

# 퇴적된 금속 분체 층을 전파하는 화염의 특성

한 우 섭

일본 산업안전연구소, 연구부 화학안전연구그룹

## 1. 서 론

최근의 공업제품의 제조에는 미분화기술이 많이 이용되고 있다. 전자공업의 발전 및 제품의 고 기능화에 수반되어, 전자제품은 충분한 강도를 가지면서 경량화, 가공 및 재활용의 용이함 등이 요구되고 있다. 개인단말기나 노트북 등의 전자기기 케이스의 재질은, Mg-Al합금이 많이 사용되어지고 있는데, Mg은 가장 가벼운 금속으로 전자파 차단성, 방열성 등에 뛰어난 반면, 발화 등의 반응위험성이 높으므로, Al과의 합금에 의해, 일정한 기계적 강도 및 반응의 안정화를 기하고 있다. 일반적으로 Mg-Al합금은 9:1의 배합비율로 제조되고 있으며, 완전히 불 활성화시키는 것은 Mg의 장점을 살릴 수 없기 때문에 실용상 어렵다. Mg 이외에도, Ta금속 분은 각종 전자기기의 부 재료로서, Zr은 원자력 등의 공업 부 재료로서 사용이 증가하고 있다.

이와 같이, 경금속 분진의 수요가 급증하고 있는 가운데, 분진 폭발의 재해도 증가하고 있어, 최근 수년간의 분진 폭발사고를 보면, Mg-Al합금, Al, Ta, Cr등과 같은 금속 분의 폭발재해가 많으며 피해도 크다. 분진에 의한 화재폭발 재해는, 분진이 공기 중에 분산되어져 있는 부유 상태에서 발생할 뿐만 아니라, 비중이 큰 금속 분이 퇴적한 분체 층의 착화에 의해서도 발생할 가능성이 크다. 퇴적금속 분체 층의 연소특성에 관해서는, 입경, 층의 두께, 분위기 조성 등에 대해서 많이 조사되어 있다<sup>1)</sup>. 그러나, 퇴적금속 분체 층을 연소대가 전파하는 화염전파(Flame spread) 메커니즘에 관한 연구는 거의 없으며, 이에 유사한 연구로는 산소 분위기 중에서 금속편의 연소 특성 및 연소합성에 대한 것이 대부분이다. 그러므로, 퇴적금속 분체의 정량적인 위험성을 평가하기 위해서는 연소특성 및 화염전파 메커니즘을 조사할 필요가 있다.

본 연구는, 퇴적금속 분체 층의 화염전파 메커니즘 해명을 위한 기초연구로서, 우선 공기 중에 있어서 퇴적 금속 분체 층의 화염전파 특성을 관찰하였고, 퇴적분진의 착화 후의 연소성 지표로서, 소염 거리와 화염전파속도에 대해서 상세하게 조사하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치 및 시료

Fig. 1은 퇴적 금속 분체 층의 화염전파를 관찰하기 위하여 제작한 실험장치로, 크게 나누어 연소 용기, 분위기가스 혼합장치, 시료홀더, 점화장치로 구성되어 있다. 공기 중

에서 뿐만 아니라 분위기 가스 중에서도 화염전파 특성을 조사하는 것이 가능하도록 밀폐 연소용기를 사용하였고, 연소용기 내부의 팬은 연소용기 내의 불활성 가스의 균일 혼합을 위한 교반기의 역할을 할 뿐만 아니라, 팬에 의한 기류는 시료홀더에 대항하고 있어, 강제 대류의 분위기에서의 연소특성의 관찰도 가능하나, 본 연구는 공기 중, 정지 분위기 중에서의 실험으로만 한정하였다. 퇴적 금속 분체 층에 있어서의 화염전파속도

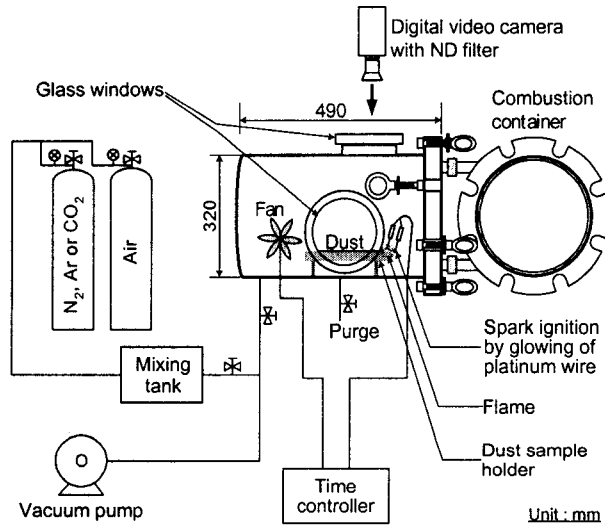


Fig.1 Experimental setup

와 동시에 화염전파한계 (연소한계)의 측정이 가능하도록, 시료홀더의 형상은 Fig.2와 같이 만들었다. 시료홀더(Fig.2)는, 폭 10 mm×길이 100 mm×깊이 (각각 1, 3, 5, 7 mm)의 스케일을 갖으며, 산화가 잘 되지 않게 하기 위해서 황동(Brass ; Cu 70%-Zn 30%)으로 만들었다. 실험에서 사용한 시료의 입도 분포는, Flow식 입자상 분석장치 (Sysmex FPIA-2100)를 사용하여 측정하였다. 그 결과, Mg, Ta, Zr, Ti의 체적 평균입경은, 각각 51.5, 30.8, 26.5, 72.7  $\mu\text{m}$ 가 얻어졌다. 또한, 금속분진과의 연소성을 비교하기 위해서, PMMA (체적평균입경 99.0  $\mu\text{m}$ )도 사용하였다.

## 2.2. 실험방법

실험은 우선 시료홀더를 전자 저울에 수평으로 올려놓고, 금속분체를 시료홀더 높이에 맞추어 균일하게 퇴적시킨다. 이 때, 시료의 무게를 각 실험마다 조사하여 체적 밀도(bulk density)가 일정하도록 하였다. 시료가 퇴적된 시료홀더를 단열재(세라믹 파이버 보드) 위에 올려 놓은 상태에서 연소용기 내에 수평으로 설치하였다. 공기 중에서의 실험은 연소용기를 개방한 상태에서 실시하였다. 그 후, 백금 용단에 의해 퇴적 금속분체에 착화시켜 연소용기의 상부로부터 표준속도(30 f/s)의 디지털 비데오카메라

(Sony DCR-VX1000)로 화염전파 모습을 관찰하고, 화염면의 미세 이동에 대해서는 고속 디지털 비디오카메라 (Kodak Imager-HG2000 ; 2000 f/s)를 이용하여 기록하고 해석을 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 화염전파 특징 및 연소대 두께

금속분체 화염은 발광이 강해 화염 선단의 식별이 곤란하기 때문에 화염 전파 모습은 감광 필터를 사용하여 관찰하였으며, 시간에 따른 화염 이동거리의 판단은 화상해석에 의해 결정하였다. 직접 화상에 있어서, 화염의 빛의 강도가 화염의 절대적인 값이 아니므로 상대적인 값으로 취급하여 빛의 강도의 기울기에 있는 역치(threshold level)지정법을 이용하여 화염 이동면을 결정하였다. Fig. 1은, 시료 두께 3 mm에 있어서 시간 경과에 따른 화염 선단의 이동으로 소멸될 때까지의 화염위치를 조사한 것이다. 연소면의 이동은 부분적으로 가속과 감속이 관찰되지만, 전체적으로 보면 거의 일정한 속도로 이동하는 것을 알 수 있다. 화염 면의 형상은 화염전파 방향의 상부 및 측면으로부터

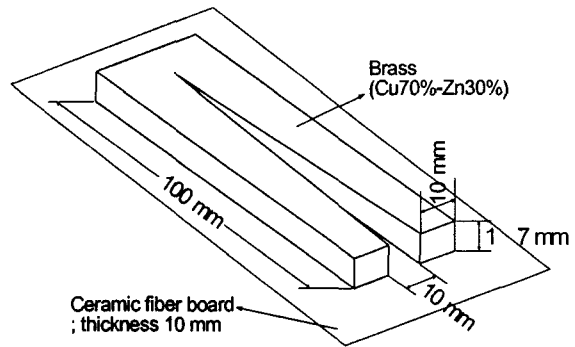


Fig.2 Dust sample holder

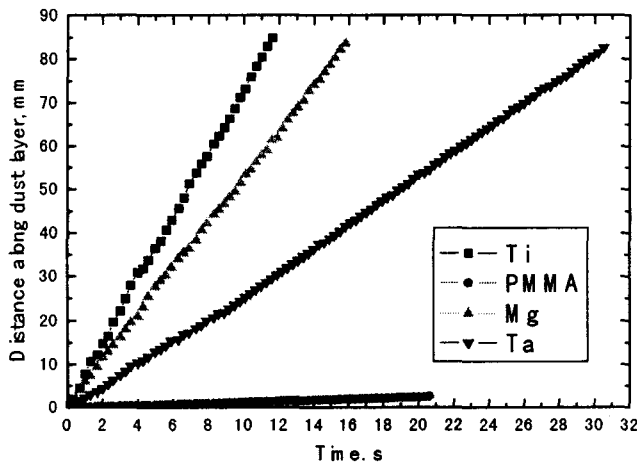


Fig.3 Location of flame over dust layer with time.

관찰하였다. 퇴적된 Mg, Ta, Zr분진층의 연소하는 화염 선단으로부터 전방으로의 화염 전파는 매우 불규칙하고 돌발적으로 일어나면서 진행되므로 화염면이 일정하지 않다. 이것은 화염면 근방의 연소입자가 화염이동 방향의 전방으로 불규칙하게 날아 가기 때문에 일어나는 현상인 것을 알았다. Mg은 밝은 휘염(Luminous flame)을 기상 중에

형성하면서 연소하는데, 연소 후는 산화마그네슘으로 추정되는 백색의 반응생성물이 생긴다. 이에 반해, Ti의 경우는 기상 중에 화염은 관찰되지 않으며 분체 표면을 연소대가 전파하는데, Ti의 평균 화염전파속도는 7.1 mm/s로 PMMA (0.12 mm/s)보다 매우 큰 것을 알 수 있다 (Fig.3). Ti시료의 두께에 의한 화염전파속도의 변화는 매우 작으며 시료의 두께에 의한 영향은 적다고 판단된다. 퇴적 유기물 분진의 smoldering연소에 의한 화염전파속도는 0.01 ~ 0.1 mm/s로 알려져 있는데<sup>2)-5)</sup>, 이에 비한다면 금속 분체 층의 화염전파 속도는 매우 크다고 할 수 있다. 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. 각 시료의 산화물 층의 평균 두께와 평균 화염전파속도를 Table 1에 나타냈는데, Ti의 산화물 층의 두께가 0.4 mm로 가장

Table 1 Thickness of oxide in 3 mm dust layer sample.

Dust sample	Thickness of oxide, mm	Spread rate, mm/s
Mg	0.9	5.06
Ti	0.4	7.1
Zr	1.0	1.73
Ta	0.8	2.52

작으며, 대부분은 1 mm 내외이다. Ti의 화염전파속도가 시료 두께에 의존하지 않는 것은, 금속분체 표면 근처만이 가열되어 연소하면서 전파하기 때문이라고 판단된다. 금속의 연소가 기체상태에서 반응하는가, 고체표면에서 반응하는가는 산화물의 비등점과 금속원소의 비등점의 차이에 의해 결정된다<sup>6)</sup>. 산화물의 비등점이 금속원소의 비등점보다 높은 Al, Mg, Zn등은 기체 상태에서 연소하며, Ti, Ta, Fe, C, Boron 등은 고체표

면에서 표면 연소한다. Fig.4는 열전도가 매우 작은 세라믹 파이버 보드 및 황동체의 시료홀더 (두께 3mm)에서의 화염전파속도를 비교한 것이다. Ti, Mg의 화염전파속도는 황동체의 시료홀더보다 세라믹 파이버 보드제 시료홀더에서 크게 나타난 것으로부터, 열손실에 의한 영향을 쉽게 알 수 있다. 그러나, 화염전파속도 증가비율을 보면, Ti보

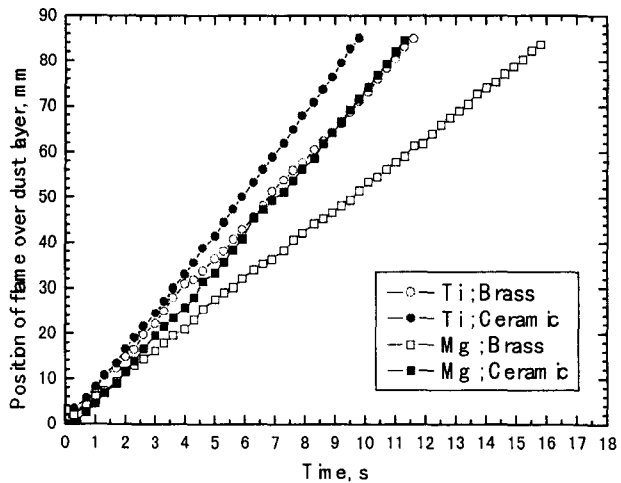


Fig.4 Influence of material property of dust holder on spread rate

다 Mg가 더 크다. 이것은 표면 연소하는 Ti에 비해, 기상 연소하는 Mg에 있어서 고체 상 내의 열전도가 현상을 지배하는 영향이 더 크다고 추정된다.

### 3.2 화염전파속도 및 소염거리

가연성 물질의 연소위험성 평가에 있어서, 착화 후의 연소지표로서는 화염전파속도와 소염거리가 있다. 가연성 가스의 경우, 화염전파속도 및 소염거리에 대한 데이터는 매우 많으며, 그 결과로부터 화염전파속도는 소염거리의 역수에 비례하는 사실이 잘 알려져 있다. 이에 반해, 가연성 분체 및 퇴적 금속의 경우는 데이터도 매우 적으며 측정 방법, 조건이 달라 정량적으로 비교하기도 곤란하다. 본 연구에서는 퇴적금속 분체에서의 화염전파속도와 소염거리의 동시 측정을 시도하였다. 이러한 퇴적금속 분체에 있어서의 소염거리는 기계 및 장치의 간극에서의 퇴적 금속분체의 화염전파 위험성을 고려한다면, 안전 상 중요하다. Table 2는 각 퇴적금속 분체의 화염전파에 있어서의 평균

Table 2 Quenching distance in flame spread over dust layer.

Thickness of dust layer [mm]	Mg, mm	Ti, mm	Zr, mm	Ta, mm	PMMA, mm
1	0.9	0.4	0.9	1.4	No spread
3	1.0	0.4	0.8	1.6	7
5	1.1	0.5	1.0	1.7	8
7	1.2	0.5	1.0	1.6	8

소염거리를 정리해 놓은 것이다. 비교하기 위해서 측정한 PMMA 분체의 경우, 소염거리는 7 ~ 8 mm로 퇴적금속 분체에 비해 매우 큰 것을 알 수 있다. 퇴적금속 분체의 소염거리는 0.4 ~ 1.7 mm로, 가연성 가스 중에서 위험성이 매우 높은 H<sub>2</sub>의 소염거리 (0.1 mm)와 비교해 보아도, 연소 위험성이 매우 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 공기 중, 대기압의 퇴적금속 분체 (두께 3mm)에 있어서 화염전파속도와 소염거리의 관계를 조사한 예이다. 상관 정도가 다소 작은 Mg, Zr을 포함하더라도 전체적인 상관은 매우 높게 나타나고 있다. 이러한 결과로부터, 본 연구에서 조사한 퇴적금속 분체에 있어서는, 화염전파속도가 증가하면 소염거리가 작아진다고 할 수 있으며, 양자간의 상대적인 위험성의 예측이 가능하다고 생각된다.

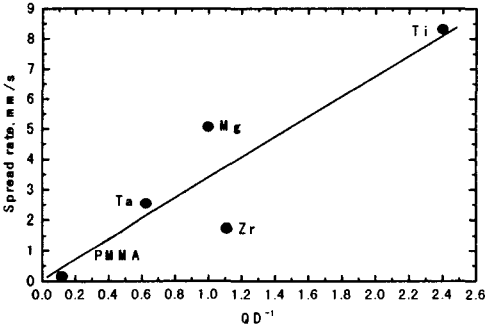


Fig.5 Relation with spread rate and quenching distance.

#### 4. 결 론

퇴적 금속 분체 층의 화염전파 특성을 관찰하고, 소염 거리와 화염전파속도에 관한 연소성 지표를 상세하게 조사한 결과 이하의 결론을 얻었다.

1. 퇴적금속 분체 층의 화염전파속도(1.73 ~ 7.1 mm/s)는 시료 두께에 관계없이 일정한 속도로 전파하며, 퇴적 유기물분진의 화염전파속도(0.01 ~ 0.1 mm/s)에 비해 매우 크다.
2. 퇴적금속 분체 층의 소염 거리는 0.4 ~ 1.7 mm로 PMMA고분자 분체층의 경우 (7 ~ 8 mm)보다 매우 작은 것을 알았다.
3. 퇴적금속 분체 층에 있어서, 소염 거리와 화염전파속도는 높은 상관성이 나타나, 이들 연소성 지표에 있어서 상대적인 위험성의 예측이 가능하다고 판단된다.

퇴적금속분진의 화염전파 및 소염거리에 미치는 분위기가스의 영향에 대해서는, 본 연구에 이어서 조사할 예정이다.

#### 참고문헌

1. Eckhoff, R.K., "Dust explosion in the process industries;2nd ed.", BH (1997).
2. El-Sayed, S.A. and Abel-latif, A.M., "Smoldering combustion of dust layer on hot surface", J. Loss Prev. in ProcessIndus., 13, pp.509-517 (2000).
3. Bakhman, N. N., "Smoldering wave propagation mechanism ; Critical condition", Combust., Explosion, and Shock Waves, 29, pp.14-17 (1993).
4. Bakhman, N. N., "Smoldering wave propagation mechanism ; Smoldering velocity and temperaturein smoldering zone", Combust., Explosion, and Shock Waves, 29, pp.18-24 (1993).
5. Ohlemiller, T.J., "Smoldering combustion propagation through a permeable horizontal fuellayer", Combust. Flame, 81, pp.341-353 (1990).
6. Glassman, I., "Combustion - 3rd Edition", Academic Press, San Diego (1996).