

소나무 분진의 최소착화에너지와 폭발한계 측정에 관한 연구

최일곤 · 조일건* · 목연수* · 이동훈* · 최재욱* · 하동명**

동광화학(주)

*부경대학교 안전공학과

**세명대학교 산업안전공학과

(1998년 4월 15일 접수, 1998년 7월 24일 채택)

The Measurement of Minimum Ignition Energy and Explosion Limit for Pine Tree Dust

Il-Gon Choi · Il-Keon Cho* · Yun-Soo Mok* · Dong-Hoon Lee* ·
Jae-Wook Choi* and Dong-Myeong Ha**

Dongkwang Chemical, Pusan 608-030, Korea

**Dept. of Safety Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea*

***Dept. of Industrial Safety Engineering, Semyung University, Jecheon 390-711, Korea*

(Received 15 April 1998; accepted 24 July 1998)

요 약

열경화성 수지의 충전제로 많이 사용되고 있는 소나무 분진을 시료로 분진폭발의 최소 착화에너지와 폭발한계를 측정하여 분진폭발 특성을 고찰하였다. 실험은 전극간 거리, 분진 농도, 분진입도 및 수분 등에 대한 실험을 행하였다.

그 결과 전극간 거리가 4mm 이하로 되면 증가하는 경향을 나타내었으며, 2mm 이하에서는 착화에너지가 갑자기 무한대로 되어 이 값이 한계전극 거리임을 알았다. 또한 분진 농도가 증가하고 분진 입도가 미세할수록 폭발성이 용이하였으며, 동일한 입도의 분진에서 수분 함유량이 증가할수록 최소착화에너지가 증가하였다.

Abstract - In this study, we investigated the dust explosion characteristics by determining minimum ignition energy and explosion limit for this experiment, we used pine-tree dust which was used widely for the filler of thermosetting resin.

The experiment was accomplished according to the variation of discharge gap, dust concentration, particle size and humidity.

The result of this experiment are as follows:

① The relation between the discharge gap and ignition energy was that ignition energy decreased according as the discharge gap became small, but increased when the discharge gap was below 4mm and suddenly became infinite when the discharge gap was below. So, we knew that this infinite value was limit discharge gap.

② When the dust concentration increase and the particle size became microscopic it was easy to explore and in the same particle size, if the humidity increase the minimum ignition energy decreased.

Key words : Dust explosion, Minimum ignition energy, Pine-tree dust, Thermosetting resin, Discharge gap, Dust concentration, Particle size, Humidity

1. 서론

최근 신소재로서의 기능성 물질과 전자재료 개발이 진행되면서 분체는 뛰어난 특성과 분체 취급 기술의 발전으로 다방면에 응용분야가 확대되고 있다.^{1,2,3)} 분체를 취급하는 분야가 확대되어 감에 따라 분진에 의한 화재·폭발의 위험성이 증가하게 되었으며, 분진폭발이 발생하면 작업자 뿐만 아니라 주위에 큰 피해를 입힐 수 있는 잠재적 위험성을 가지고 있다.

분진(dust)이란 ILO에 의한 분류에 의하면 석탄, 곡물, 금속, 암석, 목재와 같은 무기질 또는 유기물의 취급·분쇄·절단·천공·연마·충격·분무·분해 등에 의해 발생하고, 그 발생원인 본래 물질과 동일한 조직을 가지고 공기중에 비산 또는 부유하고 있는 미립자(입자경 1~150 μ m)로 정의하고 있다.⁴⁾ 분진에 의한 화재·폭발사고 사례는 탱크, 혼합기, 사일로, 집진기 등의 시설에서 알루미늄, 마그네슘 등의 금속류와 플라스틱, 프탈산 등의 화학제품류 및 합성수지류, 고무·천연수지류, 목분류 등의 가연성 분진을 취급하는 광범위한 분야에서 중대재해로 연결되었다.⁵⁾ 따라서 이들 분진을 취급하고 있는 산업현장에서 화재·폭발사고를 방지하기 위해서는 분진폭발에 대한 잠재적 위험성을 파악하는 것이 대단히 중요하다.⁶⁾

가연성 분진은 공기나 산소와 같은 지연성 기체중에 떠있는 상태(분진운)로 되면 착화가 용이하며, 또한 착화하면 폭발적으로 연소하게 된다.⁷⁾

분진폭발 발생조건의 하나로 분진·공기혼합물 속의 분진의 농도가 너무 낮거나, 역으로 너무 높아도 폭발은 일어나지 않으며 이 현상은 가스폭발의 경우와 마찬가지로이다. 따라서, 폭발은 어느 농도범위 내에서 일어나므로, 그 양측에 폭발유무를 결정하는 두가지 한계농도가 존재하며 이것을 폭발한계라 부른다. 이 중 작은 쪽의 값을 폭발하한계(또는 폭발하한농도), 큰 쪽을 폭발상한계(또는 폭발상한농도)라고 한다. 같은 종류의 분진이라도 분진의 특성과 측정장치, 측정방법에 따라 다른 값이 보고되고 있다.⁸⁾ 분진폭발의 특징은 연소의 속도나 폭발의 압력은 가스폭발에 비교하여 작으나 연소시간이 길고, 발생에너지가 크기 때문에 파괴력과 연소 정도가 크다. 발생에너지는 최고치로서 비교할 경우, 가스폭발의 수 배 정도이고 온도는 2000~3000 $^{\circ}$ C 정도까지 올라간다. 이것은 단위체적당 탄화수소의 양이 많기 때문이다. 분진폭발은 먼저 폭발압력이 발생되고, 1/10~2/10sec 늦게 화염이 온다. 화염의 파급속도는

상온상압하에서 초기에는 2~3m/s 정도로서, 그 속도는 연소한 분진의 팽창으로 압력이 상승함에 따라 가속적으로 빠르게 된다. 분진폭발은 폭발시에 입자가 연소하면서 비산하므로 가연물은 국부적으로 심한 탄화를 일으키며, 특히 금속류의 분진이 폭발할 경우 인체에 닿으면 심한 화상을 입게된다. 또한 분진폭발은 최초의 부분적인 폭발에 의한 폭풍으로 주위의 분진을 날리게 하여 2차, 3차의 폭발로 파급됨에 따라 피해가 크게 되고, 가스에 비하여 불안정한 연소를 일으키기 쉬우므로 탄소가 타서 없어지지 않고, 연소 후에 가스상에 일산화탄소가 다량으로 존재하는 경우가 있으므로 가스에 의한 중독의 위험이 있다.

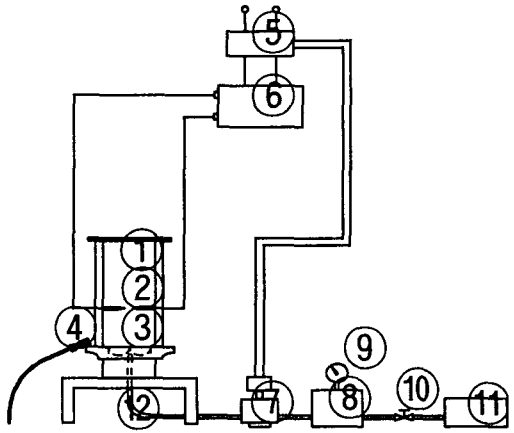
분진의 폭발한계 측정장치는 취입식, 흡인식, 자연낙하식, 교반식, 순환식, 용기회전식, 사이클론식 등이 있으며⁹⁾ 측정장치에 따라 폭발한계 측정치가 상당한 차이를 나타내고 있다. 이는 균일 농도의 분진운을 만들기 어렵기 때문이다. 内藤道夫와 梅律實¹⁰⁾은 석탄분진에 대한 최소발화에너지를 측정하였으며, 秋田一雄¹¹⁾은 가연성 가스의 최소발화에너지와 소염거리 등을 연구하였다. 또한, 石浜涉 등¹²⁾은 분진운의 착화에너지에 관한 연구를 통하여 석탄 분진운의 착화에너지에 미치는 불꽃지속시간 및 방전전극간 거리의 영향을 연구하였으나 여러 물질에 대한 실험적 연구는 현실적으로 어려운 실정이다. 본 연구에서는 산업현장에서 수지의 filler 용으로 사용되는 소나무 분진의 폭발실험을 통해 최소착화에너지와 폭발한계 등을 측정하여 분진폭발 특성을 파악하였으며, 분진의 화재·폭발 예방대책을 수립하는데 기초자료를 제공함으로써 재해예방에 기여하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치는 Fig.1 과 같으며, 폭발통부, 분산부, 공기공급부 및 전기에너지공급부로 되어 있다.

폭발통부는 폭발통, 폭발통취부대로 구성되며, 폭발통은 투명한 파이렉스제의 내열유리로 폭발통취부대의 상부에 고정되고, 상부는 마개(종이 등)의 착탈이 가능하게 되어 있다. 측벽에는 착화용 방전전극 2개를 마주보는 형태로 장착하며 상방 100mm에 위치한다. 폭발통취부대는 폭발통을 지지하고 그 하부의 시료그릇에 접속하여 폭발통부 전체를 지지선반에 고정시킨다.



- ①explosion tube ⑦electromagnetic valve
- ②discharge electrode ⑧air reservoir tank
- ③sample cup ⑨pressure gauge
- ④grounding ⑩ball valve
- ⑤timer ⑪air compressor
- ⑥high voltage transformer ⑫air piping

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

분산부는 분산접시와 분산반사판으로 구성되어 있다. 분산접시는 실험본체를 정지하는 곳으로 중앙의 공기분출구에 분산반사판이 위치하며 폭발통 내부에 공기를 주입하는 구조이다. 분산반사판은 분출하는 공기를 반대방향의 시료접시상 분진을 불어 상승시켜 분진운을 형성시킨다.

공기공급부는 공기압축기, 공기저장탱크, 압력계, 압력조절밸브로 구성되어 있다. 공기압축기는 피스톤식 공기압축기(Model NH-5, 10kg/cm²)로서 설정압력만큼의 공기를 압력조절밸브를 사용하여 공기저장탱크에 저장한 다음 타이머에 의해 설정된 방전개시 지연시간 동안 전자변을 통하여 공기를 폭발통 내부로 분산시킨다.

전기에너지공급부는 방전전극, 고압트랜스 및 고압콘덴서로 구성되어 있다. 방전전극은 분진운에 대한 착화원으로 전기불꽃을 발생시키는 곳으로, 직경 3mm의 텅스텐 합금(선단은 원뿔기동형 침상) 2개가 수평으로 폭발통의 중심축상에서 착화가 가능하도록 위치한다. 방전개시시간을 임의로 조절하기 위해 타이머를 설정한 후 전자변을 열어 압축공기에 의한 분진을 상승시킨 직후(본 실험에서는 0.6sec로 설정) 착화시킨다.

2.2 실험시료

분진의 폭발 실험을 하기 위하여 사용한 실험재료는 탄소질 분진을 발생시키는 여러 물질 중의 하나인 목재류의 소나무 분진(pine tree dust)으로서 폐놀수지의 첨가제로 많이 사용된다. -80/+120 mesh, -180/+220 mesh 및 -320/+360 mesh로 분쇄하여 실험 시작전 대상시료 30g을 105℃에서 1시간 건조시킨 후 데시게이터에서 자연냉각시켜 실험에 사용하였다.

2.3 실험방법

실험장치 각부를 점검하여 정상임을 확인한 후 아래의 절차에 따라 실시한다. 실험대상시료의 실험량을 전자저울로서 정확히 칭량한 후 분산접시 위에 균일하게 분포시킨다. 이때 시료의 무게(g)를 폭발통 내부의 체적(m³)으로 환산하여 농도(g/m³)를 구하였다. 실험대상분진은 압축공기분출구를 중심으로 분산접시의 상부에 균일하게 분포시킨다. 폭발통 상부의 덮개는 통기성이 좋은 종이(직경 9.5cm, 무게 0.56g)를 사용하였으며, 공기는 공기압축기를 동작시켜 소요압력만큼 압력조절밸브로서 공기보조탱크에 압력을 조절하여 저장한다. 방전전극은 마이크로미터로서 소정의 간격을 조절하여 고정된 후 전기에너지공급부의 전원을 켜고, 방전용 전원을 설정전압까지 충전시킨 후 점화스위치를 누른다. 본 실험에서는 점화스위치를 누른 후 콘덴서 충전시간 8sec가 흐르고 0.6sec 동안 공기가 공급되어 분진을 비산시킨 후 전기불꽃이 발생하며, 9sec에 이르는 순간 자동적으로 전원이 차단되도록 설정되어 있다.

이때 분진운의 균일한 분포, 그리고 전기불꽃의 유무와 화염전파 및 폭발을 육안으로 확인하였으며, 폭발통 상부의 종이덮개가 폭발압력에 의해 파열되는 때를 폭발로 판정하고, 파열되지 않으면 불폭으로 판정한다. 또한 전기불꽃 발생시 고전압으로 충전한 콘덴서를 방전회로 측에 접속하여 전극을 통해 순간적으로 기중 방전을 일으키며, 폭발통내 가연성 분진의 폭발 유무를 육안과 방전전류의 값으로 판정하였다. 이때 착화에너지는 방전전극간에서 소비된 방전에너지로서, 데이터 분석장치에 나타난 수치를 바탕으로 방전전극과 집지전극간의 방전전압과 방전전류를 계산하여 산출하였다.

착화에너지에 대한 전극간거리의 영향을 실험하기 위해서 분진의 입도, 소요공기압력, 분진비산시간을 고정된 후 폭발통내 분진은 농도를 250g/m³, 350g/m³ 및 450g/m³으로 조절하며 전극간극을 2mm, 3mm, 5mm, 8mm 및 10mm로 변화시켜 폭발이 발생하는 불꽃방전에너지의

최저치를 구하여 전극간극에 따른 착화에너지의 변화와 그 에너지가 급격히 증대하는 전극간극을 조사하였다.

착화에너지에 대한 분진 농도의 변화에 따른 영향을 조사하기 위하여 전극간극, 소요공기압력 및 분진비산시간을 고정한 후 폭발통 내의 분진 농도를 100g/m³, 150g/m³, 250g/m³, 350g/m³ 및 450g/m³으로 변화시켜 가며 폭발이 발생하는 불꽃방전에너지의 최저치를 구하였다. 또한, 분진의 입도를 -80/+120 mesh, -180/+220 mesh 및 -320/+360 mesh로 변화시켜 농도에 따른 방전에너지 값과 에너지가 급변하는 분진 농도를 조사하였다.

분진에 함유된 수분의 양이 분진폭발에 미치는 영향을 조사하기 위하여 분진의 입도 -80/+120 mesh, -180/+220 mesh 및 -320/+360 mesh를 폭발통내 분진 농도를 370g/m³로 하고, 전극간극은 5mm, 소요공기압력은 0.6kg/cm²로 고정한 후 수분 함유량을 임의로 증가시켜 폭발이 발생하는 최저의 불꽃방전 에너지값을 측정하였다.

폭발로 판정되는 경우에는 시료량을 변화시켜 가며 반복실험을 행하고 최소폭발시료량을 구하였다. 또한 전극간의 거리, 습도, 입도, 농도 등의 실험변수를 변화시키고 그들 변수에 따른 최소간극거리, 최소착화에너지, 폭발하한 농도 등을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전극간 거리의 영향

Fig.2 에는 소나무 분진의 입도가 -180/+220 mesh인 시료를 사용하여, 분진운의 농도를 250g/m³, 350g/m³, 450g/m³으로 변화시켰을 때의 발화에너지와 전극간 거리의 관계를 나타내었다.

Fig.2 에서 알 수 있는 바와 같이 각 분진운 농도에 있어서 전극간 거리가 좁아질수록 착화되는 에너지가 상승하였으며 4mm 이하로 되면 착화에너지는 급격하게 증대하고, 더욱 전극간 거리를 좁혀가면 아주 큰 에너지를 가하여도 착화하지 않게 됨을 알 수 있다. 역으로 전극간 거리를 크게 한 경우, 즉 7mm 이상으로 되면 거리의 증가와 함께 착화에너지도 약간 증가한다.

이와 같은 현상은 가스착화의 경우와 동일한 경향을 나타내고 있다. 즉, 전극간 거리가 아주 좁아지면 전극이 초기화염전파에 간섭을 일으키게 되어 착화에너지가 증대하고, 전극간 거리가 너무 넓으면 초기 화염의 면적이 증대하므로 다시 착화에너지가 증대하기 때문이다.

전극간 거리가 5~7mm의 경우에는 동일한 분진운 농도에서 착화에너지는 거의 같은 값을 나타내고, 이 때는 최소치가 되며 이 최소치를 그 농도에 있어서의 최소착화에너지(Minimum Ignition Energy)라 한다.

분진의 입도가 -180/+220 mesh의 시료에서 각 분진의 농도에 대한 최소착화에너지는 전극간 거리가 5mm~7mm일 때 최소착화에너지의 값을 구하였으며 분진운 농도 250g/m³, 350g/m³ 및 450g/m³일 때 각각의 최소착화에너지는 70mJ, 63mJ 및 57mJ로 구하였다.

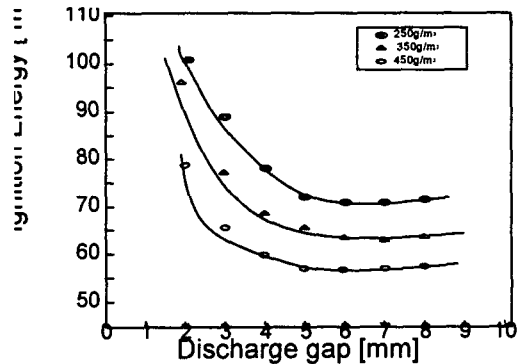


Fig. 2. Relation between Ignition Energy and discharge gap for dust explosion

3.2 농도의 영향

Fig.3 에는 분진의 입도가 -80/+120 mesh, -180/+220 mesh 및 -320/+360 mesh일 경우에 있어서 분진의 농도와 착화에너지와의 관계를 나타내었다.

Fig.3 에서 알 수 있는 바와 같이 분진의 입도와 농도가 착화에너지에 크게 영향을 미치고 있으며, 입도가 미세하고, 분진운의 농도가 증가 할수록 착화에너지가 낮게 나타났다. 또한 분진운 농도가 폭발하한농도 보다 증가하면 착화에너지는 급격하게 감소하고, 농도가 증가함에 따라 착화에너지도 감소하였으며 농도의 증가와 함께 그 영향은 작게 나타났다.

이는 분진입자의 표면에서 반응성이 높으므로 보다 작은 입경의 입자를 함유하는 분진이 폭발성이 높으며, 분진운 농도가 450g/m³일 때의 경우가 낮은 농도보다 균일한 분진운이 조성되어, 열분해에 의해 가연성 가스가 발생되기 용이하므로 발생한 가연성 가스가 산소와 반응하는 것에 의해 쉽게 착화하기 때문으로 생각된다.

각 분진의 입도에서 볼 때 분진운 농도가

150g/m³~450g/m³에서는 착화에너지에 큰 차이가 없지만, 100g/m³~150g/m³에서는 착화에너지가 크게 증대되는 것으로 측정되었으며 이 부근에서 폭발하한농도가 존재함을 알 수 있다.

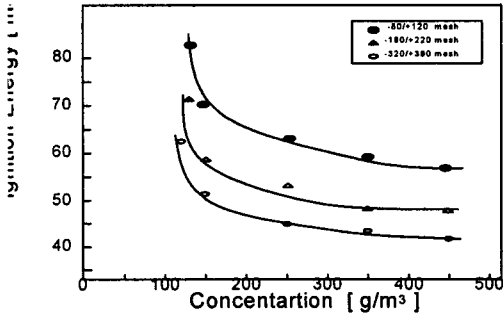


Fig. 3. Relation between Ignition Energy and dust concentration for dust explosion

3.3 수분의 영향

분진의 입도가 -80/+120 mesh, -180/+220 mesh 및 -320/+360 mesh일 경우에 있어서 수분의 함유량에 따른 착화에너지와의 관계를 Fig.4 에 나타내었다.

각 분진 입도에 있어 수분이 증가할수록 착화에너지가 크게 나타났으며, 이는 분진에 존재하는 수분이 분진의 부유성과 관련되어 폭발성에 대단히 민감하게 작용함으로 시료내에 수분이 증가함에 따라 발화에 필요한 에너지가 많이 필요하여 착화에너지가 증가한다.

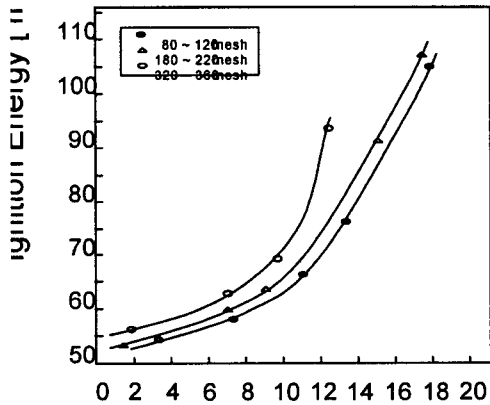


Fig. 4. Relation between Ignition Energy and humidity for dust explosion

또한 수분 함유량이 비슷한 경우 분진 입도가 미세할수록 착화에너지가 증가하였다. 이는 입도가 미세할 경우 입도의 비표면적이 증가하고 입자와 입자 사이에 수분이 많이 존재함으로 인하여 발화에 대한 억제 작용을 하기 때문으로 생각된다.

4. 결론

수지의 충전용으로 많이 사용되고 있는 소나무 분진(pine tree dust)의 분진폭발실험을 통하여 소나무 분진의 착화에너지에 영향을 미치는 전극간 거리, 분진운의 농도, 분진입도 및 수분 등의 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전극간 거리가 4mm 이하로 되면 착화에너지는 급격하게 증대하였으며 2mm 이하에서는 측정이 불가능하였다.

2) 전극간 거리가 5mm~7mm일 경우 최소착화에너지의 값을 구하였으며 분진입도가 -180/+220 mesh의 시료에서 분진운의 농도 250g/m³, 350g/m³ 및 450g/m³일 때 각각의 최소 착화에너지가 70mJ, 63mJ 및 57mJ임을 구하였다.

3) 분진운 농도가 증가하고 분진입도가 미세할수록 폭발성이 용이하고, 100g/m³~150g/m³의 농도에서 착화에너지가 크게 증가되었고, 이 부근에서 폭발하한농도가 존재함을 알 수 있었다.

4) 동일한 입도의 분진에서 수분 함유량이 증가할수록 착화에너지는 급격하게 증가하였으며, 분진입도가 미세할수록 그 영향이 크게 나타났다.

참고문헌

- 1) 中央労働災害防止協會: “粉じん爆発の防止対策” (1989).
- 2) 榎本兵治: “粉じん爆発”, オーム (1992).
- 3) 陸演洙, 趙泰濟, 全成均, 兪龍鎬: “화학안전공학”, 東和技術, pp.47~48, 253~287 (1994).
- 4) 小林義隆: “作業環境の有害物質測定法”, コロナネヒ, p.9 (1976).
- 5) Wolfgang Bartknecht: “Dust Explosions”, Springer Verlag Berlin Heidelberg, pp.2~9 (1989).
- 6) 石浜涉, 東猛, 榎本兵治, 梅律實, 荷福正治: “粉じん雲の着火エネルギーに関する研究”, 安全工学, Vol.21, No.5, pp.273~279 (1982).

- 7) 鬼山和彦, 須藤秀治 : “粉体の着火性におよぼす濕潤度の影響”, 安全工學, Vol 12 , No.3, pp.169~173 (1973).
- 8) 榎本兵治 : “粉じん爆發”, オーム, p.85 (1992).
- 9) 睦演洙, 崔載旭, 全成均: “化學安全工學實驗”, 세종출판사, pp.57~60 (1997).
- 10) 内藤道夫, 梅律實: “粉じんの最小發火エネルギー”, 安全工學, Vol.8, No.2, pp.107~121 (1969).
- 11) 秋田一雄: “最小發火エネルギーと消炎距離”, 安全工學, Vol.7, No.4, pp.296~303 (1968).
- 12) 石浜涉, 東猛, 榎本兵治, 梅律實, 荷福正治 : “粉じん雲の着火エネルギーに関する研究 II”, 安全工學, Vol.22, No.1, pp.25~31 (1983).