

## 입경 변화에 따른 퇴적금속 분체층의 화염전파

한우섭<sup>†</sup> · 최이락 · 한인수 · 이정석

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 화학물질안전보건센터  
305-380 대전광역시 유성구 문지동 104-8  
(2010년 7월 19일 접수, 2010년 8월 30일 채택)

### Flame Spreading Over Metal Dust Deposits With Particles Size

Ou Sup Han<sup>†</sup>, Yi Rac Choi, In Soo Han and Jung Suk Lee

Chemical Hazard Research Team, Center for Chemical Safety and Health, Occupational Safety & Health Research Institute (KOSHA)  
104-8 Munji-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea  
(Received 19 July 2010; accepted 30 August 2010)

#### 요 약

퇴적금속분체의 입경 변화에 따른 화염전파 거동과 발화특성을 자체 제작한 실험장치와 열중량분석 시험장치를 활용하여 조사하였다. 이를 위하여 평균입경이 다른 Mg, Ti를 포함한 Zr, Ta, Mg-Al(90:10 wt%)의 금속분진과 PMMA 시료를 사용하였다. 그 결과, 금속 퇴적층의 두께가 5 mm 이상의 경우에는 화염전파속도의 퇴적층 두께에 대한 의존성이 나타나지 않았다. 평균 입경이 작을수록 Ti는 화염전파속도가 증가하지만 Mg의 경우에는 화염전파속도가 감소하였다. 평균입경 51  $\mu\text{m}$ 에 있어서 Mg퇴적분체는 Mg-Al(90:10%wt)합금 퇴적분체에 비하여 화염전파속도가 약 50%가 감소하였다. 본 연구에서 조사한 금속분체 산화물층 두께는 화염전파속도와 반비례하는 경향을 보였으며 입경 변화에 따른 영향은 나타나지 않았다. 또한 Ti와 Mg의 열중량 분석시험 결과, Mg는 550  $^{\circ}\text{C}$ , Ta는 578  $^{\circ}\text{C}$ 에서 발화에 의한 연소로 판단되는 중량 증가가 관찰되었다.

**Abstract** – A study has been conducted experimentally to investigate behavior of ignition and flame spread over metal dust deposits with particle size using by a developed apparatus and thermogravimetric analysis(TGA). Zr, Ta and Mg-Al(90:10 wt%) alloy metal powders including Mg and Ti with different particle size were used. Also we used PMMA(Polymethylmethacrylate) powder to compare the combustion properties to those of metal powders. When dust layers were more than 5 mm in thickness, the dependency of deposit depth on flame spread rate over dust layer was not shown. With decreasing mean particle diameter, flame spread rate over Ti dust layer decreased, while the spread rate over Mg dust layer increased. For mean diameter of 51  $\mu\text{m}$ , fire spread rate over pure Mg dust layer decreased to about 50 percent in Mg-Al(90:10 wt%) dust layer. The oxide thickness of metal dust used in this study tended to be inversely proportional with the spread rate, and it was quite small for influence with particle size. From the results of TGA for Ti and Mg, weight increasing curves(550 for Mg, 578 for Ta) were observed in the oxidation process, and they seems to be caused by ignition of upper dust layer.

Key words: Metal Powders, Dust Deposit, Flame Spread, Particle Size, Spread Rate

#### 1. 서 론

국내 산업공정에서는 여러 가지 신소재의 개발과 응용, 제조공정이 다양화되고 있는 가운데, 지금까지 경험하지 못하였던 화재폭발 사고가 발생하고 있다. 이러한 재해 원인물질 중에서 알루미늄, 마그네슘 등과 같은 금속분체는 취급 방법과 관련하여 폭발하기 쉬운 물질로서 잘 알려져 있다. 이러한 금속분체는 유기물, 농산물, 고분자 분체에 비하여 단위 체적당 발생하는 연소열과 단위 시간 당의 연소속도가 매우 크기 때문에 화재나 폭발이 발생하면 큰 피해로 이

어질 가능성이 높다. 산업현장에서의 재해 발생률 측면에서 본다면 금속분체는 비중이 비교적 크고 공기 중에 분산되어 있는 경우보다 작업장이나 기계설비, 지면 등에 퇴적되어 있을 가능성이 높기 때문에 퇴적 상태에서의 연소위험성을 파악하는 것이 중요하다[1,2]. 이러한 금속 분체에 의한 화재폭발은 금속재료의 사용량 증가와 산업공정의 고도화 등으로 인하여 금속분체의 사고발생 위험성은 증가될 것으로 예상된다. 금속분체는 공기 중에 분산되더라도 자중에 의해 즉시 침강하여 퇴적층으로 존재하는 경우가 많다. 따라서 퇴적분체의 착화에 따른 연소확대를 화염전파 거동이라는 측면에서 본다면 일반적인 분진폭발과는 차이가 있다. 퇴적금속 분체층의 각 입자에 대한 산소 공급과 단위 시간 당 반응면적은 부유 상태의 분

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: hanpaule@kosha.net

진에 비하여 매우 작다. 그러므로 퇴적분체 층이 착화되어 화염이 이동되는 전파속도는 부유 입자의 연소속도보다 감소하기 때문에 분진폭발 시의 화염전파에 비하여 매우 작으며 부유 분진폭발에서 나타나는 빠른 화염전파나 급격한 압력발생이 없는 것이 일반적이다. 동일한 체적의 분체층 또는 부유 분진이 존재하는 경우에는 퇴적된 분체층에서의 분체량이 훨씬 많다. 그러므로 분체층의 경우가 연소 시간은 길지만 완전연소를 가정한 총발열량에서는 분진운보다 매우 크기 때문에 화재폭발 사고로 이어질 가능성이 높다. 이와 같은 특성으로 인하여 퇴적금속분체의 위험성평가는 부유 분진의 위험성평가와 구별할 필요가 있다.

퇴적금속의 연소성에 대하여 Coffin[3]은 Mg퇴적 분체에 수증기를 첨가하는 경우에 연소속도가 증가하여 화염전파속도가 증가한다는 결과를 얻었다. Harrison, Hirano 및 Clark 등[4-8]은 괴(Lump) 상태의 금속을 대상으로 산소 분위기 및 압력 변화에 따른 연소특성을 조사하였다. Chernenko 등[9,10]은 Ti퇴적분진의 화염전파에 미치는 Ti순도, 입자경, 퇴적층의 영향을 실험적으로 조사하였다. Molodetsky[11] 및 Dreizin[12]은 Ti 단일 입자가 연소경과에 따라 용융된 Ti의 상변화에 의하여 발광이 급격히 변화한다는 사실을 제시하였다. Siwek 등[13]은 퇴적분체의 화염전파 거동을 정성적으로 구분하여 6단계로 분류하였다. 퇴적금속분체의 연구는 산소 분위기에서의 연소특성이나 연소합성에 관한 것이 대부분이며 퇴적금속분체의 연소위험성을 정량적으로 평가하기 위한 지식은 충분하지 않다.

본 연구에서는 평균 입경 크기에 따른 퇴적금속 분체 층의 화염전파 특성을 조사하여 연소 위험성을 파악하고 그 결과를 바탕으로 퇴적 금속분체에 의한 재해예방에 활용하기 위한 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위하여 효율적 실험이 가능하도록 퇴적분진 연소성 평가용 실험 장치를 제작하여 퇴적금속의 위험성 평가에 활용하였으며, 또한 열중량분석(TG) 실험을 통하여 퇴적금속분체의 발화특성도 검토하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험 장치 및 방법

퇴적금속 분체의 입경에 따른 화염전파특성을 조사하기 위하여 사용한 실험장치를 Fig. 1에 나타냈다. Fig. 1의 좌측 그림은 개폐 가능한 밀폐식 연소용기로서 연소용기 상부에는 석영유리의 관측창이 있어 연소거동의 비디오 기록이 가능하도록 되어 있다. 본 연구에서는 상온, 대기압 상태의 공기 중에 있어서 정지 기류 분위기 상태를 실험조건으로 한정하였다. Fig. 1의 연소용기 내부 바닥 중심에 설치되어 있는 시료 지지대는 폭 10 mm × 길이 100 mm의 스케일을 가지며 퇴적층의 폭은 10 mm, 길이 100 mm, 두께는 5 mm로 하였다. 시료 지지대의 재질은 연소 시 고온의 화염으로 인한 산화 방지를 위해서 재질을 황동(Brass; Cu 70%+Zn 30%)으로 하였다. 실험은 우선 시료 지지대를 전자 저울 위에 수평으로 올려놓고 금속분체를 시료홀더 높이에 맞추어 균일하게 퇴적시킨다. 이 때, 시료의 무게를 각 실험마다 측정하고 체적 밀도(Bulk density)를 조사하여 공극률이 일정하도록 하여 동일한 퇴적조건이 되도록 하였다. 실험은 분위기 온도 22~23 °C, 습도 55~60%의 조건에서 실험을 실시하였다. 분체를 퇴적시킨 시료 지지대를 초고온 단열재(Ceramic fiber board, 형체 변형온도 1,800 °C) 위에 올려 놓은 상태에서 연소용기 내에 수평으로 설치하였다. 그 후 텅스텐 전극의 가열에 의해 퇴

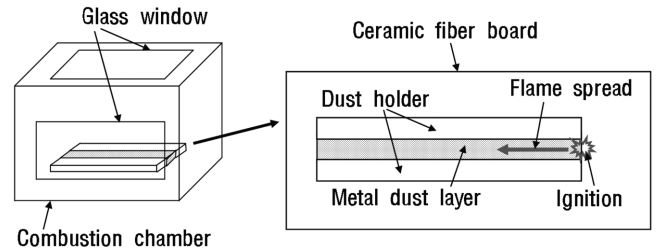


Fig. 1. Experimental apparatus.

적 금속분체 표면에 착화시켜 연소 용기의 상부에 설치된 표준속도(30 f/s)의 디지털비디오카메라로 화염전파 모습을 기록하였다. 또한 금속퇴적층의 발화특성을 검토하기 위하여 METTLER TOLEDO(제품명: TGA/DSC1)의 열중량분석기(TGA; Thermogravimetric analysis)를 사용하여 승온속도에 따른 열적 발화거동을 조사하였다.

### 2-2. 시료

본 연구에서 사용한 금속 분진은 모두 순도 99.0% 이상의 것으로, 시료의 입도 분포는 습식 입도분석기(Beckman Coulter LSI 3320)를 사용하여 측정하였다. 금속분진 시료로서 Mg, Ti, Zr, Ta, Mg-Al [90:10 wt%](이후 Mg-Al합금으로 표기)의 5종류를 사용하였다. Mg의 경우 평균입경 51, 75, 150  $\mu\text{m}$ 의 서로 다른 3종류를, 그리고 Ti는 평균입경 34, 75, 150  $\mu\text{m}$ 의 3종류를 각각 사용하였다. 그 밖에 참고용 시료로서 사용한 Zr, Ta 및 Mg-Al 합금의 평균입경은 각각 27, 31, 51  $\mu\text{m}$ 이다. 또한 금속 분진과의 연소성을 비교하기 위해서 사용한 대표적 유기물인 PMMA(Polymethyl methacrylate)의 평균입경은 99.0  $\mu\text{m}$ 로서 금속분체와 동일 조건에서 실험을 실시하였다.

### 2-3. 시료의 충전방법

퇴적분진의 연소 특성치의 평가에 영향을 미치는 인자로는 분진 밀도, 입도 분포, 습도, 온도 등이 있다. 분체층의 열전도에 관여하는 분체 조각을 정량적으로 취급하기 위해서는 퇴적층을 구성하는 입자의 밀도 조건을 균일하게 할 필요가 있다. 이를 위해 각 입자간의 공극의 부피를 포함한 공간을 분체의 충전 체적으로 하여 전체 중량과의 비로서 표현하는 겉보기 밀도(Bulk density)와 입자 밀도(Particle density)를 사용하여 퇴적조건에서의 공극율( $\epsilon$ )을 고려하였다. 겉보기 밀도를  $\rho_B$ , 입자밀도를  $\rho_P$ 라고 할 경우에 공극율( $\epsilon$ )은  $\epsilon = 1 - (\rho_B / \rho_P)$ 와 같이 표현된다. 여기서, 겉보기 밀도  $\rho_B$ 는 충전분체질량과 충전분체체적의 비로 표현된다. 실험 실시 전에는 퇴적분체의 무게를 측정하여 겉보기 밀도( $\rho_B$ )가 일정하게 되도록 하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3-1. 입경과 화염전파속도의 관계

금속 퇴적분체 상부 표면이 연소하여 미연소 영역으로 화염이 전파하는 경우 Mg의 경우에는 화염이 관찰되지만 Ti 및 Ta에서는 화염이 관찰되지 않았다. Mg, Ti 및 Ta 금속퇴적분체의 연소 시에는 산화반응으로 인한 강한 발광이 나타났는데 화염의 발광은 화염의 선단 부분이 가장 강하며 화염이 지나간 화염 후방 지역으로 갈수록 점차적으로 약해졌다. 금속 퇴적분체 상부 표면의 착화에 따른

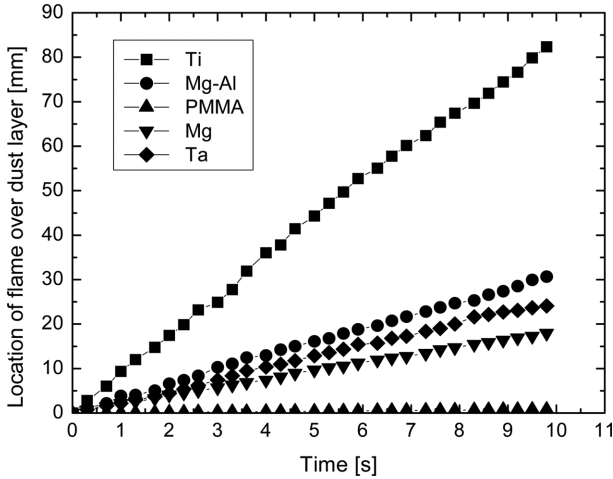


Fig. 2. The location of leading luminous zone of flame spread over metal dust deposit.

화염전파속도에 영향을 주는 인자로서 입자의 입경 이외에도 퇴적층의 두께가 있다. 본 연구에서는 퇴적층의 두께에 따라 화염전파속도가 증가하였는데 5 mm 이상의 퇴적층에서는 화염전파속도에 미치는 영향이 없음을 확인하여 퇴적층 두께를 5 mm로 하여 실험을 실시하였다. Chernenko 등[9]은 Ti 금속분체 퇴적층의 두께가 4 mm 이상에서는 화염전파속도에 영향을 주지 않는다는 결과를 보고하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 금속 퇴적분체 상의 연소대 선단의 위치를 시간 경과와 함께 조사한 예이다. 연소대 선단은 다소의 가속과 감속이 관찰되지만 전체적으로 보면 일정한 속도로 이동하였다. 평균 화염전파속도는 Ti가 가장 크며 Mg-Al, Ta, Mg 순이었으며, 유기물인 PMMA는 금속분에 비하여 매우 작았다. 금속 퇴적분체의 평균 입경이 화염전파 특성에 어떠한 영향을 주는가를 검토하기 위해서, 서로 다른 입경(34, 75, 150  $\mu\text{m}$ )의 Ti를 사용하여 화염전파에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. Ti 퇴적분체의 입경에 따른 화염의 이동이 어떻게 변하는지를 조사한 결과의 일례를 Fig. 3에 제시하였다. Ti의 입경 변화에 따른 화염전파속도를 보면 입경이 작을수록 크게 나타나고 있지만, Ti 입경의 증가에 따라 화염전파속도는 급격히 감소하는 경향을 보였다. Chernenko[10] 등은 Ti 퇴적분의 연소 시에 진동적인 화염전파 거동을 지적하고 있는데,

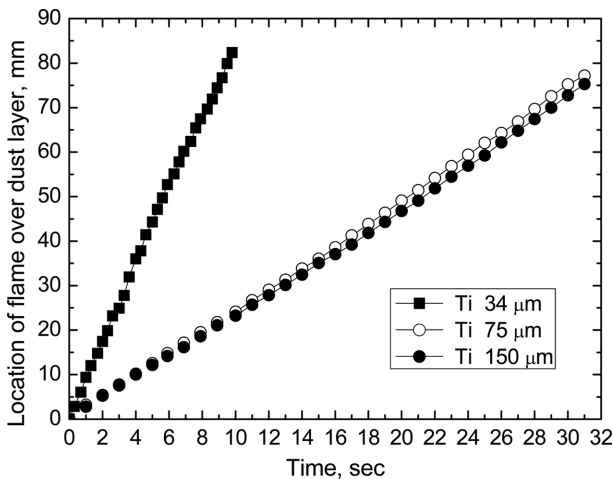


Fig. 3. The influence of particle size on flame spread over titanium dust deposit.

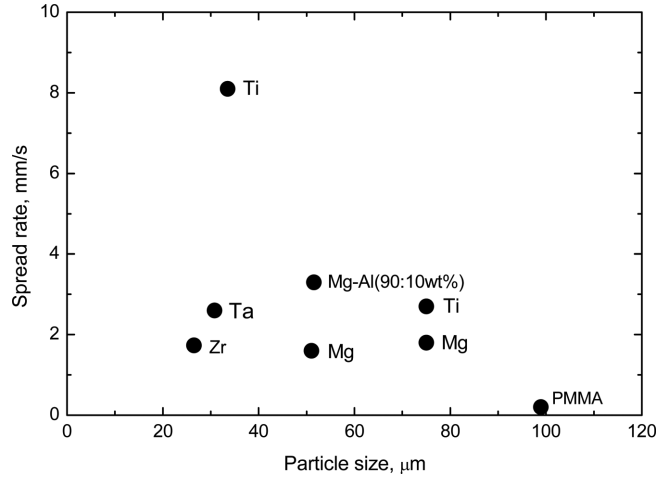


Fig. 4. Spread rate over metal and PMMA dust layer with particle size.

본 연구에서는 Ti의 화염전파 시에 화염의 발광으로 인한 회염의 강약이 불규칙적으로 발생은 하고 있지만 진동적인 화염전파 거동은 확인하지 못하였다. 일반적으로 부유 분진의 경우에는 입경이 작을수록 공기 중 산소와 접촉하는 퇴적분체 표면적이 증가한다. 그러므로 입경이 감소할수록 산화반응성은 증가하므로 화염전파속도가 증가하는데, 퇴적분체의 경우에도 그대로 적용되는지를 조사할 필요가 있다. Fig. 4는 금속 및 PMMA분체의 입경에 따른 화염전파속도를 조사한 결과이다. Ti는 입경이 작을수록 화염전파속도가 증가하지만, Mg는 입경이 작아질수록 화염전파속도가 다소 감소하는 경향을 나타냈다. 입경의 차이를 고려하더라도 Mg에 비하여 Ti는 화염전파속도가 매우 크기 나타나고 있는데 높은 산화반응성을 가지고 있는 것으로 판단되었다. Zr 및 Ta는 본 연구에서 사용된 시료 중에서 가장 작은 입경에도 불구하고 화염전파속도는 가장 작게 나타나고 있어 입경의 크기만으로 화염전파속도를 지배하는 요소가 아님을 알 수 있었다. 평균입경이 51  $\mu\text{m}$ 인 Mg는 동일 입경의 Mg-Al 합금 퇴적분체에 비하여 화염전파속도가 감소하였다. 이것은 Al의 열전도율이 Mg보다 크기 때문에 Mg-Al합금 퇴적분체 연소 시에 발생하는 고온의 산화 반응열이 미연소 분체층으로 열이동하는 과정에서 Mg보다 Mg-Al합금에서 증가하여 결과적으로 Mg-Al합금 퇴적분체에서의 화염전파가 크게 나타나는 것으로 추정되었다. 본 연구에서 확인한 Al퇴적분체의 연소실험에 따르면 착화에 의한 발화는 일어나지만 자기 전파성을 가지고 화염이 전파되지 않는다는 것을 실험적으로 확인되었다. 이러한 사실은 Al이 발화하기 위해서는 공기 중에서 금속입자 표면에 형성된 산화층 막의 파괴가 필요하지만, 그 밖에도 Al의 열전도율이 크기 때문에 퇴적층으로의 열손실이 크게 작용한다는 것을 의미한다. Al에 Mg가 첨가되면 착화 지연(Ignition delay)이 감소하여 연소성이 증가하는 등의 발화특성이 변하며, 또한 Mg, Al의 녹는점이 각각 650, 660  $^{\circ}\text{C}$ 이나 조성이 각각 50%인 Mg-Al 합금의 녹는점이 470  $^{\circ}\text{C}$  라는 연구결과가 보고되고 있다[14]. 그러므로 이러한 사실로부터 Mg-Al합금 퇴적분체는 Mg에 비하여 낮은 온도에서 용융이 일어나고 열전도율이 증가하기 때문에 화염전파속도가 Mg의 경우보다 빠르게 나타난 것으로 추정되었다. 퇴적금속 분체와의 연소특성을 비교하기 위해서 사용한 유기물인 PMMA의 화염전파속도는 0.1 mm/s로 금속에 비하여 매우 작은 것을 알 수 있었다. 고분자, 유기물 등의 훈소(Smoldering)

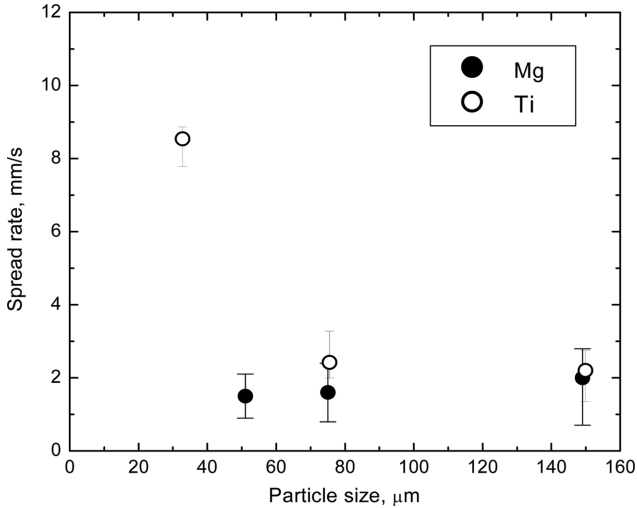


Fig. 5. Spread rate over Mg and Ti dust layer with the variation of particle size.

에 의한 화염전파속도는 0.01~0.1 mm/s로[15-17], 본 연구에서의 PMMA의 화염전파속도(0.1 mm/s)는 이와 근사한 값을 나타냈다. Fig. 4에서 입경 75 μm인 Ti의 화염전파속도는 약 2.4 mm/s가 얻어졌다. Chernenko 등[10]은 50 μm에서 2.72 mm/s의 결과를 얻고 있는데, 평균입경이 서로 다르므로 직접적인 비교는 어렵지만 입경의 영향을 고려하더라도 본 연구에서 얻어진 화염전파속도의 측정값과 유사한 경향을 보였다. Fig. 5는 Mg 및 Ti의 입경 변화에 따른 화염전파속도의 평균값을 나타내고 있다. Ti는 입경이 작을수록 화염전파속도가 증가하여 입경 34 μm에서 8.3 mm/s로 증가하였다. 반면에 Mg의 경우에는 입경 34 μm에서 1.6 mm/s이지만 150 μm에서 2.0 mm/s로 증가하면서 다소 측정값의 편차가 발생하지만 전체적인 거동은 입경이 커질수록 화염전파속도가 증가하는 경향을 보여주었다. 분체층의 연소로부터 발생하는 산화반응열의 열전도는 주어진 화염 온도에 있어서 입자의 공극율, 복사, 입경에 의해 영향을 받는다. 그러나 실제로는 금속 퇴적층의 입자에는 평균입경보다 작은 입자도 많이 포함되어 있으므로 평균입경이 달라도 공극률의 변화가 크지 않기 때문에 열전도에 미치는 입자의 영향은 작을 것으로 추정된다. 또한 Mg의 경우가 Ti보다 입경의 영향이 작은 것은 Mg의 연소형식에 기인하는 것으로 판단된다. 즉 Mg는 화염이 공기 중에 형성되는 기상 연소를 하기 때문에 미연입자를 가열시키기 위한 화염의 열전도보다도 대류에 의해 입자 표면으로의 산소의 확산이 연소성에 영향을 보다 주기 때문인 것으로 사료된다.

### 3-2. 산화층과 화염전파속도

금속퇴적층의 일부가 착화되어 화염이 전파하면 분체층 표면을 따라 열이동이 동반되고 이어서 층 내부로 전열이 진행된다. 또한 퇴적층 표면의 연소대 전방에 위치한 예열대 영역은 산소가 확산, 흡착하여 산화 발열반응이 일어나게 된다. 본 연구에서는 화염이 분체층을 통과한 후에 연소생성물의 중앙부를 중심으로 하여 수직 단면으로 절단하면 연소로 인하여 발생한 산화물 층과 미연소 퇴적층이 연결되어 경계를 이루고 있는 것이 관찰되었다. 이와 같은 산화물 층은 금속 퇴적분체 표면이 연소하는 경우 분체층 표면 근방이 가열되면서 화염이 전파하게 되는데 시간과 함께 분체 층 표면으로부터 내부로 반응이 진행하여 생성된다. 산화물 층의 두께는 금속

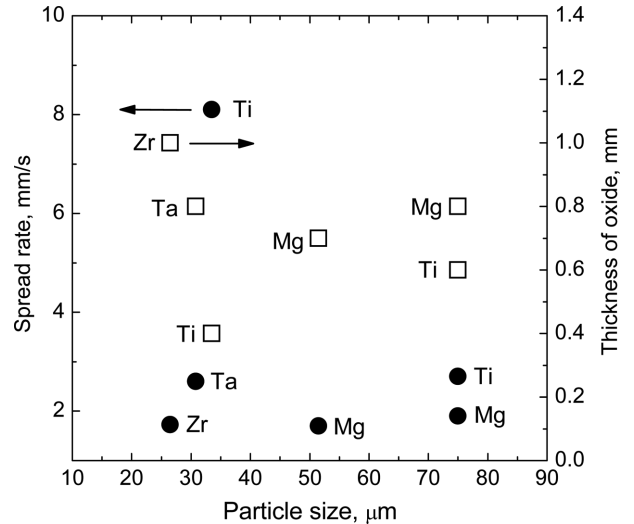


Fig. 6. Thickness of oxide after flame spreading over dust deposits.

분체의 종류, 분체층 두께 등의 조건에 따라 달라진다. 입경 변화에 따른 화염전파속도와 산화물층 두께와의 관계를 Fig. 6에 제시하였다. 산화물이 증가함에 따라 산화층을 통과한 산소의 이동이 감소하여 연소반응이 지속되지 못하는 경우에 산화물층 두께가 결정된다. 입경이 감소하면 Ti의 경우에는 화염전파속도가 급격히 증가하지만 Mg의 경우에는 다소 감소하는 경향을 보였다. 산화물층 두께는 화염전파속도가 빠른 금속 분체층일수록 작게 나타나고 있다. 그러나 입경 변화에 따른 산화물층 두께에 미치는 영향은 상관성이 보이지 않았다. 화염전파속도는 고온의 산화반응으로 발생한 발열에 따라 연소대에서 미연소대 측으로 이동하는 열유속의 크기와 분체층 내의 열이동에 의하여 결정되는 것이 일반적이다. 그러므로 화염전파속도가 작을수록 열전달에 유리하기 때문에 산화물층 형성이 증가하는 것으로 생각된다. 또한 Ti의 경우 연소하는 과정에서 화염 전파 시에 화염면의 연소입자가 화염 전방의 미연소 영역으로 튀어 날아가는 현상이 관찰되었다. 이러한 현상이 연소입자에 의한 예열대의 가열로 이어진다면 화염의 이동에 효과적으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3-3. 퇴적분진의 발화특성

Mg 및 Ta 금속분체의 발화온도 특성을 조사하기 위하여 공기 분위기에서 10 °C/min의 승온속도로 열중량분석을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 7 및 8에 나타냈다. Fig. 7에 제시된 Mg의 열중량분석 결과를 보면 급격한 2단계의 S자 곡선을 나타내며 중량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 중량증가 개시온도는 480 °C에서 시작하여 550 °C에서 급격하게 중량이 증가하여 전체 증가분의 46%에 달하며, 900~950 °C 범위에서 중량 증가 포화값에 도달하였다. 600 °C 부근에서부터 중량증가 포화값까지 17%의 질량증가를 보이고 있는데, Mg의 녹는점인 650 °C[2] 부근에서 산화되지 않고 남은 Mg가 용융과 동시에 산화되면서 중량증가 속도가 둔화된 것으로 추정되었다. Fig. 7에 제시한 바와 같이 Mg의 중량증가는 480 °C에서부터 증가하고 있는데 승온 과정 중에 Mg 퇴적층 표면의 열분해에 따른 발화(Ignition)가 550 °C 부근에서 일어나 급격한 산화물(MgO)을 형성시키면서 중량증가로 이어진 것으로 생각된다. 이러한 Mg 퇴적층 표면에서의 기상연소로 고온의 연소열이 Mg퇴적층 내부로

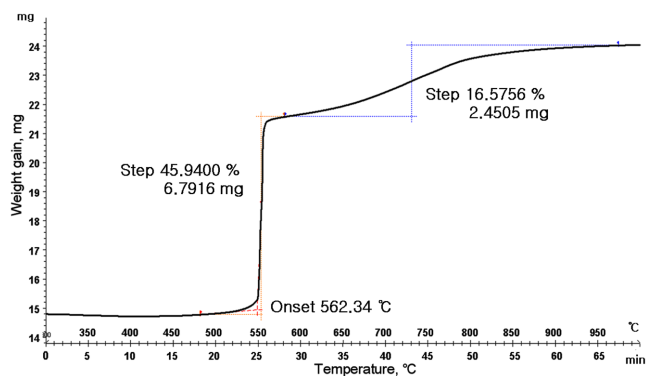


Fig. 7. Weight loss of Mg dust particles (150 μm) in heating rate of 10 °C/min.

전열되면서 570 °C 부터의 다소 완만한 산화반응이 950 °C 까지 진행되었다. 퇴적 Mg의 발화온도는 450 °C 이상으로 알려져 있는데 [2], Fig. 7의 중량증가 개시온도가 480 °C 라는 점과 승온 속도에 의해 중량 증가 곡선은 다소 달라지지만 중량 개시온도는 거의 일정한 온도에서 시작되는 점을 고려하면 본 연구 결과는 타당한 값을 가지는 것으로 판단된다. 또한 시료층 표면에서부터 산화반응이 진행하여 퇴적층 내부로 반응이 진행하기 때문에 승온속도에 따라 시료층 두께 방향에 따른 반응단계가 달라질 가능성도 있지만, 승온속도가 증가하면 퇴적층 표면부분에서 발화하고 700~900 °C 이상의 고온에서 퇴적층 하부의 연소반응이 예상된다. 반면 Ta의 경우에는 Fig. 8에 제시한 바와 같이 중량증가 개시온도는 410 °C이며 578 °C에서 급격히 발화하여 650 °C에서 중량증가 포화값에 도달하며 1단계의 중량 증가로서 연소를 종료하였다. 공기 중에 분산되어 있는 Ta분진의 발화온도는 630 °C로 공기 중에서의 최대 단열 화염온도는 3,000 °C이며 녹는점은 3,030 °C로 보고되고 있다[18-19]. 일반적으로 분진의 발화온도는 부유 상태에서보다 퇴적층에서 낮게 나타나고 있는 점을 고려하면 Ta퇴적층의 발화온도는 630 °C 보다 낮을 것으로 추정되며, 본 연구에서 얻어진 578 °C는 Ta퇴적층의 발화온도에 근사할 것으로 사료된다. Ta는 발화 후의 연소생성물(Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)이 발생하는 과정에서 연소열(1,023 kJ/mol)이 매우 큰 것으로 알려져 있으며, 또한 Ta퇴적층은 착화에 의해 일단 발화가 시작되면 전부 연소할 때까지 화염전파가 지속되는 높은 위험성을 가지고 있는 것이 본 연구에서 조사되었다. 금속의 표면연소는 산소의 대류 또는 확산에 크게 의존하는 것으로 보고되고 있는데[19],

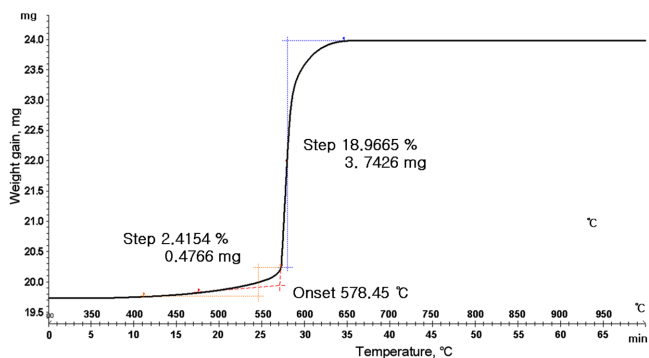


Fig. 8. Weight loss of Ta dust particles (34 μm) in heating rate of 10 °C/min.

Ta의 녹는점(3,030 °C)이 매우 높아 표면연소에 의해 화염이 전파하며 산화물 층에 산소가 확산하여 연소대가 전파하는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 Ta의 입경변화에 따른 화염전파 거동을 상세히 조사하지는 못하였지만, 표면연소에 있어서 입경이 변화하는 경우 표면연소에 유효한 입자 표면적이 관여하기 때문에 화염전파에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 퇴적금속분체의 연소위험성 파악을 통하여 관련 공정이나 사업장에서의 화재폭발 재해예방에 활용하기 위하여 입경 변화에 따른 퇴적금속분체의 화염전파 및 발화특성을 실험적으로 조사하였다. 이를 위하여 퇴적분진 연소성 평가를 위한 실험장치를 자체 제작하였고 열중량분석(TG) 시험장치를 활용하였다. 평균입경이 서로 다른 Mg, Ti와 Zr, Ta, Mg-Al(90:10 wt%) 합금의 모두 5종류의 금속분진과 비교 평가를 위한 PMMA 시료를 사용하여 퇴적분체 표면 상부를 전파하는 화염의 거동과 발화온도 특성에 대하여 검토하였으며 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 금속 퇴적층의 두께가 5 mm 이상의 경우에는 화염전파속도의 퇴적층 두께에 대한 의존성이 나타나지 않았다.
- (2) 평균 입경이 작을수록 Ti는 화염전파속도가 증가하지만, Mg의 경우에는 화염전파속도가 감소하는 경향을 보였다.
- (3) 평균입경이 51 μm인 Mg는 동일 입경의 Mg-Al합금 퇴적분체에 비하여 화염전파속도가 약 50%가 감소하였다.
- (4) Ti 및 Mg의 산화물층 두께는 화염전파속도에 반비례하는 경향을 나타냈으며 입경 변화에 따른 영향은 관찰되지 않았다.
- (5) 공기 중의 10 °C/min의 승온속도에서 Mg는 550 °C에서 그리고 Ta는 578 °C에서 급격하게 중량이 증가하였는데 발화에 의한 연소로 판단되며 기존 문헌에 제시된 발화온도에 근사하였다.

#### 참고문헌

1. Bartknecht, W., "Dust Explosion," Springer-Verlag, Berlin Heidelberg(1989).
2. Eckhoff, R. K., "Dust Explosion in the Process Industries; 3rd ed.," BH(2003).
3. Coffin, K. P., "Some Physical Aspects of the Combustion of Magnesium Ribbons," 5th Symp, Int. on Combust., The Combust. Inst., 267-276(1955).
4. Harrison, P. L. and Yoffe, A. D., "The Burning of Metals," Proc. Roy Soc., A261, 357-370(1961).
5. Harrison, P. L., "The Combustion of Titanium and Zirconium, 7th Symposium on Combustion," The Combust. Inst., 913-920(1959).
6. Hirano, T., Sato, Y. and Sato, J., "Prediction of Metal Fire Spread in High Pressure Oxygen," Combust. Sci. Tech, 32, 137-159(1983).
7. Hirano, T. and Sato, J., "Fire Spread along Structural Metal Pieces in Oxygen," J. Loss Prev. in Process Indus., 6, 151-157(1993).
8. Clark, A. F. and Hust, J. G., "A Review of the Compatibility of Structural Materials," AIAA J., 12, 441-454(1974).
9. Chernenko, E. V., Afanaseva, L. F. and Lebedeva, V. A., "Propagation of Burning along the Surface of Metallic Powders and their Mixtures with Oxides," Combust., Explosion and Shock Waves,

- 30, 617-620(1994).
10. Chernenko, E. V. and Pivtsov, A. L., "Combustion Propagation of a Titanium Powder Surface," *Combust., Explosion and Shock Waves*, **26**, 684-689(1990).
11. Molodetsky, I. E., Vicenzi, E. P., Dreizin, E. I. and Law, C. K., "Phase of Titanium Combustion in Air," *Combust. Flame*, **112**, 522-532(1998).
12. Dreizin, E. I., "Phase Change in Metal Combustion," *Proc. Energy Combust. Sci.*, **26**, 57-78(2000).
13. Siwek, R. and Pellmont, G., "Methods of Determination and Factors Influencing Hazard Evaluation in Dust Handling Equipment," *Proc. of Euromech Colloquium 208*, Explosion in Industry, Germany(1986).
14. Roberts, T. A., Burton, R. L. and Krier, H., "Ignition and Combustion of Aluminium/Magnesium Alloy Particles in O<sub>2</sub> at High Pressure," *Combust. Flame*, **92**, 125-143(1993).
15. Bakhman, N. N., "Smoldering Wave Propagation Mechanism," *Combust, Explosion Shock Waves*, **29**, 18-24(1993).
16. Ohlemiller, T. J., "Smoldering Combustion Propagation through a Permeable Horizontal Fuel Layer," *Combust. Flame*, **81**, 341-353(1990).
17. Leisch, S. O., Kauffman, C. W. and Sichel, M., "Smoldering Combustion in Horizontal Dust Layers," *20th Symp. Int. Combust., The Combust. Inst.*, 1601-1610(1984).
18. Hertzberg, M., Zlochower, I. A. and Cashdollar, K. L., "Metal Dust Combustion; Explosion Limits," Pressure and Temperature, 24th Symp. Intl. on Combustion, The Combustion Institute, 1827(1992).
19. Jacobson, M., Cooper, A. R. and Nagy, J., "Explosibility of Metal Powders," RI 6516, US Bureau of Mines(1964).