

## 정전기 방전시의 소나무목분의 최소착화에너지 측정에 관한 연구

### A Study of Measurement of Minimum Ignition Energy for Pine Tree Dust on Electrostatic Discharges

이 동 훈\* · 박 한 석\*\*

Dong-Hoon Lee · Han-Suk Park

(1998년 2월 19일 접수, 1998년 8월 21일 채택)

#### ABSTRACT

To establish measuring method for minimum ignition energy of explosive powders caused by electrostatic discharge, A measuring method(Hartman) using a very small quantity of pine tree testing powder was proposed, and the influence of discharge current limiting resistance connected in series into a capacitive discharge circuit on ignition energies of explosive powders was investigated. As a result the minimum ignition energy was 42.25mJ when discharge current limiting resistance 300 k $\Omega$ .

#### 1. 서 론

도료, 세제, 약품, 석탄 등의 분체를 다루는 생산공정에서는 분체의 접촉·마찰·분리 등에 의해 분체와 주위의 공간에 정전기가 발생한다<sup>1,2)</sup>. 발생한 정전기는 축적, 대지로 누설, 주위 공간으로 방전 등 여러 형태를 갖는다. 도전성이 작은 물체, 즉 절연체일 수록 정전기는 매우 큰 대전이 될 수 있고, 그 대전에너지도 큰 값을 갖게 된다. 이러한 정전기의 대전에너지는 가연

성 또는 인화성 분진을 착화, 폭발시키는 위험이 있다는 것도 널리 알려져 있는 사실이다. 또한, 분체를 취급하는 생산공정에서는 분체의 입도가 작기 때문에 분진 전하량이 발생하여 분진 폭발의 위험성이 있다.

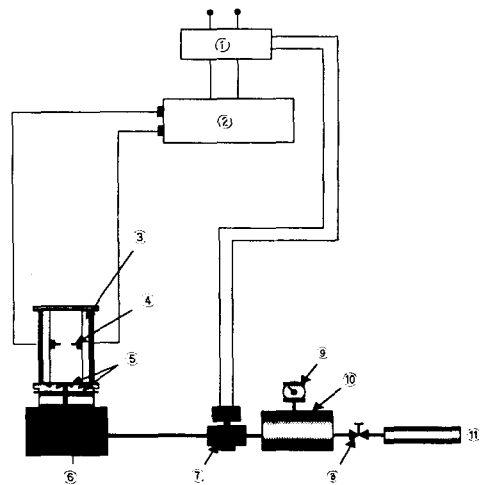
정전기에 의한 분진 폭발 사례를 조사하면 일본에서는 1967년 이후 15건<sup>3)</sup>, 미국에서는 1900년 이후 24건<sup>4)</sup>의 분진폭발이 보고되고 있고, 또 영국에서는 연간 약 20건의 정전기 화재 사례<sup>5)</sup>가 보고되고 있다.

\* 부경대학교 산업시스템·안전공학부

\*\* 부경대학교 전자정보전기공학부

생산공정에 있어서 점화원, 특히 정전기 방전에 기인한 분체류의 착화·폭발 재해를 방지하기 위해서는 분체류의 정전기 방전에 의한 착화위험성을 착화에너지를 구하여 정량적으로 해석할 필요가 있다. 현재 단일 성분의 분체류의 최소 착화에너지는 정전기 Handbook 또는 각종 물질 자료집에 일부 언급이 되어 있으나 대개는 알 수 없으며 특히 복합분체류의 최소착화에너지 및 착화 메카니즘에 대한 연구는 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 정전기 방전에 의한 분체의 착화강도 및 착화에너지 측정방법을 확립할 목적으로 가연성 분체인 소나무 목분을 시료로 하여 기지의 콘덴서에 직류 고전압(최대 20kV)을 인가시켜 정전에너지를 축적시킨 후 그 에너지를 침대침 전극 구조의 방전전극에 인가하여 기중방전을 일으켜 분진을 착화시키고 그때의 방전전압 및 방전전류로부터 컴퓨터를 이용하여 최소착화에너지를 측정하고, 또한 정전용량 방전회로에 직렬로 접속한 방전제한저항이 분체의 착화에너지에 미치는 영향을 실험적으로 연구하고자 한다.



- |   |                                    |
|---|------------------------------------|
| ① Timer   | ⑦ Solenoid valve                   |
| ② High transformer                              | ⑧ Supply pressure regulation valve |
| ③ Discharge electrode                           | ⑨ Pressure gauge                   |
| ④ Explosion case                                | ⑩ Air tank                         |
| ⑤ Sample platform & dispersion reflection plate | ⑪ Air compressor                   |
| ⑥ Air pipe                                      |                                    |

Fig. 1 Schematic diagram of dust explosion equipment

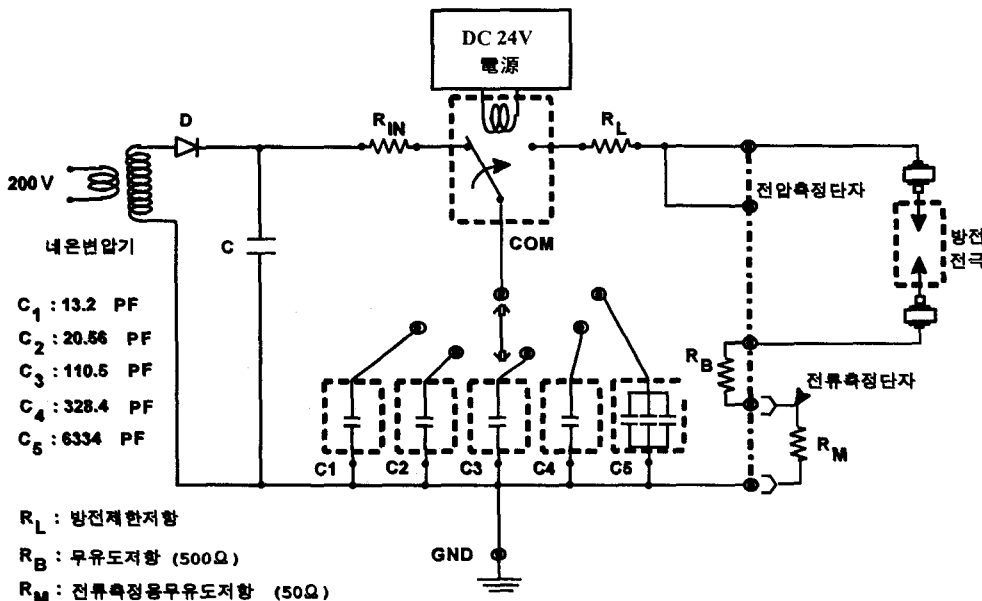


Fig. 2 Circuit diagram of minimum ignition energy measurement

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1과 Fig. 2는 본 실험에서 사용한 실험장치로 각각 취상식(Hartman式) 분진폭발장치와 최소착화에너지 측정장치의 회로도를 나타낸 것이다.

최소착화에너지 측정장치는 정전에너지 저장용으로 사용된 7 종류의 콘덴서 (13.2 pF, 20.56 pF, 110.5 pF, 328.4 pF, 6334 pF)와 가스봉입형 고전압절환스위치(Kilovac社 K61C37C), 방전전류제한저항( $R_L$ ), 침대침 방전 전극(재질: 텅스텐), 데이터 분석장치(GPIB) 및 직류고전압 발생장치로 구성되어 있다. 접지전극에는 무유도저항(500Ω) 및 전류검출용의 무유도저항(50Ω)을 직렬로 연결하였다. 무유도저항(500Ω)은 임피던스를 저감하여 방전시의 고주파 진동을 억제하기 위하여 삽입하였다. 폭발통은 강화유리(두께 5mm, 내경 70mm, 높이 300mm)로 되어 있으며, 방전통의 상부에는 폭발방산장치(종이: 직경 93mm, 무게 0.5540g)가 부착되어 있어 폭발시에는 파열되도록 되어 있다. 방전전극은 침대침 전극의 구조로 되어 있으며, 전극간격은 Digital Calipers에 연결되어 자유롭게 조절 가능하도록 되어 있다. Fig. 3는 착화시의 절차(Time Chart)를 나타내고 있다.

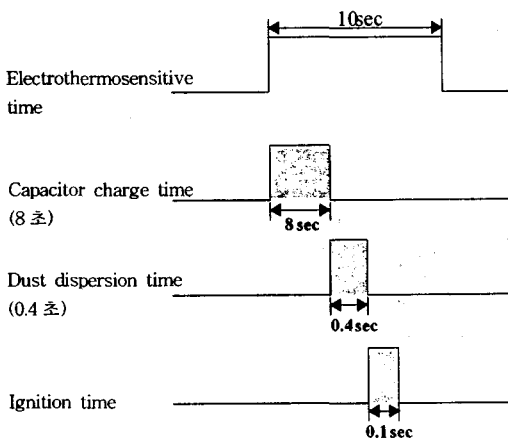


Fig. 3 Ignition time chart

### 2.2 실험방법

방전전극과 접지전극간의 방전전압은 고전압 프로브(Tektronix社: P6015A)에 의하여, 방전전류는 위에서 언급한 전류검출용 무유도저항( $R_M$ , 50Ω)의 전압강하법에 의하여 각각 검출하였다. 또한 방전전류 및 방전전압의 파형을 디지털 오실로스코프(Hewlett Packard社: HP380A)에 파형을 기억시키고, 이때의 데이터는 GPIB를 통하여 컴퓨터에 저장하였다. 오실로스코프의 전류 측정채널의 입력 Impedance는 10MΩ이며, 전류검출용 무유도저항과 병렬로 연결되기 때문에 전체적인 전류측정회로의 합성저항은 거의 50Ω이다.

착화실험은 Fig. 3에 나타난 동작 절차에 따라 먼저 가연성분진(소나무 분진-비열: 0.415 Kcal/Kg°C, 열전도율: 0.297 Kcal/m·hr·°C, Mech: 180~360)을 방전통 내로 분출시키고 전압 절환 스위치를 작동시켜서 고전압으로 충전된 콘덴서를 방전회로측에 접속하여 순간적으로 기중방전을 일으켜 착화시키고, 이때의 착화의 유무를 육안과 방전전류의 최대값으로 부터 판정하였다. 이때 방전전극 사이에서 소비된 방전에너지, 즉 최소착화에너지는 방전전극과 접지전극간의 방전전압과 방전전류의 곱(積), 즉 식(1)을 GPIB에 접속된 컴퓨터에 의해 순시적분을 하므로써 산출하였다.

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T i v dt [J] \dots \dots \dots (1)$$

여기서, T : 방전지속시간  
 i : 방전전류  
 v : 방전전압

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 콘덴서의 충전전압이 13kV, 방전제한저항  $R_L$ 이 3MΩ일때의 방전전압 및 방전전류 파형의 예를 나타낸 것이다. Fig. 4에 의하면 방전개시와 동시에 방전전압이 13kV에서 약 400V까지 저하하고, 동시에 방전전류는 최대값(15A)을 나타내고 있다.

이러한 방전전류 및 방전전압의 파형을 GPIB를 이용하여 디지털오실로스코프에서 컴퓨터로 데이터를 병렬 전송하여 방전에너지를 계산하면

약 53mJ로 된다. 이것은 방전 전의 콘덴서에 축적된 에너지(149mJ)의 약 35%에 불과하다. 이는 방전개시 때의 방전전압과 방전전류의 비로부터 방전전극 Air Gap간의 저항을 구한 867Ω과 방전전류 제한저항 ( $R_L$  3MΩ)이 직렬로 연결된, 즉 저항비( $867\Omega/3M\Omega=35\%$ )만큼 방전 에너지가 적게 작용하였기 때문이다.

이로 미루어 볼 때 종래의 콘덴서에 축적된 에너지로부터 방전에너지, 이용하여 구할 때 문제점으로 지적되어온 선로, 콘덴서간 및 전극간의 부유정전용량 때문에 콘덴서에 축적된 전 에너지가 모두 방전에너지로 작용하지 않으므로 정확한 방전에너지를 구할 수 없었으나, 본 실험에 적용된 방법으로 방전 전극에서만 소비된 기중방전시 실제로 방전에 기여한 에너지를 구할 수 있으므로 보다 정확한 방전에너지를 구할 수 있었다.

방전제한저항  $R_L$ 의 변화에 따른 착화에너지와의 관계를 구한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 제한저항이 100kΩ 및 300kΩ의 경우일 때 방전에너지가 최소값(42~59mJ)이 나타남을 알 수 있다. 이로 미루어 볼 때 최소착화에너지는 방전회로 삽입된 방전제한 저항에 크게 의존함을 알 수 있다. 최소착화에너지가 방전제한 저항에 의해 영향을 받고 있음을 증명하기 위하여 방전전극 간극의 변화에 따른 최소착화에너지를 실험할 필요가 있다.

Fig. 6은 침대침 전극의 Air Gap 및 시료의 Mesh 변화의 따른 최소착화에너지와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 간극이 적을수록 최소착화에너지가 증가함을 알 수 있다. 이는 간극이 적을수록 Paschen의 법칙에 따라 간극간의 절연파괴 전계강도가 커서 방전 에너지가 크게 되기 때문이다. 그러나 간극이 5 mm일 때에는 최소착화에너지가 극소점을 갖고 있음을 알 수 있다. 이 또한 Paschen의 법칙과 일치함을 알 수 있다. 또한 시료의 Mesh가 증가할수록 최소착화에너지는 저하함을 알 수 있다.

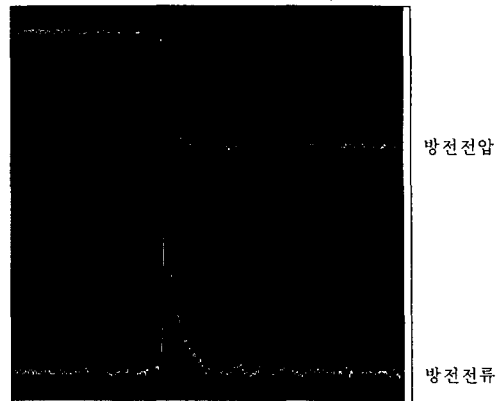
Fig. 7은 방전제한저항  $R_L$ 의 변화에 따른 방전효율(즉 방전전극에서 소비된 전력과 콘덴서에 축적된 에너지와의 비)의 변화를 나타내고

있다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 방전제한저항이 30kΩ에서 300kΩ까지는 방전효율이 40%에서 20%정도까지 저하하나, 300kΩ이상에서는 오히려 방전효율이 약 40% 정도까지 회복됨을 알 수 있다.

이로 미루어 볼 때 방전전극에 직렬로 연결된 저항값에는 방전효율이 최저값을 갖는 임계 저항이 존재함을 알 수 있다. 이는 방전전극에 직렬로 연결된 저항이 적을수록 그만큼 방전시의 에너지 전달이 감소하고, 저항이 커지면 상대적으로 저항성분에 병렬로 부유정전용량에 축적된 에너지가 부가하여 방전에 기여하였기 때문으로 생각된다.

Fig. 8은 방전제한저항  $R_L$ 의 변화에 따른 방전전극간의 기중 방전 지연 시간을 나타내고 있다. Fig. 8에 의하면 방전제한저항이 증가할수록 방전지속시간이 서서히 감소함을 알 수 있다. 이는 방전제한저항이 적은 경우에는 간헐적인 방전이 지속됨으로 상대적으로 방전지속시간을 증가시키기 때문이다. 즉 위의 결과를 종합하면 Arc와 Glow방전의 경계에서 방전이 일어나면 착화하기 쉽다는 것을 보여준다.

그러나 방전제한저항의 변화에 따른 착화의 메커니즘에 대해서 추후 보다 구체적인 연구가 필요하며 분체의 착화현상을 광학적으로 관찰하기 위한 장치가 첨가되어야 할 것으로 사료된다.



시간 : 50 ns/div., 방전전압 : 5 kV/div., 방전전류 : 4 A/div.  
Fig. 4 Discharge voltage and current waveform  
(discharge current limitation resistance : 3 MΩ)

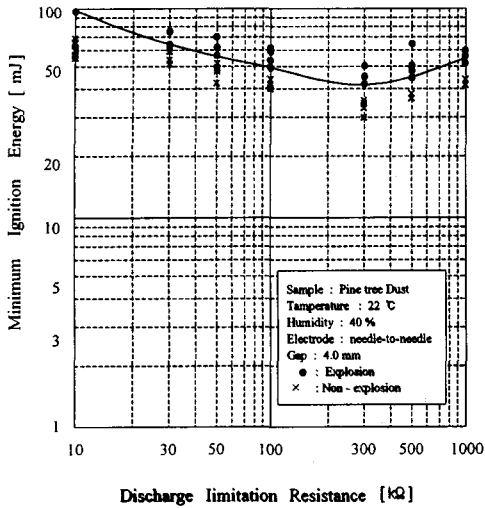


Fig. 5 Minimum ignition energy characteristics as a function of discharge current limitation resistance

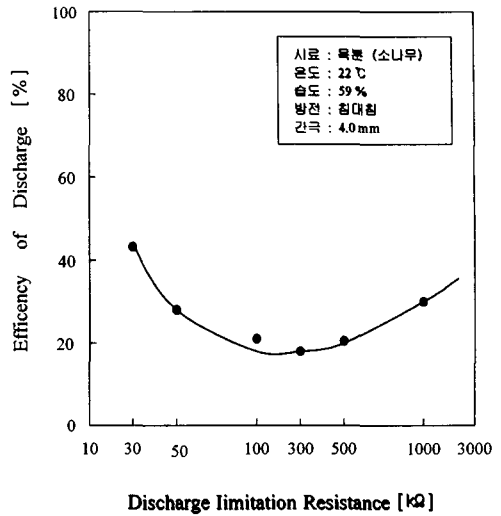


Fig. 7 Discharge efficiency characteristics as a function of discharge current limitation resistance

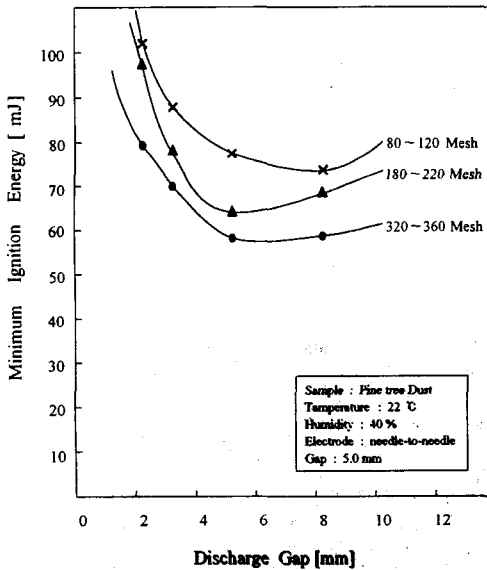


Fig. 6 Minimum ignition energy as functions of discharge gap and dust mesh respectively

### 5. 결론

가연성 분체인 목분(소나무)을 이용하여 정전기 방전에 의한 최소착화에너지 및 방전전류 제한저항, 간극의 변화에 따른 착화감도를 실험한

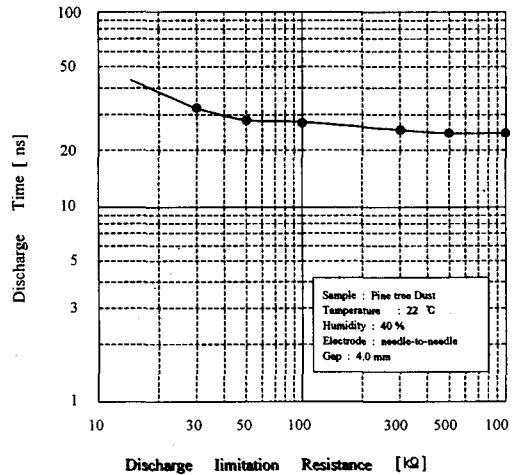


Fig. 8 Discharge duration time characteristics as a function of discharge current limitation resistance

결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시료의 착화에너지는 방전회로에 직렬로 삽입한 방전전류 제한저항에 의존하였으며, 300 kΩ의 경우 착화에너지는 42.25 mJ로 최소값을 나타내었다.
- 2) 방전전류 제한저항의 증가에 따라 방전지속 시간은 서서히 감소하였으나 방전효율은 방

전제한저항이 300 k $\Omega$ 일 때 최소값을 나타내었다.

- 3) 방전회로에 직렬로 삽입한 방전제한저항은 최소착화에너지가 가장 적게 나타나는 최적값을 갖고 있음을 알 수 있었다.
- 4) 침대침 전극 간격의 변화에 따른 최소착화에너지는 Paschen의 법칙과 거의 일치함을 알 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- 1) R.J. Loveland, "Electrostatic Inition Hazards in Industry", Journal of Electrostatics, Vol. 11, pp. 3~15, 1981.
  - 2) H.F. Eden, Electrostatics and Its Applications, John Wiley & Sons, New York, p. 425, 1973.
  - 3) Yasuki TABATA, Tsutomu KODAMA, "全國工場事業場における靜電氣の態調査", 産業安全研究所技術資料, RIIS-TN-70-3, 1970.
  - 4) H. Krupp, Physical models of static electrification of solid, The Institute of Physics, London, p. 1-30, 1971.
  - 5) H. Haase, "Electrostatic Hazards, Verlag Chemie, Weinheim, New York, 1977.
-