

## 알루미늄 분진의 평균입경 변화에 따른 폭발위험성

†한우섭 · 한인수

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원  
(2014년 6월 17일 접수, 2014년 8월 11일 수정, 2014년 8월 12일 채택)

## Explosion Hazards of Aluminum Powders with the Variation of Mean Diameter

†Ou-Sup Han · In-Soo Han

Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA  
339-30 Exporo, Yuseong-gu, Daejeon 305-380, Korea  
(Received June 17, 2014; Revised August 11, 2014; Accepted August 12, 2014)

### 요 약

본 연구에서는 알루미늄 분말의 입자 크기에 따른 폭발특성을 20 L 분진폭발실험장치(Kühner제작)를 사용하여 조사하였다. 사용한 시료는 각각 16, 33, 88  $\mu\text{m}$ 의 체적기준 평균입경을 갖는 알루미늄 입자를 대상으로 실험을 수행하였다. 분진의 평균입경이 16, 33, 88  $\mu\text{m}$ 에서 폭발하한농도는 각각 40, 60, 125  $\text{g}/\text{m}^3$ 로서 분진의 입경이 증가하면 점차적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 각각의 알루미늄 분진에서 입자 크기의 증가는 폭발압력 및 분진폭발지수( $K_{st}$ )의 감소로 이어졌다. 이러한 본 연구 결과는 알루미늄 분말의 활용 및 안전 운전을 위한 중요 자료로 활용될 수 있다.

**Abstract** - In this study, the explosion characteristic of aluminium powders have been investigated as a function of particle size using by a 20 L dust explosion apparatus (Kühner). The tested aluminium particle sizes were the volume mean diameter of 16, 33 and 88  $\mu\text{m}$ . The lower explosion limit increases gradually with the increasing of dust particle diameter, respectively 40, 60, 125  $\text{g}/\text{m}^3$  in mean diameter of 16, 33 and 88  $\mu\text{m}$ . Also the increase in particle size for each aluminium dusts was found to cause an decrease in explosion pressure and  $K_{st}$  of dust explosion index, and a increase in the lower explosion concentration. Research results may have important implications for aluminum powders utilization and safety operation.

**Key words** : aluminium powder, dust explosion, explosion pressure, lower explosion limit

### 1. 서 론

알루미늄은 비중이 2.7로서 철(7.8)보다 매우 작고 다른 금속에 비해 소성가공이 용이하여 다양한 형상으로 성형이 용이하다. 이러한 특성을 활용하여 경량화에 의한 성능향상이 요구되는 각종 기계부품, 자동차, 항공기, 선박 등에서 알루미늄이 많은 사용

되고 있다. 반면에 알루미늄 재질의 제품은 제조, 가공의 연마, 절단 등의 작업과정에서 알루미늄 분진의 발생이 필연적으로 발생하는데, 이러한 알루미늄 분진은 착화원이 존재하면 분진폭발로 이어질 수 있다. 국내에서 발생한 알루미늄 분진의 폭발사고 경향을 보면 연마기, 분쇄기, 집진기와 그 주변에서 많이 발생하고 있다[1].

지금까지의 알루미늄의 폭발특성에 관한 연구로서는 알루미늄 분진폭발 시의 화염전파특성 및 분진 입자의 연소성에 대한 조사가 보고되고 있으며[2-6],

†Corresponding author:hanpaule@kosha.or.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

알루미늄 분진폭발 시의 피해저감을 위한 불활성가스 치환을 통한 효과가 알려지고 있다[7]. 또한 알루미늄 분진폭발 시의 공기, 산소 등의 산화제 성분때 따른 착화에너지의 영향을 조사하고 알루미늄의 폭발모델링이 제시되고 있다[8-9]. 그러나 알루미늄 분진폭발 시에 다양한 분진 평균 입경이 폭발특성에 미치는 영향에 대해서는 연구가 충분하지 않다. 알루미늄을 원료로 제품을 제조, 가공하는 사업장에서 발생하는 분진은 입도분포가 업종이나 공정에 따라 일정하지 않고 이로 인해 평균입경이 달라질 수 있기 때문에 폭발위험성을 파악하기가 쉽지 않다. 또한 기존의 문헌 등에 제시되고 있는 알루미늄 분진의 폭발특성값은 입경 조건이 명확하지 않은 것이 대부분이기 때문에 화재폭발특성 자료로서 활용하기가 곤란한 문제가 있다. 그러므로 알루미늄 분진폭발의 예방이나 피해저감을 위해서는 평균 입경의 변화가 알루미늄 분진 폭발위험성에 얼마나 영향을 주는지를 정량적으로 평가하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 알루미늄 분진의 평균 입경이 폭발위험성에 미치는 영향을 실험을 통하여 조사하였다. 이를 위해 20L의 폭발용기를 갖춘 분진폭발시험장치(Kühner Inc., Swiss)를 사용하여 농도 변화에 따른 폭발하한농도, 폭발압력 등의 폭발위험특성을 조사하고 측정결과에 대해 검토하였다.

## II. 실험

### 2.1. 실험 방법

분진폭발의 특성평가는 폭발민감도와 관련한 폭발하한농도, 그리고 폭발강도를 나타내는 최대폭발압력 등의 분진폭발 특성값에 대한 조사가 필요하다. 이를 위해 20 L의 체적을 갖춘 구형(Globular shape) 폭발용기 분진폭발시험장치(Kühner AG, Swiss)를 사용하였다. 분진의 폭발특성을 측정하기 위해 본 연

구에서 사용한 20 L 분진폭발시험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타냈다. 시험방법은 먼저 시험할 농도의 분진을 6 L의 저장컨테이너에 충전한다. 다음에 분진컨테이너의 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 분진을 분산시키고 착화시키기 전에 60 ms의 시간지연(time delay)을 두어 부유 분진운의 유동성이 최대한 억제하도록 하였다[10]. 지연 시간 경과 후에 두 전극 사이로 전압을 인가시켜 5 kJ의 착화에너지를 갖고 있는 화학점화기(chemical ignitor)를 사용하여 착화시켰다. 폭발용기 내부의 온도는 폭발특성값에 영향을 주는 인자이므로 용기 내부온도가 실험조건을 유지할 수 있도록 실험 중에는 용기 내에 설치된 수냉식 재킷을 통하여 상온의 수돗물을 흘려보내어 냉각시키면서 실험을 실시한다. 분진이 착화되어 폭발이 일어나면 Fig. 2와 같이 시간-압력 곡선이 관찰되는데 이러한 압력 곡형을 통하여 폭발하한농도, 폭발압력, 최대압력상승속도 등을 측정한다. 일정 농도에 있어서의 폭발특성실험은 상온(23 °C), 대기압(1 atm)의 조건에서 실시하였으며 실험을 3회 반복하여 그 결과를 평균하였다. 분진폭발 실험에 있어서 폭발용기의 용적 크기에 따라 Fig. 2에서와 같은 폭발압력상승속도(dP/dt)가 변하기 때문에 장치 크기에 따른 스케일 효과의 영향을 보정하기 위하여 분진폭발지수(Dust explosion index,  $K_{st}$ )가 사용되고 있다 [11-12]. 최대폭발압력상승속도[bar/s]를  $(dP/dt)_{max}$ , 폭발용기의 체적을 V라고 하면,  $K_{st}$ [bar · m/s]는  $K_{st} = (dP/dt)_{max} \cdot V^{(1/3)}$ 의 관계식으로 계산할 수 있다.

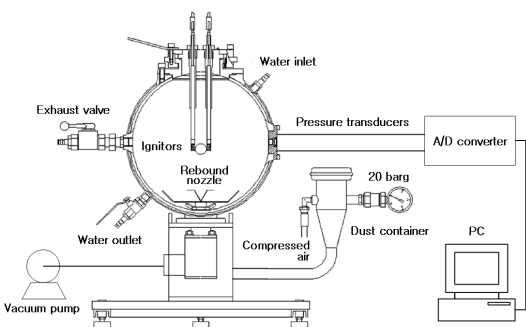


Fig. 1. 20 L dust explosion apparatus.

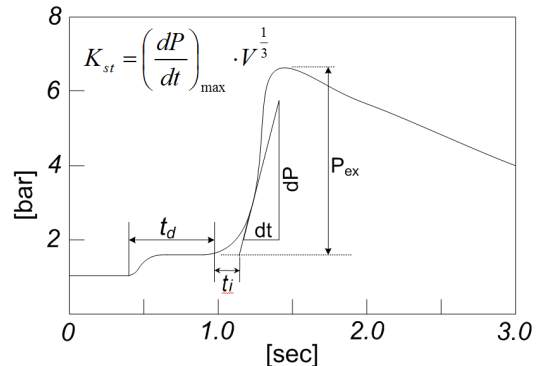


Fig. 2. Pressure-time curves in dust explosion.

## 2.2. 시료

본 연구에서 사용한 알루미늄 분진은 순도 99.5 % 이상으로서 입경이 서로 다른 3종류의 시료를 조사 연구 대상으로 하였다. 입도분포는 분진의 폭발특성과 화염전파성에 큰 영향을 주는 인자이다. 그러므로 해당 분진의 폭발위험성을 검토하기 위해서는 먼저 입도특성에 따른 분체특성을 파악하는 것이 필요

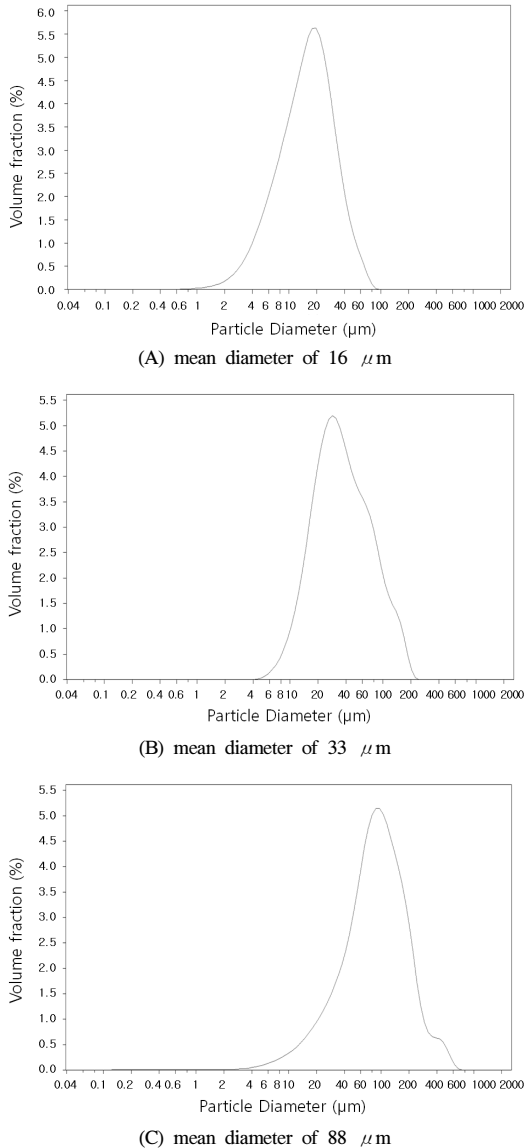


Fig. 3. Particle size distribution of aluminium dusts.

하다. Al시료 3종(Al samples ; A, B, C)에 대하여 입도분석장치 (Beckman Coulter LS 13320)를 사용하였다. 입도 분포를 측정된 결과 Fig. 3에서와 같이 평균 입경은 각각 16, 33, 88 μm가 얻어졌다. 실험에 사용한 분진은 건조 등의 전처리를 실시하지 않았으며 약 23 °C 실온 조건에서 실험을 실시하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 3.1. 폭발하한농도

부유, 분산되어 있는 분진-공기 혼합기의 폭발위험성은 크게 착화 가능성과 폭발강도로 나눌 수 있다. 착화 가능성은 분진이 얼마나 쉽게 착화할 수 있는지를 나타내는 지표로서 그 중에 하나가 폭발하한농도(Lower explosion limit,  $C_{min}$ )이며, 또한 폭발강도는 최대폭발압력( $P_m$ )과 분진폭발지수( $K_{st}$ )등에 의해 평가할 수 있다. 평균입경( $D_p$ )이 88 μm인 알루미늄 분진이 농도변화에 따른  $P_m$ 의 측정 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 농도 증가와 함께  $P_m$ 은 점점 증가하는데 6.8 bar의 폭발압력을 기점으로 농도증가에 따라 매우 완만히 감소하는 경향을 보이고 있다. 1000 ~ 2000 g/m<sup>3</sup> 구간에서와 같이 농도 증가에 따른  $P_m$ 의 변동은 일정하지 않는 것을 알 수 있다. 부유 분진의 형성을 위해서 폭발용기 내에 공기압으로 분산시키는 방법을 사용하고 있기 때문에 폭발용기 내의 난류는 항상 발생할 것으로 예측되며, 동일 농도에 서라도 분진운의 분산형태는 분산 기류 조건에 따라 확률론적으로 결정되기 때문에 착화시의 화염전파 거동이 미시적 관점에서 보면 동일 농도 조건이라 하더라도 달라질 가능성이 있다. 그러므로 농도변화에 따른 폭발압력이 일정하게 증가하거나 감소하지

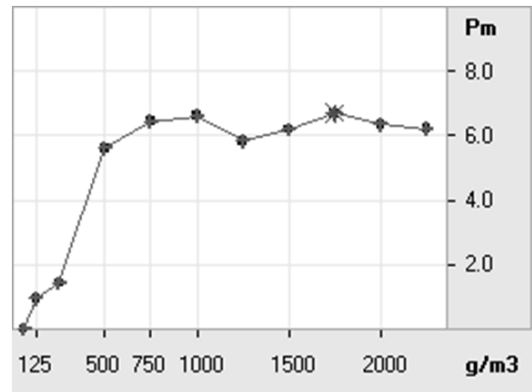


Fig. 4. DSC thermogram of HDPE in N<sub>2</sub> condition.

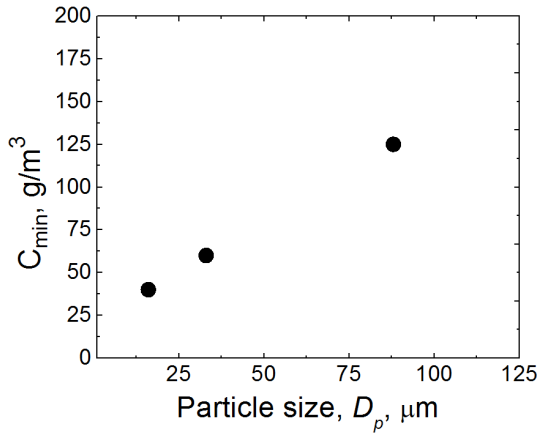


Fig. 5. Lower explosion limit ( $C_{min}$ ) of aluminium dusts with the variation of mean diameter.

않고 증감 변동을 하는 것으로 판단된다. 그러나 농도 증가에 따른 폭발압력의 증가와 계속적인 농도 증가에 따라 폭발압력이 감소하는 경향은 실험결과를 통하여 관찰이 가능하였다. 폭발하한농도( $C_{min}$ )는 폭발이 일어나는 최소한의 분진농도로서 화염전파가 지속적으로 가능한 분진의 최소농도를 의미한다. 압력상승이 0.1 bar 이상이 되는 경우를 폭발로 판정하는 방법도 제시되고 있는데[13], 본 연구에서는 국제시험규격에 따라 폭발압력 상승이 0.2 bar 이상인 경우를 폭발로 판정하였다[12-14]. 압력에 의한 폭발여부의 판정기준이 여러 가지로 제시되는 원인은 분진화염을 직접 관찰하기가 어렵기 때문이다. 분진폭발 시의 화염전파를 직접 관찰 할 수가 있다면 화염면(flame front)이 폭발용기의 벽면까지 전파하는 최소농도를  $C_{min}$ 으로 하면 가장 정확하다. 그러나 밀폐된 폭발용기에서는 분진화염의 전파거동을 직접 관찰하는 것이 불가능하고 알루미늄과 같이 폭발압력이 높은 경우에는 위험하기 때문에 직접 관찰은 간단하지가 않다. Fig. 5는  $C_{min}$ 에 미치는 평균입경( $D_p$ )의 영향을 조사한 것으로 폭발위험성이 높은 100  $\mu\text{m}$  이하의 입경을 중심으로 16, 33, 88  $\mu\text{m}$ 에서  $C_{min}$ 은 각각 40, 60, 125  $\text{g}/\text{m}^3$ 가 얻어졌으며  $D_p$ 가 증가하면  $C_{min}$ 은 증가하는 결과를 나타내고 있다. 금속분진폭발에서 입경 증가는  $C_{min}$ 의 증가로 나타나는데[11], 알루미늄의 경우에는  $C_{min}$ 에 미치는  $D_p$ 의 영향이 유사하게 나타나고 있다.

### 3.2. 폭발위험성에 미치는 입경의 영향

서로 다른 입경( $D_p$ )의 알루미늄 분진폭발에서 농도 변화에 따른  $P_m$  및  $K_{st}$ 의 실험결과를 Fig. 6 및

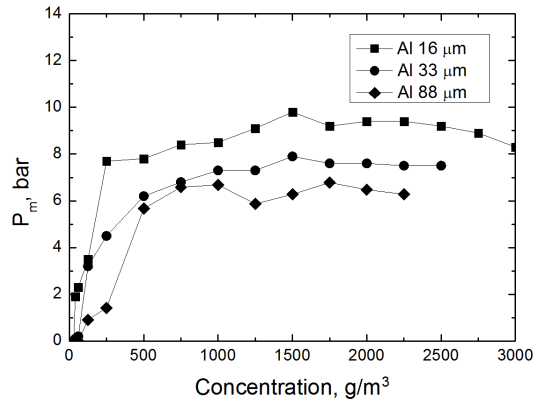


Fig. 6.  $P_m$  of aluminium dusts with different mean diameter.

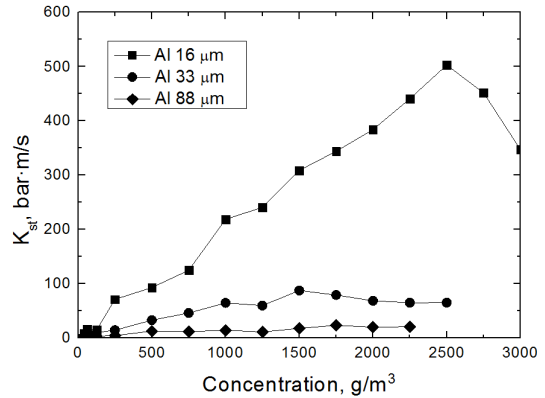


Fig. 7.  $K_{st}$  values of aluminium dusts with different mean diameter.

Fig. 7에 각각 나타냈다. 16  $\mu\text{m}$ 의  $D_p$ 에서의 알루미늄 분진의  $P_m$ 과  $K_{st}$ 는 각각 9.8 bar, 503 [ $\text{bar} \cdot \text{m}/\text{s}$ ]로서 본 연구대상 시료 중에서 가장 큰 폭발특성을 보였다.  $P_m$ 은 농도 1000  $\text{g}/\text{m}^3$ 까지 급격히 증가하며 1500  $\text{g}/\text{m}^3$ 에서부터 서서히 감소하는 경향을 보였다. 특히  $K_{st}$ 는 Fig.7에서와 같이 농도 증가에 따라 2500  $\text{g}/\text{m}^3$ 까지 직선적으로 급격하게 증가하다가 이후에 급격히 감소하는 특징을 보이고 있다.  $D_p$ 가 33  $\mu\text{m}$ 인 알루미늄 분진에 대해서도 폭발성의 증감 경향은 유사하지만,  $P_m$  및  $K_{st}$ 의 크기가 16  $\mu\text{m}$ 의  $D_p$ 를 갖는 알루미늄 분진에 비하여 급격히 감소하고 있는 것을 알 수 있으며, 이러한 입경 조건에서의  $P_m$ 과  $K_{st}$ 는 각각 7.9 bar, 87 [ $\text{bar} \cdot \text{m}/\text{s}$ ]로 나타났다. 더욱이 입경 크기가 더욱 증가한  $D_p$ 가 88  $\mu\text{m}$ 에서

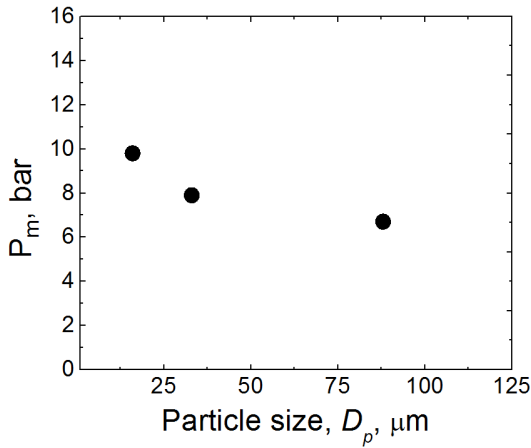


Fig. 8.  $P_m$  of aluminium dusts with the variation of mean diameter.

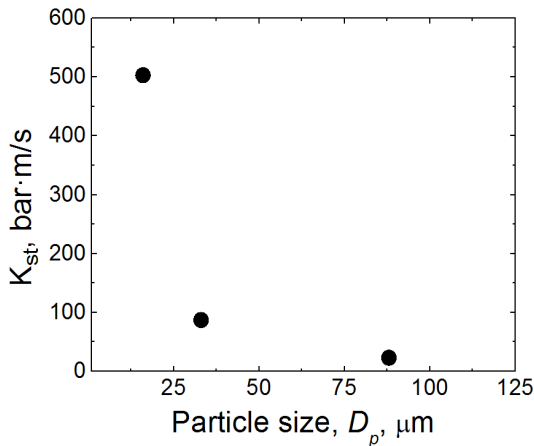


Fig. 9.  $K_{st}$  values of aluminium dusts with the variation of mean diameter.

$P_m$ 과  $K_{st}$ 는 각각 6.8 bar, 23 [bar · m/s]로서 입경 증가에 따른  $K_{st}$ 의 감소 경향이 더욱 크게 나타나고 있다. STP 상태의 공기 중에서 완전연소를 가정한 알루미늄 분진의 화학양론농도(stoichiometric concentration)는  $315 \text{ g/m}^3$ 로 계산되며 Al분진의 연소 반응은  $4\text{Al(s)} + 3\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3(\text{s})$ 와 같이 나타낼 수 있다[15]. Fig. 5에서  $1500 \text{ g/m}^3$  이상의 농도 증가에서  $P_m$ 은 거의 일정하거나 매우 완만한 감소로 이어지는데 화학양론농도 ( $315 \text{ g/m}^3$ ) 이상의 고 농도에서의 급격한 폭발압력 감소가 나타나지 않는 특징을 보이고 있다. 이러한 현상은 입경이 변화하더라

도 유사한 경향을 나타내고 있다. 이러한 원인으로서는 농도가 증가하면 입자 간의 거리가 작아지므로 열손실이 증가하고 입자 간의 응집 발생이 높아져서 침강속도 및 미연소 반응 입자가 증가하여 일정 크기의 반응 공간에서의 연소반응에 참여하는 분진 입자의 수가 거의 일정하거나 미세하게 감소하기 때문인 것으로 추정된다.

$D_p$ 의 변화에 따른  $P_m$ 과  $K_{st}$ 에의 영향을 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 나타냈다. 16, 33, 88  $\mu\text{m}$ 의  $D_p$ 조건에서  $P_m$  및  $K_{st}$ 는 각각 9.8, 8.5, 6.4 bar 및 503, 42, 26 [bar · m/s]의 결과가 얻어졌다. 입경이 증가할수록  $P_m$  및  $K_{st}$ 가 모두 감소하고 있지만, 입경에 의한 감소 경향은  $K_{st}$ 에서 더욱 크게 나타났다. 또한 16  $\mu\text{m}$ 의  $D_p$ 에서의  $K_{st}$ 는 502.7 [bar · m/s]로서 가장 높은 폭발등급인 St 3( $300 < K_{st}$ )에 해당되어 폭발위험성이 매우 높았으며, 이러한 연구 결과를 통하여 입경 증가가 폭발강도를 약화시키는 데 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 또한 50  $\mu\text{m}$  이하의 평균입경에서 폭발압력이 크게 증가하므로 폭발위험성에 특별한 주의가 필요하다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 알루미늄의 분진폭발에 있어서 폭발위험성에 미치는 평균 입경의 영향을 알기 위하여 서로 다른 3가지 종류의 입경을 갖은 알루미늄 분진의 농도 변화에 따른 폭발특성을 실험적으로 조사하고 고찰하여 이하의 결과를 얻었다.

(1) 알루미늄 분진의 폭발하한농도(Lower explosion limit,  $C_{min}$ )는 평균 입경 16, 33, 88  $\mu\text{m}$ 에서 각각 40, 60, 125  $\text{g/m}^3$ 이 측정되었으며, 평균입경이 증가하면 폭발하한농도가 증가하여 위험성이 감소하였다.

(2) 평균 입경 16, 33, 88  $\mu\text{m}$ 에서 알루미늄 분진의 최대폭발압력( $P_m$ )은 각각 9.8, 8.5, 6.4 bar가 측정되었으며, 입경이 증가할수록 폭발강도는 감소하는 경향을 나타냈다.

(3) 알루미늄 분진의 폭발압력지수( $K_{st}$ )는 평균 입경 16, 33, 88  $\mu\text{m}$ 에서 503, 42, 26 [bar · m/s]가 측정되어 입경이 증가할수록  $K_{st}$ 는 급격히 감소하였으며, 특히 평균 입경 16  $\mu\text{m}$ 에서의  $K_{st}$ 는 502.7 [bar · m/s]로서 가장 높은 폭발등급인 St 3( $300 < K_{st}$ )에 해당되어 폭발위험성이 매우 높게 나타났다.

## 참고문헌

- [1] Database for Major industrial accidents, Korea Occupational Safety and Health Agency, (1988 ~ 2013)
- [2] Kwok, Q. S. M., Fouchard, R. C., Turcotte, A., Lightfoot, P. D., Bowes, R., & Jones, D. E. G., "Characterization of aluminum nano-powder compositions", *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 27, 229-240, (2002)
- [3] Cashdollar, K. L., "Overview of dust explosibility characteristics", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13, 183-199, (2000)
- [4] Dreizin, E. L., "Experimental study of stages in aluminum particle combustion in air", *Combustion and Flame*, 105, 541-556, (1996)
- [5] Cashdollar, K. L., "Flammability of metals and other elemental dusts", *Process Safety Progress*, 13, 139-145 (1994)
- [6] Ballal, D. R., "Flame propagation through dust clouds of carbon, coal, aluminium and magnesium in an environment of zero gravity", *Proceedings of the Royal Society of London*, A385, 21-51, (1983)
- [7] Myers, T. J., "Reducing aluminum dust explosion hazards: case study of dust inerting in an aluminum buffing operation", *Journal of Hazardous Materials*, 159(1), 72-80, (2008)
- [8] O. Dufaud, M. Traore, L. Perrin, S. Chazelet, D. Thomas, "Experimental investigation and modelling of aluminum dusts explosions in the 20 L sphere", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23, 226-236, (2010)
- [9] Baudry, G., Bernard, S., & Gillard, P., "Influence of the oxide content on the ignition energies of aluminum powders", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 20(4-6), 330-336, (2007)
- [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] Eckhoff, R.K., "Dust Explosion in the Process Industries ; 3rd ed.", BH (2003)
- [12] ISO 6184/1, "Explosion Protection Systems-Part 1: Determination of Explosion Indices of Combustible Dusts in Air", Switzerland: *International Organization for Standardization*, (1985)
- [13] BIA/BVS/IES, "Brenn und Explosions ; Kenngrößen von Staube", Erich Schmidt Verlag, (1987)
- [14] BS EN 14034-3, "Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds - Part 3 : Determination of the Lower Explosion Limit LEL of Dust Clouds", (2006)
- [15] O. Dufaud, M. Traore, L. Perrin, S. Chazelet, D. Thomas, "Experimental investigation and modelling of aluminum dusts explosions in the 20 L sphere", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23, 226-236, (2010)