

분진운의 최소점화에너지에 대한 정전기 방전회로의 매개변수 영향

문균태[†] · 정재희 · 미즈키 야마구마* · 최광석*

서울과학기술대학교 에너지환경대학원 · *일본노동안전위생종합연구소

(2010. 7. 12. 접수 / 2010. 10. 6. 채택)

Influence of Electrostatic Discharge Circuit Parameters on the Minimum Ignition Energy of Suspended Dust Clouds

Kyoontae Moon[†] · Jaehee Chung · Mizuki Yamaguma* · Kwangseok Choi*

The Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University Science and Technology

*Japan National Institute of Occupational Safety and Health

(Received July 12, 2010 / Accepted October 6, 2010)

Abstract : The ignitability(minimum ignition energy, *MIE*) of a suspended dust clouds is very important aspect of technical safety indices. This paper reported the experimental results dealing with the influence of discharge circuit on the *MIE* of a suspended dust clouds. The movement of a suspended dust clouds was also observed with the high speed camera. The Hartmann vertical-tube apparatus(MIKE-3) described in the international standard of IEC and Polypropylene (PP, 50% volume-average, D50: 76 μ m) resin powders were used in this experiment. The following results were obtained: (1) the *MIE* of a suspended PP powder depended markedly on the discharge circuit; in other words, when a resistor was connected in series with the discharge sparking circuit(RC), the lowest value(31mJ) of *MIE* was obtained for a suspended PP powder comparison with the other circuits(C circuit; 370mJ or LC circuit; 71mJ). (2) the discharge duration time is more important than other factors with regard to *MIE* of a suspended PP powder.

Key Words : electrostatic discharge, discharge circuit, Minimum Ignition Energy, discharge duration time

1. 서론

석탄, 약품, 세제, 도료, 사료 등의 분체는 각종 산업에서 원료나 제품 및 연료로 매우 다양하게 취급되고 있어 각종 공정 중에서 분체폭발의 위험성이 잠재해있으며, 실제로 이러한 분체의 취급량이나 분체 사용 공정이 증대됨에 따라 분진폭발의 빈도가 증가하고 있다¹⁾.

따라서 분진폭발의 재해를 미연에 방지하기 위해서는 분진을 점화시키는데 필요한 최소한의 에너지(Minimum Ignition Energy; *MIE*)를 정확하게 파악하여 위험도를 관리하여야 한다. 이러한 가연성 분진의 최소점화에너지를 측정하는 방법 중 시료 분진을 수직원통용기 속에 넣고, 압축공기를 불어서 만든 분진운을 전기불꽃로 점화시켜 측정하는 하트만(Hartman)방식이 국제 표준화되어 널리 사용되어지고 있다²⁾. 또한 국제 표준³⁾에 따르면, 분진

운을 형성한 시료를 점화시킬 수 있는 방전회로는 인덕턴스가 있는 회로, 인덕턴스가 없는 회로로 구성되어 있으며, 일본 표준⁴⁾에서는 국제표준과 같은 회로의 구성과 저항 100k Ω 의 회로도 같이 제시하고 있다.

위의 표준에서도 나타난 방전회로의 매개변수는 가연성물질의 점화성에 매우 큰 영향을 준다는 사실에 대해 田中(1970)는 가연성 가스의 점화성에 방전회로가 미치는 영향, Choi(2003)는 자유낙하 분진에 있어서 방전전극의 형상, 방전회로의 영향 등 일부 연구결과가 보고되어졌다^{5,6)}. 하지만 이러한 이유에 대한 충분한 실험데이터는 제시되고 있지 않는 상태이다.

따라서 본 연구에서는 정전기 방전에 영향을 주는 회로의 매개변수를 정전용량만 있는 경우, 정전용량과 인덕턴스가 있는 경우, 정전용량과 저항이 있는 경우 등으로 구분하고 하트만방식의 회로에 적용시켜 매개변수에 의해 점화에너지가 어떻게 변화하는 지를 측정하고 점화 메커니즘을 초고속카

[†] To whom correspondence should be addressed.
mkt0904@hanmail.net

메트로 분석하는 등 방전회로의 매개변수 영향에 대해 고찰하였다.

2. 실험

2.1. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에서 사용된 하트만식(Köhner, MIKE-3, 방전에너지 계산프로그램 포함) 장치를 나타낸 것으로 분진의 농도는 1.25~3kg/m³의 범위에서 조절이 가능하며, 커패시터에 충전된 에너지가 점화전극에 인가하게 된다.

70kg/m³ 압력의 압축공기를 사용하여 분진운을

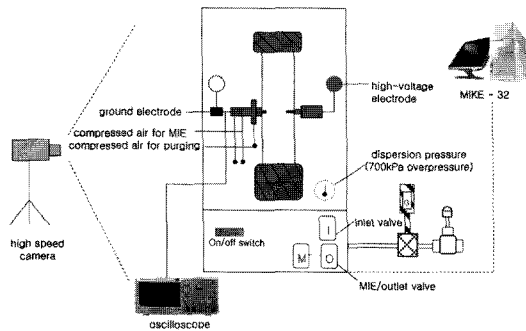
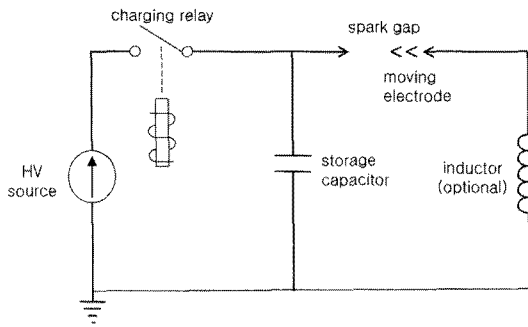
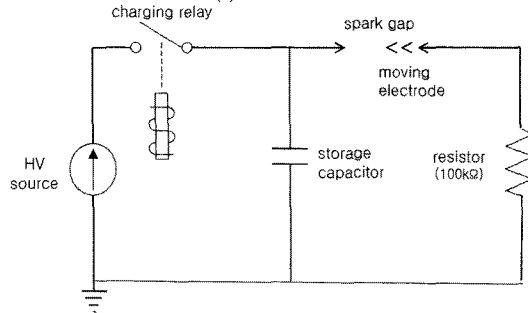


Fig. 1. schematic drawing of experimental system for measuring MIE of dust/air mixture.



(a) LC circuit



(b) RC circuit

Fig. 2. discharge circuit.

형성하고 점화전극 사이에서 방전을 일으켜 가능한 낮은 에너지부터 인가하여 점화에너지 측정실험을 하며, 본 연구에서는 최대 방전에너지를 1,000mJ로 제한하여 실험하였다.

또한 분진운 현상, 화염형태, 방전형상 및 방전지속시간 등은 초고속카메라(Photron, Fastcam-Ultima-RGB-M형) 및 오실로스코프(Tektronix, DPO 3032)를 통해 분석하였다.

방전회로는 IEC 규격과 일본표준을 기준으로 정전용량만 있는 경우(L=0.01mH; C), 정전용량과 인덕턴스가 있는 경우(L=1mH; LC), 정전용량과 저항(100kΩ; RC)이 있는 경우 등으로 회로를 구성하였으며, 본 실험에 적용된 방전 회로는 Fig. 2와 같다.

IEC 국제규격에 의해, C 회로와 LC 회로의 커패시터 내에 인가전압이 방전에너지로 전부 소비된다는 가정하에 다음 식 (1)에 의해 산출하였다⁴⁾. 또한 RC 회로의 경우, 삽입저항에 의해 일부에너지가 소비된다는 가정하에 (2)와 같은 식을 적용하여 방전에너지를 구하였다.

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

E_d : 방전에너지[J]

V : 커패시터의 충전전압[V]

C : 정전용량[F]

$$E_d = \frac{1}{2} CV^2 - \int_0^T Ri^2 dt \quad (2)$$

i : 방전전류[A]

T : 방전지속시간[s]

R : 저항[Ω]

최소점화에너지는 식 (3)과 같이 E_1 과 E_2 사이의 값으로 정의했으며, 점화확률을 고려한 값(MIEs)은 (4)와 같은 식을 적용하여 제시하였다⁹⁾.

$$E_1 < MIE < E_2 \quad (3)$$

E_1 : 공기와 혼합된 분체를 점화(10회시도)하기 위해 투입된 에너지로 실패한 가장 높은 에너지[J]

E_2 : 공기와 혼합된 분체를 점화(10회시도)하기 위해 투입된 에너지로 성공한 가장 낮은 에너지[J]

$$MIE_s = 10^{(\log E_2 - I[E_2]) / ((\exists + I)[E_2] + 1)} \quad (4)$$

$I[E_2]$: 분체의 농도변화에 따라 점화된 개수
 $(\exists + I)[E_2]$: 분체의 농도변화에 따라 점화 및 부점화된 총 개수
 I : 공기와 혼합된 분체의 점화
 \exists : 공기와 혼합된 분체의 부점화

분진의 점화판정은 10회 실험을 실시하여 한번이라도 점화가 될 경우 “점화”라 판정하였으며, 실험실의 조건은 실내에서 자동온습도조절기를 사용하여 온도 25±3℃, 상대습도 35±5%에서 실시하였다.

2.2. 실험시료

본 실험에서는 실제 플라스틱 공장에서 사용되고 있는 폴리프로필렌(Polypropylene: PP) 분진(입경 D_{50} : 76μm)을 사용하였으며, 실험의 신뢰성을 높이기 위하여 분진을 데시케이터에 넣어 24시간 이상 건조를 시킨 후 실험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 점화지연시간에 따른 점화에너지 변화

Fig. 3은 폴리프로필렌 분진의 점화지연시간을 90ms, 120ms, 150ms의 변화를 주어 하트만식 실험장치로 MIEs를 측정된 결과이며, 90ms일 경우 82mJ (0.75kg/m³), 120ms일 경우 67mJ(0.5kg/m³, 0.75kg/m³), 150ms일 경우 74mJ(1.25kg/m³)로 나타나 76μm의 폴리프로필렌 분진은 점화지연시간이 120ms에서 점화에너지가 가장 낮은 것을 확인할 수 있다.

분진의 점화에너지 측정시 점화지연시간은 분진의 입자크기 및 비중 등 특성에 따라 측정값의 변화가 있는 것은 잘 알려져 있으나⁷⁾, 이러한 분진의

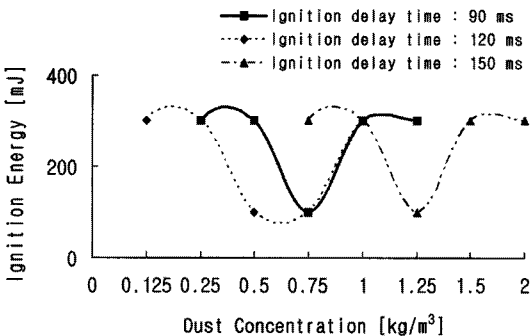


Fig. 3. relationship between Ignition energy and ignition delay time.

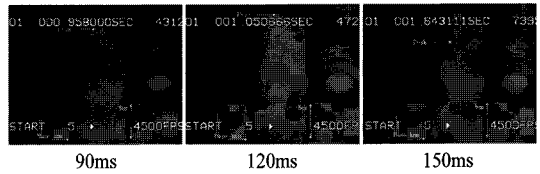


Fig. 4. movement of dust particles under various ignition delay time.

부유현상을 가시적으로 검증한 자료는 없으므로, Fig. 4와 같이 점화지연시간에 따른 분진형상을 가시적으로 확인하였다.

폴리프로필렌이 점화되지 않는 방전에너지(30mJ, 1mL, 600mg)를 인가하여 초고속카메라(4,500FPS)로 확인한 결과, 90ms에서는 폭발용기에 분진운이 일정하게 형성이 되지 않은 불균일한 상태이며, 120ms에서는 폭발용기 전체에 분진운이 잘 형성된 균일한 상태로 되어 있다. 또한, 150ms에서는 분진운이 낙하하는 상태로 분진운이 불균일하게 나뉘고 있다. 이를 통해 폴리프로필렌 분진의 경우 분진운이 잘 형성된 120ms에서 점화가 잘 이루어진 것으로 판단된다. 따라서 이하의 실험에서는 점화지연시간을 120ms로 고정하여 실험하였다.

3.2. 각 회로별 점화에너지 및 방전특성

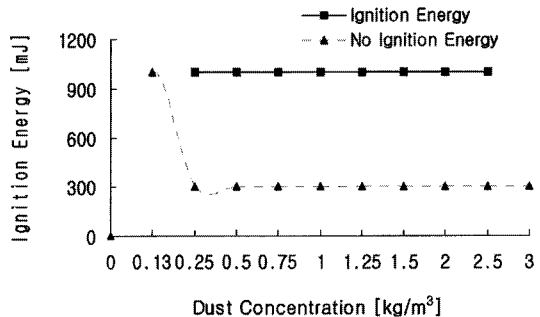


Fig. 5. ignition energy obtained with capacitance (C) circuit.

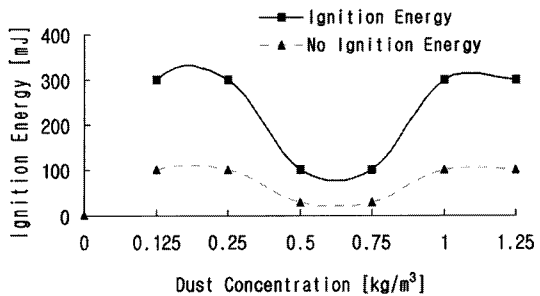


Fig. 6. ignition energy obtained with inductance-capacitance (LC) circuit.

C 회로의 점화에너지를 측정한 결과, Fig. 5와 같이 $300\text{mJ} < MIE < 1,000\text{mJ}$ 로 측정되었으며, MIEs는 370mJ 로 나타났다.

LC 회로의 점화에너지를 측정한 결과, Fig. 6과 같이 $30\text{mJ} < MIE < 100\text{mJ}$ 로 측정되었으며, MIEs는 71mJ 로 C 회로보다 약 5배 낮은 에너지 값이 나타나는 것을 알 수 있으며, LC 회로가 C 회로보다 점화의 위험성이 높은 것을 알 수 있다.

RC 회로의 점화에너지를 측정한 결과, Fig. 7과 같이 $27\text{mJ} < MIE < 253\text{mJ}$ 로 측정되었으며, MIEs는 31mJ 로 C 회로 보다 약 12배, LC 회로 보다 약 2배 정도 낮은 에너지 값을 나타나는 것을 알 수 있으며, RC 회로가 점화의 위험성이 가장 높은 것을 알 수 있다.

이러한 각 회로별 에너지 값의 차이를 확인하기 위해 다음 아래와 같이 방전특성을 확인하였으며, Table 1은 각 회로별 방전에너지에 따른 방전지속 시간과 방전전류를 분석한 결과이다.

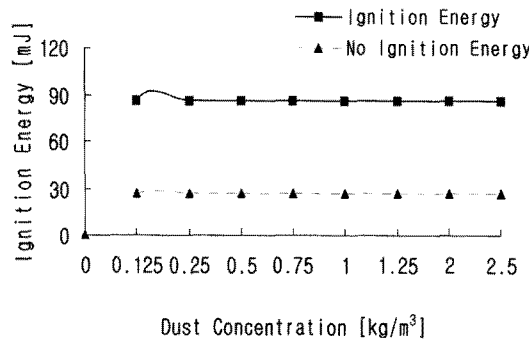


Fig. 7. Ignition energy obtained with resistance-capacitance (RC) circuit.

Table 1, comparison of discharge duration time and discharge current among C circuit, LC circuit and RC circuit

Circuit	*E _d (mJ)	****T _{da} (μs)	*****i (A)
C	30**	4.90	156*****
	100**	8.67	256*****
	300**	15.7	472*****
LC	30**	26.8	16.6*****
	100**	49.1	28.9*****
	300**	86.7	49.2*****
RC	27***	215	0.0905*****
	86***	694.3	0.096*****
	252***	1,750	0.099*****

E_d: Discharge energy, **: Value of discharge energy obtained by eq.(1), *: Value of discharge energy obtained by eq.(2), ****T_{da}: The average duration time of discharge, *****i: Discharge current, *****: Peak to peak, *****: Peak to ground

Table 2. discharge duration time measured by oscilloscopes and high-speed camera

number	*T _d (sec)		Condition
	T _{d1} (sec)	*T _{d2} (sec)	
1st	0.00164	0.00123	100kΩ, 0mH, ****252mJ
2nd	0.00177	0.00141	
3rd	0.00185	0.00171	

T_d: Discharge duration time, **T_{d1}: value measured by oscilloscope, *T_{d2}: value measured by high-speed camera, ****252mJ: value obtained by eq.(4)

우선 방전에너지별 방전지속시간을 보면, LC 회로일 때에는 C회로일 때 보다 약 5배 정도 방전지속시간이 길고, RC 회로일 때는 C 회로 보다 약 40 배, LC 회로 보다 약 8배 정도 방전지속시간이 긴 것을 확인 할 수 있으며, 이를 통해 점화에너지에 영향을 주는 방전지속시간⁸⁾이 RC 회로에서 가장 길어 점화가 잘 이루어진 것으로 판단된다.

RC 회로의 경우, 오실로스코프로 측정된 방전지속시간의 범위가 초고속카메라의 측정범위 안에 있어 두 값을 비교해본 결과 Table 2와 같이 비교적 동일하게 나타났다.

또한 Fig. 8과 같이 두 측정값을 시간별로 비교해 본 결과, 방전지속시간 동안 실제로 방전이 일정하게 진행되고 있는 것을 알 수 있어 방전지속시간이 가장 긴 RC 회로의 경우 방전지속시간동안 부유되어진 분진운으로 점화될 확률이 높을 것으로 판단된다. 이러한 결과는 기존의 방전지속시간이 길어질수록 분진의 점화 확률은 높아지는 것으로 보고 된 연구결과⁵⁻⁸⁾와 동일한 결과로 나타났다.

향후 각 회로별 시정수의 계산값과 실험값에 대한 비교 등 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

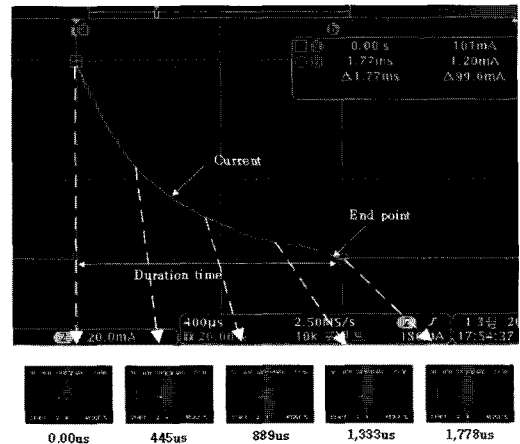


Fig. 8. discharge duration time and discharge spark(100kΩ, 286mJ).

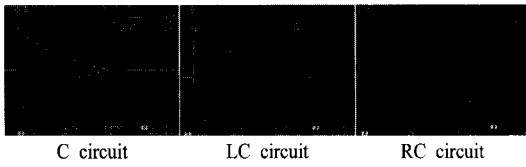


Fig. 9. typical discharge current waveforms with various circuits.

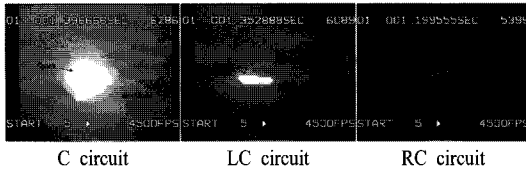


Fig. 10. typical discharge sparks with various circuits.

Table 1에서 방전에너지별 방전전류를 보면, C 회로에는 LC 회로보다 약 9배, RC 회로보다 약 1,000배 정도 방전전류값이 높은 것을 알 수 있으며, Fig. 9와 같이 방전전류의 파형을 확인한 결과, C 회로와 LC 회로의 경우에는 진동파형의 형태를 나타내고, RC 회로의 경우에는 지수함수식으로 감소되는 형태로 나타나는 것을 알 수 있다.

또한, 이러한 방전형태를 Fig. 10과 같이 초고속 카메라로 확인해 본 결과 방전전류가 가장 큰 C 회로는 LC 회로보다 강한 빛을 동반한 방전이 일어났으며, RC 회로에서는 강한 빛 보다는 전극간의 붉은 실선으로 방전되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 방전전류로 인하여 방전시 강한 빛을 동반하지만, 방전지속시간에 비해 점화에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 정전기 방전에 영향을 주는 회로의 매개변수를 C 회로, LC 회로, RC 회로 등으로 구분하여 각 회로별 점화에너지와 매개변수의 점화 메커니즘을 분석하였으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) PP 분체를 사용하여 각 회로별 점화에너지를 측정된 결과, C 회로는 $300\text{mJ} < MIE < 1,000\text{mJ}$ 로 측정되었으며 MIEs는 370mJ , LC 회로는 $30\text{mJ} < MIE < 100\text{mJ}$ 로 측정되었으며, MIEs는 71mJ , RC 회로는 $27\text{mJ} < MIE < 253\text{mJ}$ 로 측정되었으며, MIEs는 31mJ 로 C 회로 보다 약 12배, LC 회로 보다 약 2배 정도 낮은 에너지 값을 가지고 있어 점화의 위험성이 가장 높은 것을 알 수 있다.

2) 방전에너지별 방전지속시간을 분석한 결과,

RC 회로일 때 C 회로 보다 약 40배, LC 회로 보다 약 8배 정도 방전지속시간이 긴 것으로 나타나 방전지속시간이 가장 긴 RC 회로에서 점화가 잘 이루어진 것으로 판단되며, 긴 방전지속시간으로 부유되어진 분진에 대해 점화될 확률이 높을 것으로 사료된다.

3) 방전에너지별 방전전류를 보면, C 회로에는 LC 회로보다 약 9배, RC 회로보다 약 1,000배 정도 방전전류값이 높은 것으로 나타났으며, 방전형태를 초고속카메라로 확인해 본 결과, 방전전류가 가장 큰 C 회로는 LC 회로보다 강한 빛을 동반한 방전이 일어났으며, RC 회로에서는 강한 빛 보다는 전극간의 붉은 실선으로 방전되는 것으로 보아 방전전류가 방전지속시간에 비해 점화에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

따라서 정전기 방전으로 인한 분체의 점화위험성을 평가할 때는 저항에 대한 영향도 고려하는 것이 안전성을 확보하는데 바람직할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 최영상, “분진폭발의 현상과 방지대책에 관한 고찰”, 소방논문지 제5호, pp. 105~131, 2001.
- 2) 鄭國三外, “安全工學實驗”, 東和技術, p. 19, 1992.
- 3) IEC 1241-2-3, “Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust - part 2 : test methods”, pp. 9~10, 1994.
- 4) APPIE SAP, “Test method for minimum ignition energy of combustible dust/air mixtures”, pp. 1~17, 2010.
- 5) K. S. Choi, M. Yamaguma, T. Kodama, T. Y. Kim, J. H. Joung, M. Nifuku and M. Takeuci, “Influence of discharge conditions on the ignitability of lycopodium streams due to a single capacitance discharge spark”, KIEE International Transactions on Electro-physical and Application(in English), Vol. 3-C, No. 3, pp. 99~105, 2003.
- 6) 田中隆二, 本質安全防爆電氣回路に關する基礎的研究, 勞働省産業安全研究所(現: 勞働安全衛生總合研究所), 1970.
- 7) 신대성, “전기스파크에 의한 분체도료의 착화위험성에 관한 연구”, 공학박사학위 논문, pp. 11, 2008.
- 8) W. Ishihama, “Studies on the Ignition Energy of Dust Clouds”, J. Japan society for safety engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 273~27, 1982.
- 9) Ch. Cesana and R. Siwek, “Mike 3 Minimum ignition Energy 3.3”, pp. 6~10, 2001.