

화학사고 예방 및 원인규명을 위한

산업용 세척제 화재·폭발 위험성평가

서동현·고인희·최이락·이한희·김천동

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



요약문

- 연구기간 2024년 07월 ~ 2024년 9월
- 핵심 단어 세척제, 세정제, 시너, 유기용제
- 연구과제명 산업용 세척제 화재·폭발 위험성평가

1. 배경 및 목적

세척제 사용 및 취급 공정에서 화재·폭발 사고가 지속적으로 발생하고 있지만 화재·폭발 위험성에 대한 연구보다는 유해성에 대한 연구가 주로 이루어져 왔다. 따라서 본 연구에서는 세척제 사용 및 취급공정에서 발생한 화재·폭발 사고사례를 조사 및 분석하고, 세척제의 화재·폭발 특성 시험을 통해 관련 공정에서의 화재·폭발 사고예방을 위한 정보를 제공하고자 하였다.

2. 주요 내용

- 1) 산업현장에서 세척제로 사용되고 있는 것으로 파악된 111종의 물질 중 약 87.4%(97종)의 물질이 인화성이 있거나 화재가 발생할 가능성이 있는 물질인 것으로 나타났다. 특히 인화점이 30 ℃ 이하인 물질은 51개 인 것으로 나타나 약 46%의 물질이 상온에서도 불이 붙을 수 있는 것으로 나타났다. 인화점이 60 ℃ 이하인 세척제 물질로 확대하면 해당 물질은 69종으로 나타나 전체 111종의 약 62.2%를 차지하는 것으로 나타났다.
- 2) 세척제 사용 및 취급 중 발생한 중대재해사례 17건에서 사고와 관련된 세척제는 여러 물질을 혼합한 혼합물 세척제가 7건으로 가장 많았다.

단일 물질로는 톨루엔이 3건으로 가장 많았고, 아세톤, DMF, 1,3-디옥솔란, 노말헵탄 등이 있는 것으로 나타났다. 점화원으로는 정전기(추정) 7건, 용접 불꽃 5건, 모터 스파크와 설비에서 발생한 불꽃이 각 1건, 기계적 마찰 등이 1건인 것으로 나타났다. 설비별로 구분하면 탱크나 필터와 같은 용기류 4건, 세척조 3건, 반응기 2건, 기계 또는 기계부품 2건, 건조기 및 향온향습기 2건, 선박 내부 1건, 기타 세척제를 담아 놓은 용기와 관련된 화재 또는 폭발 사고 2건이 발생한 것으로 나타났다.

3) 세척제 취급 중 발생한 부상재해사례 54건에서는 시너, 유기용제(솔벤트), 알코올 등의 세척제가 많았던 것으로 나타났지만, 이러한 일반적인 명칭만으로는 세척제에 함유된 물질이 무엇인지 파악하기가 어려웠다. 점화원으로는 정전기가 5건, 전열기 또는 난로 4건, 전기 스파크 3건, 용접 불꽃 2건, 그라인더 불꽃 2건, 라이터 2건 등이었다. 그러나 세척제로 사용하는 물질의 종류와 점화원을 확인할 수 없는 재해가 많았기 때문에 사고원인 파악을 위한 추가적인 조사가 필요할 것으로 판단되었다.

4) 사고의 원인물질로 추정되는 세척제 시료 중 시너류 3종의 인화점은 (-23.5 °C ~ 38 °C)의 범위에서 나타났다. 같은 시너라는 명칭을 사용하더라도 그 구성물질의 종류에 따라 인화점이 큰 차이를 보였다. 시너 시료 2종의 인화점은 영하의 값을 보여 누출 시 점화원에 노출될 경우 쉽게 화재가 발생할 수 있을 것으로 판단되었다. 폭발한계는 0.942%, 46.75 mg/L(at 30°C), 58.5 mg/L(at 40°C)의 값을 보여 작은 양이 노출되어도 폭발이나 화재가 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 에탄올이 주성분인 세척제의 인화점은 에탄올과 비슷한 14.5 °C, 폭발 하한은 4.28%인 것으로 나타나 화재·폭발 위험성이 높은 물질인 것으로 판단되었다.

5) 세척제는 공기 중에 노출된 상태에서 사용하는 경우가 많기 때문에 점화

원 관리가 특히 중요할 것으로 판단되었다. 세척제 사용 중 화재·폭발 사고의 점화원은 KOSHA GUIDE에 제시된 사항과 유사하게 정전기, 전기 또는 기계적 스파크, 비방폭 전기설비, 마찰열, 고열 표면, 용접 또는 절단 불티, 가열용 전기설비, 라이터 등이었다. 따라서 이러한 점화원 관리가 중요한 것으로 나타났다. 세척제로 사용되는 시너의 경우 인화점이 다양하게 나타났지만, 대부분 상온에서 불이 붙을 수 있는 수준의 값을 보였다. 또한, 최소점화에너지도 매우 낮은 수준이었기 때문에 세척제 사용 및 취급 중에는 정전기 관리도 매우 중요할 것으로 판단되었다.

3. 연락처

- 평가책임자 : 산업안전보건연구원 산업안전연구실 연구위원 서동현
 - ☎ 042) 869. 0332
 - E-mail : seodh93@kosha.or.kr



목 차

I. 서 론	1
1. 배경 및 목적	3
2. 평가 범위 및 내용	5
3. 위험성평가 대상 물질	7
II. 산업용 세척제의 종류 및 세척 공정 특성	11
1. 산업용 세척제의 종류	13
2. 산업용 세척제로 사용하는 물질	17
3. 세척 공정 및 설비	27
III. 세척제 취급 관련 화재·폭발 사고사례	31
1. 중대재해 및 중대산업사고	33

2. 부상사고	40
3. 사고사례를 통해 본 시사점	45
IV. 시험장비 및 방법	49
1. 인화점	51
2. 폭발한계	57
3. 자연발화점	61
4. 증기압	66
V. 결과 및 고찰	69
1. 산업용 세척제로 사용하는 물질의 화재·폭발 특성	71
2. 세척제 시료의 화재·폭발 위험성	76

연구제목(Kopub돋움체, 9pt) 상단의 비탕쪽 아이콘을 클릭하여 수정가능

3. 세척제의 위험성평가 및 화재·폭발 예방대책	79
VI. 요약 및 결론	81
참고문헌	86

표 목차

〈표 Ⅰ-1〉 위험성평가 범위 및 내용	6
〈표 Ⅰ-2〉 물리적 위험성 시험 대상 물질의 물리적 특성 및 용도	9
〈표 Ⅰ-3〉 물리적 위험성 시험 대상 물질 구성성분의 물리적 특성	10
〈표 Ⅱ-1〉 수계 및 용제계 세척제의 특성	13
〈표 Ⅱ-2〉 세척제의 종류 및 주요 물질	16
〈표 Ⅱ-3〉 세척 공정에서 사용하는 다빈도 물질의 연도별 작업환경측정 사업장수 ..	18
〈표 Ⅱ-4〉 세척제로 사용하는 물질의 법적 적용 대상	19
〈표 Ⅱ-5〉 업종별 세정작업 작업환경 측정 건수(2014~2016년)	24
〈표 Ⅱ-6〉 산업세정 적용 분야 및 용도	25
〈표 Ⅱ-7〉 주요 업종별 주요 세척제 작업환경측정 건수(2014~2016년)	26
〈표 Ⅱ-8〉 산업 분야의 공정 및 방법 세척	29
〈표 Ⅱ-9〉 일반적인 세척 설비의 유형	30
〈표 Ⅲ-1〉 국내 세척제 취급 관련 화재·폭발사고(중대재해) 사례(2010~)	36
〈표 Ⅲ-2〉 국내 세척제 취급 관련 화재·폭발사고(부상재해) 사례(2019~2023) ..	40
〈표 Ⅳ-1〉 인화점 시험 방법의 종류	51
〈표 Ⅳ-2〉 인화점 시험방법에 따른 승온 속도	56
〈표 Ⅳ-3〉 인화점 측정 계산 및 정밀도	56
〈표 Ⅳ-4〉 자연발화점 측정 관련 표준시험법의 비교	63

연구제목(Kopub돋움체, 9pt) 상단의 바탕쪽 아이콘을 클릭하여 수정가능

〈표 IV-5〉 화학물질의 증기압 측정법의 종류 및 측정범위	67
〈표 IV-6〉 증기압 측정장비 사양	68
〈표 V-1〉 세척제 사용 물질의 화재·폭발 특성	72
〈표 V-2〉 사고원인 물질의 물리적 위험성 시험 결과	78

그림목차

[그림 IV-1] Tag Flash Point Tester (TAG 4)	52
[그림 IV-2] Fully Automatic Pensky-Martens Flash Point Analyzer (PMA4) ·	53
[그림 IV-3] Fully Automatic Flash Pointer (Cleveland Open Cup Analyzer - CLA4)	55
[그림 IV-4] 온도와 가연성 물질의 연소 특성 간의 관계	58
[그림 IV-5] 폭발한계 측정장치	59
[그림 IV-6] Semi-automatic autoignition tester (ZPA-3)	64
[그림 IV-7] 증기압 측정장비 사진 및 작동 원리	68

I. 서론

.....

I. 서론

1. 배경 및 목적

세척은 피세척물을 변형시키지 않고, 피세척물 표면에 잔류하고 있는 원하지 않는 물질(기름, 기름때, 왁스, 그리스, 먼지, 지문, 땀, 각종 이물질 등)을 화학적 또는 물리적 기전을 이용하여 제거함으로써 깨끗한 표면을 만들기 위한 작업으로 세정이라고도 한다(정경숙 등, 2017; 이혜진 등, 2023). 세척은 보통 별도의 분리 또는 독립된 과정으로 인식하기보다는 전체 공정 내에서의 한 단계로 보는 경우가 많다(이혜진 등, 2023). 그래서 세척이라는 용어를 쓰지 않고 작업 전후에 있는 단계나 다른 공정과 연계해서 탈지, 박리, 제거, 표면처리, 세정, 초음파 등으로 부르거나 다른 용어로 표현되기도 한다(이혜진 등, 2023).

세척 작업은 기계·금속 산업, 전기·전자 산업, 자동차 산업, 정밀기기 산업, 유리 및 광학 산업, 표면 처리 및 도금산업, 기타(플라스틱, 고무, 화학, 인쇄, 화장품 등) 산업(플라스틱, 고무, 화학, 인쇄, 화장품 등)에서 사용되고 있다(정경숙 등, 2017). 세척 공정에 사용되는 화학물질은 2014~2016년의 작업 환경측정 결과를 이용하여 분석한 결과 111종인 것으로 보고되었다(정경숙 등, 2017). 이러한 세척제 중에서 많은 수가 유기용제에 해당된다.

유기용제는 휘발성이 강해 공기 중으로 퍼져나가 호흡기나 피부를 통해 체내에 흡수될 수 있다. 유기용제는 물질의 종류와 독성, 노출 농도, 노출 시간 등에 따라 피부 손상, 말초신경 장애, 시력 저하, 뇌기능 장애 등 신체에 다양한 영향을 주는 것으로 알려져 있다(GS칼텍스 홈페이지). 그래서 그동안 세척제 관련 연구는 주로 인체에 미치는 유해성을 중심으로 수행되어 왔다. 그러나 세척제에는 인화되기 쉬운 물질이 포함되어 있거나, 인화성이 높은 단일

물질을 세척제로 사용하는 경우가 많아 세척제의 사용 및 취급 작업 중 화재·폭발 사고가 빈번하게 발생하고 있다(III장 참조).

세척제 사용 및 취급 공정에서의 화재·폭발사고를 예방하기 위해서는 세척제로 사용하는 물질과 그 물질의 물리적 위험성을 파악할 필요가 있다. 물리적 특성 데이터가 없는 물질은 시험을 통해 그 데이터를 제공하고, 사고사례로부터 교훈을 얻고 사고예방대책을 마련하도록 해야 한다.

따라서 본 평가에서는 세척제 사용 및 취급 공정에서 발생한 화재·폭발 사고사례를 조사 및 분석하고 세척제로 사용하는 물질의 화재·폭발 특성값을 문헌조사를 통해 제시하고자 하였다. 그리고 혼합물질로 된 세척제 일부를 선정하여 화재·폭발 특성을 시험하고 그 결과를 제시함으로써 세척제 사용 중의 화재·폭발 사고예방에 기여하고자 하였다.

2. 평가 범위 및 내용

본 위험성평가에서 의미하는 세척은 산업용 세척(industrial cleaning)으로 한정하며, 산업용 세척제로 사용되는 물질의 화재·폭발 위험성평가를 수행하고자 하였다. 이를 위해 산업용 세척제로 사용되는 물질의 종류와 이들 물질의 인화점, 자연발화점, 폭발한계, 최소점화에너지 등을 조사하였다. 그리고 화재·폭발 사고의 원인물질로 추정되는 시료 또는 유사한 물질에 대해 인화점, 자연발화점, 폭발하한계 등의 시험을 수행하였다.

본 위험성평가의 구체적인 내용과 범위는 다음과 같다.

1. 산업용 세척제 사용 및 취급 중에 발생한 화재·폭발 사고 사례 조사 및 분석
2. 산업용 세척제로 사용하는 단일 물질의 종류 및 화재·폭발과 관련된 물리적 특성 조사 및 분석
3. 산업용 세척제 사용 및 취급 중 발생한 화재·폭발 사고의 원인으로 추정되는 물질에 대한 화재·폭발 관련 물리적 특성 시험 및 평가
 - 사업장에서 발생한 사고사례를 조사하여 사고원인으로 작용한 세척제 시료 4종을 대상으로 인화점, 폭발한계, 증기압 측정 시험 등을 수행하였다. 다만, 자연발화점 시험은 장비 등의 문제로 인해 일부 물질에 대해서만 수행하고, 그 결과를 제시하였다. 시험대상 시료는 중대재해 관련 물질 2종(혼합물질), 부상재해 관련 물질 2종(혼합물질)을 선정하였다.
 - 물질에 열을 가했을 때 나타나는 특성은 DSC와 같은 열분석 시험을 수행하면 가능하나 시료를 가열하는 중 대부분 증발할 것으로 예상되어 열분석 시험은 수행하지 않았다.

4. 산업용 세척제 사용 및 취급 중 발생한 사고분석결과 및 물리적 특성 시험 결과를 종합한 위험성평가 결과 제시

- 세척제 관련 사고사례 조사 및 분석결과와 세척제로 사용되는 물질의 화재·폭발 특성 시험결과 등을 고려하여 위험성평가 결과를 제시하고자 하였다.

본 위험성평가 범위 및 내용을 정리하면 <표 II-1>과 같다.

<표 I-1> 위험성평가 범위 및 내용

조사 및 평가 대상	평가 범위 및 내용
<ul style="list-style-type: none"> • 세척제 취급 및 사용 중 재해사례 조사 <ul style="list-style-type: none"> - 중대재해, 중대산업사고, 부상재해 	<ul style="list-style-type: none"> • 최근 5년 동안 세척제 사용 및 취급 중 발생한 중대재해, 중대산업사고, 부상재해 등 조사 및 분석
<ul style="list-style-type: none"> • 산업용 세척제 <ul style="list-style-type: none"> - 사업장에서 세척제로 사용하고 있는 것으로 파악된 물질 111종 	<ul style="list-style-type: none"> • 문헌조사를 통해 인화점, 폭발한계, 자연발화점, 최소점화에너지 등을 조사하여 세척제로 사용하는 단일 물질의 화재·폭발 위험성 조사
<ul style="list-style-type: none"> • 사고원인 추정 물질 <ul style="list-style-type: none"> - 사고원인 물질로 추정되는 세척제(혼합물질) 4종(중대재해 관련 물질 2종, 부상재해 관련 물질 2종) 	<ul style="list-style-type: none"> • 인화점, 폭발한계, 자연발화점 등의 시험을 수행하고 이를 기초로 화재·폭발 위험성 평가

3. 위험성평가 대상 물질

1) 산업용 세척제로 사용하는 단일 물질

정경숙 등(2017)이 작업환경측정(2014~2016년) 결과를 이용하여 세척공정에서 사용하고 있는 물질로 확인한 111개 물질의 인화점, 자연발화점, 폭발한계(상한/하한), 최소점화에너지 등 화재·폭발과 관련된 물리적 특성값을 안전보건공단 MSDS(msds.kosha.or.kr) 자료와 참고문헌을 조사하였다.

참고로, 2019년에 산업안전보건연구원에서 수행한 작업환경실태조사 결과를 이용하여 “세척제거” 공정에서 세정제, 탈지제, 표면처리제 용도로 사용하는 물질 223개를 확인할 수 있었다. 그러나 이 물질 목록에는 소석고나 부탄과 같은 고체나 기체 상태의 물질도 포함되어 있어 참고자료로만 활용하고 평가를 위한 자료로는 사용하지 않았다.

2) 사고원인물질(추정)

최근 5년 동안 세척제의 사용 및 취급 공정에서 발생한 화재·폭발로 인한 중대재해 중에서 사고원인물질로 추정되는 세척제(혼합물질) 2종을 선정하여 인화점, 자연발화점, 폭발한계 등에 대한 시험을 수행하였다. 그리고 세척제의 사용 및 취급 공정에서 발생한 화재·폭발로 인한 부상 사고의 원인물질로 추정되는 세척제(혼합물질)와 유사한 세척제(시너) 2종을 구매하여 인화점, 폭발한계 등에 대한 시험을 수행하였다. 위험성평가 대상 물질의 MSDS에 제시된 기본 물성값 및 사고 발생 당시의 사용 용도는 <표 I-2>와 같다. <표 I-3>에는 각 물질의 MSDS에 나타난 세척제 구성 물질과 그 물리적 특성을 나타내었다. MSDS 상에는 각 구성물질의 대략적인 함량이 제시되어 있으나 본

보고서에는 그 함량을 표기하지 않았다. 시험에 사용한 시료는 다음과 같다.

[시험물질 1]

표면 처리한 기계부품을 에탄올로 세척 후 항온항습기에 넣고 건조 중 항온항습기가 폭발하였는데, 이때 사용한 세척제(에탄올 혼합물) 시료

[시험물질 2]

선박 발전기실 내부에서 세척제(시너류)를 사용해 세척작업 중 상부에서 용접 불꽃이 떨어지면서 화재가 발생하였는데, 이때 사용한 세척제 시료

[시험물질 3]

차량의 라디에이터를 교환하기 위해 탈거 후 엔진오일 등 누유로 인하여 세척제(락카 시너)로 세척 중 발화하였는데, 이때 사용한 세척제와 동일 제품 시료

[시험물질 4]

사업장에서 차량을 리프트로 들어 올린 후 엔진 하체의 오일 누유된 부분을 세척하기 위하여 세척제(에나멜 시너)를 작은 통에 담아 분사기로 뿌려 세척 중 갑자기 불꽃이 튀면서 화재가 발생하였는데, 이때 사용한 세척제와 유사한 제품 시료

〈표 I-2〉 물리적 위험성 시험 대상 물질의 물리적 특성 및 용도

연번	물질명	MSDS 자료				사용 용도 (물질구분)	
		구성 물질	인화점 (°C)	발화온도 (°C)	폭발범위 (%)		증기압
1	세척제1) (에탄올 혼합물)	Ethanol, 벤젠메탄아미움	13	363	3.3 (하한)	-	기계 부품 세척용 (중대재해 원인물질)
2	세척제2) (시너)	Naphtha, Toluene, Xylene, Benzene	≤ -21	265	1.0~7.6	0.62 kg/cm ² (37.8 °C)	선박 내부 세척용 (중대재해 원인물질)
3	세척제3) (락카 시너)	Xylene, Toluene, Methyl acetate, Acetone, 2-Butoxyethanol 등 11종	15	자료 없음	자료 없음	자료 없음	자동차 오일 제거용 (사고원인물질과 동일한 제품)
4	세척제4) (에나멜 시너)	Naphtha(petroleum), Hydrodesulfurized heavy, Xylene, Ethylbenzene	33	자료 없음	자료 없음	자료 없음	자동차 오일 제거용 (사고원인물질과 유사한 제품)

1) 중대재해조사 의견서에서 재인용

2) 중대재해조사 의견서에서 재인용

3) (주)OOOO, 락카 신나(OO-OOOO) 물질안전보건자료(MSDS), 20XX.

4) (주)OOOO, 에나멜 신나(OO-OOOO) 물질안전보건자료(MSDS), 20XX.

〈표 I -3〉 물리적 위험성 시험 대상 물질 구성성분의 물리적 특성

연번	물질명	MSDS 자료 ⁵⁾				
		구성 물질 (CAS No.)	인화점(°C)	폭발한계(%)(상한/하한)	자연 발화점(°C)	최소점화 에너지(mJ)
1	세척제1 (에탄올 혼합물)	Ethanol (67-17-5)	13	27.7/3.1	400	
		벤젠메탄아미움 (3734-33-6)	자료없음	자료없음	자료없음	자료없음
2	세척제2 (시너)	Naphtha (64741-46-4)	30(30~150)	7.6/1.1	230~260	
		Toluene (108-88-3)	4	7.8/1.0	480	0.24@4.1%
		Xylene (1330-20-7)	o-X: 30 p-X: 25 m-X: 25	6.7/0.9 7.0/1.1 7.0/1.1	≥ 528	0.2
		Benzene (71-43-2)	-11	8.0/1.2	498	0.2@4.7%
3	세척제3 (락카 시너)	Xylene (1330-20-7)	o-X: 30 p-X: 25 m-X: 25	6.7/0.9 7.0/1.1 7.0/1.1	≥ 528	0.2
		Toluene (108-88-3)	4	7.8/1.0	480	0.24@4.1%
		Methyl acetate (79-20-9)	-13	16/3.1	505	
		Acetone (67-64-1)	-18	13/2.2	465	1.15@4.5%
		2-Butoxyethanol (111-76-2)	63	12.7/1.1	230	
		Ethylbenzene (100-41-4)	18	6.7/1	432	
		n-Butyl acetate (123-86-4)	22	7.6/1.2	420	
		Ethanol (64-17-5)	13	27.7/3.1	400	
		Methanol (67-56-1)	11.11	50/6	440	0.14@14.7%
Methyl Ethyl Ketone (78-93-3)	-9	11.5/1.8	505	0.53@5.3%		
Tetrahydrofuran (109-99-9)	-14.5	11.8/2	321	0.54		
4	세척제4 (에나멜 시너)	Naphtha(petroleum), Hydrodesulfurized heavy(64742-82-1)	>25	7.0/0.6	>200	
		Xylene (1330-20-7)	o-X: 30 p-X: 25 m-X: 25	6.7/0.9 7.0/1.1 7.0/1.1	≥ 528	0.2
		Ethylbenzene (100-41-4)	18	6.7/1	432	

5) 자료출처: 한국산업안전보건공단 MSDS 웹사이트(<https://msds.kosha.or.kr>), KOSHA GUIDE(E-188-2021) 정전기 재해예방에 관한 기술지침

II. 산업용 세척제의 종류 및 세척 공정 특성



II. 산업용 세척제의 종류 및 세척 공정 특성

1. 산업용 세척제의 종류¹⁾

일반적으로 세척제는 수계와 용제계로 구분하는데, 여기서 용제계는 유기 용제를 의미한다. 수계는 물을 주제로 하며, 환경 및 작업자에 보다 친화적이라고 할 수 있다. 용제계는 수계 세척의 효과가 낮을 때 많이 사용하며, 오일, 그리스 또는 다른 제거하기 어려운 오염에 효과적이다. <표 II-1>에는 수계 및 용제계 세척제의 특성에 대해 나타내었다.

<표 II-1> 수계 및 용제계 세척제의 특성(이혜진, 2023)

구분	수계 세척제	용제계 세척제
안전성	<ul style="list-style-type: none"> • 비가연성 • 용제계보다 유해성이 낮음 	<ul style="list-style-type: none"> • 가연성(일부)으로 인해 별도 저장 및 처리 필요 • 유해성
환경영향	<ul style="list-style-type: none"> • VOC 방출 낮음 • 생분해성 	<ul style="list-style-type: none"> • VOC 방출 높음
비용 효과성	<ul style="list-style-type: none"> • 물은 공급이 쉽고, 경제적이며, 대규모 산업에 유리 (다만 폐수 처리는 별도) 	<ul style="list-style-type: none"> • 용제에 따라 비용이 다양
호환성	<ul style="list-style-type: none"> • 금속, 플라스틱, 세라믹 등 다양한 재료에 이용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 다양한 재료에 효과적이거나, 민감한 세척물의 경우 주의를 요함 • 물에 영향을 받는 정밀전자기계 기구 적용 용이
세척력	<ul style="list-style-type: none"> • 여러 종류의 오염을 제거하는데 효과적이거나, 오염도가 심한 경우 온도를 높이거나, 추가 성분(계면활성제 등)을 혼합하는 등의 물리·화학적 부가 요건 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 오일, 그리스와 같은 기름 성분 및 물에 용해되지 않는 오염 제거에 효과적
잔류물	<ul style="list-style-type: none"> • 세척 후 세척물 표면에 잔류물을 거의 남기지 않음 	<ul style="list-style-type: none"> • 용제가 비교적 빠르게 증발

1) 이혜진 등(2023)의 연구보고서 “세척작업의 안전한 관리를 위한 결정요인 분석 및 구조화”에 있는 내용을 발췌하여 작성하였으며, 다른 문헌에서 인용한 부분은 별도로 출처를 표기함

수계 세척제와 관련하여 물 자체만으로 어느 정도 오염을 제거할 수는 있지만, 산업용 세척에서 물로만 세척하는 경우는 거의 없다. 일반적으로 물을 주제로 하여 여러 성분을 혼합하여 세척력을 향상시킨다. 보통 계면활성제, 소포제, 용제, 부식방지제, 강화제, 용해보조제, 산화제 등의 성분을 첨가한다. 그러나 다른 성분을 혼합할수록 세척력은 좋아질 수 있지만 건조 또는 잔여물 제거 등에 대한 고려가 필요하다.

용제계 세척제는 보통 사용 후 증발되어 추가적인 처리를 요구하지 않는다. 휘발성 유기용제를 사용하는 냉세척도 동일하다. 이러한 휘발성의 주요한 지표는 증기압, 증발률, 증발열이다. 정밀세척분야에서는 휘발성 외에도 용해성(용해도), 낮은 점도 및 표면장력, 화학적 안전성, 대상물과의 호환성, 비휘발성 잔류물 등을 고려해야 한다.

용제(solvent)의 사전적 의미는 “물질을 용해하는 데 쓰는 액체”이다(네이버 국어사전). 용제는 물에 잘 녹지 않는 유지나 수지를 녹여 균일한 용액으로 만드는 물질로 화학적으로는 주로 석유에서 얻어지는 액체 탄화수소 유분을 말한다(GS칼텍스 홈페이지). “어떤 액체에 물질을 녹여서 용액을 만들 때 그 액체를 가리키는 말”로 용매를 사용하기도 한다(네이버 국어사전). 용매는 액체에 액체를 녹일 때 많은 쪽의 액체를 말한다(네이버 국어사전). 혹은 이 학적으로 취급하는 경우 용매라고 하며, 공업적으로 취급할 때 용제라고 말한다고도 한다.

일반적으로 용제는 액체 형태로, 녹인 물질을 화학적으로 바꾸지 않으면서 물질을 잘 드러내는 특성이 있다(GS칼텍스 홈페이지). 용제는 크게 유기용제와 무기용제로 나눌 수 있는데, 기름이나 지방과 같이 탄소를 기반으로 한 화합물은 유기용제, 그렇지 않은 경우는 무기용제라고 한다(GS칼텍스 홈페이지). 실생활에 사용하는 용제의 대부분은 유기용제이기 때문에, 이를 화학물질의 성상에 따라 다시 지방족 및 방향족 탄화수소류, 할로젠화 탄화수소류, 알코올류, 케톤류, 에테르류 등으로 분류한다. 또 극성에 따라 극성 용제와 무극성 용제, 비점에 따라 고비점, 중비점, 저비점 용제 등으로 구별할 수도 있

다(GS칼텍스 홈페이지).

참고로, 시너(thinner)는 “페인트를 칠할 때 도료의 점성도를 낮추기 위하여 사용하는 혼합 용제”를 말한다(네이버 국어사전). 톨루엔, 아세트산 에틸 따위의 혼합물로 휘발성이 크고 인화성이 강하여 화재의 원인이 되기 쉽다고 되어 있다(네이버 국어사전). “thinner”는 발음이 [θinə:]이다. 이에 따라 표기하면, ‘시너’가 옳다. ‘신나’로 발음하고 표기하는 경우가 흔한데, 잘못된 표현이다(네이버 국어사전).

〈표 II-2〉에는 진준환(2006), 정경숙 등(2017), 이해진 등(2023)이 작성한 자료를 재구성하여 세척제의 종류 및 주요 물질에 대해 나타내었다. 세척제를 수계, 용제계, 준용제계로 구분하였고, 수계는 순수계와 준수계, 용제계는 탄화수소계, 염소계, 불소계, 알코올계로 구분하였다. 준용제계는 터어핀계, 실리콘계, 무기알칼리계, 유기알칼리계로 구분하였다.

〈표 II-2〉 세척제의 종류 및 주요 물질

구분		주요 물질	주요 피세정물
수계	순수계	순수	화학처리 후의 세척물, 유리
	준수계	음이온계 계면활성제, 비이온계 계면활성제	일반금속 부품, 알루미늄 부품, 기계가공 부품, 유리
용제계	탄화수소계	이소파라핀계 탄화수소, 지방족 탄화수소 (톨루엔, 헥산, 헵탄, 벤젠, 자일렌 등)	일반기계 부품, 금속 부품, 프린트 기판, 전자 부품,
	염소계	염화메틸렌(CH ₂ Cl ₂), 트리클로로에틸렌(C ₂ HCl ₃), 퍼클로로에틸렌(C ₂ Cl ₄), 트랜스-1,2-디클로로에틸렌(C ₂ H ₂ Cl ₂), 디클로로프로판(DCP)	알루미늄 부품, 금속 기판, 필름 교정
	불소계	과불화화합물(PFC)	프린트기판, 전자부품, 일반기계 부품, 정밀기계 부품
		제2세대 프레온 (HCFC-225, HCFC-123, HCFC-141b)	
알코올계 (산소화)	메틸알콜, 에틸알콜, 이소프로필알콜(IPA), 메틸에틸케톤(MEK), 메틸이소부틸케톤, 테트라하이드로푸르푸릴알콜, 디메틸카보네디트(DMC), 아세톤 등	프린트기판, 전자 부품, 반도체 웨이퍼, 일반기계 부품	
준용제계 (준용매계)	터어핀계	리모넨	프린트 기판
	실리콘계	저분자 실리콘	프린트 기판, 전자 부품, 일반기계 부품
	무기알칼리계	수산화나트륨	금속 부품, 비철 부품
	유기알칼리계	디에탄올아민	프린트 기판, 금속 기판

※ 진준환(2006), 정경숙 등(2017), 이해진 등(2023)의 자료를 이용하여 재구성함

2. 산업용 세척제로 사용하는 물질

1) 세척 공정에서 사용하는 물질

정경숙 등(2017)은 2014~2016년의 작업환경측정 결과를 분석하여 국내 세척 공정에 111종의 화학물질이 사용되고 있는 것으로 보고하였다. 작업환경 측정 사업장 수가 60개 이상인 것은 톨루엔, 이소프로필알코올, TCE, 크실렌, 디클로로메탄, 아세톤, 에틸벤젠, 메틸에틸케톤, 수산화나트륨, n-헥산, 메틸이소부틸케톤, 메탄올, 초산부틸, 초산에틸, 헵탄, 수산화칼륨, 2-부톡시에탄올, 메틸클로로포름이었고, 이는 전체 측정 물질의 75%를 차지하는 것으로 보고하였다(정경숙 등, 2017). <표 II-3>에는 작업환경측정 결과를 이용하여 분석한 세척공정에 사용되는 물질의 측정 빈도를 나타내었다.

<표 II-4>에는 2014~2016년 작업환경측정에서 세척공정에서 사용하고 있는 물질로 확인된 111개에 대한 물질별 노출기준 유무, 작업환경측정대상 유무, 특수건강진단 대상 물질 유무를 나타내었다(정경숙 등, 2017). 노출기준이 없는 물질은 조사 작업환경측정 대상에서 제외되기 때문에 사업장에서 세척제로 사용하고 있는 물질 중 노출기준이 있는 물질만 이 목록에 나타나 있다고 볼 수 있어 제한점이 있다(정경숙 등, 2017).

참고로, 세척제로 사용하는 물질 중 인화점이 60°C 이하인 물질을 하루 동안 최대로 제조·취급하는 양이 5,000 kg 이상이거나 저장량이 200,000 kg 이상인 경우에는 산업안전보건법에 따른 공정안전보고서 제출 및 심사 대상 사업장으로 구분되어 규제 대상에 포함된다. 따라서 해당 물질을 제조하는 사업장은 대부분 법에 따라 공정안전관리를 수행하고 있을 것으로 판단되어 제조사업장보다는 취급 사업장을 중심으로 분석하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

〈표 II-3〉 세척 공정에서 사용하는 다빈도 물질의 연도별 작업환경측정 사업장수
(정경숙 등, 2017)

측정물질	2014		2015		2016		최대 측정 빈도
	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	
톨루엔	358	336	344	306	329	312	358
이소프로필알코올	270	254	279	253	274	261	279
TCE	262	230	224	209	205	197	262
크실렌	237	237	244	215	225	215	244
디클로로메탄	229	208	238	204	229	214	241
아세톤	204	219	221	201	214	206	221
에틸벤젠	173	168	174	145	157	137	174
메틸에틸케톤	141	137	144	122	143	120	144
수산화나트륨	98	97	113	117	143	131	143
n-헥산	129	121	124	121	123	111	129
메틸이소부틸케톤	122	109	123	104	105	92	123
메탄올	97	110	118	111	110	98	118
초산부틸	111	112	118	97	114	95	118
초산에틸	96	99	103	102	113	107	113
헵탄	87	76	86	85	95	78	95
수산화칼륨	45	51	66	77	83	76	83
2-부톡시에탄올	64	74	73	61	72	73	74
메틸클로로포름	61	50	49	38	41	25	61

〈표 II-4〉 세척제로 사용하는 물질의 법적 적용 대상(정경숙 등, 2017)²⁾

연번	CAS No.	물질명	노출기준 유무	작업환경측정 대상 유무	특수건강진단 대상 유무
1	79-00-5	1,1,2-트리클로로에탄	○	○	○
2	1717-00-6	1,1-디클로로-1-플루오로에탄	○	○	X
3	75-34-3	1,1-디클로로에탄	○	X	X
4	75-35-4	1,1-디클로로에틸렌	○	X	X
5	107-06-2	1,2-디클로로에탄 (이염화에틸렌)	○	X	○
6	156-59-2	1,2-디클로로에틸렌 (시스-1,2-디클로로에틸렌)	○	○	○
7	78-87-5	1,2-디클로로프로판	○	X	X
8	75-56-9	1,2-에폭시프로판	○	○	X
9	123-91-1	1,4-디옥산	○	○	○
10	106-94-5	1-브로모프로판	○	○	○
11	109-86-4	2-메톡시에탄올	○	○	○
12	110-49-6	2-메톡시에틸아세테이트	○	○	○
13	111-76-2	2-부톡시에탄올	○	○	○
14	78-92-2	2-부틸알코올	○	○	○
15	75-26-3	2-브로모프로판	○	○	○
16	110-80-5	2-에톡시에탄올	○	○	○
17	111-15-9	2-에톡시에틸아세테이트	○	○	○
18	127-19-5	N,N-디메틸아세트아미드	○	○	○
19	71-36-3	n-부틸알코올(1-부탄올)	○	○	○
20	110-54-3	n-헥산	○	○	○
21	95-50-1	o-디클로로벤젠	○	○	○
22	64-18-6	개미산	○	○	X
23	7722-84-1	과산화수소	○	○	X
24	111-30-8	글루타르알데히드	C	○	○
25	111-84-2	노난	○	X	X
26	71-23-8	노말-프로필알콜	○	X	X
27	75-52-5	니트로메탄	○	○	○

2) 정경숙 등(2017)의 보고서에서 제시된 111종의 세척제 목록임

산업용 세척제의 화재·폭발 위험성 평가

연번	CAS No.	물질명	노출기준 유무	작업환경측정 대상 유무	특수건강진단 대상 유무
28	121-14-2	디니트로톨루엔 (2,4-디니트로톨루엔)	○	○	○
29	68-12-2	디메틸포름아미드	○	○	○
30	111-42-2	디에탄올아민	○	○	X
31	111-40-0	디에틸렌트리아민	○	X	○
32	60-29-7	디에틸에테르	○	○	○
33	108-83-8	다이소부틸케톤	○	○	○
34	75-09-2	디클로로메탄	○	○	○
35	67-56-1	메탄올(메틸 알코올)	○	○	○
36	110-43-0	메틸노말-아밀케톤	○	○	○
37	591-78-6	메틸n-부틸케톤	○	○	○
38	101-68-8	메틸렌 비스페닐 다이소시아네이트	○	○	○
39	80-62-6	메틸메타크릴레이트	○	X	X
40	108-87-2	메틸시클로hex산	○	X	X
41	78-93-3	메틸에틸케톤	○	○	○
42	108-10-1	메틸이소부틸케톤	○	○	○
43	563-80-4	메틸이소프로필케톤	○	X	X
44	74-87-3	메틸클로라이드	○	○	○
45	71-55-6	메틸클로로포름	○	○	○
46	71-43-2	벤젠	○	○	○
47	7664-39-3	불산	○	○	○
48	8032-32-4	브이엠 및 피 나프타	○	X	X
49	108-05-4	비닐아세테이트	○	○	X
50	56-23-5	사염화탄소	○	○	○
51	75-21-8	산화에틸렌	○	○	○
52	1310-73-2	수산화나트륨	C	○	X
53	1310-58-3	수산화칼륨	C	○	X
54	1305-62-0	수산화칼슘	○	○	X
55	8052-41-3	스토다드솔벤트	○	○	○
56	100-42-5	스티렌	○	○	○
57	143-33-9	시아나화나트륨	○	○	○
58	74-90-8	시아나화수소	C	○	○

II. 산업용 세척제의 종류 및 세척 공정 특성

연번	CAS No.	물질명	노출기준 유무	작업환경측정 대상 유무	특수건강진단 대상 유무
59	151-50-8	시안화칼륨	○	○	○
60	108-94-1	시클로헥사논	○	○	○
61	110-82-7	시클로헥산	○	○	○
62	110-83-8	시클로헥센	○	○	○
63	75-05-8	아세토니트릴	○	○	○
64	67-64-1	아세톤	○	○	○
65	107-13-1	아크릴로니트릴	○	○	○
66	7664-41-7	암모니아	○	○	○
67	64-17-5	에탄올	○	X	X
68	141-43-5	에탄올아민	○	○	X
69	107-21-1	에틸렌글리콜	C	○	○
70	112-07-2	에틸렌글리콜모노부틸 아세테이트	○	○	○
71	100-41-4	에틸벤젠	○	○	○
72	140-88-5	에틸아크릴레이트	○	○	X
73	7647-01-0	염화수소	○	○	○
74	583-60-8	오쏘-메틸시클로헥사논	○	○	○
75	10028-15-6	오존	○	○	○
76	111-65-9	옥탄	○	X	X
77	78-83-1	이소부틸알콜	○	○	○
78	123-51-3	이소아밀알콜	○	○	○
79	67-63-0	이소프로필 알코올	○	○	○
80	7664-38-2	인산	○	○	○
81	7697-37-2	질산	○	○	○
82	64-19-7	초산	○	○	○
83	79-20-9	초산메틸	○	○	X
84	123-86-4	초산부틸	○	○	X
85	141-78-6	초산에틸	○	○	X
86	110-19-0	초산이소부틸	○	○	X
87	123-92-2	초산이소아밀	○	○	○
88	108-21-4	초산이소프로필	○	○	X
89	8008-20-6	케로젠	○	X	X
90	1319-77-3	크레졸	○	○	○

산업용 세척제의 화재·폭발 위험성 평가

연번	CAS No.	물질명	노출기준 유무	작업환경측정 대상 유무	특수건강진단 대상 유무
91	1330-20-7	크실렌	○	○	○
92	108-90-7	클로로벤젠	○	○	○
93	109-99-9	테트라하이드로퓨란	○	○	○
94	108-88-3	톨루엔	○	○	○
95	584-84-9	톨루엔-2,4-다이소시아네이트	○	○	○
96	91-08-7	톨루엔-2,6-다이소시아네이트	○	○	○
97	95-63-6	트리메틸벤젠 (1,2,4-트리메틸벤젠)	○	X	X
98	121-44-8	트리에틸아민(액체)	○	X	X
99	67-66-3	트리클로로메탄	○	○	○
100	79-01-6	트리클로로에틸렌	○	○	○
101	127-18-4	퍼클로로에틸렌	○	○	○
102	108-95-2	페놀	○	○	○
103	109-66-0	펜탄	○	X	X
104	50-00-0	포름알데히드	○	○	○
105	107-98-2	프로필렌글리콜모노메탈에테르	○	X	X
106	302-01-2	하이드라진(히드라진)	○	X	○
107	822-06-0	헥사메틸렌 다이소시아네이트	○	○	○
108	142-82-5	헵탄	○	○	○
109	7664-93-9	황산	○	○	○
110	7664-93-9	황산(pH2.0초과)	○	○	○
111	123-31-9	히드로퀴논 (디하이드록시벤젠)	○	○	○

2) 업종별 세척 작업

정경숙 등(2017)이 2014~2016년의 작업환경측정 결과를 분석한 자료에 따르면, 업종별로는 <표 II-5>와 같이 전자부품제조업, 자동차 부품제조업, 도장 및 기타 피막처리업, 도금업, 병원, 기계 제조업, 주형 및 금형 제조업, 금속가공제품 제조업, 반도체 제조용 기계제조업, 다이오드 트랜지스터 및 유사 반도체 소자 제조업, 인쇄회로기판 제조업, 탭 밸브 및 유사장치 제조업, 기타 특수목적용 기계제조업, 금속 열처리업에서 2014-2016까지 60건 이상의 작업환경 측정이 이루어진 것으로 나타났다. 이는 전체 측정 건수의 48.4%를 차지하는 것으로 나타났다.

세척작업은 <표 II-6>에서 보는 바와 같이 산업 각 분야에서 적용되며 생산효율, 경제성, 제품의 품질 및 기능 등에 크게 영향을 미치고 있다. 또한 생산공정의 환경/안전성 문제의 중요한 요인의 하나로 부각되고 있다(배재흠 등, 1999; 西村眞幸, 1997).

〈표 II-5〉 업종별 세정작업 작업환경 측정 건수(2014~2016년)(정경숙 등, 2017)

업종	빈도	비율(%)
기타전자부품제조업	466	7.2
기타자동차부품제조업	380	5.8
도장및기타피막처리업	373	5.7
자동차차체용부품제조업	280	4.3
도금업	244	3.8
일반병원	197	3.0
그외기타일반목적용기계제조업	184	2.8
주형및금형제조업	159	2.4
그외기타분류안된금속가공제품제조업	144	2.2
반도체제조용기계제조업	132	2.0
그외기타금속가공업	119	1.8
다이오드,트랜지스터및유사반도체소자제조업	116	1.8
인쇄회로기판제조업	84	1.3
탭, 밸브및유사장치제조업	82	1.3
그외기타특수목적용기계제조업	72	1.1
금속캔및기타포장용기계제조업	64	641
금속열처리업	60	0.9
전체	6,501	100

〈표 II-6〉 산업세정 적용 분야 및 용도

적용산업	적용분야 및 용도
1. 금속	a. 도금 전후 b. 도장 전 c. 금속가공 전반(판, 관, 코일 등) d. 열처리 전후 e. 팔레트(palette)
2. 화학	a. 부품(펌프 등) b. 플랜트 세정
3. 전력	a. 부품(펌프, 터빈 등) b. 플랜트 세정
4. 항공기	a. 기체 b. 부품 c. 엔진 d. 활주로
5. 자동차	a. 자동차(내외) b. 부품
6. 기계	a. 공조 b. 금속가공 부품(절삭, 프레스, 인발) c. 금형 d. 열처리 전후
7. 조선	a. 부품
8. 전기·전자	b. 프리트기판 b. 자기테이프(유리, 알루미늄) c. 가공 부품 d. 전기·전자 부품 e. 팔레트
9. 요업	a. 유리 b. 세라믹 c. 타일
10. 식품	a. 식기·용기 b. 탱크 c. 팔레트 d. 상(table)
11. 인쇄	a. 인쇄기 b. 용기 c. 도금 d. 제판·옵셋(스크린 인쇄 포함)
12. 플라스틱	a. 이형제 b. 용기 c. 도금 전 d. 스크류 e. 성형품 f. 팔레트 g. 재생을 위한 오염 제거 h. 팔레트
13. 의약	a. 주사침, b. 장치 c. 검사기기 d. 혈액제거 e. 팔레트
14. 스포츠용품	a. 부품
15. 정밀기기	a. 부품(카메라, 광학용 복사기, 베어링 등) b. 팔레트

※ 출처: 배재흠 등(1999)에서 재인용함

3) 업종별 사용 물질

업종별 주요 세척제 사용 물질을 보면 〈표 II-7〉과 같이 기타 자동차 부품 제조업에서는 이소프로필알코올, TCE, 디클로메탄, 톨루엔 순으로 작업환경 측정 건수가 많았고, 기타 전자부품제조업은 이소프로필알코올, 톨루엔, TCE, 아세톤, 디클로로메탄이 많았으며, 도금업은 TCE가 가장 많았고, 도장 및 기타 피막처리업에서는 톨루엔이 압도적으로 많고, 크실렌, 아세톤, 에틸벤젠, TCE, 이소프로필알코올 순이었으며, 자동차 차체용 부품 제조업에서는 TCE, 톨루엔, 디클로로메탄 순으로 많았다(정경숙 등, 2017).

〈표 II-7〉 주요 업종별 주요 세척제 작업환경측정 건수(2014~2016년)(정경숙 등, 2017)

화학물질	기타 자동차 부품 제조업	기타 전자부품 제조업	도금업	도장 및 기타 피막처리업	자동차 차체용 부품 제조업
이소프로필알코올	157	350	30	126	44
TCE	136	177	156	126	107
디클로로메탄	130	120	71	97	91
톨루엔	103	185	83	267	93
수산화칼륨	74	51	10	12	75
수산화나트륨	59	33	41	23	46
크실렌	57	88	48	189	63
아세톤	50	166	43	160	25
메틸에틸케톤	40	42	23	80	54
초산에틸	40	29	26	87	30
에틸벤젠	34	41	36	148	45
메탄올	34	75	0	71	50
n-헥산	27	62	20	76	10
메틸이소부틸케톤	27	14	25	119	38
헵탄	21	66	12	47	27
2-부톡시에탄올	16	23	10	70	13
초산부틸	14	14	21	141	28
1,2-DCP	10	0	0	0	1
메틸클로로포름	5	14	11	16	22
전체	1,034	1,550	666	1,855	862

3. 세척 공정 및 설비

1) 세척 공정

세척은 크게 세척(wash), 행굼(rinse), 건조(dry)의 3단계로 구성된다. 각 단계는 사실상 분리된 기능을 하며, 각각의 설비나 화학적 요소가 필요할 수 있다(이혜진 등, 2023). 세척제는 제거하고자 하는 오염과 피세척물이 무엇인지와 건조를 포함한 세척 요건을 어느 수준으로 달성해야 하는지와 같은 기능적인 부분과 안전보건환경 측면에서의 규제적인 부분을 고려해야 한다(이혜진 등, 2023).

(1) 세척

세척은 제품의 표면에서 각종 오염을 제거하는 것으로 재침착하는 것을 막는 것을 포함한다(이혜진 등, 2023). 세척에 있어서 중요한 것은 제품에 어떠한 변형도 일어나지 않는 것이다(이혜진 등, 2023). 세척대상물은 녹, 유분, 시멘트 및 콘크리트, 동·식물성 오일, 가공유, 자동차 유리 실리콘, 접착제 제거, 수지 제거, 솔더링 작업 후 플럭스, 가공유, 석유화학탱크, 불판, 그을음, 기름때, 오븐, 실링, 산업용 배관, PCB 플럭스, 미세먼지, 황사, 조류 배설물, 가공유, 배관 스케일, 석회, 물때, 유분, 절삭유, 그리스, 절삭유, 고점도 오일 등이 될 수 있다(씨제이캠, 제이엠씨).

(2) 행굼(이혜진 등, 2023)

행굼은 세척된 부분에서 남아 있는 세척제를 제거하는 단계로 제조 과정 중의 입자나 남아 있는 오염을 제거하기도 한다. 만약 잔여 세척제가 세척 조건에 있어 허용 가능한 것이라면 행굼 단계는 필요하지 않다. 그러나 보통 수

계 혹은 용제계 세척 모두에서 헹굼은 필요한 과정이다. 증기 세척과 같이 세척과 헹굼 단계가 하나로 이루어지는 경우도 있다. 이 헹굼 단계 또한 피세척물에 영향을 주어서는 안된다.

(3) 건조(이혜진 등, 2023)

건조는 세척과 헹굼 단계에서 생긴 오염을 제거하는 단계이다. 이는 물일 수도 있고, 흡착된 유기용제일 수도 있다. 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 할 부분이다. 세척제가 복잡해지고, 세척된 부품의 다음 단계에서 요구하는 조건에 따라 건조는 그만큼 중요한 역할을 한다.

2) 세척 방법

산업에서의 세척 방법으로는 <표 II-8>과 같이 단순 세척, 가온 세척, 초음파 세척, 분류 교반 세척, 기포 세척, 샤워, 요동, 회전, 여과 등이 있다(정경숙 등, 2017). 세부적인 방법은 표에 나타내었다.

〈표 II-8〉 산업 분야의 공정 및 방법 세척(정경숙 등, 2017)

연번	구분	방법
1	단순 세척	피세척물을 세척제에 단순히 침적하는 방법
2	가온 세척	세척제를 가열하여 기름의 점도를 떨어뜨려 세정 효율을 올리는 방법
3	초음파세척	초음파에 의해 액을 진동시켜 기름을 확산이나 분리시켜 제거하는 방법
4	분류 교반 세척	펌프로 액을 순환시킴에 따라 세척효과를 높이는 방법
5	기포 세척	질소 등의 불활성 가스를 조 하부에 분출시키는 것으로 액을 교반하여 세척효과를 향상시키는 방법
6	샤워(스프레이)	피세척물의 상부에서 청정한 세척제를 부려 기름을 씻어 내리는 방법 (pump 압력에 의한 노즐을 통한 분사 방식)
7	요동	피세척물을 상하 또는 좌우로 움직여서 교반하여 세정효과를 높이는 방법
8	회전	피세척물을 회전시키는 것으로 피세척물이 서로 엉키는 것을 방지하는 방법
9	여과	세정 중의 불용해 성분(절삭가루, 먼지)의 제거 방법

3) 세척 설비

세척설비 설비는 기능성, 디자인 및 응용 분야에 따라 분류하고 구분할 수 있다. 청소 작업을 포함한 보다 일반적인 유형의 세척 설비와 그 내용은 〈표 II-9〉와 같다(이혜진 등, 2023).

〈표 II-9〉 일반적인 세척 설비의 유형(이혜진 등, 2023)

구분	기능	유형	응용 분야
고압 세척기	- 압축된 물을 사용하여 표면에서 먼지, 녹, 오염물을 제거	- 냉수 고압 세척기는 일반 세정에 사용되며, 온수 고압 세척기는 기름류를 제거하는 데 효과적	- 기계, 차량, 바닥, 벽 및 야외 표면 청소에 적용
증기 세척기	- 고온의 증기를 이용하여 오염 제거	- 응용 분야에 따라 압력과 온도 수준이 다름	- 표면 살균, 기름 제거 및 수분에 민감한 부분 세척에 적합
진공 시스템	- 표면, 바닥에 있는 대량의 오염을 효과적으로 제거	- 습식 및 건식 진공 모두 가능하며, 필터 부착으로 정화 기능 추가 가능	- 일반 세척, 이물질 제거 및 다양한 산업에서 오염 관리에 사용
스크러버 및 스위퍼	- 물과 세척제를 사용하여 문지르고, 이물질은 별도 수거통에 수집	- 다양한 표면적과 세척 요구사항에 따라 보행식 및 탑승식 버전 가능	- 창고, 공장 및 산업 시설의 넓은 바닥 면적 세척에 사용
화학물질 분배 시스템	- 다양한 용도에 따라 세척제를 분배 조절	- 여러 종류의 화학물질 세척제를 사용하는 세척 장치로서, 자동화된 분사기, 폼 제조기, 분무기 등의 형태	- 정밀 분야
초음파 세척기	- 고주파수를 이용하여 미세 기포를 만들어 먼지와 오염물을 제거	- 벤치탑 및 산업용 장치로 다양하게 적용하여 활용 가능	- 민감 부품, 전자 제품, 보석 및 정밀 부품의 세척에 적합
로봇 청소기	- 인력의 직접적인 개입 없이 세척 필요 부분을 탐색 및 세척하는 자동화된 장치	- 로봇 진공 청소기, 청소용 드론 등	- 대형 공간의 일상적이고 효율적인 청소에 적합
CO2 세척기	- 드라이아이스를 사용하여 표면에서 오염물, 페인트 및 잔여물을 제거하는데 사용		- 전통적인 수계 세척 방식이 불가능한 작업 종류에 적합
압축 공기 세척기	- 압축 공기를 사용하여 달기 어려운 부분 혹은 민감 장비에서 먼지, 이물질 및 오염물을 훼손없이 제거		- 전자제품 제조, 자동차 및 정밀 산업에 사용
화학물질 분무	- 소독제, 살균제 및 청소제를 미세한 분무 형태로 분사하여 표면을 효과적으로 커버함		- 최근 전염병, 의료 시설 소독에 사용

Ⅲ. 세척제 취급 관련 화재·폭발 사고사례



Ⅲ. 세척제 취급 관련 화재·폭발 사고사례

1. 중대재해 및 중대산업사고

안전보건공단의 중대재해 관련 DB에서 2010년부터 2022년 사이에 발생한 화재 또는 폭발에 의한 중대재해¹⁾ 또는 중대산업사고²⁾ 중에서 재해개요에 “세척” 또는 “세정”이라는 단어가 포함된 재해사례를 조회하여 그 내용을 검토하고 세척 공정과 관련이 있는 재해를 분류하여 <표 III-1>에 나타내었다.

세척제 사용 및 취급 관련 중대재해 및 중대산업사고 사례 15건을 확인할 수 있었다. 재해사례에서 사고와 관련된 세척제는 여러 물질을 혼합한 혼합물 세척제가 5건으로 가장 많았다. 단일 물질로는 톨루엔이 3건으로 가장 많았고, 아세톤, 에탄올, DMF, 1,3-디옥솔란, 노말헵탄 등이 있는 것으로 나타났다. 점화원으로는 정전기로 추정된 사례가 7건(중복 포함), 용접 불꽃 4건, 모터 스파크, 전기기구, 주변 설비(열처리로)에서 발생한 불꽃이 각 1건인 것으로 나타났다. 설비별로 구분하면 탱크나 필터와 같은 용기류 4건, 세척조 2건, 반응기 2건, 기계 또는 기계부품 2건, 건조기 및 향온향습기 각 1건, 기타 세척제를 담아 놓은 용기와 관련한 2건의 화재 또는 폭발이 발생한 것으로 나타났다.

<표 III-2>에는 중대재해 또는 중대산업사고의 주요 원인과 그 예방대책을 나타내었다. 사고의 주요 원인은 화재의 3요소와 관리적인 요인을 중심으로 정리할 수 있다.

화재의 3요소 중 가연물과 관련된 사고원인은 다음과 같다.

- 1) 산업안전보건법에 따른 중대재해로 사망자가 1명 이상 발생하거나 3개월 이상의 요양이 필요한 부상자가 동시에 2명 이상 발생 또는 부상자 또는 직업성 질병자가 동시에 10명 이상 발생한 재해를 말함
- 2) 산업안전보건법시행령 제33조의5의 규정에서 정한 유해·위험설비로부터 위험물질의 누출, 화재, 폭발 등으로 인하여 사업장 내의 근로자에게 즉시 피해를 주거나 사업장 인근지역에 피해를 줄 수 있는 사고로서 대통령령으로 정하는 사고를 말함

- 1) 인화성 물질(세척제)을 분사하여 발생한 미스트 또는 인화성 증기가 화재·폭발 분위기가 형성됨
- 2) 인화성 물질(세척제)이 누출되어 화재·폭발 분위기가 형성됨
- 3) 인화성 물질(세척제)을 잘못된 방법으로 보관 및 취급하여 화재·폭발 분위기가 형성됨
- 4) 인화성 물질(세척제)을 취급하는 장소의 통풍·환기가 미흡하거나 부적절하여 화재·폭발 분위기가 형성됨
- 5) 가스 검지 및 경보 장치를 설치하지 않아 인화성 증기의 누출을 감지하지 못함

화재의 3요소 중 점화원과 관련된 사고원인은 다음과 같다.

- 1) 정전기의 발생 억제 및 제거 조치를 하지 않거나 미흡하여 정전기가 방전되면서 점화원으로 작용함
- 2) 세척제를 사용하거나 세척제가 가까이 있는 장소에서 용접 등의 화기작업을 하면서 발생한 불꽃이 점화원으로 작용함
- 3) 방폭기능이 없는 전기기계·기구가 점화원으로 작용함
- 4) 열을 사용하는 주변 설비가 점화원으로 작용함

사업장의 관리적인 측면의 사고원인으로 볼 수 있는 내용은 다음과 같다.

- 1) 안전작업절차가 없거나 미흡함
- 2) 안전작업절차 또는 정해진 작업방법을 준수하지 않음
- 3) 부적절한 작업방법으로 작업을 수행함
- 4) 위험성평가를 실시하지 않음

- 5) 근로자 교육을 실시하지 않음
- 6) 세척작업에 대한 관리감독이 미흡함
- 7) 의사소통 방법이 부적절하거나 또는 의사소통을 하지 않음
- 8) 위험물질에 대한 정보 전달이 미흡함
- 9) 설비를 사용 목적과 다르게 사용함
- 10) 폭발위험장소 설정 및 관리가 미흡함

기타 추가적인 사고의 원인은 다음과 같다.

- 1) 통로에 설비를 설치하여 작업자 통행을 방해함
- 2) 작업장 정리정돈 및 통로 확보가 제대로 되지 않음
- 3) 비상구를 설치하지 않음

〈표 III-1〉 국내 세척제 취급 관련 화재·폭발사고(중대재해) 사례(2010년 ~ 2022년)

연번	발생연월	재해개요	세척제		주요 재해원인	주요 예방대책
			제품명	중요 성분		
1	2022. 5.	세척조 내부에 있는 세척제(Dimethyl carbonate, 1,2-Dichloropropane 등의 혼합물질을 드럼 펌프를 이용하여 빈 드럼통에 옮기던 중 폭발·화재 발생(사망 1명, 부상 1명)	혼합물 (1,2-Dichloropropane, Dimethyl carbonate 등) 모터스피드크 (추정)	<ul style="list-style-type: none"> 폭발위험성소 설정 및 관리 반동성능을 갖춘 전기기계기구 사용 안전한 세척제 이송방법 적용 세척제의 유해 위험성 주지 세척작업에 대한 위험성평가 실시 		
2	2022. 9.	플러머 생산공정에서 세척제(아세톤)를 이용하여 누체(Nutche) 필터 내부를 세척하던 중 화재 발생(부상 1명)	아세톤 정전기 (추정)	<ul style="list-style-type: none"> 누체필터 개방 상태에서 인화성 물질(아세톤)을 분사하여 미스트, 증기 에 의한 폭발위험성 발생 인화성 미스트 및 증기 제거 미흡 점지 미실시 및 등전위 분당 미흡 세척작업 절차 및 방법 미준수 	<ul style="list-style-type: none"> 밀폐형 용기 사용 및 내부 불활성화 인화성 증기 발생 억제 정전기 발생 억제 호스 및 작업대 등 점지성능 유지 구체적인 작업절차서 작성 및 위험성평가 실시를 통한 개선 	
3	2022. 4.	용기 세척을 위해 투입한 세척제(톨루엔)를 용기의 하부 배관을 통해 이송하는 과정에서 폭발·화재 발생(사망 1명)	톨루엔 정전기 (추정)	<ul style="list-style-type: none"> 정전기로 인한 화재·폭발 방지 조치 미흡 	<ul style="list-style-type: none"> 정전기 억제 또는 제거 조치 	
4	2022. 3.	표면 처리한 칸터(Heater case)를 에탄올로 세척 후 혼용함습기에 넣고 건조 중 혼용함습기가 폭발(사망 1명)	에탄올 코일 or 전기기구 (추정)	<ul style="list-style-type: none"> 인화성 액체가 묻은 제품을 혼용함습기에 넣고 가열 및 증발 혼용함습기에 인화성 증기 배출설비 미설치 위험물 건조에 부적합한 혼용함습기 사용 금속표면처리 공정의 건조작업에 대한 위험성평가 미실시 	<ul style="list-style-type: none"> 인화성 액체가 묻은 제품을 혼용함습기에서 건조 금지 건조설비 사용 시 폭발위험이 있는 물질 배출 건조설비에 폭발구 설치 금속표면처리 공정 작업에 대한 위험성평가 실시를 통해 유해 위험요인 발굴 및 안전조치 실시 	

연번	발생연월	사태개요	세척제		주요 피해원인	주요 예방대책
			정화원	혼합물		
5	2021. 6.	진공 세척 건조기의 세척제 공급밸브의 동작 불량 점검 중 세척제(혼합물질) 누출로 화재 발생(부상 2명)	혼합물	열차리로 버너(추정)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 세척액 인화성 증기 발생 및 누출로 폭발분위기 형성 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 공정 설비에서의 위험물 누출 예방 조치 ○ 공정 설비 간 안전거리 확보를 통해 접화원이 될 수 있는 설비 이격 ○ 설비 작동 시 적정 조차를 위한 절차서 작성 ○ 작업위험성평가 실시
6	2020. 2.	의약품 제조용 반응기 내벽에 붙어있는 약품 중간생성물을 세척제(DMF)를 이용하여 세척하던 중 화재·폭발 발생(부상 2명)	DMF		<ul style="list-style-type: none"> ○ 반응기 내벽 세척방법(슬러지 제거방법) 부적절 ○ 반응기 내부 퍼지방법 부적절 ○ 정전기 축적 가능한 플라스틱 용기 사용 ○ 안전문전절차서 작성 미흡(직업표준 부재) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 반응기 내벽 세척방법 개선 ○ 반응기 내부 퍼지 시간 및 횟수 확보 ○ 정전기 방지조치 실시 ○ 세척작업에 대한 안전문전절차서 작성
7	2019. 12.	반응기 내부에 세척제(1,3-디옥솔란)를 투입하여 세척하던 중 정전기로 추정되는 불꽃이 발생하면서 반응기 내부에서 폭발·화재 발생(부상 5명)	1,3-디옥솔란		<ul style="list-style-type: none"> ○ 인화성 액체의 증기 및 미스트 발생 ○ 정전기 발생 및 방전 ○ 폭발위험성조사 내의 설비 정전기 발생 억제 미흡 ○ 안전문전절차서 미흡 ○ 유해위험물질에 대한 정확한 정보 전달 미흡 ○ 세척작업에 대한 위험성평가 미실시 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 반응기의 세척방법 개선 및 상시적 불활성화 실시 ○ 폭발 위험분위기 생성 방지 및 인화성 액체 투입 방법 개선 ○ 정전기 축적 방지 등 접화원 제거 ○ 접지 등 설비개선
8	2016. 1.	작업자가 합성 추출과정을 거쳐 결정화된 농축액(의약품 원료)을 여과 세척하는 작업 중 정전기로 추정되는 화재 발생(사망 1명)	n-Heptane	정전기 (추정)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 여과기(누체필터) 내부 폭발분위기 형성 ○ 정전기 발생 억제조치 미흡 ○ 정확한 밸브조작 순서 미지정 ○ 통로에 이등식 여과기를 설치하여 작업자 통행 방해 ○ 부적절한 의사소통 방식 적용(중간·육성 전달) ○ 밸브 조작 중 전도 위험 및 위험물질 누출 위험 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 덮개 등의 접합부에서 위험물질 누출 방지 조치 실시 ○ 세척액 투입 방식 개선으로 정전기 발생 억제 ○ 화학설비 사용 작업에 대한 시연조사 및 작업계획서 작성 ○ 작업자 전도 방지 및 통로 설치 ○ 작업자가 같은 장소에서 운전시 필요한 조치를 할 수 있도록 배관 및 밸브 위치 변경 작업자 간 상호전달 불필요하도록 개선

연번	발생연월	사태개요	세척제		주요 피해원인	주요 예방대책
			정화원	용접 불꽃		
9	2013. 10.	탱크컨테이너(tank container) 세척작업공정에서 작업자가 틀루엔 및 물로 탱크컨테이너 내부 세척 후 상부 맨홀에 장착되어 있던 세척기를 분리하던 중 탱크컨테이너 내부에 잔류한 틀루엔 유증기 폭발(사망 1명)	틀루엔	용접 불꽃	○ 폭발 위험장소에서 용접작업 실시	○ 폭발 위험장소에서 화기 등 사용 금지
10	2012. 10.	작업자가 실리곤 결합체를 교환하기 위해 사용하는 교환기(전기드릴에 철제 블레이드를 장착)를 사용 후, 세척하기 위해 담겨놓은 틀루엔 용기가 넘어지면서 화재가 발생(사망 1명, 부상 4명)	틀루엔	확인불가	○ 위험물질 보관 및 취급방법 부적절로 인한 인화성 증기 체류(화재 발생 가능 분위기 형성) ○ 정전기 억제 또는 제거 조치 미실시 ○ 작업장 정리정돈 및 통로 확보 ○ 비상구 미설치	○ 위험물 보관 및 취급방법 개선 ○ 정전기 발생 억제 및 제거 조치 실시 ○ 작업장 정리정돈 및 통로 확보 ○ 비상구 설치
11	2012. 3.	세척(마사지) 공정에서 작업자가 UV 코팅작업을 위한 전처리 작업으로 프라스틱 휴대판 케이스에 묻어 있는 이물질 제거하기 위해 면장갑을 이용하여 세척작업 중 세척액에 정전기로 추정되는 화재 발생(사망 1명)	혼합물 (수산화나트륨, 경질 나프타, 아소 파라핀 유도체, 시아놀로 화합물 유도체 등)	정전기 (추정)	○ 정전기로 인한 화재·폭발 등 방지조치 미흡	○ 정전기로 인한 화재·폭발 등 방지조치 실시 ○ 세척제 대체물질 사용 검토 및 지속적인 교육 실시
12	2012. 1.	작업자 5명이 기 설치된 환풍 기동기계(필링 기, peeling machine)의 세척 및 도장작업을 수행하던 중 인접한 장소에서 필링기 주변 의 누락된 가루부 덮개를 설치하기 위하여 용접작업을 하는 순간 발생한 불꽃이 피트 내부에 체류된 유증기에 발화·폭발(사망 2명, 부상 4명)	혼합물 (나프타, hexan, 틀루엔, 자이렌 등)	용접 불꽃	○ 인화성 액체 증기 제거를 위한 통풍, 환기 부적절 ○ 위험물 취급 장소에서 화기 사용	○ 인화성 액체 증기나 가스 제거를 위한 통풍·환기 조치 실시 ○ 위험물이 있는 장소에 화기 등의 사용 금지

연번	발생연월	사태개요	세척제		주요 피해원인	주요 예방대책
			정화원	용점		
13	2012. 9.	중유수 저장탱크 보수작업 과정에서 작업자 B가 탱크 하부에 드레인 배관을 설치하기 위하여 용접을 하는 동안 작업자 A가 탱크 내부에 들어가 기연성기스가 충전되어 있는 침투상감사용 세척제(기스통)를 뿌리며 탱크 내부 청소작업을 하다가 탱크 하부의 기방 된 배관을 통해 누출된 기연성기스(LPG 등)에 용접 불꽃이 착화되며 탱크 내부로 급속히 확산(사망 1명)	침투상감사용 세척제(기스통) (LPG 포함)	용접 불꽃	<ul style="list-style-type: none"> ○ 화재 또는 폭발위험이 있는 장소에서 화기 사용 ○ 인화성물질이 함유된 세척제를 사용한 탱크 내부의 통풍 환기조치 미실시 ○ 통풍 및 환기 불충분 장소 작업에 대한 관리감독 미흡 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 화재·폭발 위험 장소에서 화기 사용 금지 ○ 화재·폭발 위험장소에서 인화성 액체 증기 및 인화성 기스 제거를 위한 통풍 및 환기 실시 ○ 통풍 및 환기 불충분 장소 작업에 대한 관리감독 수행
14	2010. 4.	파이프 절단 작업장에서 작업자가 파손된 파이프 지지대 수리를 위해 용접기를 이용하여 작업하던 중 용접 불꽃이 비드에 있던 세척제 용기에 들어가면서 화재 발생(사망 1명)	확인불가 (파이프 세척제)	용접 불꽃	<ul style="list-style-type: none"> ○ 위험물이 있는 장소에서 화기작업 실시 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 위험물이 있는 장소에서 화기 사용 금지
15	2010. 7.	세척공정에서 세척조의 이상유무를 점검하던 중 인화성 세척제 증기가 정전기 방전 또는 금속미찰 불꽃으로 착화되어 화재폭발 발생(사망 1명, 부상 1명)	혼합물 (솔벤트, 중제 Heavy 나프타 등)	정전기 or 금속미찰 (추정)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 인화성 증기의 발생 억제 및 체류방지 조치 미흡 ○ 수용성 세척제 사용기기에 인화성 세척제 사용 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 인화성 증기의 발생억제 및 체류 방지 ○ 슬버의 제조 목적에 맞게 사용

2. 부상 사고

안전보건공단의 재해통계 관련 DB에서 2019년부터 2023년 사이에 발생한 화재 또는 폭발에 의한 재해 중 재해개요에 “세척” 또는 “세정”이라는 단어가 포함된 재해사례를 조회하여 그 내용을 검토하고 세척 공정과 관련이 있는 재해를 분류하여 <표 III-2>에 나타내었다. 재해 승인일을 기준으로 조회했기 때문에 2018년에 발생한 재해가 일부 포함되어 있으며, 2023년 발생한 재해 중 일부는 목록에 포함되지 않았을 수 있다.

DB 검토 결과 세척 관련 재해사례 54건을 찾을 수 있었다. 재해사례에서 사고와 관련된 세척제가 무엇인지 구체적으로 제시되어 있지 않은 경우가 많았지만, 어떤 세척제를 사용했는지 확인이 가능한 사례를 파악해 본 결과 시너, 유기용제(솔벤트), 알코올 등이 많은 것으로 나타났다. 그러나 이러한 명칭만으로는 세척제에 함유된 물질이 무엇인지 정확하게 파악하기는 어렵다.

점화원 파악이 가능한 사례를 대상으로 점화원을 살펴보면 정전기가 5건, 전열기 또는 난로 4건, 전기 스파크 3건, 용접 불꽃 2건, 그라인더 불꽃 2건, 라이터 2건 등이었다. 그러나 세척제로 사용하는 물질의 종류와 점화원을 확인할 수 없는 재해가 많았기 때문에 사고원인 파악을 위한 추가적인 조사가 필요할 것으로 판단된다.

<표 III-2> 국내 세척제 취급 관련 화재·폭발사고(부상재해) 사례(2019~2023)

연번	재해년월	재해개요	세척제	점화원
1	'19.01	생산 작업 종료 후 코팅장치 정비 중, 세척하기 위해 교반통 덮개에 꽂은 순환 호스가 빠지면서 인화성 세척액이 옆에 있던 전열 난방기로 튀면서 발생한 화염으로 작업자 옷에 불이 붙음		전열 난방기
2	'18.12	CCTV 개통 관련 광케이블 접속 작업 중 고소작업차에서 소형난로를 피워놓고 케이블 세척작업을 하다가 세척제를 건드려 난로에 넘어져 화재 발생		난로

III. 세척제 취급 관련 화재·폭발 사고

연번	재해년월	재해개요	세척제	점화원
3	'19.02	PCB 세척기 안의 세척액을 옮겨 담는 중에 전동 주유기에서 갑자기 스파크가 일어나 발화되어 화재 발생		
4	'19.02	1.5L 생수통에 시너를 따르고 뚜껑에 송곳으로 구멍을 뚫어 뚜껑에 걸레를 대고 시너를 묻혀서 완성된 가구들을 세척 및 포장하는 작업을 진행하던 중 작업자들이 모르는 사이에 시너를 담은 통이 넘어져 굴러가 시너가 흘러나옴. 옆에 있던 난로에 의해 시너로 불이 옮겨 붙어 시너통이 터지면서 화재 발생	시너	난로
5	'19.03	거래업체 내에서 피팅류(ELBOW, TEE) 비파괴 검사(액체 침투탐상) 중에 제품을 옆으로 살짝 던지는 과정에서 제품끼리 부딪혀 스파크가 발생하여 세척제(솔벤트류)에 불이 붙어 화재 발생	유기용제(솔벤트)	부딪힘에 의한 불꽃
6	'19.03	이전 작업자가 세척 장비 작동불능으로 미사용 된 것을 점검하기 위해 노즐(세척건)에서 용제가 밖으로 분사되는 것을 방지하기 위해 세척용제 저장통에 노즐(세척건)을 넣고 에어를 주입한 상태에서 피스톤을 도구를 사용하여 작동시키고 일어서는 순간 세척용제 저장통에서 갑자기 화재 발생		
7	'19.03	작업자가 캡슐 탈수공정에서 반응물의 탈수를 완료하고 작업을 마무리하기 위하여 탈수 모액 탱크 내부에 있던 잔존 물질을 물로 세척하던 중에 작업등이 침수되면서 전기 쇼트에 의한 스파크가 발생 하였고, 이 스파크에 의해 탈수 모액 탱크에 남아 있던 미반응 물질의 유증기가 발화되어 화재 발생		전기 스파크
8	'19.05	밀링 수리 중 기계에서 쏟아지는 폐유를 받기 위해 기름통 할 뚜껑을 절단해 주려고 그라인더 사용 중 기계 수리 부품 세척을 위해 사용하던 시너에 불꽃이 튀어 화재 발생	시너	그라인더 불꽃
9	'19.06	세척작업 중 옷에서 발생한 정전기로 화재 발생		정전기
10	'19.11	이형제 생산이 끝난 후 배관 세척을 대기하던 중 다음 생산품을 준비하기 위하여 원액 이송에 필요한 1톤 PE통의 잔여물을 확인하는 과정에서 원인 미상의 화재 발생		
11	'19.12	작업자가 생산 작업을 마치고 다음 날 생산을 위해 설비에 묻은 수지를 제거하기 위해 세척하는 도중 원인 미상의 화재 발생		
12	'19.12	공장 내에서 유조차(탱크로리) 누수 관련 보수 용접 작업을 위해 기름 탱크 안의 기름을 비우고 세척한 후 에어로 유증기 배출 작업을 한 다음 유증기 잔여분 검사를 위해 라이터를 켜 순간 유증기가 폭발함		라이터
13	'19.12	인쇄 작업 중 잉크 교체 후 벤젠으로 세척 작업 중 화재 발생	벤젠	
14	'20.01	도로 공장에서 제품 포장 완료 후 마감 탱크 세척용 제트클리너를 이용하여 탱크 세척 작업 중 탱크 내 유증기가 점화원에 의해 순간 발화됨	제트클리너	
15	'20.02	작업자가 수리대에서 타이어를 그라인더로 수리 후 그라인더를 거치대에 내려놓고 타이어에 사이클로hex산을	사이클로hex산	그라인더 불꽃

연번	재해년월	재해개요	세척제	점화원
		도포하여 세척하는 상황에서 잔여 회전을 하던 그라인더와 거치대 사이에서 발생한 스파크로 인해 타이어에 화재가 발생함. 작업자가 타이어에 불이 붙은 것을 인지하지 못하고 타이어를 집진기로 옮기던 중 작업자의 앞치마에 불이 옮겨붙은 후 집진기로 화재가 번짐		
16	'20.06	엠보 프레임에서 엠보 장착 후 이물질이 발견되어 세척용제(4류/석유류)를 사용하여 브러시를 통해 세척 작업 중 발생한 유증기에 정전기가 일어나 화재가 발생 되었음(부상 2명).		정전기
17	'20.10	작업 중 로라 오염으로 세척 과정에서 스파크로 화재 발생		
18	'20.11	사업장에서 차량을 리프트로 들어 올린 후 엔진 하체의 오일 누유 부분 세척을 위하여 에나멜 시너를 작은 통에 담아 분사기로 뿌리던 중에 갑자기 작업자의 머리 쪽으로 불꽃이 튼	시너	
19	'20.10	옴셋 인쇄기 롤러 세척액 보충작업 수행 시 세척액과 습수액을 혼합하는 중 정전기 발생으로 유증기에 불이 붙어 화재 발생		정전기
20	'21.02	기계 세척 후 밀폐된 프레스 점검 발판 내부 공간에 잔존해 있던 시너 증기를 인지하지 못하고 파이프 클램프 배관 용접 작업을 하던 중, 용접 불꽃에 의해 시너 증기가 점화되면서 폭발·화재가 발생하여 점검 발판이 튀어올라 작업자가 부딪힘(2명 부상)	시너	용접 불꽃
21	'21.02	공장에서 가위 세척업무를 하던 중 화재 발생 (손으로 등을 툭툭 치고, 조끼를 벗으려는 순간 손에 낀 장갑에 불이 붙음)		
22	'21.04	공장 제품작업 시 솔벤트로 제품 세척 후 마스크 작업대로 제품 이송 중 마스크 작업자가 마감 작업 시 사용하는 라이터 불이 세척 작업자의 장갑에 옮겨 붙음	유기용제 (솔벤트)	라이터
23	'21.06	청소 기계로 청소하던 도중 청소기에 스파크가 발생하여 화재 발생(바닥에 기름 성분이 잔재하여 이를 제거하기 위해 세척유를 바닥에 뿌린 후 청소기 조작 중 스파크로 인해 화재 발생)		
24	'21.06	열처리 공정에서 진공 세척기에서 흘러나온 유증기에 열처리 기계의 불꽃이 옮겨 붙어 화재 발생		열처리 기계 불꽃
25	'21.06	세척기 기름 유출로 인한 화재 발생으로 화상		
26	'21.06	조립부서에서 감속기 조립 전 부품 세척을 위해 세척실에서 환풍기를 켜고 왼손으로 세척해야 할 부분을 들고 오른손으로 시너가 들어있는 스프레이 건으로 10초가량 세척 중 원인 모를 폭발 발생	시너	
27	'21.08	세척실 안에서 세척기 기계를 사용하던 중에 기계 폭발 발생	IPA	확인불가
28	'21.07	연구실에서 촉매 세척을 위해 온도 컨트롤러(히팅기)를 사용하여 증류수를 5L 비이커에 끓이고 있고 바로 옆에서 촉매 필터를 진행하였는데 압력에 의해 필터와 연결된 호스가 터지면서 5L 비이커 위 램프로 덮어놓은 것이 전체적으로 폭발함		

연번	재해년월	재해개요	세척제	점화원
29	'21.08	도장부 세척실 안에서 세척도중 화재로 인한 재해		
30	'21.09	세척실에서 플라스틱 제품에 기름을 제거하는 목적으로 세척기를 사용하는 과정에서 세척기에 있던 핵산이 염화플러그 쇼트에 의한 폭발 발생	핵산	쇼트 불꽃
31	'21.09	OO센터 메카트로닉스 교체 후 공구 정리 및 세척 중 화재 발생(차량 메카트로닉스 작업 이후 파트클리너를 이용하여 세척 중 손잡이 부분이 놀리지면서 스파크가 튀어 화재 발생)		
32	'21.11	현장에서 의뢰받은 무게 1톤 서스콘(suscon)을 아르곤 용접하기 위해 통 안에 남아 있는 제품 잔량을 확인 후 세척하고 용접을 시행하던 중 폭발 발생		용접 불꽃
33	'21.11	OO동 옥상에서 에어리스 시너 세척 도중 스파크 현상이 발생하여 화재 발생	시너	
34	'21.12	공장 작업장(세척, 조립공정) 내에서 세척작업 준비과정에서 세척액이 바지 및 안전화 부분에 묻어 있어서 이를 제거하기 위해 마른 헝겊으로 닦아내는 과정에서 세척액(유기용제)에 휘발성 약품이 있는 것을 모르고 난방용 난로에 오른 다리를 들고 건조하는 과정에서 바지 부분에 화재 발생	유기용제(솔벤트)	난로
35	'22.05	공장에서 물건 세척 도중 원인 모를 발화로 화재 발생		
36	'22.05	사업장에서 제품 생산 후 마무리를 위해 톨루엔으로 통세척 중 화재 발생(2명 부상)	톨루엔	
37	'22.04	접착제 탱크를 톨루엔으로 세척하던 중 폭발 발생	톨루엔	
38	'22.03	표면처리 완료한 컨덕터를 에탄올로 세척 후 향온항습기에 넣고 건조 중 향온항습기 폭발	에탄올	향온항습기
39	'22.05	세척 용액을 탱크에서 퍼내려고 펌프를 가동하고 내리는 순간 폭발 발생		
40	'22.05	도장장에서 세척조의 히터봉 교체작업 중 드럼 펌프를 사용하여 세척액을 빈 드럼통으로 옮기는 과정에서 인화성 세척제 유증기에 의한 폭발·화재 발생. 세척조 내 케이지 탑승 작업자 사망)		
41	'22.09	누체필터 세척을 위해 아세톤을 이용한 내부 스프레이 세척 과정에서 발 아래의 폐액통에서 화재 발생	아세톤	
42	'22.10	세척장소에서 작업자가 스프레이건으로 세척작업 중 비산 방지용 탱크와 세척물(금속공작기계 부착 컨베이어 부품)이 부딪히는 순간 발생한 스파크로 세척제에 화재 발생		물체 간 접촉 스파크
43	'22.10	인산염피막을 하기 위한 제품을 세척하던 중 화재 발생		
44	'22.11	현장에서 불순물 제거를 위해 세척제(시너 사용)를 바구니에 올려놓는 순간 유증기와 제품이 서로 마찰하여 화재 발생	시너	

연번	재해년월	재해개요	세척제	점화원
45	'22. 11	생산팀 세척실에서 세척을 위해 초음파 세척기 뚜껑을 여는 순간 폭발 발생	IPA	정전기 (추정)
46	'22. 12	도료 공장에서 페인트 용기 내부 세척을 위해 세척제 (xylene)를 사용하여 솔로 세척 작업 중 탱크 내부와 솔 간에 정전기 스파크가 발생하여 유증기 폭발	크실렌 (xylene)	정전기
47	'22. 12	OOO 제조(성형) 공정에서 EA 세척통 내 폐 EA 교체 작업 중 세척용 도구에서 발생한 스파크(정전기)가 잔여 EA와 만나 화재 발생(부상 2명)	EA	정전기
48	'23. 04	옥외 탱크저장소에서 알코올이 저장되어 있는 옥외 탱크저장소를 세척하기 위해 알코올 잔량 회수 중 환기를 위해 팬에 연결되어 있는 콘센트의 스파크로 화재 발생	알코올	전기 스파크
49	'23. 05	세척제 작업 중 스파크로 인한 화재 발생		
50	'23. 06	차량 라디에이터를 교환하기 위해 탈거 후 엔진오일 등 누유로 인하여 청소하던 중 시너를 이용한 세척 중 불꽃이 발화되어 화재 발생	시너	
51	'23. 08	약세서리 세척과정에서 솔벤트 건조 중 화재 발생	유기용제 (솔벤트)	
52	'23. 11	물건을 세척하는 과정에서 시너에 불이 붙으면서 화재 발생	시너	
53	'18. 12	작업자 2명이 장비(파티클 카운터 - 수중 미립자 분석 장치) 세정작업을 위해 서큘레이터에 IPA(이소 프로필 알콜) 충전 후 장비 내부로 주입하는 작업 진행 중 화재 발생	IPA	
54	'22. 05	현상, 부식, 박리 공정에서 현상단을 세정 약품을 사용하여 세정작업 중 폭발 후 화재 발생		

※ 안전보건공단 재해통계DB에서 재해개요에 “세척” 또는 “세정”이 포함된 재해를 승인일 기준으로 검색하여 도출된 결과임

※ 세척제와 점화원의 확인이 불가능한 경우 공란으로 표시함

3. 사고사례를 통해 본 시사점

세척제 취급 및 사용 중에 발생한 중대재해 및 부상 사고사례를 통해 관련 사고예방에 필요한 시사점을 다음과 같이 정리할 수 있다.

1) 세척제(인화성 물질) 관리

세척제로 사용하는 물질은 인화성이 높고 최소점화에너지가 1 mJ 이하인 물질이 다수 포함되어 있다. 이러한 세척제를 분사하여 이물질을 제거하는 경우에 발생하는 미스트와 인화성 증기는 정전기 방전 시 발생하는 불꽃에 의해서도 쉽게 점화될 수 있다. 따라서 세척제 사용 중의 화재·폭발을 예방하기 위해서는 정전기에 의한 위험 관리 대책과 함께 적절한 통풍이나 환기도 필요하다. 또한 밀폐형 용기를 사용하는 등 공정 설비에서 인화성이 있는 세척제 누출에 대한 예방 조치를 할 필요가 있다.

반응기나 필터 등의 용기 형태의 설비를 세척할 때에는 퍼지 등을 통해 용기 내부를 불활성화하고, 가급적 자동 세척설비를 도입하여 위험물질(세척제)이 공기와 접촉하지 않도록 하는 것이 좋다. 인화성이 있는 세척제가 묻어 있는 물체의 건조설비에는 폭발방산구를 설치하고, 인화성 물질은 배출할 수 있도록 해야 한다. 그리고 인화성이 있는 세척제를 투입하는 경우에는 공기와의 접촉을 최소화하고, 정전기가 적게 발생하는 방법을 이용해야 하며, 세척 완료 후 세척제 배출 또는 이송 시에는 적절한 방법을 선택하여 화재·폭발을 예방할 필요가 있다.

2) 점화원 관리

세척제 사용 중 발생한 화재·폭발 사고의 점화원으로 작용한 것은 정전기,

화기작업 시 발생한 불꽃, 열을 사용하는 주변 설비 등이 있었다. 세척제로 사용하는 물질은 최소점화에너지가 낮은 것들이 많기 때문에 정전기에 의해서도 화재가 발생할 수 있으므로 정전기 관리에 주의를 기울여야 한다. 이를 위해서 작업자는 제전복과 대전 방지화를 착용하고, 설비에는 접지를 확실히 하여 그 성능이 유지될 수 있도록 하며, 정전기가 축적될 수 있는 플라스틱 바가지나 용기의 사용을 제한할 필요가 있다. 또한 용접이나 그라인더를 사용하는 등의 화기작업은 적절한 사전 안전조치를 하지 않은 상태에서는 금지해야 한다.

인화성이 있는 세척제가 들어 있거나 사용했던 위험장소에는 방폭 랜턴과 같이 방폭성능을 갖춘 전기기계·기구를 사용하도록 해야 하고 작업 중에는 스파크가 발생하지 않도록 관리가 필요하다. 그리고 공장의 설계 및 설립 당시부터 공정 설비 간 안전거리를 확보하여 설비에서 발생하는 열이 점화원으로 작용하지 않도록 해야 한다.

3) 관리적 사항

사업장에서는 일상작업뿐만 아니라 비일상작업에 대해서도 안전작업절차서 작성하여 근로자들이 준수하도록 해야 한다. 또한 설비 오작동 시에 적절한 조치를 위해 절차서도 마련할 필요가 있는 것으로 나타났다. 사업장의 유해·위험요인은 위험성평가를 통해 사전에 발굴하여 개선할 수 있도록 하고, 작업 절차서와 위험성평가 내용을 포함한 안전보건교육을 실시해야 한다. 이를 통해 작업자가 세척제의 위험성과 유해성을 알 수 있도록 하고, 작업에 필요한 안전보건정보를 제공해야 한다. 또한, 의사소통 방법을 정하고 이에 따라 의사소통할 수 있도록 하며, 설비는 설비의 설계·제작 목적에 맞도록 설비 사용하도록 해야 한다. 위험물이 누출될 수 있는 장소는 폭발위험장소로 설정해서 관리하고, 작업 수행 중 관리감독이 잘 이루어질 수 있도록 해야 한다.

4) 기타 사항

기타 사항으로 작업장 정리정돈을 통해 작업 통로 확보하여 세척제를 담은 통을 건드려 넘어지는 일이 없도록 해야 한다. 또한 비상상황 발생 시 대피할 수 있도록 작업장에 비상구를 설치하고 유사 시 모두 대피할 수 있도록 훈련할 필요가 있다.

IV. 시험장비 및 방법



IV. 시험장비 및 방법

1. 인화점¹⁾(산업안전보건연구원, 2010; 이근원 등, 2013)

액체의 인화점(Flash point)은 액체에서 발생하는 증기가 공기와 섞여서 가연성 또는 폭발성 혼합기체를 형성한 상태에서 불꽃을 유면 가까이 대었을 때 순간적으로 섬광을 내면서 연소(인화)하는 최저의 온도를 말한다. 인화점을 넘어서 가열을 더 계속하면 불꽃을 가까이 댔을 때 계속해서 연소하는 온도에 이르는데, 이 온도를 연소점이라고 하며 인화점과 구별한다. 인화점은 주로 액체의 인화성을 판단하는 수치로서 중요하다.

인화점(Flash Point)의 측정 방식에는 밀폐 상태에서 가열하는 방식과 개방 상태에서 가열하는 방식 2가지가 있으며, 전자의 측정 방식으로 구한 인화점을 밀폐식 인화점, 후자의 측정 방식으로 구한 인화점을 개방식 인화점이라고 한다. 또한 동일 시료에서는 통상 개방식 인화점이 밀폐식 인화점보다 높은 값을 나타낸다. 인화점 시험 방법의 종류는 <표 IV-1>과 같다.

<표 IV-1> 인화점 시험 방법의 종류

인화점 종류	시험방법	적용기준	적용 유종
밀폐식 인화점	태그 밀폐식	인화점이 93 °C이하인 시료 ※ 적용제외 시료 a) 40 °C의 동점도가 5.5 mm ² /s 이상인 시료 b) 시험 조건에서 기름막이 생기는 시료 c) 현탁 물질을 함유하는 시료	원유 가솔린 등유 항공 터빈 연료유
	신속 평형법	인화점이 110 °C이하인 시료	원유, 등유, 경유, 중유, 항공 터빈 연료유
	펜스키마텐스 밀폐식	밀폐식 인화점의 측정이 필요한 시료 및 태그 밀폐식 인화점 시험 방법을 적용할 수 없는 시료	원유, 경유, 중유, 전기 절연유, 방청유, 절삭유제
개방식 인화점	클리브랜드 개방식	인화점이 80 °C이상인 시료. 다만 원유 및 연료유는 제외	석유 아스팔트, 유동 파라핀, 에어 필드유, 석유 왁스, 방청유, 전기 절연유, 열처리유, 절삭유제, 각종 윤활유

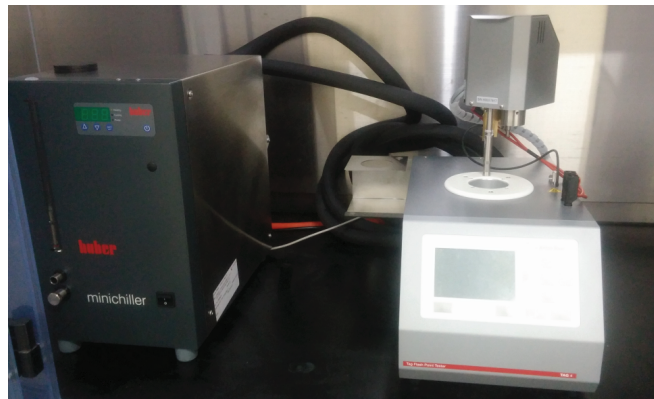
1) 산업안전보건연구원(2010) 및 이근원 등(2013)이 작성한 보고서의 내용을 발췌하여 변경 없이 인용 또는 수정하여 작성함

1) 시험장비

(1) 태그 밀폐식

가) 장비명 및 제조사

- (장비명) TAG 4 Tag Flash Point Tester
- (제조사) Anton Paar(오스트리아)



[그림 IV-1] Tag Flash Point Tester (TAG 4)

나) 장비 구성 및 사양

- (장비 구성) 인화점 측정 프로그램과 제어기가 있는 TAG 4 본체와 정확한 인화점 측정을 위해 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각할 수 있는 저온유지장치로 구성되어 있다.
- (측정 범위) $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 93\text{ }^{\circ}\text{C}$

다) 시험 중 주의사항

- 열을 방출하므로 안전한 장소에 설치해야 하며, 경사가 있거나 통풍이 심한 곳은 인화점 측정 및 점화기 조절에 오차를 유발하므로 평평하고 통풍이 심하지 않는 곳에 설치해야 한다. 특히, 시험 중 통풍에 의해 오차

가 발생할 수 있으므로 공기의 유동이 없도록 주의해야 한다.

(2) 펜스키마텐스 밀폐식

가) 장비명 및 제조사

- (장비명) Fully Automatic Pensky-Martens Flash Point Analyzer – PMA4
- (제조사) Petrotest(독일)



[그림 IV-2] Fully Automatic Pensky-Martens Flash Point Analyzer

나) 장비 구성 및 사양

- (장비구성) 제어부와 시험부, 결과물을 출력할 수 있는 프린터로 구성되어 있으며, 제어부와 시험부는 Power Cable과 Signal Cable로 연결되어 있다.
- (측정 범위) 40℃ ~ 370℃

다) 시험 중 주의사항

- 시료에서 발생하는 유해증기로부터 시험자를 보호하기 위해 자연통풍 챔버 또는 흡 후드 안에 설치하고, 인화점이 55℃ 이하인 경우에는 시험 시 시료에서 발생하는 증기가 난류의 영향을 받아 측정된 인화점 신뢰도에 영향을 줄 수 있으므로 공기의 유동을 최대한 줄여야 한다.
- 가열 시 Bubble이 발생하여 인화성 액체가 시료컵을 넘칠 수 있으므로 주의를 요한다.

(3) 클리브랜드 개방식

가) 장비명 및 제조사

- (장비명) Fully Automatic Flash Pointer Tester(Cleveland Open Cup Analyzer - CLA4)
- (제조사) Petrotest(독일)

나) 장비 구성 및 사양

- (장비구성) 제어부와 시험부, 결과물을 출력할 수 있는 프린터로 구성되어 있으며, 제어부와 시험부는 Power Cable과 Signal Cable로 연결되어 있다.
- (측정 범위) 80℃ ~ 400℃

다) 시험 중 주의사항

- 시료에서 발생하는 유해증기로부터 시험자를 보호하기 위해 자연통풍 챔버 또는 흡 후드 안에 설치하고, 시험 시 시료에서 발생하는 증기가 난류의 영향 및 국소배기장치에 연결된 후드의 풍향으로 Gas Ignitor의 화염이 꺼질 수 있기 때문에 공기의 유동을 최대한 줄여야 한다.
- 가열 시 Bubble이 발생하여 화염감지기에 기포가 접촉하게 되면 착화

로 오인될 수 있으므로 시험 시 주의하여야 한다.



[그림 IV-3] Fully Automatic Flash Pointer (Cleveland Open Cup Analyzer - CLA4)

2) 시험 방법

- 1) 시험 규격 : KS M 2010:2008 원유 및 석유 제품 인화점 시험방법
- 태그 밀폐식 시험방법

2) 시험절차

- <표 IV-2>에 근거하여 인화점 시험 방법을 결정한다.
- <표 IV-2>에 따라 시료컵에 시료를 채운 다음 시험 장치별로 프로그램을 실시하여 인화점 측정을 시작한다.
- 예상 인화점을 알고 있을 경우 이를 입력하면 <표 IV-2>과 같이 승온

속도와 시험불꽃을 시료에 접근하는 온도간격을 설정된다.

- 예상 인화점을 모르는 경우에는 Search Program을 사용하여 인화점을 측정한다.

〈표 IV-2〉 인화점 시험방법에 따른 승온 속도

시험방법	시료컵 용량	예상인화점	승온속도	시험불꽃을 대는 온도간격
태그 밀폐식	50±0.5 mL	60 °C 미만	1°C/60±6초	0.5°C마다
		60 °C 이상	3°C/60±6초	1.0°C마다
펜스키마텐스 밀폐식	약 70mL	110 °C 이하	5~6°C/분	1.0°C마다
		110 °C 초과		2.0°C마다
클리브랜드 개방식	약 80mL	80 °C 이상	5.5±0.56°C/분	2.0°C마다

3) 결과 평가

- 연속된 3회의 결과의 평균값을 사용하며 계산 방법 및 정밀도는 〈표 IV-3〉에 따른다.

〈표 IV-3〉 인화점 측정 계산 및 정밀도

시험방법	정밀도			계산방법
	인화점(°C)	반복허용차	재현허용차	
태그 밀폐식	-30~13	1.0	3.5	$F_c = F + 0.25(101.3 - P)$ 여기서, F _c : 인화점(°C) F : 측정인화점(°C) P : 시험장소의 기압(kPa)
	14~60	1.0	2.0	
	60~93	2.0	3.5	
펜스키마텐스 밀폐식	104 미만	2	4	
	104 초과	6	8	
클리브랜드 개방식	80 이상	8	16	

2. 폭발한계²⁾(산업안전보건연구원, 2010; 이근원 등, 2013)

가연성가스 또는 증기와 공기의 혼합물은 특정한 농도(조성) 이상에서만 착화하여 연소가 일어난다. 점화에 의해서 가연성 혼합물의 연소가 발생해도 발생된 열량이 점화원 주변에 있는 미연소 혼합기체를 발화온도까지 가열시키지 못하면 연소가 지속되지 않는다. 이렇게 가연성 증기와 공기에 최소점화에너지 이상의 착화원이 인가되었을 때 화염이 전파될 수 있는 가연성 혼합물을 형성할 수 있는 가연물의 농도범위를 연소한계(flammable limit) 혹은 폭발한계(explosion limit)라고 한다. 이러한 연소범위 중에서 화염전파가 발생할 수 있는 혼합물을 형성하는 가연물의 가장 낮은 농도를 폭발(연소) 하한계(LFL : Lower flammable limit)라고 하고 가장 높은 농도를 폭발(연소) 상한계(UFL : Upper flammable limit)라고 한다.

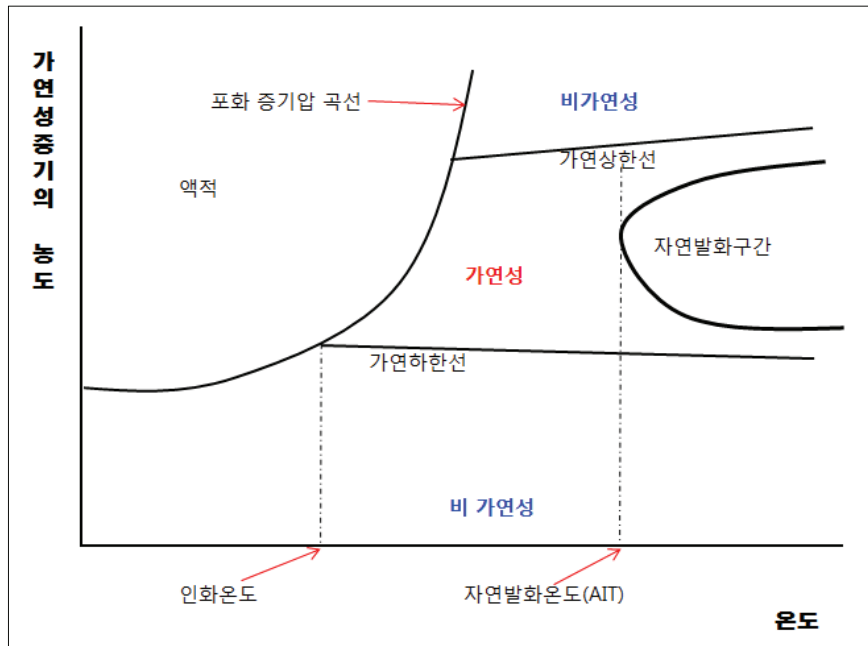
일반적으로 농도가 폭발범위를 벗어나면 최소점화에너지 이상의 착화원이 인가되어도 화염전파가 일어나지 않는다. [그림 IV-4]에 폭발한계를 포함하여 온도와 가연성 물질의 연소 특성 간의 관계를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 폭발한계는 온도에 의해서 영향을 받는데, 일반적으로 온도가 증가하면 UFL은 증가하고 LFL은 감소하는 것으로 알려져 있다.

이렇게 가연성 혼합가스의 폭발한계는 폭발성 분위기를 형성하는 주위와 관련된 다양한 인자들에 의해 영향을 받는데, 이러한 인자들에는 초기온도, 압력, 산소농도, 가연성 물질의 연소열, 분자량, 발화원의 특성, 불활성 가스의 농도, 폭발한계 측정 용기의 크기 및 화염전파방향 등이 있다. 특히 LFL은 온도가 100 °C증가할 때마다 8 %감소하고, UFL은 8 %증가하는 것으로 알려져 있고, 대단히 낮은 압력을 제외하고 압력은 LFL에 거의 영향을 주지 않지만 UFL은 압력이 증가할 때 현격히 증가되어 연소범위가 넓어지는 것으로 알

2) 산업안전보건연구원(2010) 및 이근원 등(2013)이 작성한 보고서의 내용을 발췌하여 변경 없이 인용 또는 수정하여 작성함

려져 있다.

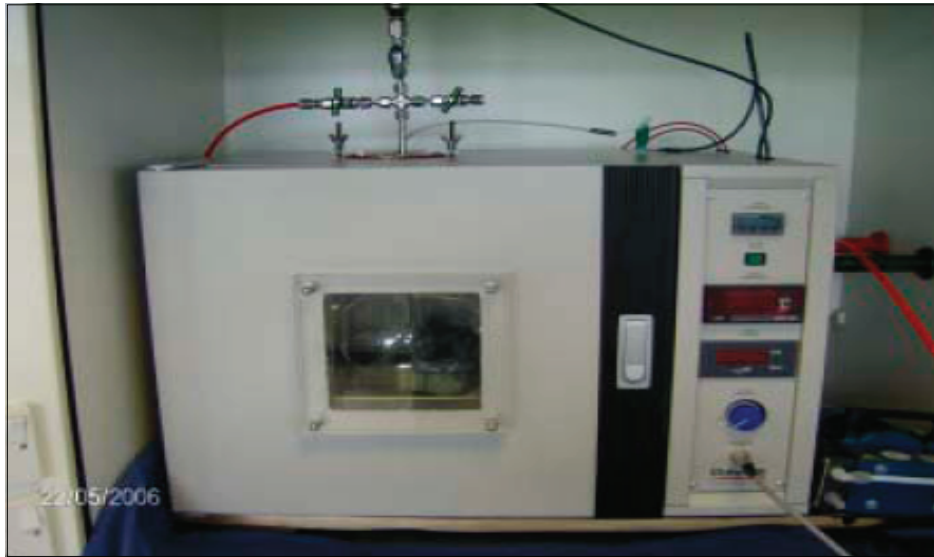
가연성 증기에 의한 폭발성 혼합물 형성의 억제를 통하여 화재폭발을 예방한다는 관점에서는 폭발한계를 나타내는 두 가지 특성값 중에서는 폭발하한계 값이 더 큰 의미를 갖는다. 이는 환기(혹은 밀폐된 시스템의 경우 불활성 가스에 의한 치환)를 통하여 특정 조건에서 가연성 증기의 농도를 쉽게 폭발하한계보다 낮은 범위로 이동시킬 수 있기 때문이다.



[그림 IV-4] 온도와 가연성 물질의 연소 특성 간의 관계

1) 시험장비

본 평가에서 폭발한계는 [그림 IV-5]에 있는 Chilworth Technology사의 『Flammable Range Apparatus』를 이용하여 측정하였다. 해당 장비는 온도 조절용 컨백션 오븐, 진공 펌프, 반응 용기(vessel) 및 점화시스템으로 구성되어 있다.



[그림 IV-5] 폭발한계 측정장치

시험을 위한 표준 규격은 『ASTM E 681-09 : 2009 “Concentration limits of flammability of chemicals (vapors and gases)”』로 진공상태의 플라스크에 원하는 양만큼 화학물질을 주입한 다음 공기(산소)와 혼합하여 완전혼합과 열적평형 상태를 만든 후에 점화원을 가하여 폭발한계를 측정한다. 해당 시험 규격은 대기압 하에서 공기와 함께 가연성 혼합물을 형성할 수 있을 만큼의 충분한 증기압을 갖는 화학물질에 적용되며, 불포화화합물, 유기산 화물, 에스터 등을 포함한 반응성 물질에는 적용할 수 없다.

만일 상온에서 충분한 휘발성 증기를 형성하지 않는 경우에는 오븐의 온도를 상승시켜서 측정할 수 있으며 최대측정가능 온도는 150 ℃이다. 또한 산화제 증가에 따라 폭발압력이 증가하기 때문에 공기 보다 더 강한 산화제를 사용하면 안 되며, 고진공(-0.95 barG)으로 인해 플라스크가 파열될 가능성이 있으므로 적당한 차폐물을 설치해야 한다.

시험 물질의 폭발하한계 농도는 다음 식을 이용하여 “%” 농도로 환산하여 표기한다.

$$LFL = \frac{(L)(d)(T)}{(MW)(P)} \times \frac{(V_o)(P_o)(100\%)}{(V)(T_o)}$$

위 식에서 L 은 폭발이 발생한 조건에서 투입된 시료량과 폭발이 발생하지 않은 시료량의 평균값, V는 플라스크의 체적(5 L), T는 시험온도(K), MW는 투입되는 시료의 분자량(g/mol), P는 시험압력(kPa), V_o는 P_o, T_o에서 시료 1 mol의 부피를 나타내며, P_o와 T_o는 표준압력과 온도로 각각 101.3 kPa과 273 K이다.

시료의 분자량을 모르는 경우에는 다음 식으로 폭발하한계 농도를 계산한다.

$$LFL = \frac{L}{V} \times 1000$$

위 식에서 L 은 폭발이 발생한 조건에서 투입된 시료량과 폭발이 발생하지 않은 시료량의 평균값, V는 플라스크 체적(5 L)이고, LFL(폭발하한)의 단위는 mg/L가 된다.

3. 자연발화점³⁾(산업안전보건연구원, 2010; 이근원 등, 2013)

자연발화는 공기 중의 물질이 화염, 불꽃 등의 점화원과 직접적인 접촉 없이 주위로부터 충분한 에너지를 받아서 스스로 점화되는 현상을 말하며, 자연발화점은 자연발화 현상이 일어날 수 있는 최저 온도를 말한다. 일반적으로 자연발화의 발생 메커니즘은 열발화 이론에서 출발하며, 물질의 온도를 상승시키는 열원의 종류에 따라서 자연발화(spontaneous ignition), 자동발화(auto ignition), 자기발화(pyrophoric ignition)로 구분되기는 하나, 일반적으로 화재 폭발 특성과 관련된 자연발화는 외부에서 열원을 공급하면서 물질의 최저발화온도를 측정하는 자동발화를 의미한다.

자연발화점은 스파크나 불꽃과 같은 직접적인 착화원이 없다는 점에서 인화점과 구별된다. 또한 자연발화점은 증기의 농도, 증기의 부피, 계의 압력, 실험 개시온도, 촉매의 유무 및 발화지연시간 등 다양한 변수에 영향을 받기 때문에 동일한 물질이라 하더라도 측정조건 및 방법에 따라서 다양한 결과값을 나타낼 수 있다. 따라서 발화온도를 플랜트의 설계나 안정성 평가에 응용하기 위해서는 측정조건과 플랜트의 설계나 플랜트의 운영방식의 차이 등을 고려할 필요가 있다.

일반적으로 자연발화점을 측정하는 방법은 에너지 공급방식과 측정대상 물질의 성상에 따라서 구분할 수 있다.

에너지 공급방식에 따른 구분에는 시료온도를 정해진 가열속도로 상승시키면서 발화되는 온도를 측정하는 “승온법”과 일정온도를 유지한 곳에 시료를 갑자기 투입하여 발화점을 측정하는 “정온법”이 있다. 승온법의 경우에는 조작이 간단하지만 시료가 발화점 전까지 예열되기 때문에 예열 영향에 대한 평

3) 산업안전보건연구원(2010) 및 이근원 등(2013)이 작성한 보고서의 내용을 발췌하여 변경 없이 인용 또는 수정하여 작성함

가와 결과해석이 어렵다. 반면에 승온법의 경우는 예열의 영향이 없고 결과의 해석이 용이하지만, 조각이 까다로우며 발화지연이 발생하는 단점이 있다.

물질의 성상에 따른 측정법을 살펴보면 기체의 경우에는 도입법, 봄브법, 유통법, 단열압축법, 충격파관법, 예열법이 있고, 액체 및 고체의 경우는 유적법, 유욕법, 발열법, 증량법, 접촉법이 있다.

이러한 측정방법들 중 일부는 몇몇 국가 및 단체에 의해서 표준화되었으며, 대표적인 자연발화점 측정관련 표준을 비교하여 <표 IV-4>에 요약하여 나타내었다. <표 IV-4>에 나타난 표준들은 자연발화점 측정에 있어서 다음과 같은 몇 가지 유사한 제한점이 있다.

먼저 ASTM D 2883-95를 제외하고 모든 시험규격이 상압 조건에서 측정하며, 가연성 물질의 농도 조절이 불가능하고 공기와 균일한 혼합물을 형성시킬 수 없다. 또한 ASTM D 2883-95를 제외하고 대부분의 규격에서 silica 계열 vessel을 사용하고 있어 연소 반응 시 금속 촉매의 영향에 대한 고찰이 불가하며, 산소 농도의 조절이 불가하기 때문에 산소결핍 혹은 과다의 영향 및 시료의 사전가열에 대한 고찰이 불가능하다. 마지막으로 자연발화점의 응용과 관련된 요소인데, 자연발화점은 시험용기가 커지면 감소하는 경향이 있으나, 대부분의 표준에서 사용하는 vessel이 산업적으로 사용되는 용기 크기에 비해 매우 작아서 부피에 대한 의존성 평가가 불가하다.

〈표 IV-4〉 자연발화점 측정관련 표준시험법의 비교

Standard ⁴⁾	Scope	test vessel	Auto-ignition criteria	time criterion
EN 14522	P = 1 atm T ≤ 923 K gas/vapor	borosilicate erlenmeyer V = 200 mL open	visual flame	t ≤ 5 min
DIN 51794	P = 1 atm T ≤ 923 K gas/vapor	borosilicate erlenmeyer V = 200 mL open	visual flame	t ≤ 5 min
IEC 60079-4	P = 1 atm gas/vapor	borosilicate/quartz/ metal erlenmeyer V = 200 mL open	visual flame	t ≤ 5 min
BS 4056-66	P = 1 atm T ≤ 923 K gas/vapor	borosilicate/quartz/ metal erlenmeyer V = 200 mL open	visual flame	t ≤ 5 min
ASTM D2155-66	P = 1 atm liquids	borosilicate erlenmeyer V = 200 mL open	visual flame	t ≤ 5 min
ASTM E 659-78	P = 1 atm liquids	borosilicate round bottom V = 500 mL open	visual flame	t ≤ 10 min
ASTM D 2883-95	P < 0.8 MPa T ≤ 923 K liquids/solids	steel explosion vessel V = 1 L closed	temp./pressure recording	t ≤ 10 min

4) EN(European Norme : 유럽표준), DIN(Deutsches Institut für Normung : 독일공업규격위원회), IEC(International Electrotechnical Commission : 국제전기기술위원회), BS(British Standards : 영국국가규격), ASTM(American Society for Testing and Materials : 미국시험재료협회)

1) 시험장비

본 평가에서 혼합 유기용제의 자연발화점을 측정하기 위하여 사용한 장비를 [그림 12]에 나타내었다. 해당 장비는 독일의 PETROTEST사에서 제작한 『ZPA-3 semi-automatic autoignition tester』로써 자연발화점 시험과 관련된 국제시험규격인 DIN 51794(2003) 『Determining the ignition temperature of petroleum products』에 적합하도록 제작되었으며, DIN 51794 규격에서 규정하고 있는 화염감지방법을 개선하여 센서에 의한 자동 발화감지와 시료의 자동 투입이 가능하도록 제작되었다. 장치는 가열로의 온도 조절, 기록 및 측정에 필요한 프로그램 선정 등을 위한 main controller 와 controller에서 결정된 가열속도에 의해서 전기로를 가열하는 오븐 그리고 샘플 투입을 위한 자동샘플투입기로 구성되어 있으며, 상온에서 최대 650℃까지 측정이 가능하다.



[그림 IV-6] Semi-automatic autoignition tester (ZPA-3)

앞서 언급하였던 바와 같이 자연발화점은 물질의 고유한 특성과 연관이 있기는 하지만 끓는점처럼 고유의 값이 아니며 측정 환경 및 장비에 따라서 영향을 받기 때문에 시험 중 측정장비 주변에 기류의 발생에 의한 시료의 농도 변화가 발생하지 않도록 주의하여야 한다. 또한 상분리가 일어나거나 휘발분의 증발에 의해서 결정화 등의 상변화가 발생할 우려가 있는 시료는 본 장비에 적용할 수 없다.

2) 측정 방법

본 평가에서 적용한 자연발화점 표준 시험 규격인 DIN 51794는 여러 가지 자연발화점 측정 방법 중 고온 표면에 액체시료를 직접 접촉시킨 후 증발된 시료와 공기 혼합증기의 발화여부를 판정하는 것으로 정온법에 의한 접촉법으로 구분할 수 있다. DIN 51794 방법은 총 3단계의 반복시험을 통하여 액체 시료의 자연발화점을 측정하게 된다.

첫 번째는 「예비시험(VORB step)」으로 액체시료가 투입되는 플라스크의 온도를 5 °C/min 의 속도로 가열한 후 측정 대상 시료의 예상 발화점(임의 결정)의 전후 100 °C범위에서 20 °C간격으로 샘플을 투입하여 발화여부를 측정한다. 두 번째는 「본 시험(H-A1 step)」으로 예비시험에서 측정된 발화온도를 기준으로 ± 5 °C단위로 플라스크 온도를 조절하여 샘플을 투입하면서 발화가 관측되는 최저온도를 결정한다. 마지막 단계는 「최종시험(H-A2 step)」으로 본 시험(H-A1 step)에서 결정된 최저 발화온도를 기준으로 ± 2 °C단위로 플라스크 온도를 조절하여 샘플을 투입하면서 발화가 발생하는 최저온도를 측정한다. 최종적으로 3단계의 시험을 통해서 결정된 측정값 중 가장 낮은 온도를 최종 자연발화점으로 결정한다.

4. 증기압

액체 내부의 분자들은 일정한 에너지를 가지고 운동하고 있으며, 분자 간 인력이 작용하며, 액체 표면에 위치하는 분자들은 액체 내부에 있는 분자들에 비해 분자 간 인력이 약하다. 따라서 일부 더 높은 에너지를 가지고 운동하는 분자들은 액체로부터 떨어져 나와서 기체 상태가 되기도 하는데, 이러한 과정을 증발(vaporization)이라고 하며, 끓음(boiling)과 구분하고 있다.

증기압은 액체 또는 고체에서 물질이 증발하는 압력으로 열역학적으로 증기가 고체나 액체와 동적 평형 상태에 있을 때의 포화증기압을 말한다. 다른 표현으로 증발속도와 응축속도가 같아 동적 평형을 이루고 있을 때 외부의 증기가 갖는 압력을 증기압이라고 한다.

증기압은 액체의 증발속도와 관련이 있어 실온 상태에서 증기압이 매우 높은 액체 상태의 물질은 휘발성을 갖는 물질이라고 표현되기도 한다. 예를 들면 액체 표면에서는 끊임없이 기체가 증발하는데, 밀폐된 용기의 경우 어느 한도에 이르면 증발이 일어나지 않고, 안에 있는 용액은 그 이상 줄어들지 않는데, 이는 같은 시간 동안 증발하는 분자의 수와 응축되어 액체 속으로 들어오는 기체분자의 수가 같아지는 동적 평형상태가 되기 때문이며, 이 상태에 있을 때 기체를 그 액체의 포화증기, 그 압력을 증기압(포화증기압)이라 한다.

개방된 용기 속에 있는 액체가 증발을 계속하는 것은 액체와 접하는 물질이 포화증기압에 이르지 못하기 때문이다. 증기압은 같은 물질이라도 온도가 높아짐에 따라 더욱 커진다. 증발과 증기 압력은 분자 간 인력과 온도라는 두 가지 요인에 의해 영향을 받는데, 분자 간의 인력이 강할수록 인력을 극복하기 어렵기 때문에 증발이 잘 일어나지 않지만, 온도가 높을수록 분자들의 평균 운동 에너지가 커져서 더 쉽게 분자들 간의 인력을 극복할 수 있어 증발이 잘 일어난다.

증기압은 화학공학 및 석유화학 공정에서 화학물질 저장탱크의 설계, Vent 시스템 설계와 증류와 같은 기체-액체 단위조작 등과 관련하여 공학적으로 중요한 물리화학적 특성 중의 하나이다. 가연성 물질인 경우 인화성 혹은 폭발성 혼합증기를 형성할 수 있는 가능성에 대한 척도로써 물리적 위험성 관점에서 중요하며, 휘발에 의한 대기 중 노출로 인한 근로자에 대한 화학물질의 직접적인 노출 가능성 및 강도와 관련해서 산업위생 측면에서도 큰 의미를 갖는 물리화학적 특성이라고 할 수 있다.

대표적인 증기압 측정법의 적용과 측정범위를 요약하여 <표 IV-5>에 나타내었다. 증기압을 측정하는 방법에는 장치 및 측정범위에 따라서 동적방법(dynamic method), 정적방법(static method), Isoteniscope방법, 분출방법(effusion method), 가스포화방법(gas saturation method), 회전자방법(spinning rotor method) 등이 있으며, 동적방법처럼 온도를 변화시켜 특정 온도에서 증기압을 측정할 수도 있다.

<표 IV-5> 화학물질의 증기압 측정법의 종류 및 측정범위

측정법	고체	액체	권장범위
동적방법 (Dynamic method)	저용점	가능	103 Pa부터 2×10^3 Pa까지 2×10^3 Pa부터 105 Pa까지
정적방법 (Static method)	가능	가능	10 Pa부터 105 Pa까지
Isoteniscope 법	가능	가능	102 Pa부터 105 Pa까지
분출방법 (Effusion method vap. pres. balance)	가능	가능	10^{-3} Pa부터 1 Pa까지
분출방법 질량감소 (Effusion method weight loss)	가능	가능	10^{-3} Pa부터 1 Pa까지
가스포화방법 (Gas saturation method)	가능	가능	10^{-5} Pa부터 103 Pa까지
회전자방법 (Spinning rotor method)	가능	가능	10^{-4} Pa부터 0.5 Pa까지

1) 시험장비

Grabner instruments사의 『MINIVAP VPXpert』를 사용하였으며 장비 사양은 <표 IV-6>과 같다.

<표 IV-6> 증기압 측정장비 장비 사양

항목	Spec.
온도 범위	(0 ~ 120) °C
압력 범위	(0 ~ 1,000) kPa
Pressure resolution	0.1 kPa
Sample volume	1 mL

2) 시험방법

본 평가에서 증기압 측정은 37.8 °C에서 Vapor-Liquid 비가 4 : 1인 상태의 증기압을 측정하는 ASTM D6378-10(Standard Test Method for Determination of Vapor Pressure (VPX) of Petroleum Products, Hydrocarbons, and Hydrocarbon-Oxygenate Mixtures(Triple Expansion Method)) 방법에 따라 측정하였다. <그림 IV-7>에는 증기압 측정장비 사진 및 작동 원리를 나타내었다.



[그림 IV-7] 증기압 측정장비 사진 및 작동 원리

V. 결과 및 고찰

.....

V. 결과 및 고찰

1. 산업용 세척제로 사용하는 물질의 화재·폭발 특성

정경숙 등(2017)의 보고서에 언급된 산업 현장에서 세척제로 사용하고 있는 물질 111종에 대해 안전보건공단 MSDS 홈페이지에서 각 물질의 인화점, 폭발한계, 자연발화점을 조사하였다. 그리고 KOSHA Guide(정전기 재해예방에 관한 기술지침)에서 최소점화에너지를 조사하였고, 세부 내용은 <표 II-4>와 같다.

111종의 물질 중 약 87.4%(97종)의 물질이 인화성이 있거나 화재가 발생할 가능성이 있는 물질인 것으로 나타났다. 특히 인화점이 30 ℃ 이하인 물질은 51개인 것으로 나타나 약 46%의 물질이 상온에서도 불이 붙을 수 있는 것으로 나타났다. 인화점을 60 ℃ 이하로 확대하면 해당되는 물질은 69종으로 전체의 약 62.2%를 차지하는 것으로 나타났다. 111종의 물질 중에서 인화점, 폭발한계, 자연발화점이 모두 없거나 불연성 또는 비인화성으로 나타난 물질은 과산화수소, 불산, 사염화탄소, 수산화나트륨, 수산화칼륨, 수산화칼슘, 시안화나트륨, 시안화칼륨, 염화수소, 오존, 인산, 질산, 황산(2종) 등 14(12.6%)종인 것으로 나타났다.

인화성이 있는 물질 중 최소점화에너지 데이터가 있는 것을 보면 최소점화에너지가 대부분 1 mJ 이하인 것으로 나타났다. 이러한 값은 폭발 분위기가 형성되어 있으면 정전기에 의해서도 충분히 점화될 수 있다¹⁾. 실제로도 정전기에 의해 화재가 발생한 사례가 상당수 보고되고 있다.

1) KOSHA Guide(E-188-2021) “정전기 재해예방에 관한 기술지침”에 따르면, 인체는 도전성이기 때문에 사람의 정전기 방전에 의해 많은 사고가 발생한다고 한다. 사람이 대지로부터 절연되어 있을 경우, 일상생활에서 상당히 많은 전하가 축적될 수 있다. 일상생활에서 인체는 10~15 kV까지 대전될 수 있으며, 이때 불꽃방전 에너지는 20~30 mJ이 된다.

〈표 V-1〉 세척제 사용 물질의 화재·폭발 특성²⁾

연번	CAS No.	물질명	인화점(°C)	폭발한계(%)(상한/하한)	자연발화점(°C)	최소점화에너지(mJ)
1	79-00-5	1,1,2-트리클로로에탄	75	15.5/6	460	
2	1717-00-6	1,1-디클로로-1-플루오로에탄	자료없음	자료없음	532	
3	75-34-3	1,1-디클로로에탄	-6	11.4/5.6	458	
4	75-35-4	1,1-디클로로에틸렌	-28	16/5.6	513	
5	107-06-2	1,2-디클로로에탄(이염화에틸렌)	13	16/6.2	440	
6	156-59-2	1,2-디클로로에틸렌(시스-1,2-디클로로에틸렌)	4	12.8/9.7	자료없음	
7	78-87-5	1,2-디클로로프로판	21	14.5/3.4	555~600	
8	75-56-9	1,2-에폭시프로판	-37	36.3/1.9	430	
9	123-91-1	1,4-디옥산	11	22.0	375	
10	106-94-5	1-브로모프로판	자료없음(고인화성)	8/4.6	490	
11	109-86-4	2-메톡시에탄올	42	24.5/2.3	285	
12	110-49-6	2-메톡시에틸아세테이트	45	12.3/1.5	380	
13	111-76-2	2-부톡시에탄올	63	12.7/1.1	230	
14	78-92-2	2-부틸알코올	24	9/1.7	405	
15	75-26-3	2-브로모프로판	-20	3/-	> 490	
16	110-80-5	2-에톡시에탄올	40	15.6/1.7	235	
17	111-15-9	2-에톡시에틸아세테이트	51	14/1.3	380	
18	127-19-5	N,N-디메틸아세트아미드	64	11.5/1.8	490	
19	71-36-3	n-부틸알코올(1-부탄올)	29.9	11.3/1.4	345	
20	110-54-3	n-헥산	-22	7.5/1.1	225	
21	95-50-1	o-디클로로벤젠	자료없음	9.2/2.2	648	
22	64-18-6	개미산	자료없음	51/18	520	
23	7722-84-1	과산화수소	자료없음	자료없음	자료없음	
24	111-30-8	글루타르알데히드	95	자료없음	395	
25	111-84-2	노난	38	5.6/0.7	205	

2) 정경숙 등(2017)의 보고서에서 제시된 111종의 세척제 목록을 기준으로 안전보건공단의 물질안전보건자료(MSDS) 홈페이지(msds.kosha.or.kr)에서 관련 자료를 검색하여 작성함

연번	CAS No.	물질명	인화점(°C)	폭발한계(%)(상한/하한)	자연발화점(°C)	최소점화에너지(mJ)
26	71-23-8	노말-프로필알콜	22.2	13.5/2.1	371	
27	75-52-5	니트로메탄	35	63/7.3	417	
28	121-14-2	디니트로톨루엔 (2,4-디니트로톨루엔)	169	자료없음	400	
29	68-12-2	디메틸포름아미드	58	15.2/2.2	135	
30	111-42-2	디에탄올아민	134	9.8/1.7	662	
31	111-40-0	디에틸렌트리아민	97	10/1	358	
32	60-29-7	디에틸에테르	-45	48/1.7	160	
33	108-83-8	디이소부틸케톤	49	6.2/0.8 (상한: 93°C)	396	
34	75-09-2	디클로로메탄	자료없음 (증기-공기 혼합물은 기연성임)	22/13	605	
35	67-56-1	메탄올(메틸 알코올)	11.11	50/6	440	0.14@14.7%
36	110-43-0	메틸노말-아밀케톤	41	5.5/1	358	
37	591-78-6	메틸n-부틸케톤	25	8/1.2	423	
38	101-68-8	메틸렌 비스페닐 다이소시아네이트	196	자료없음	> 600	
39	80-62-6	메틸메타크릴레이트	10	12.5/1.7	421	
40	108-87-2	메틸시클로hex산	-4	6.7/1.2	250	
41	78-93-3	메틸에틸케톤	-9	11.5/1.8	505	0.53@5.3%
42	108-10-1	메틸이소부틸케톤	14	7.5/1.4	460	
43	563-80-4	메틸이소프로필케톤	-3	8/1.2	475	
44	74-87-3	메틸클로라이드	자료없음	17.4/8.1	632	
45	71-55-6	메틸클로로포름	자료없음	16/8	537	
46	71-43-2	벤젠	-11	8.0/1.2	498	0.2@4.7%
47	7664-39-3	불산	자료없음	자료없음	자료없음	
48	8032-32-4	브이엠 및 피 나프타	-26	5.9/1.1	> 200	
49	108-05-4	비닐아세테이트	-8	13.4/2.6	385	0.7
50	56-23-5	사염화탄소	자료없음	자료없음	자료없음	
51	75-21-8	산화에틸렌	-29	100/3	429	
52	1310-73-2	수산화나트륨	해당없음	자료없음	(불연성)	
53	1310-58-3	수산화칼륨	자료없음	자료없음	자료없음	
54	1305-62-0	수산화칼슘	자료없음	자료없음	자료없음	
55	8052-41-3	스토다드솔벤트	21	8/0.6	232	
56	100-42-5	스티렌	31	6.8/0.9	490	

연번	CAS No.	물질명	인화점(°C)	폭발한계(%)(상한/하한)	자연발화점(°C)	최소점화에너지(mJ)
57	143-33-9	시아나화나트륨	(불연성)	자료없음	(불연성)	
58	74-90-8	시아나화수소	-17.8	46.5/5.5	535	
59	151-50-8	시아나화칼륨	(비가연성)	자료없음	자료없음	
60	108-94-1	시클로헥사논	44	9.4/1.1	420	
61	110-82-7	시클로헥산	-20	8.4/1.3	260	0.22@3.8%
62	110-83-8	시클로헥센	-6	5/1.2	244	
63	75-05-8	아세토니트릴	2	17/3	524	
64	67-64-1	아세톤	-18	13/2.2	465	1.15@4.5%
65	107-13-1	아크릴로니트릴	0	17/3	481	
66	7664-41-7	암모니아	132	33.6/15	651	680
67	64-17-5	에탄올	13	27.7/3.1	400	
68	141-43-5	에탄올아민	92.5	17/5.5	410	
69	107-21-1	에틸렌글리콜	111	15.3/3.2	398	
70	112-07-2	에틸렌글리콜모노부틸아세테이트	78	6.8/1.3	270	
71	100-41-4	에틸벤젠	18	6.7/1	432	
72	140-88-5	에틸아크릴레이트	9	14/1.4	345	
73	7647-01-0	염화수소	자료없음	자료없음	자료없음	
74	1331-22-2	메틸사이클로헥사논	48	-/12	405	
75	10028-15-6	오존	자료없음	자료없음	자료없음	
76	111-65-9	옥탄	13	6.5/1	206	
77	78-83-1	이소부틸알콜	28	10.9/1.7	415	
78	123-51-3	이소아밀알콜	43.5	9/1.2	350	
79	67-63-0	이소프로필 알코올	23	12.2/2	456	
80	7664-38-2	인산	자료없음	자료없음	자료없음	
81	7697-37-2	질산	자료없음	자료없음	자료없음	
82	64-19-7	초산	39	17/6	485	
83	79-20-9	초산메틸	-13	16/3.1	505	
84	123-86-4	초산부틸	22	7.6/1.2	420	
85	141-78-6	초산에틸	-4	11.5/2.2	427	
86	110-19-0	초산이소부틸	18	10.5/1.3	421	
87	123-92-2	초산이소아밀	25	7.5/1	379	

연번	CAS No.	물질명	인화점(°C)	폭발한계(%)(상한/하한)	자연발화점(°C)	최소점화에너지(mJ)
88	108-21-4	초산이소프로필	2	7.8/1.8	460	
89	8008-20-6	케로젠	29~70	5/0.7	220~250	
90	1319-77-3	크레졸	93	자료없음	> 580	
91	1330-20-7	크실렌	o-X: 30 p-X: 25 m-X: 25	6.7/0.9 7.0/1.1 7.0/1.1	≥ 528	0.2
92	108-90-7	클로로벤젠	27	11/1.3	590	
93	109-99-9	테트라하이드로퓨란	-14.5	11.8/2	321	0.54
94	108-88-3	톨루엔	4	7.8/1.0	480	0.24@4.1%
95	584-84-9	톨루엔-2,4-디이소시아네이트	127	9.5/0.9	> 598	
96	91-08-7	톨루엔-2,6-디이소시아네이트	127	9.5/0.9	620	
97	95-63-6	트리메틸벤젠(1,2,4-트리메틸벤젠)	44	6.4/0.9	500	
98	121-44-8	트리에틸아민(액체)	-11	8/1.2	230	
99	67-66-3	트리클로로메탄	(측정어려움)	자료없음	600	
100	79-01-6	트리클로로에틸렌	자료없음	100/7.9	410	
101	127-18-4	퍼클로로에틸렌	(비인화성)	자료없음	> 650	
102	108-95-2	페놀	79	10/1.36	715	
103	109-66-0	펜탄	-40	7.8/1.5	260	
104	50-00-0	포름알데히드	85	73/7	430	
105	107-98-2	프로필렌글리콜모노메틸에테르	38	13.1/1.9	287	
106	302-01-2	하이드라진(히드라진)	40	100/4.7	270	
107	822-06-0	헥사메틸렌디이소시아네이트	140	9.5/0.9	454	
108	142-82-5	헵탄	-4	6.7/1.1	285	0.24@3.4%
109	7664-93-9	황산	불연성	불연성	자료없음	
110	7664-93-9	황산(pH2.0초과)	불연성	불연성	자료없음	
111	123-31-9	히드로퀴논(디하이드록시벤젠)	165	자료없음	515	

※ 출처: 안전보건공단 MSDS(인화점, 폭발한계, 자연발화점)

KOSHA Guide(E-188-2021, 정전기 재해예방에 관한 기술지침)(최소점화에너지)

2. 세척제 시료의 화재·폭발 위험성

〈표 V-2〉에는 세척제 시료 4종에 대한 인화점과 폭발하한 등의 시험결과를 나타내었다. 인화점은 최저 영하 23.5℃부터 영상 38℃까지의 범위를 보여 구성 물질에 따라 차이가 크게 나타났으며, 시너의 경우 증기압이 높을수록 인화점이 낮게 나타났다. 폭발하한값도 세척제의 구성 물질의 종류에 따라 차이를 보였다. 시험결과에 대한 세부 내용은 다음과 같다.

[세척제 1]

에탄올 혼합물의 경우 에탄올 함량이 많아 인화점과 폭발한계가 에탄올과 비슷한 수준으로 나타났다. 에탄올 MSDS의 인화점은 13℃, 시험결과는 14.5℃로 나타났고, MSDS의 자연발화점은 400℃, 시험결과는 410℃로 나타났다. 부피 기준 폭발하한은 MSDS 3.1%, 시험결과 4.28%로 나타났다. 이처럼 세척제로 사용하는 에탄올은 인화점이 낮아 상온에서도 점화원에 의해 발화될 가능성이 높고, 폭발하한값도 낮기 때문에 에탄올을 취급하거나 사용할 때에는 항상 화재·폭발에 주의할 필요가 있는 것으로 나타났다.

[세척제 2]

MSDS에 나프타, 톨루엔, 자일렌, 벤젠 등으로 구성된 것으로 되어 있는 시너는 인화점이 영하 23.5℃, 부피 기준 폭발하한은 0.942%인 것으로 나타났다. 이러한 값은 추운 겨울 영하의 날씨에도 쉽게 인화될 수 있고, 조금만 누출되어도 점화원에 노출되면 화재가 발생할 위험성이 있음을 보여준다. 그리고 구성물질의 최소점화에너지도 낮기 때문에 정전기와 같은 작은 에너지에도 쉽게 화재가 발생하거나 폭발이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 물질을 이용하여 세척작업을 수행할 때에는 정전기 등을 비롯한 점화원 관리에 주의를

기울일 필요가 있다.

[세척제 3]

자일렌, 톨루엔, 메틸아세테이트 등 12개 물질로 구성된 것으로 되어있는 이 세척제(락카 시너)의 인화점은 영하 9.5 ℃, 폭발 하한계는 46.75 mg/L(at 40 ℃)인 것으로 나타났다. 이러한 값은 세척제 2와 마찬가지로 겨울 날씨에도 쉽게 인화될 수 있고, 조금만 누출되어도 점화원에 노출되면 화재가 발생할 위험성이 있음을 보여준다. 또한 구성 물질의 최소점화에너지도 낮기 때문에 정전기와 같은 작은 에너지에도 쉽게 화재 또는 폭발이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 물질로 세척작업 수행할 시에는 정전기 등을 비롯한 점화원 관리에 주의를 기울일 필요가 있다.

[세척제 4]

나프타, 자일렌, 에틸벤젠 등으로 구성된 것으로 되어 있는 이 세척제(에나멜 시너)의 인화점은 38℃, 폭발 하한계는 58.5 mg/L(at 40 ℃)인 것으로 나타났다. 이 물질은 겨울철에는 여름보다 상대적으로 불이 붙을 위험성이 낮지만, 온도가 높은 장소에서 취급하는 경우 화재 발생에 주의할 필요가 있다. 특히 자동차의 오일을 제거하는 작업과 같이 뜨거운 물체가 있는 곳에서 사용하는 경우 뜨거운 부분에 접촉하지 않도록 주의할 필요가 있다.

참고로, 세척제 2에는 세척제 4와 유사한 성분이 많이 포함되어 있지만 인화점은 서로 큰 차이가 있는 것으로 나타났는데 이러한 이유는 주성분의 인화점 차이에 따른 것으로 추정된다. 그리고 시너는 여러 종류가 있고, 각각의 물리적 특성도 서로 다르므로 사업장에서는 사용 목적에 맞는 시너를 선택하여 사용할 필요가 있다.

〈표 V-2〉 사고원인 물질의 물리적 위험성 시험 결과

연번	물질명	구성 물질 (MSDS 기준)	시험결과				비고
			인화점 (°C)	발화온도 (°C)	폭발 하한	증기압	
1	세척제1 (에탄올 혼합물)	에틸 알코올, 물 등	14.5	410	4.28%	미측정	기계부품 세척용, 중대재해 원인물질
2	세척제2 (시너)	Naphtha, Toluene, Xylene, Benzene	-23.5	미측정	0.942%	72.6 kPa (at 37.8 °C)	선박 내부 세척용, 중대재해 원인물질
3	세척제3 (락카 시너)	Xylene, Toluene, Methyl acetate, Acetone, 2-Butoxyethanol, Ethylbenzene, n-Butyl acetate, Ethanol, Methanol, Methyl Ethyl Ketone, Tetrahydrofuran	-9.5	미측정	46.75 mg/L at 30°C	29.6 kPa (at 37.8 °C)	자동차용 오일 제거용, 사고 원인물질
4	세척제4 (에니멜 시너)	Naphtha(petroleum), Hydrodesulfurized heavy, Xylene, Ethylbenzene	38	미측정	58.5 mg/L at 40°C	1.5 kPa (at 37.8 °C)	자동차용 오일 제거용, 사고 원인물질

3. 세척제의 위험성평가 및 화재·폭발 예방대책

1) 세척제의 위험성평가 결과

인화성이 높은 단일 물질 또는 인화성 물질이 혼합된 시너류를 세척제로 많이 사용하고 있는 것으로 나타났다. 혼합물질로 이루어진 세척제는 구성성분에 따라 인화점에 큰 차이를 보였다. 에나멜 시너에 비해 상대적으로 빨리 건조되는 락커 시너는 인화점과 폭발 하한 농도가 낮아 점화원에 노출되면 폭발이나 화재가 발생할 위험성이 매우 높은 것으로 나타났다. 실제로도 정전기와 같이 작은 에너지원이 점화원으로 작용하여 발생한 화재가 다수 있었다.

2) 화재·폭발 예방 방안

밀폐된 곳에서 작동하는 자동화 세척 설비를 사용하는 경우를 제외하면 인화성이 있는 세척제를 취급하는 작업은 대부분 공기와 세척제 증기가 혼합되어 있다고 볼 수 있다. 따라서 화재의 3요소 중 가연물과 산소는 이미 존재하고 있는 것으로 볼 수 있는 경우가 많기 때문에 세척제 취급 공정에서의 화재·폭발을 예방하기 위해서는 점화원 관리가 매우 중요하다고 할 수 있다. 세척제 사용 및 취급 시 고려해야 할 점화원의 종류는 다음과 같다(KOSHA Guide P-7-2011, KOSHA Guide P-6-2011, KOSHA Guide P-75-2011).

- (1) 전등, 전기회로 및 전기설비(비방폭 전기설비)
- (2) 전기 또는 기계적 스파크
- (3) 정전기
- (4) 마찰열
- (5) 고열 표면

- (6) 용접 또는 절단 불티, 그 외 화기 작업
- (7) 가열용 전기설비
- (8) 내연기관
- (9) 담뱃불(흡연) 등
- (10) 자연 발열(spontaneous heating), 화학적 반응열
- (11) 복사열
- (12) 번개

세척제 사용 및 취급 공정에서의 화재·폭발 사고 예방 방안은 KOSHA GUIDE (P-75-2011) “인화성 액체의 안전한 사용 및 취급에 관한 기술지침” 과 사고사례 분석결과 및 세척제의 화재·폭발 특성 시험결과를 이용하여 마련할 수 있으며, 대부분의 내용은 III장의 “3. 사고사례를 통해 본 시사점”에 기술해 놓았다. 또한 세부 작업별 화재·폭발 사고 예방 방안은 다음의 KOSHA GUIDE를 참고할 수 있다.

- KOSHA Guide(P-75-2011) 인화성 액체의 안전한 사용 및 취급에 관한 기술지침
- KOSHA Guide(P-6-2011) 인화성 액체의 분무공정에서 화재·폭발 예방에 관한 가이드
- KOSHA Guide(P-26-2012) 인화성 액체의 혼합작업에 관한 기술지침
- KOSHA Guide(P-3-2012) 소형탱크 세정작업을 위한 안전에 관한 기술지침
- KOSHA Guide(P-37-2012) 인화성 잔류물이 있는 탱크의 청소 및 가스 제거에 관한 기술지침
- KOSHA Guide(P-7-2011) 이동식 인화성 액체 저장용기의 안전에 관한 가이드
- KOSHA Guide(E-188-2021) 정전기 재해예방에 관한 기술지침

VI. 요약 및 결론

.....

VI. 요약 및 결론

본 위험성평가에서는 세척 및 세정 공정에서 사용 및 취급하는 세척제의 화재·폭발 위험성을 조사 및 평가하고자 하였다. 이를 위해 제조업 사업장의 세척 공정에서 사용하고 있는 세척제 목록을 조사하여 이 물질들의 화재·폭발 특성값을 문헌조사를 통해 확인하였다. 그리고 세척제 사용 및 취급 공정에서 발생한 화재·폭발 사고사례를 조사 및 분석하고, 이를 바탕으로 세척제 사용 중 화재·폭발 사고 예방 방안을 제안하였다. 또한 사고 발생 공정에서 사용한 세척제 시료를 채취 또는 구매하여 각 시료에 대한 인화점, 폭발한계 등, 자연발화점 등의 화재·폭발 특성 시험을 수행하였다. 이에 대한 요약과 결론은 다음과 같다.

1) 세척제의 종류 및 특성

산업현장에서 세척제로 사용되고 있는 것으로 파악된 111종의 물질 중 약 87.4%(97종)의 물질이 인화성이 있거나 화재가 발생할 가능성이 있는 물질인 것으로 나타났다. 특히 인화점이 30 ℃ 이하인 물질은 51개인 것으로 나타나 약 46%의 물질이 상온에서도 불이 붙을 수 있는 것으로 나타났다. 인화점이 60 ℃ 이하인 세척제 물질로 확대하면 해당 물질은 69종으로 나타나 전체 111종의 약 62.2%를 차지하는 것으로 나타났다.

2) 세척제 취급 관련 중대재해 및 중대산업사고 특성

세척제 사용 및 취급 중 발생한 중대재해사례 17건에서 사고와 관련된 세척제는 여러 물질을 혼합한 혼합물 세척제가 7건으로 가장 많았다. 단일 물질로는 톨루엔이 3건으로 가장 많았고, 아세톤, DMF, 1,3-디옥솔란, 노말헵탄

등이 있는 것으로 나타났다. 점화원으로는 정전기(추정) 7건, 용접 불꽃 5건, 모터 스파크와 설비에서 발생한 불꽃이 각 1건, 기계적 마찰 등이 1건인 것으로 나타났다. 설비별로 구분하면 탱크나 필터와 같은 용기류 4건, 세척조 3건, 반응기 2건, 기계 또는 기계부품 2건, 건조기 및 향온습기 2건, 선박 내부 1건, 기타 세척제를 담아 놓은 용기와 관련된 화재 또는 폭발 사고 2건이 발생한 것으로 나타났다.

3) 세척제 취급 관련 부상 사고 특성

세척제 취급 중 발생한 부상재해사례 54건에서는 시너, 유기용제(솔벤트), 알코올 등의 세척제가 많았던 것으로 나타났지만, 이러한 일반적인 명칭만으로는 세척제에 함유된 물질이 무엇인지 파악하기가 어려웠다. 점화원으로는 정전기가 5건, 전열기 또는 난로 4건, 전기 스파크 3건, 용접 불꽃 2건, 그라인더 불꽃 2건, 라이터 2건 등이었다. 그러나 세척제로 사용하는 물질의 종류와 점화원을 확인할 수 없는 재해가 많았기 때문에 사고원인 파악을 위한 추가적인 조사가 필요할 것으로 판단되었다.

4) 세척제 시료 시험 결과

사고의 원인물질로 추정되는 세척제 시료 중 시너류 3종의 인화점은 (-23.5 ℃ ~ 38 ℃)의 범위에서 나타났다. 같은 시너라는 명칭을 사용하더라도 그 구성물질의 종류에 따라 인화점이 큰 차이를 보였다. 시너 시료 2종의 인화점은 영하의 값을 보여 누출 시 점화원에 노출될 경우 쉽게 화재가 발생할 수 있을 것으로 판단되었다. 폭발한계는 0.942%, 46.75 mg/L (at 30℃), 58.5 mg/L (at 40℃)의 값을 보여 작은 양이 노출되어도 폭발이나 화재가 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 에탄올이 주성분인 세척제의 인화점은 에탄올과 비슷한 14.5 ℃, 폭발 하한은 4.28%인 것으로 나타나 화재·폭발 위험성이 높은 물질인 것으로 판단되었다.

5. 사고예방대책

세척제는 공기 중에 노출된 상태에서 사용하는 경우가 많기 때문에 점화원 관리가 특히 중요할 것으로 판단되었다. 세척제 사용 중 화재·폭발 사고의 점화원은 KOSHA GUIDE에 제시된 사항과 유사하게 정전기, 전기 또는 기계적 스파크, 비방폭 전기설비, 마찰열, 고열 표면, 용접 또는 절단 불티, 가열용 전기설비, 라이터 등이었다. 세척제로 사용되는 시너의 경우 인화점이 다양하게 나타났지만, 대부분 상온에서 불이 붙을 수 있는 수준의 값을 보였다. 또한, 최소점화에너지도 매우 낮은 수준이었기 때문에 세척제 사용 및 취급 중에는 정전기 관리도 매우 중요할 것으로 판단되었다.

세척제 사용 및 취급 공정에서의 화재·폭발 사고 예방을 위한 일반적인 사항과 세부 사항은 관련 안전보건기술지침을 참고할 수 있도록 V장에 별도로 정리하여 제시하였다.

참고문헌

1. 배재흠, 신민철, 산업 세정의 세정성 평가방법 및 적용사례, Clean Technology, December, 1999, 5(2) pp.1-12
2. 西村眞幸: 제3회대체세정제 응용기술 세미나, 한국화학시험연구원 (1997.4.25.)
3. 씨제이켄 웹사이트, cjchem.co.kr
4. 산업안전보건연구원, 혼합 유기용제(신나)에 대한 위험성평가, 2010.
(<https://oshri.kosha.or.kr/oshri/professionalBusiness/dangerEvaluationReport.do?mode=download&articleNo=406710&attachNo=234490>)
5. 안전보건공단, KOSHA Guide(E-188-2021), 정전기 재해예방에 관한 기술지침, 2021.
6. 이근원, 이정석, 한우섭, 한인수, 이수희, 최이락. 화학사고 예방 및 원인규명을 위한 DMF를 포함하는 혼합 유기용제의 물리화학적 특성 및 물리적 위험성평가. 안전보건공단 산업안전보건연구원. 2013.
7. 이근원, 한우섭, 이주엽, 한인수, 이정석, 최이락, 박상용. 화학사고 예방 및 원인규명을 위한 LPG 운반선 탱크용 보온재의 물리적 위험성 평가. 안전보건공단 산업안전보건연구원. 2016.
8. 이혜진, 이나루, 한정희, 이도희, 신아름, 한슬기, 세척작업의 안전한 관리를 위한 결정요인 분석 및 구조화, 안전보건공단 산업안전보건연구원. 2023.
9. 정경숙, 안연순, 김현수, 김치년, 김동현, 안연수, 김형두, 이정하, 1,2-디

- 클로로프로판(1,2-dichloropropane) 등 세척제 취급 실태조사 및 건강 모니터링 체계 구축, 안전보건공단 산업안전보건연구원, 2017
10. 제이엠씨 웹사이트, jmchem.co.kr
 11. (주)OOOO, 락카 시너(OO-OOOO) 물질안전보건자료(MSDS), 2015.
 12. (주)OOOO, 에나멜 시너(OO-OOOO) 물질안전보건자료(MSDS), 2024.
 13. 진준환, 초정밀세정을 위한 나프텐계 준용매 세정제 연구. 성균관대학교 대학원. 박사학위논문, 2006
 14. 네이버 국어사전(표준국어대사전),
<https://ko.dict.naver.com/#/entry/koko/7499df3857bb4722a14c1060c3b5e7e6>.
 15. 한우섭, 이주엽, 최이락, 박상용, 한인수, 이정석. 화학사고 예방 및 원인 규명을 위한 원료의약품 분진의 화재·폭발 위험성평가. 안전보건공단 산업안전보건연구원. 2016.
 16. 한우섭, 서동현, 최이락, 이정석, 박효진. 화학사고 예방 및 원인규명을 위한 의약품 중간체 분진의 화재·폭발 위험성 시험·평가. 안전보건공단 산업안전보건연구원. 2019.
 17. GS칼텍스 홈페이지,
<https://gscaltexmediahub.com/energy/energylife-product-solvent/>.

연구진

연구기관 : 산업안전보건연구원 산업안전연구실

평가책임자 : 서동현 (연구위원, 위험성시험부)

참여자 : 고인희 (부장, 위험성시험부)

참여자 : 최이락 (연구위원, 위험성시험부)

참여자 : 이한희 (차장, 위험성시험부)

참여자 : 김천동 (차장, 위험성시험부)

연구기간

2024. 07. ~ 2024. 9.

본 위험성평가 보고서의 내용은 평가책임자의 개인적 견해이며,
우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

산업용 세척제 화재·폭발 위험성 평가
(2024-산업안전보건연구원-467)

발 행 일 : 2025년 02월

발 행 인 : 산업안전보건연구원장

평가책임자 : 위험성시험부 서동현 연구위원

발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주 소 : (34122) 대전광역시 유성구 엑스포로339번길 30

전 화 : 042-869-0332

팩 스 : 042-863-9003

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

I S B N : 979-11-92782-10-2

공공안심글꼴 : 무료글꼴, 한국출판인회의, Kopub바탕체/돋움체