

## B-2

### 정전기방전현상에 의한 분진의 착화성에 코로나 대전의 영향

정재희, 최광석\*, 최충석\*\*,  
미쯔키 야마구마\*\*\*, 츄토무 고다마\*\*\*, 마나부 다케우치\*  
서울산업대, 일본국립이바라키대학\*, 전기안전시험연구원\*\*, 본산업안전연구소\*\*\*

### Effect of Corona Charging on Ignitability of Powders due to Electrostatic Spark

J. H. Joung, K. S. Choi, C. S. Choi\*, Myamaguma\*\*, T. Kodama\*\*,  
and M. Takeuchi

Seoul National University of Technology, Ibaraki University of Japan, \*ESLR, \*\*NIIS of Japan

#### 1. 서론

최근, 정전 도장(이하; EPC) 시스템[1], 정전 농약 살포, 정전 선별 등의 산업이 발달하면서, 정전기력에 의해 분진입자의 거동을 제어하기 위한 코로나 대전 기술이 활발하게 연구되어지고 있다. 그러나, 일반적으로 고전압을 사용하는 EPC 시스템에서의 화재 사고가 국내는 물론이고 일본 등의 선진국에서도 크게 문제화되고 있다. 이러한 재해를 방지하기 위한 안전 지침으로는 취급 분진의 최소착화에너지(이하; MIE) 측정이 필수적으로 요구되어진다[2]. 일반적으로 MIE의 측정은 최초 대전되지 않은 분진의 상태에서 캐퍼시터에 의한 충·방전에 의해 행해지고 있다. 이와는 달리, 만약 분진이 주위의 고전압 등에 의해 대전된다면 그 MIE는 달라질 가능성이 있다.

따라서, 본 연구에서는 코로나 대전이 분진의 MIE에 미치는 영향에 대해 실험적으로 조사했다. 또한, EPC 시스템에서 사용하는 분진의 대전량에 대해서도 측정 토론됐다.

#### 2. 실험

##### 2.1 실험용 분진

실험용 분진으로는 IEC 규격의 착화 실험용 분진으로 규정[3] 되어져 있는 polyacrylonitrile과 분진 도장업소에서 사용하는 Polymethylmethacrylate(이하;PMMA), Nylon(No.11)을 사용했다. 입경을 가능한 일정하게 하기 위해 메쉬(Tyler-170, 구멍크기: 88 $\mu$ m)를 사용하여 전처리를 했다. 입경 분포 측정기(LDA Win 1.21, 습식)를 사용하여 분진의 평균 입경을 측정한 결과, polyacrylonitrile 16 $\mu$ m, PMMA 60 $\mu$ m, Nylon11 16 $\mu$ m 인 것으로 나타났다.

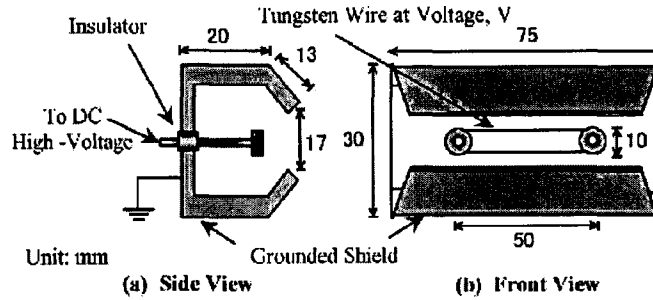


Fig. 1. Geometries for DC high-voltage (corona) discharger

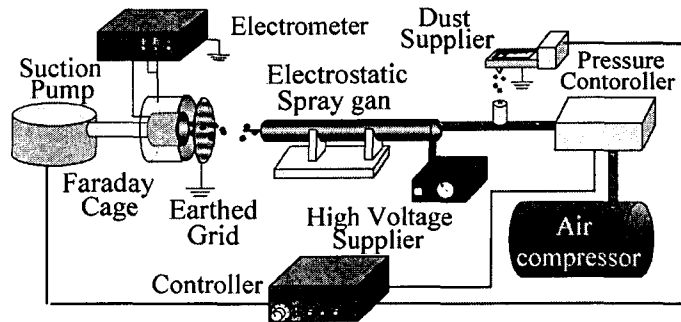


Fig. 2. Schematic diagram of measuring system for charge on powder from an electrostatic powder spray gun using corona discharge

## 2.2 MIE의 측정 및 방법

분진의 MIE 측정 실험은 저자들에 의해 개발되어진 초음파-메쉬형 분진 최소화 에너지장치를 사용했으며, 장치에 대한 상세 설명은 선행연구에 의해 보고된 바 있다[4,5]. 주요 실험 장치는 폭발 용기, 초음파 발생 장치 및 진동자(ultrasonic sieve vibrator, USS-2010, Phillip), 분진 호퍼 및 메쉬(Stainless steel), 전극(tungsten, sharp tips, 2mm in diameter)으로 구성됐다. 전원 장치와 보조 장치로는 고전압 dc 발생장치(100Ω, C=100pF - 5000pF), 디지털 오실로스코프(Textronix TDS520), 전류 증폭기(Textronix AM 503), 데이터 분석 컴퓨터(PC)를 사용했다. 그림 1에 본 실험에 사용된 코로나 이온 발생 장치의 개략도를 나타냈다. 이온을 발생시키기 위해 ± DC 6kV를 사용했으며, 접지된 외함(aluminum)과 그 내측에 텅스텐 재질의 선(0.097mm in diameter)을 삽입하여 외함과 텅스텐 선간의 코로나 방전이 가능하도록 설계했다.

실험방법으로는 (a) 28kHz의 진동에 의한 낙하 분진의 농도 및 안정도를 확인한다. (b) 코로나 이온 발생기를 작동시킨다. (c) 낙하분진 운에 정전기방전을 인가하여 착화를 시도한다. 만약 20회 이내에 착화된 화염이 호퍼 하부의 플레임 어레스터(60mm above from electrodes)에 도달한 경우를 착화라고 판정했다.

## 2.3 EPC 시스템의 분진 대전량 측정 및 방법

코로나 이온 발생기를 사용한 EPC 시스템의 구조를 그림 2에 나타냈다[6]. 실험 장치

는 분체 도장관(40mm in internal diameter, 350mm in length), 전원 공급장치(ONODA, Electro Powder Dynamics, GX376), 분진 공급장치, 공기 압축기(55 ℓ, 10.7kgf/cm, Hitachi), 압력 조절기(1-4bar), 흡입식 파라데이게이지(140mm in internal diameter, 155mm in length, 155mm in outer diameter, 180mm in length)로 구성됐다. 고전압은 분체 도장관의 내측에 부착된 전극을 통해 -30kV에서 -80kV까지의 조절 인가했다. 분진은 압력 공급라인에서 공기와 함께 삽입되었으며, 압력 공급부, 분진 공급부, 흡입 측정부를 1회 조작에 의해 종합적인 제어를 가능하게 했다.

실험 방법으로는  $12 \pm 5^\circ\text{C}$ ,  $45 \pm 5\% \text{RH}$ 의 환경에서 인가 전압 및 분진 삽입 양에 변화를 주어 10초 동안 자동 분산 공급한 뒤 비 전하량 (charge-to-mass ratio)을 측정했다. 파라데이게이지에 의해 포집된 분진의 대전량을 일렉트로미터(KEITHLEY-6512)로 동일한 조건에서 5회 측정한 후, 그 평균치로 계산했다. 실험의 신뢰성을 높이기 위해 분출구 부분을 실드하였으며, 코로나 이온 발생기에 의해 발생된 자유이온이 파라데이게이지의 유입 방식을 위해 게이지와 도장관 사이에 접지된 금속성 메쉬(wire mesh: 5mm spacing)를 설치했다. 화재 및 폭발에 따른 위험을 최소화하기 위해 실험장치의 전면을 방호 판넬로 제작했다.

### 3. 실험 결과 및 토론

#### 3.1 코로나 대전이 분진의 MIE에 미치는 영향

분진의 대전 상태에 따른 MIE 의존성을 측정하여 그림 3에 나타냈다. 코로나의 이온에 의해 대전된 분진은 전체적으로 MIE가 감소하는 경향을 보였다. 6kV의 코로나 이온발생기에 의한 분진의 대전량을 측정결과(Table 1), 낙하분진이 이온화된 영역을 통과할 때 코로나 이온발생기를 병행하지 않은 경우에 비해 명확하게 대전된다는 것을 알 수 있다.

코로나 이온 발생기에 의한 분진 운의 분산성을 관찰하여 그림 4에 나타냈다. 대전된 분진은 입자 상호간의 반발력으로 인해 분진 운의 분산성을 크게 향상시키는 것으로 나타났다. 이러한 향상된 분산성이 분진의 착화성에 크게 영향을 주는 것으로 판단된다.

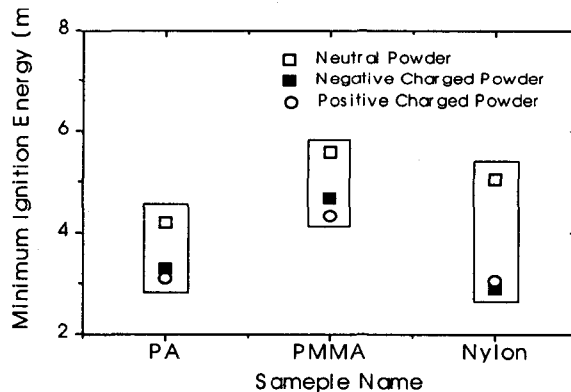
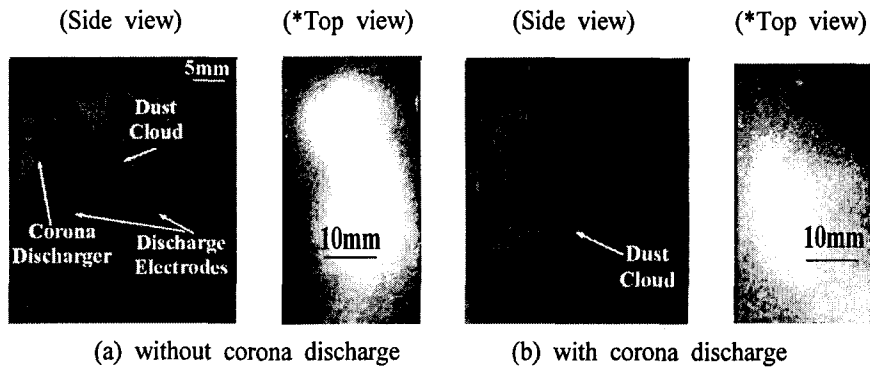


Fig. 3. Comparison of MIEs among neutral, negatively charged and positively charged powders

**Table 1.** Average charges on powders after passing through the corona discharger.

Substance	Average charge [ $\mu\text{C}/\text{kg}$ ]		
	Positive	Negative	Charging Free
Polyacrylonitrile	21.2	-30.2	-0.20
PMMA	22.8	-25.3	-0.51
Nylon 11	27.0	-44.9	-0.57



**Fig. 4.** Dust dispersion patterns with and without the corona discharges(\*Top view is that a glass plate was placed in the middle of the path of the falling dust for 3 s)

분진의 초기 착화과정[7]을 살펴보면, (a)외부의 에너지에 의해 분진 입자의 온도가 상승한다. (b) 분진입자의 자발현상(self-heating reaction)을 거쳐 초기 화염을 위한 화염 핵(kernel)을 형성시킨다. 이러한 관점으로써, 코로나 이온 발생기에 의해 향상된 분산성은 보다 많은 화염 핵의 형성을 가능하게 한다.

방전의 특성측면을 살펴보면, Table 2와 같이 코로나 이온발생기를 병행한 경우 (b,c)가 병행하지 않은 경우 (a)에 비해 방전 개시전압과 불꽃 지연시간이 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 코로나 방전을 병행한 경우, 불꽃지연시간의 표준 편차가 작아지는 것 나타났다. 이러한 결과는 코로나 대전에 의해 생성되어진 자유 이온의 영향으로 판단된다. 반면, Table 2(c)의 경우(코로나 이온과 대전된 분진 병행)가 방전 지속 시간과 에너지가 가장 크게 나타났으며, 그 다음으로 (b), (a)의 순으로 나타났다. 이것은 대전된 분진에 의해 형성된 전계와 코로나 이온 발생기에 의한 자유이온의 영향으로써, 방전지속

**Table 2.** Comparison of characteristics for discharge spark among without corona discharge(a), with corona discharge(b), and including a dust powder(c) (supply voltage was set at 10kV).

Substance	Onset voltage[kV]	Time lag[ $\mu\text{s}$ ](*S.D)	Duration time [s]	Energy [mJ]
A	8.4	170 (132)	204	3.94
B	8.0	7.9 (2)	231	4.33
C	8.0	8.5 (4)	270	4.84

\* S.D: Standard Deviation.

시간이 길어짐에 따라 방전 에너지가 커지는 것으로 나타났다. 일반적으로 방전지속시간이  $700\mu s$  이내인 경우, 방전지속시간이 길어질수록 분진의 착화 에너지는 감소하는 것으로 보고 된 바 있다[8].

따라서, 코로나 이온 발생기에 의해 향상된 분진의 분산성과 정전기의 방전특성의 변화는 분진의 MIE를 감소시키는 것으로 나타났다.

### 3.2 EPC 시스템의 분진 대전 특성

#### 3.2.1 인가전압의 영향

공급압력(3bar)과 삽입 분진의 양(5g)을 일정하게 유지한 채, 인가전압(-30- -80kV)에 따른 비전하량의 관계를 측정 관찰했다. 결과에 의하면, (a)비전하량은  $-730\mu C/kg$  (minimum) to  $-2000\mu C/kg$  (maximum)로 3.1 (Table 1)에 비해 상당히 크게 나타났다. (b)비전하량은 일정구간 인가전압의 증가에 따라 의존하여 증가한 후, 포화의 경향을 보였다.

#### 3.2.2 분진이 공급량의 영향

인가전압(-60kV)과 공급압력(3bar)을 일정하게 유지한 채, 분진의 삽입 양(1-10g)따른 비전하량의 관계를 측정 관찰했다. 결과에 의하면, 분진의 양이 증가함에 따라, 비전하량은 감소하는 경향을 보였다. 이것은 삽입된 분진의 양이 자유 이온에 비해 다소 고농도 영역으로써 분진의 역 극성 입자의 증가로 인한 것으로 저자의 일부에 의해 밝혀진 바 있다[9].

## 4. 결론

코로나 이온 발생기를 사용한 EPC 시스템에서는 높은 생산성을 위해 일반적으로 -80kV의 고전압을 사용하여 취급분진의 거동을 제어하고 있다. 그러나, 이러한 코로나 이온 발생기에 의해 대전된 분진의 MIE는 저감 될 수 있다. 이에, EPC 시스템의 안전성 평가를 위한 MIE 측정에 있어서 반드시 이러한 점은 고려되어야 한다. 또한, 분진의 비전하량은 인가 전압에 의존하여 증가하며, 삽입 분진의 양에 따라 감소하는 관계로써, EPC 시스템의 안전성과 생산성을 고려한 인가 전압과 분진 삽입 량의 효율적인 선택이 요구된다.

## 참고문헌

1. D. E. Woolard. Electric Field Modeling for Electrostatic Powder Coating of a Continuous Fiber Bundle. J. of Electrostatics, Vol. 35, pp. 373-387, (1995)
2. The research institute of industrial safety Japan, Recommended Practice for Protection against Hazards arising out of Static Electricity in General Industries. RIIS-TR-87-1, p. 44, (1988)
3. IEC, International standard, 1241-2-3, (1994)
4. Choi K-S, M.Yamaguma, T.Kodama, Joung J-H, M.Takeuchi. A new apparatus for forming

- dust clouds using ultrasonic vibration of electrostatic spark ignition of fine powders for MIE measurements. The lecture paper presented of the institute of electro-statics Japan. pp. 43-44, (2001)
5. Choi K-S, M. Yamaguma, T. Kodama, Joung J-H, J. cross, M. Takeuchi. A new apparatus for forming dust clouds using ultrasonic vibration of electrostatic spark ignition of fine powders for MIE measurements (2). The lecture paper presented of the (workshop), KICHE. pp. 42-45, (2001)
  6. Adrian G. Bailey. The science and technology of electrostatic powder spraying, transport and coating. *J. of Electrostatics*, Vol. 45, pp. 85-1, (1998)
  7. H. Enomoto. A consideration on the ignition phenomena of coal dust clouds in a single spark of capacitance discharge. *J. of Japan society for safety engineering*, Vol.29, No. 3, pp. 162-167, (1990)
  8. W. Ishihama. Studies on the Ignition Energy of Dust Clouds. *J. of Japan society for safety engineering*, Vol. 21, No. 5, pp. 273-27, (1982)
  9. Choi K-S, M.Yamaguma, T.Kodama, Joung J-H, Sin D-S, N.Iwai. T.kashiwazaki, M. Takeuchi. An experimental study on tribocharging of fine powders in powder coating spray gun. *J. of KIEE*, 11C, pp. 1-5, (2001)