

킬레이트 관능기가 도입된 활성탄소의 이산화탄소 흡착거동

장동일 · 박수진[†]

인하대학교 화학과

(2010년 3월 10일 접수, 2010년 5월 17일 채택)

CO₂ Adsorption Behaviors of Activated Carbons Modified by Chelating Groups

Dong-Il Jang and Soo-Jin Park[†]

Department of Chemistry, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received March 10, 2010; Accepted May 17, 2010)

본 연구에서는 킬레이트 관능기가 도입된 활성탄소의 이산화탄소 흡착거동에 관하여 고찰하였다. 활성탄소에 peroxide의 열분해를 통해 glycidyl methacrylate를 그래프트 중합한 후 에폭사이드기에 킬레이트 관능기로서 diethylene triamine을 도입하였다. 킬레이트 관능기가 처리된 활성탄소의 표면특성은 scanning electron microscope와 X-ray photoelectron spectroscopy를 사용하여 측정하였으며, 흡착표면적과 기공도는 BET법을 이용한 N₂ 기체 흡착을 통해 알아보았다. 또한 킬레이트 관능기 처리된 활성탄소의 흡착특성을 비교하기 위해 이산화탄소의 흡착실험을 수행하였다. 실험 결과, 활성탄소 표면에 도입된 킬레이트 관능기는 비표면적 감소에 따른 물리적 흡착량이 감소하더라도 이산화탄소에 대한 선택적, 화학적 흡착량을 향상시킴을 알 수 있었다.

In this work, the adsorption behaviors of activated carbons (ACs) containing chelating functional groups were studied in CO₂ removal. The ACs were modified by pyrolysis of peroxide and glycidyl methacrylate graft polymerization in order to induce chelating functional groups, such as diethylenetriamine groups on the AC surfaces. The surface functional groups of the ACs were characterized by scanning electron microscope (SEM) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The textural properties of the ACs were analyzed by N₂/77 K isotherms. Adsorption behaviors of the ACs were observed in the amounts of CO₂ adsorption. From the results, we found that the chelating functional groups on the AC surfaces led to enhance selectivity and chemisorption on CO₂ adsorption in spite of decreasing the physical adsorption properties.

Keywords: activated carbons, CO₂ adsorption, diethylenetriamine, graft polymerization

1. 서 론

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)'s fourth assessment report에 의하면 산업발전에 따른 화석연료의 사용증가와 산림 벌채 등에 의한 지구 자정능력 약화 등으로 기후 체계에 있어서 지구 온난화가 발생하고 대기 중의 온실가스 농도가 증가하여 지구의 평균 온도가 증가하고 있으며 또한 앞으로도 계속 될 것으로 전망하고 있다[1]. 이산화탄소는 지구온난화지수는 낮지만 controllable gas로서 전체 온실 가스 배출 중 약 80% 이상을 차지하고 있기 때문에 가장 중요한 온실가스로 분류되고 있다. 이산화탄소를 회수하기 위한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있으며, 이산화탄소 방출 감소를 위해 선택적으로 사용가능한 많은 기술적 방법에는 에너지효율 증가, 대체 에너지의 개발, 재생가능에너지 및 핵에너지의 사용, 토양이나 식물의 생물학적 흡착량의 향상, 배출된 이산화탄소의 화학적, 물리적 회수 및 저장 등이 있다. 이산화탄소의 화학적, 물리적 회수 및 저장법은 화석연료의 사용을 줄이고 신재생에너지의 사용을 점차 권장하는 현

시점에서 신재생에너지의 가격하락과 필요한 기술개발을 위한 충분한 시간을 제공할 것이다.

이산화탄소의 주배출원은 화석연료를 이용하는 에너지분야로서, 이산화탄소의 배출을 저감시킬 수 있는 방안은 에너지 절약기술 도입, 신·재생에너지 이용확대와 원자력과 같은 비탄소 에너지원의 이용 확대가 거론 될 수 있으나, 기술의 한계성과 세계 에너지원의 부존 특성을 감안하면, 이산화탄소를 궁극적으로 포집하여 처리하는 기술인 CCS (carbon dioxide capture & storage)기술의 적용은 필연적이다[2]. CCS기술은 기본적으로 이산화탄소의 포집과 운반·수송 및 격리개념에서의 저장의 세 가지 과정을 거친다. 배출 이산화탄소 회수를 위한 주요 과정은 공장이나 발전소 등으로부터 배출되어 흐르는 기체들로부터 기체분리공정을 통해 이산화탄소를 회수하는 것이다. 분리공정에 드는 비용은 이산화탄소 회수의 세 가지 과정상의 비용 중 대부분을 차지하고 있다[3,4]. 따라서 이산화탄소의 효율적이고 경제적인 분리를 위한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있으며, 현재까지 흡수법, 흡착법, 막분리법, 증류분리법, 혼합분리법을 사용한 이산화탄소 분리에 대한 연구가 가능하며 특히 흡수법과 흡착법, 막 분리법에 대한 연구가 주를 이루고 있다.

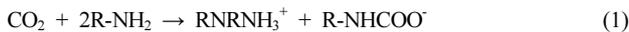
[†] 교신저자(e-mail: sjpark@inha.ac.kr)

흡수법은 이산화탄소 회수공정에 폭넓게 이용되어 왔으나, 습식흡수법의 경우 흡수용액의 주기적인 보충이 요구될 뿐만 아니라 설비부식 및 이차오염물의 생성 등 유지보수를 위한 많은 노력이 필요한 것으로 알려져 있다. 건식 흡수제의 경우에도 고온, 고압 하에서의 운전 조건 및 흡수제의 유동 마찰에 의한 분말화가 진행되는 단점이 발견되고 있다[5-7].

반면 흡착법은 에너지 소비가 적고 흡착제의 재사용이 가능하여 경제적인 저감 기술로 평가되고 있으며, 응용이 간편한 장점이 있다. 이에 따라 흡착 성능 증진에 있어 가장 중요한 흡착제 개발에 관한 연구가 꾸준히 진행되고 있다[8-10].

흡착제에는 활성탄소, 제올라이트, 탄소분자체, 클레이, 금속산화물 등이 사용된다. 그 중 활성탄소는 싸고 많은 세공을 가지고 있어 낮은 온도에서는 큰 흡착능력을 보여주고 있다. 하지만 이산화탄소에 대한 선택도가 낮고 온도가 증가함에 따라 흡착력이 감소하는 단점이 있다 [11,12]. 따라서 흡착법에 있어서 이산화탄소 회수의 궁극적 목표는 값이 싸며 물리적 흡착의 손실을 최소화하면서 흡착제의 표면개질을 통해 이산화탄소에 대한 높은 선택도를 가지면서 화학적 흡착량을 향상시킨 흡착제를 개발하는 것이다.

이산화탄소 흡착에 있어서 활성탄소의 아민 표면처리를 통한 많은 연구가 진행되고 있다[12-16]. 그리고 활성탄소의 산염기 표면처리에 따른 흡착제[17,18]에 관한 연구가 진행 중이다. 아민 표면처리를 통해 산성가스인 이산화탄소에 대한 기체흡착을 선택적으로 할 수 있으며 아민 흡수법에서 큰 문제점으로 나타났던 부식문제도 해결할 수 있는 장점을 보이고 있다[18]. 아민과 이산화탄소 사이의 화학적 흡착은 다음 반응식과 같다.



탄소표면에서 아미노 관능기의 두 질소원자가 하나의 이산화탄소를 만나서 결합한다. Hiyoshi[19] 등에 의하면 고립된 하나의 아미노 관능기는 이산화탄소 흡착에 사용될 수 없다.

그러나 이산화탄소는 3.5 Å의 크기를 갖고 있으며 흡착시 활성탄소의 미세기공이 분포가 이산화탄소 흡착량에 크게 영향을 미친다. 아민 표면처리는 활성탄소의 비표면적을 감소시키고 미세기공을 줄어든다는 단점이 있어 산성가스에 대한 선택적 흡착을 할 수 있고 비교적 높은 온도에서 미처리한 활성탄소보다 그 흡착량을 유지할 수 있지만 전체적인 흡착량은 감소한다는 단점을 갖고 있다[11,20].

금속흡착에 있어서 킬레이트 관능기를 사용하여 금속을 흡착한 연구가 진행되고 있다. 흡착제 표면에 불소 표면처리를 하여 형성된 라디칼을 반응 개시점으로 이용하여, 반응성이 좋은 당량체인 glycidyl methacrylate (GMA)를 그래프트 중합 반응을 시키고, GMA 그래프트된 흡착제에 킬레이트 관능기를 처리를 하여 비표면적이 비교적 감소하지 않으면서 금속흡착량이 증가하였다[21-23].

따라서, 본 연구에서는 이산화탄소 흡착에 있어서 그래프트 중합법의 장점을 이용하여 GMA 함량을 달리하여 그래프트 중합하고 활성탄소 표면에 킬레이트 관능기이면서 아민으로서 산성가스인 이산화탄소에 대한 잠재적 염기자리로서 diethylenetriamine (DETA)와 반응한 후 GMA 처리량 변화에 따른 이산화탄소에 대한 흡착능에 관하여 고찰하고자 하였다.

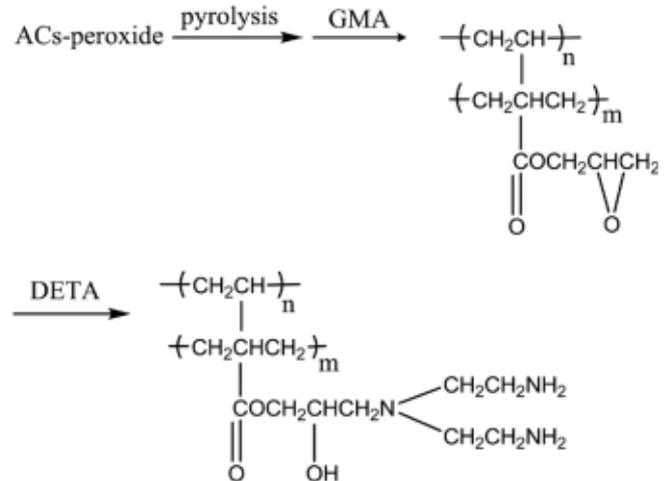


Figure 1. Preparation scheme of diethylene triamine group contained the ACs.

2. 실험

2.1. tert-butyl hydroperoxide 표면처리

활성탄소를 증류에서 2~3차례 세척한 후 353 K의 진공오븐에서 24 h 동안 건조시켜 수분 및 잔류 용매를 제거한 다음 0.5 M HNO₃의 333 K ultrasonic bath에서 30 min 정도 처리한 후, 바로 12 h 동안 리플렉스 처리를 하였다. 산처리된 활성탄소를 증류수로 세척한 후 필터링하여 338 K에서 24 h 정도 진공 하에서 건조하였다. 얻어진 carboxylic acid가 처리된 활성탄소(ACs-COOH)는 과량의 SOCl₂로 338 K 24 h 동안 처리되었다. SOCl₂처리된 ACs-COOH는 anhydrous tetrahydrofuran (THF)으로 수차례 세척 후 진공 하에서 실온으로 1 h 정도 건조하였고 acyl chloride가 도입된 활성탄소(ACs-COCl)를 얻었다[24].

얻어진 ACs-COCl을 tert-butyl hydroperoxide와 NaOH를 사용하여 peroxide 처리된 활성탄소를 얻었다. 그리고 활성탄소 표면에 라디칼을 형성하기 위해 373 K로 가열하였다.

2.2. GMA 그래프트 중합

Figure 1은 킬레이트 관능기 도입과정을 나타낸 것으로, 이 도입방법은 크게 그래프트 중합반응과 킬레이트 관능기 도입반응으로 이루어진다.

첫 번째 단계인 그래프트 중합 반응은 peroxide에 의해 화학적으로 형성된 라디칼을 반응 개시점으로 이용하여, 반응성이 좋은 당량체인 GMA를 활성탄소에 도입하기 위해서 GMA/methanol 용액으로 활성탄소를 313 K에서 24 h 동안 반응시켰다[21-23]. 그래프트 중합시킬 GMA의 양은 2, 5, 10 mL로 양을 변화시켜서 활성탄소 표면에 처리하였다.

2.3. 킬레이트 관능기의 도입

두 번째 단계인 킬레이트 관능기 도입반응은 GMA 그래프트된 활성탄소를 1,4-dioxane용액에 녹인 과량의 DETA에 24 h 동안 리플렉스 하였다[25,26]. DETA가 처리된 활성탄소는 에탄올로 세척후 에탄올/증류수(50 : 50) mixture로 세척하고 마지막으로 증류수로 세척 후 진공 하에서 실온으로 건조하였다. 결과적으로 2, 5, 10 mL의 GMA 처리 후 킬레이트 관능기가 도입된 샘플의 이름은 각각 2-ACs, 5-ACs,

Table 1. Surface Properties of the Samples

Samples	Atomic conc. (%)			S _{BET} ^a	V _{total} ^b	V _{micro} ^c	V _{meso} ^d
	C	N	O				
ACs	93.5	-	5.7	806	0.699	0.234	0.465
2-ACs	73.6	4.8	21.6	298	0.311	0.048	0.264
5-ACs	75.8	5.83	17.8	251	0.254	0.003	0.251
10-ACs	71.6	7.63	19.4	187	0.216	0.001	0.216

^a S_{BET} : specific surface area (m²g⁻¹)
^b V_{total} : total pore volume (cm³g⁻¹)
^c V_{micro} : micropore volume (cm³g⁻¹)
^d V_{meso} : mesopore volume (cm³g⁻¹)

10-ACs로 명명하였다.

2.4. 표면특성 및 기공구조

킬레이트 관능기를 도입한 활성탄소의 표면특성의 변화를 알아보기 위하여 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS, ESCALAB MK-II)를 통하여 확인하였다. XPS 측정에 사용된 W-ray source는 Al K_α를 사용하였으며, 챔버 내의 압력은 10⁻¹~10⁻⁹ torr로 조절하였다. 또한 킬레이트 관능기가 처리된 활성탄소 표면의 모폴로지 변화는 scanning electron microscope (SEM, S-4300, Hitachi Co.)를 사용하여 측정하였다.

제조한 흡착제의 비표면적은 BEL-SORP (BEL Co.)을 이용하여 측정하였다. 표면 처리된 활성탄소를 진공상태에서 수분 및 불순물을 제거한 후, 기체상의 N₂ 흡착량을 측정하고[27], N₂ 흡착 등온식, t-plot을 이용하여 비표면적과 미세기공을 측정하였으며, 증기공의 부피는 BJH method로부터 계산하였다[28].

2.5. 이산화탄소 흡착

제조한 흡착제의 이산화탄소 흡착량은 BEL-SORP (BEL Co.)을 사용하여 진공상태에서 수분 및 불순물을 제거한 후, 진공을 유지시키면서 반응기 내의 온도를 흡착온도까지 냉각시켰다. 샘플의 온도가 안정된 298 K에서 상대압력(P/P₀)에 따른 이산화탄소의 흡착량을 측정하였다. 온도에 따른 이산화탄소의 흡착거동은 temperature programmed desorption (TPD)를 사용하여 진공상태에서 수분 및 불순물을 제거한 후, 50 cm³min⁻¹의 헬륨 가스를 가하면서 298 K에서 358 K까지 승온시켜서 흡착제 내의 흡착물질을 완전히 탈기시켰다. 그 후 50 cm³min⁻¹의 이산화탄소 가스를 가하면서 303 K에서 578 K까지 0.5 Kmin⁻¹의 승온속도로 이산화탄소의 화학적 탈착 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 흡착제의 특성

제조된 흡착제의 화학적 조성은 XPS를 이용하여 측정하였으며, Table 1에 각각의 함량비를 나타내었다. 킬레이트 관능기가 도입된 활성탄소의 질소함량은 미처리 경우와 비교하여 증가하였으며, 그래프트 중합을 위한 GMA의 양이 증가할수록 도입된 DETA에 의한 질소함량 또한 증가하였다. 이러한 질소 성분은 탄소표면에 염기적 특성을 증가시켜, 산성가스와의 흡착에 대한 선택성을 증가시켜 줄 것으로 판단된다[11]. 질소함량과 산소함량이 증가한 만큼 탄소의 함량은 줄어들었으며 GMA의 그래프트 중합에 의해 산소의 함량이 크게 증가하였음을 확인하였다.

Figure 2에 제조된 흡착제의 모폴로지와 구조 변화를 나타냈다.

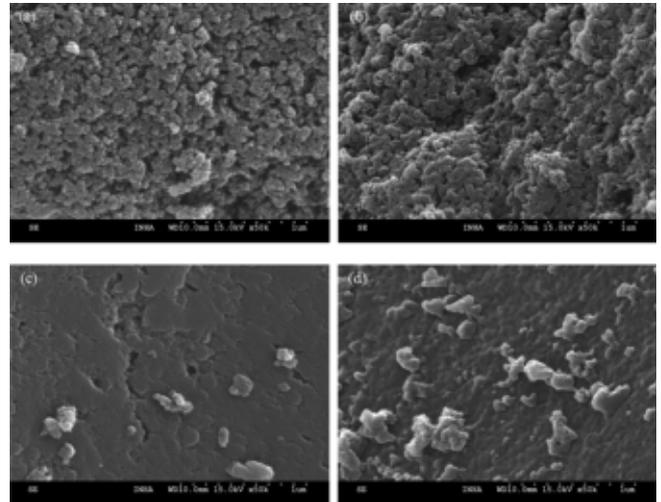


Figure 2. SEM images of (a) ACs, (b) 2-ACs, (c) 5-ACs, and (d) 10-ACs.

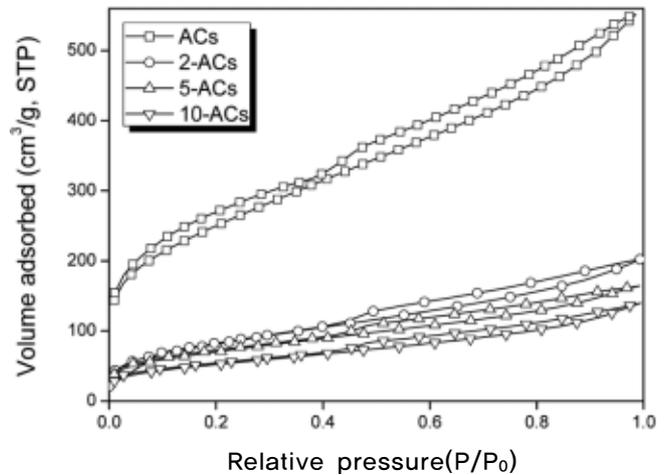


Figure 3. N₂ adsorption isotherms at 77 K of the samples.

Figure 2(a)의 경우 미처리된 활성탄소이며, Figure 2(b)-Figure 2(d)는 GMA의 양을 변화시켜 그래프트 중합 후 DETA 처리된 활성탄소를 보여주고 있다. 활성탄소 표면에 생성된 라디칼에 의해 GMA가 그래프트 중합반응을 하여 탄소표면으로부터 성장하였으며 GMA의 양이 증가함에 따라 활성탄소 표면의 기공을 막게 되는 현상을 보여주고 있다.

킬레이트 관능기 처리한 활성탄소의 기공구조 변화를 고찰하기 위하여 10⁻⁶~10⁰ torr의 상대압력에서 N₂ 기체의 흡착량을 측정하여 흡착등온곡선을 구하였으며, Figure 3에 이를 나타내었다. Figure 3에서 제조된 흡착제와 처리 하지 않은 활성탄소 모두에서 증기공이 발달되어 있는 Langmuir 등온선의 형태인 Type IV를 나타내었으며, 처리 하지 않은 활성탄소의 경우 낮은 상대압에서 많은 흡착량을 나타내었으며 상대압이 증가함에 따라 점진적으로 흡착량이 증가함을 알 수 있었다. 낮은 상대압에서 많은 흡착량을 보이는 것은 미세기공 사이의 potential fields가 중첩되어 미세기공과 질소분자 사이의 상호작용 에너지가 증가되기 때문인 것으로 알려져 있으며 높은 상대압에서도 흡착량이 증가하는 것은 대기공의 모세공 응축에 의한 것으로 판단된다 [29].

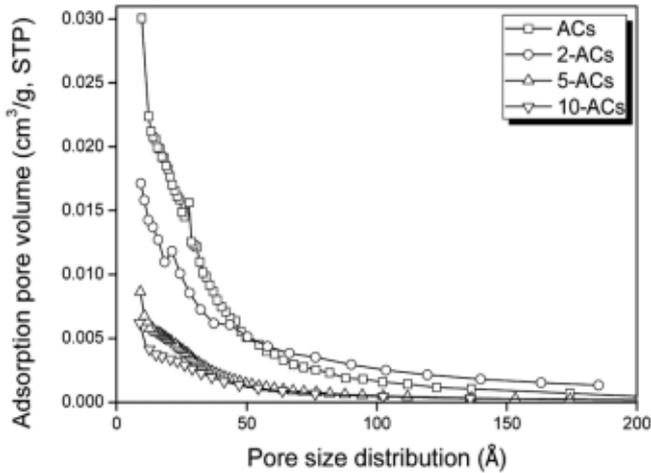


Figure 4. Pore size distribution of the samples.

반면, 제조한 흡착제에 대한 등온흡착곡선을 관찰한 결과 처리하지 않은 활성탄소에 비해서 그 흡착량이 많이 감소하였으며, 또한 GMA 그래프트 중합 처리량이 증가함에 따라 질소의 흡착량이 감소하는 것이 관찰되었다. 이는 Figure 2의 SEM 사진에서 확인한 바와 같이 그래프트 중합된 GMA의 양이 증가할수록 기공을 막는 현상이 발생하기 때문이라 판단된다.

Table 1에 제조한 흡착제의 BET 비표면적, 중기공 부피, 미세기공 부피, 그리고 기공전체의 부피를 나타내었다. 제조된 흡착제의 경우 처리 하지 않은 활성탄소에 비해 BET 비표면적이 크게 감소하였으며, 앞서 살펴본 바와 같이 GMA가 활성탄소의 기공을 막는 현상에 의해 설명할 수 있다. 미세기공과 중기공의 부피도 GMA 그래프트 중합에 의해 감소하였으며, 처리량이 증가할수록 기공부피의 감소폭 또한 증가하였다. 그러나, 중기공 부피의 경우에는 크게 감소하지 않았으며, 이는 그래프트 중합되어 성장한 GMA가 미세기공을 뒤덮은 반면 중기공은 적은 영향을 주었기 때문이라 판단된다.

따라서 이러한 기공의 pore size distribution (PSD)를 BJH 방법을 이용하여 구하였으며 Figure 4에 그 결과를 나타내었다. Figure 4에서 나타난 바와 같이 제조된 모든 흡착제에서 20~50 Å 범위의 중기공이 잘 발달된 것을 확인할 수 있었으며, 처리 하지 않은 시편의 경우에 20~50 Å의 범위에서 가장 큰 피크를 보였으며, GMA 처리량이 증가함에 따라 기공의 폐쇄로 인해 기공의 분포가 줄어들었음을 확인할 수 있었다.

3.2. 이산화탄소 흡착특성

제조한 흡착제의 이산화탄소 흡착특성은 시편의 온도가 안정된 298 K에서 상대압력(P/P₀)에 따른 이산화탄소 흡착량 측정을 통하여 알아 보았으며 Figure 5에 그 결과를 나타내었다. 처리 하지 않은 활성탄소의 이산화탄소 흡착량은 298 K, 1 atm 하에서 1.95 mmol/g을 나타내었는데, 이는 단순히 물리적 흡착에 의한 것으로 킬레이트 관능기 처리를 한 활성탄소에 의한 흡착에도 유용한 흡착 메커니즘으로 작용한다. 또한 2, 5, 10 mL GMA으로 처리 후 킬레이트 관능기를 도입하여 제조된 시편들의 경우 298 K, 1 atm 하에서 각각 1.01, 1.13, 0.68 mmol/g의 이산화탄소 흡착량을 나타내었다. 그리고 킬레이트 관능기를 처리하지 않은 2, 5, 10 mL GMA으로 처리한 활성탄의 경우 물리적 흡착에 의한 결과로서 이산화탄소 흡착량이 킬레이트 관능기를 처리한 흡착제에 비해서 그 흡착량이 크게 감소함을 확인할 수 있었다.

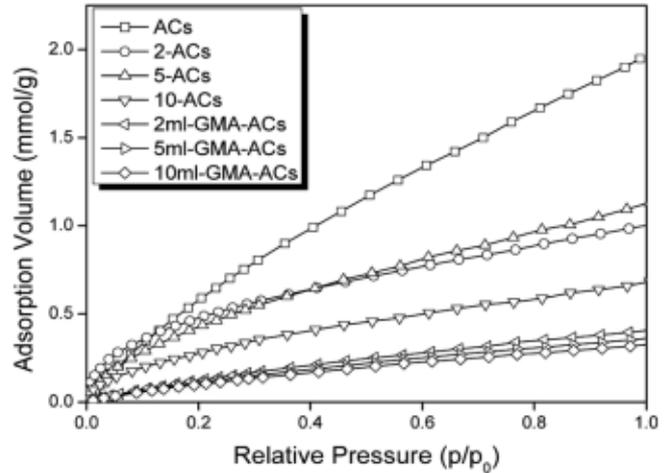


Figure 5. Volume of CO₂ gas adsorbed at 298 K on the samples.

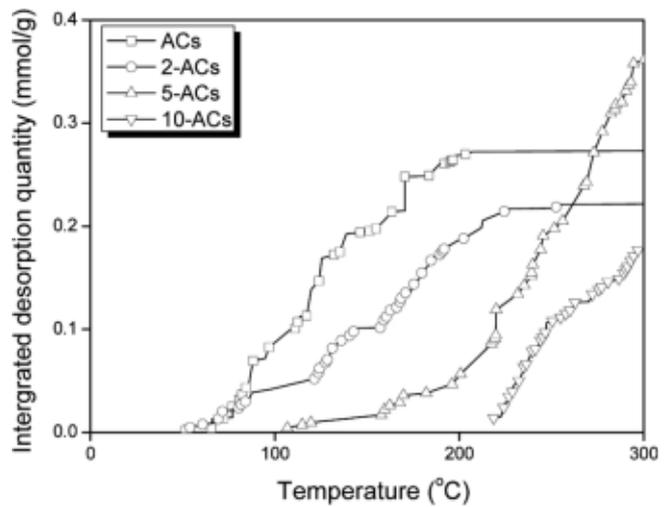


Figure 6. Integrated desorption quantity of the samples studied.

질소흡착등온선에서 나타난 결과와 달리 5 mL의 GMA를 처리한 활성탄소에서 가장 높은 흡착량을 보여주고 있으며, 이는 GMA가 그래프트 중합을 하면서 기공을 폐쇄하는 현상이 발생하지만 그래프트 중합된 GMA에 처리된 킬레이트 관능기로서의 DETA에 의한 화학적 흡착에 의한 것으로 판단된다. 10 mL의 GMA를 처리한 경우 기공폐쇄 정도가 심하여 물리적 흡착량이 크게 감소하였고, 2 mL의 GMA를 처리한 경우 그래프트 중합된 GMA에 의해 기공폐쇄는 적게 발생하였으나 그래프트 중합된 GMA에 처리된 DETA의 양 또한 적어 화학적 흡착량이 감소하였음을 보여준다.

TPD를 사용하여 흡착제의 이산화탄소의 상온에서 573 K까지의 온도증가에 따른 이산화탄소의 탈착량을 측정하였으며 탈착된 값을 적분하여 Figure 6에 나타내었다. 처리하지 않은 활성탄소의 경우 323 K에서 이산화탄소 탈착이 시작되었다. 이어서 2-ACs, 5-ACs, 10-ACs 순으로 이산화탄소가 탈착되기 시작하였다. 그러나 GMA로 그래프트 중합되어 DETA처리된 활성탄소의 경우 미처리된 활성탄소에 비해서 완만한 탈착 거동을 나타내었다. 이는 이산화탄소가 활성탄소 표면에 처리된 염기성을 띠고 있는 아민 사이의 상호작용에 의한 것으로 판단된다. 2-ACs와 10-ACs의 경우 전체적인 탈착된 이산화탄소의 양이 작은 반면 5-ACs의 경우 탈착된 이산화탄소의 양이 가장 컸으며 상대적

으로 높은 온도에서도 그 흡착량을 유지하면서 탈착됨을 확인할 수 있었다. 또한, Figure 5와 Figure 6의 결과로부터 실온상태에서는 물리적 흡착에 의해 활성탄소의 흡착량이 우세하지만 온도가 증가함에 따라 물리적 흡착량은 감소하는 반면 화학적 흡착은 온도의 증가하더라도 흡착량을 유지하기 때문에 고온상태에서의 이산화탄소 흡착에 있어서 화학적 흡착이 더 우세하다고 볼 수 있다. Lee에 의하면[8] 일반적으로 흡착과정은 발열반응으로 온도가 증가할수록 열을 발생하지 않는 쪽으로 반응이 이루어져 흡착량은 감소하게 된다. 따라서 고온 조건에서의 흡착은 물리흡착만으로는 흡착능을 기대하기 어렵기 때문에 화학적 처리를 통하여 화학 결합을 흡착제에 유도함으로써 고온에서의 흡착능을 향상시킬 수 있다. 즉 고온의 복합 가스 적용 시 기존 흡착제보다 화학처리를 통하여 이산화탄소에 대한 선택도를 향상시킨 흡착제가 더 유리할 것으로 판단된다[8].

4. 결 론

본 연구에서는 활성탄소에 GMA를 그래프트 중합한 후 킬레이트 관능기로서의 DETA를 처리에 따른 이산화탄소의 흡착거동을 고찰하고자 하였다. 실험결과, 킬레이트 관능기 처리에 따른 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다. Peroxide의 열분해를 통해 생성된 라디칼을 반응개시점으로 GMA가 그래프트 중합되었음을 확인할 수 있었으며, 또한 킬레이트 관능기로서의 DETA가 그래프트 중합된 GMA에 도입되었음을 확인할 수 있었다. 킬레이트 관능기 처리된 활성탄소의 경우 아무런 처리하지 않은 활성탄소에 비해 물리흡착량의 감소로 인해 전체적인 흡착량은 감소하였으나 킬레이트 관능기에 의한 화학적 결합에 의해 고온에서의 흡착능이 유지된 것으로 판단된다. 또한 복합적인 가스에 있어서 이산화탄소에 대한 선택성 또한 향상될 것으로 판단된다. 활성탄소 표면에 처리된 킬레이트 관능기인 DETA는 산성 가스인 이산화탄소를 흡착하기 위한 주요 요소로서 작용하였으며, 2~5 mL GMA를 처리한 후 DETA를 도입한 결과, 그래프트 중합된 GMA에 의해 활성탄소의 기공폐쇄로 인한 물리적 흡착량은 비교적 적게 감소하였지만 DETA의 도입에 의한 화학적 흡착량의 증가를 가져왔다.

감 사

본 연구는 교육과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업인 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발 사업단의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Climate change 2007 : The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of intergovernmental panel on climate change ; 2007.
2. M. M. Min, *KIC News*, **12**, 15 (2009).

3. V. Zelenak, D. Halamova, L. Gaberova, E. Bloch, and P. Llewellyn, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **116**, 358 (2008).
4. X. Xu, Ch. Song, B. G. Miller, and A. W. Scaroni, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **44**, 8133 (2005).
5. Y. J. Yoo, H. S. Kim, J. H. Park, S. S. Han, and S. H. Cho, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **18**, 273 (2007).
6. R. W. Hughes, D. Y. Lu, E. J. Anthony, and A. Macchi, *Fuel Processing Technol.*, **86**, 1523 (2005).
7. P. Li, S. Zhang, S. Chen, Q. Zhang, J. Pan, and B. Ge, *J. Appl. Polym. Sci.*, **108**, 3851 (2008).
8. K. M. Lee and Y. M. Jo, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **19**, 533 (2008).
9. J. K. Jeon, Y. K. Park, and K. Chue, *J. KOSAE*, **20**, 99 (2004).
10. N. D. Hutson, *Chem. Mater.*, **16**, 4135 (2004).
11. M. G. Plaza, C. Pevida, A. Arenillas, F. Rubiera, and J. J. Pis, *Fuel*, **86**, 2204 (2007).
12. M. M. Maroto-Valer, Z. Tang, and Y. Zhang, *Fuel Process Technol.*, **86**, 1487 (2005).
13. A. Arenillas, F. Rubiera, F. B. Parra, C. O. Ania, and J. J. Pis, *Appl. Surf. Sci.*, **252**, 619 (2005).
14. T. C. Drage, A. Arenillas, K. M. Smith, C. Pevida, S. Piippo, and C. E. Snape, *Fuel*, **86**, 22 (2007).
15. J. Przepiorski, M. Skrodzewicz, and A. W. Morawski, *Appl. Surf. Sci.*, **225**, 235 (2004).
16. K. A. Mohamed, M. A. W. D. Wan, C. Y. Yin, and D. Adinata, *Sep. Purif. Technol.*, **62**, 611 (2008).
17. S. J. Park, K. D. Kim, and J. R. Lee, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **9**, 920 (1998).
18. S. J. Park and K. D. Kim, *J. Colloid Interface Sci.*, **212**, 186 (1999).
19. N. Hiyoshi, K. Yogo, and T. Yashima, *Chem. Lett.*, **33**, 510 (2004).
20. D. I. Jang, K. S. Cho, and S. J. Park, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **20**, 658 (2009).
21. S. J. Park and Y. M. Kim, *Mater. Sci. Eng. A*, **391**, 121 (2005).
22. S. J. Park and Y. M. Kim, *J. Por. Mater.*, **12**, 41 (2005).
23. S. J. Park, G. H. Shim, and H. Y. Kim, *Textile Sci. Eng.*, **42**, 129 (2005).
24. K. Zhang, J. Y. Lim, H. J. Choi, and Y. Seo, *Diamond Relat. Mater.*, **17**, 1604 (2008).
25. S. H. Choi, Y. M. Hwang, and K. P. Lee, *J. Chromatogr. A*, **987**, 323 (2003).
26. C. Liu, R. Bai, and L. Hong, *J. Colloid Interface Sci.*, **303**, 99 (2006).
27. S. Brunauer, P. H. Emmett, and E. Teller, *J. Am. Chem. Soc.*, **60**, 309 (1938).
28. J. H. de Boer, B. G. Linsen, T. Plas, and G. J. Van Zonder, *J. Catal.*, **4**, 649 (1965).
29. S. J. Park, S. Y. Jin, and J. Wawasaki, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **14**, 1111 (2003).