



# 세척작업의 안전한 관리를 위한 결정요인 분석 및 구조화

OSHRI

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



연구보고서

# 세척작업의 안전한 관리를 위한 결정요인 분석 및 구조화

이혜진·이나루·한정희·이도희·신아롬·한슬기

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원





# 요약문

- 연구기간 2023년 2월 ~ 2023년 11월
- 핵심단어 세척공정/작업, 할로겐화 유기용제, 노출 결정요인
- 연구과제명 세척작업의 안전한 관리를 위한 결정요인 분석 및 구조화

## 1. 연구배경

할로겐화 유기용제 세척제 급성중독 사고로 인하여 세척작업의 안전성과 대체 세척제에 대한 관심이 급증하였다. 그러나 최근 현재 현장에서 유통되고 있는 친환경 세척제라는 개념은 그 의미가 잘못된 부분이 많다. 특정 이슈에의 대응을 위해서는 그 현황과 실태를 정확하게 파악할 필요가 있으나, 안전보건과 관련된 여러 보유 자료들은 개별 목적에 따라 설계되어 있어 활용하기에 충분하지 않은 측면이 있다. 세척작업은 공정의 완성을 위해 필요한 요소이지만, 선택할 수 있는 활동이기도 하며, 세척제는 최종 제품에 남아 있는 것이 아니기 때문에 이러한 관점에서 변경의 여지가 상당히 많은 아이템이다. 이와 같이 세척작업은 일반적인 공정과는 약간 차별점이 있으며, 그 범위와 개념이 광범위하고 다양한 개별 유형에 따라 안전성에 대한 고려사항이 달라질 수 있다. 이번 ‘할로겐화 유기용제’를 사용한 ‘담금’ 세척 방식 또한 안전보건상 위험 우려로 인하여 외국에서는 지양하는 방식이나 국내에서는 별다른 평가없이 관행적으로 이러한 방식이 사용되고 있었다. 따라서 동종 화학물질 사고의 근원적 예방과 대안 제시를 위하여 기존의 화학물질 중심 접근 방식에서 공정 혹은 작업 기반의 접근 방식으로 사고를 확장하는 한편, 세척작업의 목적과 이에 의한 기본 특성 구분에서부터 그 위험성을 결정하는 요인들을 도출하여 데이터베이스화할 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

## 2. 주요 연구내용

### 1) 세척작업의 특성

세척이란 대상 제품을 변형시키지 않고, 제품의 표면에서 원하지 않는 물질을 제거하는 것이다. 그 단계는 첫째, ‘세척’으로 제품의 표면에서 각종 오염을 제거하는 것이다. 둘째, ‘헹굼’으로 세척이 된 부분에서 남아있는 세척제를 제거하거나 혹은 제조 과정 중의 입자나 남아있는 오염을 제거하는 과정이다. 셋째는 ‘건조’로 세척과 헹굼 단계에서 생긴 오염을 제거하는 단계이다. 세척 작업은 별도의 분리·독립된 과정으로 이해되기 보다는 전체적인 공정 내의 한 단계로 인식되는 경우가 많다. 그래서 ‘세척’이라는 공정 혹은 작업명 외에 특정 공정·작업의 전·중·후 과정에 포함되어 기계가공이나 절삭, 연삭 등의 명칭을 사용하여 가려지는 효과도 있다. 세척작업의 주요한 기능적 요소는 ‘세척제’와 ‘세척설비’이다. 세척제는 화학적 작용으로, 수계와 용제계로 크게 구분하고 하위의 세부 유형으로 구분하며 단일 혹은 혼합의 형태로 사용된다. 세척설비는 물리적 작용으로, 세척제와의 상호작용이 상당히 중요하다. 크게 습식과 건식으로 구분하며, 국내 대표적인 습식 작업 형태가 초음파세척, 증기세척, 담금, 수작업 등이 있다. 이러한 세척작업에 있어 고려하는 요소는 생산성과 안전보건 측면에서 상당히 다양하다.

### 2) 안전한 세척작업 평가를 위한 도구, 방법론 조사

최근 들어 화학물질의 안전한 대체에 대한 국제적인 논의가 활발하게 진행되고 있다. 일반적인 대체에의 고려사항은 화학물질 위험성 평가에서 ‘유해성’과 ‘노출’의 개념을 중심으로 검토하는 것과 동일하나, ‘유해하지 않은 화학물질은 없다’라는 대원칙에서 가장 우선적인 것은 대체의 목적과 원칙, 결정 규칙을 이해 당사자간에 상호 합의하는 것이다. 그 이후 상대적인 유해성 및 노출 평가를

진행하고, 결과에 따라 ‘더 안전한’ 대체물질을 선택하는 것이다. 그래서 ‘대체 평가’란 유해성, 성능 및 경제적 실행 가능성을 기반으로, 우려되는 화학물질에 대한 더 안전한 대체 방안을 식별하고, 비교한 후, 선택하는 과정을 의미한다. 이때 고려하는 사항은 급·만성 건강영향, 환경영향 및 거동/이동, 대기영향, 물리적 특성, 공정 요인, 생애주기 등이다. 실제 국외 사례에 의하면 유해성 측면에서 할로젠화 유기용제를 대체하여 수계나 다른 용제계 세척제도 제안된 바가 있다.

### 3) 세척작업의 안전성 결정요인 구조화 및 조사양식(안) 설계

세척작업의 유형별 특성과 대체 방법론, 그리고 노출 평가 시 고려하는 사항들을 종합적으로 검토하여 1차 요인을 선정하고, 이에 따른 조사양식(안)을 설계하였다. 조사양식은 크게 일반사항, 공정 및 작업특성, 사용조건, 추가 위험관리, 대체 고려 항목으로 구분하여 하위 항목을 구성하였다. 주요한 ‘공정 및 작업특성’ 항목에서는 세척작업의 유형과 세척제의 범주를 확인하고, 세척의 이유인 피세척 물과 오염제거대상을 포함하였다. 그리고 주요한 노출 변수인 세척설비와 추가 건조 필요 여부, 재생 여부 등 고정적인 형태로 노출에 영향을 미칠 수 있는 세척작업의 특이사항을 기술하도록 하였다. 그리고 ‘사용조건’ 항목에서는 세척제 취급량과 물리적 상태, 작업자 수, 작업 시간 및 속도, 작업 온도, 작업장소, 환기수준, 보호장비 등 조건에 따라 변동 가능한 정보를 확인하도록 하였다.

### 4) 할로젠화 유기용제 세척작업 사업장 대상 시범 조사 및 분석

일차적으로 작업환경측정DB에서 국내 할로젠화 유기용제 세척작업의 특성을 간접적으로 추출(공정명/부서명/단위작업장소 중 특정 키워드 추출)하여 분석하였다. 디클로로메탄, 트리클로로에틸렌의 측정 빈도가 압도적으로 가장 많았으나 점차 감소하는 추세이며, 1,2-디클로로프로판은 오히려 점차 증가하는 추세였다. 아울러 일부 사업장을 대상으로 세척제 주요 성분의 변화 흐름을 확인한

결과 화학물질 규제 시점과 어느 정도 관련이 있는 것으로 판단된다.

다음으로 시범조사를 2-track(① 공단 기술보고서 정보 추출, ② 현장 조사)으로 진행하였다. 세척작업에 대한 작업환경정보와 노출수준 자료를 추출 혹은 직접 평가하고, 이를 표준화하여 노출평가 모델을 실행하여 결과를 비교 분석하였다. 주요한 결과는 상당수의 세척작업에서 모델을 통해 추정된 값보다 실제 측정된 노출수준이 상대적으로 높았다. 이는 국내 할로겐화 용제를 사용하는 세척방식이 유럽 노출모델에서의 해당 PROC 내에서 충분히 노출량을 반영하지 못함을 보여준다. 그리고 세척작업의 사용 특성상 상당히 유동적이어서 실측의 경우에도 노출을 충분히 반영하지 못하는 경우도 있으리라 우려된다. 따라서 근본적으로는 이러한 세척 방식의 개선 방향을 보다 적극적으로 논의할 필요가 있다.

### 5) 안전한 세척작업의 평가·관리를 위한 데이터베이스화 방안 제시

할로겐화 용제 세척작업의 노출 평가 결과와 맥락적 정보들을 바탕으로 그 안전성을 평가 및 관리하기 위한 항목들을 구성하여 데이터베이스화하기 위한 체크리스트를 정성적으로 결정, 제안하였다. 시범조사에서 활용한 조사표 항목에서 맥락에 부합하도록 항목들을 재배치하고, 불필요한 항목은 배제하고, 유해성·노출에 기반한 안전성을 평가할 때 필요한 정보 위주(세척제, 세척설비, 작업형태 등)로 재구성하였다.

## 3. 연구 활용방안

본 연구에서는 국내 세척작업 현황을 파악하고 데이터베이스화를 하기 위한 사전준비로, 산업용 세척의 유형과 특성, 화학물질 취급에 있어 일반적인 대체에 대한 개념과 고려사항을 확인하고, 시범 조사를 통하여 세척작업에 특화된 안전성을 결정하는 요인을 검토할 수 있었다. 이를 바탕으로 세척작업에 대한 안전성(위험성)을 평가하고, 세척작업에서 주요하게 고려하여 데이터베이스화를

해야 할 사항을 제안함으로써 세척작업에 대한 지속 가능한 안전관리의 토대 마련에 기여할 것이다.

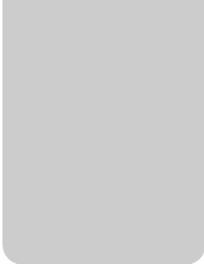
#### 4. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 산업화학연구실 연구위원 이해진
  - ☎ 042) 869. 0351
  - E-mail hana1226@kosha.or.kr

# 목 차

<b>I. 서론</b> .....	<b>1</b>
1. 연구필요성 .....	2
2. 연구목표 .....	4
<b>II. 연구내용 및 방법</b> .....	<b>5</b>
1. 연구내용 .....	6
2. 연구방법 .....	6
1) 세척작업의 특성 .....	6
2) 안전한 세척작업 평가를 위한 도구, 방법론 조사 .....	7
3) 세척작업의 안전성 결정요인 구조화 및 조사양식(안) 설계 .....	7
4) 할로겐화 유기용제 세척작업 사업장 대상 시범 조사 및 분석 .....	8
5) 안전한 세척작업의 평가·관리를 위한 데이터베이스화 방안 제시 .....	9

<b>Ⅲ. 연구결과</b> .....	<b>11</b>
1. 세척작업의 특성 .....	12
1) 세척작업의 유형 .....	12
2) 세척작업 시 고려요소 .....	23
2. 안전한 세척작업 평가를 위한 도구, 방법론 조사 .....	29
1) 화학물질 관리에 있어 안전한 대체에 대한 고려사항 .....	29
2) 세척작업에 대한 대체 평가 .....	31
3. 세척작업의 안전성 결정요인 구조화 및 조사양식(안) 설계 ...	37
1) 세척작업의 안전성 결정요인 구조화 .....	37
2) 세척작업의 안전성 평가·관리 조사양식(안) .....	37
4. 할로겐화 유기용제 세척작업 사업장 대상 시범 조사 및 분석 ·	42
1) 국내 할로겐화 유기용제 세척작업의 특성 .....	42
2) 국내 할로겐화 유기용제 세척작업 사업장 시범 조사 및 분석 .....	58
5. 안전한 세척작업의 평가·관리를 위한 데이터베이스화 방안 제시 ·	92



# 목 차

IV. 고 찰 .....	97
V. 결 론 .....	103
참고문헌 .....	109
Abstract .....	112
부록. 세척작업의 안전한 관리를 위한 조사표(안) .....	115

# 표 목차

〈표 III-1〉 수계와 용제계 세척제의 일반적인 특성 .....	13
〈표 III-2〉 세척작업에서의 선호하는 유기용제에 대한 주요 특성 .....	15
〈표 III-3〉 일반적인 세척 설비의 유형 .....	21
〈표 III-4〉 세척작업 실행 여부 결정을 위한 단계 .....	24
〈표 III-5〉 세척작업에 있어 구체적인 고려사항 .....	25
〈표 III-6〉 세척제/설비 공급업체 대상 확인 목록 .....	26
〈표 III-7〉 세척제 선택에서의 고려사항 .....	27
〈표 III-8〉 대체 평가의 원칙(TURI, 2011) .....	31
〈표 III-9〉 대체 평가에서의 유해성 평가 요소(TURI, 2021) .....	33
〈표 III-10〉 세척작업에서 할로겐화 유기용제의 대체물질(TURI, 2021) .....	35
〈표 III-11〉 SWED(Specific Worker Exposure Determinants) 양식 구성 요소(ECHA, 2020) .....	38
〈표 III-12〉 세척작업의 안전한 관리를 위한 조사양식(안) .....	39
〈표 III-13〉 할로겐화 용제(9종)에 대한 연도별 작업환경측정건수 .....	43
〈표 III-14〉 할로겐화 용제(9종) 세척작업에 대한 연도별 작업환경측정건수 ..	46
〈표 III-15〉 할로겐화 용제 대상 전체 공정 대비 세척작업에 대한 작업환경 측정비율 .....	49
〈표 III-16〉 세척작업 보유 사업장의 할로겐화 용제 측정 여부 .....	50
〈표 III-17〉 할로겐화 용제의 법적 규제 현황 .....	53
〈표 III-18〉 세척작업을 포함한 사업장 정보 및 세척제 성분 변화 흐름 .....	55

# 표 목차

〈표 III-19〉 국내 할로겐화 유기용제 세척작업 사업장 시범 조사 대상 (track1) .....	59
〈표 III-20〉 국내 할로겐화 유기용제 세척작업 사업장 시범 조사 결과 개요 (track1) .....	59
〈표 III-21〉 국내 할로겐화 유기용제 세척작업 현장 조사 대상 업종 분포	63
〈표 III-22〉 국내 할로겐화 유기용제 세척작업 현장 조사 대상 근로자수 분포 .....	64
〈표 III-23〉 국내 할로겐화 유기용제 세척작업 현장 조사 대상 지역 분포	65
〈표 III-24〉 현장 조사 대상 사업장 현황 .....	66
〈표 III-25〉 현장 조사 대상 세척작업 세척설비 .....	70
〈표 III-26〉 현장 조사 대상 세척작업 할로겐화 용제 취급량 .....	73
〈표 III-27〉 현장 조사 대상 사업장 환기수준 .....	74
〈표 III-28〉 현장 조사 대상 사업장의 세척제 대체 관련 의견 .....	78
〈표 III-29〉 현장 조사 대상 세척작업 포함 공정 노출량 TWA 환산 분포	79
〈표 III-30〉 현장 조사 대상 세척작업 노출량 분포 .....	80
〈표 III-31〉 디클로로메탄 노출기준 초과 사업장 정보- 초과 요인 분석	81
〈표 III-32〉 1,2-디클로로프로판 노출기준 초과 사업장 정보- 초과 요인 분석 .....	83
〈표 III-33〉 현장 조사(Track 2) 및 기술보고서(Track 1) 통합 분석 대상	87
〈표 III-34〉 세척작업 포함 공정의 노출 측정값 및 추정값 비교 .....	89
〈표 III-35〉 세척작업 확인사항(체크리스트 방식) .....	93

# 그림목차

[그림 Ⅲ-1] 일반적인 화학물질의 대체 평가 프레임워크(OECD, 2021) .....	29
[그림 Ⅲ-2] 할로겐화 유기용제 유해성 평가 예시(TURI, 2021) .....	34
[그림 Ⅲ-3] 할로겐화 용제에 대한 연도별 작업환경측정건수(2019~2022) ...	44
[그림 Ⅲ-4] 할로겐화 용제에 대한 연도별 작업환경측정건수(2019~2021) ...	45
[그림 Ⅲ-5] 할로겐화 용제 세척작업에 대한 연도별 작업환경측정건수 (2019~2022) .....	47
[그림 Ⅲ-6] 할로겐화 용제 세척작업에 대한 연도별 작업환경측정건수 (2019~2021) .....	47
[그림 Ⅲ-7] 세척작업 보유 사업장의 할로겐화 용제 측정 여부(2019~2021) ...	51
[그림 Ⅲ-8] 사업장 가의 세척제 변화와 화학물질 규제 변화 양상 .....	52
[그림 Ⅲ-9] 일부 사업장의 세척제 주요성분 변화 흐름 .....	57
[그림 Ⅲ-10] 국내 할로겐화 유기용제 세척작업 사업장 시범 조사 방법 .....	58
[그림 Ⅲ-11] 작업환경측정 신뢰성평가 DB와 세척작업의 안전한 관리를 위한 조사양식 연계 .....	62
[그림 Ⅲ-12] 현장 조사 대상 사업장 현황(업종별) .....	67
[그림 Ⅲ-13] 현장 조사 사업장 현황(근로자수) .....	67
[그림 Ⅲ-14] 현장 조사 사업장 현황(지역) .....	68
[그림 Ⅲ-15] 현장 조사 대상 세척작업 공정범주(PROC) .....	69
[그림 Ⅲ-16] 현장 조사 대상 세척작업 세척제 범주 .....	70
[그림 Ⅲ-17] 현장 조사 대상 세척작업 세척설비 .....	71
[그림 Ⅲ-18] 현장 조사 대상 세척작업 월 최대 세척제 취급량 .....	72

# 그림목차

[그림 Ⅲ-19] 현장 조사 대상 세척작업 월 최대 할로겐화 용제 취급량 .....	73
[그림 Ⅲ-20] 현장 조사 대상 세척작업 장소 .....	75
[그림 Ⅲ-21] 현장 조사 대상 실내 작업장 환기수준 .....	75
[그림 Ⅲ-22] 현장 조사 대상 세척작업 국소배기 .....	76
[그림 Ⅲ-23] 현장 조사 대상 사업장의 세척제 대체에 있어 고려사항 .....	77
[그림 Ⅲ-24] 현장 조사 대상 세척작업 포함 공정 노출량 TWA 환산 분포 ..	79
[그림 Ⅲ-25] 현장 조사 대상 세척작업 노출량 분포 .....	80
[그림 Ⅲ-26] 세척작업 노출량 및 추정량 비교 .....	84
[그림 Ⅲ-27] PROC 및 화학물질별 세척작업 포함 공정의 시간가중평균치 ..	85
[그림 Ⅲ-28] PROC 및 화학물질별 세척작업 집중 시간가중평균치 .....	86
[그림 Ⅲ-29] 세척작업 포함 공정의 노출 측정값 및 추정값 비교 .....	88
[그림 Ⅲ-30] 세척작업 포함 공정의 PROC별 노출 측정값 및 추정값 비교 ..	88
[그림 Ⅲ-31] 세척작업 포함 공정의 화학물질별 노출 측정값 및 추정값 비교 .....	89
[그림 Ⅲ-32] 세척공정의 디클로로메탄 노출량 및 추정량(최악의 환기조건 가정) 비교 .....	91

# I. 서론



# I. 서론

## 1. 연구필요성

- 최근 발생한 할로겐화 유기용제 세척제 관련 급성중독 사고는 여러 측면에서 현재의 안전보건관리 체계에 대한 재점검을 필요로 한다. 최영은 등(2022)에 따르면 해당 사고 발생에 대한 근원적인 진단과 대책을 세척제 시장과 규제의 큰 틀에서 바라보고, 규제 회피행위와 관련된 요인(공급망에서의 낮은 부품단가 설정, 규제 회피 행위 발견 가능성이 낮음 등)을 분석한 바가 있다. 이에 대한 정책적인 제안을 포함하여 보다 실무적인 관점에서 단발성이 아닌, 세척작업을 안전하게 관리하기 위해 관련 자료들을 수집하고 구축하는 방식을 체계적으로 설계하여 지속적으로 구축·관리할 필요가 있다.
- 일반적으로 문제를 해결하기 위한 시작점은 현황과 실태를 파악하는 것이나, 안전보건과 관련된 여러 보유 자료들이 개별 목적에 맞게 설계되어 있어 세척작업에서의 이슈를 대응하기 위한 자료를 체계적으로 확보하는데 한계가 있었다.
- 또한 이번 사고로부터 인지한 사실은 세척작업의 범위와 개념이 광범위하고 다양해 개별 유형에 따라 안전성에 대한 고려사항이 달라지며, 특히 국내 세척산업에서는 이에 대한 인식수준의 차이가 상당한 것으로 보인다.
- 예를 들어 이번 사고에서 공정 및 작업의 형태는 ‘담금’ 방식이며, 사용한 화학물질은 ‘할로겐화 유기용제’ 유형이었다. 이나루 등(2022)에 따르면 세척제 용도와 관련되어 국내 시장에 유통되고 있는 물질안전보건자료를 분석한 결과, 할로겐화 유기용제 등을 함유한 제품은 1,000여건에 이르는 것으로 보아 여전히 국내에서 많이 사용되고 있는 것으로 추정된다. 그러나 외국의 사례에 따르면 할로겐화 유기용제를 사용하는 세척 방식은 그

유해성으로 인하여 담금과 같이 노출이 많은 방식은 이미 지양하고 있었고, 가급적 노출이 되지 않는 방식을 권고하고 있는 등 대체에 대한 연구들이 지속적으로 진행되어 왔다. 이에 따르면 세척작업은 목적에 따라 다양한 유형이 있다. 공정/설비 측면에서는 담금 외에도 증기 탈지, 진공 탈지, 초음파 세척, 분사 세척, 고압 세척, 수동 세척 등의 다양한 세척 방식이 있고, 세척제는 크게 수계, 용제계의 대분류에서 각각 세분화하여 분류할 수 있으며, 여러 성분을 혼합하여 사용하는 경우도 많아 주요 성분 혹은 조합에 따라 안전보건에의 고려사항이 달라질 수 있다.

- 따라서 동종 화학물질 사고의 근원적 예방과 대안 제시를 위해서는 기존의 화학물질 중심(chemical-based) 접근 방식에서 공정 혹은 작업 기반(process-based)의 접근 방식으로 사고를 확장할 필요가 있다. 이미 각 개별적 대책에서는 이러한 요소가 포함되어 있을 수 있으나, 여전히 반복되는 사고는 아직 그 체계적인 구성이 부족하다 할 수 있다. 그리고 이러한 접근 방식은 최근 더욱 강조되는 위험성 평가 체계에서의 위험 기반(risk-based) 접근 방식과 일맥상통한다.
- 화학물질로 인한 건강장해를 예방하기 위한 주요한 영향 인자는 바로 ‘유해성’과 ‘노출’의 개념이며, 이를 평가하고 관리하는 것이 기본적인 대체의 원칙이자 고려사항이다. 다만 시간이 흐르고 기술이 발전하는 등의 변화와 함께 화학물질을 사용하는 작업의 유형도 고정되지 않고 다양해졌다. 이에 화학물질 재해 예방을 위한 공정·작업 기반의 접근 방식은 해당 작업의 특성을 분석하는 것에서 시작할 수 있다. 그리고 그 위험성을 결정하는 요인들을 도출한 후, 공정·작업에 맞게 구성하여 조사표를 만들고, 이를 데이터베이스화한다면 사고 대응 혹은 직접적인 평가에 앞선 사전 예방적 관리에 보다 용이할 것이다.
- 산업용 세척작업은 그 안전성을 평가 및 관리하는데 있어 이러한 통합적이고 체계적인 접근 방식을 시범적으로 적용할 수 있는 대표적인 사례로서 주요한 작업 형태이다.

- 이에 세척작업 현황을 파악하고 데이터베이스화를 하기 위한 사전준비로, 화학물질 취급에 있어 일반적인 대체에 대한 개념과 방법론을 알아보는 한편, 세척작업에 특화된 안전성을 결정하는 요인을 분석하고 구조화함으로써 세척작업에 대한 지속 가능한 관리의 토대를 마련하고자 한다.

## 2. 연구목표

- 세척작업에 특화된 안전성 결정요인에 대한 분석 및 구조화를 통하여 특히 할로젠화 유기용제 세척작업에 대한 안전성(위험성)을 평가하고, 세척작업에 대한 지속 가능한 안전관리의 토대를 마련하고자 한다.

## II. 연구내용 및 방법



## II. 연구내용 및 방법

### 1. 연구내용

- 세척작업의 특성 조사
  - 세척작업의 정의, 유형, 방식, 세척제, 대상물, 세척 설비, 환경 등
- 안전한 세척작업 평가를 위한 도구, 방법론 조사
  - 세척작업 유형별 안전성 평가 방법 검토(대체 평가 등)
- 위 두 정보를 융합(분석)하여 수준별로 결정요인을 구조화(mapping)
  - 세척작업의 안전성을 평가하기 위한 유해성 및 노출 기반 프로파일 구성
- 세척작업에 특화된 조사양식(안) 설계
  - 세척작업 현황 파악 및 데이터베이스화를 위한 사전준비
- 할로겐화 유기용제 세척작업 사업장 대상으로 시범 조사 및 분석
  - 대상(안): 디클로로메탄(Dichloromethane; DCM),  
1,2-디클로로프로판(1,2-Dichloropropane; 1,2-DCP) 등
- 안전한 세척작업의 평가·관리를 위한 데이터베이스화 방안 제시

### 2. 연구방법

#### 1) 세척작업의 특성

##### (1) 세척작업의 유형

세척과 관련된 국외 참고문헌(Handbook for critical cleaning 등)을

중심으로 세척작업의 기본 요소인 세척제와 이를 포함한 세척 시스템 등 전반적인 세척작업의 유형을 조사하였다.

## (2) 세척작업 시 고려요소

세척작업의 유형을 바탕으로 이미 세척작업을 하고 있는 사업장에서 고려해야 할 요소를 국외 참고문헌 혹은 기술 보고서 등을 참조하여 제시하였다.

## 2) 안전한 세척작업 평가를 위한 도구, 방법론 조사

### (1) 화학물질 관리에 있어 안전한 대체에 대한 고려사항

경제협력개발기구(OECD; Organisation for Economic Co-operation and Development)에서 발행한 위험성 관리 분야 보고서 중 대체와 관련한 안내서(Guidance on Key Considerations for the Identification and Selection of Safer Chemical Alternatives)를 기반으로 대체에 대한 고려사항을 조사하였다.

### (2) 세척작업에 대한 대체 평가

미국 매사추세츠주 독성물질저감법 연구기관(TURI; Toxics Use Reduction Institute)과 미국 환경청(US EPA; US Environmental Protection Agency)에서 발간하는 할로젠화 유기용제 세척작업 관리 및 대책을 중심으로 검토하였다.

## 3) 세척작업의 안전성 결정요인 구조화 및 조사양식(안) 설계

국내·외 세척작업의 특성과 안전한 대체를 위한 주요 고려사항을 바탕으로 유해성과 노출 측면에서 세척작업의 안전성을 결정하는데 특화된 요인에 대해 종합적으로 도출하였다. 이에 따른 요인을 유해성과 노출 기반의 프로파일로 구조화하여 이를 기반으로 조사양식(안)을 설계하였다.

#### 4) 할로겐화 유기용제 세척작업 사업장 대상 시범 조사 및 분석

##### (1) 국내 할로겐화 유기용제 세척작업의 특성

기본적인 세척작업의 원리와 특성을 바탕으로 안전보건관점에서 가장 위험이 우려되는 할로겐화 유기용제 사용 세척작업을 중심으로 그 특성을 조사하였다. 한국산업안전보건공단(이하 '공단')에서 수행한 전문사업(고독성 Top10 물질 집중관리, 작업환경측정 신뢰성평가) 보고서와 작업환경측정 결과 자료(이하 '작업환경측정DB')를 참조하여 그 특성을 분석하였다.

추가로 세척작업을 포함하는 일부 사업장을 임의 추출하여 연도별 세척제 변화 흐름을 살펴보고, 이를 화학물질 규제변화 시점과 함께 비교·분석하였다.

##### (2) 국내 할로겐화 유기용제 세척작업 사업장 시범 조사 및 분석

할로겐화 유기용제 세척작업 사업장에 대한 시범 조사는 두 가지 단계(기술 보고서를 활용한 정보 추출, 현장 조사)로 진행하였다.

첫째, 기술 보고서는 2020년부터 2022년까지 공단에서 수행한 「작업환경측정 신뢰성평가」 사업 결과 보고서를 활용하여 정보를 수집하였다. 해당 결과 보고서에서 수집한 작업환경정보를 1차 정리하여 항목별로 기재한 후, 2차로 <세척작업의 안전성 평가·관리 조사표> 구성에 따라 표준화하여 코딩하였다.

둘째, 현장 조사는 2019년부터 2022년까지의 작업환경측정자료에서 추출한 할로겐화 유기용제(9종)를 사용하는 세척작업 보유(추정) 사업장 목록 중에서 1단계에서 세척작업의 특성이 확인된 사업장을 제외한 후, 시범 조사 대상을 선정(30개소+예비)하였다. 현장 조사는 현장 방문, 조사표에 따른 면담, 개인시료 측정으로 구성되며, 이에 따른 결과를 표준화하여 코딩하였다. 최종 현장 조사는 30개소를 실시하였으며, 이는 「산업안전보건연구원 기관생명윤리위원회 표준 운영지침」(OSHRI-202303-HR-005)을 준수하여 수행하였다. 작업환경평가 시 개인시료측정 및 분석은 1단계에서 확보한 정보와의 일관성과 자료 통합을

위하여 공단의 「작업환경측정 신뢰성평가」 사업에 준하여 실시하였다.

추가로 1단계와 2단계를 거쳐 수집하고, 변환한 정보를 바탕으로 노출평가 모델(ECETOC TRA 등)을 실행하여 노출수준을 추정한 후, 이를 실제 노출수준을 측정한 결과와 비교·분석하였다.

#### 5) 안전한 세척작업의 평가·관리를 위한 데이터베이스화 방안 제시

위 조사내용과 문헌고찰을 바탕으로 전문가 의견을 수렴하여 국내 안전한 세척작업의 평가·관리를 위한 데이터베이스화 방안을 제시하였다.



### Ⅲ. 연구결과



### Ⅲ. 연구결과

#### 1. 세척작업의 특성

##### 1) 세척작업의 유형

‘세척’이란 대상 제품을 변형시키지 않고, 제품의 표면에서 원하지 않는 물질을 제거하는 것을 의미한다. 영어로 세척의 용어로 사용되는 ‘cleaning’이라는 표현은 청소 서비스 작업에도 많이 사용되고 있는 등 그 의미가 상당히 포괄적으로 사용되고 있지만, 이 보고서에서의 세척은 산업용 세척(industrial cleaning)으로 그 의미를 한정한다.

세척은 보통 별도의 분리된, 독립된 과정으로 이해되기보다는 전체적인 공정 내에서의 한 단계로 인식되는 경우가 많다. 그래서 해당 작업은 ‘세척’이라는 용어로 쓰이지 않고 다른 공정 혹은 작업 전후에 있는 단계들과 연계해서 탈지, 박리, 제거, 표면처리, 세정, 담금, 절삭, 기계가공(CNC, MCT 등), 연삭, 초음파 등으로 별도 혹은 포함하여 표현되기도 한다. 그만큼 세척은 다른 공정, 크기는 산업의 변화에 따른 영향을 많이 받는 형태의 작업이기도 하다. 아울러 세척공정 혹은 세척작업(활동)이라는 표현에서 공정, 작업(활동)의 의미를 본 과제에서 확인하고자 하는 노출 평가 관점에서 살펴보면 다음과 같다. 공정은 노출을 일으킬 수 있는 물질의 생산, 분배, 사용에 기여하는 일련의 연결된 작업 또는 단계로서 보통 산업이나 제조 분야와 밀접한 관련이 있고, 복잡하며 구조화되어 있다. 그리고 작업(활동)은 노출을 일으킬 수 있는 개인이 참여하는 구체적인 행동이나 행위로서 이는 직업적 혹은 비직업적 환경에서의 다양한 행동을 포함할 수 있다. 이와 같이 두 가지 표현은 그 범위와 조직적 측면에서 차이가 있지만, 모두 노출 평가의 관점에서 중요한 고려사항이다. 이 보고서에서는 별도의 세척공정 개념 외에도 다른 공정 내에서 이루어지는 세척활동도 포함하여 다루고 있으므로

세척작업으로 표현을 통일하기로 한다.

세척작업에서 대표적으로 중요한 기능적 요소는 세척제와 세척 설비이다. 물론 이 두 요소는 각각이 아닌 전체적인 세척과정 내에서 함께 고려하는 것이 필요하다. 때로는 이 두 가지 요소가 명확하게 분리되지 않는 경우도 있으며, 기술의 발전에 따라 점차 다변화되고 있기 때문이다.

세척작업에서 세척제는 제거하고자 하는 대상 오염과 피세척물이 무엇인지와 건조를 포함한 세척요건을 어느 수준으로 달성해야 하는지와 같은 기능적인 부분과 안전보건환경 측면에서의 규제적인 부분을 고려해야 한다. 일반적으로 세척제는 수계와 용제계로 구분하고 있다. 그리고 여기서 용제계는 유기용제를 의미한다. 수계는 물을 주제로 하는 세척제로, 환경 및 작업자에 보다 친화적 유형으로 간주된다. 용제계는 오일, 그리스 혹은 다른 제거하기 어려운 오염에 효과적인 세척제로 수계 세척이 효과적이지 않은 경우에 많이 이루어지고 있다. 수계와 용제계 세척제의 일반적인 특성은 다음과 같다.

〈표 III-1〉 수계와 용제계 세척제의 일반적인 특성

구분	수계 세척제	용제계 세척제
안전성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 비가연성</li> <li>• 용제계보다 유해성이 낮음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 가연성(일부)으로 인해 별도 저장 및 처리가 필요</li> <li>• 유해성</li> </ul>
환경영향	<ul style="list-style-type: none"> <li>• VOC 방출 낮음</li> <li>• 생분해성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• VOC 방출 높음</li> </ul>
비용효과성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 물은 공급이 쉽고, 경제적이며, 대규모 산업에 유리 (다만 폐수 처리는 별도)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 용제에 따라 비용이 다양</li> </ul>
호환성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 금속, 플라스틱, 세라믹 등 다양한 재료에 이용 가능함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 다양한 재료에 효과적이거나, 민감한 세척물의 경우 주의를 요함</li> <li>• 물에 영향을 받는 정밀전자기계 기구에 적용하기 쉬움</li> </ul>

구분	수계 세척제	용제계 세척제
세척력	<ul style="list-style-type: none"> <li>여러 종류의 오염을 제거하는데 효과적이거나, 오염도가 심한 경우 온도를 높이거나, 추가 성분(계면활성제 등)을 혼합하는 등의 물리·화학적 부가요건을 필요로 함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>오일, 그리스와 같은 기름 성분 및 물에 용해되지 않는 오염 제거에 효과적</li> </ul>
잔류물	<ul style="list-style-type: none"> <li>세척 후 세척물 표면에 잔류물을 거의 남기지 않음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>용제가 비교적 빠르게 증발</li> </ul>

먼저 수계 세척제를 살펴보면 물 자체만으로 어느 정도 오염을 제거할 수는 있다. 그러나 산업용 세척에서 물로만 세척을 하는 경우는 거의 없으며, 일반적으로 물을 주체로 하여 여러 성분들을 혼합하는 경우가 많다. 이러한 성분들이 첨가되면 그 세척력이 훨씬 향상될 수 있기 때문이다. 보통 첨가하는 성분은 계면활성제, 소포제, 용제, 부식방지제(피막여부), 강화제, 용해보조제, 산화제 등이다. 세척제에서 계면활성제(surfactant)는 습윤성(젓기 쉬운 정도)을 높이고, 오염을 분산 혹은 제거하고, 가용화, 즉 용해도를 높이는 기능을 한다. 한 분자에 친수성 및 소수성기가 함께 있고, 긴 탄소사슬을 가지고 있으며, 대표적인 예로서 알코올 에톡실레이트(alcohol ethoxylate)가 있다. 소포제(defoamer)는 거품을 제거하거나 억제하는 기능으로, 고압 세척을 하는데 필요한 성분이다. 그리고 표면장력을 낮추고, pH를 조절하거나, 용해 범위를 늘리기 위해 용제들(부틸 셀로솔브, 피롤리돈, 모르폴린, 글리콜 에테르, 알코올 등)을 첨가하기도 한다. 금속의 경우 부식을 막기 위해 부식방지제(corrosion inhibitor)를 첨가하기도 하는데 반응성을 감소시키거나 보호막을 형성하는 방식이다. 강화제(builder)는 계면활성제의 세척 효율을 높이고, 물의 경도를 관리하며, pH를 유지하고, 폐수에서 금속 함량을 낮추기 위해 보통 염이 많이 사용된다. 용해보조제(hydrotrope)는 고농도의 무기염이 있는 경우 유기물의 용해도를 증가시키고, 산화제(oxidizer)는 부식 방지의 기능이나 흡착, 오염 용해, 산소 방출을 통해 오염 제거를 용이하게 한다. 하지만 다른 성분을 혼합할수록 해당 성분에 의해 세척력은 좋아질 수 있으나, 건조 혹은 잔여물 등에 대한 고려가 필요하다.

용제계 세척제는 보통 사용 후 증발되어 추가적인 처리를 요구하지 않는 것이 주요한 특징이다. 이것은 휘발성 유기용제를 사용하는 냉세척의 경우에도 그러하다. 이러한 휘발성의 주요한 지표는 증기압(vapor pressure), 증발률(evaporation rate), 증발열(heat of vaporization)이다. 세척작업에서의 유기용제는 일반적으로 증기압의 경우 상온에서 25torr(약 133Pa) 이상, 증발률은 n-부틸 아세테이트를 기준으로 이보다 큰 것을, 용제가 액상에서 기상으로 바뀌는데 필요한 증발열의 경우는 낮은 것이 좋다. 추가로 정밀세척분야에서는 이러한 휘발성 외에도 용해성(용해도, 카우리 부탄올 값), 낮은 점도 및 표면장력, 화학적 안정성, 대상물과의 호환성, 비휘발성 잔류물(NVR; non-volatile residue)이 주요한 고려사항이다.

〈표 III-2〉 세척작업에서의 선호하는 유기용제에 대한 주요 특성

특성	필요 사유	지표
휘발성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세척 후에 추가적인 처리를 하지 않기 위함</li> <li>• 주변 환경에 대한 영향 최소화 (주변 열을 흡수하는 경우에 대한 우려)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 증기압</li> <li>• 증발률</li> <li>• 증발열</li> </ul>
용해성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일차적으로 대상 오염을 제거하기 위함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 용해도</li> <li>• KBV*</li> </ul>
침투력	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대상 세척물의 구조에 따라 해당 공간에 침투하기 위함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 점도</li> <li>• 표면장력</li> </ul>
안정성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세척하는 동안 세척제의 특성이 변하지 않고 오랫동안 유지하기 위함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 화학적 안정성</li> </ul>
호환성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대상 세척물과의 물리화학적 반응으로 인하여 변화시키지 않기 위함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대상물과의 호환성 시험</li> </ul>
잔류성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세척 후 휘발되면서 가급적 잔류물을 남기지 않아야 함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NVR 시험</li> </ul>

\* Kauri Butanol Value, 일반적으로 탄화수소계 오염에 대한 용해성을 평가

탄화수소계(hydrocarbon)에는 전통적으로 많이 사용되었던 톨루엔, 헥산, 헵탄, 벤젠, 자일렌 등도 있지만, 다양한 분자량을 가지는 석유계 추출물도 있다. 상당한 세척력을 가지고 있지만, 여러 안전보건의 이슈가 있어 한동안 외국에서는 사용이 줄어들었다. 그러나 정제기술의 발전으로 탄화수소계를 비교적 좁은 정의된 범위로 추출 사용할 수 있다면 냉세척에도 용이하며, 최근 세척 설비의 발전 등으로 가급적 노출을 적게 하고 안전을 고려한 설비를 이용하는 경우 심지어 증기세척에도 사용되기도 한다.

염소계(chlorinated)에는 메틸렌 클로라이드(MC, DCM), 퍼클로로에틸렌(PCE), 트리클로로에틸렌(TCE) 등이 많이 사용되어왔다. 이들은 제한된 공간에 갇혀있는 오염을 제거하는데 용이한 특성인 습윤성이 우수하며, 여러 용해도 지표를 확인하였을 때 다양한 오염을 제거하는데 용이함이 확인되었다. 물론 다량의 무기, 극성 오염의 경우에는 수계 세척이 훨씬 용이하다. 이외에도 최근 국내에서도 많이 사용되는 물질 중 하나는 트랜스-1,2-디클로로에틸렌(TDCE)이다. 이는 다른 염소계 물질들과 유사한 물리화학적 특성과 용해성을 가지고 있다. 상당한 용해력, 급속한 증발, 고밀도 등이다. 그래서 에어로졸 제제로도 사용될 수도 있다. TDCE는 적절히 안전을 고려한, 낮은 인화점을 고려한 방지설비가 설계된 경우에는 섞지 않고 단일 성분으로도 사용될 수 있다. 하지만 그렇지 않은 경우는 혼합해서 사용되는 경우가 많으며, 특히 하이드로플루오르카본(HFC), 하이드로 플루오르에테르(HFE) 공비혼합물에 추가해서 용해력을 높이기도 하나, 이런 경우 일부 국가에서는 휘발성유기화합물 규제 대상에도 포함될 수 있기 때문에 주요 목적에 따라 혼합 구성을 고민할 필요가 있다. 그러나 TDCE는 다른 염소계 물질에 비해 건강영향 측면에서는 확인된 유해성이 낮아 국내에서도 혼합제제에 많이 사용되고 있다.

불소계(fluorinated) 화합물은 염소와 브롬이 없고, 불소와 탄소로 이루어진 물질을 의미한다. 그중 과불화합물(perfluorinated)은 세척분야 외에도 다른 생활용품 분야에서 상당히 많이 사용되어 왔으나, 그 유해성과 잘 분해되지 않는 특성, 높은 지구 온난화 지수로 인해 국제적으로 문제가 되고 있는 물질이기

때문에 대체를 강력하게 지향하고 있는 물질군이다. 그래서 여러 면에서 HFC와 HFE가 이에 대한 대체로 고려되고 있다. HFC의 경우 탄소, 불소, 수소로 이루어져 염소를 가지고 있지 않기 때문에 오존 파괴 물질에 해당되지 않는다. 그래서 CFC, HCFC에 대한 대체 물질로 많이 고려되고 있다. 아울러 수소 원자의 존재로 인하여 대기 잔류성이 낮아서 지구 온난화 지수 또한 PFC, CFC 보다 상당히 낮다. 그리고 많은 불소 원자들은 비인화성, 저독성, 열안정성, 낮은 반응성, 대상물과의 호환성을 좋게 만든다. 이들의 세척력은 CFC-113과 PFC의 사이에 있어, 이를 강화하기 위하여 적절한 공비혼합물과 알코올, 탄화수소, 에스터, 하이드로클로로카본과의 혼합물을 사용하기도 한다. 그러나 여전히 지구 온난화와 같은 환경적 이슈가 남아있기 때문에 장기적으로 이를 낮출 수 있는 방안을 연구 중이다. HFE는 에테르 산소 원자가 들어가서 특히 환경적 관점에서 물성을 변화시키며 대기 중 반감기를 줄여 HFC, PFC 보다 지구 온난화 지수가 낮은 물질이다. HFE는 세척력이 비교적 낮은 편이지만, 다른 물질과 혼합하였을 때 강점을 가지는 성분이다.

산소화(oxygenated) 용제는 산소를 포함하고 있는 모든 용제류를 의미한다. 짧은 사슬의 알코올인 메틸 알코올, 에틸 알코올, 이소프로필 알코올과 메틸 에틸케톤, 메틸이소부틸케톤, 아세톤을 포함한다. 다른 탄화수소와 비교하여 산소가 있기 때문에 더 극성인 성질을 가지게 되어 물과 친화적이다. 따라서 세척에 있어 더 극성인 혹은 무기 오염류에 적합하다. 이러한 용제들은 그 물성, 인화성, 용해력이 달라 염소계 용제의 대체로는 적합하지 않다. IPA의 경우는 범용적인 용제는 아니고, 주로 항공우주산업이나 의료산업에서 사용되고 있다. 급속히 증발하고, 잔여물을 남기지 않으나, 잘못된 사용으로 인하여 오염 문제가 발생하는 경우도 있어 주의를 기울여야 한다. 비교적 낮은 인화점을 가지고 있어서 초음파 탱크 사용 등은 화재 위험이 있을 수 있다. 이보다 긴 사슬을 가지고 있는 알코올류 중 테트라하이드로푸르푸릴 알코올이 있다. 단독 혹은 혼합제제로 사용된다. 탄소 사슬이 길어질수록 친유성을 가지며, 알코올기를 가지고 있어서 다소 친수성도 띄고 있다. 그래서 이러한 알코올류는 수계 혹은 준수계(물로

헥검), 공용매(용제로 헥검)의 성분으로 사용되기도 한다. 케톤류의 아세톤은 하이드로카본, 할로젠화 용제, 알코올류와 다른 세척 특성을 가지고 있다. 굉장히 증발률이 높으며, 일부 플라스틱과 호환성이 떨어지며, 인화점이 매우 낮다. 그리고 아세톤에 용해된 물의 영향도 고려해야 한다. N-메틸 피롤리돈은 끓는점과 인화점이 상당히 높은 수용성 케톤류이므로, 로진과 유기산 플렉스를 둘 다 제거하는데 혼합할 수 있는 성분이다. 에스터류의 대표적인 물질은 t-부틸 아세테이트와 다이메틸 카보네이트이다. 에스터류는 물과 함께 존재하는 경우 가수분해되어 산과 알코올을 생성할 수 있다. 따라서 전후 공정을 면밀히 검토하여 가수분해에 따른 세척에의 영향을 고려할 필요가 있다. 이 중에서 DMC는 반응성이 낮고, VOC 규제에 해당되지 않아 최근 선호하는 세척제 중 하나이다. DMC는 인화점이 낮고, 끓는점이 높은 물질이며, 물에 잘 녹는 편이다. 증정도의 증발률(3.22)를 가지고 있으며, 그 용해 특성은 일반적인 글리콜에테르류와 유사하다. 특이한 것은 어는점이 높은 편(2-4℃)이므로, 다른 물질과 혼합하여 사용할 필요가 있다는 것이다. 즉 DMC를 효과적으로 세척에 이용하기 위해서는 그 낮은 인화점과 높은 어는점의 한계를 극복할 수 있는 다른 용제들과의 혼합이 필요하다. 이 외에도 생물 유래의 세척제들(methyl soyate, ethyl lactate, D-limonene)이 있다. 이러한 세척제들은 수계, 용제계 기반 둘 다 가능하며, 대부분 끓는점이 높은 편이어서 잔여물이 문제가 될 수 있어 헥검과 건조가 필요하다. 종종 이런 물질들은 환경 친화적이라는 용어와 같이 무해하다는 의미로 받아들여지곤 하는데 그렇지 않다는 점을 분명히 할 필요가 있다. 이 외에도 휘발성 메틸 실록산과 같은 실리콘 기반의 세척제들이 개발되었다.

세척제의 기본 분류는 이와 같이 수계, 용제계(탄화수소계/염소계/ 불소계/ 산소화)로 크게 구분할 수 있으며, 준수계를 별도로 구분하는 경우가 있다. 보통의 수계는 물을 중심으로 물과 계면활성제가 주가 되며, pH에 따라 산성/약산성/중성/약알칼리성/알칼리성으로 구분한다. 이에 반해 준수계는 수계에 일부 유기 용제가 추가되어 유화된 것으로, 유기용제, 계면활성제, 물이 주성분이 된다. 용제계는 지방산계/알코올계/탄화수소계/ 할로젠계로 구분하기도 하며, 연소

특성에 따라 가연성과 불연성으로 분류하여 구분하기도 한다.

세척은 단순히 화학물질만이 아니라 세척 설비와의 상호작용이 매우 중요하다. 물론 수작업으로 별도의 장비를 사용하지 않고 하는 세척도 있을 수 있다. 그리고 세척 설비는 상당한 비용 투자를 필요로 하며, 설비 종류에 따라 각종 규제를 받을 수도 있고, 장비 사용을 위한 교육과 전문가가 필요하다. 그럼에도 불구하고 세척 설비를 사용하여 세척을 하는 주요한 이유는 바로 세척 성능 때문이다. 세척제가 화학적으로 우수한 용해력을 가져 대상 오염을 효과적으로 용해할 수 있긴 하지만, 이러한 세척제가 피세척물 표면에 도달하고, 오염이 표면에서 제거되기까지는 적절한 물리적 활동이 요구되며, 세척 설비가 이러한 각종 기능 개선의 요소들을 담고 있다.

세척은 크게 세척(wash), 헹굼(rinse), 건조(dry)의 3단계로 구성된다. 각 단계는 사실상 분리된 기능을 하며, 각각의 설비나 화학적 요소를 필요로 할 수 있다. 첫째, 세척은 첫 단계로서 제품의 표면에서 각종 오염을 제거하는 것이다. 오염 제거는 해당 부근에서 제거하고, 재침착하는 것을 막는 것을 포함한다. 이러한 세척에 있어 또 하나 중요한 것은 제품에 어떠한 변형도 일어나지 않는 것이다. 둘째, 헹굼은 세척이 된 부분에서 남아있는 세척제를 제거하는 단계이다. 또한 제조 과정 중의 입자나 남아있는 오염을 제거하기도 한다. 만약 잔여 세척제가 세척 조건에 있어 허용 가능한 것이라면 헹굼 단계는 필요하지 않다. 그러나 보통 수계 혹은 용제계 세척 모두에서 헹굼은 필요한 과정이다. 물론 세척과 헹굼 단계가 한 가지로 이루어지는 경우도 있다. 바로 증기 세척 공정이다. 이 헹굼 단계 또한 피세척물에 영향을 주어서는 안 된다. 여러 번의 헹굼 단계를 요구할 수도 있지만, 이것은 세척 단계의 대체가 되어서는 안 된다. 셋째, 건조는 세척과 헹굼 단계에서 생긴 오염을 제거하는 단계이다. 이는 물일 수도 있고, 흡착된 유기용제일 수도 있다. 건조 단계는 세척작업에 있어 간과되는 경향이 있어 그만큼 신경을 쓰거나 투자를 하지 않는다. 건조 단계는 어떤 면에서는 세척작업에 있어 속도를 결정하는 단계이기도 하다. 보통 유기용제를 사용하는 세척에서 건조는 어느 정도 내재된 과정이기도 하지만, 수계 세척에서 건조는

반드시 고려해야 한 부분이다. 물론 세척제가 복잡해지고, 세척된 부품의 다음 단계에서 요구하는 조건에 따라 건조는 그만큼 중요한 역할을 한다.

세척제에서도 그렇지만 세척 설비에서의 활동도 재질의 호환성은 중요한 요소이다. 예를 들어 초음파 세척과 같은 경우는 세척력을 증가시키기도 하지만 피세척물에도 영향을 줄 수 있기 때문이다. 고압 세척 같은 경우도 피세척물의 직접적인 변형 혹은 보이지 않는 침식을 일으켜 피세척물의 내구성 등에 영향을 미칠 수 있다. 또한 지속되는 세척 활동으로 인해 세척 설비가 노후화되거나 하면 세척 과정에서 오히려 또 다른 오염을 일으킬 수도 있다.

세척 설비에서는 피세척물의 고정장치, 부품 취급장치, 혹은 자동화가 중요한 부분이다. 세척조 혹은 라인 유형으로 각각 자동화를 적용할 수 있다. 자동화의 방식은 다양하지만, 일반적인 장점은 공정관리를 쉽게 할 수 있고, 세척품질의 일관성을 개선할 수 있으며, 각종 안전보건의 규제 준수에 쉬운 적응성을 가지고 있으며, 세척제 소비를 줄일 수 있고, 그에 따른 배출도 감소시킬 수 있으며, 결국 작업자への 노출도 줄일 수 있다. 그러나 보통 세척 설비 자동화 시스템을 도입할 때, 전·후 작업 및 주변 환경을 고려하지 않는다면 다음 단계로의 연결이 편리하지 않는 등 효율성이 기대만큼 크지 않을 수 있다. 그리고 자동화에서는 인적 요소도 반드시 고려해야 한다. 점차 새로운 정밀하고 복잡한 시스템이 도입되기도 하면서 이전과는 다른 작업자 역량을 요구하기도 한다. 그리고 전문성과 교육 훈련 부분도 고려해야 하지만, 자동화 설비 자체를 작동하는데 있어서도 다른 물리적인 위험 부담이 발생하지 않는지도 면밀하게 살펴야 하는 부분이다.

세척 설비에서 빼놓을 수 없는 요소가 바로 공정 효율과 비용이다. 비용 측면에서 본다면 초기 자본 비용, 소모품 비용, 세척제 비용, 세척조 수명, 세척제 손실, 폐기 비용, 안전보건 등 각종 규제 준수 비용, 에너지 효율, 재작업 비용 등을 전반적으로 고려해야 한다. 그리고 소규모의 수작업이 아닌 종류의 설비 도입을 고려한다면 세척 물량, 피세척물의 크기 등을 포함하여 현재 작업공간에 대한 검토도 필요하다.

세척 설비는 기능성, 디자인 및 응용 분야에 따라 분류하고 구분할 수 있다. 청소 작업을 포함한 보다 일반적인 유형의 청소 설비와 그 내용은 다음과 같다.

〈표 Ⅲ-3〉 일반적인 세척 설비의 유형

구분	내용
고압 세척기	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기능성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 압축된 물을 사용하여 표면에서 먼지, 녹, 오염물을 제거</li> </ul> </li> <li>• 유형                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 냉수 고압 세척기는 일반 세정에 사용되며, 온수 고압 세척기는 기름류를 제거하는 데 효과적</li> </ul> </li> <li>• 응용 분야                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기계, 차량, 바닥, 벽 및 야외 표면 청소에 적용</li> </ul> </li> </ul>
증기 세척기	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기능성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고온의 증기를 이용하여 오염 제거</li> </ul> </li> <li>• 유형                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 응용 분야에 따라 압력과 온도 수준이 다름</li> </ul> </li> <li>• 응용 분야                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 표면 살균, 기름 제거 및 수분에 민감한 부분 세척에 적합</li> </ul> </li> </ul>
진공 시스템	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기능성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 표면, 바닥에 있는 대량의 오염을 효과적으로 제거</li> </ul> </li> <li>• 유형                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 습식 및 건식 진공 모두 가능하며, 필터 부착으로 정화 기능 추가 가능</li> </ul> </li> <li>• 응용 분야                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 일반 세척, 이물질 제거 및 다양한 산업에서 오염 관리에 사용</li> </ul> </li> </ul>
스크러버 및 스위퍼	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기능성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 물과 세척제를 사용하여 문지르고, 이물질은 별도 수거통에 수집</li> </ul> </li> <li>• 유형                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 표면적과 세척 요구사항에 따라 보행식 및 탑승식 버전 가능</li> </ul> </li> <li>• 응용 분야                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 창고, 공장 및 산업 시설의 넓은 바닥 면적 세척에 사용</li> </ul> </li> </ul>

구분	내용
화학물질 분배 시스템	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기능성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 용도에 따라 세척제를 분배 조절</li> </ul> </li> <li>• 유형                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 여러 종류의 화학물질 세척제를 사용하는 세척 장치로서, 자동화된 분사기, 폼 제조기, 분무기 등의 형태</li> </ul> </li> <li>• 응용 분야                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 정밀 분야</li> </ul> </li> </ul>
초음파 세척기	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기능성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고주파수를 이용하여 미세 기포를 만들어 먼지와 오염물을 제거</li> </ul> </li> <li>• 유형                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 벤치탑 및 산업용 장치로 다양하게 적용하여 활용 가능</li> </ul> </li> <li>• 응용 분야                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 민감 부품, 전자 제품, 보석 및 정밀 부품의 세척에 적합</li> </ul> </li> </ul>
로봇 청소기	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기능성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 인력의 직접적인 개입 없이 세척 필요 부분을 탐색 및 세척하는 자동화된 장치</li> </ul> </li> <li>• 유형                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 로봇 진공 청소기, 청소용 드론 등</li> </ul> </li> <li>• 유형                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 대형 공간의 일상적이고 효율적인 청소에 적합</li> </ul> </li> </ul>
CO <sub>2</sub> 세척기	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기능성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 드라이아이스를 사용하여 표면에서 오염물, 페인트 및 잔여물을 제거하는데 사용</li> </ul> </li> <li>• 응용 분야                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 전통적인 수계 세척 방식이 불가능한 작업 종류에 적합</li> </ul> </li> </ul>
압축 공기 세척기	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기능성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 압축 공기를 사용하여 닿기 어려운 부분 혹은 민감 장비에서 먼지, 이물질 및 오염물을 훼손없이 제거</li> </ul> </li> <li>• 응용 분야                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 전자제품 제조, 자동차 및 정밀 산업에 사용</li> </ul> </li> </ul>
화학물질 분무	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기능성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 소독제, 살균제 및 청소제를 미세한 분무 형태로 분사하여 표면을 효과적으로 커버함</li> </ul> </li> <li>• 응용 분야                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 최근 전염병, 의료 시설 소독에 사용</li> </ul> </li> </ul>

특히, 산업용 세척에서 세척제와 같이 화학적 측면이 아닌 설비적인 면에서의 물리적 방식 중 주목하는 것은 바로 초음파 세척이다. 초음파 세척은 1950년대에 등장한 기술로, 초음파라는 에너지 사용을 병행하면서 기존의 세척 과정에서 얻을 수 없는 물리적인 기능을 수행한다. 20세기 발행한 보고서에 따르면 당시 여러 오염물을 세척하기 위해 기계화된 초음파 설비를 설계하였으며, 먼저 세척 대상 부품을 바구니에 담아 세 개의 세척조를 연이어서 통과하게끔 하며, 처음 두 개의 세척조에는 TCE가 담겨 있고 첫 번째는 사전 세척, 다음은 2kW 초음파 발생기가 달려 있는 초음파 세척조를 지나고, 마지막으로 건조를 위해 뜨거운 증기 구역을 통과하는 구조였다. 이때 사용한 초음파는 10에서 30kHz 대역이었다. 사용하는 용제를 제외하고는 기본 설정은 최근 자동 초음파 세척기와 거의 유사한 구조이다. 초음파가 표면의 오염을 제거하는데 유용한 이유는 주로 캐비테이션(공동 현상)과 관련되어 있다. 캐비테이션이 일어나는 임계값 이상에서는 비대칭 압력으로 인하여 강력한 분출이 형성되고 결국 액체 내의 기체 분자가 터지면서 그 충격파가 오염을 제거하게 된다. 또한 음파가 세척액을 지나면서 음향의 흐름이 발생하여 담겨 있는 표면의 유체역학적 경계층의 두께를 줄이게 되어 결과적으로 표면의 작은 입자들이 입자와 표면 사이의 접착력을 극복할 수 있는 액체의 흐름에 더 많이 노출되게 된다. 이러한 초음파 세척의 효율성에 영향을 미치는 요소는 세척제의 종류, 온도, 정상파의 존재, 전력, 주파수 등이다.

초음파 세척 외에도 밀폐형 분사 챔버, 연속 세척, 원심분리 세척, 회전 세척, 마이크로클러스터, 캐비닛형 세척, 생물 정화 세척, 준수계/공용매/ 이성분 용매 방식, 습식 벤치, 충돌 세척, 벤치탑 형태 장비 등이 있다.

## 2) 세척작업 시 고려요소

산업용 세척은 다양한 분야에서 깨끗하고 안전하며 효율적인 작업 환경을 유지하기 위해 필수적인 작업이다. 관련 작업은 장비, 기계, 도구, 표면 및 공간에 대한 세척과 유지보수를 포함한다. 세척작업과 관련된 공정 혹은 설비를 설계하고

운영할 때 고려해야 할 구성요소로는 세척 장비 및 도구, 세척제, 안전 조치, 폐기물 관리, 교육훈련 및 인력, 세척 절차, 유지보수 및 감독, 환경영향, 품질관리와 같이 여러 구성요소가 있다. 실제 회사에서 세척작업에 대한 실행을 고려할 때는 다음과 같은 단계를 논의하고 살펴보아야 한다.

### 〈표 III-4〉 세척작업 실행 여부 결정을 위한 단계

#### 세척작업 실행 여부 결정 단계

- 세척에 대한 요구사항을 이해한다.  
과연 세척이 필요한가? 세척에서 가장 중요한 단계는 무엇인가?
- 세척 부서를 구성한다.  
세척 공정의 관리자, 기술자, 안전보건담당자를 포함했는가?
- 세척작업의 선택 범위를 결정한다.  
여러 종류의 선택 중 제약이 있는 작업 유형은 무엇인가?
- 세척제와 세척 설비 공급업체와 논의한다.  
이 두 가지는 함께 논의할 필요가 있다.
- 주문자와 요구사항에 대해 논의한다.
- 세척 유형 후보들에 대해 평가한다.  
각종 자료를 참고하고, 공정 비용을 평가한다.
- 규제 준수 사항을 고려한다.  
안전, 보건, 환경 규제, 주문자 및 당사 자체 규정을 확인한다.
- 세척 효율에 대한 사전 테스트를 한다.
- 공정의 유연성을 평가한다.  
새로운 세척을 해야 할 경우, 또는 다른 요구가 있는 경우 대체 가능한가?
- 전체 세척작업 비용을 결정한다.  
세척-행공-건조 단계 모두를 포함한 예산인가?
- 최종 결정을 한다.
- 이 모든 사항을 기록한다.
- 작업자에 대한 교육 훈련을 실시한다.
- 품질 관리, 유지보수를 고려한다.

세척작업이 결정되었다면 다음 단계는 구체적으로 고려해야 할 사항을 구조화하여 검토하고, 이에 따라 세척제와 세척 설비 공급업체들에게 각각 확인할 사항을 구분하여 검토한다.

〈표 III-5〉 세척작업에 있어 구체적인 고려사항

요소	고려사항
생산라인의 구성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세척 설비 규격, 유형(세척조 크기 등)</li> <li>• 세척 설비 구조물의 재질(세척제와 호환성, 허용 가능 온도, 초음파 적용 가능)</li> <li>• 피세척물의 세척 필요 공간, 형태(습윤성, 행금성, 물리적 에너지, 건조 여부)</li> </ul>
제품믹스	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 제품(피세척물)의 다양성, 처리 신속성</li> <li>• 생산라인 상의 주요/간헐적 변화</li> </ul>
세척 물량	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 장/단기 물량(세척 주기, 건조 요구사항, 오염 정도, 세척조 크기 등)</li> <li>• 제품 취급 시 요건(컨베이어 벨트, 로봇, 고정물, 세척 포함 전체 공정)</li> </ul>
세척 요구조건	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 외관(필요시 테스트)</li> <li>• 기능(주문자 확인)</li> <li>• 특정 요구사항(지속적인 모니터링)</li> <li>• 표면 오염(세척제 재사용)</li> <li>• 오염 입자 크기</li> <li>• 기타 주문자 요청</li> </ul>
예산	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세척제, 설비, 소모품, 폐수처리, 용제 격리, 재활용 등 포함</li> </ul>
작업장	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세척 설비 포함한 전반적인 규격(세척 설비, 컨베이어, 호이스트, 재순환 장치, 폐기 설비 등)</li> </ul>
기반 시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전기</li> <li>• 수도</li> <li>• 각종 에어 라인 설비</li> </ul>
각종 규제	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내외 안전/보건/환경 규제</li> </ul>
부가적인 고려사항	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세척제 냄새</li> <li>• 세척제 종류에 대한 선호</li> </ul>
작업자 요구	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 화학물질 취급</li> <li>• 주요 공정 변화 적응</li> <li>• 컴퓨터 사용 능력</li> </ul>

〈표 III-6〉 세척제/설비 공급업체 대상 확인 목록

세척제 공급업체 대상 확인 목록	세척 설비 공급업체 대상 확인 목록
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공급 가능 세척제 종류</li> <li>• 영업비밀 정보 여부</li> <li>• 정보 제공 형태</li> <li>• 규제 여부</li> <li>• 제거 대상 오염에 대한 추천 세척제</li> <li>• 비용, 성능 관련 정보</li> <li>• 증발률</li> <li>• 액체/증기 세척 여부</li> <li>• 현재 세척 설비에 적용 가능 여부</li> <li>• 행굼 필요성</li> <li>• 행굼에 부식 방지제 필요 여부</li> <li>• 세척제가 행굼액에 혼합되는지 여부</li> <li>• 추천 설비</li> <li>• 현재 설비 개조 가능 여부</li> <li>• 건조 옵션</li> <li>• 별도 관리 필요 용제</li> <li>• 공급자 지원 사항</li> <li>• 샘플 혹은 세척 테스트 가능 여부</li> <li>• 폐기 방식</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 장비 유형</li> <li>• 해당 장비와 조합 가능한 세척제 추천</li> <li>• 운전 시간</li> <li>• 부분별 비용과 범위, 소요 시간</li> <li>• 외관, 규격</li> <li>• 재질</li> <li>• 기본 장비와 확장 가능 부분</li> <li>• 허용 용량</li> <li>• 필요 대수</li> <li>• 고정 부분</li> <li>• 공급자 지원, 보증 기간 등</li> <li>• 세척-행굼-건조 방식</li> <li>• 오염 방지 등을 고려한 부가 설비</li> <li>• 장비 운전을 위한 필요 조건</li> </ul>

세척작업은 공정의 완성을 위해 필요한 요소이긴 하나, 선택할 수 있는 공정이기도 하다. 이러한 점에서 세척작업의 세척제는 최종 완성품, 혹은 목적 제품에 남아있지 않아 변경의 여지가 상당히 많은 아이템이다. 세척작업의 생산성과 안전보건 측면에서 세척제에 대한 고려사항은 다음과 같다.

〈표 III-7〉 세척제 선택에서의 고려사항

관점	요소 및 고려사항
생산성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세척 특성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 세척에 대한 요구사항이 어느 정도인가?</li> <li>- 실제 공정 조건에서의 기능성</li> </ul> </li> <li>• 세척 능력                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 대상 오염에 대한 용해성, 흡윤 능력, 끓는점, 증발율, 오염 허용 능력, 정화 능력, 재증류 능력</li> </ul> </li> <li>• 피세척물과의 호환성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 실제 공정 조건(온도, 노출 시간)에서의 호환성, 세척-헹굼-건조 온도에서의 제품 변형 여부</li> </ul> </li> <li>• 잔여물                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 비휘발성 잔여물 정도, 헹굼 요구사항, 공정 시간 영향</li> </ul> </li> <li>• 세척 시간                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 세척-헹굼-건조 각 시간, 제품을 식히는 시간, 구성요소 중 고정장치, 투입 및 반출 장비, 재작업</li> </ul> </li> <li>• 세척 설비                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 현재 세척 설비와의 적합성, 신규 장착 가능성 및 비용, 신규 설비 비용, 요구되는 부속 설비, 유지 보수, 자동화, 규격, 무게, 고정 요소</li> </ul> </li> <li>• 세척제 관리                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 물 공급, 공정 내 정화, 폐수 처리, 재증류 탑재 여부</li> </ul> </li> <li>• 비용                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 세척제 자체 가격, 세척제 제조 및 폐기 여부, 재활용 혹은 회석 여부, 자본 설비, 폐기 전반, 공정 관리, 규제 준수, 작업자 교육 훈련 등</li> </ul> </li> <li>• 회사 요구사항 및 공급자 책임관리                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 계약 사항, 회사 내규, 품질 관리, 규제 준수, 각종 기술 지원 및 정보 제공 등</li> </ul> </li> </ul>
안전보건	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 인화점                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 세척 설비 선택, 공정 및 작업 방식 관리, 부가 설비 및 배출 관리 방법 선택</li> </ul> </li> <li>• 독성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 단기 및 장기 독성, 작업 조건에서의 예상 노출, 경로별 노출 가능성</li> </ul> </li> <li>• 작업자 수용성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 작업 방법, 건조 속도, 공정 유사성, 자동화, 컴퓨터 기술, 냄새 등</li> </ul> </li> <li>• 규제                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 국내외 규제사항(환경, 안전, 보건)</li> </ul> </li> </ul>

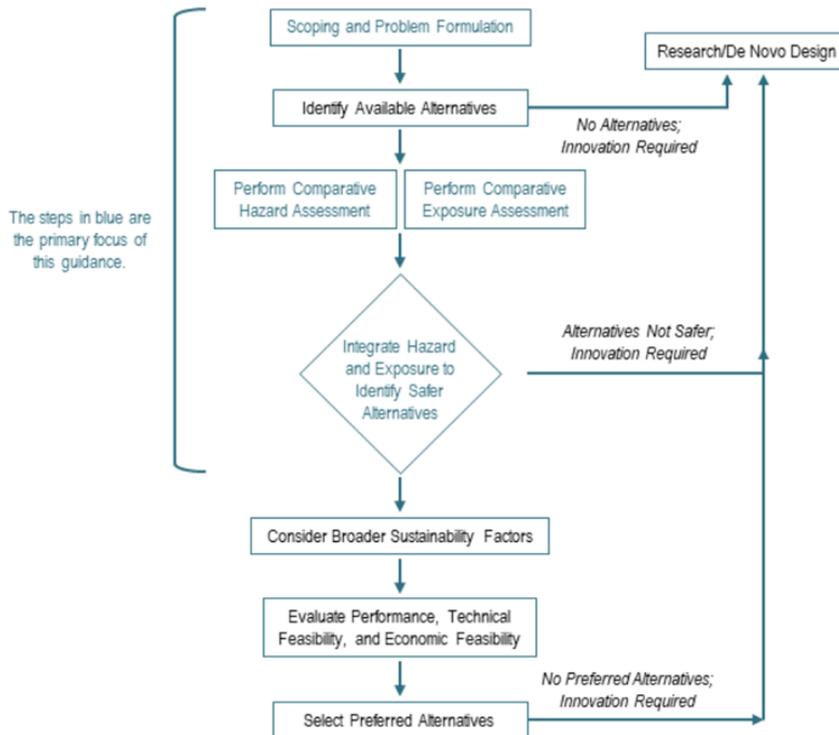
모든 면에서 이상적인 세척제는 없다. 사업장에서 일반적으로 가장 우선하여 고려하는 것은 비용도 저렴해야 하고, 빨리 그리고 효과적으로 오염을 제거할 수 있는 것이다. 그러기 위해서는 해당 세척제의 오염 제거 범위, 습윤성, 증발 속도, 잔여 정도, 호환 가능성, 단일 시스템 처리 가능 여부, 재오염 방지 등을 확인하는 것이 중요하다. 하지만 점차 ESG 경영 등이 강조될 뿐만 아니라 안전한 화학물질 관리에의 요구로 인하여 이러한 생산성 중심 외에도 작업자에의 영향, 더 넓게는 환경에의 영향도 고려할 필요가 있다. 따라서 세척제 자체의 건강 유해성과 세척제의 물성, 세척 설비 및 작업 방식에 따른 노출 가능성 등 안전보건에의 주요 결정요인을 전반적으로 구성·평가·검토하여 안전한 관리의 토대를 마련하는 것이 더욱 중요할 것이다.

## 2. 안전한 세척작업 평가를 위한 도구, 방법론 조사

### 1) 화학물질 관리에 있어 안전한 대체에 대한 고려사항

화학물질의 사용이 증가하는 한편, 유해화학물질에 대한 건강장해 우려가 현실로 나타나면서 유해한 화학물질 대체에 대한 사회적 관심 또한 증가하고 있다. OECD(2021)에서는 이에 따라 화학물질 관리에 있어 안전한 대체에 관한 주요 고려사항에 대한 지침을 제시하였다. 여기서 제시하는 일반적인 대체 평가의 프레임워크는 다음과 같다.

Exhibit 2. Generic Alternatives Assessment Framework Showing What's Covered by this Guidance



[그림 III-1] 일반적인 화학물질의 대체 평가 프레임워크(OECD, 2021)

기본적으로 ‘유해성’과 ‘노출’을 조절하여 위험성을 관리하는 일반적인 화학물질 관리의 개념이 화학물질의 안전한 대체에도 똑같이 적용된다. 이에 따라 대체 가능성을 확인하고 선택하는데 고려하고 있는 내용을 다음과 같다.

첫째, 평가 범위를 결정한다.

모호한 것 같아도 사실상 매우 중요한 부분이다. 이해 당사자들의 합의 하에 평가 범위와 기준을 정해야 하며, 이때 대체의 목적, 원칙, 결정 규칙을 명확하게 결정해야 한다.

둘째, 상대적인 유해성 평가를 한다. 후보 물질의 유해성에 대해서 단계적으로 다음 내용을 고려한다.

2-1단계는 규제물질 목록에 포함되어 있는 물질 사용을 우선적으로 배제한다. 이때 규제물질 목록의 범위는 최소한의 요건에서 확장형으로 이해 당사자들간에 합의를 할 수 있다.

2-2단계는 대체 시 고려해야 할 독성과 그 기준을 결정한다. 현재 GHS 분류가 국제적으로 사용되는 기준으로, GHS를 기반으로 어떤 유해성을 고려할 필요가 있는지를 결정한다. 이 기준은 과학적으로 입증된 우선순위는 아니며, 일반적으로 비가역적인 발암성·변이원성·생식독성 혹은 급성독성, 특정표적장기독성(반복 노출)을 최소 기준요건으로 설정할 수 있으며, 혹은 더 확장할 수도 있다.

2-3단계는 수집된 정보를 구성하고 우선순위화 할 수 있는 명확한 결정 규칙을 수립한다. 위에서 고려하기로 결정한 독성에 대하여 GHS 기준에 따라 판단 시 고유해 우려가 있는 경우를 배제한다.

2-4단계는 자료 부족과 불확실성을 고려한다. 사실상 유해성에 대한 자료는 부족한 경우가 많다. 그래서 자료의 부족과 불확실성에 대한 고려를 할 필요가 있다. 자료없음이 곧 유해성이 없음을 의미하지는 않기 때문이다.

셋째, 상대적인 노출 평가를 한다.

3-1단계는 화학물질(제품)의 생애주기를 고려하여 노출 가능 경로와 노출 시나리오를 예상한다.

3-2단계는 대체물질에 대한 노출 잠재력을 비교한다. 노출 경로에 따른 노출 자료 혹은 물리화학적 특성 자료에 따라 확인한다.

넷째, 위에서의 상대적 유해성 및 노출 평가 결과를 종합하여 더 안전한 대체물질을 선택한다.

## 2) 세척작업에 대한 대체 평가

세척분야에서 할로젠화 유기용제에 대하여 지속적으로 대체 평가와 관련된 정보 혹은 기술을 지원하는 기관 중에는 TURI가 있다. TURI에서 제안하는 대체 평가의 정의는 다음과 같다.

- 대체 평가(Alternatives Assessment): 대체 평가는 유해성, 성능 및 경제적 실행 가능성을 기반으로, 우려되는 화학물질(원자재, 공정, 기술 내 요소 내 화학물질 포함)에 대한 더 안전한 대체 방안을 식별하고, 비교한 후, 선택하는 과정이다.(목표: 더 안전한 선택을 식별하여 인간과 환경에 대한 위험을 줄이는 것)
- 더 안전한 대체(Safer Alternative): 활동을 계속하지 않는 선택을 포함하여, 기존의 필요 충족 수단보다 인간과 환경에게 더 건강한 선택을 의미한다. 예를 들어 화학물질의 경우에는 다른 화학물질로 대체하는 방법도 있지만, 아예 화학물질을 사용할 필요가 없이 설계하는 방법을 포함한다.

TURI에서 제시하는 대체 평가의 큰 원칙은 다음 6가지이다.

〈표 III-8〉 대체 평가의 원칙(TURI, 2011)

원칙	내용
위험 감소 (Reduce hazard)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 위험 우려 화학물질을 덜 유해·위험한 물질로 대체하여 위험을 줄인다. 이 방법은 노출 가능성이 동일하거나 낮은 경우 제품 또는 공정과 관련된 위험을 줄일 수 있는 효과적인 수단이다.</li> <li>• 우려 화학물질을 사용하지 않기 위해 재구성을 고려한다.</li> </ul>

원칙	내용
노출 최소화 (Minimize exposure)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사용 패턴 및 노출 경로를 평가하여 위험을 일으킬 수도 있는 대안에 대한 노출을 최소화한다.</li> </ul>
최적의 가용 기술 사용 (Use best available information)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 가능한 선택을 구별하는 데 도움이 되는 정보를 활용한다.</li> <li>• 선택하기 전에 의도하지 않은 부정적 영향을 초래할 수 있는 대안을 선택하지 않도록 제품 및 공정을 충분히 특성화한다.</li> </ul>
공개 및 투명성 요구 (Require disclosure and transparency)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공급망 전반에 걸쳐 주요 화학물질 및 기술 정보와 관련하여 공개를 요구한다.</li> <li>• 채택된 대체 평가 방법론, 대안을 특성화하는데 사용된 자료, 적용된 가정 및 적용된 의사 결정 규칙과 관련하여 투명성을 높이기 위해 평가 과정 전반에 걸쳐 이해 관계자를 참여시킨다.</li> </ul>
이해 상충 해결 (Resolve trade-off)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 제품 수명 주기에 대한 정보를 사용하여 다양한 대안과 관련된 잠재적 편익, 영향 및 완화 방안을 더 잘 이해한다.</li> <li>• 대체 선택이 명확하게 바람직한 해결책을 제시하지 않는 경우 조직의 목표와 가치를 고려하여 판단 기준의 적절한 가중치를 결정하고 수용 가능한 절충안을 확인한다.</li> </ul>
실행, 조치 (Take action)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 잠재적으로 위험한 화학물질을 제거하거나 대체하기 위한 조치를 취한다.</li> <li>• 상업적으로 이용 가능하고 기술적으로나 경제적으로 실현 가능하며 공정/제품의 성능 요구 사항을 충족하는 더 안전한 대안을 선택한다.</li> <li>• 공급망 파트너와 협력하여 더 안전한 대체 방법의 개발 및 채택에 있어 혁신을 주도한다.</li> <li>• 새로운 정보를 검토하여 선택한 대안이 더 안전한 선택인지 확인한다.</li> </ul>

이러한 원칙에 기반하여 TURI(2021)에서는 표면 세척에서 사용하는 할로겐화 유기용제에 대한 대체와 관련된 기술자료를 발간하였다. 이에 따르면 해당 화학물질의 유해성 측면에서 평가하는 요소는 다음의 8가지 항목이며, 각 항목별로 고려하는 요소는 기준 등급에 따라 점수를 배분한다. 이에 따르면 세척작업에서 사용되는 여러 할로겐화 유기용제들은 상당히 높은 등급에 해당하였다.

〈표 III-9〉 대체 평가에서의 유해성 평가 요소(TURI, 2021)

항목	고려요소
급성 건강 영향	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 흡입독성</li> <li>• 경구독성</li> <li>• 경피독성</li> <li>• 호흡기 자극</li> <li>• 피부 자극</li> <li>• 눈 자극</li> <li>• 노출기준</li> <li>• IDLH((Immediately Dangerous to Life or Health)</li> <li>• 기타 건강 영향(NFPA 지수 참조)</li> </ul>
만성 건강 영향	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 발암성</li> <li>• 생식세포 변이원성</li> <li>• 생식독성</li> <li>• 신경독성</li> <li>• 호흡기 과민성/호흡기 질환</li> <li>• 내분비계 독성</li> <li>• 기타 만성 독성</li> </ul>
환경 영향	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 급성 수생 독성</li> <li>• 만성 수생 독성(분해 정도에 따라)</li> </ul>
환경 거동 및 이동	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 잔류성</li> <li>• 이분해성</li> <li>• 생물농축성</li> </ul>
대기 영향	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 온실가스</li> <li>• 오존파괴</li> <li>• 산성비 형성</li> <li>• 대기오염</li> </ul>
물리적 특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 증기압</li> <li>• 인화성(액체/기체)</li> <li>• 인화점(액체)</li> <li>• 반응성</li> <li>• pH</li> <li>• 부식성</li> <li>• 냄새</li> <li>• 휘발성 유기화합물</li> </ul>

항목	고려요소
공정 요인	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 열</li> <li>• 소음</li> <li>• 진동</li> <li>• 인간공학적 요인</li> <li>• 사회심리학적 요인</li> <li>• 고압</li> <li>• 고온</li> <li>• 수도 사용</li> <li>• 에너지 사용</li> <li>• 노출 잠재력</li> </ul>
생애 주기	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공급망(상위) 영향</li> <li>• 소비자 노출 가능성</li> <li>• 폐기 관련 유해성</li> <li>• 보고 수량</li> <li>• 재활용 여부</li> <li>• 재생 가능성</li> </ul>

Table 2: Relative Hazard Rating Associated with Halogenated Solvents

Category	Trichloroethylene	Methylene Chloride	Perchloroethylene	N-propyl bromide	1,2 trans dichloroethylene	Hydrofluoroethers	Hydrofluorocarbons
Acute Human Effects	VH	VH	VH	H	H	M	M
Chronic Human Effects	VH	VH	VH	VH	H	L	L
Ecological Hazards	VH	L	VH	VH	M	H	H
Environmental Fate & Transport	VH	H	H	H	VH	VH	VH
Atmospheric Hazard	H	H	H	H	L	M	H
Physical Properties	VH	VH	VH	VH	VH	H	H

■ Low 
 ■ Medium 
 ■ High 
 ■ Very High

### [그림 III-2] 할로젠화 유기용제 유해성 평가 예시(TURI, 2021)

세척제의 유해성을 평가하고, 주요한 규제 요소를 파악하는 것이 안전보건환경 측면의 고려사항이고, 생산성 측면에서는 기능과 비용 부분을 고려한다. TURI에서는 할로젠화 유기용제에 대해서 다음 두 가지 범주를 제시하고 있으며, 사실 위에서도 언급했지만 이러한 화학물질 구분은 서로 중복될 수 있다.

〈표 III-10〉 세척작업에서 할로겐화 유기용제의 대체물질(TURI, 2021)

기존	대체	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 할로겐화 유기용제</li> <li>- TCE</li> <li>- DCM</li> <li>- PCE</li> <li>- 1-BP</li> <li>- 1,2-DCE</li> <li>- HFE</li> <li>- HFC</li> </ul>	⇒	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수계                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 산성 수계</li> <li>- 알칼리 수계</li> <li>- 중성 수계</li> <li>- 부식성(강알칼리)</li> </ul> </li> <li>- 효소, 미생물</li> <li>- 분말형 세제</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 용제계                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 생물 유래 용제</li> <li>- 테르판계</li> <li>- 에스터계</li> <li>- 알코올계</li> <li>- 글리콜 에테르계</li> <li>- 케톤계</li> <li>- 석유 증류물</li> <li>- 휘발성 메틸 실록산</li> <li>- 준수계(생물 유래 용제, 테르판, 에스터계 포함)</li> </ul> </li> </ul>

세척작업에서 할로겐화 유기용제를 대체할 때 빼놓을 수 없는 요소가 바로 세척 설비이다. 증기 탈지(vapor degreasing)의 경우는 용제형에만 사용할 수 있는 장비이기 때문이다. 따라서 세척제의 대체는 설비도 반드시 포함해서 고려해야 하는 세척작업 전반에 대한 평가가 필요한 것이다. 증기 탈지 외에 진공 탈지(vacuum degreasing), VCN(vacuum cycling nucleation), 초음파 세척(ultrasonic cleaning), 분사 세척(spray cleaning), 고압 세척(pressure washing), 담금(immersion), 수작업(manual wiping)은 용제계 및 수계/준수계에 다 적용 가능한 설비이자 작업 방식들이다.

이러한 대체의 원칙에 따르면 탄화수소계 중 석유계 세척제 또한 위험 우려 작업 중 하나이다. 석유계 물질은 다양한 성분으로 구성되어 그 조성이 명확하게 정의되지 않은 대표적인 복합다성분물질(UVCB)이다. 이에 따라 MSDS에도 그 조성이 명확하지 않은 경우들이 많다. 문제는 관련 세척제를 포함한 이러한 석유계 물질의 조성에 벤젠 등의 유해한 성분들이 일부 포함될 수 있다는 점이다. 김기연 등(2020)에 의하면 석유계 세척제 제품의 벌크 시료 분석 결과 대상 사업장 전부(30개소)에서 벤젠이 검출되었으며, 작업환경 공기 중 시료분석 결과 이중 3개소에서 벤젠 검출이 확인되었다. 즉, 제품 내 유해 화학물질 함유량이 곧

노출을 의미하는 것은 아니며, 실제 노출과의 관계에서는 해당 사업장 대상 공정/작업에서 노출에 영향을 미치는 요소들을 함께 면밀하게 살펴볼 필요가 있다. 이것이 세척작업에서의 안전한 관리를 위하여 사업장에서 대체를 검토할 때 무엇을 확인해야 하는지, 그 고려해야 할 요소들에 대한 데이터베이스를 구성하고자 하는 이유이기도 하다. 또한 정부에서도 이러한 데이터베이스를 구축한다면 매번 직접 노출을 평가하지 않아도 위험이 우려되는 작업을 지속적으로 관리할 수 있는 토대가 될 것이다.

### 3. 세척작업의 안전성 결정요인 구조화 및 조사양식(안) 설계

#### 1) 세척작업의 안전성 결정요인 구조화

국내·외 세척작업의 특성과 안전한 대체를 위한 주요 고려사항을 바탕으로 유해성과 노출 측면에서 세척작업의 안전성을 결정하는데 특화된 요인에 대해 종합적으로 도출하였다. 이에 따른 요인을 유해성과 노출 기반의 프로파일로 구조화하여 이를 기반으로 조사양식(안)을 설계하였다.

#### 2) 세척작업의 안전성 평가·관리 조사양식(안)

세척작업에서의 일반적인 고려사항과 해당 작업의 안전성을 결정하는 유해성과 노출 프로파일을 구조화한 내용과 함께 유럽에서 노출평가 모델을 실행하기 위하여 구성한 작업자 노출 결정 인자를 참고하여 연결하였다. 노출수준을 결정하는 방식에서 실제 노출을 모니터링/측정하는 방법은 정교한 방법이지만, 여러 면에서 제한성을 가지고 있다. 비용과 기술적인 면에서도 그렇지만, 변화하는 상황에 유연하게 대응하기가 어려운 부분이 있다. 이러한 점에서 노출모델과 같이 필수 정보를 입력하여 추정하는 방식은 실제 측정을 하지 않고도 대략의 노출수준을 예상할 수 있는 활용성이 높은 방식이다. 물론 이것의 전제는 노출모델이 실제 노출수준을 얼마나 잘 반영하느냐이다. 보통 노출모델은 노출에 영향을 미치는 변수들을 구성하여 개발·개선되고 있다. 이러한 노출모델은 개발 과정에서 고려하는 변수들이 단계별로 차이가 있기도 하다. 그래서 유럽에서는 여러 단계의 노출평가 모델을 실행하기 위한 변수들을 통합하여 다음과 같이 SWED(Specific Worker Exposure Determinants) 양식을 제안한 바 있다.

〈표 III-11〉 SWED(Specific Worker Exposure Determinants) 양식 구성요소(ECHA, 2020)

작업 확인	공정 조건	발생원 밀폐	작업 상세정보
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 작업 공정명</li> <li>• 공정 및 작업에 대한 설명 (도구, 장비, 방법)</li> <li>• 공기 중 발생 형태</li> <li>• 화학물질 용도</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 혼합물 중 함량</li> <li>• 물리적 형태</li> <li>• 공정 작업시간</li> <li>• 청소 및 유지 보수 상태</li> <li>• 전체 환기</li> <li>• 국소배기시설</li> <li>• 호흡보호구</li> <li>• 장갑</li> <li>• 눈/얼굴 보호장비</li> <li>• 사용 장소</li> <li>• 공정 온도</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 발생원 밀폐 정도</li> <li>• 고체 억제 기술 (습윤 등)</li> <li>• 작업자 포위</li> <li>• 작업자와 발생원간 거리</li> <li>• 증기 회수 장치</li> <li>• 글러브 백/박스</li> <li>• 하방 측류 부스</li> <li>• 발생원 분리</li> <li>• 발생원과 건물 사이 거리</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 취급 형태</li> <li>• 공정의 밀폐 정도</li> <li>• 표면처리 기술</li> <li>• 연마 방향</li> <li>• 고체에 대한 충돌의 힘</li> <li>• 스프레이 형태</li> <li>• 스프레이 방향</li> <li>• 제품의 양</li> <li>• 휘젓는 속도</li> <li>• 이송 속도</li> </ul>

즉, 평가하고자 하는 작업에 대하여 이 양식에 포함된 요소(인자, 변수)를 모두 파악한다면 여러 가지 모델(ECETOC TRA, Stoffenmanager, ART 등)을 이용하여 노출을 추정할 수 있다. 세척작업을 포함하여 대상 공정 혹은 작업의 안전성을, 즉 노출 가능성을 확인할 수 있는 변수들을 포함하고 있기 때문에 해당 요소는 노출 프로파일 측면에서 중요한 의미를 담고 있다. 따라서 세척작업에 있어 유해한 물질에 대한 노출 가능성을 확인하기 위해서 사업장 조사 시 고려해야 할 항목이다.

위의 조사 내용을 바탕으로 세척작업의 안전성을 평가하고 관리하기 위한 조사양식(안)을 다음과 같이 1차로 구성하였다. 크게 ① 일반사항, ② 공정 및 작업특성, ③ 사용조건, ④ 추가 위험관리 요소, ⑤ 대체에의 고려사항의 5가지 항목으로 구성하였다. 일반사항을 제외하고, ②, ③, ④는 유해성과 노출 프로파일을 확인하기 위한 항목들이며, ⑤는 결국 위험이 우려되는 경우 대체에의 가능성을 확인하기 위한 다소 정성적인 항목들이다.

〈표 III-12〉 세척작업의 안전한 관리를 위한 조사양식(안)

연번	항목	구분	설명	데이터양식	조사내용
0	사전안내	연구목적	2023 자체연구과제: 세척작업의 안전한 관리를 위한 결정요인 분석 및 구조화	-	
1	일반사항	사업장명	key identifier 구성(사업장관리번호+개시번호)	number	
		사업장 현황	작업환경측정DB에서 연결, 추가 조사 불필요	link	
		조사일	조사한 날짜	date	
		사업장 담당자	정보 제공자: 직위 등 특성 포함(개인정보제외)	free text	
2	공정 및 작업특성	세척작업 유형	세척작업 유형 설명 (1단계)습식/건식 (2단계)단일/혼합 * 작업이 공정의 어느 단계에 있는지, 건조 등 다른 과정 포함 여부 확인	dropdown +etc.	
		- 공정번호(PROC)	PROC 1~28, 0	dropdown	
		세척제	세척제의 MSDS 번호 기재(없다면 제품명 및 구성성분/함량 기재)	char-num +etc.	
		- 세척제번호	세척제의 구성성분에 따라 구분 수계/준수계/비수계(용제계)	dropdown +etc.	
		피세척물(대상물)	세척 대상물 확인(종류, 재질, 크기 등)	free text	
		오염제거대상	피세척물에서 제거해야 할 오염 종류	free text	
		세척설비	세척설비 사양(모델명 혹은 제작여부, 설계/구성, 도입시기, 세척기 개수 등)	free text	
		기타 특이사항	세척작업에 있어 특이사항, 상세내용 기술 (폐수처리 등 오염방지시설, 건조필요, 부식 및 인화 등 위험성 고려, 재생/재사용 여부, 유지보수 및 청소 관련 등)	free text	

연번	항목	구분	설명	데이터양식	조사내용
3	사용조건	세척제 취급량 (제품 내 평가대상인자 함량 반드시 포함)	월간 혹은 일일 취급량	number+unit	
		물리적 상태	사용 세척제의 물리화학적 상태(취급 중 변화 있다면 기재)	dropdown +etc.	
		작업자 수	세척 공정 작업자 수(기타 작업 병행 여부 확인)	number +etc.	
		작업시간 및 속도	일일 최소-대 작업시간(스프레이 형태라면 적용 속도, 입력 등 기타에 기재)	number+unit	
		산업안전보건 관리수준	professional use/industrial use * 산업용 예시: 숙련된 사람이 일정 구역 내에서 적절한 장비 사용	dropdown	
		작업장소	사용장소 면적 확인(실내/실내100-1,000㎡/실외)	dropdown	
		작업온도	최대 작업온도(단위고정)	dropdown	
		작업장 환기수준	실내 작업장의 전체 환기수준 기재(ACH 확인)	dropdown	
		국소배기	국소배기장치 보유 여부 및 설계, 가동에 대한 효율 확인	dropdown	
		보호장비 - 호흡기	해당 작업 시 착용하는 호흡용 보호구 및 보호계수(APF) 확인	dropdown	
		보호장비 - 피부	해당 작업 시 착용하는 피부 보호구 확인(사용여부, 효율, 재질)	dropdown	
		보호장비 - 기타	해당 작업 시 착용하는 기타 보호구 확인(고글, 안면보호구, 보호복 사용여부)	dropdown	
		오염원과의 거리	노출원과의 거리(1m 기준)	dropdown	
기타 특이사항	사용조건에 있어 특이사항, 상세내용 기술 (세척조 개방면적, 자동화 여부, 닦아내는 작업의 경우 시간당 처리 표면적 등)	free text			

연번	항목	구분	설명	데이터양식	조사내용
4	추가 위험관리	환기 및 보호구 외 기타 위험저감 요소 (발생원 격리, 등 노출저감조치)	별도 작업위치, 밀폐, 발생원 격리 여부, 외부 장소리면 거리	free text	
		세척사유 및 필요성	공정 단계에서의 세척사유 및 필요성 확인	free text	
		세척비용	세척단가	free text	
		세척수준 요구사항	탄화수소계는 KBV, 기타	free text	
5	대체 고려	대체 필요성 및 의사	현재 세척작업에서 대체가 필요하다고 생각하느니 여부 및 그 이유 대체 의사가 있는데 대체하지 못하는 이유 대체시 고려사항 우선순위(세척력, 경제성(비용/시간), 규제, 주문자 요구, 유해 위험성, 대표자/노조 요구, 전문성 등)	free text	
		기타 특이사항	공급망 고려	free text	

## 4. 할로겐화 유기용제 세척작업 사업장 대상 시범 조사 및 분석

### 1) 국내 할로겐화 유기용제 세척작업의 특성

기본적인 세척작업의 원리와 특성을 바탕으로 현재 국내 안전보건관점에서 가장 위험이 우려되는 것은 할로겐화 유기용제 사용 세척작업이다. 이나루(2022) 등에 의하면 공단에 제출(2021.1.16.~2022.4.30.)된 MSDS DB상 용도(세정 및 세척제, 비금속/금속 표면 처리제 등)를 바탕으로 확인한 세척제 주요 성분 11종은 1,2-디클로로프로판(78-87-5), 1,2-디클로로에틸렌(트랜스)(156-60-5), 1-브로모프로판(106-94-5), 디클로로메탄(75-09-2), 트리클로로에틸렌(79-01-6), 트리클로로메탄(67-66-3), 1,1,2-트리클로로에탄(79-00-5), 다이메틸 카르보네이트(616-38-6), 브롬화메틸렌(=디브로모메탄)(127-18-4), 1,1,1-트리클로로에탄(=메틸클로로포름)(71-55-6), 테트라클로로에틸렌(=퍼클로로에틸렌)(127-18-4)이었다. 이 중에서 DMC와 DBM은 작업환경측정대상 유해인자가 아니기 때문에 이를 제외한 9종의 할로겐화 유기용제 성분에 대한 작업환경측정DB를 분석하였다.

먼저 대상 할로겐화 용제에 대한 연도별 작업환경측정 현황(2019~2022)은 다음과 같다. 일차적으로 사업장수가 아닌 측정건수를 먼저 확인한 이유는 작업인구를 포함한 노출 규모를 간접적으로 파악하기 위함이었다.

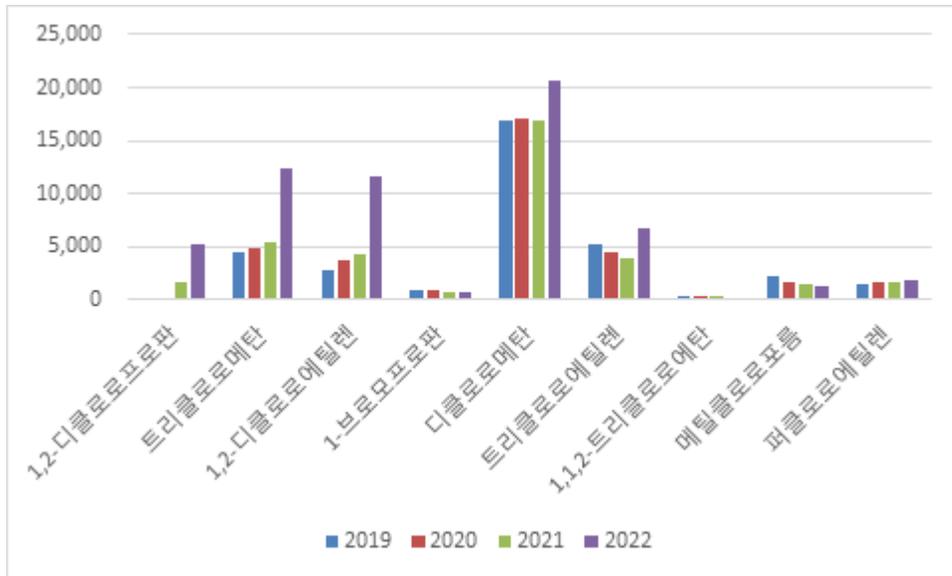
〈표 Ⅲ-13〉 할로겐화 용제(9종)에 대한 연도별 작업환경측정건수

(단위: 건)

연번	화학물질명	2019	2020	2021	2022
1	1,2-디클로로프로판 (1,2-DCP)	81 (0.2%)	167 (0.5%)	1,637 (4.5%)	5,305 (8.8%)
2	트리클로로메탄 (TCM)	4,461 (12.9%)	4,774 (13.8%)	5,317 (14.7%)	12,294 (20.3%)
3	1,2-디클로로에틸렌 (1,2-DCE)	2,809 (8.1%)	3,675 (10.7%)	4,367 (12.1%)	11,545 (19.1%)
4	1-브로모프로판 (1-BP)	908 (2.6%)	797 (2.3%)	788 (2.2%)	763 (1.3%)
5	디클로로메탄 (DCM)	16,947 (49.1%)	17,074 (49.5%)	16,937 (46.8%)	20,673 (34.2%)
6	트리클로로에틸렌 (TCE)	5,309 (15.4%)	4,473 (13.0%)	3,941 (10.9%)	6,785 (11.2%)
7	1,1,2-트리클로로에탄 (1,1,2-TCE)	252 (0.7%)	249 (0.7%)	234 (0.6%)	190 (0.3%)
8	메틸클로로포름 (1,1,1-TCE)	2,192 (6.4%)	1,611 (4.7%)	1,384 (3.8%)	1,190 (2.0%)
9	퍼클로로에틸렌 (PCE)	1,537 (4.5%)	1,685 (4.9%)	1,623 (4.5%)	1,763 (2.9%)
계		34,496 (100.0%)	34,505 (100.0%)	36,228 (100.0%)	60,508 (100.0%)

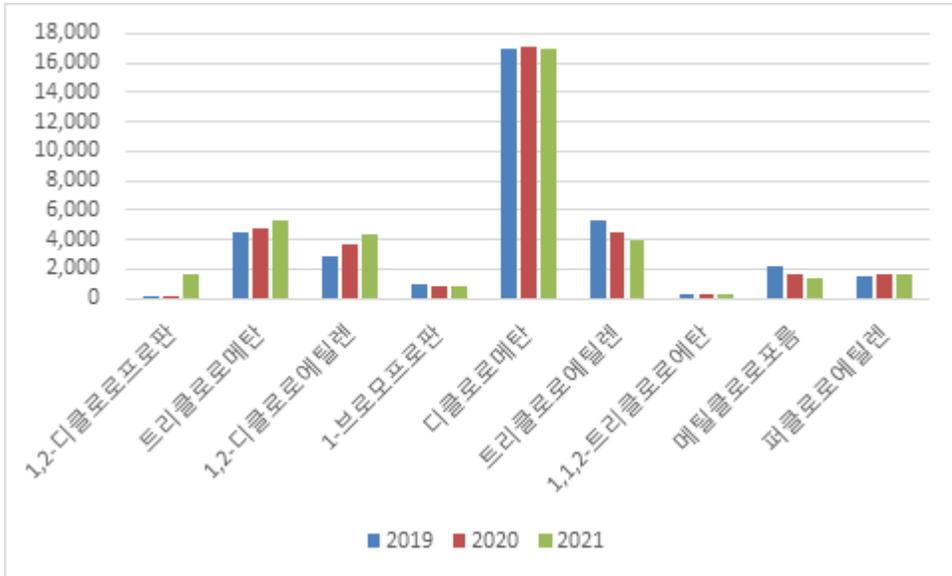
연도와 관계없이 디클로로메탄에 대한 측정건수가 가장 많았고, 그 다음 빈도수는 연도에 따라 차이가 있으나, 트리클로로에틸렌, 트리클로로메탄, 1,2-디클로로에틸렌이 그 다음으로 많이 측정된 물질이었다. 그러나 특이한 사항은 2022년에 5가지 물질(1,2-DCP, TCM, 1,2-DCE, DCM, TCE)의 측정건수가 전년 대비 최소 2,800여건에서 7,100여건까지 증가함을 확인할 수 있었다. 확인 결과 이는 고용노동부에서 세척공정 중독사고 사례를 전파하며 세척공정 보유 사업장을 대상으로 MSDS에 표시되어 있지 않더라도 이 5종의 염소계 탄화수소에

대한 측정을 하도록 지침을 시달하였기 때문이었다. 이에 따라 2019년~2021년 평균적인 할로젠화 용제(9종)의 측정건수는 대략 35,000여건 내외였다.



[그림 III-3] 할로젠화 용제에 대한 연도별 작업환경측정건수(2019~2022)

따라서 2022년의 DB는 현상을 반영하지 못하는 왜곡이 있어 2022년 자료를 제외하고 확인한 결과는 다음과 같다. 물질별로 유지, 증가, 감소 추세를 보이는 경우가 있었는데 1,2-DCP의 경우는 새롭게 규제가 도입되어 2021년도부터 본격적으로 측정을 시행하였기 때문이고, TCM과 1,2-DCE는 증가하고, 이에 반해 TCE, 1,1,1-TCE는 감소하는 경향을 보였다.



[그림 III-4] 할로겐화 용제에 대한 연도별 작업환경측정건수(2019~2021)

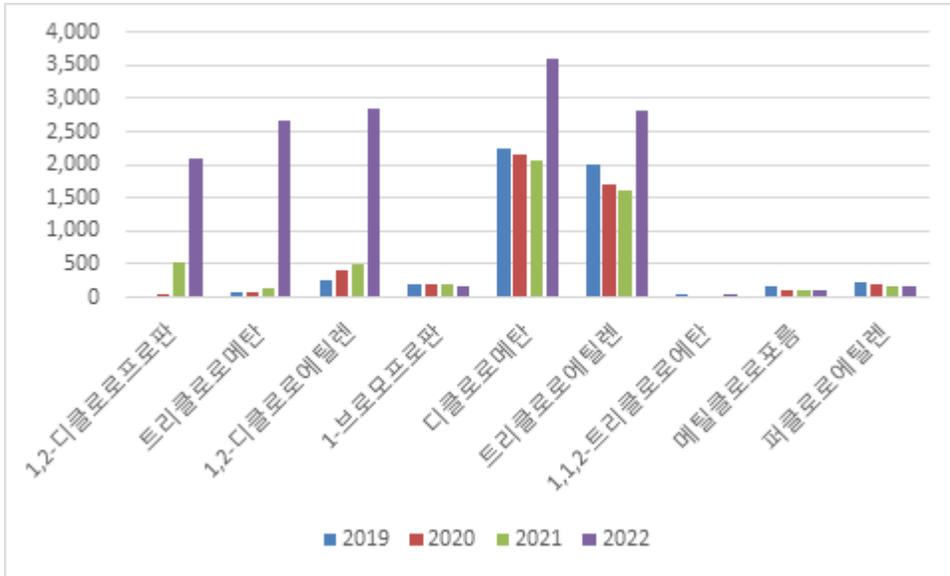
이는 전체적인 측정에 대한 자료로서 세척작업에 해당하는 분포를 확인하기 위하여 일부 키워드(단어)를 추출하여 세부적으로 분석하였다. 이때 키워드는 작업환경측정DB에서 공정명, 부서명, 단위작업장소 중 “세척”, “탈지”, “초음파”, “연삭”, “CNC”, “MCT”, “절삭”, “세정”, “담금”, “표면처리”, “제거”, “박리”라는 단어를 추출하였다. 세척작업의 경우 앞서도 언급했지만, 별도의 공정이 아니고 전·후 공정에 포함하여 기술하는 경우들도 있어 일부 기계가공을 포함하였으나, 모든 세척의 유형을 포함하지 못한다는 제한점을 가지고 있다. 이는 현재 작업환경측정DB화에서의 제한점이기도 하다.

물질과 작업을 각각 할로겐화 유기용제(9종), 세척 관련 키워드로 추출한 연도별 작업환경측정 결과는 각각 다음과 같다.

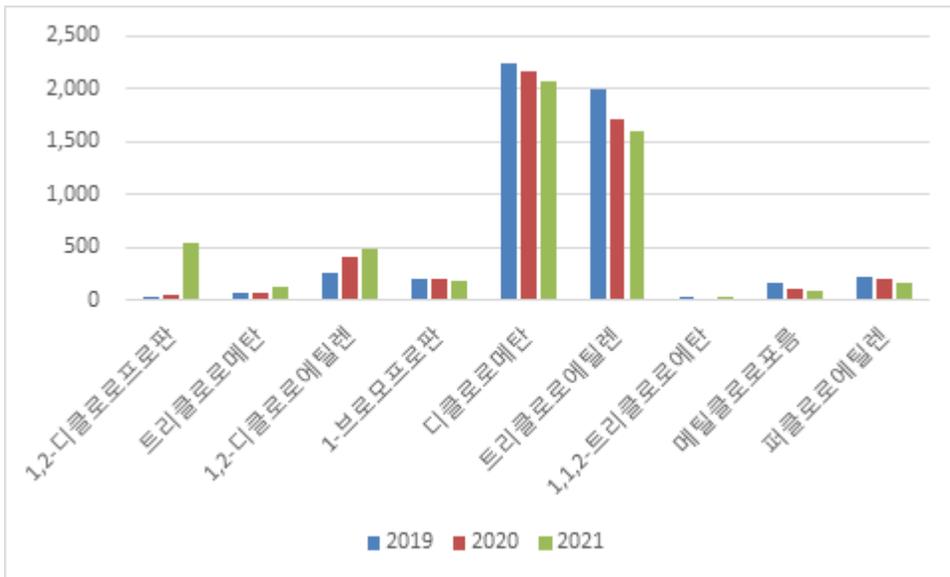
〈표 Ⅲ-14〉 할로겐화 용제(9종) 세척작업에 대한 연도별 작업환경측정건수

(단위: 건)

연번	화학물질명	2019	2020	2021	2022
1	1,2-디클로로프로판 (1,2-DCP)	30 (0.6%)	57 (1.1%)	541 (10.2%)	2,104 (14.5%)
2	트리클로로메탄 (TCM)	67 (1.3%)	73 (1.5%)	129 (2.4%)	2,676 (18.4%)
3	1,2-디클로로에틸렌 (1,2-DCE)	272 (5.2%)	418 (8.4%)	491 (9.2%)	2,844 (19.6%)
4	1-브로모프로판 (1-BP)	208 (4.0%)	202 (4.1%)	187 (3.5%)	167 (1.2%)
5	디클로로메탄 (DCM)	2,246 (42.9%)	2,157 (43.5%)	2,067 (38.9%)	3,598 (24.8%)
6	트리클로로에틸렌 (TCE)	1,991 (38.0%)	1,708 (34.4%)	1,605 (30.2%)	2,808 (19.3%)
7	1,1,2-트리클로로에탄 (1,1,2-TCE)	36 (0.7%)	27 (0.5%)	30 (0.6%)	40 (0.3%)
8	메틸클로로포름 (1,1,1-TCE)	161 (3.1%)	119 (2.4%)	100 (1.9%)	105 (0.7%)
9	퍼클로로에틸렌 (PCE)	225 (4.3%)	203 (4.1%)	163 (3.1%)	174 (1.2%)
계		5,236 (100.0%)	4,964 (100.0%)	5,313 (100.0%)	14,516 (100.0%)



[그림 III-5] 할로겐화 용제 세척작업에 대한 연도별 작업환경측정건수(2019~2022)



[그림 III-6] 할로겐화 용제 세척작업에 대한 연도별 작업환경측정건수(2019~2021)

물질 중심의 일반 작업환경측정DB와 마찬가지로 연도와 관계없이 DCM에 대한 측정건수가 가장 많았다. 그러나 그 다음이 일반 측정건수와 달리 TCE, 1,2-DCE 순이었으며 1,2-DCP는 2021년부터 본격적인 측정이 시행되었으나 세척작업에 상당히 많이 사용됨을 확인할 수 있었다. 국내·외 규제상황을 고려하였을 때 여전히 세척작업에서 TCE가 많이 쓰이는 것은 상당히 놀라운 부분이다.

위에서와 마찬가지로 2021년 대비 2022년에 5가지 물질(1,2-DCP, TCM, 1,2-DCE, DCM, TCE)의 세척작업 측정건수는 최소 1,200여건에서 2,500여건까지 증가함을 확인하였다. 아마도 세척작업 사업장이 최소 2,500여개소 이상임을 추정할 수 있다. 이상 사유로 측정건수가 증가한 2022년과 2021년부터 본격 측정한 1,2-DCP를 제외하고 확인한 결과, TCM과 1,2-DCE는 세척작업에서도 증가 경향을 보이며 이에 반해 DCM과 TCE는 감소 경향을 보였다. 전반적으로 2019년~2021년 할로젠화 용제(9종) 세척작업에 대한 측정건수는 대략 5,000여건 내외로 추정되었다.

아울러 각 물질별로 전체 공정 대비 세척작업의 측정건수 비율은 다음과 같다. 1,2-DCP와 TCE가 전체 측정건수 대비 세척작업이 차지하는 비율이 상당히 높은 편이었다. 그리고 전체적으로는 비교적 적은 사용에 비해 세척 용도로의 사용이 높은 물질은 1-BP이었다. 그리고 2021년 들어 TCM의 세척제 용도 비율이 소폭 상승했음을 확인할 수 있었다.

〈표 Ⅲ-15〉 할로겐화 용제 대상 전체 공정 대비 세척작업에 대한 작업환경측정비율

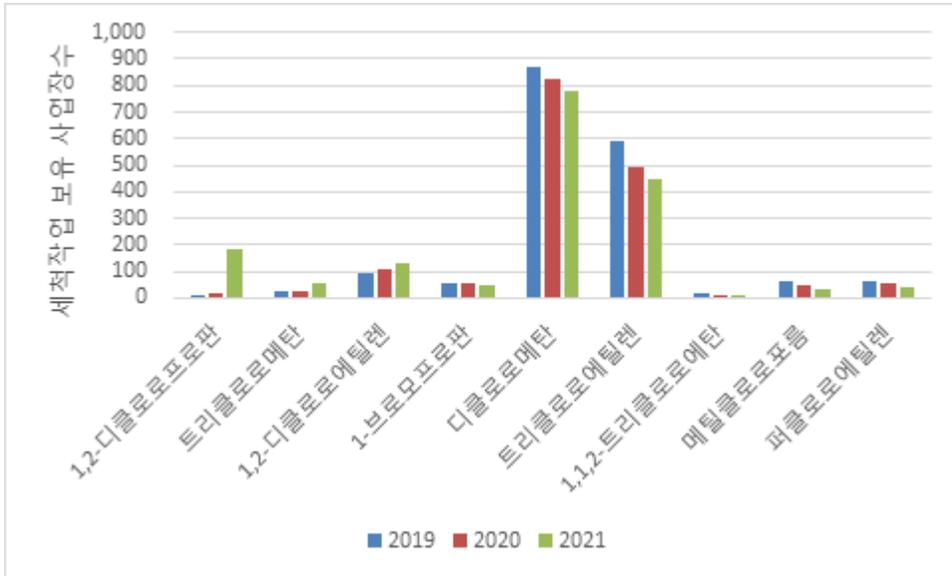
연번	화학물질명	2019	2020	2021	2022
1	1,2-디클로로프로판 (1,2-DCP)	37.0%	34.1%	33.0%	39.7%
2	트리클로로메탄 (TCM)	1.5%	1.5%	2.4%	21.8%
3	1,2-디클로로에틸렌 (1,2-DCE)	9.7%	11.4%	11.2%	24.6%
4	1-브로모프로판 (1-BP)	22.9%	25.3%	23.7%	21.9%
5	디클로로메탄 (DCM)	13.3%	12.6%	12.2%	17.4%
6	트리클로로에틸렌 (TCE)	37.5%	38.2%	40.7%	41.4%
7	1,1,2-트리클로로에탄 (1,1,2-TCE)	14.3%	10.8%	12.8%	21.1%
8	메틸클로로포름 (1,1,1-TCE)	7.3%	7.4%	7.2%	8.8%
9	퍼클로로에틸렌 (PCE)	14.6%	12.0%	10.0%	9.9%
계		15.2%	14.4%	14.7%	24.0%

이를 사업장 중심으로 분석한 결과, 2019년부터 2022년까지 할로겐화 용제(9종)을 세척작업에 사용한 것으로 추정되는 사업장은 2,806개소였다. 해당 사업장에서 대상 물질을 측정할 적이 있는 경우를 확인한 결과는 다음과 같다.

〈표 III-16〉 세척작업 보유 사업장의 할로겐화 용제 측정 여부

(단위: 개소)

연번	화학물질명	2019	2020	2021	2022
1	1,2-디클로로프로판 (1,2-DCP)	14	20	185	899
2	트리클로로메탄 (TCM)	24	27	55	1,248
3	1,2-디클로로에틸렌 (1,2-DCE)	96	108	132	1,285
4	1-브로모프로판 (1-BP)	59	57	47	41
5	디클로로메탄 (DCM)	867	825	779	1,582
6	트리클로로에틸렌 (TCE)	594	493	445	1,029
7	1,1,2-트리클로로에탄 (1,1,2-TCE)	15	12	13	13
8	메틸클로로포름 (1,1,1-TCE)	61	46	33	32
9	퍼클로로에틸렌 (PCE)	64	53	43	45

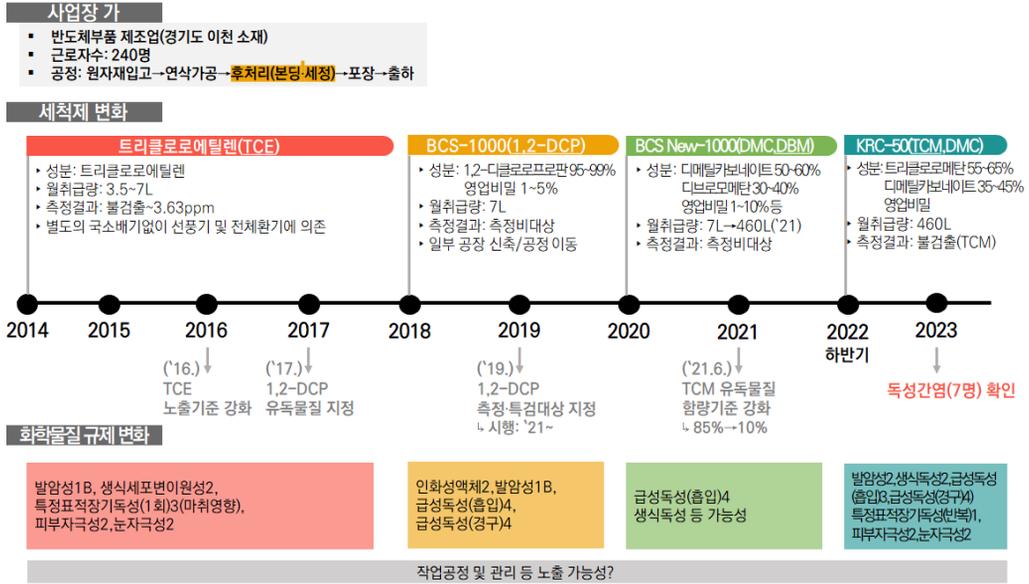


[그림 III-7] 세척작업 보유 사업장의 할로겐화 용제 측정 여부(2019~2021)

전체 2,806개소의 세척작업 보유(추정) 사업장에서 연도별로 할로겐화 용제를 측정된 경우를 분석한 결과, 빈도로는 압도적으로 많기는 하지만 DCM과 TCE의 경우 점차 감소함을 확인 수 있었다. 1,1,1-TCE나 PCE는 빈도수는 적지만 감소하고 있었고, 이에 반해 1,2-DCP, TCM, 1,2-DCE는 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 정도의 차이가 있지만, 전체적인 측정건수 분석에서의 패턴과 크게 다르지 않았다.

위에서도 언급했지만 작년 초 세척공정 급성중독 사고 이후 여러 가지 대책을 수립하여 시행한 바가 있으며 지정 물질(5종)에 대한 임시 작업환경측정 권고 또한 그중 하나였다. 그럼에도 불구하고 금년 초에도 사업장(가)에서 화학물질에 의한 독성간염이 발생했다. 이에 따라 해당 사업장의 공정 개요와 연도에 따른 세척제의 변화 이력과 동시에 규제 변화를 확인한 결과는 다음과 같다.

세척작업의 안전한 관리를 위한 결정요인 분석 및 구조화



[그림 III-8] 사업장 가의 세척제 변화와 화학물질 규제 변화 양상

사업장 가는 과거부터 전통적인 세척제인 TCE를 사용해왔다. 이후 1,2-DCP로 변경하였다가 DBM과 DMC를 주성분으로 하는 세척제로 다시 변경, 사고 직전에는 TCM이 주성분인 세척제를 사용하고 있었다. 이는 화학물질 규제 변화의 시점을 같이 비교한 결과를 보면 세척제 변경은 규제 변화와 어느 정도 관련이 있는 것으로 판단된다. 아울러 해당 사업장의 작업환경측정 결과를 보면 사용하는 세척제에 대하여 측정 비대상 물질을 선정하거나 측정 결과도 거의 불검출임을 확인할 수 있었다. 즉, 이러한 경우는 작업환경측정이 노출수준을 확인하는 수단으로 건강장해 예방을 위해 효과적으로 작동하기 어려운 구조로 판단된다.

추가로 실제 세척작업이 확인된 사업장을 일부 추출하여 연도별 세척제 변화를 살펴보았다. 정수진 등(2021)의 논문에서 확인된 2019년 DCM을 사용하는 사업장들의 작업환경측정DB를 기준으로 총 20개의 사업장을 선정하였다.

2019년을 기준으로 선정한 이유는 이때부터 일부 할로젠화 용제에 대한 국내 규제 변화가 있었기 때문이다. 국내 화학물질관련 규제 변화를 살펴보면 다음과

같다. 2016년 TCE의 노출기준이 강화(50ppm→10ppm)되고, 2017년에는 1,2-DCP가 화관법상 유독물질로 지정되었다. 2019년에는 1,2-DCP이 작업환경측정대상물질, 특수건강진단대상물질, 특별관리물질로 지정되었으며, 1,2-DCE이 특별관리물질로 지정, 2019년 7월부터 DCM이 유독물질로 지정되었다. 2020년에는 1-BP이 유독물질로 지정되었고, N,N-DMF의 유독물질 함량기준이 강화(0.3%→0.1%)되었다. 2021년에는 TCM의 유독물질 함량기준이 강화(85%→10%)되고, TCE의 유독물질 함량기준이 강화(85%→0.1%)되었다.

〈표 Ⅲ-17〉 할로겐화 용제의 법적 규제 현황

연번	화학물질명	산업안전보건법	화학물질관리법
1	1,2-디클로로프로판 (78-87-5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 작업환경측정, 특수건강진단 대상</li> <li>• 관리대상유해물질, 특별관리물질</li> <li>• 허용기준, 노출기준 설정물질</li> <li>• PSM 제출 대상물질</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유독물질 (고유번호: 2017-1-763)</li> <li>* 혼합물 함량기준: 25%</li> </ul>
2	트리클로로메탄 (67-66-3)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 작업환경측정, 특수건강진단 대상</li> <li>• 관리대상유해물질</li> <li>• 허용기준, 노출기준 설정물질</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유독물질 (고유번호: 97-1-281)</li> <li>* 혼합물 함량기준: 85%(‘97.9.) →10%(‘21.6.)</li> </ul>
3	1,2-디클로로에틸렌 (540-59-0)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 작업환경측정, 특수건강진단 대상</li> <li>• 관리대상유해물질</li> <li>• 노출기준설정물질</li> <li>• PSM 제출 대상물질</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 해당없음</li> </ul>
4	1-브로모프로판 (106-94-5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 작업환경측정, 특수건강진단 대상</li> <li>• 관리대상유해물질, 특별관리물질</li> <li>• 노출기준설정물질</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유독물질 (고유번호: 2020-1-997)</li> <li>* 혼합물 함량기준: 0.3%</li> </ul>

연번	화학물질명	산업안전보건법	화학물질관리법
5	디클로로메탄 (75-09-2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 작업환경측정, 특수건강진단 대상</li> <li>• 관리대상유해물질</li> <li>• 허용기준, 노출기준 설정물질</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유독물질 (고유번호: 2019-1-931)</li> <li>* 혼합물 함량기준: 0.1%</li> </ul>
6	트리클로로에틸렌 (79-01-6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 작업환경측정, 특수건강진단 대상</li> <li>• 관리대상유해물질, 특별관리물질</li> <li>• 허용기준, 노출기준 설정물질</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유독물질 (고유번호: 97-1-309)</li> <li>* 혼합물 함량기준: 0.1%</li> <li>• 제한물질 (고유번호: 06-5-11)</li> <li>* 혼합물 함량기준: 0.1%</li> <li>* 가정용 세정제 및 에어로졸 용도 금지</li> </ul>
7	1,1,2-트리클로로에탄 (1,1,2-TCE)	1,1,2-트리클로로에탄 (79-00-5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 작업환경측정, 특수건강진단 대상</li> <li>• 관리대상유해물질</li> <li>• 노출기준설정물질</li> </ul>
8	메틸클로로포름 (1,1,1-TCE)	메틸클로로포름 (71-55-6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 작업환경측정, 특수건강진단 대상</li> <li>• 관리대상유해물질</li> <li>• 노출기준설정물질</li> </ul>
9	퍼클로로에틸렌 (PCE)	퍼클로로에틸렌 (127-18-4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 작업환경측정, 특수건강진단 대상</li> <li>• 관리대상유해물질, 특별관리물질</li> <li>• 노출기준설정물질</li> </ul>

대상 선정 시 작업 내용 중 PROC 13(담금 및 주입 방식으로 제품 처리), PROC 19(손이 접촉되는 수작업)에 해당하는 세척작업을 포함하는지 여부와 사업장 규모, 월 취급량 등을 고려하였다. 그리고 선정된 사업장들의 2014년부터 2022년까지 작업환경측정DB를 통해 제품명, 구성성분 등 자료를 확인하였다.

분석 결과 2014년부터 2022년까지 기간 동안 세척제를 변경한 사업장은 20개 사업장 중 9개(45%)로 나타났다. 규제에 따라 주요 성분을 변경한 사업장은

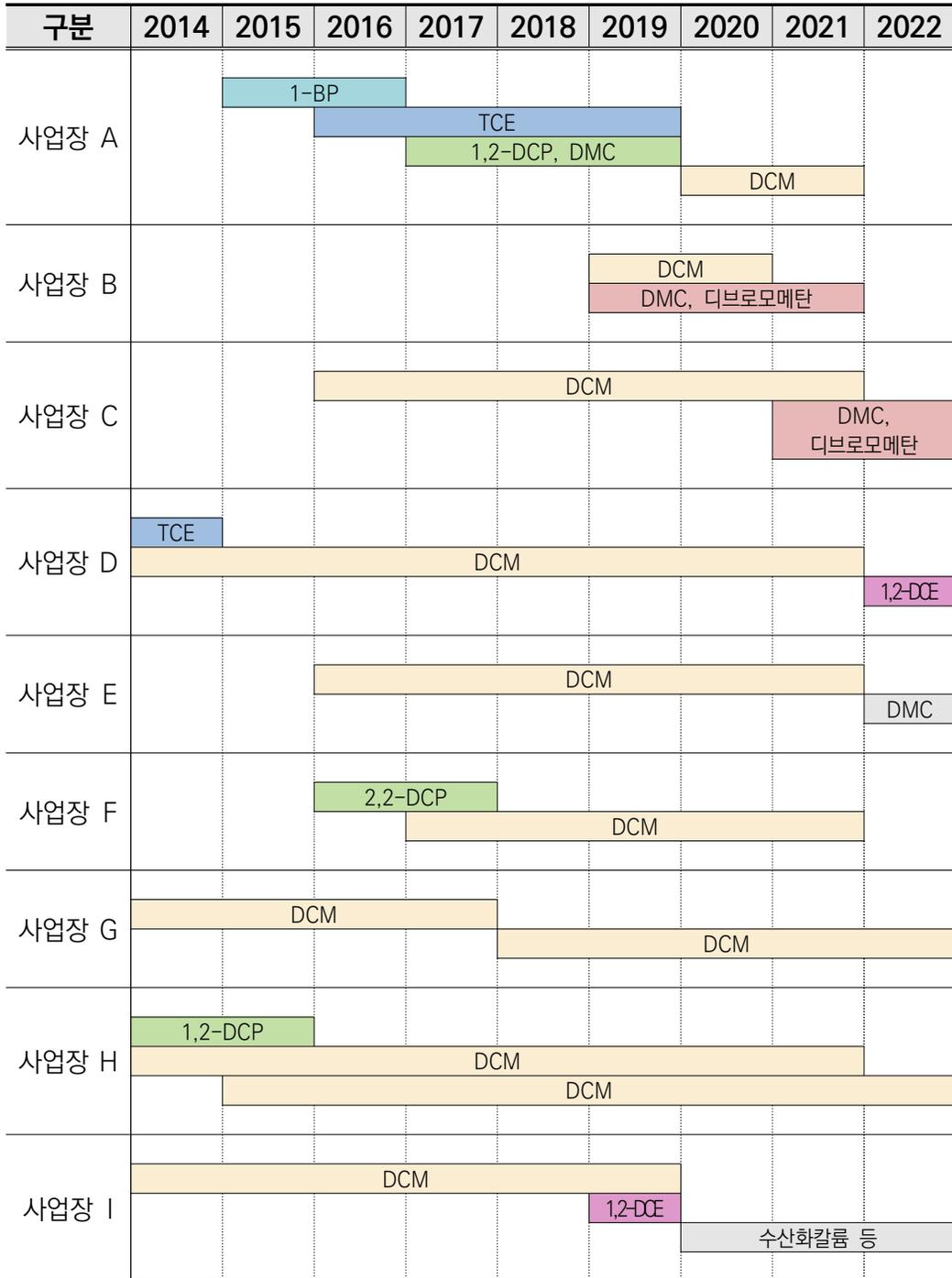
8개(40%)였고, 제품 변경을 하였으나 주요 성분이 DCM으로 동일한 사업장은 1개(5%)로 확인되었다. 그 외 사업장은 모두 2014년부터 2022년까지 기간 동안 동일한 제품을 사용하였다.

세척제를 가장 많이 변경한 사업장에서 확인한 세척제 성분 흐름은 1-브로모프로판(1-BP)→트리클로로에틸렌(TCE)→1,2-디클로로프로판(1,2-DCP)→디클로로메탄(DCM) 순서였다. 대부분 사업장에서 2019년 유독물질로 지정된 디클로로메탄(DCM)을 2021년까지 사용하다가 다른 성분의 세척제로 변경했는데, 이는 법령에 따라 유독물질 사용허가를 받을 수 있는 유예기간이 2021년 10월까지였기 때문으로 판단된다. 디클로로메탄(DCM)의 대체 물질로 디브로모메탄(DBM), 디메틸카르보네이트(DMC), 1,2-디클로로에틸렌(1,2-DCE) 등의 성분이 포함된 세척제로 변경한 사실을 확인할 수 있었다.

**〈표 III-18〉 세척작업을 포함한 사업장 정보 및 세척제 성분 변화 흐름**

구분	특징
사업장 A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 규모(근로자수) : 386명</li> <li>• 업종 : 그 외 기타 전자 부품 제조업</li> <li>• 작업공정 : PROC19 (선반가공, 펀도금)</li> <li>• 세척제 성분 변화 : 1-브로모프로판(1-BP)→트리클로로에틸렌(TCE)→1,2-디클로로프로판(1,2-DCP)→디클로로메탄(DCM)</li> </ul>
사업장 B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 규모(근로자수) : 40명</li> <li>• 업종 : 그 외 기타 전자 부품 제조업</li> <li>• 작업공정 : PROC19 (기타조립-DRYCON라인, 초음파세척-공조기라인, DRYCON라인)</li> <li>• 세척제 성분 변화 : 디클로로메탄(DCM)→다이메틸카르보네이트(DMC), 디브로모메탄(DBM)</li> </ul>
사업장 C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 규모(근로자수) : 59명</li> <li>• 업종 : 기타 플라스틱 발포 성형제품 제조업</li> <li>• 작업공정 : PROC19 (사상라인, HM라인, 분리형사상라인, 보존반)</li> <li>• 세척제 성분 변화 : 디클로로메탄(DCM)→다이메틸카르보네이트(DMC), 디브로모메탄(DBM)</li> </ul>

구분	특징
사업장 D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 규모(근로자수) : 151명</li> <li>• 업종 : 의료용품 및 기타 의약 관련제품 제조업</li> <li>• 작업공정 : PROC19 (연마실(테이프,세척), 세운귀실(테이프))</li> <li>• 세척제 성분 변화 : 트리클로로에틸렌(TCE)→디클로로메탄(DCM)→1,2-디클로로에틸렌(1,2-DCE)</li> </ul>
사업장 E	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 규모(근로자수) : 120명</li> <li>• 업종 : 그 외 기타 전자 부품 제조업</li> <li>• 작업공정 : PROC13 (함침/세척/분체코팅)</li> <li>• 세척제 성분 변화 : 디클로로메탄(DCM)→다이메틸카르보네이트(DMC)</li> </ul>
사업장 F	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 규모(근로자수) : 63명</li> <li>• 업종 : 그 외 자동차용 신품 부품 제조업</li> <li>• 작업공정 : PROC13 (세척)</li> <li>• 세척제 성분 변화 : 2,2-디클로로프로판(2,2-DCP)→디클로로메탄(DCM)</li> </ul>
사업장 G	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 규모(근로자수) : 246명</li> <li>• 업종 : 자동차 차체용 신품 부품 제조업</li> <li>• 작업공정 : PROC13 (세척(디핑작업))</li> <li>• 세척제 성분 변화 : 디클로로메탄(DCM)→디클로로메탄(DCM)</li> </ul>
사업장 H	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 규모(근로자수) : 63명</li> <li>• 업종 : 기타 반도체 소자 제조업</li> <li>• 작업공정 : PROC13 (방청/세척, 검사작업)</li> <li>• 세척제 성분 변화 : 1,2-디클로로프로판(1,2-DCP)→디클로로메탄(DCM)→디클로로메탄(DCM)</li> </ul>
사업장 I	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 규모(근로자수) : 43명</li> <li>• 업종 : 기타 자동차 신품 부품 및 내장품 판매업</li> <li>• 작업공정 : PROC13 (탈지, 건조/ 오토공정)</li> <li>• 세척제 성분 변화 : 디클로로메탄(DCM)→1,2-디클로로에틸렌(1,2-DCE)→수산화칼륨, 알루미늄 및 그 화합물 등</li> </ul>



[그림 Ⅲ-9] 일부 사업장의 세척제 주요성분 변화 흐름

## 2) 국내 할로겐화 유기용제 세척작업 사업장 시범 조사 및 분석

국내 할로겐화 유기용제 세척작업의 전체적인 현황 분석을 바탕으로 시범 조사를 실시하였다. 시범 조사는 ‘투 트랙’으로 진행하였다. 한 가지 방식은 기술 보고서를 활용한 정보 추출이며, 다른 한 가지 방식은 현장 관찰 조사를 통한 정보 수집이다.



[그림 Ⅲ-10] 국내 할로겐화 유기용제 세척작업 사업장 시범 조사 방법

첫째, 기술 보고서는 2020년부터 2022년까지 공단에서 수행한 「작업환경측정 신뢰성평가」 사업 결과 보고서를 활용하였다. 할로겐화 유기용제를 대상으로 해당 사업을 실시한 결과 중 다음 169건을 대상으로 선정하였다.

〈표 Ⅲ-19〉 국내 할로겐화 유기용제 세척작업 사업장 시범 조사 대상(track1)

(단위: 개소)

구분	대상 <sup>1)</sup>	선정 <sup>2)</sup>	DCM	1,2-DCP	TCM	TCE	1-BP	PCE
2020	41	36	2	-	-	34	-	-
2021	50	30	6	1	3	20	-	-
2022	144	103	62	10	7	22	1	1
계	235	169	70	11	10	76	1	1

1) 작업환경측정 신뢰성평가 사업 대상 중 결과 확인 가능한 사업장

2) 비교 가능한 측정 결과 및 세척작업 보유 사업장

\* DCM(디클로로메탄), 1,2-DCP(1,2-디클로로프로판), TCM(트리클로로메탄), TCE(트리클로로에틸렌), 1-BP(1-브로모프로판), PCE(퍼클로로에틸렌)

해당 결과 보고서에서 수집한 작업환경정보를 항목별로 1차 정리하였다. 항목은 사업장 일반 현황(사업장명, 근로자수 등), 평가대상 유해인자명, 측정 결과, 공정명/작업/단위작업장소, 작업내용, 환기방식, 유해인자 발생주기, 해당 작업 근로자수, 1일 작업시간, 작업시간 관련 추가정보, 화학물질명/제품명, 제조 또는 사용 여부, 사용 용도, 평가대상 물질 함유량(%), 월 취급량, 개인 보호구 착용 상태, 특이사항으로 구성하였다. 1차 정리한 결과 중 항목에 따라 범주화하여 2차 변환하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

〈표 Ⅲ-20〉 국내 할로겐화 유기용제 세척작업 사업장 시범 조사 결과 개요(track1)

항목	주요 결과 및 의의	연계
사업장 일반 현황	• (50인 미만) 128개소, (50인~299인) 37개소, (300인 이상) 4개소	업종, 규모, 지역
평가대상 유해인자	• (디클로로메탄) 70개소, (1,2-디클로로프로판) 11개소, (트리클로로메탄) 10개소, (1-브로모프로판) 1개소, (퍼클로로에틸렌) 1개소, (트리클로로에틸렌) 76개소 * 주요 유해인자 결정 필요	제품명(화학물질명), 제품 내 주요 성분 함유량(%)

항목	주요 결과 및 의의	연계
측정 결과	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (&lt;0.5) 121개소, (0.5-1.0) 20개소, (&gt;1.0) 28개소</li> </ul>	RCR
공정/작업	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세척, 탈지, 발포, 검사, 포장, 박리, 도장, 코팅, 건조, 수세, 중신, 수화, 배합, 납땜, 주입, 마킹, 혼합, 절단, 초음파, 반응, 쇼트, 마스크, 파일럿, 프레스, 사상, 샌딩, 방청, 자동세척, CNC, MCT, 밀링, 선반, 가공, 생산, 피막, 몰딩, 조립, 열처리, 함침, 표면세척, 접착, 도금, 전처리 등</li> </ul>	표준화X
작업내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 생산과정 전·중·후 세척</li> <li>• 생산대상 제품 세척(162개소), 혹은 설비(장비)를 세척하는 경우(7개소)</li> <li>• 설비(자동화/인력), 완전 수작업</li> <li>• 침지(담금), 가열 여부, 초음파 적용(54건)</li> <li>• 별도의 건조</li> </ul>	세척설비 및 유형
환기방식	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전체환기, 국소배기 설치 및 형태, 효율 확인</li> </ul>	작업장 환기수준, 국소배기, 발생원 격리 등 기타 노출 저감조치
유해인자 발생주기	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 연속적/불규칙</li> <li>* 노출 지속 형태이나, 일관성이 없음</li> </ul>	사용조건 내 물리적 상태, 작업시간 및 속도
해당 작업 근로자수	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5인 이하가 대부분(152개소)이었으며, 최대 28명</li> </ul>	사용조건 내 작업자수
1일 작업시간	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대부분 8시간 기재를 하였으나, 실제 근무 시간과 해당 작업 시간이 다른 경우가 상당함</li> </ul>	
작업시간 관련 추가정보	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 실제 노출 시간과 관련된 기타 서술 자료에서 추출</li> <li>* 세척의 경우, 해당 공정/작업만 독립적으로 수행하는 경우가 적음. 작업 물량에 따라 별도의 공정보다는 다른 작업을 병행하는 경우가 많음. 즉 고정적이지 않은 작업방식으로 인하여 유동성이 큼. 평가 방식 고민 필요</li> </ul>	사용조건 내 작업시간
화학물질명/제품명	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 추후 MSDS 번호와 연결 가능성 확인</li> </ul>	세척제에 포함

항목	주요 결과 및 의의	연계
제조 또는 사용 여부	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (사용) 100%</li> </ul>	
사용 용도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (32. 세정 및 세척제) 158건, (33. 경수 연화제) 1건, (37. 용제 및 추출제) 2건, (8. 코팅, 페인트, 신너, 페인트 제거제) 8건</li> </ul>	MSDS상 용도
평가대상 물질 함유량(%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (&lt;1%) 0개소, (1-5%) 1개소, (5-25%), 9개소, (&gt;25%) 159개소</li> </ul>	세척제에 포함
월 취급량	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 최소 0.1L에서 최대 7,500톤 사용</li> <li>* ECETOC TRA의 경우, 별도의 월 취급량 파악 X</li> </ul>	
개인 보호구 착용 상태	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 개인보호구 착용 상태 다양</li> <li>* 효율이 명확하지 않은 경우가 많음</li> </ul>	사용조건 내 보호장비
특이사항	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세척작업에 있어 특이사항, 상세내용 혹은 노출상황에 있어 고려해야 할 특이사항 (폐수처리 등 오염방지시설, 건조필요, 부식 및 인화 등 위험성 고려, 재생/재사용 여부, 유지보수 및 청소 관련 등)</li> </ul>	

\* RCR > 1인 작업의 경우, 도구를 이용한 수작업, 세척설비(세척조)는 있으나 수동 담금, 자동 세척이나 건조 별도, 지속적인 세척 물량, 환기상태 미흡 등의 요인 확인

세척작업의 안전한 관리를 위한 결정요인 분석 및 구조화

작업환경측정 신뢰성평가 DB

단일수준
사업명
사업년도
담당기관명
사업장명
사업장관리번호
근로자수
예비조사일자
정밀평가일자
유해인자명
신뢰성평가측정농도(TWA)
보고서작성
신뢰성평가노출기준
RCR
공정명
대상 공정/작업
단위작업장소(발생원)
작업내용
환기방식
유해인자 발생 주기
해당작업근로자수
1일 작업시간
작업시간 관련 추가 정보
화확물질명/제품명
제조 또는 사용
사용 용도
평가대상물질 함유량(%)
물 취급량
개인보호구 착용 상태
특이사항
작업사건보유

세척작업의 안전한 관리를 위한 조사양식

수준1	수준2	수준3
일반사항	사업장명 사업장 현황  조사일 사업장 담당자	업종 규모 지역
공정 및 작업특성	세척작업 유형 - 공정 범주(PROC) 세척제  - 세척제 범주 피세척물(대상물) 오염제거대상 세척설비 기타 특이사항	제품명 주요 성분 주요 성분 함량(%)
사용조건	세척제 취급량(제품 내 평가대상인자 함량 반드시 포함) 물리적 상태 작업자 수 작업시간 및 속도 산업안전보건 관리수준 작업장소 작업 온도 작업장 환기수준 국소배기 보호장비 - 호흡기 보호장비 - 피부 보호장비 - 기타 오염원과의 거리 기타 특이사항	
추가 위험관리 대체 고려	환기 및 보호구 외 기타 위험저감 요소(발생원 격리 등 노출저감조치)  세척 사유 및 필요성 세척비용 세척수준 요구사항 대체 필요성 및 의사 기타 특이사항	
노출평가모델실행이후	노출 추정값 RCR	

[그림 III-11] 작업환경측정 신뢰성평가 DB와 세척작업의 안전한 관리를 위한 조사양식 연계

이후, 2차 변환 결과를 <세척작업의 안전성 평가·관리 조사표> 구성에 따라 표준화하여 코딩하는 작업과 이와 연계하여 노출평가 모델을 실행하기 위한 변수들을 각각 추출한다.

둘째, 현장 조사는 2019년부터 2022년까지의 작업환경측정자료에서 추출한 할로젠화 유기용제(9종)를 사용하는 세척작업 보유(추정) 사업장 목록 중에서 Track 1에서 세척작업의 특성이 확인된 사업장을 제외한 후(2,674개소), 시범 조사 대상을 선정(30개소)하였다. 우선적으로 최근(2022년) 세척작업과 관련하여 디클로로메탄(DCM) 혹은 1,2-디클로로프로판(1,2-DCP)를 측정할 이력이 있는 사업장 중 Track 1에서 자료 수집이 가능한 경우를 제외하였으며, 측정 결과가

불검출(ND)인 경우도 제외하였다. 불검출을 제외한 이유는 2022년 별도 지침에 의해 세척공정을 보유한 경우 사용 여부와 무관하게 5종의 염소계 세척제에 대한 측정을 실시하였기 때문이다. 그리고 업종, 근로자수, 지역 분포를 기본적으로 고려한 후, RCR(Risk Characterization Ratio)을 추가로 고려하였다.

〈표 Ⅲ-21〉 국내 할로겐화 유기용제 세척작업 현장 조사 대상 업종 분포

대분류	중분류	사업장수 (개소)
건설업	전문직별 공사업	1
	종합 건설업	1
도매 및 소매업	도매 및 상품 중개업	4
	자동차 및 부품 판매업	2
운수 및 창고업	육상 운송 및 파이프라인 운송업	2
전기, 가스, 증기 및 공기 조절 공급업	전기, 가스, 증기 및 공기 조절 공급업	1
전문, 과학 및 기술 서비스업	기타 전문, 과학 및 기술 서비스업	1
제조업	1차 금속 제조업	16
	가구 제조업	2
	가죽, 가방 및 신발 제조업	2
	고무 및 플라스틱제품 제조업	27
	금속 가공제품 제조업; 기계 및 가구 제외	176
	기타 기계 및 장비 제조업	106
	기타 운송장비 제조업	5
	기타 제품 제조업	12
	목재 및 나무제품 제조업; 가구 제외	7

대분류	중분류	사업장수 (개소)
	비금속 광물제품 제조업	1
	섬유제품 제조업; 의복 제외	1
	의료, 정밀, 광학 기기 및 시계 제조업	22
	의료용 물질 및 의약품 제조업	4
	인쇄 및 기록매체 복제업	1
	자동차 및 트레일러 제조업	69
	전기장비 제조업	42
	전자 부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업	71
	코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업	2
	화학 물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외	17
협회 및 단체, 수리 및 기타 개인 서비스업	개인 및 소비용품 수리업	1
계		596

〈표 Ⅲ-22〉 국내 할로겐화 유기용제 세척작업 현장 조사 대상 근로자수 분포

대분류	중분류	사업장수 (개소)
50인 미만	5인 미만	72
	5인~49인	371
50인 이상 300인 미만	50인~99인	74
	100인~299인	59
300인 이상	300인 이상	20
계		596

〈표 Ⅲ-23〉 국내 할로겐화 유기용제 세척작업 현장 조사 대상 지역 분포

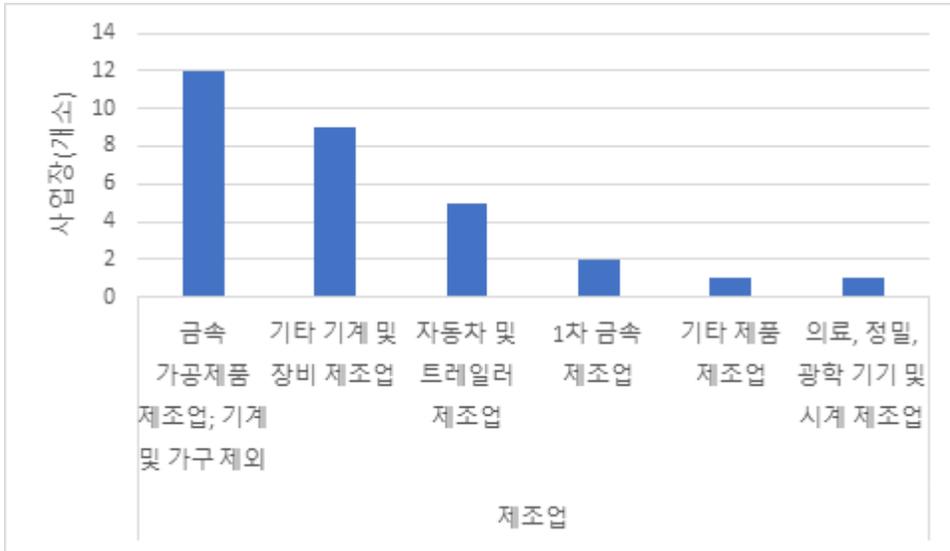
대분류	중분류	사업장수 (개소)
수도권	서울	3
	인천	71
	경기	215
충청권	대전	10
	충북	20
	충남	34
전라권	광주	9
	전북	7
	전남	0
경상권	부산	44
	울산	14
	경남	97
	대구	42
	경북	25
강원권	강원	5
제주권	제주	0
계		596

대상 사업장에 대한 현장 조사는 현장을 방문하여 〈세척작업의 안전한 관리를 위한 조사표(안)〉에 따른 면담(인터뷰)을 실시함과 동시에 세척작업에 대한 평가를 위하여 개인시료측정을 병행하였다. 활용한 〈세척작업의 안전한 관리를 위한 조사표(안)〉는 부록에 첨부하였으며, 개인시료측정 및 분석은 Track 1에서 확보한 정보와의 일관성과 이후 단계의 자료 통합을 위하여 공단의 「작업환경측정 신뢰성평가」 사업에 준하여 실시하였다.

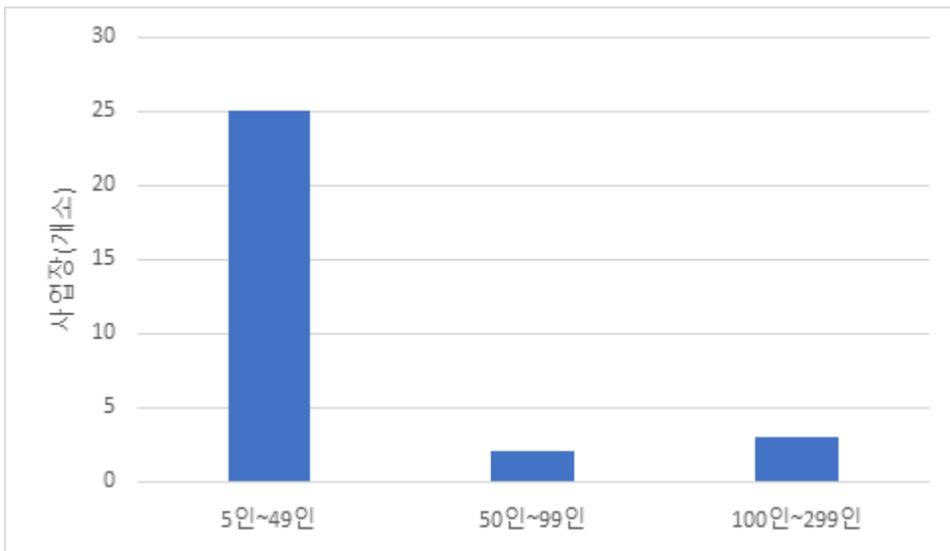
현장 조사(Track 2) 대상 사업장(30개소)에 대하여 수집한 작업환경정보를 항목별로 1차 정리한 결과는 다음과 같다. 현장 조사 대상 사업장은 총 30개소로, 업종별로는 ‘금속 가공제품 제조업; 기계 및 가구 제외’, 근로자수로는 ‘5인~49인’, 지역별로는 수도권(경기)과 경상권이 제일 많이 분포하고 있다.

〈표 III-24〉 현장 조사 대상 사업장 현황

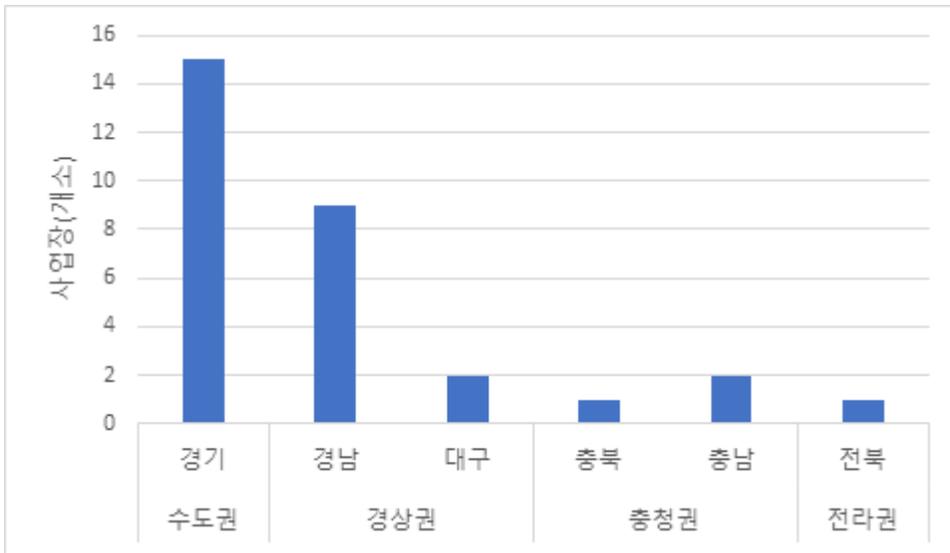
구분	대분류	중분류	사업장수 (개소)
업종	제조업	금속 가공제품 제조업; 기계 및 가구 제외	12
		기타 기계 및 장비 제조업	9
		자동차 및 트레일러 제조업	5
		1차 금속 제조업	2
		기타 제품 제조업	1
		의료, 정밀, 광학 기기 및 시계 제조업	1
		소계	30
근로자수	50인 미만	5인~49인	25
		50인~99인	2
	50인 이상 300인 미만	100인~299인	3
		소계	30
지역	수도권	경기	15
		경상권	9
	충청권	대구	2
		충북	1
		충남	2
	전라권	전북	1
	소계	30	



[그림 III-12] 현장 조사 대상 사업장 현황(업종별)



[그림 III-13] 현장 조사 사업장 현황(근로자수)

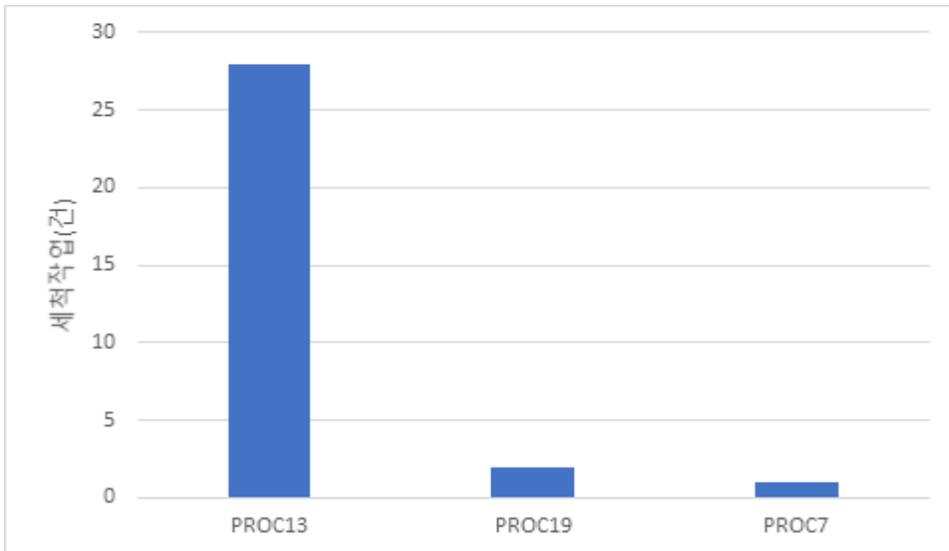


[그림 Ⅲ-14] 현장 조사 사업장 현황(지역)

이와 같은 대상 사업장(30개소)에서 <세척작업의 안전한 관리를 위한 조사표(안)>에 따라 면담(인터뷰)을 실시한 대상은 사업장당 1~2명으로 총 39명이며, 이들은 대표, 관리자, 안전보건업무 담당자, 현장 경력자 등으로 개인시료채취 대상과는 차이가 있었다.

공정 및 작업특성은 공정범주(PROC)을 포함한 세척작업 유형, 세척제 범주, 피세척물, 오염제거대상, 세척설비, 기타 특이사항으로 구분하여 조사하였다.

그 결과 현장 조사 대상 사업장에서의 세척작업 유형을 구분하면 전부 습식(31건)에 해당되며, 이를 공정범주(PROC)로 구분하면 PROC 13(담금 및 주입 방식으로 제품 취급)이 28건으로 제일 많았고, PROC 19(손이 접촉되는 수작업)는 2건, PROC 7(산업 스프레이 작업)은 1건이었다.



[그림 III-15] 현장 조사 대상 세척작업 공정범주(PROC)

대상 세척작업에서 사용하는 세척제는 31건 전부 용제계에 해당되었으며, 95% 이상 단일 염소계가 17건, 혼합 용제계가 14건으로 혼합 용제계에는 ‘할로겐계(염소계) + 산소화 용제계(에스테르계)’, ‘할로겐계(염소계) + 탄화수소계’, ‘할로겐계(염소계, 브롬계) + 산소화 용제계(에스테르계)’, ‘할로겐계(염소계, 브롬계) + 산소화 용제계(에스테르계, 에테르계)’, ‘할로겐계(염소계, 브롬계) + 산소화 용제계(알코올계, 에스테르계, 에테르계)’, ‘기타 박리제’로 구분할 수 있었다. 최근 세척제 급성 중독 사고 이후 기존 세척제에서 대체 세척제로 변경한 경우 중에서 많은 경우가 주로 DMC, 1,2-DCP(25% 미만), DBM, 이외 PGMEA, TCM으로 구성되어 있음을 확인할 수 있었다. 특히 1,2-DCP의 경우 유독물질로 규제되는 함량 기준인 25% 미만으로 의도적인 관리를 하는 것으로 판단된다.



[그림 Ⅲ-16] 현장 조사 대상 세척작업 세척제 범주

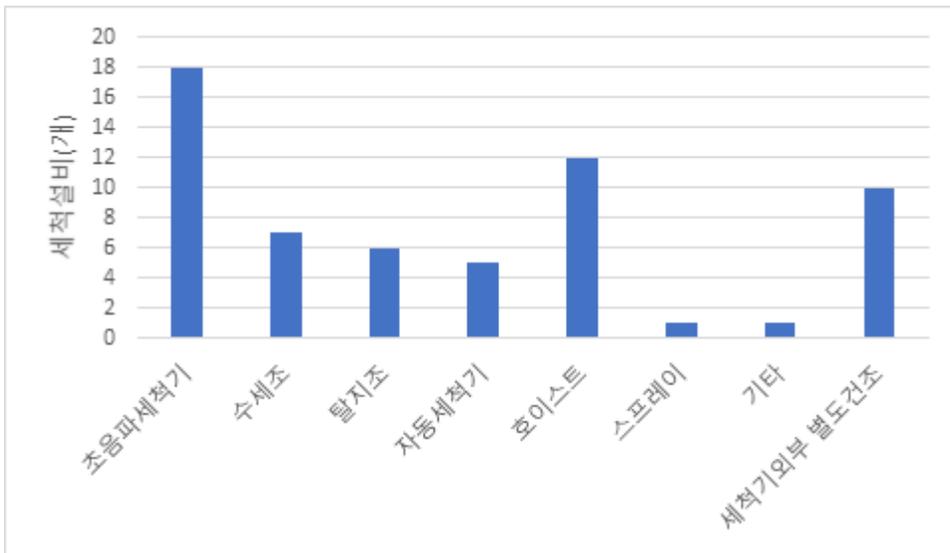
대상 세척작업의 피세척물의 종류는 각종 부품/다품종이었으며, 재질은 알루미늄, sus, 황동, 철, 동, 알코트, 잼(표면처리된 철), 파라핀왁스, 탄탈륨, 티타늄, 구리, 청동 등이었으며, 크기는 소형에서 대형까지 굉장히 다양했다. 이에 반해 오염제거대상은 거의 대부분이 금속가공유였으며, 보다 세부적으로는 타발유, 탭핑유, 드로잉유, 절삭유, 연마제, 착색제, 롤링유, 래핑유, 랩제, 방청유, 수지, 이형제, 피막, 플럭스, 칩, 샌딩 혹은 연소 찌꺼기 등 기타 이물질이었다.

사업장에서 보유하고 있는 세척설비는 크게 다음과 같이 구분하였다.

<표 Ⅲ-25> 현장 조사 대상 세척작업 세척설비

구분	설비	보유수 (건)
세척기능	초음파세척기	18
	수세조	7
	탈지조	6
	자동세척기	5
	스프레이	1
	기타	1
소계		38

구분	설비	보유수 (건)
별도기능	호이스트	12
	건조설비	10
소계		22



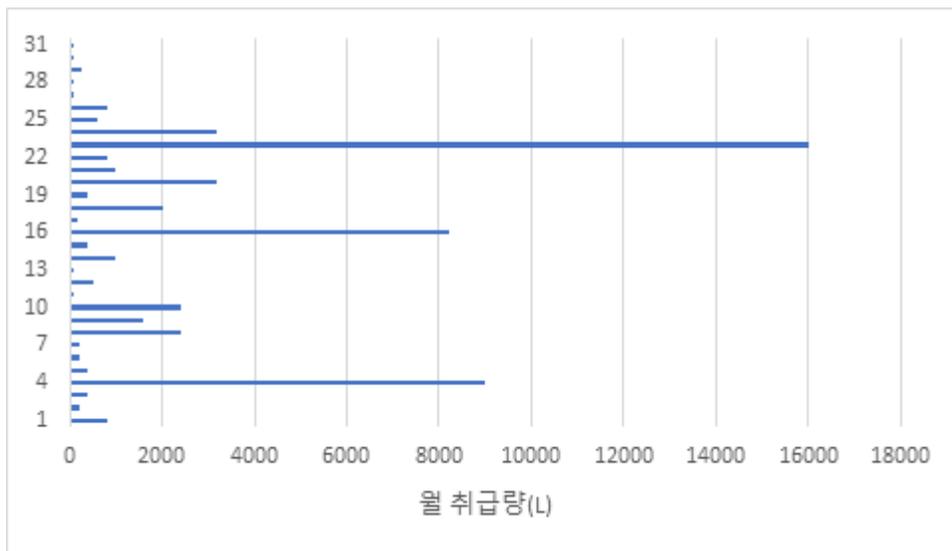
[그림 Ⅲ-17] 현장 조사 대상 세척작업 세척설비

구분의 수준이 동일하지는 않지만, 대부분의 세척기는 초음파 세척 기능이 있어 시장에서 초음파세척기로 통용되고 있기 때문에 초음파세척기를 별도로 구분하였으며, 이는 기본적으로 초음파, 가열, 냉각코일을 가지고 있는 분리 혹은 유수식으로 구성되어 있고 주로 3~4조로 이루어져 있다. 수세조는 특별한 설비 없이 별도의 침적조 혹은 통으로 이루어져 있어 추가 기능이 없는 보통 냉세척에 해당된다. 탈지조는 1개의 큰 조로 이루어져 있어 가열, 냉각코일의 구성이며, 자동세척기는 투입과 반출만 작업자가 수행하고 나머지 담금 과정은 자동으로 기계에 의해 이루어지고 내부 세척조의 구성은 일반적으로 초음파세척기와 유사하다. 그리고 스프레이 방식으로 세척을 하는 경우가 있었으며, 별도의 설비는

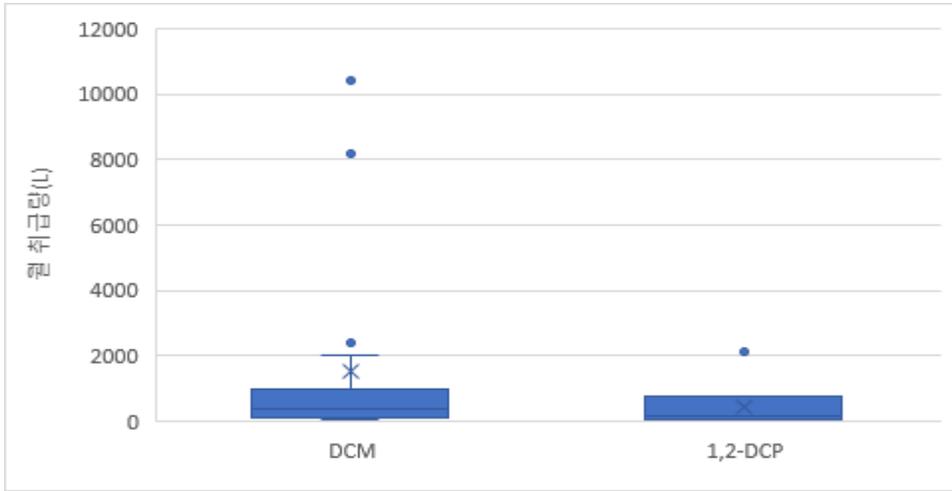
아니지만 세척 대상물 자체가 통의 구조라서 세척액을 주입하는 건을 사용하는 경우도 있었다. 이러한 기본 세척 기능 외의 부가설비로는 호이스트를 많이 사용하고 있었으며, 세척기 외부에 별도 건조(에어건, 오븐, 열풍, 선풍기 등)를 실시하는 경우도 있었다.

사용조건은 제품 내 평가대상 인자의 함량 정보를 포함한 세척제 취급량, 세척제의 작업 중 물리적 상태, 작업자 수, 작업시간 및 속도, 산업안전보건 관리수준, 작업장소, 작업온도, 실내 작업장 전체 환기수준, 국소배기, 각종 보호구, 오염원과의 거리 및 기타 특이사항으로 구분하여 조사하였다.

월 최대 취급량은 세척제 취급량에 평가 대상 할로젠화 용제 성분 함유량을 반영하여 구분하여 살펴보았다. 그 결과 월 세척제 취급량은 최소 66L에서 최대 16,000L까지였으며, 이에 함유량을 적용한 결과 평가 대상 성분(DCM, 1,2-DCP) 취급량은 최소 24.9~10,400L이었으며, 각각 구분한 결과는 다음과 같다.



[그림 III-18] 현장 조사 대상 세척작업 월 최대 세척제 취급량



[그림 III-19] 현장 조사 대상 세척작업 월 최대 할로겐화 용제 취급량

<표 III-26> 현장 조사 대상 세척작업 할로겐화 용제 취급량

구분	디클로로메탄	1,2-디클로로프로판
200L 미만	6	6
200L~1,000L	9	4
1,000L 초과	4	1
계	19	11

세척제의 작업 중 물리적 상태는 상온에서 그대로 액체 상태로 사용하는 경우가 11건, 세척조별로 액체 상태와 일부 조에서 가열로 인하여 증기 상태인 경우 16건, 증기 탈지 방식이 4건이었다. 이는 작업온도와 연관되어 있는데 보통 상온에서 취급 세척제의 끓는점을 고려하고, 일부는 최대 100℃까지 가열하는 경우도 있었다.

작업자 수는 보통 1명에서 2명으로 세척 전담을 하는 경우도 있었지만, 작업시간 내내 지속적으로 세척하는 작업 물량이 발생하는 경우는 많지 않아 다른 기타 업무와 병행하는 경우가 많았다. 이에 따라 작업시간도 연속적인 경우도 있지만 드물고, 일정하게 분산되어 있는 경우도 있고, 특정 시간대에 집중적으로 실시하는

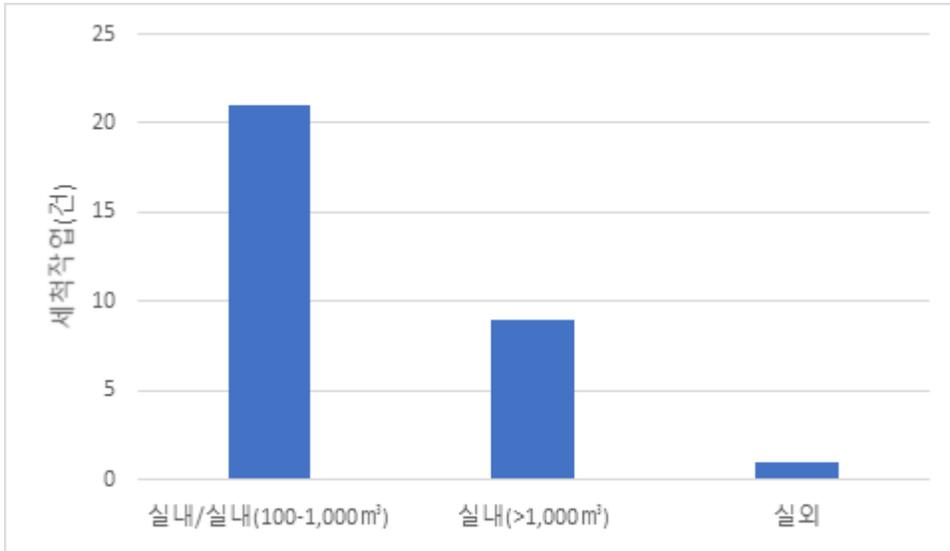
경우도 있었다. 따라서 세척작업의 경우 물량에 따라 굉장히 작업시간이 유동적이었다.

산업안전보건 관리수준은 전부 산업용(industrial use)으로, 숙련된 사람이 일정 구역 내에서 적절한 장비를 사용하고 있었다.

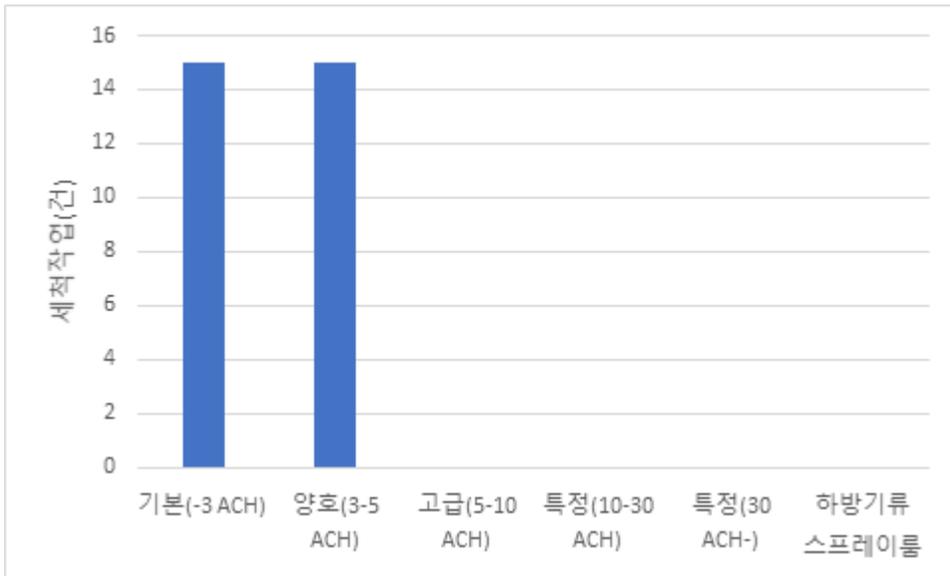
전반적인 작업장의 환기수준을 가늠하기 위하여 작업장소의 위치와 체적, 시간당 공기교환 횟수를 고려한 실내 작업장의 환기수준, 그리고 국소배기 보유 현황을 살펴보았다.

〈표 III-27〉 현장 조사 대상 사업장 환기수준

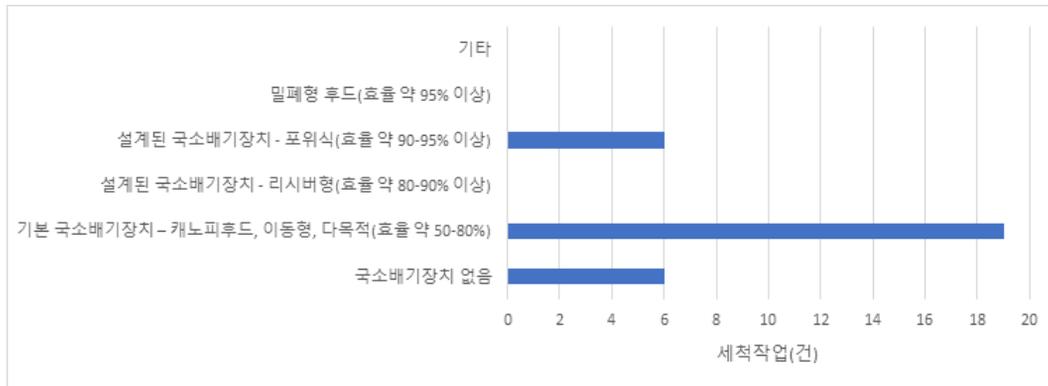
구분	내용	작업수 (건)
작업장소	실내/실내(100-1,000m <sup>3</sup> )	21
	실내(>1,000m <sup>3</sup> )	9
	실외	1
소계		31
실내 작업장 환기수준	기본(-3 ACH)	15
	양호(3-5 ACH)	15
	고급(5-10 ACH)	0
	특정(10-30 ACH)	0
	특정(30 ACH-)	0
	하방기류 스프레이룸	0
소계		30
국소배기	국소배기장치 없음	6
	기본 국소배기장치 - 캐노피후드, 이동형, 다목적(효율 약 50-80%)	19
	설계된 국소배기장치 - 리시버형(효율 약 80-90% 이상)	0
	설계된 국소배기장치 - 포위식(효율 약 90-95% 이상)	6
	밀폐형 후드(효율 약 95% 이상)	0
	기타	0
소계		31



[그림 III-20] 현장 조사 대상 세척작업 장소



[그림 III-21] 현장 조사 대상 실내 작업장 환기수준



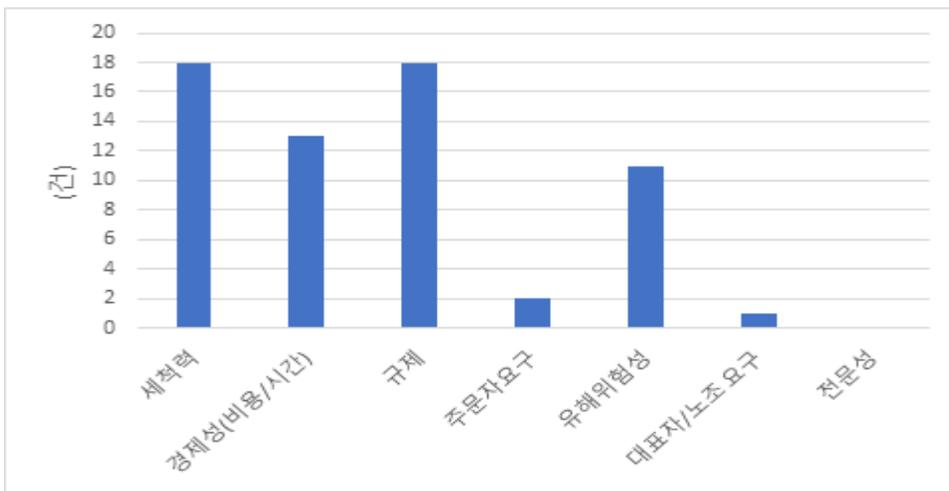
[그림 III-22] 현장 조사 대상 세척작업 국소배기

일반적으로 보호장비 착용은 작업장의 공기 중 노출수준에서 작업자의 개인의 노출수준을 저감하는 효과가 있다. 대상 세척작업에서의 보호장비 구비 및 착용 상황을 살펴보았을 때 호흡기 보호구의 경우 코로나 영향으로 덴탈 혹은 KF94 마스크를 착용하는 경우도 많았으며, 방진마스크를 착용하는 경우도 있었다. 물론 방독마스크를 구비한 경우가 많았으나, 노출 환경에 그대로 비치하거나 밀폐용기에 넣어서 보관하는 경우들이 있었으며 실제 착용 여부에 대해서는 세척작업이 있는 경우에 한해서만 착용하거나 업무 시 불편함 때문에 착용하지 않는 경우도 빈번하게 확인할 수 있었다. 이 외에 피부 보호장비는 경험에 기반하여 상당히 다양한 종류(목장갑, 비닐장갑, 고무장갑, 코팅장갑, 내화학성장갑 등)를 사용하고 있었다.

세척작업 시에는 부가적인 설비들을 이용하더라도 오염원과의 거리가 약 1m 이내의 거리에 있는 경우가 대부분이었고, 사실상 오염원이 한 군데가 아닌 경우들도 많았다. 그리고 세척조의 뚜껑은 보통 작업 시에는 거의 개방 상태로 유지하고 있었으며, 일부 드물게 담금 시에만 열고 닫는 경우도 있었으며, 작업 종료 시에는 대부분 뚜껑 혹은 덮개를 닫고 있었다. 하지만 보통 세척조 뚜껑의 구조가 위로 여는 방식이 많고(일부 밀어서 여는 방식), 호이스트와 같은 보조설비를 사용하거나 담금 시간이 짧아서 작업 회당 매번 닫아서 노출을 관리하기에는 어려운 구조였다. 자동세척을 제외하고 세척조 담금 방식에서

유일하게 한 군데 사업장의 경우 뚜껑이 자동 버튼식으로 이루어져 열고 닫기가 편리하여 오염원 관리에 보다 용이할 것으로 판단되었다. 별도 구획으로 세척실을 분리한 경우가 많았지만, 실제 문 혹은 창문이 공장 내 다른 구역으로 연결되어 있는 경우가 많아 노출 관리에 그다지 효과가 있는 것으로 판단되지 않았다.

마지막으로 세척작업 시 세척제 등의 대체를 위하여 무엇을 고려하고 있는지 확인하기 위하여 세척 사유 및 필요성, 기본적인 세척제 비용, 세척수준에서의 요구사항, 대체 필요성 및 의사, 기타 특이사항을 조사하였다. 대부분 세척작업을 하는 이유는 특정 목적의 전처리(이후 용접, 도장, 도금, 전해연마, 코팅, 연마, 방청, 피막제거, 열처리, 조립 및 체결, 기능 유지(불량) 등), 일반적인 가공 후처리(고객사 요구, 외관 등) 때문이었다. 세척수준에 대해서는 육안, 촉감 등으로 적합성에 대한 자체(숙련자) 판단을 하거나, 일종의 펜 테스트, 현미경 외관 검사, sediment 테스트, 분말 시험, leak test 등을 통해서 내·외부 요구사항을 처리하고 있었다. 그렇다면 과연 사업장은 어떠한 이유로 대체를 고려 혹은 결정했는지(할 예정인지)에 대하여 조사한 결과, 세척력, 규제, 경제성(비용/시간), 유해위험성, 주문자 요구, 대표자/노조 요구 순으로 확인되었다. 이 외에도 대체와 관련된 다양한 의견은 다음과 같다.



[그림 III-23] 현장 조사 대상 사업장의 세척제 대체에 있어 고려사항

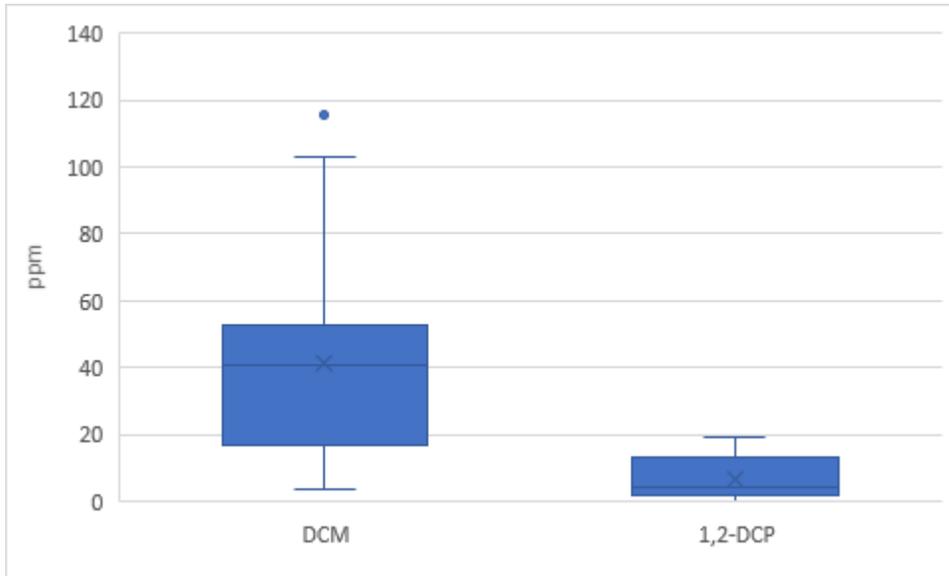
### 〈표 III-28〉 현장 조사 대상 사업장의 세척제 대체 관련 의견

#### 세척제 대체와 관련된 기타 의견

- 세척단지의 경우 물류비(이동 및 포장) 상승 및 효율성 저하 우려, 다업체 사용 조건 맞추기 어려울 것으로 판단됨, 대체 세척제 혹은 설비 개선 비용 지원 필요
- 규제때문에 대체 세척제를 사용하지만, 세척력이 떨어짐
- 가공유 사용은 필수적이므로 세척방식의 변경을 근본적으로 고려하기 어려움
- 규제 범위 내에서만 세척제 성분을 조정
- 간혹 고객사에서 까다로운 세척 수준을 요구하지만, 세척제를 포함한 세척방식까지 요청하지는 않음(ESG 경영 X), 일부 대체 권고하나 강제하지는 않음, 적절한 대체 세척제를 못찾음
- 세척 전단계의 공정 관리(오염)가 워낙 다양해서 불가능하다고 판단
- 향후 정부에서 규제강화만 하는 게 아니라 대체 세척제를 지정해주는 등 대안을 제시하면 좋겠음
- 대체 세척제 테스트가 어려움(고객사-세척제업체-세척사업장간의 협업 필요)
- 사용량 적은데 과도한 규제, 감독의 문제
- 민간위탁 사업도 효과성 떨어짐
- 규제비용이 하위로 전가되지 않고, 단가에 포함되는 선순환 구조가 필요함
- 재생기 사용 시 사용량이 약 1/2로 감소
- 수출의 경우 갈수록 협력 공급업체 심사 등의 수위는 높아지고 있음, ESG, 상생 등 요구, 그러나 국내에서는 아직 먼 실정임
- 동일 세척제인데 성분이 지속적으로 변화하기도 함
- 보통 TCE에서 MC로 다른 대체 세척제로 변경해오는데 세척력이나 설비 관리 측면에서 TCE를 선호하는 경향

세척작업 현장에서 실시한 개인시료측정 또한 대상 사업장은 30개소로 동일하며, 실제 유형에 따라 구분하였을 때 세척작업은 32건이었다. 개인 혹은 필요시 지역 시료를 채취하였으며, 개인시료채취 대상자는 사업장당 1~2명으로 총 45명이었다. 이 중에서 2건은 세척제를 이미 수계 등으로 대체하여 최종 분석대상은 세척작업 30건에 대하여 실시하였다. 평가대상 물질은 디클로로메탄 19건, 1,2-디클로로프로판 11건에 해당되었다. 모든 개인시료측정 및 분석은 공단의 「작업환경측정 신뢰성평가」 사업에 준하여 실시하였다.

할로겐화 용제를 사용하는 세척작업의 노출량을 TWA로 환산하여 확인한 결과, 디클로로메탄의 노출량(TWA) 분포는 3.46~115.36ppm이며, 1,2-디클로로프로판의 노출량(TWA) 분포는 0~19.51ppm이었다.

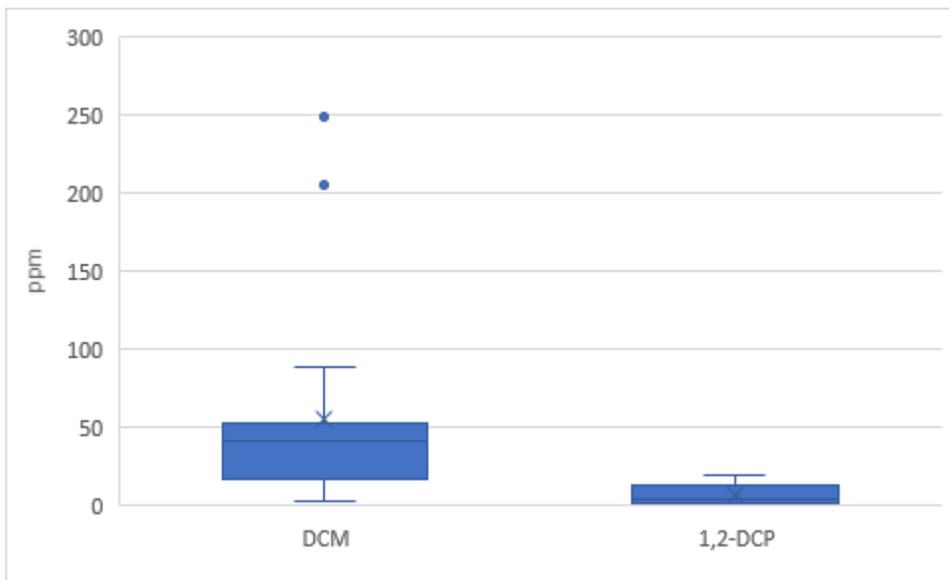


[그림 III-24] 현장 조사 대상 세척작업 포함 공정 노출량 TWA 환산 분포

<표 III-29> 현장 조사 대상 세척작업 포함 공정 노출량 TWA 환산 분포

구분	디클로로메탄	구분	1,2-디클로로프로판
25ppm 미만	7	5ppm 미만	7
25~50ppm	6	5~10 ppm	1
50ppm 초과	6	10ppm 초과	3
계	19	계	11

그러나 세척작업은 그 특성상 작업이 상당히 유동적이어서 지속적으로 하거나 일정한 간격으로 분산하여 작업하는 경우 외에 특정 시간, 예를 들면 세척물량은 모아뒀다가 오전에만 실시하는 경우도 일부(4개소) 있었다. 이러한 경우 해당 작업 노출이 과소평가될 우려가 있어 6시간 미만이라도 동일 작업으로 간주하여 노출량을 확인한 결과는 전체 분포에서는 다음과 같이 큰 차이가 없어 보이지만 작업별로 보면 작계는 1.27~2.58배로 노출이 높음을 확인할 수 있었다.



[그림 III-25] 현장 조사 대상 세척작업 노출량 분포

<표 III-30> 현장 조사 대상 세척작업 노출량 분포

구분	디클로로메탄	구분	1,2-디클로로프로판
25ppm 미만	6(-1)	5ppm 미만	6(-1)
25~50ppm	7(+1)	5~10ppm	2(+1)
50ppm 초과	6	10ppm 초과	3
계	19	계	11

실제 노출량만 확인하는 것이 아니라, 노출기준을 적용한 RCR을 비교하는 방법도 있으나 DCM의 노출기준은 50ppm이고, 1,2-DCP의 노출기준은 10 ppm으로 해당되는 범위를 기준점으로 포함 구분하여 확인하였다. 노출기준을 초과한 경우는 디클로로메탄 포함 세척제 사용 6건, 1,2-디클로로프로판 포함 세척제 사용 3건이었다. 노출기준 초과 사업장에 대한 개요는 다음과 같다.

〈표 III-31〉 디클로로메탄 노출기준 초과 사업장 정보- 초과 요인 분석

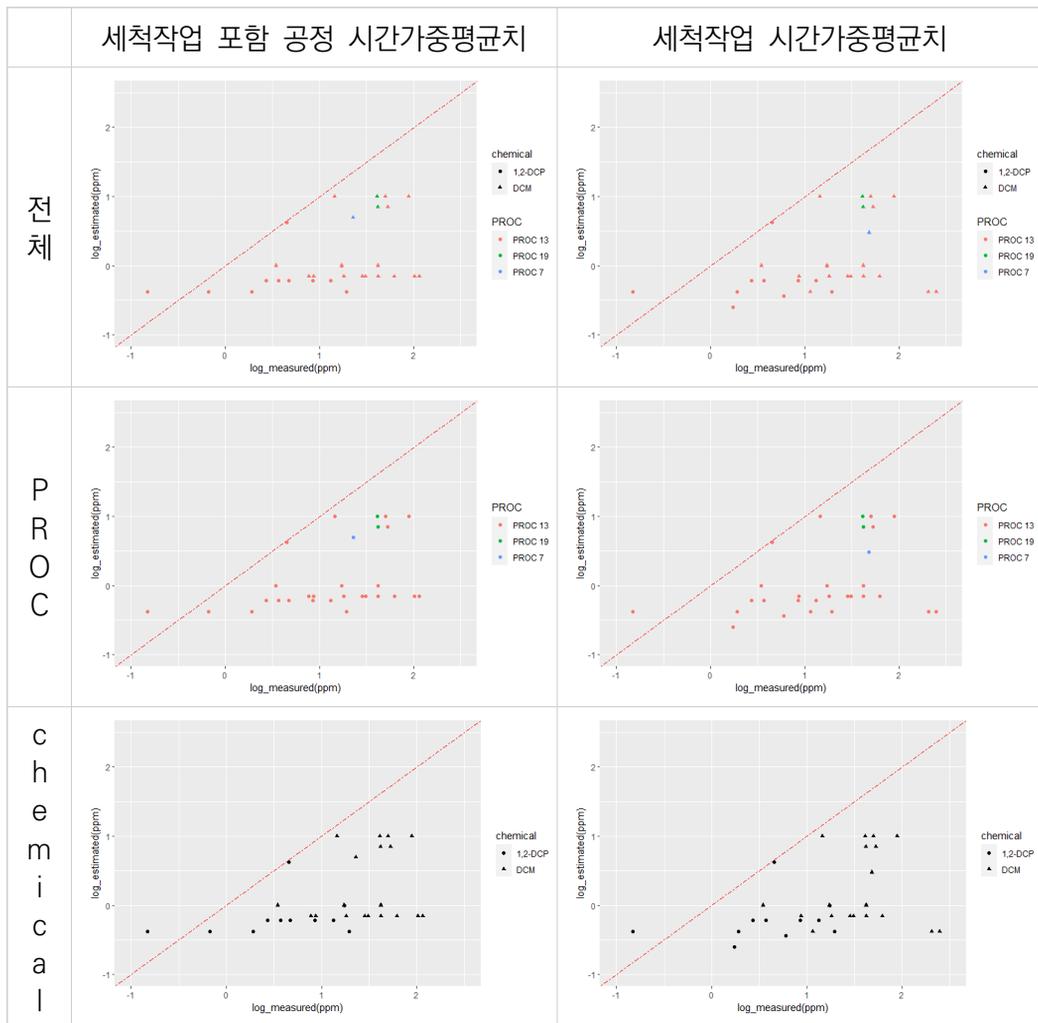
구분	특징
사업장 13	<ul style="list-style-type: none"> <li>•세척제 : DCM 95-100% (월사용량 : 70 l)</li> <li>•피세척물 : 에어컴프레샤 밸브 조립부품(재질 : SUS, 크기 다양함)</li> <li>•세척설비 : 초음파 세척기(1대)                         <ul style="list-style-type: none"> <li>- [설비구성] 4조 (1조:애벌(38℃), 2조:초음파, 3조:헹굼, 4조:증기(54℃))</li> <li>- [세척방법] PROC13(담금) / [작업온도] 38℃</li> <li>- [세척수행] 일정간격마다 분할 / 세척소요시간(1회) 약5분</li> <li>- [기타사항] 에어건 추가 사용</li> </ul> </li> <li>•작업자 : 1명, 세척 및 래핑업무 병행</li> <li>•작업장 환기수준 : 양호(문,창문 모두 개방, 환기팬(2대) 있지만 가동안함), 별도 세척실 존재</li> <li>•국소배기장치 : 기본 국소배기장치(효율 약 50~80%)-우측 측방향 후드, 상방향 후드 설치</li> </ul>
사업장 15	<ul style="list-style-type: none"> <li>•세척제 : DCM 99.9~100% (월사용량 : 400 l)</li> <li>•피세척물 : 자동차 엔진 부품(크기 다양함)</li> <li>•세척설비 : 초음파세척기(1대)                         <ul style="list-style-type: none"> <li>- [설비구성] 4조 (1조:애벌, 2조:초음파, 3조:헹굼, 4조:열풍건조)</li> <li>- [세척방법] PROC13(담금) / [작업온도] 40~45℃</li> <li>- [세척수행] 집중(1시간) / 세척소요시간(1회) : 3분~5분</li> <li>- [기타사항] 에어건 추가 사용, 세척기 수리로 뚜껑개방상태 지속, 세척액 직접 만짐</li> </ul> </li> <li>•작업자 : 2명, 박스세척, 제품이동, 작업장청소 등 기타작업 병행</li> <li>•작업장 환기수준 : 양호(문 개방됨, 공조시스템 가동), 별도 세척실 존재</li> <li>•국소배기장치 : 기본 국소배기장치(효율 약 50~80%)-상방향 후드, 측방향 후드 설치</li> </ul>
사업장 16	<ul style="list-style-type: none"> <li>•세척제 : DCM 99.9~100% (월사용량 : 8200 l)</li> <li>•피세척물 : 자동차 라디에이터 부품(재질 : 알루미늄, 크기 다양함)</li> <li>•세척설비 : 초음파세척기(2대,자동 세척기)                         <ul style="list-style-type: none"> <li>- [설비구성] 3조 (1조:초음파(30±2℃), 2조:헹굼(상온), 3조:증기조(40±2℃))</li> <li>- [세척방법] PROC13(담금) / [작업온도] 40~45℃</li> <li>- [세척수행] 연속 &amp; 분할 모두 / 세척소요시간(1회) : -(확인불가)</li> <li>- [기타사항] 작업자는 로딩, 언로딩만 진행(자동 세척기), 추가로 담금세척 진행</li> </ul> </li> <li>•작업자 : 다수, 조립업무 작업자가 세척 병행</li> <li>•작업장 환기수준 : - (실외)</li> <li>•국소배기장치 : 설계된 국소배기장치-포위식(효율 약 90-95% 이상)</li> </ul>

구분	특징
사업장 22	<ul style="list-style-type: none"> <li>•세척제 : DCM 99~100% (월사용량 : 800 ℓ)</li> <li>•피세척물 : 연료펌프 등 자동차 부품(재질 : 표면코팅된 철,SUS 등, 크기 다양함)</li> <li>•세척설비 : 초음파세척기(1대)                         <ul style="list-style-type: none"> <li>- [설비구성] 3조 (1조:초음파(30±2℃), 2조:행균(상온), 3조:증기(40±2℃))</li> <li>- [세척방법] PROC13(담금) / [작업온도] 상온~42℃</li> <li>- [세척수행] 연속 / 세척소요시간(1회) : 약5분</li> <li>- [기타사항] 호이스트 이용, 버튼조작식 세척기 덮개-세척 끝나면 뚜껑 닫음</li> </ul> </li> <li>•작업자 : 1명, 프레스 가공 등 기타작업 병행</li> <li>•작업장 환기수준 : 기본(문 개방, 환기팬(2대) 가동), 별도 세척실 존재</li> <li>•국소배기장치 : 없음</li> </ul>
사업장 29	<ul style="list-style-type: none"> <li>•세척제 : DCM 100% (월사용량 : 66 ℓ)</li> <li>•피세척물 : 산업용 송풍기, 배기장치 부품(재질 : 철, 크기 다양함)</li> <li>•세척설비 : 증기탈지기(1대)                         <ul style="list-style-type: none"> <li>- [설비구성] 1조 (탈지조)</li> <li>- [세척방법] PROC13(담금) / [작업온도] 상온~60℃</li> <li>- [세척수행] 연속(탈지 중간 용접가공 수행) / 세척소요시간(1회) : 약25분</li> <li>- [기타사항] 호이스트 이용, 세척 시 뚜껑 닫음, 세척 후 꺼내서 자연건조 진행</li> </ul> </li> <li>•작업자 : 1명, 용접가공 병행</li> <li>•작업장 환기수준 : 기본(환기팬(1대) 가동), 별도 세척실 없이 용접공정과 인접함</li> <li>•국소배기장치 : 없음</li> </ul>
사업장 30	<ul style="list-style-type: none"> <li>•세척제 : DCM 99.97~100%, 산화프로필렌&lt;1% (월사용량 : 100 ℓ)</li> <li>•피세척물 : 가스·소방용품, 캠핑/등산용품 등 핀, 너트(재질 : 알루미늄, 청동, 철, 크기 다양함)</li> <li>•세척설비 : 초음파세척기(1대)                         <ul style="list-style-type: none"> <li>- [설비구성] 4조 (1조:침적(40℃), 2조:초음파(40℃), 3조:행균-사용안함, 4조:증기-사용안함)</li> <li>- [세척방법] PROC13(담금) / [작업온도] 상온~40℃</li> <li>- [세척수행] 집중(1시간) / 세척소요시간(1회) : 약5분</li> <li>- [기타사항] 하루에 1~2시간 세척, 세척 후 선풍기 앞에서 추가건조 진행, 에어건 추가 사용</li> </ul> </li> <li>•작업자 : 2명, CNC가공, 제품이동 등 기타작업 병행</li> <li>•작업장 환기수준 : 양호(환기팬(1대) 및 선풍기(2대) 가동) 별도 세척실 없음</li> <li>•국소배기장치 : 기본 국소배기장치(효율 약 50~80%)-상방향 후드</li> </ul>

〈표 III-32〉 1,2-디클로로프로판 노출기준 초과 사업장 정보- 초과 요인 분석

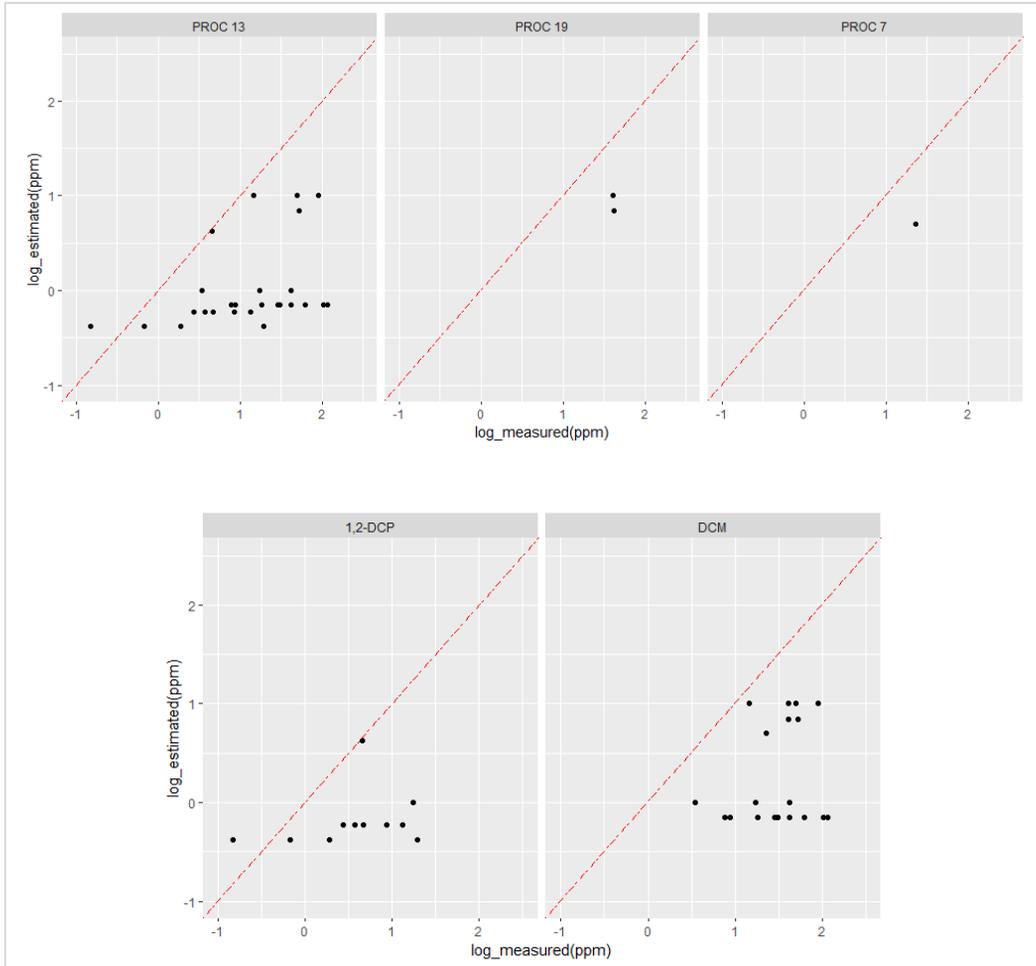
구분	특징
사업장 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세척제 : 디메틸카보네이트 48-59%, 1,2-DCP 24% 이하, 디브로모메탄 15-19%, PGMEA 3-10%, 영업비밀S1 3-5% (월사용량 : 9000 l)</li> <li>• 피세척물 : 핸드폰 부품 (재질 : 알루미늄, SUS, 크기 다양함)</li> <li>• 세척설비 : 초음파 세척기(2대), 자동세척기(1대)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- [설비구성] 4조 (1조:초음파, 2조:초음파, 3조:헥검, 4조:증기)</li> <li>- [세척방법] PROC13(담금) / [작업온도] 상온~90℃</li> <li>- [세척수행] 연속 / 세척소요시간(1회) 약5분</li> <li>- [기타사항] 온풍기 이용 건조, 에어건 추가 사용</li> </ul> </li> <li>• 작업자 : 2명, 세척업무만 전담</li> <li>• 작업장 환기수준 : 양호(창문 개방, 환기팬 가동), 별도 세척실 존재</li> <li>• 국소배기장치 : 설계된 국소배기장치-포위식(효율 약 90-95% 이상)</li> </ul>
사업장 11	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세척제 : 디메틸카보네이트 50-60%, 1,2-DCP 15-24.9%, 트리클로로메탄 5-9.9%, 디브로모메탄 1-5%, 1-메톡시-2프로판올 아세테이트 0-5%, 프로필렌 글리콜모노메틸 에테르 0-5%, 에탄올 0-5%, 1,4-다이옥세인 0-3% (월사용량 : 100 l)</li> <li>• 피세척물 : 의료기기, 광학장비 부품(재질 : 알루미늄, SUS, 철합금 등, 크기 다양함)</li> <li>• 세척설비 : 일반세척기(1대), 초음파세척기(1대)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- [설비구성] 일반세척기-1조, 초음파세척기-3조 (1조:초음파, 2조:헥검, 3조:열건조)</li> <li>- [세척방법] PROC13(담금) / [작업온도] 상온~70℃</li> <li>- [세척수행] 연속 / 세척소요시간(1회) : 약5분</li> <li>- [기타사항] 30분 담금세척(일반세척기) 후 초음파세척(초음파세척기) 진행, 에어건 추가 사용</li> </ul> </li> <li>• 작업자 : 1명, 주로 세척업무 수행하고 CNC가공 등 병행</li> <li>• 작업장 환기수준 : 기본(창문 개방하지만 환기 안되는 구조), 별도 세척실 존재</li> <li>• 국소배기장치 : 설계된 국소배기장치-포위식(효율 약 90-95% 이상)</li> </ul>
사업장 28	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세척제 : 1,2-DCP 75-85%, 디메틸카보네이트 1-5%, 디브로모메탄 5-10%, 영업비밀 1-10% (월사용량 : 270 l)</li> <li>• 피세척물 : 저울 센서 부품(재질 : 철, SUS, 알루미늄, 크기 다양함)</li> <li>• 세척설비 : 초음파세척기(1대)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- [설비구성] 3조 (1조:초음파(35℃), 2조:헥검(상온), 3조:증기조(96℃))</li> <li>- [세척방법] PROC13(담금) / [작업온도] 상온~96℃</li> <li>- [세척수행] 일정시간 집중(오전 20분, 오후 40분) / 세척소요시간(1회) : 3분~5분</li> <li>- [기타사항] 호이스트 이용, 에어건 추가 사용 후 건조오븐(50℃, 30분~1시간 건조)</li> </ul> </li> <li>• 작업자 : 1명, 케이블 작업 등 병행</li> <li>• 작업장 환기수준 : 기본, 별도 세척실 존재</li> <li>• 국소배기장치 : 기본 국소배기장치(효율 약 50~80%)-상방 측방형, 상방향 후드</li> </ul>

이후 현장 조사를 통해 수집하고, 변환한 정보를 바탕으로 노출평가 모델 (ECETOC TRA v3.1)을 실행하기 위한 변수들을 추출하였다. 그리고 노출평가 모델을 실행하여 각 사업장의 해당 작업에 대한 노출수준을 추정한 후, 이를 실제 측정된 결과와 비교·분석하였다. 이때 세척작업을 집중적으로 실시한 경우들이 있어 일반적으로 1일 작업시간인 8시간에 대한 시간가중평균치와 세척작업 시간대만을 환산 적용한 노출량을 구분하여 분석하였다.



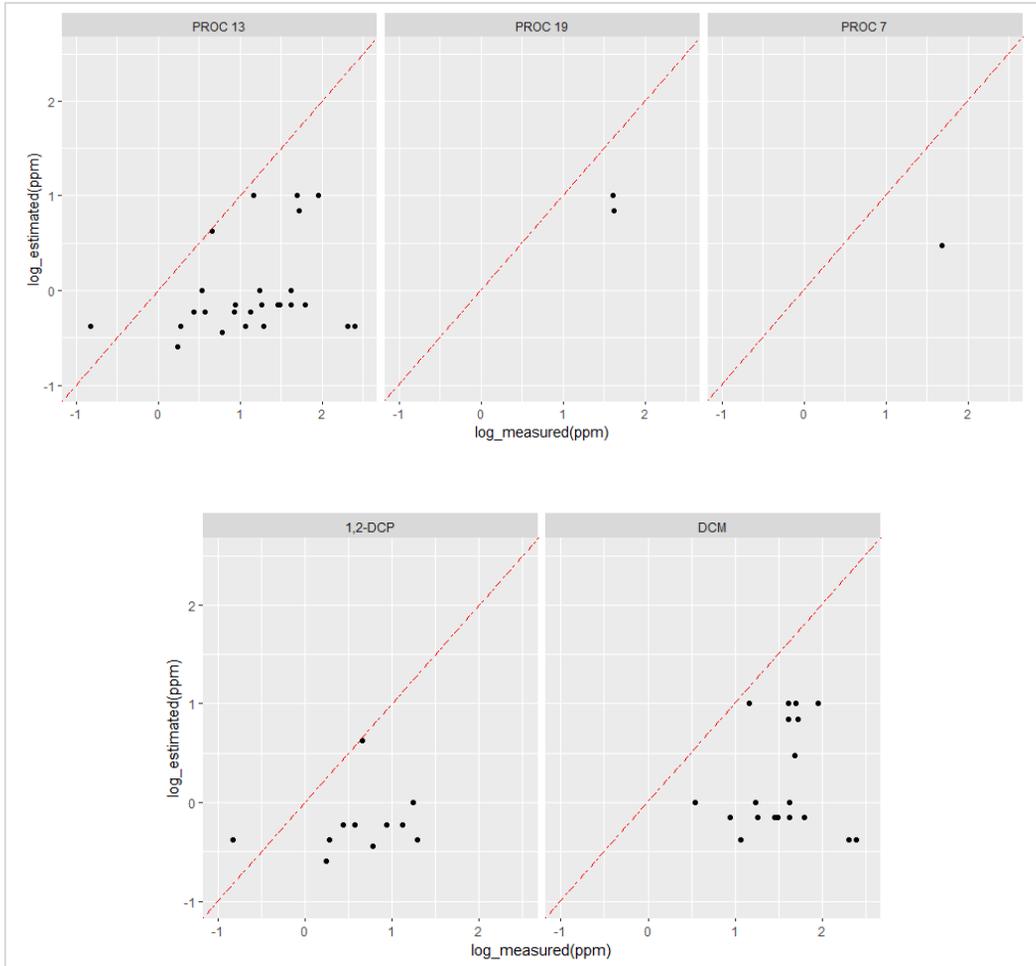
[그림 III-26] 세척작업 노출량 및 추정량 비교

먼저 세척작업을 포함한 공정의 시간가중평균치를 PROC 및 세척제의 주요 할로젠화 성분으로 구분한 결과는 다음과 같다.



[그림 III-27] PROC 및 화학물질별 세척작업 포함 공정의 시간가중평균치

다음 세척작업에 집중한 시간가중평균치를 PROC 및 세척제의 주요 할로겐화 성분으로 구분한 결과는 다음과 같다.



[그림 III-28] PROC 및 화학물질별 세척작업 집중 시간가중평균치

일부 차이는 있으나 1건의 세척작업을 제외하고는 전부 모델 추정값보다 측정값이 훨씬 높음을 확인할 수 있었다. 이는 공정의 형태에 기반하여 만들어진 노출모델(ECETOC TRA)이 국내 일부 세척작업 유형(할로겐화 용제, 담금 방식)에서의 노출량을 상당히 과소평가함을 확인할 수 있었다.

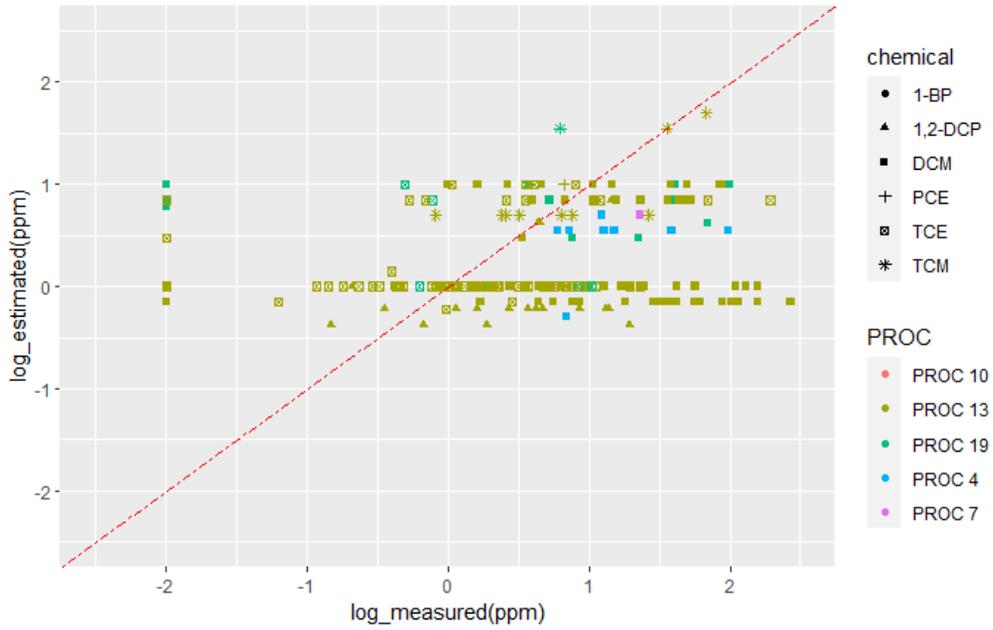
다음 단계로 Track 1의 기술보고서 정보 추출 내용을 변환하여 Track 1의 현장 조사 결과와 통합 분석을 실시하였다. 전체 통합 분석 대상 및 결과는 다음과 같다.

〈표 III-33〉 현장 조사(Track 2) 및 기술보고서(Track 1) 통합 분석 대상

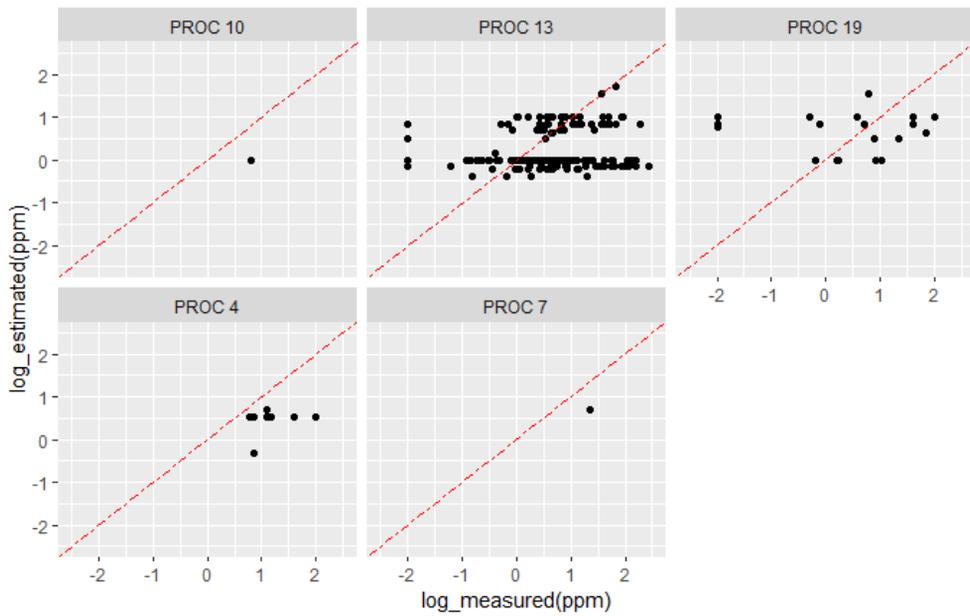
평가대상물질		PROC	
1-BP	1	PROC 10	1
1,2-DCP	22	<b>PROC 13</b>	<b>168</b>
<b>DCM</b>	<b>88</b>	PROC 19	19
PCE	1	PROC 4	9
<b>TCE</b>	<b>76</b>	PROC 7	1
TCM	10		
198		198	

\* PROC 28 제외

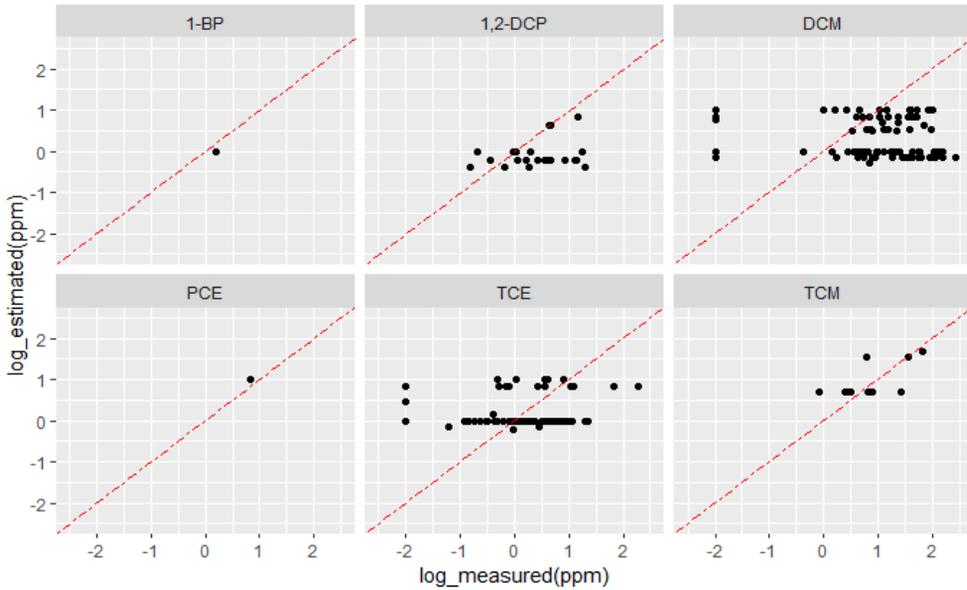
전체 DB 통합 시에는 기술보고서에서 추출한 내용 중 세척작업에 집중한 노출값을 별도로 기재하지 않은 경우들이 많기 때문에 세척작업을 포함한 해당 공정의 시간가중평균치만을 적용하여 비교 분석하였다.



[그림 III-29] 세척작업 포함 공정의 노출 측정값 및 추정값 비교



[그림 III-30] 세척작업 포함 공정의 PROC별 노출 측정값 및 추정값 비교



[그림 III-31] 세척작업 포함 공정의 화학물질별 노출 측정값 및 추정값 비교

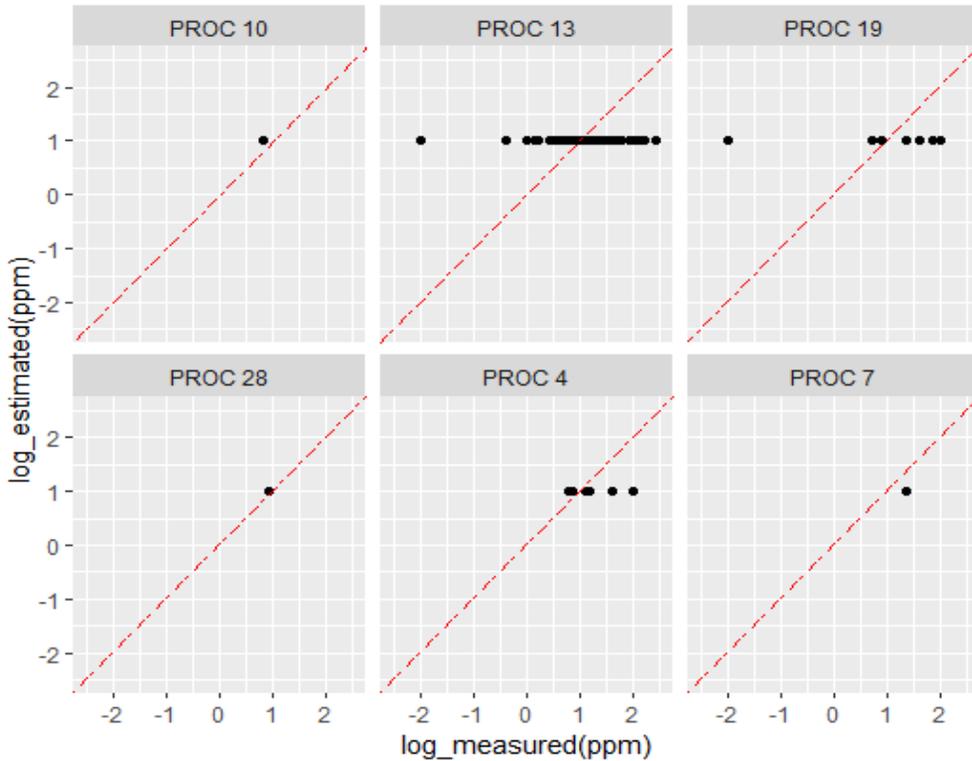
<표 III-34> 세척작업 포함 공정의 노출 측정값 및 추정값 비교

구분		측정값 > 추정값	측정값 < 추정값	계
세척작업 포함 공정		139 (70.2%)	59 (29.8%)	198
PROC	PROC 4	9 (100.0%)	0 (0.0%)	9
	PROC 7	1 (100.0%)	0 (0.0%)	1
	PROC 10	1 (100.0%)	0 (0.0%)	1
	PROC 13	118 (70.2%)	50 (29.8%)	168
	PROC 19	10 (52.6%)	9 (47.4%)	19
chemical	1-Bromopropane	1 (100.0%)	0 (0.0%)	1

구분	측정값 > 추정값	측정값 < 추정값	계
Dichloromethane	74 (84.1%)	14 (15.9%)	88
1,2-Dichloropropane	18 (81.8%)	4 (18.2%)	22
Perchloroethylene	0 (0.0%)	1 (100.0%)	1
Trichloroethylene	41 (53.9%)	35 (46.1%)	76
Trichloromethane	5 (50.0%)	5 (50.0%)	10

전체적으로 세척작업 포함 공정에서 측정값이 추정값보다 높음을 확인할 수 있었다. 약 70%에 해당하는 세척작업에서 측정값이 높았으며, 이를 PROC으로 구분해보면 가장 많은 PROC 13에서의 비율과 유사했다. 또한 화학물질별로 구분해보면 차이가 발생하는데 DCM과 1,2-DCP의 경우 상당수(80% 이상)가 추정값에 비해 측정값이 높았으며, TCE, TCM의 경우 비율이 비슷한 정도였다.

이상의 결과로 보면 국내 일부 유형의 세척작업의 경우 Tier 1 노출모델 (ECETOC TRA)를 사용하였을 때 상당 부분 노출이 과소평가될 수 있음을 확인하였다. 노출모델에서 추정값의 보수성은 상당히 중요한 지표이다. 물론 기술보고서상의 사업장 작업환경정보 중 환기수준과 같은 내용은 특정 조건에 대한 가정을 한 경우들이 있어서 충분한 반영이 되지 못할 수도 있다고 판단을 하였다. 이에 따라 일종의 사례로서 DCM에 대하여 환기수준을 최악의 조건으로 가정하고 측정값과 추정값을 비교한 결과는 다음과 같다.



[그림 III-32] 세척공정의 디클로로메탄 노출량 및 추정량(최악의 환기조건 가정) 비교

그림에서 알 수 있듯이 추정에서 최악의 환기조건을 가정했음에도 불구하고 PROC 13에서 약 60%의 경우 측정값이 추정값보다 높음을 확인할 수 있었다. 즉, 세척작업의 실측치가 DCM을 사용하는 PROC 13인 담금 방식의 경우 모델에서 추정할 수 있는 최대값의 범위를 초과하는 사례가 상당히 많음을 확인하였다.

결과적으로 국내에서 할로겐화 용제를 사용하여 세척을 하는 경우 Tier 1 모델을 통한 추정은 적합하지 않았으며, 상당한 과소추정이 우려가 된다. 아울러 세척작업은 다른 공정보다는 상당히 유동적이어서 세척작업 시간에 따라 노출수준이 높아지기 때문에 일반적인 작업환경측정에서는 해당 위험 우려가 충분히 반영되지 않았을 수 있다. 그리고 Track 2 현장 조사 대상에서 볼 때 노출기준 초과 비율은 30%로(Track 1, 2 통합한 경우는 18.6%), 국내에서 할로겐화 용제를 사용하는 세척 방식이 개선되어야 할 필요가 있음을 확인할 수 있었다.

## 5. 안전한 세척작업의 평가·관리를 위한 데이터베이스화 방안 제시

이상의 결과를 바탕으로 안전한 세척작업의 평가·관리를 위하여 확보해야 할 데이터베이스는 기본적으로 유해성과 노출 측면을 구분해서 살펴볼 필요가 있다. 일상적인 실측치는 세척작업의 유동적인 특성을 충분히 반영하지 못할 가능성이 높기 때문에 유해성과 노출 각 프로파일 내의 필수 요소를 확인함으로써 이를 DB화하여 위험 우려 가능성을 예측한다면, 혹은 이러한 형태의 작업을 할 경우는 노출이 매우 높을 수 있음에 대한 정보를 사전 제공한다면 사전 예방적 차원에서 유용할 것이다.

유해성 측면에서 세척제 확인이 필요하다. 세척제의 정확한 제품명과 그 구성 성분 및 함유량을 조사해야 한다. 사실상 유해성은 화학물질의 고유한 특성이기 때문에 어떤 성분으로 구성되어 있는지를 확인해야 그 유해성을 확인할 수 있으며, 함유량의 경우 노출 프로파일에서 영향을 미치는 요소이다. 그러나 현장 조사에서 세척제의 복잡한 구성을 조사하기 어려운 부분이 있을 것이다. 이것은 2021년부터 MSDS 제출 제도가 신규 도입되었기 때문에 향후에는 해당 사업장에서 취급하는 세척제의 MSDS 번호만 구축해도 데이터베이스를 연계하여 활용이 가능할 것이다.

노출 측면에서는 영향을 미칠 수 있는 요인은 세척작업의 유형과 방식이다. 이를 확인하기 위해서는 세척설비의 구성이 어떻게 되어있는지, 작업형태는 어떤 방식인지, 작업온도는 어느 정도인지, 그리고 건조를 어떤 방식으로 하는지를 확인할 필요가 있다. 현장 조사 결과에 따르면 포괄적인 작업형태와 건조 방식이 노출수준에 영향이 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 중요한 요소는 작업시간, 곧 작업물량이다. 이는 사업장에 따라서도 많이 다르지만, 한 사업장 내에서도 일일 변동이 큰 요소이기 때문에 일상적인 노출수준을 확인했을 때의 작업조건이 어떠한지를 반드시 확인해야 정확한 노출정도를 예상할 수 있다. 마지막으로 기본적으로 노출 저감 요소인 국소배기를 포함한 작업장 환기수준 등이다.



	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 준수계                     <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> 물+계면활성제+유기용제</li> <li><input type="checkbox"/> 기타( )</li> </ul> </li> <li>■ 용제계                     <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> 할로겐계(<input type="checkbox"/> 불소계, <input type="checkbox"/> 염소계, <input type="checkbox"/> 브롬계)</li> <li><input type="checkbox"/> 탄화수소계</li> <li><input type="checkbox"/> 산소화 용제계(<input type="checkbox"/> 알코올계, <input type="checkbox"/> 케톤계, <input type="checkbox"/> 에스테르계, <input type="checkbox"/> 에테르계)</li> <li><input type="checkbox"/> 혼합( )</li> </ul> </li> </ul>
<p>ℓ 월 평균 취급량</p>	<input type="checkbox"/> 100L 미만 <input type="checkbox"/> 100L 이상 ~ 1,000L(약 1톤) 미만 <input type="checkbox"/> 1톤 이상 ~ 10톤 미만 <input type="checkbox"/> 10톤 이상
<p>세척설비</p>	<input type="checkbox"/> 자동세척기(작업자는 투입/반출만 실시) <input type="checkbox"/> 세척조로 구성된 세척기 · 구조 : <input type="checkbox"/> 1조 <input type="checkbox"/> 2조 <input type="checkbox"/> 3조 <input type="checkbox"/> 4조 · 기능 : <input type="checkbox"/> 가열 <input type="checkbox"/> 초음파 <input type="checkbox"/> 호이스트 <input type="checkbox"/> 기타( ) <input type="checkbox"/> 스프레이 건 <input type="checkbox"/> 기타( ) <input type="checkbox"/> 없음
<p>작업형태</p>	<input type="checkbox"/> 담금/침지 <input type="checkbox"/> 코팅 <input type="checkbox"/> 탈지 <input type="checkbox"/> 주입 <input type="checkbox"/> 수작업 <input type="checkbox"/> 기타( )
<p>작업온도</p>	(                      ℃)
<p>건조방식</p>	<input type="checkbox"/> 불필요 <input type="checkbox"/> 선풍기 <input type="checkbox"/> 자연건조 <input type="checkbox"/> 열풍 <input type="checkbox"/> 세척조(증기조) 활용 <input type="checkbox"/> 오븐 <input type="checkbox"/> 에어건 <input type="checkbox"/> 기타( )
<p>재생기</p>	<input type="checkbox"/> 있음 <input type="checkbox"/> 없음
<p>세척설비 유지관리</p>	<input type="checkbox"/> 자체(주기: 월                      회) <input type="checkbox"/> 위탁





## IV. 고찰



## IV. 고 찰

- 2022년 세척제 급성중독 사건이 발생하였을 때 이에 대한 확인·대응을 위한 자료를 체계적으로 확보하는데 한계가 있었다. 동종 세척제 및 공정/작업 형태를 운영하고 있는 사업장 현황이나 실태를 확인하기 위해서는 개별 목적에 따라 설계되어 있는 자료들을 활용해야 했기에 충분한 내용이 포함되어 있지 않아 개별적인 조사나 확인을 해야 하는 경우가 발생하기도 하였다. 특히 세척작업의 경우는 그 범위와 개념이 광범위하여 개별 유형에 따라 안전보건 측면에서 고려해야 할 사항이 달라질 수 있으며, 국내 세척산업에서는 이에 대한 인식수준의 차이가 있는 것으로 보인다. 실제 사고가 났던 공정 및 작업 형태는 ‘담금’ 방식이고, 사용한 화학물질은 ‘할로젠화 유기용제’로서 물질(유해성) 외에도 공정/작업(노출 잠재력)이 노출에 상당히 영향을 미치는 사항이다. 그런데 일반적인 조사는 화학물질, 유해성에 더 초점이 맞춰지기도 한다. 하지만 실제 화학물질을 대체하는 것은 쉬운 일이 아니다. 그래서 유해성을 고려하는 것은 보통 증상기적인 과제에 해당되며, 가급적 노출이 되지 않는 방식을 고려하는 것이 보다 현실적이다. 본 연구에서는 산업용 세척작업을 시범 유형 사례로서, 이 두 가지 요소를 보다 통합적으로 고려할 수 있는 방안, 그리고 즉각적인 노출 모니터링이나 저감 대책은 이미 부분적으로 많이 실행되고 있기 때문에 보다 증상기적인, 근본적인 접근 방식을 지향하고자 하였다.
- 산업용 세척은 세척만을 주요 사업으로 하는 업체는 있지만 드물고, 보통 공정의 전·중·후처리에 있어 각각의 필요성에 따라 실시한다. 그리고 세척은 결과적으로 주요 생산품에 남아있지 않아야 하는 특성으로 인하여 다른 공정이나 산업의 변화에 따른 영향을 많이 받기도 한다. 그래서 세척제 같은 경우에는 재생을 해서 사용할 수도 있어 생산성에 영향이 덜하다면 유사한 범주 내에서 성분의 함량을 임의로 조정하는 것이 매우 용이한 일이 되기도 한다.

- 세척은 단순히 세척제만이 아니라 세척 설비와의 상호작용도 중요하다. 장기적으로 대체 방안을 마련하기 위해서는 세척력과 호환성이 중요하기 때문에 세척을 하는 이유를 명확하게 확인하고, 이에 따른 세척제의 유형이 정확하게 무엇인지와 어떤 기능의 설비를 사용하는지 등이 정확하게 확인되어야 대체 가능성 혹은 사고에 대한 대안을 마련할 수 있다. 따라서 세척 작업의 기본적인 개념부터 주요한 기능 요소(세척제와 세척 설비), 각 요소의 일반적인 유형과 특성을 고찰하여 제시하였다. 그리고 실제 세척작업에서 고려해야 할 사항을 유형화하여 수록하였다. 다만 문헌고찰과 주로 할로겐화 유기용제 세척제에 대한 시범 조사 내용을 기반으로 정보를 추출했기에 제한적일 수 있다.
- 현장 조사 시 사업장과의 면담에서도 화두가 되었던 부분은 바로 대체 세척제이다. 사업장에서는 세척제 급성중독 사고 이후에 감독이나 각종 모니터링이 많아졌다고 느끼고 있었다. 그러나 규제 기관에서는 문제만 주로 지적을 하고 정확한 대안을 제시하지 않는 것이 가장 큰 불만 사항이었다. 모든 면에서 이상적인 세척제는 없다. 이것은 국제기구에서 발행한 보고서에서도 언급되었듯이 화학물질 관리에 있어 안전한 대체에 관한 고려사항들이 상당히 모호하게 느껴지는 이유이기도 하다. 화학물질 대체의 원칙은 단순하다. 일반적인 화학물질 위험성 평가의 원칙에 따르며 ‘유해성’과 ‘노출’을 상대적으로 고려하는 것이다. 이 과정에서 중요한 것은 이해 당사자들의 합의 하에 평가 범위와 기준을 정해야 한다는 것이다. 즉, 모든 경우에 만족스러운 100% 안전한 대체 세척제를 갑자기 개발해내거나 노출이 없는 환경을 제시할 수는 없기에 그만큼 이해 당사자간의 협의체를 만들고, 대체의 목적·원칙·결정규칙을 논의하고 사회적 합의에 이르는 자발적인 활동이 필요한 시점이기도 하다.
- 다만 지금까지의 화학물질 위험성 평가에서 논의된 주요한 결정인자와 세척작업에서의 일반적인 고려사항을 구조화하여 <세척작업의 안전한 관리를 위한 조사양식(안)>을 설계하였다. 이후에는 PDCA cycle과 같은

과정을 통해 각 구성항목들을 평가하고 피드백하여 수정 혹은 확장할 필요가 있다. 이를 위해 기본적으로 할로겐화 세척작업 사업장을 대상으로 1차 시범 조사를 실시하였다. 이는 세척작업의 모든 유형을 포함할 수 없어서 일단 유해성과 노출 잠재력을 기반으로 가장 우선적으로 관리해야 할 대상을 선정한 것이었다. 이때에도 기본 대상 풀을 결정해야 하기에 국내 할로겐화 유기용제 세척작업을 보유하고 있는 것으로 추정되는 작업환경측정 현황을 기본적으로 검토 분석하였다. 그러나 화학물질은 대상을 분명하게 확인할 수 있으나, 세척작업은 그 대상을 명확히 확인할 수 있는 방법이 없어 해당 DB에서 공정명, 부서명, 단위작업장소 중 특정 키워드(단어)를 추출하여 분석하였다. 따라서 모든 세척 유형을 포함하지 못한다는 제한점이 있다. 아울러 세척제 급성중독 사고 이후 시행한 대책 중에서 특정 할로겐화 용제들에 대한 임시 작업환경측정을 권고하였기에 일부 왜곡이 있을 수도 있어 2022년을 분리하여 분석하였다.

- 위의 작업환경측정 DB에 기반하여 시범조사 대상을 선정하고 두 가지 트랙으로 구분하여 조사를 진행하였다. Track 1의 공단에서 수행한 기술 보고서를 활용한 정보 수집의 경우 자료를 이차 변환하는 과정에서 여러 가정이 있을 수 있다는 점이 주요한 한계점이다. 그리고 Track 2는 직접 현장 조사를 통해 노출 평가를 실시하는 한편, 조사 목적에 부합하는 맥락적 정보를 보다 자세하게 수집할 수 있었다. 다만 가용 자원의 한계로 인하여 업종, 근로자수, 지역을 고려한 30개 사업장에 대하여 조사를 실시하였다. 앞서 제안했던 조사표를 실제 현장에 시범 적용하는 한편, 세척작업에 특화된 유형을 재정리할 수 있었다.
- 가능한 동일 수준으로 편향을 줄이기 위해 현장 조사에서 노출평가 방식은 공단의 사업 기준을 준수하였다. 그리고 두 가지 방식의 자료를 통합하고, 확보한 맥락적 정보를 활용하여 노출모델도 실행하였다. 이에 따른 측정값과 추정값을 비교한 결과, 현장 조사 결과를 분리해서 살펴보면 대부분의 측정값이 추정값보다 높은 것을 확인할 수 있었다. 이는 국내 세척작업의 특성이 물리적인 요인으로 세척제의 활동을 증가시키는 한편, 건조 시 독특한

방법으로 인하여 해당 노출모델이 이에 대한 노출량을 충분히 보수적으로 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 보다 세부적인 평가를 위해서는 노출 모델의 작동 로직과 각 요인별 분석이 추가로 필요하다. 통합 시범 조사 결과에서도 약 70%에 해당하는 세척작업의 실제 측정값이 추정값보다 높았다. 국내 할로젠화 용제를 사용하는 세척방식을 다시금 재점검해야 하는 이유이기도 하다.

- 시범 조사 내용을 반영하여 안전한 세척작업의 평가 및 관리를 위한 체크리스트 방식의 데이터베이스화 방안을 제시하였다. 다만 시범 조사는 할로젠화 용제에 한정되어 있기 때문에 다른 방식의 세척은 범주화 내용을 보다 검토하여 확장해야 할 필요가 있다. 세척작업 데이터베이스화의 의미는 지속 가능한 관리의 토대를 마련하고자 함이다. 정량적이기 보다는 정성적으로 요인들이 선택되고 비교한 결과이기 때문에 추가적인 데이터 분석이 필요하다.
- 현장에서는 화학물질 규제에 상당히 민감하게 반응하여 세척제를 변경하고 있었다. 그래서 심지어 특정 물질의 유독물질 함유량 한계 미만으로 맞추어 구성한 제품을 사용하고, 세척제 제조업체도 제안하고 있음을 확인하였다. 이 외의 세척방식은 상당히 관행적으로 이루어지고 있음은 물론이고, 심지어 지금까지 별 문제가 없었다라는 입장이 있었다. 하지만 세척제를 바꾸지 못한다면 세척 방식을 변경하거나, 아니면 근본적으로 무엇을, 왜 세척을 해야만 하는지를 반복적으로 질문하다보니 현장에서도 다시 한 번 세척 방식을 생각해보고, 대체에 대한 여러 의견을 제시하기도 하였다.
- 할로젠화 용제를 이용한 담금 방식의 세척 외에도 다양한 세척제와 방식들이 있다. 명확하게 정보가 확인되지 않는 석유계 물질을 사용하는 경우도 있고, 신기술을 적용한 세척방식도 지속적으로 개발되고 있다. 세척작업에 특화된 안전성 결정요인이 포함된 조사 항목을 바탕으로 지속적으로 재평가하면서 데이터베이스화하여 향후 공정 혹은 작업 기반의 접근 방식으로 사고를 확장하고 대책을 마련해나갈 필요가 있다.



## V. 결론



## V. 결 론

- 최근 할로겐화 유기용제 세척제 관련 급성중독 사고가 연이어 발생하였고, 중대재해처벌법 대상이 됨으로 인해 더욱 사회의 주목을 받았다. 이러한 화학물질 중독 사고가 지속적으로 일어난다는 것은 현재의 안전보건관리 체계가 과연 잘 작동하고 있는지에 대한 재점검을 필요로 한다. 그리고 사고가 일어난 세척 방식은 현재 선진 외국에서는 잘 사용하지 않는 방식으로, 고전적이면서도 각 요소의 기능 개선을 한 방식으로 작업성은 좋아졌을지 모르나 유해인자에 대한 노출 가능성은 더욱 높아진 것으로 판단된다. 이에 대응하기 위하여 본 연구에서는 세척작업의 특성을 파악하는 한편, 일반적인 화학물질 대체의 개념과 방법론 검토를 통하여 세척작업에 특화된 안전성을 결정하고, 대체를 고려할 수 있는 요인을 데이터베이스화 하는 방안을 제시하여 세척작업에 대한 지속 가능한 안전관리의 토대를 마련하고자 하였다.
- 세척(Cleaning)이란 대상 제품을 변형시키지 않고, 제품의 표면에서 원하지 않는 물질을 제거하는 것이다. 일반적으로 세척, 행굼, 건조의 과정으로 이루어진다. 이러한 세척작업은 별도의 분리·독립된 과정으로 이해되기 보다는 전체적인 공정 내의 한 단계로 인식되는 경우가 많다. 이에 따라 “세척”, “세정”이란 직접적인 해당 활동에 대한 공정명보다 기계가공, 절삭, 연삭, 발포, 탈지, 박리, 제거, 표면처리, 담금, 초음파 등과 같이 다양한 공정명으로, 주요 공정의 전·후처리로 포함되어 관리되는 경우가 많다. 세척작업에 있어 주요한 기능적 요소는 세척제와 세척설비로 크게 구분할 수 있다. 세척제는 화학적인 작용을 하며, 수계와 용제계로 구분할 수 있다. 그리고 세척설비는 물리적인 작용을 하며, 습식과 건식으로 크게 구분할 수 있다.

- 이러한 세척제와 세척설비를 포함한 세척작업의 선택에 있어 고려해야 할 사항은 생산성과 안전보건 측면이다. 생산성에 있어서는 세척 특성, 세척 능력, 피세척물과의 호환성, 잔여물, 세척 시간, 세척 설비, 세척제 관리, 비용, 회사 요구사항 및 공급자 책임관리를 전반적으로 고려해야 한다. 그리고 안전보건과 관련하여서는 규제, 독성 및 인화성과 같은 유해성, 작업자 수용성 등이 주요 고려요소이다.
- 화학물질 관리에 있어 안전한 대체에 대한 고려사항은 일반적인 화학물질 위험성 평가의 개념과 크게 다르지 않다. 다만 대체의 목적과 원칙, 그리고 결정 규칙과 같은 평가범위를 결정하는 것이 가장 중요하다. 그리고 상대적인 유해성을 평가하고, 노출 잠재력을 고려함으로써 더 안전한 대체물질을 선택하는 것이다. 그러나 단순히 물질 측면에서의 대체만이 아니라 보다 근본적으로 왜 세척이 필요한지에 대한 질문으로 시작할 필요가 있다. 그리고 최적의 가용 정보를 활용하여 유해성을 감소시키는 한편 노출을 최소화할 수 있는 방안을 강구하고 조치를 실행하면서, 전반적으로 관련 정보들을 투명하게 공개하고, 이 활동과 관계된 이해관계자들의 협력체계 구축이 필요하다.
- 이와 같은 국내·외 세척작업의 특성과 안전한 대체를 위한 주요 고려사항을 바탕으로 유해성과 노출 측면에서 세척작업의 안전성을 결정하는데 특화된 요인(공정 및 작업특성, 사용조건, 추가 위험관리)을 1차 정리하였다. 그리고 사업장에서 실질적으로 세척제 혹은 세척방식 대체를 위해 고려하고 있는 사항을 확인하기 위한 조사항목을 별도로 구성하여 <세척작업의 안전성 결정요인 구조화 및 조사양식(안)>을 설계하였다.
- 특히 최근 세척제 사고와 관련된 할로젠화 유기용제(1,2-DCP, 1,2-DCE, 1-BP, DCM, TCE, TCM, 1,1,2-TCE, DMC, DBM, 1,1,1-TCE, PCE)를 사용하는 국내 세척작업의 특성을 확인하고자 작업환경측정 DB를 분석하였다. 세척작업에 특화된 측정 건수를 분리하기 위하여 공정명, 부서명, 단위작업장소 중 특정 키워드(세척, 탈지, 초음파, 등)로 추출하여 분석한

결과, 세척작업과 관련하여 디클로로메탄과 트리클로로메탄의 측정 빈도가 압도적으로 높았으며, 연도별 추이에 따르면 1,2-디클로로프로판의 측정 빈도가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 아울러 할로젠화 용제를 사용하는 전체 공정 대비하여 세척작업의 작업환경측정 현황을 살펴본 결과, 여전히 트리클로로에틸렌 사용에 있어 세척작업의 비중이 높음(약 40% 내외)을 알 수 있었다. 빈도수는 낮지만 비율상으로 1,2-디클로로프로판도 유사한 경향을 나타내며, 이에 반해 디클로로메탄은 빈도수는 높지만 세척 외의 다른 용도로 많이 사용되고 있는 것으로 추정된다. 전반적으로 여전히 할로젠화 용제들이 세척작업에 많이 사용되고 있음을 확인하였다.

- 또한 실제 세척작업이 확인된 사업장을 일부 추출하여 연도별 세척제 변화를 살펴보았다. 그 결과 세척제 변경은 규제 변화와 어느 정도 관련이 있는 것으로 판단되었다. 세척제를 변경한 경우는 주로 규제 대상이 아닌 성분 혹은 함량 기준을 적용한 세척제로 변경한 것을 확인할 수 있었다.
- 이러한 국내 할로젠화 유기용제 세척작업의 전체적인 작업환경측정 현황 분석을 바탕으로 실제 세척작업의 현황을 파악하고 조사양식(안)을 적용하기 위한 시범 조사를 2-track으로 진행하였다. 한 가지는 공단의 기술 보고서를 활용한 정보 추출 방식이며, 다른 한 가지는 직접 현장 관찰 조사를 통한 정보 수집 방식이었다. Track ①은 전체 169건의 기술보고서를 대상으로 작업환경정보를 분석하였으며 노출기준 초과 비율은 16.6%였으며, 이에 대한 요인은 도구를 이용한 수작업 혹은 세척설비/세척조는 있지만 수동 담금이거나 자동 세척인데 건조를 별도로 하거나, 세척 물량이 지속적이어서 연속 작업이거나, 환기상태 미흡 등을 고려해볼 수 있었다. 아울러 실제 세척작업의 형태가 독립적으로 수행하는 경우가 적고, 다른 작업을 병행하는 경우가 많았다. 즉 고정적이지 않은 작업 방식으로 인하여 유동성이 크기 때문에 노출 평가 방식을 고민할 필요가 있다.
- Track ②의 현장 조사는 전체 30개소를 대상으로 하였으며, <세척작업의 안전한 관리를 위한 조사표(안)>에 따른 인터뷰와 동시에 세척작업에 대한

개인시료측정(디클로로메탄, 1,2-디클로로프로판 중심)을 병행하였다. 대상 작업을 공정범주(PROC)로 구분하면 PROC 13(28건), PROC 19(2건), PROC 7(1건)에 해당되며, 세척제 유형은 95% 이상 단일 염소계(17건), 혼합 용제계(14건)로 구분할 수 있었다. 세척설비는 초음파세척기를 보유한 경우가 많았으며(18건), 수세조(7건), 탈지조(6건), 그리고 자동 세척기(5건) 순이며 스프레이 방식(1건)도 있었다. 또한 부가 기능으로 호이스트(12건), 별도 건조설비(10건)를 보유하고 있었다. 이 외에도 노출에 영향을 미칠 수 있는 취급량, 물리적 상태, 작업시간, 환기수준 등을 조사하였다.

- 그리고 노출 평가 결과, 세척작업의 노출량(TWA)은 디클로로메탄 3.46~115.36ppm(노출기준 50ppm), 1,2-디클로로프로판 0~19.51ppm(노출기준 10ppm)이었다. 그러나 세척작업은 특성상 작업이 상당히 유동적이어서 별도로 분석한 결과 작업별로 1.27~2.58배로 작업 시 노출이 높음을 확인할 수 있었다.
- 실측의 제한성과 국내 세척작업의 차이점으로 인하여 유럽 노출 모델이 국내 세척작업의 특성을 충분히 반영할 수 있을지 확인하기 위하여 노출평가 모델(ECETOC TRA)을 실행하여 측정값과 추정값을 비교 분석(Track ②)한 결과, 1건의 세척작업을 제외하고 전부 모델 추정값보다 측정값이 훨씬 높음을 확인할 수 있었다. 이는 공정에 기반하여 만들어진 노출모델이 국내 일부 세척작업 유형(할로젠화 용제, 담금 방식)에서의 노출량을 상당히 과소평가함을 확인할 수 있었다. Track ①까지 포함하여 통합 분석한 결과, 약 70%에 해당하는 세척작업에서 측정값이 추정값보다 높음을 확인할 수 있었다. 가장 많은 PROC 13에서의 비율과 유사하였으며, 화학물질별로 구분해보면 디클로로메탄과 1,2-디클로로프로판의 경우 80% 이상이 추정값에 비해 측정값이 높았다. 즉, 국내에서 할로젠화 용제를 사용하여 세척을 하는 경우 Tier 1 모델을 통한 추정은 적합하지 않았으며, 상당한 과소추정이 우려가 되었다. 이 외에도 최악의 환기조건 가정한 평가 결과

등을 종합적으로 고려하였을 때 국내에서 할로젠화 용제를 사용하는 일반적인 세척 방식에 대한 개선 필요성을 확인할 수 있었다.

- 추가로 사업장의 대체에 대한 고려사항을 확인한 결과, 세척력, 규제, 경제성(비용/시간), 유해위험성, 주문자 요구, 대표자 요구 순으로 확인되었다. 향후 공적 영역에서의 대안 마련 시 이러한 현장의 의견을 수렴할 필요가 있다.
- 결론적으로 안전한 세척작업의 평가 그리고 관리를 위하여 확보해야 할 데이터베이스는 유해성 측면에서는 세척제 종류, 노출 측면에서는 세척작업의 유형/세척설비, 세척제 취급량/작업시간, 물리적 상태/작업 온도/오염원과의 거리, 국소배기를 포함한 작업장 환기수준 등이다. 궁극적으로 대체 혹은 개선 방향을 제안하기 위해서는 세척 요구사항(피세척물, 오염제거대상을 포함한 세척 필요성과 세척 수준 등)에 대한 자료 또한 구축할 필요가 있다.
- 본 연구는 세척작업의 기본적인 특성과 화학물질의 안전한 대체에 대한 고려사항을 바탕으로 세척작업에 특화된 안전성 결정요인을 구조화하여 제안하였다. 이를 바탕으로 특히 할로젠화 유기용제 세척작업에 대한 안전성(위험성)을 평가하는 한편, 세척작업에 대한 지속 가능한 안전관리의 토대가 될 수 있을 것이라 판단된다.

## 참고문헌

- 고용노동부. 산업안전보건법(법률 제19611호). 2023.
- 고용노동부. 산업안전보건법 시행령(대통령령 제33597호). 2023.
- 고용노동부. 산업안전보건법 시행규칙(고용노동부령 제393호). 2023.
- 고용노동부. 산업안전보건기준에 관한 규칙(고용노동부령 제367호). 2022.
- 고용노동부. 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준(고용노동부고시 제2020-48호). 2020.
- 고용노동부. 화학물질의 분류·표시 및 물질안전보건자료에 관한 기준(고용노동부고시 제2020-130호). 2020.
- 국립환경과학원. 화학물질의 위해성에 관한 자료 작성지침. 2021.
- 국립환경과학원. 화학물질의 위해성에 관한 자료 작성 해설서. 2021.
- 김기연, 김현수, 임대성 등. 석유계 제품 세척제 취급 근로자의 벤젠 노출 위험성 평가. 안전보건공단 산업안전보건연구원. 2020.
- 이나루, 정수진, 신아롬 등. 물질안전보건자료 정보를 활용한 화학물질 관리 정책 도출. 안전보건공단 산업안전보건연구원. 2022.
- 정경숙, 안연순, 김현수 등. 1,2-디클로로프로판 등 세척제 취급 실태조사 및 건강모니터링 체계 구축. 안전보건공단 산업안전보건연구원; 2017.
- 정수진, 배계완, 이나루. 국내 디클로로메탄 제조사용 사업장 근로자의 공정별 노출수준에 대한 작업환경측정값과 ECETOC TRA 모델값 비교연구. 한국 산업보건학회지. 2021;31(4):317-330.

최영은, 김신범, 김원 등. 금속제품 세척제 관련 화학물질 규제변화의 영향 조사 및 개선방안 마련. 안전보건공단 산업안전보건연구원; 2022.

환경부. 화학물질의 등록 및 평가 등에 관한 법률(법률 제18034호). 2021.

BURSTYN, Igor; TESCHKE, Kay. Studying the determinants of exposure: a review of methods. American Industrial Hygiene Association Journal, 1999, 60.1: 57-72.

European Chemicals Agency(ECHA). Template for generation a Sector-specific Worker Exposure Description(SWED). [Cited 2022]. Available from: URL:<https://echa.europa.eu/csr-es-roadmap/use-maps/templates-and-submission>

European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals (ECETOC). ECETOC TRA version3: Background and Rationale for the Improvements - Technical Report No 114. 2012.

European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals (ECETOC). Targeted Risk Assessment: Further Explanation of the Technical Basis of the TRA v3.1 - Technical Report No 131. 2018.

European Chemicals Agency(ECHA). Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment Chapter R.12: Use description. 2015.

Exchange Network on Exposure Scenarios (ENES). Mapping of the Conditions of use (input parameters) of the different tools for workers assessment. 2020.

- Kanegsberg B, Kanegsberg E(Eds.). Handbook for Critical Cleaning, -2 Volume Set. CRC Press; 2020.
- KOIVISTO, Antti Joonas, et al. Assessment of exposure determinants and exposure levels by using stationary concentration measurements and a probabilistic near-field/far-field exposure model. Open Research Europe, 2021, 1.
- MASON, Timothy J. Ultrasonic cleaning: An historical perspective. Ultrasonics sonochemistry, 2016, 29: 519-523.
- NIEMCZEWSKI, Bogdan. Solvents for ultrasonic cleaning. Plating and surface finishing, 2004, 91.9: 44-47.
- Organisation for Economic Co-operation and Development(OECD). Guidance on Key Considerations for the Identification and Selection of Safer Chemical Alternatives. OECD Series on Risk Management, No. 60. 2021.
- Toxics Use Reduction Institute(TURI). Guide to safer chemicals: Alternatives to halogenated solvents used in surface cleaning. 2021.
- U.S. Environmental Protection Agency(US EPA). Control Techniques Guidelines: Industrial Cleaning Solvents. EPA 453/R-06-001. 2006.



## Abstract

### Analysis and structuring of determinants for safe management of industrial cleaning

**Objectives:** Due to acute poisoning accidents with halogenated organic solvent cleaning agent, interest in the safe industrial cleaning and alternative cleaners has increased rapidly. Industrial cleaning has a wide range and variety of concepts, so safety considerations may vary depending on the individual type. In this study, in order to fundamentally prevent similar chemical accidents and suggest alternatives, we need to expand the thinking from the existing chemical-centered approach to a process or activity-based approach, while we attempted to find a way to derive the factors that determine the risk and make it a database considering the purpose and characteristics of cleaning.

**Method:** Data on the type of cleaning, factors to be considered during cleaning, and safe alternative of chemicals were collected and reviewed. Based on this, a survey form for cleaning based on hazards and exposure was designed. Additionally, a pilot survey was conducted targeting workplaces that clean using halogenated organic solvents. The work environment measurement DB and the agency's technical reports were used, field surveys were also conducted, and the exposure measurement results and exposure model estimates were compared and analyzed.

**Results:** The survey format (draft) was determined by comprehensively reviewing the characteristics of each type of cleaning, alternative methodologies, and matters considered during exposure assessment. The survey form was divided into categories: general information, process and activity characteristics, operating conditions, additional risk management, and alternative considerations. As a result of analyzing the characteristics of domestic halogenated organic solvent cleaning based on the work environment measurement DB, the measurement frequency of dichloromethane and trichloroethylene was the most frequent, but it gradually decreased, while the frequency of measurement of 1,2-dichloropropane gradually increased. This seems to be related to the timing of chemical regulation. As a result of the pilot investigation, the actual measured exposure amount was relatively higher than the estimated value in a significant number of cleaning operations. This shows that domestic cleaning methods using halogenated solvents do not sufficiently reflect the exposure level within the corresponding PROC in the European exposure model.

**Conclusion:** The database to be required for the evaluation and management of safe cleaning is the type of cleaning agent in terms of hazard. And in terms of exposure, there are the type of cleaning/cleaning equipment, amount of cleaning agent handled/working time, physical condition/working temperature/distance from the source of contamination, ventilation level including local exhaust, etc. Ultimately, in order to suggest an alternative or improvement, it is also necessary to establish data on cleaning requirements (such as cleaning needs and cleaning levels, including items to be cleaned and decontamination targets, etc.). This study attempted to lay the foundation for sustainable safety management

of industrial cleaning by proposing DB items to be established for safe management of cleaning.

**Key words:** Industrial cleaning, Halogenated organic solvents, Alternative assessment, Safe cleaning database

# 부록

## 세척작업의 안전한 관리를 위한 조사표(안)

### 0. 사전안내

- 연구기관 : 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 산업화학연구실
- 연구과제 : 세척작업의 안전한 관리를 위한 결정요인 분석 및 구조화
- 연구목적 : 할로겐화 유기용제 세척작업에 대한 안전성(위험성) 평가 및 세척작업에 대한 지속 가능한 안전관리의 토대 마련

### 1. 일반사항

- 사업장명 :
- 조사일 :
- 사업장 담당자 :

### 2. 공정 및 작업특성

세척작업 유형	세척작업 유형 설명 <input type="checkbox"/> 습식 <input type="checkbox"/> 건식 <input type="checkbox"/> 혼합(                    )
- 공정범주(PROC)	PROC 1~28, 0 중 선택 세척작업이 이루어지는 과정을 상세하게 기술
세척제	세척제의 MSDS번호 기재(없다면 제품명 및 구성성분/함량 기재 혹은 MSDS 복사/사진)
- 세척제범주	세척제의 주요 구성성분에 따라 구분 <input type="checkbox"/> 수계 <input type="checkbox"/> 물+계면활성제 <input type="checkbox"/> 기타(                    ) <input type="checkbox"/> 준수계 <input type="checkbox"/> 물+계면활성제+유기용제 <input type="checkbox"/> 기타(                    ) <input type="checkbox"/> 용제계 <input type="checkbox"/> 할로겐계( <input type="checkbox"/> 불소계, <input type="checkbox"/> 염소계, <input type="checkbox"/> 브롬계) <input type="checkbox"/> 탄화수소계 <input type="checkbox"/> 산소화 용제계( <input type="checkbox"/> 알코올계, <input type="checkbox"/> 케톤계, <input type="checkbox"/> 에스테르계, <input type="checkbox"/> 에테르계) <input type="checkbox"/> 혼합(                    )

세척작업의 안전한 관리를 위한 결정요인 분석 및 구조화

피세척물(대상물)	세척 대상을 확인(종류, 재질, 크기 등)
오염제거대상	피세척물에서 제거해야 할 오염 종류
세척설비	세척설비 사양(모델명 혹은 제작여부, 설계/구성, 도입시기, 세척기 개수 등) 자동세척기, 세척조로 구성된 세척기(가열, 초음파, 호이스트 등 요건), 수작업 등 고려
기타 특이사항	세척작업에 있어 특이사항, 상세내용 기술 (폐수처리 등 오염방지시설, 건조필요, 부식 및 인화 등 위험성 고려, 재생/재사용 여부, 유지보수 및 청소 관련 등)

### 3. 사용조건

세척제 취급량	일간 혹은 작업당 취급량(단위 포함) 제품 내 평가대상인자 함량을 반드시 재확인(2. 세척제 항목 참조)
물리적 상태	사용 세척제의 물리화학적 상태(취급 중 변화가 있다면 기재)
작업자 수	세척 공정 작업자 수(기타 작업 병행 여부 확인)
작업시간 및 속도	일일 최소-대 작업시간 등 작업 상황 기술(스프레이 형태라면 적용 속도, 압력 등을 확인) 연속/간헐작업 여부
산업안전보건 관리수준	산업용 예시: 숙련된 사람이 일정 구역 내에서 적절한 장비 사용 <input type="checkbox"/> professional use <input type="checkbox"/> industrial use
작업장소	사용장소 면적 확인 <input type="checkbox"/> 실내/실내(100-1,000㎡) <input type="checkbox"/> 실내(>1,000㎡) <input type="checkbox"/> 실외

작업온도	최대 작업온도(°C)
작업장 환기수준	실내 작업장의 전체 환기수준 기재(ACH 확인) <input type="checkbox"/> 기본(-3 ACH) <input type="checkbox"/> 양호(3-5 ACH) <input type="checkbox"/> 고급(5-10 ACH) <input type="checkbox"/> 특정(10-30 ACH) <input type="checkbox"/> 특정(30 ACH-) <input type="checkbox"/> 하방기류 스프레이룸
국소배기	국소배기장치 보유 여부 및 설계, 가동에 대한 효율/제어풍속 확인 또는 상황 기술 <input type="checkbox"/> 국소배기장치 없음 <input type="checkbox"/> 기본 국소배기장치 - 캐노피후드, 이동형, 다목적(효율 약 50-80%) <input type="checkbox"/> 설계된 국소배기장치 - 리시버형(효율 약 80-90% 이상) <input type="checkbox"/> 설계된 국소배기장치 - 포워식(효율 약 90-95% 이상) <input type="checkbox"/> 밀폐형 후드(효율 약 95% 이상) <input type="checkbox"/> 기타(                      )
보호장비 - 호흡기	해당 작업 시 착용하는 호흡용 보호구 및 보호계수(APF) 확인 APF에 따라 7등급(4, 5, 10, 20, 40, 200, 2,000이상)
보호장비 - 피부	해당 작업 시 착용하는 피부 보호구 확인 (착용여부, 효율, 재질확인(NR/CR/NBR/Butyl/FR/PVC 등), 교체주기, 피부보호크림 사용여부)
보호장비 - 기타	해당 작업 시 착용하는 기타 보호구 확인(고급, 안면보호구, 보호복 사용여부)
오염원과의 거리	노출원과의 거리(1m 기준)
기타 특이사항	사용조건에 있어 특이사항, 상세내용 기술 (세척조 개방면적, 자동화 여부, 닦아내는 작업의 경우 시간당 처리 표면적 등)

#### 4. 추가 위험관리

환기 및 보호구 외 기타 위험저감 요소	별도 작업위치, 밀폐, 발생원 격리 여부, 외부 장소라면 거리
--------------------------	------------------------------------

## 5. 대체 고려

<p><b>세척 사유 및 필요성</b></p>	<p>공정 단계에서의 세척 사유 및 필요성 확인</p>
<p><b>세척비용</b></p>	<p>세척단가, 변화 등 확인</p>
<p><b>세척수준 요구사항</b></p>	<p>예를 들어 탄화수소계는 KBV, 주문자가 세척에서 요구하는 조건 등 확인</p>
<p><b>대체 필요성 및 의사</b></p>	<p>현재 세척작업에서 대체가 필요하다고 생각하는지 여부 및 그 이유                  대체 의사가 있는데 대체하지 못하는 이유                  대체시 고려사항 우선순위(세척력, 경제성(비용/시간), 규제, 주문자요구, 유해위험성, 대표자/노조 요구, 전문성 등)</p>
<p><b>기타 특이사항</b></p>	<p>공급망 고려</p>

## 연구진

연구기관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 이해진 (연구위원, 산업화학연구실)

연구원 : 이나루 (실장, 산업화학연구실)

연구원 : 한정희 (연구위원, 산업화학연구실)

연구원 : 이도희 (과장, 산업화학연구실)

연구원 : 신아롬 (대리, 산업화학연구실)

연구원 : 한슬기 (대리, 산업화학연구실)

## 연구기간

2023. 1. 1. ~ 2023. 11. 30.

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며,  
우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

**세척작업의 안전한 관리를 위한 결정요인 분석 및 구조화  
(2023-산업안전보건연구원-1131)**

발행일 : 2023년 11월 30일

발행인 : 산업안전보건연구원 원장 김은아

연구책임자 : 산업화학연구실 연구위원 이해진

발행처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400

전화 : 042-869-0351

팩스 : 042-863-9001

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

I S B N : 979-11-93642-57-3

공공안심글꼴 : 무료글꼴, 한국출판인회의, Kopub바탕체/돋움체



# 세척작업의 안전한 관리를 위한 결정요인 분석 및 구조화

## 표지

량데뷰 226g(인쇄용지)

## 내지

네오스타 미색 80g(인쇄용지)  
저탄소제품 708kg CO<sub>2</sub> eq./ton

환경보호를 위해  
저탄소용지(친환경용지)를  
사용하였습니다.



산업재해예방  
안전보건공단  
산업안전보건연구원

