

## 제올라이트 5A와 13X의 저농도 이산화탄소 흡착 및 탈착특성

### Adsorption and Desorption Characteristics of Carbon Dioxide at Low Concentration on Zeolite 5A and 13X

조영민\* · 이지윤 · 권순박 · 박덕신 · 최진식 · 이주열<sup>1)</sup>

한국철도기술연구원 철도환경연구실, <sup>1)</sup>(주)에니텍 기술연구소

(2010년 12월 24일 접수, 2011년 1월 24일 수정, 2011년 2월 18일 채택)

Youngmin Cho\*, Ji-Yun Lee, Soon-Bark Kwon, Duck-Shin Park,  
Jin-Sik Choi and Ju-Yeol Lee<sup>1)</sup>

*Railroad Environment Research Department, Korea Railroad Research Institute*

<sup>1)</sup>*Technology Institute, Anytech Co., Ltd.*

(Received 24 December 2010, revised 24 January 2011, accepted 18 February 2011)

#### Abstract

A way to adsorptively remove indoor carbon dioxide at relatively lower concentration under ambient temperature was studied. A small lab-scale carbon dioxide adsorption and desorption reactors were prepared, and 5A and 13X zeolites were packed in this reactors to investigate their adsorption and desorption characteristics. The inflow carbon dioxide concentration was controlled to 5,000 ppm, relatively higher concentration found in indoor spaces with air quality problems, by diluting carbon dioxide with nitrogen gas. The flow rate was varied as 1 ~ 5 L/min, and the carbon dioxide concentration after this reactor was constantly monitored to examine the adsorption characteristics. It was found that 5A adsorbed more carbon dioxide than 13X. A lab-scale carbon dioxide desorption reactor was also prepared to investigate the desorption characteristics of zeolites, which is essential for the regeneration of used zeolites. The desorption temperature was varied as 25 ~ 200°C, and the desorption pressure was varied as 0.1 ~ 1.0 bar. Carbon dioxide desorbed better at higher temperature, and lower pressure. 5A could be regenerated more than three times by thermal desorption at 180°C. It is required to modify zeolites for higher adsorption and better regeneration performances.

**Key words** : Indoor air, Carbon dioxide, Zeolite, Adsorption, Desorption

#### 1. 서 론

사람들이 실내공간에 머무는 시간이 증가함에 따라 최근 실내공기질에 대한 관심이 크게 증대되고 있

다. 그러나, 지속적으로 에너지 비용이 상승함에 따라 냉난방 에너지 비용에 대한 질감 요구도 크게 증가하고 있다. 이에 따라 건물에 대한 밀폐화와 단열화는 증가하는 반면에, 건물의 환기율은 감소하고 있다(Sohn *et al.*, 2006). 이는 실내공간의 이산화탄소 및 기타 오염물질 농도를 높일 우려가 있으므로(Mohamed, 2009), 환경부에서는 다중이용시설 등의 실내공

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-460-5362, E-mail : ymcho@krii.re.kr

기질 관리법을 통해 공공시설에 대해서는 실내공기질을 관리하고 있다(Korean Ministry of Environment, 2005).

일반적인 실내공기 오염물질로는 일산화탄소, 이산화탄소, 이산화질소, 오존, 미세먼지, 중금속, 석면, 휘발성유기화합물, 포름알데하이드, 부유미생물, 라돈 등이 있는데, 이 중에서도 문제가 되는 오염물질은 이산화탄소, 미세먼지, 부유미생물 등이다(Kim *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2005). 현재 미세먼지, 부유미생물의 저감기술 개발은 활발히 이루어지고 있으나, 이산화탄소 저감기술은 상대적으로 관심이 매우 낮다. 이는 실내 이산화탄소 저감의 필요성에 대한 인식이 낮기 때문인데, 실내공간 이산화탄소 농도가 높아지면, 집중력 저하에 따른 작업능률 및 생산성 감소, 어지러움, 두통 등을 유발한다(Park, 2005). 이는 특히 학교나 도서관, 그리고 작업장 등과 같이 고도의 집중력이 요구되는 곳에서 문제가 될 수 있다.

현재 이산화탄소를 포집 또는 분리하는 기술은 발전소나 제철소 또는 기타 다량의 연소가스를 배출하는 곳에 적용할 수 있도록 개발되어 왔다. 대표적인 예로는 아민류 및 수산화용액을 이용한 흡수법(Chatti *et al.*, 2009; Jo *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2001), 활성탄류 및 분자체류 등을 이용한 흡착법(Zhang *et al.*, 2008; Han *et al.*, 2005), 이산화탄소를 공기 중에서 분리할 수 있는 고분자막을 이용한 막분리법(Marzouqia *et al.*, 2008) 등이 있다. 본 연구에서는 실내에서 사용하기에 비교적 안전하고, 에너지 소비도 적으며, 재생도 비교적 용이한 흡착법을 이용하여 실내공간의 저농도 이산화탄소를 저감할 수 있는 방안을 모색하고자 하였다.

현재 흡착법에 널리 사용되고 있는 이산화탄소 흡착제로는 활성탄(Guo *et al.*, 2006; Marzouqia *et al.*, 2004; Przepiórski *et al.*, 2004), 알루미늄 산화물(Pan *et al.*, 2009), 제올라이트(Zhao *et al.*, 2006; Jeon *et al.*, 2005; Kuceba and Nowak, 2005), 탄소 분자체(Mochida *et al.*, 1995), 중공성 실리카(Jang *et al.*, 2009), 등이 널리 연구되고 있다. 그 중에서 제올라이트는 이산화탄소 흡착성능과 경제성이 비교적 우수하며, 실내공간의 이산화탄소 저감에 적합할 것으로 예상된다. 기존에 제올라이트를 이용한 이산화탄소의 흡착 연구는 다수 있었으나(Ahn *et al.*, 2006), 대부분이

화학공정에 적용하기 위한 것으로서 실내공간처럼 5,000 ppm 이하의 저농도의 이산화탄소를 대상으로 한 저감성능을 연구한 경우는 많지 않았다. 최근에서야 제올라이트를 이용한 실내 이산화탄소 저감 연구가 시작되고 있다(Lim *et al.*, 2010; Lee and Jo, 2009).

이에 본 연구에서는 분자체로 가장 널리 쓰이면서도 이산화탄소 흡착특성이 우수한 13X와 5A 제올라이트를 대상으로 실내공간의 저농도 이산화탄소를 흡착시키는 방안에 대하여 알아보았다. 13X와 5A는 이산화탄소 흡착성능이 우수하지만, 이들의 저농도 이산화탄소 흡착 및 탈착 연구는 거의 없었다. 이에 본 연구에서는 흡착제의 충전량, 유량에 따른 이산화탄소 흡착성능과 탈착온도, 탈착압력에 따른 이산화탄소 탈착성능을 알아봄으로써 실내공간에서의 적용 및 재생 가능성 등을 알아보하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 제올라이트 물성 분석

실험에 사용한 상용 5A(UOP Co. USA) 및 13X(UOP Co. USA) 제올라이트는 XRD를 통해 결정구조를 조사하였다. 측정 조건은 30 mA, 40 kV 출력으로 2θ 범위 5~65°, 주사속도 5°/min를 사용한 X-선 회절분석기(X-ray Diffraction Analyzer, Rigaku Inst. JP/D/M AX-2500H)를 사용하였다. 비표면적은 BET 장치(Quantachrome-MS22)의 액체질소 물리 흡착법을 이용하여 측정하였다. 제올라이트 시료를 400°C 질소가스로 수분과 불순물을 제거한 후, 기체상 질소가스의 흡착량을 측정하고 BET 흡착 등온식을 이용하여 비표면적을 측정하였다. 실험에 사용한 5A와 13X는 모두 크기 2mm 가량의 구형 펠렛 형태였다.

### 2.2 이산화탄소 흡착 평가

소형 이산화탄소 흡착 및 탈착성능 평가시스템을 그림 1과 같이 제작하였다. 흡착실험을 할 때에는 흡착 반응기, 탈착실험을 할 때에는 탈착 반응기를 통하여 이산화탄소 및 질소 기체가 흐르도록 하여 실험을 수행하였다.

흡착실험에서는 탄산 기체와 질소 기체의 유량을 조절하여 초기 이산화탄소 농도를 5,000 ppm으로 일정하게 맞춘 혼합기체를 흡착제가 충전된 흡착 반응

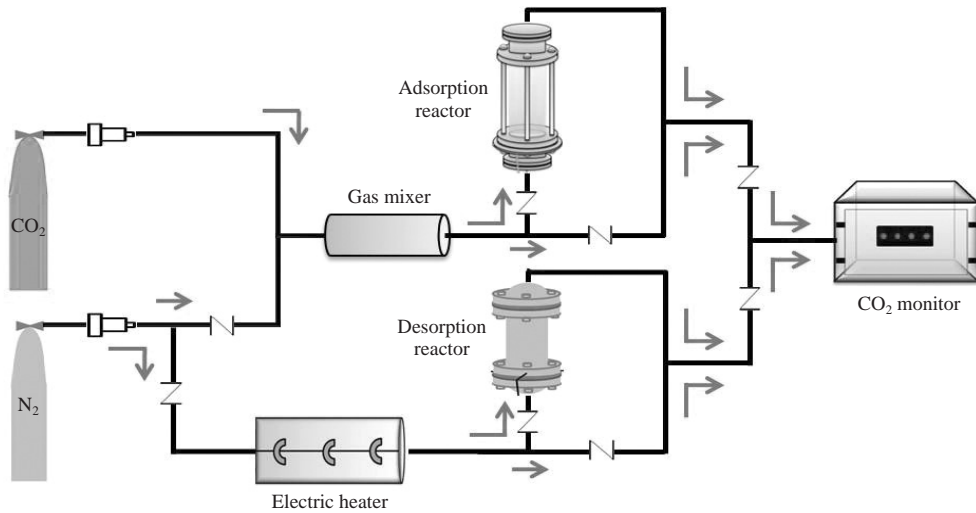


Fig. 1. Schematic diagram of CO<sub>2</sub> adsorption and desorption experimental setup.

기를 통과하도록 하고 이때 흡착 반응기를 통과한 기체의 이산화탄소 농도를 측정함으로써 흡착제의 흡착성능을 알아보았다. 흡착 반응기는 석영 재질로 만들어졌으며, 크기는 지름 3.75 cm, 길이 21 cm의 원통형으로 반응기 내부의 부피는 232 mL였다.

흡착제로는 5A 및 13X 제올라이트를 이용하여 실험하기 전에 이산화탄소 흡착성능이 있는 것으로 널리 알려진 silica gel blue (대정, 대한민국), aluminum oxide (Sigma-Aldrich, USA), activated charcoal (Sigma-Aldrich, USA)를 우선적으로 사용하여 제올라이트의 이산화탄소 흡착성능과 비교할 수 있도록 하였다. Silica gel blue, aluminum oxide, activated charcoal의 입자 크기는 각각 5 mm, 3 mm, 1 mm이었다. 각 흡착제는 실험 전에 180°C의 고온에서 5시간 건조시킨 후에 각각 30 g을 흡착 반응기에 충전하고 각 흡착제의 이산화탄소 흡착성능을 알아보았다. 이때의 유량은 3 L/min으로 하였다.

흡착기체는 흡착 반응기의 아래쪽으로 유입되어 이산화탄소의 흡착이 진행된 후에 위쪽 방향으로 나와서 이산화탄소 분석기로 유입되도록 하였다. 이산화탄소 농도는 비분산 적외선 (non-dispersive infrared) 방식의 센서 (SenseAir, Sweden)를 사용하여 모니터링 하였다. 센서는 사용 전과 후에 각각 교정한 이산화탄소 측정기 (Thermoscientific, USA)를 이용하여 보정곡선을 만들어 보정하였다. 측정 전과 측정 후의

차이는 3% 이내였다.

5A 및 13X 제올라이트의 이산화탄소 흡착실험도 같은 방법으로 수행하였다. 초기 이산화탄소 농도는 역시 5,000 ppm으로 맞추었고, 혼합기체의 유량은 1~5 L/min으로 변화시키며 유량에 따른 영향도 알아보았다. 또한, 전처리 온도에 따른 흡착성능의 변화를 알아보기 위하여 5A 및 13X 제올라이트를 2시간 동안 130°C와 180°C의 고온챔버에서 건조시킨 후에 마찬가지로 흡착 반응기에 각각의 제올라이트 30 g을 충전하고 초기 이산화탄소 농도가 5,000 ppm이 되도록 질소와 이산화탄소 혼합기체를 3 L/min의 유량으로 흘려주면서 반응기 통과 후의 혼합기체의 이산화탄소 농도를 모니터링 하였다.

### 2.3 이산화탄소 탈착실험

이산화탄소가 흡착된 제올라이트의 재생성능을 알아보기 위하여 탈착온도와 탈착압력의 영향을 알아보기 위한 온도전환공정 (Temperature Swing Adsorption; TSA) 및 압력전환공정 (Pressure Swing Adsorption; PSA) 실험을 하였다. 탈착 반응기는 스테인레스 스틸 재질로 만들었으며, 크기는 지름 7.5 cm, 길이 16 cm의 원통형이고, 반응기 내부의 부피는 700 mL였다. 탈착 반응기 전단에는 온도를 조절할 수 있는 히터를 장착하여 반응기 내부로 들어가는 질소의 온도를 25~200°C까지 변화시킬 수 있도록 하여 탈착은

도를 변화시킬 수 있도록 하였다. 탈착실험을 위하여 우선 이산화탄소를 완전히 흡착시켜 더 이상 이산화탄소의 흡착이 불가능한 포화 상태의 제올라이트 흡착제를 준비하였다. 이 제올라이트 흡착제 30g을 탈착 반응기에 충전하고, 이산화탄소를 포함하지 않은 순수 질소 기체를 3 L/min의 유량으로 일정하게 흐르도록 하였다. 질소 기체가 흐르면서 흡착제 표면에서 이산화탄소의 탈착이 일어나는데, 이때 탈착되는 이산화탄소에 의한 이산화탄소 농도 증가를 모니터링하여 탈착성능을 평가하였다. 이때 탈착압력은 탈착 반응기 토출구의 밸브를 이용하여 0.1~0.6 bar까지 변화시켰다. 이처럼 탈착온도와 탈착압력을 다양하게 변화시키면서 이에 따른 탈착성능에 대한 영향을 알아보았다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 제올라이트 흡착제의 물성 분석

본 실험에 사용한 5A 및 13X 제올라이트의 XRD 분석결과를 그림 2에 나타냈다. 측정결과 본 연구에 사용된 제올라이트의 결정구조는 일반적인 A 계열 및 X 계열 제올라이트의 결정구조와 유사함을 확인할 수 있었다(Lim *et al.*, 2010; Lee and Jo, 2008). 5A는 양이온으로 Ca와 Na가 있는 반면에 13X는 양이온으로 Na만 있는 구조였다. BET 비표면적 측정결과 5A는 383.5 m<sup>2</sup>/g, 13X는 435.9 m<sup>2</sup>/g으로 나타나 비표

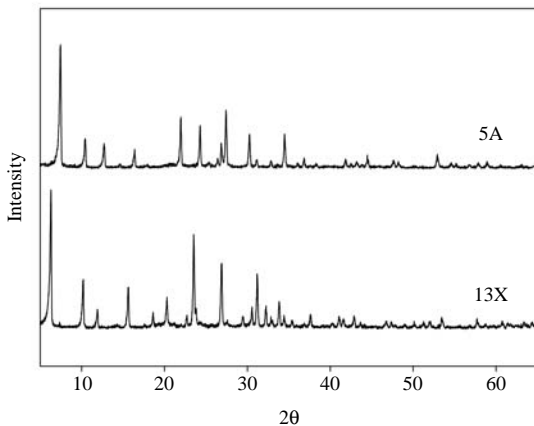


Fig. 2. XRD patterns of 13X and 5A zeolites.

면적은 13X가 5A보다 다소 더 큰 것으로 나타났다.

#### 3.2 흡착제별 흡착특성 비교

5A 및 13X 제올라이트를 이용한 이산화탄소 흡착 및 탈착실험을 시작하기 전에 보편적으로 이산화탄소 흡착성능이 있는 것으로 널리 알려진 silica gel blue, aluminum oxide, activated charcoal 등의 이산화탄소의 흡착특성을 알아보고 이를 그림 3에 나타내었다. 실험결과 동일 조건에서 silica gel blue의 이산화탄소 흡착능력이 가장 작은 것으로 나타났으며, aluminum oxide와 activated charcoal의 이산화탄소 흡착성능도 그리 우수하지 않은 것으로 나타났다. 반면에 제올라이트 5A의 흡착성능은 매우 뛰어난 것으로 나타났다. 이처럼 제올라이트의 흡착성능이 다른 일반적인 흡착제에 비하여 우수하여 본 연구에서는 이산화탄소 흡착성능도 우수하고 안전한 제올라이트를 이산화탄소 흡착 및 탈착실험에 사용하였다.

#### 3.3 유량의 영향

그림 4와 그림 5는 제올라이트 5A와 13X를 대상으로 이산화탄소 농도는 5,000 ppm으로 유지하면서 질소와 이산화탄소 혼합기체의 유량을 변화시킬 때 나타나는 흡착시간에 따른 이산화탄소 흡착특성을 나타낸 것이다. 5A의 경우 유량이 클수록 흡착성능이 빨리 포화되는 것을 볼 수 있었는데, 1L/min의 경우 460분 이상 흡착이 진행되었지만, 5L/min의 경우 약 103분만에 흡착성능이 포화되는 것으로 나타났다.

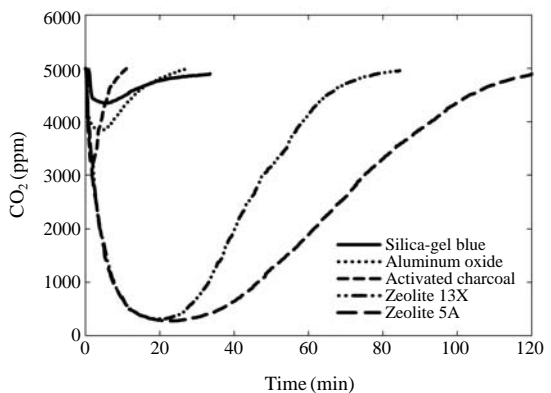


Fig. 3. CO<sub>2</sub> adsorption on various materials as a function of time.

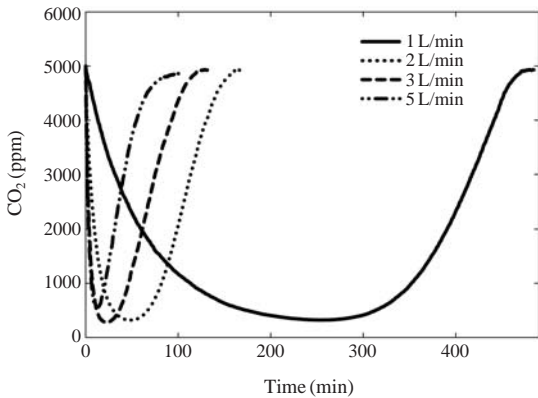


Fig. 4. CO<sub>2</sub> adsorption on 5A zeolite under various flow rate conditions as a function of time.

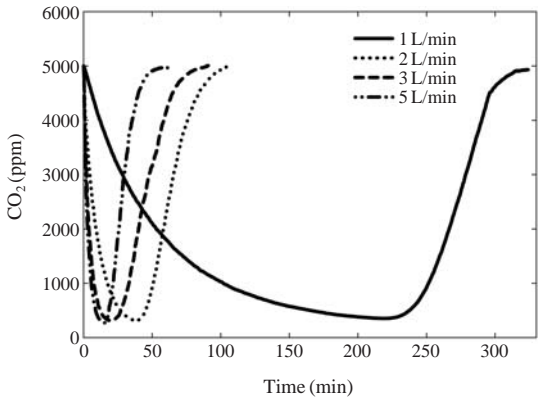


Fig. 5. CO<sub>2</sub> adsorption on 13X zeolite under various flow rate conditions as a function of time.

13X도 마찬가지로, 1 L/min의 경우 300분 이상 흡착이 진행되었으나, 5 L/min의 경우 약 65분 만에 흡착 성능이 포화되는 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 유량이 클수록 반응기 내에서의 체류시간, 즉 흡착이 이루어질 수 있는 반응시간이 감소하게 되고, 결과적으로 흡착효율이 감소하기 때문이다. 또한, 단기간에 많은 양의 이산화탄소와 접촉하게 되므로, 흡착반응점이 빨리 포화되는 것과 빠른 유량에 의하여 흡착된 이산화탄소의 일부가 빠른 유량에 의하여 다시 탈착되는 것도 영향을 미칠 수 있다. 반대로 유량이 감소하면 흡착량이 증가하였는데, 이는 흡착반응에 필요한 시간이 증가하여 미세한 기공에도 흡착이 일어나기 때문이다. 5A와 13X를 비교했을 때에는 5A

가 13X보다 흡착지속시간이 더 길었는데, 이는 5A가 13X에 비하여 BET 비표면적은 다소 작지만, 이산화탄소에 대한 흡착성능은 오히려 우수함을 의미한다.

이산화탄소 흡착량은 그림 4와 그림 5에서 흡착이 일어나는 면적과 흐른 이산화탄소 혼합기체의 유량(1~5 L/min), 흘러준 혼합기체의 이산화탄소 농도(5,000 ppm)를 곱하여 계산할 수 있는데, 그 계산결과를 표 1 및 표 2에 나타내었다. 실험결과 유량이 클수록 흡착지속시간이 대체로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 유량이 클수록 반응기 내에서의 체류시간, 즉 흡착이 이루어질 수 있는 반응시간이 감소하게 되고, 결과적으로 흡착효율이 감소하기 때문이다. 또한, 짧은 시간에 많은 양의 이산화탄소가 통과 및 흡착하게 되므로, 흡착반응점이 빨리 포화되는 것과 빠른 유량에 의하여 흡착된 이산화탄소의 일부가 빠른 유량에 의하여 다시 탈착되는 것도 영향을 미칠 수 있다.

흡착량은 5A가 13X보다 대체로 1.5배 높게 나타났는데, 이는 5A가 13X보다 이산화탄소 흡착성능이 우수함을 의미한다. 그러나, 실제로 유입된 이산화탄소 혼합기체의 양 중에서 흡착된 이산화탄소 양의 비율은 5A와 13X가 유사하거나 오히려 유량이 큰 경우에는 13X가 더 높게 나타났는데, 이는 13X가 5A에 비하여 절대적인 흡착량은 적지만, 흡착이 진행되는 동안의 이산화탄소 혼합기체 중 이산화탄소 선택적 포집능력은 거의 유사하거나 오히려 더 우수함을 의미한다. 5A와 13X의 양이온을 보면 5A는 Na와 Ca가 같이 있는 것에 비하여 13X는 Na만 있다. 제올라이트의 양이온을 K, Li, Mg, Ca 등 다양한 양이온으로 치환하여 이산화탄소 흡착성능을 알아본 기존 연구(Lim *et al.*, 2010)에 따르면, 동일한 제올라이트에 대하여 양이온을 Ca으로 치환한 경우 치환하지 않은 경우에 비하여 이산화탄소 흡착성능이 1.5배 이상 우수함을 볼 수 있었다. 이는 Ca 이온이 이산화탄소 분자와의 상호작용이 가장 활발하기 때문인 것으로 보인다(Lee and Jo, 2008).

유량의 변화에 따른 이산화탄소 흡착량은 이산화탄소 흡착 및 파과곡선을 이용하여 아래와 같은 식으로 계산하였다(Lee and Jo, 2008).

$$q = \frac{Q \times C_i}{W} \left[ \int_0^{t_s} \left( 1 - \frac{C_0}{C_i} \right) dt \right] \quad (1)$$

**Table 1. CO<sub>2</sub> adsorption on 5A zeolite under various flow rate conditions.**

Flow rate of mixing gas (L/min)		1	2	3	5
Flow rate of CO <sub>2</sub> (mL/min)		5	10	15	25
Time of adsorption duration (min)		463	160	128	103
Total amount of inflow CO <sub>2</sub> during adsorption time (mL)		2,315	1,600	1,920	2,575
Ratio of adsorbed CO <sub>2</sub> versus inflow CO <sub>2</sub>		0.697	0.586	0.496	0.346
Adsorbed amount of inflow CO <sub>2</sub> during adsorption time	Volume (mL)	1,613	937	953	890
	Mass (g)	3.19	1.86	1.89	1.76
	Molar mass (mmol)	72.5	42.1	42.9	40.0
Amount of adsorbed CO <sub>2</sub> per 1 g of 5A zeolite (mmol/g)		2.42	1.41	1.43	1.33

**Table 2. CO<sub>2</sub> adsorption on 13X zeolite under various flow rate conditions.**

Flow rate of mixing gas (L/min)		1	2	3	5
Flow rate of CO <sub>2</sub> (mL/min)		5	10	15	25
Time of adsorption duration (min)		301	105	90	65
Total amount of inflow CO <sub>2</sub> during adsorption time (mL)		1,505	1,050	1,350	1,625
Ratio of adsorbed CO <sub>2</sub> versus inflow CO <sub>2</sub>		0.691	0.590	0.451	0.386
Adsorbed amount of inflow CO <sub>2</sub> during adsorption time	Volume (mL)	1,039	620	609	627
	Mass (g)	2.06	1.23	1.21	1.24
	Molar mass (mmol)	46.8	27.9	27.4	28.2
Amount of adsorbed CO <sub>2</sub> per 1 g of 13X zeolite (mmol/g)		1.56	0.93	0.91	0.94

이때  $q$ 는 흡착제 단위 중량당 흡착한 이산화탄소의 몰량(mmol/g),  $Q$ 는 흡착반응기로 유입된 가스의 유량(mL/min),  $W$ 는 흡착제의 질량(g),  $C_i$ 와  $C_0$ 는 흡착 반응기 통과 전과 후의 이산화탄소 농도(ppm), 그리고  $t$ 는 이산화탄소 흡착이 포화되기까지 소요된 시간(min)을 나타낸다. 계산한 결과를 표 1과 표 2에 나타내었다. 5A의 경우 흡착량은 유량이 1 L/min일 경우 2.42 mmol/g으로 높았으나, 유량을 2 L/min 이상으로 올리면 흡착량이 1.3~1.5 mmol/g 수준으로 급격히 감소하는 것을 볼 수 있었다. 마찬가지로 13X의 흡착량도 1 L/min에서는 1.56 mmol/g이었으나, 유량이 2 L/min 이상으로 증가하면 흡착량이 0.9~1.0 mmol/g 정도로 급격히 감소하는 것을 볼 수 있었다.

이처럼 유량이 증가함에 따라 흡착량이 감소하는 원인은 몇 가지 고려해 볼 수 있는데, 첫 번째 원인은 앞에 기술한 바와 같이 유량이 커질수록 이산화탄소의 반응기 내에서의 체류시간이 짧아지기 때문이다. 체류시간이 짧아지면 흡착반응이 일어날 수 있는 충분한 시간을 확보할 수 없기 때문이다. 두 번째 원인은 유량의 증가에 따른 흡착점에 흡착된 이산화탄소가 다시 탈착하는 상황을 가정해볼 수 있다. 유량이 증가하면 유량이 증가할 경우 흡착되었던 이산화탄소가 제올라이트 주변을 빠르게 흐르는 혼합가

스에 의하여 다시 탈착되어 흡착/탈착이 평형을 이루는 상황을 가정해볼 수 있다. 그러나, 유량을 5 L/min으로 하여 실험을 한 흡착제에서 유량을 1 L/min으로 낮추어도 더 이상 추가로 이산화탄소를 흡착하지 않았다. 이는 다른 원인을 추측해 볼 수 있는데, 그 중에 하나가 질소와 이산화탄소가 제올라이트의 흡착점을 놓고 서로 경쟁을 하게 되는 상황을 가정해볼 수 있는데, 기존 연구를 보면 질소가 제올라이트에 흡착이 잘 일어나며, 이는 미세공확산 또는 대기 공확산에 의한 것이었다(Ahn *et al.*, 1999). 따라서, 이는 향후 질소 대신에 헬륨이나 아르곤 등을 이용하여 이산화탄소 흡착성능을 비교함으로써, 질소와 이산화탄소의 흡착점 경쟁 여부를 확인할 수 있을 것으로 보인다.

### 3. 4 전처리 온도의 영향

그림 6과 그림 7은 5A와 13X를 대상으로 이산화탄소 흡착 반응기에 넣기 전에 다양한 온도에서 전처리한 경우의 흡착성능을 나타낸 것이다. 높은 온도로 전처리를 하면 제올라이트 표면에 흡착된 이산화탄소 및 기타 흡착되어있던 기체가 탈착되므로 이산화탄소 흡착성능이 향상될 것으로 기대되었다. 실험결과, 전처리 온도가 130°C인 경우와 180°C인 경우를

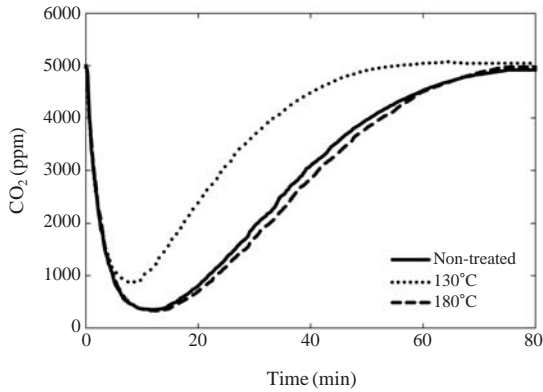


Fig. 6. CO<sub>2</sub> adsorption on 5A zeolite baked at various pretreatment temperature as a function of time.

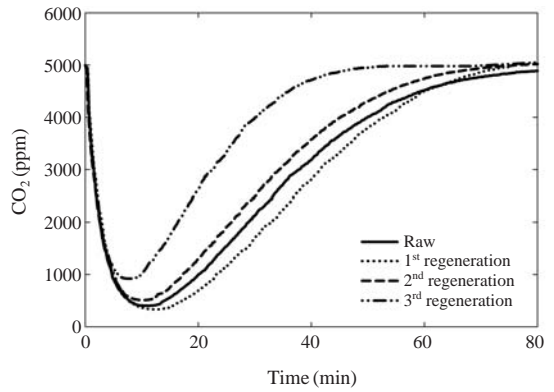


Fig. 8. Repetitive CO<sub>2</sub> adsorption on 5A zeolite before and after regeneration by heating at 180°C for 24 h as a function of time.

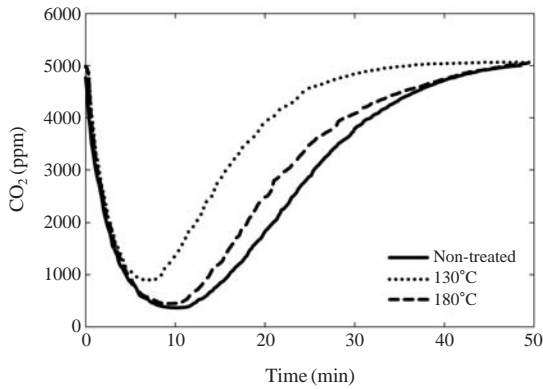


Fig. 7. CO<sub>2</sub> adsorption on 13X zeolite baked at various pretreatment temperature as a function of time.

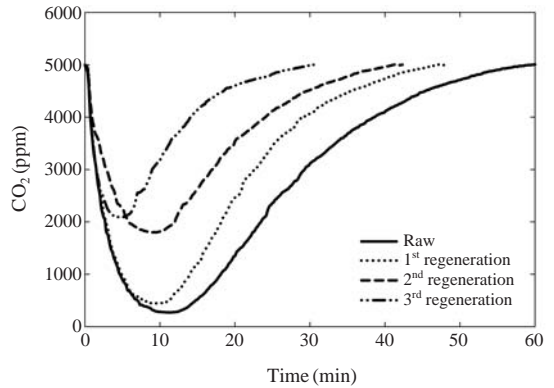


Fig. 9. Repetitive CO<sub>2</sub> adsorption on 13X zeolite before and after regeneration by heating at 180°C for 24 h as a function of time.

비교하면 전처리 온도가 높을수록 이산화탄소 흡착 성능이 우수하게 나타났으나, 전처리를 하지 않은 경우와 비교하면 크게 차이가 없거나(그림 6), 오히려 다소 떨어지는 것으로 나타났다(그림 7). 따라서 전처리 온도가 높아질수록 흡착성능이 다소 증가하기는 하였으나, 180°C 이하에서의 전처리는 흡착성능 향상에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

### 3. 5 제올라이트의 재생

제올라이트를 실내공간의 이산화탄소 저감에 사용하기 위해서는 가능하다면 이산화탄소를 흡착한 제올라이트를 재생하는 것이 필요하다. 이에 본 실험에서는 이산화탄소가 흡착 포화된 제올라이트를 180°C

의 고온에서 24시간 처리하여 이산화탄소 및 기타 기체를 열 탈착시킨 후 다시 흡착 반응기에 넣어 이산화탄소 흡착성능을 알아보았다. 실험결과 그림 8 및 그림 9와 같이 13X는 단 한 번만 이산화탄소 흡착에 사용하여도 더 이상 재생이 불가능한 것으로 나타났다. 반면에 5A는 3회까지는 재생이 가능한 것으로 나타났다.

위의 실험결과들을 통해 실내공간의 이산화탄소 흡착제거에는 5A가 13X보다 흡착성능과 재생성능이 우수하므로, 5A를 대상으로 다양한 탈착온도와 탈착압력 하에서 제올라이트의 이산화탄소 탈착성능을 알아보았다. 그림 10은 탈착온도의 영향을 나타낸 것인

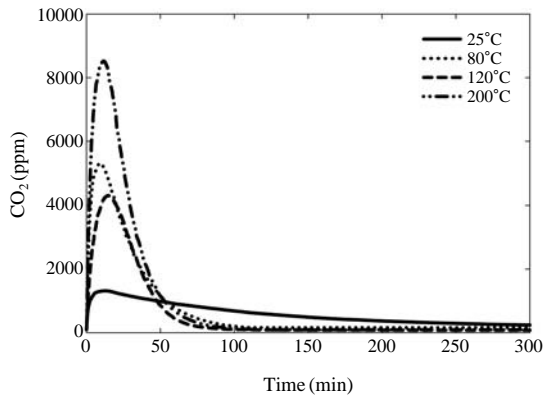


Fig. 10. CO<sub>2</sub> desorption from 5A under various temperature conditions as a function of time.

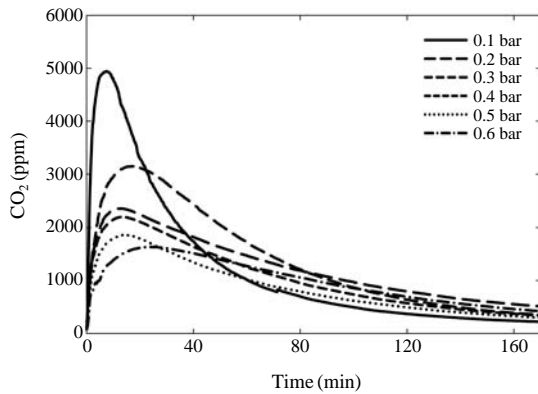


Fig. 11. CO<sub>2</sub> desorption from 5A under various pressure conditions as a function of time.

데, 200°C의 높은 온도에서 이산화탄소 탈착이 잘 일어나는 것을 볼 수 있었다. 이는 전처리 온도와 마찬가지로 탈착온도가 높을수록 이산화탄소의 운동에너지가 증가하여 제올라이트 흡착점과의 물리적 결합 에너지보다 커져서 제올라이트 표면에 흡착한 이산화탄소가 잘 탈착되기 때문으로, 제올라이트의 재생을 위해서는 200°C 가량의 고온이 필요함을 볼 수 있다.

그림 11은 탈착온도는 25°C로 고정시킨 상태에서 탈착압력의 변화에 따른 탈착성능 실험을 수행한 결과이다. 실험결과, 탈착압력이 낮을수록 탈착이 잘 일어나는 것을 볼 수 있었는데, 이는 압력이 낮을수록 제올라이트가 흡착된 이산화탄소가 제올라이트 표면에서 비교적 자유롭게 탈착됨을 의미한다. 그러나, 압

력이 높아지면 제올라이트 표면에 물리적으로 흡착한 이산화탄소가 질소 공기 중으로 탈착하는 것을 억제하므로 탈착이 잘 일어나지 않는다. 또한 탈착 반응기 내부의 압력이 높아질수록 이산화탄소 측정 지점에서는 실제 유량이 3 L/min보다 증가하기 때문에, 이에 따른 이산화탄소의 희석 효과에 의하여 탈착 반응기 통과 후의 이산화탄소 농도가 더 낮게 나타날 가능성도 고려할 수 있다. 본 연구를 통해 재생을 위해서는 압력을 줄이거나, 음압으로 감압하는 것이 짧은 시간 내에 재생할 수 있으므로 재생에 더 유리할 것으로 보인다. 향후 추가 연구를 통해 음압을 가하였을 경우의 탈착에 대한 영향도 알아보고자 한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 상용 제올라이트 13X와 5A의 이산화탄소 흡착 및 탈착특성을 분석함으로써 실내공간의 이산화탄소 처리가능성을 알아보았다. 실험결과 5A가 13X에 비하여 흡착성능이 우수한 것으로 나타났다. 또한, 다양한 탈착성능 실험을 통해 고온 저압 조건에서 여러 번 재생이 가능함을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 제올라이트 5A는 실내공간에 존재하는 최대 5,000 ppm 수준의 저농도 이산화탄소를 흡착 제거하는 것이 가능함을 알 수 있었다. 향후 추가 연구를 통해 5A의 이산화탄소 흡착성능을 개선하면 실내공간의 이산화탄소 농도 제어에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 휴먼인지 환경사업본부-신기술융합형 성장동력 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010K001142).

#### 참 고 문 헌

Ahn, H., J. Park, K.-K. Koo, and C.-H. Lee (1999) Sorption kinetics of N<sub>2</sub> on pelletized zeolite 4A and 5A, Journal of Korean Institute of Chemical Engineers, 37(3),



- 364-372. (in Korean with English abstract)
- Ahn, E.-S., S.-C. Jang, D.-Y. Choi, S.-H. Kim, and D.-K. Choi (2006) Pure gas adsorption equilibrium for H<sub>2</sub>/CO/CO<sub>2</sub> and their binary mixture on zeolite 5A, *Korean Chemical Engineering Research*, 44, 460-467. (in Korean with English abstract)
- Chatti, R., K.B. Amit, A.T. Jayashyi, K. Vivek, J. Pravin, K.L. Satish, B.B. Rajesh, K.L. Nitin, and S.R. Sadhana (2009) Amine loaded zeolites for carbon dioxide capture: Amine loading and adsorption studies, *Microporous and Mesoporous Materials*, 121, 84-89.
- Choi, W.J., K.C. Cho, and K.J. Oh (2005) Adsorption characteristics of carbon dioxide in aqueous AMP solution adding HMDA, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 21(6), 605-612. (in Korean with English abstract)
- Guo, B., L. Chang, and K. Xie (2006) Adsorption of carbon dioxide on activated carbon, *Journal of Natural Gas Chemistry*, 15(3), 223-229.
- Han, J.-U., D.-J. Kim, M. Kang, J.-W. Kim, J.-M. Kim, and J.-E. Yie (2005) Study of CO<sub>2</sub> adsorption characteristics on acid treated and LiOH impregnated carbons, *Journal of the Korean Industrial and Engineering Chemistry*, 16(3), 312-316. (in Korea with English abstract)
- Jang, H.-T., Y.-K. Park, Y.-S. Ko, J.-Y. Lee, and B. Margandan (2009) Highly siliceous MCM-48 from rice husk ash for CO<sub>2</sub> adsorption, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3, 545-549.
- Jeon, J.K., Y.K. Park, and K. Chue (2005) Study of PSA process for carbon dioxide recovery over zeolite adsorbent: Effect of rinse rate on process performance, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 20(1), 99-110. (in Korean with English abstract)
- Jo, Y.-M., H.-K. Kim, and Y.-K. Park (2008) Preparation of composite adsorbent for low level CO<sub>2</sub>, *Journal of The Korean Oil Chemists' Society*, 25(2), 257-264. (in Korea with English abstract)
- Kim, H.-J., S.-S. Kim, K.-S. Lee, S.-K. Jung, and J.-K. Cho (2009) A survey on the Indoor air quality of some schools in Goyang city, *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, 15(2), 85-90. (in Korea with English abstract)
- Korean Ministry of Environment (2005) Indoor air quality management act for public spaces.
- Kuceba, I.M. and W. Nowak (2005) A thermogravimetric study of the adsorption of the adsorption of CO<sub>2</sub> on zeolites synthesized from fly ash, *Thermochimica Acta*, 437 (1-2), 67-745.
- Lee, K.M. and Y.M. Jo (2008) Adsorption characteristics of chemically modified sorbents for carbon dioxide, *Journal of Korean Industrial and Engineering Chemistry*, 19(5), 533-538. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.M. and Y.M. Jo (2009) Ambient adsorption of low-level carbon dioxide by metal treated activated carbon, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25(4), 316-324. (in Korean with English abstract)
- Lee, S., H. Song, J. Hyun, and J. Park (2001) A study on the absorption of CO<sub>2</sub> using alkanolamine solution, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 17(5), 407-414. (in Korean with English abstract)
- Lim, Y.H., K.M. Lee, H.S. Lee, and Y.M. Jo (2010) Adsorption capacity of CO<sub>2</sub> adsorbent with the pretreatment temperature, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26(3), 286-297. (in Korean with English abstract)
- Marzouqia, M.A., M.E. Naas, S. Marzoukb, and N. Abdullatif (2008) Modeling of chemical absorption of CO<sub>2</sub> in membrane contactors, *Separation and Purification Technology*, 62, 499-506.
- Mochida, I., S. Yatsunami, Y. Kawabuchi, and Y. Nakayama (1995) Influence of heat-treatment on the selective adsorption of CO<sub>2</sub> in a model natural gas over molecular sieve carbons, *Carbon*, 33(11), 1611-1619.
- Mohamed, E.M. (2009) Indoor air quality control in case of scheduled or intermittent occupancy based building: Development of a scale model, *Building and Environment*, 44, 1356-1361.
- Pan, Y.X., C.J. Liu, T.S. Wiltowski, and Q. Ge (2009) CO<sub>2</sub> adsorption and activation over  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> supported transition metal dimers: A density functional study, *Catalysis Today*, 147(2), 68-76.
- Park, Y.-S. (2005) Indoor air quality monitoring results and strategies, *Journal of Korea Institute of Industrial Technology*, 4, 1-131.
- Przepiórski, J., M. Skrodzewicz, and A.W. Morawski (2004) High temperature ammonia treatment of activated carbon for enhancement of CO<sub>2</sub> adsorption, *Applied Surface Science*, 225(1-4), 235-242.
- Sohn, J.-R., Y.-M. Roh, and B.-S. Son (2006) The assessment of survey on the indoor air quality at schools in Korea, *Korea Journal of Environmental Health*, 32(2), 140-148. (in Korea with English abstract)
- Yang, W.-H., J.-R. Sohn, J.-H. Kim, B.-S. Son, and J.-C. Park (2005) Assessment of indoor air quality of classroom in school by means of source generation-Case study,

- Journal of the Environment Sciences, 14(10), 979-983.
- Yang, W.-H., J.-R. Sohn, J.-W. Kim, B.-S. Son, and J.-C. Park (2009) Indoor air quality investigation according to age of the school buildings in Korea, Journal of Environmental Management, 90, 348-354.
- Zhang, J., R. Singh, and P.A. Webley (2008) Alkali and alkali-earth cation exchanged chabazite zeolites for adsorption based CO<sub>2</sub> capture, Microporous and Mesoporous Materials, 111, 478-487.
- Zhao, Z., X. Cui, J. Ma, and R. Li (2006) Adsorption of carbon dioxide on alkali-modified zeolite 13X adsorbents, International Journal of Greenhouse Gas Control, 1(3), 355-359.