A-5

마그네슘합금 분진폭발에서의 화염전파속도 특성

한우섭, 이근원
한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 화학물질센터

Characteristics of Flame Propagation Velocity in Mg and Al Alloy Dust Clouds

Ou-Sup Han, Keun-Won Lee
Center for Chemicals Safety & Health
Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

요 약

본 연구에서는 폭발사고가 반복되고 있는 마그네슘합금(Mg-Al alloy) 분진의 예방대책을 위한 안전자료로 활용하기 위하여 폭발특성평가 실험과 화염전파속도를 추정하였다. 화염전파속도는 폭발과압 강도에 영향을 주지만 분진폭발에서는 화염의 확산에 따른 피해예측에도 중요한 자료로 활용될 수 있다. 밀폐공간의 분진폭발에서 화염전파속도를 계산하기 위하여 분진의 연소시간과 화염면의 도달시간을 고려하여 폭발압력으로부터 추정하는 방법을 제시하고 마그네슘합금의 성분비율에 따라 폭발에 따른 화염전파속도를 계산하였다. 그 결과, Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al(50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)의 최대화염전파속도는 각각 15.5, 18, 15.2 m/s로 추정되었으며 성분비율에 따라 최대화염속도는 변화하는 경향을 나타냈다.

1. 서 론

분진폭발이 발생하면 분진화염은 분진운이 존재하는 공간을 따라 전파하게 되는데 화염전파가 빠른 속도로 일어나기 때문에 화염면 전방에는 공기 압축에 따른 충격파가 발생하며 주변의 장치, 건물 및 작업자에게 큰 피해를 일으킬 수 있다. 이러한 충격파로 인한 피해는 가스폭발 시의 화염전파 현상을 통하여 조사되어 왔는데 [1], 가스폭발과는 달리 금속분진의 폭발에서는 폭발로 인한 충격파와 함께 높은 화염온도로 인하여 장치의 소손이나 화상 등의 인적피해가 가스폭발에 비하여 높게 나타나는 특징이 있다. 최근 국내 사업장에서는 신소재로서 우수한 물적 특성을 가지고 있는 마그네슘(Mg)을 재료로 하는 제품의 제조에 대한 수요가 높아지고 있으며 그 중에서도 Mg-Al합금(이후 마그네슘 합금으로 표기)은 다양한 분야에서 활용되고 있다. 이러한 마그네슘 합금은 활성이 높은 Mg 성분에 의해 취급 방법이 적절하지 못한 경우에는 예상치 못한 화재폭발 사고를 일으켜 적지 않은 인명 및 재산손실을 초래하고 있다. 이러한 마그네슘 합금에 의한 국내 분진폭발 사고는 과거 5년간 반복되어 발생하고 있는데 동종사고 예방을 위해서 이에 대한 대책이 필요하다.

본 연구에서는 마그네슘 합금의 Mg와 Al의 조성 비율에 따라 폭발압력특성이 어떻게 변화하는지를 20L 구형 분진폭발시험장치를 사용하여 실험적으로 조사하였다. 또한 국내에서 발생한 금속

분진폭발사고의 피해 상황을 보면 폭발지점에서 비교적 먼 거리에 떨어져 있는 작업자가 화상 등의 부상사고가 자주 발생하는데 이러한 피해 발생이 가능한지를 검토하기 위하여 마그네슘 합금의 분진폭발에 따른 분진화염전파속도를 추정하였다.

2. 실험

2.1. 시료

금속 분진 중에서 폭발사고 빈도가 높은 마그네슘 합금을 실험 대상으로 하였다. 실제 공정에서 서로 다른 성분 비율을 갖는 마그네슘 합금의 사용을 고려하여 Mg 및 Al의 성분 비율의 변화에 따른 폭발특성을 조사하기 위하여 Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al(50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)을 사용하였다. 본 연구에서는 순도 99.0 %이상의 금속 시료를 사용하였으며, 습식 입도분석기(Beckman Coulter LSI 3320)를 활용하여 시료의 입도 분포를 측정한 결과, Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al (50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)의 평균입경은 각각 160, 151, 152 μm가 얻어졌다. 시험에 사용한 시료는 151~160 μm의 좁은 범위 내의 평균입경을 가지고 있어 입경 변화에 따른 분진폭발특성의 영향을 무시할 수 있으며 성분 비율에 따른 폭발특성 관찰이 가능하도록 하였다.

2.2. 실험장치

분진 폭발압력 특성치를 조사하기 위하여 ASTM 표준시험규격에 적합한 Siwek 20L Chamber (Kühner AG사, 스위스)를 사용하였다 [Fig.1]. 시험방법은 일정 농도의 분진을 6 L의 분진 저장 컨테이너에 넣고 20 bar의 공기를 유입시켜 분진 컨테이너의 밸브를 순간적으로 열어 분진-공기 혼합물을 구형 용기 내에 부유, 분산시킨다. 다음으로 착화 지연 시간(60 ms) 경과 후에 두 전극사이로 전압을 인가하여 5 kJ의 착화에너지를 갖는 화학점화기를 착화시켜 분진-공기 혼합물의 폭발에 따른 압력 파형을 관찰하고 폭발하한농도, 폭발압력, 최대압력상승속도를 측정하였다. 이러한 폭발특성 평가는 상온, 상압의 동일 농도조건에서 실험을 3회 실시하여 평균값을 사용하였다.

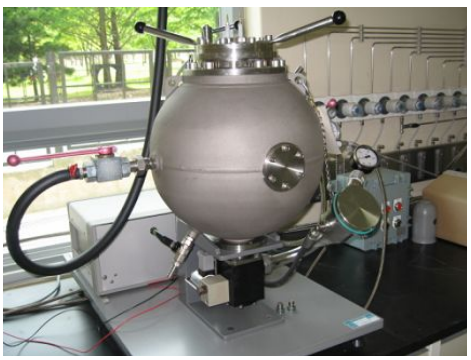

Fig. 1. 20L Siwek Chamber.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 마그네슘 합금 분진폭발 시의 피해예측을 위하여 화염전파속도를 계산하였다[2]. 마그네슘합금에 대하여 농도를 변화시키면서 최대폭발압력(P_m)을 측정하고 화염전파속도를 계산한 결과를 [그림 2]~[그림 4]에 제시하였다. 농도가 증가함에 따라 폭발압력은 일정

농도 구간에서 최대가 되며 그 이후에는 감소경향을 나타내고 있는데 Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al (50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)의 최대폭발압력은 각각 19, 17.5, 16 bar로 나타났다. 화염전파속도의 증가율을 보면 농도가 증가함에 따라 증가율도 커지는 경향을 보였다. 농도에 따른 화염전파속도의 증가 형태는 부분적으로는 다소 불규칙한 결과를 보였는데, 이는 분사 압력에 의해 큰 기류가 형성되어 있는 밀폐공간에서 분진 화염은 복잡한 형태를 가지고 있어 구상 화염으로 일정하게 전파되지 않고 불규칙한 화염전파 형태로서 전파하고 있기 때문인 것으로 추정된다. Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al (50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)의 최대화염전파속도는 각각 15.5, 18, 15.2 m/s로 계산되었다. Al성분 비율이 증가할수록 전체적으로 최대폭발압력이 감소하면 최대화염전파속도도 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 Mg-Al(60:40 wt%) 및 Mg-Al(50:50 wt%)의 특정 농도에 있어서의 최대화염전파속도는 Mg-Al(50:50 wt%)에서 보다 크게 나타나는 경우도 있었다. 밀폐공간에서의 난류상의 분진 폭발 시에는 기류 속도와 분진운의 분포가 일정하지 않기 때문에 Mg-Al(50:50 wt%)의 경우라도 분진운 농도와 기류 속도가 최대가 되는 부분이 존재할 수 있기 때문에 화염면이 일정하지 않고 매우 불규칙적으로 전파할 수 있으며 이러한 공간에서의 화염전파는 보다 증가할 것으로 추정된다. 성분비율에 따른 마그네슘합금의 화염전파속도를 농도변화에 대하여 제시한 것이 [그림 5]이다. 그림에서 알 수 있듯이 기류가 존재하는 밀폐 공간에서의 마그네슘합금 분진의 화염전파속도의 경향은 성분비율에 관계없이 농도증가에 따라 증가 경향을 보이고 있지만 증가비율은 일정하지 않고 불규칙적으로 변화하고 있다. 실제 사업장의 공정이나 배관내의 분진운의 형태는 공간적인 분진운의 농도 기울기가 존재하며 시간과 함께 농도가 실시간으로 변화하기 때문에 화염전파속도는 가감속을 반복하면서 전파할 것으로 판단된다. 본 연구에서 살펴본 마그네슘 합금 분진의 경우를 보면, 최대폭발압력이 Al성분의 증가와 함께 감소하는 경향을 보이더라도 실제 공정에서의 화염전파 거동은 기류 및 농도 조건에 따라 변화할 수 있다.

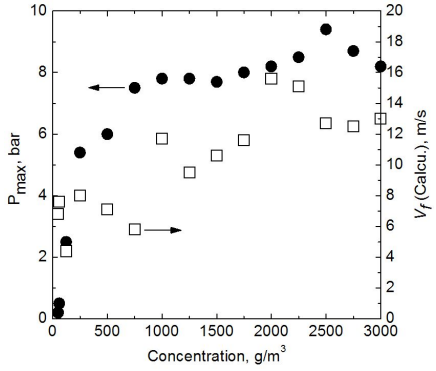

Fig. 2. P_{max} and $V_f$of Mg-Al(60:40 wt%).

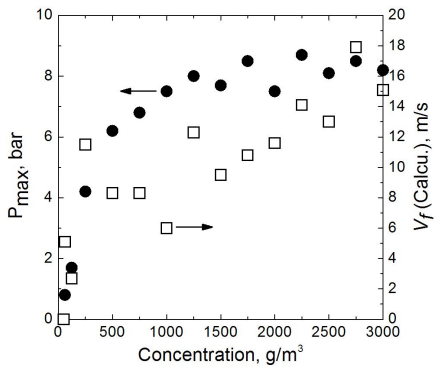

Fig. 3. P_{max} and $V_f$of Mg-Al(50:50 wt%).

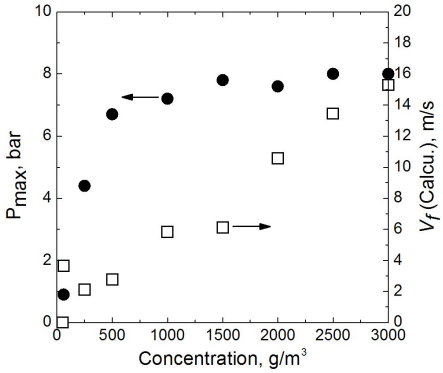

Fig. 4. P_{max} and V_f of Mg-Al(40:60 wt%).

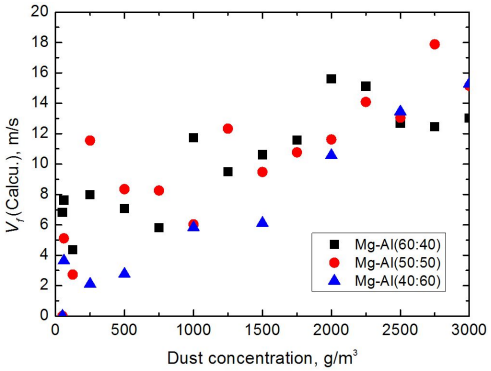

Fig. 5. Variation of flame velocity in Mg-Al alloy dust clouds.

4. 결 론

본 연구에서는 20L 구형 분진폭발시험장치를 사용하여 조성 비율이 서로 다른 마그네슘 합금의 폭발압력특성을 실험적으로 조사하였으며, 마그네슘 합금의 분진폭발에 따른 분진 화염전파속도를 추정한 결과 이하와 같은 결과를 얻었다.

(1) 마그네슘합금 농도가 증가함에 따라 폭발압력은 일정 농도 구간에서 최대가 되며 그 이후에는 감소경향을 나타내고 있다.
(2) Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al (50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)의 최대폭발압력은 각각 19, 17.5, 16 bar의 결과가 얻어졌다.
(3) Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al (50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)의 최대화염전파속도는 각각 15.5, 18.0, 15.2 m/s로 추정되었으며, 마그네슘 합금의 분진폭발에 있어서 Al성분 비율이 증가할수록 최대화염전파속도는 감소하는 경향을 나타냈다.

참고문헌

1. Lewis B. and Von Elbe, G., Combustion Flames and Explosions of Gases, 2nd edition, Academic Press Inc., New York. pp.292-294 (1961).
2. 한우섭. 한인수. 최이락. 이근원, 반응성 유기물 분진의 폭발특성과 열안정성, 한국가스학회지, Vol.15, No. 4, pp.7-14 (2011).