

부유 분진의 정전압에 의한 최소착화에너지 위험성평가

한우섭[†]

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원
34122 대전광역시 유성구 엑스포로 339번길 30
(2021년 5월 20일 접수, 2021년 6월 16일 수정본 접수, 2021년 6월 21일 채택)

Hazard Evaluation of Minimum Ignition Energy by Electrostatic Voltage in Suspended Dust Particles

Oue-Sup Han[†]

Occupational Safety & Health Research Institute, Kosha, 339-30 Exporo, Yuseong-gu, Daejeon, 34122, Korea
(Received 20 May 2021; Received in revised form 16 June 2021; Accepted 21 June 2021)

요 약

본 연구에서는 분진의 착화 특성 및 정전기 위험성 평가법을 실험적으로 조사하였다. 착화에너지 시험은 PE(HD), PE(LD), PMMA 분진에 대해 MIKE-3장치를 사용하여 실시하였다. PE (HD)의 경우 약 8 ms의 일정 시간 경과 후에 분진운의 착화 화염이 형성되고, 착화원 중심부에서는 화염 핵이 관찰되지 않았다. 분진의 분산 횟수가 증가함에 따라 정전압이 증가하고 분진 농도에 따른 정전압 발생 증가율은 PMMA, PE(LD), PE (HD) 순으로 가장 높았다. PE(HD) 분진의 분산 조건이 정전압에 미치는 영향을 조사하였으며, 분산 횟수가 많아질수록 정전압이 증가하였고 동일한 분산 횟수에서는 분진 농도가 높아질수록 정전압이 증가하였다. 정전기 착화에 의한 화재폭발사고 예방을 위한 안전 정전압은 PE(HD), PE(LD)-1, PE(LD)-2, PMMA에 있어서 각각 2.58, 44.72, 25.82, 8.16 kV로 추정되었다. 정전압 측정 자료를 사용하여 정전기 착화 위험성을 효율적으로 조사하여 최소착화에너지를 추정하는 방법을 제안하였다.

Abstract – We investigated experimentally the ignition characteristic of dust and the hazard evaluating for electrostatic discharge. The ignition energy experiments were performed on sample dusts such as PE(HD), PE(LD), PMMA using the MIKE-3 apparatus. The formation of flame during the ignition of PE(HD) dust clouds occurred after the delay time of about 8 ms, and the flame kernels were not observed in center of ignition occurrence area. The voltage increased with increasing the number of dust dispersions and the increase rate of measured voltage with dust concentration was the highest in the order of PMMA, PE(LD) and PE(HD). For the effect of dispersion condition on the voltage in PE(HD) dust, the results were obtained that the voltage increased as the number of dispersions increased and as the concentration increased under the same dispersion number. The safety voltages to prevent fire and explosions by electrostatic ignition were estimated that PE(HD), PE(LD)-1, PE(LD)-2, and PMMA were 2.58, 44.72, 25.82, and 8.16 kV, respectively. We proposed the method for estimating the minimum ignition energy by using the measured voltage data for efficient investigation of electrostatic ignition hazard.

Key words: Dust, Fire and explosion, Minimum ignition energy, Electrostatic discharge, Voltage, Capacitance

1. 서 론

가연성 분체를 사용하고 있는 사업장에서는 취급과정 중에 분진-공기 혼합기가 발생하는 경우가 많다. 이러한 공정 조건에서 분진과 설비 간의 접촉·분리 과정을 통해 정전기에 의한 불꽃 방전이 일

어날 수 있으며 분진이 착화되면 화재폭발사고가 위험성이 있다. 국내에서 발생한 정전기 착화에 의한 화재폭발 사고사례를 보면 분체투입 과정 또는 집진장치 등의 공정에서 화재폭발사고가 반복하여 일어나고 있다[1]. 정전기 착화에 의한 분진 화재폭발사고는 집진장치의 덕트와 백필터에서 분진을 제거하는 작업, 분체를 회수하는 공정, 그리고 분진청소 작업 등에서 사고 위험성이 높은 것으로 알려지고 있다. 국내에서 보고되고 있는 정전기 화재폭발사고는 매년 약 30건이 발생하고 있는데[2], 공정에서 정전기 예방을 위해 많이 사용하고 있는 접지와 분당은 도체 장치나 설비의 정전기 발생 저감에 효과적이다. 그러나 배관 내의 분진, 가스 및 유증기의 비전

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hanpaule@kosha.or.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

도성 물질은 접지와 본딩과 같은 정전기 예방대책으로는 효과가 작다. 따라서 비전도성 물질의 착화 예방을 위해서는 정전기 방전이 최소착화에너지보다 작게 발생도록 관리하거나 제어하는 것이 필요하다.

국내외적으로 정전기에 의한 분진 화재폭발 특성 연구는 실험 방법이 쉽지 않아 많은 연구가 이루어지고 있지 않지만 관련 연구를 살펴보면, Jonassen[3]은 분진 또는 가스 혼합기에서의 정전기에 의한 착화 위험성을 조사하기 위하여 정전압의 영향을 검토한 결과 절연체 간의 방전전압은 발화 위험성이 낮은 반면에 도체 간의 정전기 방전의 착화 위험성이 가장 높게 나타났음을 보고하였다. Juliusz[4]는 집진장치 투입구에서 발생할 수 있는 정전기에 의한 분진 화재폭발 위험에 대한 조사를 실시하였으며 특히 정전기 착화 및 폭발 위험성은 산소, 탄화수소 및 일산화탄소가 포함된 폭발성 혼합물에서 높게 나타났다. Yamaguma등[5]은 산업현장에서 많이 사용되고 있는 집진장치 등의 용기류와 배관류 등에 전기적 부도체인 플라스틱 재질을 저온환경에서 사용하는 경우에 마찰에 의한 대전이 쉽게 발생하고 이에 따른 연면방전을 발생시켜 분진의 착화위험성이 증가한다는 결과를 제시하였다. Ohsawa등[6]은 사일로와 연결된 배관 내에서 대전 분진의 방전에 의한 화재폭발 사고의 원인조사를 통해 방전의 발생원인이 방전검출용 돌기 형태의 센서에 의한 것으로서 배관 내부의 센서 설치용의 홀은 전자계 환경을 교란시킬 가능성이 높다고 보고하였다. 또한 Olsen등[7]은 기존의 최소착화에너지 시험장치에서 측정이 쉽지 않은 1.0 mJ 이하 분진의 착화에너지 시험에 적용가능한 동기화 스파크 발생장치(Synchronized-spark)의 활용 가능성을 제시하였다.

반면에 국내외 연구 중에서는 정전기 방전에 따른 착화에너지의 추정과 관련된 연구사례는 적으며, 분진 종류에 따른 최소착화에너지의 측정자료를 활용하여 정전기에 의한 착화 위험성을 평가하기 위한 연구를 쉽게 찾을 수 없었다. 정전기 착화에 의한 분진 화재폭발의 예방은 분진농도를 제어하는 것이 필요하지만 근본적으로 착화원의 발생을 저감하기 위한 정전기 발생 저감대책이 보다 중요하다. 분진 취급 공정에서는 분진의 농도 제어가 쉽지 않은 경우가 많으므로 정전기 방전의 발생 빈도를 낮추고 만일 정전기 방전이 일어나는 경우에는 최소착화에너지 이하로 관리하기 위한 정전압의 발생을 억제하거나 제어할 수 있는 방안이 필요하다.

본 연구에서는 분진 취급 공정에서의 정전기 발생에 의한 착화 위험성을 평가하고 사고예방에 활용하기 위해 분진농도 변화에 따른 착화에너지 및 정전압의 영향을 실험적으로 조사하였다. 이를 위해 먼저 부유 분진 조건에서 입자가 착화되는 과정에서 화염의 형성 과정을 관찰하고, 정전압 측정을 통한 착화에너지의 추정 방법을 검토하여 조사 결과를 고찰하였으며 정전기 재해예방에 활용할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 실험

2-1. 시료

정전기 착화에너지에 대한 위험성 평가를 위해 사용된 분진 시료는 High density polyethylene[PE(HD)], 평균입경이 서로 다른 2종류의 Low density polyethylene [PE(LD)] 및 PMMA 등의 4종이다. 이들 시료는 사용량이 많은 엔지니어링 플라스틱으로서 정전기 착화 위험성과 분진폭발 사고사례의 발생빈도가 타 분진과 비교하여 상대적으로 높아 동종재해 발생 가능성이 높은 물질이다. 분진폭발 특성을 지배하는 주요 영향 인자들 중에는 평균입경과 분진 농도가 있다. 분진은 다양한 크기의 입경을 갖고 있으며 특히 분진의 입도 특성이 최소착화에너지에 영향을 주기 때문에 입도 범위 및 평균입경에 대한 분체특성 조사가 중요하다. Table 1은 입도분석시험장치(Beckman Coulter LS 13320)를 사용하여 각 시료의 입도분포와 입경에 대한 분석결과이다. 입도분포 조사 결과, PE (HD), PE(LD)-1, PE(LD)-2, PMMA의 체적기준 평균입경(Median)은 각각 평균입경(Median diameter)은 각각 61.54, 166.10, 97.10, 15.66 μm 의 측정값이 얻어졌다.

2-2. 실험장치 및 방법

분진-공기 혼합물이 상온 상압에서 점화원에 의해 착화될 수 있는 가장 작은 에너지를 최소착화에너지(MIE; Minimum Ignition Energy)라고 한다[8]. MIE의 측정을 위하여 Fig. 1에 나타난 MIKE-3(Modified Hartmann apparatus, Kühner, Swiss)의 시험장치를 사용하였다. MIE의 시험결과는 Table 2와 같이 분진이 점화되지 않는 가장 높은 에너지와 점화되는 가장 작은 에너지의 범위(No ignition < MIE < Ignition)로 표현한다[9,10]. 또한 MIE측정값을 보다 보수적인 정전기 착화 예방대책에 활용하기 위해서는 Table 2에서와 같이 정전기 착화 발생빈도를 고려한 통계적 MIE(Es)를 계산하여 적용할 수 있다. 구체적인 실험방법은 일정 크기의 농도를 갖는 분진을 1.2 L 체적의 원통형 튜브의 하부에 넣고 7 bar의 압축공기에 의해 시료 분진이 부유되도록 한 다음에 1~1000 mJ 범위의 전기에너지를 변화시키면서 화염전파를 확인하여 최소착화에너지를 조사하였다. 이와 같은 실험방법을 통하여 농도 변화에 따른 화염전파 여부를 관찰하고, 동일 농도에서 10회의 반복 실험을 통하여 1회 이상의 화염전파가 일어나는 경우에 착화로 판정하였다. 또한 부유 분진의 착화 특성을 조사하기 위하여 화염발생 과정을 초고속카메라(Optronis CR3000x2, Germany)를 사용하여 관찰하였다. 분진농도와 분사 조건이 정전기 발생 위험성에 미치는 영향에 대해서는 방폭형(Ex d IIC T6) 제품의 정전압측정기(Electrostatic Field Meter, ESFM-Exd-1000A)를 사용하여 정전압의 측정(-40,000~+40,000 V)을 통해 대전 레벨의 변화를 조사하였다. 구체적인 정전압의 측정 방법은 Table 3과 같은 조건에서 분진을 Fig. 1의 튜브 내에 부유시키고 튜브의 외부 표면에서 정전압측정기를 사용하여 측정된 정전압의 최대값을 해당 분진의 정전압으로 결정하였다.

Table 1. Particle distribution of samples

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	166.10
PE(LD)-2	23.51	376.9	159.7	152.2	97.10
PMMA	7.284	24.24	6.457	15.72	15.66

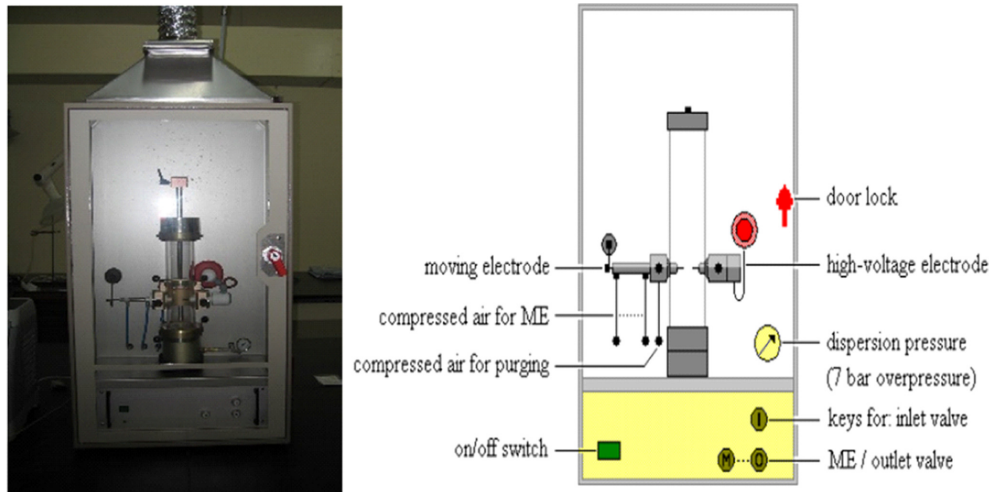


Fig. 1. Scheme and MIKE-3 apparatus for minimum ignition energy (MIE).

Table 2. MIE and statistic MIE(Es) of dust clouds

Items	Contents
MIE (E, Es)	$E = \int_0^{\tau} I(t) \cdot V(t) dt = \frac{C \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2}$
	$E_1 < MIE < E_2$
	$E_s = 10 \cdot \left\{ \frac{I[E_2] \cdot (\log E_2 - \log E_1)}{(NI + 1) \cdot (E_2 + 1)} \right\}$
Variables	E : Minimum ignition energy(MIE)
	E1 : Maximum ignition energy with no ignition
	E2 : Minimum ignition energy with ignition
	Es : Statistic minimum ignition energy
	I[E2] : Number of ignition in E2 energy
	(NI+1)·[E2] : Total number of MIE testing in E2 energy

Table 3. Measurement conditions of electrostatic discharge in dust clouds

Items	Contents
Measurement conditions	- Temperature : 21~22 °C
	- Humidity : 40~45%RH
	- Atmospheric pressure : 100.9 kPa
Conditions of dispersion	- Dispersion pressure : 7 barG
	- Dust concentration (mg/L) : 300, 900, 1500
	- Dispersion number under the same concentration : 1, 5, 10 times

3. 결과 및 고찰

3-1. 부유분진의 착화특성

공기 중의 부유 분진이 정전기 방전에 의해 착화되면 분진 입자의 화염 생성과 전파화염이 발생한다. 분진 입자의 착화특성을 상세히 조사하기 위하여 초고속카메라(Optronis CR 3000 x2, Germany)를 사용하여 1000 frames/s의 조건으로 착화과정을 관찰하였다. PE(HD)분진에 대해 스파크 방전에 의한 착화 시의 화염 형성의 시계열적인 화상 기록 결과를 Fig. 2에 제시하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 분진화염은 착화 후에 일정 크기의 지연시간(Delay time) 후에 발생하고 있으며, 방전이 시작되고($t=0$ ms) 화염핵(Flame kernel)이 생성하기까지 걸리는 시간은 약 8 ms($t=8$ ms)로 조사되

었다. 화염전파는 열분해속도와 열전달속도에 지배를 받으므로 [11], 분진이 착화하기 위해서는 폭발성혼합기의 형성이 필요하며 이를 위해서는 입자의 열분해가 먼저 이루어져야 하므로 지연시간 (8 ms)은 입자의 열분해가스의 생성과 확산에 소요되는 시간에 해당한다고 할 수 있다. 화염핵이 발생하는 공간적 위치를 시계열 변화 ($t=0\sim14$ ms)를 통해 조사한 결과, 불꽃 방전이 일어나는 전극간의 중앙부($t=0$ ms)가 아닌 착화 후의 8~14 ms의 시점에서 불꽃 방전이 일어난 주변부에서 화염핵이 나타나며, 착화원(불꽃 방전)이 발생하는 공간에서는 화염이 형성되지 않음을 알 수 있다. 착화원의 발생 공간에서 화염이 생성하지 않는 원인으로는 불꽃방전으로 인해 발생한 미세 충격파(Micro shockwave)가 열분해된 분진 입자를 모든 방향(All directions)으로 밀어 내면서 분진농도가 감소하기 때문으로 추정되며, 반면에 분진농도가 증가하면 불꽃방전의 미세 충격파에 의한 영향은 감소할 것으로 판단된다. 본 연구 결과로부터 분진 입자는 착화되면 열분해되면서 착화원의 미세 충격파의 영향으로 화염핵의 발생이 이동될 수 있으며 화염생성과 화염전파로 이어질 수 있음을 알 수 있었다.

3-2. 분진농도에 따른 착화에너지

부유 분진의 일부에 정전기와 같은 에너지를 가하면 분진 입자가 착화하여 분진폭발을 일으키는데, 이 때 착화에 필요한 가장 작은 에너지를 최소착화에너지(MIE)라고 하며 물질마다 고유 특성값을 가진다. 분진의 착화 위험성은 MIE의 크기와 에너지 공급속도에 영향을 받으므로[12], MIE는 분진폭발 특성값을 나타내는 중요한 파라메타로서 정전기 방전과 같은 작은 착화원에 의한 화재폭발 예방대책을 검토하는 경우에는 중요한 자료로 활용되고 있다. Fig. 3은 분진농도의 변화에 따른 착화에너지를 조사한 결과로서, 그래프의 세로축은 착화가 일어난 최소에너지를 나타내고 있다. 조사 대상 4종인 PE(HD), PE(LD)-1, PE(LD)-2, PMMA의 MIE는 Table 4와 같이 각각 <1 mJ, $100 < MIE < 300$ mJ, $30 < MIE < 100$ mJ, $3 < MIE < 10$ mJ이 얻어졌다. MIE장치(Fig. 1)는 1 mJ 이하의 착화에너지를 발생시킬 수가 없기 때문에, PE(HD)의 MIE는 “ <1 mJ”로 표현되고 있다. 또한 동일 농도의 분진 분산형태가 다르므로 시험 횟수에 따른 착화 확률을 고려한 통계적 MIE값(Es)을 Table 2의 추정식에 의해 계산하였으며 그 결과를 Table 4에 제시하였다. 착화 위

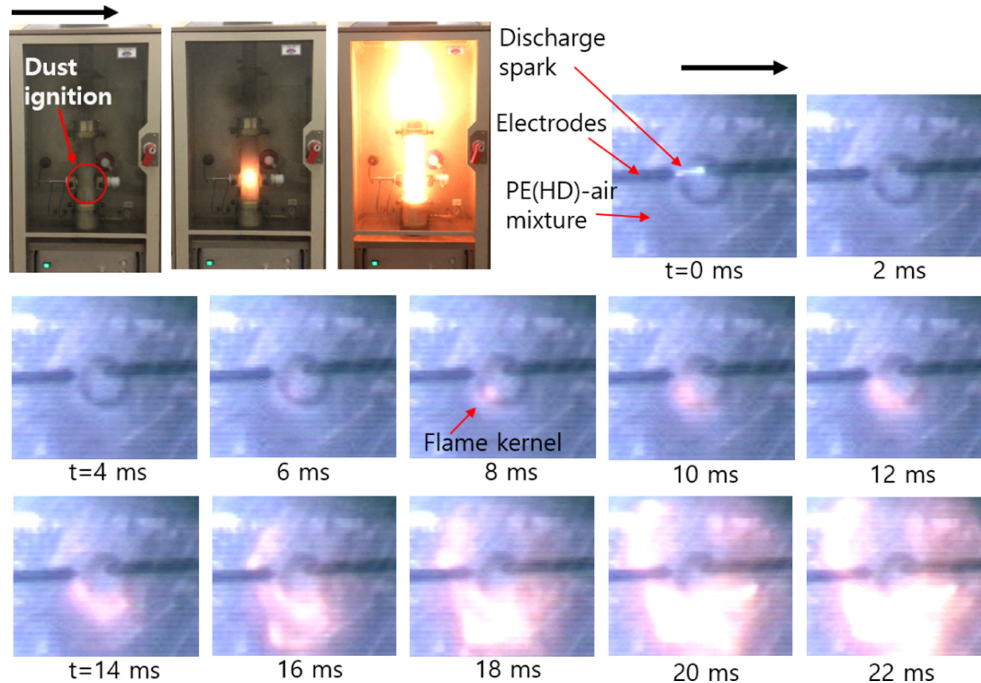


Fig. 2. Flame propagation and ignition of suspended particles in PE (HD)-air mixture by high-speed video camera (1000 frames/s).

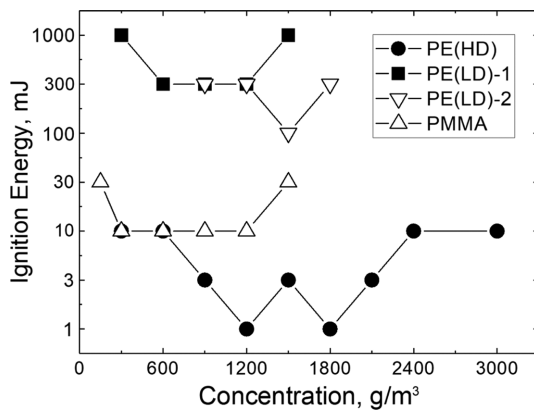


Fig. 3. Variations of ignition energy with concentration of dust samples.

Table 4. MIE measurement result of samples

Samples	Median (μm)	MIE (mJ)	Es (mJ)
PE(HD)	61.54	< 1	0.5
PE(LD)-1	166.10	100 < MIE < 300	150
PE(LD)-2	97.10	30 < MIE < 100	79
PMMA	15.66	3 < MIE < 10	4

험성은 PE (HD), PMMA, PE(LD)-1, PE(LD)-2의 순으로 높게 나타났다으며, 동일 분진[PE(LD)]에서는 상대적으로 입경이 작은 PE(LD)-2의 MIE가 작으며 착화 위험성이 보다 높았다.

3.3. 정전용량의 조사

정전용량(C)은 물질(분진) 종류, 입경, 면적, 거리, 물질의 비유전율 등과 같은 다양한 요인의 영향을 받기 때문에 직접 측정이 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 PE(HD)의 문헌값[2]과의 비교를 위하

$$Q = C \cdot V$$

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

E (mJ) : (MIE : Minimum ignition energy)
C (pF) : Capacitance
Q (Coulomb) : Electric charge
V (Volt) : Electrostatic voltage

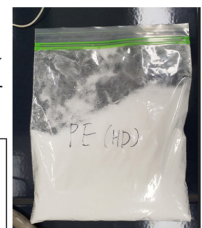


Fig. 4. Method for estimation of PE(HD) capacitance.

여, 전하량측정기(NK-1002A, Kasuga Denki, Japan) 및 정전압 측정기(ESFM-Exd-1000A)를 사용하여 전하량(Q)과 정전압(V)을 측정하고 Fig. 4의 관계식을 사용하여 정전용량(C)을 추정하였다. 조사 결과 전기량(Q) 및 정전압(V)은 각각 121~150 nC, 0.3~6.0 kV의 값이 얻어졌다. “ $C=Q/V$ ”의 계산식에 의한 PE(HD)의 정전용량(C)을 평가한 결과, 25.0~403.3 pF이 얻어졌다. PE(HD)의 정전용량(C)에 대한 측정값(25.0~403.3 pF)을 문헌값(300 pF)과 비교해 보면, 측정값은 분진 면적 및 퇴적 두께 등의 실험조건에 영향을 받으므로 일정 크기의 범위 내에서 변동하지만 문헌값에 근사한 결과를 얻을 수 있었다.

PE(HD)의 정전용량(C)에 있어서 측정값(25.0~403.3 pF)과 문헌값(300 pF)의 비교를 위해, 본 연구에서 측정한 MIE(E)를 사용하여 이하 (2)식을 사용하여 정전압(V_{ex})을 계산하였다.

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1)$$

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

Fig. 5와 같이 문헌값(300 pF)을 적용하여 정전압(V_{ex})을 계산하면 농도변화에 따라 2582~8165 [V]의 결과가 얻어졌으며, 정전압

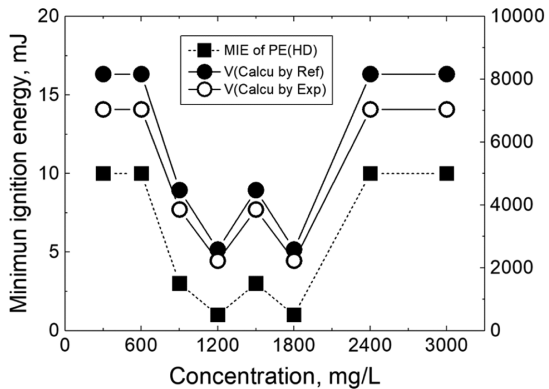


Fig. 5. Comparison of experimental and calculated volatage using estimated capacitance of PE (HD).

측정값의 최대값(403.3 pF)을 적용하면 2227~7042 [V]의 값이 얻어졌다. PE(HD)의 정전압 계산을 정전용량의 문헌값과 측정값을 적용하여 검토한 결과 Fig. 5와 같이 최소착화에너지가 나타나는 농도(1200~1800 mg/L)에서 거의 근사한 값을 가지므로 Q 및 V의 측정에 의한 조사 방법은 타당한 것으로 볼 수 있다. 그러나 정전용량은 많은 변수가 측정에 영향을 주므로 모든 분진에 대해 정전용량을 측정하는 것은 쉽지 않다. 따라서 정전용량의 조사보다는 정전압 측정을 통하여 착화에너지의 추정방법이 분체 취급 공정의 정전기 예방관리와 공정 활용성에 효율적일 것으로 판단된다. 또한 정전기의 착화에 의한 화재폭발사고의 주요 발생원인으로서 근로자의 작업중(67%), 공정운전 과정(33%) 등과 같이 작업자에 의해 발생한 정전기 사고 비율이 높다[1,2]. 이와 같이 실제 정전기 방전 사고는 인체 정전용량에 큰 영향을 받으므로, 본 연구에서는 공정 작업 중에 발생한 정전기 착화에 대하여 인체 조건의 정전용량(100~300 pF) 중에서 보수적 관점에서 최대 위험 조건인 300 pF를 정전용량(C)으로 사용하였다.

3-4. 분진농도 및 분산조건에 따른 정전압

정전압 측정을 통한 착화에너지의 추정을 검토하기 위해 먼저 분진농도 및 분진의 분산 조건에 따른 정전압 특성 변화를 조사하였다. Table 3과 같이 분산 특성이 동일한 조건(7 barG)에서 농도변화 및 분진 종류에 따른 정전압의 변화를 측정하였다. 분진의 분산 조건은 입자의 접촉, 분리 횟수 증가에 따른 정전압의 영향을 조사하기 위한 것으로서, 동일한 분산 압력(7 barG)조건에서 분진운의 부유 횟수(1, 5, 10회)를 변수로 정하여 평가하였다.

PE(HD), PE(LD)-1, PMMA에 대한 분진농도가 정전압에 미치는 영향을 Fig. 6에 제시하였다. 정전압은 발생 기준으로부터 시간에 따라 감소하기 때문에 Fig. 6의 정전압은 동일 농도에서 3회 반복하여 발생한 최대 측정값을 나타내고 있다. PE(HD), PE(LD)-1, PMMA 분진의 정전압은 농도 증가에 따라 발생량이 증가하는 경향을 보이며, 농도증가에 따른 정전압의 발생율은 PMMA, PE(LD)-1, PE(HD)의 순으로 크게 나타났다. 또한 정전압의 발생 크기는 농도의 영향만이 아니고 분진종류에 따른 특성값을 가지고 있다. 이러한 결과로부터 분체 수송 시에 분진의 이동속도가 정전기 발생 위험성을 높일 수 있음을 알 수 있다. 분체 이송배관 내의 공기 유속이 증가하면 분진입자의 속도 벡터량이 빨라지며 설비와 분진 입자의 접촉, 분리 현상의 발생빈도가 높아지므로 대전량의 증가로 이어질 수 있

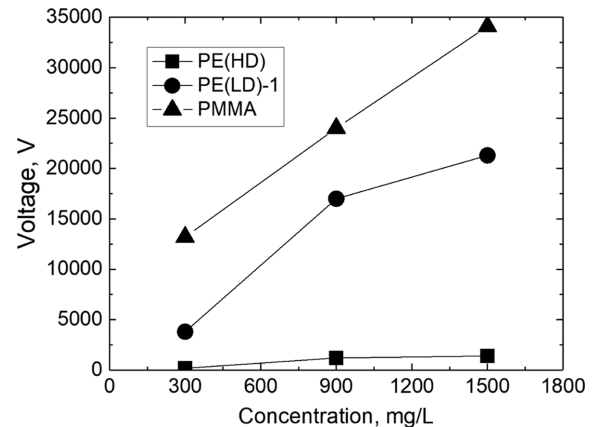


Fig. 6. Measurement results of voltage with dust concentration.

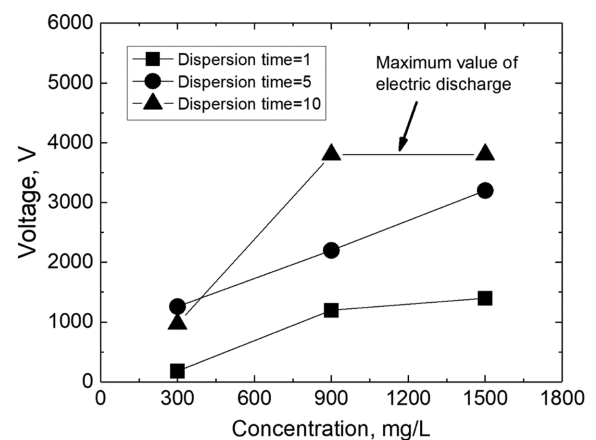


Fig. 7. Variation of voltage with concentration and dispersion time of PE (HD) dust.

다. 대전량의 증가는 정전압의 발생 가능성을 높아지게 하여 공기 중 절연과괴강도(30 kV/cm) 이상의 정전압이 발생하면 불꽃 방전 위험성이 나타나게 된다[2]. 공기 이송 배관에서 유속이 일정한 조건의 경우, 분진 농도가 증가하면 입자와 배관 내벽 간의 접촉-분리 현상의 발생 빈도가 많아지므로 대전량이 증가할 수 있으며 정전기 발생 위험성도 높아질 것으로 추정된다. PE(HD)의 분산 횟수 및 농도 변화에 따른 정전압의 측정 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 동일 분산 조건에서는 농도가 증가하면 정전압도 증가경향을 나타냈으며, 또한 동일 농도 조건에서는 분산 횟수가 증가할수록 정전압이 증가하였다. 이러한 경향은 농도 및 분산 횟수의 증가가 분진입자 간의 마찰과 충돌 대전의 빈도를 높여주며, 이러한 과정에서 전기적으로 중성인 입자들 간의 전하 분리 현상에 의한 정전기 발생이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 분진 분산에 따른 정전압은 분산 초기에 급격히 증가하지만 시간에 따라 서서히 감소한다. Fig. 7과 같이 분산 횟수가 높은 경우(Dispersion time=10)에는 분진 농도가 높아지면 정전압이 급격히 증가하여 일정 크기의 최대값으로 수렴하며, 분체 대전을 통한 정전기 방전이 최대 수준에 도달하게 된다.

3-5. 분진의 정전기 착화에너지

공정의 정전기 착화 위험성을 예방하기 위해서는 정전압 측정값을 사용하여 착화에너지를 계산하고 정전기 발생량이 최소착화에너지

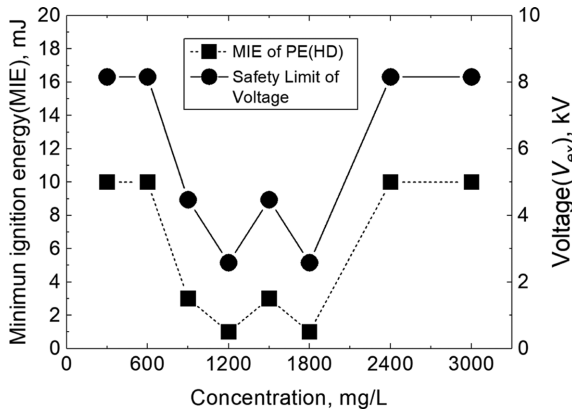


Fig. 8. Voltage corresponding to MIE with PE (HD) dust concentration.

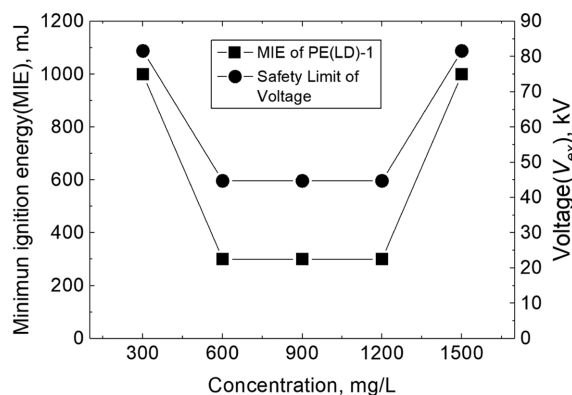


Fig. 9. Voltage corresponding to MIE with PE (LD)-1 dust concentration.

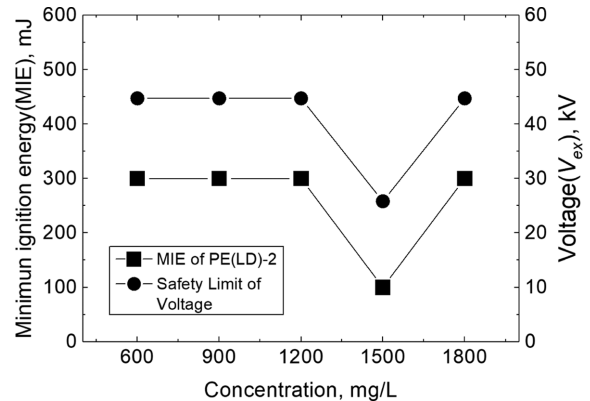


Fig. 10. Voltage corresponding to MIE with PE (LD)-2 dust concentration.

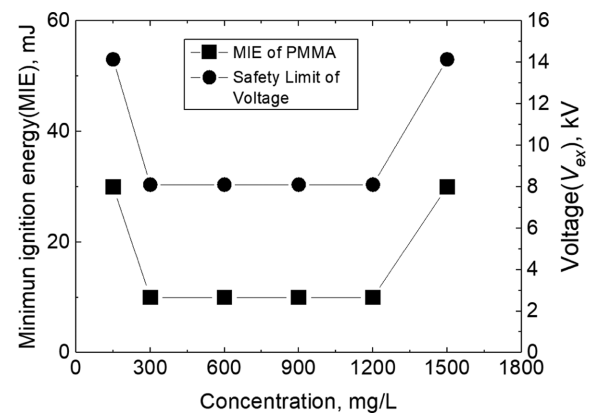


Fig. 11. Voltage corresponding to MIE with PMMA dust concentration.

(MIE)보다 작게 발생하도록 저감 대책이 필요하다. PE(HD), PE(LD)-1, PE(LD)-2, PMMA 분진에 있어서 MIE가 발생하기 위해 필요한 정전압(V_{ex})을 농도 변화에 따라 추정한 결과를 Fig. 8~Fig. 11에 나타냈다. V_{ex} 는 식 (2)에 의해 계산하였으며 C값은 인체 정전용량의 최대값(300 pF)을 적용하였다. 분진의 정전기 착화 에너지를 발생시키는 V_{ex} 는 해당 분진의 MIE값을 사용하여 정전압(V_{ex})을 계산하여 안전한계 정전압(Safety Limit of Voltage)을 결정하고, 공정에서 발생하는 정전압 수준이 안전한계 정전압 이하로 관리하도록 하는 실용적인 방법을 제시하였다. 평균입경 166.1 μm 의 PE(LD)-1의 경우, MIE는 100~300 mJ이며 MIE 기준에 따른 안전 정전압의 한계는 44.72 kV이므로, 공정 작업 중에 발생하는 정전압이 44.72 kV 보다 작게 발생하도록 관리한다면 정전기 착화에 의한 화재폭발 발생 가능성을 낮추어 사고 저감으로 이어질 수 있다. MIE 및 착화 확률을 고려한 통계적 MIE(Es)에 대한 정전압(V_{ex})을

Table 5에 나타냈다. PE(LD)와 같이 동일 분진에서는 평균입경이 작을수록 MIE가 감소하며 위험성이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 PE(HD) 및 PMMA의 결과에서 알 수 있듯이, 종류가 다른 분진의 경우에는 평균입경과 MIE의 상관 관계가 성립하지 않는 경우도 많이 있으므로 측정을 통한 정확한 MIE 값의 확보가 필요하다. Table 5에서와 같이 MIE(Es)는 착화원의 발생 빈도 증가에 따른 위험성을 고려하여 MIE값보다 보수적인 정전기 예방대책 관점에서 관리할 수도 있다. PE(LD)-1의 경우, 일반적인 정전기 대책을 위해 안전 정전압의 기준을 44.72 kV로 나타낼 수 있지만, 보다 높은 수준의 안전을 확보하기 위해서는 31.62 kV를 안전 정전압의 기준으로 하여 관리할 수도 있다. 또한 정전압을 통한 정전기 착화 예방대책을 고려하는 경우에는 동일 종류의 분진이라도 분체특성이 변하면 MIE도 달라지므로 사용 분진에 대한 MIE 자료를 우선적으로 확보할 필요가 있다.

Table 5. MIE and MIE(Es) of samples

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

5. 결 론

본 연구에서는 부유 분진의 착화 및 화염 발생 과정을 상세히 관찰하고 분진종류와 농도에 따른 착화에너지와 정전압에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 또한 정전압 측정에 의한 착화에너지의 추정 방법을 조사, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) PE(HD) 분진운의 착화 시에 발생하는 화염핵(Flame kernel)의 생성 시간은 약 8 ms로 조사되었으며, 분진 착화는 착화원이 발생하는 중심부가 아닌 착화원의 주변부에서 화염핵이 형성되며 화염은 착화원 발생 공간에서 관찰되지 않았다.

(2) PE(HD), PE(LD)-1, PE(LD)-2, PMMA 분진의 평균입경은 각각 61.54, 166.10, 97.10, 15.66 μm 로 조사되었으며, 이와 같은 분체특성에서 조사된 PE(HD), PE(LD)-1, PE(LD)-2, PMMA의 최소착화에너지(MIE)는, 각각 $< 1 \text{ mJ}$, $100 < \text{MIE} < 300 \text{ mJ}$, $30 < \text{MIE} < 100 \text{ mJ}$, $3 < \text{MIE} < 10 \text{ mJ}$ 의 결과를 얻었다.

(3) PE(HD), PE(LD), PMMA 분진의 정전압 발생은 부유 분산의 횡수가 증가할수록 또한 동일 분산횟수 조건의 경우에는 농도가 높을수록 증가하였다. 또한 분진농도 증가가 정전압 증가율에 미치는 영향을 조사한 결과, PMMA, PE(LD), PE (HD)의 순으로 크게 나타났다.

(4) 정전기 화재폭발 예방을 위한 안전 정전압의 조사를 위해 $V_{ex}=[(2 \cdot E)/C]^{0.5}$ 에 의한 산출 방법을 제안하였으며, 최소착화에너지(MIE)의 측정값을 활용하여 PE(HD), PE(LD)-1, PE(LD)-2, PMMA의 안전 정전압을 추정한 결과 각각 2.58, 44.72, 25.82, 8.16 kV가 얻어졌다.

Reference

- Database for Major industrial accidents, Korea Occupational Safety and Health Agency (1988~2020).
- Han, O.S., "Study on Reduction of Dust Fire and Explosion Accidents by Electrostatic Discharge," KOSHA, 2019-OSHRI-1641, 23-28 (2019).
- Jonassen, N. M., "Explosions and Static Electricity in Electrical Overstress," *Electrostatic Discharge Symposium Proceedings*, 331-337(1995).
- Juliusz, B. Gajewski, "Monitoring of Electrostatic Fire and Explosion Hazards at the Inlet to Electrostatic Precipitators," *J. Electrostatics*, **72**, 192-197(2014).
- Yamaguma, M. and Kodama, T., "Observation of Propagating Brush Discharge on Insulating Film with Grounded Antistatic Materials," *IEEE Trans. on Insdutry Applications*, **40**, 451-456 (2004).
- Ohsawa, A. and Ichikawa, N., "ESD Detection by Transient Earth Voltage," *Journal of Physics*, **418**, 1-6(2013).
- Olsen, W., Arntzen, B. J. and Eckhoff, R. K., "Electrostatic Dust Explosion Hazards – towards a $< 1 \text{ mJ}$ Synchronized-spark Generator for Determination of MIEs of Ignition Sensitive Transient Dust Clouds," *Journal of Electrostatics*, **74**, 66-72(2015).
- EN 13821, "Potentially Explosive Atmospheres - Explosion Prevention and Protection-Determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures," (2002).
- ASTM, "Standard Test Method for Minimum Ignition Energy of a Dust Cloud in Air," E 2019-03. West Conshohocken, PA: ASTM International (2007).
- IEC 61241-2-3, "Electrical Apparatus for use in the Presence of Combustible Dust – Part 2: Test Methods - Section 3: Method for Determining Minimum Ignition Energy of Dust/air Mixtures," (1994).
- Gan, B., Gao, W., Jianga, H., Li, Y., Zhang, Q. and Bi, M., "Flame Propagation Behaviors and Temperature Characteristics in Polyethylene Dust Explosions," *J. Powder Technology*, **328**, 345-357 (2018).
- Nifuku, M. and Katoh, H., "Incendiary Characteristics of Electrostatic Discharge for Dust and Gas Explosion," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **14**, 547-551(2001).