

Hydroxypropyl Methyl Cellulose의 분진 폭발특성에 관한 연구

임우섭 · 목연수[†]

부경대학교 안전공학과

(2000. 9. 1. 접수 / 2000. 11. 7. 채택)

A Study on Dust Explosion Characteristics of Hydroxypropyl Methyl Cellulose

Woo-Sub Lim · Yun-Soo Mok[†]

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received September 1, 2000 / Accepted November 7, 2000)

Abstract : This study was performed in Hartmann type dust explosion apparatus in order to research the dust explosion characteristics of hydroxypropyl methyl cellulose(HPMC): minimum explosive limit, minimum ignition energy, limiting oxygen concentration, maximum explosion pressure, rate of pressure rise, etc.

The samples of HPMC dust were distributed into 120-140 mesh, 170-230 mesh and 325 under, and the gap distance of the discharge electrode was setted up at 5mm.

The experimental results were obtained as follows:

- ① The minimum explosive limit for HPMC dust was founded at 180g/m^3 , the minimum ignition energy at 9.8mJ and the limiting oxygen concentration at 12%.
- ② The maximum explosion pressure of HPMC dust was $8.1\text{kg/cm}^2 \cdot \text{abs}$ at the concentration of 500g/m^3 and the maximum rate of pressure rise was 203.98 bar/sec at the concentration of 480g/m^3 for 325 under.

Key Words : HPMC, dust explosion, minimum explosive limit, limiting oxygen concentration

1. 서 론

물질의 풍요로움이 요구되는 현대사회에서는 기능성, 디자인성, 편리성 등이 요구되는 제품들이 제조되고 있으며, 이러한 제품들은 석유화학물질로부터 제조되는 고분자 물질을 원료로 하거나 천연 고분자 물질을 원료로 하고 있다.

이들 고분자 물질의 대부분은 연소가능한 물질로서, 보다 우수한 제품을 만들기 위해서 미세한 분체의 형태로 사용되는 경향이 점점 증가하고 있으며, 이 미세한 분체를 가연성분체 또는 가연성분진이라 한다.

이러한 가연성분진을 생산, 가공, 수송하는 과정에서 분진폭발의 위험성은 항상 존재하고 있으며,

일단 분진폭발이 발생하면 인명과 재산상의 피해가 큰 대형사고의 경향을 띠게 되므로, 무엇보다 중요한 과제는 폭발예방대책을 강구하는 것이라 할 수 있다. 분진폭발을 예방하기 위해서는 가연성분진의 폭발 위험성을 평가하고 필요한 예방기술을 선택하여야 한다. 가연성분진의 폭발위험성을 평가하기 위한 주요 특성치로서는 폭발하한계(lower explosive limit), 최대폭발압력(maximum explosion pressure), 폭발압력상승속도(rate of explosion pressure rise), 최소착화에너지(minimum ignition energy), 최저발화온도(minimum ignition temperature) 등이 있으며, 이들 특성치는 실험을 통하여 파악하여야 한다.¹⁾

분진폭발에 관한 연구는 Faraday²⁾의 선구적 연구가 있는 이후, Hartmann 등³⁾과 Jacobson 등⁴⁾을 비롯한 많은 연구자들에 의해 수행되어져 왔으며, 이를 바탕으로 ASTM⁵⁾, IEC⁶⁾, ISO⁷⁾ 등에서 폭발특성치 측정에 대한 국제적 규격을 제정하여 권고하고

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

있다. 최근에는 Chawla 등⁸⁾이 분진의 폭발하한계 측정방법의 실험적 비교를 행하여 ASTM방법이 보다 실질적 자료를 얻을 수 있다고 하였으며, Kumar 등⁹⁾은 대형폭발장치를 사용하여 옥수수 전분과 석탄분진에 대한 실험을 행하여 소형용기에서의 폭발특성치와 비교하였으며, 최대폭발압력은 동일하다는 것을 발표하였다.

국내에서는 오규형 등¹⁰⁾이 텔레프탈산의 분진 폭발특성에 관한 연구를 하였고, 목연수 등¹¹⁾이 소나무 분진의 폭발특성에 관한 연구가 행하였으나, 새로 개발되어 생산되고 있는 제품에 대한 분진운의 폭발특성자료가 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 S기업이 자체 개발하여 도료, 식용품, 의약품, 제지, 화장품, 세라믹 소재 등에 사용되고 있으며 수요가 날로 증가하고 있는 Hydroxypropyl methyl cellulose(이하 HPMC라 한다)를 시료로 개량된 Hartmann식 폭발시험장치를 이용하여 폭발하한계, 최대폭발압력, 최대폭발압력 상승속도, 폭발한계산소농도 등의 특성치를 조사하여 산업현장에서 폭발의 위험성이 항상 상존하고 있는 분진의 폭발예방대책을 수립하는 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 시험방법

2.1. 실험장치

본 실험에 사용한 시험장치는 ASTM E 789-81¹²⁾에 의거한 Hartmann식 폭발장치를 개량한 취입식 분진폭발 장치이며, 그 구성은 Fig. 1과 같다.

장치의 전체구성은 폭발통부, 압축공기공급부, 전기에너지공급부, 폭발에너지 측정 및 저장부로 구성되어 있으며, 폭발통부의 폭발통은 부피가 1.3 l 이고, 투명한 파이렉스제의 내열유리로서 내부를 관찰할 수 있도록 되어 있다.

상부는 종이를 사용하여 뚜껑을 덮을 수 있도록 되어 있고, 폭발압력의 측정에 사용되는 폭발통은 스테인레스로 제작하여 상부에 압력을 측정할 수 있는 압력변환기(Kyowa제 PE-30KF)를 장착하였으며, 이를 오실로스코프에서 기록되게 하였다.

폭발통에는 시료컵 상부 12cm 지점에 착화용 방전전극 2개를 수평으로 마주보는 형태로 장착하였으며, 방전전극은 직경 3mm의 텅스텐 합금을 사용하였으며, 전극의 간격은 마이크로미터로 조절할 수 있게 되어 있다.

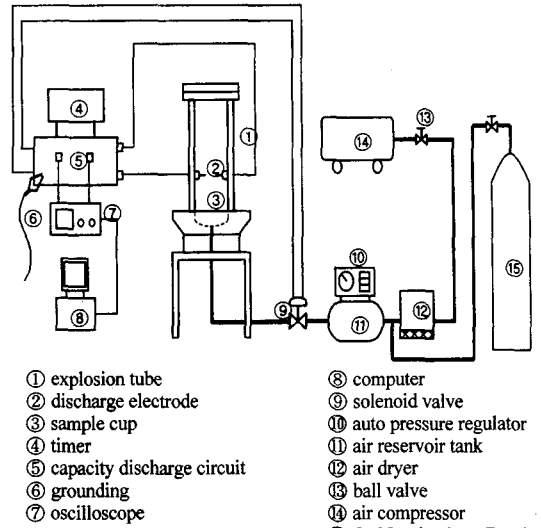


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

압축공기공급부는 공기압축기, 공기건조기, 압축공기저장탱크, 압력계, 자동압력조절장치와 폭발한계산소농도를 측정하기 위한 별도의 혼합가스 분배로 구성되어 있다. 공기압축기는 피스톤식 공기압축기(Model NH-5, 10kgf/cm²)로서, 압축된 공기는 공기건조기(Model XD-7)를 거치면서 수분이 제거된 후 압축공기저장탱크에 저장되고, 자동압력조절장치에 의해 설정압력으로 항상 유지되도록 되어 있으며, 이 장치의 압력오차는 ±0.2% 이내로서 아주 정밀한 것을 사용하였다. 혼합가스는 농도에 따라 주문제조(제조회사: (주) 덕양가스, 순도: 99.8%) 한 것으로서 산소농도 변화시에 공급되는 압축혼합가스(O₂/N₂)이다.

전기에너지공급부는 용량방전형 콘덴서, 가스 봉입형 고전압스위치, 방전제한저항, 무유도저항, 타이머 등으로 구성되어 있다. 폭발에너지 측정 및 저장부는 오실로스코프(TDS 380), 고전압 프로브(Tektronix P6015A) 및 컴퓨터로 구성되어 있다. 오실로스코프에는 폭발시 방전에너지를 측정할 수 있는 방전전류와 방전전극간의 전압이 나타나며, 전기에너지공급부와 연결된 고전압 프로브에 의해 방전전극에서 방전시 전압을 측정하였고, 방전전류는 상기 전류 검출용 전압에 의해 각각 검출하였다. 방전전류와 방전전극간의 전압은 각각 오실로스코프에 파형으로 기록되며, 이 파형을 컴퓨터로 읽어 들여 수치화 한 다음 계산에 의해 착화에너지를 구하였다.

2.2. 실험방법

분진폭발 현상은 수분의 영향을 많이 받으므로 실험의 재현성을 좋게 하기 위해 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 $50 \pm 5\%$ 의 항온항습 조건으로 실험을 행하였으며 아래의 절차에 따라 실험을 행하였다.

- ① 지정된 량의 시료를 전자저울로 정확히 평량한 후 시료컵 주위에 균일하게 분포시킨다.
- ② 폭발통을 체결시킨 후, 폭발통 상부는 종이를 사용하여 밀폐시키며, 마이크로미터로 방전전극 간격을 조절하여 고정한다.
- ③ 전기에너지공급부의 전원을 방전전극에 연결한 후, 충전-방전스위치를 누른다.
- ④ 화염전파 및 폭발을 육안으로 확인한다.
- ⑤ 오실로스코프를 통해서 방전전극간의 전압과 방전전류를 확인한 다음, 오실로스코프의 파형과 데이터를 읽어 들여 착화에너지를 계산한다.

폭발의 유무를 판단하기 위한 폭발판정기준은 폭발통 상부의 종이덮개가 폭발에 의해 파열될 때와 화염전파가 방전전극 상부 10cm 이상으로 발생할 때로 하였으며, 상부의 종이 파열되지 않거나 불꽃이 발생하지 않으면 불폭발로 판정하였다. 실험의 정밀도를 향상시킬 목적으로 동일한 농도에서 인가전압(kV)을 낮춰가며, 매 전압마다 10회의 실험을 하였다. 10회의 실험 중 1회라도 폭발이 발생하면 분진폭발로 판정하고 최저의 인가전압을 구할 때까지 실험을 행하였으며, 10회의 실험에서 1회도 폭발되지 않았을 때의 경계농도를 구하였다.

본 실험에서는 에너지 공급부의 콘덴서에 충전되는 충전시간을 15초로 설정하였으며, 시료의 비중을 고려하여 압축공기의 방출시간은 0.5초로 설정하였고, 충전 후 압축공기의 방출이 시작되고 나서 방전이 개시되는 시간을 0.1초로 설정하였다. 그리고 압축공기의 압력 또한 $0.8\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 설정하였다.

착화에너지에 대한 분진농도 변화에 따른 영향을 조사하기 위하여 전극간극, 설정공기압력, 압축공기 방출시간, 방전개시시간을 일정하게 한 후 폭발통 내의 분진농도를 $100\text{g}/\text{m}^3 \sim 700\text{g}/\text{m}^3$ 까지 변화시켜 가며 폭발이 발생하는 착화에너지의 최저치를 구하였다. 구해진 데이터를 통해 농도에 따른 착화에너지 값과 착화에너지가 급변하는 분진농도를 조사하였다.

또한 폭발압력 및 폭발압력 상승속도의 측정은

밀폐 폭발통을 사용하여 위 실험의 절차와 동일하게 행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 폭발하한계

분진의 폭발하한계는 폭발예방대책을 설계하는데 있어 중요한 인자중의 하나이며, 그 밖의 인자로는 최소착화에너지, 최저발화온도, 최대폭발압력 및 압력상승속도 등이 있다. 실험에 사용한 HPMC 시료의 폭발하한계를 측정하기 위하여 사용된 분진의 입자 분포는 120-140 mesh, 170-230 mesh, 325 mesh 통과분으로 하였다.

Fig. 2는 실험장치의 전극간 거리를 5mm로 하여 실험을 행하였을 때 각 분진의 입도에 있어서 분진의 농도와 착화에너지와의 관계를 나타내었다. Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 분진의 입도와 농도가 착화에너지에 크게 영향을 미치고 있으며, 분진의 입도가 작아질수록 착화에너지는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 입자표면에서 발생하는 분해가스의 연소현상에 기인하므로 표면적이 입자체적에 비해 커지면 열전달이 용이하기 때문이다. 분진은 농도와 착화에너지의 관계는 농도가 $400\text{g}/\text{m}^3$ 보다 작은 경우에는 농도가 작을수록 착화에너지가 증가하는 경향을 나타내다가 입도의 크기에 따라 어느 농도 이하에서는 에너지를 더 주어도 폭발하지 않는 것을 알 수 있다. 120-140 mesh의 입도를 가진 HPMC분진의 폭발하한계는 $270\text{g}/\text{m}^3$, 170-230 mesh에서는 $220\text{g}/\text{m}^3$, 325 mesh 통과분에

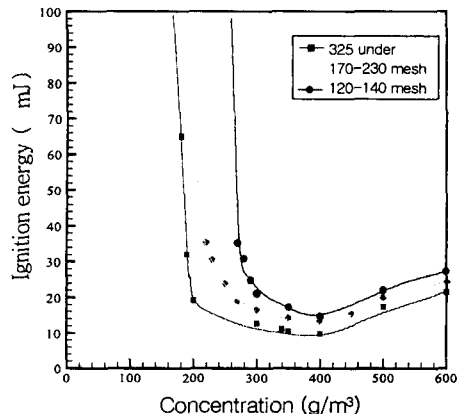


Fig. 2. Relation between the ignition energy and the dust concentration for dust explosion

서는 180 g/m³를 나타내었다. 따라서 본실험의 범위에서 HPMC의 폭발하한계는 180g/m³이다.

3.2. 최소 착화에너지

분진폭발을 위한 착화에너지 및 폭발한계농도는 분진운 형성 방법에 따라 약간의 차이가 있으며, 분진의 입도와 형상 등 여러 가지 요인에 따라 영향을 받을 수 있으므로 불균일한 현상이 일어나지 않도록 유의해서 실험을 해야 한다.¹³⁾ 동일 조건에서 실험을 할 때에도 분진의 분산상태에 따라 동일한 결과를 얻기 어려우므로 동일 조건의 실험을 10회 이상 실시하여야 한다.

분진운을 착화·폭발시키는 경우 그 착화원의 에너지를 감소시켜가면 폭발이 일어나지 않는 에너지의 한계치가 존재하며 이 한계에너지는 폭발의 발생을 미연에 방지하는 대책상 대단히 중요한 값이 된다. 본 연구에서는 임의의 농도를 설정하고 그 밖의 조건을 최적의 조건으로 설정한 경우에 있어서 분진폭발을 발생시키는데 필요한 최소의 방전 에너지를 그 농도에 있어서 최소착화에너지로 하였다.

본 연구에서는 실험을 통해 폭발로 인정된 오실로스코프의 파형은 컴퓨터(Wavestar)로 읽어 들여 수치화 하였으며, 얻어진 데이터는 다음의 계산식에 따라 착화에너지를 구하였다.

$$W = \int IV dt$$

여기서, W(J) : 착화에너지,

I(A) : 방전전류,

V(V) : 방전전극간의 전압

Fig. 3은 오실로스코프에 나타난 파형을 나타내

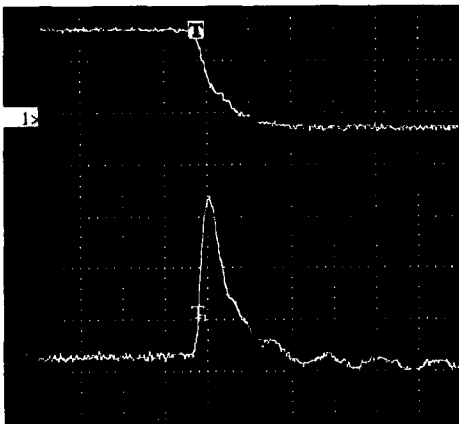


Fig. 3. The waves plotted from the oscilloscope

고 있는데, 파형 1은 방전전극간의 전압, 파형 2는 방전전류를 나타낸다.

Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 착화에너지는 분진의 입도와 농도에 크게 영향을 받는다. 120-140 mesh 의 입도에서의 최소착화에너지는 400 g/m³의 농도에서 14.57 mJ로, 170-230 mesh에서는 400 g/m³의 농도에서 13.23 mJ로, 325 mesh 통과분에서는 400 g/m³의 농도에서 9.8 mJ로 각각 측정되었다.

따라서 본 연구에서 행한 입도와 농도의 범위에서 HPMC의 최소착화에너지는 9.8 mJ이었다.

3.3. 폭발한계 산소농도

최근 가스폭발 및 분진폭발의 예방대책으로 불활성가스의 첨가가 광범위하게 이용되고 있다.

이 경우 불활성가스의 효용은 혼합가스중의 산소를 줄이는 것이며, 산소농도를 어느 한계치 이하로 유지하면 폭발의 발생을 예방할 수 있다는 원리에 바탕을 둔 것이다.¹⁴⁾

폭발한계산소농도는 실험적으로 측정하여 적용하여야 하며, 특히 분체를 취급하는 산업체에서의 불활성화에 의한 안전대책은 분쇄공정, 건조공정 및 이송공정에 적용하여 폭발을 방지하도록 하여야 한다.

본 연구에서는 폭발통의 분사기체를 산소와 질소를 혼합한 혼합가스를 사용하였고, 분진시료는 325 mesh 통과분을 사용하여 실험을 행하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 18%의 산소농도에서는 250g/m³ 이상에서, 15%에서는 400g/m³ 이

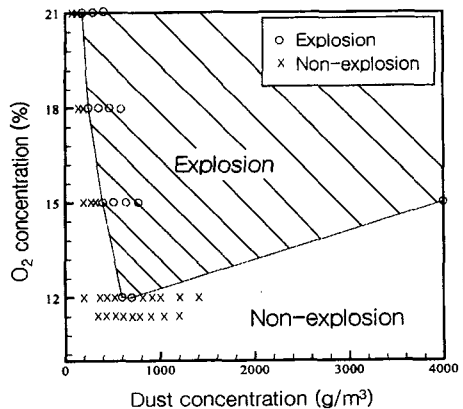


Fig. 4. Influence of the oxygen concentration upon the explosive limits of HPMC dust

상에서 4000g/m³까지 폭발하였으며, 12%에서는 600g/m³에서 700g/m³까지만 화염전파를 인지할 수 있었고 그 미만의 산소농도에서는 착화하지 않았다. 따라서 본 실험의 범위에서 HPMC의 폭발한계 산소농도는 12%임을 알 수 있다.

3.4. 폭발압력 및 폭발압력상승속도

분진폭발의 폭발압력은 작업상의 안전대책을 강구하는데 대단히 중요한 특성치라고 할 수 있으며, 특히 최고 압력은 분진의 폭발위험성을 검토하는데 유효하게 사용된다.

분진의 폭발압력은 밀폐용기중에 분체를 분산시키는 상태에 따라 큰 영향을 받게 된다. 즉, 분산 공기압력, 분진의 농도 등의 영향이 대단히 중요하므로 본 실험에서는 HPMC의 325 under의 시료를 사용하여 분산공기압력을 0.8 kg/cm²로 일정하게 고정하여 실험을 행하였다. 분진의 농도에 대한 최대 폭발압력을 측정하여 Fig. 5에 나타내었으며, 180 g/m³의 폭발하한계 농도에서는 5kg/cm² · abs의 폭발압력을 나타내고 있지만 농도가 증가할수록 폭발압력도 서서히 증가하여 500 g/m³일 때 8.1kg/cm² · abs로서 최대의 폭발압력을 나타내었고, 500 g/m³이상의 농도에서는 다시 감소하였다. 이는 분체의 폭발하한계와 상한계 부근에서는 폭발압력이 최소가 되는 것과 일치하고 있다.

또한 분진의 농도에 대한 폭발압력상승속도를 구하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 180g/m³의 폭발하한계 농도에서는 폭발압력상승속도가 25.11 bar/sec의 낮은 값을 나타내고 있으나 농도가 증가함에 따라 서서히 증가되어 480g/m³일 때 203.98

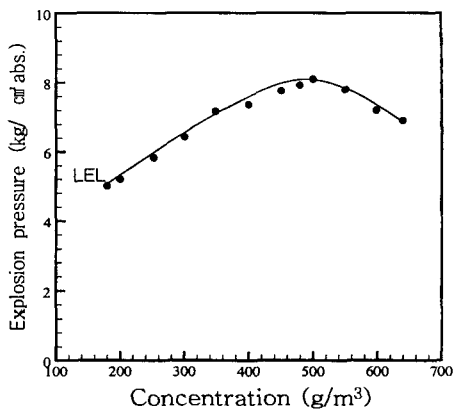


Fig. 5. Explosion pressure with the change of concentration of HPMC

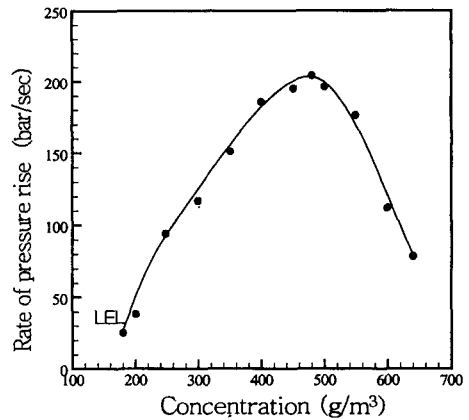


Fig. 6. Rate of pressure rise with the change of concentration of HPMC

bar/sec로 폭발압력상승속도가 최대로 나타났으며, 480g/m³ 이상의 농도에서는 다시 감소되어 640g/m³에서 78.45bar/sec의 증가비로 나타났다.

4. 결 론

여러 분야에 걸쳐 용도가 증가하고 있는 HPMC를 Hartmann식 폭발시험장치를 사용하여 분진폭발 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 폭발하한계는 분진의 입자크기와 농도에 많은 영향을 받는다. HPMC의 폭발하한계는 180g/m³이었다.
- 2) 입도와 농도의 범위에서 HPMC의 최소착화 에너지는 9.8mJ로 측정되었다.
- 3) 325 mesh 통과분의 입도에 대한 폭발한계 산소농도는 12%로 측정되었다.
- 4) 325 mesh 통과분의 시료를 사용하여 얻은 최대폭발압력을 측정한 결과 180g/m³에서 5kg/cm² · abs의 폭발압력을 나타내었고, 농도가 증가할수록 폭발압력이 서서히 증가하다가 500g/m³일 때 8.1 kg/cm² · abs로서 최대의 폭발압력을 나타내었다.
- 5) 폭발압력상승속도는 325 mesh 통과분의 시료를 사용하였을 때, 480g/m³에서 203.98bar/sec를 나타내었다.

참고문헌

- 1) Norbert Jaeger, Richard Siwek, "Prevent Explosion of Combustible Dusts", Chem. Eng. Prog, pp. 25 ~

- 37, June, 1999.
- 2) M. Faraday and C. Lyell. Philosophical Magazine, 26 ~ 16, 1845.
 - 3) J. Nagy Hartmann, and H. R. Brown, "Inflammability and explosibility of metal powders" U. S. Bur of Mines. R.I. No. 3722, 1943.
 - 4) M. Jacobson, J. Nagy and A. R. cooper: "Explosibility of dust used in the plastics Industry" U.S. Bur of Mines, R. I. No. 5971, 1962.
 - 5) American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Minimum Explosible Combustible Dusts"ASTME 1515-98, ASTM, West Conshohocken, PA, 1998.
 - 6) International Electrotechnical Commission, "Electrical Apparatus for Use in the Presence of Ignitable Dust: Part2 ; Test Method, Section 3, Method for Determining the Minimum Ignition Energy of Dust/ Air Mixtures, IEC, Geneva, 1994.
 - 7) International Standard Organization, "Explosion protection systems-Part 1 : Determination of explosion indices of combustible dusts in air", ISO 6184/ 1, 1985.
 - 8) N. Chawla, P. R. Amyotte and M. J. Pegg, "A comparison of experimental methods to determine the minimum explosible concentration of dusts", Fuel Vol. 75, No. 6, pp. 654 ~ 658, 1996.
 - 9) R. K. Kumar, E. M. Bowles and K. J. Mintz, "Large-Scale Dust Explosion Experiments to Determine the Effects of Scaling on Explosion Parameters", Combustion and Flame 89, pp. 320 ~ 332, 1992.
 - 10) 오규형, 문정기, 김한석, "Terepht-alic Acid의 폭발특성에 관한 실험적 연구", 한국산업안전학회지, Vol. 5, No. 1, pp. 41 ~ 48 1990.
 - 11) 목연수, 최재욱, 조일건, 최일건, 이동훈, 하동명, "소나무분진의 최소 착화에너지와 폭발한계 측정에 관한 연구", 한국가스학회지, Vol. 2, No. 2, pp. 55 ~ 56, 1998.
 - 12) American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Dust Explosions in a Closed Vessel", ASTME 789-81, ASTM, West Conshoho-cken, PA, 1991.
 - 13) 内勝道夫, 梅津實, "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.
 - 14) 목연수, 조태제, 전성균, 유용호, 화학안전공학, 동화기술, pp. 210 ~ 224, 1998.