

분진폭발(II)

(전호에서 계속)

(마) 발 화 원

폭발하한농도도 발화원의 종류에 따라 다르다.

특히 분진에 접촉하는 발화원의 온도와 표면의 상태에 의해서 영향을 받는다. 온도가 높고 표면적이 큰 발화원쪽의 폭발하한 농도가 낮아진다.

〈表5〉는 이 관계를 나타낸 것이다. 또 면화악이나 맥켈버어너를 사용하면 전기스파아크로는 폭발하지 않는 농도까지 폭발시킬 수 있다.

表5. 폭발하한농도와 발화원종류와의 관계

분진의 종류	폭발하한 농도 [g/cm ³]		
	고열물체백금선 1, 200°C	전기불꽃 33V 5A	유도코일 6. 5V 3A
전 분	7. 0	10. 3	13. 7
실 탕	10. 3	17. 2	34. 4
알루미늄	7. 0	7. 0	13. 7

(3) 발화온도

분진의 발화온도는 가스, 증기와 마찬가지로 측정방법에 따라 상당히 다르므로 物性常數라고는 할 수 없으나, 위험도를 판정함에 있어서 대체적인 어림을 하는 相對値로는 중요하다.

분진의 발화온도는 분진의 상태에 의해서 매우 다르다. 즉 입도나 입상, 단독 또는 집합상태, 雲狀 또는 層狀 등의 영향을 미치는 요인도 많다.

(가) 雲狀과 層狀의 차이

일반적으로 층상의 분진은 운상의 경우에 비해서 입자간의 거리가 작고, 매우 가까이 있으므로 酸化反應과정에 있어서 單位체적당 열의 손실은 훨씬 적다. 따라서 층상의 경우가 운상의 경우보다도 발화온도가 상당히 낮은편이다.

층상의 경우에 발화온도는 Glimtemperatur라 하

는데, 이것은 분진의 두께로도 변하고 또 이 온도보다 훨씬 낮은 온도로 열분해를 일으켜 시간이 경과함에 따라서 着火하기 쉬운 물질이 되는 플라스틱의 분진도 있으므로 보통 알려진 발화온도만을 안전요인이라고 보는 것은 지극히 위험한 일이다.

특히 이같은 온도조건이 되어 있을 경우에 공기의 침입이라도 생기면 自然發火해서 폭발의 원인이 되는 경우가 있다.

(나) 층의 두께

가열된 금속표면을 사용해서 측정된 분진층의 두께에 의한 발화온도의 차이는 〈表6〉과 〈그림5〉에

表6. 분진층의 두께와 관계된 발화온도

분진의 종류	층의 두께 [mm]					
	3	5	6	10	20	50
유연탄 < 70μ	270	234	230	210	195	171
빈석탄 < 70μ	340	288	280	265	245	
코르크분말	360		320	297	280	약200

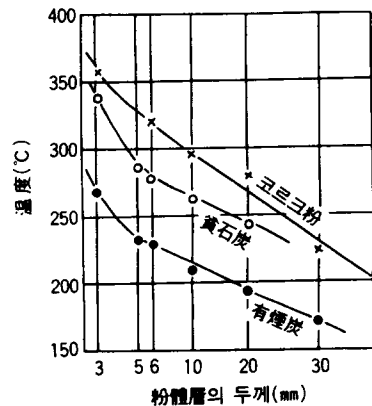


그림5. 層狀粉體의 발화온도(Glimtemperatur)와 분진층의 두께와의 관계

나타나 있는 바와 같이 되고 층의 두께가 클수록 발화온도가 낮아진다.

(다) 粉塵

분진운의 발화온도는 한정된 시간내에 부유한 분진이 발화하는 온도로서 爐의 안과 같은 벽의 영향이 있는 경우와 분진운 중에 加熱線을 넣은것과 같이 벽의 영향이 없는 경우로 나누어진다.

前者의 경우는 後者에 비해서 상당히 낮고, 탄진의 경우 가열로 안으로 불어넣으면 580~620℃, 열선에서는 810~915℃이었다. 분진운의 발화온도도 폭발한계농도와 같이 粒度나 휘발분의 함량, 분위기의 산소량 등에 의해서 영향을 받는다.

Cassel 등의 보고에 따르면 만일 粒子的 발화온도는 입자의 반지름, 즉 입자가 작을수록 높고 클수록 낮아진다. 이 관계는 쌍곡선을 닮은것이며 Mg 가루 뿐만 아니라 탄진에서도 그렇다. <그림6>에서

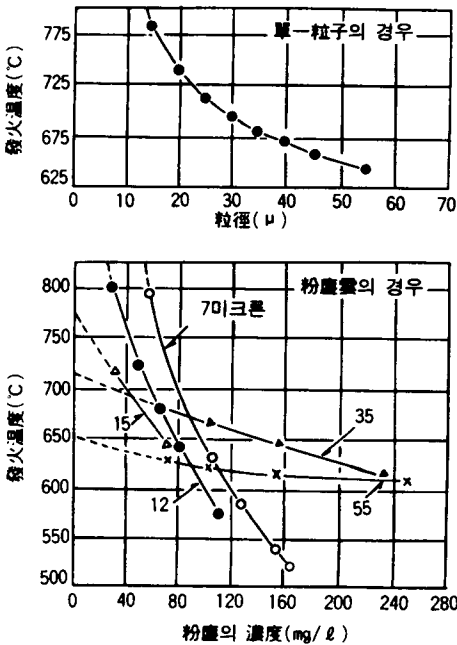


그림6. 마그네슘 분진의 발화온도와 粒徑濃度와의 관계

나타난 바와 같이 분진농도와 발화온도의 관계는 입도가 작을수록 낮아지는 한편 입도가 커지면 영향을 받는 일이 적어진다. 이것은 열의 발생과 방산의 밸런스와 관계가 있으며 單一粒子처럼 열방산

이 좋고 복사열을 받지 않는 경우와 운상이어서 입자사이가 비교적 좁아 복사열을 크게 받는 경우의 차이이다.

다만 이상의 결과는 분진이 매우 미소하고 농도도 낮은 금속분의 경우이고 다른 경우에는 반대의 결과가 나타난다. 즉, 분진운의 농도가 매우 높은 경우에는 粒度의 영향은 150미크론 정도까지는 거의 없고 그 이상의 경우에만 커진다. 분위기 중의 산소농도 및 분진중의 휘발분과 발화온도와의 관계는 <그림7>에 나타나 있는 것과 같아서, 발화온도는 산소안에서는 낮고 휘발분이 늘어남에 따라서 저하되고 있다. 그리고 또한 層狀과 雲狀의 경우에는 휘발성분의 함유량에 따라서 발화온도가 저하

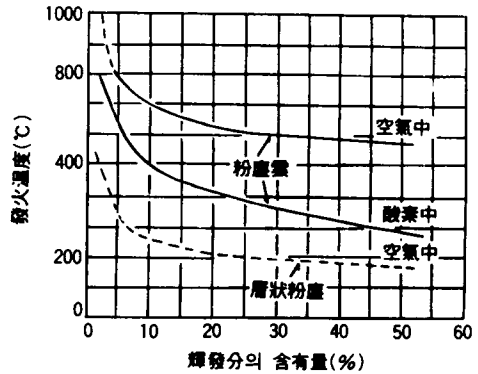


그림7. 탄진중의 휘발분의 함유량과 발화온도와의 관계

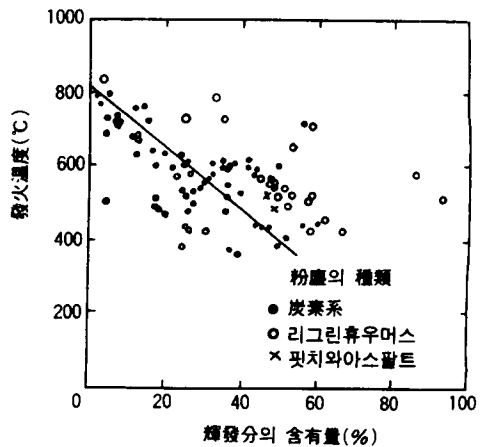


그림8. 雲狀粉塵의 발화온도와 휘발분의 함유량과의 관계

되는 상태는 <그림8>, <그림9>에 나타나 있는 바와 같이 다르다.

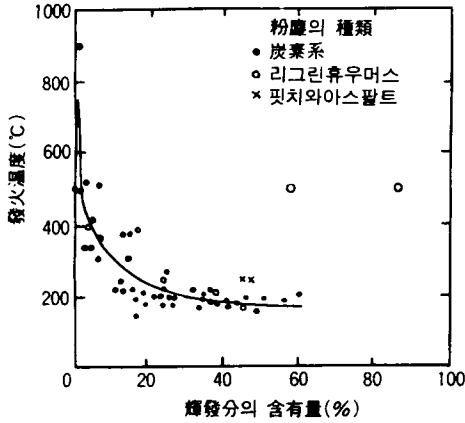


그림9. 層狀粉塵의 발화온도와 휘발분의 함유량과의 관계

이처럼 분진의 발화온도는 조건에 따라 달라지므로 그것은 분명히 해명하기가 이론적으로 어렵다.

(4) 최소발화에너지

분진운에 불꽃을 쫓기면 발화하고 폭발에 이르는 수가 있으며, 또 層狀분진에 있어서도 똑같이 발화하는 수가 있다. 이 발화를 위해서 필요한 최소에너지의 값이 당연히 존재하는데, 일반적으로 이 값을 분진에 대한 최소발화에너지라고 한다.

최소발화에너지는 분진이 전기적인 발화원에 의한 위험성을 아는데 있어서 중요하고 분진 그 자체의 상대적인 위험성은 아는데에도 중요하다.

다만, 분진이 가지는 독특한 성격상, 과거에 측정된 수치는 절대적인 것일 수 없고 실험조건에 따라 달라지기 때문에 定量的으로 논하기는 어려운 일이다.

최소발화에너지는 많은 요인에 의해서 영향을 받는다. 즉 입도가 작으면 에너지는 작아지고 또한 산소 중에서는 공기에 비해서 작다. 수분이 많으면 커진다. 분진농도가 일정량 이상 필요하다(그림 10).

휘발분을 함유한 분진에서는 분위기 온도가 상

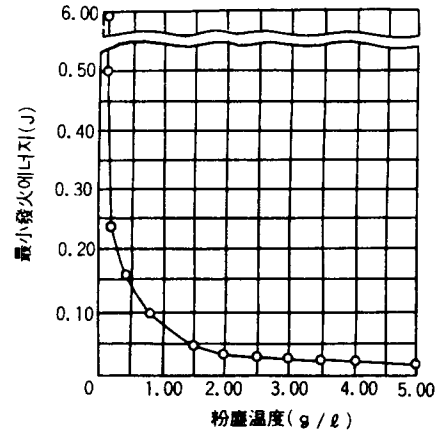


그림10. 티탄雲狀분진을 점화시키기에 필요한 최소발화에너지

승하면 작아지지만, 일정온도이상이 되면 휘발분이 날아가고 말기 때문에 반대로 발화하기가 힘들게 된다.

(5) 최고폭발압력 및 압력상승 속도

가연성 분진의 폭발에 있어서 그 파괴력을 나타내는 것이 폭발압력과 압력의 상승속도인데, 그들이 모두 큰 것을 파괴위험성이 큰 분진이라 할 수 있다.

이 특성은 분진체를 대상으로 하는 건물이나 장치, 배관의 안전설계의 기본이 되는 것이므로 매우 중요하다.

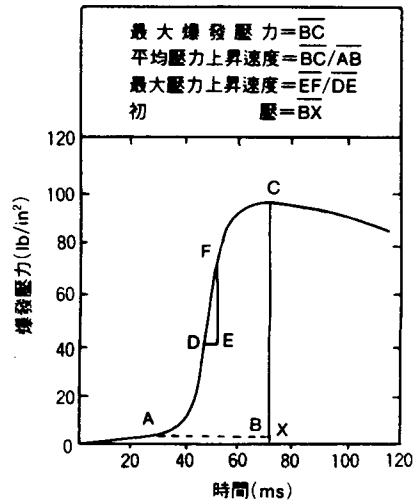


그림11. 폭발압력-시간의 기록도

분진폭발의 압력-시간의 관계를 그림으로 나타내면 (그림11)로 나타낼 수가 있다.

이 그림에서 \overline{BC} 가 최대폭발압력, $\overline{BC}/\overline{AB}$ 가 평균압력 상승속도, $\overline{EF}/\overline{DE}$ 가 최대압력 상승속도, \overline{BX} 가 初壓의 校正値를 나타내는 것이다.

폭발압력, 압력상승 속도도 분진농도, 분위기중의 산소량, 입도, 불활성물질의 混入量, 初壓 등의 많은 인자에 의해서 영향을 받는다.

폭발압력의 최대치는 常壓에서는 대체로 8기압인 것으로 되어 있으며 化學量論組成부근의 분진농도에서 최대치가 얻어진다. 이 경우, 체적비는 대부분의 분진에서는 $200\sim 500\text{cm}^3/\text{m}^3$ 로서 전용적의 0.05%이하의 농도이어서, 가스의 경우와는 다르다.

압력상승속도, 폭발압력은 입도에 따라 큰 영향을 받아서 입자의 평균경이 작아지면 상승한다.

폭발압력이나 압력상승속도가 분진농도나 분진의 종류에 따라 다른 이유는 유기분진의 경우에는 연소시에 있어서의 산소의 소비량이나 발생하는 연소생성 가스의 종류와 成分比에 관계가 있다.

化學量論組成보다 분진농도가 작을 때에는 대부분 분진의 연소생성가스가 2산화탄소와 수증기에 불과하지만 농도가 크면 매우 복잡해진다. 특히 농도가 큰 조성에서 연소생성가스에 1산화탄소의 함유량이 많은 것은 폭발위력이 크다. 그리고 또한 금속분에서는 연소열과 그 복사효과가 영향을 미친다.

(6) 불활성 물질과 限界酸素 濃度

부유 또는 퇴적되어 있는 분진의 분위기중 산소 농도를 다른 不活性가스의 첨가로 감소시킨다거나, 불활성 물질을 첨가함으로써 분진의 폭발성을 저하시킨다는 것은 폭발방지대책면에서 응용범위가 매우 넓으므로 잘 알려져 있는 일이다.

限界산소농도나 폭발을 억제하는 불활성 분진양은 개개의 분진이나 불활성 물질의 종류에 따라서 달라지는 이외에 주위의 온도, 휘발분의 함량, 다른 가연성 가스의 존재 유무, 분진농도나 입도 등에 의해서 영향을 받고 있다.

(가) 불활성 분체

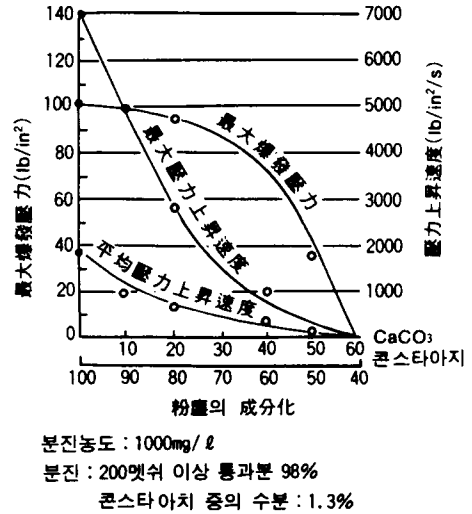


그림12. 불활성분진의 혼입에 의한 폭발압력 및 폭발압력상승속도에 대한 영향

탄산칼슘, 규조토, 시리카젤, 무기염 등의 불활성 분체는 분진안에 섞이면 比熱이 크기로 냉각효과를 가져올 뿐만 아니라 부유성을 억제하는 효과까지도 가진다.

(그림12)는 탄산칼슘을 콘스타아치에 첨가했을 경우 폭발압력·압력상승속도와 혼합비와의 관계를 나타낸 것이다. 그리고 첨가하는 불활성 물질의 첨가량과 종류별의 폭발압력 관계는 (그림13)처럼 나타내지는데 종류에 따라 상당히 차이가 있다.

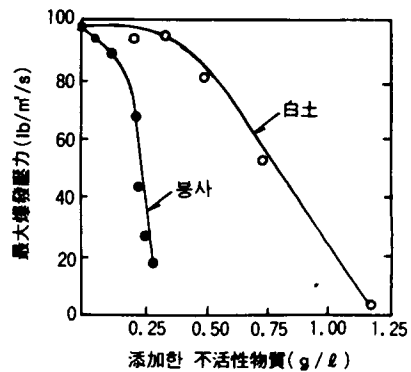


그림13. 농도 0.5g/l의 콘스타아치의 폭발압력과 첨가한 불활성 분진의 영향

(그림14)는 분위기중에 가연성가스(메탄)가 존재하고 있을때 탄진폭발을 방지하는 岩粉과 메탄농도, 탄진농도와의 관계를 나타낸 것으로서 탄진량

이 많을 경우에는 메탄량과 암분함유율에는 그리 큰 변화가 없으나 탄진량이 적을 경우에는 차가 커서, 메탄량이 증가함에 따라서 다량의 암분을 필요로 한다.

(나) 한계산소농도

가연성가스와 마찬가지로 폭발가능한 한계산소

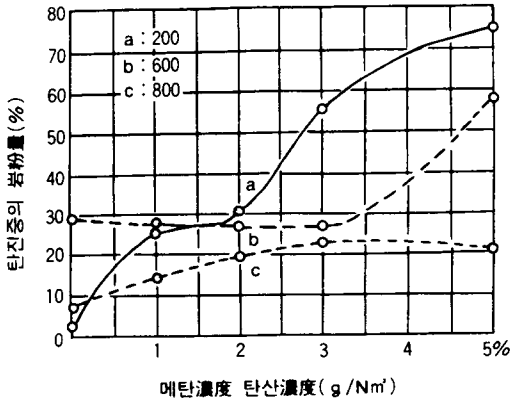


그림14. 폭발을 방지할 수 있는 岩粉量과 메탄 및 탄진농도와와의 관계

表7. 각종 불활성가스 중에 있어서의 금속 및 금속 하이드라이드의 한계산소 농도 (%)

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	3.0
우라늄하이드라이드	0.5	2.5	4.0	2.0
토륨 하이드라이드	6.0	5.0	5.0	4.0
질코늄하이드라이드	11.0	8.5	8.5	6.0
티탄 하이드라이드	13.5	10.0	8.5	8.0

a. 純二酸化炭素 중에서도 연소한다.
b. 高温下에서는 純窒素중에서도 發火한다.

농도가 분진에도 있다. <表7>은 부유금속분의 한계 산소농도를 나타낸 것으로, 금속의 종류에 따라서는 산소가 전혀없는 분위기속에서 발화하는 것이 있다. 일반적으로 산소농도가 작아지면 폭발압력이나 압력상승속도는 작아지고, 드디어 폭발성을 잃게 되고 만다. <그림15>는 이것은 나타낸 것이다. 그리고 또한 분위기의 온도가 상승하면 한계산소량은 감소한다. <그림16>은 테레프탈산 분진의 경우에서 이 관계를 나타낸 것이다. 그리고 퇴적분진의 발화온도도 산소농도에 의해서 변화하며 불활성가스의 종류에 따라 다소 차이가 있다.

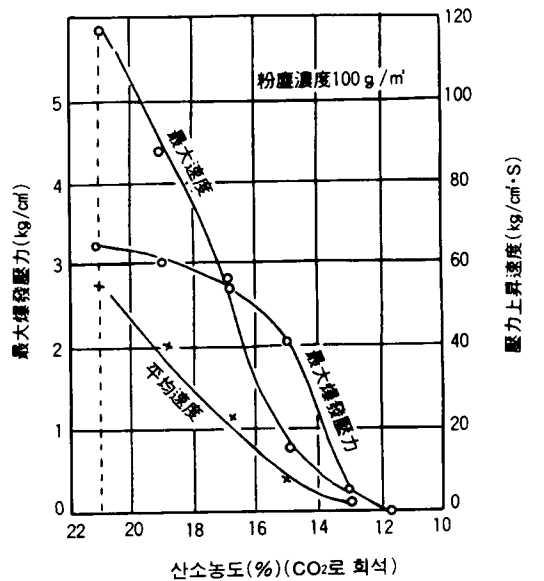


그림15. 분위기 안의 산소농도와 최대폭발압력 및 압력상승속도와와의 관계(초산 셀룰로오즈 성형파우더 200멧쉬 이하)

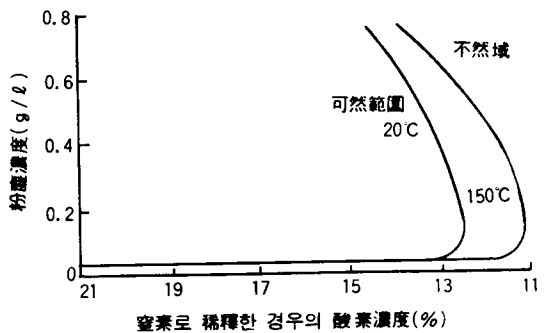


그림16. 테레프탈산 분진의 한계산소농도와 粉塵濃도와의 온도에 의한 영향

7. 粉塵의 폭발위험성과 級別

분진의 위험성을 어떤 형식으로든 나타내어, 이로써 위험등급별로 분류하여 안전대책의 기초로 삼는 방법이 세계 각국에서 채택되고 있다. 미국에 있어서의 폭발지수(Index of explosibility)라는 것이 그 한 예이며 폭발의 정도로 4등급으로 나누어 <表8>처럼 분류하고 있다.

그러나 <表9>가 보여주고 있는 바와 같이 대표적인 분진이라 하더라도 지수로 표시되는 위험성에는 큰 폭이 있어서 단순히 물질의 명칭만 가지고는 구별하기 어렵다.

表8. 폭발의 정도와 爆發指數와의 관계

폭발의 정도	發火의 容易度	폭발의 크 기	폭발지수
약 한 폭 발	<2.0	<0.5	<0.1
中 位 의 폭 발	0.2~1.0	0.5~1.0	0.1~1.0
강 한 폭 발	1.0~5.0	1.0~2.0	1.0~10
매우 강한 폭발	>5.0	>2.0	>10

表9. 분진 폭발성의 難易

분 진	폭발지수	분 진	폭발지수
나 일 른	4.0~>10	로 딘	>10
초산셀룰로오즈	3.2~>10	세 락	>10
폴리에틸렌	2.4>10	합성 고무	7.4~>10
폴리프로필렌	<0.1~>10	셀룰로오즈	1.2~>10
레이온	0.1~0.2	코로크	2.0~9.7
리그닌	0.8~>10	木粉	5.0~>10
고무	0.3~>10	핏츠 버어그	1.0

폭발지수는 미국 광산국이 상대적인 분진의 폭발성을 나타내는 수치로서 다음과 같이 산출한 하나의 표시방법이다. 이것은 미국의 펜실베니아 핏츠버어그시 부근에 산출되는 석탄분진을 표준으로 하고 있다. 즉

● 발화성(ignition sensitivity) =

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

● 폭발의 크기(explosion severity)

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

● 폭발지수(index of explosibility)

$$= (\text{발화성}) \times (\text{폭발의 크기})$$

처럼 표시되며 숫자로 분진의 폭발위험성을 비교할 수 있는 것으로서 실용적으로 사용되고 있다.

또 서독에서는 폭발성을 지닌 분진을 폭발지수(Explosions Kennziffer Kex)6이상으로 하고 있는 예가 있다.

이 폭발지수는 10^{-3}atm/s^2 로 나타내는 폭발압력 속도의 최고와 평균의 곱이라고 하는 개념으로서, 물질 그 자체의 위험성을 나타내고 있는 것이 아니라, 일정한 조건하에서의 분진운의 폭발의 크기를 나타내고 있는 것이다.

소련에서는 분진의 위험성을 4단계로 나누고 있으며 영국에서는 공장에서 취급되는 주요분진의 위험성을 3등급으로 급별해서 위험성이 있는 공업이나 플랜트를 소개하고 있다. 그리고 또한 미국 화재방지협회(NFPA)에서는 가스, 증기, 분진을 포함시켜 폭발압력 상승속도에 따라 3단계로 분류하고 있다.

8. 豫防과 對策

분진폭발을 방지하기 위해서는 분진운의 생성 방지, 점화원의 제거, 불활성물질의 첨가가 제일이라 생각되지만, 분진운의 생성방지는 분진운 다루는 공정장치 안에서는 거의 불가능할 뿐 아니라 플랜트에 있어서 불활성물질의 첨가나 불활성가스 퍼지(purge)는 조업중에는 거의 불가능한 경우가 많다(경제성과 품질관리성). 따라서 공정장치내에 있어서의 분진의 발화폭발이라는 일차적인 災害는 어느정도 인정하고, 이에 따른 2차적인 큰 재해를 방지하는 것이 분진폭발대책의 주안점으로 아래에 간단한 예방대책을 적어보기로 한다.

(1) 작업장의 청소와 정비

작업장 안에 있는 쓸데없는 분진의 퇴적이나 산란을 될 수 있는대로 없애도록 이것을 제거 청소하도록 한다.

정기적인 除塵을 위해서 진공청소기를 사용하는 것이 바람직하다.

작업장안에 퇴적하는 분진의 최대허용두께를, 대상분진의 폭발하한 농도와 실내의 높이 및 퇴적분진의 밀도로부터 다음과 같은 관계식에 의해서 결정하고 있는 例가 있다.

$$k_s = \frac{UzGr \cdot HR}{\rho_s \cdot 10^3}$$

여기에서

k_s : 분진의 최대허용 두께 [mm]

$UzGr$: 분진의 폭발하한 농도 [g/m^3]

HR : 실의 높이 [m]

(2) 건물의 위치와 구조

기연성 분진을 다루는 플랜트도 다른가스, 액체류를 사용하는 플랜트와 마찬가지로 될 수 있는대로 건물을 개발설로 해서 屋外露出形으로 만들어야 하며, 독립시켜서 다른 위험성이 적은 건물과 격리시키는 것이 바람직하다.

건축물안에 플랜트를 수용할 때에는 골조의 주변을 불연성의 가벼운 재료(플라스틱板 등)로 감쌀 정도의 방폭구조로 만들도록 한다.

건물안은 분진이 잘 쌓이지 않게하고 또 쉽게 청소를 할 수 있는 구조로 되어 있어야 한다.

그러기 위해서 천장이나 지붕부분은 노출된 비임을 그대로 하며 벽에 들출부 또는 凹凸부를 만들지 말고 평탄하게 한다.

건물의 내용적은 1단위로, 될 수 있는대로 小形으로 만든다. 또 계단도 옥외에 만들거나 통로와 격리하도록 하고 문은 밖으로 열리도록 한다.

건물의 위치는 폭발이 일어날 경우 가벼운 지붕이나 벽을 통해서 폭발화염이 외부로 방출되더라도 다른 작업장이나 건물에 피해를 입히지 않도록 장소를 선정한다. 건물전체를 경량화할 수 없는 경우에는 지붕 등에 지붕햇치를 장치한다거나 옆벽에 힌지패널 등을 설치해 두는 것이 좋겠다.

(3) 工程 및 장치

플랜트는 될 수 있는대로 유닛별로 분리시켜서 폭발의 파급을 막도록 해야하는데, 분진을 다루는 工程은 가능하면 습식 프로세스로 한다.

그리고 분진 그 자체가 필요품이 아닐 경우에는 습식의 스크래버(scrubber)를 설치하는 것이 좋다.

이 경우, 스크래버는 될 수 있는대로 가까이에 설치하여 3cm 이내로하고 슬러지(Sludge)는 항상 제거할 필요가 있다.

이같은 습식프로세스는 물과 반응하는 물질에 대해서는 사용할 수 없으나 물 대신에 휘발성이 낮은 유류를 사용할 수도 있다.

가연성 분진을 다루는 장치류는 완전 밀폐하고 분진이 외부로 새어 나가는 것을 방지한다.

공기 수송을 하는 배관, 機器의 내부압력은 대기압보다도 다소 낮게 하는 것이 좋다.

다만 배관의 연결부분이나 기계 등에 있어서 분진이 새어나오는 곳은 吸引이나 밀폐를 완전하게 하도록 한다. 공기로 배기할 경우 유닛마다 집진기를 사용하는데, 이들 유닛트는 덕트로 재결합시키는 등의 일은 피하도록 한다.

분진을 처리하는 장치가 작업시의 호흡작용에 의해서 분진을 발산시킬 경우에는 자동적으로 분진을 소제하도록 하는 대책이 필요하다.

콤베이어나 엘레베이터의 폭은 될 수 있는대로 좁게 해서 그 둘레 부분의 단면적을 작게 할 필요가 있다. 공기수송방식에 있어서의 공기의 吸入은 안전한 장소에서 하도록하고 逆火가 되더라도 후환이 없는 장소로 한다.