

마그네슘의 폭발특성에 미치는 평균입径의 영향

†한우섭 · 이수희

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원
(2013년 7월 24일 접수, 2013년 8월 26일 수정, 2013년 8월 26일 채택)

Effect of Mean Diameter on the Explosion Characteristic of Magnesium Dusts

†Ou-Sup Han · Su-Hee Lee

Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA
104-8 Munji-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-380, Korea
(Received July 24, 2013; Revised August 26, 2013; Accepted August 26, 2013)

요약

본 연구에서는 마그네슘(Mg)분진의 폭발특성에 미치는 평균 입径의 영향을 조사하였다. 이를 위해 20-L분진 폭발시험장치와 10 kJ의 에너지를 갖는 화학 점화기를 사용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 Mg분진은 평균입径이 서로 다른 3가지 시료(38, 142, 567 μm)를 대상으로 분진농도를 2250 g/m^3 까지 조사하였다. Mg분진의 폭발하한농도(LEL)는 평균입径 38, 142 μm 에 있어서 각각 30, 40 g/m^3 이 얻어졌다. LEL은 입径 증가에 의해 감소 경향을 나타냈는데 Mg분진은 입径이 증가할수록 폭발 확률이 감소함을 의미한다. 최대폭발압력(P_m)과 폭발지수(K_{st})는 입径이 증가하면 감소하였지만, 평균입径 567 μm 의 Mg분진의 경우에는 5 kJ의 착화에너지에서는 폭발 현상이 관찰되지 않았다.

Abstract - A study was carried out on the effect of particle size (mean diameter) on magnesium dust explosion. Experimental investigations were conducted in a 20-L explosion sphere, using 10 kJ chemical igniters. Explosion tests were performed with three different dusts having mean diameter (38, 142, 567 μm) and the dust concentrations were up to 2250 g/m^3 . The lower explosion limits(LEL) of magnesium dusts were about 30 g/m^3 at 38 μm and 40 g/m^3 at 142 μm . LEL tended to increase with particle size and this means that the explosion probability of magnesium dust decreased with increase of particle size. The maximum explosion pressure (P_m) and K_{st} (Explosion index) decreased with the increase of particle size. For magnesium powder of 567 μm , however, the explosive properties were not observed in the 5 kJ ignition energy.

Key words : magnesium particles, dust explosion, explosion pressure, rate of pressure rise

1. 서론

마그네슘(Mg)은 경금속 중에서도 비중이 작고 전자파의 차폐 성능이 뛰어날 뿐만 아니라 방열 특성도 우수하기 때문에 기존의 플라스틱 대체재로서 스마트폰, 전자기기, 노트북 등의 제품 케이스로서 활

용이 급증하고 있다. 자동차 분야에 있어서도 경량화를 통한 연비 향상을 목적으로 철이나 알루미늄 부품에서 마그네슘 부품으로의 전환이나 개발이 많이 이루어졌다. Mg용융에 의한 성형품은 제품표면의 가공이 필수적으로 수반되는데, 그라인더, 버프 연마 과정에서 미세 Mg 분진이 대량 발생한다. Mg는 연소열이 크고 물이나 이산화탄소 등과의 반응위험성이 있으며 경금속으로서 입자 비중이 다른 일반 금속에 비하여 작기 때문에 쉽게 부유하는 특징을

†Corresponding author: hanpaule@kosha.net

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

가지고 있어 분진폭발 위험성이 높은 특징을 가지고 있다. 최근 금속분진에 의한 화재폭발사고의 발생빈도를 보면 Mg에 의한 폭발사고가 반복적으로 발생하고 있는데[1], Mg의 분진폭발사고 저감을 위해서는 안전대책 강구에 필요한 폭발특성값 등의 정량적인 안전성 자료가 우선적으로 필요하다.

Mg분진의 화재폭발특성에 대한 기존 연구를 살펴보면 화염전파를 설명하기 위한 연소 거동을 이론적으로 조사한 경우도 있지만[2], 대부분은 Mg의 폭발 위험성에 대한 연구가 수행되어 보고되고 있다[3-9]. Matsuda[4] 및 Nifuku[5]는 금속분진의 종류별 폭발압력특성을 조사하였으며, Li[5-6]등은 불활성 가스(Ar, N₂, CO₂) 분위기에서의 Mg의 폭발한계와 폭발강도를 실험적으로 조사하였다. Kuai 등[7]은 문헌에 제시된 Mg폭발특성값을 사용하여 Mg분진폭발의 위험성평가를 제안하였다. 또한 Han 등[7-8]은 농도변화에 따른 폭발압력을 조사하고 화염전파속도를 계산하였으며, Mg-Al합금에서의 Mg성분의 증가는 폭발하한농도의 감소와 최대폭발압력의 증가로 나타나는 것을 실험을 통해 제시하였다. 그러나 문헌자료를 통해 제시되고 있는 Mg 단일 금속의 입경 변화에 따른 폭발특성 자료는 충분히 알려지지 않고 있다. Mg 성형 제품을 가공하는 경우에는 100 μm이하의 미세 분진 이외에도 공정 조건에 따라서는 500 μm 이상의 분진도 발생할 수 있다. 특히 평균입경 500 μm 이상의 Mg에 대한 부유 상태에서의 폭발특성에 대한 자료는 거의 보고되고 있지 않다.

본 연구에서는 부유 Mg분진의 폭발위험성에 미치는 평균입경의 영향을 실험적으로 평가하였다. 이를 위해 20 L 분진폭발시험장치(스위스 Kuhnert AG 사 제작)를 사용하여 평균 입경이 서로 다른 3가지 종류의 Mg에 대하여 농도 변화에 따른 폭발특성을 조사하고 결과를 고찰하였다.

II. 실험

2.1. 시료

본 연구에서 사용한 Mg분진은 순도 99.5 % 이상으로서 입경이 서로 다른 3종류의 시료를 조사 대상으로 하였다. 입도분포는 분진의 폭발특성과 화염전파성에 큰 영향을 주는 인자이다. 그러므로 해당 분진의 폭발위험성을 검토하기 위해서는 먼저 입도특성에 따른 분체특성을 파악하는 것이 필요하다. Mg 시료 3종(Mg sample A, B, C)에 대하여 입도분석장치(Beckman Coulter LS 13320)를 사용하여 평균입경을 측정된 결과 각각 38, 142, 567 μm가 얻어졌다 [Fig. 1]. 실험에 사용한 Mg분진은 건조 등의 전처리

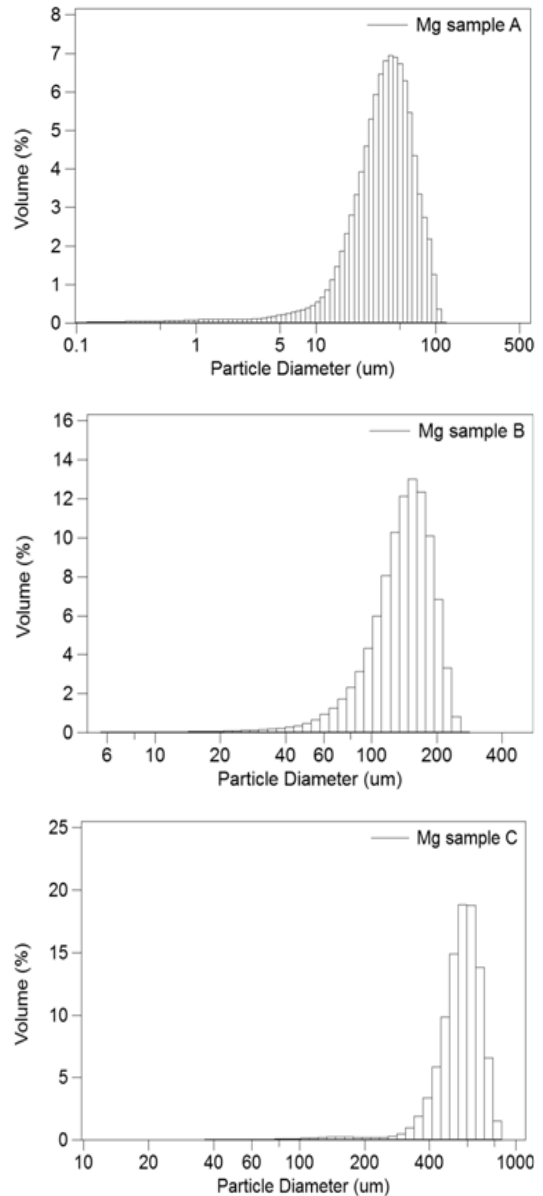


Fig. 1. Particle distributions of Mg sample dusts.

를 실시하지 않았으며, 약 23 °C 실온 조건에서 실험을 실시하였다.

2.2. 실험장치 및 방법

분진의 폭발특성을 측정하기 위해 본 연구에서 사용한 분진폭발시험장치를 [Fig. 2]에 나타냈다. 분

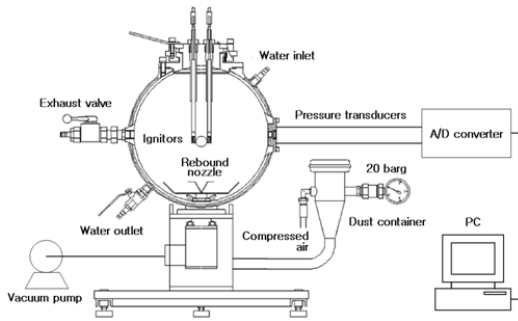


Fig. 2. The 20 L dust explosion sphere.

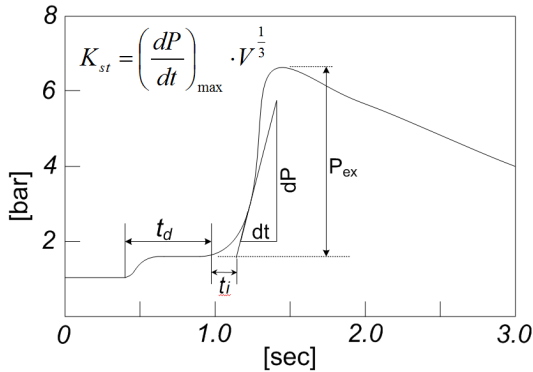


Fig. 3. Pressure-time curves in dust explosion.

진폭발 표준시험장치는 ASTM 시험규격에서 정한 측정장치를 채용하고 있는데[10], Fig.2.는스위스의 Kühner AG사가 제작하여 판매하고 있는 Siwek 20 L Chamber로 불리는 실험장치이다.

폭발용기 내부의 온도는 폭발특성치에 영향을 주는 인자이므로 용기 내부온도가 실험조건을 유지할 수 있도록 시험 중에는 용기 내에 설치된 수냉식 재킷을 통하여 상온의 수돗물을 흘려보내어 냉각시키면서 실험을 실시한다. 구체적인 시험방법은 먼저 시험할 농도의 분진을 6 L의 저장컨테이너에 충전한다. 다음에 분진 컨테이너의 밸브를 순간적으로 열고 20 bar의 압력을 갖는 공기를 유입시켜 대기압 상태의 분진-공기 혼합물을 폭발용기 내에 분산시킨다. 이 때 발생하는 분체 유동으로 인한 난류는 폭발압력, 압력상승속도, 폭발한계 등의 폭발특성에 영향을 주기 때문에 난류 레벨을 안정화 시킬 필요가 있다. 이를 위해 분진 분산 후에 60 ms의 일정한 시간 지연을 두어 부유 분진운의 유동성이 최대한 억제하도록 하였다[10]. 지연 시간 경과 후에 두 전

극사이로 전압을 인가시켜 5 kJ의 착화에너지를 갖고 있는 화학점화기를 사용하여 착화시켰다. 분진이 착화되어 폭발이 일어나면 Fig.3과 같이 시간-압력 과형이 관찰되는데 이러한 압력 과형을 통하여 폭발 하한농도, 폭발압력, 최대압력상승속도 등을 측정한다. 일정 농도에 있어서의 폭발특성시험평가는 상온(23℃), 대기압(1 atm)의 조건에서 실험을 3회 반복하여 그 결과를 평균하였다. 또한 실험 조건은 분위기온도 23℃에서 실시하였다. 폭발용기의 크기에 따라 폭발압력상승속도(dP/dt)가 변하기 때문에 이러한 영향을 보정하기 위하여 폭발지수(K_{st})를 사용한다. Fig.3에서와 같이 K_{st}는 $K_{st} = (dP/dt)_{max} \cdot V^{(1/3)}$ 의 관계를 이용하여 계산할 수 있는데, 이 때 V는 폭발용기의 체적(0.02 m³)이며 (dP/dt)_{max}는 최대폭발압력상승속도[bar/s]를 나타낸다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 농도에 따른 폭발특성

분진의 화재폭발특성에 영향을 주는 요인으로는 입경, 농도, 온도, 압력 등이 있는데 이 중에서 분체 특성에 관련하는 것이 입경이다. 본 연구에서는 입경 특성이 폭발위험성에 어떻게 영향을 주는지를 실험적으로 조사하였다. 이를 위해 [Fig.1]에서와 같이 38, 142, 567 μm의 서로 다른 평균입경(Mean diameter)을 가지는 Mg 부유 분진의 폭발특성을 실험적으로 평가하였다. 특히 연소성이 높은 Mg분진이 500 μm 이상의 비교적 큰 입경을 갖는 부유 분진 상태에서 폭발위험성을 나타내는데 대한 연구는 보고된 사례가 없다. Mg시료(Sample A)의 전자현미경(SEM; Scanning electron microscope) 사진을 [Fig.4]에 나타냈다. Mg분진의 표면은 파단면이 많이 관찰되는데 이는 괴상의 Mg 금속을 파쇄하여 Mg분진을 제조하는 과정에서 발생된 것으로 사료된다. 또한 Mg의 표면 강도는 Al 등의 다른 금속에 비하여 약하기 때문에 외력에 의해 파쇄될 수 있으므로 실험시의 취급 중에는 주의가 필요하다. [Fig.5]는 38 μm의 평균입경을 가진 Mg분진폭발에 있어서 농도변화에 따른 최대폭발압력(P_m)의 예이다. 농도 증가와 함께 P_m은 점점 증가하는데 1250 g/m³에서 최대값을 나타내며 그 이상의 농도에서 점차로 감소하는 경향을 보이고 있다. [Fig.6]은 Mg분진(38 μm)의 농도 변화에 따른 P_m을 폭발압력지수(K_{st})와 함께 나타낸 것이다. 최대폭발압력상승속도([dP/dt]_m)는 2000 g/m³에서 최대가 되며 그 이상의 농도에서 완만하게 감소하고 있다. P_m과 (dP/dt)_m의 측정은 폭발용기 측면에 설치되어 있는 2개 압력센서의 출력값에

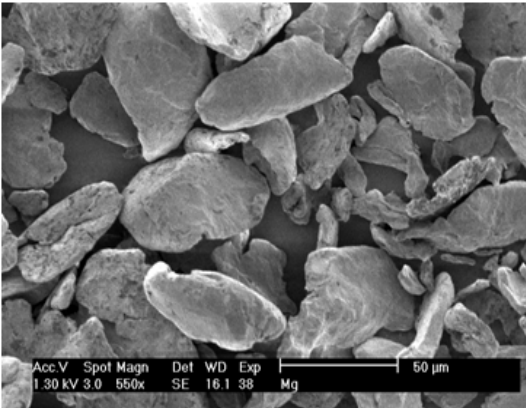


Fig. 4. SEM of Mg dust sample (38 μm).

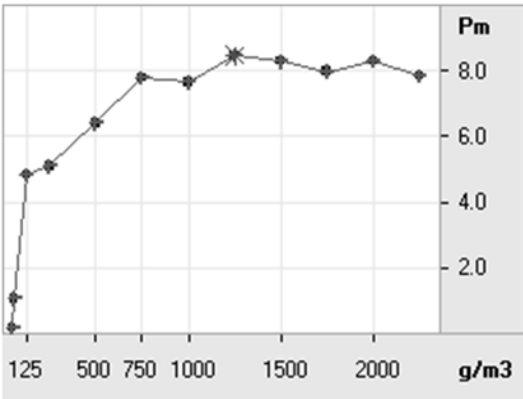


Fig. 5. Sample of P_m in Mg of 38 μm.

대한 평균치로 구하였다. 폭발용기 내에서 분진폭발을 일으키기 위해서는 부유 분진운의 형성이 필요하며 이를 위해서 폭발용기 내에 압축 공기에 의한 분산 방법을 사용하고 있다. 압축 공기에 의해 분진이 분산되는 과정에서 분진-공기 혼합기는 난류성 기류가 될 수 있으므로 동일 농도 조건이라도 분진의 분산형태가 달라져 착화시의 화염전파속도가 변동할 가능성이 있다. 그러므로 가스 폭발에서와는 달리 분진폭발에서는 분진운의 농도 불균일에 의해 [Fig. 6]에서와 같이 농도 변화에 따른 P_m이 일정한 비율로 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 또한 농도 증가에 따라 P_m이 증가하는 경향은 [Fig.6]에서와 같이 확인할 수 있었으며, K_{st}[bar·m/s]는 $[dP/dt]_{max} \cdot V^{(1/3)}$ 의 관계식을 사용하여 계산하였다. P_m과 K_{st}는 각각 8.5 bar, 42 [bar·m/s]가 얻어졌다. K_{st}는 분진혼합기의 난류레벨에도 의존하기 때문에 분진폭발에 따

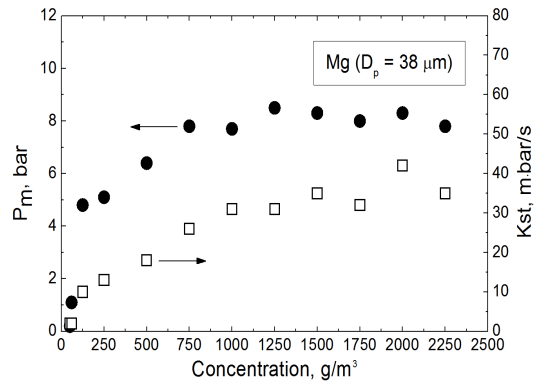


Fig. 6. Evolution of P_m and K_{st} with dust concentration in Mg of 38 μm.

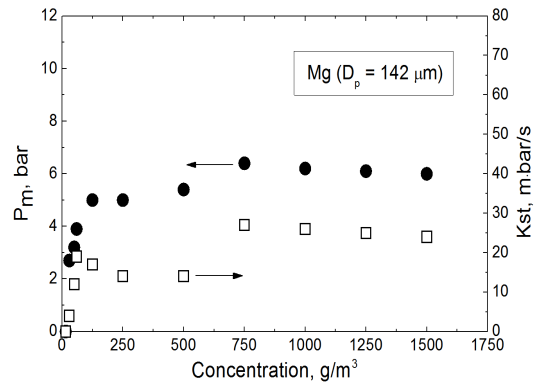


Fig. 7. Evolution of P_m and K_{st} with dust concentration in Mg of 142 μm.

른 분진-공기 혼합기의 에너지 방출속도만을 반영한 파라메타라고 볼 수는 없다. 그러므로 K_{st}값을 실제 분진폭발이 발생할 수 있는 장치나 설비에 적용하는 경우에는 공정에서의 난류 레벨을 함께 고려할 필요가 있다. 평균입경 142 μm의 Mg분진의 농도 변화에 따른 P_m과 K_{st}를 [Fig. 7]에 나타냈다. 142 μm의 Mg에서의 P_m과 K_{st}는 각각 6.4 bar, 26 [bar·m/s]로 나타났으며, 38 μm의 Mg에 비하여 감소하는 것을 알 수 있다.

3.2. 입경에 의한 폭발압력의 영향

P_m은 분진운이 폭발하는 동안에 방출된 총발열량에 해당되며 (dP/dt)_m는 반응열의 방출속도와 관련되기 때문에 이러한 폭발 파라메타는 폭발특성을 이해하는데 중요한 정보가 된다. Mg의 입경 변화가 P_m에 미치는 영향을 [Fig. 8]에 나타냈는데, 입경이 증가

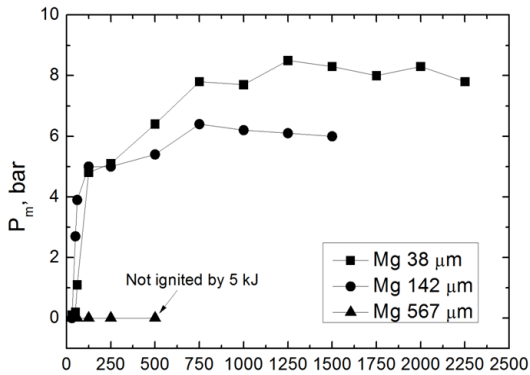


Fig. 8. Variation of P_m with dust concentration for various particle sizes.

하면 분진 농도에 관계없이 P_m 이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 평균입경 567 μm 의 Mg분진에서는 폭발이 관찰되지 않았는데, 본 연구에서 사용한 착화 에너지(5 kJ)로 열적평형에 이르기 위한 에너지의 공급이 충분하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 또한 [Fig. 1]의 Mg sample C(567 μm)의 입도 분포에서 알 수 있듯이, 평균입경 567 μm 의 분진에는 최대 입경 800 μm 의 입자 만이 아니고 입도가 약 900 μm 의 넓은 범위에 걸쳐 크고 작은 입자로 구성된 분체 특성을 가지고 있다. 이러한 분체 특성은 공기중의 분진 체류 시간을 짧게 하여 분산성을 크게 저하시켜 이로 인해 분진이 착화할 수 있는 최소착화에너지(MIE ; Minimum Ignition Energy)를 증가시키는 요인으로 작용한 것으로 추정된다. 그러므로 567 μm 의 Mg분진을 착화시키기 위해서는 본 연구에서 사용한 5 kJ 보다 큰 에너지가 필요할 것이다. 또한 입경 변화에 따른 Mg의 폭발하한농도(LEL)는 38, 142 μm 에서 각각 30, 40 $[\text{g}/\text{m}^3]$ 로 나타났다. Mg입경이 증가할수록 LEL은 증가하였는데, 입경이 증가하면 폭발발생 위험성이 상대적으로 낮아지는 것을 알 수 있다. Mg 입경의 변화가 폭발압력상승속도($(dP/dt)_m$)에 미치는 영향을 [Fig. 9]에 나타냈다. 농도가 증가할수록 입경에 따른 $(dP/dt)_m$ 의 상승률 변화 차이가 크게 나타나고 있지만 경향은 P_m 의 경우와 유사한 결과를 나타내고 있다. 분진폭발특성 실험에서는 고압 분산 공기에 의한 농도 기율기 이외에도 Mg와 같이 취성이 높은 시료의 경우에는 미세한 시료 변형이 발생할 가능성이 있는데 이로 인한 입경 변화로 인하여 폭발성이 $(dP/dt)_m$ 의 상승률 변화에 영향을 주었을 가능성도 있다.

Mg분진폭발에 있어서 입자 연소에 대한 기존의 연구를 살펴보면 Mg용융에 따른 기체 상태의 연소 메커

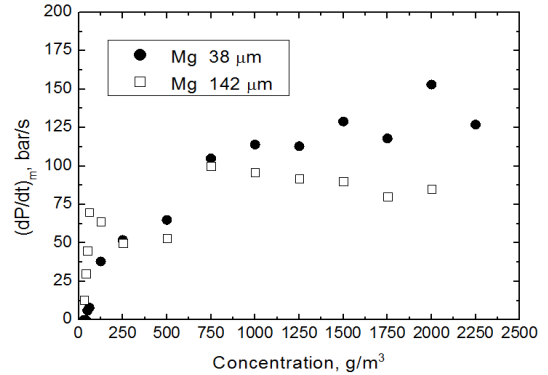


Fig. 9. Variation of $(dP/dt)_m$ with dust concentration for various particle sizes.

니즘이 제시되고 있다[11-12]. Dreizin 등[11]은 미소 중력장(Microgravity field)에서 Mg분진의 화염을 관찰한 결과 예열대(Preheat zone)과 연소대(Combustion zone)으로 구성되어 있었으며, 기체상 화염에서 나타나는 산화마그네슘(MgO)은 연소된 입자 표면에서 생성된 MgO의 주요 발생원이 아님을 제시하였다. 또한 초기 연소 메커니즘으로서 Mg용융 입자 내로의 산소 용해가 기체상 연소와 함께 동시에 시작되며 산화반응이 진행되는 것이라고 설명하고 있다[12]. Han 등[1]은 Mg분진의 발화특성을 열분석장치(TGA/DSC)로 조사하여 열분해반응이 400~500 $^{\circ}\text{C}$ 에서 일어나며 550 $^{\circ}\text{C}$ 에서 급격한 발화가 일어나는 것을 실험적으로 제시하고 있다. Vilyunov 등[13]은 Mg금속입자 표면의 산화 피막에 흡착된 공기 중의 산소 이온이 확산되어 산화반응이 일어나는데 착화에너지에 의해 금속 입자의 온도가 급격하게 증가하면 금속 증기가 발생하여 기체상 균일 확산반응에 의하여 연소가 일어남을 제안하였다. 종래의 Mg연소 특성에 대한 연구결과를 바탕으로 Mg분진폭발을 추정해 보면 Mg 입자가 연소하기 위해서는 먼저 예열대(Preheat zone)에서 입자가 열분해되기 위한 일정한 가열 시간이 필요하다. 그러므로 분진폭발이 지속되기 위해서는 [Fig. 3]의 시간-압력 곡선에서 나타난 유도시간(t_i ; Induction time)이 중요하다. t_i 는 분진 입자를 가열하는데 소요되는 시간으로서, 폭발하한농도 근방에서는 t_i 가 크기 때문에 연소속도가 작지만 농도 증가에 따라 t_i 가 감소하기 때문에 연소속도가 빨라지며 그 결과 P_m 및 $(dP/dt)_m$ 이 증가한다.

VI. 결론

본 연구에서는 부유 Mg분진의 평균입경이 폭발

위험성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하기 위하여 서로 다른 평균입경(38, 142, 567 μm)을 갖는 Mg분진에 대하여 농도 변화에 따른 폭발압력특성을 평가하고 고찰하여 이하의 결과를 얻었다.

(1) Mg의 폭발하한농도(LEL)는 38, 142 μm 에서 각각 30, 40 $[\text{g}/\text{m}^3]$ 로 나타났다.

(2) Mg의 입경변화에 따른 폭발압력(P_m)과 폭발압력지수(K_{st})는 각각 38 μm 에서 8.5 bar, 42 $[\text{bar}\cdot\text{m}/\text{s}]$, 142 μm 에서 6.4 bar, 26 $[\text{bar}\cdot\text{m}/\text{s}]$ 로 조사되었다.

(3) Mg입경이 증가할수록 LEL은 증가하며 P_m 과 K_{st} 는 감소하는 경향을 나타냈는데, 이는 입경증가로 인해 폭발위험성이 상대적으로 낮아지는 것을 의미한다.

(4) 567 μm 의 Mg분진은 10 kJ의 착화에너지에 있어서 농도 변화에 따른 폭발특성 실험에서는 폭발이 관찰되지 않았는데, 이러한 원인으로는 입경 증가로 인하여 분산성이 저하되고 최소착화에너지가 높기 때문으로 추정된다.

참고문헌

- [1] Han, O.S. et al., Study on Ignition Hazards of Suspended Metal Fine Particles, Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA, 2012-OSHIRI-920, 5-19, (2012)
- [2] Dreizin, E. L., Berman, C. H., & Vicenzi, E. P., Condensed-phase Modifications in Magnesium Particle Combustion in Air, *Combustion and Flame*, **122**(1-2), 30-42, (2000)
- [3] Matsuda, T., Yashima, M., Nifuku, M., & Enomoto, H., Some Aspects in Testing and Assessment of Metal Dust Explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **14**(6), 449-453 (2001)
- [4] Nifuku, M., Koyanaka, S., Ohya, H., Barre, C., Hatori, M., Fujiwara, S., Ignitability Characteristics of Aluminium and Magnesium Dusts that are generated During the shredding of Post-consumer Wastes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **20**(4-6), 322-329 (2007)
- [5] Li, G., Yuan, C. M., Fu, Y., Zhong, Y. P., & Chen, B. Z., Inerting of Magnesium Dust cloud with Ar, N₂ and CO₂. *Journal of Hazardous Materials*, **170**(1), (2009)
- [6] Li, G., Yuan, C. M., Zhang, P.H., Chen, B.Z., Experiment-based Fire and Explosion Risk Analysis for Powdered Magnesium Production Methods, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **21**, 461-465 (2008)
- [7] Kuai, N. S., Li, J. M., & Chen, Z., Study on the Risk Control of Magnesium Dust Explosion Based on Inherent Safety Principle, *Fire Science and Technology*, **29**(5), 369-372 (2010)
- [8] Han, O.S., Lee, K.W., Properties of Explosion and Flame Velocity with Content Ratio in Mg-Al Alloy Particles, *KIGAS*, **16**(4), 32-37 (2012)
- [9] Han, O.S., Lee, K.W., Influence of the Magnesium Content on the Explosion Properties of Mg-Al Alloy Dusts, *KIGAS*, **16**(6), 1-6 (2012)
- [10] ASTM E1226, Standard Test Method for Pressure and Rate of Pressure Rise for Combustible Dusts, The American Society for Testing and Materials, (1988)
- [11] Dreizin, E. L., & Hoffmann, V. K., Experiments on Magnesium Aerosol Combustion in Microgravity. *Combustion and Flame*, **122**(1-2), 20-29 (2000)
- [12] Dreizin, E. L., & Shoshin, Y., Particle Combustion Rates in Premixed Flames of Polydisperse Metal-air Aerosols. *Combustion and Flame*, **133**, 275-287 (2003)
- [13] Vilyunov, V.N. and Zarko, V.E., Ignition of Solids, *Studies in Physical and Theoretical Chemistry*, No.60, 329-345 (1989)