

KIO₃ 침착활성탄의 황화수소 흡착 성능평가

김준석 · 김명찬 · 강은진 · 김명수[†]

명지대학교 공과대학 화학공학과
(2003년 2월 4일 접수 ; 2003년 3월 10일 채택)

H₂S Adsorption Characteristics of KIO₃ Impregnated Activated Carbon

Jun-Suk Kim · Myung-Chan Kim · Eun-Jin Kang · Myung-Soo Kim[†]

Department of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

[†]e-mail : myungkim@mju.ac.kr

(Received February 4, 2003 ; Accepted March 10, 2003)

Abstract : The impregnated activated carbons were prepared by the incipient wetness method with the contents of KIO₃ varied from 1.0~10 wt% as the impregnation material. The specific surface area and micropore volume of the rice hulls activated carbon were 2,600~2,800 m²/g and 1.1~1.4 cc/g, respectively. With increasing the contents of impregnation materials, the surface area and micropore volume decreased by 3~21%. However, The amounts of hydrogen sulfide adsorbed increased by 2.1~2.8 times depending on the impregnation content. The optimum contents of KIO₃ were 2.4 wt%. Although the breakthrough time and adsorption capacity of hydrogen sulfide decreased with increasing temperature in the case of the unimpregnated activated carbons, they increased by 1.2~3.2 times for the case of the impregnated activated carbons. The optimum aspect ratio(L/D) was 1.0 and the adsorption amount of hydrogen sulfide enhanced with increasing the gas flow rate. The regeneration temperature was determined as 400°C from the TGA experiment. The adsorption capacity of hydrogen sulfide with the impregnated activated carbon decreased gradually as the regeneration continued. The hydrogen sulfide adsorption amount of the regenerated activated carbon up to 4 times was still higher than that of the unimpregnated activated carbon.

Keywords : impregnated activated carbon, hydrogen sulfide, adsorption capacity.

1. 서론

악취는 황화수소·메르캅탄류·아민류 기타 자극성 있는 기체상 물질이 사람의 후각을 자극하여 불쾌감과 혐오감을 주는 냄새로, 인체에 미치는 위험성보다는 정신적·심리적 피해를 끼

치는 감각공해로서, 악취의 원인이 되는 물질은 그 종류가 대단히 많을 뿐만 아니라 악취물질간의 복합적인 작용이나 후각의 개인적인 차이 등으로 인하여 느끼는 정도나 피해정도를 일률적으로 나타내기가 어려워 대기오염 중에서도 가장 까다롭고 해결하기 어려운 공해문제중의 하

나로 취급하고 있다[1].

이러한 악취는 다양한 산업시설과 공정, 그리고 생활주변에서 광범위하게 발생함에 따라, 대기환경보전법에서는 문제발생 여지가 큰 대기오염물질 배출시설에 대해서는 배출허용기준을 정하여 엄격하게 관리하고 있으며, 대기오염물질 배출시설 이외의 일정 시설들을 생활악취시설로 규정하여 관리하고 있다[2].

이러한 악취물질은 단독으로 발생하여 피해를 주는 것이 아니라 악취물질 서로간의 상호작용으로 인하여 복합적으로 작용하여 측정과 탈취에 많은 어려움이 따르고 있다. 탈취기술은 제거하고자 하는 물질의 물리적·화학적 성질에 따라 그 방법이 다양하며, 최근에는 생물공학기술의 급격한 발전에 따라 미생물에 의한 생물학적 탈취가 개발·보급되고 있다. 그러나 탈취기술의 국내 개발수준은 연구차원에서만 진행되어 악취공해문제 해결을 위한 적절한 탈취대책을 제공하지 못하고 있으며, 시범적으로 하수처리장에 설치된 약액세정이나 활성탄 등의 탈취방법이 이용되지만 운영여건의 한계로 인해 탈취기능이 거의 상실되고 있어, 탈취기술의 상용화가 절실한 실정이다[3-5].

악취물질을 제거하기 위한 탈취방법 중 흡착법이 가장 많이 이용되는데 흡착제로 사용되는 활성탄은 그 광범한 표면의 물리적 힘이나 기공으로의 내부확산, 모세관 응축 등의 작용에 의하여 많은 물질을 상당히 대량으로 흡착 보전할 수 있다. 또한, 활성탄은 소수성의 중성물질에 대하여 특히 효과적인 흡착성을 발휘하기 때문에 탈취용 흡착제로 많이 사용되어 왔지만 중성 성분 이외의 산성 성분이나 염기성 성분에 대하여 더욱 효과적인 흡착작용을 일으키는 흡착제의 출현이 요구되고 있다. 따라서 활성탄 표면을 개질하거나 화학약품을 침착시켜 특정 성분에 대한 선택적 흡착성을 가지는 악취가스 제거용 활성탄이 많이 이용되고 있다. 활성탄에 대한 흡착 친화도가 낮은 가스의 경우에는 화학적 침착물을 첨가한 침착활성탄을 사용함으로써 탈취효과도 증대시키고, 탈취조작 운전시간의 연장으로 인한 경제적인 탈취조작이 가능하다[6].

따라서 본 연구에서는 국내 자원이 풍부한 왕겨를 이용하여 활성탄을 제조하고, 황화수소를 효과적으로 제거하기 위하여 탈취방법 중 물리적 성질을 이용한 흡착법과 화학적 성질을 이용한 흡착제에 약품을 처리한 방법을 병행하여 사

용하였다. 약품은 산성기체 흡착에 이용되는 물질 중 KIO_3 를 왕겨활성탄에 침착시켜서 사용하였고, 최적의 침착량을 결정하여 흡착 온도와 활성탄의 충전량, 가스유량의 변화에 따른 황화수소 흡착 특성을 비교·분석하였다. 또한, 황화수소로 포화된 침착활성탄의 재생실험을 통하여 재사용 가능성을 검토하였다.

2. 실험

2.1. 실험 재료

왕겨활성탄을 제조하기 위하여 사용한 KOH는 순도 85%의 Junsei Chemical의 것을 사용하였다. 침착시약으로 사용한 약품은 KIO_3 (순도 99.5%, (주) 대정)를 사용하였다. 실험에 사용된 황화수소는 제이씨가스에서 제조된 것으로, 황화수소가 질소에 1000ppm으로 희석된 것을 사용하였다

2.2. 활성탄 및 KIO_3 침착활성탄의 제조

비표면적과 미세공이 잘 발달된 활성탄을 제조하기 위하여 온도를 850°C , 활성화 시간을 3 시간으로 고정하고 탄화왕겨와 KOH를 1~6의 비율로 변화시켜 왕겨활성탄을 제조하였다[7-10]. 침착활성탄의 제조는 KIO_3 침착시약을 왕겨활성탄 7 g에 침착농도를 1~10 wt%로 변화시키면서 incipient wetness법을 이용하여 첨가한 후, 상온에서 증류수를 증발시켜 침착물질을 활성탄에 침착시켰다. 얻어진 시료를 110°C oven에서 24 시간 건조하여 침착활성탄을 제조하였다[11,12].

제조된 활성탄의 비표면적 및 세공구조는 Quantachrome사의 automated adsorption apparatus (Autosorb-1)를 이용하여 77 K에서의 N_2 흡착자료로부터 구해졌다. 비표면적은 P/P_0 를 0.075, 0.1, 0.125로 잡고 BET식으로 구하였으며, 평균 세공직경(average pore diameter)과 세공분포(pore size distribution)는 Dubinin Astakhov (DA)식에 의해 계산되었다. 또한 중간세공과 거대세공의 용적 및 분포는 Barrett, Joyner 및 Hallenda (BJH)방법으로 계산되었다[13].

2.3. 황화수소 흡착 및 재생 실험

활성탄에 침착된 KIO_3 의 침착농도에 따른 황

황화수소의 흡착특성을 살펴보기 위하여 질소에 희석된 황화수소의 유량을 44 ml/min으로 고정하고, aspect ratio는 약 1로 고정하여 실온에서 실험을 수행하였다. 가장 우수한 황화수소 제거 성능을 보인 침착농도 조건에서 흡착시 온도에 따른 흡착특성은 반응기의 온도를 27, 50, 80 및 150°C로 변화시키면서 비침착활성탄과 KIO₃ 침착활성탄을 비교하였다. 또한 황성탄의 충전량에 따른 흡착능을 살펴보기 위하여 aspect ratio(L/D)를 0.53, 1, 2.1 및 2.7로 변화시켜 실험하였고 황화수소 가스의 유량에 따른 흡착능은 16, 44, 76, 108 ml/min의 유량을 유량계로 일정하게 주입하면서 실험을 수행하였다[14]. 이때 내경 15 mm, 외경 17 mm, 길이 600 mm의 반응기를 사용하였으며, 반응기를 통과한 황화수소의 농도는 (주) Donam Instrument의 GC(Gas Chromatography)의 TCD (Thermal Conductivity Detector)를 이용하여 측정하였다. 그리고 황화수소로 포화된 침착활성탄의 재사용의 조건을 정하기 위하여 열중량 분석기(TGA)를 통하여 800°C까지 온도를 올리면서 전체적인 무게감량을 측정하였다. 이를 통하여 침착활성탄의 최적의 재생온도를 400°C로 결정하고 흡착이 끝난 활성탄에 질소를 주입하면서 재생하였으며, 27°C의 온도에서 44 ml/min의 유량, 0.39 g의 KIO₃ 침착활성탄에 황화수소를 주입하면서 흡착과 재생 실험을 반복 수행하였다[15].

3. 결과 및 고찰

왕겨를 공기를 차단시키고 질소 분위기에서 700°C에서 2 시간 탄화시켜 얻어진 비표면적이

약 220 m²/g의 탄화왕겨에 4:1(KOH:char)의 중량비로 KOH활성화에 의해 2,600~2,800 m²/g 정도의 비표면적과 1.1~1.4 cc/g의 미세세공부피를 가지는 왕겨활성탄을 제조하였다. Table 1은 KOH 함량에 따른 비표면적, 세공구조 그리고 수율을 나타낸 것으로, 흡착질이 기체인 경우 활성탄은 micro-pore가 잘 발달되어야 하는데 이에 부합하는 활성탄을 제조하였다[16]. KOH의 함량이 4:1까지 증가하다가 그 이상의 비율에서 감소한다. 이는 KOH의 함량이 많아져 활성탄의 미세세공 벽이 깨지면서 중간 및 거대세공이 상대적으로 많이 생김으로 비표면적과 미세세공부피가 감소되기 때문이라고 판단되었다[10]. 따라서 비표면적이 크고 미세세공이 잘 발달된 왕겨활성탄을 얻기 위한 최적의 조건은 KOH:char의 비율 4:1로 850°C에서 3 시간 활성화로 결정하였다.

왕겨활성탄에 KIO₃ 화학약품을 침착시킨 침착활성탄에서 농도에 따른 물성과 황화수소 흡착능을 비교·분석하였다. Fig. 1에 왕겨활성탄과 KIO₃ 침착활성탄의 비표면적(m²/g)과 H₂S 흡착량(mg/g)을 비교하였다. 그림에서 보듯이 침착물질의 함량이 1.0~10 wt.%로 변화함에 따라 비표면적은 3~21% 감소하지만 흡착량은 2.1~2.8 배 증가함을 알 수 있다. 침착물질의 농도에 따른 비표면적의 감소는 침착물질에 의한 pore filling 현상 때문이라고 판단되며[17], 황화수소의 흡착능의 증가는 일반활성탄에서 일어나는 탄소-탄소간의 반데르 발스 힘에 의한 물리적인 흡착외에 침착물질의 첨가에 따른 황화수소에 대한 다양한 반응 메커니즘이 존재하기 때문이라고 판단되었다[18].

또한 그림을 통하여 황화수소 흡착에 있어서

Table 1. Effect of KOH Amount on Specific Surface Area and Pore Size Distribution of Activated Carbons

Sample (KOH:Char)	Surface area (m ² /g)	Pore diameter (Å)	Pore volume (cc/g)		Yield (%)
			~ 20 Å	20 ~ 2000 Å	
1 : 1	565	14.8	0.305	0.112	24.4
2 : 1	1,355	16.4	0.608	0.243	21.3
4 : 1	2,823	18.0	1.415	0.353	17.6
6 : 1	2,780	18.0	1.374	0.873	10.7

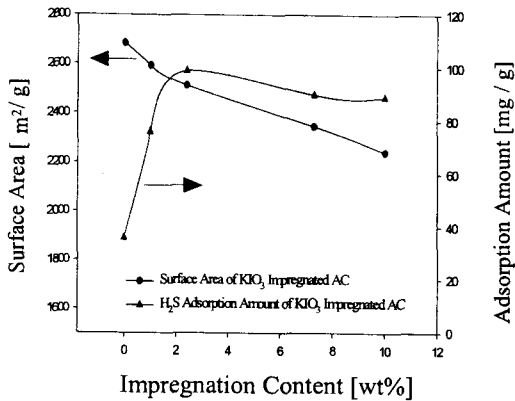


Fig. 1. Specific surface area and H₂S adsorption amount of impregnated activated carbons as a function of KIO₃ impregnation content.

가장 우수한 흡착능을 보이는 침착농도가 있음을 알 수 있었다. 1.0 wt%일 때 흡착량은 비침착활성탄의 2 배 수준인 76 mg/g으로 가장 낮았으며, 농도가 증감함에 따라 흡착량은 2.4 wt%에서 최고치인 99 mg/g을 나타내었고, 그 이후로는 침착함량이 높아질수록 흡착량이 감소하는 경향을 보였다. 따라서 흡착능을 향상시키는 침착물질에 따른 최적 농도가 존재함을 알 수 있었고, 높은 농도에서 pore filling에 의한 비표면적의 감소에 따른 영향으로 인한 흡착량의 감소효과를 나타내었으며, 낮은 농도에서는 비표면적과 미세세공부피의 감소는 적었으나 침착물질과 황화수소 간의 반응에 관여하는 양이 너무 적어 흡착량이 감소하는 것으로 판단되었다.

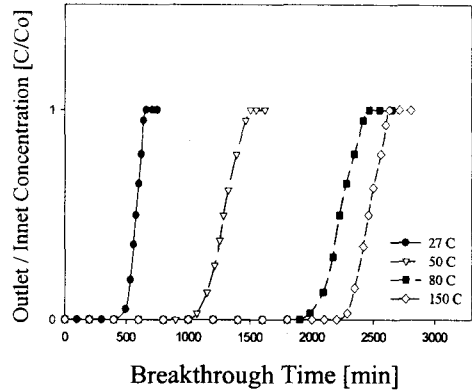


Fig. 2. H₂S adsorption capacity of impregnated activated carbons at different temperatures.

가장 우수한 흡착능을 보인 2.4 wt% KIO₃ 침착활성탄의 흡착온도에 대한 황화수소 가스 흡착특성을 왕겨활성탄과 비교하였다. 침착활성탄의 흡착특성은 Fig. 2와 Table 2에 나타내낸 것처럼 온도가 증가할수록 흡착량이 증가하는 경향을 나타내는데, 물리흡착보다 활성화에너지가 요구되는 화학흡착의 의존도가 크기 때문에 온도가 증가할수록 흡착량이 상온에서 보다 약 1.2~3.2 배 증가함을 알 수 있었다. 반면에 물리흡착이 지배하는 비침착활성탄의 흡착특성은 Fig. 3와 Table 2에 나타낸 것처럼, 물리흡착시의 발열반응의 영향으로 온도가 증가할수록 흡착이 억제되어 온도에 반비례하는 경향을 나타내었다[19]. 따라서 고온의 조건일수록 일반활성탄보다 침착활성탄을 사용한 황화수소의 흡착 처리가 더 효율적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

Table 2. H₂S Adsorption Amount of Impregnated and Pristine Activated Carbons at Different Temperatures

Temperature (°C)	H ₂ S adsorption amount of pristine activated carbon (mg/g)	H ₂ S adsorption amount of impregnated activated carbon (mg/g)
27	36	99
50	31	219
80	26	379
150	17	419

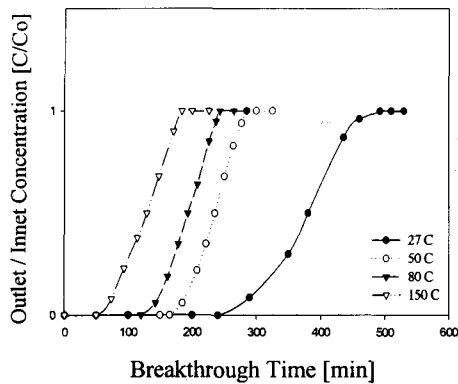


Fig. 3. H₂S adsorption capacity of impregnated activated carbons at different temperatures.

Bed 높이에 따른 황화수소 가스의 흡착특성을 살펴보기 위하여 침착활성탄의 양을 0.18, 0.39, 0.60, 0.87 g으로 하여 흡착실험을 수행한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보듯이 0.18 g을 충전한 L/D=0.53인 경우에는 L/D=1 이상인 것보다 낮은 흡착능을 보였다. 이는 bed 높이가 너무 낮아서, 주입되는 가스의 일부는 흡착되지 않고 반응기를 빠져나가기 때문으로 설명할 수 있었다. 또한 Table 3에 나타난 단위 g당 흡착되는 황화수소의 흡착량은 L/D=1 이상에서는 aspect ratio(L/D)를 증가시키더라도 파과시간이 길어질 뿐 수렴된 값을 나타냄을 알 수 있었다.

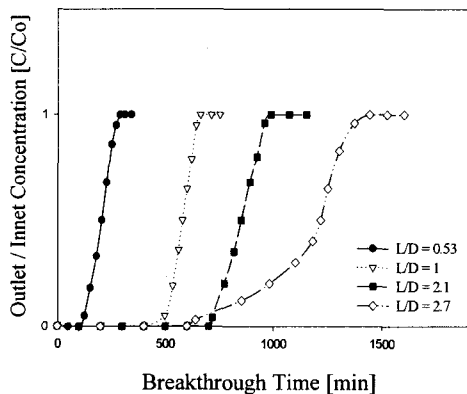


Fig. 4. Breakthrough curves of impregnated activated carbons with various aspect ratios.

Table 3. H₂S Adsorption Amount of Impregnated Activated Carbons with Various Aspect Ratios

Aspect ratio (L/D)	H ₂ S adsorption amount (mg/g)
0.53	76
1.0	99
2.1	94
2.7	93

Fig. 5는 KIO₃ 침착활성탄의 가스유량의 변화에 따른 황화수소 흡착능을 비교한 것이다. 그림에서 나타내었듯이 유량이 증가할수록 반응기의 활성탄을 통과하여 나온 황화수소의 파과시간이 783, 495, 286 및 214 min으로 단축되는 것을 볼 수 있으나, 단위 g당 흡착량(Table 4)은 오히려 증가함을 알 수 있었다. 이는 유속이 빨라질수록 활성탄 입자의 표면에서의 농도 구배인 기체막이 얇아지면서 활성탄 세공 내부로의 확산이 빨리 이루어지기 때문에 황화수소와 침착물질 간의 접촉이 빨리 이루어져 반응이 촉진되어 활성탄 표면이나 세공에 흡착되는 양이 많아짐으로 인하여 생기는 결과라고 판단되었다.

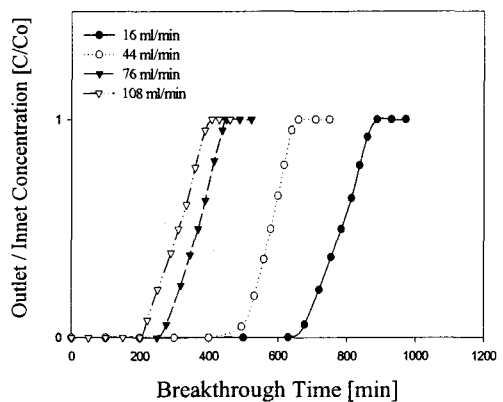


Fig. 5. H₂S adsorption capacity of impregnated activated carbons with various flow rates.

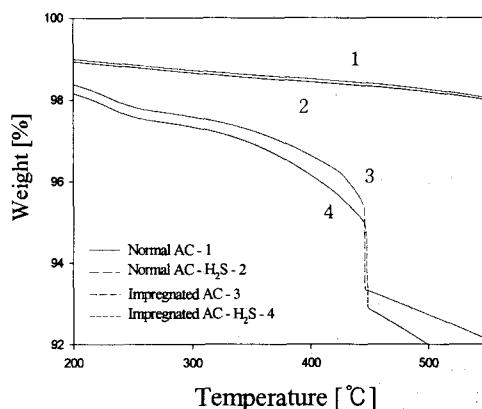
Table 4. H₂S Adsorption Amount of Impregnated Activated Carbons with Various Flow Rates

Flow rate (ml/min)	H ₂ S adsorption amount (mg/g)
16	50
44	99
76	109
108	130

침착활성탄의 재생 조건을 찾기 위하여 열중량 분석기(TGA)를 통한 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로 활성탄 표면은 산소 또는 산화성 기체와 반응하여 국부적으로 산화가 되며, 표면 화학구조의 분석 결과에 의하면 활성탄의 화학구조는 200°C 이하에서는 안정한 것으로 알려져 있다. 또한 활성탄의 열분해 실험 결과를 보면 온도를 증가시키면서 배출되는 기체의 성분을 분석한 결과, 탈착되는 성분은 이산화탄소, 일산화탄소와 수증기로 나타났다. 그리고 탈착되는 성분 중 이산화탄소는 일산화탄소에 비하여 덜 안정된 상태이며 300°C 정도에서 이산화탄소가 열분해되어 탈착되고, 이때 산소와 결합한 표면의 화학구조는 주로 카르복실기와 페놀기 등으로 되어있다. 반면에 일산화탄소는 고온에서도 상당히 안정한 상태로 존재하며 600°C 이상의 온도에서 열분해되어 탈착되는 것으로 나타났다. 이러한 결과들과 비교하여 볼 때, 200°C 이하에서는 활성탄 내에 존재하는 수분이 대부분 증발한 것으로 보여지며 300°C 부근까지의 무게감량은 주로 활성탄 표면에 형성된 화학적인 기능기와 결합한 산소가 이산화탄소의 형태로 떨어져 나가기 때문으로 사료된다[17].

황화수소의 흡착 전·후의 비침착활성탄과 침착활성탄에 대한 열중량 분석결과를 나타낸 Fig. 6과 정량적인 실험 데이터를 분석하여 보면 다음과 같다. 800°C에서의 최종 무게 감소량의 경우를 보면 H₂S가 흡착된 침착활성탄(15.92%) > 침착활성탄(13.67%) > H₂S가 흡착된 비침착활성탄(3.95%) > 비침착활성탄(3.90%) 순으로 무게감소율이 나타났다. 비침착활성탄에 흡착된 황화수소는 물리흡착에 의한 흡착이기 때문에 시료의 보관 과정에서 대부분

의 황화수소가 탈착되어 열중량 분석에서 황화수소의 흡착에 따른 차이가 미미하였다. 한편, 침착활성탄에 흡착된 황화수소는 약 400°C 부근에서 일어나는 것으로 관찰되었고, 침착물질인 KIO₃의 분해는 약 450°C에서 일어나는 급격한 무게 감소로 설명할 수 있었다. 따라서 황화수소가 흡착된 KIO₃ 침착활성탄의 재생은 400°C 부근에서 운전하는 것이 적합할 것으로 판단되었다.

Fig. 6. TGA curves of KIO₃ impregnated and normal activated carbons with and without H₂S adsorption.

400°C에서 재생한 후 흡착실험을 수행한 결과를 Table 5에 나타내었다. 표에서 보듯이 재생이 반복될수록 활성탄의 흡착능이 점차로 감소하는 것을 볼 수 있다. 3 회 재생하여 황화수소를 흡착시켰을 때, 초기 흡착능의 80% 정도로

Table 5. H₂S Adsorption Amount of Impregnated Activated Carbon with Consecutive Regenerations

Number of regeneration	H ₂ S adsorption amount (mg/g)
Fresh	99
1	97
2	87
3	78
4	63
5	29

비침착활성탄보다 높은 흡착능을 나타내었다. 따라서 침착활성탄의 재사용 가능성을 3 회까지 확인할 수 있었으며 4 회 이상 재생된 활성탄의 흡착능은 급격히 감소하였음을 볼 수 있는데, 이는 흡착 및 재생 실험을 반복하면서 활성탄 표면이나 내부의 미세세공에 흡착된 황화수소가 누적되어 모두 탈리되지 않았기 때문으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구에서는 왕겨를 원료로 KOH 약품 활성화를 통하여 고성능의 활성탄을 제조하였고, 황화수소 흡착성능을 향상시키기 위하여 KIO₃를 침착시켜 침착활성탄을 제조하고 흡착성능을 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. KOH:char의 비를 4:1로 하고 850 °C에서 3시간 동안 활성화하는 방법으로 비표면적이 2,600~2,800 m²/g이고 미세세공부피가 1.1~1.4 cc/g인 고성능의 활성탄을 제조하였다.

2. KIO₃를 첨가한 침착활성탄에서는, 침착시약의 함량이 증가할수록 비표면적은 약 3~21% 감소하였으나 황화수소의 흡착량은 비침착활성탄보다 2.1~2.8 배 증가되었다. 침착시약의 함량이 증가할수록 비표면적이 감소하는 것은 침착물질이 활성탄의 세공을 막는 pore filling 현상 때문이라고 판단되며, 황화수소 흡착량의 증가는 침착물질과 황화수소와의 다양한 반응메카니즘 때문이라고 판단되었다.

3. 흡착온도를 27~150°C 증가시켰을 때, 비침착활성탄에서는 흡착량이 감소하였으나 침착활성탄은 약 1.2~3.2 배 증가하였다. 비침착활성탄의 경우 물리흡착에 의한 흡착이 대부분이기 때문에 발열반응이 주류를 이루어 온도가 증가할수록 흡착을 억제하기 때문이며, 침착활성탄의 경우는 대부분 활성화에너지가 요구되는 화학흡착에 의한 흡착이기 때문에 반대의 결과가 얻어졌다고 설명할 수 있었다.

4. Aspect ratio가 1 이상일 때는 파과시간은 길어지나 단위 g당 흡착량은 거의 변화가 없었으며, L/D가 0.53일 때만 낮은 흡착량을 보여었는데, bed 높이가 너무 낮아 주입되는 가스가 흡착제에 충분히 흡착되지 않고 반응기를 통과하기 때문으로 판단되었다.

5. 가스의 유량이 증가할수록 파과시간은 짧

아지지만 흡착능은 증가하는 경향을 보였다. 유량이 빨라질수록 기체막이 얇아지면서 가스가 세공내로의 확산이 촉진되면서 생기는 현상이라고 판단되었다.

6. 열중량 분석을 통하여 KIO₃의 분해는 약 450°C에서 일어나는 것을 확인하였고, 400°C 부근에서 황화수소의 탈착이 이루어지는 것으로 판단되어 침착활성탄의 재생 온도를 400°C로 결정하였다.

7. 400°C에서 재생된 침착활성탄의 흡착실험을 통하여 재생이 반복될수록 침착활성탄의 황화수소 흡착량은 점점 감소하지만, 3 회까지는 비침착활성탄의 흡착능보다는 우수함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 명지대학교 천연 신기능성 소재 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. F. Adib, A. Bagreev, and T. J. Bandosz, *Interface Sci.*, **214**, 407 (1999).
2. 오광중, 김영식, 김규광, 김미경, 김재용, 박영구, 서종원, 손병현, 오인교, 정진도, "환경시리즈 5 - 대기오염개론", pp. 254~259, 동화기술, 서울 (1998).
3. 대기환경연구회, "대기오염개론", pp. 223~225, 동화기술, 서울 (1995).
4. R. W. Boubel, D. L. Fox, D. B. Turner, and A. C. Stern, "Fundamentals of air pollution", 3rd ed., pp. 223~225, 동화기술, 서울 (2000).
5. 김종석, 김문찬, 박상찬, 박영구, 박정호, 서정민, 이주상, 정진도, 조익준, 차규석, 최정부, 황갑성, "대기오염방지기술", pp. 391~404, 동화기술, 서울 (2000).
6. 박성원, "트리에칠렌디아민-침착활성탄에 의한 메칠아요다이드의 흡·탈착 특성 연구", 한국과학기술원 박사학위논문 (1994).
7. 김준석, *J. Korean Oil Chemists Soc.*, **19**, 213 (2002).

8. K. Gergova and S. Eser, *Carbon*, **34**, 879 (1996).
9. 고용식, “국산왕겨를 이용한 활성탄 제조 및 흡착특성 연구”, 인하대학교 석사학위논문 (1993).
10. 홍중철, “왕겨로부터 고비표면적의 활성탄 제조 및 흡착특성”, 명지대학교 석사학위논문 (1998).
11. A. A. Malik, P. R. Meddings, A. Patel, and K. M. Thomas, *Carbon*, **34**, 439 (1996).
12. 신창섭, “저오염·무공해 공정기술 ; 사업장 등에서의 악취제거기술개발”, 1차년도 연차 보고서, 충북대학교, 환경부 (1997).
13. S. Lowell and J. E. Shields, “Powder Surface Area and Porosity”, 3rd ed. Chapman & Hall (1991).
14. K. H. Kim and C. S. Shin, *Carbon*, **2**, 109 (2001).
15. 한국화학연구소, “침착활성탄소의 제조와 활용에 관한 연구(II)”, *과학기술처*, 서울 (1988).
16. C. N. Satterfield, “Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice”, 2nd ed., McGraw-Hill, Singapore (1991).
17. 조기철, “ Na_2CO_3 침착활성탄을 이용한 H_2S 제거에 관한 연구”, 부산대학교 석사학위 논문 (1999).
18. M. P. Cal, B. W. Strickler, and A. A. Lizzio, *Carbon*, **38**, 1757 (2000).
19. 이석기, 차선영, 김한수, 박영성, 대전대학교 환경문제연구소 논문집 제4호, p. 31 (1999).