

아민계 함침 메조포러스 실리카를 이용한 CO₂ 흡착

최성우*

계명대학교 환경과학과

(2011년 3월 2일 접수; 2011년 4월 23일 수정; 2011년 5월 23일 채택)

Adsorption of CO₂ on Amine-impregnated Mesoporous Silica

Sung-woo Choi*

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

(Manuscript received 2 March, 2011; revised 23 April, 2011; accepted 23 May, 2011)

Abstract

Adsorption experiment of carbon dioxide was performed on MCM41 silica impregnated with two kinds of EDA(ethylenediamine) and MEA(monoethanolamine). The prepared adsorbents were characterized by BET surface area, X-ray diffraction and FT-IR. The CO₂ capture study was investigated in a U type packed column with GC/TCD. The results of XRD for MCM-41 and amine-impregnated MCM41 showed typical the hexagonal pore system. BET results showed the MCM 41 impregnated amine to have a surface area of 141 m²/g to 595 m²/g and FT-IR revealed a N-H functional group at about 1400cm⁻¹ to 1600cm⁻¹. The CO₂ adsorption capacity on EDA and MEA was as follow: MCM41-EDA30 > MCM41 -EDA40 >MCM41-EDA20 >MCM-EDA10 and MCM41-MEA40 >MCM41-MEA30 > MCM41-MEA20> MCM41-MEA10. The MCM41-EDA30 showed the highest adsorption capacity due to physical adsorption and chemical adsorption by amino-group content. The results suggest that mesoporous media with EDA is effective adsorbent for CO₂ capture from flue gases.

Key Words : Adsorption, CO₂ capture, Porous media, Impregnation, MCM41

1. 서론

화석연료의 연소에 의한 인위적인 CO₂ 발생량은 지난 백년간 지구평균 기온을 0.6℃ 상승 시켜 지구온난화로 인한 기후변화에 영향을 미치고 있다. 우리나라의 경우 CO₂ 총 배출량이 1990년 306 백만 ton CO₂에서 2007년 620 백만 ton CO₂로 약 314 백만 ton CO₂가 증가하여 연평균 6.1%의 증가세를 기록하였다(에너지경제연구원, 2010). 특히 6대 온실가스 중 지구

온난화에 대한 기여도는 CO₂가 61%로 가장 높아 기후변화의 주요 원인물질로 인식되어 이에 대한 저감 대책과 포집 및 저장기술에 대한 연구가 매우 필요한 실정이다. 또한 IPCC (intergovernmental panel on climate change)는 2005년도 특별보고서에서 기후변화에 대응하기 위한 CO₂ 저감을 위해 연소 후 포집, 순 산소연소, 연소 전 포집 기술등 다양한 CCS(carbon capture and storage)기술을 제안하였으며 CO₂ 포집 및 저장의 필요성을 역설하였다(IPCC, 2005). 대표적인 연소 후 포집기술로는 흡수법, 흡착법등이 있으며(Aaron과 Tsouris, 2005), 대용량 CO₂를 포집하는 방법으로 아민기를 이용한 흡수법이 보편화 되어있다. 그러나 흡수법은 재생에 많은 에너지가 필요하며, 장

*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

치의 부식, 흡수액의 감소 등의 문제점이 제기되고 있다(Veawab 등, 1999). 반면에 흡착법은 흡수법에 비해 에너지 소모가 크고 대용량처리가 어렵지만 장치가 간단하며, 흡착제의 높은 재생성, 동역학적 흡탈착 등의 장점을 가지므로 CO₂포집을 위한 경쟁력과 실용성 있는 기술로 고려되어진다(Feng 등, 2007; Wang 등, 2008; Lee 등, 2008; Belmabkhout 등, 2009).

흡착법을 이용한 CO₂ 분리를 위해 활성탄(Siriwardane 등, 2001), 제올라이트(Walton 등, 2006), 탄소나노튜브(Cinke 등, 2003) 등의 고체흡착제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Chena 등(2010)은 고체흡착제는 물리적인 흡착기전으로 CO₂를 포집하므로 일정 온도 이상에서는 CO₂ 흡착능이 급격하게 낮아지며, 또한 선택적으로 CO₂를 흡착하는 능력이 낮은 문제점이 있다고 보고하였다. 물리적흡착의 고체흡착제의 화학적흡착능을 증가하기 위해 아민계 물질을 활성탄(이 등, 2010), 제올라이트(Su 등, 2010)에 함침한 연구가 있으나 이들 흡착제는 기공이 불규칙적이고 작아 재생의 어려움이 있다. 그러나 1992년 모빌사에서 제조된 메조포러스 실리카인 MCM41은 활성탄과 제올라이트에 비해 기공이 크고 크기조절이 가능하여 육방구조의 균일하고 규칙적인 배열 특성이 있어 흡착제로 많이 사용되고 있다(Biz 등, 1998). Lu 등(2009)은 구형의 메조포러스 실리카 물질에 EDA(Ethanediamine)의 아민계 물질을 함침하여 CO₂ 흡착하였고, 박 등(2007)은 MCM41, MCM-48, SBA-15에 아민계 물질인 MEA (Monoethanolamine)를 함침하여 CO₂를 흡착한 결과 MCM41에 MEA를 함침한 물질이 가장 좋은 흡착능이 있다고 보고하였다. 그러나 MEA, EDA, PEI 등 단일 함침물질에 대한 효율성 평가로 흡착조건이 다른 상태에서의 흡착제 간 CO₂ 포집 효율평가는 의미가 없을 것으로 생각된다. 따라서 선행연구에서 흡착효율이 입증된 MEA와 EDA를 선정하여 동일한 흡착조건하의 연구를 수행함으로써 최적의 흡착제를 선정하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 대표적인 아민계 물질인 MEA와 EDA의 조성비를 달리하여 함침한 MCM41을 제조하여 함침물질별 조성함량별 CO₂의 흡착특성을 비교 평가하였다. 또한 흡착제별 표면특성을 평가하기 위해

XRD, BET, FT-IR의 분석을 실시하였으며 표면특성과 흡착효율과의 연관성을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구재료

본 연구에 사용된 MCM41은 계면활성제인 CTABr(cetyltrimethylammonium bromide)을 사용하였고, 실리카 원료로써 TEOS(tetraethylorthosilicate)를 사용하여 합성 하였다. 제조방법으로 계면활성제를(CTABr, 99%) 증류수와 혼합하여 실온에서 1시간 교반하였다. 이때 소수성기와 친수성기를 갖는 계면활성제의 특성상 친수성기가 물과의 접촉을 하기위하여 바깥쪽에 형성되고 소수성기는 안쪽으로 형성되어 마이셀이 만들어진다. 1시간 후 교반 하면서 NaOH를 혼합하고 10분이 지난 다음 TEOS를 주입하였다. 시료의 전체 몰 비는 0.1 CTMABr : 0.9 TEOS : 0.1 NaOH : 100 H₂O 이다. 그 후 1시간 교반을 하고 80°C에서 24시간 수열합성 하였다. 그리고 여과 후 남은 계면활성제 제거를 위하여 0.1M HCl/EtOH로 세척하여 550°C에서 3시간 소성하여 MCM41을 제조하였다.

합성된 MCM41에 아민계 물질을 함침하기 위하여 Xu 등(2003)의 방법을 적용하였다. 함침 방법으로 메탄올과 아민계 물질인 EDA 또는 MEA를 혼합하여 15분 동안 상온에서 교반후 MCM41을 주입하여 30분 동안 교반하면 슬러리 형태의 혼합물이 형성 된다. 그리고 슬러리 형태의 혼합물을 70°C에서 16시간 진공건조하면 아민물질이 함침된 MCM41을 얻을 수 있다. 함침량은 10 wt%, 20 wt%, 30 wt%, 40 wt%로 하였으며, 이때 함침된 촉매를 MCM41-X-Y라 명하였다. 여기서 X는 아민계 물질로 EDA 또는 MEA를 나타내며, Y는 함침량을 나타내었다.

2.2. 연구방법

CO₂의 흡착평가를 위해 제조된 흡착제의 표면분석 및 흡착실험을 실시하였다. 제조된 흡착제에 대한 표면적 및 N₂ 흡탈착특성을 평가하기 위해 77.7K에서 ASAP2020 (Micromeritics Instrument Corp. U.S.A)을 이용하였으며 BET(Brunauer-emmett-teller) 표면적, 기공부피 및 기공크기를 계산하였으며 메조포러스물질의 결정구조를 분석하기 위해 XRD(x-ray

diffractometer)는 XDS 2000(Scintag, U.S.A)으로 분석하였으며 MCM41과 MCM-X-Y에 대해 각각 실시하였다. 또한 MCM41에 함침된 아민기의 함침특성을 파악하기위해 FT-IR(Fouier 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%의 CO₂가스를 사용하였으며, 40℃에서 등온 흡착하였다. 농도가스의 주입부분의 내경이 10 mm, 길이가 200 mm인 U자형 석영 반응관을

을 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℃의 injector 온도와 150℃의 detector 온도를 설정하였으며, oven 온도는 35℃를 유지하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. MEA와 EDA 함침 MCM41의 흡착 효율 평가

MEA와 EDA 함침농도에 따른 MCM41에 대한 이산화탄소의 흡착실험결과를 Fig. 2에 나타내었다. 본 실험의 흡착온도는 40℃에서 실시하였으며 C₀는 초기 이산화탄소농도이며 C는 t시간 후 이산화탄소의 농도를 나타낸다. 아민류가 함침 되는 않은 MCM41은 초기 1분대의 농도비가 0.18로 나타났으며 1분대에 파과가 시작되었다. MEA로 함침된 MCM41은 함침농도에 따라 2~18분대의 파과시간을 가졌으며 MCM41-MEA30과 MCM41-MEA40의 유사한 파과 특성을 가졌다. EDA로 함침된 MCM41의 파과시간은 EDA 10%가 5분대, 20%가 6분대, 30%가 20분대, 40% 15분대로 EDA30%로 함침된 MCM41이 가장 길었다. 또한 두 함침물질별 농도비특성을 살펴보면 농도비 0.8까지는 빠른 포화효율을 보여주나 0.8에서 1사이에서는 기울기가 상대적으로 작아서 포화효율

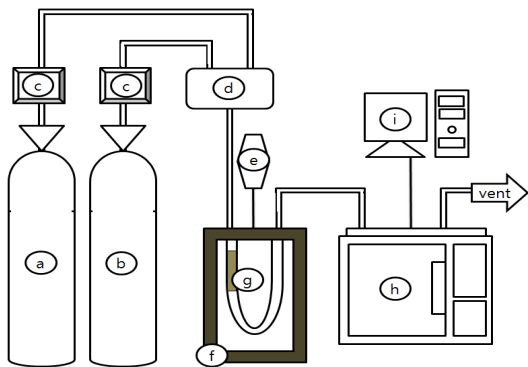


Fig. 1. Diagram of the experimental setup (a: CO₂, b: N₂, c: mass flow controller, d: mixing chamber, e: temperature controller, f: furnace, g: adsorbent in U-tube, h: GC-TCD, i: PC).

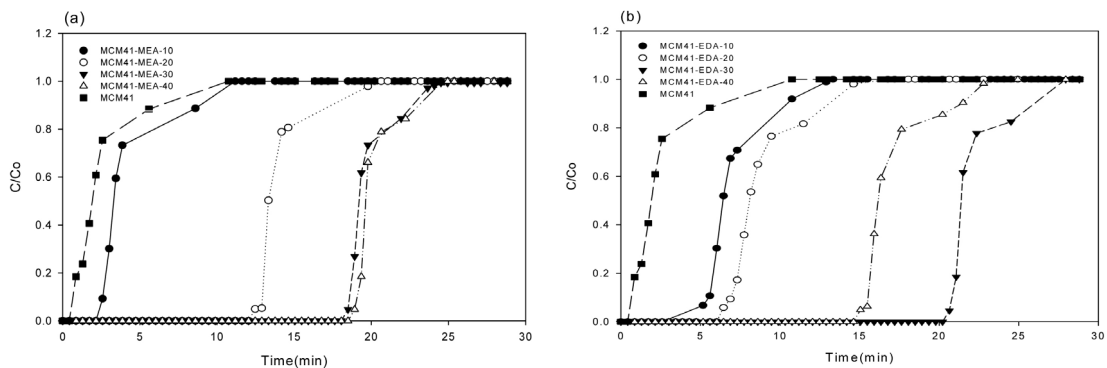


Fig. 2. The experimental breakthrough curves of CO₂ absorbed onto MCM41 at different amine-impregnation content (a:MEA, b:EDA).

이 낮아짐을 알 수 있었다. 흡착제는 다르나 이 등 (2010)의 MEA가 함침된 활성탄의 파과특성과 유사한 현상을 보여주었으며 Jang 등(2009)의 MCM48을 이용한 CO₂ 흡착 연구에서 본 연구와 유사하게 파과 형태가 농도비 0.8까지 급속한 경사를 이루다가 0.8 이후로 완만한 경사를 보여주었다.

함침물질별 함량별에 따른 CO₂의 흡착량을 Fig. 3에 나타내었다. CO₂ 총흡착량은 본 실험에서 사용한 흡착제 0.5 g이 100% 파과될 때까지 흡착된 양을 의미한다. MCM41-EDA의 경우 10%가 18.3 mg, 20%는 22.6 mg, 30%는 55.4 mg, 40%는 42.4 mg으로 MCM41-EDA30이 가장 높은 흡착능을 보여주었으며 MCM41-MEA의 경우 10%는 10.4 mg, 20%는 35.9 mg, 30%는 49.0 mg, 40%는 50.1 mg으로 MEA의 함침량이 증가할수록 흡착능이 증가함을 보여주었다. 박 등 (2007)은 MEA를 30%, 50%, 70%를 함침하여 CO₂의 흡착능을 평가하였는데 50%에서 흡착능이 가장 높았고 함침량이 증가함에 따라 흡착제의 기공을 막아 효율이 떨어진다고 하였으며 본 연구의 결과도 이와 유사하게 최고 함침 농도인 40%에서 가장 높은 흡착효율을 보여주었다. 함침물질별 함량별에 따른 CO₂의 흡착량 비교시 MCM41-EDA30 > MCM41-MEA40 ≈ MCM41-MEA30 > MCM41-EDA40 > MCM41-MEA20 > MCM-EDA10 > MCM-MEA10 순으로 나타났다. 가장 높은 흡착능을 보여준 물질은 MCM41-EDA30으로 MEA로 함침된 MCM41보다

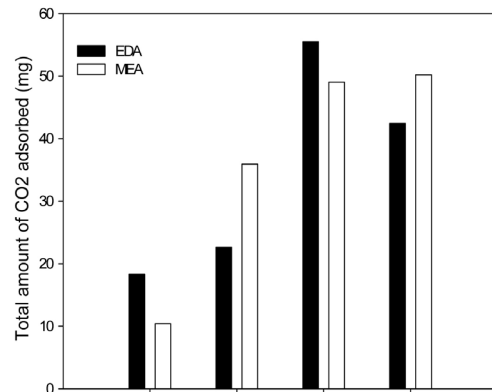


Fig. 3. Comparison of total amount of CO₂ adsorbed onto MCM41 and amine-impregnated MCM41.

약 4%정도 높은 흡착효율을 보여주었다.

Fig. 4는 MCM41과 함침량별 MCM41-MEA 및 MCM41-EDA의 N₂ 등온흡탈착곡선을 보여준다. MCM41의 경우 등온흡탈착곡선의 형태가 IV형으로 메조기공을 가지는 다공성물질의 전형적인 패턴을 보여주었다(Wei 등, 2010). MCM41과 MCM-X-Y는 P/P₀가 0.3~0.4 및 0.9~1.0에서 기울기의 변화를 보여주는데 이는 메조기공내의 모세관응축에 의한 것이며, MCM41-MEA의 경우 함침량이 증가할수록 P/P₀가 0.3~0.4의 기울기가 완만해지나 MCM41-EDA의 경우는 기울기 양상이 함침량에 관련 없이 MCM41과 유사한 경향을 보여주었다. 이는 육방구조의 다공성 물질에서 나타나는 전형적 특성으로 이전 연구의 결

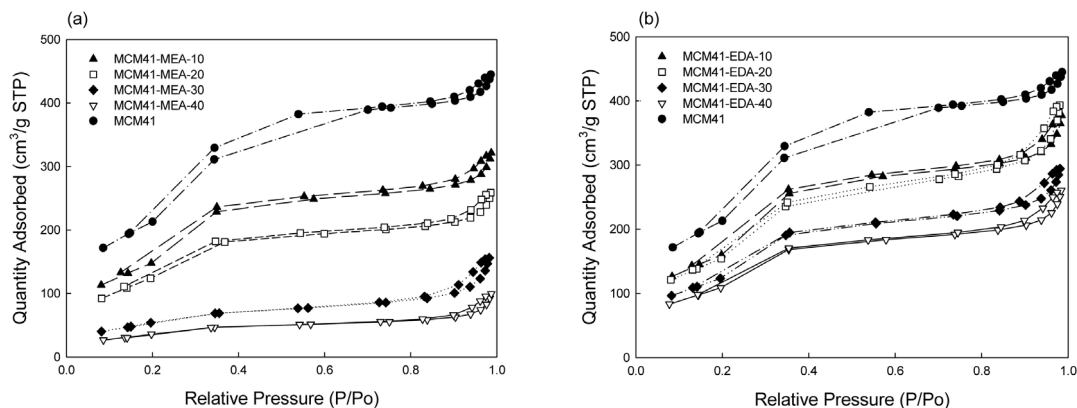


Fig. 4. N₂ adsorption/desorption isotherms of MCM41 and amine-impregnated MCM41 (a:MEA, b:EDA).

과 동일한 현상을 보여주었다(박 등, 2007; Chen 등, 2010).

3.2. MEA와 EDA 함침 MCM41의 표면분석결과

제조된 흡착제의 표면특성과 효율과 연관성을 분석하기 위해 BET, XRD, FT-IR 분석을 실시하였다. Table 1은 함침물질별 함량별 MCM41의 비표면적, 기공부피, 기공크기를 보여준다. 함침물질의 함침량이 증가함에 따라 비표면적은 MEA가 560 m²/g에서 141 m²/g으로, EDA는 595 m²/g에서 409 m²/g으로 낮아졌다. 기공부피 역시 비표면적의 감소특성과 유사한 경향을 보여 주었으며 기공크기는 MCM41-MEA는 3.2~4.3 nm, MCM41-EDA는 3.7~4.1 nm로 MCM41에 비해 큰 변화가 없었다. 즉 함침량의 증가는 비표면적과 기공부피에 영향을 주며 비표면적의 감소는 아민기능성기가 MCM의 표면에 형성됨을 의미한다. Lu 등(2009)의 연구에서도 MSP에 EDA함침시 비표면적이 1129 m²/g에서 345 m²/g으로 감소하였으며 MCM41에 MEA 50%를 함침시 10배 이상 비표면적이 감소하였고 기공부피에도 영향을 주었으며(박 등, 2007), Chen 등(2010)의 연구에서도 이와 유사한 결과를 보여주었다.

MCM41과 MEA와 EDA로 함침된 MCM41의 XRD결과를 Fig. 5에 나타내었다. MCM41의 XRD의 분석결과를 보면 회절피크는 2θ값이 2°에서 100의 주피크가 나타났으며 MCM41의 전형적인 XRD패턴으로 Lu 등(2009)의 연구와 Belmabkhout 등(2009)의 연구결과와 유사한 경향을 보여주었다. MCM41-

Table 1. Surface area, pore volume, and pore size of the prepared MCM41

| | BET Surface Area (m ² /g) | Pore Volume (cm ³ /g) | Pore Size (nm) |
|--------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------|
| MCM41 | 781 | 0.6763 | 3.464 |
| MCM41-MEA-10 | 560 | 0.4830 | 3.452 |
| MCM41-MEA-20 | 483 | 0.3871 | 3.209 |
| MCM41-MEA-30 | 209 | 0.2272 | 4.336 |
| MCM41-MEA-40 | 141 | 0.1431 | 4.047 |
| MCM41-EDA-10 | 595 | 0.5638 | 3.789 |
| MCM41-EDA-20 | 574 | 0.5906 | 4.116 |
| MCM41-EDA-30 | 464 | 0.4405 | 3.791 |
| MCM41-EDA-40 | 409 | 0.3880 | 3.791 |

MEA의 경우 함침량이 증가함에 따라 회절강도가 감소하는 형태를 보여주었으며 MEA10과 MEA20은 피크치가 MCM41과 같이 뾰족하게 나타나 육방구조의 규칙성을 보여주었으나 MEA30과 MEA40은 피크치가 완만하여 낮은 함량으로 함침된 MCM41보다 규칙성이 낮음을 보여주었다. Chen 등(2010)의 연구에서도 함침물질의 영향으로 인해 회절피크의 강도가 본 연구와 유사하게 감소하였으며 이는 함침물질이 실리카내 channel에 성공적으로 함침된 것이라고 보고했다. 이는 Table 1에서 볼 수 있듯이 MEA의 함침량이 증가함에 따라 아민계기능성기가 표면에 함침되어 비표면적이 감소됨을 의미하며 XRD결과에서도 영향을 주는 것으로 사료된다. 본 연구의 결과 CO₂의 흡착능

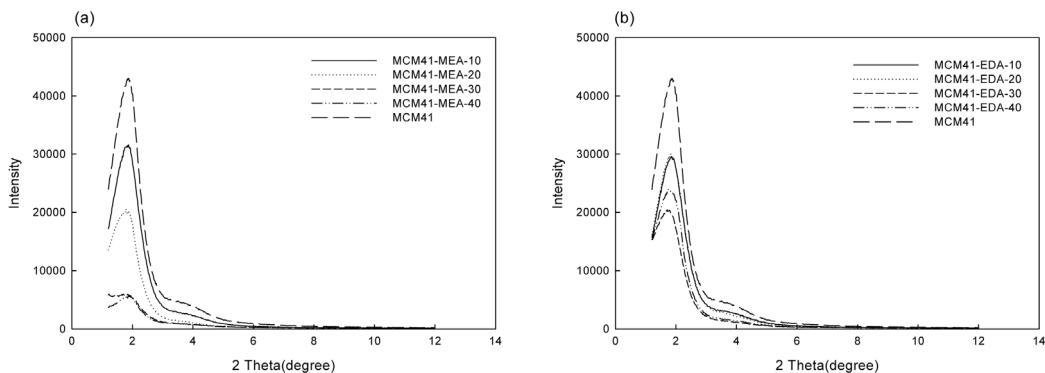


Fig. 5. XRD patterns of MCM41 and amine-impregnated MCM41(a:MEA, b:EDA).

은 비표면적과 XRD 피크 강도에 반비례하는 것으로 나타났다. MCM41-EDA의 경우 XRD 주피크의 강도가 함량의 증가에 따라 감소하나 MCM41-MEA와는 달리 뾰족한 형태를 유지하여 육방구조의 규칙성을 잘 보존하고 있음을 보여주었다. EDA의 함량에 따른 비표면적의 변화를 보면 MEA에 비해 크지 않아 EDA가 함침 되더라도 육방구조의 메조기공이 잘 유지되는 것으로 사료된다.

BET분석과 XRD의 분석을 기초로 MEA 및 EDA의 N-H밴드의 함침정도를 평가하기 위해 FT-IR분석을 실시하였으며 Fig. 6에 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 Lu 등(2009)의 연구와 일치하였다. 또한 CO_2 흡착능 가장 좋은 MCM-EDA30 및 MCM-MEA40과 MCM41의 FT-IR 결과를 비교 분석하였다. MCM-EDA30 및 MCM-MEA40은 1400 cm^{-1} 에서 1600 cm^{-1} 부근에서 N-H밴드의 강한 피크가 확인되어 함침이 잘 되었음을 보여주었으며 C-H₂ 밴드는 2950 cm^{-1} 에서 나타났다. Lu 등(2009)의 연구결과에서는 EDA를 함침한 MSP를 IR로 분석한 결과 2930, 1650, 1440, 1010 cm^{-1} 에서 중요 밴드가 나타났으며 이는 $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{-NH}_2$ 그룹과 관련 있다고 보고 하였다. 또한 Aroua 등(2008)의 활성탄에 PEI를 함침 하였는데 N-H밴드가 1480 cm^{-1} 에서 나타나 본 연구결과와 유사한 경향을 보여 주었다. MCM41을 이용한 CO_2 포집 연구에서 MCM41은 물리적 흡착기전 따르나 아

민기가 함침된 MCM41은 물리적 흡착과 화학적 흡착이 동시에 일어나 흡착능이 향상된다고 박 등(2007)이 보고하였다. 본 연구의 결과 MCM41에 MEA와 EDA로 함침한 결과 MCM41-EDA30이 가장 높은 흡착능을 보여주었으며 XRD 피크패턴과 BET표면적, FT-IR의 결과와 일치하는 경향을 보여 주었다.

4. 결론

본 연구에서는 CO_2 포집을 위해 대표적인 아민계 물질인 MEA와 EDA의 함량비 10wt%, 20wt%, 30wt%, 40wt%로 달리하여 표면 개질화한 MCM41의 CO_2 흡착실험 및 표면분석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, CO_2 흡착실험에서 EDA로 함침된 MCM41의 흡착능은 $\text{MCM41-EDA30} > \text{MCM41-EDA40} > \text{MCM-EDA20} > \text{MCM-EDA10}$ 순으로 나타났으며 MEA로 함침된 MCM41은 $\text{MCM41-MEA40} > \text{MCM41-MEA30} > \text{MCM41-MEA20} > \text{MCM-MEA10}$ 나타났다. 둘째, 질소등온흡착실험에서는 다공성물질의 IV형 그래프가 나타났으며 MCM41-MEA의 경우 함침량이 증가할수록 기울기가 완만해지나 MCM41-EDA의 경우는 함침량과 관련 없이 MCM41의 피크패턴을 유지하였다. 셋째, BET표면분석결과 MCM41-MEA는 함침량에 따라 비표면적의 변화가 상대적으로 높았으며 MCM41-EDA는 $595\text{ m}^2/\text{g}$ 에서 $409\text{ m}^2/\text{g}$ 으로 비교적 변화가 적었다. 특히 MCM41-EDA30의 BET표면적은 $463\text{ m}^2/\text{g}$ 이었으며 XRD와 FT-IR 분석결과 육방구조를 가지고 있음을 확인하였다. 넷째, 본 연구에서는 MCM41-EDA30이 CO_2 흡착에 가장 효과적인 물질로 평가되었으며 이는 MCM41에 아민기가 함침되어 화학적 흡착과 동시에 물리적 흡착이 일어나 흡착능이 증가된 것으로 사료된다. 본 연구의 결과는 추후 CO_2 흡착제 개발에 기초적 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 MEA와 EDA의 함침량을 10%에 40%까지 조절하였으나 50%이상의 고 함량에 따른 CO_2 흡착능에 대한 연구, 연소장치의 배출되는 CO_2 모사가스 농도 실험 및 흡착 후 CO_2 탈착기전에 대한 연구가 추후 진행되어야 할 것으로 사료된다.

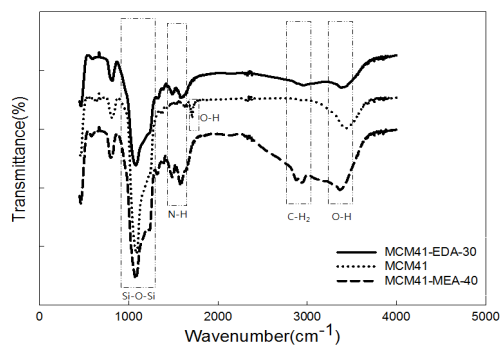


Fig. 6. FT-IR spectra of MCM41 and amine-impregnated MCM41.

감사의 글

본 연구는 2010년도 계명대학교 비사연구기금으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 박예원, 백일현, 박상도, 이재욱, 박소진, 2007, MEA (monoethanolamine) 함침 메조포러스 물질을 이용한 CO₂ 회수, 화학공학, 45(6), 573-581.
- 이동환, 감상규, 이송우, 이민규, 2010, 함침농도와 CO₂ 가스 유입농도에 따른 활성탄의 흡착특성, 한국환경과학회지, 26(12), 1403-1407.
- 에너지경제연구원, 2010, http://www.gihoo.or.kr/portal/01_General_Info/04_ST01_02.jsp.
- Aaron, D., Tsouris, C., 2005, Separation of CO₂ from flue gas: a review, Sep. Sci. Technol., 40, 321-348.
- Aroua, M. K., Daud, W. M. A. W., Yin, C. Y., Adinata, D., 2008, 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
- Belmabkhout, Y., Serna-Guerrero, R., Abdelhamid 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.
- Biz, S., Occelli, M. L., 1998, Synthesis and characterization of mesostructured materials, Catal. Rev. Sci. Eng., 40, 329-407.
- Chena, C., Sona, W. J., Youb, K. S., Ahnb, J. W., Ahna, W. S., 2010, Carbon dioxide capture using amine-impregnated HMS having textural mesoporosity, Chem. Eng. J., 161, 46-52.
- Cinke, M., Li, J., Bauschlicher Jr, C. W., Ricca, A., Meyyappan, M., 2003, CO₂ adsorption in single-walled carbon nanotubes, Chem. Phys. Lett., 376, 761-766.
- Feng, B., An, H., Tan, E., 2007, Screening of CO₂ adsorbing materials for zero emission power generation systems, Energ. Fuel., 21, 426-434.
- IPCC, 2005, IPCC special report on carbon dioxide capture and storage, Cambridge University Press, New York, 105-178.
- Jang, H. T., Park, Y. K., Ko, Y. S., Lee, J. Y., Margandan, B., 2009, Highly siliceous MCM-48 from rice hush ash for CO₂ adsorption, Int. J. Greenh. Gas Con., 3, 545-549
- Lee, K. B., Beaver, M. G., Caram, H. S., Sircar, S., 2008, Reversible chemisorbents for carbon dioxide and their potential applications, Ind. Eng. Chem. Res., 47, 8048-8062.
- 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.
- Siriwardane, R. V., Shen, M. S., Fisher, E. P., Poston, J. A., 2001, Adsorption of CO₂ on molecular sieves and activated carbon, Energ. Fuel., 15, 279-284.
- Su, F., Lu, C., Kuo, S. C., Zeng, W., 2010, Adsorption of CO₂ on amine-functionalized y-type zeolites, Energ. Fuel., 24(2), 1441-1448.
- Veawab, A., Tontiwachwuthikul, P., Chakma, A., 1999, Corrosion of carbon steel in the CO₂ absorption process using aqueous amine solutions, Ind. Eng. Chem. Res., 38, 3917-3924.
- Walton, K. S., Abney, M. B., Levan, M. D., 2006, CO₂ adsorption in Y and X zeolites modified by alkali metal cation exchange, Micropor. Mesopor. Mater., 91, 78-84.
- 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.
- Wei, J., Liao, J., Xiao, Y., Zhang, P., Shi, Y., 2010, Capture of carbon dioxide by amine-impregnated as-synthesized MCM41, J. Environ. Sci., 22(10), 1558-1563.
- Xu, X., Song, C., Andrése, 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. Mesopo. Mat., 62, 29-45.