

## Terephthalic Acid의 폭발특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Explosion Characteristics of Terephthalic Acid

오 규 형\*    문 정 기\*\*    김 한 석\*\*\*  
Kyu hyung Oh    Jung gi Moon    Han seuk Kim

### ABSTRACT

In this study the explosion characteristics of terephthalic acid dust(PTA) was investigated with the Hartmann type apparatus. The minimum ignition energy, minimum explosible concentration, flame propagation velocity, explosion pressure, explosion pressure rise rate and the effect of inert dust(talcum) on explosion characteristics were measured.

Flame velocity was 50m/s at 700g/m<sup>3</sup> concentration, and the explosion pressure and explosion pressure rise rate were most likely with that of gas explosion. It was found that an inert dust acts as a heat sinker and it disturbs the combustion of flammable dust, as a result, explosion pressure and explosion pressure rise rate were decreased and minimum explosion concentration was increased with increasing the fraction of talcum dust in PTA.

### 1. 서    론

테레프탈산(PTA)은 석유화학공업에서 생산되는 백색 고체 결정형의 분체로서 폴리에스텔 섬유와 엔지니어링 플라스틱, 필름, 도료, 전자제품, 타이어

코트, 식음료 용기 등에 사용되며 그 용도가 점차 확대되고 국내에서의 생산량도 급격히 증가하고 있다.

이 분체형의 제품은 생산과정으로 부터 공기에 의해 수송되거나 기계적으로 대형의 탱크에 저장되고 있으며, 가연성 분체로서 전기적 스파크나 적은 점화원에 의하여 점화하여 대형의 폭발사고로 발전할 위험성을 갖고 있다.<sup>1), 4), 8)</sup>

외국의 경우 이미 오래전부터 분진폭발에 대한 연구를 수행해왔으며 각국의 연구기관으로는 미국의

---

\* 正會員 : 한국기계연구소 방폭기기실  
\*\* 正會員 :                    /  
\*\*\* 正會員 :                    /

PRC,<sup>6)</sup> 영국의 SMRE, 일본의 RIIS와 NRIPR, 노르웨이의 CMI,<sup>9)</sup> 폴란드의 바르샤바 대학, 독일의 PTB 등이 있고 이들이 사용한 실험장치는 Hartmann<sup>1), 2), 6), 9)</sup> 식에서 대형의 Silo<sup>10)</sup>에 이르기까지 다양하나 미국의 PRC에서 개발한 Hartmann식을 그대로 사용하거나 조금 개선한 형태가 대부분이다.<sup>5), 9), 14), 16)</sup> 한편, Hartmann식의 분진폭발 실험장치는 소형이고 밀폐형으로 실험결과를 대형공장에 그대로 적용하기는 어려운 점이 있으나 조작의 간편성과 데이터를 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다.<sup>1), 9), 19)</sup>

국내에서는 아직까지 분진폭발 사고가 공식적으로 발표된 적은 없으나 고분자 물질이나 기타 가연성 분체의 취급공정과 생산량이 증가하고 있으며 이에 따른 분진폭발 사고의 위험성도 높아져 분진의 폭발특성에 대한 연구의 필요성이 높아지고 있다.

본 연구는 PTA의 폭발특성에 대한 실험적 고찰을 통하여 농도변화에 따른 폭발 특성의 변화와 화염 전파속도의 변화, 폭발하한농도와 최소 점화에너지 등을 측정하였고 또 불활성 분진의 혼합에 따른 폭발특성의 변화를 중심으로 살펴보고자 하였다.<sup>1)</sup>

## 2. 실험장치 및 실험방법

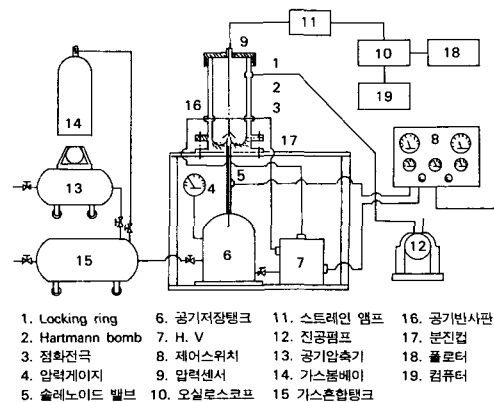
### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Hartmann식 분진폭발 실험장치의 분진 분산컵 부분을 개선하여 제작한 것으로 실험장치의 전체 구성도는 그림1과 같다. Hartmann식 장치는 분진 분산컵에 분진을 펼쳐놓고 압축공기는 이용하여 상 방향으로 강제 분산시키는 형태이다.<sup>6), 15)</sup> 폭발통은 내경이 75mm 외경이 95mm인 투명 아크릴통을 사용했고 폭발통의 부피는 약 1.2ℓ이다. 점화원은 용량 방전식 점화에너지 측정장치들<sup>1)</sup> 사용하였고 점화전극은 0.2mm의 텅스텐 봉으로 폭발통의 아래로부터 약 5cm 윗부분 중앙에 설치하였으며 전극의 간격은 방전이

잘되는 약 2mm 간격으로 조절하였다. 분진의 분산시간과 전극의 방전시간을 동기 시키기 위해 시간조절장치를 사용하였으며, 분진이 폭발통 내에 균일하게 분산되는 시간을 고려하여 솔레노이드 밸브의 열림시간과 점화 지연시간을 조절할 수 있도록 하였다. 폭발압력의 측정은 최대 30kg/cm<sup>2</sup>까지 측정 가능한 스트레인식 압력센서를 폭발통의 덮개 중앙에 부착하였고<sup>15)</sup> 센서에서 나오는 신호는 증폭기를 통하여 175MHz의 디지털 오실로스코프로 받아 분석하였으며 오실로스코프에서 컴퓨터를 이용하여 처리하거나 플로타로 연결하여 직접 그릴 수 있었다. 화염전파속도의 측정을 위해서는 광센서를 폭발통의 측면에 점화원으로부터 10cm 떨어진 곳에 5cm의 간격으로 두 곳에 부착하였다. 광센서는 빛의 응답속도가 빠른 Hamamats의 S-1190모델을 사용하였다. 또 압축공기는 응축에 의한 수분방지를 위해서 중간에 여과기를 설치하였다.

### 2.2 실험방법

일반적인 분진의 폭발 실험방법은 미국 PRC의 연구보고서와<sup>6)</sup> ASTM E-780<sup>15)</sup> 등에 잘 나타나 있으며 이와 유사한 방법을 사용하였다. 먼저 PTA의



1. Locking ring 6. 공기저장탱크 11. 스트레인 앰프 16. 공기반사판  
2. Hartmann bomb 7. H. V 12. 진공펌프 17. 분진컵  
3. 점화전극 8. 제어스위치 13. 공기압축기 18. 플로터  
4. 압력게이지 9. 압력센서 14. 가스통배이 19. 컴퓨터  
5. 솔레노이드 밸브 10. 오실로스코프 15. 가스혼합탱크

Fig. 1 Schematic diagram of Hartmann type experimental apparatus

폭발하한농도 실험은 점화에너지를 충분히 크게 한 후 PTA의 농도를 10g/m<sup>3</sup>의 단계로 감소시키면서 한 농도에서 10회 이상의 폭발실험을 했을때 1회도 폭발되지 않는 농도를 폭발하한농도로 하였으며 농도는 분진의 무게를 폭발통의 부피로 나눈 값으로 환산하였다.<sup>1), 2), 3), 10), 17)</sup>

폭발하한농도의 실험과 최소 점화에너지 측정 실험 및 화염전파 속도측정 실험시에는 폭발통 상부의 덮개와 압력센서를 분리하여 다공성의 Filterpaper Diaphragm<sup>1), 2), 6)</sup>으로 막고 실험을 하였는데 이것은 분진의 분산을 보다 균일하게 하기 위한 것이다. 예비실험을 통하여 분진의 균일한 분산조건을 찾았으며, 이때의 분진을 분산시키기 위한 공기의 압력은 0.6~0.8kg/cm<sup>2</sup>이었으며 솔레노이드 밸브의 열림시간은 0.2초, 점화 지연시간은 0.1초였다.

최소 점화에너지의 측정은 PTA의 농도를 300g/m<sup>3</sup>으로 하고 점화에너지를 점점 감소시키면서 실험하였고 하나의 점화에너지에서 10회씩 실험하여 폭발이 일어나지 않는 점을 최소 점화에너지로 하였다. 그림2는 최소 점화에너지 측정 실험 예로서 A는 전류파형이고 C는 전압파형이며 B는 전류파형 A를 적분한 것으로 A'는 Δt의 구간에 대한 적분값이며 C'는 Δt 사이의 전압치의 중간값으로 전기에너지 값은 E=ivt에서 점화에너지 E=A'xC'이다. 여기서 1A=1V이고 전압은 1000V=1V로 표시된 것이다. PTA의 폭발화염 전과속도는 점화에 충분한 일정 에너지를 이용하였고 PTA의 농도는 100g/m<sup>3</sup>~700g/m<sup>3</sup>까지로 하였고 광센서는 폭발통 내의 빛의 반사에 의한 측정오차를 줄이기 위해 폭발통 내면으로부터 약 3cm 떨어진 부분에서 φ5mm의 관을 통하여 폭발에 의한 화염을 볼 수 있도록 설치하였고 광센서를 직접 폭발통에 부착하여 측정할 경우 신호의 잡음이 커서 폭발통으로부터 일정거리를 광섬유로 연결하여 광섬유 단면에 광센서를 부착한 후 BNC 케이블을 오실로스코프에 연결하는 방법을 사용하였다. 그림3은 화염전파속도 측정 예로써 광센서

부터 얻은 신호의 시간 차이 Δt를 두 점 사이의 거리를 나누어 속도로 환산하였다. 폭발압력 및 압력상승 속도의 측정은 폭발통을 밀폐시키고 폭발통 상부에 부착한 압력센서를 이용하여 측정하였다. PTA의 농도범위는 100g/m<sup>3</sup>~500g/m<sup>3</sup>까지로 하였으며 이때의 분진 분산 공기압력은 2kg/cm<sup>2</sup>으로 조절하였고 다른 조건은 위의 실험들과 동일하게 하였으며 분진의 폭발에 의한 실제 압력은 오실로스코프 화면에 측정된 압력에서 분진분산시 공급된 압축공기의 압력을 빼주므로서 정확한 값을 얻을 수 있었다.

한편, 분진폭발에 대한 불활성 분진의 영향을<sup>7), 11)</sup>

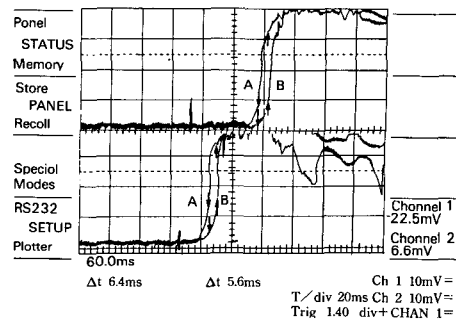


Fig. 2 Record of minimum ignition energy

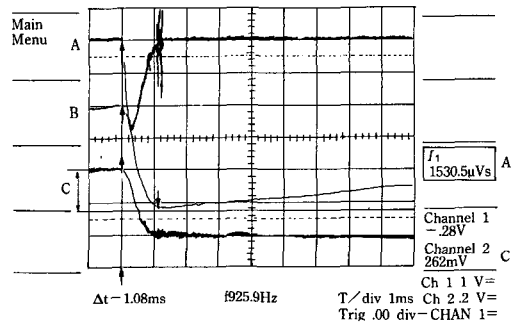


Fig. 3 Record of flame propagation velocity

알아보기 위하여 PTA에 200mesh 이하의 Talcum을 혼합하여 시료로 사용하였다. Talcum을 혼합한 분진의 폭발하한 농도측정과 폭발압력 측정 및 폭발압력 상승속도 측정방법도 앞의 방법들과 동일한 조건으로 하였는데 폭발하한농도는 Talcum의 혼합비율 10%씩 증가 시키면서 측정하였고 폭발압력 및 폭발압력 상승속도는 가연성 분진인 PTA의 농도를 120g/m<sup>3</sup>으로 유지시키고 Talcum의 혼합비율 10%씩 증가시키면서 측정하였다.

실험 순서는<sup>6), 15)</sup> 폭발통을 분진 분산컵으로 부터 분리한 후 폭발통과 분산컵을 깨끗이 한 후 전극의 간격을 방전이 잘되는 2mm로 조절한 다음 폭발통의 부피에 따라 평량한 농도의 분진을 분산컵에 잘 펼쳐 놓는다. 다시 폭발통을 결합하여 공기 저장통에 압축공기를 필요한 압력으로 채운 후 솔레노이드 밸브의 열림시간과 점화지연 시간을 결정한다. 끝으로 점화에너지를 충전시킨 후 원하는 에너지에서 점화 스위치로 폭발실험을 한다.

본 실험에 사용된 시료인 PTA는 국내 S사의 제품으로 체질을 하여 200mesh(75 μm) 이하의<sup>15)</sup> 것을 사용하였으며 기초물성은 표1과 같다.

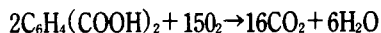
표1. PTA의 기초물성

분자식	분자량	비중	융점	연소열	형상
C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (COOH) <sub>2</sub>	166.13	1.55	421℃	4,634cal/g	백색 고체 결정

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 폭발하한 농도 및 최소 점화에너지

먼저 PTA의 완전 연소반응식을 살펴보면 다음과 같다.



폭발통의부피가 1.2ℓ이고, 공기 중 산소의 농도를 20%라고 하면 폭발통 내의 산소의 양은 0.24ℓ가 된다. 완전연소를 가정할 경우 폭발통 부피에 대한

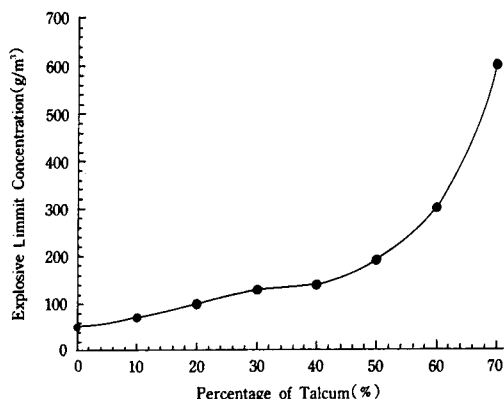


Fig. 4 Minimum explosible concentration of PTA-Talcum mixture

PTA의 당량 농도는 약237g(200g/m<sup>3</sup>)이 된다. 다음 그림4에서 순수 PTA의 폭발하한농도는 50g/m<sup>3</sup>으로 당량농도의 25% 정도가 되며, Talcum의 혼합정도를 증가시킬수록 폭발하한농도로 증가하는 현상을 보여주고 있으며 특히 Talcum의 혼합비율이 80% 이상에서는 폭발되지 않았다. 한편, Talcum의 비율이 50% 정도까지는 폭발하한농도의 증가 경향이 매우 완만하여 폭발성이 큰 분진임을 알 수 있었다. 여기서 Talcum분진은 연소성이 없는 무기물로서 혼합비율이 증가할수록 분진 폭발하한농도가 증가하는 것은 PTA 분진의 연소에 의해 생성된 열이 Talcum 분진이 흡수되어 폭발화염이 진행되는 것을 방해하기 때문인 것으로 생각된다. 한편, PTA의 수송이나 저장 등 실제 취급공정에서 폭발방지를 위해서 불활성 분진을 사용하기는 곤란하기 때문에 불활성 가스를 사용하여 분위기 중의 산소농도를 제어하는 방법을 사용하고 있으며 실온에서 한계 산소의 농도는 약 13%인 것으로 알려져 있다.<sup>16)</sup> 그리고 PTA의 최소 점화에너지의 측정결과는 약 20mj로 가연성 가스에 비하면<sup>10), 11), 12)</sup> 10~100배 정도 크기이지만 일반적인 화학분진의 최소점화에

너지와 비슷하며 PRC에서 비교한 폭발감도를<sup>1)</sup> 비교해보면 폭발감도가 2.9로 폭발성이 강한 범위에 속한다.

### 3.2 폭발압력 및 폭발압력 상승속도

분진의 폭발압력 및 압력 상승속도는 분진의 연소에 의한 에너지 및 연소속도 등과 관계가 있으며, 이에 영향을 미치는 요소들이 많이 있으나 우선 분진 폭발에 가장 중요한 요소인 농도변화를 함수로 하여 실험하였다. 일반적으로 가스의 폭발은 공기와의 당량농도보다 훨씬 큰 농도에서 나타날 것으로 생각된다. 실험결과에서 보여주는 것처럼 분진운의 농도 증가와 함께 폭발압력이 상승하고 있으나 농도가 계속 증가하면 어느 한계점 이상에서 산소의 부족으로 폭발압력이 감소할 것으로 예측되나 Hartmann식 실험장치로 실험이 곤란하고 결과의 편차가 크기 때문에 500g/m<sup>3</sup>까지만을 본 실험의 범위로 하였다. PTA의 농도가 500g/m<sup>3</sup> 정도의 농도가 되면 폭발압력이 약 7kg/cm<sup>2</sup>, 최대 폭발압력 상승속도는 300kg/cm<sup>2</sup>/sec로 가스폭발과 같은 크기의 폭발력을 갖는 것을 알 수 있었다.<sup>10)</sup> 다음 그림5는 PTA의 농도와 폭발압력의 관계를 보여주고 있으며 그림6과

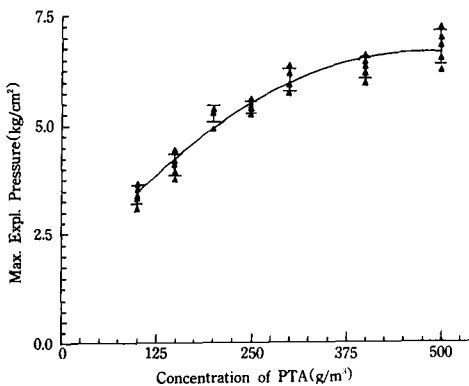


Fig. 5 Influence of concentration on explosion pressure

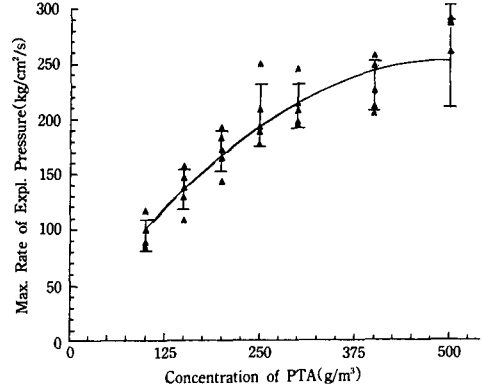


Fig. 6 Influence of concentration on maximum explosion pressure rise rate

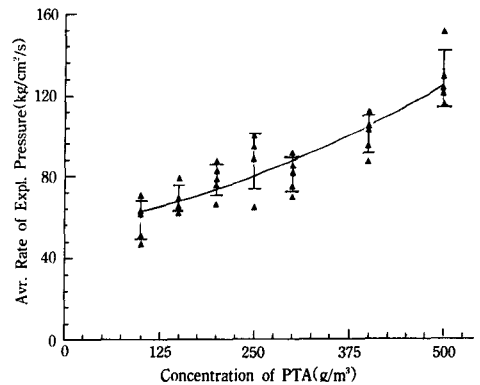


Fig. 7 Influence of concentration on average explosion pressure rise rate

그림7은 최대 폭발압력 상승속도와 평균 폭발압력 상승속도를 보여주고 있다. 한편 PTA와 불활성 분진인 Talcum을 혼합했을 때의 폭발특성을 살펴보기 위하여 PTA의 농도를 120g/m<sup>3</sup>으로 유지시키고 여기에 Talcum의 분율을 10%씩 증가시켜 60%가 될

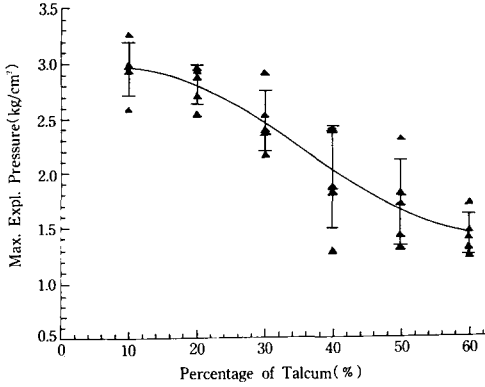


Fig. 8 Influence of inert dust on explosion pressure of PTA

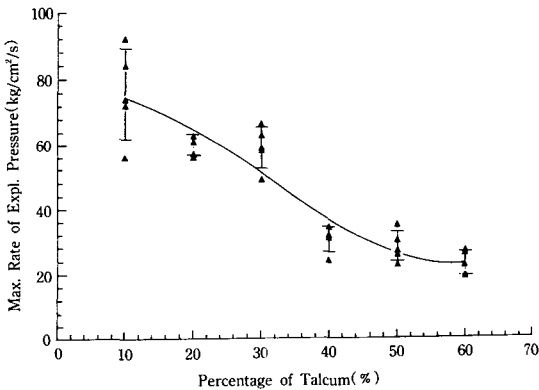


Fig. 9 Influence of inert dust on explosion pressure rate of PTA

때까지 폭발실험을 하였다. 그림8과 9에서 보는 바와 같이 Talcum의 분율이 증가할수록 폭발압력과 폭발압력 상승속도가 낮아짐을 알 수 있는데 이는 폭발하한농도 측정결과에서 설명한 것처럼 Talcum이 분진의 폭발화염전파를 방지하고 열흡수제의 역할을 하기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 미국의 PRC에서 분진폭발격렬도를<sup>1)</sup> 핏츠버그 탄진과 상

대적으로 비교한 값을 보면 폭발 격렬도가 2, 3 정도로 매우 격렬한 것을 알 수 있으며 폭발지수는 폭발강도와 폭발 격렬도를 곱한 값이며 6.67로 상대적으로 폭발 위험성이 매우 높은 분진임을 알 수 있다.

### 3.3 화염전파속도

화염전파속도는 분진입자의 연소속도와 직접적인 관계가 있으며<sup>1)</sup> 분진 자체의 물성과도 깊은 관계가 있다. 즉 분진의 입도가 작을수록 단위 무게당 입자의 표면적이 증가하게되어 연소반응이 빨라지고 농도가 증가할수록 입자간의 거리가 감소하여 화염전파가 용이하여 연소속도가 빨라지는 것으로 생각할 수 있다. 다음 그림10은 200mesh 이하의 시료에 대하여 농도를 변수로 광센서를 이용하여 화염전파속도를 측정한 것이다.

위의 설명에서 예측한 것처럼 PTA의 농도를 증가시킬수록 화염전파속도도 증가되고 있음을 알 수 있다. 또 이러한 현상을 폭발압력 및 폭발압력 상승속도와 같은 경향을 보여주고 있음을 볼 수 있다. 한편, 분진의 농도를 계속 증가시킬 경우 화염전파속도가 점점 증가하나 어느 점을 지나면 연소에

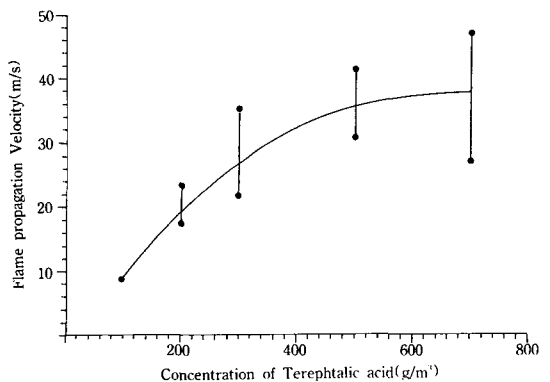


Fig. 10 Influence of concentration on flame propagation velocity

필요한 산소양의 부족으로 화염전파속도가 감소할 것으로 생각된다.

분진의 폭발속도는 가스폭발보다 훨씬 늦기 때문에 광센서를 사용하여 분진폭발을 감지하고 이에 대응하여 분진폭발의 방지 및 방호계획을 세울 수 있을 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

PTA의 폭발실험을 통하여 분진폭발의 특성을 연구하는데 필요한 기초지식을 습득할 수 있었으며 실험을 통하여 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

- 1) PTA의 폭발 하한농도는  $50\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 최소 점화에너지는  $20\text{mj}$ 이었다.
- 2) 불활성 분진인 Talcum은 heat sink의 역할을 하여 Talcum의 분율이 80% 이상에서는 폭발이 일어나지 않는다.
- 3) PTA의 농도의 증가와 함께 폭발압력 및 폭발압력 상승속도가 증가하였고 화염전파 속도도 증가하여 분진의 폭발특성은 분진입자의 연소속도와 관계가 있음을 알 수 있었다.
- 4) PTA는 폭발감도가 2.9 폭발격렬도는 2.3, 폭발지수는 6.67로 폭발 위험성이 매우 큰 분진이다.

#### 参 考 文 献

1. P. Field "Dust Explosion", Elsevier Sci. Pub., Amsterdam, (1982)
2. K. N. Palmer., "Dust Explosion and Fires", Chapman & Hall, London, (1973)
3. 종합안전공학연구소 편저, "화재·폭발 위험성의 측정법", 일간공업신문사, 동경, (1977)
4. Richard E. Cocks "Dust Explosion: Prevention and control" chemical engineer-ing P. 94, (1979).
5. M. Nifuku., 분진운의 착화에 관한 연구", Vol.26, No.3, (1987)
6. Henry G. Dorsett, Jr Murray Jacobson, John Nagy, Roger P. Williams, "Laboratory equipment and Test Procedure for Evaluating Explosibility of Dust", RI 5624 US Bureau of Mines, (1960)
7. M. Naito "분진은 왜 폭발하는가?" 화학기술지 MDL(JPN) 21[9], (1983)
8. Waylcmd C. Griffith "Dust Explosion" Ann. Rev. Fluid Mech, (1978)
9. Rolf. K. Eckhoff "Pressure development during explosion in clouds of dust from grain" Fire Research. 1(1977/78) 71. 85.
10. 안전공학협회 "안전공학 편람" 코로나사 (1980)
11. 김용욱 "최신 화공안전공학" 형설출판사 (1976)
12. 안전공학협회 "폭발" 해문당 (1983)
13. D. Kitagawa "폭발재해의 해석" 일간공업신문사 (1980)
14. W. Ishihama, H. Enomoto "Explosion characteristics of coal dust-rock dust mixture" 일본 광업회지 (1983. 10)
15. ASTM-E-789-86.
16. Symposium on Industrial dust explosion "ASTM PCN 04-958000-31 (1986)
17. T. Matsuidhl "분진 폭발 위험성과 그 방지대책" 산업안전연구소 기술자료 RIIS-TN-69-1.
18. A. D. Craven, M. G. Foster "Dust explosion prevention" Combustion & Flame. 11(5)408-414(1967)
19. M. Nifuku, 문정기 외 "분진폭발 실험에 있어서의 농도 평가" 분체와 공업 20(2)40-46 (1988)

## 후 기

본 연구내용은 과학기술처의 연구비 지원으로 일본의 공해자원연구소와 국제공동연구로 수행한 “가연성 더스트의 폭발 방지에 관한 연구” 결과 중의 일부이며 이후 계속적인 분진 폭발연구에 관심이 있기를 기대한다.