

연구보고서

# 정전기 화재·폭발 원인분석을 통한 안전관리 방안 마련

변정환

산업재해예방  
안전보건공단  
산업안전보건연구원





# 요약문

- 연구기간 2023년 2월 ~ 2023년 11월
- 핵심단어 정전기, 화재·폭발, 원인분석, 안전관리
- 연구과제명 정전기 화재·폭발 원인분석을 통한 안전관리 방안 마련

## 1. 연구배경

석유화학·정유·에너지산업, 반도체·전자산업의 동향분석 결과 신물질 취급사용 확대에 따라 정전기적 위험물질 수요는 확대될 것으로 전망되고 있다. 또한, 석유화학공장 및 생산설비의 노후화로 인해 화재·폭발 위험 공정 및 작업에서의 정전기 발생 가능성이 높아질 것으로 예상되고 있다.

또한, 정전기 화재·폭발 특성상 현장 보존의 어려움, 물적 증거 부족 및 실증실험 관련 방법·절차 및 장비 등의 부재로 정전기 화재·폭발 사고조사는 대체로 추정의 방식이 적용되고 있으며 사고조사 결과의 신뢰성·객관성을 확보하기 위해서는 재해발생 원인 변수, 원인분석 방법 및 절차 그리고 실증적 실험방법 등에 대한 고찰이 필요한 시점이다.

이에 정전기 화재·폭발 재해조사 의견서에 대한 발생원인의 재해석, 유해·위험 요인 재분류 및 개입지점의 상세화를 통해 화재·폭발 위험장소에서의 정전기를 안전한 수준으로 관리·통제할 수 있는 절차 및 방법 등 관리방안을 제시하고자 한다.

## 2. 주요 연구내용

화재·폭발 위험장소에서의 정전기를 안전한 수준으로 관리·통제할 수 있는

절차 및 방법 등 관리방안을 제시하고자 다음과 같이 연구를 수행하였다.

## 1) 정전기 관련 중대재해 및 중대산업사고 현황

고용부 산업재해통계, 소방청 화재통계, 일본 후생노동성 산재통계와 일본 소방청 화재통계 분석을 통해 국내·외 정전기 관련 중대재해 및 중대산업사고 현황을 파악·정리하였다.

## 2) 정전기 화재·폭발 발생원인

2012년부터 2021년까지 정전기 화재·폭발 관련 재해조사 의견서를 심층 분석하고, 1995년부터 2010년까지 일본 노동후생성 산재통계의 발생개요 분석을 통해 한국과 일본의 정전기 화재·폭발 발생원인을 각각 정리 및 비교·분석하였다.

## 3) 정전기 관련 위험요인 및 주요 변수

2012년부터 2021년까지 정전기 화재·폭발 관련 재해조사 의견서의 분석 결과를 토대로 발생원인, 기인물, 발생공정, 작업형태 및 정전기 현상 등을 유형별로 분류하고 분석하여 정전기 관련 위험요인 및 주요변수를 도출하였다.

## 4) 화재·폭발 위험장소의 정전기 안전관리 방안

연구내용을 토대로 선행연구 분석, 문헌고찰 및 전문가 자문 등을 통해 화재·폭발 위험장소에서 효과적으로 작동될 수 있는 정전기 안전관리 방안(화재·폭발 위험장소에서의 정전기 위험 관리, 정전기 위험성 평가, 주요 원인변수 통제, 정전기 관련 화재·폭발 조사)을 마련하였다.

### 3. 연구 활용방안

정전기 화재·폭발 관련 유해·위험요인 및 재해발생 원인변수 도출결과를 토대로 수립한 화재·폭발 위험장소에서의 정전기 안전관리 방안은 「산업안전보건 기준에 관한 규칙」 개정 등에 활용하고, 유해·위험요인별로 안전작업 절차를 마련하고 재해발생 원인변수에 대해서는 중대재해 원인조사에 필수항목으로 반영 예정이다.

또한 연구결과 환류를 위해서 기술지침·매뉴얼 개발에 활용하고, 연구성과 홍보를 위해서 학술지 논문게재 및 학술대회 발표 예정이다.

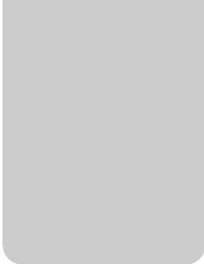
### 4. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 산업안전연구실 연구위원 변정환
  - ☎ 052) 703. 0843
  - E-mail bjh6918@kosha.or.kr

# 목 차

<b>I. 서론</b> .....	<b>1</b>
1. 연구목적 및 필요성 .....	2
2. 연구내용 및 방법 .....	3
3. 선행연구 분석 .....	5
<b>II. 정전기 관련 중대재해 및 중대산업사고 현황</b> ....	<b>7</b>
1. 한국 정전기 화재·폭발 현황 .....	8
2. 일본 정전기 화재·폭발 현황 .....	14
3. 한국·일본 비교를 통한 시사점 .....	24
<b>III. 정전기 화재·폭발 발생원인</b> .....	<b>27</b>
1. 이론적 고찰 .....	28
2. 정전기 중대재해·중대산업사고 발생 현황 .....	33

3. 정전기 중대재해·중대산업사고 발생현황 교차분석 .....	40
4. 소결 .....	103
<b>IV. 정전기 관련 위험요인 및 주요 변수 .....</b>	<b>107</b>
1. 위험요인 및 원인변수 도출을 위한 분석모형 설계 .....	108
2. 분석모형 기반 원인조사 의견서 원인변수 정리 .....	110
3. 정전기 화재·폭발 관련 도출 원인변수 분석 .....	115
<b>V. 화재·폭발 위험장소의 정전기 안전관리 방안 ..</b>	<b>141</b>
1. 화재·폭발 위험장소에서의 정전기 위험 관리 .....	142
2. 화재·폭발 위험장소에서의 정전기 위험성평가 .....	152
3. 주요 원인변수 통제 .....	154
4. 정전기 관련 화재·폭발 조사 .....	179



# 목 차

<b>VI. 결 론</b> .....	<b>185</b>
1. 연구 내용 및 결과 .....	186
2. 기대효과 및 활용방안 .....	188
<b>참고문헌</b> .....	<b>191</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>192</b>
<b>부록. 재해·사고 사례 변수카드</b> .....	<b>194</b>

# 표 목차

〈표 II-1〉 화재 발화열원별 발생건수 .....	9
〈표 II-2〉 발화열원의 작동기기 중 불꽃·스파크·정전기 발생 현황 .....	9
〈표 II-3〉 정전기 화재·폭발 재해/사고 발생 건수 .....	11
〈표 II-4〉 정전기 화재·폭발 발생건수, 사망자수 및 부상자수 .....	12
〈표 II-5〉 중대산업사고 관련 정전기 사고 현황 .....	13
〈표 II-6〉 년도별 정전기 화재·폭발 발생건수 .....	14
〈표 II-7〉 월별 정전기 화재·폭발 발생건수 .....	15
〈표 II-8〉 대전물체별 정전기 화재·폭발 발생건수 .....	16
〈표 II-9〉 년도별 정전기 화재·폭발 발생현황 .....	17
〈표 II-10〉 업종별 정전기 화재·폭발 발생현황 .....	18
〈표 II-11〉 대전종류별 정전기 화재·폭발 발생현황 .....	19
〈표 II-12〉 원인물질별 정전기 화재·폭발 발생현황 .....	20
〈표 II-13〉 공정(장소)별 정전기 화재·폭발 발생건수 .....	21
〈표 II-14〉 작업내용별 정전기 화재·폭발 발생건수 .....	22
〈표 II-15〉 기인물별 정전기 화재·폭발 발생건수 .....	23
〈표 III-1〉 정전기 재해·사고 발생 중업종과 장소의 교차분석 .....	41
〈표 III-2〉 정전기 재해·사고 발생 중업종과 공정의 교차분석 .....	43
〈표 III-3〉 정전기 재해·사고 발생 중업종과 작업의 교차분석 .....	48
〈표 III-4〉 정전기 재해·사고 발생 중업종과 기인물의 교차분석 .....	52
〈표 III-5〉 정전기 재해·사고 발생 중업종과 물질의 교차분석 .....	58

# 표 목차

〈표 III-6〉 정전기 재해·사고 발생 중업종과 대전종류의 교차분석	60
〈표 III-7〉 정전기 재해·사고 발생 장소와 공정의 교차분석	62
〈표 III-8〉 정전기 재해·사고 발생 장소와 작업의 교차분석	64
〈표 III-9〉 정전기 재해·사고 발생 장소와 기인물의 교차분석	66
〈표 III-10〉 정전기 재해·사고 발생 장소와 물질의 교차분석	67
〈표 III-11〉 정전기 재해·사고 발생 장소와 대전종류의 교차분석	69
〈표 III-12〉 정전기 재해·사고 발생 공정과 작업의 교차분석	71
〈표 III-13〉 정전기 재해·사고 발생 공정과 기인물의 교차분석	74
〈표 III-14〉 정전기 재해·사고 발생 공정과 물질의 교차분석	80
〈표 III-15〉 정전기 재해·사고 발생 공정과 대전종류의 교차분석	82
〈표 III-16〉 정전기 재해·사고 발생 작업과 기인물의 교차분석	86
〈표 III-17〉 정전기 재해·사고 발생 작업과 물질의 교차분석	90
〈표 III-18〉 정전기 재해·사고 발생 작업과 대전종류의 교차분석	92
〈표 III-19〉 정전기 재해·사고 발생 기인물과 물질의 교차분석	96
〈표 III-20〉 정전기 재해·사고 발생 기인물과 대전종류의 교차분석	98
〈표 III-21〉 정전기 재해·사고 발생 물질과 대전종류의 교차분석	102
〈표 IV-1〉 정전기 재해·사고 분석 대상	110
〈표 IV-2〉 재해·사고 변수카드 양식	114
〈표 IV-3〉 인화성 액체의 정전기 대전 영향 요인	117
〈표 IV-4〉 가연성 분진의 정전기 대전 영향 요인	117

〈표 V-1〉 발화성 금속분진의 최소점화에너지 .....	166
〈표 V-2〉 기폭약의 최소점화에너지 .....	167
〈표 V-3〉 폭약류의 최소점화에너지 .....	168
〈표 V-4〉 붕소/산화제 혼합계의 50% 점화율 최소점화에너지 .....	168
〈표 V-5〉 Mg/KClO <sub>4</sub> 혼합계의 50% 점화율 최소점화에너지 .....	169
〈표 V-6〉 대전물체의 정전용량과 방전에너지 .....	174

# 그림목차

[그림 I-1] 연구추진 체계도 .....	5
[그림 II-1] 소방청 화재통계 분류체계 .....	8
[그림 II-2] 년도별 정전기 화재·폭발 발생건수(화재통계) .....	10
[그림 II-3] 년도별 정전기 화재·폭발 발생건수(산재통계) .....	11
[그림 II-4] 정전기 화재·폭발 발생건수, 사망자수 및 재해자수 .....	12
[그림 II-5] 중대산업사고 관련 정전기 사고 현황 .....	13
[그림 II-6] 년도별 정전기 화재·폭발 발생건수(일본 화재통계) .....	14
[그림 II-7] 월별 정전기 화재·폭발 발생건수(일본 화재통계) .....	15
[그림 II-8] 대전물체별 정전기 화재·폭발 발생건수(일본 화재통계) .....	16
[그림 II-9] 년도별 정전기 화재·폭발 발생현황(일본 산재통계) .....	17
[그림 II-10] 업종별 정전기 화재·폭발 발생현황(일본 산재통계) .....	18
[그림 II-11] 대전종류별 정전기 화재·폭발 발생현황(일본 산재통계) .....	19
[그림 II-12] 원인물질별 정전기 화재·폭발 발생현황(일본 산재통계) .....	20
[그림 II-13] 공정(장소)별 정전기 화재·폭발 발생현황(일본 산재통계) .....	21
[그림 II-14] 작업내용별 정전기 화재·폭발 발생현황(일본 산재통계) .....	22
[그림 II-15] 기인물별 정전기 화재·폭발 발생현황(일본 산재통계) .....	23
[그림 III-1] 시스템적 분석기법 사례 .....	30
[그림 III-2] 업종별 정전기 재해·사고 발생 현황 .....	33
[그림 III-3] 장소별 정전기 재해·사고 발생 현황 .....	34

[그림 Ⅲ-4] 공정별 정전기 재해·사고 발생 현황 .....	35
[그림 Ⅲ-5] 작업별 정전기 재해·사고 발생 현황 .....	36
[그림 Ⅲ-6] 기인물별 정전기 재해·사고 발생 현황 .....	37
[그림 Ⅲ-7] 물질별 정전기 재해·사고 발생 현황 .....	38
[그림 Ⅲ-8] 대전종류별 정전기 재해·사고 발생 현황 .....	39
[그림 Ⅳ-1] 분석모형 설계 절차 및 방법 .....	108
[그림 Ⅳ-2] 원인변수 도출을 위한 분석모형 .....	109
[그림 Ⅳ-3] 도전성 원인변수 확인 현황 .....	115
[그림 Ⅳ-4] 최소점화에너지 원인변수 확인 현황 .....	116
[그림 Ⅳ-5] 취급조건 원인변수 확인 현황 .....	118
[그림 Ⅳ-6] 도전성 원인변수 확인 현황 .....	119
[그림 Ⅳ-7] 접지 원인변수 확인 현황 .....	120
[그림 Ⅳ-8] 운전조건 원인변수 확인 현황 .....	121
[그림 Ⅳ-9] 작업내용 원인변수 확인 현황 .....	122
[그림 Ⅳ-10] 보호구 원인변수 확인 현황 .....	123
[그림 Ⅳ-11] 작업내용 원인변수 확인 현황 .....	124
[그림 Ⅳ-12] 매뉴얼 및 교육 원인변수 확인 현황 .....	125
[그림 Ⅳ-13] 대전대상 원인변수 확인 현황 .....	126
[그림 Ⅳ-14] 대전서열 원인변수 확인 현황 .....	127
[그림 Ⅳ-15] 대전조건 원인변수 확인 현황 .....	128

# 그림목차

[그림 IV-16] 대전종류 원인변수 확인 현황 .....	129
[그림 IV-17] 대전전위 원인변수 확인 현황 .....	130
[그림 IV-18] 접지 원인변수 확인 현황 .....	131
[그림 IV-19] 차폐 원인변수 확인 현황 .....	132
[그림 IV-20] 제전 원인변수 확인 현황 .....	133
[그림 IV-21] 온·습도 원인변수 확인 현황 .....	134
[그림 IV-22] 습도와 정전기 축적의 상관관계 .....	135
[그림 IV-23] 방전대상 원인변수 확인 현황 .....	136
[그림 IV-24] 방전종류 원인변수 확인 현황 .....	137
[그림 IV-25] 정전용량 원인변수 확인 현황 .....	138
[그림 IV-26] 전하량 원인변수 확인 현황 .....	139
[그림 IV-27] 방전에너지 원인변수 확인 현황 .....	140
[그림 V-1] 3성분계의 연소범위를 나타내는 삼각선도 .....	143
[그림 V-2] 접촉연소식 가연성 가스 농도측정기 .....	146
[그림 V-3] 스위치 로딩 시 용기 내 가스 농도 변화 .....	147
[그림 V-4] 항공기 연료탱크 내부 환경변화와 폭발범위 .....	148
[그림 V-5] 도체와 부도체에서의 방전에너지와 방전거리 .....	149
[그림 V-6] 전극의 크기에 따른 방전전류 .....	150
[그림 V-7] 절연물체의 점화확률 .....	151
[그림 V-8] 정전기 위험성평가 기본절차 .....	152

[그림 V-9] 전극거리와 용량방전에 의한 점화에너지 .....	155
[그림 V-10] 최소점화에너지와 소염거리( $C_3H_8-O_2-N_2$ 계) .....	156
[그림 V-11] 최소점화에너지와 혼합기체 온도의 관계 .....	157
[그림 V-12] 최소점화에너지와 온도의 영향 .....	158
[그림 V-13] 최소점화에너지와 압력의 영향 .....	159
[그림 V-14] 분사식 분진폭발 시험장치를 사용한 최소점화에너지 측정장치 구성 ..	162
[그림 V-15] 최소점화에너지에 미치는 온도의 영향 .....	164
[그림 V-16] 정전기 방전 종류와 형태 .....	171
[그림 V-17] 정전기 방전 종류와 최소점화에너지 .....	172
[그림 V-18] 연면방전 발생 과정 .....	177
[그림 V-19] 연면방전 발생 한계 .....	178



# I. 서론



# I. 서론

## 1. 연구목적 및 필요성

### 1) 연구 배경 및 목적

산업동향 분석내용에 따르면, 석유화학·정유·에너지산업의 경우 배터리·바이오·신재생에너지 소재, 플라스틱·폐배터리 리사이클 및 수소에너지 중심으로 투자 역량을 집중하고 있다. 또한 반도체·전자산업의 경우 반도체 생산 클러스터 구축 및 디스플레이 사업 투자 가속화 및 시스템 반도체·에너지저장장치 개발 등 미래 기술혁신에 집중하고 있다. 다만, 2020년 국정감사(김정호 의원) 제출 자료(한국산업단지공단)에 따르면 착공 20년 이상 경과 노후 산업단지가 10년간 450개소, 176% 증가로 노후 산업단지 비율이 36.8%로 증가되어 공장설비가 노후화되고 있다.

따라서 석유화학·정유·에너지산업·반도체·전자산업의 신물질 사용 확대에 따른 정전기적 위험물질의 사용취급 수요는 확대될 것으로 전망되고 있으며, 석유·화학공장 및 생산설비 노후화로 인해 화재·폭발 위험 공정·작업에서의 정전기 발생 가능성이 높아질 것으로 예상되고 있다. 특히 반도체, 디스플레이, PCB 및 화학증착 공정의 경우 다양한 종류의 인화성 액체가스가 촉매제로 취급·사용되고 있어 정전기로 인한 화재·폭발 위험이 상존하고 있다. 또한, 노후화에 따른 설비의 유지보수 및 관리 상태 불량으로 정전기 대전방지 및 제거 시스템의 작동 유효성이 상실되어 인화성 위험분위기에서의 정전기 대전 및 방전으로 화재·폭발이 발생할 수 있다.

본 연구에서는 정전기 관련 화재·폭발 재해조사 의견서에 대한 발생원인의 재해석, 유해·위험요인 재분류 및 개입지점 상세화를 통해 화재·폭발 위험장소에서의 정전기를 안전한 수준으로 통제할 수 있는 절차 및 방법 등 관리방안을 제시하고자 한다.

## 2) 연구 필요성

정전기 관련 화재·폭발의 경우 정전기 대전 종류, 방전 종류·형태·조건 등에 따라서 방전에너지 크기가 다양하고, 화재·폭발 특성상 현장 보존의 어려움, 물적 증거 부족 그리고 발생원인 규명을 위한 실증실험 관련 방법·절차 및 장비 등의 부재로 정전기 관련 화재·폭발 원인분석은 대체로 추정의 방식이 적용되고 있다.

이에 점화원(정전기 발생원)을 추정하는 방식이 아닌 인화성 물질과 점화원의 상관관계 규명을 통한 원인분석이 필요하며, 원인분석 결과의 신뢰성·객관성을 확보하기 위해서는 재해 발생원인 변수(Feature), 원인분석 방법 및 절차 그리고 실증실험 등에 대한 고찰이 필요한 시점이다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 1) 연구내용 및 방법

#### (1) 정전기 관련 중대재해 및 중대산업사고 현황

고용부 산업재해통계, 소방청 화재통계, 일본 후생노동성 산재통계와 일본 소방청 화재통계 분석을 통해 국내·외 정전기 관련 중대재해 및 중대산업사고 현황을 파악·정리하였다.

#### (2) 정전기 화재·폭발 발생원인

2012년부터 2021년까지 정전기 화재·폭발 관련 재해조사 의견서를 심층 분석하고, 1995년부터 2010년까지 일본 노동후생성 산재통계의 발생개요 분석을 통해 한국과 일본의 정전기 화재·폭발 발생원인을 각각 정리 및 비교·분석하였다.

### (3) 정전기 관련 위험요인 및 주요변수

2012년부터 2021년까지 정전기 화재·폭발 관련 재해조사 의견서의 분석결과를 토대로 발생원인, 기인물, 발생공정, 작업형태 및 정전기 현상 등을 유형별로 분류하고 분석하여 정전기 관련 위험요인 및 주요변수를 도출하였다.

### (4) 화재·폭발 위험장소의 정전기 안전관리 방안

연구내용을 토대로 선행연구 분석, 문헌고찰 및 전문가 자문 등을 통해 화재·폭발 위험장소에서 효과적으로 작동될 수 있는 정전기 안전관리 방안(화재·폭발 위험장소에서의 정전기 위험 관리, 정전기 위험성 평가, 주요 원인변수 통제, 정전기 관련 화재·폭발 조사)을 마련하였다.

### (5) 기타

선행연구 분석, 문헌고찰, 사업장 실태조사 및 전문가 자문회의 운영 등을 통해 연구내용을 검토·정리하였다.

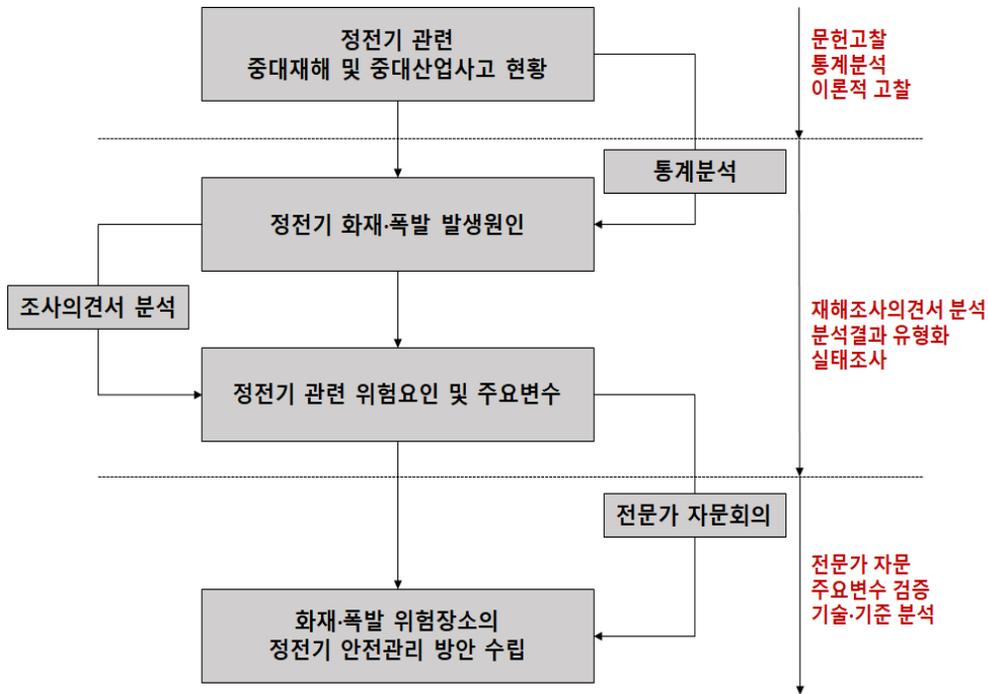
## 2) 연구추진 체계

다음 [그림 I-1]은 연구 내용 및 방법을 토대로 작성한 연구추진 체계를 나타내고 있다.

정전기 관련 중대재해 및 중대산업사고 현황을 문헌고찰, 이론적 고찰 등을 통해 파악하고 통계분석을 통해 정전기 화재·폭발 발생원인을 분석하였다.

재해조사 의견서 분석, 분석결과의 유형화 그리고 실태조사 등을 통해 정전기 화재·폭발 관련 위험요인 및 주요변수를 도출하였다.

전문가 자문, 주요변수 검증 및 기술·기준 분석 등을 통해 화재·폭발 위험 장소에서의 정전기 안전관리 방안을 수립하였다.



[그림 I-1] 연구추진 체계도

### 3. 선행연구 분석

#### 1) 선행연구 현황

한우섭(2019)은 「정전기 착화에 의한 분진 화재·폭발사고 저감 연구」를 통해 정전기 착화로 인한 화재·폭발사고가 반복 발생하고 있어 정전기 방전 관련 위험성평가 관리 방법의 개발 필요성을 제기하였으며, 이에 정전압 측정값을 사용하여 정전기 방전에너지를 계산하고 계산 결과 값이 최소점화에너지 값 이하가 되도록 하는 정전기 발생량 저감 대책을 마련하였다.

## 2) 기존 연구와의 차별점

기존 연구는 정전기 착화에 의한 화재·폭발 사고가 많이 발생하는 분진 취급 공정에서의 사고 저감을 위한 정전기 방전 예방대책을 제시하였으나, 본 연구에서는 정전기 화재·폭발 관련 재해조사 의견서 분석을 통해 재해발생 원인변수를 도출하여 안전관리 방안 수립에 활용하고자 한다. 또한 연구범위를 분진을 포함한 인화성 액체 및 하이브리드 혼합물까지 확대하여, 정전기 대전 시점부터 개입할 수 있는 정교한 안전관리 방안을 수립하고자 한다.

## Ⅱ. 정전기 관련 중대재해 및 중대산업사고 현황



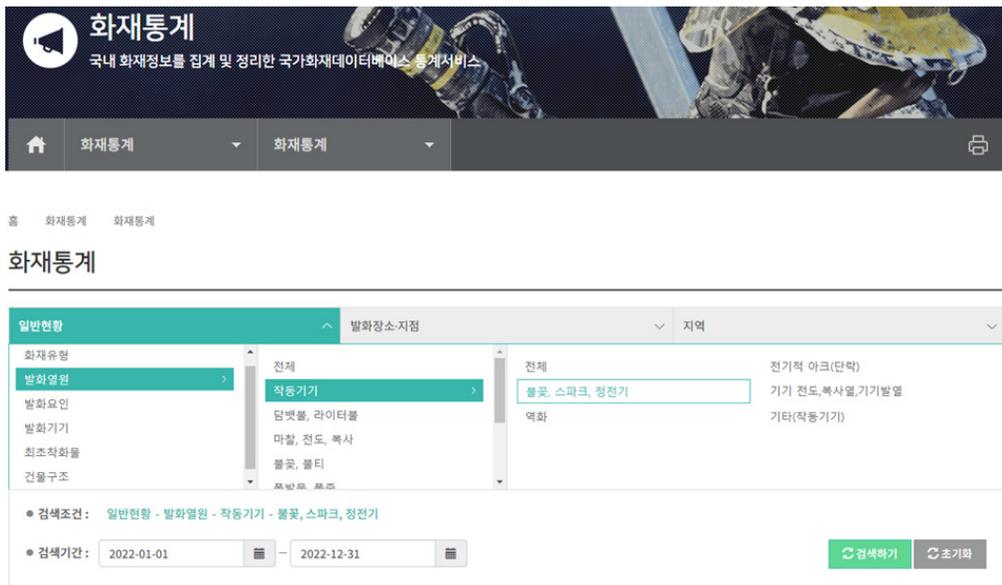
## II. 정전기 관련 중대재해 및 중대산업사고 현황

### 1. 한국 정전기 화재·폭발 현황

#### 1) 소방청 통계

##### (1) 분류체계

다음 [그림 II-1]은 소방청 화재통계의 분류체계를 나타내고 있다. 정전기 관련 화재사고는 발화열원 → 작동기기 → 불꽃, 스파크, 정전기로 분류하고 있다. 그러나 정전기를 화재사고로 발화열원으로 별도로 구분하고 있지는 않고 있어, 정전기로 인한 화재사고 통계의 정확한 산출은 어려운 상황이다.



[그림 II-1] 소방청 화재통계 분류체계

(2) 화재통계 현황

다음 <표 II-1>은 전체 화재 중에서 발화열원별 발생건수를 나타내고 있으며, <표 II-2>는 발화열원의 작동기기 중에서 불꽃·스파크·정전기 발생현황을 나타내고 있다.

<표 II-1> 화재 발화열원별 발생건수

(단위 : 건)

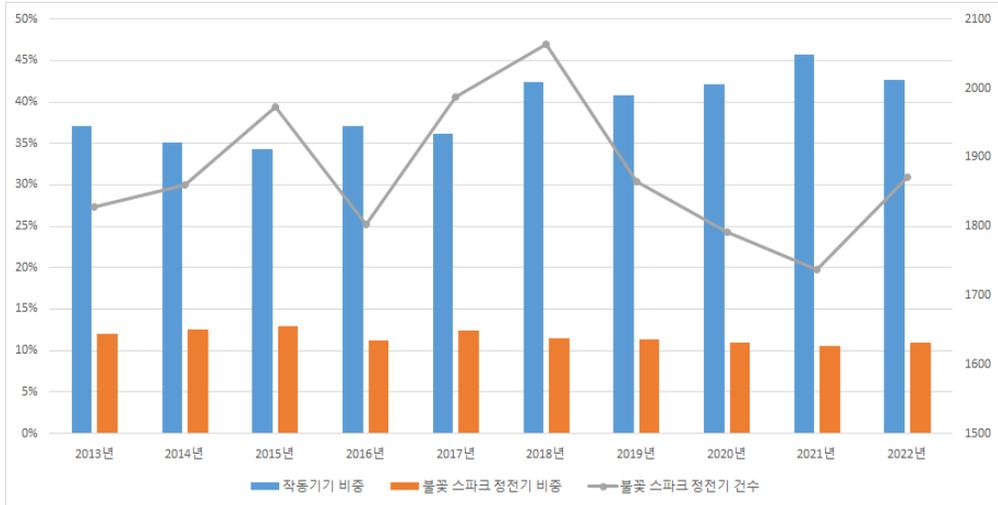
발화열원	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22
전체	40,932	42,135	44,435	43,413	44,178	42,338	40,103	38,659	36,267	40,113
작동기기	15,166	14,803	15,266	16,113	15,988	17,942	16,377	16,308	16,566	17,119
기기전도·복사열 ·기기발열	2,786	3,017	3,369	3,869	4,312	5,014	4,534	4,635	5,045	5,217
<b>불꽃·스파크· 정전기</b>	<b>1,828</b>	<b>1,860</b>	<b>1,973</b>	<b>1,802</b>	<b>1,988</b>	<b>2,063</b>	<b>1,865</b>	<b>1,791</b>	<b>1,738</b>	<b>1,871</b>
역화	46	34	28	45	39	43	42	31	26	18
전기적아크 (단락)	9,277	9,055	8,485	8,282	8,912	8,766	9,789	8,853	8,873	8,900
기타	1,478	1,463	1,413	1,597	1,491	879	1,034	1,094	983	865

<표 II-2> 발화열원의 작동기기 중 불꽃·스파크·정전기 발생 현황

(단위 : 건, %)

구분	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22
작동기기(건수)	15,166	14,803	15,266	16,113	15,988	17,942	16,377	16,308	16,566	17,119
작동기기(비중)	37%	35%	34%	37%	36%	42%	41%	42%	46%	43%
발생건수	1,828	1,860	1,973	1,802	1,988	2,063	1,865	1,791	1,738	1,871
발생비중	12%	13%	13%	11%	12%	11%	11%	11%	10%	11%

다음 [그림 II-2]은 발화열원의 작동기기 중 불꽃·스파크·정전기 발생현황을 나타내고 있다.



[그림 II-2] 연도별 정전기 화재·폭발 발생건수

소방청 화재통계의 분류체계에서는 별도의 정전기 분류 항목이 없기 때문에 불꽃·스파크·정전기 항목으로 일괄 공표하고 있다. 따라서 정전기로 인한 화재사고의 정확한 통계 산출은 불가능하다.

이에 국민 신문고를 통해 확인한 화재통계의 정전기 화재 발생건수는 2015년 80건, 2016년 54건, 2017년 81건 정도로 발생하는 것으로 확인할 수 있었다. 다만, 이는 일본 소방청 통계 발생건수(약 평균 100여건) 대비 낮은 발생건수로 한국과 일본의 수치상의 차이에 대한 원인분석이 필요하다.

## 2) 산업재해통계

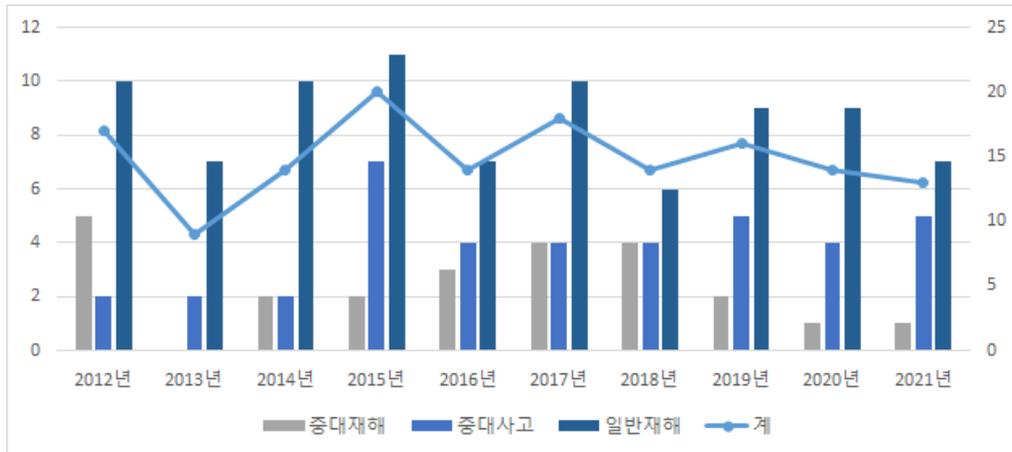
### (1) 정전기 화재·폭발 재해/사고 발생 현황

다음 <표 II-3>와 [그림 II-3]은 산업재해통계에서 정전기 화재·폭발 관련 중대재해, 중대산업사고 및 일반재해 발생 건수를 각각 나타내고 있다.

<표 II-3> 정전기 화재·폭발 재해/사고 발생 건수

(단위 : 건, 명)

구분	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21
계	17	9	14	20	14	18	14	16	14	13
중대재해	5	0	2	2	3	4	4	2	1	1
중대산업사고	2	2	2	7	4	4	4	5	4	5
일반재해	10	7	10	11	7	10	6	9	9	7



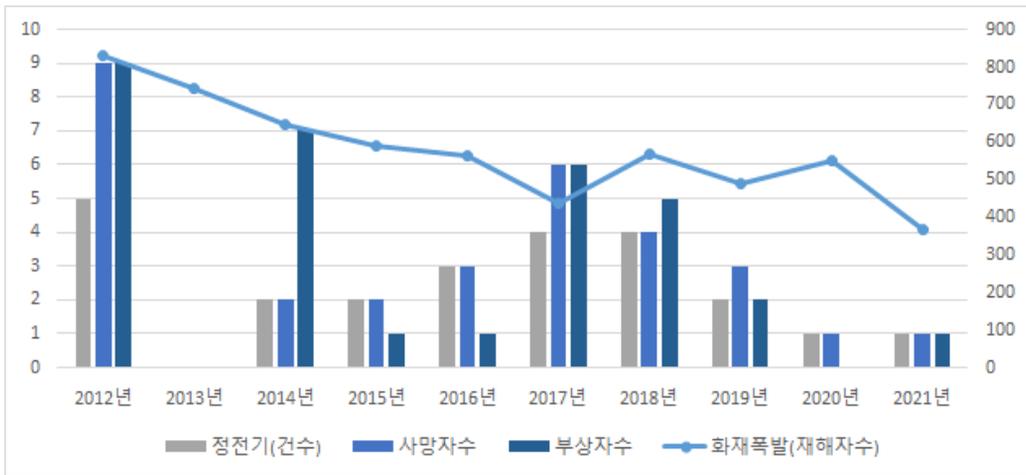
[그림 II-3] 연도별 정전기 화재·폭발 발생건수

다음 <표 II-4>와 [그림 II-4]는 산업재해통계에서 전체 화재·폭발 재해자수 대비 정전기로 인한 화재·폭발 발생건수, 사망자수 및 부상자수를 각각 나타내고 있다.

**<표 II-4> 정전기 화재·폭발 발생건수, 사망자수 및 부상자수**

(단위 : 건, 명)

구분	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21
화재·폭발 (전체)	832	744	648	589	566	439	569	490	549	366
정전기	5	0	2	2	3	4	4	2	1	1
사망자수	9	0	2	2	3	6	4	3	1	1
부상자수	9	0	7	1	1	6	5	2	0	1



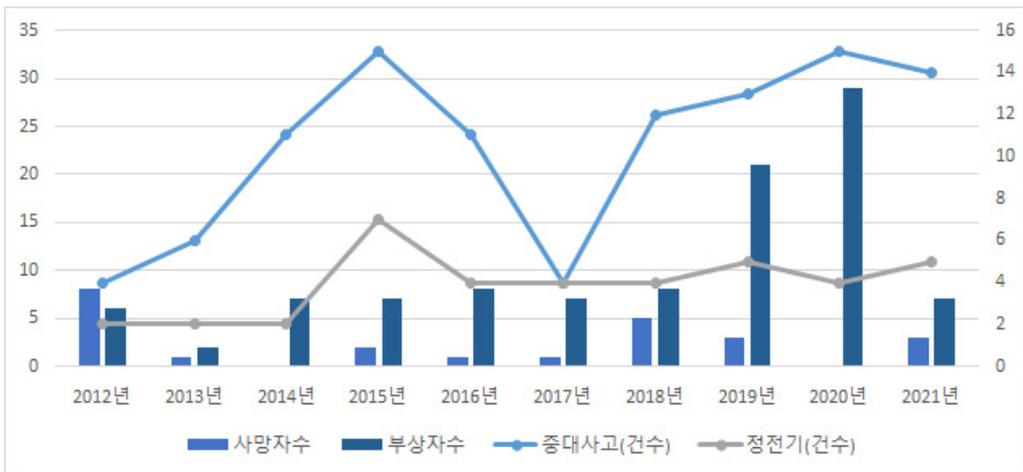
**[그림 II-4] 정전기 화재·폭발 발생건수, 사망자수 및 재해자수**

다음 <표 II-5>와 [그림 II-5]는 산업재해통계에서 전체 중대산업사고 중 정전기로 인한 화재·폭발 발생건수, 사망자수 및 부상자수를 각각 나타내고 있다.

<표 II-5> 중대산업사고 관련 정전기 사고 현황

(단위 : 건, 명)

구분	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21
중대사고 (전체)	4	6	11	15	11	4	12	13	15	14
정전기	2	2	2	7	4	4	4	5	4	5
사망자수	8	1	0	2	1	1	5	3	0	3
부상자수	6	2	7	7	8	7	8	21	29	7



[그림 II-5] 중대산업사고 관련 정전기 사고 현황

## 2. 일본 정전기 화재·폭발 현황

### 1) 소방청 통계

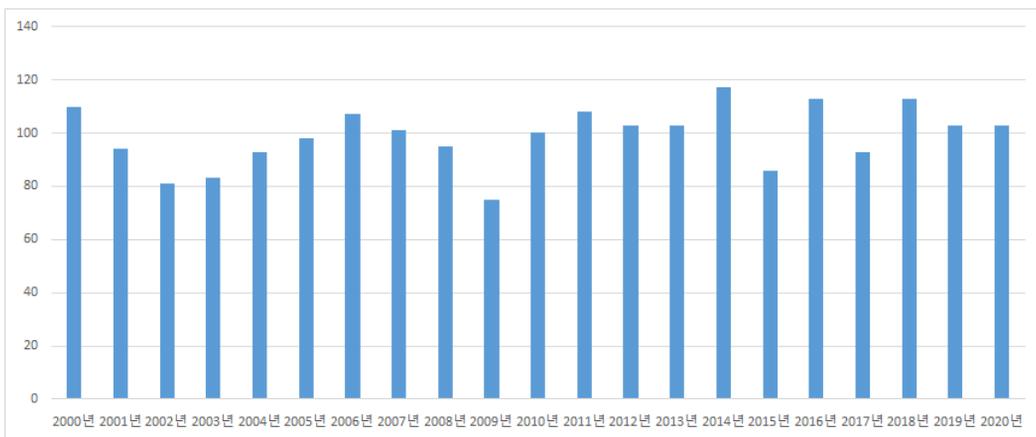
#### (1) 연도별

다음 <표 II-6>과 [그림 II-6]은 연도별 정전기 화재·폭발 발생건수를 나타내고 있다.

<표 II-6> 연도별 정전기 화재·폭발 발생건수

(단위 : 건)

년도	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10
발생건수	110	94	81	83	93	98	107	101	95	75	100
년도	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	계
발생건수	108	103	103	117	86	113	93	113	103	103	2,079



[그림 II-6] 연도별 정전기 화재·폭발 발생건수

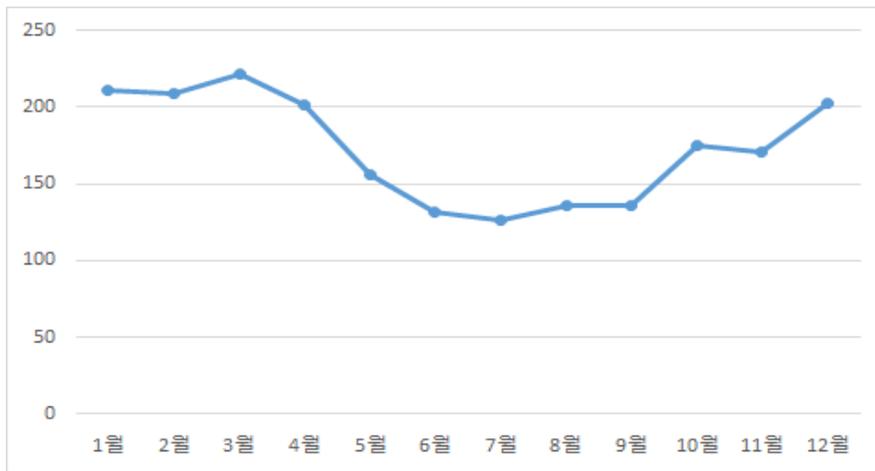
(2) 월별

다음 <표 II-7>과 [그림 II-7]은 연도별 정전기 화재·폭발 발생건수를 나타내고 있다.

<표 II-7> 월별 정전기 화재·폭발 발생건수

(단위 : 건)

월	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
발생건수	211	209	222	202	156	132	126	136	136	175	171	203



[그림 II-7] 월별 정전기 화재·폭발 발생건수

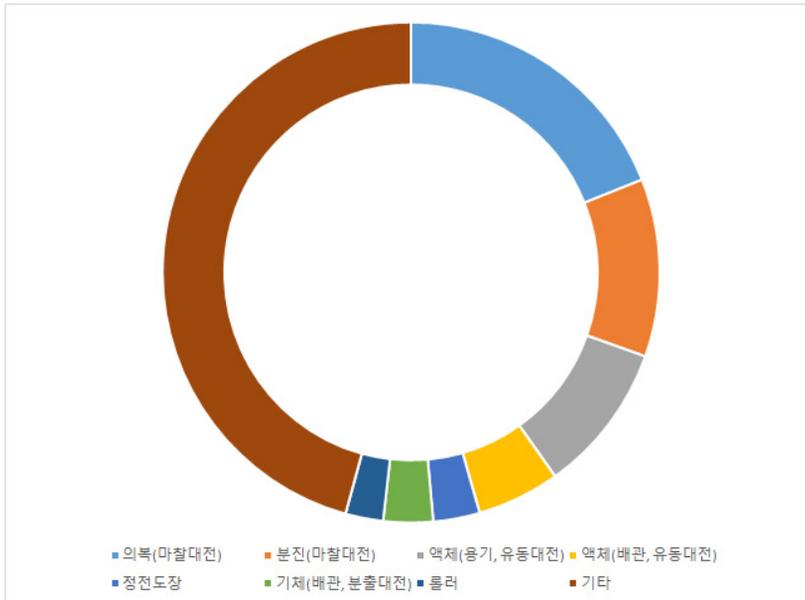
### (3) 대전물체별

다음 <표 II-8>과 [그림 II-8]은 대전물체별 정전기 화재·폭발 발생건수를 나타내고 있다.

**<표 II-8> 대전물체별 정전기 화재·폭발 발생건수**

(단위 : 건)

대전물체	의복 (마찰대전)	분진 (마찰대전)	액체[용기] (유동대전)	액체[배관] (유동대전)	정전도장	기체[배관] (분출대전)	롤러	기타
발생건수	394	239	202	112	63	67	51	951



**[그림 II-8] 대전물체별 정전기 화재·폭발 발생건수**

## 2) 후생노동성 통계

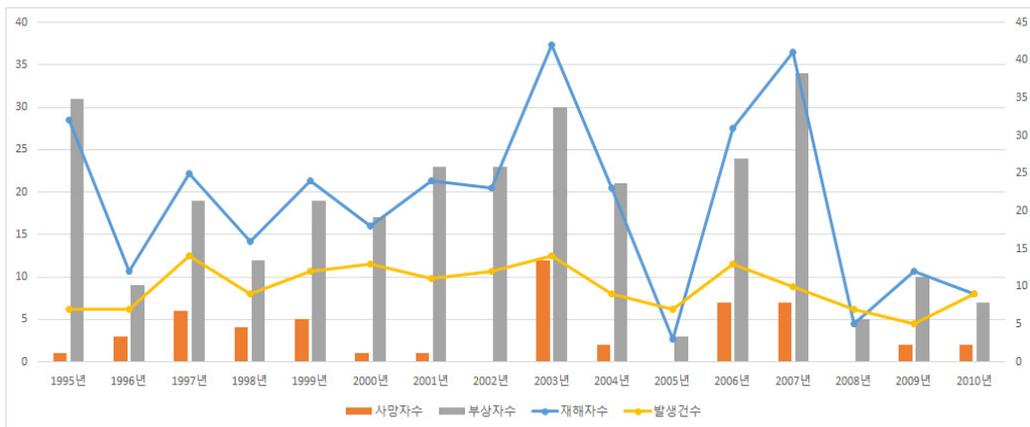
### (1) 연도별

다음 <표 II-9>와 [그림 II-9]는 연도별 정전기 화재·폭발 발생현황을 나타내고 있다.

<표 II-9> 연도별 정전기 화재·폭발 발생현황

(단위 : 건, 명)

년도	'95	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03
발생건수	7	7	14	9	12	13	11	12	14
재해자수	32	12	25	16	24	18	24	23	42
사망자수	1	3	6	4	5	1	1	0	12
부상자수	31	9	19	12	19	17	23	23	30
년도	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	계	-
발생건수	9	7	13	10	7	5	9	159	
재해자수	23	3	31	41	5	12	9	340	
사망자수	2	0	7	7	0	2	2	53	
부상자수	21	3	24	34	5	10	7	287	



[그림 II-9] 연도별 정전기 화재·폭발 발생현황

## (2) 정전기 화재·폭발 발생현황 유형화

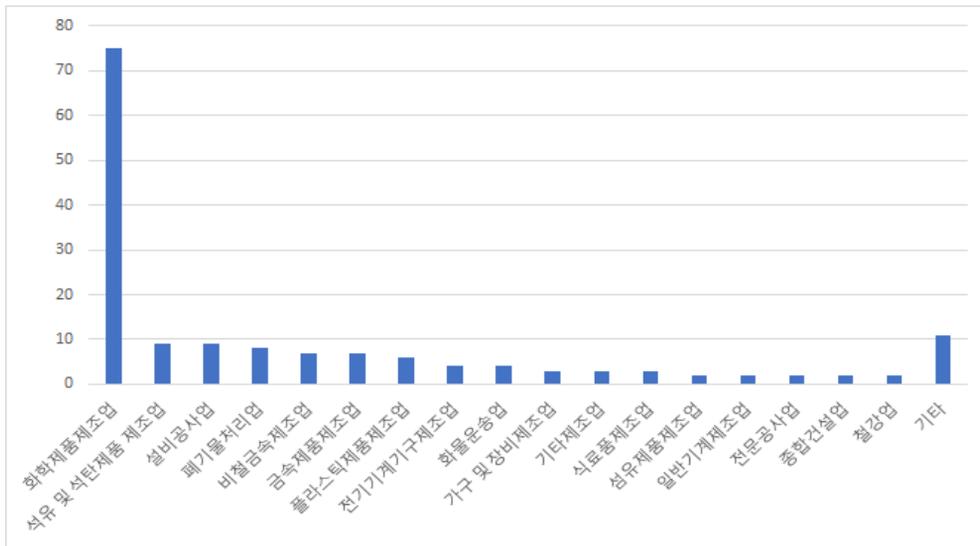
### 가) 업종

다음 <표 II-10>과 [그림 II-10]은 업종별 정전기 화재·폭발 발생현황을 나타내고 있다.

<표 II-10> 업종별 정전기 화재·폭발 발생현황

(단위 : 건, 명)

업종	발생건수	업종	발생건수
화학제품제조업	75	기구및장비제조업	3
석유및석탄제품제조업	9	기타제조업	3
설비공사업	9	식료품제조업	3
폐기물처리업	8	섬유제품제조업	2
비철금속제조업	7	일반기계제조업	2
금속제품제조업	7	전문공사업	2
플라스틱제품제조업	6	종합건설업	2
전기계기구제조업	4	철강업	2
화물운송업	4	기타	11



[그림 II-10] 업종별 정전기 화재·폭발 발생현황

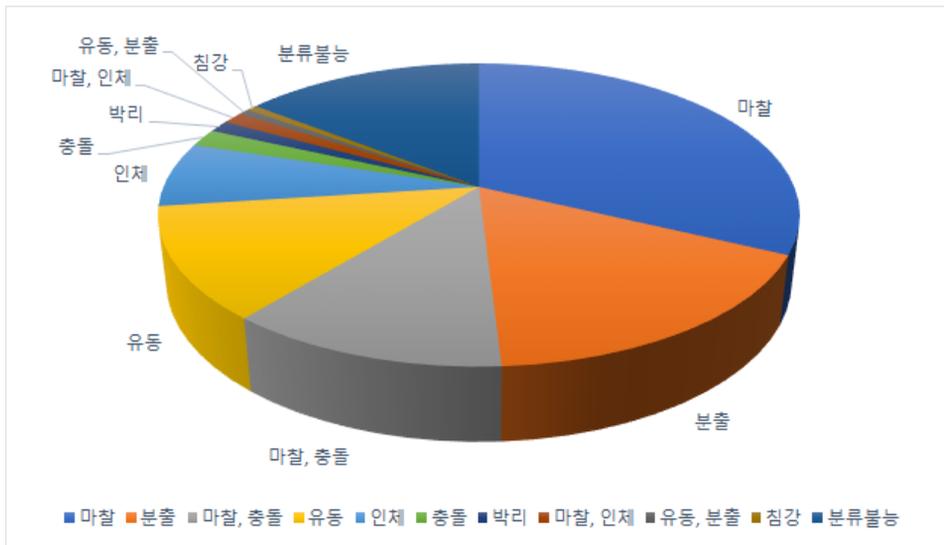
나) 대전종류

다음 <표 II-11>과 [그림 II-11]은 대전종류별 정전기 화재·폭발 발생현황을 나타내고 있다.

<표 II-11> 대전종류별 정전기 화재·폭발 발생현황

(단위 : 건, 명)

대전 종류	마찰	분출	마찰 충돌	유동	인체	충돌	박리	마찰 인체	유동 분출	침강	분류 불능
발생 건수	51	27	19	19	11	3	2	2	1	1	23



[그림 II-11] 대전종류별 정전기 화재·폭발 발생현황

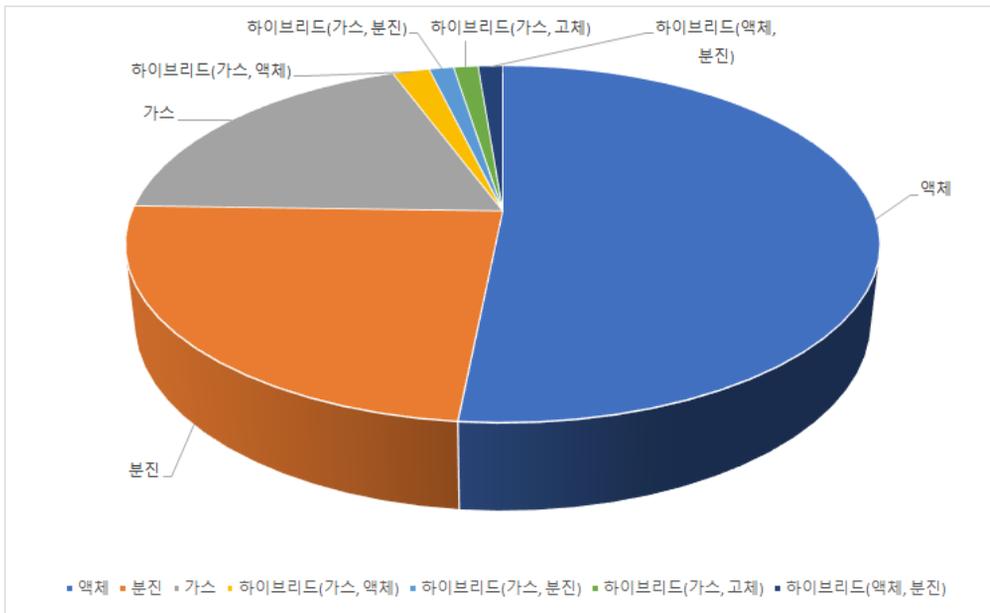
다) 원인물질

다음 <표 II-12>와 [그림 II-12]는 원인물질별 정전기 화재·폭발 발생현황을 나타내고 있다.

<표 II-12> 원인물질별 정전기 화재·폭발 발생현황

(단위 : 건, 명)

원인물질	액체	분진	가스	가스, 액체	가스+분진	가스+고체	액체+분진
발생건수	51	27	19	19	11	3	2



[그림 II-12] 원인물질별 정전기 화재·폭발 발생현황

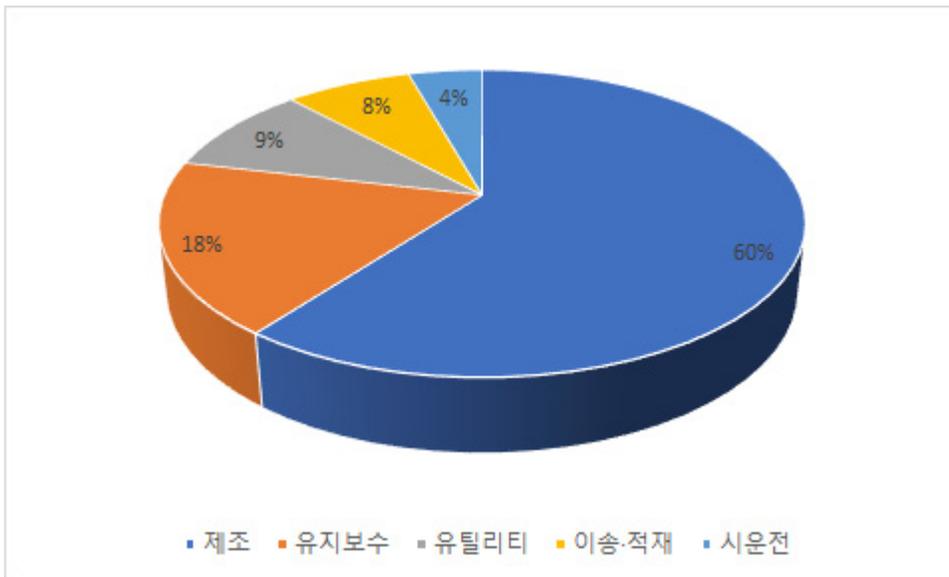
라) 공정(장소)

다음 <표 II-13>과 [그림 II-13]은 공정(장소)별 정전기 화재·폭발 발생현황을 나타내고 있다.

<표 II-13> 공정(장소)별 정전기 화재·폭발 발생건수

(단위 : 건, %)

공정(장소)	제조	유지보수	유틸리티	이송·적재	시운전
발생건수(비율)	96(60)	29(18)	15(9)	12(8)	7(4)



[그림 II-13] 공정(장소)별 정전기 화재·폭발 발생현황

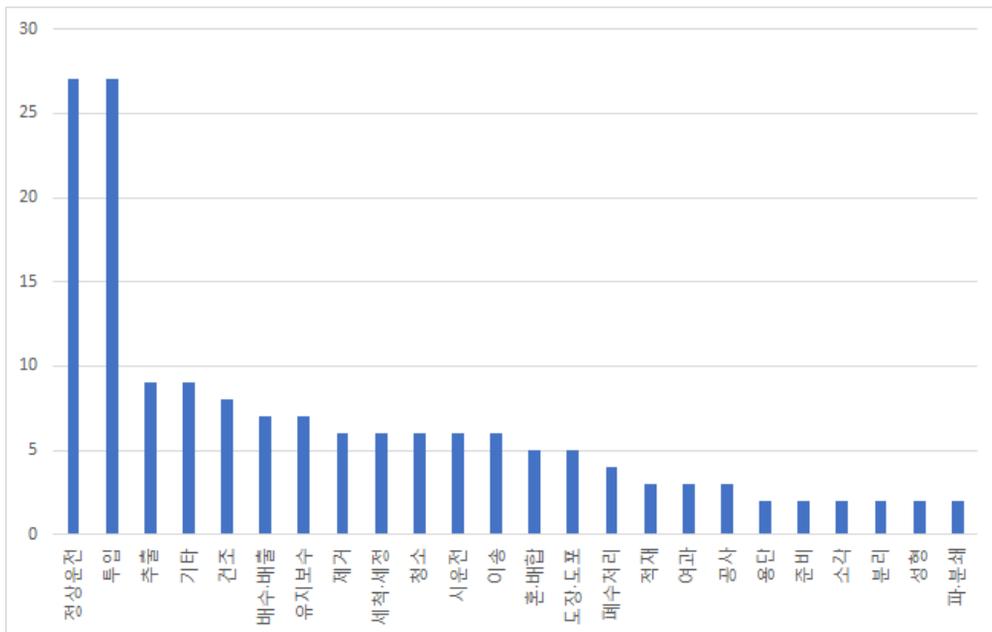
마) 작업내용

다음 <표 II-14>와 [그림 II-14]는 작업내용별 정전기 화재·폭발 발생현황을 나타내고 있다.

<표 II-14> 작업내용별 정전기 화재·폭발 발생건수

(단위 : 건)

작업내용	발생건수	작업내용	발생건수	작업내용	발생건수
정상운전	27	세척·세정	6	여과	3
투입	27	청소	6	공사	3
추출	9	시운전	6	용단	2
기타	9	이송	6	준비	2
건조	8	혼합·배합	5	소각	2
배수·배출	7	도장·도포	5	분리	2
유지보수	7	폐수처리	4	성형	2
제거	6	적재	3	분쇄·파쇄	2



[그림 II-14] 작업내용별 정전기 화재·폭발 발생현황

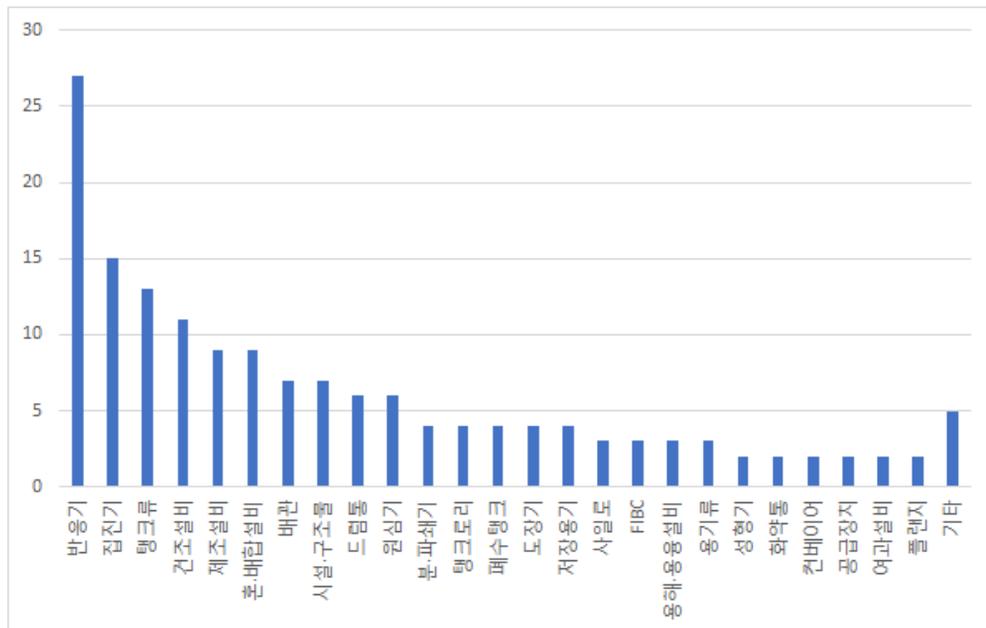
바) 기인물

다음 <표 II-15>와 [그림 II-15]는 기인물별 정전기 화재·폭발 발생현황을 나타내고 있다.

<표 II-15> 기인물별 정전기 화재·폭발 발생건수

(단위 : 건)

기인물	발생건수	기인물	발생건수	기인물	발생건수
반응기	27	원심기	6	용기류	3
집진기	15	분·파쇄기	4	성형기	2
탱크류	13	탱크로리	4	화약통	2
건조설비	11	폐수탱크	4	컨베이어	2
제조설비	9	도장기	4	공급장치	2
혼·배합설비	9	저장용기	4	여과설비	2
배관	7	사일로	3	플랜지	2
시설·구조물	7	FIBC	3	기타	5
드럼통	6	용해·용융설비	3		



[그림 II-15] 기인물별 정전기 화재·폭발 발생현황

### 3. 한국·일본 비교를 통한 시사점

#### 1) 소방청 통계자료

한국과 일본의 소방청 통계자료에서는 정전기로 인한 화재·폭발 발생건수가 년 간 평균 각각 70, 100여건 정도로 분석되었다. 한국과 일본의 통계상의 수치가 상당한 차이를 보이고 있는데, 이는 산업설비 규모 또는 근로자수 등의 상대적 조건 또는 통계 시스템에서도 기인할 수도 있지만 우선적으로는 절대적인 수치로는 일본이 한국보다는 발생건수가 많다는 것은 명확한 사실이다.

한편 일본 소방청에서는 전기화재에서의 정전기를 별도의 점화원 항목으로 지정하여 분류하고 정전기 관련 화재·폭발 재해·사고 발생 현황을 지속적으로 국민들에게도 제공함으로써 경각심을 일깨우고 있다. 그러나 우리나라의 경우 정전기 화재·폭발 재해·사고의 일부에 대해서만 원인조사가 이루어지고 있으며, 또한 조사기간이 길지 않고 과학적 조사 시스템이 구축되지 않아서 합리적·객관적인 조사결과를 기대하기 어렵다.

따라서 전기화재 통계의 정전기 발생원인 수치가 일본이 우리나라보다 높은 이유는 화재·폭발 재해 또는 사고에서 발생원인을 정전기로 규명할 수 있는 분석 및 조사 역량이 일본이 높다는 반증이 될 수도 있다. 그리고 우리나라 전기화재 통계의 경우 분류 항목·체계에서 정전기가 별도 항목으로 분류되지 않기 때문에 수치상으로도 낮게 나타날 수밖에 없다. 즉, 불꽃·스파크·정전기를 일괄적으로 분류하고 있어 화재·폭발에서의 정전기 발생의 정확한 실태를 파악하는데 한계가 있다.

특히, 정전기 화재폭발 관련 예방대책을 수립하기 위해서는 예방역량을 집중해야 하는 타겟 설정도 중요하기 때문에, 전기화재 통계 분류 항목·방법 및 절차 등의 개선이 필요하다.

## 2) 산업재해 통계자료

일본의 경우 정전기 관련 재해 또는 사고 발생 시 노동후생성에서 JNIOOSH에 원인조사 의뢰를 하고, JNIOOSH에서는 3개월 동안의 원인조사 후 원인미상인 경우 차기년도 연구과제와 연계하여 지속적이면서 체계적인 원인조사 및 실험·분석을 통해 원인규명을 하고 있다. 특히 일본에서 통계자료 분석결과에서도 확인되는 바와 같이 재해발생 개요, 발생 장소, 공정 및 작업, 기인물 및 원인물질 등에 대한 명확한 확인·검증 및 실험을 통해 발생원인을 규명하고 있다.

반면 우리나라에서는 정전기 화재·폭발 관련 중대재해 또는 중대산업사고의 경우 체계적·합리적인 방법으로 원인조사를 실시하고는 있지만 제도 및 시스템의 한계로 추정 방식으로 원인조사를 수행하고 있어 조사결과의 신뢰성·객관성을 담보하기가 어렵다. 또한 정전기 화재·폭발 관련 일반재해의 경우 일반재해 원인조사표에 기본적으로 재해발생 개요 등이 충실히 작성되지 않아서 조사 및 예방기관에서 예방대책 수립 및 재해예방 기술지원을 위한 기초자료조차 확보할 수 없는 상황이다.

즉, 실효적인 발생원인 조사 및 예방대책 수립을 위해서는 재해발생 개요, 발생 장소, 공정 및 작업, 기인물 및 원인물질 등에 대한 정확한 데이터 정리가 필요하고, 이러한 기본 데이터를 토대로 원인조사 시 주요변수에 대해서는 확인검증 및 실험을 통해 영향도를 분석하고 예방대책 수립에 활용해야 한다.



### Ⅲ. 정전기 화재·폭발 발생원인



### Ⅲ. 정전기 화재·폭발 발생원인

#### 1. 이론적 고찰

##### 1) 정전기 관련 사고/재해 특성

정전기 관련 사고/재해는 재현성이 낮은 정전기 대전 특성을 전제로 하기 때문에 발생원인은 확률적 요인이 크게 작용한다. 특히 화재·폭발은 대전 및 방전 조건과 인화성 물질의 조건이 일치되어야 발생하기 때문에 발생 확률은 매우 낮다고 볼 수 있다. 다만 발생 확률이 낮기 때문에 안전관리 및 위험통제 대책을 수립·시행하지 않을 수도 있지만, 통계적으로 보면 정전기 관련 화재·폭발 사고/재해가 최근에 평균적으로 매년 100여건 정도 발생하고 있다. 따라서 정전기 관련 화재·폭발은 발생 확률이 낮지만, 잠재 위험성이 크기 때문에 화재·폭발 위험장소에서 정전기를 안전한 수준으로 관리해야 한다.

##### 2) 정전기 잠재 위험성

정전기 화재·폭발 사고/재해를 예방하기 위해서는 잠재적인 위험성을 인식하는 것에서부터 출발하는데, 그 효과적인 수단은 과거의 사고/재해 원인분석을 통해 시사점을 도출하는 것이다. 즉 사고/재해 사례를 통해 유사하거나 다른 생산 공정에서 사고/재해 발생의 잠재 위험성을 부각시킬 수 있다. 따라서 정전기 사고/재해 특성 중의 하나인 유사한 형태로 많이 발생한다는 점은 사례 분석을 통해 효과적으로 정전기 위험성을 통제·관리 할 수 있다고 본다.

### 3) 정전기 화재·폭발 사고/재해 사례 분석

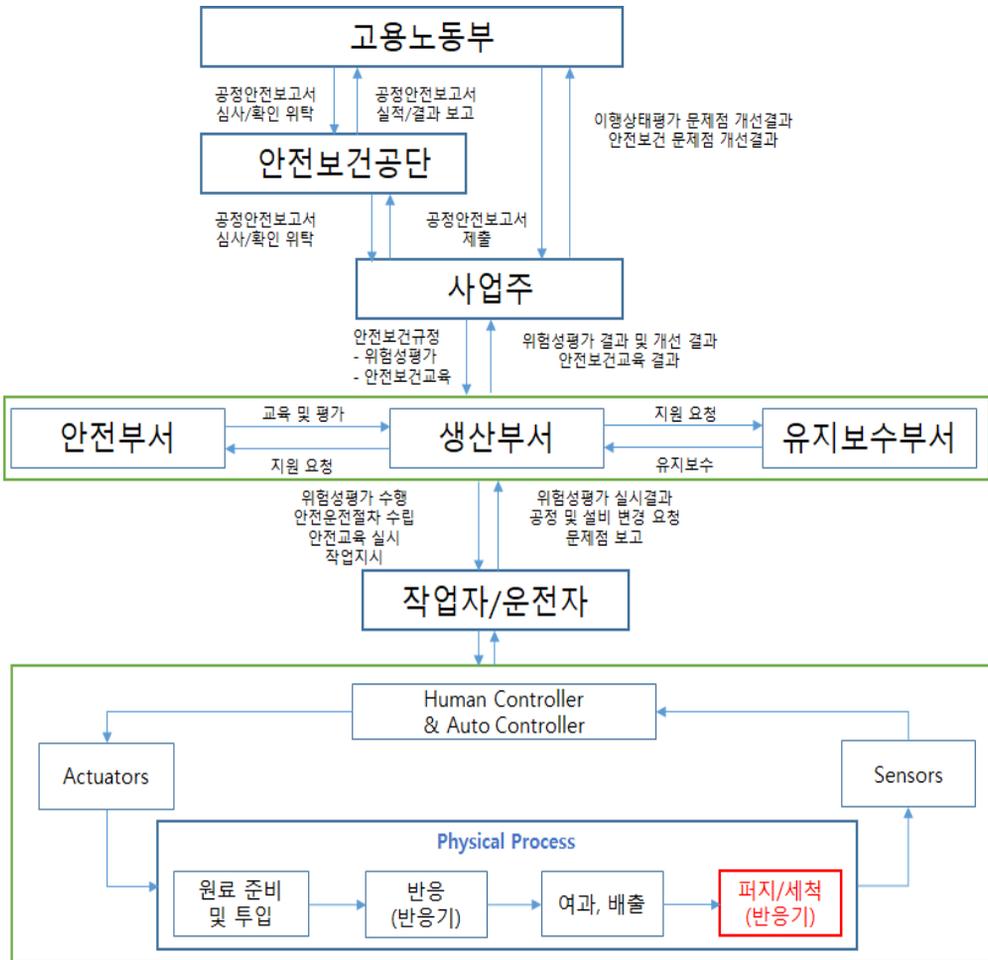
정전기 화재·폭발 사고/재해의 잠재적인 위험성을 인식하고 생산 공정에 적합하면서도 효과적인 안전관리 및 위험통제 대책을 수립·시행하는 것이 필요하다.

이와 같이 사례 분석이 사고/재해 예방을 위해서는 유용하지만, 사고/재해 자체의 부정적인 이미지 때문에 정부, 공단 및 사업장에서는 관련 사례가 공개 내지 공유가 되지 않고 있다. 다만, 사고/재해 사례가 공개되는 경우는 사회적 파급력이 큰 화재·폭발 등으로, 이러한 경우도 전문 연구자가 포함된 조사 보고서가 발표되는 경우이다.

물론 산업현장에서 화재·폭발이 발생하는 경우 고용부·공단에 의해서 원인 조사가 이루어지며 보고서는 비공개로 처리된다. 다만, 사고/재해 발생 사업장에서 자체적으로 전문 연구자 중심으로 기술 컨설팅을 요청하여 실증실험 등의 전문적인 조사·분석이 이루어지는 경우에는 조건부로 공개되는 사례도 있다. 따라서 이러한 자료에 대하여 적극적으로 수집·활용 노력도 필요하다.

### 4) 정전기 화재·폭발 분석 기법

정전기 화재·폭발 사고/재해 사례를 통해 재발방지대책 수립에 활용하기 위해서는 시스템적 원인분석이 필요하다. 다음 [그림 III-1]은 시스템적 분석방법 중 STAMP기법을 활용하여 정전기 관련 화재·폭발 사고를 분석한 사례이다.



[그림 Ⅲ-1] 시스템적 분석기법 사례

## 5) 정전기 화재·폭발 발생 유형

### (1) 초보적 실수형

초보적 실수형은 접지 미실시로 금속 물체인체 도전성 재료 등 정전기 유도 경로상의 도체가 대전되었기 때문 발생하는 사고/재해로 접지 미실시형이라고도 할 수 있다. 이러한 유형의 사고/재해는 정전기의 잠재적인 위험성에 대한 인식 부족이나 안전교육 미흡 등을 배경으로 발생하기 때문에 다음과 같은 종류의 재래형 사고/재해라고도 볼 수 있다.

#### 가) 사례 #1

유기용제와 석유제품을 작업자가 개방상태에서 취급 시 금속용기와 여과기 금속 부분 등의 접지 미실시로 스파크 방전으로 인한 화재·폭발이 발생하였다. 그러나 과거로부터 발생하고 있는 이러한 유형의 사고/재해가 현재까지도 많이 발생하고 있다.

#### 나) 사례 #2

분체 취급작업 시 도전성 재질의 플렉시블 용기 또는 백필터에 대한 접지가 미흡하여 분진 화재·폭발이 발생하고 있다.

#### 다) 사례 #3

절연성 재질의 호스 금속제 연결 부분이나 보강 금속선에 대한 접지 미실시로 등유 저장탱크의 폭발과 분진 폭발 사례도 있다.

### (2) 관리 미비형

관리 미비형 사고/재해는 주로 절연물체 등 비도전성 물체가 대전되어 발생하는 유형으로 절연물체 대전형태라고 볼 수 있다. 절연물체가 대전되면 접지로는

대전을 방지할 수 없기 때문에 위험 통제가 어렵다. 절연물체 대전의 경우 관리기준·방법, 대책이 제정되어 있지만, 적극적으로 실행하지 않아서 사고/재해가 발생한 경우와 관리기준·방법, 대책이 부재한 관계로 위험 통제를 할 수 없어 사고/재해가 발생한 경우로 구분한다. 여기서 전자는 관리 가능형이고 후자는 대책 수립 불가능형이다.

#### 가) 관리 가능형

관리 가능형의 재해 사례로 과대 유속과 필터로 인해 대전된 인화성 액체에서 발생하는 브러쉬 방전에 의한 점화와 도색 및 인쇄 공정에서 제전기 선정을 잘못하거나 보수점검 상태 미흡으로 발생하는 화재 등이 있다.

#### 나) 대책 불가형

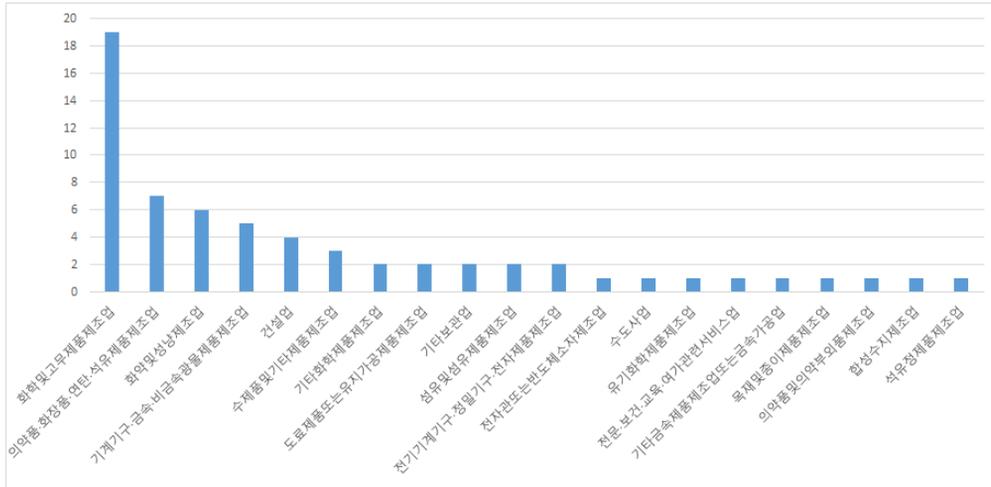
대책 불가형의 재해 사례로 인화성 액체 및 가연성 가스가 고압으로 누출·분출 시 점화, 절연성 재질의 플렉시블 용기와 종이포대에서 미세한 입자를 반응기 등에 투입 시 점화 그리고 글래스(Glass) 라이닝 교반 용기의 연면방전에 의한 핀홀(Pin-Hole)과 스태틱(Static) 마크의 발생 등이 있다.

## 2. 정전기 중대재해·중대산업사고 발생 현황

정전기로 추정되는 화재·폭발 관련 중대재해 및 중대산업사고는 2012년부터 2021년까지 최근 10년간 63건이 발생하였으며, 55명이 사망하고 134명이 부상자가 발생하였다.

### 1) 업종

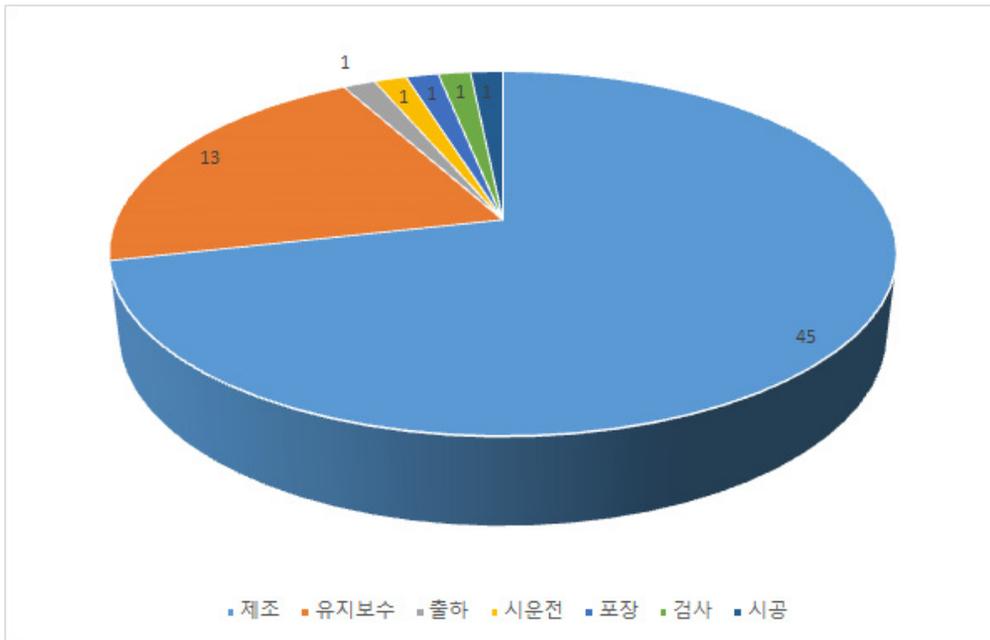
다음 [그림 Ⅲ-2]는 업종별 정전기 재해·사고 발생 현황을 나타내고 있다. 업종별 발생 현황에서는 화학및고무제품제조업이 19건으로 가장 높고, 의약품·화장품·연탄·석유제품제조업, 화학및성냥제조업 순으로 높다.



[그림 Ⅲ-2] 업종별 정전기 재해·사고 발생 현황

## 2) 장소

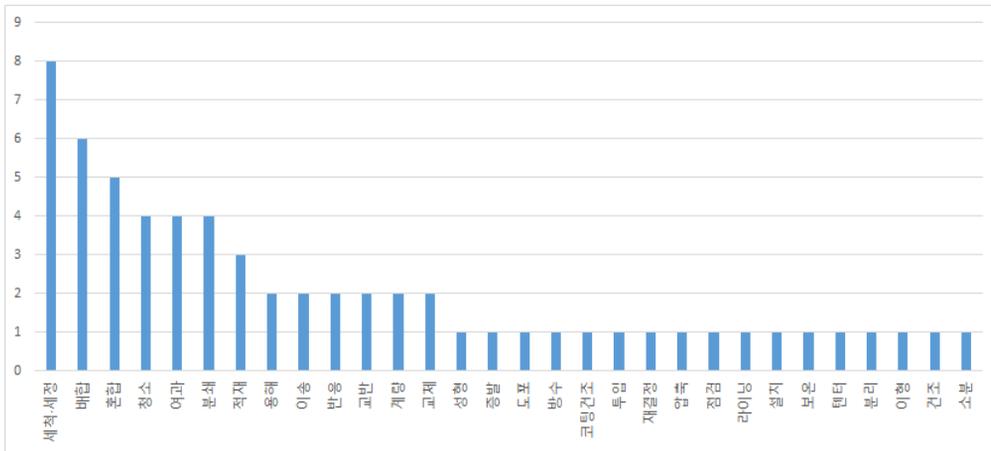
다음 [그림 Ⅲ-3]은 장소별 정전기 재해·사고 발생 현황을 나타내고 있다. 장소별 발생 현황에서는 제조 장소에서 45건으로 가장 높고, 유지보수 장소, 시공 순으로 높다. 일반적으로는 유지보수 장소에서 재해·사고 발생 비율이 높은 것과 달리 정전기 재해·사고의 경우는 제조 장소에서 재해·사고 발생 비율이 가장 높다.



[그림 Ⅲ-3] 장소별 정전기 재해·사고 발생 현황

### 3) 공정

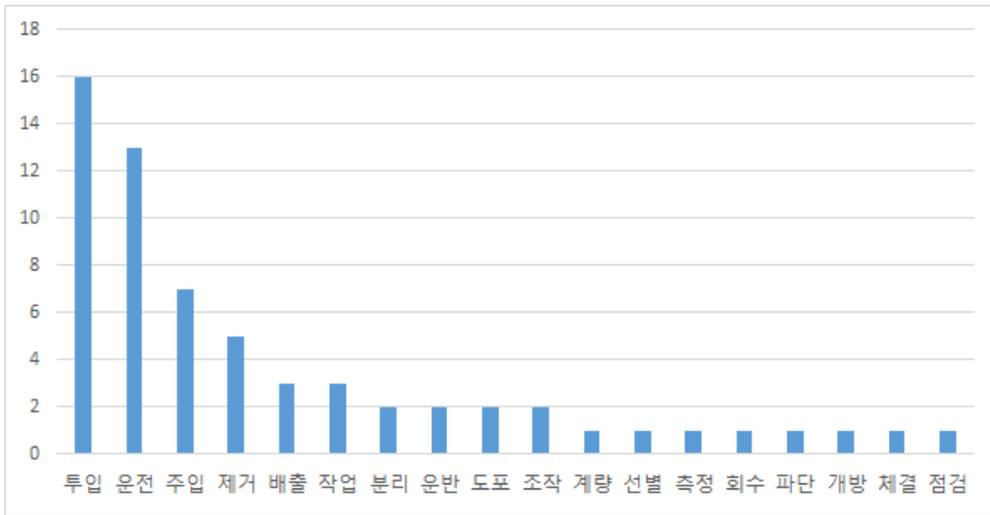
다음 [그림 Ⅲ-4]는 공정별 정전기 재해·사고 발생 현황을 나타내고 있다. 공정별 발생 현황에서는 세척·세정이 8건으로 가장 높고, 배합·혼합이 각각 6건 및 5건, 청소·여과·적재가 각각 4건순으로 높다.



[그림 Ⅲ-4] 공정별 정전기 재해·사고 발생 현황

#### 4) 작업

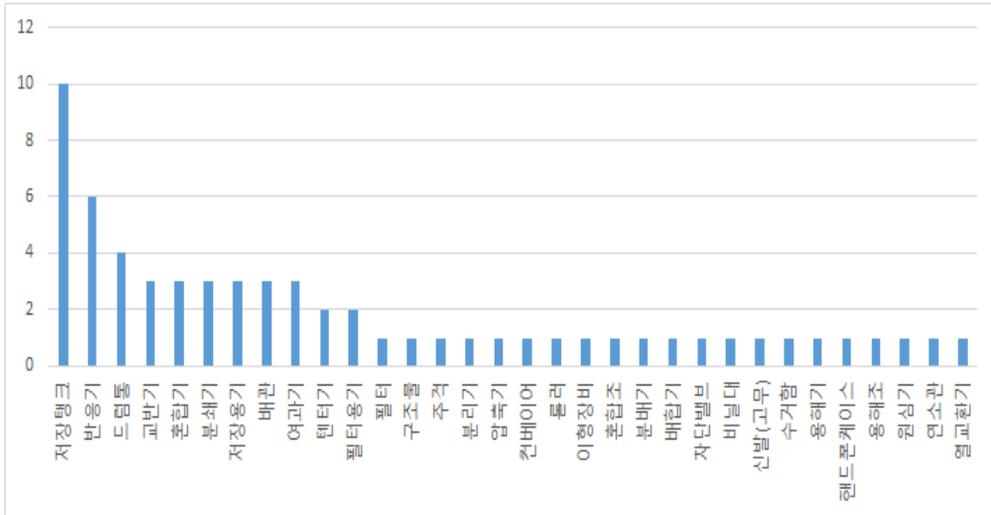
다음 [그림 III-5]는 작업별 정전기 재해·사고 발생 현황을 나타내고 있다. 작업별 발생 현황에서는 제조설비에서의 투입작업이 16건으로 가장 높고, 운전, 주입, 제거 순으로 높다.



[그림 III-5] 작업별 정전기 재해·사고 발생 현황

### 5) 기인물

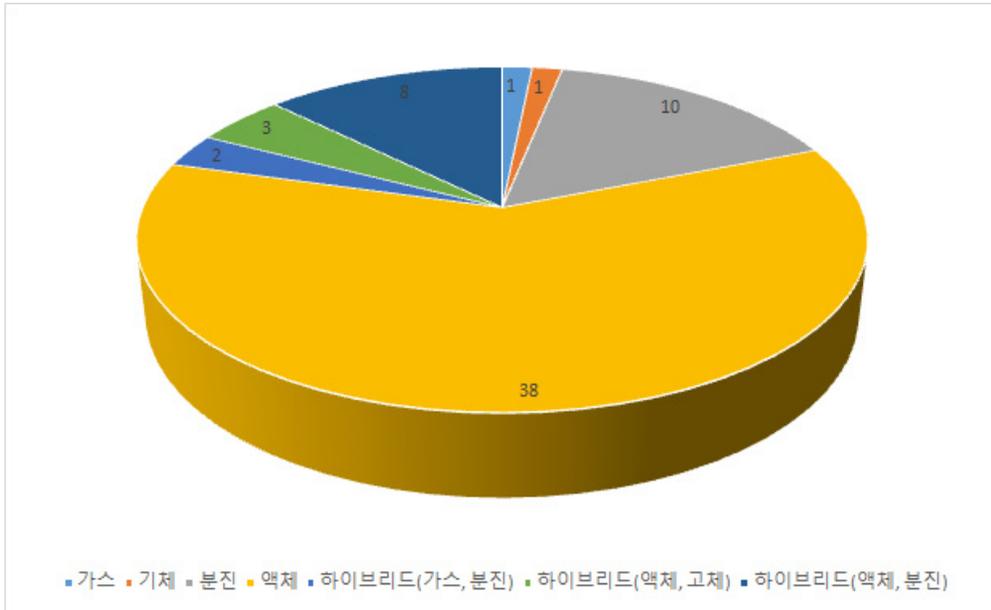
다음 [그림 Ⅲ-6]은 기인물별 정전기 재해·사고 발생 현황을 나타내고 있다. 기인물별 발생 현황에서는 저장탱크가 10건으로 가장 높고, 반응기, 드럼통 및 교반기·혼합기·분쇄기·저장용기·배관·여과기 순으로 높다.



[그림 Ⅲ-6] 기인물별 정전기 재해·사고 발생 현황

## 6) 물질

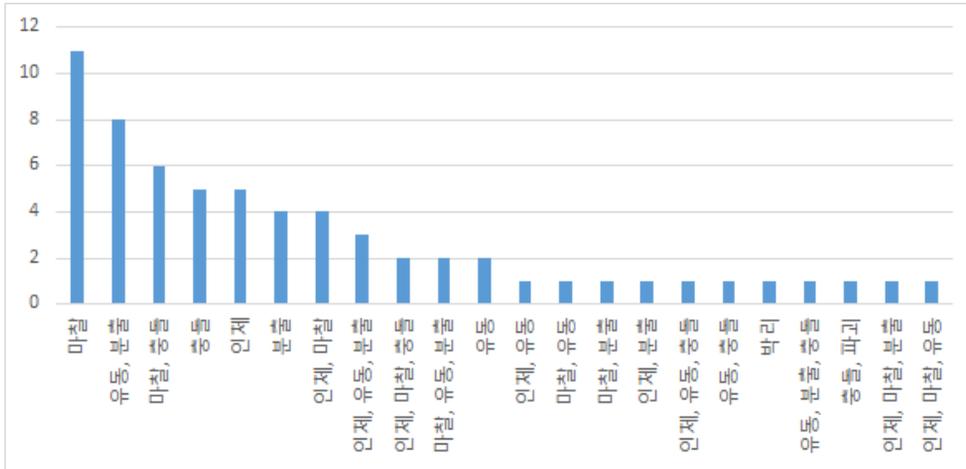
다음 [그림 III-7]은 물질별 정전기 재해·사고 발생 현황을 나타내고 있다. 물질별 발생 현황에서는 인화성 액체가 38건으로 가장 높고, 가연성 분진 그리고 액체+분진 형태의 하이브리드 혼합물 순으로 높다.



[그림 III-7] 물질별 정전기 재해·사고 발생 현황

### 7) 대전종류

다음 [그림 Ⅲ-8]는 대전종류별 정전기 재해·사고 발생 현황을 나타내고 있다. 대전종류별 발생 현황에서는 마찰대전이 11건으로 가장 높고, 액체의 유동·분출, 그리고 마찰·충돌 순으로 높다.



[그림 Ⅲ-8] 대전종류별 정전기 재해·사고 발생 현황

### 3. 정전기 중대재해·중대산업사고 발생현황 교차분석

정전기 재해·사고 발생원인 분석을 위해 업종, 장소, 공정, 작업, 기인물, 원인 물질 및 대전종류별 교차분석을 다음과 같이 실시하였다.

#### 1) 업종-장소

다음 <표 III-1>은 정전기 재해·사고 발생 (중)업종과 장소의 교차분석 결과이다.

업종과 장소의 교차분석 결과, 화학및고무제품제조업의 제조장소에서 정전기 화재·폭발 관련 중대재해·중대산업사고가 가장 많이 발생하였다. 또한 의약품 및 화약 업종의 경우에도 정전기 화재·폭발 관련 중대재해·중대산업사고가 제조장소에서 대부분 발생하였다.

이처럼 제조업의 경우 제조·생산(일상작업)보다는 유지보수(비일상작업)에서 재해발생 비율이 높음을 감안했을 때, 정전기 화재·폭발 관련 중대재해·중대 산업사고의 경우는 특이한 양상을 보이고 있다.

〈표 Ⅲ-1〉 정전기 재해·사고 발생 중업종과 장소의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	제조	유지 보수	포장	출하	시운전	시공	검사
계	63	45	13	1	1	1	1	1
화학및고무제품제조업	19	17	1	1				
의약품·화장품·연탄· 석유제품제조업	7	5	1		1			
화학및성냥제조업	6	6						
기계기구·금속·비금속광물 제품제조업	5	3	2					
건설업	4	1	2				1	
수제품및기타제품제조업	3	3						
기타화학제품제조업	2	1	1					
도료제품또는유지가공제품 제조업	2	1				1		
기타보관업	2		1					1
섬유및섬유제품제조업	2	2						
전기기계기구·정밀기구· 전자제품제조업	2	2						
전자관또는반도체소자제조업	1		1					
수도사업	1	1						
유기화학제품제조업	1	1						
전문·보건·교육·여가관련 서비스업	1		1					
기타금속제품제조업또는 금속가공업	1		1					
목재및종이제품제조업	1	1						
의약품및의약부외품제조업	1	1						
합성수지제조업	1		1					
석유정제품제조업	1		1					

## 2) 업종-공정

다음 <표 III-2>은 정전기 재해·사고 발생 (중)업종과 공정의 교차분석 결과이다.

업종과 공정의 교차분석 결과, 화학및고무제품제조업의 세척·세정, 배합 공정에서 정전기 화재·폭발 관련 중대재해·중대산업사고가 가장 많이 발생하는 것으로 확인되었다. 또한 업종별 분석에서는 어느 정도의 차별성을 보이고 있으나, 정전기 재해·사고 관련 작업별 분석에서는 차별성은 크지 않다.

그러나 의약품·화장품·연탄·석유제품제조업 여과공정의 경우 4건, 화학및고무제품제조업 세척·세정, 배합공정의 경우 각각 3건의 재해사고가 발생하였다.

〈표 Ⅲ-2〉 정전기 재해·사고 발생 중업종과 공정의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	세척·세정	배합	혼합	청소	여과	분쇄	적재
계	63	8	6	5	4	4	4	3
화학및고무제품제조업	19	3	3	1			2	2
의약품·화장품·연탄·석유제품제조업	7	1		1		4		1
화학및성냥제조업	6		1	1				
기계기구·금속·비금속 광물제품제조업	5	1			1		1	
건설업	4				1			
수제품및기타제품제조업	3	1	1				1	
전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업	2			1				
도료제품또는유지가공 제품제조업	2	1		1				
기타화학제품제조업	2	1						
섬유및섬유제품제조업	2							
기타보관업	2				1			
기타금속제품제조업또는 금속가공업	1							
전자관또는반도체소자제조업	1							
전문·보건·교육·여가 관련서비스업	1				1			
석유정제품제조업	1							
합성수지제조업	1							
목재및종이제품제조업	1		1					
유기화학제품제조업	1							
수도사업	1							
의약품및의약부외품제조업	1							

〈표 III-2〉 계속

(단위 : 건)

구분	용해	이송	반응	교반	계량	교체	성형	증발
계	2	2	2	2	2	2	1	1
화학및고무제품제조업	1			1	2			
의약품·화장품·연탄·석유제품제조업								
화학및성냥제조업							1	1
기계기구·금속·비금속 광물제품제조업				1				
건설업		1						
수제품및기타제품제조업								
전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업	1							
도료제품또는유지가공 제품제조업								
기타화학제품제조업			1					
섬유및섬유제품제조업								
기타보관업		1						
기타금속제품제조업또는 금속가공업						1		
전자관또는반도체소자제조업								
전문·보건·교육·여가 관련서비스업								
석유정제품제조업						1		
합성수지제조업								
목재및종이제품제조업								
유기화학제품제조업								
수도사업			1					
의약품및의약부외품제조업								

〈표 Ⅲ-2〉 계속

(단위 : 건)

구분	도포	방수	코팅건조	투입	재결정	압축	점검	라이닝
계	1	1	1	1	1	1	1	1
화학및고무제품제조업					1			1
의약품·화장품·연탄·석유제품제조업								
화학및성냥제조업								
기계기구·금속·비금속 광물제품제조업	1							
건설업		1						
수제품및기타제품제조업								
전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업								
도료제품또는유지가공 제품제조업								
기타화학제품제조업								
섬유및섬유제품제조업			1					
기타보관업								
기타금속제품제조업또는 금속가공업								
전자관또는반도체소자제조업							1	
전문·보건·교육·여가 관련서비스업								
석유정제품제조업								
합성수지제조업								
목재및종이제품제조업								
유기화학제품제조업						1		
수도사업								
의약품및의약부외품제조업				1				

〈표 III-2〉 계속

(단위 : 건)

기인물	설치	보온	텐터	분리	이형	건조	소분
계	1	1	1	1	1	1	1
화학및고무제품제조업				1			1
의약품·화장품·연탄·석유제품제조업							
화학및성냥제조업					1	1	
기계기구·금속·비금속 광물제품제조업							
건설업	1						
수제품및기타제품제조업							
전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업							
도료제품또는유지가공 제품제조업							
기타화학제품제조업							
섬유및섬유제품제조업			1				
기타보관업							
기타금속제품제조업또는 금속가공업							
전자관또는반도체소자제조업							
전문·보건·교육·여가 관련서비스업							
석유정제품제조업							
합성수지제조업		1					
목재및종이제품제조업							
유기화학제품제조업							
수도사업							
의약품및의약부외품제조업							

### 3) 업종-작업

다음 <표 Ⅲ-3>은 정전기 재해·사고 발생 (중)업종과 작업의 교차분석 결과이다.

업종과 작업의 교차분석 결과, 화학및고무제품제조업의 투입과 주입작업에서 정전기 화재·폭발 관련 중대재해·중대산업사고가 가장 많이 발생하였다. 또한 화학및고무제품제조업과 화약및성냥제조업의 운전작업에서 정전기 화재·폭발 관련 중대재해·중대산업사고가 다음 순서로 많이 발생하였다.

화학및고무제품제조업, 의약품·화장품·연탄·석유제품제조업 및 화약및성냥 제조업의 투입, 운전 및 주입 작업에서의 재해·사고 비중이 전체 정전기 화재폭발 중대재해·중대산업사고 중에서 36.5%를 차지하고 있다.

〈표 III-3〉 정전기 재해·사고 발생 중업종과 작업의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	투입	운전	주입	제거	배출
계	63	16	13	7	5	3
화학및고무제품제조업	19	7	3	4	1	1
의약품·화장품·연탄·석유제품제조업	7	2	2	1	1	1
화학및성냥제조업	6	1	3			
기계기구·금속·비금속광물제품제조업	5	2			1	
건설업	4		1			
수제품및기타제품제조업	3			1	1	
전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업	2	1	1			
도료제품또는유지가공제품제조업	2	1				1
기타화학제품제조업	2		1	1		
섬유및섬유제품제조업	2	1	1			
기타보관업	2		1			
기타금속제품제조업또는금속가공업	1					
전자관또는반도체소자제조업	1					
전문·보건·교육·여가관련서비스업	1					
석유정제품제조업	1				1	
합성수지제조업	1					
목재및종이제품제조업	1					
유기화학제품제조업	1					
수도사업	1					
의약품및의약부외품제조업	1	1				

〈표 Ⅲ-3〉 계속

(단위 : 건)

구분	작업	분리	운반	도포	조작	계량
계	3	2	2	2	2	1
화학및고무제품제조업			1	1		
의약품·화장품·연탄·석유제품제조업						
화학및성냥제조업			1		1	
기계기구·금속·비금속광물제품제조업	1					
건설업	1			1		
수제품및기타제품제조업						
전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업						
도료제품또는유지가공제품제조업						
기타화학제품제조업						
섬유및섬유제품제조업						
기타보관업						
기타금속제품제조업또는금속가공업		1				
전자관또는반도체소자제조업		1				
전문·보건·교육·여가관련서비스업						
석유정제품제조업						
합성수지제조업	1					
목재및종이제품제조업						1
유기화학제품제조업						
수도사업					1	
의약품및의약부외품제조업						

〈표 III-3〉 계속

(단위 : 건)

구분	선별	측정	회수	파단	개방	체결	점검
계	1	1	1	1	1	1	1
화학및고무제품제조업		1					
의약품·화장품·연탄·석유제품제조업							
화학및성냥제조업							
기계기구·금속·비금속광물제품제조업					1		
건설업						1	
수제품및기타제품제조업	1						
전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업							
도료제품또는유지가공제품제조업							
기타화학제품제조업							
섬유및섬유제품제조업							
기타보관업							1
기타금속제품제조업또는금속가공업							
전자관또는반도체소자제조업							
전문·보건·교육·여가관련서비스업			1				
석유정제품제조업							
합성수지제조업							
목재및종이제품제조업							
유기화학제품제조업				1			
수도사업							
의약품및의약부외품제조업							

#### 4) 업종-기인물

다음 <표 Ⅲ-4>는 정전기 재해·사고 발생 (중)업종과 기인물의 교차분석 결과이다.

업종과 기인물의 교차분석 결과, 화학및고무제품제조업의 저장탱크(4건)와 드럼통(3건)에서 정전기 화재·폭발 관련 중대재해·중대산업사고가 가장 많이 발생하였다. 그리고 화학및고무제품제조업의 경우 저장용기에서 3건, 의약품·화장품·연탄·석유제품제조업의 경우 여과기에서 3건이 발생하였다.

〈표 III-4〉 정전기 재해·사고 발생 중업종과 기인물의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	저장탱크	반응기	드럼통	교반기	혼합기	분쇄기
계	63	10	6	4	3	3	3
화학및고무제품제조업	19	4	1	3	2		2
의약품·화장품·연탄·석유제품제조업	7	1	2				
화학및성냥제조업	6					2	
기계기구·금속·비금속 광물제품제조업	5	1			1		1
건설업	4	1					
수제품및기타제품제조업	3						
전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업	2					1	
도료제품또는유지가공 제품제조업	2			1			
기타화학제품제조업	2		2				
섬유및섬유제품제조업	2						
기타보관업	2	2					
기타금속제품제조업 또는금속가공업	1						
전자관또는반도체소자제조업	1						
전문·보건·교육·여가관련 서비스업	1	1					
석유정제품제조업	1						
합성수지제조업	1						
목재및종이제품제조업	1						
유기화학제품제조업	1						
수도사업	1						
의약품및의약품제조업	1		1				

〈표 Ⅲ-4〉 계속

(단위 : 건)

구분	저장용기	배관	여과기	필터용기	텐터기	이형장비	수거함
계	3	3	3	2	2	1	1
화학및고무제품제조업	3						
의약품·화장품·연탄·석유제품제조업			3	1			
화학및성냥제조업						1	
기계기구·금속·비금속 광물제품제조업							
건설업		1					
수제품및기타제품제조업		1					1
전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업							
도료제품또는유지가공 제품제조업							
기타화학제품제조업							
섬유및섬유제품제조업					2		
기타보관업							
기타금속제품제조업 또는금속가공업							
전자관또는반도체소자제조업		1					
전문·보건·교육·여가관련 서비스업							
석유정제품제조업				1			
합성수지제조업							
목재및종이제품제조업							
유기화학제품제조업							
수도사업							
의약품및의약품부품제조업							

〈표 III-4〉 계속

(단위 : 건)

구분	분배기	차단밸브	비닐대	산벌(고무)	구조물	압축기	분리기
계	1	1	1	1	1	1	1
화학및고무제품제조업				1			
의약품·화장품·연탄·석유제품제조업							
화학및성냥제조업			1				
기계기구·금속·비금속 광물제품제조업					1		1
건설업							
수제품및기타제품제조업							
전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업							
도료제품또는유지가공 제품제조업							
기타화학제품제조업							
섬유및섬유제품제조업							
기타보관업							
기타금속제품제조업 또는금속가공업	1						
전자관또는반도체소자제조업							
전문·보건·교육·여가관련 서비스업							
석유정제품제조업							
합성수지제조업							
목재및종이제품제조업							
유기화학제품제조업						1	
수도사업		1					
의약품및의약품제조업							

〈표 Ⅲ-4〉 계속

(단위 : 건)

구분	롤러	주걱	혼합조	컨베이어	배합기	필터	용해기
계	1	1	1	1	1	1	1
화학및고무제품제조업						1	1
의약품·화장품·연탄·석유제품제조업							
화학및성냥제조업		1					
기계기구·금속·비금속 광물제품제조업							
건설업	1			1			
수제품및기타제품제조업							
전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업							
도료제품또는유지가공 제품제조업			1				
기타화학제품제조업							
섬유및섬유제품제조업							
기타보관업							
기타금속제품제조업 또는금속가공업							
전자관또는반도체소자제조업							
전문·보건·교육·여가관련 서비스업							
석유정제품제조업							
합성수지제조업							
목재및종이제품제조업					1		
유기화학제품제조업							
수도사업							
의약품및의약품제조업							

〈표 III-4〉 계속

(단위 : 건)

구분	핸드폰케이스 (비닐장갑)	용해조	원심기	연소관	열교환기
계	1	1	1	1	1
화학및고무제품제조업			1		
의약품·화장품·연탄· 석유제품제조업					
화학및성냥제조업				1	
기계기구·금속·비금속 광물제품제조업					
건설업					
수제품및기타제품제조업	1				
전기기계기구·정밀 기구·전자제품제조업 도료제품또는유지가공 제품제조업		1			
기타화학제품제조업					
섬유및섬유제품제조업					
기타보관업					
기타금속제품제조업 또는금속가공업					
전자관또는반도체소자제조업					
전문·보건·교육·여가관련 서비스업					
석유정제품제조업					
합성수지제조업					1
목재및종이제품제조업					
유기화학제품제조업					
수도사업					
의약품및의약품제조업					

## 5) 업종-물질

다음 <표 Ⅲ-5>는 정전기 재해·사고 발생 (중)업종과 물질의 교차분석 결과이다.

업종과 물질의 교차분석 결과, 화학및고무제품제조업에서 취급·사용되는 인화성 액체로 인한 정전기 화재·폭발 관련 중대재해·중대산업사고가 가장 많이 발생하였다. 또한 화약및성냥제조업에서는 분진으로 인한 재해·사고가 다음 순서로 많이 발생하였다.

그리고 기계기구·금속·비금속광물제품제조업과 건설업에서도 인화성 액체로 인한 정전기 화재·폭발 관련 중대재해·중대산업사고가 각각 3건씩 발생하였다.

〈표 III-5〉 정전기 재해·사고 발생 중업종과 물질의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	액체	분진	하이브리드 (액체, 분진)	하이브리드 (액체, 고체)	하이브리드 (가스, 분진)	가스
계	63	38	10	8	3	2	1
화학및고무제품제조업	19	13	1	2	3		
의약품·화장품·연탄·석유 제품제조업	7	6		1			
화학및성냥제조업	6		4	2			
기계기구·금속·비금속 광물제품제조업	5	3	2				
건설업	4	3	1				
수제품및기타제품제조업	3	2	1				
전기기계기구·정밀기구· 전자제품제조업	2			1		1	
도료제품또는유지가공 제품제조업	2	1		1			
기타화학제품제조업	2	2					
섬유및섬유제품제조업	2	1	1				
기타보관업	2	2					
기타금속제품제조업또는 금속기공업	1						
전자관또는반도체소자제조업	1	1					
전문·보건·교육·여가관련 서비스업	1	1					
석유정제품제조업	1	1					
합성수지제조업	1	1					
목재및종이제품제조업	1	1					
유기화학제품제조업	1					1	
수도사업	1						1
의약품및의약부외품제조업	1			1			

## 6) 업종-대전종류

다음 <표 Ⅲ-6>은 정전기 재해·사고 발생 (중)업종과 대전종류의 교차분석 결과이다.

업종과 대전종류의 교차분석 결과, 마찰대전으로 인한 정전기 화재·폭발 관련 중대재해·중대산업사고는 화학및고무제품제조업에서 13건, 의약품·화장품·연탄·석유제품제조업에서 6건 순으로 가장 많이 발생하였다.

그리고 화학및성냥제조업(4건)에서 유동, 분출 대전으로 인한 정전기 화재·폭발 관련 중대재해·중대산업사고가 다음 순서로 많이 발생하였다.

〈표 III-6〉 정전기 재해·사고 발생 중업종과 대전종류의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	마찰	유동, 분출	마찰, 충돌	충돌	인체	분출	인체, 마찰
계	63	38	10	8	3	2		1
화학및고무제품제조업	19	13	1	2	3			
의약품·화장품·연탄·석유제품제조업	7	6		1				
화학및성냥제조업	6		4	2				
기계기구·금속·비금속광물제품제조업	5	3	2					
건설업	4	3	1					
수제품및기타제품제조업	3	2	1					
전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업	2			1		1		
도료제품또는유지가공제품제조업	2	1		1				
기타화학제품제조업	2	2						
섬유및섬유제품제조업	2	1	1					
기타보관업	2	2						
기타금속제품제조업또는금속가공업	1							
전자관또는반도체소재제조업	1	1						
전문·보건·교육·여가관련서비스업	1	1						
석유정제품제조업	1	1						
합성수지제조업	1	1						
목재및종이제품제조업	1	1						
유기화학제품제조업	1					1		
수도사업	1							1
의약품및의약품부외품제조업	1			1				

## 7) 장소-공정

다음 <표 Ⅲ-7>은 정전기 재해·사고 발생 장소와 공정의 교차분석 결과이다.

장소 공정의 교차분석 결과, 제조장소의 혼·배합 공정(11건)에서 정전기 화재·폭발 중대재해·중대산업사고가 가장 많이 발생하였으며, 제조장소의 여과와 분쇄 공정에서도 각각 4건이 발생하여 다음 순서로 많이 발생하였다.

그리고 유지보수 장소의 경우 청소, 교체 공정에서 각각 4건, 2건씩 발생하였다.

〈표 III-7〉 정전기 재해·사고 발생 장소와 공정의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	제조	유지보수	출하	시운전	포장	검사	시공
계	63	45	13	1	1	1	1	1
세척·세정	8	3	4		1			
배합	6	6						
혼합	5	5						
청소	4		4					
여과	4	4						
분쇄	4	4						
적재	3	1		1		1		
용해	2	2						
이송	2	1					1	
반응	2	2						
교반	2	2						
계량	2	2						
교체	2		2					
성형	1	1						
증발	1	1						
도포	1	1						
방수	1							1
코팅건조	1	1						
투입	1	1						
재결정	1	1						
압축	1	1						
점검	1		1					
라이닝	1	1						
설치	1		1					
보온	1		1					
텐터	1	1						
분리	1	1						
이형	1	1						
건조	1	1						
소분	1	1						

## 8) 장소-작업

다음 <표 Ⅲ-8>은 정전기 재해·사고 발생 장소와 작업의 교차분석 결과이다.

장소와 작업의 교차분석 결과, 제조장소의 투입과 주입 작업에서 15건, 4건이 각각 발생하였으며, 제조장소의 운전 작업에서도 12건으로 다음순으로 많이 발생하였다. 그리고 유지보수 장소의 경우 제거작업에서 3건으로 가장 많이 발생하였다.

〈표 III-8〉 정전기 재해·사고 발생 장소와 작업의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	제조	유지보수	출하	시운전	포장	검사	시공
계	63	45	13	1	1	1	1	1
투입	16	15	1					
운전	13	12					1	
주입	7	4	1	1		1		
제거	5	2	3					
배출	3	2			1			
작업	3	1	2					
분리	2		2					
운반	2	2						
도포	2	1						1
조작	2	2						
계량	1	1						
선별	1	1						
측정	1	1						
회수	1		1					
파단	1	1						
개방	1		1					
체결	1		1					
점검	1		1					

## 9) 장소-기인물

다음 <표 Ⅲ-9>은 정전기 재해·사고 발생 장소와 기인물의 교차분석 결과이다.

장소와 기인물의 교차분석 결과, 제조 장소에서는 저장탱크, 반응기에서 각각 4건씩 발생하였으며, 교반기, 혼합기, 분쇄기, 저장용기, 여과기에서 각각 3건씩 발생하였다. 그리고 제조 장소 외에서는 저장탱크와 반응기의 유지보수 장소에서 각각 4건, 2건씩 발생하였다.

〈표 III-9〉 정전기 재해·사고 발생 장소와 기인물의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	제조	유지보수	출하	시운전	포장	검사	시공
계	63	45	13	1	1	1	1	1
저장탱크	10	4	4	1			1	
반응기	6	4	2					
드럼통	4	2			1	1		
교반기	3	3						
혼합기	3	3						
분쇄기	3	3						
저장용기	3	3						
배관	3	1	2					
여과기	3	3						
필터용기	2	1	1					
텐터기	2	2						
이형장비	1	1						
수거함	1	1						
분배기	1		1					
차단밸브	1	1						
비닐대	1	1						
신발(고무)	1	1						
구조물	1		1					
압축기	1	1						
분리기	1		1					
롤러	1							1
주걱	1	1						
혼합조	1	1						
컨베이어	1	1						
배합기	1	1						
필터	1	1						
용해기	1	1						
핸드폰케이스	1	1						
용해조	1	1						
원심기	1	1						
연소관	1	1						
열교환기	1		1					

### 10) 장소-물질

다음 <표 Ⅲ-10>은 정전기 재해·사고 발생 장소와 물질의 교차분석 결과이다.

인화성 액체를 취급하는 제조 장소에서 22건으로 가장 많이 발생하였으며, 유지보수 장소에서 11건으로 다음순으로 많이 발생하였다. 특히 분진의 경우 제조 장소에서만 10건이 발생하였다. 그러나 액체, 분진, 고체 및 가스의 하이브리드 혼합물을 취급하는 제조 장소에서도 12건이 발생하였다.

<표 Ⅲ-10> 정전기 재해·사고 발생 장소와 물질의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	제조	유지보수	출하	시운전	포장	검사	시공
계	63	45	13	1	1	1	1	1
액체	38	22	11	1	1	1	1	1
분진	10	10						
하이브리드 (액체, 분진)	8	8						
하이브리드 (액체, 고체)	3	2	1					
하이브리드 (가스, 분진)	2	2						
가스	1	1						
기체	1		1					

## 11) 장소-대전종류

다음 <표 III-11>은 정전기 재해·사고 발생 장소와 대전종류의 교차분석 결과이다.

장소와 대전종류의 교차분석 결과, 제조 장소에서는 마찰대전이 8건, 유동·분출 및 마찰·충돌이 각각 6건이 발생하였다. 그러나 장소별 정전기 대전은 단일 대전종류로 발생하기보다는 복합적으로 발생하고 있다.

다만, 재해조사 의견서 확인 결과 명확한 대전종류의 구분·규명이 불가능한 관계로 발생원인 관련 대전종류를 복합적으로 판단하고 있는 부분도 있었다. 따라서 실험적 방법 또는 심층원인 분석 등을 통해 중대재해·중대산업사고를 유발한 대전종류의 실체를 규명하는 것이 필요하다.

〈표 Ⅲ-11〉 정전기 재해·사고 발생 장소와 대전종류의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	제조	유지보수	출하	시운전	포장	검사	시공
계	63	45	13	1	1	1	1	1
마찰	11	8	2					1
유동, 분출	8	6		1		1		
마찰, 충돌	6	6						
충돌	5	5						
인체	5	3	2					
분출	4	1	3					
인체, 마찰	4	2	2					
인체, 유동, 분출	3	3						
인체, 마찰, 충돌	2	2						
마찰, 유동, 분출	2	2						
유동	2	2						
유동, 충돌	1		1					
인체, 분출	1	1						
마찰, 유동	1						1	
충돌, 파괴	1	1						
인체, 유동	1	1						
마찰, 분출	1	1						
인체, 유동, 충돌	1				1			
인체, 마찰, 유동	1	1						
유동, 분출, 충돌	1		1					
박리	1		1					
인체, 마찰, 분출	1		1					

## 12) 공정-작업

다음 <표 III-12>는 정전기 재해·사고 발생 공정과 작업의 교차분석 결과이다.

공정과 작업 교차분석 결과는 혼·배합 공정에서 투입 5건, 운전 및 주입이 각각 2건으로 발생하였으며, 분쇄 공정에서는 투입작업과 적재 공정에서는 주입작업 시 각각 3건 발생하였다.

결론적으로는 투입, 운전 및 주입 작업이 전체 작업에서 57.1%이상을 차지하고 있어, 공정 전체에서 재해·사고 관련 해당 작업에서의 안전관리 및 위험성 감소 방안 마련이 필요하다.

〈표 Ⅲ-12〉 정전기 재해·사고 발생 공정과 작업의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	투입	운전	주입	제거	배출	작업	분리	운반	도포
계	63	16	13	7	5	3	3	2	2	2
세척·세정	8	1	1	1	3	1				
배합	6	2		2					1	
혼합	5	3	2							
청소	4				1		1			
여과	4	1	2			1				
분쇄	4	3								
적재	3			3						
용해	2	2								
이송	2		2							
반응	2		1							
교반	2	1	1							
계량	2			1						
교체	2				1			1		
성형	1									
증발	1								1	
도포	1						1			
방수	1									1
코팅건조	1	1								
투입	1	1								
재결정	1	1								
압축	1									
점검	1							1		
라이닝	1									1
설치	1									
보온	1						1			
텐터	1		1							
분리	1		1							
이형	1		1							
건조	1		1							
소분	1					1				

〈표 III-12〉 계속

(단위 : 건)

구분	조작	계량	선별	측정	회수	파단	개방	체결	점검
계	2	1	1	1	1	1	1	1	1
세척·세정							1		
배합		1							
혼합									
청소					1				1
여과									
분쇄			1						
적재									
용해									
이송									
반응	1								
교반									
계량				1					
교체									
성형	1								
증발									
도포									
방수									
코팅건조									
투입									
재결정									
압축						1			
점검									
라이닝									
설치								1	
보온									
텐터									
분리									
이형									
건조									
소분									

### 13) 공정-기인물

다음 <표 Ⅲ-13>은 정전기 재해·사고 발생 공정과 기인물의 교차분석 결과이다.

공정과 기인물 교차분석 결과는 분쇄 공정의 분쇄기, 여과 공정의 여과기에서 각각 3건의 재해·사고가 발생하였으며, 반응기의 세척·세정 공정과 저장탱크의 청소 공정에서 각각 2건의 재해·사고가 발생하였다.

다만, 정전기 재해·사고 발생 공정과 기인물의 교차분석에서는 핵심적인 재해·사고 예방 타겟은 확인하지 못하였다.

〈표 III-13〉 정전기 재해·사고 발생 공정과 기인물의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	저장탱크	반응기	드럼통	교반기	혼합기	분쇄기
계	63	10	6	4	3	3	3
세척·세정	8	1	2	1			
배합	6	1	1		1	1	
혼합	5		1			2	
청소	4	2					
여과	4						
분쇄	4						3
적재	3	1		1			
용해	2	1					
이송	2	1					
반응	2		1				
교반	2				2		
계량	2						
교체	2						
성형	1						
증발	1						
도포	1	1					
방수	1						
코팅건조	1						
투입	1		1				
재결정	1			1			
압축	1						
점검	1						
라이닝	1	1					
설치	1	1					
보온	1						
텐터	1						
분리	1						
이형	1						
건조	1						
소분	1			1			

〈표 Ⅲ-13〉 계속

(단위 : 건)

구분	저장용기	배관	여과기	필터용기	텐터기	이형장비	수거함
계	3	3	3	2	2	1	1
세척·세정							
배합		1					
혼합							
청소		1					
여과			3	1			
분쇄							1
적재	1						
용해							
이송							
반응							
교반							
계량	2						
교체				1			
성형							
증발							
도포							
방수							
코팅건조					1		
투입							
재결정							
압축							
점검		1					
라이닝							
설치							
보온							
텐터					1		
분리							
이형						1	
건조							
소분							

〈표 III-13〉 계속

(단위 : 건)

구분	분배기	차단밸브	비닐대	신발(고무)	구조물	압축기	분리기
계	1	1	1	1	1	1	1
세척·세정				1			1
배합							
혼합							
청소					1		
여과							
분쇄							
적재							
용해							
이송							
반응		1					
교반							
계량							
교체	1						
성형							
증발			1				
도포							
방수							
코팅건조							
투입							
재결정							
압축						1	
점검							
라이닝							
설치							
보온							
텐터							
분리							
이형							
건조							
소분							

〈표 Ⅲ-13〉 계속

(단위 : 건)

구분	롤러	주걱	혼합조	컨베이어	배합기	필터	용해기
계	1	1	1	1	1	1	1
세척·세정						1	
배합					1		
혼합			1				1
청소							
여과							
분쇄							
적재							
용해							
이송				1			
반응							
교반							
계량							
교체							
성형							
증발							
도포							
방수	1						
코팅건조							
투입							
재결정							
압축							
점검							
라이닝							
설치							
보온							
텐터							
분리							
이형							
건조		1					
소분							

〈표 III-13〉 계속

(단위 : 건)

구분	핸드폰케이스	용해조	원심기	연소관	열교환기
계	1	1	1	1	1
세척·세정	1				
배합					
혼합					
청소					
여과					
분쇄					
적재					
용해		1			
이송					
반응					
교반					
계량					
교체					
성형				1	
증발					
도포					
방수					
코팅건조					
투입					
재결정					
압축					
점검					
라이닝					
설치					
보온					1
텐터					
분리			1		
이형					
건조					
소분					

#### 14) 공정-물질

다음 <표 Ⅲ-14>는 정전기 재해·사고 발생 공정과 물질의 교차분석 결과이다.

공정과 물질의 교차분석 결과는 세척·세정 공정에서 인화성 액체가 7건으로 가장 높고, 청소 및 여과 공정에서 인화성 액체가 각각 4건이다.

그리고 인화성 액체를 배합하는 공정, 인화성 액체와 가연성 분진의 하이브리드 혼합물을 혼합하는 공정, 인화성 액체를 적재하는 공정에서 각각 3건의 재해·사고가 발생하였다.

〈표 III-14〉 정전기 재해·사고 발생 공정과 물질의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	액체	분진	하이브리드 (액체, 분진)	하이브리드 (액체, 고체)	하이브리드 (가스, 분진)	가스	기체
계	63	38	10	8	3	2	1	1
세척·세정	8	7			1			
배합	6	3		2	1			
혼합	5		1	3		1		
청소	4	4						
여과	4	4						
분쇄	4	1	3					
적재	3	3						
용해	2			1	1			
이송	2	1	1					
반응	2	1					1	
교반	2	1	1					
계량	2	2						
교체	2	1						1
성형	1		1					
증발	1		1					
도포	1	1						
방수	1	1						
코팅건조	1	1						
투입	1			1				
재결정	1	1						
압축	1					1		
점검	1	1						
라이닝	1	1						
설치	1	1						
보온	1	1						
텐터	1		1					
분리	1	1						
이형	1		1					
건조	1			1				
소분	1	1						

### 15) 공정-대전종류

다음 <표 Ⅲ-15>는 정전기 재해·사고 발생 공정과 대전종류의 교차분석 결과이다.

공정과 대전종류의 교차분석 결과는 혼합공정에서 마찰대전으로 인한 정전기 재해·사고가 4건으로 가장 높다.

그리고 배합공정에서의 마찰·충돌대전으로 재해·사고가 2건, 여과·적재·계량 공정에서 인화성 액체의 유동·분출대전으로 인한 재해·사고가 각각 2건 발생하였다.

〈표 III-15〉 정전기 재해·사고 발생 공정과 대전종류의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	마찰	유동,분출	마찰,충돌	충돌	인체	분출	인체,마찰
계	63	11	8	6	5	5	4	4
세척·세정	8	1						1
배합	6			2				
혼합	5	4						
청소	4	2				1		1
여과	4		2					
분쇄	4			1	1	1		
적재	3		2					
용해	2				1			
이송	2				1			
반응	2	1					1	
교반	2		1		1			
계량	2		2					
교체	2						1	1
성형	1					1		
증발	1	1						
도포	1					1		
방수	1	1						
코팅건조	1			1				
투입	1							
재결정	1							
압축	1				1			
점검	1						1	
라이닝	1							
설치	1					1		
보온	1						1	
텐터	1			1				
분리	1	1						
이형	1			1				
건조	1							1
소분	1		1					

〈표 Ⅲ-15〉 계속

(단위 : 건)

구분	인체, 유동, 분출	인체, 마찰, 충돌	마찰, 유동, 분출	유동	유동, 충돌	인체, 분출	마찰, 유동	충돌, 파괴
계	3	2	2	2	1	1	1	1
세척·세정					1	1		
배합	1	1	1	1				
혼합			1					
청소								
여과	2							
분쇄								1
적재				1				
용해		1						
이송							1	
반응								
교반								
계량								
교체								
성형								
증발								
도포								
방수								
코팅건조								
투입								
재결정								
압축								
점검								
라이닝								
설치								
보온								
텐터								
분리								
이형								
건조								
소분								

〈표 III-15〉 계속

(단위 : 건)

구분	인체, 유동	마찰, 분출	인체, 유동, 총돌	인체, 마찰, 유동	유동, 분출, 총돌	박리	인체, 마찰, 분출
계	1	1	1	1	1	1	1
세척·세정			1		1	1	1
배합							
혼합							
청소							
여과							
분쇄							
적재							
용해							
이송							
반응							
교반							
계량							
교체							
성형							
증발							
도포							
방수							
코팅건조							
투입				1			
재결정	1						
압축							
점검							
라이닝		1					
설치							
보온							
텐터							
분리							
이형							
건조							
소분							

## 16) 작업-기인물

다음 <표 Ⅲ-16>은 정전기 화재·사고 발생 작업과 기인물의 교차분석 결과이다.

작업과 기인물의 교차분석 결과는 분쇄기의 투입작업에서 3건으로 가장 높고, 저장탱크 및 반응기 등은 전체 작업에서 전반적으로 화재·사고가 발생하였다.

그래서 저장탱크, 반응기 및 교반기에서 투입작업, 혼합기 및 여과기 운전작업, 반응기 주입작업 그리고 드럼통 배출작업에서 각각 2건의 화재·사고가 발생하였다.

〈표 III-16〉 정전기 재해·사고 발생 작업과 기인물의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	투입	운전	주입	제거	배출	작업
계	63	16	13	7	5	3	3
저장탱크	10	2	1	1			1
반응기	6	2	1	2	1		
드럼통	4	1		1		2	
교반기	3	2	1				
혼합기	3	1	2				
분쇄기	3	3					
저장용기	3			2			
배관	3			1			1
여과기	3		2			1	
필터용기	2	1			1		
텐터기	2	1	1				
이형장비	1		1				
수거함	1						
분배기	1						
차단밸브	1						
비닐대	1						
신발(고무)	1				1		
구조물	1				1		
압축기	1						
분리기	1						
롤러	1						
주걱	1		1				
혼합조	1	1					
컨베이어	1		1				
배합기	1						
필터	1		1				
용해기	1	1					
핸드폰케이스	1				1		
용해조	1	1					
원심기	1		1				
연소관	1						
열교환기	1						1

〈표 Ⅲ-16〉 계속

(단위 : 건)

구분	분리	운반	도포	조작	계량	선별	측정
계	2	2	2	2	1	1	1
저장탱크		1	1				
반응기							
드럼통							
교반기							
혼합기							
분쇄기							
저장용기							1
배관	1						
여과기							
필터용기							
텐터기							
이형장비							
수거함						1	
분배기	1						
차단밸브				1			
비닐대		1					
신발(고무)							
구조물							
압축기							
분리기							
롤러			1				
주걱							
혼합조							
컨베이어							
배합기					1		
필터							
용해기							
핸드폰케이스							
용해조							
원심기							
연소관				1			
열교환기							

〈표 III-16〉 계속

(단위 : 건)

구분	회수	파단	개방	체결	점검
계	1	1	1	1	1
저장탱크	1			1	1
반응기					
드럼통					
교반기					
혼합기					
분쇄기					
저장용기					
배관					
여과기					
필터용기					
텐터기					
이형장비					
수거함					
분배기					
차단밸브					
비닐대					
신발(고무)					
구조물					
압축기		1			
분리기			1		
롤러					
주걱					
혼합조					
컨베이어					
배합기					
필터					
용해기					
핸드폰케이스					
용해조					
원심기					
연소관					
열교환기					

## 17) 작업-물질

다음 <표 Ⅲ-17>은 정전기 재해·사고 발생 작업과 물질의 교차분석 결과이다.

작업과 물질의 교차분석 결과는 제조설비의 운전작업 중 인화성 액체에 의한 재해·사고가 7건으로 가장 높다.

그리고 인화성 액체의 주입작업이나 인화성 액체와 가연성 분진 하이브리드 혼합물의 투입 또는 주입작업에서 12건으로 다수를 차지하고 있다. 또한 인화성 액체의 제거작업에서도 5건이 발생하였다.

〈표 III-17〉 정전기 재해·사고 발생 작업과 물질의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	액체	분진	하이브리드 (액체, 분진)	하이브리드 (액체, 고체)	하이브리드 (가스, 분진)	가스	기체
계	63	38	10	8	3	2	1	1
투입	16	4	3	6	3			
운전	13	7	4	1		1		
주입	7	6		1				
제거	5	5						
배출	3	3						
작업	3	3						
분리	2	1						1
운반	2	1	1					
도포	2	2						
조작	2		1				1	
계량	1	1						
선별	1		1					
측정	1	1						
회수	1	1						
파단	1					1		
개방	1	1						
체결	1	1						
점검	1	1						

## 18) 작업-대전종류

다음 <표 Ⅲ-18>은 정전기 재해·사고 발생 작업과 대전종류의 교차분석 결과이다.

작업과 대전종류의 교차분석 결과는 운전작업에서 마찰대전으로 인한 재해·사고가 4건으로 가장 높고, 운전 및 주입작업에서 유동·분출대전이 각각 3건 그리고 투입작업에서 마찰·충돌대전이 3건이다.

〈표 III-18〉 정전기 재해·사고 발생 작업과 대전종류의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	투입	운전	주입	제거	배출	작업
계	63	16	13	7	5	3	3
마찰	11	2	4		2		
유동, 분출	8		3	3		1	
마찰, 충돌	6	3	2				
충돌	5	2	1				
인체	5	1					2
인체, 마찰	4		1		2		
분출	4						1
인체, 유동, 분출	3	1				1	
유동	2			2			
인체, 마찰, 충돌	2	1		1			
마찰, 유동, 분출	2	2					
인체, 마찰, 분출	1	1					
박리	1						
인체, 분출	1		1				
인체, 유동, 충돌	1					1	
유동, 충돌	1				1		
마찰, 유동	1		1				
마찰, 분출	1						

〈표 Ⅲ-18〉 계속

(단위 : 건)

구분	분리	운반	도포	조작	선별	개방	체결
계	2	2	2	2	1	1	1
마찰		1	1				
유동, 분출							
마찰, 충돌		1					
충돌					1		
인체				1			1
인체, 마찰							
분출	2			1			
인체, 유동, 분출							
유동							
인체, 마찰, 충돌							
마찰, 유동, 분출							
인체, 마찰, 분출							
박리						1	
인체, 분출							
인체, 유동, 충돌							
유동, 충돌							
마찰, 유동							
마찰, 분출			1				

〈표 III-18〉 계속

(단위 : 건)

구분	계량	파단	측정	회수	점검
계	1	1	1	1	1
마찰					1
유동, 분출			1		
마찰, 충돌					
충돌		1			
인체					
인체, 마찰				1	
분출					
인체, 유동, 분출	1				
유동					
인체, 마찰, 충돌					
마찰, 유동, 분출					
인체, 마찰, 분출					
박리					
인체, 분출					
인체, 유동, 충돌					
유동, 충돌					
마찰, 유동					
마찰, 분출					

## 19) 기인물-물질

다음 <표 Ⅲ-19>는 정전기 화재·사고 발생 기인물과 물질의 교차분석 결과이다.

기인물과 물질의 교차분석 결과는 인화성 액체로 인한 화재·사고가 저장탱크에서 8건으로 가장 많고, 드럼통에서 4건으로 그 다음 순으로 많다.

그리고 반응기에서 인화성 액체 및 인화성 액체·가연성 분진의 하이브리드 혼합물이 각각 3건이며, 저장용기, 배관 및 여과기에서는 인화성 액체가 각각 3건이다.

〈표 III-19〉 정전기 재해·사고 발생 기인물과 물질의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	액체	분진	하이브리드 (액체, 분진)	하이브리드 (액체, 고체)	하이브리드 (가스, 분진)	가스	기체
계	63	38	10	8	3	2	1	1
저장탱크	10	8			2			
반응기	6	3		3				
드럼통	4	4						
교반기	3	1	1		1			
혼합기	3		1	1		1		
분쇄기	3	1	2					
저장용기	3	3						
배관	3	3						
여과기	3	3						
필터용기	2	2						
텐터기	2	1	1					
이형장비	1		1					
수거함	1		1					
분배기	1							1
차단밸브	1						1	
비닐대	1		1					
신발(고무)	1	1						
구조물	1	1						
압축기	1					1		
분리기	1	1						
롤러	1	1						
주걱	1			1				
혼합조	1			1				
컨베이어	1		1					
배합기	1	1						
필터	1	1						
용해기	1			1				
핸드폰케이스	1	1						
용해조	1			1				
원심기	1	1						
연소관	1		1					
열교환기	1	1						

## 20) 기인물-대전종류

다음 <표 Ⅲ-20>은 정전기 재해·사고 발생 기인물과 대전종류의 교차분석 결과이다.

기인물과 대전종류의 교차분석 결과는 드럼통, 저장용기 및 여과기에서 인화성 액체의 유동·분출대전으로 인한 재해·사고가 각각 2건이며, 혼합기에서의 마찰 대전과 텐터기에서의 마찰·충돌대전이 각각 2건이다.

〈표 III-20〉 정전기 재해·사고 발생 기인물과 대전종류의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	마찰	유동, 분출	마찰, 충돌	충돌	인체	분출	인체, 마찰
계	63	11	8	6	5	5	4	4
저장탱크	10	1	1	1		2		1
반응기	6	1						
드럼통	4		2					
교반기	3		1		1			
혼합기	3	2		1				
분쇄기	3			1		1		
저장용기	3		2					
배관	3					1	1	
여과기	3		2					
필터용기	2							1
텐터기	2			2				
이형장비	1			1				
수거함	1				1			
분배기	1						1	
차단밸브	1						1	
비닐대	1	1						
신발(고무)	1							1
구조물	1	1						
압축기	1				1			
분리기	1							
롤러	1	1						
주걱	1							1
혼합조	1	1						
컨베이어	1				1			
배합기	1							
필터	1							
용해기	1	1						
핸드폰케이스	1	1						
용해조	1				1			
원심기	1	1						
연소관	1					1		
열교환기	1						1	

〈표 Ⅲ-20〉 계속

(단위 : 건)

구분	인체, 유동, 분출	인체, 마찰, 충돌	마찰, 유동, 분출	유동	유동, 충돌	인체, 분출	마찰, 유동	충돌, 파괴
계	3	2	2	2	1	1	1	1
저장탱크		1					1	
반응기		1	1		1			
드럼통								
교반기			1					
혼합기								
분쇄기								1
저장용기				1				
배관				1				
여과기	1							
필터용기	1							
텐터기								
이형장비								
수거함								
분배기								
차단밸브								
비닐대								
신발(고무)								
구조물								
압축기								
분리기								
롤러								
주걱								
혼합조								
컨베이어								
배합기	1							
필터						1		
용해기								
핸드폰케이스								
용해조								
원심기								
연소관								
열교환기								

〈표 III-20〉 계속

(단위 : 건)

구분	인체,유동	마찰,분출	인체,유동,충돌	인체,마찰,유동	유동,분출,충돌	박리	인체,마찰,분출
계	1	1	1	1	1	1	
저장탱크		1					1
반응기				1	1		
드럼통	1		1				
교반기							
혼합기							
분쇄기							
저장용기							
배관							
여과기							
필터용기							
텐터기							
이형장비							
수거함							
분배기							
차단밸브							
비닐대							
신발(고무)							
구조물							
압축기							
분리기						1	
롤러							
주걱							
혼합조							
컨베이어							
배합기							
필터							
용해기							
핸드폰케이스							
용해조							
원심기							
연소관							
열교환기							

## 21) 물질-대전종류

다음 <표 Ⅲ-21>는 정전기 재해·사고 발생 물질과 대전종류의 교차분석 결과이다.

물질과 대전종류의 교차분석 결과는 인화성 액체의 경우 유동·분출대전으로 인한 재해사고가 8건으로 가장 많고, 마찰대전이 6건 그리고 인체대전이 4건으로 많다. 분진의 경우 마찰·충돌대전 및 충돌대전이 각각 3건으로 많다.

특히, 인체대전에 의한 재해·사고의 경우 가연성 분진(1건)에서 보다는 인화성 액체에 의한 재해·사고가 4건으로 더 많다.

〈표 III-21〉 정전기 재해·사고 발생 물질과 대전종류의 교차분석

(단위 : 건)

구분	계	액체	분진	하이브리드 (액체, 분진)	하이브리드 (액체, 고체)	하이브리드 (가스, 분진)	가스	기체
계	63	38	10	8	3	2	1	1
마찰	11	6	2	2		1		
유동, 분출	8	8						
마찰, 충돌	6	2	3	1				
충돌	5		3	1		1		
인체	5	4	1					
분출	4	2					1	1
인체, 마찰	4	3		1				
인체, 유동, 분출	3	3						
인체, 마찰, 충돌	2			1	1			
마찰, 유동, 분출	2			1	1			
유동	2	2						
유동, 충돌	1	1						
인체, 분출	1	1						
마찰, 유동	1	1						
충돌, 파괴	1		1					
인체, 유동	1	1						
마찰, 분출	1	1						
인체, 유동, 충돌	1	1						
인체, 마찰, 유동	1			1				
유동, 분출, 충돌	1	1						
박리	1	1						
인체, 마찰, 분출	1				1			

## 4. 소결

### 1) 정전기 화재·폭발 재해·사고 재해예방 영역 설정

정전기 중대재해·중대산업사고 발생원인을 도출하기 위해 2012년부터 2021년까지 조사의견서 63건을 심층 분석하였다. 이를 위해 1차로 업종별, 장소별, 공정별, 작업별, 기인물별, 물질별 및 대전종류별로 발생 현황을 분석하고, 2차로 발생 현황에 대한 교차분석을 실시하여 예방영역을 도출하고자 하였다.

정전기 관련 화재·폭발은 화학및고무제품제조업, 의약품및화약업종 등 위험업종의 제조장소에서 상당한 비중으로 발생하고 있는데, 이는 위험업종의 제조·생산 관련 설비, 취급물질, 작업방법 및 절차 등이 자체 위험성을 내포하고 있어 제조장소에서 화재·폭발 비중이 유지보수 등 다른 장소보다는 높게 나타나고 있다. 또한 위험업종의 작업별 구분에서도 투입과 주입 등 정상적인 운전작업으로 인한 화재·폭발 발생 비중이 높으며, 특히 화학및고무제품제조업에서의 저장탱크, 드럼통 등 저장설비 또는 반응설비 등에서의 화재·폭발 발생 비중이 높다.

제조장소에서는 혼·배합 공정과 여과, 분쇄 공정에서 화재·폭발이 30% 이상 발생하고 있으며, 투입과 운전작업에서 화재·폭발이 42% 이상 발생하고 있다. 또한 제조장소의 제조·생산설비에서 대다수의 화재·폭발이 발생하고 있으며, 제조·생산 설비에서 취급되는 물질 중 인화성 액체가 34% 이상을 차지하고 있다.

### 2) 정전기 화재·폭발 발생원인

이론적 고찰 내용을 토대로 최근 10년간의 정전기 화재·폭발 관련 중대재해 및 중대산업사고 조사의견서 심층분석을 통해 발생원인을 다음과 같이 정리하였다.

## (1) 잠재적 위험성

정전기 관련 화재·폭발은 발생 확률은 낮지만, 잠재적 위험성이 크기 때문에 화재·폭발 위험장소에서 정전기를 안전한 수준으로 관리해야 한다. 이러한 잠재적 위험성 때문에 유사한 성격의 재해/사고가 유사한 공정/작업 및 설비 등에서 주기적으로 발생하고 있다.

여기서 잠재적 위험성이란 제조·생산의 공정·작업 및 설비 자체가 위험성을 내포하고 있거나 공정, 작업방법절차, 설비 그리고 취급물질의 특성으로 인해 정전기 발생이 불가피할 수밖에 없다는 것이다. 특히, 화학및고무제품제조업, 의약품및화약업종 등 위험업종에서는 이러한 잠재적 위험성을 아주 크게 내포하고 있고, 반도체·전자산업에서도 신기술·신공정 및 신물질로 인해 정전기적 관점에서의 잠재적 위험성이 아주 클 것으로 예상된다.

따라서 이러한 잠재적 위험성으로 인해 화재폭발 위험장소에서 정전기를 안전한 수준으로 관리하기 위해서는 공정 개선, 작업방법·절차 대체 및 실증실험을 통한 위험성 정보를 확인하여 안전관리 기술 개발도 필요하다.

## (2) 위험성 정보 부족

정전기 화재·폭발이 발생하고 있는 공정·작업에서 취급되는 물질 및 설비 등의 위험성 정보가 부족하다. 그 이유는 해당 공정·작업·물질·설비 등의 위험성 정보가 과거 문헌 내용과 과거기술을 토대로 정보를 파악 및 확인하고 있는 상황으로 신기술·신공법·신물질에 따른 위험성 정보를 확인할 수 있는 기반(기술, 실증실험, 데이터 등)이 부족하다. 또한 실효적인 재발방지대책 수립을 위해서는 사고조사 결과의 객관성을 확보할 수 있어야 하는데, 조사기반의 기술적 한계가 재해/사고의 원인규명에도 영향을 미치고 있다.

이에 미래 산업구조 변화에 따른 정전기적 위험성에 대한 새로운 고찰이 필요한 시점으로 화재·폭발 위험장소에 정전기로 인한 위험성 감소 및 재해예방을

위해서는 실증실험 기반의 위험성평가 등을 통해 새로운 위험요인을 발굴하는 것이 중요하다.

### (3) 안전작업 절차 및 방법 미수립

정전기 화재·폭발이 발생한 공정에서 작업자가 수행하는 작업에 대한 안전한 절차 및 방법이 부재하였다. 즉 제조·생산 측면에서의 작업 방법 및 절차는 마련되어 있으나, 작업자가 안전한 작업을 수행하기 위한 취급물질의 특성 또는 위험성 정보 등이 작업 절차 및 방법에 반영되어 있지 않다. 따라서 정전기 발생 가능성의 특수성을 배제한 상황에서 작업자가 일반적인 작업 절차 및 방법을 준수하는 관례로 화재·폭발 가능성은 상존하고 있다.

이에 화재·폭발위험장소에서 정전기로 인한 위험성을 고려해야 하는 경우에는 정전기 위험성을 감소시키기 위한 방안을 작업 절차 및 방법에 내재화하여 제조생산과정에서 안전작업 시스템이 작동될 수 있도록 하는 것이 필요하다.

### (4) 작업자 역량 부족

재해조사의견서 확인결과에 따르면 정전기 화재·폭발 공정작업에서 안전보건 교육이 실시되고는 있으나 교육내용이 일반적인 내용으로 정전기 위험성이 전혀 고려되고 있지 않다. 또한, 작업자도 작업시 정전기 위험성을 감소시키기 위한 작업 방법 및 절차를 고려하고 있지는 않다. 예를 들어 화재·폭발 위험장소에서의 방폭구조 전기기계·기구의 선정·사용처럼 전문역량을 요구하는 상황도 아닌 것으로 분석되었다.

이에 설비 및 작업 방법·절차 개선도 중요하겠지만, 통계분석을 통해 설정된 정전기 화재·폭발 예방영역에서 이루어지는 작업에 한해서라도 작업자의 전문역량 향상이 필요하며, 이를 위해 작업자가 자격·면허·기능·교육 등을 통해 전문역량을 강화할 필요성이 있다.

### (5) 정전기 화재·폭발 안전관리 및 재해예방 기술과 사고조사 기법 부재

현재 정전기 화재·폭발 위험성이 상존하는 공정·작업에 대한 안전관리 및 재해예방을 위한 안전기술 그리고 사고조사를 위한 과학적 기법이 부재한 상황이다. 해당 공정·작업에 대한 정전기 화재·폭발 안전관리 및 재해예방은 과거와 비교하더라도 일반적인 수준으로 이루어지고 있어, 신기술·신공법·신물질 대응 관련 안전 신기술은 마련되어 있지 않다. 또한 사고조사에서도 관련 실증실험 방법·절차 부재 등으로 문헌내용에 의존하여 추정하는 방식으로 이루어지고 있어 조사결과의 신뢰성·객관성을 담보할 수가 없는 상황이다.

이에 정전기 화재·폭발 위험 공정·작업에서 실효적인 안전관리 및 재해예방 그리고 사고조사 결과의 신뢰성·객관성 담보를 위해서는 인화성 물질의 물리·화학적 위험성 확인, 제조생산 설비의 정전기 대전방지를 위한 설계·개발, 공정·작업 단계에서의 정전기 위험성 감소 그리고 사고조사의 과학화를 위해 각 단계별 위험성을 확인할 수 있는 실증실험 기반의 정전기 위험성평가 시스템 구축이 필요하다.

## IV. 정전기 관련 위험요인 및 주요 변수

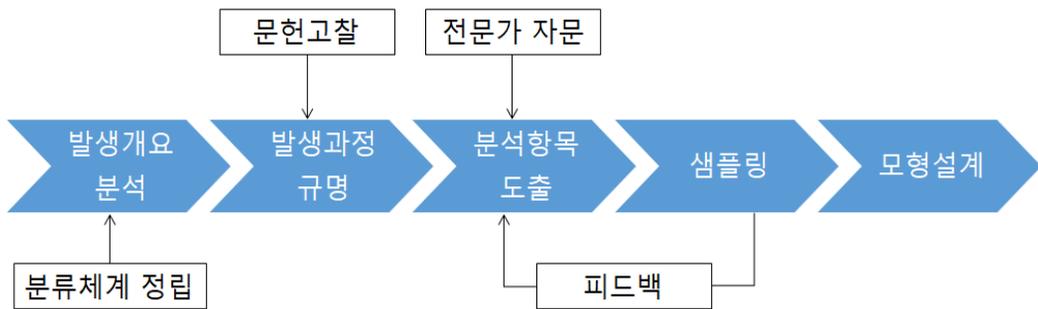


## IV. 정전기 관련 위험요인 및 주요 변수

### 1. 위험요인 및 원인변수 도출을 위한 분석모형 설계

#### 1) 분석모형 설계

정전기 관련 화재·폭발 원인변수 도출을 위한 분석모형 설계 절차 및 방법은 [그림 IV-1]과 같다.



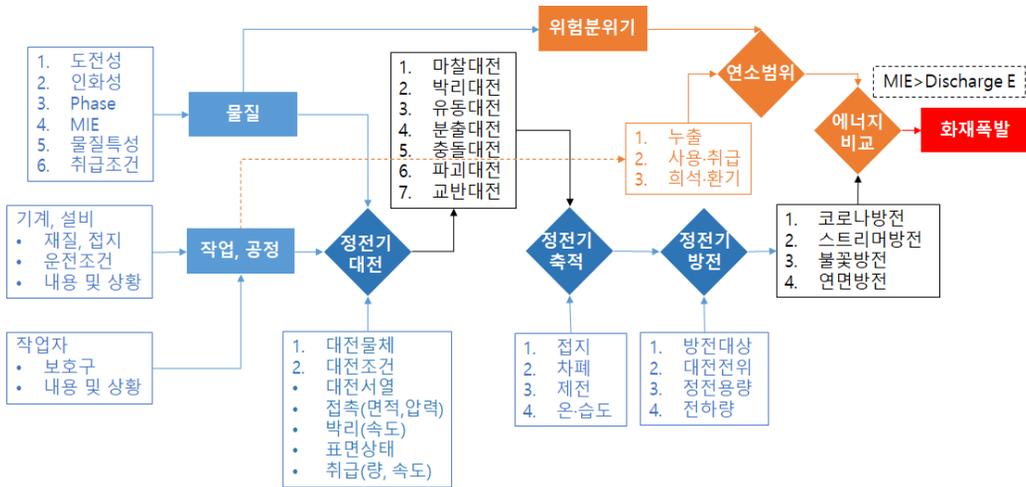
[그림 IV-1] 분석모형 설계 절차 및 방법

먼저 중대재해·중대산업사고 발생개요 분석을 실시하고, 기술자료 조사 등 문헌고찰을 통해 화재·폭발 위험장소에서의 정전기 발생, 대전·방전 매커니즘(Mechanism)을 규명하였다.

발생개요 분석결과와 정전기 발생 매커니즘을 토대로 조사의견서 분석 항목을 도출하여, 샘플링 분석을 실시하였다. 샘플링 분석을 통해 분석 항목의 적합성을 확인하여 모형설계를 위한 체계를 마련하였다. 또한 샘플링 분석과정에서 도출된 보완사항은 분석항목 도출 단계로 피드백 수정·반영하였다.

## 2) 원인변수 도출을 위한 분석모형

정전기 관련 화재·폭발 원인변수 도출을 위한 분석모형은 다음 [그림 IV-2]와 같다.



[그림 IV-2] 원인변수 도출을 위한 분석모형

## 2. 분석모형 기반 원인조사 의견서 원인변수 정리

### 1) 중대재해·중대산업사고 분석 대상

정전기 관련 화재·폭발 원인변수 도출을 위하여 다음 <표 IV-1>과 같이 화재·폭발 발생원인이 정전기로 추정되는 2012년부터 2021년까지 중대재해·중대산업사고 원인조사 의견서 63건을 심층 분석하였다.

<표 IV-1> 정전기 재해·사고 분석 대상

연번	년도	구분	업종	사망	부상	장소	공정	작업	기인물	원인물질	대전종류
1	2012	중대재해	화학및고무제품제조업	4	9	제조	혼합	투입	용해기	액체, 분진	마찰
2	2012	중대재해	수제품및기타제품제조업	1		제조	세척·세정	제거	핸드폰케이스	액체	마찰
3	2012	중대사고	화학및고무제품제조업	8	3	제조	재결정	투입	드럼통	액체	인체, 유동
4	2012	중대재해	화학및고무제품제조업	1		제조	세척·세정	제거	신발(고무)	액체	인체, 마찰
5	2012	중대재해	건설업	1		시공	방수	도포	롤러	액체	마찰
6	2012	중대재해	전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업	2		제조	혼합	운전	혼합기	가스, 분진	마찰
7	2012	중대사고	기타보관업		3	검사	이송	운전	저장탱크	액체	마찰, 유동
8	2013	중대사고	화학및고무제품제조업	1		제조	분리	운전	원심기	액체	마찰
9	2013	중대사고	의약품·화장품·연탄·석유제품제조업		2	제조	여과	운전	여과기	액체	유동, 분출

〈표 IV-1〉 계속

연번	년도	구분	업종	시망 부상	장소	공정	작업	기인물	원인물질	대전종류
10	2014	중대재해	기계기구·금속·비금속광물제품제조업	1	제조	교반	투입	교반기	분진	충돌
11	2014	중대재해	화학및고무제품제조업	1	제조	세척·세정	운전	필터	액체	인체, 분출
12	2014	중대사고	도로제품또는유지기공제품제조업	6	시운전	세척·세정	배출	드럼통	액체	인체, 유동, 충돌
13	2014	중대사고	기타보관업	1	유지보수	청소	점검	저장탱크	액체	마찰
14	2015	중대사고	화학및고무제품제조업	2	제조	배합	운반	저장탱크	액체	마찰, 충돌
15	2015	중대재해	화학및고무제품제조업	1	제조	소분	배출	드럼통	액체	유동, 분출
16	2015	중대재해	기계기구·금속·비금속광물제품제조업	1	제조	분쇄	투입	분쇄기	분진	충돌, 파괴
17	2015	중대사고	화학및고무제품제조업	1	제조	계량	측정	저장용기	액체	유동, 분출
18	2015	중대사고	화학및고무제품제조업	1	제조	계량	주입	저장용기	액체	유동, 분출
19	2015	중대사고	의약품·화장품·연탄·석유제품제조업	1	출하	적재	주입	저장탱크	액체	유동, 분출
20	2015	중대사고	화학및고무제품제조업	1	포장	적재	주입	드럼통	액체	유동, 분출
21	2015	중대사고	화학및고무제품제조업	1	제조	적재	주입	저장용기	액체	유동
22	2015	중대사고	화학및상장제조업	2	제조	혼합	운전	혼합기	분진	마찰
23	2016	중대재해	목재및종이제품제조업	1	제조	배합	계량	배합기	액체	인체, 유동, 분출
24	2016	중대재해	화학및고무제품제조업	1	제조	배합	주입	반응기	액체, 분진	인체, 마찰, 충돌
25	2016	중대재해	의약품·화장품·연탄·석유제품제조업	1	제조	여과	운전	여과기	액체	유동, 분출
26	2016	중대사고	화학및상장제조업	1	제조	건조	운전	주걱	액체, 분진	인체, 마찰
27	2016	중대사고	화학및고무제품제조업	1	제조	배합	투입	교반기	액체, 고체	마찰, 유동, 분출
29	2016	중대사고	의약품·화장품·연탄·석유제품제조업	2	제조	혼합	투입	반응기	액체, 분진	마찰, 유동, 분출
30	2016	중대사고	화학및고무제품제조업	5	제조	교반	운전	교반기	액체	유동, 분출

〈표 IV-1〉 계속

연번	년도	구분	업종	사망	부상	장소	공정	작업	기인물	원인물질	대전종류
31	2017	중대재해	기계기구·금속·비금속광물제품제조업	1		제조	도포	작업	저장탱크	액체	인체
32	2017	중대재해	기계기구·금속·비금속광물제품제조업	1	1	유지보수	청소	제거	구조물	액체	마찰
33	2017	중대재해	섬유및섬유제품제조업	2	1	제조	텐터	운전	텐터기	분진	마찰, 충돌
34	2017	중대사고	도료제품또는유지기공제품제조업		2	제조	혼합	투입	혼합조	액체, 분진	마찰
35	2017	중대사고	기타금속제품제조업또는금속가공업		2	유지보수	교체	분리	분배기	기체	분출
36	2017	중대사고	기타화학제품제조업	1	2	제조	반응	운전	반응기	액체	마찰
37	2017	중대사고	전자관또는반도체소자제조업		1	유지보수	점검	분리	배관	액체	분출
38	2018	중대재해	수제품및기타제품제조업	1	1	제조	배합	주입	배관	액체	유동
39	2018	중대재해	건설업	1	4	제조	이송	운전	컨베이어	분진	충돌
40	2018	중대재해	수제품및기타제품제조업	1		제조	분쇄	선별	수거함	분진	충돌
41	2018	중대재해	섬유및섬유제품제조업	1		제조	코팅건조	투입	텐터기	액체	마찰, 충돌
42	2018	중대사고	화학및성냥제조업	5	4	제조	성형	조작	연소관	분진	인체
43	2018	중대사고	합성수지제조업		1	유지보수	보온	작업	열교환기	액체	분출
44	2018	중대사고	화학및성냥제조업		1	제조	증발	운반	비닐대	분진	마찰
45	2018	중대사고	화학및성냥제조업		2	제조	배합	투입	혼합기	액체, 분진	마찰, 충돌
46	2019	중대재해	화학및고무제품제조업	2	2	제조	라이닝	도포	저장탱크	액체	마찰, 분출
47	2019	중대재해	화학및고무제품제조업	1		제조	분쇄	투입	분쇄기	분진	마찰, 충돌
48	2019	중대사고	화학및성냥제조업	3	2	제조	이형	운전	이형장비	분진	마찰, 충돌
49	2019	중대사고	기타화학제품제조업		5	유지보수	세척·세정	주입	반응기	액체	유동, 분출, 충돌
50	2019	중대사고	기계기구·금속·비금속광물제품제조업		9	유지보수	세척·세정	개방	분리기	액체	박리

〈표 IV-1〉 계속

연번	년도	구분	업종	사망 부상	장소	공정	작업	기인물	원인물질	대전종류
51	2019	중대사고	수도사업		제조	반응	조작	차단밸브	가스	분출
52	2019	중대사고	전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업		제조	용해	투입	용해조	액체, 분진	총돌
53	2020	중대재해	전문·보건·교육·여가관련서비스업	1	유지보수	청소	회수	저장탱크	액체	인체, 마찰
54	2020	중대사고	의약품·화장품·연탄·석유제품제조업	1	제조	여과	배출	여과기	액체	인체, 유동, 분출
55	2020	중대사고	유기화학제품제조업	25	제조	압축	파단	압축기	가스, 분진	총돌
56	2020	중대사고	의약품·화장품·연탄·석유제품제조업	2	유지보수	세척·세정	제거	반응기	액체	유동, 총돌
57	2020	중대사고	의약품및의약품외품제조업	1	제조	투입	투입	반응기	액체, 분진	인체, 마찰, 유동
58	2021	중대재해	화학및고무제품제조업	1	제조	분쇄	투입	분쇄기	액체	인체
59	2021	중대사고	석유정제품제조업	2	유지보수	교체	제거	필터용기	액체	인체, 마찰
60	2021	중대사고	의약품·화장품·연탄·석유제품제조업	2	제조	여과	투입	필터용기	액체	인체, 유동, 분출
61	2021	중대사고	화학및고무제품제조업	3	유지보수	세척·세정	투입	저장탱크	액체, 고체	인체, 마찰, 분출
62	2021	중대사고	건설업	3	유지보수	설치	체결	저장탱크	액체	인체
63	2021	중대사고	화학및고무제품제조업		제조	용해	투입	저장탱크	액체, 고체	인체, 마찰, 총돌

## 2) 정전기 관련 화재·폭발 원인변수 도출 현황

중대재해·중대산업사고 63건을 다음 <표 IV-2>와 같이 변수카드 양식을 활용하여 작성하고 부록과 같이 재해·사고별로 정리하였다.

<표 IV-2> 재해·사고 변수카드 양식

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1		설비#1		대전#1	
도전성		도전성		대전대상	
인화점		접지(본딩)		대전서열	
상태		운전조건		대전조건	
MIE		작업내용		대전종류	
물성1		설비#2		대전전위	
물성2		도전성		대전#2	
취급조건1		접지(본딩)		대전대상	
취급조건2		운전조건		대전서열	
물질#2		작업내용		대전조건	
도전성		작업자		대전종류	
인화점		보호구		대전전위	
상태		작업내용		대전#3	
MIE		매뉴얼/교육		대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	
인화점				차폐	
상태				제전	
MIE				온·습도	
물성1				방전	
물성2				대상	
취급조건1				종류	
취급조건2				정전용량	
				전하량	
				방전에너지	

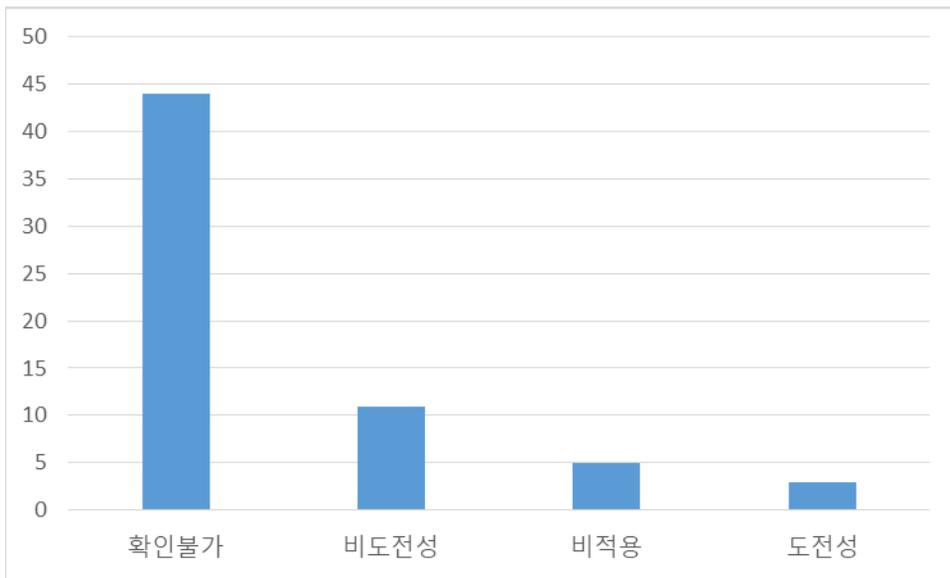
### 3. 정전기 화재·폭발 관련 도출 원인변수 분석

#### 1) 물질

##### (1) 도전성

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 원인물질의 도전성 여부 확인 현황은 다음 [그림 IV-3]과 같다.

원인물질의 도전성 여부는 화재·폭발 점화원의 정전기 해당 여부를 판단하는 기본변수임에도 불구하고, 기술적 한계 및 분석 인프라 부재로 재해/사고 원인조사 시 도전성 여부 확인이 일부는 불가능하였다. 무엇보다도 화재·폭발 원인조사 시 정전기를 점화원으로 판단하기 위해서는 원인물질의 도전성 여부 판단이 선행되어야 한다.

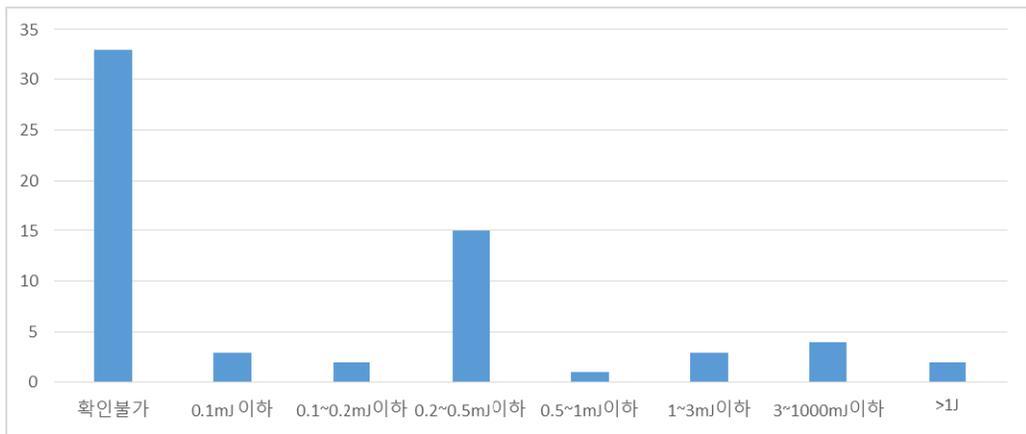


[그림 IV-3] 도전성 원인변수 확인 현황

## (2) 최소점화에너지

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 원인물질의 최소점화에너지 값 확인 현황은 다음 [그림 IV-4]와 같다.

정전기 화재·폭발에서 재해/사고 원인물질의 최소점화에너지는 정전기 방전에너지와의 비교 확인을 위해 필수적으로 확인이 필요하나, 기술적 한계 및 분석 인프라 부재로 재해/사고 원인조사 시 최소점화에너지 값 확인은 대부분 문헌조사에 의존하고 있다. 실제로 단일물질의 데이터는 존재하지만 산업현장에서 취급하는 물질은 대부분이 하이브리드 물질로 정전기 방전에너지와 실제 비교를 위해서는 원인물질의 최소점화에너지에 대한 실증 측정도 필요하다.



[그림 IV-4] 최소점화에너지 원인변수 확인 현황

## (3) 물성

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 원인물질의 재질 및 최소점화에너지 외 추가적으로 정전기 대전 및 점화에 영향을 미칠 수 있는 요인을 확인하고 다음 <표 IV-3> 및 <표 IV-4>와 같이 정리하였다. 다만 기술적 한계 및 분석 인프라 부재로 재해/사고 원인조사 시 정전기 대전 영향 요인 확인은 일부는 불가능하거나 문헌조사에 의존하고 있다. 가연성 분진 관련 주요 화재·폭발은 해당 항목에 대한 실증실험이 수행되고 있다.

&lt;표 IV-3&gt; 인화성 액체의 정전기 대전 영향 요인

액체	내용
이송속도	▪ 비도전성 재질 호스 및 배관을 통하여 이송 시 유동대전에 의한 정전기 발생에 영향을 미치며, 이송속도가 빠를수록 정전기 발생량은 증가함
유전상수	▪ 인화성 액체에 전압이 인가되면 양전하와 음전하로 나뉘지는데, 이 상태가 얼마나 지속되는지에 관한 척도로, 유전상수가 높으면 전기적 에너지를 저장할 수 있는 능력이 크다는 것을 의미함
완화시간	▪ 인화성 액체에 발생한 정전기 전하의 축적 및 소멸과정에서 최초값의 36.8%까지 감소하는 시간을 시정수 또는 완화시간이라고 함
폭발범위	▪ 인화성 액체의 증기가 공기와 혼합하여 폭발반응을 일으킬 수 있는 적절한 농도범위를 폭발범위라고 함

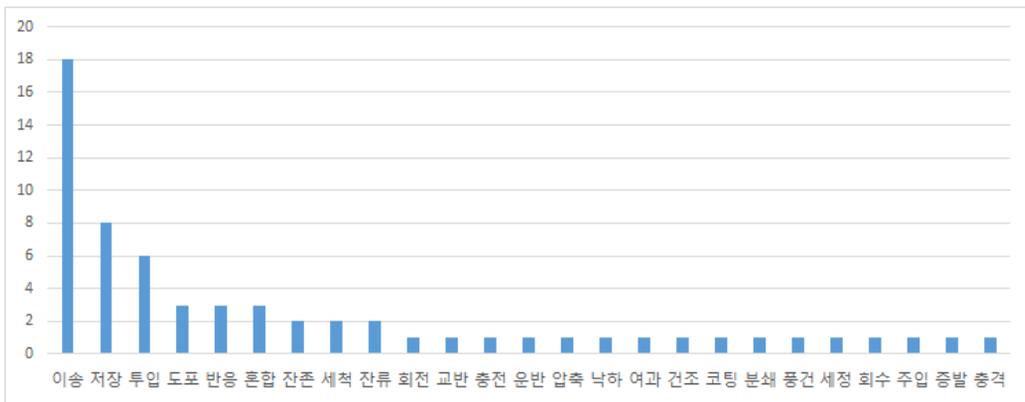
&lt;표 IV-4&gt; 가연성 분진의 정전기 대전 영향 요인

분진	내용
입경	▪ 분진의 입경이 미세할수록 단위중량에 대한 표면적이 크기 때문에 공기와 접촉면적이 증가하여 위험성은 증가함
무게감소율	▪ 가연성 분진의 연소반응 전과 후의 무게를 비교하여 위험성 판단
열중량	▪ 가연성 분진 내 수분과 휘발성 물질의 존재 여부와 함량, 열적특성
열안정성	▪ 가연성 분진의 연소반응 전과 후의 열축적 여부를 비교
마찰감도	▪ 퇴적 분진이 마찰에 의한 폭발 및 분해반응이 일어날 수 있는 가능성에 대한 척도
낙추감도	▪ 퇴적 분진이 충격에 의한 폭발 및 분해반응이 일어날 수 있는 가능성에 대한 척도
폭발범위	▪ 가연성 분진이 폭발반응을 일으킬 수 있는 적절한 농도범위

#### (4) 취급조건

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 원인물질의 취급조건 확인 현황은 다음 [그림 IV-5]와 같다.

원인물질의 취급조건은 정전기 대전여부 및 대전종류 확인에 필요한 주요 변수로 이송조건에서 다수의 정전기 대전이 발생하고 있으며, 저장 및 투입 등의 조건에서 정전기 대전이 발생하고 있는 것으로 분석되었다. 특히 이송조건에 영향을 미칠 수 있는 속도, 압력 및 배관 직경 등에 대한 추가 검토가 필요한 상황이나 이론적 배경에 의존하거나 이송조건의 영향요인에 대한 추가 검토는 기술·방법적 한계로 일부 사례는 확인이 불가능한 경우도 있었다.



[그림 IV-5] 취급조건 원인변수 확인 현황

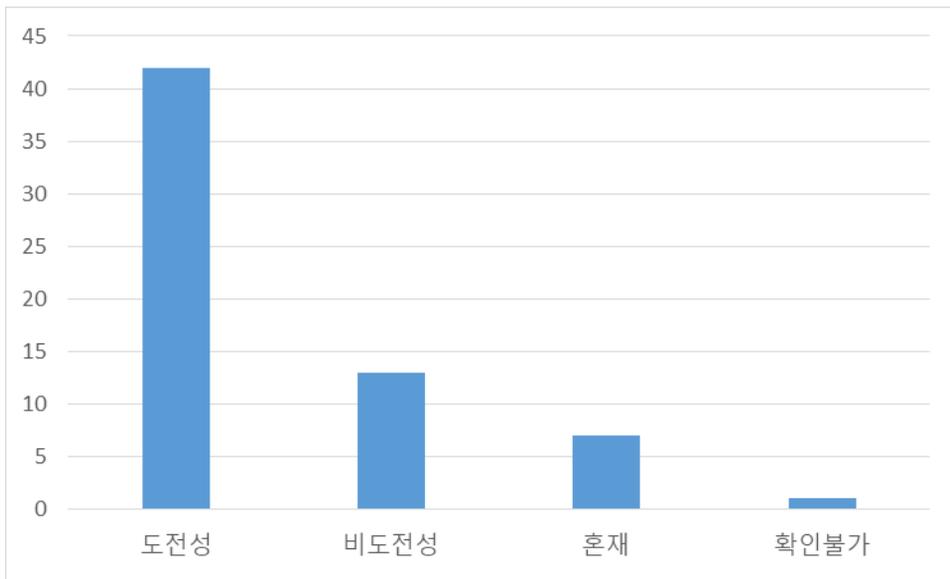
## 2) 공정·작업

### (1) 설비

#### 가) 도전성

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 관련 설비의 도전성 여부 확인 현황은 다음 [그림 IV-6]과 같다.

설비의 도전성 여부는 설비 또는 취급물질에서 정전기 대전시 정전기를 효과적으로 제거할 수 있는 방법 등 안전조치 사항의 결정 시 필요한 주요변수로 설비의 재질이 도전성인 경우 접지만으로도 안전조치가 가능하지만 부도체인 경우 공정·작업 및 설비 개선 등 개별적인 안전조치가 필요하다.



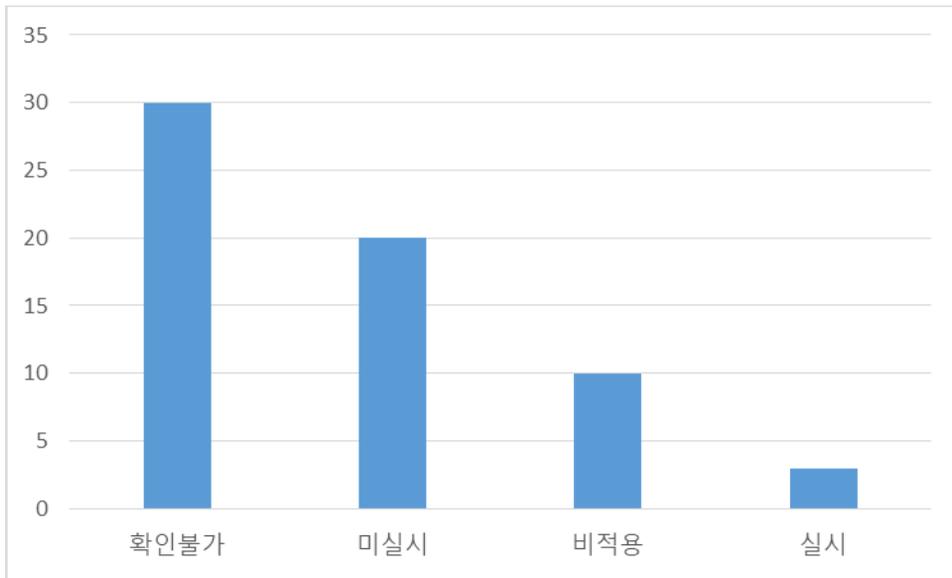
[그림 IV-6] 도전성 원인변수 확인 현황

### 나) 접지

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 관련 설비의 접지 실시 여부 확인 현황은 다음 [그림 IV-7]과 같다.

접지는 설비 재질 또는 취급물질의 물성이 도전성인 경우 확인이 필요한 주요변수로 재해조사의견서 확인결과 화재·폭발 특성상 그리고 기술적 한계 및 분석 인프라 부재로 재해/사고 원인조사 시 도전성 여부 확인이 일부는 불가능하였다.

여기서 화재·폭발의 점화원을 정전기로 규명하는 것도 중요하지만, 정전기가 아님을 확인하는 것도 중요한 사항이기 때문에 정전기가 화재·폭발 점화원으로 작용하였음을 증명하기 위해서는 필수 주요변수에 대한 확인이 원인조사 시 접지여부 확인은 필수적이다.

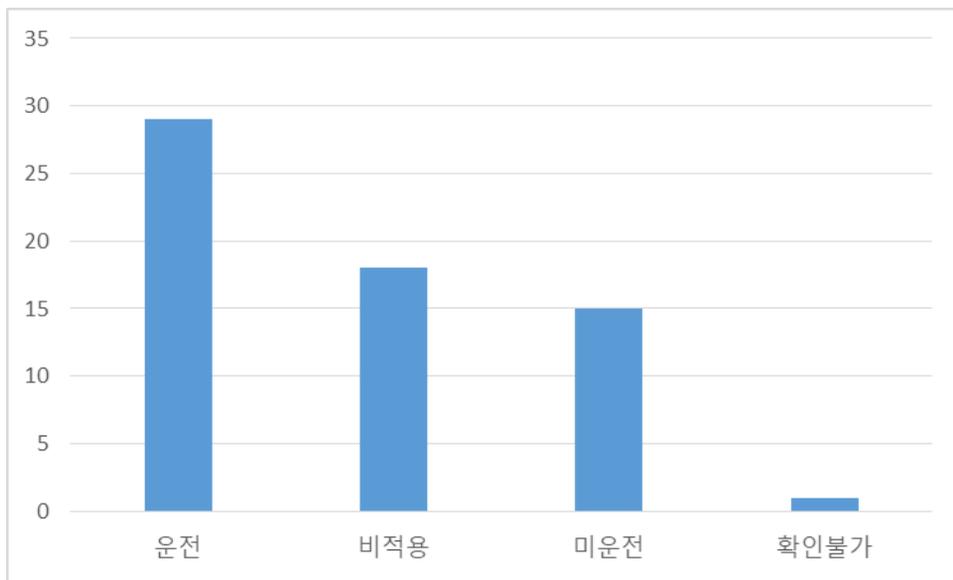


[그림 IV-7] 접지 원인변수 확인 현황

## 다) 운전조건

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 관련 설비의 운전 여부 확인 현황은 다음 [그림 IV-8]과 같다.

통계분석 결과 정전기 화재·폭발은 제조장소의 생산공정에서 정상작업 중 발생비중이 높기 때문에 설비 운전 시 다수가 발생하고 있다.

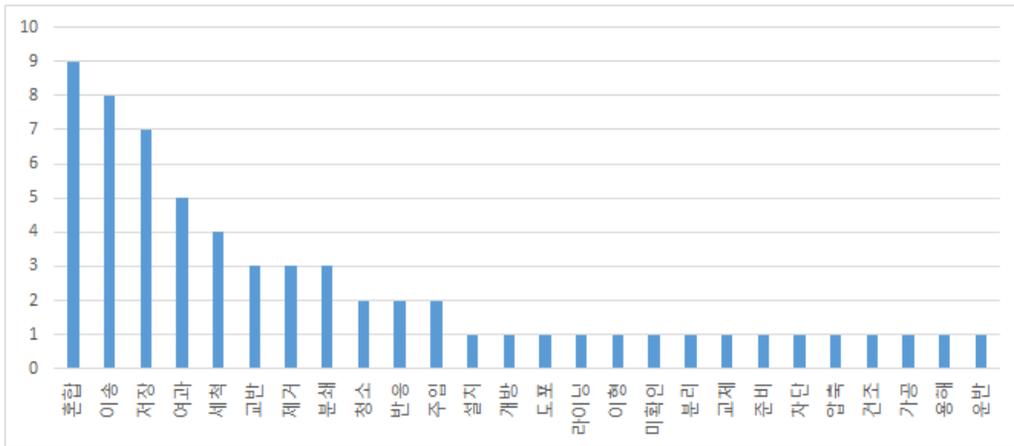


[그림 IV-8] 운전조건 원인변수 확인 현황

### 라) 작업내용

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의전서에서 재해/사고 관련 설비의 작업내용 확인 현황은 다음 [그림 IV-9]와 같다.

설비의 작업내용은 정전기 대전 및 방전조건에 영향을 미치는 주요변수로 혼합, 이송, 저장, 여과 및 세척 등의 작업에서 다수가 발생하고 있어 해당작업에 대한 안전작업 방법 및 절차 등의 제정이 필요한 상황이다.



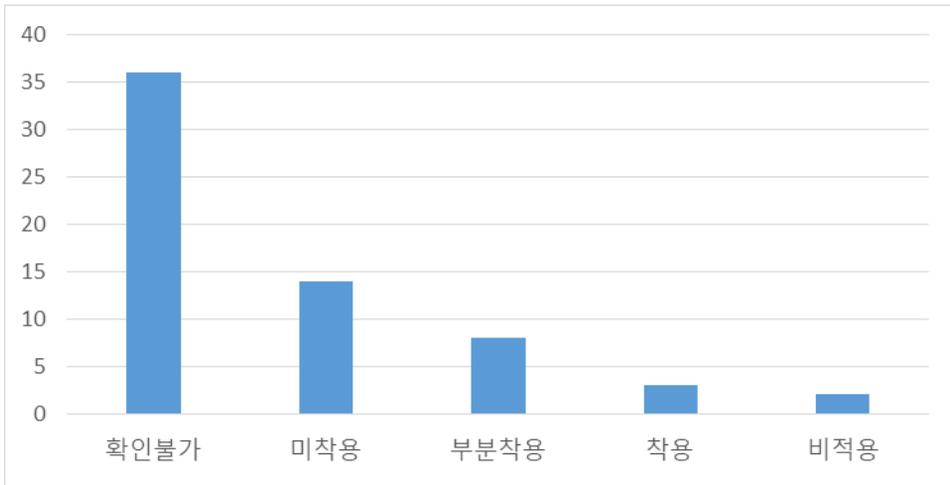
[그림 IV-9] 작업내용 원인변수 확인 현황

## (2) 작업자

### 가) 보호구

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 작업자의 보호구 착용 여부 확인 현황은 다음 [그림 IV-10]과 같다.

작업자의 인체대전이 화재·폭발에서 주요 점화원으로 작용하고 있기 때문에 작업자의 정전기 대전방지를 위한 보호구 착용 여부 확인은 필요하다. 다만 조사의견서 확인 결과 화재·폭발 특성상 작업자의 정전기 대전방지용 보호구 착용 여부 또는 안전성능에 대한 확인은 불가능하였다. 그리고 정전기 대전종류를 인체대전으로 구분하는 경우 필수적으로 작업자의 보호구 착용여부를 확인할 수 있어야지만 조사결과의 신뢰성·객관성을 담보할 수 있다.

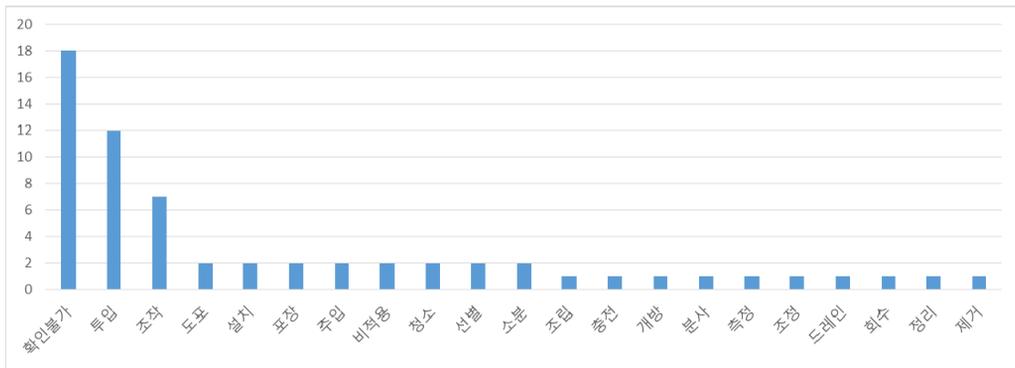


[그림 IV-10] 보호구 원인변수 확인 현황

### 나) 작업내용

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 작업자의 작업내용 확인 현황은 다음 [그림 IV-11]과 같다.

앞서 설비의 작업내용은 확인하였으나, 작업자의 작업내용은 화재·폭발 특성상 및 사고 관련 자료 부족 등으로 사고 발생 당시의 작업자의 작업내용 또는 행동거동에 대한 세부적인 확인이 불가능한 경우가 일부 있었다. 따라서 인체 대전에 의한 정전기 방전으로 인한 화재·폭발 가능성을 제기하기 위해서는 작업자의 행동 거동은 필수적으로 확인할 필요가 있다.

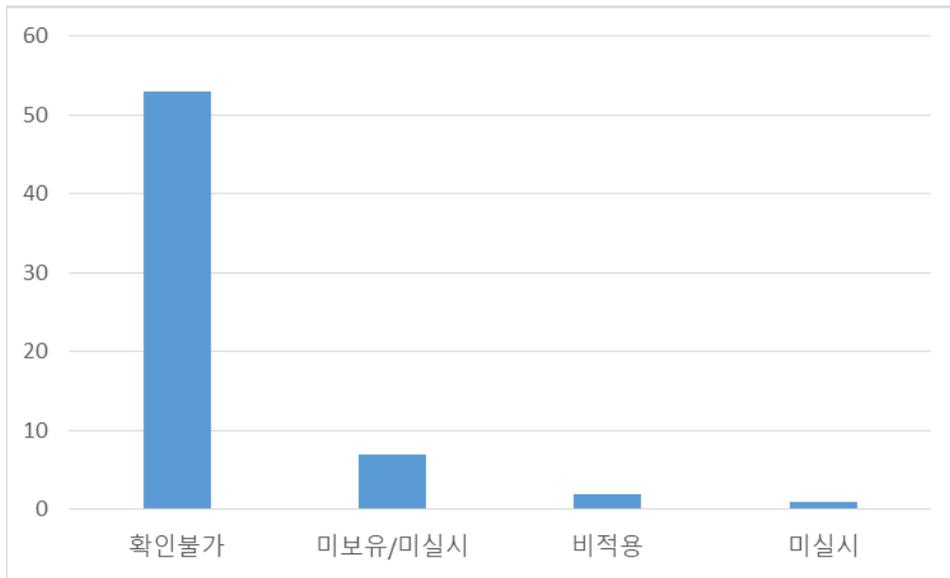


[그림 IV-11] 작업내용 원인변수 확인 현황

## 다) 매뉴얼 및 교육

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의전서에서 재해/사고 작업자 대상 매뉴얼 보유 및 교육 실시 여부 확인 현황은 다음 [그림 IV-12]와 같다.

현재의 정전기 재해예방 기술 수준은 이미 과거에 제정되어 활용되고 있는 내용으로, 현재 또는 미래의 신물질·신공법에 대한 위험성 확인 및 안전기술 마련도 필요한 상황이다. 따라서 정전기 재해예방을 위한 안전기술에 대한 향상을 위해서는 정전기 화재·폭발 공정 및 작업 등에서 안전작업 매뉴얼 그리고 작업자에 대한 정전기 관련 안전교육에 대한 개선 필요성도 있다.



[그림 IV-12] 매뉴얼 및 교육 원인변수 확인 현황

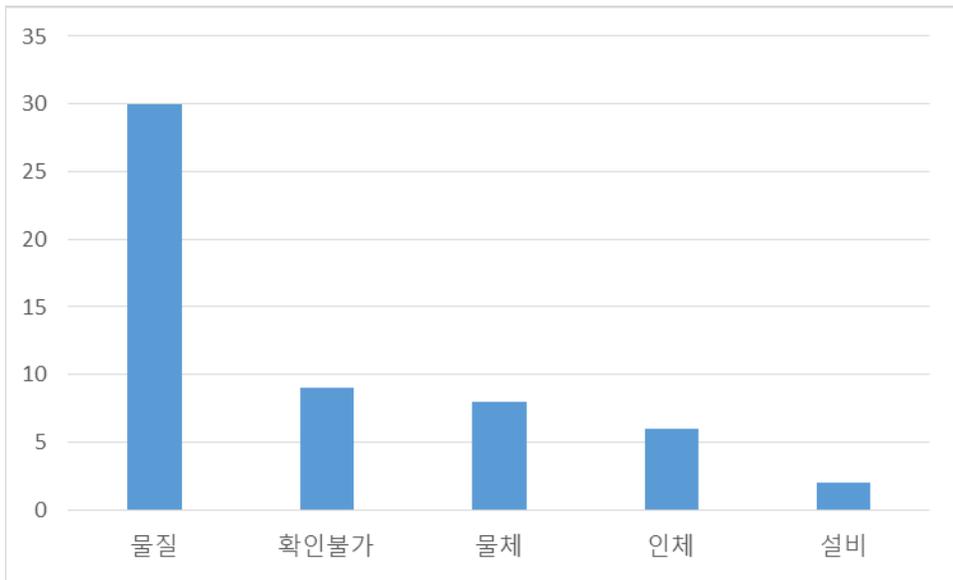
### 3) 매커니즘(Mechanism)

#### (1) 대전

##### 가) 대전대상

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 대전대상 확인 현황은 다음 [그림 IV-13]과 같다.

원인물질의 최소점화에너지 값과의 비교를 위해 정전기 방전에너지 값의 결정이 중요한데, 정전기 방전에너지 값에 영향을 미치는 요인이 정전기 대전이고 정전기 대전대상에 따라서 정전기 방전에너지 값도 달라질 수 있다. 예를 들어 부도체에 정전기 대전되는 경우 방전 시 정전기 완화에 필요한 시간이 길어지므로 방전에너지 값이 작아지는 경향도 보일 수 있다.

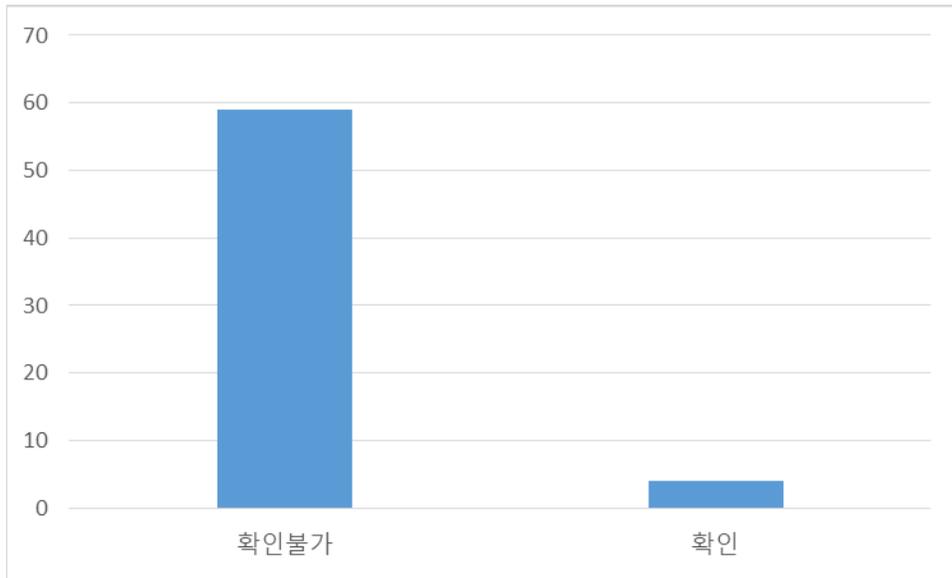


[그림 IV-13] 대전대상 원인변수 확인 현황

## 나) 대전서열

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의전서에서 재해/사고 관련 물질과 설비의 대전서열 확인 현황은 다음 [그림 IV-14]와 같다.

또한 대전서열도 정전기 방전에너지 값에 영향을 미칠 수 있는 영향인자로 대전서열에서 상호 위치가 멀면 멀수록 방전에너지 값은 높아질 수 있다. 따라서 정확한 대전서열 파악을 위해서는 마찰·접촉 등 상호관계가 발생하는 물질을 확인할 수 있어야 하는데 정전기 현상의 재현성 부족 및 기술적 한계로 대부분이 추정의 방식이 적용되고 있다.

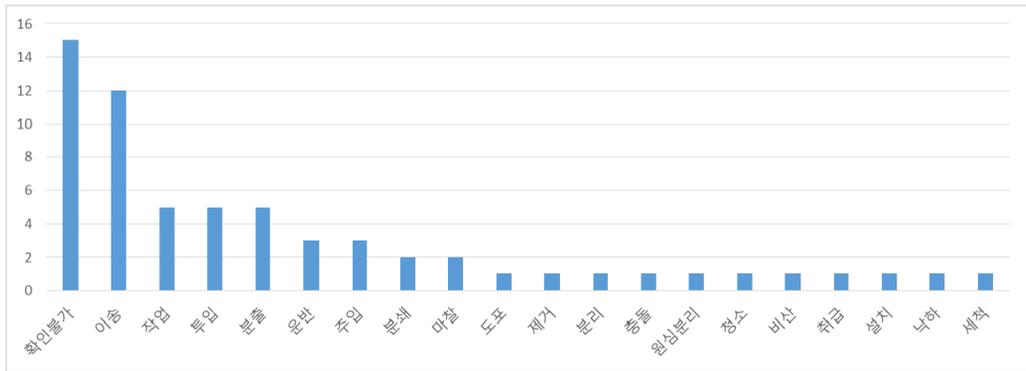


[그림 IV-14] 대전서열 원인변수 확인 현황

#### 다) 대전조건

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 관련 물질과 설비의 대전조건 확인 현황은 다음 [그림 IV-15]와 같다.

정전기 방전현상 규명에 앞서 필요한 내용인 대전 종류 등 현상을 규명하기 위해서는 대전조건이 파악이 선행되어야 하지만, 실제 조사의견서에서는 기술적 한계 및 정전기 현상의 재현성 부족으로 명확한 대전조건 파악이 불가능한 것으로 확인된다. 그리고 파악된 대전조건에서는 이송, 인력작업, 투입 등의 작업에서 대전이 발생하고 있는 것으로 확인된다.

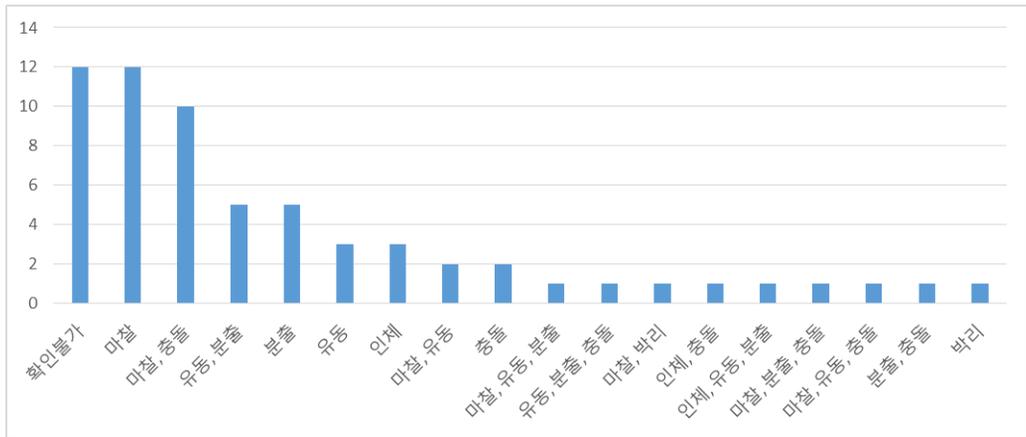


[그림 IV-15] 대전조건 원인변수 확인 현황

라) 대전종류

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 관련 물질과 설비의 대전종류 확인 현황은 다음 [그림 IV-16]과 같다.

원인물질과 제조설비의 대전종류는 어느 수준 이상으로 확인이 이루어지고 있지만, 다수가 복합적으로 판단하고 있다. 여러 가지 가능성을 두고 판단하다 보니 정전기 대전종류도 복합적으로 판단하고 있어 재해예방대책 수립 등 재해예방영역의 명확한 설정을 위해서는 심층적인 분석이 필요한 부분이다.



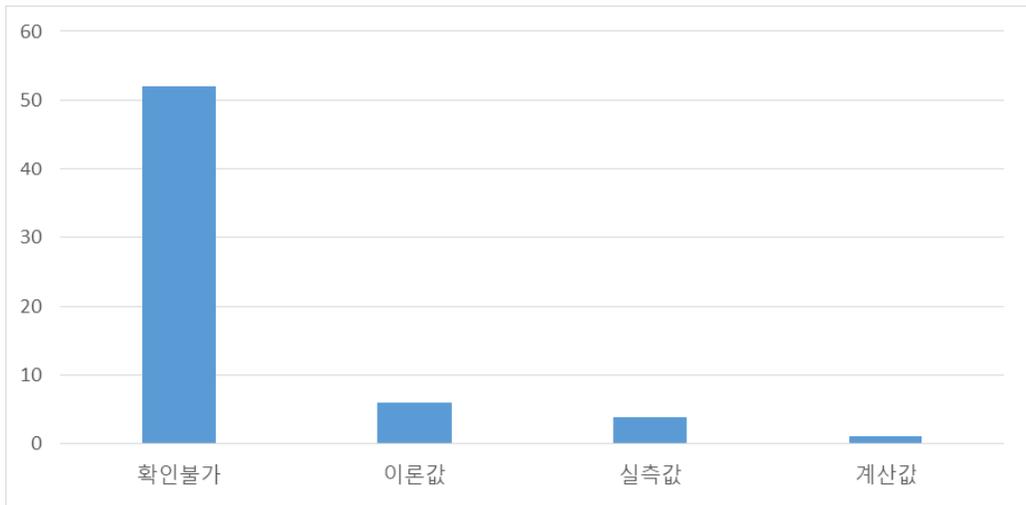
[그림 IV-16] 대전종류 원인변수 확인 현황

마) 대전전위

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의전서에서 재해/사고 관련 물질과 설비의 대전전위 확인 현황은 다음 [그림 IV-17]과 같다.

대전전위 측정은 정전기 화재·폭발 원인조사 시 가장 범용적으로 활용할 수 있는 방법이다. 그러나 대부분 원인조사 시 실제 대전전위를 측정하기 보다는 기술적 한계 또는 정전기 현상의 재현성 부족에 따른 측정불가로 이론값 또는 계산값을 활용하였거나 일부는 확인이 불가능한 것으로 확인되었다.

다만 대전전위 측정기 사용 시 측정과정에서 대전물체에서 역으로 측정기로 방전현상이 발생할 수 있기 때문에 주의가 필요한 사항으로, 조사자의 역량강화가 필요한 부분이기도 하다.



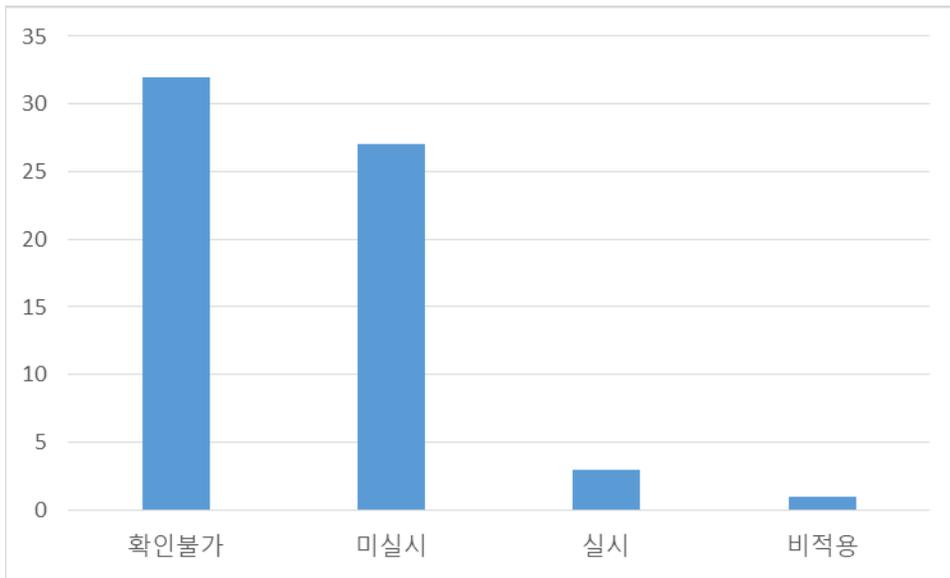
[그림 IV-17] 대전전위 원인변수 확인 현황

## (2) 축적

### 가) 접지

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 관련 설비의 접지 실시 여부 확인 현황은 다음 [그림 IV-18]과 같다.

원인물질 또는 제조설비 등에 정전기 대전 시 물질 또는 설비의 물리적 특성이 도전성인 경우 접지를 통해 사전에 충분히 정전기를 안전한 수준으로 관리할 수 있다. 또한, 화재·폭발위험장소에서의 점화원을 정전기로 판단하기 위해서는 물질 또는 설비의 물성이 도전성이라고 한다면, 접지실시 여부는 아주 중요한 판단 근거가 될 수 있기 때문에, 재해/사고 조사시 필수적으로 확인이 필요하지만, 화재·폭발 특성 및 기술·방법적 한계로 확인이 불가능한 경우도 있었다.

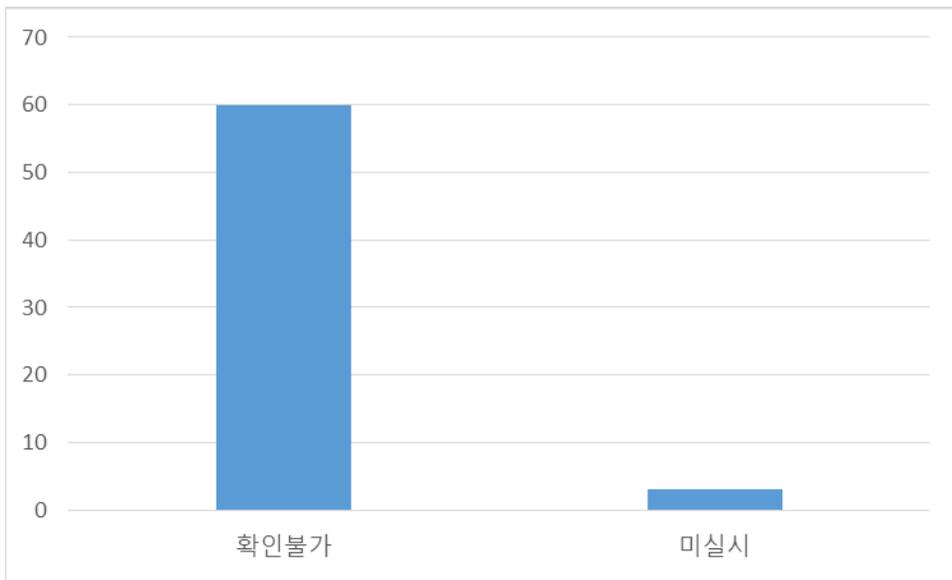


[그림 IV-18] 접지 원인변수 확인 현황

### 나) 차폐

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의전서에서 재해/사고 관련 물질 및 설비의 차폐 실시 여부 확인 현황은 다음 [그림 IV-19]와 같다.

원인물질 또는 제조설비 등에 정전기 대전 시 물질 또는 설비의 물리적 특성에 따라서 차폐를 통해 사전에 충분히 정전기를 안전한 수준으로 관리할 수 있다. 따라서 재해/사고 원인조사 시 정전기를 화재·폭발의 점화원으로 간주하기 위해서는 차폐장치의 설치 여부 확인을 통해 보다 높은 원인조사 결과의 신뢰성·객관성을 확보할 수 있다.

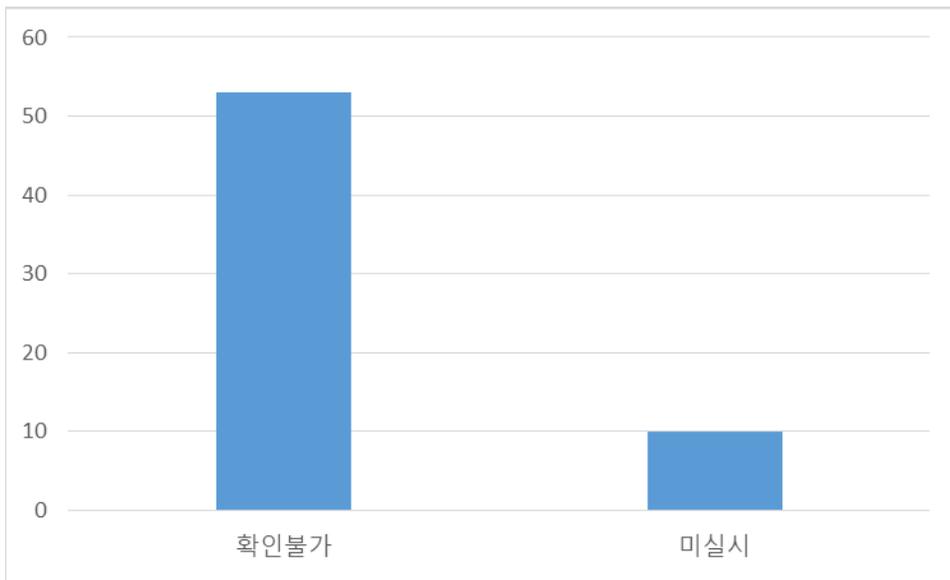


[그림 IV-19] 차폐 원인변수 확인 현황

## 다) 제전

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의전서에서 재해/사고 관련 설비의 제전 실시 여부 확인 현황은 다음 [그림 IV-20]과 같다.

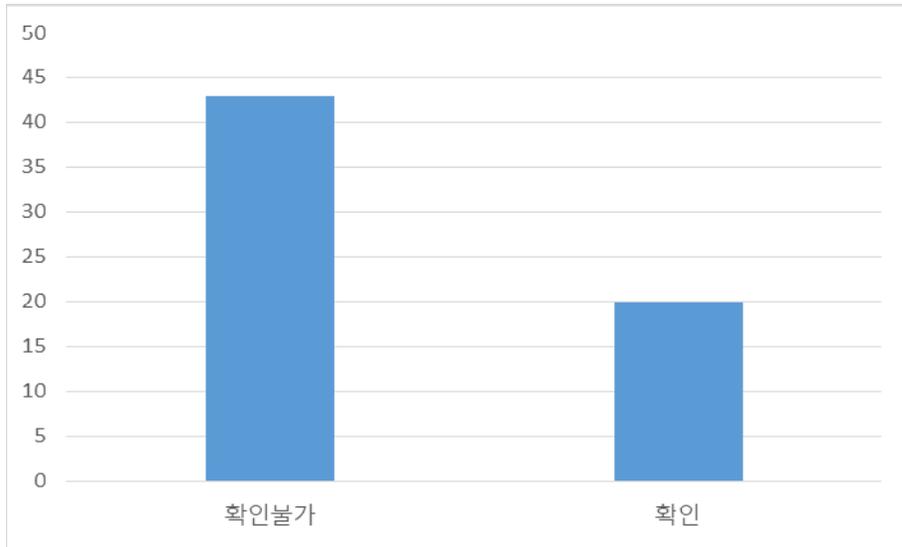
원인물질 및 제조설비에 정전기가 대전되더라도 제전장치 설치여부에 따라서 제전성능이 양호하다면 정전기 방전으로 이어지지 않는 경우도 있다. 따라서 재해/사고 원인조사 시 정전기를 화재·폭발의 점화원으로 간주하기 위해서는 제전장치의 설치 여부 확인을 통해 보다 높은 조사결과의 신뢰성·객관성을 확보할 수 있다.



[그림 IV-20] 제전 원인변수 확인 현황

라) 온·습도

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 관련 물질 취급 및 설비 운전 관련 온·습도 확인 현황은 다음 [그림 IV-21]과 같다.



[그림 IV-21] 온·습도 원인변수 확인 현황

화재·폭발 중대재해·중대산업사고에서 점화원을 정전기로 판단하는 경우 단순히 온·습도가 높고 낮음을 기준으로 판단하고 있다. 이는 통상적으로 합리적인 방법이 될 수 있으나, 대전물질, 공정·작업 및 설비 등에 따라서 적합하지 않을 수도 있다.

문헌 및 자료를 근거로 습도가 높아서 정전기로 인한 화재·폭발 가능성을 완전히 배제하는 것은 적합하지 않으므로, 다른 주요 및 관계 원인변수를 확인하여 정전기의 점화원 대상 여부를 결정해야 한다.

예를 들어 다음 [그림 IV-22]와 같이 NFPA 77(Recommended Practice on Static Electricity)에 따르면 고분자 화합물질의 경우 대기 습도가 100%인 경우에도 해당물질 표면에 정전기가 소멸되지 않고 축적될 수 있다.

## 7.4.2 Humidification.

**7.4.2.1** The surface resistivity of many materials can be controlled by the humidity of the surroundings. At humidities of 65 percent and higher, the surface of most materials adsorbs enough moisture to ensure a surface conductivity that is sufficient to prevent accumulation of static electricity. When the humidity falls below about 30 percent, these same materials could become good insulators, in which case accumulation of charge occurs.

**7.4.2.2** While humidification does increase the surface conductivity of the material, the charge will dissipate only if there is a conductive path to ground.

**7.4.2.3** Humidification is not a cure-all for static electricity problems. Some insulators do not adsorb moisture from the air; therefore, high humidity will not noticeably decrease their surface resistivity. Examples of such insulators are uncontaminated surfaces of some polymeric materials, such as plastic piping, containers, and films, and the surface of petroleum liquids. These surfaces are capable of accumulating a static electric charge even when the atmosphere has a humidity of 100 percent.

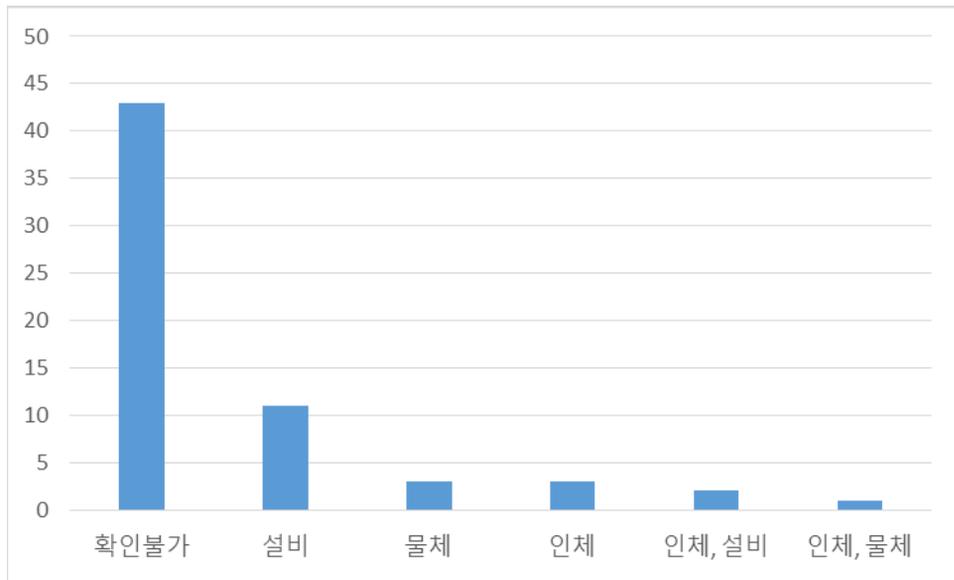
[그림 IV-22] 습도와 정전기 축적의 상관관계

### (3) 방전

#### 가) 대상

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 관련 물질 또는 설비의 방전 대상 확인 현황은 다음 [그림 IV-23]과 같다.

원인물질 또는 제조설비에 대전된 정전기의 방전대상이 정전기 방전에너지 값에 영향을 미치게 되는데 예를 들어 대전 정전기가 도체를 통해 방전되는 경우 방전에너지 값은 커지게 된다. 그러나 조사의견서 확인 결과 방전대상에 대한 확인이 기술적 한계로 실제로는 이행되기 어려운 것으로 확인되었다.

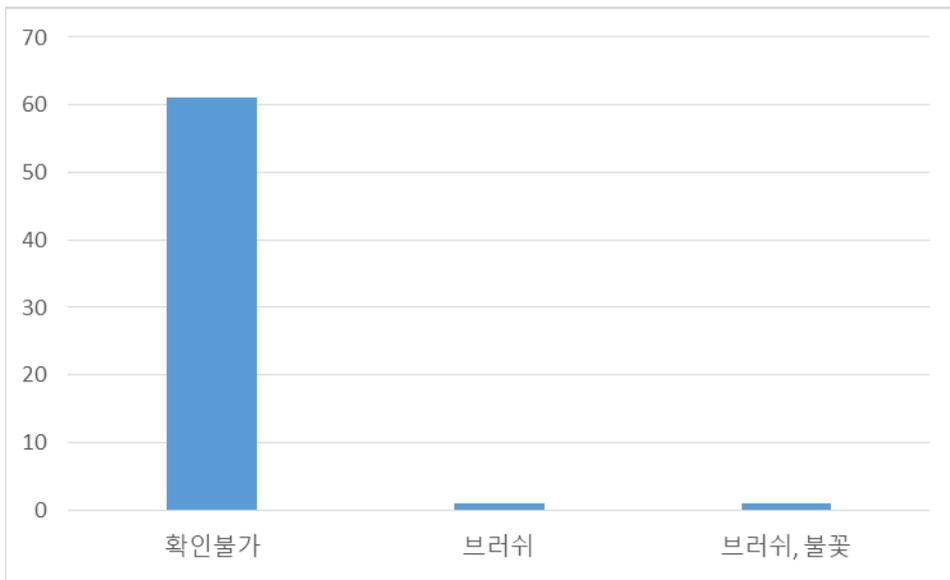


[그림 IV-23] 방전대상 원인변수 확인 현황

## 나) 종류

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 관련 물질 또는 설비의 방전종류 확인 현황은 다음 [그림 IV-24]와 같다.

정전기 대전 물질 또는 설비의 방전종류는 원인물질의 최소점화에너지와의 비교를 위해 필요한 정전기 방전에너지 값 결정에 영향을 미치는 영향요인이다. 그러나 재해조사의견서에서는 극히 일부 사례만 확인되었으며 기술적 한계로 인해 실증실험을 통한 확인이 아닌 문헌내용 또는 기술자료를 주로 활용하고 있는 것으로 확인되었다.

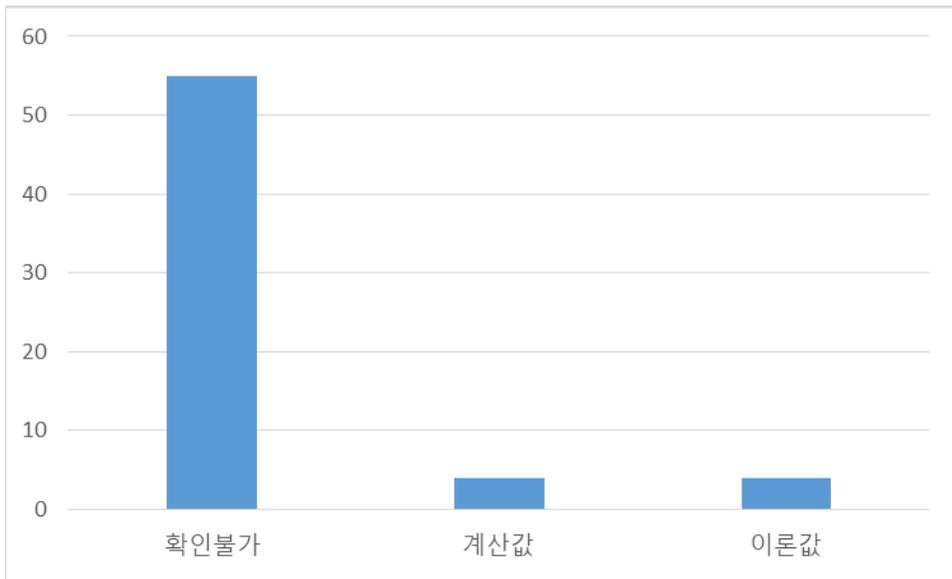


[그림 IV-24] 방전종류 원인변수 확인 현황

#### 다) 정전용량

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 관련 물질 또는 설비의 정전용량 확인 현황은 다음 [그림 IV-25]와 같다.

정전기 정전용량의 경우 정전기 방전에너지 값 결정에 필요한 변수이나 정전용량을 측정할 수 있는 기술 및 방법·절차 등이 부재하여 대부분이 문헌상의 자료를 인용하여 판단하고 있다. 또한 기술적 한계로 대부분의 조사의견서에서도 확인이 불가하여 이론값이나 계산값을 활용하여 역으로 추정하고 있는 상황이다.

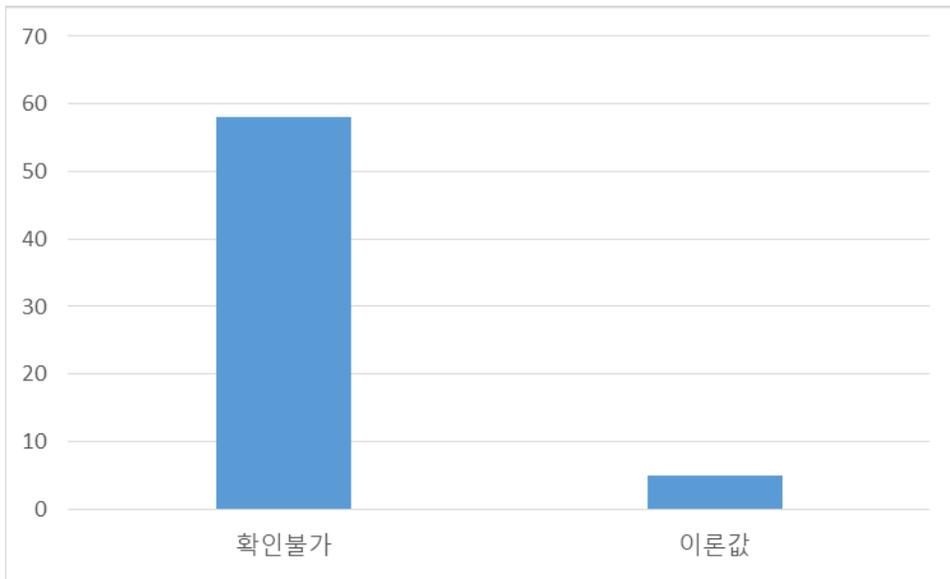


[그림 IV-25] 정전용량 원인변수 확인 현황

## 라) 전하량

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 관련 물질 또는 설비의 전하량 확인 현황은 다음 [그림 IV-26]과 같다.

정전기 전하량의 경우 정전기 방전에너지 값 결정에 필요한 변수이나 전하량을 측정할 수 있는 기술 및 방법·절차 등이 부재하여 대부분이 문헌상의 자료를 인용하여 판단하고 있다. 또한 기술적 한계로 대부분의 조사의견서에서도 확인이 불가하여 이론값이나 계산값을 활용하여 역으로 추정하고 있는 상황이다.

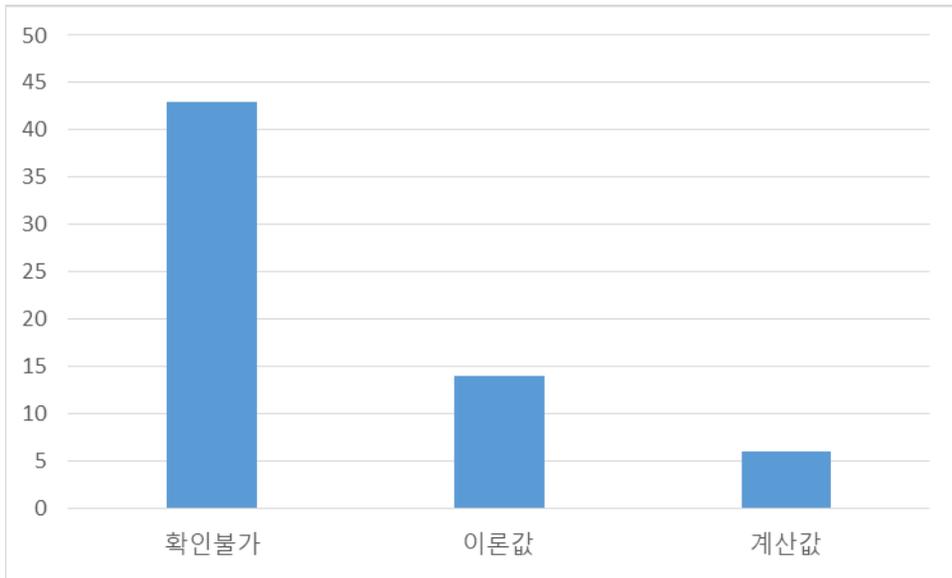


[그림 IV-26] 전하량 원인변수 확인 현황

마) 방전에너지

최근 10년간 63건의 중대재해 또는 중대산업사고 조사의견서에서 재해/사고 관련 물질 또는 설비의 방전에너지 확인 현황은 다음 [그림 IV-27]과 같다.

정전기 방전에너지는 화재·폭발에서 정전기를 점화원으로 판단 시 원인물질의 최소점화에너지와의 비교를 위해서 필수적으로 확인이 필요한 주요변수이나 방전에너지를 측정할 수 있는 기술 및 방법·절차 등이 부재하여 대부분이 문헌상의 자료를 인용하여 판단하고 있다. 또한 기술적 한계로 대부분의 조사의견서에서도 확인이 불가하여 이론값이나 계산값을 활용하여 역으로 추정하고 있는 상황이다.



[그림 IV-27] 방전에너지 원인변수 확인 현황

## V. 화재·폭발 위험장소의 정전기 안전관리 방안



## V. 화재·폭발 위험장소의 정전기 안전관리 방안

### 1. 화재·폭발 위험장소에서의 정전기 위험 관리

#### 1) 화재·폭발 발생 조건

폭발 개념에는 연소반응이 수반되지 않는 수증기 폭발, 외부에서 산소공급이 필요 없는 자기 반응성 물질의 분해 반응에 의한 폭발도 포함된다. 그러나 정전기 장·재해 관점에서의 대부분 화재·폭발은 가연성 혼합 기체가 점화되어 시작하는 연소반응에 의한 화재·폭발이라고 볼 수 있다.

따라서 연소범위 내에 있는 가연성 물질과 지연성 기체의 혼합 분위기와 그 가연성 분위기가 점화되기에 충분한 에너지를 가지는 정전기 방전, 즉 두 가지 요소가 존재할 때 화재·폭발 발생조건이 발생한다.

Ⅱ. 정전기 관련 중대재해 및 중대산업사고 현황, Ⅲ. 정전기 화재·폭발 발생원인 내용을 통해 정전기 관련 화재·폭발은 가연성 분위기의 통제가 어려운 공정에서 점화원의 통제가 불충분한 작업 시 발생하고 있는 것으로 분석되었다. 따라서 가연성 분위기 생성을 방지하고 점화능력이 있는 정전기 방전을 방지하는 것이 정전기 화재·폭발 예방을 위한 기본적인 대책이다.

#### 2) 가연성 분위기의 생성 방지

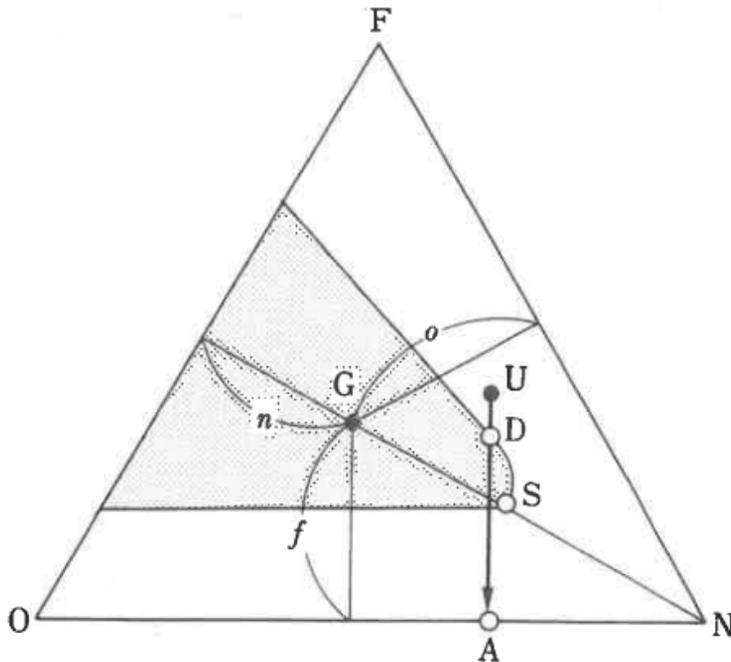
##### (1) 일반사항

가연성 분진, 미스트, 가스 등의 가연성 물질과 공기, 산소 등의 지연성 기체와의 혼합물이 폭발 또는 연소되기 위해서는 가연성 물질의 농도가 연소범위에 포함되지 않도록 가연성 물질의 농도를 유지·관리할 수 있으면 화재·폭발을

예방할 수 있다. 그러나 연소범위 내에서도 가연성 물질의 농도가 연소의 최적 범위에서 벗어나면 최소점화에너지는 급격히 증가하고, 화재·폭발 발생 가능성은 급격히 낮아진다. 따라서 가연성 물질의 농도 제어는 화재·폭발 예방대책으로 가장 유효하다.

(2) 삼각선도법

가연성 물질이 체류하는 밀폐공간에서 가연성 분위기 생성 방지를 위해 불활성 가스를 첨가하는 방법이 있다. 이때 불활성 가스가 첨가된 혼합기체의 연소범위는 편의적으로 가연성 기체, 지연성 기체 및 불활성 기체 즉, 3성분계로 구분하여 다음 [그림 V-1]과 같이 삼각선도로 나타낼 수 있다.



[그림 V-1] 3성분계의 연소범위를 나타내는 삼각선도

[그림 V-1]에서는 정삼각형 F-N-O 주변 및 내부 각 점을 각 변으로 내린 수직선의 길이를 조성 비율로 하는 혼합물 기체에 대응시키고, 정삼각형의 내부영역은 혼합물 기체의 연소한계를 나타내고 있다.

3성분계 연소범위를 나타내는 삼각선도법의 예를 다음과 같이 설명한다.

첫 번째는 그림 안의 점 G는 가연성 기체, 지연성 기체 및 불활성 기체의 비율을  $f:o:n$ 로 하는 혼합물 기체를 나타내고 있으며, 그림자 영역은 연소범위를 나타내고 있다. 이때, 산소와 질소의 비율이 1:4인 공기는 그림에서는 A로 표시되고, 당초 점 G로 표시되는 혼합물 기체에 질소를 첨가한 농도는 선분 G-N상에서 N점을 향하여 이동하고, 점 S에서 연소범위를 벗어나게 된다. 이는 연소범위 밖에 있는 가연성 혼합물 기체의 관리·통제 시 주의해야하는 부분으로 공기 중에서 누설 또는 방출 후에도 혼합물 기체의 농도가 연소범위 밖에 존재하도록 관리할 필요가 있다.

두 번째는 그림 안의 U점에 위치하는 혼합물 기체의 농도가 연소범위 밖에 있지만 공기 중에서 방출되어 공기와 혼합되는 경우 선분 U-A상에서 A점을 향하여 이동하고 D점에서는 연소범위에 들어가게 된다. 즉, 방출되기 전에는 연소범위 밖에 있던 혼합물 기체의 농도가 공기 중에서 혼합과정을 통해 점화 위험성이 있는 혼합물 기체의 상태가 된다.

### (3) 포화 증기압

인화성 액체 표면에서의 포화 증기압은 액체의 온도에 의존하는데 액면에서의 포화 증기압이 연소범위에 들어가는 하한의 온도를 하한 인화점, 상한의 온도를 상한 인화점이라고 한다. 통상적으로 연소범위에 들어가는 하한의 온도를 인화점이라고 약칭한다. 여기서 인화성 액체의 사용·취급온도를 하부 인화점 미만으로 유지할 수 있으면 점화를 방지할 수 있다. 또한 상부 인화점 이상의 액체 온도를 유지하는 경우에도 인화성 액체의 증기 농도가 높아서 연소범위를 벗어나서 점화가 되지 않지만, 외기의 유입 또는 증기 누출 등의 결과로 가연성

분위기가 형성될 수 있기 때문에 안전하다고 볼 수 없다.

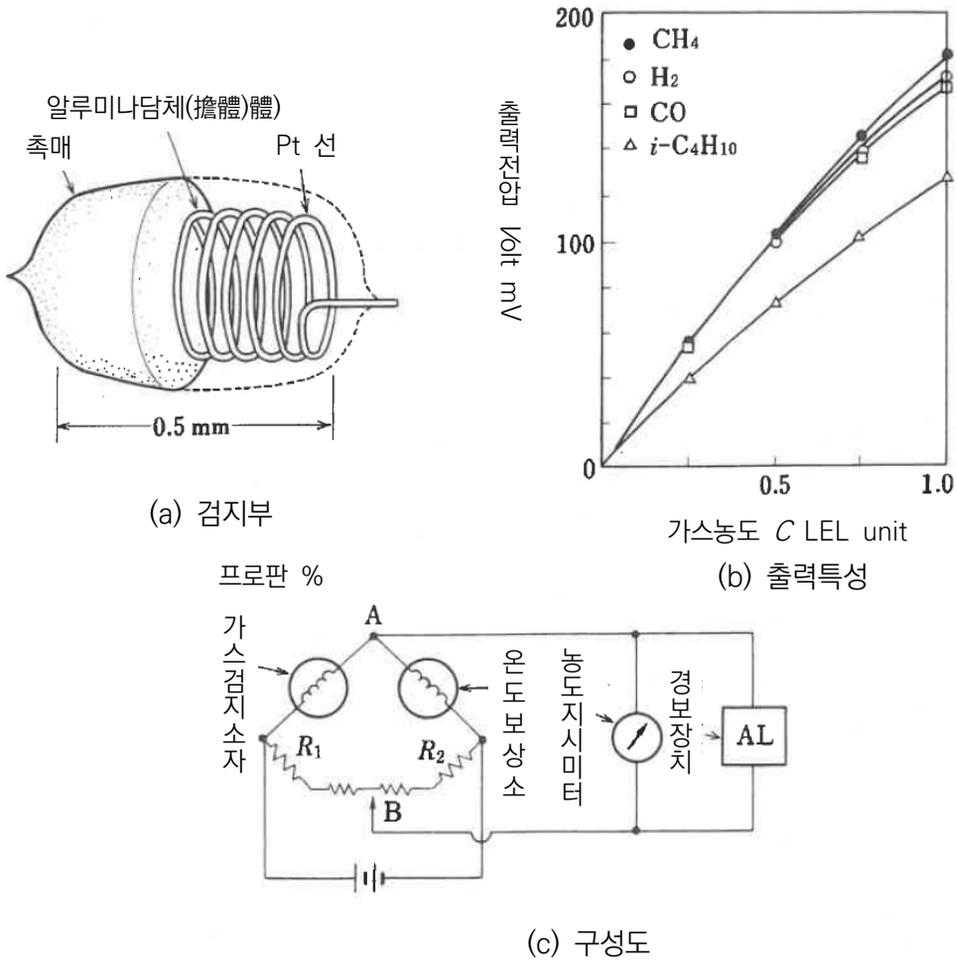
실온에서 보다 인화점이 낮은 인화성 액체가 충분히 환기되는 개방공간에서 취급·사용되는 경우 해당 영역에서는 인화성 증기의 농도가 연소범위에 도달하지는 않는다. 그러나 환기효과를 고려하는 경우에는 극히 일부 예외를 제외하고는 인화성 액체의 증기가 공기의 상대밀도보다 높을 수 있다는 점을 간과해서는 안 된다.

#### (4) 가스 농도측정기

가연성 기체 및 인화성 액체의 취급·사용 시 가연성 분위기의 생성 방지를 위한 효과적 수단으로 가연성 혼합물의 농도를 측정하는 방법이 있다. 여기서 가연성 혼합물의 농도를 측정하는 센서(Sensor)로는 반도체식, 기체 열전도식, 전기화학식 센서(Sensor) 등이 보편적이지만, 다음 [그림 V-2]와 같이 가스검지 소자로 백금 촉매를 사용하여 표면에서의 산화반응 발열량으로부터 가연성 혼합물의 농도를 검출하는 방법이 있다. 이 방법은 접촉 연소식 센서(Sensor)가 가연성 혼합물의 농도도 측정할 수 있는 이점을 가지고 있으며, 탄화수소계의 농도 관리에도 적합하다. 그러나 접촉 연소식 센서(Sensor)는 이황화탄소 등의 일부 기체 측정에는 적합하지 않을 수 있다.

#### (5) 미스트 및 분체

미스트 및 분체도 인화성 액체 또는 가연성 기체와 같이 연소범위가 존재한다. 그러나 기체와는 달리 입자의 미세함, 형상, 입경 및 분포 등의 영향을 많이 받기 때문에 일반적으로는 가연성 분진의 최소점화에너지가 가연성 기체보다는 1~2자리 이상 크다고 생각하지만, 분체의 공기 수송 등의 경우에는 대량의 정전기가 발생할 수 있기 때문에 가연성 분진이 흩날리지 않도록 취급·관리하는 것이 바람직하다. 특히, 분체를 교반용기에 투입하는 등 취급 시 인화성 액체 또는 가연성 기체와 혼재하여 취급하는 경우 위험성이 더 클 수 있다.

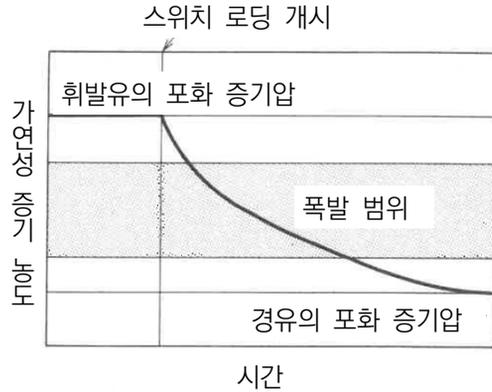


[그림 V-2] 접촉연소식 가연성 가스 농도측정기

(6) 스위치 로딩

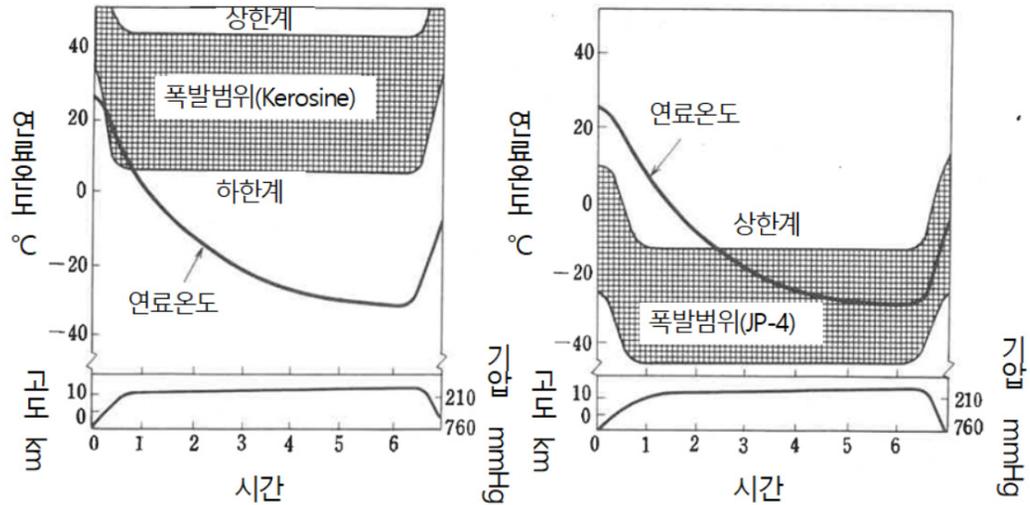
스위치 로딩>Loading)이란 휘발성이 높은(인화점이 낮은) 인화성 액체를 먼저 충전한 용기에 연속하여 휘발성이 낮은(인화점이 높은) 인화성 액체를 충전하는 작업방식을 말한다. 전형적인 예로는 휘발유를 이송한 탱크로리에 등유와 경유를 로딩하는 경우이다.

스위치 로딩작업의 위험성을 다음 [그림 V-3]과 같이 도식적으로 나타내었다. 최초 로딩 시 탱크 내부의 농도가 폭발범위를 초과하는 경우라도 고 휘발성의 포화 증기가 스위치로 로딩되는 저 휘발성의 포화 증기로 흡수되기 때문에 탱크 내부 가연성 증기의 농도가 낮아지게 되어 스위치 로딩작업 중에는 탱크 내부의 농도가 폭발범위로 형성될 가능성이 크다. 따라서 스위칭 로딩작업을 위한 조작 전에는 탱크 내부 공간의 고 휘발성 포화증기에 대한 흡입·제거 등의 안전대책을 강구하는 것이 필요하다.



[그림 V-3] 스위치 로딩 시 용기 내 가스 농도 변화

또한, 인화성 물질의 취급·사용 환경조건에 따라 화재·폭발 위험분위기가 생성될 수 있다. 다음 [그림 V-4]는 항공기 비행 중 환경변화에 따른 연료(등유, 항공유) 탱크 내부의 폭발범위를 나타내고 있다. 즉, 항공기가 이륙하여 주변 기압이 낮아지면 인화성 액체 증기의 상대농도가 증가하기 때문에 비행 고도가 높아질수록 등유의 폭발범위를 형성하는 인화점이 낮아지고 있음을 알 수 있다. 다만, 비행 고도 상승에 따라 주변온도가 낮아질수록 일정시간 경과 후에는 등유의 온도가 폭발 범위에서 벗어나지만, 통상적으로는 탱크 내부 등유의 상대농도가 폭발범위에 포함되지는 않더라도 일시적으로는 폭발범위에 들어갈 수 있음을 알 수 있다.



[그림 V-4] 항공기 연료탱크 내부 환경변화와 폭발범위

### 3) 점화성 방전의 발생 방지

#### (1) 일반사항

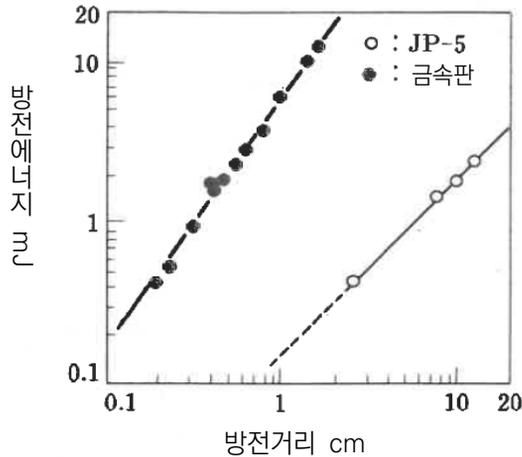
폭발범위에 있는 가연성 혼합 가스에서 최소점화에너지를 초과하는 방전이 발생하더라도 반드시 점화로 이어지지 않는다. 이는 방전에너지의 공간적·시간적 분포 등의 요인이 방전조건에 추가적으로 요구되기 때문이다.

방전 에너지의 총량이 동일하더라도 에너지가 서서히 방전되는 경우와 비교하여 단시간에 일시에 방전되는 경우가 위험성이 높다. 또한, 공간적으로 제한된 영역에 에너지가 집중하는 경우가 그렇지 않은 경우보다 점화 위험성이 높아질 수 있다는 것을 추측할 수 있다. 여기서 정전기 대전에 의한 방전 시 대전전하 총량의 방전으로 일시에 중화되는 경우와 부분적으로 중화되는 경우를 비교할 때, 대전량이 동일하더라도 방전에너지의 총량의 차이가 발생하기 때문에 전자의 경우가 점화 위험성이 높다.

또한, 방전으로 인한 점화 위험성에 영향을 미치는 특성은 대전물체의 형상이나 배치 등의 기하학적 조건, 도전성 또는 전위 등의 전기적 물성과 관련이 있다. 즉, 이러한 연관성이 도체로부터 방전과 부도체로부터 방전, 스파크 방전과 코로나 방전 사이에서의 점화 위험성이 차이가 발생한다.

## (2) 방전거리

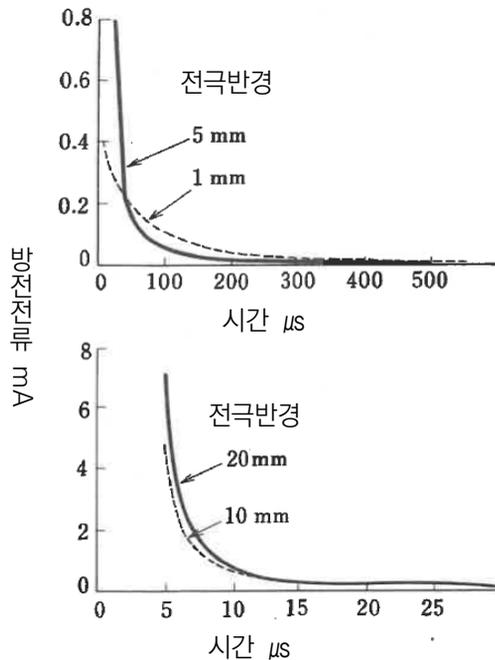
다음 [그림 V-5]는 도체로부터 방전과 부도체로부터 방전의 상위(相違)를 나타낸다. 이 그림은 대전물질(JP-5)의 액면과 금속판으로부터 각각 구 전극(직경 약 25mm)에 방전시킨 경우의 방전 갭(Gap)과 방전에너지의 관계를 조사한 것으로, 동일한 방전 갭(Gap)에서는 금속판으로부터 방전이 절연물질(JP-5)로부터 방전보다 30배 이상 방전에너지가 크다는 것을 알 수 있다.



[그림 V-5] 도체와 부도체에서의 방전에너지와 방전거리

### (3) 전극크기

다음 [그림 V-6]은 대전된 폴리에틸렌 표면을 향해 접지된 반구형의 금속 전극을 천천히 접근시켰을 때의 방전전류를 나타내고 있다. 전극반경이 1mm에서 10mm까지 증가시켰을 때 방전전류가 급격히 감소되어 전극반경이 1mm에서는 코로나(Corona) 방전 형태의 완만한 방전전류가, 10mm이상에서는 1회의 스파크(Spark) 방전전류가 흐르는 것을 나타내고 있다.

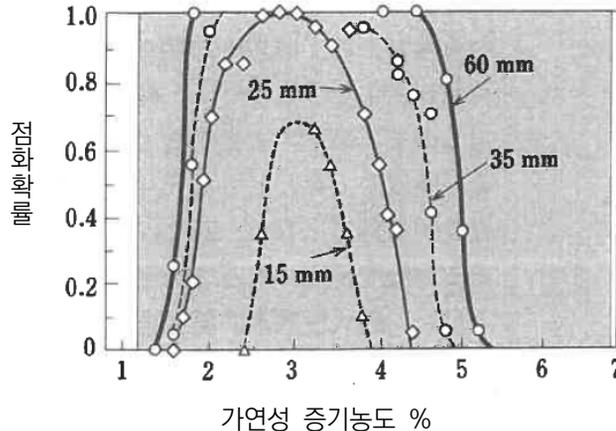


[그림 V-6] 전극의 크기에 따른 방전전류

### (4) 폭발범위

다음 [그림 V-7]은 대전된 플라스틱의 표면에 금속구를 접근시키고 다양한 농도의 헥산 혼합기체에서 방전시켰을 때 점화 확률을 나타내고 있다. 그림에서 세로축은 점화 확률을, 가로축은 헥산 증기의 농도를 나타내고 있다. 그리고 그림에서의 숫자는 금속전극의 직경을, 그림자 영역은 헥산 혼합기체의 폭발

범위를 나타내고 있다. 또한 금속전극의 직경이 증가할수록 점화 확률이 높아짐을 그리고 점화가 발생할 수 있는 폭발범위도 확대됨을 알 수 있다.



[그림 V-7] 절연물체의 점화확률

#### (5) 방전 방지대책

점화 위험성이 높은 방전을 방지하기 위한 대책은 다음과 같다.

첫째, 대전된 도체로부터 방전을 회피하기 위해 도체를 접지한다. 특히, 도체의 정전유도에 의한 전위상승을 방지하기 위하여 접지 및 본딩이 효과적이다.

둘째, 곡률반경이 큰 도체가 고전위로 대전된 물체에 접근하는 경우의 스파크 방전을 방지하기 위하여 대전량이 많지 않을 경우 표족한 도체에서의 코로나 방전이 안전하다. 다만, 대전량이 많은 경우에는 코로나 방전도 위험하다.

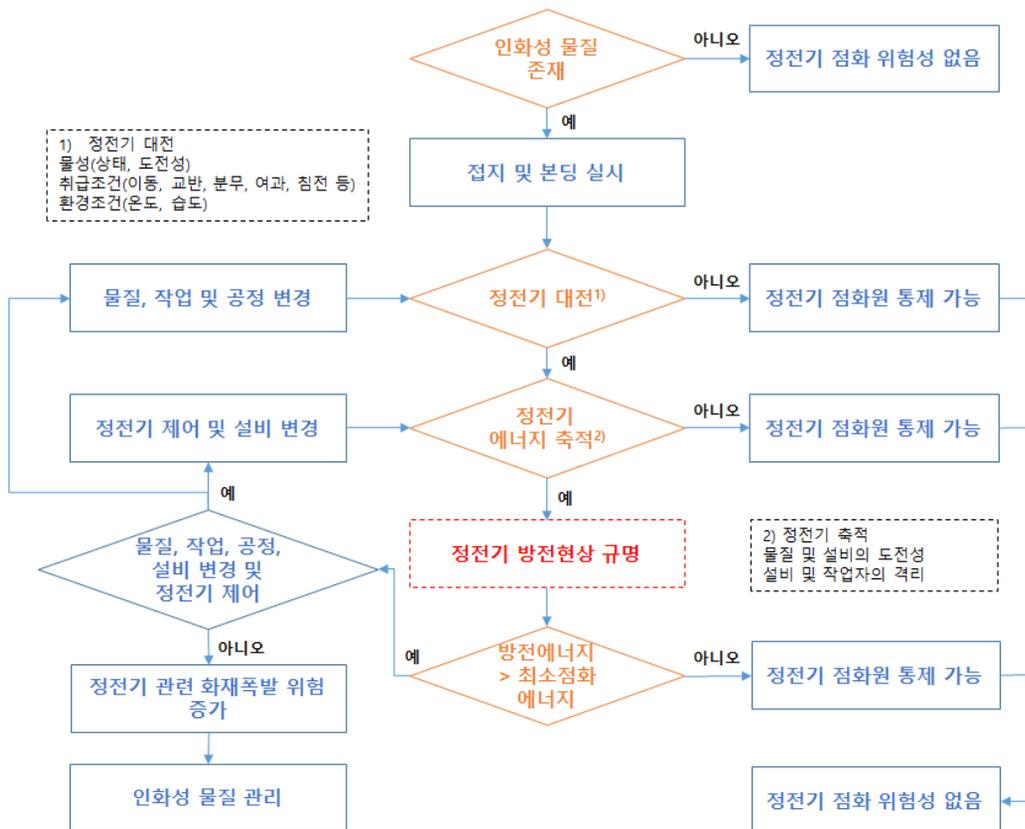
셋째, 방전에 의한 점화 위험성을 감소하기 위해서는 정전기 발생, 축적 그리고 고전위 발생을 억제하는 것이 효과적이다.

## 2. 화재·폭발 위험장소에서의 정전기 위험성평가

### 1) 원칙 및 절차

화재·폭발 위험장소에서의 정전기 위험성평가는 다음과 같이 2단계로 수행하며, 기본절차는 다음 [그림 V-8]과 같다.

- (1) 전하의 분리와 축적이 발생하는 장소 확인
- (2) 해당 장소에서의 점화 위험성평가



[그림 V-8] 정전기 위험성평가 기본절차

## 2) 내용

화재·폭발 위험장소에서 위험성평가를 위한 유해·위험요인 확인·조사에서 접지 및 본딩(Bonding)의 기능을 저해할 수 있는 물질·설비나, 작업자를 포함한 접지되지 않은 도전성 물체를 확인한다.

또한 위험성평가 시점에서 전하가 축적되었다는 증거가 없더라도 정전기가 축적될 수 있어 위험을 발생시킬 수 있는 수 있는 대상 여부를 확인하기 위한 다음 사항을 준수한다.

- 가) 공정에서 취급·처리되는 절연물질은 특히 유의하고, 온도와 상대습도의 변화는 절연물질의 체적·표면 도전율에 큰 영향을 미치므로 이를 감안하여 안전한 수준으로 관리한다.
- 나) 현장에서의 육안검사를 원칙으로 하여 기계·설비의 운전조건 및 공정작업 등의 설계검토를 실시한다. 또한, 실제 발생할 수 있는 정전기 위험성을 발굴·확인·조치하기 위해서 위험성평가는 공정 및 기계·설비 운전 중에 실시한다.
- 다) 효과적인 위험성평가를 위해 측정이 필요한 경우 측정장비에 의한 위험성을 고려해야 하는데, 전하의 축적 물체·장소에 측정장비를 접근시키면 대전 정전기가 측정장비로 방전될 수 있으므로, 정전기 대전물체를 측정하는 경우 측정장비의 응답속도를 모니터링 하면서 서서히 접근시킨다.
- 라) 기계·설비의 벨트나 풀리와 같은 물리적 위험성이 있는 장소 또는 해당 장소 근처에서 측정장비를 사용할 경우에는 적합한 안전작업지침에 따른다.

### 3. 주요 원인변수 통제

#### 1) 최소점화에너지

##### (1) 가스·증기의 최소점화에너지

최소점화에너지는 인화성 분위기에서 화염전파를 발생시키기 위한 해당 계에서 부여되어야만 하는 에너지의 최소량으로 정의할 수 있다. 분체와 공기 계에서의 최소점화에너지 값은 열 공급 속도와 방법, 열원의 기하학적 형상에 따라 크게 영향을 받는다.

지금까지 다양한 에너지원과 점화원을 활용하여 최소점화에너지 측정이 이루어지고 있는데, 가장 많이 사용되는 점화원은 전기 스파크이다. 측정방법으로는 용량성 방전형과 유도성 방전형이 있으나, 일반적으로 용량성 방전형이 사용된다. 이는 모든 인화성 분위기에서 용량성 스파크가 최소점화에너지를 발생시키기 가장 용이하며, 점화원 형상이나 초기 화염의 시간적 변화가 수학적 해석과 잘 일치하기 때문이다.

##### 가) 최소점화에너지 측정

최소점화에너지를 실험적 방법으로 측정하기 위해서는 콘덴서(C)에 충전한 에너지를 전극 간에 방전시켜, 스파크가 발생하기 전의 콘덴서(C) 전압(V)을 측정하고, 최소점화에너지는  $E=CV^2/2$  으로 계산하여 결정한다. 이러한 전제 조건을 만족시키기 위해서는 스파크 저항 외에는 방전회로 내부의 저항은 가능한 낮게 하고 코로나 손실을 방지하기 위해서는 전극 전단을 원형 또는 평판 전극을 사용한다. 이때 방전 트리거는 기계적 스위치를 사용하면 스위치 자체 저항으로 에너지 손실이 발생하기 때문에 에너지 손실이 낮은 진공 스위치를 사용하는 경우도 있다. 일반적으로는 콘덴서 용량, 충전전압, 전극거리 중 하나를 변화시켜

자발 방전의 방법이 사용된다. 이러한 방법을 사용하여 충전 에너지 90% 이상을  $10^{-5}$ s 이내로 전극 간에 스파크 형태의 에너지로 방출시킬 수 있다.

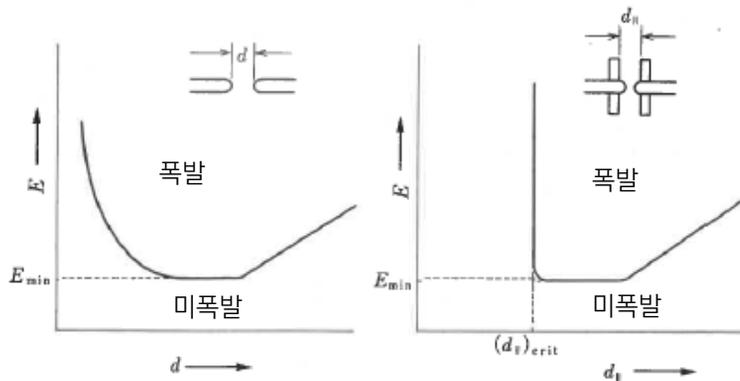
최근에는 최소점화에너지를 정확하게 계측하기 위해서 다음식과 같이 방전전극 간의 방전 중 전압과 전류의 시간 변화를 동시에 측정하는 방법이다.

$$E = \int V(t) \cdot i(t) dt$$

이는 최근 계측기의 고속·고분해 성능화로 회로에 인덕턴스 또는 저항을 접속하여 방전파형을 변화시켜서 방전저항 이외의 에너지 손실에 의존하지 않는다는 이점이 있다. 이러한 방법으로 측정된 최소점화에너지 값은 과거의  $E=CV^2/2$  방법의 측정값과 거의 일치한다.

#### 나) 최소점화에너지와 소염거리

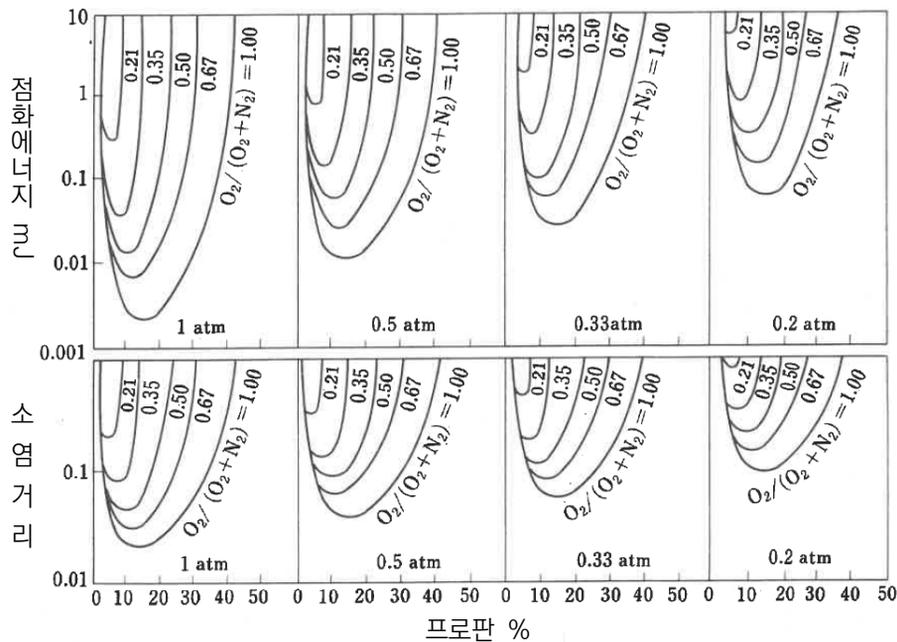
최소점화에너지는 전극형상과 전극거리에 크게 영향을 받는데 전극거리와 최소점화에너지 관계를 다음 [그림 V-9]와 같이 나타내었다. 이때 전극거리가 너무 작으면 전극의 열손실이 커져서 최소점화에너지는 급격히 증가하며, 플랜지를 포함하는 전극을 이용한 화염전파가 발생되지 않는 한계의 플랜지 틈새를 화염의 소염거리(Quenching distance)라고 한다.



[그림 V-9] 전극거리와 용량방전에 의한 점화에너지

한편 전극거리가 너무 커지면 점화 시 스파크 형상이 선상으로 되어 화염의 형상은 원통형으로 된다. 따라서 단위 스파크 길이 당 에너지 밀도가 감소되어 최소점화에너지는 직선형으로 증가한다. 따라서 최소점화에너지를 측정하기 위해서는 전극거리를 변화시키면서 최소값으로 결정한다.

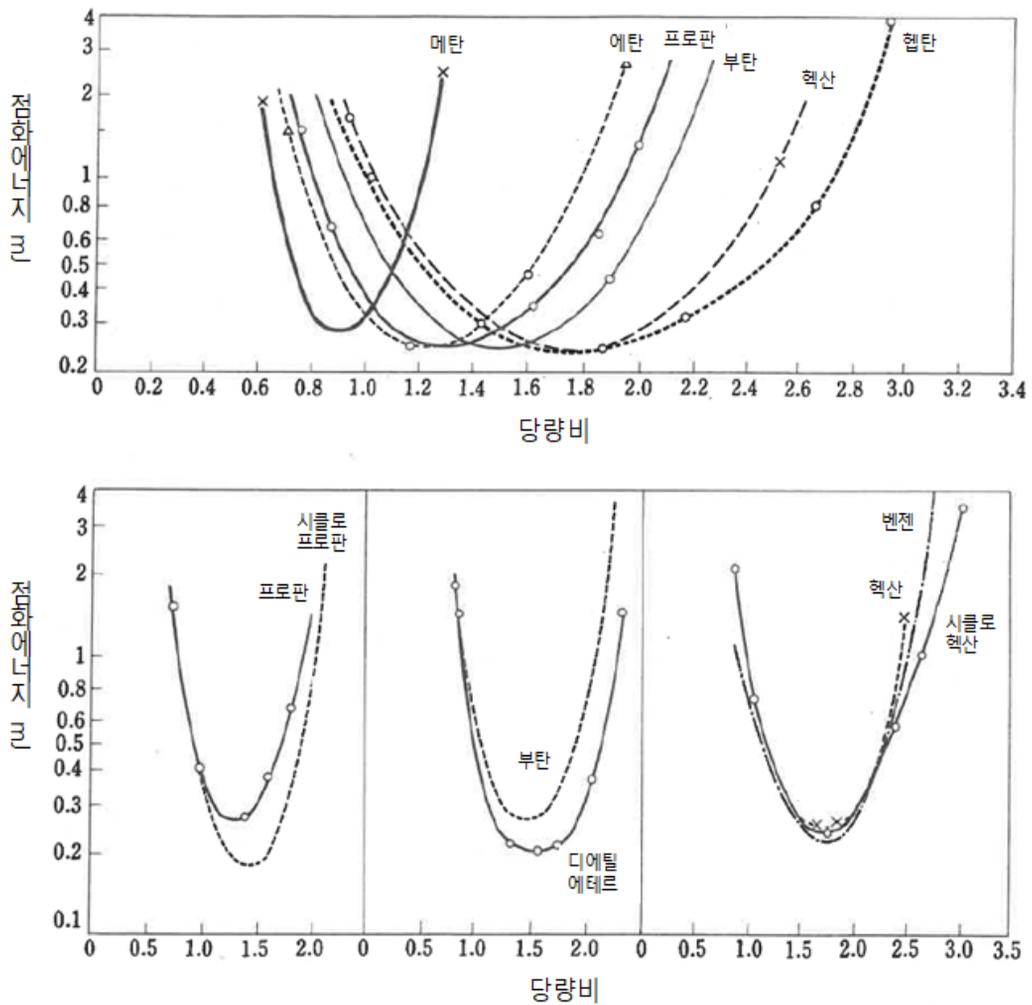
프로판-산소-질소 3성분계 대상으로 용량성 스파크 법을 활용하여 측정한 소염거리와 최소점화에너지 관계를 다음 [그림 V-10]과 같이 나타내었다. 일반적으로는 산소에서의 점화에너지는 공기에서보다 두 자리 수 정도 작아진다. 여기서 최소점화에너지  $E_{min}$ 와 평행평판의 소염거리  $d_{II}$ 사이에는  $E_{min} \propto d_{II}$  관계를 확인할 수 있다.



[그림 V-10] 최소점화에너지와 소염거리(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>계)

다) 최소점화에너지와 혼합기체의 농도

최소점화에너지는 인화성 혼합기체의 농도에 따라서 달라지기 때문에 이론적 혼합비 농도에서 최소값을 가진다고 볼 수 없다. 즉 분자량이 크고 무거운 가스일수록  $E_{min}$ 의 이론 혼합비로부터의 편차는 커지는데, 이는 화염면에서의 연료와 산화제 선택 확산에서 기인한다. 그리고 각종 연료와 공기의 혼합기체의 농도와 최소점화에너지 관계를 다음 [그림 V-11]과 같이 나타내었다.

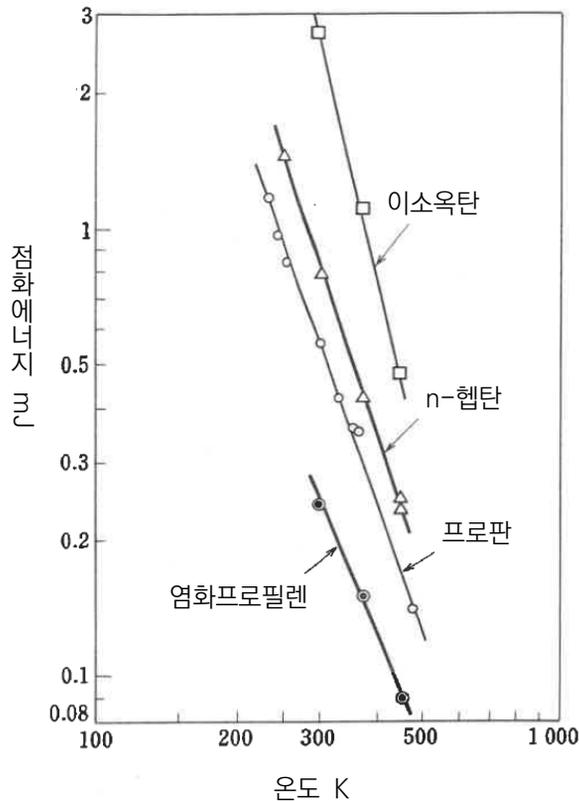


[그림 V-11] 최소점화에너지와 혼합기체 온도의 관계

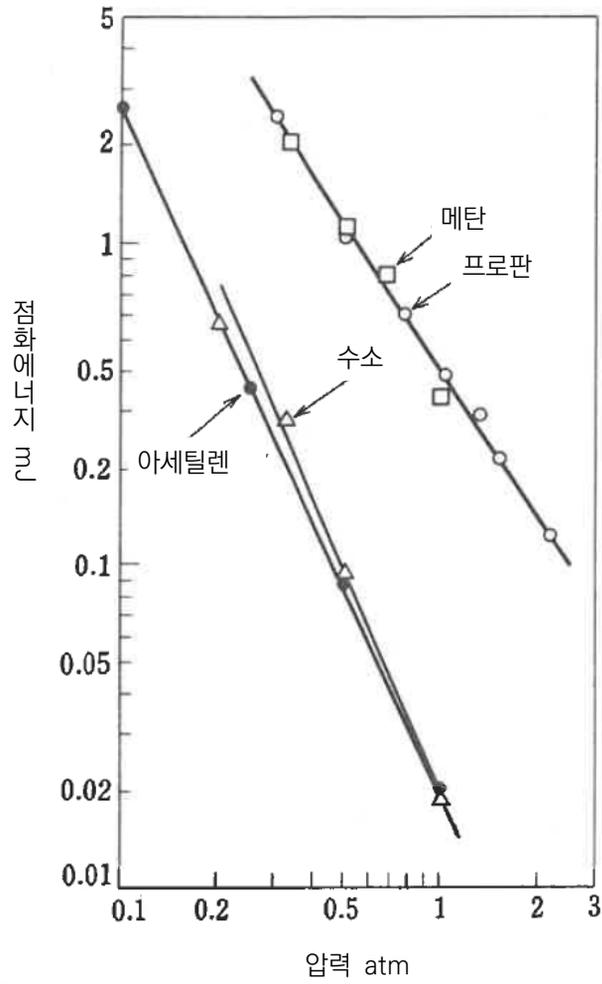
라) 최소점화에너지와 혼합기체의 온도, 압력 및 거동

최소점화에너지는 혼합기체의 온도가 상승함에 따라 일반적으로 크게 감소한다. 이때 최소점화에너지  $E_{ig}$ 와 혼합기의 초기온도  $T_0^\alpha$ 와 사이에는  $E_{ig} \propto T_0^\alpha$ 의 관계가 있다.  $\alpha$ 는 인화성 가스의 종류와 조성에 따라서  $-2 \sim -7$ 의 값을 취하고, 최소점화에너지의 압력 의존은  $E_{ig} \propto P_0^b$ 의 관계가 있다. 여기서  $P_0$ 는 혼합기체 압력으로 탄산수소류에서는  $b \approx -2$ 이지만 반드시 일정하지는 않다.

다음 [그림 V-12] 및 [그림 V-13]은 인화성 가스증기의 최소점화에너지에 대한 온도와 압력의 영향을 나타내고 있다. 또한 혼합기체 유동 시가 정지 시보다 최소점화에너지는 커지며, 유동 방향에 따라 스파크의 발생 영향도 다르다.



[그림 V-12] 최소점화에너지와 온도의 영향



[그림 V-13] 최소점화에너지와 압력의 영향

### 마) 미스트 최소점화에너지

인화성액체의 분무로 인한 스프레이 또는 미스트의 최소점화에너지는 일반적으로 수 mJ 정도로 대부분 온도에 의존한다. 분무온도가 액체의 인화점보다는 높은 경우 미스트의 최소점화에너지는 낮아지고 인화성액체의 최소점화에너지는 0.2~0.3mJ 정도이다.

## (2) 가연성 분진의 최소점화에너지

외부 에너지에 기인하는 분체의 점화로 발생하는 화재폭발의 경우 분체가 바닥이나 기기 등의 표면에 얇은 층상으로 축적되거나 공간 내에서 부유 또는 분산될 수 있다. 전자를 층상퇴적 분체의 점화, 후자를 분진운(분진과 공기의 혼합기체 또는 입자군)의 점화라고 하지만 분체의 최소점화에너지는 가스증기와 동일하게 분진운 또는 층상퇴적 분체에 대하여 전기 스파크를 발생시켰을 때 점화되는 최소의 에너지로 가연성 분체를 취급하는 경우에 방재상 중요한 개념이다.

### 가) 분진운의 점화

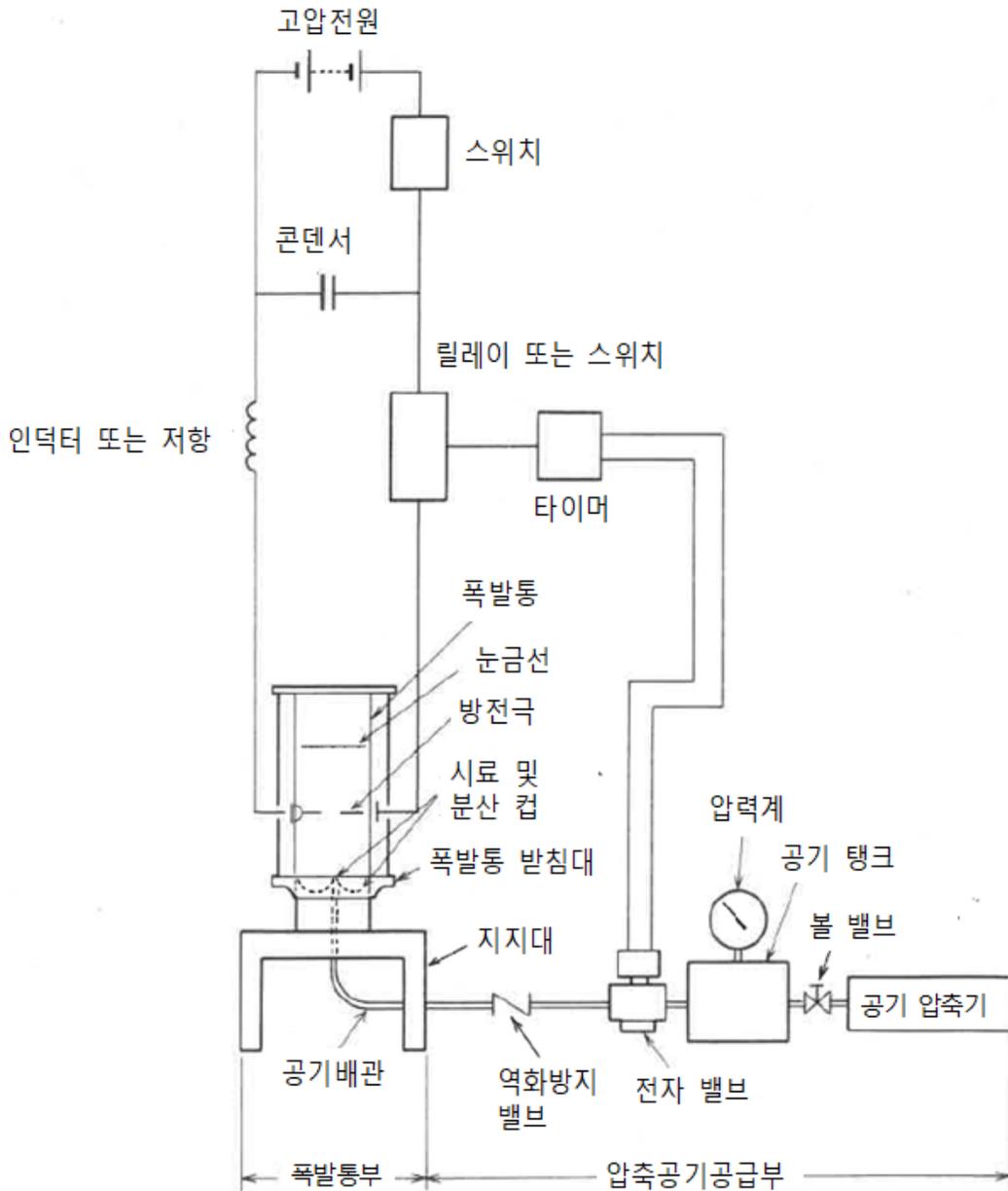
분진폭발이 발생하기 위해서는 분진운 내부에서 화염이 전파되어야 하며, 화염전파를 위한 전기 스파크 에너지의 최소값은 가연성 분진운 내부의 최소 화염 핵의 형성과 관계가 있다. 또한 유기화합물 또는 일부 금속의 분진은 가열로 인한 열분해 gas와 휘발성분의 증기 방출로 인화성 분위기를 조성하고 공기와 혼합되어 혼합가스(또는 증기)를 구성하는 동일한 매커니즘을 가진다. 여기서 최소 화염핵의 반경은 최소 화염폭과 같고, 분진운의 최소 화염핵은 인화성 혼합기체의 몇 배로 이들의 최소점화에너지는 일반적으로 입자크기 등에도 의존하지만 화염폭의 3승에 비례하기 때문에 분진운의 최소점화에너지는 혼합기체의 경우보다 10~1,000배 정도가 높다.

한편, 전기 스파크는 국소적으로 에너지 밀도가 높은 일종의 플라즈마를 형성함과 동시에 통상적으로는 충격파를 발생시킨다. 이때 충격파 크면 에너지 손실도 크고 스파크 발생에 필요한 에너지는 감소한다. 충격파는 방전개시 시점으로부터 약  $10\mu\text{s}$  이후에는 소멸되기 때문에 혼합기체에서는 화염형성에 직접적인 영향이 없지만, 분진운에서는 전극 주변의 분진을 분산시켜 충격파 발생 조건에서는 점화가 매우 어렵다. 실제로 전극사이에 얇은 종이를 통과시켜 스파크를 발생시키면 충격파에 의해 종이가 두 전극사이에서 이탈되는 것을 관찰할 수 있다.

이와 같이 분진운의 최소점화에너지를 측정하기 위해서는 충격파 발생을 억제할 수 있는 조건에서 방전시간, 전극간 거리, 분진분의 농도, 온도 및 압력, 그리고 혼합기체의 난류 등을 고려해야 한다. 실제로 부유 분진의 최소점화에너지를 정밀 측정하는 것은 아주 어렵기 때문에, 통상적으로 최소점화에너지는 최소 10회의 동일조건 시험에서 분진운이 점화되지 않는 경우의 방전에너지 최대값과 점화되는 경우의 최소값 사이의 범위로 결정한다.

국제전기표준위원회(IEC)에서는 분진방폭구조 전기기기와 관련하여 최소 점화에너지의 간이 측정법을 다음과 같이 측정장치는 최소 전극간격이 6mm, 전극재료는 텅스텐 또는 스테인리스 강, 전극직경은 2mm, 방전회로의 인덕턴스(접속의 경우는 1~2mH, 방전회로 내부의 인덕턴스(미접속의 경우는)  $\leq 0.025$  mH 등의 조건을 충족해야 한다고 제시하고 있다. 이때 인덕턴스를 접속하면 진동방전이 발생하지만, 방전시간이 길어져서 일반적으로는 인덕턴스를 접속하지 않는 경우보다는 낮은 값의 최소점화에너지를 측정할 수 있다.

최소점화에너지를 측정하기 위해서는 분진운의 농도를 변화시키면서 점화 에너지의 최소값을 결정할 필요가 있다. 그러나 분산이 적으면서 균일한 농도의 분진과 공기 혼합기체를 형성하는 것은 매우 어렵기 때문에 균일한 농도의 혼합기체를 형성하기 위해 개량 하트만형, 분사식, 낙하식 등의 각종 분진폭발 시험장치를 사용하고 있다. 다음 [그림 V-14]는 분사식 형태의 최소점화에너지 측정장치의 구성 사례로 최소점화에너지에 영향을 미치는 입자 직경과 온도의 영향을 설명하고 있으며, 다만 다른 영향요인도 고려해야 한다.



[그림 V-14] 분사식 분진폭발 시험장치를 사용한 최소점화에너지 측정장치 구성

분진의 경우 중위직경(또는 메디안 직경)  $M$ 이 작을수록 낮은 에너지에서 점화되는데, 구형입자로 균일분산을 가정한 경우 분진운의 최소점화에너지는 입자직경 3승에 비례하여 증가할 것으로 추정할 수 있지만 실제로는 입경 분포도( $1 \sim 500 \mu\text{m}$ )로 인해  $M$ 의 2.5승에 비례하여 변화된다. 이러한 결과를 배경으로 다음 식을 이용하여 한 입자 직경( $M_1$ )의 최소점화에너지 $_1$ 에서 다른 입자 직경( $M_2$ )의 최소점화에너지 $_2$ 를 추정할 수 있어서 미세한 분체시료로는 측정할 필요가 없다. 그러나 분체 종류에 따라서 너무 미세하면 입자가 서로 응집되어 점화되기가 어려워지는 경우도 있다.

$$\text{MIE}_2 = \text{MIE}_1 \cdot (M_2/M_1)^{2.5} \quad (\text{단, } M_1 < M_2)$$

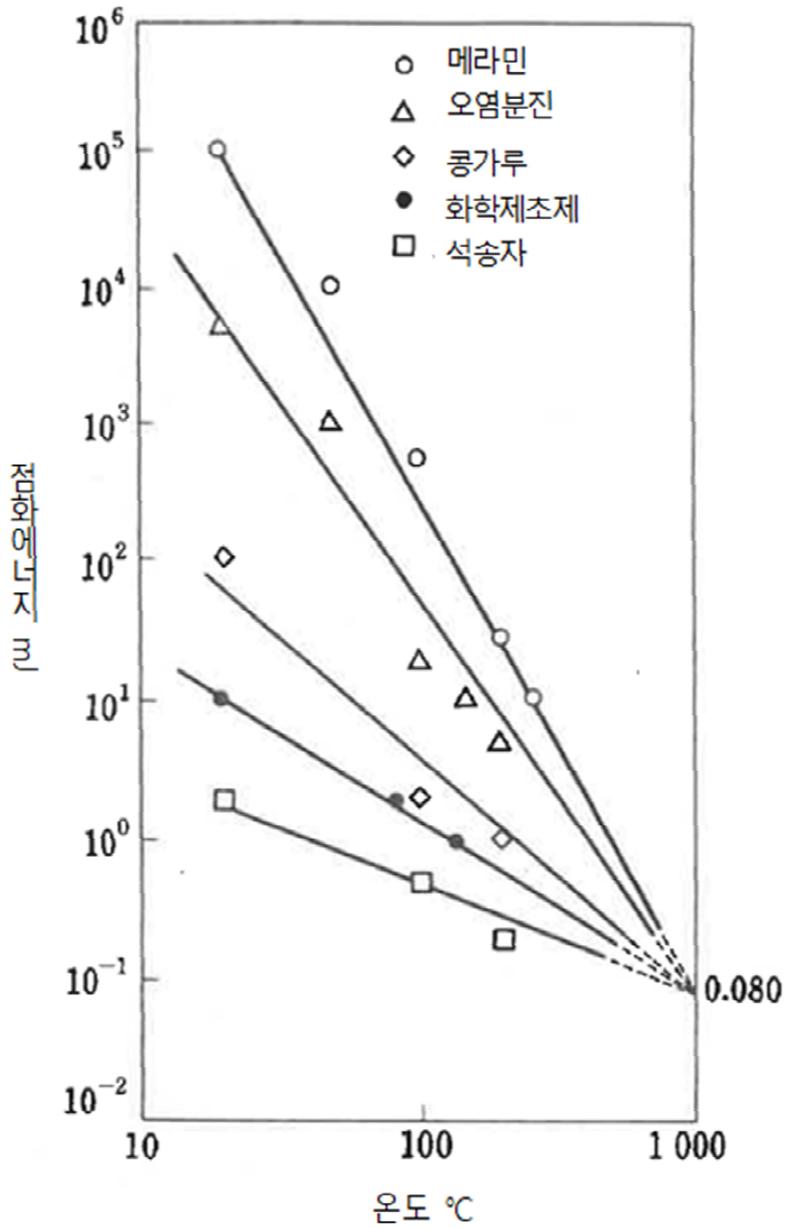
또한, 공기 중에서 부유분진의 최소점화에너지에 미치는 온도의 영향은 매우 크고, 온도가 높을수록 최소점화에너지는 급격히 낮아지며, 다음 [그림 V-15]와 같이 온도와 최소점화에너지 상관관계에서 유기화합물 분진의 최소점화에너지는 온도가 높아지면 분말의 종류와 상관없이  $1000^\circ\text{C}$ 에서  $0.088\text{mJ}$ 의 값으로 수렴된다.

이 상관관계는 온도 적용범위를  $25 \sim 300^\circ\text{C}$ 로 하고 다음 식과 나타낼 수 있다.

$$\text{MIE}(T) = 10^{-4.056 + (1.873 - 0.624 \log T) \cdot (\log \text{MIE}(25^\circ\text{C}) + 4.056)}$$

단,  $\text{MIE}(T)$ : 고온  $T$ 에서의  $\text{MIE}$  [J],  $\text{MIE}(25^\circ\text{C})$ : 상온 (통상  $25^\circ\text{C}$ )에서  $\text{MIE}$  [J]

다만,  $400 \sim 500^\circ\text{C}$  이상의 고온 분위기에서는 유기화합물 분진이 열분해 되면서 대부분이 점화온도에 도달하기 때문에  $1,000^\circ\text{C}$ 에서는 인화성 혼합가스의 최소점화에너지 값과 유사하다.



[그림 V-15] 최소점화에너지에 미치는 온도의 영향

## 나) 층상퇴적 분진의 점화

일반적으로 층상 퇴적분진의 화약류나 발화성 물질을 대상으로 최소점화 에너지를 측정하지만 가연성의 무기 또는 유기화합물 분진에 대해서도 최소점화 에너지를 측정하는 것도 가능하다. 다만 가연성 분진은 점화현상에 대한 기준을 정하는 것이 필요하기 때문에 퇴적층 표면에서 화염의 전파 현상을 관찰한다. 이는 대부분의 유기화합물 퇴적분진의 최소점화에너지가 분진운보다 크기 때문에 유용한 방법은 아니다.

층상 퇴적분진의 최소점화에너지 측정방법은 직경 25mm의 강판에 두께 1.6mm의 시료층을 만들고 전압 V로 충전한 정전용량 C의 콘덴서에 접속한 끝이 뾰족한 선단의 전극을 시료층 표면에 접근시키고 방전으로 인한 점화여부를 관찰하는 것이다. 이때 최소점화에너지는 20회 반복하여  $MIE=1/2 \cdot CV^2$ 로 계산한다.

이후에는 시료층 용기를 다수 준비하여 시험의 효율화를 도모하거나 전극을 고정하여 스파크 방전을 발생시키는 등 개선하여 층상 퇴적분체의 최소점화에너지 측정방법으로 활용하였다. 그러나 최근에는 스파크 방전 에너지와 방전시간을 변화시키는 20회 반복시험을 통해 점화 확률 5% 범위에서의 값을 최소점화 에너지로 산정하는 방법이 하나의 표준화된 방법으로 채택되었다. 이때 방전 에너지는 방전 시 발생하는 전압·전류 파형분석을 통해 산출할 수 있다.

다음 <표 V-1>은 초기 시험방법으로 측정한 발화성 금속분말의 최소점화에너지를 나타내고 있다. 여기서 부유상태보다 퇴적상태가 최소점화에너지가 낮으며 대부분의 인화성 혼합기체보다도 낮은 값을 가지는 물질도 있음을 알 수 있다.

〈표 V-1〉 발화성 금속분진의 최소점화에너지

금속분진	최소점화에너지(mJ)	
	분진운	총상 퇴적분진
Th, 2% O <sub>2</sub> 함유	5	0.004
Th 수소화물, 0.94% H <sub>2</sub> 함유	3	0.0064
Ti, 99% Ti	0.24	0.045
Ti, 96.3% Ti	15	0.008
Ti, 96% Ti	25	0.04
U	45	0.004
U 수소화물	5	0.032
Zr	15	0.0004
Zr	25	0.0008
Zr, 초미분진 3% O <sub>2</sub> 함유	15	0.064
Zr 수소화물	100	0.64

### (3) 가연성 고체의 최소점화에너지

#### 가) 이동 전극장치에 의한 최소점화에너지

다음 〈표 V-2〉는 기폭약의 최소점화에너지를 나타낸 것이다. 여기서 아지화 납과 트리시네이트는 다수 폭발사고를 유발한 물질로, 아지화 납은 접촉방전에서는 민감하지만 기중방전에서는 둔감하다. 그리고 트리시네이트는 접촉방전, 기중방전 모두 민감하다. 또한 금속과 고무 전극에서는 최소점화에너지 값이 낮은 편이나 금속과 금속 전극에서의 박막상 시료의 경우에는 아지화 납이  $4 \times 10^{-10}$  J, 트리시네이트는  $10^{-8}$  J로 매우 낮은 에너지에서도 점화한다.

〈표 V-2〉 기폭약의 최소점화에너지[uJ](점화율: 1/50)

금속분진	금속-금속 전극		금속-고무전극 (회로저항 100kΩ)
	접촉방전	기중방전	
아지화납	2	1,000	225
트리시네이트	6	6	2
디니트로네조르신납	80	45	125
뇌관	100	2,000	310
테트라센	-	2,000	80

아주 민감한 금속분말 지르코늄의 점화율 50% 최소점화에너지는 콘덴서 용량 10 pF, 직렬저항 없음, 전극간극 길이 0.05 mm 이하 조건에서는 약 0.1  $\mu$ J이다. 이때 점화율 50% 최소점화에너지는 콘덴서 용량, 직렬저항, 전극간극 길이가 증가함에 따라서 높아지지만 500 pF, 1 M $\Omega$ , 1.0 mm 조건에서 40  $\mu$ J로 낮은 값으로도 산출될 수 있다.

반대로 아주 둔감한 수소화 지르코늄은 수소 함유량이 감소함에 따라 점화율 50% 최소점화에너지가 낮아지는데, 직렬저항 없이 30 nF 정전용량인 경우 ZrH<sub>1.8</sub>에서 12 mJ, ZrH<sub>1.20</sub>에서 5mJ이다. 이때 점화율 50% 최소점화에너지가 6 mJ인 경우는 최소 정전용량은 ZrH<sub>1.8</sub>에서는 20 nF이다. 또한 직렬저항을 접속한 경우의 50% 점화율 최소점화에너지를 나타내는 시정수(콘덴서 용량× 직렬 저항)와 최소 정전용량은 ZrH<sub>1.8</sub>의 경우는 시정수 600  $\mu$ s, 최소 용량 10 nF이며 점화율 50% 최소점화에너지는 1 mJ이다.

분진층의 최소점화에너지는 미국 광산국에서 이동 전극장치와 유사한 방법으로 측정한 314종의 금속분의 데이터가 보고되어 있지만, 통상적으로 분진층의 최소점화에너지가 낮은 것으로 보고되고 있다.

## 나) 고정 전극장치에 의한 최소점화에너지

폭약류의 최소점화에너지는 CRL 회로에서 회로 저항 R과 인덕턴스 L을 가능한 작게 하여 임계 감쇠조건에서 측정된다. 다음 <표 V-3>은 폭약류의 최소점화에너지 측정결과를 나타내는 것으로 직렬저항 없이 시험한 경우에는 점화율 50% 최소점화에너지가 전극간극 길이에 따라서 다르다. 여기서 전극간극 길이는 PEN에서 3 mm, TNT에서 4 mm이다.

**<표 V-3> 폭약류의 최소점화에너지**

물질명	점화율 50% 최소점화에너지
PEN	0.25
RDX	0.45
HMX	1.2
흑 갈릿	1.5
테트릴	3.2
TNT	14.5

다음 <표 V-4>는 연소반응 물질인 붕소와 산화제의 혼합계 데이터를 나타내고 있다.

**<표 V-4> 붕소/산화제 혼합계의 50% 점화율 최소점화에너지**

산화제	전극간격(mm)	시정수( $\mu$ s)	최소점화에너지(mJ)
PbO <sub>2</sub>	0.1	20	0.015
BaO <sub>2</sub>	0.1	40	1.14
CuO	0.1	120	3.85
PbCrO <sub>4</sub>	0.2	120	2.77
PbO	0.2	150	24.6
BaCrO <sub>4</sub>	1.2	150	27.4
KClO <sub>3</sub>	1.2	1500	150
KNO <sub>3</sub>	1.2	300	231

50% 점화율 최소점화에너지가 낮을수록 전극간격의 길이가 짧을수록 짧은 시정수를 나타낸다. 다음 <표 V-5>는 금속분과 산화제 혼합계의 정전기 감도 데이터로서 3종의 마그네슘과 과염소산칼륨 혼합계의 데이터를 나타내고 있다. 이때 상부전극은 1mm만 시료 내부에 묻혀 있는 경우로 연소반응 물질은 직렬저항 없이는 점화하지 않거나 또는 매우 높은 최소점화에너지를 나타내는 경우가 많다.

<표 V-5> Mg/KClO<sub>4</sub> 혼합계의 50% 점화율 최소점화에너지

산화제	전극간격 (mm)	시정수 ( $\mu$ s)	정전기 감도 (mJ)	분진감도 (mJ)	입도, 형태
M 1002	200	1.7	56.6	21.5	10 $\mu$ m 박막 환형
M 45	300	1.8	170	26.7	14.5 $\mu$ m 판상 부정형
M 15	400	2.0	562	165	10 $\mu$ m 구형

#### 다) 정전기 감도에 의한 최소점화에너지

정전기 감도 시험에서는 금속분 또는 금속분과 산화제 혼합계에서는 전극간격 내부가 시료로 완전히 채워지는 경우보다 전극간격의 일부에만 시료가 채워지는 경우가 최소점화에너지가 낮다. <표 V-5>에서는 정전기 감도 시험 시정수 기준으로 시료 표면과 전극의 간격 0.5mm에서 정전기 분진 감도 데이터를 나타내고 있다.

<표 V-3> 폭약의 정전기 감도 시험에서는 수백 옴 이상의 직렬저항을 접촉하더라도 점화되지 않지만, 전극 내부의 절반을 공기로 채운 정전기 분진 점화 감도 시험에서는 270 mesh 통과 테트릴 가루는 용량 1 nF, 직렬 저항 50 k $\Omega$ , 전극 간극 길이 2mm에서 18 mJ, TNT 미분은 용량 1 nF, 직렬 저항 20 k $\Omega$ , 전극 간극 길이 2mm에서 135 mJ에서 점화되었다. 즉, 정전기 분진 점화 감도 시험에서는 최소점화에너지가 낮다는 것을 알 수 있다.

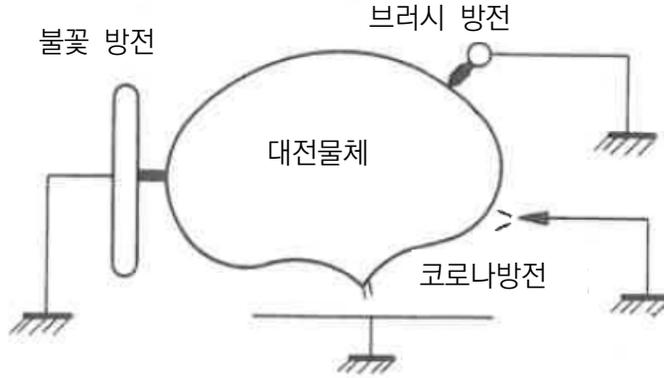
## 2) 방전에 의한 점화

### (1) 방전형태와 점화 위험성

정전기 대전 등으로 물체나 공간에 전하가 축적되고 그 전하에 의해 형성된 전기장의 강도가 일정 수준 이상이 되면 절연파괴를 일으키면서 파괴음과 발광을 수반되는 정전기 방전 현상이 발생한다. 이는 전기계 내부를 운동하는 전자와 기체 원자·분자와의 충돌에 의해 발생하는 것으로, 전자의 운동 에너지는 전기장의 강도에 의존하기 때문에 전기계가 커지면 전자는 기체 원자·분자와 여기나 전리 충돌 등을 일으키기에 충분한 에너지를 가지게 된다. 따라서 전리현상으로 전자와 양이온이 생성되고, 생성된 전자가 전기계에 의해 가속되어 전리 충돌에 다른 증배작용을 방전현상이라고 한다. 여기서 방전은 상온·상압의 공기 중에서는 약 3 MV/m의 전기계에서 발생되는데, 전자의 평균 자유 행정과 전자의 충돌 상대인 원자·분자의 밀도가 변화하는 것에 기인하기 때문에 주로 기압에 의존한다. 이것은 소위 파셴의 법칙(Paschen's law)으로 잘 알려져 있는데, 다만 평등 전기계에서만 적용될 수 있다.

다음 [그림 V-16]은 정전기 방전 형태 및 종류를 나타내는 것이다. 정전기 방전 종류는 스파크 방전, 코로나 방전, 브러쉬 방전 및 연면 방전 등이 있으며, 발생형태는 대전체와 근접도체(방전 전극 등)의 구조, 형상 및 전기적 특성 등에 의존한다. 여기서 스파크 방전은 평등전기 하에서 암류(暗流)가 자속방전 형태의 글로우 또는 아크 방전으로 이행되는 과도현상으로 발생조건은 타운젠드(Townsend)에 의해 유도된 암류의 전류밀도가 무한대가 되는 스파크 조건으로 이론적 설명이 가능하다.

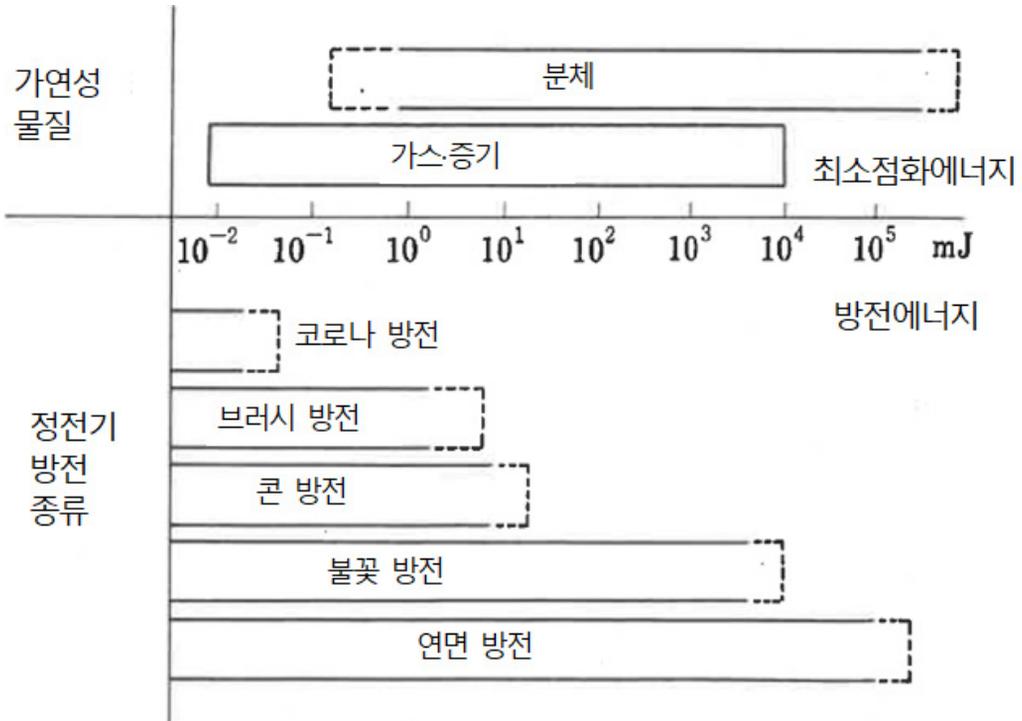
또한, 코로나 방전은 불평등 전기 하에서 바늘·침과 같이 뾰족한 전극 등에서 발생하는 자속방전이다. 브러쉬 방전은 코로나 방전 경우보다 큰 곡률반경에 발생하는 방전이다. 연면방전은 두께가 얇은 대전물체의 표면 전하밀도가 높아졌을 때 발생하는 방전이다.



[그림 V-16] 정전기 방전 종류와 형태

대전물체의 방전에너지는 정전에너지에 의존하는데, 일반적으로는 정전기 방전의 경우 대전이라는 형태로 정전에너지가 축적되어 있기 때문에 방전에너지의 양은 유한하고 방전현상은 일회성 또는 간헐적으로 발생한다. 이때 정전기 방전으로 인한 에너지가 인화성 물질의 최소점화에너지보다 높은 경우에 점화가 발생할 수 있다. 다음 [그림 V-17]은 다양한 방전형태의 방전에너지와 인화성 기체증기 및 가연성 분진의 최소점화에너지의 대략적 범위를 나타내고 있다.

방전에 의한 점화는 정전기적 에너지가 방전에너지로 변환되는 과정이다. 이는 전자 충돌로 인해 원자·분자를 여기·해리·전리시키고 원자·분자로 에너지를 전달하여 화학반응 형태인 연소를 유발하는 에너지(열)로 변환되는 현상이다. 여기서 에너지 전달시간 또는 화학반응 속도 때문에 방전과 동시에 점화되지는 않기 때문에 점화까지는 일정한 지연시간이 발생한다. 그리고 에너지의 부여방법(방전시간)이나 크기(전류, 전압)에 따라서 방전의 종류에 따른 점화성이 다르게 되는 것이다. 스파크 방전의 최소점화에너지 측정은 방전시간이 짧고 손실이 작기 때문에 용량성 스파크 방전 방식이 사용된다.



[그림 V-17] 정전기 방전 종류와 최소점화에너지

한편 용량성 스파크 방전은 조건에 따라서 인화성 기체·증기 및 가연성 분진의 점화원으로 작용할 수 있다. 일반적으로 연면방전도 방전에너지가 높기 때문에 인화성 증기·액체 및 가연성 분진의 점화원으로 작용할 수 있으며, 또한 브러쉬 방전도 점화원으로 작용할 수 있다. 다만, 코로나 방전은 에너지 밀도 낮아서 점화원으로 작용할 가능성은 거의 없다.

최근에는 생산기술의 발전에 따른 분체의 미세화 또는 기능화로 물성 또는 위험성을 예상할 수 없는 신재료·신물질에 의한 화재·폭발 사고가 예견된다.

## (2) 불꽃방전

평등전계에서 전극사이에 전압을 인가하는 경우 암류(Dark current)가 전계에 흐른다. 여기서 암류(Dark current)는 방전 시 발생하는 발광이 보이지 않는 전류를 말한다. 이러한 현상은 우주선 내부의 통상적인 방사선 전리현상의 일종으로, 발생된 전자와 양이온의 하전입자가 전계 내부에서 운동하기 때문에 발생한다.

또한 지상의 대기 중에서도 방사선에 의해  $1\text{m}^3$  당 매초 4~10회 정도의 비율로 전리현상이 발생하고 있다. 여기서 전계 크기의 증가로 전자의 재결합에 기인한 암류는 곧 포화되지만 전계는 수십 V/cm 정도이다. 이때 전계의 크기를 급격하게 증가시키면 전류가 증가하기 시작하지만, 이것은 기체 원자·분자와 전자의 전리 충돌에 의한 전자의 증배( $\alpha$  작용)와 양이온의 음극에의 충돌에 의한 2차 전자의 방출( $\gamma$  작용)에 기인한다. 이 암류로 인해 자속 방전이 글로우 방전이나 아크 방전으로 이행될 때의 과도적 현상이 불꽃 방전(spark discharge)으로 발생 조건은 암류값의 무한대 시점에서 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma\{\exp(\alpha d)-1\}=1$$

여기서  $\alpha$ : 기체 분자와 전자와의 충돌 전리 계수,  $\gamma$ : 양이온의 음극에서의 2차 전자 방출의 확률,  $d$ : 방전 간격

이 식은 음극에서 나온 1개의 전자에 의해 생성된  $\exp(\alpha d)-1$ 개의 양이온이 음극에서 2차 전자를 1개 발생시키는 것을 의미하며, 방전의 자속 조건을 나타내고 있다. 이것을 Townsend의 불꽃 조건이라고 하며 불꽃 방전은 자속 방전의 초기 단계라고 할 수 있다.

불꽃 방전은 평등 전계를 형성하는 평판 상호간 또는 방전 간격(Gap)보다도 큰 곡률 반경의 도체 사이에서 발생하며, 방전 간격(Gap)은 방전로에 의해 교락(橋絡)된다. 대전된 도체와 접지 도체 사이에서 발생하는 불꽃 방전은 대전물체의 축적 정전기 에너지가 거의 모두 방전 에너지로서 방출되기 때문에 방전 에너지는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV = \frac{Q^2}{2C}$$

여기서, W: 방전 에너지, Q: 대전 전하, C: 대전 물체의 정전 용량

산업현장 등에서 발생하는 정전기 관련 불꽃방전은 대부분이 용량성 성분으로 커패시터 성분의 대전도체와 접지도체 사이에서 발생하는 스파크 방전이 발생하는 경우가 많다.

예를 들어 절연된 금속 용기, 삽, 호퍼, 배관 또는 절연성 재질의 신발을 착용한 작업자 등으로부터 불꽃 방전이 발생한다. 다음 <표 V-6>은 산업현장에서 발생할 수 있는 대전물체의 정전용량과 방전 에너지를 나타내는 것으로 일부 대전물체는 방전에너지가 가연성 기체·증기뿐만 아니라 분진의 최소점화에너지를 초과한다. 또한 대부분의 정전기 방전 관련 분진 폭발은 용량성에 기인하는 불꽃방전이다.

이러한 불꽃 방전을 방지하기 위해서는 금속제의 설비·도구나 인체의 대지 전압을 100 V 이하로 관리할 필요가 있다. 여기서 100 V라는 값은 대기 중에서의 최소 스파크 전압(파셴 곡선의 최소치에 상당한다)인 약 300 V에서 안전율을 적용한 값이다. 추가적으로 대지 접촉저항(절연 저항)을 사람의 경우는  $10^8 \Omega$  이하, 사람 이외의 도체의 경우는  $10^6 \Omega$  이하로 유지할 필요가 있다.

<표 V-6> 대전물체의 정전용량과 방전에너지

대전물체	정전용량(pF)	방전에너지(mJ)
플랜지(Flange)	~10	~0.5(10 kV 대전)
셔블(Shovel)	~20	~2(15 kV 대전)
드럼	100~300	~40(~200, 20 kV 대전)
인체	100~300	~10(10 kV 대전)
탱크로리(Tank lorry)	~1000	~100(15 kV 대전)

### (3) 코로나 방전 및 브러쉬 방전

코로나 방전(Corona discharge)은 세침(細針) 및 세선 전극이나 곡률 반경이 매우 작은 전극 부근에서 형성된 불평등 전계가 국부적으로 절연파괴 전계강도를 초과할 때 발생된다. 일반적으로 코로나 방전은 곡률 반경이 5 mm 이하에서 발생하는데, 전극의 극성에 크게 의존한다. 또한 코로나 방전은 전압의 크기에 따라서 형태가 변화되어 최종적으로 전압이 상승하면 스파크(불꽃) 방전으로 이행된다. 극성 또는 전압으로 인한 형태의 변화는 전자·이온에 의해 형성된 공간 전하의 차이에 기인한다. 이때 방전 개시전압은 전극의 곡률에 의존하고, 곡률이 작을수록 전극 근방의 전계는 커지기 때문에, 방전 개시전압은 작아진다. 예를 들어, 곡률 반경이 1mm에서는 방전 개시전압은 6 kV 정도이지만, 0.1mm에서는 2 kV 정도가 된다. 따라서 대전 전위가 수 kV라도 코로나 방전은 발생할 수 있다.

산업 현장에서는 대전물체에 곡률 반경이 매우 작은 부분이 있는 금속 물체나 사람의 손끝이 가까워지는 경우, 반대로 금속 용기의 가장자리 부분에 대전물체가 가까워지는 경우 코로나 방전이 발생한다. 따라서 코로나 방전을 방지하기 위해서는 날카로운 모서리나 돌기 부분을 제거하는 것이 효과적이다.

코로나 방전 에너지의 값은 작기 때문에 수소와 같이 최소점화에너지가 매우 작은 기체·증기를 제외하고는 대부분의 인화성 물질을 점화시키기 어렵기 때문에, 제전기, 코로나 하전입자기, 전기 집진장치 등 분야에서 활용한다.

대전전위가 수십 kV 이상의 경우 또는 전극의 곡률 반경이 5~50 mm인 경우 코로나 방전에서 진전되어 브러쉬 방전(Brush discharge)이 발생한다. 브러쉬 방전은 스트리머(Streamer) 코로나 방전이라고도 하는데 표면 전하 밀도가  $3 \mu\text{C}/\text{m}^2$  이상이고 전계가 5 kV/cm 이상일 때 발생할 수 있다. 또한 브러쉬 방전의 방전특성도 코로나 방전과 같은 형태로 전극의 극성에 의존한다. 곡률 반경이 작은 접지 도체가 음으로 대전된 물체에 가까워지는 경우 등과 같은 정극성 방전이 부극성 방전보다 점화 위험성이 높다. 따라서 브러쉬(방전

(Brush discharge)) 에너지 최대값은 3~5 mJ 정도라고 하면 가연성 기체·증기 또는 최소점화에너지가 수 mJ 이하의 분진의 점화원이 될 수 있다.

산업현장에서의 코로나 방전이나 브러시 방전 발생 사례는, ① 분진·액체를 이송하는 절연성 파이프와 벨트 컨베이어, ② 플라스틱 백(Bag)에서 배출되는 분진이나 플라스틱 백(Bag), ③ 탱크에 충전된 액체·분진, ④ 분진을 충전·배출하는 플렉시블 컨테이너, ⑤ 분진을 집진하는 백 필터나 분진 자체 등 주로 절연물의 대전으로 금속제의 도구, 설비의 가장자리·돌기부분 또는 사람의 손가락 끝에 가까워짐으로써 방전이 발생하고 있다.

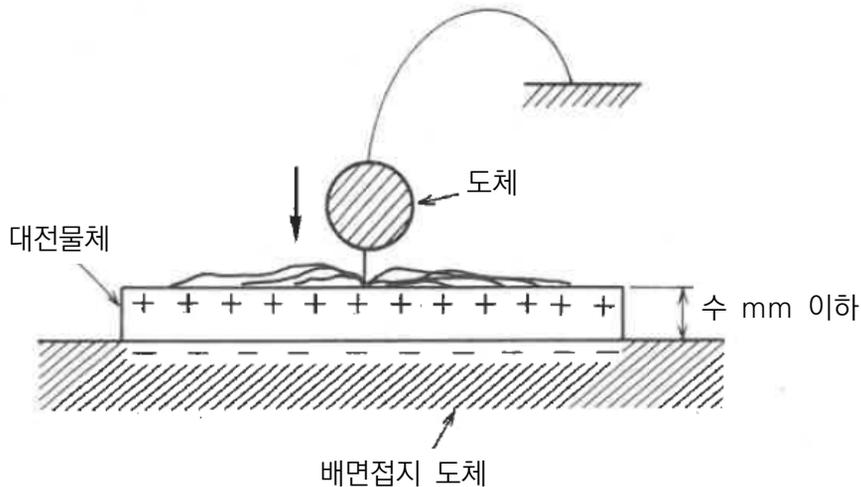
#### (4) 연면 방전

절연물체의 표면에서는 공기의 절연파괴가 발생하기 때문에 전하밀도를 최대  $27\mu\text{C}/\text{m}^2$ 로 제한한다. 그러나 절연물체의 두께가 얇으면서 배면에 도체가 밀착되는 경우 절연물체의 표면전하와 다른 극성의 전하가 배면에 유도되어, 이른바 전기 이중층이 형성된다. 따라서 절연물체 표면의 전계강도가 약해지면서 기술한 최대치 이하의 표면 전하밀도를 유지할 수 있다. 이러한 조건에서 절연물체의 두께가 8 mm 이하이고 동시에 표면 전하밀도가  $250\mu\text{C}/\text{m}^2$  이상이 되면 절연물체 표면을 따라서 강한 발광을 수반하는 연면방전(Propagating Brush Discharge)이 발생한다.

연면방전은 다음 [그림 V-18]과 같이 대전된 절연물체의 표면에 접지 도체를 접근시켰을 때의 방전 또는 얇은 절연물체의 절연파괴(핀홀)의 발생 등 국부적인 방전이 계기가 되어 개시한다. 즉, 국부 방전으로 발생한 공간전하에 의해 표면을 따라서 직경 방향으로 전계가 발생되고, 방전이 개시된 점을 중심으로 한 직경 방향으로 많은 방전경로가 형성되어 연면방전이 관측된다.

그러나 배면의 접지도체가 연면방전 발생조건은 아니며, 예를 들어 절연성이 높은 내면을 갖는 탱크, 배관, 플렉시블 컨테이너와 같이 마찰 등에 의해 내면에 다량의 정전기가 발생하는 경우는 배면도체가 없어도 내면의 표면전하 밀도가

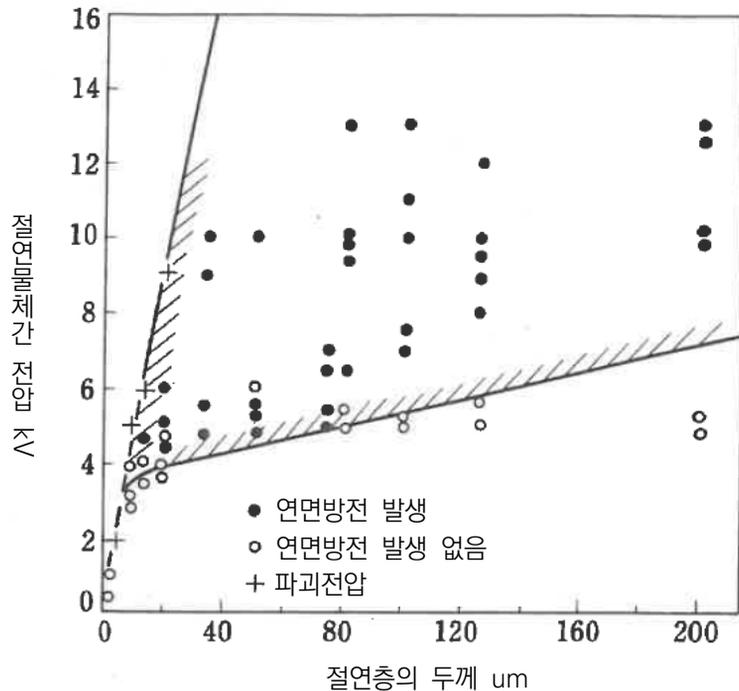
높아져 연면방전이 발생하는 조건이 성립된다. 연면방전의 방전 에너지는 최대 약 1 J 정도에 달하므로 가연성 기체·증기뿐만 아니라 분체를 점화시킬 수 있다.



[그림 V-18] 연면방전 발생 과정

산업현장의 연면방전은 절연물체의 내부가 코팅된 파이프, 유리 파이프 등에서 분체·액체가 고속으로 이송되는 경우, 분체 이송 등으로 분체가 연속적으로 절연판에 충돌하는 경우 그리고 내부가 절연성으로 코팅된 사일로나 절연성의 플렉시블 컨테이너 등에서 분체가 충전되는 경우 등에서 발생한다.

이러한 연면방전을 방지하기 위해 절연물체의 전기저항을 감소시키는 등의 방법으로 연면방전의 발생한계 두께 8 mm 이하의 절연물체의 표면전하 밀도를  $250 \mu\text{C}/\text{m}^2$  이하로 유지하는 것이다. 다음 [그림 V-19]는 절연물체의 두께와 절연물체 간의 전위차 관계에 따라서 연면방전의 발생한계를 나타내는 것으로 절연물체의 두께가 10  $\mu\text{m}$ 일 때 연면방전이 발생하는 전위차는 4 kV로 최소가 된다. 따라서 절연물체 간의 전위차 가 4 kV 이상이 되면 연면방전의 발생 조건이 성립될 수 있다.



[그림 V-19] 연면방전 발생 한계

### (5) 기타 방전

#### 가) 콘 방전

Maurer 및 Glor는 사일로 등과 같이 부피가 큰 용기에 분체를 투입 또는 반입할 때에 원추(Cone)상의 퇴적 분체 표면에서 스파크를 수반되는 브러시 방전의 발생을 실험적으로 관측하였다. 따라서 이러한 방전을 콘(Cone) 방전 또는 Maurer 방전이라고 한다.

콘(Cone) 방전은 분체의 입경이 1~10 mm 정도이고, 동시에 분체의 전하량이  $3 \mu\text{C}/\text{kg}$  이하로 연속적으로 분말이 반입될 때 발생할 수 있다. 이때 콘 방전의 방전 에너지는 최대 수십 mJ 정도이며, 이것보다 최소 점화 에너지가 작은 분체의 점화원이 될 가능성이 있다. 따라서 콘 방전이 점화원으로 작용할 수 있는 분진폭발

발생조건은 입경이 1~10 mm의 분체로 입경이 100  $\mu\text{m}$  정도 이하의 분체가 혼재하는 것이다.

#### 나) 뇌상 방전

사일로 등에 분체를 투입·반입하는 경우 대전된 미세 분체가 기상 공간을 부유하여 공간 전하운을 형성할 수 있다. 이때 공간 전하운의 규모가 크고, 분진 농도가 높으면서 공간 전하밀도까지 높은 경우 벽면의 전계강도가 높아짐에 따라서 발생하는 방전으로, 공간 전하운 내부에서는 번개와 같은 뇌상방전(Lightning-Like Discharge)이 발생한다.

뇌상방전이 발생하면 방전 에너지가 크고 가연성 분체의 점화원이 될 수 있다. 그러나 공간 전하운으로 인한 뇌상방전은 용량 60  $\text{m}^3$  이하 또는 직경 3 m 이하의 탱크 등에서는 아직 실험적으로는 관측되지 않았다. 다만, 재해 사례 분석을 통해 분체 투입 시 뇌상방전이 점화원으로 추정되는 분진폭발이 발생하고 있음을 확인하였다. 따라서 안전관리를 위해 스트리머(Streamer) 방전의 발생 조건을 고려하여 벽면의 전계 강도를 3  $\text{kV/cm}$  이하, 또는 공간 전하운의 직경을 1.5 m 이하로 유지하는 것이 필요하다.

## 4. 정전기 관련 화재·폭발 조사

정전기 관련 화재·폭발 원인분석 시 현상의 물리적 측면, 조작 및 운전 오류 등의 인적 측면과 작업방법·절차 등을 다양하게 확인하여 다음과 같이 직·간접, 근본 원인 관련 데이터를 수집할 필요가 있다.

### 1) 직접원인

#### (1) 정전기 화재·폭발 기점

설비 및 장치, 구조물의 변형, 파괴 및 손상 상태를 확인하여 파괴력 작용 방향을 특정할 수 있다. 이때 파편의 비산 방향 등을 조사하고 파편의 위치와 근원적 위치를 연계하면 폭발의 기점 방향을 특정할 수 있다.

## (2) 화재·폭발 대상 기체

피해 규모 및 파괴 상태 등을 전반적으로 조사하고, 폭발 조건 및 상황을 분석하기 위해서는 폭발 혼합기를 생성했던 인화성 물질의 종류와 양, 지연성 가스의 종류 그리고 혼합기에 의한 기체 상태의 체적 규모를 추정한다. 또한, 폭발 혼합기의 온도, 압력 및 기류 등 기상조건을 조사하여 정전기 방전이 점화원으로 작용할 수 있는지 여부를 판단한다.

추정 및 판단 결과를 토대로 인화성 물질의 특성, 기체 상태의 체적 공간·체류 상태와 장치 및 시설의 파괴 상황과의 정합성을 확인한다.

## (3) 점화원으로 작용한 대전물체

대전 가능성이 높은 물체에 대하여 도전을 등의 전기적 특성, 크기, 형상 및 설치·취급 위치 등을 확인한다. 또한, 예상되는 대전물체의 취급조건·주변상황, 특히 접지상태 및 접지체와 대전물체와의 위치 연관성을 확인하면 정전기 방전의 점화원 작용여부를 확인할 수 있다. 그리고 대상물체의 대전조건 형성여부와 그 가능성을 확인하여, 모델링 및 실증실험을 통해 확인한다.

## (4) 화재·폭발 발생시점

화재·폭발 발생시점은 사고/재해의 시계열 분석내에서 중요한 의미를 가지는데, 이때 발생시점에서 공정운영과 설비조작의 연관성을 정밀하게 확인할 수 있으면 화재·폭발에 필요한 환경조건, 가연물 생성 및 점화원 존재 가능성을 판단할 수 있다. 또한 사고/재해는 정상운전 시 보다는 공정 설비의 시운전,

운전 종료시점 그리고 유지보수 작업시 등 비정상 운전에서 많이 발생하고 있다.

따라서 사고/재해 발생 시 공정 내 설비 운전조건을 포함하여 다양한 관점에서 관계자로부터 정보를 수집하여 현장의 물리적 상황과 정합시켜 화재·폭발의 발생시점을 특정할 수 있다.

### (5) 인적 거동

피재자를 포함한 공장 내 관리자 및 근로자 등의 행동 상황을 파악하고, 작업절차 및 안전수칙을 준수하여 조작운전 및 유지보수 등의 작업을 수행하였는지를 확인한다. 또한 평상시와 다른 조작운전 및 유지보수 등의 작업을 수행하였는지 여부와 최초 이상상태 발생 시 사고/재해 발생 방지를 위해 어떤 조치가 이루어졌는지, 그리고 사고/재해 발생 시 및 이후에 피해 확산 방지를 위한 대처 방안 등의 적정성을 확인한다.

### (6) 기타

정전기 관련 사고/재해는 기체 상태 조건에서도 크게 영향을 받기 때문에 현장에서의 온도와 습도를 확인한다.

## 2) 간접원인

### (1) 물리적 현상 발생 요인

다음과 같은 사항을 확인하고 물리적 현상의 발생 요인을 추정한다.

- 가) 코드(Code), 매뉴얼, 재해사례, 조사 및 분석 결과 등 전문적인 정보와 지식
- 나) 설계 및 운전 관련 기준과 사양 등 설비 및 장치의 운전조건
- 다) 검사와 유지보수(계획 및 실시), 관리감독(훈련지원, 횡수, 인적역량, 위험예지) 등

## (2) 방호벽 요인

방호벽은 에너지원, 사람 또는 물체와 에너지원 사이, 사람 또는 물체 사이에서 설치된다. 또한 시간과 공간을 구분하여 설치될 수도 있다. 이러한 방호벽의 설치 여부, 유효성, 실행 여부 및 실행하지 않은 사유 등을 확인한다.

## (3) 위험장소에서의 근로자 활동

근로자가 사고/재해 발생 위험장소에서 작업, 보행 등의 활동이 필요한지, 필요하지 아니한지 여부를 확인하고, 근로자의 활동이 필요했다고 하면 위험을 회피할 수 있는 행동의 적정성에 대해서도 확인한다. 또한 근로자가 위험장소에서 불필요한 활동을 했다고 하면 이유를 확인한다.

## (4) 피해 확산 방지

2차 사고/재해 예방조치, 소화, 구조 등 긴급활동 등을 사업장과 소방 등 외부기관과 공동 확인한다.

# 3) 근본원인

## (1) 시스템 및 조직 요인

정책, 지침, 기준, 예산 및 체계(라인 및 직원의 책임, 정보전달, 지시 및 안전·위험 관리 등)의 항목을 확인하고 관리 시스템 및 조직상의 요인 즉 근본원인으로 접근한다. 여기서 위험관리 체계의 항목은 허용할 수 있는 위험범위 결정, 전문적 정보 관리, 잠재적 위험 식별, 위험 해석과 안전관리 계획(매뉴얼, 절차서, 지침서) 등으로 세분화 할 수 있다.

## (2) 정보 관리 요인

정보 관리 확인 항목은 전문지식 습득 체계, 내·외부 정보전달 체계, 감시보고 (안전 모니터링, 위험 발굴, 사고/재해 및 위험상황 보고, 제안제도, 패트롤 등) 체계, 정보 수집과 해석(문제점 리스트, 통계자료, 구성원 역량) 체계, 위험 통제(안전 시스템 설정, 안전요구 사항 수립, 데이터 최신화, 예상되거나 예상되지 않는 변화 대응) 체계, 독립적 감사와 심사 체계 그리고 문서화 체계 등으로 세분화 할 수 있다.



## VI. 결 론



## VI. 결 론

### 1. 연구 내용 및 결과

#### 1) 연구내용

##### (1) 정전기 관련 중대재해 및 중대산업사고 현황

고용부 산업재해통계, 소방청 화재통계, 일본 후생노동성 산업재해통계 및 일본 소방청 화재통계 분석을 통해 국내외 정전기 관련 중대재해 및 중대산업사고 발생 현황을 파악하여 정리하였다.

##### (2) 정전기 화재·폭발 발생원인

2012년부터 2021년까지 정전기 화재·폭발 재해조사 의견서를 심층 분석하고, 1995년부터 2010년까지 일본 후생노동성 산업재해통계의 발생 개요 분석을 통해 한국과 일본의 화재·폭발 발생원인을 각각 정리하고 비교·분석하였다.

##### (3) 정전기 관련 위험요인 및 주요변수

2012년부터 2021년까지 정전기 화재·폭발 재해조사 의견서 분석결과를 토대로 발생원인, 기인물, 발생과정, 작업형태 및 정전기 현상 등을 유형별로 분류 및 분석하여 정전기 관련 위험요인 및 주요변수를 도출하였다.

##### (4) 화재·폭발 위험장소의 정전기 안전관리 방안

연구내용을 토대로 선행연구 분석, 문헌고찰 및 전문가 자문 등을 통해 화재·폭발 위험장소에서 효과적으로 작동될 수 있는 정전기 안전관리 방안을 마련하였다.

## 2) 연구결과

### (1) 정전기 화재·폭발 관련 현황 및 원인 분석

한국과 일본의 소방청 통계 및 산업재해 통계의 비교·분석을 통해 양국의 정전기 화재폭발 재해·사고의 발생수준을 확인하였다. 또한 정전기 재해·사고의 원인분석 관련 절차 및 방법 등에 대하여 고찰하고 시사점을 도출하였다.

그리고 정전기 화재·폭발 발생원인 분석을 위해 2012년부터 2021년까지 정전기 중대재해·중대산업사고 발생 현황을 분석하고 업종, 장소, 공정, 작업, 기인물, 물질 및 대전종류 등 7개 항목으로 분류하여 발생빈도를 확인하였다. 또한 분류항목 7개를 기준으로 항목별 2차 교차분석을 실시하여 정전기 화재폭발 예방을 위한 타겟을 도출·설정 하였다.

### (2) 정전기 화재·폭발 관련 위험요인 및 주요 원인변수

최근 10년간 정전기 화재·폭발 조사의견서 심층 분석을 통해 위험요인 파악 및 주요 원인변수 도출을 위한 분석모형을 제안하였다. 이 분석모형은 화재·폭발 위험장소에서의 정전기 위험성평가, 안전관리 방안 수립 및 재해사고 조사 시 근본원인 규명에 활용할 수 있다.

그리고 재해·사고조사 의견서에서 주요 원인변수에 대한 확인 여부와 적정성 등을 검토하여 개선방안을 제시하였다. 또한, 모형을 활용하여 재해·사고 사례별 분석을 통해 주요 원인변수를 정리·활용할 수 있는 변수카드도 제시하였다.

### (3) 화재·폭발 위험장소의 정전기 안전관리 방안

정전기 관련 중대재해·중대산업사고 현황 분석 및 원인 규명을 통해 정전기 관련 화재·폭발은 인화성 위험분위기의 통제가 어려운 공정에서 점화원 관리가 미흡한 작업에서 발생하고 있음을 확인하였다. 따라서 화재·폭발 위험장소에서

정전기를 안전한 수준으로 관리할 수 있는 방안으로 인화성 위험분위기 생성을 방지하고 점화능력을 가지는 정전기 방전 발생방지를 위한 기술적 사항을 정리하였다.

화재·폭발 위험장소에서 인화성 위험분위기 생성 방지를 위한 주요 기술적 사항으로 3성분계의 연소범위를 나타내는 삼각선도법, 폭발 또는 연소범위 회피를 위한 포화 증기압 관리, 위험분위기 생성 방지를 위한 가스 농도 측정기 사용, 미스트 및 분체의 위험성, 인화성 액체의 스위치 로딩 작업의 위험성 등을 제시하였다.

## 2. 기대효과 및 활용방안

### 1) 제언

#### (1) 산업안전보건기준에 관한 규칙 개정

산업안전보건기준에 관한 규칙 제325조(정전기로 인한 화재폭발 등 방지)제1항에서는 설비에서 정전기로 인한 화재폭발 발생할 위험이 있는 경우 접지하거나 도전성 재료를 사용 또는 가습 및 점화원이 발생할 우려가 없는 제전장치를 사용하는 등 정전기 발생을 억제 또는 제거하기 위한 안전조치를 해야 한다고 규정하고 있으나, 화재·폭발 원인조사 시 점화원을 정전기로 불가항력적으로 추정하는 상황임에도 불구하고 정전기 화재·폭발의 사전적 예방조치인 정전기 대전전위 측정에 관한 기준은 부재한 상황이다. 이에 화재·폭발 위험장소에는 정전기 대전전위의 주기적 측정을 통해 정전기 발생을 안전한계 이하로 억제 또는 제거할 수 있는 안전조치의 구체화가 필요하다.

#### (2) 고용부 안전인증고시 개정

산업안전보건기준에 관한 규칙 제325조에서는 인체대전 정전기로 인한

화재폭발 위험이 있는 경우 정전기 대전방지용 안전화 또는 제전복 착용, 정전기 제전용구 사용 등의 안전조치를 하도록 규정하고 있으나 정전기 대전방지용 보호구 및 제전용구 등의 안전성능 저하로 인한 문제점을 해결하기 위한 방안은 마련되어 있지 않다. 따라서 KS C IEC 61340 시리즈, IEC 61340 시리즈 및 JIS IEC 61340의 성능평가 기준을 토대로 정전기 관련 용품의 안전성능 향상을 위한 안전인증기준 제정 및 안전인증 시험을 위한 기술/항목 등에 대한 제도화 필요성도 있다.

### (3) 플랜트 산업 분야 정전기 안전관리 전문인력 양성

한국산업기술시험원(KTL)에서는 반도체 분야에서 코디네이터 자격 인증을 위한 연구 및 양성교육을 실시하고 있는데, 반도체 산업의 경우 정전기 발생이 제품불량과 연계되므로 사업장 자체적으로 정전기 문제를 해결하기 위한 많은 투자와 노력을 하고 있다. 미국의 경우 정전기 방전협회에서는 정전기 안전 기술표준 제정 및 정전기 안전관리 프로그램을 운영하고 있으며, 이러한 시스템에서 정전기 프로그램 관리자 양성하는 제도도 운영하고 있다. 또한 일본에서도 전기전자부품신뢰성센터를 중심으로 IEC 61340 시리즈 표준을 기반으로 정전기 안전관리 기술자 ESD Coordinator 교육을 시행하고 있다.

따라서 우리나라의 석유화학 플랜트 산업현장에서도 반도체 산업분야와는 이원화하여 관련 제도의 도입이 필요한 실정이다.

### (4) 실증실험 기반 사고조사 및 위험성평가 시스템 구축 및 통계분류 체계 개선

산업현장에서는 자주는 아니지만 지속하여 유사한 장소, 공정, 작업, 물질 및 기인물 등에서 지속·반복되는 정전기 관련 화재·폭발을 예방하기 위해서는 실증실험 기반의 시스템 구축을 통해 객관적 사고조사와 합리적 원인도출, 효과적인 위험성평가가 필요하다. 또한 전체 화재·폭발 재해사고 중에서 효과적인 정전기 예방영역 설정을 위해서는 소방청 화재통계 및 고용부 산업재해통계

분류체계에서 별도의 정전기 항목을 추가하여 관련 데이터를 축적하여 재해원인 분석 및 재발방지대책 수립 등 정전기 재해·사고의 체계적 관리가 필요하다.

## 2) 활용방안

한국과 일본의 소방청 통계와 산업재해 통계의 현황, 발생원인 및 교차분석을 통해 도출된 문제점과 시사점은 향후 법·제도 개선과 재해예방 수요기술 개발에 활용할 수 있다. 그리고 정전기 화재·폭발 관련 유해·위험요인 및 재해발생 원인변수 도출 결과를 토대로 수립한 화재·폭발 위험장소에서의 정전기 안전관리 방안은 산업안전보건기준에 관한 규칙 개정 및 화재·폭발 위험장소에서의 위험성평가 및 안전작업 절차 마련에 활용할 수 있다. 또한 분석모형을 통해 도출된 재해발생 원인변수는 중대재해·중대산업사고 원인조사 시 필수 확인항목으로 규정하고, 재해사고 사례별 변수카드는 재발방지대책 수립 및 안전관리방안 마련에 활용할 수 있다. 마지막으로 본 연구결과는 정전기 화재·폭발 예방을 위한 안전작업 지침 및 가이드 제정에 활용할 수 있다.

## 참고문헌

- 한우섭. 정전기 착화에 의한 분진 화재폭발사고 저감 연구. 산업안전보건연구원. 2019.
- 변정환. 정전기 방전 검지기술 및 관련기기 방폭기술 개발 연구. 산업안전보건연구원. 2018.
- 최상원, 변정환. 정전기 안전용품의 안전인증기준 개발 연구. 산업안전보건연구원. 2017.
- 안전보건공단. 정전기 재해예방에 관한 기술지침, E-188-2021. 안전보건공단. 2021.
- 안전보건공단. 정전기에 의한 화재·폭발 재해조사에 대한 관한 기술지침, E-182-2021. 안전보건공단. 2021.
- 변정환 등 5명. 재해분석을 통한 정전기 안전관리 수준 향상 방안 연구. 한국안전학회. 2019.
- 서동현. 화학공장 정비보수 중 화재폭발 사고의 사회기술적 원인분석. 산업안전보건연구원. 2023.
- 静電気学会. 静電気ハンドブック. Ohmsha. 1998.



## Abstract

# A Study on the Establishment of Safety Management Plan through Analysis of Cause of Electrostatic Fire and Explosion

**Objectives:** Due to the nature of static electricity fires and explosions, the difficulty of on-site preservation, lack of physical evidence, and absence of methods, procedures and equipment related to empirical experiments, the estimation method is generally applied to static electricity fire and explosion accident investigations. In order to secure the reliability and objectivity of accident investigation results, it is necessary to consider the causal variables of disaster occurrence, cause analysis methods and procedures, and empirical experiment methods.

**Method:** Through analysis of the Ministry of Employment and Labor's industrial accident statistics, the National Fire Agency's fire statistics, the Japanese Ministry of Health, Labor and Welfare's industrial accident statistics, and the Japanese Fire Agency's fire statistics, the current status of major accidents and serious accidents related to static electricity at home and abroad was identified and organized. And through an in-depth analysis of disaster investigation opinions related to static electricity fires and explosions from 2012 to 2021, and an analysis of the occurrence outline of the Japanese Ministry of Labor and Health's industrial accident statistics from 1995 to 2010, the causes

of static electricity fires and explosions in Korea and Japan were summarized and summarized, respectively. Comparison and analysis were conducted. Also, Based on the analysis results of the disaster investigation opinion, the causes, substances, generation processes, work types, and static electricity phenomena were classified and analyzed by type to derive static electricity-related risk factors and major variables.

**Results:** We identify risk factors through in-depth analysis of static electricity fire and explosion investigation reports over the past 10 years, propose and utilize an analysis model to derive major causal variables, and organize and utilize major causal variables through analysis of each case of disaster or accident. Present variable card. As a way to manage static electricity at a safe level in fire and explosion hazard areas, technical details are summarized to prevent the creation of a flammable hazardous atmosphere and prevent the occurrence of electrostatic discharge with ignition capabilities.

**Conclusion:** Presentation of essential items to be checked when investigating or establishing preventive measures for static electricity – related fire/explosion disasters/accidents, static electricity risk assessment methods for preemptive prevention of disasters/accidents in fire/explosion hazard locations, and hazardous substances in fire/explosion hazard locations. and suggests safe control measures for ignition sources.

**Key words:** Electricity, Fire/explosion, Cause analysis,  
Safety management, Causal variables

## 부록. 재해·사고 사례 변수카드

〈표 부록-1〉 재해·사고 사례 #1 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	n-butyl acrylate	<b>설비#1</b>	용해기	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	미확인
인화점	36.5°C	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	미확인
MIE	미확인	작업내용	교반	대전종류	미확인
물성1	-	<b>설비#2</b>	반응기	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	저장	접지(본딩)	미확인	대전대상	
취급조건2	-	운전조건	정지	대전서열	
<b>물질#2</b>	<b>톨루엔</b>	작업내용	저장	대전조건	
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	
인화점	4°C	보호구	미확인	대전전위	
상태	액체	작업내용	미확인	<b>대전#3</b>	
MIE	미확인	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	-			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	저장			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-2〉 재해·사고 사례 #2 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>세척액</b>	<b>설비#1</b>	<b>비닐장갑</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	비도전성	대전대상	미확인
인화점	0°C 이하	접지(본딩)	비적용	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	비적용	대전조건	미확인
MIE	미확인	작업내용	제거	대전종류	미확인
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>휴대폰케이스</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	비도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	세척	접지(본딩)	비적용	대전대상	
취급조건2	-	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>		작업내용	제거	대전조건	
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	
인화점		보호구	미확인	대전전위	
상태		작업내용	미확인	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-3〉 재해·사고 사례 #3 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	1,4-Dioxane	<b>설비#1</b>	플렉시블호스	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	비도전성	대전대상	미확인
인화점	12°C 이하	접지(본딩)	비적용	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	이송
MIE	미확인	작업내용	이송	대전종류	인체
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>드럼</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	저장	접지(본딩)	미실시	대전대상	미확인
취급조건2	이송	운전조건	비적용	대전서열	미확인
<b>물질#2</b>		작업내용	회수	대전조건	이송
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	유동
인화점		보호구	미확인	대전전위	미확인
상태		작업내용	미확인	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	미확인
물성1				대전서열	미확인
물성2				대전조건	이송
취급조건1				대전종류	인체
취급조건2				대전전위	미확인
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-4〉 재해·사고 사례 #4 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1	솔벤트	설비#1	신발	대전#1	인체
도전성	미확인	도전성	비도전성	대전대상	미확인
인화점	- 10°C 이하	접지(본딩)	비적용	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	비적용	대전조건	이송
MIE	미확인	작업내용	제거	대전종류	인체
물성1	-	설비#2		대전전위	미확인
물성2	-	도전성	-	대전#2	
취급조건1	세척	접지(본딩)	-	대전대상	솔벤트
취급조건2	-	운전조건	-	대전서열	미확인
물질#2		작업내용	-	대전조건	문지름
도전성		작업자		대전종류	마찰
인화점		보호구	미확인	대전전위	미확인
상태		작업내용	미확인	대전#3	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				방전	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-5〉 재해·사고 사례 #5 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>톨루엔</b>	<b>설비#1</b>	<b>롤러</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	비도전성	대전대상	롤러
인화점	4℃	접지(본딩)	비적용	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	비적용	대전조건	도포
MIE	0.25mJ	작업내용	도포	대전종류	마찰
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>발수제용기</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	미확인	<b>대전#2</b>	
취급조건1	도포	접지(본딩)	미확인	대전대상	롤러
취급조건2	-	운전조건	미확인	대전서열	미확인
<b>물질#2</b>	<b>벤젠</b>	작업내용	미확인	대전조건	도포
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	박리
인화점	-11℃	보호구	미확인	대전전위	미확인
상태	액체	작업내용	도포	<b>대전#3</b>	
MIE	0.1mJ	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	-			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	도포			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	비적용
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	23.9℃, 43.5%
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2	-			정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-6〉 재해·사고 사례 #6 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>알루미늄합금</b>	<b>설비#1</b>	<b>혼합기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	도전성	도전성	미확인	대전대상	미확인
인화점	비적용	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	미확인	대전조건	미확인
MIE	미확인	작업내용	미확인	대전종류	미확인
물성1	-	<b>설비#2</b>		대전전위	미확인
물성2	-	도전성		<b>대전#2</b>	
취급조건1	혼합	접지(본딩)		대전대상	
취급조건2	반응	운전조건		대전서열	
<b>물질#2</b>	<b>적린</b>	작업내용		대전조건	
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	
인화점	비적용	보호구	미확인	대전전위	
상태	고체	작업내용	미확인	<b>대전#3</b>	
MIE	미확인	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	-			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	혼합			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
<b>물질#3</b>	<b>수소</b>			<b>축적</b>	
도전성	비적용			접지	미확인
인화점	비적용			차폐	미확인
상태	가스			제전	미확인
MIE	0.03mJ			온·습도	미확인
물성1	-			<b>방전</b>	
물성2	-			대상	미확인
취급조건1	반응			종류	미확인
취급조건2	-			정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-7〉 재해·사고 사례 #7 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>휘발유</b>	<b>설비#1</b>	<b>호스</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	비도전성	대전대상	휘발유
인화점	-43℃	접지(본딩)	미실	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	이송
MIE	미확인	작업내용	이송	대전종류	마찰
물성1	-	<b>설비#2</b>		대전전위	미확인
물성2	-	도전성		<b>대전#2</b>	
취급조건1	이송	접지(본딩)		대전대상	휘발유
취급조건2	-	운전조건		대전서열	미확인
<b>물질#2</b>		작업내용		대전조건	이송
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	마찰
인화점		보호구	미확인	대전전위	미확인
상태		작업내용	미확인	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-8〉 재해·사고 사례 #8 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>휘발유</b>	<b>설비#1</b>	<b>호스</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	비도전성	대전대상	휘발유
인화점	-43℃	접지(본딩)	미실	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	이송
MIE	미확인	작업내용	이송	대전종류	마찰
물성1	-	<b>설비#2</b>		대전전위	미확인
물성2	-	도전성		<b>대전#2</b>	
취급조건1	이송	접지(본딩)		대전대상	휘발유
취급조건2	-	운전조건		대전서열	미확인
<b>물질#2</b>		작업내용		대전조건	이송
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	마찰
인화점		보호구	미확인	대전전위	미확인
상태		작업내용	미확인	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-9〉 재해·사고 사례 #9 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>시클로hex산</b>	<b>설비#1</b>	<b>누체여과기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	비도전성	도전성	혼재	대전대상	여과기
인화점	-20℃	접지(본딩)	미실시	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	이송
MIE	0.22mJ	작업내용	여과	대전종류	미확인
물성1	유전상수	<b>설비#2</b>	<b>호스</b>	대전전위	미확인
물성2	완화시간	도전성	도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	교반	접지(본딩)	미실시	대전대상	
취급조건2	이송	운전조건	운전	대전서열	
<b>물질#2</b>		작업내용	이송	대전조건	
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	
인화점		보호구	미착용	대전전위	
상태		작업내용	미확인	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	인체
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-10〉 재해·사고 사례 #10 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1	알루미늄	설비#1	교반기	대전#1	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	미확인
인화점	비적용	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	운전	대전조건	미확인
MIE	미확인	작업내용	교반	대전종류	미확인
물성1	입경(d71.2)=45(μm)	설비#2		대전전위	미확인
물성2	-			대전#2	
취급조건1	투입	접지(본딩)		대전대상	
취급조건2	-	운전조건		대전서열	
물질#2		작업내용		대전조건	
도전성		작업자		대전종류	
인화점		보호구	미확인	대전전위	
상태		작업내용	투입	대전#3	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				방전	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-11〉 재해·사고 사례 #11 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>펜탄</b>	<b>설비#1</b>	<b>필터</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	미확인
인화점	-49℃	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	미운전	대전조건	미확인
MIE	미확인	작업내용	세척	대전종류	미확인
물성1	-	<b>설비#2</b>	/	대전전위	미확인
물성2	-	도전성		<b>대전#2</b>	
취급조건1	반응	접지(본딩)		대전대상	
취급조건2	-	운전조건		대전서열	
<b>물질#2</b>	<b>디이소프로필아민</b>	작업내용		대전조건	
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	
인화점	-6℃	보호구	미확인	대전전위	
상태	액체	작업내용	미확인	<b>대전#3</b>	
MIE	미확인	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	-			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	반응			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
<b>물질#3</b>	/			<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-12〉 재해·사고 사례 #12 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1	톨루엔	설비#1	백필터, 호스등	대전#1	
도전성	미확인	도전성	비도전성	대전대상	톨루엔
인화점	5℃	접지(본딩)	비적용	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	이송
MIE	미확인	작업내용	여과, 이송	대전종류	마찰
물성1	-	설비#2	드럼	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	도전성	대전#2	
취급조건1	이송	접지(본딩)	미실시	대전대상	톨루엔
취급조건2	세정	운전조건	비적용	대전서열	미확인
물질#2		작업내용	저장	대전조건	이송
도전성		작업자		대전종류	유동
인화점		보호구	미착용	대전전위	미확인
상태		작업내용	드레인	대전#3	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				방전	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-13〉 재해·사고 사례 #13 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1	휘발유	설비#1	저장탱크	대전#1	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물체#2
인화점	-12℃	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	비적용	대전조건	미확인
MIE	미확인	작업내용	세척	대전종류	마찰
물성1	-	물체#2	작업도구, 송기마스크	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	비도전성	대전#2	
취급조건1	잔류	접지(본딩)	비적용	대전대상	
취급조건2	-	운전조건	비적용	대전서열	
물질#2		작업내용	세척	대전조건	
도전성		작업자		대전종류	
인화점		보호구	미확인	대전전위	
상태		작업내용	미확인	대전#3	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				방전	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-14〉 재해·사고 사례 #14 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>솔벤트</b>	<b>설비#1</b>	<b>저장탱크</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물체#2
인화점	미확인	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	비적용	대전조건	운반
MIE	0.2mJ	작업내용	저장	대전종류	마찰, 충돌
물성1	-	<b>물체#2</b>	<b>플라스틱용기</b>	대전전위	이론값
물성2	-	도전성	혼재	<b>대전#2</b>	
취급조건1	저장	접지(본딩)	비적용	대전대상	인체
취급조건2	운반	운전조건	비적용	대전서열	미확인
<b>물질#2</b>		작업내용	운반	대전조건	미확인
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	미확인
인화점		보호구	미확인	대전전위	이론값
상태		작업내용	미확인	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	8.5℃, 98%
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	인체, 용기, 탱크
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	계산값
				전하량	이론값
				방전에너지	이론값

〈표 부록-15〉 재해·사고 사례 #15 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>톨루엔</b>	<b>설비#1</b>	<b>저장용기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	2.5*10 <sup>13</sup> Ω·cm	도전성	도전성	대전대상	물체#1
인화점	4℃	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	비적용	대전조건	운반
MIE	0.24mJ	작업내용	저장	대전종류	마찰, 충돌
물성1	-	<b>물체#2</b>	<b>드럼</b>	대전전위	이론값
물성2	-	도전성	도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	낙하	접지(본딩)	미확인	대전대상	인체
취급조건2	운반	운전조건	비적용	대전서열	미확인
<b>물질#2</b>		작업내용	소분	대전조건	미확인
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	미확인
인화점		보호구	미착용	대전전위	이론값
상태		작업내용	소분	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	인체, 드럼
취급조건1				종류	브러쉬, 불꽃
취급조건2				정전용량	계산값
				전하량	이론값
				방전에너지	이론값

〈표 부록-16〉 재해·사고 사례 #16 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1	알루미늄	설비#1	분쇄기	대전#1	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물체#1
인화점	0℃	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	운전	대전조건	분쇄
MIE	미확인	작업내용	분쇄	대전종류	마찰, 충돌
물성1	-	물체#2		대전전위	미확인
물성2	-			대전#2	
취급조건1	분쇄	접지(본딩)		대전대상	
취급조건2	-	운전조건		대전서열	
물질#2		작업내용		대전조건	
도전성		작업자		대전종류	
인화점		보호구	미착용	대전전위	
상태		작업내용	투입	대전#3	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미실시
상태				제전	미실시
MIE				온·습도	미확인
물성1				방전	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-17〉 재해·사고 사례 #17 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	DMC	<b>설비#1</b>	저장용기	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	혼재	대전대상	물체#1
인화점	18℃	접지(본딩)	미실시	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	비적용	대전조건	이송
MIE	미확인	작업내용	저장	대전종류	유동
물성1	-	<b>물체#2</b>	<b>측정자</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	이송	접지(본딩)	비적용	대전대상	
취급조건2	저장	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>		작업내용	계량	대전조건	
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	
인화점		보호구	미착용	대전전위	
상태		작업내용	측정	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	설비, 인체
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-18〉 재해·사고 사례 #18 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1	톨루엔	설비#1	계량용기	대전#1	
도전성	<1(pS/m)	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	4℃	접지(본딩)	미실시	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	주입
MIE	0.24mJ	작업내용	저장	대전종류	분출, 충돌
물성1	유전상수(2.37)	물체#2	배관	대전전위	미확인
물성2	완화시간(21s)	도전성	혼재	대전#2	
취급조건1	주입	접지(본딩)	미실시	대전대상	물질#1
취급조건2	저장	운전조건	비적용	대전서열	미확인
물질#2		작업내용	이송	대전조건	이송
도전성		작업자		대전종류	유동
인화점		보호구	미확인	대전전위	미확인
상태		작업내용	미확인	대전#3	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	27℃, 45%
물성1				방전	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-19〉 재해·사고 사례 #19 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>경유</b>	<b>설비#1</b>	<b>로디암</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	$10^{11} \sim 10^{13} \Omega \cdot m$	도전성	혼재	대전대상	물질#1
인화점	40℃ 이상	접지(본딩)	미실시	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	비적용	대전조건	주입
MIE	미확인	작업내용	주입	대전종류	유동,분출
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>탱크로리</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	이송	접지(본딩)	실시	대전대상	
취급조건2	주입	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>		작업내용	저장	대전조건	
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	
인화점		보호구	미확인	대전전위	
상태		작업내용	미확인	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	설비#2
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-20〉 재해·사고 사례 #20 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>톨루엔</b>	<b>설비#1</b>	<b>저장용기/배관</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	4℃	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	비적용	대전조건	주입
MIE	미확인	작업내용	주입	대전종류	유동
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>드럼</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	혼재	<b>대전#2</b>	
취급조건1	이송	접지(본딩)	미실시	대전대상	
취급조건2	주입	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>	Butyl Cellosolve	작업내용	저장	대전조건	
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	
인화점	67℃	보호구	미확인	대전전위	
상태	액체	작업내용	미확인	<b>대전#3</b>	
MIE	미확인	매뉴얼/교육	확인	대전대상	
물성1	-			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	이송			대전종류	
취급조건2	주입			대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-21〉 재해·사고 사례 #21 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>톨루엔</b>	<b>설비#1</b>	<b>IBC</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	<1(pS/m)	도전성	비도전성	대전대상	물질#1
인화점	4℃	접지(본딩)	비적용	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	비적용	대전조건	이송
MIE	미확인	작업내용	저장	대전종류	미확인
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>호스/필터</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	혼재	<b>대전#2</b>	
취급조건1	이송	접지(본딩)	미실시	대전대상	
취급조건2	저장	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>		작업내용	이송	대전조건	
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	
인화점		보호구	미확인	대전전위	
상태		작업내용	미확인	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-22〉 재해·사고 사례 #22 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>염소산칼륨</b>	<b>설비#1</b>	<b>혼합기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	혼재	대전대상	미확인
인화점	비적용	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	운전	대전조건	미확인
MIE	미확인	작업내용	혼합	대전종류	미확인
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>호스/필터</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	혼재	<b>대전#2</b>	
취급조건1	혼합	접지(본딩)	미실시	대전대상	
취급조건2	-	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>		작업내용	이송	대전조건	
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	
인화점		보호구	비적용	대전전위	
상태		작업내용	비적용	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	비적용	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	70.5%
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-23〉 재해·사고 사례 #23 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>톨루엔</b>	<b>설비#1</b>	<b>배합기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	<1(pS/m)	도전성	도전성	대전대상	인체
인화점	4℃	접지(본딩)	미실시	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	미운전	대전조건	미확인
MIE	0.24mJ	작업내용	혼합	대전종류	미확인
물성1	유전상수(2.37)	<b>설비#2</b>	<b>호스</b>	대전전위	미확인
물성2	완화시간(21s)	도전성	혼재	<b>대전#2</b>	
취급조건1	이송	접지(본딩)	미실시	대전대상	
취급조건2	주입	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>		작업내용	이송	대전조건	
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	
인화점		보호구	스트랩 착용, 안전화 미착용	대전전위	
상태		작업내용	주입	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미보유/미실시	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	24~26℃, 40~45%
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	배합기
취급조건1				종류	브러쉬
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-24〉 재해·사고 사례 #24 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	테레프탈산	<b>설비#1</b>	반응기	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	260℃	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	미운전	대전조건	투입
MIE	100~300mJ	작업내용	저장	대전종류	마찰, 충돌
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>톤백</b>	대전전위	실측값
물성2	-	도전성	비도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	투입	접지(본딩)	비적용	대전대상	
취급조건2	-	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>	옥탄올	작업내용	투입	대전조건	
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	
인화점	73℃	보호구	미착용	대전전위	
상태	액체	작업내용	투입	<b>대전#3</b>	
MIE	1mJ이하	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	폭발범위(09~12.7)			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	저장			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	이론값
				전하량	이론값
				방전에너지	이론값

〈표 부록-25〉 재해·사고 사례 #25 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>헵탄</b>	<b>설비#1</b>	<b>여과기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	-4℃	접지(본딩)	실시	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	이송
MIE	0.24mJ	작업내용	여과	대전종류	유동,분출
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>배관</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	이송	접지(본딩)	미확인	대전대상	
취급조건2	주입	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>		작업내용	이송	대전조건	
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	
인화점		보호구	미확인	대전전위	
상태		작업내용	조작	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-26〉 재해·사고 사례 #26 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>산화구리</b>	<b>설비#1</b>	<b>트레이</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	도전성	도전성	10 <sup>4</sup> ~10 <sup>5</sup> Ω/sq	대전대상	물질#1,2
인화점	비적용	접지(본딩)	미실시	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	비적용	대전조건	비산
MIE	1,000mJ	작업내용	운반	대전종류	마찰, 충돌
물성1	450g/m <sup>3</sup> (LEL)	<b>설비#2</b>	<b>스패툴라</b>	대전전위	미확인
물성2		도전성	비도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	건조	접지(본딩)	비적용	대전대상	
취급조건2	비산	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>	<b>알루미늄</b>	작업내용	조작	대전조건	
도전성	도전성	<b>작업자</b>		대전종류	
인화점	비적용	보호구	안전화 착용, 작업복 미착용	대전전위	
상태	분진	작업내용	조작	<b>대전#3</b>	
MIE	미확인	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	60g/m <sup>3</sup> (LEL)			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	건조			대전종류	
취급조건2	비산			대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	이론값

〈표 부록-27〉 재해·사고 사례 #27 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>솔벤트</b>	<b>설비#1</b>	<b>교반기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	-4℃	접지(본딩)	미실시	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	이송
MIE	0.24mJ	작업내용	교반	대전종류	유동,분출
물성1	유동속도(1.67m/s)	<b>설비#2</b>	<b>배관</b>	대전전위	이론값
물성2		도전성	혼재	<b>대전#2</b>	
취급조건1	이송	접지(본딩)	미실시	대전대상	
취급조건2	주입	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>		작업내용	이송	대전조건	
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	
인화점		보호구	비적용	대전전위	
상태		작업내용	비적용	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	비적용	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미실시
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	교반기
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	이론값

〈표 부록-28〉 재해·사고 사례 #28 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>록소프로펜산</b>	<b>설비#1</b>	<b>반응기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	221℃	접지(본딩)	미실시	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	미운전	대전조건	투입, 낙하
MIE	1~3mJ	작업내용	혼합	대전종류	마찰, 충돌
물성1	무게감소율=0.13%	<b>설비#2</b>	<b>비닐백</b>	대전전위	미확인
물성2	입도(d50) = 5.314(μm)	도전성	비도전성(1× 1013 pS/m)	<b>대전#2</b>	
취급조건1	저장	접지(본딩)	비적용	대전대상	
취급조건2	투입	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>	<b>아세톤</b>	작업내용	저장	대전조건	
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	
인화점	-20℃	보호구	미착용	대전전위	
상태	액체	작업내용	투입	<b>대전#3</b>	
MIE	0.15mJ	매뉴얼/교육	비적용	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미실시
상태				제전	미실시
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	인체, 설비
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	이론값

〈표 부록-29〉 재해·사고 사례 #29 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>핵산</b>	<b>설비#1</b>	<b>교반기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	1x10 <sup>-5</sup> pS/m	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	-22℃	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	분출
MIE	0.24mJ	작업내용	제거	대전종류	분출
물성1	폭발범위 (1.1~7.5%)	<b>설비#2</b>	/	대전전위	미확인
물성2	-	도전성		<b>대전#2</b>	
취급조건1	저장	접지(본딩)		대전대상	인체
취급조건2	흡착	운전조건		대전서열	미확인
<b>물질#2</b>	<b>에틸렌</b>	작업내용		대전조건	미확인
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	미확인
인화점	-136℃	보호구	미확인	대전전위	이론값
상태	액체	작업내용	교체, 조작	<b>대전#3</b>	/
MIE	미확인	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	2.7~36%			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	저장			대전종류	
취급조건2	흡착			대전전위	
<b>물질#3</b>	<b>프로필렌</b>			<b>축적</b>	
도전성	미확인			접지	미확인
인화점	-107℃			차폐	미확인
상태	액체			제전	미확인
MIE	미확인			온·습도	76%
물성1	2.7~10.3%			<b>방전</b>	
물성2	-			대상	미확인
취급조건1	저장			종류	미확인
취급조건2	흡착			정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-30〉 재해·사고 사례 #30 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>원유</b>	<b>설비#1</b>	<b>송유관</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	인체
인화점	20℃미만	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	정지	대전조건	청소
MIE	0.2~0.25mJ	작업내용	청소	대전종류	마찰
물성1	폭발범위 (0.7~5.0%)	<b>설비#2</b>	<b>피그</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	혼재	<b>대전#2</b>	
취급조건1	이송	접지(본딩)	미확인	대전대상	
취급조건2	잔류	운전조건	미운전	대전서열	
<b>물질#2</b>		작업내용	청소	대전조건	
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	
인화점		보호구	미착용	대전전위	
상태		작업내용	청소	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	21.1℃,53%
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	설비
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-31〉 재해·사고 사례 #31 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>톨루엔</b>	<b>설비#1</b>	<b>탱크</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	인체
인화점	4℃	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	정지	대전조건	작업
MIE	0.24mJ	작업내용	라이닝	대전종류	마찰
물성1	폭발범위 (1.1~7.1%)	<b>설비#2</b>	<b>불소수지</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	비도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	도포	접지(본딩)	비적용	대전대상	
취급조건2	-	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>	<b>hexan</b>	작업내용	라이닝	대전조건	
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	
인화점	-22℃	보호구	미착용	대전전위	
상태	액체	작업내용	정리	<b>대전#3</b>	
MIE	0.12mJ	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	1.1~7.5%			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	도포			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
<b>물질#3</b>	<b>아세톤</b>			<b>축적</b>	
도전성	미확인			접지	미확인
인화점	-4℃			차폐	미확인
상태	액체			제전	미확인
MIE	1.15mJ			온·습도	미확인
물성1	2.2~13			<b>방전</b>	
물성2	-			대상	설비
취급조건1	도포			종류	미확인
취급조건2	-			정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-32〉 재해·사고 사례 #32 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1	에틸알코올	설비#1	청소도구	대전#1	
도전성	미확인	도전성	비도전성	대전대상	미확인
인화점	미확인	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	비적용	대전조건	청소
MIE	0.14mJ	작업내용	청소	대전종류	마찰
물성1		설비#2		대전전위	미확인
물성2	-	도전성		대전#2	
취급조건1	도포	접지(본딩)		대전대상	
취급조건2	-	운전조건		대전서열	
물질#2		작업내용		대전조건	
도전성		작업자		대전종류	
인화점		보호구	미확인	대전전위	
상태		작업내용	청소	대전#3	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				방전	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-33〉 재해·사고 사례 #33 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>DMF</b>	<b>설비#1</b>	<b>텐터기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	원단
인화점	58℃	접지(본딩)	미실시	대전서열	확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	이송
MIE	미확인	작업내용	가공	대전종류	마찰
물성1	폭발범위 (2.2~15.2%)	<b>설비#2</b>	<b>롤러</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	도전성	<b>대전#2</b>	/
취급조건1	증발	접지(본딩)	미실시	대전대상	
취급조건2	-	운전조건	운전	대전서열	
<b>물질#2</b>	<b>톨루엔</b>	작업내용	이송	대전조건	
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	
인화점	4℃	보호구	미확인	대전전위	
상태	액체	작업내용	포장	<b>대전#3</b>	
MIE	미확인	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	1.1~7.1%			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	증발			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
<b>물질#3</b>	<b>원단</b>			<b>축적</b>	
도전성	미확인			접지	실시
인화점	미확인			차폐	미확인
상태	분진			제전	미실시
MIE	미확인			온·습도	미확인
물성1	-			<b>방전</b>	
물성2	-			대상	미확인
취급조건1	가공			종류	미확인
취급조건2	-			정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-34〉 재해·사고 사례 #34 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>탄산칼슘</b>	<b>설비#1</b>	<b>조합조</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	미확인	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	운전	대전조건	미확인
MIE	미확인	작업내용	혼합	대전종류	마찰, 충돌
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>벌크백</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	비도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	운반	접지(본딩)	비적용	대전대상	설비#2
취급조건2	투입	운전조건	운반	대전서열	미확인
<b>물질#2</b>	<b>톨루엔</b>	작업내용	투입	대전조건	미확인
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	마찰, 충돌
인화점	4℃	보호구	미확인	대전전위	미확인
상태	액체	작업내용	투입	<b>대전#3</b>	
MIE	미확인	매뉴얼/교육	미실시	대전대상	
물성1	1.1~7.1%			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	저장			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
<b>물질#3</b>	<b>아크릴수지</b>			<b>축적</b>	
도전성	미확인			접지	미확인
인화점	42℃			차폐	미확인
상태	액체			제전	미확인
MIE	미확인			온·습도	미확인
물성1	-			<b>방전</b>	
물성2	-			대상	설비#1
취급조건1	저장			종류	미확인
취급조건2	-			정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-35〉 재해·사고 사례 #35 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용	
물질#1	수소	설비#1	분배기	대전#1		
도전성	비적용	도전성	도전성	대전대상	물질#1	
인화점	비적용	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인	
상태	가스	운전조건	운전	대전조건	미확인	
MIE	0.017mJ	작업내용	이송	대전종류	분출	
물성1	폭발범위 (4~75%)	설비#2	/	대전전위	미확인	
물성2	-	도전성		대전#2		
취급조건1	이송	접지(본딩)		대전대상	인체	
취급조건2	방출	운전조건		대전서열	미확인	
물질#2	/	작업내용		대전조건	미확인	
도전성		작업자		대전종류	마찰, 충돌	
인화점		보호구	미확인	대전전위	미확인	
상태		작업내용	조립	대전#3	/	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상		
물성1				대전서열		
물성2				대전조건		
취급조건1				대전종류		
취급조건2				대전전위		
물질#3		/				축적
도전성				접지		미확인
인화점				차폐	미확인	
상태				제전	미확인	
MIE				온·습도	미확인	
물성1				방전		
물성2				대상	미확인	
취급조건1				종류	미확인	
취급조건2				정전용량	미확인	
				전하량	미확인	
			방전에너지	미확인		

〈표 부록-36〉 재해·사고 사례 #36 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1	톨루엔	설비#1	반응기	대전#1	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	미확인
인화점	4℃	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	미확인
MIE	0.24mJ	작업내용	혼합	대전종류	미확인
물성1	-	설비#2		대전전위	미확인
물성2	-			대전#2	
취급조건1	투입	접지(본딩)		대전대상	
취급조건2	반응	운전조건		대전서열	
물질#2	알키드수지	작업내용		대전조건	
도전성	미확인	작업자		대전종류	
인화점	미확인	보호구	미확인	대전전위	
상태	액체	작업내용	미확인	대전#3	
MIE	미확인	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	-			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	투입			대전종류	
취급조건2	반응			대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	28.6℃, 73.6%
물성1				방전	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-37〉 재해·사고 사례 #37 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>열매유</b>	<b>설비#1</b>	<b>온도계</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	204℃	접지(본딩)	비적용	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	미확인
MIE	미확인	작업내용	분리	대전종류	분출
물성1	열중량	<b>설비#2</b>	<b>배관</b>	대전전위	미확인
물성2	열안정성	도전성	도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	이송	접지(본딩)	미확인	대전대상	
취급조건2	방출	운전조건	이송	대전서열	
<b>물질#2</b>		작업내용	분리	대전조건	
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	
인화점		보호구	미확인	대전전위	
상태		작업내용	미확인	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-38〉 재해·사고 사례 #38 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>초산에틸</b>	<b>설비#1</b>	<b>배관·엘보</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	혼재	대전대상	물질#1
인화점	-4℃	접지(본딩)	비적용	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	비적용	대전조건	미확인
MIE	0.46mJ	작업내용	이송	대전종류	유동
물성1	유동속도(6.25m/s)	<b>설비#2</b>	<b>배합용기</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	이송	접지(본딩)	미실시	대전대상	
취급조건2	저장	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>	<b>코팅액</b>	작업내용	저장	대전조건	
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	
인화점	-4℃	보호구	미확인	대전전위	
상태	액체	작업내용	미확인	<b>대전#3</b>	
MIE	0.46mJ	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	-			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	이송			대전종류	
취급조건2	저장			대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	설비
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	이론값
				전하량	이론값
				방전에너지	이론값

〈표 부록-39〉 재해·사고 사례 #39 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1	석탄	설비#1	컨베이어	대전#1	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	비적용	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	운전	대전조건	충돌
MIE	<1000mJ	작업내용	이송	대전종류	충돌
물성1	하한, 25g/m³	설비#2		대전전위	미확인
물성2	휘발성분 함유량	도전성		대전#2	
취급조건1	이송	접지(본딩)		대전대상	
취급조건2	-	운전조건		대전서열	
물질#2		작업내용		대전조건	
도전성		작업자		대전종류	
인화점		보호구	미확인	대전전위	
상태		작업내용	조정	대전#3	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				방전	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-40〉 재해·사고 사례 #40 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1	금속	설비#1	컨베이어	대전#1	
도전성	도전성	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	비적용	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	운전	대전조건	미확인
MIE	20~100mJ	작업내용	이송	대전종류	미확인
물성1	하한, 35g/m³	설비#2		대전전위	미확인
물성2	열중량, 열안정성	도전성		대전#2	
취급조건1	이송	접지(본딩)		대전대상	
취급조건2	-	운전조건		대전서열	
물질#2		작업내용		대전조건	
도전성		작업자		대전종류	
인화점		보호구	미확인	대전전위	
상태		작업내용	선별	대전#3	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	28.4℃, 70.7%
물성1				방전	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-41〉 재해·사고 사례 #41 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>플리우레탄수지</b>	<b>설비#1</b>	<b>텐터기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	미확인	접지(본딩)	미실시	대전서열	확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	마찰, 충돌
MIE	미확인	작업내용	코팅, 건조	대전종류	마찰, 충돌
물성1	폭발범위(하한, 1.1~2.2%)	<b>설비#2</b>		대전전위	미확인
물성2	-	도전성		<b>대전#2</b>	
취급조건1	코팅	접지(본딩)		대전대상	
취급조건2	건조	운전조건		대전서열	
<b>물질#2</b>	<b>톨루엔</b>	작업내용		대전조건	
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	
인화점	미확인	보호구	미확인	대전전위	
상태	액체	작업내용	포장	<b>대전#3</b>	
MIE	미확인	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	1.1~7.1%			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	코팅			대전종류	
취급조건2	건조			대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미실시
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-42〉 재해·사고 사례 #42 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	Ammonium perchlorate	<b>설비#1</b>	믹서볼	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	인체
인화점	미확인	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	미운전	대전조건	작업
MIE	23.65J	작업내용	혼합	대전종류	인체
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>추진기관</b>	대전전위	계산값
물성2	-	도전성	도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	충전	접지(본딩)	미확인	대전대상	
취급조건2	-	운전조건	미운전	대전서열	
<b>물질#2</b>	HTPB	작업내용	성형	대전조건	
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	
인화점	비적용	보호구	미확인	대전전위	
상태	액체	작업내용	충전	<b>대전#3</b>	
MIE	23.65J	매뉴얼/교육	미보유/미실시	대전대상	
물성1	-			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	충전			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	계산값
				전하량	미확인
				방전에너지	계산값

〈표 부록-43 재해·사고 사례 #43번수카드〉

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>에틸렌</b>	<b>설비#1</b>	<b>열교환기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	인체
인화점	-136℃	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	작업
MIE	0.124mJ	작업내용	준비	대전종류	인체
물성1	폭발범위 (2.7~36%)	<b>설비#2</b>	<b>플랜지</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	혼재	<b>대전#2</b>	
취급조건1	반응	접지(본딩)	미확인	대전대상	물질
취급조건2	이송	운전조건	비적용	대전서열	미확인
<b>물질#2</b>	<b>프로필렌</b>	작업내용	준비	대전조건	분출
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	분출
인화점	-136℃	보호구	미확인	대전전위	미확인
상태	액체	작업내용	설치	<b>대전#3</b>	
MIE	0.28mJ	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	2.4~10.3			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	반응			대전종류	
취급조건2	이송			대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	43%
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-44〉 재해·사고 사례 #44변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1	점화약	설비#1	비닐대	대전#1	
도전성	미확인	도전성	혼재	대전대상	물질
인화점	비적용	접지(본딩)	미실시	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	비적용	대전조건	취급
MIE	2.25mJ	작업내용	저장	대전종류	마찰,충돌
물성1	발열량, 입도	설비#2	용기	대전전위	0.5~3.6kV
물성2	마찰&낙추 감도	도전성	도전성	대전#2	
취급조건1	풍건	접지(본딩)	미실시	대전대상	
취급조건2	-	운전조건	비적용	대전서열	
물질#2		작업내용	운반	대전조건	
도전성		작업자		대전종류	
인화점		보호구	착용	대전전위	
상태		작업내용	소분	대전#3	
MIE		매뉴얼/교육	미보유/미실시	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미실시
MIE				온·습도	18℃,47%
물성1				방전	
물성2				대상	물체#2
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	계산값
				전하량	미확인
				방전에너지	계산값

〈표 부록-45〉 재해·사고 사례 #45변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1	PAS,BRS	설비#1	혼합기	대전#1	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#2
인화점	20~30℃	접지(본딩)	미실시	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	운반,투입
MIE	미확인	작업내용	혼합	대전종류	마찰,충돌
물성1	-	설비#2	포대	대전전위	2.76kV
물성2	-	도전성	미확인	대전#2	
취급조건1	혼합	접지(본딩)	비적용	대전대상	
취급조건2	저장	운전조건	비적용	대전서열	
물질#2	폴리프로필렌	작업내용	운반, 투입	대전조건	
도전성	미확인	작업자		대전종류	
인화점	비적용	보호구	부분착용	대전전위	
상태	분진	작업내용	투입	대전#3	
MIE	측정불가	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	입경(d50) = 1.459~38.17(μm)			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	투입			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미실시
MIE				온·습도	0.2℃,43.6%
물성1				방전	
물성2				대상	물체#1
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	이론값

〈표 부록-46〉 재해·사고 사례 #46변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>본드</b>	<b>설비#1</b>	<b>배합통</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	<50pS/m	도전성	비도전성	대전대상	물질#2
인화점	-15℃	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	비적용	대전조건	스프래우팅
MIE	미확인	작업내용	혼합	대전종류	유동,분출
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>롤러</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	혼재	<b>대전#2</b>	
취급조건1	저장	접지(본딩)	미확인	대전대상	인체
취급조건2	도포	운전조건	비적용	대전서열	미확인
<b>물질#2</b>	<b>톨루엔</b>	작업내용	도포	대전조건	마찰
도전성	<1pS/m	<b>작업자</b>		대전종류	인체
인화점	7℃	보호구	미확인	대전전위	미확인
상태	액체	작업내용	투입, 도포	<b>대전#3</b>	
MIE	미확인	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	설비#2
물성1	-			대전서열	미확인
물성2	-			대전조건	도포
취급조건1	투입			대전종류	박리
취급조건2	도포			대전전위	미확인
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-47〉 재해·사고 사례 #47변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>페플라스틱</b>	<b>설비#1</b>	<b>분쇄기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	비적용	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	운전	대전조건	마찰
MIE	미확인	작업내용	분쇄	대전종류	마찰
물성1	하한, 50g/m³	<b>설비#2</b>		대전전위	미확인
물성2	발화점	도전성		<b>대전#2</b>	
취급조건1	투입	접지(본딩)		대전대상	
취급조건2	분쇄	운전조건		대전서열	
<b>물질#2</b>		작업내용		대전조건	
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	
인화점		보호구	미확인	대전전위	
상태		작업내용	선별	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	34.1%
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-48〉 재해·사고 사례 #48변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>추진체</b>	<b>설비#1</b>	<b>이형장비</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	비적용	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	운전	대전조건	미확인
MIE	25J	작업내용	이형	대전종류	미확인
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>추진체</b>	대전전위	이론값
물성2	-	도전성	도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	충격	접지(본딩)	미확인	대전대상	인체
취급조건2	이형	운전조건	비적용	대전서열	미확인
<b>물질#2</b>		작업내용	이형	대전조건	마찰
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	인체
인화점		보호구	착용	대전전위	이론값
상태		작업내용	조작	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미보유/미실시	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	이론값
				전하량	미확인
				방전에너지	계산값

〈표 부록-49〉 재해·사고 사례 #49변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1	1,3-디옥솔란	설비#1	반응기	대전#1	
도전성	10 <sup>2</sup> ~10 <sup>4</sup> pS/m	도전성	혼재	대전대상	물질#1
인화점	-2.5℃	접지(본딩)	미실시	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	미운전	대전조건	세척
MIE	미확인	작업내용	세척	대전종류	유동,분출, 충돌
물성1	폭발범위 (2.8~20.5%)	설비#2		대전전위	이론값
물성2	발화점	도전성		대전#2	
취급조건1	세정	접지(본딩)		대전대상	인체
취급조건2	분사	운전조건		대전서열	미확인
물질#2		작업내용		대전조건	작업
도전성		작업자		대전종류	인체
인화점		보호구	착용	대전전위	미확인
상태		작업내용	분사	대전#3	
MIE		매뉴얼/교육	미보유/미실시	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	20℃, 26%
물성1				방전	
물성2				대상	인체
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	이론값

〈표 부록-50〉 재해·사고 사례 #50변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>에틸렌</b>	<b>설비#1</b>	<b>분리기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	비적용	도전성	도전성	대전대상	물체#2
인화점	-136℃	접지(본딩)	실시	대전서열	확인
상태	기체	운전조건	미운전	대전조건	분리
MIE	0.07mJ	작업내용	개방	대전종류	박리
물성1	폭발범위 (2.7~36%)	<b>설비#2</b>	<b>가스켓</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	비도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	잔존	접지(본딩)	비적용	대전대상	인체
취급조건2	-	운전조건	비적용	대전서열	미확인
<b>물질#2</b>	<b>비닐아세테이트</b>	작업내용	제거	대전조건	작업
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	인체
인화점	-8℃	보호구	미확인	대전전위	미확인
상태	액체	작업내용	개방	<b>대전#3</b>	
MIE	0.7mJ	매뉴얼/교육	미보유/미실시	대전대상	
물성1	-			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	잔존			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	63%
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	인체
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	이론값
				전하량	미확인
				방전에너지	계산값

〈표 부록-51〉 재해·사고 사례 #51 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>수소</b>	<b>설비#1</b>	<b>밸브</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	비적용	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	비적용	접지(본딩)	미확인	대전서열	확인
상태	기체	운전조건	비적용	대전조건	분출
MIE	미확인	작업내용	차단	대전종류	분출
물성1	폭발범위 (4.0~75%)	<b>설비#2</b>		대전전위	미확인
물성2	-	도전성		<b>대전#2</b>	
취급조건1	이송	접지(본딩)		대전대상	인체
취급조건2	-	운전조건		대전서열	미확인
<b>물질#2</b>		작업내용		대전조건	작업
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	인체
인화점		보호구	미착용	대전전위	미확인
상태		작업내용	조작	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	88.9%
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-52〉 재해·사고 사례 #52변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>망간</b>	<b>설비#1</b>	<b>용해조</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	비도전성	대전대상	물질#1
인화점	비적용	접지(본딩)	비적용	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	운전	대전조건	낙하
MIE	미확인	작업내용	용해	대전종류	분출
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>톤백</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	비도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	투입	접지(본딩)	비적용	대전대상	
취급조건2	낙하	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>	<b>황산</b>	작업내용	투입	대전조건	
도전성	도전성	<b>작업자</b>		대전종류	
인화점	비적용	보호구	미확인	대전전위	
상태	액체	작업내용	투입	<b>대전#3</b>	
MIE	미확인	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	-			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	저장			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-53〉 재해·사고 사례 #53변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>휘발유</b>	<b>설비#1</b>	<b>호스/배관</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	비도전성	대전대상	인체
인화점	-45℃	접지(본딩)	비적용	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	비적용	대전조건	작업
MIE	미확인	작업내용	이송	대전종류	마찰
물성1	폭발범위 (1.4~7.6%)	<b>설비#2</b>		대전전위	미확인
물성2	-	도전성		<b>대전#2</b>	
취급조건1	회수	접지(본딩)		대전대상	
취급조건2	이송	운전조건		대전서열	
<b>물질#2</b>		작업내용		대전조건	
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	
인화점		보호구	부분착용	대전전위	
상태		작업내용	회수	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	인체
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	이론값

〈표 부록-54〉 재해·사고 사례 #54변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	n-헵탄	<b>설비#1</b>	여과기	<b>대전#1</b>	
도전성	3*10 <sup>-2</sup> pS/m	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	-4℃	접지(본딩)	미실시	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	이송, 분출
MIE	0.24mJ	작업내용	여과	대전종류	마찰, 분출, 충돌
물성1	폭발범위 (1.0~7.0%)	<b>설비#2</b>	<b>호스</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	비도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	여과	접지(본딩)	비적용	대전대상	
취급조건2	이송	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>		작업내용	이송	대전조건	
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	
인화점		보호구	부분착용	대전전위	
상태		작업내용	조작	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	이론값

〈표 부록-55〉 재해·사고 사례 #55변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>에틸렌</b>	<b>설비#1</b>	<b>압축기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	비적용	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	자료없음	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	기체	운전조건	운전	대전조건	분출
MIE	미확인	작업내용	압축	대전종류	미확인
물성1	-	<b>설비#2</b>	/	대전전위	미확인
물성2	-	도전성		<b>대전#2</b>	
취급조건1	압축	접지(본딩)		대전대상	
취급조건2	이송	운전조건		대전서열	
<b>물질#2</b>	<b>프로필렌</b>	작업내용		대전조건	
도전성	비적용	<b>작업자</b>		대전종류	
인화점	-107℃	보호구	미확인	대전전위	
상태	기체	작업내용	조작	<b>대전#3</b>	
MIE	미확인	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	-			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	압축			대전종류	
취급조건2	이송			대전전위	
<b>물질#3</b>	/			<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
			방전에너지	미확인	

〈표 부록-56〉 재해·사고 사례 #56변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	THF	<b>설비#1</b>	반응기	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#3
인화점	-14℃	접지(본딩)	미실시	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	미운전	대전조건	운반,도포
MIE	0.54mJ	작업내용	혼합	대전종류	마찰,유동,충돌
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>바가지</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	비도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	저장	접지(본딩)	비적용	대전대상	
취급조건2	-	운전조건	비적용	대전서열	
<b>물질#2</b>	IPA	작업내용	도포	대전조건	
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	
인화점	11.7℃	보호구	부분착용	대전전위	
상태	액체	작업내용	도포	<b>대전#3</b>	
MIE	0.65mJ	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	-			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	저장			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
<b>물질#3</b>	<b>DMF</b>			<b>축적</b>	
도전성	$6 \times 10^6 \text{pS/m}$			접지	미확인
인화점	57℃			차폐	미확인
상태	액체			제전	미확인
MIE	미확인			온·습도	10.9℃, 32%
물성1	-			<b>방전</b>	
물성2	-			대상	설비#1
취급조건1	도포			종류	미확인
취급조건2	-			정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-57〉 재해·사고 사례 #57변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>원료</b>	<b>설비#1</b>	<b>반응기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	비적용	접지(본딩)	미실시	대전서열	미확인
상태	분진	운전조건	미운전	대전조건	투입
MIE	미확인	작업내용	혼합	대전종류	마찰,충돌
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>비닐포대</b>	대전전위	5.7kV
물성2	-	도전성	비도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	투입	접지(본딩)	비적용	대전대상	인체
취급조건2	낙하	운전조건	비적용	대전서열	미확인
<b>물질#2</b>	<b>에틸아세테이트</b>	작업내용	포장	대전조건	작업
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	마찰
인화점	-4℃	보호구	부분착용	대전전위	미확인
상태	액체	작업내용	투입	<b>대전#3</b>	
MIE	0.23mJ	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	폭발범위 (2.2~11.5%)			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	이송			대전종류	
취급조건2	저장			대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	설비#1
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	계산값

〈표 부록-58〉 재해·사고 사례 #58변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>MeOH</b>	<b>설비#1</b>	<b>분쇄기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질
인화점	12℃	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	분쇄
MIE	미확인	작업내용	분쇄	대전종류	미확인
물성1	폭발범위 (6.0~36%)	<b>설비#2</b>	<b>폐플라스틱</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	비도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	잔류	접지(본딩)	비적용	대전대상	인체
취급조건2	-	운전조건	비적용	대전서열	미확인
<b>물질#2</b>	<b>EtOAc</b>	작업내용	저장	대전조건	작업
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	마찰
인화점	-4℃	보호구	미착용	대전전위	미확인
상태	액체	작업내용	투입	<b>대전#3</b>	
MIE	미확인	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	2.0~11.5%			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	잔류			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
<b>물질#3</b>	<b>THF</b>			<b>축적</b>	
도전성	미확인			접지	미확인
인화점	-14℃			차폐	미확인
상태	액체			제전	미확인
MIE	미확인			온·습도	5℃
물성1	2.0~11.8%			<b>방전</b>	
물성2	-			대상	설비#1
취급조건1	잔류			종류	미확인
취급조건2	-			정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-59〉 재해·사고 사례 #59변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>등유</b>	<b>설비#1</b>	<b>필터</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#2
인화점	35~44℃	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	미운전	대전조건	제거
MIE	미확인	작업내용	교체	대전종류	마찰
물성1	폭발범위 (0.6~4.5%)	<b>설비#2</b>	<b>호스</b>	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	혼재	<b>대전#2</b>	
취급조건1	이송	접지(본딩)	미실시	대전대상	인체
취급조건2	-	운전조건	비적용	대전서열	미확인
<b>물질#2</b>	<b>Clay</b>	작업내용	이송	대전조건	작업
도전성	미확인	<b>작업자</b>		대전종류	마찰
인화점	비적용	보호구	미착용	대전전위	미확인
상태	분진	작업내용	제거	<b>대전#3</b>	
MIE	미확인	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	열중량			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	이송			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미실시
MIE				온·습도	3.1℃, 53~57%
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-60〉 재해·사고 사례 #60변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>틀루엔</b>	<b>설비#1</b>	<b>반응기, 필터</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	<1pS/m	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	4℃	접지(본딩)	실시	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	운전	대전조건	이송
MIE	0.24mJ	작업내용	이송	대전종류	유동, 분출
물성1	유전상수, 완화시간	<b>설비#2</b>	<b>호스</b>	대전전위	미확인
물성2	이송속도	도전성	혼재	<b>대전#2</b>	
취급조건1	이송	접지(본딩)	미실시	대전대상	인체
취급조건2	낙하	운전조건	비적용	대전서열	미확인
<b>물질#2</b>		작업내용	이송	대전조건	작업
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	마찰
인화점		보호구	부분착용	대전전위	-0.09kV, -3.31kV
상태		작업내용	투입	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	설비#1
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	미확인

〈표 부록-61〉 재해·사고 사례 #61 변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
<b>물질#1</b>	<b>수소</b>	<b>설비#1</b>	<b>저장용기</b>	<b>대전#1</b>	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	물질#1
인화점	비적용	접지(본딩)	미확인	대전서열	분출
상태	기체	운전조건	미운전	대전조건	분출
MIE	0.017mJ	작업내용	세척	대전종류	유동, 분출
물성1	-	<b>설비#2</b>	<b>호스</b>	대전전위	이론값
물성2	-	도전성	비도전성	<b>대전#2</b>	
취급조건1	반응	접지(본딩)	비적용	대전대상	인체
취급조건2	-	운전조건	비적용	대전서열	미확인
<b>물질#2</b>		작업내용	이송	대전조건	작업
도전성		<b>작업자</b>		대전종류	마찰
인화점		보호구	미확인	대전전위	미확인
상태		작업내용	주입	<b>대전#3</b>	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	호스
물성1				대전서열	미확인
물성2				대전조건	이송
취급조건1				대전종류	유동
취급조건2				대전전위	-0.62kV
<b>물질#3</b>				<b>축적</b>	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				<b>방전</b>	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	계산값

〈표 부록-62〉 재해·사고 사례 #62변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1	이소파라핀C	설비#1	저장탱크	대전#1	
도전성	미확인	도전성	도전성	대전대상	인체
인화점	-6℃	접지(본딩)	미실시	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	미운전	대전조건	설치
MIE	미확인	작업내용	설치	대전종류	마찰
물성1	폭발범위 (0.9~6.3%)	설비#2		대전전위	이론값
물성2	-	도전성		대전#2	
취급조건1	잔류	접지(본딩)		대전대상	
취급조건2	-	운전조건		대전서열	
물질#2		작업내용		대전조건	
도전성		작업자		대전종류	
인화점		보호구	미착용	대전전위	
상태		작업내용	설치	대전#3	
MIE		매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1				대전서열	
물성2				대전조건	
취급조건1				대전종류	
취급조건2				대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	미실시
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	24%
물성1				방전	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	이론값

〈표 부록-63〉 재해·사고 사례 #63변수카드

물질	내용	공정/작업	내용	매커니즘	내용
물질#1	초산에틸	설비#1	저장탱크	대전#1	
도전성	2*10 <sup>6</sup> pS/m	도전성	도전성	대전대상	물질#2
인화점	-4℃	접지(본딩)	미확인	대전서열	미확인
상태	액체	운전조건	미운전	대전조건	투입
MIE	1.42mJ	작업내용	반응	대전종류	마찰
물성1	폭발범위 (2.2~11.5%)	설비#2	비닐포대	대전전위	미확인
물성2	-	도전성	비도전성	대전#2	
취급조건1	저장	접지(본딩)	비적용	대전대상	
취급조건2	-	운전조건	비적용	대전서열	
물질#2	수지	작업내용	투입	대전조건	
도전성	미확인	작업자		대전종류	
인화점	비적용	보호구	미착용	대전전위	
상태	분진	작업내용	투입	대전#3	
MIE	미확인	매뉴얼/교육	미확인	대전대상	
물성1	-			대전서열	
물성2	-			대전조건	
취급조건1	투입			대전종류	
취급조건2	-			대전전위	
물질#3				축적	
도전성				접지	미확인
인화점				차폐	미확인
상태				제전	미확인
MIE				온·습도	미확인
물성1				방전	
물성2				대상	미확인
취급조건1				종류	미확인
취급조건2				정전용량	미확인
				전하량	미확인
				방전에너지	이론값

## 연구진

연구기관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 변정환 (연구위원, 산업안전연구실)

## 연구기간

2023. 2. 20. ~ 2023. 11. 30.

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

산업안전보건연구원장

**정전기 화재·폭발 원인분석을 통한 안전관리 방안 마련  
(2023-산업안전보건연구원-820)**

발 행 일 : 2023년 12월 31일

발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 김은아

연구책임자 : 산업안전연구실 연구위원 변정환

발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주 소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400

전 화 : 052-703-0843

팩 스 : 052-703-0334

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

I S B N : 979-11-93642-49-8

공공안심글꼴 : 무료글꼴, 한국출판인회의, Kopub바탕체/돋움체