

# 정전 분체 도장관의 공기압력에 의한 미세분진의 마찰대전특성에 관한 연구

최광석 · 신대성\* · N. Iwai · T. Kashiwazaki · M. Takeuchi · 정재희\*  
M. Yamaguma\*\* T. Kodama\*\*

국립이바라키대학대학원 이공학연구과

\*국립서울산업대학교 안전공학과 · \*\*일본 노동성 산업안전연구소

## 1. 서론

현대에 들어와 석유화학, 제약, 플라스틱 공업 등의 발달에 의해 분진의 기능이 활성화되었다. 그에 따라, 분진의 정전기 대전 현상으로 장·재해도 증가하고 있는 추세에 있다. 공기 압력을 이용한 분체 도장의 경우는 물론이고, 일정구간으로 분진을 이송, 저장할 경우, 분진 입자는 배관 또는 입자 상호간 마찰, 충돌 등으로 전하의 이동을 일으켜 대전된다[1]. 게다가, 단면적이 작은 개구부, 배관의 균열 등에 의해 일시적으로 외부로 분출되어질 때 대전량은 급상승하게 된다[2]. 이러한 정전기 대전 현상은 유동하는 분진의 흐름을 방해할 뿐만 아니라, 분진 폭발을 일으킬 확률이 높기 때문에, 분진의 대전특성에 공기 흐름이나 분진의 농도가 미치는 영향에 대한 실험적 연구가 행해지고 있다[3]. 따라서, 본 연구에서는 정전 분체 도장관의 공기압력에 의한 분진의 마찰 대전 특성에 삼입 분진의 양 및 종류, 공급 압력이 미치는 영향에 대해 실험했다.

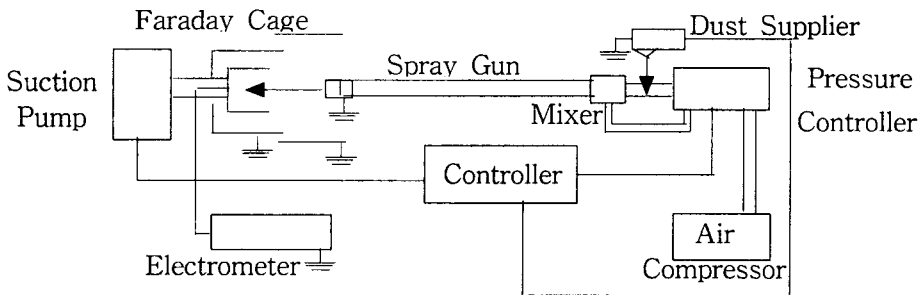


Fig. 1 Measuring system for tribocharge.

## 2. 실험장치 및 방법

Figure 1에 실험 장치의 개략적인 구조를 나타냈다. 실험 장치는 정전 분체 도장관 ( $\phi$  30, 1000mm, Tribomatic, Powder coating system, Nordosn, Type, LAB S.N BJ-90-A-51786), 흡입식 파라데이케이지(내측 용기:  $\phi$  140, 155mm, 외측 용기:  $\phi$  155, 180mm), 분진 공급장치(ONODA, Electro Powder Dynamics, GX501), 공기 압축기(55 l, 10.7kgf/cm, Hitachi), 압력 조절기(주 공급라인 및 보조 공급라인: 1~4[bar])로 구성했다. 분진의 공급은 주 압력공급라인에서 공기와 함께 삽입했으며, 분산의 일정화 및 마찰의 활성화를 위해 분산기에 보조 압력공급라인을 부착했다. 공급압력, 분진공급, 흡입부분을 1회 조작에 의해 종합적인 제어를 가능하게 했다. 실험 방법으로는  $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ,  $55 \pm 5\% \text{RH}$ 에서 분진의 삽입 양 및 종류, 공급압력에 변화를 주어 10초 동안 분진을 자동 분산 공급했다. 파라데이 컵에 의해 포집된 분진의 대전량을 일렉트로미터(KEITHLEY-6512)로 동일한 조건에서 5회 측정 후, 그 평균치로 계산했다. 실험의 신뢰성을 높이기 위해 주요 부분(분출구 및 파라데이케이지와 도장관 사이: 150mm)에 실드를 했으며, 화재 및 폭발에 따른 위험을 최소화하기 위해 실험장치의 전면을 방호판넬로 제작했다. 실험용 분진은 IEC규격의 착화 실험용 분진으로 규정[4]되어져 있는 lycopodium, polyacrylonitrile과 분진 도장업소에서 사용하는 Nylon(No.11), 금속배관의 노화로 인해 발생 가능한 초기 산화철( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )을 사용했다. 실험용 분진의 입경을 가능한 일정하게 하기 위해 메쉬(Tyler-170, 구멍크기:  $88\mu\text{m}$ )를 사용하여 전처리를 했다. 입경 분포측정기(LDA Win 1.21, 습식)를 사용하여 분진의 평균 입경 측정결과, 산화철( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )  $2\mu\text{m}$ , Nylon11  $16\mu\text{m}$ , lycopodium  $25\mu\text{m}$ , polyacrylonitrile  $17\mu\text{m}$ 인 것으로 나타났다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 삽입 분진의 양이 미치는 영향

공급 압력을 일정(Main: 3bar, Sub: 1bar)하게 유지한 채, 삽입 분진의 양(1~5g)에 따른 대전량과 비 전하량의 관계를 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타냈다. Figure 2에 의하면, 삽입된 분진의 양이 증가함에 따라 대전량이 대체적으로 상승하는 경향을 보였다. 이것은 분진 입자의 개수가 증감함에 따라 배관 내벽과의 마찰, 충돌의 횟수의 증감하기 때문인 것으로 나타났다.

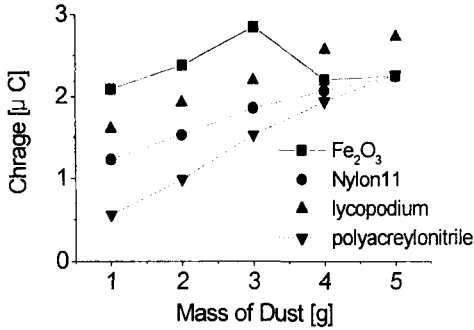


Fig. 2 Relationship between charge and mass of dust fed into spray gun.

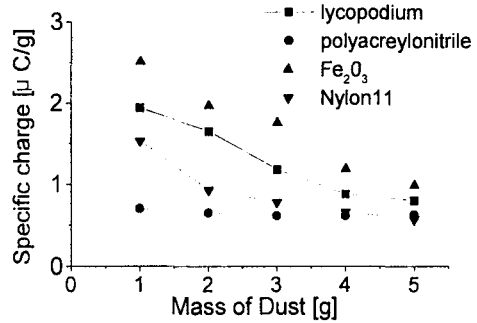


Fig. 3 Relationship between specific charge and mass of dust fed into spray gun.

Table 1 Number of toner particles charged negative and positive for several choices of toner concentration.

Specimen [%=toner/(carrier+toner)]	Count[%]			Net specific charge [μC/g]
	Negative	Positive	Total	
0.1g (9%)	2066 (86)	340 (14)	2406 (100)	-3.41
0.5g (33%)	1942 (87)	291 (13)	2233 (100)	-3.54
1g (50%)	1794 (82)	383 (18)	2177 (100)	-1.60
2g (66%)	2135 (79)	567 (21)	2702 (100)	-0.90

Figure 3에 의하면, 비 전하량의 경우는 삼입 분진의 양이 증가함에 따라 lycopodium, Nylon11, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>은 감소하는 경향을 보였다. 반면, polyacrylonitrile의 경우는 비교적 동일한 값으로 일정한 추이를 나타냈다. 따라서 이러한 현상을 좀 더 명확하게 관찰하기 위해서, 금속 캐리어 1g(KBN-100, lot No. 5-0729)과 토너(DH 431-1, 10[μm])의 일정량(0.1g, 0.5g, 1g, 2g)을 마찰(200rpm, 2분)시킨 후, 분진 입자의 대전 특성을 측정(E-SPART, Model EST-1)하여 Table 1에 나타냈다. 결과에 의하면, 금속 캐리어는 정(+)극성, 토너는 마이너스(-)의 대전 경향을 나타냈다. 삼입 분진이 0.1g(9%)~0.5g(33%)의 영역에서는 배관 내벽과 충분한 마찰, 충돌로 인해 분진 입자의 극성에 큰 변화가 나타나지 않았다. 그러나, 삼입 분진이 0.5g(33%)~2g(66%)의 영역에서는 배관과의 마찰, 충돌에 반해 입자 상호간의 마찰, 충돌의 횟수가 더 크므로 분진의 농도가 증가할수록 부(-)대전에서 정(+)대전의 방향으로 극성이 이동하는 것을

알 수 있었다. 이로 인해 전체적인 비 전하량도 -3.54에서 -1.60, -0.90로 점차로 감소하였다. 따라서, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, lycopodium, Nylon11의 경우, 삽입된 분진 양이 배관에 비해 다소 고농도의 영역으로써 분진의 역 극성 입자의 증가로 인해 비 전하량은 감소한 것으로 나타났으며, polyacrylonitrile의 경우는 삽입된 분진 양이 배관에 비해 저 농도의 영역으로 대체로 일정한 비 전하량을 나타냈다.

### 3.2 분진의 종류에 대한 영향

3.1의 Fig. 2 및 Fig. 3에서와 같이, 분진 종류에 따른 대전특성에 대해서는 실험 장치의 내벽 재질이 부(-)대전성이 강한 합성 수지체(테프론)이므로 분진이 전체적으로 정(+)대전된 상태로 나타났다. 특히 그 중 산화철(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)이 가장 큰 대전량과 비 전하량을 나타냈으며, lycopodium, Nylon11, polyacrylonitrile순으로 나타났다. 이러한 현상에 대한 원인을 파악하기 위해 다음과 같은 실험을 하였다. Table 2에 분진의 겉보기 체적[cm<sup>3</sup>/g], 이온화 포텐셜[eV], 체적 저항률[Ω · m]에 대해 실험 측정하여, 그 결과치를 나타냈다.

Table 2 Specific volume, ionization potential, and resistivity of dusts.

Specimen	Specific volume [cm <sup>3</sup> /g]	Ionization potential [eV]	Resistivity [Ω · m]
lycopodium	3.2	4.40	3.0 × 10 <sup>11</sup>
polyacrylonitrile	1.1	4.54	6.0 × 10 <sup>13</sup>
Nylon 11	1.8	4.45	7.8 × 10 <sup>12</sup>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.5	4.34	3.5 × 10 <sup>8</sup>

분진의 겉보기 체적[cm<sup>3</sup>/g]에 대해 살펴보면, 산화철이 3.5cm<sup>3</sup>/g로 가장 크게 나타났으며, 폴리아크릴이 1.1cm<sup>3</sup>/g로 가장 작은 것으로 나타났다. 결과적으로 분진의 체적이 많아질수록 마찰과 충돌의 횟수 및 체적이 증가함으로써 대전량 및 비 전하량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 표면 분석장치(Ionization Potential AC-1, Riken Keiki, 광량 2005.4 nW, 27°C, 54%)를 사용하여 분진의 이온화 포텐셜[eV]에 대하여 측정한 결과로는, 대전량(Q)=접촉전위(V) · 정전용량(C)의 관계로부터 2개 물질에 대한 접촉전위(V)는 이온화 포텐셜의 차로 결정이 되며, 이에 따라 접촉 전위와 대전량은 비례적으로 증감하는 것으로 나타났다. 따라서, 본 실험에서는 배관 내벽(테프론; 6.72[5])과 분진과의 이온화 포텐셜차에 의존한 대전량의 서열이 나타났다. Table 2의 체적 저항률, ρ(Ω · m, 300V, 1분, 23±2°C; 38±2%RH)은 주 전극의 유효 단면적 S[cm<sup>2</sup>]와 시료의

두께  $L[\text{cm}]$ , 저항  $R[\Omega]$ 을 측정한 후,  $\rho=R \cdot S/L$ 로 계산했다. 그 결과에 의하면, polyacrylonitrile이  $6.0 \times 10^{13}$ 로 가장 높게 나타났으며, Nylon 11, lycopodium, 산화철 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )의 순으로 나타났다. 따라서, 본 실험에서는 저항율이 낮은 분진이 대전량이 상승하는 반비례적인 경향을 알 수 있었다. 이 현상을 좀 더 명확히 관찰하기 위해, 토너 1g(DH 431-1,  $10 \mu\text{m}$ , 약  $10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ [5])과 저항율이 높은 테프론( $> 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ [5]) 및 상대적으로 낮은 알루미늄( $2.62 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ [6])과의 마찰(200rpm, 2분)을 일으킨 후, 전술한 기기(E-SPART)를 사용하여 토너 입자의 극성 분석 결과를 Table 3에 나타냈다. 양쪽의 저항율이 높은 경우(테프론과 토너)에 비해 한쪽의 저항율이 높고 다른 한쪽은 낮은 경우(알루미늄과 토너)가 대전량이 크게 나타났다. 이것은 동일한 양(1g)의 토너인 경우, 입자의 극성이 테프론과의 마찰에 있어서는 부극성 73%(정극성 27%)임에 비해 알루미늄과의 마찰에 있어서는 부극성 81%(정극성 19%)로 증가(감소)함에 따라 전하의 이동량에 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서, 본 실험에 사용한 배관 절연성 재료(테프론)임을 고려할 때, 전하를 일으키는 상대 분진의 저항율이 낮을수록 전자의 이동이 용이하기 때문에 더욱 큰 대전량을 갖는 것으로 나타났다.

Table. 3 Charging characteristics of toner when rubbing with Teflon and aluminum.

Specimen	Count[%]			Mass [ng]	Charges [ $\mu\text{C}$ ]	Specific charges [ $\mu\text{C/g}$ ]
	Negative	Positive	Total			
Teflon	994(73)	364(27)	1358(100)	547.70	-482	-0.88
Aluminium	1068(81)	254(19)	1322(100)	579.90	-907	-1.57

### 3.3 공급압력이 미치는 영향

삽입 분진의 양(5g)과 보조 공급 압력(0bar)을 일정하게 유지한 채, 주 공급 압력 변화(1~4bar)에 대한 분진의 대전량의 변화를 측정한 예를 Fig 5에 나타냈다. 압력의 변화가 증가할수록 대전량은 비례하는 추이를 보였다. 이것은 분진이 정해져 있는 구간을 이동할 때 마찰 속도가 빠르면 단위 시간당 마찰 회수가 증가함에 따라 전하 누설의 영향이 작게 되어지기 때문이다[7]. 또한, 공급압력이 상승하면 분진 입자와 배관 내벽과의 마찰에 있어서 접촉, 분리의 속도 및 강도가 크게 작용하여 더욱 큰 대전량을 발생시키는 것으로 나타났다.

## 4. 결론

정전 분체 도장관의 공기 압력에 의한 분진의 마찰 대전특성에 삽입 분진의 양 및

종류, 공급 압력이 미치는 영향에 대해 실험했다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 삽입분진의 양 및 공급압력의 증감에 비례하여 대전량은 증감하는 것으로 나타났다.
- (2) 삽입분진의 양이 배관에 비해 고 농도인 영역에서는 비 전하량이 대체로 감소하는 것으로 나타났으나, 저 농도인 영역에서는 비 전하량이 일정하게 나타났다.
- (3) 분진의 종류에 대해서는 분진의 체적, 이온화 포텐셜, 저항율에 의존하여,  $Fe_2O_3$ 이 가장 큰 대전특성을 나타냈으며, lycopodium, Nylon11, polyacrylonitrile 순으로 나타났다.

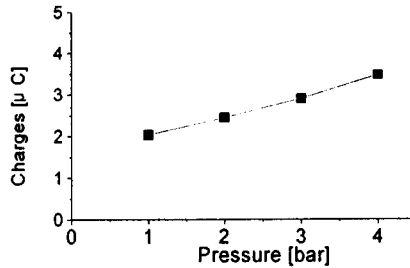


Fig. 4 Relationship between tribocharge and air pressure feeding the lycopodium.

## 감사의 글

본 논문은 1999년 학술 진흥 재단의 학술 연구비에 의하여 일부 지원되었기에, 여기에 기입하여 감사를 표함.

## 참고문헌

- 1) 일본산업안전연구소기술지침 "정전기안전지침", RIIS-TR-87-1, p.6, 1988.
- 2) 정재희외, "전기안전공학", 동화기술, p.422, 1995.
- 3) S. MATSUSAKA "Particle Electrification in Gas-Solids Pipe Flow and its Application" 일본 정전기 학회지 23호, 1999.
- 4) IEC, International Standard 1241-2-3, 1994.
- 5) 일본 정전기 학회, "Handbook of Static Electricity", p.1233, p.284, 1998.
- 6) 물리학 사전 편집위원회 "물리학사전", p.2324, 1989.
- 7) 村田雄司 "정전기의 기초와 대전 방지 기술", 일간공업신문사, p.124, 1998.