

석탄비산재로부터 합성한 제올라이트의 SO₂ 흡착특성

김성수* · 이창한

부산가톨릭대학교 환경행정학과
(2012년 2월 13일 접수; 2012년 4월 9일 수정; 2012년 5월 14일 채택)

Adsorption of SO₂ by Zeolite Synthesized from Coal Fly Ash

Seong-Soo Kim*, Chang-Han Lee

Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea
(Manuscript received 13 February, 2012; revised 9 April, 2012; accepted 14 May, 2012)

Abstract

Zeolite 4A was synthesized by fusion method from coal fly ash discharged at the thermal power plants. The synthesized zeolite(FAZ) was characterized through particle size analyzer, XRD, XRF and SEM. N₂ adsorption-desorption measurement was used to examine surface and pore structures. The adsorption experiments were carried out under dynamic conditions of trace SO₂ in N₂ to investigate SO₂ adsorption capacity of FAZ. The experiments were conducted to characterize the breakthrough characteristics of SO₂ in a fixed bed under different operating conditions including temperature(50-125 °C), concentration of SO₂(3000-10000 ppm) and FAZ with 4 kinds of commercial zeolite. The adsorption capacity of FAZ was **53.84 mgSO₂/g adsorbent**, larger than that of the same type commercial zeolite(WK4A).

Key Words : Fly-ash, Zeolite, SO₂, Adsorption

1. 서론

석유화학산업에서 에너지 소비는 점차 증가되고 있는 추세이며, 이러한 에너지 수요를 대부분 화력 및 원자력 발전으로 충당하고 있다. 화력발전은 원료인 석탄의 약 10~20%가 비산재, 미연재 및 바닥재로 발생한다. 비산재(fly ash)는 미분탄 연소과정에서 발생하는 석탄재 중 마지막으로 집진기에서 포집된 것을 말한다.

비산재의 주성분은 SiO₂와 Al₂O₃가 60%를 이루고 있으며, 그 외에 Fe₂O₃, CaO, MgO 등 금속산화물과

미연탄소분을 포함하고 있다. 미연탄소분은 소각조건에 따라 함량이 달라지며 일반적으로 10% 이내로 알려져 있다(이, 2010).

제올라이트는 규소, 알루미늄, 산소로 이루어진 결정성 알루미늄실리케이트의 총칭으로서 구성성분을 SiO₂와 Al₂O₃로 표시하기도 한다. 제올라이트는 넓은 표면적과 우수한 열적 안정성을 가지며 규칙적인 결정구조를 가지고 있어 세공크기와 모양이 모두 같다. 따라서 세공크기와 흡착되는 분자의 크기에 따라서 세공 내에 흡착될 수 있는 물질이 결정되는 분자체(molecular sieving) 효과가 나타나며, 연속적인 재생이 가능하므로 폐가스로부터 SO₂의 저온회수와 산업 가스로부터 SO₂제거를 위한 흡착제로 사용되고 있다. 석탄 비산재는 제올라이트와 성분이 유사하여 국내에서 석탄연소에서 발생하는 비산재로부터 제올라이트

*Corresponding author : Seong-Soo Kim, Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea
Phone: +82-51-510-0620
E-mail: sskim@cup.ac.kr

트를 합성하여 산업공정에 이용하는 연구가 진행되고 있다(이, 2010; Hui와 Chao, 2006; Jee와 Choi, 2011; Kam 등, 2003; Lee와 Park, 2011; Murayama 등, 2002; Querol 등, 2002; Srinivasan과 Grutzeck, 1999).

주요대기오염물질의 하나인 SO_2 는 석탄 등의 연소나 산업공정에서 발생하는 비율이 전체 배출량의 83%를 차지하고 있으며 나머지는 이동오염원이나 폐기물 처리에서 배출되고 있다(환경부, 2010). 배출된 SO_2 의 대부분은 Ca이나 Na 화합물에 의한 습식공정에 의해 처리되고 있으나 폐기물 처리비용이나 SO_2 재이용 측면에서 건식법에 의한 SO_2 처리가 바람직하다.

건식법에 의한 SO_2 제어법으로는 흡착법, 원소 황으로의 환원, SO_3 로 산화 후 H_2SO_4 생산 등이 있으며, 이중 가장 간단하면서도 경제적인 것은 흡착제에 의한 SO_2 흡착이라 할 수 있다. 이 방법은 주로 상온에서 물리흡착에 의해 SO_2 상태로 흡착되고, 포화된 흡착제는 온도를 증가시키거나 압력을 낮춤으로써 SO_2 를 탈착시켜 Clause 공정을 통해 원소 황으로 재이용한다.

제올라이트의 SO_2 흡착특성을 연구한 논문으로는 Srinivasan과 Grutzeck(1999)가 비산재로부터 합성한 제올라이트의 건조조건과 SO_2 흡착사이의 상관관계를 연구하였으며, 150°C 에서 7일 동안 건조한 analcime과 sodalite를 포함하는 시료 1g당 6-7 mg의 SO_2 흡착량을 나타내었다. Querol 등(2002)은 KM과 Na-P1 제올라이트에서 20 mg SO_2/g 의 흡착용량을 보였으며, 보다 큰 세공을 가진 Na-chabazite, 4A, X 시료에서 각각 시료 1g당 100, 300, 380 mg의 비교적 큰 평형흡착량을 보였다. 그러나 이들의 제올라이트 합성과정은 고농도의 알카리용액에서 비산재속의 SiO_2 와 Al_2O_3 를 용해하는 과정을 포함하고 있어 반응시간이 오래 걸리는 비효율적인 공정이다. Suchecki 등(2004)은 400°C 에서 10시간 동안 전처리한 합성제올라이트의 흡착용량은 38 mg SO_2/g 임을 보고하였으며, Lee 등(2003)은 시약용 KA, NaA, CaA와 NaX 제올라이트 실험에서 SO_2 의 평형흡착량은 세공크기에 따라 증가하였으며 가장 큰 흡착용량을 나타낸 NaX 제올라이트에서 49.8 mg SO_2/g 의 흡착용량을 나타내었다.

본 연구는 석탄보일러에서 폐기물로 발생하는 비산재로부터 합성한 제올라이트의 SO_2 흡착제로서의

활용가능성을 검토하기 위한 연구로서 합성 제올라이트의 물성을 평가하였으며, 고정층 흡착반응기에서 합성 제올라이트와 시판되는 4종류의 제올라이트를 흡착제로 사용하여 반응기 온도와 SO_2 농도 변화에 대한 흡착실험을 행하여 흡착과과곡선을 구하고, 과과곡선의 해석으로부터 흡착용량을 계산하여 합성제올라이트의 SO_2 흡착특성을 고찰해 보고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 제올라이트의 합성

합성 제올라이트(fly ash zeolite; FAZ)는 석탄용 보일러(H사)의 전기집진기에서 발생하는 비산재를 사용하여 합성하였다. 비산재로부터 제올라이트 합성은 비산재를 800°C 에서 소성하여 미연분을 제거하고 시약급 Al_2O_3 를 첨가하여 Si/Al의 몰비를 1:1.5로 조절하고, 이 시료와 Na_2CO_3 을 1:1.2로 혼합하여 800°C 에서 1시간동안 용융시킨 후 수용액 상태에서 교반하면서 숙성 및 결정화 과정을 거쳐 제조하였다. Fig. 1에 제올라이트의 합성과정도를 도시화 하여 나타내었다.

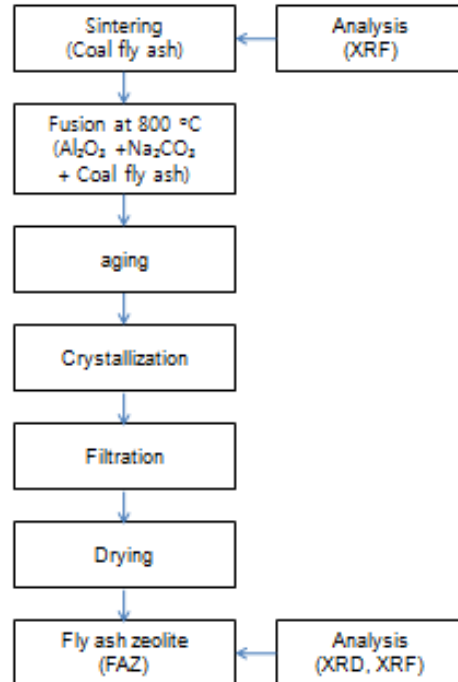


Fig. 1. Manufacturing procedure of FAZ by coal fly ash.

2.2. 흡착제

SO₂ 흡착실험에 사용한 흡착제는 FAZ와 시판되고 있는 4종류의 흡착제를 사용하였다. 상업용 제올라이트는 FAZ와 동일한 NaA type인 WK4A와 CaA type의 SM5A, 양이온이 Na인 X type의 SP13X, 그리고 제올라이트 Y 골격에서 Si/Al 몰비를 높여 산촉매 성질을 크게 향상시킨 초안정(ultrastable) 제올라이트 Y인 USY 제올라이트를 사용하였다. 합성제올라이트인 FAZ는 별도의 첨가제를 사용하지 않고 분말상태로 실험에 사용하였으며, 시료의 전처리에는 100 °C의 진공 오븐에서 72시간 건조하여 흡착제에 흡착된 가스와 수분을 제거하여 사용하였다. Table 1에 본 실험에 사용한 흡착제의 종류를 나타내었다.

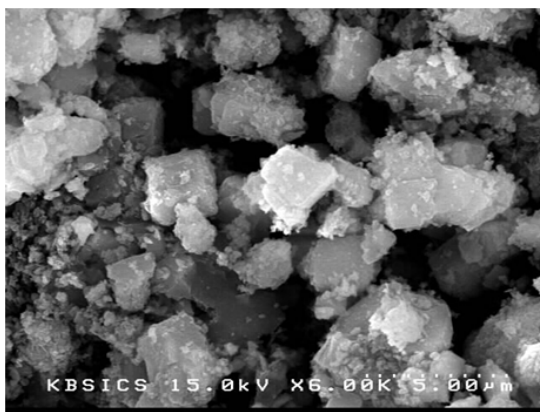
Table 1. Zeolites for SO₂ adsorbent

Adsorbents	Metrics	Average size	Type	Maker
FAZ	powder	25.23 μm	4A	synthesis
WK4A	bead	8-12 mesh (1.40-2.36 mm)	4A	Wako Co.
SM 5A	pellet	8-12 mesh (1.40-2.36 mm)	5A	Sigma-Aldrich
USY	pellet	5x7 mm	USY	Zeo Builder Co.
SP13X	bead	45-60 mesh (0.25-0.32 mm)	13X	Supelco Co.

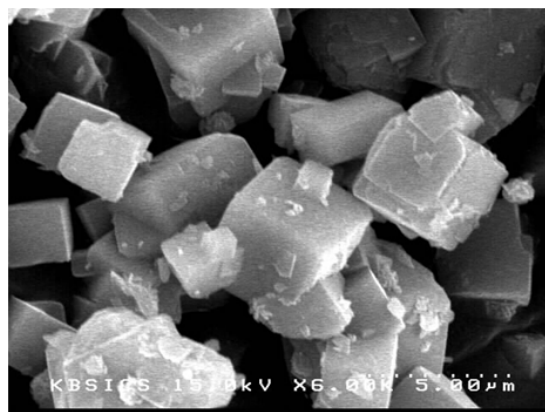
2.3. 흡착제의 물성측정

FAZ의 입도분포는 광회절식 입도분석기(HELOS & RODOS, Sympatec)로 측정하였으며, 입도분포곡선으로부터 얻어진 체적평균직경은 25.23 μm였다. FAZ와 WK4A 제올라이트의 성분은 X-선 형광분석장치(X-Ray Fluorescence; XRF: PHILIPS PW2400)를 이용하여 SiO₂와 Al₂O₃을 포함한 성분비를 분석하여 Table 2에 나타내었다. FAZ의 화학적 조성은 시약급인 WK4A에 비해 SO₃와 CaO의 함량이 높게 나타났으며, 이 결과는 연료 중의 황의 연소와 배연탈황과정에서 주입되는 CaO에 의한 영향으로 생각된다. 본 실험에서는 Si와 Al의 순도를 높이기 위하여 CaO와 SO₃를 제거하는 별도의 전처리 과정 없이 FAZ를 합성하였으며, 이러한 결과는 Fig. 3의 SEM 사진과 결정화도에서 시약급인 WK4A와 차이를 보이고 있다.

제올라이트의 결정구조는 X-선 회절장치(X-Ray Diffraction; XRD: D8 Advance, Bruker AXS)와 전자현미경(Hitachi Ltd., S-4200)을 사용하였다. Table 2의 결정화도(crystallinity)는 시료의 XRD 패턴분석을 통하여 시약급인 WK4A의 피크높이에 대한 FAZ 피크높이의 비를 백분율로 나타낸 것이며, 전자현미경 사진은 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보면 FAZ는 표면에 불순물이 다소 붙어있긴 하지만 WK4A와 같은 입방체의 모형을 하고 있어 4A형 제올라이트임을 알 수 있다.



(a) FAZ



(b) WK4A

Fig. 2. SEM image patterns of zeolites. (a) FAZ (b) WK4A

Table 2. Characterization of FAZ and WK4A zeolite

Composition (wt%)	Zeolites	
	WK4A	FAZ
SiO ₂	47.32	35.61
Al ₂ O ₃	34.87	20.07
Na ₂ O	17.66	12.89
CaO	0.07	21.39
SO ₃	0.03	6.18
Fe ₂ O ₃	0.03	1.06
MgO	-	1.14
TiO ₂	-	0.44
etc.	0.02	1.22
total	100.00	100.00
Si/Al mole ratio	1.15	1.51
Crystallinity(%)	100	54

2.4. 제올라이트의 표면분석

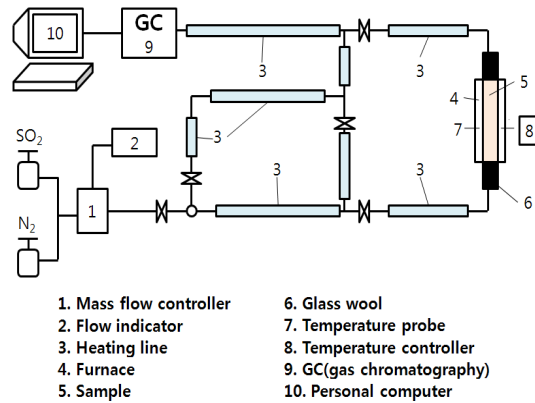
SO₂ 흡착실험에 사용한 제올라이트의 비표면적과 세공구조 및 기공체적 등을 알아보기 위해 질소 흡탈착장치(ASAP 2010, Micromeritics)로 시료를 분석하였다. 시료의 전처리에는 350 °C에서 시료의 잔류압력이 5×10^{-3} torr 이하로 될 때까지 6~7시간 탈기하였으며, 액체질소의 온도인 77K에서 상대압력의 증가에 따라 흡착등온선을 구하여 분석하였다.

2.5. SO₂ 흡착실험

내경 2 cm, 높이 30 cm의 파이렉스로 제작한 충전층 반응기에 흡착제를 충전하고 SO₂의 흡착실험을 행하였다. 흡착장치는 온도조절기가 부착된 길이 30 cm, 내경 2 cm의 관형로 내에 설치하였으며, 흡착층의 길이는 1~3 cm 정도였다. 흡착실험은 50~125 °C 범위에서 행하여졌고, 반응기 외벽에 부착한 열선(heating coil)과 흡착장치 내의 흡착제의 중간 부분에 각각 설치한 열전대를 사용하여 흡착온도를 조절하였으며, 흡착장치내의 온도분포는 측정하지 않았다.

실험용 가스는 1%(10000 ppm)의 SO₂를 포함하는 N₂혼합가스와 순수 N₂ 가스를 질량유량조절기(mass flow controller)를 사용하여 실험농도(3000~10000 ppm)와 유량(100 mL/min)으로 조절하였다. 흡착장치의 출구에서 나오는 가스의 유량은 유량계(Defender

510M, USA)를 사용하여 측정하고, SO₂농도는 6방향 밸브를 사용하여 온라인으로 조작하여 기체 크로마토그래프법(Gas chromatography; GC)을 사용하여 측정하였다. 본 실험에 사용한 GC는 HP 5890 Series 2(Hewlett Packard Co.)이며 검출기(Detector)는 열전도도(thermal conductivity) 검출기이며, 컬럼(column)은 직경 1/8 inch, 길이 10 ft의 Haysep D를 사용하고, 분석조건은 주입온도 120 °C, 컬럼과 검출기 온도 120 °C, He 기체의 유량은 60 mL/min이었다. 실험 장치도를 Fig. 3에 나타내었다.

**Fig. 3.** Schematic flow diagram of a fixed bed apparatus.

3. 결과 및 고찰

3.1. FAZ의 흡착등온선

질소 흡탈착장치로부터 구한 FAZ와 WK4A 제올라이트의 흡착등온선을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보면 FAZ와 WK4A 제올라이트의 hysteresis loop는 높은 상대압에서도 흡착상한값을 보이지 않는 H3 형태이며, 이형태의 시료는 판상입자의 집합체에서 관찰되는 것으로 slit 형태의 세공에서 나타난다(Sing 등, 1985). 두 시료 모두 상대압이 1에 근접하여도 흡착량은 급격히 증가하고 있어 mesopore와 더불어 상당량의 macropore가 존재하는 것으로 생각되며, 이러한 형태의 흡탈착등온선에서 총 세공체적을 확실하게 정의하는 것은 어렵다. 또한 FAZ의 흡착등온선이 WK4A의 위에 있는 것으로 보아 비산재로부터 합성한 FAZ 제올라이트의 흡착용량이 WK4A 보다 큰 것

을 알 수 있다.

N₂ 흡탈착등온선으로부터 구한 제올라이트의 세공 구조 분석결과를 Table 3에 나타내었다. BET 표면적은 0.05-0.3의 상대압력(P/Po)에서 흡착데이터를 사용하여 multipoint BET법에 의해 구하였으며, 세공체적과 평균세공경은 상대압 0.993에서 N₂ 가스 흡착부피로부터 구하였다. Table 3에 나타낸 바와 같이 FAZ, WK4A 와 USY 제올라이트는 mesopore 영역의 세공이 지배적 이었으며, SM5A와 SP13X는 평균세공경이 각각 2.35 nm와 2.11nm로 mesopore와 micropore의 경계에 있는 것으로 나타났다. BET 표면적과 세공체적도 FAZ의 값이 WK4A 보다는 큰 값으로 나타나 Fig. 4의 N₂ 흡탈착등온선의 결과와 일치하였다.

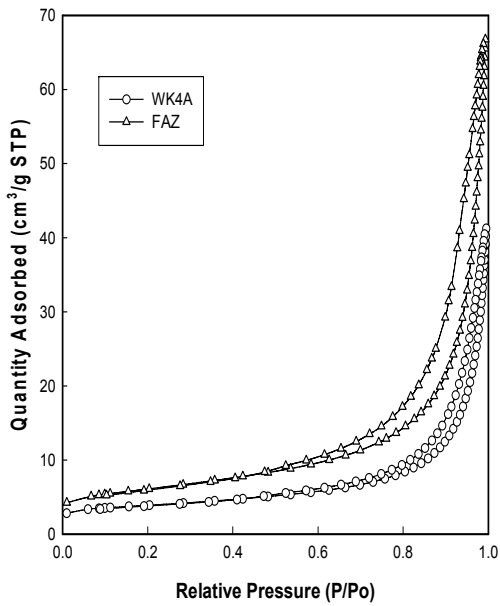


Fig. 4. N₂ adsorption-desorption isotherms of FAZ and WK4A zeolites.

Table 3. The pore structure analysis of zeolites

Zeolites	FAZ	WK4A	SM5A	USY	SP13X
Surface area ^{a)} [m ² /g]	18.10	13.88	561.04	49.21	646.30
Pore volume ^{b)} [cm ³ /g]	0.1033	0.0638	0.3291	0.2530	0.3410
Pore diameter ^{c)} [nm]	19.29	18.39	2.35	20.57	2.11

a) BET surface area; b) single point pore volume at P/Po= 0.993; c) BJH desorption average pore diameter

3.2. SO₂ 흡착실험

고정층 흡착실험으로부터 얻어지는 파과곡선에서 실험시간까지 흡착된 흡착질의 양을 나타내는 흡착제의 흡착용량[mg adsorbate/g adsorbent]은 이론적으로 아래 식으로 구할 수 있다(Kim 등, 2010)

$$q = \frac{C_{Ao}Q}{wM_w} \left[t - \int_0^t \frac{C_A}{C_{Ao}}(t) dt \right] \quad (1)$$

여기서 q는 흡착용량을 나타내며, C_{Ao}와 C_A는 각각 반응기 입출구에서 흡착질의 농도, Q는 혼합가스 유량, w는 흡착제의 양, M_w는 흡착질의 분자량, t는 반응기 운전시간을 나타낸다.

3.2.1. 반응기 온도의 영향

FAZ 제올라이트 2 g, 혼합가스 유량 100 mL/min, SO₂ 농도 5000 ppm의 조건에서, 흡착층 온도를 50 °C, 75 °C, 100 °C, 125 °C로 변화시켜 얻은 파과곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 이들 파과곡선으로부터 식(1)을 사용하여 구한 흡착용량은 각각 25.30, 48.69, 53.84, 38.69 mg/g으로서 100 °C에서 가장 큰 흡착량을 보였으며 그 다음으로 75 °C, 125 °C, 50 °C의 순서였다. 다공질 흡착제의 흡착에서 세공 내부에서의 확산이 전체 물질전달속도를 지배할 것으로 생각되며, 표면확산이나 Knudsen 확산이 흡착속도를 결정하는 경우에는 온도증가와 함께 흡착량이 감소하나 micropore를 가진 제올라이트와 같은 흡착제의 경우 흡착질과 세공벽과의 상호작용이 강하게 일어나는 활성화 확산이 일어나면 온도증가와 함께 흡착용량이 증가한다(Clark, 1970). 그러나 125 °C의 경우 흡착용량이 오히려 감소한 것은 높은 온도에서 흡착질의 활동도가 흡착질과 흡착제 표면과의 상호작용의 한계를 벗어난 결과라고 추정된다. 이와 같은 결과는 5A 제올라이트

에서 SO_2 흡착실험을 행한 Gupta 등(2004)의 연구에서도 관찰된다. 실험 온도에서 100°C 에서의 흡착량이 가장 컸으므로 이후부터는 반응기 온도를 100°C 로 하여 실험하였다.

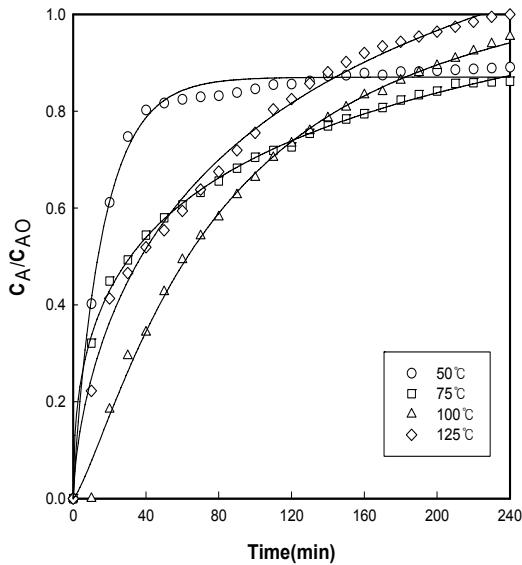


Fig. 5. Effect of adsorption temperature on the breakthrough curves of SO_2 in FAZ zeolites ($w=2\text{g}$, $Q=100\text{mL}/\text{min}$, $C_{A0}=5000\text{ppm}$).

3.2.2. SO_2 농도 변화

SO_2 유입농도에 따른 흡착특성의 영향을 알아보기 위해 FAZ 제올라이트 2g , 혼합가스 유량 $100\text{mL}/\text{min}$, 흡착층 온도 100°C 에서 SO_2 농도를 3000, 5000, 8000, 10000 ppm으로 조절하여 실험한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. SO_2 농도가 증가할수록 파과곡선의 기울기가 증가하고 있어 흡착제가 포화에 도달하는 시간이 짧아짐을 알 수 있으나 실험시간인 240분 동안 식(1)에서 구한 흡착제의 흡착용량은 유입농도 증가에 따라 각각 43.07, 53.84, 63.24, 69.32 $\text{mgSO}_2/\text{gFAZ}$ 으로 증가하였다. 이는 흡착질의 농도가 높을수록 분압이 증가하여 FAZ 세공으로의 확산속도와 흡착속도가 증가하게 되므로 흡착이 그만큼 빠르게 진행되어 평형에 도달하는 시간이 짧아지기 때문으로 생각된다. 흡착질의 농도가 증가함에 따라 흡착제의 흡착용량이 증가하는 것은 물질전달의 driving force인 농도차가 증가하기 때문이다(Lee 등, 2006).

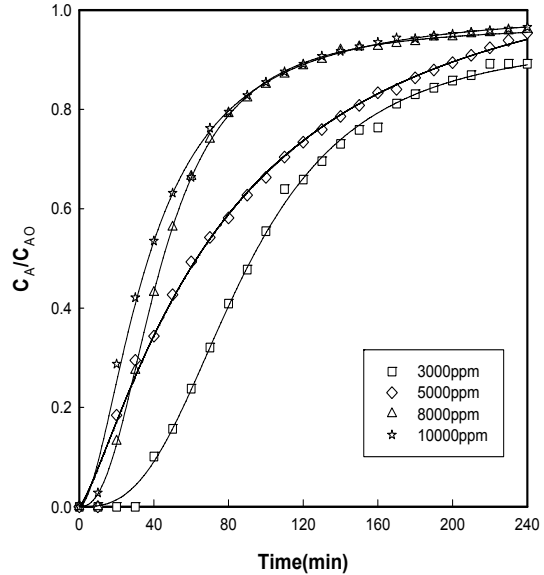


Fig. 6. Concentration effects on the breakthrough curves of SO_2 in FAZ zeolites ($w=2\text{g}$, $T=100^\circ\text{C}$, $Q=100\text{mL}/\text{min}$).

3.2.3. 흡착제의 종류에 따른 영향

흡착제 종류에 따른 SO_2 가스의 흡착용량을 알아보기 위해 흡착제 량 2g , 혼합가스 유량 $100\text{mL}/\text{min}$, 농도 5000ppm , 반응기 온도 100°C 에서 본 실험에 사용한 제올라이트 FAZ, WK4A, SP13X, USY, SM5A의 파과곡선을 Fig. 7에 나타내었다.

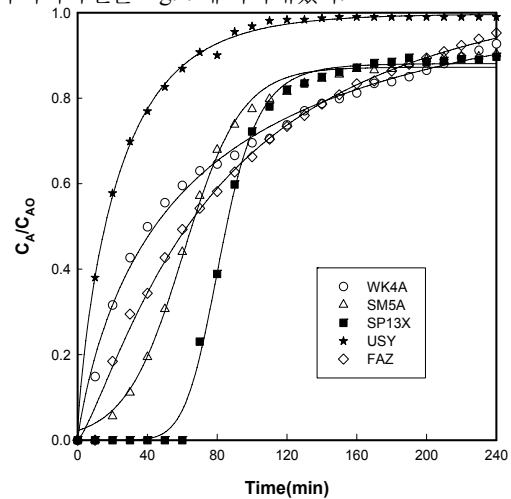


Fig. 7. Effect of adsorbents on the breakthrough curves of SO_2 ($w=2\text{g}$, $T=100^\circ\text{C}$, $Q=100\text{mL}/\text{min}$, $C_{A0}=5000\text{ppm}$).

Fig. 7의 흡착 파괴곡선을 그래프 작성과 통계분석을 하는 대표적인 공학용 소프트웨어인 Sigma plot에 의한 회귀분석법으로 C_A/C_{A0} 를 구하여 식 (1)에 의해 흡착용량을 계산하여 Fig. 8에 나타내었다. Micropore가 발달되어 있어 넓은 표면적을 가진 SP13X의 흡착용량이 67.27 mg/g 으로 가장 큰 것으로 나타났고 다음으로 SM5A였으며, FAZ와 WK4A는 비슷한 값을 나타내었고, USY는 17.57 mg/g으로 가장 작은 값을 보였다.

USY 제올라이트가 FAZ나 WK4A에 비해 넓은 표면적을 가지고 있고 세공체적이 큼에도 불구하고 상대적으로 적은 흡착용량을 보이는 것은 USY 제올라이트의 화학적 성질에 기인하는 것으로 생각된다. USY 제올라이트는 HY제올라이트를 고온에서 수증기로 처리하여 골격 밖으로 빠져나온 Al을 산으로 용출시켜 Si/Al 몰비를 증가시킨 것이므로(서곤, 2005) 강한 산점이 많아 산세기가 증대되므로 분해반응에서는 촉매활성이 증가하나 산성가스인 SO₂와의 친화력에는 부정적인 영향을 미치는 것으로 생각된다.

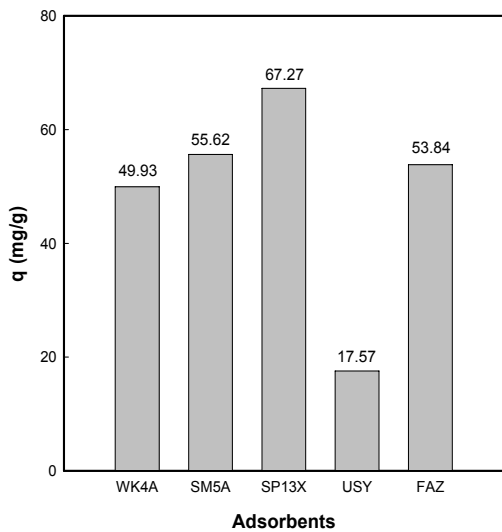


Fig. 8. SO₂ adsorption capacity of zeolites(w=2g, T=100 °C, Q=100mL/min, C_{A0}=5000ppm).

흡착제의 SO₂ 흡착용량을 나타내는 Fig. 8의 결과로부터 석탄비산재로 합성한 FAZ 제올라이트의 흡착용량이 53.84 mg/g 으로서 동일한 4A형인 WK4A보

다 큰 값으로 나타나 합성 제올라이트의 SO₂ 흡착제로서의 사용가능성을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 국내 H사의 석탄보일러에서 폐기물로 발생하는 비산재로부터 제올라이트를 합성하여 제올라이트의 물리화학적 특성을 평가하고 SO₂ 흡착실험을 행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

불순물 제거를 위한 별도의 전처리 과정 없이 석탄비산재로부터 합성한 제올라이트는 Si/Al 비가 1.51인 4A형 이었으며, 상용 제올라이트를 기준으로 결정화도는 54%였다.

N₂가스 흡탈착법으로 77K에서 측정한 합성 제올라이트의 hysteresis loop는 H3형태로서 slit 형태의 mesopore가 지배적인 것으로 나타났으며, BET표면적과 평균세공경은 각각 18.10 m²/g과 19.29 nm로서 동일 타입의 시판 제올라이트보다 커거나 대등한 값을 보였다.

합성제올라이트를 흡착제로 사용한 고정층 흡착반응기에서 50-125 °C의 온도변화에 따른 흡착제의 흡착용량은 100 °C에서 가장 큰 값을 나타내었으며, 그 다음으로 75 °C, 125 °C, 50 °C의 순서였다.

흡착제 2g, 반응기온도 100 °C, SO₂ 농도 5000ppm의 조건에서 흡착제의 흡착용량은 SP13X>SM5A>FAZ>WK4A>USY 순서로 나타났으며, 합성제올라이트의 흡착용량, 53.84 mg/g은 동일 타입의 시판되고 있는 흡착제(WK4A)보다 우수한 것으로 나타나 합성제올라이트의 SO₂ 흡착제로서의 사용가능성을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 부산가톨릭대학교 교내연구비에 의하여 연구되었으며, 학교의 연구비 지원에 감사드립니다. 실험을 도와준 장경수와 김동 군에게도 고마운 마음을 전합니다.

참고문헌

- 서곤, 2005, 제올라이트 첫걸음, 전남대학교출판부, 34-54.
- 이창한, 2010, 울산공단 내 발생 비산재를 이용한 합성촉매의 자원순환형 네트워크 구축 최종보고서, 부산가톨릭대학교 산학협력단.
- 환경부, 2010, 환경통계연감, 제 23권.
- Clark, A., 1970, The theory of adsorption and catalysis, Academic Press, 272-279.
- Gupta, A., Gaur, V., Verma, N., 2004, Breakthrough analysis for adsorption of sulfur-dioxide over zeolites, Chemical Engineering and Processing, 43, 9-22.
- Hui, K. S., Chao, C. Y. H., 2006, Effects of step-change of synthesis temperature on synthesis of zeolite 4A from coal fly ash, Microporous and Mesoporous Materials, 88, 145-151.
- Jee, J. D., Choi, K. Y., 2011, Synthesis of Zeolite A from Coal Fly Ash, Appl. Chem. Eng., 22, 214-218.
- Kam, S. K., Lee, D. W., Moon, M. J., Lee, M. G., 2003, Removal Characteristics of Strontium and Cesium Ions by Zeolite Synthesized from Fly Ash, J. of the Environmental Sciences, 12, 1061-1069.
- Kim, S. S., Lee, C. H., Park, S. W., 2010, Adsorption Analysis of VOCs of Zeolite Synthesized by Coal Fly Ash in a Fixed-bed Adsorber, Korean Chem. Eng. Res., 48, 784-790.
- Lee, C. H., Park, J. W., 2011, Synthesis of Zeolite Using Discharged Fly Ash in an Industrial Complex in Ulsan, J. of KSEE, 33, 301-306.
- Lee, J. H., Kim, J. G., Yang, H. C., Kim, J. H., Lee, J. K., 2003, Adsorption characteristics of sulfur dioxide on pellet type zeolites, HWAHAK KONGHAK, 41, 129-133.
- Lee, M. G., Lee, S. W., Lee, S. H., 2006, Comparison of vapor adsorption characteristics of acetone and toluene based on polarity in activated carbon fixed-bed reactor, Korean J. Chem. Eng., 23, 773-778.
- Murayama, N., Yamamoto, H., Shibata, J., 2002, Mechanism of zeolite synthesis from coal fly ash by alkali hydrothermal reaction, Int. J. Miner. Process, 46, 1-17.
- Querol, X., Moreno, N., Umaña, J. C., Alastuey, A., Hernández, E., López-Soler, A., Plana, F., 2002, Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview, International J. of Coal Geology, 50, 413-423.
- Sing, K. S. W., Everett, D. H., Haul, R. A. W., Moscou, L., Pierotti, R.A., Rouquérol, J., Siemieniowska, T., 1985, Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity, Pure & Appl. Chem., 57, 603-619.
- Srinivasan, A., Grutzeck, M. W., 1999, The adsorption of SO₂ by zeolites synthesized from fly ash, Environ. Sci. Technol., 33, 1464-1469.
- Suchocki, T. T., Walek, T., Banasik, M., 2004, Fly ash zeolite as sulfur dioxide adsorbents, Polish J. of Environmental Studies, 13, 723-727.