

연구보고서

정전기 착화에 의한 분진 화재폭발사고 저감 연구

한우섭 · 이근원 · 서동현 · 이정석 · 변정환

요 약 문

연구기간

2019년 01월 ~ 2019년 11월

핵심 단어

정전기, 분진, 대전, 화재폭발, 정전압, 정전용량,
최소착화에너지

연구과제명

정전기 착화에 의한 분진 화재폭발사고 저감 연구

1. 연구배경

가연성 분진을 사용하고 있는 대부분의 사업장에서는 정전기 방전에 의한 착화원을 경험하고 있으며 이로 인한 화재폭발사고 위험성이 상존하고 있다. 국내 사업장에서의 정전기 화재폭발사고는 매년 약 30건 발생하고 있는 것으로 알려지고 있는데 그로 인한 인적 및 물적 피해가 발생하고 있어 정전기 착화에 대한 저감대책이 시급이 요구되고 있다. 국외의 경우에도 정전기 착화에 의한 화재폭발사고가 분체 투입과 집진공정에서 가장 많이 발생하고 있는 것으로 조사되고 있다. 정전기는 분진 취급 과정 중에 쉽게 확인할 수 있는 현상이 아니기 때문에 대부분의 정전기 화재폭발사고는 정전기 방전에 대한 이해 부족과 안전대책 미비가 원인이 되고 있다. 정전기 발생은 예측이 쉽지 않지만 정전기 발생 구조를 이해하고 과학적인 접근방법을 통하여 체계적인 정전기 안전대책을 수립할 수 있다. 이와 같이 매년 반복되어 발생하고 있는 정전기 착화에 의한 화재폭발사고를 저감시키기 위한 관련 국내 연구는 많지가 않다. 또한 사업장에서 정전기 예방을 위해 가장 많이 사용되는 접지와 본딩은 도체의 장치, 설비 등의 정전기 발생의 저감에 주로 효과가 있다. 반면에 접지와 본딩에 의한 정전기 대책은 배관

내부의 분진, 가스, 유증기 등의 비전도성 물질에는 효과가 작기 때문에 최소착화에너지보다 큰 정전기 방전이 발생하지 않도록 관리하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 정전기 착화에 의한 화재폭발사고가 많이 발생하는 분진 취급 공정에서의 사고 저감을 위해 효율적인 정전기 방전 예방대책 방안을 제시하였다. 이러한 연구목적을 달성하기 위해 정전기 착화에 의한 국내외의 화재폭발사고사례를 조사, 분석하고 정전용량 측정을 통한 정전압의 계산 및 정전압 측정에 의한 착화에너지 추정치의 타당성을 검토하여 정전기 사고저감에 활용할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 주요 연구 내용

- 연구 결과

국내외의 정전기에 의한 분진 화재폭발사고가 반복하여 일어나고 있으며 국내 정전기 착화에 의한 분진 화재폭발사고사례 분석 결과, 발생원인은 근로자 작업중(67 %), 공정 운전중(33 %)으로 조사되었으며 작업자 기인에 의한 사고가 많은 것을 알 수 있었다. 분진운의 착화시에 화염의 발생은 일정 시간 경과후에 발생하며 PE(HD)분진의 착화 후의 화염핵 생성 시간은 약 8 ms이었으며 불꽃 방전에 의한 분진 착화는 착화원 중심부가 아닌 주변부에서 화염핵(Flame kernel)이 형성되며 착화원 발생 공간에서는 화염이 관찰되지 않았다. 이러한 원인으로 불꽃 방전 발생 시에 미세 충격파에 의해 분진농도가 감소하기 때문으로 추정된다. 또한 PE(HD) 등의 4종의 최소착화에너지(MIE)를 조사하고 PE(HD)의 정전용량(C)을 측정하 정전압을 계산한 결과 문헌값을 사용하여 얻은 정전압의 결과와 거의 유사하였다. 정전기 착화 위험성에 대한 정전용량(C)은 “작업중(인체대전), 분진 및 공정설비,

자료 없는 분진” 등의 3가지로 분류하여 적용하는 방법을 제시하였으며, 정전용량의 효율적인 조사방법을 위해 정전압과 MIE자료를 사용하여 $V_{ex}=[(2 \cdot E)/C]^{0.5}$ 에 의한 C값의 산출방법을 제안하였다. 분진은 분산 횟수가 많아질수록 정전압이 증가하였으며, 분진농도 증가에 따른 정전압의 증가율은 PMMA, PE(LD), PE (HD)의 순으로 크게 나타났다. PE(HD)를 대상으로 분진 분산 조건이 정전압에 미치는 영향을 조사한 결과, 분산 횟수가 증가할수록 또한 동일 횟수의 조건에서는 농도가 클수록 정전압이 증가하였다. 분진 분산 시에 발생하는 정전압은 분산 초기에 급격히 증가하다 서서히 감소하며 분진 농도가 증가할수록 정전압은 최대값으로 수렴하는데, 이는 분체대전에 의한 정전기 방전 위험성을 나타낸다. PE(LD)에 있어서 정전압의 최소 및 최대값의 범위는 농도가 증가할수록 증가 경향을 나타냈는데, 이는 농도 증가는 분진의 마찰 및 충돌 대전이 증가하기 때문으로 추정된다. 정전기 화재폭발 예방을 위한 안전 정전압을 조사한 결과, PE(HD), PE(LD)-1, PE(LD)-2, PMMA는 각각 2.58, 44.72, 25.82, 8.16 kV의 값이 얻어졌다. 공정설비의 정전압 측정값을 사용하여 정전기 방전에너지를 계산하고 이러한 계산값이 MIE값의 이하가 되도록 정전기 발생량을 저감시키는 대책을 제안하였다. 또한 산업안전기준에 관한 규칙 제325조(정전기로 인한 화재 폭발 등 방지)에서 “정전압 측정기”를 규정하는 개정안을 제안하였다.

- 시사점

정전기 착화에 의한 화재폭발사고는 유사재해가 반복하여 발생하고 있는데 이러한 경향은 정전기 착화 대책의 미비한 결과를 반영하고 있

다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위해서는 정전기 방전 위험성을 쉽게 평가하고 관리할 수 있는 방법을 개발하여 사업장에 보급함으로써 정전기 안전에 대한 사업장의 관심을 유도할 필요가 있다. 이를 위해서 정전압측정기를 활용하여 간편하게 대전 레벨을 감시하고 측정된 정전압을 사용하여 착화에너지를 계산하여 최소착화에너지 이하로 정전압을 관리하는 방안이 제도개선을 통하여 관리하는 것이 필요하다.

3. 연구 활용 방안

- 제언

정전기 착화에 의한 화재폭발사고는 발생 위험성이 높은 분체투입 작업, 집진공정 등에서 동종재해가 매년 발생하고 있다. 정전기의 대전 현상은 재현이 쉽지 않고 구체적인 예방대책은 도체의 물질에서 제한적으로 실시되고 있기 때문에 부도체의 분진 등에 적용할 수 있는 안전대책 및 제도적 개선이 요구되고 있다.

- 개선 방안

- 정전기 예방을 위해 많이 사용되고 있는 접지, 본딩은 도체에 대한 정전기 대책으로서 효과적이지만 대부분의 분진과 같은 부도체에 대한 정전기 대책 효과는 전혀 없거나 거의 기대할 수 없다. 그러므로 부도체인 분진에 대한 정전기 착화 위험성과 이를 저감시키거나 제어할 수 있는 구체적 방안 등에 대한 검토가 필요하다.
- 정전기 착화에 의한 화재폭발 예방을 위해서, 산업안전기준에 관한

규칙 제325조(정전기로 인한 화재 폭발 등 방지)에서 “정전압 측정기”를 규정하는 개정안을 통해서 사업장에서 쉽게 활용할 수 있으며 체계적인 정전기 안전대책의 활성화에 필요한 제도적 지원이 요구된다.

－ 활용

- 국내 학회 논문게재를 통한 정전기 착화에너지의 추정 방법에 대한 안전기술정보 보급
- 제도개선 활용을 통한 정전기 착화에 의한 분진 화재폭발사고 방지에 기여

4. 연락처

- － 산업안전보건연구원 산업화학연구실 한우섭 부장
- － ☎ 042-869-0331
- － E-mail : hanpaule@kosha.or.kr

차 례

요 약 문	i
 I. 서 론	1
1. 연구 배경 및 목적	1
2. 선행 연구	3
3. 연구 내용 및 범위	4
 II. 분체 대전 및 정전기 착화 위험성	7
1. 분체의 대전 현상	7
2. 정전기의 종류 및 발생 조건	12
3. 정전기 방전과 착화	14
4. 정전용량	17
5. 정전압	19
6. 분체의 착화 위험성	20
 III. 정전기 화재폭발 사고사례 조사 및 분석	23
1. 국내 사고사례 조사	23
2. 국외 사고사례 조사	27
3. 사고 원인 분석 및 발생 경향	29
4. 사고 저감 방안	32

IV. 정전기 착화에너지 평가 및 추정	35
1. 평가 대상 분진	35
1) 시료	35
2) 입도 분석 및 방법	36
3) 평균입경 및 분체특성	37
2. 최소착화에너지의 조사	40
1) 시험 및 방법	40
2) 시험결과 및 분석	44
3) 분진입자의 착화 특성	46
3. 정전용량의 조사	48
1) 조사 방법	48
2) 정전용량 적용 방법	50
4. 정전압의 조사	52
1) 조사 방법	52
2) 분진농도에 의한 영향 분석	54
3) 분산 횟수에 의한 영향 분석	56
5. 분진의 정전기 착화에너지 추정 및 활용방안	57
 V. 결 론	 63
1. 주요 결과	63
2. 제도개선 방안	66
 참고문헌	 69
 Abstract	 71

표 차 례

<표 2-1> 분체의 대전성	11
<표 2-2> 분체의 저항률에 의한 분류	12
<표 2-3> 정전기의 종류 및 발생 사례	13
<표 2-4> 정전기 방전의 발생 조건	14
<표 2-5> 정전용량의 예	18
<표 2-6> 정전기 발생원에 따른 정전압 측정 예	19
<표 2-7> 각종 공정에서의 분체의 대전량	21
<표 3-1> 국내의 정전기에 의한 분진 화재폭발 사고사례	24
<표 3-2> 국외(일본)의 정전기에 의한 분진 화재폭발 사고사례	28
<표 3-3> 정전기의 위험성이 높은 분체 공정	31
<표 4-1> 평가 대상 분진 시료	35
<표 4-2> 입도분석장치(LS 13320)의 사양	37
<표 4-3> 입도분석 시험 결과	40
<표 4-4> MIE 시험장치의 사양	43
<표 4-5> 평가 대상 분진의 MIE 측정 결과	46
<표 4-6> 정전용량에 대한 문헌 자료 예	52
<표 4-7> 정전압 측정 및 분진 분사 조건	53
<표 4-8> 정전압 측정기의 사양	54
<표 4-9> 정전기 화재폭발 예방을 위한 정전압 관리	60

그림 차례

[그림 2-1] 정전기 방전의 원리	7
[그림 2-2] 체적저항률과 접지 효과	10
[그림 2-3] 대전과 정전기 방전	15
[그림 2-4] 정전용량의 정의	17
[그림 3-1] 우레탄 제조공정의 정전기 화재폭발사고	25
[그림 3-2] 텅스텐 합금 분진의 정전기 화재폭발사고	26
[그림 3-3] 테레프탈산 분진의 정전기 화재폭발사고	26
[그림 3-4] 국내외 정전기 화재폭발사고의 발생건수 비교	30
[그림 3-5] 국내 정전기 화재폭발사고의 사상자 수	30
[그림 3-6] 국내 정전기 화재폭발사고의 발생 건수 및 사상자	31
[그림 4-1] 분진 입도분석장치	36
[그림 4-2] PE(HD)의 입도분포 특성	38
[그림 4-3] PE(LD)-1의 입도분포 특성	39
[그림 4-4] PE(LD)-2의 입도분포 특성	39
[그림 4-5] PMMA의 입도분포 특성	40
[그림 4-6] 최소착화에너지(MIE) 시험장치	42
[그림 4-7] MIE의 측정 및 통계적 MIE의 계산 방법	43
[그림 4-8] PE(HD)의 최소착화에너지	44
[그림 4-9] PE(LD)-1의 최소착화에너지	45
[그림 4-10] PE(LD)-2의 최소착화에너지	45
[그림 4-11] PMMA의 최소착화에너지	46

[그림 4-12] 초고속카메라에 의한 분진입자의 착화 특성 조사	47
[그림 4-13] 정전용량의 정의	49
[그림 4-14] 정전용량의 측정 방법	49
[그림 4-15] PE(HD)의 전하량 및 정전압 측정	50
[그림 4-16] PE(HD)의 정전용량 측정값을 사용한 정전압 계산	51
[그림 4-17] 정전압의 측정 모습	53
[그림 4-18] 분체 종류별 농도가 정전압에 미치는 영향	54
[그림 4-19] PE(LD)의 농도변화에 따른 정전압의 측정 결과	55
[그림 4-20] PMMA의 농도변화에 따른 정전압의 측정 결과	55
[그림 4-21] 분산 횟수 및 농도에 따른 PE(HD)의 정전압 측정 결과	56
[그림 4-22] PE(HD)의 정전압 측정을 통한 정전기 착화예방	58
[그림 4-23] PE(LD)-1의 정전압 측정을 통한 정전기 착화예방	58
[그림 4-24] PE(LD)-2의 정전압 측정을 통한 정전기 착화예방	59
[그림 4-25] PMMA의 정전압 측정을 통한 정전기 착화예방	59
[그림 4-26] 정전기 화재폭발 예방대책	61

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

화학공장을 포함하는 대부분의 사업장에서는 가연성의 분진, 가스, 액체 등의 화학물질을 사용하고 있다. 이러한 가연성 물질은 공기 중의 취급 과정에서 가연성혼합기를 형성하기 쉬우며 이러한 조건에서 정전기 방전이 일어나면 착화원으로 작용하여 화재폭발사고가 일어날 위험성이 있다. 정전기는 서로 다른 물질이 접촉하는 순간에 전하 이동이 일어나며 전기 2중 층을 형성하고 양 물질이 떨어지는 순간에 전하분리에 의한 전하 과부족으로 일어난다. 정전기는 사업장에서 화학물질의 취급 과정이나 공정 운전 중에 용이하게 확인할 수 있는 현상이 아니며 정전기 방전에 대한 이해도 쉽지 않기 때문에 이러한 요인으로 인해 사업장에서 정전기에 대한 안전대책이 미비한 원인이 되고 있다. 일반적으로 정전기 발생은 예측이 어려운 자연적 현상으로서 정전기 방전에 의한 사고를 방지하는 것이 쉽지 않아 형식적으로 대책을 강구하는 경향이 있지만, 정전기 발생 구조를 이해하고 과학적인 접근방법을 통하여 체계적인 정전기 안전대책을 수립하는 것은 가능하다. 더욱이 과거의 정전기 관련 화재폭발사고를 조사해 보면 분류 가능한 일정한 형태의 사고 특징을 가지고 있으며, 특정 작업이나 공정에서 반복하여 발생하는 것을 알 수 있다. 화학물질의 화재폭발 예방을 위한 정전기 안전대책의 목적은 착화원으로 작용하지 않도록 하는 것이며, 이를 위해 정전기 대전을 제어하고 착화성 방전으로 발전하지 않도록 하는 것이다. 정전기 착화에 의한 사고가 반복되고 있는 국내 사업장의 현실을 고려하면 정전기 방전에 의한 화재폭발사고 저감을 위한 조사와 안전대책 방안이 시급이 요구되고 있다.

국내외에서 발생한 정전기 착화에 의한 화재폭발사고사례를 보면 분체 투입 및 집진공정에서와 같이 분진을 취급하는 공정에서 화재폭발사고가 가장 많이

일어나고 있다. 분체 투입은 플레시블 컨테이너, 종이 및 플라스틱 재질의 포장지에 들어 있는 원료를 반응 용기 등에 투입하는 작업 중에 일어난 사고사례가 많다. 또한 반응 용기에 용제가 없는 경우의 공정에서도 분진이 착화한 사례도 적지 않으며, 분체 투입 시에 사용 분진의 최소착화에너지가 작을수록 착화 위험성은 증가한다. 집진 장치에서의 정전기 착화에 의한 화재폭발사고는 주로 집진 덕트 및 백필터에서의 분진 제거작업, 분체 회수 과정, 분진청소 작업 등에서 많이 발생하고 있다. 또한 정전기 착화의 화재폭발사고에 있어서 근로자가 작업중에 발생하는 사고가 많이 발생하고 있는데 잠재적인 도체인 작업자의 인체가 정전기 착화의 직접요인이 될 수 있다는 점을 고려할 필요가 있다.

국내 사업장에서도 정전기 착화에 의한 화재폭발사고가 매년 반복되고 있으며 그로 인한 인적 및 물적 피해가 발생하고 있다. 국내에서 발생하고 있는 정전기 화재폭발사고는 매년 약 30건 발생하고 있는 것으로 조사되고 있다 (산업안전보건연구원 연구보고서, 2018). 반면에 매년 반복되어 발생하고 있는 정전기 착화에 의한 화재폭발사고로 많은 인적 및 물적 피해가 발생하고 있지만 이에 관련한 국내 연구는 매우 적은 것이 현실이다. 사업장에서 정전기 예방에 주로 많이 사용되는 접지 및 본딩은 도체의 장치, 설비 등의 정전기 발생의 저감에 효과가 있다. 그러나 이러한 접지 및 본딩에 의한 정전기 대책은 배관 내부의 분진, 가스, 유증기 등의 비전도성 물질에는 효과가 작으므로, 최소착화에너지 이상의 정전기 방전이 발생하지 않도록 제어하고 관리하는 것이 요구된다.

본 연구에서는 분진취급 공정에서 정전기 착화위험성을 효율적으로 관리하기 위해 착화에너지 관리 방법의 제시를 목적으로 하고 있다. 이를 위해 먼저 정전기 착화에 의한 국내외의 화재폭발사고사례를 조사하여 사고원인, 작업형태 등을 분석하여 정전기 착화 예방에 필요한 사항에 대하여 검토하였다. 또한 사업장에서 실제로 활용가능한 예방대책을 위하여 정전용량의 실측값을 통한 착화에너지의 조사의 효율성과 정전압 측정에 의한 착화에너지 추정의 타당성을 검토하여 정전기 재해저감에 적용할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다.

2. 선행 연구

정전기에 의한 방전은 전계강도가 공기 중의 절연파괴 강도 이상으로 증가하는 경우에 발생한다. 정전기의 발생은 설비 및 장치의 고장이나 장애로 작용하기도 하며, 가연성 화학물질이 존재하는 경우에는 착화원이 되어 화재폭발을 초래하는 원인이 된다. 그러므로 정전기의 발생 자체는 물적 또는 인적피해의 결과로 나타나고 있다. 이러한 관점에서 정전기 자체의 현상이나 착화 특성에 대한 연구가 국내외적으로 많이 수행되어 왔으며 대부분의 연구 내용은 주로 발생의 저감이나 방지 측면에서 접근이 이루어져 왔다.

국내의 관련 연구로는 정전기 재해발생 현황과 방전 검지기 개발(산업안전보건연구원 연구보고서, 2018), 정전기 사고분석 및 인체대전 연구(산업안전보건연구원 연구보고서, 2006) 등이 있다. 국외 관련 연구를 살펴 보면, 최근의 산업용 분진은 분진 자체의 연소성 또는 분체 특성에 영향을 받아 착화에너지(Ignition energy)가 1.0 mJ 이하의 경우도 많으며, 현재는 이러한 분진에 대해 시험 가능한 측정장치가 존재하지 않는 문제점을 개선하기 위해서 동기화 스파크 발생 장치(Synchronized-spark)를 사용하여 1.0 mJ 이하의 분진 착화시험에도 적용 가능한 개선 방법을 검토되었다 (Olsen, W., 2015). 분진 사일로 및 배관 내의 공기 이송에 의해 대전된 분진이 접지 도체와의 방전에 의한 화재폭발사례가 많이 발생하고 있는데 이에 대한 원인조사 결과에 따르면 방전검출용 돌기 형태의 센서가 방전 발생의 원인이 되었으며 특히 센서 설치를 위한 배관 등의 홀은 전자계 환경을 교란시킬 가능성이 높음을 제시하고 있다(Ohsawa, A., et al., 2013). 또한 산업현장의 용기류, 배관류 등에 플라스틱과 같은 전기적 부도체의 사용은 저온 환경에서 마찰에 의해 쉽게 대전되어 연면방전을 일으키며 분진에의 착화 위험성이 높음을 확인하였다 (Yamaguma, M., 2004). 증기 또는 분진 혼합기에서의 점화 원인으로서의 정전기 방전을 검토하기 위하여 폭발한계의 개념, 다양한 방

전 유형 및 안전한 방전 전압을 조사하였는데 그 결과 절연체 간의 방전전압은 발화 위험성이 낮았으며 도체 간의 방전에 의한 착화 위험성이 가장 높았음을 제시하였다(Jonassen, N. M., 1995).

이상으로 국내외 관련 연구사례를 살펴 보았으며, 본 연구의 목적인 분진 작업 시에 발생할 수 있는 정전기 방전에 의한 착화에너지의 추정 방법과 관련된 선행 연구는 쉽게 찾아 볼 수 없었다. 또한 본 연구에서 조사 대상으로 하는 가연성 분진의 취급 작업이나 공정설비에서 사용 분진에 대한 최소착화에너지의 자료를 바탕으로 정전기 착화 위험성을 비교적 간단하게 측정하고 관리할 수 있는 방안에 대한 연구도 충분하지 않음을 알 수 있었다. 정전기에 의한 분진 화재폭발 저감대책은 분진농도와 착화원 발생 저감의 2가지 측면을 함께 고려할 필요가 있는데, 농도 제어의 관리가 쉽지 않은 경우에는 정전기 방전의 발생 빈도 저감 노력과 함께 만일에 정전기가 발생하더라도 최소착화에너지 이상으로 정전기 방전이 일어나지 않도록 제어하고 지속적인 관리 방안이 강구되어야 한다.

3. 연구 내용 및 범위

본 연구에서는 정전기 착화에 의한 가연성 분진의 화재폭발사고 저감을 대상으로 하고 있는데, 산업안전보건기준에 관한 규칙 제325조(정전기로 인한 화재 폭발 등 방지)에서는 설비를 사용할 때에 정전기에 의한 화재 또는 폭발 등의 위험이 발생할 우려가 있는 경우에는 해당 설비에 대하여 확실한 방법으로 접지를 하거나, 도전성 재료를 사용하거나 가습 및 점화원이 될 우려가 없는 제전장치를 사용하는 등 정전기의 발생을 억제하거나 제거하기 위하여 필요한 조치를 하도록 규정되어 있다. 그러나 접지 등의 대책은 도전성 설비나 물질에만 유효하며 제전장치의 경우에도 정전기를 저감시킬 수 있는 유효 면적이 매우 작다는 한계점이 있다. 분체를 저장하거나 배관을 통해 이송하는 과정에서 발생하는 정전기를 예방하기 위해 주로 사용하고 있는 접지와 본딩은 배관 내부의 가스, 유증기,

절연성 분진 등의 비전도성 물질에는 효과가 거의 없다는 점을 고려할 필요가 있다. 그러므로 정전기 대전 수준을 판단할 수 있는 정전압 측정을 통하여 정전기 방전에 의한 에너지가 최소착화에너지 이상으로 정전기 방전이 발생하지 않도록 관리, 제어하는 것이 필요하다.

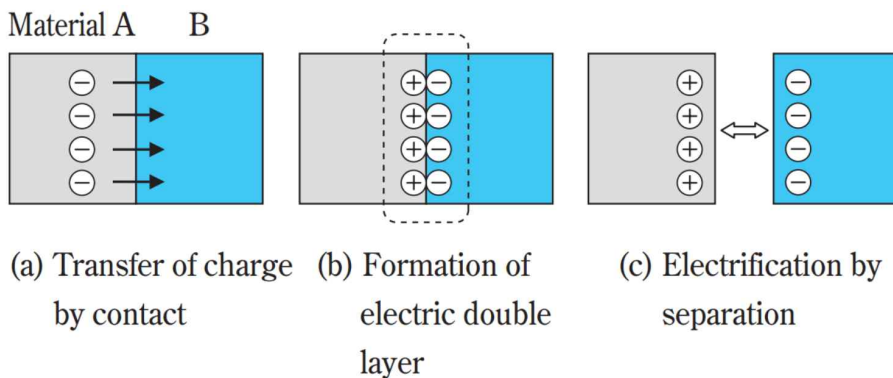
본 연구에서는 분진 취급 공정에서 정전압 측정기를 활용하여 간단하게 정전기 발생 여부를 확인하고 측정된 정전압에 따른 착화에너지를 산정하여 정전기 착화 위험성을 효율적으로 관리하는 방안을 제시하고자 수행하는 것으로서 연구 내용 및 방법은 이하와 같다.

1. 분진의 정전기 착화에 의한 화재폭발사고사례 조사 및 분석
2. 조사대상 분진(PE 등)에 대한 MIE시험장치를 활용한 착화에너지 특성 조사
3. 정전용량의 조사 및 분진농도에 따른 MIE와 정전압을 측정하고 활용법 검토
4. 분진의 농도 조건에 따른 정전압 측정을 통한 착화에너지 추정의 타당성을 조사
5. 분진의 정전기 최소착화에너지 추정방법 및 제도개선안 제시

II. 분체 대전 및 정전기 착화 위험성

1. 분체의 대전 위험성

정전기 방전은 주위에 가연성 분진 등과 같은 연소하기 쉬운 물질이 존재하는 경우에 착화되어 화재폭발의 원인이 된다. [그림 2-1]과 같이 서로 다른 물질이 접촉하면 경계면에서 전하 이동이 일어나는 전기 이중층이 형성되고 두 물질이 떨어지면 전하 분리가 발생하면서 양자에 동등하며 서로 다른 부호의 전하 과부족이 생기면서 대전(정전기)이 일어난다. 이와 같이 발생하는 정전기는 물체의 마찰, 유동성, 분쇄, 분무 등에 의해 발생하고 축적된 전하에 의한 현상이다. 도체와 같이 전하가 이동하기 쉬운 물체의 경우에는 부분적으로 플러스 또는 마이너스의 전하 편향이 발생하더라도 단시간에 그러한 전하 편향이 완화된다. 반면에 전하가 이동하기 어려운 절연체의 경우에는 전하 편향을 유지하기 쉽기 때문에 전기 에너지로 축적되게 되며, 절연성이 높은 플라스틱 수지 등은 마찰에 의한 정전기가 발생하기 쉽다.



[그림 2-1] 정전기 방전의 원리

분진 사일로, 이송배관, 집진장치 등의 공정 내에서 원료 분체나 부산물 분진 입자가 장치의 벽면이나 또는 입자들 간에 접촉, 분리되는 과정에서 접촉 대전이나 마찰 대전에 의해 정전기가 발생한다. 이러한 현상은 분진과 같은 고체 입자만이 아닌 액체나 기체가 배관 내부를 흐르는 경우에서도 내부 벽면 간의 마찰 대전이 발생하기 때문에 일반적으로 유동 대전이라고 한다. 절연성 물질과 이송배관 간의 유동 대전은 출구에서 물질과 함께 배출된 전하와 배관 사이에 전위차를 가지고 있기 때문에 물질이 가연성인 경우에는 착화성 방전 스파크의 발생이 정전기 안전의 관점에서 문제가 될 수 있다. 건식 분진을 취급하는 모든 공정에서도 마찰 대전에 의해 발생한 전하는 해당 분진이 가연성이거나 또는 가연성 가스와 함께 공존하는 시스템인 경우에는 정전기 방전 착화에 의한 화재폭발사고의 원인이 될 수 있으므로 전하의 축적 저감이나 적절한 제전 대책은 정전기 방지 대책에서 매우 중요하다.

분체는 저장 또는 공정 과정에서 뛰어난 절연체라고 할 수 있는 공기와 접촉하고 있는 경우가 많다. 만일 공기가 절연성을 가지고 있지 않다면 기계 점점 스위치와 콘센트 또는 공기 중에 노출되어 금속 전극 사이의 절연이 성립하지 않게 되어 문제가 될 수 있다. 또한 정전기 예방을 위해서 65 % 이상의 높은 습도를 유지하도록 하는 대책이 자주 제시되고 있다. 그러나 높은 습도 조건에서의 전하 누설이 용이해지는 것은 타당하지만 고습도 공기가 직접 도전성을 높이는 것이 아니라는 점에 주의할 필요가 있다. 공기는 높은 습도 조건에서도 양호한 절연체이기 때문에 전하의 이동이나 누설은 직접적으로 접촉하고 있는 고체 표면을 통해서 발생하고 있다 (Matsuyama, T., 2013). 절연체인 분진이나 고체라고 하더라도 그 표면은 높은 습도 조건에서 흡착한 표면 수분 층을 통하여 일정 크기의 전도성을 갖으며, 습도 상승에 따라 흡착 수분 층이 증가하면 표면의 전도성도 증가한다. 따라서 높은 습도 조건에서는 상호 연결된 분진이나 고체의 입자 표면을 통해서 전하가 누설된다. 따라서 분진의 경우에 전하 누설이 되도록 하기 위해서는 분진이 적층하여 서로 연결되어 있어야 한다. 만일 에어로졸처럼 공기 중

에 부유하고 고립된 분진 입자가 전하를 띠고 있는 경우에는 높은 습도 조건을 부여해도 그 상태에서는 전하가 소실되지 않는다. 전하가 이동하기 위해서는 이동할 수 있는 전하 캐리어가 필요하며, 일반적으로 공기 중에는 그러한 이동성 전하가 거의 존재하지 않는다. 전하 캐리어는 우주선(Cosmic rays) 및 환경 방사선에 의한 미량의 전리 분자(이온)나 광전 효과 등에 의해 고체 표면으로부터 발생한 전자 등이 존재하여 공기 중에 전기장이 있으면 전기장을 따라 이동한다. 이러한 공기 중에 자연적으로 존재하는 소량의 전하 캐리어의 이동에 의한 전류량은 무시할 정도로 매우 적다. 현재 정전기 저감을 위해 사용되고 있는 제전장치의 작동 원리는 코로나 방전(직류 · 교류)을 이용하여 공기 중의 분자를 일부 이온화되도록 하고 전하 캐리어의 농도를 증가시켜 이에 따라 공기에 일정한 크기의 도전성을 부여하도록 하고 있다.

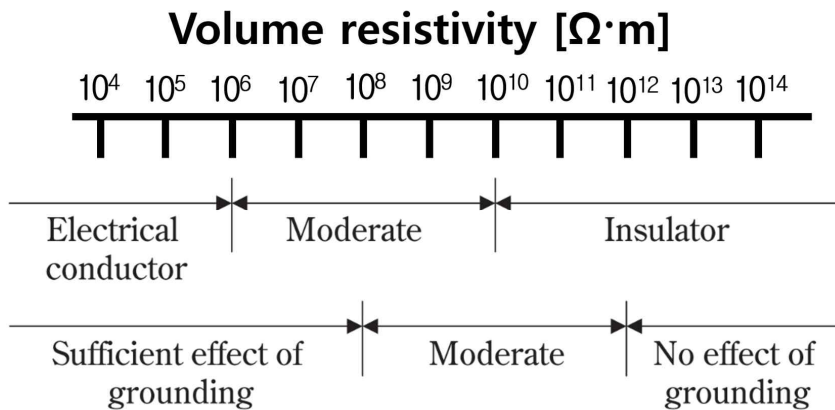
분체의 대전 현상 연구에 있어서 아직 해결하지 못한 사항 중의 하나는 정확한 분진 입자 대전량의 예측이 아직 가능하지 않다는 점이다. 입자 대전량이 해명되면 분체 입자에 작용하는 힘의 계산이 가능해지며 분체 공정 설비에서의 장애 원인인 입자 부착의 발생 여부를 알 수 있게 된다. 입자 군(Particle group) 전체의 대전은 입자군과 외부, 예를 들면 장치의 기벽 사이의 전하 이동에 의해 축적된다. 입자 간의 접촉에 의한 전하 이동은 입자 군 내부의 전하 분포의 확대에만 관계가 있다. 물질의 조합에 의해 정전기 극성이 결정되면 단일 성분의 분체는 장치 내벽에 대하여 플러스 또는 마이너스의 전하를 축적하게 될 것이다. 정전기의 실체는 전하이므로 동일 분체에 있어서 전하가 같은 조건이라면 전위는 정전용량이 달라지면 변하게 된다.

물체에 정전기가 발생하더라도 일반적으로 발생한 정전기가 모두 축적되는 것은 아니며 그 일부는 소멸되는데 이것을 전하 완화 또는 전하 누설이라고 한다. 전하 완화는 분체의 접촉, 분리 시에도 일어나고 있으며, 실제로 전하 분리는 분리된 모든 전하가 남는 것이 아니라 그 일부는 전하 완화에 의해 소멸한다. 또한 분리 시에 분리 전하에 의해 형성되는 전계가 공기의 절연 파괴 전계 이상이 되어

기체 방전이 발생할 때도 분리 전하의 일부가 소멸된다. 전하 완화는 물체의 정전용량(C), 누설저항(R), 유전율(ϵ), 저항률(ρ), 전하 완화시간(τ), 발생 시의 전하(Q_0) 등의 파라메타 조건에서, 전하 발생이 소멸되었을 때에 t 초 후의 물체의 전하(Q)는 다음 식으로 표현된다.

$$Q = Q_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad \tau = CR = \epsilon\rho$$

물체의 대전량은 전하 완화에 의해 시간에 따라 지수함수적으로 감소한다. 대전된 물체도 전하의 발생을 없앨 수 있다면 대전량은 점차 감소하여 소멸되어 간다는 것을 보여주고 있다. 또한 전하 완화는 물체의 정전용량(유전율)과 누설저항(저항율)에 의존하며 정전용량과 누설저항이 클수록 전하 완화의 시간이 길어진다. 접지 및 본딩은 이러한 전하 완화 현상을 이용한 정전기 안전대책에 해당된다. 체적저항률(Volume resistivity, $\Omega\cdot m$)은 물질에 따라 정전기 누설이 얼마나 잘 일어나는지에 대한 기준이 된다. 전기적인 전도성과 체적저항률에 따른 접지 효과의 구분을 [그림 2-2]에 나타냈다. 도체에 대한 접지는 정전기 대책으로서



[그림 2-2] 체적저항률과 접지 효과

효과적이지만 이에 반해서 절연물에 대한 접지 효과는 전혀 없거나 거의 기대할 수 없다. 그러므로 접지가 되어 있지 않은 도체는 정전기적으로 매우 위험한 상태이며 인체(Human body)가 이러한 조건에 해당된다. [그림 2-2]에서 알 수 있듯이 체적저항률이 $10^{12} \Omega \cdot m$ 이상인 경우에는 접지의 효과가 거의 없다.

분체의 저항율이 높을수록 전하 완화는 억제되기 때문에 저항율에 의해 정전기 위험 수준을 평가한다. 절연 물체는 접지하여도 효과가 없으므로 절연물체의 사용은 전하 축적 요인이 되며 대전 위험성이 있다. 분진 등의 고체물질의 대전성은 체적저항률과 표면저항율에 의존하며 <표 2-1>과 같이 대전레벨을 결정한다.

<표 2-1> 분체의 대전성

대전성 구분	체적저항률($\Omega \cdot m$)	표면저항률(Ω)	대전 레벨
비 대전성	$< 10^8$	$< 10^{10}$	-
저 대전성	$10^8 \sim 10^{10}$	$10^{10} \sim 10^{12}$	저
중 대전성	$10^{10} \sim 10^{12}$	$10^{12} \sim 10^{14}$	중
고 대전성	$> 10^{12}$	$> 10^{14}$	고

분체의 전하완화는 벌크 저항율에 의존하기 때문에 저항율이 높을수록 대전 되기가 쉬워진다. 저항율에 따른 분체 구분을 <표 2-2>에 나타냈다. 분체의 대전 위험성은 질량비 전하, 벌크저항율 또는 전하 완화시간으로 평가할 수 있다. 알루미늄, 마그네슘, 지르코늄 등과 같은 금속 분진은 표면이 산화되기 때문에 일반적으로 절연성(약 $10^{12} \Omega \cdot m$)에 해당되며, 카본 블랙은 산화가 되더라도 가스화(CO 또는 CO_2)되기 때문에 전도성에는 영향을 주지 않는다. 절연성 용기 및 배관을 사용하는 경우에는 전하 완화가 없어지기 때문에 대전 위험성이 있다. 벌크 저항율이 $10^6 \Omega \cdot m$ 이하의 분체가 절연되면 불꽃 방전의 위험성이 나타날 수 있다.

<표 2-2> 분체의 저항률에 의한 분류

분류 구분	분체 벌크 저항률($\Omega \cdot m$)
저 저항률	$< 10^8$
중 저항률	$10^8 \sim 10^{12}$
고 저항률	$> 10^{12}$

2. 정전기 방전

정전기는 서로 다른 물질의 접촉 분리에 의해 발생하며 이 때 발생하는 정전기의 크기는 접촉 물질 간의 조합에 의해 서로 달라지는데 이를 대전열(Series of frictional electrification)이라고 한다. 대전열 중에서 두 물질을 접촉, 분리 시켰을 때 대전서열에 따라 하나의 물질은 플러스(+)로 대전하고 다른 하나의 물질은 마이너스(-)로 대전한다. 대전량은 대전열 상하 위치가 서로 멀리 떨어져 있을수록 커진다. 대전열 중에서 마이너스(-)로 대전되는 최대값에 위치하는 물질이 폴리테트라플루오르에틸렌(Polytetrafluoroethylene)으로서 테프론으로 불리는 플라스틱 계열의 고체물질이다. 원료 분체를 많이 취급하는 사업장에서는 분체 저장을 위한 호퍼나 슈트의 배출성을 높이기 위하여 장치 내부의 표면에 테프론 라이닝을 처리하는 경우가 있다. 그러나 이는 대전성을 높이어 정전기 방전 위험이 높아지는 원인이 될 수 있으므로 사용에 따른 분진폭발 위험성에 대한 검토가 요구된다. <표 2-3>은 정전기의 주요 발생 종류 및 사례를 나타낸 것이다. 고체와 액체에서의 정전기의 형태는 표면 대전 및 체적 대전으로 분류된다. 정전기 형태 중에서 마찰 대전은 분체를 공기 이송하거나 슈트로부터 배출 하는 과정에서 발생한다. 유동 대전은 배관 수송 등에서 발생하는데 정전기가 발생하는 배관 내부에서 폭발이 발생할 가능성은 낮으며 주로 가연성 액체의 이송 대상 탱크 등의

<표 2-3> 정전기의 종류 및 발생 사례

정전기의 종류	정전기 발생 사례
마찰 대전	1. 인체와 의복의 마찰에 의한 대전 2. 사람이 바닥을 걸을 때 바닥 면과의 마찰에 의한 대전
유동 대전	1. 배관 내부에서 중심부와 외부의 전하의 차이가 발생하고 중심 부분의 유량이 증가함에 따라 전하 축적에 의해 대전 2. 액체를 용기에서 다른 용기에 이동할 때의 대전
분쇄 대전	1. 분쇄에 의해 전하 극성의 균형이 무너지며 대전 2. 분체가 공기 이송 시에 잘게 분쇄되며 전하 균형이 붕괴되어 대전
분무 대전	액체가 분무기의 관과 반대의 극성으로 대전된 상태에서 공기 중으로 방출

기상부에서의 폭발이 문제가 된다. 절연성이 높은 액체 등의 경우에는 내부에서 플러스와 마이너스로 극성이 나뉘어져 대전되며 한쪽 극성 부분이 유출함으로써 남겨진 극성의 전하가 축적되는 현상이 일어난다. 또한 대전된 액체를 다른 용기에 옮기는 경우에도 전하가 축적되기도 한다. 고체에서는 플러스와 마이너스의 전하를 보유하고 있던 부분이 분열하고 단편적으로 동일 극성의 전하가 편재하는 경우가 있다. 정전기에 의한 화재폭발은 정전기 방전 현상이 가연성물질의 점화원이 되었기 때문에 일어난다는 것으로서 <표 2-4>는 정전기 방전의 착화위험과 발생 조건을 나타낸 것이다 (NFPA 77, 2014). 정전기 방전에는 여러가지 형태가 있지만 스파크 방전은 도체 사이에서 일어나는 방전으로서 방전에 의해 대부분의 정전기 전하가 소멸하기 때문에 방전에너지는 $E=(CV^2)/2$ 의 정전에너지의 식으로 추정 할 수 있으며, 방전에너지는 다른 방전 에너지보다 상대적으로 높은 1000 mJ 정도까지 도달 할 수 있다.

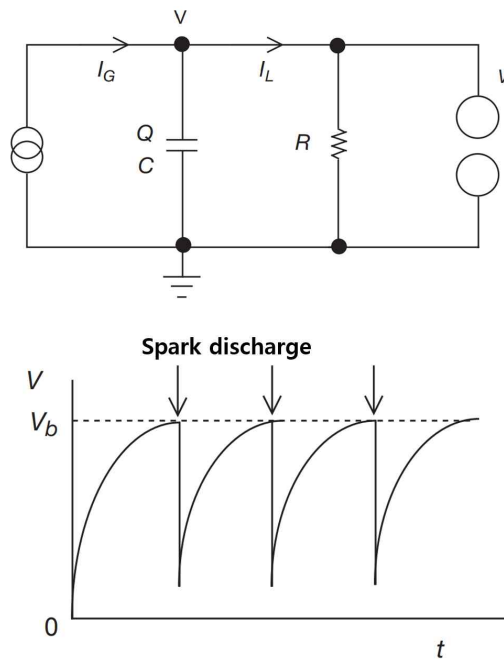
<표 2-4> 정전기 방전의 발생 조건

방전 종류	착화 위험	방전 조건
코로나	최소착화에너지가 작은 수소 등과 같은 물질을 제외하고 대부분의 물질을 착화하기에 충분히 에너지가 작음	수 kV이상
브러쉬	최소착화에너지가 낮은 가스, 증기 및 분진을 점화시키기에 충분한 에너지(수 mJ)를 갖음	1. 수십 kV이상 2. 평균 전기장 1.0×10^5 V/m 이상
콘	최소착화에너지가 낮은 가스, 증기 및 분진을 점화시키기에 충분한 에너지(10 mJ 전후)를 갖음	1~10 mm의 직경을 갖는 분진
표면	가스, 증기 및 분진을 점화시키기에 충분한 에너지(1000 mJ 이하)를 갖음	1. 절연체의 두께 8 mm 미만 2. 표면 전하 $250 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 이상
스파크	가스, 증기 및 분진을 점화시키기에 충분한 에너지(1000 mJ 이하)를 갖음	전기장 3.0×10^6 V/m 이상

3. 정전기 방전과 착화

전하의 발생과 전하 완화의 차이에 의해 전하의 축적이 일어나며 대전한다. 그러나 전하 완화가 없을 때라도 무한대로 대전하는 것은 아니며 대전 전하에 의해 형성되는 전계가 공기의 절연과괴전계(E_b ; 30 kV/cm) 이상이 되면 기체 방전이 일어나고 전하의 일부가 이로 인해 손실되기 때문에 대전이 제한된다. 대전과 정전기 방전에 대한 회로 모델을 [그림 2-3]에 제시하였는데 본 회로모델은 대전

물체가 도체의 경우에 적용된다. 전하분리(전하 발생)가 연속적으로 일어나는 경우에 대전 전위가 방전개시 전계에 도달하는 전위(V_b)가 되었을 때에 단속적으로 방전이 발생하고 대전 전하의 대부분이 소멸한다. 이러한 회로모델은 도체 간의 스파크 방전 모델에 적용 할 수 있다. 대전 물체가 절연물인 경우에는 불꽃 방전이 되지 않고 여러 가지의 방전 형태가 된다. 정전기 방전 대책을 위해서는 다양한 방전의 발생기구 및 착화성을 먼저 이해하는 것이 필요하다.



[그림 2-3] 대전과 정전기 방전

대전 물체가 도체인 경우에는 그 물체에 축적된 정전에너지(E)는 다음과 같다.

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

상기 식에서 C 는 물체의 정전용량, Q 및 V 는 물체의 정전기 전하량 및 정전압(전위)이다. 정전기가 발생하면 정전 에너지의 대부분 또는 일부가 방전에너지로

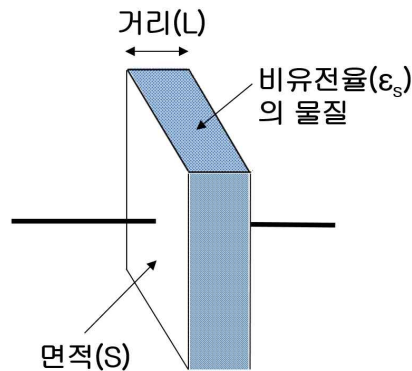
방출된다. 방전 에너지에 의해 가연성 물질이 발화하거나 화재폭발 등의 정전기 사고를 일으키는 원인이 되고 있다. 작업자의 대전, 분체의 대전 등이 정전기 화재폭발사고의 주요 원인으로 알려지고 있으며 정전기 화재폭발사고 방지를 위한 대책으로서 착화성 정전기 방전의 예방이 중요하다.

가연성 물질과 공기(산소 등의 지연성 가스)의 혼합물이 착화되어 연소를 시작하고 화염이 전파함으로써 화재폭발이 일어난다. 구체적으로는 화재폭발의 원인이 되는 3가지 요소 중에서 가연성 물질이 폭발범위 농도이며 산소가 한계산소농도 이상이며 점화원의 에너지가 최소착화에너지 이상의 조건이 갖추어져야 하며 이 중 하나라도 조건을 충족하지 않으면 착화는 방지 할 수 있다. 일반적으로 착화 에너지는 가연성 물질의 농도에 의존하고 농도를 횡축으로 나타낸 최소착화에너지의 곡선은 가연성 물질과 산소가 화학양론조성비가 되는 농도 부근에서 최소가 되는 U 자형 곡선이 된다. 가연성 물질과 공기의 혼합물인 경우에는 산소와의 혼합인 경우와 비교하여 2자리 정도로 최소착화에너지는 증가한다. 또한 최소착화에너지는 온도와 압력에 영향을 받으며 온도의 상승과 함께 거의 지수함수적으로 감소하고 압력의 거의 제곱에 비례하여 감소하는 것으로 알려지고 있다 (Luttgens, G., et al., 1997). 최소착화에너지는 정전기의 위험성을 평가하는 중요한 자료이며, 예측하기 위한 정전기의 방전에너지(E)는 최소착화에너지(MIE)의 자료를 참고로 하여 필요한 안전대책을 강구할 필요가 있다.

가연성 물질의 정전기 방전에 대한 착화성은 최소착화에너지에 의해서 평가된다. 따라서 정전기 방전의 에너지 밀도와 공간적인 확대를 고려하여 방전의 착화성(방전 에너지)을 검토할 필요가 있다. 그러나 불꽃 방전을 제외하고 정전기 방전의 총 에너지를 구하는 것은 쉽지 않으며, 더욱이 총 에너지 중에서 얼마나 많은 에너지가 착화(연소)에 기여하고 있는지를 해명하는 일은 매우 어렵다. 이런 점에서 시공간적으로도 에너지 밀도가 높아 쉽게 방전 에너지를 구할 수 있는 불꽃 방전이 착화에너지의 측정에 이용되고 있다. 착화에너지의 측정에서는 불꽃 방전 에너지(정전기 에너지)의 대부분이 착화에 기여하고 있다고 가정하고 있다.

4. 정전용량

정전용량(C ; capacitance)은 전기에너지의 저장용량으로서 서로 떨어져 배치된 2개의 전도체는 절연된 도체들로서 어느 정도의 전하가 축적되는지를 나타내는 양을 의미한다. 공간에 배치된 두 도체 사이에는 반드시 정전용량이 형성되며 그 정전용량의 값은 두 전도체의 거리와 형상 도체 사이의 공간 특성에 따라 결정된다. [그림 2-4]와 같이 금속성의 판(도체)을 평행하도록 하고 전압을 가하면 정전용량이 형성된다. 정전용량(C)의 값은 금속판의 면적(S)과 금속판 사이의 거리(L), 그리고 금속판 사이의 절연체의 유전율(ϵ_s)에 의해 결정된다.



[그림 2-4] 정전용량의 정의

정전용량의 계산 식은 이하와 같으며, 이 때 진공 유전율(ϵ_0)은 8.85419×10^{-12} 이며 공기의 비유전율은 1.000059이다.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_s \left(\frac{S}{L} \right)$$

만일 S와 L이 같은 경우에는 정전용량(C)은 절연체의 유전율(ϵ_s)의 변화에 비례함을 알 수 있다. 유전율(또는 비유전율)은 기체, 액체, 고체를 불문하고 절연성 물질이 가지는 기본적인 전기적 정수이다. 각 물질은 고유의 유전율을 가지고 있으며, 유전율 값은 외부에서 전기장을 주었을 때에 각 물질에 존재하는 전자가 어떻게 반응하는지에 따라 결정된다. 또한 유전율은 절연성 물질의 정수이지만 전도성이 있는 물질에서도 나타날 수 있다. 예를 들면 반도체는 유전율을 가지고 있으며 전도성인 것으로 보이는 물질에도 유전율이 있을 수 있다. 도체와 절연체의 전기적 작용의 차이는 금속 내를 자유롭게 이동할 수 있는 자유전자의 존재 여부에 따라 구분된다. 절연체는 자유 전자가 존재하지 않기 때문에 전기를 흐르게 할 수 없지만, 이 절연체를 전기장에 놓으면 전자 분극 현상이 발생하고 이 분극의 강약이 비유전율의 차이로 나타난다. 이러한 현상이 결과적으로 정전용량의 변화로 나타난다. 일반적으로 도전성 물질은 유전율이 크고 절연성 물질은 유전율이 작아진다. 고체상 물질이 괴상 형태의 경우와 분체의 경우에는 입자 크기 또는 환경조건에 따라 유전율이 변화 할 수 있다. 대전되어 있는 도체의 전하가 $Q[C]$, 정전압(전위)이 $V[V]$ 일 때, 정전용량 $C[F]$ 는 $C= Q/V$ 로 표현된다. 이 때 도체에 축적된 에너지(E)는 $E = (1/2) \cdot CV^2$ 로 나타내며 가연성 물질의 최소착화 에너지와 비교함으로써 정전기 착화 위험성을 평가할 수 있다. 불꽃 방전에 의한 에너지 추정식(E)에서 정전용량(C)과 정전압(V)은 방전에너지의 값에 영향을 주며, 특히 정전용량에 비하여 정전압의 영향이 보다 큰 것을 알 수 있다. 정전용량의 측정 예를 <표 2-5>에 제시하였다.

<표 2-5> 정전용량의 예

구분	정전용량(pF)
Polyethylene	300
Human body	100 ~ 300
PE bag	100
Large containers, reactors	100 ~ 1000

5. 정전압

정전압(V ; volt)은 전위라고도 하며 시간적으로 변화하지 않는 전기장 내에서 단위 양전하(1 쿨롱의 전하)를 기준점 (보통 무한대 점 또는 대지)에서 그 위치까지 운반하는 데 필요한 일을 그 점의 전위라고 한다. 전위가 동일한 점을 연결하여 생기는 면을 등전위면이라 하며, 전기력선은 등전위면에 직각으로 교차한다. 전기장 내의 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 공간전위측정으로 구분된다. 표면전위의 측정은 대전물체의 전면에 측정전극을 일정거리에 두어 검출전극에 유기되는 전압을 계측하여 측정한다. <표 2-6>은 작업 조건에 따른 정전압의 측정 예를 나타낸 것이다. 인체의 정전기 전압이 2 kV에서는 희미한 방전음이 발생

<표 2-6> 정전기 발생원에 따른 정전압 측정 예

정전기 발생원 구분	정전압(V) (측정조건 : 상대습도 10~20%)
카펫 위를 걷는 사람	35,000
비닐 바닥을 걷는 사람	12,000
작업대에서 작업하는 사람	6,000
비닐포장	7,000
작업대에서 취급하는 폴리백	20,000
폴리우레탄을 채운 의자	18,000

하고 4 kV에서는 방전 발광이 관찰되며, 또한 3 kV에서부터 정전기 방전 시의 전격에 의한 피부의 통증이 느껴지기 시작하는 것으로 알려지고 있다. 대략적으로 1~10 kV의 정전압에서 약 1~10 mJ의 방전에너지가 발생하는데, 정확한 값을 알기 위해서는 측정 물질의 착화에너지, 정전용량의 자료가 필요하다.

6. 분체의 착화 위험성

가연성 고체가 미세하게 분쇄되어 공기 중에 부유하면 가연성분진-공기의 혼합기가 형성될 위험이 있다. 이러한 분체의 착화성평가는 최소착화에너지에 의해 수행되며, 일반적으로 수 mJ 이상의 값을 가지며, 가연성 가스·증기의 최소 착화에너지보다 높다. 그러나 분진의 최소착화에너지는 입경 크기에 따라 달라지므로 반드시 측정을 통해서 확인하여야 한다. 분진의 가연성 분위기에 가연성 가스 또는 증기가 혼합된 하이브리드 혼합기에서는 최소착화에너지가 현저하게 감소한다. 분진의 최소착화에너지가 1000 mJ을 초과하면 가연성 가스나 증기가 함께 공존하지 않는 한 정전기방전에 의해 착화될 위험성은 매우 낮아지므로 이러한 경우에는 착화 방지를 위한 정전기 대책은 불필요하게 된다.

분체는 액체보다 대전 위험성이 높다. 액체의 대전은 액체 내의 하전 입자(이온)에 의한 것으로서, 분체의 접촉 분리에 의한 전하 분리와 대전 메커니즘과는 서로 다르다. 이온은 움직이기 쉽기 때문에 액체의 전하 완화는 분체의 전하 완화보다 증가한다. 분체는 전하 분리(서로 다른 물체와의 접촉·분리)에 의해 대전되며 그 저항율이 증가하면 접지 도체와 접촉하여 전하 완화가 저하되므로 전하가 축적되어 대전이 증가한다. 대전은 접촉·분리가 일어나는 공정, 예를 들면 충전·배출, 혼합, 분쇄, 선별, 투입, 미분화, 공기 이송 등에서 일어난다. 분체의 정전기는 저항율에 의존하는데, 절연성 파이프, 호스, 용기, 포장지, 시트, 코트 등의 사용 시에는 전하 누설이 없기 때문에 대전을 촉진시켜 정전기 위험성을 증가시킨다. 분체의 공기 이송에서는 저밀도 이송의 경우가 입자의 관 내벽과의 충돌

횟수가 증가하기 때문에 고밀도 이송보다 질량비 전하를 높이는 경향이 있다. 입경이 작을수록 마찰하는 접촉면적이 상대적으로 증가하여 질량비 전하가 높아진다. 각종 공정에서의 분체 취급 시의 발생 대전량을 <표 2-7>에 나타냈다. 분체의 미립화, 공기 이송 시의 대전량의 발생이 가장 큰 것을 알 수 있다.

<표 2-7> 각종 공정에서의 분체의 대전량

공정 구분	대전량 ($\mu\text{C/kg}$)
분급	$10^{-5} \sim 10^{-3}$
투입, 충전	$10^{-3} \sim 10^{-1}$
스크롤 이송	$10^{-2} \sim 1$
분쇄	$10^{-1} \sim 1$
미립화	$10^{-1} \sim 10^2$
공기 이송	$1 \sim 10^2$

Ⅲ. 정전기 화재폭발 사고사례 조사 및 분석

1. 국내 사고사례 조사

최근 9년 동안 국내에서 정전기 방전에 기인하여 발생한 화재폭발 사고사례를 <표 3-1>에 나타냈다(KOSHA 중대산업사고사례, 1990~2019). <표 3-1>의 사고사례는 정전기 방전에 의한 분진 화재폭발사고가 모두 포함된 것은 아니며, 전체 정전기 화재폭발 사고 중에서 가연성 분체가 사고원인물질이 된 사고 중의 일부를 제시하고 있다. 따라서 정전기 방전에 기인한 분진 화재폭발사고는 <표 3-1>에 제시된 사례보다 실제로 더 많을 것으로 판단된다. 왜냐하면 현재 소방청 화재통계나 산업재해통계에서 정전기에 의한 사고는 분류 코드 및 통계 자료가 제공되고 있지 않아 국내 정전기 사고 발생 현황을 정확하게 파악하기가 쉽지 않기 때문이다. 본 연구에서는 중대산업사고 조사보고서 등을 통해 조사된 자료를 통해 정전기가 원인으로 판단되는 사고사례를 선별하였다. 사고 발생 시의 작업 유형을 보면 반응기, 교반기, 사일로에 분체 원료를 투입하는 과정에서 발생한 정전기 착화 사례가 많은 것을 알 수 있다. 원료 투입 작업에 있어서는 분진이 포장 및 보관 용기, 그리고 장치 내벽 등과의 접촉, 분리에 의한 대전으로 분체 단독의 착화로 인한 화재폭발사고도 있지만, 용기 내부에 미리 투입된 가연성 액체의 증기와 혼합된 하이브리드 혼합기에서 착화된 것으로 추정되는 사고도 있었다. 2016년 1월에 발생한 록소프로펜산 분진의 화재폭발사고는 하이브리드 혼합기 조건에서 방전, 착화된 사고사례로 조사되고 있다. 사고 원인물질을 보면 금속분진에 의한 사고가 가장 많았으며 플라스틱, 기타 유기물 분진 순으로 나타나고 있다. 국내 정전기 화재폭발사고 경향에 대한 연구에서는(산업안전보건연구원 연구보고서, 2018), 정전기 사고가 매년 약 30건 발생하고 있는 것으로 조사되고 있는데 이러한 사고 경향을 고려하면 반복되어 발생하고 있는 정전기 사고의 저감

대책이 시급이 필요한 것으로 판단된다.

<표 3-1> 국내의 정전기에 의한 분진 화재폭발 사고사례

년도	월	발생장치	원인물질	사상자	사고 개요
2019	2	반응용기	폴리올, 트리메틸올프로판	-	디메틸카보네이트를 반응 시키는 과정에서 반응기 내부의 정전기에 의한 착화에 의한 폭발로 추정
2018	4	용해용 대차 설비	텅스텐 합금 분진	부상 3	텅스텐 합금철 원료인 금속분말을 용해용 대차에 투입공정에서 정전기에 의한 분진폭발 발생
2017	7	사일로	폴리프로필렌	-	폴리프로필렌 저장 사일로 내부의 폴리프로필렌 분진이 정전기 추정에 의해 분진폭발 발생
2016	9	약품 제조 공정	알루미늄-산화동 혼합분진	부상 1	산화동-알루미늄 분말의 혼합공정에서 정전기 추정에 의한 분진폭발이 발생
2016	3	반응기	테레프탈산	사망 2 부상 1	테레프탈산-옥탄올 혼합공정에서 테레프탈산 분진을 반응기에 투입 중에 정전기 추정에 의한 폭발 발생
2016	1	교반기	록소프로펜산	부상 2	혼합 공정에서 록소프로펜산 분말을 교반기에 투입 중에 정전기 추정에 의한 착화원으로 폭발
2014	12	CNC 조각기	마그네슘	부상 1	CNC조각기 작업 후에 분진 청소 중에 정전기(추정)에 의한 화재발생
2013	7	교반기	알루미늄	사망 1	알루미늄 분진과 물을 혼합하여 교반하는 공정에서 알루미늄분진을 교반기에 투입하는 중에 정전기(추정)에 의해 폭발
2011	4	사일로	EPS수지 분진	사망 1 부상 1	사일로 내부청소를 위해 압축공기호스를 사용하여 제거 작업 중에 정전기(추정)에 의해 분진폭발 발생

2019년 1월에 우레탄 제조공정의 디메틸 카보네이트 반응기에서 발생한 정전기 화재폭발사고 모습을 [그림 3-1]에 나타냈다. 반응기에 폴리올과 트리메틸올프로판을 넣은 뒤 디메틸 카보네이트를 반응시키는 과정에서 반응기 내부의 정전기에 의한 착화, 폭발로 추정되고 있다.



[그림 3-1] 우레탄 제조공정의 정전기 화재폭발사고

2018년 4월에는 텅스텐 합금철 원료인 금속분말을 용해용 대차에 투입하던 과정에서 정전기 착화에 의해 분진 폭발사고가 일어나 3명의 부상자 발생하였다 [그림 3-2]. 또한 2016년 3월에는 테레프탈산-옥탄올 혼합공정에서 테레프탈산 분진을 반응기에 투입하는 과정에서 포장용 비닐백 및 반응용기의 내벽과 접촉, 분리에 의한 정전기 방전 추정에 의한 폭발사고가 일어나서 사망 2명, 부상자 1명의 사상자가 발생하였다 [그림 3-3].



[그림 3-2] 텅스텐 합금 분진의 정전기 화재폭발사고



[그림 3-3] 테레프탈산 분진의 정전기 화재폭발사고

2. 국외 사고사례 조사

최근 10년 동안(2007~2017년) 일본에서 발생한 정전기에 의한 분진 화재폭발 사고사례를 <표 3-2>에 제시하였다(일본 JNIOOSH, 화재폭발사고사례). 일본 JNIOOSH(노동안전위생총합연구소)의 화재폭발사고사례 및 사고분석 통계에 의하면 정전기 사고 건수는 매년 80 건 정도가 발생하고 있으며, 정전기 사고를 분석한 결과 사고발생 장소는 용제, 분체 도료, 수지 등의 가연성 물질을 많이 취급하는 화학 공장이 전체의 절반 가량(46 건)을 차지하고, 작업형태별 정전기 사고는 원료 등의 투입작업(17 건)에서 가장 많이 발생하고 있는 것으로 조사되고 있다. 또한 석유류 탱크, 백필터 내장 집진기 등에서도 심각한 정전기 화재폭발사고가 많이 발생하고 있는 것으로 보고하고 있다. 또한 정전기에 의한 일본의 화재폭발의 발생 건수(매년 80건)는 국내(매년 30건)보다 높은 것을 알 수 있다. 이러한 사고 경향은 국내의 정전기 사고에 대한 분류 코드가 미비하고 관련 연구가 부족한 실정이지만 일본의 경우에는 정전기 화재폭발사고에 대한 실험 연구와 과학적인 정전기 화재폭발 사고 조사가 많이 이루어지고 있기 때문으로 판단된다.

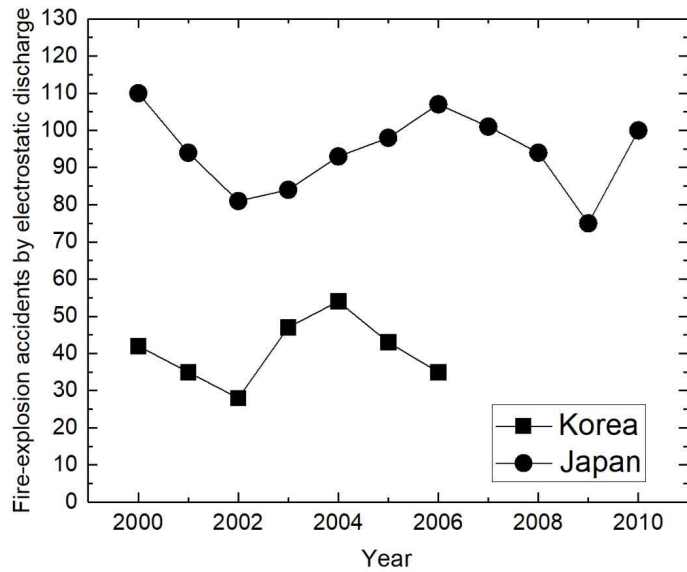
<표 3-2>에서와 같이 일본의 경우에도 국내의 정전기 사고경향(표 3-1)에서와 같이 금속분진의 정전기 화재폭발사고 건수가 가장 많이 발생한 것을 알 수 있다. 예를 들면 폴리에틸렌이나 종이 재질 등의 절연체의 포장 백에 알루미늄 분진을 보관하다가 분체 취급이나 투입하는 과정에서 알루미늄 분진은 플러스로 포장 백의 분진은 마이너스로 대전되는 경우가 있으며 이러한 조건에서 반응장치 등의 주변 금속 간에 대전되어 불꽃방전이 발생할 수 있다. 그러므로 포장용 백은 표면 저항율이 $10^9 \sim 10^{12} \Omega$ 이 되도록 대전방지가공을 처리해야 하며 정전유도에 의한 대전 방지를 위해 주변 도체는 모두 접지를 해야 한다. 정전기 접지에서 중요한 것은 접촉 불량이나 단선을 일으키지 않도록 하는 것이 중요하며, 이동 물체의 접지는 접지선을 설치하거나 분리하는 경우가 많으므로 대전방지용품에 의한 상시 접지 또는 자동접지장치를 사용해야 한다.

<표 3-2> 국외(일본)의 정전기에 의한 분진 화재폭발 사고사례

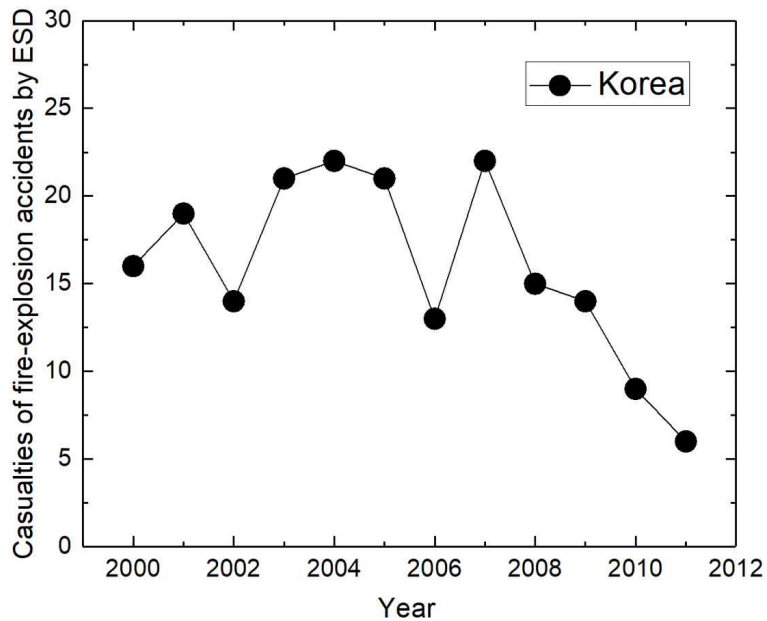
년도	월	발생장치	원인물질	사상자	물적 손실 및 기타
2007	9	집진장치	마그네슘	사망 2, 부상 3	공기 청소기, 집진장치 파괴
2007	11	집진장치	밀가루	-	집진설비 화재
2007	12	집진장치	마그네슘	-	연마기 및 집진 설비 파손
2008	2	집진장치	아연	부상 2	집진설비, 배관 파괴
2008	3	집진장치	알루미늄	부상 11	집진 장치실 화재
2008	3	집진장치	피혁 분진	부상 4	피혁 공장 화재로 인한 집진장치의 폭발
2010	1	집진장치	마그네슘-알루미늄 합금	-	집진장치 파손 및 제품 전소
2010	3	집진장치	알루미늄	사망 1	알루미늄 코일 산화피막 연마 작업 중 퇴적 분진의 화재폭발
2010	3	집진장치	마그네슘-알루미늄 합금	사망 2, 부상 1	집진장치 파손 및 건물피해
2010	6	집진장치	알루미늄	부상 6	퇴적 알루미늄 분진의 착화에 따른 화재폭발
2011	7	집진장치	아연	사망 1	아연 분진이 포집된 집진장치에서 폭발
2012	4	집진장치	목 분진	부상 3	건축자재 생산 공장의 집진장치 폭발
2012	5	집진장치	목 분진	부상 2	합판 제조공장의 집진장치 화재폭발로 공장 전소
2013	12	집진장치	목 분진	-	목재소 공장의 집진장치 폭발
2014	6	집진장치	목재 분진(톱밥)	부상 4	목재 교구 제조공장의 집진장치의 폭발
2015	6	집진장치	플라스틱 부산물	부상 4	화장품용기 제조공장의 집진장치 폭발
2015	7	집진장치	원료 부산물 분진	-	집진장치 화재폭발
2016	4	집진장치	플라스틱 분진	부상 2	플라스틱 물질 제조 공장의 집진장치 폭발
2016	4	집진장치	비료 원료 분진	부상 2	비료원료 제조공장의 집진장치 폭발
2016	5	집진장치	피혁 분진	-	가죽제조공정의 집진 장치 화재
2016	10	집진장치	테이프 원료 부산물	사망 2	의료용 테이프 생산 공정의 집진시설 화재폭발
2016	10	집진장치	테레프탈산	사망 1, 부상 4	저장탱크 내부의 집진장치의 용접기에 의한 철거작업 중에 폭발
2017	5	집진장치	중밀도 섬유보드 분진	-	집진장치 및 생산설비 소손

3. 사고 원인 분석 및 발생 경향

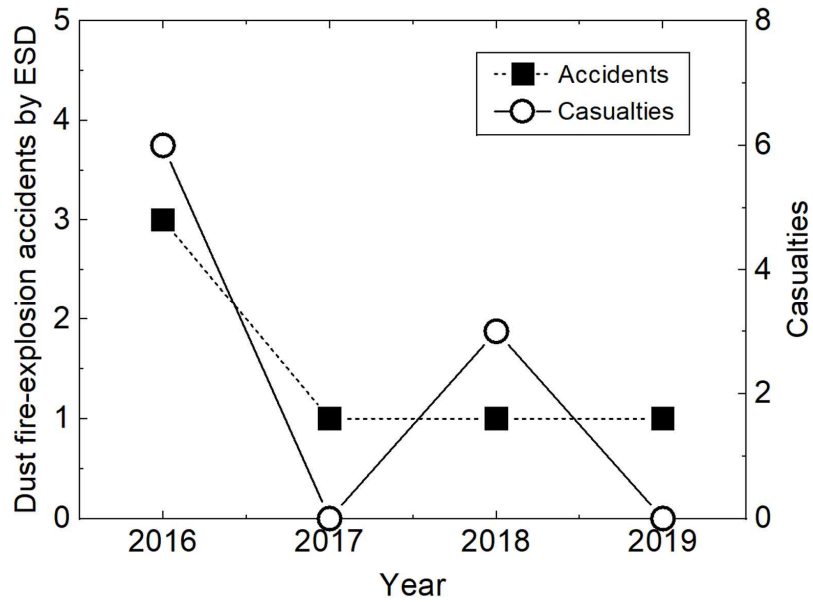
국내 및 국외(일본)에서의 정전기 화재폭발사고의 발생건수를 비교하였으며 그 결과를 [그림 3-4]에 나타냈다. 매년 정전기에 의해 발생하는 사고 건수는 다소의 증가 또는 감소가 되고 있지만 해마다 반복적으로 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 평균적으로 매년 발생하는 건수는 국내의 경우에는 약 30건, 일본의 경우는 약 80건으로 일본이 국내의 경우보다 약 2.7배가 높았다. 이러한 조사 결과로부터 일본의 정전기 사고발생율이 높다고 판단하기는 쉽지 않다. 그러나 정전기 화재폭발사고에 대한 연구나 실증적 사고조사 또는 사업장의 정전기에 대한 안전대책 등에 있어서 일본이 국내보다 많이 이루어지고 있으며 일본의 정전기 안전기준과 제도를 동일하게 국내에 적용하는 경우에는 국내의 정전기 사고 발생율이 조사된 결과보다 높을 것으로 조사되고 있다(산업안전보건연구원 연구보고서, 2018). 국내 정전기 화재폭발사고의 사상자 수의 추이를 [그림 3-5]에 나타냈다. 2011년까지는 감소경향에 있지만 그 이후에는 정전기 사고의 분류코드가 지정되지 않아 국내 정전기 사고 통계자료가 집계되고 있지 않기 때문에 최근의 사고 경향을 정확히 알 수는 없다. 최근에 일어난 국내 정전기 화재폭발사고의 발생 건수 및 사상자를 [그림 3-6]에 제시하였다. 발생 건수가 적게 조사된 것은 조사대상이 분진 화재폭발 사고사례만을 중대재해사고사례에서만 검토하였기 때문이며, 과거의 정전기 사고 경향을 고려하면 매년 일정 건수가 발생하고 있을 것으로 추정된다. 정전기에 의한 사고 위험성이 높은 주요 분체 공정을 <표 3-3>에 나타냈다. 일부 도체 금속 등을 제외하고 대부분의 분진은 부도체인 경우가 많으며 이러한 부도체 분진의 정전기 착화 예방을 위해서는 대전량의 관리가 필요하며 정전압 측정을 통해 최소착화에너지(MIE)의 계산이 가능하다. 또한 사업장에서 취급하는 가연성 분진의 MIE를 파악하고 정전압을 관리하여 방전 에너지의 크기를 평가할 필요가 있다.



[그림 3-4] 국내외 정전기 화재폭발사고의 발생건수 비교



[그림 3-5] 국내 정전기 화재폭발사고의 사상자 수



[그림 3-6] 국내 정전기 화재폭발사고의 발생 건수 및 사상자

<표 3-3> 정전기의 위험성이 높은 분체 공정

구분	작업 종류	공정 예
분진	분쇄 및 파쇄	분쇄기, 이송 중의 분진 입자의 파쇄
	투입	반응기에 포장백의 원료 분진을 투입
	이송 및 저장	공기 이송, 스크류 컨베이어, 버킷 엘리베이터 등에 의한 사일로, 포대 등의 충전
	건조	유동층 건조기
	박리 및 제거	집진장치 백필터의 분진 제거
	분체 분무	분체 도장, 약품의 산포
	분급	체(Sieve) 작업, 이물질 제거

<표 3-1>의 국내 정전기 화재폭발 사고사례를 보면 근로자 작업 중에 발생한 사고는 총 9건 중의 6건으로서 67%에 해당되며 공정 운전 중의 사고는 3건으로서 33 %임을 알 수 있다. 정전기 화재폭발 사고는 근로자 작업 중에 많이 발생하고 있으며 이 때의 정전기 착화 위험성은 인체 정전용량(100~300 pF)에 큰 영향은 받는다. 그러므로 근로자 작업 중의 정전기 착화 위험성평가는 인체 정전용량(100~300 pF)중에서 가장 위험한 조건(300 pF)의 사용이 필요하다.

4. 사고 저감 방안

가연성 분체를 취급하는 장치 및 기기류 중에서 백 필터를 내장하는 집진장치, 분체 회수장치 등은 정전기 방전에 의한 화재폭발을 일으키는 대표적인 예이다. 백 필터는 분체가 부착하여 퇴적하기 때문에 정기적으로 분체를 제거할 필요가 있다. 진동이나 압축 공기를 사용하여 제거하는 과정에서 한번에 다량의 대전 분체가 박리되기 때문에 백 필터가 절연체인 경우에는 대전 분체의 박리에 동반하여 강한 브러시 방전이 발생한다. 브러시 방전은 4 mJ 정도에서 착화하기 쉬운 분체가 화재폭발로 이어질 가능성이 있다. 또한 대전 방지용 백 필터를 사용하여도 이것이 코로나 방전 타입이 아닌 필터 전면의 전도성을 높인 구조와 재료인 경우에서도 동일한 현상이 일어날 수 있다.

그러므로 공정에서 대전 방지용 백 필터를 선정할 때에는 박리 대전방지 효과의 유무를 검토할 필요가 있다. 백 필터가 절연체이며 또한 고정용 금속기구가 접지, 본딩되어 있지 않은 경우에는 백 필터에 부착된 대전 분체 등에 의한 고정용 금속기구의 전위가 상승하여 불꽃 방전이 발생할 수도 있다. 고정용 금속기구는 반드시 접지, 본딩하고 도전성을 확보할 필요가 있으며 분체를 취급하는 경우에는 다음의 대전 방지 대책을 실시해야 한다.

- (1) 분체의 MIE값을 정확히 파악하고 적절한 정전기 대책을 실시해야 한다.

- (2) 모든 금속기기, 장치, 기구의 접지와 본딩을 정확하게 설치한다.
- (3) 취급 분체의 이송 속도를 제한하여 정전기의 발생을 최대한 억제한다.
- (4) 정전기 방전에 의한 착화 위험성이 높은 경우에는 분체의 폭발 혼합기의 저감을 목적으로 질소 가스를 충전하고 산소량을 감소시킨다.
- (5) 분체의 취급에 사용하는 대차는 금속재질로 하고 도전성 타이어를 사용한다.
- (6) 분체 수지와 반응용 원료를 용매 등이 들어있는 용해 탱크나 반응기에 투입할 때에는 가급적 소량씩 넣어 천천히 실시한다.
- (7) 정전기에 의해 발생한 방전에너지가 MIE값 보다 큰 지를 정전압 측정 등을 통해 확인할 수 있어야 한다.
- (8) 공정, 설비 등에서의 정전기 발생 유무를 용이하게 확인하고, 발생량의 정량적 조사를 실시한다.
- (9) 정전압 조사를 통한 정전기 방전 에너지의 발생 제어 및 안전관리 방안 확립이 필요하다.

IV. 정전기 착화에너지의 평가 및 추정

1. 평가 대상 분진

1) 시료

선정된 평가대상 물질은 <표 4-1>과 같이 PE(HD), 2종의 서로 다른 입경을 갖는 PE(LD) 및 PMMA 등의 4종 시료를 사용하였다. 시료 선정의 사유로는 <표 3-1>의 사고 원인물질과 동일한 분체특성을 가지고 있는 시료의 입수가 곤란하였기 때문에, 본 연구에서는 산업용으로 많이 사용하고 있으며 착화 위험성

<표 4-1> 평가 대상 분진 시료

시료명	주요 물성	산업 활용도
PE (Polyethylene) • PE(HD) (HD; High density) • PE(LD) (LD ; Low density)	- 충격에 강하고, 내한성이우수하다. - 내수성과 내약품성이 뛰어나고 수증기와 공기를 통과시키지 않는다. - 용점이 125℃이며 연소하면 양초 냄새가 난다.	- 포장지, 필름, 봉투 등의 주재료 - 각종 플라스틱용기
PMMA (Polymethylmetacrylate)	- 플라스틱 중 빛 투과성이 가장높고 자외선 투과율이 92 %로 유리보다 높음 - 내후성 및 다양한 착색이 가능하고 성형성이 뛰어나 - 인체에 무해하고 수분 흡수율이 낮고 치수 안정성이 매우 우수함 - 강알칼리 및 강산 등의 내약품성이 뛰어나	- 안경 및 카메라 등의 렌즈, 콘택트 렌즈 - 자동차 라이트커버 인스트루먼트 패널, 각종 조명 재료 - 가로등 하우징 및 전등의 장식품, 자동 판매기 하우징

이 높고 분진폭발 사고사례가 많아서 향후 동종재해 발생 가능성이 높은 PE(HD), PE(LD) 및 PMMA를 평가대상 시료로서 선정하였다.

2) 입도 분석 및 방법

분진화염전파 및 폭발특성에 있어 입경과 입도 분포는 큰 영향을 주기 때문에 그러한 영향 인자를 파악해 둘 필요가 있다. 해당 분진의 입도특성에 따른 분진 폭발 특성자료를 파악하여 그 위험성을 검토하기 위해서 측정이 필요하다. 본 연구에서 사용한 입도분석기(Beckman Coulter LS13320)를 [그림 4-1]에 나타냈다. 입도 분석기는 일정한 부피의 에멀전(Emulsion)이나 분말(Powder) 상태의 시료에 대하여 입도분포를 측정하는 분석 장비이다. 상업적으로 생산되어 사용되고 있는 입도 분석기는 분석 원리에 따라 현미경법, 침강법, 광산란법(Laser scattering) 등 크게 세 분류로 나눌 수 있다. 또한 시료의 분산 상태에 따라 습식과 건식으로 나눌 수 있는데 습식은 물, 알코올과 같은 액상의 매질에 측정하고자 하는 물질을 분산시켜 분석하는 방법이며 건식은 압축공기 혹은 진공으로 분진형태의 시료를 부유시켜 분석하는 방법이다. 본 시험에 사용된 입도분석기(LS 13 320)의 사양은 <표 4-2>와 같으며 광산란법에 적합하도록 설계되어 습식 방식으로 시료를 투입하도록 되어 있다. 또한 본 장치의 측정가능 적용 범위는 0.04 ~ 1000 μm 이다. 광산란법은 시료 입자들에 의해 산란된 빛의 패턴을 조사하여



[그림 4-1] 분진 입도분석장치

입자 크기와 분포를 측정하는 방식이다.

<표 4-2> 입도분석장치(LS 13320)의 사양

Items	Specifications
Humidity	0% to 90%, non-condensing
Particle Size Analysis Range	0.4 μm to 2000 μm
Temperature Range	10 $^{\circ}\text{C}$ to 40 $^{\circ}\text{C}$

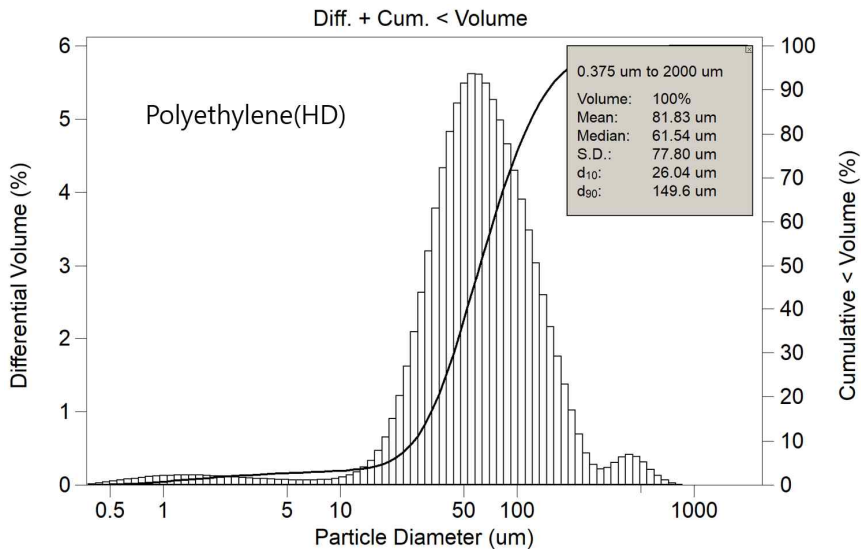
시료를 투입하여 적정한 농도의 시료가 순환하는 셀에 레이저가 투사되면 이 레이저는 입자에 의해 표면에서 산란되게 되고, 고유의 각도 값을 가지고 있는 수십개의 검출기가 산란되는 레이저의 빛의 각도를 측정하게 되며 이를 통해 입자의 크기와 분포를 측정하게 된다. 구체적인 시험방법은 입도분석 전용 프로그램의 실행 순서를 선택하여 실행시키면 세척, 버블 제거, 블랭크 측정 등의 과정을 거친 후에 시료를 투입하면 입도 측정이 시작된다. 이 때 투입되는 시료는 광학적으로 분석한 시료의 농도(obscuration)가 8~12 % 이내에 있어야 한다. 또한 입도시험은 총 3회 측정하여 재현성이 있으며 최대허용 편차에 들어오는 결과값에 대하여 통계적 처리 절차를 거쳐 최종 입도측정값으로 결정한다.

3) 평균 입경 및 분체 특성

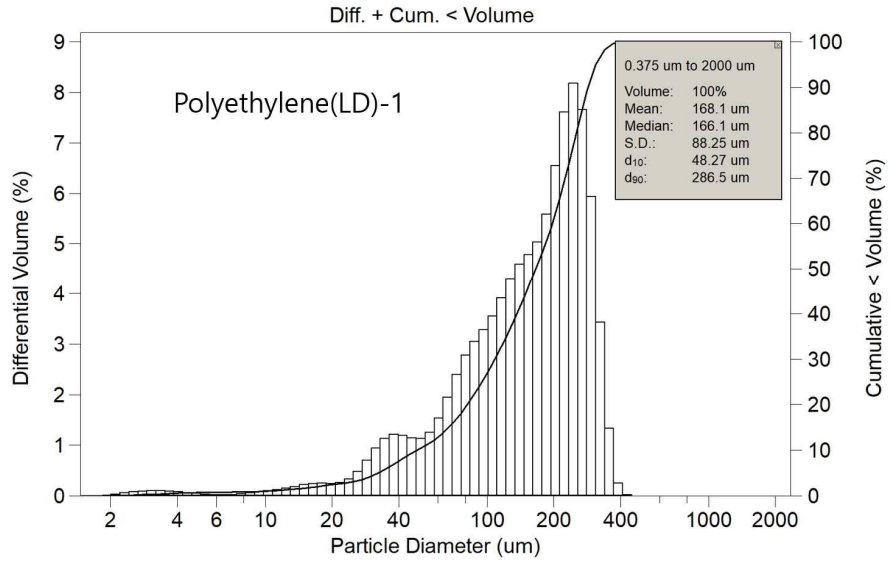
조사대상 분진 시료의 최소착화에너지 특성에 영향을 주는 입도분포 및 입경을 분석하기 위해 분진의 입도특성을 조사하였다. 분진은 다양한 입경이 혼합되어 있기 때문에 어느 정도 범위의 입도 범위와 입경을 대표하는 평균 입경이 어느 정도인지를 사전에 조사하는 것이 중요하다. 특히 평균입경과 분진 농도는 분

진폭발 특성을 지배하는 주요 영향 인자들이기 때문이다.

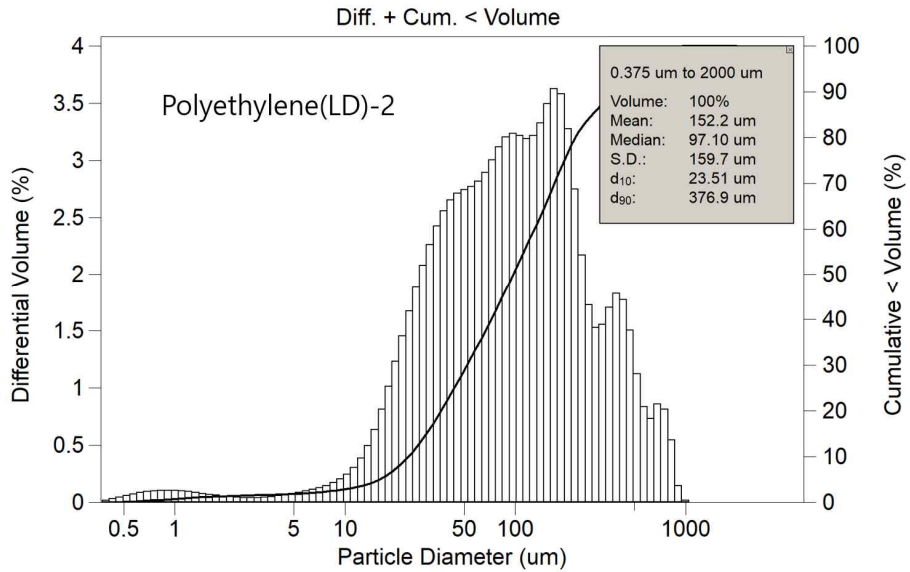
PE(HD), PE(LD)-1, PE(LD)-2, PMMA의 각 분진의 상세한 입도 분석 결과를 [그림 4-2]~[그림 4-5]에 나타냈다. 입도 범위는 PE(HD), PE(LD)-2 분진이 비교적 넓은 분포를 나타내는 반면에 PE(LD)-1, PMMA분진은 상대적으로 좁은 입도 분포를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 입도 분포가 작은 PMMA입자 표면을 조사하기 위하여 전자 빔이 시료 표본의 표면을 체계적으로 이동하며 조사하는 방식인 주사 전자현미경(SEM ; Scanning Electron Microscope)을 사용하였다. SEM에 의해 관찰된 PMMA 분진 입자 예를 [그림 4-5]에 나타냈는데, SEM관찰 시에 선명한 상을 얻기 위한 증착이나 방전제 등의 특별한 전처리를 하지 않은 상태의 모습이다. PMMA 입자는 거의 구형에 가까운 형태를 가지고 있으며 평균입정보다 작은 미세 분진도 포함되어 있지만 일정한 입경을 가지고 있는 것이 많다. <표 4-3>의 입도분석 시험결과에서 알 수 있듯이 평균입경은 PE(LD)-1, PE(LD)-2, PE(HD), PMMA의 순으로 컸으며, 각각 166.1, 97.10, 61.54, 15.66 μm 의 측정 결과가 얻어졌다.



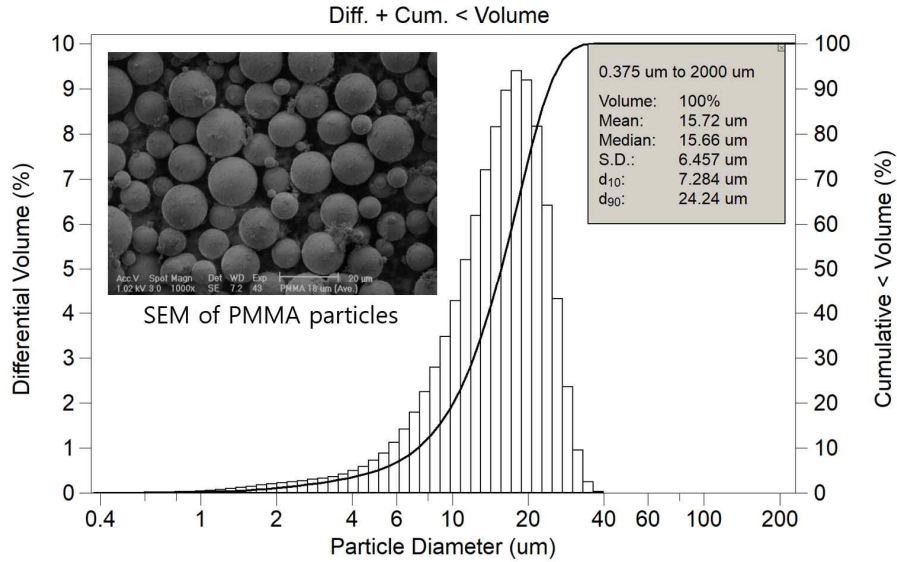
[그림 4-2] PE(HD)의 입도분포 특성



[그림 4-3] PE(LD)-1의 입도분포 특성



[그림 4-4] PE(LD)-2의 입도분포 특성



[그림 4-5] PMMA의 입도분포 특성

<표 4-3> 입도분석 시험 결과

Samples	d ₁₀ (μm)	d ₉₀ (μm)	S.D. (μm)	Mean (μm)	Median (μm)
PE(HD)	26.04	149.6	77.80	81.83	61.54
PE(LD)-1	48.27	286.5	88.25	168.1	166.1
PE(LD)-2	23.51	376.9	159.7	152.2	97.10
PMMA	7.284	24.24	6.457	15.72	15.66

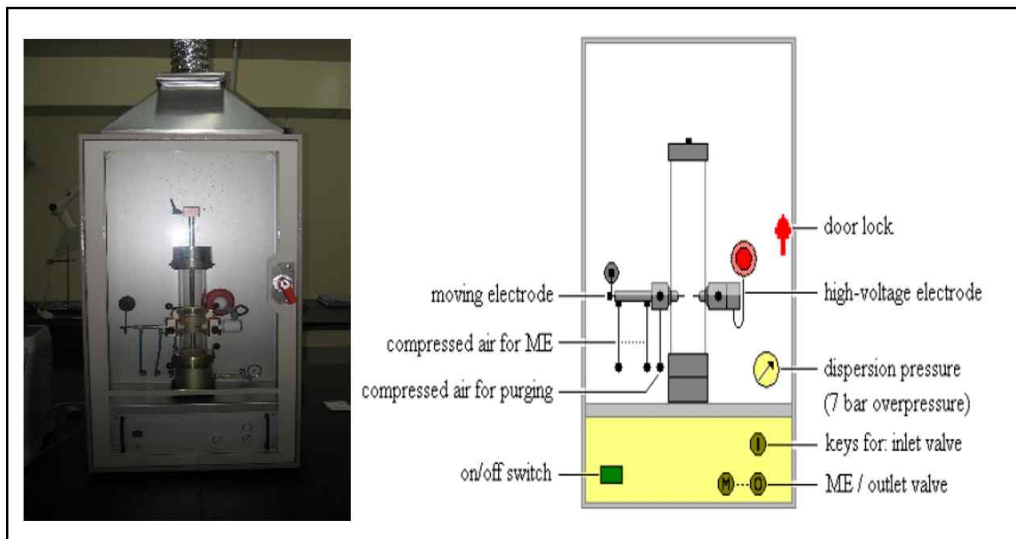
2. 최소착화에너지의 조사

1) 시험 및 방법

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, 스위스의 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($\text{No ignition} < \text{MIE} < \text{Ignition}$). 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.

본 시험장비는 [그림 4-6]과 같이 부유분진(분진-공기 혼합물)의 점화에 필요한 최소의 에너지를 측정하는 장비이다. 폭발용기는 1.2 L 용기의 강화유리 재질인 하트만(Hartmann)식 폭발용기를 사용하고 있다. 폭발용기에서의 분진 분사 시스템은 시료가 공기중에 부유, 분산 되도록 고안된 버섯모양의 형태를 이루고 있다. 7 bar의 압축공기를 사용하여 분산된 분진을 폭발용기의 두 전극사이의 스파크를 사용하여 착화시키고 유리관 실린더 내부에서의 화염전파 모습을 통하여 폭발여부를 판정할 수가 있다. 최소착화에너지(MIE) 시험장치의 사양을 <표 4-4>에 제시하였다. 분진-공기 혼합물은 분진 조건에 따라서는 10 mJ보다 낮은 값에서도 MIE값을 갖는데, MIKE 3의 측정범위는 더 낮은 에너지 값에서도 측정이 가능하도록 되어 있다. 본 MIKE 3의 시험장치에서는 하트만(Hartmann)식 폭발용기와 커패시터 방전기구를 직접적으로 연결할 수 있게 되어 있으며, 고압 유니트

와 폭발용기는 같은 장치 내에 구성되어 있는 장치 일체형으로 구성되어 있다. 구체적인 시험방법은 일정 농도의 분진을 폭발용기의 하부에 넣고 압축 공기로 분사시켜 해당 분진을 점화시킬수 있을 정도의 에너지를 가하여 점화를 확인한 후 해당 농도에서 10회 이상 점화가 이루어지지 않을 때까지 에너지를 감소시켜 가면서 실험을 반복한다. 이와 같은 실험을 점화가 일어나지 않는 최소농도와 최대농도가 관측될 때 까지 반복하여 해당물질의 최소착화에너지 범위를 측정한다. 또한 최소착화에너지는 난류의 강도에 영향을 받으므로 다양한 점화지연시간으로 위와 같은 실험을 실시하여야 정확한 최소착화에너지 범위를 측정할 수 있다. 최소 착화에너지 측정시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 “EN 13821 : 2002”이며, 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. [그림 4-7]에서 주어진 식에서와 같이 MIE는 통계적 MIE(Es)를 계산하여 보다 보수적인 안전대책을 위해서 적용할 수도 있다.



[그림 4-6] 최소착화에너지(MIE) 시험장치

<표 4-4> MIE 시험장치의 사양

Items	Specifications
Maker	MIKE-3 (Kühner, Swiss)
Volume of glass tube	1.2 liter
Dust dispersion system	Mushroom-shaped
Electrodes	- Diameter : 2 mm - Material : Tungsten or stainless steel - Distance : 6 mm
Condition of inductance(L)	- With L in discharge circuit : L = 1 ~ 2 mH - Without L in discharge circuit : L ≤ 0.025 mH
Ignition energy(E) range for test	1 ~ 1000 mJ
A blast of compressed air	7 bar

$$E = \int_0^{\tau} I(t) \cdot V(t) dt = \frac{C \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2}$$

$$E_1 < MIE < E_2$$

$$E_s = 10^{\log E_2 - \left\{ \frac{I[E_2] \cdot (\log E_2 - \log E_1)}{(NI+I) \cdot [E_2] + 1} \right\}}$$

E : Minimum ignition energy (MIE)

E1 : Maximum ignition energy with no ignition

E2 : Minimum ignition energy with ignition

Es : Statistical MIE

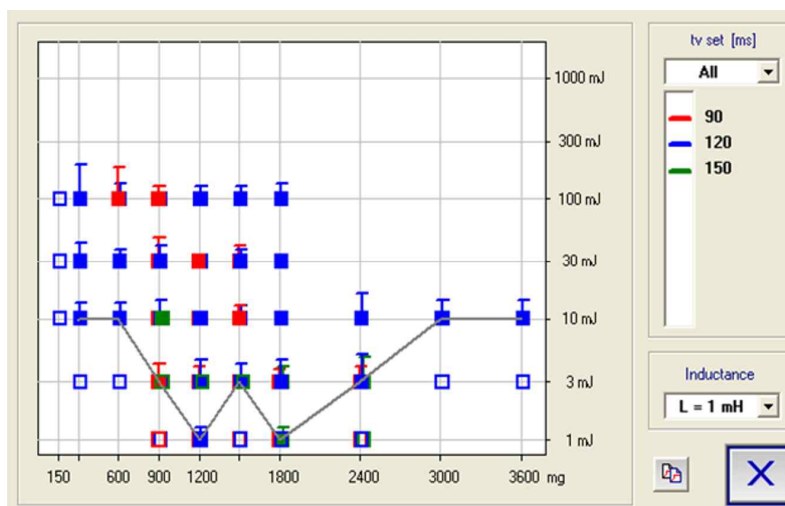
I[E2] : Number of ignition in E2 energy

(NI+I)·[E2] : Total number of MIE testing in E2 energy

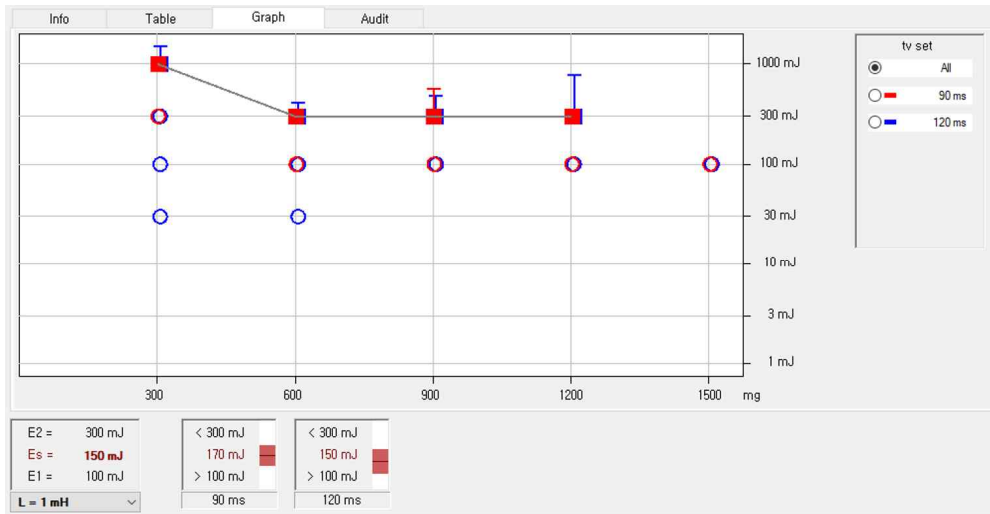
[그림 4-7] MIE의 측정 및 통계적 MIE의 계산 방법

2) 시험결과 및 분석

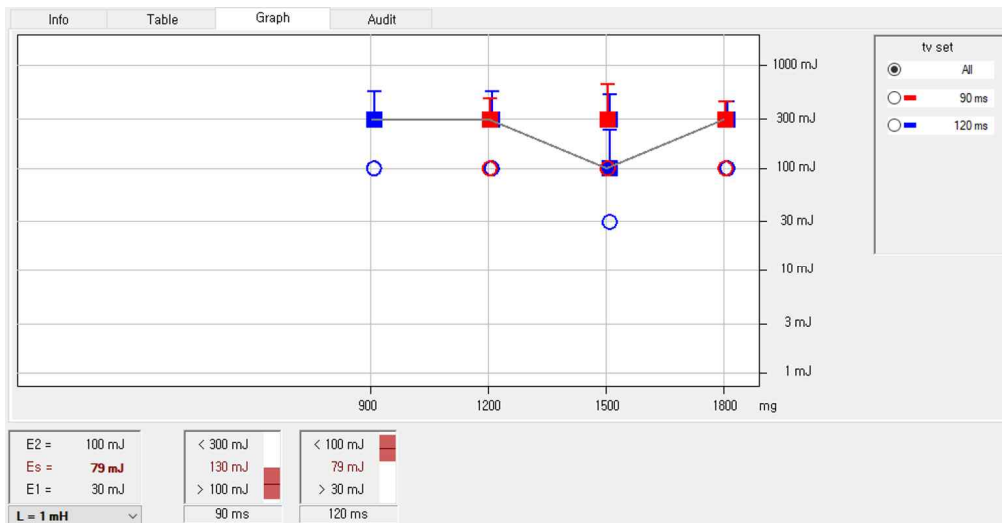
분진운의 일부분에 일정 크기의 에너지를 가하면 분진운이 착화하여 폭발을 일으키게 되는데 이 때 필요한 가장 작은 크기의 에너지를 최소 착화에너지(MIE)라고 한다. [그림 4-8]은 PE(HD)의 최소착화에너지로서 분진 분산 후의 90, 120, 150 ms의 지연시간(t_v)을 설정하였을 때의 최소착화에너지의 시험 결과로서 MIE는 $< 1 \text{ mJ}$ 로 얻어졌다. 또한 PE(LD)-1, PE(LD)-2, PMMA의 MIE결과를 [그림 4-9]~[그림 4-11]에 나타냈다. 평가 대상 4종의 분진의 MIE 측정 결과를 <표 4-5>에 제시하였다. PE(LD)-1, PE(LD)-2, PMMA의 MIE는 각각 $100 < \text{MIE} < 300 \text{ mJ}$, $30 < \text{MIE} < 100 \text{ mJ}$, $3 < \text{MIE} < 10 \text{ mJ}$ 이 얻어졌다. 입자경이 클수록 또한 상대적으로 입도분포가 넓을수록 착화가 되기 위해서는 보다 큰 에너지가 필요하므로 MIE값이 증가한다. MIE는 분진폭발 특성값을 나타내는 주요 인자로서 재해예방대책을 강구하기 위해 활용되고 있으며, 특히 정전기 방전 등과 같은 매우 작은 착화원이 사고위험 요인으로서 검토해야 하는 경우에 중요한 자료가 된다.



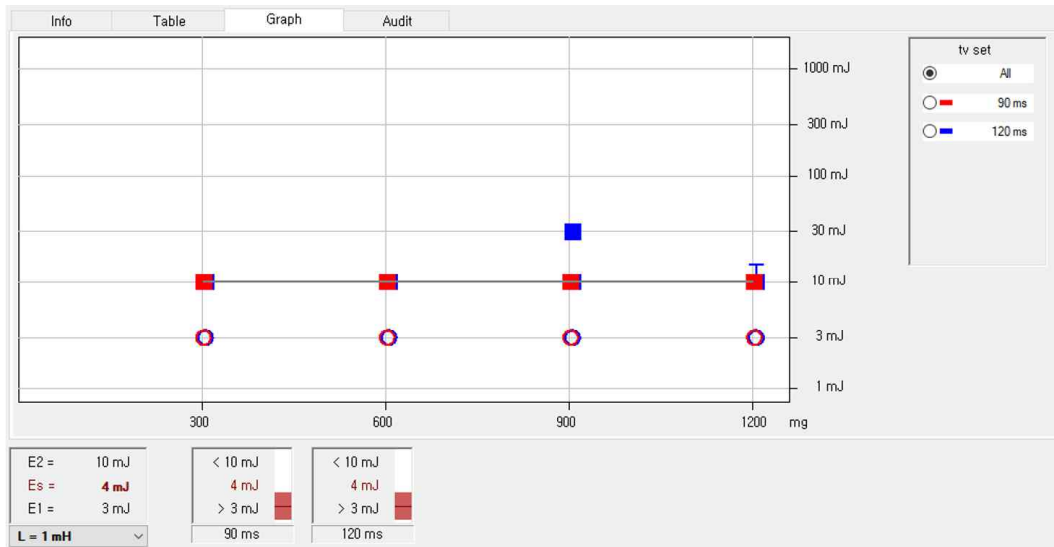
[그림 4-8] PE(HD)의 최소착화에너지



[그림 4-9] PE(LD)-1의 최소착화에너지



[그림 4-10] PE(LD)-2의 최소착화에너지



[그림 4-11] PMMA의 최소착화에너지

<표 4-5> 평가 대상 분진의 MIE 측정 결과

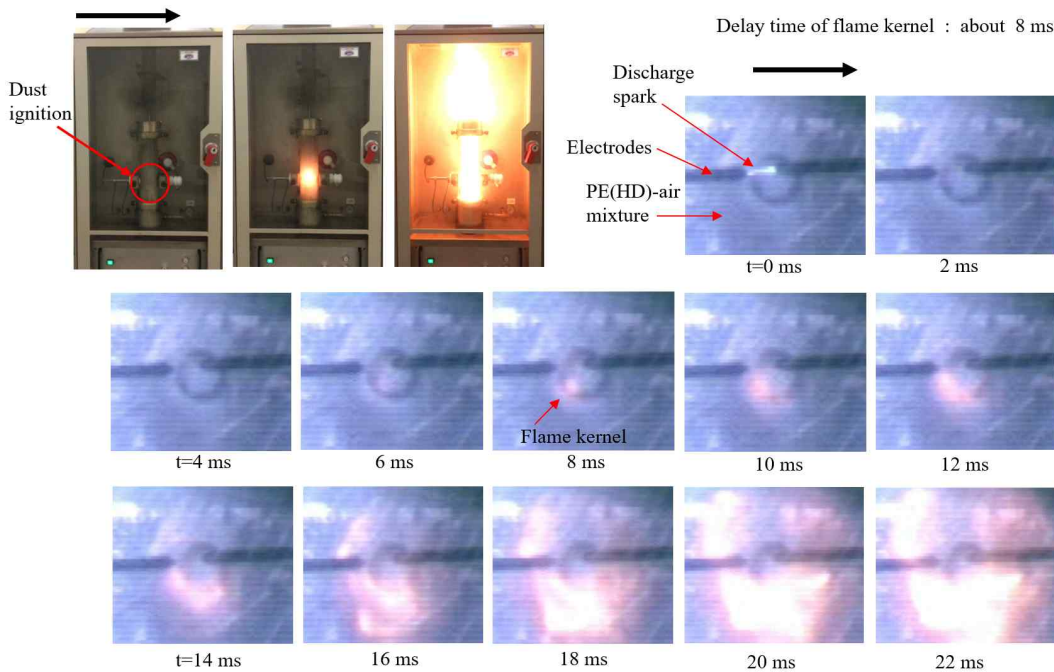
Samples	Median (μm)	MIE (mJ)	Es of MIE (mJ)
PE(HD)	61.54	< 1	0.5
PE(LD)-1	166.1	100 < MIE < 300	150
PE(LD)-2	97.10	30 < MIE < 100	79
PMMA	15.66	3 < MIE < 10	4

3) 분진입자의 착화 특성

초고속카메라(Optronis CR3000x2, Germany)에 의한 분진입자의 착화 특성을 조사하였는데 스파크 방전 시에 시간에 따른 착화 거동을 [그림 4-12]에 제시하

였다. PE(HD)분진의 착화 방전 후의 분진화염은 지연시간(Delay time) 후에 발생하는데 착화방전 후 화염핵 생성시간이 약 8 ms로 조사되었다. 분진폭발은 폭발성혼합기 형성을 위해 열분해 시간이 필요하며 지연시간은 열분해가스의 생성 및 확산 소요시간에 해당된다.

[그림 4-12]에서 화염핵(Flame kernel)의 형성 위치를 살펴보면 착화원(불꽃 방전)의 중심부가 아닌 주변부에서 화염핵이 형성되고 있으며 착화원 발생 공간에서는 화염 형성이 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다. 착화원 발생 공간에서 화염이 존재하지 않는 원인으로서는 불꽃방전 발생 시에 미세 충격파에 의해 분진 입자가 전 방향으로(All directions)으로 밀려 나가며 분진농도가 감소하기 때문으로 추정되며, 분진농도가 증가하는 경우에는 이러한 영향 요인은 감소할 것으로 판단된다. 이와 같은 착화 후의 화염거동을 통해서 분진 분산 조건에 따른 정전기 착



[그림 4-12] 초고속카메라에 의한 분진입자의 착화 특성 조사

화 위험성을 검토하였다. 분체 수송 시에는 분진의 이동속도는 정전기 발생 위험성에 영향을 준다. 이송(기류) 속도가 증가하면 분진입자의 벡터량이 증가하며 이로 인해 입자의 접촉, 분리의 현상이 증가하여 대전량의 증가로 이어질 것이다. 대전량의 증가는 정전압의 증가로 이어지며 공기중의 절연과괴강도(30 kV/cm)보다 높아지면 불꽃 방전 위험성이 증가한다. 만일 이송(기류) 속도가 더욱 증가하는 경우에는 입자간 거리가 감소하여 분진입자의 벡터량이 감소하여 분체 대전량 저하로 이어지며 정전기 발생 위험성은 감소한다. 분진농도의 변화가 정전기 위험성에 미치는 영향을 검토하였다. 분진운의 기류속도가 일정한 조건에서의 분진 농도가 증가하면 입자와 내벽과의 접촉-분리 현상이 증가하고 대전량 증가로 정전기 발생 위험성이 높아질 것이다. 농도가 더욱 증가하게 되면 입자 표면을 경유한 전하누설 및 대전된 입자의 전기장에 의한 전하이동 억제에 따른 대전 발생량이 감소하여 정전기 발생 위험성은 감소할 것으로 판단된다.

3. 정전용량의 조사

1) 조사 방법

정전용량(C)은 [그림 4-13]과 같이 분진의 두께, 입경, 면적, 거리, 물질의 비유전율 등의 다양한 영향 요인에 의해 의존한다. 그러므로 영향요인이 많은 정전용량(C)의 직접적 측정이 용이하지 않다. 본 연구에서는 문헌에 알려진 PE(HD)에 대하여 정전용량을 측정하고 고찰하고자 하였다. 이를 위해 전기량(Q)과 정전압(V) 측정을 통하여 [그림 4-14]의 식을 사용하여 정전용량(C)을 조사하는 방법을 검토하였다. 구체적인 PE(HD)의 전하량 및 정전압 측정은 [그림 4-15]와 같이 전하량과 정전압을 각각 측정하였다. 측정 결과, 전기량(Q)은 121~150 nC, 정전압(V)은 0.3~6.0 kV가 얻어졌다. “ $C=Q / V$ ”의 계산식에 의한 PE(HD)의 정전용량(C)의 평가 결과, 25.0~403.3 pF가 얻어졌으며, PE(HD)의 정전용량(C)에 대한 문헌값(300 pF) 및 측정값(25.0~403.3 pF)을 비교하면 측정값은 일정 크기의

범위 내에서 변동하지만 문헌값과 비교하여 거의 유사한 값이 얻었졌다. 다양한 물질에 대한 정전용량의 문헌자료가 거의 찾아 볼 수 없는데, 그러한 이유로는 정전용량 측정은 다양한 파라메타에 영향을 받기 때문에 측정이 쉽지 않기 때문으로 판단된다.

1. 정전용량(C)

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_s \left(\frac{S}{L} \right)$$

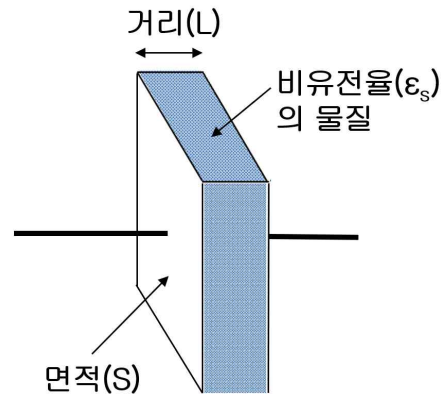
2. 매개 변수

ϵ_0 : 진공의 유전율

ϵ_s : 물질의 비유전율

S : 물질의 면적

L : 물질의 거리

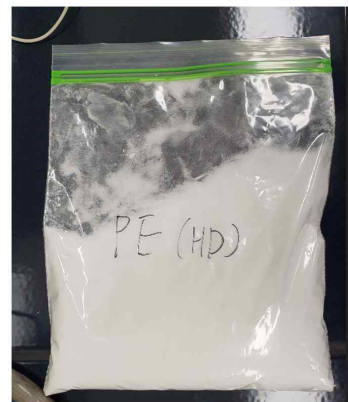


[그림 4-13] 정전용량의 정의

$$Q = C \cdot V$$

$$E = \frac{1}{2} C \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q}{V} \cdot V^2 = \frac{QV}{2}$$

E (mJ) : 정전기 에너지
(MIE : Minimum ignition energy)
C (pF) : 정전용량
Q (Coulmb) : 전기량
V (Volt) : 정전압(정전기 전위)



[그림 4-14] 정전용량의 측정 방법

전하량(Q ; quantity of electric charge)의 측정 모습



정전압(V ; voltage of static-electricity)의 측정 모습



[그림 4-15] PE(HD)의 전하량 및 정전압 측정

2) 정전용량 적용 방법

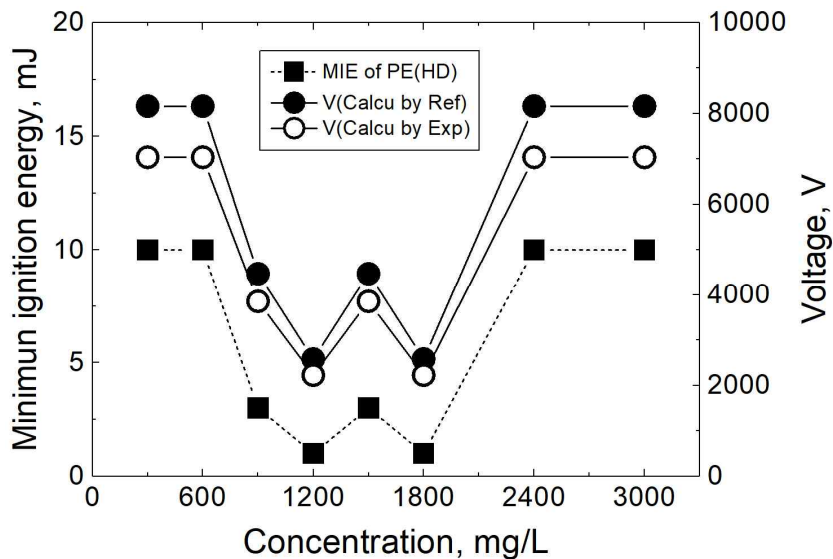
PE(HD)의 정전용량(C)에 대한 문헌값(300 pF) 및 측정값(25.0~403.3 pF)의 비교를 위해 시험적으로 조사된 MIE자료를 사용하여 이하 식에 의해 정전압 (V_{ex})을 계산하였다. 그 결과 문헌값(300 pF)을 적용하면 2582~8165 [V], 측정값 (최대값의 403.3 pF를 적용)에서는 2227~7042 [V]의 값이 얻어졌다. PE(HD)의

$$E = \frac{1}{2} C V^2$$

$$V_{ex} = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{C}}$$

정전용량에 대한 문헌값과 측정값을 적용한 정전압의 계산 결과는 다소 오차는 있지만 유사한 경향을 보이므로 측정자료는 적정하며, 전기량(Q) 및 정전압(V) 측정을 통한 정전용량 조사 방법은 타당한 것으로 판단된다.

정전압 측정에 의한 정전용량 평가 대체방법의 타당성을 검토하였다. 정전용량의 측정에 의한 착화에너지 계산은 문헌값 결과와 차이는 있지만 유사한 값을 얻었지만 정전용량의 측정은 많은 변수가 관여하므로 모든 물질에 대한 정전용량의 측정 및 관리는 쉽지 않다. 그러므로 정전용량을 직접 평가하는 것보다는 정전압 측정을 통한 정전기 방전에너지의 추정방법이 사업장에서의 현장 활용성을 높이고 정전기 예방 관리에 효율적일 것으로 판단된다. 또한 정전기 착화에 의한 화재폭발사고는 근로자 작업 중에 많이 발생하며, 이 때의 정전기 방전은 인체 정전용량에 큰 영향은 받는다. 그러므로 본 연구에서는 정전용량을 <표 4-6>과 같이 작업 중에 발생한 정전기 착화 사고인 경우에는 인체의 정전용량(100~300 pF) 중에서 가장 위험한 300 pF를 C값으로서 사용하였다. 물질 및 공정 중의 사고는 <표 4-6>의 자료를 적용하였다(산업안전보건연구원, 2006). 또한 정전용량



[그림 4-16] PE(HD)의 정전용량 측정값을 사용한 정전압 계산

<표 4-6> 정전용량에 대한 문헌 자료 예

구분	정전용량, C (pF)
Single screw, Bolt	1 이하
Flange (nominal size 100 mm)	10 이하
Small container (50 ℓ)	10~100
Polyethylene bag	100
Human body	100~300
Polyethylene	300
Drum (200 ℓ)	100~300
Large containers, reactors	100~1000

자료가 없는 분진의 경우에는 시험측정을 하거나 PE자료(300 pF)를 활용하는 방법을 제안하였다.

4. 정전압의 조사

1) 조사 방법

정전압의 측정을 통한 착화에너지의 추정을 검토하였다. 이를 위해 먼저 정전압에 미치는 분진의 농도와 대전 레벨을 조사하였다. 분진의 농도는 동일 기류 조건에서 분진 종류에 따른 정전압의 변화를 알기 위함이며, 대전 레벨은 분진의 접촉, 분리 횟수 증가에 따른 정전압에의 영향을 조사하기 위한 것으로서 대전 레벨은 시험 편의상 분진운의 분사 횟수를 변수로 정하여 평가하였다. [그림 4-17]은 하트만식 시험장치에서 분진농도 및 분사 횟수에 따른 정전압의 측정 모습을 나타낸 것이다. 정전압 측정 및 분진 분사 조건은 <표 4-7>과 같으며 정전

압측정기(Electrostatic Field Meter, ESFM-Exd-1000A)는 방폭형 제품(Ex d II C T6)으로서 측정기의 사양은 <표 4-8>에 제시하였다.



[그림 4-17] 정전압의 측정 모습

<표 4-7> 정전압 측정 및 분진 분사 조건

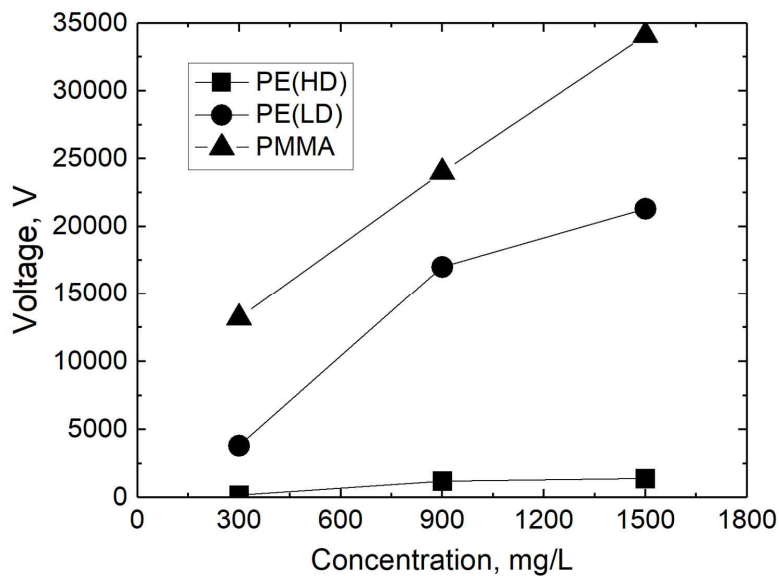
구분	상세 내용
정전압 측정 조건	(1) 온도 : 21~22 ℃ (2) 습도 : 40~45 %RH (3) 기압 : 100.9 kPa
분진 분사 조건	(1) 분사 압력 : 5 barG (2) 분진 농도 : 300, 900, 1500 mg/L (3) 분사 횟수 : 동일 농도 조건에서 1회, 5회, 10회

<표 4-8> 정전압 측정기의 사양

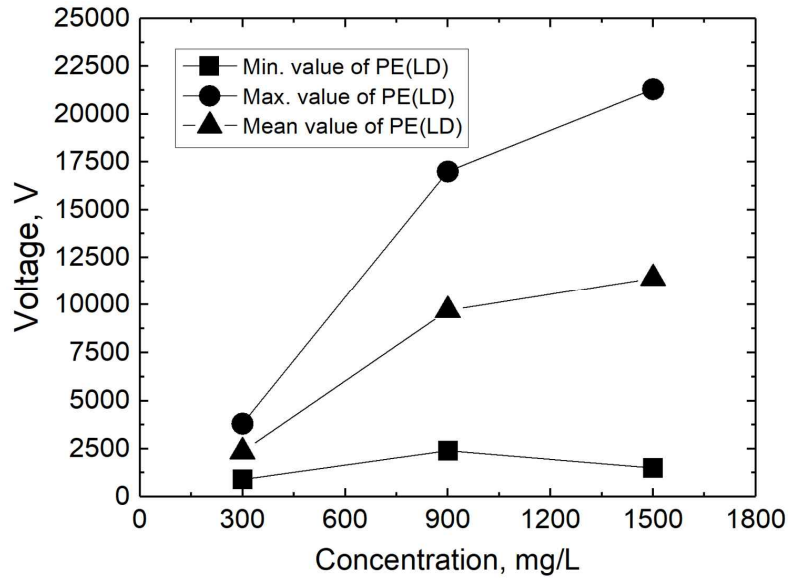
구분	상세 내용
Explosion-proof type	Ex d IIc T6
Range	-40,000 ~ +40,000 V
Electrostatic probe	SUS316 (Φ12 x 200L)
Data acquisition	Bluetooth method

2) 분진농도에 의한 영향 분석

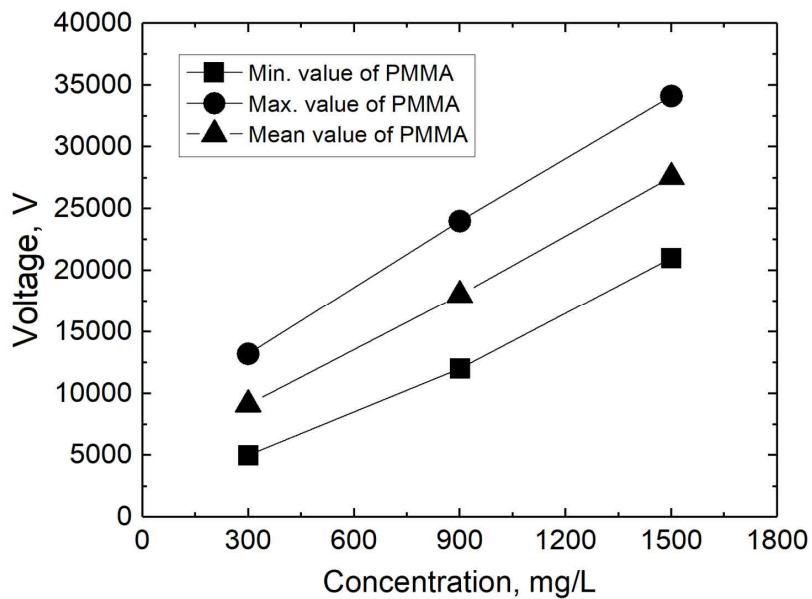
PE(HD), PE(LD), PMMA 분진에 대한 분체 종류별 농도가 정전압에 미치는 영향을 [그림 4-18]~[그림 4-20]에 나타냈다. PE(HD), PE(LD), PMMA 분진은 분산 횟수가 많아질수록 정전압이 증가하였으며, 분진농도 증가에 따른 정전압의



[그림 4-18] 분체 종류별 농도가 정전압에 미치는 영향



[그림 4-19] PE(LD)의 농도변화에 따른 정전압의 측정 결과

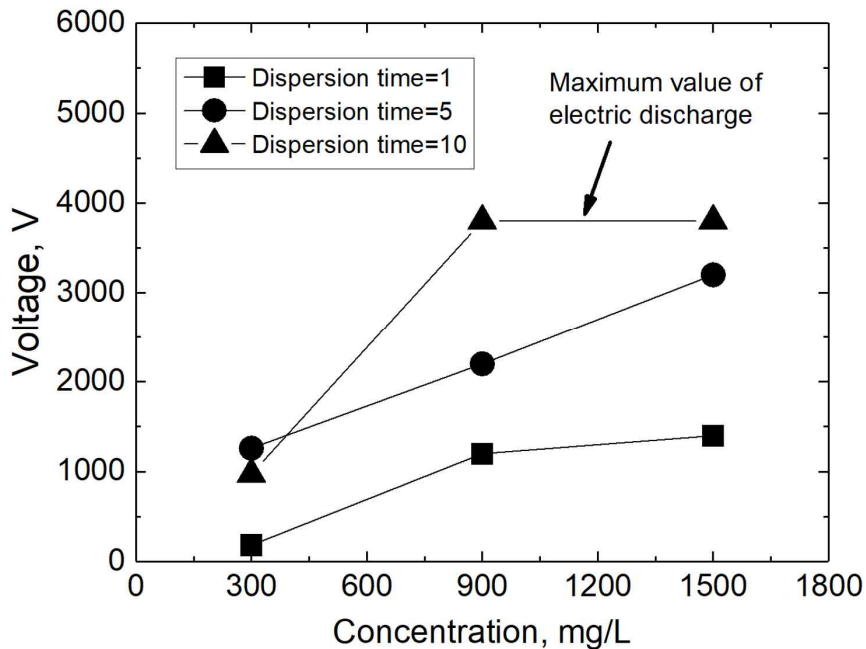


[그림 4-20] PMMA의 농도변화에 따른 정전압의 측정 결과

증가율은 PMMA, PE(LD), PE(HD)의 순으로 크게 나타났다. 농도 증가에 따른 정전압의 최대-최소값의 차이를 조사한 결과, PMMA의 농도증가에 따른 정전압의 최소 및 최대값의 범위 변화는 PE(HD), PE(LD)와 비교하여 작게 나타났는데 이러한 원인으로는 구형에 가까운 PMMA의 입자 형상과 작은 입경($15.66\ \mu\text{m}$)에 의한 것으로 판단된다.

3) 분산 횟수에 의한 영향 분석

분산 횟수 및 농도에 따른 PE(HD)의 정전압 측정 결과를 [그림 4-21]에 나타냈다. PE(HD)를 대상으로 분진 분산 조건이 정전압에 미치는 영향을 조사한 결과, 분산 횟수가 증가할수록 또한 동일 횟수의 조건에서는 농도가 클수록 정전압이 증가하였다. 분진 분산 시에 발생하는 정전압은 분산 초기에 급격히 증가

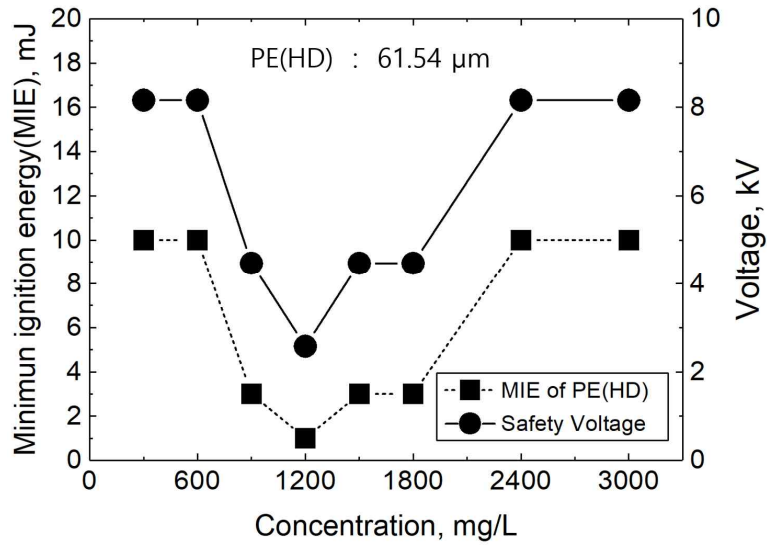


[그림 4-21] 분산 횟수 및 농도에 따른 PE(HD)의 정전압 측정 결과

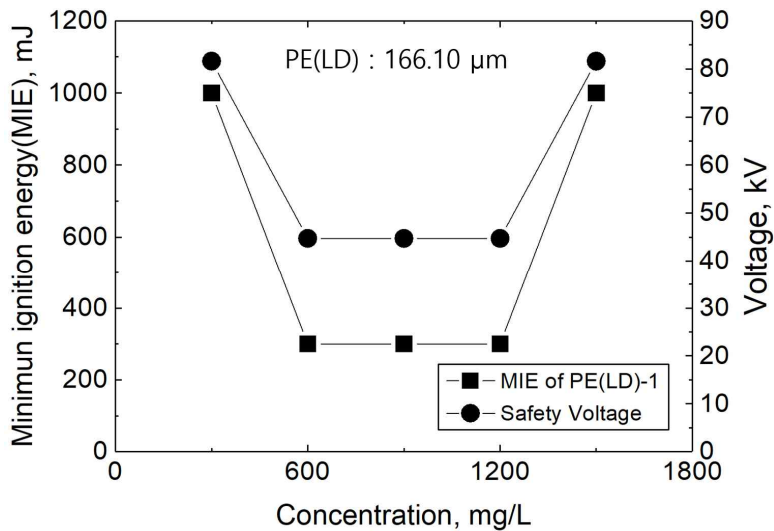
하다 서서히 감소하며 분진 농도가 증가할수록 정전압은 증가하다가 최대값으로 수렴하는데, 이는 분체 대전에 의한 정전기 방전 레벨이 최대가 됨을 의미한다. 또한 PE(LD)에 있어서 정전압의 최소 및 최대값의 범위는 농도가 증가할수록 증가 경향을 나타냈는데, 이는 농도 증가는 분진의 마찰 및 충돌 대전이 증가하기 때문인 것으로 추정된다.

5. 분진의 정전기 착화에너지 추정 및 활용방안

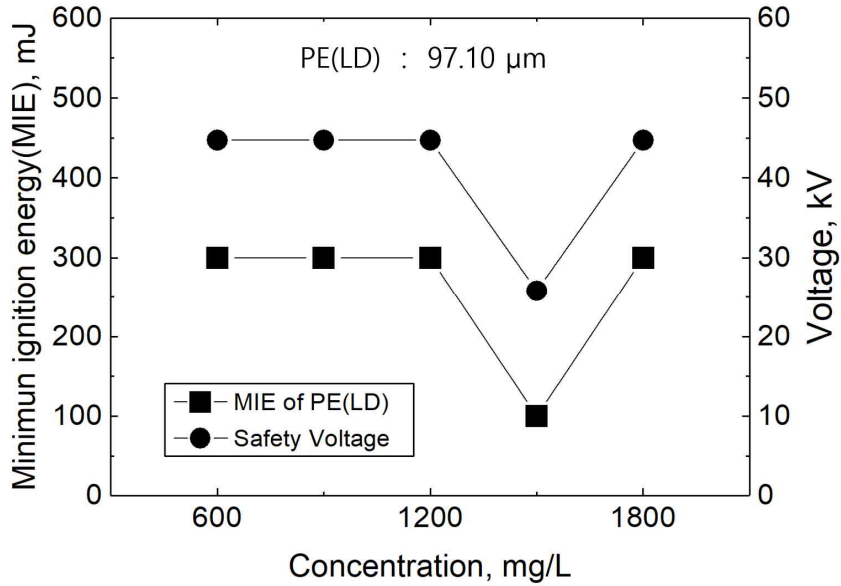
분진입자 1개의 정전용량(C)은 1.0×10^{-18} pF로서 분진 농도가 증가할수록 C값도 증가한다. C값의 측정은 물질종류, 면적, 거리, 물질 비유전율 등의 많은 영향요인에 의해 달라지기 때문에 물질 종류와 사용조건에 따른 C값의 측정은 간단하지가 않으며, 시간적, 비용적 측면에서 효율적인 방법이라고 할 수 없다. 정전기 착화 화재폭발사고의 발생원인은 근로자 작업중(67 %), 공정 운전 중(33 %)으로 작업자 기인이 많으므로, 정전기 착화 위험성에 대한 정전용량(C)은 “작업 중(인체 대전), 분진 및 공정설비, 자료 불명 분진 및 공정” 등의 3가지로 분류하여 적용하는 방법을 제안하였다. 그리고 인체의 정전용량은 의복종류 등의 여러 가지 조건에 따라 100~300 pF으로 변하며 영향이 가장 큰 값을 고려하여 300 pF의 사용하는 방안을 제시하였다. 또한 상대적으로 측정이 용이한 정전압의 관리를 통한 정전기 방전에너지(최소착화에너지, MIE)의 활용이 효율적이며 실용적인 방법이다. 이를 위해 공정설비의 정전압 측정값을 사용하여 정전기 방전 에너지를 계산하고 이러한 계산값이 정전기 방전 저감 대상의 분진이 MIE값 이하가 되도록 정전기 발생량을 저감시키는 대책을 제안하였다. 정전압 측정을 통한 정전기 착화에너지 추정방법 활용 예를 PE(HD), PE(LD), PMMA 분진에 대하여 적용하였으며, 그 결과를 [그림 4-22]~[그림 4-25]에 나타냈다. 정전압을 측정하여 안전전압(Safety voltage) 이하로 관리하는 것이 필요하다. 정전기 화재폭발 예방을 위한 정전압 관리를 <표 4-9>에 나타냈다.



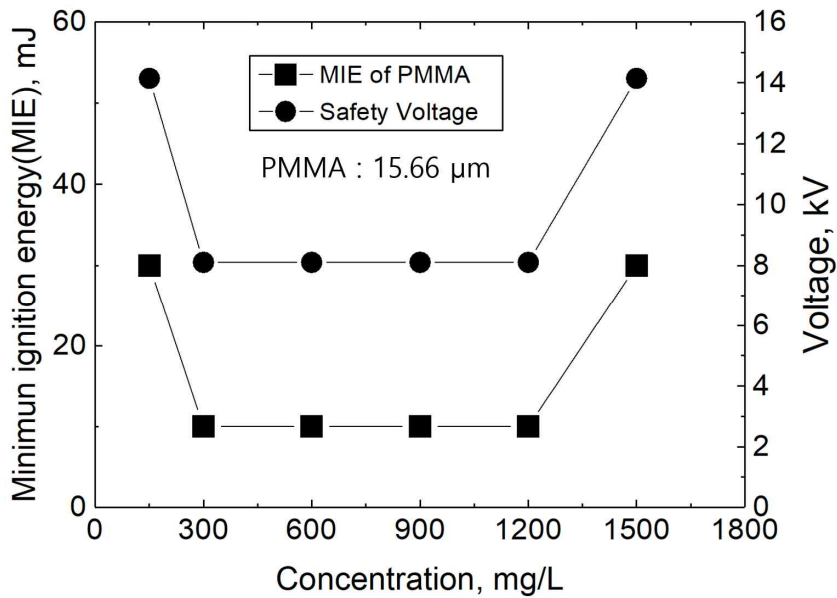
[그림 4-22] PE(HD)의 정전압 측정을 통한 정전기 착화예방



[그림 4-23] PE(LD)-1의 정전압 측정을 통한 정전기 착화예방



[그림 4-24] PE(LD)-2의 정전압 측정을 통한 정전기 착화예방



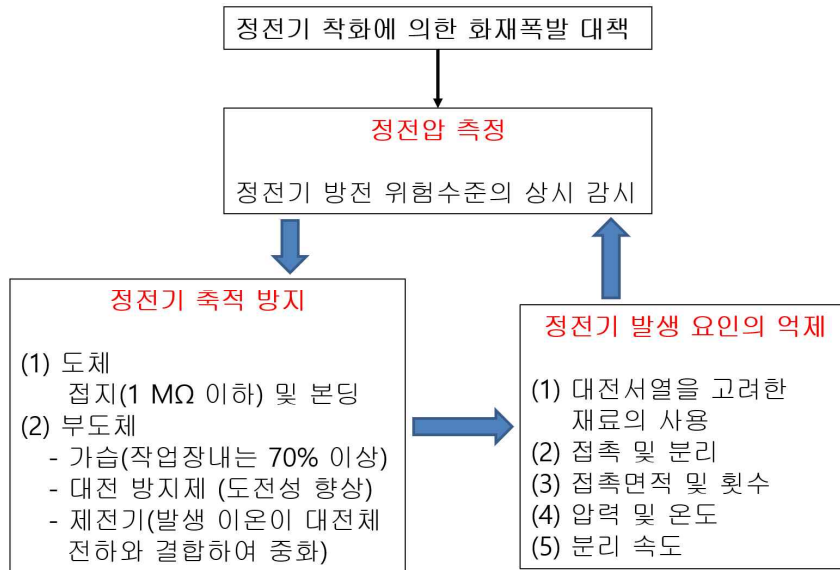
[그림 4-25] PMMA의 정전압 측정을 통한 정전기 착화예방

정전기 화재폭발 저감방안으로서 <표 4-9>에서와 같이 해당 물질의 최소착화에너지(MIE)를 사용하여 정전압을 계산하고 공정에서 발생하는 정전기의 발생 수준을 측정하여 계산된 정전압보다 작게 관리하는 방법을 제시하고 있다. 평균입경 166.1 μm 의 PE(LD)-1의 경우를 예로 들면, MIE는 100~300 mJ이며 MIE 기준에 따른 안전 정전압의 한계는 44.72 kV이므로 공정 및 작업 과정에서 발생하는 측정된 정전압이 44.72 kV 보다 작게 발생하도록 관리한다면 정전기 착화에 의한 화재폭발 예방이 가능하며 저감대책 방안을 강구할 수 있다. MIE(Es)는 통계적 최소착화에너지로서 착화원의 발생 빈도가 증가할수록 300 mJ보다 작은 착화원에서 착화될 가능성도 있으므로, 보수적인 안전 관점에서 보다 높은 안전수준으로 관리하고자 하는 경우에는 22.95 kV를 안전 정전압의 기준으로 하여 관리할 수도 있다. 또한 분진의 MIE는 평균입경에 따라 영향을 받으므로 동일 종류의 분진이라도 분체특성이 변하면 MIE도 달라지므로 사용 분진에 대한 MIE 자료를 확보할 필요가 있다.

구체적인 정전기 화재폭발 예방대책은 [그림 4-26]과 같이 “정전압 측정-정전기 축적 방지-정전기 발생 요인의 억제”의 안전활동이 필요하다. 정전압의 측정,

<표 4-9> 정전기 화재폭발 예방을 위한 정전압 관리

물질 종류	Median (μm)	MIE 기준		MIE(Es) 기준	
		MIE (mJ)	정전압 (kV)	MIE(Es) (mJ)	정전압 (kV)
PE(HD)	61.54	< 1	2.58 (1 mJ)	0.5	1.82
PE(LD)-1	166.1	100~300	44.72 (300 mJ)	150	31.62
PE(LD)-2	97.10	30~100	25.82 (100 mJ)	79	22.95
PMMA	15.66	3~10	8.16 (10 mJ)	4	5.16



[그림 4-26] 정전기 화재폭발 예방대책

관리 만으로는 정전기 착화 위험성을 저감시킬 수가 없으므로 정전기의 발생 요인을 감소시키기 위한 장치 및 설비의 재질 선정, 공정운전 조건 등의 방안도 함께 고려되어야 한다.

[그림 4-26]의 정전기 발생 요인은 사용설비의 종류와 형태, 설비의 재질, 공정운전 조건 및 사용 분진 등에 따라 복잡하기 때문에 억제 대책을 상세히 제시하는 것은 쉽지 않다. 일반적으로 정전기 억제 대책을 위한 방법으로서 대전서열을 고려하여 재료를 사용하는 경우에는 대전량의 감소 방안을 고려해야 한다. 대전량 감소를 위한 구체적인 예방대책은 취급 분진이 접촉하고 있는 설비 재료와 대전열의 상하위치가 가까운 물질을 사용하여 분진과 설비의 접촉, 분리 시에 발생할 수 있는 대전량을 최소화하는 방법이다. 예를 들면 분진 취급 공정에서 많이 사용하고 있는 설비로서 호퍼, 슈트 등이 있다. 이러한 설비에서 분진의 배출성을 용이하게 하기 위해서 일명 테프론으로 불리고 있는 폴리테트라플로르에틸렌

(Polytetrafluoroethylene)을 설비 내면에 코팅하여 사용하고 있다. 그러나 폴리테트라플로르에틸렌은 대전서열에서 음(-)의 최하단에 위치하고 있어 대전 위험성이 높은 물질이므로 분진착화 예방을 위해서는 사용 시에 충분한 검토가 필요하다. 그 밖에 분진과 설비와의 접촉 및 분리 발생빈도를 감소시키기 위해서 배관의 길이를 최소화하거나, 분진과의 접촉면적이 작아지도록 설계하는 등의 장치 설치 이전 단계에서부터 대전량 발생을 감소시킬 수 있는 방안도 고려해야 한다. 또한 온도, 압력 및 분리속도와 같이 공정 운전 조건이 대전량에 미치는 영향을 조사하여 대전량의 발생이 최소화되도록 대책을 강구할 필요가 있다.

이와 같이 정전기 발생 요인은 다양하게 존재하며 각각의 요인에 대한 영향검토를 위해서는 수많은 관련자료와 취급 분진의 화재폭발특성 자료가 필요하다. 더욱이 이러한 자료를 활용하여 공정의 효율성을 함께 고려해야 하기 때문에 대책이 간단하지는 않을 것이다. 그러나 정전기 위험을 방치한 결과에 따른 위험성 증가로 화재폭발사고가 발생할 수 있고 그로 인해 인적 손실과 물적 피해를 고려하면 사고저감대책의 필요성은 매우 중요하다고 할 수 있다.

VI. 결 론

1. 주요 결과

본 연구에서는 분진취급 공정의 정전기 착화 위험성을 효율적으로 관리하고 화재폭발사고를 저감시키기 위한 방안으로서 정전기 착화에너지의 추정 방법을 제시하였다. 이를 위해 국내외 사고사례를 조사하여 정전기 착화 예방에 필요한 사항을 검토하였다. 또한 정전용량의 실측값을 통한 착화에너지의 조사 효율성과 정전압 측정에 의한 착화에너지 추정의 타당성을 검토하여 사업장에서 활용가능한 정전기 예방대책을 제시하였으며 본 연구를 통해 이하의 결과를 얻었다.

- 1) 국내외의 분진 화재폭발사고사례를 조사한 결과, 정전기에 의한 사고가 반복하여 발생하고 있다.
- 2) 국내 정전기 착화에 의한 분진 화재폭발사고사례 분석 결과, 발생 원인은 근로자 작업중(67 %), 공정 운전중(33 %)으로 조사되었으며 작업자 기인에 의한 사고가 많은 것을 알 수 있었다.
- 3) 분진운의 착화 시에 화염의 발생은 일정 시간 경과 후에 발생하며, PE(HD)의 경우 착화 후 화염핵 생성 시간은 약 8 ms로 조사되었다.
- 4) 불꽃 방전에 의한 분진 착화는 착화원 중심부가 아닌 주변부에서 화염핵(Flame kernel)이 형성되며 착화원 발생 공간에서는 화염의 형성이 이루어지지 않았다. 이러한 원인으로서는 불꽃 방전 발생 시에 미세 충격파에 의해

분진 입자가 전 방향(All directions)으로 밀려 나가며 분진농도가 감소하기
때문으로 추정된다.

- 5) PE(HD), PE(LD)-1, PE(LD)-2, PMMA의 평가대상 분진의 평균입경은 각각 61.54, 166.1, 97.10, 15.66 μm 로 측정되었으며, 이러한 분체특성 조건에서 최소착화에너지(MIE)를 조사한 결과, PE(HD), PE(LD)-1, PE(LD)-2, PMMA는 각각 $< 1 \text{ mJ}$, $100 < \text{MIE} < 300 \text{ mJ}$ ($E_s 150 \text{ mJ}$), $30 < \text{MIE} < 100 \text{ mJ}$ ($E_s 79 \text{ mJ}$), $3 < \text{MIE} < 10 \text{ mJ}$ ($E_s 4 \text{ mJ}$)의 결과를 얻었다.
- 6) PE(HD)의 정전용량(C) 시험은 전기량(Q) 및 정전압(V) 측정을 통한 조사 방법으로 수행하였으며 시험평가 결과, 25.0~403.3 pF의 값이 얻어졌으며 문헌값(300 pF)에 유사하였다. 또한 PE(HD)의 C값에 대한 문헌값과 측정값을 적용한 정전압의 계산 결과는 분진농도에 따라 근사한 결과가 얻어졌다.
- 7) 정전기 착화 위험성에 대한 정전용량(C)은 “작업중(인체대전), 분진 및 공정 설비, 자료 없는 분진” 등의 3가지로 분류하여 적용하는 방법을 제안하였다.
- 8) 효율적인 C값의 조사를 위해 정전압 및 최소착화에너지(MIE) 측정자료를 사용하여 $V_{ex} = [(2 \cdot E) / C]^{0.5}$ 에 의한 C값의 산출 방법을 제안하였다.
- 9) PE(HD), PE(LD), PMMA 분진은 분산 횟수가 많아질수록 정전압이 증가하였으며, 분진농도 증가에 따른 정전압의 증가율은 PMMA, PE(LD), PE(HD)의 순으로 크게 나타났다.
- 10) PE(HD)를 대상으로 분진 분산 조건이 정전압에 미치는 영향을 조사한 결

과, 분산 횟수가 증가할수록 또한 동일 횟수의 조건에서는 농도가 클수록 정전압이 증가하였다.

- 11) 분진 분산 시에 발생하는 정전압은 분산 초기에 급격히 증가하다 서서히 감소하며 분진 농도가 증가할수록 정전압은 최대값으로 수렴하는데, 이는 분체대전에 의한 정전기 방전 위험성을 나타낸다.
- 12) PE(LD)에 있어서 정전압의 최소 및 최대값의 범위는 농도가 증가할수록 증가 경향을 나타냈는데, 이는 농도 증가는 분진의 마찰 및 충돌 대전이 증가하기 때문으로 추정된다.
- 13) PMMA의 농도증가에 따른 정전압의 최소 및 최대값의 범위 변화는 PE(HD), PE(LD)와 비교하여 작게 나타났는데, 이러한 원인으로는 구형에 가까운 PMMA의 입자형상과 작은 입경($15.66\ \mu\text{m}$)에 의한 것으로 추정된다.
- 14) 정전기 화재폭발 예방을 위한 안전 정전압을 조사한 결과, PE(HD), PE(LD)-1, PE(LD)-2, PMMA는 각각 2.58, 44.72, 25.82, 8.16 kV의 값이 얻어졌다.
- 15) 공정설비의 정전압 측정값을 사용하여 정전기 방전에너지를 계산하고 이러한 계산값이 MIE값의 이하가 되도록 정전기 발생량을 저감시키는 대책을 제안하였다.
- 16) 정전기 착화 예방을 위해서는 “정전압 측정-정전기 축적방지-정전기 발생요인 억제”의 상시 모니터링 대책이 필요하다.

2. 제도 개선 방안

분진을 원료 등으로 사용하거나 취급하는 공정에서는 정전기 방전에 의한 착화로 인해 분진 화재폭발사고가 매년 반복하여 발생하고 있다. 매년 반복되어 발생하고 있는 정전기 착화에 의한 화재폭발사고의 동종재해와 물질 및 인적 손실 저감을 위해, 산업안전기준에 관한 규칙 제325조(정전기로 인한 화재 폭발 등 방지)에서 “정전압 측정기”를 규정하는 이하의 개정안을 제안하였다. 산업안전기준에 관한 규칙 제325조(정전기로 인한 화재 폭발 등 방지)에서는 도전성 물질에 대한 정전기 제어를 위해 접지 및 제전장치의 사용만이 규정되어 있지만 이러한 규정은 부도체가 많은 분진의 대전방지에 대한 대책에는 효과가 거의 없다.

산업안전기준에 관한 규칙	산업안전기준에 관한 규칙(개정안)	개정 사유
제4절 정전기 및 전자파로 인한 재해 예방 제325조(정전기로 인한 화재 폭발 등 방지) ① 사업주는 다음 각 호의 설비를 사용할 때에 정전기에 의한 화재 또는 폭발 등의 위험이 발생할 우려가 있는 경우에는 해당 설비에 대하여 확실한 방법으로 접지를 하거나, 도전성 재료를 사용하거나 가습 및 점화원이 될 우려가 없는 제전(除電)장치를 사용하는 등 정전기의 발생을 억제하거나 제거하기 위하여 필요한 조치를 하여야 한다.	제4절 정전기 및 전자파로 인한 재해 예방 제325조(정전기로 인한 화재 폭발 등 방지) ① 사업주는 다음 각 호의 설비를 사용할 때에 정전기에 의한 화재 또는 폭발 등의 위험이 발생할 우려가 있는 경우에는 해당 설비에 대하여 확실한 방법으로 접지를 하거나, 도전성 재료를 사용하거나 가습 및 점화원이 될 우려가 없는 제전(除電)장치 또는 정전압측정기를 사용하는 등 정전기의 발생을 억제하거나 제거하기 위하여 필요한 조치를 하여야 한다.	가연성분진 중에는 부도체가 많아 접지, 제전장치 등에 의한 정전기 제어가 쉽지 않은 경우가 많음. 따라서 이러한 경우에는 정전압 측정 및 관리를 통해 대전 레벨이 최소화하여너지 이상으로 증가하는 것을 제어하는 것이 필요함.

또한 집진장치, 분체 투입, 분체 이송 등과 같이 분진 취급이 빈번한 장소에서의 분진에 대한 정전기 착화 대책에 대한 제도적 개선이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 정전압 측정을 통해서 실체를 확인하기 어려운 정전기에 대한 제어를 사업장에서 쉽게 관리할 수 있으며 착화에너지 이하의 대전 레벨 관리를 통한 화재폭발예방에도 적용할 수 있다는 점에서 시급히 요구되는 사항이다. 아울러 향후 정전압측정기의 도입에 대한 제도개선을 검토하기 위해서는 규제영향 분석을 통한 비용대 효과도 함께 이루어질 필요가 있다.

참 고 문 헌

- KOSHA(한국산업안전보건공단), 중대산업사고사례, (1990~2019).
- 최상원, 정전기 방전에너지에 의한 화재폭발의 실험적 규명 연구, 산업안전 보건연구원 연구보고서, 2006.
- 변정환 등, 정전기 방전 검지기술 및 관련기기 방폭기술 개발 연구, 산업안전 보건연구원 연구보고서, 2018.
- 일본 JNIOH(노동안전위생총합연구소), 화재폭발사고사례, (2007~2017).
- Olsen, W., et al., "Electrostatic dust explosion hazards - towards a < 1 mJ synchronized-spark generator for determination of MIEs of ignition sensitive transient dust clouds", Journal of Electrostatics, 74, 2015:66-72
- Ohsawa, A., et al., "ESD detection by transient earth voltage", Journal of Physics Conference Series, 418, 2013:012054
- Jonassen, N. M., Explosions and static electricity in Electrical Overstress-Electrostatic Discharge, Symposium Proceedings, 1995:331-337
- Yamaguma, M., et al., "Observation of propagating brush discharge on insulating film with grounded antistatic materials", IEEE Trans. on Insdutry Applications, 40, 2004:451-456
- Matsuyama, T., "The Mechanism of Electrostatic Charging of Powder", Japan Association of Aerosol Science and Technology, 28(4), 2013:245-250
- NFPA 77(2014), Recommended Practice on Static Electricity.
- Luttgens, G., et al., Electrostatic Hazards. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1997.
- BS EN 13821:2002, Potentially explosive atmosphere- Explosion prevention and protection-Determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures.

EN 13821 : 2002 “Potentially explosive atmospheres - Explosion prevention and protection - Determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures.

Abstract

Study on Reduction of Dust Fire and Explosion Accidents by Electrostatic Discharge

Objectives : In this study, we examined the preventive measures of dust fire and explosion accidents by electrostatic discharge in dust handling process. For this purpose, we proposed the method for estimating the electrostatic ignition energy by measuring electrostatic voltage and the legal improvement measures related to industrial safety and health Act.

Methods : The calculation methods were conducted to identify the minimum ignition energy by using the measured voltage data with electrostatic field meter. We investigated the dust fire and explosion accidents caused by the ignition of electrostatic discharge and analyzed the main causes of the accidents. In order to examine the method for estimating the ignition energy, the ignition energy tests were performed on sample dusts such as PE(HD), PE(LD), PMMA using the MIE test apparatus(MIKE 3). We also measured the capacitance of PE(HD) and presented the application method of capacitance data from experimental results. The estimation method of MIE(minimum ignition energy) with the dust concentration condition was investigated by measuring the electrostatic voltage.

Results : As a result of analysis of dust fire explosion accidents caused by electrostatic ignition in Korea, the causes of accidents occurred in workers' work(67%) and during process operation(33%). The formation of flame during

the ignition of dust clouds occurred after a certain period of time, and the flame kernel after the ignition of PE(HD) dust was about 8 ms and the flame kernel was not observed in center of ignition occurrence area. The voltages were calculated from the measured MIE and capacitance(C) of PE(HD) and it was almost similar to the result of the calculated voltages obtained using the literature capacitance(C) value of PE(HD). The capacitance(C) for the electrostatic ignition hazard was presented in three category with in operation(human charging), dust and process equipment, and dust without capacitance data. We proposed the calculation method by $V_{ex}=[(2 \cdot E)/C]^{0.5}$ using voltage and MIE data for efficient investigation of electrostatic ignition hazard. The voltage increased with increasing the number of dispersions and the increase rate of measured voltage with dust concentration was the highest in the order of PMMA, PE(LD) and PE(HD). As a result of investigating the effect of dust dispersion condition on the voltage in PE(HD), the voltage increased as the number of dispersions increased and as the concentration increased under the same dispersion number. Also, the range of the minimum and maximum values of the voltage increased as the concentration increased. The safety voltages for the prevention of fire and explosion accident by electrostatic ignition showed that PE(HD), PE(LD)-1, PE(LD)-2, and PMMA were 2.58, 44.72, 25.82, and 8.16 kV, respectively and the improvement of legal standards was proposed.

Conclusions : Fire and explosion accidents caused by electrostatic ignition have caused similar disasters repeatedly and this accident tendency is due to the inadequate results of the electrostatic ignition measures. Therefore, in order to solve these problems, it is necessary to develop a method for evaluating and managing the hazard of electrostatic discharge and to attract

the workplace's interest in the safety of electrostatic ignition by distributing the electrostatic safety data to the workplace. In consideration of the current safety status of static electricity, it is important to monitor the electrostatic ignition hazard by using the measured voltage, calculate the ignition energy using the measured voltage, and manage the measured voltage with the minimum ignition energy data.

Key Words : Electrostatic discharge, Dust, Dust explosion, Minimum ignition energy, Capacitance, Voltage

〈〈연 구 진〉〉

연 구 기 관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 한우섭 (부 장, 산업화학연구실)

연 구 원 : 이근원 (국 장, 산업화학연구실)

서동현 (연구위원, 산업화학연구실)

이정석 (연 구 원, 산업화학연구실)

변정환 (연구위원, 산업안전연구실)

〈〈연 구 기 간〉〉

2019. 1. 1 ~ 2019. 11. 30

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

산업안전보건연구원장

정전기 착화에 의한 분진 화재폭발사고 저감 연구

2019-연구원-1641

발 행 일 : 2019년 11월 30일
발 행 인 : 산업안전보건연구원장 고 재 철
연구책임자 : 산업화학연구실 부장 한 우 섭
발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원
주 소 : (34122) 대전광역시 유성구 엑스포로 339번길 30
전 화 : (042) 869-0331
F A X : (042) 869-9002
Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>
