

CO₂ 흡착을 위한 Ethylenediamine 함침 MCM41의 특성 분석

이철규 · 최성우*

계명대학교 환경과학과

(2012년 2월 20일 접수; 2012년 4월 12일 수정; 2012년 5월 11일 채택)

Characteristics Analysis of MCM41 Impregnated with Ethylenediamine for CO₂ Adsorption

Chul-Kyu Lee, Sung-Woo Choi*

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

(Manuscript received 20 February, 2012; revised 12 April, 2012; accepted 11 May, 2012)

Abstract

Adsorption experiment of carbon dioxide was performed on MCM41 silica with a 30 wt. % EDA(ethylenediamine) loading at different CO₂ inlet concentration and various adsorption temperature. The surface characteristics of CO₂ capturing agent were carried out using BET analysis, X-ray diffraction and FT-IR. The results of BET showed 781 m²/g for MCM41 and 464 m²/g for EDA/MCM41. X-ray diffraction results revealed typical hexagonal pore system. The higher sorption capacity of EDA/MCM41 was about 80 mg_{CO₂}/g_{sorbent} with 50% CO₂ inlet concentration and 303 K adsorption temperature. The isosteric heat of adsorption in 303-353 K ranged from -25.47 to -28.24 KJ/mole for EDA/MCM41, which indicates CO₂-EDA/MCM41 interaction with exothermic adsorption process. Finally, the performance of EDA/MCM41 in 10 consecutive sorption-desorption runs was a stable with only a minor drop in its sorption capacity.

Key Words : Adsorption, Carbon dioxide, EDA, Mesoporous material

1. 서론

CCS(carbon capture and storage)기술은 온실가스 저감의 필요성으로 인하여 최근 많은 관심을 모으고 있다(Yang 등, 2008; Zakkour 와 Haines, 2007). CCS 기술에는 흡수법을 포함하여, 흡착법, 막분리 등의 방법이 있으며(Veawab 등, 1999), 이들 기술 중 MEA(monoethanolamine), DEA(diethanolamine)와 같은 alkanolamine 수용액을 이용한 화학적 흡수법이 널리 사용되고 있다. 하지만 아민을 기반으로 하는 흡수법

은 높은 재생에너지를 필요로 하며, 장비의 거대화, 용매의 침식, 장비부식 등의 단점이 있다(Xu 등, 2003). 반면에 흡착법의 경우 흡수법에 비해 광범위한 온도, 압력범위에서 적용성이 쉽고 경제적 이점 및 낮은 에너지를 요구하기 때문에 많은 관심을 받고 있다. 또한 재생 가능한 고체흡착제 사용은 취급 시 용이하며 낮은 독성과 부식성으로 인하여 흡수법을 대체할 수 있는 대안으로 기대되고 있다.

일반적으로 다공성 흡착제는 낮은 열수용량과 비표면적이 높고 저비용으로 이산화탄소를 분리, 포집할 수 있는 유용한 물질로 알려져 있다. 대표적인 다공성 흡착제는 활성탄, 제올라이트, 메조포러스 실리카 등으로 나눌 수 있으며, 활성탄과 제올라이트는 질소와 같은 다른 가스가 존재할 경우 이산화탄소에 대한 선택성이 낮고 흡착제를 재사용 시 많은 에너지가 요

*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

구된다. Chang 등(2009)은 MCM41과 같은 메조포러스 물질은 균일한 기공의 크기 및 분포를 가지고 있으며, 유기아민류를 지탱하는 실라노 그룹을 포함하고 있어 아민류의 함침이 잘 이루어진다고 보고하였다. MCM41(Mobile Crystalline Material)로 1992년 모빌사에서 제조된 육방형구조를 갖는 메조포러스 실리카 물질이다. Son 등(2008)은 메조포러스 실리카에 PEI (polyethyleneimine)를 함침하여 CO₂를 흡착하였으며, 박 등(2007)은 MEA를 각기 다른 메조포러스 물질에 함침하여 CO₂ 흡착에 관한 연구를 하였으며, Lu 등(2009)은 EDA(ethylenediamine)를 함침한 구형 메조포러스 실리카가 PEI로 함침된 경우보다 CO₂ 흡착능이 더 우수하다고 보고하였다. 최(2011)는 MEA와 EDA의 조성비를 달리한 MCM41을 제조하여 CO₂ 흡착특성을 비교한 결과 EDA를 30wt.% 함침한 MCM41이 가장 좋은 CO₂ 흡착능을 가진다고 보고하였다. 하지만 최(2011)의 선행연구에서는 함침물질에 따른 최적 비율만 확인하였을 뿐 흡착 후 CO₂ 탈착에 대한 연구와 CO₂ 유입농도 및 함착온도에 따른 함착연구가 진행되지 못한 한계성을 지니고 있다.

따라서 본 연구에서는 EDA를 30wt.% 함침한 MCM41을 대상으로 CO₂ 흡착연구를 진행하였다. CO₂ 최적 흡착조건을 도출하기 위해 CO₂ 유입농도 및 함착온도를 변화하여 CO₂ 흡착특성 및 재현성을 평가하였으며, 흡착제의 표면특성을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구재료

본 연구에서 사용한 MCM41은 실리카 원료로 TEOS(tetraethylorthosilicate, Aldrich, USA)와 계면활성제인 CTABr(cetyltrimethylammonium bromide, 99%, Aldrich, USA)를 이용하여 제조하였고 CTABr : TEOS : NaOH : H₂O 의 몰비는 0.1, 0.9, 0.1, 100을 사용하였다. 증류수와 CTABr을 혼합한 후 실온에서 1시간 교반하고 pH 조절을 위해 NaOH를 혼합 후 TEOS를 주입하였다. 그 후 1시간 동안 교반시킨 후 혼합물을 80℃에서 24시간 수열합성을 하였다. 수열합성 이후 잔존하는 계면활성제를 제거하기 위해 0.1M HCl/에탄올용액으로 세척하여 550℃에서 3시

간 소성하였다.

합성된 MCM41에 아민계 물질인 EDA를 함침하기 위해 Xu 등(2003)이 제안한 습식함침방법을 적용하였다. 함침과정은 EDA 용액을 메탄올 8 g 용액에 15분 동안 교반하여 용해시킨 후 소성된 MCM41을 EDA/메탄올 용액에 첨가하여 30분 동안 교반하였다. 슬러리형태의 혼합물을 진공증발기를 이용하여 70℃에서 16시간 교반하여 함침된 MCM41을 얻었다. 이때 함침량은 식 (1)과 같이 메조포러스물질(M₁)과 EDA(M₂)의 함량비로 계산하였다.

$$\text{함침량}(\%) = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \times 100 \quad (1)$$

선행연구(최, 2011) 결과 EDA를 10wt.%에서 50wt.%까지 함침된 흡착제 중 30wt.%를 함침한 MCM41이 가장 높은 흡착효율을 보여주었으며 이를 본 실험의 연구재료로 사용하였다.

2.2. 연구방법

본 연구에서 사용한 CO₂ 흡착장치는 Fig. 1과 같다. 반응기는 내경이 10 mm, 길이가 200 mm인 U자관 반응관을 사용하였으며 석영으로 만들었다. CO₂의 유량은 MFC(mass flow controller)를 이용하여 10 ml/min으로 조절하였으며, 5%, 15%, 30%, 50%의 CO₂ 유입농도를 사용하였으며 30℃, 40℃, 60℃, 80℃의 온도 범위에서 흡착실험을 실시하였다.

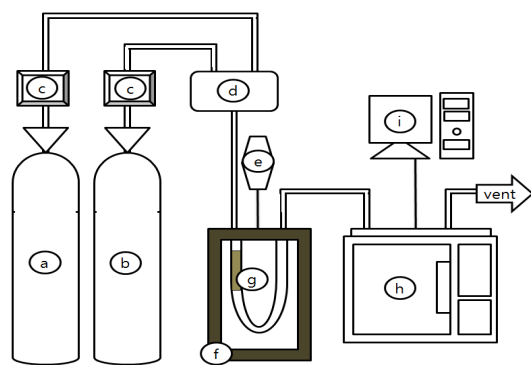


Fig. 1. Diagram of the experimental setup (a: CO₂, b: N₂, c: mass flow controller, d: mixing chamber, e: temperature controller, f: furnace, g: adsorbent in U-tube, h: GC-TCD, i: PC).

CO₂ 농도는 GC-TCD(HP 6890A GC, Agilent)를 이용하여 분석하였으며 길이 30 m, 직경이 0.32 mm, 두께 3 μm인 컬럼(GS-Carbonplot, Agilent)을 사용하였다. 분석조건으로 오븐온도는 30°C로 유지하였으며 185°C injector 온도와 150°C의 detector 온도를 설정하였다.

제조한 MCM41의 결정구조를 확인하기 위하여 XRD(X-ray diffraction, X'Pert PRO MPD, PANalytical)를 이용하였고 CuKα radiation tube(40kV, 25mA) 조건에서 1.2°에서 12°까지 범위의 2θ 값을 확인하였다. 시료에 대한 표면적 및 기공분포를 측정하기 위하여 surface area analyzer(ASAP2020, Micromeritics)를 사용하였으며, 77 K에서 질소 흡탈착을 수행하여 기공직경, 기공부피, 기공면적과 같은 물리적 특성을 분석하였다. 비표면적은 BET(Brunauer-Emmett-Teller) 방법을 통하여 계산하였으며 기공크기는 BJH(Barrett-Joyner-Halenda) 방법을 사용하였다. 또한 FT-IR(Spectrum GX & autoimage, PerkinElmer) 분석을 통하여 아민 기능성기의 함침 유무를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 흡착제 특성 평가

제조된 흡착제의 표면 특성과 효율과의 연관성을 분석하기 위해 BET, XRD, FT-IR 분석을 실시하였다. Table 1은 MCM41과 30wt.%함침된 MCM41의 비표면적과 기공부피, 기공크기를 나타내었다. EDA를 함침한 후 비표면적이 781 m²/g에서 464 m²/g로 낮아졌으며, 기공부피 역시 비표면적의 감소특성과 유사한 경향을 보여 주었다. 기공크기는 MCM41이 3.464 nm, 30wt.%EDA/MCM41이 3.791 nm로 큰 변화가 없었다. 즉 EDA의 함침은 비표면적과 기공부피에 영향을 주며 비표면적의 감소는 아민기능성기가 MCM41의 표면에 형성된 것으로 사료된다. Lu 등(2009)의 연구에서도 MSP에 EDA함침 시 비표면적이 1129 m²/g에서 345 m²/g으로 감소하였으며 Chen 등(2009)의 연구에

서도 이와 유사한 결과를 보여주었다.

함침 전후 XRD 결과를 Fig. 2에 나타내었다. XRD의 분석결과에서 회절피크는 2θ 값이 2°에서 100의 주피크가 나타났으며 MCM41의 전형적인 육방형구조 패턴을 확인할 수 있었다. 또한 30wt.% EDA를 함침한 MCM41의 XRD 피크강도는 MCM41보다 감소하였으나 100의 주피크가 나타나 MCM41의 구조는 그대로 유지되는 것을 알 수 있었다. XRD 피크강도의 감소는 BET 감소결과와 유사하며 이는 EDA가 함침됨에 따라 MCM41의 표면에 아민계기능성기가 형성되어 XRD 결과에서도 영향을 주는 것으로 사료된다.

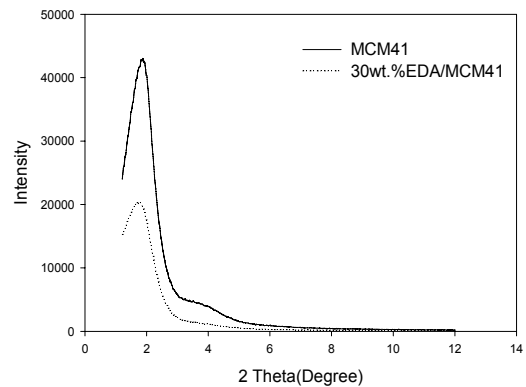


Fig. 2. XRD patterns of MCM41 and 30wt.%EDA/MCM41.

Fig. 3은 두 흡착제의 FT-IR의 분석결과를 나타내었다. MCM41의 경우 1085 cm⁻¹ 부근에서 흡수가 강한 Si-O-Si 피크가 관찰되었으며 O-H 피크는 1711 cm⁻¹ 부근 및 3445 cm⁻¹ 부근에서 관찰되었다. 이는 MCM41에서 나타나는 전형적인 피크로 Ambroggi 등(2006)의 연구와 일치하였다. 30wt.%EDA/MCM41은 2950 cm⁻¹에서 CH₂CH₂CH₂-NH₂로부터 C-H₂ 밴드가 나타났으며 동시에 1485 cm⁻¹, 1575 cm⁻¹대의 피크는 RNH₂의 N-H₂ 밴드를 확인할 수 있어 MCM41에 아민계기능기가 잘 함침되었음을 알 수 있었다 (Chang 등, 2003; Huang 과 Yan, 2003; Su 등, 2010).

Table 1. Porosity characteristics MCM41 and 30wt.%EDA/ MCM41

Adsorbents	BET surface area (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Pore size (nm)
MCM41	781	0.6763	3.464
30wt.%EDA/MCM41	464	0.4405	3.791

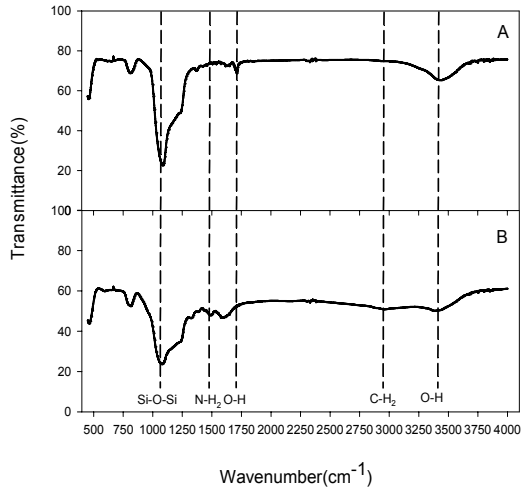


Fig. 3. FT-IR spectra of MCM41 and 30wt.%EDA/MCM41 (A: MCM41 B: 30wt.%EDA/MCM41).

3.2. CO₂ 흡착특성

30wt.%EDA/MCM41의 CO₂ 흡착특성의 변화를 확인하기 위해서 파과실험을 수행하였다. 파과실험은 303 K~353 K의 다양한 온도에서 유속을 10 ml/min로 고정하고, CO₂의 유입농도를 5%~50%까지 변화시키며 실험을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. CO₂ 유입농도가 5%인 경우 4~10분, 15%에서는 5~8분, 30%에서는 4~6분, 50%에서는 4~6분으로 유입농도가 증가함에 따라 파과시간이 짧아졌으며 30%이상에서는 유입농도와 상관없이 파과시간대가 유사하게 나타났다. 또한 흡착온도에 따른 CO₂ 흡착특성을 비교 시 303 K에서 파과시간이 가장 길었으며, CO₂ 유입농도가 5%인 경우에는 흡착온도가 CO₂ 파과시간에 많은 영향을 주나 CO₂ 유입농도가 30% 이상의 고농도에서는 흡착온도의 영향이 적은 것으로

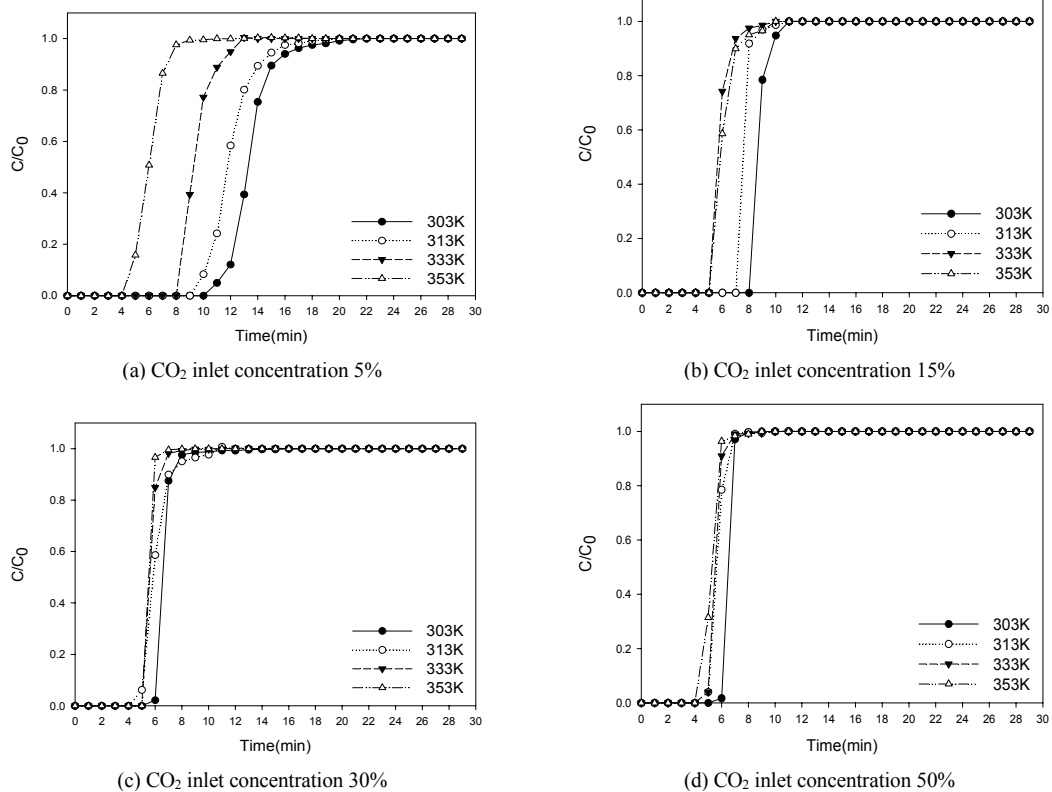


Fig. 4. Breakthrough curve of CO₂ adsorbed on 30wt.%EDA/MCM41 at different CO₂ inlet concentration and adsorption temperature.

나타났다. 또한 MEA로 함침된 활성탄의 연구(이 등, 2010)에서도 CO₂ 가스의 유입농도가 증가함에 따라 파과가 빨리 일어나 유입가스농도가 CO₂ 흡착연구의 중요한 인자임을 보여주었다.

또한 CO₂ 유입농도와 흡착온도에 따른 30wt.% EDA/MCM41의 흡착량(q_e , mg/g)을 다음 (2)식으로 계산하였으며 Fig. 5에 나타내었다.

$$q_e = \frac{1}{m} \int_0^t Q \times (C_I - C_E) dt \quad (2)$$

m 은 흡착제의 무게(g), Q 는 유입가스량(L/min), C_I 과 C_E 은 유입, 유출되는 CO₂의 농도(mg/L)로 이상기체방정식을 활용하여 변환하였다. CO₂ 흡착량은 CO₂의 유입농도에 따라 증가하였으며, 흡착온도가 증가할수록 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. CO₂의 유입농도가 동일하더라도 흡착온도에 따라 흡착량이 약 2 배 이상 차이가 났으며 CO₂ 유입농도 50%, 흡착온도 303 K에서 흡착량이 가장 높았다. 따라서 CO₂ 농도가 일정하면 고온 흡착보다는 저온 흡착이 유리하며 Lu 등(2009)의 연구에 따르면 흡착온도가 감소하는 경우 흡착제의 표면과 CO₂ 분자사이의 반데발스힘과 화학적 상호작용의 증가로 인하여 CO₂ 흡착량이 증가한다고 보고하였다. 또한 박 등(2007)의 연구에서도 50wt.% MEA 함침 MCM-41을 이용한 흡착실험에서 온도가 증가할수록 흡착능력이 떨어지며 이는 온도가 증가함에 따라 흡착보다는 탈착에너지가 증가되며, 흡착된 CO₂의 탈리가 증가하여 흡착능력이 저하된다고 보고하였다.

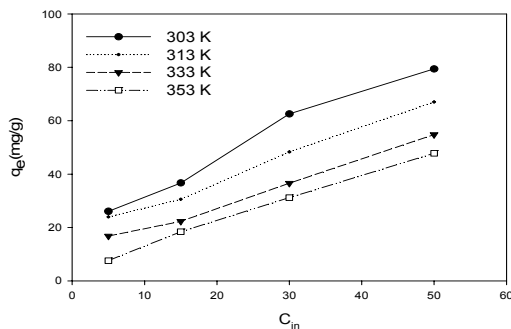


Fig. 5. CO₂ adsorption isotherms of 30wt.%EDA/MCM41 at various temperatures.

3.3. 등온 흡착열

흡착온도는 CO₂ 흡착량에 많은 영향을 줌으로 각 온도에 따른 흡착등온선으로부터 흡착열을 계산하여 분석하였다. Szekely 등(1976)은 흡착열은 흡탈착 과정의 활성화에너지의 차이로서, 흡착제와 흡착물의 물리적 상호작용의 강함을 표현한 것으로 정의하였다. Agnihotri 등(2005)은 흡착제에서 열의 방출 및 흡수는 흡착제의 온도 및 흡착율에 영향을 미치기 때문에 흡착과정에서의 흡착열의 정량화는 매우 중요하다고 보고하였다. 흡착량(q_e)에 따른 30wt.%EDA/MCM41의 흡착열(Q_{st})은 Clausius-Clapeyron equation을 이용하여 산출하였다.

$$\left(\frac{\partial(\ln P_{CO_2})}{\partial(1/T)} \right)_{q_e} = \frac{Q_{st}}{R} \quad (3)$$

식 (3)에서 P_{CO_2} 는 CO₂의 분압(P_a)이며, T 는 절대온도(K), R 은 이상기체상수(8.314J/mol·K)를 의미한다. C_{in} 값과 q_e 값은 Fig. 5의 결과를 활용하였고 P_{CO_2} 값으로 전환하였다. CO₂ 흡착량의 범위를 26 mg/g에서 46 mg/g으로 선정하여 흡착열을 계산하였고 그 결과를 Fig. 6과 Table 2에 나타내었다. Fig. 6은 $\ln P_{CO_2}$ 와 $1/t$ 는 음의 관계를 가지며, 기울기가 흡착량이 증가함에 따라 -3.8에서 -2.1로 약간 증가하는 경향을 보여주었다. 또한 Table 2를 보면 흡착량에 따라 R^2 값은 0.9633-0.9828로 나타났으며 흡착온도 303 K에서 353 K까지 흡착열은 음의 값을 가지며 -25.47에서 -28.54 KJ/mole로 점차적으로 감소하는 경향이 나타났다. Lu 등(2009)의 연구에서 EDA를 함침한 MSP의 Q_{st} 값은 -16.35 KJ/mole로 음의 값을 가져 발열흡착과정으로 보고하였다. 본 연구에 사용된 흡착제의 평균 Q_{st} 값은 -27.12 KJ/mole로 Lu 등(2009)의 연구와 차이점을 보이나 이는 MCM41과 MSP의 구조차이로 사료되며, 동일한 발열흡착과정임을 알 수 있었다. 반면에 활성탄의 등온흡착열과 비교 시 순수활성탄은 5.1~7.6 Kcal/mol였고, KOH/KAC = 4로 제조된 활성탄은 5.1~8.1 Kcal/mol이었다고 박 등(2007)이 보고하였다. Ross와 Olivier(1964)의 연구에 따르면 흡착열의 감소는 에너지 불균일성에 의한 것이며, 흡착열의 증가는 흡착물질 간 상호작용에 의한 것으로 보

고하였다. 따라서 본 연구에서 사용된 흡착제는 흡착량이 증가함에 따라 흡착열이 감소함으로 에너지 불균일성에 의한 영향을 받은 것으로 생각된다.

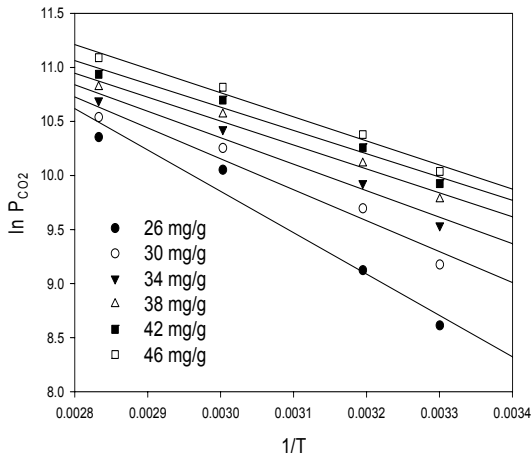


Fig. 6. Regression lines of $\ln P_{CO_2}$ vs. $1/T$ under various q_e .

Table 3. Isostatic adsorption heats of 30wt.%EDA/MCM41 under various q_e

q_e (mg/g)	Q_{st} (KJ/mole)	
	20-60 °C	r^2
26	-25.47	0.9633
30	-26.48	0.9596
34	-27.08	0.9748
38	-27.54	0.9801
42	-27.89	0.9771
46	-28.24	0.9828
Average	-27.12	

3.4. 흡탈착반복실험

본 연구에서 사용된 흡착제의 내구성 및 흡착효율의 재현성을 평가하기 위해 흡탈착 반복실험을 수행하였다. 30wt.%EDA/MCM41을 30°C에서 15% CO₂에 충분히 흡착시킨 후 130°C에서 탈착하였으며 10회 반복한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. CO₂ adsorption index는 사용 전 흡착제와 재생한 흡착제의 흡착능을 평가한 것으로 100%의 결과가 나오면 흡착능의 손실이 없음을 의미한다. 실험 결과 흡착능 증감 변화를 확

인할 수 있었고, 2회 재생 시 90%로 흡착능이 가장 낮은 것으로 나타났다. 하지만 10회 재생 결과 평균 흡착능이 97.7%로 나타나 본 연구에서 제조한 30wt.% EDA/MCM41은 반복적인 흡탈착 시 재현성이 있으며 일정한 흡착능을 가진 것으로 확인되었다.

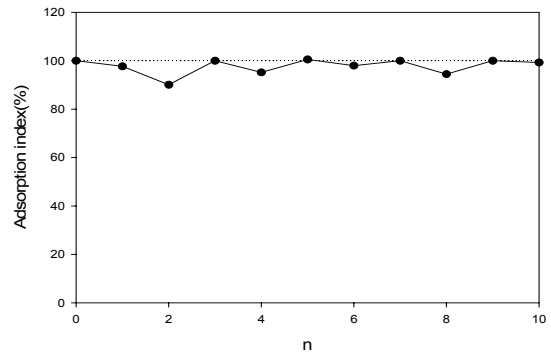


Fig. 7. Cyclic CO₂ adsorption on 30wt.%EDA/MCM41 via thermal desorption.

4. 결론

본 연구는 선행연구에서 CO₂ 흡착효율이 가장 높은 30wt.% EDA를 MCM41에 함침하여 CO₂ 유입농도별, 흡착온도별 흡착능을 평가하였다. 또한 등온흡착열을 계산하여 MCM41의 흡착기전을 알아보았으며, 흡탈착 반복실험을 통해 흡착제의 내구성을 평가하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다

첫째, 흡착제 표면분석결과 30wt.%EDA/MCM41의 BET표면적이 MCM41에 비해 약 1.7 배정도 감소하였으며 함침 후에도 MCM41의 전형적인 육방형구조를 가졌다. 또한 FT-IR분석결과 N-H₂밴드가 나타나 아민성기능기가 잘 형성됨을 보여주었다.

둘째, CO₂ 파과시간은 유입농도와 흡착온도가 증가함에 따라 감소하였으며 CO₂ 흡착량은 유입농도에 비례하였으며 흡착온도와는 반비례관계를 가졌다.

셋째, 30wt.%EDA/MCM41의 등온 흡착열 계산 결과 흡착량이 증가함에 따라 흡착열은 감소하였다. 이를 통해서 발열흡착과정으로 판단되며, 흡착제 표면의 에너지 불균형에 의한 영향으로 사료된다. 또한 흡착제 재생실험결과 흡착능이 일정하게 유지됨을 알 수 있었다.

본 연구는 MCM41에 30wt.%EDA를 함침하여 CO₂의 흡착성을 평가하였다. 향후 연구에서는 실리카 계열보다 카본계열에 아민계 물질을 함침 후 동일조건에서의 CO₂흡착실험과 장기적 흡·탈착실험을 통한 흡착제의 흡착능 재현성실험 및 복합가스를 대상으로 CO₂ 흡착 및 분리연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 박예원, 백일현, 박상도, 이재욱, 박소진, 2007, MEA (monoethanolamine)함침 메조포러스 물질을 이용한 CO₂ 회수, 화학공학, 45(6), 573-581.
- 이동환, 김상규, 이승우, 이민규, 2010, 함침농도와 CO₂ 가스 유입농도에 따른 활성탄의 흡착특성, 한국환경과학회지, 9(2), 1403-1407.
- 최성우, 2011, 아민계 함침 메조포러스 실리카를 이용한 CO₂ 흡착, 한국환경과학회지, 20(7), 873-879.
- Agnihotri, S., Rood, M. J., Rostam-Abadi, M., 2005, Adsorption equilibrium of organic vapors on single-walled carbon nanotubes, Carbon, 43, 2379-2388.
- Ambrogi, V., Famiani, F., Perioli, L., Marmottini, F., Di Cunzolo, I., Rossi, C., 2006, Effect of MCM-41 on the dissolution rate of the poorly soluble plant growth regulator, the indole-3-butyric acid, Micro. Meso. Mater., 96, 177-183.
- Chang, A. C. C., Chuang, S. S. C., Gray, M., Soong, Y., 2003, In-situ infrared study of CO₂ adsorption on SBA-15 grafted with γ -(aminopropyl)triethoxysilane, Energy Fuels, 17(2), 468-473.
- Chang, F. Y., Chao, K. J., Cheng, H. Hs., Tan, C. S., 2009, Adsorption of CO₂ onto amine-grafted mesoporous silica, Sep. Pur. Technol., 70(1), 87-95.
- Chen, G., Wang, L., Zhang, J., Chen, F., Anpo, M., 2009, Photophysical properties of a naphthalimide derivative encapsulated within Si-MCM-41, Ce-MCM-41 and Al-MCM-41, Dyes Pigments, 81(2), 119-123.
- Huang, H. Y., Yang, R. T., 2003, Amine-grafted MCM-48 and silica xerogel as superior sorbents for acidic gas removal from natural gas, Ind. Eng. Chem. Res., 42(12), 2427-2433.
- 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 Technol., 90(12), 1543-1549.
- Ross, S., Olivier, J. P., 1964, On physical adsorption, Inter-science, New York.
- Son, W. J., Choi, J. S., Ahn, W. S., 2008, Adsorptive removal of carbon dioxide using polyethyleneimine-loaded mesoporous silica materials, Micro. Meso. Mater., 113, 31-40.
- Szekely, J., Evans, J. W., Sohn, H. Y., 1976, Gas-Solid Reaction, Academic Press, New York.
- Veawab, A., Tontiwachwuthikul, P., Chakma, A., 1999, Corrosion of carbon steel in the CO₂ absorption process using aqueous amine solution, Ind. eng. Chem. Res., 38(10), 3917-3924.
- Xu, X., Song, C., Andresen, 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 MCM-41, Micropor. Mesopo. Mat., 62, 29-45.
- Yang, H., Xu, Z., Fan, M., Gupta, R., Slimane, R.B., Bland, A.E., Wright, I., 2008, Progress in carbon dioxide separation and capture: a review, J. Environ. Sci., 20, 14-27.
- Zakkour, P., Haines, M., 2007, Permitting issues for CO₂ capture, transport and geological storage: a review of Europe, USA, Canada and Australia, Int. J. GreenH. Gas Con., 1, 97-100.