

# 粉塵爆發에 대한 小考

이 지 섭 / 화공연구실 연구원

## — ABSTRACT —

This document, translated and rearranged describes the features of dust explosion and the factors which have an important effect upon the hazard of dust explosion on the purpose of prevention the disaster caused by dust explosion.

The dust explosion exist close to our common life as latently, but it seems to be overlooking in common, regrettably

It need to be evoked.

## 1. 서론

수년간 산업계나 주택, 고층건축물, 기타 가스나 석유제품에 의한 폭발화재로 인한 재해가 눈에 띄게 일어나고 있다. 이들 폭발화재사고의 원인은 주로 가연성 가스나 액체류이고 가연성분진에 의한 것은 거의 발견되지 않는다. 한편 이와 같은 사고와는 달리 눈에 띄지 않는 장소에서 몇 안되는 가연성분진에 의한 폭발사고도 발생하였다. 일본의 경우 분진폭발재해의 통계를 보면 1952년부터 1979년의 약 28년간에 사고발생 건수가 209건 사상자수 546명(사망 86명)에 달한다. 물적손해에 대해서는 누계가 어느 정도 되는지는 불명확하지만 수억을 넘는 손해를 낸 재해가 꽤 있기 때문에 막대한 것일 것이다.

이런 재해를 발생하고 있는 장소는 화학공장보다는 오히려 다른 업종에서 더 많이 발생하고 있다. 특히 곡물싸이로나 사료공장, 중소규모의 금속공장이나 제재(製材)공장이 중심이 되고 있다. 또 분체도장 공

업이나 공해방지용 분진, 악취흡착용(惡臭吸着用)의 설비에 있어서도 작은 사고의 발생을 볼 수 있다. 이 사실은 가연성분진의 폭발위험성에 대한 일반적인 인식부족과 신기술이나 공해 대책 상의 설비장치에 안전이 취급되지 않았다고 하는 현실을 나타내고 있는 것이다. 따라서 현재의 상태를 이대로 방치하면 생각지 않은 대형분진 폭발재해의 발생도 예상되며, 그제서야 허둥대어도 때는 이미 늦어버린다고 하는 결과가 될 것이다. 그래서 이런 재해의 예방이란 견지에서 도움이 되는 몇가지 항목에 대해서 기술하고자 한다.

## 2. 분진폭발의 특수성

한마디로 분진이라고 하면 생활상, 생산상 제외할 수 없는 것이므로 먼지나 매연과 같이 불필요한 것까지 넓은 범위에 걸쳐 있다.

이들은 항상 우리 주위에 존재하고 있지만 언제

어디서나 폭발하는 것이 아니고, 어느 조건이 갖추어짐에 따라서 위험상태가 되는 것이다. 분진의 연소폭발 위험성을 고찰할 때 공기중에 부유한 경우와 구조물상에 퇴적한 경우로 나눌 수 있다. 어느 경우도 가연성이다. 즉 공기중의 산소와 반응하여 발열하는 성질을 갖고 있는 물질을 대상으로 한다. 분진은 가연성고체를 세분화한 것이라고 생각해도 좋지만 대단히 입자가 작아서(예를들면 직경이  $10^{-5}\mu\text{m}$  이하로 되면) aerosol로 공기중에 분산하여 현탁상태가 된다. 이들은 액체의 미립자 즉 mist의 상태와 거의 동일하며, 침하(沈下)가 발생하지 않는다. 이와 같이 되면 가연성가스와 마찬가지로의 위험성이 있다고 생각하여도 좋지만 실제로 우리가 직면하는 분진은 더욱 입자가 커서, 대강  $10^{-3}\mu\text{m}$  정도 이하의 입자이며 영구적으로 부유(浮遊) 상태로 있는 것은 아니다. 또 분진은 그 생성과정에서 균일한 입자인 것은 거의 없고 aerosol과 같은 작은 것에서부터 꽤 큰 알갱이로서 확실히 확인할 수 있는 것까지 굵은 것이 혼합하여 있는 것이 상식이다.

이와 같이 분진폭발은 공기와 잘 혼합하여 있는 부유상태가 필요하다. 큰 입자는 간단히 부유하지 않으며, 일단 부유하더라도 곧 침하하므로 폭발위험성은 적게 된다. 따라서 폭발을 일으키려면 어느 정도의 미립자로 외부로부터 생성시켜야 한다. 왜냐하면 침강한 분진은 스스로는 가스나 증기와 같이 확산성을 갖지 못하기 때문이다. 확산성을 갖지 못하는 분진은 방치하면 침강하여 퇴적한다. 퇴적분진은 공기를 다량으로 함유한 겔(Gel) 상태로서 에어로겔이라 부른다. 이것은 또 발화위험이 존재한다. 이런 발화폭발 위험이 있는 분진의 생성조건은 가연성 고체의 분쇄, 이송, 분체, 교반 등 외부에서 기계적인 작용을 주고, 또 분체물질의 건조, 혼합, 분급, 계량 등을 하는 공장에서 존재하기 쉽다. 분진의 발화폭발도 물질 스스로 상온에서 산화발열하는 일부의 금속류를 제외하면 점화원의 존재가 필요하다. 따라서 분진이 발화폭발을 하기 위한 조건으로는

- (1) 가연성
- (2) 미분상태

- (3) 지연성 가스(공기)중에서의 교반과 유동
- (4) 점화원의 존재

라고 하는 각종의 조건이 필요하다. 또 분진이 장시간 가열되어 건류(乾溜) 가스가 발생하면 가스폭발의 위험이 있고 분진폭발의 원인이 될 것이다.

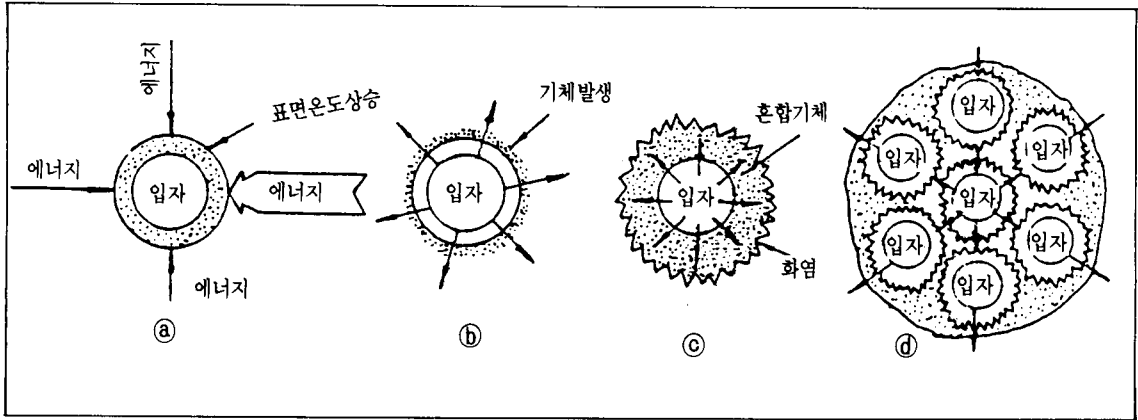
### 3. 분진폭발의 의의

#### 3.1 가연성분진의 착화폭발기구

분진폭발은 분진입자의 표면에서 산소와 반응이 일어나는 것이고, 가스폭발처럼 산화제(공기)와 가연물이 균일하게 혼합하여 반응하는 것이 아니고, 어딘가 모여 있는 가연물의 주위에 산화제가 존재한다고 하는 불균일한 상태에서 반응이 발생하여, 마치 가스폭발과 화약 폭발의 중간에 있다고 생각할 수 있으며 폭발에 의해 방출된 에너지는 최고값으로 비교하면 가스폭발의 수배에 달한다. 그러나 분진폭발은 가스폭발이나 화약의 폭발과는 달라 발화에 요하는 에너지가 훨씬 크다. 이것은 분진이 폭발하는 과정이 <그림 1>에 나타난 것처럼 다음과 같이 되기 때문이다.

- (1) 입자표면에 열에너지가 주어져, 표면온도가 상승한다.
- (2) 입자표면의 분자가 열분해 혹은 건류작용을 일으켜, 기체로 되어 입자의 주위로 방출한다.
- (3) 이 기체가 공기와 혼합하여 폭발성혼합기를 생성하여, 발화해 화염을 일으킨다.
- (4) 이 화염에 의해 발생한 열은 더욱 분말의 분해를 촉진하여 차차 기상으로 가연성기체가 방출되어 증기와 혼합해 발화, 전파한다.

따라서 분진폭발도 결국은 본질적으로 가스폭발로 분진 자체에 가연성의 가스가 저장되어 있는 것이라고 생각하여도 지장이 없다. 다만 이와 같은 폭발의 과정으로 앞의 (1)에서는 입자표면온도를 감쪽같이 상승시키는 수단으로서 열전도(熱傳導)뿐아니라 복사전열(輻射傳熱)이 큰 역할을 차지하는 것이 가스폭발과 다른 점이다.



(그림 1) 분진의 폭발과정

### 3.2 화염전파의 상황

가연성가스와 공기의 혼합가스를 어떤 직경의 관속을 흘러, 한점에서 착화시킬 경우 미연혼합(未然混合)가스는 착화 바로 직전에 예열대(預熱帶)를 거쳐 연소대(燃燒帶), 반응대(反應帶)에 달하여 고온연소가스로 이동한다. 이 때 예열대의 합계 길이는 통상 1mm 정도의 짧은 것이며, 이 경우 화염면의 전파속도는 Mallard Le Chatlier의 식으로 표시할 수 있다. 다만, 열에너지의 공급은 열전도만으로 한다.

$$V = \frac{\lambda(T_b - T_i)}{\rho C b (T_i - T_w)} \dots\dots\dots (1.1)$$

- 여기서 V : 전파속도
- b : 연소대의 길이
- $\lambda$  : 미연혼합가스의 열전도율
- $\rho$  : 미연혼합가스의 밀도
- C : 미연혼합가스의 평균비열
- $T_w, T_i, T_b$  : 각각의 존(Zone) 경계온도 (°C)

그런데 분진운의 경우 열에너지의 공급은 열전도 이외에 복사전열이 가하여지기 때문에 화염전파의 모양이 (그림 2)처럼 나타난다.

이처럼 열전대의 길이가 가스의 경우에 비교하여 훨씬 길어진다.

또 입자는 연소시에 발생하는 분출가스 때문에 여러가지 방향으로 비산하고, 입자자체도 파열비산하므로, 이것도 또 하나의 화염전파기구를 형성한다.

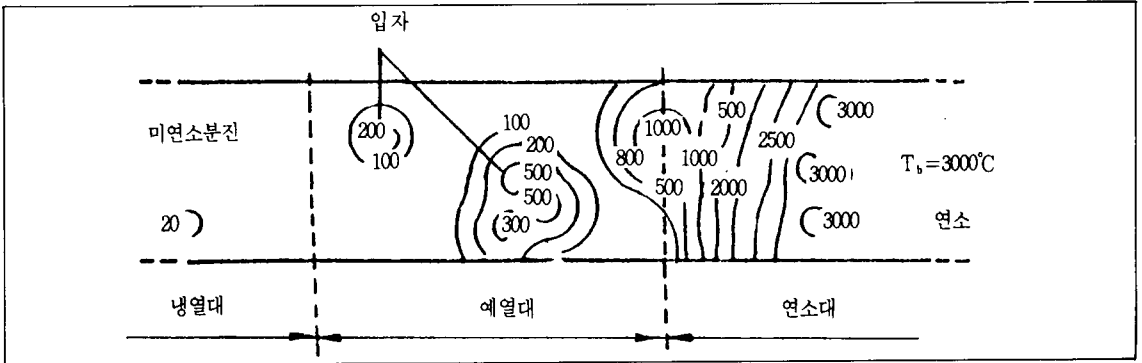
이 화염전파속도를 Cassel 등은 복사전열을 고려하여 (1. 1)식을 수정해 다음 (1. 2)식을 유도했다.

$$V_{st} = \frac{\lambda(T_b - T_i) + \frac{b w \sigma \alpha F (T_b^4 - T_i^4)}{\rho_{st} \gamma}}{(C \rho + C_{st} W) (T_i - T_w)} \dots (1.2)$$

- 여기서  $V_{st}$  : 화염의 전파속도
- W : 분진농도
- $\alpha$  : 보정계수
- $\sigma$  : 복사능(輻射能)
- F : 기하학인자
- $\rho_{st}$  : 분진밀도
- $\gamma$  : 분진의 평균반경
- $C_{st}$  : 분진의 평균비열

또 이식에서  $\lambda, \rho, C$ 는 각각 분진공기의 미연혼합물의 열전도율, 밀도, 평균비열이다.

이처럼 분진의 연소기구는 가스에 비교하여 복잡하며 많은 factor가 관계하므로 폭발특성도 정량적인 수치를 명확히 정하는 것이 곤란하며, 오히려 상대적인 비교치로서 위험성을 논하는 경우가 많다.



〈그림 2〉 분진 폭발의 화염전파상황

### 3.3 분진폭발의 특징

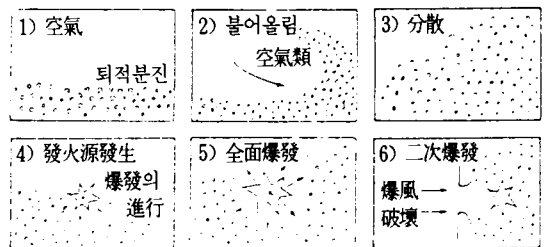
(1) 연소속도나 폭발압력은 가스폭발에 비교하여 작지만 연소시간이 길고 발생에너지가 크기 때문에 파괴력과 그을음(탄)의 정도가 크다. 발생에너지는 최고치에서 비교한 경우 가스폭발의 수배이고, 온도는 2,000~3,000°C 정도까지 상승한다고 할 수 있다. 이것은 단위체적당의 탄화 수소량이 많기 때문이다. 분진폭발은 우선 폭발압력이 선행하며 1/10~1/20초 늦게 화염이 온다. 화염의 파급으로 미치는 스피드는 상온, 상압에서는 초기에 2~3m/s 정도이고 그 속도는 연소한 분진의 팽창 때문에 압력이 상승함에 따라 가속도적으로 빠르게 된다.

또 폭발염에 의한 압력의 스피드는 300m/s 정도라고 할 수 있고, 화염속도가 상승함에 따라 압력의 스피드도 상승한다. 어쨌든 화염스피드보다 압력스피드의 쪽이 훨씬 빠르다. 이것을 이용하여 폭발제어장치를 고안할 수 있다.

(2) 폭발의 제 입자가 연소하면서 비산하므로 이것을 받는 가연물에 국부적으로 심한 탄화를 발생하고 특히 인체에 받는 경우 화상이 심하다.

(3) 최초의 부분적인 폭발에 의해 폭풍이 주위 분진을 날려올려 2차, 3차의 폭발로 파급함에 따라서 피해가 커지게 된다. 분진폭발의 발생순서를 〈그림 3〉에 나타낸다.

(4) 가스에 비하여 불완전연소를 일으키기 쉽기 때문에 탄소가 연소할 수 없어 연소 후의 가스에 일산화탄소가 다량으로 존재하는 것이므로 어떤 가스에 따른 중독의 위험이 있다.



〈그림 3〉 분진폭발의 발생순서

## 4. 분진의 폭발위험성

### 4.1 분진의 폭발성에 영향을 미치는 Factor

분진의 폭발용이성과 폭발의 격렬함, 착화의 어려움 등은 가스폭발과 마찬가지로, 개개의 분진의 종

류에 따라 대단히 다른 것이지만, 특히 분진의 경우에는 그 물리적, 화학적 성상이 크게 관계하므로 이들 factor를 충분히 알아둘 필요가 있다.

### (1) 분진의 화학적 성질과 조성

분진의 폭발성에 관한 factor로서 분진 자체의 화학적인 구조나 반응성은 대단히 큰 의미를 갖는다. 발열량이 큰 만큼 폭발성도 큰 것이다. <표 1.1>은 가연성 유기고체의 발열량을 나타낸 것이다. 다음으로 탄진(炭塵) 그 외의 분진에서 휘발성분 (VM)의 함유 대소가 큰 영향을 미치며 VM이 많은 만큼 폭발하기 쉽다. 탄진에는 휘발분이 11% 이상 있으면 폭발하기 쉬우며, 폭발의 전파가 용이한 것을 폭발성탄진이라 한다.

한편, 분진중의 회분(灰分) 함유량의 대소가 폭발성에 영향을 미치며, 예를들면 15~30%의 회분을 갖는 역청탄에서 40% 이상의 VM을 갖는 것이 폭발하지 않는다고 할 수 있다. 또 분진자체의 열분해 용이성이나 탄화수소 기체의 발생속도 등도 관계한다.

<그림 4>는 회분과 휘발성 물질을 포함한 각종 탄진이 공기중에서 농도와 화염속도의 관계를 나타낸 것이다.

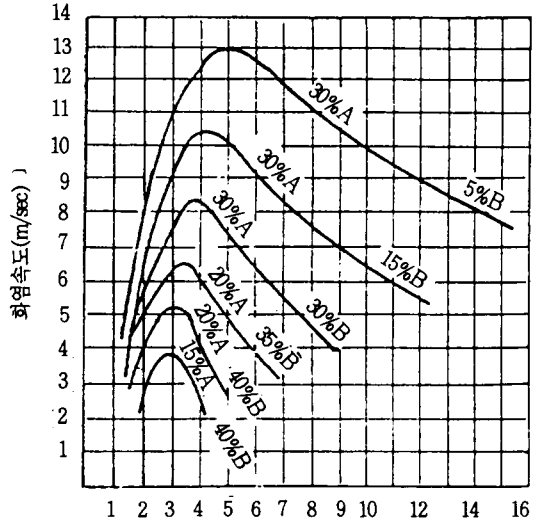
<표 1.1> 가연성 유기고체의 발열량

물 질 명	발열량(Kcal/kg)
탄화수소류	> 10,000
합성품(고분자)	3,000~11,000
석 탄	7,000~9,000
목 재	3,500~5,000

### (2) 입도 및 입도분석

분진의 폭발 용이성은 분진의 입도나 입도분포에 크게 좌우된다.

분진의 연소기구에서 기술한 것처럼, 입자표면에서 반응하기 위해서 표면적이 입자체적에 비교하여 증대되면, 열의 발생속도가 방산속도를 상회하며, 예를



공기/탄진의 공급비  
A: 휘발분 B: 회분

<그림 4> 제트혼합공기-탄진계의 연소속도와 석탄중의 휘발분과 회분의 함유량간의 관계

들면 <표 1.2>에 나타낸 것처럼 1cm의 정사각 입방체의 표면적은 6cm<sup>2</sup>에 지나지 않지만 이것을 분쇄하여 1μ입방으로 하면, 총계의 표면적은 6m<sup>2</sup>에나 달한다.

<표 1.2> 미세하게 분쇄한 경우의 표면적의 증가량

표면적 6cm <sup>2</sup> , 한번 1cm의 입방체입자 1개를 분쇄한 경우	
한개 ... 천개의 입방체 : 한번 1mm : 표면적 0.006m <sup>2</sup>	
만개 " : 100μ : " 0.06 "	
십만개 " : 10μ : " 0.6 "	
백만개의 " : 1μ : " 6.0 "	

어떤 일정한 증량을 갖는 분진의 표면적을 표시하는 경우 비표면적이라고 하는 표현을 사용한다. 이것

은 다음과 같은 관계식으로 표시할 수 있다.

$$S = \frac{N \times k_s \cdot d^2}{N \times \rho \times k_v \cdot d^3} = \frac{\phi}{\rho d} \dots\dots\dots (1.3)$$

여기서 S : 비표면적

$$\phi : \frac{k_s}{k_v}$$

d : 평균입자경

N : 입자수

ρ : 분진밀도

k<sub>s</sub>, k<sub>v</sub> : 형상계수

구상입자(球狀粒子)에서는 k<sub>s</sub>=π, k<sub>v</sub>= $\frac{\pi}{6}$

따라서 평균입자경이 작고, 밀도가 작은 쪽이 비표면적은 크게되어, 표면에너지도 커지게 된다.

입도가 너무 작아지면 분진의 종류에 따라서 서로 끌어당기어 분산이 좋지 않게 되어 오히려 폭발성이 감소하므로, 입자의 전기적 성질도 관계한다. 입자의 크기는 통상 μ(micron) 또는 통과하는 표준체인 number로 나타낸다. 입자의 평균경과 통과체의 number 관계는 <표 1.3>과 같다. 분진의 입도를 나타내는 경우 200mesh 전량 통과 혹은 100~150mesh라고 하는 표현을 사용하지만, 이것은 대상분진의 완전한 입자의 크기를 나타내는 것은 아니다. 같은 체를 통과한 것에서도 통과입자의 입도의 크기가 꽤 다른 경우가 있으므로 통과분진의 입도분포를 알 필요가 있다. 다만, 입도분포의 다름에 따른 폭발특성의 변화에 대해서는 일부 문헌 이외에 그다지 알려져 있지 않지만, 보다 작은 입경의 입자를 포함한 분진쪽이 폭발성이 높은 것으로 생각해도 좋다.

<표 1.3> 체의 번호와 통과 마이크론과의 관계

Sieve No.	Size μ	Sieve No.	Size μ
20	840	270	53
100	149	325	44
140	105	400	27
200	74		

### (3) 입자의 형상 표면의 상태

평균 입형이 동일한 분진에 있어서도 형상이나 표면의 상태도 폭발성에 큰 영향을 준다. 1.3식에서 보는바와 같이 비표면적에서는 형상계수가 큰 인자로서 작용하고 있으며, 구상입자에서는 φ=6에서 가장 작고, 침상으로 되면 6보다 크고, 편평상(扁平狀)에서는 50보다 크게나 달한다.

예를들면 어떤 종류의 합성수지에서는 <표 1.4>에 나타낸 것처럼 폭발지수가 형상에 따라 꽤 다른 것을 알 수 있다. 또 입자의 형상 비표면적 등에 대해서 문헌도 알려져 있으므로 참고하는 것이 좋다. 또 입자표면이 공기(산소)에 대해서 활성인 경우, 예를 들면 새롭게 깨끗한 표면으로 하고, 노출시간을 짧게 하는 것에 있어서는 폭발성은 높게 된다.

<표 1.5>는 어떤 종류의 금속의 공기 노출시간과 발화에너지의 관계를 나타낸 것이다. 이것은 산화피막을 곧바로 생성하는 금속분에 공통으로 적용되며, 알루미늄분에서도 스테알린산 피복을 하기도 하므로

<표 1.4> 분진폭발과 입자의 형성관계

시 료 분 진	폭발지수	
	구상	부정형
메타아크릴산메칠의 성형 Compound	6.1	> 10
" 아크릴산공중합체	7.2	> 10
석탄산수지	< 0.1	> 10
" , 비가열반응물	2.3	> 10
" , 유도체	5.8	> 10

<표 1.5> 공기에 노출된 효과와 점화에너지의 관계

금속시료	운 상		총 상	
	노출전	노출6주간후	노출전	노출6주간후
티 탄	15mJ	25mJ	8×10 <sup>-6</sup> J	8×10 <sup>-6</sup> J
"	10	15	2×10 <sup>-4</sup>	2×10 <sup>-5</sup>
지르코늄	5	15	1×10 <sup>-6</sup>	1×10 <sup>-6</sup>
"	15	*	3×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-5</sup>

\*25mJ에서 발화하지 않음

합지분(含脂粉)쪽이 폭발이 쉽다. 석탄분진 등도 새롭고 깨끗한 쪽이 위험성이 크므로 마쇄(摩碎)나 분쇄(粉碎)라고 하는 작업공정에서 발생한 분진은 활성이 크고 위험성도 큰 것이라고 할 수 있다.

#### (4) 수분

분진중에 존재하는 수분은 폭발성에 영향을 준다. 즉, 분진의 부유성을 억제한다. 다만 소수성(疏水性)의 분진에 대해서는 부유성에 별로 영향이 없지만 수분의 증발로 점화에 유효한 에너지가 감소하거나 발화한 수증기가 불활성가스로 작용하는 것은 대전성(帶電性)을 감소시키는 듯한 효과가 있다. 또 마그네슘, 알루미늄 등은 물과 반응하여 수소를 발생하여, 오히려 위험성을 증가시키는 수가 있다.

#### (5) 분진의 부유성

일반적으로 입자가 작고 가벼운 것은 공기중에서 산란(散亂), 부유하기 쉽다. 부유성이 큰 쪽이 공기중에서 체류하는 시간이 길고 위험성이 증가한다. <표 1.6>는 분체의 입도와 자유낙하 시간의 관계를 표시한 것으로 온도 및 밀도에 의한 영향이 크지만 200 $\mu$ 보다 작은 입도의 것에서는 입도와 밀도가 작고 온도가 높을수록 낙하속도가 작게 된다. 또 500 $\mu$  부근의 입도에서는 온도에 관계없고 이것보다 큰 입자에서는 반대로 이것보다 온도가 높은 쪽이 낙하속도가 크게 된다.

다음에 공기 분리법에 따라 분진의 부유성을 측정 한 보고에 의하면 풍량 P(1/min)와 부유율 W (%)의 관계는  $W=K P^n$ 의 실험식이 얻어지고 K, n은 일정한 입도 분포를 갖는 분체의 고유정수이며, K값이 큰 분진은 약한 바람에 의해서도 쉽게 부유상승한다. n은 통상 1~2.6의 값을 갖고 n값이 큰 분진은 강한 바람의 경우에만 잘 부유한다. 따라서 n이 큰 분진은 응집성이 큰 것으로 유동의 경우에 분진의 부유성은 미세한 상태의 지속성 즉 응집의 난이에 좌우된다. 이와 같은 부유성은 입자의 대전성이나 대전의 극성 및 흡습성에 큰 영향을 받는다. 따라서

(표 1.6) 공기중을 자유 낙하하는 분체의 낙하속도 (cm/sec)와 입자의 크기, 밀도 및 주위 공기 온도와의 관계(전압)

입자의 크기 ( $\mu$ )	분진 밀도 $d(g/cm^3)$					
	$d=1$			$d=2$		
	온도( $^{\circ}C$ )			온도( $^{\circ}C$ )		
	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	115	108	101
500	200	119	196	316	328	325
1000	390	415	426	594	642	685
5000	1160	1420	1650	1680	2070	2390

분진의 분산성 및 물질의 성상에 관해서는 다수의 고찰이 알려져 있다.

## 5. 맺는말

이 글에서는 분진이 폭발하는 과정과 분진의 연소기구 및 분진의 폭발성에 영향을 미치는 많은 원인 중 단지 몇몇만 기술하였다. 분진폭발사고는 막대한 인적, 물적 손해를 발생시킨다. 그러나 사고를 완전히 방지하는 것 또한 불가능한 것이다.

적절한 점화원의 제거와 전기방폭시설 등의 안전장치를 갖추고 동시에 주위환경의 청결을 유지함으로써 손실 규모를 최소화하도록 노력해야 할 것이다.

## (참고문헌)

1. 안전공학협회편 : 폭발, 해문당(1983)
2. 한국화재보험협회 : '94 기술직원 직무교육 교재 (1994)