



Mg-Al합금 분진의 폭발특성에 미치는 마그네슘 성분의 영향

†한우섭 · 이근원

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원
(2012년 10월 24일 투고, 2012년 12월 17일 수정, 2012년 12월 17일 채택)

Influence of the Magnesium Content on the Explosion Properties of Mg-Al Alloy Dusts

†Ou-Sup Han · Keun-Won Lee

Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA
104-8 Munji-dong, Yuseong-gu, Deajeon 305-380, Korea

(Received October 24, 2012; Revised December 17, 2012; Accepted December 17, 2012)

요 약

Mg-Al합금 분진의 마그네슘 성분 비율이 분진폭발특성에 미치는 영향을 알기 위하여 Siwek 20 L 구형 분진폭발시험장치를 사용하여 농도를 변화시키면서 실험적으로 조사하였다. 이를 위하여 체적평균입경이 151~160 μ m의 Mg-Al합금 분진을 사용하였다. 그 결과 Mg-Al합금에서의 Mg성분의 증가는 폭발하한농도의 감소와 최대폭발압력의 증가로 나타났다. 또한 Mg-Al합금의 최대폭발압력과 최대폭발압력상승속도는 주로 분진 농도에 의존하였다. 그러나 Mg-Al (40:60 wt%), Mg-Al (50:50 wt%) 및 Mg-Al (60:40 wt%)의 폭발지수(Kst)에 있어서, 마그네슘 성분의 증가에 따라서 폭발지수가 증가함을 알 수 있었다.

Abstract - Using the Siwek 20 L spherical explosion vessel, the explosion properties have been examined to understand the influence of magnesium content in Mg-Al alloy dusts with different concentration. For this purpose, the Mg-Al alloy dusts (volume mean diameter : 151~160 μ m) with magnesium content ratio were used. As the results, the increase of Mg content in Mg-Al alloy causes an decreased minimum explosion concentration and an increased maximum explosion pressure. Also the maximum explosion pressure and maximum rate of pressure rise in Mg-Al alloy dusts mainly depended on the dust concentrations. However, for the explosion index (Kst) of Mg-Al (40:60 wt%), Mg-Al (50:50 wt%) and Mg-Al (60:40 wt%), it was founded to increase the Kst with increasing of magnesium content ratio.

Key words : metal dust explosion, minimum explosion concentration, explosion pressure, magnesium dust

1. 서 론

최근 5년간 국내에서 발생한 분진폭발 관련 의 화재폭발 중대사고를 보면 마그네슘(Mg)과 마그네슘합금(Mg-Al alloy)에 의한 사례가 많이 보고되고 있다[1]. 이러한 금속 분진폭발사고의 특징은 공장 건물이나 설비 등의 파괴에 따른 물적 피해와 함께 사망자의 발생율이 높은 특징을 가지고 있다[2]. 금속의

폭발압력은 금속분진의 종류나 입경 크기에 따라 달라지지만 약 7~16 bar 정도이며, 화염온도는 2000~3000 $^{\circ}$ C의 고온이기 때문에 이러한 금속분진화염에 노출된 경우에는 심각한 화상을 입을 가능성이 매우 높아진다. 이러한 특성으로 인하여 가스폭발의 경우에 작업자에의 피해가 주로 충격파 등의 과압에 따른 물리적인 충격인데 반하여, 금속분진의 폭발사고의 피해는 높은 폭발 압력과 함께 고온의 화염에 의한 화상을 동반하는 경우가 많다.

마그네슘합금은 전자제품이나 휴대폰, 모바일 기기 등의 케이스, 자동차부품 등의 사회적 수요 증가

†Corresponding author:hanpaule@kosha.net

Copyright © 2012 by The Korean Institute of Gas

로 사용량이 급증하고 있다. 마그네슘합금 분진의 폭발재해를 감소시키고 피해 최소화를 위해서는 폭발특성을 정량적으로 평가하고 이러한 자료를 활용하여 안전대책을 강구하는 것이 필요하다. 그러나 문헌 등에 제시되고 있는 마그네슘합금의 폭발특성 관련 데이터는 문헌자료가 거의 없기 때문에[3], 국내 관련 사업장에서 폭발방지대책 강구를 위한 안전자료로서 사용하는 것이 쉽지 않은 실정이다. 마그네슘합금(Mg합금)은 Mg분진과 Al분진을 섞은 혼합물이 아닌, 일정 비율로 용융시켜 분쇄한 합금 화합물이다. Mg합금을 취급하는 공정에서는 사용 용도에 따라 조성 비율이 각기 다르기 때문에 폭발특성도 달라진다. 그러므로 폭발방지 대책을 위해서는 조성 비율에 따른 Mg합금의 폭발성 자료가 필요하다.

마그네슘(Mg)의 폭발특성에 대한 연구로는 Hertzberg 등[4]이 Mg분진의 폭발한계, 폭발압력, 화염온도 등을 실험적으로 검토하였다. Going 등[5]은 폭발용기의 크기에 따른 폭발한계에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. Li 등[6-7]은 단일 성분 Mg분진의 폭발한계와 폭발강도에 대해 실험적 평가를 실시하고, 일정 농도의 분위기가스(Ar, N₂, CO₂) 중에서 폭발강도와 감도 특성을 검토하였다. Kuai 등[8]은 Mg분진 폭발특성에 관련한 문헌값을 활용한 Mg분진의 폭발위험성평가법을 제시하였다. Dreizin 등[9-11]은 Mg 분진폭발과 화염전파를 설명하기 위하여 응축상의 연소와 이종(Heterogeneous) 연소 메커니즘을 제안하였다. 또한 Han 등[12]은 Mg합금 분진의 농도에 따른 폭발압력을 실험적으로 조사하고 화염전파속도를 계산하였다. 그러나 기존 관련 연구에서는 Mg합금의 폭발특성에 대한 연구가 거의 없는 상황이다. 특히 Mg합금의 폭발특성을 설명하고 안전대책을 강구하기 위해서는 Mg합금의 성분비율 변화에 따라 폭발압력특성이 어떻게 변화하는지에 대한 안전기술정보를 문헌 등에서 찾아 볼 수가 없다.

본 연구에서는 Mg합금을 구성하는 Mg 성분이 폭발위험성에 어떠한 영향을 미치는 가에 대하여 실험적으로 조사하였다. 이를 위해 Mg합금을 구성하는 Mg의 성분비율이 변화하는 경우에 폭발한계 및 폭발압력특성과 같은 폭발 민감도와 폭발 강도가 어떻게 변화하는지를 20 L 분진폭발시험장치를 사용하여 실험을 수행하였으며 그 결과에 대하여 고찰하였다.

II. 실험

2.1 시료

본 연구에서는 순도 99 % 이상의 Mg합금과 Al분진 시료를 사용하였다. Mg합금은 조성비율이 서로 다

른 3종류의 Mg-Al(40:60 wt%), Mg-Al(50:50 wt%), Mg-Al(60:40 wt%)을 사용하였으며, 각 시료의 평균 입경(D_p)은 152, 151, 160 μm이다. 또한 폭발특성 비교를 위해 사용한 Al분진 시료의 경우에는 분쇄 특성이 다르기 때문에 Mg합금과 유사한 입경분포를 갖는 시료의 입수가 쉽지 않았다. 본 연구에서 사용한 Al분진 시료의 평균입경은 88 μm이다.

2.2 실험장치 및 방법

분진의 폭발특성을 측정하기 위한 시험방법은 여러 가지 시험장치가 있다. 실용적 관점에서 국제적 분진폭발 표준시험장치는 ASTM 시험규격에서 정한 측정장치를 사용하고 있다[13]. 본 연구에서는 스위스의 Kühner AG사가 제작하여 판매하고 있는 Siwek 20L Chamber로 불리는 분진폭발시험장치를 사용하였으며[Fig. 1]에 나타났다. 금속분진 화염은 고온이기 때문에 구형 폭발용기의 냉각이 필요하다. 이는 분진폭발특성값이 폭발용기 주변의 온도 분위기의 영향을 받기 때문이다. 그러므로 시험 중에는 용기 내에 설치된 수냉식 재킷을 통하여 상온의 수돗물을 흘려보내어 냉각시키면서 실험을 실시한다. 구체적인 실험방법은 먼저 시험할 농도의, 분진을 저장컨테이너(6 L)에 충전한다. 그 다음에 분진 컨테이너의 밸브를 순간적으로 열어 20 bar의 압력을 갖는 공기를 유입시켜 대기압 상태의 분진-공기 혼합물을 폭발용기 내에 부유시킨다. 이 때 폭발압력, 압력상승속도, 폭발한계 등의 폭발특성에 미치는 착화 전후의 분체 유동과 난류의 영향이 크기 때문에, 압축공기로 분진을 분산하는 방법을 사용하고 있는 폭발 시험에서는 분산 후에 일정한 시간 지연(0.06 s)을 두어 부유 분진운의 유동성을 최대한 억제하여 착화

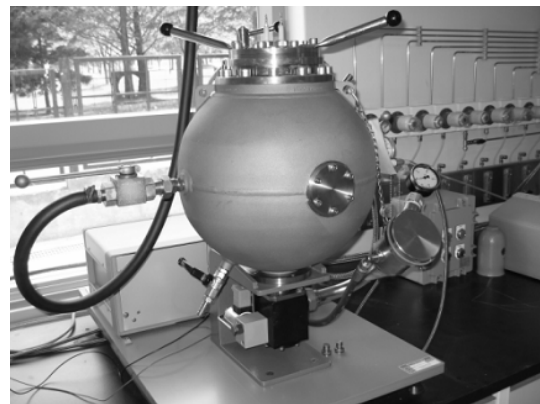


Fig. 1. The 20 L dust explosion apparatus.

조작을 할 필요가 있다. 이와 같은 착화지연 시간 경과 후에 두 전극사이로 전압을 인가시켜 5 kJ의 착화에너지를 갖고 있는 화학점화기로 착화시킨다. 분진이 착화되어 폭발이 일어나면 시간-압력 파형을 관찰하고 폭발하한농도, 폭발압력, 최대압력상승속도 등을 측정한다. 일정 농도에 있어서의 폭발특성 평가는 상온(23°C), 대기압(1atm)의 조건에서 실험을 3회 반복하여 그 결과를 평균하였다. 또한 분진농도 결정은 사용분진량을 폭발용기 체적으로 나누어 계산되어지며, 실험 조건은 분위기온도 23 °C, 상대습도 44~46 % R.H.에서 실시하였다. 일반적으로 폭발용기의 크기에 따라 폭발압력상승속도(dP/dt)가 변하기 때문에 이러한 영향을 보정하기 위하여 폭발지수(K_{st})를 사용한다. K_{st} 는 $K_{st} = (dP/dt)_{max} \cdot V^{(1/3)}$ 의 관계를 이용하여 얻어지며, V는 폭발용기의 체적(0.02 m³)을 나타낸다.

III. 결과 및 고찰

3.1. Mg합금의 폭발특성

단일 성분의 Al분진 및 조성 비율이 서로 다른 Mg-Al(40:60 wt%), Mg-Al(50:50 wt%), Mg-Al(60:40 wt%) 분진에 대하여 농도 변화에 따른 최대폭발압력을 Fig. 2에 제시하였다. 분진폭발 특성값은 분진의 입경에 크게 영향을 받는다. Mg합금의 평균입경(D_p)은 151~160 μ m 범위 내이며 서로간의 입경 차이가 9 μ m이기 때문에 입경에 따른 폭발성의 영향은 매우 작을 것으로 판단이 된다. 그러나 Al분진의 경우에는 파쇄특성의 차이로 인하여 Mg합금과 평균입경과 유사한 시료의 입수가 곤란하였다. 본 연구에서 사용한 Al분진의 D_p 는 88 μ m로서 Mg합금보다 작다. 만일 Al분진의 D_p (88 μ m)가 Mg합금과 유사한 151~160 μ m 라고 한다면 Fig. 2에 나타난 Al의 최대폭발압력(P_m)보다 더 작게 나타났을 것으로 판단된다. Mg합금의 폭발압력은 순수한 Al분진에 비하여 높게 나타나고 있다. 농도가 높아질수록 폭발 압력은 증가하지만 약 2500 g/m³을 기점으로 감소하는 경향을 보이고 있다. Mg-Al(60:40)의 폭발압력은 일부 농도에 있어서 Mg-Al(50:50)과 유사하거나 작게 나타나는 경우도 있다. 이러한 원인으로서는 폭발압력이 분진운의 분산 상태나 기류 크기에 영향을 받는데, 압축공기를 사용하는 실험방법으로 인하여 각각의 실험에서 동일한 난류레벨이 형성되지 않아 실험결과에 영향을 준 것으로 추정된다. 이러한 실험적인 영향과 측정값의 편차에도 불구하고 Mg합금에 있어서 Mg의 성분이 가장 많은 Mg-Al(60:40)의 폭발압력이 전체적으로 가장 높은 경향을 나타나고 있다. 이와 같은 경

향은 폭발압력이 가장 높게 나타난 2500 g/m³에서부터 명확히 나타나고 있는데, 이 농도에서부터 분진의 에너지 방출속도가 최대가 되어 분진 혼합기의 기류 크기에 따른 요인보다 폭발성에의 영향이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 압축공기로 분산시킨 분진-공기 혼합기는 난류성 기류를 가지는데 이는 분진 화염의 면적을 증대시키고 화염전파속도를 증가시키는 결과로 이어진다. 그러므로 폭발압력은 분진운의 분산 상태에 따라 달라지는데 분진 분산 후의 시간이 길어질수록 난류레벨이 감소하기 때문에 폭발압력이 낮아지는 경향이 관찰되었다. Al분진의 폭발하한농도(C_{min})는 125 g/m³에서 나타나고 있다. 반면에 Mg-Al(40:60)과 Mg-Al(50:50)의 C_{min} 은 60 g/m³이었으며, Mg-Al(60:40)에서는 50 g/m³으로 측정되었다. C_{min} 에서는 화염전파가 유지 가능한 최저농도이기 때문에 분진의 화염전파속도는 0.1 m/s 이하로 나타나며 폭발압력도 매우 작게 나타난다 [12].

농도 변화에 따른 Mg합금의 최대폭발압력상승속도를 Fig. 3에 나타냈다. 분진폭발에 있어서 최대폭발압력상승속도는 분진의 착화지연시간에 큰 영향을 받는다. 이는 분진혼합기의 난류 크기가 작아지면 최대폭발압력상승속도가 작아진다는 것을 의미한다. 압력상승속도가 분진의 연소속도에 비례하고, 연소속도는 분진 혼합기의 난류 크기에 큰 영향을 받기 때문이다. 20L 분진폭발 시험장치는 분진 분산 방법에 있어서 압축공기의 사용으로 인하여 난류의 영향을 피할 수가 없기 때문에 측정된 분진폭발 특성치는 난류의 영향이 포함하고 있다고 볼 수 있다.

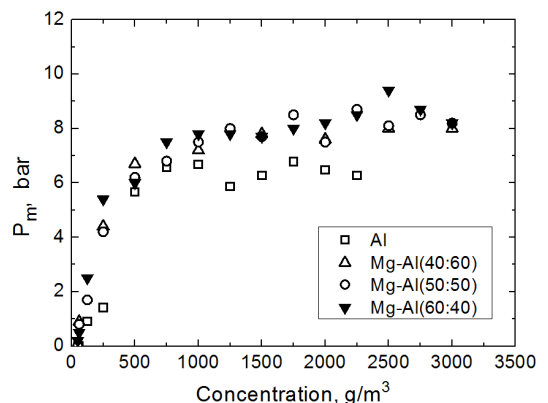


Fig. 2. Maximum explosion pressure (P_m) in Mg-Al alloy dust clouds with dust concentration.

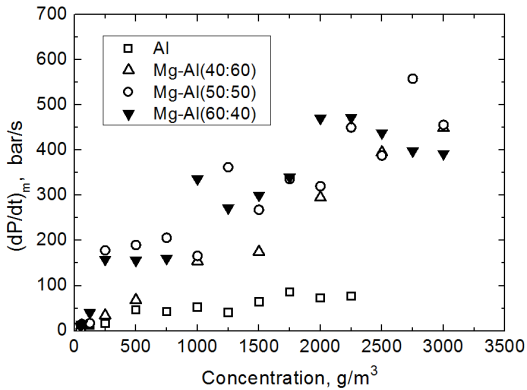


Fig. 3. Maximum rate of pressure rise $(dP/dt)_m$ in Mg-Al alloy dust clouds with dust concentration.

Fig. 3에서 측정된 Mg-Al(40:60), Mg-Al(50:50) 및 Mg-Al(60:40)의 최대폭발압력상승속도는 각각 449, 558, 472 [bar/s]로 나타났다. 농도가 증가하면 폭발압력상승속도도 증가하지만 Mg의 성분 비율이 증가할수록 최대폭발압력상승속도는 증가하는 경향을 나타내고 있다. Mg의 성분 비율이 40 wt%인 Mg-Al(40:60)의 폭발압력상승속도의 변화를 보면 본 연구에서 검토한 Mg합금 시료 중에서 가장 작은 증가비율을 보이고 있다. 최대폭발압력상승속도는 분진 폭발 시에 설비나 작업자에 대한 충격의 정도를 나타내는 것으로서 반응 용기나 이송 배관 또는 폭발방산구의 내압설계에 중요한 자료로서 사용할 수가 있다. 최대폭발압력상승속도는 최대폭발압력이 나타나는 농도(2500 g/m³)와 거의 동일한 농도에서 발생하고 있다. 일반적으로 압력상승속도는 측정하는 폭발용기의 크기에 따라 달라지는 값으로서, 폭발용기의 크기가 증기할수록 압력상승속도는 작아지는 경향을 나타내고 있다.

폭발강도를 평가하기 위해 가장 유용한 특성치로서 폭발지수(K_{st})가 있다. K_{st} 의 주된 용도는 폭발압력의 경감을 통한 폭발방산구의 설계와 폭발억제장치의 방호대책을 강구하는데 있어 중요한 자료로 활용된다. Table 1에서와 같이 Mg-Al(40:60), Mg-Al(50:50) 및 Mg-Al(60:40)의 K_{st} 는 각각 121, 122, 128 [bar · m/s]로 나타났다. 모두 폭발등급 1의 비교적 약한 정도의 폭발강도인데, 이렇게 약한 폭발의 원인은 본 연구에서 사용된 Mg-Al합금의 D_p (151~160 μ m)가 큰 것을 사용하였기 때문인 것으로 사료된다. 국내의 Mg합금에 의한 폭발사고사례를 보면 D_p 가 약 30~40 μ m의 분진이 폭발한 것으로 알려지고 있

Table 1. K_{st} in Mg-Al alloy particle clouds with dust concentration

Dust samples	K_{st} , (bar·m)/s
Mg-Al(40:60 wt%)	121
Mg-Al(50:50 wt%)	122
Mg-Al(60:40 wt%)	128

는데[1-2], 이와 같이 D_p 가 감소하게 되면 K_{st} 는 증가하여 폭발등급 3의 매우 격렬한 폭발이 발생할 것으로 예상된다.

3.2. Mg합금의 폭발특성에 미치는 Mg성분의 영향

Mg합금에서 Mg의 성분비의 변화에 따른 폭발하한농도(C_{min})와 폭발압력상승속도 $(dP/dt)_m$ 에 미치는 영향을 Fig. 4에 제시하였다. Mg성분이 없는 단일 성분의 Al분진의 C_{min} 은 125 g/m³으로 측정되었는데, Al의 D_p 가 151~160 μ m로 증가하였을 경우에는 C_{min} 은 감소할 것으로 예상된다. Mg성분이 증가하면 C_{min} 은 감소하는데 Mg-Al(40:60) 및 Mg-Al(50:50)의 C_{min} 은 60 g/m³으로 거의 차이가 없지만 Mg성분이 보다 증가한 Mg-Al(60:40)에서는 50 g/m³으로 나타났다. $(dP/dt)_m$ 은 Mg성분이 증가할수록 다소 증가하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 5는 Mg합금의 Mg성분에 따른 최대폭발압력(P_m)과 폭발지수(K_{st})의 관계를 나타낸 것이다. Mg성분이 증가하면 P_m 은 2 bar 이상으로 크게 증가하는 반면, K_{st} 는 Table 1 및 Fig. 5에서와 같이 증가율이 크지 않았으며 Mg성분이 폭발지수(K_{st})에 미치는 영향은 작은 것으로 나타났다. 그러므로 Mg합금은 동일한 D_p 의 조건에서 K_{st} 의 변화는 Mg성분에 의한 영향보다는 농도 및 입경에 의한 영향이 보다 클 것으로 추정된다. Popov 등[14]은 Mg합금의 단일 입자를 대상으로 연소 메커니즘을 실험적으로 조사한 결과 Mg가 먼저 연소하고 다음으로 Al이 연소하는 2단계의 연소 과정을 제시하였다. Mg합금의 2단계의 발화 메커니즘은 퇴적 상태의 Mg합금에 대한 열중량분석(TGA) 실험에서도 확인되고 있다[2]. 이러한 선행 연구의 결과는 단일 입자 및 퇴적 분진 조건에서의 실험결과이기 때문에 부유 상태의 Mg합금 분진에서도 적용 가능한가에 대해서는 아직 명확한 실험적 근거가 제시되고 있지 않다. 그러나 Mg와 Al의 비점이 각각 1,110℃ 및 2,467℃이며, Mg합금 분진폭발에서 입자가 Mg합금 화염대에서 용융, 기화하여 기상연소가 일어나는 것을 고려하면 Mg 및 Al 입자가 물 질면에서 각기 독립적으로 연소가 일어날 것으로 추정된다.

Mg-Al합금 분진의 폭발특성에 미치는 마그네슘 성분의 영향

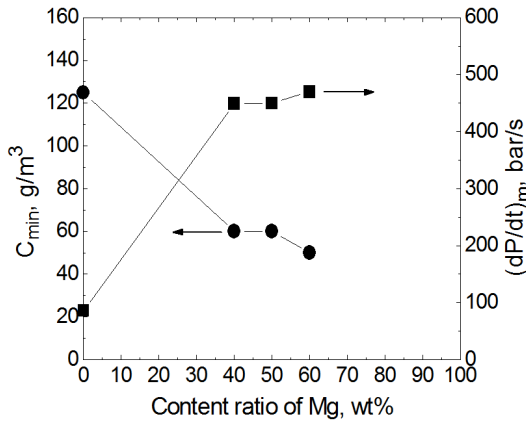


Fig. 4. Effect of magnesium content ratio on minimum explosion concentration (C_{min}) and maximum rate of pressure rise $[(dP/dt)_m]$ of Mg-Al alloy dust clouds.

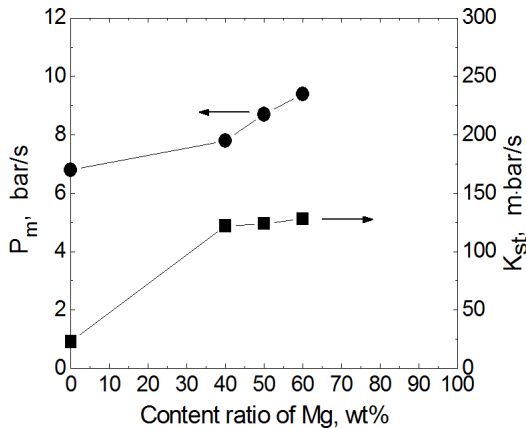


Fig. 5. Effect of magnesium content ratio on maximum explosion pressure (P_m) and explosion index (K_{st}) of Mg-Al alloy dust clouds.

VI. 결론

본 연구에서는 일정한 평균입경(151~160 μm)을 갖는 Mg합금에 대해서 Mg 성분비율이 폭발특성에 미치는 영향을 실험적으로 평가하고 고찰하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) Mg-Al(40:60 wt%), Mg-Al (50:50 wt%) 및 Mg-Al(60:40 wt%)의 폭발하한계는 각각 60, 60, 50 [g/m^3]가 얻어졌는데, Mg성분비율이 증가할수록

폭발하한농도는 감소하였다.

(2) 농도변화에 따른 Mg-Al(40:60 wt%), Mg-Al (50:50 wt%) 및 Mg-Al(60:40 wt%)의 최대폭발압력은 8.0, 8.7, 9.4 [bar]가 얻어졌으며, Mg성분비율의 증가는 최대폭발압력을 증가시키는 요인으로 작용하였다.

(3) Mg-Al(40:60 wt%), Mg-Al (50:50 wt%) 및 Mg-Al(60:40 wt%)의 폭발지수(K_{st})는 각각 121, 122, 128 [$\text{bar} \cdot \text{m}/\text{s}$]로 나타났다. Mg조성비율의 변화에 따른 폭발지수(K_{st})에 미치는 영향이 크지 않음을 실험적으로 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Database for Major industrial accidents, Korea Occupational Safety and Health Agency, (1988~2011)
- [2] Han, O.S., Study on Explosibility and Ignitability Properties of High Functional Metal Dust, Occupational Safety & Health Research Institute (KOSHA), 1038, 5-19, (2010)
- [3] Eckhoff, R.K., *Dust Explosion in the Process Industries ; 3rd ed.*, BH, (2003)
- [4] Hertzberg, M., Zlochower, I. A., & Cashdollar, K. L., Metal dust combustion: Explosion limits, pressures, and temperatures. In 24th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1827-1835, (1992)
- [5] Going, J. E., Chatrathi, K., & Cashdollar, K. L., Flammability Limit Measurements for Dusts in 20 L and 1 m³ vessels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **13**(3-5), 209-219, (2000)
- [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**(4), 461-465 (2008)
- [7] 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), 180-183 (2009)
- [8] 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)
- [9] Dreizin, E. L., & Hoffmann, V. K., Constant

- Pressure Combustion of Aerosol of Coarse Magnesium Particles in Microgravity, *Combustion and Flame*, **118**(1-2), 262-280, (1999)
- [10] 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)
- [11] Dreizin, E. L., & Hoffmann, V. K., Experiments on Magnesium Aerosol Combustion in Microgravity. *Combustion and Flame*, **122**(1-2), 20-29, (2000)
- [12] 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)
- [13] ASTM E1226, Standard Test Method for Pressure and Rate of Pressure Rise for Combustible Dusts, The American Society for Testing and Materials, (1988)
- [14] Popov, E.I., Kashporov, L. Ya., Maltsev, V.M., Breiter, A.L., Combustion mechanism of aluminum-Magnesium alloy particles Combustion, *Explosion and Shock Waves*, **9**(2), 204-208 (1973)