

활성탄의 부유중 폭발 위험성에 관한 연구  
A Study on the Explosion Riskiness with  
Flying of Activated Carbon

김 정 환\*  
Jeong Hwan Kim\*  
현 성 호\*  
Seong Ho Hyun\*  
이 창 우\*\*  
Chang Woo Lee\*\*  
함 영 민\*\*  
Yeong Min Hahm\*\*

Abstract

We investigated the weight loss according to temperature using TGA in order to find the thermal hazard of brand-new activated-carbon and disused activated-carbon dusts, and the properties of dust explosion in variation of the specific surface area of their dust with the same particle size. Using Hartman's dust explosion apparatus which estimate dust explosion by electric ignition after making dust disperse by compressed air, dust explosion experiments have been conducted by varying concentration and size of activated carbon dust. The explosion pressure of both activated carbon increased as the specific surface area increased. The results indicated that brand-new activated-carbon of which specific surface area was larger three to four times than that of disused activated-carbon was much easier of dust explosion.

\*경민대학 소방안전관리과

\* Dept. of Fire Protection Management, Kyung Min College, Euijeongbu, 480-702, Korea

\*\* 단국대학교 공과대학 화학공학과

\*\* Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Dankook Univ., Seoul 140-714, Korea

## 국문 요약

순수 활성탄과 흡착제로 사용된 동종의 폐활성탄 분진의 온도에 따른 열적 안정성을 조사하기 위하여 열중량 분석기(TGA)를 이용하여 온도에 따른 무게감량을 조사하고, 이들의 입도별 비표면적을 측정하여 동일한 입도를 갖는 순수 활성탄과 폐활성탄 분진의 비표면적 변화에 따른 분진폭발 특성을 살펴보고자 하였다. 분진폭발 시험 장치로는 압축공기에 의해 분진을 강제 분산시킨 후 전기 점화원에 의해 분진의 폭발성을 측정하는 Hartman 식 측정장치를 이용하여 순수 활성탄과 폐활성탄 분진의 입도별로 분진의 농도를 변화시켜가며 분진폭발실험을 행하였다. 실험 결과 입도가 작을수록 분진폭발압력이 크며, 동일한 입도에서 폐활성탄에 비해 비표면적이 3~4배 정도 큰 순수 활성탄이 상대적으로 분진폭발 발생이 용이하며, 폭발압력 또한 높은 것으로 나타났다.

### 1. 서론

활성탄은 20세기 초부터 공업적으로 생산되어 화학공업의 급속한 발전과 함께 촉매 또는 용매회수용, 분리·정제공정 및 식품, 의약, 화학공업 등 모든 산업분야에서 흡착제로 중요한 위치를 차지하고 있다. 특히 최근에는 환경오염 문제와 관련한 대기오염, 수질오염, 악취 제거 등 공해방지와 환경보전, 상수 고도처리와 같은 수처리용 흡착제 및 의료용 흡착제로서 폭넓은 분야에 걸쳐 그 응용범위가 확대되고 있는 실정이다. 아울러 활성탄은 공극 구조가 매우 발달한 탄소재료로서 촉매 담체로도 널리 이용되고 있다. 이러한 활성탄은 그 형상에 따라 분말 활성탄과 입상 활성탄으로 대별되며, 입도가 100mesh 이하의 것을 분말로 간주하고 있다. 한편 국내에서 생산되는 활성탄과 외국에서 수입되는 양을 합쳐 연간 소비되는 활성탄은 입상 활성탄의 경우 약 10,000m/t이며, 분말 활성탄의 경우에는 약 6,000m/t 정도이다. 특히 흡착제 등의 용도로 활성탄의 응용범위가 확대되면서 국내·외 소비량은 매년 증가 추세에 있다.<sup>1,2)</sup> 또한, 다양한 용도로 인해 소비량이 날로 증가하고 있는 활성탄 중 분말 활성탄은 입도가 작고 가연성이 있기 때문에 취급 시 분진폭발의 위험성을 상당부분

내포하고 있다. 그러나 국내에서 활성탄의 자연발화에 관한 연구는 행한 바 있으나<sup>3)</sup> 분진폭발에 관한 위험성 연구는 매우 미진한 형편이며, 특히 흡착제로 이용된 폐활성탄의 경우 사용 전·후의 위험성의 변화에 대한 연구는 아직 보고된 바 없다.

한편, 일반적으로 분진의 크기가  $10^{-5}$ cm 이하인 경우 에어로졸을 형성하여 대기 중에 분산되며 이러한 상태의 분진은 가연성 가스와 같은 위험성을 갖는다. 에어로졸 형태의 분진은 가연성 분진이 지연성 가스인 대기 중에 부유한 상태에서 점화원에 의해 발화되면 대형 폭발로 전이할 수 있는 것이다. 또한, 이러한 분진폭발은 부유 분진에 의한 폭발뿐 아니라 부유 분진에 의한 1차폭발의 압력파에 의하여 퇴적분진의 부유에 대해 2차, 3차의 연쇄폭발을 유도함으로써 그 피해가 증폭되는 경우가 있으므로 분진폭발은 연쇄폭발을 방지하는 것이 보다 중요한 방지대책이다. 또한 이러한 분진폭발의 메카니즘에 영향을 미치는 인자는 분진의 화학적 조성, 활성화에너지, 표준 연소열, 분진의 입도와 형상, 분산상태, 수분함량, 비표면적, 존재하는 산소의 양, 기체 중 분진의 농도 등이 중요한 변수가 된다<sup>4-6)</sup>. 그러므

로 분진의 종류나 입도 등의 특성에 따라 위험성을 평가하는 것은 대단히 중요한 일이다.

따라서 본 연구에서는 순수 활성탄과 흡착제로 사용된 동종의 폐활성탄 분진의 부유중 폭발 위험성을 조사하고자 하였다. 먼저 순수 활성탄과 폐활성탄 분진의 온도에 따른 열적 안정성을 조사하기 위하여 열중량 분석기(TGA)를 이용하여 온도에 따른 무게감량을 조사하고, BET를 이용하여 입도별 비표면적을 측정함으로써 동일한 입도를 갖는 순수 활성탄과 폐활성탄 분진의 비표면적 변화를 살펴보고자 하였다. 또한, 순수 활성탄과 폐활성탄 분진의 폭발 위험성을 조사하기 위하여 압축공기에 의해 분진을 강제 분산시킨 후 전기 점화에 의해 폭발 여부를 측정하는 장치로 미국에서 개발되어 현재 분진의 폭발 위험성을 측정하는 장치로 가장 널리 이용되고 있는 Hartman 식<sup>7)</sup> 측정장치로서 입도별로 분진의 농도를 변화시키면서 분진폭발실험을 수행함으로써 활성탄의 분진폭발 방지대책의 기초자료로 이용하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 시료의 준비

본 실험에 사용한 시료는 한번도 사용된 적이 없는 활성탄, 즉 순수 활성탄과 동종의 활성탄으로 흡착제로 장시간 사용함에 따른 재생이 불가능하여 폐기 처분하는 활성탄, 즉 폐활성탄을 170/200, 200/230, 230/270 및 270/325 mesh로 체가름하여 사용하였다. 이와 같이 준비된 시료를 건조기를 이용하여 110℃에서 2시간 건조시킨 후 데시케이터(dessicator)에서 48시간 방냉시킨 후 실험에 사용하였다.

### 2.2. 기기분석 및 분진폭발실험

본 실험에서 사용한 순수 활성탄과 폐활성탄의 열분해 위험성을 평가하기 위하여 열중량 분석기(TGA) [Model : STD 2960, TA Instruments, U.S.A.]를 이용하여 온도에 따른 무게감량을 측정하였으며, 순수 활성탄과 폐활성탄의 비표면적과 평균기공크기를 측정하고자 Micromeritics Co.의 ASAP 2000을 사용하여 BET법으로 측정하였다. 비표면적 측정에 앞서 시료는 120℃로 유지된 dry oven에서 24시간 건조한 후 0.2g정도를 평량하여 sample tube에 넣고 온도를 250℃까지 유지시키며 압력이 10 $\mu$ mHg이하에서 degassing을 완료하였다. 이후 sample tube를 analysis port로 옮겨 760mmHg 상태에서 질소기체(N<sub>2</sub>)를 흡착시켜 흡착등온선을 얻었다. 이때 비교압력(relative pressure)이 0.198인 조건에서 흡착등온선을 구하여 five point 법으로 비표면적을 측정하였고, 비교압력이 0.9946인 조건에서 기공 부피와 기공 크기를 측정하였다.

또한 순수 활성탄과 폐활성탄의 분진폭발실험은 5 Kg/cm<sup>2</sup>로 일정하게 유지되도록 압축기를 이용하여 압축공기로 강제 분산시킨 후 전기 점화에 의해 폭발성을 측정하는 Hartman 식 분진폭발 시험장치를 이용하였으며, 이에 따른 장치와 실험방법은 전보<sup>8)</sup>와 동일하다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 열중량분석기(TGA)에 의한 무게감량 특성

먼저 온도에 따른 시료의 열분해 특성을 조사하기 위하여 270/325mesh의 입도분포를 갖는 순수 활성탄과 폐활성탄을 승온속도 10℃/min, 분위기기체인 N<sub>2</sub>를 60 ml/min의 속

도로 주입하면서 시료의 무게감량을 나타낸 TGA 분석결과를 Fig.1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 순수 활성탄과 폐활성탄의 무게감량에는 약간의 차이를 보이고 있으나 공통적으로 150°C까지는 수분의 감량을 보이고 있다. 또한 두 시료 모두 건조기에서 동일한 조건으로 건조하였음에도 불구하고 약 4wt%의 수분감량을 보이고 있는 폐활성탄에 비해 순수 활성탄의 수분감량이 13wt%로 다소 크게 나타나고 있다. 이는 순수 활성탄의 경우 미세 기공의 발달로 비표면적이 폐활성탄에 비해 상대적으로 커서 보다 많은 수분을 함유하였기 때문으로 사료된다. 한편 폐활성탄은 250~450°C까지 중량감소가 나타나고 있으며, 이는 미세공을 막고 있던 흡착 유기물의 감량에 의한 것으로 생각되며, 450°C 이상에서도 약간의 무게감량을 보이고 있다. 반면, 순수 활성탄의 경우 폐활성탄과는 달리 처음 150°C까지는 급격한 무게 감량을 보이지만 그 이상의 온도에서는 무게감량이 거의 없음을 볼 수 있다.

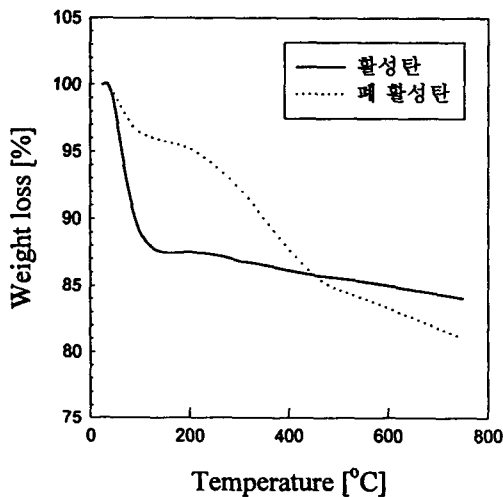


Fig.1. 순수 활성탄과 폐활성탄의 열분해 곡선. [270/325mesh, 승온속도: 10°C/min, 분위기 기체: N<sub>2</sub>]

### 3.2. 비표면적과 평균기공크기 측정

3.1.절과 관련하여 순수 활성탄과 폐활성탄의 입도별 비표면적과 평균세공반경을 조사하기 위해 BET법으로 측정하였으며 그 결과를 Fig.2에 나타내었다. Fig.2에서 보는 바와 같이 순수 활성탄과 폐활성탄 모두 입도가 작아질수록 비표면적은 다소 증가하고 있으나, 동일한 입도를 갖고 있더라도 폐활성탄에 비해 순수 활성탄의 경우 비표면적에 있어 약 3~4배 정도의 큰 값을 보이고 있다. 또한 폐활성탄의 평균 세공반경이 순수 활성탄에 비하여 증가된 것을 볼 수 있다. 이는 폐활성탄의 경우 활성탄 세공에 존재하는 활성점(active site)에 흡착질이 흡착되면서 미세공을 막음으로서 세공반경의 증대와 비표면적의 현저한 감소를 보이는 것으로 생각된다. 이와 같은 세공반경과 비표면적의 차이는 시료가 부유층 폭발할 경우 상당한 영향을 미칠 것으로 사료된다.

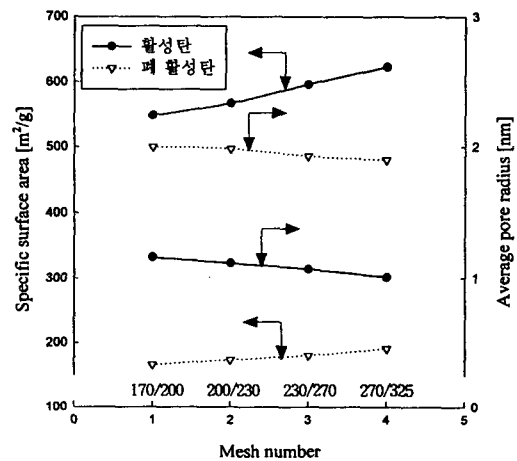


Fig.2. 입도별 시료의 비표면적과 평균세공반경.

### 3.3. Hartman식 시험장치에 의한 활성탄 분진의 부유중 폭발실험

순수 활성탄과 폐활성탄의 분진폭발 특성을 조사하기 위하여 170/200, 200/230, 230/270 및 270/325 mesh로 체가름된 시료의 농도를 0.3 ~ 1.3 mg/cm<sup>3</sup>로 변화시키면서 동일한 입도에 대해 10회 이상 폭발실험을 반복해서 수행하여 각각에 대한 분진폭발 가능성을 조사하였다. 한편 10회의 분진폭발압력 측정시 매 실험마다 결과값이 약간씩 상이하게 측정되는 관계로 Q-test<sup>9)</sup>에 의해 측정값의 범위를 계산하였다. Q-test는 의심스러운 값과 이 값과 가장 가까운 값의 차를 구하여 측정값의 범위로서 나눈 비율, Q를 얻어 이 값이 Q<sub>0.90</sub> 값보다 크면 버리고 작으면 취하는 방식으로 얻은 값들을 평균하여 폭발압력을 나타내었다.

#### 3.3.1. 순수 활성탄의 분진폭발 특성

Fig.3은 순수 활성탄 분진의 농도를 0.3~0.56mg/cm<sup>3</sup>로 변화시키며 입도별 분진폭발 실험을 수행하고 Osilloscope를 이용하여 폭발당시에 얻어진 압력파형으로 부터 분진폭발 당시의 폭발압력을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 입도가 작을수록 폭발압력은 증가하는 것을 볼 수 있으며, 순수 활성탄 분진의 농도가 증가할수록 폭발압력은 증가하고 있다. 또한, 순수 활성탄 분진의 농도가 증가할수록 입도에 따른 폭발압력의 차이가 많이 나는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 순수 활성탄 분진의 입자가 미세해지면 그만큼 분진이 부유하기 쉽고 BET 분석 결과에서 나타난 바와 같이 비표면적이 증가하여 산소와의 접촉면적이 넓어지기 때문에 부유중 폭발이 일어나기 쉬운 것으로 생각된다. 특히, 순수 활성탄 270/325mesh에서의 분진의 농도가 0.625mg/cm<sup>3</sup>가 되었을 때 특별한 점화원 없이 단순히 강제 부유시키는 과정에서 폭발현상이 나타났

다. 이때의 폭발압력을 측정코자 했으나, 압력 센서로부터 폭발압력이 잡히지 않아 측정이 불가능하였다. 이러한 폭발은 단순한 물리적 폭발로 보이며, 육안 관찰로 미루어 보아 상당한 위험성이 있을 것으로 사료된다.

#### 3.3.2. 폐활성탄의 분진폭발 특성

Fig.4는 폐활성탄 분진의 농도를 0.5~1.25mg/cm<sup>3</sup>로 변화시키며 입도별 폭발압력을

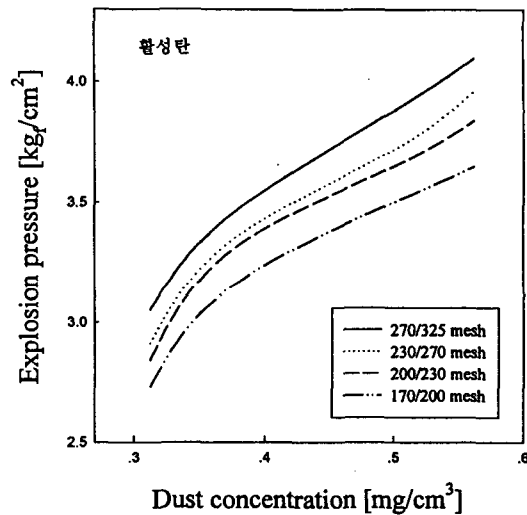


Fig.3. 순수 활성탄 분진의 농도에 따른 폭발압력.

나타낸 것이다. 폐활성탄의 경우에도 순수 활성탄의 경우와 동일한 경향성을 보이고 있으나, 순수한 활성탄에 비해 농도가 높은 차이를 나타내고 있다. 이는 앞서 측정된 순수 활성탄과 폐활성탄 분진의 비표면적의 차이에서 발생하는 현상으로 비표면적이 상대적으로 큰 순수 활성탄의 경우 점화원에 의해 공기중의 산소와 쉽게 반응할 수 있다는 것을 보여주는 것이다. 반면에 유기물이 흡착된 폐활성탄의 경우는 공기중의 산소와 반응할 수 있는 비표면적이 감소되기 때문에 상대적으로 분진의 농도가 높은 조건에서 폭발이 관찰되는 것으

로 사료된다. 폐활성탄의 경우도 순수 활성탄의 경우와 마찬가지로 일정농도 이상에서는 점화원 없이 부유중 폭발이 나타났으며, 이 경우에도 분진의 농도는 3~4배 정도 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 폐활성탄에 비해 순수 활성탄의 경우 더욱 위험한 것으로 사료되며, 추후 이와 같은 물리적 폭발현상에 관한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

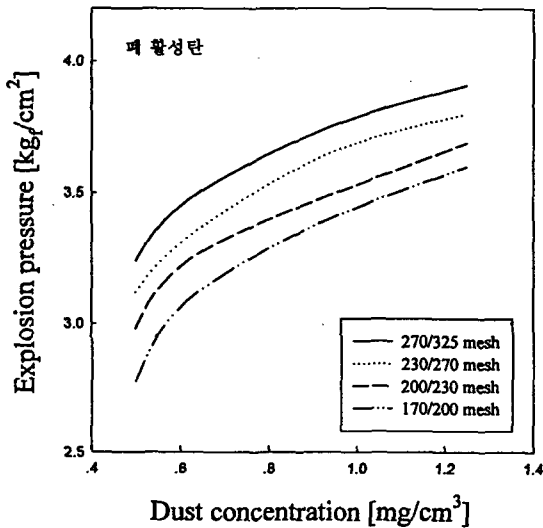


Fig. 4. 폐활성탄 분진의 농도에 따른 폭발압력.

착질의 흡착으로 인하여 순수 활성탄 보다 비표면적이 상대적으로 작기 때문에 사료된다. 따라서 분진폭발 기구에서 설명한 바와 같이 비표면적은 분진폭발의 중요한 변수로 작용하기 때문에 동일 입도에서 비표면적이 3~4배 큰 순수 활성탄이 폐활성탄에 비해 상대적으로 분진폭발의 위험성이 크고, 폭발압력도 높은 것으로 생각된다.

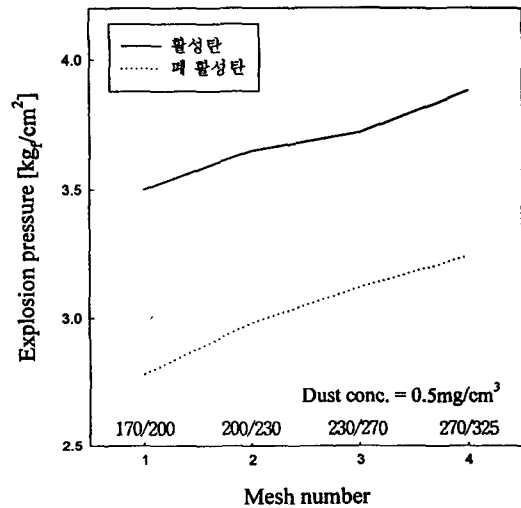


Fig. 5. 순수 활성탄과 폐활성탄 분진의 입도분포별 폭발압력.

### 3.3.3. 순수 활성탄과 폐활성탄의 입도분포에 따른 분진폭발 특성

본 연구에서 사용된 두가지 활성탄의 입도에 따른 분진폭발 특성을 조사하기 위하여 순수 활성탄과 폐활성탄 분진의 농도를  $0.5\text{mg}/\text{cm}^3$ 로 고정하고 분진폭발실험을 실시하여 각 입도별 폭발압력을 측정하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 모든 입도에서 순수 활성탄 분진의 폭발압력이 폐활성탄보다 높음을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞서도 언급한 바와 같이 폐활성탄의 경우 흡

## 5. 결 론

순수 활성탄과 흡착제로 사용된 동종의 폐활성탄 분진의 비표면적과 Hartman 식 시험장치를 이용한 순수 활성탄과 폐활성탄 분진의 입도별로 분진의 농도에 따른 분진폭발 특성을 조사한 결과 순수 활성탄이 폐활성탄에 비해 비표면적은 3~4배 정도 크게 나타났으며, 비표면적이 큰 순수 활성탄의 경우 폐활성탄 보다 적은 농도에서 폭발이 관찰되었고 폭발압력도 크게 나타났다. 따라서 순수 활성탄이 폐활

성탄 보다 더욱 폭발 위험성이 크며. 또한 두 시료 모두 비교적 높은 일정 농도이상에서 분진운이 조성될 경우 점화원 없이 단순한 물리적 폭발 현상이 나타났으며, 활성탄의 이러한 물리적 폭발현상을 규명하기 위해 이에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 한국공업화학회, 흡착제와 그의 활용에 관한 work shop(I,II,III), (1991, 1993, 1995)
2. 박영태 역, 활성탄 -기초와 응용-, 동화기술 (1997)
3. 목연수, 최재욱, 김상렬, 최광재, 입상활성탄의 자연발화에 관한 연구, 한국산업안전학회지, 6(4), 66 (1991)
4. John E.B., Emergency Management of Hazardous Materials Incidents, NFPA (1995)
5. 중앙소방학교, Hartman식 분진폭발 실험을 통한 분진의 위험성분석, 소방기술 (1996)
6. K.N.Palmer, "Dust Explosion and Fire", Chapman & Hall, London.(1973)
7. I. Hartman 외 2인. RI 4835 U.S. Bureau of Mines(1951)
8. 이창우, 함영민, 김정환, 현성호, "가축사료의 분진폭발 위험성에 관한 연구", 한국화재·소방 학회지, 12(2), (1998)
9. 최재성, 분석화학, 동화기술, p45 (1992)