

Al 및 Zn 분진의 혼합에 따른 폭발특성의 변화

한우섭

한국산업안전보건공단산업안전보건연구원 화학물질안전보건센터

Explosion Characteristics in Dust Mixtures of Al and Zn Particles

Ou-Sup Han

Chemical Safety & Health Research Center,
Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

요 약

본 연구에서는 알루미늄(Al), 아연(Zn)이 단일 성분으로 존재하는 경우의 폭발위험성이 Al-Zn혼합물 분진에 비하여 어떻게 변화하는지를 알기 위하여 폭발하한농도(LEL), 최대 폭발압력(P_{max}) 등에 대한 폭발특성을 실험적으로 조사하였다. 그 결과 Al은 Zn의 혼합에 의해 폭발하한농도(LEL)가 급격히 증가하고 최대폭발압력이 감소하였으며, Al-Zn혼합물의 폭발위험성은 단일 성분의 Al에 비하여는 낮지만 Zn 단독의 경우보다는 높은 것을 알 수 있었다. 그러므로 Zn-Al혼합물이 Al보다 폭발성이 낮아지지만 화재폭발 가능성이 충분히 잠재되어 있으므로 예방대책이 필요하다.

1. 서 론

국내의 금속제품 취급 사업장에서는 금속 성형 제품의 표면 가공 처리를 위해 알루미늄 불을 사용하여 쇼트작업을 하고 있는 경우가 많은데, 그러한 작업 과정에서 알루미늄 분진이 발생하며 집진기 및 배관 덕트 내에서 분진폭발사고가 발생하고 있다. 그러나 최근 관련 사업장에서는 알루미늄 분진의 폭발 위험성을 경감시키기 위한 방법으로 아연 재질의 불을 사용하는 경우가 있다. 그러나 아연 불을 사용하여 알루미늄 제품의 표면 처리를 하면 알루미늄 분진과 아연 분진이 같이 발생하게 되며, 이렇게 발생된 알루미늄-아연 혼합물 분진도 폭발 위험성을 가지고 있으므로 폭발사고 방지대책을 강구하기 위해서는 이에 대한 폭발특성 자료를 확보하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 알루미늄(Al)-아연(Zn) 혼합물 분진이 단독의 알루미늄(Al) 또는 아연(Zn)에 비하여 어느 정도의 폭발위험성을 가지고 있는지를 실험적으로 조사함으로써 분진 폭발사고 예방에 기여하는 것을 목표로 하고 있다. 이를 위해 20 L 구형 폭발시험장치를 사용하여 Al, Zn 및 Zn-Al혼합물 분체 등의 3종에 대하여 분진폭발특성을 평가하고 고찰하였다.

2. 실험

2.1. 시료

시험평가물질은 Al, Zn 및 혼합에 따른 폭발특성을 비교하기 위하여 Al-Zn혼합물을 사용하였는데, 습식 입도분석기를 사용하여 측정된 결과 Al 및 Zn분진의 평균입경은 각각 25 μm , 7.8 μm 로 나타났다. Al-Zn혼합물은 관련 사업장에서 채취된 시료를 사용하였는데

시료의 강한 흡착력으로 인하여 입도 분포의 측정이 곤란하였으며 시료의 혼합 비율에 대한 정보도 명확하지 않았다. Al-Zn혼합물 시료의 평균입경과 혼합 비율이 불명하기 때문에 동일 조건에서의 평가라고는 할 수 없으나, Al 및 Zn분진이 단독으로 존재하는 경우와 Al 및 Zn분진이 혼합되어 있는 경우의 폭발성에 대한 경향을 파악하고자 하였다.

2.2. 실험장치

분진폭발 특성치를 조사하기 위하여 Siwek 20L Chamber 를 사용하였으며 장치 개요를 그림1에 나타냈다. 실험장치의 폭발용기는 20 L의 구형 형태로서 폭발 열에 의한 용기의 온도상승을 방지하기 위하여 냉각수 재킷이 갖추어져 있다. 착화 전후의 분체 유동과 난류가 폭발압력, 압력상승속도, 폭발하한농도에 치는 영향이 크기 때문에, 압축공기로 분진을 분산시킨 후에 일정 시간의 착화 지연 시간(Delay time)을 정하여 부유 분진운의 유동성을 최대한 억제시키기 위한 착화 조작이 필요하다. 구체적인 시험 방법은 일정 농도의 분진을 6 L의 분진 저장컨테이너에 넣고 20 bar의 공기를 유입시켜 분진 컨테이너의 밸브를 순간적으로 열어 분진-공기 혼합물을 구형 용기 내에 부유, 분산시킨다.

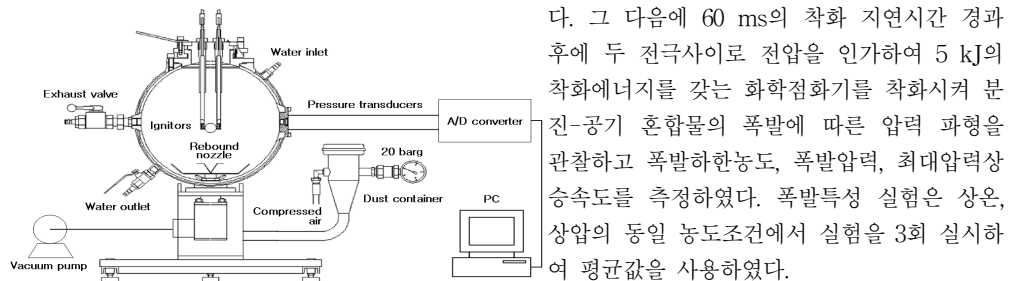


그림 1. 20L explosion chamber.

3. 결과 및 고찰

3.1 폭발하한농도

폭발용기를 사용하여 분진의 폭발하한농도(Lower explosion limit ; LEL)를 측정하는 경우에는 폭발에 따른 상승압력을 측정하여 일정 크기 이상의 압력이 발생하였을 때를 폭발로 판정하는 방법을 사용한다. 본 연구에서 수행한 실험의 폭발 유무의 판단은 해당 시험규격(BS EN 14034-3)에 따라 시료의 폭발에 의해 발생하는 압력 상승이 0.2 bar이상이 되는 경우를 폭발로 판정하고 있다. 평균입경이 25 μm 인 Al분진의 폭발하한농도(LEL)는 40 g/m^3 이었으며 평균입경 7.8 μm 의 Zn분진의 LEL은 750 g/m^3 로 나타났다. 반면에 Al-Zn혼합물의 LEL은 500 g/m^3 으로서 일반적인 유기물 분진에 비해 매우 높은 것을 알 수 있다. 또한 Al의 LEL은 40 g/m^3 로서 낮은 경향을 나타내지만 Zn의 혼합에 의해 LEL은 급격히 증가하여 폭발 위험성이 낮아지는 것을 알 수 있다. Zn과 Al의 평균입경이 각각 7.8 μm , 25 μm 로서 Al이 더 크기 때문에 동일 조건은 아니지만, 입경이 Zn에 비하여 작음에도 불구하고 Al의 폭발위험성이 큰 것을 알 수 있다.

Table 1. Lower explosion limit(LEL) of samples

시료 명	폭발하한계(LEL) [g/m^3]
Al (평균입경 25 μm)	40
Zn (평균입경 7.8 μm)	750
Al-Zn 혼합물 (평균입경 : 측정 불가)	500

3.2 폭발압력특성

Al, Zn 분진의 각 성분이 단독으로 존재하는 경우와 Al-Zn 혼합물 분진의 폭발성이 어떻게 변화하는지를 알기 위하여 농도 변화에 따른 폭발특성을 조사하였다. 평균입경이 25 μ m인 Al분진에 대해서 폭발압력 실험 결과를 [그림 2]에 나타냈다. 최대폭발압력(P_{max})은 9.8 bar로 나타났으며 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$ 는 1838 [bar/s]이며 폭발지수(Kst)는 499 [$m \cdot bar/s$]로서 분진폭발등급은 3등급(St 1)이다. 평균입경 7.8 μ m의 Zn분진에 대해서도 Al과 동일한 시험방법으로 폭발특성을 조사하였으며 폭발압력 결과를 [그림 3]에 제시하였다. 최대폭발압력(P_{max})은 5.5 bar가 얻어졌으며 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$ 는 321 [bar/s]로서 폭발지수(Kst)는 87 [$m \cdot bar/s$]로서 분진폭발등급은 1등급(St 1)이 된다. Al-Zn혼합물의 최대폭발압력(P_{max})은 4.1 bar로서 [v 4], 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$ 는 112 [bar/s]가 얻어졌는데, 이는 Al과 Zn분진의 중간 정도에 해당하는 폭발위험성을 나타내고 있다. Zn과 Al의 평균입경은 각각 7.8 μ m, 25 μ m로서 Al이 더 크기 때문에 동일 조건은 아니지만, 입경이 보다 작은 Zn에 비하여 Al의 폭발성이 큰 것을 알 수 있다. 폭발성이 상대적으로 큰 Al분진에 폭발성이 작은 Zn 분진을 혼합하게 되면, Al의 폭발성보다 작아질 것으로 충분히 예상할 수 있다. 이러한 결과는 평균입경을 고려하지 않더라도 Zn-Al 혼합물 분진의 폭발성이 Al의 폭발성보다 작게 나타난 결과를 통해서도 간접적인 추정이 가능하다. Zn-Al혼합물이 공기 중에 부유되어 폭발하는 경우에는 분진 화염이 주위로 전파하면서 급격한 압력팽창을 일으킨다. 화염전파속도가 큰 분진일수록 연소속도가 빠르다고 할 수 있으며 이와 함께 위험성이 크다고 볼 수 있다. 그러므로 부유 분진의 화염전파속도를 추정할 수 있다면 해당 분진의 위험성을 보다 상세히 알 수 있으므로 유용한 정보가 된다. 본 평가에서는 측정된 폭발압력으로부터 화염전파속도를 추정하는 방법을 검토하였다. 밀폐용기에서 분진이 착화되어 화염이 전파하면 폭발압력이 발생하는데

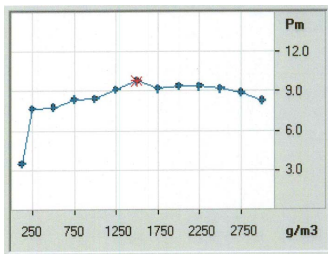


그림 2. P_{max} of Al dust.

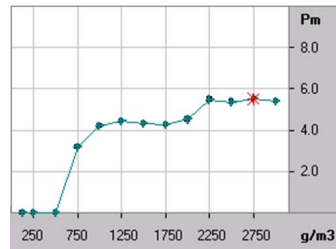


그림 3. P_{max} of Zn dust.

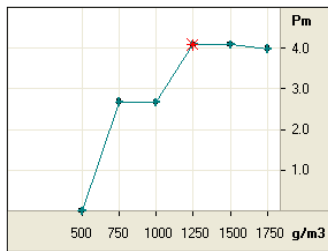


그림 4. P_{max} of Al-Zn dust.

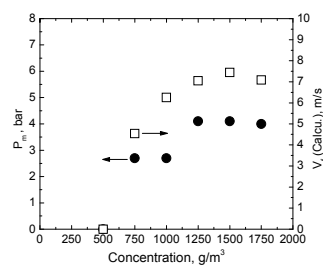


그림 5. Flame velocity and P_{max} of Al-Zn dust.

최대폭발압력(P_m)은 화염이 용기의 벽면에 도달하는 지점에서 발생한다. 분진 화염면(Flame front)이 밀폐 용기의 벽면에 접하는데 소요되는 시간을 화염도달시간(Flame arrival time, t_w)이라고 하였을 때, 구형 폭발용기의 반경을 r (m)이라고 하면 분진폭발로 인한 화염전파속도(Flame velocity, V_f)는 $V_f = r / t_w$ 과 같이 나타낼 수 있다. 단, 용기의 반경에 대한 분진화염 전파 시의 화염두께(Flame thickness)는 고려하지 않았다. 또한 용기의 반경(r)은 용기 체적(V)의 3제곱근($V^{1/3}$)에 비례하며, 연소가 거의 종료되고 압력이 최대가 되는 시점에서 t_w 는 P_m 과 $(dP/dt)_m$ 의 비율에 근사하므로 $t_w = P_m / [(dP/dt)_m]$ 와 같이 표현할 수가 있다. 그러므로 V_f 는 $V_f = V^{1/3} \cdot [(dP/dt)_m / P_m]$ 와 같이 표현 가능하며, Zn-Al혼합물의 폭발압력으로부터 화염전파속도를 계산한 것이 [그림5]이다. 화염전파속도는 농도와 함께 변화하는데 1500 g/m³에서 7.5 m/s의 전파속도를 가지며 최대를 나타내고 있다. [그림 5]의 농도 750 g/m³ 및 1000 g/m³에서의 폭발압력이 약 2.6 bar로 동일하다라도 폭발압력상승속도가 1000 g/m³에서 크기 때문에 화염전파속도는 750 g/m³보다 1000 g/m³에서 커지게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Al-Zn 혼합물 분진의 폭발위험성이 단독의 알루미늄(Al) 또는 아연(Zn)의 경우와 비교하여 어떻게 변화하는지를 실험적으로 조사함으로써 폭발위험성을 검토하고 재해예방대책에 활용하고자 하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) Al-Zn혼합물, Zn, Al에 대하여 평균입경을 측정된 결과, Al-Zn혼합물은 흡착력이 강하여 정확한 입도 분포의 측정이 곤란하였으며, Zn 및 Al의 평균입경은 각각 7.8 μ m, 25 μ m로 나타났다

(2) Al분진의 폭발하한농도(LEL)는 40 g/m³이었으며 Zn분진의 LEL은 750 g/m³로 나타났다. 그러나 Al-Zn혼합물의 LEL은 500 g/m³으로서 유기물 분진에 비해 매우 높았다. Al의 LEL은 40 g/m³로서 낮은 경향을 나타내지만 Zn의 혼합에 의해 LEL은 급격히 증가하여 폭발 위험성이 낮아지는 것을 알 수 있었다.

(3) Al 및 Zn분진의 최대폭발압력(P_{max})은 각각 9.8 bar, 5.5 bar가 얻어졌으며, 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$ 는 각각 1838 [bar/s], 321 [bar/s]로 나타났다. 반면에 Al-Zn혼합물의 최대폭발압력(P_{max})은 4.1 bar로서 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$ 는 112 [bar/s]가 얻어졌는데, 이는 Al과 Zn분진의 중간 정도에 해당하는 폭발위험성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Eckhoff, R. K., Dust explosions in the process industries-3rd ed., Gulf professional publishing (2003).
2. Hertzberg, M. and Cashdollar, K. L. "Introduction to dust explosions. In Industrial Dust Explosions", ASTM STP 958, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, pp.5-32 (1987).
3. Cashdollar, K.L., "Overview of Dust Explosibility Characteristics", J. Loss Prev. Process Ind. 10, pp.317-324 (1997).