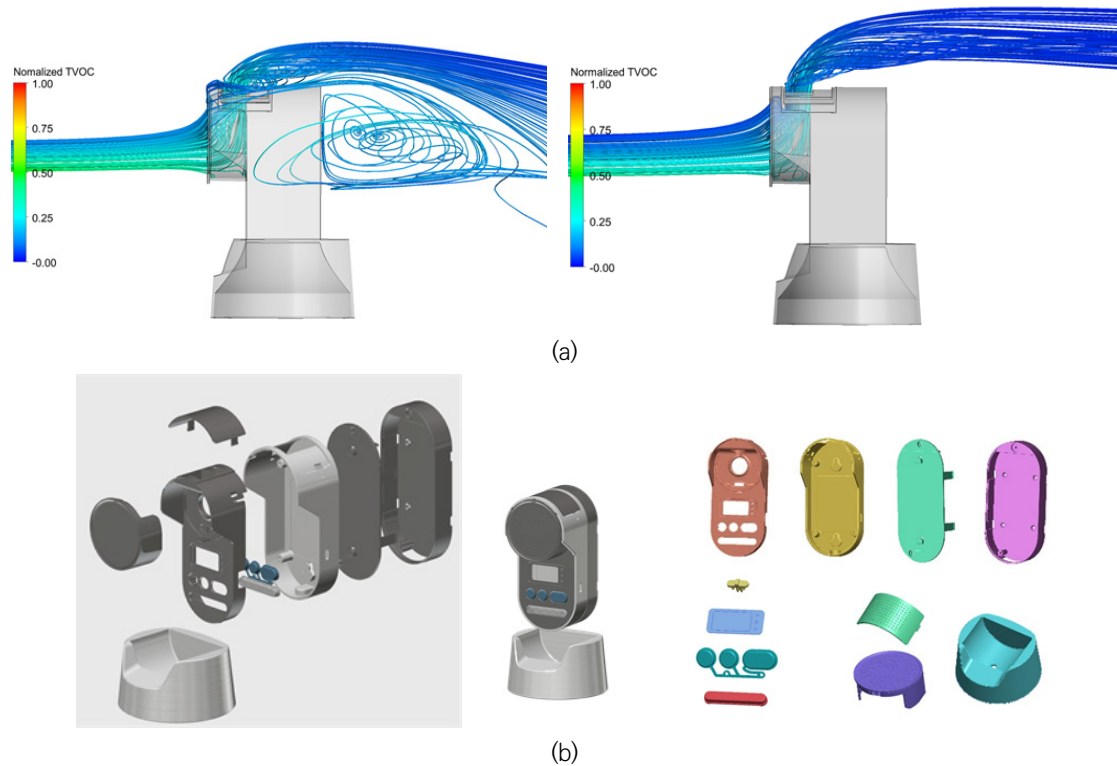


Figure 3. Computational fluid dynamics verification (a) left: without fan, Right: with fan. and production process of smart sensor system (b) mechanical design for molding, (c) mock-up, and (d) molding and mass production.

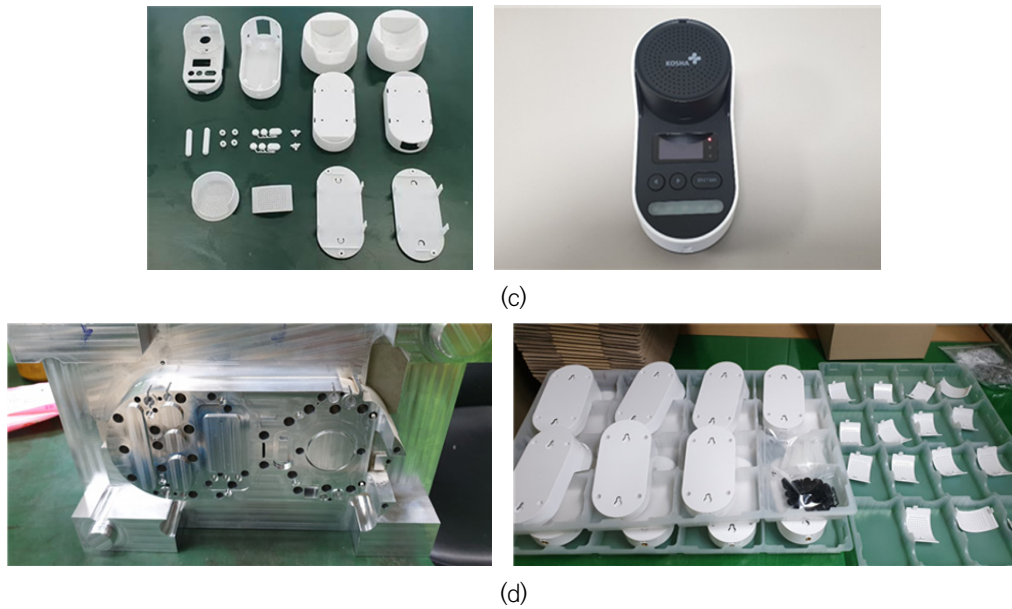


Figure 3. Continued

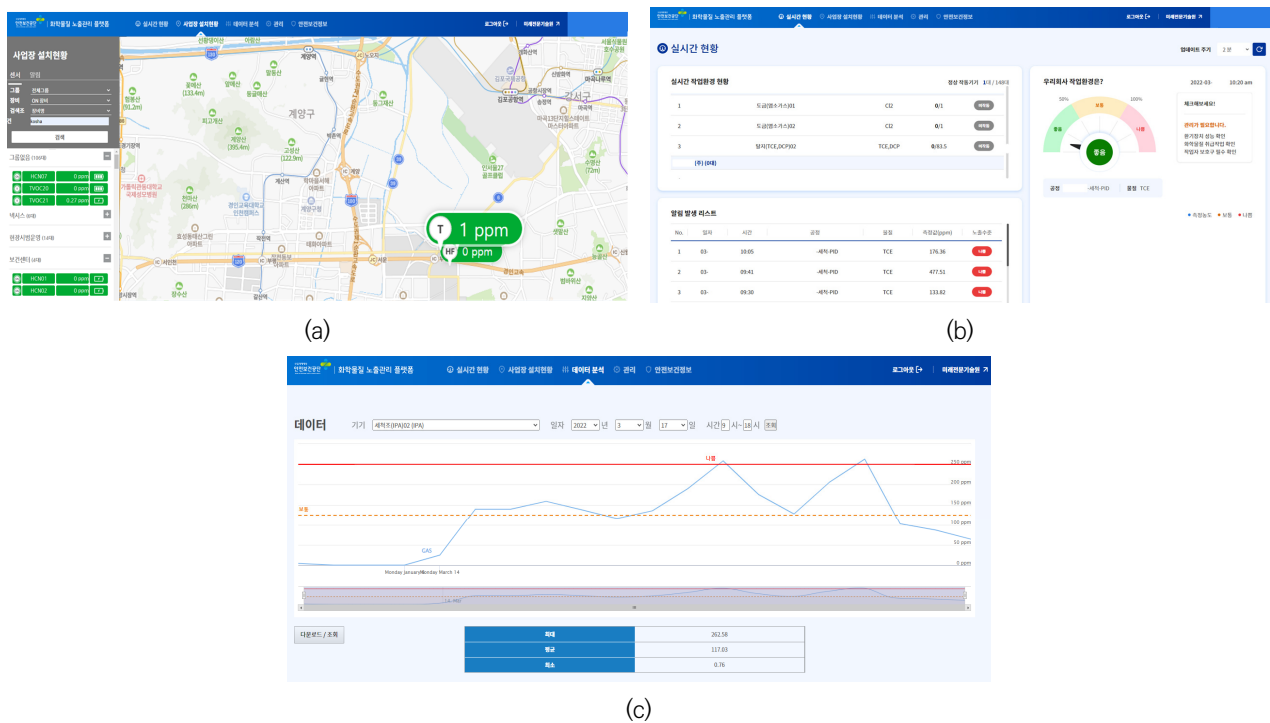


Figure 4. Monitoring platform (a) monitoring by mapping, (b) management console, and (c) statistics monitoring

있도록 하였다. 모니터링 플랫폼은 직관적으로 설계를 하여 지도에서 즉시 색상(빨강: 경고, 주황: 주의, 초록: 정상)으로 알람을 주었고(Fig. 4(a)), 관리페이지(Fig. 4(b))와 통계페이지(Fig. 4(c))를 이용하여 관리를 할 수

있도록 구성하였다. 또한 향후 다른 종류의 센서를 사용하더라도 연동이 쉽도록 표준화하여 개발하였기 때문에 모니터링 플랫폼은 다양하게 활용이 가능하도록 구성 하였다.

IV. 고 찰

이 연구에서는 사업장의 자율보건관리에 필요한 화학물질 상시모니터링 시스템 구축을 위한 스마트센서의 개념을 고찰하고 및 1차 개발 결과에 대하여 기술하였다. 작업장 화학물질 노출에 의한 업무상 질병은 반도체를 포함한 전자제품 제조 산업을 중심으로 지속적으로 이슈화 되어 왔다(Park et al, 2011; Park, 2019). 특히 중소규모 사업장의 화학물질 중독사고의 경우는 수시로 변하는 작업장 여건에 따른 화학물질 노출 수준에 대해 사업주 또는 관리자가 실시간으로 위험수준을 확인하고 작업중지, 작업방법 변경, 환기, 보호구착용 등 자율적인 관리를 통해 예방될 수 있다. 2022년 시행된 중대재해처벌법에는 법 적용 대상이 되는 직업병을 규정하고 있는데 이때 유기용제, 시안화수소, 염소, 불화수소에 의한 중독사고를 포함하여 기술 하고 있다. 이러한 중독사고 예방을 위해 4차산업기술이 적용된 산업보건 장비들이 활용될 수 있을 것으로 판단되고 앞으로로도 완성도 높은 기술개발을 통하여 현장 적용성을 높일 수 있을 것이다.

현재 작업환경측정제도의 측정주기는 통상 1년에 1-2회로 정해져 있으나, 작업환경의 특성상 주간변화, 일변화 등이 존재하며, 같은 공정 작업자의 경우라도 개인별 변이가 존재한다(Ahn et al., 2019). 그간 작업환경측정 제도의 신뢰도를 높이기 위하여 측정기관에 대한 정도관리, 작업환경측정 신뢰성평가 등 법제도의 강화와 함께 포괄적 작업환경측정, 신뢰도 향상방안 검토 등 산업위생 전문가들의 연구가 계속되고 있다(Kim et al., 2017; Hwang, 2019). 하지만 Jeong & Choi (2017)의 연구에서는 54명의 방청유 취급작업자에 대한 개인노출평가 결과 취급 방청유의 종류, 작업방법 등에 따라 유의미한 차이가 발견되지 않았다고 보고되었고, Ahn et al.(2019)은 조선소 작업자 5명에 대해 20일간 유기용제 노출농도를 측정한 결과 작업장 내 유기용제 노출농도는 하루 중에도 변이차가 있다고 보고되는 등 작업장에서 실시간으로 변화하는 화학물질 노출수준에 대한 명확한 평가와 모니터링은 현재 방식으로는 어려운 상황이다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 실시간 측정방법인 오픈패스 방식의 푸리에 변환 적외선 분광법(open path Fourier transform infrared spectroscopy), 화학물질 감지센서를 이용한 유해화학

물질 감지가 검토되었다(Park & Levine, 1994; Lee & Lim, 2015).

또한 미국 에너지시설 계약자 그룹(Energy Facility Contractor's Group, EFCOG)과 미국 산업위생협회(American Industrial Hygiene Association, AIHA)에서는 화학물질 노출수준을 신속하게 평가하고 이를 근로자의 건강관리에 적용하기 위하여 직독식 측정장비를 활용에 대한 적용방법을 검토하여 백서로 발표하였다(Siegel et al., 2019). 이 백서에서는 직독식 측정장비가 기존에는 긴급상황이나 사전조사에만 사용되었으나 황화수소 등과 같이 빠르게 농도가 변화하는 화학물질에 대하여는 일상적인 작업여건에서도 최고농도를 검출하기 위한 도구로 사용이 가능하다고 평가했다. 또한 데이터 기록장치 등과 결합할 경우 작업장 노출기준 준수여부 확인에도 활용이 가능하며, 데이터 시각화가 가능하다면 최고노출치가 언제 어떻게 나타나는지 등의 정보를 산업보건 전문가에게 제공할 수 있다고 하였다. 따라서 화학물질 감지센서를 이용한 스마트센서세트의 개발 및 적용방안 강구는 산업보건분야에 매우 중요한 이슈이다. 2018년 발생한 시안화수소 급성중독 사건에서도 급성중독물질의 경우에는 기존의 작업환경측정 제도로는 관리가 어렵기 때문에 직독식 측정기를 이용하여 측정을 허용하는 것을 지금보다 확대해야 한다고 주장한바 있다(Ham et al. 2019).

스마트센서세트를 이용한 화학물질 상시모니터링 시스템은 센서에서 감지된 노출수준 정보를 전송할 수 있는 전송방식, 전송된 정보를 처리하여 표출하는 플랫폼과 이를 모니터링하여 사업장에 전달할 수 있는 피드백 방식 등의 구성요소에 대한 검토가 필요하다. 안전보건공단에서는 1차 연구를 통하여 상시모니터링 시스템의 구축방향을 설정(OSHFTI, 2020)하고 노출수준에 대한 위험 경보 기준, 우선 감지 대상 유해가스 선정 등 이론적 배경에 대하여 검토하였다.

이번 연구에서는 현장에서 사용이 가능한 센서를 선정하여 스마트센서세트를 실제 제작하였다. PID방식의 총휘발성유기화합물 센서를 선정하여 센서부를 제작하였고 이와 함께 통신부, 클라우드서버 및 플랫폼 등을 실제 구성해보고 제작하였다. 대상물질은 중독 위험성, 사용량 또는 빈도 등을 고려하여 총휘발성유기화합물, 염소, 시안화수소, 불화수소 등 4종을 선정하였다. 현재 적용된 PID방식의 센서는 정확도면에서는 우수하나 가

격이 비싸다는 단점이 있다. 총휘발성유기화합물 센서의 경우 보정계수를 이용하여 다양한 유기화합물 농도를 환산하여 계산할 수 있으며 이를 플랫폼에서도 자동으로 변환하여 표출할 수 있도록 설계하였다.

측정결과에 대한 신뢰도를 높이기 위하여 국외센서를 적용하고 KOLAS기관에 의뢰한 테스트를 진행하였다. 스마트센서세트에 의한 화학물질 감지는 직독식 장비와 크게 다르지 않으나 현장에서의 오염으로 인한 센서 성능저하 등의 문제가 있을 수 있어 주기적인 점검 및 측정데이터에 대한 검토가 필요하며, 향후 기존작업환경 측정 방식과 동시 비교 등의 추가 연구가 필요하다.

통신방식은 사업장 등의 Wi-Fi를 이용하는 방식과 별도의 LTE 라우터를 이용하는 방식 모두를 적용하였다. 두 방식 모두 도장부스 등과 같이 작업장 내 일부 밀폐된 공간에서는 통신이 어려울 수 있으나 통신망이 잘 갖춰진 국내의 경우 대부분 지역에서 사용이 가능한 장점이 있다. 다만 LTE 라우터를 이용하는 경우에는 통신비용 문제, 라우터 별도 전원 연결 문제 등에 대한 향후 개선이 필요한 부분이 있다. 수집된 정보를 표출하기 위한 플랫폼은 크게 관리자용과 사용자용으로 구분하였다. 플랫폼에서 표출하는 정보는 측정된 데이터를 일일 변화 또는 관찰하고자 하는 기간을 정하여 시각화될 수 있다. 플랫폼은 실제 수집된 데이터를 작업환경 관리에 적용하기 위한 중요한 구성요소로 데이터의 시각화와 사용자위주의 위험정보전달, 피드백 방식 등에 대한 추가 개발이 필요하다.

이번 연구는 사물인터넷 등 4차산업기술을 산업보전에 접목시킨 디바이스를 최초로 개발했다는 데 의의가 있다. 이번 연구를 통해 개발된 스마트센서세트는 작업장의 화학물질 노출수준을 실시간으로 측정하여 이를 작업환경관리에 활용할 수 있도록 정보를 제공해 줄 수 있다. 화학물질 노출 수준이 높게 나타나는 위험작업과 위험 시간대를 알 수 있고 실제 노출치가 어느 정도인지 바로 확인할 수 있다는 장점이 있다. 또한 위험장소에 대한 정보도 사업장 관리자가 스스로 확인할 수 있다. 다만 현 시스템의 단점을 감안하여 향후에는 센서부, 전원부, 통신부 등 각각의 부분들을 모듈화하여 각 부분의 기술발달을 적용시켜 효과적인 시스템 구축 추진이 필요하다. IoT 기술, 통신기술 등은 기술개발속도가 매우 빠르므로 이에 대한 검토 및 적용연구 추진이 필요하기 때문이다. 또한 현재 개발된 4종의 가스센

서세트 이외에 다른 가스에 대한 센서부를 개발하여 시스템에 적용하는 등 시스템의 활용도를 높이는 데도 모듈형 센서세트가 유리할 것으로 판단된다. 또한 센서 및 배터리 기술의 발전 등을 감안하여 저전력 블루투스 통신기술을 결합한 일회용 센서세트(disposable smart sensor set)로의 개발방향도 고려되어야 한다.

현재 우리나라의 가스센서의 개발은 중소기업을 중심으로 낮은 수준의 기술력을 가지고 있는 것이 현실이고, 휴대용 센서의 경우에는 특히 수입에 의존하고 있는 현실이다(Lee & Lim, 2015). 이번에 개발한 스마트 센서세트의 경우에도 모두 외국산 센서를 구입하여 개발을 하였기 때문에 향후에는 국산화에 대한 국가적 정책지원도 고려가 필요하다.

V. 결 론

이 연구에서는 스마트센서를 이용하여 소규모 사업장의 작업환경 자율관리를 지원하기 위한 상시모니터링 시스템을 시범 개발 하였다. 화학물질 감지 및 통신기능이 결합된 스마트센서세트와 수집된 정보를 표출하기 위한 플랫폼, 사업장에 대한 피드백 시스템 등을 구성하여 실현하였다.

기술적인 부분 뿐 아니라 스마트센서세트의 작업환경 적용에 대한 전문가의 공감대형성과 사업주의 이해도 중요한 과제이다. 이를 위해 신뢰도 높은 시스템 구축 노력이 필요하며 아울러 위험사업장에 대한 시범적용을 통해 직업병예방 관리 사례 발굴 등이 병행되어야 한다. 현장 연구를 통해 2022년 시행된 중대재해처벌법에 따른 유기화합물, 시안화수소 등 화학물질 중독 및 산소결핍증 등의 직업성질병 예방에 상시모니터링 시스템이 보다 효과적으로 활용될 수 있는 방안 마련도 필요하다. 상시모니터링 시스템에 대한 정확도와 현장 적용성을 지속적으로 향상시키는 것과 함께 안전보건 관리역량이 부족한 중소규모 사업장 등의 화학물질 자율관리에 도움이 될 수 있도록 효과적인 현장 적용방안 및 지원방안이 마련되어야 한다.

감사의 글

이 연구는 반도체 직업병에 따른 안전보건발전기금으로 수행되었습니다.

References

- Ahn JS, Park DY, Kang TS. Characteristics of workers exposure concentration and daily variations to organic solvents in shipbuilding painting processes. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2019;29(4): 488-499
- Ham SH, Choi WJ, Lee JH, Lim YS, Kang JH, Kang SK. Acute hydrogen cyanide poisoning in a plating worker and workplace measurement. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2019;29(3):336-342
- Hwang GS. Study on the improvement of reliability assessment of work environment measurement in Korea. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2019;29(1): 50-56
- Jeong YK, Choi SJ. Exposure assessment of volatile organic compounds for workers handling rust-preventive oils. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2017;27(1):23-37
- Kang SK. Outline and implication of the N-Hexane poisoning accident. Proceedings of the Korean Association of Occupational Health Nurses; 2005. p. 73-89
- Kim DK, Lee SI, Cho BM, O CH, Yi CH. A study on human effects of solvent 5200+S PG-6AR. Proceedings of the Korea Occupational and Environmental Medicine; 2001. p. 53-59
- Kim EA. Epidemiological surveillance on occupational diseases hard to discover occupational disease, reproductive toxic disease-2-Bromopropane poisoning(1). Industrial Hygiene 2009;260:6-10
- Kim HY. Current situation and issue of methanol poisoning accident. Proceedings of the Korean Society Of Occupational And Environment Medicine; 2016. p. 19-31.
- Kim KY, Kang TS, Lee SG, Park HD, Jeong JY. A review of a system for improving the reliability of domestic measurement results regarding the work environment. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2017; 27(2):87-96
- Lee GT, Lee SY, Park HY, Kang TS. Why did non-oral occupational methanol poisoning occur in South Korea in the 21st century?. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2017;27(3):149-162
- Lee JH, Lim SH. Review on sensor technology to detect toxic gases. J Sensor Science and Technology 2015;24(5):311-318
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Fatal Accidents Act. 2021
- Park DY, Levine SP. Characteristics of an open path ftr capable of rapid beam movement for monitoring gas and vapor contaminants in workplace air. J Korean Soc Occup Environ Hyg 1994;4(1):3-4
- Park DU, Byun HJ, Choi SJ, Jeon JY, Yoon CS, Kim CN, Ha KC, Park DY. Review on potential risk factors in wafer fabrication process of semiconductor industry. Ann Occup Environ Med 2011;23(3):333-342
- Park DU. Challenges and issues of cancer risk on workers in the semiconductor industry. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2019;29(3):278-288
- OSHFTI(Occupational Safety and Health Future Technology Institute). Developing a real-time monitoring system for chemical exposure for small and medium-sized electronics manufacturing industry. OSHFTI; 2019
- OSHRI(Occupational Safety and Health Research Institute). Research on cutting-edge technology to prevent accidents in confined spaces. OSHRI; 2018
- OSHRI(Occupational Safety and Health Research Institute). Development of gas detector for confined space using state of art sensor technology. OSHRI; 2019
- Siegel D, Abrams D, Hill J, Jahn S, Smith P, Thomas K, practical guide for use of real time detection systems for worker protection and compliance with occupational exposure limit [online] 2019 [Accessed 2022 Mar 5]. Available from: URL: <https://orau.org/ihos/downloads/meetings/support-files/2019/doeaihc/RealTimeDetectionGuide.pdf>

<저자정보>

김옥(부장), 김영교(차장), 유연선(차장), 정기효(교수), 최원준(교수), 이완형(교수), 강성규(교수), 함승현(교수)