

하수슬러지 활성탄의 벤젠 흡착특성

김종문, 정찬교,* 이택룡, 민병훈,[†] 김형진,[†] 권영식[†]

수원대학교 환경공학과, [†]화학공학과
445-743 경기도 화성시 봉담읍 와우리 산2-2

[†]수원과학대학 환경보건과
445-742 경기도 화성시 정남면 보통리 산9-10

(2009년 11월 12일 접수; 2009년 12월 2일 수정본 접수; 2009년 12월 3일 채택)

A Study on the Adsorption Characteristics of Benzene using Activated Carbon from Sewage Sludge

Jong-Moon Kim, Chan-Kyo Chung,* Taek-Ryong Lee,
Byong-Hun Min,[†] Hyung-Jin Kim,[†] and Young-Shik Kwon[†]

Dept. of Environmental Engineering, [†]Dept. of Chemical & Biochemical Engineering
The University of Suwon

San 2-2 Wau-ri, Bongdam-eup, Hwaseong, Gyeonggi-do 445-743, Korea

[†]Department of Environmental Health, Suwon Science College
San 9-40 Botong-ri, Jeongnam-myun, Hwaseong, Gyeonggi-do 445-742, Korea

(Received for review November 12, 2009; Revision received December 2, 2009; Accepted December 3, 2009)

요 약

본 연구에서는 하수슬러지에서 만든 활성탄을 이용하여 벤젠에 대한 정지(static)흡착실험을 수행하였다. 7.999 kPa에 이르는 압력 범위 내에서 온도 조건을 변화시켜 가며 303.15, 318.15, 333.15 K에서 흡착실험을 진행하였다. 등온흡착곡선은 Langmuir isotherm, Freundlich isotherm, Toth isotherm을 적용하여 비교하였다. 벤젠의 흡착량(q)을 fitting한 결과 Langmuir isotherm과 Toth isotherm으로 fitting한 등온흡착곡선의 정확도가 높은 것으로 나타났다. 그리고 Langmuir isotherm의 q_{max} 값을 이용하여 흡착제의 흡착량을 비교하였다. 또한, 하수슬러지 활성탄과 상용활성탄의 세공 발달 여부를 비교하기 위해 SEM image를 관찰하였다. SEM image 관찰 결과, 국내외 상용활성탄(DARCO A.C., SPG-100 A.C.)이 하수슬러지 활성탄에 비해 세공발달 정도가 우수하며, 세공발달 정도가 우수한 국내외 상용활성탄(DARCO A.C., SPG-100 A.C.)이 하수슬러지 활성탄에 비해 벤젠흡착량(q)이 높은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 실온조건인 303.15K에서 하수슬러지의 최대 벤젠흡착량(q_{max})은 국내 상용활성탄(SP-100 A.C.)의 최대 벤젠흡착량(q_{max})과 대등한 수치로 나타났으므로 하수슬러지 활성탄의 상용화 가능성을 검증할 수 있었다.

주제어 : 하수슬러지, 활성탄, 정지흡착실험

Abstract : In this study the experiments on the static adsorption of benzene were carried out using activated carbon made from sewage sludge. The experiment was performed at 303.15 K, 318.15 K and 333.15 K under the pressure up to 7.999 kPa. Isothermal adsorption curves were obtained using Langmuir isotherm, Freundlich isotherm and Toth isotherm for comparison. Based on fitting the adsorption quantity of Benzene (q), the isothermal adsorption curves obtained from Langmuir isotherm and Toth isotherm showed the higher accuracy. Although there was little difference in accuracy between result from Langmuir isotherm and that from Toth

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ckchu@suwon.ac.kr

isotherm, the adsorption quantity of Benzene (q) was expressed in terms of Langmuir isotherm because less parameters were required for Langmuir isotherm than for Toth isotherm. Moreover SEM images of the activated carbon from sewage sludge and the commercial activated carbon were taken to observe the pore size development. The results showed that the perforation development of the commercial activated carbon (DARCO A.C., SPG-100 A.C.) was better than that of activated carbon from sewage sludge. Adsorption quantity of benzene on commercial activated carbon was confirmed to be higher than that on activated carbon from sewage sludge. However the maximum adsorption quantity of benzene on activated carbon from sewage sludge was close to that on SGP-100 A.C. at 303.15K. Therefore, we may conclude that it is feasible to commercialize the process to manufacturing activated carbon from sewage sludge.

Keywords : Sewage sludge, Activated carbon, Static adsorption experiment

1. 서 론

경제 발전에 따른 국내 상수도 보급률이 증가로 인해 전국 상수도 보급률 평균 수치는 약 92.1%에 육박하고 있으며, 2007년 말 전용공업용수를 제외한 1일 1인당 급수량은 340 L로 나타났다. 이에 따라 하수처리량도 증가되어 왔으며 하수슬러지 발생량 또한 계속적으로 증가하고 있는 추세이다. 우리나라는 2003년도 이전까지는 하수슬러지 처리방안으로 주로 해양투기를 이용하였는데 이는 전체 하수슬러지 배출량의 약 71%에 달한다. 하지만 우리나라에서도 2007년부터 런던협약에 따라 하수슬러지 내 중금속 함량 규제를 받게 되어 해양투기를 점차 줄이고 있으며, 2011년도에는 해양투기 0%를 목표로 하고 있다. 즉, 2011년도부터 해양투기를 대체하는 방안으로 재활용을 늘려가는 것으로서 현재 많이 연구되고 있으며, 일부는 이미 시행되고 있다. 재활용 방법에는 복토재 이용, 시멘트 원료, 녹생토, 퇴비화 등 여러 가지 방법이 존재하나 슬러지 내에 존재하는 중금속과 하수슬러지의 성상에 따라 처리하는데 큰 차이를 나타내는 것이 문제점으로 나타나고 있다 [1-5].

이러한 가운데 대체기술로 소각과 자원화 분야가 부각되고 있다. 90년대 초 소각으로 하수슬러지를 연료화하여 슬러지 감량과 에너지화 기술로서 이용되고 있으나, 지역적 특성과 하수처리공정에 따라 발생하는 하수슬러지의 성질이 다르고 소각 후 발생하는 소각재의 중금속 함량의 문제 또한 해결해야 하는 문제를 안고 있다. 하수슬러지의 성상이 높은 수분함량과 유기물함량으로 인해 열량이 낮게 나타나는 것은 기존 연구에서 밝혀진바 있다[6]. 그렇기 때문에 하수슬러지의 자원화 기술 개발이 필요하다. 유럽과 일본에서는 이미 하수슬러지 탄화물을 이용한 개발이 진행되고 있고, 국내에서도 탄화물을 이용한 자원화 기술 개발이 이루어지고 있다[7-8].

하수처리장 단위공정에서 배출되는 하수슬러지를 저감시키고 하수처리장에서 배출되는 하수슬러지의 2차적인 오염발생을 해결하기 위하여 본 연구에서는 하수슬러지의 탄화물의 활성화를 이용한 VOCs 흡착에 관한 연구를 진행하였다. VOCs는 자동차, 각종 유기용제, 건축 등의 도장분야에서 많이 발생되고 있으며, VOCs를 제거하는 기술은 소각 및 분해에 의한 제거 기술과 VOCs를 회수하여 재사용 하는 회수 기술로 나눌

수 있는데, VOCs가 고가일 경우에는 회수기술의 사용이 생산 비용 면에서 유리하다. 회수기술에는 흡착, 막분리, 응축 등의 다양한 방법이 있으나 이 중에서 흡착은 실제 공정에서 처리 방법이 간단하며, 다양한 VOCs의 처리가 가능하고 운영비가 상대적으로 적게 드는 장점으로 인해 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 저농도의 경우에는 활성탄 흡착방법에 의해 효과적으로 제거가 가능하며, 산업 유기용제의 회수, 에너지 절약 및 자원화 관점에서 흡착기술이 유리한 기술이라 할 수 있다 [9-11].

본 연구에서는 제조된 하수슬러지 활성탄에 대한 VOCs 흡착제로의 사용 가능성을 평가하기 위해, 수입 상용활성탄 (DARCO Co., 12~20 mesh, granular)과 국내 상용활성탄 (SGP-100, 삼천리 활성탄소, pellet)을 준비하여 VOCs 물질 중 벤젠에 대한 정지흡착 비교실험을 수행하였다. 또한 흡착 특성을 확인하기 위하여 Langmuir isotherm, Freundlich isotherm과 Toth isotherm을 이용하여 흡착등온식을 비교하였으며[12,13], SEM images를 통해 각각 활성탄의 세공 발달 여부를 확인하였다.

본 연구를 통해 하수슬러지 활성탄을 이용하여 VOCs 흡착제로 활용할 수 있는 방안을 마련할 수 있을 것이라 예상되며, 하수슬러지의 영향인자를 파악하기 위하여 하수슬러지 탄화온도 변화를 고려하여 연구를 수행하였다.

2. 실 험

2.1. 실험장치

VOCs는 상온에서 일반적으로 액체 상태로 존재하다가 기상으로 기화되어 흡착이 이루어지게 된다. 따라서 정지흡착실험을 수행함에 있어서 이러한 물질의 흡착량(q)을 측정할 경우 기화시키는 부분이 필요하게 되며, 기화된 물질이 P-V-T 관계에서 일정한 상태를 유지하기 위한 저장 공간을 필요로 하게 된다. 본 연구에서는 정지흡착실험의 수행을 위해 Figure 1의 저압 정지흡착 실험장치를 이용하였다. 실험장치의 구성은 크게 네 부분으로 나뉜다. 원료를 공급해주는 부분과 시료가스를 저장하는 부분, 흡착제가 삽입되어 흡착이 일어나는 부분, 정확한 압력을 읽을 수 있는 측정부 등이다. 본 실험 장치에서는 rotary vacuum pump를 이용하여 1.3×10^{-5} kPa까지 낮

Table 1. Optimal condition for the production of activated carbons from sewage sludge

	Char at 1073 K, 60 min	KOH 75 wt%, 60 min	NaOH 50 wt%, 60 min
BET surface area (m ² /g)	85.76	558.68	460.06
Iodine number (mg/g)	84.29	559.93	508.87

Table 2. BET surface area of commercial adsorbents

Adsorbent	DARCO activated carbon	SGP-100 activated carbon
BET surface area [m ² /g]	1000	950
Application	VOCs adsorption, gases filtration	VOCs adsorption, solvents adsorption

추어 초진공 상태를 유지하였다. 또한 가장 중요한 부분인 측정부는 온도와 압력을 측정하는 부분으로 구성되는데, 온도는 강제대류건조기(forced convection oven)의 온도센서를 이용하여 측정할 수 있도록 하고 추가적으로 온도탐침(temperature probe)을 설치하여 온도편차를 최소화하였다. 압력은 흡착질의 종류가 다양해짐에 따라 기체 특성에 영향을 받지 않는 격막식 압력계를 선택하였으며, 압력의 정밀도를 높이기 위하여 pressure transmitter (model : PAA-23S)를 설치하였다.

2.2. 흡착제 제조방법

본 연구에서 최적의 하수슬러지 활성탄을 제조하기 위해 하수슬러지의 탄화조건과 화학적 활성화조건을 Table 1에 나타내었다. 우선 최적화된 하수슬러지 탄화물을 활성화제(KOH,

NaOH)를 이용하여, 하수슬러지 활성탄 제조의 최적조건을 찾았으며[2], 본 연구에서는 BET 표면적이 가장 우수한 75 wt%의 KOH를 이용하여 하수슬러지 활성탄의 정지흡착실험을 진행하였다.

또한 연구를 진행하면서 하수슬러지 활성탄과 수입 상용활성탄(DARCO Co., 12~20 mesh, granular) 그리고 국내 상용활성탄(SGP-100, 삼천리 활성탄소, pellet)의 벤젠의 흡착능력에 대한 비교평가를 진행하였다. Table 2에 수입 상용활성탄과 국내 상용활성탄의 기본 물성치와 용도를 나타내었다.

2.3. 흡착질

본 연구에서는 대표적인 휘발성 유기화합물(VOCs)인 벤젠(Cas No. 71-43-2)을 흡착질로서 사용하였다. 벤젠은 독특한

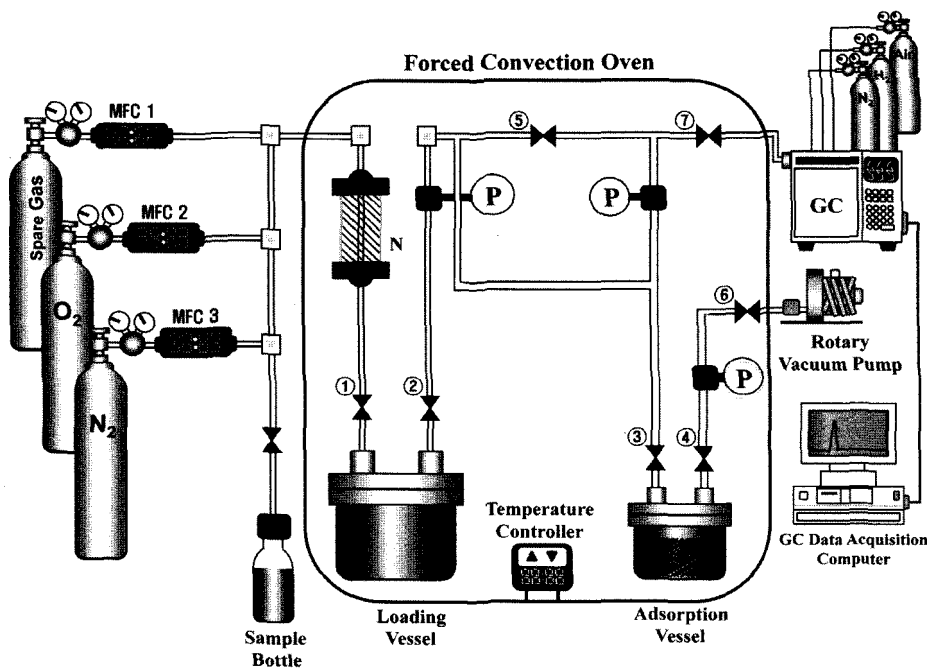


Figure 1. Experimental apparatus for low-pressure static adsorption. (N : Inline mixer, P : Pressure transmitter, MFC : Mass flow controller)

Table 3. Constants a and b of van der Waals equation

Adsorbates	a (bar · L ² /gmol ²)	b (L/gmol)
Benzene	18.82	0.1193

냄새를 띠며 증기압이 높다는 특징을 가지고 있다. 벤젠의 높은 증기압으로 인해 대기 중에 빨리 증발되고 대기로 유출되는 속도 또한 다른 물질에 비해 크다고 할 수 있다.

2.4. 흡착실험

흡착질이 벤젠이므로 시료병에 시료를 20 ml 정도 채운 후, 1번과 2번 valve를 열고 원하는 압력까지 흡착질을 기화시켜서 채운다. 다음, 각 valve을 잠그고 20분 이상 지나서 정상상태에 도달한 압력, 온도(P₁, T₁)를 측정한다. 이 때 미리 측정된 부피 값(V₁)을 이용하여 기상의 몰수를 계산한다. Eq. 1인 van der Waals식을 이용하여 보정한다. 계수는 CRC-Handbook data 이용하여 구한다.

$$\left(P_1 + \frac{n_1 a}{V_1^2} \right) (V_1 - n_1 b) = n_1 R T_1 \tag{1}$$

$$a = \frac{27 R^2 T_c^2}{64 P_c} \tag{2}$$

$$b = \frac{R T_c}{8 P_c} \tag{3}$$

5번, 3번, 4번 valve를 열어서 흡착시킨 후 평형상태에 도달할 때까지 방치하는데, 보통 20분 정도 걸린다. 이것은 흡착열에 의한 비평형이 있을 수 있으므로 행하는 것이다. 평형에 도달하면 압력, 온도, 부피(P₂, T₂, V₂)를 측정하는데, 이 값들은 van der Waals식을 이용하여 흡착되고 난 후 기상에 남은 몰수를 계산하는데 사용할 수 있다.

$$\left(P_2 + \frac{n_2 a}{V_2^2} \right) (V_2 - n_2 b) = n_2 R T_2 \tag{4}$$

이 때 감소된 기상의 몰수가 흡착제에 흡착한 흡착량(q)인데 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$m = n_1 - n_2 \tag{5}$$

2.5. 흡착량(q) 계산

Eq. 1부터 Eq. 5까지의 식들을 이용하여 특정 압력에서의 흡착 몰수 m을 구할 수 있다. 이렇게 계산한 m을 흡착제의 무게로 나누면 흡착제 단위질량당 흡착량 q를 구할 수 있다. 이

것을 압력을 x축으로, 단위질량당 흡착량 q를 y축으로 정하여 도시하면 흡착등온선을 구할 수 있다. 이 그래프를 Langmuir isotherm으로 fitting을 하면 q_{max}를 구할 수 있다. 여기서 구한 파라미터를 이용하여 extended Langmuir isotherm에 대입하면 흡착등온선을 완성할 수 있으며, Freundlich isotherm과 Toth isotherm 역시 동일한 방법으로 fitting하여 가장 적합한 흡착등온선을 구하고자 하였다.

Langmuir 식은 변형하면 다음과 같은 흡착속도식을 구할 수 있다.

$$V_{ads} = \alpha v(1 - \theta) \tag{6}$$

여기서, 흡착이 가능한 공간은 1-θ로 정의되며, α는 흡착상수이고, v는 표면에 충돌하는 기체분자들의 충돌빈도를 나타내는데 기체운동론에 의해 v는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$v = \frac{p}{(2\pi m k T)^{1/2}} \tag{7}$$

물리흡착에 대한 탈착속도는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V_{des} = \beta \theta e^{-E_d/RT} = \beta \theta e^{-Q/RT} \tag{8}$$

여기서 β는 탈착상수이며, θ는 탈착 가능한 흡착 분율을 의미한다. 또한 탈착은 열에 의해 가능하므로 온도 의존관계를 설명한 Arrhenius 형태를 쓸 수 있다. E_d는 탈착을 위한 활성화 에너지로서 물리흡착된 흡착열 Q와 같다.

Eq. 6과 Eq. 8을 동적 평형에 기초하여 흡착속도와 탈착속도가 같을 때 다음의 식이 유도된다.

$$\theta = \frac{\alpha v}{\alpha v + \beta e^{-Q/RT}} \tag{9}$$

여기에 Eq. 7을 이용하여 새로운 Langmuir 흡착상수 b를 유도하면 다음과 같다.

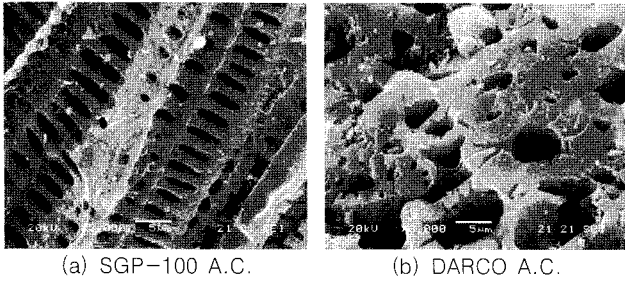
$$b = \frac{\alpha}{\beta (2\pi m k T)^{1/2}} e^{Q/RT} \tag{10}$$

Eq. 10을 Eq. 4에 대입하여 정리하면 Eq. 11을 얻을 수 있다. 또한 θ는 흡착분율, 즉, 가능한 최대 흡착량 대비 실제 흡착량이므로 다음과 같이 Eq. 11에 적용하여 나타낼 수 있다.

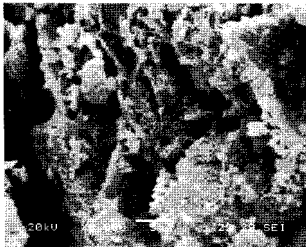
$$\theta = \frac{q}{q_s} = \frac{bP}{1 + bP} \tag{11}$$

이를 흡착량에 관한 식으로 다시 정리하면 다음과 같다.

$$q = \frac{q_s b P}{1 + b P} \tag{12}$$



(a) SGP-100 A.C. (b) DARCO A.C.



(c) Sewage sludge A.C.

Figure 2. SEM images of activated carbon.

Eq. 11을 Langmuir의 일반적인 형태라고 할 수 있으며, Eq. 12에서 P 가 0에 근접하면 θ 는 bP 로 되어 선형인 Henny의 법칙으로 줄어든다. 반면에 P 가 커지면 θ 는 1이 되어 최대 흡착량에 근접하게 된다.

또한 Eq. 10에서 온도가 증가함에 따라 b 값은 급격히 작아지게 된다. 온도에 따른 Langmuir 흡착상수는 보통 아래의 식으로 주어진다.

$$b = b_0 \exp\left(\frac{-\Delta H}{RT}\right) \quad (13)$$

$$q = \left(\frac{q_0}{T^m}\right) \quad (14)$$

여기서 $-\Delta H$ 는 흡착열을 나타낸다. Langmuir 식은 저압 영역에서 Henny의 법칙을 만족하며 이때의 상수는 q_s, b 이다.

2.6. 흡착압력

흡착압력은 상온에서 벤젠의 vapor pressure가 9.999 kPa (75 torr)이므로 실험조건은 7.999 kPa (60 torr)에 이내의 압력범위 내에서 정지흡착 실험을 진행하였다.

2.7. 흡착온도

흡착온도는 대기압에서 벤젠의 boiling point가 353.15 K임을 고려하여 온도조건을 303.15K, 318.15K, 333.15K로 각각 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 하수슬러지 활성탄의 VOCs 흡착제로써의

사용 가능성을 평가하기 위해 벤젠의 증기압을 이용하여, 7.999 kPa에 이르는 압력범위와 303.15K, 318.15K, 333.15K의 실험 온도에서 정지흡착실험을 수행하였다.

수입 상용활성탄(DARCO Co., 12~20 mesh, granular)과 국내 상용활성탄(SGP-100, 삼천리 활성탄소, pellet)을 준비하여 화학적 활성화 연구 결과 가장 물성치가 우수했던 하수슬러지 활성탄과의 벤젠에 대한 흡착능력에 대한 비교 평가를 진행하였다.

3.1. SEM image

Figure 2에서는 각각 활성탄소의 세공 발달 여부를 SEM images를 통해 확인할 수 있었으며, 배율은 모두 같은 3,000 배로 하여 측정하였다. 국내 상용활성탄 (a) SGP-100 A.C.은 거대세공(macropore)이 규칙적으로 발달되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 수입 상용활성탄 (b) DARCO A.C.도 역시 거대세공이 규칙적으로 발달되어 있는 것을 확인할 수 있었으며, 거대세공 내부에 또 다른 세공들이 발달되어 있어 중간세공(mesopore)과 미세세공(micropore)의 발달 가능성이 (a) SGP-100 A.C.에 비해 클 것이라 예상된다. 반면, (c) 하수슬러지 활성탄의 경우에는 세공 발달이 상용활성탄(DARCO A.C., SGP-100)에 비해 우수하지 않았으며, 세공 형태 또한 매우 불규칙함을 확인할 수 있었다.

3.2. 흡착량(q)에 따른 등온흡착곡선

본 연구에서는 활성탄에 의한 벤젠의 흡착량(q)에 따른 실험 결과를 Figure 3~5에 Langmuir isotherm, Freundlich isotherm, Toth isotherm으로 fitting한 graph로 나타내었다. 상온에서 VOCs 중 벤젠의 vapor pressure가 9.999 kPa임을 고려하여, 실험조건은 7.999 kPa에 이내의 압력범위 내에서 정지흡착실험을 진행하였다. 온도 조건은 303.15 K, 318.15 K, 333.15 K로 각각 설정하였는데, 이는 벤젠의 boiling point가 353.15 K이므로 온도를 이 온도 미만으로 하여 진행하였다. 각각 등온흡착곡선(Langmuir isotherm, Freundlich isotherm 그리고 Toth isotherm)을 통해 활성탄의 벤젠흡착 실험에 부합하는 등온흡착곡선을 확인하였다.

Table 4. Parameters of Langmuir isotherm

Adsorbate	Adsorbent	T(K)	b(1/kPa)	q _{max} (gmol/kg)
	Sewage sludge A.C.	303.15	0.1767	3.8174
		318.15	0.1731	3.3251
		333.15	0.1415	3.0484
Benzene (C ₆ H ₆)	DARCO A.C.	303.15	0.6899	5.6758
		318.15	0.6227	5.4187
	333.15	0.6629	4.9379	
	SGP-100 A.C.	303.15	0.6968	3.9086
		318.15	0.5170	3.7119
		333.15	0.5073	3.2615

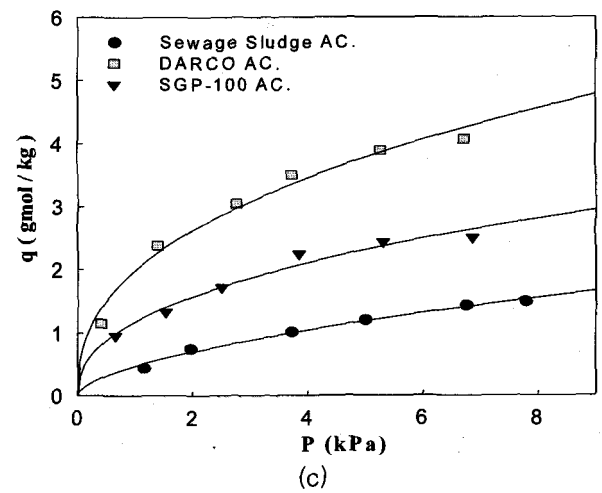
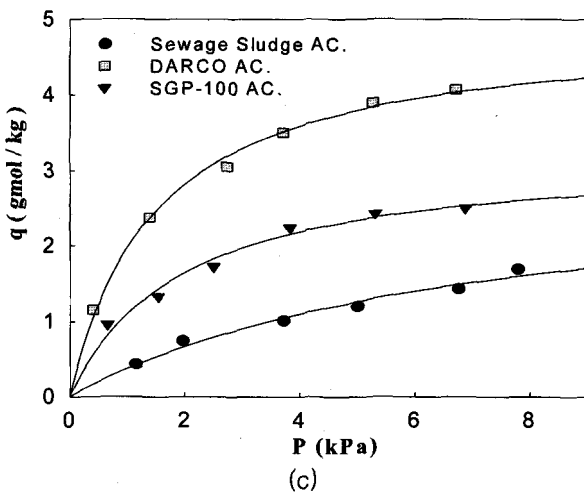
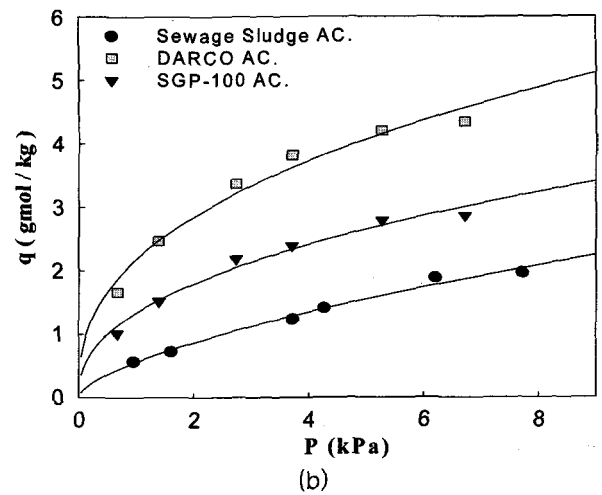
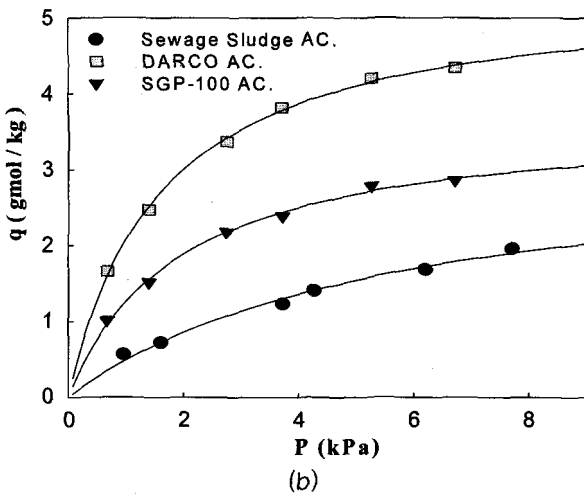
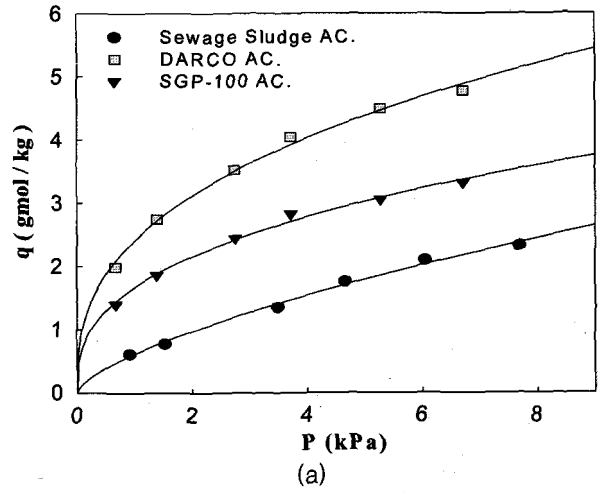
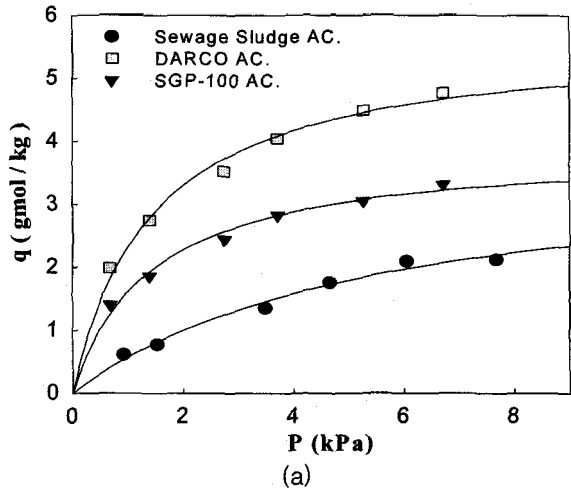


Figure 3. Amount of benzene adsorbed on activated carbons at 303.15 K (a), 318.15 K (b), and 333.15 K (c). Solid curves are those fitted with Langmuir isotherm.

Figure 4. Amount of benzene adsorbed on activated carbons at 303.15 K (a), 318.15 K (b), and 333.15 K (c). Solid curves are those fitted with Freundlich isotherm.

각각의 식으로 벤젠의 흡착량(q)을 fitting한 결과 Langmuir isotherm과 Toth isotherm으로 fitting한 등온흡착곡선이 큰 오차 없이 잘 맞는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 어느 식을 사용하여도 무방하나 Toth isotherm보다 parameter가 적고

간편한 형태의 식인 Langmuir isotherm이 더 적합할 것으로 생각된다. Freundlich isotherm은 저압영역에서 Henry 법칙을 만족하지 않고, 압력이 증가함에 따라 흡착량(q)이 무한대로 증가하기 때문에 미세세공을 가지는 흡착체의 흡착등온선에는

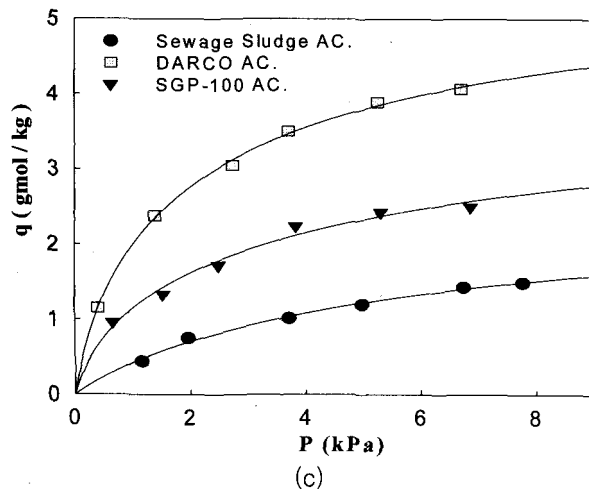
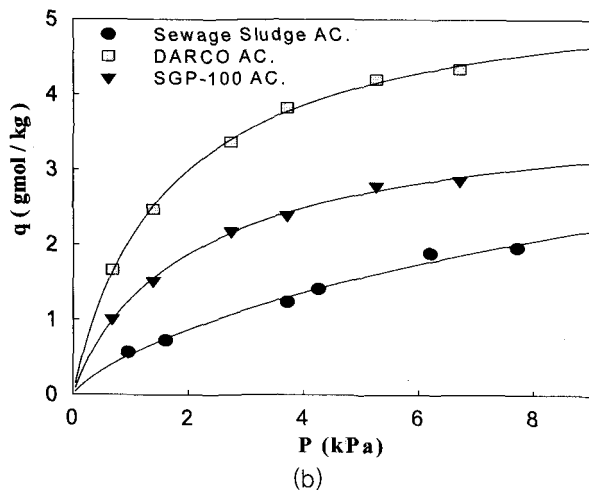
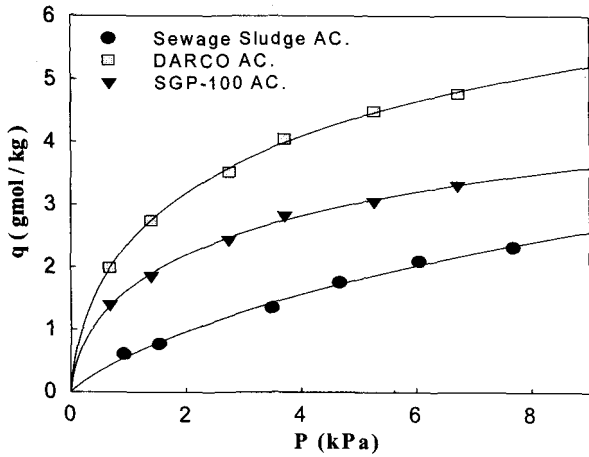


Figure 5. Amount of benzene adsorbed on activated carbons at 303.15 K (a), 318.15 K (b), and 333.15 K (c). Solid curves are those fitted with Toth isotherm.

적합하지 않는 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 Langmuir isotherm을 이용하여 활성탄의 벤젠의 흡착량(q)을 계산하여 Table 4에 정리하였으며, b와 q_{max}값을 정량적으로 표현하였다. Table 4에서 온도가 증가할수록 q_{max}값은 감소하는 경향을

보이는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 흡착원리와 잘 일치함을 알 수 있다.

외국 상용활성탄인 DARCO A.C.의 벤젠흡착량(q)은 하수슬러지 활성탄보다 월등히 우수함을 보여준다. 그러나 하수슬러지 활성탄의 최대 벤젠흡착량(q_{max})은 303.15 K에서 3.8174 gmol/kg으로 국산 상용활성탄(SGP-100)의 최대 벤젠흡착량(q_{max})인 3.9086 gmol/kg과 비교 시 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 폐기물인 하수슬러지로부터 만들 경우 원료비가 안 들므로 국산 상용활성탄에 비해 경제성 면에서 우위에 있다고 판단된다.

4. 결 론

하수슬러지 활성탄의 벤젠에 대한 흡착특성에 관한 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) SEM image 관찰 결과 국내의 상용활성탄은 거대세공이 규칙적으로 발달하였음을 확인할 수 있고, 수입 상용활성탄의 경우에는 거대세공 내부에 또 다른 세공들이 발달되어 있어 중간세공과 미세세공의 발달 가능성을 확인할 수 있었다. 반면 하수슬러지 활성탄의 경우 세공 발달이 불규칙하고, 국내의 상용활성탄에 비해 세공 발달이 우수하지 못한 것을 확인할 수 있었다.
- (2) Langmuir isotherm을 적용할 때 온도가 증가할수록 b, q_{max}값은 감소하고 있으며, 실험결과 수입 상용활성탄(DARCO A.C.)의 최대흡착량(q_{max})이 가장 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 실온조건에 가까운 303.15K에서 하수슬러지의 최대 벤젠 흡착량(q_{max})은 국내 상용활성탄의 최대 벤젠흡착량(q_{max})과 비교하여 단지 약간 작은 값을 가졌다. 경제성 면을 고려해 볼 때 하수슬러지 활성탄은 상용화될 수 있으므로 제조공정 개선과 제조기술 보완 등을 통해 향후 하수슬러지의 자원화 가능성을 예측해 볼 수 있다.

감 사

본 연구는 수원대학교 환경청정기술연구센터 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ministry of Environment, 2008 Waterworks Supply, Ministry of Environment, 2007.
2. Lee, T.-R., Chung, C.-K., and Joe, Y.-C., "A Study on Development of Activated Carbons from Sewage Sludge," *Clean tech.* **15**(1), 31-37 (2009).
3. Kim, J.-M., Chung, C.-K., and Min, B.-H., "A Study on Development of Activated Carbons from Waste Timbers," *J. Korean Inst. Resour. Recy.*, **17**(6), 68-78 (2008).

4. Chiang, P.-C., and You, J.-H., "Use of Sewage Sludge for Manufacturing Adsorbents," *Can. J. Chem. Eng.*, **65**(6), 922-927 (1987).
5. Han, J.-Y., Cho, H.-C., and Kim, K.-D., "Life Cycle Assessment (LCA) Study of Wastewater Sludge Treatment System: Incineration, Composting, Solidification," *J. Korean Inst. Resour. Recy.*, **11**(4), 17-26 (2002).
6. Jung, J.-S., and Chin, S.-M., "Study on Co-incineration of Municipal Solid Waste and Organic Sludges," Proceedings of the 31th autumn conference of Korean Society of Environmental Engineers, 238-244 (2005).
7. Choung, Y.-H., Cho, K.-C., Kang, D.-H., Kim, Y.-K., Park, C.-W., and Oh, K.-J., "A Study on the Drying and Carbonization of Sewage Sludge in Fluidized Bed Reactor," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **23**(7), 746-751 (2006).
8. Kojima, N., Mitomo, A., Itaya, Y., Mori, S., and Yoshida, S., "Adsorption Removal of Pollutants by Active Cokes Produced from Sludge in the Energy Recycle Process of Wastes," *Waste Manage.*, **22**, 399-404 (2002).
9. Bae, J. G., "Recycling Condition and Forecast for Sewage Sludge," *J. Korea Org. Resour. Recy. Assoc.*, **8**(3), 7-29, (2000).
10. Choi, Y.-C., "Evaluating Optimum Treatment of Sewage Sludge in Busan Metropolitan City," Busan Development Institute, 2003.
11. Song, H.-T., Kang, S.-W., Min, B.-H., and Suh, S.-S., "A Study on Adsorption Characteristics by Heat Transfer Coefficient Change at Adsorption Process of Benzene & Toluene," *J. Soc. Ind. Eng. Chem.*, **6**(1), 220-223 (2002).
12. Kim, J. M., "Study on Development of Activated Carbons from Waste Timbers and Their Adsorption Characteristics," Ph. D. Dissertation, University of Suwon, Suwon, 2008.
13. Park, J. K., "A Study on Adsorption Characteristics of VOCs on Activated Carbon," M.S. Thesis, University of Suwon, Suwon, 2005.