

유동층 건조설비에 있어서 분진의 정전기 위험성에 관한 실험적 연구

문균태[†] · 정재희 · 최광석^{*}

서울산업대학교 에너지환경대학원 · *일본노동안전위생종합연구소
(2010. 7. 14. 접수 / 2010. 8. 16. 채택)

Experimental Study on Electrostatic Hazards of Powder in Fluidized Bed

Kyoontae Moon[†] · Jaehee Chung · Kwangseok Choi^{*}

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

^{*}Japan National Institute of Occupational Safety and Health

(Received July 14, 2010 / Accepted August 16, 2010)

Abstract : A large amount of electrostatic charges is often generated on polymer powders in fluidized bed and thereby may lead to electrostatic problems. In this study, to evaluate electrostatic hazards of powder in fluidized bed, the electric field(E [v/m]) and the charge amount(q [c/g]) during fluidizing were monitored. We also investigated the Minimum Ignition Energy(MIE [J]) of sample powder used in fluidized bed with the Hartman vertical-tube apparatus. The batch-type fluidized bed system and 2kg as Polypropylene(PP) resin powders were used in the experiments. The following results were obtained: (1) Even when a safe margin of several times was considered, the values of E obtained with PP powder in this paper did not exceed 3 to 5kV/cm, at which an incendiary electrostatic discharge could occur. (2) the ave. q was $-0.26\mu\text{C/g}$ during fluidizing. This value was high enough to cause electrostatic agglomeration and adhesion. (3) the entrained PP powder in upper column due to fluidizing could be ignited by electrostatic discharges of 71mJ.

Key Words : fluidized bed, electrostatic discharge, minimum ignition energy, electric field, electrostatic hazard

1. 서론

현재 여러 산업의 공정에서 분체에 대해 다양한 형태로 많이 사용하고 있다. 또한, 산업기기가 고도화되고 정밀화됨에 따라 분체의 입경이 미세화 되어 분체를 취급하는 공정에서 형성된 부유 분진운이 정전기방전으로 인해 분진폭발 사고의 위험성을 가지고 있다¹⁾.

특히 산업체에서 널리 사용되고 있는 유동층 건조기의 경우, 빠른 건조 속도와 다양한 성질 및 형태를 가진 분체에 건조, 코팅 등에 적용할 수 있는 장점을 가지고 있어 적용되는 곳이 확대·진보되고 있으나, 공정 내에서 건조된 입자가 공기 중으로 떠서 상층부에 부유 분진운을 형성하게 되어 발생되어지는 분진폭발의 사고사례가 국내외에서 보고되고 있는 실정이다^{2,3)}.

이러한 배경하에 유동건조기를 비롯하여, 분체공

기운송장치, 분체혼합장치, 정전도장장치 등의 가연성분체를 사용하는 설비에 있어서 정전기 특성에 관한 연구결과가 국내외 널리 보고되어지고 있다⁹⁻¹³⁾.

또한, 정전기로 인한 위험을 제거하기 위한 대책으로 국내 산업체내 공정에서는 정전기 발생억제 bag filter 설치, 접지장치 등의 안전대책은 실시하고 있으나, 실제 현장에서의 부유 분진운에 대한 정전기 대전특성파악, 사용되는 분체의 최소점화에너지 측정 등 정전기로 인한 정량적인 위험성 평가에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 모의실험용 분체유동장치를 설계하여, 유동장치내의 전계, 부유분진의 대전량 등을 정량적으로 측정 검토하였다. 또한 실제사고가 많이 발생하는 상층부의 부유 분진을 포함하여 정전기 점화위험성에 관해서 측정 평가했다.

2. 실험

2.1. 실험장치 및 방법

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

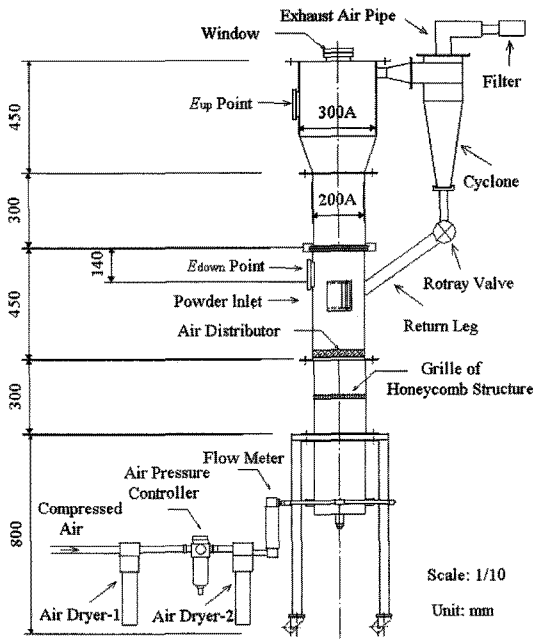


Fig. 1. Fluidized-bed system.

본 실험에서 사용된 분체 유동 실험장치를 Fig. 1과 같이 나타냈다. 실험장치는 하부 유동탑(SUS, Ø: 200mm, H: 450mm), 중부 유동탑(Ø: 200mm, H: 300mm), 상부 유동탑(Ø: 300mm, H: 450mm), 상부 공기탑(Ø: 200mm, H: 300mm), 하부 공기탑(Ø: 200mm, H: 300mm), 사이클론(SUS, Ø: 150mm, H: 550mm), 로터리 밸브(Clean Valve Corp., 1.5S), 분산판(SUS, Ø: 190mm, t: 1mm, 구멍지름: 0.8mm, 다공률: 8%), 에어 공급기 및 조절기 등으로 구성되어있다.

측정장치로는 전계센서(KSF - 0201, 春日電機), 흡입식 패러데이케이지(외부용기 Ø: 76.5mm, 내부용기 Ø: 27.5mm, L: 100mm), 일렉트로미터(6514 system electrometer, Keithley), 기록계(GL 200, Graphtec) 등을 사용했다.

일반적으로 분체의 대전량은 실험시 습도에 크게 의존하기 때문에, 본 실험에서는 정전기의 기초특성을 명확하게 하기 위해, 18±3℃의 건조 공기(유량: 550L/min)를 사용하였다. 유동층에서의 전계의 강도를 검출하기 위하여 전계센서를 유동탑 측벽에 설치하여 측정하였다. 전계센서는 진동형 감지전극으로 하였으며, 전극부위에 분진의 침입과 부착을 방지하기 위하여 에어파지타입으로 하였다. 또한 실험시 에어파지가 분체 유동성에 영향을 미치지 않도록 공기압력을 0.05Mpa로 조정하여 실험하였다.

전계센서로 측정된 전계치(E_m)의 신뢰성을 확인하기 위해 흡입식 패러데이케이지를 이용하여 공간전하밀도를 측정하였으며, 다음 식 (1)에 의하여 산출하였다.

$$\rho = q \times M \quad (1)$$

ρ : charge density[C/m³]

q : specific charge[C/kg]

M : concentration of dust[kg/m³]

비전하량은 흡입식 패러데이케이지를 유동성 탑 측벽에 설치하여 10초 동안 분진과 혼합 공기를 흡입하여 포집하는 분진의 전하량(Q)과 질량(W)을 측정하였으며, 다음 식 (2)에 의해 산출하였고, 분진농도는 다음 식 (3)에 의하여 산출하였다.

$$q = \frac{Q}{W} \quad (2)$$

q : specific charge[C/kg]

Q : total charge[C]

W : mass of suctioned powder[kg]

$$M = \frac{W}{Y} \quad (3)$$

M : concentration of dust[kg/m³]

W : mass of suctioned powder[kg]

Y : volume of suctioned air[m³]

또한 유동탑내에 있어서 유동 분진의 공간전하 밀도가 일정하다고 가정할 때, 유동탑내의 전계강도(E_c)는 다음 식 (4)에 의하여 추정할 수 있다.

$$E = \frac{\rho \times r}{2\epsilon_0} \quad (4)$$

E : estimated electric field[V/m]

r : radius of fluidized column[m]

ϵ_0 : permittivity of free space[F/m]

본 실험에서 정전기 방전으로 인한 분체의 점화 위험성을 규명하고자 국제 표준화되어 널리 사용되어지고 있는 Hartmann식 장치(Model: MIKE-3)를 이용하여 분진의 최소점화에너지(Minimum Ignition

Energy; MIE)를 측정하였다. 분진의 농도는 1.25~3kg/m³의 범위에서 조정이 가능하며, 캐패시터에 충전된 에너지가 점화전극에 인가하게 된다.

70kg/m³ 압력의 압축공기를 사용하여 분진운을 형성하고 점화전극 사이에서 방전을 일으켜 가능한 낮은 에너지부터 인가하여 점화에너지 측정실험을 실시하며, 본 연구에서는 최대 방전에너지를 1,000 mJ로 제한하여 실험하였다.

방전회로는 IEC 규격의 시험방법에 따라 인덕턴스(1mH), 방전지속시간 120ms, 전극간격 6mm로 설정하였으며, 인덕턴스-캐패시터(LC) 회로의 방전에너지는 다음 식 (5)에 의해 산출하였다⁹⁾.

$$E_d = \frac{1}{2} CV^2 \quad (5)$$

E_d : Discharge energy[J]
 V : Voltage applied to C[V]
 C : Capacitance of fixed capacitor[F]

MIE 는 식 (6)과 같이 E_1 과 E_2 사이의 값으로 점화확률을 고려한 값이다¹⁴⁾.

$$E_1 < MIE < E_2 \quad (6)$$

E_1 : The highest energy at which ignition fails to occur in 10 successive attempts to ignite the dust/air mixture[J].

E_2 : The lowest energy at which ignition occurs within 10 successive attempts[J].

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

2.2. 실험시료

본 실험에서는 실제 화학공장 등에서 사용되고 있는 폴리프로필렌(Polypropylene; PP, 1mm ≤ D_{50} < 2mm; 2kg) 분체를 사용하였으며, 실험의 신뢰성을 높이기 위하여 온도 18±3℃의 데시케이터에 넣어 24시간 이상 건조를 시킨 후 실험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 유동분체에서 형성된 전계특성

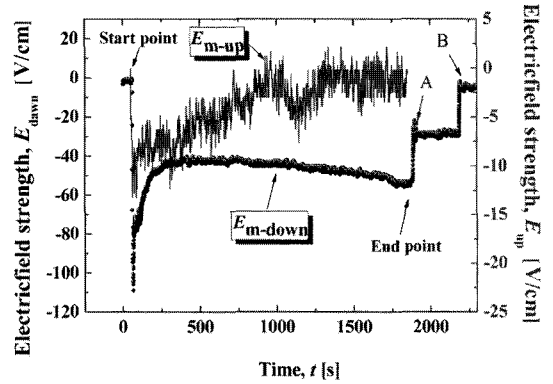


Fig. 2. E_m measured by electrostatic field meter.

유동중 E_m 의 측정결과를 Fig. 2에 나타냈다. 상단 유동탑 E_{m-up} (절대값)은 유동시작 직후에 피크에 도달하고 이후 점진적으로 감소했다. 반면, 하부 유동탑 E_{m-down} 은 유동개시직후에 피크값을 나타내고 바로 최소값이 된 후에 일정하게 유지 후 점진적으로 증가하였으며, E_{m-up} 은 E_{m-down} 에 비해 매우 낮은 E_m 을 가지고 있는 것을 알 수 있다.

상부와 하부 E_m 에서 서서히 증감하는 이유는 향후 자세히 분석할 필요가 있으며, 상부와 하부의 측정값의 차이는 주로 부유 분진의 공간전하밀도가 다르기 때문으로 나타났다. 측정결과와 예를 들면, 운전개시 후 900sec일 때 상부 유동탑에서의 M은 5g/m³, q는 -16nC/g, ρ는 80nC/m³이며, 하부 유동탑에서의 M은 92g/m³, q는 -2.1nC/g, ρ는 190nC/m³로 나타났다.

Fig. 3은 E_c 의 시간에 따른 변화를 측정된 것이며, 이를 통해 전계센서의 측정값과 비교하여 데이터의 신뢰성을 검증하였다. 상부 유동탑과 달리 하부 유동탑에서는 실험시작부터 600sec까지는 분체의 채집량이 많고, 변화량이 크기 때문에 정확한

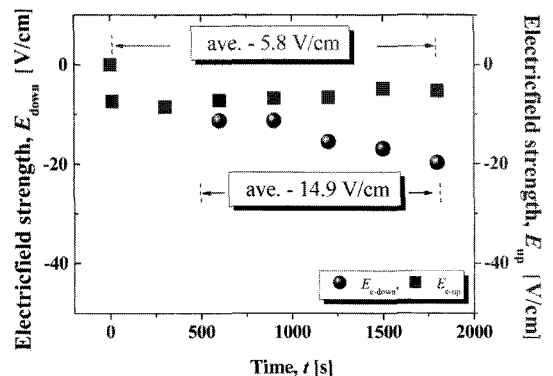


Fig. 3. E_c calculated from charge density.

값을 산출할 수 없어 600sec 이후부터 실험을 실시하였다.

Fig. 2와 3을 비교해 보면 E_m 과 E_c 는 피크값을 제외하고 동일한 시간변화를 나타내고 있다. 또한, E_{m-up} 은 E_{c-up} 보다 약간 작지만 피크값을 제외하면 모두 0~10V/cm의 범위 안에 있다. 반면, E_{m-down} 는 E_{c-down} 에 비해 몇 배 크지만, 그 원인은 E_{m-down} 의 측정값에 있어 유동탑의 벽면에 부착된 대전 미분과 유동탑 하부에 체적된 대전분체의 영향으로 생각되어진다.

이를 좀 더 정량적으로 검토한 결과, Fig. 5에서 E_{m-down} 는 유동정지 후 A, B점과 같이 E_m 값이 감소하는 현상이 나타났다. A점의 유동정지 직전·후의 전계치는 각각 -52V/cm, -29V/cm로 그 차이는 -23V/cm이다. 여기서 -23V/cm는 부유 분진의 값이며, 그 값은 E_{m-down} 의 -20V/cm와 거의 동일하다.

또한 Fig. 4의 금속판을 유동탑 밑부분의 분체표면에 설치하면, E_{m-down} 은 -5V/cm까지(B점) 내려가는 것을 알 수 있다. 그 차이는 -24V/cm로 체적된 대전분체에 의한 전계값이고, -5V/cm는 Fig. 5와 같이 유동탑 벽면에 부착된 미분에 대한 영향으로 나타났다.

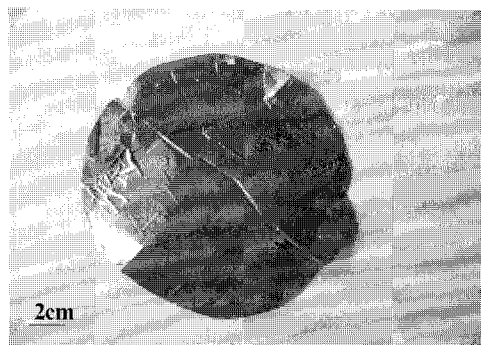


Fig. 4. metal plate used in study.

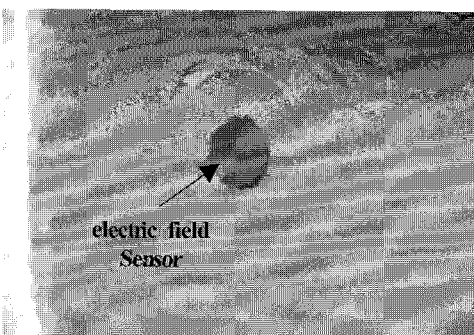


Fig. 5. Photo of inside of lower column after fluidizing test.

이와 같이 분석된 결과, 전계센서로 측정된 값은 신뢰성이 양호하다고 판단되며, 본 실험에서 얻어진 전계값은 정전기 방전의 발생한계치, 3~5kV/cm 이하로서⁹⁾, 위험한 레벨은 아니라고 판단된다.

3.2. 유동분체의 대전특성

유동된 분체의 대전특성을 확인하기위해 우선 Fig. 1의 개략도에 나타낸 사이클론에 대해 절연을 실시하고, 로터리 밸브를 제거하여 채집용 컵을 설치한 후 부유되는 분진을 포집하여 측정하였다.

유동시간내 부유 분진의 전하량을 측정한 결과는 Fig. 6과 같으며, 유동이 개시됨에 따라 포집된 분진은 마이너스로 대전되는 것을 확인할 수 있다. 이는 3.1의 전계의 측정결과에서 나타난 대전된 분체의 극성과 잘 일치됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 유동시간경과별 채집용 컵에 포집된 분체의 양을 나타낸 것으로, 유동개시 300sec에 포집

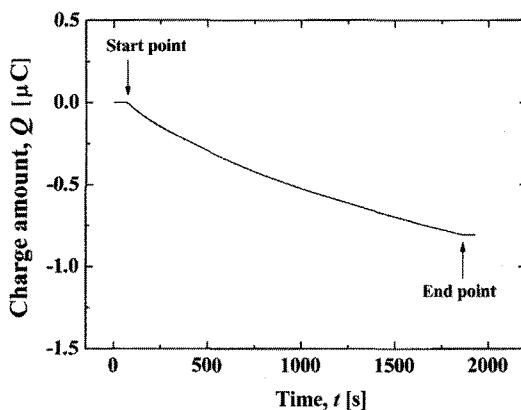


Fig. 6. Cumulative charge of PP powders entrained to cyclone during fluidizing.

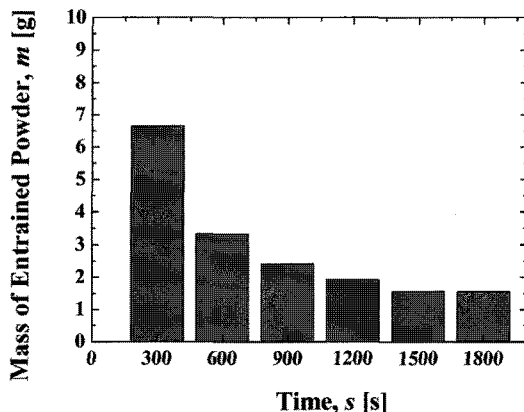


Fig. 7. Mass of PP powders entrained to cyclone as function of fluidization time.

된 양이 가장 많았다. 이러한 점은 3.1의 전계값의 변화 중 유동개시직후에 전계 피크값에 보여진 것과 같이 부유 분진의 농도가 상당히 영향을 미쳤다고 추정할 수 있다.

Fig. 6, 7의 상호관계로 채집된 분체의 비전하량 [c/g](평균값)을 산출한 결과, $-0.26\mu\text{C/g}$ 로 상당히 크게 나타났으며 이는 실제 정전기대전으로 문제가 많이 발생하는 분체공기이동시스템에서 발생하는 대전량⁷⁾과 비슷하므로 정전기 대전에 대한 주의 및 안전대책이 필요할 것으로 판단된다.

3.3. 유동분체의 정전기 점화위험성

본 실험에서는 데이터의 신뢰성을 검증하기위해 IEC 1241-2-3 기준에서 제시하는 표준시료(lycopodium)로 기초실험을 하였으며⁴⁾, MIE는 12 mJ(D₅₀: 35 μm)로 나타나 표준범위 안에 있는 것을 확인하였다.

PP 분체의 정전기 방전으로 인한 점화위험성을 확인하고자 유동전의 PP분체와 3.2와 같이 상부 유동탑에 의해 포집된 PP분체를 가지고 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 8, 9와 같다.

유동전 하부 유동탑에 삽입된 PP분체의 MIE를 측정된 결과(Fig. 8), $300\text{mJ} < \text{MIE} < 1,000\text{mJ}$ 의 범위에 있으며, MIE는 630mJ로 상당히 높은 에너지값이 측정되었다.

반면, 실험후 상부 유동탑에 의해 포집된 PP분체에 대해 MIE를 측정된 결과(Fig. 9), $30\text{mJ} < \text{MIE} < 100\text{mJ}$ 의 범위에 있으며, MIE는 71mJ로 유동전 PP분체의 MIE보다 약 9배 정도 낮은 에너지값이 측정되었다. 이러한 MIE의 차이는 입경사이지의 영향으로 낮아질 수 있기 때문에⁸⁾ 두 PP분체의 입

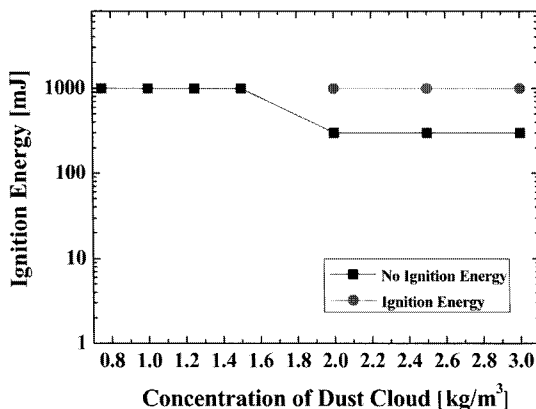


Fig. 8. Ignition energy obtained with PP powders collected from lower bed before fluidization test.

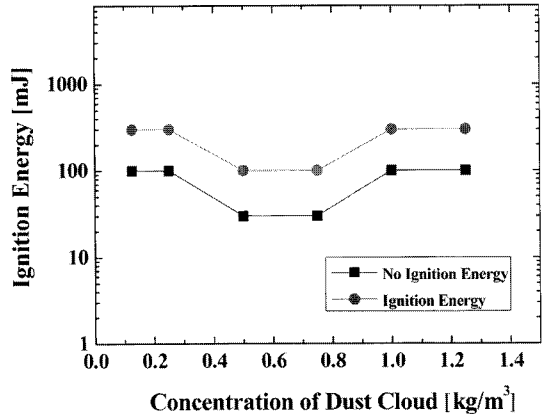


Fig. 9. Ignition energy obtained with PP powders collected from upper bed.

경사이지를 확인한 결과, 유동전의 PP분체는 D₅₀: 약 1mm, 상부 유동탑에 분포된 PP분체는 D₅₀: 76 μm 으로 작아져 MIE가 낮아진 것으로 판단된다.

또한 71mJ은 유동장치 특성상 유동탑 내부에 절연된 금속체가 있는 경우(실제 온도측정용 센서, 농도센서 등이 절연성이 높은 가스켓의 사용으로 절연될 수 있음), 부유 분진에 의한 유도대전으로 일어나는 정전기 방전 등을 고려하면 점화의 위험성이 매우 높은 상태이다.

따라서 유동층의 건조설비에 있어서 점화위험성을 평가할 때에는 상부 유동탑 일수록 입경사이지가 작아져서 MIE 값이 상당히 낮아질 가능성이 높기 때문에 각 유동탑에 대한 점화위험성을 관리하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 유동층 건조설비의 분체에 대한 정전기 위험성을 확인하고자, 유동층에 있어서 전계변화, 부유 분진의 대전량, 부유 분진의 점화성 등을 정량적으로 측정·분석하였으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 유동분체에서 형성된 전계특성을 확인하기 위해 전계센서의 측정치와 산출치를 비교해본 결과, 데이터 값이 비교적 동일하게 나타났으며, 실험에서 얻어진 전계값은 정전기 방전의 발생한계치, 3~5kV/cm 이하로 위험한 상태는 아닌 것으로 판단된다.

2) 유동된 분체의 대전특성을 확인한 결과, 상부 유동탑의 분체를 포집하여 산출된 비전하량은 -0.26

$\mu\text{C/g}$ 로 상당히 크게 나타나 정전기대전으로 인한 문제가 발생할 수 있으므로 이러한 정전기 대전에 대한 주의 및 안전대책이 필요할 것으로 판단된다.

3) 유동층의 건조설비에 있어서 점화위험성을 평가한 결과, 하부 유동탑보다 상부 유동탑의 *MIE*가 약 9배 낮아 졌으며, 이는 입경사이즈가 작아져서 점화의 위험성이 증가한 것으로 판단되므로, 이러한 점을 고려하여 각 유동탑에 대한 점화위험성을 관리하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 이덕출, 황명환, 육재호, “분체의 대전현상과 정전기장해 대책”, 한국안전학회지, 제8권, 제4호, pp. 223~230, 1993.
- 2) 정용철, 김준삼, 이동훈, “대전된 분체의 정전기 제거장치 개발 및 특성에 관한 연구”, 한국안전학회지, 제21권, 제3호, pp. 22~30, 1999.
- 3) Y. Kumagai, T. Watanabe, Y. Kawai, B. Tagawa, “Risk Evaluation of Electrostatic Dust Explosion by the Measurement of Electric Charge Density”, 住友化學, pp. 122~131, 1990.
- 4) 신대성, “전기스파크에 의한 분체도료의 착화위험성에 관한 연구”, 공학박사학위 논문, pp. 11, 2008.
- 5) IEC 1241-2-3, “Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust - part 2 : test methods”, pp. 8~15, 1994.
- 6) 일본산업안전연구소, “정전기안전지침”, RIIS-TR-87-1, pp. 47, 1988.
- 7) Martin Glor, “Electrostatic Hazards in Powder Handling”, pp. 28, 1988.
- 8) 김정환외 3, “점화에너지 변화에 따른 쌀겨분진의 폭발 거동에 관한 연구”, 한국화재소방학회지, 제13권, 제2호, pp. 26~32, 1999.
- 9) Susumu Natsuyama, “Explosion Prevention & Protection for Fluidized bed apparatus”, Pharm Tech Japan, Vol. 23, No. 11, pp. 7~8, 2007.
- 10) K. S. Choi, Muammar Omar, Xiaotao BI, and John R. GRACE, “Electrostatic Charging of Polymer Powders in Mixing Processes”, Proc. of Asia Pacific Symposium on Safety, pp. 460~463, 2009.
- 11) Muammar Omar, K. S. Choi, Xiaotao T. Bi and John R. Grace, “Effects of particle size and fluidizing velocity on the charge density of entrained fines”, Fluidization XIII, Engineering Conferences International, NewYork, pp. 225~232, 2010.
- 12) T. Mogami, T. Suzuki and T. Ikehata, “Control of Electrostatic Charge for Powder by Using Feedback Control-Type Ionizer System”, J. Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 23, No. 1, pp. 237~241, 2010.
- 13) K. S. Choi, M. Yamaguma, T. Kodama, J. H. Joung, D. S. Sin, N. Iwai. T. Kashiwazaki and M. Takeuchi, “An experimental study on tribocharging of fine powders in powder coating spray gun (in English)”, KJEE International Transactions on EA, Vol. 11C, No. 2, pp. 1~5, 2001.
- 14) Ch. Cesana and R. Siwek, “Mike 3 Minimum ignition Energy 3.3”, pp. 6~10, 2001.