

# MEA가 함침된 MCM-41 흡착제의 CO<sub>2</sub> 흡착 특성

## Characteristics of CO<sub>2</sub> Adsorption by MEA Impregnated MCM-41

이중범 · 최성우<sup>†</sup>  
Jung-Beom Lee · Sung-Woo Choi<sup>†</sup>

계명대학교 환경과학과  
Department of Environmental Science, Keimyung University

(2011년 5월 31일 접수, 2011년 9월 28일 채택)

**Abstract :** The CO<sub>2</sub> adsorption and characteristics of mesoporous silica MCM-41 impregnated by MEA (Monoethanolamine) were examined in this study. The adsorbents were characterized by XRD (X-ray powder diffraction), FT-IR (Fourier transform infrared spectroscopy), N<sub>2</sub> adsorption-desorption isotherms. CO<sub>2</sub> adsorption measurements were carried out using a GC-TCD unit using 15% CO<sub>2</sub> gas. The CO<sub>2</sub> adsorption capacity of MCM-41 increased by MEA contents to 10-40 wt%, otherwise MEA content of 50 wt% was decreased CO<sub>2</sub> adsorption capacity. The amines tended to deform at MCM-41 surface if too many amines were provided. Therefore CO<sub>2</sub> adsorption capacity can be decreased. The results of this study suggest it is important to control content of MEA in MCM-41 for adsorption of CO<sub>2</sub>.

**Key Words :** MEA, CO<sub>2</sub> Adsorption, MCM-41

**요약 :** 본 연구는 MEA가 함침된 MCM-41에 대하여 이산화탄소 흡착실험과 특성 분석을 하였다. 흡착제의 XRD, FT-IR, N<sub>2</sub>흡착 실험을 통하여 물리적 특성을 분석하였으며, 흡착실험은 15%의 이산화탄소를 사용하여 GC-TCD를 통하여 분석하였다. MEA 함침량이 10-40 wt%까지 함침량이 증가할수록 이산화탄소 흡착능은 증가하였다. 그러나 MEA 함침량이 50 wt%에서 흡착능이 감소하였다. 많은 아민이 제공되면 흡착제 표면에서 제공된 아민이 변형되는 경향이 있다. 그러므로 이산화탄소 흡착능이 감소될 수 있다. 본 연구의 결과로 이산화탄소 흡착을 위한 MCM-41에 MEA의 함침 함량의 조절이 중요하다는 것으로 사료되어진다.

**주제어 :** MEA, CO<sub>2</sub> 흡착, MCM-41

## 1. 서론

산업 활동으로 인한 이산화탄소는 지구온난화현상을 가속 화함에 따라 감소의 필요성이 대두된다.<sup>1)</sup>

대기에 방출되는 이산화탄소의 양을 감소하기 위하여 주로 흡수, 흡착, 막분리, 그리고 극저온을 이용하는 방법을 사용하고 있다. 그 중 흡수법은 장치의 부식, 흡수액의 감소 등의 문제점이 있으며 막분리와 극저온을 이용한 방법은 경제적으로 부담이 되는 단점이 있다. 하지만 흡착법의 경우에 에너지 소비가 적으며 장치가 간단하여 큰 관심이 되고 있다.<sup>2,3)</sup> 흡착법에 사용되는 고체 흡착제로는 활성탄 및 활성탄소섬유, 제올라이트, 메조포러스 실리카 등이 널리 사용되고 있다.<sup>4-6)</sup> 고체 흡착에 Van der Waals의 힘이 작용하여 이산화탄소를 물리적으로 흡착을 한다. 하지만 흡착온도가 상승할수록 흡착능이 급격하게 감소하며 또한 이산화탄소를 선택적으로 흡착하는데 어려움이 있다. 특히, 제올라이트의 경우 수분과의 친화력이 더 강함으로 습기의 존재 유무에 따라 흡착능이 떨어진다.<sup>7)</sup>

물리적 흡착의 단점을 보완하기 위하여 이산화탄소를 흡수할 수 있는 흡수액인 MEA (Monoethanolamine), DEA (Diethanolamine), TEA (Triethanolamine)등과 같은 알칸올아민류를

고체 흡착제 표면에 함침하여 이산화탄소를 포집한다. 알칸올아민류의 NH<sub>2</sub>는 온실가스인 CO<sub>2</sub>와 결합하는 성질을 가지고 있어 이산화탄소를 선택적으로 포집할 수 있으며 현재 활발히 연구가 진행되고 있다.<sup>1,8)</sup>

고체 흡착제 중 MCM-41과 같은 메조포러스 물질은 균일한 기공의 크기와 분포를 가지고 있을 뿐만 아니라 많은 실라놀 그룹을 가지고 있다. 실라놀 그룹은 이산화탄소와 결합하는 유기아민류를 지탱하는 기능을 가지고 있어 아민류 함침을 잘 일어나도록 한다.<sup>9)</sup> 따라서 Lu 등은<sup>10)</sup> EDA (Ethylenediamine)의 아민류 물질을 구형 메조포러스 실리카 물질에 함침하였으며, 박 등은<sup>11)</sup> MEA를 각기 다른 메조포러스 물질에 함침하여 이산화탄소 흡착에 관한 연구를 하였다. 그 결과 순수한 메조포러스 실리카 물질 보다 아민류 물질을 함침한 메조포러스 실리카의 경우가 이산화탄소의 흡착능이 더 좋은 것으로 나타났다. 하지만 일정농도 이상 함침을 하면 이산화탄소 흡착능이 감소하는 현상이 나타났다.

따라서 본 연구에서는 기공이 균일하고 유기아민류를 잘 함침할 수 있는 메조포러스 실리카 물질인 MCM-41에 흡수액으로 가장 많이 사용하는 MEA를 10 wt%의 함침 간격을 두고 50 wt%까지 함침하여 흡착제를 제조하였다. 그리고 함침량 변화에 따른 흡착제의 변화되는 특성을 이산화탄

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: swchoi@kmu.ac.kr Tel: 053-580-5245 Fax: 053-580-5385

소 흡착능과 비교 분석하여 일정농도 이상의 함침량에서 이산화탄소 흡착능 감소의 원인에 대하여 연구하였다. 특성분석을 위하여 XRD, N<sub>2</sub>흡탈착, FT-IR 분석을 하였으며, GC-TCD를 사용하여 이산화탄소 흡착능을 분석하였다.

## 2. 연구재료 및 방법

### 2.1. 연구재료

흡착제는 메조포러스 물질인 MCM-41을 사용하였다. MCM-41의 합성은 계면활성제로 CTAB (cetyltrimethylammonium bromide)를 사용하였으며 TEOS (tetraethylorthosilicate)를 실리카원으로 사용하였다.

중류수에 CTAB를 1시간 동안 교반한다. 그리고 NaOH를 혼합하여 15분 교반 후 TEOS를 주입하여 1시간 더 교반한다. 이 때 시료의 몰비는 0.1 CTAB : 0.9 TEOS : 0.1 NaOH : 100 H<sub>2</sub>O이다. 교반이 끝난 후 80℃에서 수열합성 한다. 24시간 합성을 하고 에탄올을 바탕으로 0.1 M의 HCl 용액을 제조하여 여과 후 세척을 3회 반복한다. 그리고 70℃에서 하루 건조하고 마지막으로 550℃에서 3시간 소성하여 MCM-41을 제조하였다.

제조된 MCM-41을 아민물질인 MEA로 함침하기 위하여 Xu 등의<sup>12)</sup> 방법을 인용하였다. 메탄올과 MEA를 15분 동안 교반 후 MCM-41을 주입하여 30분 교반하였다. 슬러지형태의 시료를 70℃에서 16시간 진공 건조하여 MEA가 함침된 MCM-41을 합성하였다. 함침량은 10 wt%, 20 wt%, 30 wt%, 40 wt%, 50 wt%로 하였으며, 이때 함침량은 식 (1)에 의해 계산하였다. 또한 함침된 촉매를 MCM-41-MEA<sub>x</sub>라 명한다. 여기서 x는 함침량을 나타낸다.

$$\text{함침량 (wt\%)} = \frac{\text{MEA}(g)}{\text{MCM41}(g) + \text{MEA}(g)} \quad (1)$$

### 2.2. 연구방법

MEA를 함침한 흡착제의 특성을 알아보기 위하여 XRD, FT-IR, N<sub>2</sub>흡탈착 실험을 하였다. XRD (XDS 2000, Scintag)는 흡착제의 MEA 함침 전후의 결정구조 변화를 알아보기 위하여 2θ각을 1.2~12.0까지 분석하였다. surface area analyzer (ASAP2020, Micromeritics Instrument Corp.)를 이용하여 N<sub>2</sub>흡탈착 실험후 BET식을 통해 입자의 비표면적을 구했으며 BJH식을 통하여 기공의 크기 및 부피를 도출하였다. 또한 함침의 유무를 확인하기 위하여 FT-IR (Spectrum GX & autoimage, PerkinElmer) 분석을 하였다.

이산화탄소 흡착실험은 GC-TCD (HP 6890A GC, Agilent)를 이용하여 분석하였다. 칼럼(GS-Carbonplot, Agilent)은 길이 30 m, 직경이 0.32 mm, 필름의 두께 3 μm를 사용하였으며, 분석 조건으로 injector 온도를 185℃, detector 온도를 150℃, oven 온도를 35℃를 유지하여 분석하였다. Fig. 1은 이산화탄소 흡착장치를 나타내었다. 가스분배로부터 나오는

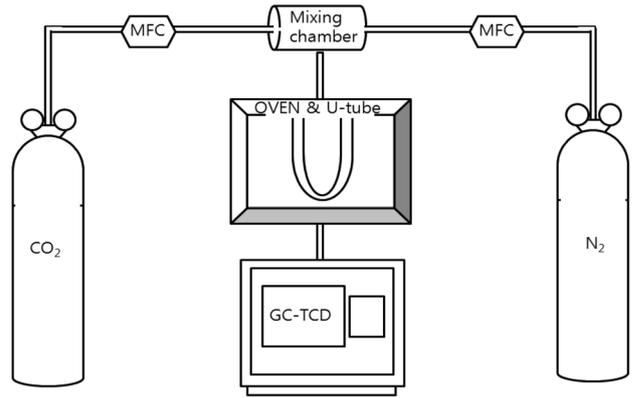


Fig. 1. Diagram of the experimental setup for CO<sub>2</sub> adsorption.

가스의 유량을 조절하기 위하여 MFC (mass flow meter)를 사용하였으며 오븐 안의 U자형 석영관은 내경이 10 mm 길이 200 mm를 사용하였다. U자형 석영관에 제조된 흡착제 0.5 g을 넣고 15% 이산화탄소를 10 mL/min으로 흘려 흡착 실험하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. CO<sub>2</sub> 흡착

제조된 MCM-41과 MEA로 함침된 MCM-41의 이산화탄소 흡착능을 알아보기 위하여 313 K 등온에서 0.43분의 간격을 두고 연속적으로 인젝션하여 흡착실험을 실행하였다.

시간에 따른 흡착제 0.5 g당 이산화탄소의 흡착량을 Fig. 2에 나타내었다. GC-TCD로 분석된 이산화탄소의 농도(ppm)를 식 (2)를 이용하여 이산화탄소의 흡착량 W<sub>CO<sub>2</sub></sub> (mg)을 계산하였다.

$$W_{CO_2} = \frac{1}{1000} \times \int_0^t Q \times \left( \frac{M}{R \times T} C_{in} - \frac{M}{R \times T} C_{eff} \right) dt \quad (2)$$

여기서 C<sub>in</sub>은 초기 이산화탄소의 농도(ppm), C<sub>eff</sub>는 검출된

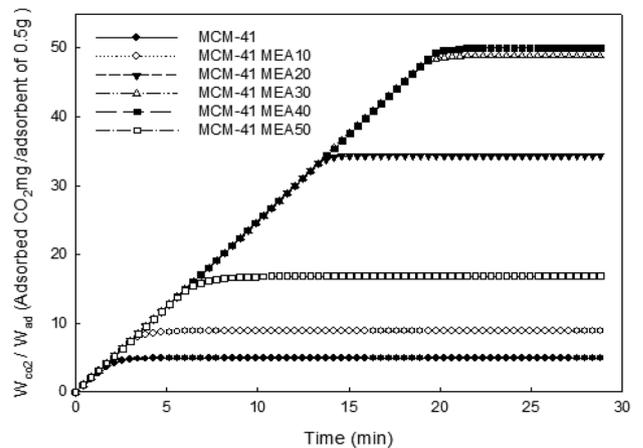


Fig. 2. Amount of CO<sub>2</sub> adsorption on each adsorbent of 0.5 g.

이산화탄소의 농도(ppm), M은 이산화탄소의 분자량, T는 흡착온도(K), Q는 이산화탄소의 유량(L/min), R은 기체상수, t는 시간(min)을 나타낸다.

MCM-41의 경우 흡착제 0.5 g에 흡착되는 이산화탄소의 양이 약 4.9 mg으로 가장 낮게 나타났으며 MEA로 함침된 모든 MCM-41에서 더 높게 나타났다. 박 등<sup>11)</sup>과 Wei 등<sup>13)</sup>에 따르면 이산화탄소 1몰은 2몰의 RNH<sub>2</sub>와 화학적 결합을 한다. MCM-41의 경우 물리적 흡착만 일어나지만 아민물질로 함침된 MCM-41은 아민과 이산화탄소가 화학적 결합을 할 수 있는 화학적 활성점을 제공하기 때문에 물리적 화학적 흡착이 동시에 일어남으로 이산화탄소 흡착량이 증가한다고 하였다.

MCM-41은 2.5분 이후에 포화되어 가장 짧은 흡착시간을 가지는 것으로 나타났다. 반면에 MCM-41-MEA40이 흡착시간이 약 22분으로 가장 긴 것으로 나타났으며 함침량이 증가할수록 이산화탄소 흡착시간이 길어져 흡착량이 증가하는 현상이 나타났다. 그러나 함침량이 50 wt%인 흡착제에서는 흡착시간이 줄어들어 흡착량이 감소되었다. 활성탄에 MEA를 함침하여 이산화탄소 흡착 실험을 수행한 이 등의<sup>14)</sup> 연구에서도 함침량이 50 wt% 이상부터 흡착능이 감소하는 것으로 본 연구와 유사하게 나타났다. 일정량 이상의 아민물질은 이산화탄소를 흡착할 수 있는 화학적 활성점 제공에 영향을 미친 것으로 사료된다.

### 3.2. 흡착제의 특성분석

77 K 등온에서 질소흡탈착실험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 제조된 모든 흡착제는 IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)에 의해 규정되어진 메조구조의 물질에서 나타나는 IV형의 등온곡선이 나타났다. 상대압력이 0.15~0.3과 0.9~1.0에서의 급격한 기울기 변화는 모세관 응축 현상에 의하여 발생된다. 모세관 응축현상은 흡착되는 물질이 응축되어 세공을 채워줌으로써 급격히 흡착되는 것이다. Chang 등의<sup>9)</sup> 연구에 따르면 MCM-41은 2번의 급격한 기울기 변화를 보여주므로 원통형과 막대형의 모양이 다른 2개의 기공이 주로 분포한다고 하며 본 연구와 유사한 결과를 가진다. 또한 함침량이 10~40 wt%까지 상대압력이 0.15~0.3에서의 기울기가 함침량이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. Liang 등에<sup>1)</sup> 의하면 기울기의 감소는 아민물질이 세공을 메움으로 발생되므로 아민기의 함침이 잘 이뤄졌음을 알 수 있다.

Fig. 3의 MCM-41에서 상대압력이 0.3~0.7범위 내에 흡착곡선과 탈착곡선의 차이가 나타나는 H3형태의 히스테리시스 현상이 나타났다. 히스테리시스 현상은 흡착되는 물질이 양 끝이 개방된 기공에 흡착과 탈착시 서로 다른 메니스커스모양을 가지기 때문에 나타나는 현상으로 IUPAC에서 H3의 히스테리시스 현상은 좁고 긴 구조를 가진 기공에서 발견된다고 한다. MEA가 함침됨에 따라 히스테리시스의 현상이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 아민물질이 기공을 메움으로 히스테리시스 현상이 감소한 것으로 생각된다.

직경이 5 nm 이하의 기공의 부피 및 BET 비표면적을 Fig. 4에 나타내었다. 제조된 MCM-41은 전체 기공의 부피중 직경이 5 nm 이하인 기공이 99 wt%를 차지한다. 함침량이 10~40 wt%까지는 기공 내에 아민 물질의 함침이 이루어져 함침량이 증가함에 따라 5 nm 이하의 기공분포가 점점 감소한 것으로 전체기공의 부피 감소에 영향을 미친 것으로 예측된다. 그러나 함침량이 50 wt%의 경우 상대압력이 0.15~0.3에서 기울기가 MCM-41-MEA40에 비하여 증가한 것과 직경이 5 nm 이하 기공의 부피가 증가한 것은 많은 아민량에도 불구하고 기공 내부로 아민물질이 충분히 함침되지 않음으로 사료된다.

MCM-41의 비표면적이 780.864 m<sup>2</sup>/g으로 가장 넓은 면적을 가지고 있었으며 10~40 wt%까지 함침량이 증가할수록 비표면적은 감소하는 경향을 보였다. 하지만 함침량이 50 wt%의 경우 비표면적이 증가하는 현상이 나타났다. 일정농도 이상의 함침량의 경우 흡착제의 특성에 영향을 있을 것으로 사료된다. 이외 기공의 크기는 MCM-41이 3.464 nm, MCM-41-MEA10이 3.452 nm, MCM-41-MEA20이 3.209 nm, MCM-41-MEA30이 4.336 nm, MCM-41-MEA40이 4.047 nm, MCM-41-MEA50이 4.023 nm로 함침량의 증가에 따른 일

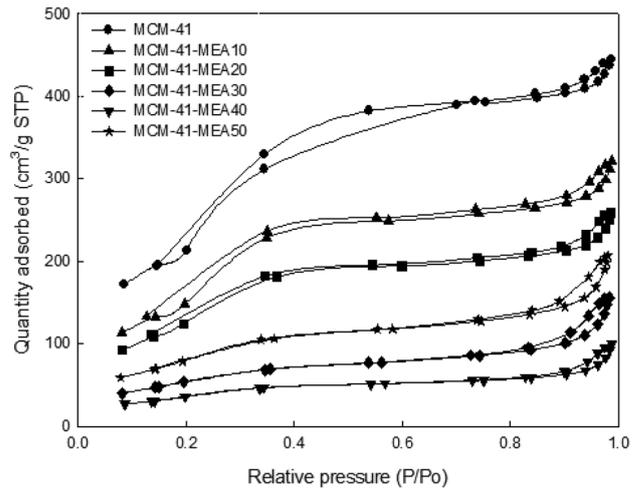


Fig. 3. N<sub>2</sub> adsorption-desorption isotherms at 77 K.

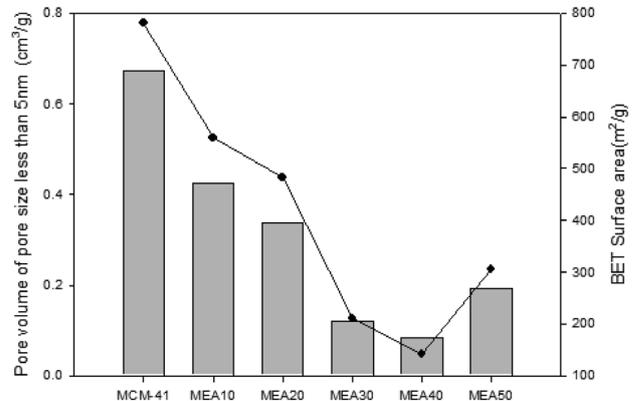


Fig. 4. Volume of pore size less than 5 nm and BET surface area each adsorbent.

정한 증감이 나타나지 않았으며 박 등의<sup>11)</sup> 연구와 유사하게 나타났다. MEA의 함침이 결정구조에 미치는 영향을 알아보기 위하여 XRD분석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. MCM-41의 XRD 피크는 박 등과<sup>11)</sup> Chang 등의<sup>9)</sup> 연구 결과와 유사한 결과로 2θ각이 2~6° 사이에서 [100], [110]의 주 피크가 나타났으며 [200]에서도 약하게 나타났다. 따라서 2D-hexagonal 구조를 갖는 MCM-41의 합성이 잘 이루어 졌다고 생각한다. 10~40 wt%의 XRD 피크는 MEA의 함침량이 증가할수록 피크의 강도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 유기물 등이 함침 될수록 기공 안을 메움으로 피크의 강도는 줄어드는 현상을 보이며 Liang 등과<sup>1)</sup> Xu 등의<sup>12)</sup> 연구와 유사한 결과를 얻었다. 그러나 50 wt%의 함침의 경우 30 wt%와 40 wt%의 함침량 보다 피크의 강도가 더 높게 나타났다. Xu 등의<sup>12)</sup> 연구에 따르면 함침량이 많은 경우 피크의 강도가 약간 증가하는 경향이 나타났는데 이는 MCM-41의 결정 외부에 함침물질이 코팅되어 피크강도의 증가를 야기할 수 있다고 하였다. 연구에서도 MCM-41-MEA50의 결정구조피크가 MCM-41-MEA30과 MCM-41-MEA40 보다 더 뚜렷하게 나타나있으므로 결정 외부에도 함침된 것으로 사료된다.

MEA 함침정도를 알기 위하여 FT-IR분석을 하여 Fig. 6에 나타내었다. MEA로 함침 되지 않은 MCM-41의 경우 박 등과<sup>15)</sup> 김 등의<sup>16)</sup> 연구와 유사한 결과로 1085 cm<sup>-1</sup>에서 Si-O-Si의 불균형적 신축진동에 의한 피크와 1700 cm<sup>-1</sup>에서 H-O-H 밴드 및 3445 cm<sup>-1</sup>에서의 수소와 실라놀 그룹과의 신축진동에 의한 O-H 밴드가 나타났다. MEA로 함침된 MCM-41의 경우 2950cm<sup>-1</sup>에서 CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-NH<sub>2</sub>로부터 C-H<sub>2</sub> 신축밴드가 나타났으며 동시에 1485 cm<sup>-1</sup>, 1575 cm<sup>-1</sup>대의 피크는 RNH<sub>2</sub>의 N-H<sub>2</sub> 진동으로 관계 될 수 있으므로 MEA가 함침이 되었다는 것을 알 수 있다.<sup>17-19)</sup> 그러나 MCM-41-MEA50의 경우 N-H<sub>2</sub>밴드가 약해지고 1640 cm<sup>-1</sup>대의 밴드가 나타났다. Wang 등의<sup>20)</sup> 연구에 따르면 표면의 실라놀 그룹과 아민그룹의 상호작용에 의하여 아민그룹의 NH<sub>2</sub>에 양자를 가함으로 NH<sub>3</sub>로 변형되어 1640 cm<sup>-1</sup>밴드가 나타날 수 있다. 따라서

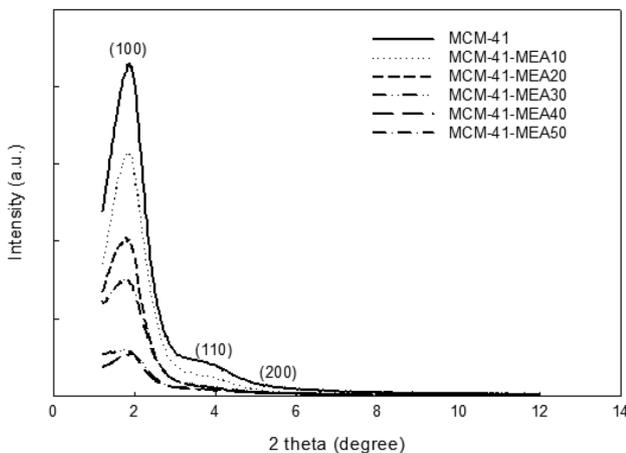


Fig. 5. X-ray diffraction patterns of MCM-41 before and after MEA loading.

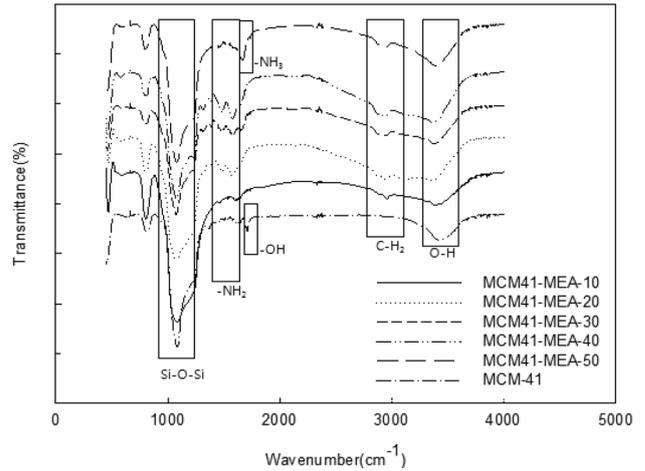


Fig. 6. FT-IR spectra of MCM-41 and impregnated MCM-41 by MEA.

함침량이 많아지면 아민그룹의 변형이 일어났음을 알 수 있었다.

### 3.3. MEA함침에 따른 흡착제 특성분석과 CO<sub>2</sub> 흡착능 간의 관계 분석

표준화된 흡착량 및 흡착제 특성결과를 Fig. 7에 도식화하여 나타내었다. 흡착량 및 XRD 분석결과 중 [100]면의 피크 강도, BET 비표면적, 기공크기, 5 nm 이하 기공 부피의 최고 수치를 각각 100점으로 표준화 하였다. XRD강도 및 비표면적, 5 nm 이하 기공 부피는 흡착량과 반비례 관계를 갖는 것으로 나타났으며 기공의 크기와 흡착량은 일정한 관계가 나타나지 않았다. 이는 주로 화학적 활성점에서 흡착이 일어남으로 기공 크기에 영향을 받는 물리적 흡착보다 화학적 흡착이 지배적인 것으로 사료된다.

MCM-41의 경우 흡착량이 가장 적으며 가장 높은 흡착량을 가지는 흡착제는 MCM-41-MEA40으로 나타났다. MEA로 함침된 흡착제는 함침량이 증가 할수록 흡착량도 증가하는 경향이 나타났으나 50 wt% 함침량의 경우 흡착능이 떨어지는 현상이 나타났다. 비표면적과 기공의 부피는 함침량의 증가에 따라 감소하였으나 50 wt%가 함침된 흡착제에서는 증가하였다. 이는 많은 아민의 함침이 흡착제의 특성을 다르게 변화시켰음을 예상 할 수 있었다. XRD 피크의 패턴 또한 함침량이 증가할수록 [100]면의 피크가 감소하나 MCM-41-MEA50에서는 증가하였다. 피크의 강도가 증가한 것은 아민물질이 흡착제 외부에 함침된 것으로 알 수 있다.

이외에도 질소흡탈착 실험을 통하여 아민이 함침됨에 따라 상대압력이 0.15~0.3에서의 기울기 감소가 나타났으며 5 nm 이하 기공의 부피도 아민물질이 기공 내에 함침됨에 따라 감소하였다. 하지만 함침량이 50 wt%의 경우 상대압력이 0.15~0.3에서 기울기와 직경이 5 nm 이하 기공의 부피가 증가한 것은 과아민이 제공되면 기공 내부로 아민물질이 충분히 함침되지 않음을 알 수 있었다. FT-IR의 분석 결

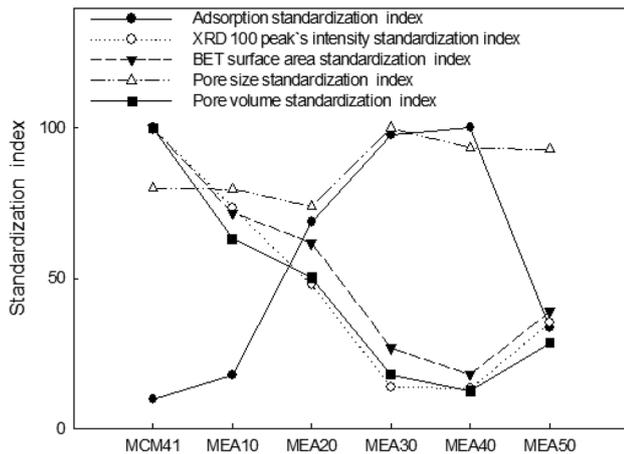


Fig. 7. Standardization index of adsorption capacity, XRD intensity, surface area, pore size and volume each adsorbent.

과로 아민으로 함침된 흡착제에서 MCM-41에 존재하지 않던 NH<sub>2</sub> 밴드와 CH<sub>2</sub>밴드가 나타났으며 MCM-41-MEA50의 경우 NH<sub>2</sub> 밴드는 거의 사라지며 NH<sub>3</sub>밴드가 나타났다.

모든 결과를 종합하면 MEA 함침량이 일정량 이상 될 경우 흡착제 기공내부에 완전히 함침이 이뤄지지 않고 외부 표면에 일어났으며 그로 인하여 흡착제 표면의 실라놀 그룹과 아민과의 상호작용으로 NH<sub>2</sub>의 아민물질이 NH<sub>3</sub>로 변형되었다.

식 (3)에서 나타나있듯 Xu 등은<sup>12)</sup> 이산화탄소가 NH<sub>2</sub>와 결합한다고 보고하였다. 따라서 NH<sub>2</sub>가 NH<sub>3</sub>로 변형되면서 이산화탄소와 결합할 수 있는 NH<sub>2</sub>의 감소에 따라 이산화탄소 흡착능 또한 감소시킨 것으로 사료된다.



#### 4. 결론

본 연구에서는 10~50 wt% MEA로 함침된 MCM-41을 제조하여 313 K 등온에서 이산화탄소 흡착능을 GC-TCD를 이용하여 평가하였다. 또한 N<sub>2</sub>흡탈착, XRD, FT-IR을 이용하여 MEA 함침에 따른 흡착제의 특성의 변화와 흡착능을 비교분석하였다.

아민량이 40 wt%까지 함침됨에 따라 흡착량은 증가하며 XRD 피크강도 및 비표면적, 기공의 부피, 질소등온흡착 곡선의 기울기는 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 50 wt%의 경우 반대의 결과가 나타났다. 이 결과는 Surface area analyzer분석을 통하여 아민 물질이 기공 내부에 함침이 일어나지 않았으며 XRD 분석의 결과로 기공 외부 표면에 함침이 이루어 졌음을 알 수 있었다. 그리고 FT-IR분석에서 NH<sub>3</sub>의 밴드가 발견됨에 따라 외부에 함침된 NH<sub>2</sub>의 아민이 표면의 실라놀 그룹과 반응하여 NH<sub>3</sub>가 생성되어졌음을 알 수 있었다. 따라서 NH<sub>2</sub>분자와 결합하는 이산화탄소의 흡착능이 감소된 것으로 사료된다.

본 연구에서는 최적의 함침량이 40 wt%라 할 수 있다. 이 등의<sup>14)</sup> 연구와 유사한 결과로 나타났지만 박 등의<sup>11)</sup> 연구에서는 50 wt%가 최적 함침량이라 하였으며, Lu 등의<sup>10)</sup> 연구는 15 wt% 함침율이 최적이라 하였다. 이러한 현상은 함침 방법의 차이에 따른 함침효율이 다르게 나타나기 때문으로 사료되어 추후 함침효율에 따른 연구가 필요 된다. 또한 실제 연소가스중의 이산화탄소 농도와 온도에 따른 연구가 추가적으로 필요하다고 생각되며 본연구의 한계성으로 남는다.

KSEE

#### 참고문헌

- Liang, Z., Fadhel, B., Schneider, C. J. and Chaffee, A. L., "Stepwise growth of melamine-based dendrimers into mesopores and their CO<sub>2</sub> adsorption properties," *Micro. Meso. Mater.*, **111**(15), 536-543(2008).
- Gomes, V. G. and Yee, K. W. K., "Pressure swing adsorption for carbon dioxide sequestration from exhaust gases," *Sep. Pur. Technol.*, **28**(2), 161-171(2002).
- Gray, M. L., Soong, Y., Champagne, K. J., Baltrus, J., Stevens, R. W. Jr., Toochinda, P. and Chuang, S. S. C., "CO<sub>2</sub> capture by amine-enriched fly ash carbon sorbents," *Sep. Pur. Technol.*, **35**(1), 31-36(2004).
- 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 Fuels*, **15**(2), 279-284(2001).
- Harlick, P. J. E. and Tezel, F. H., "An experimental adsorbent screening study for CO<sub>2</sub> removal from N<sub>2</sub>," *Micro. Meso. Mater.*, **76**(1), 71-79(2004).
- 문승현, 박성열, "활성탄소섭유 의 기공구조 변형을 이용한 CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>의 선택적 분리 기술," 대한환경공학회지, **29**(9), 1227-1034(2007).
- Brandani, F. and Ruthven, D. M., "The effect of water on the adsorption of CO<sub>2</sub> and C3H8 on type X zeolites," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **43**(26), 8339-8344(2004).
- Rinker, E. B., Ashour, S. S. and Sandall, O. C., "Absorption of carbon dioxide into aqueous blends of diethanolamine and methyldiethanolamine," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **39**(11), 4346-4356(2000).
- 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. Pur. Technol.*, **70**(19), 87-95(2009).
- Lu, C., Su, F., Hsu, S. C., Chen, W., Bai, H., Hwang, J. F. and Lee, H. H., "Thermodynamics and regeneration of CO<sub>2</sub> adsorption on mesoporous spherical-silica particles," *Fuel Process Technol.*, **90**(12), 1543-1549(2009).
- 박예원, 백일현, 박상도, 이재욱, 박소진, "MEA (monoethanolamine) 함침 메조포러스 물질을 이용한 CO<sub>2</sub> 회수," 화학공학, **45**(6), 573-581(2007).
- 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 meso-

- porous molecular sieve MCM-41,” *Micro. Meso. Mater.*, **62** (14), 29~45(2003).
13. Wei, J., Liao, L., Xiao, Y., Zhang, P. and Shi, Y., “Capture of carbon dioxide by amine-impregnated as-synthesized MCM-41,” *J. Environ. Sci.*, **22**(10), 1558~1563(2010).
  14. 이동환, 감상규, 이송우, 이민규, “함침농도와 CO<sub>2</sub> 가스 유입농도에 따른 활성탄의 흡착특성,” *한국환경과학회지*, **26** (12), 1403~1407(2010).
  15. 박수진, 전병렬, Kawasaki, J., “MCM-41의 표면 특성이 Cr(3)과 Cr(4)의 흡착거동에 미치는 영향,” *공업화학*, **15**(1), 11~16(2004).
  16. 김영민, 김승도, 박영권, 김지만, 전종기, “Si-MCM-41과 Si-MCM-48 상에서의 HDPE의 촉매열분해,” *한국폐기물학회지*, **22**(6), 556~562(2005).
  17. Chang, A. C. C., Chuang, S. S. C., Gray, M. and Soong, Y., “In-situ infrared study of CO<sub>2</sub> adsorption on SBA-15 grafted with  $\gamma$ -(Aminopropyl)triethoxysilane,” *Energy Fuels*, **17**(2), 468~473(2003).
  18. Huang, H. Y. and Yang, R. T., “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(2003).
  19. Su, F., Lu, C., Kuo, S. C. and Zeng, W., “Adsorption of CO<sub>2</sub> on amine-functionalized Y-type zeolites,” *Energy Fuels*, **24**(2), 1441~1448(2010).
  20. Wang, X., Schwartz, V., Clar, J. C., Ma, X., Overbury, S. H., Xu, X. and Song, C., “Infrared study of CO<sub>2</sub> sorption over “molecular basket” sorbent consisting of polyethylenimine-modified mesoporous molecular sieve,” *J. Phys. Chem. C.*, **113**(17), 7260~7268(2009).