

플라스틱 부유 분진의 폭발특성과 화염전파속도

한우섭 · 이근원[†]

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원
34122 대전광역시 유성구 엑스포로 339번길 30
(2016년 3월 2일 접수, 2016년 3월 31일 수정본 접수, 2016년 4월 1일 채택)

Explosion Characteristics and Flame Velocity of Suspended Plastic Powders

Ou Sup Han and Keun Won Lee[†]

Occupational Safety & Health Research Institute, Kosha, 30, Expo-ro 339 Beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34122, Korea
(Received 2 March 2016; Received in revised form 31 March 2016; accepted 1 April 2016)

요 약

산업분야에서 사용되는 플라스틱 분진은 대부분 가연성이며 화재폭발사고 위험성이 있다. 그러나 산업현장에서 안전한 취급을 위해 활용할 수 있는 폭발특성 자료는 매우 적다. 본 연구에서는 사업장에서 취급하는 다양한 플라스틱 분진의 폭발특성을 실험적으로 조사하여 관련 자료와 안전정보를 제공하는 것을 목적으로 수행하였다. 이를 위해 20 L 분진폭발시험장치를 사용하여 각종 폭발특성값을 측정하였다. 그 결과 ABS (209.8 μm), PE (81.8 μm), PBT (21.3 μm), MBS (26.7 μm) 및 PMMA (14.3 μm) 시료의 분진폭발지수(K_{st})는 각각 62.4, 59.4, 70.3, 303, 203.6 [bar·m/s]의 값이 얻어졌다. 또한 플라스틱 분진폭발에 의한 피해예측을 위하여 분진폭발압력에서 분진의 연소속도가 일정하다고 가정하고 최대압력소요시간 및 화염도달시간을 고려한 화염전파속도모델을 통하여 분진폭발시의 화염전파속도를 추정하였다.

Abstract – Many of plastic powders handled in industry are combustible and have the hazard of dust fire and explosion accidents. However poor information about the safe handling has been presented in the production works. The aim of this research is investigated experimentally on explosive characteristics of various plastic powders used in industry and to provide additional data with safety informations. The explosibility parameters investigated using standard dust explosibility test equipment of Siwek 20-L explosion chamber. As the results, the dust explosion index (K_{st}) of ABS (209.8 μm), PE (81.8 μm), PBT (21.3 μm), MBS (26.7 μm) and PMMA (14.3 μm) are 62.4, 59.4, 70.3, 303 and 203.6 [bar·m/s], respectively. And flame propagation velocity during plastic dust explosions for prediction of explosive damage was estimated using a flame propagation model based on the time to peak pressure and flame arrival time in dust explosion pressure assuming the constant burning velocity.

Key words: Plastic dusts, Dust explosion, Explosion pressure, Flame velocity

1. 서 론

플라스틱은 경량성, 부식 내구성, 우수한 전기적 성질, 가공 용이성 등의 많은 장점을 가지고 있어 다양한 분야에서 사용되고 있다. 그러나 플라스틱은 화재에 취약하며 플라스틱 분진이 공기 중에 부유, 분산되어 일정 농도의 분진운(Dust cloud)이 형성되고 착화원이 존재하면 분진폭발 위험성이 있다. 플라스틱 분진에 의한 국내 사업장에서의 폭발사고사례를 보면, 1989년에 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) 분진폭발사고(사망 16명, 부상 17명)가 일어났으며, 2000

년에는 PVC공정 Bag filter청소 시에 발생한 PVC분진폭발사고(부상 4명)와 PVC공정의 배관용접작업 중의 분진폭발사고(부상 5명)가 있었으며, 2012년의 PE (Polyethylene)분진폭발사고 및 2013년의 HDPE (High-density Polyethylene)분진폭발사고(사망 6명, 부상 11명) 등과 같이 플라스틱 분진에 의한 폭발사고가 반복적으로 발생하고 있으며 피해규모도 큰 것을 알 수 있다[1]. 국외에서도 ABS분진[2,3] 및 PE분진[4,5]에 의한 폭발사고 등으로 심각한 물질 및 인적피해가 보고되고 있다. 플라스틱 제조 시에는 건조, 저장 공정과 같이 중간 공정에서 미세한 분진 발생이 증가하므로 잠재적인 폭발 위험성을 가지고 있다. 플라스틱 제품 제조공정에서는 설비 외부로의 분진 누출이 없는 경우라도 공정설비 내에서는 미세 분진의 발생을 피할 수 없으므로 상시 폭발범위 내에 존재할 가능성이 있다는 점을 고려하여 폭발방지대책을 강구하는 것이 필요하다. 그러나 국내 사업장에서 사용하고 있는 플라스틱 분진원료 제품 중에는 과거 폭발

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: leekw@kosha.or.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

사고사례가 있었음에도 불구하고 화재폭발특성자료가 거의 없다. 이러한 플라스틱 분진 제품을 제조하는 경우에는 화재폭발 위험성을 알지 못하여 잘못된 운전조건이나 취급 부주의로 인하여 발화나 화재폭발사고가 일어날 수 있으므로 이러한 사고예방과 안전대책 강구에 필요한 정량적인 안전자료를 확보하는 것이 우선적으로 필요하다.

플라스틱 분진의 종류는 다양하지만 이에 관련하여 화재폭발특성에 대한 연구가 발표되고 있다. Wei 등[6]은 입경이 서로 다른 2종의 PMMA (Polymethylmetacrylate) 분진을 대상으로 20 L 폭발용기를 사용한 벤팅의 직경에 따른 폭발압력특성을 조사하였는데 압력배출을 위한 벤팅의 직경이 증가할수록 최대폭발압력이 감소하는 결과를 얻었다. Hertzberg 등[7,8]은 PE가 폭발하한농도(Minimum explosible concentration; MEC)에서 완전 분해되면 폭발특성이 메탄(CH_4)과 유사하다고 보고하였으며, 그 후에 Cashdollar [9]는 PE 분진과 CH_4 의 MEC를 실험적으로 조사한 결과 PE와 CH_4 의 MEC는 거의 일치하였으며 이는 PE가 거의 완전분해되어 가스상태의 공기 혼합기를 형성하였기 때문이라는 연구결과를 제시하고 있다. Duh 등[10]은 ABS 분진의 열분해성을 시차열분석시험장치(DSC)를 사용하여 조사한 결과 발화가 193 °C에서 일어나는 것을 보고하였다. 그러나 플라스틱 분진은 다양한 분체특성으로 인해 알려진 폭발특성자료가 매우 적어 활용하기가 쉽지 않은 것이 현실이다. 한편 분진폭발에서의 층류연소속도의 연구는 장방형 배관의 분진 전파화염(Propagating dust flames)과 구형(Spherical) 형태의 밀폐공간에서 전파하는 분진 구상화염(Spherical dust flames)으로 크게 2가지로 분류된다. 장방형 수직 연소관을 사용하여 분진화염의 전파거동을 조사한 연구[11-19]에서는 유동층(Fluidized bed)을 사용하여 층류에 가까운 분진운을 형성시켜 화염전파를 관측하고 층류연소속도를 제시하고 있다. 밀폐공간에서의 분진 전파화염에 대한 연구로서 Lewis 등[20]은 밀폐공간의 폭발에서 시간-압력 곡선과 화염전파속도 측정값에 의한 층류연소속도를 평가하였다. 난류의 크기가 연소속도에 미치는 영향에 대해서는 몇 가지 연구결과[21-23]가 보고되고 있다. Tezok [22] 등은 옥수수 분진을 사용하여 난류 강도와 연소속도의 상관성을 실험적으로 조사한 결과 0-7 m/s의 연소속도에서는 선형적인 상관성이 존재하는 것을 제시하였다. Van der Wel[23]은 20 L 분진폭발시험장치를 사용하여 조사한 결과 0-3 m/s의 연소속도에서 난류 강도에 대한 명확한 선형성이 나타나았다고 보고하였다. Dahoe 등[24]은 분진폭발에서 해석이 곤란한 반응대(Reaction zone)의 화염두께(Flame thickness)를 무시한 폭발모델을 제시하고 화염면의 이동속도를 계산하였다. Han 등[25]은 입자거동을 고려한 분진화염전파모델을 통해 화염전파속도를 추정하였으며, 또한 Han 등[26]은 밀폐공간의 분진폭발에서 시간-압력 곡선으로부터 용기 벽면에서의 화염도달시간과 분진의 연소시간을 고려하여 화염전파속도를 계산하였다.

본 연구에서는 국내 유통량이 많고 재해사례가 있음에도 물리적 위험성 자료가 없어서 반복적인 화재폭발 발생 위험성이 높은 플라스틱 분진을 대상으로 화재폭발특성을 실험적으로 조사하였다. 이를 위해 플라스틱 분진이 폭발하는 경우에 폭발피해를 최소화하기 위한 대책을 강구하는데 필요한 폭발압력, 압력상승속도, 분진폭발지수 등의 폭발특성값을 측정하고 평가하였다. 또한 플라스틱 분진이 폭발하는 경우에 폭발피해 최소화 또는 예방대책에 필요한 피해예측을 위해서 분진폭발시의 화염전파속도를 계산하고 위험성을 검토하였다.

2. 실 험

2-1. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 분진폭발 시험장치는 국제시험규격(ASTM)의 분진폭발 표준시험장치를 채용한 Siwek 20 L Chamber (Kühner AG, Swiss)를 사용하였으며 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타냈다[27]. 시험방법은 먼저 시험할 농도의 분진을 6 L의 저장컨테이너에 충전한 다음에 분진 컨테이너의 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 분진 분산 후에 60 ms의 일정한 시간 간격(착화지연시간)을 두어 부유 분진운의 유동성이 최대한 억제하도록 하였다. 지연시간 경과 후에 2개 전극사이로 전압을 인가시켜 10 kJ의 착화에너지를 갖고 있는 화학점화기(Chemical ignitors)를 사용하여 착화시켰다[27]. 분진이 착화되어 폭발이 일어나면 시간-압력 곡선이 관찰되는데 이러한 압력 곡형을 통하여 폭발한계농도, 폭발압력, 최대압력상승속도 등을 측정한다. 일정 농도에서의 폭발특성평가는 상온(23 °C±1 °C), 대기압(1 atm)의 조건에서 실험을 3회 반복하여 그 결과를 평균하였다. 또한 분진의 폭발강도 비교를 위해서 각 플라스틱 시료에 대한 폭발지수(K_{st})를 $K_{st}=(dP/dt)_{max} \cdot V^{(1/3)}$ 의 관계식을 이용하여 계산하였다. 이 때 V는 폭발용기의 체적(0.02 m³)이며 $(dP/dt)_{max}$ 는 최대폭발압력상승속도 [bar/s]를 나타낸다.

2-2. 분진 시료

본 연구에서 사용한 분진 시료는 국내 관련 사업장에서 제조, 취급량이 많지만 MSDS(물질안전보건자료) 등의 물리화학적특성 항목에 폭발특성값이 없으며 분진폭발사고사례가 있어 위험성이 높다고 판단되는 플라스틱 분진을 연구대상 시료로 선정하였다. 본 연구에서 화재폭발특성을 조사, 평가한 분진시료는 국내사업장에서 제공한 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene, Kumho PetroChem), PE (Polyethylene, LG Chem), PBT (PolyButylene Terephthalate, BASF Korea), MBS (Methylmethacrylate Butadiene Styrene, LG Chem) 및 PMMA (Polymethylmetacrylate, LG Chem)의 5종으로 하였다. 특히 PMMA는 MMA의 중합에 의해 만들어지는데 PMMA를 조사 대상 시료로 선정한 이유는 일상생활에서 많이 사용하는 플라스틱으로서 PMMA는 거의 완전연소가 이루어지며 이 때문에 열분해 등의 연소메커니즘이 잘

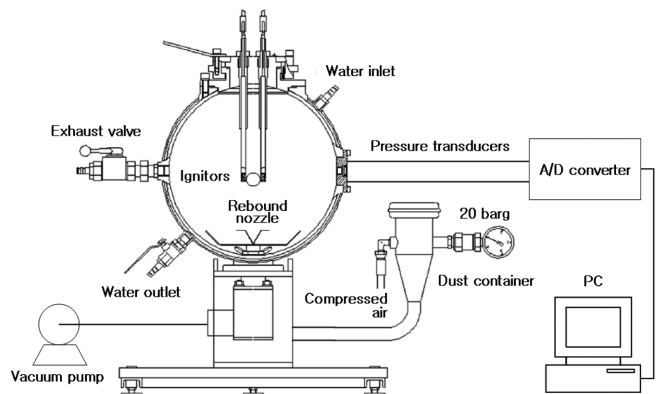


Fig. 1. 20 L spherical explosion test apparatus (Kühner AG, Swiss).

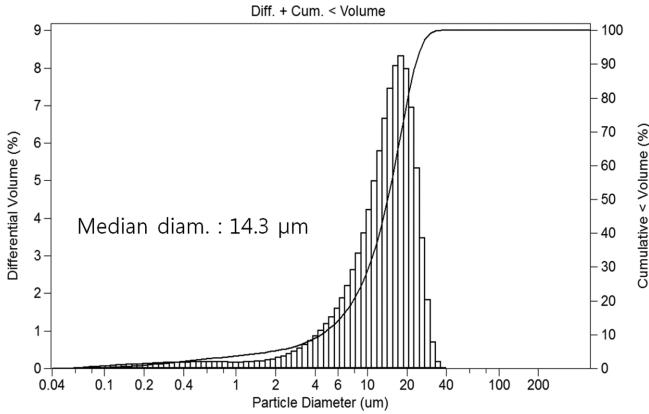


Fig. 2. Particle size distribution of PMMA dust.

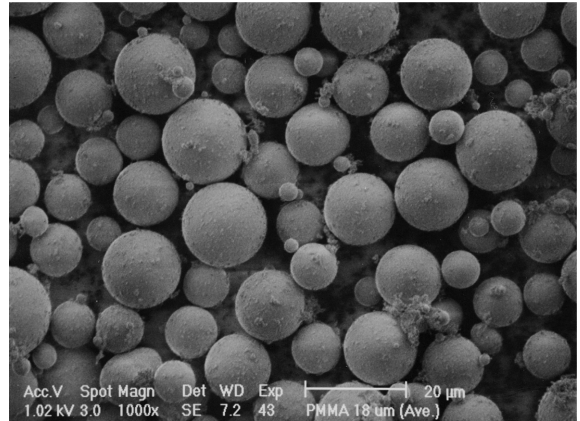


Fig. 3. Scanning Electron Microscope of PMMA dust.

알려져 있다는 점이며 이러한 이유로 많은 연구자들에 의해 PMMA의 연소특성의 연구결과가 보고되고 있어 비교 연구가 가능하기 때문이다.

분진의 폭발특성에 영향을 주는 요인 중에서 평균입경과 분진농도는 분진폭발 특성을 지배하는 주요 영향 인자들이다. 그 중에서도 평균입경은 분진폭발특성이 결정되는데 가장 큰 영향을 주며 분진에는 다양한 입경이 혼합되어 있기 때문에 입도 범위와 입경을 대표하는 평균입경이 어느 정도인지를 사전에 조사하는 것이 중요하다. 동일한 플라스틱 분진이라 하더라도 평균입경이 변하면 폭발하한농도, 폭발압력특성 등이 달라지기 때문이다. 그러므로 폭발특성 실험값은 해당 분진의 분체 특성이 명확하지 않으면 활용하는 것이 곤란하다. 본 연구에서는 입도특성을 알기 위하여 입도분석기(Beckman Coulter, LS 13320)를 사용하여 분진입도 특성을 조사하였으며 Fig. 2는 PE의 입도분석 결과 예이며 입도분석장치를 사용하여 측정된 각 시료의 평균입경(Median diameter)을 Table 1에 나타냈다. ABS, PE, PBT, MBS, PMMA분진의 평균입경은 각각 209.8, 81.8, 21.3, 26.7, 14.3 μm의 결과가 얻어졌다. 입도범위는 ABS, PE, MBS 분진이 비교적 넓은 분포를 내내내는 반면에 PMMA, PBT 분진은 상대적으로 좁은 입도 분포를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 평균입경 측정결과의 타당성을 검토하기 위하여 주사 전자현미경(SEM; Scanning Electron Microscope, Hitachi system)에 의해 관찰된 PMMA 분진 입자의 예를 Fig. 3에 나타냈는데 SEM관찰 시에 선명한 상을 얻기 위한 증착이나 방전제 등의 특별한 전처리를 하지 않은 상태의 모습이다. PMMA 입자는 거의 구형에 가까운 형태를 가지고 있으며 평균입경보다 작은 미세 분진도 포함되어 있지만 일정한 입경을 가지고 있는 것이 많으며 Fig. 2의 입도분석장치 실험결과와 비슷한 평균입경을 나타내고 있다는 것을 확인할 수 있다. 사업장에서의 폭발특성자료 활용성을 고려하여 실험에 사용한 시료 분진은 건조 및 일정한 입경분포를 갖도록 하기 위한 전처리를 실시하지 않았으며 약 23 °C의 실온 조건에서 실험을 실시하였다.

Table 1. Particle size of samples

Samples	Particle Diameter Range (μm)	Median diameter, D_p (μm)
ABS	1~1000	209.8
PE	1~800	81.8
PBT	0.4~160	21.3
MBS	1~900	216.7
PMMA	1~40	14.3

3. 결과 및 고찰

3-1. 분진폭발의 발생 위험성

분진폭발은 공기 중에 분산된 부유 분진이 연소하여 화염이 전파하기 때문에 일어난다. 공간을 화염이 전파하기 위해서는 분진 입자가 지속적으로 연소를 해야 하므로 일정량 이상의 분진 입자가 공기 중의 공간에 존재할 필요가 있다. 분진폭발이 발생하는데 필요한 단위 체적에서의 분진의 최소량이 폭발하한농도(Minimum explosible concentration; MEC)이다. 부유, 분산되어 있는 분진-공기 혼합기의 폭발위험성은 크게 분진폭발 발생 가능성과 폭발강도로 나눌 수 있다. 폭발발생 가능성은 분진이 얼마나 쉽게 폭발할 수 있는지를 나타내는 지표로서 그 중에 하나가 MEC이다.

20L 분진폭발시험장치(Siwiek 20-L Apparatus)를 사용하여 MEC를 측정하였으며 Fig. 4는 ABS 분진의 MEC를 측정할 때 예이며, 농도 변화에 따른 폭발압력(P_m)과 폭발압력상승속도(dP/dt)를 조사한 결과를 나타낸 것이다. MEC의 기준이 되는 폭발압력은 0.2 bar이며[27], 농도 50 [g/m³]에서 0.2 bar의 폭발압력을 나타내고 있으므로 이 농도가 폭발하한농도의 기준이 되는 것을 알 수 있다. Table 2는 MEC를 조사한 결과로서 PMMA, ABS, PE, PBT 및 MBS에서의 MEC는 각각 40, 50, 30, 40 및 50 [g/m³]이 얻어졌다. 폭발발생 가능성은 MEC가 작을수록 높으므로 본 연구에서 PE분진의 폭발 위험성이 가장 높다고 할 수 있다. 그러나 분진의 입도특성은 Table 1과 같이 일정하지 않기 때문에 평균입경이 변하면 MEC 측정값도 달라질 수 있으므로 MEC와 같은 폭발특성자료의 활용 시에는 분진의 평

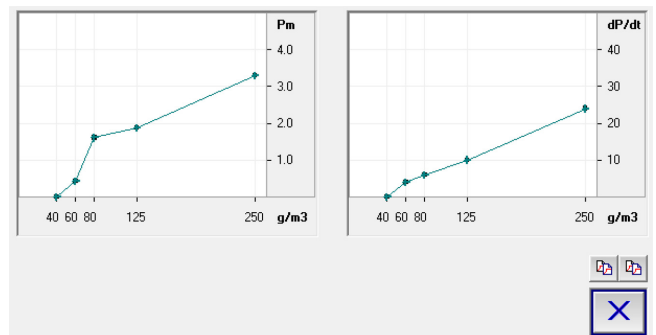


Fig. 4. Measurement of MEC of ABS dust.

Table 2. Minimum explosible concentration (MEC) of plastic dust samples

Samples	Median diameter (μm)	MEC (g/m^3)
ABS	209.8	50
PE	81.8	30
PBT	21.3	40
MBS	216.7	50
PMMA	14.3	40

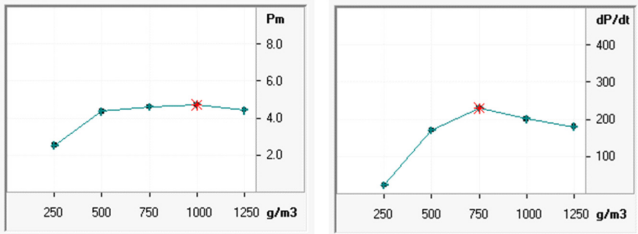


Fig. 5. Maximum pressure and rate of pressure rise in ABS dust explosion.

균입경을 함께 고려하여 적용하여야 한다.

3-2. 폭발압력특성

분진폭발은 입자의 연소에 의해 화염이 전파하여 0.2 bar 이상의 압력이 발생한 경우이다[27]. 이 때 특정 농도에서 발생하는 폭발압력(P_m)의 시간변화에 대한 최대값이 폭발압력상승속도($[dP/dt]_m$)이며 P_m 과 $[dP/dt]_m$ 은 폭발피해 저감대책을 위해 중요하게 활용되는 폭발 특성 값이다. 이러한 폭발특성값은 동일한 종류의 분진이라 하더라도 입경 크기, 농도, 온도, 압력 등에 따라 변화한다. Fig. 5는 분진농도가 변화하는 경우의 ABS분진에 대하여 P_m 과 $[dP/dt]_m$ 를 측정할 예를 나타낸 것이다. ABS분진의 농도가 증가하면 P_m 이 증가하는 경향을 보이며 1000 [g/m^3]에서 최대폭발압력(P_{max})인 4.9 bar가 얻어졌으며 이 값은 ABS의 전체 농도 변화에서 P_m 이 최대값으로 나타난 경우이다. 1000 [g/m^3] 이상의 고 농도로 분진량이 증가하면 P_m 은 감소하기 시작하는데 1250 [g/m^3]에서 4.6 bar로 낮아지고 있다. 반면에 ABS 분진의 MEC 근방으로 농도가 감소하는 250 [g/m^3]에서 P_m 이 2.6 bar로서 희박 분진농도로 갈수록 폭발에 의한 압력 발생이 낮아지는 것을 알 수 있다. 농도가 계속 저하되어 60 [g/m^3]에서는 폭발압력이 0.48 bar가 되면서 화염전파 능력이 더욱 감소한다. 또한 Fig. 5의 우측 그래프는 ABS 농도변화에 따른 $(dP/dt)_m$ 는 단위시간에 있어서 폭발압력이 가해지는 힘으로서 값이 클수록 폭발강도가 증가함을 의미한다. 또한 $(dP/dt)_m$ 는 750 [g/m^3]에서 약 238 [bar/s]로서 최대값 $[(dP/dt)_{max}]$ 을 보이며 그 이상의 농도에서는 매우 완만하게 감소하고 있다. ABS, PE, PBT, MBS, PMMA 분진이 농도변화에 따른 P_m , $[dP/dt]_m$ 및 폭발지수(K_{st})의 실험결과를 Fig. 6 및 Fig. 7에 각각 나타냈다. Fig. 6에서 분진농도 변화에 따라 일정 농도에서 P_m 이 최대가 된 후에 감소 경향을 나타내는데, P_m 이 최대가 되는 농도는 분진 종류에 따라 달라진다. PMMA 및 PE는 500 [g/m^3]에서 P_m 이 최대가 되며 ABS, PBT, MBS는 최대가 되는 P_m 이 1000 [g/m^3]에서 나타난다. 또한 P_{max} 의 크기를 보면 MBS가 9.8 bar로 가장 큰 값으로 조사되었다. ABS, PE, PBT, MBS, PMMA의 P_{max} 는 각각 4.9, 7.3, 5.9, 9.8, 8.0 bar가 얻어졌다. 본 연구에서는 PMMA의 P_{max} 가 평균입경 14.3 μm 에서 8.0 bar가 측정되었으며, Wei 등[6]은 PMMA의 평균 입경이 본 연구의 경우(14.3 μm)보다 작은 0.8 μm 에서 8.65 bar로

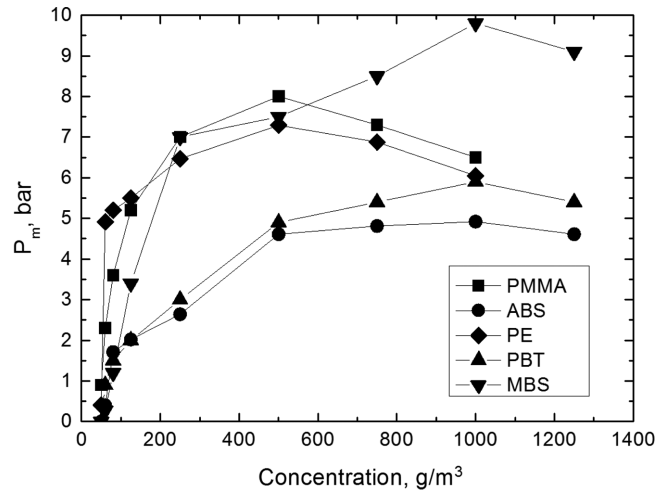


Fig. 6. Maximum explosion pressure of plastic dust samples with concentration.

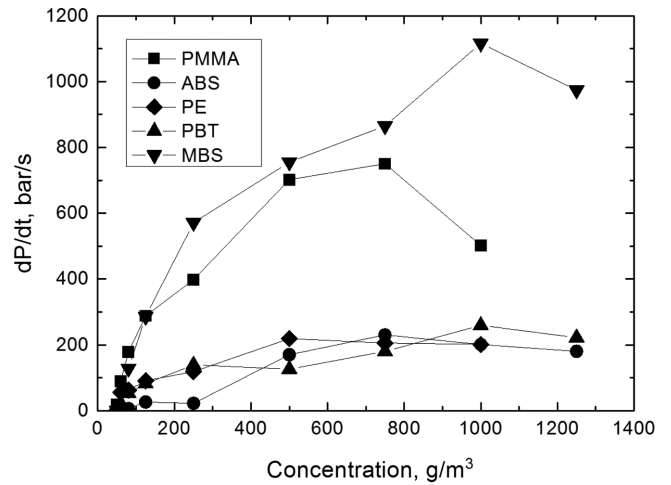


Fig. 7. Rate of explosion pressure rise of plastic dust samples with concentration.

보고하고 있으며 평균입경이 감소하면 P_{max} 가 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7은 플라스틱 분진시료의 $[dP/dt]_m$ 를 나타낸 것으로서, ABS, PE, PBT, MBS, PMMA의 $[dP/dt]_m$ 는 230, 218, 259, 1116 및 750 [bar/s]의 측정값이 얻어졌다. $[dP/dt]_m$ 은 MBS가 1116 [bar/s]로서 가장 큰 것으로 나타났으며, 그 다음으로 PMMA, PBT, ABS, PE 순으로 감소하였다. 그러나 Fig. 7에서 알 수 있듯이 PBT, ABS, PE의 농도에 따른 $[dP/dt]_m$ 의 차이는 그다지 크지 않았다.

분진농도의 변화에 따른 플라스틱 분진의 폭발강도지수(K_{st})를 Fig. 8에 제시하였다. K_{st} [$\text{bar}\cdot\text{m}/\text{s}$]는 $K_{st} = (dP/dt)_{max} \cdot V^{(1/3)}$ 의 관계식으로 계산할 수 있으며, 이 때 $(dP/dt)_{max}$ 는 최대폭발압력상승속도 [bar/s]이며 V 는 폭발용기의 체적(m^3)이다[28]. K_{st} 는 P_m 과 함께 분진폭발에 따른 설비의 피해저감을 위한 장치설계와 폭발방산구 면적의 설정 시에 필요한 폭발특성값으로서 활용성이 높은 안전기술 자료이다. K_{st} 의 최대값이 발생하는 분진농도를 살펴보면 PE는 500 [g/m^3]이며, ABS 및 PMMA는 750 [g/m^3], 그리고 PBT, MBS의 최대 K_{st} 는 1000 [g/m^3]에서 발생하고 있다. ABS, PE, PBT, MBS, PMMA의 K_{st} 는 각각 62.4, 59.4, 70.3, 303 및 203.6 [$\text{m}\cdot\text{bar}/\text{s}$]로 분

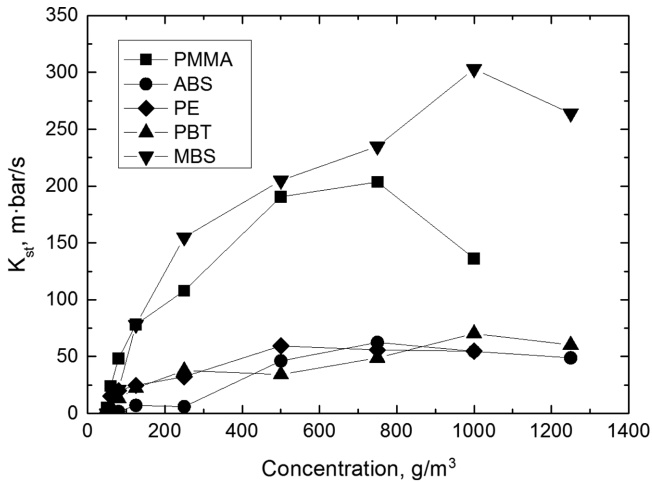


Fig. 8. Explosion index (K_{st}) of plastic dust samples with concentration.

석되었다. PE의 P_{max} 및 K_{st} 가 평균입경 72 μm 의 조건에서 각각 7.5 bar, 67 [$\text{m}\cdot\text{bar}/\text{s}$]로 알려지고 있는데[3], 본 연구에서는 평균입경 81.8 μm 에서 7.3 bar 및 62.4 [$\text{m}\cdot\text{bar}/\text{s}$]가 얻어졌으며 이러한 결과로부터 입경 증가에 따른 폭발성의 감소 효과를 고려하면 본 연구의 결과가 타당한 것임을 나타내고 있다. 또한 분진폭발등급(Dust explosion class)은 폭발성을 Class 0~3으로 구분되는데, Class 0 ($K_{st}=0$)은 비폭발성(No Explosion), Class 1 ($0 < K_{st} \leq 200$)은 중간 정도의 폭발(Weak or Medium-Scale Explosion), Class 2 ($200 < K_{st} \leq 300$)는 강한 폭발(Large-Scale Explosion), Class 3 ($K_{st} > 300$)은 매우 격렬한 폭발(Extremely Large Scale Explosion)로 구분된다[29]. 이러한 분류는 가연성 분진에 대한 폭발강도의 상대적 비교를 정성적 크기로 나타낸 것이며, 국내외적으로 Class 1의 분진에 의한 폭발사고가 가장 많이 발생하기 때문에 Class 1 분진의 폭발위험성을 작게 평가해서는 않된다는 점에 유의해야 한다. Table 3에 측정된 플라스틱 시료의 폭발특성값을 제시하였는데, 상대적인 폭발위험성은 MBS가 가장 높았으며 다음으로 PMMA도 폭발위험성이 높은 것으로 나타났다.

3-3. 분진화염의 전파속도 특성

분진폭발에 의해 발생된 에너지는 압력, 빛, 온도상승 등으로 방출되는데 화염전파는 물리적인 충격파를 발생시키며 인체나 구조물에 큰 피해를 준다. 폭발압력은 화염전파에 의해 발생되므로 화염전파속도의 추정은 폭발압력의 피해만이 아니고 분진폭발의 특징인 2차 화재폭발의 예측을 가능하게 해 준다.

Fig. 9는 분진폭발 시의 시간-압력 파형 예를 나타낸 것이다. P_m 은 분진의 방출에너지에 비례하며 (dP/dt_m)는 폭발압력에 따른 상승곡선의 최대 기울기이다. 또한 P_m 및 dP/dt_m 는 폭발강도를 표현하는

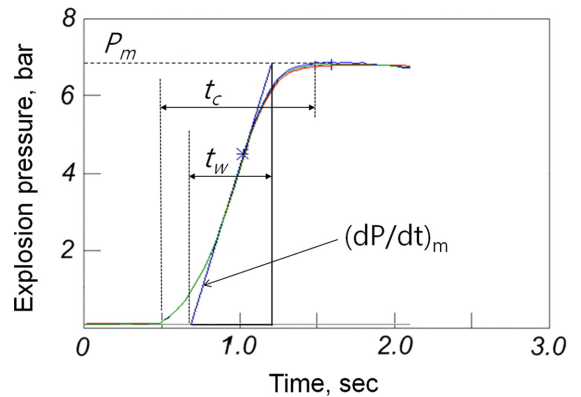


Fig. 9. Time-pressure curve and combustion time of particles in dust explosion of closed chamber.

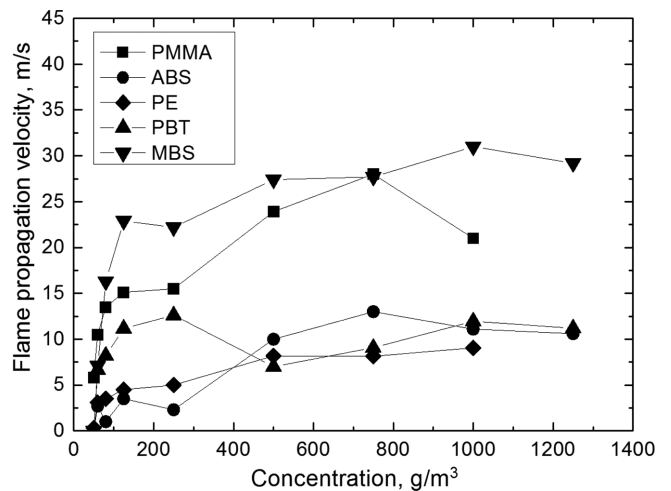


Fig. 10. Flame propagation velocity of plastic dust samples with concentration.

물리적 특성값으로서 분진농도에 크게 영향을 받는다. Fig. 9에서 t_c 는 분진의 연소시간으로서 착화와 함께 P_m 이 최대가 될 때까지의 시간(Time to peak pressure)을 의미한다. 밀폐 용기에서 분진이 착화되어 화염이 전파하면 폭발압력이 발생하는데 P_m (Peak pressure)은 전파 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, t_c 는 t_w 와 거의 비례한다[25]. 그러므로 Fig. 1과 같은 구형폭발용기(Spherical explosion vessel)의 반경을 r (m)이라고 하면 분진폭발로 인한 화염전파속도(Flame velocity, V_f)는 $V_f=r/t_w$ 와 같이 나타낼 수 있다. 이 때 V_f 의 추정에 있어서 분진화염 전파 시의 화염두께(Flame thickness)는 고려하지 않았다. 구형폭발용기의 반경(r)은 용기 체적(V)의 3제곱근

Table 3. Explosion characteristics of plastic dust samples

	ABS	PE	PBT	MBS	PMMA
Mean Diam. [μm]	209.8	81.8	21.3	26.7	14.3
MEC [g/m^3]	50	30	40	50	40
P_{max} [bar]	4.9	7.3	5.9	9.8	8.0
$(dP/dt)_{max}$ [bar/s]	230	218	259	1116	750
K_{st} [$\text{m}\cdot\text{bar}/\text{s}$]	62.4	59.4	70.3	303	203.6
Dust explosion class	Class 1	Class 1	Class 1	Class 3	Class 2

($V^{1/3}$)에 비례한다. 또한 화염면이 용기 벽에 도달하여 연소 종료와 함께 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 표현되며 이 식을 $V_f = r/t_w$ 에 대입하면 V_f 는 $V_f = V^{1/3} \cdot [(dP/dt)_m / P_m]$ 와 같이 된다.

플라스틱 분진의 폭발로 인한 피해예측을 위해서 농도 변화에 따른 V_f 의 계산결과를 Fig. 10에 나타냈다. V_f 는 분진농도에 의해 달라지는 것을 알 수 있으며 ABS, PE, PBT, MBS, PMMA에서의 최대 V_f 는 각각 31.0, 9.1, 12.6, 31.0, 28.0 m/s가 얻어졌다. MBS 및 PMMA의 V_f 는 수십 미터의 단위로 매우 빠르게 전파하는 것을 알 수 있으며 이러한 분진폭발에 따른 화염전파의 피해확대 위험성이 예상되므로 예방대책을 검토하는 것이 필요하다. 또한 V_f 는 분진의 농도 이외에도 분진혼합기의 기류 속도에도 영향을 받을 수 있으므로 분체의 이송속도와 같이 공정조건에 따라 위험성이 달라질 수 있다는 점에도 유의할 필요가 있다.

3-4. 폭발지수와 화염전파속도

분진폭발은 분진이 연소하여 화염을 발생시키고 화염이동에 의한 전파를 통하여 압력이 급격하게 증가하므로 P_m 은 V_f 와 밀접한 관련이 있다고 할 수 있다. Fig. 11의 PMMA분진의 경우에서 알 수 있듯이 농도증가에 따라 P_m 이 증가하면 V_f 도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 20 L 폭발실험장치는 20 bar의 공기 분사에 의해 분진을 분산시키기 때문에 폭발특성은 기류의 영향을 피할 수가 없다. 농도 변화에 따른 V_f 의 증가 형태를 보면, 전체적으로 폭발압력의 증가와 비례 관계를 보였으나 부분적으로는 다소 불규칙한 결과를 보였다. 이러한 결과는 강한 기류에 의한 분진의 분산 형태가 확률적으로 결정되며 일정하게 전파되지 않기 때문에 불규칙한 화염전파 모습으로 나타난다는 것을 간접적으로 말해 주고 있다.

화염전파속도의 계산식($V_f = V^{1/3} \cdot [(dP/dt)_m / P_m]$)에서 $V^{1/3} \cdot (dP/dt)_m$ 는 K_{st} 의 관계식과 같으므로 $V_f = (K_{st} / P_m)$ 과 같이 보다 간략히 나타낼 수 있다. 이러한 관계식을 사용하여 PMMA의 화염전파속도 계산식($V_f = V^{1/3} \cdot [(dP/dt)_m / P_m]$)과 간략화된 식($V_f = K_{st} / P_m$)의 값을 비교하면 Fig. 12와 같이 완전히 일치하고 있으며, 분진의 화염전파속도(V_f)를 ($V_f = K_{st} / P_m$)의 식을 사용하여 간단히 추정하는 것이 가능함을 알 수 있었다.

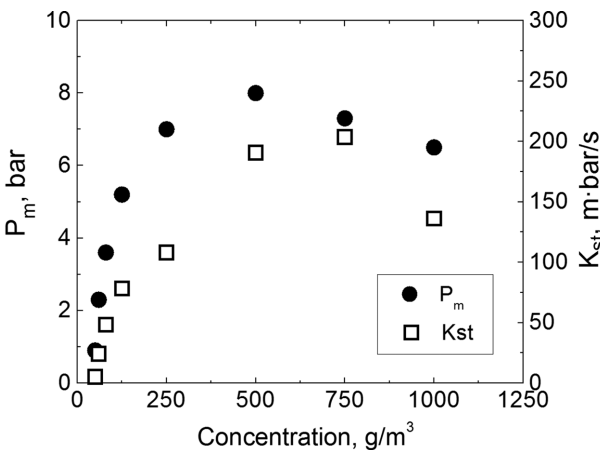


Fig. 11. Maximum explosion pressure and explosion index of PMMA dusts.

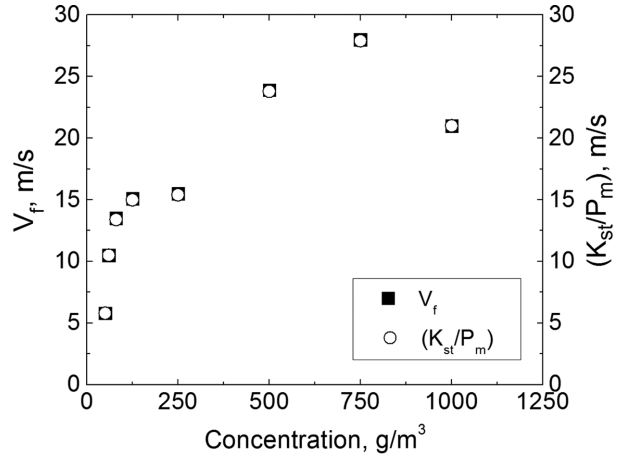


Fig. 12. Comparison of flame velocity (V_f) and (K_{st}/P_m) in PMMA dust explosion.

4. 결 론

본 연구에서는 플라스틱 분진의 폭발특성을 실험적으로 조사하고 위험성을 평가하였다. 플라스틱 분진의 폭발사고 예방과 피해최소화 대책에 필요한 폭발하한농도, 폭발압력, 압력상승속도, 분진폭발지수 등의 화재폭발특성을 조사, 분석하였으며 화염전파속도를 추정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) ABS, PE, PBT, MBS, PMMA의 체적 기준 평균입경이 각각 209.8, 81.8, 21.3, 26.7, 14.3 μm 인 조건에서 폭발하한농도(MEC)의 측정 결과 50, 30, 40, 50 및 40 $[\text{g}/\text{m}^3]$ 의 값이 얻어졌다.
- (2) 또한 ABS, PE, PBT, MBS, PMMA의 최대폭발압력(P_{max})은 4.9, 7.3, 5.9, 9.8, 8.0 bar, 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$ 는 750, 230, 218, 259 및 1116 $[\text{bar}/\text{s}]$ 그리고 폭발지수(K_{st})는 203.6, 62.4, 59.4, 70.3 및 303 $[\text{m}\cdot\text{bar}/\text{s}]$ 로 나타났다.
- (3) 분진폭발에 의한 피해예측을 위하여 화염전파속도(Flame velocity, V_f)의 추정식($V_f = V^{1/3} \cdot [(dP/dt)_m / P_m]$)을 사용하여 계산한 결과, ABS, PE, PBT, MBS, PMMA에서의 최대화염전파속도는 각각 31.0, 9.1, 12.6, 31.0 및 28.0 m/s가 얻어졌다. 또한 화염전파속도(Flame velocity, V_f)의 계산은 ($V_f = K_{st} / P_m$)에 의해 보다 간단히 추정이 가능함을 알 수 있었다.

사용 기호

- P_m : explosion pressure [bar]
- P_{max} : maximum explosion pressure [bar]
- $(dP/dt)_m$: rate of pressure rise [bar/s]
- $(dP/dt)_{max}$: maximum rate of pressure rise [bar/s]
- V : closed vessel volume [m^3]
- K_{st} : dust explosion index [$\text{bar}\cdot\text{m}/\text{s}$]
- t_c : combustion time of dust particles [s]
- t_w : flame arrival time to vessel wall [s]
- r : radius of spherical explosion vessel [m]
- V_f : flame velocity [m]

아래 첨자

max	: maximum
c	: combustion
w	: vessel wall
f	: flame

References

1. Database for Major Industrial Accidents, Korea Occupational Safety and Health Agency(1988~2015).
2. Kao, C.-S. and Duh, Y.-S., "Accident Investigation of an ABS Plant," *J. Loss Prev. Process Ind.*, **15**(3), 223-232(2002).
3. Eckhoff, R. K., *Dust Explosions in the Process Industries (3rd ed.)*, Amsterdam: Gulf Professional Publishing(2003).
4. Genserik Reniers and Valerio Cozzani, *Domino Effects in the Process Industries: Modelling, Prevention and Managing*, Elsevier(2013).
5. CSB, *Final Report on West Pharmaceutical Dust Explosion Accident*, The U.S. Chemical Safety Board(2004).
6. Wei Gaoa, Jianliang Yua, Xinyan Zhanga, Jian Lia, Bing Wang, "Characteristics of Vented Nano-polymethyl Methacrylate Dust Explosions," *Powder Technology*, **283**, 406-414(2015).
7. Hertzberg, M., Zlochower, I. A. and Cashdollar, K. L., "Volatility Model for Coal Dust Flame Propagation and Extinguishment," *21st International Symposium on Combustion, The Combustion Institute*, 325-333(1988).
8. Cashdollar, K. L., Hertzberg, M. and Zlochower, I. A., "Effect of Volatility on Dust Flammability Limits for Coals, Gilsonite and Polyethylene," *22st International Symposium on Combustion, The Combustion Institute*, 1757-1765(1989).
9. Cashdollar, K. L., "Overview of Dust Explosibility Characteristics," *J. Loss Prev. Process Ind.*, **13**(3), 183-199(2000).
10. Duh, Y.-S., Ho, T.-C., Chen, J.-R. and Kao, C.-S., "Study on Exothermic Oxidation of Acrylonitrile-butadienestyrene (ABS) Resin Powder with Application to ABS Processing Safety," *Polymers*, **2**(3), 174-187(2010).
11. Horton, M. D., Goodson, F. P. and Smoot, L. D., "Characteristics of Flat, Laminar Coal Dust Flames," *Combustion and Flame*, **28**, 187-195(1977).
12. Proust, C. and Veyssiere, B., "Fundamental Properties of Flames Propagating in Starch Dust-air Mixtures," *Combustion Science and Technology*, **62**, 149-172(1988).
13. Mazurkiewicz, J. and Jarosinski, J., "Investigation of a Laminar Cornstarch Dust-air Flame Front," *Proceedings of the 6th International Colloquium on Dust Explosions*, Shenyang: Northeastern University Press, 179-185(1994).
14. Glinka, W., Wang, X., Wolanski, P. and Xie, L., "Velocity and Structure of Laminar Dust Flames," *Proceedings of the 7th International Colloquium on Dust Explosions*, Bergen, Norway, 61-68(1996).
15. Krause, U., Kasch, T. and Gebauer, B., "Velocity and Concentration Effects on the Laminar Burning Velocity of Dust-air Mixtures," *Proceedings of the 7th International Colloquium on Dust Explosions*, Bergen, Norway, 51-54(1996).
16. Han, O. S., Yashima, M., Matsuda, T., Matsui, H., Miyake, A. and Ogawa, T., "Behaviour of Flames Propagating through Lycopodium Dust Clouds in a Vertical Duct," *J. Loss Prev. Process Ind.*, **13**, 449-457(2000).
17. Dahoe, A. E. and de Goey, L. P. H., "On the Determination of the Laminar Burning Velocity from Closed Vessel Gas Explosions," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **16**, 457-478(2003).
18. Proust, C., "Flame Propagation and Combustion in some Dust-air Mixture," *J. Loss Prev. Process Ind.*, **19**, 89-100(2006).
19. Han, O. S., Han, I. S. and Choi, Y. R., "Flame Propagation Characteristics Through Suspended Combustible Particles in a Full-Scaled Duct," *Korean Chem. Eng. Res.*, **47**(5), 572-579(2009).
20. Lewis, B. and von Elbe, G., *Combustion, Flames and Explosions of Gases (3rd ed.)*, Orlando, FL: Academic Press (1987).
21. Veynante, D. and Vervisch, L., "Turbulent Combustion Modelling," *Progress in Energy and Combustion Science*, **28**, 193-266(2002).
22. Tezok, F. I., Kauffman, C. W., Sichel, M. and Nichols, J. A., "Turbulent Burning Velocity Measurements for Dust-air Mixtures in a Constant Volume Spherical Bomb," *Progress in Astronautics and Aeronautics*, **105**, 184-195(1986).
23. Van der and Wel, P., *Ignition and Propagation of Dust Explosions*, Delft Univ. Press, Netherlands(1993).
24. Dahoe, A. E., Zevenbergen, J. F., Lemkowitz, S. M. and Scarlett, B., "Dust Explosions in Spherical Vessels: The Role of Flame Thickness in the Validity of the Cube-root Law," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **9**, 33-44(1996).
25. Han, O. S., Han, I. S. and Choi, Y. R., "Prediction of Flame Propagation Velocity Based on the Behavior of Dust Particles," *Korean Chem. Eng. Res.*, **47**(6), 705-709(2009).
26. Han, O. S., Han, I. S., Choi, Y. R. and Lee, K. W., "Explosion Properties and Thermal Stability of Reactive Organic Dust," *KIGAS*, **15**(4), 7-14(2011).
27. ASTM E1226, *Standard Test Method for Pressure and Rate of Pressure Rise for Combustible Dusts*, The American Society for Testing and Materials(1988).
28. Bartknecht, W., *Dust-Explosions, Course, Prevention, Protection*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York(1989).
29. Wu, H.-C., Ou, H.-J., Hsiao, H.-C. and Shih, T.-S., "Explosion Characteristics of Aluminum Nanopowders," *Aerosol and Air Quality Research*, **10**, 38-42(2010).