

메조포러스 실리케이트에 의한 기상 벤젠 흡착

이채영 · 문남구* · 정진석 · 신은우†

울산대학교 생명화학공학부, *(주)태성환경연구소
(2008년 6월 9일 접수, 2008년 7월 3일 채택)

Adsorption of Gaseous Benzene onto Mesoporous Silicates

Chae Young Lee, Nam Gu Moon*, Jin Suk Chung, and Eun Woo Shin†

School of Chemical Engineering and Bioengineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

*Tae Sung Environmental Institute Co. LTD., Ulsan 680-808, Korea

(Received June 9, 2008; accepted July 3, 2008)

메조포러스 실리케이트 물질은 넓은 비표면적과 규칙적인 나노 기공구조를 가지고 있어 흡착제로 활용도가 높다. 본 연구에서는 대표적인 메조포러스 실리케이트인 MCM-41, SBA-15를 흡착제로 활용하여 휘발성 유기화합물의 하나인 벤젠의 기상 흡착 실험을 수행하였다. 벤젠의 파과곡선(Breakthrough curves)을 통하여 각 물질의 벤젠 흡착량을 비교한 결과, 본 실험의 조건에서는 기공구조가 큰 SBA-15이 더 높은 벤젠 흡착량을 보여주었다. 특히 다른 분자체 물질인 제올라이트 X보다도 약 2.7배 높은 흡착력을 보여주었다. SBA-15를 이용하여 흡착온도와 벤젠 주입속도를 달리하며 벤젠 기상 흡착을 수행한 결과, 온도가 증가할수록 벤젠의 흡착량은 급속히 감소하였다. 이러한 결과는 SBA-15에 흡착하는 벤젠의 결합이 약하다는 것을 보여준다.

Mesoporous silicate materials have been used as adsorbents due to the advantage of high specific surface area and regular mesopores. In this study, conventional mesoporous silicates (MCM-41, and SBA-15) were utilized as adsorbents for gaseous benzene, one of volatile organic compounds. In the results of the breakthrough curves of gaseous benzene, SBA-15 showed a higher benzene adsorption capacity in adsorption condition of this study. Especially, compared to benzene adsorption of zeolite X, that of SBA-15 was higher by a factor of 2.7. With increasing adsorption temperature, adsorption capacity for benzene of SBA-15 was decreased rapidly. This indicates that benzene adsorbed weakly on SBA-15.

Keywords: mesoporous silicates, SBA-15, MCM-41, benzene, breakthrough curves

1. 서 론

산업용 용제로서 혹은 다른 화학합성물의 공급 원료로서 널리 이용되고 있는 벤젠은 대표적인 휘발성 유기 화합물(Volatile Organic Compounds: VOCs)로 화학, 석유화학 산업 혹은 이와 연관된 산업에서 방출되는 대표적인 대기오염물질 중의 하나이다. 벤젠은 독성이 심할 뿐만 아니라 아주 극소량이라도 돌연변이와 발암을 유발하기 때문에 인체와 환경에 주는 위해성은 아주 심각하다[1,2]. 특히, 모든 노출경로에 대해 발암성 물질로 분류되고 있으며, 백혈병 및 임파종을 유발하는 물질로 알려져 있다. 벤젠의 이와 같은 위험성 때문에 세계 각국은 엄격한 규제치를 마련하여 대기 중의 이들의 농도를 관리하고 있다. 벤젠 등의 VOCs는 최근에 환경 이슈로 많이 부각되었던 새집증후군, 새빌딩증후군의 주된 원인 물질 중의 밝혀졌으며, 이와 같은 VOCs는 마감재, 바닥재와 같은 건축내장재에 사용되는 접착제 등에 많이 포함되어 있다. 건축 내장재에 들어 있는 VOCs는 극소량씩 조금씩 새어 나와 실내 공기를 오염시켜 다양한 실내 환경에서 하루 생활의 대부분을 보내는 현대인의 인체 건강에 막대한 영향을 미

치고 있다. 또한, 현대화된 오늘날 사람들은 다양한 냄새에 민감하며 이를 싫어하는 경향이 늘어가고 있다. 특히, 석유화학 제품을 근간으로 하는 다양한 기능성 기초 소재에서 나오는 냄새는 많은 사람들이 싫어하여 최종 생산제품의 판매에 영향을 미치고 있다. 예를 들면, 자동차 내부에 들어가는 플라스틱 내장재나 놀이방 매트와 같은 합성 고무 제품들은 제품 출시 초기에 어느 정도 냄새를 방출하고 있고 이런 냄새의 원인은 석유화학 제품으로부터 나오는 VOCs들이다. 그러므로 VOCs들의 발생 억제는 제품 판매에 직접적인 관련이 있는 중요한 이슈가 되고 있다. 이들 제품에서 방출되는 VOCs의 양이 극소량이기 때문에 이들을 효율적으로 관리하는 방법 중 하나는 새어나오는 양을 흡착제 또는 촉매를 이용하여 처리하는 후처리 방법과 혹은 VOCs 발생 오염원에 흡착제를 소량씩 섞어 넣어 VOCs 발생을 억제하는 선처리 방법 등이 있을 수 있다. 따라서 어느 방법을 취하든 VOCs를 흡착, 제거하는 흡착제의 개발이 필요하다.

벤젠을 포함한 VOCs의 일반적인 처리 방법으로는 응축, 흡수, 접촉산화, 흡착, 소각 등 다양하게 있으나, VOCs 방산량이 적은 저농도 시스템에서는 흡착 공정을 통한 제거가 기술적으로 주목받고 있다[3]. 흡착시스템을 통한 벤젠의 제거는 흡착제의 선택이 경제적인 면 혹은

† 교신저자(e-mail: ewshin@mail.ulsan.ac.kr)

기술적인 면에서 아주 중요하다. 가장 널리 알려진 VOCs 흡착제는 높은 표면적을 가지는 활성탄이었으나 이것은 약한 결합력으로 인해 물리흡착을 일으키며, 이로 인해 흡착종이 파괴되거나 분해되는 현상이 관찰되지 않는다는 약점을 가지고 있다[1]. 또한 기능성 소재에서 발생하는 VOCs를 제거하는 흡착제로서의 실용성은 흡착제 첨가 후, 기능성 소재의 미관과 물성변화, 그리고 흡착제의 VOCs 흡착 효율에 근거하여 판단된다. 즉, 흡착제의 VOCs 흡착효율도 중요하나 첨가 후 기능성 소재의 물성변화에 영향을 주지 않는 것이 더욱 중요하다. 이런 점에서 기존의 대표적인 VOCs 흡착제인 활성탄은 색깔이 검정색이어서 다양한 플라스틱 소재의 미관과 물성에 나쁜 영향을 주기 때문에 비록 활성탄의 흡착능은 우수할지라도 이를 기능성 소재에 적용하는 VOCs 제거용 흡착제로 사용할 수 없다. 따라서, 요즘은 벤젠과 화학결합을 유도하는 무기물 흡착제 즉, 무정형 실리카, 제올라이트, 그리고 메조포러스 실리케이트 등이 새로운 흡착제로 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 언급된 무기물 중, 대표적인 메조포러스 실리케이트의 벤젠의 흡착 거동을 관찰하였다.

1990년대 초반에 새롭게 합성된 메조포러스 실리케이트 물질은 표면적이 넓고, 기존의 합성제올라이트보다 큰 나노크기의 포어를 규칙적으로 가지고 있어 정밀화학용 촉매나 흡착제로 이용가치가 높다 [4-6]. 메조포러스 실리케이트 물질은 사용되는 실리카 원료 및 계면활성제 종류에 따라 합성되는 구조가 달라지고, 합성 시 조건(상대적인 농도, 합성온도, 합성시간)에 따라서 다양한 기공 구조가 나타난다. 초기의 합성 메조포러스 실리케이트 물질인 MCM-41 계열은 나쁜 수열특성으로 인해 수중에서 약간의 온도가 높은 조건에서 구조가 파괴되는 단점이 있었지만, 현재는 이런 단점을 극복한 SBA-15 계열의 메조포러스 실리케이트가 개발되어 다양한 물질의 흡착제로 활용되어 왔다[6-11]. 메조포러스 실리케이트 표면에는 활성관능기로 실란올기(SiOH)가 존재하기 때문에 이 표면관능기가 타겟 오염원인 벤젠과 반응하여 벤젠을 흡착시킬 수 있다.

본 연구에서는 나노 기공 크기와 계면활성제 종류가 다른 메조포러스 실리케이트(SBA-15, MCM-41)를 합성하고, 표면 및 기공 특성 분석을 통해 메조포러스 실리케이트의 합성 여부를 확인하였다. 제조된 메조포러스 실리케이트 물질의 BTX 흡착 효율을 확인하고자 흡착시험장치를 구성하여 벤젠흡착의 파과곡선(breakthrough curve)으로부터 벤젠의 흡착효율을 측정 계량화하였다. 또한 메조포러스 실리케이트에서 벤젠의 흡착 특성을 파악하고자 벤젠의 흡착 온도와 주입속도를 달리하여 벤젠흡착 효율을 관찰하였다.

2. 실험

2.1. 실험재료

본 연구에서는 메조포러스 실리케이트를 문헌을 따라 제조하였다 [6,8,11-13]. SBA-15의 제조방법은 다음과 같다. 계면활성제인 Pluronic P123 (Sigma-Aldrich Korea Co., 경기도 용인) 4.0 g을 실험실에서 제작한 합성용 테프론 반응기에 넣은 후, 2 M HCl 120 g과 초순수 30 g에 부어 계면활성제가 녹을 때까지 자석막대로 잘 교반시켰다. 이후, 실리카 원료인 tetraethylorthosilicate (TEOS, Sigma-Aldrich Korea Co., 경기도 용인) 8.5 g을 반응기에 추가하여 308 K에서 20 h 동안 교반시켜 주었다. 균일하게 잘 교반된 용액을 353 K의 오븐에 넣고 24 h 동안 숙성시킨 후, 제조된 고체 분말을 펄넬과 진공펌프를 이용하여 걸러내고, 초순수 물로 여러 번 세척하였다. 이렇게 하여 얻어진 고체 분말을 상온의 공기 분위기 하에서 잘 말렸다. 이 건조된 SBA-

15을 전기로에 넣고 773 K까지 14 h에 걸쳐 승온시킨 뒤, 773 K에서 6 h 동안 열처리하였다.

또 다른 메조포러스 실리케이트인 MCM-41의 합성은 아래와 같이 진행하였다. 초순수 7.35 g, 메탄올 2.45 g, 그리고 수산화나트륨 0.065 mL을 합성용 테프론 반응기에 넣었다. 그리고 계면활성제인 hexadecyltrimethylammoniumbromide (HDTMA, Sigma-Aldrich Korea, 경기도 용인) 0.2 g을 넣은 후, 308 K에서 30 min간 잘 저어주었다. 그런 다음, 실리카 원료인 tetramethylorthosilicate (TMOS, Sigma-Aldrich Korea, 경기도 용인) 0.625 mL를 반응기에 부은 후, 또 308 K에서 30 min간 교반하였다. 교반된 용액을 오븐에 넣은 후, 373 K에서 4일간 숙성하였다. 제조된 고체 분말은 걸러지고 세척된 뒤, 상온에서 건조되었다. 이 건조된 시료를 823 K에서 4 h 동안 소성시켜 최종적인 MCM-41 분말을 제조하였다.

2.2. 흡착제 특성분석

제조된 메조포러스 실리케이트의 표면관능기 측정 및 계면활성제의 유무를 확인하고자 FT-IR 분석실험을 수행하였다. 사용된 FT-IR은 Thermo Electron Corporation 사의 Nicolet 380 FT-IR spectrometer이며, 고체 시료 0.001 g을 펠렛화하지 않고 IR 장치 약세사리인 Smart Specular ATR™을 이용하여 파우더 상태로 측정하였다. 분해능은 4 cm^{-1} 이며 32번 반복 스캔하였다. 제조된 흡착제의 표면적과 세공구조에 대한 정보를 얻고자 질소기체 흡·탈착 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 기기는 Micromeritics사의 ASAP 2020 모델이며, 각 흡착제의 BET 표면적 및 기공의 크기 분포 및 평균 기공 크기 값을 얻을 수 있었다.

2.3. 흡착실험 및 파과곡선

BTX 기상 흡착 실험을 위하여 fixed-bed 형태의 반응 장치를 구성하였다. 장치의 대략적인 개요도가 Figure 1에 나타나 있다. 운반 기체는 질소가 이용되었고, 질소의 유량은 질량유량계로 조절되었다. 질소의 유량 조건은 다양한 조건에서 실험한 후, 100 cc/min으로 최종적으로 고정하였다. 흡착종은 microsyringe pump를 이용하여 액상의 상태로 주입되었다. 액상의 흡착종을 극소량씩 주입되게 되면 휘발성이 강한 벤젠은 쉽게 기화하여 기상의 형태로 흡착제까지 흘러간다. 그리고 주입부부터 반응기까지 히팅 밴드로 감아 온도 조절을 통해 기상의 흡착종이 반응기까지 도달하기 전에 응축되지 않도록 하였다. 벤젠의 주입속도는 $0.3 \mu\text{L/hr} \sim 2.7 \mu\text{L/hr}$ 로서 이를 농도로 환산하면 12.6~113.4 ppm의 농도의 벤젠이 100 cc/min 속도의 질소와 함께 반응기를 통과한다. 벤젠의 주입속도 변화는 주입되는 벤젠의 농도 변화와 동일한 의미를 가진다. 즉, 주입속도가 빠른 경우에는 높은 농도에서 흡착 실험이 진행되었다. 반응기에 고체 시료 0.1 g을 넣은 후, 흡착실험을 수행하기 전에 시료내부에 있는 물 등을 제거하기 위해 시료들을 523 K에서 1 h 동안 질소 100 cc/min의 흐름 하에서 열처리하였다. 전처리 후, 벤젠을 흘러 보내주었지만, 초기 50 min은 벤젠 주입의 안정화를 위하여 벤젠의 주입을 bypass하였다. 즉, 벤젠 주입 후 초기 50 min은 흡착제가 있는 반응기로 벤젠이 흘러가지 않도록 했다. 이후에 반응기 쪽으로 흘러가게 하였다.

반응기는 석영으로 제작되었으며, 반응기의 온도는 주변에 설치된 전기로로 조절할 수 있었다. 따라서 다양한 온도 조건에서 실험하여 흡착량에 대한 흡착온도의 영향도 살펴보고자 하였다. 흡착량 계산은 기상흡착곡선(breakthrough curve)를 작성을 통하여 진행되었고, breakthrough curve를 작성하기 위해서는 반응기 이후 라인에서 벤젠의 농

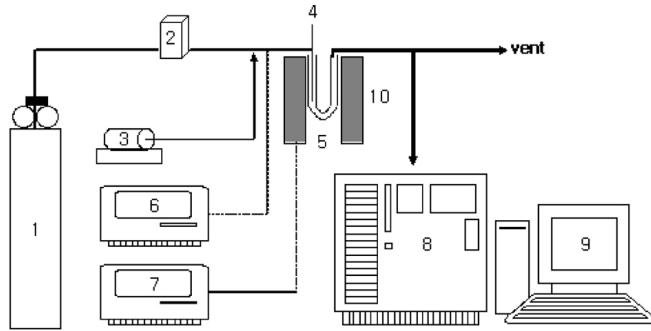


Figure 1. A schematic diagram for gas-phase-adsorption-test-unit. 1: N₂ cylinder, 2: mass flow controller, 3: syringe pump, 4: thermocouple, 5: quartz reactor, 6: line heating controller, 7: furnace controller, 8: gas-chromatography, 9: PC, 10: furnace.

Table 1. Surface Areas and Average Pore Diameters of the Prepared Mesoporous Silicates

Samples	Surface area (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	D _{BJH} * (nm)
SBA-15	751	0.872	5.74
MCM-41	1081	0.845	2.42

*D_{BJH} = 4 V_{BJH}/A_{BJH} : V_{BJH} and A_{BJH} are pore volume and surface area, respectively, calculated by BJH analysis.

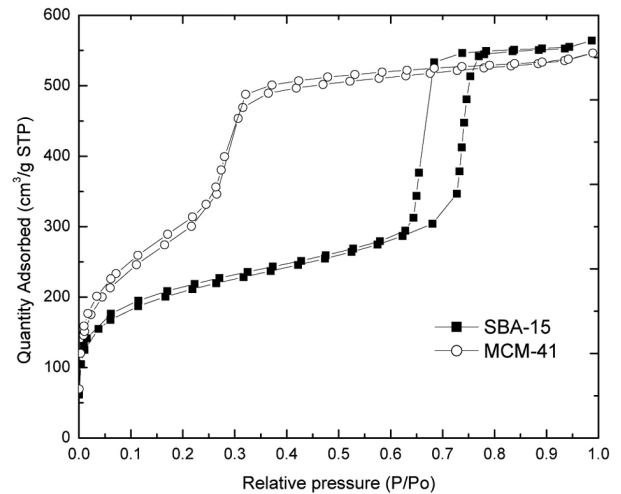
도를 시간에 따라 모니터링을 하였다. 벤젠의 농도 분석은 반응기 이후 라인에서 기상 채취용 시린지로 1 cc의 시료를 채취하여 이를 gas chromatography analyser (Younglin instruments, Acme 6000 M GC)의 Flame ionization detector (FID)로 벤젠량을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

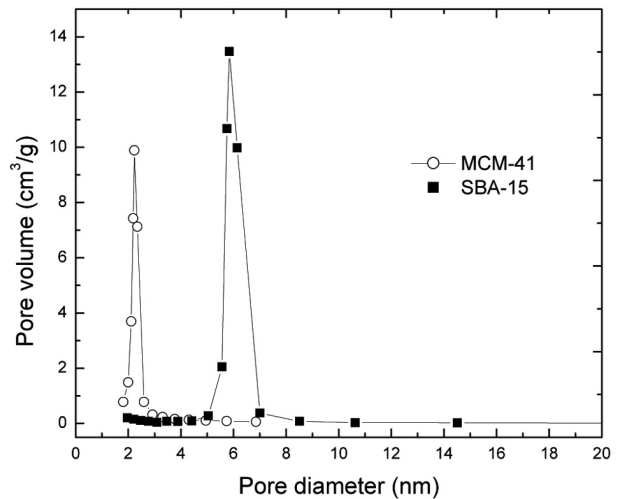
3.1. 제조된 메조포러스 실리케이트의 특성분석

Figure 2는 메조포러스 실리케이트 물질의 질소 흡탈착 등온선과 기공크기분포를 보여주고 있다. SBA-15의 질소 흡탈착 등온선의 경우, 상대압력(P/P₀)이 0.6~0.8 부근에서 H1 히스테리시스가 나타나며, 전형적인 IUPAC type IV의 흡착등온선의 형태를 따르고 있다. 이는 문헌에 보고된 질소 기체 흡탈착 거동에 거의 동일하다[8,10]. 또한 기공크기분포에서 약 5.7 nm 근처에서 단일 메조 포어를 가지고 있음을 확인되었다. MCM-41의 경우에도, 질소 기체 흡탈착 등온선의 패턴은 기존의 문헌보고와 일치하며[11], 기공크기분포에서도 2 nm 근처에서 단일 기공크기를 가지고 있음이 확인되었다. 따라서 기공크기가 다른 두 메조포러스 실리케이트가 제대로 제조되었음이 확인되었다. 그리고 SBA-15과 MCM-41의 비표면적은 각각 751과 1081 m²/g으로 MCM-41이 더 높은 값을 보여주었다. 반면에 기공부피는 0.872와 0.845 cm³/g으로 SBA-15이 약간 더 높았다. 그러므로 비표면적은 MCM-41이 흡착에 유리하나, 기공부피 및 기공 크기에서는 SBA-15이 흡착에 유리하다고 볼 수 있다. 각 메조포러스 실리케이트의 비표면적, 기공부피, 평균기공크기를 Table 1에 보였다.

Figure 3은 각 메조포러스 실리케이트의 FT-IR 패턴이다. 800과 1085 cm⁻¹에 나타나는 피크는 SiO₂ 구조 내의 내부 tetrahedral 구조에 존재하는 산소 원자의 비대칭 신축진동과 굽힘 진동에 관련된 것이며, 966 cm⁻¹에서 나타나는 IR 피크는 메조포러스 실리케이트 표면 실란올기에 해당한다. 1650과 3400 cm⁻¹에서의 넓은 폭의 피크들은 수분



(a)



(b)

Figure 2. (a) N₂ gas adsorption/desorption isotherms and (b) Pore size distributions of SBA-15 and MCM-41.

의 굽힘진동과 신축진동으로 인해 발생한다. 이 중 기상 벤젠의 흡착에 관여하는 실란올기는 실란올기이며, 두 메조포러스 실리케이트의 IR 패턴에서 공히 966 cm⁻¹에 shoulder형태로 피크가 뚜렷이 나타나는 것으로 보아 실란올기가 두 메조포러스 실리케이트 표면에 존재하며, 이들이 벤젠을 반응할 것이라는 것을 예상할 수 있다[14].

소성 전 메조포러스 실리케이트 물질은 계면활성제를 포함하고 있으며 계면활성제의 대표적인 IR 피크는 2800~3000 cm⁻¹에서 나타나는 피크들로 계면활성제에 들어 있는 C-H 신축진동에 의하여 발생한다. 이 피크들은 세 가지 메조포러스 실리케이트의 소성 전 FT-IR 패턴에서 공히 나타나, Figure 3에서는 전혀 나타나지 않았다. 계면활성제와 관련있는 IR 피크는 소성 후 IR 패턴에서 거의 사라졌고 이는 소성과정에서 계면활성제가 산소와 반응하여 완전히 분해되었기 때문이라고 볼 수 있다.

3.2. 메조포러스 실리케이트의 벤젠 흡착특성

두 메조포러스 실리케이트 흡착제의 기상벤젠 흡착결과와 비교를 위해 제올라이트 X의 기상벤젠 흡착결과를 Figure 4에 도시하였다. 이 때, 벤젠의 주입속도는 0.3 μL/hr이고 흡착온도는 303 K였다.

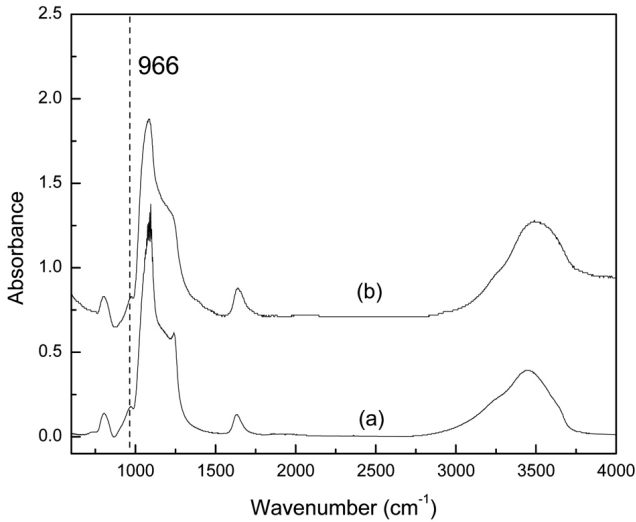


Figure 3. FT-IR spectra of (a) MCM-41, and (b) SBA-15.

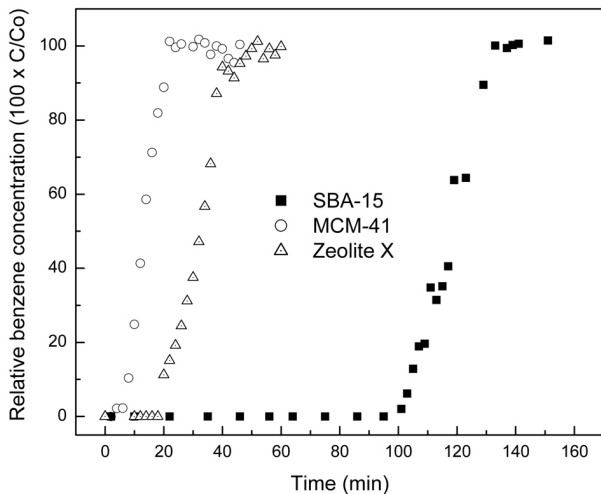


Figure 4. The breakthrough curves of benzene adsorbed onto SBA-15, MCM-41 and zeolite X (Adsorption temperature = 303 K, benzene injection rate = 0.3 $\mu\text{L/hr}$).

Figure 4의 기상 벤젠의 파과곡선에서 세 물질 공히 기상벤젠에 대한 흡착능이 있는 것으로 나타났다. MCM-41의 경우에는 20 min 근처에서 벤젠 흡착능이 포화되는 것으로 나타났고, 비교실험을 위해 적용된 제올라이트 X는 약 40 min경에 벤젠 흡착이 포화되는 것으로 나타났다. 한편 다른 메조포러스 흡착제인 SBA-15는 130 min경에 벤젠 흡착이 포화되는 것으로 나타나 가장 좋은 벤젠 흡착능을 보여주었다. 벤젠흡착의 파과곡선을 기초로 각 물질의 벤젠흡착능을 계산하여 그 결과를 Table 2에 도시하였다. 정량적인 비교에서는 SBA-15의 벤젠 흡착능이 130.2 $\mu\text{mol/g}$ 으로 23.2 $\mu\text{mol/g}$ 의 MCM-41의 흡착량보다 약 5.6배 높았다. 메조포러스 실리케이트 흡착제의 흡착점은 표면 실란올기가 유력하며, 메조포러스 흡착제의 표면적, 그리고 세공의 부피나 크기 등이 흡착제의 흡착능과 직, 간접적인 관련이 있을 것으로 추측된다.

높은 벤젠흡착능을 보여준 SBA-15을 가지고 흡착온도를 달리하며 벤젠흡착능을 구하였다. 벤젠의 주입속도를 0.9 $\mu\text{L/hr}$ 혹은 1.8 $\mu\text{L/hr}$ 로 고정하여 흡착온도에 따른 기상 벤젠의 파과 곡선을 구하였고 이

Table 2. Benzene Adsorption Capacities of Mesoporous Silicates and Zeolite X (Adsorption Temperature = 303 K, Benzene Injection Rate = 0.3 $\mu\text{L/hr}$)

Samples	Adsorption capacities ($\mu\text{mol/g}$)
SBA-15	130.2
MCM-41	23.2
Zeolite X	48.0

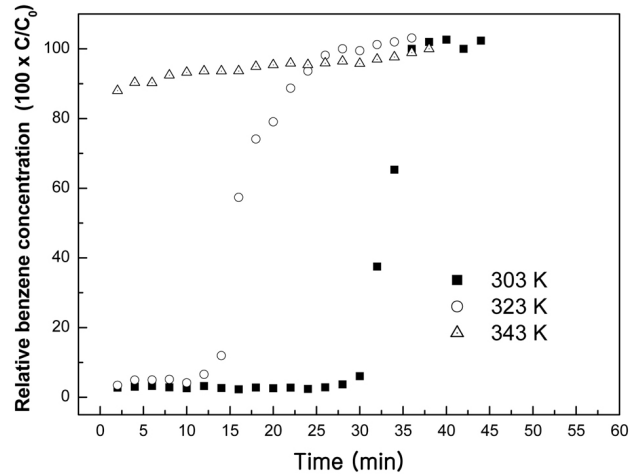


Figure 5. The breakthrough curves of benzene adsorbed onto SBA-15 at different adsorption temperature (Benzene injection rate = 0.9 $\mu\text{L/hr}$).

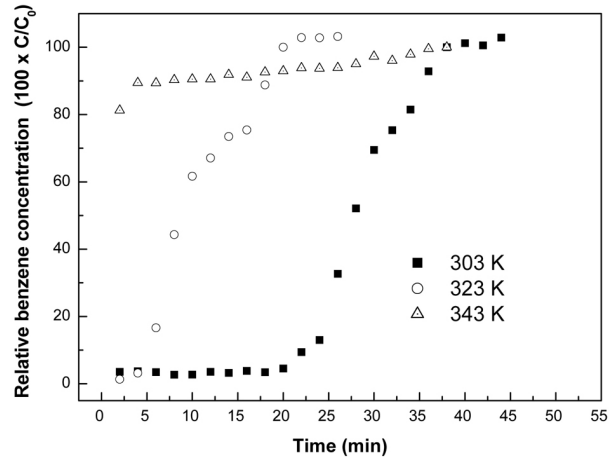
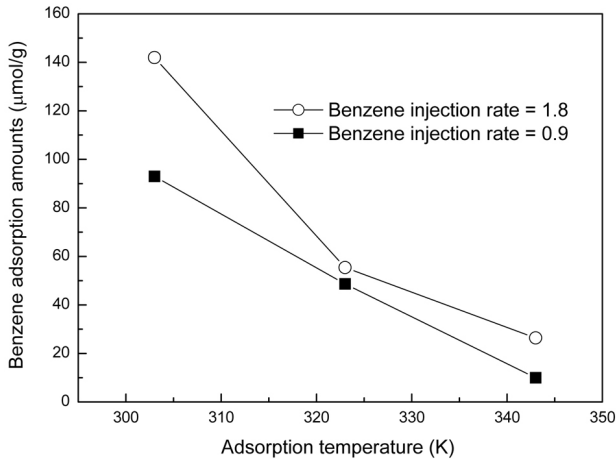


Figure 6. The breakthrough curves of benzene adsorbed onto SBA-15 at different adsorption temperature (Benzene injection rate = 1.8 $\mu\text{L/hr}$).

를 Figure 5와 Figure 6에 도시하였다. 먼저 Figure 5에서 벤젠의 흡착 온도가 높을수록 벤젠의 흡착능이 급속히 감소함을 확인할 수 있었다. 흡착온도가 303 K일 때는 약 30 min에서 흡착이 감소하면서 거의 40 min경에 흡착이 포화되는 것으로 나타났다. 하지만 온도가 323 K로 증가하면 약 25 min경에 흡착이 포화되었으며, 심지어 흡착 온도가 343 K이면 거의 시작과 더불어 흡착이 포화되었다. 이는 Figure 6에서도 동일하게 나타났다. Figure 6은 다른 조건은 동일하며, 다만 벤젠의 주입속도가 Figure 5의 경우보다 두 배 증가하였을 때의 벤젠흡착 파과 곡선이다. 벤젠의 주입속도의 증가에 따라 벤젠의 파과곡선의 전체적인 패턴의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 기상의 유체 흐

Table 3. Benzene Adsorption Capacities of SBA-15 in Various Adsorption Conditions

Adsorption amounts ($\mu\text{mol/g}$)	Adsorption temperature			
	303 K	323 K	343 K	
Benzene injection rate	0.9 $\mu\text{L/hr}$	93.0	48.6	9.98
	1.8 $\mu\text{L/hr}$	142	55.4	26.4

**Figure 7. Benzene adsorption capacities of SBA-15 at different adsorption temperatures.**

름에서 벤젠의 농도의 증가는 벤젠의 파과곡선 패턴에는 큰 영향은 없었으며, 벤젠 흡착량의 증가가 결과로 나타났다. 각 벤젠 흡착의 파과곡선으로부터 벤젠흡착능을 계산하여 그 값들을 Table 3에 도시하였다.

벤젠의 흡착온도는 벤젠의 흡착능에 큰 영향을 미친다. Table 3에서 얻은 벤젠 흡착능을 흡착온도에 따라 도시한 결과가 Figure 7에 나타나 있다. 벤젠의 흡착능은 흡착온도가 증가하면서 급격히 줄어들고 이는 벤젠의 주입속도의 변화에도 동일하게 나타났다. 벤젠의 흡착온도가 343 K일 때는 SBA-15의 벤젠 흡착능이 상당히 손실되었다고 볼 수 있다. 이러한 현상은 SBA-15으로의 벤젠의 흡착이 아주 약한 결합임을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서 메조포러스 실리케이트에 의한 기상벤젠의 흡착에 대한 결론을 다음과 같이 도출하였다.

1) 본 연구에서는 메조포러스 실리케이트 물질(SBA-15, MCM-41)

을 합성하였고, 벤젠 기상 흡착 실험 결과, 메조포러스 실리케이트와 제올라이트를 포함한 백색 분말 흡착제 중에서는 SBA-15이 가장 높은 벤젠 흡착능을 보여주었다.

2) 벤젠의 기상흡착실험에서 흡착 온도와 벤젠의 주입속도를 흡착 변수로 하여 SBA-15의 벤젠 흡착량을 구한 결과, 온도가 높을수록 벤젠의 흡착량이 급격히 감소하였다. 이러한 현상은 SBA-15에서의 벤젠의 흡착이 약하게 이루어졌다는 것을 암시한다.

감 사

본 연구는 2005년 울산지역환경기술개발센터로부터 지원받은 연구비에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. M. A. Hernandez, J. A. Velasco, M. Asomoza, S. Solis, F. Rojas, and V. H. Lara, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **43**, 1779 (2004).
2. Y. Ueno, T. Horiuchi, M. Tomita, O. Niwa, O., H.-S. Zhou, T. Yamada, and I. Honma, *Anal. Chem.*, **74**, 5257 (2002).
3. J.-H. Yun, K.-Y. Hwang, and D.-K. Choi, *J. Chem. Eng. Data*, **43**, 843 (1998).
4. C. T. Kresge, M. E. Leonowicz, W. J. Roth, J. C. Vartuli, and J. S. Beck, *Nature*, **359**, 710 (1992).
5. M. Kruk, M. Jaroniec, C. H. Ko, and R. Ryoo, *Chem. Mater.*, **12**, 1961 (2000).
6. D. Zhao, J. Feng, Q. Huo, N. Melosh, G. H. Fredrickson, B. F. Chmelka, and G. D. Stucky, *Sci.*, **279**, 548 (1998).
7. A. Sayari, S. Hamoudi, and Y. Yang, *Chem. Mater.*, **17**, 212 (2005).
8. E. W. Shin, J. S. Han, M. Jang, S. H. Min, J. K. Park, and R. M. Rowell, *Environ. Sci. Technol.*, **34**, 912 (2004).
9. X. Feng, G. E. Fryxell, L.-Q. Wang, A. Y. Kim, J. Liu, and K. M. Kemner, *Sci.*, **276**, 923 (1997).
10. M. Jang, J. K. Park, and E. W. Shin, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **75**, 159 (2004).
11. L. Mercier and T. J. Pinnavaia, *Environ. Sci. Technol.*, **35**, 2749 (1998).
12. H. Zhao, K. L. Nagy, J. S. Waples, and J. Vance, *Environ. Sci. Technol.*, **34**, 4822 (2000).
13. H. S. Choi, D. G. Lee, G. J. Cho, C. Y. Lee, J. S. Chung, I.-k. Yoo, and E. W. Shin, *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**, 172 (2006).
14. R. T. Yang, *Adsorbents: Fundamentals and Applications*, **135**, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey (2003).