

제올라이트 13X와 실리카-알루미나의 흡착특성 비교

이승우 · 나영수¹⁾ · 안창덕¹⁾ · 이민규*

부경대학교 화학공학과, ¹⁾세계화학공업(주) 연구소
(2011년 3월 9일 접수; 2011년 4월 11일 수정; 2011년 4월 12일 채택)

Comparison of Adsorption Characteristics on Zeolite 13X and Silica-aluminar

Song-Woo Lee, Young-Soo Na¹⁾, Chang-Doeuk An¹⁾, Min-Gyu Lee*

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

¹⁾ Segye Chem. Co., Ltd., R & D Center, Kyungnam 626-120, Korea

(Manuscript received 9 March, 2011; revised 11 April, 2011; accepted 12 April, 2011)

Abstract

This work is to compare the experiment results by a continuous fixed-bed adsorption of water vapor, acetone vapor, and toluene vapor on zeolite 13X (SAU) and silica-alumina (SAK). SAU and SAK have very different pore structure but similar composition as inorganic adsorbent. The relationship between the equilibrium adsorption capacity and specific pore size range were studied. Adsorption of water vapor was more suitable on SAU than SAK because SAU has relatively more developed pores around 5 Å than SAK in the pore range of 10 ~ 100 Å. Adsorption of acetone vapor was more suitable on SAK than SAU because SAK has relatively more developed pores around 5~10 Å than SAU in the pore range of less than 10 Å. Adsorption of toluene vapor was more suitable on SAK than SAU because SAK has relatively more developed pores in the pore range of 10~100 Å than SAU. Adsorption capacity of the adsorbent was closely related to the surface area generated in the specific pore size region. But it was difficult to distinguish the relationships between adsorption capacity and micro area, and the external surface area of adsorbent.

Key Words : Zeolite, Silica-aluminar, VOCs, Adsorption, Breakthrough curve

1. 서론

흡착현상은 흡착질과 흡착제 표면과의 상호작용에 의한 것으로, 흡착질 분자의 특성과 흡착제의 기공구조 및 표면적은 상호 밀접한 관계가 있으며, 흡착제의 흡착용량과 흡착질에 대한 선택성에도 많은 관계가 있다. 흡착공정의 목표는 큰 흡착성과 높은 선택성,

그리고 안정성을 갖는 흡착제를 개발하여 사용하는 것이다. 균일한 기공을 갖는 흡착제일수록 입자 내의 확산이 빠르고 흡착성능이 우수하며, 선택흡착이 가능하다(임, 2004; Allen, 1990). 적합한 흡착제를 사용하면 농도가 극히 낮은 흡착질도 선택적으로 제거할 수 있기 때문에 각종 산업분야 및 환경방시설비 등에 널리 활용되고 있다(Khan, 2000). 현재 상용화되어 있는 흡착제는 활성탄, 실리카겔, 그리고 제올라이트 등이 있다. 제올라이트는 결정구조(crystalline structure) 중앙에 Si, Al 원자가 있고 그 주위를 4개의 산소가 둘러싸고 있는 정사면체로 구성된 구조를 가지고 있다.

*Corresponding author : Min-Gyu Lee, Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
Phone: +82-51-629-6435
E-mail: mglee@pknu.ac.kr

제올라이트는 천연과 합성으로 분류되고 건조제, 탈취제, air separation, 수처리, 그리고 촉매에 사용되며 합성 제올라이트는 세공직경에 따라 3A, 4A, 5A, 10X 그리고 13X로 구분된다. 제올라이트가 가지고 있는 기공은 결정격자에 의해 정해지며 내부에 존재하는 기공의 크기가 매우 균일하여, 특정크기의 분자만을 선택적으로 흡착할 수 있는 분자체효과가 있고 여러 종류의 이온과 이온교환이 가능하며 열적으로 매우 안정하다. 제올라이트는 Si/Al의 비율(1~5)과 양이온(Na, K, Ca 등)의 종류에 따라 A-type, X-type, Y-type로 구분한다. X-type는 산소 12개가 공유되어 만든 window size는 약 10 Å 정도며 양이온이 Na, Ca에 따라서 각각 10X, 13X로 구분한다. 이 금속 양이온은 매우 유동적이며 항상 다른 금속 양이온에 의해 치환될 수 있다. 이로 인해 제올라이트의 금속 양이온은 교환이나 탈수 등을 통해 또 다른 구조로 바뀔 수 있다(전, 1995; Breck, 1974). 제올라이트 13X의 유효세공크기는 8.4 Å로 알려져 있다(Breck, 1974). 실리카-알루미나(silica-aluminar)는 실리카(SiO_2)와 알루미나(Al_2O_3)를 혼합하여 합성한 비결정질 실리카-알루미나이고 석유화학의 접촉분해 반응에 촉매로 주로 사용되고 있다(김, 2003).

지금까지 흡착에 관한 연구는 활성탄을 흡착제로 주로 사용하고 흡착제의 종류에 따른 흡착용량을 평가하거나 온도변화에 따른 흡착능을 비교 고찰한 것이 대부분을 차지하고 있다. 최근에는 흡착제의 세공크기별 표면적 또는 부피와 흡착량과의 상관관계를 고찰하고, 잘 발달한 특정 세공영역에서의 흡착능과 흡착질의 크기와 극성과의 상관관계를 고찰하였다(Lee 등, 2005a; Lee 등, 2006a; Lee 등, 2006b; Lee 등, 2007; Lee 등, 2008a). 그러나 제올라이트나 실리카-알루미나와 같은 무기계 흡착제의 흡착특성에 관한 연구는 부족한 실정이다(Ahn 등, 1999; Lee 등, 1999; Lee 등, 2005b; Lee 등, 2008b).

본 연구는 세공구조가 매우 다르지만 비슷한 성분으로 제조된 무기계 흡착제인 제올라이트 13X와 실리카-알루미나를 사용하여 서로 특성이 다른 3가지 흡착질로 연속식 고정층 흡착장치로 실험하여 흡착제와 흡착질과의 특성 차이에 따른 흡착특성의 차이를 비교 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

흡착제는 미국 UOP사의 제올라이트 13X와 국내 경남기업의 실리카-알루미나를 사용하였다. 사용한 2종류의 흡착제는 직경 4 mm인 구형으로 성형된 제품으로 각각 SAU, SAK로 명명하였다. 흡착제는 사용 전에 250°C에서 5시간 이상 방치하여 내부에 있을 수 있는 불순물을 제거하고, 데시케이터에 보관하여 사용하였다. 흡착질은 수증기, acetone 증기, 그리고 toluene 증기를 사용하였다. 수증기는 상대습도(R.H., relative humidity) 50%R.H.로 제조하여 사용하였고, 실험에 사용한 물(H_2O)은 1차 증류수를 초순수장치(Milli-Q water system)로 제조한 순수를 사용하였다. Acetone 증기는 공기를 사용하여 농도 2,000~7,000 ppmv로 조절하여 사용하였고, toluene 증기는 공기를 사용하여 농도 3,000~12,000 ppmv로 조절하여 사용하였다.

2.2. 실험장치 및 방법

수증기 흡착에 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같고, acetone 증기와 toluene 증기의 흡착에 사용한 실험장치는 Fig. 2와 같은 고정층 연속식 흡착장치를 사용하였다. 실험장치는 크게 증기 발생 부분, 흡착제 충전층, 그리고 분석부분으로 구성되어 있다. 증기 발생부분은 온도조절용 수조(water bath)와 흡착질을 담은 세척병, 그리고 혼합기 등으로 구성하였다. 항온수조의 온도를 흡착온도로 설정한 다음, 흡착질이 담긴 세척병 속으로 유량계로 조절할 일정량의 공기를 공급하여 실험에 필요한 증기의 농도를 조절하였다. 발생된 증기를 by-pass line으로 통과시키면서 해당 증기의 농도가 설정치의 $\pm 5\%$ 이내로 유지될 때 흡착층 내로 통과시키며 흡착실험을 수행하였다. 수증기의 온도와 농도는 온도센서와 습도센서(Testo, Model, 0563445)가 연결된 습도분석기(Testo, Testo 445)를 사용하여 온도와 상대습도(relative humidity, %R.H.)를 측정하였다. 흡착이 진행되는 동안 습도분석기로 수증기 농도를 계속 측정하여 그 결과를 사용하였다. Acetone 증기와 toluene 증기의 농도는 FID(Flame Ionization Detector)가 장착된 gas chromatography (HP 5890)를 사용하여 일정 간격으로 분석하였다. Gas chromatography의

분석조건은 Table 1과 같다. 흡착관의 출구에서 유출 증기의 농도(C)가 유입 증기의 농도(C₀)와 거의 같은 수준(C/C₀≃1)이 되었을 때를 흡착평형으로 간주하고 흡착실험을 종료하였다.

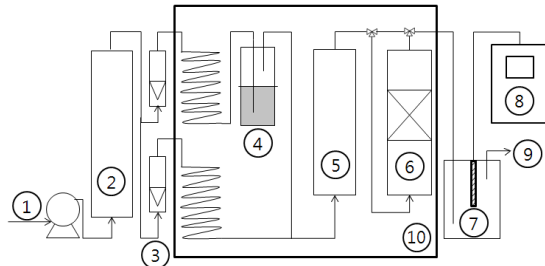


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus for dynamic adsorption test of water vapor (① air pump, ② drying bottle, ③ flow meter, ④ washing bottle, ⑤ mixing chamber, ⑥ adsorption bed, ⑦ moisture analyzer sensor, ⑧ moisture analyzer, ⑨ vent, ⑩ water bath).

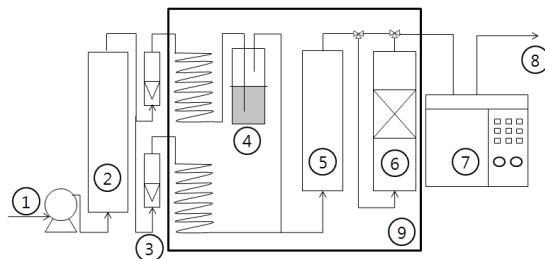


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus for dynamic adsorption test of acetone and toluene vapor (① air pump, ② drying bottle, ③ flow meter, ④ washing bottle, ⑤ mixing chamber, ⑥ adsorption bed, ⑦ GC, ⑧ vent, ⑨ water bath).

2.3. 분석

흡착제의 기공특성은 BET 비표면측정기(Micromeritics, ASAP 2010)를 이용하여 비표면적(BET specific surface area), 총 세공부피(total pore volume), 평균 세공직경(average pore diameter), 그리고 t-plot method에 의한 external surface area와 micro area를 측정하여 비교하였다(Allen, 1990; Micromeritics, 1997). 증기의 포화흡착량은 파과곡선의 면적값으로 계산하였다.

Table 1. Analysis conditions for acetone vapor and toluene vapor by gas chromatography

GC	HP 5890
Detector	FID
Column	HP-Innowax Capillary
Carrier gas	N ₂
Oven temp.	60 °C
Inject temp.	150 °C
Detector temp.	250 °C
Flow rate(N ₂ : H ₂ : Air)	60 : 20 : 40

3. 결과 및 고찰

3.1. 흡착제의 세공특성 비교

실험에 사용한 SAU와 SAK 흡착제의 기공특성을 고찰하기 위하여 BET 비표면측정기를 이용하여 비표면적(S_{BET}), 총 세공부피(V_T), 평균 세공직경(D_p), 그리고 t-plot method에 의한 micro area(S_{MIC})와 external surface area(S_{EXT})를 각각 측정하여 비교하였다. BET 비표면측정기로 측정한 SAU와 SAK의 특성치는 Table 2에, 세공분포는 Fig. 3에, 그리고 온도 77 K에서 질소흡착에 의한 흡착등온선은 Fig. 4에 각각 비교하였다.

SAU와 SAK의 특성을 비교하여 나타낸 Table 2에서 보면, SAK의 BET 비표면적이 SAU 보다 약 15% 정도 크게 나타났지만 micro area와 external surface area의 비교는 매우 상반된 결과를 나타내었다. 즉, SAU의 표면적은 입자 내부에 주로 형성되어 있는 micro area가 대부분인 반면, SAK는 external surface area가 대부분인 것으로 나타났다. SAU는 분말로 된 결정형 제올라이트 13X를 바인드를 사용하여 구형으로 성형한 것으로 기공의 대부분이 입자 내부에 존재하는 결정격자로 이루어진 크기가 매우 균일한 기공들로 구성되어 있다. 이 때문에 SAU에는 micro area(S_{MIC})가 external surface area(S_{EXT})에 비해 많은 것으로 판단되었다. SAK는 실리카(SiO₂)와 알루미나(Al₂O₃)를 일정 비율로 혼합하여 일정크기로 합성한 비결정질 입자이다. SAK에 external surface area가 micro area에 비해 많은 것은 합성과정에서 실리카와 알루미나의 입자들이 인접되어 형성된 기공들의 표면에 기인된 것으로 판단되었다. Fig. 3의 세공분포 비교에서, SAU는 10 Å 이하의 미세세공과 100 Å 이상

의 큰 세공이 상대적으로 잘 발달한 것을 볼 수 있었으며, 특히 5 Å 부근의 미세세공이 상대적으로 많이 발달한 것을 확인 할 수 있었다. 반면에 SAK는 100 Å 이하에만 세공이 형성되어 있는 것을 볼 수 있었으며, 특히 10~100 Å 범위에서 20 Å 부근의 세공이 상대적으로 많이 발달한 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 4의 흡착등온선 비교에서, SAU는 상대압력(P/P_0) 0.1 이하의 낮은 상대압력에서 대부분의 흡착이 이루어진 후부터 상대압력의 증가에 따라 곡선의 기울기 증가는 미미한 상태를 보인다. 상대압력 0.9에서 변곡점이 생긴 것을 볼 수 있었다. 이것은 상대압력 0.9 이상부터 흡착력이 증가하여 곡선의 기울기가 증가한 것으로 판단되었다. 이것은 미세세공과 거대세공이 주로 발달한 흡착제의 대표적인 등온선 형태이다(Lee 등, 2001). Fig. 3의 세공분포에서 확인한 결과와 같이 SAU는 10 Å 이하의 미세세공과 500 Å 이상의 거대세공이 발달해 있는 결과이며, 거대세공은 성형 시 형성된 흡착제의 표면에 있는 기공인 것으로 사료되었다. SAK는 상대압력 0.7까지는 흡착량이 서서히 증가하며, 흡착이 이루어진 후 상대압력 증가에도 불구하고

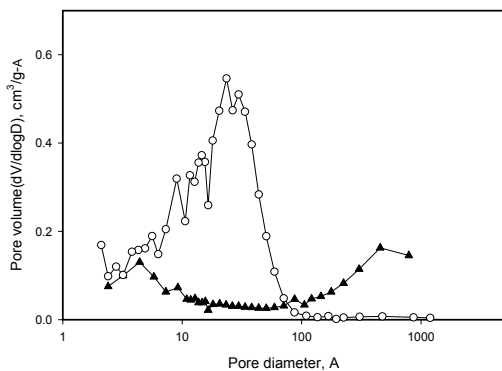


Fig. 3. Pore size distributions measured by BET analysis for SAU and SAK: (▲) SAU, (○) SAK.

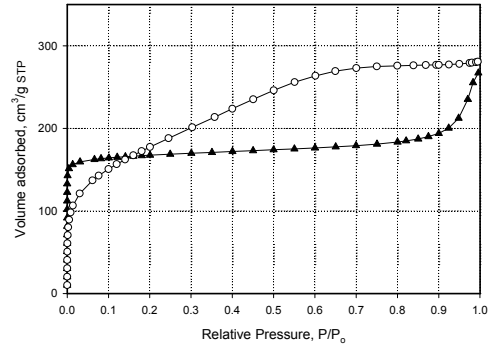


Fig. 4. Adsorption isotherms of nitrogen at 77 K for SAU and SAK: (▲) SAU, (○) SAK.

고 더 이상의 흡착량 증가는 볼 수 없었다. 이것은 중간세공이 주로 발달한 흡착제의 대표적인 등온선 형태이며 Fig. 3의 세공분포에서 세공의 크기와의 관계를 확인 할 수 있었다.

3.2. 수증기의 흡착특성 비교

SAU와 SAK의 수증기 흡착에 따른 흡착특성을 고찰하기 위해 SAU와 SAK의 파과곡선을 Fig. 5에 비교하였다. 파과실험은 온도 25 °C에서 농도 50% R.H.(15,360 ppmv)인 수증기를 유량 1 L/min으로 흡착층 20 g에 연속적으로 흡착시켜 고찰하였다.

SAK는 파과시간(초기농도의 10%)이 100분 정도인 것에 비해 SAU는 500분 정도로 매우 길었다. 파과곡선에서 SAK는 수증기 흡착능이 SAU에 비해 많이 떨어진다는 것을 알 수 있었다. 파과곡선의 면적값으로 구한 수증기 포화흡착량은 SAK가 173 mg/g이고, SAU는 323 mg/g으로 측정되었다. 두 흡착제가 비슷한 구성성분으로 되어있고 비슷한 BET비표면적 값을 가지고 있지만 수증기 흡착량은 많은 차이가 있는 것을 알 수 있었다. 이것은 세공분포의 차이 때문으로 사료되었다. 물 분자는 직경이 2.3 Å(Naono 등, 1993)

Table 2. Characteristics of adsorbents

Adsorbent	Maker	Surface area			Total pore volume $V_T, \text{cm}^3/\text{g}$	Average pore diameter $D_p, \text{Å}$
		$S_{\text{BET}}, \text{m}^2/\text{g}$	$S_{\text{MIC}}, \text{m}^2/\text{g}$	$S_{\text{EXT}}, \text{m}^2/\text{g}$		
SAU	UOP, U.S.A.	559	488	71	0.413	29.0
SAK	Kyungnam, Korea	641	56	585	0.434	27.0

정도이므로 수증기 분자의 흡착은 이 직경보다 조금 큰 세공에 주로 흡착될 것으로 판단된다. 그리고 균일한 기공을 갖는 흡착제일수록 입자 내의 확산이 빠르고 흡착능력이 우수하며, 선택흡착이 가능하기 때문에 입자 내부에 5 Å 부근의 미세세공이 상대적으로 많이 발달해 있는 SAU는 수증기를 잘 흡착할 수 있을 것으로 사료되었다(Allen, 1990). 반면, SAK는 10~100 Å 사이의 세공이 상대적으로 많이 발달하여 수증기 흡착에는 SAU 보다 적합하지 않은 것으로 판단되었다.

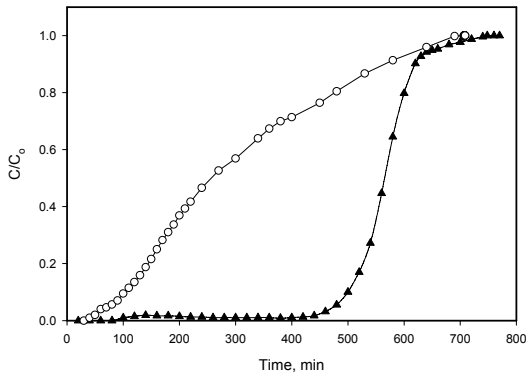


Fig. 5. Comparison of breakthrough curve of water vapor on SAU and SAK at 25 °C: (▲) SAU, (○) SAK (water vapor concentration, 15,360 ppmv; adsorbent amount, 20 g; flow rate, 1 L/min).

3.3. Acetone 증기의 흡착특성 비교

Acetone 증기의 농도변화에 따른 SAU와 SAK의 흡착특성의 변화를 고찰하기 위하여 흡착실험에 의한 파과곡선을 Fig. 6에 비교하였다. 파과실험은 온도 25 °C에서 acetone 증기의 농도를 2,000 ppm, 4,000 ppm, 그리고 7,000 ppm로 변화시키며 유량은 1 L/min으로 흡착층 20 g에 연속적으로 흡착시켜 고찰하였다.

Fig. 6(a)의 SAU 파과곡선에서 SAU의 파과시간은 acetone 증기의 농도 증가에 따라 90~270분 사이로 나타났고, Fig. 6(b)의 SAK 파과곡선에서 SAK의 파과시간은 acetone 증기의 농도 증가에 따라 90~250분 사이로 비슷하게 나타났다. SAU와 SAK의 acetone 증기 파과시간은 농도에 반비례하는 경향을 보였다. SAK는 실험 농도 범위에서 파과곡선의 기울기 변화가 거의 없었으나 SAU는 농도가 증가함에 따라 파과곡선의 기울기가 증가한 것을 볼 수 있었다. Acetone 증기농도 2,000 ppmv의 파과곡선을 흡착제 별로 비교해 보면, SAK의 파과시간은 250분, SAU는 270분으로 큰 차이가 없었지만, 파과점 이후 포화될 때까지의 시간은 SAK가 300분, SAU 500분으로 큰 시간차이가 있었다. 이것은 흡착제의 세공분포에 따른 차이로 사료되었다. Acetone의 분자직경은 4.3 Å 정도로 이 크기보다 작은 기공들로 이루어진 영역의 표면에 흡착되기는 어려울 것으로 판단된다. 활성탄을 사용하여 acetone 증기의 흡착량과 특정 세공영역의 표

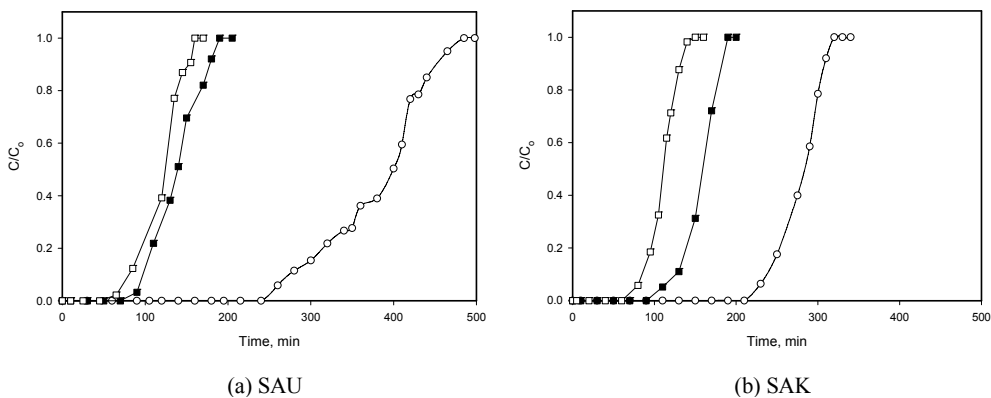


Fig. 6. Comparison of breakthrough curve of acetone vapor according to concentration on SAU (a) and SAK (b) at 25 °C: (○) 2,000 ppmv, (■) 4,000 ppmv, (□) 7,000 ppmv (acetone vapor concentration, 2,000~7,000 ppmv; adsorbent amount, 20 g; flow rate, 1 L/min).

면적과의 상관관계 연구에서 직경 10 Å 이하의 세공 영역에서 비교적 잘 흡착된 것으로 알려져 있다(Lee 등, 2005a). 10 Å 이하는 SAU가 잘 발달되어 있지만 5~10 Å 부근이 상대적으로 잘 발달된 SAK가 acetone 증기의 흡착에 더 적합한 것으로 사료되었다.

3.4. Toluene 증기의 흡착특성 비교

Toluene 증기의 농도변화에 따른 SAU와 SAK의 흡착특성의 변화를 고찰하기 위하여 흡착실험에 의한 파과곡선을 Fig. 7에 비교하였다. 파과실험은 온도 25 °C에서 toluene 증기의 농도를 3,000 ppmv, 7,700 ppmv, 그리고 12,000 ppmv로 변화시키며 유량은 1 L/min으로 흡착층 20 g에 연속적으로 흡착시켜 고찰하였다.

Toluene 증기의 농도가 클수록 곡선의 기울기가 크고 파과시간이 짧게 나타났으며, 각각의 농도에서 SAK가 SAU에 비해 파과시간이 상대적으로 길게 나타났다. Toluene 증기의 농도 증가에 따른 SAU의 파과시간 차이는 SAK에 비해 매우 미미하였다. Toluene은 분자직경이 5.9~8.38 Å 범위이므로 이 크기보다 작은 기공들로 이루어진 영역의 표면에 흡착되기는 어려운 것으로 알려져 있다(Lee 등, 2005b). 흡착제 종류에 관계없이 toluene 증기의 유입농도가 높을수록 파과시간은 빨랐으며, 같은 농도일 때 흡착제 SAK의 파과시간이 흡착제 SAU보다 약 2배 정도 길게 나타났다. 이것은 SAK의 비표면적이 SAU보다 약 15%

크고, SAK가 SAU보다 중간세공이 더 많이 발달된 결과로 사료되었다. SAK의 세공부피가 SAU에 비해 조금 크지만, 직경 10~100 Å 사이의 세공이 SAU보다 잘 발달되어 있어 toluene 증기를 잘 흡착한 결과로 판단되었다. 이 결과는 제올라이트를 사용하여 toluene 증기의 흡착량과 특정 세공영역의 표면적과의 상관관계 연구에서 직경 15 Å 이상의 세공영역에서 비교적 잘 흡착된 것과 같은 결과로 사료되었다(Lee 등, 2005b).

3.5. 평형흡착량 비교

흡착제의 종류와 흡착질의 종류에 따른 흡착특성의 차이를 평형흡착량 차이로 비교해 보았다. 흡착제 SAU와 SAK를 사용하여 수증기, acetone 증기, 그리고 toluene 증기의 상대적인 평형흡착량 차이를 Fig. 8에 비교하였다. 흡착실험은 온도 25 °C에서 수증기 농도는 15,360 ppmv, acetone 증기 농도는 4,000 ppmv, toluene 증기 농도는 7,700 ppmv로 각각 조절하고 유량은 1L/min으로 하여 흡착층 20 g에 연속적으로 흡착시켜 고찰하였다.

수증기의 평형흡착량은 SAU가 SAK에 비해 많은 반면, acetone 증기와 toluene 증기의 흡착량은 SAU가 SAK보다 작게 나타났다. 분자직경이 2.3 Å 정도로 알려져 있는 수증기는 흡착제 내부에 5 Å 부근의 미세세공이 SAK에 비해 상대적으로 많이 발달해 있는 SAU에 잘 흡착되었고, 분자직경은 4.3 Å 정도로

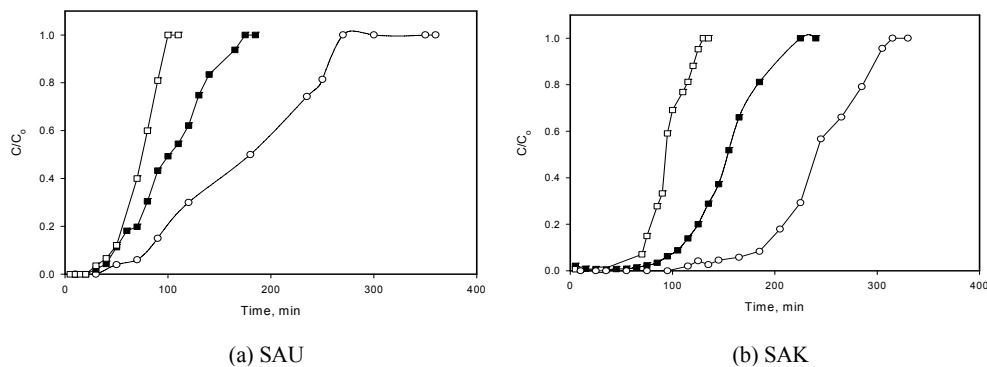


Fig. 7. Breakthrough curve of toluene vapor according to concentration on SAU (a) and SAK (b) at 25 °C: (○) 3,000 ppmv, (■) 7,700 ppmv, (□) 12,000 ppmv (toluene vapor concentration, 3,000~12,000 ppmv; adsorbent amount, 20 g; flow rate, 1 L/min).

알려져 있는 acetone 증기는 5~10 Å 부근이 SAU에 비해 상대적으로 잘 발달된 SAK에 잘 흡착되었으며 분자직경이 5.9~8.38 Å 범위로 알려져 있는 toluene 증기는 10~100 Å 사이의 세공이 SAU 보다 상대적으로 잘 발달되어 있는 SAK에 잘 흡착되는 것을 알 수 있었다.

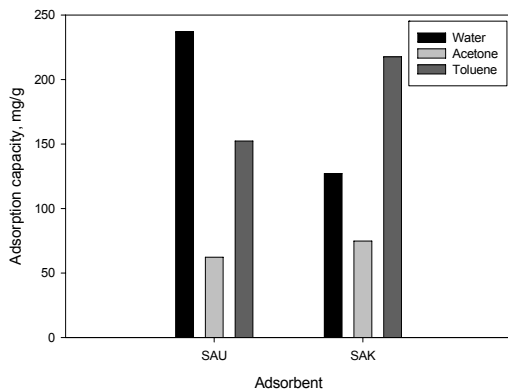


Fig. 8. Comparison of equilibrium adsorption capacity of water vapor, acetone vapor, and toluene vapor on SAU and SAK at 25 °C (water vapor concentration, 15,360 ppmv; acetone vapor concentration, 4,000 ppmv; toluene vapor concentration, 7,700 ppmv; adsorbent amount, 20 g; flow rate, 1 L/min).

4. 결론

2종류의 흡착제와 3종류의 흡착질을 사용하여 흡착제와 흡착질의 특성에 따른 흡착특성의 차이를 평형흡착량과 흡착제의 특정 세공영역과의 관계를 비교해 보았다. 흡착제는 세공구조가 매우 다르지만 비슷한 성분으로 제조된 무기계 흡착제인 제올라이트 13X와 실리카-알루미나를 사용하고 흡착질은 서로 특성이 다른 수증기, acetone 증기, 그리고 toluene 증기 3가지 흡착질을 사용하였다. 수증기 흡착은 입자 내부에 5 Å 부근의 미세세공이 상대적으로 많이 발달해 있는 SAU가 10~100 Å 사이의 세공이 상대적으로 많이 발달한 SAK보다 적합하였다. Acetone 흡착은 5~10 Å 부근이 상대적으로 잘 발달된 SAK가 10 Å 이하가 잘 발달되어 있는 SAU보다 적합하였다. Toluene 흡착은 전체적으로 직경 10~100 Å 사이의 세공이 잘 발달되어 있는 SAK가 SAU 보다 적합하였다. 흡

착질의 흡착량은 흡착제의 내부와 표면에 생성되어 있는 특정 세공영역의 표면적과 밀접한 관계가 있는 반면 micro area(S_{MIC})와 external surface area(S_{EXT})에 따른 차이는 구별하기 어려웠다.

감사의 글

본 논문은 기본적인 연구를 수행하는데 도움을 받은 환경부 차세대핵심환경기술개발사업(과제번호: 012-061-046)과 이를 바탕으로 응용 수행된 지식경제부 기술혁신사업 중 자원순환 및 산업에너지기술개발보급사업(과제번호: 20105020200020)의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 전학제, 1995, 촉매개론, 한림원.
 임평, 2004, 흡착공학과 과학, 두양사.
 김영철, 2003, 촉매 첫걸음, 전남대학교출판부.
 Allen, T., 1990, Particle Size Measurement, 4th ed., Chapman & Hall, London, 547-628.
 Ahn, H. W., Park, J. S., Koo, K. K., Lee, C. H., 1999, Sorption kinetics of N₂ on pelletized zeolite 4A and 5A, HWAHAK KONGHAK, 37(3), 364-372.
 Breck, D. W., 1974, Zeolite molecular sieve, John Wiley and Sons, NY.
 Khan, F. I., Ghoshal, A. K., 2000, Removal of volatile organic compound from polluted air, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13, 527-545.
 Lee, H. J., Lee, H. K., Park, G. I., Ro, S. G., Choi, H. S., Lee, Y. T., 1999, Adsorption property of water vapor on the modified natural zeolite, J. Korean Soc. Environ. Engrs, 21(4), 643-651.
 Lee, M. G., Lee, S. W., Lee, S. H., 2006a, Comparison of vapor adsorption characteristics of acetone and toluene based on polarity in activated carbon fixed-bed reactor, Korean J. Chem. Eng., 23(5), 773-778.
 Lee, S. W., Bae, S. K., Kwon, J. H., Na, Y. S., An, C. D., Yoon, Y. S., Song, S. K., 2005a, Correlations between pore structure of activated carbon and adsorption characteristics of acetone vapor, J. Korean Soc. Environ. Engrs, 27(6), 620-625.

- Lee, S. W., Bae, S. K., Kwon, J. H., Na, Y. S., An, C. D., Yoon, Y. S., Song, S. K., 2005b, Adsorption characteristics of toluene vapor according to pore structure of zeolite 5A modified with hydrochloric acid, *J. Korean Soc. Environ. Engrs*, 27(8), 807-812.
- Lee, S. W., Cheon, J. K., Park, H. J., Lee, M. G., 2008a, Adsorption characteristics of binary vapors among acetone, MEK, benzene, and toluene, *Korean J. Chem. Eng.*, 25(5), 1154-1159.
- Lee, S. W., Moon, J. C., Lee, C., H., Ryu, D. C., Choi, D. H., Ryu, B. S., Song, S. K., 2001, Analysis of pore characteristics between commercial activated carbons and domestic anthracite-based activated carbon, *J. Korean Soc. Environ. Engrs*, 23(7), 1211-1218.
- Lee, S. W., Kam, S. K., Lee, M. G., 2007, Comparison of breakthrough characteristics for binary vapors composed of acetone and toluene based on adsorption intensity in activated carbon fixed-bed reactor, *J. Ind. Eng. Chem.*, 13(6), 911-916.
- Lee, S. W., Kwon, J. H., Kang, J. H., Na, Y. S., An, C. D., Yoon, Y. S., Song, S. K., 2006b, Adsorption characteristics of toluene vapor according to pore size distribution of activated carbon, *J. Environ. Sci.*, 15(7), 695-699.
- Lee, S. W., Park, H. J., Lee, S. H., Lee, M. G., 2008b, Comparison of adsorption characteristics according to polarity difference of acetone vapor and toluene vapor on silica-alumina fixed-bed reactor, *J. Ind. Eng. Chem.*, 13, 10-17.
- Micromeritics, 1997, ASAP 2010 Manual.
- Naono, H., Hakuman, M., 1993, Analysis of porous texture by means of water vapor adsorption isotherm with particular attention to lower limit of hysteresis loop, *J. Colloid Interface Sci.*, 158, 19-26.