기술지도자료연구

화학 90-081-3

한국산업안전공단 산업안전보건연구원

분진방폭 안전기법

1990. 12.

한국산업안전공단
산업안전보건연구원
INDUSTRIAL SAFETY AND HEALTH RESEARCH INSTITUTE

안전연구부

머 리 말

가연성분체에 의한 분진폭발은 탄광에서의 탄진폭발에서 보는 바와 같이 순식간에 많은 인명을 손상시키고 또한 대규모의 설비파괴를 가져오는 등의 대재해를 발생시켜 그 기업뿐만 아니라 사회적으로도 대단히 커다란 영향을 미치는 경우가 많다. 분진폭발에 대해서는 소맥분이나 알루미늄분말등에 의한 폭발등과 같이 관련산업종사자들에게는 종래부터 많이 알려져 왔으나, 폭발의 원인이 되는 분진의 종류 및 폭발의 발생경위 및 전파순서등에 대해서는 일반적으로 잘 알려져 있지 않은 것이 현실정이다.

최근의 과학기술의 진전에 따라, 파인세라믹스공업 또는 정밀화학공업에서 보는 바와 같이 각종 분체의 생산 및 가공작업 또는 부차적으로 분진을 발생하는 작업이 산업현장에 많이 도입되어 왔고 그에 따라 분진에 의한 폭발·화재가 빈번하게 발생하였으나 기업주 및 관계자들은 이에 대한 충분한 지식이 없어 적절한 폭발·화재의 방지대책이 수립되어 있지 않은 경우가 많다.

이에 당산업안전보건연구원의 화학연구실에서는 분진의 폭발 및 분진에 의한 화재를 방지하는데 기여하기 위하여 본책자를 발간하게 되었다. 아무쪼록 본자료가 분체를 취급하는 작업에 종사하는 실무자들에게 많은 도움이 되기를 바라마지 않는다.

1990. 11.

산업안전보건연구원장

여 백

목　　차

제 1 장　서 론 ································ 5

1-1　용어의 설명 ································ 6

제 2 장　분진폭발의 원리 ································ 13

2-1　연 소 ································ 13

2-2　폭 발 ································ 14

2-3　분진폭발의 발생기구 ································ 17

제 3 장　분진폭발에 영향을 주는 요인 ································ 24

3-1　분진의 폭발성에 영향을 미치는 인자 ································ 24

3-2　분진의 폭발특성 ································ 28

3-3　분진의 폭발위험성과 폭발지수 ································ 38

제 4 장　분체 대전 현상 ································ 41

4-1　정전기 발생현상 ································ 41

4-2　정전기 발생에 영향을 주는 요인 ································ 45

4-3　정전기 대전구조 ································ 47

4-4　분체의 대전 ································ 54

제 5 장　분진폭발 방지대책 ································ 58

5-1　방폭의 원칙 ································ 58

5-2　화학공장의 정전기 발생위험과 방지대책 ································ 64

5-3　분체공정의 정전기 발생위험과 방지대책 ································ 71

5-4 분진폭발 예방대책 ······ 75
5-5 분진폭발 · 화재의 피해억제대책 ······ 87

참 고 문 헌 ······ 101

부록 1 분진의 폭발특성표 ······ 103

제 1 장 서 론

일반적으로 가연성분진이 존재하는 장소는, 업종이나 취급형태에 관계없이 분진에 의한 폭발·화재의 위험성이 있고 관련 작업자들에게 커다란 피해를 입힐 우려가 있다.

현재까지 발생한 분진에 의한 폭발·화재의 사례를 보더라도 저장탱크, 혼합기, 집진기 등의 시설에서, 알루미늄, 마그네슘등의 금속, 플래스틱등의 화학제품, 사료, 목재, 석탄등의 분진에 의한 중대재해가 여러형태로 발생하고 있다. 또한 폭발·화재시의 발화원은 보통 밝혀내기 힘들지만 용접 및 절단시의 불꽃, 충격불꽃, 마찰열, 화학반응열, 정전기등에 의한 것이 많다.

한편 분진에 의한 폭발·화재의 방지대책으로는, 가연성의 분진이 존재하는 장소의 위험성에 따라 환기, 통풍, 제진등의 방법, 화기 등의 사용금지, 방폭구조 전기기계·기구의 사용등이 정해져 있으나 불충분한 점이 많고, 또한 분진을 취급하고 있는 사업장중의 일부에서는 그 위험성을 충분히 인식하지 못하고 있는 예도 있는만큼 적절한 대책이 수립되어 있다고는 말할 수 없다.

분진에 의한 폭발·화재의 방지대책을 수립할때 고려할 사항은, 가연성의 분진을 취급할 경우에는 폭발·화재의 위험성이 항상 존재한다는 사실을 인식하고, 그 위험요소를 근본적으로 제거하기 위하여 다음 사항에 유의해야 한다.

① 분진을 폭발한계밖의 상태에서 취급할 것

② 분진을 취급하는 시설주위에서 발화원의 가능성이 있는 요소를

배제할 것

또한 폭발·화재가 발생했을 경우를 예상하여 관련시설의 배치, 내압화(耐壓化), 폭발억제장치 및 폭발압력 방산구의 설치등 피해의 최국소화, 최소화를 위한 대책도 중요하다.

본서에서는 분진폭발의 위험성 평가를 기준으로하여 분진폭발·화재에 대한 총합적인 대책을 현장의 실정에 맞게끔 이해하기 쉽게 정리하였다.

1-1 용어의 설명

(1) 분체와 분진

분체는 분말, 가루등과 같은 의미로 사용되고 있고, 대단히 많은 고체입자의 집합체로, 각입자간에 적당한 상호작용을 가지고 있는 상태를 말한다. 공업적으로는 좀더 넓은 의미를 가지고 있어 곡물과 같은 크기로부터 에어로졸이나 분진과 같은 미세분말까지 포함한다.

고체가 세분화하여 분체가 되면 고체상태로 유동성을 가지게 되고 또한 비표면적이 커지게 되면 화학적 활성이 커지므로 고체상태와는 상당히 다른 특성을 나타내게 된다.

일반적으로 분체는 지름이 1000μm보다 작은 고체입체를 말하고 분진은 공기중에 부유하는 미세한 고체입자를 의미하며 지름이 76μm 이하의 분체를 말한다. 공기중에 분진이 비교적 균일하게 부유·분산된 상태의 고체-기체혼합물을 분진-공기혼합물(또는 분진운)이라고 부르고 이때의 분진농도는 단위체적당 혼합물중의 분진중량(g/m^3, mg/m^3)으로 나타낸다. 일반적으로 공기중에서 연소하는 것을 가연성 분

진, 연소하지 않는 것을 불연성분진이라 한다.

(2) 분진폭발

분진－공기 혼합물에서 기상중의 산소와 분진이 반응하여 국소적인 연소반응대를 형성하고 이 반응대가 혼합물중을 전파함으로써 압력의 발생이 인정되면 이것을 분진폭발이라 한다. 분진폭발은 현상적으로는 가스폭발과 유사하나 특징으로는, 최초의 소규모의 폭발로 생긴 폭풍에 의하여 퇴적분진이 부유하게 되고 다시 폭발이 연쇄적으로 발생하여 대규모의 재해를 발생시킬 가능성이 높은 점이다.

일반적으로 이와 같은 가연성 분진에는 알루미늄, 마그네슘, 티탄등의 금속류, 합성수지, 화학약품류, 식품·곡물류, 농산물·목제품류, 석탄등이 있다. 그리고 분진폭발을 일으키는 분진의 입자경은 500㎛ 이하이다.

(3) 1차폭발과 2차폭발

분진폭발은 최초의 폭발단계에서 발생한 압력파가 퇴적되어 있는 분진을 부유시키는 원인이 되는 특성을 지니고 있다. 이 분진에 의하여 또다시 분진운이 형성되고 그것이 이내 존재하고 있는 폭발화염에 의하여 발화한다.

여기서 부유분진이 발생되는 최초의 단계를 1차폭발이라고 한다. 그리고 새롭게 형성된 분진운이 화염을 동반하며 폭발하는 단계를 2차폭발이라 한다.

공장에서의 대부분의 분진폭발의 순서는 다음과 같다. 먼저 플랜트내의 한 장소에서 분진폭발이 발생한다(1차폭발). 그리고 부적당한 폭발방지대책으로 인하여 화염이 플랜트로부터 작업장까지 확대한

다. 그때 작업장에 퇴적되어 있는 분진이 분산·부유하여 분진운을 형성하며 플랜트로부터의 화염에 의하여 발화한다.(2차폭발) 이때 2차폭발은 1차폭발보다도 대규모이고 또한 방출하는 에너지량도 많으며 건물의 파괴 및 인명의 살상을 불러 일으킨다.

(4) 폭발한계

분진폭발의 발생조건중에 분진-공기혼합물의 분진농도가 있다. 폭발은 이 분진농도의 일정한 농도범위내에서 발생하며 폭발의 유무를 결정한다. 2개의 한계농도(하한, 상한)가 존재하는데 이것을 폭발한계라 부른다. 이 중의 하한농도를 폭발하한계(폭발하한계농도)라 하고 상한농도를 폭발상한계(폭발상한계농도)라 한다. 각종 분진의 폭발하한계치는 잘 알려져 있으며 공업적으로 사용되는 대부분의 가연성분진의 폭발하한계는 20～100 g/m^3의 범위에 속한다. 그러나 폭발상한계치는 고농도의 분진의 균일한 분산이 실험적으로 극히 곤란하여 적정한 값을 구하지 못하고 있는 실정이다.

(5) 폭발압력

밀폐용기내의 분진-공기 혼합물이 발화하여 연소반응대가 전파되면 반응열에 의한 고온의 발생 및 생성가스의 증가에 의하여 용기내의 압력이 증가한다. 반응이 혼합물의 전체에 전파되면 압력은 최고치를 나타내고 그후 가스의 냉각에 의하여 압력은 저하한다. 이 압력의 최고치를 폭발압력이라 한다.

폭발압력은 분진의 종류, 입자경 및 농도, 용기형상, 분진의 유동상태등에 의하여 영향을 받는다. 폭발압력은 최적분진농도에서 최대치를 나타내며 이 최대치를 그 분진-공기혼합물의 최대폭발압력이라 한다.

또한 폭발압력의 시간에 대한 변화율의 최대치를 최대압력상승속도라 한다.

(6) 폭발한계 산소농도

질소등의 불활성가스를 첨가하여 분진-공기혼합물중의 산소 농도를 감소시켜가면 어떠한 분진농도에서도 폭발이 발생하지 않는 한계산소농도가 존재한다. 이것을 한계산소농도라 하며 이값은 분진 및 불활성가스의 종류에 의존하고 온도와 압력의 상승에 의하여 저하한다. 다수의 유기성 분진의 폭발한계산소농도는 질소첨가시에는 10～12 %, 탄산가스 첨가시에는 13～15 %의 범위내에 존재한다.

(7) 발화온도

발화온도는 가연성분진을 공기중에서 가열했을 때 자연 발화하는 최저온도를 말한다. 발화온도는 가열하는 용기와 측정방법, 분진의 형태등에 의하여 크게 차이난다. 분진의 형태는 부유분진(분진-공기혼합물)과 분진층(퇴적분진)이 있고 각각 부유분진의 발화온도, 분진층의 발화온도라 한다. 전자는 일정조건하의 가열분위기중에 분진을 분산시켜 측정한다. 후자는 가열판위에 분진층시료를 놓고 측정한다. 이때 발화온도는 시료분진의 체류시간, 가열방법, 시료의 크기등에 의하여 영향을 받는다. 분진층의 발화온도는 부유분진층의 발화온도 보다도 일반적으로 낮은 값을 나타낸다.

(8) 최소발화에너지

분진-공기혼합물에 국부적인 에너지를 투입했을 때, 혼합물의 온도, 압력, 분진농도등의 다양한 조건하에서 발화하는 최소에너지를 그 분진-혼합물의 최소발화에너지라 한다. 이것을 측정하는데는 일반적으로

전기방전이 사용된다. 분진－공기혼합물의 용기속에 장치된 전극간에 전기스파크를 발생시켜 발화여부를 조사하여 최소발화에너지를 측정한다. 실온에서의 분진－공기혼합물의 최소발화에너지는 통상 1 mJ 이상이며 대부분의 분진이 10mJ 이상으로 보고 되어있다.

(9) 자연발화

공기중의 퇴적분진이 비교적 저온에서 외부로부터의 에너지공급없이 자연적으로 발열현상을 일으켜 그 열이 축적되어 온도가 상승하여 발화연소에 도달하는 현상을 말한다. 자연발열의 원인으로는 산화반응, 분해반응, 흡착, 발효등이 있다.

(10) 발화원

가연조건을 형성하고 있는 분진에 에너지를 부여하여 발화시켜 화재·폭발을 일으키는 원인이 되는 물질이나 현상을 말한다. 발화원의 예로는 전기기기의 불꽃, 정전기불꽃, 용접의 불꽃, 고온표면, 고온가스, 충격·마찰에 의한 불꽃, 마찰열, 열복사, 단열압축등이 있다.

(11) 분진화재

분진화재는 퇴적분진이나 분진층과 같은 축적된 분진의 연소현상을 총칭하는 것으로 분체화재라고도 한다. 분진화재에는 발염연소, 그을림연소, 무염연소의 세가지 형식이 있다. 발염연소는 분진의 가열의 결과 열분해 또는 기화에 의하여 가연성기체를 발생하여 이것이 발화원에 의하여 발화하여 화염을 동반하며 연소하는 현상이다. 그러나 공기가 부족하거나 가연성기체의 발생량이 부족하면 발염연소 현상이 생기지 않는다. 이것을 그을림연소라 한다. 무염연소는 가연성 기체를 발생하지 않는 탄소나 금속등의 고체 및 유기물의 분해생성물인 탄

소가 공기의 침입에 의하여 발생하는 표면연소현상을 말한다.

(12) 폭발압력 방산구

폭발압력 방산구는, 폭발위험성이 있는 장치의 일부에 구조상 고의적으로 내압력(耐壓力)이 작은 부분을 설치한 것으로, 폭발에 의한 내압(內壓)의 상승시에 그부분으로부터 압력이 방출되어 장치 본체의 파열, 파손을 막고, 피해를 국소화하는 것을 목적으로 하며 폭발벤트라고도 부른다.

이 방출구는 평소에는 분진의 누출을 막기 위하여 파열판, 카바, 판넬등으로 밀봉되어 있다. 분진폭발을 대상으로 할 경우 일반적으로 분체처리장치는 용적이 크고 내압력(耐壓力)이 낮기 때문에 방출구의 최소 필요면적을 크게 하지 않으면 안된다.

(13) 폭발억제장치

폭발의 개시를 조속히 감지하여 폭발이 전파되는 경로 및 폭발화염에 폭발억제제(소화제)를 분사하여, 폭발을 초기단계에 억제하는 시스템을 폭발억제장치라 한다. 이 시스템은 감지부와 억제부로 분리되고 감지부는 폭발화염에 따른 압력, 적외선 및 자외선, 온도 상승을 감지한다. 분진폭발의 경우 분진이 광의 투과를 방해하거나, 온도상승에 의한 감지는 응답이 느리므로 일반적으로 압력감지에 의한 방법이 적당하다. 제어부는 감지기의 신호를 증폭하여 전기신호에 의하여 억제제를 분사하는 제어기능을 가진다.

억제제는, 할로겐화합물 소화제 또는 분말소화제를 내압용기에 충전하여 사용하며 살수장치도 이용된다. 이때 금속분진에 대한 할로겐화합물 소화제 및 물과 같이, 분진과 위험반응을 일으킬 가능성이 있

는 억제제를 사용해서는 안된다.

(14) 방진구조

방진구조에는 분체를 취급하는 기기, 용기로부터 분진을 외부에 누출시키지 않는 경우와 발화원이 되는 고온발생부위와 불꽃발생부위에 외부의 분진을 퇴적시키지 않는 경우가 있다.

용기로부터 분진을 누출시키지 않는 방진구조는 전폐구조로 하여 플랜지등의 접합면을 패킹이나 실링으로 밀봉하면 된다. 그러나 회전축의 베아링부위나 전기설비등에 분진을 유입시키지 않는 방진 구조는 복잡하며 다음과 같은 방법이 채택되고 있다.

① 기기를 전폐구조로 하고 접합면에 패킹을 사용한다.

② 회전부분의 실링은 Dust실링, V링등의 실링을 행한다.

③ 약간 가압시킨 공기나 불활성가스를 기기내에 봉입한다.

④ 기기를 불연구조의 건물이나 상자에 넣어 독립시켜 분진발생원으로부터 격리한다.

제 2 장 분진폭발의 원리

2-1 연 소

(1) 연소현상

연소란 발열산화현상으로서, 연소가 일어나려면 발열산화 반응이 쉽게 일어날 수 있는 가연성물질, 가연성물질을 산화시키는 산소공급원, 가연성물질과 산소공급원을 활성화시키는데 필요한 에너지인 점화원의 세가지 요소가 반드시 필요하다.

가연물이 되려면 우선 산소와 화합할때 생기는 연소열이 많아야하며, 그리고 열전도율이 작고, 산소와 화학반응을 일으키는데 필요한 활성화에너지가 작아야 한다.

가연물이 산소와 화합하여 연소하는 데에는 열이 필요하며 점화원이란 활성화 에너지를 주는 것이다.

점화원으로서는 화기·고열물등의 열에너지가 점화원으로 되는 것이 가장 많고, 전기기기·배선류의 누전, 과전, 전기스파크 등의 전기적에너지, 정전기스파크, 마찰·충격으로 인한 불꽃, 벼락 및 고열물의 열, 기체의 단열압축에서 발생하는 열, 산화열·분해열·발효열등과 같은 자연발열등이 있다.

(2) 연소의 활성화 에너지

연소는 산화반응으로서의 화학반응이고 原系에 일정한 에너지(E)가 주어져서 활성상태에 달한 후 에너지를 방출하면서 생성계로 옮겨가는 것이다. 연소의 경우 이 활성화에 필요로 하는 에너지가 점화에너지이고, 생성계와 原系와의 에너지의 차(Q)가 연소열에 상당한다.

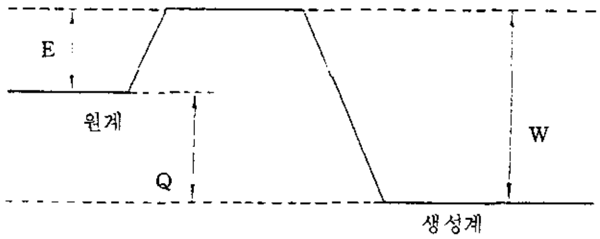


그림 2-1 활성화 에너지

E : 활성화에너지 (점화에너지), Q : 반응열 (연소열)

W : 활성계가 생성계로 옮길 때의 방출에너지

$Q : W - E$, $W = Q + E$, $Q - E$가 클수록 타기 쉬워진다.

이때에 생기는 연소열은 전부 미반응 부분의 활성화로 쓰이는 것이 아니고 복사, 대류, 열전도등에 의하여 잃게 되는데 흡열과 발열을 비교하여, 발생하는 열이 많으면 연소는 계속되고 그리고 확대된다.

2-2 폭 발

가연성 기체가 산소와 적당한 비율로 혼합되었을때 점화원이 존재하면 급속하게 연소하여 팽창되기 때문에 국부적으로 압력이 급격히 상승하여 폭발현상을 나타낸다.

가연물이 고체나 액체인 경우에도 고체나 액체가 직접 연소되는 것이 아니라 열로 인하여 분해되어 가연성가스를 방출하여 타오르게 되는 것이다.

일반적으로 폭발은 기상폭발과 응상폭발로 대별할 수 있다. 기상폭발이란 폭발을 일으키기 이전의 상태가 기상(氣相)인 경우를 뜻하

며, 응상폭발이란 폭발이전의 물질의 상태가 고체 또는 액체와 같은 응상(凝相)인 경우를 뜻한다.

(1) 기상폭발

① 혼합가스폭발	가연성가스와 지연성 가스의 적당한 농도의 혼합가스 안에서의 연소파 또는 폭연파의 전파에 의해서 생기는 폭발	예 : 공기 및 수소가스, 프로판가스, 에테르증기등의 혼합가스의 폭발
② 가스의 분해 폭발	단일가스의 분해반응의 반응열이 클 때에 나타나는 가스폭발	예 : 아세틸렌, 에틸렌, 산화에틸렌등의 분해에 의한 가스폭발
③ 분진폭발	공기중에 분산된 가연성 분진의 급속한 연소에 의한 폭발	예 : 공기중에 분산된 황산가루, 밀가루, 알루미늄가루등의 분진폭발
④ 분무폭발	공기중에 분출된 가연성 액체의 액상의 급격한 연소에 의한 폭발	예 : 유압기의 기름의 분출에 의한 油商의 폭발

(2) 응상폭발

① 혼합위험성 물질의 폭발	산화성 및 환원성물질의 혼합 위험에 따른 폭발	예 : 질산알미늄과 유지, 액체산소와 탄소분, 과망간산칼리와 농황산 등의 혼합에 의한 폭발

② 폭발성 화합물의 폭발	유기과산화물, 니트로화합물, 질산에스텔등의 분자내 연소에 따른 폭발 및 흡열화합물의 분해반응에 따른 폭발	예 : 트리니트로톨루엔, 니트로글리세린 등의 폭발
③ 증기폭발	과열액체의 생성에 따른 급속한 증발현상을 수반한 폭발	예 : 용해슬러그의 물과의 접촉에 따른 수증기폭발, 고분자 모노어의 이상중합에 의한 용기의 파열직후의 증기폭발
④ 도선폭발	금속도선에 큰 전류를 흘러 보냈을때 금속의 급속한 기화에 따른 폭발	예 : 알루미늄도선의 전류에 의한 폭발
⑤ 고상전이에 의한 폭발	고상간의 전이열에 따른 공기의 팽창에 기인한 폭발	예 : 무정형 안티몬이 결정형 안티몬으로 전이할 때의 발열에 따른 폭발

(3) 분진 폭발위험 장소

분진위험장소는 폭발성분진, 도전성분진, 가연성분진 또는 연소하기 쉬운 섬유의 위험성, 부유상태, 집적상태 등을 충분히 고려하여 그의 적용을 정하여야 한다.

위험장소에 해당하는 장소를 예시하면 다음과 같다.

① 폭발성분진 (마그네슘, 알루미늄) 을 분리하는 장소, 분쇄하는 장소, 한 개의 용기에서 다른 용기로 옮기는 장소, 한 개의 용기

에서 다른 용기로 옮기는 장소, 또는 이들의 분진을 저장하는 장소

② 도전성분진(카본블랙, 석탄, 코우크스, 철, 동 등)을 분리하는 장소 분쇄하는 장소, 한개의 용기에서 다른 용기로 옮기는 장소, 저장하는 장소, 분진을 수송하는 콘베어가 있는 장소, 건조장등

③ 가연성분진(소맥분, 전분, 설탕, 합성수지)을 분리하는 장소, 한개의 용기에서 옮기는 장소, 저장하는 장소, 분진을 수송하는 콘베어가 있는 장소, 건조장등(가연성분진에는 공기중에 부유하여 분진폭발을 일으키는 것과 부착한 상태에서 착화의 원인이 되는 것이 있다)

④ 타기 쉬운 섬유(견, 마, 면, 대패밥, 톱밥)등을 분리하는 장소, 한 개의 용기에서 다른 용기로 옮기는 장소, 분진을 수송하는 콘베어가 있는 장소, 건조장등

2-3 분진폭발의 발생기구

(1) 분진폭발 재해

가연성 고체의 미분이 어떤 농도 이상으로 공기와 같은 조연성가스중에 분산된 상태로 있을 때는 발화원에 의하여 착화됨으로써 분진폭발을 일으킨다. 분진폭발은 유황이외에 플라스틱, 식품사료, 석탄등의 분말 및 산화반응열이 큰 금속, 예를 들면 마그네슘, 칼슘, 실리콘 등의 분말에서 일어난다.

이러한 분진의 폭발범위는 분진의 종류, 분진의 크기, 수분의 함유량 기타 조건에 의하여 다르나 중정도의 소맥분에 대하여는 공기 1세제곱미터중 60그램이 폭발하한이라고 한다.

폭발상한은 곡분의 경우 1,000그램 정도라는 설이 있다. 그러나 분진은 가스나 증기와 달라 균일하게 분포하기 어렵고 국부적으로 폭발범위로 될 우려도 있으므로 폭발방지에는 특별히 주의하여야 한다.

일반적으로 제조공업에 있어서 분진폭발재해는 현재로서 화약 그밖의 폭발성 분진류에 의한 재해를 빼고서는 가연성가스나 인화성 액체류에 의한 폭발재해에 비하면 그 발생건수나 손해 정도는 훨씬 적지만, 최근에는 플라스틱공업·유기합성공업·분말금속공업·사료공업 등 기술의 진보에 따라 원료·제품을 분체로 다루는 공정이 많아졌고, 이같은 분체의 취급분야의 확대, 취급량의 증대, 공정의 연속화, 스피이드화에 의하여 분진폭발의 잠재위험성이 증가하고 있다.

분진의 연소·폭발위험성을 생각할 때, 공기 안에 부유한 경우와 구조물 위에 퇴적된 경우로 나눌 수 있다. 입자가 직경이 10^{-5} ㎝이하로 되면 공기중에 분산해서 현탁상태가 된다. 이들은 액체의 미립자, 즉 미스트상태와 거의 비슷해서 침강을 일으키지 않는다. 이처럼 되면 가연성 가스와 마찬가지의 위험성이 있다고 생각해도 되는데, 실제로 우리들이 직면하는 분진은 그보다 입자가 커서 대체로 10^{-3} ㎝ 정도 이상의 입자이어서 부유가 영구적인 것이 아닌 것이다.

이같은 분진의 폭발은 공기와 잘 혼합되어 있는 부유상태가 필요하다. 따라서 (1)가연성 (2) 분진상태 (3) 지연성가스(공기) 중에서의 교반과 유동 (4) 발화원의 존재라고 하는 각종 조건이 필요해진다. 그리고 분진이 장시간 가열되어 건류가스가 발생하면 가스폭발의 위험성이 있으며 분진폭발의 원인이 될 수 있다.

(2) 가연성 분진의 폭발기구

분진의 폭발은 분진입자의 표면에 있어서 산소와 반응이 일어나는 것으로서, 가스폭발처럼 산화제 (공기) 와 가연물이 균일하게 혼합되어 반응하는 것이 아니라, 일정한 덩어리로 되어 있는 가연물의 주위에 산화제가 존재한다고 하는 불균일한 상태로 반응이 일어나며, 폭발에 의해서 방출되는 에너지는 최고 값으로 비교하면 가스폭발의 수배에 달한다.

그러나 분진폭발은 가스폭발이나 화약폭발과 달라서 발화에 필요한 에너지가 훨씬 크다. 이것은 분진이 폭발하는 과정이 다음 그림과 같이 되기 때문이다.

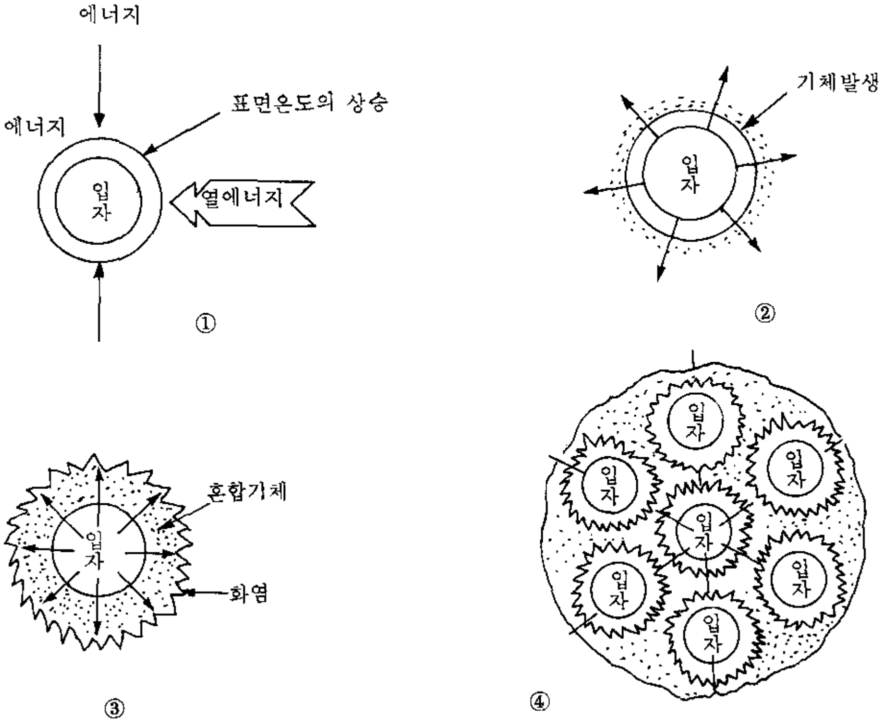


그림 2-2 분진의 폭발과정

그림 2-2 의 설명은 다음과 같다.

① 입자표면에 열에너지가 주어져 표면 온도가 상승한다.

② 입자표면의 분자가 열분해 또는 건류작용을 일으켜 기체가 되어 입자의 주위에 방출된다.

③ 이 기체가 공기와 혼합되어 발화해서 화염을 생기게 한다.

④ 이 화염으로 생긴 열은 다시 분말의 분해를 촉진시켜서 차례로 기상에 가연성 기체가 방출되어 공기와 혼합 돼서 발화하여 전파된다.

따라서 분진폭발도 결국은 본질적으로 가스폭발이어서 분진 자체에 가연성의 가스가 저장되어 있는 것이라 생각해도 된다고 할 수 있다.

분진폭발의 경우 입자가 연소할때 발생하는 분출가스 때문에 사방팔방으로 비산하고, 입자 자체도 파열비산되므로 이것도 또한 하나의 화염전파기구를 형성하는 것으로 되어있다. 이 화염전파 속도를 Cassel 등은 복사전열을 고려해서 공식 ＜2.1＞과 같이 표현했다.

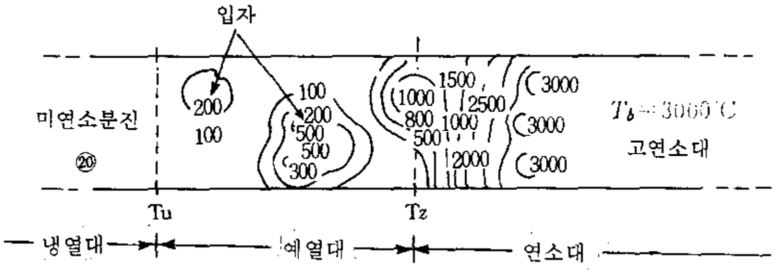


그림 2-3 분진폭발의 화염전파 상황

$$V_{st}=\frac{\dfrac{\lambda(T_b-T_z)}{b}+\dfrac{bw\sigma\alpha F(T_b^4-T_c^4)}{\rho_{st}r}}{(c\rho+C_{st}w)(T_z-T_u)} \qquad (2.1)$$

여기에서 V_{st} : 화염의 전파속도 w : 분진농도 α : 보정계수 σ : 방사능 F : 기하학인자 ρ_{st} : 분진밀도 r : 분진의 평균 반지름 c_{st} : 분진의 평균비열.

그리고 또한 λ, ρ, c는 각각 분진공기의 미연혼합물의 열전도율·평균밀도·비열이다.

이처럼 분진의 연소기구는 가스에 비해서 복잡하며 많은 연소가 작용하기 때문에 폭발특성의 정량적인 수치를 명확히 정하기가 곤란하여 오히려 상대적인 비교값으로 위험성을 논하는 경우가 많다.

화염전파에서는 몇가지 현상이 잘알려져 있으며, 그러한 현상은 화염의 전파방향에 의하여 좌우된다. 즉, 관이나 공간을 화염이 통과할 때의 개방단이나 밀폐단의 형태에 연관되어 있으며, 개방단으로 부터 밀폐단에의 화염전파는 일반적으로 완만하며 전파속도는 거의 일정하다.

반대로, 밀폐단으로부터 개방단에의 화염전파의 전파속도는 급속하다. 만약에, 관의 중앙에서 발화했을 때는, 양방향으로 화염이 형성되고, 상호간에 멀어지는 쪽으로 화염이 이동한다. 또한, 기류를 탄 분진이 흐르고 있는 관속에서는 그림 2-4 와 같은 현상을 일으키며, 분진운의 이동에 따라 화염도 같은 방향으로 확산된다.

2개의 화염면 사이에 고온 가스층이 생기고, 이 가스층이 충분히 커지면, 기류를 흡인하는 Fan에 대하여 큰 저항이 생겨 점도가 상승하고, 기류의 흐름이 폐쇄하는 현상을 일으켜 상류측에도 화염이 전파된다. 밀폐단 점화에서 개방단에 화염이 전파되는 화염속도는 최고 1,500 m/sec 에 달한 경우도 있다.

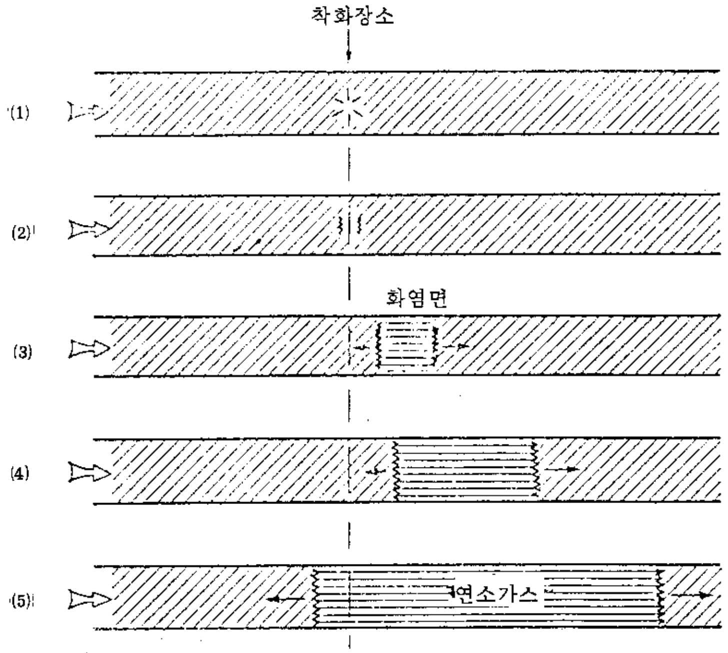


그림 2-4 배관내의 유동분진의 화염전파 상황

(3) 분진폭발의 특징

분진폭발의 특징을 열거하면 다음과 같다.

① 연소의 속도나 폭발의 압력은 가스폭발에 비하면 비교적 작지만, 연소시간이 길고 발생에너지가 막대하기 때문에 파괴력과 화염 연소력이 큰 특징을 가진다. 발생에너지는 최고치에 달했을때 가스폭발의 수배에 달하고, 온도는 2,000 ~ 3,000 ℃까지 상승한다.

이 이유는 단위체적당 탄화수소의 양이 많기 때문이다. 분진폭발의 경우는 폭발압력이 먼저 전파되고, 다음에 1/10 ~ 2/10 초 늦게 화염이 전파된다. 화염이 전파되는 속도는 상온, 상압하에서는 초기에 있어서는 2 ~ 3 m/s 정도이고, 그 속도는 분진의 팽창에 의한 압력의 상

승과 더불어 가속도적으로 빨라진다. 또한 폭발화염에 의한 압력의 전파속도는 300m/s정도이고, 화염속도가 빨라질수록 압력의 전파속도도 빨라지며, 언제나 화염속도보다 압력전파속도가 훨씬 빠르다. 현장에서는 이 원리를 이용한 폭발억제장치가 고안되어 사용되고 있다.

② 폭발시 입자가 연소하며 비산하기 때문에, 주변의 가연물에 국부적인 극심한 탄화현상을 발생시키며, 인체의 경우 심한 화상을 입는다.

③ 최초의 부분적인 폭발에 의하여 발생한 폭풍이 주변의 분진을 부유시켜, 2차, 3차 폭발을 일으켜 피해가 커진다. 분진폭발의 발생순서를 그림 2-5 에 나타냈다.

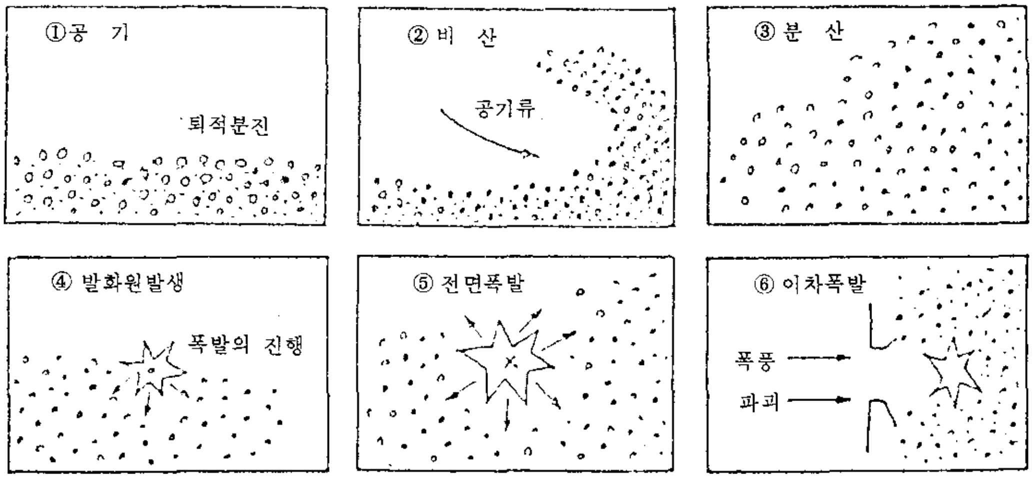


그림 2-5 분진폭발의 발생순서

④ 가스에 비하여 불완전연소를 일으키기 쉽기때문에, 일산화탄소가 대량 발생하여, 가스에 의한 중독의 위험성이 높다.

제 3 장 분진폭발에 영향을 주는 요인

3-1 분진의 폭발성에 영향을 미치는 인자

분진의 폭발발생율이나 폭발의 세기, 착화의 난이도등은 그 분진의 종류에 따라 매우 다르며, 분진의 물리적·화학적 특성에 크게 좌우되고 있다.

(1) 분진의 화학적 특성과 폭발성

분진의 폭발성에 관한 요인으로는 분진자신의 화학적인 구조나 반응성이 매우 큰 뜻을 가진다. 예컨대, 산화반응에 의해서 생성하는 기체량이 매우 큰 것. 반응전후에 용적이 변화하지 않는것. 오히려 감소하는 것, 동시에 그와 같은 경우에 발생하는 연소열의 대소등이 분진폭발의 폭발특성에 영향을 미친다.

표 3-1 은 가연성 유기고체의 발열량을 나타낸 것이다.

<표 3-1 > 가연성유기고체의 발열량

물 질 명	발열량 [kcal/kg]
탄 화 수 소 류	> 10000
합 성 품 (고분자)	3000 ~ 11000
석 탄	7000 ~ 9000
목 재	3500 ~ 5000

탄진 및 그밖의 분진에서 휘발성물질의 함유량의 대소 및 회분의 함유량의 대소가 폭발성에 영향을 미치고 또한 분진자체의 열분해의

난이도나 탄화수소계 기체의 발생속도 등도 폭발성에 관계된다.

그림 3-1 은 회분과 휘발성 물질을 포함한 각종 탄진의 공기중의 농도와 화염속도와의 관계를 나타낸 것이다.

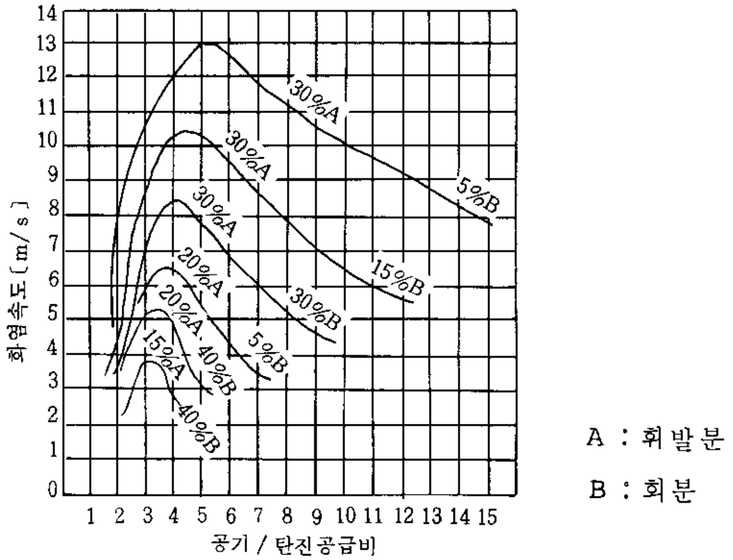


그림 3-1 공기 - 탄진계의 연소속도와 석탄 중의
휘발분과 회분의 함유량의 관계

(2) 입도 및 입도분포

분진의 폭발 난이도는 분진의 입도나 입도분포에 크게 좌우된다. 분진의 연소기구에서 기술했듯이 입자표면에 있어서 반응하기 때문에 표면적이 입자부피에 비해서 증대하면, 열의 발생속도가 방산속도를 웃돌아 폭발성을 크게 한다. 예컨대, 1 ㎝ 입방의 정4각 입방체의 표면적은 6 ㎠에 지나지 않으나 이것을 분할해서 1 미크론 입방으로하면 총계의 표면적은 6 ㎡에도 이른다.

어떤 일정한 중량을 가진 분진의 표면적을 나타낼 경우, 비표면적이라고 하는 표현을 사용한다.

$$S = \frac{N \times k_s d^2}{N \times \rho \times k_v d^3} = \frac{\phi}{\rho d} \qquad (3.1)$$

여기서 S : 비표면적, $\phi = \frac{k_s}{k_v}\alpha$: 평균입자경 N : 입자수 ρ : 분진 밀도 k_s, k_v : 형상계수, 구상입자에서는 $k_s = \pi$, $k_v = \frac{\pi}{6}$

따라서 평균입자경이 작고 밀도가 작은 것일수록 비표면적이 커지고 또 표면에너지가 커진다.

<표 3-2> 체의 넘버와 통과 미크론과의 관계

sieve No	size μ	sieve No	size μ
20	840	270	53
100	149	325	44
140	105	400	37
200	74		

분진의 입도를 나타내는 경우, 200 멧쉬 전통 또는 100 ~ 150멧쉬 등의 표현을 쓰는데, 이것은 대상분진의 완전한 입자의 크기를 나타내는 것이 아니다. 같은 체를 통과한 것이라도 통과입자의 입도에는 상당한 차이가 있는 것이므로 통과분진의 입도분포를 알 필요가 있다.

다만 입도분포의 상이에 따른 폭발특성의 변화에 관해서는 보다 작은 입경의 입자를 포함하는 분진쪽이 폭발성이 높은 것이라고 생각하면 된다.

(3) 분진의 부유성

일반적으로 입자가 작고 가벼운 것은 공기 중에 산란, 부유하기 쉽다. 부유성이 큰 것일 수록 공기중에 체류하는 시간이 길고 위험성도 증가한다. 표 3-3 은 분체의 입도와 자연낙하시간과의 관계를 나타낸 것으로서 온도 및 밀도에 따른 영향이 큰데, 200 미크론보다 작은 입도의 것에서는 입도가 작고 온도가 높으며 밀도가 작을 수록 낙하속도가 작아진다. 그리고 또한 500 미크론 부근의 입도에서는 온도에 관계가 없고, 이보다 큰 입도에서는 반대로 온도가 높을 수록 낙하속도가 커진다.

<표 3-3> 공기 중을 자연낙하하는 분체의 낙하속도 (cm/sec) 와 입자의 크기 · 밀도 · 분위기의 온도와의 관계 (常壓)

입자의크기 (μ) 미 크 론	분 진 밀 도 σ (g/cm³)					
	σ = 1			σ = 2		
	온 도 (℃)			온 도 (℃)		
	20	177	370	20	177	370
5	0.075	0.055	0.043	0.150	0.109	0.085
10	0.30	0.22	0.17	0.60	0.44	0.34
30	2.68	1.96	1.53	5.32	3.91	3.06
50	7.25	5.39	4.24	14.1	10.7	8.43
70	13.5	10.4	8.23	25.4	20.1	16.3
100	24.7	20.1	16.4	45.6	37.6	31.7
200	68.5	62.9	55.2	11.5	108	101
500	200	199	196	316.	328	325
1000	390	415	426	594	642	685
5000	1160	1420	1650	1680	2070	2390

(4) 수 분

분진안에 존재하는 수분은 폭발성에 영향을 미친다. 즉 분진의 부유성을 억제한다. 다만 소수성의 분진에 관해서는 부유성에 그리 큰 영향을 미치지 않으나, 수분의 증발로 점화에 유효한 에너지가 감소한다는 것, 증발한 수증기가 불활성 가스로서 작용한다는 것, 대전성을 감소시키는 등의 효과가 있다. 또한, 마그네슘, 알루미늄등은 물과 반응하여 수소를 발생시켜서 오히려 위험성을 증대시키는 일이 있다.

3-2 분진의 폭발특성

분진의 폭발성에 영향을 미치는 요인은 다음에 서술하는 분진의 폭발특성과 밀접한 관계가 있으며 따로 떼어서 생각할 수가 없다. 이하에 주요 폭발특성치에 관하여 설명한다.

(1) 폭발한계 농도

기체폭발과 마찬가지로 분진폭발에 있어서도 일정한 농도한계 밖에서는 화염이 전파되지 않는다. 따라서 분진의 종류에 따라 각각 고유의 폭발한계 농도(공기중)가 있는데, 가스의 그것처럼 상한계에 관해서는 일반적으로 널리 알려져 있지 않다. 탄화수소계분진 예컨대, 폴리에틸렌이나 폴리프로필렌 등의 분진의 폭발하한계는, 그것이 완전히 가스화해서 타 없어져버리는 것이라 생각하면 가연성가스의 폭발하한계와 마찬가지로 Burgess Wheeler의 관계가 성립되는 것이라 생각된다. 즉,

$$C \times Q = K$$

여기에서 C : 폭발 하한농도(vol% 또는 wt%), Q : 그 물질의

연소열 / mol 또는 연소열 / g, K : 상수

탄화수소에서는 중량당의 연소열이 거의 모두 같으므로 중량 퍼어센트로 나타낸 C는 대체로 같으며 45 ~ 50 g / ㎥로 된다. 따라서 분진에 있어서도 폭발하한농도는 탄화수소류에 있어서 45 ~ 50 g / ㎥ 의 범위안에 들어 있어야 되고 이 이하라는 것은 신뢰할 수가 없다. 그리고 또한 이경우, 입경이 20 μ 이하이면 완전히 연소하고 앞의 조건이 성립되나 일반적으로는 입도분포가 널리, 상당히 큰 입자가 섞여 있으므로 오히려 하한농도는 높아져 있는 경우가 많다. 그리고 실측에 의한 폭발하한농도는 폭발확률에 따라 차이가 있고 그림 3-2 처럼 폴리프로필린 분진에서는 100 % 폭발하한농도가 대체로 73 g/㎥ 인데, 10 % 폭발하한농도는 대체로 48 g / ㎥이어서 상당한 차이가 있다.

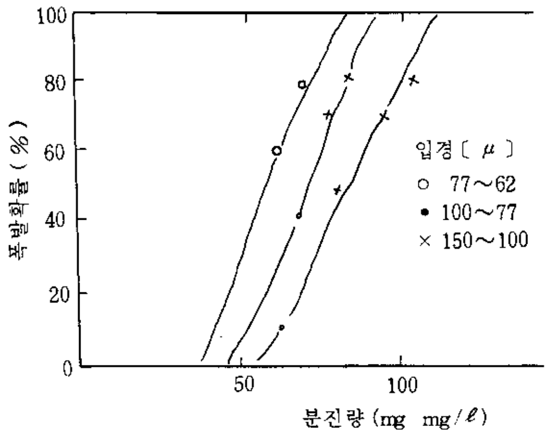


그림 3-2 폴리프로필린 분진의 폭발하한농도와 폭발확률과의 관계

일반적으로 분진의 폭발하한농도는 20 ~ 60 g/㎥, 폭발상한농도는 2,000 ~ 6,000 g/㎥의 범위 안에 든다고 하는데, 입도나 입도분포,

그밖의 요인에 의해서 상당히 변동이 크다.

(2) 폭발한계농도에 영향을 미치는 요인

① 입도 및 입도분포

분진의 폭발한계농도, 특히 하한농도는 분진의 입도나 입도분포에 의하여 큰 영향을 받는다.

그림 3-3은 평균입경과 폭발하한농도와의 관계를 또 그림 3-4는 입도분포에 의한 상관관계를 나타낸 것으로서 입도가 작을 수록 폭발하한농도가 낮아진다.

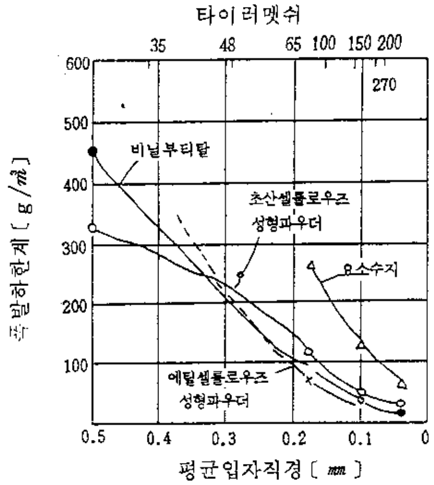


그림 3-3 플라스틱 분진의 평균입자 직경과 폭발하한계와의 관계

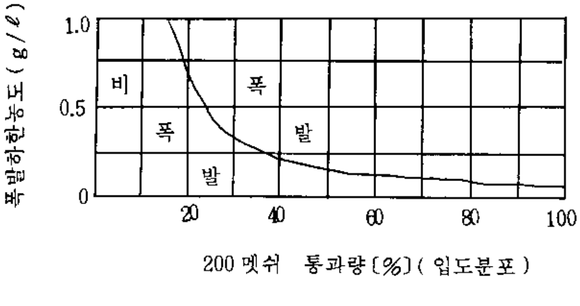


그림 3-4 탄진의 폭발하한농도와 입도분포와의 관계

② 수 분

분진공기계에 수분이 있으면 폭발하한 농도가 높아져서 폭발성을 잃게 된다. 그림 3-5는 이 관계를 나타내주고 있다.

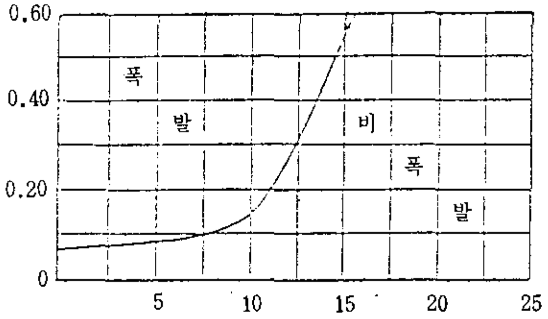


그림 3-5 폭발하한농도와 분위기 중의 수분과의 관계
(200 멧쉬통과 핏츠버어그 탄진)

③ 산소농도

분진이 분산하는 분위기중의 산소농도가 변화하면 폭발한계 농도도 영향을 받는다. 예컨대, 산소중이나 공기중에서는 하한계농도가 낮아짐과 동시에 입도가 큰 것도 폭발성을 갖게 된다. 한편 산소농도를 감소시키면 폭발하한 농도가 높아져서 폭발불능 영역이 생기게 된다.

④ 가연성가스

메탄, 그밖의 가연성가스나 인화성액체의 증기가 분진공기계에 혼입해 들어오면 폭발하한계 농도는 저하되어 위험성이 커진다. 그림 3-6은 저농도 메탄이 탄진의 폭발하한 농도에 주는 영향을 나타낸 것으로, 가스농도의 증가에 비례해서 직선적으로 하한농도가 저하되고 있는 것을 나타내고 있다.

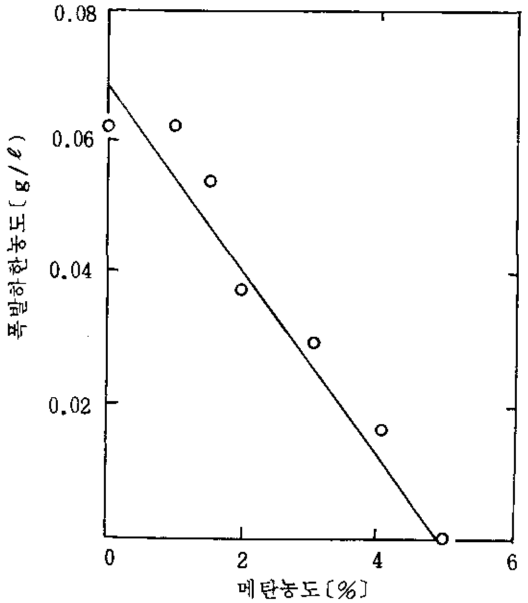


그림 3-6 메탄-공기 혼합기 중에 있어서의 탄진의 폭발하한 농도

⑤ 발화원

폭발하한농도도 발화원의 종류에 따라 다르다. 특히 분진에 접촉하는 발화원의 온도나 표면의 상태에 의해서 영향을 받는다. 온도가 높고 표면적이 큰 발화원쪽의 폭발하한농도가 낮아진다.

표 3-4는 이 관계를 나타낸 것이다. 그리고 또 면화약이나 멕켈버

<표 3-4> 폭발하한 농도와 발화원 종류와의 관계

분진의 종류	폭발하한농도 (g/㎤)		
	고열물체 백금선 1,200 ℃	전기불꽃 33V 5A	유도코일 6.5V 3A
전분	7.0	10.3	13.7
설탕	10.3	17.2	34.4
알루미늄	7.0	7.0	13.7

어너를 사용하면 전기스파아크로는 폭발하지 않는 농도까지 폭발시킬 수 있다.

(3) 발화온도

분진의 발화온도는 가스, 증기와 마찬가지로 측정방법에 따라 상당히 다르므로 절대적인 물성상수라고는 할수 없으나, 위험도를 판정함에 있어서 대체적인 어림을 하는 상대치로는 중요하다. 분진의 발화온도는 분진의 상태에 의해서 매우 다르다. 즉 입도나 형상, 단독 또는 집합상태, 운상 또는 층상 등의 영향을 미치는 요인도 상당히 많다.

일반적으로 층상의 분진은 운상의 경우에 비해서 입자간의 거리가 작고, 매우 가까이에 있으므로 산화반응과정에 있어서 단위체적당의 열의 손실은 훨씬 적다. 따라서 층상의 경우가 운상의 경우 보다도 발화온도가 상당히 낮은 편이다.

층상의 경우에 분진의 발화온도는 Glimtemperatur라 하는데, 이것은 분진의 두께로도 변하고 또 이 온도보다 훨씬 낮은 온도로 열분해를 일으켜, 시간이 경과함에 따라서 착화하기 쉬운 물질이 되는 플라스틱의 분진도 있으므로 보통 알려진 발화온도만을 안전요인이라고 보는 것은 지극히 위험한 일이다. 특히 이같은 온도조건이 되어 있을 경우에 공기의 침입이라도 생기면 자연 발화하여 폭발의 원인이되는 경우가 있다.

분진운의 발화온도도 폭발한계 농도와 같이 입도나 휘발분의 함량, 분위기의 산소량등에 의해서 영향을 받는다.

Cassel등의 보고에 따르면 단일입자의 발화온도는 입자의 반지름

에 반비례하며, 입자가 작을수록 높고 클수록 낮아진다.

(4) 최소 발화에너지

분진의 발화를 위해서 필요한 최소에너지 값을 최소발화에너지라고 한다.

최소발화에너지는 분진의 전기적인 발화원에 의한 위험성을 아는데 있어서 중요하며, 동시에 분진 그 자체의 상대적인 위험성을 아는데도 중요하다.

최소발화에너지도 많은 요인에 의해서 영향을 받는다.

즉 입도가 작으면 에너지는 작아지고 (그림 3-7) 또한 산소중에서는 공기에 비해서 작다. 수분이 많으면 커진다. (그림 3-8)

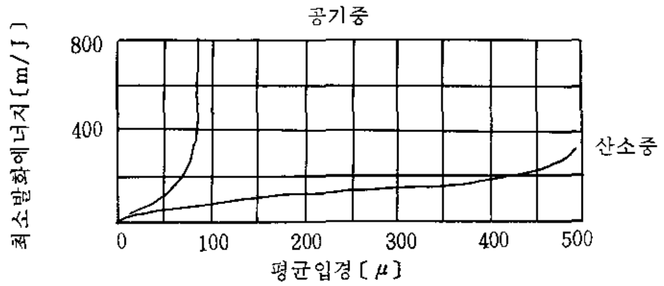


그림 3-7 탄진의 입경과 최소발화에너지와의 관계

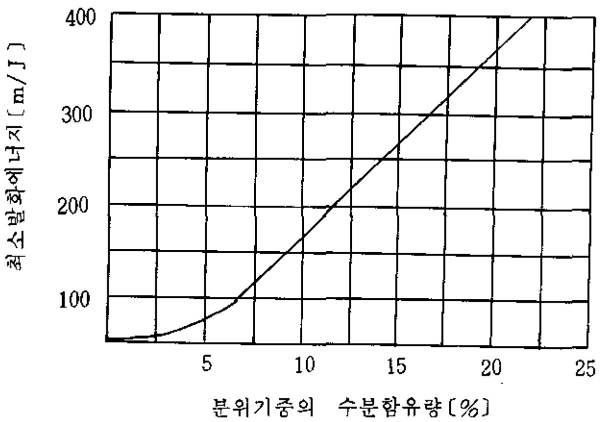


그림 3-8 최소발화에너지 (탄진) 에 대한 수분의 영향

(5) 최고 폭발압력 및 압력상승속도

가연성 분진의 폭발에 있어서 그 파괴력을 나타내는 것이 폭발압력과 압력의 상승속도인데, 그 둘이 모두 큰 것을 파괴위험성이 큰 분진이라 할 수 있다. 이 특성은 분진계를 대상으로 하는 건물이나 장치, 배관의 안전설계의 기본이 되는 것이므로 매우 중요하다.

분진폭발의 압력-시간의 관계를 그림으로 나타내면 그림 3-9로 나타낼 수가 있다.

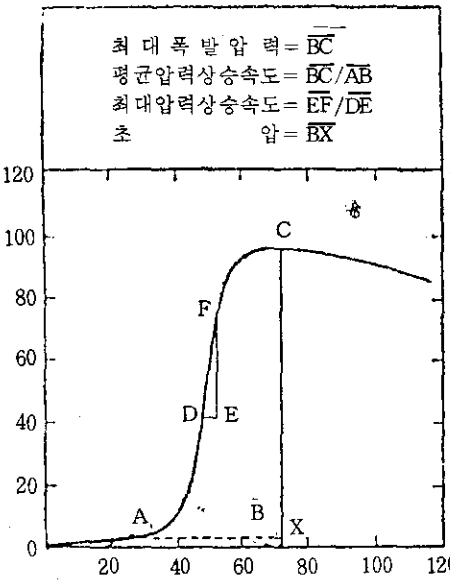


그림 3-9 폭발압력-시간의 기록도

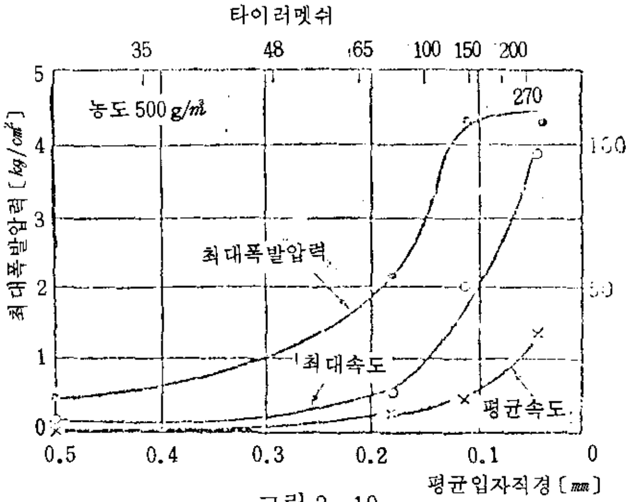


그림 3-10

분진의 평균입자의 지름과 최대 폭발 압력 및 압력상승속도와의 관계(초산샐룰로우즈 성형 파우더)

폭발압력의 최대치는 상압에서는 체체로 8기압인 것으로 되어 있으며 이 경우, 체적비는 대부분의 분진에서는 200 ~ 500 ㎤/㎥로서 전용적의 0.05 % 이하의 농도이어서, 가스의 경우와는 상당히 다르다.

압력상승속도, 폭발압력은 입도에 따라 큰 영향을 받아서 그림 3-

10 처럼 입자의 평균경이 작아지면 상승한다.

폭발압력이나 압력상승속도가 분진농도나 분진의 종류에 따라 다른 이유는 유기분진의 경우에서는 연소시에 있어서의 산소의 소비량이나 발생하는 연소생성가스의 종류와 성분비에 관계가 있다.

화학양론조성보다 분진농도가 작을때는 대부분 분진의 연소생성가스가, 이산화탄소와 수증기에 불과하지만, 농도가 크면 매우 복잡해진다. 특히 농도가 큰 조성에서 연소생성가스에 일산화탄소의 함유량이 많은 것은 폭발위력이 크다.

(6) 불활성물질과 한계산소농도

부유 또는 퇴적되어 있는 분진의 분위기 중 산소농도를 다른 불활성가스의 첨가로서 감소시킨다거나, 불활성물질을 첨가함으로써 분진의 폭발성을 저하시킨다는 것은 폭발방지 대책면에서 응용범위가 매우 넓으므로 잘 알려져 있는 일이다. 한계산소농도나 폭발을 억제하는 불활성 분진양은 개개의 분진이나 불활성물질의 종류에 따라서 달라지는 이외에, 주위의 온도·휘발분의 함유량·다른 가연성가스의 존재 유무·분진농도나 입도 등에 의해서 영향을 받고 있다.

① 불활성분체

탄산칼슘·규조토·실리카겔·무기염 등의 불활성분체는 분진안에 섞이면 비열의 크기로 냉각효과를 가져올 뿐만 아니라 부유성을 억제하는 효과까지도 가진다.

② 한계산소농도

가연성가스와 마찬가지로 폭발가능한 한계산소농도가 분진에도 있다. 표 3-5는 부유금속분진의 한계산소농도를 나타낸 것으로, 금속의 종류

에 따라서는 산소가 전혀 없는 분위기 속에서 발화하는 것이 있다. 일반적으로 산소농도가 작아지면 폭발압력이나 압력상승속도는 작아지고, 드디어는 폭발성을 잃게 되고 만다. 그리고 또한 분위기의 온도가 상승하면 한계산소량은 감소한다.

그림 3-11 은 텔레프탈산 분진의 경우에서 이 관계를 나타낸 것이다.

<표 3-5 > 각종 불활성가스 중에 있어서의 금속 및 금속 하이드라이드의 한계산소농도 (%)

금속	한계산소농도 (%)			
	이산화탄소	질소	헬륨	아르곤
알루미늄	3.0	9.0	10.0	–
마그네슘	a	2.0b	3.0	–
알루미늄 마그네슘 합금 (5050)	a	5.0	6.0	–
다우메탈	a	3.0b	3.0	–
티탄	a	6.0b	7.0	4.0
납	10.0	10.0	–	–
우란	a	1.5	2.5	2.0
토륨	a	2.5	5.0	2.0
질코늄	a	3.5b	5.0	4.0
우라늄하이드라이드	0.5	2.5	4.0	2.0
토륨하이드라이드	6.0	5.0	5.0	4.0
질코늄하이드라이드	11.0	8.5	8.5	6.0
티탄하이드라이드	13.5	10.0	8.5	8.0

a. 순이산화탄소 중에서도 연소한다.
b. 고온하에서는 순질소 중에서도 발화한다.

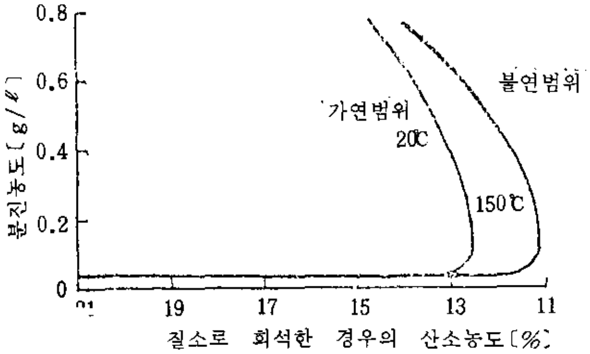


그림 3-11 테레프탈산 분진의 한계산소농도와 분진농도와의 온도에 의한 영향

3-3 분진의 폭발위험성과 폭발지수

분진의 위험성을 폭발지수로 나타내어, 이로써 위험등급별로 분류하여 안전대책의 기초로 삼는 방법이 세계 각국에서 채택되고 있다. 미국에 있어서의 폭발지수(index of explosibility)는 폭발의 정도를 4등급으로 나누어 표 3-6 처럼 분류하고 있다. 그러나 표 3-7이 보여주고 있는 바와 같이 대표적인 분진이라 하더라도 지수로 표시되는 위험성에는 큰 폭이 있어서 단순한 물질의 명칭만 가지고는 구별하기 어렵다.

<표 3-6> 폭발의 정도와 폭발지수와의 관계

폭발의 정도	발화의 용이도	폭발의 크기	폭발지수
약한 폭발	<0.2	<0.5	<0.1
중위의 폭발	0.2~1.0	0.5~1.0	0.1~1.0
강한 폭발	1.0~5.0	1.0~2.0	1.0~10
매우 강한 폭발	>5.0	>2.0	>10

<표 3-7> 분진 폭발성의 난이

분 진	폭발지수	분 진	폭발지수
나일론	4.0～>10	로딘	>10
초산셀룰로우즈	3.2～>10	세락	>10
폴리에틸렌	2.4>10	합성고무	7.4～>10
폴리프린필렌	<0.1～>10	셀룰로우즈	1.2～>10
레이온	0.1～0.2	코르크	2.0～9.7
리그닌	0.8～>10	목분	5.0～>10
고무	0.3～>10	핏츠버어그탄	1.0

폭발지수는 미국 광산국이 상대적인 분진의 폭발성을 나타내는 수치로서 다음과 같이 산출한 하나의 표시 방법이다.

이것은 미국의 펜실베니아 핏츠버어그시 부근에서 산출되는 석탄분진을 표준으로 하고 있다.

발화성(ignition sensitivity)

$$= \frac{(\text{탄진의 최소발화에너지})\times(\text{폭발하한농도})\times(\text{발화온도})}{(\text{시료분진의 최소발화에너지})\times(\text{폭발하한농도})\times(\text{발화온도})}$$

폭발의 크기(explosion severity)

$$= \frac{(\text{시료분진의 최대폭발압력})\times(\text{최대압력상승속도})}{(\text{탄진의 최대폭발압력})\times(\text{최대압력상승속도})}$$

여기서,

폭발지수(index of explosibility)

= (발화성) × (폭발의 크기)

로 표시되며, 숫자로 분진의 폭발위험성을 비교할 수 있는 것으로써 실용적으로 사용되고 있다.

제 4 장 분체대전현상

화학공장에서는 다량의 인화성가스 및 가연성·폭발성 분진을 취급하고 있어 작은 점화원만 존재하더라도 쉽게 점화되어 대형 폭발사고를 일으키게 된다. 점화원으로는, 정전기적방전, 화재, 열, 충격, 마찰, 화학반응등의 여러가지가 있으나 화학공장에서는 여러 조작과정에서 정전기적 방전이 발생할 가능성이 매우 높다고 하겠다.

본장에서는 정전기적 충전과 방전의 기본원리를 설명하고 화학공장의 각종 공정가운데 분체의 대전가능성이 있는 공정 및 조작에 관하여 설명하고자 한다.

4-1 정전기 발생현황

정전기 발생의 역사는 고대 그리이스의 "탈레스"가 호박을 모피에 마찰한 결과 작은 먼지등을 흡인하거나 이를 반발시키는 힘이 발생하는 사실을 발견한 것을 그 기원으로 하고있다.

그후, 정전기에 대한 연구가 거듭되어 현상 및 발생원인이 점차 규명되었으며, 산업사회의 고도화에 따라 각종 석유화학공업 및 고분자공업, 전자공업등이 발달하면서 정전기로 인한 재해발생이 증가하며 그 심각성이 대두되고 있다.

정전기란 어떤 물체가 양전기나 혹은 음전기만을 가지는 대전된입자로 구성된 경우에 외부로 나타나는 전기적인 현상을 말한다.

일반적인 경우에는 물체를 구성하고 있는 원자 및 분자들은 양전기와 음전기가 평형상태를 이루고 있는 전기적인 중성상태가 되어 외

부에 대한 정전기현상은 나타나지 않는다.

그러나 외부적인 원인에 의해 이 평형상태가 깨어지는 경우에는 양전기나 음전기중에서 어느 특정한 정전기가 물체에 대전되게 된다.

이러한 정전기가 계속적으로 발생하는 경우에 그림 4-1 에서와 같이 B의 저항이 대단히 큰 절연물일 때와 대지와의 사이에 S와 같은 대단히 큰 저항이 있을때는 발생된 정전기가 대지로 빠지기 힘들어, 대전된 정전기 Q가 큰 값으로 축적이 되면 여러가지 형태의 사고 및 재해를 초래하며 방전현상에 의해 대형화재 및 폭발사고를 야기하기도 한다.

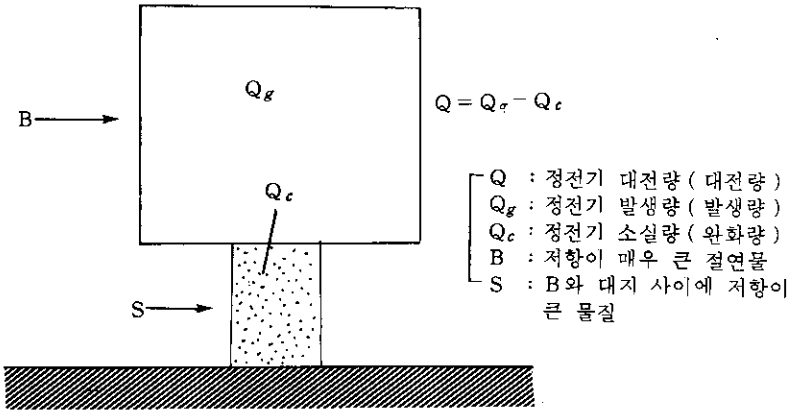


그림 4-1 대 전

그러나 정전기에 의한 사고는 원인불명으로 귀착되는 경우가 많이 있는데 이것은 정전기의 대전상태를 파악하기 힘들기 때문에 정전기에 의한 위험이 어느정도의 수준에 도달하였는지를 짐작할 수 없고 또한 정전기 제거장치의 동작여부 및 실제의 제거정도를 알기 힘들며 적당한 정전기 경보장치도 마련되어 있지 않다는 점을 들수가 있

겠다.

정전기의 발생은 물체중에서 정 또는 부의 전하가 과잉이 되는것을 말하고 주로 2개의 물체가 접촉, 분리할 때에 일어난다.

즉, 2개의 물체 A, B가 접촉하면 그림 4-2에 표시하는 것과 같이 그 계면에서 전하의 이동이 일어나고 정부의 전하가 상대쪽을 향해서 배열되는 전기이중층이 형성된다. 그 후 물체가 분리하면 전기이중층의 전하가 분리되고 2개의 물체에는 각각 극성이 다른 같은 량의 전하가 발생한다. 또한 정전기는 동종의 물체이여도 표면상태(표면의 오염, 부식등)의 차이에 의해서도 접촉, 분리가 일어나면 발생

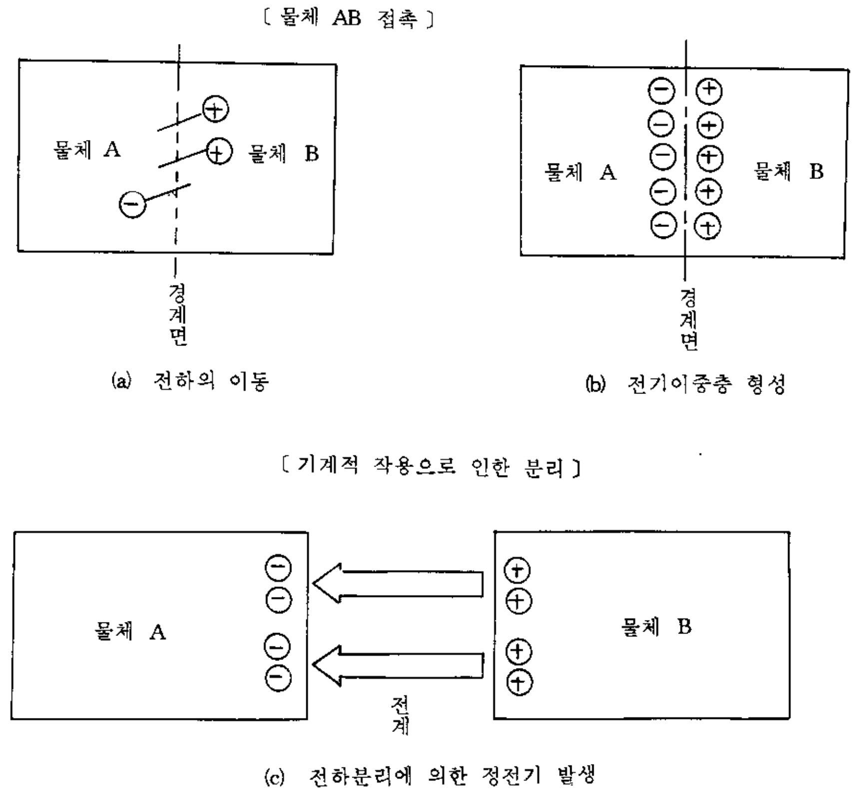


그림 4-2 접촉으로 인한 정전기발생

한다. 그러므로 정전기는 일반적으로 접촉 분리과정을 거쳐 발생되며 모든 물체에 발생한다고 볼 수 있다.

이런 대전현상은 물질을 다시 분리하거나 분쇄, 분무 또는 분산시키거나 분진 또는 액상의 물질을 배관등을 통하여 수송할 때도 발생한다. 즉, 두가지 물체중 한 쪽 또는 양 쪽이 절연체이든가 또는 땅으로부터 절연된 상태에 있으면 앞에 말한 운동작용으로 점차 전하가 축적되어 수천V, 때로는 수만V까지 이르는 경우가 있어 만일 정전기가 인체에 대해 방전할 때 전격(electric shock)으로 인해 사망하는 경우까지 발생한다. 이 때 정전기가 방전할 때 방전에너지 E는

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV \text{ 로}$$

(단, C : 도체의 정전용량, V : 대전전압, Q : 대전전하량)

나타내며 방전에너지가 물질의 최소발화에너지 보다 크면 발화한다. 일반적으로 정전기에서 오는 방전에너지는 고체가연물을 발화시킬 만큼 크지는 않으나 폭발한계 내의 가연성가스, 인화성액체(휘발유, 이황화탄소, 벤젠, 톨루엔, 크실렌)등은 정전기의 스파아크에 의해 착화되어 화재를 일으키는 경우가 있다.

충전 과정이 정지되면 과잉 전하는 스스로 균형을 이루기 시작한다. 이 방전은 지수함수 경로를 유지하며, 그 형태는 충전된 물질의 저항접지선의 저항 등에 따라 다르고, 이때 중요한 변화는 충전체 표면의 주위에서 일어난다.

한 예로 전하가 표면에 축적되어 있는 그림 4-3의 (a)를 고려하면,

접지된 전도성 구를 장치하면 그림(b)와 같이 전장은 변하여 구 근방의 전장이 증가한다.

(a) (b)

그림 4-3 전하의 방전

구 근방에서 임계전장의 세기 즉 breakdown field Strength(공기의 경우 $3 MV \cdot m^{-1}$) 에 도달하면 기체는 방전이 일어나기 시작한다. 방전은 공기속에 존재하는 자유 전자가 공기분자들을 이온화할 수 있게 충분히 가속화되었을 때 가능하다.

기체의 breakdown field strength는 액체나 고체·부도체보다는 상당히 낮기 때문에 기체방전은 가장 중요한 위험원인이 될 수 있다.

4-2 정전기의 발생에 영향을 주는 요인

(1) 대전서열

정전기의 발생은 접촉, 분리되는 두 물질의 상호작용에 의하여 결정되는데 이것은 표 4-1에서 나타내고 있는바와 같이 대전서열에서 두 물질이 가까운 위치에 있으면 정전기의 발생량은 적고 반대로 먼 위치에 있으면 발생량이 커지게 된다.

이 경우에는 두 물질을 마찰한 경우 대전서열의 윗쪽에 있는 물질이 양전기로 대전되고 아랫쪽에 있는 것은 음전기로 대전된다.

(2) 표면상태

물질의 표면상태는 정전기의 발생에 영향을 주어 일반적으로 표면이 원활하면 발생이 적어지게 된다. 또 물체표면이 수분이나 기름등에 의해 오염되었을 때에는 산화, 부식에 의해 정전기가 크게 발생한다.

(3) 발생량

정전기의 발생은 일반적으로 처음 접촉, 분리가 일어날 때 최대가 되며 이 후 접촉, 분리가 반복됨에 따라 발생량도 점차 감소한다.

그러므로 접촉, 분리가 처음으로 일어났을때 재해발생 확율도 최대로 나타난다.

(4) 접촉면적 및 압력

접촉면적은 정전기의 발생에 큰 영향을 주며 이것이 클수록 발생량이 커지고 또한 접촉압력이 증가하면 접촉면적도 증가하므로 결국 정전기의 발생량도 증가하게 된다.

(5) 분리속도

분리 과정에서는 전하의 완화시간에 따라 정전기 발생량이 좌우되며 전하완화시간이 길면 전하분리에 주는 에너지도 커져서 발생량이 증가한다.

또한 일반적으로 분리속도가 빠를수록 정전기의 발생량은 커지게 된다.

<표 4-1 > 대전 서열

아스베스토스			셀 로 판	
머 리 털			제 라 틴	
유 리	유 리		유 리	
운 모	나 이 론		산화셀룰로즈	
양 모	양 모	양 모	폴 리 메 틸	
견	견	나 이 론	메타크릴레이트	Cd
아 연	레 이 온		폴리카보네이트	Zn
종 이	면	면	폴 리 스 틸 렌	Al
에 보 나 이 트	마	아 세 테 이 트	매 연 가 루	Fe
동	동	루 이 사 이 트	폴 리 에 틸 렌	Cu
유 황		폴 리 스 틸 렌	염 화 비 닐	Ag
고 무	고 무	폴 리 에 틸 렌	테 프 론	Au
	폴 리 에 틸 렌	테 프 론	사 란	Pt

4-3 정전기 대전구조

(1) 정전기 대전 형태

① 마찰에 의한 발생

두 물질사이의 마찰에 의한 접촉과 분리과정이 계속되면 이에 따른 기계적 에너지에 의해 자유전자가 방출, 흡입되어 정전기가 발생한다.

일반적으로 고체·액체류 또는 분체류에서 발생하는 정전기는 주로 이러한 마찰에서 기인된다.

예를 들어 유리봉을 마찰하면 유리봉에 발생하는 정전기와 모직물

에 발생하는 정전기는 서로 다른 성질을 갖는 것을 알수 있다.

전자를 플러스(+) 전기, 후자를 마이너스(-) 전기라고 한다.

그림 4-4 는 마찰에 의한 정전기의 발생현상을 나타낸 것이다.

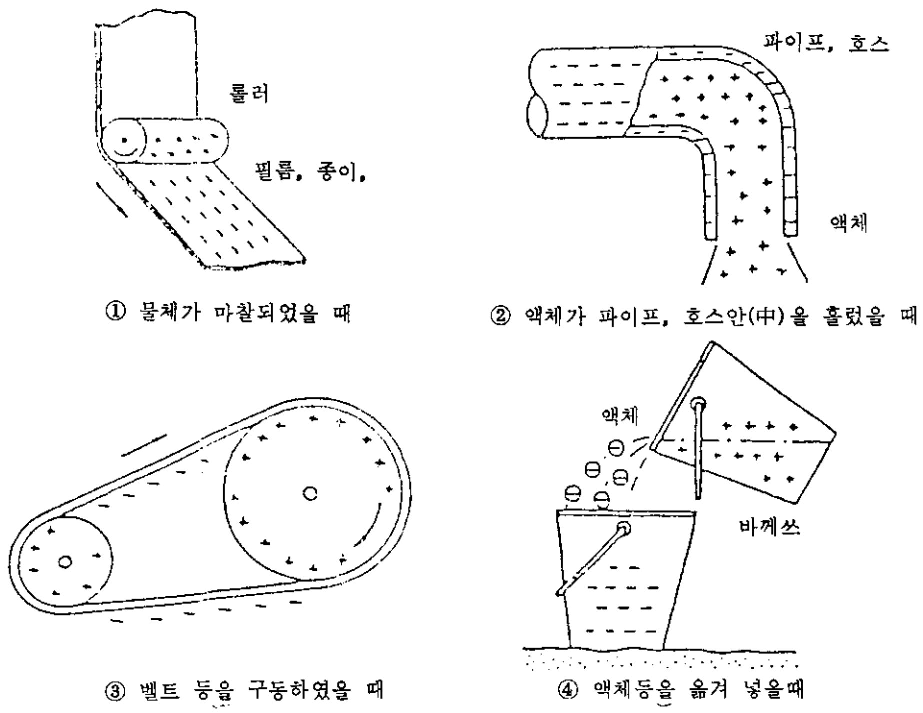


그림 4-4 마찰에 의한 정전기 발생

② 박리에 의한 발생

서로 밀착되어 있는 물체가 떨어질때 전하의 분리가 일어나 정전기가 발생하는 현상을 말한다.

이것은 접촉면적, 밀착력, 박리속도 등에 의해 정전기 발생량이 변화하며 마찰에 의한 것보다 더 큰 정전기가 발생한다.

박리대전의 상태는 그림 4-5와 같다.

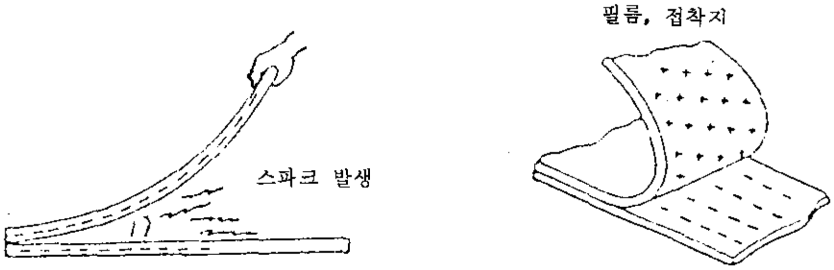


그림 4-5 박리대전에 의한 정전기 발생

③ 유동에 의한 발생

액체류가 파이프 등 내부에서 유동할때 액체와 관벽사이에 정전기가 발생한다.

그림4-6과 같이 액체류가 파이프 등 고체와 접촉하면 액체류와 고체와의 경계면에 전기2중층이 형성되어 이 때 발생된 전하의 일부가 액체류와 함께 유동하기 때문에 정전기가 발생하는 현상으로서, 정전기의 발생에 크게 영향을 미치는 요인은 액체의 유동속도이다.

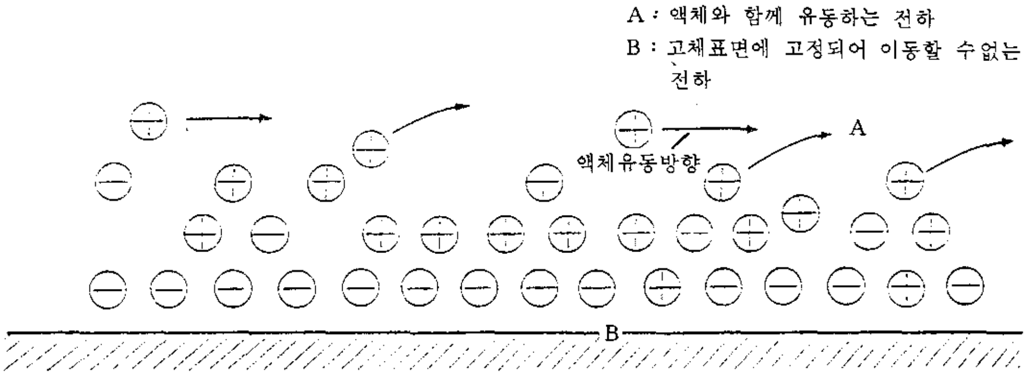


그림4-6 액체류의 유동에 의한 정전기 발생

실제로 탱커에 가연성액체류를 주입할때 정전기로 인한 화재가 가끔 발생하며, 이는 대전액체가 탱커등에 주입될때 전하 상호간의 척력에 의하여 표면중심과 탱커에 유도된 전하사이에 고전압이 발생되어 정전기방전에 의한 화재로 생각된다.(그림 4-7 참조)

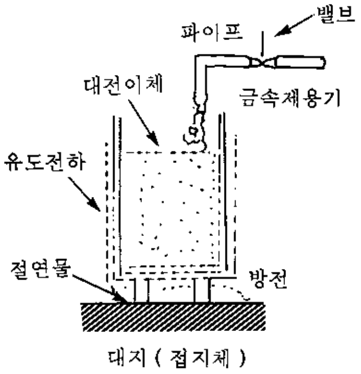


그림 4-7 액체의 대전에 의해 정전유도를 받은 금속제용기

④ 분출에 의한 발생

분체류, 액체류, 기체류가 단면적이 작은 분출구를 통해 공기중으로 분출될때 분출하는 물질과 분출구와의 마찰로 인해 정전기가 발생한다.

이경우 분출되는 물질과 분출구를 구성하는 물질과의 직접적인 마찰에 의해서도 정전기가 발생하지만 실제로 더 큰 정전기를 발생시키는 요인은 분출되는 물질의 구성입자들간의 상호충돌이다.

분출대전 상태는 그림4-8과 같다.

실제로 12 ㎏/㎠의 스팀이 그림 4-8과 같이 플랜지에서 분출되고 있을때 그 대전 전위를 측정한 바 50 KV이상 이었다.

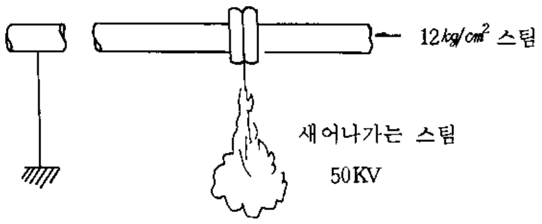


그림 4-8 스팀의 누설과 대전

⑤ 충돌에 의한 발생

분체류와 같은 입자상호간이나 입자와 고체와의 충돌에 의해 빠른 접촉, 분리가 행하여짐으로써 정전기가 발생하는 현상이다.

충돌에 의한 정전기 발생 현상은 그림 4-9와 같다.

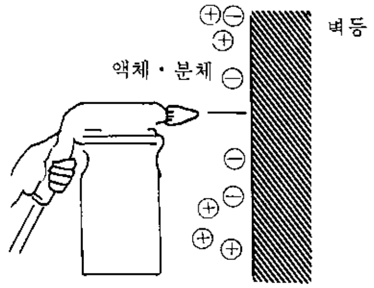
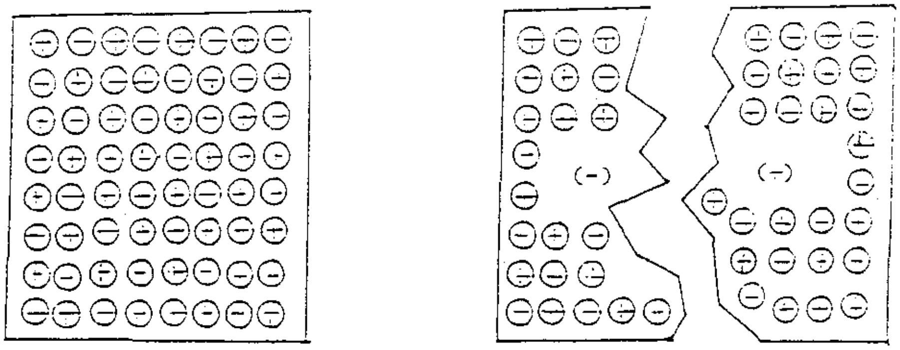


그림 4-9 액체・분체의 충돌에 의한 정전기 발생

⑥ 파괴에 의한 발생

고체나 분체류와 같은 물체가 파괴되었을 때 전하분리 또는 정, 부 전하의 균형이 깨지면서 정전기가 발생하는 현상을 말한다(그림 4-10).



(a) 정・부전하의 균형(파괴전)　　(b) 정・부전하의 불균형(파괴후)

그림 4-10　분체류나 고체의 파괴에 의한 정전기 발생

⑦ 교반이나 침강에 의한 발생

액체가 교반될때 대전한다.

탱크로울리나 탱커는 수송중에 대전하므로 접지하도록 규정하고 있다. 실험에 의하면 기름을 탱크에 넣어 진동시키면 그림 4-11과 같은 현상이 일어난다.

이 밖에 액체와 그것에 혼합되어 있는 불순물이 침강할 때도 대전한다.

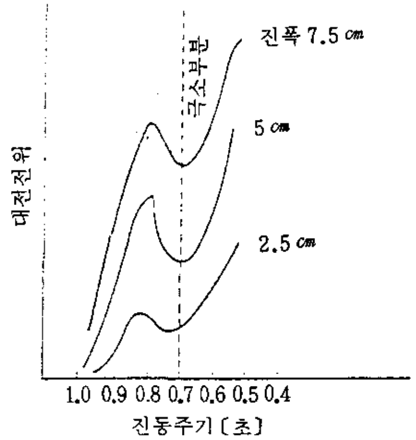


그림 4-11　진동　대전

표 4-2는 어느 화학공장에서 크실렌을 탱크에 적재할때의 대전전위 및 완화시간이다. NO.1의 경우는 웨이브(wave)가 적었기 때문에 10KV까지 대전하였지만 400V까지 내려가는데 45분 걸렸다.

NO.2의 경우는 6KV 대전하였는데 웨이브(wave)가 심했기 때문에 400V까지 내려가는데 90분 걸렸다.

NO.3의 경우는 유속을 제한하였기 때문에 다소 웨이브(wave)는 있었으나 5KV에 대전하고 400V가 될때까지 20분 걸렸다.

<표 4-2> 탱커 적재시의 실측 완화시간

No	기 온 (℃)	습 도 (%)	풍 속 (m/초)	물 결	적재량 (kℓ)	적재속도 (m/초)	대 전 (Kv)	완화시간 (분)
1	10	56	1	없 다	110	3.0	10	45
2	4.6	44	4	있 다	150	3.0	6	90
3	6.5	50	3	조 금	220	평균 2.4	5	20

⑧ 비말대전

비말(물보라 : Spray)은 공간에 분출한 액체류가 가늘게 비산해서 분리되고, 많은 물방울이 될 때 새로운 표면을 형성하기 위해 정전기가 발생하는 현상을 말한다.

⑨ 기타의 대전

• 액체중에는 이것과 비중이 다른 타 고체, 기포, 액체등이분산, 혼입되어 있으면 이러한 것이 가라앉거나 올라올 때 액체류와의 경계면에서 전기이중층이 형성되고 정전기가 발생한다.

• 물체의 근처에 전자 또는 전리된 이온(ion)이 존재하고 있거나 다른 대전물체가 존재하면 다음과 같은 현상이 일어나서 정전기가 발생한다.

- 물체에 전자 또는 이온이 부착하기 때문에 물체의 전하가 그만큼 과잉이 된다.
- 물체가 대전물체에 의해서 정전유도를 받기 때문에 물체의 표면에는 전하분리가 일어나고 물체의 표면에 외관상 정 또는 부의 전하가 과잉된다.

4-4 분체의 대전

(1) 입자의 직경과 대전량

고체를 미소한 입자로 분할했을때 그 단면적의 총합은 분할전 고체의 단면적에 비해 상당히 크게 된다.

마찰·충돌등의 작용으로 인해 고체표면에 발생하는 전하의 밀도를 그 크기에 관계없이 일정하게 하면 분체는 고체에 비해 그 단면적이 매우 크기 때문에 발생하는 전하량도 매우크다. 즉, 입자의 크기가 작은 분체일수록 대전에 의한 재해발생율이 높다는 것을 알수있다.

(2) 충돌에 의한 대전

① 충돌면적

분체입자의 충돌시 충돌면적은 충돌대전의 특성을 결정하는 중대한 요인의 하나가 된다.

탄성물리학에 의하면 구상입자가 평면과 충돌할 경우, 충돌시의 변

형이 탄성변형인 범위에서는 충돌면적은 충돌속도와 입자의 질량 및 반경에 비례한다는 것을 알수 있다.

충돌속도를 빠르게 하면 충돌시의 변형은 탄성변형의 영역을 넘어 소성변형으로 된다.

② 접촉시간

고체입자간 혹은 고체입자와 고체벽간의 충돌대전은 접촉시간이 극히 짧은 접촉대전이라고 할수 있다. 이러한 충돌의 경우 접촉시간은 입자질량에 비례하고, 그 반경 및 충돌속도와 반비례하는 상관관계를 나타낸다.

일례로 반경이 10 μm인 강철구와 충돌할 경우, 이때의 접촉시간은 약 7×10^{-8} sec가 된다. 접촉경계면에서의 전하이동은 단시간내에 이루어진다고 생각되지만, 그 시정수의 실효값은 10^{-3} sec 정도이므로 충돌시 7×10^{-8} sec라는 짧은 접촉시간에서 접촉이 완전히 평행상태가 되기는 불가능하다.

(3) 마찰에 의한 대전

분체의 마찰대전은 접촉·충돌·마찰·분쇄등의 각종 과정이 복합되어 나타난다. 분체나 입자와 고체벽간의 마찰대전에서, 대전량은 마찰거리의 증가에 대하여 지수함수적으로 증가하는 경우가 많다.

노즐(Nozzle)에서 분말입자를 분출시킬때 발생하는 대전에서는 노즐과 분출입자의 재질이 다를 경우 마찰대전이 그 원인이 된다.

고압 용기내의 CO_2 가스를 분출시킬때 가스나 용기가 대전하는 경우가 있다. 이것은 우선 보기에 가스가 대전한 것같이 보이나 실제로는 CO_2 가스가 분출할때 발생된 드라이아이스 입자가 노즐과 마

찰하여 발생된 대전인 것이다.

폴리에틸렌 입자 또는 각종의 고분자 페레트등이 반복마찰할 경우 발생하는 대전량은 아래 식과 같다.

$$q = q_m(1 - e^{-as/q_m})$$

이식에서 q_m은 최대대전량, S는 마찰거리, a는 전하발생에 관계하는 정수이다.

(4) 분체 수송중의 대전

닥트내를 공기에 의해 수송되는 분체입자는 수송관과 충돌, 반발을 번복한다. 충돌의 순간에는 입자나 관벽의 국소적 변형이 일어나고 접촉면을 통하여 전하가 이동한다. 그다음 순간에 입자는 매우 빠른속도로 반발·분리한다.

이러한 충돌, 반발의 반복에 의해 발생되는 전하의 이동으로 입자는 대전된다.

수송중의 입자의 대전은 위와같은 과정을 거치면서 발생하며 그러한 과정이 몇번 반복되면 대전량은 포화상태에 도달한다. 충돌하는 한개의 입자에 초점을 맞추면, 그 주변의 대전입자가 그 입자와 극성이 같으면 전하의 이동은 서로간에 발생하는 반발력때문에 억제되며 극성이 서로 반대이면 전하이동은 촉진된다.

(5) 분쇄에 의한 대전

고체를 잘게 부수어 분말로 만들 경우 이때 부서진 분말은 대전한다. 이러한 대전은 주로 분쇄에 의한 대전이다.

한편 분쇄시간을 길게하면 대전량은 증가하다가 어느시간을 기점으로 감소한다. 대전량은 전하발생과 누설의 두가지 과정에 의해 결

정되며 천천히 분쇄하면 전하발생량은 증가하지만 이에 따라서 누설량도 증가한다. 같은 분쇄시간에서도 물질의 경도에 따라서 전하발생량의 최대점 위치가 다르게 나타난다.

제 5 장 분진폭발 방지대책

분진폭발·화재에 대한 재해방지대책은 2종류로 나누어 생각할 필요가 있다. 그 첫째는 폭발·화재의 발생을 미연에 방지하는 대책으로 예방대책이라 한다. 둘째는 예방대책을 행하였더라도 일단 폭발·화재가 발생했을 때를 상정하여 폭발의 발생직후의 국한화, 설비와 인적인 손실에 대한 방호를 목적으로 한 대책으로 이것을 피해억제대책 또는 방호대책이라 한다. 물론 폭발과 화재가 완전히 예방가능하다면 방호대책은 불필요하다. 일반적으로 폭발의 피해억제대책은 폭발에 기인하는 고압·고온에 견딜 수 있는 건설투자가 필요하며 막대한 비용을 필요로 하므로 예방대책이 그만큼 중요하다 하겠다.

그러나 실제적으로는 가스폭발의 대책에는 전자의 예방대책이 중요하지만 분진폭발의 대책에서는 양자의 대책이 모두다 중요하다. 그이유는 분진폭발이 일반적으로 가스폭발보다 예방대책수립이 곤란한데서 기인하고 있으며 분진폭발의 예방을 위해서는 충분한 지식의 습득과 세심한 주의가 필요하다.

5-1 방폭의 원칙

일반적으로 폭발재해중에는 폭발사고로 인한 손해만으로 그치는경우와 폭발로서 화재가 유발되어 다시 손해가 확대되는 경우등이 있다. 그리고 경우에 따라서는 반대로 화재로 인해서 폭발이 유발되는 수도 있다.

폭발 및 화재의 방지대책으로서는 (1) 예방 (2) 국한 (3) 소화 (4) 피난의 4대책에 관해서 생각해보지 않으면 안된다.

(1) 예방대책

일단 폭발사고가 발생하면 순식간에 피해가 발생하고 뒤에는 폐허와 사상자만을 남기게 된다. 따라서 방폭대책으로서는 다른 어떤 대책보다도 폭발을 사전에 예방하는 대책이 가장 중요하다.

예방계획은 일반적으로

(i) 폭발의 위험성이 있는 물질의 관리

(ii) 폭발의 발화원이 되는 에너지관리의 둘이 된다.

폭발의 종류에 따라 위험성물질과 발화원의 종류 및 조성이 서로 다르므로 폭발이 생기는 조건을 잘 조사해서 이 조건이 충족되지 않도록 계획을 짜야 한다.

예컨데, 분진폭발의 예방에는 (1) 분진의 조성을 폭발범위안에 들지 않도록 할 것 (2) 발화원이 되는 에너지를 주지 않을 것 등의 두 조건을 지킬 필요가 있다. (1)의 조건에는 분진농도를 하한계 이하로 할 것 또는 그것을 상한계 이상으로 할 것 또는 불활성가스로 공기를 치환해서 산소농도를 한계치이하로 할 것의 3 방법이 있다. 그리고 (2)의 발화원에 관해서는 일반적으로 충격마찰 · 나화 · 고온표면 · 단열압축 · 자연발열 · 전기불꽃 · 정전기불꽃 및 열선광선의 8 종류의 발화원에 관해서 그 발생조건을 검토해서 그 조건이 충족되지 않도록 하는 대책을 강구할 필요가 있다.

화학공업은 특히 폭발사고가 많이 나는 업종인데, 다른 기계공업 · 건설업 · 광산업등에 있어서도 폭발사고가 발생하는 일이 많으므로 각 업종의 특수성에 따라 각각 적절한 방폭대책을 강구해야 한다.

예컨대, 화학공업에 있어서는 공장건설에 있어서 제조공정도를 기초

로 해서 폭발위험의 유무에 관해서 충분히 검토를 한다. 즉 원료·재료·중간품·제품·폐기물의 모든 계통에 걸쳐서 온도·압력·조성·불순물·유속·밸브조작·계측·제어·세정·수리 그밖의 각 요소에 관해서 안전공학적 입장에서 검토를 가하여 만일 폭발가능성이 발견될 때에는 계획단계에 확실하게 방폭대책을 세워 넣지 않으면 안된다.

이처럼 생산공정의 계획설계단계에 있어서 이미 안전공학상의 전문지식을 도입해서 상세한 검토를 하는것이 폭발예방대책으로 중요한 일이다. 그리고 이 단계에 있어서 검토되어야 할 것은 단순히 방폭대책에만 그칠 것이 아니라 유해물질의 누설등에 의한 중독 또는 직업병, 폐기물질에 의한 공해, 공장건설중의 노동재해등의 예방대책에 관해서도 종합적으로 전문지식을 가지고 검토해 두지 않으면 안된다.

(2) 국한대책

일단 폭발이 일어났다고 하면 될 수 있는대로 피해를 적게 내도록 피해의 국한대책을 강구할 필요가 있다. 폭발재해 및 그에 잇달아 일어나는 화재에 대한 국한대책으로서는 다음의 것들을 고려해야 한다.

① 안전장치

안전장치란 일반적으로 저장·반응조·분쇄기·집진장치·보일러·압력용기·고압가스용기등의 내압이 이상으로 상승해서 어떤 설정압력 또는 설정온도 이상이 되었을 때, 안전장치가 작용해서 이 압력을 외부로 방출시켜 용기나 설비의 파괴를 방지하는 것이 목적이다. 용기나 설비의 압력 또는 온도의 이상상승은 제어계의 고장 이상반응·냉각불충분·태양직사·구내의 화재등에 의해서 일어난다.

여기서는 이들 장치내부에 있어서 가스폭발 또는 분진폭발이 일어났을 경우에 그 압력을 안전장치를 통해서 외부로 방출시켜 폭발에 의한 장치의 파괴를 방지함을 목적으로 하고 있다. 분진폭발처럼 압력상승속도가 비교적 느린 폭발에 대해서는 안전장치의 작동이 유효하게 일어나는 경우가 있다. 그러나 가스폭발은 흔히 폭굉으로 이행하고 압력상승속도가 극히 커지면 안전장치의 관성때문에 유효하게 작동하지 못하는 경우가 많다.

② 가연물의 집적방치

폭발사고에 이어 화재가 발생하여 피해가 크게 확대된 사례에는 폭발현장 부근에 다량의 가연물이나 폭발물이 집적되어 있어서 이에 연소 또는 유폭된 데 기인하는 일이 많다. 발화위험이 있는 작업장 내외에 불필요한 원료·제품·상품 등을 다량집적해 둔다는 것은 극히 위험한 일이다. 반드시 안전한 창고 또는 집적장을 설치하여 직접작업에 필요한 물품이외에는 그곳에 저장해두지 않도록 한다.

③ 공지의 보유

폭발위험이 있는 작업장이나 저장소의 건물시설의 주변에는 일정한 공지를 남겨두든가 거리를 두도록해서 폭발이 일어났을 경우 그 피해가 다른 건물시설이나 민간에 미치지 않도록 계획하지 않으면 안된다.

④ 방폭벽

고압실험설비나 고압의 파일로트 플랜트의 주위는 방폭벽으로 쌓고 그 외부에서 계기로 판독하거나 밸브의 개폐조작 등을 하지 않으면 안된다.

그밖에 폭발위험이 있는 설비, 건물의 주변에는 방폭벽·장벽·토담 등을 설치하여 폭발사고가 발생한 경우에 파편의 비산과 폭풍에 의한 직접적인 압력을 저지하는 대책을 세우지 않으면 안된다.

폭굉이 일어났을 경우에는 충격파의 전파에 의해서 폭심으로 부터 수백미터의 원거리에 있는 건물의 창문이 파손되는 일이 있는데 폭발지점에 가까운 장벽의 존재에 의해서 충격파의 전파를 방지하는 것은 어느 정도 가능하다.

⑤ 건물·설비의 불연화

폭발위험이 있는 건물은 방화구조·내화구조로 하고 내부의 기구, 부속품 등 설비도 될 수 있는대로 불연성의 재료를 사용한다.

건물의 지붕을 경구조로 해서 폭발이 일어날 경우 내부의 압력을 상공으로 방출하도록 계획하거나 건물의 한쪽 면을 개방해서 그 방향을 공지로 향하게 하여 사람의 통행을 금지하는 조치를 강구하는 일도 있다.

⑥ 긴급조치

폭발사고가 났을 경우에는 그것이 다른 공장으로 파급되지 않도록 하기 위해서 가열원이나 동력원을 끊거나 위험물을 다른 곳으로 옮기든가 하고 또 장치안의 가연성가스를 긴급히 불활성가스로 치환하는 수도 있다.

파괴를 당한 공장은 적절한 긴급조치에 의해서 가연성가스, 액체등의 위험물의 누설방지를 위한 응급대책을 강구하지 않으면 안된다.

(3) 소화대책

폭발재해는 화학공업에 있어서 2건중 1건은 화재를 병발하는 율

로 되어 있다. 폭발직후에 있어서의 화재는 순식간에 확대되어 소화기와 같은 초기소화대책으로는 어림도 없는 사태에 이르는 수가있다.

그리고 springkler, 포말등의 고정식 소화설비가 갖춰지고 있다고 하더라도 폭발에 의한 충격때문에 파괴되어 소화목적으로 쓰일 수 없게 되는 경우가 많다. 폭발후의 화재에는 소방용수를 확보하고 공장의 자위소방대와 도시의 공설소방대와의 협력에 의해서 소화에 힘쓰지 않으면 안된다. 그러나 가스화재에는 직접 물을 뿌리지 말고 연소방지에 노력할 것이며 원변을 폐지하든가 불활성가스, 스팀등을 배관에 주입해서 소화하는 대책을 취한다.

(4) 피난대책

폭발 또는 화재가 발생하면 위험지구에서 안전한 장소로 대피하지 않으면 안된다. 그리고 폭발은 최초의 1회만으로 끝난다고는 할 수 없다. 일정한 시간이 지난뒤 아무 일도 일어날 것 같지 않다가도 갑자기 제2차의 큰 폭발이 일어나는 수도 있다. 그리고 연쇄적으로 수차의 폭발이 잇달아 일어나 공장이 완전히 파괴되어 버리는 수도 있다.

따라서 평상시부터 미리 대사고를 예상해서 안전한 피난구역을 지정하고 대피훈련 등을 시켜둘 필요가 있다.

폭발 위험성이 있는 작업실에는 작업인원을 엄중히 제한하고 피난통로, 피난계단 또는 활강대를 설치해서 피난방향을 명시한 유도표식과 정전중에도 소등이 되지 않는 유도등을 설치해서 극력 인명의 피해를 막아주는 대책을 강구해 두어야 한다.

5-2 화학공장의 발생위험과 방지대책

화학공장에서는 정전기의 발생에 의한 분진폭발의 위험성이 높다고 사료된다. 본절에서는 화학공장에서의 정전기 발생 위험성에 관하여 설명하고 또한 그 대책에 관하여 설명하고자 한다.

(1) 정전기 발생 방지대책

① 접지

금속물체와 대지사이의 전위를 최소를 하기 위해 접지극으로 동판등을 매설하고 이것을 금속물체에 접속하는 것이다. 배관등 금속물체를 전부 접지하기 곤란한 경우 본딩을 한다. 본딩이란 배관의 플랜지나 레일의 접속부분등에서 절연상태로 되어 있는 경우에 이들 사이를 동선등으로 접속하는 것을 말한다.

② 도전성 재료의 사용

대전물체가 도체인 경우와는 달리 부도체인 경우에는 접지나 접속(bonding)에 의해서 정전기를 대지로 흘러줄 수 없다.

또한 부도체는 근본적으로 정전기가 대전되기 쉽고 이에 대한 방지대책도 마련하기 곤란한 경우가 많은데 그중 특히 문제가 되는것은 염화비닐과 고무계열의 제품을 사용한 경우이다.

따라서 가능한한 이러한 부도체의 사용은 억제하고 금속도체나 도전성 재료를 사용하는 것이 바람직하며 그렇지 못할 경우에는 대전방지제를 사용한 재료 즉 도전성 재료를 써야 한다.

③ 대전방지제의 사용

대전방지제는 부도체의 도전성을 증가시켜 매우 불균일하게 대전된 전하가 잘 이동할 수 있도록 하는 것으로서 부도체의 종류와 사용

방법에 따라 여러 종류가 있다.

그러나 대전방지처리는 도전성 재료와는 달리 단기간성이며 또한 기계적인 마찰·압력등의 사용조건과 상대습도등의 환경조건에 의해 변화하기 쉬우므로 정기적인 대전전위나 대전전하량의 측정등에 의해서 대전방지효과를 항상 점검하는 것이 필요하다.

④ 가습(加濕)

정전기의 발생은 습도와 밀접한 관계를 가지고 있어 습도가 충분한 곳에서는 정전기의 발생이 상당히 감소하는 경향을 보이고 있다.

이러한 습도는 부수적으로 정전기에 대한 대기로의 자연방전효과가 향상 되기 때문에 정전기가 발생하더라도 누설될 수 있는 통로를 형성해 주며 또한 가연성물질등의 최소착화에너지가 습도에 의해 높아지므로 화재 및 폭발방지의 면에서도 상당히 중요하다.

대전방지를 위한 습도는 대전되기 쉬운 부도체 주위의 상대습도를 70%이상이 되도록 해줌으로써 그 효과를 얻을 수 있다.

⑤ 제전기의 사용

제전은 물체에 발생 또는 대전하여 있는 정전기를 안전하게 제거하는 것으로 주로 정전기상의 부도체를 대상으로 한 대전방지대책이며 일반적으로 제전기를 사용한다.

제전의 원리는 제전기를 대전물체 가까이에 설치하면 그림 5-1과 같이 제전기에서 생성된 이온가운데 대전물체와 역극성의 이온이 대전물체쪽으로 이동하여 이 이온과 대전물체의 이온과의 재결합으로 중화가 이루어져 그 결과 대전물체의 정전기가 제전된다.

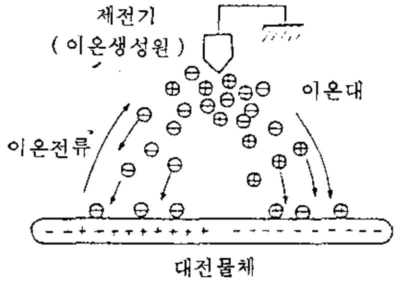


그림 5-1 제전기의 원리개요

⑥ 배관내 액체의 유속제한

가. 불활성화 할 수 없는 탱크, 탱크로울러, 드럼통등에 위험물을 주입하는 배관은 다음의 관내 유속이 되도록 설비하고 그 유속의 값 이하이어야 한다.

1) 저항률이 10^{10} (Ωcm) 미만의 도전성 위험물의 배관유속은 7 (m/s) 이하로 할 것

2) 에텔, 이황화탄소 등과 같이 유동대전이 심하고 폭발위험성이 높은것은 배관내 유속을 1 (m/s) 이하로 할 것

3) 물이나 기체를 혼합한 비수용성 위험물은 배관내 유속을 1 (m/s) 이하로 할것

4) 저항률 10^{10} (Ωcm) 이상인 위험물의 배관내 유속은 표 5-1 값 이하로 할것

단 주입구가 액면밑에 충분히 침하할때 까지의 배관내 유속은 1 (m/s) 이하로 할것

<표 5-1>　　　　　　관경과 유속제한 값

관 내 경 D		유속V〔m/초〕	V^2	V^2D
〔inch〕	〔m〕			
0.5	0.01	8	64	0.64
1	0.025	4.9	24	0.6
2	0.05	3.5	12.25	0.61
4	0.1	2.5	6.25	0.63
8	0.2	1.8	3.25	0.64
16	0.4	1.3	1.6	0.67
24	0.6	1.0	1.0	0.6

나. 주입구에 대해서는 다음과 같이 설비한다.

1) 탱크에 대해서는 위쪽에서 위험물을 낙하시키는 구조로 하지 말것이며 주입구는 밑쪽으로 하고 위험물이 수평방향으로 유입, 교반이 적도록 시설할 것이며 또한 주입구아래에 고이는 수분을 제거할 수 있도록 설계할 것

2) 탱크, 탱크로울러, 드럼통 등에서 위쪽으로부터 주입배관을 넣어 주입하는 경우에는 주입구가 용기의 바닥쪽에 이르도록 시설할 것

⑦ 정치시간(靜置時間)의 확보

정치시간이란 탱크, 탱커, 탱크로울러, 탱크차 등에 위험물을 주입해서 용기내의 유동이 정지하여 정전기가 완화될 때까지의 시간을 말한다.

각 용기에 따른 정치시간은 다음과 같다.

탱크로울러	5분
탱크차	15분
500kl 미만의 탱커	30분
500kl 이상의 탱커	60분
1,000kl 미만의 탱크	30분
1,000kl - 5,000kl 미만의 탱크	60분
5,000kl 이상의 탱크	120분

(2) 정전기적 유도의 대표적 예

화학공장에서 취급하는 조작가운데 정전기적 유도현상에 의하여 비전도성 물체나 전도성 물체 주위에 전하를 띠게 되는 대표적 예를 그림 5-2에 나타내었다. 그림설명은 다음과 같다.

① 비전도성 용매가 금속관을 흘러내릴 때

② 분체를 플라스틱자루에서 비울 때

③ 유리나 플라스틱관을 통하여 비전도성액이나 분체를 수송할때

④ 플라스틱이나 종이 로울을 풀때

⑤ 액을 금속노즐을 통하여 분사할 때

⑥ 비전도성액을 용기내에서 교반할 때

⑦ 절연구두를 신고 나일론 카페트나 플라스틱마루를 거닐 때

(3) 액체의 취급에 따른 대책

액의 저항율(resistivity)이 $10^{8}\Omega\cdot m$ 이상인 비극성 용매가 관내를 흐를때 위험할 정도의 전하발생이 기대된다. 만약 액에 불혼화성 성분이나 부유물(suspended solid)이 포함되어 있을 경우에는

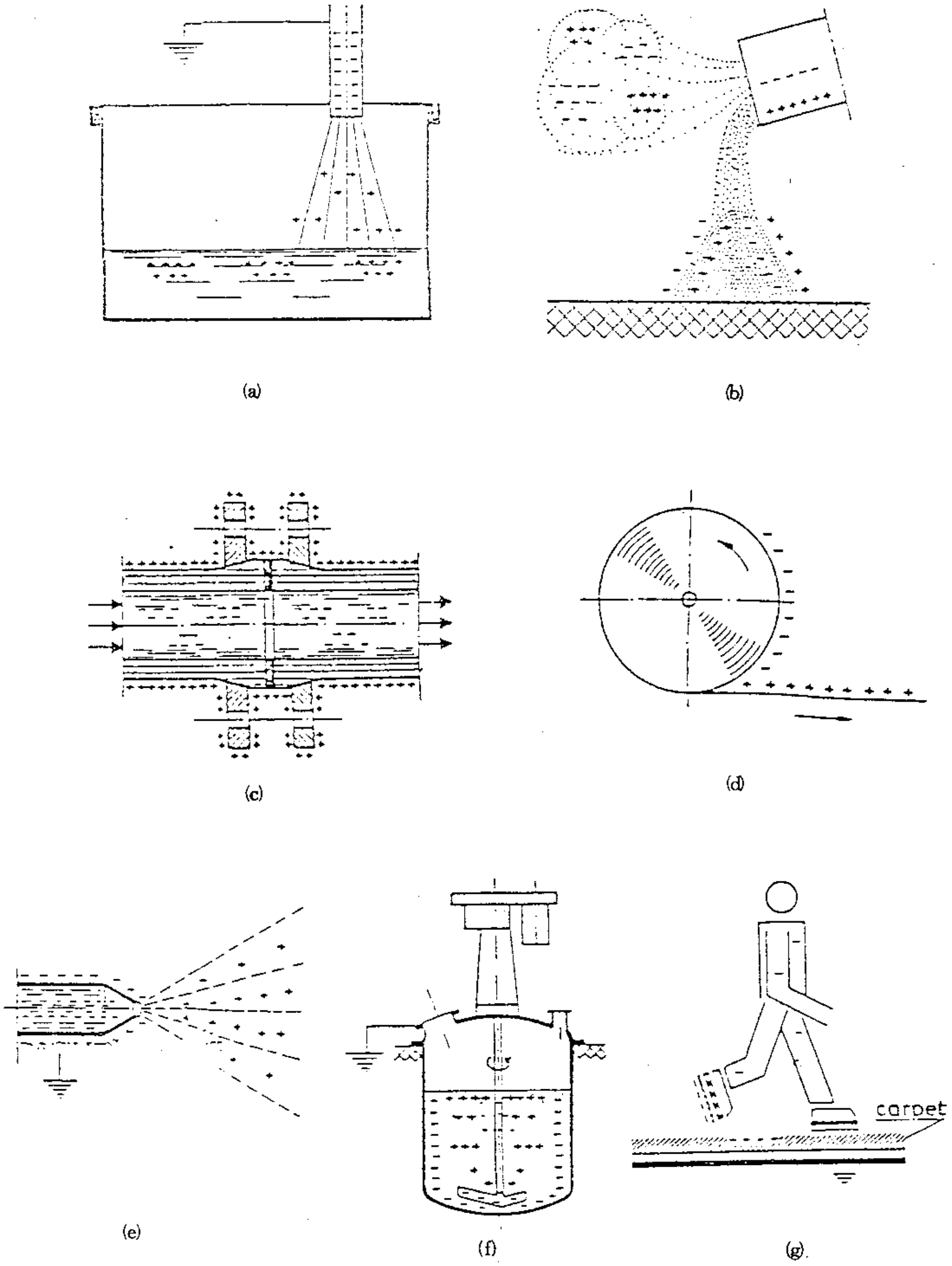


그림 5 - 2　화학공장에서의　정전기적　유도　현상의　예

정전기 전하의 충전이 크게 증가하는 경향이 있다.(비전도성액에서의 결정화 공정등)

만약 저항율이 $10^8 \Omega \cdot m$ 이상인 액의 수송이나 기타 중간조작에 있어서는 상당량의 충전이 기대되므로 특수한 화합물이나 물과 같은 극성이 큰 용매를 첨가시킴으로써 저항율을 감소시키는 것이 좋다.

(3) 기계나 장치의 회전요소

제지공장, 섬유공장, 플라스틱공장 등에서는 많은 장치에서 회전체를 가지고 있다.

각종 벨트나 로울러, 실린더 등 회전체를 구성하는 물질, 회전요소의 폭이나 속도에 따라 차이는 있으나 두 접촉표면의 연속적인 분리는 스파크를 일으킬 정전기적 전하를 생성하게 되므로 벨트, 푸울리, 실린더 등을 전도성 물질로 만들어야 한다.

5-3 분체공정의 정전기 발생위험과 방지대책

분체가 공기속에서 순환되거나 분산될 때 또는 입구나 관을 따라 미끄러져 내려갈 때(분쇄, 수송, 혼합, 충진, 분리조작등) 분체는 전도성이거나 부전성에 관계없이 독립적으로 전하를 띠게 된다. 전하를 띤 분체와 접촉하는 장치의 일부는 동시에 전하를 띠게 된다. 이러한 분위기에서 분체와 분진과 같이 공기속에 분산된 가연성 고체는 폭발하게 된다.

만약 그들이 입자형태, 얇은조각형태 또는 큰 결정적인 상태로 취급이 된다하더라도 그속에는 폭발성 미립자가 포함되어 있어 미립자의 폭발이 개시가 되고 다음 폭발이 잘 되지 않는 큰입자에 연쇄적으로 폭발이 일어나게 된다. 특히 공기속에 용매증기가 공존하는 가연성분진인 혼성혼합물은 분진의 농도(미립자)와 용매증기가 각 성분에 대한 최소폭발범위이하인 경우에도 폭발할 수 있다. 인화성증기의 존재는 가연성 물질의 점화를 더욱 촉진할 것이다.

(1) 공기수송

분체류의 공기수송에 있어서는 분체류가 관벽과 마찰 또는 서로충돌해서 정전기가 발생한다. 그러므로

① 수송관내의 수송속도는 필요이상으로 크게하지 말고 또 수송관의 직경은 될 수 있는한 크게 한다.

더우기 관내에는 망, 격자 등 수송의 장해가 되는 물건은 설치하지 않는다.

② 분체류의 크기, 형태 및 수송관의 재료, 직경 등을 검토하고 정전기의 발생이 적은 것을 선택한다.

③ 수송관은 될 수 있는한 도전성의 것을 사용하고 이것을 접지한다.

(2) 컨베이어 수송

컨베이어 수송에 있어서는 분체류가 스크류 컨베이어, 벨트컨베이어 등과 마찰, 충돌해서 정전기가 발생한다. 그러므로 스크류의 날개형상을 검토하고 스크류의 회전수는 필요이상으로 크게 하지 않으며 벨트컨베이어에 진동을 가하거나 수송량을 잘못해서 이상 진동하지 않도록 한다.

또 분체류가 부유, 비산하지 않도록 한다.

(3) 슈트(chute) 수송

슈트수송시 분체류가 슈트벽과 마찰, 충돌해서 정전기가 발생하는것을 방지하기 위하여 슈트 또는 호퍼(hopper)는 벽면의 기울이가 연직에 가깝게 하고 마찰면적을 작게 한다.

(4) 교반, 혼합작업

교반, 혼합 과정에서는 분체류가 교반기, 혼합기 등과 마찰하여 정전기가 발생하므로 분체류의 교반, 혼합은 속도를 늦추고 그 취급량을 적게 하며 분체류속에 이물이 혼입하지 않도록 한다.

(5) 백 필터(bag filter)포집

분체류의 포집과정에 있어서는 분체류가 백 필터와 마찰, 충돌해서 또는 백 필터에 부착해 있는 분체류가 박리하는 것에 의해서 정전기가 발생한다.

그러므로 백 필터의 재질은 분체류와의 상호재질을 검토하고 정전기의 발생이 적은 재료를 선택한다.

일반적으로 백 필터는 도전성 섬유가 있는 것을 사용하는것이 바람직하다.

(6) 인화성 액속으로의 분체의 주입작업

주입하는 분체가 가연성이고 분체의 미립분의 최소 점화 에너지가 50mJ 이하이거나 인화점 근방의 온도를 유지할 경우 폭발의 위험이 있다. 이에 대한 대책으로는 드럼이나 용기, 주입구 등은 전도성물질로 만들어야 하며 반드시 접지를 시켜야 한다. 전도성 플라스틱은 그 전도성이 실험으로 입증할 경우만 허용된다. 바닥도 전도성이어야 하고 사람도 전도성 구두를 착용하여야 한다. 또 이때 지켜야할 사항은 다음과 같다.

① 모든 외부점화원(불티, 연마 및 충격스파아크)을 배제할 것

② 주입용 삽은 나무와 나무손잡이로 이루어진 것이나 접지한 금속으로 이루어진 것

불활성분위기에 있는 장치를 열 경우에는 그것이 아주 짧은 경우라 할지라도 공기나 산소가 항상 들어가게 되고, 그 장치의 내부는 폭발성이 된다. 특히 작은 반응용기를 사용할 때 고체를 주입하면서도 완전히 불활성인 분위기를 유지할 수 있도록 특수한 장치(funnel, ventilation, N_2 purging 등)를 이용하여야 한다.

(7) 인화성 기체와 함께 분체를 취급하는 경우

인화성 기체(증기)가 포함된 분체의 취급에는 물질의 이송에 따라 분리현상이 끊임없이 일어나 용기, 분체, 장치의 요소들은 전하를 띠게 되고 접지가 없을 경우에는 brush 방전이 일어난다. 즉 플라스틱자루를 흔들어 비울 때, 비전도성 드럼에서부터 funnel을 제거

할 때 전하를 띤 드럼표면을 손으로 접촉할 때, 방전이 발생하고, 특히 물질을 주입할 때는 장치의 공급구 근방에서 발생하기 때문에 더욱 위험하다. 화학공장에서 이와 같은 유형의 사고가 정전기 충전에서 야기된 사건중 가장 빈번하게 일어난다.

인화성 용제를 포함한 분체에 대하여는 전도성이고 접지된 용기만 허용되고 비전도성 플라스틱 용기나 플라스틱 포대로부터 주입장치로 부어서는 절대로 안된다.

(8) 분사식 건조나 유동층 건조 조작

건조기나 분진분리기(cyclone) 및 여과기내에서 건조상태로 분체가 존재할 때 그 분체 입자는 전하를 띠게 되고 그 가루와 접하고 있는 장치의 요소는 방전이 일어나 가연성, 인화성 증거가 있으면 연속적으로 폭발이 일어난다. 인화성 기체나 증기는 분진 점화에너지의 1/100 ~ 1/10 정도이다. 이를 예방하기 위하여는 장치의 모든 금속요소는 서로 연결하여 접지를 시켜야 한다.

건조기 내부의 불활성조건을 만들어 주기 위하여 산소와 인화성물질의 농도를 수시로 조사하여 자동적으로 이에 대한 대처가 되어야 한다.

5-4 분진폭발 예방대책

(1) 예방대책의 기본

표 5-2에 일본에 있어서의 분진폭발의 발생상황(1952~84년) 을 나타냈다. 이 표에 의하면 연평균 발생건수는 6.8건이고 연평균 사상자수는 약 17명에 달한다.

<표 5-2> 분진의 종류별 폭발발생상황(1952~84년)

분진의종류		발생건수		사상자수		사망자수		부상자수	
석탄		12		45		7		38	
무기약품	유황	29	19	37	20	9	3	28	17
	카아본		5		4		–		4
	규화석회		5		13		6		7
금속	알루미늄	49	30	166	116	37	28	129	88
	마그네슘		5		9		2		7
	그외의금속		14		41		7		34

분진의종류		발생건수		사상자수		사망자수		부상자수	
농산가공품	쌀 겨	42	3	113	16	16	5	97	11
	사 탕		1		1		–		1
	전 분		7		36		4		32
	소 맥 분		6		12		1		11
	수 숫 가 루		1		4		–		4
	팥 가 루		1		3		3		–
	맥 주 효 모		1		1		–		1
	밀 기 울		2		5		–		5
	대 맥 분		2		–		–		1
	사 료 분		14		23		2		21
	야자열매가루		1		2		–		2
	그 외 곡 분		3		10		1		9
합성물	염료중간물	31	8	51	6	5	2	46	4
	플 래 스 틱		20		38		2		36
	합 성 세 제		2		4		1		3
	합성접착제		1		3		–		3
유기화학약품	무수프탈산	42	11	72	20	9	3	63	17
	가 유 제		1		–		–		–
	의 약 품		7		9		1		8
	기 타		23		43		5		38
섬유류	목 분	19	14	74	39	5	3	69	36
	코 르 크		1		–		–		–
	리 그 닌		1		2		–		2
	지 분		2		22		–		22
	기 타		1		11		2		9
기 타			1		4		–		4
계			225		562		88		474

표 5-3에 공정별 폭발발생상황을 나타내고, 표 5-4에 점화원별의 폭발 발생상황을 나타냈다. 공정별로는 분쇄·제분공정과 집진분리공정에서 사고가 빈발하고 점화원별로는 1/3이 충격·마찰에 의한 재해이고 다음이 정전기불꽃에 의한 재해이다.

<표 5-3> 공정별 분진폭발 발생상황

(1952-84년)

공정별	발생건수
분쇄제분공정	49
집진분리공정	49
건조공정	32
수송공정	24
저장공정	17
연소실	3
기타	51
계	225

<표 5-4> 착화원별 분진폭발 발생상황

(1952-84년)

착화원별	발생건수
마찰·충격	68
{ 이물혼입	19
{ 기타	49
금속의 과열	9
불티	14
정전기 스파크	39
전기설비	10
용접·용단 의불꽃	26
자연발화	26
불명	24
기타	9
계	225

일반적으로 폭발에 필요불가결한 요소는 가연물, 산소 및 열의 3가지이나 분진폭발은 분진에 기인하는 특징을 가지고 있어 그에 맞는 예방대책이 필요하다. 통상 공기중에서 분진이 폭발하기 위해서는 다음 3가지 조건이 필요하다.

① 분진이 공기중에 부유·분산해 있을 것

② 분산된 분진농도가 폭발하한계 이상의 농도일 것

③ 충분한 에네르기를 가진 점화원이 존재할 것

따라서 분진폭발의 예방대책은 다음과 같다.

- 가연성 분진의 제거
- 분진운(雲)의 생성방지
- 불활성 물질의 첨가(산소의 배제)
- 점화원의 제거

그러나 통상의 제조공정에서는 산소의 배제는 곤란한 경우가 많으므로 실제로는 가연성분진의 제거와 점화원의 제거가 분진폭발의 예방대책이 된다.

(2) 가연성분진의 제거

분진은 부유상태가 가장 위험하지만 퇴적된 상태도 최초의 작은폭발에 의한 폭풍발생으로 2차폭발을 일으킬 수 있으므로 장치로부터 누출된 분진은 신속하게 제거하여 넓은 지역에 비산하는 것을 막을 필요가 있다.

① 건물구조

건물은 불연성구조로 하는 것이 바람직하고, 내부구조는 분진이 퇴적하기 힘든 구조 또는 퇴적하더라도 즉시 청소·제거가능한 구조로 해야 한다.

② 장치

분체를 취급하는 장치, Duct 등은 불연성의 재료를 사용하고 방진구조를 하여 외부에 분진을 누출시키지 않도록 하여야 한다. 예를들

면 장치전체를 약간 감압하는등의 조치를 한다. 특히 집진계통의 Duct는 폭발 및 화재의 전파경로가 되기 때문에 다른 Duct와의 연결을 피하고 청소하기 쉬운 구조를 하여야 한다.

③ 작업장의 청소

작업장에 분진이 퇴적하지 않도록 정기적으로 청소를 해야하며 청소시 분진을 비산시키지 말아야 한다. 발화성 분진의 경우는 진공소제기로 흡인하여서는 아니된다.

(3) 분진운(雲)의 생성방지

퇴적분진에 바람이나 공기압이 작용하여 여러가지 농도의 분진운이 형성되는 것은 가연성분체를 취급하는 프로세스에 있어서는 피할 수 없고 또 그 농도를 제어하는 것도 곤란하다. 그러므로 플랜트설계시 적절한 프로세스의 선택에 의하여 분진운의 형성을 억제하고 그 용적을 최소한으로 하여야 한다. 예를들면 불필요하게 큰 용적의 플랜트는 폭발하한계 이상의 분진농도가 그 공간내에 형성될 위험성이 있으므로 몇개의 작은 플랜트로 분할하여 설계하는 것이 바람직하다. 또한 분체공정중에서 분체를 건식(乾式)보다는 습식(濕式)으로 취급하는 방법도 가능하다.

한편, 부유분진이 형성되는 장소에는 집진기를 설치하여 분진을 제거하여야 한다. 부유분진의 침강을 쉽게하기 위하여 살수장치를 사용하거나 탄광갱도내의 탄진의 부유억제를 위하여 불연성의 암분(岩粉)을 살포하는 방법등이 있다. 이 방법은 (−)로 대전한 탄진입자에 (+)로 대전하는 암분입자를 부착시켜 침강시키는 방법이다.

(4) 불활성물질의 첨가

불활성물질(불활성가스 또는 불연성분체)를 첨가하여 분진 자체의 폭발위험성을 제거하는 방법이다. 이 방법은 공장 생산물에 대한 경제성 및 품질관리면에서 적용곤란한 경우도 있으나 확실한 효과가 기대되고 점화원이 존재하여도 폭발하지 않는 이점이 있어 발화위험성이 큰 경우의 대책으로 적당하다.

① 불활성가스의 첨가

불활성가스를 첨가하여 분위기중의 산소농도를 폭발한계 산소농도이하로 감소시킴. 일반적으로 불활성가스는 탄산가스와 질소가 사용되나 유기성분진에는 탄산가스가 유리하고 경금속류에는 산화물 생성방지를 위하여 질소가 유리하다. 금속분진중에는 탄산가스 또는 질소분위기중에서 발화하는 물질이 있으므로 주의가 필요하다. 폭발방지를 위한 산소농도는 탄산가스를 사용할 때 8～12%, 질소의 경우 5～9%로 적당하나 용접바나 등의 강력한 점화원이 존재할 때는 산소농도를 더 낮출 필요가 있다.

불활성가스는 분쇄기, 혼합기, 건조기, 저장Tank등의 밀폐형의 장치에 유효하다. 불활성가스의 첨가가 정지되었을 때는 가스분석장치와 연동해서 자동적으로 장치가 정지하는 Interlock장치를 구비할 필요가 있다. 또한 불활성가스 사용시에는 인체의 산소결핍사고 대책이 필요하다.

② 불연성분체의 첨가

탄산칼슘, 규조토, 실리카겔, 무기염등의 불연성분체를 가연성분진속에 첨가시키면 냉각효과 및 부유성 억제효과가 있다. 예를들면 탄산칼슘을 옥수수전분에 첨가했을 때 혼합비가 60:40 정도가 되면 폭발성이

거의 없어진다.

(5) 점화원의 제거

가연성분진의 점화원의 점화에너지는 가연성가스의 최소발화 에너지 0.02 ~ 0.5mJ의 약 10배~100배 정도이다.

그러나 통상적인 스파크도 100mJ을 넘는 것을 생각하면 적절한 점화원의 제거대책이 필요하다. 점화원으로는 담배, 난로, 화로, 보일라 등의 화기에서 나오는 불꽃과 용접작업시의 불꽃, 전기설비의 불꽃 및 과열로 인한 발화, 정전기의 방전불꽃, 금속의 충격 및 마찰로 인한 불꽃등이 있으며 그외에도 자연발화성이 있는 미분탄(微紛炭), 비누 분말등에 의한 자연발화 위험성도 있다. 또한 작은 분말입자가 태양열과 같은 강한 복사열을 받아 고온이 되어 발화하는 경우도 있다.

(6) 주요장치의 대책예

① 반응기·혼합기 등

반응기·혼합기와 같은 장치는 정전기 대전이 일어나기 쉽기 때문에 정전기에 의한 점화원이 항상 존재한다고 생각하여야 한다.

장치에 투입된 분체는 가연성 물질일 경우가 많고 반응기 중에는 가연성용제가 들어있는 경우도 많으므로 투입구부근은 폭발성 혼합기체상을 형성하고 있을 가능성이 있다. 또한 분체투입시에는 부유분진이 생성되므로 반응기내에 공기와 용제증기가 존재하고 있는 상태에서 교반을 행하면서 분체를 투입하는 것은 극히 위험한 작업이다.

안전대책으로는 정전기의 대전 및 축전을 가능한한 억제하여야 한다. 즉, 분체용기 및 투입구에는 도전성 재료를 사용하고 확실하게 접지(接地)를 행하며 작업자는 대전방지복이나 정전화를 착용하고 투

입속도를 제한한다.

또한, 반응기 혼합기등의 내부를 불활성가스로 치환하는 것도 효과가 있다. 이때는 용기내 각부의 산소농도를 측정하면서 불활성가스를 공급할 필요가 있으며 반응기등의 공간부에는 용제증기가 존재하지 않게끔 하여야 한다.

② 분쇄기

분쇄기의 종류는 여러가지이고 운전속도 또한 저속에서 고속까지 여러 종류이다. 분쇄기는 공기중에서 분쇄할 때 발열량이 큰 물질이나 충격·마찰불꽃을 발생시키며 대단히 위험하다. 그러나 일반적으로 분쇄기는 분쇄공정의 기계적인 힘에 견딜 수 있게끔 단단하게 만들어져 있으며 내부에서 폭발이 일어나더라도 그 입구 또는 출구가 폭발압력 방출구의 역할을 하기 때문에 본체가 크게 파손되는 일은 없다.

안전대책으로는 압력에 견딜 수 있게끔 설계하고 폭발압력 방산구나 폭발억제장치를 설치할 필요가 있다. 분쇄기는 내부에 금속편이나 자갈등이 원료중에 혼입하여 마출·충격불꽃을 일으키기 때문에 점화되기 쉽다. 그대책으로는 자력 또는 공기압력을 이용한 이물질제거(분리)기를 설치할 필요가 있다.

또한 원료의 공급속도가 최적치로부터 크게 벗어나면 분쇄기중에서 이상고온을 발생시켜 화재·폭발의 위험성을 유발할 수 있다. 즉, 분쇄기에 걸리는 부하가 너무 크거나 또는 너무 작아도 위험 하므로 설계시에는 모타에 과전류차단기를 부착하는 것이 좋다.

③ 건조기

건조기는 열원이 존재하고 또한 건조기내부는 교반에 의한 분진부유상태가 발생가능하므로 일반적으로 발화·폭발의 위험성이 높다. 분체가 발화하지 않게끔 열원의 온도를 안전한 저온영역에 설정해야 하나 이를 위해서는 분체의 열적성질, 특히 자연발화온도를 파악해둘 필요가 있다.

또한 어떤 경우에는 자연발화온도보다 훨씬 낮은 온도에서 운전하여도 그 분체가 건조기내에 장기간 체류하면 발화하는 경우도 있다. 이것은 그 물질의 열화(劣化)에 의하여 발화온도가 저하되었기 때문이며 또한 축열에 의하여 분체자신의 온도가 건조기의 온도보다 높아졌기 때문이다. 이것을 방지하기 위해서는 건조기내에 분체가 장기 체류하지 않는 구조로 만들 필요가 있다.

④ 저장조

저장조는 단순한 저장목적의 작은 용기로부터 자동공급, 배출설비를 가진 커다란 사일로까지 많은 종류가 있으며 사일로등의 분진폭발사고는 규모도 크고, 사일로용량은 점점 커지는 경향을 나타내고 있으므로 그 안전대책이 대단히 중요하다.

저장조는 내화구조로 하고 큰 저장조는 옥외에 설치한다. 또한 저장조는 밀폐구조로 하여 분진의 방산을 방지한다.

사일로내의 부유분진을 억제하기 위해서는 집진기를 병설하면 되지만 집진기내의 화재·폭발이 사일로내로 전파하지 않도록 차단변등으로 격리시킬 필요가 있다. 저장조로부터 분체를 배출할때는 분진이 누출하여 그것이 퇴적하거나 또는 부유분진운을 형성할 위험성이 있으므로 국소배기장치를 설치하도록 한다.

한편 피해억제대책의 관점으로 볼 때, 너무 높은 원통형 사일로는 상부부근이 커다란 파괴력을 받기 쉽기 때문에 높이대 직경의 비 (L/D)가 5이하로 되도록 설계한다. 폭발압력방출구를 설치할 때는 각종 자료를 참조하여 그 면적을 충분히 크게 하도록 주의한다. 저장중의 퇴적분진의 자연발화에 대해서는 온도감시시스템이나 냉각설비, 소화설비등을 설치할 필요가 있다.

(7) 주요 작업의 대책예

① 콘베어에 의한 이송작업

벨트콘베어, 스크류콘베어 등의 콘베어류의 작동중에는 기계적인 마찰이나 충격, 볼트등의 부품의 낙하에 의한 충격불꽃등에 의한 착화 위험성이 존재한다. 특히 노후설비나 보수불량의 설비에는 이와 같은 위험성이 높기 때문에 Maintenance를 충분히 실시해야 한다. 또한 작동중에는 다음 사항에 주의해야 한다.

벨트콘베어에서는 벨트의 가동부분에 분진이 퇴적하지 않도록 한다. 바께스콘베어에서는 바께쓰와 엘리베이트지주와의 충돌이나 볼트 등의 부품이 분체중에 혼입되지 않도록 충분히 주의한다. 스크류콘베어에서는 분체의 막힘이 원인이 되는 과부하에 의한 발열이나 금속 등의 이물질의 혼입에 의한 착화원의 발생에 주의한다.

② 공기수송작업

분체공기수송장치는 공기를 동력원으로 하여 분체공급으로부터 수송관을 거쳐 회수부에 분체를 이동시키는 시스템인데 분진폭발은 수송관, 회수부에서 발생할 위험이 높다. 배관중의 수송농도는 폭발한계밖의 농도로 하고 집진목적이외의 압선식에서는 플러그수송이 바람직하

다. 배관은 폭발에 견딜 수 있게 하고 접지의 필요성이 있으므로 금속제로 하고 수송속도는 정전기를 현저하게 발생시킬 가능성이 있는 분체의 경우 충분히 저속으로 한다. 분산분진의 이동으로 정전기의 대전이 심한 경우에는 수송공기를 가습하든지 하여 제전장치의 설치를 고려할 필요가 있다. 쉽게 착화하는 분진의 경우에는 공기대신에 불활성가스로 수송한다. 절단기나 연마기로부터 발생하는 불필요 분진의 제거에 진공식배출시스템을 사용할 때는 담배꽁초등을 버리는 곳으로 사용되는 경우가 있으므로 엄중하게 감시한다. 또한 이러한 시스템의 Duct내에서는 타고 있는 물질이 부착된 그대로 있는 경우도 있으므로 Duct계통을 철저히 검사하고 그러한 연소물 또는 부착물을 용이하게 제거·청소가능한 구조로 할 필요가 있다.

③ 포장작업

분체제품을 드럼통이나 종이봉지, 플래스틱봉지등에 충전하여 출하할 때 마찰불꽃, 고온열원등의 착화원이 존재하지 않으므로 안심하기 쉽지만 정전기의 대전과 방전에 의한 불꽃의 발생은 피하기 어렵다.

예를들면, 공기중에서 분체를 자연낙하시키며 비전도성의 플래스틱용기등에 충전할 경우에는 착화가능한 양의 정전기가 축적할 가능성이 높다. 특히 분체중에 미량이라도 가연성용제가 포함되어 있을 경우에는 착화는 대단히 발생하기 쉽다. 따라서 이러한 작업에서는 정전기의 대전을 배제해야 한다.

분체의 배출구나 충전용기의 재질은 가능한한 도전성의 재질을 쓴다. 작업자는 대전방지복과 정전화를 착용하며 분체의 배출속도도 억

제한다. 그리고 공정상 가능하면 물등의 불활성액체로 분체를 축축하게 해주면 좋다.

분체중에 가연성용제가 포함될 경우에는 배출설비내의 기체상을 불활성가스로 치환시킬 필요가 있다. 이경우 작업자의 산소결핍사고방지를 위한 대책이 필요하다. 경우에 따라서는 공정의 변경도 검토해야 되고 예를 들면, 용제를 불연성의 물질로 변경하는 등의 대책도 고려할 필요가 있다.

④ 분진의 폐기작업

청소로 수집한 분진 또는 불필요한 분진을 폐기할 경우에는 분진의 장기체류나 다른 화학품과의 혼합에 의하여 발화할 가능성이 있는지 여부도 검토해야 한다.

소각에 의한 폐기는 일반적인 처리방법이지만 폐기분진을 일반폐기물과 섞어두면 일반 폐기물속에 존재하는 라이타, 스프레이깡통 등의 폐기물속에 잔존하는 가연성의 액화가스가 누출되어 충격불꽃 등으로 착화되면 의외의 장소에서 화재가 발생하고 또한 분진의 폭발을 일으킬 위험이 있다. 그러므로 일반폐기물과 분진폐기물을 함께 방치하거나 섞어서 처리하지 않도록 주의해야 한다.

또한 분진폐기물을 보일러등의 연소장치에서 소각할때는 부유분진의 생생을 막아야 하고 한꺼번에 대량의 분진을 투입하면 그을림연소를 한다음에 돌연 폭발적으로 연소하는 사고도 있으므로 주의해야 한다.

5-5 분진폭발화재의 피해억제대책

가연성분진의 취급시 분진운과 착화원이 접촉하지 않게끔 엄격한 폭발예방대책을 실시하여도 장치의 종류나 작업의 조건에 따라서는 완벽한 사고방지대책이 될 수 없는 경우가 발생한다. 즉, 분진을 취급하는 장치등의 내부에서 분진운의 생성을 완전히 방지하는 것은 불가능하고 또한 착화원의 완전한 배제도 곤란하므로 예상도 못한 착화원이 발생하는 경우도 있어 분진폭발의 발생을 완전히 예방하는것은 일반적으로 곤란하다. 또는 분진플랜트가 개방형으로 되어 있어 적절한 예방대책수립이 곤란하거나 대단히 비용이 많이 드는 경우도 있다.

이와같은 불측의 사태가 발생하여 가연성분진이 공기중에 분산될 경우에는 분진폭발이 발생할 위험성이 있으므로 그 대책으로 폭발의 피해억제대책을 강구하는 것이 바람직하다.

일반적으로 부유분진이 존재하는 용적이 클수록 높은 위험성을 나타내고 있으므로 아주 작은 용적의 경우에는 위험성을 무시할 수도 있으나 피해억제대책을 강구할때는 분진의 폭발위험성 즉 분진의 종류·특성, 처리장치, 공정등에 의존하며 취급하는 분체에 폭발위험성이 명백하게 존재할때는 플랜트의 설계단계때부터 대책을 강구해야 한다.

피해억제대책에는 적절한 플랜트의 배치, 폭발압력에 견딜 수 있는 강도로 장치를 제작할 것, 폭발압력을 안전한 장소에 방출할 것, 발생하는 폭발압력을 낮게 억제할 것, 발생원으로부터 다른 장소에 폭발이 전파되지 않도록 차단할 것 등이 있다.

(1) 플랜트의 배치

공장의 설계·배치단계에서 취급분체의 위험성에 따라 분진폭발·화재의 위험성이 높은 설비를 옥외에 설치하든지 또는 옥내에 설치할 경우에는 옥외로 통하는 폭발압력방산구를 설치하는등의 대책을 강구한다. 또한 폭발을 일으키는 부유분진양을 제한하고 폭발이 동시에 플랜트전체에 확산되는 것을 억제하기 위하여 플랜트의 장치를 분리하는 것이 바람직하다. 각각의 설비를 독자의 건물내에 설치하여 충분한 거리를 확보하면 방폭뿐 아니라 방화대책도 된다. 위험성이 큰 조작을 행할때는 방폭벽등으로 격리한다.

(2) 기기의 내폭(耐爆)구조

내폭(耐爆)구조란 용기 및 장치의 내부에서 발생하는 폭발압력에 견딜 수 있는 강도를 가진 구조를 말한다. 또한 폭발압력이란 최대폭발압력 또는 폭발압력방산구 또는 폭발억제장치에 의해서 감소된 폭발압력을 말한다. 일반적으로 내폭구조의 용기·장치등의 설계강도는 예상되는 최대폭발압력에 안전계수값으로 50%값을 가산한 값으로 한다.

한편, 다음조건에서는 대단히 높은 폭발압력의 발생이 예상되므로 내폭구조를 사용할 수가 없다.

① 용기의 길이대 직경의 비(L/D)가 5이상일 경우

② 2개이상의 용기가 굵은 관이나 닥트(Duct)로 접속되어 있을 때

③ 초기압력이 대기압보다 높을 때($2kg/cm^2$이상)

따라서 이와같은 조건은 장치의 설계단계에서 피해야 하지만 어쩔수 없을 경우에는 폭발압력방산구, 폭발압력억제장치등의 대책을 강구해야

한다.

(3) 폭발압력방산구

폭발압력방산구는 용기·장치등의 내부에서 폭발에 의한 고압이 발생했을 때 작동하여 압력 또는 화염을 외부에 방출하여 재해의 국소화를 도모하는 장치이다. 방산구의 설치장소는 분진의 폭발 위험성 및 장치의 상황에 따라 안전한 방향, 안전한 공간에 방출될 수 있도록 후면·측면 또는 천정부등으로 한다. 폭발압력방산구에 닥트(D-uct)등을 접속할 때에는 강도를 본체와 동등하게 하고, 길이는 되도록 짧게 하고 단면적의 크기는 닥트의 길이에 따라 조정한다. 또한 방산구설치시 1개의 방산구로 필요면적이 확보되지 않을때는 복수의 방산구를 설치한다.

① 폭발압력방산구의 형태

내부가 음압인 기기·장치에 대해서는 음압에 대한 강도를 가지고 또한 양압발생시 설정압력에서 즉시 압력을 해소시킬 수 있는 재료, 즉 내부에 간단한 격자상 보강재를 구비한 비닐시이트 또는 알루미늄박지등을 사용한다. 사진 5-1 에 알루미늄박지를 이용한 방산구의 예를 보인다.

내부가 양압한 기기·장치에 대해서는 통상작업중에는 작동하지 않고 설정압력을 초과한 경우에 신속하게 작동할 수 있는 형상·재료의 방산구를 설치한다.

집진기나 사일로등에 방산구를 설치할 경우 이러한 장치는 일반적으로 용적이 크고 내압력(耐壓力)이 작으므로 방산면적을 충분히 크게할 필요가 있다. 사진 5-2 와 같이 복수의 방산구를 설치한 예도

많다.

② 부착위치

폭발압력방산구의 부착위치는 분진운에 가까운 위치로 하고, 내부에 고체-기체분리용 크로스등을 설치한 장치는 분체쪽에 설치한다. 폭발압력방출시에는 화염, 연소가스, 미연소분진등이 고속으로 방출 되므로 작업실이나 통로에 향하게 해서는 아니된다. 닥트를 사용할때는 닥트를 통과할때 방출압력이 상승할 위험이 있으므로 주의하여야 한다.

③ 폭발압력방산구의 면적

방산구의 면적은 폭발시의 압력을 용기의 설계강도이하로 급속하게 방출할 수 있는 면적이어야 한다. 그 면적은 분진의 폭발특성, 용기 및 장치의 설계강도, 방산구카바, 용기용적, 용기내용물, 닥트등의 상태에 따라 결정된다. 방산구의 면적 및 설치기준에 관해서는 일본의 분체공업협회규격에 정해져 있다.

(4) 폭발전파차단장치

폭발전파의 억제대책으로는 플랜트내의 각설비를 분리시키는 것이 필요하나 생산적인 면을 생각하면 플랜트의 각 설비는 접속 또는 근접해 있는 것이 요구된다.

이와같은 경우의 폭발전파차단장치로 로터리밸브 또는 스크류콘베어가 통상 사용되고 있지만 훈소중인 입자가 운반분체중에 섞여들어올때는 화재발생의 위험이 있다. 따라서 보다 적극적으로 폭발 차단을 위해 개발된 것이 급속차단밸브, 급속정지밸브(폭발방지밸브), 소화제차단밸브등이 있다.(그림 5-3)

이러한 장치는 폭발시의 압력과 화염이 닥트등의 접속부를 통하여

다른 설비로 전파되는 것을 방지하기 위하여 닥트의 중간에 설치되어 압력과 화염을 차단(또는 소화)하는 것으로 겸지기, 제어기, 밸

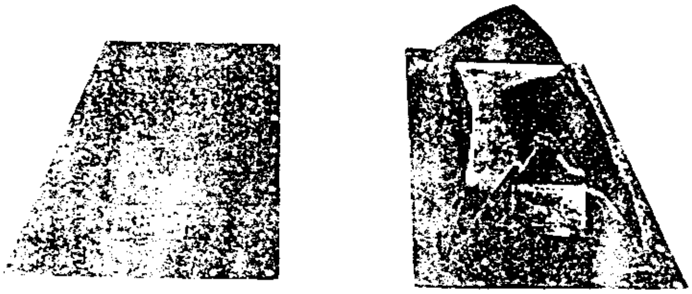


사진 5-1 알루미늄박지를 소재로한 폭발압력방산구

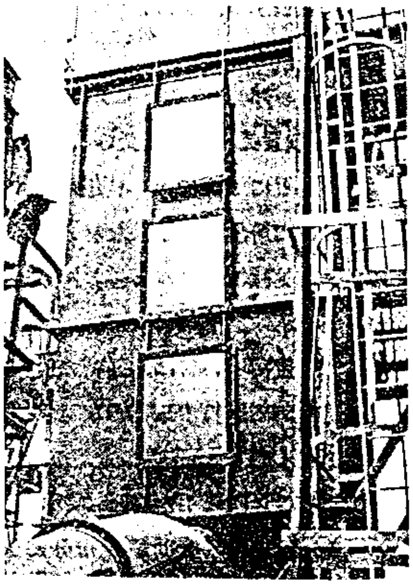


사진 5-2 백 필터에서의 폭발압력방산구 설치

브작동부 (소화제살포부) 로 구성되어 있다. 또한 급속차단밸브를 설치할 경우에는 장치 및 기기에 유효면적의 폭발압력방산구를 설치하여야 한다.

검지기에는 압력센서, 온도센서, 광학센서 등이 있으며 때로는 복수설치하는 경우도 있다. 그리고 센서부와 차단밸브간의 거리는 밸브작동시간, 화염속도 및 압력전파속도에 따라 결정한다. 밸브작동은 공기작동식이 일반적이며 밸브본체는 폭발압력에 견딜 수 있도록 충분한 강도로 한다. (일반적으로 10㎏/㎠G정도)

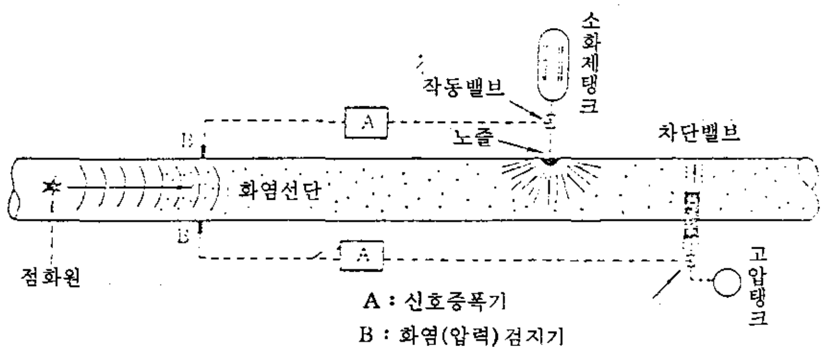


그림 5-3 폭발차단밸브의 예

(5) 폭발억제장치

폭발억제장치는 기계 · 장치등의 내부에서 발생한 분진폭발의 초기상태를 압력파동으로 감지하여 억제제를 고속도로 살포하여 초기화염을 진압함으로써, 기계 · 장치등의 내압력 (耐壓力) 을 초과하는 폭발압력의 발생을 저지하는 것이다. (그림 5-4) 따라서 용기의 내압력 (耐壓力) 이 비교적 작을 경우 또는 용기밖으로 압력이 방출되거나 폭발음의

발생이 바람직하지 않을 경우에 이 장치를 설치하는 것이 적절하다.

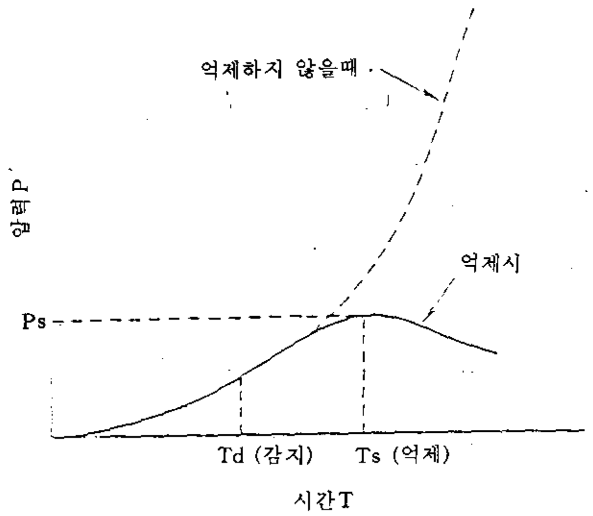


그림 5-4 폭발억제시의 압력의 변화

폭발억제장치는 폭발의 발생을 검출하는 감지기, 감지기로부터의 신호에 의해서 기동하여 억제제를 분출하는 억제기(소화용기) 및 시스템의 동작을 제어하는 제어장치등으로 구성된다.(그림 5-5)

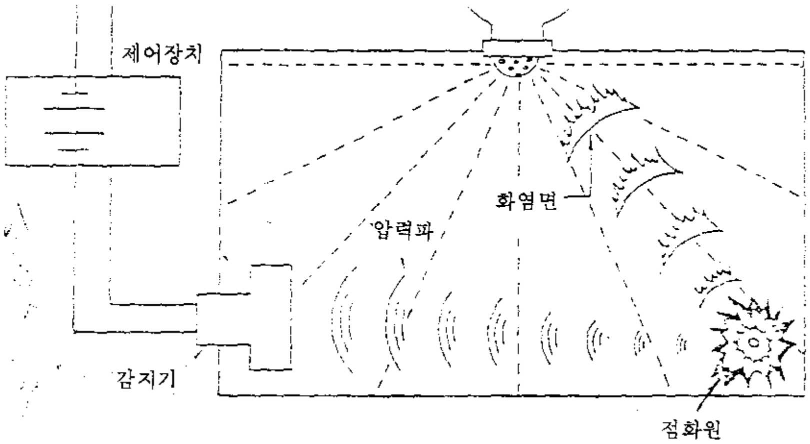


그림 5-5 폭발억제장치의 시스템구성

① 폭발의 감지

폭발의 발생을 검출하는 방법에는 압력의 상승이나 화염으로부터 발생되는 방사에너지를 감지하는 방법등이 사용된다. 이러한 방법에는 빠른 응답과 확실한 동작이 요구되며, 조업시의 온도·압력등의 변동, 진동이나 충격등의 외력, 분진의 부착에 의한 감도의 저하등의 영향을 받지 않고 설정된 조건에 도달했을때 신속하게 작동하는 것이 필요하다.

가장 일반적으로 사용되는 것은 고감도이고 응답성이 좋은 금속막과 마이크로 스윗치를 조합한 압력감지기이다. 감지압력은 조업시의 장치내압의 변동폭을 고려하여 정한다. 조업시의 내압이 음압인 경우에는 압력상승율을 검출하는 방법을 사용하기도 한다.

방사에너지를 감지하는 방법으로는 방전관식의 자외선 감지기나 광소자등을 이용한 적외선 감지기가 있다. 기계적인 동작이 없으므로 응답성은 좋지만 전자회로를 필요로 하는등의 회로구성이 복잡하다. 또한 분진을 취급하는 장치내에서는 빛의 투과성이 나빠 감도가 열화하므로 주의할 필요가 있다. 그외에 발화원인이 과열인 경우나 발화하여도 압력이 상승하지 않는 경우는 온도식 감지기가 유효하다. 하지만 응답성이 느리므로 사용시 주의해야 한다.

② 폭발의 억제

억제제(소화제)는 할로겐화물소화제, 분말소화제, 물을 사용하며 가연물의 종류, 기계의 형상등을 고려하여 가장 유효한 소화제를 선택한다. 일반적으로 연소반응을 화학적으로 억제하는 할로겐화물소화제가 억제효과, 작동후처리의 용이성, 취급의 용이성등의 점에서 우수하다.

물은 할로겐화물소화제보다 억제효과가 떨어지지만 (약 1/2 ~ 1/10)분진에 따라서는 물밖에 사용할 수 없는 경우도 있다. 분말소화제는 억제효과가 크므로 감지부의 설계가 용이하지만 작동후 분말의 제거가 용이하지 않으므로 생산설비에 대한 응용은 거의 하지 않고 도시쓰레기처리용의 파쇄기등에 사용된다.

③ 장치의 제어

제어장치는 감지기로부터의 신호를 소화용기에 전달하여 억제제를 방출하는 것이 주된 기능이지만 예측할 수 없는 폭발사고에 확실하게 응답하도록 감지기, 뇌관회로의 단선·절연불량의 감시, 상용전원의 고장에 대한 예비전원의 구비등이 필요하다.

그외에 억제장치의 작동시에는 프로세스기기의 인터록, 경보의 발신, 2차소화장치의 기동등이 행하여지도록 하여야 한다.

④ 폭발억제장치의 설치예

폭발억제장치는 가연성분진을 취급하는 기계나 장치등에 설치할 수 있다. 분쇄공정에 설치한 예를 그림 5-6 에 나타냈다. 자동차나 도시쓰레기등의 폐기물파쇄기에도 억제장치가 설치된다. 이러한 경우 폭발원인이 되는 가연물은 자동차의 가솔린탱크내에 잔류된 가솔린이나 도시쓰레기에 혼입한 라이타용가스봄베 등이 있다.

특히 도시쓰레기처리시에는 억제효과가 큰 분말소화제를 사용하고 화염이 투입구나 배출구로부터 외부에 전파되는 것을 억제한다. (그림 5-7)

(6) 소화대책

분진화재의 피해억제대책은 소화설비가 중심이 되며 국부적인 분진

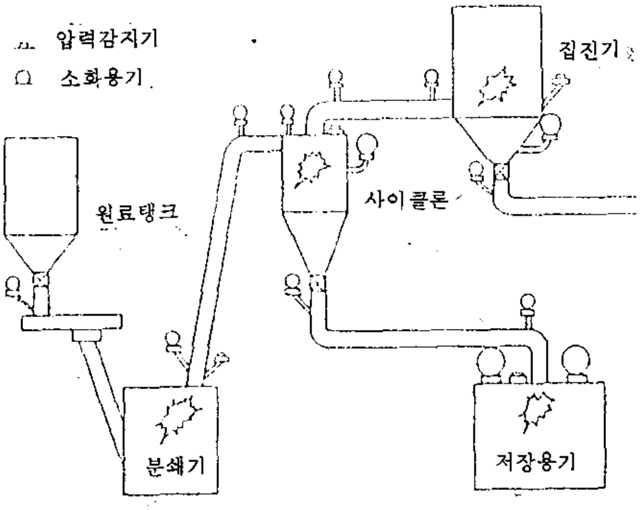


그림 5-6　분쇄공정에　설치한　폭발억제장치

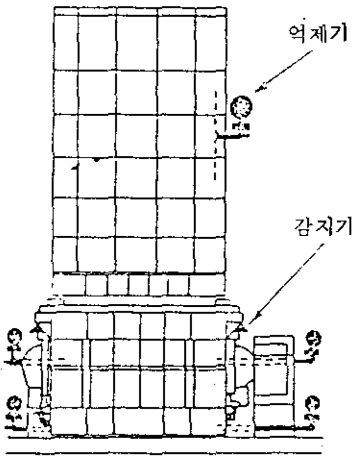


그림 5-7　폐기물파쇄기에　설치한 폭발억제장치

연소의 조기발견이 피해억제의 관건이 된다. 분진화재의 소화작업은 일반적인 가연성고체의 화재시와 동일하나 소화작업중에 분진이 비산되어 분진운이 발생되는 것을 극력 피하여야 한다. 소화제의 선택은 분진의 종류, 타위험성물질의 존재, 주변 플랜트의 상황등에 의하여 좌우되며 최적의 소화제를 사전에 결정해 두는 것이 좋다. 다만, 대상물질에 따라서 사용해서는 안될 소화제가 있으므로 주의가 필요하다.

① 분진화재의 탐지

마루, 배관, 장치의 표면이나 내부에 퇴적된 분진의 화재는 발염연소, 훈소, 표면연소의 형태를 취한다. 퇴적분진의 훈소는 진행속도가 느리므로 조기발견은 어려우나 대규모 화재 또는 폭발로 확대되기 이전에 발견하여 소화대책을 강구해야 한다.

분진화재의 검지에는 자동화재경보설비가 이용가능하나 온도, 연기, 화염, 일산화탄소등을 검지하여 보다 빠르게 화재나 연소를 발견하는 방법을 검토하여야 한다.

대량의 연기가 발생하는 화재에는 연기감지식이 유효하나 분진에 의한 오염으로 감도가 변화하므로 기능유지에 주의해야 한다.

② 소화제와 소화설비

소화설비는 고정식과 이동식이 있으며, 이동식의 경우 대규모 화재 발생시 근접하여 소화작업을 할 수 없다는 단점이 있다. 아래에 대표적인 소화제나 소화설비에 관하여 설명한다.

- 물, 강화액 소화기 : 물은 냉각효과가 크고 대부분의 유기용제에 사용 가능하다. 다만, 금속화재의 경우 연소온도가 높으므로 물이 분해하여 수소를 발생하여 폭발을 일으킬 위험이 있으므로 물은

엄금하여야 한다. 또한 전기설비에도 물은 사용해서는 안된다. 물의 사용방법은 강한 물줄기를 사용하지 말고 스프링쿨러나 분무 형식의 형태로 대상물을 물방울로 감싸는 형식으로 소화하여야 한다.

탄산칼륨이나 유기산염의 수용액등의 강화액 소화기는 냉각작용에 의하여 소화하지만, 알칼리 금속이온이 화학적 억제작용을 가지고 있으므로 물소화기보다 효과적이다.

• 포말소화제 : 포말소화제는 공기와 교반 혼합하여 발생하는 포말로 연소물의 표면을 둘러쌈으로서 소화한다. 탄소재의 표면 연소나 얇은 분진층의 소화에는 적합하나 두꺼운 퇴적분진층의 훈소에는 적합하지 않다.

• 분말소화제 : 분말소화제는 알칼리금속의 탄산염, 인산염, 황산염, 염화물등의 고체를 분말로 한것으로 화학적 억제작용으로 소화한다. 분말소화제는 금속화재를 대상으로 한 염화나트륨이나 인산암모늄을 주성분으로 한것이 있다. 연소하고 있는 금속표면에서 용융하여 연소면을 피복하여 질식 또는 냉각작용으로 소화하는 것으로 사용시에는 연소하고 있는 금속분진이 비산하지 않도록 방출압력을 낮게하여 화재표면에 퇴적하도록 조작한다.

• 탄산가스, 할로겐화물소화제 : 탄산가스는 산소농도를 한계농도 이하로 내려서 질식작용으로 소화하고, 할로겐화물소화제는 화학적억제작용으로 소화한다. 탄산가스, 할로겐화물은 기체로 방출되므로 바람의 영향을 많이 받는다. 또한, 금속화재에 할로겐화물소화제를 사용하면 도리어 불을 강하게 하고 폭발의 위험도 있으므로 사용해서는 아니 된다.

• 불연성고체에 의한 피복 : 건조모래 또는 흙, 팽창석, 팽창진주암 등의 건조한 불연성분체는 퇴적분진화재를 피복하여 질식효과에 의하여 소화할 수가 있다. 건조모래는 알루미늄, 마그네슘등의 금속분말의 화재에 유효하고 팽창석, 팽창진주암은 금속나트륨과 금속칼륨의 화재에 사용된다.

(7) 가스중독등의 위험성에 대한 대책

분진폭발이 발생했을 경우 화염, 폭풍, 비산물에 의한 직접상해이외에 일산화탄소에 의한 중독 및 산소결핍의 위험이 있다. 유기물질이나 탄소질의 분진은 불완전연소로 인한 일산화탄소를 다량 발생하여 폭발현장근처의 근로자들이 급성가스중독을 일은킬 위험성이 높다. 또한 분진폭발후의 연소가스는 산소함유량이 급격히 떨어지므로 산소결핍증을 일으키기 쉽다. 그림 5-8 에 옥수수전분의 분진농도와 연소가스 조성과의 관계를 나타냈다. 일반적으로 유기물질에서는 분진농도가 0.5 ~2.0g/ℓ의 범위에서 연소가스중의 일산화탄소농도는 10 %를 넘고 산소농도는 5 %이하로 내려가는 경우가 많다. 따라서 폭발로 부상한 사람을 구조할 경우에는 공기호흡기등의 호흡보호구를 장착하여야 한다. 또한 유기물질이나 탄소질의 분진폭발에서는 생성물질은 일산화탄소, 탄산가스, 수증기등이고 유황의 분진에서는 아황산가스로 가스상의 물질이지만 알루미늄, 마그네슘, 칼슘, 실리콘합금 등의 금속분진의 폭발에서는 연소후의 물질이 용융한 산화금속으로 구성된 고온의 재입자이다. 이때 폭발현장근처의 근로자들의 피부에 재입자가 침착하거나 또는 구강내에 흡인되어 화상을 입을 위험이 있다. 따라서 금속분진의 폭발후에는 불연성 시이트 또는 의복등을 사용하여 생성된 고온

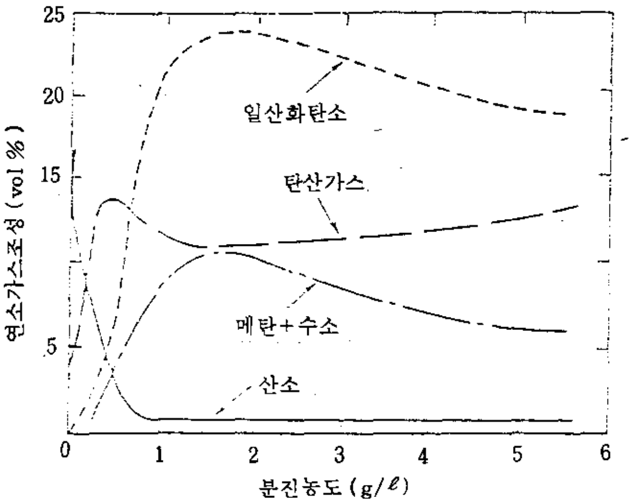


그림 5-8 옥수수전분의 분진농도와 연소가스조성의 관계

의 재로부터 신체를 보호하여야 한다.

또한 금속화재시 발생하는 연소가스중에도 산화금속으로 구성된 고온의 미립자가 포함되어 이것을 흡입하면 호흡기장해를 일으킨다. 금속화재시는 일반적으로 대량의 열과 자외선광선을 동반하므로 금속분진의 소화활동시에는 호흡기 및 눈의 보호를 고려하여야 한다.

참 고 도 서

1. K.N.PALMER, "Dust Explosions and Fires", Chapman and Hall, 1973.
2. 安全工學講座 2, "爆發", 海文堂, 1983.
3. 北川徹三, "化學安全工學", 日刊工業新聞社, 1983.
4. "プロセス防災工學", 化學工業協會, 槇書店, 1973.
5. "化學工場大型事故의 문제점과 대책", 한국산업안전공단, 1988.
6. 강수헌·고남준, "산업안전관리총론", 韓進.
7. "안전관리총람", 한국노동문제연구원, 成原安全硏究社.
8. "정전기 재해방지대책 조사연구보고서", 국립노동과학연구소, 1986.
9. "粉じん爆發の防止對策", 中災防, 1988.

여 백

부록 1.　분진의　폭발특성표

여 백

1. 분진의 폭발특성표

Dust	Minimum ignition temperature °C		Minimum explosible concentration g/l	Minimum ignition energy mJ	Maximum explosion pressure lb/in²	Maximum rate of pressure rise lb/in²s	Maximum oxygen concentration to prevent ignition % by volume	References	Notes
	cloud	layer							
Phthalodinitrile	> 700	Melts	—	—	43	—	—	2	
Phytosterol	330	Melts	0.025	10	76	> 10 000	—	1	
Piperazine	480	—	—	—	72	1 400	—	1	
Pitch	710	—	0.035	20	88	6 000	—	7	
Polyacetal	440	—	0.035	20	113	4 100	—	4	
Polyacrylamide	410	240	0.040	30	85	2 500	—	4	
Polyacrylonitrile	500	460	0.025	20	89	11 000	—	4	
Polycarbonate	710	—	0.025	25	96	4 700	—	4	
Polyethylene	390	—	0.020	10	80	7 500	—	4,8	
Polyethylene oxide	350	—	0.030	30	106	2 100	5	4	
Polyethylene terephthalate	500	—	0.040	35	98	5 500	—	4	
Poly isobutyl methacrylate	500	280	0.020	40	74	2 800	—	4	
Poly methacrylic acid	450	290	0.045	100	97	1 800	—	4	
Polymethyl methacrylate	440	—	0.020	15	101	1 800	7	4	
Polymonochlorotrifluoro ethylene	600	720	Did	not		ignite	—	4	
Polypropylene	420	—	0.020	30	76	5 500	—	4	
Polystyrene	500	500	0.020	15	100	7 000	—	4	
Polytetrafluoro ethylene	670	570	Did	not		ignite	—	4	
Polyurethane foam	510	440	0.030	20	87	3 700	—	4	
Polyurethane foam, fire retardant	550	390	0.025	15	96	3 700	—	4	
Polyvinylacetate	450	—	0.040	160	69	1 000	11	4,8	Inert gas carbon dioxide.
Polyvinyl alcohol	450	Melts	—	—	78	—	—	2	
Polyvinyl butyral	390	—	0.020	10	84	2 000	5	4	

Polyvinyl chloride	670	—	Did not ignite		38	500	—	4	Flame ignition source.
Polyvinylidene chloride	670	—	—	—	—	—	—	8	Group (b) dust
Polyvinyl pyrrolidone	465	Melts	—	—	15	—	—	2	
Potassium hydrogen tartrate	520	—	—	—	—	—	—	1	
Potassium sorbate	380	180	0.120	60	79	9 500	—	1	
Potato, dried	450	—	—	—	97	1 000	—	8	
Potato starch	430	—	—	—	—	—	—	2	
Provender	370	—	—	—	93	1 400	—	8	
Pyrethrum	460	210	0.100	80	95	1 500	—	1	
Quillaia bark	450	—	—	—	—	—	—	8	
Rape seed meal	465	—	—	—	—	—	—	2	
Rayon, viscose	420	—	—	—	—	—	—	8	
Rayon, flock	—	—	0.03	—	—	—	—	8	
Rice	440	240	0.050	50	105	2 700	—	5	
Rosin	390	—	0.015	10	87	12 000	—	4	
Rubber	380	—	—	—	—	—	—	8	
Rubber, crude, hard	350	—	0.025	50	80	3 800	13	4	
Rubber, crumb	440	—	—	—	84	3 300	—	8	
Rubber, vulcanized	360	—	—	—	40	—	—	2	
Rye flour	415	325	—	—	35	—	—	2	
Saccharin	690	—	—	—	—	—	—	1	
Salicylanilide	610	Melts	0.040	20	73	4 800	—	1	
Salicylic acid	590	—	0.025	—	84	6 800	—	4,8	
Sawdust	430	—	—	—	97	2 000	—	8	
Sebacic acid	—	—	—	—	74	400	—	8	
Senna	440	—	0.010	105	49	300	—	8	
Shellac	400	—	0.020	10	73	3 600	9	4	
Silicon	Did not ignite	760	<0.10	80	94	13 000	—	3	
Soap	430	600	0.085	100	77	2 800	—	6	
Sodium acetate	590	—	0.030	35	90	4 600	—	1	
Sodium amatol	580	Melts	0.140	—	65	800	—	1	
Sodium benzoate	560	680	0.050	80	91	3700	—	1	

Dust	Minimum ignition temperature °C cloud	Minimum ignition temperature °C layer	Minimum explosible concentration g/l	Minimum ignition energy mJ	Maximum explosion pressure lb/in²	Maximum rate of pressure rise lb/in²s	Maximum oxygen concentration to prevent ignition % by volume	References	Notes
Sodium carboxymethyl cellulose	320	—	1.10	440	49	400	5	8	
Sodium 2-chloro-5 nitrobenzene sulphonate	550	440	—	—	—	—	—	1	
Sodium 2,2-dichloro propionate	500	—	0.260	220	68	500	—	1	
Sodium dihydroxy naphthalene disulphonate	510	—	—	—	—	—	—	8	Group (b) dust.
Sodium glucaspaldrate	600	—	—	—	—	—	—	8	
Sodium glucoheptonate	600	—	—	—	—	—	—	8	
Sodium monochloracetate	550	—	—	—	—	—	—	8	
Sodium m-nitrobenzene sulphonate	—	—	—	—	92	400	—	1	
Sodium m-nitrobenzoate	—	—	—	—	87	2 900	—	1	
Sodium pentachlorophenate	Did not ignite	360	—	—	Did not ignite		—	1	
Sodium propionate	479	—	—	—	70	700	—	8	
Sodium secobarbital	520	—	0.100	960	76	800	—	1	
Sodium sorbate	400	140	0.050	30	87	6 500	—	1	
Sodium thiosulphate	510	330	—	—	11	<100	—	1	Guncotton ignition source in pressure test.
Sodium toluene sulphonate	530	—	—	—	—	—	—	8	

Sodium xylene sulphonate	490	—	—	—	—	—	—	8	
Soot	> 690	535	—	—	Did not ignite		—	2	
Sorbic acid	440	460	0.020	15	106	> 10 000	5	1,8	Inert gas nitrogen
L-Sorbose	370	—	0.065	80	76	4 700	—	1	
Soya flour	550	340	0.060	100	94	800	9	5	
Soya protein	540	—	0.050	60	98	6 500	9	5	
Starch	470	—	—	—	—	—	—	8	
Starch, cold water	490	—	—	—	—	—	—	8	
Stearic acid	290	—	—	25	80	8 500	—	1	
Steel	450	—	—	—	—	—	—	8	
Streptomycin sulphate	700	—	—	—	—	—	—	8	
Sucrose	420	Melts	0.045	40	86	5 500	—	1	
Sugar	370	400	0.045	30	109	5 000	—	5	
Sulphur	190	220	0.035	15	78	4 700	—	1	
Tantalum	630	300	<0.20	120	55	4 400	—	3	
Tartaric acid	350	—	—	—	—	—	—	8	
Tea	500	—	—	—	93	1 700	—	8	
Tea, instant	580	340	Did not ignite		48	400	—	5	
Tellurium	550	340	—	—	—	—	—	3	
Terephthalic acid	680	—	0.050	20	84	8 000	—	4	
Tetranitro carbazole	395	Melts	—	—	—	—	—	2	
Thiourea	420	Melts	—	—	29	100	—	1	
Thorium	270	280	0.075	5	79	5 500	—	3	
Thorium hydride	260	20	0.080	3	81	12 000	—	3	
Tin	630	430	0.190	80	48	1 700	—	3	
Titanium	375	290	0.045	15	85	11 000	Ignites in carbon dioxide	2,3	
Titanium hydride	480	540	0.070	60	121	12 000	3	3	
Tobacco	485	290	—	—	—	—	—	2	

Dust	Minimum ignition temperature °C cloud	layer	Minimum explosible concentration g/l	Minimum ignition energy mJ	Maximum explosion pressure lb/in²	Maximum rate of pressure rise lb/in²s	Maximum oxygen concentration to prevent ignition % by volume	References	Notes
Maleic anhydride	500	Melts	—	—	—	—	—	2	
Malt barley	400	250	0.055	35	95	4 400	—	5	
Manganese	460	240	0.125	305	53	4 900	—	3	
Manganese ethylene bis dithio carbamate	270	—	0.07	35	—	—	—	8	
Manioc	430	—	—	—	—	—	—	8	
Mannitol	460	—	0.065	40	97	2 800	—	1	
Melamine formaldehyde resin	410	—	0.02	50	93	1 800	—	4,8	
DL Methionine	370	360	0.025	35	119	5 700	7	1	
1-Methylamino anthraquinone	830	Melts	0.055	50	71	3 300	—	1	
Methyl cellulose	360	340	0.030	20	133	6 000	—	4	
2,2-Methylene bis-4-ethyl-6-t-butyl phenol	310	—	—	—	76	7 300	—	8	
Milk	440	—	—	—	—	—	—	8	
Milk, skimmed	490	200	0.050	50	95	2 300	—	5	
Milk sugar	450	Melts	—	—	31	—	—	2	
Molybdenum	720	360	—	—	—	—	—	3	
Molybdenum disulphide	570	290	—	—	—	—	—	6	
Monochloracetic acid	620	—	—	—	—	—	—	8	
Monosodium salt of trichloro ethyl phosphate	540	—	—	—	—	—	—	8	Group (b) dust
Moss, Irish	530	230	Did not ignite		21	300	—	5	
Naphthalene	575	Melts	—	—	87	—	—	2	
β-Naphthalene-azo-dimethyl aniline	510	Melts	0.020	50	70	2 300	—	1	

β–Naphthol	670	—	—	—	—	—	—	8
Naphthol yellow	415	395	—	—	—	—	—	2
Nigrosine hydrochloride	630	—	—	—	—	—	—	8
p–Nitro–o–anisidene	400	—	—	—	—	—	—	8
p–Nitro–benzene arsonic acid	360	280	0.195	480	77	900	—	1
Nitrocellulose	—	—	—	30	> 256	> 20 900	—	8
Nitro diphenylamine	480	—	—	—	—	—	—	8
Nitro furfural semi carbazone	240	—	—	—	> 143	8 600	—	8
Nitropyridone	430	Melts	0.045	35	111	> 10 000	—	1
p–Nitro–o–toluidine	470	—	—	—	—	—	—	8
m–Nitro–p–toluidine	470	—	—	—	—	—	—	8
Nylon	500	430	0.030	20	95	4 000	6	4
Oilcake meal	470	285	—	—	—	—	—	2
Onion, dehydrated	410	—	0.130	Did not ignite	35	500	—	5
Paper	440	270	0.055	60	96	3 600	—	6
Para formaldehyde	410	—	0.040	20	133	13 000	—	4
Peanut hull	460	210	0.045	50	116	8 000	—	5
Peat	420	295	—	—	—	—	—	2
Peat, sphagnum	460	240	0.045	50	104	2 200	—	5
Pectin	410	200	0.075	35	132	8 000	—	5
Penicillin, N–ethyl piperidine salt of	310	—	—	—	—	—	—	8
Penta erythritol	450	—	0.030	10	90	9 500	7	4
Phenol formaldehyde	450	—	0.015	10	107	6 500	—	8,4
Phenol furfural resin	530	—	0.025	10	88	8 500	—	4
Phenothiazine	540	—	0.030	—	56	3 000	—	1
p–Phenylene diamine	620	—	0.025	30	94	11 000	—	4
Phosphorus, red	360	305	—	—	—	—	—	2
Phosphorus pentasulphide	280	270	0.050	15	64	> 10 000	—	1
Phthalic acid	650	Melts	—	—	62	—	—	2
Phthalic anhydride	605	Melts	0.015	15	72	4 200	11	2,4
Phthalimide	630	—	0.030	50	89	4 800	—	1

Dust	Minimum ignition temperature °C cloud	layer	Minimum explosible concentration g/l	Minimum ignition energy mJ	Maximum explosion pressure lb/in²	Maximum rate of pressure rise lb/in²s	Maximum oxygen concentration to prevent ignition % by volume	References	Notes
Coke, petroleum, 13 per cent volatiles	670	—	1.00	—	36	200	—	7	Guncotton ignition source in min. expl. conc. and max. expl. pressure tests.
Colophony	325	Melts	—	—	—		—	2	
Copal	330	Melts	—	—	68	—	—	2	See also Gum manila
Copper	700	—	—	Did not ignite	Did not ignite	Did not ignite	—	3	
Copper–zinc, gold bronze	370	190	1.00	—	44	1 300	—	3	
Cork	460	210	0.035	35	96	7 500	—	6	
Corn cob	450	240	0.045	45	127	3 700	—	5	
Corn dextrine	410	390	0.040	40	124	7 000	—	5	
Cornflour	390	—	—	—	—	—	—	8	
Cornstarch	390	—	0.040	30	145	9 500	—	5	
Cotton flock	470	—	0.050	25	94	6 000	—	4	
Cotton linters	520	—	0.50	1920	73	400	5	5	
Cottonseed meal	530	200	0.055	80	89	2 200	—	5	
Coumarone–indene resin	550	—	0.015	10	93	11 000	11	4	
Crystal violet	475	Melts	—	—	—	—	—	2	
Cyclohexanone peroxide	—	—	—	21	84	5 600	—	8	
Dehydroacetic acid	430	—	0.030	15	87	8 000	—	1	
Dextrin	410	440	0.050	40	99	9 000	—	6	
Dextrose monohydrate	350	—	—	—	—	—	—	8	
Diallyl phthalate	480	—	0.030	20	90	8 500	—	1	

Diamino stilbene disulphonic acid	550	—	—	—	—	—	—	8	Group (b) dust
Diazo aminobenzene	550	—	0.015	20	114	> 10 000	—	1	
Di-t-Butyl-p-cresol	420	—	0.015	15	79	13 000	9	4	
Dibutyl tin maleate	600	—	—	—	—	—	—	8	
Dibutyl tin oxide	530	—	—	—	—	—	—	8	
Dichlorophene	770	—	—	—	72	3 000	—	1	
2,4-Dichlorophenoxy ethyl benzoate	540	—	0.045	60	84	2 200	—	1	
Dicyclopentadiene dioxide	420	—	0.015	30	89	9 500	—	4	
Dihydrostreptomycin sulphate	600	230	0.520	—	42	200	7	1	
3-3′ Dimethoxy 4-4′ diamino diphenyl	—	—	0.030	—	82	> 10 000	—	1	
Dimethylacridan	540	—	—	—	—	—	—	8	
Dimethyl diphenyl urea	490	—	—	—	—	—	—	8	
Dimethyl isophthalate	580	—	0.025	15	84	8 000	—	4	
Dimethyl terephthalate	570	—	0.030	20	105	12 000	6	4	
S-S′-Dimethyl xanthogenethylene bis dithiocarbamate	400	—	0.300	3200	84	1 500	—	1	
Dinitro aniline	470	—	—	—	—	—	—	8	
3,5-Dinitrobenzamide	500	Melts	0.040	45	163	6 500	—	1	
3,5-Dinitrobenzoic acid	460	—	0.050	45	139	4 300	—	1	
Dinitrobenzoyl chloride	380	—	—	—	—	—	—	8	
Dinitrocresol	340	Melts	0.030	—	—	—	—	1,2	
4,4′-Dinitro-sym-diphenyl urea	550	—	0.095	60	102	2 500	—	1	
Dinitro stilbene disulphonic acid	450	—	—	—	—	—	—	8	
Dinitrotoluamide	500	—	0.050	15	153	> 10 000	—	6	
Diphenyl	630	—	0.015	20	82	3 700	—	1	
4,4′-Diphenyl di sulphonylazide	590	140	0.065	30	143	5 500	—	1	

Dust	Minimum ignition temperature °C cloud	Minimum ignition temperature °C layer	Minimum explosible concentration g/l	Minimum ignition energy mJ	Maximum explosion pressure lb/in²	Maximum rate of pressure rise lb/in²s	Maximum oxygen concentration to prevent ignition % by volume	References	Notes
Diphenylol propane (Bisphenol–A)	570	—	0.012	11	81	11 800	5	4,8	Inert gas nitrogen
Egg white	610	—	0.14	640	58	500	—	5	
Epoxy resin	490	—	0.015	9	94	8 500	—	4,8	
Esparto grass	—	—	—	—	94	7 300	—	8	
Ethyl cellulose	340	330	0.025	15	112	7 000	—	4	
Ethylene diamine tetra acetic acid	450	—	0.075	50	106	3 000	—	1	
Ethyl hydroxyethyl cellulose	390	—	0.020	30	94	2 200	—	6	
Ferric ammonium ferrocyanide	390	210	1.500	—	17	100	—	1	
Ferric dimethyl dithio carbamate	280	150	0.055	25	86	6 300	—	1	
Ferric ferrocyanide	370	—	—	—	82	1 000	—	1	
Ferrochromium	790	670	2.00	—	—	—	—	3	
Ferromanganese	450	290	0.130	80	62	5 000	—	3	
Ferrosilicon (45 per cent Si)	640	—	—	—	—	—	—	2	
Ferrosilicon (90 per cent Si)	Did not ignite	980	0.240	1280	113	3 500	—	3	
Ferrotitanium	370	400	0.140	80	55	9 500	—	3	
Ferrous ferrocyanide	380	190	0.400	—	—	—	—	1	
Ferrovanadium	440	400	1.300	400	—	—	—	3	
Fish meal	485	—	—	—	—	—	—	2	
Fumaric acid	520	—	0.035	35	103	3 000	—	4	
Garlic	360	—	0.10	240	57	1 300	—	5	
Gelatin, dried	620	480	<0.5	—	78	1 200	—	1	

Gilsonite	580	500	0.020	25	78	4 500	—	7	
Graphite	730	580	—	—	—	—	—	7	
Grass	—	—	—	—	56	400	—	8	
Gum arabic	500	260	0.060	100	117	3 000	—	4	
Gum Karaya	520	240	0.100	180	116	2 500	—	4	
Gum manila (copal)	360	390	0.030	30	89	6 000	—	4	
Gum tragacanth	490	260	0.040	45	123	5 000	—	4	
Hexa methylene tetramine	410	—	0.015	10	98	11 000	11	4	
Horseradish	—	—	<0.100	—	96	1 600	—	6	
Hydrazine acid tartrate	570	—	0.175	460	30	200	—	1	
p-Hydroxy benzoic acid	620	—	0.040	—	37	—	—	1	
Hydroxyethyl cellulose	410	—	0.025	40	106	2 600	—	6	
Hydroxyethyl methyl cellulose	410	—	—	—	—	—	—	8	
Hydroxy propyl cellulose	400	—	0.020	30	96	2 900	—	6	
Iron	430	240	—	—	—	—	—	2	
Iron, carbonyl	420	230	0.105	100	47	8 000	—	3	
Iron pyrites	380	280	1.00	8 200	5	100	—	3	
Isatoic anhydride	700	—	0.035	25	80	4 900	—	1	
Isinglass	520	—	—	—	Nil	Nil	—	8	
Isophthalic acid	700	—	0.035	25	78	3 100	—	4	
Kelp	570	220	Did not ignite		19	200	—	5	
Lactalbumin	570	240	0.040	50	97	3 500	—	4	
Lampblack	730	—	—	—	—	—	—	7	
Lauryl peroxide	—	—	—	12	90	6 400	—	8	
Lead	790	290	—	Did not ignite	3	100	—	3	Flame ignition source in pressure test.
Leather	390	—	—	—	—	—	—	8	
Lignin	450	—	0.040	20	102	5 000	7	4	
Lignite	450	200	0.030	30	94	8 000	—	7	
Lycopodium	480	310	0.025	40	75	3 100	9	5	
Magnesium	560	430	0.030	40	116	15 000	—	3	
Maize husk	430	—	—	—	75	700	—	8	
Maize starch	410	—	—	—	—	—	—	2	

Dust	Minimum ignition temperature °C cloud	layer	Minimum explosible concen-tration g/l	Minimum ignition energy mJ	Maximum explosion pressure lb/in²	Maximum rate of pressure rise lb/in²s	Maximum oxygen concen-tration to prevent ignition % by volume	References	Notes
Acetamide	560	—	—	—	—	—	—	8	Group (b) dust
Aceto acetanilide	560	—	0.030	20	90	4 800	—	4	
Acetoacet-p-phenetedide	560	—	0.030	10	87	> 10 000	—	1	
Acetoacet-o-toluidine	710	—	—	—	—	—	—	1	
2 Acetylamino—5—nitro thiazole	450	450	0.160	40	137	9 000	—	1	
Acetyl-p-nitro-o-toluidine	450	—	—	—	—	—	—	8	
Adipic acid	550	—	0.035	60	95	4 000	—	4,8	
Alfalfa	460	200	0.100	320	88	1 100	—	5	
Almond shell	440	200	0.065	80	101	1 400	—	5	
Aluminium, atomized	650	760	0.045	50	84	> 20 000	—	3	
Aluminium, flake	610	320	0.045	10	127	> 20 000	—	3	
Aluminium-cobalt alloy	950	570	0.180	100	92	11 000	—	3	
Aluminium-copper alloy	—	830	0.100	100	95	4 000	—	3	
Aluminium-iron alloy	550	450	—	—	36	300	—	3	
Aluminium-lithium alloy	470	400	<0.1	140	96	6 000	—	3	
Aluminium-magnesium alloy	430	480	0.020	80	86	10 000	—	3	
Aluminium-nickel alloy	950	540	0.190	80	96	10 000	—	3	
Aluminium-silicon alloy	670	—	0.040	60	85	7 500	—	3	
Aluminium acetate	560	640	—	—	59	950	—	1	Guncotton ignition source in pressure test.
Aluminium octoate	460	—	—	—	—	—	—	8	
Aluminium stearate	400	380	0.015	10	86	> 10 000	—	1	

2 Amino-5-nitrothiazole	460	460	0.075	30	110	5 600	—	1	
Anthracene	505	Melts	—	—	68	700	—	2.8	
Anthranilic acid	580	—	0.030	35	84	6 500	—	1	
Anthraquinone	670	—	—	—	—	—	—	8	
Antimony	420	330	0.420	1 920	28	300	—	3	
Antipyrin	405	Melts	—	—	53	—	—	2	
Asphalt	510	500	0.025	25	94	4 800	—	7	
Aspirin	550	Melts	0.015	16	87	7 700	—	8	
Azelaic acid	610	—	0.025	25	76	4 700	—	4	
αα′ Azo isobutyronitrile	430	350	0.015	25	134	8 000	—	4	
Barley	370	—	—	—	—	—	—	8	
Benzethonium chloride	380	410	0.020	60	91	6 700	—	1	
Benzoic acid	600	Melts	0.011	12	95	10 300	—	8	
Benzotriazole	440	—	0.030	30	103	9 200	—	1	
Benzoyl peroxide	—	—	—	21	—	—	—	8	
Beryllium	910	540	—	—	Did not ignite		—	3	Contained 8 per cent oxide
Beryllium acetate, basic	620	—	0.080	100	87	2 200	15	1	Inert gas carbon dioxide
Bis (2-hydroxy-5-chlorophenyl)-methane	570	—	0.040	60	70	2 000	13	1	Inert gas carbon dioxide
Bis (2-hydroxy-3,5,6,-trichlorophenyl)-methane	Did not ignite	450	—	—	—	—	—	1	
Bone meal	490	230	—	—	11	100	—	6	Guncotton ignition source in pressure test.
Boron	730	390	Did not ignite	—	41	200	—	3	Guncotton ignition source in pressure test.
Bread	450	—	—	—	—	—	—	8	
Brunswick green	360	—	—	—	—	—	—	8	
P-t-butyl benzoic acid	560	—	0.020	25	88	6 500	—	4	
Cadmium	570	250	—	4 000	7	100	—	3	
Cadmium yellow	390	—	—	—	—	—	—	8	

Dust	Minimum ignition temperature °C cloud	Minimum ignition temperature °C layer	Minimum explosible concentration g/l	Minimum ignition energy mJ	Maximum explosion pressure lb/in²	Maximum rate of pressure rise lb/in²s	Maximum oxygen concentration to prevent ignition % by volume	References	Notes
Calcium carbide	555	325	—	—	13	—	—	2	
Calcium citrate	470	—	—	—	—	—	—	8	Group (b) dust
Calcium gluconate	550	—	—	—	—	—	—	8	Group (b) dust
Calcium DL Pantothenate	520	—	0.050	80	105	4 600	—	1	
Calcium propionate	530	—	—	—	90	1 900	—	8	
Calcium silicide	540	540	0.060	150	86	20 000	—	3	
Calcium stearate	400	—	0.025	15	97	> 10 000	—	1	
Caprolactam	430	—	0.07	60	79	1 700	8	8	
Carbon, activated	660	270	0.100	—	92	1 700	—	7	Guncotton ignition source in min. expl. conc. and max. expl. pressure tests.
Carbon, black	510	—	—	—	—	—	—	7	
Carboxy methyl cellulose	460	310	0.060	140	130	5 000	—	4	
Carboxy methyl hydroxy ethyl cellulose	380	—	0.200	960	83	800	—	4	
Carboxy polymethylene	520	—	0.115	640	76	1 200	—	4	
Casein	460	—	—	—	89	1 200	—	8	
Cellulose	410	300	0.045	40	117	8 000	—	4	
Cellulose acetate	340	—	0.035	20	114	6 500	5	4,8	Inert gas nitrogen
Cellulose acetate butyrate	370	—	0.025	30	81	2 700	7	4	
Cellulose proprionate	460	—	0.025	60	105	4 700	—	4	
Cellulose triacetate	390	—	0.035	30	107	4 300	—	4,8	
Cellulose tripropionate	460	—	0.025	45	88	4 000	—	4	
Charcoal	530	180	0.140	20	100	1 800	—	7	

Chloramine-T	540	150	—	—	7	150	—	1	Guncotton ignition source in pressure test.
o-Chlorobenzmalono nitrile	—	—	0.025	—	90	> 10 000	—	1	
o-Chloro aceto acetanilide	640	—	0.035	30	94	3 900	—	1	
p-Chloroaceto acetanilide	650	—	0.035	20	85	5 500	—	1	
Chloro amino toluene sulphonic acid	650	—	—	—	—	—	—	8	
4-Chloro-2 nitro aniline	590	120	<0.750	140	123	3 500	—	1	
p-Chloro o-toluidine hydrochloride	650	—	—	—	—	—	—	8	
Chocolate crumb	340	—	—	—	—	—	—	8	
Chromium	580	400	0.230	140	56	5 000	—	3	
Cinnamon	440	230	0.060	30	121	3 900	—	5	
Citrus peel	500	330	0.060	100	51	1 200	—	5	
Coal, brown	485	230	—	—	—	—	—	2	See also Lignite
Coal, 8 per cent volatiles	730	—	—	—	—	—	—	7	
Coal, 12 per cent volatiles	670	240	—	—	—	—	—	7	
Coal, 25 per cent volatiles	605	210	0.120	120	62	400	—	7	
Coal, 37 per cent volatiles	610	170	0.055	60	90	2 300	—	7	Standard Pittsburgh coal
Coal, 43 per cent volatiles	575	180	0.050	50	92	2 000	—	7	
Cobalt	760	370	—	—	—	—	—	3	
Cocoa	500	200	0.065	120	69	1 200	—	5	
Coconut	450	280	—	—	—	—	—	2	
Coconut shell	470	220	0.035	60	115	4 200	—	5	
Coffee	360	270	0.085	160	38	150	10	5,8	Inert gas carbon dioxide
Coffee, extract	600	—	—	—	47	—	—	2	
Coffee, instant	410	350	0.280	Did not ignite	68	500	—	5	
Coke	> 750	430	—	—	—	—	—	2	

Dust	*Minimum ignition temperature °C* cloud	layer	*Minimum explosible concen-tration g/l*	*Minimum ignition energy mJ*	*Maximum explosion pressure lb/in²*	*Maximum rate of pressure rise lb/in²s*	*Maximum oxygen concen-tration to prevent ignition % by volume*	*References*	*Notes*
Tobacco, dried	320	—	—	—	85	1 000	—	8	
Tobacco, stem	420	230	Did not ignite		53	400	—	5	
Tribromosalicyl anilide	880	Melts	—	—	—	—	—	1	
Trinitro toluene	—	—	0.070	75	63	2 100	—	6	
s-Trioxane	480	—	0.143	—	85	600	—	1	
α, α′-Trithiobis (N, N-dimethyl-thioformamide)	280	230	0.060	35	96	6 000	—	1	
Tung	540	240	0.070	240	74	1 900	—	5	
Tungsten	730	470	—	—	Did not ignite		—	3	
Uranium	20	100	0.060	45	69	5 000	—	3	
Uranium hydride	20	20	0.060	5	74	9 000	—	3	
Urea	900	—	Did	not		ignite	—	4,8	Group (b) dust.
Urea formaldehyde moulding powder	460	—	0.085	80	89	3 600	9	4	
Urea formaldehyde resin	430	—	0.02	34	110	1 600	—	8	
Vanadium	500	490	0.220	60	57	1 000	10	3	
Vitamin B1 mononitrate	380	190	0.035	35	120	9 000	—	1	
Vitamin C	460	280	0.070	60	88	4 800	—	1	
Walnut shell	420	210	0.035	60	121	5 500	—	5	
Wax, accra	260	—	—	—	—	—	—	8	
Wax, carnauba	340	—	—	—	—	—	—	8	

Wax, paraffin	340	—	—	—	—	—	—	8
Wheat, flour	380	360	0.050	50	109	3 700	—	5
Wheat, grain dust	420	290	—	—	43	—	—	2
Wheat starch	430	—	0.045	25	100	6 500	—	5
Wood	360	—	—	—	90	5 700	5	8
Wood, bark	450	250	0.020	60	103	7 500	—	4
Wood, flour	430	—	0.050	20	94	8 500	7	4
Wood, hard	420	315	—	—	66			2
Wood, soft	440	325	—	—	63	—	—	2
Yeast	520	260	0.050	50	123	3 500	—	5
Zinc	680	460	0.500	960	70	1 800	—	3
Zinc ethylene dithio-carbamate	480	180	—	—	45	300	—	1
Zinc stearate	315	Melts	0.020	10	80	> 10 000	—	1,2
Zirconium	20	220	0.045	5	75	11 000	Ignites in carbon dioxide	3
Zirconium hydride	350	270	0.085	60	90	9 500	3	3

Dust	Minimum ignition temperature °C cloud	Minimum ignition temperature °C layer	Minimum explosible concentration g/l	Minimum ignition energy mJ	Maximum explosion pressure lb/in²	Maximum rate of pressure rise lb/in²s	Maximum oxygen concentration to prevent ignition % by volume	References	Notes
Acetamide	560	—	—	—	—	—	—	8	Group (b) dust
Aceto acetanilide	560	—	0.030	20	90	4 800	—	4	
Acetoacet–p–phenetedide	560	—	0.030	10	87	> 10 000	—	1	
Acetoacet–o–toluidine	710	—	—	—	—	—	—	1	
2 Acetylamino—5—nitro thiazole	450	450	0.160	40	137	9 000	—	1	
Acetyl–p–nitro–o–toluidine	450	—	—	—	—	—	—	8	
Adipic acid	550	—	0.035	60	95	4 000	—	4,8	
Alfalfa	460	200	0.100	320	88	1 100	—	5	
Almond shell	440	200	0.065	80	101	1 400	—	5	
Aluminium, atomized	650	760	0.045	50	84	> 20 000	—	3	
Aluminium, flake	610	320	0.045	10	127	> 20 000	—	3	
Aluminium–cobalt alloy	950	570	0.180	100	92	11 000	—	3	
Aluminium–copper alloy	—	830	0.100	100	95	4 000	—	3	
Aluminium–iron alloy	550	450	—	—	36	300	—	3	
Aluminium–lithium alloy	470	400	<0.1	140	96	6 000	—	3	
Aluminium–magnesium alloy	430	480	0.020	80	86	10 000	—	3	
Aluminium–nickel alloy	950	540	0.190	80	96	10 000	—	3	
Aluminium–silicon alloy	670	—	0.040	60	85	7 500	—	3	
Aluminium acetate	560	640	—	—	59	950	—	1	Guncotton ignition source in pressure test.
Aluminium octoate	460	—	—	—	—	—	—	8	
Aluminium stearate	400	380	0.015	10	86	> 10 000	—	1	

2 Amino-5-nitrothiazole	460	460	0.075	30	110	5 600	—	1	
Anthracene	505	Melts	—	—	68	700	—	2,8	
Anthranilic acid	580	—	0.030	35	84	6 500	—	1	
Anthraquinone	670	—	—	—	—	—	—	8	
Antimony	420	330	0.420	1 920	28	300	—	3	
Antipyrin	405	Melts	—	—	53	—	—	2	
Asphalt	510	500	0.025	25	94	4 800	—	7	
Aspirin	550	Melts	0.015	16	87	7 700	—	8	
Azelaic acid	610	—	0.025	25	76	4 700	—	4	
αα′ Azo isobutyronitrile	430	350	0.015	25	134	8 000	—	4	
Barley	370	—	—	—	—	—	—	8	
Benzethonium chloride	380	410	0.020	60	91	6 700	—	1	
Benzoic acid	600	Melts	0.011	12	95	10 300	—	8	
Benzotriazole	440	—	0.030	30	103	9 200	—	1	
Benzoyl peroxide	—	—	—	21	—	—	—	8	
Beryllium	910	540	—	—	Did not ignite		—	3	Contained 8 per cent oxide
Beryllium acetate, basic	620	—	0.080	100	87	2 200	15	1	Inert gas carbon dioxide
Bis (2-hydroxy-5-chlorophenyl)-methane	570	—	0.040	60	70	2 000	13	1	Inert gas carbon dioxide
Bis (2-hydroxy-3,5,6,-trichlorophenyl)-methane	Did not ignite	450	—	—	—	—	—	1	
Bone meal	490	230	—	—	11	100	—	6	Guncotton ignition source in pressure test.
Boron	730	390	Did not ignite	—	41	200	—	3	Guncotton ignition source in pressure test.
Bread	450	—	—	—	—	—	—	8	
Brunswick green	360	—	—	—	—	—	—	8	
P-t-butyl benzoic acid	560	—	0.020	25	88	6 500	—	4	
Cadmium	570	250	—	4 000	7	100	—	3	
Cadmium yellow	390	—	—	—	—	—	—	8	

Dust	Minimum ignition temperature °C cloud	layer	Minimum explosible concentration g/l	Minimum ignition energy mJ	Maximum explosion pressure lb/in²	Maximum rate of pressure rise lb/in²s	Maximum oxygen concentration to prevent ignition % by volume	References	Notes
Calcium carbide	555	325	—	—	13	—	—	2	
Calcium citrate	470	—	—	—	—	—	—	8	Group (b) dust
Calcium gluconate	550	—	—	—	—	—	—	8	Group (b) dust
Calcium DL Pantothenate	520	—	0.050	80	105	4 600	—	1	
Calcium propionate	530	—	—	—	90	1 900	—	8	
Calcium silicide	540	540	0.060	150	86	20 000	—	3	
Calcium stearate	400	—	0.025	15	97	> 10 000	—	1	
Caprolactam	430	—	0.07	60	79	1 700	8	8	
Carbon, activated	660	270	0.100	—	92	1 700	—	7	Guncotton ignition source in min. expl. conc. and max. expl. pressure tests.
Carbon, black	510	—	—	—	—	—	—	7	
Carboxy methyl cellulose	460	310	0.060	140	130	5 000	—	4	
Carboxy methyl hydroxy ethyl cellulose	380	—	0.200	960	83	800	—	4	
Carboxy polymethylene	520	—	0.115	640	76	1 200	—	4	
Casein	460	—	—	—	89	1 200	—	8	
Cellulose	410	300	0.045	40	117	8 000	—	4	
Cellulose acetate	340	—	0.035	20	114	6 500	5	4,8	Inert gas nitrogen
Cellulose acetate butyrate	370	—	0.025	30	81	2 700	7	4	
Cellulose proprionate	460	—	0.025	60	105	4 700	—	4	
Cellulose triacetate	390	—	0.035	30	107	4 300	—	4,8	
Cellulose tripropionate	460	—	0.025	45	88	4 000	—	4	
Charcoal	530	180	0.140	20	100	1 800	—	7	

Chloramine-T	540	150	—	—	7	150	—	1	Guncotton ignition source in pressure test.
o-Chlorobenzmalono nitrile	—	—	0.025	—	90	> 10 000	—	1	
o-Chloro aceto acetanilide	640	—	0.035	30	94	3 900	—	1	
p-Chloroaceto acetanilide	650	—	0.035	20	85	5 500	—	1	
Chloro amino toluene sulphonic acid	650	—	—	—	—	—	—	8	
4-Chloro-2 nitro aniline	590	120	<0.750	140	123	3 500	—	1	
p-Chloro o-toluidine hydrochloride	650	—	—	—	—	—	—	8	
Chocolate crumb	340	—	—	—	—	—	—	8	
Chromium	580	400	0.230	140	56	5 000	—	3	
Cinnamon	440	230	0.060	30	121	3 900	—	5	
Citrus peel	500	330	0.060	100	51	1 200	—	5	
Coal, brown	485	230	—	—	—	—	—	2	See also Lignite
Coal, 8 per cent volatiles	730	—	—	—	—	—	—	7	
Coal, 12 per cent volatiles	670	240	—	—	—	—	—	7	
Coal, 25 per cent volatiles	605	210	0.120	120	62	400	—	7	
Coal, 37 per cent volatiles	610	170	0.055	60	90	2 300	—	7	Standard Pittsburgh coal
Coal, 43 per cent volatiles	575	180	0.050	50	92	2 000	—	7	
Cobalt	760	370	—	—	—	—	—	3	
Cocoa	500	200	0.065	120	69	1 200	—	5	
Coconut	450	280	—	—	—	—	—	2	
Coconut shell	470	220	0.035	60	115	4 200	—	5	
Coffee	360	270	0.085	160	38	150	10	5,8	Inert gas carbon dioxide
Coffee, extract	600	—	—	—	47	—	—	2	
Coffee, instant	410	350	0.280	Did not ignite	68	500	—	5	
Coke	> 750	430	—	—	—	—	—	2	

Dust	Minimum ignition temperature °C cloud	Minimum ignition temperature °C layer	Minimum explosible concentration g/l	Minimum ignition energy mJ	Maximum explosion pressure lb/in²	Maximum rate of pressure rise lb/in²s	Maximum oxygen concentration to prevent ignition % by volume	References	Notes
Coke, petroleum, 13 per cent volatiles	670	—	1.00	—	36	200	—	7	Guncotton ignition source in min. expl. conc. and max. expl. pressure tests.
Colophony	325	Melts	—	—	—		—	2	
Copal	330	Melts	—	—	68	—	—	2	See also Gum manila
Copper	700	—	—	Did not ignite	Did not ignite	Did not ignite	—	3	
Copper-zinc, gold bronze	370	190	1.00	—	44	1 300	—	3	
Cork	460	210	0.035	35	96	7 500	—	6	
Corn cob	450	240	0.045	45	127	3 700	—	5	
Corn dextrine	410	390	0.040	40	124	7 000	—	5	
Cornflour	390	—	—	—	—	—	—	8	
Cornstarch	390	—	0.040	30	145	9 500	—	5	
Cotton flock	470	—	0.050	25	94	6 000	—	4	
Cotton linters	520	—	0.50	1920	73	400	5	5	
Cottonseed meal	530	200	0.055	80	89	2 200	—	5	
Coumarone-indene resin	550	—	0.015	10	93	11 000	11	4	
Crystal violet	475	Melts	—	—	—	—	—	2	
Cyclohexanone peroxide	—	—	—	21	84	5 600	—	8	
Dehydroacetic acid	430	—	0.030	15	87	8 000	—	1	
Dextrin	410	440	0.050	40	99	9 000	—	6	
Dextrose monohydrate	350	—	—	—	—	—	—	8	
Diallyl phthalate	480	—	0.030	20	90	8 500	—	1	

Diamino stilbene disulphonic acid	550	—	—	—	—	—	—	8	Group (b) dust
Diazo aminobenzene	550	—	0.015	20	114	> 10 000	—	1	
Di-t-Butyl-p-cresol	420	—	0.015	15	79	13 000	9	4	
Dibutyl tin maleate	600	—	—	—	—	—	—	8	
Dibutyl tin oxide	530	—	—	—	—	—	—	8	
Dichlorophene	770	—	—	—	72	3 000	—	1	
2,4-Dichlorophenoxy ethyl benzoate	540	—	0.045	60	84	2 200	—	1	
Dicyclopentadiene dioxide	420	—	0.015	30	89	9 500	—	4	
Dihydrostreptomycin sulphate	600	230	0.520	—	42	200	7	1	
3-3' Dimethoxy 4-4' diamino diphenyl	—	—	0.030	—	82	> 10 000	—	1	
Dimethylacridan	540	—	—	—	—	—	—	8	
Dimethyl diphenyl urea	490	—	—	—	—	—	—	8	
Dimethyl isophthalate	580	—	0.025	15	84	8 000	—	4	
Dimethyl terephthalate	570	—	0.030	20	105	12 000	6	4	
S-S'-Dimethyl xanthogene-thylene bis dithiocarbamate	400	—	0.300	3200	84	1 500	—	1	
Dinitro aniline	470	—	—	—	—	—	—	8	
3,5-Dinitrobenzamide	500	Melts	0.040	45	163	6 500	—	1	
3,5-Dinitrobenzoic acid	460	—	0.050	45	139	4 300	—	1	
Dinitrobenzoyl chloride	380	—	—	—	—	—	—	8	
Dinitrocresol	340	Melts	0.030	—	—	—	—	1,2	
4,4'-Dinitro-sym-diphenyl urea	550	—	0.095	60	102	2 500	—	1	
Dinitro stilbene disulphonic acid	450	—	—	—	—	—	—	8	
Dinitrotoluamide	500	—	0.050	15	153	> 10 000	—	6	
Diphenyl	630	—	0.015	20	82	3 700	—	1	
4,4'-Diphenyl di sulphonylazide	590	140	0.065	30	143	5 500	—	1	

Dust	Minimum ignition temperature °C cloud	layer	Minimum explosible concentration g/l	Minimum ignition energy mJ	Maximum explosion pressure lb/in²	Maximum rate of pressure rise lb/in²s	Maximum oxygen concentration to prevent ignition % by volume	References	Notes
Diphenylol propane (Bisphenol-A)	570	—	0.012	11	81	11 800	5	4,8	Inert gas nitrogen
Egg white	610	—	0.14	640	58	500	—	5	
Epoxy resin	490	—	0.015	9	94	8 500	—	4,8	
Esparto grass	—	—	—	—	94	7 300	—	8	
Ethyl cellulose	340	330	0.025	15	112	7 000	—	4	
Ethylene diamine tetra acetic acid	450	—	0.075	50	106	3 000	—	1	
Ethyl hydroxyethyl cellulose	390	—	0.020	30	94	2 200	—	6	
Ferric ammonium ferrocyanide	390	210	1.500	—	17	100	—	1	
Ferric dimethyl dithio carbamate	280	150	0.055	25	86	6 300	—	1	
Ferric ferrocyanide	370	—	—	—	82	1 000	—	1	
Ferrochromium	790	670	2.00	—	—	—	—	3	
Ferromanganese	450	290	0.130	80	62	5 000	—	3	
Ferrosilicon (45 per cent Si)	640	—	—	—	—	—	—	2	
Ferrosilicon (90 per cent Si)	Did not ignite	980	0.240	1280	113	3 500	—	3	
Ferrotitanium	370	400	0.140	80	55	9 500	—	3	
Ferrous ferrocyanide	380	190	0.400	—	—	—	—	1	
Ferrovanadium	440	400	1.300	400	—	—	—	3	
Fish meal	485	—	—	—	—	—	—	2	
Fumaric acid	520	—	0.085	35	103	3 000	—	4	
Garlic	360	—	0.10	240	57	1 300	—	5	
Gelatin, dried	620	480	<0.5	—	78	1 200	—	1	

Gilsonite	580	500	0.020	25	78	4 500	—	7	
Graphite	730	580	—	—	—	—	—	7	
Grass	—	—	—	—	56	400	—	8	
Gum arabic	500	260	0.060	100	117	3 000	—	4	
Gum Karaya	520	240	0.100	180	116	2 500	—	4	
Gum manila (copal)	360	390	0.030	30	89	6 000	—	4	
Gum tragacanth	490	260	0.040	45	123	5 000	—	4	
Hexa methylene tetramine	410	—	0.015	10	98	11 000	11	4	
Horseradish	—	—	<0.100	—	96	1 600	—	6	
Hydrazine acid tartrate	570	—	0.175	460	30	200	—	1	
p-Hydroxy benzoic acid	620	—	0.040	—	37	—	—	1	
Hydroxyethyl cellulose	410	—	0.025	40	106	2 600	—	6	
Hydroxyethyl methyl cellulose	410	—	—	—	—	—	—	8	
Hydroxy propyl cellulose	400	—	0.020	30	96	2 900	—	6	
Iron	430	240	—	—	—	—	—	2	
Iron, carbonyl	420	230	0.105	100	47	8 000	—	3	
Iron pyrites	380	280	1.00	8 200	5	100	—	3	
Isatoic anhydride	700	—	0.035	25	80	4 900	—	1	
Isinglass	520	—	—	—	Nil	Nil	—	8	
Isophthalic acid	700	—	0.035	25	78	3 100	—	4	
Kelp	570	220	Did not ignite		19	200	—	5	
Lactalbumin	570	240	0.040	50	97	3 500	—	4	
Lampblack	730	—	—	—	—	—	—	7	
Lauryl peroxide	—	—	—	12	90	6 400	—	8	
Lead	790	290	—	Did not ignite	3	100	—	3	Flame ignition source in pressure test.
Leather	390	—	—	—	—	—	—	8	
Lignin	450	—	0.040	20	102	5 000	7	4	
Lignite	450	200	0.030	30	94	8 000	—	7	
Lycopodium	480	310	0.025	40	75	3 100	9	5	
Magnesium	560	430	0.030	40	116	15 000	—	3	
Maize husk	430	—	—	—	75	700	—	8	
Maize starch	410	—	—	—	—	—	—	2	

Dust	Minimum ignition temperature °C cloud	layer	Minimum explosible concen-tration g/l	Minimum ignition energy mJ	Maximum explosion pressure lb/in²	Maximum rate of pressure rise lb/in²s	Maximum oxygen concen-tration to prevent ignition % by volume	References	Notes
Maleic anhydride	500	Melts	—	—	—	—	—	2	
Malt barley	400	250	0.055	35	95	4 400	—	5	
Manganese	460	240	0.125	305	53	4 900	—	3	
Manganese ethylene bis dithio carbamate	270	—	0.07	35	—	—	—	8	
Manioc	430	—	—	—	—	—	—	8	
Mannitol	460	—	0.065	40	97	2 800	—	1	
Melamine formaldehyde resin	410	—	0.02	50	93	1 800	—	4,8	
DL Methionine	370	360	0.025	35	119	5 700	7	1	
1–Methylamino anthraquinone	830	Melts	0.055	50	71	3 300	—	1	
Methyl cellulose	360	340	0.030	20	133	6 000	—	4	
2,2–Methylene bis–4–ethyl–6–t–butyl phenol	310	—	—	—	76	7 300	—	8	
Milk	440	—	—	—	—	—	—	8	
Milk, skimmed	490	200	0.050	50	95	2 300	—	5	
Milk sugar	450	Melts	—	—	31	—	—	2	
Molybdenum	720	360	—	—	—	—	—	3	
Molybdenum disulphide	570	290	—	—	—	—	—	6	
Monochloracetic acid	620	—	—	—	—	—	—	8	
Monosodium salt of trichloro ethyl phosphate	540	—	—	—	—	—	—	8	Group (b) dust
Moss, Irish	530	230	Did not ignite		21	300	—	5	
Naphthalene	575	Melts	—	—	87	—	—	2	
β-Naphthalene-azo-dimethyl aniline	510	Melts	0.020	50	70	2 300	—	1	

β-Naphthol	670	—	—	—	—	—	—	8
Naphthol yellow	415	395	—	—	—	—	—	2
Nigrosine hydrochloride	630	—	—	—	—	—	—	8
p-Nitro-o-anisidene	400	—	—	—	—	—	—	8
p-Nitro-benzene arsonic acid	360	280	0.195	480	77	900	—	1
Nitrocellulose	—	—	—	30	> 256	> 20 900	—	8
Nitro diphenylamine	480	—	—	—	—	—	—	8
Nitro furfural semi carbazone	240	—	—	—	> 143	8 600	—	8
Nitropyridone	430	Melts	0.045	35	111	> 10 000	—	1
p-Nitro-o-toluidine	470	—	—	—	—	—	—	8
m-Nitro-p-toluidine	470	—	—	—	—	—	—	8
Nylon	500	430	0.030	20	95	4 000	6	4
Oilcake meal	470	285	—	—	—	—	—	2
Onion, dehydrated	410	—	0.130	Did not ignite	35	500	—	5
Paper	440	270	0.055	60	96	3 600	—	6
Para formaldehyde	410	—	0.040	20	133	13 000	—	4
Peanut hull	460	210	0.045	50	116	8 000	—	5
Peat	420	295	—	—	—	—	—	2
Peat, sphagnum	460	240	0.045	50	104	2 200	—	5
Pectin	410	200	0.075	35	132	8 000	—	5
Penicillin, N-ethyl piperidine salt of	310	—	—	—	—	—	—	8
Penta erythritol	450	—	0.030	10	90	9 500	7	4
Phenol formaldehyde	450	—	0.015	10	107	6 500	—	8,4
Phenol furfural resin	530	—	0.025	10	88	8 500	—	4
Phenothiazine	540	—	0.030	—	56	3 000	—	1
p-Phenylene diamine	620	—	0.025	30	94	11 000	—	4
Phosphorus, red	360	305	—	—	—	—	—	2
Phosphorus pentasulphide	280	270	0.050	15	64	> 10 000	—	1
Phthalic acid	650	Melts	—	—	62	—	—	2
Phthalic anhydride	605	Melts	0.015	15	72	4 200	11	2,4
Phthalimide	630	—	0.030	50	89	4 800	—	1

Dust	Minimum ignition temperature °C cloud	layer	Minimum explosible concen-tration g/l	Minimum ignition energy mJ	Maximum explosion pressure lb/in²	Maximum rate of pressure rise lb/in²s	Maximum oxygen concen-tration to prevent ignition % by volume	References	Notes
Phthalodinitrile	> 700	Melts	—	—	43	—	—	2	
Phytosterol	330	Melts	0.025	10	76	> 10 000	—	1	
Piperazine	450	—	—	—	72	1 400	—	1	
Pitch	710	—	0.035	20	88	6 000	—	7	
Polyacetal	440	—	0.035	20	113	4 100	—	4	
Polyacrylamide	410	240	0.040	30	85	2 500	—	4	
Polyacrylonitrile	500	460	0.025	20	89	11 000	—	4	
Polycarbonate	710	—	0.025	25	96	4 700	—	4	
Polyethylene	390	—	0.020	10	80	7 500	—	4,8	
Polyethylene oxide	350	—	0.030	30	106	2 100	5	4	
Polyethylene terephthalate	500	—	0.040	35	98	5 500	—	4	
Poly isobutyl methacrylate	500	280	0.020	40	74	2 800	—	4	
Poly methacrylic acid	450	290	0.045	100	97	1 800	—	4	
Polymethyl methacrylate	440	—	0.020	15	101	1 800	7	4	
Polymonochlorotrifluoro ethylene	600	720	Did	not		ignite	—	4	
Polypropylene	420	—	0.020	30	76	5 500	—	4	
Polystyrene	500	500	0.020	15	100	7 000	—	4	
Polytetrafluoro ethylene	670	570	Did	not		ignite	—	4	
Polyurethane foam	510	440	0.030	20	87	3 700	—	4	
Polyurethane foam, fire retardant	550	390	0.025	15	96	3 700	—	4	
Polyvinylacetate	450	—	0.040	160	69	1 000	11	4,8	Inert gas carbon dioxide.
Polyvinyl alcohol	450	Melts	—	—	78	—	—	2	
Polyvinyl butyral	390	—	0.020	10	84	2 000	5	4	

Polyvinyl chloride	670	—	Did not ignite		38	500	—	4	Flame ignition source.
Polyvinylidene chloride	670	—	—	—	—	—	—	8	Group (b) dust
Polyvinyl pyrrolidone	465	Melts	—	—	15	—	—	2	
Potassium hydrogen tartrate	520	—	—	—	—	—	—	1	
Potassium sorbate	380	180	0.120	60	79	9 500	—	1	
Potato, dried	450	—	—	—	97	1 000	—	8	
Potato starch	430	—	—	—	—	—	—	2	
Provender	370	—	—	—	93	1 400	—	8	
Pyrethrum	460	210	0.100	80	95	1 500	—	1	
Quillaia bark	450	—	—	—	—	—	—	8	
Rape seed meal	465	—	—	—	—	—	—	2	
Rayon, viscose	420	—	—	—	—	—	—	8	
Rayon, flock	—	—	0.03	—	—	—	—	8	
Rice	440	240	0.050	50	105	2 700	—	5	
Rosin	390	—	0.015	10	87	12 000	—	4	
Rubber	380	—	—	—	—	—	—	8	
Rubber, crude, hard	350	—	0.025	50	80	3 800	13	4	
Rubber, crumb	440	—	—	—	84	3 300	—	8	
Rubber, vulcanized	360	—	—	—	40	—	—	2	
Rye flour	415	325	—	—	35	—	—	2	
Saccharin	690	—	—	—	—	—	—	1	
Salicylanilide	610	Melts	0.040	20	73	4 800	—	1	
Salicylic acid	590	—	0.025	—	84	6 800	—	4,8	
Sawdust	430	—	—	—	97	2 000	—	8	
Sebacic acid	—	—	—	—	74	400	—	8	
Senna	440	—	0.010	105	49	300	—	8	
Shellac	400	—	0.020	10	73	3 600	9	4	
Silicon	Did not ignite	760	<0.10	80	94	13 000	—	3	
Soap	430	600	0.085	100	77	2 800	—	6	
Sodium acetate	590	—	0.030	35	90	4 600	—	1	
Sodium amatol	580	Melts	0.140	—	65	800	—	1	
Sodium benzoate	560	680	0.050	80	91	3700	—	1	

Dust	Minimum ignition temperature °C cloud	Minimum ignition temperature °C layer	Minimum explosible concentration g/l	Minimum ignition energy mJ	Maximum explosion pressure lb/in²	Maximum rate of pressure rise lb/in²s	Maximum oxygen concentration to prevent ignition % by volume	References	Notes
Sodium carboxymethyl cellulose	320	—	1.10	440	49	400	5	8	
Sodium 2-chloro-5 nitro-benzene sulphonate	550	440	—	—	—	—	—	1	
Sodium 2,2-dichloro propionate	500	—	0.260	220	68	500	—	1	
Sodium dihydroxy naphthalene disulphonate	510	—	—	—	—	—	—	8	Group (b) dust.
Sodium glucaspaldrate	600	—	—	—	—	—	—	8	
Sodium glucoheptonate	600	—	—	—	—	—	—	8	
Sodium monochloracetate	550	—	—	—	—	—	—	8	
Sodium m-nitrobenzene sulphonate	—	—	—	—	92	400	—	1	
Sodium m-nitrobenzoate	—	—	—	—	87	2 900	—	1	
Sodium pentachlorophenate	Did not ignite	360	—	—	Did not ignite		—	1	
Sodium propionate	479	—	—	—	70	700	—	8	
Sodium secobarbital	520	—	0.100	960	76	800	—	1	
Sodium sorbate	400	140	0.050	30	87	6 500	—	1	
Sodium thiosulphate	510	330	—	—	11	<100	—	1	Guncotton ignition source in pressure test.
Sodium toluene sulphonate	530	—	—	—	—	—	—	8	

Sodium xylene sulphonate	490	—	—	—	—	—	—	8	
Soot	> 690	535	—	—	Did not ignite		—	2	
Sorbic acid	440	460	0.020	15	106	> 10 000	5	1,8	Inert gas nitrogen
L-Sorbose	370	—	0.065	80	76	4 700	—	1	
Soya flour	550	340	0.060	100	94	800	9	5	
Soya protein	540	—	0.050	60	98	6 500	9	5	
Starch	470	—	—	—	—	—	—	8	
Starch, cold water	490	—	—	—	—	—	—	8	
Stearic acid	290	—	—	25	80	8 500	—	1	
Steel	450	—	—	—	—	—	—	8	
Streptomycin sulphate	700	—	—	—	—	—	—	8	
Sucrose	420	Melts	0.045	40	86	5 500	—	1	
Sugar	370	400	0.045	30	109	5 000	—	5	
Sulphur	190	220	0.035	15	78	4 700	—	1	
Tantalum	630	300	<0.20	120	55	4 400	—	3	
Tartaric acid	350	—	—	—	—	—	—	8	
Tea	500	—	—	—	93	1 700	—	8	
Tea, instant	580	340	Did not ignite		48	400	—	5	
Tellurium	550	340	—	—	—	—	—	3	
Terephthalic acid	680	—	0.050	20	84	8 000	—	4	
Tetranitro carbazole	395	Melts	—	—	—	—	—	2	
Thiourea	420	Melts	—	—	29	100	—	1	
Thorium	270	280	0.075	5	79	5 500	—	3	
Thorium hydride	260	20	0.080	3	81	12 000	—	3	
Tin	630	430	0.190	80	48	1 700	—	3	
Titanium	375	290	0.045	15	85	11 000	Ignites in carbon dioxide	2,3	
Titanium hydride	480	540	0.070	60	121	12 000	3	3	
Tobacco	485	290	—	—	—	—	—	2	

Dust	Minimum ignition temperature °C cloud	layer	Minimum explosible concentration g/l	Minimum ignition energy mJ	Maximum explosion pressure lb/in²	Maximum rate of pressure rise lb/in²s	Maximum oxygen concentration to prevent ignition % by volume	References	Notes
Tobacco, dried	320	—	—	—	85	1 000	—	8	
Tobacco, stem	420	230	Did not ignite		53	400	—	5	
Tribromosalicyl anilide	880	Melts	—	—	—	—	—	1	
Trinitro toluene	—	—	0.070	75	63	2 100	—	6	
s-Trioxane	480	—	0.143	—	85	600	—	1	
α, α′-Trithiobis (N, N-dimethyl-thioformamide)	280	230	0.060	35	96	6 000	—	1	
Tung	540	240	0.070	240	74	1 900	—	5	
Tungsten	730	470	—	—	Did not ignite		—	3	
Uranium	20	100	0.060	45	69	5 000	—	3	
Uranium hydride	20	20	0.060	5	74	9 000	—	3	
Urea	900	—	Did	not		ignite	—	4,8	Group (b) dust.
Urea formaldehyde moulding powder	460	—	0.085	80	89	3 600	9	4	
Urea formaldehyde resin	430	—	0.02	34	110	1 600	—	8	
Vanadium	500	490	0.220	60	57	1 000	10	3	
Vitamin B1 mononitrate	380	190	0.035	35	120	9 000	—	1	
Vitamin C	460	280	0.070	60	88	4 800	—	1	
Walnut shell	420	210	0.035	60	121	5 500	—	5	
Wax, accra	260	—	—	—	—	—	—	8	
Wax, carnauba	340	—	—	—	—	—	—	8	

Wax, paraffin	340	—	—	—	—	—	—	8
Wheat, flour	380	360	0.050	50	109	3 700	—	5
Wheat, grain dust	420	290	—	—	43	—	—	2
Wheat starch	430	—	0.045	25	100	6 500	—	5
Wood	360	—	—	—	90	5 700	5	8
Wood, bark	450	250	0.020	60	103	7 500	—	4
Wood, flour	430	—	0.050	20	94	8 500	7	4
Wood, hard	420	315	—	—	66			2
Wood, soft	440	325	—	—	63	—	—	2
Yeast	520	260	0.050	50	123	3 500	—	5
Zinc	680	460	0.500	960	70	1 800	—	3
Zinc ethylene dithio–carbamate	480	180	—	—	45	300	—	1
Zinc stearate	315	Melts	0.020	10	80	>10 000	—	1,2
Zirconium	20	220	0.045	5	75	11 000	Ignites in carbon dioxide	3
Zirconium hydride	350	270	0.085	60	90	9 500	3	3

분진방폭 안전기법

화학(화학 90－081－3)

발행일 : 1990. 12.

발행인 : 원 장 金 元 甲

작성인 : 연구원 황 규 석

발행처 : 한국산업안전공단

산업안전보건연구원

주 소 : 인천직할시 북구 구산동 34-4

TEL : (032)526－6485

(비매품)