

# 아민 처리가 탄소나노튜브의 이산화탄소 흡착거동에 미치는 영향

장동일 · 조기숙\* · 박수진†

인하대학교 화학과, \*고려대학교 환경시스템협동과정  
(2009년 8월 25일 접수, 2009년 9월 15일 채택)

## Influence of Amine Surface Treatment on Carbon Dioxide Adsorption Behaviors of Activated Carbon Nanotubes

Dong-II Jang, Ki-Sook Cho\*, and Soo-Jin Park†

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

\*Environmental Systems Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received August 25, 2009; accepted September 15, 2009)

본 연구에서는 탄소나노튜브를 KOH를 이용하여 활성화 한 후 이를 아민으로 표면처리한 탄소나노튜브의 이산화탄소 흡착 거동에 관하여 고찰하였다. 아민 처리한 탄소나노튜브의 물리화학적 특성은 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), N<sub>2</sub> adsorption isotherm, thermogravimetric analysis (TGA), 그리고 temperature programmed desorption (TPD)을 이용하여 분석하였다. 실험 결과, 활성화된 탄소나노튜브 표면의 아미노 관능기는 산성가스인 이산화탄소를 선택적으로 흡착하기 위한 염기성 자리로서 작용하였다. 상온에서의 이산화탄소 흡착량은 미처리된 탄소나노튜브가 가장 크게 나타났으나 온도가 증가할수록 급격한 감소를 나타내었으며 PEHA 처리한 경우 완만한 흡착거동을 보였다. 이는 탄소표면의 아미노 관능기와 이산화탄소 사이의 상호작용 때문이라 판단된다.

In this work, the amine-treated activated carbon nanotubes (A-MWNTs) were used to investigate the CO<sub>2</sub> adsorption behaviors. A-MWNTs were prepared by impregnation with amine in methanol after chemical activation methods using a KOH. The characteristics of amine-treated A-MWNTs were studied by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), N<sub>2</sub> adsorption, desorption isotherms at 77 K. The specific surface area and pore volume of the A-MWNTs were analyzed by BET equation, BJH method, and t-plot method. CO<sub>2</sub> capture capacity as a function of temperature was measured by temperature programmed desorption (TPD). From the results, the amine treatment increased the basicity and nitrogen content of the A-MWNTs. The CO<sub>2</sub> adsorption capacity of the amine-nontreated A-MWNTs showed the highest value at room temperature and then greatly decreased with increasing the temperature. However, the amine-treated A-MWNTs presented a softer slope with temperature compared to the amine-nontreated ones. It was due to the strong interactions between CO<sub>2</sub> and amino groups presented on the carbon surfaces studied.

**Keywords:** activated carbon nanotubes, CO<sub>2</sub> adsorption, chemical activation

### 1. 서 론

IPCC's Third Assessment Report[1]에 의하면 지구온난화는 지난 50년간 인류의 화석연료의 과도한 사용과 산업화로 인한 결과이며 또한 앞으로도 계속 될 것으로 전망하고 있다. 지구온난화의 주원인인 이산화탄소를 회수하기 위한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있으며, 이산화탄소 방출 감소를 위해 선택적으로 사용 가능한 많은 기술적 방법에는 에너지효율 증가, 대체에너지의 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 신

재생에너지의 사용을 점차 권장하는 현 시점에서 신재생에너지의 가격하락과 필요한 기술개발을 위한 충분한 시간을 제공할 것이다.

일반적으로 배출 이산화탄소의 회수를 위해 분리, 운반, 격리의 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 과정 상의 비용 중 대부분을 차지하고 있다[2]. 따라서 이산화탄소의 효율적이고 경제적인 분리를 위한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있으며, 현재까지 흡수법과 흡착법, 막분리법에 대한 연구가 주를 이루고 있다.

흡수법은 그 동안 이산화탄소 회수공정에 폭넓게 이용되었으나 흡수용액의 주기적인 보충이 요구될 뿐만 아니라 설비부식 및 이차오염물의 생성 등 유지보수를 위한 많은 노력이 필요한 것으로 알려져 있

† 교신저자(e-mail: sjpark@inha.ac.kr)

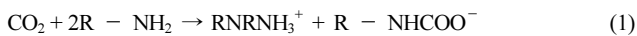
다. 건식 흡수제의 경우에도 고온, 고압 하에서의 운전조건 및 흡수제의 유동 마찰에 의한 분말화가 진행되는 단점이 발견되고 있다[3-5].

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[6-8].

이산화탄소 회수시스템이 도입되기 위해서는 공간, 비용, 에너지상의 문제를 해결해야 한다[9,10]. 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]. 따라서 흡착법에 있어서 이산화탄소 회수의 궁극적 목표는 값이 싸며 물리적 흡착의 손실을 최소화하면서 흡착제의 표면적질을 통해 이산화탄소에 대한 높은 선택도를 가지면서 화학적 흡착량을 향상 시킨 흡착제를 개발하는 것이다.

흡착법에서는 이산화탄소 흡착제로서 질소 성분의 처리를 통해 이산화탄소와 다공성 탄소사이의 상호작용을 향상시킨 흡착제[12-16], 활성탄소의 산-염기 표면처리에 따른 흡착제[17,18], 그리고 중기공 실리카에 아민을 도입한 연구[19-21]가 보고되었다. 아민을 사용하여 흡착제를 제조한 연구들로부터 지지체가 중기공의 특성이 강할수록 아민으로 함침법을 사용할 때 흡착량이 증가한 반면, 지지체가 미세기공의 특성이 강할 경우 아민으로 함침법을 사용할 때 흡착량이 감소함을 나타내었는데, 이는 지지체에 붙은 아미노 관능기가 지지체 표면의 미세기공을 막기 때문이다.

아민은 산성가스인 이산화탄소 회수를 위해 잠재적 염기자리로서 평가되고 있다. 흡착제에 도입된 아미노 관능기는 전형적인 아민흡수법의 이점을 갖으면서 동시에 부식 문제를 야기시키지 않고 고체로서 다루기 쉬운 장점을 가지고 있다. 아민과 이산화탄소사이의 화학적 흡착은 다음 반응식과 같다.



탄소표면에서 아미노관능기의 두 질소원자가 하나의 이산화탄소를 만나서 결합한다. Hiyoshi[22] 등에 의하면 고립된 하나의 아미노 관능기는 이산화탄소 흡착에 효과적이지 않다는 연구를 수행하였다. 두 질소원자는 서로 가까이 있어야 하고 단독으로 고립된 아미노 관능기는 위 반응식을 통한 이산화탄소 흡착에 사용될 수 없다.

일반적으로 아민은 다공성 탄소지지체의 중기공에 도입된다[23]. 그러나 활성탄소는 중기공의 비율이 적은 미세기공의 특성을 주로 갖는 지지체이다. 활성탄소에 처리된 아민은 미세기공을 막아 물리적 흡착량의 감소를 발생시킨다. 탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotubes : MWNTs)는 기공 크기 분포가 일정한 표면을 가지고 있지만 비표면적이 작은 특징을 갖고 있다. KOH는 잘 알려진 활성화제이며 [24,25] 탄소나노튜브를 KOH를 사용하여 활성화시킨 결과 비표면적이 증가하였으며 중기공의 비율이 증가하였다.

따라서 본 연구에서는 탄소나노튜브를 KOH를 사용하여 활성화시킨 후 diethylenetriamine (DETA), pentaethylenhexamine (PEHA), polyethylenimine (PEI)을 사용하여 아민 처리한 후, 이에 따른 활성화된 탄소나노튜브의 이산화탄소 흡착 특성을 고찰하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 시약 및 재료

본 연구에서는 Nano Solution사에서 제조한 탄소나노튜브(purity 95 ± %)로서 반경 10~25 nm, 길이는 10~50 μm의 탄소나노튜브를 사용하였다. 77 K에서 질소흡착등온선으로부터 BET식, BJH method, t-plot에 의해 계산된 중기공의 부피는 0.3628 cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>, 미세기공의 부피는 0.0022 cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>였다. 구입한 탄소나노튜브는 불순물 제거를 위하여 우선 소각로에서 350 °C로 가열한 후, 5 M HNO<sub>3</sub>의 실온에서 5 h 정도 담지처리한 다음 증류수로 세척한 후 필터링하여 24 h 동안 건조하여 사용하였다.

활성화된 탄소나노튜브를 얻기 위하여 정제된 탄소나노튜브를 6 M KOH와 5 h 교반한 후 진공오븐에서 100 °C, 24 h 동안 건조하였다. 건조한 탄소나노튜브를 소각로에서 900 °C, 3 h 동안 활성화시켰다 [26-28]. 그리고 나서, 수차례 증류수로 세척한 후, 48 h 동안 건조하여 최종적으로 활성화된 탄소나노튜브를 얻었고, 이를 A-MWNTs로 명명하였다.

A-MWNTs의 화학적 표면처리는 DETA, PEHA, 그리고 PEI의 3가지 아민을 습식 함침법(wet impregment)[24]으로 A-MWNTs에 아민을 도입하였고 이를 DETA-A-MWNTs, PEHA-A-MWNTs, 그리고 PEI-A-MWNTs로 각각 명명하였다. 1 g의 아민을 8.0 g의 메탄올에 15 min 동안 교반하여 용해시킨 후 1 g의 A-MWNTs를 첨가하여 30 min 교반하였다. A-MWNTs와 용매, 아민을 1 : 8 : 1의 비율로 처리하여 50 wt%의 아민 처리한 활성화된 탄소나노튜브인 A-MWNTs를 얻었다. 아민 처리한 A-MWNTs를 수차례 증류수로 세척한 후 진공오븐에서 70 °C, 16 h 건조하였다. 처리된 아민의 양은 A-MWNTs의 중기공과 아민의 밀도에 의해 결정되었다. 사용된 아민의 물리적·화학적 특성을 Table 1에 나타내었다.

### 2.2. 표면관능기 및 흡착특성

3종류의 아민 처리한 A-MWNTs의 화학적 조성은 XPS (ESCALAB MK-II)를 통하여 확인하였다. XPS 측정에 사용된 X-ray source는 Al K<sub>α</sub>를 사용하였으며, 챔버 내의 압력은 10<sup>-1</sup>~10<sup>-9</sup> torr로 조절하였다.

제조한 흡착제의 비표면적은 BET 장치(TRISTAT 3000, Micromeritics Co.)를 이용하여 측정하였다. 아민 처리한 A-MWNTs를 진공상태에서 수분 및 불순물을 제거한 후, 기체상의 N<sub>2</sub> 흡착량을 측정하고, BET 흡착 등온식, t-plot을 이용하여 비표면적과 미세기공을 측정하였으며, 중기공의 부피는 BJH method로부터 계산하였다.

Table 1. Physical and Chemical Properties of the Amines

Amine	Molecular formula	Molecular weight	N content (%wt)	Density (g · cm <sup>-3</sup> )	pH
Diethylen-triamine (DETA)	C <sub>4</sub> H <sub>13</sub> N <sub>3</sub>	103	41	0.95	14.8
Pentaethylene-hexamine (PEHA)	C <sub>10</sub> H <sub>28</sub> N <sub>6</sub>	232	36	1.00	13.6
Polyethylen-imine (PEI)	H(NHCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> NH <sub>2</sub>	423	35	1.07	13.8

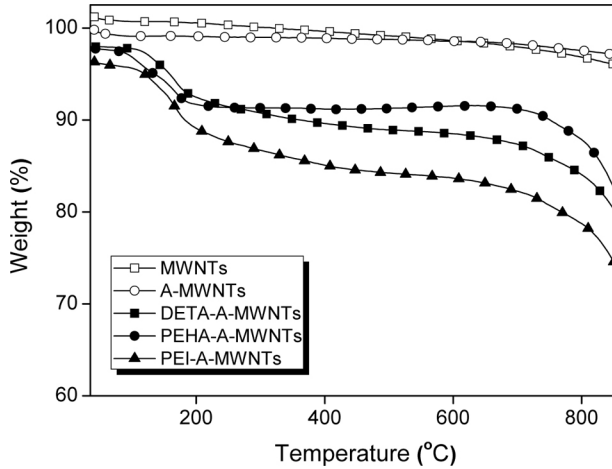


Figure 1. Thermal stability of the samples studied.

2.3. 열적 특성 및 이산화탄소 흡·탈착 거동

제조한 A-MWNTs의 열적 특성 변화는 질소분위기 하에서 승온속도 10 °C/min으로 상온에서 900 °C까지 thermogravimetric analyser 장치(netzsch simultaneous Thermal Analyser STA 409 PC : TGA)를 사용하여 측정하였다.

이산화탄소 흡착량은 temperature programmed desorption (TPD)를 사용하여 진공상태에서 수분 및 불순물을 제거한 후, 50 cm<sup>3</sup>min<sup>-1</sup>의 헬륨 가스를 가하면서 25 °C에서 80 °C까지 승온시켜서 흡착제 내의 흡착물질을 완전히 탈기시켰다. 그 후 50 cm<sup>3</sup>min<sup>-1</sup>의 이산화탄소 가스를 가하면서 25 °C에서 100 °C까지 0.5 °Cmin<sup>-1</sup>의 승온속도로 이산화탄소의 물리화학적 흡·탈착 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 제조된 흡착제의 특성

도입된 아민과 A-MWNTs 사이의 상호작용을 분석하기 위해 제조한 A-MWNTs를 N<sub>2</sub>하에서 승온속도 15 °Cmin<sup>-1</sup>에서 열분해하였다. Figure 1은 MWNTs, A-MWNTs, DETA-A-MWNTs, PEHA-A-MWNTs, PEI-A-MWNTs의 열안정성을 나타낸 결과이다. 제조된 흡착제의 열안정성은 A-MWNTs, PEI-A-MWNTs, DETA-A-MWNTs, PEHA-A-MWNTs 순으로 점점 감소하였으며, 아민이 도입된 세 개의 A-MWNTs의 질량 손실은 100 °C에서부터 200 °C까지 점진적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 두 가지 상반된 효과로부터 설명할 수 있는데, 하나는 탄소지지체와 도입된 아민 사이의 상호작용에 의해 열분해에서 고정되어 있는 현상이고, 또 다른 하나는 탄소지지체 표

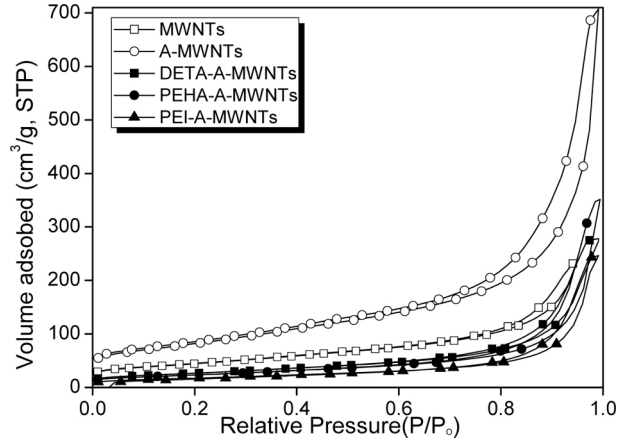


Figure 2. N<sub>2</sub> adsorption isotherms at 77 K of the samples studied.

면에 아민이 잘 분산되어 도입됨에 따라 더 낮은 온도에서 분해를 촉진시킬 수 있기 때문이라 판단된다. 질량 손실은 탄소표면에 처리된 아민이 떨어져 나가거나 분해됨을 의미한다.

아민 처리한 A-MWNTs의 화학적 조성은 XPS를 이용하여 측정하였으며, Table 2에 제조한 흡착제의 각각의 함량비를 나타내었다. 아민이 코팅된 A-MWNTs의 질소함량은 미처리 경우와 비교하여 증가하였는데, 이러한 질소 성분은 약산성을 띠는 탄소나노튜브에 염기성을 증가시켜 주며 이러한 탄소표면의 염기성 증가는 산성가스와의 흡착에 선택성을 증가시켜 줄 것으로 판단된다[23].

아민 처리한 A-MWNTs의 기공구조 변화를 고찰하기 위하여 10<sup>-6</sup> ~ 10<sup>0</sup> torr의 상대압력에서 N<sub>2</sub> 기체의 흡착량을 측정하여 흡착등온곡선을 구하였으며, Figure 2에 이를 나타내었다. Figure 2에 나타낸 바와 같이 제조된 시편의 N<sub>2</sub> 흡착등온곡선은 BET 분류 중 중기공의 발달을 볼 수 있는 Type IV형태임을 알 수 있었고[29], 대부분 낮은 상대압에서 흡착량의 증가가 이루어지지 않고 있으며, 높은 상대압에서 많은 흡착량을 보인 다음 흡착평형을 이루었다. 또한, 각기 다른 세 개의 아민으로 처리한 결과, PEHA-A-MWNTs와 DETA-A-MWNTs의 경우 흡착량이 PEI-A-MWNTs보다 크게 나타났는데, 이는 처리한 아민의 분자량이 증가함에 따라 A-MWNTs 표면의 기공을 폐쇄 또는 채우는 아민의 함량이 증가하여 흡착량이 감소한 것으로 판단된다.

Table 2에 제조한 흡착제의 BET 비표면적, 중기공의 부피, 미세기공의 부피, 그리고 기공전체의 부피를 나타내었다. 앞서 살펴 본 바와 같이 Table 2의 결과로부터 A-MWNTs에 대한 함침법은 비표면적을 감소시키는 요인으로 작용하며, 이는 아민이 함침법에 의해 도입될 때 미세기공을 막기 때문이다. 또한 미세기공과 중기공의 부피도 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, Table 2의 중기공도의 비율을 통해

Table 2. Surface Properties of the Samples Studied

Samples	Atomic conc. (%)			S <sub>BET</sub> <sup>a</sup>	V <sub>total</sub> <sup>b</sup>	V <sub>micro</sub> <sup>c</sup>	V <sub>meso</sub> <sup>d</sup>
	C	N	O				
MWNTs	97.5	—	2.5	159	0.365	0.0022	0.363
A-MWNTs	97.9	—	2.1	293	1.095	0.0007	1.094
DETA-A-MWNTs	90.8	1.7	5.3	96	0.430	0.0021	0.428
PEHA-A-MWNTs	89.4	2.0	5.8	84	0.544	0.0021	0.542
PEI-A-MWNTs	87.5	2.5	6.8	63	0.381	0.0016	0.380

S<sub>BET</sub><sup>a</sup>: specific surface area (m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>)    V<sub>total</sub><sup>b</sup>: total pore volume (cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>)    V<sub>micro</sub><sup>c</sup>: micropore volume (cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>)    V<sub>meso</sub><sup>d</sup>: mesopore volume (cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>)

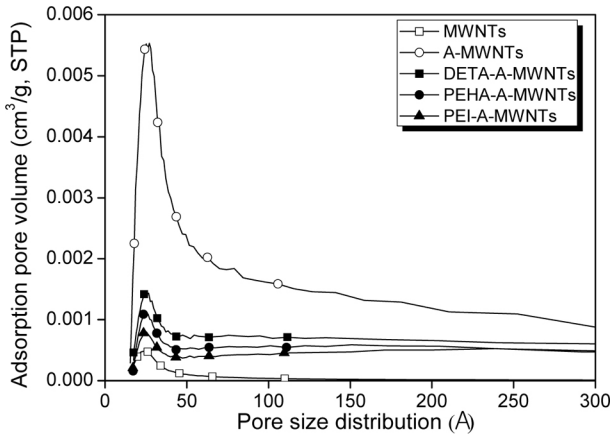


Figure 3. Pore size distribution of the samples studied.

제조된 모든 흡착제는 증기공에서 대부분의 흡착이 이뤄지고 있음을 확인하였다.

제조된 흡착제의 증기공의 PSD를 BJH 방법을 이용하여 구하였다. 증기공의 분포는 17~3000 Å 범위의 기공구조를 관찰할 수 있는 BJH 방법을 이용하여 Figure 3에 나타내었다. 기공이 일정한 크기로 구성된 경우, 비슷한 크기의 가스분자만 분리가 가능하기 때문에 기공의 크기는 흡착제의 성격을 규정하는 요소로 작용할 수 있다[30]. Figure 3에서 보는 바와 같이 제조된 모든 흡착제에서 20~50 Å 사이의 증기공이 잘 발달된 것을 관찰할 수 있었으며, A-MWNTs의 경우는 20~50 Å 사이에서 증기공이 우세하게 발달하였음을 알 수 있었다. 이는 6 M KOH 용액의 농도에서는 미세기공의 파괴를 유발하여 미세기공이 확대되고, 그 결과 증기공이 우세하게 발달되기 때문으로 판단된다[25]. 각 시편 기공의 최대피크는 A-MWNTs, DETA-A-MWNTs, PEHA-A-MWNTs, PEI-A-MWNTs, MWNTs의 순이었으며, 그 값은 각각 27 Å, 26.66 Å, 25.44 Å, 25.38 Å, 24.36 Å로 나타났다. KOH를 사용한 탄소나노튜브의 활성화는 가장 큰 비율을 갖은 증기공과 미세기공의 전체적인 분포를 증가시킴을 보여주며, 아민 처리 후에는 미세기공과 증기공의 비율이 감소함을 확인하였다.

### 3.2. 이산화탄소 흡착특성

이산화탄소 흡착특성은 temperature programmed desorption를 사용하여 측정하였으며, 그 결과를 Figure 4와 Figure 5에 나타내었다. 모든 경우에 있어서 실온에서 가장 큰 흡착량이 나타났으며 온도가 증가함에 따라 탈착됨을 알 수 있었다. 실온에서의 큰 흡착량은 물리적 흡착에 의한 것으로 이는 A-MWNTs의 경우에 있어서 유일하게 이용 가능한 흡착 메커니즘이며 또한 아민 처리한 A-MWNTs의 경우에도 유용하다. 그러나 아민 처리한 A-MWNTs의 경우 표면 처리된 아민이 기공을 막아 실온에서의 이산화탄소 흡착량은 미처리한 A-MWNTs에 비해 적은 양을 나타내었다. 또한 온도가 증가함에 따라 모든 시편들의 흡착된 이산화탄소들이 탈착되는 경향을 보여주고 있지만 아민 처리한 A-MWNTs의 경우 미처리된 A-MWNTs에 비해서 완만한 탈착 거동을 나타내었다. 이는 산성 가스인 이산화탄소와 A-MWNTs 표면에 처리된 염기성을 띠고 있는 아민 사이의 강한 상호작용에 의한 것으로 판단된다[23]. 흡착제의 이산화탄소의 상온에서 100 °C까지의 온도증가에 따른 이산화탄소의 탈착된 값을 적분하여 Figure 5에 나타내었다. A-MWNTs의 경우 앞서 언급한 것과 같이 가장 큰 이산화탄소 흡착량을 나타내었으며, 승온에 따른 급격한 탈착을 하였다. 반

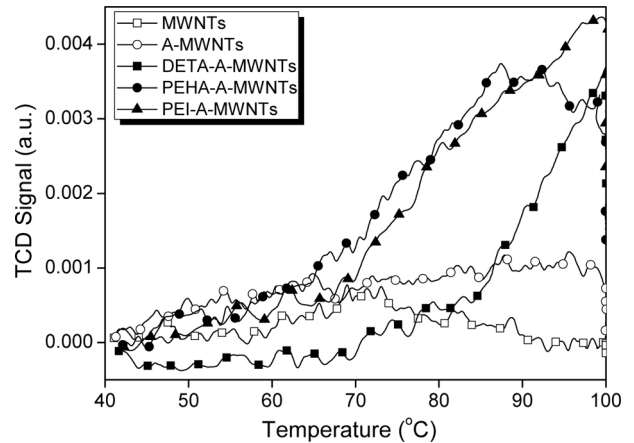


Figure 4. Temperature-programmed CO<sub>2</sub> capture tests of the samples studied.

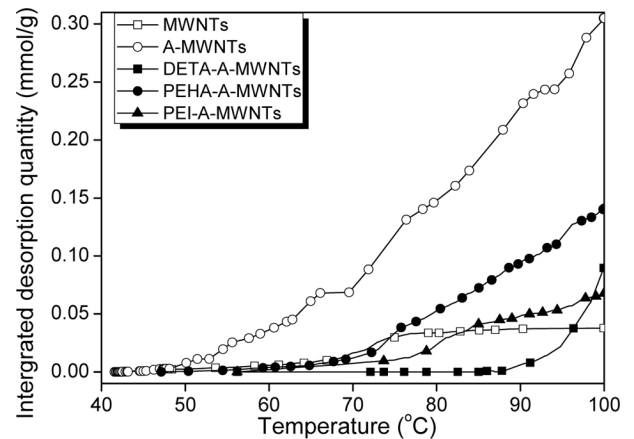


Figure 5. Integrated desorption quantity of the samples studied.

면, 아민 처리된 흡착제의 경우에는 A-MWNTs에 비해 전체적인 이산화탄소 흡착량은 낮았으며, 이는 아민이 A-MWNTs의 기공을 막아서 생긴 현상으로 판단된다. 전반적으로 A-MWNTs 표면의 아민 처리에 의해 산성가스에 대한 선택적 흡착력이 부여되고 미처리된 A-MWNTs에 비해 승온에 따른 완만한 탈착거동을 나타내고 있지만 전체적인 이산화탄소 흡착량은 감소함을 알 수 있었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 활성화시킨 탄소나노튜브의 아민 처리에 따른 이산화탄소 흡착거동을 고찰하고자 하였다. 실험결과, 아민 처리에 따른 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다.

1) A-MWNTs의 표면에 처리된 아민은 산성가스인 이산화탄소를 흡착하기 위한 주요 요소로서 작용하였으며, 산성가스인 이산화탄소에 대한 선택적 흡착을 가능케 하였다. 그러나 아민을 처리함에 따라 물리흡착의 주요 요소로서 작용하는 미세기공을 감소시켰으며, 이것이 전체적인 이산화탄소의 흡착량 감소를 가져왔다.

2) 아민 처리한 A-MWNTs의 경우 미처리된 A-MWNTs에 비해 상온에서의 이산화탄소 흡착량은 줄어들었으나, 온도가 증가함에 따라 미처리된 A-MWNTs의 이산화탄소 흡착량은 이산화탄소가 탈착하면서 급격히 감소한 반면, 아민 처리한 A-MWNTs는 완만하게 이산화

탄소가 탈착하면서 그 흡착량을 유지함을 확인하였다.

## 감 사

이 연구는 과학기술부의 지원으로 수행하는 21세기 수소프론티어 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of intergovernmental panel on climate change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press (2001).
- X. Xu, C. S. Song, J. M. Andresen, B. G. Miller, and A. W. Scaroni, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **62**, 29 (2003).
- Y. J. Yoo, H. S. Kim, J. H. Park, S. S. Han, and S. H. Cho, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **18**, 273 (2007).
- P. Li, S. Zhang, S. Chen, Q. Xhang, J. Pan, and B. Ge, *J. Appl. Polym. Sci.*, **108**, 3851 (2008).
- R. W. Hughes, D. Y. Lu, E. J. Anthony, and A. Macchi, *Fuel Processing Tech.*, **86**, 1523 (2005).
- K. M. Lee and Y. M. Jo, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **19**, 533 (2008).
- J. K. Jeon, Y. K. Park, and K. Chue, *J. KOSAE*, **20**, 99 (2004).
- N. D. Hutson, *Chem. Mater.*, **16**, 4135 (2004).
- IPCC Special Report on carbon dioxide capture and storage intergovernmental panel on climate change. Cambridge university Press, Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore and Sao Paulo (2005).
- K. Damen, M. van Troost, A. Faaij, and W. Turkenburg, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **32**, 215 (2006).
- X. Xu, C. Song, J. M. Andresen, B. Miller, and A. Scaroni, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **62**, 29 (2003).
- A. Arenillas, F. Rubiera, F. B. Parra, C. O. Ania, and J. J. Pis, *Appl. Surf. Sci.*, **252**, 619 (2005).
- T. C. Drage, A. Arenillas, K. M. Smith, C. Pevida, S. Piippo, and C. E. Snape, *Fuel*, **86**, 22 (2007).
- M. M. Maroto-Valer, Z. Tang, and Y. Zhang, *Fuel Process Technol.*, **86**, 1487 (2005).
- J. Przepiorski, M. Skrodzewicz, and A. W. Morawski, *Appl. Surf. Sci.*, **225**, 235 (2004).
- K. A. Mohamed, M. A. W. D. Wan, C. Y. Yin, and D. Adinata, *Sep. Purif. Technol.*, **62**, 611 (2008).
- S. J. Park, K. D. Kim, and J. R. Lee, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **9**, 920 (1998).
- S. J. Park and K. D. Kim, *J. Colloid Interface Sci.*, **212**, 186 (1999).
- G. P. Knowles, S. W. Delaney, and A. L. Chaffee, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**, 2626 (2006).
- M. L. Gray, Y. Soong, K. J. Champagne, H. Pennline, J. P. Baltrus, R. W. Stevens Jr., R. Khatri, S. S. C. Chuang, and T. Filburn, *Fuel Process Technol.*, **86**, 1449 (2005).
- X. Xu, C. S. Song, B. G. Miller, and A. W. Scaroni, *Fuel Process Technol.*, **86**, 1457 (2005).
- N. Hiyoshi, K. Yogo, and T. Yashima, *Chem. Lett.*, **33**, 510 (2004).
- M. G. Plaza, C. Pevide, A. Arenillas, and F. Rubiera, *J. J. Pis, Fuel*, **86**, 2204 (2007).
- W. J. Son, J. S. Choi, and W. S. Ahn, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **113**, 31 (2008).
- S. J. Park, S. Y. Jin, and J. Kawasaki, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **14**, 1111 (2003).
- Q. Jiang, M. Z. Qu, B. L. Zhang, and Z. L. Yu, *Carbon*, **40**, 2743 (2002).
- B. J. Kim, Y. S. Lee, and S. J. Park, *J. Colloid Interface Sci.*, **306**, 454 (2007).
- S. J. Park and K. D. Kim, *Carbon*, **39**, 1741 (2001).
- S. brunauer, P. H. Emmett, and E. Teller, *J. Am. Chem. Soc.*, **60**, 309 (1938).
- K. M. Lee and Y. M. Jo, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **19**, 533 (2008).