

Hydroxy Propyl Methyl Cellulose 분진의 습도와 온도에 대한 영향성 연구

임우섭 · 목연수* · 최재욱^{†*}

부경대학교 안전공학과 대학원 · *부경대학교 안전공학과
(2004. 7. 19. 접수 / 2004. 8. 9. 채택)

A Study on The Effect of Humidity and Temperature of Hydroxy Propyl Methyl Cellulose Dust

Woo-Sub Lim · Yun-Soo Mok* · Jae-Wook Choi^{†*}

Department of Safety Engineering, Graduate School, Pukyong National University.

*Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received July 19, 2004 / Accepted August 9, 2004)

Abstract : This study was performed with Hartmann type dust explosion apparatus and Godbert-Greenwald furnace apparatus in order to research the effect of temperature and humidity affecting LEL, minimum ignition temperature of Hydroxy Propyl Methyl Cellulose. The experimental determinations in the range between 20°C and 60°C of temperature was not affected LEL(180g/m³) but LEL showed 200g/m³ and 250g/m³ at 80°C and 100°C. As the change of humidity LEL was 180g/m³ for 50%, 200g/m³ for 60% and 250g/m³ for 70% but dust explosion didn't occur over 80%. The ignition temperature of HPMC dust clouds was increased as increasing of humidity. So, the minimum ignition temperatures at 50%, 60%, 70%, 80% of humidity was 363°C, 375°C, 397°C, 405°C.

Key Words : hydroxy propyl methyl cellulose, dust explosion, dust cloud, lower explosive limit, minimum ignition temperature, hartmann, godbert-greenwald furnace

1. 서 론

분진폭발은 탄광의 폭발사고가 논의되었던 1870년경 가연성가스가 존재하지 않아도 분진만으로 폭발한다는 것이 확인되었고, 1886년 영국의 탄광폭발 조사위원회는 탄진에 폭발성이 있다는 것을 정식으로 인정했다¹⁾. 이러한 사실들이 밝혀진 후 분진폭발 사고는 여러 가지 물질과 여러 가지 형태에서 발생한다는 것이 국제 사회에 계속 보고 되어져 왔으며, 해마다 증대하는 경향을 나타내었다²⁾. 물론 산업화가 급속히 진행되면서 물질의 풍요로움에 대한 욕구는 분진의 취급 공정을 다변화, 대량화시켜 여러 가지 물질들이 생산되어졌기 때문이지만 최근의 사고는 기존의 자료로서는 사고를 예방하지 못하는

경우가 많다. 이 가운데 하나는 갈수록 정밀한 제품을 만들기 위해 혹은 보다 질 좋은 제품을 만들기 위해 나노기술 형태를 요구하게 되어진 것도 중요한 이유라고 할 수 있다.

실질적으로 분진은 입자경의 크기에 따라서 폭발 특성은 매우 달라지고 있으며 이러한 입자경의 크기에 따른 연구로는 Faraday³⁾의 선구적 연구가 있는 이후 많은 연구자들에 의해 수행되어져 왔으며, 국내에서도 오규형 등⁴⁾이 텔레프탈산의 분진폭발특성에 관한 연구를 하였고, 최재욱 등⁵⁾이 소나무 분진의 폭발특성에 관한 연구를 수행하였다.

그리고 이러한 미세한 분진들의 폭발사고를 예방하기 위해서 제조, 수송, 저장 과정에서 폭발 특성치들을 관리하는 것으로 온도와 습도를 조절하는 방법이 있으며, 이러한 것들에 대한 연구로는 K. Kiyama와 H. Sudo⁶⁾는 P.V.A분체를 사용하여 분체의 착화성에 미치는 습도의 영향성을 조사하였

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

으며, M. Mittal과 B. K. Guha⁷⁾는 폴리에틸렌 분진을 사용하여 분진운의 발화온도에 대한 영향성을 연구하였다.

따라서 본 연구에서는 S기업이 자체 개발하여 도료, 식품품, 의약품, 제지, 화장품, 세라믹 소재 등에 사용되고 있으며 수요가 날로 증가하고 있는 hydroxypropyl methyl cellulose(이하 HPMC라 한다)를 시료를 개량된 Hartmann식 폭발 실험 장치를 이용하여 온도와 습도에 대한 영향성을 실험하였다.

또한 분진운의 습윤도에 대한 영향도 Godbert-Greenwald furnace 실험 장치를 이용하여 실험하였으며, 여기서 제시한 자료들은 분진을 취급하는 공정에서 재해를 예방하는데 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1. 실험장치

2.1.1. 분진폭발 실험장치

폭발실험에 사용한 장치는 ASTM (E1515- 98)⁸⁾에 의거한 Hartmann식 폭발장치를 개량한 취입식 분진 폭발 장치이며, 그 구성은 Fig. 1과 같다.

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

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 있으며, 상부는 종이를 사용하여 뚜껑을 덮을 수 있도록 되어 있다.

압축공기공급부는 공기압축기, 공기진조기, 압축 공기저장탱크, 압력계, 자동압력조절장치와 폭발한계산소농도를 측정하기 위한 별도의 혼합가스 봄베로 구성되어 있다.

전기에너지공급부는 용량방전형 콘덴서, 가스봉입형 고전압스위치, 방전제한저항, 무유도저항, 타이머 등으로 구성되어 있다. 폭발에너지 측정 및 저장부는 오실로스코프(TDS 3014), 고전압 프로브(Tektronix P60 15A) 및 컴퓨터로 구성되어 있다.

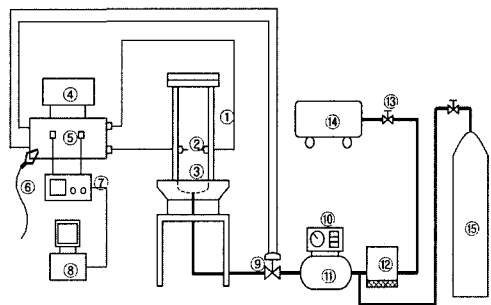
또한 온도변화에 따른 분진폭발의 특성을 조사하기 위해 Hartmann식 폭발장치에 먼저 분체의 분산

을 위해서 공급되는 압축공기의 온도를 조절하기 위해서 압축공기 저장탱크에 자켓식 히터(주문제작)를 설치하여 온도를 1차적으로 제어할 수 있도록 하였으며, 압축공기가 수송되는 관내에서 온도의 하강을 막기 위해 2차적으로 직경 5mm, 길이 90cm의 동관 내부에 히팅 코일을 삽입하고 여기에 온도센스를 부착하고, 보온 재료를 사용하여 2중으로 단열시켰다. 그리고 시료의 분사시 폭발통내의 공기가 온도저하의 원인으로 작용하는 것을 방지하기 위해서 폭발통 외부로 히팅코일(직경 1mm, 길이 5m)로 감싸고, 전압조절 장치를 부착하여 폭발통 내부에 설치된 열전대 온도계에 의해 자동적으로 온도를 조절할 수 있도록 하였다.

2.1.2. 운상발화 실험장치

운상연구에 사용한 실험장치는 Godbest-Greenwald furnace⁹⁾를 개량한 것으로 그 구성은 Fig. 2와 같으며, 발화부, 압축공기 공급부, 온도제어장치로 구성되어 있다.

발화부는 외경 42cm×30cm로 제작된 KT Type의 4kw 발열체로 최고 1000℃까지 올릴 수 있으며, 전기로 내부에 $\phi 4\text{cm} \times \text{H}26\text{cm}$ 의 석영관을 전기로 중심부에 넣고, 석영관의 후면 중심부에 $\phi 1.6\text{mm}$ 의 열전대 온도계를 삽입하여 관내부의 온도를 측정하였다. 온도조절은 PID조절기에 의하여 설정온도를 조절하였다.



- | | |
|--------------------------------|-------------------------------------------------|
| ① explosion tube | ⑥ 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 |
| | ⑮ O ₂ -N ₂ mixed gas Bomb |

Fig. 1. Experimental apparatus for Hartmann type of dust explosion apparatus.

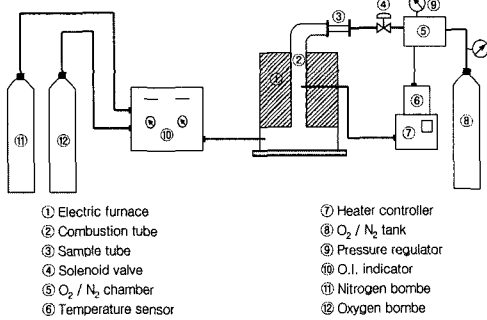


Fig. 2. Experimental apparatus for Godbert-Greenwald furnace of ignition temperature of dust cloud.

2.2. 실험방법

2.2.1. 분진폭발

분진폭발 현상이 온도와 수분의 영향을 받으므로 실험의 재현성을 좋게 하기 위해 HPMC, 325mesh이하의 시료를 사용하였으며, 온도의 영향성에 대해서는 실험실 내부의 온도를 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 $50 \pm 5\%$ 의 항온항습 조건하에서 실험장치의 내부 온도만 20°C , 40°C , 60°C , 80°C , 100°C 로 변화시켜 가면서 실험을 행하였으며, 습도에 대한 영향성을 평가할 때에는 항습조건을 50%, 60%, 70%, 80%로 단계적으로 상승시켜 시료를 비롯한 모든 장비들을 위의 조건에 24시간이상 방치하여, 그 조건이 안정화되었을 때 아래의 절차에 따라 시험을 실시하였다.

- (1) 온도와 습도의 조작성 설정 값에 도달한 후 일정시료를 전자저울로 정확히 달아서 폭발통 내부에 삽입한다.
- (2) 폭발통을 고정식 연결부에 견고히 체결시킨 후 온도의 영향성을 평가하기 위한 경우는 폭발통 내부가 설정온도에 도달할 때까지 기다린다.
- (3) 마이크로미터로 방전전극 간격을 조절하고, 전압, 충전시간, 압축공기 방출압력, 방전개시 시간을 확인한 후 전원스위치를 누른다.
- (4) 분진운의 균일한 분포, 방전에 의한 방전불꽃의 유무, 그리고 화염전파 및 폭발을 육안으로 확인한다.

폭발의 유무를 판단하기 위한 폭발 판정 기준은 다음과 같다.

- (1) 폭발통 상부의 종이덮개가 폭발에 의해 파열될 때

- (2) 화염전파가 방전전극 상부 10cm이상으로 발생할 때

그러나 파열되지 않거나 불꽃이 발생하지 않으면 비(非)폭발로 판정하였고, 10회의 실험에서 1회도 폭발되지 않았을 때의 경계농도를 구하였다.

2.2.2. 운상발화

실험은 온도제어장치에 의해 발화부 내부를 일정 온도로 유지하고, 시료를 습도 50%, 60%, 70%, 80%에서 24시간 방치한 325mesh이하의 HPMC 시료를 충전한 후 조정된 압력으로 발화통 내부로 이송한다. 이 때 발화통 하부에 시료가 연소하여 화염이 분출하게 되면 발화로 판정하고, 화염이 분출하지 않을 경우에는 비발화로 판정하여 시험관 내부의 잔류분진을 제거한 후 1회의 실험을 종료하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 온도변화에 따른 폭발한계의 영향

HPMC, 325mesh이하의 분진에 대한 온도변화에 따른 폭발한계의 영향성을 연구한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3은 온도를 $20^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 까지 20°C 간격으로 변화시켜 실험을 행한 결과로서, $20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 까지는 온도에 대한 영향성이 나타나지 않았으나, 60°C 이상에서부터는 폭발한계(LEL)의 값이 온도가 상승함에 따라서 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 온도 80°C 에서는 LEL 값이 170g/m^3 , 온도 100°C 에서는 150g/m^3 으로 각각 나타났다.

이는 주위의 온도변화에 따라 HPMC 분진 입자 자체가 일정 온도 이상이 되면 그 표면으로부터 활

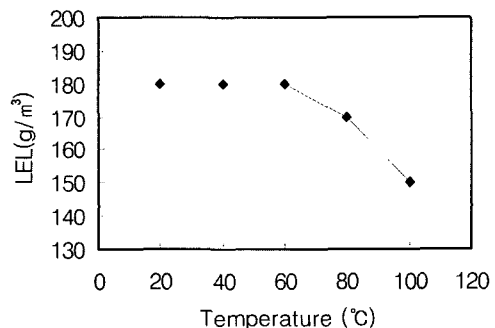


Fig. 3. LEL with the change of temperature.

성화되는 경향이 나타나기 때문인 것으로 사료된다. 특히 선형 연구^{10,11)}에서 밝혀진 바와 같이 HPMC의 경우 최소착화에너지(MIE)는 9.8mJ이며, 적층 상태에서의 자연발화 온도는 두께 7cm에서 180.5℃로 비교적 열적으로 불안정한 물질임을 알 수 있었다. 또한 100℃이상에서는 HPMC 분체의 물성에 변화를 주게 될 수도 있으므로 고온의 온도에서는 실험을 하지 않았다. 따라서 HPMC를 취급하는 작업장에서는 온도상승 방지를 위한 예방대책이 필요하다.

3.2. 습도변화에 따른 폭발한계의 영향

분진 입자의 크기 및 농도 그리고 불활성 가스(N₂)의 첨가에 의한 폭발한계의 영향에 관한 검토가 앞서 진행되었으며, 이들로부터 분진 입자의 크기가 작아지거나, 분진농도가 증가할수록 분진의 폭발위험성이 증대하는 것으로 나타났다¹⁰⁾.

따라서 본 연구에서는 습도를 변화시킬 때 분진 입자표면의 활성정도가 얼마만큼 감소되는지를 실험하여, 분체 표면의 활성화가 분진폭발 하한농도에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 상대습도 50%에서 LEL은 180g/m³이었으며, 60%와 70%는 각각 200g/m³과 250g/m³의 LEL 값을 구하였으며, 80%에서는 시료량을 증가하였으나 폭발이 일어나지 않았다.

이것은 분진의 입자가 습윤 상태가 되면 분진 입자간에 화염전파에 의해서 분진폭발이 일어나는 활성화 메카니즘을 생각할 때, 습윤된 수분이 수증기로 변하면서 분진입자 상호간의 화염전파를 억제한 것으로 사료된다. 실제 이러한 현상은 상대습도 80%에서 폭발이 일어나지는 않지만 순간적으로 폭죽의 경우처럼 덩어리상태로 연소하고 사라져 버리는 현상을 나타내는 것을 확인 할 수 있었다.

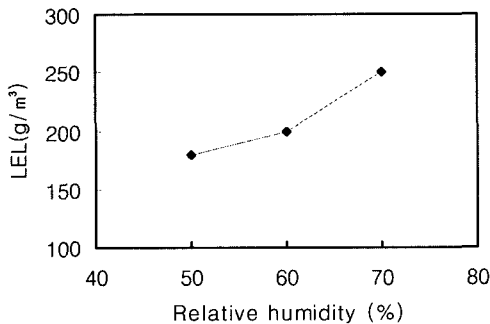


Fig. 4. LEL with the change of humidity.

3.3. 습도 변화에 따른 발화온도의 영향

Fig. 5는 운상발화온도를 앞서 말한 항습조건지의 시료를 가지고 상대습도 50%~80%까지의 변화를 두고, 시료량을 0.1g에서부터 0.9g까지 변화시켜 실험한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5는 습윤도가 높을수록 발화온도가 높게 나타나고 있으며, 상대습도 70%와 80%에서는 0.6g까지만 실험을 행하였고, 60%는 0.7g까지만 실험을 할 수가 있었다. 그 이유는 Fig. 2의 sample tube에서 combustion tube로 시료를 이송 할 때 0.8 Kg/cm²의 일정압력으로 시료를 운송하여야 하나, 습윤도가 높아지면서 시료 자체의 수송이 곤란하였기 때문이다.

또한 Fig. 6은 Fig. 5에서 나타난 발화온도 중에서 가장 낮은 온도를 나타내는 최저발화온도를 비교한 것으로서 상대습도 50%에서는 시료량 0.8g에서 363℃, 상대습도 60%와 70%에서는 시료량 0.5g에서 최저발화온도 375℃, 397℃로 각각 구하였으며, 상대습도 80%에서는 시료량 0.4g에서 최저발화온도 405℃를 구하였다.

여기서 시료의 습윤도가 증가할수록 발화온도는 높아지고, 서로 다른 습윤 상태를 비교하여 보면 최

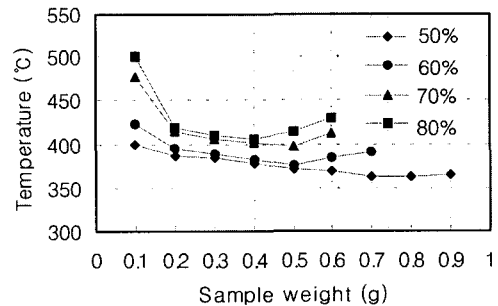


Fig. 5. Dust cloud spontaneous ignition temperature with the change of humidity.

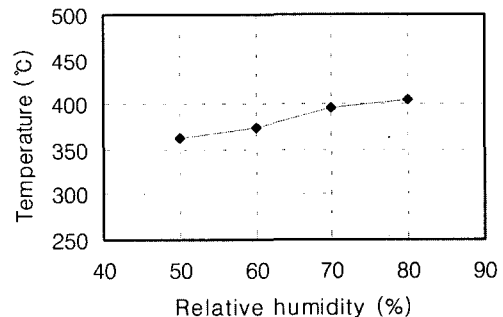


Fig. 6. Dust cloud spontaneous minimum ignition temperature with the change of humidity.

저발화온도가 나타난 지점의 경우 습윤도가 높을수록 시료의 량이 적어지는 경향을 나타내고 있다. 이것은 시료의 량이 많아지면 습윤도만큼 수분이 증기가 되어서 발화를 방해하는 효과를 나타내는 것으로 사료된다.

4. 결 론

HPMC 분진의 습도와 온도에 대한 영향성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 분진폭발의 온도의 영향성은 20℃~60℃까지는 동일한 폭발하한농도인 180g/m³을 얻었으나, 80℃에서는 170g/m³, 100℃에서는 150g/m³을 구하였으며, 온도가 높아짐에 따라 폭발한계농도가 감소하는 경향을 나타내었다.

2) 분진폭발의 습도에 대한 영향성은 상대습도 50%, 60%, 70%일 때 폭발하한농도는 180g/m³, 200g/m³, 250g/m³을 구하였다.

3) 운상발화온도에 대한 습윤의 영향성은 습윤도 50%, 60%, 70% 및 80%에 대해서 최저발화온도 363℃, 375℃, 397℃ 및 405℃를 구하였다.

참고문헌

1) 内藤道夫, 松田東榮, 粉塵爆發の危険性とその對策, 産業安全研究技術資料(RIIS-TN-69-1), pp. 1~2, 1981.

- 2) W. Bartknecht, Dust Explosions, Springer Verlag Berlin Heidelberg, pp. 51~92, 1989.
- 3) M. Faraday and C. Lyell, Philosophical Magazine, pp. 26~16, 1845.
- 4) 오규형, 문정기, 김한석, "Terephthalic acid의 폭발특성에 관한 실험적 연구", 산업안전학회지, 제5권, 제1호, pp. 41~48, 1990.
- 5) 최재욱, 최일곤, 조일건, 목연수, 이동훈, 하동명, "소나무분진의 최소착화에너지와 폭발한계 측정에 관한 연구", 한국가스학회지, 제2권, 제2호, pp. 55~60, 1998.
- 6) K. Kiyama and H. Sudo, "The Effect of the Moisture Content on Dust Explosion", ANZEN-KOGAKU, Vol. 12 No. 3, pp. 169~173, 1973.
- 7) M. Mittal, B. K. Guha, "Study of Ignition Temperature of a Polyethylene Dust Cloud", Fire and Materials, Vol. 20, pp. 97~105, 1996.
- 8) American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Minimum Explosible Combustible Dust, ASTM E 1515-98, 1998.
- 9) N. Jaeger, R. Siwek, Prevent Explosion of Combustible Dust, Chem. Eng. Prog., pp. 25~37, 1999.
- 10) 임우섭, 목연수, "Hydroxypropyl Methyl Cellulose의 분진 폭발특성에 관한 연구", 산업안전학회지, 제15권, 제4호, pp. 95~99, 2000.
- 11) 임우섭, 목연수, "Hydroxypropyl Methyl Cellulose 분진의 운상자연발화에 관한 연구", 산업안전학회지, 제19권, 제1호, pp. 137~140, 2004.