

아민기 개질 탄소를 이용한 이산화탄소 분리 특성

차왕석¹, 임병준⁵, 김준수⁴, 이성연², 박태준³, 장현태^{4*}

¹군산대학교 토목·환경공학부, ²(주)파인텍, ³안센백신, ⁴한서대학교 화학공학전공, ⁵씨제이생물자원

Characteristics of carbon dioxide separation using amine functionalized carbon

Wang Seog Cha¹, Byeong Jun Lim⁵, Jun Su Kim⁴,
Sung Youn Lee², Tae Jun Park³, Hyun Tae Jang^{4*}

¹School of Civil and Environmental Engineering, Kunsan National University, ²Finetech. Co. Ltd.,

³Janssen Vaccine, ⁴Department of Chemical Engineering, Hanseo University, ⁵CJ Feed & Care

요약 새로운 이산화탄소 분리용 흡착제 개발은 흡착속도, 소수성, 상용 흡착제보다 낮은 재생온도 등을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 CO₂를 분리하기 위하여 아미노실란이 그래프팅된 활성탄을 합성하였다. 아민 작용기 전구체로 methyltrimethoxysilane(MTMS) and 3-Aminopropyl-triethoxysilane(APTES)을 사용하여 그래프팅하였다. APTES를 그래프팅 활성탄이 MTMS를 사용한 것보다 우수한 흡착 특성을 나타내었다. 온도 및 이산화탄소 분압에 따른 흡착 특성으로 이산화탄소 분리 메커니즘을 규명하였다. 이산화탄소의 흡수/흡착능은 25 °C에서 아민 그래프팅 활성탄과 활성탄과 비슷하지만 아민 그래프팅 활성탄이 75 °C에서 더 높게 나타났다. 아민 작용기 그래프팅 활성탄은 이산화탄소 분압이 1 % 인 조건에서 활성탄보다 더 우수한 흡수능을 나타내었다. 아미노실란 그래프팅 활성탄은 물리적 흡착 특성을 지닌 화학적 흡수 메커니즘을 나타내었다. 아민 작용기가 부여되어 개질된 고체상 흡수/흡착제는 이산화탄소 흡착/흡수 공정만 아닌 재료 관련 산업에 큰 영향을 미칠 수 있는 고성능 복합 재료이며, 개발된 흡착제는 흡수/흡착 및 분리 관련 산업 공정에 적용될 수 있다.

Abstract The development of a new sorbent for carbon dioxide depends on several factors, such as fast adsorption/absorption velocity, hydrophobicity, and lower regeneration temperature than commercial sorbent. In this study, aminosilane grafted activated carbon was synthesized to capture CO₂. Methyltrimethoxysilane (MTMS) and 3-aminopropyl-triethoxysilane (APTES) were used as the grafting precursor of the amine functional group. The APTES grafting activated carbon showed higher sorption property than MTMS used one. The characteristics of the separation mechanism of carbon dioxide were examined by measuring the adsorption capacity according to temperature and carbon dioxide partial pressure. The absorption capacity of carbon dioxide was similar to amine grafting activated carbon and activated carbon at 25°C, but amine-grafted activated carbon was higher at 75°C. The amine functional group-grafted activated carbon showed higher absorption capacity than activated carbon with a 1% carbon dioxide partial pressure. Aminosilane grafting of activated carbon was chemically absorbed but also showed the characteristics of physical adsorption. The reforming activated carbon with an amine functional group grafted solid absorption/adsorption sorbent would significantly impact the material engineering industry and carbon dioxide adsorption process. The functionalized sorbent is a high-performance composite material. The developed sorbent may have applications in other industrial processes of absorption/adsorption and separation.

Keywords : Amine, Solide Sorbent, Grafting, Carbon Dioxide, Absorption/Adsorption

*Corresponding Author : Hyun Tae Jang(Hanseu Univ.)

email: htjang@hanseo.ac.kr

Received February 1, 2021

Accepted April 2, 2021

Revised March 2, 2021

Published April 30, 2021

1. 서론

산업혁명 이후 산업화에 따른 에너지 사용 증가되며, 선진국의 경우 에너지 소비 증가율이 정체되는 경향을 나타내고 있으나 중국, 인도, 개발도상국 등의 산업화에 따른 에너지 소비 증가에 의하여 환경오염이 증대되고 부산물인 온실가스의 방출 속도도 급격히 증가하고 있다. 아직 청정에너지의 사용이 미비한 상태에서 2050년까지 70% 이상의 에너지를 화석연료가 담당할 것으로 보고되고 있다[1]. 화석연료 연소시 다양한 오염물질이 발생되며, 최근에는 심각하지 않게 취급되던 이산화탄소의 발생에 의한 지구온난화가 가장 심각한 문제로 부각되고 있다. 이러한 화석연료 연소시 발생하는 오염물질 중 황화합물은 산림과 각종 구조물 및 생태환경에 피해를 주고 있으며, 질소화합물에 의하여 온난화 및 스모그 등 다양한 문제점이 발생되며, 특히 미세먼지에 의한 오염에 의한 피해가 급격히 증가하고 있는 추세이다. 계속적인 화석연료의 사용 증가는 자연환경에 직접적인 독성을 미치는 물질에 의한 오염 뿐만 아니라 지구환경의 여러가지 형태로 악영향을 미치고 있다. 이러한 환경오염 유발유해가스에 의한 영향과 더불어 연소시 발생하는 이산화탄소에 대한 문제점이 급속히 부각되고 있다. 지구 온난화는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)등 질소화합물(NO_x), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs) 및 육불화황(SF₆)등 대표적인 6대 온실가스(greenhouse gas, GHG)와 수증기에 의하여 발생된다. 6대 온실가스 중 이산화탄소에 의하여 가중되는 온실효과가 지구환경의 전체적인 문제에 중요한 부분으로 발전할 수 있다는 사실이 다양한 연구에서 밝혀지고 있다[2, 3]. 이산화탄소는 무색, 무미, 무취의 기체로 일반 대기 중에 0.05%정도 존재하며, 온실가스 가운데 이산화탄소 배출에 의한 영향이 전체 지수의 55%를 차지하고 있다. 또한 2030년까지 연 평균 9.7%씩 증가할 것으로 예측하고 있다[1]. 비교적 쉽게 변화가 관측되는 현상으로는 해수면 상승이 지난 100년간 14.3~22.7cm 상승하는 추세를 나타내고 있다[2, 6]. 메탄에서 수소를 생산하는 공정은 물과 산소를 이용하는 개질공정이 현재 상용화되어 있으나, 이산화탄소의 발생 문제를 해결하고자 다양한 연구도 진행되고 있다[4, 5]. 이산화탄소의 분리방법은 흡수법, 흡착법, 막분리법이 대표적이며[7], 본 연구에서는 물리적 흡착과 화학적 흡수가 동시에 일어날 수 있는 방법을 연구하였다. 물리적 흡착제로는 제올라이트, 탄소, 알루미늄, 실리카 등이 있으며, 물리흡착과 화학흡수를 동시에 이용할

수 있는 Metal-Organic Frameworks가 제시되고 있다 [8]. 물리흡착제를 화학흡수와 물리흡착이 일어나는 하이브리드형으로 개질하여 흡착 및 탈착 효율을 높이기 위하여 본 연구에서는 활성탄소에 아민기를 이용하여 개질하여 이산화탄소에 대한 분리 특성을 연구하였다. 아민기를 grafting한 경우 아민에 의한 화학흡수를 발생시키며, 고체상의 화학흡수는 물리흡착 특성을 지닌 흡수제로 낮은 재생에너지와 분리단계에서 이산화탄소 농도를 높일 수 있으므로 이에 대한 개질특성을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 탄소 개질

탄소는 다양한 구조로 존재하며, graphite, Amorphous, Diamond, Fullerene, Nano tube의 형태로 존재한다 [9]. 최근 Fullerene과 Nano tube의 우수한 물성으로 인한 다양한 응용 연구가 진행되고 있으나 저비용 대량생산이 어려움으로 인하여 다양한 분야의 상용화는 이루어지지 않고 있다[9]. 본 연구에서는 활성탄(Aldrich)에 아민기를 표면에 부여하기 위하여 다음의 Fig. 1과 같은 과정으로 수행하였다.

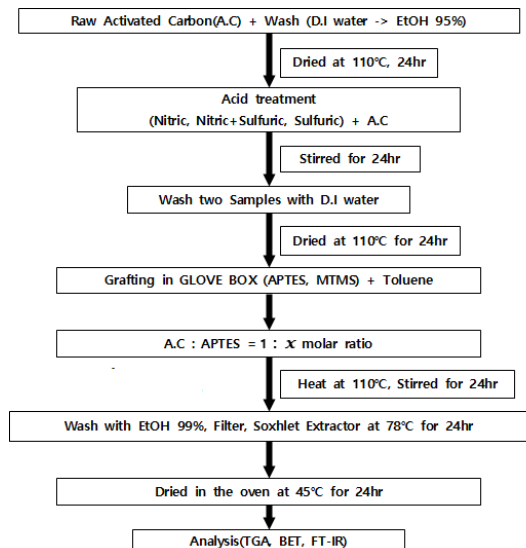


Fig. 1. The scheme diagram of amine grafting on hydroxyl radical derived carbon.

탄소를 물과 에탄올로 세척한 후 질산, 황산, 질산과 황산을 혼합하여 제조한 용액을 이용하여 처리하였다. 산

처리에 의하여 탄소의 표면에 수산화기를 생성시키며 [10]. 본 연구에서는 질산만이 아닌 황산과 왕수에 의한 영향을 고찰하였다. 처리된 탄소에 grafting을 위하여 아민 전구체 APTES(3-Aminopropyltriethoxysilane, Aldrich), MTMS(methyltrimethoxysilane, Aldrich,)을 사용하였다. Grafting은 아르곤 분위기 글로브박스에서 무수톨루엔을 용매에서 MTMS, APTES을 각각 첨가하고 환류조건에서 24시간 가열 반응시켰으며, 첨가된 아민기의 양은 사용된 탄소 몰수에 1/3을 양론비로 설정하고, 이에 대한 과잉비로 사용하였다. 이는 실란이 3개의 hydroxy기와 결합하여 한 개의 아민이 생성되기 때문이다. 아민전구체 과잉비는 2, 7, 10배를 각각 사용하였다. 이러한 과잉량을 사용하는 이유는 반응과정에서 생성되는 부생성물인 에탄올에 의하여 aminosilane이 반응하여 탄소체와 탈리된 상태로 생성되므로 과잉량을 사용하여 탄소 표면에 아민기를 최대로 유도할 수 있다. Grafting된 탄소를 Soxhlet 추출기에서 에탄올을 사용하여 미반응된 아민전구체와 표면에 침적된 아민화합물을 제거하였다

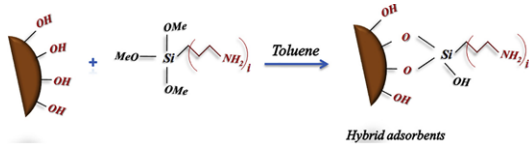


Fig. 2. Simplified illustration of amine functionalization grafting procedure[10]

상기 Fig. 1, 2의 처리 후 생성된 아민 grafting carbon의 표면분석과 FT-IR 분석을 다음 표 1과 Fig. 3에 나타내었다. 표면분석은 질소흡착장치(BET, Belsorp-mini)를 이용하였으며, 질소흡착등온선으로 부터 계산하였다. 아민기 grafting을 확인하기 위하여 FT-IR Spcctrometer (thermo, Nicolet IR 200)을 이용하여 활성탄과 APTES가 grafting된 시료의 spectrum을 500cm⁻¹에서 4000cm⁻¹까지 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. 표 1에서 아민의 grafting에 의하여 비표면적과 기공 부피 등이 감소함을 알 수 있으며, 평균 기 공크기도 감소하고 있다. 이는 기공에 아민의 grafting되어 기공이 감소함을 나타내며, 물리흡착이 감소될 수 있음을 알 수 있다.

MTMS를 grafting한 경우 비표면적 및 기공부피 감소가 매우 적게 나타나며, 평균기공도 질산처리한 활성탄과 유사하다. 이는 MTMS은 grafting이 매우 적은양 되는 것으로 예측할 수 있으며, 이러한 특성은 이산화탄소 온도에 따른 흡수평형으로 알 수 있다.

Table 1. Metal precursor for synthesis of catalysts

Sample	Surface Are(m ² /g)	Pore Volume(cm ³ /g)	Maan pore diameter(nm)
AC	538.15	0.6457	4.7993
ACN	461.82	0.3187	2.7600
ACM	346.35	0.2100	2.4255
ACMA	117.76	0.1097	3.7257
ACNA	147.61	0.1161	3.1467
ACNM	410.11	0.2724	2.6567

AC : Untreated Carbon, ACN : Nitric acid treated carbon, ACM : Sulfuric acid treated carbon, ACNA : APTES grafting on ACN, ACMA : APTES grafting on ACM, ACNM : MTMS grafting on ACN

Fig. 3 (a)에서 아민에 의한 peak로 3433cm⁻¹, 2900cm⁻¹에서 NH, 2357cm⁻¹에서 NH₂, N=C=O, C=O가 나타나며, 1150cm⁻¹에서 C-N, 1100cm⁻¹에서 C-O를 의미한다. 또한 2349cm⁻¹에서 흡착된 O=C=O가 나타난다. (b)에서 3428cm⁻¹, 1558cm⁻¹, 1097cm⁻¹, 787cm⁻¹에 전형적인 활성탄의 피크가 나타난다. 따라서 APTES에 의하여 아민이 grafting된 것을 알 수 있다 [10].

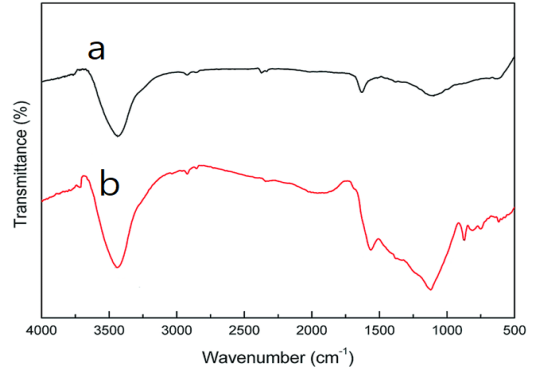


Fig. 3. FT-IR spectrum of sample(a : ACNA, b: AC).

2.2 실험방법

본 연구에서 이산화탄소의 분리특성은 열중량반응기 (TGA, Sinco TGA-1000)를 이용하여 수행하였다. 실험에 사용한 시료는 약 10 mg이며, 보관 과정에 흡수, 흡착된 된 이산화탄소 및 수분 등을 제거하기 위하여 질소 분위기에서 150 ℃로 10℃/min의 승온 속도로 승온하여 일정 시간 유지하여 흡착, 흡수된 물질을 제거한 후 실험을 수행하였다. 흡수, 흡착실험에 사용된 이산화탄소 농도는 100%, 15.0%(N₂ Balance), 1.0%(N₂ Balance)이었으며, 재생온도는 150℃, 이산화탄소 흡수, 흡착 실

험온도는 25, 50, 75℃에서 수행하였다. 특히, 50, 75℃의 실험은 이산화탄소가 배출되는 연소공정의 마지막의 공정인 탈황 공정의 배출온도[11]를 고려하여 설정하였다. 본 연구에서 이산화탄소는 고체흡수제 기공에 물리적 흡착되거나, 아민기에 화학적 흡수가 일어나게 된다. 따라서 아민기의 화학흡수와 기공의 물리흡착이 함께 일어나는 현상이 발생된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도에 따른 흡수, 흡착 특성

Fig. 4은 활성탄을 과포화 질산으로 처리하여 hydroxyl기를 유도하고 APTES를 2배의 몰비로 첨가하여 grafting한 시료의 흡수특성을 나타낸 그림이다. Fig. 3에서 붉은색은 온도 변화를 나타내며, 검은선은 질량 변화를 나타낸다. 실험은 11.138 mg의 시료를 sample pan에 장착한 후 질소분위기에서 150℃까지 10℃/min의 속도로 승온하여 약 90분간 유지하여 시료에 흡수, 흡착된 물질을 제거한다. Fig. 4에서 열중량반응기에 초기 loading된 시료의 질량을 100%로 산정하고 온도상승에 의하여 감소된 분율이 Fig. 4에 표기되었다. 따라서 이산화탄소가 시료에 흡수, 흡착된 양은 초기 loading 시료 질량을 TG에서 측정되는 백분율을 이용하여 계산하였다. 즉, 실제 사용된 시료량은 초기 loading 양에 질소분위기에서 150℃로 온도를 상승시켜 감소된 무게를 제외한 양으로 산정하였다. 온도를 25℃까지 강하시키며, 질소공급을 차단하고 100% 이산화탄소를 공급하여 나타난 무게변화를 측정된 값이다. 이러한 방법으로 반복하여 50, 75℃를 수행하고 마지막에 25℃를 다시 한번 수행하여 나타내었다.

Fig. 4에서 아민 grafting 활성탄을 사용하였으나 흡수, 흡착 온도 상승에 따른 무게 증가가 감소하며, 이는 아민기로 기능화된 표면에서도 물리적 흡착이 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 고체흡수제의 경우는 화학흡수도 온도에 따른 영향을 받는 것으로 다수의 연구자가 보고 [12, 13, 14]하고 있다. 즉 화학흡수량의 변화는 미비하나 온도 상승에 따른 물리흡착이 감소하여 나타나는 특성이다.

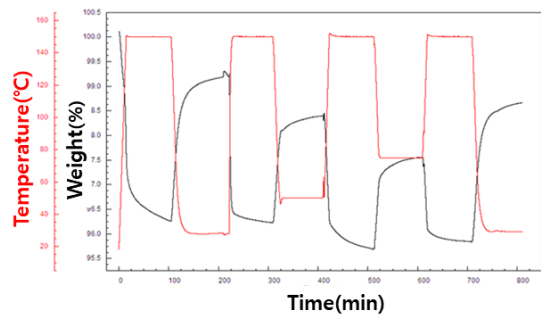


Fig. 4. Carbon dioxide adsorption profile according to temperature(ACNA, 100% CO2).

Fig. 5는 흡수, 흡착량을 온도에 따라 나타내었다. 활성탄, 산세척 활성탄, 질산을 이용하여 hydroxyl기를 유도하고 APTES, MTMS를 각각 grafting한 4 종류의 시료를 비교하였다. 그림에 표기된 ACNA-2, ACNM-2의 표기된 2는 활성탄의 탄소 몰수 2배의 aminosilane을 사용한 경우이다. 그림에서 온도에 따른 이산화탄소의 분리 양은 감소된다. 분리량의 감소로 표현한 것은 아민기 개질 활성탄의 경우 아민기 의한 화학흡수와 흡착제 표면 기공에 의한 물리흡착이 동시에 일어나고, 물리흡착제의 경우 물리흡착만이 일어나므로 흡수·흡착을 분리량으로 표현한 것이다. 온도에 따라 고체에 유도된 아민기에 의한 이산화탄소의 화학적 흡수의 경우 일반적인 화학적 흡수와 달리 온도에 영향을 받으므로 일어나는 현상이다 [12]. 가장 높은 값을 나타내는 것은 질산으로 처리한 경우이며, 이는 산세척에 의하여 표면에 흡착된 오염물질이 완전히 제거되어 표면이 활성화되어 나타나는 현상이다.

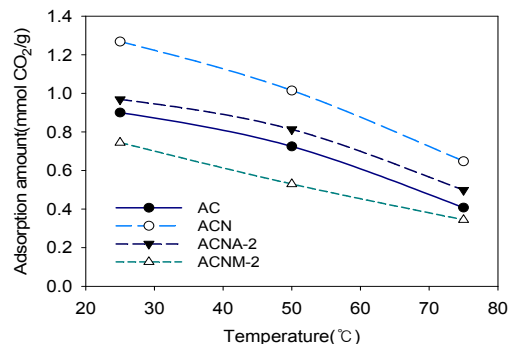
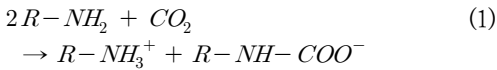


Fig. 5. Carbon dioxide adsorption amount according to temperature(aminosilane excess ratio 2.0).

아민을 grafting한 경우 처리하지 않은 활성탄보다 높게 나타나며, 이는 사용된 aminosilane의 양이 적으므로 완전한 grafting이 이루어지지 않고 오히려 micro 기공이 감소되어 일부 화학흡수가 일어나고 대부분의 흡착점에서는 물리흡착이 일어나며, 기공 크기가 감소되어 일어나는 현상으로 판단된다[15].

또한 MTMS를 사용한 경우는 APTEs보다 grafting이 불완전하고 이산화탄소의 흡착점이 확보되지 못하여 일어나는 현상으로 해석된다. 다음 반응식 1과 같이 아민에 의한 이산화탄소 흡수는 2개의 아민기가 관여되며, 고체상의 경우 이산화탄소가 흡수된 아민기는 수소 하나를 다른 아민기에 제공하여야 하므로 근접한 아민기 간의 거리가 흡수량에 매우 중요한 요인이 된다.



따라서 탄소 몰수의 두배의 aminosilane을 사용한 경우 충분한 grafting이 되지 않은 것을 알 수 있다. Fig. 6은 aminosilane을 과잉비 7배를 사용한 경우이다. 2배와 달리 MTMS를 사용한 경우가 APTEs보다 높게 나타난다. 또한 APTEs의 경우 처리되지 않은 활성탄과 동일한 분리량을 나타내고 있다. 이는 grafting과 미반응된 aminosilane이 상호 가교를 이루는 것으로 판단되며, 장시간의 soxhlet 추출로 반응 부산물을 완전히 제거하여 micro 기공의 활성화로 흡수량 증대를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

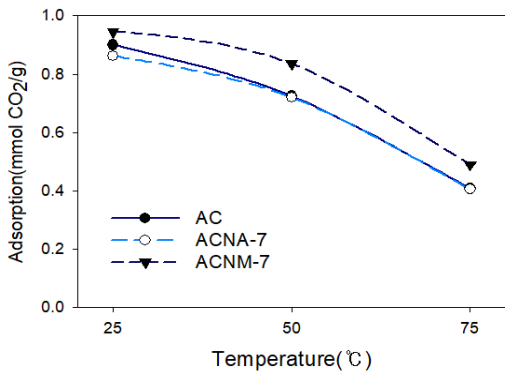


Fig. 6. Carbon dioxide adsorption amount according to temperature(aminosilane excess ratio 7.0).

3.2 이산화탄소 분리기구 해석

고체 흡착제를 아민으로 개질한 경우 이산화탄소 분리가 화학흡수와 물리흡착으로 일어나므로[16] 분리 기구 해석을 위하여 수행하였다. 그림 7은 활성탄 시료(AC),

APTEs를 과잉 10배로 사용하여 grafting한 시료(ACNA-10)과 동일 시료를 공기 분위기에서 200°C에 노출한 시료(ACNA-10 200°C treated)를 대상으로 1%의 이산화탄소를 사용하여 흡착평형 실험을 수행하여 나타내었다.

Fig. 7의 실험은 시료 loading 후 질소를 사용하여 150°C에서 활성화한 후 1% 이산화탄소(N₂ balance)를 공급하며, 150°C에서 25°C 간격 온도를 하강하며 나타나는 무게 변화를 나타내었다. 측정된 온도에서 유지 시간은 50min 으로 유지하였다. 그림에서 공기분위기에 200°C에 노출된 ACNA-10과 활성탄은 유사한 무게 변화 양을 나타내며, ACNA-10은 상대적으로 매우 큰 변화량을 나타낸다. 100%의 이산화탄소를 사용한 Fig. 5, 6의 결과와는 다른 특성을 나타낸다. 분리 대상 기체인 이산화탄소 분압 영향이 큰 경우 물리흡착이며, 분압의 영향이 적은 경우 화학흡수에 해당된다. Fig. 6의 100% 이산화탄소에서 나타나는 유사한 흡수량이 Fig. 7의 1% 사용시에는 매우 큰 차이를 나타낸다. 물리흡착의 경우 분압에 영향을 크게 받으며, 화학흡수는 분압에 영향을 매우 적게 받으므로 물리흡착과 화학흡수를 구분하기 위하여 1%의 분압을 나타내는 1% 이산화탄소를 이용하여 실험하여 분리 메커니즘을 규명하였다. 또한 200°C에서 공기에 아민기 개질 활성탄이 노출된 경우 아민은 우레아로 열화 형성되므로 인하여 흡수점이 사라지게 되며, 이러한 현상을 열화에 의한 비활성화로 표현한다. 이러한 비활성화로 그림에서 열처리에 의하여 흡수량이 크게 감소되는 것을 알 수 있다. 즉, 활성탄에 아민의 grafting에 의하여 화학흡수제로 개질이 완전히 일어난 것을 알 수 있다.

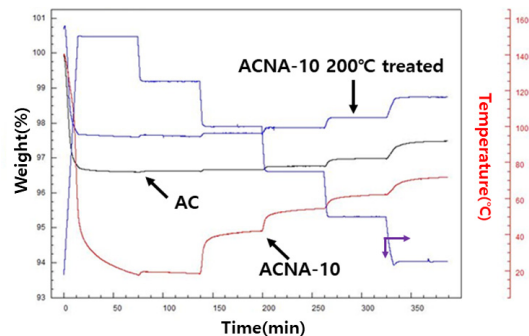


Fig. 7. Carbon dioxide adsorption isotherm according to temperature using 1% CO₂.

활성탄에 grafting된 아민의 열적 안정성을 열화온도

에 따른 이산화탄소 흡수량으로 측정하여 나타내었다. Fig. 8은 APTES를 과잉 10배로 사용하여 grafting한 시료(ACNA-10)를 공기 분위기에서 150°C, 175°C, 200°C에서 각각 노출하여 아민기의 열화를 측정한 결과이다.

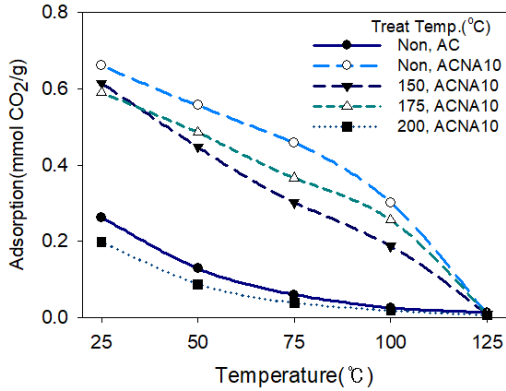


Fig. 8. Effect of treatment temperature under air atmosphere(ACNA-10, carbon dioxide partial pressure 1%).

흡수실험은 1% 이산화탄소를 사용하여 수행하였다. 그림에서 150°C와 175°C의 이산화탄소 흡수량은 산소와 접촉하지 않은 시료보다는 감소하며, 200°C의 경우 활성탄과 동일한 흡수량을 나타낸다. 이는 150°C 이상에서 아민기가 산소와 접촉하는 경우 열화반응이 발생되어 아민이 변형되어 이산화탄소에 대한 흡수능을 감소가 시작되며, 175°C에서 흡수량의 감소가 증가하고 200°C에서 거의 모든 아민기가 비활성화되어 활성탄과 유사한 분리량을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 200°C에서는 아민기 열화가 완전하게 일어나는 것을 알 수 있다. 또한 125°C에서는 화학흡수와 물리흡착이 일어나지 않는 것을 알 수 있으며, 고체상에 유도된 아민의 경우 물리흡착과 화학 흡수 특성을 동시에 나타내는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

이산화탄소 분리를 aminosilane으로 개질된 활성탄으로 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

1. Aminosilane을 grafting한 활성탄의 이산화탄소 분리는 이산화탄소의 분압이 낮은 경우 화학흡수 특성이 나타나며, 분압이 높은 경우 물리흡착 특성을 나타낸다. 분리메카니즘은 물리흡착 특성을 나타내는 화학흡수로 일어난다.
2. Aminosilane grafting에 의한 개질시 활성탄의

기공 및 비표면적은 감소되며, 아민기에 의한 흡수는 상대적으로 빠른 흡,탈착을 얻을 수 있다. 온도 상승과 이산화탄소 분압 감소에 따라 화학흡수가 증대되고 물리 흡착이 감소되는 특성을 나타내었다.

3. 활성탄 표면에 유도된 아민기는 150°C 이상에서 산소와 접촉에 의하여 열화가 일어나며, 200°C 이상에서 모든 아민기는 열화에 의하여 비활성화된다.

References

- [1] Hannah Ritchie and Max Roser (2017) "CO and Greenhouse Gas Emissions". Published online: <https://www.studocu.com/en-us/document/brigham-young-university-idaho/environmental-and-natural-resource-economics/other/co2-and-greenhouse-gas-emissions-our-world-in-data/9710989/view>
- [2] <https://www.epa.gov/climateleadership>
- [3] Jane M.-F. Johnson, Alan J. Franzluebbers, Sharon Lachnicht Weyers, Donald C. Reicosky, "Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions", *Environmental Pollution* 150, 107-124, 2007 DOI : <https://pubag.nal.usda.gov/download/15176/PDF>
- [4] H. He, W. Li, M. Zhong, D. Konkolewicz, D. Wu, K. Yaccato, T. Rappold, G. Sugar, N.E. David, K. Matyjaszewski, "Carbon black functionalized with hyperbranched polymers: synthesis, characterization, and application in reversible CO₂ capture", *Journal of Materials Chemistry A*, 6, 2013, 6810-6821, DOI : <https://doi.org/10.1039/c3ta10699c>
- [5] Q. B. Meng, G. S. Yang, Y. S. Lee, "Preparation of highly porous hypercrosslinked polystyrene adsorbents: Effects of hydrophilicity on the adsorption and microwave-assisted desorption behavior toward benzene", *Micro. Mesoporous Mater.*, 181(15), 2013, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2013.07.027>
- [6] I. Bano, M. Arshad, "Climatic changes impact on water availability", *Perspect. On Water Usage for Biofuels Production*, 2018, DOI : https://doi.org/10.1007/978-3-319-66408-8_2
- [7] Douglas Aaron, Costas Tsouris, "Separation of CO₂ from Flue Gas: A Review", *Separation Science and Technology*, 40(1-3), 321-348, 2005 DOI : <https://doi.org/10.1081/SS-200042244>
- [8] Hong-Cai Zhou, Jeffrey R. Long, and Omar M. Yaghi, "Introduction to Metal-Organic Frameworks", *Chem. Rev.*, 112(2), 673-674, 2012 DOI : <https://doi.org/10.1021/cr300014x>
- [9] World of Carbon - Interactive Nano-visulisation in Science & Engineering Education (IN-VSEE), <https://web.archive.org/web/20081005162616/http://invssee.asu.edu/nmodules/Carbonmod/point.html>

[10] Nouha Horria, Eloy S. Sanz-Pérez, Amaya Arencibia, Raul Sanz, Najoua Frini-Srasra, Ezzeddine Srasra, "Amine grafting of acid-activated bentonite for carbon dioxide capture", *Applied Clay Science*, 180, 105195, 2019 DOI : <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105195>

[11] R. K. Srivastava, W. Jozewicz, "Flue Gas Desulfurization: The State of the Art", *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 51, 1676-1688, 2001, DOI : <http://dx.doi.org/10.1080/10473289.2001.10464387>

[12] Margandan Bhagiyalakshmi, Lee Ji Yun, Ramani Anuradha, Hyun Tae Jang, "Utilization of rice husk ash as silica source for the synthesis of mesoporous silicas and their application to CO₂ adsorption through TREN/TEPA grafting", *Journal of Hazardous Materials, Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 928-938, 2010 DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.097>

[13] Norio Tsubokawa, "Preparation and Properties of Polymer-grafted Carbon Nanotubes and Nanofibers", *Polymer Journal*, 37(9), 637-655, 2005 DOI : <https://doi.org/10.1007/s11814-007-5037-9>

[14] L.A. Darunte, K.S. Walton, D.S. Sholl, C.W. Jones, "CO₂ capture via adsorption in amine-functionalized sorbents", *Curr. Opin. Chem. Eng.*, 12, 82-90, 2016 DOI : <https://doi.org/10.1295/polymi.37.637>

[15] C. Chen, D.W. Park, W.S. Ahn, "Surface modification of a low cost bentonite for post-combustion CO₂ capture", *Appl. Surf. Sci.*, 283, 699-704, 2013 DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.07.005>

[16] Y. Kong, M. Fan, B. Dutcher, S. Cui, X. Shen, Y. Kong, A.G. Russell, P. McCurdy, "Dynamic capture of low-concentration CO₂ on amine hybrid silsesquioxane aerogel", *Chem. Eng. J.*, 283, 1059-1068, 2015 DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.07.044>

차 왕 석(Wang Seog Cha)

[정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 화학공학 (공학석사)
- 1993년 8월 : 고려대학교 화학공학 (공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 토목·환경공학부 교수

<관심분야>

폐기물가스화 및 열분해

임 병 준(Byeong Jun Lim)

[준회원]



- 2021년 2월 : 한서대학교 항공화공전공 (공학사)
- 2021년 4월 ~ 현재 : 씨제이생물자원

<관심분야>

화학공정, 정밀화학, 분리공정

김 준 수(Jun Su Kim)

[준회원]



- 2021년 2월 : 한서대학교 항공화공전공 (공학사)

<관심분야>

화학공정, 정밀화학, 온실가스처리

이 성 연(Sung Youn Lee)

[준회원]



- 2021년 2월 : 한서대학교 항공화공전공 (공학사)
- 2020년 12월 ~ 현재 : ㈜파인텍

<관심분야>

화학공정, 정밀화학, 분리공정

박 태 준(Tae Jun Park)

[준회원]



- 2021년 2월 : 한서대학교 항공화공전공 (공학사)
- 2021년 1월 ~ 현재 : 안센백신 품질관리팀

<관심분야>

기기분석, 분리공정, 유동층반응

장 현 태(Hyun Tae Jang)

[종신회원]



- 1989년 8월 : 고려대학교 화학공학 학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 고려대학교 화학공학 학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학과 교수

<관심분야>

분리공정, 유동층반응