

ORIGINAL ARTICLE

Piperazine으로 함침된 활성탄의 이산화탄소 흡착 특성

최 성 우*

계명대학교 환경과학과

Adsorption Characteristic of Carbon Dioxide on Activated Carbon Impregnated with Piperazine

Sung-woo Choi*

Department of Environmental Science and Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

Abstract

Functionalized adsorbent has been synthesized by piperazine(Pz) on activated carbon. Quantitative estimations of CO₂ were undertaken using gas chromatography with GC/TCD and the prepared adsorbents were characterized by BET surface area and FT-IR. It was also studied effect of various parameters such as piperazine loadings and adsorption temperature. The specific surface area decreased from 1212.0 m²/g to 969.8 m²/g by impregnation and FT-IR revealed a N-H functional group at about 1400 cm⁻¹ to 1700 cm⁻¹. The CO₂ adsorption capacity at 20°C and 50~100°C was as follow: AC > Pz(10)-AC > Pz(30)-AC > Pz(50)-AC at 20°C and Pz(10)-AC > AC > Pz(30)-AC > Pz(50)-AC at 50~100°C. Therefore, for high temperature flue gas condition, the Pz(10)-AC showed the highest adsorption capacity due to physical adsorption and chemical adsorption by amino-group content. The results suggest that activated carbon impregnated with Pz is an effective adsorbent for CO₂ capture from real flue gases above 50°C.

Key words : Piperazine, CO₂ adsorption, Activated carbon, Impregnation

1. 서론

이산화탄소는 적외선 복사열을 흡수하거나 다시 방출하여 지구온난화를 유발하는 온실가스이며 기후-생태계변화유발물질로써 대기 중 이산화탄소 농도는 1900년에는 280 ppm에서 현재 380 ppm으로 급격한 증가를 보여주었다(IPCC, 2001). 2009년 우리나라의 이산화탄소 배출량은 5억 2813만톤으로 국가별 배출

량 비교 시 8위로 영국, 프랑스 보다 높고 인구가 우리 보다 많은 인도네시아, 브라질보다 높은 순위를 기록하고 있다(U.S. EIA, 2010). 우리나라의 온실가스 배출량은 점차 증가 추세에 있으며 이에 따라 이산화탄소의 포집분리기술의 개발은 기후변화 대응에 매우 중요하다(KEEI, 2010).

이산화탄소는 화력발전소 등 에너지부문에 대량 배출되고 있으며 건조흡수제 또는 흡착제를 이용하여

Received 26 December, 2012; Revised 20 March, 2013;

Accepted 10 April, 2013

*Corresponding author : Sung-woo Choi, Department of Environmental Science and Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

Phone: +82-53-580-5245

E-mail: swchoi@kmu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

산화탄소를 회수하고 저장하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Kwon 등, 2010). 흡착법은 높은 재생성, 동역학적 흡착 및 탈착 등의 장점을 가지므로 이산화탄소의 분리 포집을 위한 실용성 있는 기술로 평가되고 있다(Belmabkhout 등, 2009; Wang 등, 2008). 이산화탄소 포집 및 분리를 위한 대표적인 흡착제로는 메조포러스실리카(Choi, 2011), 제올라이트(Chatti 등, 2009; Jadhav 등, 2007), 활성탄(Amalina, 2012; Lee 등, 2010) 등이 많이 사용되고 있다. 활성탄 등 흡착제의 경우 상온에서는 이산화탄소의 흡착효율이 매우 뛰어나나 온도가 상승할 경우 탈착현상이 일어나 흡착효율이 급격히 감소하는 단점을 가진다. 이는 기체와 흡착제가 상호간의 인력에 의해 고체상 흡착제 표면에 부착되는 현상으로 물리적 흡착에 따른 것이다. 일반적으로 온도가 낮고 압력이 높을수록 흡착이 잘 이루어지며 압력이 낮고 온도가 높을수록 탈착이 잘 이루어진다. 즉 물리적 흡착기전에 의해 이산화탄소를 포집 시 공정상의 온도 및 배기가스의 50~100°C 이상일 경우에는 흡착효율이 급격히 감소된다. 따라서 석탄 화력발전의 경우 연소 배기가스의 대기 중 배출온도는 50°C 임을 감안한다면 고온에서 이산화탄소를 포집·분리할 수 있는 흡착제의 개발이 매우 중요하다(Huston, 2004). 고체흡착제의 물리적 흡착 외에 화학적 흡착능을 증가시키기 위한 방법으로 흡착제에 아민계 물질을 함침하여 기능성 흡착제를 개발하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다. Lee 등(2010)은 활성탄에 MEA를 함침하였으며 Lu 등(2009)은 구형의 메조포러스 실리카에 EDA의 아민계 물질을 함침하여 이산화탄소 흡착연구를 진행하였다. 그러나 상온에서는 물리적 흡착 외 화학적 흡착 효과로 이산화탄소의 흡착효율은 증가하였으나 온도 증가시 흡착능이 감소하는 경향을 보여주었다.

따라서 본 연구에서는 50°C 이상의 고온에서도 이산화탄소의 포집·분리에 효과적인 흡착제를 제조하고자 야자계 활성탄에 piperazine을 함량별로 함침하여 기능성 흡착제를 제조하였다. 제조된 흡착제는 흡착 온도에 따라 이산화탄소의 흡착효율을 평가하였으며 BET, FTIR의 표면분석을 실시하여 흡착효율에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에 사용된 흡착제는 야자계 활성탄으로 개질화를 위해 piperazine(이하 Pz, Aldrich)를 활성탄에 함침하여 기능성 활성탄을 만들었다. Pz는 고리모양의 제 2급 디아민으로 분자량이 86.14 g의 무색의 흡습성을 가진 고체이다. 야자계 활성탄에 Pz를 함침하기 위하여 Xu 등(2003)의 방법을 이용하였다. 함침방법으로 메탄올과 아민계 물질인 Pz와 혼합하여 15분 동안 상온에서 교반 후 야자계 활성탄을 주입하여 30분 동안 교반 후 70°C에서 16시간 진공 건조하면 아민 물질이 함침된 야자계 활성탄을 얻을 수 있었다. Pz의 함침량은 10 wt%, 30 wt%, 50 wt%로 하였으며, 이때 함침된 기능성 촉매를 Pz(X)-AC로 표기하였다. 여기서 X는 Pz의 함침량을 나타내었다.

CO₂의 흡착평가를 위해 AC 및 Pz-AC의 표면분석 및 흡착실험을 실시하였다. 제조된 흡착제에 대한 비표면적을 평가하기 위해 77.7K에서 ASAP2020 (Micromeritics Instrument Corp. U.S.A)을 이용하였으며 BET(Brunauer-Emmett-Teller) 표면적, 기공부피를 계산하였으며 또한 Pz에 함침된 아민기의 함침특성을 파악하기 위해 FT-IR(Fourier transform infrared spectroscopy) 분석은 Spectrum GX (PerkinElmer, U.S.A)를 이용하였다. CO₂ 흡착실험은 GC-TCD (HP6890, Hewlett Packard, U.S.A)를 이용하였으며 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용된 모사가스는 15%

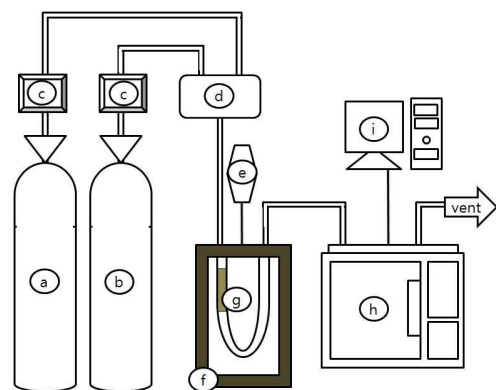


Fig. 1. Diagram of the experimental setup for CO₂ adsorption system (a: CO₂, b: N₂, c: mass flow controller, d: mixing chamber, e: temperature controller, f: furnace, g: adsorbent in U-tube, h: GC-TCD, i: PC).

의 CO₂가스를 사용하였으며, 20, 50, 100 °C에서 등온 흡착하였다. 농도가스의 주입부분의 내경이 10 mm, 길이가 200 mm인 U자형 석영 반응관을 사용하였으며, MFC(mass flow meter)를 이용하여 봄베로부터 CO₂의 유량을 조절하였다. U자형 반응관으로 부터 나오는 CO₂의 농도 분석은 GC-TCD를 이용하여 검출하였다. 길이 30 m, 직경이 0.32 mm 그리고 필름의 두께 3 µm인 칼럼(GS-Carbonplot, U.S.A)을 사용하였다. 또한 GC-TCD 분석 조건으로 185 °C의 injector 온도와 150 °C의 detector 온도를 설정하였으며, 오븐 온도는 35 °C를 유지하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 흡착온도 및 Pz 함량에 따른 이산화탄소 파과특성 AC와 Pz-AC의 이산화탄소의 분리능을 평가하기

위해 흡착온도별 Pz 함침 함량별 흡착실험을 실시하였다. Fig. 2는 Pz 함량별 흡착온도에 따른 이산화탄소의 흡착특성을 나타내었다. AC는 흡착온도가 증가할수록 흡착능이 낮아지는 경향을 보여주었으며 흡착온도가 20 °C에서 10분대에서 파과가 일어나 14분대까지 흡착이 진행되었으며 50 °C에서는 10분대에 100 °C에서는 6분대에 파과가 진행되어 20 °C에서 흡착효율이 가장 좋았다. 온도에 따른 파과시간대의 변화는 흡착능에 영향을 주게 되며 순수한 AC의 경우 이산화탄소를 물리적 흡착기전에 의해 흡착함으로 흡착온도에 크게 영향을 받는 것으로 사료된다. Plaza 등(2007)은 상용화 AC에 DETA, PEHA, PEI를 함침하여 이산화탄소 흡착실험을 실시한 결과 아민 코팅 시 AC에 N₂ 함량과 염기도가 증가된다고 보고하였다. 또한 아민 코팅으로 인해 AC의 마이크로포러스 볼륨이 감소되어 물리적 흡착에 영향을 주게 되어 상온에서 이산화

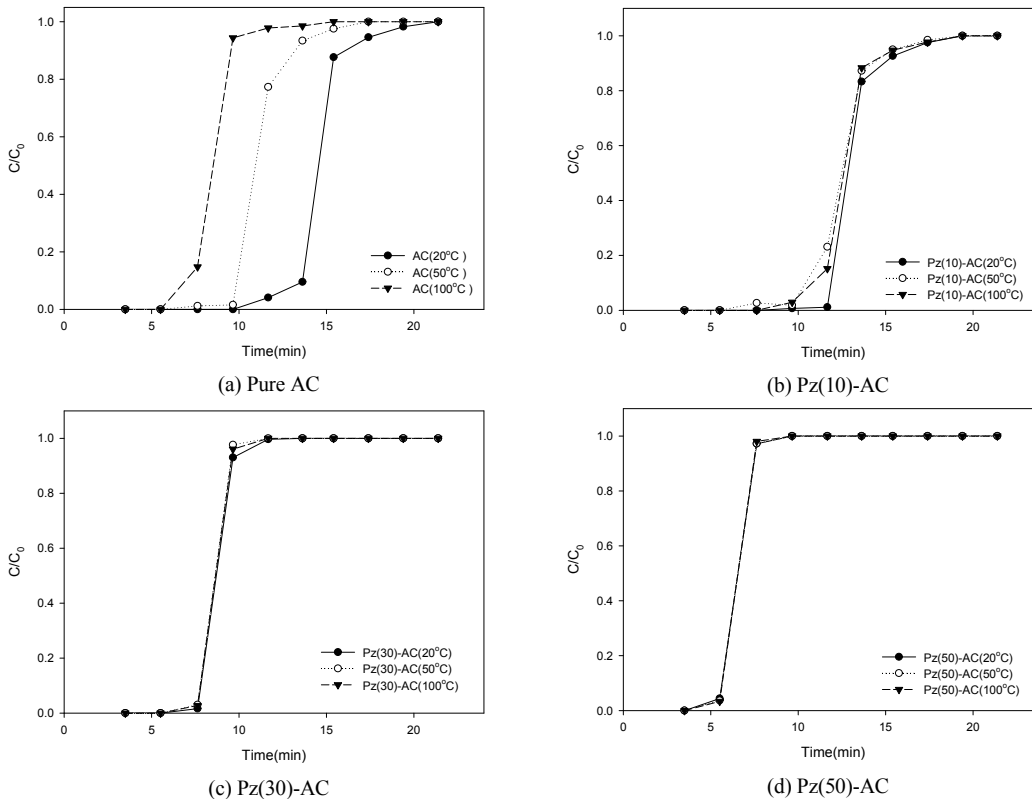


Fig. 2. Breakthrough curves of CO₂ on pure AC and modified AC at different Pz loading.

탄소의 흡착효율이 감소된다고 하였다. 반면에 Pz를 함침한 AC의 경우 흡착온도에 따른 흡착능의 차이는 거의 없었으며 함침량이 증가할수록 파과시간을 짧아지는 현상을 보여주었다. Pz(10)-AC는 10 분대에 파과가 되었으며 Pz(30)-AC는 8 분대에, Pz(50)-AC는 6분대에 파과가 진행되어 Pz의 함량이 증가함에 따라 흡착능이 감소됨을 보여주었다. 특히 방향족아민인 Pz를 AC에 함침 하였을 때 이산화탄소의 흡착은 물리적 흡착능 외에 화학적 흡착능을 증가시킬 수 있는 장점을 가지나 함침에 의해 AC 표면의 비표면적이 작아져 이산화탄소의 물리적 흡착능을 저하시키는 단점을 가지기도 한다.

Fig. 3은 흡착온도별 AC와 Pz-AC의 파과에 따른 농도변화를 나타내었다. 흡착온도가 20°C일 때 AC가 흡착효율이 가장 높았으며 그 다음으로 Pz(10)-AC, Pz(30)-AC, Pz(50)-AC 순으로 Pz의 함침량이 증가할수록 흡착능이 감소하였다. 반면에 50°C 이상에서는 AC에 비해 Pz(10)-AC가 흡착효율이 가장 높았으며 AC, Pz(30)-AC, Pz(50)-AC 순으로 나타났다. 특히 100°C에서는 AC와 Pz(30)-AC의 이산화탄소 흡착효율이 유사한 것으로 확인되었다. 따라서 Pz-AC 중 10 wt%로 함침된 Pz-AC는 상온에서는 AC에 비해 흡착효율은 낮아지나 50~100°C에서는 동일 온도 조건에서 흡착효율이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 산성 가스인 이산화탄소와 Pz로 처리된 AC의 표면이 염기성을 띠고 있어 물리적 흡착 외에 화학적 흡착이 작용한 것으로 판단된다. Jang 등(2009)은 아민 처리된 탄소나노튜브의 이산화탄소 흡착 및 탈착 거동 연구를 실시하였는데 온도 증가에 따른 이산화탄소 탈착실험에서 아민으로 처리된 시편과 아민이 처리되지 않은 시편에 비해 완만한 탈착 경향을 보여주었으며 이는 아민 사이의 강한 상호작용에 의한 것이라고 설명하였다.

3.2. 흡착온도 및 Pz함량에 따른 이산화탄소 흡착량 비교

흡착온도에 따른 AC와 Pz-AC의 흡착량을 비교해 보면 20°C에서 AC가 55.5 mg/g로 가장 높았으며 Pz(10)-AC는 48.0 mg/g, Pz(30)-AC는 28.0 mg/g, Pz(50)-AC는 18.2 mg/g로 Pz의 함침량이 증가함에 따라 흡착량이 급격히 감소되었다. 반면에 흡착온도

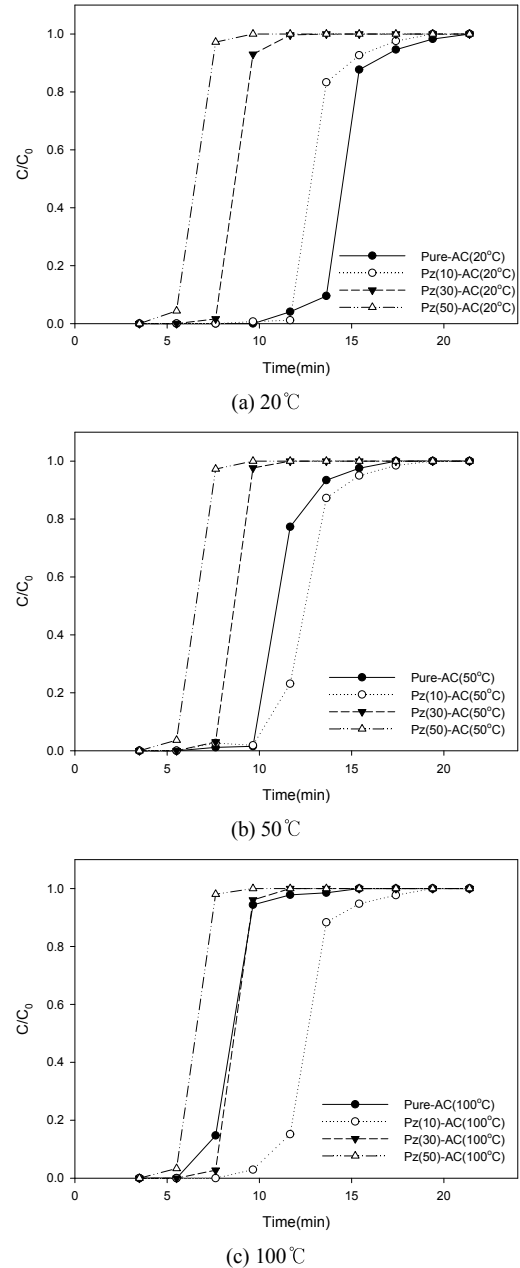


Fig. 3. Breakthrough curves of CO₂ on pure AC and modified AC at different adsorption temperatures.

가 50°C에서는 AC가 39.3 mg/g, Pz(10)-AC가 45.0 mg/g로 AC에 비해 흡착량이 약 15% 증가하였으며 Pz(30)-AC과 Pz(50)-AC의 흡착량은 크게 변화하지

않았다. 흡착온도가 100°C에서는 Pz(10)-AC의 흡착량이 45.9 mg/g로 가장 높았으며 흡착온도가 50°C인 경우와 유사한 흡착량을 보여주었다. 따라서 20°C의 상온에서는 순수한 AC의 흡착량이 가장 높았으며 흡착온도가 50°C이상에서는 Pz(10)-AC > AC > Pz(30)-AC > Pz(50)-AC 순으로 흡착량이 증가되었다. 또한 순수 AC의 경우 온도가 증가함에 따라 흡착량이 감소되었으나 Pz로 개질화된 AC의 경우 온도변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 즉 순수 AC의 경우 20°C에서 55.5 mg/g 이었으나 100°C의 흡착온도에서는 36.1 mg/g로 약 35%정도 흡착량이 감소하였다. 반면에 Pz(10)-AC의 경우 20°C, 50°C, 100°C의 흡착온도에 따른 흡착량이 48 mg/g, 45 mg/g, 45.9 mg/g 이었으며 Pz(30)-AC은 28.0 mg/g, 27.4 mg/g, 27.6 mg/g이었고 Pz(50)-AC은 약 18.2 mg/g를 AC에 비해 흡착량이 67%감소하였다. 따라서 Pz-AC의 경우 흡착온도에 상관없이 흡착량이 일정하였으며 Pz의 함침량이 증가됨에 따라 흡착량은 감소되었다. 또한 상온에서는 AC가 Pz-AC에 비해 흡착량이 높았으나 이는 AC의 비표면적이 Pz-AC보다는 상대적으로 커 물리적 흡착에 의한 영향을 받은 것으로 사료되며 50°C 이상의 온도에서는 Pz(10)-AC가 가장 높은 흡착량을 보여주었는데 이는 화학적 흡착과 물리적 흡착에 영향을 받은 것으로 사료된다. Hong 등(2012)의 연구에서 연소 배기가스 배출 온도인 50°C에서 이산화탄소 흡착 실험을 한 결과 Pz로 함침된 성형 제올라이트와 미처리된 성형제올라이트에 비해 1.8배의 이산화탄소의 흡수능이 증가한다고 보고하여 본 연구와 유사한 경향을 보여주었다. 또한 Chartti 등(2009)의 연구에서도 MEA와 IPA의 아민계를 제올라이트에 함침하여 이산화탄소 흡착능을 연구한 결과 75°C 흡착온도에서 순수 13matrix의 흡착능은 16.01 mg/g이었으며 MEA를 함침한 경우 19.98 mg/g, IPA를 함침한 경우 22.78 mg/g로 아민계를 함침한 제올라이트에서 이산화탄소의 흡착능이 증가하였다. 또한 일반 상온에서는 물리적 흡착이 화학적 흡착에 비해 우선하며 흡착온도가 증가 시 화학적 흡착에 의해 이산화탄소가 주로 흡착되며 이는 제올라이트 내 아민그룹의 역할이 기인한다고 보고하였다.

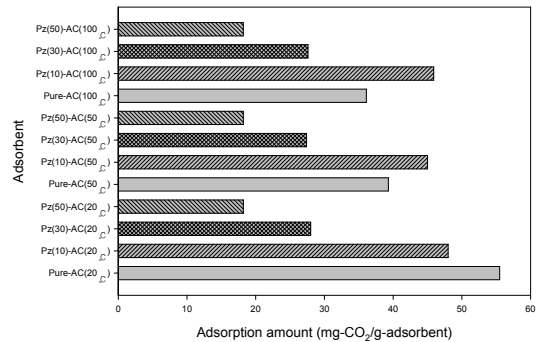


Fig. 4. Adsorption amount of Pz impregnated AC and pure AC according to temperature.

3.3. 표면특성분석

Pz의 함침정도를 평가하기 위해 FTIR 분석을 실시하였으며 Fig. 5에 나타내었다. AC와 Pz(10)-AC간의 FTIR 결과 비교 시 1200~1400 cm⁻¹에서 두 개의 피크가 나타났으며 1700 cm⁻¹부근의 피크가 증가하는 것을 볼 수 있었다. Plaza 등(2007)은 N-enriched 카본에 대한 CO₂ 흡착 연구에서 N으로 함침된 카본과 함침되지 않은 카본의 FTIR의 결과 비교 시 N으로 함침된 카본은 1400 cm⁻¹ 부근과 1677 cm⁻¹ 부근에서 아민그룹과 관련된 피크가 나타난다고 보고 하였다. Hong 등(2012)의 연구에서는 제올라이트 13X에 Pz를 30 wt%, 50 wt%, 70 wt%로 함침 하여 FTIR 분석을 하였으며 1637 cm⁻¹에서 N-H의 유의한 피크를 관찰할 수 있었다고 보고 하였다. 본 연구에서도 1400 cm⁻¹ 부근과 1700 cm⁻¹ 부근에서 피크가 관찰되어 Pz에 의한 아민그룹의 함침정도를 확인할 수 있었다.

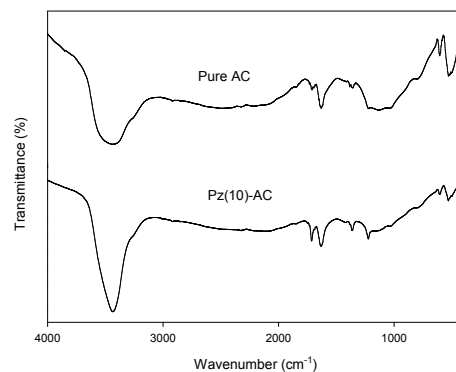


Fig. 5. FTIR transmission spectra of pure AC and Pz(10)-AC.

Table 1. Surface properties of AC and Pz-AC

Parameter	AC	Pz(10)-AC	Pz(30)-AC	Pz(50)-AC
BET surface area(m ² /g)	1212.0	1081.2	1028.2	969.8
Pore volume(cm ³ /g)	0.059	0.047	0.045	0.043

또한 제조한 흡착제의 BET 비표면적과 기공부피를 Table 1에 나타내었다. 순수한 AC의 경우 BET 비표면적은 1212.0 m²/g이었으며 Pz의 함침량에 따라 비표면적이 감소함을 보여주었으며 기공부피 역시 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Pz-AC의 경우 아민기가 미세기공을 막아 비표면적과 기공부피가 감소됨을 나타내며 이는 Jang 등(2009)의 연구결과와 유사하게 나타났다. 특히 Pz(10)-AC는 순수한 AC에 비해 10%이상의 비표면적이 감소되었음에도 불구하고 50℃이상의 흡착온도에서는 순수 AC보다 높은 흡착량을 보여주었으나 Pz(30)-AC와 Pz(50)-AC의 경우에는 흡착효율이 상대적으로 낮았다. 따라서 Pz(10)-AC의 경우 비표면적은 감소하였으나 아민기의 형성에 따라 화학적 흡착이 이산화탄소 흡착에 관여하여 흡착효율이 증가된 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 연소배기가스의 온도가 50℃이상일 때 이산화탄소의 포집·분리에 효과적인 흡착제를 제조하고자 아자계 활성탄에 piperazine을 함량별로 함침하여 기능성 흡착제를 제조하여 이산화탄소의 흡착효율 및 표면분석을 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

흡착온도 및 Pz 함량에 따른 이산화탄소 파과특성을 평가 시 흡착온도가 20℃일 때 AC > Pz(10)-AC > Pz(30)-AC > Pz(50)-AC 순으로 상온에서는 순수 AC의 CO₂ 흡착능이 가장 높았으며 50℃이상에서는 Pz(10)-AC > AC > Pz(30)-AC > Pz(50)-AC 순으로 나타났다. 순수 AC의 경우 20℃에서 55.5 mg/g의 흡착량을 보였으나 100℃의 흡착온도에서는 36.1 mg/g로 약 35%정도 흡착량이 감소하였다. 반면에 Pz(10)-AC의 경우 100℃의 흡착량이 45.9 mg/g이었으며 Pz(30)-AC은 27.6 mg/g이었고 Pz(50)-AC은 18.2

mg/g이었다. FTIR 분석 결과에서 연구에서도 1400 cm⁻¹부근과 1700 cm⁻¹부근에서 피크가 관찰되어 Pz에 의한 아민그룹의 함침정도를 확인할 수 있었다. AC의 경우 BET 비표면적은 1212.0 m²/g이었으며 Pz의 함침량에 따라 비표면적이 감소함을 보여주었으며 기공부피 역시 감소하였다. 따라서 일반적인 연소 배기가스 온도인 50℃이상에서 흡착량을 비교 시 Pz(10)-AC가 순수 AC에 비해 비표면적이 감소하였음에도 불구하고 흡착능이 가장 좋았으며 이는 이산화탄소 흡착 시 비표면적에 의한 물리적 흡착기전 외에 아민기의 활성화에 따른 화학적 흡착에 영향을 받은 것으로 사료된다.

본 연구에서는 연소가스의 온도가 50℃이상에서도 CO₂ 흡착이 가능한 기능성 흡착제를 개발하고자 하였다. 흡착온도가 50℃이상에서는 Pz로 함침된 AC의 CO₂ 흡착능 높았으나 상온에서는 순수 AC의 흡착량이 높았다. 따라서 다양한 아민계 물질과 AC 외에 제올라이트13X, Y-제올라이트 등에 함침 하여 동일 실험 조건에서 비교 연구하여 고온뿐만 아니라 상온에서도 흡착능이 높은 기능성 흡착제의 개발이 매우 중요할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- Amalina, M. D., Ibrahim, A. S., Hadi, A., 2012, General study about activated carbon for adsorption carbon dioxide, *J. Purity Util. React. Environ.*, 1(5), 206-221.
- Belmabkhout, Y., Serna-Guerrero, R., Sayari, A., 2009, Adsorption of CO₂ from dry gases on MCM41 silica at ambient temperature and high pressure. 1: pure CO₂ adsorption, *Chem. Eng. Sci.*, 64(17), 3721-3728.
- Chatti, R., Bansiwala, A. K., Thote, J. A., Kumar, V., Jadhav, P., Lokhande, S. K., Biniwale, R. B., Labhsetwar, N. K., Rayalu, S. S., 2009, Amine loaded zeolites for carbon dioxide capture: amine loading and

- adsorption studies, *Micropor. Mesopor. Mat.*, 121, 84-89.
- Choi, S. W., 2011, Adsorption of CO₂ on amine-impregnated mesoporous Silica, *J. Environ. Sci. Int.*, 20(7), 873-879.
- Hong, M. S., Pankaj, S., Jung, Y. H., Park, S. Y., Park, S. J., Baek, Y. H., 2012, Separation of carbon dioxide using pelletized zeolite adsorbent with amine impregnation, *Korean J. Chem. Eng. Res.*, 50(2), 244-250.
- Huston, N. D., Speakman, S. A., Payzant, E. A., 2004, Structural effects on the high-temperature absorption of CO₂ on a synthetic hydrotalcite, *Chem. Mater.*, 16, 4135-4143.
- IPCC, 2001, *Climate Change 2001: The scientific intergovernmental panel on climate change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jahav, P. D., Chatti, R. V., Biniwale, R. B., Labhsetwar, N. K., Devotta, S., Rayalu, S. S., 2007, Monoethanol amine modified zeolite 13X for CO₂ adsorption at different temperatures, *Energy & Fuels*, 21, 3555-3559.
- Jang, D. I., Jo, K. S., Park, S. J., 2009, Influence of amine surface treatment on carbon dioxide adsorption behaviors of activated carbon nanotubes, *J. Ind. and Eng. Chem.*, 20(6), 658-662.
- K.E.E.I, 2010, http://www.gihoo.or.kr/portal/01_General_Info/04_ST01_02.jsp.
- Kwon, J. S., Choi, S. S., Kim, S. I., Yeun, M. S., 2010, Abatement the newest technology trend of carbon dioxide capture storage & sulfur hexafluoride, Korea Environmental industry & Technology Institute, 68-70.
- Lee, D. H., Kam, S. K., Lee, S. W., Lee, M. K., 2010, Adsorption characteristics of activated carbons according to impregnation concentrations and inlet CO₂ gas concentrations, *J. Environ. Sci. Int.*, 26(12), 1403-1407.
- Lu, C., Su, F., Hsu, S. C., Chen, W., Bai, H., Hwang, J. F., Lee, H. H., 2009, Thermodynamics and regeneration of CO₂ adsorption on mesoporous spherical-silica particles, *Fuel. Process. Tech.*, 90(12), 1543-1549.
- Plaza, M. G., Pevida, C., Arenillas, A., Rubiera, F., Pis, J. J., 2007, CO₂ capture by adsorption with nitrogen enriched carbons, *Fuel*, 86, 2204-2212.
- U.S.EIA, 2010, <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/>.
- Wang, X. P., Jun, J. J., Cheng, J., Hao, Z. P., Xu, Z. P., 2008, High-temperature adsorption of carbon dioxide on mixed oxides derived from hydrotalcite-like compounds, *Environ. Sci. Technol.*, 42, 614 - 618.
- Xu, X., Song, C., Andrésen, J. M., Miller, B. G., Scaroni, A. W., 2003, Preparation and characterization of novel CO₂ "molecular basket" adsorbents based on polymer-modified mesoporous molecular sieve MCM41, *Micropor. Mesopor. Mat.*, 62, 29-45.