

특별관리물질 중 단시간노출기준 설정 물질의 작업환경측정 현황 및 농도 수준

박현희* · 조지훈

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

The Current Work Environment Monitoring Status and Concentration Level of Substances with Short-Term Exposure Limits among Special Management Substances

Hyunhee Park* · Jihoon Jo

Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

ABSTRACT

Objectives: To investigate the work environment measurement (WEM) status and concentration levels of substances with short-term exposure limits (STEL) among special management substances.

Methods: Data from the past 5 years of WEM for 6 substances (1,2-dichloropropane (1,2-DCP), 1,3-butadiene, benzene, trichloroethylene (TCE), perchloroethylene (PCE) and sulfuric acid) were analyzed. The number of samples and concentration level of STEL and 8-hour TWA (time weighted average) were compared.

Results: The number of STEL measurement for 1,3-butadiene, benzene, and sulfuric acid was less than 1% of the number of TWA measurement samples, while TCE, 1,2-DCP, and PCE, which are mainly used for cleaning metals, were relatively high, at 16.1%, 5.6%, and 2.2%, respectively. When comparing the concentrations of STEL with TWA on the same STEL measured workers (STEL-matched TWA), STEL concentrations were 2.8, 3.1, 2.6, 2.6 and 40.5 times higher than TWA as 1,2-DCP, benzene, TCE, PCE, and sulfuric acid. When comparing the concentration of STEL-matched TWA with the total TWA, STEL-matched TWA was 3.4, 8, 1.4, 2.0, 8.6 and 0.7 times higher for 1,2-DCP, benzene, 1,3-butadiene, TCE, PCE, and sulfuric acid, respectively.

Conclusions: This study found that the workers performing irregular tasks may be exposed to higher concentrations of hazardous substances than regular workers. It is necessary to strengthen short-term exposure measurement, even for substances which STEL have not been set.

Key words: work environment measurement, hazards surveillance, risk assessment, high-risk industry, specially managed CMR substances


1. 서 론


노출기준이란 거의 모든 근로자에게 건강상 나쁜 영향을 미치지 아니하는 기준으로, 국내 화학물질의 노출기준은 시간가중평균노출기준(time weighted average, TWA), 단시간노출기준(short term exposure limits, STEL) 또는 최고노출기준(ceiling, C)으로 구분하여 고용노동부 고시로 정하고 있다(MoEL, 2020). TWA는 1일

8시간 작업을 기준으로 유해인자 측정치에 발생시간을 곱하여 8시간으로 환산한 농도이며, STEL은 15분간의 시간가중평균노출값으로 주로 고농도에서 급성중독을 유발할 수 있는 물질에 적용된다. 산업안전보건법에서는 발암성, 생식세포 변이원성, 생식독성(carcinogenic, mutagenic or reproductive toxic) 등 근로자에게 중대한 건강장해를 일으킬 우려가 있는 물질을 특별관리물질로 정하고 있는데, 특별관리물질 중 작업환경측정 대상이면서

*Corresponding author: Hyunhee Park, Tel: 010-5065-9835, E-mail: bioaerosol@kosha.or.kr
400, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 44429, Republic of Korea

Received: August 22, 2024, Revised: September 15, 2024, Accepted: September 24, 2024

 Hyunhee Park <http://orcid.org/0000-0003-1506-9505>

 Jihoon Jo <http://orcid.org/0000-0003-1418-7518>

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.

STEL이 설정된 물질은 2024년 6월 기준, 1,2-디클로로프로판(1,2-dichloropropane, 1,2-DCP), 벤젠(benzene), 1,3-부타디엔(1,3-butadiene), 트리클로로에틸렌(trichloroethylene, TCE), 퍼클로로에틸렌(perchloroethylene, PCE), 황산(pH 2.0 이하인 강산)의 6종이 있었다(Table 1).

1,2-DCP는 클로로포름 냄새가 나는 무색의 가연성 액체로, 과거에는 도료제거(paint remover)나 드라이클리닝(dry cleaning)에서 많이 사용되었으나, 최근에는 반도체, 금속제품 제조업 등에서 세척, 탈지, 코팅 등의 용도로 주로 사용된다(ACGIH, 2019; Roh et al., 2020). 흡입 및 경구 노출 시 빠르고 광범위하게 흡수되는데, 급성 영향의 표적장기는 중추신경계, 조혈기계, 간, 신장이며, 만성영향은 담관암으로 인한 황달, 체중감소 등이 있다(KOSHA, 2021). 일본의 인쇄공장에서 담관암 발생과 높은 관련성이 있다고 보고된 이후(Kumagi et al., 2013), 2014년 국제암연구소(international agency for research on cancer, IARC)에서 발암성 Group 1(인체 발암성 물질)으로 분류하였다. 1,2-DCP는 2020년 작업환경측정 대상으로 포함되었으며(MoEL, 2019), 국내 노출기준은 TWA 10 ppm, STEL 110 ppm으로 관리되고 있다(MoEL, 2020). 벤젠은 무색의 투명한 액체로 원유의 정제과정에서 생산되며, 화학제품, 플라스틱, 합성섬유, 고무, 페인트 제조 등의 기초원료로 사용된다. 벤젠은 공기나 피부를 통해 흡수되는데, 체내에 들어온 벤젠은 전신에 빠르게 흡수된다. 주요 표적장기는 혈액학적 계통 및 상피조직으로 알려져 있고, IARC에서 인간에서 급성골수성백혈병(acute myeloid leukemia)을 유발하는 확실한 발암물질인 Group 1으로 분류하고 있다(IARC, 2018). 벤젠의 국내 노출기준은 TWA 0.5 ppm, STEL 2.5 ppm으로 관리되고 있다(MoEL, 2020). 1,3-부타디엔은 가솔린과 유사한 냄새가 나는 비부식성 무색 가스로, 주로 타이어, 자동차 부품, 가전 및 전기 장비 부품에 사용되는 고무 탄성의 고분자 물질 제조에 사용된다. 단기간에 높은 농도로 노출되면 중추 신경계를 손상시키는 것으로 알려져 있으며, 혈액림프기관에 암을 유발하는 것으로 보고되어 IARC에서 Group 1으로 분류되었다(Grosse et al., 2007). 1,3-부타디엔의 국내 노출기준은 TWA 2 ppm, STEL 10 ppm으로 관리되고 있다(MoEL, 2020). TCE는 상온에서 달콤한 클로로포름 같은 냄새가 나는 투명한 액체로, 주로 자동차 및

금속 산업에서 탈유지세정제, 금속표면의 건조, 섬유공업에서 세척과 염색, 일반 용해제, 락커의 희석제, 유리나 광학기구의 세척제, 피혁의 지방 제거제 등으로 사용된다(Kim et al, 2019; Kim et al., 2023). 급성 노출은 신장과 간을 손상시키고 부정맥을 일으킬 수 있으며, 피부 노출 후 피부 자극도 보고되었다. IARC에서 인체 발암 물질인 Group 1로 분류되었으며, 신장암과 관련이 있고, 역학연구에서도 비호지킨 림프종 및 간암 사이의 연관성에 대한 제한된 증거를 발견하였다(ASTDR, 2015; Kim et al., 2019). TCE의 국내 노출기준은 TWA 10 ppm, STEL 25 ppm으로 관리되고 있다(MoEL, 2020). PCE는 에테르와 같은 냄새가 나는 무색의 휘발성 액체로, 주로 드라이클리닝과 화학 합성의 중간체로 사용된다. 또한 금속 탈지제 및 페인트 제거제, 인쇄 잉크, 자동차 세정제 및 접착제에도 사용된다. IARC은 동물에 대한 충분한 증거와 인간에 대한 제한된 증거에 근거하여 PCE를 인간에게 발암 가능성이 있는 Group 2A로 분류하였고, 인간의 방광암, 위에서는 백혈병, 간암, 신장암을 일으키는 것으로 알려져 있다. PCE의 국내 노출기준은 TWA 25 ppm, STEL 100 ppm으로 관리되고 있다(MoEL, 2020). 황산은 무색의 점성도가 높은 액체로, 부식성이 강해 피부에 닿으면 심각한 화상을 유발하며, 에어로졸 상태로 노출되면, 눈, 치아 및 호흡기 점막 등에 큰 손상을 입힌다. 고순도의 황산은 제약 산업이나 염색용 및 분석용 시약으로 사용되고, 일반 황산은 인산염 비료 제조, 이소프로판올 등 화학제품 제조, 폐수처리, 가정용 배관 세제 및 납축전지의 전해질 등으로 이용된다. IARC은 황산을 함유한 강한 무기산 미스트에 직업적으로 노출되면 인체에 후두암 및 폐암 등의 발암 위험이 있다고 보고하고, Group 1으로 분류하였다(IARC, 2012). 황산의 국내 노출기준은 TWA 0.2 ppm, STEL 0.6 ppm으로 관리되고 있다(MoEL, 2020). Collins et al.(2003)은 벤젠의 경우 만성노출보다 간헐적 고농도 노출이 다발성 골수암 발생 위험을 더 높일 수 있어, 순간적인 고농도 노출을 예방하기 위한 대책이 필요하다고 하였다. Choi et al.(2009)는 석유화학 등 장치산업에서 1,3-부타디엔에 대한 TWA 노출평가 결과는 노출기준 미만이었으나, 비정기적으로 발생하는 단시간 노출작업에서는 STEL을 초과하는 사례가 다수 발생하였으며, 산업위생전문가는 TWA보다는 STEL 노출평가에 관심을 가져야 한다고 하였다. 작업자가 유지보수, 수리 및 밀폐

공간 작업 등 단시간에 고농도에 노출 가능한 상황에서 건강에 악영향을 미치지 않을 농도가 STEL로 설정되는데, 건설현장, 수리·정비 작업, 실험실 등 작업 내용이 일정하지 않고 유해인자 노출이 간헐적으로 발생하는 경우, 8시간 TWA에 대한 측정과 함께 단시간 고농도 노출 수준에 대한 관리가 필요하다. 이번 연구에서는 특별관리물질 중 단시간노출기준이 있는 물질을 대상으로 단시간 노출평가 현황 및 농도 수준을 살펴보고, 급성중독 예방 등 단시간 고농도 노출 관리를 위한 작업환경측정 및 관리 방안 마련에 활용하고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. 연구대상

연구대상 물질은 산업안전보건법에서 정한 특별관리물질 중 작업환경측정 대상이면서 STEL이 설정된 1,2-DCP, 벤젠, 1,3-부타디엔, TCE, PCE, 황산의 6종을 선정하였으며(Table 1), 2018년~2022년 K2B(KOSHA to Business service) 전산시스템을 통해 보고된 작업환경측정 자료를 대상으로 하였다. 물질별 TWA와 STEL 자료의 구분은 설정된 노출기준으로 분류하였고, STEL을 측정한 작업자의 측정 당일 TWA를 추출하여 비교하였다. 측정값 구분에서 ‘공정폐쇄’, ‘횡수조정’으로 표시된 자료는 제외하였으며, ‘수치입력’, ‘불검출’, ‘검출한계 미만’ 자료를 대상으로 분석하였다. 물질별 측정결과는 한국표준산업분류의 세세업종(1,196개)에 따라 측정 시료 수, 검출 시료 수, 노출기준 초과 시료 수, 산술평균, 표준편차, 중위수, 기하평균, 기하표준편차, 최소, 최대값 및 자료의 분포를 통해

추정되는 95% 상위농도(기하평균×기하표준편차^{1.645})를 분석하여 살펴보았다. 업종은 10차 한국표준산업분류(Korea Standard Industrial Classification, KSIC-10)를 적용하였다(Statistics Korea, 2017).

2. 자료 처리 및 통계 분석

작업환경측정 결과에서 불검출(non-detected) 및 검출한계(limit of detection, LOD)미만으로 보고된 자료는 미국 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Agency, OSHA)의 시료분석지침에서 제시하는 LOD와 보고된 측정값 중 최솟값을 비교하여 더 낮은 값의 1/2로 변환하였다. 자료처리는 Excel 2013(Microsoft, USA) 및 SPSS(ver 29.0, IBM, USA)을 사용하였다.

3. 위험 등급 구분

연구대상 유해인자에 대한 위험성 평가 활용을 위해 세세업종별 자료의 분포를 통해 추정되는 95% 상위농도($X_{0.95}$)를 기준으로 다음과 같이 등급을 구분하였다(AIHA, 2015;Koh et al., 2021). (0)은 $X_{0.95}$ 가 노출기준 1% 미만인 경우, (1)은 $X_{0.95}$ 가 노출기준 10% 미만인 경우, (2)은 $X_{0.95}$ 가 노출기준 50% 미만인 경우, (3)은 $X_{0.95}$ 가 노출기준 100% 미만인 경우, (4)는 $X_{0.95}$ 가 노출기준 100% 이상인 경우로 구분하였다.

III. 결 과

1. STEL 설정 특별관리물질의 작업환경측정 실시 현황

최근 5년간(2018~2022년) 연구대상물질 6종에 대한

Table 1. Target substances and occupational exposure limits

Sub*. No.	Substance	CAS no.	Occupational exposure limits						Unit	Health effect(MoEL, 2020)
			MoEL [†]		ACGIH [‡]		OSHA [§]			
			TWA ^{**}	STEL ^{***}	TWA	STEL	TWA	STEL		
1	1,2-Dichloropropane	78-87-5	10	110	10	–	75	–	ppm	Carcinogenicity 1A
2	Benzene	71-43-2	0.5	2.5	0.5	2.5	1	5	ppm	Carcinogenicity 1A, Mutagenicity 1B, Skin
3	1,3-Butadiene	106-99-0	2	10	2	–	1	5	ppm	Carcinogenicity 1A, Mutagenicity 1B
4	Trichloroethylene	79-01-6	10	25	10	25	25	100	ppm	Carcinogenicity 1A, Mutagenicity 2
5	Perchloroethylene	127-18-4	25	100	25	100	25	100	ppm	Carcinogenicity 1B
6	Sulfuric acid (Thoracic fraction)	7664-93-9	0.2	0.6	0.2	–	0.1	3	mg/m³	Carcinogenicity 1A(In case of strong acid mist), Thoracic particle

^{*} Sub: Substance, ^{**} TWA: Time Weighted Average, ^{***} STEL: Short-term exposure limit, [†] MoEL: Ministry of Employment and Labor, [‡] ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, [§] OSHA: Occupational Safety and Health Agency,

Table 2. Number of samples and descriptive statistics of TWA&STEL data by substances (2018–2022)

Sub. No.	Substance	Classification	OEL Unit	No. of measured industry	No. of measured company	No. of detected samples	No. of samples exceeding OEL	AM±SD*	GM** (GSD†)	Median	Min	Max	X _{0.95} ‡	Risk Level§
1	1,2-Dichloro propane	TWA	10 ppm	300	407	6,815	28	0.46±2.68	0.0003 (50.74)	0.00005	0.00005	100.16	0.21	1
		STEL-matched TWA	10 ppm	37	69	280	3	1.55±6.11	0.013 (138.78)	0.12	0.00005	62.24	44.23	4
		STEL	110 ppm	37	70	380	1	4.28±10.51	0.51 (8.57)	0.37	0.065	122.08	17.33	2
2	Benzene	TWA	0.5 ppm	348	904	45,829	15	0.005±0.04	0.00007 (5.07)	0.00005	0.00005	3.22	0.001	0
		STEL-matched TWA	0.5 ppm	21	33	315	1	0.04±0.09	0.0005 (33.85)	0.00005	0.00005	0.65	0.16	2
		STEL	2.5 ppm	24	38	386	1	0.12±0.36	0.025 (4.27)	0.012	0.012	4.81	0.27	2
3	1,3-Butadiene	TWA	2 ppm	151	369	17,189	4	0.014±0.10	0.00001 (10.3)	0.000005	0.000005	4.79	0.0004	0
		STEL-matched TWA	2 ppm	3	7	62	0	0.02±0.09	0.00001 (14.82)	0.000005	0.000005	0.57	0.0009	0
		STEL	10 ppm	4	10	90	2	1.38±0.54	1.34 (1.20)	1.31	1.31	6.31	1.80	1
4	Trichloro ethylene	TWA	10 ppm	391	1,226	21,719	167	0.93±3.26	0.0018 (137.05)	0.00005	0.00005	176.62	6.02	1
		STEL-matched TWA	10 ppm	103	534	3,245	33	1.83±3.51	0.036 (153.37)	0.50	0.00005	70.41	143.55	4
		STEL	25 ppm	113	566	3,515	41	4.82±9.15	0.41 (19.23)	1.03	0.02	154.84	53.28	4
5	Perchloro ethylene	TWA	25 ppm	199	322	7,824	17	0.47±3.18	0.0001 (24.23)	0.0001	0.0001	128.57	0.028	0
		STEL-matched TWA	25 ppm	13	20	120	3	4.06±15.66	0.0015 (199.06)	0.00005	0.00005	128.57	9.01	2
		STEL	100 ppm	15	23	169	53	10.57±24.04	1.56 (6.01)	0.51	0.51	143.65	29.81	2
6	Sulfuric acid (Thoracic fraction)	TWA	0.2 mg/m³	612	6,322	216,359	104,824	4	0.006±0.013	0.00004 (113.0)	0.0000005	0.41	0.10	3
		STEL-matched TWA	0.2 mg/m³	40	48	468	0	0.004±0.01	0.00002 (100.4)	0.0000005	0.0000005	0.07	0.04	2
		STEL	0.6 mg/m³	67	97	921	232	0.016±0.0483	0.0002 (16.74)	0.0001	0.0001	0.39	0.025	1

*AM±SD : Arithmetic mean±Standard Deviation, †GSD : Geometric Standard Deviation, ‡X_{0.95} : estimated 95%ile value (GM×GSD^{1.645}), §Risk level: (0) X_{0.95} < OEL 1%, (1) X_{0.95} < OEL 10%, (2) X_{0.95} < OEL 50%, (3) X_{0.95} < OEL 100%, (4) X_{0.95} ≥ OEL 100%

Table 3. Yearly number of STEL samples by substances (2018–2022)

Sub.No.	Substance	No. of samples	No. of samples by year				
			2018	2019	2020	2021	2022
1	1,2-Dichloropropane	380	4	6	1	142	227
2	Benzene	386	34	98	93	90	71
3	1,3-Butadiene	90	6	19	19	21	25
4	Trichloroethylene	3,515	556	985	741	627	606
5	Perchloroethylene	169	15	53	42	28	31
6	Sulfuric acid (Thoracic fraction)	921	156	170	184	195	216

Table 4. Distribution of number of STEL samples according to the classification of exposure limits

Sub.No.	Substance	No. of samples	No. of samples by classification of exposure limits (%)		
			≤ TWA	TWA > x ≤ STEL	> STEL
1	1,2-Dichloropropane	380	331 (87.1%)	48 (12.6%)	1 (0.3%)
2	Benzene	386	359 (93.0%)	26 (6.7%)	1 (0.3%)
3	1,3-Butadiene	90	88 (97.8%)	2 (2.2%)	–
4	Trichloroethylene	3,515	2,930 (83.3%)	544 (15.5%)	41 (1.2%)
5	Perchloroethylene	169	146 (86.4%)	19 (11.2%)	4 (2.4%)
6	Sulfuric acid (Thoracic fraction)	921	903 (98.1%)	18 (1.9%)	–

측정 시료수, 검출 시료수, 평균농도 및 위험등급 등은 Table 2와 같다. STEL 측정은 TWA 시료수와 비교하여 1,2-DCP는 5.58%(TWA 6,815개, STEL 380개), 벤젠 0.84%(TWA 45,829개, STEL 386개), 1,3-부타디엔 0.52%(TWA 17,189개, STEL 90개), TCE 16.18%(TWA 21,719개, STEL 3,515개), PCE 2.16%(TWA 7,824개, STEL 169개), 황산 0.43%(TWA 216,359개, STEL 921개) 실시되었다. 시료의 불검출률은 STEL을 기준으로 1,3-부타디엔이 97.78%(TWA 93.75%)로 가장 높았고, 벤젠 77.98%(TWA 94.3%), 황산 74.81%(TWA 51.55%), PCE 68.64%(TWA 89.35%), 1,2-DCP 43.16%(TWA 80.75%), TCE 42.93%(TWA 64.44%) 순이었다. TWA 시료에 대한 불검출률은 평균 79%이었으며, STEL 시료의 평균 불검출률은 67.5%이었다. 연도별 STEL 시료수는 Table 3과 같다. 연구대상 물질 6종 모두 모두 2018년과 비교하여 2022년에 STEL 측정 시료수가 증가하였는데, 특히, 1,2-DCP는 2018년과 비교하여 2022년 50배 이상 증가하였다. 동일 작업자를 대상으로 반복 측정된 횟수는 Table 5와 같다. 6개 물질 전체 시료를 대상으

로 반복측정 횟수를 살펴보면, 1회 측정이 평균 92.61%, 2회 측정 3.55%, 3회 측정 2.09%, 4회 이상이 1.75%였다.

2. STEL 설정 특별관리물질의 작업환경측정 실시 결과

불검출 자료가 많은 특성으로 자료는 정규성 검정을 대부분 만족하지 못하여 산술평균, 기하평균 및 중앙값과 추정되는 95% 상위값을 제시하였다(Table 2). 물질별 STEL 측정 농도를 TWA와 비교하여(STEL/TWA, 산술평균 기준) 살펴보면, 1,2-DCP의 경우 약 9.3배(TWA 0.46 ± 2.68 ppm, STEL 4.28 ± 10.51 ppm), 벤젠은 약 24.6배(TWA 0.005 ± 0.04 ppm, STEL 0.123 ± 0.36 ppm), TCE는 약 5.2배(TWA 0.93 ± 3.26 ppm, STEL 4.82 ± 9.15 ppm), PCE는 약 22.5배(TWA 0.47 ± 3.18 ppm, STEL 10.57 ± 24.04 ppm), 황산은 약 27.9배(TWA 0.0058 ± 0.0131 mg/m³, STEL 0.162 ± 0.0483 mg/m³) 높았다. 1,3-부타디엔은 약 98.6배(TWA 0.014 ± 0.10 ppm, STEL 1.38 ± 0.54 ppm)의 차이를 보였으나, 검출된 STEL 시료가 2개로 비교에 제한점이 있었다. STEL을 측정한 작업자의 당

일 측정된 TWA 농도와 STEL을 상호 매칭하여 농도수준을 비교하면(STEL/matched TWA), 1,2-DCP의 경우 약 2.8배, 벤젠은 약 3.1배, TCE는 약 2.6배, PCE는 약 2.6배, 황산은 약 40.5배 높았다. 또한 STEL을 측정한 작업자의 TWA 농도와 전체 TWA를 비교하면(matched TWA/TWA), 1,2-DCP의 경우 약 3.4배, 벤젠은 약 8배, 1,3-부타디엔 1.4배, TCE는 약 2.0배, PCE는 약 8.6배로 높았고, 황산은 약 0.7배로, 황산을 제외한 5종의 물질에서 전체 시료의 TWA가 더 높은 농도를 나타내었다.

3. STEL 초과 업종 및 위험 등급 현황

유해인자별 TWA와 STEL의 위험등급을 살펴보면, 1,2-DCP는 TWA 1등급, STEL 2등급, 벤젠 TWA 0등급, STEL 2등급, 1,3-부타디엔 TWA 0등급, STEL 1등급, TCE TWA 1등급, STEL 4등급, PCE TWA 0등급, STEL 2등급, 황산 TWA 3등급, STEL 1등급 이었다. 측정치를 TWA 미만, TWA 이상 STEL 이하, STEL 초과로 구분하여 시료수를 살펴보면 Table 4와 같다. 1,3-부타디엔과 황산은 STEL 초과 시료는 없었으며, 1,2-DCP와 벤젠에서는 1개, TCE 41개, PCE는 4개 시료가 STEL을 초과하였다, TWA 이상 STEL 이하인 시료수는 1,2-DCP 12.6%(48건), 벤젠 6.7%(26건), 1,3-부타디엔 2.2%(2건), TCE 15.5%(544건), PCE 11.2%(19건), 황산 1.9%(18건)이었다. STEL에 대한

평가가 가장 많이 수행된 업종은 1,2-DCP는 자동차 차체용 신품 부품 제조업(KSIC-30320), 주형 및 금형 제조업, 도금업(KSIC-29294) 등 순이었고, 벤젠 및 1,3-부타디엔은 합성수지 및 기타 플라스틱 물질 제조업(KSIC-20202), 석유화학계 기초 화학 물질 제조업(KSIC-20111) 등 순이었다. TCE 및 PCE에서는 도금업(KSIC-25922), 자동차 종합 수리업(KSIC-95211), 도장 및 기타 피막 처리업(KSIC-25923) 등 순이었고, 황산은 금속선 가공제품 제조업(KSIC-25944), 지질 조사 및 탐사업(KSIC-72923), 기타 반도체 소자 제조업(KSIC-26129)등 순이었다(Table 6~17). 물질별 STEL 측정 시료수가 많은 상위 15개업종 중 추정되는 95% 상위농도가 노출기준을 초과하는 업종(위험등급 4등급)으로 1,2-DCP는 금속 가공제품 제조업(KSIC-25999), 전기회로 접속장치 제조업(KSIC-28122)이 있었고, 벤젠은 기타 구조용 금속제품 제조업(KSIC-25119), 화력 발전업(KSIC-35113), 1,3-부타디엔에서는 없었다. TCE는 상위 15개 업종 중 자동차 수리 등 관련 4개 업종을 제외한 도금업(KSIC-25922), 도장 및 기타 피막 처리업(KSIC-25923), 그 외 기타 전자 부품 제조업(KSIC-26299), 그 외 기타 금속 가공업(KSIC-25929), 인쇄 회로기판용 적층판 제조업(KSIC-26221) 등 11개 업종이 해당되었다. PCE는 TWA는 호텔업(KSIC-55101)에서 위험등급이 4등급이었으나, STEL은 물질 성분 검사 및 분석업(KSIC-72911)과 기타 전자 부품 제조업

Table 5. Repeated measurement status of STEL sampling by workers

Sub.No.	Substance	Classification	No. of samples	No of repeated measurement			
				1	2	3	≥ 4
1	1,2-Dichloropropane	worker	257	195	1	61	-
		sample	380	195	2	183	-
2	Benzene	worker	375	367	5	3	-
		sample	386	367	10	9	-
3	1,3-Butadiene	worker	85	80	5	-	-
		sample	90	80	10	-	-
4	Trichloroethylene	worker	3,272	3,154	58	27	33
		sample	3,515	3,154	116	81	164
5	Perchloroethylene	worker	123	104	4	9	6
		sample	169	104	8	27	30
6	Sulfuric acid (Thoracic fraction)	worker	681	539	97	-	45
		sample	921	539	194	-	188

Table 6. Top 15 industries with the largest number of TWA samples of 1,2-DCP

Sub. No.	Industry	KSIC-10 [†]	No. of samples	No. of detected samples	AM±SD* (ppm)	GM ^{††} (GSD [†]) (ppb)	Median (ppb)	Min (ppb)	Max (ppm)	X0.95 [‡] (ppm)	Risk level [§]
1	Manufacture of other new parts and accessories for motor vehicles n.e.c.	30399	426	70	0.78±4.32	0.27 (47.57)	0.05	0.05	55.64	0.15	1
2	Manufacture of electronic tubes, interface cards and other electronic components n.e.c.	26299	411	111	0.61±2.19	0.74 (88.67)	0.05	0.05	32.08	1.18	2
3	Plating of metals	25922	350	46	0.24±0.89	0.18 (28.77)	0.05	0.05	6.75	0.05	0
4	Manufacture of parts and accessories for motor vehicle body(new products)	30320	265	95	0.40±2.11	1.23 (78.62)	0.05	0.05	31.90	1.61	2
5	Manufacture of mould and metallic patterns	29294	230	50	0.38±0.98	0.44 (64.1)	0.05	0.05	6.27	0.41	1
6	Coating and similar treatment of metals	25923	187	58	0.64±1.31	1.15 (115.74)	0.05	0.05	6.51	2.84	2
7	Manufacture of other general-purpose machinery n.e.c.	29199	162	45	0.63±2.06	0.82 (96.75)	0.05	0.05	21.94	1.52	2
8	Manufacture of other basic iron and steel	24119	125	0	—	—	—	—	—	—	—
9	Other metalworking n.e.c.	25929	125	35	2.15±9.93	1.05 (141.97)	0.05	0.05	100.16	3.65	2
10	Manufacture of other fabricated and processed metal products n.e.c.	25999	114	26	2.00±9.36	0.59 (100.26)	0.05	0.05	62.24	1.15	2
11	Manufacture of coal and other basic organic chemicals	20119	98	6	0.14±0.65	0.1 (12.73)	0.05	0.05	4.02	0.01	0
12	Manufacture of synthetic resin and other plastic materials	20202	98	12	0.23±0.79	0.17 (28.87)	0.05	0.05	4.31	0.04	0
13	Manufacture of other rubber products n.e.c.	22199	97	43	0.59±1.45	2.9 (112.69)	0.05	0.05	8.17	6.88	3
14	Other manufacturing n.e.c.	33999	90	9	1.25±4.93	0.17 (38.02)	0.05	0.05	34.13	0.07	0
15	Manufacture of taps, valves and similar products	29133	89	36	0.63±2.31	2.17 (109.03)	0.05	0.05	20.59	4.87	2

Table 7. Top 15 industries with the largest number of STEL samples of 1,2-DCP

Sub. No.	Industry	KSIC-10 [†]	No. of samples	No. of detected samples	AM±SD* (ppm)	GM ^{††} (GSD [†]) (ppm)	Median (ppm)	Min (ppm)	Max (ppm)	X0.95 [‡] (ppm)	Risk level [§]
1	Manufacture of parts and accessories for motor vehicle body(new products)	30320	187	138	3.36±6.63	0.67 (6.48)	0.62	0.06	38.09	14.59	2
2	Manufacture of mould and metallic patterns	29294	28	10	3.81±8.22	0.33 (10.63)	0.06	0.06	40.58	16.33	2
3	Plating of metals	25922	25	15	7.24±11.59	0.91 (12.51)	1.02	0.06	39.07	58.24	3
4	Manufacture of electronic tubes, interface cards and other electronic components n.e.c.	26299	16	6	5.2±11.8	0.36 (11.42)	0.06	0.06	35.92	19.95	2
5	Coating and similar treatment of metals	25923	11	1	0.14±0.23	0.08 (2.17)	0.06	0.06	0.84	0.29	1
6	Manufacture of other fabricated and processed metal products n.e.c.	25999	10	7	25.18±38.19	2.57 (22.05)	10.13	0.06	122.08	416.88	4
7	Manufacture of other general-purpose machinery n.e.c.	29199	10	3	2.91±4.9	0.29 (11)	0.06	0.06	13.78	14.74	2
8	Manufacture of apparatuses for connecting electrical circuits used in power distribution systems	28122	8	4	9.13±14.94	0.95(18.5)	4.67	0.06	44.23	115.37	4
9	Manufacture of machinery for mining, quarrying and construction	29241	8	0	—	—	—	—	—	—	—
10	Testing and analysis services of composition and purity of materials	72911	8	0	—	—	—	—	—	—	—
11	Manufacture of synthetic resin and other plastic materials	20202	7	0	—	—	—	—	—	—	—
12	Manufacture of surface processing wood and woods for special purpose	16102	6	6	12.34±8.69	9.86 (2.12)	10.26	3.72	26.32	33.93	2
13	Manufacture of pressing products for motor vehicles	25913	6	6	8.09±15.11	2.01 (6.57)	2.21	0.23	38.74	44.40	2
14	Heat treatment of metals	25921	6	3	0.74±0.82	0.29 (5.38)	0.44	0.06	1.88	4.68	1
15	Other printing	18119	4	4	2.07±1.9	1.17 (4.53)	1.74	0.14	4.67	14.09	2

[†]KSIC-10: 10th Korea Standard Industrial Classification, *AM±SD : Arithmetic mean±Standard Deviation, **GM : Geometric Mean, [†]GSD : Geometric Standard Deviation, [‡]X_{0.95}: estimated 95%ile value (GM×GSD^{1.645}), [§]Risk level: (0) X_{0.95} < OEL 1%, (1) X_{0.95} < OEL 10%, (2) X_{0.95} < OEL 50%, (3) X_{0.95} < OEL 100%, (4) X_{0.95} ≥ OEL 100%

Table 8. Top 15 industries with the largest number of TWA samples of Benzene

Sub. No.	Industry	KSIC-10 [†]	No. of samples	No. of detected samples	AM±SD* (ppm)	GM ^{**} (GSD [†]) (ppb)	Median (ppb)	Min (ppb)	Max (ppm)	X0.95 [†] (ppm)	Risk level [§]
1	Petroleum refineries	19210	8,535	130	2.23±0.03	0.05 (2.48)	0.05	0.05	2.13	0.23	0
2	Manufacture of basic organic petrochemicals	20111	5,931	396	5.87±0.04	0.07 (5.67)	0.05	0.05	1.47	1.29	0
3	Manufacture of finished medicaments	21210	2,424	52	5.56±0.1	0.05 (2.83)	0.05	0.05	3.22	0.30	0
4	Manufacture of synthetic resin and other plastic materials	20202	2,185	361	15.46±0.05	0.15 (14.62)	0.05	0.05	0.65	12.58	1
5	Thermal power generation	35113	2,049	90	4.46±0.02	0.07 (4.77)	0.05	0.05	0.21	0.86	0
6	Manufacture of other chemical products n.e.c.	20499	1,289	34	2.63±0.02	0.06 (3.2)	0.05	0.05	0.25	0.38	0
7	Other power generation	35119	1,117	30	1.67±0.01	0.06 (3.04)	0.05	0.05	0.22	0.35	0
8	Manufacture of coal and other basic organic chemicals	20119	998	90	10.99±0.04	0.09 (9.01)	0.05	0.05	0.31	3.48	0
9	Manufacture of basic iron	24111	942	237	6.27±0.02	0.2 (12.8)	0.05	0.05	0.28	13.18	1
10	Manufacture of general paints and similar products	20411	808	23	2.5±0.02	0.06 (3.4)	0.05	0.05	0.17	0.43	0
11	Manufacture of medicinal chemicals and antibiotics	21101	771	24	1.71±0.01	0.06 (3.13)	0.05	0.05	0.17	0.38	0
12	Manufacture of perfumes and cosmetics	20423	626	13	1.94±0.02	0.05 (2.69)	0.05	0.05	0.24	0.28	0
13	Research and experimental development on other engineering	70129	626	20	2.76±0.02	0.06 (3.35)	0.05	0.05	0.29	0.42	0
14	Testing and analysis services of composition and purity of materials	72911	598	30	3.97±0.02	0.07 (4.77)	0.05	0.05	0.27	0.88	0
15	Manufacture of medical supplies and related other medicaments	21300	497	6	0.5±0.01	0.05 (1.96)	0.05	0.05	0.11	0.15	0

Table 9. Top 15 industries with the largest number of STEL samples of Benzene

Sub. No.	Industry	KSIC-10 [†]	No. of samples	No. of detected samples	AM±SD* (ppm)	GM ^{**} (GSD [†]) (ppm)	Median (ppm)	Min (ppm)	Max (ppm)	X0.95 [†] (ppm)	Risk level [§]
1	Manufacture of synthetic resin and other plastic materials	20202	73	9	0.13±0.62	0.02 (3.4)	0.01	0.01	4.81	0.13	1
2	Manufacture of basic organic petrochemicals	20111	44	6	0.1±0.23	0.02 (3.9)	0.01	0.01	0.99	0.19	1
3	Regulation of the activities of health care and welfare affairs	84214	38	3	0.05±0.12	0.02 (2.7)	0.01	0.01	0.54	0.08	1
4	Manufacture of finished medicaments	21210	35	0	–	–	–	–	–	–	–
5	Manufacture of other general-purpose machinery n.e.c.	29199	29	18	0.28±0.37	0.09 (5.75)	0.01	0.01	1.62	1.65	3
6	Manufacture of general paints and similar products	20411	27	1	0.02±0.02	0.01 (1.57)	0.17	0.01	0.12	0.03	1
7	Testing and analysis services of composition and purity of materials	72911	20	0	–	–	–	–	–	–	–
8	General repair services of motor vehicles	95211	16	5	0.17±0.32	0.04 (5.72)	0.01	0.01	1.15	0.64	2
9	Manufacture of perfumes and cosmetics	20423	15	0	–	–	–	–	–	–	–
10	Other sports services n.e.c.	91199	14	10	0.15±0.18	0.07 (4.07)	0.01	0.01	0.63	0.69	2
11	Manufacture of metal frameworks or skeletons for land structure and parts thereof	25113	11	11	0.56±0.57	0.41 (2.25)	0.08	0.01	2.13	1.54	3
12	Manufacture of other structural metal products	25119	10	7	0.49±0.56	0.14 (7.95)	0.46	0.13	1.67	4.27	4
13	Office, commercial and institutional building construction	41121	9	2	0.08±0.14	0.02 (4.32)	0.31	0.01	0.33	0.27	2
14	Manufacture of lifting equipment	29162	8	5	0.24±0.36	0.08 (5.76)	0.01	0.01	1.06	1.38	3
15	Thermal power generation	35113	8	6	0.39±0.26	0.19 (5.71)	0.10	0.01	0.74	3.42	4

[†]KSIC-10: 10th Korea Standard Industrial Classification, *AM±SD : Arithmetic mean±Standard Deviation, **GM : Geometric Mean, [†]GSD : Geometric Standard Deviation, [†]X_{0.95}: estimated 95%ile value (GM×GSD^{1.645}), [§]Risk level: (0) X_{0.95} < OEL 1%, (1) X_{0.95} < OEL 10%, (2) X_{0.95} < OEL 50%, (3) X_{0.95} < OEL 100%, (4) X_{0.95} ≥ OEL 100%

Table 10. Top 15 industries with the largest number of TWA samples of 1,3-Butadiene

Sub. No.	Industry	KSIC-10 [†]	No. of samples	No. of detected samples	AM±SD* (ppm)	GM ^{**} (GSD [†]) (ppb)	Median (ppb)	Min (ppb)	Max (ppm)	X0.95 [†] (ppm)	Risk level [§]
1	Manufacture of basic organic petrochemicals	20111	3,588	308	19.12±0.14	0.01 (14.54)	0.01	0.01	4.79	0.89	0
2	Manufacture of synthetic resin and other plastic materials	20202	3,070	385	36.12±0.17	0.02 (31.05)	0.01	0.01	4.04	5.17	0
3	Manufacture of other plastic products n.e.c.	22299	1,812	30	2.87±0.03	0.01 (3.54)	0.01	0.01	0.77	0.05	0
4	Manufacture of synthetic rubber	20201	896	118	7.74±0.05	0.01 (15.61)	0.01	0.01	0.85	1.29	0
5	Petroleum refineries	19210	739	36	0.29±0.01	0.01 (2.43)	0.01	0.01	0.13	0.03	0
6	Manufacture of rubber tires and tubes	22111	607	5	0.03±0	0.01 (1.7)	0.01	0.01	0.01	0.01	0
7	Manufacture of other plastic products for fabricating of machine	22249	552	6	0.19±0	0.01 (2.07)	0.01	0.01	0.05	0.02	0
8	Manufacture of mould and metallic patterns	29294	517	7	1.04±0.01	0.01 (3)	0.01	0.01	0.15	0.03	0
9	Manufacture of other fabricated structural plastic products	22229	489	1	0.05	0.01 (1.46)	0.01	0.01	0.02	0.01	0
10	Manufacture of plastic wires, bars, pipes, tubes and hoses	22211	484	0	–	–	–	–	–	–	–
11	Manufacture of other chemical products n.e.c.	20499	405	26	8.57±0.05	0.01 (10.47)	0.01	0.01	0.44	0.44	0
12	Manufacture of plastic cases, boxes and containers	22232	262	1	1.71	0.01 (2.02)	0.01	0.01	0.45	0.02	0
13	Manufacture of coal and other basic organic chemicals	20119	257	10	4.23±0.03	0.01 (6.28)	0.01	0.01	0.36	0.15	0
14	Manufacture of electronic tubes, interface cards and other electronic components n.e.c.	26299	145	5	8.64±0.07	0.01 (6.46)	0.01	0.01	0.73	0.15	0
15	Interdisciplinary convergence research and experimental development on natural sciences and engineering	70130	120	3	1.34±0.01	0.01 (2.93)	0.01	0.01	0.16	0.03	0

Table 11. Top 15 industries with the largest number of STEL samples of 1,3-Butadiene

Sub. No.	Industry	KSIC-10 [†]	No. of samples	No. of detected samples	AM±SD* (ppm)	GM ^{**} (GSD [†]) (ppm)	Median (ppm)	Min (ppm)	Max (ppm)	X0.95 [†] (ppm)	Risk level [§]
1	Manufacture of synthetic resin and other plastic materials	20202	46	0	–	–	–	–	–	–	–
2	Manufacture of basic organic petrochemicals	20111	28	2	1.53±0.97	1.42 (1.38)	1.31	1.31	6.31	2.4	2
3	Thermal power generation	35113	10	0	–	–	–	–	–	–	–
4	Manufacture of other plastic products n.e.c.	22299	6	0	–	–	–	–	–	–	–

[†]KSIC-10: 10th Korea Standard Industrial Classification, *AM±SD : Arithmetic mean±Standard Deviation, **GM : Geometric Mean, [†]GSD : Geometric Standard Deviation, [†]X_{0.95}: estimated 95%ile value (GM×GSD^{1.645}), [§]Risk level: (0) X_{0.95} < OEL 1%, (1) X_{0.95} < OEL 10%, (2) X_{0.95} < OEL 50%, (3) X_{0.95} < OEL 100%, (4) X_{0.95} ≥ OEL 100%

Table 12. Top 15 industries with the largest number of TWA samples of TCE

Sub. No.	Industry	KSIC-10 [†]	No. of samples	No. of detected samples	AM±SD* (ppm)	GM ^{**} (GSD [†]) (ppb)	Median (ppb)	Min (ppb)	Max (ppm)	X0.95 [‡] (ppm)	Risk level [§]
1	Plating of metals	25922	1,888	1,377	1.96±2.88	89.94 (110.57)	964.70	0.05	62.98	206.91	3
2	Manufacture of electronic tubes, interface cards and other electronic components n.e.c.	26299	1,783	994	1.33±2.41	14.65 (171.23)	289.30	0.05	26.59	69.19	4
3	General repair services of motor vehicles	95211	1,002	327	0.25±0.57	1.02 (78.53)	0.05	0.05	5.97	1.34	4
4	Manufacture of finished medicaments	21210	984	14	0.01±0.1	0.06 (2.72)	0.05	0.05	2.28	0.0003	2
5	Manufacture of other new parts and accessories for motor vehicles n.e.c.	30399	725	304	1.31±5.92	3.77 (173.79)	0.05	0.05	143.31	18.24	0
6	Coating and similar treatment of metals	25923	604	352	1.93±3.86	22.1 (190.32)	442.18	0.05	46.80	124.21	4
7	Petroleum refineries	19210	555	8	0.01±0.14	0.06 (2.89)	0.05	0.05	3.04	0.0003	4
8	Other manufacturing n.e.c.	33999	372	119	0.85±1.87	1.37 (132.4)	0.05	0.05	15.82	4.23	0
9	Manufacture of laminated plates for printed circuit boards	26221	323	217	1.1±1.51	36.4 (112.85)	395.66	0.05	7.94	86.58	2
10	Other metalworking n.e.c.	25929	318	152	1.69±2.94	8.02 (217.77)	0.05	0.05	23.20	56.26	4
11	Manufacture of mould and metallic patterns	29294	300	143	1.69±3.14	7.94 (217.75)	0.05	0.05	24.08	55.70	4
12	Manufacture of pipes and tubes, of steel	24132	288	238	5.99±7.98	618.11 (82.89)	3,426.24	0.05	56.93	885.17	4
13	Printing of textiles	13403	275	55	0.14±0.53	0.29 (36.21)	0.05	0.05	5.86	0.11	4
14	Testing and analysis services of composition and purity of materials	72911	256	24	0.09±0.4	0.12 (15.76)	0.05	0.05	3.22	0.01	1
15	Repair services of motor vehicles specializing in parts	95212	241	91	0.21±0.38	1.52 (83.02)	0.05	0.05	2.47	2.18	0

Table 13. Top 15 industries with the largest number of STEL samples of TCE

Sub. No.	Industry	KSIC-10 [†]	No. of samples	No. of detected samples	AM±SD* (ppm)	GM ^{**} (GSD [†]) (ppm)	Median (ppm)	Min (ppm)	Max (ppm)	X0.95 [‡] (ppm)	Risk level [§]
1	Plating of metals	25922	1,027	838	6.59±7.67	1.58 (12.14)	4.53	0.02	126.84	96.10	4
2	General repair services of motor vehicles	95211	319	76	1.13±2.48	0.06 (10.38)	0.02	0.02	12.03	2.79	2
3	Coating and similar treatment of metals	25923	196	145	7.24±13.88	0.97 (15.56)	2.20	0.02	105.98	88.66	4
4	Manufacture of electronic tubes, interface cards and other electronic components n.e.c.	26299	161	101	4.91±11.11	0.55 (17.19)	2.29	0.02	100.23	59.60	4
5	Testing and analysis services of composition and purity of materials	72911	118	9	0.33±1.11	0.02 (4.33)	0.02	0.02	6.13	0.28	1
6	Other metalworking n.e.c.	25929	85	48	6.93±11.74	0.54 (23.71)	2.44	0.02	63.74	98.28	4
7	Manufacture of other new parts and accessories for motor vehicles n.e.c.	30399	77	24	3.82±9.82	0.1 (16.57)	0.02	0.02	48.37	10.05	2
8	Manufacture of laminated plates for printed circuit boards	26221	63	36	2.54±3.34	0.3 (15.12)	0.63	0.02	12.44	26.41	4
9	Other manufacturing n.e.c.	33999	57	41	6.62±6.33	1.35 (17.08)	6.00	0.02	23.28	144.28	4
10	Manufacture of other general-purpose machinery n.e.c.	29199	56	27	3.97±5.54	0.29 (21.16)	0.02	0.02	21.81	43.38	4
11	Manufacture of mould and metallic patterns	29294	55	38	8.05±11.79	1.12 (19.58)	3.63	0.02	74.85	148.81	4
12	Manufacture of other fabricated and processed metal products n.e.c.	25999	53	35	9.85±15.42	1.08 (23.13)	6.25	0.02	81.84	189.38	4
13	Manufacture of other special purpose machinery, n.e.c.	29299	48	29	7.18±8.38	0.78 (24.53)	4.90	0.02	38.01	151.33	4
14	Repair services of motor vehicles specializing in parts	95212	46	12	0.76±1.6	0.06 (9.4)	0.02	0.02	8.72	2.41	1
15	Manufacture of other electrical equipment n.e.c.	28909	43	39	5.33±5.49	1.79 (8.19)	2.94	0.02	18.13	56.82	4

[†]KSIC-10: 10th Korea Standard Industrial Classification, *AM±SD : Arithmetic mean±Standard Deviation, **GM : Geometric Mean, [‡]GSD : Geometric Standard Deviation, [‡]X_{0.95}: estimated 95%ile value (GM×GSD^{1.645}), [§]Risk level: (0) X_{0.95} < OEL 1%, (1) X_{0.95} < OEL 10%, (2) X_{0.95} < OEL 50%, (3) X_{0.95} < OEL 100%, (4) X_{0.95} ≥ OEL 100%

Table 14. Top 15 industries with the largest number of TWA samples of PCE

Sub. No.	Industry	KSIC-10 [†]	No. of samples	No. of detected samples	AM±SD* (ppm)	GM ^{**} (GSD [†]) (ppb)	Median (ppb)	Min (ppb)	Max (ppm)	X0.95 [†] (ppm)	Risk level [§]
1	Petroleum refineries	19210	1,031	5	0.004±0.07	0.05 (1.86)	0.05	0.05	2.01	0.0002	0
2	Plating of metals	25922	822	27	0.094±0.83	0.07 (5.45)	0.05	0.05	11.37	0.0011	0
3	Manufacture of basic organic petrochemicals	20111	629	1	0.002±0.04	0.05 (1.48)	0.05	0.05	0.97	0.0001	0
4	Manufacture of synthetic resin and other plastic materials	20202	315	20	0.136±1.03	0.09 (10.51)	0.05	0.05	10.91	0.0044	0
5	Testing and analysis services of composition and purity of materials	72911	213	60	1.061±3.07	0.91 (111.72)	0.05	0.05	19.84	2.1339	1
6	Manufacture of other rubber products n.e.c.	22199	194	21	0.174±0.95	0.14 (21.39)	0.05	0.05	11.54	0.0222	0
7	Manufacture of electronic tubes, interface cards and other electronic components n.e.c.	26299	158	55	5.714±16.24	2.57 (259.71)	0.05	0.05	128.57	24.1095	3
8	Hotels	55101	152	77	0.922±1.87	7.53 (154.03)	78.25	0.05	16.63	29.8971	4
9	Manufacture of explosives and pyrotechnic products	20494	137	23	0.237±0.89	0.23 (33.82)	0.05	0.05	6.34	0.0770	0
10	Manufacture of other chemical products n.e.c.	20499	136	3	0.057±0.41	0.06 (4.89)	0.05	0.05	4.09	0.0009	0
11	Other printing	18119	129	36	1.935±4.35	1.14 (164.69)	0.05	0.05	17.02	5.0699	2
12	Manufacture of wooden packing boxes, drums and similar containers	16232	110	17	0.064±0.27	0.19 (22.81)	0.05	0.05	2.53	0.0322	0
13	Coating and similar treatment of metals	25923	100	23	0.66±2.11	0.47 (67.16)	0.05	0.05	9.89	0.4757	1
14	Manufacture of parts and accessories for motor vehicle body(new products)	30320	98	10	0.053±0.21	0.12 (15.25)	0.05	0.05	1.38	0.0110	0
15	Other technical testing and analysis	72919	97	31	1.471±3.41	1.65 (174.21)	0.05	0.05	17.42	8.0108	2

Table 15. Top 15 industries with the largest number of STEL samples of PCE

Sub. No.	Industry	KSIC-10 [†]	No. of samples	No. of detected samples	AM±SD* (ppm)	GM ^{**} (GSD [†]) (ppm)	Median (ppm)	Min (ppm)	Max (ppm)	X0.95 [†] (ppm)	Risk level [§]
1	Plating of metals	25922	56	2	2.54±10.81	0.6 (2.42)	0.51	0.51	66.98	2.58	1
2	Manufacture of parts and accessories for motor vehicle body(new products)	30320	27	0	—	—	—	—	—	—	—
3	Other printing	18119	23	4	1.04±1.28	0.71 (2.1)	0.51	0.51	5.22	2.40	1
4	Testing and analysis services of composition and purity of materials	72911	22	21	24.17±23.63	11.83 (4.25)	13.81	0.51	66.27	127.66	4
5	Coating and similar treatment of metals	25923	6	6	31.72±8.72	30.61 (1.35)	34.19	20.51	40.46	50.24	3
6	Manufacture of electronic tubes, interface cards and other electronic components n.e.c.	26299	6	6	87.9±61.57	48.14 (5.01)	114.14	2.68	143.65	681.46	4
7	Other service activities incidental to air transportation	52939	6	6	31.52±21.83	25.94 (1.97)	23.46	12.09	67.67	79.21	3
8	Other finishing of textiles and wearing apparel	13409	5	5	24.44±14.31	21.07 (1.86)	22.83	10.29	44.76	58.65	3
9	Manufacture of general paints and similar products	20411	4	0	—	—	—	—	—	—	—
10	Manufacture of taps, valves and similar products	29133	4	3	9.43±9.49	4.43 (5.46)	8.35	0.51	20.50	72.18	3
11	General repair services of motor vehicles	95211	4	0	—	—	—	—	—	—	—
12	Manufacture of shoes	15211	2	0	—	—	—	—	—	—	—
13	Manufacture of synthetic resin and other plastic materials	20202	2	0	—	—	—	—	—	—	—
14	Manufacture of work wear and similar garments	14192	1	0	—	—	—	—	—	—	—
15	Manufacture of other general-purpose machinery n.e.c.	29199	1	0	—	—	—	—	—	—	—

[†]KSIC-10: 10th Korea Standard Industrial Classification, *AM±SD : Arithmetic mean±Standard Deviation, **GM : Geometric Mean, [†]GSD : Geometric Standard Deviation, [†]X_{0.95}: estimated 95th percentile value (GM×GSD^{1.645}), [§]Risk level: (0) X_{0.95} < OEL 1%, (1) X_{0.95} < OEL 10%, (2) X_{0.95} < OEL 50%, (3) X_{0.95} < OEL 100%, (4) X_{0.95} ≥ OEL 100%

Table 16. Top 15 industries with the largest number of TWA samples of Sulfuric acid

Sub. No.	Industry	KSIC-10 [¶]	No. of samples	No. of detected samples	AM±SD* (ppm)	GM ^{**} (GSD [†]) (ppb)	Median (ppb)	Min (ppb)	Max (ppm)	X0.95 [†] (ppm)	Risk level [§]
1	Plating of metals	25922	23,850	16,420	13.98±0.019	0.48 (116.47)	5.450	0.20	0.20	1.208	4
2	Manufacture of other diodes, transistors and similar semi-conductor devices	26129	12,709	3,978	1.5±0.004	0.01 (52.22)	0.001	0.13	0.13	0.005	1
3	Manufacture of laminated plates for printed circuit boards	26221	9,366	5,655	6.25±0.011	0.14 (103.87)	1.860	0.13	0.13	0.282	4
4	Manufacture of electronic tubes, interface cards and other electronic components n.e.c.	26299	8,699	4,134	5.06±0.011	0.04 (109.32)	0.001	0.13	0.13	0.089	2
5	Manufacture of other chemical products n.e.c.	20499	8,309	4,126	5.81±0.013	0.05 (115.18)	0.001	0.18	0.18	0.124	3
6	Manufacture of finished medicaments	21210	7,707	3,233	3.11±0.008	0.02 (80.85)	0.001	0.13	0.13	0.026	2
7	Manufacture of basic organic petrochemicals	20111	4,376	2,021	3.27±0.008	0.03 (87.13)	0.001	0.18	0.18	0.044	2
8	Manufacture of synthetic resin and other plastic materials	20202	4,019	1,776	3.42±0.009	0.03 (90.18)	0.001	0.15	0.15	0.042	2
9	Other manufacturing n.e.c.	33999	3,720	771	1.8±0.009	0.003 (32.78)	0.001	0.31	0.31	0.001	0
10	Research and experimental development on other engineering	70129	3,458	1,303	4.94±0.013	0.02 (98.98)	0.001	0.19	0.19	0.032	2
11	Manufacture of medicinal chemicals and antibiotics	21101	3,386	1,656	4.14±0.01	0.04 (92.58)	0.001	0.12	0.12	0.063	2
12	Manufacture of other basic inorganic chemicals	20129	3,140	1,666	6.04±0.014	0.07 (111.46)	0.500	0.19	0.19	0.155	3
13	Manufacture of coal and other basic organic chemicals	20119	2,851	1,060	4.95±0.013	0.02 (99.76)	0.001	0.16	0.16	0.031	2
14	Petroleum refineries	19210	2,768	1,183	3.04±0.009	0.02 (78.82)	0.001	0.14	0.14	0.026	2
15	Research and experimental development on physics, chemistry and biology	70111	2,768	997	3.04±0.01	0.01 (67.23)	0.001	0.13	0.13	0.011	1

Table 17. Top 15 industries with the largest number of STEL samples of Sulfuric acid

Sub. No.	Industry	KSIC-10 [¶]	No. of samples	No. of detected samples	AM±SD* (ppm)	GM ^{**} (GSD [†]) (ppm)	Median (ppm)	Min (ppm)	Max (ppm)	X0.95 [†] (ppm)	Risk level [§]
1	Manufacture of articles made of metal wires	25944	94	5	5.89±0.03	0.07 (4.98)	0.05	0.05	0.221	0.001	0
2	Geological surveying and prospecting services	72923	88	0	-	-	-	-	-	-	-
3	Manufacture of other diodes, transistors and similar semi-conductor devices	26129	68	24	16.11±0.03	0.52 (25.07)	0.05	0.05	0.097	0.104	2
4	Manufacture of other basic inorganic chemicals	20129	60	32	9.62±0.01	0.92 (17.17)	2.37	0.05	0.053	0.098	2
5	Manufacture of basic organic petrochemicals	20111	46	0	-	-	-	-	-	-	-
6	Mining support service activities	08000	44	0	-	-	-	-	-	-	-
7	Manufacture of finished medicaments	21210	38	0	-	-	-	-	-	-	-
8	Heat treatment of metals	25921	38	1	2.21±0.01	0.06 (3.32)	0.05	0.05	0.082	0.0004	0
9	Plating of metals	25922	32	23	20.32±0.04	2.94 (16.2)	8.25	0.05	0.198	0.287	2
10	Manufacture of other fabricated and processed metal products n.e.c.	25999	30	4	35.22±0.09	0.16 (19.35)	0.05	0.05	0.282	0.021	1
11	Manufacture of other chemical products n.e.c.	20499	29	7	21.4±0.05	0.28 (23.54)	0.05	0.05	0.244	0.051	1
12	Manufacture of parts and accessories for motor vehicle body(new products)	30320	28	15	70.94±0.08	3.14 (52.28)	34.30	0.05	0.202	2.103	4
13	Other metalworking n.e.c.	25929	26	3	14.54±0.06	0.12 (11.32)	0.05	0.05	0.292	0.006	1
14	Manufacture of accumulators	28202	26	9	14.02±0.02	0.46 (23.52)	0.05	0.05	0.076	0.083	2
15	Sewage treatment services	37011	23	12	21.38±0.06	0.84 (20.76)	0.70	0.05	0.292	0.123	2

[¶]KSIC-10: 10th Korea Standard Industrial Classification, *AM±SD : Arithmetic mean±Standard Deviation, **GM : Geometric Mean, [†]GSD : Geometric Standard Deviation, [†]X_{0.95}: estimated 95%ile value (GM×GSD^{1.645}), [§]Risk level: (0) X_{0.95} < OEL 1%, (1) X_{0.95} < OEL 10%, (2) X_{0.95} < OEL 50%, (3) X_{0.95} < OEL 100%, (4) X_{0.95} ≥ OEL 100%

(KSIC-26299)이 해당되었다(Table 6~17).

IV. 고 찰

고용노동부 고시에서 정한 연구대상 물질별 STEL 기준을 TWA 기준과 비교하면, 1,2-DCP의 경우 11배, 벤젠 5배, 1,3-부타디엔 5배, TCE 2.5배, PCE 4배, 황산은 3배가 더 높으나, 이번 연구를 통해 5년간 (2018~2022) 작업환경측정 결과에서 확인한 STEL과 TWA를 동시에 측정한 작업자의 STEL/TWA 농도 차이는 1,2-DCP 약 2.8배, 벤젠 약 3.1배, TCE 약 2.6배, PCE 약 2.6배, 황산은 약 40.5배를 보여, 황산을 제외하고 설정된 STEL/TWA 노출기준 비율보다 낮았다. 다만, STEL을 측정한 작업자의 TWA 평균 농도를 해당 물질별 전체 TWA 평균 농도와 비교하면 평균 약 4배 더 높아, 단시간 노출 작업이 있는 작업장의 8시간 평균 노출 수준이 더 높음을 알 수 있었다. Kim et al.(2023)은 통신용 기계부품 제조업에서 TCE 세척공정을 대상으로 TWA와 STEL을 평가하였는데, 세척공정은 하루 한번(30~40분) TCE가 담긴 용기에 피세정물을 5~6회 반복하여 담그고 탈수기를 이용하여 건조하는 작업이며, 별도의 국소배기장치가 없이 이루어졌다고 하였다. 평가 결과, TWA(8시간)는 노출기준의 4배, STEL은 노출기준의 16배를 초과하였는데, 하루 1회(30~40분) 작업이 이루어지더라도 작업방법과 환기시설 설치 유무에 따라 작업장 전반으로 유해인자가 확산되어 TWA 농도도 높았다고 보고하였다.

TWA 전체 시료 중 노출기준 초과 시료수는 모든 물질에서 1% 미만이었으나, STEL에서는 TCE 1.17%, PCE 2.37%가 기준을 초과하였다. 황산을 제외한 5개 물질에서 TWA에 대한 위험등급은 1등급 미만이었으나, STEL은 1,2-DCP 2등급, 벤젠 2등급, 1,3-부타디엔 1등급, TCE 4등급, PCE 2등급이었다. STEL 노출평가에 대한 위험등급 확인을 통해 단시간 노출 작업이 노출 변이가 크고, 고농도에 노출될 가능성도 높음을 알 수 있었다. 반면, 황산은 TWA가 3등급, STEL은 1등급으로 상반된 결과를 나타내었다. 황산은 단시간 노출 작업에 따른 작업장 유해인자 확산이 적고, STEL 노출농도 수준은 높지 않았으나, TWA 농도는 상대적으로 높아 8시간 연속 작업 근로자에 대한 작업환경관리가 우선 필요할 것으로 평가되었다.

이번 연구에서 1,2-DCP는 자동차용 부품과 관련한

제조업, TCE는 도금업에서 TWA와 STEL 모두 시료수가 가장 많았다. 반면, 벤젠과 1,3-부타디엔은 원유 정제처리업과 석유화학계 기초 화학 물질 제조업에서 TWA 평가가 많았으나, STEL은 합성수지 및 기타 플라스틱 물질 제조업에서 많았다. 황산은 도금업에서 TWA가 가장 많았으나, STEL은 금속선 가공제품 제조업에서 많았다. 단시간 노출평가는 작업특성 상 노출이 균일하지 않거나, 작업자가 유지보수, 수리 및 밀폐공간 작업 등 단시간에 고농도에 노출 가능한 상황에서 TWA에 추가하여 측정하게 된다. 석유화학 등 장치산업에서 주로 취급되는 1,3-부타디엔, 벤젠 및 황산은 TWA 측정 시료수의 1% 미만으로 STEL 측정이 수행되었다. 반면 금속 등의 세척용도로 주로 사용되는 TCE는 TWA 측정 시료수의 약 16.1%, 1,2-DCP 5.6%, PCE 2.2%로 STEL 측정이 상대적으로 많았다. STEL 측정이 다수 이루어진 도금, 세척작업 등 화학물질을 직접 다루는 사업장은 50인 미만의 소규모 사업장이 많고 노동집약적이며 작업환경이 열악한 것으로 알려져 있다(An et al., 2024). 작업환경측정 결과에서 화학물질의 노출기준 초과 사업장은 대부분 50인 미만 사업장으로, 2016년 2월 휴대폰 부품 가공 사업장에서 발생한 메탄을 중독 사고는 소규모 사업장이 여전히 산업안전보건법의 사각지대에 있음을 보여 주었다(Kim et al., 2016). 향후 소규모 사업장을 우선으로 하는 단시간 고농도 노출 관리에 대한 실태조사 및 관리 감독이 필요해 보인다.

연구결과에서 Table로 별도 제시되지 않았으나, 물질별 STEL 초과 업종 및 공정 등을 살펴보았다. 1,2-DCP에 대한 STEL 초과 시료는 금속 가공제품 제조업의 핸드폰 부품을 세척하는 작업으로 측정값은 122 ppm이었다. TWA와 STEL 사이의 농도로 평가된 시료(48건)의 업종은 자동차 차체용 신품 부품 제조업에서 22건으로 가장 많았고, 도금업 6건, 주형 및 금형 제조업 3건 등 순이었다. 공정은 세척공정이 18건으로 가장 많았고, 랩핑 8건, 코일링 8건, 조립 4건, 도금 3건 등 순으로 많았다. Jeong et al.(2017)의 연구에서 1,2-DCP를 취급하는 도금사업장을 대상으로 도금 전 세척작업에 대한 작업환경측정결과를 살펴본 결과 가방 부자재 도금작업에서 TWA 59 ppm, STEL 99 ppm이었으며, 악세사리 도금작업에서는 TWA 113 ppm, STEL 267 ppm이었다. STEL 평가 농도가 TWA의 약 2배 수준이었으며, 악세사리 도금작업에서는 STEL

이 노출기준(110 ppm)을 초과하였다. 당시 1,2-DCP의 TWA 노출기준은 75 ppm이었으나, 현재 노출기준 10 ppm과 비교하면 가방부자재 도금작업 약 6배, 악세사리 도금작업에서는 10배를 초과하는 농도 수준이었다. 또한 인쇄업과 기계부품 제조업을 대상으로 1,2-DCP에 대한 현장 노출평가를 직접 실시한 결과, 인쇄업에서의 TWA는 산술평균 18 ppm (0.29~162.4 ppm), STEL 37ppm이었으며, 기계부품제조업은 TWA 산술평균 38 ppm (7.02~35.24 ppm), STEL 226 ppm (0.91~1,073.2 ppm)으로 STEL에서 기준(110 ppm)의 약 10배 수준으로 노출되는 경우도 있었다.

미국산업위생전문가협회(American conference of governmental industrial hygienists, ACGIH)는 2005년 1,2-DCP에 대한 기존 노출기준(TWA 75 ppm, STEL 110 ppm)을 TWA 10ppm으로 강화하고, STEL은 철회하였다 (ACGIH, 2005). ACGIH는 노출기준 설정에 대한 설명(documentation)에서 STEL 농도를 결정한 충분한 동물실험 자료나 사람에 대한 역학조사 자료가 부족하다고 하였다(ACGIH, 2019). 국내에서는 2018년에 STEL(110 ppm)은 그대로 유지하면서, TWA를 10 ppm으로 강화하였다. 1,2-DCP의 과거 TWA(75 ppm)과 비교하면 STEL이 약 1.5배 높은 수준이었으나, TWA가 10 ppm으로 강화된 이후, STEL은 약 11배 더 높은 수준이 되었다. STEL이 없는 물질의 경우 TWA의 3배, 보수적으로는 1.5배를 적용하는 것과 비교하면 1,2-DCP의 STEL 기준치에 대해 강화된 TWA에 따른 향후 재검토가 필요할 것이다.

벤젠에 대한 STEL 초과 시료는 합성고무 및 플라스틱 물질 제조업의 석유화학제품 제조 작업으로 측정값은 4.8 ppm이었다. TWA와 STEL 사이의 농도로 평가된 시료의 업종은 갯품 및 거푸집 등을 생산하는 구조용 금속제품 제조업에서 8건으로 가장 많았고, 기타 일반 목적용 기계 제조업 5건, 기초 유기화학 물질 제조업 및 자동차 수리 및 세차업 각 4건 등 순이었다. 공정은 도장작업이 16건으로 가장 많았다. 벤젠의 TWA 노출기준은 2003년 10 ppm에서 1 ppm으로 설정되고, 2016년 다시 0.5 ppm으로 강화되었으며, STEL은 2007년 5 ppm으로 제정·공포된 이후, 2016년 2.5 ppm으로 강화되었다(고용노동부 고시 제2016-41호, MoEL, 2016). 국립산업안전보건연구원(National institute of occupational safety and health)에서는 TWA 0.1 ppm, STEL 1 ppm으로 권

고하고 있다. Park et al.(2023)은 조경유(crude right oil) 출하 작업을 대상으로 벤젠의 노출 수준을 평가한 결과 기하평균이 0.589 ppm으로 노출기준을 초과하였다. 해당 작업을 직독식 장비를 이용하여 휘발성유기화합물에 대한 실시간 모니터링을 한 결과, 상자, 운전, 하차작업 중 하차작업에서 간헐적으로 노출량이 매우 높았다고 보고하였다. 실시간 노출평가를 통해 고농도에 노출되는 단시간 작업을 파악하게 되면, 향후 작업환경 개선 대책 마련에 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

1,3-부타디엔에 대한 STEL 측정 자료에서는 90개 시료 중 88개 시료는 불검출이었으며 검출된 2개 시료의 농도는 TWA와 STEL 사이였다. 1,3-부타디엔을 제조하거나 사용하는 사업장 근로자를 대상으로 STEL을 평가한 연구에서(Choi et al., 2009), 합성고무 제조 과정에서 평가한 시료의 41.2%(14명)와 수리작업에서 평가한 63.2%(12명)의 시료가 STEL을 초과하였다고 보고하였다. 1,3-부타디엔 취급은 대부분 장치산업에서 이루어져 TWA는 대부분 노출기준 미만이었으나, 비정기적으로 발생하는 단시간 노출 작업에서는 STEL을 초과하는 사례가 다수 발생하였다고 보고하였다.

TCE에 대한 STEL 초과 시료는 금속 가공 관련 업종에서 15건으로 가장 많았고, 도장 및 기타 피막 처리업에서 9건, 자동차용 신품 부품 제조업 5건 등 순이었다. TWA와 STEL 사이의 농도로 평가된 시료의 업종은 도금업이 273건으로 가장 많았고, 금속 가공 관련 업종 61건, 도장 및 기타 피막 처리업 27건, 전자부품 제조 관련 27건, 기계 제조 관련 26건, 주형 및 금형제조업 17건 등 순이었다. 공정은 세척 작업이 357건, 도금 143건 등 순이었다. PCE에 대한 STEL 초과 시료는 전자부품 제조업의 세척 작업으로 측정값은 101~143 ppm 수준이었다. TWA와 STEL 사이의 농도로 평가된 시료의 업종은 기술 시험, 검사 및 분석업에서 8건으로 가장 많았고, 금속 열처리, 도금 및 기타 금속 가공업 6건, 항공 운송 지원 서비스업 3건 등 순이었다. 공정은 드라이클리닝 및 세탁 작업이 11건, 도장 및 세척 4건 등 순이었다. 황산에 대한 TWA와 STEL 사이의 농도로 평가된 시료는 날붙이 제조업에서 7건으로 가장 많았고, 금속 가공 관련 업종에서 6건 등 순이었으며, 공정은 도금이 7건으로 가장 많았다.

TCE와 PCE는 세척제로 주로 사용되며, 국내 급성중독 사례가 지속적으로 발생하는 대표적인 물질이다. 화

학물질에 의한 급·만성 및 비가역적인 조직 손상 등으로부터 근로자를 보호하기 위해 단기 노출 관리는 매우 필요하나, 이를 위한 가장 적절한 작업환경 측정 전략을 수립하는 일은 산업위생전문가에게 어렵고, 많은 시간이 소요되는 작업이다(Poirot et al., 2004). 최근 센서 및 IoT(Internet of Things) 기술의 발달로 다양한 직독식 장비가 개발되었으며 향후 센서의 신뢰성 및 자료 해석에 대한 기준이 마련된다면, 단기 노출 관리에 매우 효율적인 도구로 활용될 수 있다. 또한, 과거 작업환경측정 자료 분석을 통해 STEL 고위험 노출 물질과 업종을 파악하고, 관리 우선순위를 결정하는 데 활용할 수 있을 것이다.

최근 5년간(2018~2022) STEL 농도값이 TWA와 STEL 사이인 시료는 1,2-DCP 48건(12.6%), 벤젠 26건(6.7%), 1,3-부타디엔 2건(2.2%), TCE 544건(15.5%), PCE 19건(11.2%), 황산 18건(1.9%)이 있었으나, STEL 측정을 1일 4회 이상 실시한 경우는 전체 측정의 1.75%이었고, 92.61%는 1일 1회 실시되었다. 1,2-DCP, 벤젠 및 1,3-부타디엔은 측정 시료 중 1일 4회 이상 평가된 시료는 없었다. STEL 측정은 1회 15분간 실시하며, 노출특성에 따라 횟수를 정할 수 있는데, 2회 이상 측정한 단시간 노출농도값이 단시간 노출기준과 시간가중평균기준값 사이의 경우로 15분 이상 연속 노출되거나, 노출과 노출사이의 간격이 1시간 미만이거나 1일 4회를 초과하는 경우 노출기준 초과로 평가한다. 따라서, STEL 설정 유해인자의 노출작업이 1시간 이상 또는 4회 이상 이루어지는 경우, STEL 측정을 4회 이상 실시하는 것이 위험을 평가하기에 적절하다고 판단된다.

노출기준은 역학조사 사례 등이 보고됨에 따라 강화되기도 하고, 근거자료가 부족하다는 의견이 있는 경우 철회되기도 한다. ACGIH는 TWA가 있는 많은 화학물질이 여전히 STEL이 없는 경우가 많은데, 8시간 TWA가 노출기간 미만일지라도 일시적인 고농도 노출에 따른 급성 건강 부작용을 예방하기 위해 단기피크 노출은 통제되어야 한다고 하였다. 이를 위해 ACGIH는 STEL이 없는 물질도 TWA의 3배를 초과하는 농도에는 15분 이상 노출될 수 없으며, TWA의 5배를 초과하는 농도에는 잠시도 초과하여서는 안된다고 제안하였다. 이는 산업위생분야 측정자료의 통계학적 특성에 기반하는데, 대부분의 측정자료는 대수정규분포하는 특성이 있어, 기하표준편차가 2.0인 경우, 자료의 5%가 기하평균의

3.13배를 초과하는 특성에서 제안되었다, 다만, 자료의 기하표준편차가 2.0보다 큰 경우에는 전문가가 현장 특성에 따라 더욱 보수적으로 적용하여야 한다(ACGIH, 2018).

일본 산업위생학회는 유해인자의 일일 평균농도가 노출기준을 초과하지 않더라도 근로자가 단기 고농도 노출로 인한 급성 건강영향이 초래하지 않도록 15분간 농도가 TWA의 1.5배를 초과하지 않도록 권장하고 있다(Kumaga et al., 1998). 또한 8시간을 15분 간격으로 나누면 총 32개 구간이 되는데, 이를 모두 측정하고 측정값 중 최대값을 노출기준과 비교하는 방법을 제안하였다, 다만, 이러한 평가를 위해 많은 비용과 노력이 필요하므로 32개 구간 중 3개 구간 이상을 무작위로 선택하여 평가한 후 자료 분포의 98.44%에 해당하는 값을 기준값과 비교하는 방법을 제안하였다(Kumaga et al., 1998). Poirot et al.(2004)의 연구에서 건설현장 도장 작업 등을 대상으로 PID(photoionization air detectors) 센서를 활용하여 유기화합물 농도를 평가하였는데, STEL 농도의 적용은 작업장의 유해인자 노출 상황과 측정 대상 화학물질의 증기압 등 특성을 반영하여 결정할 필요가 있으며, 해당 연구에서는 유기화합물이 용매로 활용된 작업장 상황 등을 반영하여 TWA의 1.5배를 적용하여 비교하였다.

건설현장, 실험실 분석 및 정비 등 비정형 작업에서 단시간 고농도에 노출될 우려가 있는 경우, 유해인자에 대한 농도 수준은 지속적으로 변화하게 되는데 이를 8시간 가중 평균 농도로 평가하는 경우 고농도 노출로 인한 급성중독을 예방하기에 한계가 있다. 향후 급성중독 우려가 있는 물질에 대해서는 STEL이 설정되어 있지 않더라도, 단시간 노출평가를 반복 측정하여 자료의 분포를 확인하거나 직독식 장비를 활용한 실시간 측정을 통해 노출기준 초과 가능성에 대한 평가를 실시할 필요가 있다. 또한 STEL 측정 대상이 되는 작업장은 환기장치 등의 성능 등 환경 조건에 따라 유해인자가 작업장 전반으로 확산될 수 있으므로 작업환경에 우선적인 관리가 요구된다.

V. 결 론

최근 5년간(2018~2022년) 특별관리물질 중 단시간 노출기준이 있는 물질(6종)을 대상으로 단시간 노출평가 현황 및 농도 수준을 살펴보고, 급성중독 예방 등 단

시간 고농도 노출 관리를 위한 정책 수립에 활용하고자 하였다.

1. 1,3-부타디엔, 벤젠 및 황산에 대한 STEL 측정 시료수는 TWA 측정 시료수의 1% 미만으로 실시된 반면, 금속 등의 세척용으로 주로 사용되는 TCE, 1,2-DCP, PCE는 TWA 측정 시료수의 각 16.1%, 5.6%, 2.2%로 상대적으로 많았다.
2. STEL을 측정한 작업자의 당일 측정된 TWA 농도와 STEL을 상호 매칭하여 농도수준을 비교하면 (STEL/matched TWA), 1,2-DCP의 경우 약 2.8배, 벤젠은 약 3.1배, TCE는 약 2.6배, PCE는 약 2.6배 높았으나, 설정된 STEL과 TWA 노출기준 간 차이(1,2-DCP 11배, 벤젠 5배, 1,3-부타디엔 5배, TCE 2.5배, PCE 4배)보다는 낮았다.
3. STEL을 측정한 작업자의 TWA 농도와 전체 TWA를 비교하면(matched TWA/TWA), 1,2-DCP의 경우 약 3.4배, 벤젠은 약 8배, 1,3-부타디엔 1.4배, TCE는 약 2.0배, PCE는 약 8.6배로 높았다. 단시간 노출 작업을 보유한 작업장이 8시간 평균 노출 농도 수준도 더 높아 향후 우선적인 작업환경관리가 필요하였다.
4. STEL이 없는 물질도 일시적인 고농도 노출에 따른 건강영향이 발생하지 않도록 단기 피크 노출은 관리되어야 하며, 관련 문헌을 통해 TWA의 3배 (유기용제의 특성 및 변이가 큰 작업의 경우 1.5배)수준으로 관리가 필요하였다.
5. STEL 측정의 92.61%는 1일 1회 실시되었으나, 5년간(2018~2022) 농도수준이 TWA와 STEL 사이인 시료는 1,2-DCP 48건(12.6%), 벤젠 26건(6.7%), 1,3-부타디엔 2건(2.2%), TCE 544건(15.5%), PCE 19건(11.2%), 황산 18건(1.9%)이었다. 단시간 노출평가 시, 노출 사이의 간격이 1시간 미만인지, 1일 4회를 초과하는지 등 실시 횟수 및 방법의 적절성에 대한 개선이 필요하다.
6. 1,2-DCP는 자동차용 부품 관련 제조업, TCE는 도금업에서 TWA와 STEL 모두 시료수가 가장 많았다. 벤젠과 1,3-부타디엔은 원유 정제처리업과 석유화학계 기초 화학 물질 제조업에서 TWA 평가가 많았으나, STEL은 합성수지 및 기타 플라스틱 물질 제조업에서 많았고, 황산은 도금업에서 TWA가 가장 많았으나, STEL은 금속선 가공제품

제조업에서 많았다.

이번 연구를 통해 단시간 고농도 노출 우려가 있는 작업장이 8시간 평균 노출 수준도 더 높은 수준임을 알 수 있었다. 아울러, STEL이 설정되어 있지 않는 물질이라도 단시간 노출평가를 측정하여, 급성중독 발생 위험을 평가하고 관리할 필요가 있다. 또한, 물질별 취급용도 및 방법 등을 통해 단시간 고농도 노출이 예측되는 업종을 파악하여, 작업환경관리가 필요한 업종의 우선순위 결정 등에 활용할 필요가 있다.

References

- ACGIH TLVs Documentation: Propylene dichloride(1, 2-Dichloropropane)
- An JH, Phee YG. Exposure assessment of airborne hexavalent chromium in the South Korea plating industry. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2024; 34(1):98-106
- Choi HC, An SH, Lee HS, Park WY, Kim KS. Exposure Characteristics of 1,3-Butadiene Exposed Workers. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2009;19(4): 321-327
- Collins JJ, Ireland B, Buckley CF, Shepperly D. Lymphohaematopoeitic cancer mortality among workers with benzene exposure. *Occup. Environ. Med* 2003;60(9):
- Grosse Y, Baan R, Straif K, Secretan B, Ghissassi F et al. Carcinogenicity of 1,3-butadiene, ethylene oxide, vinyl chloride, vinyl fluoride, and vinyl bromide. *Policy Watch* 2007;8(8):679-680
- IARC. Benzene: IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 120, 2018
- Jeong KS, Ahn YS, Kim HS, Kim CN, Kim DH. Status of cleaning agent usage including 1,2-Dichloropropane. OSHA, 2017
- Kim HJ, Ryu JA. Acute occupational poisoning in Korea. *Ewa Med J* 2016;39(4):99-103
- Kim HS. TCE Exposure Assessment of Cleaning Workers. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2023, 33(1) Page: 3-5
- Koh DH, Park JH, Lee SG, Kim HC, Jung H, Kim I, Choi S, Park D. Estimation of lead exposure intensity by industry using nationwide exposure databases in Korea. *Saf Health Work* 2021;12(4):439-444 (<https://doi.org/10.1016/j.shaw.2021.07.008>)

- KOSHA Health management guideline for workers exposed to dichloropropane (KOSHA GUIDE H-147-2020). KOSHA, 2021
- Kumagi S, Kurumatani N, Arimoto A, Ichihara G. Cholangiocarcinoma among offset colour proof-printing workers exposed to 1,2-dichloropropane and/or dichloromethane. *Occup and Environ Med* 2013;70:508-5010
- Kumagai S. Two offset printing workers with cholangiocarcinoma. *Journ of Occup Health* 2014; 56:164-168
- MoEL. Occupational Exposure limits for chemical and physical agents(Notice No. 2020-48). MoEL, 2020
- MoEL. OSH law-enforcement rules. MoEL, 2020
- MoEL. Regulation for the Work Environment Measurement and Quality Control. MoEL, 2011
- Park HD, Kim SD, Lee GY, Kim JB, Jang MY. Survey to improve working environment at steel mill. *OSHA*, 2023(2023-OSHRI-724)
- Poirot P, Subra L, Gerardin F, Baudin V, Grossmann S. Determination of short-term exposure with a direct reading photoionization detector. *Ann Occup Hyg* 2004;48(1):75-84
- Roh JW. Sampling and analytical methods of permitted standard substances according to to the revision of the OSH Act-1,2-dichloropropane
- Statistics Korea. 10th Korea Standard Industrial Classification, Available from: URL: <http://www.kssc.kostat.go.kr>

<저자정보>

박현희(실장), 조지훈(연구위원)