

퇴적금속 분진층을 전파하는 화염의 연소특성과 위험성 평가

한 우 섭†

(주)TRC Korea 부설 위험관리연구소
150-712 서울시 영등포구 여의도동 23-2(굿모닝신한타워 16층)
(2004년 9월 7일 접수, 2004년 11월 4일 채택)

Characteristics and Risk Assessment of Flame Spreading Over Metal Dust Layers

Ou-Sup Han†

Risk Management Research Institute, Goodmorning Shinhan Tower Bldg. 16F, 23-3, Yoido-dong, Youngdungpo-gu, Seoul 150-712, Korea
(Received 7 September 2004; accepted 4 November 2004)

요 약

미립 금속분체에 대한 산업 수요 증가와 함께, 퇴적 금속분의 착화에 의한 화재, 폭발사고가 증가하고 있다. 본 연구에서는 퇴적 금속분체의 화재, 폭발 위험특성을 조사하기 위하여 새로운 실험장치를 개발하였다. 금속분(Mg, Zr, Ta, Ti) 및 PMMA(polymethyl methacrylate)분진을 사용하여, 연소 거동(소염거리, 화염전파속도) 및 화염전파에 미치는 N₂ 치환 분위기 농도의 영향 등을 실험적으로 상세히 조사하였다. 실험결과로부터, 퇴적 금속 분체의 화염전파속도는 PMMA보다 크고, 화염전파속도의 퇴적층 두께에 대한 의존성은 작으며, 질소 치환 분위기에서의 Mg의 한계 산소 농도는 3.6-3.7 vol%로 나타났다. 퇴적금속 분체층의 화염전파속도와 소염거리 역수는 높은 상관관계를 가지고 있으며, 이들 연소성 지표에 있어서 상대적인 위험성의 예측이 가능하다.

Abstract – The wide use of metal dusts have been found in industrial field and many dust explosion accidents occur by fire spread of dust layer. In this study, we developed a new experimental device to examine fire and explosion characteristics of the dust layer. Aspects of the burning zone over metals(Mg, Zr, Ta, Ti, etc) and PMMA(Polymethyl methacrylate) dust layers have been investigated experimentally to clarify behaviors (Spread rate and quenching distance) and effects of N₂ surrounding gas on the fire spread over metal dust layers. From the experimental result, it was found that the spread rate of metal dusts is larger than PMMA, the dependability of spread rate over the thickness of dust layer is small, and the minimum oxygen concentration of spread flame over Mg dust layer is 3.6-3.7 vol%. Since high correlation between the spread rate and the reciprocal of quenching distance was seen, relative risk prediction in those inflammable parameters can be predicted.

Key words: Dust Layer, Dust Explosion, Flame Spread, Quenching Distance, Spread Rate

1. 서 론

전자공업의 발전에 따라 전자제품의 외장 재질은 충분한 강도를 가지면서 경량화가 중요해 졌으며, 이와 함께 가공 및 재활용의 용이함이 높이 요구되고 있다. 예를 들면, 개인 단말기나 노트북 등의 전자기기 케이스는, 미세 분체화된 Mg-Al 합금이 주로 사용되고 있다. Mg는 매우 가벼운 금속으로 전자과 차단성, 방열성 등에 뛰어났지만, 발화 등의 반응위험성이 높기 때문에, Al과의 합금에 의해 일정한 기계적 강도 및 반응의 안정화를 부여하도록 하고 있다. 일반적으로 Mg-Al 합금은 9:1의 배합비율로 제조되고 있는데, 안전을 위해 Al 비율을 높여 완전히 불활성화하는 것은 Mg의 장점을 살릴 수 없기 때문에 실용적이지 않다. Mg 이외에도, Ta는 콘덴서 등 각

종 전자기기의 부재료로서, Zr은 원자력 등의 공업 부재료로서 사용이 증가하고 있다. 이처럼, 최근의 공업 제품 성형화 및 제조에는 미분화 기술이 대량으로 사용되고 있으며, 제조공정의 다양화, 고도화에 수반되어 불연성으로 여겨졌던 미세 분체가 예상하지 못한 화재, 폭발사고의 원인으로 작용하고 있다. 금속재료는 분체 상태가 되면 일정 크기의 착화원에 의해 공기 중에서 용이하게 연소하게 되는데, 금속분진의 수요가 늘고 있는 가운데, 금속분의 폭발사고는 Al, Mg가 가장 많지만, Ti, Zr, Ta, Cr, Mn, Fe, Zn, 금속 규소 등과 같은 금속 분의 폭발사고도 보고되고 있다.

분진에 의한 화재폭발 재해는, 분진이 공기 중에 분산되어 있는 부유 상태에서 발생할 뿐만 아니라, 비중이 무거운 금속 분의 경우 퇴적한 분체층의 착화에 의한 가능성도 크다. 퇴적금속 분체층의 연소특성에 관해서는, 훈소(smoldering)[1-4], 고체연료, 연소합성 등에 관련하여, 분체 입경, 분체층 두께 등에 대해서 많이 조사되어 있

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hanpaule@trckorea.co.kr

며, 분위기 조성으로는 산소 중에서 연소 특성을 조사한 예가 대부분이다[5]. 그러나 퇴적금속 분체층을 연소대가 전파하는 화염전파에 관한 연구는, 산소 이외의 분위기 조성에서의 연소 특성을 조사한 예는 거의 없으며, 퇴적금속 분체층의 화염전파를 설명하기에는 불명한 점이 많다. 분체 퇴적 상을 화염이 전파하는 위험성을 평가하는 방법으로는 Siwek과 Pellmont[6]의 연구가 있는데, 퇴적 분체를 삼각주 상의 형태로 하여 일단에 착화시킬 때 화염전파가 어느 정도 진행되는 가하는 화염전파 능력을 6단계로 분류하여 위험성을 평가하고 있다. 이 시험법에 의해 얻어진 데이터를 활용하여 퇴적 분체의 상대적 위험성 비교가 가능하다. 그러나 분체 취급 공정의 정량적 위험성 평가와 분체설비·기계기구의 방폭 설계 등에 적용하기 위한 기초 데이터 제공이라는 실용적 관점에서 본다면, 화염전파속도 및 소염거리에 대한 퇴적분체의 연소성을 구체적으로 평가하기 위한 효과적인 실험장치 및 방법이 요구되고 있다.

본 연구는, 퇴적금속 분체층의 화염전파 특성을 해명하기 위한 기초 연구로서, 퇴적 분진의 화재, 폭발 위험성 평가법의 개발 및 연소 특성치의 예측을 목적으로 하고 있다. 이를 위해, 퇴적분진 착화 후의 연소성 지표로서, 소염거리와 화염전파 속도를 동시에 측정 가능하여 효율적으로 조사할 수 있는 실험장치를 새롭게 개발하였고, 각각의 연소 특성치 및 그 상관관계에 대해서 상세하게 조사하였다. 산업현장의 기계, 설비 간극에 퇴적 금속분체가 존재하는 경우 분체 착화에 의한 화재폭발의 위험성이 존재하기 때문에, 한계 화염전파(소염거리)의 지식은 매우 중요하다. 또한, 질소와 같은 분위기가스 중에서 연소 가능한 Mg에 대한 연소성 데이터(소염거리, 화염전파 속도)는 불명하며[5], 본 연구의 실험 결과는 실용적인 데이터로서 활용이 가능하며, 본 연구의 실험장치를 사용하면 여러 가지 퇴적 분체의 화재, 폭발에 관한 정량적 위험성 평가가 가능하다.

2. 실험

2-1. 실험장치

Fig. 1은 퇴적 금속 분체층의 화염전파를 관찰하기 위하여 제작한 실험장치로, 연소 용기, 분위기 가스 혼합장치, 시료홀더, 점화장

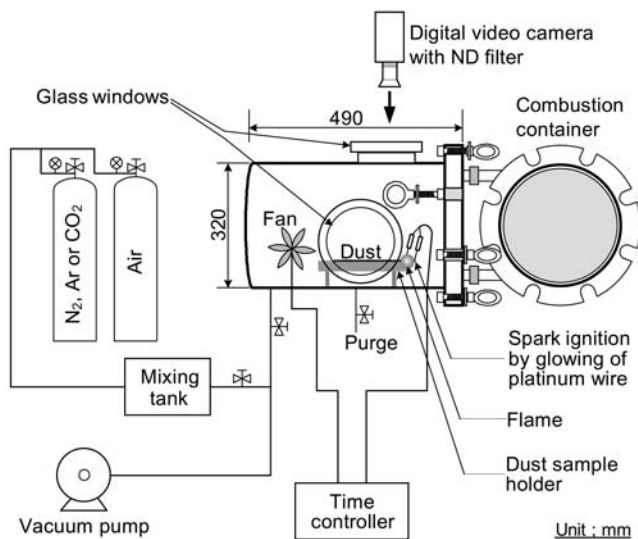


Fig. 1. Experimental setup for identifying combustion characteristics of dust layer.

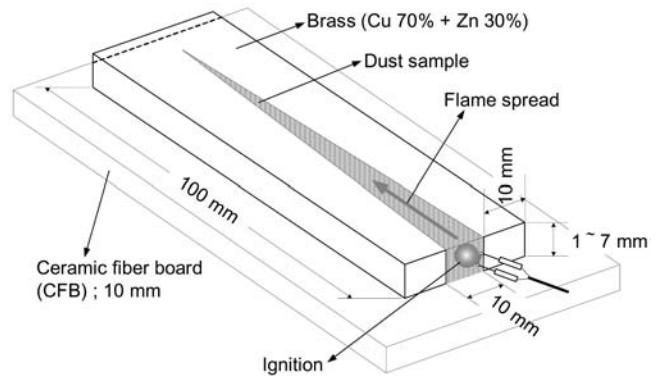


Fig. 2. Schematic of dust sample holder.

치로 구성되어 있다. 공기 중에서뿐만 아니라 분위기 가스 중에서도 화염전파 특성을 조사하는 것이 가능하도록 밀폐 연소용기를 사용하였고, 연소용기 내부의 팬은 분위기 가스의 균일 혼합을 위한 교반기의 역할을 할 뿐만 아니라, 팬에 의한 기류는 시료 홀더에 대항하고 있어, 강제 대류의 분위기에서의 연소특성의 관찰도 가능하다. 본 연구에서는 정지 기류 분위기 중에서의 실험으로만 한정하였다. 퇴적 금속 분체층에 있어서의 화염전파속도와 동시에 한계 화염전파(소염거리)의 측정이 가능하도록, 시료 홀더의 형상은 Fig. 2와 같이 제작하였다. 시료 홀더는, 폭 10 mm×길이 100 mm×깊이 각 1, 3, 5, 7 mm의 스케일을 갖으며, 화염 영향으로 인한 산화가 잘 되지 않게 하기 위해서 재질을 황동(Brass; Cu 70%/Zn 30%)으로 하였다. 본 연구에서 평가하는 퇴적 분체의 소염거리는, Fig. 2에서와 같이 시료 홀더 내에 동일 높이로 균일하게 퇴적시켜 놓은 상태에서 퇴적 금속의 일단에 착화시켜 화염이 전파하게 될 때, 열 손실에 의해 소염이 이루어지는 시료 홀더 폭의 길이로 정의하였는데, 이를 한계 화염전파 특성치로서 평가하였다.

2-2. 분진 시료

실험에서 사용한 금속분진은 모두 순도 99.0% 이상의 것으로, 시료의 입도 분포는, Flow식 입자상 분석장치(Sysmex FPIA-2100)를 사용하여 측정하였다. 그 결과, Mg, Ta, Zr, Ti의 체적 평균 입경은,

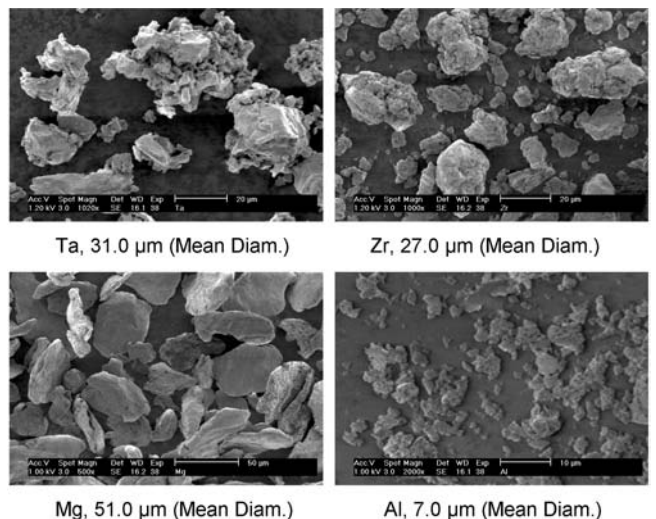


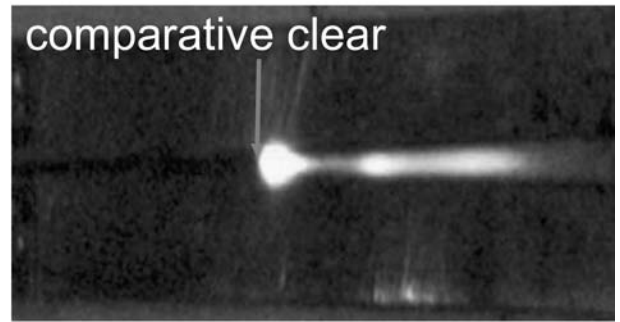
Photo 1. SEM of Dust samples (Ta, Zr, Mg, Al).

각각 51.5, 30.8, 26.5, 75.0 μm 가 얻어졌다. 또한, 금속 분진과의 연소성을 비교하기 위해서, PMMA(체적평균 입경 99.0 μm)의 화염전파 속도도 조사하였다. 시료 분체의 입경 차이에 대한 영향을 밝히기 위해서, 3종류의 Mg(< 51 μm , <75 μm , <150 μm)와 2종류의 Ti(<75 μm , <150 μm)를 사용하였다. Photo 1은 본 연구에서 사용된 Ta, Zr, Mg, Al 분진의 전자현미경사진(SEM)의 예로, 특히 Ta는 복잡한 형상과 미세 공극을 가지고 있어 이러한 입자 형태가 연소성과 전기적 특성에 영향을 주리라 생각되며, 취급 중에 파쇄되기 쉬운 특징이 있어 실험시의 취급에 유의를 하였다.

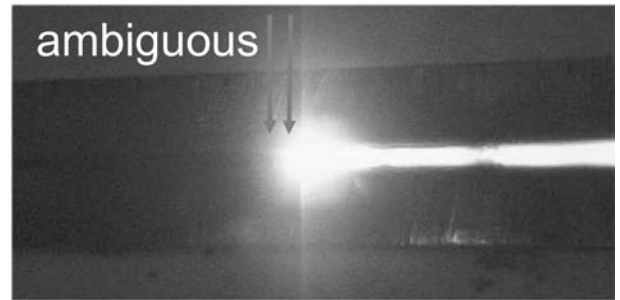
2-3. 실험방법

실험은 우선 시료 홀더를 전자저울 위에 수평으로 올려놓고, 금속분체를 시료홀더 높이에 맞추어 균일하게 퇴적시킨다. 이때, 시료의 무게를 실험마다 조사하여 체적 밀도(bulk density)가 일정하도록 하여 동일한 농도조건이 되도록 하였고, 22-23 °C의 온도 및 55-60%의 습도가 되는 조건에서 실험을 하였다. Fig. 1에서와 같이, 분체를 퇴적시킨 시료 홀더를 단열재(ceramic fiber board) 위에 올려놓은 상태에서 연소용기 내에 수평으로 설치하였다. 실험은 정지기류 상태의 공기 중에서 연소 용기를 개방한 상태에서 실시하였다.

또한, 분위기 조성에 따른 영향을 조사하기 위해 실시된 실험은, 밀폐상태의 연소 용기 내를 진공으로 한 다음, 일정 농도의 N₂ 분위기 가스를 만들어 연소용기 내에 도입하는 방법을 채용하였다. 용기 내에 도입된 소정의 분위기 가스는 15분간 팬으로 교반하여, 분위기 가스의 농도 기울기를 최소화하였다. 그 후, 백금 또는 텅스텐 전극의 가열에 의해 퇴적 금속분에 착화시켜 연소 용기의 상부에 설치된 표준속도(30 f/s)의 디지털 비디오카메라(Sony DCR-VX1000)로 화염전파 모습을 관찰하고, 화염면의 미세 이동에 대해서는 고속 디지털 비디오카메라(Kodak Imager-HG2000; 2000 f/s)를 이용하여 기록하였다.



(A) Flame front of Zr



(B) Flame front of Ti

Photo 2. Example of flame spread over Zr and Ti dust layer; (exposure time=1/1000 sec).

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 화염전파 특징 및 연소대 두께

금속분체 화염은 발광이 강해 화염 선단의 식별이 곤란하기 때문에 화염전파 모습은 감광 필터를 사용하여 관찰하였으며, 시간에 따른 화염 이동거리의 판단은 화상해석에 의해 결정하였다. Photo 2

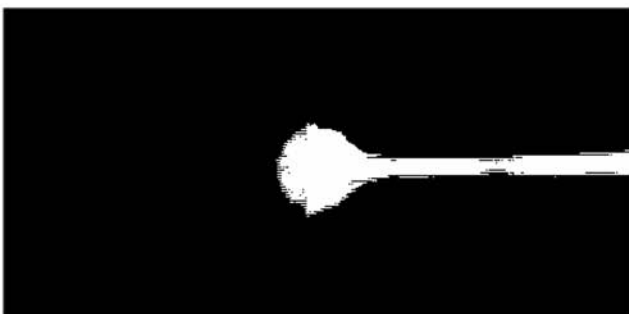


Photo 3. Determination of flame front by threshold level.

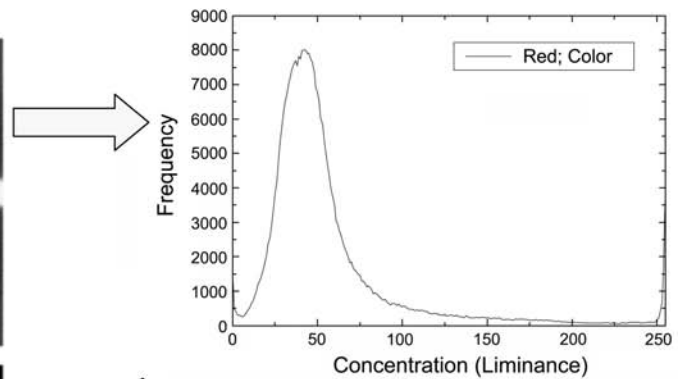


Fig. Density histogram in color information of flame

Segmentation method by threshold level

Generalized method of determining flame front

에서와 같이, 화염 선단 부근은 연소대로 생각되어지는 강한 발광이 나타나며, 그 강도는 화염전과 선단에서부터 멀어질수록 감소하고 있는데, 동일 촬영 조건 하에서도 시료마다 화염 발광 강도가 달라 화염면의 결정은 측정자마다 다를 수가 있다. 직접 화상에 있어서 화염의 빛의 강도가 화염의 절대적인 값이 아니므로, 이를 위해 Photo 3에 나타난 것과 같이 상대적인 값으로 취급하여 빛의 강도 기울기의 일정치를 경계로 하는 역치(threshold level)지정법을 이용한 화상해석을 통하여 일반적인 화염 이동면을 결정하였다. 즉, 화염의 컬러 화상을 흑과 백으로 구분시킨 2치화 화상으로 변환하여 화염면의 결정을 일반화하였다. 역치(threshold value)에 의한 2치화 방법은 화상의 각 pixel의 밝기가 일정치 이상의 경우를 백, 이하를 흑으로 출력하는 방법이다. 이때, 역치는 화상 밝기(luminance)의 히스토그램을 참고로 하여 결정한다(Photo 3). 역치에 의한 2치화 방법은 화상의 중간조를 표현할 수 없는 특징이 있지만, 본 연구에서와 같이 화염면의 결정에는 화상 중간조의 정보가 필요 없기 때문에 문제가 되지는 않는다.

Fig. 3은, 시료 두께 3 mm에 있어서 시간 경과에 따른 화염 선단의 이동으로 소멸될 때까지의 화염 위치를 조사한 예이다. 화염면의 형상 및 속도는 화염전과 방향의 상부로부터 관찰한 결과로 결정하였다. 연소 면의 이동은 부분적으로 가속과 감속이 관찰되지만, 전체적으로 보면 거의 일정한 속도로 이동하는 것을 알 수 있다. 화염전과속도의 크기는 Ti, Mg, Ta, Zr 순으로 나타났는데, 퇴적 금속 분체층의 화염전과속도의 차이는 산화물층을 통한 산소 공급 속도, 발열 및 열 이동 속도에 크게 의존한다는 연구결과가 보고되고 있다[7]. 그 밖에도 퇴적된 Mg, Ta, Zr 분진층의 화염 선단으로부터 전방으로의 화염전과는 매우 불규칙하고 돌발적으로 일어나면서 진행되므로 화염면이 일정하지 않았다. 이것은 화염면 근방의 연소입자 일부가 화염이동 방향의 전방으로 불규칙하게 날아 이동하기 때문에 일어나는 현상으로 인해 발생된다. Mg는 밝은 화염(luminous flame)을 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. PMMA(polymethyl methacrylate)의 평균 화염전과속도(0.12 mm/s)를 고려하면 금속 분체의 연소성이 매우 높은 것을 알 수 있으며, 그 중에서도 Ti의 평균 화염전과

속도는 7.1 mm/s로 본 연구의 실험대상 금속분체 중에서 가장 높았다(Fig. 3).

3-2. 퇴적 분체의 연소특성

화염전과 후의 산화물층의 두께 및 평균 화염전과속도를 Table 1에 나타냈는데, 화염전과속도가 가장 큰 Ti의 산화물층 두께는 0.4 mm로 가장 작으며 대부분은 1 mm 이내이다. 화염전과속도가 클수록 산화물층의 두께는 작은 경향을 보이고 있는데, 퇴적 금속층은 표면으로부터 1 mm 이내의 깊이 부분만이 가열되어 화염전과가 이루어진다는 것을 알 수 있었다. 퇴적층 두께의 변화에 따른 화염전과속도를 조사한 결과, 금속분 시료의 퇴적 두께에 의한 화염전과속도의 변화는 매우 작았으며 이러한 사실로부터 시료의 두께에 의한 영향은 적다고 판단된다. 금속 분체의 화염전과 소멸 후의 시료 단면을 조사해 보면, 연소에 의한 산화물층과 고온의 영향을 받아 열화된 부분이 있는데, 이는 시료 표면으로부터 내부로 반응이 진행된 것을 의미한다. 금속의 연소가 기체상태에서 반응하는가, 고체표면에서 반응하는가는 산화물의 비등점과 금속원소의 비등점의 차이에 의해 결정된다[8]. 산화물의 비등점이 금속원소의 비등점보다 높은 Al, Mg, Zn 등은 기체상태에서 연소하며, Ti, Ta, Fe, C, Boron 등은 고체표면에서 표면 연소한다. Ta의 공기 중에서의 단일화염온도의 최대 계산치는 2,987.0 °C로[9], 용점은 3,030 °C, 비점 5,300 °C로 매우 높아 표면연소에 의해 연소대가 전파한다고 생각된다.

Table 2는 퇴적 금속층 두께의 변화에 따른 소멸거리를 조사한 것으로, 두께 증가에 따라 소멸거리는 다소 커지지만, 두께 5 mm 이상에서는 소멸거리의 변화가 거의 보이지 않는다. 특히, Ti의 화염전과속도가 시료 두께에 의존하지 않는 것은, 산화물층이 0.4 mm로 금속 분체 표면 근처만이 가열되어 연소하면서 전파하기 때문으로 판단된다. 비교 실험을 위해서 측정된 PMMA 분체의 소멸거리는 7-8 mm로 퇴적 금속 분체에 비해 매우 큰 것을 알 수 있었다. 또한, 퇴적 유기물 분진의 smoldering 연소에 의한 화염전과속도는 0.01-0.1 mm/s로 알려져 있으며[1-3], 이에 비한다면 금속 분체층의 화염전과 속도는 매우 크다고 할 수 있다. 금속 분체의 소멸거리는 0.4-1.7 mm로, 2.65 m/s의 화염전과속도로 폭발압력이 큰 H₂의 소멸거리가 공기 중 STP(standard temperature and pressure) 상태에서 0.6 mm인 것을 고려할 때, 금속 분체의 연소 위험성이 매우 큰 것을 알 수 있다.

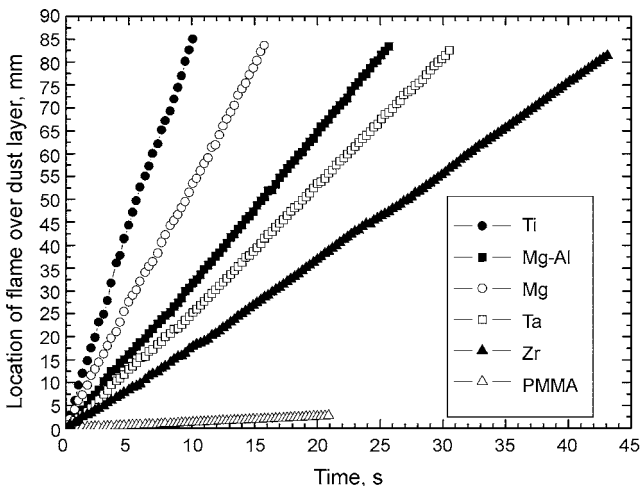


Fig. 3. Location of flame front of dust layer with time.

Table 1. Thickness of oxide and spread rate after fire spread over dust layer

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

Table 2. Quenching distance of metal dust layer in air

Thickness of dust layer [mm]	Mg [mm]	Ti [mm]	Zr [mm]	Ta [mm]	PMMA [mm]
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

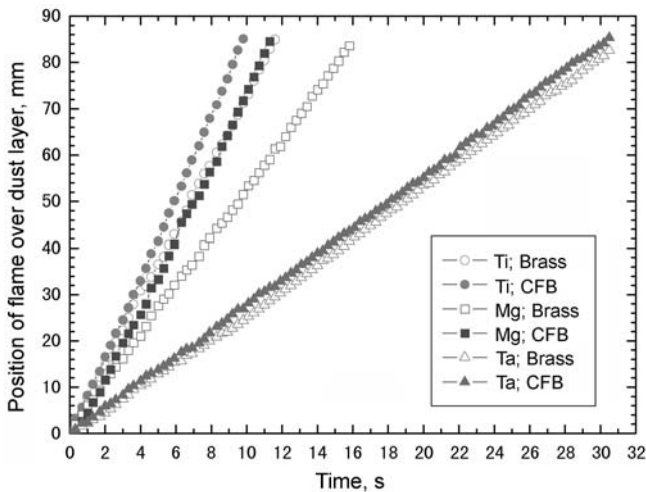


Fig. 4. Difference of flame spread rate over dust layer by sample holder.

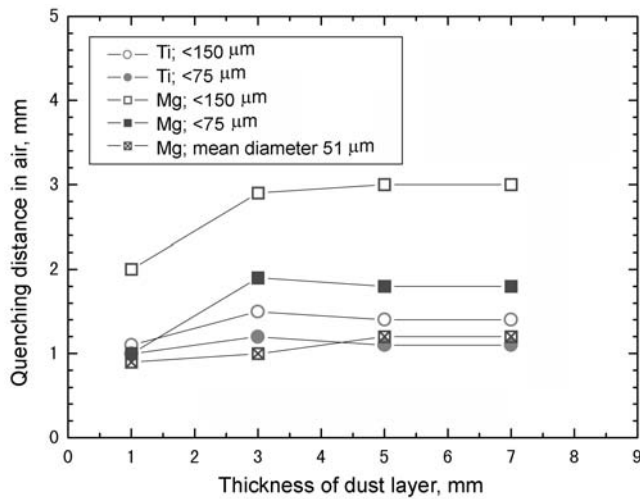


Fig. 5. Variation of quenching distance with thickness of dust layer.

Fig. 4는 시료 홀더의 열전도 차이에 의한 화염전파속도에의 영향을 알아보기 위한 것으로, CFB(ceramic fiber board)와 열전도가 상대적으로 큰 황동(brass)제의 두께 3 mm 시료 홀더에서의 화염전파속도를 비교한 것이다. Ti, Mg의 화염전파속도는 Brass 제보다 CFB제에서 크게 나타났는데, 이는 시료 홀더의 열 손실 차에 의한 영향으로 생각된다. 그러나 화염전파속도 증가비율을 보면, Ti보다 Mg가 더 크다. 이것은 표면 연소하는 Ti에 비해, 기상 연소하는 Mg에 있어서 고체상 내의 열전도가 현상을 지배하는 영향이 더 크기 때문으로 추정된다. 입자 입경 및 퇴적층 두께가 소염 거리에 미치는 영향에 대하여 조사한 것이 Fig. 5이다. 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.

3-3. 화염전파속도와 소염거리의 관계

가연성 물질의 연소위험성 평가에 있어서, 착화 후의 연소지표로서는 화염 전파속도와 소염거리가 있다. 가연성 가스의 경우, 화염 전파속도 및 소염거리에 대한 데이터는 매우 많으며, 그 결과로부터

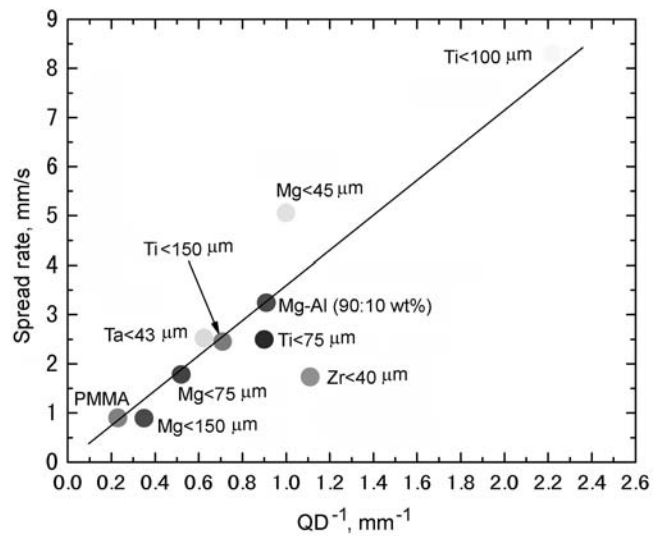


Fig. 6. Relation of spread rate and quenching distance in dust layer.

터 화염전파속도는 소염거리의 역수에 비례하는 사실이 잘 알려져 있다. 이에 반해, 가연성 분체 및 퇴적 금속의 경우는 데이터도 매우 적으며 측정방법, 조건이 달라 정량적으로 비교하기도 곤란하다. 본 연구에서는 퇴적금속 분체에서의 화염전파속도와 소염거리의 동시 측정을 시도하였다. 퇴적금속 분체의 소염거리가 화학산업설비 기계장치 간극에서 퇴적 분체의 화염전파 능력과 깊은 관계가 있다는 것을 생각한다면, 안전 및 위험성 평가 지표로서 중요한 의미가 있다고 할 수 있다. Fig. 6은 공기 중, 대기압의 퇴적금속 분체(두께 3 mm)에 있어서 화염전파속도(SR)와 소염거리(QD)의 관계를 조사한 예이다. 상관 정도가 다소 작은 Mg, Zr를 포함하더라도 전체적인 상관은 매우 높게 나타나고 있다. 또한, 입경의 다른 Mg, Ti의 결과를 포함하더라도 SR과 QD⁻¹의 상관관계는 0.9 이상으로 높게 인정되었다. 이러한 결과로부터, 본 연구에서 조사한 퇴적금속 분체에 있어서 화염전파속도가 증가하면 소염거리가 작아진다고 할 수 있으리라 생각되며, SR과 QD의 상대적인 위험성의 예측이 가능하다고 판단된다.

3-4. 분위기 조성에 있어서의 화염전파관계

소화제로서 불활성가스인 N₂가 산업현장에서 많이 사용되고 있으나, Mg 분진이 연소하는 경우 질화 반응의 지연제로 작용할 가능성이 있다. 이러한 점 때문에 N₂ 분위기 중에서의 연소 특성에 대한 기초 지식을 얻기 위하여 N₂-O₂ 조성에서의 N₂ 농도 변화에 따른 화염전파한계를 조사하였다. Fig. 7에서와 같이, 분위기 농도로서 N₂ 농도를 증가시키면서 화염대 선단의 이동을 주목하면, 거의 일정하게 전파하는 공기 중에서의 달리, 화염면의 이동은 불안정하며 불규칙적으로 이동하고 있으며, 화염전파속도는 N₂ 농도 증가와 함께 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 8과 같이, O₂ 농도의 감소와 함께 소염까지의 시간은 길어지는데, 화염의 이동이 인정되는 농도는 3.6-3.7 vol%의 O₂ 농도로, 이 농도가 한계 화염전파 산소농도라고 판단된다. 연소가 유지되는 최소 산소농도에 있어서의 화염전파속도는 1.20 mm/s로, 공기 중의 5.06 mm/s에 비하여 매우 작다. N₂의 농도 증가와 함께, 화염전파한계에서의 소염거리는 증가하며, 공기 중의 경우에 비하여 약 8배인 것을 알았다.

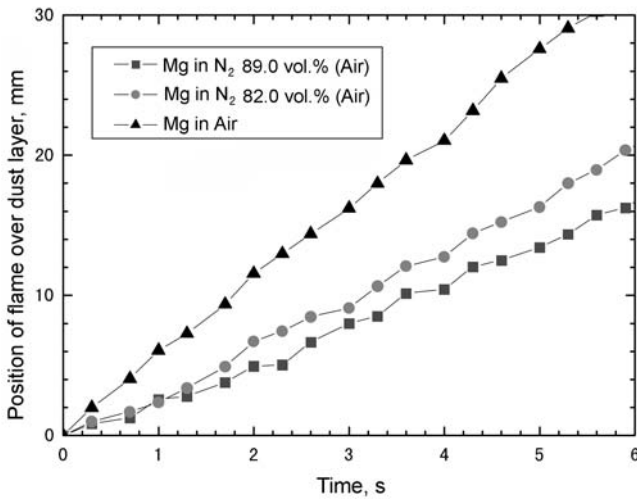


Fig. 7. Location of flame front over dust layer with increasing of N₂ concentration.

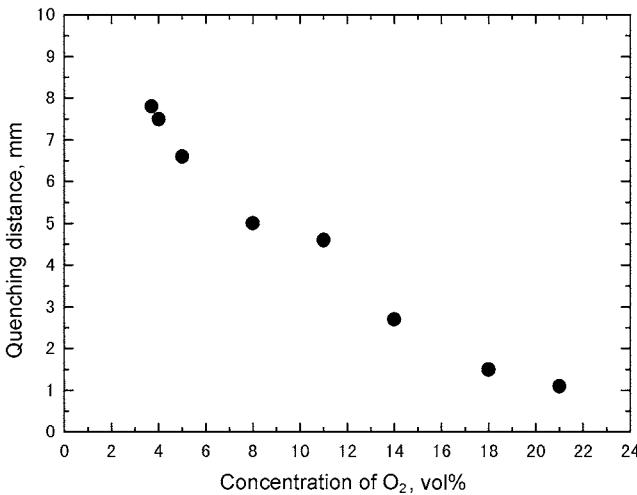


Fig. 8. Quenching distance of Mg with decreasing of O₂ concentration in N₂ diluted air.

4. 결 론

본 연구에서는 전자공업의 발전으로 사용량이 증가하는 전자제품의 외장 금속 제품 제조의 중간원료가 되는 금속 미세 분체의 발화 위험성에 대한 기초연구를 수행하기 위하여, 금속분체 화염의 연소 특성을 공기와 질소 분위기에서 조사하였다. 화염의 연소특성 파악과 위험성 평가에서 필수적인 화염전파속도와 소염거리를 자체 개발한 실험장치를 이용하여 간편하고 효과적으로 측정 가능하도록 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 퇴적금속 분체층의 화염전파속도(1.73-7.1 mm/s)는 PMMA 분체층의 화염전파 속도(0.06-0.08 mm/s)에 비하여 매우 크지만, 시료 종류 및 두께에 관계없이 화염 선단은 거의 일정한 속도로 이동한다(Fig. 3, 4). 또한, 설정된 퇴적금속 분체층의 소염 거리는 0.4-1.7 mm로, PMMA 고분자 분체층의 7-8 mm에 비해 매우 작은 것으로 밝혀졌다. 이상의 두 사실로부터 금속 분체층의 연소 위험성은 PMMA보다 매우 크고, Ti 보다는 Mg가 더 안전한 것으로 추정된다.

(2) 퇴적층 2 mm 이상에서의 화염전파 후의 산화물층의 두께는 약 1 mm 이내로 표면층에 가까운 영역에서만 연소하며, 공기 중 정지기류 상태에 있어서 금속 분체 상의 화염전파속도는 분체층의 두께(깊이)에 대한 의존성이 매우 작았다.

(3) Mg의 경우, 질소 치환 분위기 중의 한계 산소 농도는 3.6-3.7 vol%로, 소염거리는 공기 중에 비해 약 8배이다.

(4) 공기 중, 퇴적금속 분체층의 화염전파속도와 소염거리 역수는, PMMA의 경우와 같이, 높은 상관관계를 보였다. 따라서, 이들 연소성 지표에 있어서 상대적인 위험성의 예측이 가능하다고 생각된다.

참고문헌

- Ohlemiller, T. J., "Smoldering Combustion Propagation Through a Permeable Horizontal Fuel Layer," *Combust. Flame*, **81**, 341-353(1990).
- Bakhman, N. N., "Smoldering Wave Propagation Mechanism; Critical Condition," *Combust., Explosion and Shock Waves*, **29**, 14-17(1993).
- Bakhman, N. N., "Smoldering Wave Propagation Mechanism; Smoldering Velocity and Temperature in Smoldering Zone," *Combust., Explosion and Shock Waves*, **29**, 18-24(1993).
- El-Sayed, S. A. and Abel-latif, A. M., "Smoldering Combustion of Dust Layer on Hot Surface," *J. Loss Prev. in Process Indust.*, **13**, 509-517(2000).
- Eckhoff, R. K., "Dust Explosion in the Process Industries; 2nd ed.," BH(1997).
- 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).
- Chernenko, E. V., *Combust., Explos and Shock Waves*, **30**(5), 617-620(1994).
- Glassman, I., "Combustion - 3rd Edition," Academic Press, San Diego(1996).
- Reynolds, W. C., STANJAN - Chemical Equilibrium Code, Stanford University(1987).