



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

공 학 박 사 학 위 논 문

화학물질 중독사고 예방을 위한 스마트기술
적용에 관한 연구
- 전자산업 중심 상시모니터링 시스템 구축 -

Application of Smart Technologies to Prevent Chemical
Poisoning
- Focus on the Electronics Industry by establishing
a Continuous Monitoring System -

울 산 대 학 교 일 반 대 학 원
산 업 경 영 공 학 과
김 욱

화학물질 중독사고 예방을 위한 스마트기술
적용에 관한 연구
- 전자산업 중심 상시모니터링 시스템 구축 -

지도교수 정 기 효

이 논문을 공학박사학위 논문으로 제출함

2023년 8월

울산대학교 일반대학원
산업경영공학과
김 욱

김 욱의 공학박사학위 논문을 인준함

심사위원 : 박 창 권 (인)

심사위원 : 장 길 상 (인)

심사위원 : 이 수 동 (인)

심사위원 : 김 승 원 (인)

심사위원 : 정 기 효 (인)

울 산 대 학 교 대 학 원

2023년 8월

국문 요약

화학물질 중독사고 예방을 위한 스마트기술 적용에 관한 연구 - 전자산업 중심 상시모니터링 시스템 구축 -

울산대학교 일반대학원
산업경영공학과
김 욱

우리나라에서는 작업장 유해인자를 산업안전보건법 제105조에 따라 노출기준 설정 대상 유해인자, 허용기준 설정 대상 유해인자, 제조 등 금지물질, 제조 등 허가물질, 작업환경측정 대상 유해인자, 특수건강진단 대상 유해인자, 관리대상 유해물질 등으로 구분하여 관리하고 있다. 하지만 트리클로로에틸렌(Trichloroethylene, CAS No. 79-01-6), n-헥산(n-Hexane, CAS No. 110-54-3), 트리클로로메탄(Trichloromethane, CAS No. 67-66-3), 메탄올(Methanol, CAS No. 67-56-1) 등 관리대상 유해물질 중 유기화합물에 해당하는 화학물질에 의한 중독 사고는 지속적으로 발생되고 있다. 이러한 화학물질 중독 사고는 주로 노트북, 핸드폰 등의 부품을 가공하거나 제조하는 전자산업 영세 하청업체에서 집단으로 발생되고 있어 우리나라 화학물질 관리제도 사각지대의 현실을 보여주고 있다. 또한 국내 사업장에서 신규로 취급되는 화학물질은 2020년 31,600종으로 2018년에 비해 7.1% 증가하는 등 산업기술의 발달로 화학물질의 취급량과 취급방법이 변화하고 있어 이에 따른 화학물질 관리제도 및 방법에 대한 변화가 필요한 시점이다.

스마트기술은 사물인터넷(Internet of Things, IoT), 인공지능(Artificial Intelligence, AI), 로봇공학(Robotics), 무인운송수단(UAV), 3차원 인쇄(3D printing), 나노기술(Nano technology), 센서(Sensor) 등 정보통신기술과 정보지능기술 등이 실제 생산이나 제품과 연계되어 기능함으로써 새로운 제조 솔루션을 나타내는 기술이다. 최근 산업안전보건 분야에도 접목이 활발하게 추진되고 있으며, 유해화학물질과 관련해서는 유해물질 누출을 감지하여 그 정보를 처리시스템으로 전송해 관리자에게 전달하는 모니터링 시스템에 대해 관심을 받고 있다. 세계노동기구(International Labour Organization, ILO)는 새로운 미래 일터에 대한 안전보건 분야 주요 이슈로 유해요인의 노출에 대한 실시간 모니터링(Real-time monitoring of exposure to hazards)을 선정한 바 있고, 미국 국립 직업안전보건연구원(National Institute of Occupational Safety and Health, NIOSH)에서는 CDRST(Center for Direct Reading and Sensor

Technology)를 설치하여 센서를 활용한 화학물질 노출 모니터링 방안에 대해 연구하였다. 국내에서는 안전보건공단과 일부 대기업이 중심이 되어 센서와 통신기술을 융합시킨 디바이스를 활용하여 작업자의 출입이 어려운 밀폐공간 내의 공기질 수준을 측정하려는 연구와 디바이스 개발을 시도하였고 이러한 연구결과로 밀폐공간 공기질 측정에 무선통신을 이용한 원격측정방법이 포함되는 등 실제 제도 변화를 이끌어내기도 했다.

화학물질 상시모니터링시스템(Continuous chemical exposure level monitoring system)이란 화학물질의 노출이 일정 수준 이상이 될 경우 즉시 경고하여 사업장에서 환기 등을 통해 스스로 관리할 수 있도록 지원하는 작업환경관리방안이다. 화학물질 사용이 많은 중소기업 제조업은 제품 생산시기에 따라 작업량이 집중되는 등 생산여건에 따라 화학물질 노출수준 변화량이 크고, 사용물질이 다양하며, 외국인·비정규직 종사자 등의 위험요인이 있다. 본 연구에서는 이러한 위험요인을 극복하기 위하여 주요 중독 위험물질에 대하여 24시간 실시간으로 노출수준을 모니터링하고 위험상황을 경고할 수 있는 화학물질 상시모니터링시스템의 시범개발하고 효과성을 검토하였다. 중독 위험성 및 취급현황을 고려하여 감지대상 가스를 선정하였으며 총휘발성유기화합물(Total Volatile Organic Compounds, TVOC) 측정용, 염소가스(Cl_2) 측정용, 불화수소(HF) 측정용, 시안화수소(HCN) 측정용 등 총 4종의 센서세트가 개발되었다. LTE 또는 WiFi로 전용플랫폼과 통신이 가능하며 배터리를 활용한 이동측정이 가능하여 정비작업 등에도 활용될 수 있다. 시범 개발된 센서세트 중 TVOC용 센서세트를 실제 유기용제 취급 사업장에 약 5개월간 설치하여 효과성을 검토하였다. 센서에 의한 작업장소별 노출수준 측정결과를 작업장 노출기준과 비교해본 결과, 일별 최댓값은 노출기준보다 28배~110배 높게 나타났으며 특정일의 시간별 노출수준의 최댓값은 39배~71배 높게 나타났다. 단시간 노출은 노출기준의 77배, 기존 측정방법의 15배 높게 나타나는 등 작업장 화학물질 노출수준 변화는 그 정도가 매우 큰 것으로 파악되었다. 또한 통상 작업환경측정 등의 관리가 이루어지는 정규작업시간 이외의 시간에 높은 수준의 노출발생에 따른 위험상황이 발견되기도 했다. 따라서 가스센서와 통신기술, 전용 플랫폼, 알림기준 및 방식 등 스마트 기술과 산업보건이론을 복합시킨 화학물질 상시모니터링 시스템을 활용할 경우 현재 연 1~2회 제한되게 실시되고 있는 작업환경측정을 보완하여 사업장이 작업별 시기별로 유해화학물질의 노출수준을 알고 예방에 활용하는 화학물질 위험관리가 가능할 것이다. 아울러 향후 스마트센서세트에 대한 기술개발, 위험기준 설정 등의 이론 연구, 정책변화 및 지원 확대방안 연구 등이 필요하며 이를 통해 상시모니터링 시스템이 중소기업사업장의 자기규율 위험관리능력 향상지원과 위험성평가 등 작업장 중독사고 예방에 효과적으로 활용될 것으로 기대된다.

Key word : 화학물질 중독, 급성중독사고, 센서, 사물인터넷, 상시모니터링, 자기규율 위험관리, 위험성평가

목 차

국문요약	i
표 목차	v
그림 목차	vi
1. 서론	
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구의 구성	2
2. 화학물질 중독과 스마트 안전보건기술	
2.1 화학물질 중독	4
2.1.1 개념	4
2.1.2 발생위험 및 현황	6
2.1.3 작업환경 관리제도	7
2.2 스마트 안전보건기술	10
2.2.1 개념	10
2.2.2 안전보건 적용사례	13
2.2.3 스마트 센서세트 개념	15
3. 전자산업 화학물질 중독	
3.1 산업현황	19
3.2 안전보건특성	22
3.3 선행연구	23
3.4 주요 사고사례	26
3.4.1 노말렉산 다발성말초신경병증	26
3.4.2 트리클로로에틸렌 중독	29
3.4.3 메탄올 실명	33
3.5 사고원인 정밀분석	35
3.5.1 DoE기법 개요	35
3.5.2 정밀분석 결과	35
4. 화학물질 상시모니터링시스템	
4.1 개념	41
4.2 시범개발 결과	42
4.2.1 시스템 구성	42
4.2.2 대상물질 선정	42
4.2.3 위험기준 선정	43

4.2.4 구성요소 선정결과	44
4.2.5 센서 성능 확인방법	48
4.3 현장적용 대상 및 방법	49
4.3.1 대상	49
4.3.2 방법	51
4.4 현장적용결과	55
4.4.1 전체기간의 일별 노출수준	55
4.4.2 특정일의 시간별 노출수준	58
4.4.3 기존 측정방식과의 비교	59
5. 결론 및 향후 연구방향	
5.1 결론	61
5.2 향후 연구방향	64
참고문헌	65
Abstract	70

표 목차

<표 2-1> 산업안전보건법에 따른 유해물질의 구분과 그 정의	8
<표 2-2> 4차 산업혁명 15대 기술 중 안전 분야 기술개발테마	11
<표 2-3> 스마트기술이 반영된 밀폐공간 공기질 측정 규정	15
<표 2-4> 가스센서 종류별 특징	16
<표 3-1> 2019~2021년 10대 수출품목과 수출현황	19
<표 3-2> 2017~2022년 전 업종, 제조업, 전자제품 제조업 산업재해 발생현황	20
<표 3-3> 전자산업에 대한 다양한 법적 정의	21
<표 3-4> 제조업 중소기업의 수급비중 및 거래단계 현황	23
<표 3-5> 검토된 선행연구 목록 및 연구개요	23
<표 3-6> 주요 방호벽의 실제 작동상태 및 실패이유, 사고에 미친 영향	38
<표 3-7> 주요 변동요인의 사고현장 상태와 안전작업 상태의 차이분석	39
<표 4-1> 물질별 선정된 센서의 특성	44
<표 4-2> 작업장 특성	50
<표 4-3> 과거 작업환경측정결과(2018~2021)	52
<표 4-4> 신뢰성평가에 의한 작업환경측정 실시결과	53
<표 4-5> 스마트 센서세트 별 데이터 측정일수	55
<표 4-6> 일별 TCE 노출수준 측정값 분석결과	56
<표 4-7> 특정일의 시간별 TCE 노출수준 측정값 분석결과	58

그림 목차

[그림 1-1] 연구수행 과정	3
[그림 2-1] 질병관리청에 따른 중독에 대한 분류	5
[그림 2-2] 4차 산업혁명 개념도	11
[그림 2-3] 디지털화와 정보통신기술이 산업안전보건 미래에 미치는 영향분석	12
[그림 2-4] 스마트 세이프티볼 사용사례	14
[그림 2-5] 스마트 센서 플랫폼 구성방안	17
[그림 3-1] 전자산업 생태계	21
[그림 3-2] 병실에 모인 피해 근로자들	27
[그림 3-3] 노말렉산 노출 재현실험 결과	28
[그림 3-4] 사고발생 세척조	31
[그림 3-5] 사례2(a) 및 타 사고 발생사업장(b) 세척조 하부	32
[그림 3-6] 사업장의 TCE 취급 설비	33
[그림 3-7] 메탄올 CNC가공 작업환경	34
[그림 3-8] 시간대별 E&CF Chart(Draft)	36
[그림 3-9] TCE 중독사고 Barrier Analysis 개요	37
[그림 3-10] TCE 증기 세척조 청소작업 중 중독사망 사고의 사고요인 분석결과 ...	40
[그림 4-1] 노출기준 대비 위험수준에 따른 경보 색상	44
[그림 4-2] Alphasense사의 적용 참고자료(Application Note) ANN 305-06 (일부)	45

[그림 4-3] 시범 개발된 스마트 센서세트	46
[그림 4-4] 플랫폼의 맵핑(Mapping) 화면	47
[그림 4-5] 센서세트 별 노출수준 데이터 표출 화면	47
[그림 4-6] 화학물질 상시모니터링 시스템 시범구성도	48
[그림 4-7] 주요 작업공정 및 화학물질 취급 작업	49
[그림 4-8] 검사 작업	50
[그림 4-9] 지그세척 작업	51
[그림 4-10] 검사 작업장 스마트 센서세트	54
[그림 4-11] 지그세척 작업장 스마트 센서세트	54
[그림 4-12] 전체기간 TCE 노출수준 일별 변화 (검사 작업)	57
[그림 4-13] 전체기간 TCE 노출수준 일별 변화 (지그세척 작업)	57
[그림 4-14] 특정일의 시간별 트리클로로에틸렌 노출수준 변화 (검사 작업)	59
[그림 4-15] 특정일의 시간별 TCE 노출수준 변화 (지그세척 작업)	59
[그림 4-16] 특정일의 TCE 노출수준 상자그림 그래프 (검사 작업)	60
[그림 4-17] 특정일의 TCE 노출수준 상자그림 그래프 (지그세척 작업)	60

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

작업장 화학물질 중독 사고는 안전보건의 주요 이슈 중 하나이다. 산업발전에 따라 경제는 크게 성장했지만 필연적으로 수반된 화학물질의 사용과 노출의 증가에 따라 많은 중독사고가 유발되었다. 1988년 압력계 및 온도계 제조업체인 협성계공에서 근무했던 10대 소년 문송면은 수은방울이 바닥에 흩어져 있는 열악한 환경에서 2개월간 일하다 직업성 수은중독으로 사망했다(박정일 등, 1989). 당시 88서울올림픽 준비분위기에도 불구하고 500여명이 참석한 산업재해노동자장이 치러지는 등 故문송면군 수은중독 사망사고는 우리나라 직업병 문제에 대한 사회적 관심을 촉발시켰다. 이와 함께 우리나라 최대 규모의 화학물질 중독 사고로 기록된 원진레이온 이황화탄소 집단중독 사고는 1987년 초 팔다리 마비, 언어장애 등 중독 증상을 보인 근로자 4명의 사연이 한겨레의 보도에 의해 사회적 이슈로 대두되었다(김대성, 2010). 이후 고려대학교 환경의학연구소, 서울대학교 보건대학원 등에 의해 작업장 환경에 대한 조사 및 노출근로자에 대한 건강진단이 본격적으로 실시됨에 따라 당시 이황화탄소 노출이 방사실의 내부에 안개가 낀 것처럼 자욱할 정도의 수준이었다는 열악한 작업환경이 알려지고 900명이 넘는 근로자가 직업병 판정을 받았다(안종주, 2022). 그 결과 제1차 경제개발 5개년 계획에 따른 전략 산업 집중 육성방침에 따라 설립되어 31년 간 운영되었던 기업은 첫 중독 발생이후 12년 만에 파산처리 되었다(염용태, 1996). 이처럼 작업장의 화학물질 중독 사고는 경제구조, 산업발전과도 직접적인 관련이 있다.

수출 위주의 경제구조를 가진 우리나라 산업은 대내외적 영향을 받으며 발전되어 왔다. 국가기록원 누리집 자료에 따르면 경제구조가 1차 산업 중심이던 1950년대에는 쌀, 생사, 김, 한천, 돈모, 면직물 등의 생산품이 전체 70~80%를 차지하였으나 1960년대 경제개발 5개년 계획과 수출주도형 개발정책 추진에 힘입어 합판, 가발, 신발 등 경공업 생산비중이 확대되었다. 1970년대는 기계, 선박, 철강 등 중화학제품의 수출이 본격화됨과 동시에 라디오 등 전자제품의 수출이 시작되었고 1980년대에는 컬러TV, CDP, 휴대폰 등 전자제품이 전체 수출의 30%를 차지하게 되었다. 이러한 산업변화로 인해 70년대 이후 신발제조업에서의 노말핵산 중독, 납중독, 크롬 노출에 의한 도금공의 비중격 천공, 카드뮴 중독 등이 발생되었다(김은아, 2009). 90년에는 전자산업의 발달에 따라 전자제품 제조 관련 화학물질 중독이 발생되었다. 1995년 경남 양산에 위치한 엘지전자부품(주)에서 발생한 2-브로모프로판에 의한 집단 생식독성사고는 전자부품인 Tactile switch(일명 TACT S/W)를 생산하는 조립부서에서 제품 세척제로 사용한 SOLVENT 5200에 함유되어 있던 2-브로모프로판(CAS No. 75-26-3)에 의한 집단생식독성 사고이다(유일재, 2023). 사고 이후 안전보건공단 산업안전보건연구원을 중심으로 하는 전문가집단의 연구결과에 따라 전 세계 최초로 2-브로모프로판에 대한 노출기준이 1 ppm(Part per million)으로 설정되었으며, 새로

운 물질에 대한 정보를 제공하는 제도인 물질안전보건(Material Safety Data Sheet, MSDS)에 관한 규정이 산업안전보건법에 따라 강화되었고 화학물질안전보건센터가 안전보건공단 산업안전보건연구원 내에 설치되는 등 화학물질의 유해성에 대한 근로자의 알권리가 제도적으로 강화되는 변화가 초래되었다(정무수, 2011).

이러한 화학물질 중독문제는 단순한 개인의 질병이나 건강문제가 아닌 우리나라의 산업 체계 강화를 위한 문제이다. 화학물질 중독 사고는 2022년 시행된 「중대재해 처벌 등에 관한 법률(법률 제17907호)」 제2조(정의)에 따른 처벌 대상이며 경남 창원에 소재한 에어컨 부품 제조업체에서 발생한 트리클로로메탄 집단중독 사고는 중대재해처벌법 대상 제1호 사고이기도 하다. 내년에 50인 미만 확대를 앞두고 있는 이 법에 대비하여 안전보건 역량이 부족한 2, 3차 하청업체 등 중소기업에 대한 보호방안 마련이 필요하다. 중소기업에 대하여는 중소기업기본법(법률 제19044호) 제2조 및 같은 법 시행령 제3조에서 업종 및 매출 등에 따라 그 범위가 규정된다. 하지만 산업안전보건에 관한 본 연구에서는 산업안전보건법에 따른 제조업 안전관리자 등의 선임업무가 없는 상시 근로자 수 50인 미만 사업장을 중소기업 또는 중소기업 규모 사업장으로 통칭한다. 중소기업 사업장 종사자의 화학물질 중독사고 예방을 위해서는 실효성 있는 제도나 안전보건 기술이 필요하다. 특히 최근 대두되고 있는 사물인터넷(Internet of Things, IoT), 센서(Sensor), 통신, 인공지능(Artificial Intelligence, AI), 기계학습(Machine Learning) 등 스마트기술을 근로자의 안전보건을 보호하기 위해 적용하는 것이 필요하다.

본 연구의 목적은 전자산업 등 화학물질 취급이 많은 산업생태계에 속하는 사업장 중 안전보건 인프라가 부족한 중소기업 사업장에서의 화학물질로 인한 중독, 직업병 등 산업재해 예방을 위해 스마트기술을 활용한 화학물질관리체계 구축 방안을 마련하는데 있다.

1.2 연구의 구성

본 연구는 화학물질 노출로 인한 사고가 발생하는 전자산업 중소기업 사업장을 중심으로 스마트기술이 적용된 화학물질 관리체계 구축 방안을 마련하기 위하여 다음과 같이 구성하였다.

첫째, 작업장 화학물질 노출에 따른 중독사고의 발생 메커니즘과 발생현황을 알아보고 이를 예방하기 위해 마련되어 있는 사업장 안전보건관리 제도에 대해 알아보았다.

둘째, 전자산업에서의 화학물질 중독사고 발생현황과 주요 사례에 대해 검토하고 일부 사례에 대해 정밀 사고분석기법을 적용하여 근본원인을 파악하여 보았다.

셋째, 센서, 통신 등 화학물질 노출관리를 위한 스마트기술을 알아보고 이를 활용한 스마트센서세트와 사업장에서 화학물질 노출 위험수준을 자율적으로 관리 할 수

있는 플랫폼을 시범개발 하였다.

넷째, 개발된 스마트센서세트를 실제 중소규모 전자산업의 유해화학물질 취급공정에 설치하여 수집된 데이터를 기존 작업환경측정방식의 데이터와 비교하여 화학물질 노출수준의 변이현황을 알아보고 이에 대한 관리방안을 제시하였다.

본 연구를 수행하기 위한 추진 체계는 [그림 1-1]과 같다. 본 연구는 크게 5장으로 구성되며, 제1장은 연구배경 및 목적, 연구내용과 방법 등에 대한 서론, 제2장은 화학물질 중독과 스마트기술의 개념과 현황에 대해 조사하였다. 제3장은 전자산업의 현황과 특성, 화학물질 중독사고 사례 및 그 원인에 대해 분석하였다. 제4장은 화학물질 상시모니터링시스템의 개발과 실제 작업현장에 적용하여 화학물질 노출수준의 변화에 대해 분석한 결과를 제시하였다. 마지막으로 제5장은 결론으로 연구결과 및 한계점 그리고 향후 연구 방향을 제시하였다.



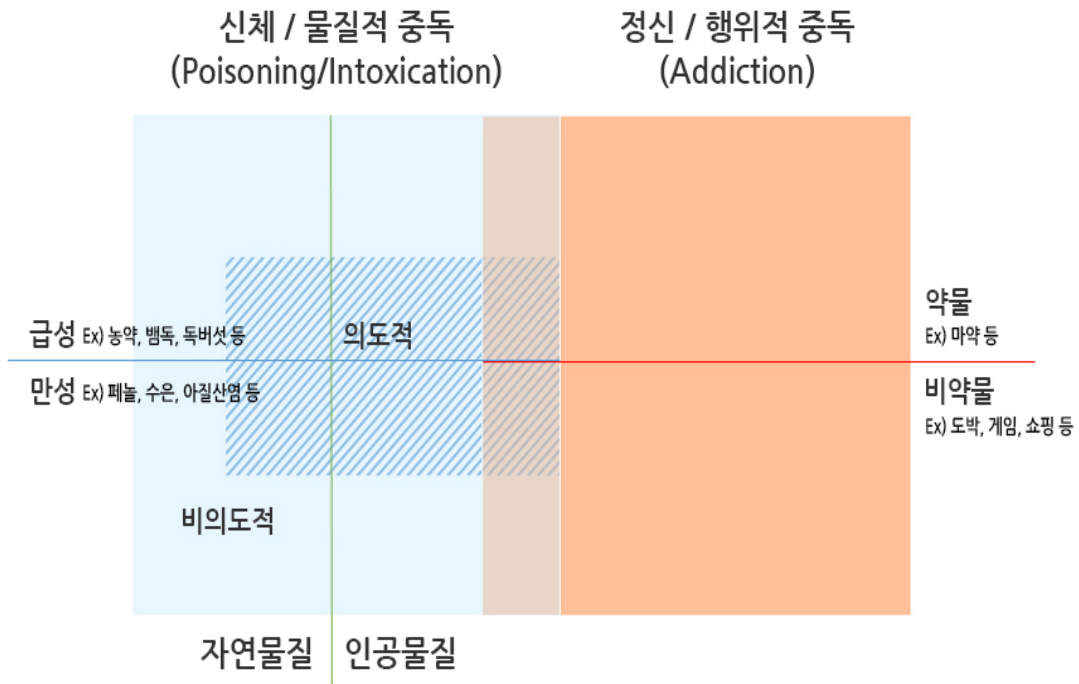
[그림 1-1] 연구수행 과정

2. 화학물질 중독과 스마트 기술

2.1 화학물질 중독

2.1.1 개념

화학물질(Chemical substance)이란 원소, 화합물 및 그에 인위적인 반응을 일으켜 얻어진 물질과 자연 상태에서 존재하는 물질을 화학적으로 변형시키거나 추출 또는 정제한 것을 말한다(화학물질 관리법 제2조). 일반적으로 작업현장에서는 단일 종류의 화학물질을 사용하는 경우는 많지 않고 혼합물을 사용한다. 혼합물이란 화학적으로 반응하지 않는 두 종류 이상의 화학물질이 섞여있는 물질을 말하며 화학물질을 함유한 제제는 화학물질의 주성분에 부형제, 용제, 안정제 등을 첨가하여 제조한 제품을 말한다. 유해화학물질이라는 표현도 자주 사용된다. 자연에서 생성된 화학물질을 포함한 모든 물질은 인체에 해로운 영향을 줄 수 있으며 대부분 화학물질은 일정 수준 이상에서 인체에 해로운 영향을 줄 수 있으므로 작업장의 유해화학물질이라고 하는 것은 기본적으로는 생산과정에서 사용되는 모든 화학물질을 의미할 수 있으나 협의적으로는 산업안전보건법, 화학물질관리법 등 관련 법규에 지정된 물질로 이해될 수 있다. 물질의 유해성은 화학물질 자체의 물리화학적 특성과 함께 농도, 노출기간 및 노출빈도, 작업강도, 성상, 개인적 요소(나이, 성별, 체중, 인종 등)와 환경적 요소(온도, 습도, 대기압 등) 등과 관련되어 있다. 화학물질이 인체에 침투하게 되는 경로(Route of entry)는 크게 공기 중에 존재하여 코나 입 등을 통해 들어오는 호흡기 경로(Respiratory tract), 화학물질을 함유한 제제를 마시거나 먹는 등 입을 통해 위나 장으로 들어오는 소화기 경로(Gastrointestinal tract), 화학물질을 다루거나 묻는 등 피부에 직접 묻어서 침투하게 되는 피부흡수 경로(Skin absorption) 등 3가지로 구분될 수 있다. 인체에 침투한 화학물질은 흡수(Absorption), 분배(Distribution), 대사변환(Metabolism) 과정을 거쳐 체외로 배출(Elimination)되는데 이 과정에서 중독 등 다양한 인체 영향을 발생시키게 된다. [그림 2-1]과 같이 중독은 화학물질 등 독성작용을 일으키는 물질에 노출되어 발생하는 신체적·물질적인 중독(Poisoning or Intoxication)과 정신적·행위적 중독(Addiction)으로 구분할 수 있다(질병관리청, 2022). 산업현장에서의 화학물질에 의한 중독은 취급하는 화학물질 또는 작업장 내의 유해물질이 근로자에게 흡입, 경구섭취 또는 피부접촉 등의 노출로 인해 신체에 유해한 영향을 일으키는 것을 말하는데, 화학물질이 신체에 미치는 영향의 속도에 따라 급성중독(Acute Poisoning)과 비교적 장기간 노출되어 발생하는 만성중독(Chronic poisoning)으로 구분될 수 있다.



[그림 2-1] 질병관리청에 따른 중독에 대한 분류

작업장에 존재하는 화학물질은 대부분 상온 상압에서 기체인 오염물질인 가스(Gas) 형태, 액체가 기화된 상태의 오염물질인 증기(Vapor), 물리적으로 생성된 액체 미립자인 미스트(Mist), 고체 덩어리에 물리적인 힘이 가해져서 만들어진 분진(Dust), 금속 등이 고온에 의해 기화된 후 응결된 흠(Fume) 등의 형태로 존재한다. 금속의 세척 또는 세정 작업에 따른 세척액(Degreasing agent or Cleaning agent)의 가스 또는 증기, 금속 가공 시 가공날의 회전에 따라 발생하는 오일 미스트(Oil mist) 등이 대표적인 예이다. 이러한 화학물질은 근로자의 신체에 다양한 경로로 침투하여 흡수, 대사 및 배출되는 과정에서 유해한 영향을 미치게 된다.

가. 노출경로

작업장 내의 유해인자는 호흡기, 피부, 소화기 등을 통해 작업자의 신체에 유입되며 각 기관의 방어기전을 통과한 화학물질은 체내에서 운반체와 결합, 대사성활동, 조직 및 장기, 간으로의 이동 등의 과정에 따라 끊임없이 재배치된다. 이때 신체가 배출시키는 속도보다 흡수되는 속도가 빠르게 되면 물질 특성에 따라 특정 조직이나 표적장기에 축적되며 이것이 일정 수준 이상에 이르면 독성을 일으키게 된다. 일반적으로는 같은 화학물질이라도 어떤 경로를 통해 노출되느냐에 따라 독성이 다르지만 일부는 노출경로에 상관없이 동일한 독성을 나타내기도 한다.

나. 흡수, 대사 및 배출

(1) 흡수-호흡기

작업장 유해인자는 호흡기를 통하여 생체에 유입되는 경우가 가장 많다. 인간은 하루에 10~20m³의 공기를 호흡한다. 또한 일반적인 인간의 폐는 표면적이 약 140m²로 테니스코트 한 면의 면적과 비슷할 정도로 넓고 혈액순환이 활발하여 유입된 화학물질은 혈관을 통하여 신속하게 전신으로 확산될 수 있다. 호흡기를 통해 흡수되는 유해물질들은 아황산가스, 이산화질소, 일산화탄소 등과 같은 가스상 물질, 벤젠 및 톨루엔 등 휘발성을 지닌 증기상 물질, 기타 에어로졸(Aerosol) 등이다. 가스상 물질의 경우 물에 대한 용해도, 조직의 반응성, 혈액가스 분배계수에 따라 흡수가 결정된다. 암모니아와 아황산가스 등 물에 대한 용해도가 아주 높은 가스 대부분은 상기도의 점막에 흡수되기 때문에 즉각적인 자극을 유발한다. 염소와 포스겐 등은 물에 대한 용해도가 매우 낮기 때문에 상기도 자극 증상은 경미하다. 하지만 수 시간 경과 후에는 폐포를 포함한 하기도에 대한 자극 증상이 현저하다.

(2) 흡수-피부

건강한 피부는 대부분의 화학물질을 방어할 수 있는 기능을 가지고 있다. 하지만 이황화탄소, 사에틸납, 니트로벤젠 등은 피부를 통하여 체내에 흡수되어 건강장해를 일으키기도 한다. 피부흡수는 주로 모낭, 피지선, 땀샘 등을 통해 이루어지지만 직접 표피나 진피를 통과하는 물질도 있다. 특히 피부 손상, 염증 등으로 표피가 탈락한 경우에는 흡수가 더욱 쉽게 이루어 질 수 있다.

(3) 대사 및 배설

체내로 들어온 화학물질은 생화학적 변환과정을 통해 인체에 영향을 미친다. 변환과정은 주로 간(Liver)에서 이루어지며 대부분의 화학물질이 이 변환과정에서 독성이 낮은 물질로 변환되나 일부 화학물질은 신체 내 대사과정에서 독성이 더 강한 물질로 변환될 수 있다. 대사과정은 산화 또는 환원, 가수분해 등의 1기 반응과 결합, 글루쿠로닐화 등의 2기 반응으로 구분된다. 2기 반응을 통해 수용성이 높아진 대사물은 배설이 용이하게 되어 소변, 대변, 호기, 모발, 땀 등으로 배설된다. 화학물질의 성질에 따라서 친수성 물질은 신장을 통하여 지방친화성 물질은 장관을 통해, 그리고 휘발성 물질은 호흡과정을 통해 주로 배설된다.

2.1.2 발생위험 및 현황

화학물질 중 근로자의 건강장해 위험이 있어 산업안전보건법 제39조에 따라 건강장해 예방을 위한 보건상의 조치 대상이 되는 유기화합물은 117종이다. 안전보건공

단 조사에 따르면 2019년 기준 유기화합물을 취급하는 국내 사업장 수는 20,229개 소이며 연간 취급량은 약 3,424,336,764톤이다. 취급 사업장 당 22명의 근로자가 1일 평균 5시간가량 취급하고 있는 것으로 나타났다(작업환경실태조사, 2019). 환경부에 따르면 우리나라 사업장에서 신규로 취급된 화학물질은 2020년 기준 31,600종으로 2018년 신규로 취급된 29,499종에 비해 7.1% 증가되었으나 작업장 내에서 취급하는 화학물질에 대한 법적 관리 대상은 큰 변화가 없었다. 이러한 관리 사각지대의 증가로 인해 n-헥산(n-Hexane, CAS No. 110-54-3), 2-브로모프로판(2-Bromopropane, CAS No. 75-26-3), 메탄올(Methanol, CAS No. 67-56-1) 등 다양한 화학물질에 의한 중독사고가 발생되었다. 고용노동부에 따르면 화학물질 누출 또는 접촉으로 인한 사고재해자는 연 평균 315명, 화학물질 중독으로 인한 업무상질병자는 평균 97명 발생되고 있다(2016~2020 산업재해현황분석, 고용노동부).

유기용제에 의한 급성중독은 중대재해 처벌 등에 관한 법률(시행 2022.1.27., 법률 제17907호, 약칭 중대재해처벌법(Serious Accidents Punishment Act))에 따른 처벌 대상 질병 중 하나이다. 2022년 2월 경남 창원시의 에어컨 부품 제조 사업장에서 배관 세척용 화학물질 누출에 의해 급성 간독성이 집단으로 발생하는 사건이 있었으며 이어 같은 달 경남 김해의 자동차부품제조업 사업장에서도 급성 간독성이 집단으로 발생하는 등 유사한 사고가 이어지고 있다. 2023년에도 경기도의 한 반도체 부품 제조업체에서도 제품 세척에 사용되는 화학물질 집단중독사고가 발생하는 등 화학물질 급성중독 사고는 지속적으로 발생되고 있다.

2.1.3 작업환경 관리제도

우리나라 사업장에서 취급하는 화학물질에 대한 작업환경관리 주요 규정은 산업안전보건법(법률 제18426호, 2021.8.17)에 그 내용이 명시되어 있다. 작업장 유해화학물질에 의한 건강장해예방을 위해 산업안전보건법에 규정된 주요 제도는 사업주가 작업환경 실태를 파악하기 위하여 해당 근로자 또는 작업자를 대상으로 유해인자에 대한 측정계획을 수립한 후 시료를 채취하고 분석·평가 하는 작업환경측정(산업안전보건법 제125조) 그리고 작업환경측정결과는 노출기준 미만이나 직업병 유소견자가 발생한 경우, 공정설비, 작업방법 또는 사용 화학물질의 변경 등 작업조건의 변화가 없는데도 유해인자 노출 수준이 현저히 달라진 경우, 신뢰성평가의 필요성이 인정되는 경우 등 실시하도록 명시된 작업환경측정 신뢰성평가(산업안전보건법 시행규칙 제194조), 고용노동부령으로 정하는 유해인자에 노출되는 업무에 종사하는 근로자 등을 대상으로 시행되는 특수건강진단(산업안전보건법 제130조) 등의 건강진단, 그리고 화학물질의 명칭 및 함유량, 안전보건상 취급 주의 사항, 건강 및 환경에 대한 유해성, 물리적 위험성, 물리·화학적 특성 등 유해성 정보를 근로자에게 알려주기 위한 물질안전보건자료(산업안전보건법 제110조) 등이 있다. 이 외에 유해인자의 노출기준 설정(산업안전보건법 제106조), 발암성 물질 등에 대한 허용기준 설정(산업안전보건법 제107조), 신규화학물질의 유해성·위험성 조사(산업안전보건법 제108조) 등이 있다.

<표 2-1> 산업안전보건법에 따른 유해물질의 구분과 그 정의

구분	근거	정의
제조 등 금지물질	법 제117조, 시행령 제87조	제조·수입·양도·제공·사용이 불가한 물질로 고용노동 부장관, 화학물질관리법에 따른 승인을 받아 시험·연구· 검사목적에 한해 예외적으로 가능 (예 : 베타-나프틸아민과 그 염, 석면 등)
허가대상 물질	법 제118조, 시행령 제88조	대체물질이 개발되지 않은 물질로 고용노동부장관 허가를 받아 제조·사용이 가능한 물질 (예 : 알파-나프틸아민과 그 염, 베릴륨 등)
관리대상 유해물질	산업안전 보건기준에 관한규칙 제420조, 별표 12	근로자에게 상당한 건강장해를 일으킬 우려가 있어 법 제 39조에 따라 건강상태 예방을 위한 보건상 조치가 필요한 물질 (예: 벤젠 등 유기화합물, 수은 등 금속류, 불화수소 등 산 알카리류, 시안화수소 등 가스상 물질)
특별관리 물질		발암성, 생식세포 변이원성, 생식독성물질 등 근로자에게 중대한 건강장해를 일으킬 우려가 있는 물질 (예 : 트리클로로에틸렌, 1,3-부타디엔 등)
노출기준 설정물질	고용노동부 고시 제2020-48호	고시에 명시된 물질

산업안전보건법에서는 화학물질을 제조등금지물질, 허가대상물질, 관리대상 유해물질, 특별관리물질, 노출기준 설정물질 등과 같이 구분하여 관리하고 있으며 각각의 정의는 [표2-2]와 같다. 이러한 기준에 따라 작업장에서 산업안전보건법에 따라 정해진 화학물질을 취급하는 업무에 근로자를 종사시킬 경우에는 취급근로자의 건강보호를 위해 작업장 내의 화학물질 노출수준을 주기적으로 측정하여 일정기준 이내로 유지할 수 있도록 관리하고, 종사근로자에 대한 건강진단을 실시하여야 한다. 근로자가 취급하는 화학물질 중 건강장해를 일으킬 위험이 높아 법에 따른 조치가 필요한 물질은 관리대상물질이라고 하며 유기화합물(123종), 금속류(25종), 산·알카리류(18종), 가스상물질류(15종) 등으로 구성되며, 관리대상물질 중 암을 일으킬 수 있거나 생식독성이 있는 CMR물질(Carcinogenic, Mutagenic or Reproductive toxicity) 등은 특별관리물질로 정해져 있다(안전보건기준규칙 제420조). 사업주가 근로자를 관리대상물질을 취급하는 공정에 종사시킬 경우에는 관리대상물질의 증기, 가스, 흡

등이 외부로 노출되지 않도록 밀폐시키거나 국소배기장치 또는 전체환기장치를 설치하여야 한다. 이러한 설비는 유해물질이 근로자의 호흡기를 통해 침입하지 않도록 하는 것이 목적이므로 유해물질의 종류나 작업방법 등에 따라 법에서 정한 성능 이상을 유지하여야 한다(안전보건규칙 제422조 내지 제430조). 실내작업장의 바닥은 불침투성의 재료를 사용하고 청소가 용이한 구조라 하여야 하며(안전보건규칙 제431조) 관리대상물질에 접촉하는 설비는 녹이 슬지 않는 재료로 만드는 등 부식되지 않도록 관리하여야 한다(안전보건규칙 제432조). 관리대상물질이 누출되지 않도록 플랜지(Flange), 밸브(Valve) 및 콕(Cock) 등의 접합부에 대한 관리(안전보건규칙 제433조)와 함께 누출될 경우를 대비하여 경보설비(안전보건규칙 제434조) 및 긴급 차단장치(안전보건규칙 제435조) 등을 설치하여야 한다. 관리대상 유해물질 취급설비나 그 부속설비를 사용하는 경우에는 장치의 조작, 점검, 시료 채취, 응급조치 등의 내용이 담긴 작업수칙을 정하고(안전보건규칙 제436조), 환기장치가 고장나거나 관리대상 유해물질이 새어 나옴에 따라 중독우려가 있을 경우에는 즉시 작업을 중지하고 근로자를 대피시켜야 한다(안전보건규칙 제438조). 작업장의 관리 관련 내용은 국소배기장치에 대한 사용전 점검을 하여 정상적으로 작동될 수 있도록 조치하고(안전보건규칙 제441조) 취급하는 작업장에는 물질의 명칭, 인체 영향, 취급상 주의사항, 보호구, 응급조치와 긴급 방재요령 등과 함께 관리대상 유해물질을 취급하는 실내작업장에는 관계근로자가 아닌 사람의 출입을 금지하는 내용, 담배를 피우거나 음식을 먹지 않도록 하는 내용 등을 보기 쉬운 장소에 게시하여야 한다(안전보건규칙 제442조, 제446조, 제447조). 관리대상 유해물질의 올바른 저장방법과 빈 용기의 관리방법, 오염을 제거하기 위한 청소방법의 준수와 함께 세면·목욕·세탁 등을 위한 세척시설을 설치하고 특별히 유해한 작업을 실시하는 근로자에게는 호흡용 보호구를 지급하여 착용하도록 하거나 불침투성 보호복, 보호장갑 등을 갖추고 사용하도록 하여야 한다(안전보건규칙 제443조, 제444조, 제445조, 제448조, 제450조, 제451조). 무엇보다 중요한 것은 관리대상 유해물질의 구체적인 명칭 및 물리화학적 특성, 건강 영향과 증상, 취급 시의 주의사항, 작업 시 착용해야 할 보호구와 착용방법, 위급상황에 대한 대처 및 응급조치 요령 등 근로자 건강장해 예방에 관해 필요한 사항을 해당 근로자를 관리대상 유해물질 취급 작업에 배치하기 전에 알려 주어야 한다는 사항이다(안전보건규칙 제449조). 생식독성 등 유해성이 높은 특별관리대상물질을 취급하는 경우에는 취급 근로자의 이름, 특별관리물질의 명칭 및 취급량, 작업내용, 작업내용, 작업시 착용한 보호구 등을 기록하여야 하며 누출, 오염, 흡입 등의 사고가 발생한 경우에는 피해내용 및 조치 사항을 포함하여 기록하여야 한다(안전보건규칙 제439조). 근로자가 취급하는 물질이 산업안전보건법에 따른 특별관리물질에 해당된다는 사실과 함께 발암성물질, 생식세포 변이원성물질, 생식독성물질 중 어느 물질에 해당하는지를 고지하여야 한다(안전보건규칙 제440조).

산업안전보건법 외에 화학물질의 안전과 관련된 사항을 규정하는 법령으로 환경부가 주관하는 화학물질관리법(법률 제18420호, 2021.8.17)과 화학물질의 등록 및 평가 등에 관한 법률(법률 제18034호, 2021.4.13., 약칭 화학물질등록평가법)이 있다. 화학물질관리법은 화학물질에 대한 체계적인 관리와 사고 예방을 통해 국민 건강과

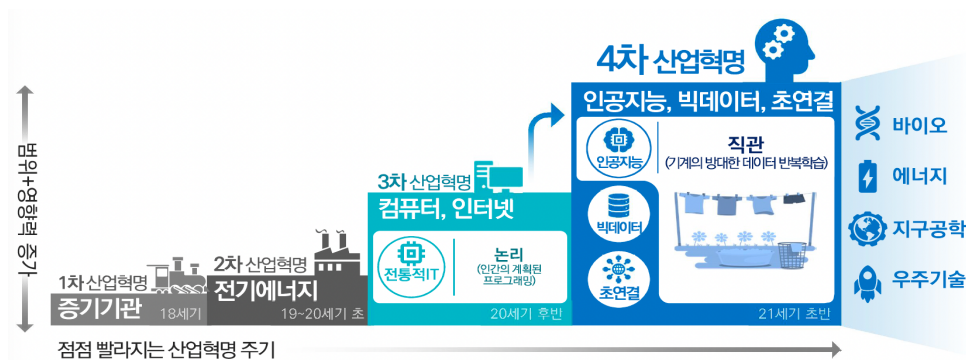
환경 보호를 목적으로 기존 유해화학물질(법률 제4261호, 시행 1991.2.2.)을 2013년 전부 개정하여 만들어진 법률로써 유해성이 있는 화학물질의 취급과 운반을 제한하고, 취급시설의 안전성을 강화하는 것을 목적으로 한다. 화학물질등록평가법은 화학물질의 국내 시장 출시 전 등록과 평가를 의무화하고, 유해성이 있는 화학물질의 사용을 제한하는 것을 목적으로 한다. 화학물질등록평가법에 따라 국내에서 제조되거나 수입되는 모든 화학물질에 대해 등록을 의무화하고 있고 대상 화학물질의 위해성 평가를 통해 유해성이 있는 경우 사용을 제한하거나 금지할 수 있다. 이러한 환경부 소관법령의 규제는 과태료 및 벌금이 매출액 대비 비율로 정해지는 등 강력하여 현장에 미치는 영향이 크다. 하지만 환경관련 법에 따라 세척제 등 화학물질을 변경하는 과정에서 근로자의 건강영향이 제대로 검토되지 않은 상태에서 현장에서 사용됨에 따라 중독 등 건강장해 위험이 발생할 수 있다.

2.2 스마트 안전보건기술

2.2.1 개념

2016년 스위스 다보스포럼에서 열린 세계경제포럼에서 클라우스 슈밥(Klaus Schwab)이 주창했던 '4차 산업혁명 기술'이란 디지털 기술이 주가 되었었던 3차 산업혁명에 정보통신기술(Information & Communication Technology, ICT)이 융합된 것을 말한다. 대표적인 기술로는 사물인터넷(Internet of Things), 인공지능(Artificial Intelligence, AI), 로봇공학(Robotics), 무인운송수단, 3차원 인쇄(3D printing), 나노기술(Nano technology) 등이 있다. 우리나라에서는 대통령직속 4차산업혁명위원회에서 4차 산업혁명을 인공지능, 빅데이터, 초연결 등으로 인해 촉발되는 지능화혁명, 그 이상으로 정의하고 있으며 바이오, 에너지, 지구공학, 우주기술 등을 주요 활용방안으로 제시했다. '스마트기술'이란 문헌 또는 목적에 따라 다양하게 정의될 수 있는데, 생산현장과 관련해서는 4차 산업혁명 기술 중 특히 정보통신기술과 정보지능기술 등이 실제 생산이나 제품과 연계되어 기능을 구현함으로써 새로운 제조 솔루션의 효과를 나타내는 기술을 의미한다(Nho & No, 2022). 예를 들어 스마트공장이란 빅데이터, 인공지능, 사물인터넷, 센서 등의 4차 산업혁명 기술이 생산방식에 직접적으로 접목되어 생산성향상, 작업속도 개선 등에 영향을 미치는 공장을 말한다. 중소벤처기업부 산하 창조혁신경제센터에서는 4차 산업혁명기술 적용이 필요한 15대 핵심분야를 선정하여 연구개발비를 지원하고 있다(2023년 청주시 기술선도 스타트업 R&D 지원사업 모집공고, 2023.3.28.). 15대 핵심분야는 인공지능, 5G, 지능형센서, 바이오, 웨어러블 등이 있으며 산업현장의 안전보건과 직접적으로 관련이 되는 부분은 스마트공장과 안전 분야가 있다. 스마트공장 관련에는 스마트제조 어플리케이션 등 8개 기술개발테마가 선정되었고, 안전 분야으로는 안전사고 대응 지능형 모니터링 시스템 등 6개 기술개발테마가 선정되었다. 이 중 본 연구와 유사한 개념의 기술로는 안전 분야 기술개발테마 중 유해물질이 누출될 경우 센서를 이용하여

감지한 후 처리시스템으로 전송하는 방식으로 유해물질 누출로 인한 안전문제에 대응하기 위한 기술인 유해물질 유통 모니터링시스템이 있다.



[그림 2-2] 4차 산업혁명 개념도 (4차 산업혁명 위원회)

<표 2-2> 4차 산업혁명 15대 기술 중 안전 분야 기술개발테마

기술개발테마	정의
센서형 식품안전 관리시스템	ICT, Bio Tech, Sensor 등을 활용해 식품 이력, 안전, 품질 및 신선도 등의 정보 제공 및 효율적인 관리가 가능한 차세대 식품시스템
안전사고 대응 지능형 모니터링 시스템	Mobil과 Application을 활용하여 문자·영상 등의 재난관리 정보를 사전에 공유·전파하여 사전대비를 통해 피해를 최소화하기 위한 시스템
지능형 화재 안전 대응 시스템	ICT 및 Sensor를 활용하여 대형 및 고층건물에서 발생하는 화재를 조기 발견 및 신속 대응으로 피해를 최소화하도록 하는 시스템
유해물질유통 모니터링 시스템	유해물질이 누출되었을 경우, 곧바로 감지해 통합 모니터링을 한 뒤 처리시스템으로 전송해 정보를 수집하고 전달하는 시스템. 유독성물질의 누출 피해를 최소화하고 근로자가 쾌적한 환경에서 작업하도록 도움
미세먼지측정 시스템	PM10 및 초미세먼지 노출을 실시간으로 경보하여 심장 및 호흡기에 치명적인 질환 발생을 예방하는 시스템
범죄 대응시스템	군 화학작용제를 포함한 대량살상용 유독성 화합물, 폭발물 또는 감염성 병원균을 탐지 또는 식별하거나 실시간으로 감지하는 시스템을 개발. 경보나 주의보를 조기 발령하여 신속히 대처함으로써 인적/물적 피해가 확산되지 않도록 하는 등 사회적 경제적 피해를 최소화하기 위한 시스템

2019년 세계노동기구(International Labour Organization)는 100년간의 작업장 안전 보건 경험을 바탕으로 새로운 미래 일터에 대한 안전보건 분야의 도전과제와 발전 기회를 분석하여 자료로 제시하였다. 기술적 측면에서 새로운 변화요인으로는 전산화와 정보통신기술, 자동화와 로봇공학, 나노기술 등이 선정되었으며 노동인구의 고령화, 이주노동자등의 위험요인이 선정되어 각각 검토되었다(Safety and Health at the Heart of the Future Work-Building on 100 years of experience, ILO, 2019). 전산화와 정보통신기술(Digitalization and ICT)분야에서 유해요인의 노출에 대한 실시간 모니터링(Real-time monitoring of exposure to hazards)은 유해한 환경으로부터 작업자를 지키기 위한 기술로 선정되었다.

OPPORTUNITIES	CHALLENGES
<p>POSSIBLE REDUCTION IN SOME PSYCHOSOCIAL RISKS FROM</p> <ul style="list-style-type: none"> Improved work-life balance due to telework Reduction of stress associated with commuting <p>REMOVING PEOPLE FROM HAZARDOUS ENVIRONMENTS</p> <ul style="list-style-type: none"> Reduced need for work-related travel Increased worker control over work-life balance Reduced need for real-world trial of prevention measures Real-time monitoring of exposure to hazards <p>HEALTH PROMOTION</p> <ul style="list-style-type: none"> Real-time monitoring of physiology and 'nudges' towards behaviours such as taking a break from computer use <p>IMPROVED PREVENTION MEASURES</p> <ul style="list-style-type: none"> Increased understanding of human behaviour and its underlying mechanisms Improved communication of OSH practice New opportunities for OSH research, development and learning Improved collection and sharing of accurate OSH records <p>REDUCING INEQUALITY</p> <ul style="list-style-type: none"> Cost-effective way for developing countries to keep pace with progress in OSH Improved and widened access to education and training (including for OSH itself) 	<p>POSSIBLE INCREASE IN SOME PSYCHOSOCIAL RISK FROM</p> <ul style="list-style-type: none"> A perceived need to be 'available' at all time, poorer work-life balance Isolation (remote working and lack of social interaction) Performance monitoring Job insecurity Cyber-bullying, -aggression and -attacks Technostress and technology addiction and overload <p>Can lead to:</p> <ul style="list-style-type: none"> Increased pressure to 'cut corners' (taking fewer breaks, taking risks, using performance enhancing drugs etc.) <p>INCREASED RISK TO SECURITY AND PRIVACY FROM</p> <ul style="list-style-type: none"> The collection and recording of sensitive personal information The loss of jobs and roles <p>INCREASED ERGONOMIC RISK</p> <ul style="list-style-type: none"> From increasing use of mobile devices and sedentary work Leading to increased risk of associated health problems (MSDs, visual fatigue, obesity, heart disease etc.) <p>EXPOSURE TO NEW CHEMICAL OR BIOLOGICAL RISKS OR ELECTROMAGNETIC FIELDS</p> <ul style="list-style-type: none"> Electromagnetic fields <p>INCREASED RISK OF INCIDENTS AND EXPOSURES</p> <ul style="list-style-type: none"> From lack of risk assessment in remote workspaces, particularly public places (cafes, transport systems etc.) <p>OSH MANAGEMENT AND OUTCOME CHALLENGES RELATED TO</p> <ul style="list-style-type: none"> A more diverse (because of widened access to employment) and dispersed (because of remote working) workforce

[그림 2-3] 디지털화와 정보통신기술이 산업안전보건 미래에 미치는 영향분석 (ILO, 2019)

2.2.2 안전보건 적용사례

인공지능, 로봇공학, 정보통신, 사물인터넷, 센서 등 신기술을 접목시켜 실시간으로 데이터를 수집하고 분석하며 자동화된 의사결정과 동작을 수행하는 것을 스마트 기술이라고 한다. 이러한 스마트기술을 안전보건에 접목하려는 시도는 지속되어 왔으며, 사고예방과 위험관리, 작업환경개선, 직업병 예방과 건강관리 등에 기여하고 있다. 스마트기술은 위험요인을 실시간으로 감지하여 예측하며, 경보와 조치를 자동화하여 사고위험을 감소시켜 줄 수 있다. 포스코 등 대기업을 중심으로 스마트 CCTV를 개발하여 작업장 사고위험요인을 관리하거나 스마트 헬멧으로 작업장 상황을 모니터링 하거나 응급신호를 송출할 수도 있다. 스마트 워치 등 웨어러블 디바이스를 이용하여 작업자의 심박수를 체크하여 태배 노동자 등의 피로도를 분석하거나 야간근로자의 심박수를 체크하여 뇌심혈관계질환 예방 등 안전보건관리에 활용하는 방안도 제시되었다. 최근에는 한국산업보건학회에 스마트 보건안전환경 분과 위원회가 구성되어 관련 연구가 더욱 가속화될 전망이다.

작업장 유해인자 관리 분야에 스마트 기술을 적용하는 것은 유해인자 측정결과를 실시간으로 알 수 있기 때문에 노출위험도를 바로 알고 대응할 수 있다는 점, 무인으로 자동 측정이 가능하여 측정자가 위험장소에 들어가는 측정방식에 따른 위험요인을 줄일 수 있는 점, 측정결과에 따라 사업주나 근로자가 예방과 관련된 활동을 자율적으로 할 수 있는 점 등을 장점으로 꼽을 수 있다. 예컨대 급성중독성이 있는 화학물질을 매일 짧은 시간 동안에 취급하는 사업장의 화학물질 노출 특성을 알아낼 수 있고 밀폐공간의 경우 위험공간에 있는 화학물질의 농도를 실시간으로 측정할 수 있으며, 사람이 들어가서 측정하지 않아도 그 위험도를 파악할 수 있다. 산소결핍이나 황화수소 등 유해가스에 의한 질식 위험장소인 밀폐공간의 공기질 측정과 관련하여서는 IoT 기반의 밀폐공간 유해가스 측정장비를 활용한 밀폐공간 사고예방을 위한 첨단기술 활용방안 연구(OSHRI, 2018)와 IoT 밀폐공간 측정장치 및 드론, 로봇, 케이블, 레일, 공 형태 등 캐리어시스템의 구현과 실증을 수행한 밀폐공간 유해가스 측정장치 개발 연구(OSHRI, 2019)가 있었다. 기업의 연구도 활발히 진행되고 있다. 포스코는 스타트업 기업과 협업하여 밀폐공간의 공기질을 실시간으로 측정하고 이를 스마트폰이나 태블릿 전용 앱에서 확인할 수 있는 스마트 세이프티 볼을 개발하여 현장에 적용을 추진하고 있다. 개발된 스마트 세이프티 볼은 테니스공 정도의 크기(직경 60mm, 무게 100g)로 산소(Oxygen, O₂), 일산화탄소(Carbon Monoxide, CO), 황화수소(Hydrogen Sulfide, H₂S) 등 3가지 가스농도를 실시간으로 파악할 수 있으며 밀폐되어 유해가스 중독 또는 질식 위험이 있는 장소에 던져 넣어 위험수준일 경우 작업자 및 관리자에게 메시지를 자동으로 전송하는 방식으로 사용이 가능하다.



[그림 2-4] 스마트 세이프티볼 사용사례(newsroom.posco.com)

밀폐공간 유해위험관리를 중심으로 하는 산업보건 분야의 스마트기술 접목 노력에 따라 「산업안전보건기준에 관한 규칙」 제619조의2(산소 및 유해가스 농도의 측정)에 따른 밀폐공간에서의 산소 및 유해가스 농도의 측정관련 규정 중 해당 밀폐공간의 산소 및 유해가스 농도를 측정하는 방법에 「전파법」 제2조 제1항 제5호·제5호의2에 따른 무선설비나 무선통신이 적용된 원격 측정을 포함시키는 등 제도의 뒷받침도 함께 이루어지고 있다.

<표 2-3> 스마트기술이 반영된 밀폐공간 공기질 측정 규정(안전보건기준규칙 제619조의2)

개정 전	개정 후(2021. 5. 28)
<p>제619조의2(산소 및 유해가스 농도의 측정) ① 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 측정하여 적정공기가 유지되고 있는지를 평가하도록 하여야 한다. <개정 2019. 12. 26.></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 관리감독자 2. 법 제17조제1항에 따른 안전관리자 또는 법 제18조제1항에 따른 보건관리자 3. 법 제21조에 따른 안전관리전문기관 4. 법 제21조에 따른 보건관리전문기관 5. 법 제125조제3항에 따른 작업환경측정기관 	<p>제619조의2(산소 및 유해가스 농도의 측정) (전략) 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 자로 하여금 해당 밀폐공간의 산소 및 유해가스 농도를 측정(「전파법」 제2조 제1항 제5호·제5호의2에 따른 무선설비 또는 <u>무선통신을 이용한 원격 측정을 포함한다.</u> 이하 제629조, 제638조 및 제641조에서 <u>같다</u>)하여 적정공기가 유지되고 있는지를 평가하도록 해야 한다. <개정 2019. 12. 26., 2021. 5. 28.></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 관리감독자 2. 법 제17조 제1항에 따른 안전관리자 또는 법 제18조 제1항에 따른 보건관리자 3. 법 제21조에 따른 안전관리전문기관 또는 보건관리전문기관 4. 법 제74조에 따른 건설재해예방전문지도기관 5. 법 제125조 제3항에 따른 작업환경측정기관 6. 「한국산업안전보건공단법」에 따른 한국산업안전보건공단이 정하는 산소 및 유해가스 농도의 측정·평가에 관한 교육을 이수한 사람

2.2.3 스마트 센서세트 개념

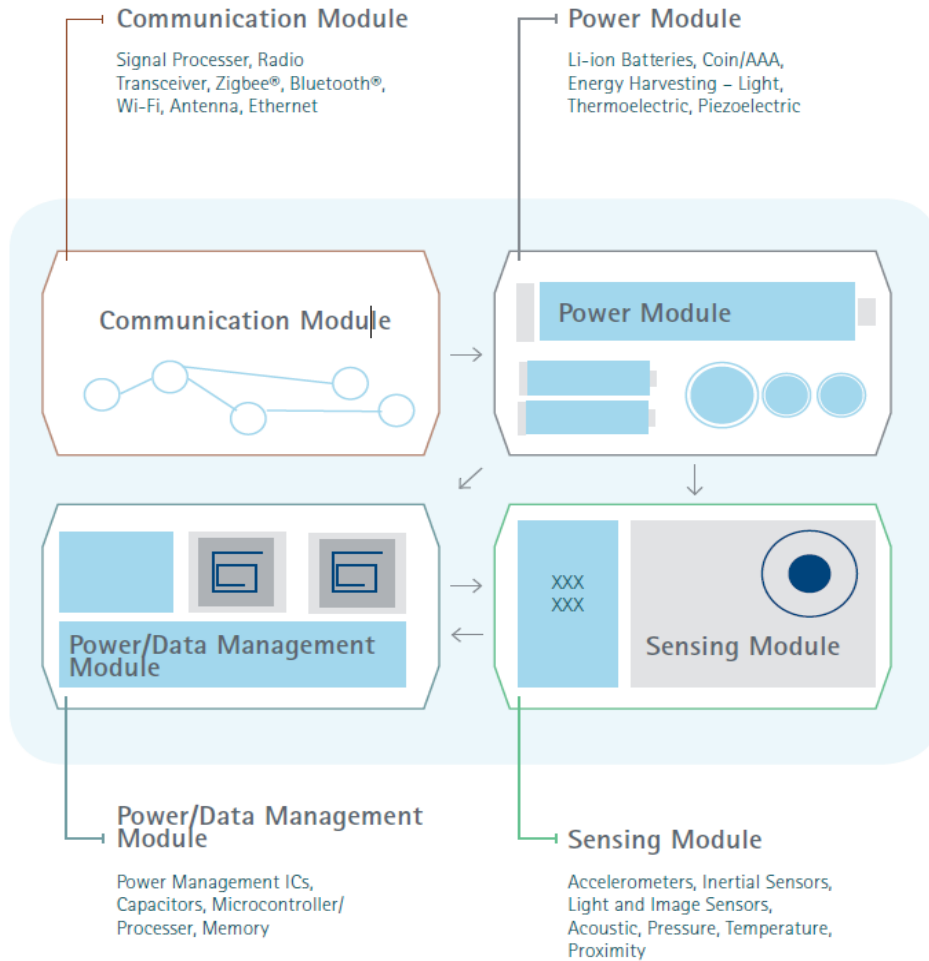
센서란 어떤 대상의 정보를 수집하여, 기계가 취급할 수 있는 신호로 치환하는 소자 및 장치를 말한다. 센서가 감지할 수 있는 정보는 움직임, 거리, 화학적 농도, 소음 등 물리적 신호 등으로 다양한데 이중 화학물질의 공기 중 노출수준 감지를 목적으로 하는 센서를 가스센서 또는 화학센서라고 한다. 실용화된 가스센서의 종류는 크게 반도체식, 전기화학식, 접촉연소식 및 광학식으로 구분할 수 있으며 사용하는 목적과 환경에 따라 감도, 선택성, 안정성, 반응속도 등을 검토하여 선택한다. 반도체식 센서(Semiconductor type)는 반도체 표면에 가스가 접촉할 때 나타나는 전기전도도의 변화를 이용하는데 제조가 간단하고 비교적 가격이 저렴하다는 특징이 있다. 전기화학식 센서(Electrochemical type)은 크기가 작고 전력소모가 적는데 구동 원리는 내장되어 있는 전극의 작용에 의해 CO, H₂S, Cl₂, SO₂ 등 측정대상 가스가 산화 또는 환원반응을 일으킬 때 발생하는 전류를 측정하여 가스 농도를 측정한다.

다. 접촉연소식 가스센서(Catalytic combustion type)는 가연성 가스 검출에 주로 사용되는데 백금선을 코일로 만들고 촉매(Pt, Pd 등)를 균일하게 분산시킨 알루미늄 나노입자와 같은 지지층에 넣은 것이다. 가연성 가스와 촉매가 접촉할 때 발생하는 반응열에 의한 백금코일의 전기적 저항 변화를 측정한다. 광학식 또는 비분산 적외선 방식 가스센서(Non-dispersive Infrared type, NDIR)는 적외선 흡수의 원리를 이용한 센서이다. 가스 농도와 흡수도 사이에 성립되는 Beer-Lambert 법칙을 이용하여 대기 중의 유해가스를 선택성 있게 검출할 수 있다(Lee JH, 2015). 각 가스센서 종류별 특징은 다음 표와 같다.

<표 2-4> 가스센서 종류별 특징

구분	반도체식	전기화학식	접촉연소식	광학식
크기	매우 작음	작음	작음	보통
구조	단순	보통	단순	복잡
민감도	높음	높음	보통	나쁨
선택성	나쁨	높음	나쁨	높음
반응속도	빠름	빠름	빠름	빠름
회복속도	빠름	빠름	-	빠름
가격	저렴	낮음	보통	비쌘
전력소모	낮음 (~100 mW)	-	보통 (~400 mW)	보통 (~500 mW)
활용도	단순감지	산업안전, 환경 (0~1,000 ppm)	가연성 가스 (0~100% LEL)	환경 (0.1~10 ppm)
대상가스	CO, NO ₂ , Alcohol, O ₂ 등	CO, H ₂ S, NH ₃ , HF, Cl ₂ 등	CH ₄ , C ₂ H ₆	CO, CO ₂

‘스마트’라는 단어에 대한 구체적인 정의를 내리기는 어렵지만 가스센서에 온보드 인텔리전스(On-board Intelligence)와 디지털 네트워크를 결합하여 통신이 가능한 것을 스마트 센서세트라고 할 수 있다(Rick Rys, 2018). 미국산업위생사 협회(American Industrial Hygiene Association, AIHA)에서는 센서를 이용한 근로자 건강 보호를 위한 기술자료에서 스마트센서의 구성을 감지 모듈, 통신 모듈, 전원 모듈, 관리 모듈로 구분하여 제시하였다(AIHA, 2016).



[그림 2-5] 스마트 센서 플랫폼 구성방안(AIHA, 2016)

최신기술연구를 통해 3M, BASF, Oracle, SAP, Microsoft, DuPont 등 우수 기업에 기술컨설팅을 하고 있는 ARC Advisory Group은 스마트센서가 산업 사물인터넷 (Industrial Internet of Things)의 발달과 함께 장치산업과 기존제조업에 적용이 확대되고 있으며 스마트센서의 교정과 요구사항을 정하기 위해 전기전자공학자협회 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)에서는 IEEE 1451.4 표준을 제정되었고 안전 및 공정제어 분야에 센서가 효과적으로 적용되기 위해서는 정확성, 보정, 신뢰성, 적시성, 보안성에 대한 신뢰가 필요하다는 점을 강조했다. 센서를 통한 정보에 따라 주요 공정 조작을 실시하기 전에는 Fail Safe Design 개념이 적용되어야 하며, 데이터 검증을 통한 유효성 확보로 시스템의 고장, 사고 발생이전 단계에서 스마트센서가 활용되는 방안에 대해 제시하였다,

산업안전 분야에서 유해화학물질의 수준을 빠르게 파악하여 그 정보를 근로자 건강보호에 활용하는 것은 중요하므로 센서가 부착된 직독식 장비를 활용하여 작업장 화학물질 수준을 신속하게 알기 위한 측정방식의 변화가 검토되었으나 직독식 장비는 통신기능이 없어 현장에서만 사용될 수 있다는 제한점이 있다(Siegel et al., 2019). 미국 국립 직업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)은 2008년 직독식 장비운영을 위한 계획안(Direct Reading Exposure

Assessment Methods, DREAM)을 수립하고 관련연구를 시작하였고 2014년에는 온라인 조직인 CDRST(Center for Direct Reading and Sensor Technology)를 설치하여 산업안전보건 분야에 스마트기술 도입 및 관련 연구를 지원하였다. 유해화학물질 감지에는 대상 화학물질에 대한 감도(Sensitivity), 선택성(Selectivity), 안정성(Stability), 반응속도(Response time) 등의 특성에 따라 반도체식(Semiconductor type), 전기화학식(Electrochemical type), 접촉연소식(Catalytic combustion gas sensor) 등 다양한 센서가 사용될 수 있다. SnO₂, ZnO, Fe₂O₃ 등의 금속산화물을 이용한 반도체식 센서는 반도체 표면에 가스가 접촉될 경우 전기전도도의 변화가 발생된다는 원리가 이용되었다. 온습도의 영향에 따라 센서의 반응속도나 회복속도가 떨어지며 특정가스를 검출하는 선택성은 낮으나, 감지대상 가스의 종류가 많고 제작이 쉽고 검출회로의 구성이 간단하다는 특성이 있고 소형화 및 장기안정성이 좋다. 전기화학식 센서는 대상가스가 내장되어 있는 전극의 작용에 따라 산화 또는 환원반응을 일으킬 때 발생하는 전자의 양(전류)를 측정하여 가스 농도를 감지하며 센서의 크기가 작고 구동 전력이 낮으며 선형성과 반복성이 좋다는 특성이 있다. 접촉연소식 또는 촉매식 가스 센서는 센서소자에 설치된 촉매가 가연성가스와 접촉할 경우 산소와의 반응이 일어나 발생하는 반응열에 따른 온도변화가 발생된다는 원리가 적용되었다. 온습도의 영향을 적게 받고 동작이 안정적이고 반복 측정에 대한 재연성이 좋다는 장점 때문에 가스검지기 등에 주로 사용된다(Lee & Lim, 2015). 작업장의 화학물질, 특히 유기화합물에서 발생하는 총휘발성유기화합물(Total Volatile Organic Compounds, TVOC)을 측정하기 위해 일본을 중심으로 광이온화식 센서(photoionization detector, PID) 적용 방안이 연구되었다(Hori et al., 2012; Hori et al., 2015). 광이온화식 센서는 단가가 높고 이온화 전위가 높은 화학물질에 대해 측정오류가 발생될 수 있으나, 정확한 측정값을 얻을 수 있다. 하지만 설치환경에 따라 공기 중의 먼지, 기름때 등 오염물이 센서에 부착될 수 있으므로 적절한 방법으로 주기적인 관리가 필요하다는 점 등이 지적되었다.

안전보건공단은 화학물질 취급이 많은 전자산업에서의 중소규모 전자사업장에 대한 IoT 기술을 이용한 TVOC 측정장비의 현장 적용 필요성 및 개발 방법에 대한 연구에 이어 화학물질 상시 모니터링시스템에 대한 시범구축(OSHFTI, 2019; OSHFTI, 2020)을 통해 스마트센서세트가 산업보건 분야에서 유해가스 노출의 예방과 관리에 기여할 수 있음을 보여주었다.

3. 전자산업 화학물질 중독

3.1 산업현황

전자산업은 국가경제의 핵심산업이며 최근 반도체, 이차전지 등을 중심으로 정부에서 ‘신성장 수출동력 확보 추진계획(관계부처합동, 2022)’을 발표하는 등 정책적으로 지원이 되고 있는 산업이다. 과거 전자공업진흥법에 따르면 전자산업이 ‘전자관, 반도체 소자 또는 이와 유사한 부품을 사용하여 전자의 운동과 그 특성을 응용하는 기계·기구 제조 사업’으로 정의되었으나, 최근에는 정보통신기술을 활용한 IT산업까지 포함하여 ‘정보통신과 관련된 제품을 개발·제조·생산 또는 유통하거나 이와 관련한 서비스를 제공하는 산업’으로 정의하고 있다(정보통신산업진흥법). 우리나라 전자산업의 발전은 태동기, 기반형성기, 도약기, 고도화기 등으로 구분될 수 있다. 주요 생산품인 반도체, 무선통신기기, 평판 디스플레이, 컴퓨터, 가전 등의 제품군에서 세계 정상권을 차지하고 있다(임원혁 등, 2016). 코로나-19로 인한 세계적인 경제 침체에도 데이터 스토리지, 비메모리반도체, 핸드폰, 노트북 등의 4차 산업 기술시대로 전환에 따른 디지털 디바이스 수요로 산업의 발전과 생산 증가가 꾸준히 이어지고 있다. 국정모니터링시스템(index.go.kr)에서 확인된 우리나라 10대 수출품목 및 수출액 자료 분석결과 전자산업에서 생산되는 품목 중 반도체, 디스플레이, 무선통신기기, 컴퓨터 등 3~4개 품목은 10대 수출품목에 지속적으로 포함되고 있으며 이들 품목의 수출액은 2022년 기준 전체 수출액의 28.3%, 10대 품목 수출액의 50.1%에 해당되고 있다.

<표 3-1> 2019~2021년 10대 수출품목과 수출현황 [단위 : 백만불]

구분	2019년		2020년		2021년	
	품목명	금액	품목명	금액	품목명	금액
1위	반도체	93,930	반도체	99,177	반도체	127,980
2위	자동차	43,036	자동차	37,399	자동차	46,465
3위	석유제품	40,691	석유제품	24,168	석유제품	38,121
4위	자동차부품	22,535	선박해양구조물 및 부품	19,749	합성수지	29,144
5위	평판디스플레이 및 센서	20,657	합성수지	19,202	선박해양구조물 및 부품	22,988
6위	합성수지	20,251	자동차부품	18,640	자동차부품	22,776
7위	선박해양구조물 및 부품	20,159	평판디스플레이 및 센서	18,151	철강판	22,494
8위	철강판	18,606	철강판	15,997	평판디스플레이 및 센서	21,573
9위	무선통신기기	14,082	컴퓨터	13,426	컴퓨터	16,816
10위	플라스틱 제품	10,292	무선통신기기	13,184	무선통신기기	16,194

(자료 : 국정모니터링시스템(e-나라지표) 관세청 수출통관자료(index.go.kr), 2023)

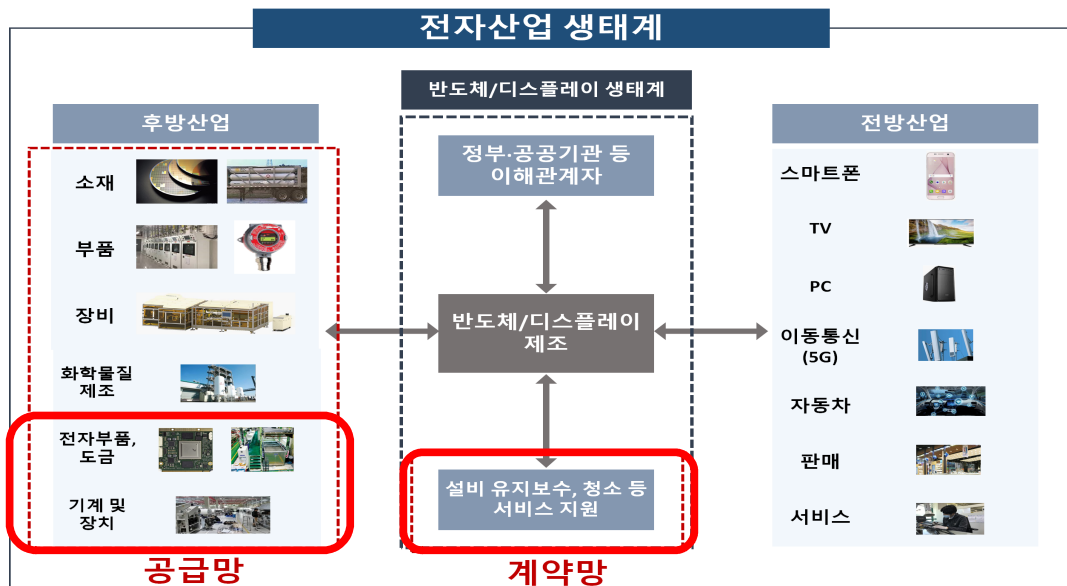
이렇듯 국가경제의 큰 부분을 담당하는 전자산업의 획기적인 발전에는 많은 산업 재해로 인한 피해도 뒤따랐다. 전자산업의 산업재해자 수는 다른 산업에 비해 많지는 않으나 국민적 관심도가 높아 산업재해가 발생되면 사회적 이슈로 발전한다는 데 특징이 있다. 2007년 백혈병으로 사망한 故황유미씨(당시 23세)의 경우 대기업을 대상으로 유족, 시민단체의 10년이 넘는 보상 및 재발방지대책을 요구하는 사회적 갈등이 있었고 이로 인해 전자산업 안전보건에 대한 많은 연구와 활동 등 변화가 있었다(Park, 2019; Kong, 2012).

<표 3-2> 2017~2022년 전 업종, 제조업, 전자제품 제조업 산업재해 발생현황 [단위 : 명, %]

구분	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년
전업종	89,848	102,305	109,242	108,379	122,713	130,348
제조업	25,321 (28.2)	27,377 (26.8)	29,274 (26.8)	28,840 (26.6)	31,709 (25.8)	31,554 (24.2)
전자제품 제조업	1,392 (5.5)	1,512 (5.5)	1,701 (5.8)	1,725 (6.0)	1,914 (6.0)	1,941 (6.2)

전자제품 제조업의 산업재해는 전체 제조업 대비 5~6%이나 최근 지속적으로 증가하고 있다<표 3-2>. 전자산업에서의 산업재해 중 가장 사회적 이슈가 되고 있는 것은 화학물질 노출로 인한 중독문제이다. 반도체 등 전자산업은 정밀한 부품이 사용되며, 공정의 불순물 관리가 엄격하며 노동집약적이라는 생산특성이 있다. 이에 따라 부품 및 제품에 대한 세척공정, 납땜 등을 이용한 조립공정, 정밀 부품의 가공공정 등에서 다양한 화학물질 사용은 필수적인데 이러한 작업과정에서의 화학물질 관리가 부적절한 경우 집단으로 중독사고가 발생할 수도 있다. 특히 반도체, 휴대폰, 디스플레이, 배터리 등의 전자제품 제조는 기술개발속도가 빠르며 다른 나라와의 기술 초격차로 인해 다양한 화학물질이 제품성능을 높이기 위해 시험 및 연구되고 있다. 우수한 생산성능, 즉 강한 작용력을 지닌 화학물질이 적절한 관리 없이 현장에 사용되어 직업병 발생으로 이어져 사회적 이슈가 되고 있다. <표 3-3>과 같이 전자산업에 대한 다양한 법적 정의가 있을 수 있으나, 본 연구에서는 제품의 생산과정에서 발생하는 안전보건에 초점을 맞추기 위하여 전자산업을 반도체, 디스플레이 및 핸드폰, TV, 냉장고 등 기타 전자제품 등을 제조하는 산업으로 정의하고자 한다. 이는 한국표준산업분류에 따른 중분류 26(전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업), 27(의료, 정밀, 광학기기 및 시계 제조업), 28(전기장비 제조업)과 29(기타 기계 및 장비 제조업) 중 일부(29171, 29172, 29180, 29222)가 이에 해당된

다. 이러한 기준으로 볼 때 전자산업의 규모는 2020년 기준 사업장 수는 53,811개로 전체 사업장의 약 2%를 차지하며 종사자는 914,017명으로 전체 근로자의 약 4%에 해당된다. 생산품과 기업규모에 따라 대기업이 중심이 되어 반도체, 디스플레이 등 수출 주력제품을 생산하는 주요 전자산업 사업장과 전자부품 등 중소기업 사업장이 중심인 기타 전자산업 사업장으로 세분화될 수 있다. 하지만 전자산업은 제품 생산을 위해 다양한 주변 산업과 밀접하게 관련 되어 있어 하나의 생태계를 유지하여 성장하고 있다. 즉 [그림 3-1]과 같이 엔드유저가 사용하는 제품을 생산하는 대형 제조사에 소재, 부품, 장비, 사용되는 화학물질 등을 제조, 가공하는 후방산업과 판매, 서비스하는 후방 산업이 가치사슬(Value chain)로 연관되어 있다(미래전문기술원, 2020). 다양한 사업그룹 중 PCB기판 등 전자부품을 직접적으로 생산하거나 제품 본체나 부품 등에 대한 도금, 세척가공 사업장 등 사외 n차 협력사업장이나 원청 내에서 기기 세척, 부품가공, 장비 오버홀, 유지보수 등 화학물질 다량 취급 공정 등에 종사하는 사내 협력업체 등이 화학물질 중독사고의 취약한 부분이다.



[그림 3-1] 전자산업 생태계

<표 3-3> 전자산업에 대한 다양한 법적 정의

구분	내용
전자공업진흥법	전자관·반도체소자, 기타 이와 유사한 부품을 사용하여 전자의 운동과 특성을 응용하는 기계·기구를 제조하는 사업
한국고용정보원 (2018 상반기 주요업종 일자리 전망)	전자, 전기, 제어, 정보기술과 관련된 지식을 바탕으로 기획·개발·생산·영업기술을 적용하여 휴대폰, 반도체, 디스플레이패널, 대형가전 등의 제품 및 기술을 구현·보급하는 산업
전자산업	반도체 등 전자부품, 가전, 통신, 의료기기 등 제품 제조업 및

인적자원 개발위원회	소프트웨어, 통신서비스, 디지털콘텐츠 개발 산업 등
한국표준 산업분류	26.전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업, 27.의료, 정밀, 광학 기기 및 시계 제조업, 28.전기장비제조업, 29.기타 기계 및 장비 제조업의 일부
ICT통합분류	정보통신방송기기업 *방송통신발전기본법과 정보통신산업진흥법에 따라 과학기술정보통신부에 분류한 분류체계로 제조업(=한국표준산업분류 26), 서비스업(도매업, 임대업, 수리업 등) 등으로 분류할 수 있음
고용노동부 (사업종류별 산재보험료율)	224.전기기계기구, 전자제품 및 정밀기구 제조업 중 일부 *한국표준산업분류 26, 27, 28을 포함하고 있음
한국전자정보 통신산업진흥회	한국표준산업분류 26.전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업, 27.의료, 정밀, 광학 기기 및 시계 제조업, 28.전기장비제조업, 29.기타 기계 및 장비 제조업의 일부
한국산업기술 진흥원	한국표준산업분류 26.전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업, 27.의료, 정밀, 광학 기기 및 시계 제조업, 28.전기장비제조업, 29.기타 기계 및 장비 제조업의 일부

3.2 안전보건특성

전자산업은 기술변화의 속도가 빠르고 기술경쟁이 심하다는 산업 특성으로 인해 유해성이 명확히 밝혀지지 않은 다양한 유해·위험요인에 노출되고 있다. 그동안 발생된 산업안전보건 이슈는 화학물질에 의한 백혈병 등 직업성 암, 화학물질 누출, 메탄올 중독으로 인한 실명 등으로 주로 화학물질에 의한 산업재해가 주를 이루고 있다. 전자산업 중 반도체 제조업의 클린룸공정 중심의 안전보건 조사결과에 따른 산업안전보건연구원 자료집(반도체산업 근로자를 위한 건강관리 길잡이, 2012)에 따르면 반도체 사업장에서는 화학물질에 의한 다양한 건강영향이 있다고 밝혔다. 안전보건 확보 속도보다 기술변화 속도가 더 빠른 특성으로 인해 실험실연구 근로자의 직업성 암 문제, 인덱스 등 법으로 관리방안이 정해지지 않은 물질로 인한 건강장해 문제가 지속적으로 논란이 되고 있다. 전자산업의 또 다른 특징은 대기업중심의 산업구조이다. 기술의 복잡성과 보안특성으로 주요 대기업을 중심으로 하는 중소 제조업 등의 원청 의존도가 높으며 다단계 하청구조가 타 산업에 비해 심화되어 있다. <표 3-4>에서 보듯이 제조업 전체에 비해 3차 이상 거래비율이 높고 수급기업 비중 또한 높다. 이러한 심화된 하청구조로 하청기업의 자체 안전보건 인프라 확보가 어려운 상황이고 보안문제로 인해 안전보건 협업도 쉽지 않은 상황이다. 또한 전자산업은 제품 제조 뿐 아니라 건설, 서비스업 등 다양한 업종이 복합적으로 구성되어 상호간에 유기적으로 작용을 하고 있다.

<표 3-4> 제조업 중소기업의 수급비중 및 거래단계 현황

[단위 : %]

구분	수급기업 비중	거래단계현황		
		1차	2차	3차 이상
제조업	50.6	20.5	29.6	50.0
전자부품, 컴퓨터, 영상장비 제조업	51.1	14.6	18.2	67.2

(자료 : 2021년 기준 중소기업실태조사결과, 중소기업중앙회, 2022)

3.3 선행연구

전자산업 안전보건에 관한 연구와 활동은 주로 국내 반도체 제조업의 직업성 암, 생식독성 등과 관련되어 박동욱, 윤충식, 박승현 등 산업위생 전문가, 강성규, 공유정옥 등 산업의학 전문가, 임자운 등 법률 전문가, 이종란 등 노동 활동가 등 다양한 분야 전문가가 중심이 되어왔다. 미국 또는 대만의 반도체산업과 관련된 트리클로로에틸렌 등 화학물질에 의한 건강장해 등 국외 연구결과들도 있다. 다양한 분야의 연구결과 중 이번 분석대상은 연구목적에 따라 전자부품 제조 등 중소기업 하청 사업장의 현장 화학물질 노출관리를 중심으로 하는 전자산업 전반에 대한 주요 연구결과를 중심으로 조사하였다.

<표 3-5> 검토된 선행연구 목록 및 연구개요

제목	저자 (연구연도)	연구개요
반도체 제조업 작업환경관리 매뉴얼 개발 연구	박승현 등 (2012)	<ul style="list-style-type: none"> - 2009년에서 2011년까지 우리나라 반도체 제조기업을 대상으로 조사연구된 '반도체 제조 사업장에 종사하는 근로자의 작업환경 및 유해요인 노출특성 연구'를 바탕으로 하여 반도체 제조업에 종사하는 근로자 건강을 보호하기 위해 적용이 가능한 작업환경관리 방안을 연구 - 반도체 제조공정을 주요 공정별 특성에 따라 세부 분류하고 각 공정별 유해요인과 그 노출 특성, 작업환경관리 방안을 검토하여 작업환경관리를 위한 매뉴얼 작성
화학물질 직종 및 임무별 매트릭스에 대한 리스크	하권철 등 (2008)	<ul style="list-style-type: none"> - 2005년 작업환경측정 자료를 바탕으로 화학적 유해인자 6종에 대해 직종별 임무별 매트릭스 설정 - 고위험 화학물질에 대한 매트릭스별 관리 문제점 파악. - 관리실태를 조사하여 업종 및 공정별로 유해도 평가기법

평가 연구		<p>적용 가능성을 검토.</p> <ul style="list-style-type: none"> - 작업환경 중의 노출 프로세스 및 집중관리가 필요한 우선 순위에 따른 표준모델 개발 - 노출 매트릭스를 통한 화학물질 관리의 추후 활용 방안에 대한 검토
전자산업의 보건관리 실태조사 및 노동자 보호방안 마련 - 반도체 제조업 중심	손미아 등 (2018)	<ul style="list-style-type: none"> - 국내 전자산업(반도체 제조업)의 최신동향 및 고용실태, 안전보건관리체계 실태, 건강영향평가 실시 - 전자산업 노동자에 대한 건강보호방안 제시 - “안전보건관리 전담기구”의 조직 및 역할 등을 제안
전자산업 안전보건 실태조사 및 안전보건정보 전달	정혜선 등 (2019)	<ul style="list-style-type: none"> - 전자산업의 안전보건관리 실태를 조사하여 전자산업에 안전보건정보를 전달하고, 산재예방 서비스 효과를 제고하기 위한 합리적인 안전보건 정책을 제안하고, 전자산업의 효과적인 산업재해 예방사업을 제시 - 전자산업의 안전보건에 영향을 미칠 수 있는 잠재적인 요소인 경영시스템, 고용구조, 근로조건, 노동정책 및 조직문화, 안전보건의 5가지 영역에 대해 실태조사를 하고, 모니터링을 실시

반도체 제조공정에서 발생하는 작업장 유해요인에 관한 연구를 수행한 박승현 등 (2012)은 반도체가 웨이퍼 가공과 조립이라는 여러 단위공정으로 이루어지며, 이때 다수의 화학물질과 설비들이 사용된다고 보고하였다. 사업장에서는 국제 반도체 장비 및 재료협회가 제시한 안전지침을 따르고 있지만, 주로 설비의 안전성에 관한 것이어서 근로자의 건강보호에 적용하기 어렵다고 지적하였다. 조사결과에 따라 각 공정마다 다른 유해요인에 노출되는 특징을 고려하여 근로자의 작업환경을 개선할 수 있는 매뉴얼을 개발하고 보급하였다. 매뉴얼의 주요 내용은 화학물질 취급근로자에 대한 건강관리, 장비의 유지보수(Preventive maintenance, PM)작업에 대한 급성중독 사고 예방 등으로 다음과 같다.

○ 대부분 자동화된 공정으로 이루어진 반도체 제조공정 중 일부 수동으로 작업해야 하는 경우에 대해 특별한 관리가 필요하다.

○ 부품을 세척하거나 교체하기 위한 PM작업을 할 때 세척액, 잔류되어 있는 가스, Byproducts 등에 노출될 수 있으므로 장비 안의 잔류물질을 잘 배기하고 개인보호구를 착용해야 한다.

○ 용액을 보충하거나 배관을 점검하는 과정에서 화학물질이 누출되어 급성중독 사고가 일어날 수 있으므로 PM작업을 안전하게 할 수 있는 방법을 따라야 한다. 특히 PM작업은 대부분 협력업체의 근로자들이 수행하기 때문에 협력업체의 근로자들도 건강관리 교육과 작업관리를 잘 받아야 한다.

○ 법적으로 관리해야 하는 유해인자는 아니지만 자극성이나 독성이 있는 물질도 많이 사용되기 때문에 화학물질 취급 근로자들의 건강관리도 필요하다

○ 일부 공정에서는 벤젠이나 포름알데히드, 비소 같은 발암물질이 부산물로 나올 수 있는데, 이런 경우에는 장비의 커버를 열거나 반응 챔버(Chamber)를 열 때 보호구를 착용하고 잔류물질을 배기하고 국소배기장치를 사용해서 근로자가 발암물질에 노출되지 않게 해야 한다.

○ 이온주입장비는 웨이퍼에 입자를 주입할 때 전리방사선이 나오고, 조립라인 검사공정에서는 X-선 검사 장비를 사용해서 제품을 검사해야 한다.

○ 전리방사선에 노출될 수 있는 공정에 근로자가 일하게 되면 방사선 관리구역을 정해서 운영해야 하고, 관리구역에는 방사선량 측정용구를 착용하라고 하고 방사선 업무에 주의할 점들을 근로자가 볼 수 있는 곳에 게시해야 한다. 이때 장비의 인터록장치는 근로자가 임의로 해체 또는 제거하지 못하게 해야 한다.

화학물질 직종 및 임무별 매트릭스에 대한 리스크 평가 연구(하권철 등, 2008)는 화학물질을 취급하는 근로자에 대해 직종 및 임무별로 매트릭스를 구성하여 그 리스크를 평가함으로써 체계적인 화학물질 관리에 기여하기 위해 수행되었다. 직종(Job title)과 임무(Task)를 통해 파악되는 노출 정도를 추정하는 ‘노출 매트릭스’를 이용하여 근로자가 유해물질에 노출되는 수준을 측정하였고, 산화에틸렌, 휘발성 콜타르 피치, 곡물분진, 디클로로메탄, 2-메톡시에탄올, 초산 2-메톡시에탄올 등 6종의 유해인자에 대해 직종별 임무별 유해도 매트릭스를 설정하였다. 설정된 매트릭스별로 유해인자의 유해성, 노출가능성, 노출시간 등을 고려하여 각각의 리스크를 평가하였다. 고위험 직종 및 임무에 대한 현장조사 결과를 통해 화학물질 취급실태를 파악하여 문제점 등을 도출하여 우선순위별로 체계적이고 집중적으로 관리할 수 있는 노출 범주 관리(Control banding)와 연계한 표준 모델을 개발함으로써 현장 관리자가 화학물질을 효과적으로 관리할 수 있는 방안을 제시했다는 데 의미가 있다.

손미아 등(2018)은 반도체 제조업 사업장, 중소기업 협력업체, 관련 협회, 국내외 시민단체 등 전반적인 이해관계자에 대한 면담 및 현장조사를 통해 전자산업의 보건관리 실태를 조사하였다. 특히 파견, 기술용역, 사내 하도급(협력업체)을 활용함에 따라 하도급업체 근로자의 처우개선과 안전보건에 대한 고려가 필요하다고 지적하였다. 아울러 현재 산업안전보건법에 의해 작업장에서 시행되고 있는 작업환경측정, 위험도조사, 특수검진, 보건관리대행 등의 산업보건 서비스가 일부에서는 단편적 준수 또는 이행에 치우쳐 있었음을 밝히며 사업장 산업보건의 올바른 방향 설정을 위한 산업안전보건 감독의 역할이 중요하다고 주장하였다. 5년간(2013~2017)의 반도체 제조업 작업환경측정 자료를 분석한 결과, 산업안전보건법에 규정된 “작업환경측정 대상물질”에 속하지 않은 “영업비밀물질”의 노출평가를 전혀 진행하지 않고 있다고 밝혔다. 연구에서는 하도급(협력)업체의 화학물질 중독 재해에 대해서도 언급되었는데 청소, 시설유지보수, 실험실, 약품이동, 생산 등의 작업에서 중독재해가 발생하였으며 이러한 문제 해결을 위해 하도급업체 노동자들의 안전보건관리모델 개발, 작업환경개선 및 직업성질환 및 산업재해 예방대책 수립, 사업장 단위 맞춤형 안전보건관리프로그램 개발, 안전보건전문가 양성을 제안하였다. 이러한 반도체 제조업 산업안전보건 관리를 총괄하기 위해 전담기구 조직을 제시하기도 하였다.

정혜선 등(2019)은 전자산업 종사자에 대한 안전보건관리 실태를 조사하여 사회적 약자의 안전보건관리 불균형을 해소하기 위한 방안 마련연구를 수행한 결과 국내 반도체 및 디스플레이 산업은 대기업 중심으로 구성되어 있어 협력업체 안전보건에 관한 대기업의 관리와 지원이 필요하다고 주장하였다. 연구에서는 과거 10년간 산업재해통계를 분석하여 소규모 전자산업 사업장에서 업무상 질병 발병률이 높고, 뇌심혈관질환으로 인한 재해율이 높았으며, 사망비율이 제조업보다 높게 나타났다고 밝혔다. 이에 대한 해결을 위해 화학물질 관리, 근골격계질환 관리, 야간교대작업에 대한 관리가 주요 추진방안으로 제시되었다. 중소기업 사업장의 안전보건 실태 현장조사 결과, 규모별로는 소규모 사업장의 위험도가 높다는 점, 위험도가 높은 공정은 납땜, 솔더링, 용접, 조립 등이며 국소배기장치 설치 비율이 낮다는 점, 관리대상유해물질, 특별관리물질 취급에 사업주의 주의가 필요하다는 점을 지적하였다.

3.4 주요 사고사례

3.4.1 노말렉산 다발성말초신경병증

2004년 12월 태국 여성근로자 8명에게서 ‘얇은뱅이병’이란 직업병이 발견되었다. 여기서 ‘얇은뱅이병’이란 다발성 말초신경병증(Peripheral poly-neuropathy)을 말하며 화학물질 노출, 바이러스, 약물, 선천적요인 등의 원인으로 신체 여러 부위의 말초신경에서 동시에 발생하는 병증으로 감각이 마비되거나 움직이지 못하게 되는 것을 말한다. 이 근로자들이 근무한 곳은 경기도 화성시에 위치한 (주)동화디지털이란 액정디스플레이(Liquid-crystal Display, LCD)와 디지털 다기능 디스크(Digital

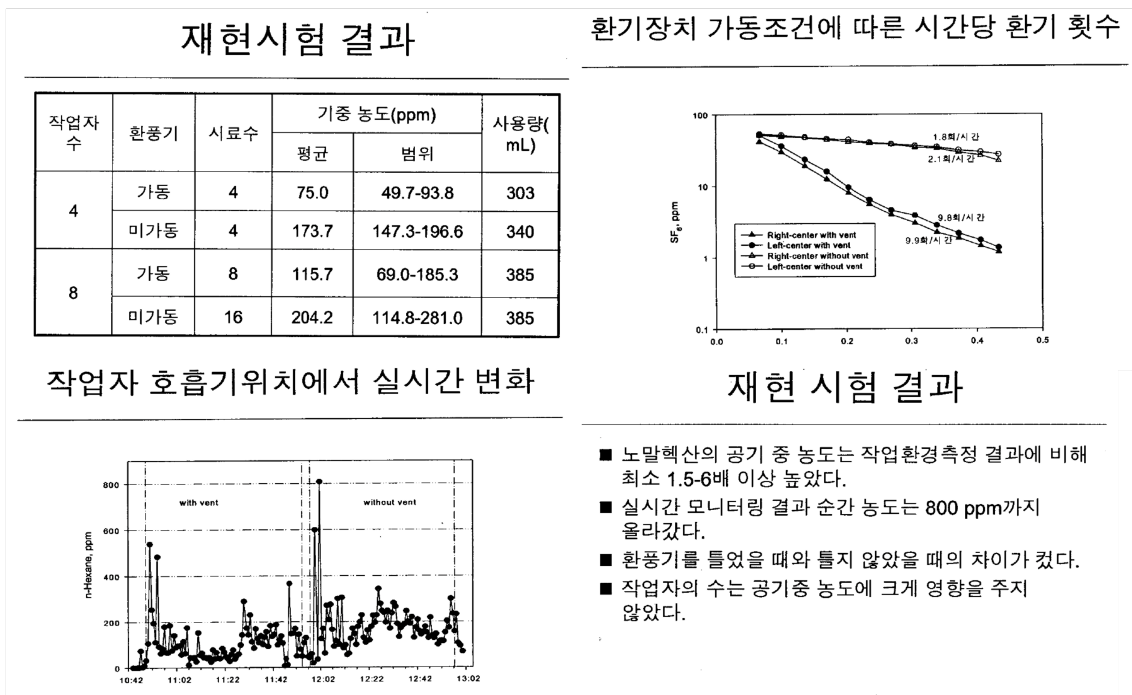
Versatile Disk, DVD) 등의 전자제품 제조업체였으며 당시 작업했던 공정은 대기업에 납품되는 노트북의 플라스틱 틀(백라이트)에 대한 세척공정이었다. 사출된 플라스틱 틀에 묻은 얼룩, 때 등의 불순물을 세척제로 닦은 후 포장하는 작업을 수행하였으며 사용된 세척제는 노말헥산(n-Hexane, CAS No. 110-54-3)이었다. 작업공간은 폭 3.5m, 길이 8~9m, 높이 2.5m로 약 9평의 공간에서 최대 8명의 근로자가 작업을 하였다. 오전 8시 30분부터 오후 11시에서 12시까지 작업했고 때로는 새벽까지 작업을 했으며 휴일은 월 1회 주어졌다. 작업장 내에 환풍기가 2개 설치되어 있었는데 먼지발생으로 인한 불량 등으로 사용을 꺼려서 실제 가동여부는 확인이 어려웠고, 에어컨도 설치되어 있었다. 재해자는 태국에서 온 불법 이주노동자들이었으며 일부는 2003년 10월부터, 대부분은 2004년 중반부터 작업을 시작하였다. 세척작업은 당초 옥외 작업장에서 수행하였으나 2004년 2월에 건물이 신설되어 실내 작업으로 변경되었다. 2005년 9~10월경 초기 증상자가 발견되어 3명은 사업주에 의해 태국으로 귀국조치 되었고 5명은 2004년 12월 입원하여 2005년 1월 언론에 보도되었다(LCD작업장 타이노동자 집단'얕은뱅이병', 한겨레 2005.1.12.). 언론보도에 따르면 보호구를 지급받은 사실은 없으며 작업하다 어지러워 쓰러져도 잠시 쉬었다가 작업에 복귀했다고 한다.



[그림 3-2] 병실에 모인 피해 근로자들(한겨레)

이 사고의 직접적인 발생원인은 인체에 유해한 화학물질을 취급하는 작업장에 유해물질의 배출을 위한 국소배기장치가 설치 및 가동되지 않아 고농도의 유기용제에 노출된 것이다. 2004년 옥내 작업장으로 이전하는 과정에서 유해물질의 유해성, 사용량, 작업방법 등에 따른 적절한 환기방안이 검토되지 않았고 작업 시 환기팬(Fan)도 적절히 가동되지 않는 등 부실한 작업환경관리로 인해 작업에 따라 발생한 노말헥산 증기가 작업 공간 내에 고농도로 존재하여 주로 작업자의 호흡기를 통해 노출되었다. 실제 사고발생 이후 2005년 2월 안전보건공단에서 유사조건으로 재현실험을 실시한 결과 환풍기를 가동한 경우 노말헥산의 공기 중 농도는 최대 평균 115.7ppm, 환풍기를 가동하지 않을 경우는 최대 평균 204.2ppm이었고 50초 간격으

로 실시한 실시간 모니터링 결과에서는 최대 800 ppm 수준으로 나타났다. 이러한 수치는 당시 노말렉산 작업장 노출기준(8시간 TWA 50 ppm)을 초과하는 수준이며 연구진은 공간 내 작업자의 수 보다 환풍기의 가동여부가 노말렉산 농도에 미치는 영향이 더 컸으며 실내 에어컨 가동은 화학물질 확산에 부정적인 영향을 미치는 것으로 지적하였다. 유해물질을 외부로 배출시키거나 깨끗한 공기를 유입시키는 환기 팬이 없이 실내 에어컨만 가동할 경우에는 화학물질로 오염되어 있는 내부공기만 순환되고 게다가 공기냉각과정 중 수분이 제거되므로 노말렉산의 확산과 증발을 촉진시킬 위험이 있다.



[그림 3-3] 노말렉산 노출 재현실험 결과(강성규, 2005)

작업장 환기라는 직접적인 원인 외에도 이 사고 발생에는 다양한 기여요인이 존재한다. 첫 번째는 화학물질에 대한 무지이다. 언론에 따르면 공장장은 노말렉산을 정전기로 인한 화재 위험이 없는 ‘친환경’ 세척제로 알고 있었다고 하였다. 하지만 노말렉산으로 인한 중독사고는 이미 전 세계적으로 반복적으로 발생된 바 있다. 1960년대 초 일본 비닐센들 제조공장에서 노말렉산이 70% 함유된 접착제 사용에 따라 1,662명 중 93명에게서 말초신경염이 집단 발생된 이후 휴대폰 케이스 제조공장(일본), 인쇄공장(대만), 지갑공장(폴란드) 등에서 집단적으로 중독사고가 발생되었다. 우리나라에서도 1974년 신발공장 근로자 17명 중 13명의 말초신경염 환자가 발생되었고 2002년 안산 반월공단 액정표시장치(LCD) 부품회사의 중국인 근로자 3명이 노말렉산으로 인한 다발성 신경장애로 산재보상을 신청하여 2003년 전국적인 역학조사가 실시된 바 있다. 세척제의 성능과 함께 유해성에 대해 사업주 및 관리자가 알고 적절한 조치를 하는 것은 화학물질로 인한 건강장해 예방의 기본이나 당시 사업주는 작업환경에 대해서 무관심했다. 관련 업무는 현장과장과 공장장만 담당했

다고 했으나 현장 책임자라고 할 수 있는 공장장도 그 유해성을 몰랐던 결과 물질 안전보건자료(Material Safety Data Sheet, MSDS) 제공에 대한 확인, 경고표지 부착, 안전보건 교육실시 등이 적절히 이루어지지 않게 되었다. 두 번째는 부적절한 작업 관리이다. 당시 전자제품의 기술변화와 생산 증가로 플라스틱 재료의 수요가 많아 짐에 따라 유기용제를 사용한 세척작업의 업무량 또한 증가되고 관련 생산시설은 확대되었으나 적절한 관리가 따르지 않는 않았다. 일일 근무시간이 15시간가량으로 과중하고 주휴일도 적정히 지켜지지 않는 등 화학물질 노출 시간이 길었다. 당시 작업환경측정결과 또한 54~59ppm으로 높은 수준이었으나 작업환경측정기관, 보건대행기관 등의 예방조치나 건의는 이루어지지 않았다. 재현실험결과를 통해 미뤄볼 때 작업환경측정결과보다 당시 현장 노출수준은 더 높았을 것은 타당한 추측이나 이러한 기관들의 조치가 이루어지지 않은 요인 중 하나는 노말hex산의 특성일 것이다. 노말hex산은 지방족 탄화수소로 냄새의 역치가 벤젠 등 방향족 탄화수소보다 높다. 재현 실험 당시 200ppm 가까운 농도에서도 참여자가 악취를 느끼지 않았다고 할 정도이어서 측정기관, 대행기관 등이 간과했을 가능성이 높다. 또한 안전보건 대행관리의 한계와 작업환경 측정비용을 사업주가 지급하는 현실을 고려할 때 적극적 예방활동에는 한계가 있을 수 있을 것이다. 하지만 의사, 간호사, 위생기사, 안전대행기관 등의 안전보건전문가가 40여 차례 이상 현장을 방문했으나 이러한 위험요인이 지적되지 않은 사실은 당시 작업환경관리의 사각지대가 있었음을 알려주고 있다. 세 번째는 작업자의 특성이다. 불법체류자라는 약점에 따라 특수건강진단에서도 제외되는 등 적절한 관리조치를 받지 못하고 유해화학물질에 노출된 상태에서 장시간 노동을 견뎌야 했다. 또한 초기 증상이 발생된 3명의 근로자는 사업주에 의해 본국으로 보내지는 등 부적절한 대우를 받아야 했다. 물질안전보건자료 등 안전자료나 교육기회가 주어지더라도 이해가 어려운 상황이었다.

3.4.2 트리클로로에틸렌 중독

트리클로로에틸렌(Trichloroethylene, CAS No. 79-01-6)은 주로 금속제품 제조업에서 탈지(금속표면의 유분기를 제거하는 것), 섬유 세척과 염색 및 피혁 제조 시 지방제거 등에 사용된다. 쉽게 발화하지 않으며 화학적으로 안정되어있다는 장점으로 전기전자, 금속, 항공, 염색, 방직 등 다양한 산업에서 사용된다. 하지만 휘발성이 강하고 지용성이기 때문에 호흡기와 피부를 통해서 쉽게 흡수될 수 있는 위험성이 있다. 트리클로로에틸렌의 가장 대표적인 독성은 중추신경계 억제 작용이며 부정맥, 급성 간독성, 급성 신부전, 폐부종, 호흡곤란, 시력장애, 오심, 구토, 피부증상 등의 증상이 있다. 100ppm이상의 고농도에서 노출될 때 탈지성능에 따른 자극으로 피부가 트거나 붉게 변하는 홍반 등이 생길 수 있다. 이러한 복합적인 독성증상으로 인해 스티븐슨존슨증후군, 호흡부전, 신경정신증상 등의 질병과 중독되어 넘어지거나 쓰러짐에 따른 부상 또는 사망, 고농도 노출에 따른 사망 등의 사고 등 다양한 형태의 산업재해가 발생되었다. 중증 다형홍반(Erythema multiforme major)라고 불리는 스티븐슨존슨증후군(Stevens-Johnson Syndrome, SJS)은 피부와 점막의 심한 부종

과 손상을 일으키는 질환이다. 스티븐슨존슨증후군의 원인은 잘 알려져 있지 않으나 감염, 약물, 화학물질, 전신질환 등에 의해 발생하는 것으로 추정되며 스티븐슨존슨증후군을 유발시키는 대표적인 화학물질은 트리클로로에틸렌, 니켈, 코발트, 포름알데히드, 살충제, 에폭시레진 등으로 알려져 있다. 초기 피부증상이 있을 후 타깃 모양(Target shape) 또는 홍채 모양(Iris shape)의 홍반이 여러 부분에 생겼다가 수포형 형태로 변한다. 특징적으로 구강의 점막에도 수포가 생기는 구내염으로 음식물섭취가 어려워진다.

가. 사례 1

51세 남성 근로자가 2002년 8월부터 트리클로로에틸렌을 이용한 세척작업에 종사하여 입사 1개월 만에 다형홍반과 독성간염이 나타났고 그해 10월, 즉 입사 2개월 만에 사망하였다. 해당업체는 스테인리스 강판을 절단 및 표면가공 처리하여 수저나 젓가락 등 반가공 금속제품을 생산하는 업체이며 작업시간은 08시30분부터 17시30분까지 이고 일요일에 휴무하였다. 재해자는 주로 세척작업을 실시하였으며 세부 작업내용은 샴링기로 재단된 스테인리스 강판을 세척기에 넣었다가 호이스트를 이용해 꺼내는 것이다. 동료작업자에 따르면 스테인리스 강판을 손으로 집어넣었다가 세척이 끝나면 허리를 굽혀 짐게로 건져내는 방법이었으며 세척기에 배기장치 등은 설치되지 않고 연마실에는 30마력짜리 환풍기만 설치되었다. 세척작업시간은 깨끗한 트리클로로에틸렌의 경우 약 1분, 사용하던 트리클로로에틸렌은 5분가량 소요되었으며 통상 1일 5회 세척작업을 하였다. 작업상 가장 취약한 부분은 제품을 넣거나 빼낼 때 세척조에 상체를 구부려 접근해야 하므로 호흡기나 피부에 직접적으로 최대 수백 ppm 수준의 트리클로로에틸렌에 노출될 수 있다는 점이다. 트리클로로에틸렌은 드럼통으로 입고하여 작업장 한쪽에 보관하였으며 작업자가 직접 쏟아 붓는 등의 방법으로 세척조에 보충하였다.

2002년 9월에 식욕저하, 오한 증상이 나타났고 어깨와 손 등 쪽부터 발진이 나기 시작하여 전신으로 퍼져나가며 고열이 났다. 9월 8일에 입원치료를 시작하였고 열, 기침, 피부가 벗겨지는 증상이 있었다. 구강섭취 장애, 호흡곤란, 혈변, 구역질, 구토 등이 있다가 2002년 10월 17일 사망하였다. 몸통부터 시작되어 전신으로 퍼진 타깃 모양 홍반(Target lesion) 등 중증의 다형홍반 소견과 피부박탈, 심한독성간염으로 인한 간 기능 저하와 감염에 따른 폐렴 등에 따라 전형적인 스티븐슨존슨증후군으로 판정되었고 그 원인은 환기장치가 없는 상태에서 스테인리스 강판을 세척액에 직접 투입하고 꺼내는 작업을 반복하는 과정에서 노출된 수백 ppm 수준의 트리클로로에틸렌이다.

나. 사례 2

2015년 6월 경기도 안산시에 위치한 통신장비, 치과 수술용 영상장비 부품 등에

대한 도장 및 피막 처리업 사업장에서 근로자 2명이 트리클로로에틸렌 증기를 이용한 세척조 청소작업 중 잔류되어 있는 트리클로로에틸렌 증기에 중독되어 쓰러져 병원으로 이송되었으나 모두 사망하였다. 전체 작업공정은 자재입고-세척(트리클로로에틸렌)-분체도장-건조-검사-포장-출고로 이루어져 있으며 세척공정은 트리클로로에틸렌 증기를 이용하여 도장작업 전 원자재에 묻어 있는 기름때 등 오염물질을 제거하는 방식이다. 운반용 세척케이지에 원자재를 넣고 호이스트로 옮겨 세척조 바닥에 위치시킨 후 트리클로로에틸렌 증기를 이용하여 세척한다. 세척조(L2,300 mm x W1,200 mm x H1,600 mm)에는 3개의 열선히터가 설치된 증기조(L600 mm x W900 mm x H130 mm)가 바닥면에 위치해 있어 통상 10~15 리터의 트리클로로에틸렌을 증기조에 넣고 약 60℃로 가열하여 증기를 발생시키는 구조이다.

사고발생 당일 07시경 세척조 청소를 위해 재해자 2명이 형짚과 주걱을 들고 내부로 들어갔고, 07시 40분경 청소 작업을 하는 소리가 들리지 않아 이상을 느낀 주변 근로자에 의해 발견되어 119에 의해 병원에 이송되었으나 1명은 발견 당시 사망 상태였고 1명은 병원 이송 후 심폐소생술을 시행하였으나 사망하였다. 재해조사 당시 세척조 내부 트리클로로에틸렌 농도는 개인시료채취기(Personal air sampler) 측정결과¹⁾ 57.7 ppm, 직독식 검지기 측정결과는 세척조 바닥면과 30 cm 높이에서는 70 ppm 이상²⁾, 80 cm 높이에서는 48 ppm, 포집공기의 가스크로마토그래피 질량분석기(GC-MS) 분석결과³⁾는 최대 287 ppm 이었다. 재해자들은 송기마스크 등 보호구를 착용하지 않았으며 세척조 내부 공기를 치환할 수 있는 별도의 환기설비를 갖추지 않은 상태였다.



[그림 3-4] 사고발생 세척조(KOSHA Alert, 2015)

- 1) 재해발생 6시간 경과 후 Gilian사 채취기 사용하여 세척조 바닥면으로부터 80 cm 높이에서 1시간 측정
- 2) 재해발생 2시간 경과 후 GASTEC No. 132L로 측정, 직독식 검지기 검출농도(70 ppm) 상한선 초과
- 3) 환경부 합동방제센터 측정결과 270~287 ppm

유기용제 증기를 이용한 방식의 세척은 세척액 사용량을 줄일 수 있으며 작업이 용이하고 건조에 소요되는 시간이 적으며 세척효율이 높아 컴퓨터 케이스 등 전자 제품에 사용되는 정밀부품에 많이 사용되고 있다. 트리클로로에틸렌 세척조 내의 중독 사망사고는 2019년 6월 경기도 화성시에 위치한 도장 및 피막처리업 사업장에서 발생되었으며 2022년 3월에는 인천에 위치한 전자제품 부품 세척업체의 동일 방식 증기 세척조 내부 청소작업 중 트리클로로메탄(Trichloromethane, CAS No. 67-66-3) 증기에 작업자 1명이 사망하는 등 유사한 사고가 지속적으로 반복 발생되고 있다.



[그림 3-5] 사례2(a) 및 타 사고발생 사업장(b) 세척조 하부 ((a) 경기일보, (b) 직접촬영)

다. 사례 3

김자현 등(2008)은 근로자 19명 규모의 전자부품 제조사업장에서 8년간 생산부 직원으로 근무한 48세 남성 근로자의 신경정신증상을 보고하였다. 최초 의욕저하와 전신쇠약으로 병원을 찾았고 불면증, 식욕부진, 사물이 흐리게 보이는 증상, 식욕부진, 성욕 감소 및 발기 부전을 동반한 우울감정 등의 증상이 있었다. 뇌신경들에 대한 이학적 이상 소견은 없었으나 생각을 말로 표현하기 어려운 증상과 말을 더듬는 증상이 있었고 양손과 발의 감각이 저하되어 있었다.

주 작업내용은 탈지부서(Degreasing)에서 트리클로로에틸렌을 사용한 세척작업을 단독 수행하는 것이었다. 세척액은 99% 트리클로로에틸렌이며 다른 유기용제류는 사용하지 않았다. 트리클로로에틸렌이 든 세척조에 전자부품을 담갔다가 꺼내는 작업을 일일 8~9시간씩 주 6일 수행하였으며 세척조에는 덮개와 간이 환기시설이 설치되어 있었다. 트리클로로에틸렌에 대한 작업환경측정결과는 2004년 하반기 41.75 ppm, 2005년 상반기 43.85 ppm으로 노출기준 50 ppm을 초과하지는 않았고, 방독마스크, 고무장갑을 착용하였으나 방독마스크의 필터는 교체되지 않았다.



[그림 3-6] 사업장의 TCE 취급 설비(김자형 등, 2008)

라. 사례 4

박재석 등(2011)은 트리클로로에틸렌으로 인한 도장 공장 근로자의 호흡부전 사례를 보고하였다. 재해자는 베트남 국적의 38세 남자로 트리클로로에틸렌을 보관한 약품 탱크에 작업을 위해 들어갔다가 의식을 잃었다. 5분이 지나도 인기척이 없음을 이상하게 여긴 직장 동료들이 구조하여 응급실로 이송되었으나 의식은 반혼수 상태였고 자발호흡이 미약한 상태였다. 당시 입에 거품을 물고 있었고 온몸, 특히 양측 엉덩이와 오른쪽 다리 부위 의복에서 강한 휘발성 용매 냄새가 났고 피부에는 발적과 피부탈락이 있었다. 보호 장구를 착용하지 않고 약품탱크에서 작업을 하던 중 중추 신경에 영향을 받아 의식을 잃고 호흡부전 상태에 이르렀으나 인공호흡과 피부 세척 등을 통해 상태가 호전되어 11일간의 치료 후 퇴원하였다.

3.4.3 메탄올 실명

‘메탄올 실명사고’란 2015년, 2016년 부천과 인천에 소재한 삼성과 엘지 휴대폰 3차 하청업체에서 일한 20~30대 청년 파견근로자들에게 실명, 시야결손 등의 시신경 손상이 발생한 사고를 말한다. 재해자들은 인터넷에 이력서를 올리거나 직접 연락을 하여 인력파견업체의 소개로 휴대폰 부품제조업체에 파견근로를 하였다. 주로 컴퓨터 수치제어 절삭기(Computerized numerical control machine, CNC절삭기)를 이용하여 알루미늄 재질의 휴대폰 버튼, 케이스 등 부품을 절삭하여 가공하는 작업 또는 인근 장소에서 검사작업을 수행하였는데 이때 메탄올은 절삭가공 시 발생하는 열을 식혀주는 냉각 및 윤활 등의 기능을 위해 사용되었다. CNC절삭기에는 별도 국소배기장치가 설치되지 않았으며 작업편의를 위해 덮개는 개방되어 있었다. 작업 방식은 CNC절삭기가 알루미늄 휴대폰 부품을 절삭하고 나면 가공된 부품은 빼내고

가공할 부품을 케이스에 넣어 절삭기에 투입하는 것으로 가공된 부품에 묻은 금속 칩(Chip)과 메탄올을 에어건으로 불어내어 제거하였다.



[그림 3-7] 메탄올 CNC가공 작업환경(메탄올 국회토론회자료집(박두용), 2016)

관련 논문 및 자료, 언론보도 등에 따른 메탄올 중독사고의 발견과정은 다음과 같다. 당시 부천소재 YN테크에 근무하던 이모씨(여, 27세)가 구토증상, 의식저하, 실명증세로 이대 목동병원 응급실에 방문하였고 메탄올 중독으로 파악되었다. 같은 병원 직업환경의학과 김현주 교수가 협진과 함께 비슷한 증상으로 부천성심병원에 입원중인 다른 근로자를 확인하게 되었고 이를 고용노동부에 신고하였다. 고용노동부는 해당사업장에 대한 확인, 부천 지역 유사 사업장 8개사에 대한 감독, 이후 전국 메탄올 취급사업장 3,117개소에 대한 감독 등의 조치와 함께 2016년 2월 메탄올 중독으로 인한 실명에 대해 공식화 하였다.

류지아 등(2016)의 연구에 따르면 메탄올 공기 중 농도 측정결과는 1,030.1~2,220.5 ppm으로 노출기준 200 ppm을 10배가량 초과한 것으로 나타났다. 열악한 작업환경에서 근로기준법에서 정한 당시 주당 최대 근로시간(68시간)을 초과하여 근무한 것으로 나타났다. 파견근로자들은 일일 12시간 주야 맞교대로 근무하면서 생산물량이 많을 때는 주휴일 없이 근무했다. 짧은 기간 돈을 많이 벌려는 파견 근로의 목적과 생산물량을 저단가로 제때 맞추기 위한 생산의 목적이 맞아떨어진 형태이나 그 과정에서 근로자 건강과 안전을 위한 최소한의 보호조치나 제도적 관리가 이루어지지 않았다.

이근탁 등(2017)은 하돈 매트릭스를 이용하여 인적요인, 물질·기계요인, 물리환경요인, 사회경제요인을 사고발생 단계별로 분석하여 메탄올 실명사고의 원인을 분석하였다. 분석결과 파견노동의 취약성(인적요인), CNC절삭기의 냉각에 메탄올을 사용한 작업특성(물질·기계특성), 환기장치 없는 좁은 공간에 CNC절삭기가 밀집되어 장시간 가동된 작업공간 특성(물리환경요인), 새로운 모델의 휴대폰이 출시되는 기간에 수요가 몰리는 특성, 작업특성, 제조업 중소기업장의 관행, 대기업 원청기업들의 안전보건 관리 부재, 노동부의 전략적인 감독부재 등(사회경제요인)이 원인으로 지적되었다. 보다 구체적으로는 당시 휴대폰의 고급화와 다변화, 빨라진 생산주기 등으로 인해 생산시기가 특정 기간에 몰린 점, 그에 따라 상시 근로인원을 보유하는 방식이 아닌 수시 인력채용이 이루어진 점, 제조업은 파견근로가 불법이나 공공연하게 이루어졌으며 파견근로에 대해 안전한 작업방법 교육, 보호구 지급, 작업환경 관리 및 건강관리 등이 이루어지지 않은 점, 알루미늄 부품 정밀 가공을 위해 절삭팁(Tip)이 고속회전하는 CNC절삭기를 사용했고 이때 냉각을 위해 제품에 영향을 주지 않지만 에탄올(1kg에 약 1,200원)에 비해 단가가 저렴하지만 독성이 높은 메탄올(1kg에 약 500원)이 사용된 점 등이 다수의 젊은 근로자들에게 장애를 가져온 사고를 초래하였다.

3.5 사고원인 정밀분석

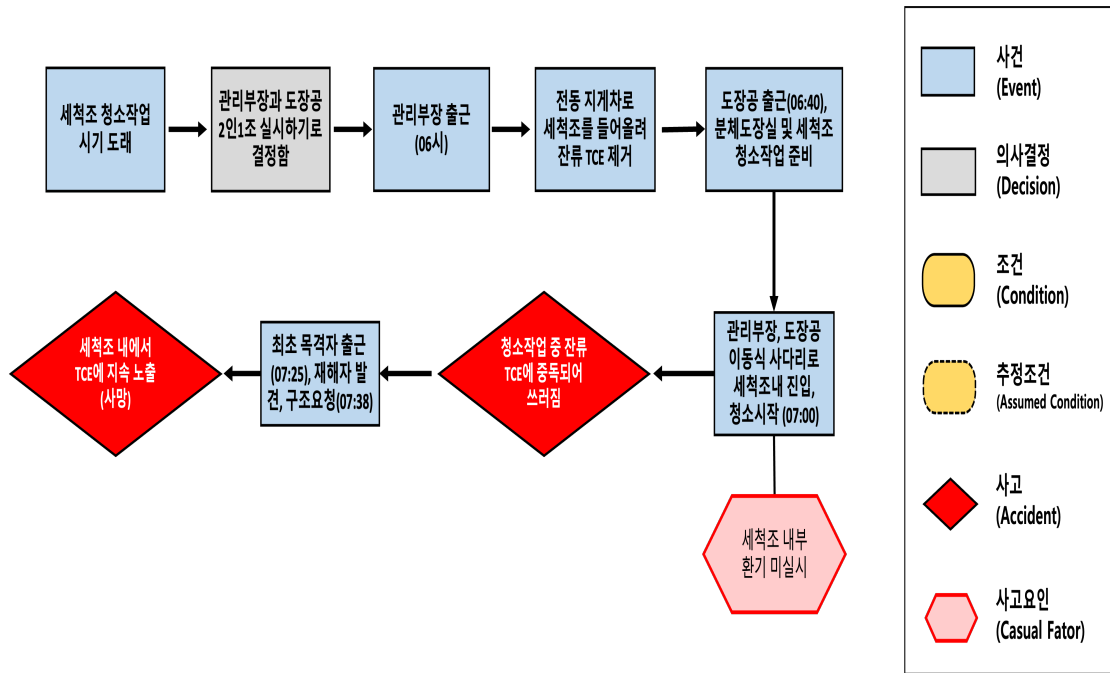
3.5.1 DoE 기법 개요

미국 에너지부(Department of Energy, DoE)의 사고원인 분석기법(DoE, 2012)은 사고의 원인을 개별 작업자의 단순한 실수가 아라 조직의 관행, 의사결정구조, 문화 등 그 사업장에 오랜 기간 잠재되어 있는 조직결함에 따른 결과로 간주하고 있다. DoE 사고원인 분석기법은 박희석 등(2019)이 재해조사를 위한 휴먼에러 평가 매뉴얼 개발에 주로 참조하였으며 MTO(Man, Technology, Organization)기법에 기반을 둔 사상 및 원인요소 차트, 방호벽 분석, 변화 분석을 핵심 분석 도구로 활용한다. 적용 절차는 객관적 사실 분석과 사상 및 원인요소 차트(Event and Causal Factor Chart, E&CF Chart) 작성, 물리적 및 관리적 방호벽에 대한 분석(Barrier Analysis), 시스템 운영 계획과 실제 운영의 차이를 분석하는 변화 분석(Change Analysis)을 차례로 수행하면서 사상 및 원인요소 차트를 지속적으로 업데이트하고 근본 원인을 파악하는 과정을 거친다.

3.5.2 정밀분석 결과

분석대상 사고는 트리클로로에틸렌 중독사고 중 유기용제를 이용한 증기 세척조 내 급성중독사고인 3.4.2의 (사례2)로 선정하였다. 전자제품에 사용되는 부품을 분체 도장작업을 실시하기 전 이물질을 제거하기 위한 세척작업에 사용되는 증기 세척조

의 청소를 위해 내부로 진입한 작업자 2명이 잔류되어 있던 트리클로로에틸렌에 중독되었고 결국 모두 사망한 사고이다. 중대재해 조사의견서, 언론보도 내용 및 관련 기술자료 등을 활용하여 사고내용을 조사하였고, 사고발생과 관련된 사실(Fact)을 바탕으로 시간대별로 정리한 E&CF Chart 초안을 작성하였다.

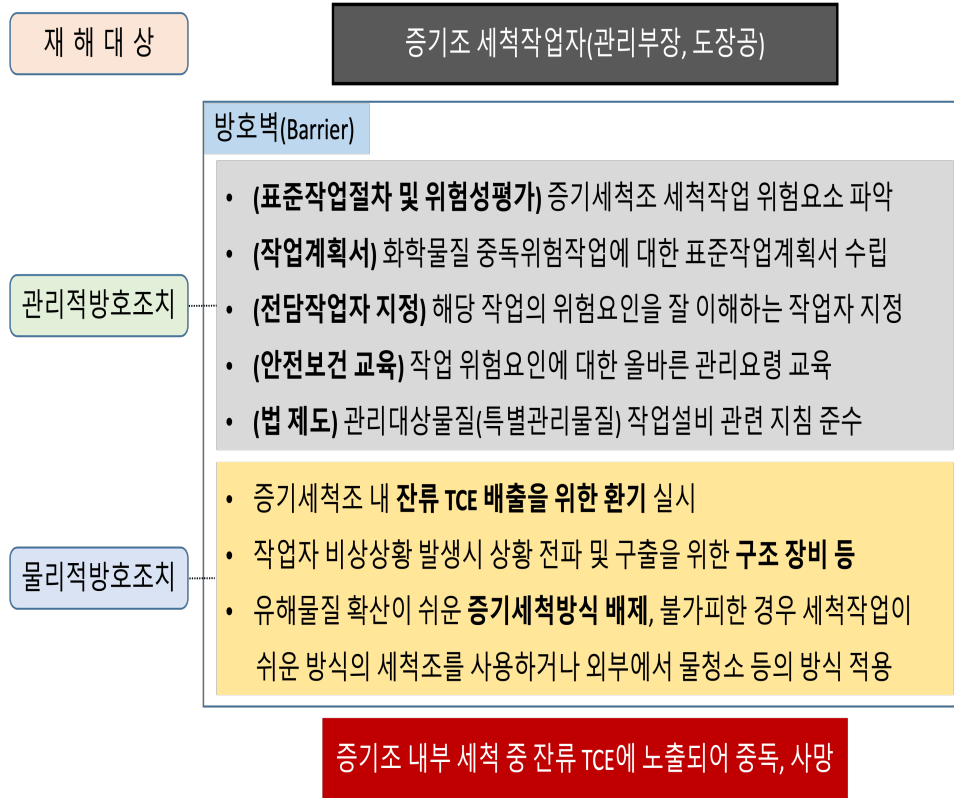


[그림 3-8] 시간대별 E&CF Chart(Draft)

일반적으로 사고는 유해위험요인(Hazard)이 재해자(Target)와 접촉되는 과정에서 이를 저지하기 위한 방호벽(Barrier)이 작동되지 못하여 발생된다. 해당 사고를 예방하기 위한 방호벽을 관리적 방호조치와 물리적 방호조치로 구분하여 분석하였다.

사고예방을 위한 기본적인 관리적 방호조치로는 해당 작업에 대한 표준작업절차를 들 수 있다. 증기세척조의 청소작업을 실시하기 위해 어떤 준비를 하여야 하고 누가 언제 실시하여야 하는지에 대해 작업표준을 정하고 작업을 수행하는 과정의 위험요인에 대해 보호구, 환기 등의 절차에 대해 안전한 방법을 마련하고 근로자에게 알려야 한다. 안전한 작업방법을 마련하기 위해서는 관련근로자와 함께 유해위험을 파악하여 평가하는 위험성 평가가 수반되어야 하며 이러한 유해위험을 최소화하는 방법의 작업이 될 수 있도록 계획되어야 한다. 작업방법을 잘 아는 작업자로 전담반을 구성하고 교육인원에 대한 안전보건교육이 이루어져야 한다. 사업주는 해당 물질이 관련법에 따라 어떻게 관리되어야 하는지 파악하고 전문지식이 필요한 경우 안전보건 전문기관의 도움을 요청하여 올바른 법적 조치사항이 준수될 수 있도록 조치하여야 한다. 화학물질 중독사고 예방을 위한 물리적 방호조치의 기본은 환기이다. 증기 세척조 작업의 경우 고정적인 국소배기장치의 설치는 어려우므로 플렉시블 덕트(Flexible duct) 등을 이용하여 외부의 깨끗한 공기를 불러넣어 내부에 체류되어 있는 유기용제 증기를 완전히 배출시켜야 한다. 가능하다면 작업환경측정기

관이나 안전보건 대행기관 등에 협조를 요청하여 작업 전·중·후 가스농도에 대한 측정을 실시하여 위험수준을 파악하는 것이 필요하다. 이러한 사고방지에 필요한 방호벽(Barrier)에 대한 개념적 분석결과와 현장에서 작동되지 않은 요인을 분석한 결과를 [그림3-9]와 <표3-6>으로 정리하였다.



[그림 3-9] TCE 중독사고 Barrier Analysis

<표 3-6> 주요 방호벽의 실제 작동상태 및 실패이유, 사고에 미친 영향

(유해·위험요인) TCE 중독		(재해대상) 사업장 근로자(관리부장, 도장공)		비 고
방호조치 종류	방호조치의 실제 작동상태	방호 실패 이유	사고에 미친 영향	
작업 전 세척조 내부 환기	- 위험 장소에 대한 정보부족 - 사전 조치(환기) 없이 진입	- 정상작업 시작 전에 세척작업 완료를 위한 서두름 - 여름철이어서 잔류 TCE 양이 많지 않음(추정) - 작업 관행, 환기설비 미보유 등(추정)	- 중독에 직접적으로 기인	- 위험요인 관리능력 부재
표준작업 절차	- 표준작업 절차 미수립	- TCE 위험성 간과, 증기 세척조 청소작업을 주요 위험작업으로 인식하지 않음	- 안전조치 없이 위험장소 출입	
법제도	- 화학물질 안전 관련 법제도 인식 미흡	- 안전보건관리 법제도 사각지대 (10인 미만사업장 이행부족)	- 특별관리물질 취급 부적절	- 법제도 영향력 부족
위험성 평가	- 미실시 (세척제/청소작업 유해위험 인식부족)	- 세척제의 건강장해 위험에 대한 인식부족 또는 무시	- 중독사고 대비 및 대응 미흡	- 위험요소 인지부족
안전작업 방식	- 증기세척 방식 위험성에 대한 관리 미흡	- 관행대로 위험한 작업방법에 따라 업무 수행	- 증기세척조 구조적 위험 (주기적 청소 필요)	- 세척방법 개선 필요

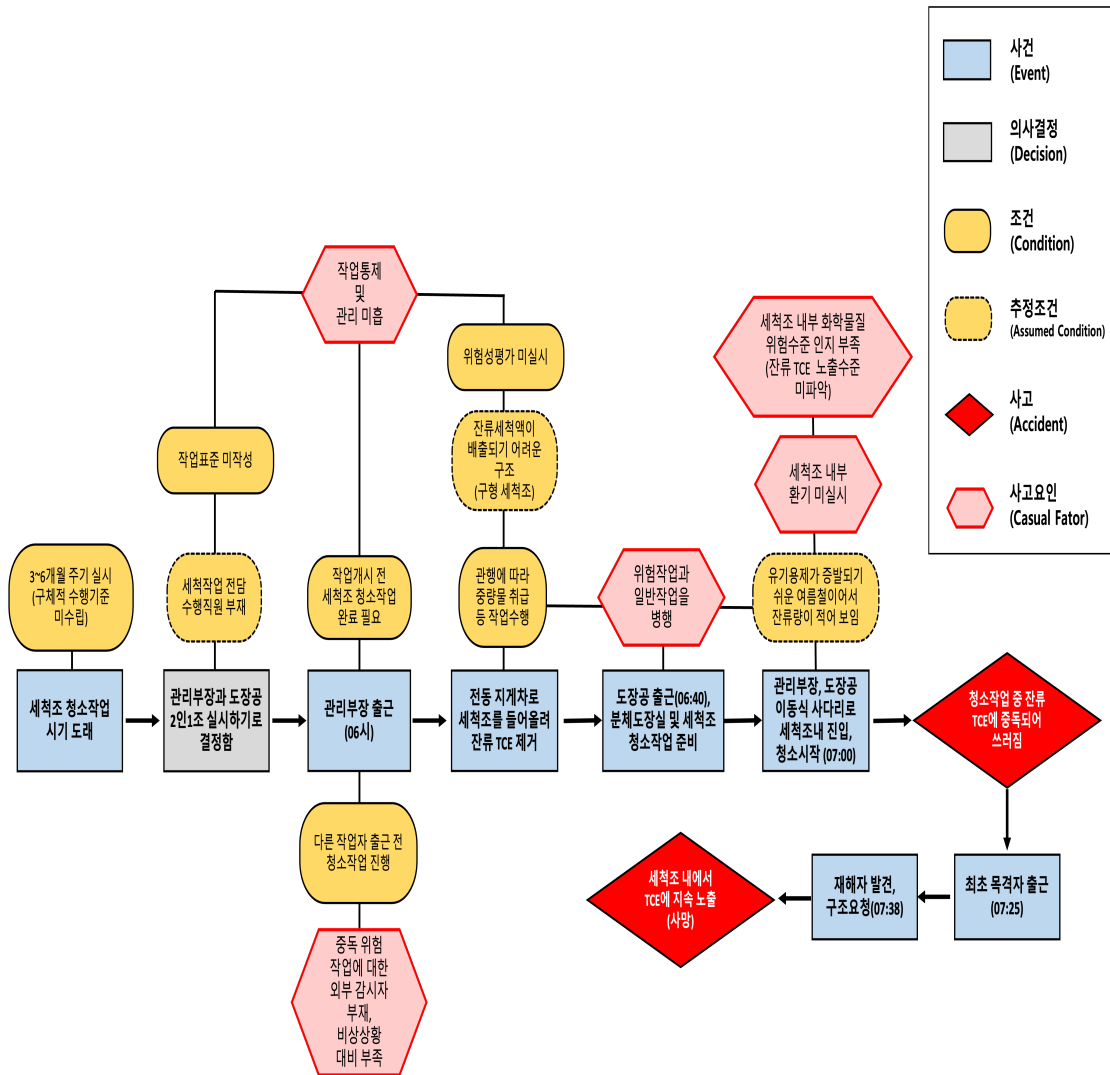
사고발생과 관련된 변동요인을 현재시점에서 명확히 파악하기는 어려우나 크게 작업자 측면과 화학물질의 노출수준으로 구분할 수 있다. 증기 세척조 청소작업의 위험요인을 알고 집중하여 작업할 수 있는 작업자가 아닌 관리부장과 도장공이 투입된 결과 자연환기가 잘 되지 않는 증기 세척조 내부에 대해 강제 환기를 실시하지 않고 손으로 잔류 TCE를 닦아내려는 방식을 택하여 세척작업이 진행되었다. 손으로 닦아내는 작업방법은 세척조 내 유해화학물질의 노출수준을 낮추지 못하고 오히려 표면적을 넓힘으로써 확산을 촉진시킴으로써 노출수준이 높아지는데 기여할 수 있다. 또한 청소작업을 정상작업을 실시하기 전에 완료하기 위하여 정상 출근시간 이전에 실시하여 감시자나 다른 근로자가 없었던 점도 사고발생에 기여하였다.

<표 3-7> 주요 변동요인의 사고현장 상태와 안전작업 상태의 차이분석

요소	사고현장 상태 (Present Condition)	안전작업 상태 (Ideal Condition)	차이 (Difference)
작업자	-도장공이 분체도장부스 필터청소와 증기세척조 청소작업을 병행	-세척조의 위험요인을 잘 아는 전담작업조를 구성하여 안전하게 수행	-위험요인에 대한 인지 및 관리 능력, 작업 을 서두르게 됨
화학물질 노출수준	-유해위험화학물질의 노출 수준에 대한 측정, 관리 미이행	-중독 위험장소와 작업자에게 실제 노출되는 화학물질 수준 실시간 파악	-위험상황에 대한 인식 및 대피 등 관리 가능

이러한 상황을 종합해보면 작업의 진행에 따라 안전작업 내용을 담은 작업계획서 미수립, 관행에 따른 작업 진행 등 작업 통제 및 작업 관리가 미흡했던 점, 위험작업을 전담자가 아닌 도장공이 다른 작업과 병행하여 수행한 점, 무엇보다 세척조 내부 환기를 실시하지 않고 화학물질 노출수준을 관리하지 않은 점, 중독 위험물질에 대한 인식과 중독사고 발생 시 즉각 조치를 위한 작업 감시자가 부재했던 점 등은 해당사고에 근본적인 원인을 제공했다고 볼 수 있다. 무엇보다도 작업자가 진입했던 세척조 내부 유해화학물질의 수준을 모르고 있었던 점, 작업에 따라 변화하는 화학물질 노출수준을 인지하지 못한 점, 위험수준에 대한 경고가 없었던 점은 사고의 직접적인 원인으로 작용하였다. 전반적인 사건(Event)의 흐름과 그에 대한 주요 의사결정, 다양한 여건에 따른 작업조건, 그로 인해 발생된 사고를 도식화 하면 [그림 3-10]과 같다.

분석결과 작업과 관련된 위험성평가, 작업표준 등의 행정적 통제, 감시자 배치 등 대응과 함께 작업 전 작업 장소에 대한 유해화학물질 노출수준을 알고 작업을 수행하는 과정에서 유해화학물질 노출수준 변화를 파악하여 실시간으로 위험을 관리할 수 있는 방식의 작업장 환경관리가 필요하다는 것을 알 수 있다. 특히 청소, 작업도구 세척, 유지보수작업 등 비정상작업은 통상적인 작업방법이 아니므로 작업환경측정 등 기존 법제도에 따른 안전보건관리의 관점에서 누락되기 쉬우므로 실시간 노출수준관리의 필요성이 높다고 할 수 있다. 분석에 포함시키지는 못했으나 증기세척작업 방식 자체의 위험성에 의한 영향도 중요한 위험요인 중 하나이며, 장기적으로 공정 자체의 변경을 검토할 필요성이 있다.



[그림 3-10] TCE 증기세척조 청소작업 중 중독사망 사고의 사고요인 분석결과

4. 화학물질 상시모니터링 시스템

4.1 개념

화학물질 상시모니터링 시스템(Continuous chemical exposure monitoring system)이란 화학물질 감지용 센서와 통신기술이 복합된 스마트센서를 이용하여 작업장에서 발생하는 화학물질의 노출수준을 실시간으로 감지하고 이를 사업주 또는 근로자에게 알리고 위험수준에 대해 경고하여 스스로 환기나 국소배기, 화학물질 사용 조절 등의 작업환경을 관리할 수 있도록 지원하는 시스템이다. 세부 구성요소는 스마트 센서세트, 모니터링 플랫폼, 서버 등 하드웨어와 화학물질별 위험장소에 대한 위험기준 설정 등 이론정립, 센서 기술 및 설치비용 등 경제성, 경보 및 관리방법, 작업환경 자율 관리활동 지원, 설치지원 및 활용을 위한 제도, 사업주와 관리자 및 근로자의 인식·홍보 등 소프트웨어로 구분할 수 있다. 엄밀히 말하면 측정 즉시 결과를 알 수 있는‘실시간(Real-time)’이라는 개념과 24시간 또는 작업 간 지속적이라는 ‘상시(Continuous)’라는 개념은 각각 별개로 구분될 수 있다. 이번에 개발된 시스템은 정상 작업시간 이외 시간에도 모니터링을 실시한다는 의미에서 ‘상시(Continuous)’라고 명명했으나 노출수준 측정결과를 실시간으로 관리자가 확인 할 수 있다는 점과 국내외 관련 연구주제 등을 고려할 때 ‘실시간(Real-time)’의 의미를 포함하고 있다고 할 수 있다.

현재 작업장 화학물질 노출 수준은 작업환경측정 및 정도관리 등에 관한 고시(고용노동부고시 제2020-44호)에 따른 작업환경측정을 통해 파악할 수 있다. 예비조사를 통한 공정별 작업내용, 화학물질 사용실태, 노출가능성, 측정대상 공정, 대상 유해인자 및 발생주기, 종사근로자 현황 파악 등으로 이루어진다(고시 제17조). 하지만 앞의 화학물질 중독 사고사례들에서 볼 수 있듯이 최근 작업현장은 생산방식이 유동적이고 불법적인 과전 노동 등 종사근로자 파악이 어려우며 사용 물질도 다양해져 작업환경측정 등 기존 제도만으로는 관리가 어려운 점이 있다. 최상준(2008)은 작업환경측정 제도 운영 실태를 파악한 결과 단순한 법 의무 이행을 위한 측정행이 아닌 사업주와 근로자가 주도적으로 작업환경관리를 할 수 있어야 한다고 주장했다. 상시모니터링 시스템은 이러한 사업장 주도형 작업환경관리에 활용이 가능하다. 즉, 사업주가 위험작업에 따른 화학물질 노출수준을 자율적으로 파악하여 환기, 작업방법 변경 등 관리에 활용하거나 작업환경측정기관이 예비조사 시 일정기간 설치하여 화학물질 노출 변화를 파악에 활용될 수 있다. 안전보건 대행기관에서는 상시모니터링 시스템을 이용하여 화학물질 작업자의 위험수준을 파악하여 보호방안을 구체적으로 제시하는데 활용할 수 있다. 스마트센서세트 현장적용을 위해 면담했던 한 사업장의 관리자는 증기 세척조 청소작업을 경험에 따라 위험작업으로 관리하고 있는데 상시모니터링 시스템을 통해 얼마나 위험한지 수치적으로 알 수 있을 것이라고 말했다.

상시모니터링 시스템을 시범적으로 구축하고 현장에 적용하기 위하여 안전보건공

단에서는 두 단계로 나누어 선행연구를 진행하였다. 먼저 화학물질로 인한 중독 사고가 다발했던 전자산업을 중심으로 대상 화학물질의 선정, 적용 가능한 센서 기술의 현황, 타 분야 적용사례 등을 연구하고 환경보건분야에서 활용중인 IoT 기술이 적용된 총휘발성유기화합물(Total volatile organic compounds, TVOC) 측정장비를 사업장에 설치하여 현장 적용성에 대한 가능성을 평가하였다(OSHFTI, 2019). 2020년에는 TVOC, Cl₂, HF, HCN 등 전자산업에서 많이 취급되며 사고위험이 있는 4종의 화학물질을 선정하여 각각에 대한 센서세트와 전체 시스템 운영을 위한 전용플랫폼 등 상시모니터링 시스템을 개발하였다(OSHFTI, 2020). 본 연구에서는 시범 개발된 센서세트와 플랫폼 등 시스템의 개요에 대해 소개하고 이를 활용하여 유기용제 사용 작업현장의 화학물질 노출수준을 분석하여 상시모니터링의 적용성에 대해 평가하고자 한다. 이번 상시모니터링의 구축과 적용결과는 산업보건학회에도 보고되었다(Kim et al. 2022, Kim et al. 2023).

4.2 시범개발 결과

4.2.1 시스템 구성

상시모니터링 시스템의 구성은 하드웨어 부분과 소프트웨어 부분으로 구분될 수 있다. 하드웨어 부분은 감지(Detect)를 위한 스마트 센서세트와 모니터링(Monitoring) 및 관리(Management)를 위한 플랫폼으로 구성된다. 세부 요소인 센서, 통신, 플랫폼은 센서에서 감지된 화학물질 노출정보가 통신을 통해서 플랫폼으로 전송될 수 있도록 유기적으로 연동되도록 구성하였다. 화학물질 감지센서(Gas Sensor)는 반도체식, 광학식 등 다양한 센서 별 특성을 검토하여 측정치에 대한 신뢰성, 대상 화학물질을 측정할 수 있는지 여부, 측정의 범위, 반응속도, 작동 온습도, 센서의 수명 및 보증기간 등을 고려하여 선정했다. 통신(Communication)은 거리가 이격된 상태에서 정보를 주고받는 것으로 센서에서 감지한 노출수준 데이터를 플랫폼을 통해 클라우드 서버로 전송하는 것이다. 거리, 주파수대역, 전송속도, 확장성, 사용요금, 망 설치비용 등을 고려하여 LTE(Long Term Evolution), Wi-Fi 등의 통신을 사용할 수 있게 구성하였다. 플랫폼은 데이터를 받아서 저장하는 클라우드 서버 또는 물리적 서버 등이 있고 전송된 데이터를 가공하여 표출함으로써 의미 있는 정보가 될 수 있도록 하는 웹(Web) 또는 앱(Application)이다. 플랫폼을 통해 측정된 데이터에 따라 관리자 또는 현장 작업자에게 위험수준을 알려 주거나, 환기장치에 연동시켜 자동으로 가동하는 등 자율 관리에 활용할 수도 있다.

4.2.2 대상물질 선정

생산현장에서는 세척, 접착 등의 목적에 따라 다양한 화학물질을 사용하고 있다. 이러한 작업여건을 고려하여 상시모니터링 시스템을 우선적으로 적용하기 위한 대

상물질을 선정하기 위하여 사고, 직업병 등 안전보건 측면에서 모니터링이 필요한 물질을 선정한 이후 센서의 기술적인 사항을 고려하였다. 사업장의 화학물질 중독 사고에 대한 위험정보가 포함된 KOSHA Alert를 2008년부터 2020년까지 분석하였고, 2009년부터 2019년까지 10년간 중독사고 사례에 대하여도 분석하였다. 2017년부터 2020년까지 작성된 직업성 중독질환 감시체계 연구용역보고서와 안전보건공단 미래 전문기술원에서 수행했던 전자사업장의 화학물질 상시 모니터링 시스템 구축에 대한 연구에서 제시되었던 화학물질들도 검토하였다.

이러한 안전보건측면에 대한 검토결과 총휘발성유기화합물, 염소, 시안화수소, 불화수소, 황산, 일산화질소, 암모니아 등에 대한 적용이 필요한 것으로 판단되었다. 질식재해를 발생시킬 수 있는 CO, H₂S, O₂ 등의 물질들에 대하여도 검토하였으나 연구결과의 활용이 제조 또는 사용과정에서 발생될 수 있는 화학물질을 대상으로 한다는 점을 고려하여 제외시켰다. 이러한 검토결과를 바탕으로 대상 화학물질에 대해 현재 수준의 센서기술이 실용적으로 적용 가능한지에 대하여 기술 검토를 실시하였다. 2단계에 걸친 검토결과 총휘발성유기화합물, 염소, 불화수소, 시안화수소 등 4종의 물질을 선정하였다. 총휘발성유기화합물은 여러 화학물질 중에서도 사업장의 사용 빈도가 높은 유기용제에서 발생하는 특성이 있고 TCE, DMF, 디클로로메탄, 1-브로모프로판 등에 인한 중독사고에 따른 KOSHA Alert 발생 빈도도 높은 물질이다. 불화수소와 염소는 반도체 등 전자산업 제조공정에서 사용되며 공정안전관리(Process Safety Management, PSM) 대상이 되는 물질이다. 시안화수소는 도금공정에서 주로 사용되며 KOSHA Alert가 발생된 사례와 PSM 대상물질임을 고려하여 선정하였다. 선정된 결과에 대하여는 관련 전문가 의견을 받아 최종 선정을 하였다.

4.2.3 위험기준 선정

작업장 내 전체 근로자의 위험을 실시간으로 모니터링하기 위해서는 작업장 내에서 화학물질 위험이 가장 높은 장소에 센서세트를 설치하는 것이 필요하다. 따라서 이때 측정된 화학물질 위험감지 결과는 기존 작업환경측정에 따른 결과와 직접적으로 비교하는 것이 바람직하지 않다. 하지만 현재 우리나라 법적 기준 중 장소에 대한 위험기준은 마련되어 있지 않은 상태이므로 개인시료채취에 따른 작업장 노출기준으로 활용되는 고용노동부 노출기준, 즉 산업안전보건법에 명시된 시간가중 평균농도(TWA), 단시간 노출기준(STEL), 최고노출기준(C)을 비교기준으로 활용하였다. 위험경보 설정 시 최고노출기준(C)은 넘지 않도록 알람기준을 물질별로 설정하였다. 단시간 노출기준(STEL)은 지속적으로 15분간의 노출량을 환산하여 이에 따른 알람 기준 설정을 하였다. 시간가중평균농도(TWA)는 1H 평균과 8H 평균 등 두 가지로 환산을 하여 관리자가 다양한 지표를 이용하여 관리를 할 수 있도록 하였다.

설정된 기준에 따라 알람은 LED 램프 표출, 부저 신호음을 통해 작업자와 관리자에게 알릴 수 있도록 하였다. 정상(노출기준(Occupational Exposure Level, OEL) 50% 미만), 주의(OEL 51%에서 100% 미만까지), 경고(OEL 101% 이상인 경우)로 나누어 각 초록, 노랑, 빨강 등 색상으로 표시하도록 하였다.

노출기준의 0-50%	
노출기준의 51-100%	
노출기준의 101-%	

[그림 4-1] 노출기준 대비 위험수준에 따른 경보 색상

4.2.4 구성요소 선정결과

가스센서는 성능이 검증된 제품을 작업장의 감지대상 농도수준을 고려하여 대상 물질별로 구입하여 설치하였다. TVOC, Cl₂, HCN 센서는 영국 Alphasense사의 제품을 사용하였고 HF 센서는 독일 City Technology Sensoric사의 센서를 사용하였다. 각 물질별 감지를 위해 선정된 센서 별로 인쇄 회로 기판(printed circuit board, PCB)를 설계하고 제작하였고 향후 다양한 센서 적용을 위한 확장성을 고려하여 센서 소켓부위를 별도로 구성하였다. 선정된 센서의 측정범위, 해상도, 반응시간 등 특성은 다음과 같다.

<표 4-1> 물질별 선정된 센서의 특성

구분	TVOC*	Cl ₂ [†]	HF [‡]	HCN [§]
측정범위 (ppm)	0 ~ 6,000	0 ~ 20	0 ~ 10	0 ~ 100
해상도 (ppm)	0.05	0.02	0.15	0.05
반응시간 (T90)	3초 이내	60초 이내	90초 이내	70초 이내
동작온도 (°C)	-40 ~ 65	-20 ~ 50	-20 ~ 40	-30 ~ 50
동작 습도 (%)	0 ~ 95	15 ~ 90	15 ~ 90	15 ~ 90
작동기간	5년	24개월 (80% 성능)	18개월	12개월 (80% 성능)
보증기간	2년 또는 5,000 시간	24 개월	12개월	12개월

TVOC 감지센서는 PID방식(Photoionization detector)으로 반응계수(Response factor, RF) 또는 보정계수(Correction factor, CF)로 불리는 환산계수를 가지고 있어 개별 물질별로 추정할 수 있도록 하고 있다. 환산계수는 [그림 4-2]와 같이 제조사에서 제공해 주며 이를 이용하여 다양한 물질별 농도로 환산이 가능하다.

Accuracy of the Table

This table is for indication only. Table accuracy is 1 to 2 digits only, so when calculating concentration for a specific VOC, specify to 1 or 2 digits only.

Index	Chemical name	Alternative name	Formula	CAS no.	IE, eV	Response Factor (RF)			Typical MDL, 10.6 eV lamp	Typical MDL, 10.6 eV lamp
						10.0 eV	10.6 eV	11.7 eV		
1	Acetaldehyde		C2H4O	75-07-0	10.23	NR	5.5	2.2	25	480
2	Acetamide		C2H5NO	60-35-5	9.69	NA	2	NA		
3	Acetic acid		C2H4O2	64-19-7	10.66	NR	28	4	180	3615
4	Acetic anhydride		C4H6O3	108-24-7	10.14	NA	4	2	20	400
5	Acetoin	3-hydroxybutanone	C4H8O2	513-86-0	~9.8	NA	1	NA		
6	Acetone	2-propanone	C3H6O	67-64-1	9.69	1.2	1.17	1.7	5	70
7	Acetone cyanohydrin		C4H7NO	75-86-5	11.09	NR	NR	1		
8	Acetonitrile		CH3CN	75-05-8	12.20	NR	NR	100		
9	Acetophenone	methyl phenyl ketone	C8H8O	98-86-2	9.29	NA	0.6	NA		
10	Acetyl bromide		C2H3BrO	506-96-7	10.24	NR	8	1.5		
11	Acetylene	ethyne	C2H2	74-86-2	11.40	NR	NR	2		
12	Acetylglycine, N-		C4H7NO3	543-24-8	9.40	NA	2	NA		
13	Acrolein	Prop-2-enal	C3H4O	107-02-8	10.22	NA	3.2	1.2	20	400
14	Acrylic Acid		C3H4O2	79-10-7	10.60	NR	21	3	15	275
15	Acrylonitrile		C3H3N	107-13-1	10.91	NR	NR	1.6		
16	Alkanes, n-, C6+		CnH2n+2	NA	~10	NA	1.2	NA		
17	Allyl acetoacetate		C7H10O3	1118-84-9	~10	NR	1.5	NA		
18	Allyl alcohol		C3H6O	107-18-6	9.63	4	2.3	1.1	10	200
19	Allyl bromide	3-bromopropene	C3H5Br	106-95-6	9.96	NA	3	NA		
20	Allyl chloride	3-chloropropene	C3H5Cl	107-05-1	10.05	NA	4.5	0.7	20	450
21	Allyl glycidyl ether		C6H10O2	106-92-3	~10	NA	0.8	NA		
22	Allyl propyl disulfide		C8H12S2	2179-59-1	~8.5	NA	0.4	NA		
23	Ammonia		NH3	7664-41-7	10.18	NA	8.5	5.7	40	850
24	Amyl acetate		C7H14O2	628-63-7	9.90	9	1.8	0.64	10	180
25	Amyl alcohol		C5H12O	71-41-0	10.00	10	2.6	0.75	15	320
26	Amyl alcohol, tert-		C5H12O	75-85-4	9.80	2.8	1.5	1.01		
27	Anethole		C10H12O	104-46-1	~9	NA	0.4	NA		
28	Aniline		C6H7N	62-53-3	7.70	0.8	0.5	NA	3	50
29	Anisole		C7H8O	100-66-3	8.21	0.59	0.59	0.57	2	50
30	Anisyl aldehyde		C8H8O2	123-11-5	~9	NA	0.4	NA		

[그림 4-2] Alphasense사의 적용 참고자료(Application Note) ANN 305-06 (일부)

통신은 LTE 네트워크 방식을 채용하였다. 분리형 LTE 라우터를 이용하여 플랫폼과 통신할 수 있고 주변 Wi-Fi를 이용할 수도 있다. 라우터는 임대하는 비용이 통상 월별로 소요되므로 Wi-Fi를 이용할 경우에는 통신비용이 절감될 수 있다. 금속제 도장부스 내부 등 외부와 통신이 연결되지 않는 경우에도 센서에서 감지된 화학물질 노출수준에 따라 소리와 LED램프를 이용해 근로자에게 알려주는 기능도 탑재되었다.

센서를 통해 수집된 데이터는 플랫폼으로 전달되어 클라우드 서버를 통해 플랫폼에 등록된 관리자와 근로자에게 알려주는 기능을 가지고 있으며, 문자메시지를 이용하여 추가 알람을 줄 수도 있다. 센서, 통신, 플랫폼 외에 스마트센서세트가 필수 기능 수행할 수 있도록 다음과 같은 부분도 고려하였다. 통신이 연결되지 않는 상황을 대비하여 화학물질 수준 감지 데이터를 기록하고 저장할 수 있는 미니SD카드

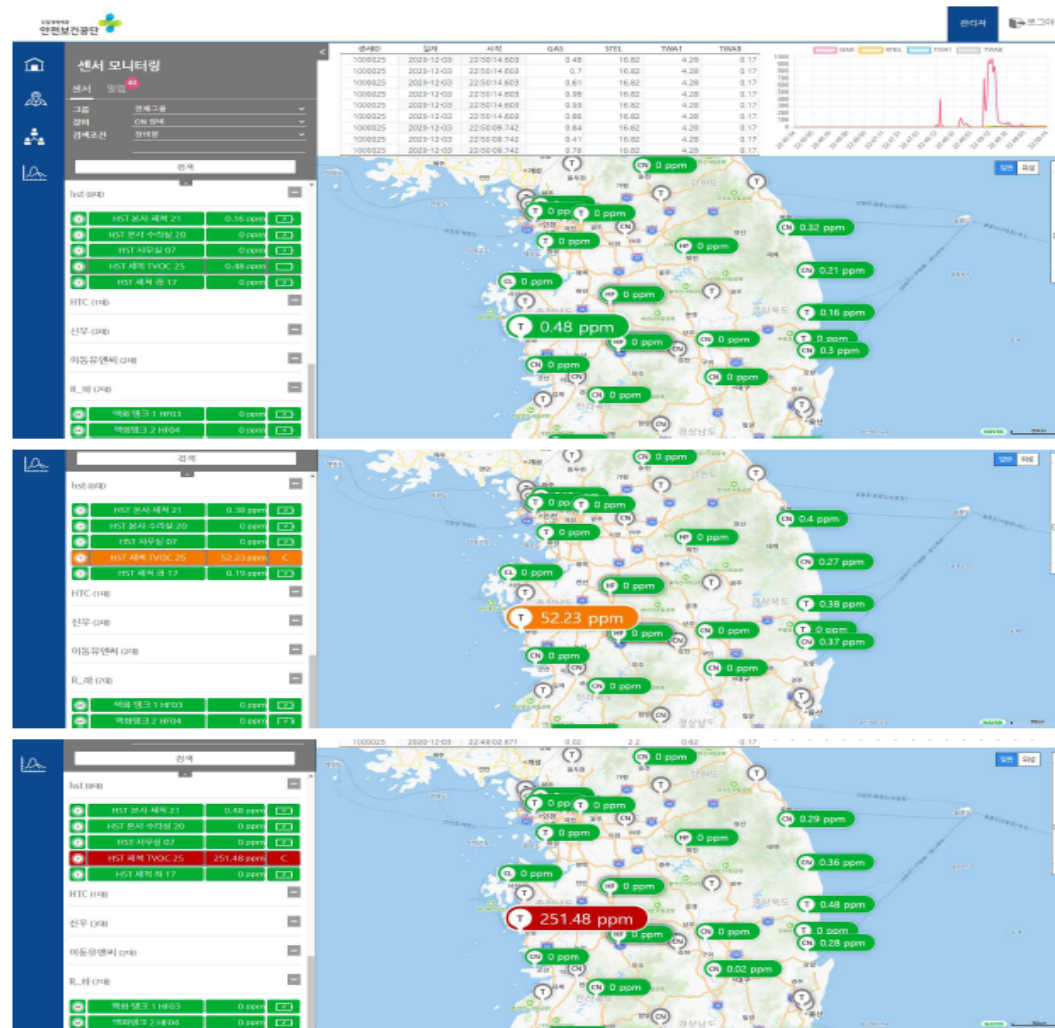
가 설치되었다. 농도 수준, 통신, 배터리 수준을 표시 할 수 있는 표시창과 가스상태(3개), Wi-Fi 접속 상태(1개) 등 4개의 LED, 알람 부저 등이 설치되어 있다. 통신 연결 등의 조작은 측면의 입력키로 가능하며, 전원을 켜고 끌 수 있는 전원 키와 외부 전기를 공급하거나 2,700mAh 규격의 내장 배터리 충전을 위한 C 타입 전원 입력 포트도 설치되었다. 가스형태의 화학물질이 센서에 잘 접촉될 수 있도록 설계된 원형 벤트홀, 작업자 또는 벽면 거치 등을 위한 거치대, LTE 라우터 설치를 위한 공간 등을 고려하여 설계하였다.

시범 개발된 스마트 센서세트의 크기는 가로 6.5 cm, 높이 14.5 cm, 두께 5.5~7.5 cm 이며 무게는 LTE라우터를 제외하면 약 250g이다. 개별 통신을 위해 LTE라우터(약 150 g)를 추가할 경우 약 400 g으로 작업환경측정의 개인시료 포집용으로 사용되는 공기 흡입용 펌프(약 600 g)보다 가볍다.



[그림 4-3] 시범 개발된 스마트 센서세트

모니터링 및 자율관리를 위한 전용플랫폼(smartsensor.or.kr)도 구축하였다. 사업장별 전체 센서세트 설치현황 및 정상 작동여부, 화학물질 노출 위험수준 정도(빨강: 경고, 주황: 주의, 초록: 정상) 등의 현황을 지도에서 확인 할 수 있는 화면과 관리용 화면, 데이터를 통계 처리하여 표출해주는 화면 등으로 구분하여 구성하였다. 플랫폼의 통신 프로토콜만 맞추면 다른 종류의 센서를 사용하더라도 연동이 가능하도록 확장성 높게 개발하였다. 플랫폼은 전체 센서세트의 초기 세팅과 유지관리를 위한 총괄용 플랫폼과 개별 사업장용으로 구분되며 대시보드(Dashboard) 화면, 맵핑(Mapping) 화면, 센서 별 노출수준 데이터 표출 화면으로 구성된다. 초기 화면인 대시보드 화면을 통해 센서세트의 설치현황과 작동여부를 직관적으로 알 수 있다. [그림 4-4], [그림 4-5]에서 볼 수 있듯이 Mapping 화면에서는 전체 센서세트의 설치위치와 노출수준에 따른 위험정도를 확인할 수 있으며 센서별 데이터 표출화면에서는 일별, 시간별 측정값 정보를 확인할 수 있다.

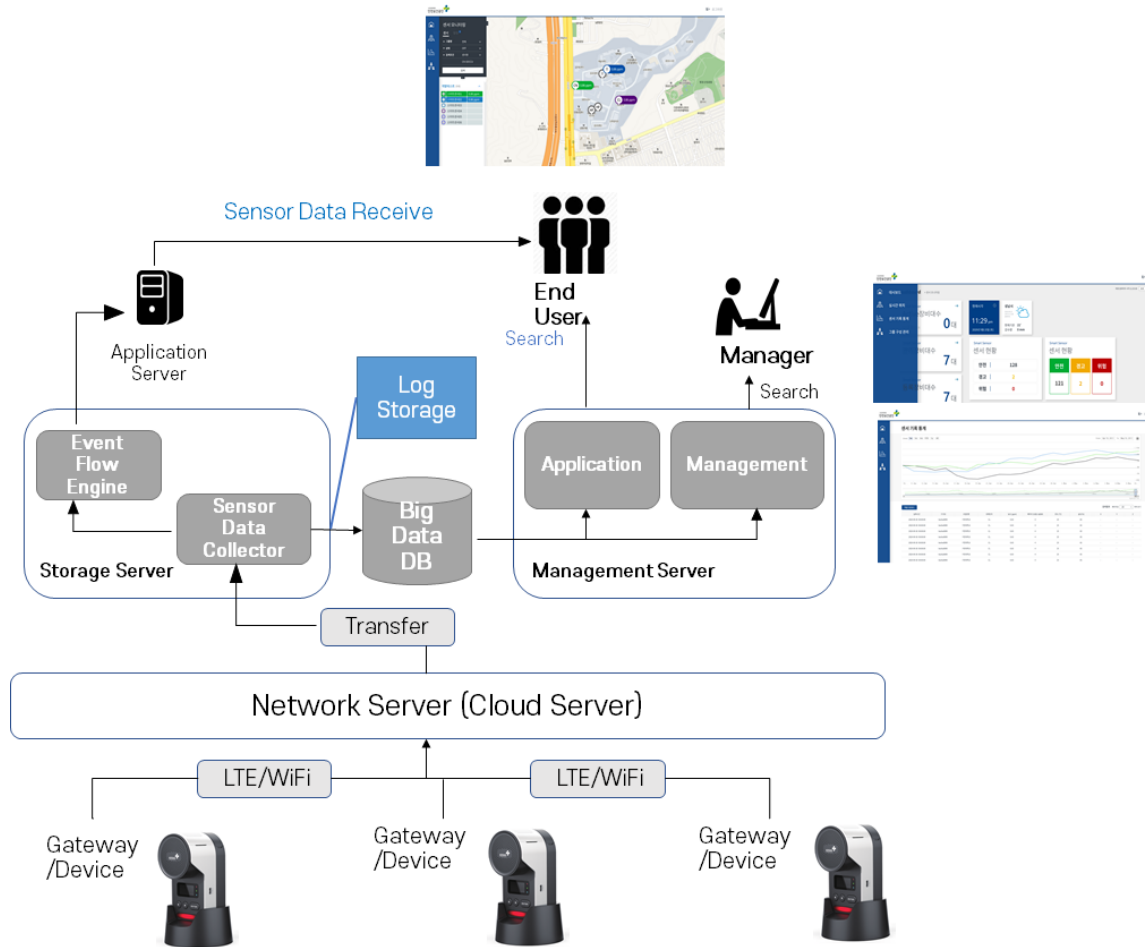


[그림 4-4] 플랫폼의 맵핑(Mapping) 화면(시스템 관리자용)



[그림 4-5] 센서세트 별 노출수준 데이터 표출 화면

최종 구성된 상시모니터링 시스템의 시범구성결과는 [그림 4-6]과 같다. 센서세트에서 취합된 데이터는 Cloud server에 저장되며 통신이 불가능한 장소에서는 각 센서세트에 설치된 메모리카드에 기록이 가능하다. 플랫폼이나 핸드폰용 앱으로 현장 작업자 및 관리자가 측정된 데이터를 확인하여 작업현장의 위험수준을 관리할 수 있다. 현장 작업자는 센서에서 표시되는 알람을 통해 위험수준 확인이 가능하며 관리자는 센서별 세부데이터 통계를 통해 위험장소에 대한 구분과 데이터 기반 현장관리를 할 수 있도록 구성하였다.



[그림 4-6] 화학물질 상시모니터링 시스템 시범구성도

4.2.5 센서 성능 확인방법

센서에 대한 성능확인은 교정과 시험을 병행하여 실시하였다. TVOC용 PID센서는 한국 인정기구(Korea Laboratory Accreditation Scheme, KOLAS) 공인시험검사기관에서 이소부틸렌 가스(100ppm)를 이용하여 검증하고 염소, 시안화수소, 불산 전용 센서는 교정이 아닌 시험으로 성능확인을 하였다. KOLAS 기관에서 각 물질별 센서에 대해 표준가스로 시험을 하고 교정성적서 및 시험성적서를 발급받아 성능확인을 하였다.

4.3 현장적용 대상 및 방법

4.3.1 대상

시범 개발된 상시모니터링의 시범적용 대상 화학물질은 트리클로로에틸렌(TCE, Trichloroethylene, CAS No. 79-01-6)로 선정하였다. TCE는 금속제품 등의 세척공정에 사용되는 대표적인 유기용제로 산업안전보건법 상 관리대상물질 중 특별관리물질이며 국제암연구소(International Agency of Research on Cancer, IARC)에서 지정된 1급 발암물질이다. 플라스틱, 금속 제품 등의 생산과정에서 발생된 오염 또는 이물질의 제거(Cleansing), 유분 제거, 탈지(Degreasing), 접착, 도료 용제(Solvent) 등으로 사용되며, 고농도에서 스티븐슨슨 증후군(Steven Johnson Syndrome, SJS), 급성 간독성, 급성 신부전 등의 급성 중독을 일으킬 수 있다.

시범적용 대상사업장은 전자제품을 생산하는 100여 명 규모의 제조업 사업장으로 주 작업공정은 저항, 콘덴서 등의 부품 입고, 입고된 부품을 PCB기판에 삽입하여 납땜으로 붙이는 솔더링, 그리고 조립된 제품에 대한 테스트와 출고 등으로 이루어진다. 주요 공정 중 솔더링은 투입, 자동 솔더링기 조작, 검사, 지그세척 등의 작업으로 구성되며 검사 작업 및 지그세척 작업에 TCE가 사용된다. 사업장의 주요 유해위험요인은 납땜 작업시 금속흡, 유기용제 등 화학적 인자, 중량물 취급, 부적절한 작업자세에 따른 인간공학적 인자 등 다양한 유해인자가 각 공정별로 존재하나 이번 상시 모니터링 시스템 시범적용 연구에서는 TCE 사용 공정만으로 한정하였다.



[그림 4-7] 주요 작업공정 및 화학물질 취급 작업

솔더링 작업장은 약 300㎡ 규모이며 높이는 약 3m로 실내에 자동 솔더링기 2대가 설치되어 있다. 세척실은 솔더링 작업장 인근에 별도 구분되어 설치되어 있으며 크기는 폭 2.4m, 길이 4m, 높이 2.5m이다. 수동세척 및 지그세척 모두 100% TCE를 세척액으로 사용하며 사용량은 월 평균 100리터이다. 세척액 사용량의 95%는 지그세척작업에서 사용되며 검사작업에는 월 평균 5리터가 사용된다.

솔더링 공정의 작업인원은 모두 7명이다. 5명은 기판투입 및 솔더링기 조작 등 화학물질 노출범위 외에서 작업을 수행하며 2명이 TCE를 이용한 검사와 지그세척 작업을 수행한다. 솔더링 공정은 입고된 PCB기판을 전용 지그(Jig)에 삽입하여 자동

솔더링기에 투입하면 자동 솔더링기에서 기판과 부품이 자동으로 삽입되어 납땜 조립되며 진행된다. 검사 작업은 자동 솔더링기에서 조립이 완성된 기판을 각 기기별로 배치된 작업자가 조립상태를 육안으로 검사하고 플럭스 자국(Flux) 등 이물질은 세척액을 제전솔에 묻혀 닦아내는 작업이다. 지그세척 작업은 솔더링에 사용된 전용지그(Jig)를 검사작업대 옆에 모아두었다가 작업자 중 한명이 교대로 1~2회 별도 설치된 세척실에서 초음파세척기에 함침방식으로 세척하는 것을 말한다. 자동 솔더링기 라인별 각 1명씩 총 2명이 검사 작업을 하루 8시간 작업을 수행하며 지그세척 작업은 평균 15~20분이 소요되는 단시간 작업으로써 검사작업자 중 1명이 교대로 수행한다. 검사작업 테이블 상판에 외부식 후드가 각각 설치되어 있으나 덕트가 탈락된 경우도 있는 등 설치상태가 적절하지 못하여 제어속도가 관리대상물질의 국소 배기장치 설치기준에는 미달했다. 지그세척 공정에는 밀폐식 세척기 1대와 외부식 상방향 후드가 설치된 세척기 1대가 설치되어 있다. 이중 외부식 상방향 후드에 대한 제어풍속 측정결과는 0.03 ~ 0.04 m/s 이었다.

<표 4-2> 작업장 특성

구분	검사작업	지그세척
작업자 수	2	1*
작업공간 (W*D*H, m ³)	15*20*3	2.4*4.0*2.5
환기설비 형태	국소배기(외부식)	국소배기(밀폐식 1, 상방향1)
TCE사용량 (liter/month)	5	95

*검사작업자 2명 중 1명이 교대로 실시



[그림 4-8] 검사작업



[그림 4-9] 지그세척작업

4.3.2 방법

검사 작업과 지그세척 작업에 대해 스마트 센서세트를 활용한 상시모니터링시스템의 측정을 실시하고 그 결과를 기존 작업환경측정 방식의 측정결과와 비교하였다. 센서세트의 설치기간은 2021년 5월부터 2021년 10월까지 약 5개월간이다. 데이터 수집결과 일부 데이터가 전송되지 않거나 측정값이 0으로 표시되는 경우도 있었다. 측정이 되지 않은 이유는 사업장에서 청소나 휴가 등으로 전원을 끄거나 작업을 실시하지 않은 경우로 판단되며 전체 데이터 중 화학물질이 감지되지 않은 시간의 데이터, 센서 제작사에서 제시된 최소 감지범위(TCE 65 ppb)의 절반 이하 측정값은 통계분석에서 제외하였다. 수집된 데이터는 SPSS 27.0.0.0(IBM Corporation, USA)을 사용하여 유의수준은 0.05로 분석하였다. 이와 함께 산업보건 웹기반 화학물질 위험성평가 도구인 Expostats도 활용하였다(expostat.ca). Expostats은 베이시안 분석기반의 산업보건 자료해석 도구로써 국내에서는 안진수 등(2019)이 선박건조 작업의 도장근로자 화학물질 노출 연구에 활용하였다. Expostats에는 총 4가지 Tool이 있는데 이중 측정결과에 대한 Log-normal distribution 계산과 Box and Whisker graph의 자동 생성이 가능한 'Tool 1'을 사용하였다.

작업환경측정 방식의 데이터는 작업환경측정전문기관을 통해 실시된 최근 4년간 작업환경측정결과 및 안전보건공단에서 2021년 실시한 신뢰성평가 측정결과로 확인하였다.

가. 작업환경측정 결과

솔더링 공정에서 작업환경측정을 실시한 대상인자는 혼합유기화합물질과 금속류이다. 기존 작업환경측정 보고서의 예비조사 결과에 따르면, 2018년부터 2021년까지 사용된 화학물질은 플럭스, 플럭스 제거제, 이소프로필알콜 등이며 월평균 사용량은 각각 약 5L이다. TCE는 2019년부터 2021년 상반기까지 매월 5리터를 취급했다. 솔더링 공정 검사작업자 2명의 개인시료 채취 결과 혼합유기화합물 최대 노출값은 0.266으로 2020년 상반기에 나타났다. 2019 하반기와 2020 상반기, 2021 하반기를 제외한 4년간 실시된 8차례 측정에서 혼합유기화합물(Em)은 모두 0으로 평가되었으며, 초산프로필과 n-헵탄은 모든 측정에서 미검출 되었다.

<표 4-3> 작업환경측정결과(2018~2021)

연도	측정위치	Em*	IPA [†] (ppm)	TCE [‡] (ppm)	EDC [§] (ppm)
2018 상반기	P1	0	ND	-	-
	P2	0	ND	-	-
2018 하반기	P1	0	ND	-	-
	P2	0	ND	-	-
2019 상반기	P1	0	ND	ND	-
	P2	0	ND	ND	-
2019 하반기	P1	0.062	0.386	0.601	-
	P2	0.052	0.296	0.506	-
2020 상반기	P1	0.266	4.413	2.443	-
	P2	0.121	4.579	0.985	-
2020 하반기	P1	0	ND	ND	-
	P2	0	ND	ND	-
2021 상반기	P1	0	ND	-	-
	P2	0	ND	-	-
2021 하반기	P1	0.039	7.305	-	0.543
	P2	0.038	7.250	-	0.361

*혼합유기용제

†이소프로필 알콜(Isopropyl alcohol)

‡트리클로로에틸렌(Trichloroethylene)

§1,2-디클로로에틸렌(1,2-Dichloroethylene)

나. 신뢰성평가 결과

작업환경 신뢰성평가는 안전보건공단 신뢰성평가 대상선정 기준에 해당됨에 따라 실시되었다. 예비조사로 사업장의 일반현황 및 공정을 파악하고 대략적인 유해물질 취급작업과 그 특성, 작업시간 및 노출실태 등을 조사하였다. 본 측정은 TCE 취급 공정인 검사와 지그세척에 대하여 KOSHA Guide에 따라 실시하였다. 예비조사 시 자동 솔더링기(2대)에서 작업이 끝난 제품의 접합여부, 이물질 제거 등 검사작업을 각각 1명의 근로자가 실시하고 있어 이들 2명의 근로자에 대해 개인시료포집방법으로 8시간 TWA측정을 하였다. 지그세척 작업에 대하여는 작업을 실시하는 동안 개인시료포집방법으로 단시간 측정을 실시하였다. 전체 측정시료 수는 8시간 TWA 2건, STEL 1건 등 3건이었다. 측정시간은 검사작업을 실시하는 두 명의 근로자(P1, P2)에 대해 점심시간을 제외한 작업시간을 대상으로 6시간 이상 측정하였다. 당일 지그세척 작업은 대상 근로자 중 1명(P2)이 실시하였다. 지그세척 작업에 대하여는 작업시간 중 15분간 단시간측정(P3)을 별도로 실시하였다.

측정결과 검사 작업 및 지그세척 작업을 같이 실시했던 P2에서 노출기준(10 ppm)을 초과한 12.03 ppm으로 나타났으며, 지그세척 작업에서의 단시간 시료측정 결과 (P3) 또한 단시간 노출기준(25 ppm)을 5.1배 초과한 128.66 ppm으로 나타났다. P2와 P3의 표준화 값 산출결과도 1을 초과하여 허용기준 초과여부에 대한 평가결과는 '초과'로 판단되었다(<표 4-4>).

<표 4-4> 신뢰성평가에 의한 작업환경측정 실시결과

연도	작업	측정위치	TCE 측정결과 (ppm)	노출기준 (ppm)
2021	검사	P1	1.28	10*
		P2	12.03	10
	지그세척	P3	128.66	25 [†]

*트리클로로에틸렌 8시간 시간가중 평균기준(TWA)

[†]트리클로로에틸렌 단시간 노출기준(STEL, P3에만 적용)

다. 상시모니터링

검사와 지그세척 각 작업장소 별 2개씩 총 4개의 센서세트가 설치되었다. 장기간 센서 작동 및 통신 등 위한 전원공급이 가능한 곳, 최대한 작업에 지장을 주지 않는 곳, 오염원에 가능한 근접한 곳을 선정하여 설치하였다. 검사 작업에는 자동 솔

더링기 별로 연결된 작업테이블 상단에 설치하였으며 지그세척 작업에는 초음파세척기의 맞은편에 2대를 설치하였다. 발생원으로부터의 거리는 검사작업은 0.5 m 이내였으며 지그세척 작업은 전원케이블 연결문제로 세척기와 약 2 m 떨어진 곳에 설치되었다.



[그림 4-10] 검사 작업장 스마트 센서세트



[그림 4-11] 지그세척 작업장 스마트 센서세트

센서에서 측정된 TVOC 노출수준은 다음 식 1과 같이 반응계수(Response Factor, RF)를 이용하여 TCE 노출수준으로 환산하여 평가하였다.

$$\text{TCE 감지결과(ppm)} = (\text{센서 감지결과} * \text{RF}) \quad (\text{식 1})$$

[그림 4-2]에 소개된 알파센스사의 자료에 따른 PID A12(10.6 eV)의 TCE RF는 0.6이므로 센서에 따른 TVOC 노출수준이 10 ppm으로 측정된 경우 TCE 노출수준은 6 ppm으로 계산되었다.

4.4 현장적용 결과

스마트 센서세트는 작업현장에 153일간 설치되어 노출수준의 변화와 최고노출수준 현황을 측정하였다. 측정기간 동안 검사작업은 7일, 지그세척작업은 45일 동안 스마트 센서세트의 일 평균값이 작업장 노출기준을 초과하였다. 일일 화학물질 노출수준 변화를 알아보기 위하여 신뢰성평가 실시일의 센서세트 상세 측정결과를 확인한 결과 하루 중 검사 작업은 0.01%, 지그세척 작업은 28%의 측정값이 노출기준을 초과하였다.

4.4.1 전체기간의 일별 노출수준

전체 측정기간 중 근무일은 105일, 토요일, 일요일 또는 공휴일 등 비근무일은 48일이다. 설치기간 중 가동 확인결과 센서가 측정되지 않은 날도 있었는데 센서별 측정일 수는 최소 135일에서 최대 145일로 상이했고 휴일 4일을 포함한 8일간은 모든 센서세트에서 측정값이 나타나지 않았다. 작업별 노출수준 분석을 위해서 대표 센서세트를 선정하였는데, 정상가동일수가 더 많고 근무일 중 미작동일수가 더 적은 센서세트를 해당 작업의 대표센서로 선정하였다. 검사작업은 144일 가동된 2번 센서세트를, 지그세척작업은 145일 가동된 4번 세트를 작업별 대표센서로 선정하고 대표센서의 측정 자료를 이용하여 작업별 노출수준을 분석하였다(<표 4-5>).

<표 4-5> 스마트 센서세트 별 데이터 측정일수

구분	검사작업		지그세척작업	
	1번 센서세트	2번 센서세트	3번 센서세트	4번 센서세트
N1*	135	144	144	145
N2†	18	9	9	8
N3‡	11	4	4	4
N4§	7	5	5	4

*센서세트 정상가동 일수

†센서세트 미작동 일수

‡근무일 중 센서세트 미작동 일수

§비근무일 중 센서세트 미작동 일수

일별 최댓값(Peak exposure level), 평균값(Average exposure level)의 변화는 [그림 4-12]와 [그림 4-13]에 표시하였다. 최댓값은 대부분 노출기준을 상회하였으나 평균값은 노출기준 미만으로 표시되었다. 전체 측정기간 동안 일별 최댓값의 범위는 검사작업의 경우 1.2 ppm(13일차, 비근무일)에서 279.1 ppm(144일차, 근무일)이었다. 지그세척 작업은 최댓값이 더 높게 나타났다. 일별 최댓값이 1.2 ppm(20일차, 비근무일)에서 2,769.3 ppm(105일차, 근무일)로 검사작업보다 변이가 더 컸다. 일별 평균값의 변이도 지그세척 작업에서 더 컸다. 검사작업은 77일차(비근무일)에서 최소 0.06 ppm이었고 근무일인 126일차에서 최대 20.2 ppm으로 나타났다. 지그세척 작업은 비근무일인 20일차에서 가장 낮은 0.04 ppm이었고 마찬가지로 비근무일인 125일차에서 109.8 ppm로 나타났다. 대부분 작업을 실시한 정상근무일에서 더 높은 측정 결과가 나타났으나 지그세척 작업의 일일 평균값은 비근무일인 125일차에 나타났다. 일일 평균값의 높은 수준은 다음날(126일차, 근무일)까지도 유사한 수준인 108.5 ppm으로 유지되었다.

작업 영향을 파악하기 위하여 각 공정별로 전체기간과 근무일, 비근무일로 구분하여 일별 최댓값과 평균값을 구하였다(〈표 4-6〉). 근무일에 대한 일별 최댓값에 대한 기하평균(Geometric mean, GM)은 검사 작업은 44.9 ppm, 지그세척 작업은 710 ppm이다. 지그세척 작업의 기하평균값이 검사 작업보다 15.8배 높았다. 근무일에 대한 일일 평균값의 기하평균은 지그세척 작업이 검사 작업보다 9배가 높았다. 근무일에 대한 일별 최댓값의 기하평균은 전체기간보다 검사작업에서는 1.9배 높고, 지그세척 작업에서는 3.0배가 높았다. 비근무일에 비하여는 각 작업별로 8.2배, 37.8배 높게 나타났다. 근무일의 평균값 또한 전체기간의 평균값에 비하여 검사 작업의 경우는 1.2배 높았고 지그세척 작업에서는 1.4배 높게 나타나는 등 근무일 작업실시에 따른 노출수준은 전체기간이나 비근무일에 비해 높게 나타났다.

<표 4-6> 일별 TCE 노출수준 측정값 분석결과

[단위 : 일, ppm]

구분	검사작업			지그세척작업			
	N*	AM [†] ±SD [‡]	GM [§] (GSD)	N*	AM [†] ±SD [‡]	GM [§] (GSD)	
피크값	전체기간	144	45.4±47.80	24(3.68)	145	736±729.00	236(8.17)
	근무일	101	60.5±49.00	44.9(2.29)	101	1,030±691.00	710(3.07)
	비근무일	43	9.8±14.50	5.5(2.70)	44	69.8±139.00	18.8(4.77)
평균값	전체기간	144	1.74±3.72	0.69(3.38)	145	12.1±19.10	4.99(4.44)
	근무일	101	1.25±2.23	0.795(2.28)	101	10.1±12.60	7.19(2.17)
	비근무일	43	2.89±5.77	0.49(6.09)	44	16.8±28.70	2.16(9.39)

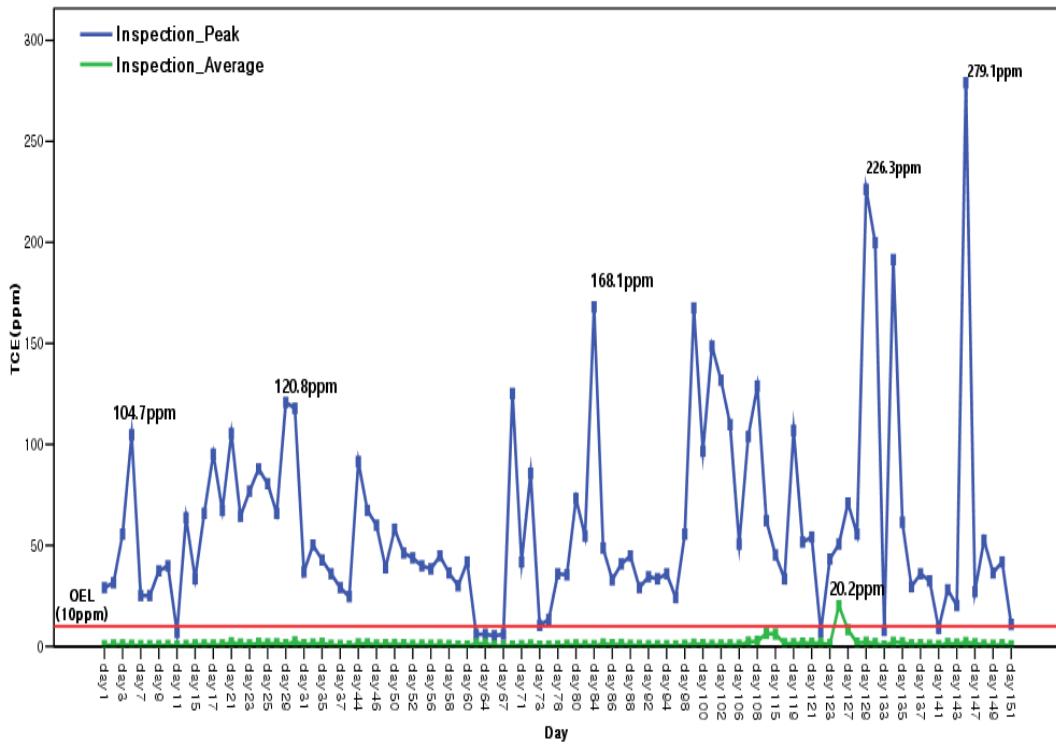
*측정일 수

[†]산술평균

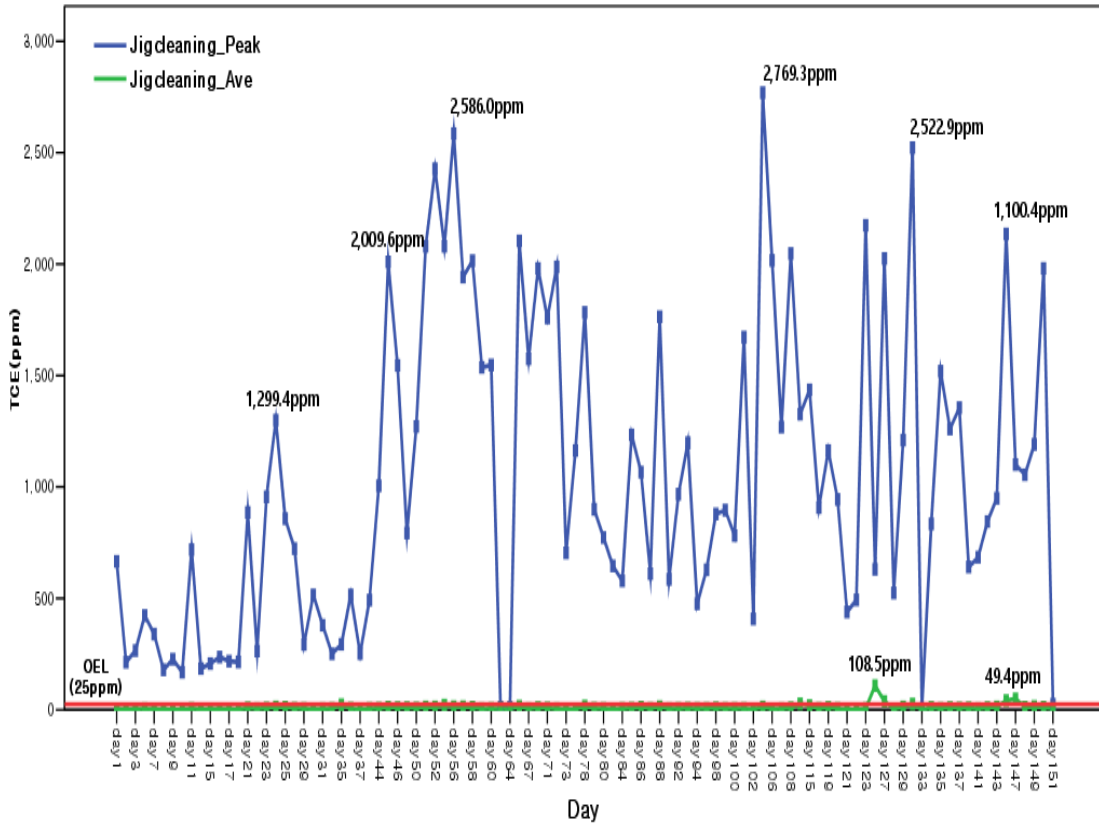
[‡]표준편차

[§]기하평균

^{||}기하표준편차



[그림 4-12] 전체기간 TCE 노출수준 일별 변화 (검사 작업)



[그림 4-13] 전체기간 TCE 노출수준 일별 변화 (지그세척 작업)

4.4.2 특정일의 시간별 노출수준

근무일 중 특정 하루 동안의 시간별 TCE 측정결과를 분석하여 작업에 따른 화학 물질 노출수준 변화를 알아보았다. 분석대상은 상시모니터링 실시 57일차에 기존 측정방식으로 실시한 신뢰성평가 측정일로 하였다.

검사 작업에 비해 지그세척 작업의 최고 노출수준(Peak exposure level)이 보다 명확하게 관찰되었다. 검사작업은 작업개시 직후인 09시, 작업 마무리 시점인 17시, 야간작업의 마무리시간으로 추정되는 20시 경 등에서 피크치가 나타났다. 지그세척 작업에서는 8시 30분경, 12시 30분경, 17시 30분경, 20시 30분경 등에서 피크치가 4차례 나타났는데 특히 17시30분경과 20시30분경에서는 1,700 ppm 수준의 높은 피크치가 나타났다. 검사 작업의 일일 최댓값은 44.8 ppm, 기하평균은 0.346 ppm이었으며 지그세척 작업은 일일 최댓값 1,941.8 ppm, 기하평균은 0.885 ppm으로 지그세척 작업에서 더 높게 나타났다. 지그세척 작업의 경우 최대치가 단시간작업 노출기준의 77배 이상 나타나기도 했다. 오전 8시30분 이후 8차례 STEL치를 초과하였으며, STEL를 초과한 경우는 모두 TWA(10 ppm)의 5배 이상 초과되었다. 17시 36분 40초 이후 가장 오랜 시간 초과된 것으로 확인되었으며 18시 04분 52초까지 총 28분 12초간 STEL치 이상으로 나타났다. 측정값의 구체적인 일변화는 [그림 4-14], [그림 4-15]에 그래프로 나타났다.

<표 4-7> 특정일의 시간별 TCE 노출수준 측정값 분석결과 [단위 : 일, ppm]

구분	검사 작업			지그세척 작업		
	N*	AM [†] ±SD [‡]	GM [§] (GSD)	N*	AM [†] ±SD [‡]	GM [§] (GSD)
24시간	63,427	0.831±2.01	0.346(3.03)	60,448	18±85.8	0.885(7.24)
측정시간	17,383	0.427±0.57	0.295(2.17)	871	13.4±18.5	3.33(6.6)
측정시간외	42,672	1.04±2.4	0.38(3.43)	59,577	18±86.4	0.868(7.2)

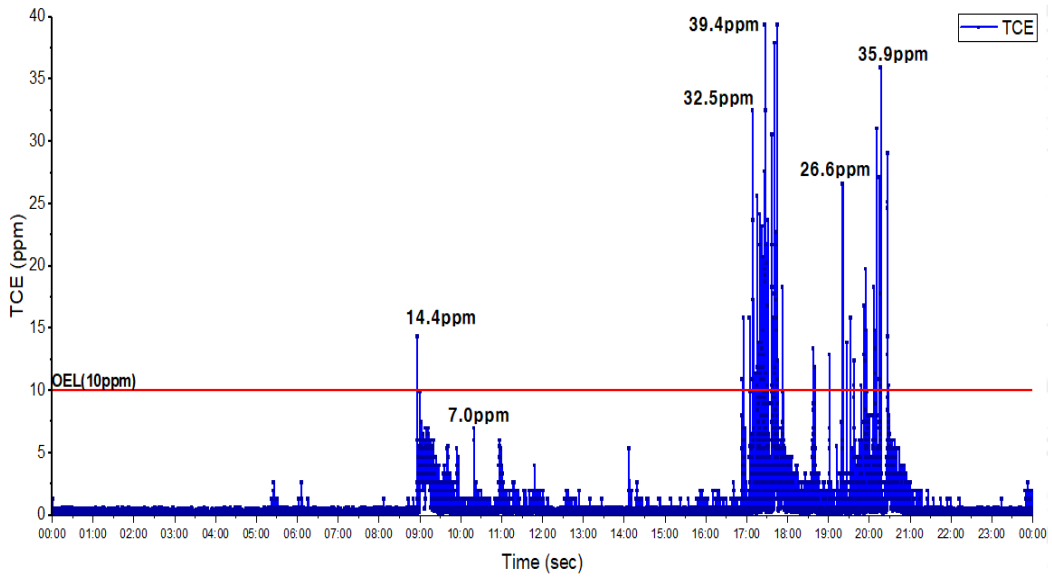
*측정일 수

[†]산술평균

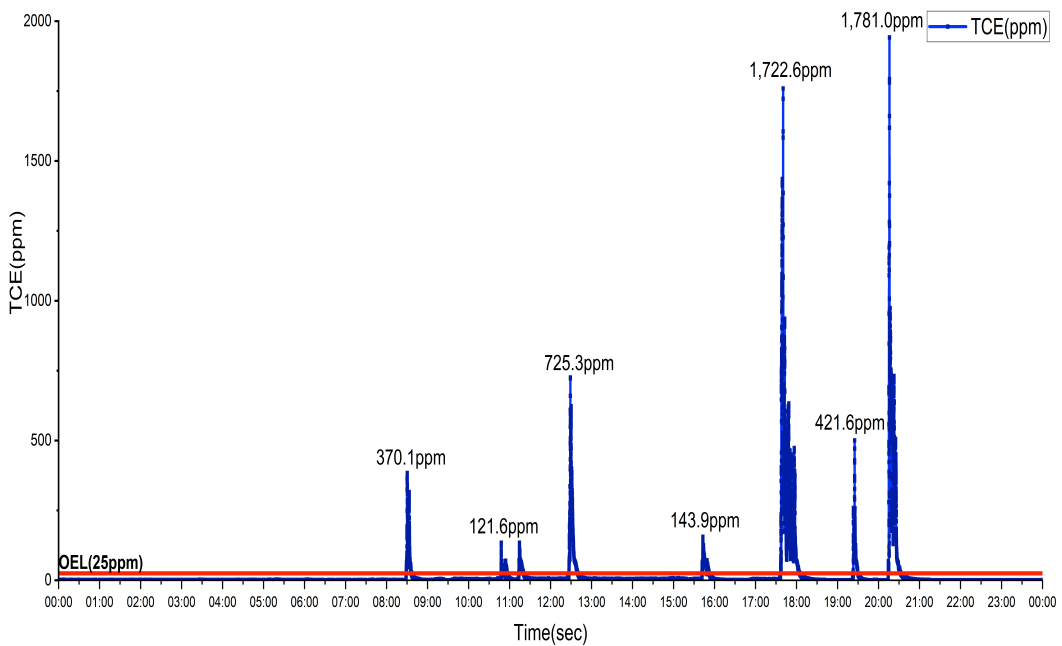
[‡]표준편차

[§]기하평균

^{||}기하표준편차



[그림 4-14] 특정일의 시간별 TCE 노출수준 변화 (검사 작업)



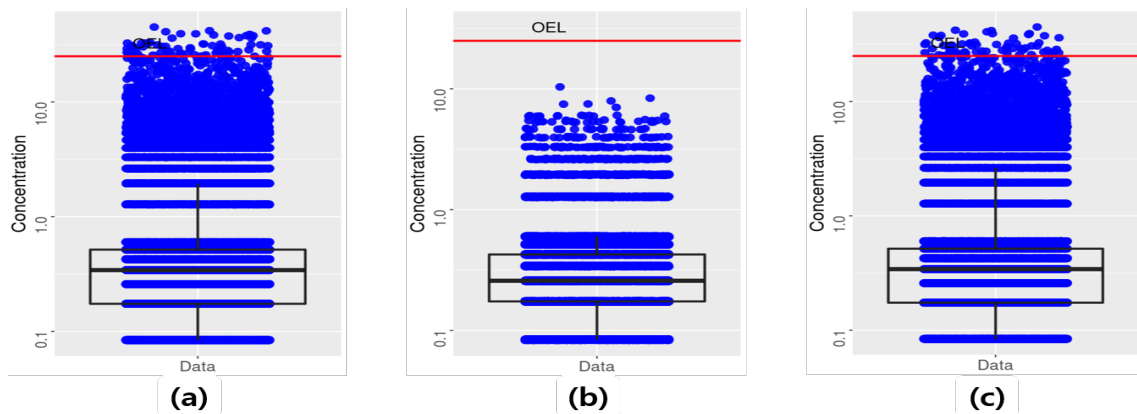
[그림 4-15] 특정일의 시간별 TCE 노출수준 변화 (지그세척 작업)

4.4.3 기존 측정방식과의 비교

기존 작업환경측정방식 측정결과와 스마트 센서세트를 이용한 측정결과를 비교하는 것은 위치, 시간 등이 다르기 때문에 수치를 단순 비교하는 것은 큰 의미가 없다. 다만 작업장의 TCE 노출수준 변화추이, 최대 노출수준 현황을 파악하는 것은 중요하므로 기존 측정방식에 의한 결과와 비교해 보았다(Kim et al., 2023).

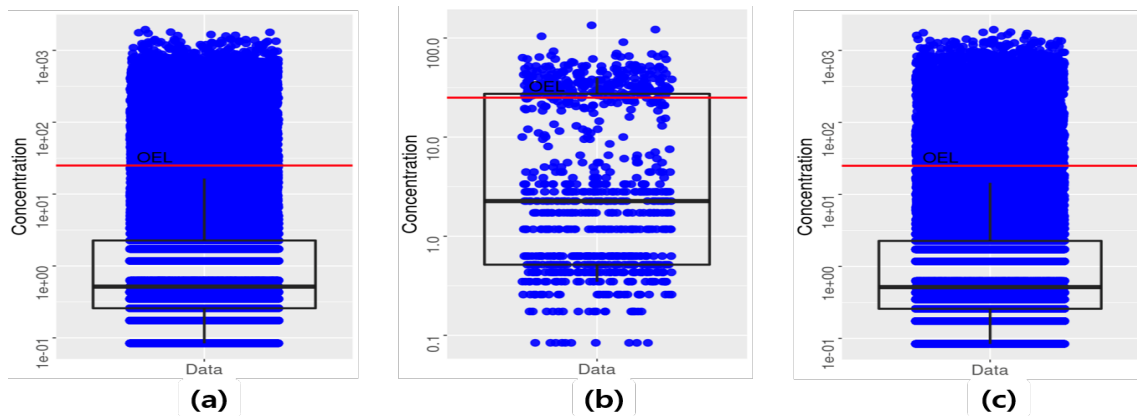
TCE의 작업환경측정 결과는 2020년 상반기에 0.506 ppm ~ 2.443 ppm으로 측정되었다. 2021년 신뢰성평가 측정 시 검사작업만 수행한 근로자에 대한 측정결과는 1.278 ppm으로 작업환경측정 결과와 큰 차이가 없었으나, 지그세척작업을 같이 실시한 근로자에 대한 측정결과는 12.029 ppm이고 특히 단시간측정결과는 128.66 ppm으로 STEL치를 5배가량 초과하였다. 상시모니터링 결과에 따르면 최댓값(Peak exposure level)의 변이가 평균값(Average level)의 변이보다 더 컸고 특히 지그세척 작업에서 작업에 의한 노출수준 변이가 더 큰 것으로 나타났다.

스마트 센서세트를 통해 파악한 특정일의 시간별 TCE 노출수준을 하루 종일 (24H), 측정시간, 측정 이외의 시간으로 구분하여 측정값의 분포를 알아보았다. 검사작업의 경우 측정시간은 모두 노출기준 이하였으나 작업 외 시간에 노출기준을 일부 초과한 것이 확인되었다. 지그세척 작업은 모든 경우 단시간노출기준을 초과한 데이터가 확인되었다. 특히 측정 외 시간에서 많은 데이터가 노출기준을 초과한 것으로 보아 작업장 화학물질의 노출수준을 정확히 파악하기 위해서는 더 많은 시간, 즉 24시간 상시 모니터링이 필요하다.



[그림 4-16] 특정일의 TCE 노출수준 상자그림 그래프 (검사작업)

(a) 24시간 (b) 측정시간 (c) 측정 외 시간



[그림 4-17] 특정일의 TCE 노출수준 상자그림 그래프 (지그세척작업)

(a) 24시간 (b) 측정시간 (c) 측정 외 시간

5. 결론 및 향후 연구방향

5.1 결론

작업장에서의 유해 화학물질 노출에 따른 중독 등 건강장해를 예방하기 위한 방안을 모색하기 위하여 작업장 중독사고 사례, 대표적인 화학물질 다량 취급 산업인 전자산업의 안전보건 현황 및 특성, 스마트 기술을 적용시킨 화학물질 상시모니터링을 시범개발하고 현장에 적용해보았다.

화학물질에 의한 중독사고는 무관심 또는 위험 무시, 화학물질의 위험성에 대한 인식부족, 작업환경측정이나 특수건강검진 등 제도적 관리의 허점, 외국인 근로자 또는 파견근로자 등 취약 근로자 등 다양한 요인이 복합적으로 작용하여 발생되었다. 전자산업과 같이 정밀 가공을 위해 화학물질의 사용이 많고 기술개발에 따른 작업방법 변화가 빠른 경우 화학물질 중독사고의 위험에 더 취약하다. 전자산업은 몇몇 대기업을 중심으로 다층구조의 중소기업 하청사업장으로 구성되어있는 산업구조 특성상 대기업인 원청을 중심으로 하는 안전보건 확보 네트워크가 필요하다. 특히 최근 반도체 산업육성을 정부에서 대대적으로 추진하고 있으며 용인, 평택 등의 경기 남부 지역에 대형 반도체 기업이 신규투자를 설치하고 있으므로 이러한 정책적 지원 및 대기업의 신규투자 구상시 n차 하청기업인 중소기업을 포함한 안전보건 확보 네트워크 구축이 병행되는 것이 필요하다. 지역 근로자의 안전보건을 통합지원하는 근로자건강센터 또는 SK하이닉스에서 지원하고 있는 일환경건강센터와 같이 지역 중소기업사업장을 원청과 같이 통합 지원하는 모델, 정부(안전보건공단) 주도의 전자산업안전보건센터 등 다양한 안전보건 지원방안에 대해 노사정 및 시민단체 등 이해관계자들이 논의하여 효과적인 지원방안을 구체화 하는 것이 필요하다.

이번 연구에서는 중소기업사업장의 자기규율 화학물질 위험관리를 위한 효과적인 방안 중 하나로 스마트기술을 접목시킨 작업장 화학물질 상시모니터링 시스템을 시범 개발하고 이중 TVOC 센서세트를 전자제품을 생산하는 사업장의 TCE 취급 작업장에 약 5개월간 설치하여 적용성에 대해 확인하였다. 측정된 결과는 대략적인 노출변동 현황과 피크치의 패턴분석을 위해 분석하고 기존 작업환경측정방식에 따른 결과와도 비교해 보았다. 스마트 센서세트의 측정 결과는 사업장에서 과거에 실시한 작업환경측정 결과보다 더 높게 나타났는데, 이는 화학물질의 발생원에 가까운 장소에 설치된 스마트 센서세트에 더 많은 화학물질이 직접적으로 영향을 미치기 때문이다. 또한 기존 측정방식은 작업자에게 측정장치를 부착시키므로 휴식, 작업준비, 다른 작업 등을 위해 화학물질 노출이 적은 장소로 이동하기 때문으로 판단된다. 특정일 시간별 노출수준 변동현황 분석을 통해 작업에 따른 화학물질 노출특성을 파악할 수 있었다. 검사작업의 화학물질 노출은 09시경부터 시작되어 21시경까지 지속되었다. 09시경, 17시경, 20시경 노출기준을 초과하고 있었고 최고 노출수준은 17:37(44.7 ppm), 20:17(41.8 ppm)에 나타났다. 최초 면담 시에는 1일 8시간 작업을 한다고 파악되었으나 실제 작업은 생산량 증가로 잔업이 이루어진 것으로 보인다.

다. 지그세척 작업에서는 20시 20분경, 17시 40분경, 12시30분경 그리고 08시 30분경 등 4회 이상 STEL을 크게 초과하였고 고농도 노출은 20시 15분 (1,941.8 ppm), 17시 40분 (1,722.6 ppm), 12시 29분 (725.3 ppm), 08시 33분 (315.9 ppm) 순으로 나타났다. 이러한 결과를 볼 때 당일 작업은 오전 9시경부터 본격적으로 시작되어 오후 9시 경 마무리 되는 것으로 보이며, 작업준비 시점과 작업 종료 시점에서 화학물질 노출이 많은 것으로 나타났다. 또한 지그세척 작업의 경우 세척조에 담겨있는 세척용액에 작업자가 손으로 지그를 담갔다 빼는 작업의 특성에 따라 최고노출수준이 검사작업보다 높고 작업을 실시하는 시간에 집중적으로 발생 되는 것을 알 수 있었다. 또한 상방향 후드와 세척조 사이에 작업자의 호흡기가 위치한 노출특성에 따라 급성중독 위험성이 더 높다. 따라서 공기정화장치가 정상적으로 가동되는지 여부를 사전에 점검하고 공기정화장치 작동스위치를 세척조 설치공간 외부에 설치하여 세척 작업공간에 출입하기 전에 충분한 환기가 이루어질 수 있도록 조치하는 것이 필요하다. 아울러 세척작업자는 호흡용 보호구를 착용하고, 사업주는 유해인자가 세척작업자의 호흡기 영역에 거치지 않도록 현재 상방향으로 설치된 후드 형태를 측방향으로 변경하거나 작업방식을 바꾸는 등의 개선이 필요하다.

시범구축 및 적용결과 상시모니터링에 대한 제한점과 개선필요사항도 확인되었다. 먼저 기술적인 제한점이 있다. 센서세트에 대한 전원공급 및 통신연결 문제, 센서자체의 신뢰도 및 사용 중 오염문제, 유사한 성질의 화학물질이 있는 경우 발생할 수 있는 간섭현상, 고정된 작업장소에 설치된 센서세트 측정값에 대한 노출기준 적용 적정성 검토 또는 장소에 대한 노출기준 설정 등이다.

이번에 사용된 스마트 센서세트는 가동 및 데이터 송수신을 위한 전원이 공급되어야 하고 전용 배터리가 부착되어 있어 3시간가량 운용이 가능하여 유지보수, 정비작업 등에 사용이 가능하다. 하지만 3시간 이상 가동하기 위해서는 상시전원코드 연결이 필요하다. 화학물질 노출을 정확하게 측정하여 위험상황을 알리기 위해서는 센서세트를 발생원에 최대한 가깝게 설치하여야 한다. 하지만 현장에서 전원코드를 연결하는 문제는 설치의 가장 큰 제한점이었다. 또한 통신 연결에 대한 고려도 필요했다. 통신음영지대 또는 밀폐된 장소 등의 장소는 센서세트 설치가 어려울 수 있다. 이러한 문제는 저전력 블루투스(Bluetooth low energy, BLE) 기술, 네트워크 통신 방식으로 통신음영지역 발생을 최소화시킨 노드 네트워크 통신방식 등 새로운 ICT기술을 적용하여 스마트 센서세트를 개발할 경우 상당부분 해결될 수 있을 것으로 판단된다. 일부 업체에서 개발 중인 BLE방식 센서세트는 전력소모량이 적고 단가가 저렴하여 1~2년간 사용한 뒤 폐기하는 방식의 활용이 가능하다. 또한 사업장별로 구축된 NORA망이나 LTE Cat.M1방식의 통신을 이용하는 방안도 적용 검토연구가 필요하다.

센서의 현장 적용 시 측정데이터의 객관성 확인 방안도 필요하다. 센서 제작사가 성능테스트를 실시하여 출시하므로 초기 정확도는 확인될 수는 있으나 현장 최초 적용 시 확인방법, 일정 기간 사용 시 성능유지여부 확인방법, 설치환경의 오염도 등에 따른 정확도 측정 방법 등의 단계별 성능유지 확인에 대한 표준화 방안이 마련되어야 한다. 센서 측정값에 대한 위험장소 경보 기준 등에 대한 검토도 필요하

다. 미국 질병관리청(Centers for Disease Control and Prevention, CDC) 산하 미국 국립 직업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)은 화학물질에 의한 근로자의 생명과 건강을 보호하기 위한 기준(Immediately Dangerous To Life or Health, IDLH)을 제시하고 있다. IDLH란 작업장소의 화학물질 노출수준이 생명이나 건강에 즉각적인 영향을 미칠 수 있는 농도를 의미한다. 향후 IDLH와 STEL, TWA 등 작업장의 화학물질 노출기준을 복합적으로 검토하여 센서세트 또는 직독식 장비의 측정결과에 대해 위험수준을 평가할 수 있는 기준 마련에 대한 추가 연구가 필요하다.

현장 적용성에 대해 작업자와 관리자 관점에서 각각 검토해보았다. 작업자 관점에서는 센서세트가 작업에 지장을 줄 경우 불편함을 느낄 수 있다. 임의로 센서세트의 위치를 변경시키거나 꺼버림 또는 화학물질을 이용하여 측정치를 왜곡하려는 등의 행동을 시도할 수 있다. 관리자는 작업장의 높은 수준의 최대노출수준(Peak Exposure Level)이 외부로 알려질 것을 우려해 측정값을 왜곡시키거나 센서세트를 꺼버릴 수 있다. 심한 경우 센서세트 설치나 측정을 거부할 수 있으므로 향후 적용 시 이러한 부분에 대한 사전 설명과 함께 법적인 제재조치는 배제하여 화학물질 자율관리를 위한 인센티브 부여 방안이 필요하다. 센서세트로 인한 폭발, 화재 등의 위험성도 배제할 수 없으므로 향후 방폭기능 등에 대한 추가 기술개발도 필요하다.

이러한 제한점들이 있으나 상시모니터링에 대한 현장적용 연구를 실시한 결과 다음과 같은 장점들도 확인되었다. 첫째, 시범 구축된 전용 Platform이나 App을 통해 누구나 화학물질 취급작업에 따른 노출수준을 원하는 때에 실시간으로 확인이 가능하다. 지그세척 작업 등 임시 또는 수시로 실시하는 작업에 대한 최고노출수준(Peak exposure level)을 시각적으로 확인이 가능하므로 화학물질 위험에 대한 인식이 개선될 수 있다. 사업주 또는 관리자가 세척기 주변의 화학물질 노출수준 변이에 대해 눈으로 확인하여 근로자 중독사고 예방 및 건강보호, 국소배기장치 정상작동여부 확인 등과 함께 화학물질 위험성평가 및 안전보건교육에 활용할 수 있다. 둘째, 화학물질 누출수준의 변위 파악을 통해 생산 장비의 이상 유무를 파악할 수 있다. 일례로 초음파 세척기를 사용한 세척작업장에서 평소보다 높은 수준의 측정값이 지속적으로 발생하는 경우 세척조 내부 상단의 냉각코일 고장으로 인한 세척용제의 비정상적인 증발 등 이상여부를 확인할 수 있다. 생산 장비에 대한 개선을 통해 화학물질 사용량을 줄여 근로자에 대한 과도한 화학물질 노출을 예방할 수 있다. 셋째, 작업환경측정의 실효성을 높이는데 도움이 될 수 있다. 작업환경측정기관에서 예비조사를 실시할 때 스마트 센서세트를 측정대상 근로자의 작업위치에 일정기간 설치하는 등 노출수준, 작업특성, 변이정도 등을 확인하는 절차를 통해 실제 측정을 보다 정확하게 실시하는데 활용할 수 있다. 마지막으로 작업장의 화학물질 위험설비나 위험작업에 대한 개선 시 개선 성능을 수치적으로 평가하고 개선효과를 직접적으로 확인할 수 있다. 센서와 ICT기술이 접목된 새로운 방식의 안전보건서비스가 제공될 경우 사업장에서 화학물질 노출위험을 상시 관리하여 자기규율 기반의 위험성 인지와 그에 따른 예방관리활동 등 위험성평가가 실행되어 급성중독사고 예방에 기여할 수 있을 것이다.

본 연구는 전자산업 근로자의 건강과 안전보호를 위해 가장 필수적인 관리체계를 제시하였고 이는 현장관리 측면과 학술적 측면, 그리고 정책적인 측면에서 의의가 있다.

첫째, 본 연구에서는 작업장 화학물질 관리의 사각지대로 인한 화학물질 중독사고의 주요 사례를 분석하여 원인을 제시하였다. 2022년 시행된 중대재해처벌법에 따라 최초 기소된 사고는 화학물질 중독 사고였다. 화학물질을 사용하여야 하는 사업장 관리자들이 어떤 점에 주안점을 두고 현장을 관리해야 하는지 방향을 제시하였다는데 본 연구의 현장관리 측면의 의의가 있다. 둘째, 본 연구를 통해 제시된 작업장 화학물질 노출수준의 실시간 변화에 대한 기존 작업장 노출기준에 대한 재검토 등 학계의 관심이 필요하다. 본 연구를 통해 컨베이어 방식의 고정된 작업방식을 바탕으로 1960년대 만들어진 현행 작업환경관리 방식에 대한 전환에 대한 새로운 이론정립이 필요하다는 문제가 제기되었다. 셋째, 본 연구는 원청 중심의 산업체계에서 중소기업사업장의 자기규율 기반 안전관리체계 구축의 방안을 제시하였다. 작업장 화학물질 관리를 위해 중소기업사업장을 어떻게 관리하고 지원해야 하는지에 대해 제도적 해결방안을 제시하였다는데 본 연구의 정책적 의미가 있다.

5.2 향후 연구 방향

화학물질에 의한 중독은 사고 및 직업병의 형태 모두 발생할 수 있다. 가장 중요한 관리상의 이슈는 사업주, 관리자, 근로자가 취급하는 유해 화학물질의 유해성과 올바른 취급방법에 관심을 갖고 안전한 작업표준을 만들어 지키는 것이다. 작업환경측정과 특수건강진단을 주기적으로 실시하여 작업장의 노출수준을 관리하고 근로자의 건강을 점검하는 것이다. 화학물질 취급시설은 가급적 밀폐하고 밀폐가 불가능한 부분은 국소배기장치를 설치하여 유해 화학물질이 근로자에게 노출되는 것을 최소화해야 한다. 하지만 사업장에서는 화학물질 안전보건보다는 생산이 우선인 것이 현실이고 특히 하청계약을 통한 위험의 전가로 중소기업사업장 근로자는 화학물질 중독 상황에 노출될 위험이 더 크다. 또한 작업환경측정, 특수건강진단, 안전보건대행서비스 등 법 제도는 규제적용의 시기, 대상, 방법, 경제적인 부분에 사각지대가 존재한다.

시범 개발된 스마트센서세트는 기술적이나 이론적으로 보완이 필요하며 설치방법, 경보기준 등에 대한 논의도 필요한 것이 사실이나, 시범적으로나마 개발하고 현장에 적용해보지 않으면 학계, 사업주, 근로자 등의 논의의 시작이 어려울 것이다. 상시모니터링 시스템의 개념 및 필요성, 활용방안에 대한 공감대가 형성되고 적절한 제도적 경제적 지원제도가 마련된다면 민간기업을 위주로 스마트센서세트에 대한 개발이 활성화되어 민간 주도의 설치 및 운영 확대가 추진될 것으로 기대한다.

참고문헌

- 강성규. 노말핵산 중독 사고의 개요와 시사점(<https://koreascience.kr/article/CFK0200572813695307.pdf>) 한국산업간호학회 2005년도 춘계학술대회논문집 p.73-89, 2005
- 고용노동부. 2017년도 산업재해 발생현황(고용노동부 홈페이지>정책자료실), 2018
- 고용노동부. 2018년 산업재해 발생현황(고용노동부 홈페이지>정책자료실), 2019
- 고용노동부. 2019년 산업재해 현황(고용노동부 홈페이지>정책자료실), 2020
- 고용노동부. 2020년 산업재해 현황(고용노동부 홈페이지>정책자료실), 2021
- 고용노동부. 2021년 산업재해 현황(고용노동부 홈페이지>정책자료실), 2022
- 고용노동부. 중대재해처벌법 해설서 안내(고용노동부 홈페이지>정책자료실), 2021
- 고용노동부. 외국인근로자 노말핵산 중독관련 간담자료, 2005
- 김대성. 원진레이온 이황화탄소 중독사건의 전말. 안전보건 연구동향(OSH research brief) vol.32 p8-13. 산업안전보건연구원, 2010
- 김은아. 직업성질환 역학조사3 - 급성 중독성 질환에 대한 사회적 환기(1990년대 전반). 산업보건 No.257 p5-12, 대한산업보건협회, 2009
- 대한산업보건협회. 물질안전보건자료(MSDS)제도란? 산업보건 No.94 p46-49, 대한산업보건협회, 1996
- 미래전문기술원. 전자업종 산업생태계 맞춤형 안전보건모델 개발 연구, 안전보건공단 미래전문기술원, 2020
- 민주노총 등. 메탄올 중독사고로 드러난 파견 노동자 안전보건 실태와 제도개선 과제 국회토론회 자료, 2016
- 박정일, 정치경, 이광목, 이승한. 직업성 수은중독 진단1례. 산업보건 No.11 p7-12. 대한산업보건협회, 1989
- 염용태. 원진레이온과 이황화탄소중독. 산업보건 No.100 p11-16, 대한산업보건협회, 1996
- 임원혁, 서중해, 우천식. 한국 전자산업의 발전: 기반형성기를 중심으로(기획재정부, KDI국제정책대학원), 2016
- 전수경. 삼성-LG 스마트폰 하청공장의 청년 파견노동자 메탄올 실명사고. 노동건강연대, 2021
- 정무수. 화학물질 관리에 대한 이해2 - 물질안전보건자료(MSDS)제도 어떻게 변해 왔나? 산업보건 No.277 p30-33. 대한산업보건협회, 2011

- 조현미. 노말핵산에 주저앉은 코리아드림. 매일노동뉴스(<http://www.labortoday.co.kr/news/articleView.html?idxno=87930>), 2009
- 홍용덕. LCD작업장 타이노동자 집단 '앉은뱅이병'. 한겨레신문(www.hani.co.kr/arti/society/labor/2883.html), 2005
- AIHA, The Future of Sensors-Protecting Worker Health Through Sensor Technologies, American Industrial Hygiene Association, 2016
- Ahn JJ, Occupational and Environmental Safety Issues in South Korea and Their Implications for Health Experts. J Environ Health Sci. 2022;48(1):19-27
- 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
- Choi SJ. Assessment on Work Environment Monitoring Program in Korea. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2008;18(4):282-292
- 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(doi.org/10.15269/JKSOEH.2019.29.1.50)
- Hori H, Ishematsu S, Fueta Y, Hinoue M, Ishidao T. Comparison of sensor characteristics of three real-time monitors for organic vapors. J Occup Health 2015; 57: 13-19
- Hori H, Ishematsu S, Fueta Y, Hinoue M, Ishidao T. Sensing characteristics of a real-time monitor using a photoionization detector on organic solvent vapors. J UOEH. 2012;34(4):363-368. Japanese. doi: 10.7888/juoeh.34.363. PMID: 23270260.
- International Labour Organization. Safety and Health at the Heart of the Future Work-Building on 100 years of experience, ILO, 2019
- 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

- John E. Snawder. Direct-Reading and Sensor Technologies for Gases and Vapors, AIHA, 2021
- John E. Snawder. Use and Application of Real-Time Exposure Monitoring, National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH), 2020
- 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 JH, Ryu SJ, Kim BG, Jhun HJ, Park JT, Kim HJ. A Case of Trichloroethylene Intoxication with Neuropsychiatric Symptoms. Korean J Occup Environ Med 2008;20(1):54-61
- 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
- Kim W, Kim YK, You YS, Jung KH, Choi WJ, Lee WH, Kang SK, Ham SH. Development of an IoT Smart Sensor for Detecting Gaseous Materials. J Korean Soc Occup Environ Hyg, 2022; 32(1): 78-88 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2022.32.1.78>)
- Kim W, Ryoo JJ, Jung JD, Park GH, Kim GY, Kang JJ, Jung KH, Ham SH. The Results of the Application of a Real-time Chemical Exposure Monitoring System in a Workplace. J Korean Soc Occup Environ Hyg, 2023; 33(2): 215-229 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2023.33.2.215>)
- Kong JO. Working Environment and Experiences of Diseases in Semiconductor Industry. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2012; 22(1): 32-41
- 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 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2017.27.3.149>)
- Lee JH, Lim SH. Review on Sensor Technology to Detect Toxic Gases. J Sensor Sci & Tech 2015;24(5):311-318 (<https://dx.doi.org/10.5369/JSST.2015.24.5.311>)
- Nho YJ, No SR. Firm Performance Effects of Smart Technology in SMEs. Korean J Labor Studies 28(1), 2022: 135~168
- Occupational Safety and Health Future Technology Institute(OSHFTI). Developing a real-time monitoring system for chemical exposure for small and medium-sized electronics manufacturing industry. OSHFTI; 2019
- Occupational Safety and Health Future Technology Institute(OSHFTI). Developing and application of a smart sensor set for chemical exposure for electronics manufacturing industry. OSHFTI; 2020
- Occupational Safety and Health Research Institute(OSHRI). Research on cutting-edge technology to prevent accidents in confined spaces. OSHRI; 2018
- Occupational Safety and Health Research Institute(OSHRI). Development of gas detector for confined space using state of art sensor technology. OSHRI; 2019
- Occupational Safety and Health Research Institute(OSHRI). Current status and prospect for working environment monitoring by adopting real time detection system. Research report. OSHRI; 2020
- Park DY, S.P. Levine. Characteristics of an open path FTIR capable of rapid beam movement for monitoring gas and vapor contaminants in work place 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 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2019.29.3.278>)
- Park JH, Kim BS, Kang JW, Han SH, Kim KJ. Real-time TVOC Monitoring System

- and Measurement Analysis in Workplaces of Root Industry. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2022;32(4):425-434 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2022.32.4.425>)
- Park JS, Jeon YW, Kim YI, Gil HW, Yang JO, Lee EY, Hong SY. A Case of Acute Respiratory Failure After Trichloroethylene Inhalation. *J Korean Soc Clin Toxicol* 2011;9(1):30~33
- RICK RYS. Smart Sensors Increasingly Important in the Industrial IoT Age. ARC Advisory Group Blog(arcweb.com), 2018
- Ryu J, Lim KH, Ryu DR, Lee HW, Yun JY, Kim SW et al. Two cases of methyl alcohol intoxication by sub-chronic inhalation and dermal exposure during aluminum CNC cutting in a small-sized subcontracted factory. *Ann Occup Environ Med*, 2016;28:65.
- 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/doeahce/RealTimeDetectionGuide.pdf>
- Yeo JH, Choi KM. Comparative Analysis between Direct-reading Meter of PID and GC-FID using the Active Type Air Sampler for VOCs Measurement. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2016; 26(3): 301-306 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2016.26.3.301>)
- Yu IJIARC Carcinogenicity Assessment for 2-Bromopropane: 28 Years after Outbreak of Reproductive Toxicity. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2023; 33(1): 1-2 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2023.33.1.1>)
- U. S Department of Energy(DoE). DOE Handbook Accident and Operational Safety Analysis Volume1: Accident Analysis Techniques(DOE-HDBK-1208-2012). DoE, 2012
- Virji MA and Kurth L. Peak Inhalation Exposure Metrics Used in Occupational Epidemiologic and Exposure Studies. *Front. Public Health* 8:611693.(doi: 10.3389/fpubh.2020.611693)

Abstract

Application of Smart Technologies to Prevent Chemical Poisoning

- Focus on the Electronics Industry by establishing a Continuous Monitoring System -

Wook Kim

Department of Industrial Engineering

University of Ulsan

In Korea, hazardous substances in the workplace are managed by categorizing them into exposure limit setting target harmful substances, permissible limit setting target harmful substances, prohibited substances for manufacture and others, permitted substances for manufacture and others, harmful substances subject to workplace environmental measurement, harmful substances subject to special health diagnosis, and managed harmful substances, according to Article 105 of the Occupational Safety and Health Act. However, incidents of poisoning caused by organic compounds among managed harmful substances, such as trichloroethylene (CAS No. 79-01-6), n-hexane (CAS No. 110-54-3), trichloromethane (CAS No. 67-66-3), and methanol (CAS No. 67-56-1), continue to occur. These incidents mainly occur in subcontractors in the electronics industry that process or manufacture parts for laptops, cell phones, and other devices, exposing a gap in Korea's chemical substance management system. Furthermore, the number of newly handled chemical substances in domestic workplaces increased by 7.1% from 2018 to 31,600 in 2020, indicating a need for changes in chemical substance management systems and methods due to the development of industrial technologies and changes in the quantity and handling methods of chemical substances.

Smart technologies such as the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), robotics, unmanned transportation, 3D printing, nano technology, and sensors are being actively integrated into manufacturing solutions by being combined with information communication technology and information intelligence technology. Recently, these technologies have also been applied to the field of industrial safety

and health. In relation to hazardous chemicals, monitoring systems that detect chemical leaks and transmit this information to processing systems for delivery to administrators are of particular interest. The International Labour Organization (ILO) has identified continuous monitoring of exposure to hazards as a key issue in the field of safety and health for new workplace. The National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) in the United States has conducted research on the use of sensors for chemical exposure monitoring through the installation of the Center for Direct Reading and Sensor Technology (CDRST). In Korea, the Occupational Safety and Health Research Institute and some major companies have attempted to measure air quality levels in confined spaces where worker access is difficult by utilizing devices that combine sensors and communication technology. As a result of this research, remote measurement methods using wireless communication have been included in actual system changes for measuring air quality in confined spaces.

In this study, we propose a chemical substance management approach for small and medium-sized enterprises (SMEs) using a continuous chemical exposure monitoring system based on an IoT smart sensor set that combines sensor and communication technologies. To this end, we developed a pilot smart sensor set and installed it for four months in the chemical handling areas of actual SMEs in the electronics industry to measure the level of chemical exposure. The continuous chemical exposure monitoring system is an operational environment management approach that supports SMEs to manage workplace exposure levels in continuous, in order to prevent health effects caused by hazardous chemicals that may occur due to the high concentration of work at the time of product production, among other factors. By combining smart technology and industrial hygiene theory, such as gas sensors, communication technology, dedicated platforms, and notification standards and methods, SMEs can now monitor and manage the exposure levels of harmful chemicals according to work and time periods. The pilot smart sensor set developed for this study consists of four types of sensors for measuring total volatile organic compounds (TVOCs), chlorine gas (Cl_2), hydrogen fluoride (HF), and hydrogen cyanide (HCN), and the target chemicals were selected based on their toxic risks and the current handling status at the workplace. The sensors can use LTE or WiFi communication, and mobile measurements using batteries can be utilized for maintenance operations. The TVOC sensor set includes a photoionization detector (PID) sensor from Alphasense, UK, and the measurement range is 0–6,000 ppm, and the conversion of each substance can be made possible using the manufacturer's stated response factor (RF). The actual measurement results showed that the daily maximum value varied up to 28–110 times the exposure standard, depending on the process, and the maximum values of exposure levels by time of day on specific days were found to be up to 39–71 times higher for each process, indicating a significant

degree of change. While the measurement by the smart sensor set is for the location, and the measurement according to the Industrial Safety and Health Act is for the worker, it is difficult to directly compare the two measurement results or determine whether the exposure standard is exceeded. However, it can be seen that the level of workplace chemical exposure changes significantly. Therefore, continuous development and theoretical research, policy changes, and expanded support for the continuous monitoring system are necessary to improve SMEs' self-regulatory risk management capabilities and prevent workplace poisoning accidents.

Key word : Chemical poisoning, Acute poisoning, Gas sensor, IoT, continuous monitoring, Self-regulatory risk management