

技師會員을 爲한 理論과 實務

● 安全知識 ●

靜電氣災害의 事例와 對應策

최근 취급이 간편한 파인케미컬의 발달등으로 원료 및 재료를 분말의 형태로 취급하는 기회가 많아지면서 취급의 규모, 속도도 함께 늘어나고 粉体の 크기는 점차 미세화하는 경향이 있다. 이같은 취급조건은 어느 것도 분체의 靜電氣 帶電을 원인으로하는 粉塵폭발의 위험성을 증대하는 것이며, 그 때문에 최근 분체취급시의 정전기 재해문제가 클로즈업되고 있다.

분체취급시의 정전기 재해는 분진폭발등 중대한 재해로 연결될 수도 있으므로 여기서는 이같은 재해를 방지하기 위해 참고가 될 수 있는 정전기의 현상과 대책의 개요를 소개하고 분체취급시의 정전기재해 사례를 분석하기로 한다.

1. 靜電氣의 現象

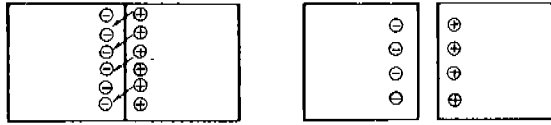
정전기 재해를 방지하기 위해서는 그 배경이 되는 정전기의 현상을 올바르게 이해할 필요가 있으므로 그 개요를 소개한다.

(1) 정전기의 발생과 대전

두개의 물체가 접촉하면 그림 1 과 같이 접촉면에서 한쪽의 물체에서 다른 한쪽으로 電荷의 이동이 생기며, 이 물체의 분리에 따라 전하도 분리된다. 이것이 마찰, 충돌, 剝離등에 의한 일반적인 정전기 발생 현상이다. 한편 물체가 파괴될 때도 그림 2와 같

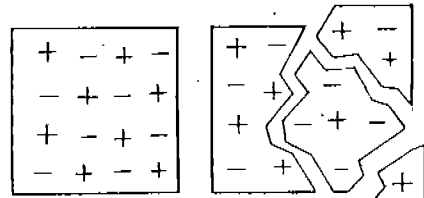
이 물체상에 正, 負 전하의 불균형이 생긴다. 분체의 분쇄에 의한 정전기 발생은 이와같은 예이며, 이러한 경우에는 물질이 동일해도 가령 粒徑이 다른 입자에서 각각 반대 極性의 정전기 대전을 나타내는 수가 있다. 그림 3 과 같이 誘導帶電에 의해서도 정전기대전이 일어난다. 즉 대전물체의 가까운 곳에 절연된 도체가 있으면 이것이 정전유도를 받고 그 전위가 상승한다. 대전물체를 충전 또는 적재한 금속의 용기, 台車등의 대전은 유도대전의 예이다.

발생한 정전기는 모두가 물체상에 머무는 것이 아니고 방전 또는 전기전도에 의해 전하를 잃는다. 그림 4는 전기전도에 의해 대전전하가 대지에 누설하



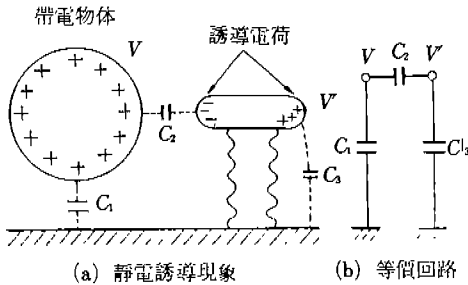
(a) 接觸面에서의 電荷移動 (b) 物體의 분리에 따른 電荷分離

〈그림-1〉 物體의 接觸·分離에 의한 靜電氣發生

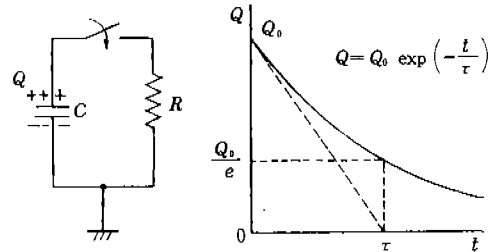


(a) 破壞前 (b) 破壞後

〈그림-2〉 物體의 破壞에 의한 靜電氣發生



〈그림-3〉 絶緣된 導體의 誘導帶電



(a) 等價回路 (b) 帶電量의 減衰特性

〈그림-4〉 電氣傳導에 의한 帶電電荷의 緩和

는 현상의 等價回路와 대전의 減衰특성을 나타낸 것이다. 그림 속의 $\tau(S)$ 는 완화시 定數이며, 이것은 대전물체의 누설저항 $R(\Omega)$ 와 정전용량 $C(F)$ 의積으로 표시된다.

용기내에 충전된 분체와 같이, 體積적으로 분포 대전하고 있을 경우에는 이 완화시정수는 대전물체의 체적저항률 $e(\Omega \cdot m)$ 과 유전률 $\epsilon(F/m)$ 의積으로 나타나게 된다. 표 1에 표시하는 것과 같이 물질의 대전성은 그 저항률에 의해 평가되며 한편 도체의 대전성은 누설저항에 관계된다. 그리고 각종 물질의 저항률, 유전률 및 착화 위험성에 관한 物性值(는 이 글의 끝에서 표시된다.

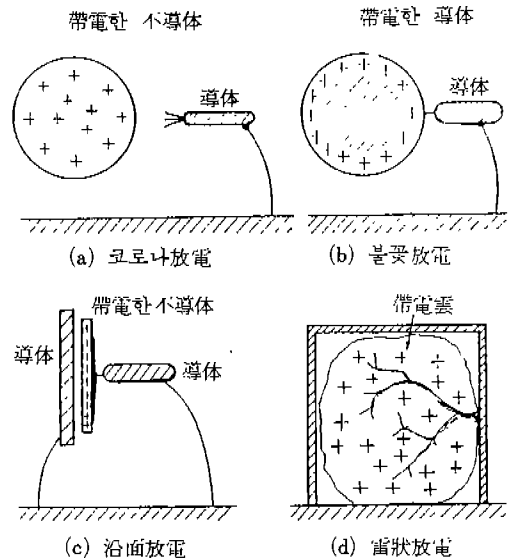
(2) 정전기 放電과 着火

〈표-1〉 物體의 電氣抵抗과 帶電性.

不導體	體積抵抗率 [$\Omega \cdot m$]	10^8	10^{10}	10^{12}	10^{14}
	導電率 [S/m]	10^{-8}	10^{-10}	10^{-12}	10^{-14}
	表面抵抗率 [Ω]	10^{10}	10^{12}	10^{14}	10^{16}
導體	漏洩抵抗 [Ω]	10^8	10^6	10^4	10^2
物體의 帶電性	매우 작다	작다	크다	어느정도 크다	매우 크다

대전량이 많아지고 電界의 강도가 공기의 절연 파괴 전계강도(약 30KV/cm)에 달하면 방전이 개시된다.

이 정전기 방전은 그림 5에 표시하는 것과 같이 코로나放電, 불꽃放電, 沿面放電 및 雷狀放電으로 크게 나누어진다. 코로나방전은 절연성의 대전물체



〈그림-5〉 靜電氣放電의 種類

의 가까운 곳에 돌기한 끝을 갖는 도체가 있을 때에 일어나는 방전으로 도체의 선단에 가까운 일부 부분이 發光한다. 불꽃방전은 대전한 도체와 접지된 도체간에 일어나는 방전으로 강한 불꽃과 피식하는 방전음이 따른다. 연면방전은 얇은 층상의 대전물체가 접지도체에 밀접하여 그 대전량이 대단히 크게 되었을 때에 표면에 따라 불꽃을 동반하여 발생하는 방전이다.

뇌성방전은 공간에 부유하고 있는 대전입자의 대규모적인 확산이 즉 帶電雲이 생겼을 경우에 번개와 같은 발광을 동반하여 발생하는 방전이다. 정전기 방전의 방전에너지가 가연성 물질의 최소 착화에너지 보다 크면 착화원이 되는 가능성이 생기게 된다. 최소착화에너지는 물질에 따라 다르며, 가스 및 액체증기의 그것은 거의 0.01~1mJ의 범위에 있으며 그 가운데서도 탄화수소등 0.2mJ정도의 것이 많다. 분진의 최소착화 에너지는 거의 10~1000mJ의 범위이며, 10~100mJ의 것이 많다. 한편 방전에너지는 도체간에서 일어나는 불꽃방전의 경우에는 다음식에 의해 산출된다.

$$W = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV$$

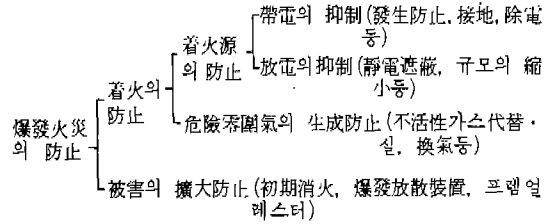
여기에서 W(J)는 방전에너지, C(F)는 대전물체의 정전용량, V(V)는 방전전의 대전물체의 電位, Q(C)는 방전전하량이다. 이외의 방전은 대전한 절연물에서의 방전이며, 방전에너지를 구하는 것은 극히 곤란하다. 정전기 방전의 가연성물질에 대한 착화능력은 코로나방전이 가장 약하며 가스 및 증기의 착화원이 될 수는 있으나, 분진의 착화원은 되지 않는다.

한편 불꽃방전, 연면방전 및 뇌상방전은 가스 및 증기뿐만 아니라, 분진의 착화원도 될 수 있다.

그리고 가연성 물질이 착화하는 조건으로는 그 농도가 적당해야 하며, 폭발 한계라고 말하고 있는 농도범위에서 벗어나면 착화원의 에너지가 아무리 커도 착화하지 않는다.

2. 靜電氣의 一般的인 對策

정전기 대전이 원인이 되는 폭발화재의 방지대책은 그림6과 같이 체계화 할 수 있다. 이하 착화원의 방지를 목적으로 하는 정전기대책의 개요를 기



〈그림-6〉 靜電氣에 의한 爆發火災의 防止對策

술한다.

(1) 靜電氣의 발생방지

정전기의 발생방지는 실제적으로는 곤란한 면이 있으며, 취급속도, 양 및 규모를 가급적 제한하는 것이 그 주가 되고 있다. 기타, 분체를 취급하는 경우에는 미세한 분진을 될 수 있는 한 발생시키지 않도록 粒徑과 형상의 것을 선정함으로써 발생을 억제할 수 있다.

(2) 接 地

접지는 금속제의 설비부분, 용기등 도체를 대전 방지하기 위해 행한다. 도체는 그 누설저항이 $1 \times 10^6 \Omega$ 이하일 것 같으면 대전방지 할 수 있으므로 정전기 접지에 요구되는 접지저항은 1000Ω 이하이면 충분하다 할 수 있다.

정전기 접지에 있어서는 접속을 잊어버리는 것과 접속불량을 일으키지 않도록 하는 것이 가장 중요하며, 그러기 위해서는 접지용 기구와 배선은 기계적 강도가 충분한 것을 사용하며 전기접점을 비롯하여 안전관리를 철저히 하는 것이 중요하다.

(3) 絶연물의 대전방지

절연물의 대전방지를 위해서는 다음과 같은 방법이 실시되고 있다.

(a) 導電性 재료의 사용

용기, 자재, 장치부품등은 절연재 재료의 것을 대신하여 금속제의 것, 혹은 표2와 같이 대전 방지 용품으로 바꿈으로써 대전방지를 할 수 있다.

(b) 加 濕

대전물체 주변의 분위기 습도를 높게하면 일반으

〈표 - 2〉 帶電防止用品一覽

導電性 材料	주요한 帶電防止用品
카본블랙, 金屬粉을分 散시킨 고무	타이어, 카스터, 벨트, 물, 패킹, 호스 매트, 신발, 스티퍼, 장갑, 테이프 시트, 카펫
카본, 블랙, 金屬粉을分 산시킨 플라스틱	필름, 시트, 테이프, 스폰지, 파이프, 호스, 半導體케이스, 자루, 차폐재, 바닥재, 各種成型品
카본, 블랙, 金屬粉을分 산시킨 塗工材	塗料, 接着劑, 페스트, 러미네트, 코팅劑
導電性的 塗工材를 積 層, 프린트한플라스틱	필름, 시트, 테이프, 風管, 텐트, 半導體袋
金屬을 매키, 蒸着한 플라스틱	필름, 시트, 테이프, 半導體케이스 자루, 미터커버, 크린룸窓, 遮蔽材
帶電防止劑를 넣은 플라스틱	필름, 시트, 테이프, 半導體케이스, 자루, 風管, 텐트, 바닥材, 各種成型 品
導電性的 섬유를 混入 한 布, 糸	作業服, 防寒服, 無菌服, 모자, 장 갑, 양말, 카펫, 백필터, 벨트, 로프, 슈트, 베트, 호스, 웨브, 布 袋, 風管, 카펫

로 대전량이 감소한다. 이것은 물체의 표면이 吸濕하여 그 표면저항률이 저하하는 효과에 의한다. 따라서 플라스틱 등 吸濕性이 전혀 없는 재료에 대해서는 효과는 기대 할 수 없다. 加濕방법에는 수증기의 분출, 가습기, 바닥에 물 뿌리는 등이 있으며 이에 따라 상대습도를 65%정도로 하면 적당하다.

(c) 靜置시간

절연물이라 해도 그 저항률이 극단적으로 크지 않는 경우에는 접지된 도체에 접촉한 상태로 靜置하면 대전량이 감소한다. 필요한 정치시간은 표 3에 하나의 목표를 표시하는 것처럼 도전물체의 저항률과 규모에 따라 다르다.

〈표 - 3〉 靜置時間의 一例

帶電物체의 体積抵抗率 [Ω·m]	靜置時間 [分] 帶電物체의容積 [m³]			
	<10	10~50	50~5000	>5000
<10 ⁸	1	1	1	2
10 ⁸ ~10 ¹²	2	3	10	30
10 ¹² ~10 ¹⁴	4	5	60	120
>10 ¹⁴	10	15	120	240

(d) 帶電防止劑의 사용

대전방지제를 절연물의 표면에 도포하거나 내부에 혼입하면 표면의 吸濕성과 이온성이 높아져 결과적으로는 표면저항률이 저하하여 대전방지 효과가 작용한다. 대전방지제는 섬유용, 플라스틱용, 액체용 등 각종 용도의 것이 시판되고 있다.

(e) 除電器의 사용

除電器는 공기를 이온화하여 대전물체의 전하와 반대의 極性을 갖는 이온과의 中和작용을 이용하여 대전전하를 제거한다. 除電器에는 표 4와 같이 대별하여 3개 종류의 것이 있어 용도에 따라 구별하여 사용되고 있다.

〈표 - 4〉 除電器의 종류와 용도

종 류	除電原理	型	특 징	주요용도
전압인가 식대전기	침 또는 細線 에 고전압을 인가하여 코 로나방전을일 으키게 하여 공기들이온화 한다.	표준형 送風형 방폭형 直流型	기종이 풍부 노즐형, 간 형, 프렌지 형, 보트와 형, 점화원이되 지 않는다 除電능력이 크다	필름, 종이 천, 분체, 반도체 溶劑를도공 한 종이, 필 름 單一極性的 필름, 천, 종 이
自己放電	接地플레임에 부착한導電性 섬유混入布와 帶電物체間에 일어나는코로 나放電에의해 空氣들이온화 한다.	바형	輕量, 安價 點火源이되 기 어렵다	필름, 紙, 천, 플라스 틱, 고무粉 体
放射線式 除電器	放射性同位元 素의 電離作 用に 의해 空 氣를 이온화 한다.	α線源 β線源	點火源이되 지 않는다 放射線防護 가 필요	密閉空間內 帶電物체

(4) 작업자의 帶電방지

인체는 정전기상은 도체이며 대전방지를 하지 않으면 불꽃방전을 발생할 위험성이 있다. 대전 방지

작업화 및 도전성의 바닥에 의해 인체의 누설저항이 $1 \times 10^4 \Omega$ 이하가 되면 인체는 대전방지를 할 수 있다. 도전성의 바닥으로서는 금속바닥, 도전성이 있는 콘크리트바닥, 대전방지 가공을 한 바닥재·메트·카페트등이 있다. 한편 작업복은 대전방지 작업복의 착용에 의해 대전방지 할 수 있다.

(5) 放電의 억제

대전방지가 충분하지 않은 경우에는 착화되기 쉬운 위험한 정전기 방전을 방지하는 대책이 강구된다. 이 방법에는 정전遮蔽가 있다. 구체적으로는 접지된 금속제의 판, 관, 망, 선등을 사용하여 대전물체를 커버하나 혹은 體積的 또는 面積的으로 세분화하면 대전물체의 電位가 낮아져 위험한 방전의 발생이 억제된다. 실례를 들면 호스의 표면 또는 肉內的 금속 와이어를 스파이럴狀으로 감아 이 와이어를 접지면 이 호스에서 위험한 정전기 방전의 발생은 피할 수 있다.

3. 靜電氣災害 事例의 分析

최근 문제가 되고 있는 粉體 취급시의 정전기재해 사례의 몇가지에 대해 원인을 분석하고 대책을 검토해 보겠다.

(1) 粉體사이로의 폭발사고

최근 분체 사이로의 폭발사고가 잇달아 발생하여 그 착화원으로서 정전기 방전이 유력시 되고 있다. 다행하게도 이 사고는 모두 피재자가 나오지 않았으나 먼질의 두께가 수10m 나 날아 가는 등으로 최악의 경우에는 큰 사고로 발전하는 위험성도 있어 이같은 종류의 사고의 무서움을 알 수 있다. 그 가운데 한 건의 사고는 원인규명을 위한 정전기대전 실험도 실시되었는데 뇌상방전에 의한 粉塵폭발의 가능성이 시사되고 있으므로 이 분석의 개요를 기술한다.

사고가 있었던 사이로는 용적량100³, 縱円筒형의 고분자 수지원료용 사이로이며, 그 직경은 3.5m 높이는 14m이다. 폭발사고는 사이로 하부의 호퍼(Hopper)에서 원료분체를 빼어 내면서 사이로 상부에서 원료분체를 공기수송에 의해 공급하고 있었을 때에 발생한 것으로서 사이로의 피재상황에서

사이로 내부에서의 폭발사고로 추정되었다.

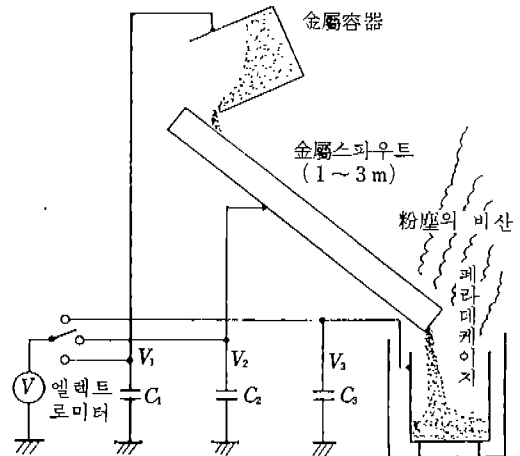
그림7은 원료분체의 대전특성을 조사한 실험의 개요도이며 금속제 용기에 들어간 분체를 금속제 스파우트를 통해 페라테케이지로 받는 과정에서 스파우트와의 마찰에 의해 분체에 발생하는 電荷量 $-Q_2$ [C] ($= -C_2 V_2$), 페라테케이지에 들어가는 분체의 대전량 Q_3 [C] ($= C_3 V_3$), 금속용기에서 나오는 분체의 대전량 $-Q_1$ [C] ($= -C_1 V_1$)을 각각 측정했다. 여기서 C_1, C_2, C_3 [F]는 스티롤론벤서의 정전용량으로 V_1, V_2, V_3 [V]는 엘렉트로 미터로 읽은 電位이다. 실험시에는 스파우트등 측정에서 날아 올라가며 튀어나가는 미세한 분진이 관찰되었는데 이것이 갖는 대전량은 $-(Q_1 + Q_2 + Q_3)$ 로 산출된다. 미세한 분진의 단위중량當의 대전량의 하나의 예를 들면 약 $2 \times 10^{-8} C/g$ 이며, 이것은 페라테케이지로 측정된 분체의 대전량에 비해 약 20배로 전하의 極性은 반대였다.

대전분진雲內에서 뇌상방전이 일어날 수 있는 조건은 명확하지 않으나 대전분진雲의 직경이 수m이상으로 대전분진雲의 주변부에서의 평균電界강도가 5KV/cm 이상이라는 것이 일설로 되어 있다. 원통형 사이로의 벽면에 있어서의 평균전계강도 E [V/m]는 다음식과 비슷하다.

$$E = \sigma r / 2 \epsilon$$

$$\sigma = wq$$

여기서 σ [C/m²]는 분진雲의 공간전하밀도, r [m]는 사이로의 반경, ϵ 는 공기의 유전률 (8.85×10^{-12} F/m), w [g/m³]는 분진농도로 q [C/g]는 분진의



〈그림 - 7〉 粉體의 帶電特性的의 測定

단위중량당 대전량이다. 통상의 사이로 운전시의 분진농도는 약 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 예상되어, 여기에서 구한 평균전계강도는 약 $0.4\text{KV}/\text{cm}$ 에 지나지 않는다. 그런데 사고당일은 통상과는 달리 사이로내의 원로 레벨이 매우 낮았으며 그것이 원인이 된 것으로 생각되거나 사이로벽에 남은 두께 수 100cm 의 분진층이 사고의 직전에 입구쪽으로 무너져 떨어지는 현상이 일어난 것이 거의 확인되고 있었다. 이 현상에 의해 사이로내에 날아 올라간 분진의 농도는 약 $400\text{g}/\text{m}^3$ 로 추산되었는데, 이 농도에서는 평균전계강도가 약 $8\text{KV}/\text{cm}$ 가 되어 뇌성방전이 발생한 가능성을 부인할 수 없다. 이상의 분석 결과에서 이 사고는 통상보다 고농도의 분진층내에서 뇌성방전이 발생하여 이것이 분진의着火源이 되어 일으킨 것이라고 추정되고 있다.

이상의 사고분석에서 용적 100m^3 정도의 사이로에 있어서도 粒徑 수 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세한 분진이 발생하여 사이로내의 분진농도가 수백 g/m^3 이상에 달할 염려가 있을 경우에는 뇌성방전에 의한 분진폭발이 일어날 위험성이 있는 것이 시사된다. 이같은 종류의 주해를 방지하기 위해서는 사이로내에 不活性가스를 충전시킴으로써 분진의 연소위험성을 경감하는 것이 유력한 대책이다.

(2) 백필터設備의 폭발사고

流動乾燥機를 사용하여 메타놀을 함유하는 약 60kg 의 분체를 열풍 건조하는 프로세스에 있어서 앞선 운전 때에 백필터에 막힌 분진을 털은 후, 운전을 재개한 직후에 전조기가 폭발한 사례가 있다. 이 전조기에는 화석제의 백필터가 사용되고 있었으므로 이것이 수 10KV 로 대전하여 여기에서 부터의 정전기 방전이 가연성 溶劑증기에 착화하여 잇달아 분진폭발로 이어진 것으로 추정되고 있다. 한편 中低圧法에 의한 폴리에틸렌을 제조하는 공정에 있어서 중합후 전조처리한 폴리에틸렌 분말을 원로탱크로 공기수송중에 집진기가 폭발한 사례도 있다.

이 사고는 집진기 백필터의 분진을 털 때에 분진이 덩어리가 되어 낙하하여 이때에 발생한 정전기 방전이 착화원이 되어 분진폭발을 일으킨 것으로 추정되고 있다.

이상의 사례가 말하듯, 백필터의 대전은 착화원이 되는 확률이 높으므로 이 같은 종류의 재해를

방지하기 위해 대전방지 가공된 백필터가 사용되고 있다. 이외에도 백필터설비에서는 콘텐서, 台車 등 금속물체의 접지가 불완전 했기 때문에 발생한 사례도 적지 않으므로 이들 금속부분의 확실한 접지가 불가결하게 된다. 특히 백필터의 달아내는 금구조임밴드, 除電용와이어등은 접지를 잊어버리는 수가 많으므로 운전전에 접지의 확인을 철저히 해야 한다.

(3) 粉体投入·자루넣기作業에 있어서의 폭발 사고

스크류콘베어가 고장났기 때문에 내면에 폴리에틸렌을 바른 30kg 들이 紙袋에서 직접 용제가 들어간 용해조에 분체를 투입하는 작업중에 화재가 일어난 사례가 있다. 이 사고는 분체의 투입에 의해 $50\sim 60\text{KV}$ 로 대전한 자루로부터의 정전기 방전 또는 대전한 인체로부터의 방전이 용제증기 착화원이 되어 발생한 것으로 추정되고 있다.

이같은 종류의 재해를 방지하기 위해 용제가 들어 있는 溶解槽에는 분체의 직접투입을 피하고 금속제 슈터등의 導體製 투입설비를 사용하여 투입하는 방법이 채용되고 있다. 또 분체의 대전위험을 완화하기 위해 작업환경을 가습하거나 투입전에 除電器를 사용하여 분체의 대전을 제거하는 대책이 강구된다.

한편 대형 호퍼에서 1톤들이 연화비닐자루에 분체를 넣는 작업중에 분진폭발이 일어난 사례가 있다. 이 작업에서는 사고 발생전부터 작업자가 가끔 전격을 받고 있어, 자루가 $60\sim 100\text{KV}$ 로 대전하는 것이 확인되고 있다. 분체의 자루넣기에 있어서는 자루의 용량이 1톤 가까이 되면 정전기 방전이 직접 분진에 착화하는 위험성이 있다.

이것은 극도로 대전한 분체나 자루로부터 불꽃 방전과 연면방전이 일어나기 때문인 것으로 생각된다. 이같은 종류의 재해를 방지하기 위해 대전방지가공된 플레콘백을 사용하여 투입방법도 다량의 분진이 비산하지 않도록하는 연구가 진행되고 있다. 그리고 플레콘백의 매어달기 금구등 금속부분의 확실한 접지 및 작업의 대전방지는 분체투입작업 및 자루넣기작업에 있어서도 가장 기본적인 대책이다.

(내용중 수치 또는 예등은 일본의 예로 되어있음) *