



마그네슘합금의 조성비율에 따른 폭발 및 화염전파 특성

†한우섭 · 이근원

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원
(2012년 5월 4일 투고, 2012년 7월 31일 수정, 2012년 8월 10일 채택)

Properties of Explosion and Flame Velocity with Content Ratio in Mg-Al Alloy Particles

†Ou-Sup Han · Keun-Won Lee

Center for Chemical Safety and Health, Occupational Safety & Health Research Institute,
KOSHA, 104-8 Munji-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-380, Korea
(Received May 4, 2012; Revised July 31, 2012; Accepted August 10, 2012)

요약

본 연구에서는 폭발사고가 반복되고 있는 마그네슘합금(Mg-Al alloy) 분진의 동종재해 예방대책을 위한 안전 자료로 활용하기 위하여 폭발특성을 실험적으로 조사하고 화염전파속도를 추정하였다. 화염전파속도는 폭발과 압력 강도에 영향을 주지만 분진폭발에서는 화염의 확산에 따른 피해예측에도 중요한 자료로 활용될 수 있다. 실험은 마그네슘합금(평균입경 151~161 μm)의 성분비에 따른 폭발특성을 조사하였으며, 밀폐공간의 분진폭발에서 화염전파속도를 계산하기 위하여 분진의 연소시간과 화염면의 도달시간을 고려하고 폭발압력으로부터 추정하는 방법을 사용하였다. 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/s가 얻어졌으며 성분비율에 따라 최대화염속도는 변화하는 경향을 나타냈다.

Abstract - The aim of this study is to evaluate the characteristics of explosion and flame velocity that can be utilized to factories where Mg-Al alloy metal powders are handled in the form of raw materials, products or by-product for similar dust explosion prevention and mitigation. Because the strength of the blast pressure is the result due to flame propagation, flame velocity in dust explosion can be utilized as a valuable information for damage prediction. An experimental investigation was carried out on the influences of content ratio of Mg-Al alloy (mean particle size distribution of 151 to 161 μm). And a model of flame propagation velocity based on the time to peak pressure and flame arrival time in dust explosion pressure, assuming the constant burning velocity, leads to a representation of flame velocity during dust explosion. As the results, the maximum flame velocity of Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al(50:50 wt%) and Mg-Al(40:60 wt%) was estimated 15.5, 18 and 15.2 m/s respectively, and also tend to change with content ratio of Mg-Al.

Key words : dust explosions, explosion pressure, flame velocity, Mg-Al alloy

I. 서론

분체기술의 발전으로 휴대폰, 노트북 등의 전자 부품 등의 제조에 금속 분체의 사용이 증가하고 있다.

금속분체는 다양한 기능성 재료를 만들기 위하여 제조과정에서 미립자 상태로 혼합하거나 제품 정밀 가공 시에 다량의 미분체 폐기물이 발생하게 된다. 이러한 금속분체 취급 공정에서는 금속분진이 원인물질이 되어 발생하는 분진폭발 사고가 발생할 수 있다. 분진폭발이 발생하면 분진화염은 분진운이 존재

†주저자:hanpaule@kosha.net

하는 공간을 따라 전파하게 된다. 화염전파가 빠른 속도로 일어나면 화염면 전방에는 공기 압축에 따른 충격파가 발생하며 주변의 장치, 건물 및 작업자에게 큰 피해를 주게 된다. 폭발 시의 충격파에 따른 폭발특성에 대해서는 주로 가스폭발 시의 화염전파 현상을 통하여 많이 조사되었다 [1-2]. 그러나 금속 분진의 폭발은 화염전파에 따른 충격파발생과 함께 가스폭발 시보다 높은 화염온도로 인하여 설비나 장치의 손상이 크게 발생하는 경우가 많다. 또한 가스 폭발에 비하여 작업자의 화상 등과 같은 인적피해가 높게 나타나는 특징이 있다.

최근 국내 사업장에서는 우수한 물리적 특성을 가지고 있는 마그네슘(Mg)을 신소재의 원재료로 하는 제품의 수요가 높아지고 있다. 그 중에서도 Mg-Al 합금(이하 마그네슘 합금으로 표기)은 다양한 분야에서 활용되고 있다. 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 반복해서 발생되고 있는데 [3], 유사한 화재폭발사고 예방을 위한 대책 마련이 필요하다.

Mg 또는 알루미늄(Al) 단일성분의 폭발특성에 대한 연구가 몇몇 연구자에 의해 수행되었는데, Li 등(2008)은 Mg의 최저발화온도(MIT)를 유기물, 석탄 분진과 비교한 연구에서 Mg의 MIT가 높게 나타났다고 보고하였으며[4], 불활성 가스 분위기 내에서의 Mg의 연소성을 실험적으로 검토하여 N₂가 Ar에 비하여 연소억제가 효과적이었다고 보고하였다 [5]. 입경분포를 가지는 Al(0~8 μm) 및 Mg(0~20 μm)에 대하여 최소발화에너지(MIE)를 실험적으로 조사하여 입경증가에 따라 MIE도 증가하는 것을 제시하고 있다 [6]. 단일 성분의 Al에 대한 연구에서는 Al의 입경, 농도, 습도변화에 따른 폭발특성에 대해서 실험적 및 이론적 연구가 진행되었다 [7]. 반면에 마그네슘합금에 대한 연구는 거의 없으며, 특히 Mg 및 Al의 성분비 변화에 따른 폭발특성자료가 제시되고 있지 않아 마그네슘 합금의 폭발사고예방을 위한 안전기술자료가 부족한 것이 현실이다.

본 연구에서는 마그네슘 합금의 Mg와 Al의 조성비율에 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 분진

화염전파속도를 추정하고자 하였다.

II. 실험

2.1. 시료

본 연구에서는 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 성분비를 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 LS 13320)를 활용하여 시료의 입도 분포를 측정된 결과, Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al(50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)의 평균입경은 각각 160, 151, 152 μm로 분석되었다. 사용된 3종 시료의 평균입경을 거의 일정하게 하여 입경에 따른 폭발특성에의 영향을 최소화하도록 하였다. 입경 조건이 분진폭발특성에 영향을 주지만 10 μm 이내의 입경변화에 따른 폭발특성의 차이는 무시할 정도로 작기 때문에 [2], 조성 비율 변화만을 고려한 폭발특성 비교가 가능할 것으로 판단하였다. 또한 본 연구에 의한 실험결과와의 비교를 위하여 분진폭발 시험의 표준분체인 석송자(Lycopodium)분진을 사용하여 폭발압력특성을 조사하였다.

2.2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 20 L 구형 분진폭발시험장치를 Fig.1에 나타냈다. 장치는 폭발용기, 분진분사장치, 폭발압력 기록시스템으로 구성되어 있다. 용기 내부의 온도는 폭발특성치에 영향을 주는 인자이므로 본

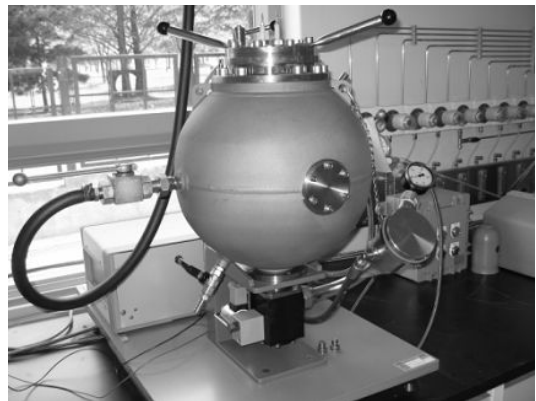


Fig. 1. The 20L apparatus for dust explosion.

장치에는 폭발 열에 의한 용기의 온도상승을 방지하기 위하여 냉각수 재킷이 갖추어져 있다. 구체적인 실험방법은 일정 농도의 분진을 6 L의 분진 저장 컨테이너에 충전한다. 다음에 20 bar의 공기를 유입시키고 분진 컨테이너의 밸브를 순차적으로 열어 분진-공기 혼합물을 구형 용기 내에 부유, 분산시킨다. 그리고 분진-공기 혼합물 분산 후에 착화 지연시간(60 ms)을 두어 일정 시간 경과 후에 두 전극사이로 전압을 인가하여 5 kJ의 착화에너지를 갖는 화학점화기(Chemical igniter)를 착화시킨다. 이때 분진-공기 혼합물의 폭발에 따른 압력 파형을 관찰하고 폭발한계농도, 폭발압력, 최대압력상승속도 등을 측정하였다. 폭발특성평가는 상온, 상압의 동일 농도조건에서 실험을 3회 실시하여 평균값을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 기류 변화에 따른 화염전파속도

분진 혼합기의 기류 속도가 같은 조건에서는 화염전파속도가 큰 분진일수록 연소속도가 빠르다고 할 수 있으며 연소속도가 빠를수록 폭발 위험성은 증가한다. 또한 기류의 증가도 폭발압력 특성에 영향을 주므로 석송자를 사용하여 기류 영향에 따른 화염전파속도를 추정하였다. 분진폭발은 분진이 연소하여 화염으로 발전하고 화염전파를 통하여 압력이 급격하게 증가하므로 폭발압력은 화염전파속도(V_f)와 밀접한 관련이 있다. 그러므로 부유 분진의 화염전파속도를 추정함으로써 해당 분진의 위험성을 보다 상세히 파악하는데 도움이 된다. 본 연구에서는 분진폭발 시의 피해예측을 위하여 분진폭발압력으로부터 화염전파속도를 계산하였다 [8]. 밀폐공간 내의 분진폭발에 있어서 착화와 함께 폭발압력이 최대가 될 때까지의 시간(Time to peak pressure)을 분진의 연소시간(t_c)이라고 하고, 분진이 착화되어 화염전파로 인해 폭발압력이 발생하면 최대폭발압력(P_m)은 화염이 용기의 벽면에 도달하는 지점에서 발생한다. 분진 화염면(Flame front)이 밀폐 용기의 벽면에 이르게 데 소요되는 시간을 화염도달시간(Flame arrival time, t_w)이라고 하였을 때, t_c 는 t_w 와 거의 비례한다. 구형 폭발용기의 반경을 r (m)이라고 하면 분진폭발로 인한 화염전파속도(V_f)는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_f = r / t_w \quad (1)$$

구형용기의 반경(r)은 체적(V)의 3제곱근($V^{1/3}$)에 비례한다. 또한 화염면이 용기 벽에 도달하여 연소 종료와 함께 압력이 최대가 되는 시점에서 t_w 는 최대

폭발압력(P_m)과 최대압력상승속도 ($(dP/dt)_m$)의 비율에 근사하므로 식(2)와 같이 표현된다.

$$t_w = P_m / [(dP/dt)_m] \quad (2)$$

그러므로 식 (1) 및 (2)로부터 V_f 는 식 (3)과 같이 된다.

$$V_f = V^{1/3} \cdot [(dP/dt)_m / P_m] \quad (3)$$

식 (3)을 사용하면 폭발압력시험을 통해 측정된 시험 분진의 최대폭발압력(P_m)과 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_m]$ 의 값을 활용하여 화염전파속도의 계산이 가능하다.

본 연구에서는 표준 분체로서 평균 입경이 32 μm 인 석송자(Lycopodium)를 사용하여 층류 및 난류의 기류 변동에 따른 폭발압력을 측정하고 화염전파속도를 계산하였다. 실제로 국내 사업장에서 일어나는 분진폭발은 난류상의 기류 조건에서 발생하는 비율이 높기 때문에 분진운의 기류 조건이 폭발압력에 어느 정도의 영향을 주는가를 조사하는 것은 공정 중의 분진이송 조건을 고려한 안전대책 강구에 필요하다. 층류 상태에 가까운 분진운에서 실험적으로 조사한 석송자의 화염전파속도를 Fig.2에 나타냈다. Fig. 2의 층류상 화염전파속도의 측정값은 디지털 비디오카메라를 사용하여 연속화염전파 모습과 화염 크기 스케일을 동시에 기록하여 단위시간 당 화염의 이동거리를 컴퓨터 화상해석을 통하여 분석한 결과이다 [9]. 분진농도의 증가와 함께 화염전파속도도 증가하는데 약 150 g/m^3 에서 0.5 m/s 로서 최대가

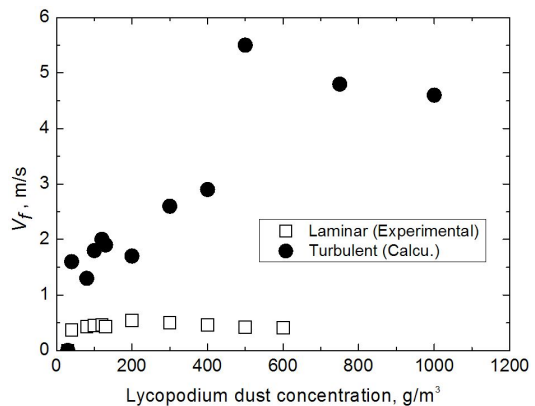


Fig. 2. Flame velocity in dust explosion of laminar and turbulent lycopodium dust clouds

되고 계속적인 농도 증가에 따라 화염전파속도는 서서히 감소하고 있다. 증류 조건에서의 석송자 분진의 화염전파속도는 메탄, 에탄, 프로판 등의 탄화수소가 스의 증류상태에서의 화염전파속도와 유사한 값을 가지고 있다. Fig.2의 난류상태의 화염전파속도는 20L 구형 분진폭발시험장치에서 20 bar의 공기압력을 통해 분출된 난류상태의 석송자-공기 혼합물 분진을 농도 변화시키면서 측정된 폭발압력으로부터 계산한 값이다. 본 연구에서 조사된 석송자의 최대폭발압력은 6.3 bar가 얻어졌는데, 최대폭발압력은 분진 분사 시의 혼합기 기류의 변동 등의 장치 특성에 의존한다. 최대폭발압력이 증가하면 화염전파속도도 증가하는 경향을 보였는데, 화염전파속도는 500 g/m³에서 5.5 m/s로 분석되었다.

3.2. 마그네슘 합금 성분비에 따른 화염전파속도

Mg 및 Al의 성분 비율이 서로 다른 마그네슘합금에 대하여 농도를 변화시키면서 최대폭발압력(P_m)을 측정하고 화염전파속도를 계산한 결과를 Fig.3~Fig.5에 제시하였다. 농도가 증가함에 따라 폭발압력은 일정 농도 구간에서 최대가 되며 그 이후에는 완만하게 감소 경향을 나타내고 있으며 이러한 결과는 성분비율과 관계없이 나타났다. Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al(50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)의 최대폭발압력은 각각 9.4, 8.7, 8.1 bar로 측정되었다. 화염전파속도의 증가율을 보면 농도가 증가함에 따라 증가율도 커지는 경향을 나타내고 있다. 농도에 따른 화염전파속도의 증가 형태는 부분적으로는 다소 불규칙한 결과를 보였다. 이러한 현상은 분사 압

력에 의해 큰 기류가 형성되어 있는 밀폐공간에서의 분진 화염은복잡한 형태를 가지고 있어 구상 화염(Parabolic flame)으로 일정하게 전파되지 않고 불규칙한 화염전파 형태로서 전파되기 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 감소하며, 최대화염전파속도도 감소 경향을 보이고 있다. 그러나 2750 g/m³에서와 같이 일부 농도에 있어서 Mg-Al(60:40 wt%)의 최대화염전파속도는 Mg-Al(50:50 wt%)보다 작게 나타나는 경우도 있었다. 밀폐공간에서의 난류상의 분진폭발 시에는 기류 속도와 분진운의 분포가 일정하지 않기 때문에 Mg-Al(50:50 wt%)의 경우라도 분진운 농도와 기류 속도가 Mg-Al(60:40 wt%)의 경우보다 크게 나타날 가능성이 있다. 따라서 화염면이 일정하지 않고 매우 불규칙적으로 전파할 수 있으며 이러한 농도분포 공간에서의 화염전파는 보다 크게 나타날 수 있을 것으로 추정된다. 성분비율에 따른 마그네슘합금의 농도와 화염전파속도의 상관관계를 Fig.6에 나타내었다. Fig.6에서 알 수 있듯이 큰 기류가 존재하는 밀폐 공간에서의 마그네슘합금 분진의 화염전파속도는 성분비율에 관계없이 농도증가에 따라 높아지는 경향을 보이고 있지만 증가비율은 불규칙적으로 변화하였다. 그러나 성분비율의 변화에 따른 화염전파속도에의 영향이 일부 다른 경향을 나타내는 자료가 조사되고 있다. 이러한 이유로서는 각각의 실험 조건에서의 난류성 기류 조건이 일정하지 않아 분진운의 농도 기울기가 존재

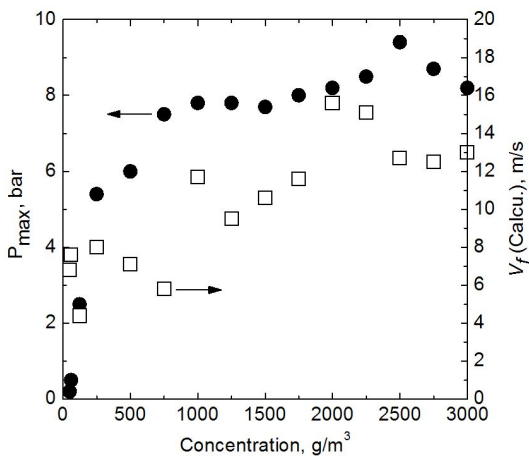


Fig. 3. Explosion pressure and flame velocity in dust explosion of Mg-Al(60:40 wt%).

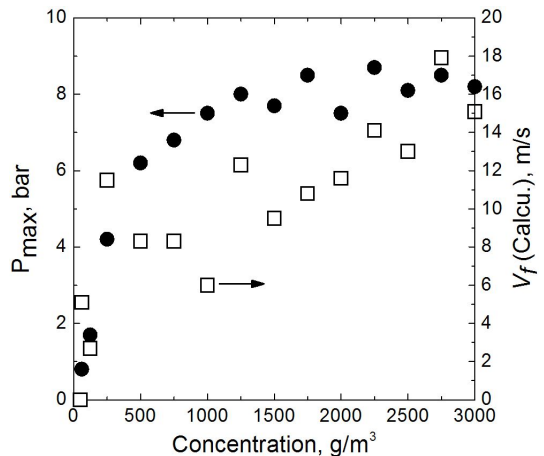


Fig. 4. Explosion pressure and flame velocity in dust explosion of Mg-Al(50:50 wt%).

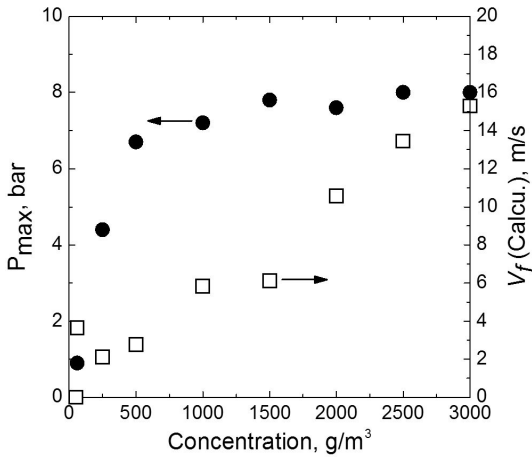


Fig. 5. Explosion pressure and flame velocity in dust explosion of Mg-Al(40:60 wt%).

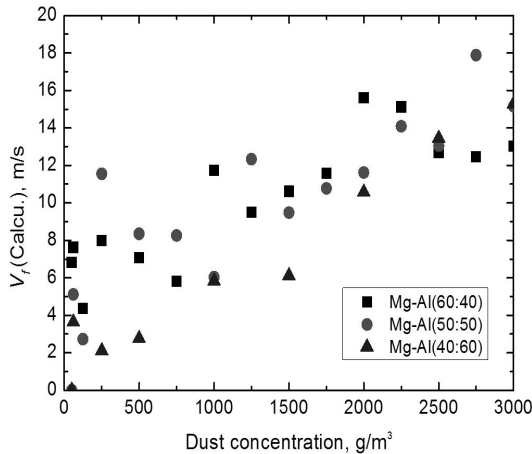


Fig. 6. Variation of flame velocity for Mg-Al dust clouds with different content ratio.

하기 때문에 화염전파속도에 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다. 실제 사업장의 공정이나 이송배관 내의 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 Al 성분의 증가와 함께 감소하는 경향을 보이더라도 실제 공정에서의 화염전파 거동은 기류 및 농도 조건에 따라 변화할 수 있을 것으로 판단된다. 마그네슘 합금의 최대화염전파속도는 Mg 및 Al의 성분 비율

에 따라 변화하지만 15.2~18.0 m/s의 비교적 빠른 속도로 전파하는 것으로 추정되는데 이는 석송자(Lycopodium)와 같은 일반 유기물 분진폭발에서 볼 수 있는 화염 같은 일반 유기물 분진폭발에서 볼 수 있는 화염전파속도보다 3배 이상 큰 수치이다. 또한 주로 과압에 의한 피해를 미치는 가스폭발에 비하여 마그네슘 합금과 같은 금속분진의 연소시간은 보다 길며 빠른 화염전파속도를 나타내고 있다. 이러한 이유 등으로 재 부유된 분진에 의한 2차 폭발 위험성이 나타날 수 있으며 마그네슘합금 분진을 취급하는 공정의 이송배관이나 집진기에서 폭발이 발생하여 화염이 분출되는 경우에는 그 피해범위가 확대될 위험성이 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 20L 구형 분진폭발시험장치를 사용하여 조성 비율이 서로 다른 마그네슘 합금의 폭발압력특성을 실험적으로 조사하였으며, 마그네슘 합금의 분진폭발에 따른 분진화염전파속도를 계산하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 마그네슘합금은 성분비율에 관계없이 농도증가에 따라 폭발압력이 증가하여 일정 농도 구간에서 최대가 되며 그 이후에는 완만한 감소경향을 나타내고 있다.
- (2) Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al (50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)의 최대폭발압력은 각각 9.4, 8.7, 8.1 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 감소 경향을 나타냈다.

참고문헌

- [1] Lewis B. and Von Elbe, G., Combustion Flames and Explosions of Gases, 2nd edition, Academic Press Inc., New York, 292-294, (1961)
- [2] Enckhoff, R. K., Dust explosions in the process industries (3rd ed.), Amsterdam: Gulf Professional Publishing (2003)
- [3] Korea Occupational Safety and Health Agency, Database of major industrial accidents (1988~2010)
- [4] G. Li, C.M. Yuan, P.H. Zhang, B.Z. Chen, Experi-

- ment-based fire and explosion risk analysis for powdered magnesium production methods, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 21, 461-465, (2008)
- [5] G. Li ., C.M. Yuan, Y. Fu, Y.P. Zhong, B.Z. Chen, Inerting of magnesium dust cloud with Ar, N₂ and CO₂, *Journal of Hazardous Materials* 170, 180-183, (2009)
- [6] M. Nifuku, S. Koyanaka, H. Ohya, et al., Ignitability characteristics of aluminium and magnesium dusts that are generated during the shredding of post-consumer wastes, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 20, 322-329 (2007)
- [7] 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)
- [8] Han, O.S., HAN, I.S., CHOI, Y.R., Lee, K.W., Explosion properties and thermal stability of reactive organic dust, *KIGAS*, 15(4), 7-14, (2011)
- [9] Han, O.S., HAN, I.S., CHOI, Y.R., LEE, J.S., LEE, S.H., "Characteristics of flames Propagating Through Combustible Particles Concentration in a Vertical Duct", *Korean Chem. Eng. Res.*, 49(1), 41-46, (2011)