

## 금속 미분체의 연소 위험성평가에 관한 연구

한우섭, 한인수, 표돈영, 이정석, 최이락  
 산업안전보건연구원 (한국산업안전공단)

### Study on combustion risk assessment of metal fine particles

Han OuSup, Han InSoo, Pyo DonYoung, Lee JungSuk, Choi  
 YiRac

Occupational Safety & Health Research Institute (KOSHA)

#### 1. 서론

금속분체는 유기물, 농산물, 고분자분체에 비하여 단위 체적당 발생 연소열과 단위 시간 당의 연소속도가 매우 크기 때문에 재해가 발생하면 폭발 과압이 크게 작용하여 대형 재해를 유발할 가능성이 높다 1). 금속분체를 취급하는 산업현장에서의 재해 발생률 측면에서 본다면, 부유 분체보다도 작업장이나 기계설비, 지면 등에 퇴적되어 있을 가능성이 보다 높기 때문에 퇴적 상태에서 연소할 위험성이 많다 2)-3). 이와 같은 금속재료 분체에 의한 폭발재해는 금속재료의 사용량 증가, 산업공정의 고도화 등에 따른 부산물이라는 관점에서 앞으로도 금속분체에 의한 폭발화재 발생 위험성은 증가될 것으로 예상된다. 금속분체는 공기 중에 부유하여도 자중에 의해 즉시 침강하여 퇴적층으로 존재하는 경우가 대부분이다. 따라서, 퇴적분체의 착화에 따른 연소확대는 화염전파 거동이라는 측면에서 본다면 일반적인 분진폭발과는 차이가 있다. 퇴적금속 분체층의 각 입자에 대한 산소 공급 및 단위 시간 당 반응면적은 부유 상태에서보다 매우 적기 때문에 입자의 연소속도가 작아, 결과적으로 퇴적분체층을 전파하는 화염전파속도는 분진 폭발 시의 화염전파에 비하여 매우 느리며, 부유 분진폭발에서 나타나는 급속한 화염전파나 급격한 압력발생이 없는 것이 일반적이다. 분체층과 폭발성 부유분진이 동일한 체적을 가지고 있는 경우, 분체량은 분체층의 경우가 훨씬 많다. 그러므로 분체층의 경우가 연소 시간은 길지만 완전연소를 가정한 총발열량에서는 분진운의 경우보다 매우 크기 때문에 재해로 이어질 가능성이 높다. 이와 같은 특성으로 인하여 퇴적금속분체의 위험성평가는 부유분체의 위험성평가법과 구별하여 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는, 퇴적금속 분체 층의 화염전파 특성을 해명하고 위험성평가법을

개발하기 위한 실용적 연구를 목적으로 하고 있다. 이를 위하여, 퇴적분진의 소염거리 측정법을 제안하고 간편하고 단시간 내에 측정치의 편차가 적은 방법으로 연소특성을 조사할 수 있는 실험장치를 개발하였다. 본 연구에서 제안하는 실험장치를 사용하면 여러 가지 퇴적 금속분체의 화재, 폭발예방을 위한 정량적 위험성평가가 가능하다.

## **2. 퇴적금속분체의 위험성평가**

### **2.1. 평가법의 필요성**

금속분체 취급 사업장에서의 분진 폭발을 예방하고 재해를 예측하기 위해서는 사용하고 있는 분체의 안전성 데이터의 확보가 무엇보다도 중요하다. 이를 통하여 재해 발생을 억제하기 위한 안전장치를 사전에 강구할 수 있으며, 만일 재해 사전 예방에 실패하여 재해가 발생한다고 하여도 피해 최소화를 위한 대책을 세우는데 활용할 수가 있기 때문이다. 이러한 국내 관련 사업장의 안전정보 수요 요구와는 달리 국내외적으로는 퇴적금속분체에 대한 위험성평가 연구는 거의 없는 실정이다. 그러므로 관련 사업장에 제시 가능한 안전 정보는 부유 금속분체상의 폭발특성치 만을 제공할 수 밖에 없는 상황이기 때문에, 분체 취급 사업장에서는 안전한 퇴적분체의 관리와 방폭 또는 재해 재발대책을 세우는 것이 어려운 경우가 적지 않다. 폭발특성의 평가 인자는 착화 전후의 연소특성을 표현할 수 있는 물리적특성으로 나타낼 수 있다. 퇴적 분진의 경우, 착화 후의 화염의 전파능력으로서 화염전파속도와 소염거리를 가지고 표현이 가능하다. 화염전파속도가 크면 클수록 연소속도가 크기 때문에 연소 확대를 일정 시간에 얼마나 많이 일으킬 수 있는가에 대한 기준으로서 사용할 수 있다. 또한, 소염거리는 열용량이 큰 주변의 물체에 접촉되어 있는 퇴적 분진의 연소로부터 발생하는 연소열이 열전도에 의해 손실되더라도 화염을 지속할 수 있는 최소의 간극 거리를 나타내며, 화염전파 지속력을 나타내는 척도가 될 수 있다. 본 연구에서는 이상의 2가지 평가 인자를 실험적으로 검토할 수 있는 실험장치를 제작하고 이를 통하여 연소위험성을 평가하고자 하였다

### **2.2. 실험장치**

퇴적금속분체의 연소위험성평가를 위해 본 연구에서 개발한 시험장치를 [그림 1]에 나타냈다. [그림 1]에서 좌측 사진은 시험장치의 전체적인 모습으로, 장치 상부에는 시료를 장착하여 착화, 연소특성을 측정하기 위한 연소관이 설치되어 있다. 연소관은 밀폐식으로 되어 있으며, 본 장치에서는 여러 가지 분위기 가스 및 농도를 설정, 공급이 가능하도록 되어 있다. 또한 연소용기 내부의 팬은 분위기 가스 내에서의 연소특성 조사 시에 가스의 균일한 혼합을 위한 교반기의 역할을

할 뿐만 아니라, 팬에 의한 기류는 시료 홀더에 대향하고 있어, 강제 기류 분위기에서의 연소특성의 관찰도 가능하도록 되어 있다. 향후 필요시에 일정 크기의 기류가 존재하는 작업환경에서의 퇴적 금속분체의 연소특성을 조사할 수가 있도록 하였으나, 본 연구에서는 정지 기류 분위기 중에서의 실험조건으로만 한정하였다. [그림 1]의 A 사진에 나타낸 연소용기 바닥 중심에 설치되어 있는 시료 지지대의 상세를 [그림 2]에 나타냈다. 시료 지지대는, 폭 10 mm × 길이 100 mm × 깊이 각 1, 3, 5, 7 mm의 스케일을 가지며, 화염 영향으로 인한 산화가 잘 되지 않게 하기 위해서 재질을 황동(Brass ; Cu 70% / Zn 30%)으로 하였다. 시료 지지대의 형상이 삼각형의 형태로서 간극이 10 mm로부터 시작하여 점점 좁아지게 제작한 이유는, 1회의 실험으로 퇴적 금속 분체 층에 있어서의 화염전파 속도와 동시에 소염거리의 측정이 가능하도록 하기 위함이다. 만일 평행한 시료 지지대의 간극을 변화시키면서 시험을 실시하는 경우, 수 많은 실험을 통하여 소염거리를 결정하여야 하기 때문에 실험에 소요되는 많은 비용과 시간, 노력 등으로 매우 비효율적인 실험을 수행해야 되는 문제점이 있다.

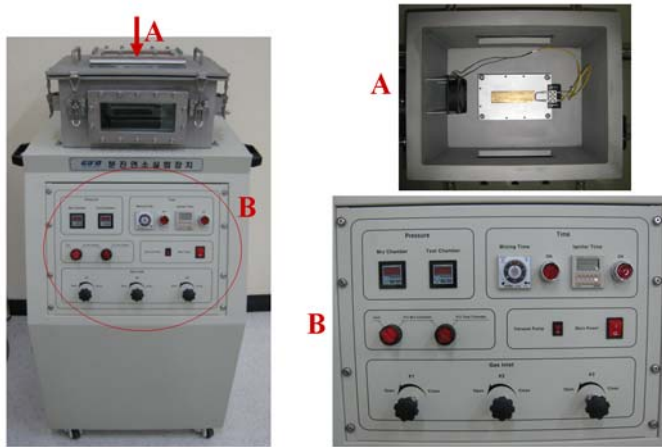


그림 1. 퇴적분체의 연소위험성평가를 위해 개발된 실험장치

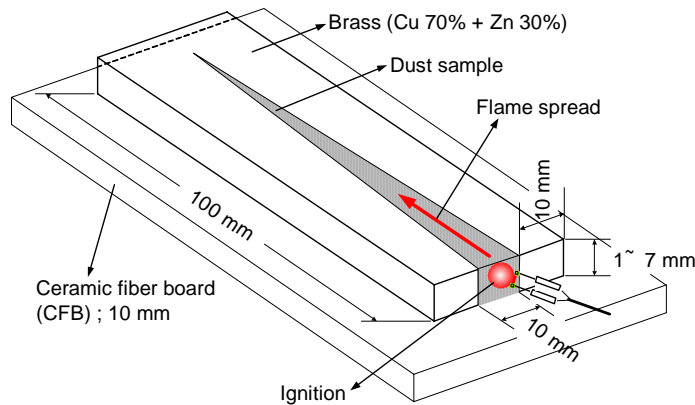


그림 2. 시료 홀더의 상세

### 2.3. 실험 방법 및 사용 시료

본 연구에서 평가하는 퇴적 분체의 소염거리는, [그림 2]에서와 같이 시료 홀더 내에 동일 높이로 균일하게 퇴적시켜 놓은 상태에서 퇴적 금속의 일단을 착화시켜 화염이 전파하게 될 때, 열 손실에 의해 소염이 이루어지는 시료 홀더 폭의 길이로 정의하였는데, 이를 소염거리의 특성치로서 평가하였다. 실험은 우선 시료 지지대를 전자 저울 위에 수평으로 올려놓고, 금속분체를 시료홀더 높이에 맞추어 균일하게 퇴적시킨다. 이 때, 시료의 무게를 각 실험마다 체적 밀도(bulk density)를 조사하여 공극률이 일정하도록 하여 동일한 농도조건이 되도록 하였다. 온도조건으로서는, 22~23 °C의 온도 및 55~60 %의 습도가 되는 조건에서 실험을 실시하였다. [그림 2]에서와 같이, 분체를 퇴적시킨 시료 지지대를 초고온 단열재(Ceramic fiber board, 1800°C) 위에 올려 놓은 상태에서 연소용기 내에 수평으로 설치하였다. 실험은 정지기류 상태의 공기 중에서 실시하였다. 그 후, 텅스텐 전극의 가열에 의해 퇴적 금속분에 착화시켜 연소 용기의 상부에 설치된 표준속도(30 f/s)의 디지털비디오카메라로 화염전파 모습을 관찰 하여 기록하였다. 퇴적금속분체의 연소 위험성평가를 위해 본 연구에서 개발한 시험장치에서 사용한 금속분진은 모두 순도 99.0 %이상의 것으로, 시료의 입도 분포는, 입자상 분석장치를 사용하여 측정하여, 그 결과 Mg, Ta, Zr, Ti의 체적 평균입경은 각각 51.5, 30.8, 26.5, 75.0  $\mu\text{m}$ 가 얻어졌다 <표 1>. 또한, 금속 분진과의 연소성을 비교하기 위해서, PMMA(Polymethyl methacrylate ; 체적평균입경 99.0  $\mu\text{m}$ )도 동일 조건의 실험에 의해 화염전파속도를 조사하였다.

&lt;표 1&gt; 시료의 입도 분포 특성

구 분	PMMA	Mg	Ti	Zr	Ta	Al
평균입자경, $\mu\text{m}$	98.96	51.49	72.74	26.45	30.81	6.38
입자경 SD, $\mu\text{m}$	26.39	14.55	59.5	10.33	13.53	8.33
입자경 CV, %	26.66	28.27	81.8	39.0	43.92	130.65

퇴적분진의 경우에는 분산방법에 따른 영향이 시험 결과에 미치는 영향은 없으나, 분체층의 전도열에 관여하는 분체조작을 정량적으로 취급하기 위해서는 퇴적층의 구성 입자의 조건을 일반화할 필요가 있다. 이를 위해 각 입자 간의 공극의 부피까지를 포함한 공간을 분체의 충전 체적으로 하여 전체 중량과의 비로서 표현하는 겉보기 밀도(Bulk density)와 입자 밀도를 사용하여 퇴적조건에서의 공극율( $\varepsilon$ )을 균일하게 하였다. 겉보기 밀도를  $\rho_B$ , 입자밀도를  $\rho_P$ 라고 할 경우에 공극율( $\varepsilon$ )은  $\varepsilon = 1 - (\rho_B / \rho_P)$ 와 같이 표현된다. 여기서, 겉보기 밀도  $\rho_B$ 는 (충진분체 질량 / 분체 충전 체적)으로 표현된다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 연소 특성

퇴적금속분체층을 전과한 후의 산화물 층의 두께 및 화염전파속도의 평균치를 <표 2>에 나타냈는데, 화염전파속도가 가장 큰 Ti의 산화물 층 두께는 0.4 mm로 가장 작으며 대부분은 1 mm 이내인 것을 알 수 있다. 화염전파속도가 클수록 산화물 층의 두께는 작은 경향을 보이고 있는데, 퇴적 금속층은 표면으로부터 1mm 이내의 깊이 부분만이 가열되어 화염전파가 이루어진다는 것을 알 수 있었다. 퇴적 층 두께의 변화에 따른 화염전파 속도를 조사한 결과, 금속분 시료의 퇴적 두께에 의한 화염전파속도의 변화는 매우 작았으며 이러한 사실로부터 시료의 두께에 의한 영향은 적다고 판단된다. 금속 분체의 화염전파 소염 후의 시료 단면을 조사해 보면, 연소에 의한 산화물 층과 고온의 영향을 받아 열화 된 부분이 있는데, 이는 시료 표면으로부터 내부로 반응이 진행된 것을 의미한다. 금속의 연소가 기체상태에서 반응하는가, 고체표면에서 반응하는가는 산화물의 비등점과 금속원소의 비등점의 차이에 의해 결정된다. 산화물의 비등점이 금속원소의 비등점 보다 높은 Al, Mg, Zn등은 기체상태에서 연소하며, Ti, Ta, Fe, C, Boron 등은 고체표면에서 표면 연소한다. Ta의 공기 중에서의 단열화염온도의

최대 계산치는 2987.0 °C로, 융점은 3030 °C, 비점 5300 °C으로 매우 높아 표면연소에 의해 연소대가 전파한다고 추정된다.

<표 2> 퇴적금속분체층의 화염전파속도와 산화층 두께

Dust sample (Mean diam.)	Thickness of oxide, [mm]	Spread rate, [mm/s]
Ti ( < 75.0 μm	0.4	7.1
Ta (30.8 μm	0.8	2.5
Mg (51.5 μm	0.9	5.1
Zr (26.5 μm	1.0	1.7

### 3.2 소염거리

퇴적 금속층 두께의 변화에 따른 소염거리를 조사한 것을 <표 3>에 나타냈다. 퇴적층의 두께 증가에 따라 소염거리는 다소 커지지만, 두께 5 mm 이상에서는 소염거리의 변화가 거의 보이지 않는다. 특히, Ti의 화염전파속도가 시료 두께에 의존하지 않는 것은, 산화물 층이 0.4 mm로 금속 분체 표면 근처만이 가열되어 연소하면서 전파하기 때문으로 판단된다. 비교 실험을 위해서 측정된 PMMA 분체의 소염거리는 7 ~ 8 mm로 퇴적 금속 분체에 비해 매우 큰 것을 알 수 있었다. 또한, 퇴적 유기물 분진의 smoldering연소에 의한 화염전파속도는 0.01 ~ 0.1 mm/s로 알려져 있으며, 이와 비교하면 금속 분체 층의 화염전파 속도는 매우 크다고 할 수 있다. 금속 분체의 소염거리는 0.4 ~ 1.7 mm로, 2.65 m/s의 화염전파속도로 폭발압력이 큰 수소 가스의 소염거리가 공기 중 STP(Standard temperature and pressure) 상태에서 0.6 mm인 것을 고려할 때, 금속 분체의 연소 위험성이 매우 큰 것을 알 수 있다.

&lt;표 3&gt; 퇴적금속분체층의 소염거리 (단위 : mm)

Thickness of dust layer	Mg	Ti	Zr	Ta	PMMA
1.0	0.9	0.4	0.9	1.4	No spread
3.0	1.0	0.4	0.8	1.6	7.0
5.0	1.1	0.5	1.0	1.7	8.0
7.0	1.2	0.5	1.0	1.6	8.0

### 3.3 소염거리

퇴적분진층을 3 mm로 일정하게 한 경우에 있어서, 분진 종류별의 시간 경과에 따른 화염 선단의 이동에서 소염될 때 까지의 화염 위치를 조사하여, 화염 면의 형상 및 속도는 화염전파 방향의 상부로부터 관찰한 결과로부터 결정하였다. 연소 면의 이동은 부분적으로 가속과 감속이 관찰되지만, 전체적으로 보면 거의 일정한 속도로 이동하였다. 화염전파속도의 크기는 Ti, Mg, Ta, Zr순으로 나타났는데, 퇴적 금속 분체층의 화염전파속도의 차이는 산화물 층을 통한 산소 공급속도, 발열 및 열 이동 속도에 크게 의존한다는 연구결과가 보고되고 있다 4)-6). 그 밖에도 퇴적된 Mg, Ta, Zr분진층의 화염 선단으로부터 전방으로의 화염전파는 매우 불규칙하고 돌발적으로 일어나면서 진행되므로 화염 면이 일정하지 않았다. 이것은 화염 면 근방의 연소입자 일부가 화염이동 방향의 전방으로 불규칙하게 날아 이동하기 때문에 일어나는 현상으로 인해 발생된다. Mg는 밝은 휘염을 기상 중에 형성하면서 연소하는데, 연소 후는 산화마그네슘으로 추정되는 백색의 반응물이 생성된다. 이에 반해, Ti의 경우는 기상 중의 화염은 관찰되지 않았으며 분체 표면을 연소대가 전파하는 것으로 추정되었다. PMMA의 평균 화염전파속도(0.12 mm/s)를 고려하면 금속 분체의 연소성이 매우 높은 것을 알 수 있으며, 그 중에서도 Ti의 평균 화염전파속도는 7.1 mm/s로 본 연구의 실험대상 금속분체 중에서 가장 높았다. 입자 입경 및 퇴적 층 두께가 소염 거리에 미치는 영향에 대하여 조사한 것이 <그림 3>이다. 입경이 클수록 소염거리가 증가하는 경향을 보이고, 분체층 두께에 대한 의존성은 크지 않다. 또한, 화염전파 속도가 빠른 Ti가 Mg에 비하여 입경의 변화에 대한 영향이 작은 것으로 나타났다. 동일 평균입경에 있어서 퇴적층의 두께는 3mm 까지는 다소 증가하나 그 이상의 두께에서는 거의 일정한 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 퇴적금속분체의 연소위

험성 평가에 있어서 1~3 mm 까지의 퇴적층 두께 범위 내에서만 소염거리를 측정하여도 충분할 것으로 판단된다.

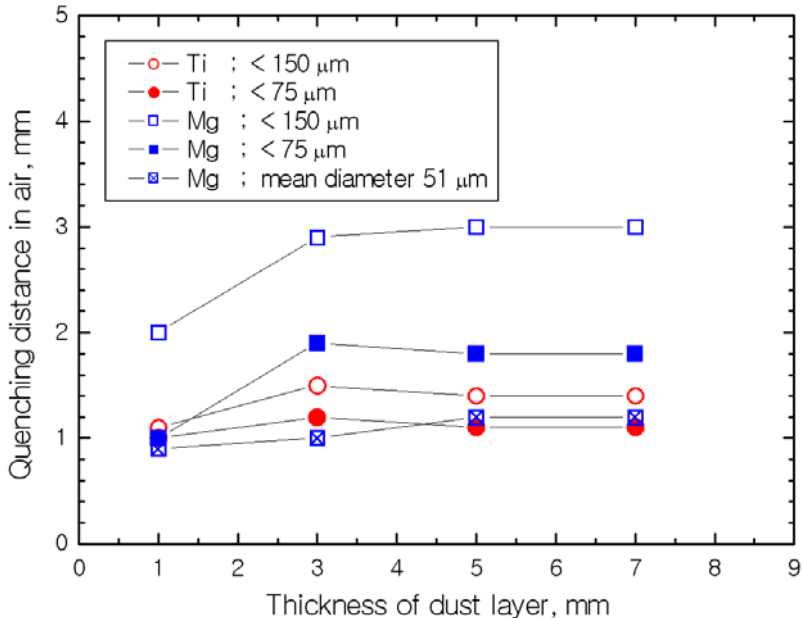


그림 3. 분체층 두께에 따른 소염거리의 변화

#### 4. 결론

본 연구에서는 금속분체 재해예방을 위한 퇴적금속의 위험성평가법과 장치를 개발하고 그 실용성 평가를 목적으로 최근 재해 발생 금속분체를 중심으로 연소특성을 상세히 조사하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 퇴적분진의 착화 후의 연소성 지표로서, 소염거리와 화염전파속도를 단시간 내에 측정치의 편차가 적은 방법으로 측정하여 연소위험성의 대소를 정량적으로 평가할 수 있는 측정방법과 시험장치를 개발하였다.

(2) 퇴적금속 분체층의 화염전파속도는 본 연구에서 측정한 금속 분체시료(Mg, Ta, Ti, Zr, )에 있어서 1.73 ~ 7.1 mm/s이었으며, 이는 대표적인 유기물 분체인 PMMA분체층의 화염전파 속도 (0.06 ~ 0.08 mm/s)에 비하여 매우 큰 값이지만, 시료 종류 및 퇴적층 두께에 관계없이 화염은 거의 일정한 속도로 전파한다.



(3) 퇴적금속 분체 층의 소염 거리는 0.4 ~ 1.7 mm로, PMMA고분자 분체층의 7 ~ 8 mm에 비해 매우 작은 것으로 나타났다. 금속 분체층의 연소 위험성은 유기물에 비하여 매우 높은 것으로 판단되며, 특히 Ti의 소염거리는 0.4 mm로 조사된 시료 중에서 연소위험성이 가장 크며, 화염전파속도도 가장 큰 결과로 나타났다.

(4) 퇴적층 2 mm이상에서의 화염전파 후의 산화물 층의 두께는 약 1 mm이내로 표면 층에 가까운 영역에서만 연소하며, 공기 중 정지기류 상태에 있어서 금속 분체 상의 화염전파속도는 분체 층의 두께에 대한 의존성이 매우 작았다.

### 참고문헌

1. Chernenko, E. V., et al., Combust., Explos., and Shock Waves, 30, 5, pp.617-620 (1994).
2. Eckhoff, R.K., "Dust explosion in the process industries ;2nd ed.", BH (1997).
3. W.Bartknecht, Dust explosion, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg(1989).
4. Bakhman, N. N., "Smoldering wave propagation mechanism ; Critical condition", Combust., Explosion and Shock Waves, 29, pp.14-17 (1993).
5. Ohlemiller, T.J., "Smoldering combustion propagation through a permeable horizontal fuellayer", Combust. Flame, 81, pp.341-353 (1990).
6. Siwek, R., and Pellmont, G, Safety Technical Indices : Methods of Determination and Factors Influencing Hazard Evaluation in Dust Handling Equipment. Proc. of Euromech Colloquium 208, Explosion in Industry, Germany (1986).