

정전기 방전시의 분체류의  
최소착화에너지 측정에 관한 연구  
A Study of Minimum Ignition Energy  
Measurement of Explosive Powders Caused  
by Electrostatic Discharges

이동훈\*, 목연수\*, 최재욱\*, 신중현\*\*, 류상민\*\*, 조일건\*\*, 정준채\*\*\*,

\*:부경대학교 안전공학과 교수 \*\* : 부경대학교 안전공학과 대학원 \*\*\* : 대한산업안전협회울산지회

**Abstract :**

To establish testing method for ignition energy of explosive powders caused by electrostatic discharge, one testing method using a very small quantity of tested powders ( Frima ) was proposed, and the influence of discharge - limiting resistance connected in series into a capacitive discharge circuit on ignition energies of explosive powders was investigated using, as tested powders. As a result the minimum ignition energy was 9 mJ when discharge-limiting resistance was 300 k $\Omega$ . The reason for the dependence of ignition energy on discharge-limiting resistance was thought to the difference in the type of electrostatic discharge, such as arc or glow discharge, from the observation of discharging wave forms.

## 1. 서론

생산공정에 있어서 점화원, 특히 정전기 방전에 기인한 분진류의 착화·폭발 재해를 방지하기 위해서는 분진류의 정전기 방전에 의한 착화위험성을 착화에너지를 구하여서 정량적으로 해석할 필요가 있다. 현재 단일 성분의 분진류의 최소착화에너지는 정전기 handbook 또는 각종 물질자료집에 일부 언급이 되어 있으나, 대개는 알 수 없으며 특히 복합분체류의 최소착화에너지 및 착화 메카니즘에 대한 연구는 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 이를 위해서 본 연구에서는 정전기 방전에 의한 분진의 착화감도 및 착화에너지 측정 방법을 확립할 목적으로 가연성분체인 (프리마)를 시료로 하여 기지의 콘덴서(capacitor)에 직류고전압을(최대 15 kV)를 인가하여 정전에너지를 축적하고, 그 에너지를 침대침전극 구조의 방전전극에 가하여 기증방전을 일으켜 분진을 착화시키고, 그때의 방전전압및 방전전류로부터 컴퓨터를 이용하여 최소착화에너지를 측정하고, 또한 정전용량(Capacitance) 방전회로에 직렬로 삽입한 방전제한저항이 분진의 착화에너지에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

그림 1은 최소착화에너지 측정장치의 개략적인 회로도를 표시하였다. 측정장치는 정전에너지 저장용으로 사용된 7 종류의 콘덴서 (10PF, 30PF, 50PF, 100PF, 300PF, 1000PF, 2000PF)와 가스봉입형 고전압절환스위치(Kilovac 社 K61C37C), 방전제한저항( $R_x$ ), 침대침 방전전극(재질: 텅스텐)및 데이터 분석장치(GPIB)및 직류고전압 발생장치로 구성되어 있다. 접지전극에는 무유도저항( $500\Omega$ ) 및 전류검출용의 무유도저항( $50\Omega$ )을 직렬로 연결하였다. 무유도저항( $500\Omega$ )은 임피던스를 저감하여 방전시의 고주파 진동을 억제하기 위하여 삽입하였다. 방전통은 강화유리( 두께 5 mm, 내경 70 mm, 높이 300 mm)로 되어 있으며, 방전통의 상부에는 폭발방산장치(중이 직경 93 mm, 무게 0.5540 g)가 부착되어져 있어 폭발시에는 파열하도록 되어 있다. 방전전

극은 침대침전극의 구조로 되어 있으며, 전극간격은 Digital Calipus 에 연결되어 자유롭게 조절 가능하도록 되어 있다. 그림 2는 착화시의 절차 time chart 를 나타내고 있다.

표 1. 시료의 물리적특성

시료명	연소열 (cal/g)	수분 (%)	입도 (Mash)
Frima	8960	3.93	150

방전전극과 접지전극간의 방전시의 방전전압은 고전압 probe Tektronix.社 P6015A)에 의하여, 방전전류는 위에서 언급한 전류검출용 무유도저항(Rm, 50 Ω)의 전압강하법에 의하여 각각 검출하였다. 또한 방전전류 및 방전전압의 파형을 디지털오실로스코프(Digital oscilloscope, HP380A)에 파형을 기억시키고, 이때의 data 는 GPIB 를 통하여 컴퓨터에 저장하였다. 오실로스코프의 전류측정 Channel 의 입력 Impedance 는 10 MΩ 으로써 전류검출용 무유도저항, Rm 50Ω 과 병렬로 연결되므로써 전체적인 전류측정회로의 합성저항은 거의 50 Ω 이다. 착화실험은 그림 2에 나타난 동작절차에 따라 고전압 절환 스위치를 작동시켜서 고전압으로 충전한 콘덴서를 방전회로측에 접속하여 순간적으로 기중방전을 일으킴과 동시에 가연성분진을 방전통내로 분출시켜 착화시키고, 이때의 착화의 유무를 육안과 방전전류의 최대값으로 부터 판정하였다. 이때 방전전극 간격간에서 소비된 방전에너지, 즉 최소착화에너지는 방전전극과 접지전극간의 방전전압과 방전전류의 곱(積), 즉 식(1)에 나타낸 바와 같이 컴퓨터와 GPIB 에 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

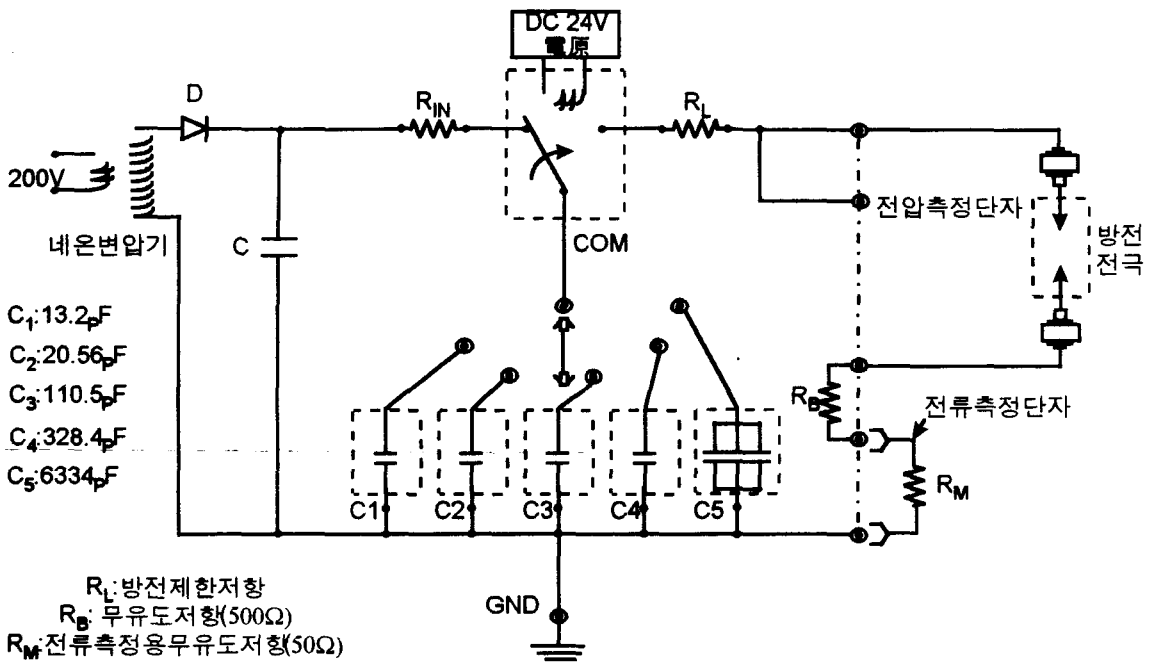


그림 1 최소 착화 에너지 측정 회로도

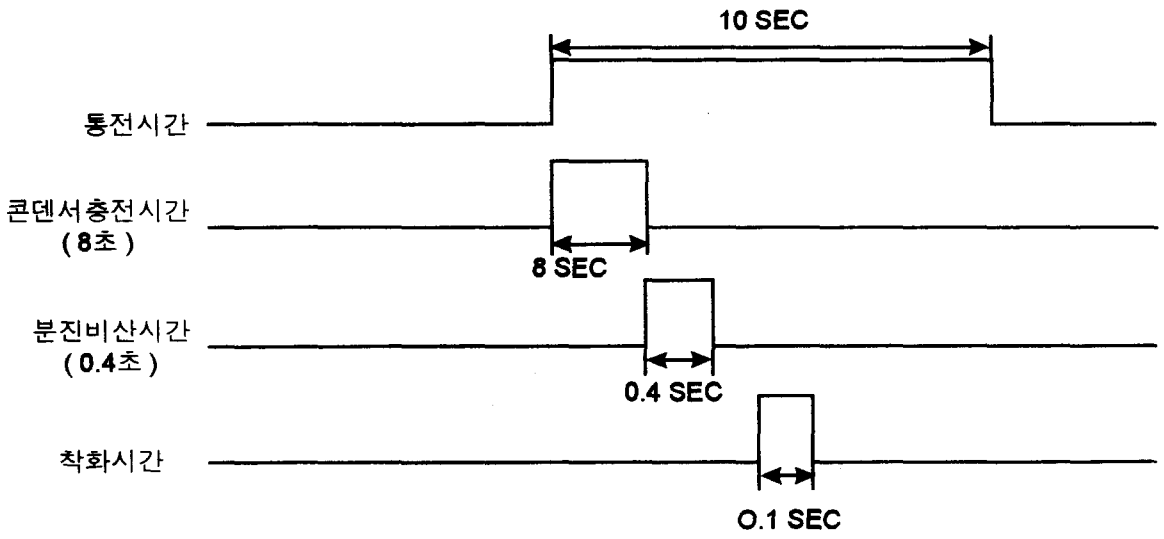
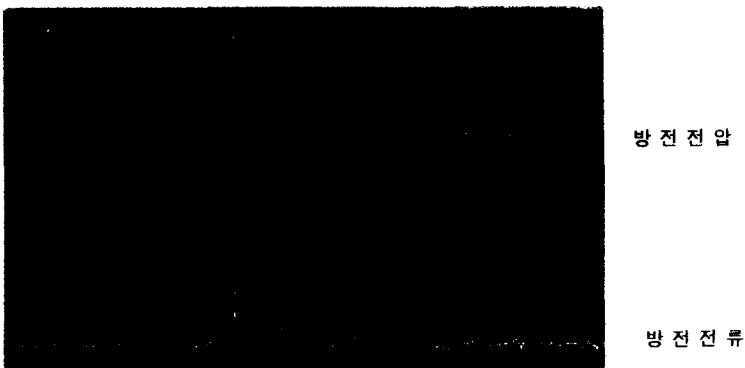


그림 2 착화 Sequence

### 3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 콘덴서의 충전전압이 9.5KV, 방전제한저항, RL이 3MΩ일때의 방전전압 및 방전전류 파형의 예를 나타낸 것이다. 그림 3에 의하면 방전개시와 동시에 방전전압이 10KV에서 약 400V까지 저하하고, 동시에 방전전류는 최대값(6A)를 나타내고 있다. 이러한 방전전류 및 방전전압의 파형을 GPIB를 이용하여 디지털오실로스코프에서 컴퓨터로 데이터를 병렬 전송하여 방전에너지를 계산하면 약 19.13mJ로 된다. 이것은 방전 전의 콘덴서에 축적된 에너지(245mJ)의 약 8%에 불과하다. 이는 방전개시 때의 방전전압과 방전전류의 비로부터 방전전극 Gap(공극)간의 저항을 구한 240kΩ과 방전제한저항, RL 3MΩ이 직렬로 연결된 회로로 생각할 수 있어서, 즉 저항비 ( $240\text{ K}\Omega/3\text{ M}\Omega = 8\%$ )만큼 방전에너지로써 작용하였기 때문으로 생각된다. 이로 미루어 볼 때 종래의 콘덴서에 축적된 에너지로부터 방전에너지, 즉  $W = 1/2 CV^2$ 을 이용하여 구할 때 문제점으로 지적되어온 선로, 콘덴서간 및 전극간의 부유용량 때문에 콘덴서에 축적된 전 에너지가 모두 방전에 에너지로 작용하지 않으므로 정확한 방전에너지를 구할 수 없었으나, 본 실험에 적용된 방법으로 방전 전극에서만 소비된 기중방전시의 방전전력으로부터 실제로 방전에 기여한 에너지를 구할수 있으므로 보다 정확한 방전에너지를 구할 수 있었다.



시간: 50ns/div., 방전전압: 5KV/div, 방전전류: 4A/div.

그림 3. 방전전압 및 방전전류 파형 (방전제한저항 3MΩ)

방전제한저항,  $R_L$ 의 변화에 따른 착화에너지와의 관계를 구한 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 제한저항이  $100k\Omega$  및  $300k\Omega$ 의 경우일 때 방전에너지가 최소값 ( $9 \sim 10mJ$ )이 나타남을 알 수 있다. 이로 미루어 볼 때 최소착화에너지는 방전회로 삽입된 방전제한저항에 크게 의존함을 알 수 있다. 최소착화에너지가 방전제한저항에 의해 영향을 받고 있음을 증명하기 위하여 방전파형에 관한 검토를 하였다.

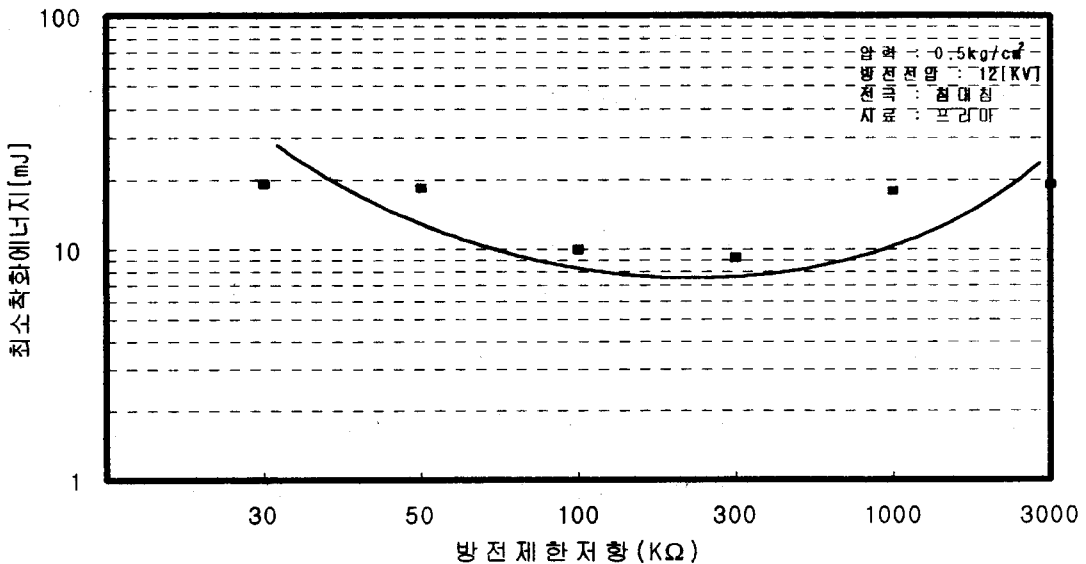


그림 4. 방전제한저항의 변화에 따른 최소착화에너지특성

그림 5는 방전제한저항,  $R_L$ 의 변화에 따른 방전효율(즉 방전전극에서 소비된 전력과 콘덴서에 축적된 에너지와의 비)의 변화를 나타내고 있다. 그림 5에서 알 수 있듯이 방전제한저항이 증가할수록 방전효율이 35% 정도에서 거의 9% 정도까지 저하함을 알 수 있다. 이는 방전전극에 직렬로 연결된 저항값이 클수록 그만큼 방전시의 에너지전달이 감소되기 때문으로 생각한다.

압력:  $0.5\text{kg/cm}^2$   
 방전전압: 12 (kv)  
 전극: 침대침  
 시료: 프리마

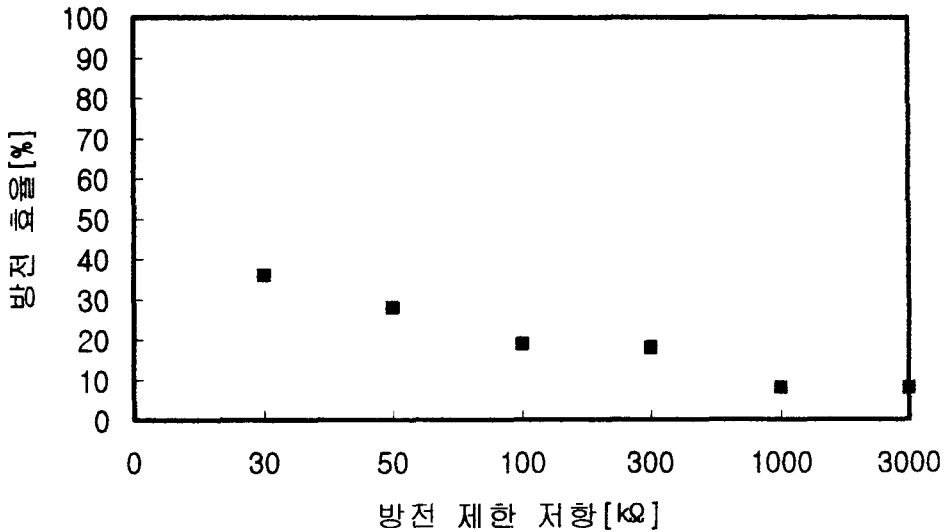


그림 5. 방전제한저항의 변화에 따른 방전효율특성

그림 6은 방전제한저항,  $R_L$ 의 변화에 따른 방전전극간의 기중방전지연시간을 나타내고 있다. 그림 6에 의하면 방전제한저항이 증가할수록 방전지속시간이 감소함을 알 수 있다. 이는 방전제한저항이 적은 경우에는 간헐적인 방전이 지속됨으로 상대적으로 전체적으로는 방전지속이 증가하기 때문이다. 즉 위의 결과를 종합하면 Arc와 glow 방전의 경계에서 방전이 일어나면 착화하기 쉽다는 것을 보여준다.

그러나 방전제한저항의 변화에 따른 착화의 mechanism에 대해서 추후보다 구체적인 필요하며 분체의 착화현상을 광학적으로 관찰하기 위한 장치가 첨가되어야 할 것으로 사료된다.

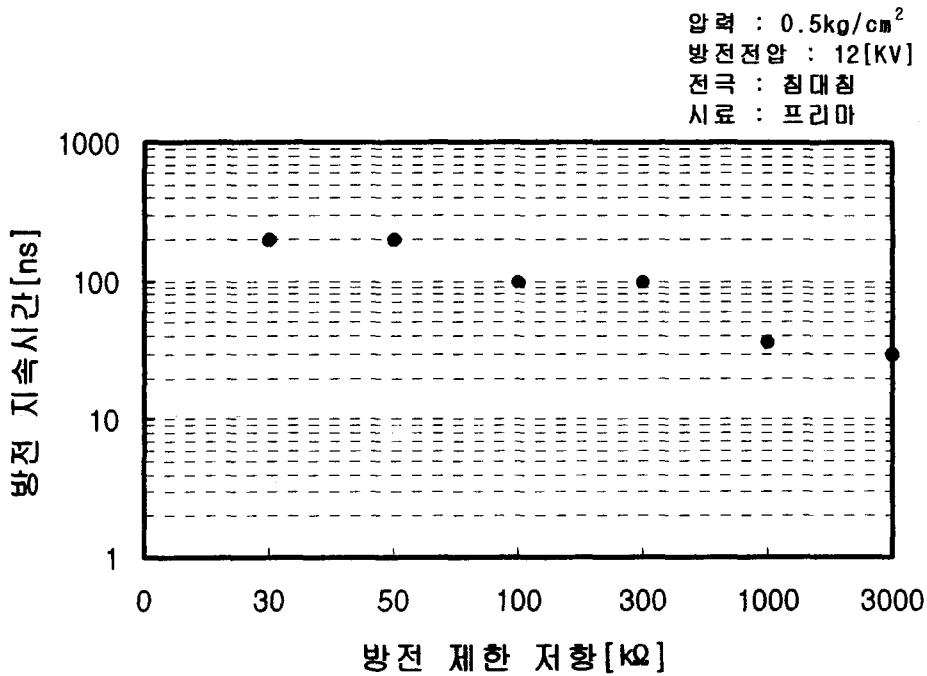


그림 6. 방전제한저항의 변화에 따른 방전지속시간특성

#### 4. 결론

가연성 분체인 프리마를 이용하여 정전기 방전에 의한 최소착화에너지 및 방전제한저항의 변화에 따른 착화감도를 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시료의 착화에너지는 방전회로에 직렬로 삽입한 방전제한저항에 의존하였으며, 300 kΩ의 경우 착화에너지는 9mJ로 나타났다.
- 2) 방전제한저항의 증가에 따라 방전지속시간은 급격히 감소하였으나, 방전효율은 서서히 감소함을 알 수 있었다.
- 3) 방전회로에 직렬로 삽입한 방전제한저항은 최소착화에너지가 가장 적게 나타나는 최적값을 갖고 있음을 알 수 있었다.



## 참고문헌

1. Hajime TOMITA, yasuyuki TABATA and Tsutomu KODAMA, “粉末火薬類の  
静電気放電による着火感度に関する検討”, 日 静電気學會講演論文集,  
1993
2. えのもとへいい, しはまわたる, “容量放電のよる炭じん雲の着火現像に關す  
る一考察”, 安全工學, vol 29, NO.3, 1990 えのもとへいいしはまわたる