

마그네슘 부유 분진의 입자 체류시간과 발화온도

*한우섭

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 (2015년 5월 7일 접수, 2015년 6월 5일 수정, 2015년 6월 8일 채택)

Ignition Temperature and Residence Time of Suspended Magnesium Particles

[†]Ou-Sup Han

Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA 339-30 Exporo, Yuseong-gu, Deajeon 305-380, Korea (Received May 7, 2015; Revised June 5, 2015; Accepted June 8, 2015)

요 약

본 연구에서는 부유 Mg분진의 최소발화온도(MIT)에 있어서 입자 체류시간이 어떠한 영향을 주는지를 실험 자료와 입자속도의 계산결과를 사용하여 조사하였다. 평균입경이 증가하면 Mg분진의 MIT는 증가하는 반면에 입자 체류시간(Residence time)은 지수함수적으로 감소하여 분진의 발화 가능성이 저하되는 요인이 될 수 있음을 계산을 통해 확인할 수 있었다. 또한 온도증가에 의한 입자속도에의 영향은 평균입경이 클수록 미세하지만 증가 하는 결과가 얻어졌다.

Abstract - Effects of residence time on the MIT(Minimum Ignition Temperature) in suspended Mg particles are examined by using MIT experimental data and calculation results of terminal velocity. With increasing of the average particle diameter, we were able to identify that MIT of Mg dusts increased and the calculated residence time of particle decreased exponentially. Also, the influence on terminal velocity due to temperature increase increased slightly with increasing of average particle diameter.

Key words : magnesium particles, terminal velocity, minimum ignition temperature, residence time

l. 서 론

최근 국내 사업장에서 발생하고 있는 금속분진의 폭발사고를 보면 마그네슘, 알루미늄 등의 경금속에 의한 사례가 가장 많다. 특히 마그네슘은 비중이 1.7 로서 실용성 금속 중에서 가장 작지만, 비중 대비 인 장강도로 표현되는 비강도(Specific tenacity)는 알루 미늄이나 강철보다 높은 특징을 가지고 있다. 또한 진동 흡수성과 절삭성이 매우 우수하고 재활용이 가 능한 재료로서 사용량이 증가하고 있다. 반면에 마 그네슘 분진은 공기 중의 산소와 반응성이 매우 풍 부하고 연소열도 크기 때문에 미분화가 될수록 위험 성은 더욱 증가하여 분진폭발 위험성이 높아진다. 마그네슘 분진의 폭발방지대책을 강구하기 위한 방 법은 다양하지만, 이러한 예방대책 중에서 착화원은 분진폭발의 발생에 직접적으로 작용하므로 착화원 의 제거는 매우 효율적인 안전대책이라 할 수 있다. 가연성 분진이 얼마나 쉽게 착화하는가를 나타내는 판단 기준으로서 발화온도가 있는데[1], 공기 중에 부유분산된 분진운(Dust cloud)이 발화할 수 있는 가장 낮은 온도를 최소발화온도(Minimum Ignition

[†]Corresponding author:hanpaule@kosha.or.kr Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

Temperature ; MIT)라고 한다. 이러한 MIT의 측정 장치는 Godbert-Greenwald(G-G) Furnace를 활용 한 시험장치가 과거에 주로 사용되어 왔으며[2], 현 재에는 개량된 G-G Furnace를 채용한 IEC규격의 국제표준시험장치로 표준화되었다[3]. MIT에 대한 기존의 연구를 보면 실험실적 규모에서 측정된 발화 온도는 실규모 장치에 적용하는 경우에는 차이가 발 생할 수 있으며[4], 발화온도에의 영향은 분진농도 의 변화와 유속에 따른 입자의 체류시간과 같은 요 인에 영향을 받을 수 있다[5]. MIT의 실험 및 이론적 연구로는 폴리에틸렌 분진을 사용하여 입자의 급속 휘발과정을 고려한 제한적인 예측 모델연구가 수행 되었다[6-7]. 마그네슘 입자의 착화거동을 조사한 연 구로는 입자가 최초 발화되는 온도는 마그네슘의 녹 는점 부근에서 일어나는 것으로 추정되는데, 그러한 주장에 대한 근거로서는 발화 시에 표면연소 단계로 추정되는 연분홍색의 화염이 관찰되었다[8]. 그 밖 에 폐기물 처리과정에서 발생되는 마그네슘 분진의 MIT에 대한 실험적 조사도 보고되었다[9]. 마그네슘 분진의 MIT에 있어서 입경의 영향을 제한적 온도 조 건에서 조사하였는데[10], 입경이 증가할수록 MIT 가 증가하는 결과를 얻었지만 일정 크기 입경의 마 그네슘 분진에서는 발화가 일어나지 않았다. 그러나 마그네슘 발화온도특성에 있어서 평균입경에 따른 입자의 물리적 특성이 발화온도에 미치는 영향은 검 토되지 못하였다.

본 연구에서는 마그네슘(Mg) 분진의 발화온도 측 정에 있어서 분진의 입경특성이 어떠한 물리적 영향 을 줄 수 있는지를 실험결과 및 계산을 통하여 조사 하였다. 이를 위해 서로 다른 평균입경을 가지는 3 종의 Mg분진을 사용하여 입자속도 및 입자 체류시 간 등을 추정하고 고찰하였다.

Ⅱ. 실험 및 계산

2.1 시료 및 입경 특성

본 연구에서 조사 대상으로 한 Mg분진 3종(Mg, 순도 99.6 wt%, Alfa aesar)의 입도분포의 측정 및 평균입경의 분석결과의 예를 Fig. 1에 제시하였다. MIT의 측정에 있어서 평균입경이 분진 입자의 속도 와 입자의 발열에 어떻게 영향을 주는지를 조사하고 자 하였다. 이를 위해 매우 작은 입경의 38 µm, 중간 크기의 142 µm, 그리고 다소 큰 입경의 567 µm의 Mg 시료를 선정하였다.

2.2 폭발화염 의 연소입자 거동

Mg분진의 폭발 시에 전파화염 내의 연소입자 거 동을 조사하기 위하여 Fig. 2와 같은 화염계측장치 를 사용하였다. 실험장치는 화염전파용 수직 연소관,



Fig. 1. Particle size distribution of Mg samples.



Fig. 2. Measurement system for observation of burning dust particles.

화상기록장치, 듀얼펄스 레이저, 제어용 컴퓨터로 구 성되어 있다. Mg화염은 강한 훠염(Luminous flame) 을 동반하기 때문에 532 nm의 Band-pass 필터를 사 용하였다. 또한 화염 중심부의 입자만을 선택적으로 관찰하기 위하여 화염 중심부의 수직면을 관통하도 록 5 mm의 레이저 광 시트를 만들고 고해상도 비데 오 카메라를 사용하여 연소입자의 선택적 계측이 가 능하도록 하였다.

2.3. 온도장에서의 입자 체류 시간

MIT시험장치의 가열로(Furnace by electrical heating)의 내부 공간은 원통형(지름 36.5mm, 높이 250 mm)의 형태를 하고 있다[3],[10]. 실험에서는 원 통형 가열로의 고온 내부 공간을 분진운이 낙하하면 서 발화 여부가 결정된다. 그러므로 MIT시험에서의 입자 발화특성을 검토하기 위해서는 일정온도 공기 분위기에서 입자가 가열되는 시간을 검토해야 하는 데, 이를 계산하기 위해서는 고온 공간을 분진이 어 느 정도의 속도로 통과하는지를 아는 것이 필요하 다. 이와 같이 분진 입자의 속도를 알면 고온공기 분 위기에서 입자 체류시간(Residence time, t_{res})을 예 측할 수 있다. 또한 입자가 가열로 내부 공간에서 체 류하는 시간을 통하여 일정 온도조건에서 입자가 열 분해되어 발화하는데 필요한 가열시간도 추정할 수 있다.

일정 크기의 고온 환경을 가지는 가열로(높이 H_i) 내를 분진이 통과할 때에 얻어지는 분진입자의 속도 를 계산하기 위하여 Fig. 3과 같은 조건을 가정하였 다. 실온(T₀), 대기압(P₀)에서 초기 속도(V₀)를 갖는 입자는 일정 크기의 온도(T)와 압력(P)을 갖는 가열 로 내부로 진입하면 가속하여 최대속도인 중단속도 (Terminal velocity, V)가 된다. 그러므로 공기의 저 항을 고려한 분진 입자의 운동방정식은 식(1)과 같 이 표현할 수 있다.



Fig. 3. Prediction of dust velocity in furnace.

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = mg - D \tag{1}$$

여기서 D는 항력(Drag force)이며 (1)식은 식(2) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$m \frac{dv}{dt} = mg - D \tag{2}$$

Newton의 저항법칙(Law of resistance)으로부터 D는 식(3)과 같다.

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 S \tag{3}$$

식(3)에서 C_D는 항력계수(Drag coefficient), p는 공기의 밀도, u는 공기와 분진입자 간의 상대속도 이며 S는 분진의 면적이다. 공기유체장에 있어서 C_D는 Re수(Reynolds number)에 영향을 받는데 입 자속도(u)가 증가하면 Re수는 증가하며 C_D는 감소 한다[11]. 층류성 유체(Laminar)나 Re수가 1보다 작 은 Stokes유체에서는 대류력(Convective forces)의 영향을 무시할 수 있으므로 구형(Spherical) 형태 입 자의 C_D는 24/Re로 표현된다[12]. Re수가 1이상 및 1000 미만의 천이(Transition)단계 유체장에서 C_D는 24/Re^{0.5}이며, 또한 난류성(Turbulent) 유체를 Re수 가 1000보다 큰 경우로 가정하는 경우에 항력계수는 C_D = 0.44의 고정값으로 나타낼 수 있다[13]. 예를 들면 구형(Spherical)의 분진이 층류유체 내에서 받 는 항력(D)는 식(4)와 같이 Stokes법칙으로 나타내 어지며 분진입자에 적용할 수 있다.

 $D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 S = 6\pi \mu r v \tag{4}$

식(4)를 식(2)에 대입하면 식(5)가 얻어진다.

$$m\frac{dv}{dt} = mg - 6\pi\mu rv \tag{5}$$

식(5)에서 입자속도 V는 중력(Gravity force)과 항 력(Drag force)이 균형을 이룰 때이므로 식(5)에서 (dv/dt) = 0이 되었을 때의 속도가 된다. 또한 식(5) 는 층류유체의 경우이지만 난류유체에서의 Cn는 0.44이므로 식(2)에서 항력(D)는 D=0.22pm²v²가 되 어 식(5)의 계산식은 달라진다. 이와 같이 입자속도 V는 Re수에 따라 달라지지만, 입자속도 V를 알지 못하면 Re수를 계산할 수 없다는 모순이 일어난다. 그러므로 본 연구에서는 먼저 층류상태에서의 입자 속도를 계산하고 계산된 속도에 대한 Re가 1이하이 면 입자속도 V로 결정하고, 만일 Re가 1이상이면 Cp=24/Re^{0.5}를 적용하여 입자속도를 재계산하여 Re 가 1000 이하이면 그 때의 속도를 입자속도로 결정 하였다. 만일 Re가 1000이상으로 나오면 Cp=0.44를 새로 적용하여 입자속도를 재계산하였다. 또한 온도 (t) 변화에 따른 건조공기의 밀도(p) 및 점성계수의 데이터는 관련 문헌자료를 사용하여 계산하였다 [14].

Ⅲ. 결과 및 고찰

3.1. Mg의 연소특성

금속분진은 분진조건에 따라 다양한 연소특성을 나타낸다. 알루미늄(Al)의 경우에는 부유분진 조건 에서 폭발성이 크지만 퇴적 Al분진에서는 가스 불 꽃을 사용하여도 쉽게 착화가 일어나지 않는 것이 관찰되었다. Al분진은 가열하면 표면에 산화피막이 형성되는 것이 알려져 있는데 이러한 이유로 화염전 파가 일어나지 않는 것으로 판단된다. 반면에 Mg분 진은 공기중에 부유한 상태에서만이 아니고 퇴적 상 태에서도 착화가 쉽게 일어났다. 퇴적 Mg분진의 착 화에 따른 화염전파 모습을 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4의 최상부 사진은 Mg분진이 폭 10 mm, 길이 150 mm, 깊이 5mm의 조건으로 퇴적시키고 시료의 중 심에서 좌측 부분에 스프레이 형태로 수분을 뿌린 상태이며, 중간 사진은 시료 좌측 말단부에서 착화 하여 우측방향으로 화염이 전파하는 모습이다. Fig. 4는 평균입경 142 µm의 Mg분진의 예이지만, 38 µ m, 567 µm의 퇴적 Mg분진에서도 화염전파가 관찰 되었다. 분진입경에 따른 화염전파 특성은 다르게 나타나며, 수분을 함유한 Mg분진은 Fig. 4의 중간 및 최하단 사진에서 알 수 있듯이 격렬한 연소반응 을 보이며 매우 밝은 화염이 발생하였다. Fig. 5는 단면이 정사각형(150×150 mm)인 수직배관 내의 부 유 Mg분진(38 µm, 500 g/m³)이 폭발하여 상방향으 로 화염이 전파하는 모습을 나타내고 있다. 연소 시



Fig. 4. Spread flame over Mg dust layer of 142 μ m.



Fig. 5. Upward flame propagation of Mg dust cloud of 38 μ m.

에 강렬한 백색 발광으로 일반적인 계측으로는 화염 을 관찰할 수 없으므로 감광필터를 사용하여 화염을 가시화하였다. Mg분진 화염면(Leading flame edge) 은 가스폭발 화염과 같이 연속적(Continuous flame) 이지 않으며 화염면 후방에 위치하는 연소대(Reaction zone)에는 개별적으로 연소하고 있는 분진입자 가 명확히 관찰되었다. 연소입자는 화염면 전방의 온도 기울기를 가지는 예열대를 통과하며 가열되어 열분해되며 발화하는 것으로 판단된다.

3.2. 분진의 체류시간과 발화온도

가열로(Furnace) 내부의 입자 체류시간(tres)은 분 진의 발화에 영향을 주는 요소가 된다. 체류시간을 추정하기 위해서는 분진입자의 속도를 알아야 하며 이를 위해 입자를 구형(Spherical)으로 가정하면 면 적(S)은 πr²이며 질량(m)은 (4ρ_sπr³/3)이 되므로 식 (2) 및 (3)을 사용하여 계산할 수 있다. 입자속도(V) 는 층류(Re<1)에서 (2p_sr²g/9µ)이며, 천이영역(1≤ Re<1000)에서 {(ρ_sg/9)·(2r³/ρμ)^{0.5}}^{2/3}가 된다. Mg의 평균입경에 따른 MIT의 실험값은 38, 142 µm에서 각각 710, 740 ℃였으며 567 µm에서는 발화가 관찰 되지 않았다[10]. 퇴적 상태의 567 μm의 Mg분진은 불꽃 등의 착화원에 의해 연소가 일어나지만, 부유 상태가 되면 입경 증가가 입자의 낙하속도를 증가시 켜 발화특성에 영향을 줄 것으로 예상된다. Fig. 6은 25℃에서의 Mg의 밀도(ρ_s)는 1783 kg/m³, 공기의 점 성계수(µ)는 18.2 µPa·s를 사용하여 입경 증가에 따 른 입자속도(V)와 해당 V에서의 Re수를 계산한 결 과이다. 입경 증가와 함께 V는 선형적으로 증가하며 Re수는 지수함수적으로 증가하는 경향을 보였다. 입자 체류시간(tres)과 Re수를 입경에 따라 계산한 결 과를 Fig. 7에 나타냈다. 공기저항(D)은 식(3)에서와



Fig. 6. V and Re with mean diameter of Mg dust.

같이 입자속도의 제곱(V²)과 입자면적(S)에 비례하 여 증가한다. 입경 38 µm에서 Re수는 0.191로 층류 상태이지만, 입경이 67 µm로 증가하면 Re수가 1.030으로 층류상태에서 천이(Transition) 상태로 변 하며, 계속하여 입경이 증가하면 Re수가 증가하고 반대로 t_{res}는 감소한다. 그러므로 입경 증가는 V의 증가로 이어지며 Fig. 8과 같이 t_{res}의 감소 원인이 되 어 분진의 발화 가능성을 저하 시키는 요인이 될 수 있다. Fig. 8에서 MIT는 Mg의 평균입경 38, 142 µm 에서의 실험값(각각 710, 740 ℃)이며 이 때의 t_{res}는 3.25, 0.50 s가 된다. t_{res}를 분진입자의 열분해에 필요 한 가열시간으로 본다면 평균입경 567 µm에서의 0.126 s는 38, 142 µm의 경우(3.25, 0.50 s)보다 매우 작아 충분한 열적조건을 형성하기가 어려워 발화가 일어나지 않는 것으로 판단된다. 이상은 공기의 온



Fig. 7. *tres* and Re with mean diameter of Mg dust.



Fig. 8. MIT and *tres* with mean diameter of Mg dust.



Fig. 9. V with mean diameter and temperature.

Table. 1. MIT and residence time of Mg samples

Mean diameter of Mg dust, Dp (μ m)	MIT (℃)	Residence time, <i>tres</i> , s	Re [-]
38	710	3.25	0.191
142	740	0.50	4.626
567	*	0.126	73.748

✗ Not ignited

도를 25 ℃로 가정한 결과이지만, 실제로 가열로 Tube내의 온도는 고온이므로 공기의 온도변화가 입 자속도(V)에 미치는 영향을 검토하였다. Fig. 9는 각 분진입경에 있어서 공기 온도가 V에 미치는 영향을 계산한 결과이다. 식(3)에서 온도에 따른 공기밀도 (µ) 및 점성계수(µ)를 고려하여 계산하였으며, 평균 입경이 클수록 온도증가에 따른 V에의 영향이 미세 하지만 증가하는 경향을 나타났다. 38, 142 µm에서 의 V에의 온도영향은 무시할 정도로 작았다. 입경이 작을수록 투영 면적(S)이 감소하여 공기저항의 영향 이 작아지므로 입경이 작아질수록 온도에 따른 입자 속도의 영향은 감소하는 것으로 판단된다. 이상의 결과를 정리하면 Table 1과 같다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 Mg분진의 화염특성을 가시화하 고 부유 분진의 발화온도 특성에 있어서 입자의 체 류시간이 발화특성에 어떠한 영향을 주는지를 검토 하였다. 이를 위해 평균입경이 서로 다른 3종의 Mg 분진에 대한 발화온도 실험자료와 입자속도 계산결 과를 고찰하고 이하의 결과를 얻었다. (2) 평균입경이 증가(38, 142, 567 µm)하면 Mg분 진의 MIT는 710, 740 ℃로 증가하는 반면에 입자체 류시간(Residence time)은 각각 3.25, 0.50, 0.126 s로 지수함수적으로 감소하여 분진의 발화 가능성이 저 하되는 요인이 될 수 있음을 계산을 통해 확인할 수 있었다.

(3) 공기의 온도증가에 따른 분진 입자속도를 검 토한 결과 평균입경이 클수록 온도증가에 의한 영향 이 미세하지만 증가하는 결과가 얻어졌다.

REFERENCES

- Eckhoff, R. K., Dust Explosions in the process industries (3rd ed.), Amsterdam: Gulf Professional Publishing (2003)
- [2] Palmer, K. N., Dust explosions and fires. London: Chapman and Hall, 42-111 (1973)
- [3] IEC 61241-2-1-1994, Methods for Determining the Minimum Ignition Temperatures of Dust. Part 2: Dust Cloud in a Furnace at a Constant Temperature, Central Office of International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 11-27 (1994)
- [4] M. Mittal, B.K. Guha, Study of ignition temperature of a polyethylene dust cloud, Fire Mater., 20, 97-105 (1996)
- [5] U. Krause, M. Wappler, S. Radzewitz, F. Ferrero, On the minimum ignition temperature of dust clouds, in: Proceedings of Sixth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosion, vol. I, Dalhousie University, Halifax, NS, Canada, August 27.September 1, 68-76 (2006)
- [6] M. Mittal, B.K. Guha, Study of ignition temperature of a polyethylene dust cloud, Fire Mater., 20, 97-105 (1996)
- [7] M. Mittal, B.K. Guha, Models for minimum ignition temperature of organic dust clouds, Chem. Eng. Technol., 20, 53-62 (1997)
- [8] G. Li, C.M. Yuan, P.H. Zhang, B.Z. Chen, Experiment-based fire and explosion risk analysis for powdered magnesium production methods, J. Loss Prev. Process Ind. 21, 461-465, (2008)

- [9] M. Nifuku, S. Koyanaka, H. Ohya, C. Barre, M. Hatori, S. Fujiwara, S. Horiguchi, I. Sochet, *Ignitability characteristics of aluminium and magnesium dusts that are generated during the shredding of post-consumer wastes*, J. Loss Prev. Process Ind., 20, 322-329 (2007)
- [10] Han, O.S., Lee, J.S., Characteristic of Thermal Decomposition and Ignition Temperature of Magnesium Particles, KIGAS, 17(5), 69-74 (2013)
- [11] Almedeij J. Drag coefficient of flow around

a sphere : matching asymptotically the wide trend, Powder Technol, 186(3), 218-223 (2008)

- [12] Concha F., Settling velocities of particulate system, J. Powder Particle, 27, 18-37 (2009)
- [13] Gultieri C, Mihailovic DT. Fluid mechanics of environmental interfaces, Florida: Taylor & Francis; (2012)
- [14] National Astronomical Observatory, Rika Nenpyo (Chronological Scientific Tables), 87th ed., Maru-zen, Tokyo (2014)