

화학사고 예방 및 원인규명을 위한

플라스틱 분진의 정전기 착화 위험성평가

2021년도 위험성평가 보고서

플라스틱 분진의 정전기 착화 위험성평가

요 약 문

본 평가에서는 국내 화재·폭발사고사례를 조사·분석하고 정전압, 최소착화에너지, 자연발화에너지 측정 등의 실험을 통해 플라스틱 분진의 정전기 착화 위험성을 평가하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 레이저회절 방식을 이용한 입도분석시험 결과에서 각 분진의 체적기준 평균 입경(median)은 각각 HDPE 166.17 μm , LDPE 157.9 μm , PMMA 16.11 μm 로 측정되어 HDPE, LDPE의 입도는 서로 비슷한 것으로 나타났으나, PMMA 분진의 입도는 HDPE, LDPE 분진에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 아울러 각 분진의 체적기준 입도분포는 각각 HDPE 0.68~1,000 μm , LDPE 2.26~1,000 μm , PMMA 0.35~40 μm 의 범위에 분포하고 있는 것으로 측정되어 PMMA 분진은 주로 입경이 작은 분진으로 구성되어 있으나, HDPE, LDPE 분진은 다양한 크기의 입경을 가진 분진으로 구성되어 있는 것으로 나타났다.
- 2) 부유분진에 대한 최소점화에너지를 측정한 결과, HDPE 및 LDPE 분진은 모두 $30\text{mJ} < \text{MIE} < 100\text{mJ}$, PMMA 분진은 $1\text{mJ} < \text{MIE} < 3\text{mJ}$ 의 최소점화에너지를 갖는 것으로 나타났으며, 이렇게 낮은 점화에너지는 분진운에서 기인되는 정전기 방전에 의한 착화위험이 존재할 수 있기 때문에 접지 등 점화원 관리에 충분한 주의를 기울일 필요가 있는 것으로 평가되었다.
- 3) 부유분진에 대한 최저발화온도를 측정한 결과, HDPE 450 $^{\circ}\text{C}$, LDPE 450 $^{\circ}\text{C}$, PMMA 510 $^{\circ}\text{C}$ 로 측정되었다. 실규모 장치에서는 입자의 체류시간이 증가하여 발화온도에 필요한 열적평형에 도달하기가 쉬워지므로 MIT는 감소할 수 있으며 이러한 이유로 인하여 실험실적 소규모 시험에서 얻어진 MIT 측정 결과를 실규모 장치에 적용하는 경우에는 충분한 검토가 필요하다.

- 4) 밀폐공간에서 부유분진에 대한 정전압을 측정한 결과, HDPE, LDPE, PMMA 분진의 정전압은 분산 초기에 급격히 증가하다 서서히 감소하는 경향을 보인다. 아울러 분진 농도가 증가할수록 정전압의 최대값 역시 증가하는 것으로 나타나는데, 이는 분체대전에 의한 정전기 방전 위험성을 나타낸다.

차 례

요 약 문	i
I. 서 론	1
1. 평가배경 및 목적	1
2. 국내 화재·폭발사고 발생현황 분석	3
3. 분진폭발의 특성 및 예방대책	40
4. 정전기의 특성 및 예방대책	45
5. 플라스틱 분진 특성	50
6. 평가대상 및 항목	58
II. 평가장비 및 방법	63
1. 입도 분석	63
2. 최소점화에너지 시험	65
3. 최저발화온도 시험	68
4. 정전압 시험	70
III. 평가결과 및 고찰	73
1. 입도 분석 결과	73
2. 최소착화에너지 시험 결과	76
3. 최저발화온도 시험 결과	81
4. 정전압 시험 결과	83
IV. 요약 및 결론	85
참고문헌	87

표 차 례

<표 1> 국내 대형 화재·폭발사고 사례	5
<표 2> 가연성 유기고체의 발열량	41
<표 3> 입자 크기별 표면적 증가량	41
<표 4> 공기 중에서의 분진의 폭발하한농도	42
<표 5> 분진폭발 위험도	43
<표 6> 정전기 발생 종류	45
<표 7> 정전기 방전의 종류	47
<표 8> 플라스틱의 종류 및 특성	53
<표 9> 플라스틱 분진의 화재·폭발 사고사례	56
<표 10> 플라스틱 분진의 화재·폭발 위험공정	57
<표 11> 평가 대상 시료의 특성	58
<표 12> 평가 항목 및 내용	61
<표 13> 입도분석의 재현성 최대허용편차	64
<표 14> 입도분석 실험 결과	74
<표 15> 평가 대상 분진의 MIE 측정 결과	76
<표 16> MIE에 따른 분진의 정전기 안전 지침	80

그림 차례

[그림 1] 최근 10년간 화재·폭발사고 재해현황	4
[그림 2] 발생연도별 화재·폭발사고 재해현황	6
[그림 3] 발생기간별 화재·폭발사고 발생현황	7
[그림 4] 발생시간별 화재·폭발사고 발생현황	8
[그림 5] (대)업종별 화재·폭발사고 재해현황	9
[그림 6] 제조업 중업종별 화재·폭발사고 재해현황	10
[그림 7] 규모별 화재·폭발사고 재해현황	11
[그림 8] 기인물별 화재·폭발사고 재해현황	12
[그림 9] 발생지역별 화재·폭발사고 재해현황	13
[그림 10] 고용형태별 화재·폭발사고 재해현황	14
[그림 11] 근속기간별 화재·폭발사고 재해현황	15
[그림 12] 최근 10년간 분진폭발사고 재해현황	16
[그림 13] 발생연도별 분진폭발사고 발생현황	17
[그림 14] 발생기간별 분진폭발사고 발생현황	18
[그림 15] 발생시간별 분진폭발사고 발생현황	19
[그림 16] 업종별 분진폭발사고 재해현황	20
[그림 17] 제조업 중업종별 분진폭발사고 재해현황	21
[그림 18] 규모별 분진폭발사고 재해현황	22
[그림 19] 점화원별 분진폭발사고 발생현황	23
[그림 20] 발생설비별 분진폭발사고 발생현황	24
[그림 21] 발생작업별 분진폭발사고 발생현황	25
[그림 22] 최근 10년간 정전기폭발사고 발생현황	26
[그림 23] 발생연도별 정전기폭발사고 발생현황	27
[그림 24] 발생기간별 정전기폭발사고 재해현황	28
[그림 25] 발생시간별 정전기폭발사고 발생현황	29
[그림 26] 업종별 정전기폭발사고 재해현황	30
[그림 27] 제조업 중업종별 정전기폭발사고 재해현황	31

[그림 28] 규모별 정전기폭발사고 재해현황	32
[그림 29] 가연물별 정전기폭발사고 발생현황	33
[그림 30] 발생설비별 정전기폭발사고 발생현황	34
[그림 31] 발생작업별 정전기폭발사고 발생현황	35
[그림 32] 최근 10년간 정전기 분진폭발사고 발생현황	36
[그림 33] 분진 종류별 정전기 분진폭발사고 발생현황	37
[그림 34] 발생설비별 정전기 분진폭발사고 발생현황	38
[그림 35] 발생작업별 정전기 분진폭발사고 발생현황	39
[그림 36] 플라스틱의 구분	51
[그림 37] LDPE 제조공정	59
[그림 38] HDPE 제조공정	59
[그림 39] PMMA 제조공정	60
[그림 40] 입도분석 장치	64
[그림 41] 최소점화에너지 측정 장치(MIKE3)	66
[그림 42] 최저발화온도 시험장치	68
[그림 43] 정전압 측정 장비	72
[그림 44] HDPE의 입도분포 특성	74
[그림 45] LDPE의 입도분포 특성	75
[그림 46] PMMA의 입도분포 특성	75
[그림 47] HDPE의 최소착화에너지	77
[그림 48] LDPE의 최소착화에너지	77
[그림 49] PMMA의 최소착화에너지	78
[그림 50] HDPE의 최저발화온도	81
[그림 51] LDPE의 최저발화온도	82
[그림 52] PMMA의 최저발화온도	82
[그림 53] HDPE의 농도별 정전압	83
[그림 54] LDPE의 농도별 정전압	84
[그림 55] PMMA의 농도별 정전압	84

I. 서론

1. 평가 배경 및 목적

2013년 전남 여수시 소재 ○○산업(주) 내 고밀도폴리에틸렌(HDPE)공장 제품(분진) 저장탱크(사일로)의 정비·보수를 위해 용접작업을 실시하던 중 저장탱크 내부에 잔류해 있던 HDPE 분진이 용접 불티에 의해 점화되어 폭발하는 사고로 6명의 사망자와 11명의 부상자가 발생하였다.

흔히 산업현장에서 발생하는 화재·폭발사고라 하면 흔히 뉴스나 기사를 통해 접하거나 일상생활에서 겪을 수 있는 가스 또는 유류 화재·폭발사고를 많이 떠올리게 되지만 분진으로 인한 화재·폭발사고 역시 산업현장 곳곳에서 흔히 발생한다. 분진폭발은 공기 중에 부유해 있는 아주 작은 크기의 가연성 분진(Dust)에 일정크기 이상의 에너지가 가해질 경우 열과 압력을 발생시키며 연소·폭발하는 현상이다. 한편 분진폭발은 가스·유류폭발에 비해 연소속도나 폭발압력은 상대적으로 작으나 충격파(Impulse)가 크고 폭발압력 지속시간이 길며 화염속도가 느린 경향이 있어 연소시간이 긴 특성을 가진다. 그러나 무엇보다도 분진폭발은 최초 폭발에 의해 발생한 폭풍으로 주위에 퇴적되어 있던 분진이 흩날리며 추가적인 폭발이 발생해 그 피해가 눈덩이처럼 불어나는 특성을 가진다. 그러므로 분진폭발의 위험성을 인지하고 이를 예방하기 위한 체계적인 안전대책 수립이 무엇보다 요구된다.

분진폭발은 가스 및 유류폭발과 마찬가지로 용접·절단작업 시 발생하는 불티, 마찰 및 충격으로 인한 스파크, 고온 표면, 전기 아크, 정전기, 자연 발화 등 다양한 점화원에 의해 발생할 수 있지만 최근 10년간('11년~'20년) 발생한 분진폭발사고(70건)의 점화원을 확인한 결과 약 50%인 35건의 사고가 정전기가 점화원이 되어 발생한 것으로 추정된다. 우리는 일상생활 속에서 옷을 입거나 벗을 때 정전기 방전이 일어나는 것을 쉽게 경험할 수 있으며 이 때문에 불편함을 느끼곤 하지만 산업현장에서 정전기로 인해 대형 화재·폭발사고의 직·간접적인 원인이 되기도 하므로 이에 대한 예방을 절대 간과해서는 안 된다.

분진폭발을 일으키는 분진의 성분에는 밀가루 등과 같은 곡물에서부터 목재, 금속, 플라스틱 등에 이르기까지 매우 다양하다. 이 중에서 플라스틱은 경량성, 부식

성, 내구성, 가공성 등 많은 장점을 가지고 있어 우리의 일상 전반에 널리 사용되고 있지만, 화재에 취약할 뿐만 아니라 전기 절연성이 높아 정전기가 발생하기 쉬운 단점을 가지고 있다. 플라스틱 제품은 지름 2~4mm 정도의 비교적 큰 알갱이(pellet) 형태로 출하되어 사용자에게 공급되므로 정전기로 인한 폭발 위험성이 높지 않지만, 일부 제조 공정에서 분말(power) 형태의 미분화된 분진으로 취급되어 잠재적인 폭발 위험성이 있음에도 불구하고 이에 대해 작업자가 충분히 인지하고 있지 못해 정전기로 인한 플라스틱 분진의 화재·폭발사고가 반복하여 발생하고 있다.

최근 미래 산업 환경을 바꿀 신소재로 고기능성 플라스틱 제품에 대한 사회적 요구가 높아짐에 따라 플라스틱 원료 및 제품의 종류와 특성이 다양해지면서 플라스틱 분진의 폭발 위험성 또한 증가하고 있으므로 이를 예방하기 위해 정전기 및 분진폭발에 대한 충분한 이해와 체계적인 안전대책 수립이 무엇보다 우선시 되지만 대부분의 사업장에서 이를 인지하지 못하고 있는 실정이다.

본 평가에서는 이러한 현실을 고려하여 2011년부터 2020년까지 최근 10년간 국내에서 발생한 화재·폭발사고에 대해 조사·분석하고 정전압, 최소착화에너지, 자연 발화에너지 측정 등을 통해 플라스틱 분진의 정전기 착화로 인한 화재·폭발 위험성을 실험적으로 평가함으로써 플라스틱 분진의 정전기 착화로 인한 화재·폭발사고 예방하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

2. 국내 화재·폭발사고 발생현황 분석

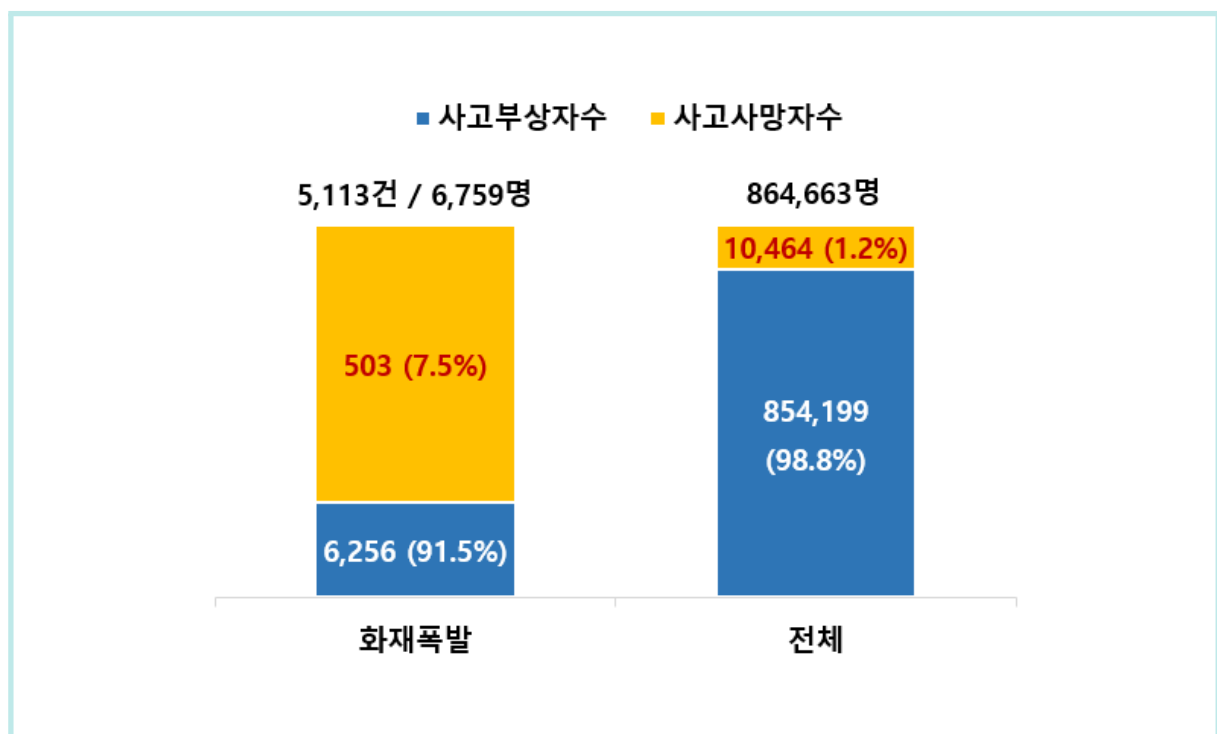
이 조사는 최근 10년간('11년~'20년) 국내 산재보험 적용 사업장에서 발생한 화재·폭발사고를 대상으로 아래와 같이 분류하여 각각의 사고 발생 분포 및 특성을 분석함으로써 향후 화재·폭발사고 예방 정책에 반영하거나 참고할 수 있는 기초자료를 제공하는 데 그 목적이 있다.

< 사고 분석 대상 >

- 전체 화재·폭발사고
- 가연성 분진의 착화로 발생한 화재·폭발사고(이하 '분진폭발사고')
- 정전기가 점화원이 되어 발생한 화재·폭발사고(이하 '정전기폭발사고')
- 정전기가 점화원이 되어 가연성 분진의 착화로 발생한 화재·폭발사고(이하 '정전기 분진폭발사고')

2.1. 국내 화재·폭발사고 발생현황 분석

최근 10년간('11년~'20년) 국내에서는 5,113건의 크고 작은 화재·폭발사고가 발생하였다. 이로 인해 발생한 사고재해자수는 6,759명에 달하며, 이는 같은 기간 국내에서 발생한 전체 사고재해자수(864,663명)의 0.8%에 불과하다. 그러나 사고재해자에서 사망자가 차지하는 비율의 경우, 전체 사고가 1.2%(10,464명) 수준에 불과한 반면 화재·폭발사고는 7.5%(503명)인 것으로 나타나 화재·폭발로 인한 사고의 치명도가 다른 유형의 사고에 비해 매우 높음을 알 수 있다. 그러므로 산재로 인한 사고사망자를 줄이기 위해 화재·폭발사고를 미연에 방지하기 위한 안전대책을 수립하고 실행하는 것은 선택이 아니라 필수라 할 수 있다.



[그림 1] 최근 10년간 화재·폭발사고 재해현황

다음 <표 1>은 최근 10년간('11년~'20년) 대형 인적피해가 발생한 화재·폭발사고 사례들이다. 대부분의 화재는 작업자들이 미처 피할 틈도 없이 연쇄폭발로 이어져 인명피해가 늘어나는 경향이 있으므로 화재취약 대상에 대한 화재예방 감시체계를 구축하고 관리하는 것이 무엇보다 중요하다.

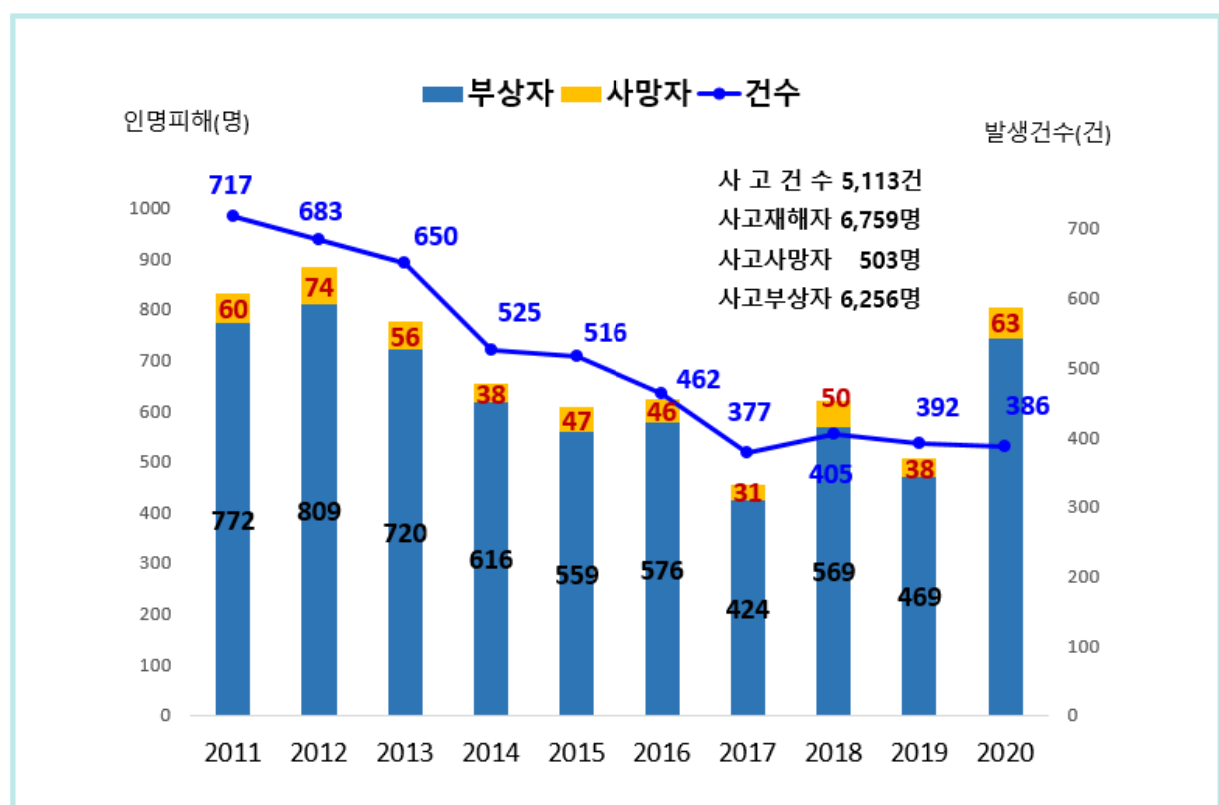
<표 1> 국내 대형 화재·폭발사고 사례

발생일시	사고 개요	인명피해	점화원	가연물
2011/8/27	PE섬유 제조공정 시험운전 중 헵탄(heptane) 건조설비(Drying Chamber)에서 폭발·화재가 발생	사망 5 부상 2	정전기	가연성 증기
2012/6/18	디졸바(믹서기) 혼합용기를 이용하여 아크릴점착제 생산 작업 중 화재·폭발사고 발생	사망 4 부상 9	정전기	가연성 증기
2012/8/23	용매로 사용한 1,4-Dioxane을 200ℓ 드럼으로 회수하는 과정에서 폭발이 발생	사망 9 부상 2	정전기	가연성 증기
2013/3/14	HDPE 저장탱크(사일로)의 정비·보수를 위해 용접작업을 실시하던 중 사일로 내 잔류해 있던 HDPE 분진이 폭발하여 발생	사망 6 부상 11	기계적 마찰·충격	가연성 분진
2015/7/3	폐수처리장 폐수집수조 상부에서 환경설비 개선공사 중 폐수집수조 내부에서 폭발 발생	사망 6 부상 1	용접불티	가연성 가스
2016/9/10	신나로 세척하여 둔 강관파이프와 연결자재에 고속절단기의 불티에 의해 화재 발생	사망 4 부상 2	불티 불꽃	가연성 증기
2017/8/20	R/O탱크 내부에서 스프레이 도장 작업 중 원인미상의 폭발사고 발생	사망 4	미상	가연성 증기
2018/8/21	전자부품용 회로기판 생산공장 4층 천장 내부에서 전기적 원인으로 추정되는 화재 발생	사망 9 부상 6	전기적 요인	건축물
2018/5/29	로켓추진 공정실에서 추진제를 충전하던 중 폭발사고 발생	사망 3 부상 2	미상	화학 물질
2018/1/26	밀양소재 요양 병원에서 전기적 원인으로 추정되는 화재 발생	사망 46 부상 112	전기적 요인	건축물
2019/2/14	이형작업장에서 추진기관 이형준비 작업 중 화재·폭발이 발생	사망 5 부상 3	미상	화학 물질
2020/4/29	냉동 및 냉장 물류창고 공사현장 지하 2 층에서 우레탄폼 작업시 발생하는 유증기에 용접불티가 점화원이 되어 폭발사고 발생	사망 38 부상 10	용접불티	가연성 증기

다음은 최근 10년간('11년~'20년) 국내에서 발생한 화재·폭발사고를 대상으로 연도별, 기간별, 시간별, 업종별, 규모별 발생 분포 및 설비별, 작업별 발생 특성을 분석한 자료이다.

1) 발생연도별

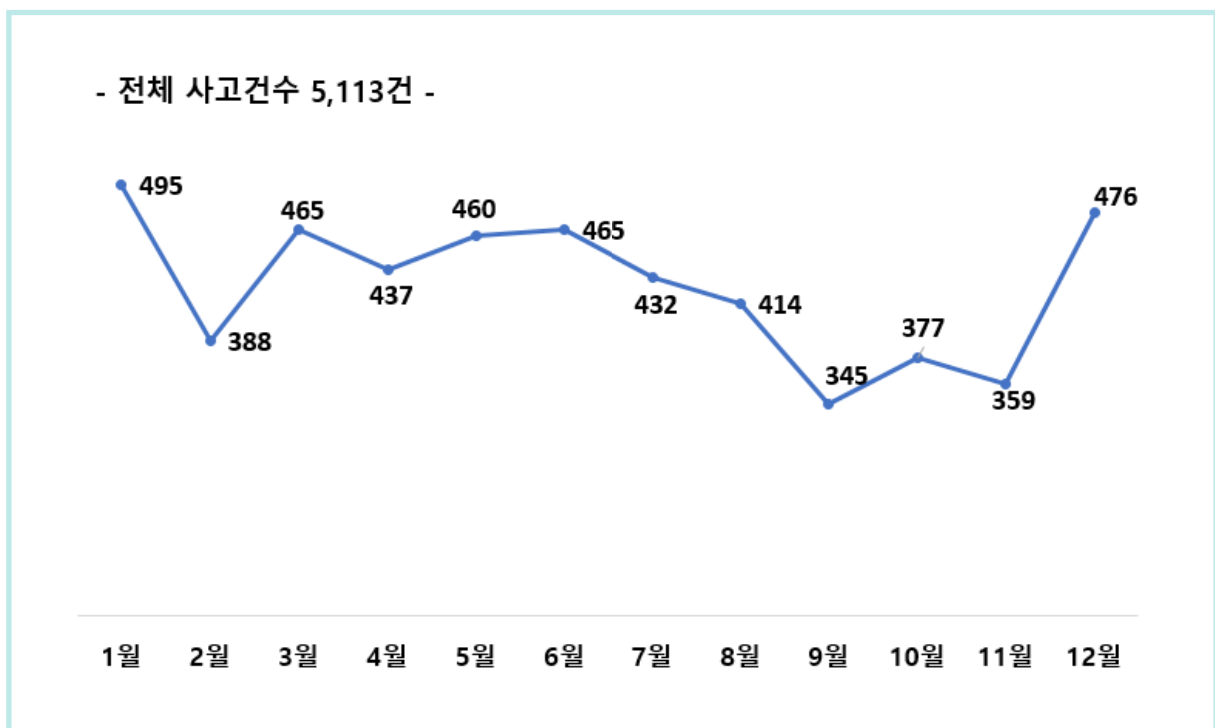
국내 화재·폭발사고 발생건수는 '11년부터 지속적으로 감소하는 추세를 보이다 2018년에 잠시 증가하였으나, 2019년부터 다시 감소하는 추세를 보이고 있다. 화재·폭발사고로 인한 사고재해자수 역시 '11년부터 지속적으로 감소하는 추세를 보이다 '20년에 크게 증가하였는데, 이는 그해 4월에 발생해 대규모 인명피해(사망자 36명, 부상자 8명)를 입힌 이천 물류센터 화재사고 때문인 것으로 분석된다.



[그림 2] 발생연도별 화재·폭발사고 재해현황

2) 발생시기별

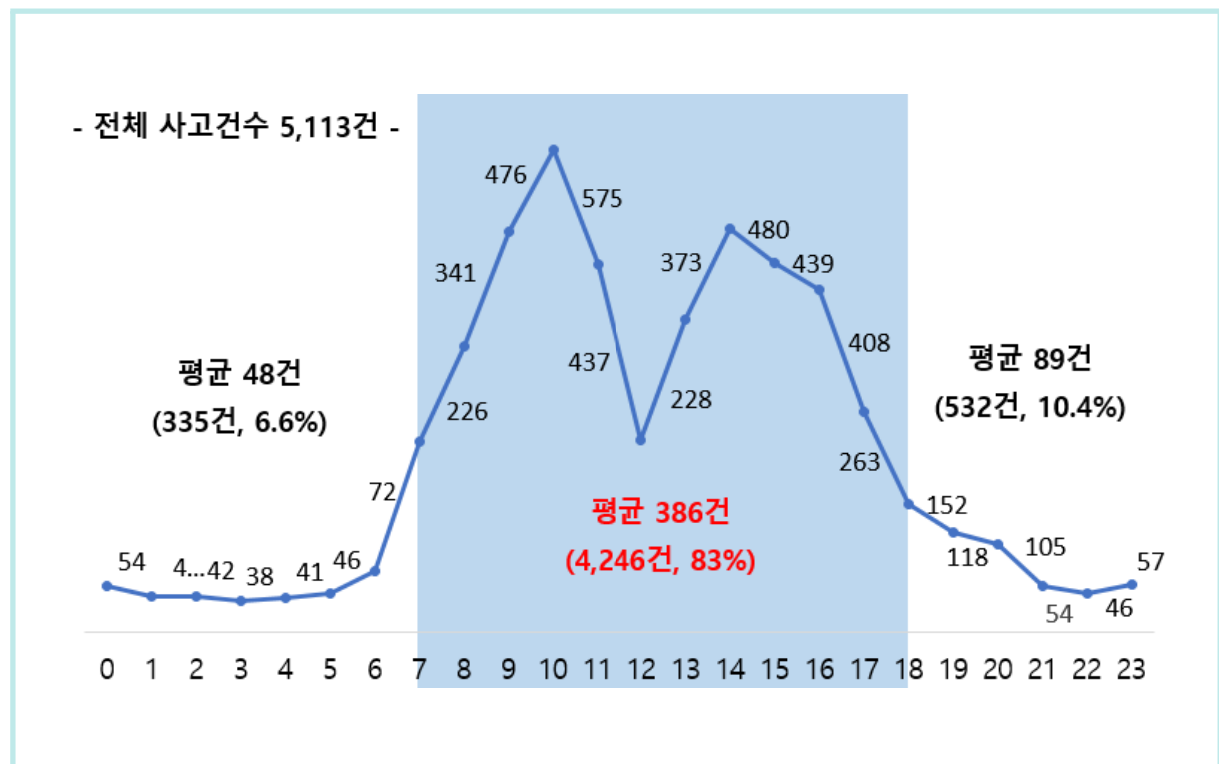
월별 화재·폭발사고 발생건수는 1월에 495건(10%)으로 가장 많이 발생하였으며, 계절별로는 봄(3월~5월)에 1,362건, 여름(6월~8월)에 1,311건, 가을(9월~11월)에 1,081건, 겨울(12월~2월)에 1,359건이 발생한 것으로 나타났다. 주택을 포함한 일반화재의 경우 난방을 위한 전열기구의 사용 등으로 겨울철에 많이 발생하나 사업장의 경우 계절에 따른 유의미한 차이는 없는 것으로 분석된다.



[그림 3] 발생시기별 화재·폭발사고 발생현황

3) 발생시간별

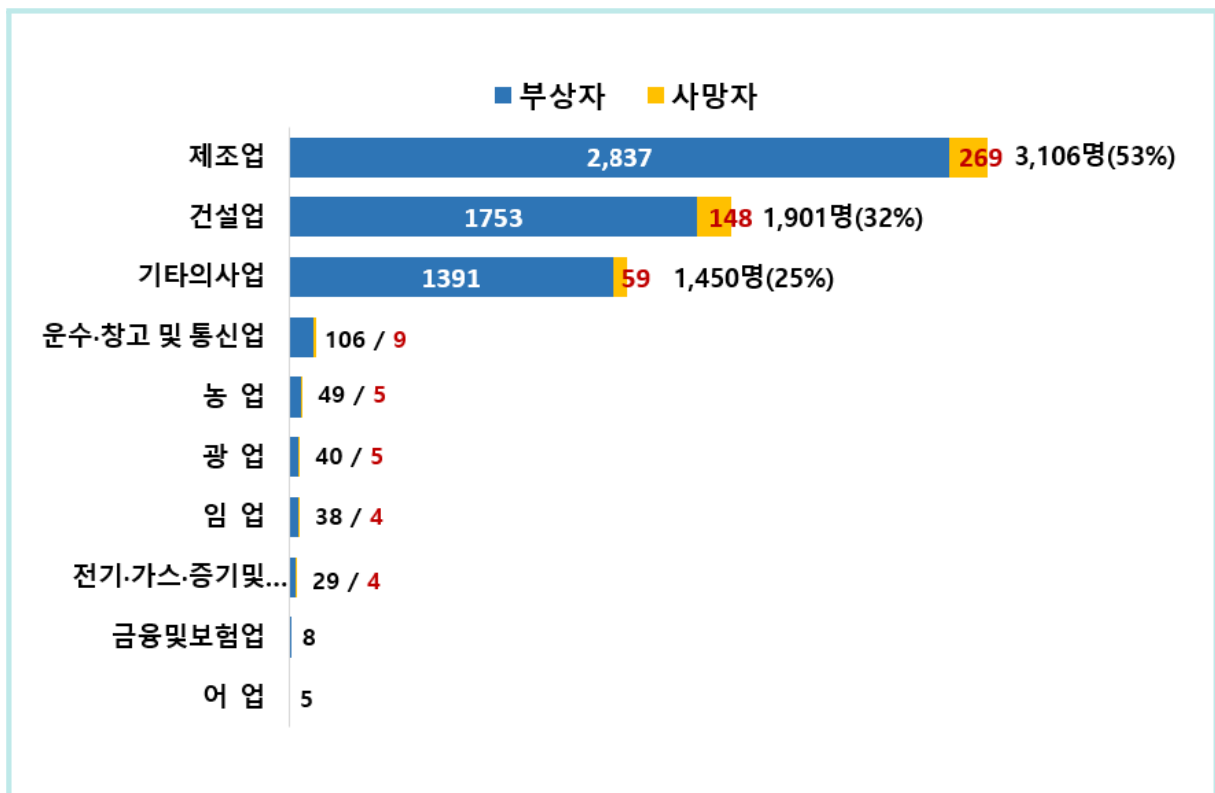
발생시간별 분석 결과 화재·폭발사고 발생건수(전체 5,113건)는 자정~8시 전까지 시간당 평균 47건(327건, 6.6%)으로 비교적 적으나, 작업을 준비하고 시작하는 아침 8시부터 증가하기 시작하여 작업이 끝나는 18시 전까지 평균 384건(4,229건, 83%)의 사고가 발생하였으며, 이후 18시부터 다시 감소하기 시작하여 자정 전까지 평균 89건(537건, 10.4%)의 사고가 발생한 것으로 나타났다. 이로 미루어 보아 대부분의 화재·폭발사고가 근무시간(8시~18시)에 발생하였음을 알 수 있다.



[그림 4] 발생시간별 화재·폭발사고 발생현황

4) (대)업종별

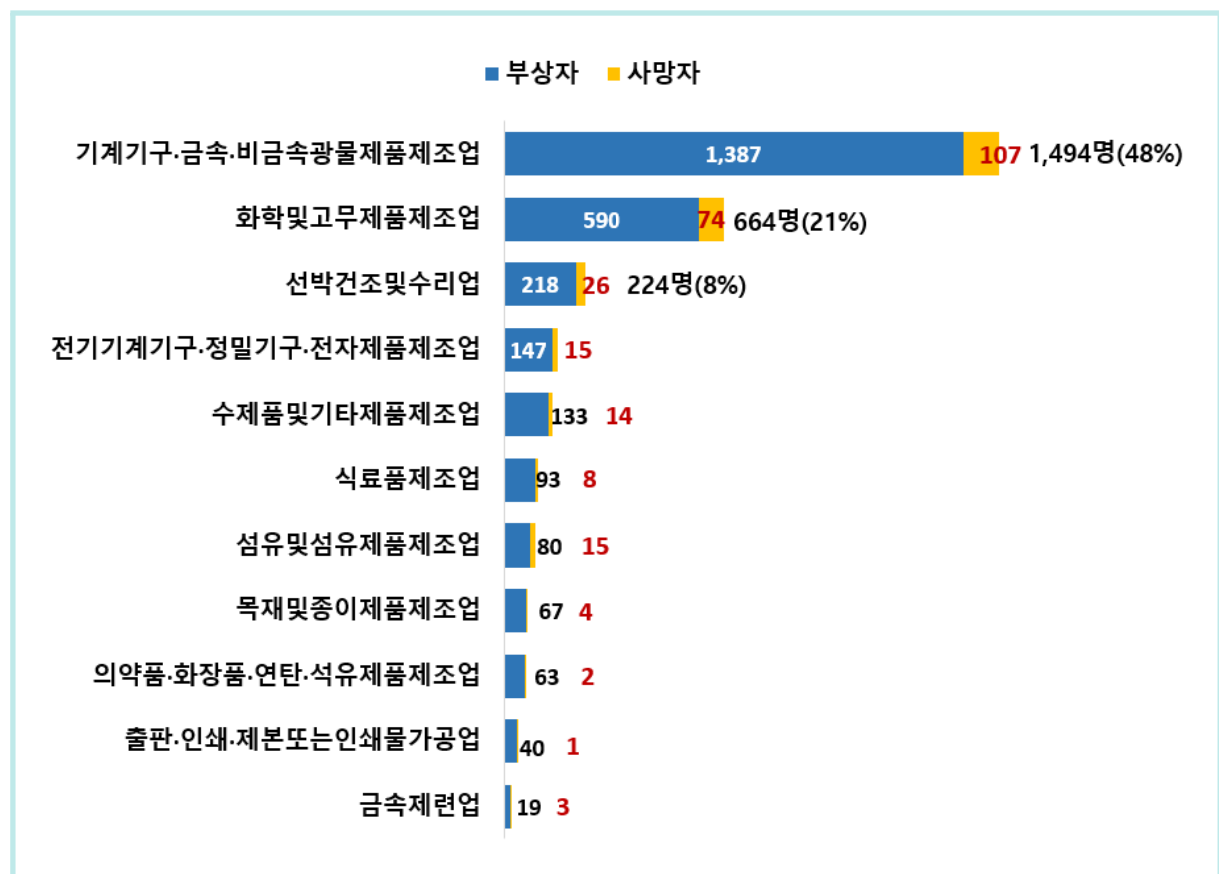
사업장 업종별 분석 결과 최근 10년간('11년~'20년) 화재·폭발사고로 인한 전체 사고재해자(6,759명) 중 85%(5,007명)가 제조업(3,106명, 53%)과 건설업(1,901명, 32%)에서 발생하였으며, 특히 전체 사망자(503명) 중 83%(417명)가 제조업(269명, 54%)과 건설업(148명, 29%)에서 발생하였다.



[그림 5] (대)업종별 화재·폭발사고 재해현황

5) (중)업종별

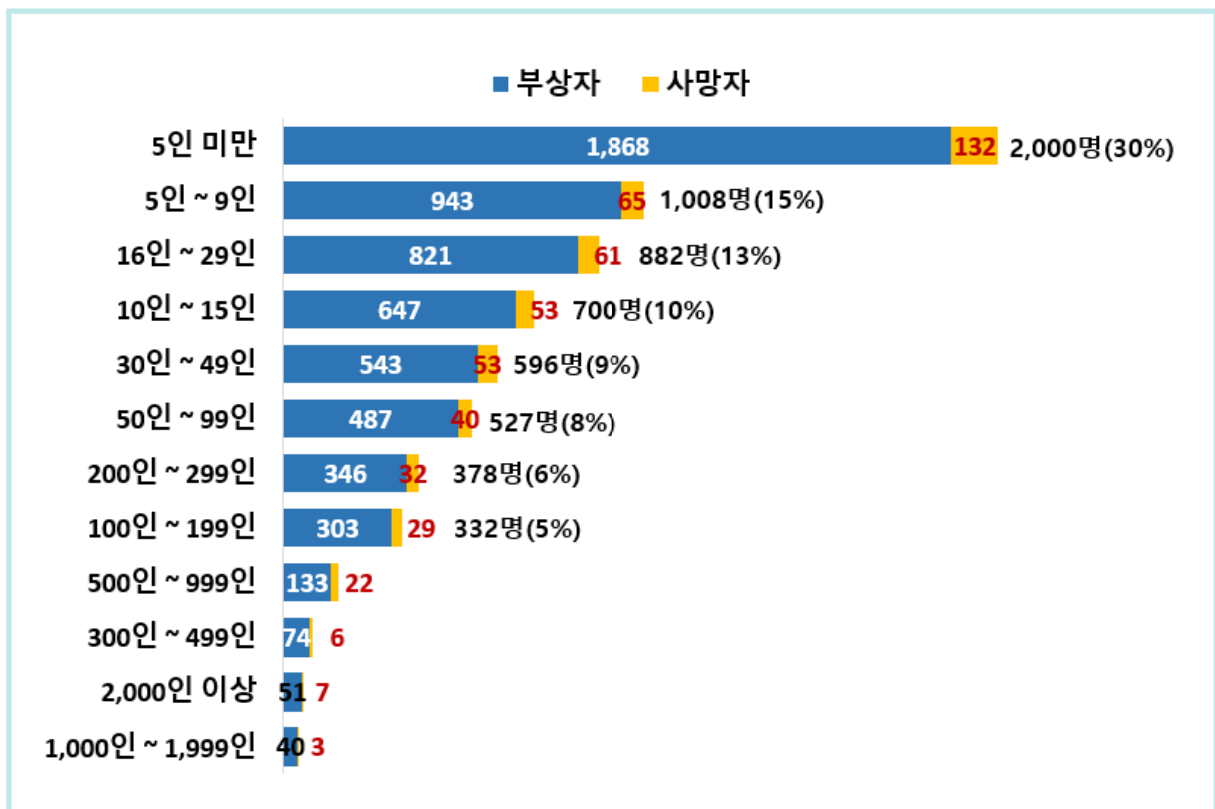
가장 많은 인명피해가 발생한 제조업 중에서는 재해자의 69%(2,158명)가 기계기구·금속·비금속광물제품제조업(1,494명, 48%)과 화학및고무제품제조업(664명, 21%)에서 발생하였다. 사고사망자 역시 기계기구·금속·비금속광물제품제조업에서 107명(39%)으로 가장 많이 발생하였으나, 재해자 중 사망자가 차지하는 비율은 기계기구·금속·비금속광물제품제조업 7.2%(107명), 화학및고무제품제조업 12.5%(74명)으로 나타나 화재 위험성이 높은 화학물질의 취급 및 사용이 많은 화학및고무제품제조업의 사고 치명도가 높은 것으로 나타났다.



[그림 6] 제조업 중업종별 화재·폭발사고 재해현황

6) 규모별

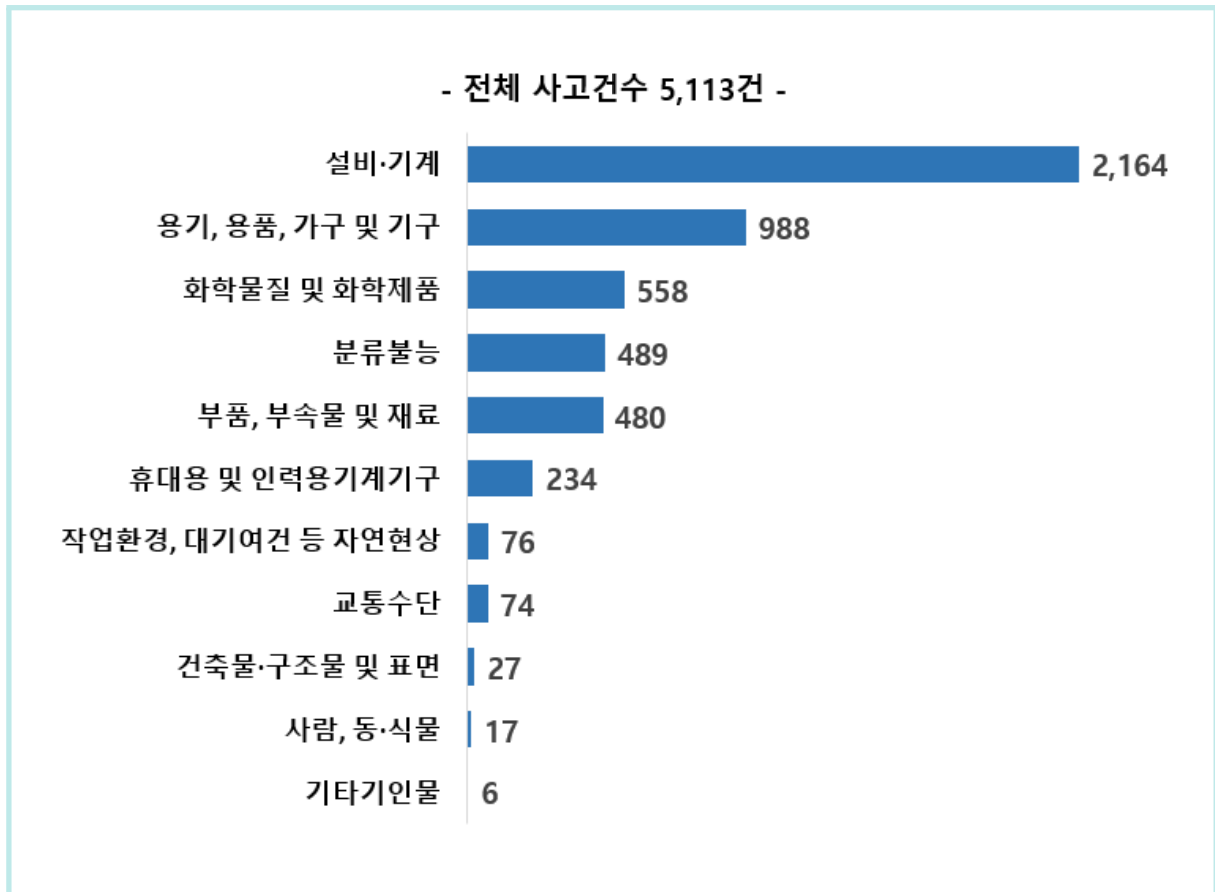
사업장 규모별 분석 결과 전체 재해자(6,759명) 중 77%(5,186명)가 50인 미만 소규모 사업장에서 발생하였으며, 특히 5인 미만 사업장에서 가장 많은 재해자(1,868명, 30%) 및 사망자(132명, 26%)가 발생하였다. 이는 이들 사업장의 화재·폭발 예방시설이 상대적으로 열악할 뿐만 아니라 화재·폭발사고의 상당수가 정비보수 등 비일상 작업을 수행하는 소규모 하청업체에서 발생하기 때문인 것으로 분석된다.



[그림 7] 규모별 화재·폭발사고 재해현황

7) 기인물별

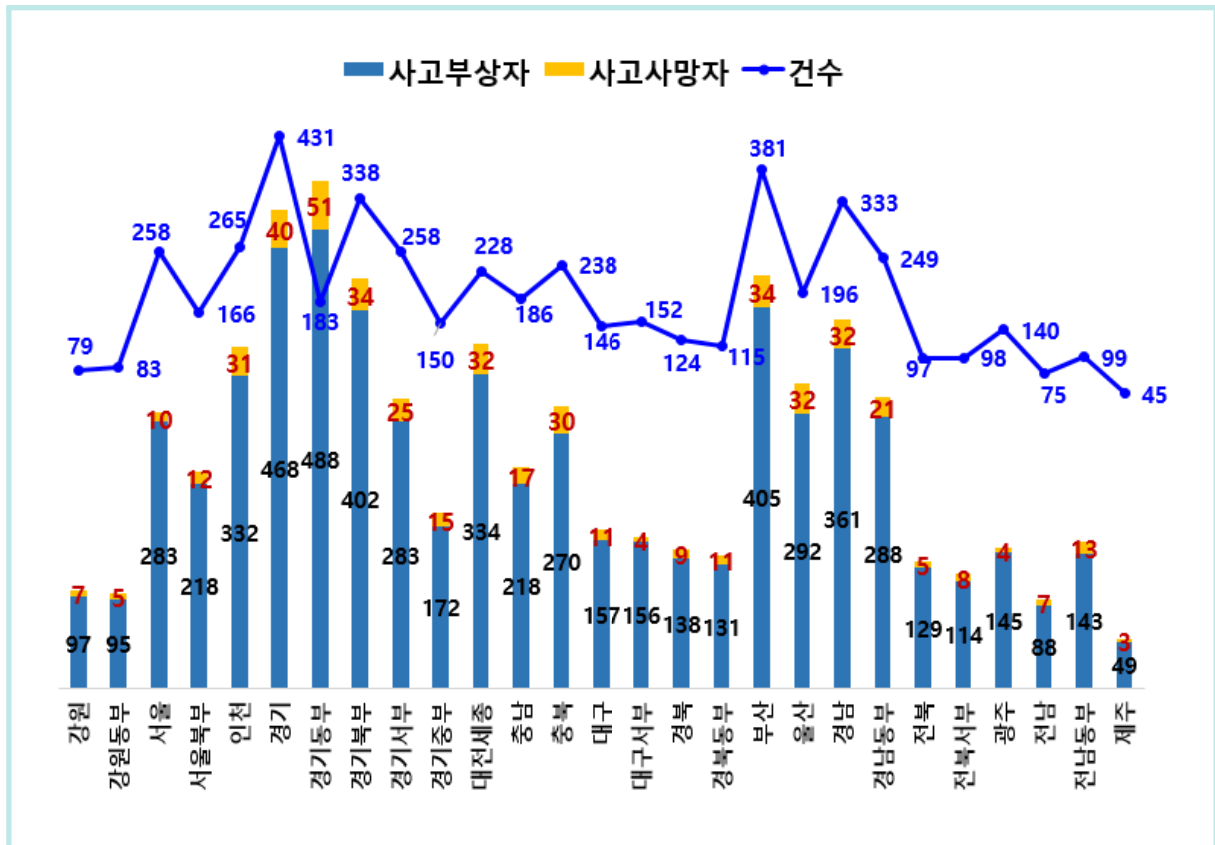
사고 기인물별 분석 결과 전체 사고발생건수 5,113건 중 42%(2,164건)가 반응기, 혼합기, 저장탱크, 열교환기, 증류탑 등의 화학설비에서 발생하였다.



[그림 8] 기인물별 화재·폭발사고 재해현황

8) 발생지역별

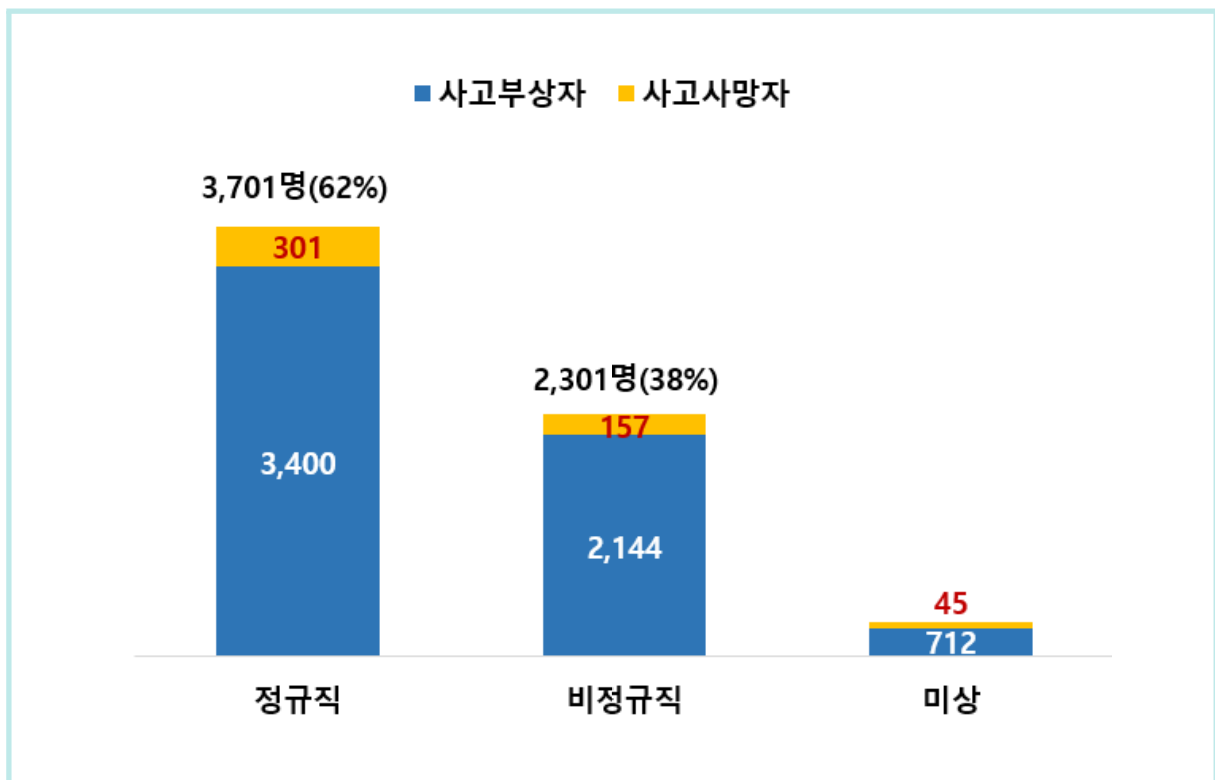
지역별 분석 결과 경기(431건), 경기북부(338건), 부산(381건), 경남(333건)에서 300건 이상의 화재·폭발사고가 발생하였다.



[그림 9] 지역별 화재·폭발사고 재해현황

9) 고용형태별

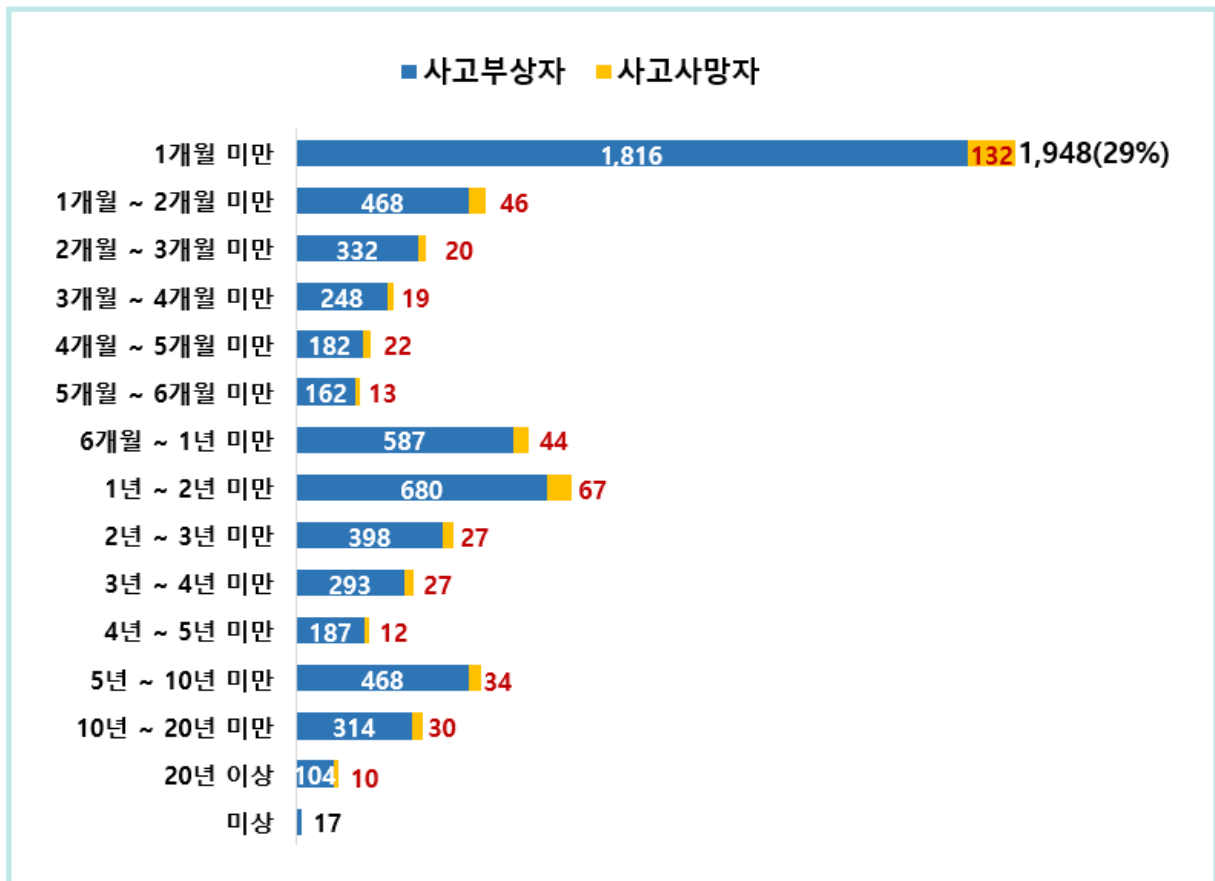
재해자 고용형태별 분석 결과 전체 재해자(6,256명) 중 38%(2,301명)가 비정규직 근로자로 주로 도급, 하청업체 소속 근로자이다. 이는 유해하고 위험한 작업을 법과 제도의 사각지대에 있는 하청업체 근로자 등 외부에 떠넘기는 ‘위험의 외주화’에 기인한 것으로 원청이 위험 업무를 외주화할 때 비용을 깎고 책임까지 하청에 떠넘기면서 안전관리가 제대로 이루어지지 않는다는 점에서 꾸준한 비판의 대상이 되고 있다.



[그림 10] 고용형태별 화재·폭발사고 재해현황

10) 근속기간별

재해자 근속기간별 분석 결과 전체 재해자(6,759명) 중 61%(4,091명)가 근속기간 1년 미만의 근로자로 특히 전체 재해자의 29%(1,948명), 전체 사망자의 26%(132명)가 근속기간 1개월 미만의 근로자인 것으로 나타났다. 이는 근로자가 새로운 작업에 대한 위험성을 충분히 인지하지 못한 채 작업 수행 시 사고로 이어지는 경우가 많으므로 이를 예방하기 위해 새로운 작업 전 충분한 안전교육 및 안전점검을 절대 간과해서는 안 된다.

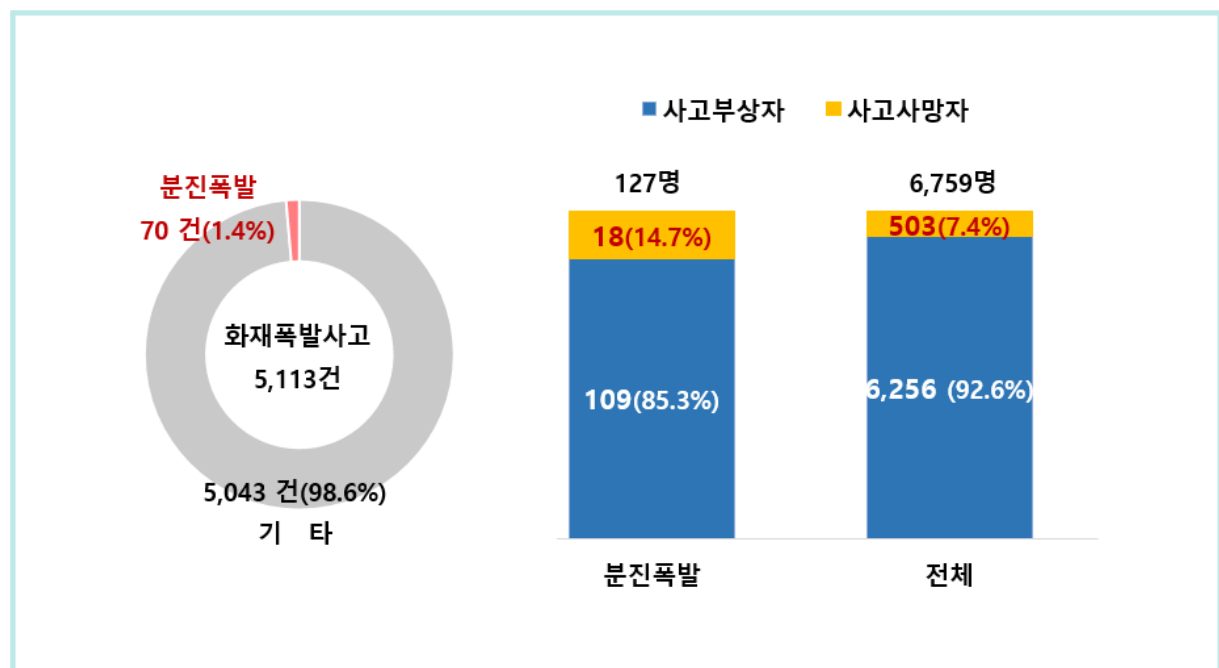


[그림 11] 근속기간별 화재·폭발사고 재해현황

2.2. 분진폭발사고 발생 현황 분석

산업현장 곳곳에서 분진폭발사고가 끊임없이 발생하고 있지만 대부분의 사업장에서 분진폭발의 기본개념 및 위험성에 대해 충분히 인지하지 못하고 있는 것이 현실이다. 본 평가에서는 최근 10년간('11년~'20년) 국내에서 발생한 분진폭발사고의 특성 분석을 통해 향후 동종사고 예방 정책 수립 시 반영하거나 참고할 수 있는 정보를 제공하고자 한다.

최근 10년간('11년~'20년) 국내에서는 총 70건의 분진폭발사고가 발생하였으며 이로 인해 18명의 사고사망자를 포함한 127명의 사고재해자가 발생하였다. 이는 전체 화재·폭발 사고재해자수(6,759명)의 1.9%에 불과한 수준이나 전체 화재·폭발 사고재해자 중 사망자 비율이 7.4%(503명)인 반면 분진폭발사고로 발생한 사고사망자는 사고재해자(127명)의 14.7%(18명)에 해당하는 것으로 나타나 분진폭발사고의 치명도가 다른 유형의 사고에 비해 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 이는 분진폭발사고 발생 시 최초 폭발에 의해 발생한 폭풍으로 주위에 퇴적되어 있던 분진들이 날리면서 연속적으로 점화되어 2차, 3차의 분진폭발을 일으켜 인적·물적 피해가 가중되는 특성에 기인한 것으로 추정된다.

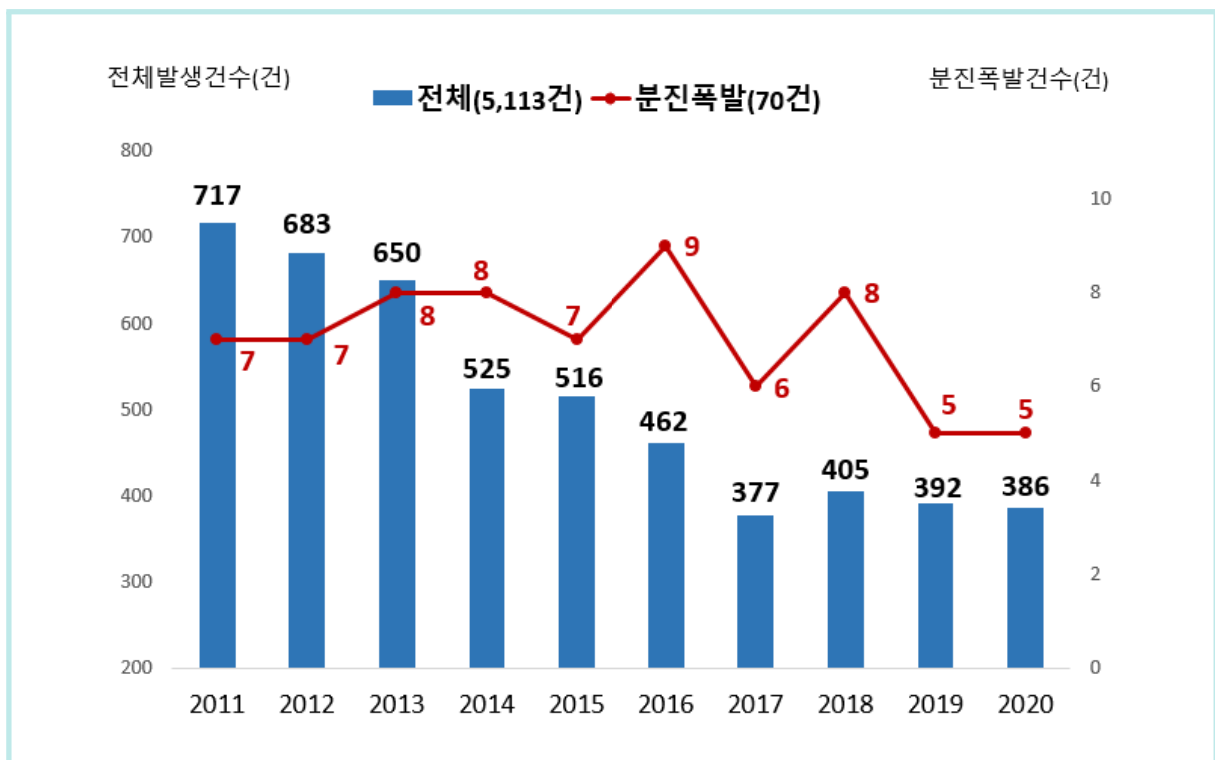


[그림 12] 최근 10년간 분진폭발사고 재해현황

다음은 최근 10년간('11년~'20년) 국내에서 발생한 분진폭발사고를 대상으로 연도별, 기간별, 시간별, 업종별, 규모별 발생 분포 및 설비별, 작업별 발생 특성을 분석한 자료이다.

1) 발생연도별

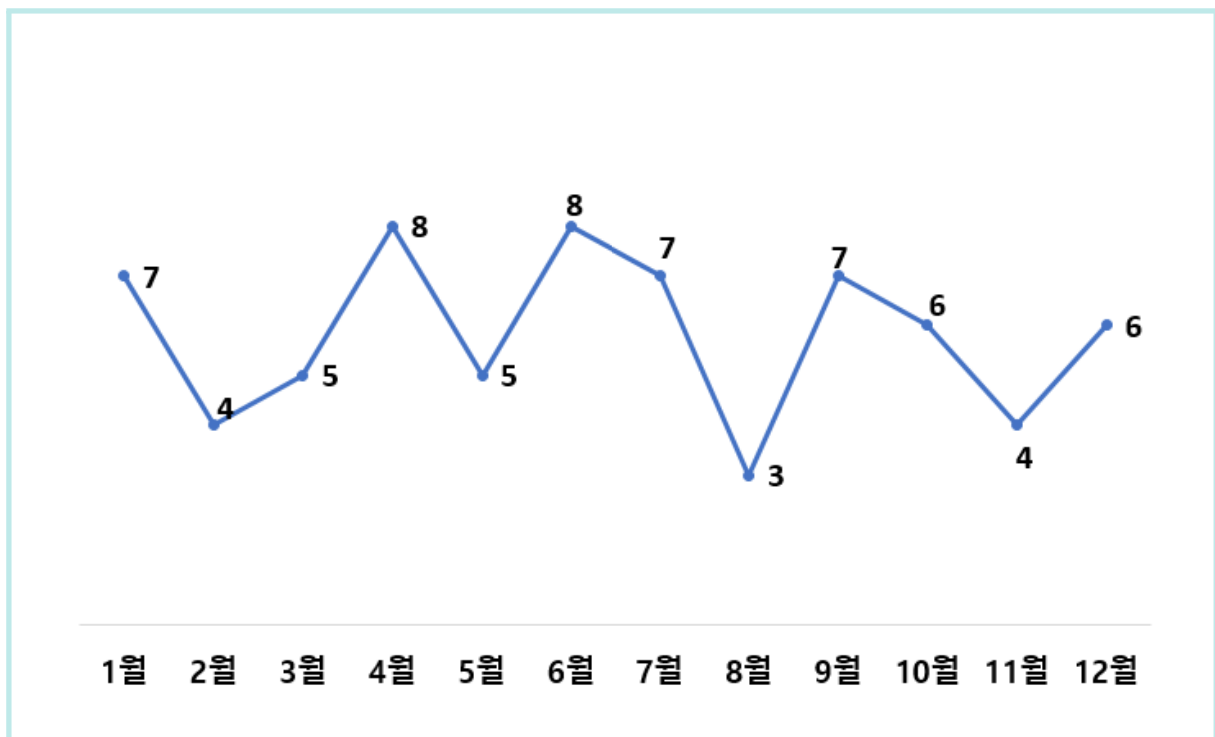
최근 10년간('11년~'20년) 국내 분진폭발사고 발생건수는 총 70건으로 매년 10건 이하 수준으로 발생하고 있으며, 2019년부터 감소하는 추세를 보이고 있다.



[그림 13] 연도별 분진폭발사고 발생현황

2) 발생시기별

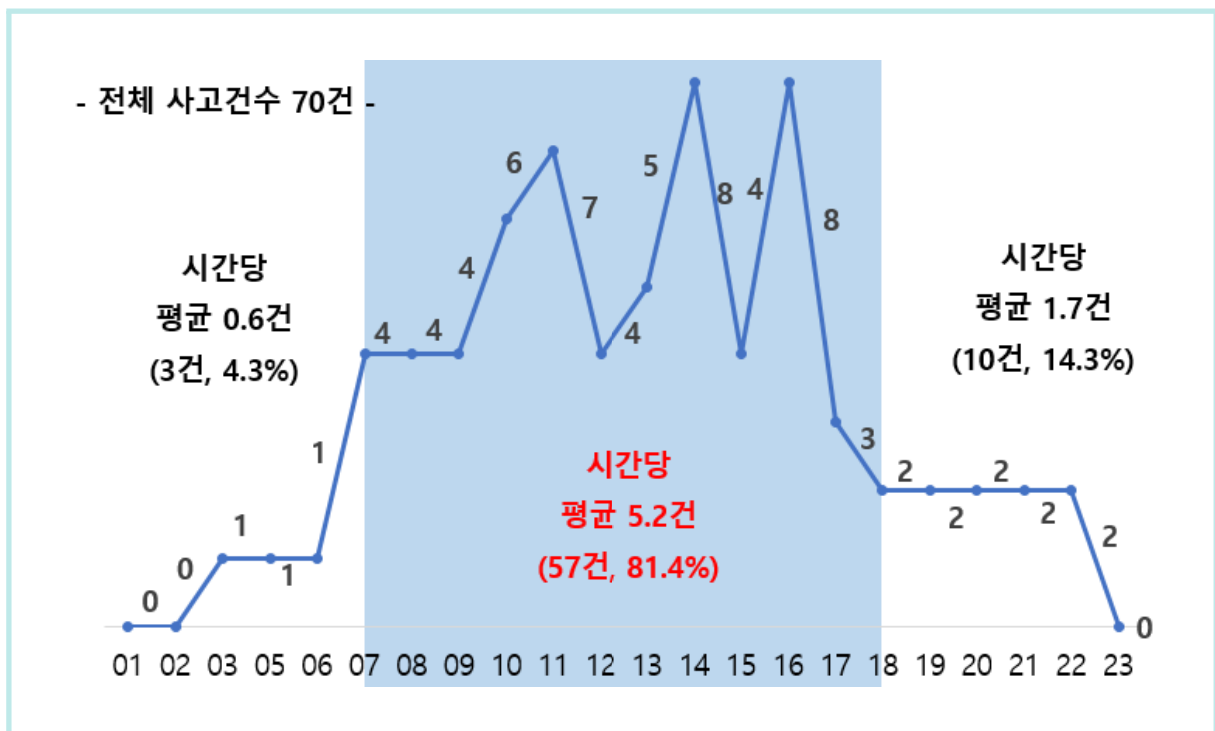
월별 분석 결과 분진폭발사고 발생건수(전체 70건)는 4월과 6월에 8건으로 가장 많이 발생하였으며, 계절별로는 봄(3월~5월)에 18건, 여름(6월~8월)에 18건, 가을(9월~11월)에 17건, 겨울(12월~2월)에 17건이 발생한 것으로 나타나 계절에 따른 유의미한 차이는 없는 것으로 분석된다.



[그림 14] 발생시기별 분진폭발사고 발생현황

3) 발생시간별

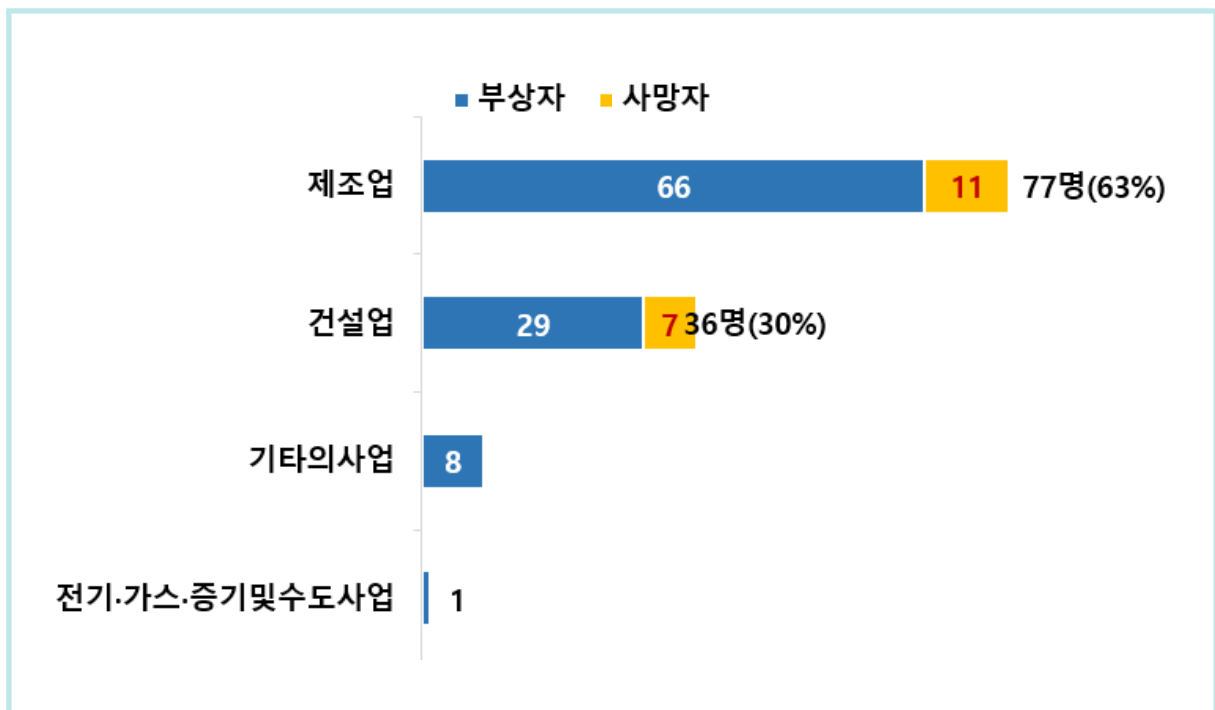
발생시간별 분석 결과 분진폭발사고 발생건수(전체 70건)는 자정~7시 전까지 시간당 평균 0.6건(3건, 4.3%)에 불과하나, 작업을 준비하고 시작하는 아침 7시부터 증가하기 시작하여 작업이 끝나는 18시 전까지 평균 5.2건(57건, 81.4%)의 사고가 발생하였다. 이후 18시부터 다시 감소하기 시작하여 자정 전까지 평균 1.7건(10건, 14.3%)의 사고가 발생한 것으로 나타났다. 이로 미루어 보아 대부분의 화재·폭발사고가 근무시간(7시~18시)에 발생하였음을 알 수 있다.



[그림 15] 발생시간별 분진폭발사고 발생현황

4) (대)업종별

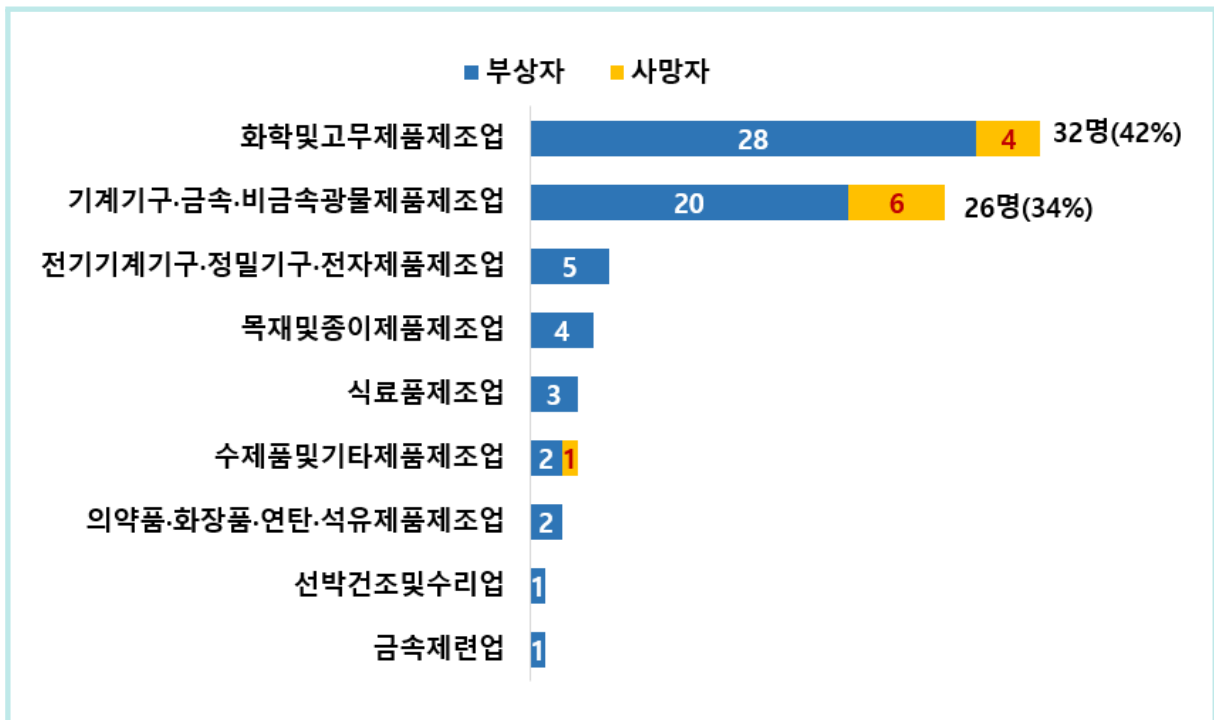
업종별 분석 결과 최근 10년간('11년~'20년) 분진폭발사고로 인한 사고재해자(127명)의 63%(77명)가 제조업에서 발생하였다. 이는 전체 화재·폭발사고 재해자(6,759명) 중 제조업이 차지하는 비율(30%, 3,106명)보다 월등히 높은 수치로, 분진폭발사고의 대부분이 밀폐공간에서 발생하는 특성에 기인한 것으로 추정된다.



[그림 16] 업종별 분진폭발사고 재해현황

5) (중)업종별

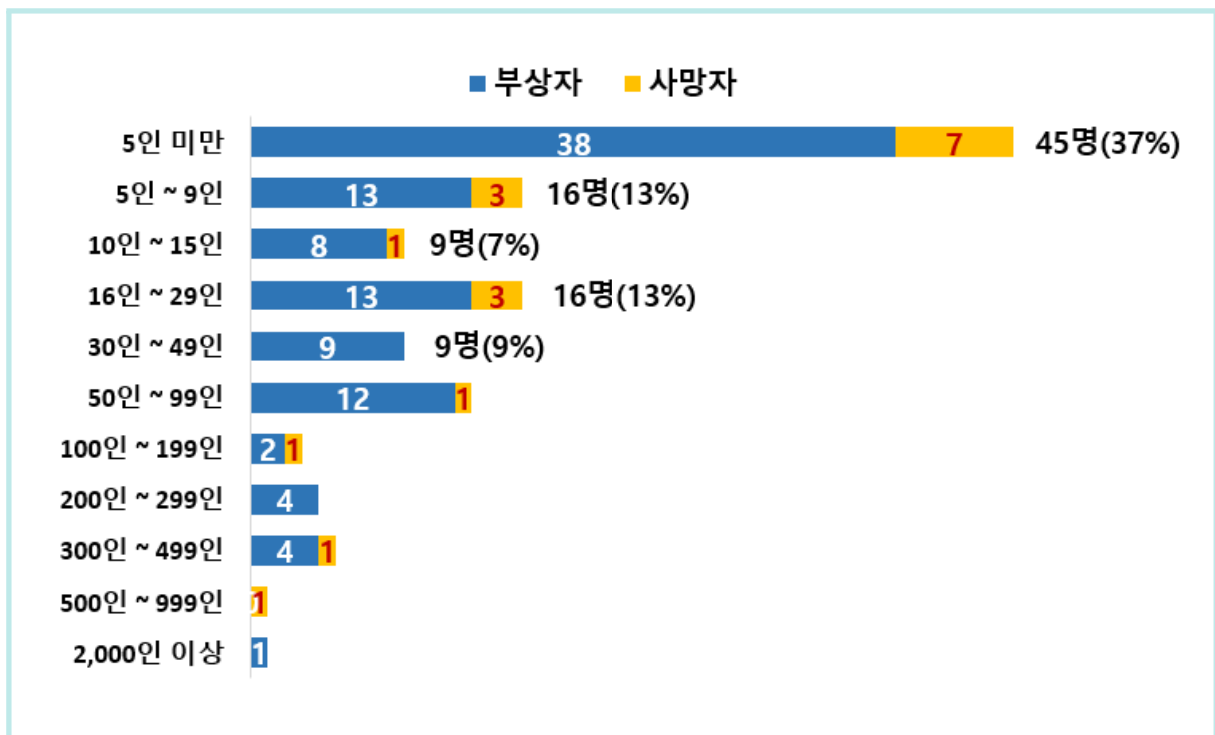
가장 많은 인명피해가 발생한 제조업 중에서는 전체 화재·폭발사고 (중)업종별 분석결과와 마찬가지로 재해자의 76%(58명)가 화학및고무제품제조업(32명, 42%)과 기계기구·금속·비금속광물제품제조업(26명, 34%) 2개의 (중)업종에서 발생하였다. 그러나 전체 화재·폭발사고로 인한 재해자가 기계기구·금속·비금속광물제품제조업(1,494명, 48%)에서 가장 많이 발생한 반면 분진폭발사고로 인한 재해자는 화학및고무제품제조업에서 가장 많이 발생한 것으로 나타났다.



[그림 17] 제조업 중업종별 분진폭발사고 재해현황

6) 규모별

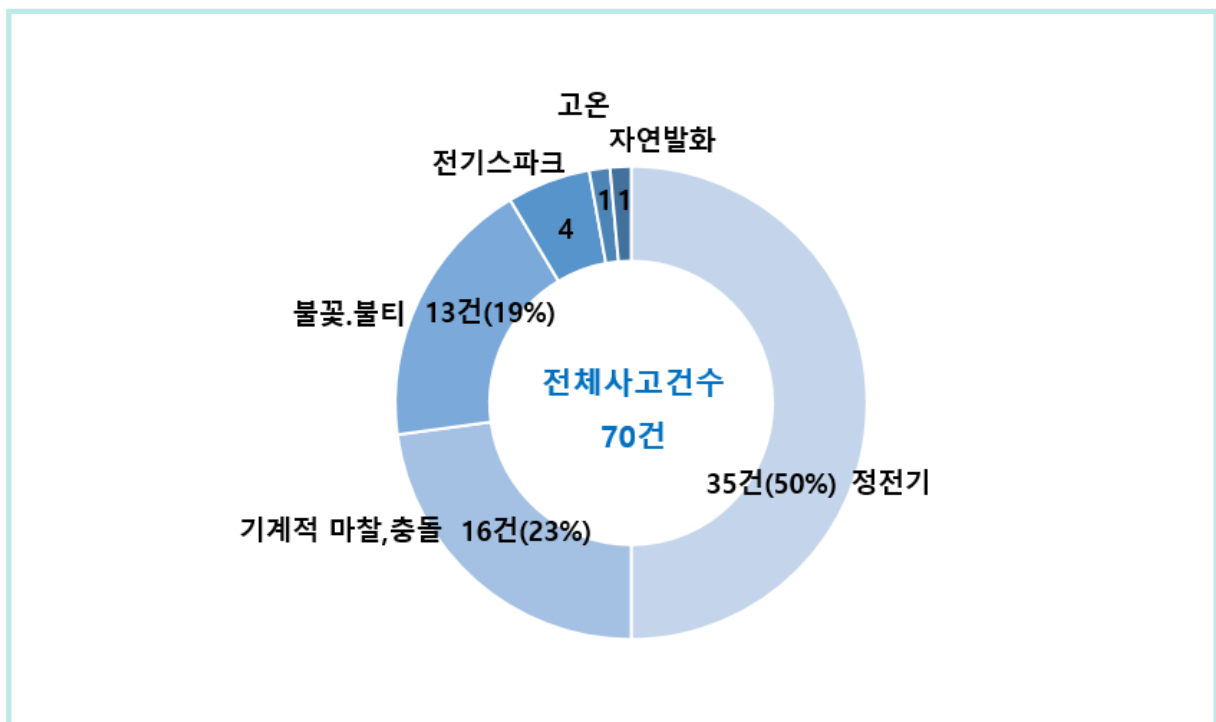
사업장 규모별 분석 결과 분진폭발사고 역시 전체 화재·폭발사고와 마찬가지로 분진폭발사고 사고재해자(127명) 중 75%(95명)가 50인 미만 소규모 사업장에서 발생하였으며, 특히 화재·폭발 예방시설이 상대적으로 열악한 5인 미만 사업장에서 가장 많은 재해자(45명, 37%) 및 사망자(7명, 39%)가 발생하였다.



[그림 18] 규모별 분진폭발사고 재해현황

7) 점화원별

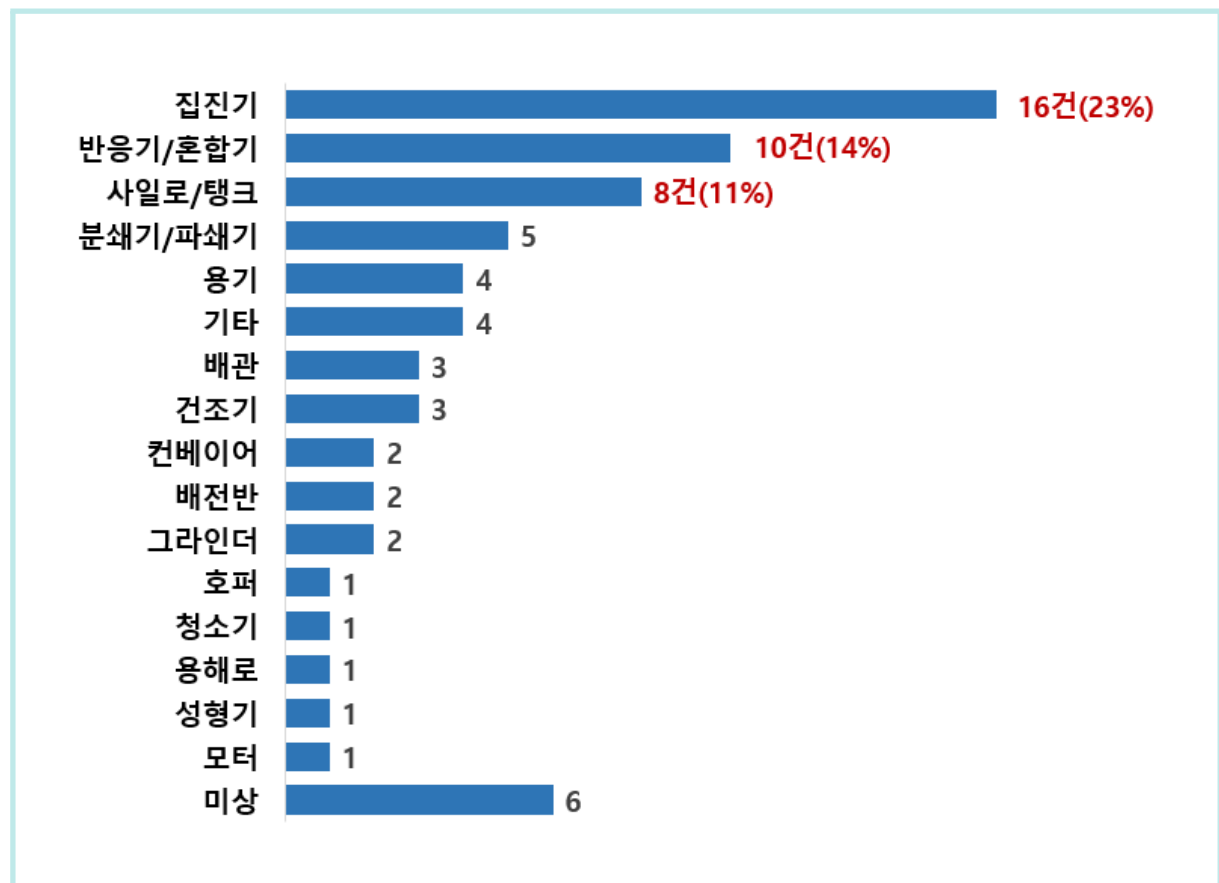
화재·폭발사고는 다양하고 복합적인 요인들에 의해서 발생하는 경우가 많아 화재·폭발사고의 계기가 되는 점화원을 규명하는 것은 매우 어려운 숙제이다. 부유 및 퇴적상태의 분진을 착화시키는 점화원에는 마찰·충돌에 의한 기계적 에너지, 불꽃·불티, 전기 스파크, 고온표면, 자연발화 등이 있으며, 최근 10년간('11년~'20년) 국내에서 발생한 분진폭발사고 분석 결과 전체 70건 중 35건(50%)의 사고가 정전기가 점화원이 되어 발생한 사고로 추정된다.



[그림 19] 점화원별 분진폭발사고 발생현황

8) 발생설비별

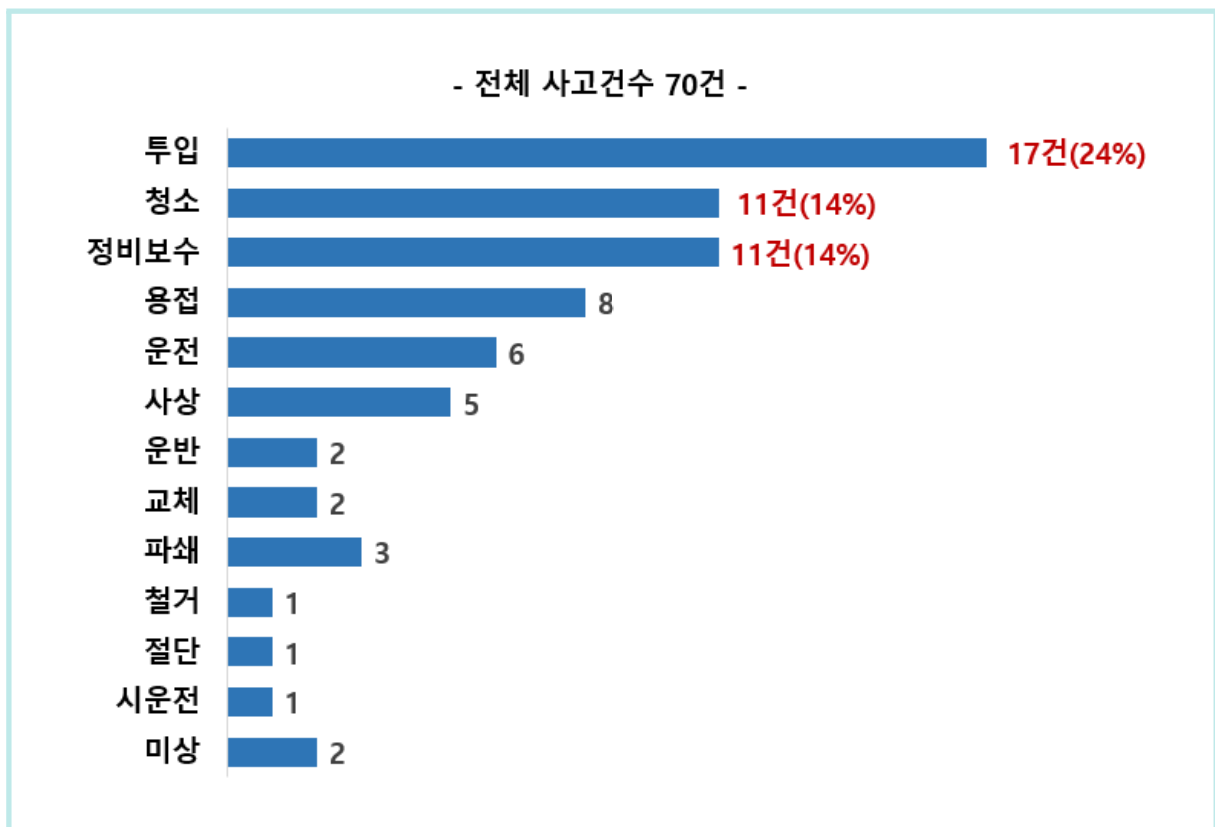
발생설비별 분석 결과 분진폭발사고는 집진기에서 16건, 반응기 및 혼합기에서 13건, 사일로 등의 저장탱크에서 8건이 발생해 확실하지 않거나 분류할 수 없는 설비(11건)를 제외하면 분진폭발사고의 절반가량(48%)이 이들 설비에서 발생한 것으로 나타났다. 그러므로 집진기 정비·청소, 반응기 및 혼합기에 분체원료 투입 등의 작업 시 분진폭발사고를 미연에 방지할 수 있는 별도의 조치가 반드시 선행되어야 한다.



[그림 20] 발생설비별 분진폭발사고 발생현황

9) 발생작업별

발생작업별 분석 결과 분진폭발사고는 원료 투입 17건(24%), 설비 정비보수 11건(14%), 청소 11건(14%), 용접 8건(11%) 등의 작업 시 발생하는 경우가 많으며, 대부분 분진폭발 위험성에 대해 충분히 인지하지 못한 작업자의 불안전한 행동에 기인하여 발생하는 경우가 많다. 그러므로 작업 전 분진폭발에 대한 작업자의 충분한 이해와 사전 위험성평가를 통해 분진폭발사고를 미연에 방지할 수 있는 별도의 조치가 반드시 선행되어야 한다.

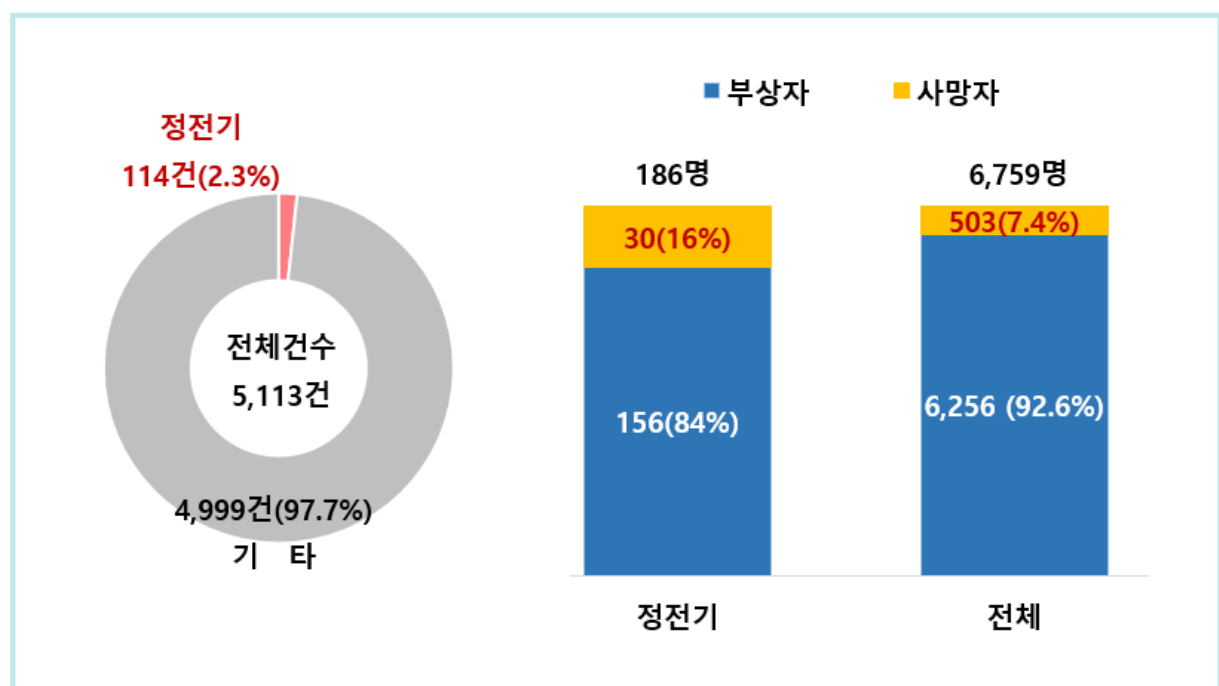


[그림 21] 발생작업별 분진폭발사고 발생현황

2.3. 정전기폭발사고 발생 현황 분석

정전기는 주로 아주 건조한 겨울철에 문을 열기 위해 손잡이를 잡거나 옷을 벗거나 입을 때 등 우리의 일상생활 속에서 흔히 발생하여 순간 찌릿함과 불쾌감을 주곤 한다. 어쩌면 가볍게 여길 수 있는 순간이지만 주유소와 같이 유증기가 가득 차 있는 장소에서 정전기로 인해 자칫하면 대형 화재·폭발사고가 발생할 수 있다. 이 뿐만 아니라 정전기는 산업현장에서 설비 및 장치의 고장이나 장애를 일으켜 생산에 차질을 발생시키기도 하며, 가연성 화학물질을 제조 또는 취급하는 장소에서 대형 화재·폭발사고의 직·간접적인 원인이 되기도 한다.

최근 10년간('11년~'20년) 정전기폭발사고 발생건수는 114건으로 전체 화재·폭발사고 건수(5,113건)의 2.3%에 해당하며, 사고재해자수는 186명으로 이는 전체 화재·폭발 사고재해자수(6,759)의 2.2%에 해당한다

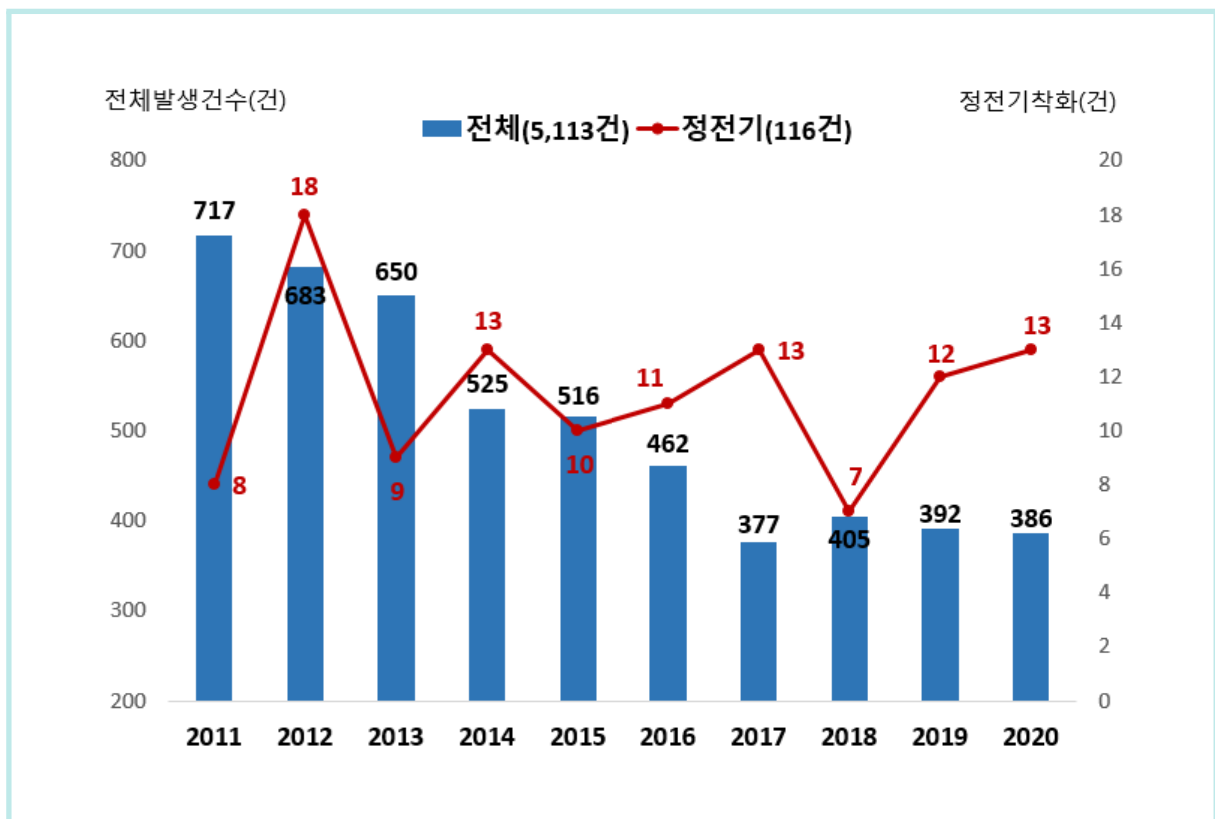


[그림 22] 최근 10년간 정전기폭발사고 발생현황

다음은 최근 10년간('11년~'20년) 국내에서 발생한 정전기폭발사고를 대상으로 연도별, 기간별, 시간별, 업종별, 규모별 발생 분포 및 설비별, 작업별 발생 특성을 분석한 자료이다.

1) 발생연도별

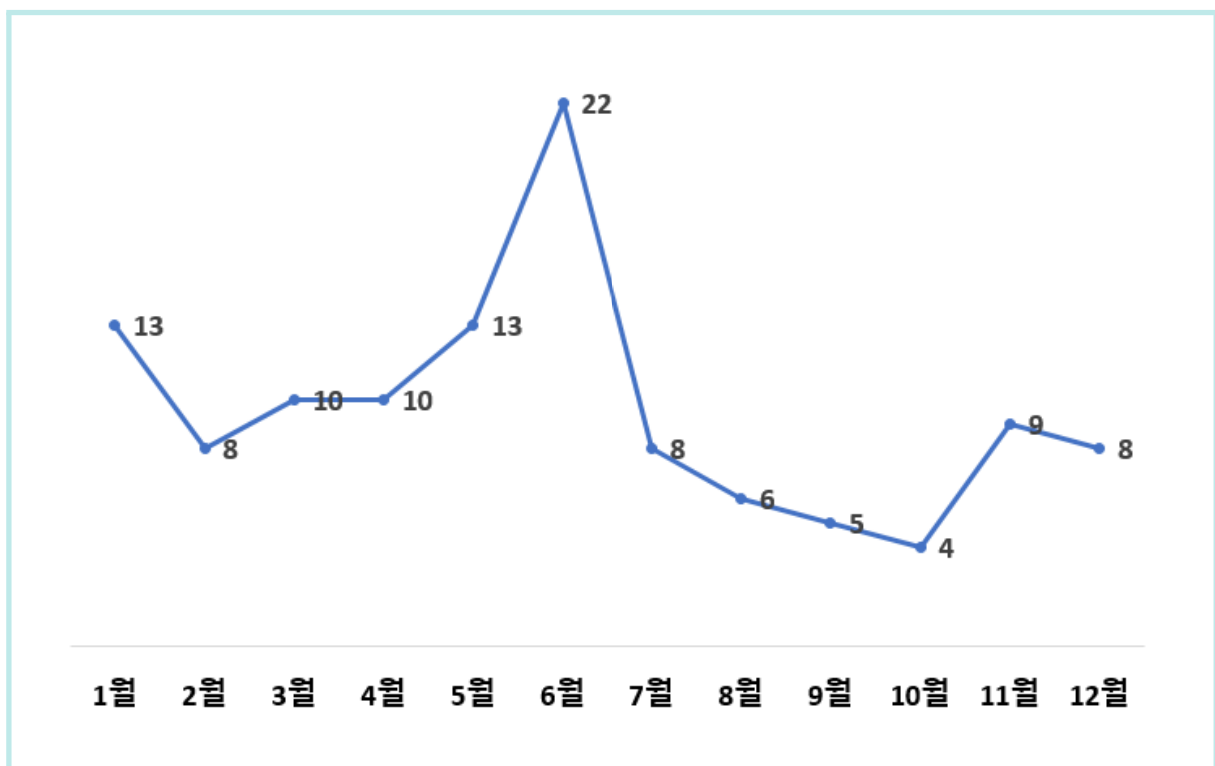
전체 화재·폭발사고는 '11년부터 지속적으로 감소하는 추세를 보이고 있는 반면, 정전기폭발사고는 2018년까지 증감을 반복하다 2018년 이후 증가하고 있는 추세이다



[그림 23] 연도별 정전기폭발사고 발생현황

2) 발생시기별

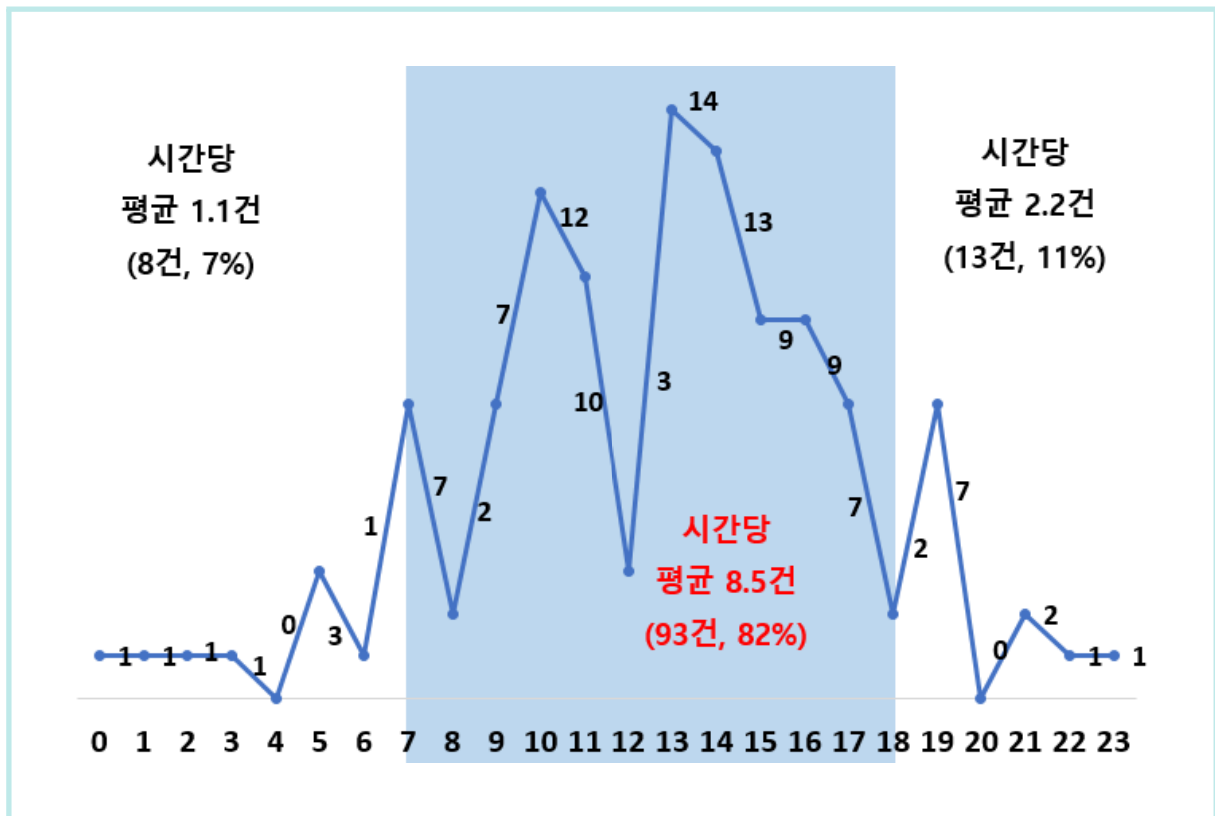
정전기는 건조할 때 주로 발생하기 때문에 습한 여름보다는 겨울이나 봄에 주로 발생하지만 정전기폭발사고는 6월에 22건(19%)으로 가장 많이 발생한 것으로 나타났다. 계절별로는 봄(3월~5월)에 33건, 여름(6월~8월)에 36건, 가을(9월~11월)에 18건, 겨울(12월~2월)에 29건이 발생하여 계절에 따른 유의미한 차이는 없는 것으로 나타났다.



[그림 24] 발생시기별 정전기폭발사고 재해현황

3) 발생시간별

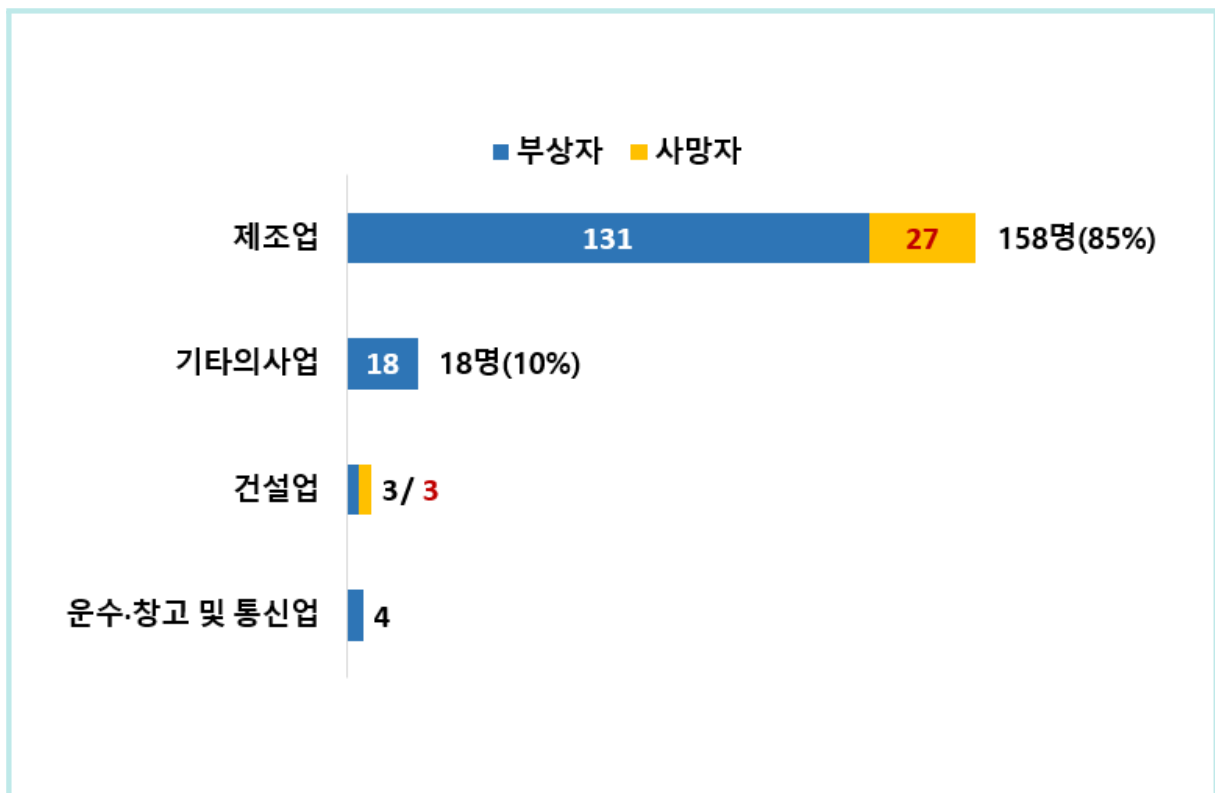
발생시간별 분석 결과 정전기폭발사고는 자정~7시 전까지 시간당 평균 1.8건(9건, 7.8%)에 불과하나, 작업을 준비하고 시작하는 아침 7시부터 증가하기 시작하여 작업이 끝나는 18시 전까지 시간당 평균 8.4건(92건, 80%)의 사고가 발생하였다. 이후 18시부터 다시 감소하기 시작하여 자정 전까지 시간당 평균 3건(15건, 12.2%)의 사고가 발생한 것으로 나타났다. 이로 미루어 보아 주로 근무시간에 화재·폭발사고가 발생하였음을 알 수 있다.



[그림 25] 발생시간별 정전기폭발사고 발생현황

4) (대)업종별

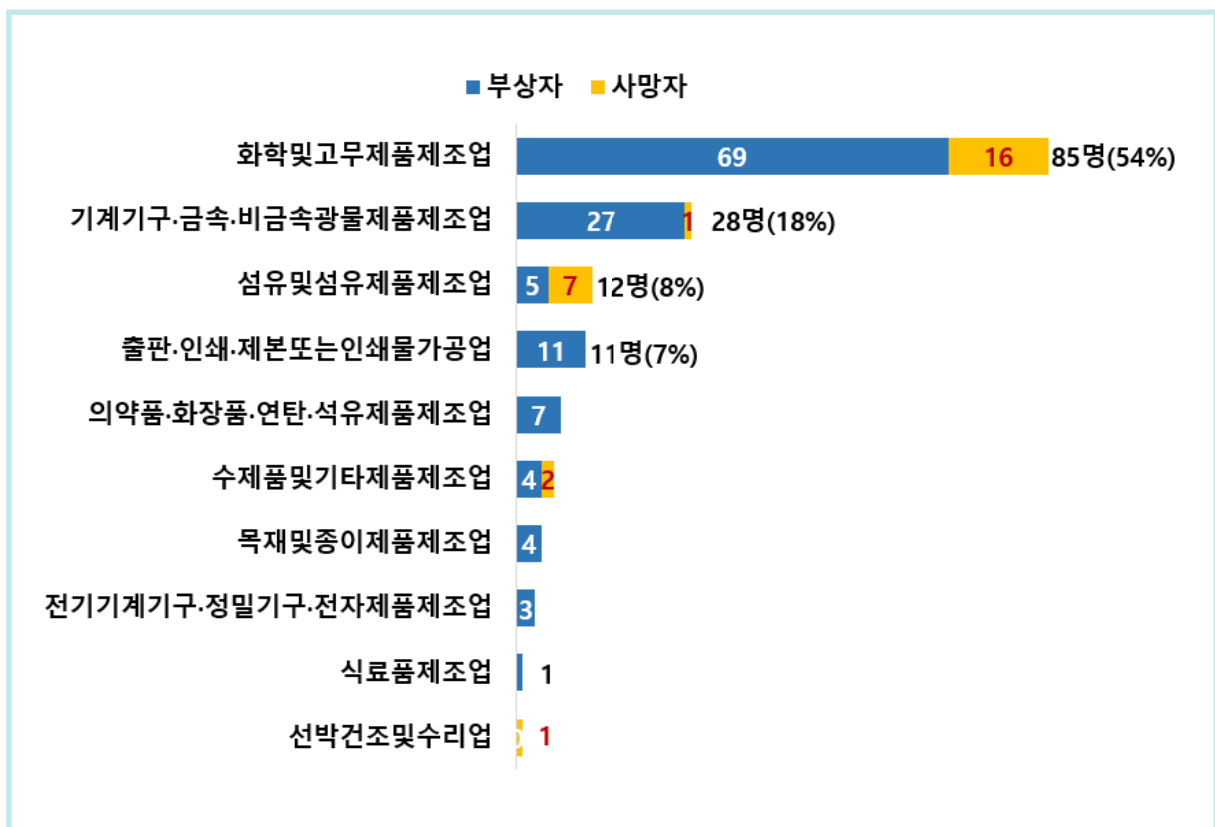
업종별 분석 결과 정전기폭발사고로 발생한 사고재해자(186명)의 85%(158명)가 제조업에서 발생하였으며, 이는 전체 화재·폭발사고 재해자(6,759명) 중 제조업이 차지하는 비율(48%)보다 월등히 높은 수치로, 분진폭발사고의 대부분이 밀폐공간에서 발생하는 특성에 기인한 것으로 추정된다.



[그림 26] 업종별 정전기폭발사고 재해현황

5) (중)업종별

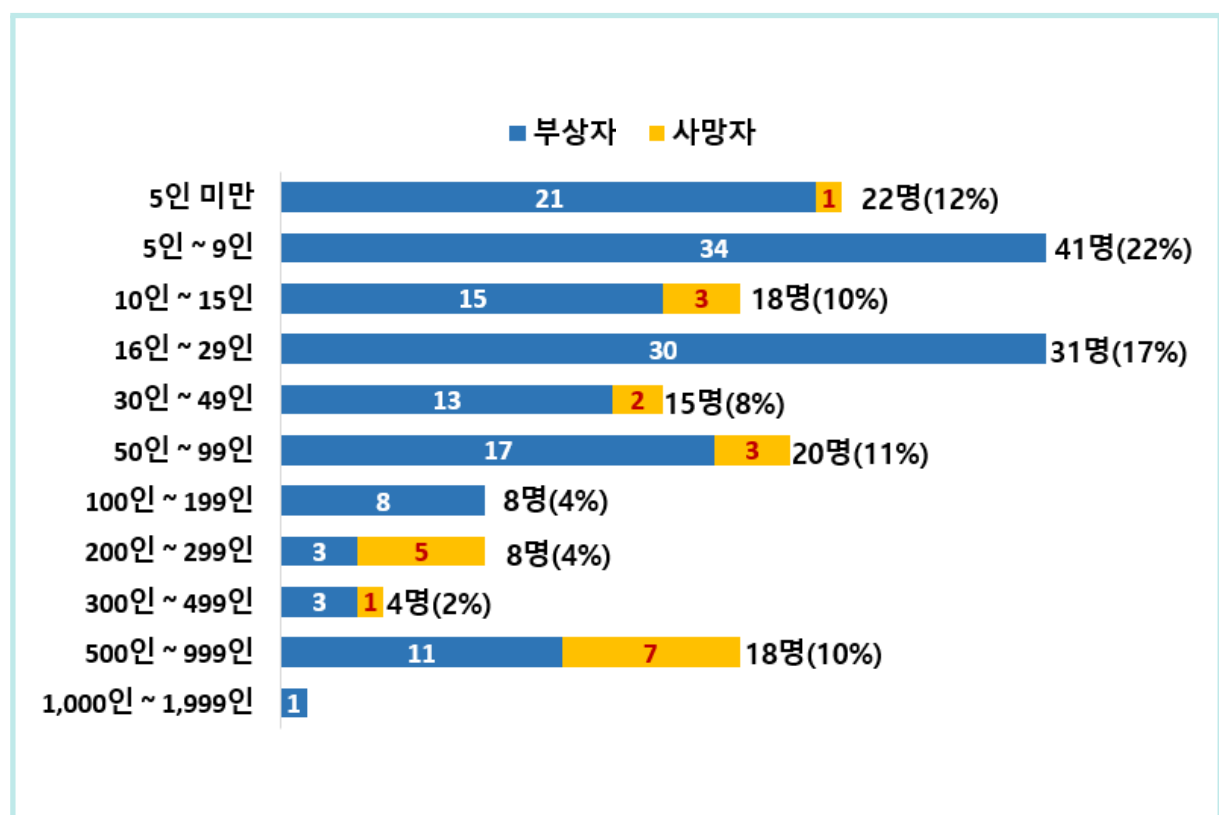
정전기폭발사고로 155명의 사고재해자가 발생한 제조업의 중업종별 분석 결과 사고재해자(155명)의 72%(113명)가 화학및고무제품제조업(85명, 54%)과 기계기구·금속·비금속광물제품제조업(28명, 18%)에서 발생하였으며, 화학및고무제품제조업에서 가장 많은 16명(53%)의 사망자가 발생하였다.



[그림 27] 제조업 중업종별 정전기폭발사고 재해현황

6) 규모별

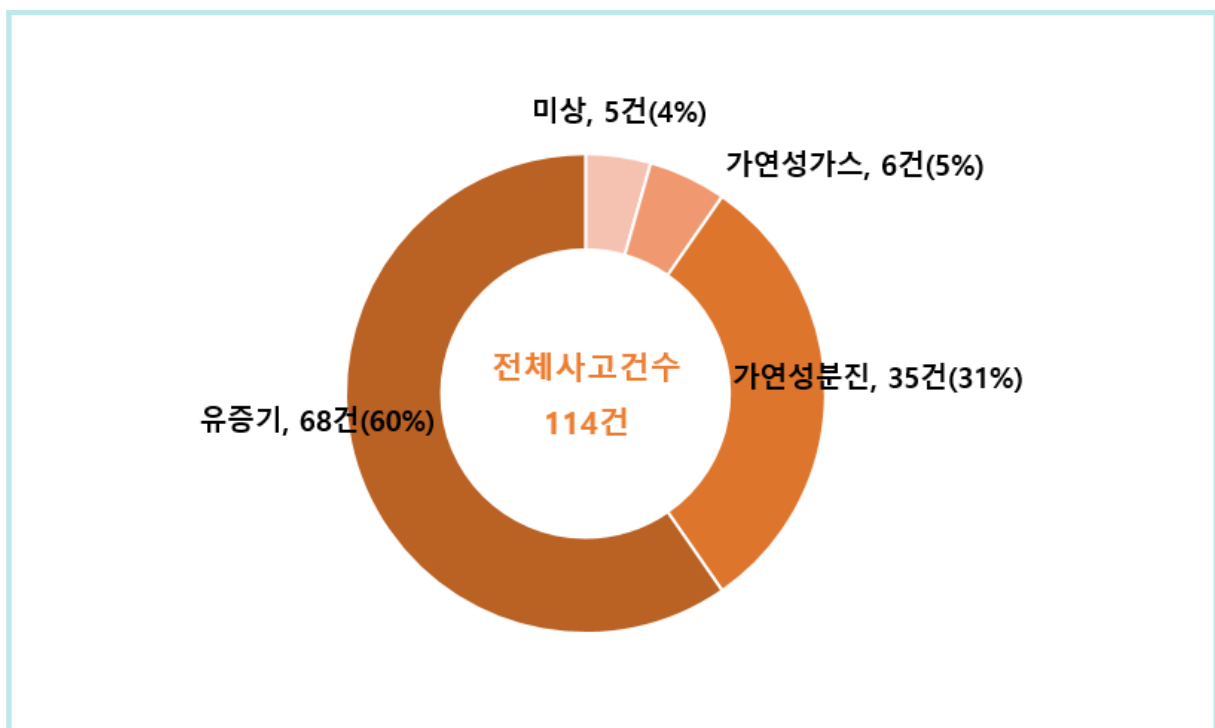
사업장 규모별 분석 결과 정전기폭발사고 사고재해자(186명)의 68%(127명)가 화재·폭발 예방시설이 상대적으로 열악한 50인 미만 소규모 사업장에서 발생하였다. 그러나 앞서 분석한 전체 화재·폭발사고 및 분진폭발사고의 경우 5인 미만 사업장에서 가장 많은 재해자가 발생한 것과 달리 정전기폭발사고는 5인~9인(41명, 22%), 16인~29인(31명, 17%) 사업장에서 가장 많은 재해자가 발생하였다.



[그림 28] 규모별 정전기폭발사고 재해현황

7) 가연물별

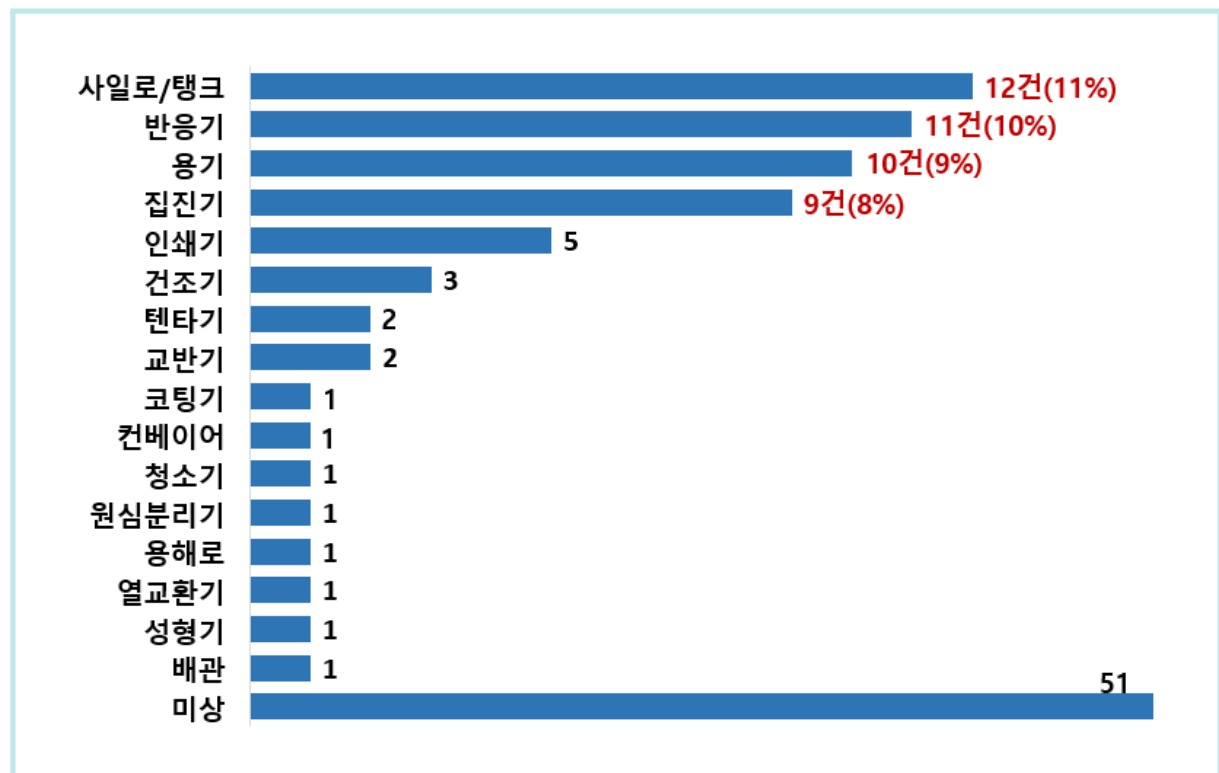
정전기폭발사고는 정전기 방전에너지의 발생, 즉 불꽃방전, 연면방전, 뇌상방전 등에 의한 방전에너지가 가연성 가스·분진 등에 점화원이 되어 발생한다. 정전기 폭발사고 114건에 대한 가연물 조사 결과 가연성 증기가 68건(60%)으로 절반 이상을 차지하며, 그 다음으로 가연성 분진 35건(31%), 가연성 가스 6건(5%) 등으로 나타났다.



[그림 29] 가연물별 정전기폭발사고 발생현황

8) 발생설비별

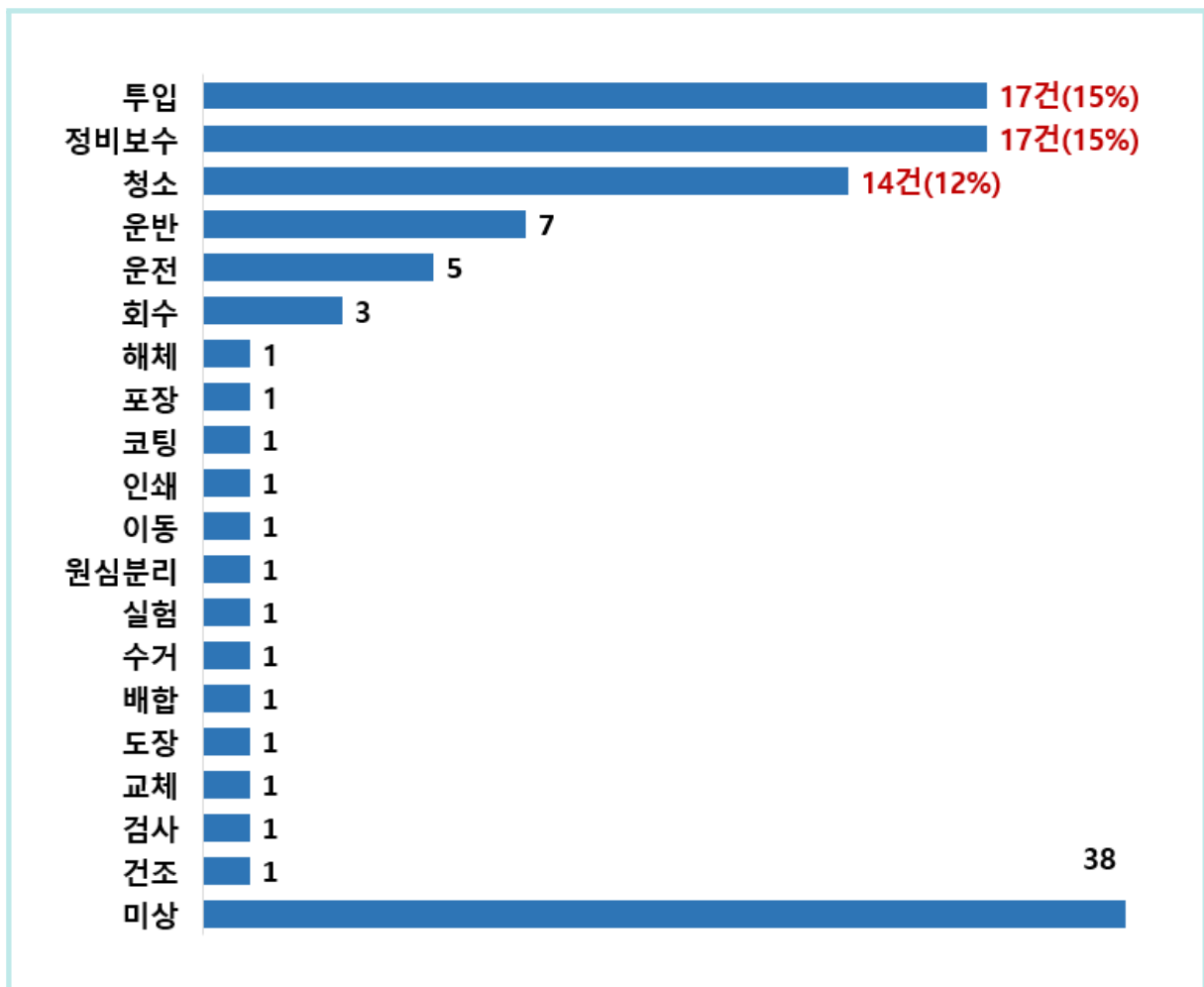
정전기폭발사고는 사일로 등의 저장탱크에서 12건으로 가장 많이 발생하였으며, 그 다음으로 반응기에서 11건, 집진기에서 9건이 발생해 확실하지 않거나 분류할 수 없는 설비(51건)를 제외하면 정전기로 인한 화재·폭발사고의 51%가 이들 설비에서 발생하였음을 알 수 있다. 그러므로 탱크 및 집진기의 정비보수 및 청소, 반응기에 분체원료 투입 등의 작업 시 화재·폭발사고를 예방할 수 있는 별도의 조치가 반드시 선행되어야 한다.



[그림 30] 발생설비별 정전기폭발사고 발생현황

9) 발생작업별

정전기폭발사고는 원료 투입 17건(22%), 청소 16건(21%), 설비 정비보수 14건(18%) 등의 작업 시 발생하는 경우가 많으므로, 작업 전 정전기 착화로 인한 화재·폭발사고의 위험성에 대한 충분한 이해와 위험성평가를 통해 이를 미연에 방지할 수 있는 별도의 조치가 반드시 선행되어야 한다.



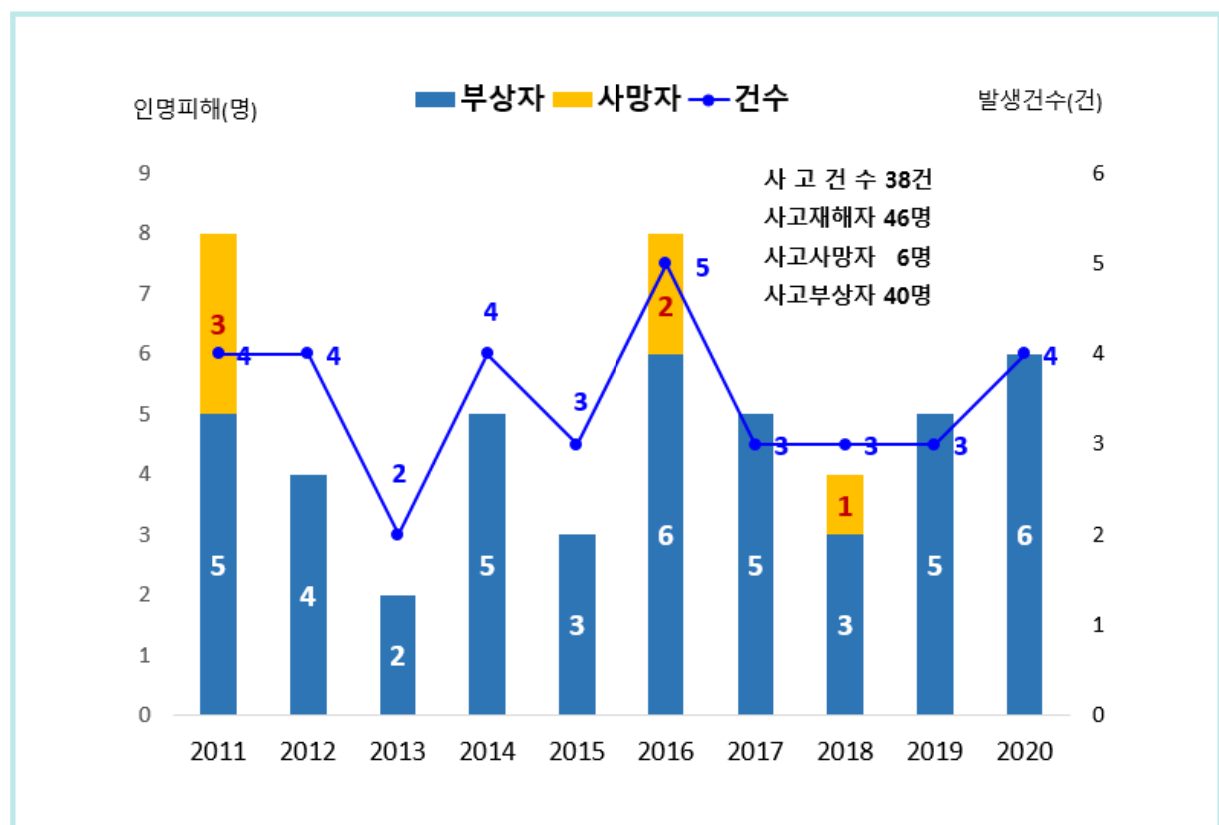
[그림 31] 발생작업별 정전기폭발사고 발생현황

2.4. 정전기 분진폭발사고 발생 현황 분석

다음은 최근 10년간('11년~'20년) 국내에서 발생한 정전기 분진폭발사고를 대상으로 연도별, 기간별, 시간별, 업종별, 규모별 발생 분포 및 설비별, 작업별 발생 특성을 분석한 자료이다.

1) 발생연도별

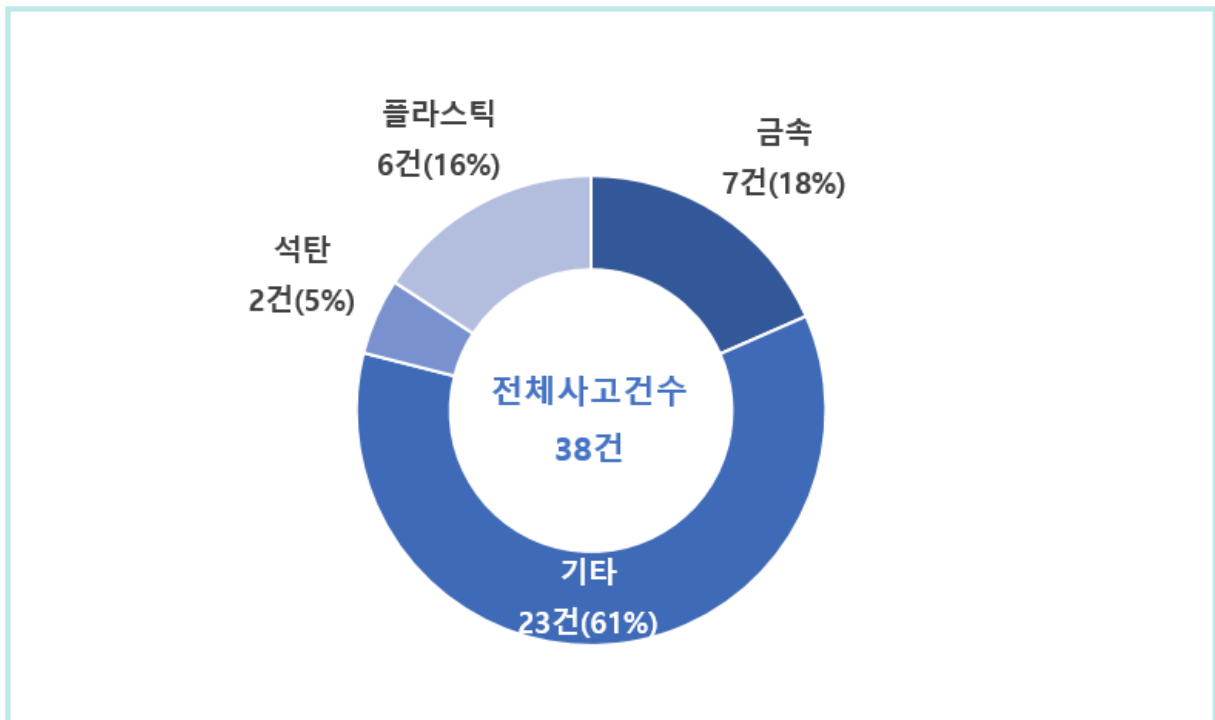
최근 10년간('11년~'20년) 총 38건의 정전기 분진폭발사고가 발생하였다. 매년 증감을 반복하고 있으며, 연도별 유의미한 차이는 없는 것으로 분석된다.



[그림 32] 발생연도별 정전기 분진폭발사고 발생현황

2) 분진 종류별

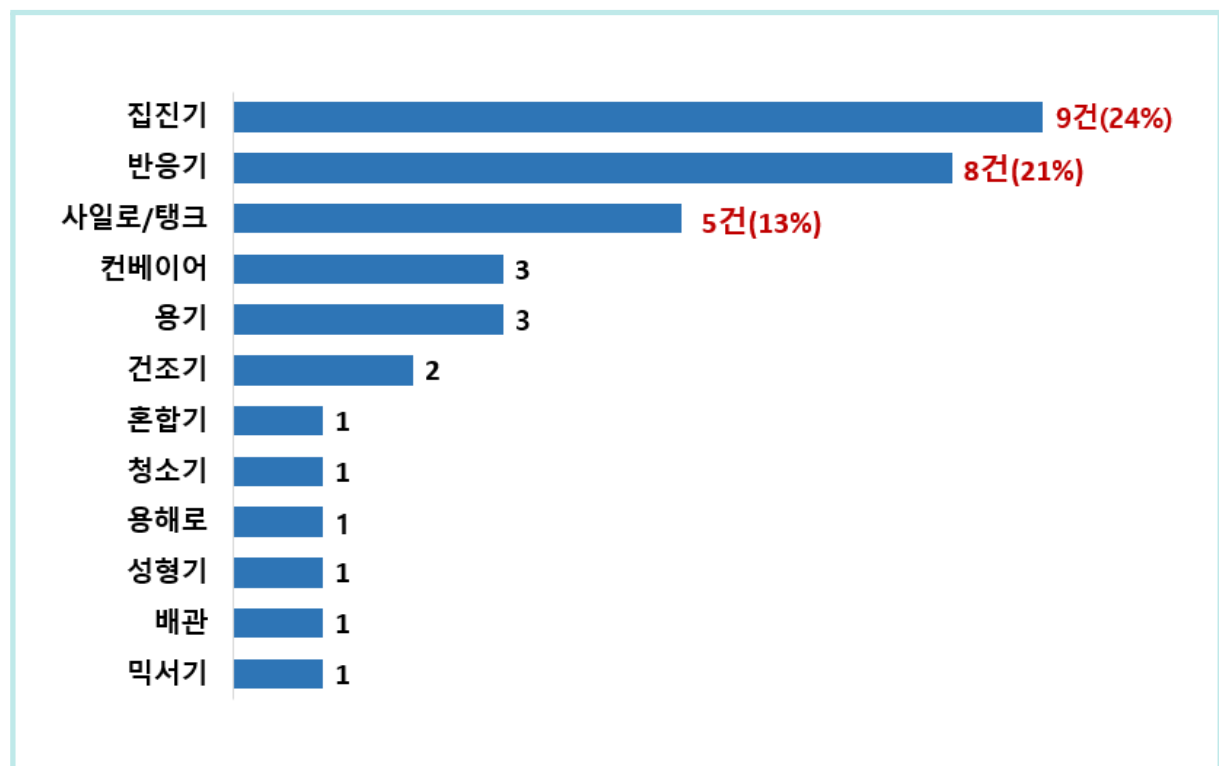
최근 10년간('11년~'20년) 발생한 정전기 분진폭발사고 38건에 대한 사고분진의 성분 조사 결과 알루미늄·마그네슘·아연 등의 금속분진이 7건(18%)으로 가장 많았으며, 그 다음으로 폴리스틸렌·폴리프로필렌 등의 플라스틱이 6건(16%), 그 밖에 석탄분진이 2건으로 나타났다.



[그림 33] 분진 종류별 정전기 분진폭발사고 발생현황

3) 발생설비별

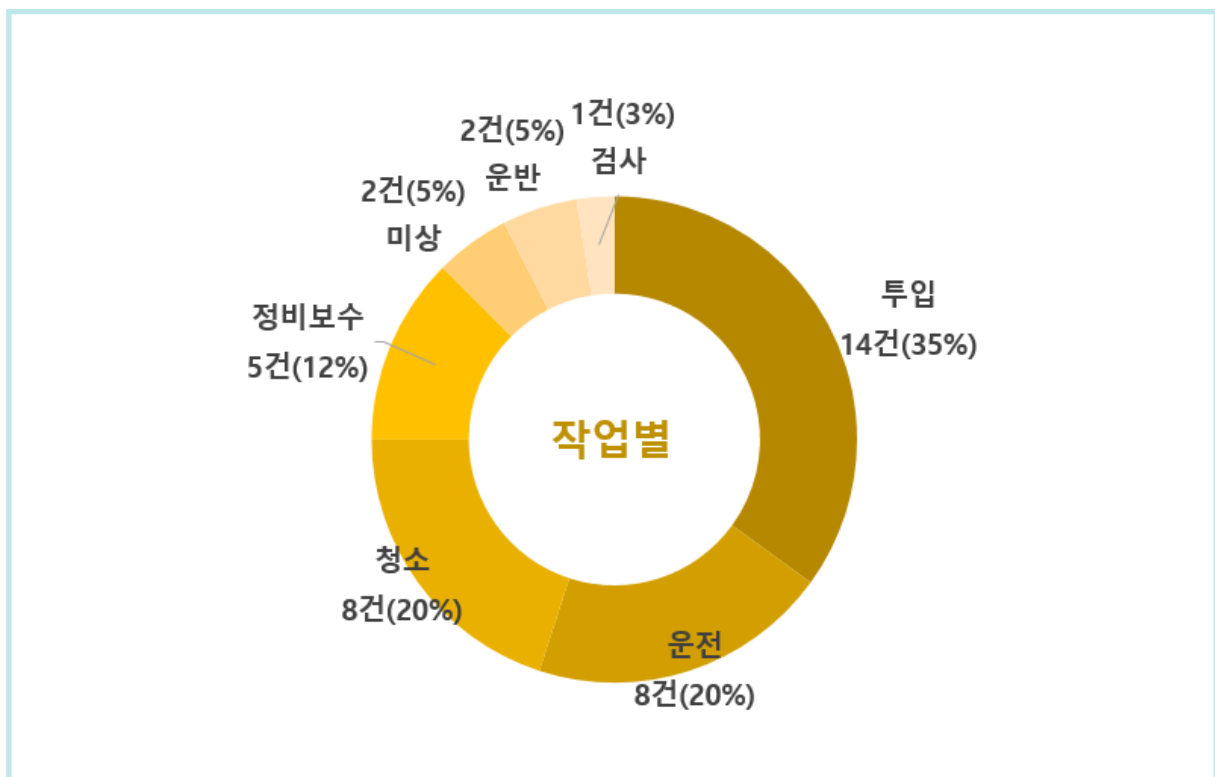
발생설비별 분석 결과 정전기 분진폭발사고 역시 정전기폭발사고, 분진폭발사고와 마찬가지로 집진기(9건, 24%), 반응기(8건, 21%), 사일로 등의 저장탱크(5건, 13%) 등에서 발생하는 경우가 많으므로 탱크 및 집진기의 정비보수 및 청소, 반응기에 분체원료 투입 등의 작업 시 화재·폭발사고를 예방할 수 있는 별도의 조치가 반드시 선행되어야 한다.



[그림 34] 발생설비별 정전기 분진폭발사고 발생현황

4) 발생작업별

발생작업별 분석 결과 정전기 분진폭발사고는 원료 투입 17건(22%), 청소 16건(21%), 설비 정비보수 14건(18%) 등의 작업 시 발생하는 경우가 많으므로, 작업 전 정전기 착화로 인한 화재·폭발사고의 위험성에 대한 충분한 이해와 위험성평가를 통해 이를 해소할 수 있는 별도의 조치가 반드시 선행되어야 한다.



[그림 35] 발생작업별 정전기 분진폭발사고 발생현황

3. 분진폭발의 특성 및 예방대책

3.1. 분진폭발의 발생

분진폭발은 공기 중에 가연성 분진이 분산되어 있고, 이를 착화시킬 수 있는 점화원이 존재할 때 발생한다. 가스폭발과 마찬가지로 연소의 3요소인 산소, 가연물, 착화원이 존재해야 한다. 일반적으로 분진의 크기가 작을수록 단위 무게 당 표면적이 증가하여 반응속도가 증가하게 되므로 그 위험성이 높다. 분진폭발이 발생하기 위해서는 다음 조건을 만족하여야 한다.

- 분진이 가연성이어야 하며
- 적당한 공기로 수송할 수 있어야 하고
- 화염을 전파할 수 있는 분진크기 분포를 가져야 하며
- 농도가 폭발범위 이내여야 하고
- 화염을 전파시키는 충분한 에너지의 점화원이 존재해야 하며
- 연소를 지원하고 유지하기 위해 충분한 산소가 존재해야 한다.

3.2. 분진폭발의 특징

분진폭발은 인화성 증기나 가스 폭발에 비해 연소속도나 폭발압력은 작으나 충격파(Impulse)가 크고 과압 지속시간이 길며 화염속도가 느린 경향이 있어 연소시간이 긴 특징을 가진다. 분진폭발 시 발생하는 에너지는 최고치에서 비교할 경우 가스폭발의 수배 정도, 온도는 2,000~3,000℃ 정도까지 상승하는데, 이는 단위 체적당 탄화수소의 양이 많아 발열량이 높기 때문이다.

무엇보다도 분진폭발의 가장 큰 특징은 최초 폭발에 의해 발생된 폭풍으로 주위에 퇴적되어 있던 분진들이 날리면서 연속적으로 점화되어 2차, 3차의 분진폭발을 일으켜 인적·물적 피해가 가중된다는 점이다

3.3. 분진폭발에 영향을 미치는 요인

1) 분진의 발열량

분진의 화학적 성질 및 조성은 분진폭발에 영향을 미치는 대단히 중요한 요인으로 발열량이 큰 분진일수록 폭발성이 크다. 다음 <표 2>는 대표적인 가연성 유기고체의 발열량을 나타낸 것이다.

<표 2> 가연성 유기고체의 발열량

물 질 명	발열량(kcal/kg)
탄 화 수 소 류	>10,000
합성품(고분자)	3,000 ~ 11,000
석 탄	5,000 ~ 8,000
목 재	3,500 ~ 5,000

※ 출처 : 육연수 외 3인 공저 화학안전공학 동화기술 272쪽

2) 분진의 입도

분진폭발은 분진의 입도(Particle size)에 큰 영향을 받는데 일반적으로 입자의 크기가 작고 입자의 표면적이 크면 열의 발생속도가 증가하여 폭발이 용이하다. 예를 들면, 한 변이 1 cm인 정육면체의 표면적은 6 cm²에 불과하나 이것을 분쇄하여 한 변을 1 μm로 만들면 다음 <표 3> 입자 크기별 표면적 증가량에서 알 수 있듯이 표면적은 6 m²에 증가하여 평균입자경이 작고, 밀도가 작은 쪽이 표면적은 물론 표면에너지도 증가하여 폭발이 용이하게 된다.

<표 3> 입자 크기별 표면적 증가량

분쇄하여 만든 입자 수(개)	한 변의 길이	표면적(m ²)
1 ~ 1,000	1mm	0.006
10,000	100μm	0.06
100,000	10μm	0.6
1,000,000	1μm	6.0

※ 출처 : 육연수 외 3인 공저 화학안전공학 동화기술 273쪽

3) 분진의 수분

분진 중에 존재하는 수분은 분진의 폭발성에 영향을 주며, 일반적으로 분진의 부유성을 억제하지만 소수성(疏水性)의 분진에 대해서는 부유성에 별로 영향이 없고, 수분의 증발로 점화에 유효한 에너지가 감소하거나 발화한 수증기가 불활성 가스로 작용하는 것은 대전성(帶電性)을 감소시키는 효과가 있다. 하지만 마그네슘, 알루미늄 등과 물이 반응하여 수소를 발생시켜, 오히려 위험성을 증가시키는 것도 있다.

4) 분진의 부유성

입자가 작고 가벼운 분진은 공기 중에서 산란 및 부유하기 쉽고 공기 중에 체류하는 시간이 길어 위험성이 증가한다.

5) 분진의 폭발한계농도

분진의 폭발한계농도는 가스의 경우처럼 명확하지 않아 입도, 부유 상황 또는 점화원의 종류와 강도 등에 따라 복잡하게 달라진다. 일반적으로 분진 또한 가스 폭발과 마찬가지로 일정한 폭발한계농도 밖에서는 화염이 전파되지 않는다. 일반적으로 분진의 폭발하한 농도는 20~60 g/m³, 폭발상한농도는 2,000~6,000 g/m³의 범위에 있으나 입도, 입도 분포, 그 밖의 요인에 의해서 상당히 변동이 크며, 폭발을 일으키는 가장 쉬운 농도는 대개 경우 200~500 g/m³의 범위이다.

<표 4> 공기 중에서의 분진의 폭발하한농도

분진	하한농도(g/m ³)	분진	하한농도(g/m ³)
요소계	70 ~ 140	마그네슘	20 ~ 50
페놀계	25 ~ 175	알루미늄	35 ~ 40
리그닌계	40 ~ 65	철(카보닐법)	105
비닐계	20 ~ 40	철(수소환원)	120 ~ 250
폴리스틸렌계	20	안티몬	190 ~ 220
초산셀룰로오스	35 ~ 40	지르코늄	190
셀락	14 ~ 20	망간	210 ~ 350
합성고무	30	아연	300
역청탄	30 ~ 38		

※ 출처 : KOSHA GUIDE P - 41 - 2012 분진폭발방지를 위한 폭연 방출구 설치방법에 관한 기술지침

한편 미국의 방화협회(NFPA)에서는 다음 <표 5> 분진폭발 위험도와 같이 폭발압력 상승속도(bar/sec)에 따라 3등급($0 < s_t 1 < 345 < s_t 2 < 690 < s_t 3$)으로 구분하기도 한다.

<표 5> 분진폭발 위험도

분진	P_{max} [bar]	K_{st} [bar·m/s]	폭발등급
석탄	7.8- 8.0	60- 97	$s_t 1$
곡물	8.6- 9.3	98- 112	$s_t 1$
폴리에틸렌	1.3- 7.9	4- 120	$s_t 1$
PVC	7.5- 9.6	37- 168	$s_t 1$
에폭시수지	5.3-10.0	53- 168	$s_t 1$
소맥분	7.9-10.5	80- 192	$s_t 1$
유기안료	6.5-10.7	28- 344	$s_t 1 - s_t 3$
알루미늄	6.5-13.0	16-1900	$s_t 1 - s_t 3$

※ 출처 : KOSHA GUIDE D - 16 - 2012 폭발억제장치의 설치에 관한 기술지침

3.3. 분진폭발 방지 대책

폭발이 발생하기 위해서는 연소의 3요소인 가연성 물질, 점화원 및 공기(산소, 산화제)가 혼합된 상태로 있어야 한다. 이 중 가연물이 공기와 혼합되어 폭발범위 내에 존재하는 조건을 물질조건이라 하며, 발화온도 또는 점화에너지를 에너지조건이라 한다. 이러한 물질조건과 에너지조건을 제어함으로써 분진폭발사고를 예방할 수 있다.

분쇄, 이송, 포진, 포장 등과 같이 다량의 분진이 발생하는 공정에서 분진의 퇴적 및 분진운의 생성을 방지하기 위해 건식공정을 습식공정으로 대체하거나, 불연성 분진을 첨가하는 등의 방법이 있으나, 이는 현실적으로 한계가 있으므로 질소, 이산화탄소 등과 같은 불활성 가스를 주입하거나 점화원을 제거 또는 제어하는 것이 가장 현실적이고 효과적인 방법이라 할 수 있다.

1) 분진 농도 제어

분체취급공정에서 정기적인 청소 및 전체 환기 및 국소배기장치의 지속적인 사용 등을 통해 분진폭발이 발생할 수 있는 폭발하한농도 이상의 분진이 퇴적하거나 부유하는 것을 일정부분 방지할 수 있다. 한편 물을 분무해도 지장이 없는 공정은 물을 분무하여 분진을 제거하는 것은 물론 정전기로 인한 착화 또한 방지할 수 있다.

분체취급공정에서 분진의 발생을 완전히 배제하는 것은 불가능하나 위의 방법들을 적절히 조합하여 분진폭발의 위험성을 최소화 할 수 있다.

2) 불활성 물질 첨가

불활성 물질을 첨가하는 방법은 폭발성 분위기 내의 물질조건을 제어함으로써 폭발을 방지하는 방법으로 불활성 가스를 주입하여 산소의 농도를 제어하거나 분진 자체에 불활성 분진을 첨가한다. 이때 불활성 가스로는 질소, 이산화탄소, 알곤 등이 사용되고, 불활성 분진으로는 규조토, 탄산칼슘, 실리카겔 등이 사용되며 불활성 물질은 제품 품질, 작업자에 미치는 영향 등을 고려하여 선택하여야 한다.

3) 점화원 제거

점화원을 제거하는 것은 분진폭발을 일으킬 수 있는 잠재적인 위험성을 제거하는 방법으로 분진폭발을 예방할 수 있는 가장 현실적인 방법이다.

분진폭발의 점화원으로는 고온표면, 불꽃(나화), 용접 또는 절단작업 시 발생하는 불티, 마찰 및 충격, 전기 불꽃, 정전기 불꽃, 자연발화(spontaneous combustion) 등이 있다.

최근 10년간('11년~'20년) 발생한 분진폭발사고(70건)의 점화원을 확인한 결과 약 50%인 35건의 사고가 정전기가 점화원이 되어 발생한 것으로 추정된다. 특히 정전기로 인한 화재·폭발사고는 가연성 액체·가스·분진 등과 같이 인화성, 폭발성이 매우 강한 물질을 취급 및 사용하는 장소에서 발생하여 사고의 전파나 피해가 매우 큰 특징이 있으므로 체계적이고 과학적인 정전기 방지대책을 수립 및 시행하는 것이 무엇보다 중요하다.

4. 정전기의 특성 및 예방대책

4.1. 정전기의 발생

정전기는 정지하고 있는 전기를 말한다. 물체끼리 마찰할 때 생기는 마찰 전기도 이에 속한다. 건조한 겨울철에 털이 많은 스웨터를 벗거나 금속으로 된 문고리를 잡을 때 순간 짜릿! 하고 발생하는 정전기 때문에 여간 성가신 게 아니다. 이때 발생하는 전압은 1만 V를 넘을 뿐만 아니라, 순간 전류는 수 A에 달하지만, 실제 전기가 흐르는 시간은 매우 짧기(약 0.000002 초)때문에 정전기로 인해 부상을 입는 경우는 극히 드물다. 이렇듯 정전기는 우리의 일상생활 속에서 흔히 발생하여 불편함을 끼치지만 이러한 정전기로 인해 산업현장에서는 설비 및 장치의 고장이나 장애로 생산에 차질을 빚기도 하며, 특히 가연성 물질을 제조 또는 취급하는 장소에서 정전기는 대형 화재·폭발사고의 직·간접적인 원인이 되기도 하므로 정전기의 위험성을 절대 간과해서는 안 된다.

이러한 정전기는 고체는 물론이고 액체와 기체에서도 발생하며 일반적으로 서로 다른 두 물체가 접촉 또는 분리될 때 발생한다.

<표 6> 정전기 발생 종류

발생종류	내 용
마찰대전	사일로, 이송배관, 집진장치 등의 공정 내에서 원료 분체나 부산물 분진 입자가 장치의 벽면이나 또는 입자들 간에 접촉, 분리되는 과정에서 발생 - 인체와 의복의 마찰에 의한 대전 - 사람이 바닥을 걸을 때 바닥 면과의 마찰에 의한 대전
박리대전	서로 밀착되어 있던 물체가 떨어지며 발생
유동대전	액체 또는 증기가 배관 내부 등을 통해 유동할 때 관벽과 물질 사이에서 발생 - 배관 내부에서 중심부와 외부의 전하의 차이가 발생하고 중심부분의 유량이 증가함에 따라 전하 축적에 의해 대전 - 액체를 용기에서 다른 용기에 이동할 때의 대전
분출대전	액체 또는 증기 등이 좁은 단면적을 갖는 분출구를 통해 나올 때 분출구와 물질 사이의 마찰에 의하여 발생
진동대전	액체가 혼합되는 과정에서 진동에 의하여 발생
충돌대전	분진 입자가 상호간 또는 다른 고체와 충돌할 때 발생

4.2. 정전기에 영향을 주는 요인

1) 물체의 물리적 특성

접촉·분리되는 두 가지 물체의 종류 및 특성에 따라 발생하는 정전기의 크기 및 극성이 영향을 받는다.

2) 물체의 표면상태

정전기의 발생은 물체의 표면 또는 경계면에서의 현상이므로, 물체의 표면상태가 정전기의 발생에 크게 영향을 미친다. 일반적으로 물체의 표면이 거칠 때와 오염, 산화물 등이 표면에 존재할 때 정전기의 발생이 증가한다.

3) 물체의 이력

물체의 정전기 발생 또는 대전이력은 물체표면에 물성변화, 대전 상태 등에 따라 정전기의 발생이 영향을 받는다. 일반적으로 첫 회 및 초기에 발생이 크고, 대전의 반복 및 지속에 의해 발생이 작아진다.

4) 접촉면적 및 압력

접촉면적은 정전기의 발생범위에 관계되기 때문에, 접촉면적이 크면 클수록 정전기 발생이 증가한다. 접촉압력 역시 크면 클수록 정전기 발생이 증가한다.

5) 분리속도

접촉 후에 물체가 분리되는 속도는 전하분리에 부여되는 에너지에 관계되기 때문에, 분리속도가 크면 정전기 발생이 증가한다.

4.3. 정전기의 방전

정전기의 대전물체 주위에는 정전계가 형성된다. 이때 정전계의 강도는 물체의 대전량에 비례하며, 점점 증가하여 공기 절연파괴강도(약 30KV/cm)에 이르면 공기의 절연파괴 현상인 정전기 방전이 발생하게 된다. 그러나 정전기 방전이 발생하였다

하더라도 방전에너지가 물체의 최소 착화에너지보다 작을 경우 화재·폭발은 일어나지 않는다. 다음 <표 8>은 정전기 방전의 종류를 나타낸 것이다.

<표 7>정전기 방전의 종류

종류	내 용
불꽃방전	가스설비 점화 시 발생하는 불꽃에서 볼 수 있듯이 강한 파괴음과 발광을 수반
뇌상불꽃방전	불꽃방전의 일종으로 번개와 같이 여러 가닥의 발광을 수반 - 강력하게 대전된 입자가 구름 모양으로 확산되어(대전운) 발생
코로나방전	근거리에서만 절연파괴를 일으키는 부분방전으로 약간의 소음과 발광을 수반
연면방전	절연물의 표면에 따라 강한 발광을 수반

4.4. 정전기폭발사고 방지 대책

일반적으로 사업장에서 정전기로 인한 화재·폭발사고를 예방하기 위한 관리 포인트는 크게 3가지(가연성 분위기 관리, 정전기 축척 방지, 정전기 발생 억제)로 나눌 수 있다.

1) 가연성 분위기 관리

정전기가 방전되더라도 점화되지 않도록 가연성 물질을 제거하거나 밀폐된 공간에서 취급하고 누설을 방지하여야 하며, 환기작업을 통해 가연성 액체 또는 가스의 농도가 폭발한계 범위 내에 있지 않도록 조치하여야 한다. 특히 저장탱크의 세정, 가연성 액체 또는 가스의 고속 충전, 가연성 분진의 사일로 저장 등과 같이 작업 특성상 정전기 방전을 방지하기 어려운 경우에는 불활성 기체를 주입하는 등 정전기 방전이 일어나더라도 폭발이 발생하지 않게 하는 방법이다.

2) 정전기 축적 방지

이를 위해 접지 및 본딩, 습도 조절, 제전기 설치, 도전성 바닥재 마감, 제전봉 및 제전화 착용 등을 통해 전하가 쌓이는 것을 방지한다.

○ 본딩과 접지

배관 내 존재하는 액체 또는 가스 등은 유동 및 충돌대전에 의해 전하가 다량으로 발생하므로 금속 재질의 배관, 용기 등은 반드시 본딩 및 접지를 실시하여야 한다. 특히 탱크로리를 통하여 가연성액체 또는 가스를 공급하는 장소에 탱크로리 접지를 위한 단자함이 설치되어 있으나, 많은 사업장에서 접지저항이 적정 수준 이하인 경우가 많으므로 정기적인 점검 및 관리가 무엇보다 필요하다.

○ 제전기 설치

가연성 용제를 사용하는 인쇄 공정에서 Roller를 통과한 종이나 Film 등의 정전기는 화재발생의 주 원인으로 작용할 수 있다. 이러한 경우에는 공정 특성에 따라서 적합한 제전기를 선정하여 설치하여 대전전압을 낮춰야 한다.

○ 제전화, 제전복 등의 착용

화재·폭발사고 중 상당수가 작업자의 옷에서 발생한 정전기가 원인이 되어 발생한다. 제전복은 섬유에 매우 가는 도전성 물질을 삽입하여 정전기 발생을 저감시키며, 제전화는 작업자에게서 발생한 정전기가 신발 바닥면을 통해 신속히 대지로 흘러가도록 함으로써 정전기 방전을 막아 준다. 따라서 화재·폭발위험장소에서는 반드시 제전복 및 제전화를 착용하여야 한다.

○ 도전성 바닥재 설치

일반적으로 주유소 등 가연성 액체 또는 기체를 취급하는 장소의 바닥면은 주로 에폭시 또는 우레탄 등과 같은 절연성 물질을 사용해 마감하는 경우가 많다. 그러나 이런 경우 정전기가 대지로 흘러가지 못해 축적된 정전기의 순간적인 방전으로 화재·폭발사고가 발생할 수 있으므로 가연성 물질을 취급 및 사용하는 장소의 바닥면은 반드시 도전성 바닥재를 사용하여 마감하여야 한다.

3) 정전기 발생 억제

○ 가연성액체, 가스 및 분말의 유동속도 관리

배관 내 가연성 가스, 액체 및 분말의 유동속도와 정전기 발생은 비례한다. 그러므로 배관 내 가연성 물질의 유동속도를 제한하고 낙차를 최소화 등의 방법을 통해 정전기 발생을 억제할 수 있다.

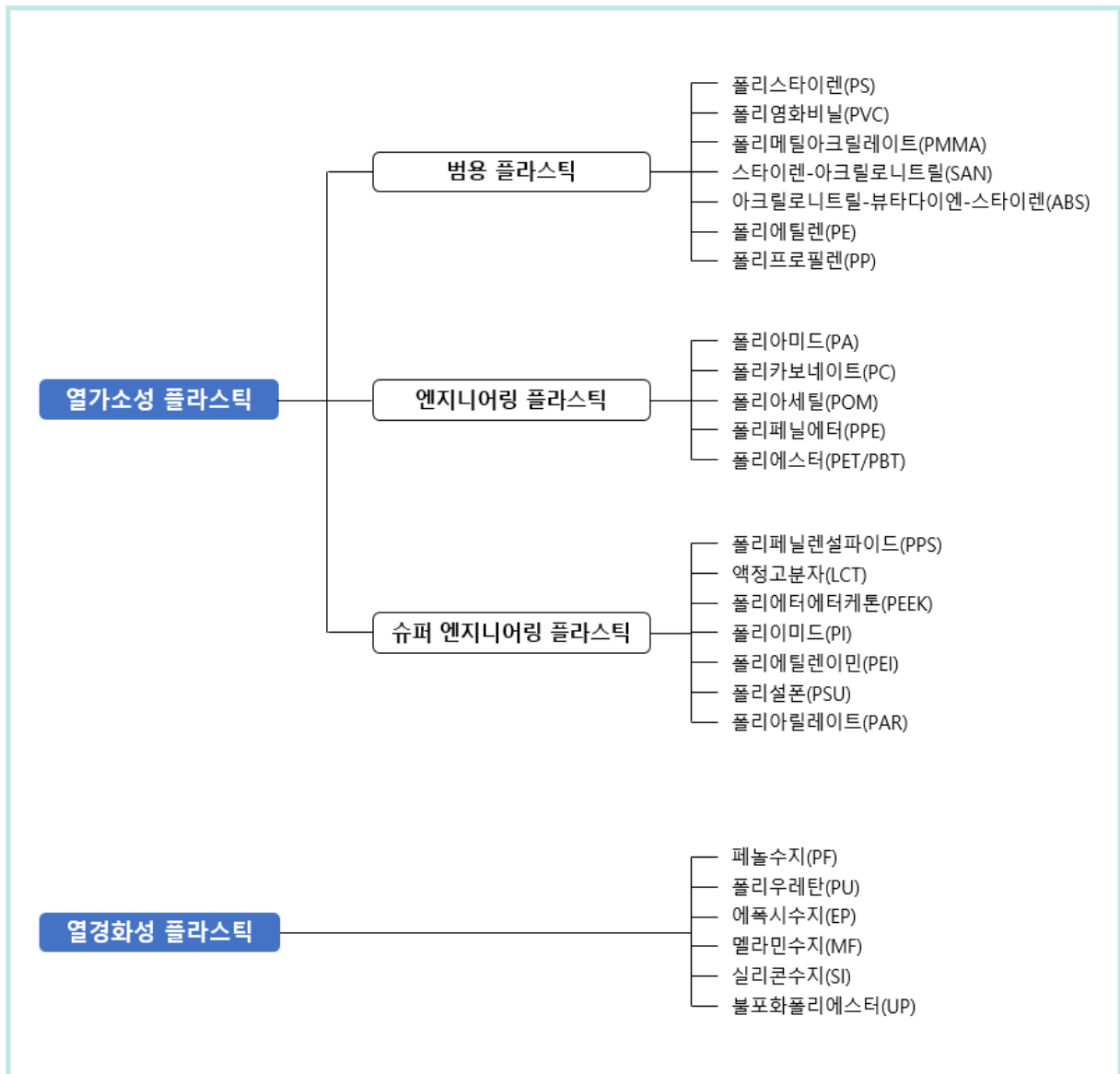
5. 플라스틱 분진의 특성

5.1. 플라스틱의 정의

일반적으로 플라스틱은 열 또는 압력에 의하여 변화될 수 있는 고분자 물질 또는 그 혼합물이라 정의한다. 플라스틱의 어원은 라틴어의 plasticus와 그리스어의 plastikos에서 유래하였으며, 이는 ‘거푸집으로 조형이 가능한, 성형할 수 있는’이라는 의미이다. 플라스틱은 합성수지(resin)라고도 부르며 이들을 혼용하여 사용되고 있다. 인류 역사를 석기·청동기·철기시대로 구분 한다면 현대는 플라스틱 시대라 불리울 만큼 플라스틱은 우리 일상 전반에 깊숙이 자리 잡고 있을 뿐만 아니라 플라스틱이 없었다면 현대 문명이 만들어낸 수많은 혁신제품들 또한 존재할 수 없었을 것이다. 예를 들면 수십 나노미터 크기의 반도체 소자, 고성능 2차 전지, LCD와 유기EL 디스플레이, 자동차 내장재, 초극세사와 기능성 섬유 등은 플라스틱이 개발되지 않았다면 존재할 수 없었을 제품이다. 20세기를 이끈 기술 중 하나인 플라스틱의 진화는 지금까지도 현재 진행형이다.

5.2. 플라스틱의 구분

플라스틱을 구분하는 방법은 여러 가지가 있지만, 열에 대한 특성에 따라 열가소성 플라스틱과 열경화성 플라스틱으로 구분한다. 열가소성 플라스틱은 열을 가할 때마다 유동성을 가지는 반면, 열경화성 플라스틱은 처음 열을 가하여 성형할 때를 제외하고 나중에 열을 가해도 더 이상 유동성을 가지지 않는 특성이 있다. 열가소성 플라스틱은 사용 가능 온도에 따라 다시 범용 플라스틱, 엔지니어링 플라스틱, 슈퍼 엔지니어링 플라스틱으로 구분하기도 한다. 아울러 사용 가능 온도가 높은 플라스틱일수록 높은 강도, 내마모성 등 금속, 세라믹에 대응하는 물성 또한 우수하다.



[그림 36] 플라스틱의 구분(출처 : 대한화학회)

1) 열가소성 플라스틱

열가소성 플라스틱은 열에 따라 유동성을 가지는 플라스틱 재료이다. 고분자 사슬 간 상호작용이 약해 고온에서 이동이 자유로운 특성을 가진다. 처음 사용 후에도 다른 형태로 재가공이 가능하므로 재활용하여 사용할 수 있다. 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 폴리스타이렌, 폴리카보네이트 등이 대표적인 열가소성 플라스틱이다.

○ 범용 플라스틱(commodity plastics)

일상 생활 및 산업용품으로 흔히 사용되는 플라스틱으로 100 °C 이하에서 사용 가능한 제품군이다. 가격이 저렴하며, 플라스틱 생산의 대부분을 차지한다. 저밀도 폴리에틸렌(LDPE), 고밀도 폴리에틸렌(HDPE), ABS, 폴리스타이렌(PS), 스타이렌-아크릴로니트라일(SAN), 폴리염화비닐(PVC), 폴리프로필렌(PP), 폴리메틸메타크릴레이트(PMMA) 등이 있다.

○ 엔지니어링 플라스틱(engineering plastic)

전자, 전기, 자동차 부품 및 기타 공업용으로 사용되는 플라스틱으로 100 °C 이상 150 °C 미만에서도 사용 가능한 플라스틱 제품군이다. 특히 절연성, 내약품성, 기계적 강도, 내열성, 내후성, 난연성 등이 우수하여 가전, 자동차, 건축 자재 등에 널리 사용한다. 폴리부틸렌 테레프탈레이트(PBT), 폴리카보네이트(PC), 나일론(Nylon), 폴리페닐렌 옥사이드(mPPO), 폴리아세탈(Acetal 또는 POM) 있다.

○ 슈퍼 엔지니어링 플라스틱(super engineering plastic)

전기, 전자, 자동차 및 고내열 부품에 사용하며, 150 °C 이상의 온도에서도 사용 플라스틱 수지이다. 폴리이미드(PI), 폴리설펜(PSU), 폴리아릴레이트(PAR), 폴리에터설펜(PES), 폴리에터이미드(PEI), 폴리페닐렌설펜(PPS), 테플론(PTFE) 등이 여기에 속한다.

2) 열경화성 플라스틱

열경화성 플라스틱은 처음 열을 가하여 성형할 때를 제외하고 열에 따라 유동성을 가지지 않는 플라스틱 재료이다. 일반적으로 고분자 사슬 간 촘촘한 가교를 통해 고분자를 생성하여 제조한다. 단단하며, 내열성이 강한 특성을 가진다. 열경화성 플라스틱은 열을 통한 재가공이 어려우므로 재활용하여 사용할 수 없다. 멜라민 수지, 에폭시 수지, 페놀 수지 등이 대표적인 열경화성 플라스틱이다.

<표 8> 플라스틱의 종류 및 특성(출처: 2019 석유화학 편람)

제품명	개 요
LDPE (Low Density Polyethylene)	에틸렌을 원료로 중합공정을 거쳐 제조
	① 상온에서 투명한 고체 ② 비중이 0.91~0.94인것으로 결정화가 낮아 가공성과 유연성, 투명성이 우수
	농업용, 포장용투명필름, 전선피복, 일회용품 등의 원료
	대표적인 합성수지
EVA (Ethylene Vinyl Acetate)	에틸렌과 VAM을 원료로 공중합시켜 제조
	① 내충격성, 내열성, 접착성, 유연성이 우수한 쌀알 모양의 투명한 고체 ② VAM함량에 따라 탄성력, 열접착온도, 내구성 및 투과성이 달라짐
	농업용, 포장용, 보호용, 태양광용 필름, 신발밀창, 구멍조끼 등의 원료
L-LDPE (Linear Low Density Polyethylene)	에틸렌을 원료로 전이금속 촉매 하에 중합공정을 거쳐 제조
	반투명한 고체로 비중은 약 0.91~0.94 수준
	필름 제조용
	LDPE와 다르게 분자 구조가 일직선인 것이 특징
HDPE (High Density Polyethylene)	에틸렌을 원료로 중합공정을 거쳐 제조
	② 밀도가 0.94 이상으로 강도는 우수하나, 유연성과 가공성은 떨어짐
	공업용 필름, 쇼핑백, 각종 용기, 노끈, 컨테이너, 파이프 등의 원료
PP(Polypropylene)	프로필렌을 원료로 중합공정을 거쳐 제조
	① 무색, 무취의 반투명한 고체 ② 인장, 충격, 표면강도, 내열성, 내약품성이 우수하고 물리적 특성 양호
	필름, 포대용 백, 섬유, 자동차 및 전가전자부품, 장난감, 컨테이너, 일회용품 등의 원료로 가장 폭넓게 사용
	PE와 더불어 석유화학제품을 대표하는 열가소성 수지
PS(Polystyrene)	SM을 원료로 중합공정을 거쳐 제조

제품명	개 요
	① 열가소성수지로서고체 ② 범용성(GPPS), 고강도HIPS), 발포성(EPS) 등으로 구분 *GPPS(GeneralPurposePS) : 투명성. 전기적특성. 착색성. 가공성 우수 *HIPS(HighImpactPS) : 내충격성. 기계적물성. 가공성형성. 착색성 우수 가전제품의 케이스 및 부품. 유제품 용기. 문구. 완구류 등의 원료
EPS (Expandable Polystyrene)	巧를 발포(發泡)하여 제조 다량의 공기층으로구성되어 있어. 단열. 완충. 방수 및 방음성이 우수한 열가소성 수지 건축 단열재. 가전제품의 완충포장재, 식품 및 농수산물 포장용기 등의 원료 스티로폴(BASF社) 또는 스티로폼(Dow社) 이란상표명으로 잘 알려짐
ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)	SM. AN, BD를 원료로 공중합하여 제조 ① 옅은 아이보리색의 고체 ② 착색이 용이하고 표면광택 이우수 ③ 내구성. 내열성. 내약품성. 가교성 및 기계적·전기적성질 우수 가전제품의 하우징. 냉장고 내장재. 자동차부품. 장난감, 잡화 등의 원료
PVC (Poly Vinyl Chloride)	VCM을 원료로 중합공정을 거쳐 제조 ① 무색. 무취의 고체 ② 내구성. 내화학성. 내부식성. 난연성 및 절연성 등이 우수 열과 자외선에 안정적이지 못해 안정제를 첨가해야 하며. 착색과 유연성이 요구되는 용도에는 가소제와 함께 사용 바닥재. 창틀. 파이프. 벽지 등 주택·건설용으로 주로 사용. 농업용필름. 전선 피복. 합성피혁 등의 원료

5.3. 플라스틱 제조공정

플라스틱 제조방법은 크게 유화중합, 분산중합, 괴상중합, 용액중합의 4가지로 구분할 수 있다. 유화중합은 단량체와 유화제, 개시제 등을 물에 넣고 유화상태로

만든 후에 온도를 올려 중합시키는데 쉽게 중합제품을 얻을 수 있지만 불순물이 많고 후가공이 필요하다. 분산중합은 단량체와 개시제 혼합물을 물에 분산시킨 후 중합하는 방법으로 순수한 물질을 얻을 수 있고 제열도 쉬우나 중합할 수 있는 제품에 제약이 있다. 괴상중합은 단량체에 열을 가해 중합하는 방법으로 매우 순수한 물질을 얻을 수 있지만 제열이 쉽지 않다. 용액중합은 단량체를 물 대신 용매에 녹여 중합하는 방법으로 특수한 고분자를 얻을 수 있으나 용매를 다시 회수해야 하는 문제점이 있다.

용액중합의 경우 플라스틱 제조공정은 원료공정, 촉매공정, 중합공정, 분리공정, 회수공정, 출하공정 등으로 이루어진다. 원료공정에서 모노머, 원료 또는 물 등의 원료를 저장·세정·정제·건조·조합하며, 촉매공정에서 중합촉매와 조제 등 용해·저장·조합 등이 이루어지고 있다. 중합공정은 중합기를 중심으로 냉각·가열·중합물이송으로 구성되며, 분리공정을 통해 폴리머에서 분리된 모노머와 용매는 회수공정을 거쳐 정제되며, 폴리머는 탈수·건조·저장하여 제품으로 출하되게 된다.

5.4. 플라스틱 분진의 특성

플라스틱 분진이 건조설비에서 건조 중이거나 공정설비의 고온표면에 퇴적되어 있을 때와 같이 플라스틱 분진의 발화에 필요한 에너지가 단기간에 급격히 또는 장시간에 걸쳐서 완만하게 공급되는 경우 발화되어 화재로 이어질 수도 있다. 분진으로 인한 화재는 단순히 화재만으로 끝날 수도 있지만 조건에 따라 폭발로 발전하는 경우도 적지 않기 때문에 이를 간과해서는 안 된다.

알갱이(pellet)형태의 플라스틱 제품의 경우 비중이 커서 쉽게 퇴적되지만 플라스틱 제조공정 중의 분진은 비중이 작아 기류의 발생으로 쉽게 분진운을 발생시킬 수가 있기 때문에 건조설비나 사일로와 같이 퇴적분진의 취급량이나 저장량이 많으면 분진폭발의 위험성이 증가하며 폭발 후 화재의 진화도 쉽지 않으며 피해 규모도 증가한다. 공기 중에 부유 분산되어 있는 분진량에 비하여 퇴적분진은 분진량이 상대적으로 매우 많으며 산화, 분해, 고분자화 반응 등의 화학반응에 의해 분진 내부에서 발열이 동반하게 되면 발생열이 축적되기 쉽다. 더욱이 퇴적분진의 입자 간 공극 내부에는 공기가 포함되어 있기 때문에 산화반응에 의한 발열 위험성이 있으며 자연 발화하여 화재·폭발이 일어날 수 있다. 퇴적분진의 발화는 반응

성이 매우 크기 때문에 자연발화가 일어나는 것보다 발열속도가 작은 분진이라도 퇴적분진의 양이 많아 분진 내부의 단열성 증가로 이어지고 지속적인 발열량 축적으로 자연 발화하여 화재·폭발이 일어난다. 그러므로 산화나 분해 등 발열을 일으킬 수 있는 분진은 발열속도가 매우 작다고 하더라도 자연발화에 의한 화재·폭발 위험성이 있다고 할 수 있다.

5.5. 플라스틱 분진폭발사고 사례

다음 <표 9>에는 그간 국내에서 발생하여 대형 인적·물적 피해를 입힌 대표적인 플라스틱 분진폭발사고 사례들을 나타내었다.

<표 9> 플라스틱 분진의 국내 화재·폭발 사고사례

일시	사고 개요	피해 상황
1989년 10월	ABS 압출작업 중 압출기 내의 ABS수지 분진폭발	사망 23명 부상 60명
2000년 4월	PVC 제조공정에서 Bag filter청소 중 PVC 분진이 폭발	부상 4명
2000년 12월	PVC 제조공정에서 슬러리 탱크와 배관의 용접작업 중 PVC분진이 폭발	부상 5명
2011년 8월	플라스틱 소재인 폴리스타일렌 제조공정에서 혼합탱크 중압과정에서 폭발	사망 3명 부상 4명
2012년 6월	PE분진의 폭발로 생산설비 파손	설비 파손 등
2013년 3월	HDPE 저장 사일로의 보수작업 중의 용접불꽃에 의한 분진폭발	사망 6명 부상 11명

이들 사고사례 중 2013년 발생한 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 분진에 의한 화재·폭발사고는 가장 큰 인적피해 및 재산손실을 입힌 중대산업사고로 사회적으로도 큰 이슈가 된 사고였다. 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 분진폭발사고는 전남 여수시 소재 ○○산업(주) 내 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)공장 제품(분진) 저장탱크(사일로)의 정비·보수를 위해 용접작업을 실시하던 중 사일로 내 잔류해 있던 분진이 폭발하여 발생한 사고로 사망자 6명, 부상자 11명의 인명피해가 발생하였다.

사일로로는 가연성 분진인 폴리에틸렌을 취급하기 때문에 내부가 분진폭발위험지역으로 구분되어 있고 정상운전 중에는 폭발의 3요소 중 산소를 관리하기 위하여 질소를 채운 상태에서 운전되고 있으나, 정비작업 시에는 사일로를 개방하기 때문에 대기 중의 공기가 내부로 공급되고 작업 특성상 용접 등과 같은 화기작업이 필수적이기 때문에 가연물이 될 수 있는 물질을 폭발한계농도 이하로 제거하여야 한다. 그러나 작업 전 가연물이 될 수 있는 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 분진을 충분히 제거하지 않아 사일로 내부에 잔류하던 분진이 용접 불티에 의해 점화되어 폭발한 것으로 조사되었다. 아울러 작업 시작 전 안전작업 허가서를 발생할 경우 분진폭발위험장소의 경우 가연성 분진의 잔류 유무를 확인하여 작업시작 여부를 결정하여야 하나 별도의 가연성 분진의 잔류 유무 확인 없이 안전작업 허가서를 발행하였으며, 협력업체 근로자들에게 가연성 분진의 화재 및 폭발특성, 관리방법, 위험성 등에 대한 구체적인 교육을 실시하여 관계자들이 위험성을 인지하고 조치할 수 있는 능력을 배양시켜야 하나 이를 누락하는 등의 관리적인 문제점 또한 제기되었다.

5.6. 플라스틱 분진폭발 위험공정

다음 <표 10>에는 그간 국내·외에서 발생한 플라스틱 분진폭발사고·사례를 통해 화재·폭발 위험성이 높은 공정을 플라스틱 종류별로 나타내었다.

<표 10> 플라스틱 분진의 화재·폭발 위험공정

분진명	주요 위험 공정
ABS 수지	건조기, 회수기
폴리에틸렌	건조기, 집진기, 사일로
페놀수지	분쇄기, 사이클론
폴리스틸렌	사출기, 온풍건조기, 사이클론, 혼합장치, 저장탱크
폴리프로필렌	버그피터, 저장탱크

6. 평가 대상 및 항목

6.1. 평가 대상 시료

본 평가에서는 우리 일상생활뿐만 아니라 산업용으로 널리 사용되고 있으며 착화 위험성이 높고 분진폭발사고 사례가 많아 향후 동종재해 발생 가능성이 높은 고밀도폴리에틸렌(HDPE), 저밀도폴리에틸렌(LDPE) 및 폴리메틸아크릴레이트(PMMA)를 위험성평가 대상 물질로 선정하였다.

1) 주요 특성

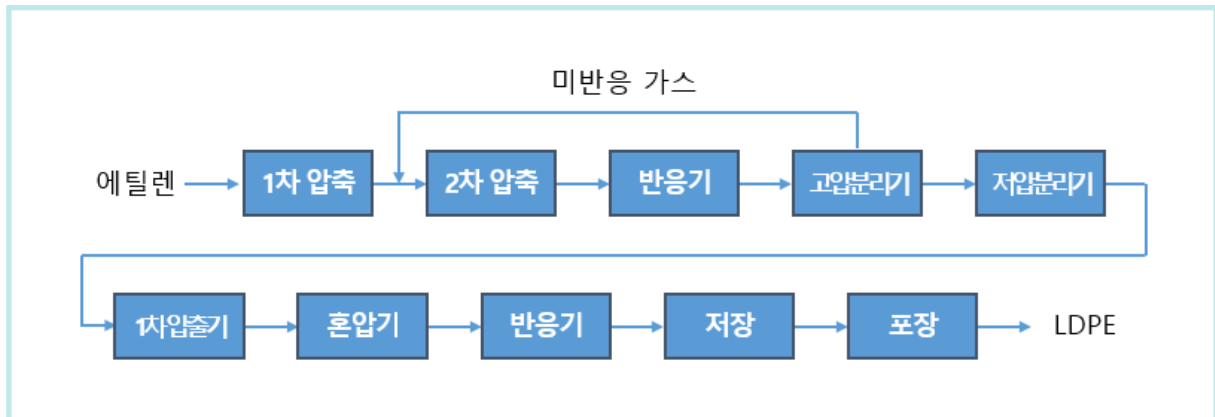
본 평가에 사용할 HDPE, LDPE 및 PMMA의 제조방법, 물리화학적 특성, 용도 등 평가 대상 시료의 주요 특성을 정리하여 <표 11>에 나타내었다.

<표 11> 평가 대상 시료의 특성

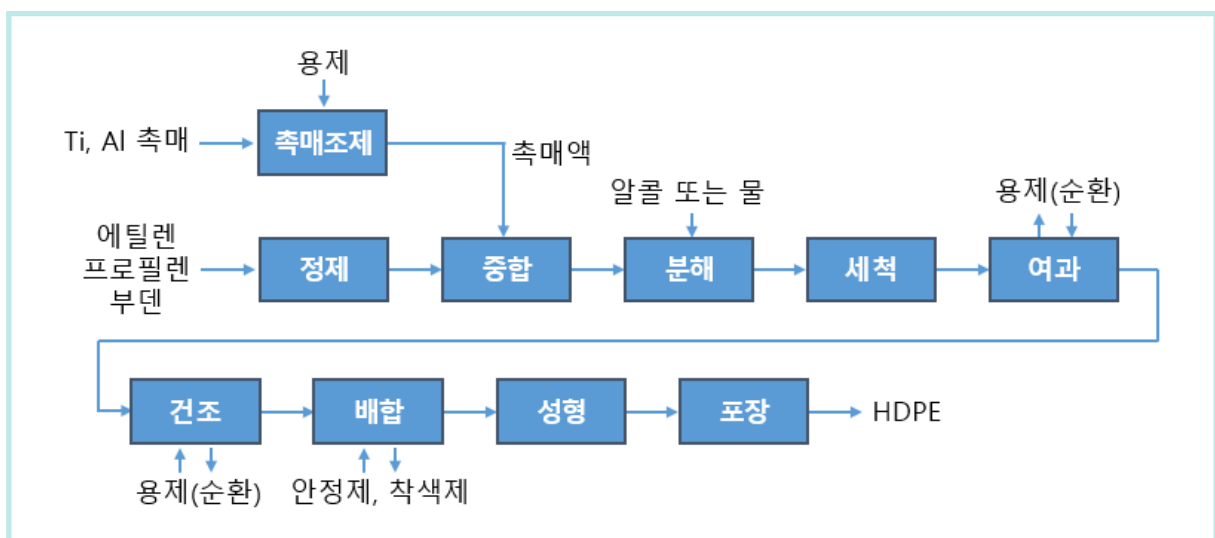
제품명	개 요
LDPE (Low Density Polyethylene)	에틸렌을 원료로 중합공정을 거쳐 제조
	① 상온에서 투명한 고체
	② 비중이 0.91~0.94으로 결정화가 낮아 가공성과 유연성, 투명성이 우수
	농업용, 포장용투명필름, 전선피복, 일회용품 등의 원료
	대표적인 합성수지
HDPE (High Density Polyethylene)	에틸렌을 원료로 중합공정을 거쳐 제조
	① 무색, 무취의 반투명한 고체
	② 밀도가 0.94 이상으로 강도는 우수하나, 유연성과 가공성은 떨어짐
	공업용 필름, 쇼핑백, 각종 용기, 노끈, 컨테이너, 파이프 등의 원료
PMMA (Polymethyl-metacrylate)	MMA를 원료로 유호중합, 용액중합, 벌크중합, 음이온중합 등을 통해 제조
	무색 투명한 고체로 내열성, 내화학성이 약하나, 가볍고 내수성이 우수함
	광섬유, 간판, 위생용품, 가구, 안경렌즈 등의 용도로 사용
	시아노박테리아(Cyanobacteria), 고세균(Archaea)에 생분해성이 있는 것으로 밝혀짐

2) 제조 공정

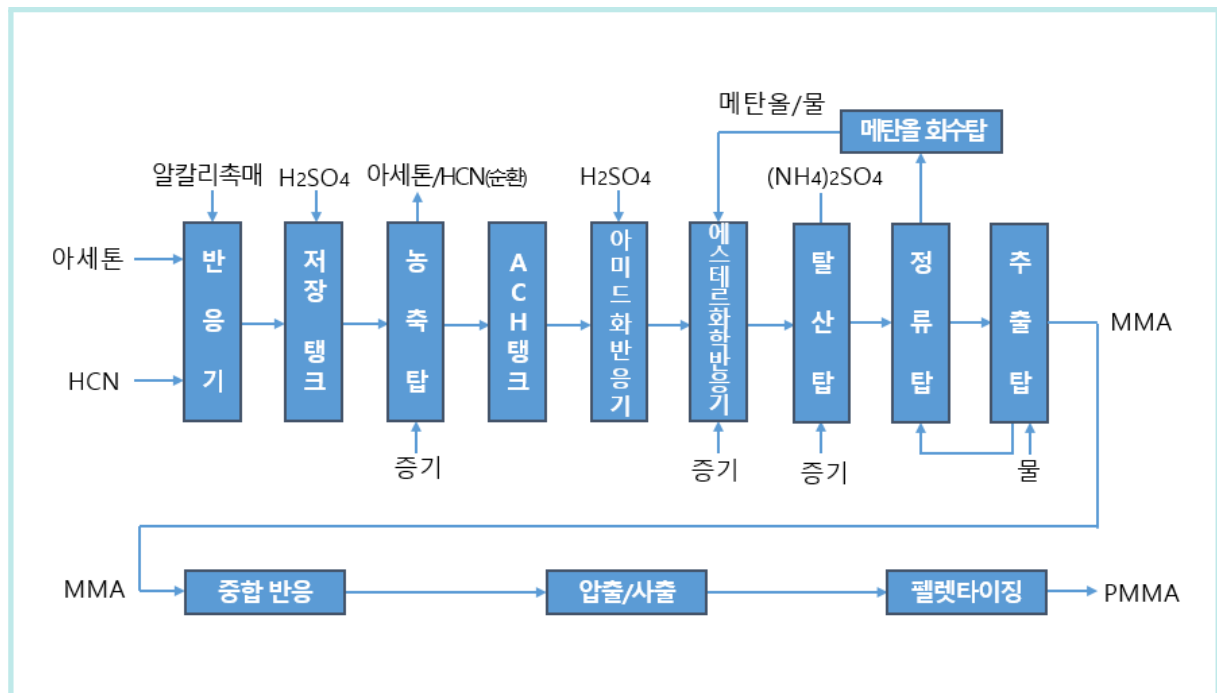
본 평가에 사용할 HDPE, LDPE 및 PMMA의 제조 공정을 도식화하여 각각 [그림 37], [그림 38], [그림 39]에 나타내었다.



[그림 37] LDPE 제조공정(출처: 2019 석유화학 편람)



[그림 38] HDPE 제조공정(출처: 2019 석유화학 편람)



[그림 39] PMMA 제조공정(출처: 2019 석유화학 편람)

6.2. 평가 항목

1) 평가 범위

본 평가에서는 착화 위험성이 높으며 분진폭발사고 사례가 많아 향후 동종재해 발생 가능성이 높은 플라스틱(HDPE, LDPE, PMMA) 분진에 대하여 국제 표준 시험방법을 적용한 실험 장비를 활용하여 입자 크기·분포 등의 물리적 특성 및 최소점화에너지(MIE), 최소점화온도(MIT) 등의 화재·폭발 특성을 평가하였다. 뿐만 아니라, 실제 플랜트에서 분진폭발 사례가 많은 사일로(Silo) 및 집진기를 축소 제작하여 플라스틱 분진의 정전압을 측정함으로써 정전기 착화 특성을 평가하여 플라스틱 분진을 제조 또는 취급하는 사업장에서 플라스틱 분진의 정전기 착화로 인한 화재·폭발사고 예방을 위한 안전대책 수립에 도움을 주고자 실시하였다.

<표 12> 평가 항목 및 내용

평가 항목	내 용
입도분석	레이저 회절/산란법에 의한 건식 입도분석으로 고체 시료의 평균 입자크기 및 분포 평가
정전압	농도 변화에 따른 분진운의 정전압 발생량 측정(사일로 및 집진기)
최소점화에너지 (MIE)	농도 변화에 따른 분진운의 최소점화에너지 측정
최소발화온도 (MIT)	농도 변화에 따른 분진운의 최소발화온도 측정

II. 평가 장비 및 방법

1. 입도 분석(Particle Size Analysis)

입도 분석을 통한 입경 및 입도 분포는 분진의 화염전파 및 폭발특성에 큰 영향을 미치기 때문에 플라스틱 분진의 폭발 위험성을 평가하는데 있어 중요한 정량적 자료가 된다.

입도 측정 방법은 직접측정 방법과 분체 입자의 물리·화학적인 특성을 분석하여 입도를 결정하는 간접측정 방법으로 크게 나눌 수 있다. 입도 분석에는 광학 또는 전자 현미경을 통해 측정하는 현미경법, 분말을 일정한 크기의 체(sieve)에 통과시켜 측정하는 체가름법, 중력 또는 원심력으로 인한 입자의 침강을 이용한 침강법, 입자가 전극 사이를 통과할 때 변하는 저항을 이용한 전기적 감지법, 그 밖에 레이저 회절과 산란을 이용한 레이저 회절법 등이 있다.

레이저 회절법의 측정 원리는 다음과 같다. 레이저광을 입자에 조사하면 흡수, 회절, 반사, 투과 등의 현상이 발생하는데 이는 빛의 파장 및 편광, 굴절률, 측정 각도 등으로 구분된다. 레이저의 회절 및 산란을 이용한 입도분석장치는 시료 주변에 수십 개의 광 검출기가 설치되어 있어 회절 및 산란된 레이저광의 강도를 감지하여 입자의 크기 분포를 측정한다. 레이저 회절 및 산란을 이용한 입도 측정 방법은 조작이 용이하고, 측정시간이 짧은 장점이 있다. 또한 전자재료, 파인세라믹, 안료, 금속 및 고분자 재료, 화장품, 잉크 등 다양한 분말의 입도 측정에 사용할 수 있다.

1.1. 평가 장비

- 장 비 명 : LS 13 320 Laser Diffraction Particle Size Analyzer
- 제 작 사 : Beckman Counter社(미국)
- 장비구성 : 렌즈, 검출기 등이 내부에 장착된 본체와 건식시료 투입부로 구성.
- 측정범위 : 0.4~1000 μm



[그림 40] 입도분석 장치

1.2. 평가 방법

- 관련 규격 : KS A ISO 13320 (입자 크기 분석-레이저 회절법)
- 시험 순서 : 건식방식으로 진공을 이용하여 분진 형태의 시료를 부유시킨 후 투입하여 측정하며, 시험 결과는 입자를 구형으로 가정하여 평균입경을 산출.
- 결과 평가 : 총 3회 측정하여 재현성 최대허용편차에 들어오는 결과값에 대해 통계적 처리 절차를 거쳐 최종 입도 값으로 결정하며, 반복되는 시험의 재현성 및 반복성 허용차는 다음 <표 13>과 같다

<표 13> 입도분석의 재현성 최대허용편차

입도 평균값	최대허용편차 (10 μm 이상)	최대허용편차 (10 μm 이하)
X10	5%	10%
X50	3%	6%
X90	5%	10%

※ X10, X50, X90 : 각각 분석대상 입자가 10%, 50%, 90% 누적 되었을 때의 평균 입도

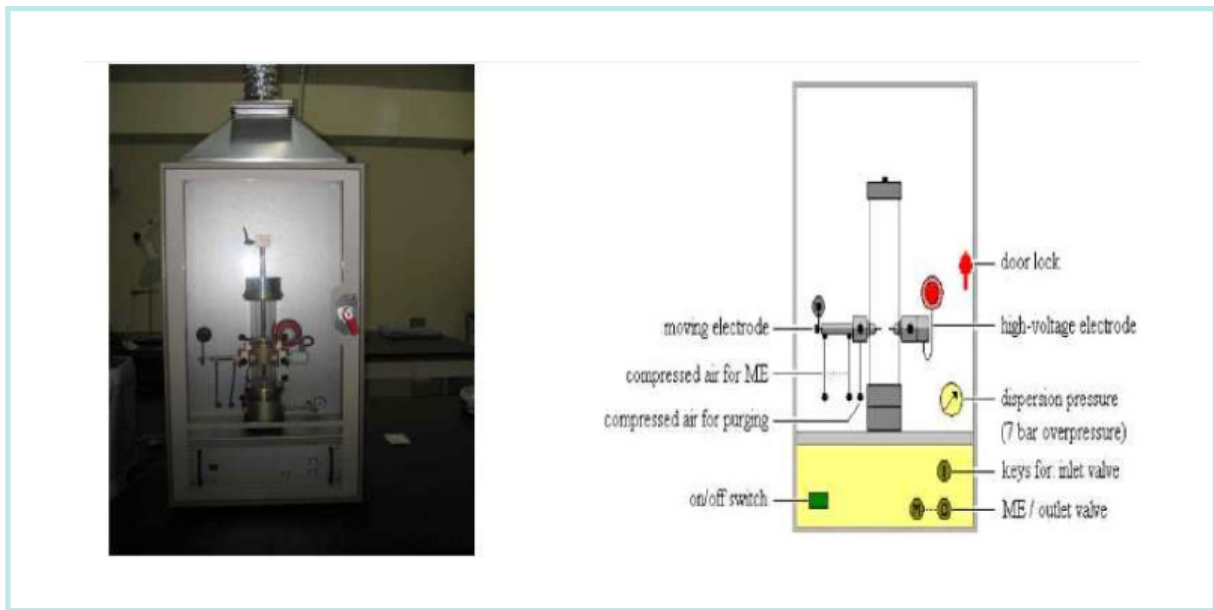
2. 최소점화에너지(MIE) 시험

분진운에 일정 크기 이상의 에너지를 가하면 분진운이 착화하여 폭발을 일으키게 되는데 이 때 필요한 가장 작은 크기의 에너지를 최소착화에너지(MIE)라고 한다. 분진 취급 공정의 위험성평가를 위해서는 최소착화에너지에 대한 이해는 필수적이다. 이 값은 분진 폭발 등의 위험성 예방 수단의 범위와 비용을 결정할 수 있게 해준다. 최소착화에너지(MIE)는 상온 상압에서 분진-공기 혼합물을 점화시킬 수 있는 가장 낮은 커패시터(Capacitor) 방전 에너지로 설명할 수 있다. 부유 분진의 MIE를 측정하기 위한 장비는 전 세계적으로 다양한 장비가 사용되고 있으나, 스위스 Kühner사에서 제작된 MIKE 3으로 측정하는 것이 표준화 되어 있다. MIE는 일반적으로 분진이 점화되지 않는 가장 높은 에너지와 점화시킬 수 있는 가장 낮은 에너지의 범위로서 표현되어 진다.(No ignition < MIE < Ignition).

MIE 측정값에 영향을 주는 인자는 인덕턴스(Inductance in the discharge circuit), 난류의 강도(Turbulence, Ignition delay time), 입도분포, 농도, 온도, 수분함량 등이 있다. 일반적으로 MIE는 인덕턴스 존재 하에서 얻어지나 정전기 방전에 의한 위험성평가를 위해서는 인덕턴스가 없는 상태에서 MIE가 측정되어야 한다. 즉, 최소착화에너지 MIE는 인덕턴스가 존재할 때 일반적으로 더 작다. 또한 MIE 측정은 분진이 점화될 수 있는 최적의 농도와 난류의 강도를 고려하여야 하기 때문에 각 변수의 변화를 주면서 반복 시험을 실시하여야 한다.

2.1. 평가 장비

- 장 비 명 : MIKE3
- 제 작 사 : Kuhner(스위스)
- 장비구성
 - 본체 : 시료투입 및 폭발구현을 위한 약 1.2 L의 유리 튜브와 분진 부유 시스템 및 가변 전극에 의한 점화시스템으로 구성
 - DAQ system : 부유분진 형성을 위한 전 대변 구동, 인가되는 점화 에너지 변화 등 구동 프로그램과 데이터 기록을 위한 MIKES/W



[그림 41] 최소점화에너지 측정 장치(MIKE3)

2.2. 평가 방법

일정 농도의 분진을 튜브에 넣고 압축 공기로 분사시켜 해당 분진을 점화 시킬 수 있을 정도의 에너지를 가하여 점화를 확인한 후 해당 농도에서 10회 이상 점화가 이루어지지 않을 때까지 에너지를 줄여주면서 실험을 반복한다. 이와 같은 실험을 점화가 일어나지 않는 최소농도와 최대농도가 관측될 때 까지 반복하여 해당물질의 최소점화에너지 범위를 측정한다. 또한 최소점화에너지는 난류의 강도에 영향을 받으므로 다양한 점화지연시간으로 위와 같은 실험을 실시하여야 정확한 최소점화에너지 범위를 측정할 수 있다. 부유분진에 점화에너지 제공을 위한 스파크(spark) 발생 방법은 1~3 mJ일 경우에는 High-Voltage Relay로 유발하며, 10~1,000 mJ 경우에는 Electrode movement로 유발시켜 시험을 실시한다.

최소점화에너지 측정시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 EN 13821(2002)이다.

- 관련 규격 : BS EN 13821(2002) “Potentially Explosion atmospheres-Explosionprevention atmospheres-Explosionprevention andprotection-Determination of minimum ignition energy of dust/airmixtures”
- 적용 대상 : 화약, 다이너마이트, 자연발화성물질 및 연소를 위하여 산소가 필요하지 않는 물질에 대해서는 적용이 불가능.

○ 시험 절차

- 10번의 연속 시험에도 더 이상 점화가 되지 않을 때까지 에너지를 감소
- 점화가 되지 않는 에너지에서 분진 농도를 변화(증가/감소) 시키며 시험 실시
- 10번 연속 시험에서 점화되지 않는 가장 높은 에너지(E1)와 점화가 이루어지는 가장 낮은 에너지(E2)를 기준으로 점화 에너지 범위 평가
- $E1 < MIE < E2$ 로 표현된다.

○ 주의 사항

- 분진의 최소점화에너지는 입자의 크기에 따라서도 영향을 받으나 수분에 따라서도 영향을 받기 때문에 시험을 실시하는 경우 입수된 형태 그대로 시험을 실시하는 것이 중요하며,
- 특별한 사유에 의해서 통상의 수분 이상으로 함습된 시료이거나 취급공정의 수분데이터가 없는 경우에는 적절한 방식으로 전처리를 수행하여야 하며, 추천되는 방법에는 다음 2가지가 있다.

☞ 진공상태에서 24시간 동안 50℃ 유지시킨 후 밀봉

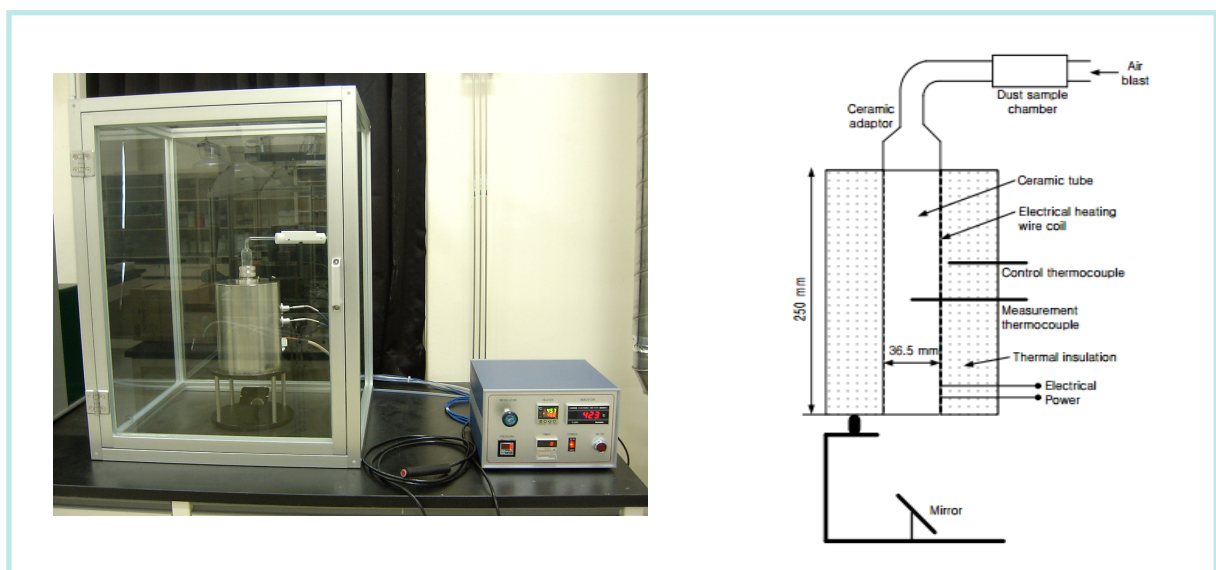
☞ 대기압 상태에서 24시간 동안 75℃ 유지시킨 후 밀봉

3. 최저발화온도(MIT) 시험

부유분진의 발화위험성을 평가하기 위해 최저발화온도를 측정하였다. 부유분진의 최소발화온도는 공기 중에 부유되어 있는 분진이 발화할 수 있는 가장 낮은 온도를 말한다. 최저발화온도에는 분진이 연소반응을 통하여 입자 간 전파한다는 개념이 포함되어 있지 않으므로 폭발하한농도 이하에서도 최저발화온도가 존재할 수 있다. 분진폭발사고 방지 관점에서 건조설비에서와 같이 다량의 분진이 부유되어 있는 일정 크기 이상의 밀폐공간을 가열하는 공정에서는 발화온도가 매우 중요한 폭발특성이 된다. 분진의 발화온도 정의는 일정 온도 장(Temperature field)에 있어서 분진입자가 충분히 긴 시간 동안 체류하는 경우의 값이지만, 실제 실험에서는 충분한 체류시간이 어려우므로 발화온도는 분진농도, 측정장치, 측정방법에 따라 달라질 수 있다.

3.1. 평가 장비

- 장 비 명 : 최소발화온도 시험장치
- 제 작 사 : Petrotest(독일)
- 장비구성 : 가열로, 분진운 시료홀더, 온도조절장치, 압축공기 제어장치



[그림 42] 최저발화온도 측정 장치

3.2. 평가 방법

부유 분진의 발화 온도는 일정 온도로 유지되어 있는 공간에 분진운을 분산시켜서 발화하는 최저 온도를 조사한다. 구체적인 시험방법은 시료 분진을 분진홀더에 투입한 후 0.5 bar의 압축공기를 0.3 sec 동안 주입하여 일정 온도로 가열된로의 내부에 분진운을 부유시킨다. 이때 주입하는 공기는 주입 전 필터를 통해 수분, 이물질 등을 제거한다. 분산된 분진운이 발화하여 가열로 하단부의 개방구에 까지 화염이 전파하는지를 관찰하여 화염전파 기준에 따라 발화 유무를 판단한다. 부유 분진의 농도는 분진홀더에 투입한 시료 분진의 중량을 가열로의 체적으로 나누어 구한다.

- 관련 규격 : ISO/IEC 80079-20-2:2016“Material characteristics - Combustible dusts test methods”
- 적용 대상 : 화약, 다이너마이트, 자연발화성물질 및 연소를 위하여 산소가 필요하지 않는 물질에 대해서는 적용이 불가능.
- 조건 및 주의사항
 - 분진의 최소점화에너지는 입자의 크기에 따라서도 영향을 받으나 수분에 따라서도 영향을 받기 때문에 시험을 실시하는 경우 입수된 형태 그대로 시험을 실시하는 것이 중요하며,
 - 특별한 사유에 의해서 통상의 수분 이상으로 함습된 시료이거나 취급공정의 수분데이터가 없는 경우에는 적절한 방식으로 전처리를 수행하여야 하며, 추천되는 방법에는 다음 2가지가 있다.

☞ 진공상태에서 24시간 동안 50℃ 유지시킨 후 밀봉

☞ 대기압 상태에서 24시간 동안 75℃ 유지시킨 후 밀봉

4. 정전압 시험

정전압은 전위라고도 하며 시간적으로 변화하지 않는 전기장 내에서 단위 양전하 (1 쿨롱의 전하)를 기준점(보통 무한대 점 또는 대지)에서 그 위치까지 운반하는데 필요한 일을 그 점의 전위라고 한다. 전위가 동일한 점을 연결하여 생기는 면을 등전위면이라 하며, 전기력선은 등전위면에 직각으로 교차한다. 전기장 내 한 점인 방향으로 향하는 전기장의 강도는 그 방향의 전위 기울기와 동일하며 전위는 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 향한다. 전하가 움직이지 않는 경우에는 도체의 각 점의 전위는 모두 동일하며 그 표면은 등전위면이지만, 전류가 흐를 때 도체의 전위는 위치에 따라 다르며 전기장이 존재한다. 전위의 측정방법은 측정부위에 따라 도체전위, 표면전위, 그리고 공간전위 측정으로 구분된다. 표면전위의 측정은 대전물체의 전면에 측정전극을 일정거리에 두어 검출전극에 유기되는 전압을 계측하여 측정한다.

4.1. 평가 장비

- 장 비 명 : 정전기 착화 위험성평가 분체이송 시험장치
- 장비사양
 - ELECTROSTATIC TRANSMITTER
 - ENCLOSURE CLASS : Ex d IIC T6, Ex tD A21 IP67 T80℃
 - RANGE : -20,000 ~ +20,000V
 - CONSTRUCTURE TYPE : Flange
 - POWER SUPPLY : 24VDC Loop Power
 - OUTPUT SIGNAL : 4 ~ 20mA
 - DISPLAY TYPE : Digital
 - INCLUDED CALIBRATION CHART
 - QUANTITY : 2 set
 - DUST HOPPER
 - TYPE : Clamp Open/Close
 - SIZE : Ø300 × 600L
 - BOTTOM 1½" BALL VALVE(FLANGE TYPE)
 - CCD CAMERA CONNECTION

- STATIC SENSOR CONNECTION
- 50W HOPPER VIBRATOR
- DUST COLLECTOR(BAG FILTER)
 - SIZE : $\varnothing 213 \times 700 \times 920\text{L}$
 - NOZZLE SIZE : 50A(2")
 - MAX PRESSURE : 100psi
 - MATERIAL : SUS304
 - FILTER MATERIAL : Polypropylene
 - FILTER SIZE : $\varnothing 170 \times 800\text{L}$
 - CCD CAMERA CONNECTION
 - STATIC SENSOR CONNECTION
- AIR BLOWER
 - TYPE : RING BLOWER
 - MOTOR POWER : 1.5kW
 - POWER SUPPLY : 220VAC, 11.5A
 - SOUND LEVEL : 75dB
 - RATED PRESSURE : 1800mmH₂O
 - RATED VACUUM : 1600mmH₂O
 - AIR FLOW : 4m³/min
 - QUANTITY : 2set
- GAS FLOW METER
 - TYPE : Rotameter with Metering Valve
 - FLOW : 120L/min
 - GAS : Air, Nitrogen
 - QUANTITY : 2set
- PIPING
 - SIZE : 1½"
 - DUST SAMPLING CONNECTION : ¼" O.D. Ball Valve with Pitot Probe
 - "Y" CONNECTION FOR GAS • SOLID TIE LINE
- DATA PROCESSING SYSTEM RECORDER
 - POWER SUPPLY : 24VDC(79W)
 - DISPLAY : LCD Dot Matrix(128×32)
 - INPUT SIGNAL : 4~20mA
 - COM TYPE : RS485(Modbus RTU Prorocol)



[그림 43] 정전압 측정 장비

Ⅲ. 평가 결과 및 고찰

1. 입도 분석 결과

입도분석을 통한 입경 및 입도 분포는 분진의 화염전파 및 폭발특성에 큰 영향을 미치기 때문에 플라스틱 분진의 폭발 위험성을 평가하는데 있어 중요한 정량적 자료가 된다.

화학물질이 가지는 물리적 인자 중에서 입자의 크기는 반응의 용이성 및 가능성과 밀접한 관계를 가지고 있다. 이를 분진폭발의 위험성 관점에서 살펴보면, 입자 크기가 작을수록 반응되는 표면적이 증가하고 외력에 의해 쉽게 부유되며, 부유되었을 때 침강속도가 감소하여 분진운 형성으로 인한 분진폭발 가능성이 높아질 수 있다. 따라서 고체 형태의 화학물질의 입경 및 입도분포를 측정하는 입도분석은 플라스틱 분진의 폭발 위험성을 평가하는데 있어 중요한 정량적 자료가 된다. 평가대상 시료 HDPE, LDPE, PMMA에 대하여 입도분석을 실시한 결과를 <표 9>와 [그림 13]~[그림 14]에 각각 나타내었다.

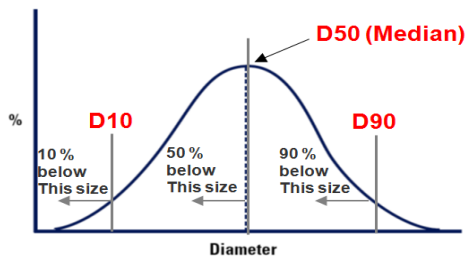
<표 9>의 입도분석 시험 결과에서 각 분진의 체적 기준 중간값(median)은 각각 HDPE 166.17 μm , LDPE 157.9 μm , PMMA 16.11 μm 로 측정되어 HDPE, LDPE의 입도는 서로 비슷한 것으로 나타났으나, PMMA 분진의 입도는 HDPE, LDPE 분진에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 아울러 각 분진의 체적 기준 입도는 각각 HDPE 0.68~1,000 μm , LDPE 2.26~1,000 μm , PMMA 0.35~40 μm 의 범위에 분포하고 있는 것으로 측정되어 PMMA 분진은 주로 입경이 작은 분진으로 구성되어 있으나, HDPE, LDPE 분진은 다양한 크기의 입경을 가진 분진으로 구성되어 있는 것으로 나타났다.

분진의 입경은 분진의 폭발강도나 폭발민감성 등 분진의 폭발특성에 영향을 주는 주요 인자로서, 일반적으로 입경이 작을수록 폭발하한농도와 최소점화에너지는 감소하고 폭발압력은 증가하는 경향성을 보인다. 그러므로 본 시험을 통해 PMMA 분진이 HDPE, LDPE 분진에 비해 부유 분진의 폭발 위험성이 높음을 알 수 있다.

<표 14> 입도분석 시험 결과

시료명	시험 결과 [μm]				
	Median (중간값)	S.D.	d10	d50	d90
HDPE	166.17	0.68	76.88	166.17	407.10
LDPE	157.90	2.26	55.84	157.90	278.27
PMMA	16.11	0.35	4.82	16.11	25.05

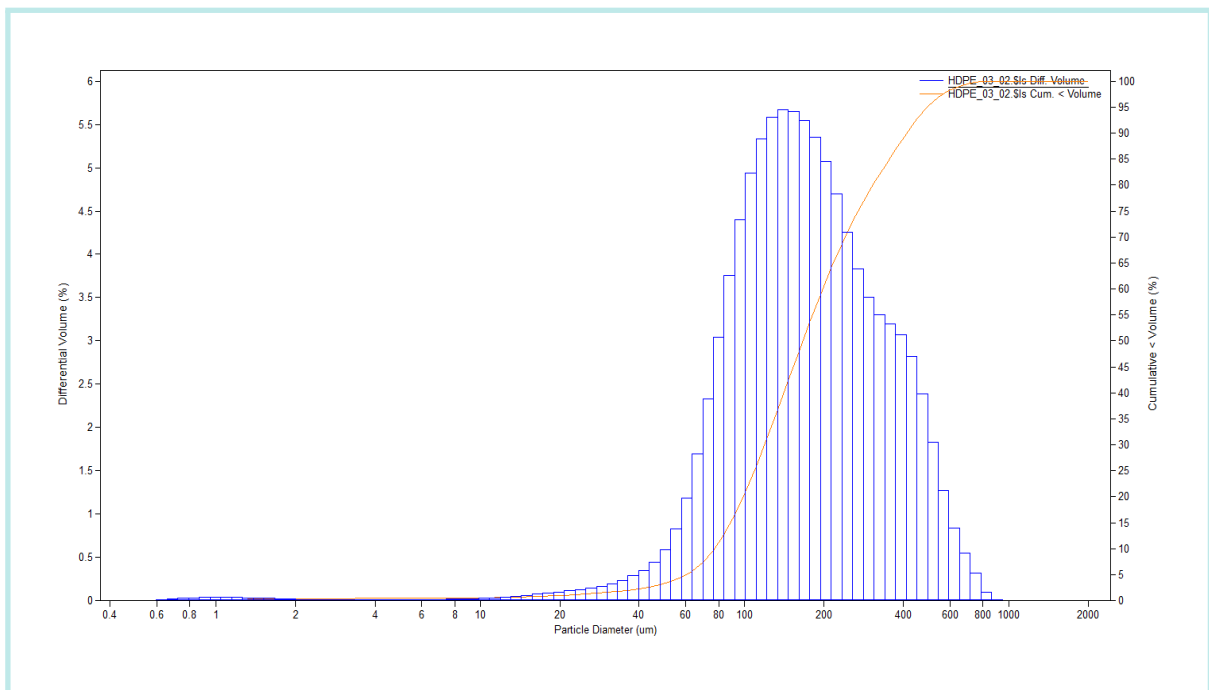
※ 참조



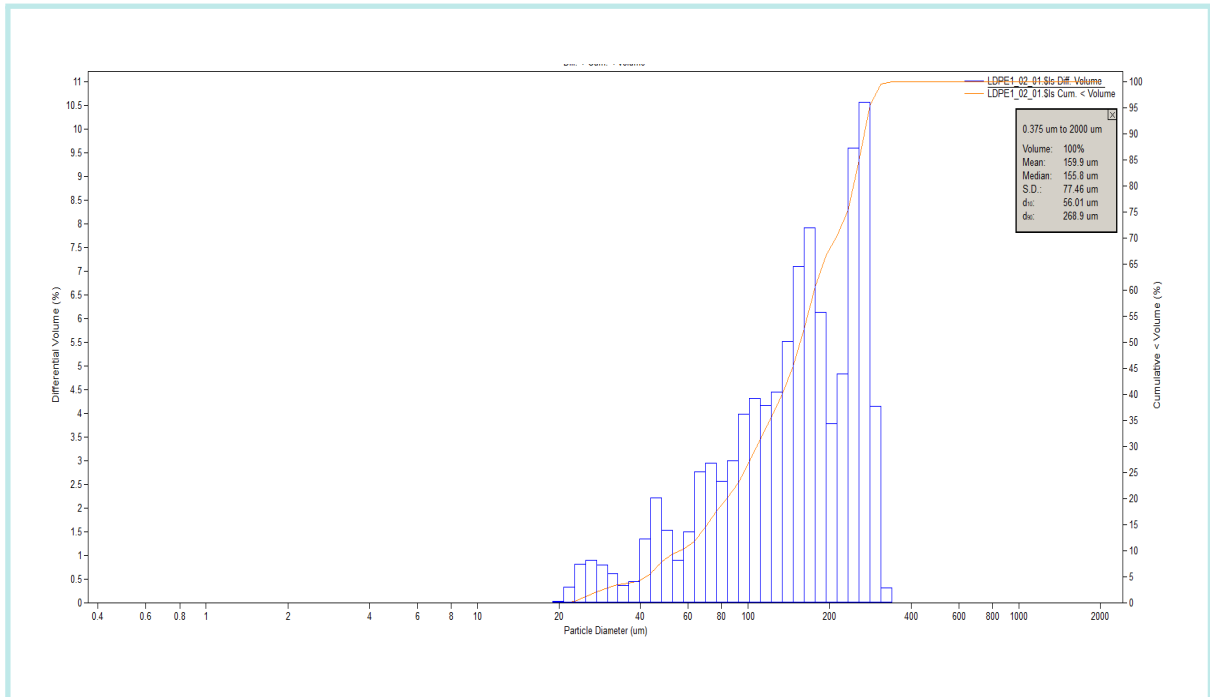
D₁₀ 전체 분포상에서 10%일 때의 입도

D₅₀ 전체 분포상에서 50%일 때의 입도

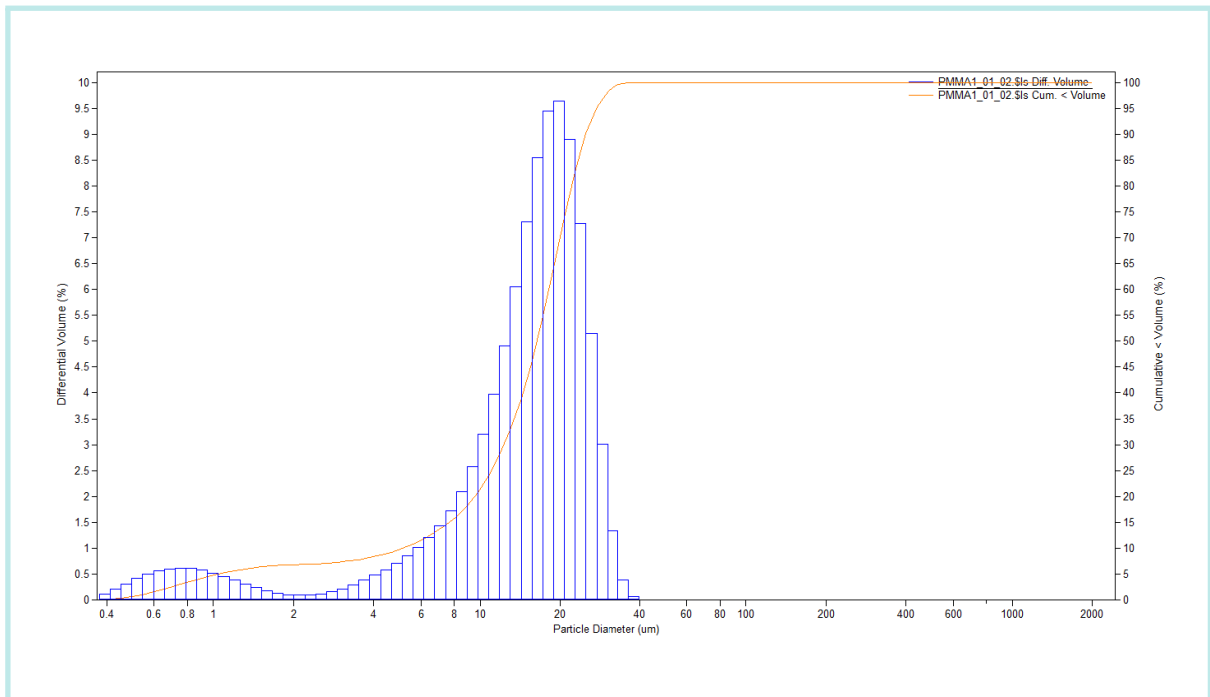
D₉₀ 전체 분포상에서 90%일 때의 입도



[그림 44] HDPE의 입도분포 특성



[그림 45] LDPE의 입도분포 특성



[그림 46] PMMA의 입도분포 특성

2. 최소점화에너지(MIE) 시험 결과

평가 대상 시료 HDPE, LDPE 및 PMMA를 대상으로 농도 및 분진의 점화지연 시간을 변화시키며 최소점화에너지를 측정한 결과를 <표 22>와 [그림 13]~[그림 14]에 각각 나타내었다.

[그림 1]과 같이 HDPE 분진은 지연시간 120ms, 150ms일 때 모두 600g/m³, 900g/m³의 농도에서 최소점화에너지가 300mJ로 나타나 HDPE 분진의 최소점화에너지는 30mJ < MIE < 100mJ의 범위로 표현할 수 있다.

[그림 1]과 같이 LDPE 분진은 지연시간 120ms일 때 600g/m³의 농도에서 최소점화에너지가 300 mJ로 나타났으며, 지연시간 150ms에서는 600g/m³의 농도에서 100mJ로 나타나 LDPE 분진의 최소점화에너지는 30mJ < MIE < 100mJ의 범위로 표현할 수 있다.

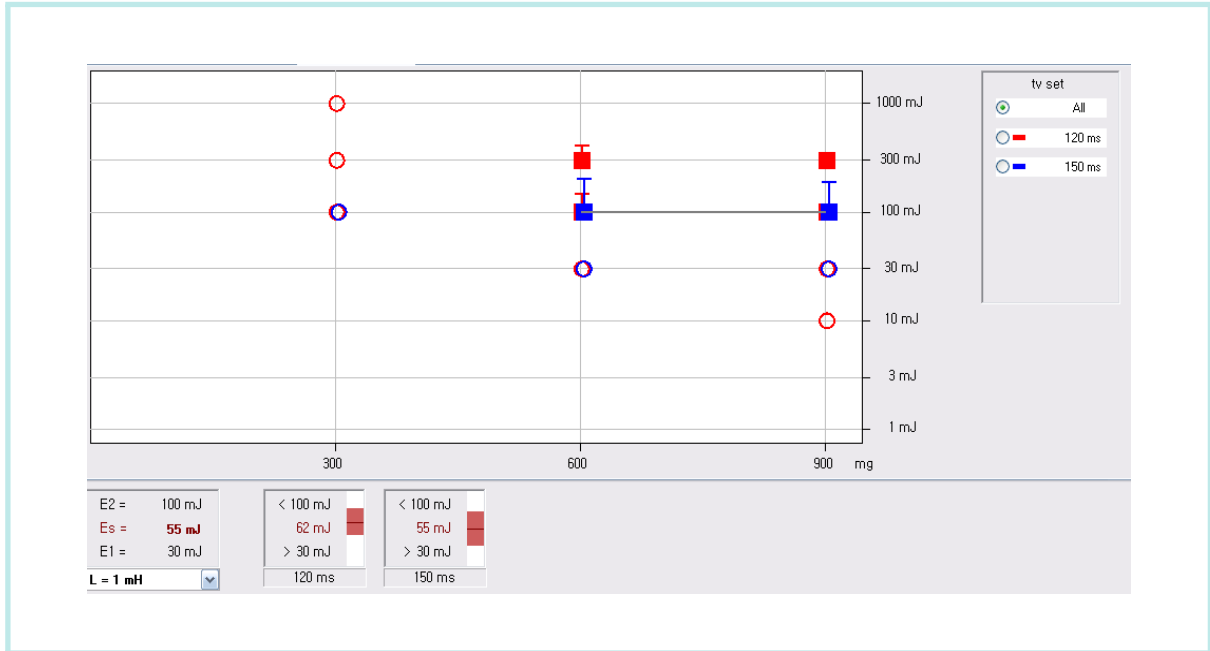
[그림 1]과 같이 PMMA 분진은 지연시간 120ms일 때 1,800g/m³의 농도에서 최소점화에너지가 3mJ로 나타났으며, 지연시간 150ms에서는 900g/m³, 1,200g/m³의 농도에서 3mJ로 나타나 최소점화에너지의 범위는 1J < MIE < 3J로 표현할 수 있다.

입경 크기 및 분진의 분산지연시간은 최소점화에너지에 영향을 미치는 주요 인자로서 일반적으로 분진의 입경이 작을수록, 분산지연시간이 길수록 최소점화에너지도 감소하는 경향성을 보인다.

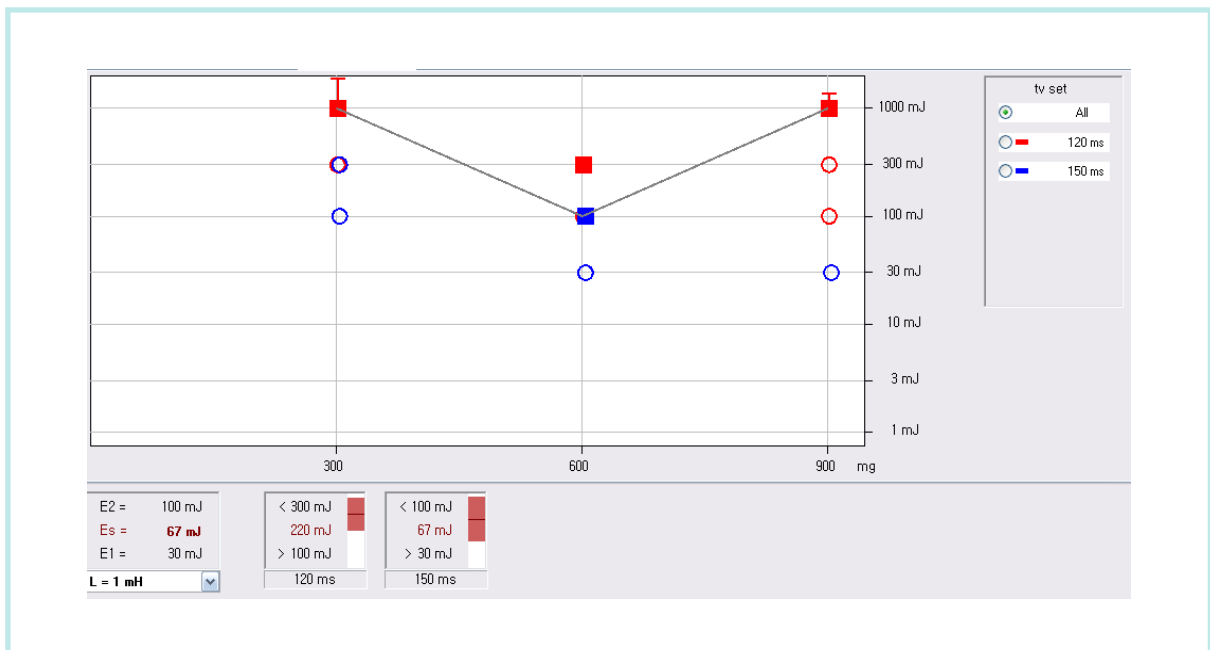
본 시험을 통해 각 시료 분진의 입경이 비슷한 HDPE, LDPE는 30mJ과 100mJ 사이의 최소점화에너지를 가지나, PMMA는 최소점화에너지는 1mJ과 3mJ 사이에 있으므로 PMMA 분진의 부유분진 폭발 위험성이 HDPE, LDPE 분진보다 상대적으로 높음을 알 수 있다.

<표 15> 평가 대상 분진의 MIE 측정 결과

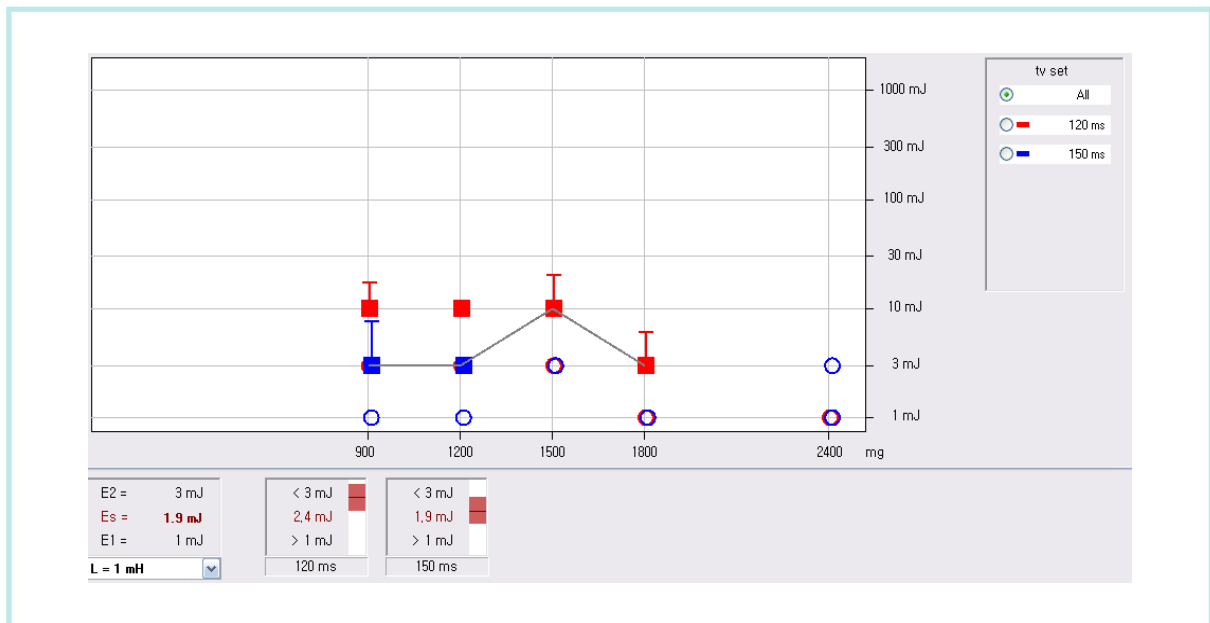
Samples	Median(μm)	MIE(mJ)	Es of MIE(mJ)
HDPE	166.17	30 < MIE < 100	55
LDPE	157.90	30 < MIE < 100	67
PMMA	16.11	1 < MIE < 3	1.9



[그림 47] HDPE의 최소착화에너지



[그림 48] LDPE의 최소착화에너지



[그림 49] PMMA의 최소착화에너지

MIE는 분진폭발 특성값 중 폭발발생의 가능성을 가늠할 수 있는 주요 인자로서 재해예방대책을 강구하기 위해 활용되고 있으며, 특히 정전기 방전 등과 같은 매우 작은 착화원이 사고위험 요인으로서 검토해야 하는 경우에 중요한 자료가 된다. 문헌에 따르면 10 mJ에서 25 mJ 사이의 최소점화에너지를 갖는 분진의 경우 분진운에서 기인되는 정전기 방전에 의한 착화위험은 물론 마찰 및 충격 등 기계적 스파크에 의한 착화위험을 예방하기 위한 적절한 조치를 취해야 하는 것으로 알려져 있다.

앞서 수행된 결과로부터 최소점화에너지가 분진 내에 존재하는 수분에 의해서 변화될 수 있는 것을 확인하였는데, 온도 또한 최소점화에너지에 영향을 주는 요인이다. 분진의 최소점화에너지에 대한 온도의 영향은 분진의 점화력에 따라 다르지만 온도가 증가할수록 점화에너지는 감소하는 것으로 알려져 있으며, 25 ℃에서 300 ℃ 사이에서 25 ℃에서 측정된 최소점화에너지를 기준으로 다음과 같은 온도의 의존성을 갖는 것으로 알려져 있다.

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

예를 들어 평가대상 시료의 MIE를 평가한 조건이 25 °C에서 약 7mJ이었다면, 폭발사고가 발생된 설비의 사고당시 내부온도를 35 °C로 추정할 경우에 최소점화 에너지는 2.5 mJ로 현저히 낮아짐을 알 수 있다. 물론 상기 식은 실험결과를 바탕으로 근사한 추정식이기 때문에 절대적이라고 할 수 없으나, 최소점화에너지의 온도 의존성에 따른 공정의 안전관리 관점에서 그 활용의 의미가 있다고 할 수 있다.

부유분진의 점화 민감도(ignition sensitivity)는 위험성평가 및 방호대책 수립을 위한 중요한 인자이며, VDI 2263 Part6에서는 최소점화에너지가 3 mJ 이상이면 “Particularly ignition sensitive”로 분류된다. 분진폭발을 일으키기 위해 필요한 점화원으로 작용할 수 있는 것은 대표적으로 정전기방전에너지가 있으며, 일반적으로 정전기 방전의 종류에는 Corona discharge(0.025mJ 이하), Brush discharge(3mJ 이하), Conical pile discharge(1J 이하), Spark discharge(1J 이하), Propagating brush discharge(10J 이하) 등이 있다.

분진의 정전기 예방을 위한 국제 안전지침(BS 5958-1) “Code of Practice for Control of Undesirable Static Electricity - Part 1:General Considerations”에 의하면 최소점화에너지에 따라서 <표 17>과 같은 관리를 하도록 제안하고 있다. 즉 MIE의 크기가 1 mJ 이하의 분진은 점화 민감도가 매우 높은 분류에 해당되며 이러한 분진은 인화성 액체 및 가스와 동일하게 예방대책을 강구해야 한다. MIE가 1 ~ 10mJ 인 분진인 경우에는 점화 민감성이 높은 분진으로 분류되어 예방대책을 수립한다. 또한 MIE가 10 ~ 25mJ 의 경우에는 분진으로부터의 정전기 방전의 위험성을 고려하여야 하고, MIE가 25 ~ 100mJ 인 경우에는 인체 접지를 고려해야 하며, MIE가 100 ~ 500mJ의 경우에는 점화에 낮은 민감도를 가진 분진으로 설비 접지를 해야 한다.

<표 16> MIE에 따른 분진의 정전기 안전 지침

MIE [mJ]	세부 기준
100 < MIE ≤ 500	Low sensitivity to ignition. Earth plant when ignition energy is at or below this level.
25 < MIE ≤ 100	Consider earthing personnel when ignition energy is at or below this level
10 < MIE ≤ 25	The majority of ignition is below this level. The hazard from electrostatic discharges from dust clouds should be considered.
1 < MIE ≤ 10	High sensitivity to ignition. Take above precautions and consider restrictions on the use of high resistivity materials(plastics). Electrostatic hazard from bulk powders of high resistivity should be considered.
MIE ≤ 1	Extreme sensitivity to ignition. Precautions should be as for flammable liquids and gases

3. 최저발화온도(MIT) 시험 결과

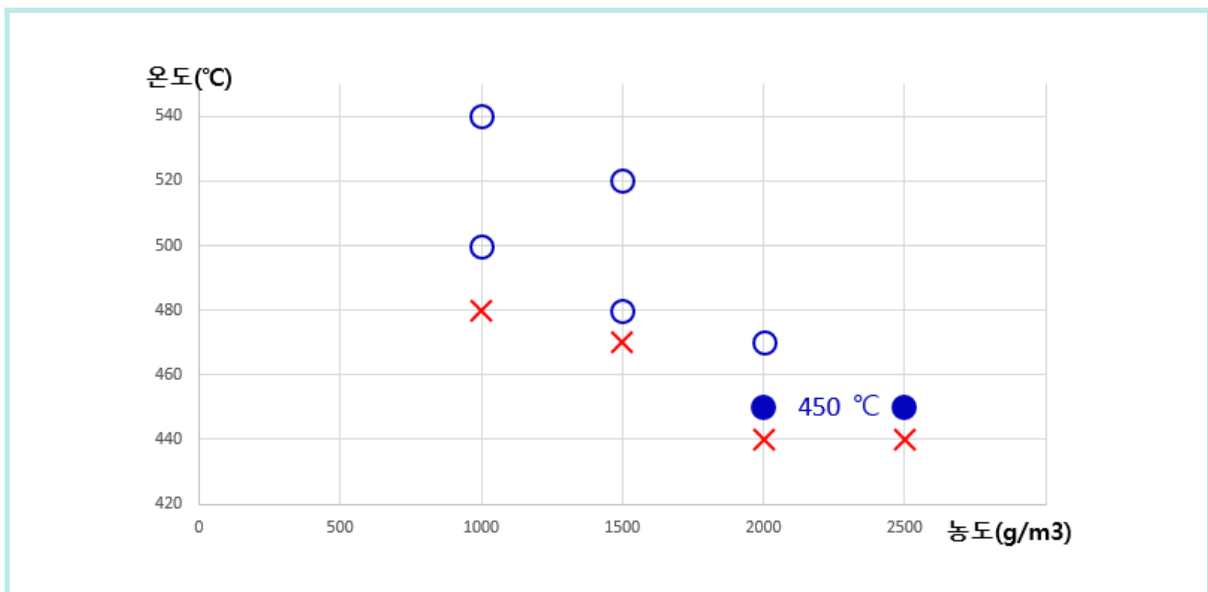
평가 대상 시료 HDPE, LDPE 및 PMMA를 대상으로 농도를 변화시키며 조사한 부유분진의 최저발화온도(MIT) 측정 결과를 [그림 1] ~ [그림 3]에 나타내었다.

[그림 50]과 같이 HDPE 분진의 발화온도는 1,000g/m³에서 500℃로, 1,500g/m³에서 480℃로, 2,000g/m³, 2,500g/m³에서 450℃ 또는 이보다 높은 것으로 나타나 최저발화온도(MIT)는 450℃인 것으로 판단되었다.

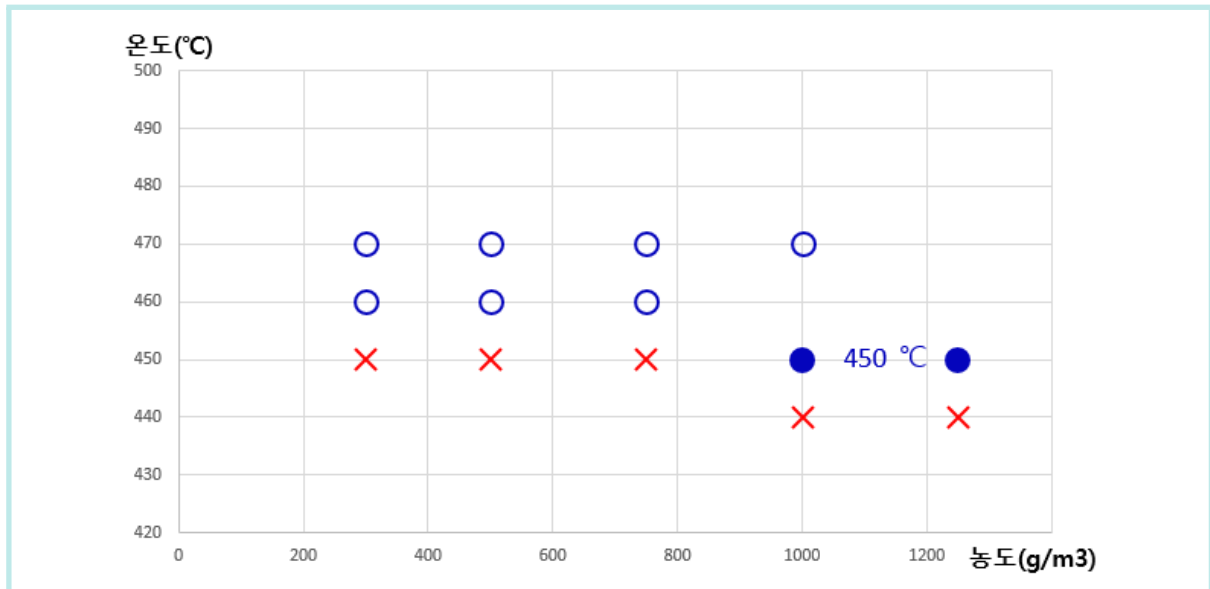
[그림 51]과 같이 LDPE 분진의 발화온도는 300g/m³, 500g/m³, 750g/m³에서 460℃로, 1,000g/m³, 1,250g/m³에서 450℃ 또는 이보다 높은 것으로 나타나 최저발화온도(MIT)는 450℃인 것으로 판단되었다.

[그림 52]과 같이 PMMA분진의 발화온도는 1,000g/m³에서 540℃로, 1,500g/m³에서 520℃로 2,000g/m³, 2,500g/m³에서 510℃ 또는 이보다 높은 것으로 나타나 최저발화온도(MIT)는 510℃인 것으로 판단되었다.

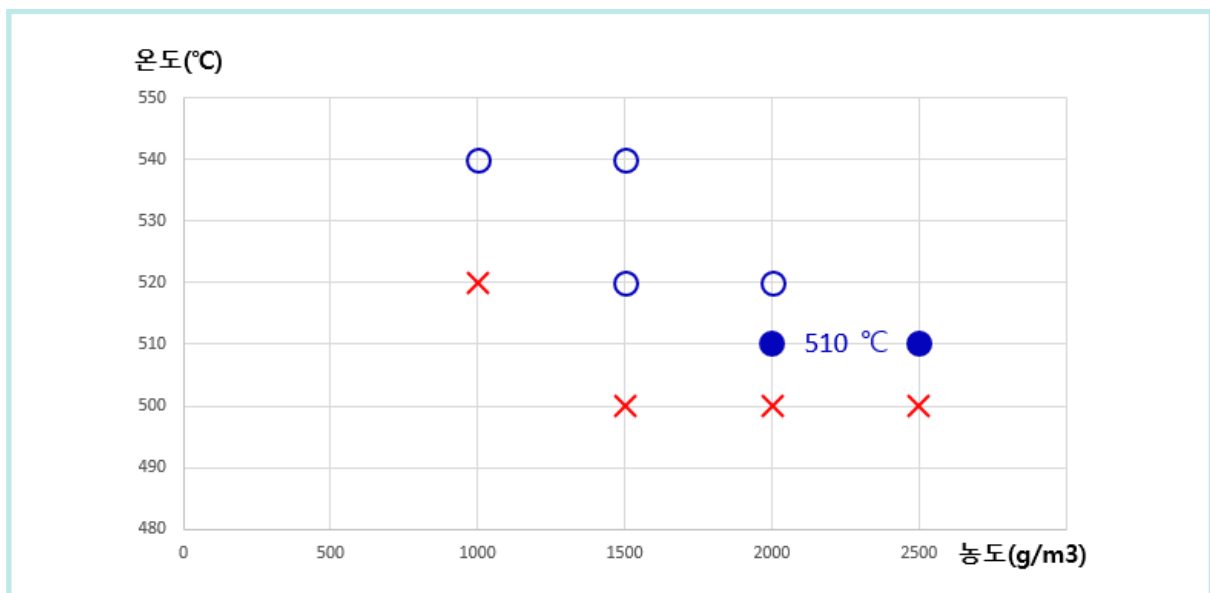
아울러, 본 시험을 통해 얻은 각 시료의 최저발화온도(MIT)를 사업장에서 실규모의 설비에 적용하는 경우 추가적인 시험을 통한 충분한 검토가 요구된다. 부유분진이 존재하는 공간의 체적이 증가할수록 분진입자의 체류시간 또한 증가하게 되어 발화온도에 필요한 열적평형에 도달하기 쉬워지므로 최저발화온도(MIT)는 감소할 수 있기 때문이다.



[그림 50] HDPE의 최저발화온도



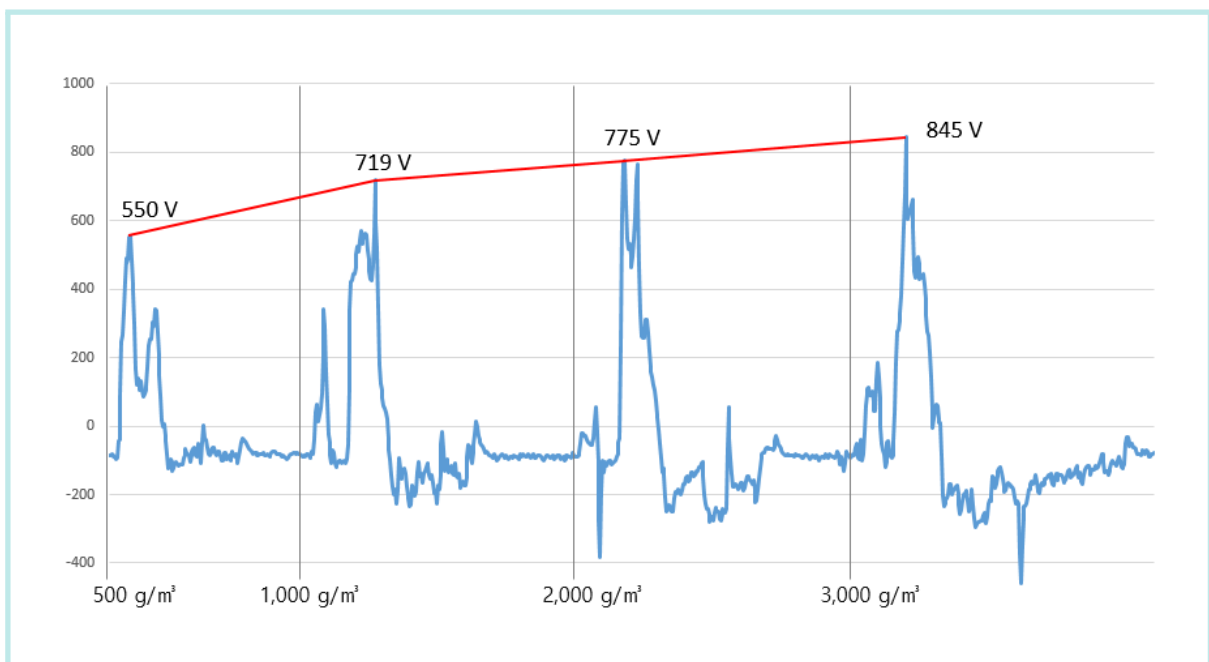
[그림 51] LDPE의 최저발화온도



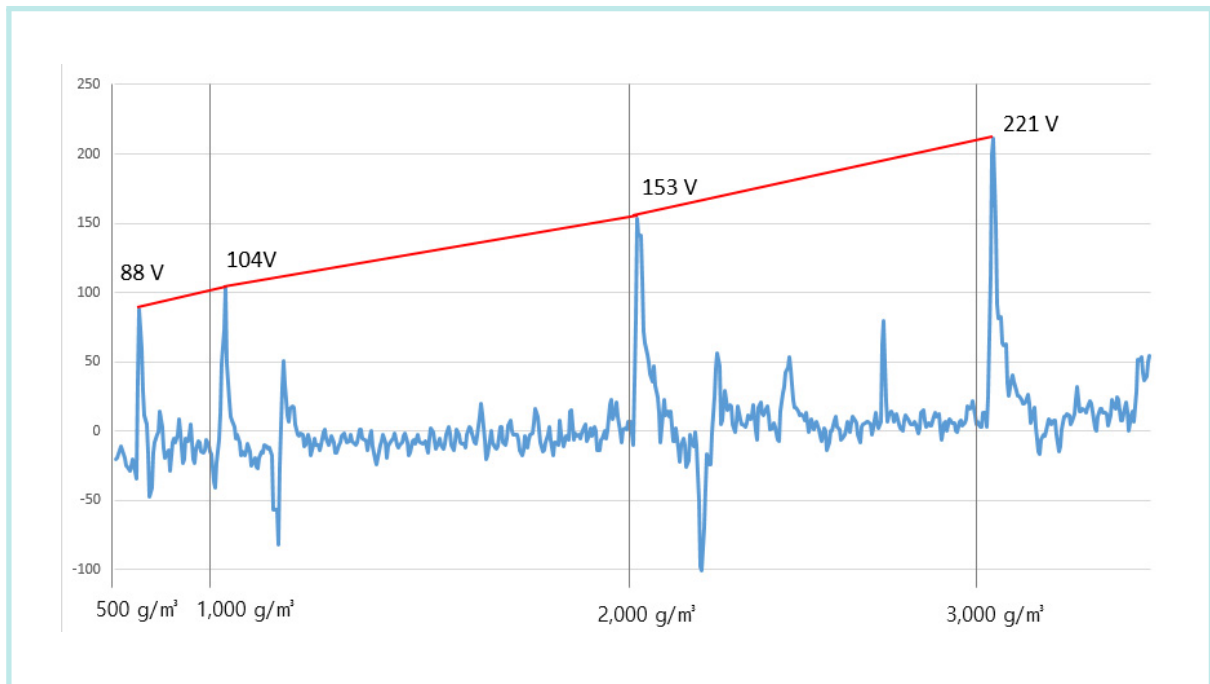
[그림 52] PMMA의 최저발화온도

4. 정전압 시험 결과

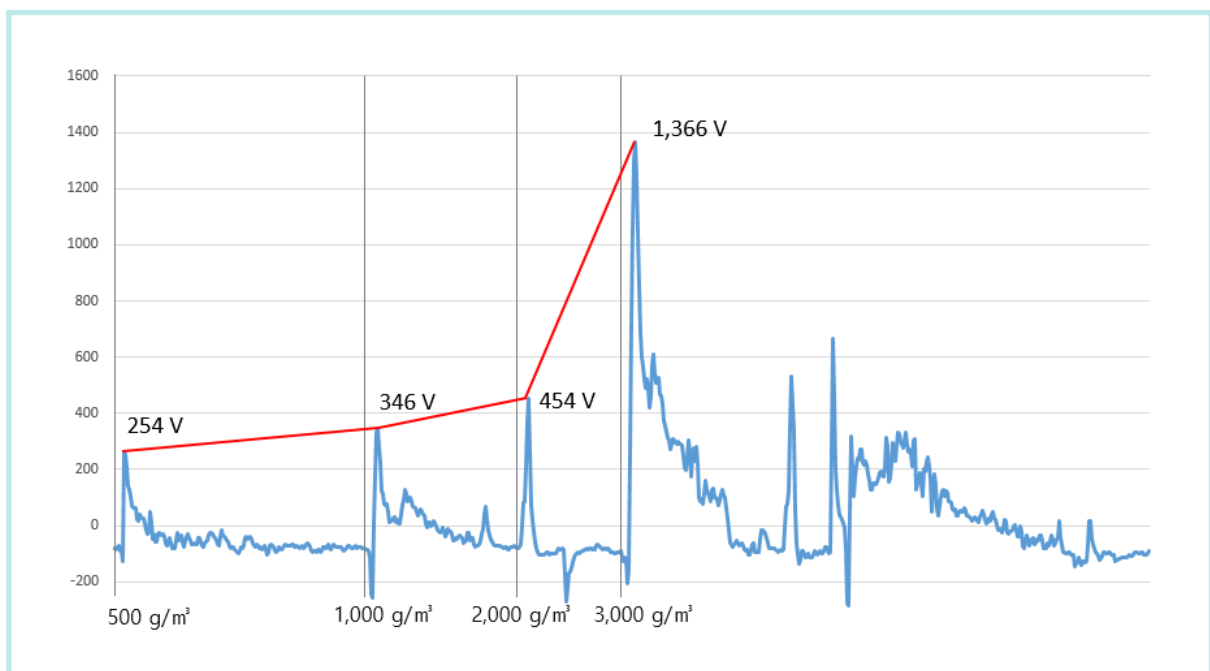
HDPE, LDPE, PMMA 분진에 대해 각각 농도가 정전압에 미치는 영향을 [그림 4-18]~[그림 4-20]에 나타내었으며, 모든 시료 분진의 농도가 증가할수록 정전압이 증가하는 경향성이 나타남을 알 수 있다. 분진의 농도가 증가하면 분진 입자와 저장 용기 및 배관 벽과의 접촉, 분리의 발생 비율이 늘어나며 전하량이 높아지게 된다. 전하량이 축적되면서 점차적으로 증가하여 대전된 전하에 의해 형성된 전계가 공기 절연파괴전계(E_b ; 30 kV/cm)보다 높아지게 되면 정전기 방전이 일어나면서 착화원으로 작용할 수 있게 된다. 분진 농도의 증가에 따른 정전압의 발생은 분진종류에 따라 달라진다. 본 평가에서 조사한 3종의 분진 중에서 농도 증가에 따른 정전압 발생 증가량은 PMMA, LDPE, HDPE의 순으로 크게 나타나고 있다. 또한 정전압 발생량을 보면 PMMA가 가장 크며, 다음으로 HDPE, LDPE의 순으로 조사되었다. 정전기의 위험성은 최소착화에너지(MIE)로 나타낼 수 있는데 이러한 MIE를 예측하기 위해서는 정전압 자료를 사용하는 방법이 효과적이다. 이를 위해 취급 분체의 정전기 착화 위험성 예측 및 화재폭발 예방 대책 강구를 위해 정전압 측정 관리를 적극적으로 활용할 필요가 있다.



[그림 53] HDPE 농도별 정전압



[그림 54] LDPE 농도별 정전압



[그림 55] PMMA 농도별 정전압

IV. 요약 및 결론

본 평가에서는 국내 화재·폭발사고사례를 조사·분석하고 정전압, 최소착화에너지, 자연발화에너지 측정 등의 실험을 통해 플라스틱 분진의 정전기 착화 위험성을 평가하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 레이저회절 방식을 이용한 입도분석 입도분석 시험 결과에서 각 분진의 체적 기준 중간값(median)은 각각 HDPE 166.17 μm , LDPE 157.9 μm , PMMA 16.11 μm 로 측정되어 HDPE, LDPE의 입도는 서로 비슷한 것으로 나타났으나, PMMA 분진의 입도는 HDPE, LDPE 분진에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 아울러 각 분진의 체적 기준 입도는 각각 HDPE 0.68~1,000 μm , LDPE 2.26~1,000 μm , PMMA 0.35~40 μm 의 범위에 분포하고 있는 것으로 측정되어 PMMA 분진은 주로 입경이 작은 분진으로 구성되어 있으나, HDPE, LDPE 분진은 다양한 크기의 입경을 가진 분진으로 구성되어 있는 것으로 나타났다.
- 2) 부유분진에 대한 분진폭발특성 중 최소점화에너지를 측정한 결과, HDPE 및 LDPE 분진은 모두 $30\text{mJ} < \text{MIE} < 100\text{mJ}$, PMMA 분진은 $1\text{mJ} < \text{MIE} < 3\text{mJ}$ 의 최소점화에너지를 갖는 것으로 나타났으며, 이렇게 낮은 점화에너지는 분진운에서 기인되는 정전기 방전에 의한 착화위험이 존재할 수 있기 때문에 접지 등 점화원 관리에 충분한 주의를 기울일 필요가 있는 것으로 평가되었다.
- 3) 부유분진에 대한 분진폭발특성 중 최저발화온도를 측정한 결과, HDPE 450 $^{\circ}\text{C}$, LDPE 450 $^{\circ}\text{C}$, PMMA 510 $^{\circ}\text{C}$ 로 측정되었다. 실규모 장치에서는 입자의 체류시간이 증가하여 발화온도에 필요한 열적평형에 도달하기가 쉬워지므로 MIT는 감소할 수 있으며 이러한 이유로 인하여 실험실적 소규모 시험에서 얻어진 MIT 측정 결과를 실규모 장치에 적용하는 경우에는 충분한 검토가 필요하다.

- 4) 밀폐공간에서 부유분진에 대한 정전압을 측정한 결과, HDPE, LDPE, PMMA 분진의 정전압은 분산 초기에 급격히 증가하다 서서히 감소하는 경향을 보인다. 아울러 분진 농도가 증가할수록 정전압의 최대값 역시 증가하는 것으로 나타나는데, 이는 분체대전에 의한 정전기 방전 위험성을 나타낸다.

참고문헌

- 1) 한우섭 외, “정전기 착화에 의한 분진 화재폭발사고 저감 연구”, 산업안전보건연구원, 2019.
- 2) 한인수 외, “플라스틱 분진의 화재폭발 예방 연구”, 산업안전보건연구원, 2014
- 3) 이정석 외, “화학사고 예방 및 원인규명을 위한 화력발전용 아역청탄 분진의 화재 폭발 위험성평가”, 산업안전보건연구원, 2018
- 4) 석유화학편람, 한국석유화학협회, 2019
- 5) KOSHA GUIDE “(D-16-2012) 폭발억제장치의 설치에 관한 기술지침”, 2012
- 6) KOSHA GUIDE “(P-41-2015) 분진폭발방지를 위한 폭연 방출구 설치방법에 관한 기술지침”, 2015
- 7) 육연수 외, “화학안전공학”, 동화기술, 272쪽

연구진

- 연구기관 : 안전보건공단 산업안전보건연구원 산업안전연구실
 - 연구책임자 : 한우섭 (위험성연구부)
 - 연구원 : 임진호 (위험성연구부)
서동현 (위험성연구부)
최이락 (위험성연구부)
이준영 (위험성연구부)
 - 연구기간 : 2021. 4. 15. ~ 2021. 6. 30.
-

화학사고 예방 및 원인규명을 위한

정전기로 인한 플라스틱 분진의 화재·폭발 위험성평가

2021-산업안전보건연구원-863

- 발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원 산업안전연구실
 - 발 행 인 : 산업안전보건연구원장
 - 발 행 일 : 2022년 3월
 - 주 소 : 대전광역시 유성구 엑스포로 339번길 30
 - 전 화 : 042) 869-0333
 - F A X : 042) 863-9003
 - Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>
-