

분진폭발

1. 서 문

분진이 폭발한다는 사실에 대한 인식은 탄광에서의 탄진폭발력의 가능성에 관하여 거론된데서 발단 되었다고 하는데 1870년경부터 가연성가스가 존재 하지 않더라도 탄진만으로 폭발한다는 것이 인정되었고, 1886년에는 영국에서 탄광폭발조사 위원회가 탄진에 폭발성이 있다는 것을 인정하였다.

대체로 구미제국에 있어서의 탄진폭발에 관한 연구는 19세기 후반에서 20세기에 걸쳐 시작되었으며, 현재는 그 성과로서 대규모의 탄진폭발은 줄어들고 있다. 우리나라에 있어서의 탄광폭발도 그 대규모적인 것은 거의 탄진에 의한 것이 있다.

이처럼 분진중에서도 탄진은 폭발성을 가져 위험스럽다는 것이 과거의 여러 대폭발 사고로 일반에게 알려져 있고 또한 이같은 성질을 이용해서 미분탄(微粉炭) 연소로서 이용되고 있다.

그러나 다른 많은 분진류에 관해서는 먼 옛날부터 폭발재해를 일으키고 있으면서도 일반에게는 의외로 그 위험성이 알려져 있지 않다.

일반적으로 제조공업에 있어서 분진폭발 재해는 현재 화약 그밖의 폭발성 분진류에 의한 재해를 빼고는 가연성 가스나 인화성 액체류에 의한 폭발재해에 비하면 건수나 손해정도는 훨씬 적지만 최근처럼 플라스틱공업, 유기합성공업, 분말금속공업, 사료공업 등 기술의 진보에 따라 원료, 제품을 분체로 다루는 공정이 많아졌고, 이같은 분체의 취급 분야의 확대, 취급량의 증대, 공정의 연속화, 스피이드업화의 경향은 분진폭발의 잠재 위험성을 증대하는 결과로 되어 있다.

2. 粉塵爆発의 위험성

분진이라 하더라도生活上 또는 生産上에 없어

서는 안될 것으로부터 먼지나 매연처럼 불필요한 것까지 넓은 범위에 걸쳐 있다.

이들은 항상 우리 주위에 존재하고 있지만 현재 어디서나 폭발한다는 것은 아니고, 일정한 조건이 갖춰져야 비로소 위험상태로 되는 것이다.

분진의 연소 폭발위험성을 생각할때, 공기중에 行遊하는 경우와 구조물 위에 퇴적된 경우로 나눌 수 있다. 어떠한 경우라도 가연성인, 즉 공기중의 산소와 發熱하는 성질을 가진 물질을 대상으로 한다.

분진은 可燃性의 고체를 細分化한 것이라고 생각해도 되는데, 粒子的 직경이 10^{-5} cm 이하로 되면 에어졸로서 공기중에 분산해서 懸濁狀態가 된다. 이들은 액체의 微粒子, 즉 미스트(mist) 상태와 거의 비슷하며 沈降을 일으키지 않는다.

이처럼되면 가연성 가스와 마찬가지로의 위험성이 있다. 실제로 우리들이 직면하는 분진은 그보다 粒子가 커서 대체로 10^{-3} cm 정도 이상의 입자이어서 行遊가 영구적인 것이 아닌 것이다. 그리고 또 분진은 그 생성의 과정에 있어서 균일한 입자의 것은 하나도 없으며 에어러졸과 같은 미세한 것으로부터 제법 큰 粒子로서 눈으로 확인할 수 있는 것까지 크기가 다른 것이 혼합하고 있는 것이 상식이다.

이같은 분진의 폭발은 공기와 잘 혼합되어 있는 부유상태가 필요하다. 따라서 (1) 可燃性 (2) 분진상태 (3) 可燃性가스(공기)중에서의 교란과 유동 (4) 발화원의 존재하고 있는 각종 조건이 필요해진다. 그리고 분진이 장시간 가열되어 乾溜가스가 발생하면 가스폭발의 위험성이 있으며 분진폭발의 원인이 될 수 있다.

3. 可燃性 粉塵의 着火爆発機構

분진의 폭발은 분진입자의 표면에 있어서 산소와 반응이 일어나는 것으로서, 가스폭발처럼 酸化劑

(공기)와 가연물이 균일하게 혼합되어 반응하는 것이 아니라, 일정한 덩어리로 되어 있는 가연물의 주위에 산화제가 존재한다고 하는 불균일한 상태로 반응이 일어나서, 마치 가스폭발과 화약폭발의 중간에 해당되는 것으로 생각되며 폭발에 의해서 방출되는 에너지는 최고값으로 비교하며 가스폭발의 倍數에 달한다.

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

(1) 粒子表面에 열에너지가 주어지면 표면온도가 상승한다.

(2) 입자표면의 분자가 열분해 또는 乾溜作用을 일으켜 기체가 되어 입자의 주위에 방출한다.

(3) 이 기체가 공기와 혼합되어 발화하여 火炎을 생기게 한다.

(4) 이 화염으로 생긴 열은 다시 분말의 분해를 촉진시켜서 차례로 氣相에 가연성 기체가 방출되어 공기와 혼합되어 發化傳波가 된다.

따라서 분진폭발도 결국은 본질적으로 가스폭발이어서 분진자체에 가연성의 가스가 저장되어 있는 것이라 생각해도 된다고 할 수 있다. 다만 이같은 폭발의 과정에서 입자 표면온도를 상승시키는 수단으로서 열전도뿐만 아니라 열복사열이 큰 역할을 한다는 것이 가스폭발과 다른 점이다

粉塵爆発의 特性

분진폭발은 재해 결과로서 나타나는 경우, 폐쇄된 장소나 실내에서 일어나면 가스폭발과 동일한 파괴력을 나타내므로, 이같이 위험한 플랜트는 될수 있는대로 露天狀態로 조업하도록 하고, 안전한 제어실에서 컨트롤(Control)하는 식의 이른바 최근의 최신 화학공업에 있어서의 手法을 도입하여야 하는데, 현실적으로 그러한 플랜트는 거의 볼 수 없는 실정이다. 따라서 분진폭발 특유의 비참한 결과를 초래한다.

분진의 연소속도나 폭발압력은 가스의 그것과 비교하면 비교적 작지만, 연소대의 길이가 길고 발생 에너지가 크기 때문에 가해지는 힘(파괴력과 연소의 정도)이 큰것이 특징이다. 특히 입자가 타면서 비산하므로 이것을 받는 가연물에 局部的인 연소상태를 초래한다.

분진폭발의 경우, 플랜트안의 공기 전체에 걸쳐서 폭발가능한 농도의 분진이 分散浮遊하고 있는 일은 거의 없으며 국부적으로 날라 오를 것은 어떤 원인으로 폭발하는 일이 많다.

최초의 폭발은 그리 큰것이 못되나 이로 인해서 생겨난 작은 폭풍의 주변에 퇴적되어 있는 분진을 교반하여 熱, 빛의 전달 및 放射에 의해서, 그리고 다시 폭발을 일으키게 하는 2次 폭발이다.

이것은 최초에 비해서 규모가 확대되면서 차츰 분진폭발을 유발하여 분진이 퇴적된 곳은 모조리 파괴하고 태워버리는 결과가 된다. 이것이 재해로서의 분진폭발의 큰 특징인데, 탄광 등에 있어서는 정도에 따라 수천미터에 걸쳐서 폭발이 전파되는 수가 있다. 따라서 건물의 구조나 퇴적분진의 처리가 방폭대책상 매우 큰 웨이트를 점하고 있는 것이다.

다음에 분진폭발에서는 폭발시 발생하는 가스중의 성분에 가스폭발에 비해서 CO가 상당히 많다. 이것은 單位空間當의 酸素燃料比가 가스에 비해서 연료 과잉상태가 되어 불완전연소를 일으키는 경향이 있기 때문이며, 탄광등 폐쇄된 장소에 있어서의 분진폭발에서는 피해자의 대다수가 CO 중독이라는 결과를 가져오고 있다.

그리고 또한 폭발뒤의 가스를 완전히 분석함으로써 폭발한 물질이 가스인가 분진인가를 계산에 의해서 C/H 比로 내서 확인할 수 있다. 메탄의 경우 2.3~2.8 정도인것이 분진에서는 3~16인 것으로 되어 있다.

탄진을 비롯해서 많은 분진류는 폭발전과 과정에서는 분진입자의 열변질 및 건류작용에 의해서 CO, CO₂, CH₄, H₂ 등 이외의 건류가스의 발생도 있고 또 HCN과 같은 유독가스도 존재한다.

5. 분진의 폭발성에 영향을 미치는 여러 要因

분진의 폭발 발생율이나 폭발의 세기, 着火의 難易 등은 가스폭발과 마찬가지로 그 분진의 종류에 따라 매우 다른데, 특히 분진의 경우는 그 물리적, 화학적 性狀이 크게 관계되므로 이들 여러 요인을 충분히 알아둘 필요가 있다.

(1) 분진의 화학적 성질과 組成

분진의 폭발성에 관한 요인으로는 분진자신의 화학적인 구조나 반응성이 매우 큰 뜻을 가진다.

예컨대, 酸化反應에 의해서 생성하는 기체량이 매우 큰것, 반응전후에 용적이 변화하지 않는것, 오히려 감소되는것, 또는 그와같은 경우에 발생하는 연소열의 대소 등이 분진폭발의 激熱度에 영향을 미친다. <表 1>은 가연성 유기고체의 발열량을 나타낸 것이다.

表 1. 가연성 유기고체의 上部 발열량

물 질 명	발열량(Kcal/kg)
탄 화 수 소 류	> 10,000
합 성 품 (고분자)	3,000~11,000
석 탄	7,000~ 9,000
목 재	3,500~ 5,000

다음에 탄진 21밖의 분진에서 휘발성분(VM)의 함유의 대소가 큰 영향을 주어 VM이 많을수록 휘발하기 쉽다. 탄진에서는 휘발분이 11%이상이므로 폭발하기 쉽고 폭발의 전과가 용이한 것은 폭발성 탄진이라 불리운다.

한편 분진중의 灰分含量的의 대소가 폭발성에 영향을 미쳐, 예컨대 15~30%의 회분을 지닌 瀝青炭의 경우, 40% 이상의 VM을 가진것이 폭발하지 않는다. 그리고 또한 분진자체의 열분해의 난이도나 탄화수소계 기체의 발생속도 등에 관계된다. <그림 1>은 灰分과 휘발성 물질을 포함한 각종 탄

진의 공기중의 농도와 화염속도와와의 관계를 나타낸 것이다.

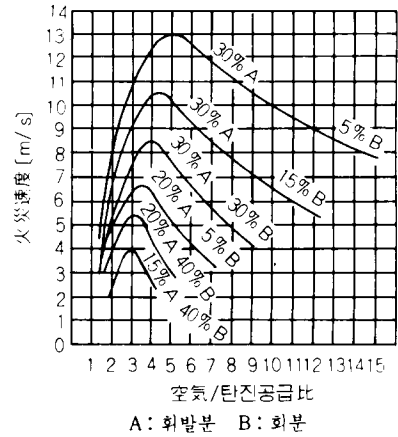


그림 1. 제트혼합 공기-탄진계의 연소속도와 석탄 중의 휘발분과 灰分의 함유량간의 관계

(2) 粒度 및 粒度分布

분진의 폭발 난이도는 분진의 입도나 입도분포에 크게 좌우된다. 분진의 연소는 입자표면에 있어서 반응하기 때문에 표면적이 입자부피에 비해서 증대하면, 열의 발생속도가 放散속도를 웃돌아 폭발성을 크게 한다.

예를들면, 1cm입방의 정 4각입방체의 표면적은 60cm²에 지나지 않으나 이것을 분할해서 1 마이크로(μ) 입방으로 하면 총계의 표면적은 6m²에 이른다. 어떤 일정한 중량을 가진 분진은 표면적을 나타낼 경우, 比表面積이라고 하는 표현을 사용한다.

$$S = \frac{N \times k_s d^2}{N \times e \times k_v d^3} = \frac{\phi}{ed} \quad (\text{公式 1})$$

여기서 S : 비표면적, $\phi = \frac{k_s}{k_v} \alpha$: 평균粒子徑, N : 입자수, e : 분진밀도, k_s, k_v : 形狀계수, 球狀입자에서는 $k_s = \pi, k_v = \frac{\pi}{6}$

따라서 평균입자경이 작고 밀도가 작은것일수록 비표면적이 커지고 또 표면에너지가 커진다.

경우에 따라서는 입도가 너무 작아지면 분진의 종류에 따라 서로 끌어당겨 분산이 불량해져서 오히려 폭발성이 줄어드는 수가 있고, 입자의 전기적 성질에 관계가 있게 된다.

입자의 크기는 보통 마이크론 또는 통과하는 표준체의 넘버로 표시된다. 입자의 평균경과 통과하는 체의 넘버와의 관계는 <表 2>와 같다.

表 2. 체의 넘버와 통과 마이크론과의 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, 200멧쉬 全通 또는 100~150멧쉬하는 등의 표현을 쓰는데, 이것은 대상분진의 완전한 입자크기를 나타내는 것이 아니다. 같은 체를 통과한 것이라도 통과입자의 입도에 상당한 차이가 있는 것이므로 통과분진의 입도 분포를 알 필요가 있다. 다만 粒度分布의 상이에 따른 폭발특성의 변화에 관해서는, 보다 작은 粒度의 입자를 포함하는 분진쪽이 폭발성이 높은 것이라고 생각하면 된다.

(3) 粒子的 形狀과 表面의 狀態

평균입형이 같은 분진이라도 형상이나 표면의 상태도 폭발성에 큰 영향을 미친다.

전기학 <公式 1>에 있어서 比表面積에는 형상계수가 큰 인자를 가진다는 것이 나타나 있는데 球狀 粒子에서는 $\psi=6$ 이어서 가장 적고, 針狀이면 >6 이고, 扁平狀에서는 >50 에까지 이른다. 예컨대, 어떤 류의 합성수지에서는 <表 3>과 같이 폭발 지수가 형상에 따라 다르다는 것을 알 수 있다.

表 3. 분진의 폭발과 입자의 형상과의 관계

試料 분진	폭발 지수
	球狀 不定形
메타크릴酸 메틸成形콤파운드	6.1 >10
메타크릴酸메틸,아크릴酸共重合物	7.2 >10
石炭酸 樹脂	<0.1 >10
上同 非加熱 反應物	2.3 >10
上同 유도체	5.8 >10

그리고 또한 粒子表面이 공기(산소)에 대해서도 활성일 경우 예컨대, 표면이 신선하고 폭로시간이 짧은 것일수록 폭발성이 높다.

<表 4>는 어떤 금속의 공기폭로시간과 발화에너지와의 관계를 나타낸 것이다.

이것은 산화피막을 곧 생성하는 금속분에 공통된 것으로서, 알미늄분에 있어서도 스테아린酸 피막을 한다거나 舍脂粉쪽이 더 폭발하기 쉽다. 그리고 또한 摩碎나 粉碎라는 작업공정에 생기는 분진은 활성이 높고 위험성도 크다고 할 수 있다.

表 4. 공기에 폭로된 효과와 발화에너지와의 관계

금속시료		雲 狀		層 狀	
		폭 로 전	폭 로 6 주 간 후	폭 로 전	폭 로 6 주 간 후
티 탄	15mJ	25mJ	$8 \times 10^{-4} J$	$8 \times 10^{-4} J$	
"	10	15	2×10^{-4}	8×10^{-5}	
질 코늄	5	15	1×10^{-4}	1×10^{-4}	
"	15	*	3×10^{-5}	1×10^{-5}	

* 25mJ에서 발화하지 않음.

(4) 粉塵의 浮遊性

일반적으로 입자가 작고 가벼운 것은 공기중에 산란, 부유하기 쉽다. 부유성이 큰것일수록 공기중에 체류하는 시간이 길고 위험도 증가한다.

<表 5>는 粉體와 粒度의 자연 낙하시간과의 관계를 나타낸 것으로 온도 및 밀도에 따른 영향이 큰데, 200마이크론보다 작은 粒度의 것에서는 입도가 작고 온도가 높으며 밀도가 작을수록 낙하속도가 작아진다. 그리고 또한 500마이크론 부근의 입도에서

는 온도에 관계없고, 이보다 큰 입자에서는 반대로 온도가 높을수록 낙하속도가 커진다.

다음에 공기分粒法에 의해서 분진의 부유성을 측정하는 보고에 의하면 風量 P(l/min)와 부유流出量 W(%)와의 관계를 각종 분진으로 부터 구해본 결과 <그림 2>처럼 되었다. 이경우 $W=k \cdot P^n$ 의 실험식이 얻어지는데 k, n는 일정한 입도분포를 가진 분체에 대한 고유한 常數이고 k가 큰 분진은 약한 바람에 의해 쉽게 상승한다.

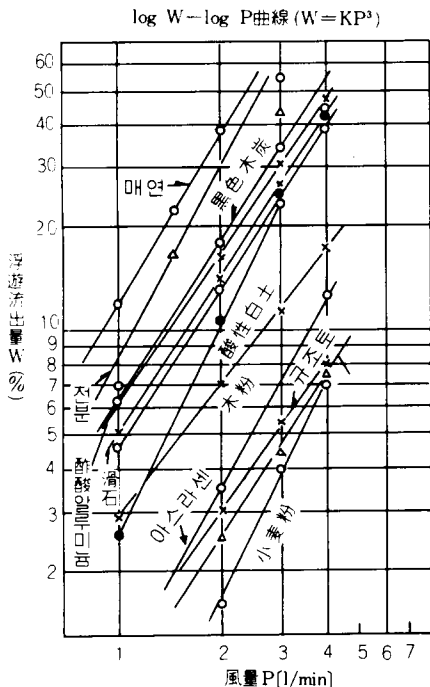


그림 2. 각종 분체의 浮遊性

n은 보통 1~2.6의 값을 가지며 n가 큰 분진은 강풍하에서 잘 부유한다.

따라서 n가 큰 분진은 응집성이 크므로 流動時의 분진의 부유성은 가늘기의 지속성, 즉 응집의 난이에 좌우된다.

이같은 부유성은 입자의 帶電性이나 대전의 極性, 흡수성이 크게 영향을 미친다.

表 5. 공기 중을 자연낙하하는 粉体の 낙하속도 [cm/sec]와 입자의 크기·밀도·분위기의 온도와의 관계(常圧)

입자의 크기 [μ] 미 크 론	분진 밀도 σ(g/cm³)					
	σ=1			σ=2		
	온 도(℃)			온 도(℃)		
	20	177	370	20	177	370
5	0.075	0.065	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	115	108	101
500	200	199	196	316	328	325
1000	390	415	426	594	642	685
5000	1160	1420	1650	1680	2070	2390

(5) 水分

분진안에 존재하는 수분은 폭발성에 영향을 미친다. 즉 수분은 분진의 부유성을 억제한다. 다만 疎水性의 분진에 관해서는 부유성에 그리 큰 영향을 미치지 않으나 수분의 증발로 점화에 유효한 에너지가 감소한다는 것, 증발한 수증기가 不活性가스로서 작용한다는 것, 대전성을 감소시키는 것과 같은 효과가 있다.

그리고 마그네슘, 알루미늄 등은 물과 반응하여 수소를 발생시켜 오히려 위험성을 증대시키는 일이다.

6. 粉塵의 爆發特性

前記한 분진의 폭발성에 영향을 미치는 요인은 분진의 폭발특성과 밀접한 관계가 있으며 따로 떼어서 생각할 수가 없다. 폭발특성은 온도, 압력 분위기중의 가스組成, 不活性물질의 존재 등 前記 이외의 요인에 의해서도 큰 영향을 받지만, 원래 특성을 측정할 경우에는 물리적 조건의 변동폭이 크기 때문에 결과로서 얻어진 특성치를 그대로 절대적인 것으로 믿을수 없으며, 상대적인 비교치로서 밖에 이용할 수가 없다.

1) 폭발 한계농도

기체폭발과 마찬가지로 분진폭발에 있어서도 일정한 농도한계 밖에서는 화염이 전파하지 않는다. 따라서 분진의 종류에 따라서 각각 고유의 폭발 한계농도(상한농도)가 있는데, 가스의 그것처럼 확고한 수치는 얻을 수 없다. 특히 상한계에 관해서는 일반적으로 널리 알려져 있지 않다.

일반적으로 분진의 폭발하한 농도는 $20\sim60\text{g/m}^3$, 폭발 상한농도는 $2,000\sim6,000\text{g/m}^3$ 의 범위에 든다고 하는데, 입도나 입도분포, 그밖의 요인에 의해 상당히 변동이 크다.

2) 폭발 한계농도에 영향을 미치는 요인

(가) 입도 및 입도분포

분진의 폭발 한계농도, 특히 하한농도는 분진의 입도나 입도분포에 큰 영향을 받는다.

〈그림 3〉은 평균 粒徑과 폭발 하한 농도와의 관계를 〈그림 4〉는 입도분포의 상이와의 관계를 나타낸 것이므로서 입도가 작은 것일수록 폭발 하한 농도가 낮아진다.

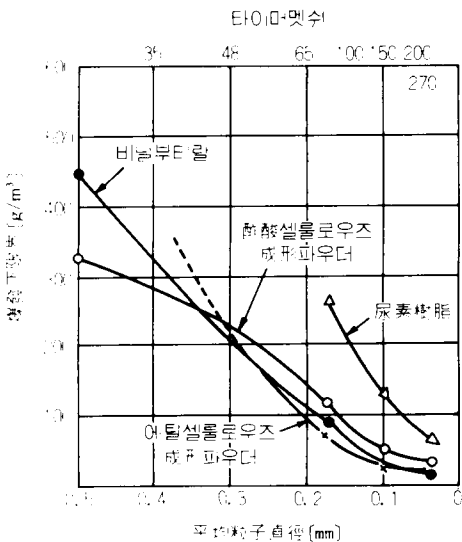


그림 3. 플라스틱 분진의 平均粒子 직경과 폭발하한계와의 관계

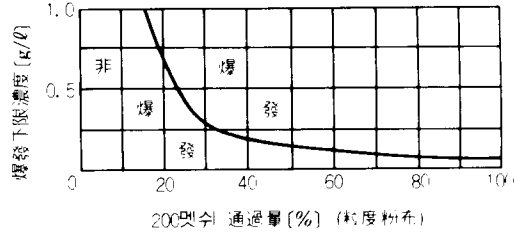


그림 4. 탄진의 폭발하한 농도와 粒度分布와의 관계

(나) 수 분

분진공기계에 수분이 있으면 폭발하한농도가 높아져서 폭발성을 잃게 된다.

(다) 산소농도

분진이 分散하는 분위기중의 산소농도가 변화하면 폭발한계농도도 영향을 받는다. 산소중이나 공기중에서는 하한농도가 낮아짐과 동시에 입도가 큰 것도 폭발성을 갖게 된다. 한편 산소농도를 감소시키면 폭발하한농도가 높아져서 폭발불능영역이 생기게 된다.

(라) 가연성가스

메탄, 그밖의 가연성가스나 인화성 액체의 증기가 粉塵空氣계에 혼합해 들어오면 폭발하한농도가 저하되어 위험성이 커진다.

당연히 가스가 폭발 범위에 들어가면, 분진이 존재하지 않더라도 폭발하고 발화에너지는 보다 작아 지므로 위험성이 크다. 다만 분진의 폭발상한농도에서는 가스 그 자체의 농도가 폭발 범위에 들어있더라도 분진농도가 지나치게 크면 결국 연료과잉으로 폭발성을 잃고 만다.

(계속)