

질산을 이용한 Fly Ash 흡착제의 표면 활성화에 따른 VOCs 흡착 특성의 변화

The Change of Adsorption Characteristics for VOCs by HNO₃ Activation of Adsorbent Prepared from MSWI Fly Ash

심 춘 희 · 이 우 근*

강원대학교 환경공학과

(2005년 5월 3일 접수, 2005년 7월 28일 채택)

Choon-Hee Shim and Woo-Keun Lee*

Department of Environmental Engineering, Graduate School, Kangwon National University

(Received 3 May 2005, accepted 28 July 2005)

Abstract

The objective of this research is to improve adsorption efficiency of adsorbent made from MSWI (Municipal Solid Waste Incinerator) fly ash by HNO₃ activation. The acidity and the basicity were determined by Boehm's method and the surface structure was studied by BET method with N₂ adsorption. The adsorption properties were investigated with benzene and MEK (Methylethylketone). HNO₃ activation can modify the surface property of an adsorbent such as specific surface area, pore volume, and functional group. According to the results, the specific surface area of the adsorbent was increased from 309.2 m²/g to 553.2 m²/g by activation. Also oxygen-containing functional groups were formed on it.

Key words : MSWI fly ash, HNO₃ activation, Benzene and MEK adsorption

1. 서 론

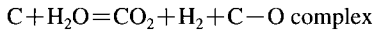
흡착제의 특성은 비표면적이나 세공용적, 세공의 크기와 같은 물리적인 특성과 흡착제 표면에 존재하는 작용그룹과 같은 표면 화학적 특성으로 나누어 볼 수 있다. 흡착제의 물리적인 특성에만 의존한 흡착 현상은 흡착제 표면과 흡착질 사이에 전자의 공유가 없으므로 흡착질은 흡착제에 일시적으로 붙잡

힌 상태에 놓이게 되어 쉽게 탈착되는 단점이 있어 흡착제 표면을 화학적으로 처리한 많은 연구 결과들이 발표되었다. 탄소계 흡착제를 화학적으로 처리하면 표면의 화학적 성질과 구조적 성질을 변화시킬 수 있고, 처리된 흡착제는 각종의 유해가스나 악취 성분 등 보다 넓은 활용범위에 적용, 혹은 흡착제의 흡착특성이 보다 향상되기 때문에 흡착제에 특수한 물질을 침착하거나 표면을 개질하는 연구들이 수행되어왔다 (박병렬, 2003; Moreno-castilla *et al.*, 1998; 이원희, 1996; King, 1993; Adams *et al.*, 1988; Pierce *et al.*, 1951).

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)33-250-6355, E-mail : woklee@kangwon.ac.kr

활성 탄소 흡착제는 상온 상태에서 공기와 수분의 존재만으로도 탄소의 산화(Adams *et al.*, 1988)가 일어나는 것으로 알려져 있다. King (1993)은 공기에 노출시킨 sugar carbon으로부터 옥살산을 추출하는 것으로 탄소의 산화를 증명하였고, Pierce *et al.* (1951)는 이 과정을 아래와 같이 가정하였다.



산화에 의해 생성되는 대표적인 C-O complex에는 carboxyl, lactone, phenol 및 carbonyl 그룹 등을 들 수 있으며, carboxyl, lactone, phenol 그룹은 산성 그룹으로 분류된다. 산화 처리로 형성된 carboxyl, lactone, phenol 그룹과 같은 산성 작용 그룹은 친수성이고 불분자와 같은 친수성 흡착질에 화학흡착의 흡착점을 제공한다. 따라서 표면의 작용그룹이 증가하게 됨에 따라 표면은 산성의 친수성을 띠게 된다(박병렬, 2003). 표면의 화학적 특성 변화는 흡착질에 따라 흡착 강도의 강화 및 흡착 용량의 증가 등 흡착능을 개선시킬 수 있다. 특히 소각 비산재로 제조한 흡착제(심영숙 등, 2003)처럼 비표면적이 크게 발달되지 않은 흡착제의 경우에 표면의 화학적 특성에 따른 영향이 더 크게 작용하는 것으로 알려져 있지만(이원희, 1996) 아직 소각 비산재로 제조한 흡착제의 표면 활성화에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있어 이에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구는 소각비산재로 제조한 흡착제의 흡착능 개선을 위하여 가장 많은 산성 작용그룹을 생성시키는 것으로 알려진(Moreno-castilla *et al.*, 1998) HNO₃로 활성화를 수행하여 흡착제의 물리·화학적 특성 변화를 살펴보고자하였다. 또한 활성화에 따른 흡착제의 특성 변화가 흡착 특성에 미치는 영향을 benzene과 MEK 흡착 실험을 통하여 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 흡착제의 제조

소각 비산재를 이용하여 흡착제를 제조하는 방법은 이전에 수행된 구의 연구 결과(심영숙 등, 2003)를 따르고 있다. 본 실험에서 사용한 소각 비산재는 1일 처리 용량이 200 ton/day인 도시고형폐기물 소각

장에서 채취하였다. 충분한 건조를 위하여 105°C dry oven에서 24 hr 건조 시키고 150~75 μm의 입경으로 체 거름한 다음 비산재에 함유된 중금속을 제거하고 비산재의 비표면적을 증가시키기 위해 수열합성 하였다. 수열합성은 3N NaOH 용액으로 고액비 1:10, 100°C에서 12 hr 반응시켰고, 수열합성이 끝난 비산재는 pH가 7이 될 때까지 수세하여 105°C dry oven에서 24 hr동안 건조하였다(심영숙 등, 2003). 수열합성이 끝난 소각재와 150 μm 이하의 입경을 갖는 coal tar pitch, 그리고 활성화제인 K₂CO₃를 4:4:2 wt%의 비율로 혼합하고 약간의 물을 첨가하여 직경 3 mm, 길이 6 mm의 cylinder type으로 입상화 하였다. 그리고 수분이 완전히 제거되도록 105°C dry oven에서 건조한 다음 온도 조절이 가능한 전기로(USA, Lindberg)를 이용하여 N₂를 30 mL/min으로 흘려주면서 800°C에서 1 hr 동안 활성화하였다. 활성화 후 흡착제의 표면에 남아있을 활성화 약품을 제거하고 pH를 조절하기 위해 0.5 N HCl로 2 hr 동안 끓여 산세척 한 후 증류수로 수 회 세척하여 건조하였다(심영숙 등, 2003). 이렇게 소각비산재로 제조한 흡착제를 본 연구에서는 “FAA”라 명명하였다.

2.2 HNO₃ 활성화 방법

제조한 흡착제의 표면 활성화 조건은 예비실험 및 문헌 연구(Leon Y Leon *et al.*, 1992)를 통하여 선정하였다. 5 M HNO₃를 이용하여 100°C, 3 hr, S/L(Solid/Liquid) 비 1/5의 조건으로 활성화하였다. 온도 조절은 물중탕 방식을 이용하였다. 활성화가 끝난 흡착제는 증류수로 수회 세척 후 80°C vacuum dry oven에서 24 hr 동안 건조시켰다. HNO₃ 활성화를 마친 흡착제를 본 연구에서는 “FAA-N”이라고 명명하였다.

2.3 흡착제의 표면 특성 평가

2.3.1 표면 산도 및 표면 염기도 측정

표면 산도는 Boehm의 선택 중화법에 의하여 염기성 용액의 선택적인 중화 성질을 이용하였다(Park and Kim, 1999). 우선 시료를 정확히 1.0 g을 취하여 0.1 N NaOH 용액 100 mL를 가하여 밀봉시킨 다음 24 hr동안 진탕하여 여과한다. 상등액 20 mL를 취하여 0.1 N HCl 용액으로 적정하였다. 이때 지시약은 페놀프탈레인 용액을 사용하였다. 표면 산도(acidity)

값은 (1)식에 따라 구할 수 있다.

$$Acidity (meq/g) = \frac{(a-b) \times f \times N}{M} \times 1000 \quad (1)$$

여기서 a는 시료를 첨가하지 않은 0.1 N NaOH 용액 20 mL를 0.1 N의 HCl 용액으로 적정했을 때, 적정에 소모된 0.1 N HCl의 양(mL), b는 시료 첨가 후 적정에 소모된 0.1 N HCl 용액의 양(mL), f는 0.1 N HCl 용액의 factor (20°C에서 f=1.002), N은 적정에 사용된 HCl 용액의 농도(즉, N=0.1)을 나타내며, M은 실험에 사용된 시료의 양(1 g)을 의미한다.

표면 염기도의 측정도 표면산도 측정과 같은 과정에 따라 진행하였으며, 시료 첨가 용액은 0.1 N HCl로 적정용액은 0.1 N NaOH, 지시약은 메틸오렌지를 사용하였다.

2.3.2 pH 및 pHpzc

흡착제의 pH를 ASTM D-3838에 따라 측정하였다(박수진 등, 2000). 건조한 시료 0.5 g을 증류수 20 mL에 첨가하여 12 hr 이상 진탕한 후, 여과하여 pH를 측정하였다.

2.3.3 표면에 생성된 표면작용기의 확인

HNO₃ 활성화 후 생성된 산소를 함유한 작용그룹은 Boehm법을 이용하여 확인하였다. 1.0 g의 흡착제를 강도가 다른 네 종류의 0.1 N 염기용액(NaHCO₃, Na₂CO₃, NaOH, NaOC₂H₅) 100 mL가 들어 있는 250 mL 플라스크에 각각 넣고 밀봉하여 24 hr 교반하였

다. 이 용액을 membrane filter (φ=0.45 μm)로 여과시킨 후 상등액 20 mL을 취하여 0.1 N HCl로 역적정하여 식(1)에 따라 계산하였다. 생성된 각각의 작용그룹은 식(2)~(5)의 방법으로 구한다(Chiang et al., 2002).

$$NaHCO_3 \text{ 적정값} = \text{carboxyls (meq/g)} \quad (2)$$

$$Na_2CO_3 - NaHCO_3 = \text{phenols (meq/g)} \quad (3)$$

$$NaOH - Na_2CO_3 = \text{lactones (meq/g)} \quad (4)$$

$$NaOC_2H_5 - NaOH = \text{carbonyls (meq/g)} \quad (5)$$

2.3.4 비표면적 및 세공 분석

시료의 비표면적 및 세공 구조를 분석하기 위하여 BET 비표면적 측정기(ASAP 2010, USA)를 사용하여 시료를 350°C의 N₂ 분위기에서 완전히 탈기한 후 분석온도 77 K에서 질소를 사용하여 비표면적과 세공크기 등을 측정하였다. 비표면적 측정 시 N₂ 흡착이 단층영역을 벗어나는 경우에 적용되는 multi-point-BET (Brunauer-Emmet t-Teller)법을 이용, N₂ 한 분자의 단면적을 16.2Å²로 하여 계산하였다. 또한 총 세공용적과 세공의 크기 측정은 Kelvin 식을 기본으로 하여 전개한 BJH (Barrett, Johner and Halenda) method를 이용하여 계산하였다.

2.3.5 Benzene 및 MEK 흡착 특성 평가

본 연구에서는 흡착질을 비극성 물질로 Benzene, 극성 물질로 MEK를 선택하여 기상 흡착능과 연속

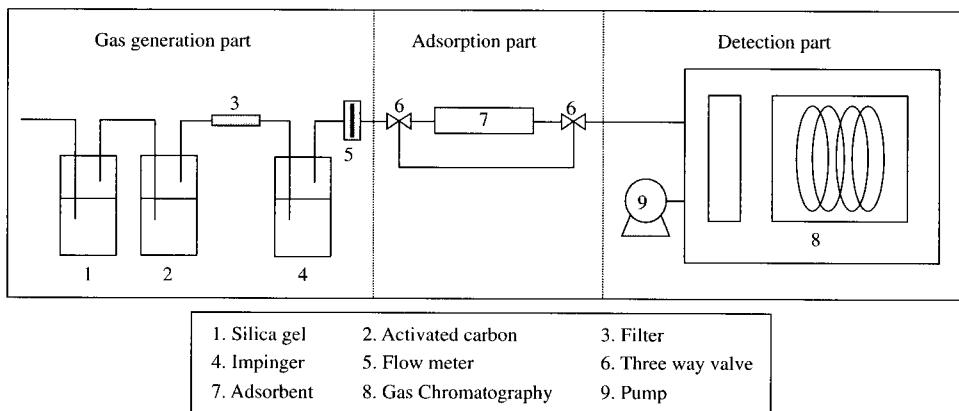


Fig. 1. Experimental apparatus for On-line adsorption.

흡착 특성을 살펴보았다. 기상 흡착능 실험은 한국공업규격의 입상활성탄 시험방법 KSM 1802 (한국공업규격, 1994)로 수행하였고, 연속 흡착 특성을 살펴보기 위하여 그림 1의 실험장치를 이용, 주입되는 흡착질의 농도를 80 ppm으로 조절하면서 상온에서 흡착 실험을 수행하였다.

흡착질의 농도는 불꽃이온화 검출기 (Flame Ionization Detector, FID)가 장착된 gas chromatography (Varian Star 3400 Cx, U.S.A)로 주기적으로 측정하여 농도가 일정해 지면 three way valve로 방향을 바꾸어 105°C에서 2시간 건조한 흡착제를 충전한 U자관을 통과하도록 하였다. 흡착이 진행되는 동안 15분 간격으로 가스농도를 분석하였다. 흡착량은 식 (6)로 구하였으며, 출구농도/입구농도 (C_o/C_i)의 비가 0.95가 될 때까지 시간에 따라 적분하여 계산 (김달한 등, 1996)하였다. 여기서 m 은 시료량 (g)이며, V 는 유량을 의미한다.

$$dW = \frac{(C_i - C_o) \times V}{m} dt \quad (6)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 HNO₃ 활성화에 따른 흡착제 표면 특성의 변화

흡착제 FAA와 FAA-N의 화학적 특성을 표 1에 나타내었다. 우선 HNO₃ 활성화 전의 FAA의 특성을 살펴보면 표면산도는 35.6 meq/g, 표면염기도 805.6 meq/g으로 표면에 염기도가 높은 것으로 나타났으며 pH는 10.1인 것으로 나타났다. 또한 산성 작용기로 분류되는 carboxyl, phenol group은 존재하지 않으며, lactone group만이 소량 존재하는 것으로 나타났다. 이것은 흡착제 제조 과정 중 800°C에서 활성화하는 동안 탄소 구조체 중 불안정한 말단 탄소 원자가 표면에서 전자쌍 주기에 의한 자기 편재화에 따라 점차 안정화 (Dimotakis *et al.*, 1995)되었을 것으로 생각된다. 이러한 표면 탄소-산소 표면의 관능기의 안정화는 약한 전자 받게 공명탄소 구조를 전자 주게 공명구조로 전환 (Dimotakis *et al.*, 1995)시켜, 그동안 표면에 존재하던 산소를 함유한 작용 그룹을 CO 및 CO₂의 형태로 방출 (박준택, 1994)시켰을 것

Table 1. Chemical characteristics of FAA and FAA-N.

	FAA	FAA-N
Acidity*	35.6	420
Basicity	805.6	100
C (%)	42.1	42.1
H (%)	0.5	1.4
O (%)	7.6	21.6
N (%)	0.2	0.6
S (%)	N.D.	N.D.
Carbonyls*	134	330
Lactones	35.6	220
Phenols	0	120
Carboxyls	0	80
pH	10.1	3.8

* unit : (meq/g)

으로 판단된다.

표면산도 및 산소를 함유한 작용그룹의 생성을 위해 흡착제를 HNO₃로 활성화한 FAA-N의 표면 특성 (표 1)을 살펴본 결과, HNO₃ 활성화로 표면산도는 420 meq/g으로 크게 증가하였고, 표면염기도는 100 meq/g으로 감소하여 pH는 3.8인 것으로 나타났다. FAA-N의 원소분석 결과를 살펴보면 FAA의 산소 함량은 7.6%였으나 HNO₃ 활성화로 FAA-N의 산소 함량은 21.6%로 2.8배 증가하였고, 산소를 함유한 작용그룹의 변화를 살펴보면 활성화 전의 FAA에는 존재하지 않던 강한 산성 그룹인 carboxyl 그룹이 80 meq/g이나 생성되었고, phenol 그룹도 120 meq/g이 생성되었으며 lactone 그룹은 220 meq/g으로 크게 증가한 것이 확인되었다.

HNO₃ 활성화는 흡착제 표면에 산성을 띠는 산소를 함유한 작용그룹을 생성시켜 표면산도를 증가시키고 표면염기도 및 pH를 감소시키는 것으로 나타났다.

3.2 흡착제의 질소 흡착·탈착 특성 및 세공 특성

표 2는 흡착제 FAA와 FAA-N의 BET 비표면적 및 세공 특성 등 물리적인 표면 특성을 나타낸 것이다. 표 2에 따르면, FAA의 비표면적이 309.2 m²/g이었던 것이 HNO₃ 활성화 후에 비표면적이 553.2 m²/g으로 1.8배 증가하였고, 총 기공 용적뿐만 아니라 미세공 용적 또한 1.7배씩 증가하였으며, 평균 세공

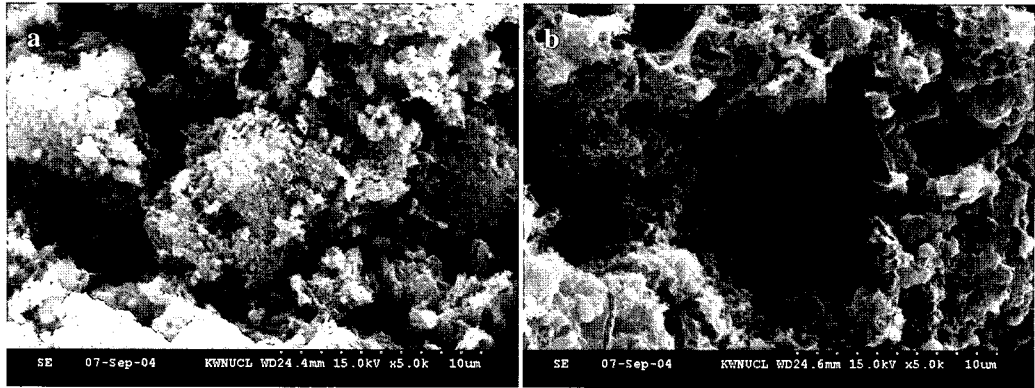


Fig. 2. SEM of micrographs ($\times 5,000$): (a) FAA, (b) FAA-N.

Table 2. Surface area and porosity of FAA and FAA-N.

	S_{BET} (m^2/g)	Total pore volume (cm^3/g)	Micro pore volume (cm^3/g)	Average pore diameter (\AA)
FAA	309.2	0.218	0.089	2.82
FAA-N	553.2	0.381	0.154	2.76

직경이 2.82\AA 에서 2.76\AA 으로 감소하는 등 미세공의 발달이 나타났는데 이것은 HNO_3 활성화로 비산재 속에 함유되어 있던 구성성분의 일부가 HNO_3 에 녹아 나와 (Nagano *et al.*, 2000) 그 빈자리가 미세공을 형성하고, 비표면적을 증가시킨 것으로 판단된다. 일반적으로 강산을 이용하여 활성화하면 기공의 파괴 및 확장이 진행되는 동시에 표면에 아직 기공으로 발달하지 못하고 남아있던 활성점 (active site)들이 기공으로 발달하는 일련의 과정이 진행 (심재운과 유승곤, 1998)되는데 HNO_3 활성화 과정에서는 전자보다는 후자의 과정이 보다 활발했을 것으로 판단된다. 그림 2는 흡착제의 표면 구조를 SEM을 통하여 5,000 배율로 각각 관찰한 것으로 (a)와는 달리 (b)는 HNO_3 후 표면에 남아 있던 잔여물들이 제거되어 깨끗해 졌고 흡착제 표면에 큰 기공 뿐 아니라 세공이 발달했음을 확인 할 수 있었다.

그림 3은 FAA와 FAA-N의 질소 흡·탈착 등온선을 나타낸 것이다. FAA의 등온선은 상대압력 (P/P₀) 0.1에서 대부분의 흡착이 일어나고, 압력의 증가에 따라 흡착량이 조금씩 증가하다가 상대압력 0.95에서 변곡점이 생길 것을 볼 수 있었으며 상대

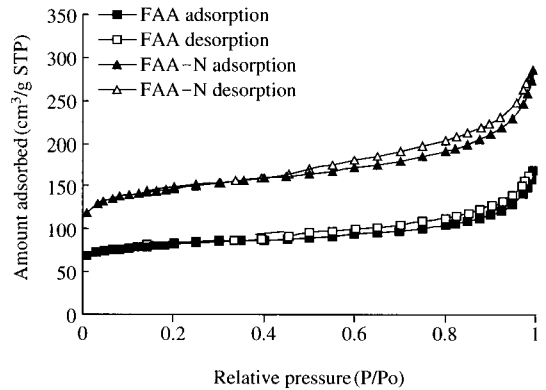


Fig. 3. N_2 adsorption-desorption isotherms on FAA and FAA-N.

압력 0.45에서 약한 이력현상이 나타났다. HNO_3 활성화에 따른 FAA-N의 질소 흡·탈착 등온선은 상대압력 0.2에서 대부분의 흡착이 일어나고 압력의 증가에 따라 흡착량이 조금씩 증가하다가 상대압력 0.9에서 변곡점이 나타나고 상대 압력 0.45 정도에서 이력현상이 나타나 FAA와 비슷한 경향을 보이지만, 압력의 증가에 따른 흡착량의 증가는 FAA보다 크게 나타나 BDDT (Brunauer, Deming, Deming and Teller)분류 (Gregg and Sing, 1982) 중 Tape IV의 형태에 가깝게 나타났다. 따라서 HNO_3 활성화로 미세공 뿐만 아니라 transition pore ($20-1000\text{\AA}$)도 생성되었음을 알 수 있었다.

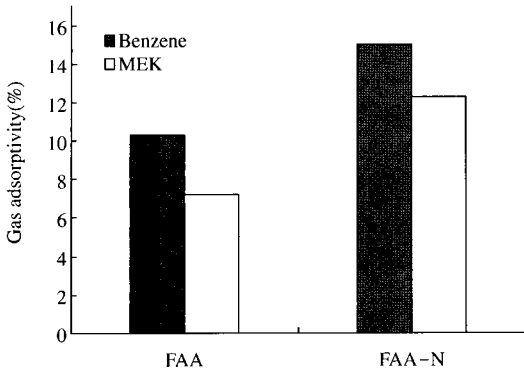


Fig. 4. Gas adsorptivity of FAA and FAA-N.

3.2 HNO₃ 활성화에 따른 흡착 특성의 변화

3.2.1 활성화에 따른 기상 흡착능의 평가

HNO₃ 활성화에 따른 흡착제의 물리·화학적 특성 변화가 benzene 및 MEK 흡착 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 기상흡착능을 평가하여 그림 4에 나타내었다. 그림 4에 따르면 FAA의 benzene 흡착능은 10.3%, MEK 흡착능은 7.2%를 나타내었고, HNO₃ 활성화 후 FAA-N은 benzene 흡착능 15%, MEK 12.3%로 활성화 후 benzene 흡착능은 4.7%, MEK 흡착능은 5.1% 증가하였고 이것은 FAA의 흡착능에 45.6, 70.8%에 해당하는 증가량으로 benzene 흡착능 보다는 MEK 흡착능의 증가량이 큰 것을 알 수 있다. 표면 활성화로 흡착제 표면에 산소를 함유한 작용그룹이 생성되면 표면 특성이 친수성으로 변하여 친수성 물질인 흡착능은 증가되고 비극성 물질의 흡착능이 저하되었다는 이전의 연구 결과(Dimotakis *et al.*, 1995)와는 반대로 benzene의 흡착능도 증가한 것으로 나타났는데, 이것은 HNO₃ 활성화로 비표면적 및 미세공이 발달하게 되어 흡착능이 오히려 증가한 것으로 판단된다. FAA-N의 Benzene 흡착능의 경우는 표면의 화학적 특성 보다는 기공의 발달에 따른 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

3.3.2 활성화에 따른 Benzene 및 MEK의 파과실험

HNO₃ 활성화에 따른 benzene 및 MEK의 파과곡선을 그림 5와 6에 나타내었다. 우선 활성화에 따른 benzene의 흡착 특성을 살펴보면(그림 5) FAA는 일반적으로 흡착탑 설계 시 사용되는 파과시간(박준

Table 3. Adsorption data of benzene and MEK on FAA and FAA-N (20°C, 55 mL/min, 80 ppm).

	Benzene		MEK	
	FAA	FAA-N	FAA	FAA-N
Time _{C₀/C_i=0.05} (min)	444.3	168	88	560.1
Time _{C₀/C_i=0.95} (min)	780	540	315	885
Adsorbed amount (mg/g) until C ₀ /C _i =0.95	497.4	289.7	188.9	638.7

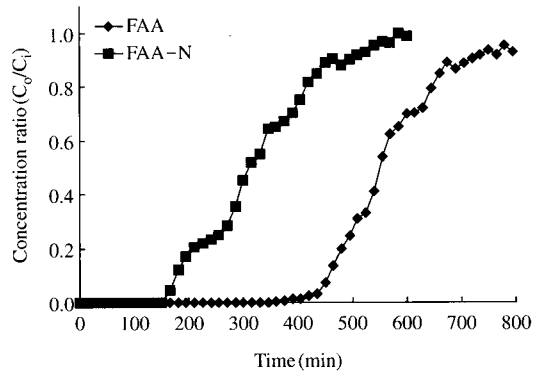


Fig. 5. The breakthrough curves of benzene for FAA and FAA-N (20°C, 55 mL/min, 80 ppm).

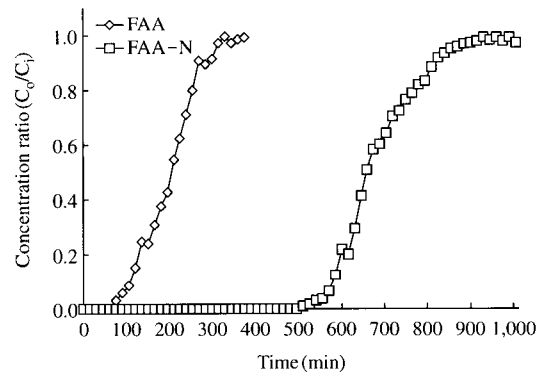


Fig. 6. The breakthrough curves of MEK for FAA and FAA-N (20°C, 55 mL/min, 80 ppm).

택, 1994)인 C₀/C_i가 0.05가 되는데 걸린 시간이 444.3 min으로 나타났고, C₀/C_i가 0.95가 되는데 걸린 시간(포화시간)은 780 min이었으나, 활성화 후 일찍 파과되기 시작하여 FAA-N의 C₀/C_i이 0.05가 되는

데 168 min이 걸렸고, 포화되는데 540 min이 걸리는 것으로 나타났으며 포화시간 ($C_0/C_1=0.95$)에 도달할 때까지 흡착된 양 (mg/g)은 FAA가 497.4 mg/g, FAA-N이 287.7 mg/g으로 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 HNO_3 활성화로 흡착제의 BET 비표면적 및 미세공 용적의 증가에 의한 benzene의 기상흡착 능력이 증가한 것과는 반대의 결과로 HNO_3 활성화로 생성된 산소를 함유한 작용그룹이 표면을 친수성으로 바꾸어 소수성 표면을 선호하는 benzene의 흡착능을 감소시킨 것 (Dimotakis *et al.*, 1995)으로 판단된다.

그림 6은 HNO_3 활성화에 따른 MEK의 파과곡선을 나타낸 것이다. MEK 흡착특성은 benzene과는 달리, HNO_3 활성화 후 흡착능이 증가하여 C_0/C_1 가 0.05가 되는 시간이 FAA는 88 min에서 315 min으로 증가하였고, C_0/C_1 가 0.95가 되는 시간은 560 min에서 885 min으로 증가하였고 포화에 도달할 때까지 흡착된 양 (mg/g)은 FAA 188.9 mg/g, FAA-N 638.7 mg/g으로 크게 증가하였다. FAA-N의 증가된 MEK 흡착량은 FAA의 benzene 흡착량 보다도 많았으며 이것은 HNO_3 활성화로 흡착제의 BET 비표면적 및 미세공 용적의 증가와 더불어 표면에 산소를 함유한 작용그룹이 표면을 친수성을 변화시켜 극성물질인 MEK의 흡착능이 증가 (Dimotakis *et al.*, 1995)시켰을 것으로 추측된다. 하지만 HNO_3 활성화로 나타난 MEK 흡착능의 증가는 흡착제의 물리적 특성의 변화에 의한 것인지, 화학적 특성의 변화에 의한 것인지 구분짓는 것은 어려우며 표면 활성화로 인한 흡착제의 화학적 특성의 변화가 흡착제에 미치는 영향을 파악하는 데에는 어려움이 있는 것으로 나타났다. 따라서 화학적 특성의 차이에 의한 흡착 특성의 변화를 살펴보기 위해서는 보다 다양한 활성화가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

소각 부산재로 제조한 흡착제를 HNO_3 로 활성화하여 물리·화학적 특성 변화뿐만 아니라 benzene 및 MEK의 흡착 특성 변화를 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 소각 부산재로 제조한 흡착제 FAA는 표면 산

도 35.6 meq/g, 표면 염기도 805.6 meq/g으로 나타났고, HNO_3 로 활성화한 흡착제 FAA-N는 표면 산도는 420 meq/g으로 증가, 표면 염기도는 100 meq/g으로 감소하였다. HNO_3 활성화로 흡착제의 표면에 산소의 함량은 7.6%에서 21.6%로 2.8배 증가하였으며, 표면에 산소를 함유한 작용 그룹의 증가가 나타났다.

2. HNO_3 활성화로 비표면적은 309.2 m^2/g 에서 553.2 m^2/g 으로 1.8배 증가 하였고, 총 기공 용적과 미세공 용적 또한 1.7배씩 증가한 것으로 나타났다.

3. HNO_3 활성화로 benzene 기상 흡착능은 10.3%에서 15%로, MEK의 기상 흡착능은 7.2%에서 12.3%로 모두 증가했지만, 연속 흡착 특성은 benzene의 흡착능은 497.4 mg/g에서 287.8 mg/g으로 감소하고 MEK의 흡착능은 188.9 mg/g에서 638.7 mg/g으로 증가한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 김달한, 유명호, 이상식, 손진언 (1996) 활성화탄에 의한 피리딘류의 흡착평형 및 속도에 미치는 온도의 영향, 대한환경공학회지, 18(6), 705-713.
- 박병렬 (2003) 유해가스 제거를 위한 침착활성탄의 연구, 연세대학교 대학원 화학공학과 석사학위논문.
- 박수진, 김기동, 이재탁 (2000) 활성화 온도에 의한 PAN계 활성화탄소섬유/폐누수지 복합재료의 표면 및 흡착 특성, Polymer (Korea), 24(1), 97-104.
- 박준택 (1994) 입상활성탄에 대한 유기용제의 기상흡착특성, 계명대학교 대학원 화학공학과 박사 학위 논문.
- 심영숙, 구명희, 이우근 (2003) 소각비산재와 Coal Tar Pitch를 이용한 성형 흡착제 제조: K_2CO_3 활성화, 대한환경공학회지, 25(3), 275-281.
- 심재운, 유승곤 (1998) 구리, 니켈의 흡착에 대한 활성화탄소섬유 표면 처리의 영향, Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers, 36(6), 903-907.
- 이원희 (1996) Effects of surface oxidation states and pore structure on the gravimetric adsorption properties of microporous carbon materials, University of Kentucky 박사 학위 논문.
- 한국공업규격 (1994) KSM 1802.
- Adams, L.B., C.R. Hall, R.J. Holmes, and R.A. Newton (1988) Carbon, Vol. 26, pp. 451.
- Chiang, H.L., C.P. Huang, and P.C. Chiang (2002) The surface characteristics of activated carbon as affected by ozone and alkaline treatment, Chemosphere, 47, 257-265.

- Dimotakis, E.D., M.P. Cal, J. Economy, M.J. Rood, and S.M. Larson (1995) Chemically treated activated carbon cloths for removal of volatile organic carbons from gas streams: evidence for enhanced physical adsorption, *Environ. Sci. Technol.*, 29, 1876.
- Gregg S.J. and K.S.W. Sing (1982) *Adsorption, Surface area and porosity*, Academic press.
- Kaixi L., L. Licheng, L. Chunxiang, L. Zhenyu, L. Lang, I. Mochida (2001) Influence of CO-evolving groups on the activity of activated carbon fiber for SO₂ removal, *Fuel Processing Technology*, 70, 151-158.
- King, A. (1993) *J. Chem. Soc.* 842.
- Leon Y Leon, C.A., J.M. Solar, V. Calemma, and L.R. Radovic (1992) Evidence for the protonation of basal plane sites on carbon, *Carbon*, 30(5), 791-811.
- Moreno-castilla, C., F. Carrasco-marín, F.J. Maldonado-hodar, and J. Rivera-utrilla (1998) Effects of non-oxidant and oxidant acid treatments on the surface properties of an activated carbon with very low ash content, *Carbon*, Vol. 36, Issues 1-2, pp.145-151.
- Nagano, S., H. Tamon, T. Adzumi, K. Nakagawa, and T. Suzuki (2000) Activated carbon from municipal waste, *Carbon*, 38, 915-920.
- Park, S.J. and K.D. Kim (1999) Adsorption behaviors CO₂ and NH₃ on chemically surface-treated activated carbons, *Journal of colloid and Interface Science*, 212, 186-189.
- Pierce, C., R.N. Smith, J.W. Wiley, and H. Cordes (1951) *J. Amer. Chem. Soc.* 73, 4551.