

작업환경측정 자료를 활용한 특별관리물질 노출 현황 및 고위험 업종 분석

박현희* · 조지훈

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Analysis of Exposure Status and High-risk Industries of Special Management Substances using Working Environment Measurement Data

Hyunhee Park* · Jihoon Jo

Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

ABSTRACT

Objectives: This study aims to assess the current status of work environment measurement (WEM) for carcinogenic, mutagenic, reproductive toxic substances and to identify their high-risk industries for hazard surveillance and risk assessment.

Methods: WEM Data from 37 specially managed CMR substances (2018–2022), the high-risk industries were identified by using estimated 95th percentile levels ($X_{0.95}$) of measurements compared with the occupational exposure limit (OEL).

Results: The substances most frequently measured were nickel (insoluble), followed by sulfuric acid, lead, chromium (VI), formaldehyde, phenol, dimethylformamide and benzene. The industries with highest number of measurement samples for special management substances were plating of metals, followed by hospitals, general repair services of motor vehicles, building of ships, manufacture of synthetic resin and other plastic materials, manufacture of finished medicaments. Out of the 37 special management substances studied, 22 had a non-detection rate of over 90%. The rate of samples exceeding the OEL was less than 1% for all substances. The substance with the highest number of samples exceeding the OEL was trichloroethylene, which also had the highest average concentration compared to exposure limit. The substances with the highest percentage of industries which ($X_{0.95}$) exceeding OEL was formaldehyde followed by sulfuric acid, trichloroethylene, lead, l-bromopropane etc.

Conclusions: This study identified high-risk industries of CMR substances, highlighting the need for prioritizing these industries in hazards surveillance and risk assessment.

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

I. 서 론

작업환경측정 제도는 1981년 산업안전보건법을 통해 법적 근거를 마련하고, 1990년부터 측정 결과를 고용노동부에 보고하도록 개정되었다. 지방고용노동관서에 서

류 형태로 제출되던 작업환경측정 결과표를 2002년부터 한국산업안전보건공단(Korea Occupational Safety and Health Agency, KOSHA)에서 전산입력(마이크로소프트 엑셀 및 엑세스 자료)을 시작하였다. 2009년 하반기에는 온라인 전산시스템을 활용하여 측정기관이 직접

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

Received: July 11, 2024, Revised: August 20, 2024, Accepted: September 20, 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.

결과를 입력하는 시스템이 도입되었고, 2012년부터 K2B (KOSHA to Business service) 시스템을 통해 실시간으로 보고되고 있다.

국내 작업환경측정 사업장 수(상·하반기 중복 사업장 포함)는 1990년 10,680개소, 1995년 44,296개소, 2000년 50,285개소, 2005년 57,897개소, 2010년 67,229개소, 2015년 90,257개소, 그리고 2020년 115,211개소로 꾸준히 증가하였다(Kim et al., 2007; MoEL, 2014; 2020; 2022). 2021년 기준 우리나라 산업재해보상보험법에 가입한 사업장 2,876,635개소 중 작업환경측정을 실시한 사업장(상·하반기 중복 제외)은 75,377개소로 전체 사업장의 약 3% 수준이었다. 제조업에서는 400,242개 사업장 중 57,227개가 측정하여 약 14.3%가 측정을 실시하였다(MoEL, 2022). 그러나, 실제 측정 의무가 있는 사업장 수에 대해서는 파악된 자료가 없어, 측정 대상 사업장 중 실시율이 어느 정도인지는 확인이 어려운 실정이다. 작업환경측정 대상 규모 추정에 관한 연구(Bahk et al., 2018)에서 산업재해보상보험에 가입한 5인 이상 제조업 사업장(150,655개)의 약 41.9%(63,146개)를 측정 대상으로 추정하였는데, 이 중 측정을 실제 실시한 사업장은 30.7%(46,294개)라고 보고하였다.

작업환경측정 자료를 활용한 그간의 연구를 살펴보면, 벤젠 노출 매트릭스 구축(Baek et al., 2015), CNC 공정(메탄올) 노출 특성 파악(Lee et al., 2018), 무기산류의 작업환경측정 현황(Park et al., 2021a) 및 전자산업 발암물질 노출특성(Son et al., 2022) 등에서 일부 물질, 공정 또는 업종을 중심으로 주요 노출농도 수준과 발암성 물질 측정 현황 등 파악에 활용되었다. 국내 작업환경측정 현황(2002~2014)을 살펴본 연구(Jang et al., 2015)에서 가장 많은 측정수를 기록한 물질은 산화철 분진과 흙이었으며, 다음으로 망간과 그 무기화합물, 톨루엔, 이산화티타늄, 이소프로필알코올, 크실렌, 아세톤, 구리(흙), 수산화나트륨, 메틸에틸케톤 등 순이었다. 측정 빈도수가 많았던 유해인자 상위 60종을 대상으로 업종별(대분류), 년도별, 지역별 및 규모별 산술평균과 표준편차를 분석하였는데, 대업종(제조업-중업종)으로 분석하여 노출 위험성이 높은 업종을 확인하기보다 유해인자별 연도별, 지역별 분포 등 현황 확인에 제한적으로 활용된 측면이 있었다. 2017~2019년 작업환경측정을 실시한 7만여 사업장의 표준산업분류 업종별 작업환경측정 실시 여부를 분석한 연구 결과(소

음 제외)에서(Park et al., 2021b), 세세분류 기준 1,196개 업종 중 작업환경측정을 전혀 실시하지 않은 업종이 262개(21.9%) 있었다고 보고하였으며 미 실시 업종에 대한 측정 누락 감시가 필요하다고 하였다.

작업환경측정은 근로자 건강보호를 위한 사전적 수단이자, 산업안전보건법에서 예방적 기능을 하는 유일한 수단으로 평가받고 있다(Pyi et al., 2004). 약 20년간 구축된 작업환경측정 데이터베이스 자료는 그간 일부 연구 및 노출기준 초과 사업장 현황 파악 등에 제한적으로 활용되었으나, 최근 작업장 유해인자 분포 및 산업보건 커버리지 수준 확인 등 정책적 활용에 대한 요구가 높아지고 있다. 이번 연구에서는 국내 작업환경 유해인자 노출 감시에 활용할 수 있는 최대 자료인 작업환경측정 자료를 통해 건강 유해성이 높은 특별관리 물질의 측정 현황과 고위험 업종을 살펴보았으며, 향후, 작업환경측정 자료의 정책적 활용 가능성에 대해 평가하고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. 연구대상

연구대상 물질은 산업안전보건법에서 정한 특별관리 물질 44종 중 작업환경측정 대상이 아닌 7종(2-니트로 톨루엔, 디부틸 프탈레이트, 벤조(a)피렌, 와파린, 포름아미드, 산화붕소, 사붕소산 나트륨)을 제외한 37종(Table 1)을 선정하였다. 2018년~2022년 K2B 전산시스템을 통해 보고된 작업환경측정 자료를 대상으로 하였으며, 추출정보는 '사업장관리번호', '업종(대, 중, 소, 세, 세세)', '생산물', '부서명', '공정명', '단위작업', '유해인자', '측정값', '유해인자 노출시간', '측정값_기타(수치입력, 불검출, 검출한계 미만, 공정폐쇄, 횡수조정)', '노출기준' 이었다. 공정명 정보는 현재 측정기관에서 입력 시 추가 생성이 가능하도록 전산프로그램이 작성되어 입력된 공정명이 약 3,400개를 초과하므로 참고자료로 확인은 하였으나, 통계분석 변수로는 활용하지 못하였다. 업종은 10차 한국표준산업분류(Korea Standard Industrial Classification, KSIC-10)를 적용하였다(Statistics Korea, 2017). 물질별 측정 결과는 한국표준산업분류의 세세업종(1,196개)별로 측정 시료 수, 검출 시료 수, 노출기준 초과 시료 수, 산술평균, 표준편차, 중위수, 기하평균, 기하표준편차, 최소, 최대 값 및 자료의 분포를 통해 추정되는 95% 상위농도

Table 1. Target substances and occupational exposure limits

| Sub. No. | Substances | CAS no. | Occupational exposure limits (TWA ^{**}) | | | | Health effect |
|-------------|---|-----------------|---|--------------------|-------------------|-------------------|---|
| | | | MoEL [†] | ACGIH [‡] | OSHA [§] | Unit | |
| 1 | Dinitrotoluene | 25321-14-6, etc | 0.2 | 0.2 | 1.5 | mg/m ³ | Carcinogenicity 1B, Mutagenicity 2, Reproductive toxicity 2, Skin |
| 2 | N,N-Dimethyl acetamide | 127-19-5 | 10 | 10 | 10 | ppm | Reproductive toxicity 1B, Skin |
| 3 | Dimethylformamide | 68-12-2 | 10 | 5 | 10 | ppm | Reproductive toxicity 1B, Skin |
| 4 | 1,2-Dichloroethane | 107-06-2 | 10 | 10 | 50 | ppm | Carcinogenicity 1B |
| 5 | 1,2-Dichloropropane | 78-87-5 | 10 | 10 | 75 | ppm | Carcinogenicity 1A |
| 6 | 2-Methoxyethanol | 109-86-4 | 5 | 0.1 | 25 | ppm | Reproductive toxicity 1B, Skin |
| 7 | 2-Methoxyethyl acetate | 110-49-6 | 5 | 0.1 | 25 | ppm | Reproductive toxicity 1B, skin |
| 8 | Benzene | 71-43-2 | 0.5 | 0.5 | 1 | ppm | Carcinogenicity 1A, Mutagenicity 1B, Skin |
| 9 | 1,3-Butadiene | 106-99-0 | 2 | 2 | 1 | ppm | Carcinogenicity 1A, Mutagenicity 1B |
| 10 | 1-Bromopropane | 106-94-5 | 25 | 0.1 | - | ppm | Carcinogenicity 2, Reproductive toxicity 1B |
| 11 | 2-Bromopropane | 75-26-3 | 1 | - | - | ppm | Reproductive toxicity 1A |
| 12 | Carbon tetrachloride | 56-23-5 | 5 | 5 | 10 | ppm | Carcinogenicity 1B, Skin |
| 13 | Stoddard solvent | 8052-41-3 | 100 | 100 | 500 | ppm | Carcinogenicity 1B, Mutagenicity 1B (If benzen is more than 0.1%) |
| 14 | Acrylonitrile | 107-13-1 | 2 | 2 | 2 | ppm | Carcinogenicity 1B, Skin |
| 15 | Acrylamide (Inhalable fraction and vapor) | 79-06-1 | 0.03 | 0.03 | 0.3 | mg/m ³ | Carcinogenicity 1B, Mutagenicity 1B, Reproductive toxicity 2, Skin |
| 16 | 2-Ethoxyethanol | 110-80-5 | 5 | 5 | 200 | ppm | Reproductive toxicity 1B, Skin |
| 17 | 2-Ethoxyethyl acetate | 111-15-9 | 5 | 5 | 100 | ppm | Reproductive toxicity 1B, Skin |
| 18 | Ethylenimine | 151-56-4 | 0.5 | 0.05 | - | ppm | Carcinogenicity 1B, Mutagenicity 1B, Skin |
| 19 | 2,3-Epoxy-1-propanol | 556-52-5, etc | 2 | 2 | 100 | ppm | Carcinogenicity 1B, Mutagenicity 2, Reproductive toxicity 1B |
| 20 | 1,2-Epoxypropane | 75-56-9, etc | 2 | 2 | 50 | ppm | Carcinogenicity 1B, Mutagenicity 1B |
| 21 | Epichlorohydrin | 106-89-8, etc | 0.5 | 0.5 | 5 | ppm | Carcinogenicity 1B, Skin |
| 22 | Trichloroethylene | 79-01-6 | 10 | 10 | 100 | ppm | Carcinogenicity 1A, Mutagenicity 2 |
| 23 | 1,2,3-Trichloropropane | 96-18-4 | 10 | 0.005 | 50 | ppm | Carcinogenicity 1B, Reproductive toxicity 1B, Skin |
| 24 | Perchloroethylene | 127-18-4 | 25 | 25 | 100 | ppm | Carcinogenicity 1B |
| 25 | Phenol | 108-95-2 | 5 | 5 | 5 | ppm | Mutagenicity 2, Skin |
| 26 | Formaldehyde | 50-00-0 | 0.3 | 0.1 | 0.75 | ppm | Carcinogenicity 1A, Mutagenicity 2 |
| 27 | Propylene imine | 75-55-8 | 2 | 0.2 | 2 | ppm | Carcinogenicity 1B, Skin |
| 28 | Dimethyl sulfate | 77-78-1 | 0.1 | 0.1 | 1 | ppm | Carcinogenicity 1B, Mutagenicity 2, Skin |
| 29 | Hydrazine | 302-01-2 | 0.05 | 0.01 | 1 | ppm | Carcinogenicity 1B, Skin |
| 30 | Lead and Inorganic compounds, as Pb | 7439-92-1, etc | 0.05 | 0.05 | 0.05 | mg/m ³ | Carcinogenicity 1B, Reproductive toxicity 1A |
| 31 | Nickel (Insoluble Inorganic compounds, as Ni) | 7440-02-0, etc | 0.2 | 0.2 | 1 | mg/m ³ | Carcinogenicity 1A |
| 32 | Mercury elemental and inorganic form (All forms except aryl & alkyl compounds) | 7439-97-6, etc | 0.025 | 0.025 | 0.1 | mg/m ³ | Reproductive toxicity 1B, Skin |
| 33 | Antimony trioxide (Handling & use, as Sb) | 1309-64-4 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | mg/m ³ | Carcinogenicity 2 |
| 34 | Cadmium and compounds, as Cd | 7440-43-9, etc | 0.01 | 0.01 | 0.01 | mg/m ³ | Carcinogenicity 1A, Mutagenicity 2, Reproductive toxicity 2, Respirable |
| 35 | Chromium(VI)compounds (Water insoluble inorganic compounds) | 18540-29-9, etc | 0.01 | 0.0002 | 0.005 | mg/m ³ | Carcinogenicity 1A |
| | Chromium(VI)compounds (Water soluble) | 18540-29-9, etc | 0.05 | 0.0002 | 0.005 | mg/m ³ | Carcinogenicity 1A |
| 36 | Sulfuric acid(Thoracic fraction) | 7664-93-9 | 0.2 | 0.2 | 1 | mg/m ³ | Carcinogenicity 1A(In case of strong acid mist), Thoracic particle |
| 37 | Ethylene oxide | 75-21-8 | 1 | 1 | 1 | ppm | Carcinogenicity 1A, Mutagenicity 1B |

* Sub: Substance, ** TWA: Time Weighted Average, †MoEL: Ministry of Employment and Labor, ‡ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, § OSHA: Occupational Safety and Health Agency

(기하평균×기하표준편차^{1.645})를 분석하여 살펴보았다.

2. 자료 처리 및 통계분석

작업환경측정 결과에서 불검출(non-detected) 및 검출한계(limit of detection, LOD)미만으로 보고된 자료는 미국 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Agency, OSHA)의 시료분석 지침에서 제시하는 LOD와 보고된 측정값 중 최솟값을 비교하여 더 낮은 값의 1/2로 변환하였다. 상기 기준에 따라 2-브로모프로판은 OSHA에서 제시한 LOD의 1/2값을 적용하였고, 나머지 물질은 연구대상 유해인자별 측정 자료 중 불검출 값을 제외한 최솟값의 1/2로 변환하였다. 측정값 중 8시간 가중평균(time weighted average, TWA)으로 평가된 자료(‘수치입력’)를 기준으로 분석하였고, ‘공정폐쇄’, ‘횡수조정’으로 표시된 자료는 제외하였다. 단시간 노출기준(short term exposure limits, STEL)이 있는 물질의 경우, 단시간 노출기준이 적용된 측정값 자료는 제외하였다. 또한 측정방법이 총 분진 및 호흡성 분진으로 각각 평가된 경우, 호흡성 분진 시료는 제외하고 총 분진으로 평가된 자료를 기준으로 평가 결과를 살펴보았다. 자료의 분포 및 통계 처리는 SPSS(ver 29.0, IBM, USA) 및 Excel 2013(Microsoft, 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. 특별관리물질 작업환경측정 실시 현황

국내 특별관리물질 37종에 대한 측정 시료수(2018~2022년), 검출 시료수 및 불검출률(%) 등은 Table 2와 같다. 측정이 가장 많이 보고된 물질은 불용성 니켈(n=257,895)이었으며, 다음으로 황산(n=216,359), 납 및 그 무기화합물(n=156,720), 불용성 6가 크롬(n=136,250), 포르말데히드(n=130,122), 수용성 6가

크롬(n=71,458), 페놀(n=56,298), 디메틸포름아미드(n=48,342), 벤젠(n=45,829), 2-에톡시에틸아세테이트(n=45,739), 2-에톡시에탄올(n=33,412), 산화에틸렌(n=27,182), 트리클로로에틸렌(n=21,719) 등 순으로 많았다. 반면, 프로필렌이민은 최근 5년간 측정이 이루어지지 않았고, 에틸렌이민, 2,3-에폭시-1-프로판올과 1,2,3-트리클로로프로판, 황산디메틸은 측정 시료 전체가 불검출이었다.

연구대상 특별관리물질 37종 중 22종에서 전체 시료의 90% 이상이 불검출이었다. 불검출률이 가장 낮은 물질은 포르말데히드(31.2%)이었으며, 다음으로 황산(51.6%), 불용성 니켈(54.8%), 트리클로로에틸렌(64.4%), 삼산화안티몬(64.7%), 납 및 그 무기화합물(66.1%), 수용성 6가 크롬(68.1%), 1-브로모프로판(68.8%), 카드뮴 및 그 화합물(74.1%), 불용성 6가 크롬(78.3%), 스토다드용제(80.5%), 1,2-디클로로프로판(80.7%), 산화에틸렌(81.2%), 디메틸포름아미드(86.9%), 퍼크로로에틸렌(89.4%)등 순으로 낮았다.

노출기준 초과율은 트리클로로에틸렌이 0.769%(n=167)로 가장 높았고, 1,2-디클로로프로판 0.411%(n=28), 디니트로톨루엔 0.224%(n=1), 퍼클로로에틸렌 0.217%(n=17), 에피클로로하이드린 0.132%(n=11), 산화에틸렌 0.132%(n=36), 2-에톡시에탄올 0.1%(n=12), 1-브로모프로판 0.094%(n=12), 디메틸포름아미드 0.058%(n=28), 벤젠 0.033%(n=15), 납 및 그 무기화합물 0.031%(n=48) 등 순이었다.

특별관리물질별 측정값 산술평균을 노출기준과 비교하여 살펴보면 트리클로로에틸렌이 노출기준의 9.27%(0.927 ppm) 수준으로 가장 높았고, 포르말데히드 4.78%(0.014 ppm), 1,2-디클로로프로판 4.58%(0.458 ppm), 1-브로모프로판 4.17%(1.042 ppm), 황산 2.91%(0.006 ppm) 등 순이었다. 기하평균은 에피클로로하이드린을 제외하고(노출기준의 1.2%), 모두 노출기준의 1% 미만 수준으로 매우 낮았다(Table 2).

특별관리물질별 최근 5년간의 측정 시료수 및 산술평균 농도 변화를 살펴보면, 측정 시료수는 증가하고, 산술평균 농도는 감소하는 경향을 보였다. 특히, 2018년과 비교하여 2022년 측정시료수가 약 2배 이상 증가된 물질로 1,2-디클로로에탄, 1,2-디클로로프로판, 2-브로모프로판, 1,2-에폭시프로판, 수은 및 그 화합물이 있었다. 반면, 2-메톡시에탄올, 2-메톡시에틸 아세테이트, 1-브로모프로판, 2-에톡시에탄올, 2-에톡시에틸아

Table 2. Number of samples and descriptive statistics of data by substances

| Sub. No. | Substances | No. of industries measured | No. of samples | No. of detected samples | Rate of non-detected samples (%) | No. of samples exceeding OEL | AM±SD* | GM**(GSD [†]) | Min | Max | X _{0.95} | Unit | Risk level [§] |
|----------|--|----------------------------|----------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------------|--|-------------------------|---------|--------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| 1 | Dinitrotoluene | 21 | 443 | 5 | 98.9 | 0 | 2.49±25.92 | 1.24 (1.4) | 1.20 | 549 | 2.15 | µg/m ³ | 1 |
| 2 | N,N-Dimethyl acetamide | 175 | 19,565 | 1,776 | 90.9 | 2 | 106.25±514.4 | 0.12 (15.5) | 0.05 | 10,774 | 10.66 | ppb | 0 |
| 3 | Dimethylformamide | 312 | 48,342 | 6,319 | 86.9 | 28 | 183.65±790.28 | 0.08 (35.1) | 0.02 | 27,778 | 27.27 | ppb | 0 |
| 4 | 1,2-Dichloroethane | 129 | 6,834 | 285 | 95.8 | 0 | 56.75±328.92 | 12.62 (2.3) | 10.65 | 5,794 | 50.96 | ppb | 0 |
| 5 | 1,2-Dichloropropane | 300 | 6,815 | 1,312 | 80.7 | 28 | 0.46±2.68 | 0.0003 (50.7) | 0.0001 | 100 | 0.21 | ppm | 1 |
| 6 | 2-Methoxyethanol | 175 | 12,021 | 361 | 97.0 | 12 | 35.74±591.04 | 1.55 (2.8) | 1.30 | 44,984 | 8.47 | ppb | 0 |
| 7 | 2-Methoxyethyl acetate | 82 | 2,461 | 221 | 91.0 | 0 | 54.38±207.99 | 4.41 (4.3) | 2.80 | 2,975 | 49.13 | ppb | 0 |
| 8 | Benzene | 348 | 45,829 | 2,571 | 94.4 | 15 | 5.23±38.93 | 0.07 (5.1) | 0.05 | 3,223 | 1.00 | ppb | 0 |
| 9 | 1,3-Butadiene | 151 | 17,189 | 1,074 | 93.8 | 4 | 13.83±104.83 | 0.01 (10.3) | 0.01 | 4,794 | 0.42 | ppb | 0 |
| 10 | 1-Bromopropane | 147 | 4,271 | 1,332 | 68.8 | 4 | 1.04±3.69 | 0.01 (44) | 0.0005 | 121 | 3.04 | ppm | 2 |
| 11 | 2-Bromopropane | 32 | 414 | 3 | 99.3 | 0 | 3.71±33.91 | 0.96 (1.7) | 0.92 | 489 | 2.21 | ppb | 0 |
| 12 | Carbon tetrachloride | 82 | 2,093 | 27 | 98.7 | 0 | 6.42±68.9 | 0.11 (2.5) | 0.10 | 1,510 | 0.51 | ppb | 0 |
| 13 | Stoddard solvent | 104 | 4,448 | 866 | 80.5 | 0 | 1.53±4.64 | 0.0005 (91.5) | 0.0001 | 58 | 0.76 | ppm | 0 |
| 14 | Acrylonitrile | 166 | 13,696 | 441 | 96.8 | 2 | 11.78±91.3 | 0.07 (4.4) | 0.05 | 3,299 | 0.76 | ppb | 0 |
| 15 | Acrylamide (Inhalable fraction and vapor) | 134 | 12,844 | 451 | 96.5 | 2 | 0.11±1.22 | 0.00065 (4.2) | 0.00 | 76 | 0.01 | µg/m ³ | 0 |
| 16 | 2-Ethoxyethanol | 314 | 33,412 | 2,855 | 91.5 | 9 | 64.47±360.58 | 0.01 (24.2) | 0.01 | 25,114 | 2.48 | ppb | 0 |
| 17 | 2-Ethoxyethyl acetate | 347 | 45,739 | 3,407 | 92.6 | 3 | 35.91±200.79 | 0.04 (11.9) | 0.02 | 5,496 | 2.36 | ppb | 0 |
| 18 | Ethylenimine | 1 | 4 | 0 | 100.0 | - | All samples were below detection limit | | | | | ppb | - |
| 19 | 2,3-Epoxy-1-propanol | 13 | 188 | 0 | 100.0 | - | All samples were below detection limit | | | | | ppb | - |
| 20 | 1,2-Epoxypropane | 61 | 3,222 | 196 | 93.9 | 0 | 27.78±110.01 | 6.78 (2.6) | 5.35 | 1,285 | 32.86 | ppb | 1 |
| 21 | Epichlorohydrin | 85 | 5,108 | 121 | 97.6 | 11 | 11.86±117.03 | 6.8 (1.6) | 6.35 | 7,682 | 14.69 | ppb | 1 |
| 22 | Trichloroethylene | 391 | 21,719 | 7,723 | 64.4 | 167 | 0.93±3.26 | 0.002 (137) | 0.0001 | 177 | 6.02 | ppm | 3 |
| 23 | 1,2,3-Trichloropropane | 16 | 290 | 0 | 100.0 | - | All samples were below detection limit | | | | | ppb | - |
| 24 | Perchloroethylene | 199 | 7,824 | 833 | 89.4 | 17 | 0.47±3.18 | 0.00015 (24.2) | 0.0001 | 129 | 0.03 | ppm | 0 |
| 25 | Phenol | 411 | 56,298 | 2,824 | 95.0 | 0 | 11.48±96.7 | 0.01 (7.6) | 0.01 | 2,855 | 0.22 | ppb | 0 |
| 26 | Formaldehyde | 444 | 130,122 | 89,482 | 31.2 | 14 | 14.37±25.03 | 0.27 (234.7) | 0.00010 | 1,155 | 2,132.77 | ppb | 4 |
| 27 | Propylene imine | 0 | 0 | 0 | - | - | No measurement has been made in the last 5 years | | | | | ppb | - |
| 28 | Dimethyl sulfate | 30 | 1,177 | 0 | 100.0 | - | All samples were below detection limit | | | | | ppb | - |
| 29 | Hydrazine | 84 | 3,159 | 85 | 97.3 | 0 | 0.12±1.28 | 0.00062 (3.7) | 0.0005 | 31 | 0.01 | ppb | 0 |
| 30 | Lead and Inorganic compounds, as Pb | 555 | 156,720 | 53,100 | 66.1 | 48 | 1±3.69 | 0.00045 (224.1) | 0.00001 | 166 | 3.29 | µg/m ³ | 1 |
| 31 | Nickel (Insoluble Inorganic compounds, as Ni) | 658 | 257,895 | 116,610 | 54.8 | 63 | 1.37±12.25 | 0.00346 (120.6) | 0.0001 | 2,694 | 9.19 | µg/m ³ | 1 |
| 32 | Mercury elemental and inorganic form (All forms except aryl & alkyl compounds) | 170 | 13,509 | 692 | 94.9 | 0 | 0.05±0.52 | 0.00014 (5.3) | 0.0001 | 16 | 0.002 | µg/m ³ | 0 |
| 33 | Antimony trioxide (Handling & use, as Sb) | 214 | 16,250 | 5,742 | 64.7 | 0 | 2.3±12.92 | 0.00286 (68.2) | 0.0002 | 435 | 2.97 | µg/m ³ | 0 |
| 34 | Cadmium and compounds, as Cd | 197 | 13,130 | 3,362 | 74.4 | 1 | 0.1±0.83 | 0.00036 (31.5) | 0.0001 | 81 | 0.11 | µg/m ³ | 1 |
| 35 | Chromium(VI)compounds (Water insoluble inorganic compounds) | 624 | 136,250 | 29,587 | 78.3 | 8 | 0.12±0.46 | 0.00009 (66.8) | 0.00001 | 34 | 0.09 | µg/m ³ | 0 |
| | Chromium(VI)compounds (Water soluble) | 510 | 71,458 | 22,815 | 68.1 | 2 | 0.34±1.71 | 0.00083 (66.1) | 0.0001 | 145 | 0.82 | µg/m ³ | 1 |
| 36 | Sulfuric acid(Thoracic fraction) | 612 | 216,359 | 104,824 | 51.6 | 4 | 5.83±13.09 | 0.04367 (113) | 0.0005 | 413 | 104.05 | µg/m ³ | 3 |
| 37 | Ethylene oxide | 109 | 27,182 | 5,122 | 81.2 | 36 | 25.66±197.76 | 0.00734 (68.6) | 0.001 | 14,873 | 7.69 | µg/m ³ | 0 |

*AM±SD : Arithmetic mean±Standard Deviation, **GM : Geometric Mean, †GSD : Geometric Standard Deviation §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. Number of samples and arithmetic mean by year (Refer to *Supplementary material 1*)

| Sub. No. | Substances | No. of samples by year | | | | | Arithmetic mean by year | | | | | (Unit) |
|----------|--|------------------------|--------|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| | | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | |
| 1 | Dinitrotoluene | 82 | 80 | 92 | 86 | 107 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.23 | 6.58 | μg/m ³ |
| 2 | N,N-Dimethyl acetamide | 3,347 | 3,872 | 4,009 | 4,170 | 4,167 | 151.61 | 115.64 | 78.36 | 109.37 | 84.81 | ppb |
| 3 | Dimethylformamide | 8,385 | 8,908 | 9,559 | 10,195 | 11,295 | 277.97 | 238.10 | 163.32 | 141.90 | 125.59 | ppb |
| 4 | 1,2-Dichloroethane | 893 | 1,209 | 1,284 | 1,616 | 1,832 | 62.31 | 41.06 | 58.88 | 61.01 | 59.17 | ppb |
| 5 | 1,2-Dichloropropane | 78 | 73 | 160 | 1,478 | 5,026 | 1.19 | 1.15 | 0.36 | 0.69 | 0.37 | ppm |
| 6 | 2-Methoxyethanol | 3,002 | 2,847 | 2,013 | 1,979 | 2,180 | 17.31 | 23.81 | 33.02 | 46.92 | 69.06 | ppb |
| 7 | 2-Methoxyethyl acetate | 631 | 756 | 420 | 332 | 322 | 61.42 | 78.42 | 22.80 | 33.73 | 46.61 | ppb |
| 8 | Benzene | 7,788 | 8,236 | 8,989 | 9,691 | 11,125 | 6.64 | 4.45 | 5.61 | 6.50 | 3.39 | ppb |
| 9 | 1,3-Butadiene | 2,482 | 3,019 | 3,661 | 4,036 | 3,991 | 13.99 | 7.11 | 14.18 | 14.60 | 17.69 | ppb |
| 10 | 1-Bromopropane | 1,046 | 897 | 791 | 783 | 754 | 0.89 | 0.90 | 1.23 | 1.34 | 0.92 | ppm |
| 11 | 2-Bromopropane | 50 | 68 | 84 | 94 | 118 | 0.92 | 0.92 | 14.71 | 0.92 | 0.92 | ppb |
| 12 | Carbon tetrachloride | 398 | 402 | 394 | 425 | 474 | 10.16 | 3.63 | 8.33 | 5.99 | 4.46 | ppb |
| 13 | Stoddard solvent | 0 | 0 | 1,220 | 1,485 | 1,743 | | | 1.92 | 1.21 | 1.52 | ppm |
| 14 | Acrylonitrile | 2,325 | 2,486 | 2,702 | 3,000 | 3,183 | 17.96 | 13.56 | 12.12 | 7.59 | 9.52 | ppb |
| 15 | Acrylamide (Inhalable fraction and vapor) | 2,115 | 2,217 | 2,440 | 2,799 | 3,273 | 0.07 | 0.08 | 0.07 | 0.15 | 0.14 | μg/m ³ |
| 16 | 2-Ethoxyethanol | 7,284 | 7,357 | 6,922 | 6,395 | 5,454 | 99.07 | 65.24 | 57.86 | 47.24 | 45.83 | ppb |
| 17 | 2-Ethoxyethyl acetate | 10,768 | 10,364 | 8,355 | 8,141 | 8,111 | 40.57 | 35.84 | 34.37 | 38.51 | 28.81 | ppb |
| 18 | Ethylenimine | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | All samples were below detection limit | | | | | ppb |
| 19 | 2,3-Epoxy-1-propanol | 16 | 38 | 36 | 30 | 68 | All samples were below detection limit | | | | | ppb |
| 20 | 1,2-Epoxypropane | 401 | 526 | 734 | 739 | 822 | 47.08 | 25.49 | 19.47 | 24.80 | 29.93 | ppb |
| 21 | Epichlorohydrin | 945 | 975 | 1,044 | 1,082 | 1,062 | 7.89 | 10.36 | 18.39 | 13.03 | 9.19 | ppb |
| 22 | Trichloroethylene | 4,420 | 4,260 | 3,698 | 3,281 | 6,060 | 1.06 | 1.19 | 0.99 | 1.00 | 0.56 | ppm |
| 23 | 1,2,3-Trichloropropane | 66 | 51 | 54 | 55 | 64 | All samples were below detection limit | | | | | ppb |
| 24 | Perchloroethylene | 1,398 | 1,479 | 1,632 | 1,590 | 1,725 | 1.08 | 0.62 | 0.27 | 0.20 | 0.27 | ppm |
| 25 | Phenol | 9,849 | 10,565 | 11,234 | 11,738 | 12,912 | 14.25 | 12.17 | 13.51 | 9.21 | 9.11 | ppb |
| 26 | Formaldehyde | 22,938 | 24,419 | 25,385 | 26,892 | 30,488 | 15.04 | 14.31 | 13.80 | 15.06 | 13.77 | ppb |
| 27 | Propylene imine | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | No measurement has been made in the last 5 years | | | | | ppb |
| 28 | Dimethyl sulfate | 181 | 209 | 253 | 256 | 278 | All samples were below detection limit | | | | | ppb |
| 29 | Hydrazine | 599 | 574 | 562 | 646 | 778 | 0.24 | 0.02 | 0.11 | 0.15 | 0.10 | ppb |
| 30 | Lead and Inorganic compounds, as Pb | 28,602 | 33,037 | 31,288 | 28,217 | 35,576 | 1.20 | 0.93 | 1.00 | 1.03 | 0.87 | μg/m ³ |
| 31 | Nickel (Insoluble Inorganic compounds, as Ni) | 44,517 | 50,006 | 51,621 | 52,013 | 59,738 | 1.46 | 1.42 | 1.68 | 1.18 | 1.16 | μg/m ³ |
| 32 | Mercury elemental and inorganic form (All forms except aryl & alkyl compounds) | 1,118 | 1,537 | 3,089 | 3,377 | 4,388 | 0.23 | 0.08 | 0.04 | 0.02 | 0.01 | μg/m ³ |
| 33 | Antimony trioxide (Handling & use, as Sb) | 2,970 | 3,137 | 3,256 | 3,384 | 3,503 | 2.87 | 2.51 | 2.11 | 1.95 | 2.16 | μg/m ³ |
| 34 | Cadmium and compounds, as Cd | 3,499 | 2,929 | 2,187 | 2,119 | 2,396 | 0.10 | 0.10 | 0.12 | 0.09 | 0.09 | μg/m ³ |
| 35_1 | Chromium(VI)compounds (Water insoluble inorganic compounds) | 19,304 | 24,078 | 26,437 | 29,782 | 36,649 | 0.13 | 0.11 | 0.10 | 0.13 | 0.11 | μg/m ³ |
| 35_2 | Chromium(VI)compounds (Water soluble) | 13,555 | 14,906 | 16,161 | 14,672 | 12,164 | 0.32 | 0.36 | 0.35 | 0.33 | 0.35 | μg/m ³ |
| 36 | Sulfuric acid (Thoracic fraction) | 38,077 | 41,102 | 43,222 | 45,225 | 48,733 | 7.17 | 5.78 | 4.91 | 5.42 | 6.02 | μg/m ³ |
| 37 | Ethylene oxide | 5,037 | 5,266 | 5,512 | 5,577 | 5,790 | 25.70 | 17.71 | 22.92 | 32.75 | 28.63 | μg/m ³ |

세테이트, 카드뮴 및 그 화합물은 시료수가 감소하였다 (Table 3).

특별관리물질에 대한 작업환경측정 시료수가 가장 많았던 (세세)업종은 도금업(n=45,964), 종합병원(n=44,010), 일반병원(n=43,479), 자동차 종합 수리업(n=39,066), 강선 건조업(n=36,725), 선박 구성 부분품 제조업(n=36,171), 합성수지 및 기타 플라스틱 물질 제조업(n=33,995), 완제 의약품 제조업(n=32,323), 그 외 기타 전자 부품 제조업(n=31,325), 기타 선박 건조업(n=30,414), 그 외 기타 분류 안된 화학제품 제조업(n=28,386), 그 외 기타 일반 목적용 기계 제조업(n=25,523), 석유화학계 기초 화학 물질 제조업(n=25,512), 그 외 자동차용 신품 부품 제조업(n=23,050), 열간 압연 및 압출제품 제조업(n=20,382) 등 순이었다(Supplementary material 2).

2. 특별관리물질별 고위험 업종 분포

물질별 전체 시료(2018~2022)의 분포를 통해 추정된 95% 상위농도($X_{0.95}$)를 노출기준과 비교하여 위험등급을 살펴보면, 포름알데히드가 4등급(노출기준 이상), 트리클로로에틸렌과 황산은 3등급(노출기준 50~100%), 1-브로모프로판은 2등급(노출기준 10%~50%)이었고, 디니트로톨루엔, 1,2-디클로로프로판, 1,2-에폭시프로판, 에피클로로하이드란, 카드뮴 및 그 화합물, 수용성 6가크롬, 납 및 그 무기화합물, 불용성 니켈은 1등급(노출기준 1%~10%)이며, 나머지 특별관리물질은 0등급 수준이었다(Table 2).

특별관리물질별 측정을 실시한 세세업종 수와 세세업종별 95% 상위농도($X_{0.95}$)의 위험등급 분포 현황은 Table 4와 같다. $X_{0.95}$ 가 4등급에 해당하는 업종의 수가 가장 많은 물질은 포름알데히드로 63.7%의 업종이 4등급에 해당하였다. 다음으로 황산(27.3%), 트리클로로에틸렌(22.8%), 납 및 그 무기화합물(16%), 1-브로모프로판(13.7%), 디메틸포름아미드(10.6%), 1,2-디클로로프로판(11.3%), 스토다드용제(8.65%) 등 순으로 4등급 해당 업종이 많았다. 반면, 1,3-부타디엔, 사염화탄소, 아크릴로니트릴, 아크릴아미드, 2-에톡시에탄올, 2-에톡시에틸아세테이트, 페놀, 히드라진은 약 80% 이상이 0등급이었다. $X_{0.95}$ 가 노출기준을 초과하는 업종이 10개 이상인 특별관리물질은 12개(디메틸포름아미드, 1,2-디클로로프로판, 벤젠, 1-브로모프로판, 트리클로로에틸렌, 퍼클로로에틸렌, 포름알데히드, 납 및 그 무

기화합물, 니켈(불용성), 카드뮴 및 그 화합물, 6가크롬(불용성), 황산)가 있었으며, 물질별 고위험 및 측정 시료수가 많은 상위 5개 업종은 Table 5와 같다.

IV. 고 찰

특별관리물질 중 작업환경측정 대상인 37종에 대해 최근 5년간(2018-2022) 측정 및 검출 시료수, 평균 농도, 추정되는 95% 상위농도 등을 한국표준산업분류의 세세업종(1,196종)에 따라 살펴보았다. 2-메톡시에탄올, 2-메톡시에틸 아세테이트, 2-에톡시에탄올, 2-에톡시에틸아세테이트는 도료의 희석용제로 자동차 수리업에서 가장 많은 평가가 이루어졌는데, 최근 5년간 2-메톡시에탄올은 3,002건에서 2,180건으로, 2-메톡시에틸아세테이트는 631건에서 322건으로, 2-에톡시에탄올은 7,234건에서 5,454건으로, 2-에톡시에틸아세테이트는 10,768건에서 3,111건으로 감소하였다. 2-에톡시에탄올에 대한 환경부의 등록화학물질 위해성 평가 보고서에 따르면, 취급 사업장 수는 1998년 93개소에서 2016년 334개소로 증가하였으나, 수입량은 33,162톤에서 722톤으로 크게 감소하였고, 국내 사용량도 33,950톤에서 1,194톤으로 크게 감소하였다고 보고하였다(NIER, 2022). 반면, 국내 주요 세척제로 사용되는 물질인 1,2-디클로로프로판은 자동차 부품 및 전자 부품 제조업에서 측정 시료수가 가장 많았으며, 2020년 160건에서 2022년 5,026건으로 증가하였다. 2015년 메탄올 중독사고를 계기로 세척 용도로 사용되는 유기화합물에 대한 관리 감독이 강화되었다. 대표적인 세척용매인 트리클로로에틸렌의 노출기준이 50 ppm에서 10 ppm으로 개정되면서, 당시 규제가 적었던 1,2-디클로로프로판의 취급이 크게 증가하였다(Jeong et al., 2017). 이후 1,2-디클로로프로판의 인쇄업 단판암 등이 알려지면서, 2019년 특별관리물질로 지정되었고 작업환경측정대상 물질로 추가되었다. 1,2-디클로로프로판은 미국국립산업안전보건연구원의 측정분석방법에서 Anasorb tube를 이용하여 시료채취 후 가스크로마토그래프 ECD(electron capture detector) 검출기로 분석하는 것을 제시하였으나, ECD는 국내 작업환경측정기관에서 거의 보유하고 있지 않는 검출기로 작업환경측정 분석에 어려움이 있었다. 2021년 산업안전보건연구원에서 코코넛셀 활성탄관(coconut shell charcoal tube)으로 채취하여 FID(flame ionization detector)

Table 4. Number of industries(detailed) by risk level of $X_{0.95}$ value

| Sub. No. | Substances | No. of industries measured | No. of industries(detailed) by risk level of $X_{0.95}$ value | | | | | |
|----------|--|----------------------------|---|---|--|--|---|--|
| | | | Not available (less than 3 samples) | Risk level 0 ($X_{0.95} < \text{OEL } 1\%$) | Risk level 1 ($X_{0.95} < \text{OEL } 10\%$) | Risk level 2 ($X_{0.95} < \text{OEL } 50\%$) | Risk level 3 ($X_{0.95} < \text{OEL } 100\%$) | Risk level 4 ($X_{0.95} \geq \text{OEL } 100\%$) |
| 1 | Dinitrotoluene | 21 | 4 | 16 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | N,N-Dimethyl acetamide | 175 | 18 | 131 | 10 | 6 | 4 | 6 |
| 3 | Dimethylformamide | 312 | 25 | 220 | 19 | 9 | 6 | 33 |
| 4 | 1,2-Dichloroethane | 129 | 29 | 85 | 13 | 1 | 1 | 0 |
| 5 | 1,2-Dichloropropane | 300 | 64 | 145 | 24 | 25 | 8 | 34 |
| 6 | 2-Methoxyethanol | 175 | 23 | 137 | 11 | 0 | 1 | 3 |
| 7 | 2-Methoxyethyl acetate | 82 | 11 | 51 | 11 | 3 | 4 | 2 |
| 8 | Benzene | 348 | 32 | 252 | 40 | 11 | 3 | 10 |
| 9 | 1,3-Butadiene | 151 | 19 | 127 | 3 | 1 | 0 | 1 |
| 10 | 1-Bromopropane | 146 | 26 | 80 | 8 | 11 | 1 | 20 |
| 11 | 2-Bromopropane | 32 | 0 | 31 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | Carbon tetrachloride | 82 | 15 | 67 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | Stoddard solvent | 104 | 43 | 38 | 8 | 5 | 1 | 9 |
| 14 | Acrylonitrile | 166 | 14 | 144 | 6 | 1 | 0 | 1 |
| 15 | Acrylamide (Inhalable fraction and vapor) | 134 | 15 | 110 | 4 | 2 | 1 | 2 |
| 16 | 2-Ethoxyethanol | 314 | 32 | 257 | 10 | 5 | 2 | 8 |
| 17 | 2-Ethoxyethyl acetate | 347 | 34 | 290 | 13 | 4 | 1 | 5 |
| 18 | Ethylenimine | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 2,3-Epoxy-1-propanol | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 1,2-Epoxypropane | 61 | 9 | 29 | 19 | 3 | 0 | 1 |
| 21 | Epichlorohydrin | 84 | 6 | 0 | 77 | 1 | 0 | 0 |
| 22 | Trichloroethylene | 391 | 55 | 166 | 34 | 29 | 18 | 89 |
| 23 | 1,2,3-Trichloropropane | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | Perchloroethylene | 199 | 33 | 121 | 14 | 13 | 3 | 15 |
| 25 | Phenol | 411 | 28 | 358 | 17 | 3 | 2 | 3 |
| 26 | Formaldehyde | 444 | 50 | 22 | 18 | 38 | 33 | 283 |
| 27 | Propylene imine | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 28 | Dimethyl sulfate | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 29 | Hydrazine | 84 | 10 | 69 | 3 | 1 | 1 | 0 |
| 30 | Lead and Inorganic compounds, as Pb | 555 | 40 | 202 | 136 | 69 | 25 | 83 |
| 31 | Nickel (Insoluble Inorganic compounds, as Ni) | 658 | 46 | 278 | 221 | 87 | 14 | 12 |
| 32 | Mercury elemental and inorganic form (All forms except aryl & alkyl compounds) | 170 | 11 | 138 | 15 | 3 | 3 | 0 |
| 33 | Antimony trioxide (Handling & use, as Sb) | 214 | 29 | 127 | 38 | 9 | 4 | 7 |
| 34 | Cadmium and compounds, as Cd | 197 | 15 | 108 | 31 | 23 | 7 | 13 |
| 35_1 | Chromium(VI)compounds (Water insoluble inorganic compounds) | 624 | 45 | 356 | 116 | 66 | 10 | 31 |
| 35_2 | Chromium(VI)compounds (Water soluble) | 510 | 47 | 336 | 81 | 29 | 12 | 5 |
| 36 | Sulfuric acid (Thoracic fraction) | 612 | 54 | 64 | 100 | 161 | 81 | 152 |
| 37 | Ethylene oxide | 109 | 16 | 66 | 17 | 4 | 1 | 5 |

Table 5. Top 5 high-risk industries and industries with the largest number of samples by substances

| Sub. No. | Substances | KSIC-10 | Top 5 high-risk industries | KSIC-10 | Top 5 industries with the largest number of samples |
|----------|----------------------|---------|---|---------|--|
| 3 | Dimethyl formamide | 13409 | Other finishing of textiles and wearing apparel | 21210 | Manufacture of finished medicaments |
| | | 22214 | Manufacture of plastic synthetic leather | 20202 | Manufacture of synthetic resin and other plastic materials |
| | | 15110 | Manufacture of furs and leathers | 21101 | Manufacture of medicinal chemicals and antibiotics |
| | | 13402 | Dyeing and finishing of woven and knitted fabrics, including wearing apparel | 20499 | Manufacture of other chemical products n.e.c. |
| | | 13994 | Manufacture of impregnated, coated, covered or laminated fabrics | 70129 | Research and experimental development on other engineering |
| 5 | 1,2-Dichloro propane | 29299 | Manufacture of other special purpose machinery, n.e.c. | 30399 | Manufacture of other new parts and accessories for motor vehicles n.e.c. |
| | | 26329 | Manufacture of other peripheral apparatuses | 26299 | Manufacture of electronic tubes, interface cards and other electronic components n.e.c. |
| | | 29271 | Manufacture of semi-conductor manufacturing machinery | 25922 | Plating of metals |
| | | 28112 | Manufacture of transformers | 30320 | Manufacture of parts and accessories for motor vehicle body(new products) |
| | | 27301 | Manufacture of optical lens and elements | 29294 | Manufacture of mould and metallic patterns |
| 8 | Benzene | 25999 | Manufacture of other fabricated and processed metal products n.e.c | 19210 | Petroleum refineries |
| | | 29223 | Manufacture of metal cutting machinery | 20111 | Manufacture of basic organic petrochemicals |
| | | 29224 | Manufacture of metal shaping machinery | 21210 | Manufacture of finished medicaments |
| | | 22112 | Retreading of rubber tires | 20202 | Manufacture of synthetic resin and other plastic materials |
| | | 91199 | Other sports services n.e.c. | 35113 | Thermal power generation |
| 10 | 1-Bromo propane | 26221 | Manufacture of laminated plates for printed circuit boards | 26299 | Manufacture of electronic tubes, interface cards and other electronic components n.e.c. |
| | | 33999 | Other manufacturing n.e.c. | 26421 | Manufacture of broadcasting apparatuses |
| | | 27199 | Manufacture of other medical and surgical equipment and orthopedic appliances n.e.c. | 20132 | Manufacture of dyes, synthetic inorganic pigments, tanning materials and other coloring agents |
| | | 26329 | Manufacture of other peripheral apparatuses | 26221 | Manufacture of laminated plates for printed circuit boards |
| | | 27191 | Manufacture of dental instruments and appliances | 20111 | Manufacture of basic organic petrochemicals |
| 22 | Trichloro ethylene | 25922 | Plating of metals | 25922 | Plating of metals |
| | | 26299 | Manufacture of electronic tubes, interface cards and other electronic components n.e.c. | 26299 | Manufacture of electronic tubes, interface cards and other electronic components n.e.c. |
| | | 30399 | Manufacture of other new parts and accessories for motor vehicles n.e.c. | 95211 | General repair services of motor vehicles |
| | | 25923 | Coating and similar treatment of metals | 21210 | Manufacture of finished medicaments |
| | | 26221 | Manufacture of laminated plates for printed circuit boards | 30399 | Manufacture of other new parts and accessories for motor vehicles n.e.c. |
| 24 | Perchloro ethylene | 55101 | Hotels | 19210 | Petroleum refineries |
| | | 18121 | Plate-making and typesetting services | 25922 | Plating of metals |
| | | 26221 | Manufacture of laminated plates for printed circuit boards | 20111 | Manufacture of basic organic petrochemicals |
| | | 28902 | Manufacture of electrical carbon products and insulators | 20202 | Manufacture of synthetic resin and other plastic materials |
| | | 15110 | Manufacture of furs and leathers | 72911 | Testing and analysis services of composition and purity of materials |

*KSIC-10: 10th Korea Standard Industrial Classification

Table 5. Continued

| Sub. No. | Substances | KSIC-10 | Top 10 high-risk industries | KSIC-10 | Top 10 industries with the largest number of samples |
|----------|--|---------|---|---------|---|
| 26 | Form aldehyde | 86101 | General hospitals | 86101 | General hospitals |
| | | 86102 | Specialized hospitals | 86102 | Specialized hospitals |
| | | 86201 | General clinics | 86201 | General clinics |
| | | 21210 | Manufacture of finished medicaments | 21210 | Manufacture of finished medicaments |
| | | 86909 | Other human health activities n.e.c. | 86909 | Other human health activities n.e.c. |
| 30 | Lead and Inorganic compounds, as Pb | 24121 | Manufacture of steel products by hot rolling, hot extrusion and hot drawing | 31113 | Building of non-ferrous metal ships and other ships |
| | | 28202 | Manufacture of accumulators | 31111 | Building of steel ships |
| | | 24213 | Manufacture of smelting, refining and alloys of lead and zinc | 24121 | Manufacture of steel products by hot rolling, hot extrusion and hot drawing |
| | | 29133 | Manufacture of taps, valves and similar products | 26299 | Manufacture of electronic tubes, interface cards and other electronic components n.e.c. |
| | | 24329 | Casting of other non-ferrous metals | 31114 | Manufacture of sections for ships |
| 31 | Nickel (Insoluble Inorganic compounds, as Ni) | 24312 | Casting of steel | 31111 | Building of steel ships |
| | | 23995 | Manufacture of carbon fibers | 31114 | Manufacture of sections for ships |
| | | 25123 | Manufacture of metal containers for compressed or liquefied gas | 29199 | Manufacture of other general-purpose machinery n.e.c. |
| | | 29191 | Manufacture of general weighing machinery | 31113 | Building of non-ferrous metal ships and other ships |
| | | 42135 | Special railway laying works | 25929 | Other metalworking n.e.c. |
| 34 | Cadmium and compounds, as Cd | 31114 | Manufacture of sections for ships | 24121 | Manufacture of steel products by hot rolling, hot extrusion and hot drawing |
| | | 30399 | Manufacture of other new parts and accessories for motor vehicles n.e.c. | 24211 | Manufacture of smelting, refining and alloys of copper |
| | | 24221 | Manufacture of copper products by rolling, extrusion and drawing | 86101 | General hospitals |
| | | 28909 | Manufacture of other electrical equipment n.e.c. | 21210 | Manufacture of finished medicaments |
| | | 25933 | Manufacture of non-power-driven hand tools | 86102 | Specialized hospitals |
| 35_1 | Chromium(VI) compounds (Water insoluble inorganic compounds) | 24329 | Casting of other non-ferrous metals | 29199 | Manufacture of other general-purpose machinery n.e.c. |
| | | 27191 | Manufacture of dental instruments and appliances | 31114 | Manufacture of sections for ships |
| | | 31201 | Manufacture of rail locomotives and rolling stock | 25929 | Other metalworking n.e.c. |
| | | 29180 | Manufacture of office machinery and equipment | 30399 | Manufacture of other new parts and accessories for motor vehicles n.e.c. |
| | | 28512 | Manufacture of domestic electrothermic appliances | 24112 | Manufacture of basic steel |
| 36 | Sulfuric acid (Thoracic fraction) | 25922 | Plating of metals | 25922 | Manufacture of other general-purpose machinery n.e.c. |
| | | 26221 | Manufacture of laminated plates for printed circuit boards | 26129 | Manufacture of sections for ships |
| | | 25923 | Coating and similar treatment of metals | 26221 | Other metalworking n.e.c. |
| | | 28202 | Manufacture of accumulators | 26299 | Manufacture of other new parts and accessories for motor vehicles n.e.c. |
| | | 37012 | Wastewater treatment services | 20499 | Manufacture of basic steel |

*KSIC-10: 10th Korea Standard Industrial Classification

검출기로 분석하는 KOSHA-Guide(A-188-2021)를 제정하였다(Roh, 2020).

과거 한 전자제품 제조업에서 생식기능저하가 확인된 후 사용량이 감소되었던 2-브로모프로판은, 최근 의약

용 화합물 및 의약품 관련 제조업에서 다소 증가하였다. 반면 1-브로모프로판은 오존층 파괴 물질을 대체할 수 있는 용도로 승인되어 사용량이 증가하다가, 2020년 미국 환경보호청(U.S. Environment Protection Agency,

EPA)에서 부당한 위험(unreasonable risk)으로 분류되면서, 최근 측정 시료수는 감소하고 있었다. 다만, 국내 노출기준(25 ppm)은 ACGIH의 노출기준(0.1 ppm)의 250배 수준이며, ACGIH의 노출기준 적용 시 전체 측정 시료의 약 30%가 초과하는 수준이었다. ACGIH는 1-브로모프로판에 대한 노출기준을 역학연구 사례와 생식독성, 중추신경계 손상 등의 건강영향을 바탕으로 2014년 기존 10 ppm에서 0.1 ppm으로 변경하였으며(ACGIH, 2011), 국내 노출기준에 대해서도 0.3 ppm으로 낮추는 방안이 검토 논의가 필요하다고 제안된 바 있다(Ha et al., 2020). ACGIH 및 국내 연구에서도 노출기준 강화를 제안하고 있어 추후 1-브로모프로판의 노출기준 재설정에 관한 후속 연구가 필요해 보인다.

특별관리물질의 작업환경측정 결과, 불검출(검출한계 미만) 시료가 매우 많은 특성이 있었는데, 37종의 물질 중 22종의 물질에서 측정 시료의 90% 이상이 불검출이었다. 대한산업보건협회에서 2004년~2011년 실시한 허용기준 설정 물질에 대한 작업환경측정 결과에서(Choi et al., 2014), 벤젠, 카드뮴, 6가 크롬(불용성), 니켈(불용성), 6가 크롬(수용성), 납 및 그 무기화합물, 포름알데히드의 불검출률은 각 81.0%, 59.6%, 34.5%, 34.4%, 33.8%, 33.6%, 7.3%이었고, 이번 연구에서는 각 94.4%, 74.4%, 78.3%, 54.8%, 68.1%, 66.1%, 31.2%로 그간 불검출률이 더 높아진 것을 확인할 수 있었다. 유해인자의 노출기준이 낮아지고, 작업장 관리 수준이 향상되면서 농도수준은 낮아지고 불검출률이 높아지는 것으로 추정된다. 다만, 측정 결과에서 유해인자가 검출한계 미만이라고 하여, 유해인자가 존재하지 않거나, 건강영향이 없다는 것을 의미하지 않는다. 작업환경측정 결과를 통해 위험성을 평가하기 위해서는 불검출 자료를 수치로 대체한 후, 자료의 분포 특성을 파악하고 통계적 방법을 활용하여 위험을 다양하게 평가해 볼 필요가 있다. AIHA(2007)는 유해물질의 위험수준, 취급시간 및 노출농도 등으로 위험값(danger value)을 산출하여 위험등급별로 유해물질은 관리하는 컨트롤밴딩 지침(Guide for conducting control banding analyses)을 제안하였고, IHData 분석(tool)에서는 베이시안 통계 기법(Bayesian decision statistics)을 활용하여 위험수준을 평가하고 있다. 이번 연구는 작업환경측정 자료의 업종별 실제 측정자료를 통해 얻은 기하평균과 기하표준편차로 산출한 95% 상위값(95%ile)을

노출기준과 비교하여 위험성을 평가하였다(AIHA, 2015). 다양한 위험성 평가 기법 적용과 함께 향후 변화된 작업환경 등을 반영하여 저농도 시료의 검출을 위한 시료 채취유량 설정 및 물질별 분석방법에 따른 검출한계 설정 등에 관한 연구가 필요하다.

특별관리물질 37종 중 $X_{0.95}$ 가 노출기준을 초과하는 업종이 10개 이상인 물질 중 최근 5년간 측정 시료수가 100개 이상인 세세업종을 도출하고, 유사 연구에서 제시한 고위험 업종과 비교해보았다. 디메틸포름아미드는 일반 유기용제와 달리 물에 대한 용해성이 뛰어나고 원료표면에 다공성을 부여하여 인조피혁, 합성수지, 섬유 코팅 등 산업에서 수지를 녹이는 용제로 많이 사용된다. 이번 연구에서 측정 시료수는 완제의약품 제조업(KSIC-21210)에서 가장 많았으나, 고위험 업종은 섬유제품 기타 정리 및 마무리 가공업(KSIC-13409), 플라스틱 합성피혁 제조업(KSIC-22214), 모피 및 가죽 제조업(KSIC-15110), 직물, 편조 원단 및 의복류 염색 가공업(KSIC-13402), 기타 가죽제품 제조업(KSIC-15190) 등의 순으로 우선적인 관리가 요구되었다. Lee et al.(2018)은 2014년 디메틸포름아미드에 대한 작업환경측정 자료를 통한 중심경향 노출(central tendency exposure), 합리적인 최대노출(reasonable maximum exposure) 및 위험지수(hazard quotient) 등을 산출하여, 노출위험이 가장 높은 업종(중분류)으로 섬유, 고무 및 플라스틱 제조업을, 노출 위험이 낮은 업종은 의약품 제조업으로 보고하였다. Ha et al.(2008)은 2005년 작업환경측정 자료를 활용하여 노출시간, 노출농도를 통한 위험값(danger value)을 소분류 업종으로 살펴본 결과, 봉제 의복, 모피제품 제조업의 코팅공정, 섬유제품 제조업의 가공, 배합, 실험실, 코팅 공정을 가장 위험한 공정으로 평가하여 이번 연구와 유사한 결과를 보였다. 디메틸포름아미드 고위험 업종에 대한 관리 요구가 과거 연구를 통해 제시된 바 있으나 최근 작업환경측정에서도 높은 수준을 유지하고 있어, 작업환경개선을 위한 적극적인 기술지원 등이 요구된다.

1-브로모프로판은 전자부품 제조업(KSIC-26299)과 방송장비 제조업(KSIC-26421) 등에서 가장 많이 평가되었고, 접착제 및 세척제 성분으로 주로 사용되었다. 미국의 가구 폼 쿠션 제조업에서 스프레이 접착제에 함유된 1-브로모프로판을 평가한 결과, 시간 가중 평균농도가 92~108 ppm으로 재봉틀 작업(10.5~11 ppm)과 비교하여 매우 높았으나, 부스식 국소배기장치 설치 후

농도의 약 90%가 감소되었다고 보고하였다(Majersil et al., 2007; Hanley et al., 2009). 국내에서도 과거 가구 제조업의 쿠션 폼 접착작업과 전자제품 세척작업에서 직업병 발생 위험 경보가 발생한 사례가 있었다(Ha et al., 2020). 이번 연구에서 평가된 고위험 업종은 인쇄회로기판용 적층판 제조업(KSIC-26221), 의료용 기기 제조업(KSIC-27199)이었고, 항공기 부품 제조 및 항공 운송지원 서비스업(KSIC-52939)의 시트커버 탈·장착을 위한 본딩 작업에서도 기하평균 농도가 높았다. 2017년 항공기 기내 청소작업에 대한 노출평가에서 시트접착제에 1-브로모프로판이 함유되어 있었고, 시트 본딩작업에 대한 노출평가 결과 최고 농도가 9.09 ppm 수준으로 평가되었다(Park et al., 2024). 이는 국내 노출기준(25 ppm)은 초과하지 않지만 ACGIH의 노출기준(0.1 ppm)은 초과하는 수준으로 노출농도를 최소화하기 위한 노력이 필요하다.

트리클로로에틸렌은 자동차 및 금속산업에서 금속부품의 탈유지세정제, 섬유공업에서 세척과 염색, 도료 희석제, 유리나 광학기구의 세척제 등으로 주로 사용된다. 고위험 업종으로 도금업(KSIC-25922), 그 외 기타 전자 부품 제조업(KSIC-26299), 그 외 자동차용 신품 부품 제조업(KSIC-30399), 도장 및 기타 피막 처리업(KSIC-25923), 인쇄회로기판용 적층판 제조업(KSIC-26221) 등이 해당되었고, 주요 평가 공정은 세척, 초음파 세척, 도금, 도장, 금속 가공, 납땀, 분석실험실 등이었다. 그간 트리클로로에틸렌에 관해서는 여러 중독사례가 보고되었는데, 휴대전화 금속 외장 부품을 세척하는 작업에서 피부 벗음을 동반한 전신의 피부 발진과 가려움이 발생하였고, 이와 동반한 독성간염과 간 부전으로 사망한 사례가 있었다(Lee et al., 2008). 당시 해당 사업장의 세척 작업자 2인을 대상으로 노출평가를 실시한 결과, 시간가중평균은 32.3 ppm, 21.9 ppm, 단시간 노출농도는 69.2 ppm, 104.3 ppm으로 현재의 노출기준(TWA 10 ppm, STEL 25 ppm)을 크게 초과하는 수준이었다. 다른 사례로 조립용 기구제품 제조업의 금속 프레임 세척작업에서 전신의 피부질환과 전격성 간염, 패혈증으로 사망한 사례가 있었고, 당시 재연 실험에서 TWA 적용 시 30.08 ppm, STEL 적용 시 40.43 ppm이었다. 최근 기계부품 제조업 세척공정을 대상으로 평가한 연구에서(Kim et al., 2023), TWA(8시간) 노출기준의 4배, STEL의 16배를 초과하여 작업자가 여전히 높은 농도에 노출되고 있어 지속적인 관리

가 요구되었다.

퍼클로로에틸렌은 뛰어난 세척력과 비가연성이라는 특성으로 드라이클리닝, 금속 탈지제 및 페인트 제거제 등으로 많이 사용되었다. 캐나다의 발암인자 노출감시 프로그램(CARcinogen EXposure, CAREX) 보고서에서 퍼클로로에틸렌 노출이 가장 큰 산업으로 드라이클리닝 및 세탁 서비스, 플라스틱제품 제조, 기타 화학제품 제조, 폐기물처리, 섬유 및 직물가공 및 직물코팅, 인쇄 및 관련 지원 활동, 여행자 숙박 시설 등이 있다고 하였다. 이번 연구에서 측정 시료수는 원유 정제처리업에서 가장 많았으나, $X_{0.95}$ 가 노출기준(25 ppm)을 초과하는 고위험 (세세)업종으로는 호텔업(KSIC-55101)이 해당되었다. 그간 세탁업에서의 휘발성유기화합물 노출에 대한 연구는 다수 수행되었으나(An et al., 1994; Roh et al., 2001; Jeong et al., 2005), 세탁작업이 부가적으로 이루어지는 호텔업, 항공서비스업 등에 대한 관리는 다소 소홀하여 향후 작업환경에 대한 실태조사가 요구되었다. 퍼클로로에틸렌을 사용하는 세탁소 작업자들을 대상으로 평가한 연구(An et al., 1994)에서 체인본부 16.85 ppm, 일반 세탁소 8.83 ppm, 셀프-서비스점 3.07 ppm으로 보고하였고, 23개 세탁소 중 4개소에서 25 ppm을 초과하였다고 보고하였다.

포름알데히드는 소독제 및 보존제로 오랫동안 활용되었고, 목재, 플라스틱, 직물 및 가죽용 접착제 등으로도 주로 사용되었다. 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 사람에게 비인두암과 백혈병을 유발한다는 충분한 근거를 기반으로 Group 1으로 지정되었는데(Bosetti et al., 2008), 이번 연구에서 $X_{0.95}$ 가 노출기준(0.3 ppm)을 초과하는 4등급에 해당하는 세세업종의 수가 가장 많은 물질로 지속적인 관리가 요구되었다. 또한 시료수가 많은 상위 5개 업종이 측정 자료의 $X_{0.95}$ 가 노출기준을 초과하는 고위험 업종이었다. 특히, 종합병원(KSIC-86101) 및 일반병원(KSIC-86102)의 수술실, 내시경실, 병리과 등 의료관련분야에서 측정이 가장 많았고, 노출농도 수준도 높아 우선적인 관리가 요구되었다. 그간 의료기관을 중심으로 노출평가 연구가 수행되었는데, 종합병원 내시경실에서 TWA(8시간) 기하평균은 0.056 ppm이나 범위는 0.003~0.923 ppm으로 다양하였고, STEL 농도는 기하평균 1.428 ppm, 범위 0.103~14.773 ppm으로 보고하였다(Kim et al., 2009). 2개 종합병원의 외래 간호사 62명을 대상으로한 연구에서는 기하평균

0.023 ppm, 범위 0.001~0.258 ppm으로 보고하였다 (Gu et al., 2014). 미국 산업안전보건청(OSHA)은 노출평가 데이터(1979~2001년)를 분석하여 목재제품, 바닥재 산업 및 장례 서비스 산업 등에서 포름알데히드가 높은 농도 수준을 나타내었고, 외부 기온이 높을수록 노출 농도 수준이 증가하였고, 단시간 측정 자료에서 8시간 가중평균 농도보다 높았다고 보고하였다 (Lavoue et al., 2008).

황산은 고부식성 물질로 증기로 흡입 시 기침, 호흡 곤란, 기도의 화학적 화상 등을 유발하고, 치명적인 폐부종을 일으킬 수 있다. 또한, IARC은 강 무기산 미스트에 대해 인체 발암(후두암)을 근거로 Group 1으로 지정하였고, 국내 산업안전보건법에서는 pH 2.0이하인 경우 특별관리물질로 정하고 있다. 황산증기에 의한 흡입손상 증례 보고에 따르면 구리 제련 공장에서 황산 탱크 필터 교체 작업에서 급성 후두염, 후두암 및 폐부종으로 사망한 사례가 있었다(Huh et al., 2013). 이번 연구에서 황산은 실험, 도금, 폐수처리, 표면처리, 산처리, 산세척, 후판조형, 피막, 전해연마 등 용도로 주로 평가되었고, 도금업(KSIC-25922), 인쇄회로기판용 적층판 제조업(KSIC-26221), 도장 및 기타 피막 처리업(KSIC-25923) 등에 대해 향후 우선적 관리가 필요하였다. 무기산류에 대한 국내 작업환경측정 현황 분석에서(Park et al., 2021a), 중분류 업종으로 금속가공제품제조업, 전자 부품 제조업, 반도체 제조업 등에서 측정 건수가 많았고, 시간가중평균은 금속가공제품 제조업과 기초 화학물질 제조업에서, 단시간 노출수준은 반도체 제조업, 전자부품 제조업에서 노출수준이 높았다고 보고하였다.

중금속은 인간에게 암을 유발하는 다양한 병리현상에 관여한다고 알려져 있는데, 최근, 암 환자의 소변 및 혈액 등 생체시료와 조직에서 중금속 농도가 높았다는 보고가 있었다(Coradduzza et al., 2024). 특히, 니켈(불용성), 납, 카드뮴, 크롬(6가)은 IARC에서 인간에게 암을 유발하는 발암물질로 지정되었으며, 작업장 뿐 아니라 환경을 통해서도 장기간 노출될 가능성이 있어, 노출을 최소화하기 위한 노력이 중요하다. 불용성 니켈은 선박, 철구조물, 자동차 부품, 1차 금속기계, 일반기계, 선박용 엔진, 철근, 철장, 화물선, 특수강, 강봉, 강관, 주물 등 생산을 위한 용접, 사상, 공무, 취부, 제관, 레이저 절단, 용해, 조립, 보수, 후처리 등 공정에서 주로 측정되었으며, 강 주물 주조업(KSIC-24321), 탄소섬유

제조업(KSIC-23995), 압축 및 액화 가스 용기 제조업(KSIC-25123) 등에 대해 향후 우선적 관리가 필요한 것으로 평가되었다. 이번 연구에서 최근 5년간 불용성 니켈에 대한 작업환경측정결과 전체 시료의 산술평균은 $1.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균 $0.00346 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 추정된 95% 상위농도는 $9.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이었다. 이탈리아에서 1996~2016년 사이 니켈에 대한 노출평가 자료 10,083건을 분석한 결과 기하평균 $2.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 이번 연구보다 높았고, 대부분의 노출은 금속제품 제조 및 금속을 다듬는 작업이었다. 또한 니켈에 노출되는 근로자는 크롬 및 코발트에 동시 노출되는 경우가 빈번하였다고 하였다(Scarselli et al., 2018). 독일의 노출 데이터베이스에서 1990년~2009년 사이 수집된 흡입성 니켈에 대한 개인 측정자료 8,052개를 분석한 결과, 중앙값이 $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 95% 상위농도는 $460 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 작업환경측정 결과보다 높았다. 니켈 함량이 높은 용접 재료를 사용하는 용접작업, 금속 분무, 연삭기 및 단조 프레스 작업, 배터리 및 축전지 산업에서 높은 농도 수준을 나타냈다고 하였다(Kendzia et al., 2017).

납 및 그 무기화합물은 선박, 철구조물, 강선, 선박 건조, 해양 철 구조물, 특수강, 강봉, 강관, 열간 압연 및 압출 제품의 용접, 조립, 납땀, 취부, 검사, 도장, 공무, 분체도장 등 공정에서 주로 평가되었고, 열간 압연 및 압출제품 제조업(KSIC-24121), 축전지 제조업(KSIC-28202), 연 및 아연 제련, 정련 및 합금 제조업(KSIC-24213) 등이 고위험 업종으로 평가되었다. 미국 캘리포니아의 혈중 납 농도 등록 자료(2020~2021년)를 통해 28개 산업의 151명에 대한 측정값 분석을 실시한 결과, 축전지 제조, 도장 도금업, 사격장 순으로 높았다고 보고하였다(Armatas et al., 2022). 납에 대한 직무노출 매트릭스(Choi et al., 2022) 연구에서 1981년부터 2018년까지 국내에서 보고된 노출자료를 통해, 1차 금속 제조업, 일차전지 및 축전지 제조업, 무기 안료용 금속산화물 제조업, 내화 비내화 요업제조업, 연 및 아연 제련, 정련 및 합금 제조업, 일반 목적용 기계 제조업, 제강업 등에서 노출기준 초과 공정이 확인되었으며, 향후, 납 축전지 제조업과 납 재생을 위한 2차 제련업을 주요 노출 관리 산업이라고 하여 이번 연구에서 도출한 주요 위험 업종과 유사하였다.

6가 크롬(불용성)은 일반 목적용 기계 제조업(KSIC-29199), 선박 구성 부분품 제조업(KSIC-31114)에서 평가가 많이 진행되었고, 고위험 업종으로 기타 비철금

속 구조업(KSIC-24329), 치과용 기기 제조업(KSIC-27191)이 해당되었다. 6가 크롬(불용성)의 주요 평가 공정은 용접, 사상, 공무, 제관, 레이저 절단 등 공정이었고, 6가 크롬(수용성)은 도금 공정에서 주로 평가되었다. 6가 크롬은 수용성과 불용성으로 구분하기 위한 명확한 법적 정의가 정해져 있지 않으나, 수용성(0.05 mg/m³)과 불용성(0.01 mg/m³)에 따라 노출기준은 5배의 차이를 보이고 있어, 이에 대한 제도상의 정의를 하거나 또는 국외기관(ACGIH, OSHA, NIOSH) 노출기준처럼 수용성과 불용성을 구분하지 않고 단일 기준(0.0002 mg/m³)으로 관리할 필요가 있다. 유럽 9개국에서 용접, 도금, 페인트 도포 또는 제거 등 작업에서 6가 크롬에 노출되는 근로자 399명을 대상으로 노 중 총 크롬 농도를 살펴보았는데, 도금 작업에서 노출이 가장 높았다고 하였다. 또한 공기 중 및 피부 중 크롬농도와 소변 중 크롬 농도 간의 높은 상관관계를 보였고, 호흡보호구 및 장갑 착용과 국소배기장치를 통한 환기가 농도를 낮추는데 효과가 있음을 확인하였다(Santonen et al., 2022). 국내 도금사업장 10개소를 대상으로 공기 중 6가 크롬을 평가한 결과 기하평균 0.052 µg/m³였으며, 샤프트 도금(0.092 µg/m³)이 기계부품 도금(0.055 µg/m³)이 안경테 도금(0.021 µg/m³)보다 유의하게 높았다고 하였다.

측정자료 분석을 통해 그간 유해성이 잘 알려지지 못한 새로운 산업에서 유해인자 노출 위험을 사전에 확인할 수 있었다. 공기청정기 및 정수기의 내부 필터를 생산하는 기체여과기(KSIC-29174) 및 액체여과기 제조업(KSIC-29175)에서 N,N-디메틸아세트아마이드의 95% 상위농도(X_{0.95})가 측정업종 중 가장 높아 현장 실태조사 등 후속 연구가 필요함을 확인하였다. 최근 수산 양식장에서 발생한 포르말린 사용으로 발생한 백혈병이 업무상 질병으로 인정받았는데, 해수양식어업(KSIC-03211)에서 포름알데히드의 기하평균이 측정업종 중 두 번째로 높음을 확인할 수 있었다. 또한, 고용노동부와 ACGIH TLV간 노출기준에 차이가 있는 물질인 2-메톡시에탄올, 2-메톡시에틸아세테이트, 1-브로모프로판, 포름알데히드, 6가 크롬의 경우, 국외에서 노출기준이 낮추어진 만큼, 국외 노출기준을 초과하는 사업장에 대해서도 추가적인 관찰이 요구되었다.

작업환경측정은 근로자 건강 보호를 위한 사전예방적 수단으로 알려져 있으나, 작업환경측정 결과가 실제 노동자의 노출 실태를 반영할 수 있는지에 대한 논란이

있으며, 2005년 노말핵산 중독사고를 계기로 작업환경 측정의 신뢰성에 대해 의문이 제기되면서 신뢰성 평가 제도가 도입되기도 하였다(Hwang, 2019). 화학물질에 대한 위험성 평가에서 작업환경측정을 통해 확인된 노출농도 수준은 위험도를 결정하는 데 매우 중요한 요소이다. 그러나, 작업환경측정은 측정 시기와 측정 환경에 따라 농도에 변이가 발생할 가능성이 매우 높아 위험성 평가에 활용하는 데는 제한점이 있었다. 이번 연구는 유해인자에 대한 사업장 개별 작업환경측정 결과가 아니라 업종별 전체 자료의 분포와 통계적 분석을 통해 고위험 업종을 파악하고, 자료의 활용 가능성을 살펴보았다. 측정 자료의 약 90%가 불검출로 분포를 통한 통계적 분석에 일부 제한점이 있었지만, 도출된 위험 업종에 대한 추가적인 현장 실태조사 및 업종별 노출 모델 개발 등을 통해 향후 작업환경개선을 위한 우선순위를 결정하고, 측정 누락 사업장에 대한 감시 등 정책적 방안 마련에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

V. 결 론

최근 5년간 국내 작업환경측정 결과 자료(2018~2022)를 활용하여, 건강 유해성이 높은 특별관리물질의 측정 현황 및 노출 고위험 업종을 파악하고, 작업환경 관리를 위한 정책 마련에 활용하고자 하였다.

1. 특별관리물질별 측정 시료수는 니켈(불용성)이 가장 많았고, 다음으로 황산, 납 및 그 무기화합물, 6가 크롬(불용성), 포름알데히드, 6가 크롬(수용성), 페놀, 디메틸포름아미드, 벤젠, 2-에톡시에틸아세테이트, 2-에톡시에탄올, 산화에틸렌, 트리클로로에틸렌 등 순이었다.
2. 전체 특별관리물질에 대한 측정 시료수가 가장 많았던 세세업종은 도금업이었으며, 다음으로 종합병원, 일반병원, 자동차 종합 수리업, 강선 건조업, 선박 구성 부품품 제조업, 합성수지 및 기타 플라스틱 물질 제조업, 완제 의약품 제조업, 그 외 기타 전자 부품 제조업, 기타 선박 건조업, 그 외 기타 분류 안 된 화학제품 제조업, 그 외 기타 일반 목적용 기계 제조업, 석유화학계 기초 화학 물질 제조업 등 순이었다.
3. 특별관리물질별 측정을 실시한 세세업종의 95% 상위농도(X_{0.95})가 노출기준을 초과하는 고위험 업종 수가 가장 많은 물질은 포름알데히드였으며, 다음으로 황

산, 트리클로로에틸렌, 납 및 그 무기화합물, 1-브로모프로판, 디메틸포름아미드, 1,2-디클로로프로판, 스토다드용제 등 순이었다.

4. 특별관리물질별 노출기준 초과율은 모두 1% 미만으로 낮았으나, 일부 세세업종에서 측정 자료의 변이수준을 반영하여 산출한 95% 상위농도($X_{0.95}$)가 노출기준을 초과하는 고위험 업종이 있었으며, 향후 작업환경개선을 위한 우선 관리가 요구되었다.

5. 작업환경측정 대상인 37종의 물질 중 22종에서 측정 시료의 90% 이상이 불검출이었으며, 불검출률은 점차 높아지고 있었다. 향후, 작업환경 변화 등을 반영하여 저농도 시료의 검출을 위한 시료채취 유량 설정 및 검출한계 설정 등에 관한 연구가 필요하였다.

특별관리물질에 대한 세세업종별 측정값 분포를 통해 추정되는 95% 상위농도($X_{0.95}$)를 활용하여 고위험 업종을 선별한 결과, 과거 직업병 발생 증례 및 다양한 위험성 평가 방법을 적용한 타 연구와 유사한 결과를 나타내었다. 향후 작업환경측정 자료를 통해 유해인자 노출 고위험 업종을 파악하고 업종별 작업환경관리 모델을 개발하여 사업장 자기규율 관리에 활용할 수 있을 것이다.

References

- ACGIH(American conference of governmental industrial hygienists). TLVs and BEIs, 2011
- AIHA(American Industrial Hygiene Association). Hallmark risk assessment tool in guidance for conducting control banding analysis. AIHA, 2007
- AIHA(American Industrial Hygiene Association). A strategy for assessing and managing occupational exposure. AIHA, 2015
- An SH, Lee JH, Park JA. Evaluation of worker's health and occupational exposure to perchloroethylene in laundry. J Korean Soc Occup Environ Hyg 1994; 4(2):224-239
- Armatas C, Loper B, Tandoc A, Materna B. Industries with the highest occupational blood lead test results, California Occupational Blood Lead Registry, 2020-2021. Am J Public Health 2022;112(S7):S690-S694.
- Bahk JW, Kim SW, Yang SH, Ryu HW, Kim EA. Estimating the number of target workplaces for work environment monitoring using survey data among manufacturing businesses with more than five employees in 2016. Korean Soc Occup Environ Hyg 2018; 28(2): 166-174
- Baek KH, Park DU, Ha KC. Benzene exposure matrices using employees's exposure assessment data. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2015;25(2): 146-155
- Bosetti C, McLaughlin JK, Tarone RE, Pira E, Vecchia CL. Formaldehyde and cancer risk: a quantitative review of cohort studies through. Ann Oncol 2008 Jan; 19(1):29-43
- Choi AR, Lim SG, Lee GY. Research on exposure to 13 types of substances subject to permissible standards - 2004-11, survey according to the results of work environment measurement by the Korean Occupational Health Association. Occupational Health, no.320, 2014, pp.19 - 32
- Choi SJ, Koh DH, Park JH, Park DU, Kim HC. Evaluation of the input status of exposure-related information of working environment monitoring database and special health examination database for the construction of a national exposure surveillance system. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2022; 32(3): 231-241
- Coradduzza D, Congiargiu A, Azara E, Mohammed I, De Miglio MR. Heavy metals in biological samples of cancer patients: a systematic literature review. Biometals 2024
- Gu DC, Lee CK, Lee JW, Lee SY, Yun SY. Exposure to formaldehyde of ambulatory care nurses in university hospital. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2014; 24(4):446-452
- Ha KC, Park DU, Yoon CS, Choi SJ, Lee GY. Application of matrices and risk assessment of industries and processes using DMF. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2008;18(4):303-309
- Ha KC, Kim SW, Phee YG, Lee NR. Strengthening the occupational exposure limit for 1-bromopropane according to the results of epidemiological studies and exposure status. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2020;30(3): 270-279
- Hanley KW, Petersen MR, Cheever KL, Luo L. N-acetyl-S-(n-propyl)-L-cysteine in urine from workers exposed to 1-bromopropane in foam cushion spray adhesives. Ann Occup Hyg 2009;53(7):759-769.
- Huh GY, Ha HI, Park JH, Jang SJ. Fatal inhalation injuries by sulfuric acid fumes: case report. Korean J Leg Med 2013;37:216-219
- 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

- Jang JK, Park HD, Ro JW. Statistical analysis of domestic work environment monitoring big data. Occupational Safety and Health Research Institute, 2015
- Jeong JY, Lee NR, Lee BK, Kim BN, Kim KJ. An evaluation of exposure to petroleum based dry cleaning solvent used in commercial dry cleaning shops. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2005;15(1):19-26
- Jeong KS, Ahn YS, Kim HS, Kim CN, Kim DH. Status of cleaning agent usage including 1,2-dichloropropane. Occupational Safety and Health Research Institute, 2017
- Kendzia B, Pesch B, Koppisch D, Van Gelder R, Pitzke K. Modelling of occupational exposure to inhalable nickel compounds Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology 2017;27:427-433
- Kim HS. TCE exposure assessment of cleaning workers. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2023;33(1): 3-5
- Kim JH, Kim DJ, Kim HW. A study on exposure workers to formaldehyde in endoscopy unit of hospital. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2009;19(3): 195-201
- Kim JM, Won JI, Roh YM, Kim SW, Ki YH et al. Study on the improvement of appropriate interval of work environment measurement. Occupational Safety and Health Research Institute(OSHRI), 2007
- Koh DH, Park JH, Lee SG, Kim HC, Jung H et al. 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>)
- Lavoue J, Vincent R, Gerin M. Formaldehyde exposure in U.S. industries from OSHA air sampling data. J Occup Environ Hyg 2008;5(9):575-587
- Lee JW, Park DU, Ha KC. Exposure characteristics of chemical hazards in metalworking operations using an employee exposure assessment database. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2018;28(2): 230-239
- Lee SW, Kim EA, Kim DS, Koh DH, Kang SK. Exposure level of trichloroethylene in Stevens-Johnson syndrome due to occupational exposure - 3 case reports and a review of other cases. Korean J Occup Environ Med 2008;20(2):132-146
- Majersik JJ, Caravati EM, Steffens JD. Severe neurotoxicity associated with exposure to the solvent 1-bromopropane (n-propyl bromide). Clin Toxicol 2007;45(3):270-276.
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). White Papers on Employment and Labor, 2006; 2014; 2020; 2022 National Institute of Environment Research(NIER). Risk assessment of registered chemical substances: (2-Ethoxyethanol), 2022
- Park HD, Ro JW, Jang MY, Kim SH, Kim SD et al. Case study of 1-bromopropane exposure assessment during aircraft disinfection and seat cover replacement work. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2024;34(1): 8-13
- Park HD, Park SH, Jung KH. Analysis of exposure levels for inorganic acids in Korea. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2021a;31(3): 255-265
- Park SH, Bae GW, Kim JB, Kim SD. Strengthening occupational health services through monitoring exposure to health hazards. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2021b;31(2): 147-155
- Phi YH. A study on the system of working environment measurement under Industrial Safety and Health Act. Environmental Law Review 2004;26(2):313-330
- Roh JW. Sampling and analytical methods of permitted standard substances according to the revision of the OSH Act-1,2-dichloropropane. Occupational Safety and Health Research Institute, 2020(2020-OSHRI-834)
- Roh YM, Kwon GB, Park SH, Jeong JY. A survey on the management of chemical substances and airborne concentration in laundry exposed to organic solvents. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2001;11(1):70-77
- Santonen T, Porras S, Bocca B, Bousoumah R, Corneliu Duca R. HBM4EU chromates study - Overall results and recommendations for the biomonitoring of occupational exposure to hexavalent chromium. Environ Res 2022;204(Pt A):111984
- Scarselli A, Di Marzio D, Marinaccio A, Iavicoli S. Nickel compounds in the workplaces: Occupations and activities involving high-risk exposures in Italy American Journal of Industrial Medicine 2018;61(12): 968-977
- Son MA, Yun JW, Hwang YS, Park MJ, Choi MS. Exposure of carcinogens in electronics industries and strategy for control of carcinogens: using Work Environment Measurement Database (2013-2017) in Korea. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2022;32(4): 302-324
- Statistics Korea. 10th Korea Standard Industrial Classification. Accessed 2024 06 30. available from URL: <http://www.kssc.kostat.go.kr>

<저자정보>

박현희(실장), 조지훈(연구위원)