

VOC 흡착 분말활성탄의 폭발특성

김성규 · 이경덕 · 김영수* · 신창섭

충북대학교 안전공학과 · *신성대학 소방안전관리과

1. 서 론

휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOC)은 연소배기가스중의 NO_x, SO_x와 함께 대기환경오염의 주 요인이 되는 물질로서, 제거방법의 하나로 활성탄 흡착법을 주로 사용한다. 흡착제로서 석탄이나 나무에서 제조된 활성탄(Activated Carbon)을 사용하는데, 활성탄 자체는 폭발하지 않으나 어느 정도 유기증기를 흡착하면 분산상태에서 폭발을 일으키는 것으로 알려져 있다. 그러나, 국내에서 활성탄에 대한 연구는 자연발화위험성에 대해서만 연구가 진행되었을 뿐, 휘발성유기화합물이 흡착된 활성탄에 대한 연구는 전무한 상태이다.

Cashdollar 등은 휘발성물질의 양에 따라 graphite와 polyethylene 혼합물과 석탄분진에 대한 폭발하한농도를 결정할 수 있음을 나타내었고, Hertzberg 등은 석탄분진과 유기분진의 경우 폭발하한농도 부근에서 연소속도는 매우 느려서 각 분진입자로부터 가연성물질들이 완전히 휘발되어 연소가 진행되기 전에 화염면의 예가열영역(preheating zone)에서 휘발성분들이 공기와 혼합되기 때문에 폭발하한농도에서 화염은 예혼합가스 화염(premixed gas flame)임을 나타내었다. 또한 분진폭발의 용이성(sensitivity)과 격렬성(violence)은 분진의 물리적·화학적 성질, 분진농도, 분진의 균질성과 난류, 점화원, 용기의 기하학적 형태, 그리고, 분진운의 상태에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 장판, 자동차, 범퍼 등을 생산하고 있는 공장의 캘린더(calender)공정에서 발생하는 유기화합물을 제거하기 위한 공기정화장치의 흡착/재생장치에 사용중인 활성탄이 유기증기를 흡착했을 때의 위험성을 평가하기 위해, 현재 사용중인 입상활성탄과 같은 전구물질의 분말활성탄에 Toluene을 흡착시켜 흡착량에 따른 분진폭발특성, 난류의 영향, 열적위험성을 평가하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 분진폭발장치는 Hartmann식 분진폭발장치로서 Fig. 1과 같으며 실험에서 사용한 활성탄은 전구물질이 석탄(coal)계인 200mesh이하의 분말활성탄을 사용하였다. Toluene을 흡착시키기 위하여 200(H)×300(L)×300(W)mm, 18 l 체적을 갖는 두께 10mm의 아크릴재질의 밀폐용기와 지름 900mm, 높이 20mm 내열유리의 시료접시로

구성된 흡착활성탄 제조장치를 사용하였다.

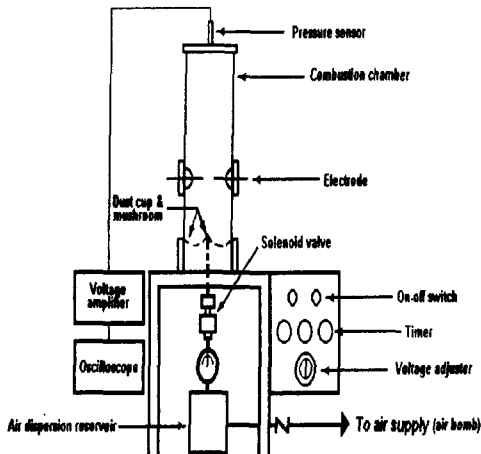


Fig. 1 Schematic of Hartmann tube

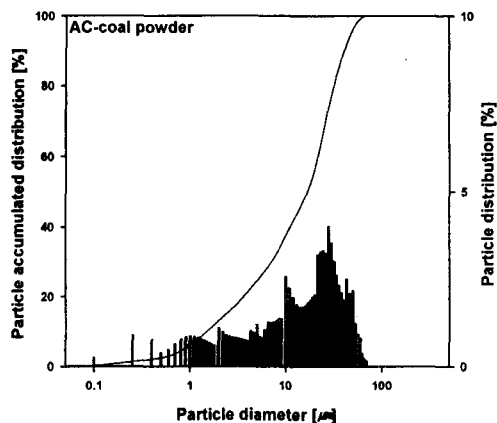


Fig. 2 Particle size distribution of AC-coal powder

또한, 실험에서 사용된 분말AC-coal은 105℃로 24시간 건조시킨 후 데시게이터(desiccator)에 보관하였다가, 흡착활성탄 제조장치에서 Toluene을 흡착시켜 사용하였으며, 흡착량은 흡착된 Toluene양(mg)/분말활성탄양(g)으로 표시하였다. 폭발하한농도는 아크릴 폭발통을 이용하여 상부를 통기성이 좋은 거름종이로 덮고, 미리 설정된 폭발조건하에서 실험을 실시하였다. 분진폭발로 인하여 거름종이가 파열되었거나, 폭발통 상부까지 화염이 전파되었을 경우를 폭발로 판정하였으며, 폭발이 일어난 분진의 무게에서 0.1g씩 낮추고, 폭발하한농도 부근에서는 0.02g씩 낮추거나 높여가면서 10회반복 실험하여 한번도 폭발하지 않았을 경우 폭발통 내부의 체적(0.0012m³)으로 나누어 폭발하한농도(g/m³)로 결정하였다. 폭발압력과 압력상승속도는 stainless steel 폭발통에 설치된 압력센서로부터 폭발압력을 감지 압력증속기를 통하여 오실로스코프에 기록된다. 폭발하한농도로부터 2.0g까지 무게를 변화시켜 각각의 무게에서 3회 반복실험하여 최대값을 폭발압력과 압력상승속도로 구하였다. 또한, SDT2960(simultaneous DTA-TGA)을 이용하여 실험대상시료의 무게 10~20g에서 승온속도 10℃/min, 온도범위 30~800℃, 공기 분위기 하에서 열적위험성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분말AC-coal의 폭발특성

분말AC-coal은 70μm이하의 입자로서 입자크기와 입도분포를 Fig. 2에 나타내었으며 점화용 변압기로부터 인가전압 3kV, 전극간격 4mm, 분사압력 0.6~3.0kg/cm², 분사시간 0.4s, 지연시간 0.4~1.4s, 점화시간 0.4s의 폭발조건에서 실험한 결과 폭발하지 않았다. 이것은 활성탄이 탄소질물질을 약 500℃로 가열하여 고정탄소만 남는 탄화공정과 800~1000℃에서 탄화물에 미세 세공구조를 발달시키는 활성화공정을 거쳐 제조되기[14]

때문이다. Fig. 3의 열분해곡선에서 분말AC-coal의 산화에 의한 급격한 무게감소와 발열반응이 360~550°C에서 일어났다. 또한, TGA 열분해곡선에서 자연발화온도는 무게 100%로 유지되는 기준선과 열분해곡선상의 굴곡지점에서의 tangent 기울기와 교차되는 지점으로 자연발화온도는 500°C로 나타났다.

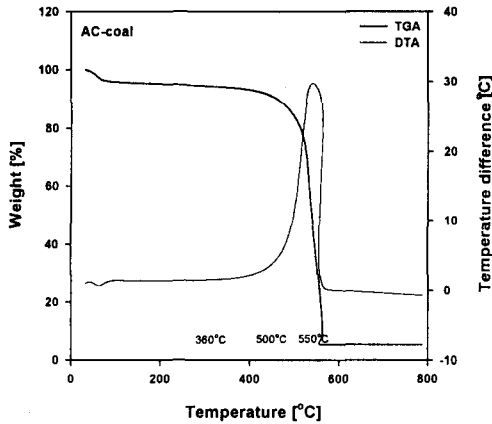


Fig. 3 Thermogram of AC-coal powder

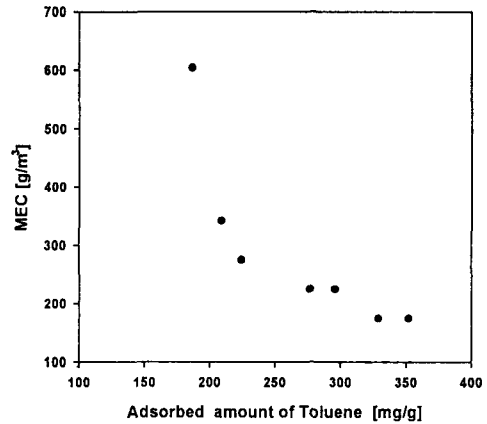


Fig. 4 Effect of the adsorbed amount of Toluene on MEC

3.2 흡착분말활성탄의 폭발특성

1) 폭발하한농도에 대한 흡착량의 영향

Fig. 4에서 보는 것처럼 분말 AC-coal의 Toluene 흡착량이 187, 209, 225, 352mg/g으로 많아질수록 각각의 폭발하한농도(MEC)는 604, 342, 275, 175g/m³으로 낮아짐을 보였다. Table. 1과 Fig. 5에서는 Toluene 흡착량이 많아질수록 분말AC-coal의 폭발하한농도에서 흡착된 Toluene의 농도는 Toluene 가연성가스의 폭발하한농도 1.27vol%를 25°C 1기압일 때 질량농도로 바꾼 농도 44g/m³와 거의 일치함을 보였다. 따라서, 가연성분진에서 비휘발성물질의 질량분을 P를 알면, 즉, 분말AC-coal 활성탄의 Toluene 흡착량을 알면 폭발하한농도를 식(1)에 의해 예측할 수 있게 된다.

$$MEC = C_{volatiles} [100/(100 - P)] = 44g/m^3 [100/(100 - P)] \quad (1)$$

그러나, Toluene 흡착량이 낮아질수록 폭발하한농도의 값이 식(1)에 의해 예측된 값보다 점점 높게 나타나는데, 이것은 흡착량이 낮아질수록 점화전극부근에서 분말AC-coal로부터 휘발되는 Toluene의 농도가 작아져 화염이 스스로 전파되지 않기 때문이며, 점화원으로부터 화염전파에 충분한 농도를 형성하기 위해서는 점화전극 부근에 그 만큼의 Toluene이 흡착된 분말AC-coal 입자들이 필요하게 되어 폭발하한농도가 증가하게 되는 것이다. 이러한 경향은 흡착량이 낮아진다고 해서 계속되지 않는다. Table. 1에서 Toluene 흡착량이 134mg/g인 분말AC-coal에서 폭발이 일어나지 않은 것처럼 점

화전극부근의 분진농도가 너무 높아지게 되면 각각의 입자에 대한 점화에너지가 상대적으로 작아지게 되어 분말AC-coal로부터 Toluene이 휘발되기 어려워질 뿐만 아니라 입자간격이 너무 좁아지게 되어 오히려 점화원으로부터 분진입자로의 열전달을 방해하므로 폭발이 일어나지 않는다. 따라서, 폭발을 일으킬 수 있는 한계흡착량이 존재하게 된다.

Table. 1 Mass fraction for MEC

Adsorbed amount of Toluene [mg/g]	MEC [g/m ³]			AC-coal mass fraction [%]	MEC by Eq.(1)
	Total	AC-coal	Toluene		
134	-	-	-	88	366
187	604	509	95	84	275
209	342	283	59	83	258
225	275	224	51	82	244
277	225	176	49	78	200
296	225	174	51	77	191
329	175	132	43	75	176
352	175	129	46	74	169

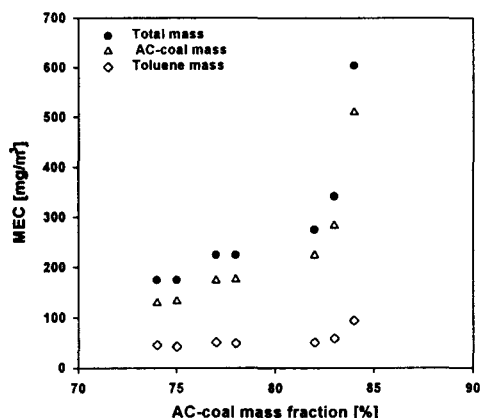


Fig. 5 Mass fraction for MEC

2) 폭발압력 및 압력상승속도에 대한 흡착량의 영향

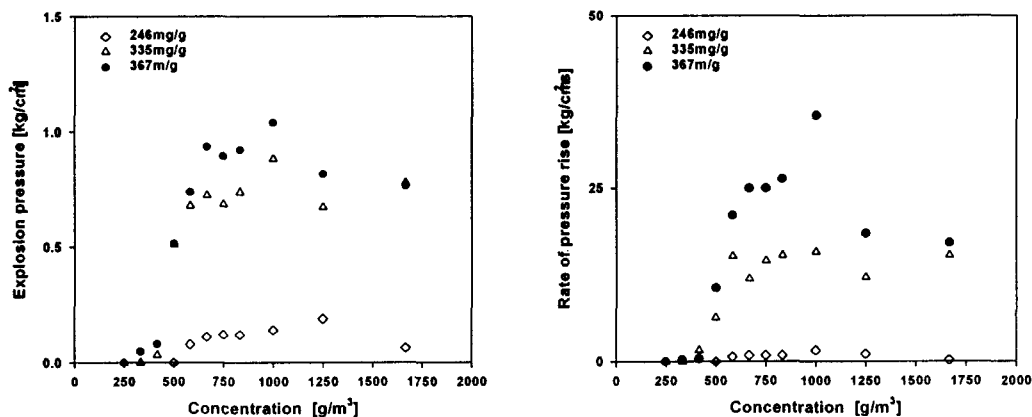


Fig. 6 The effect of the adsorbed amount of Toluene on AC-coal powder on explosion pressure and rate of pressure rise.

폭발압력과 압력상승속도에 대한 흡착량의 영향은 Fig. 6에 나타내었다. 이때, 분말 AC-coal의 Toluene 흡착량이 246, 335, 367mg/g 증가할수록 주어진 점화에너지에 의해 휘발된 Toluene 가연성혼합가스의 농도를 증가시켜 화학양론조성이 될 때까지 연소반응속도증가를 수반하므로 폭발압력과 압력상승속도가 상승되었다.

3) 열적위험성

분말AC-coal의 Toluene 흡착량에 따른 열분해곡선을 Fig. 7에 나타내었다. 흡착량이 246, 335, 367mg/g으로 증가함에 따라 30~340°C에서 Toluene 탈착에 의한 흡열반응과 19.3%, 21.5%, 21.5%씩 무게가 감소하였다. 이러한 무게감소는 대기 중에 가연성혼합가스 형성을 의미하고 흡착량에 따른 폭발압력과 압력상승속도는 Toluene 흡착량에 의존함을 알 수 있다. Toluene 탈착에 의한 흡열반응 후, 360°C부근에서 분말AC-coal의 무게감소와 함께 발열반응이 일어났다.

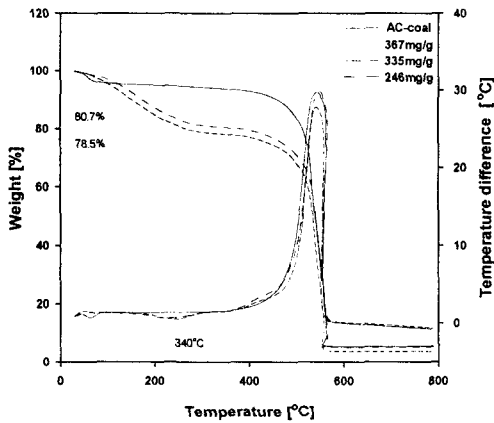


Fig. 7 Thermogram of adsorbed AC-coal powder with Toluene

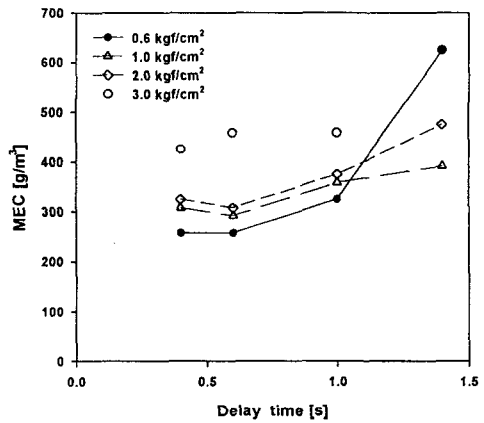


Fig. 8 Effect of turbulence on MEC

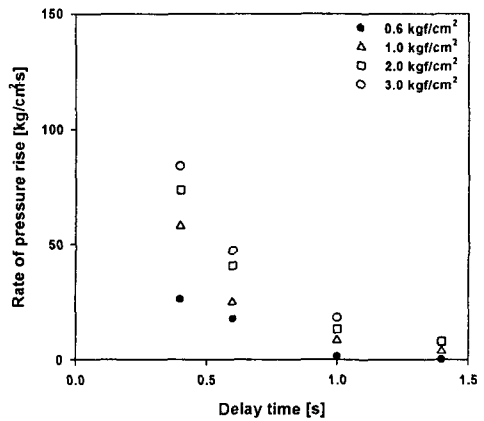
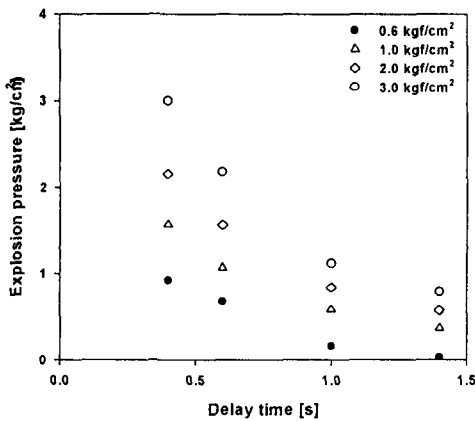


Fig. 9 Effect of turbulence on explosible pressure and rate of explosion rise

4) 난류의 영향

폭발하한농도에 대한 난류의 영향은 Fig. 8에서 보는 바와 같이, 폭발통 내부에서 분진운 형성을 위한 분사압력, 즉 초기난류의 증가는 점화원으로부터 분말AC-coal 입자로

의 열전달을 방해하여 휘발성물질을 감소시켜 Toluene 흡착량 357mg/g인 AC-coal의 폭발하한농도가 258, 308, 325, 425g/m³으로 증가함을 알 수 있다. 초기 분사압력에 비해 지연시간이 너무 길게되면 분진입자의 침강(sedimentation)으로 폭발하한농도가 증가함을 알 수 있다. 폭발압력과 압력상승속도에 대한 난류의 영향은 Fig. 9에서 처럼 Toluene 흡착량 367mg/g인 AC-coal의 농도 833g/m³에서 분사압력이 0.6kg/cm²에서 3.0kg/cm²로 증가함에 따라 난류의 정도가 커져서 폭발시 연소입자와 미연소 입자상호간의 혼합을 증가시켜 Toluene의 휘발을 용이하게 하여 폭발압력과 압력상승속도는 1.04kg/cm²와 35.6kg/cm²·s에서 3.21kg/cm²와 113.3kg/cm²·s로 비례하여 증가하였고, 지연시간이 길어질수록 난류의 정도가 작아지게 되어 폭발압력과 압력상승속도가 감소함을 알 수 있다.

5. 결론

- 1) 분말AC-coal 자체는 폭발하지 않았으나, Toluene을 187mg/g이상 흡착한 경우 폭발을 일으켰다. 폭발하한농도에서 흡착된 Toluene의 농도는 Toluene 가연성가스의 폭발하한농도 44g/m³와 거의 일치하였으며, 비가연성물질인 분말AC-coal의 질량분율을 P라 할 때 폭발하한농도는 $MEC=44g/m^3[100/(100-P)]$ 에 의해 예측할 수 있다. 흡착량이 증가함에 따라 폭발하한농도가 낮아지고 폭발압력과 압력상승속도는 증가하였다.
- 2) 열분해폭선에서 흡착량이 증가함에 따라 30~340℃에서 Toluene 탈착에 의한 흡열반응과 무게감소율이 증가하였으며, 분말AC-coal의 산화에 의한 발열반응이 360~500℃일어났다. 무게감소율의 증가로부터 폭발압력과 압력상승속도는 Toluene 흡착량에 의존함 알 수 있다
- 3) 분사압력과 지연시간의 증가는 점화원으로부터 분진입자로의 열전달을 방해하고 입자의 침강현상으로 폭발하한농도는 증가한 반면, 분사압력의 증가는 폭발시 연소입자와 미연소입자의 혼합을 용이하게 하여 폭발압력과 압력상승속도는 증가하였다.

참고문헌

1. 신창섭외 5인, 방폭공학, 동화기술, 2000.
2. Ekhooff, R. K., Dust Explosions in the Process Industries, Butterworth Heinemann, 1991.
3. Bartknecht, W., Explosions, Springer-Verlag, 1981.
4. Suzin, Y., Buettner, L. C., and Le Duc, C. A., "Characterizing the Ignition Process of Activated Carbon", *Carbon*, Vol. 37, pp. 335~336, 1999.
5. Cashdollar, K. L., "Overview of Dust Explosibility Characteristics", *J. Loss Prevention*, Vol. 13, pp. 183~189, 2000.