

테레프탈산의 분진 폭발특성에 관한 연구

목연수[†] · 장성록

부경대학교 산업시스템안전공학부
(1999. 12. 15. 접수 / 2000. 2. 1. 채택)

A Study on Explosion Characteristics of Terephthalic Acid

Yun-Soo Mok[†] · Seong-Rok Chang

Department of Safety Engineering, Pukyong National University
(Received December 15, 1999 / Accepted February 1, 2000)

Abstract : This study was executed by dust explosion experiment of terephthalic acid which was widely used for various purposes of food packing material and film etc. and the demand was rapidly increasing. The particle size and concentration of dust affected the minimum ignition energy largely and the lean concentration and the minimum ignition energy in the range of this study were obtained 50g/m³ and 19mJ respectively. Minimum ignition energy was shown at the 4 and 5mm gap distance of discharge electrode, and when the gap distance was below 2mm the explosion could not generated although the sufficient energy was given. It was also found that the ignition energy decreased linearly with the decreasing of dust mean particle size.

1. 서 론

산업의 급속한 발전과 생활양식의 다양화로 인하여 산업현장에서 분체를 사용할 기회가 많아짐에 따라 분진에 의한 화재폭발 재해의 위험이 증가하고 있다. 최근에는 플라스틱공업, 유기합성 공업, 분말금속 공업, 식료품 공업, 사료 공업 및 제약 산업 등에서 기술의 진보에 따라 원료·제품을 취급하는 공정이 많아졌으며, 이와 같은 분체 취급분야의 확대, 취급량의 증대, 공정의 대형화, 생산속도의 증대 등의 경향이 분진폭발의 잠재 위험성을 증대시키는 결과를 초래하고 있다.

분진폭발에 관한 연구는 Faraday의 연구¹⁾ 이후 많은 연구자들에 의해 활발히 진행되어 왔으며 Field²⁾는 500 μ m까지의 입자경을 가지는 분진은 공기중에 부유할 수 있으며, 만약 분진이 가연성이면 분진폭발을 일으킬 수 있다고 지적했다.

Nifuku 등³⁾은 미분탄을 사용하여 분진운의 착

화에 관한 연구를 통하여 분진운의 착화에너지는 분진운 농도가 클수록 작게 되고, 불꽃방전지속시간이 2ms 이상일 때 영향을 주지 않는다는 것을 밝혔다.

T. Matsuda and T. Hayashi⁴⁾는 ABS수지 분진과 EVA(ethylene-vinylacetate 공중합체)분진을 사용하여 사이클론 중에서 분진 폭발의 위험성을 평가하였으며, 이외에도 외국에서는 많은 연구를 행하여 왔다.⁵⁻⁷⁾

본 연구에서는 국내 S화학에서 생산되는 테레프탈산(Terephthalic acid)을 사용하였으며, 테레프탈산은 각종 플라스틱류, 식품포장 및 식음료용기 등의 포장재료, 전기·전자산업분야에서의 절연재료, 전자제품, 자동차, 폴리에스텔 섬유와 필름 등 사용처가 점차 확대되고 있으며, 사용량 또한 급격히 증가되고 있는 물질로서 미세분말의 경우 분진폭발의 위험성이 있다. 분진폭발의 실험장치는 Hartmann식의 일부를 개량한 것을 사용하였으며, 착화에너지 공급장치는 용량방전식 착화장치를 사용하였다.

실험을 통해 테레프탈산분진의 최소착화에너지를 구하고, 분진농도, 입도분포 및 전극간 거

[†] To whom correspondence should be addressed.
ysmok@pine.pknu.ac.kr

리가 착화에너지에 미치는 영향을 조사하였으며, 분진의 폭발하한농도를 구하고, 분진폭발의 특성을 파악하여, 분진의 화재·폭발 예방대책을 수립하는데 기초자료를 제공함으로써 재해예방에 기여하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

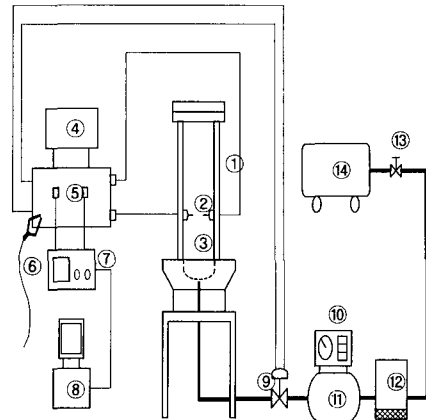
2.1. 실험장치

본 실험에 사용한 장치를 Fig. 1에 나타내었으며, Hartmann식 분진폭발 장치 중 공기 공급부를 일부 개량한 것으로, 폭발통부, 압축공기부, 전기에너지 공급부 및 방전에너지 기록 저장부로 구성되어 있다.

폭발통부의 폭발통 부피는 1.3ℓ이며, 투명한 파이렉스제의 내열유리로서 상부는 종이 등을 사용하여 두께를 닳을 수 있도록 되어 있다. 폭발통에는 시료컵 상부 12cm 지점에 착화용 방전전극 2개를 수평으로 마주보는 형태로 장착하였으며, 방전전극은 직경 3mm의 텅스텐 합금(선단은 원뿔기둥형 침상)으로, 전극간 간격은 마이크로미터로 조절할 수 있게 되어 있다. 폭발통 취부대의 상부에는 분체시료를 정지하는 부분인 시료컵이 설치되어 있고, 시료컵 중앙부에는 압축공기분출구와 압축공기분산판이 있어 폭발통 내부에 압축공기를 주입할 수 있는 구조로 되어 있다.

압축공기공급부는 공기압축기, 공기건조기, 압축공기저장탱크, 압력계, 자동압력조절장치로 구성되어 있다. 압축공기는 공기건조기(Model XD-7)를 거치면서 수분이 제거된 후 압축공기저장탱크에 저장되고, 압력오차 $\pm 0.2\%$ 이내의 자동압력조절장치에 의해 설정압력으로 항상 유지되도록 되어 있다.

전기에너지공급부는 용량방전형 콘덴서, 가스봉입형 고전압스위치, 방전제한저항, 무유도저항, 타이머 등으로 구성되어 있으며, 방전에너지 측정·저장부는 오실로스코프(TDS380), 고전압 프로브(Tektronix P6015A×2EA) 및 컴퓨터로 구성되어 있다. 오실로스코프에는 폭발시 방전에너지를 측정할 수 있는 방전전류와 방전전극간의 전압이 나타나며, 전기에너지공급부와 연결된 고전압 프로브에 의해 방전전극에서의 방전전압을 측정할 수 있고, 방전전류는 상기 전류 검출용 전압에 의해 각각 검출할 수 있게 되어 있다.



- | | |
|--------------------------------|---------------------------|
| ① explosion tube | ⑧ computer |
| ② discharge electrode | ⑨ solenoid valve |
| ③ sample cup | ⑩ auto pressure regulator |
| ④ timer | ⑪ air reservoir tank |
| ⑤ capacitive discharge circuit | ⑫ air dryer |
| ⑥ grounding | ⑬ ball valve |
| ⑦ oscilloscope | ⑭ air compressor |

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

2.2. 실험시료 및 실험방법

본 실험에 사용한 시료는 국내 S화학의 백색 고체 결정형의 테레프탈산을 볼밀(Model YJB-10)로 분쇄하여 분체분리기를 통해 -100/+170, -200/+270 및 -325 mesh로 분리하여, 데시게이터에서 5일간 건조시킨 후 실험에 사용하였다.

분진폭발의 실험은 실험의 재현성을 좋게 하기 위해 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, $50 \pm 5\%$ 의 황온 황습 조건으로 행하였으며, 실험은 다음의 절차에 따라 행하였다.

- (1) 시료를 전자저울로 정확히 평량한 후 시료 컵 위의 압축공기분출구를 중심으로 균일하게 분포시킨다.
- (2) 폭발통을 폭발통 취부대에 견고히 체결시킨 후, 폭발통 상부는 통기성이 좋은 종이를 사용하여 밀폐시킨다.
- (3) 마이크로미터로 방전전극 간격을 조절하여 고정한다.
- (4) 전기에너지공급부의 전원을 방전전극에 연결한 후 설정된 전압, 충전시간, 압축공기 방출시간, 방전개시시간을 확인한다.
- (5) 충전-방전스위치를 누른다.
- (6) 분진운의 균일한 분포, 방전에 의한 방전 불꽃의 유무, 그리고 화염전파 및 폭발을 육안으로 확인한다.

- (7) 오실로스코프를 통해서 방전전극간의 전압과 방전전류를 확인한다.
- (8) 컴퓨터(program : wavestar)로 오실로스코프의 파형과 데이터를 읽어 들여 저장시킨다.
- (9) 착화에너지를 계산한다.

이상의 과정을 거쳐 착화에너지를 측정하였으며, 이 착화에너지는 방전전극과 접지전극간에서 소비된 방전에너지로서, Fig. 2의 오실로스코프에 나타난 방전전류와 방전전극간의 전압을 바탕으로 계산에 의해 산출하였다.

폭발의 유무를 판단하기 위해 폭발판정기준을 다음의 ①,②와 같이 정하였으며,

- ① 폭발통 상부의 종이덮개가 폭발에 의해 파열되는 때
- ② 화염전파가 방전전극 상부 10cm 정도로 발생할 때

위의 ①항이거나 ②항일 때만 폭발로 판정하고, 파열되지 않거나 불꽃의 크기가 10cm 이하이면 불폭으로 판정하였다.

본 실험에서는 스위치를 누른 후 콘덴서 충전시간을 15sec로, 입경에 따른 시료의 비중을 고려하여 압축공기의 방출시간은 0.2sec ~ 0.5sec로, 충전 후 압축공기의 방출이 시작되고 나서 방전이 개시되는 시간을 0.1sec ~ 0.3sec로, 압축공기의 압력은 0.5kgf/cm² ~ 1.0kgf/cm²로 가변 설정하였다.

착화에너지에 대한 분진농도변화에 따른

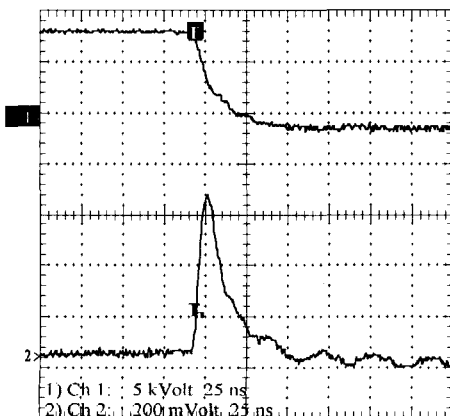


Fig. 2. The plotted Waves from the Oscilloscope

영향을 조사하기 위하여 전극간극, 설정공기압력, 압축공기 방출시간, 방전개시시간을 일정하게 한 후 폭발통 내의 분진농도를 변화시켜 가며 폭발이 발생하는 착화에너지의 최저치를 구하였다.

착화에너지에 대한 방전전극 극간의 영향을 실험하기 위해서 분진의 입경, 설정공기압력, 압축공기 방출시간, 방전개시시간을 일정하게 한 후 폭발통 내의 분진농도를 150g/m³, 250g/m³ 및 350g/m³으로 나누어 실험하였다. 간극은 1mm ~ 9mm 까지 변화시켜 가며 폭발이 발생하는 착화에너지의 최저치를 구하여 간극에 따른 착화에너지의 변화와 그 에너지가 급격히 증대하는 전극간극을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 농도의 영향

실험에 사용한 테레프탈산 시료의 입도는 -100/+170 mesh, -200/+270 mesh, -325 mesh로 하였다. Fig. 3은 전극간 거리를 5mm로 하여 각 분진의 입도에 있어서 분진의 농도와 착화에너지와의 관계를 나타냈었다.

Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 분진의 입도와 농도가 착화에너지에 크게 영향을 미치고 있으며, 분진의 입도가 작아질수록 착화에너지는 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 입자표면에서 발생하는 분해가스의 연소현상에 기인하므로 표면적이 입자체적에 비해 커지면 열전달이 용이하기 때문이다.

분진농도의 영향을 보면 일반적으로 농도가 300g/m³보다 작은 경우에는 농도가 작을수록 착화에너지는 증가하는 경향을 나타내다가 입도의 크기에 따라 어느 농도 이하에서는 급격한 증가를 나타내고 그 이하의 농도에서는 에너지를 더 주어도 폭발하지 않는 것을 알 수 있다.

100~170mesh의 입도에서의 최소착화에너지는 53mJ, 분진의 폭발하한농도는 200g/m³이었으며, 200~270mesh의 입도에서의 최소착화에너지는 24mJ, 폭발하한농도는 75g/m³이었고, 325mesh 이상에서 최소착화에너지는 19mJ, 폭발하한농도는 50g/m³을 얻었다.

본 연구에서 행한 입도와 농도의 범위에서 테레프탈산의 폭발하한농도와 착화에너지의 최소

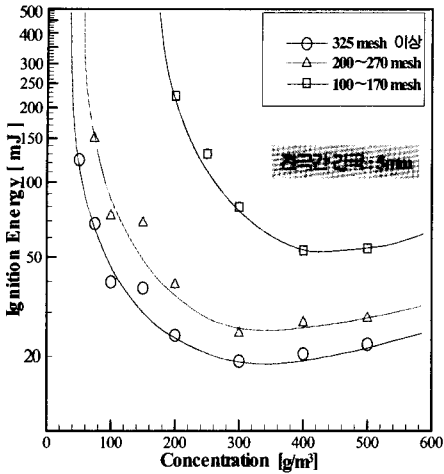


Fig. 3. Relation between Ignition Energy and discharge gap for dust explosion

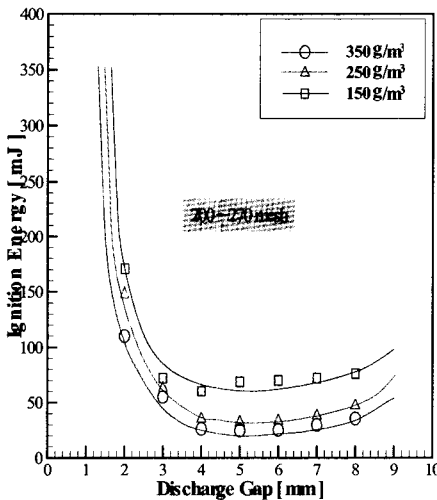


Fig. 4. Relation between Ignition Energy and discharge gap for dust explosion

치는 325mesh 이상의 입도에서 50g/m³과 19mJ로 구하여 졌다.

3.2. 전극간 거리의 영향

Fig. 4는 테레프탈산 분진의 입도가 -200/+270 mesh인 시료를 사용하여, 분진농도의 농도를 150g/m³, 250g/m³ 및 350g/m³으로 변화시켰을 때의 착화에너지와 전극간 거리의 관계를 나타냈었다.

Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 각 분진농도에 있어서 전극간극 4mm~6mm에서 착화

에너지가 거의 비슷함을 알 수 있으며, 이 보다 전극간극이 좁아질수록 착화에너지가 상승하고 3mm 이하로 되면 착화에너지는 급격하게 증가하여 2mm에서는 측정할 수 있는 최대치가 나타나고, 2mm 이하에서는 아무리 큰 에너지를 가하여도 착화가 일어나지 않았다. 또한 전극간극이 7mm 이상으로 뒀에 따라 착화에너지가 증가하였으며 간극이 넓어질수록 더욱 증가하는 경향을 보였다.

이와 같은 현상은 가스착화의 경우와 거의 동일한 경향을 나타내고 있는데, 전극간극이 아주 좁아지면 전극이 초기화염전파에 간섭을 일으키게 되어 착화에너지가 증가하고, 전극간극이 너무 넓으면 초기화염의 면적이 증대하고 공기의 절연과피 전계강도(약 $3 \times 10^6 \text{V/m}$) 이상으로 되어 착화에너지가 크게 증가하다가 결국 공기의 절연과피가 일어나지 않게 되기 때문이다.

전극간 거리가 4mm~6mm에서 착화에너지는 거의 같은 값을 나타내고, 이때가 최소치가 되는데, 이 최소치를 그 농도에 있어서의 최소착화에너지(Minimum Ignition Energy)라 하고, 각 분진농도 150g/m³, 250g/m³, 350g/m³일 때 각각의 최소착화에너지는 60mJ, 32mJ 및 24mJ로 측정되었다.

3.3. 분진입경의 영향

분진입자의 평균입자경을 입자분석기(SHIMAZU SALD-2001)로 분석한 결과는 Table. 1과 같으며, 평균입자경이 착화에너지에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 테레프탈산의 분진폭발에 있어서 평균입자경과 착화에너지 사이에는 직선적관계가 성립하며, 이는 입자경이 작으면 비표적이 증대하게 되어 열전달이 용이하므로 분체의 분해가 쉽게 일어나기 때문이다.

본 실험의 범위내에서 착화에너지와 평균입자경의 관계를 최소사승법에 의해서 회귀식을 구하면 다음과 같다.

$$y = 0.48450x + 3.19105$$

여기서 y는 착화에너지(mJ) x는 평균입자경(μm)를 나타내며 두 변수사이의 상관 계수는 0.9026이었다.

Table 1. Average diameter of Terephthalic Acid

Mesh	-100/+170	-200/+270	-325
Average diameter[μm]	89	61	27

* 입자분석기(SHIMAZU SALD-2001)의 측정치

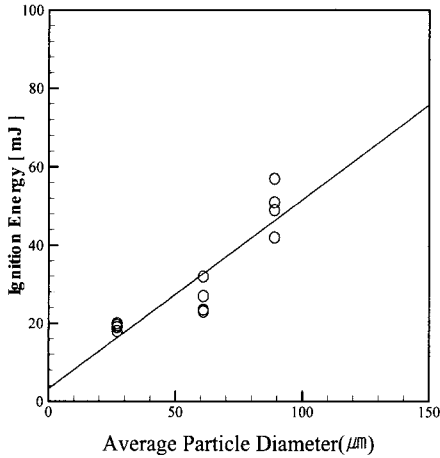


Fig. 5. Relation between Ignition Energy and Average Particle Diameter

4. 결론

산업의 고도화와 함께 사용량이 급격히 증가 되고 그 용도가 다양화되고 있는 테레프탈산의 분진폭발실험을 통하여 폭발특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 분진의 입도 및 농도는 최소착화에너지에 큰 영향을 미치며 본 연구의 범위에서 테레프탈산의 폭발하한농도는 $50\text{g}/\text{m}^3$, 최소착화에너지는 19mJ 로 얻어졌다.

2) 분진입경에 따른 폭발하한계와 최소착화에너지는 100-170mesh의 경우에는 $200\text{g}/\text{m}^3$ 과 53mJ 을, 200-270mesh에서는 $75\text{g}/\text{m}^3$ 과 24mJ 을, 325mesh

이상에서는 $50\text{g}/\text{m}^3$ 과 19mJ 로 각각 구하여 졌다.

3) 각 폭발하한계 이상의 농도에서는 농도가 증가할수록 착화에너지가 감소하다가 $300\sim 400\text{g}/\text{m}^3$ 에서 최소치를 나타내어 폭발이 용이하게 일어났고, 그 이상의 농도로 되면 착화에너지는 증가하였다.

4) 방전전극 간극 4~5mm에서 착화에너지의 최소치를 나타내었고, 6mm 이상에서는 전극간극이 넓을수록 착화에너지는 증가하였으며, 2mm 미만에서는 충분한 에너지를 주어도 폭발하지 않았다.

5) 테레프탈산의 입자경이 작아지면 착화에너지도 작아지는 선형적관계를 나타내었다.

감사의 글 : 본 연구는 1999년도 부경학술진흥재단 학술연구비의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) M. Faraday and C. Lyell:Philosophical Managine, pp. 16~26, 1845.
- 2) Field, Dust Explosions, Handbook of Power Technology, Elsevier Scientific Publishing Co. Amsterdam, 1982.
- 3) M. Nifuku, T. Ishikawa, T. Hanawa and T. sasaki, Study on Ignition of Dust cloud J. JSSE, Vol. 26, No. 3, pp. 148~152, 1987.
- 4) T.Matsuda and T.Hayashi Dust Explosions in a Cyclon System, Research Report of the Research Institute of Industrial Safety, R 11S-RR-87, pp. 123~137, 1987.
- 5) G. Butters, Dust Explosion Prevention and Protection in the PlasticsIndustry, Plastics Rubber Processing and Application, Vol. 5. No. 1, pp. 27~33, 1985.
- 6) W. E. Baker and M. J. Jang, Gas, Dust Hybrid Explosions, pp. 15~31, Elsevier, 1991.