

스마트 센서 세트를 활용한 화학물질 상시모니터링 시스템의 작업현장 적용 결과

김욱 · 류장진¹ · 정종득² · 박귀현² · 김기영³ · 강진주⁴ · 정기효⁵ · 함승헌^{6*}

안전보건공단 중앙사고조사단, ¹안전보건공단, ²안전보건공단 산업보건실, ³안전보건공단 고양파주지사,
⁴안전보건공단 대전세종광역본부, ⁵울산대학교 산업경영공학부, ⁶가천대학교 의과대학 길병원 직업환경의학과

The Results of the Application of a Real-time Chemical Exposure Monitoring System in a Workplace

Wook Kim · Jangjin Ryoo¹ · Jongdeok Jung² · Gwi Hyun Park² ·
Giyeong Kim³ · Jinju Kang⁴ · Kihyo Jung⁵ · Seunghon Ham^{6*}

Accident Investigation Board, Korea Occupational Safety and Health Agency

¹*Korea Occupational Safety and Health Agency*

²*Occupational Health Bureau, Korea Occupational Safety and Health Agency*

³*Goyang & Paju Area office, Korea Occupational Safety and Health Agency*

⁴*Daejeon-Sejong Metropolitan office, Korea Occupational Safety and Health Agency*

⁵*School of Industrial Engineering, University of Ulsan*

⁶*Department of Occupational and Environmental Medicine, Gil Medical Center,
College of Medicine, Gachon University*


ABSTRACT


Objectives: To validate the effectiveness of a real-time chemical exposure monitoring system developed by KOSHA (Korea Occupational Safety and Health Agency), we applied the system to a workplace in the electronics industry for 153 days.


Methods: The monitoring system consisted of a PID chemical sensor, a LTE communication equipment, and a web-based platform. To monitor chemical exposure, four sets of sensors were placed in two manufacturing tasks – inspection and jig cleaning – which used TCE as a degreasing agent. We reviewed previous reports of work environment measurements and conducted a new work environment measurement on one day during the period. The PID sensor systems detected the chemical exposure levels in the workplace every second and transmitted it to the platform. Daily average and maximum chemical exposure levels were also recorded.


Results: We compared the results from the real-time monitoring system and the work environment measurement by traditional methods. Generally, the data from the real-time monitoring system showed a higher level because the sensors were closer to the chemical source. We found that 28% of jig cleaning task data exceeded the STEL. Peak exposure levels of sensor data were useful for understanding the characteristics of the task's chemical use. Limitations and implications were reviewed for the adoption of the system for preventing poisoning caused by chemical substances.

*Corresponding author: Seunghon Ham, Tel: 032-458-2634, E-mail: shham@gachon.ac.kr
Department of Occupational and Environmental Medicine, Gachon University Gil Medical Center, 21, Nadongdaero774-gil,
Namdong-gu, Incheon, 21565, Republic of Korea
Received: April 19, 2023, Revised: June 4, 2023, Accepted: June 28, 2023


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


 Jongdeok Jung <https://orcid.org/0009-0006-3401-1893>


 Giyeong Kim <https://orcid.org/0009-0008-9688-1266>

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

 Jangjin Ryoo <https://orcid.org/0009-0009-2748-5451>

 Gwi Hyun Park <https://orcid.org/0009-0000-9330-2371>

 Jinju Kang <https://orcid.org/0009-0005-4311-9479>

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

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

Conclusions: We found that the real-time chemical exposure monitoring system was an efficient tool for preventing occupational diseases caused by chemical exposure, such as acute poisoning. Further research is needed to improve the reliability and applicability of the system. We also believe that forming a social consensus around the system is essential.

Key words: chemical poisoning, peak exposure level, PID, real-time chemical exposure monitoring, sensor

I. 서 론

산업 기술의 발달과 함께 산업현장은 생산공정, 작업 방식 등에 다양한 변화가 발생되었다. 소품종 대량 생산 방식에서 다품종 소량 생산방식으로의 변화되었고, 제품 출하 시기에 맞춰 작업량이 특정 시기에 집중되기도 한다. 또한 인력파견 등 비정형적인 근로형태가 확대됨에 따라 교육, 검진 등의 안전보건 관리의 어려움이 증가되고 있다. 2020년 국내 신규 화학물질의 수는 31,600종으로 2018년(29,499종) 대비 7.1% 증가되었고, 화학물질 취급업체 수는 37,107개소로 2018년 대비 19.9% 증가되었으나 작업환경측정 대상 등 관리 제도는 큰 변화가 없다 (MoE, 2023). 생산방법의 다변화, 고용형태의 비정규성 증가, 새로운 물질의 사용 등의 화학물질 관리 사각지대의 증가로 인해 우리나라 산업현장에서는 n-헥산(n-hexane), 2-브로모프로판(2-bromopropane), 메탄올(methanol) 등 다양한 화학물질에 의한 중독사고가 지속적으로 발생되고 있다(Kim et al., 2001; Kang, 2005; Kim, 2009, Kim, 2016; Lee et al., 2017).

이러한 사각지대와 함께 작업장 내에서 화학물질 노출 수준의 변이도 작업자의 건강에 영향을 미친다. 특히 작업 시 발생하는 최고 노출 수준(peak exposure level)은 화학물질에 대한 작업자 신체의 정상적인 방어 기전을 무너뜨리고 유해한 건강영향을 초래할 수 있어서 역학이나 노출 과학 분야의 주된 관심이기도 하다(Virji & Kurth, 2021). 하지만 현행 제도에서의 제한된 작업 실태 파악과 1년에 1-2회 제한적으로 실시하는 작업환경측정으로는 유동적으로 변하는 작업장 유해인자의 최고 노출 수준(peak exposure level)의 발생 시점을 찾아서 측정을 실시하기에는 한계가 있다. 작업환경측정의 신뢰도를 높이기 위하여 작업환경측정 신뢰성 평가가 산업안전보건법에 반영되어 시행되고 있으나 이러한 제한점을 해결하기는 어렵고 신뢰성평가 사업 자체에 대한 개선방안도 논의되고 있는 상황이다(Hwang, 2019).

스마트 센서 세트를 이용한 화학물질 상시모니터링 시스템은 작업장에서 사용되는 대표적인 화학물질에 대해

노출수준 변이를 파악하고 이를 사업주 및 근로자에게 알려주어 스스로 관리할 수 있도록 지원하기 위해 안전보건공단이 개발하고 있는 사업장 화학물질 위험수준 자율관리 시스템이다(Kim et al., 2022). 이 시스템은 총 휘발성유기화합물(total volatile organic compounds, TVOC), 염소(chlorine, Cl₂), 불화수소(hydrogen fluoride, HF), 시안화수소(hydrogen cyanide, HCN) 등 4개 화학물질에 대해 LTE(long-term evolution) 통신 기술을 이용해 설치된 작업장의 상시 노출 수준을 초 단위로 파악할 수 있다. 4개 화학물질 중 제1타깃은 세척 등의 공정에 많이 사용되며 전자산업, 금속 제품 가공 등 다양한 작업장에서 흔하게 취급되고 있으며 급성중독을 일으킬 수 있는 유기용제이다. 유기용제 등에 의한 급성중독은 2022년 1월 시행된 중대재해처벌법에 따른 처벌 대상 질병 중 하나이다(MoEL, 2021). 2022년 2월 경남 창원시의 금속 제품 제조업 사업장에서 세척제 노출에 따른 급성 간 독성 집단발생 사건이 발생되었으며 이어 같은 달 경남 김해의 자동차 부품 제조업 사업장에서도 유사한 사고가 발생하는 등 사고가 이어지고 있다(MoEL, 2022).

본 연구는 급성중독 등 직업병 예방을 위해 화학물질 노출 수준의 변이와 최고 노출 수준(peak exposure level)의 발생 현황 파악을 위한 스마트센서 세트의 현장 적용성을 확인하기 위해 실시되었다. 개발된 스마트 센서 세트를 실제 작업 현장에 설치하고 화학물질 노출 수준을 실시간으로 모니터링하였다. 대상은 전자부품을 생산하는 한 사업장의 작업공정 중 TCE를 사용하는 세척작업이며 모니터링 기간은 약 5개월이다. 모니터링 결과는 사업장의 기존 작업환경측정 결과 및 안전보건공단의 신뢰성 평가 결과와 비교하여 상시 노출 모니터링의 효과를 확인하고 화학물질 상시 모니터링 시스템의 현장 적용을 위한 발전방안을 검토하였다.

II. 연구 대상 및 방법

1. 연구 대상

대상 사업장은 PCB 기판 및 이를 활용한 전자제품을

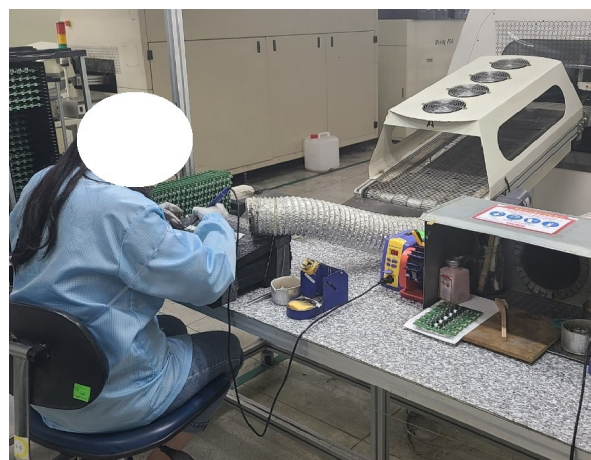
생산하는 제조업 사업장으로 전체 종사자 수는 100-150인 규모이다. 기본 생산공정은 저항, 콘덴서 등의 부품을 입고하여 이를 PCB 기판에 조립하는 솔더링과 조립된 반제품에 대한 테스트, 출고 등으로 구성되어 있다. 솔더링은 납땀이라고도 불리며 PCB 기판에 설계에 따라 다양한 부품을 부착하고 고정하는 공정으로 투입, 기기 조작, 검사, 지그 세척 등의 세부작업으로 구성된다. 공정 간 다양한 유해인자가 있으나 이번 연구에서는 솔더링공정 중 TCE를 취급하는 ‘검사 작업’과 ‘지그 세척 작업’을 대상으로 하였다.

생산라인에 입고된 PCB 기판은 전용 지그(jig)에 일정 수량만큼 삽입되어 자동솔더링기에 투입되고 기기 내부에서 부품과 기판이 자동 납땀으로 조립된다. 자동솔더링기에서 조립된 기판은 작업자가 기판의 조립상태 등 외관을 확인하고 플럭스(flux) 얼룩 등의 이물질이 있는 경우 제전술에 세척제를 묻혀 닦아내는 ‘검사 작업’을 거쳐 출하된다. ‘지그 세척 작업’은 PCB 기판을 운반하기 위한 전용지그를 검사 작업대 옆에 모아두었다가 1일 1-2회가량 별도의 세척실에 설치된 초음파세척기 내의 세척제에 실시한다. 검사 작업은 통상 1일 8시간 수행되며 지그 세척 작업에는 평균적으로 15-20분가량 소요된다. 솔더링 작업 인원은 모두 7명으로 5명은 기판 투입 및 솔더링기 조작 등을 수행한다. 검사 작업은 2명이 수행하는데 이 중 1명이 지그 세척 작업을 병행한다. 전체 작업장 크기는 폭 15 m, 길이 20 m, 높이 3 m이고 자동솔더링기는 총 2기가 설치되어 있다. 별도 장소에 설치되어 있는 세척실은 크기는 폭 2.4 m, 길이 4 m, 높이 2.5 m이며 초음파세척기 2기가 설치되어 있다. 검사 작업 및 지그 세척 작업 모두 동일한 세척제를 사용하는데 세척제의 주성분은 TCE (100%)이다. 월평균 사용량은 100 L로 검사 작업에는 월평균 5 L 가량이 사용되며, 나머지는 주로 초음파세척기를 활용한 지그 세척에 사용된다. 검사 작업은 작업대 위에 놓인 제품을 의자에 앉은 작업자가 검사작업을 수행한다. 작업대 위에 외부식 후드가 설치되어 있으나 제어 속도 측정 결과 0.40-0.42 m/s로 관리대상 유해물질의 국소배기 설치 기준을 충족하지 못하고 후드 중 1개는 덕트와 분리되어 있었다. 지그 세척 공정에 설치된 초음파세척기 중 1대는 덕트가 체결된 밀폐식 세척기였으며 1대는 외부식 상방형 후드가 설치되어 있다. 상방형 후드의 제어 풍속은 0.03-0.04 m/s로 측정되었다.

Table 1. Characteristics of the workplaces

Category	Inspection	Jig cleaning
No. of workers	2	1*
Volume (W*D*H) (m)	15.0*20.0*3.0	2.4*4.0*2.5
Ventilation type	Local exhaust	Local exhaust
Amount of use (liter/month)	5	95

*Short-term task (Performed by one of the inspection workers at a different place)



(a) Inspection



(b) Jig cleaning

Figure 1. Task procedure

2. 연구 방법

상시 모니터링 시스템의 효과 및 특성을 평가하기 위해 동일 작업장에 대한 기존 작업환경측정 방식의 화학물질 측정 결과와 스마트 센서 세트를 활용한 TCE 노출수준 결과를 비교하였다. 기존 작업환경측정 방식 결과는 사업장에서 작업환경측정 전문기관을 통해 실시한 최근 4년간의 작업환경측정결과와 안전보건공단에서 실시한 신뢰성평가 결과로 확인하였다.

작업환경측정 신뢰성평가는 예비조사를 통해 사업장 현황 및 공정 파악, 유해 물질 취급작업 특성, 노출 실태 등을 파악한 후 TCE 취급공정에 한하여 KOSHA Guide A-24-2019에 따라 실시되었으며, 8시간 시간가중평균농도 2건, 단시간 농도 1건 등 시료 3건에 대해 측정하였다.

해당 작업들에 대한 상시모니터링은 안전보건공단에서 연구용역을 통해 2020년 개발된 스마트 센서 세트를 2021년 5월부터 2021년 10월까지 현장에 약 5개월간 설치하여 24시간 상시 노출수준을 측정하였다. Kim et al.(2022)에 의해 소개된 스마트 센서 세트는 영국 Alphasense사의 광이온화 검출기(photoionization detector, PID) 센서가 설치되어 있으며 1초 단위로 총 휘발성유기화합물 노출수준을 감지하여 LTE통신을 통해 서버로 전송하는 방식으로 구성되어 있다. 본 연구를 위하여 이소부틸렌(isobutylene)을 이용하여 교정이 완료된 스마트 센서 세트를 사용하였으며 정상작동여부 및 모니터링 플랫폼과의 통신 상태 등을 사전에 확인하였다.

검사와 지그 세척 각 작업 장소별 2개씩 총 4개의 스마트 센서 세트가 현장에 설치되었으며, 장기간 모니터링을 위한 전원공급이 가능하고 작업에 지장을 주지 않는 범위 내에서 발생원에 최대한 가깝게 설치하였다. 검사 작업에는 자동솔터링기에 연결된 작업 테이블에 2대를 설치하였으며 지그 세척 작업에는 별도 작업실 내에 설치된 초음파세척기 맞은편에 2대를 설치하였다. 발생원으로부터의 거리는 검사 작업장의 경우 모두 0.5 m 이내였으며 지그 세척 작업장은 전원공급문제로 2 m가량 이격 되어 설치되었다.

센서에서 측정된 총 휘발성유기화합물 노출 수준은 식1과 같이 반응계수(response factor, RF)를 이용하여 TCE 노출수준으로 환산하였다. 즉 TCE 노출 수준은 총 휘발성유기화합물 센서에 감지된 신호에 다음 식과 같이 response factor를 곱하여 산출된다. 본 실험에 적용된 알파센스사의 PID A12(10.6 eV)는 제조사가



(a) Inspection



(b) Jig cleaning

Figure 2. Smart sensor system in the workplace

해당 센서의 TCE 농도 환산을 위하여 반응계수(RF)를 0.6으로 제시하였다. 따라서 센서에 따른 총 휘발성유기화합물 노출수준이 10 ppm으로 측정된 경우 TCE 노출수준은 6 ppm으로 계산된다.

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

스마트 센서 세트에서 측정된 데이터는 전용 플랫폼으로 LTE통신망을 통해 매초마다 전송되도록 설정하였다. 전용 플랫폼을 통해 화학물질 노출수준을 사업장에서 확인할 수 있으며 노출 수준에 따라 8시간 TWA를 초과하는 ‘높은 수준’, ‘중간 수준’, 8시간 TWA의 1/2 수준인 ‘낮은 수준’으로 구분하였다. ‘높은 수준’이 감지될 경우는 센서 세트에서 경고음과 램프가 작동되고 사전에 플랫폼에 등록된 사업장 관리자 휴대폰으로 메시

지를 송출하여 작업장 화학물질 노출수준의 관리에 참조하도록 설계하였다.

3. 통계 분석

본 연구의 통계 분석은 SPSS 버전 27.0.0.0(IBM Corporation, USA)을 사용하였고, 유의수준 0.05를 적용하였다. 이와 함께 안진수 등(2019)이 조선소의 도장작업자 유기용제 노출에 관한 연구에 사용했던 웹 기반 화학물질 위험성 평가 도구인 Expostats toolkit (expostat.ca)을 활용하였다. Expostats은 산업보건자료 해석을 위한 통계 도구로 4가지 Tool kit이 있으며 이중 측정결과에 대해 로그노말분포 파라미터를 계산해 주며 상자 그림 그래프(box and whisker graph) 등을 자동으로 생성시켜주는 Tool 1을 주로 사용하였다.

사물인터넷 기술이 접목된 화학센서를 이용한 작업장의 상시 화학물질 노출수준 데이터의 특성상 데이터가 전송되지 않는 시간이 포함되어 있거나 화학물질 측정값이 0으로 표시된 경우도 있었다. 이렇듯 화학물질이 감지되지 않은 시간의 데이터, 제작사가 제시한 최소

감지 범위(TCE 환산결과 65 ppb)의 1/2 이하 데이터는 통계분석에서 제외하였다.

III. 결 과

1. 과거 4년 작업환경측정결과

솔더링 공정의 작업환경측정 대상 물질은 혼합유기화합물질과 금속류이었다. 화학물질 사용실태에 대한 예비조사 결과 주 사용 화학물질은 플렉스, 플렉스 제거제, 이소프로필알콜 등이었으며 사용량은 각각 월평균 5 L 가량으로 파악되었다. TCE는 2019년부터 2021년 상반기까지 매월 5 L를 취급하는 것으로 파악되었고 2021년에는 다른 세척제로 교체한 것으로 나타났다. 혼합유기화합물측정은 검사 작업자 2명에 대해 8시간 TWA 개인시료채취법으로 측정되었다.

과거 4년간(2018년-2021년) 8차례 측정 중 2019년 하반기, 2020년 상반기, 2021년 하반기를 제외하면 혼합유기화합물(EM) 평가 결과는 모두 0으로 평가되었으며 해당기간 동안 n-헥탄과 초산프로필은 모든 측정에

Table 2. Results of workplace chemical exposure monitoring (2018–2021)

Year	Point	EM*	IPA [†] (ppm)	TCE [‡] (ppm)	EDC [§] (ppm)
1 st half of 2018	P1	0	N.D.	-	-
	P2	0	N.D.	-	-
2 nd half of 2018	P1	0	N.D.	-	-
	P2	0	N.D.	-	-
1 st half of 2019	P1	0	N.D.	N.D.	-
	P2	0	N.D.	N.D.	-
2 nd half of 2019	P1	0.062	0.386	0.601	-
	P2	0.052	0.296	0.506	-
1 st half of 2020	P1	0.266	4.413	2.443	-
	P2	0.121	4.579	0.985	-
2 nd half of 2020	P1	0	N.D.	N.D.	-
	P2	0	N.D.	N.D.	-
1 st half of 2021	P1	0	N.D.	-	-
	P2	0	N.D.	-	-
2 nd half of 2021	P1	0.039	7.305	-	0.543
	P2	0.038	7.250	-	0.361

*EM: Exposure level for mixed volatile organic compounds

[†]Isopropyl alcohol

[‡]Trichloroethylene

[§]Ethylene dichloride (1,2-Dichloroethylene)

서 검출되지 않았다. 혼합유기화합물의 최대 노출수준은 2020년 상반기에 0.266으로 나타났다.

2. 작업환경측정 신뢰성평가 결과

작업환경측정 신뢰성평가는 2021년도 안전보건공단 신뢰성평가 사업 대상으로 선정되어 대상통보 안내 등 절차에 따라 추진되었다. 예비조사 시 TCE 취급 여부를 사업장 담당자와 함께 확인하였고 취급공정, 취급량 및 취급 방법에 대하여도 파악하였다.

예비조사결과 TCE는 완제품 검사 시 생산과정에서 부착된 오염을 제거하는 '검사 작업'과 부품조립을 위해 사용된 지그를 세척하는 '지그 세척 작업'에 사용되고 있었다. 월사용량은 평균 100 L이며 지그세척작업에 95%가 사용되고 있었다. 자동솔더링기 2대에서 배출되는 제품에 대한 검사 작업을 기기별로 각각 1명이 실시되고 있으므로 2명에 대한 개인시료포집방법으로 8시간 TWA측정을 하였다. 검사작업자 2명 중 1명이 작업간 수시로 모아진 지그를 별도의 세척실에서 자동세척기를 이용하여 세척하고 있어 지그 세척 작업에 대하여는 단시간 측정을 별도로 실시하였다.

측정 결과 당일 검사 작업과 함께 지그 세척 작업을 실시한 P2에서 8시간 TWA가 12.029 ppm으로 노출기준을 1.2배 초과하였으며, 지그 세척 작업에 대한 단시간 시료포집(P3)에서도 STEL값은 128.660 ppm으로 단시간노출기준(25 ppm)을 5.1배 초과한 것으로 나타났다. P2와 P3의 표준화 값 계산 결과도 모두 1을 초과하여 허용 기준 초과 여부 평가 결과 '초과'로 평가되었다.

Table 3. Results of working environment measurement by KOSHA (2021)

Year	Task	Point	TCE* (ppm)	OEL† (ppm)
2 nd half of 2021	Inspection	P1	1.278	10
		P2	12.029	10
	Jig cleaning	P3‡	128.660	25

*Trichloroethylene

†Occupational exposure limit

‡Short term exposure measurement (performed by the same worker as P2)

3. 스마트 센서 세트를 이용한 상시 모니터링 결과

1) 설치 및 운영

스마트 센서 세트에서 전송된 데이터는 매 초당 감지되는 TVOC 노출수준으로, 전용 모니터링 플랫폼을 통해 TCE 노출 수준으로 자동 변환되어 일일 최댓값, 최솟값 및 평균값이 기록된다. 각 작업별 2개씩 총 4개의 스마트 센서 세트(1번-4번)가 총 153일간 설치 및 운영되었다. 설치 기간 중 토요일, 일요일 또는 법정 공휴일은 총 48일이었고 8일간(휴일 4일 포함)은 모든 센서 세트가 측정되지 않았다. 센서 세트별 측정되지 않은 일수는 최소 135일에서 최대 145일로 상이했다. 작업별 노출 수준 분석을 위해서 정상 가동일수를 확인하여 더 많은 데이터 확보가 가능한 센서 세트 측정치를 해당 작업의 대표 자료로 선정하였다. 검사 작업은 135일간 정상 가동이 되었던 1번 센서 세트보다 2번 센서 세트가 9일간 더 많이 정상 가동되었고, 지그 세척 작업은 4번 세트가 145일간 정상 가동되어 작업별 대표자

Table 4. Number of days of missing data for each smart sensor system

Category	Inspection		Jig cleaning	
	Sensor #1	Sensor #2	Sensor #3	Sensor #4
N1*	135	144	144	145
N2†	18	9	9	8
N3‡	11	4	4	4
N4§	7	5	5	4
N5	9 (6.67%)	8 (5.56%)	16 (11.11%)	12 (8.28%)

*Total numbers of days of the sensor system working

†Total numbers of days of the sensor system not working

‡Total numbers of days of the sensor system not working on work days

§Total numbers of days of the sensor system not working on off days

||Total number of days that the minimum exposure level exceeded the threshold of the sensor

료로 각각 선정하여 노출 수준을 분석하였다. 4개 센서 세트 모두 일일 최솟값은 대부분 최소 감지 수준 이하로 나타났으나, 센서별로 5.56-11.11%는 일일 최솟값이 최소 감지 범위보다 높게 나타났다.

2) 전체 기간의 일일 최댓값 및 평균값

일일 최댓값(peak exposure level)과 평균값(average level)의 변화는 Fig. 3과 Fig. 4에 표시하였다. 전체 측정 기간 동안 일일 최댓값의 범위는 검사 작업은 1.2 ppm(day13, 휴일)-279.1 ppm(day144, 평일)이고, 지그 세척 작업은 1.2 ppm(day20, 휴일)-2,769.3 ppm(day105, 평일)이었다. 일일 평균값의 범위는 검사 작업 0.06 ppm(day77, 휴일)-20.2 ppm(day126, 평일), 지그 세척 작업 0.04 ppm(day20, 휴일)-109.8 ppm(day125, 휴일)으로 나타났다. 최댓값의 변화량이 평균값의 변화량보다 더 크게 나타났으며, 지그 세척 작업은 변화량이 검사 작업보다 크게 나타났다. 지그 세척 작업 평균값의 최댓값은 휴일(day125)에 나타났는데 다음날(day126, 평일)까지도 유사한 정도의 높은 수준인 108.5 ppm으로 유지되었다.

작업에 의한 영향을 파악하기 위하여 각 공정별 전체 기간, 평일 및 휴일을 구분하여 일일 최댓값과 평균값에 대한 통계를 구했다. 평일 일일 최댓값의 기하평균(geometric mean, GM)은 검사 작업 44.9 ppm, 지그세척작업 710 ppm으로 지그 세척 작업이 15.8배 높게 나타났으며, 평일 일일 평균값의 GM은 검사 작업 0.795 ppm, 지그 세척 작업 7.19 ppm으로 지그 세

척 작업이 9.0배 높게 나타났다. 평일 일일 최댓값의 GM은 전체 기간보다 검사 작업의 경우 1.9배, 지그 세척 작업의 경우 3.0배 높고, 휴일보다는 각각 8.2배, 37.8배 높게 나타났다. 평일의 평균값 또한 전체 기간의 평균값 대비 검사 작업은 1.2배, 지그 세척 작업은 1.4배 높게 나타나는 등 평일 작업에 따른 노출수준은 전체 기간이나 휴일에 비해 높게 나타났다.

3) 신뢰성평가 실시일 측정 결과

작업환경측정 신뢰성평가 측정일은 측정시작부터 57 일차(day57)로 평일이었다. 해당일 검사 작업의 스마트 센서 세트 측정 결과는 일 최댓값 44.8 ppm, 일 평균값 0.7 ppm이었으며 지그 세척 작업 측정 결과는 일 최댓값 1,941.8 ppm, 일 평균값 13.9 ppm이었다. 스마트 센서 세트에서 초당 측정된 측정값의 일변화는 Fig. 5, Fig. 6과 같다. 검사 작업의 노출수준은 오전 09시부터 감지되기 시작해서 오후 9시까지 변화가 이어지고 있다. 오전 작업에 대한 피크치는 9시경 14 ppm을 초과하는 수준에서 시작하여 오후 1시에서 2시 경에는 매우 낮은 수준을 나타내다가 오후 5시반, 오후 8시반 등에 피크치를 보여주고 있다. 지그 세척 작업의 일변화는 검사작업보다 더 크게 나타났는데 최댓값이 단시간작업 노출기준의 71배 이상 측정되기도 했다. 오전 8시반 이후 8차례 단시간노출기준을 초과하였으며 8차례 모두 8시간 TWA인 10 ppm의 5배 이상 초과되었다. 가장 오랜 시간 초과된 것은 17시 36분 40초 이후 관찰되었으며 18시 04분 52초까지 총 28분 12초간

Table 5. Descriptive statistics of daily TCE exposure level by the smart sensor system

Category	Inspection			Jig cleaning			
	N*	AM [†] ±SD [‡]	GM [§] (GSD)	N	AM±SD	GM (GSD)	
All	144	45.4±47.8	24.0 (3.68)	145	736±729	236 (8.17)	
Peak level	Working day	101	60.5±49.0	44.9 (2.29)	101	1030±691	710 (3.07)
	Off day	43	9.8±14.5	5.5 (2.70)	44	69.8±139	18.8 (4.77)
Average level	All	144	1.74±3.72	0.7 (3.38)	145	12.1±19.1	5.0 (4.44)
	Working day	101	1.3±2.23	0.8 (2.28)	101	10.1±12.6	7.0 (2.17)
	Off day	43	2.9±5.77	0.5 (6.09)	44	16.8±28.7	2.2 (9.39)

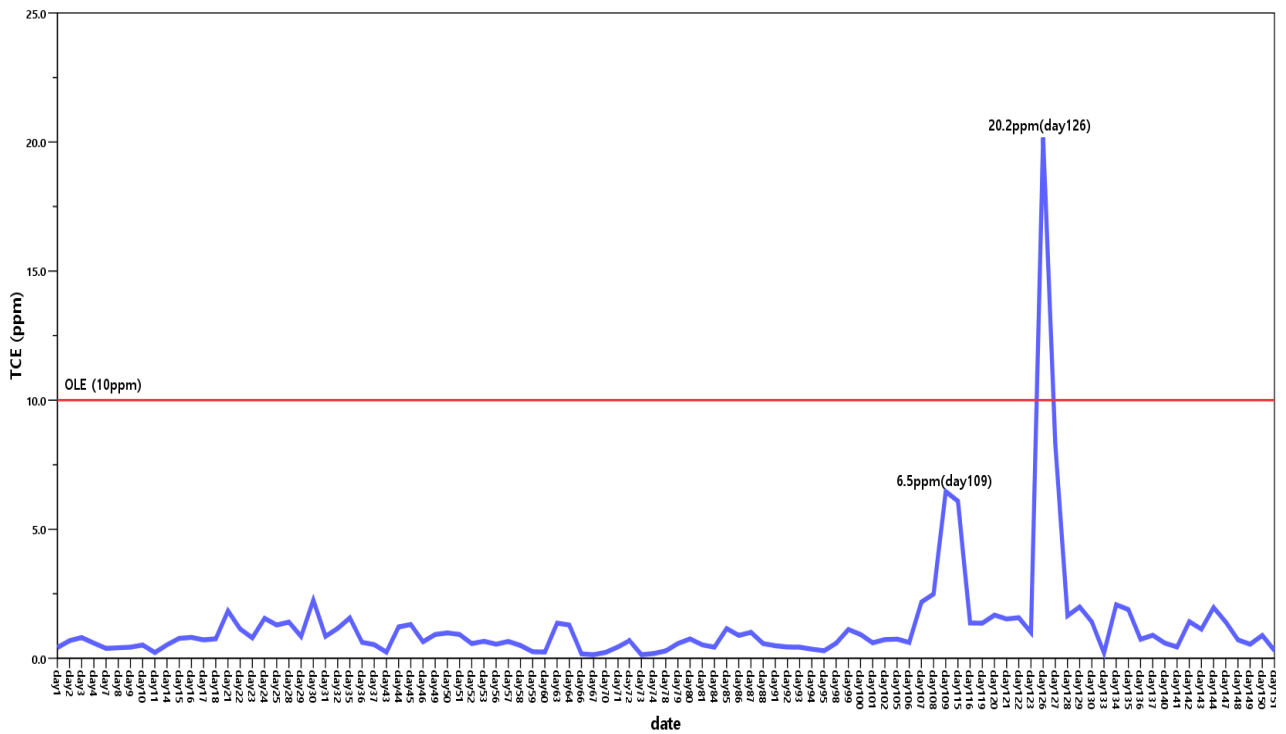
*Number of samples

[†]Arithmetic mean

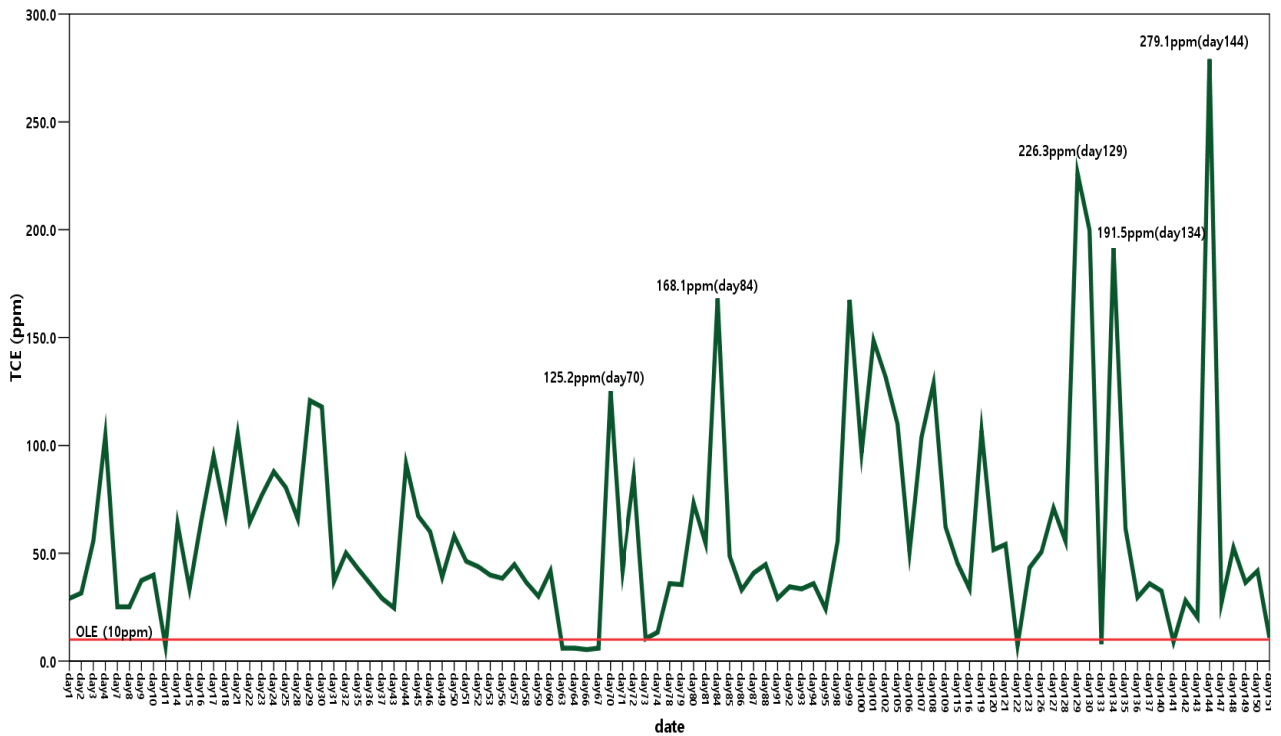
[‡]Arithmetic standard deviation

[§]Geometric mean

^{||}Geometric standard deviation

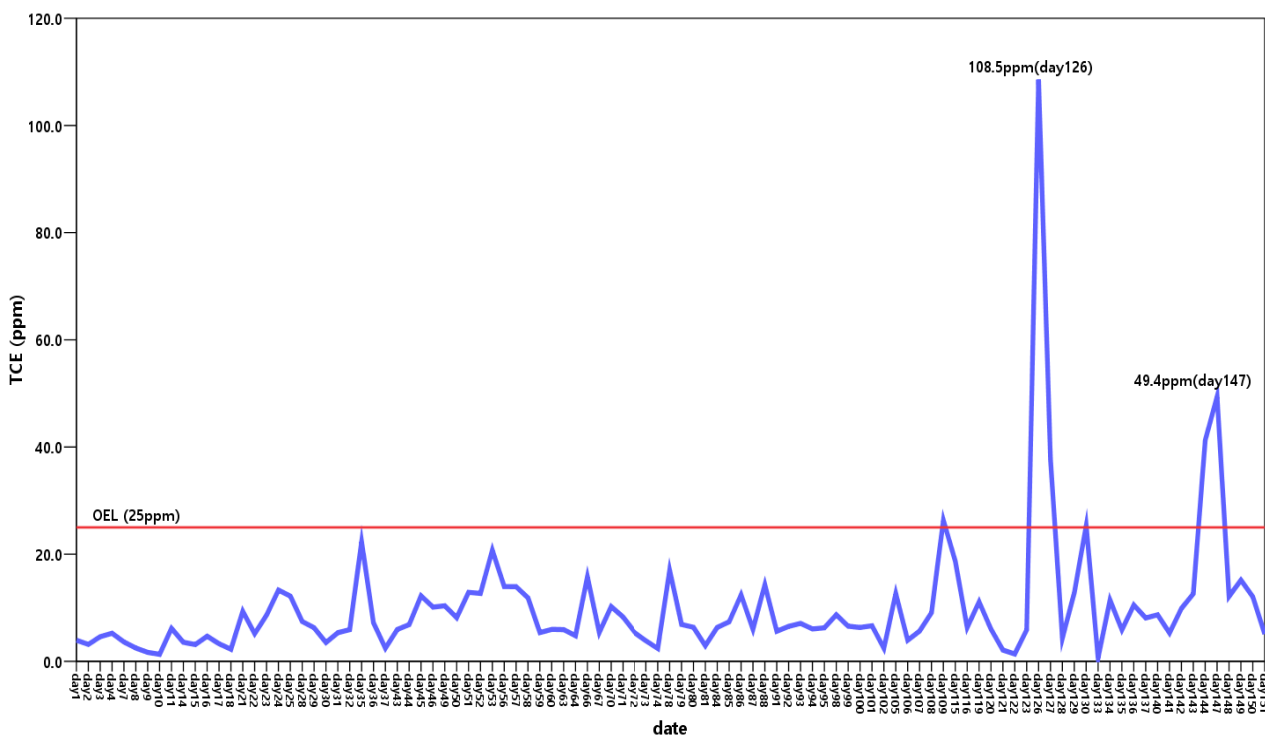


(a) Average exposure level

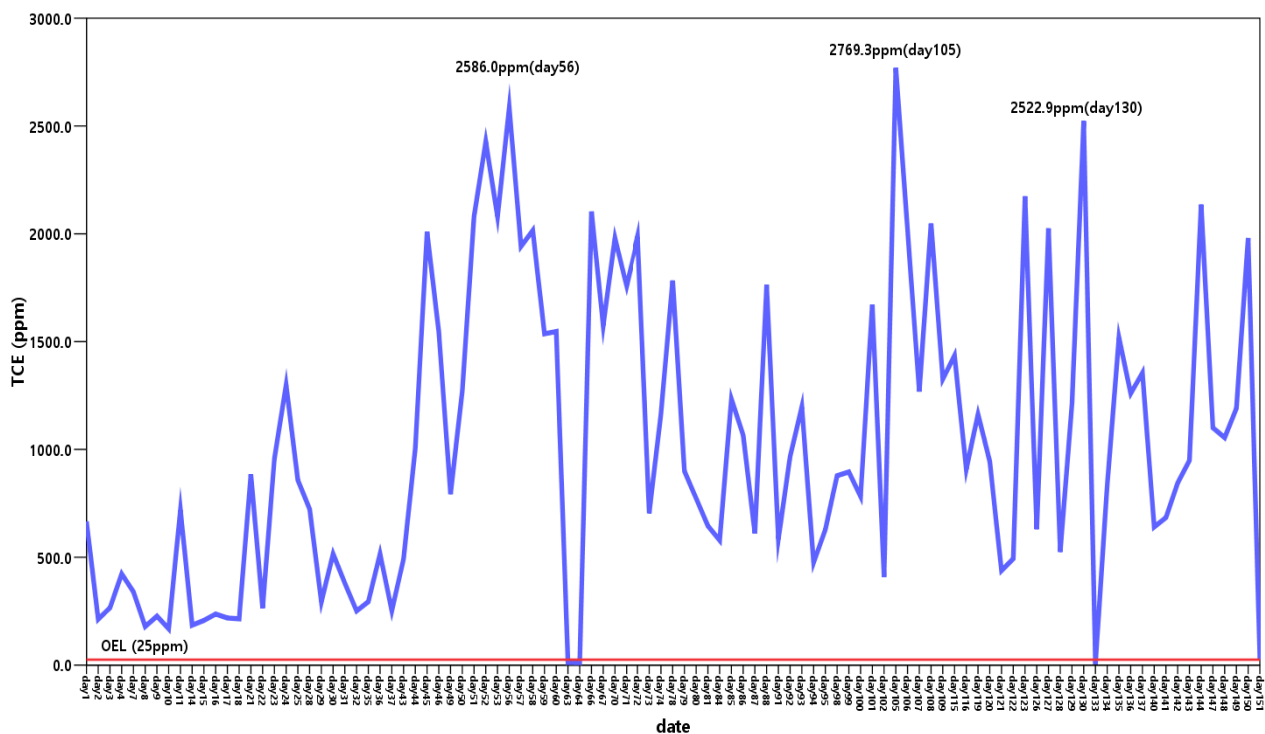


(b) Peak exposure level

Figure 3. Daily variation in TCE exposure levels for the inspection task (Red solid line indicates the OEL-TWA for TCE)



(a) Average exposure level



(b) Peak exposure level

Figure 4. Daily variation of TCE exposure levels for the jig cleaning task (Red solid line indicates the OEL-STEEL for TCE)

Table 6. Descriptive statistics of TCE exposure level by the smart sensor system(day57)

Category	Inspection			Jig cleaning		
	N*	AM [†] ±SD [‡]	GM [§] (GSD)	N	AM±SD	GM (GSD)
24Hr	63,427	0.831±2.01	0.346 (3.03)	60,448	18±85.8	0.885 (7.24)
Sampling time	17,383	0.427±0.57	0.295 (2.17)	871	13.4±18.5	3.33 (6.6)
Other time	42,672	1.04±2.4	0.38.0 (3.43)	59,577	18±86.4	0.868 (7.2)

*Number of samples

[†]Arithmetic mean

[‡]Arithmetic standard deviation

[§]Geometric mean

^{||}Geometric standard deviation

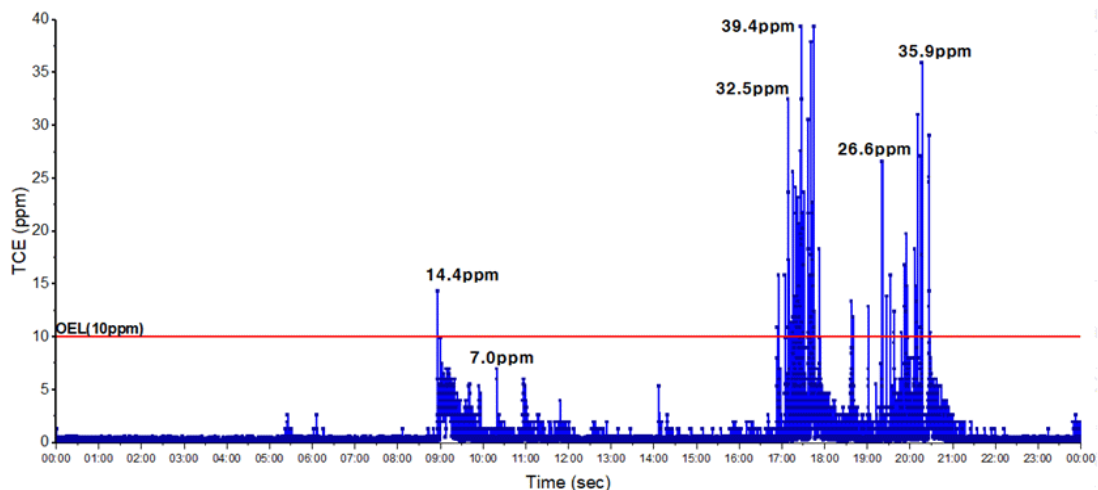


Figure 5. TCE exposure level variation over 24 hours on the reliability assessment day during the inspection task (Red solid line indicates the OEL-TWA for TCE)

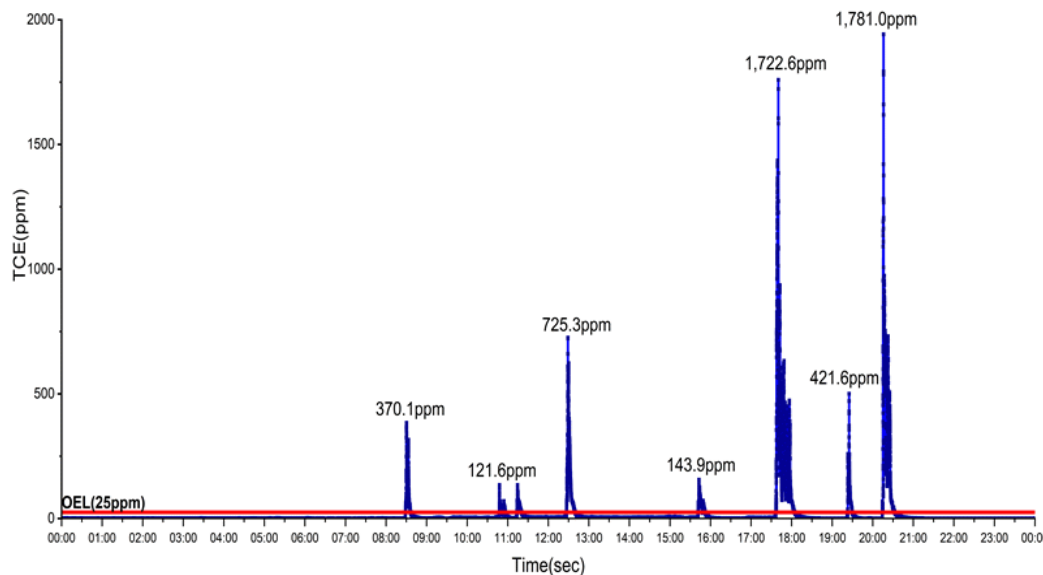


Figure 6. TCE exposure level variation over 24 hours on the reliability assessment day during the jig cleaning task (Red solid line indicates the OEL-STEL for TCE)

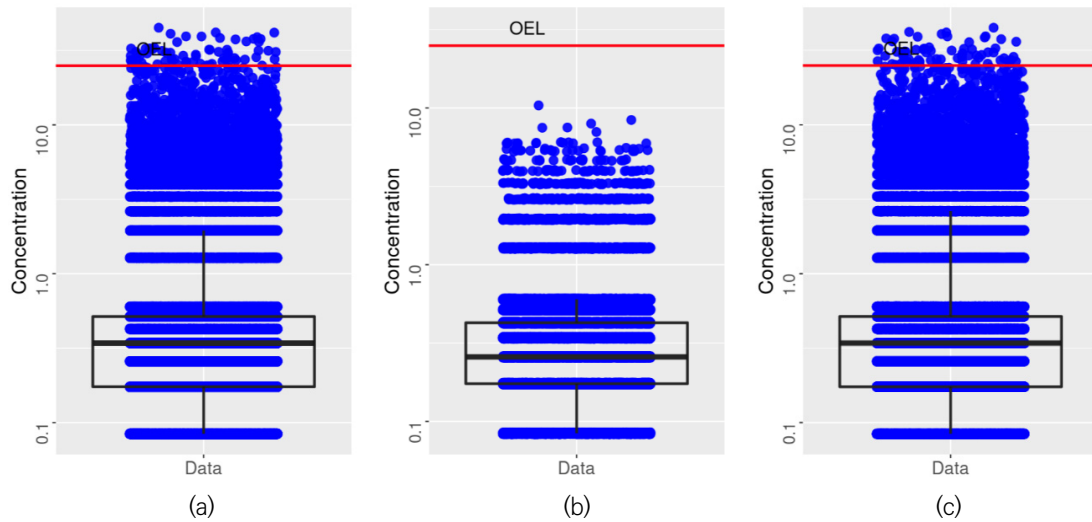
단시간노출기준을 초과한 것으로 측정되었다.

4. 작업환경측정, 신뢰성평가, 스마트 센서 세트 측정 결과의 비교

작업환경측정 결과에 따른 TCE 노출농도는 0.506 ppm-2.443 ppm으로 최고 노출수준은 2020년 상반기에 측정되었다. 신뢰성평가에서는 검사 작업만 수행한 근로자는 1.278 ppm으로 작업환경측정 결과와 큰 차이가 없었으나 지그 세척 작업을 같이 실시한 근로

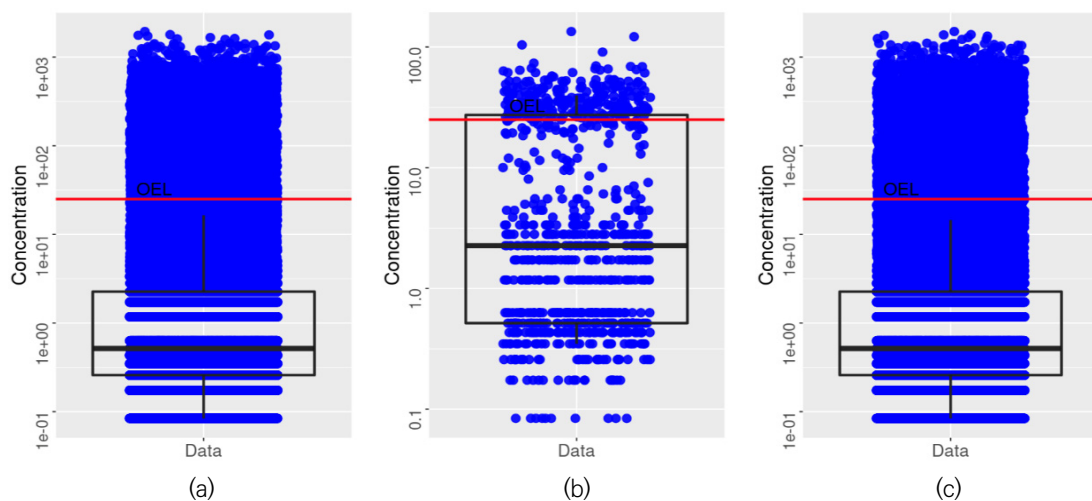
자의 8시간 TWA는 12.029 ppm, 단시간측정결과는 128.660 ppm으로 노출기준을 최대 5.1배 초과된 것으로 나타났다.

스마트 센서 세트에 의한 측정은 작업환경측정이나 신뢰성평가보다 장기간 실시되었고 24시간 연속으로 측정이 진행되었다. 전반적으로 볼 때 최댓값(peak exposure level)이 평균값(average level)에 비해 작업별, 근무 유무 등에 의한 차이가 더 크게 나타났고 근무일과 휴일의 차이는 지그 세척 작업에서 더 크게 나타났다.



(a) 24 hours (set OEL for 8hr TWA (10 ppm)), (b) Sampling time, (c) Other time

Figure 7. Box and whisker plot of TCE exposure level for the inspection task for day 57 (Red solid line indicates the OEL-TWA for TCE)



(a) 24 hours (Set OEL for STEL (25 ppm)), (b) Sampling time, (c) Other time

Figure 8. Box and whisker plot of TCE exposure level for the jig cleaning task for day 57 (Red solid line indicates the OEL-STEL for TCE)

신뢰성평가 측정일에 대한 스마트 센서를 통한 전반적인 노출수준을 파악하기 위하여 24시간, 측정시간, 측정 외 시간으로 구분하여 box and whisker plot을 작성하였다(Fig 7, 8). 검사 작업장의 경우 세 경우 모두 대부분 8시간 TWA 노출기준 이하로 나타났으나 지그 세척 작업장은 세 경우 모두 단시간노출기준을 초과한 데이터가 많이 나타났다. 특히 측정 외 시간에서 측정시간보다 더 많은 데이터가 노출기준을 초과하였다. 지그 세척 작업에 대해 신뢰성평가 측정이 실제 진행된 시간(15분)의 측정값의 GM(GSD)은 3.33 ppm (6.6)이며 최솟값은 0.084 ppm, 최댓값은 134 ppm이었다. 신뢰성평가 측정시간 중 전체 측정치의 28%가 단시간노출기준을 초과하는 것으로 나타났다.

IV. 고 찰

1. 화학물질 상시 모니터링 결과

스마트 센서 세트를 이용한 작업장소의 상시 모니터링 결과와 기존 작업환경측정방식으로 작업자에 대해 측정된 결과 또는 노출기준을 직접적으로 비교하는 것은 추가 논의가 필요하다. 하지만 상시모니터링의 현장 적용성을 평가하기 위해 센서 세트 측정 결과를 8시간 TWA 및 STEL, 작업환경측정 결과와 각각 비교하여 검토해 보았다.

검토결과 지그 세척 작업의 노출수준은 검사 작업의 노출수준보다 모든 통계량이 높게 나타났다(Table 5). 일일 최댓값(peak level)을 STEL과 비교한 결과 두 작업 모두 휴일을 제외하고 평균치가 STEL을 넘었으며, 근무일의 일일 최댓값이 전체기간 또는 휴일의 일일 최댓값보다 높은 것을 볼 때 지그 세척 작업의 실시여부가 최댓값 수준에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 일일 평균값(average level)은 대부분의 경우 8시간 TWA 이하 수준으로 나타났다. 지그 세척 작업의 경우 휴일의 평균값이 높게 나타났는데 이는 밀폐된 장소에 설치된 세척기에서 발생된 세척제 증기가 국소배기장치가 가동되지 않는 휴일에 작업장 외부로 배출되지 못한 것이 주요 원인으로 판단된다.

센서세트와 기존 작업환경측정 방식의 측정값에 대한 비교결과 전반적으로 스마트 센서 세트의 측정값이 작업환경측정 방식의 측정값보다 더 높게 나타났는데, 이는 측정 장소와 측정 시간이 다르기 때문이다. 즉, 화학물질의 발생원에 최대한 근접하여 설치된 스마트 센서

세트의 노출수준 측정값은 휴식, 작업준비 또는 이동 등의 영향으로 작업자에 대한 개인시로 채취결과 보다 높게 나타날 수 있고 8시간 또는 15분간의 평균값보다 짧은 시간동안의 측정값이 더 높게 나타날 수 있다. 강성규(2005)는 노말핵산 직업병 발생에 따른 재현실험에서 4시간 측정값은 최고 208 ppm이었으나 50초 간격으로 실시한 실시간 측정결과는 1,000 ppm을 넘는 경우도 있었다고 보고했다. 이번 연구에서는 1초 단위로 측정을 실시하였으며, 일일 최댓값은 지그 세척 작업 2,769 ppm(day 105), 검사작업 279 ppm(day 144)으로 나타났다.

노출수준의 일일변동현황 검토를 통해 작업에 따른 화학물질 사용특성을 파악할 수 있었다(Table 6). 검사 작업에 대한 신뢰성평가 측정일의 노출수준 측정결과에 따르면 TCE 노출은 09시부터 시작되어 21시까지 지속되었다. 09시, 17시, 20시 등 세 차례 10 ppm을 초과하고 있었고 최고 노출수준은 17시37분(44.7 ppm), 20시17분(41.8 ppm)에 나타났다. 지그 세척 작업은 20시20분경, 17시40분경, 12시30분경, 08시30분경 등 총 8차례 25 ppm을 초과하였고 최고 노출 수준(peak exposure level)은 20시15분(1,941.8 ppm), 17시40분(1,722.6 ppm), 12시29분(725.3 ppm), 08시33분(315.9 ppm) 순으로 나타났다. 이러한 데이터를 볼 때 해당 작업은 오전 9시경부터 본격적으로 시작되어 오후 9시 즈음 마무리 되는 것으로 보이며, 작업준비 시점과 작업 종료 시점에서 화학물질 노출이 많은 것으로 나타났다. 또한 지그 세척 작업의 경우 세척조에 담겨있는 세척제의 양이 많고 작업자가 직접 손으로 지그를 담갔다 빼는 작업의 특성에 따라 최고노출수준이 검사작업보다 높고 작업을 실시하는 시간에 집중적으로 발생 되는 것을 알 수 있었다. 따라서 공기정화장치의 정상 가동 여부를 점검하고 가동스위치를 작업 공간 외부에 설치하여 작업 전후 충분한 환기가 이루어질 수 있도록 조치하고 작업 시 유기가스용 방독마스크 착용 확인 등 건강장해 예방조치가 우선 적용되는 것이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

실제 작업장소에 상시모니터링을 실시한 결과 작업환경측정결과보다 높은 수준의 노출이 순간적으로 발생되고 있음을 알 수 있었다. 적절한 관리가 이루어지지 않는 경우 화학물질 노출수준은 노출기준보다 높을 수 있다. TCE를 이용한 금속세척작업에 대한 김현수(2023)의 연구에 따르면 최초 측정 시 TWA 37.5 ppm,

STEL 411.7 ppm으로 노출기준을 초과하였고, 사업장에 초과여부 통보 후 재측정을 실시한 결과 역시 TWA 9.1 ppm, STEL 38.0 ppm으로 1, 2차 측정 모두 노출기준을 초과하였다.

2. 스마트센서세트 적용

근로자 건강보호를 위해 작업과정에서 발생하는 유해화학물질의 노출수준을 효과적으로 파악하는 것은 위험의 인지측면에서 중요한 부분이다. 유해화학물질 노출수준을 현장에서 신속하게 알기 위해 센서가 부착된 직독식 장비 활용 등 측정 방식의 개발과 변화는 지속되어 왔다(Siegel et al., 2019). Lee & Lim(2015)는 유해화학물질 감지를 위한 반도체식(semiconductor gas sensor), 전기화학식(electrochemical sensor), 촉매식(catalytic sensor) 등 다양한 센서의 특성을 측정목적 및 측정환경에 따라 대상 화학물질에 대한 감도(sensitivity), 선택성(selectivity), 안정성(stability), 반응속도(response time) 등의 항목에 대해 검토하였다. 독성가스 누출감지 성능을 중심으로 검토한 결과 전기화학식센서가 가격이나 검지능력차원에서 누출감지를 위한 산업안전목적으로는 활용도가 높은 것으로 평가되었다. 작업환경측면에서 TVOC 측정을 위하여 광이온화식 센서(photoionization detector, PID)를 적용하기 위한 방안도 연구되었다(Hori et al., 2012; Hori et al., 2015). 검토결과 광이온화식 센서는 정확한 측정값을 얻을 수 있어 작업장의 TVOC 검출을 위한 목적으로 사용이 적정하지만, 가격이 다른 센서에 비해 고가인 점, 이온화전위가 높은 화학물질에 대한 측정오류가 발생할 수 있는 점, 장기간 사용 시 주변 여건에 따라 센서에 오염물이 부착될 수 있으므로 올바른 방법으로 주기적인 관리가 필요하다는 점 등이 지적되었다.

센서의 구체적인 적용방안측면과 제도적 관점에서의 발전방안도 검토되었다. 시안화수소 등 급성중독사고를 발생시킬 수 있는 물질에 대한 직독식 장비를 이용한 현장 측정 및 위험수준 평가 방안, 유해화학물질이 단시간 고농도로 노출되는 반도체 제조공정의 유지보수작업(maintenance)의 유해성을 파악하기 위해 직독식장비의 활용방안이 연구되었고, 실시간 직독식 장비(real time detection system, RTDS)를 작업환경측정에 활용하는 방안과 센서 성능 평가 전문기관 설치 등의 발전방안이 제시되기도 했다(Ham et al., 2019; Yeo &

Choi, 2016; OSHRI, 2020). 최근에는 이론적 연구에 이어 철강산업의 작업현장에 반도체식 센서를 설치하여 TVOC 노출 수준 변화를 분석한 현장연구도 진행된 바 있다(Park et al., 2022).

이번 연구에서는 유해화학물질 취급이 많은 중소기업 전자산업에 대한 화학물질 상시 모니터링 시스템 구축 연구(OSHFTI, 2019)와 상시모니터링 시스템 개발 연구(OSHFTI, 2020)에 따라 개발된 상시 모니터링 시스템을 실제 현장에 적용하여 보았다. 기존 연구들 보다 설치기간이 길고 실제 작업장에서 측정된 결과를 방법에 따라 비교했다는데 특징이 있다. 스마트 센서 세트를 실제 작업현장에 장기간 설치하고 LTE 통신을 통한 상시 모니터링 시스템을 적용하여 기존 작업환경측정 방식의 측정 결과와 비교해본 결과 다음과 같은 기술 측면과 현장 적용성 측면의 제한점이 발견되었다. 기술 측면의 제한점은 센서세트의 전원 및 통신 문제, 센서 자체의 신뢰도 및 오염문제, 다른 화학물질의 존재에 따른 간섭현상, 고정된 장소에 설치된 센서세트의 측정값에 대한 작업장 노출기준 마련 등이다. 이번 연구에 사용된 스마트 센서 세트도 기기 가동 및 통신 등을 위한 전원 공급을 위한 배터리가 부착되어 있어 2-3시간은 단독 운용이 가능하나 장기간 가동을 위해서는 외부전원 연결이 필요했다. 작업장에서 화학물질 노출을 모니터링 하기 위해서 스마트 센서 세트를 발생원에 가깝게 작업 위치에 가깝게 설치하는 것이 필요하나 전원 연결문제는 현장설치의 제한점으로 작용되었다. 또한 LTE 통신 연결에 대한 고려도 필요했다. 통신음영지대 또는 밀폐 공간 등 통신이 되지 않는 지역은 설치가 어렵다. 향후 이러한 문제는 기존 센서세트에 비해 전력소모량이 적어 1-2년간 사용 후 폐기가 가능한 저전력블루투스(bluetooth low energy, BLE)기술, 네트워크 통신 방식으로 통신음영지역 발생을 최소화시킨 노드 네트워크 통신방식 등 새로운 ICT 기술이 적용된 스마트 센서 세트가 개발될 경우 상당부분 해결될 수 있을 것으로 판단된다. 센서의 현장 적용 시 측정값의 객관성 담보 방안도 필요하다. 제작사의 성능테스트를 통해 초기 정확도를 확인할 수는 있으나 최초 현장적용 시, 일정 주기 이후 사용 시, 설치환경의 오염도 등에 따라 센서 측정값에 대한 정확도를 측정하기 위한 방법의 표준화 방안 마련이 필요하다. 센서 측정값에 대한 위험장소 경보기준 등에 대한 검토도 필요하다. 미국 질병관리청(Centers for Disease Control and Prevention,

CDC) 산하 국립직업안전보건원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)은 화학물질로부터 근로자 생명과 건강보호를 위해 작업장소의 화학물질 노출수준이 생명이나 건강에 즉각적인 영향을 미칠 수 있는 농도(immediately dangerous to life or health, IDLH)를 제시하고 있다. 향후 IDLH, STEL, TWA 등 작업장의 화학물질 노출기준을 검토하여 센서나 직독식장비에 의한 측정결과 평가기준 마련이 필요하다. 현장 적용성 측면의 제한점에 대해서는 작업자와 관리자 관점에서 검토해보았다. 작업자는 센서 세트가 작업에 지장을 줄 경우 임의로 위치를 변경시키거나 꺼버림, 화학물질을 이용하여 측정치를 왜곡하려는 등의 행동을 시도할 수 있고, 관리자는 높은 수준의 최대노출수준이 외부로 알려질 것을 우려해 측정값을 왜곡시키려고 하거나 센서 세트를 꺼버리거나 측정을 거부할 수 있으므로 향후 적용 시 이러한 부분에 대한 사전 설명과 함께 법적인 제재조치는 배제하여 화학물질 자율관리를 위한 인센티브 부여 방안이 필요하다.

이러한 제한점들에도 불구하고 스마트 센서 세트를 이용한 상시모니터링의 현장적용 연구결과 다음과 같은 장점을 확인할 수 있었다. 첫째, 전용플랫폼을 이용하여 작업에 따른 화학물질 노출수준을 원하는 때 수시로 확인할 수 있다. 지그 세척 작업 등 수시로 수행하는 작업에 따른 노출수준 평가를 통해 작업자의 위험인식이 개선될 수 있고, 세척기 주변의 화학물질 노출수준 변이 등에 대해 사업주 또는 관리자가 확인하여 근로자의 건강보호, 장비 이상 유무 파악, 보호구 착용 등을 위한 안전보건교육에 활용할 수 있다. 둘째, 화학물질 누출 등의 이상 유무를 파악할 수 있다. 예를 들어 세척조에서 평소보다 높은 수준의 고노출 상황이 발생 될 경우 세척조 내부 냉각코일의 고장으로 인한 세척용제의 비정상적인 증발이 의심되므로 장비에 대한 개선을 통해 세척용제 소모량을 줄일 수 있다. 세 번째, 작업환경측정 정도의 효과성을 높이는데 활용 될 수 있다. 작업환경측정기관에서 예비조사 시 1차 측정대상을 선정하고 스마트 센서 세트를 측정대상 근로자의 작업위치에 1-2주간 설치하는 등 평가를 통해 실제 측정 대상을 정밀하게 선정하는데 활용할 수 있다.

V. 결 론

스마트 센서 세트를 전자산업 사업장의 화학물질 취급

작업장소에 153일간 설치하여 노출수준의 변화와 최고노출수준 현황을 파악한 결과 스마트 센서 세트의 일일 평균값이 작업장 노출기준을 초과한 일수는 검사 작업은 7일, 지그 세척 작업은 45일 발생 되었다. 작업환경측정 신뢰성 평가 실시일에 대한 노출수준의 변화를 확인한 결과 측정시간 동안 검사 작업 0.01%, 지그 세척 작업 28%가 노출기준을 초과하였다. 현장 적용 연구결과 스마트 센서 세트의 기술적 측면과 사용자 관점에서의 제한사항도 확인되었다. 향후 전원 및 통신 등 센서 세트의 기술관련 문제, 센서 세트 측정결과에 대한 평가기준 및 객관성 확보 방안 마련, 사업주 및 근로자의 공감대 형성 등을 위한 추가 연구가 필요하며 이를 위한 학계, 정부, 노사의 관심과 논의가 필요하다. 상시모니터링의 근본적인 목적은 고농도 화학물질 노출 발생에 대해 사업주 및 관리자, 작업자에게 실시간으로 알리고 환기나 사용량 조절 등의 자율적인 조치를 유도하는 것이므로 화학물질에 의한 중독사고 예방을 위한 자기규율 기반 위험성평가의 기초단계로 현장에 적용하여 중독사고 및 직업병 예방에 활용하는 것이 필요하다.

References

- 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.
- 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)
- Jeong WS. The concentration of normal hexane over 4.5 times for occupational exposure limits(Feb.1.2005). *YeonhapNews*, 2005
- Kang SK. Outline and implication of the N-Hexane poisoning accident. *Proceedings of the Korean Association of Occupational Health Nurses* 2005. p.73-89
- Kim DK, Lee SI, Cho BM, O CH, Yi CH. A study on human effects of solvent 5200+S PG-6AR. *Proceedings of the Korea Occupational and Environmental Medicine*

2001. p. 53-59
- Kim EA. Epidemiological surveillance on occupational diseases hard to discover occupational disease, reproductive toxic disease-2-Bromopropane poisoning(1). *Industrial Hygiene* 2009;260:6-10
- Kim HY. Current situation and issue of methanol poisoning accident. *Proceedings of the Korean Society Of Occupational And Environment Medicine* 2016. p.19-31.
- Kim JH, Ryu SJ, Kim BG, Jhun HJ, Park JT et al. A Case of Trichloroethylene Intoxication with Neuropsychiatric Symptoms. *Korean J Occup Environ Med* 2008;20(1):54-61
- Kim HS. TCE Exposure Assessment of Cleaning Workers. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2023;33(1): 3-5 <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2023.33.1.3>
- Kim W, Kim YK, You YS, Jung KH, Choi WJ et al. 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>
- Lee GT, Lee SY, Park HY, Kang TS. Why did non-oral occupational methanol poisoning occur in South Korea in the 21st century?. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2017;27(3):149-162
- Lee JH, Lim SH. Review on Sensor Technology to Detect Toxic Gases. *J Sensor Sci & Tech* 2015;24(5): 311-318 (<https://dx.doi.org/10.5369/JSST.2015.24.5.311>)
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Reporting of another case of occupational acute poisoning by using degreasing agent. https://www.moel.go.kr/news/enews/report/enewsView.do?news_seq=13273. 2022.
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Commentation of Serious Accidents Punishment Act 2021.
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Fatal Accidents Act. 2021
- OSHFTI(Occupational Safety and Health Future Technology Institute). Developing a real-time monitoring system for chemical exposure for small and medium-sized electronics manufacturing industry. OSHFTI; 2019
- OSHFTI(Occupational Safety and Health Future Technology Institute). Developing and application of a smart sensor set for chemical exposure for electronics manufacturing industry. OSHFTI; 2020
- Occupational Safety and Health Research Institute (OSHRI). Current status and prospect for working environment monitoring by adopting real time detection system. Research report 2020
- 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 et al. A Case of Acute Respiratory Failure After Trichloroethylene Inhalation. *J Korean Soc Clin Toxicol* 2011;9(1): 30-33
- Siegel D, Abrams D, Hill J, Jahn S, Smith P et al. 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/doehaihc/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>)
- Virji MA and Kurth L. Peak Inhalation Exposure Metrics Used in Occupational Epidemiologic and Exposure Studies. *Front. Public Health* 2021;8:611693. (doi:10.3389/fpubh.2020.611693)

<저자정보>

김욱(팀장), 류장진(이사), 정종득(실장), 박귀현(대리), 김기영(과장), 강진주(과장), 정기효(교수), 함승헌(교수)