

# 고온 이산화탄소 포집을 위한 기능성 활성탄의 흡착특성 Adsorption Characteristics of Functionalized Activated Carbon for High Temperature CO<sub>2</sub> Capture

최성우<sup>†</sup> · 이철규  
Sung-Woo Choi<sup>†</sup> · Cheol-Gyu Lee

계명대학교 환경과학과

Department of Environmental Science and Engineering, Keimyung University

(Received November 6, 2014; Revised March 23, 2015; Accepted March 31, 2015)

**Abstract :** Activated carbon impregnated with polyethyleneimine (PEI) was evaluated as a functionalized adsorbent for CO<sub>2</sub> capture. The CO<sub>2</sub> adsorption characteristics of the adsorbents was undertaken using GC/TCD, BET surface area and FT-IR. A series of adsorbents were synthesized by impregnating 10, 30, 50 wt% of PEI on activated carbons and were investigated CO<sub>2</sub> adsorption capacity at high and low adsorption temperature. The CO<sub>2</sub> adsorption capacity at 20°C and 100°C was as follow: AC > PEI(10)-AC > PEI(30)-AC > PEI(50)-AC at 20°C and PEI(10)-AC > PEI(30)-AC > PEI(50)-AC > AC at 100°C. Adsorption capacities of amine functionalized AC was larger than virgin AC at high temperature due to chemisorption by amino-group content. From the results, the PEI(10)-AC showed one of the most promising adsorbents for CO<sub>2</sub> capture from flue gas at high temperature.

**Key Words :** Polyethyleneimine, CO<sub>2</sub> Adsorption, Activated Carbon, Impregnation

**요약 :** 이산화탄소 포집을 위한 기능성 흡착제인 폴리에틸렌이민(PEI)을 함침한 활성탄을 평가하였다. 이산화탄소 흡착제의 흡착 특성은 GC/TCD, BET 표면적 및 FT-IR을 사용하였다. 활성탄에 PEI를 10, 30, 50 wt%를 함침하여 흡착제를 합성하고, 온도변화에 따른 이산화탄소의 흡착능을 조사하였다. 20°C와 100°C에서의 이산화탄소 흡착능은 다음과 같다: 20°C에서는 AC > PEI(10)-AC > PEI(30)-AC > PEI(50)-AC의 순으로 나타났으며, 100°C에서는 PEI(10)-AC > PEI(30)-AC > PEI(50)-AC > AC 순으로 나타났다. 아민 기능기의 활성탄의 흡착능이 순수 활성탄보다 아미노기에 의하여 화학 흡착 때문에 높은 온도에서 높게 나타났다. 본 연구의 결과로 PEI(10) 활성탄은 고온의 가스로부터 이산화탄소 포집에 가장 유능한 흡착제 중 하나로 보여진다.

**주제어 :** 폴리에틸렌이민, 이산화탄소 흡착, 활성탄, 함침

## 1. 서론

이산화탄소는 지구온난화의 주요원인으로 온실가스의 80%를 차지하며 지속적인 화석연료의 사용으로 인하여 대기 중의 농도가 증가하고 있다.<sup>1)</sup> 이산화탄소는 화력발전소 등 에너지부문에 대량 배출되고 있으며 증류, 추출 및 흡수, 흡착, 막분리 등이 포집 및 회수하는 방법으로 제어하고 있다. 특히 대형 화력발전소의 습식 세정탑을 사용하여 이산화탄소를 제거할 경우 아민을 분사하거나 혼합하는 방법을 사용하나 많은 세정액을 필요로 하고 폐수처리 및 부식 등의 단점이 발생될 수 있다.<sup>2)</sup> 반면에 흡착법의 경우 낮은 에너지 요구량과 비용, 넓은 온도범위와 압력범위에서 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다고 보고하고 있다.<sup>3)</sup>

다공성 흡착제의 경우 제올라이트와 활성탄 등으로 나눌 수 있는데 제올라이트의 경우 이산화탄소 흡착 시 수분의 함유량에 따라 흡착능이 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그러나 활성탄의 경우 수분의 영향을 상대적으로 받지 않고 높은 흡착능을 가지고 있으며 재생이 쉬운 장점이 있다.<sup>4)</sup> 또한 활성탄의 물리적, 표면화학적 특성은 산화과정,

열처리 및 함침 등의 과정을 통해 흡착에 중요한 역할을 하는 산소의 양, 표면의 질소 기능기가 변화될 수 있는 장점이 있다.<sup>5)</sup>

활성탄을 이용하여 이산화탄소를 흡착할 경우 흡착온도에 의해 흡착능이 크게 영향을 받는다. Siriwardane 등<sup>6)</sup>은 이산화탄소의 분압이 낮거나 25°C보다 높은 온도 조건에서는 흡착능의 급격한 감소를 보인다고 보고하고 있다. 흡착제는 상온에 비해 온도 상승 시 흡착효율이 급격히 감소하는 단점을 가지며 이는 물리적 흡착 기전에 의한 영향을 받기 때문이다. 화력발전의 경우 연소 배기가스의 대기 중 배출온도가 50°C 이상임을 고려할 때 고온에서 이산화탄소를 포집·분리할 수 있는 흡착제의 개발이 필요하다.<sup>7)</sup>

고온에서 활성탄의 흡착능 증가를 위해 흡착제 표면 개질화를 통해 물리적 흡착 외에 화학적 흡착능을 향상시키는 연구가 많이 진행되고 있다. 개질화 과정에 대한 연구로는 활성탄의 알칼리성을 높여 이산화탄소의 친화도를 높이는 방향으로 진행되고 있으며 활성탄 표면에 질소성분처리에 관한 연구,<sup>8,9)</sup> 산-염기 표면처리,<sup>10)</sup> 알카놀 아민을 도입하는 연구가 보고되고 있다. 또한 Chang 등<sup>11)</sup>과 Liang 등<sup>12)</sup>은

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: swchoi@kmu.ac.kr Tel: 053-580-5245 Fax: 053-580-6286

흡수법에서 널리 사용되고 있는 알카놀 아민류는 이산화탄소를 선택적으로 포집하는 특성이 있다고 보고하였으며, 현재 MEA (Monoethanolamine), DEA (Diethanolamine), TEA (Triethanolamine) 등을 이용한 개질화된 흡착제 연구가 증가하고 있는 추세이다.<sup>13,14)</sup> 특히 알카놀 아민류 중에서 PEI (Polyethyleneimine)는 이산화탄소와 반응할 수 있는 질소원자가 많아 이산화탄소 제거에 효과적이라는 연구 보고가 있다.<sup>15)</sup>

따라서 본 연구에서는 PEI를 함침한 활성탄을 이용하여 50℃ 이상의 고온에서 이산화탄소의 흡착거동을 평가하였다. 활성탄에 PEI를 10, 30, 50 wt%로 함침한 후 FT-IR을 사용하여 표면 특성을 비교하였으며 GC-TCD를 이용하여 흡착 온도에 따른 이산화탄소의 흡착 효율을 비교 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구에 사용된 흡착제는 야자계 활성탄으로 개질화를 위해 PEI (Aldrich, USA)를 사용하였다. 함침 시 메탄올을 용매로 이용하였고 Xu 등<sup>16)</sup>의 방법을 사용하여 개질화된 활성탄을 만들었다. 함침방법은 메탄올과 아민계 물질인 PEI와 혼합하여 15분 동안 상온에서 교반 후 흡착제인 야자계 활성탄을 주입하였다. 30분간 교반 후 슬러리 상태의 흡착제를 진공오븐을 이용하여 70℃에서 16시간 진공 건조하였다. 개질화된 흡착제의 아민 함침량은 식 (1)을 활용하여 질량비에 의해 계산되었으며 10 wt%, 30 wt%, 50 wt%으로 산정하였다. 50 wt% 기준으로 합성에 필요한 아민 : 메탄올 : 흡착제의 질량비는 1 : 8 : 1이며, PEI(X)-AC로 표기하였다. 여기서 X는 PEI의 함침량을 나타내었다.

Amine impregnation (wt%) =

$$\frac{\text{Amine (g)}}{\text{Adsorbent (g) + Amine (g)}} \times 100 \quad (1)$$

이산화탄소 흡착 실험은 GC-TCD (HP6890, Hewlett Packard, U.S.A)를 이용하였으며 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용된 모사가스는 N<sub>2</sub>가스로 밸런스 한 50%의 CO<sub>2</sub>가스를 사용하였으며, 20, 50, 100℃에서 등온 흡착하였다. 이산화탄소의 흡착실 험은 내경이 10 mm, 길이가 200 mm인 U자형 석영 반응관을 사용하였으며, 질량유량계를 이용하여 분배로부터 CO<sub>2</sub>의 유량을 6,000 sv<sup>-1</sup>로 조절하였다. U자형 반응관으로 부터 나오는 CO<sub>2</sub>의 농도 분석은 GC-TCD를 이용하여 검출하였다. GC-TCD 분석 시 오븐 온도는 35℃를 유지하고 injector 온도를 185℃, detector 온도를 150℃로 설정하였다. 또한 길이 30 m, 직경이 0.32 mm 그리고 두께 3 μm인 칼럼(GS-Carbonplot, U.S.A)을 사용하였다. 또한 흡착 실험을 통해서 나타난 결과는 식 (2)를 통하여 CO<sub>2</sub> 흡착량을 계산하였다.

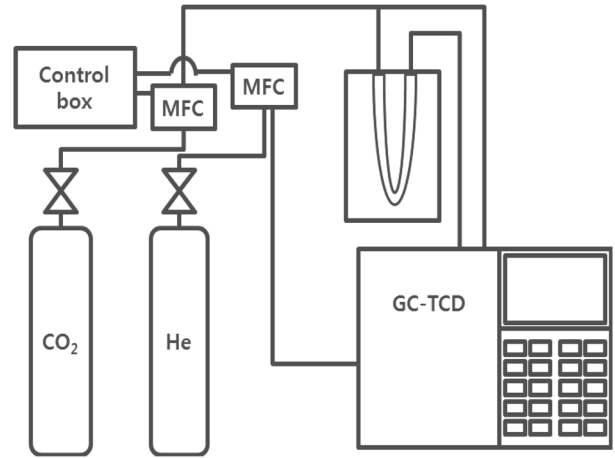


Fig. 1. Diagram of the experimental setup for CO<sub>2</sub> adsorption system.

$$q = \frac{1}{m} \int_0^t Q \times (C_i - C_o) dt \quad (2)$$

여기에서 m은 흡착제의 무게(g)이며 Q는 유입가스유량(mL/min), C<sub>i</sub>와 C<sub>o</sub>은 유입 · 유출되는 CO<sub>2</sub>의 농도(ppm)이며, t는 시간(sec)을 의미한다.

PEI가 함침된 흡착제에 대한 비표면적을 평가하기 위해 ASAP2020 (Micromeritics Instrument Corp. U.S.A)을 이용하였으며 BET (Brunauer-Emmett-Teller) 표면적, 기공 부피를 계산하였다. 또한 Spectrum GX (PerkinElmer, U.S.A)를 이용한 FT-IR (Fourier transform infrared spectroscopy) 분석으로 아민기의 함침 특성을 평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 흡착온도 및 PEI 함량에 따른 이산화탄소 파과특성

이산화탄소의 흡착능을 평가하기 위해 흡착온도와 PEI 함침 함량의 변화에 따른 흡착실험을 실시하였다. 흡착실험은 개질화하지 않은 활성탄(이하 AC)과 개질화된 활성탄(이하 PEI-AC)을 동일한 조건에서 비교 분석하였다. Fig. 2는 흡착온도별 AC와 PEI-AC의 농도변화를 나타내었다. Fig. 2(a)는 20℃ 흡착온도에서 이산화탄소의 파과시간을 나타낸 것으로 개질화하지 않은 AC의 파과시간이 12 분대로 가장 길었으며 PEI-AC의 경우 PEI의 함유량의 증가될수록 파과 시간이 짧아졌다. Plaza 등<sup>17)</sup>은 상용화 AC에 DETA (Diethylenetriamine), PEHA (Pentaethylene hexamine), PEI를 함침하여 이산화탄소 흡착실험을 실시한 결과 아민 코팅으로 인해 AC의 마이크로포러스 볼륨이 감소되고, 이는 물리적 흡착에 영향을 주어 상온에서 이산화탄소의 흡착 효율이 감소된다고 하였다. 반면에 50℃ 흡착온도에서는 AC와 PEI(10)-AC의 파과 형태가 유사한 것으로 나타났으며 100℃의 흡착 온도에서는 PEI(10)-AC의 파과시간이 가장 길었고 PEI(50)-AC와 AC에서 비슷한 파과형태를 확인할 수 있었다. 즉 흡

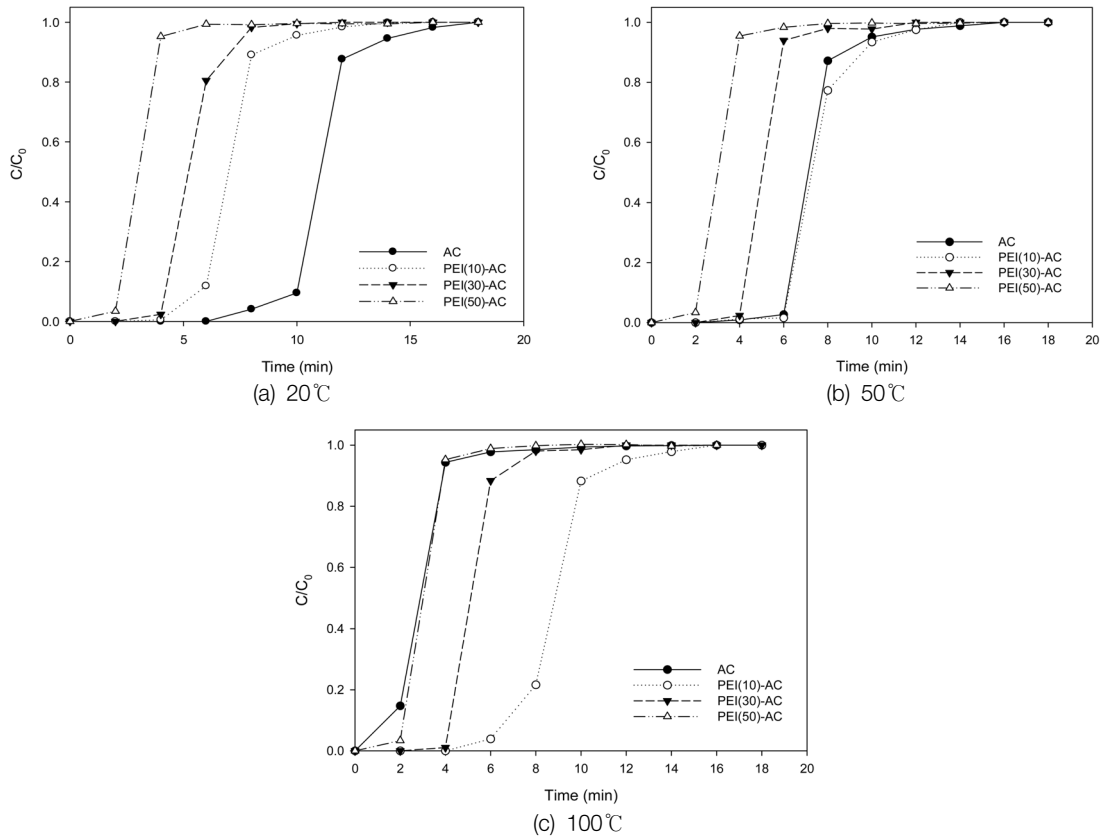


Fig. 2. Breakthrough curves for CO<sub>2</sub> adsorption on virgin and modified AC at different adsorption temperatures.

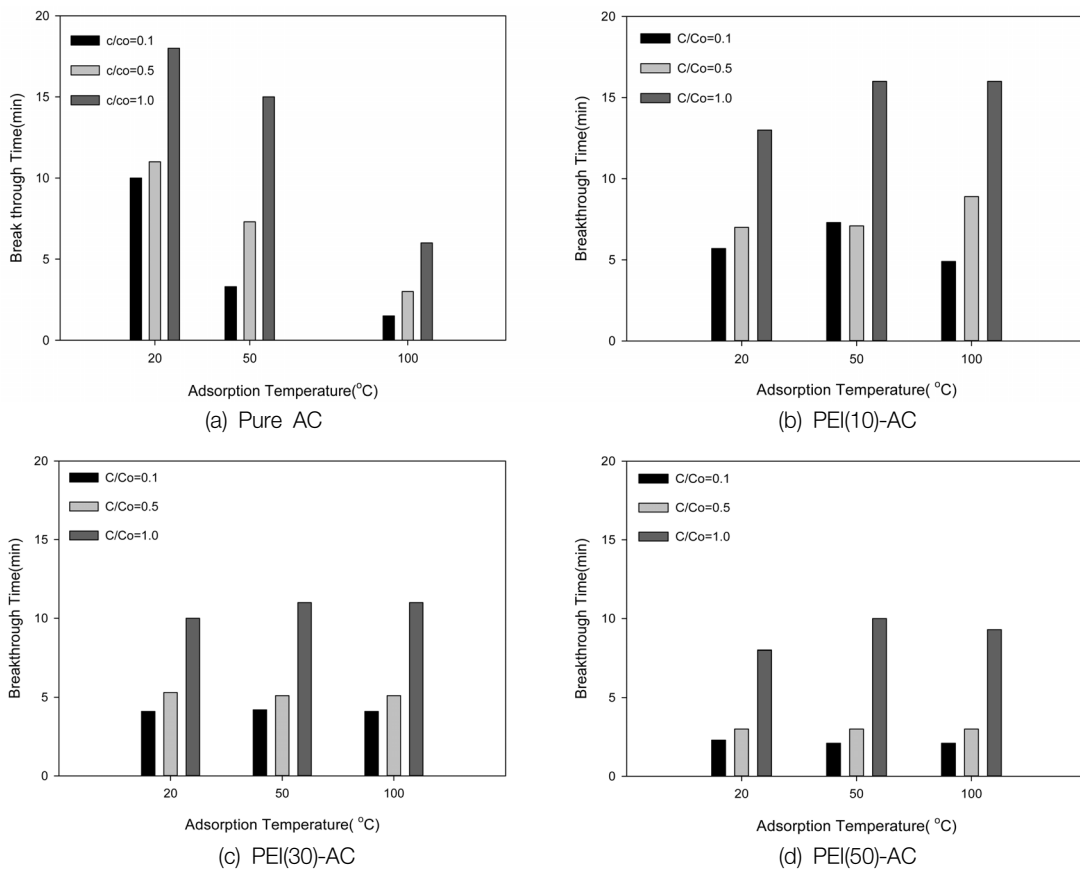


Fig. 3. Comparison of breakthrough time for CO<sub>2</sub> concentration ratio on virgin AC and modified AC at different PEI content.

작온도가 50°C 이하인 경우 AC는 물리적 기전에 의해 이산화탄소를 흡착함으로써 흡착온도 변화는 흡착능의 감소를 가져왔으며, PEI-AC의 경우에는 개질화에 따른 마이크로포러스 볼륨의 감소로 인해 흡착능이 낮은 것으로 나타났다. 반면에 PEI-AC의 경우 상온에서는 AC에 비해 흡착효율이 낮지만 100°C 흡착온도에서 흡착효율이 증가하는 것으로 나타났다. Jang과 Park<sup>18)</sup>은 활성탄소에 DETA를 함침하여 이산화탄소의 흡착거동을 저온, 고온에서 실험하였으며, 고온에서의 흡착능이 유지된 이유는 킬레이트 관능기에 의한 화학적 결합에 의한 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서도 PEI가 함침된 활성탄이 50°C 이상의 흡착온도에서 파과시간이 상대적으로 길어지는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 흡착온도별 파과시간과 이산화탄소의 농도비의 관계를 나타내었으며 농도비  $C/C_0$ 에서  $C_0$ 는 초기농도, C는 파과시간 후 농도를 의미한다. 즉  $C/C_0=0.1$ 은 초기농도의 10%이 파과됨을 의미하며,  $C/C_0=1$ 은 초기농도가 100% 파과됨을 의미한다. 파과된 이산화탄소의 농도비를 10%, 50%, 100%로 비교한 결과 AC는 흡착온도가 증가할수록 파과시간이 줄어들며, PEI-AC는 흡착온도가 증가함에 따라 파과시간이 약간 길어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 PEI 함침량의 증가에 따라 흡착시간이 15분에서 약 9분으로 감소하는 것으로 알 수 있었다.

이산화탄소의 농도비가 10%가 되는 점을 파과시간으로 정의할 때 AC의 경우 흡착온도가 20°C에서 10분대에서 파과가 일어나 18분대까지 흡착이 진행되었으며 50°C에서는 15분대에 100°C에서는 13분대에 흡착이 완료되었다. PEI-AC의 파과시간은 2~5분 범위이며, 흡착이 완료되는 시간은 10~15분으로 함침농도의 증가에 따라 파과시간, 흡착시간이 감소하였다. Lee와 Jo<sup>19)</sup>의 연구결과에 의하면 일반적으로 흡착반응은 발열반응으로 온도가 높아질수록 열을 발생하지 않는 쪽으로 반응이 이루어져 흡착량은 감소하게 된다고 보고하고 있다.

### 3.2. 흡착온도 및 PEI 함량에 따른 이산화탄소 흡착량 비교

흡착온도에 따른 AC와 PEI-AC의 흡착량을 식 (2)을 이용

하여 계산하였고, Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 흡착온도에 따른 AC와 PEI-AC의 흡착량을 나타내었다. AC의 경우 온도가 20°C에서 100°C로 증가함에 따라 흡착량이 63.29 mg에서 30.86 mg으로 감소하며, PEI-AC의 경우 흡착온도에 따른 흡착량의 변화가 AC보다 적어 온도의 영향을 적게 받는 것으로 확인되었다. 흡착온도별 흡착량을 비교할 때 20°C의 상온에서는 AC의 흡착량이 가장 많았으며 흡착온도가 50°C 이상에서는 PEI(10)-AC이 53.4 mg, 58.01 mg으로 흡착능이 우수한 것으로 나타났다. 반면에 PEI-AC의 경우 PEI 함침량이 증가할수록 흡착능이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 Lee와 Choi<sup>20)</sup>의 MCM41에 MEA를 함침하여 이산화탄소의 흡착특성 연구에서와 같이 함침량이 최적함량을 초과할 경우 흡착제 내 기공 내부에 완전히 함침이 이루어지지 않고 외부 표면에 함침이 일어나기 때문에 생각된다. Fig. 4(b)는 AC의 흡착량을 기준으로 PEI-AC의 흡착량 변화(%)를 비교하였다. 20°C의 상온에서 PEI가 함침된 AC의 경우 함침농도가 증가함에 따라 17~49%까지 흡착량이 감소하였으나 100°C 고온에서 PEI(10)-AC는 AC에 비해 흡착량이 188%까지 증가하는 경향을 보여주었다. 즉 AC의 경우 20°C에서 흡착량이 가장 높았으며 100°C의 흡착량은 20°C에 비해 2배 이상 감소하는 현상을 보여주었다. AC의 경우 흡착온도가 증가할수록 흡착량과 흡착시간의 감소 비율이 크게 증가함을 알 수 있었다. 반면에 PEI-AC의 경우 AC와 다르게 흡착온도에 따른 흡착량의 변화가 적었으며 PEI 함침농도가 증가함에 따라 흡착량이 감소하는 경향을 보여 주었다. 즉 PEI-AC의 경우 흡착온도가 흡착량에 미치는 영향을 적었으나 PEI의 함침량에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. Hong 등<sup>21)</sup>은 제올라이트에 MEA (Monoethanlamine), PZ (Piperazine)를 30%, 50%, 70%로 함침하여 25°C, 50°C, 75°C의 온도에서 이산화탄소 흡착실험을 실시하였다. 아민물질에 따른 흡착능의 차이는 아민물질 별 이산화탄소 흡수속도의 차이, 비표면적의 손실 유무의 영향을 받으며, 온도증가에 따른 흡착능의 증가를 PZ와 같은 화학적 흡수제가 함침되어 이산화탄소의 화학적 흡수능이 증가되었다고 보고하였다. 또한 Jang 등<sup>22)</sup>은 탄소나노튜브에 아민을 함침하여 이산화탄소 흡착실험을 실시한 결

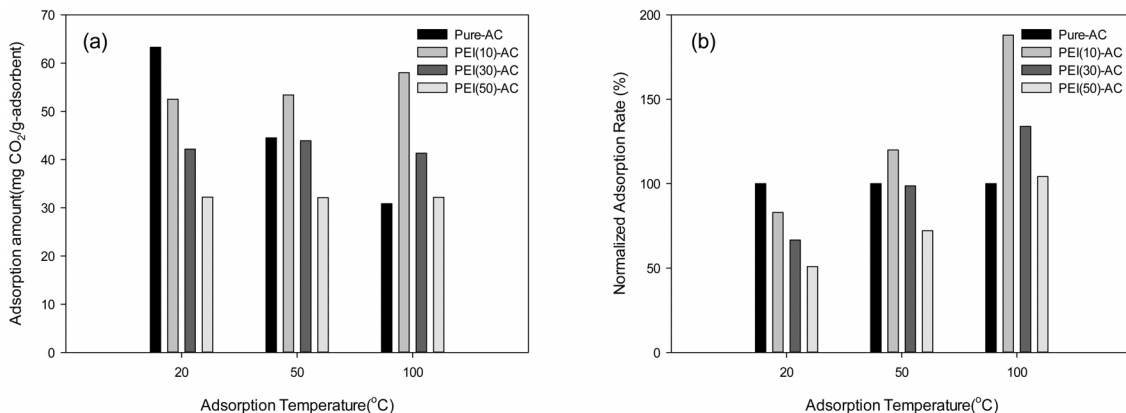


Fig. 4. Amount of CO<sub>2</sub> adsorbed on virgin AC and modified AC at different temperature.

과 아민의 첨가는 탄소표면의 염기성을 증가시켜 산성가스와의 흡착의 선택성을 증가시켜 줄 수 있다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서 PEI(10)-AC의 흡착능이 50°C 이상의 온도에서 이산화탄소의 흡착량이 우수하게 나타난 것은 활성탄에 함침된 일정량 이상의 아민물질이 산성가스인 이산화탄소를 흡착할 수 있는 선택성 제공하여 영향을 미친 것으로 사료되었다.

### 3.3. 표면특성분석

Fig. 5는 함침 전후 AC와 PEI-AC의 질소 흡탈착 등온식을 나타내었다. 모든 활성탄에서 IUPAC에 의해 규정되어진 H3 히스테리시스를 포함한 전형적인 IV형의 형태로 나타나 메조구조로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 함침량이 증가할수록 상대압력이 0~0.2에서의 기울기가 감소하는 것으로 나타났다. Liang 등<sup>12)</sup>은 기울기의 감소는 아민물질이 세공을 메움으로 발생되므로 AC의 세공에 PEI가 함침되어진 것으로 판단되었다. N<sub>2</sub> 흡탈착등온식을 기초로 비표면적, 기공 부피 등을 산정하였으며 Table 1에 나타내었다. AC의 경우 BET 비표면적은 1,212.0 m<sup>2</sup>/g이었으며 PEI의 함침량에 따라 비표면적이 감소함을 보여주었으며 기공부피 역시 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Kong 등<sup>23)</sup>의 연구결과와 유사하게 나타나 아민기가 미세기공을 막아 PEI-AC

Table 1. Properties of AC and PEI-AC

Parameter	AC	PEI(10)-AC	PEI(30)-AC	PEI(50)-AC
BET surface area (m <sup>2</sup> /g)	1,212.0	1,150.7	1,127.6	1,124.9
Pore volume (cm <sup>3</sup> /g)	0.059	0.061	0.061	0.048

의 비표면적과 기공부피가 감소된 것으로 판단되었다.

PEI의 함침정도를 평가하기 위해 FT-IR 분석을 실시하였으며 Fig. 6에 나타내었다. AC와 PEI-AC간의 FT-IR 결과 비교 시 1,200~1,400 cm<sup>-1</sup>에서 두 개의 피크가 나타났으며 1,700 cm<sup>-1</sup>부근의 피크가 증가하는 것을 볼 수 있었다. Plaza 등<sup>17)</sup>은 N-enriched 카본에 대한 CO<sub>2</sub> 흡착 연구에서 N으로 개질화 전·후 카본의 FT-IR 분석결과 개질화된 카본은 1,400 cm<sup>-1</sup> 부근과 1,677 cm<sup>-1</sup>부근에서 아민그룹과 관련된 피크가 나타난다고 보고하였다. Subagyono 등<sup>24)</sup>의 연구에서는 MC-M41에 분자량이 다른 PEI (mw = 2,500, mw = 1,200)를 함침하여 FT-IR 분석을 하였으며 3,260 cm<sup>-1</sup>에서 N-H, N-H 피크가 변형된 R-NH<sub>3</sub><sup>+</sup> 피크를 1,560~1,570, 1,650 cm<sup>-1</sup>에서 관찰할 수 있었다고 보고하였다. 본 연구에서도 1,560~1,570, 1,650 cm<sup>-1</sup>부근에서 피크가 관찰되어 PEI에 의한 아민그룹의 함침정도를 확인할 수 있었다.

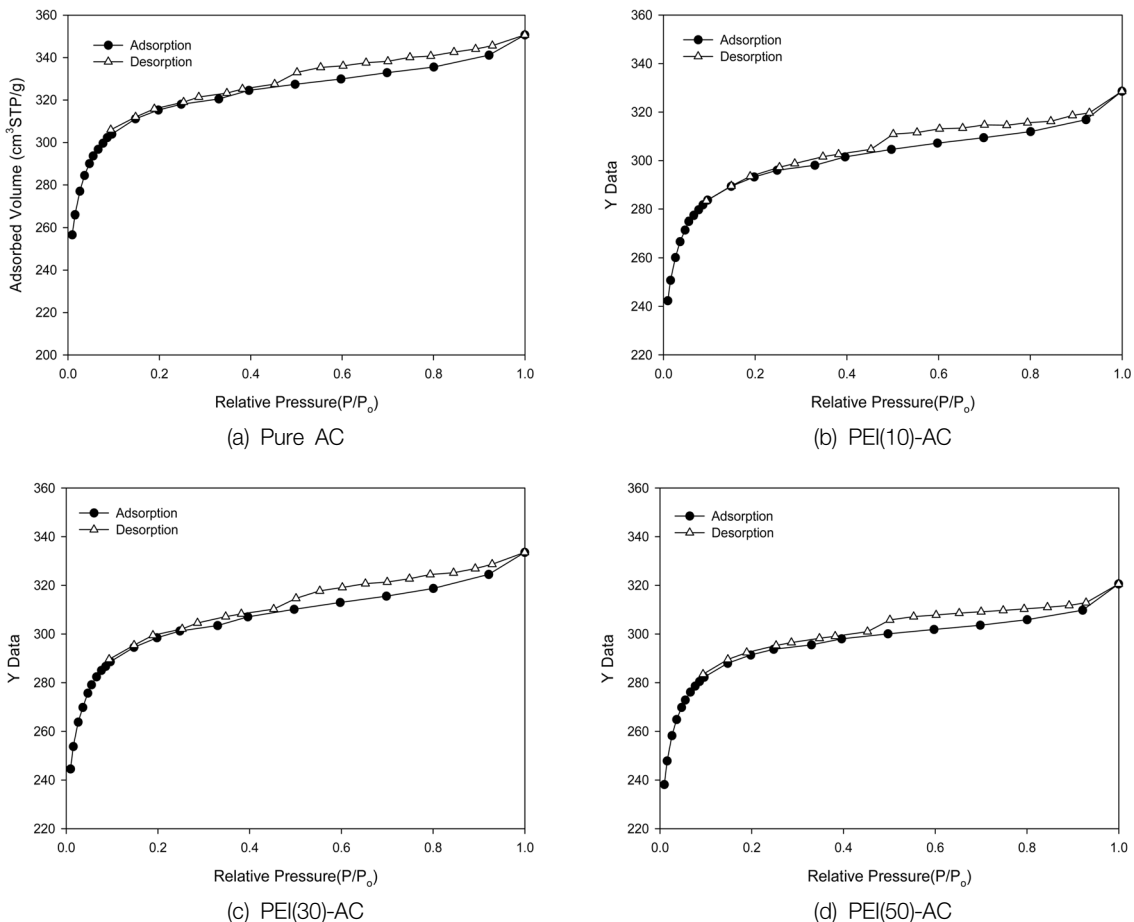


Fig. 5. N<sub>2</sub> adsorption-desorption isotherms.

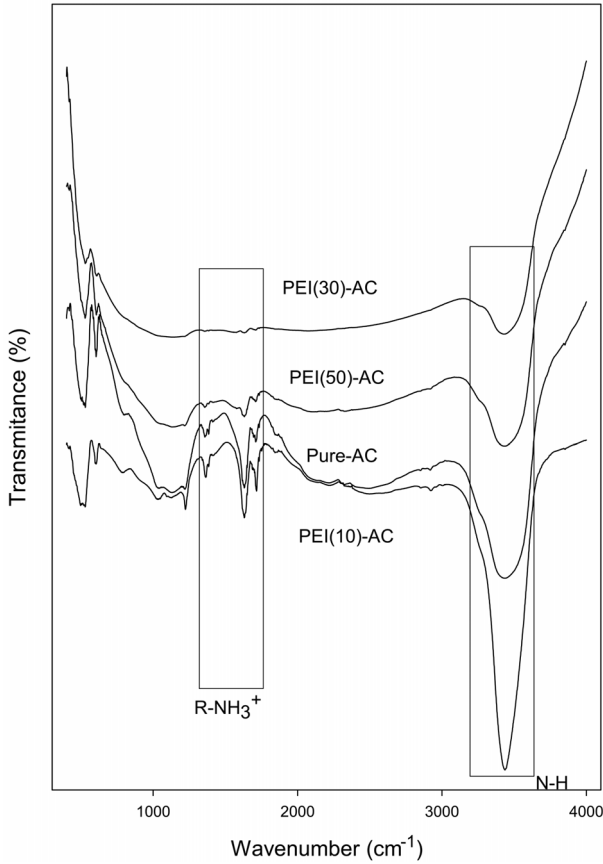


Fig. 6. FT-IR transmission spectra of virgin AC and PEI-AC.

#### 4. 결론

본 연구는 50℃ 이상 온도에서 배출되는 연소배기가스 내 이산화탄소를 포집·분리를 위해 야자계 활성탄에 PEI를 함량별로 함침하여 기능성 흡착제를 제조하였고 이산화탄소의 흡착효율 및 표면분석을 실시하였다.

흡착온도 및 PEI 함량에 따른 이산화탄소 파과특성을 평가결과 상온에서는 AC의 CO<sub>2</sub> 흡착능이 가장 높았으며 50℃ 이상에서는 PEI(10)-AC이 높게 나타났다. 흡착온도와 파과시간의 경우 AC는 반비례관계를 가졌으며 PEI-AC는 흡착온도변화에 따른 흡착시간이 소폭 길어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 PEI의 함침량이 증가할수록 흡착시간이 감소하는 것으로 확인되었다. AC의 경우 흡착온도가 증가함에 따라 흡착량이 감소하며 PEI-AC의 경우 흡착온도에 따른 흡착량의 변화가 없어 온도의 영향을 적게 받는 것으로 확인되었다. 표면분석 결과 PEI의 함침량에 따라 비표면적 및 기공부피가 감소하였다. FTIR 분석 결과에서 1,560~1,570, 1,650 cm<sup>-1</sup>부근에서 피크가 관찰되어 PEI에 의한 아민그룹의 함침정도를 확인할 수 있었다.

따라서 50℃ 이상에서 흡착량을 비교 시 PEI(10)-AC가 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 판단되었다.

본 연구에서는 50℃ 이상에서도 CO<sub>2</sub> 흡착이 가능한 기능성 흡착제를 개발하고자 하였으나 한 종류의 흡착제 및 아민 물질을 사용하여 실험하였기 때문에 다양한 아민계 물질 및 흡착제에 대한 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

KSEE

#### References

- Kim, Y. H., Yi, K. B., Park, S. Y., Ko, C. H., Park, J. H., Beum, H. T., Han, M. G. and Kim, J. N., "Characteristics of aqueous ammonia CO<sub>2</sub> reaction at regeneration condition of high temperature and pressure," *Korean Chem. Eng. Res.*, **48**(2), 253~258(2010).
- Plaza, M. G., Pevida, C., Arias, B., Feroso, J., Rubiera, F. and Pis, J. J., "A comparison of two methods for producing CO<sub>2</sub> capture adsorbents," *Energy Procedia*, **1**(1), 1107~1113 (2009).
- Shafeeyan, M. S., Daud, W. M. W. A., Houshmand, A. and Shamiri, A., "A review on surface modification of activated carbon for carbon dioxide adsorption," *J. Anal. Appl. Pyrol.*, **89**(2), 143~151(2010).
- Pevida, C., Snape, C. E. and Drage, T. C., "Templated polymeric materials as adsorbents for the post combustion capture of CO<sub>2</sub>," *Energy Procedia*, **1**(1), 869~874(2009).
- Rodríguez-reinoso, F., "The role of carbon materials in heterogeneous catalysis," *Carbon*, **36**(3), 159~175(1998).
- Siriwardane, R. V., Shen, M. S., Fisher, E. P. and Poston, J. A., "Adsorption of CO<sub>2</sub> on molecular sieves and activated carbon," *Energy and Fuels*, **15**(2), 279~284(2001).
- Huston, N. D., Speakman, S. A. and Payzant, E. A., "Structural effects on the high-temperature absorption of CO<sub>2</sub> on a synthetic hydrotalcite," *Chem. Mater.*, **16**(21), 4135~4143 (2004).
- Arenillas, A., Drage, T. C., Smith, K. and Snape, C. E., "CO<sub>2</sub> removal potential of carbons prepared by co-pyrolysis of sugar and nitrogen containing compounds," *J. Anal. Appl. Pyrol.*, **74**(1-2), 298~306(2005).
- Drage, T. C., Smith, K. M., Pevida, C., Arenillas, A. and Snape, C. E., "Development of adsorbent technologies for post-combustion CO<sub>2</sub> capture," *Energy Procedia*, **1**(1), 881~884(2009).
- Park, S. J. and Kim, K. D., "Adsorption behaviors of CO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> on chemically surface-treated activated carbons," *J. Colloid Interface Sci.*, **212**(1), 186~189(1999).
- Chang, F. Y., Chao, K. J., Cheng, H. H. and Tan, C. S., "Adsorption of CO<sub>2</sub> onto amine-grafted mesoporous silicas," *Sep. Purif. Technol.*, **70**(1), 87~95(2009).
- Liang, Z., Fadhel, B., Schneider, C. J., Chaffee, A. L., "Step-wise growth of melamine-based dendrimers into mesopores and their CO<sub>2</sub> adsorption properties," *Micro. Mesop. Mat.*, **111**(15), 536~543(2008).
- Amalina, M. D., Ibrahim, A. S. and Hadi, A., "General study about activated carbon for adsorption carbon dioxide," *J.*

- Purity, Utility React. Environ.*, **1**(5), 206~221(2012).
14. Lee, D. H., Kam, S. K., Lee, S. W. and Lee, M. K., "Adsorption characteristics of activated carbons according to impregnation concentrations and inlet CO<sub>2</sub> gas concentrations," *J. Environ. Sci. Int.*, **26**(12), 1403~1407(2010).
  15. Aroua, M. K., Daud, W. M. A. W., Yin, C. Y. and Adinata, D., "Adsorption capacities of carbon dioxide, oxygen, nitrogen and methane on carbon molecular basket derived from polyethyleneimine impregnation on microporous palm shell activated carbon," *Sep. Purif. Technol.*, **62**, 609~613(2008).
  16. Xu, X., Song, C., Andrésen, J. M., Miller, B. G. and Scaroni, A. W., "Preparation and characterization of novel CO<sub>2</sub> "molecular basket" adsorbents based on polymer-modified mesoporous molecular sieve MCM41," *Micro. Mesop. Mater.*, **62**, 29~45(2003).
  17. Plaza, M. G., Pevida, C., Arenillas, A., Rubiera, F. and Pis, J. J., "CO<sub>2</sub> capture by adsorption with nitrogen enriched carbons," *Fuel*, **86**, 2204~2212(2007).
  18. Jang, D. I. and Park, S. J., "CO<sub>2</sub> Adsorption behaviors of activated carbon modified by chelating groups," *Appl. Chem. Eng. Res.*, **21**(4), 396~400(2010).
  19. Lee, K. M. and Jo, Y. M., "Adsorption characteristics of chemically modified sorbents for carbon dioxide," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **19**(5), 533~538(2008).
  20. Lee, J. B. and Choi, S. W., "Characteristics of CO<sub>2</sub> adsorption by MEA impregnated MCM-41," *Environ. Eng. Res.*, **33**(9), 686~691(2011).
  21. Hong, M. S., Pankaj, S., Jung, Y. H., Park, S. Y., Park S. J. and Baek, I. H., "Seperation of carbon dioxide using pelletized zeolite adsorbent with amine impregnation," *Korea Chem. Eng. Res.*, **50**(2), 244~250(2012).
  22. Jang, H. T., Park, Y. K., Ko, Y. S. and Lee, J. Y., Margandan, B., "Highly siliceous MCM-48 from rice hush ash for CO<sub>2</sub> adsorption," *Int. J. Greenh. Gas Con.*, **3**(5), 545~549(2009).
  23. Kong, Y., Jin, L. and Qiu, J., "Synthesis, characterization, and CO<sub>2</sub> capture study of micro-nano carbonaceous composites," *Sci. Total. Environ.*, **463~464**, 192-198(2013).
  24. Subagyono, D. J. N., Liang, Z., Knowles, G. P., Webley, P. A. and Chaffee, A. L., "PEI modified mesocellular siliceous foam: A novel sorbent for CO<sub>2</sub>," *Energy Procedia*, **4**, 839~843(2011).