

## 바이오필터설계를 위한 바이오필터 담체의 흡착 특성

이은주 · 임광희†

경북대학교 화학공학과  
702-701 대구광역시 북구 산격동 1370번지  
†대구대학교 화학공학과  
712-714 경상북도 경산시 진량면 내리리 15  
(2008년 6월 3일 접수, 2008년 6월 19일 채택)

### Evaluation of Adsorption Characteristics of the Media for Biofilter Design

Eun-Ju Lee and Kwang-Hee Lim†

Department of Chemical Engineering, Kyungpook National University, 1370 Sankyuk-dong, Buk-gu, Daegu 702-701, Korea

†Department of Chemical Engineering, Daegu University, Jillyong, Gyeongsan, Gyeongbuk 712-714, Korea

(Received 3 June 2008; accepted 19 June 2008)

#### 요 약

바이오필터 모델로서 프로세스러핑 모델(Lim의 모델)을 넓은 농도범위의 친수성 VOC의 경우에도 유효하도록 robust 하게 개선하기 위하여, 수막으로 둘러싸였다고 가정된 멸균된 입상 활성탄, compost 및 동부피의 입상 활성탄/compost 담체 각각에 대해서 모델적용에 필요한 Freundlich 등온흡착관계식의 흡착상수들을 구하고 상호 비교하였다. 당 연구에서는 각각 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.2, 0.4, 0.8 및 1.0 ml의 에탄올을 멸균된 각각의 젖은 담체에 첨가하여서 바이오필터 운전조건과 같은 30°C에서 흡착이 정상상태에 도달한 후에 각각의 담체에 대한 흡착량을 산출하는 에탄올 등온흡착평형 실험을 통하여, 각 담체 내부의 세공에 응축된 물에 용해된 에탄올농도와 등온흡착평형을 이루는 에탄올의 평형 흡착량을 모사하는 Freundlich 등온흡착모델의 파라미터인 흡착능 상수(K) 및 흡착지수(1/n) 값을 멸균된 입상 활성탄, compost 및 동부피의 입상 활성탄/compost 담체에 대하여 각각  $0.7566$ 과  $5.070 \times 10^{-7}$  mg-ethanol/mgmedia/(mg-ethanol/m<sup>3</sup>)<sup>0.7566</sup>,  $0.8827$ 과  $1.000 \times 10^{-8}$  mg-ethanol/mgmedia/(mg-ethanol/m<sup>3</sup>)<sup>0.8827</sup> 및  $0.5688$ 과  $5.243 \times 10^{-6}$  mg-ethanol/mgmedia/(mg-ethanol/m<sup>3</sup>)<sup>0.5688</sup>과 같이 구축하였다. 이와 같은 에탄올 등온흡착평형 실험에서 구해진 흡착능 상수 및 흡착지수를 포함하는 Freundlich 흡착상수는, 바이오필터의 바이오막으로 덮여진 바이오필터담체의 흡착특성에 적용할 수 있었다. 당 연구에서의 에탄올의 공기/물 분배계수와 Delhomenie 등의 젖은 compost담체에 대한 톨루엔 흡착실험에서의 톨루엔의 공기/물 분배계수의, 비의 크기 정도는 compost를 담체로 하는 양쪽의 연구에서 산출된 흡착량 비의 크기 정도와 거의 일치하였다.

**Abstract** – Freundlich isothermal adsorption parameters, applicable to such biofilter-model as process-lumping model(Lim's model), for sterilized granular activated carbon(GAC), sterilized compost and sterilized equal volume mixture of GAC and compost were obtained and were compared each other, assuming that adsorbents are enclosed by water layer, in order to construct robust process-lumping biofilter model effective for wide-range of hydrophilic volatile organic compounds(VOC). In this investigation 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.2, 0.4, 0.8 and 1.0ml of ethanol were added to three kinds of adsorbent-media and were placed at 30°C... under the wet condition of the media, which was the same as biofilter operating condition, until the adsorption reached the condition of equilibrium before each adsorbed amount of ethanol was obtained. Then adsorption capacity parameters(K) and adsorption exponents of Freundlich adsorption isotherm equation, which simulates the adsorbed amount of ethanol equilibrated with the ethanol concentration of the condensed water in the pore of the media, were constructed for sterilized granular activated carbon(GAC), sterilized compost and sterilized equal volume mixture of GAC and compost as  $(0.7566$  and  $5.070 \times 10^{-7}$  mg-ethanol/mgmedia/(mg-ethanol/m<sup>3</sup>)<sup>0.7566</sup>),  $(0.8827$  and  $1.000 \times 10^{-8}$  mg-ethanol/mgmedia/(mg-ethanol/m<sup>3</sup>)<sup>0.8827</sup>) and  $(0.5688$  and  $5.243 \times 10^{-6}$  mg-ethanol/mgmedia/(mg-ethanol/m<sup>3</sup>)<sup>0.5688</sup>), respectively. These Freundlich isothermal adsorption parameters were applicable to the adsorption characteristics of biofilter media enclosed with bio-layer. The order of magnitude of the ratio of ethanol-air/water partition coefficient and toluene-air/water partition coefficient was almost consistent to that of ethanol-adsorbed amounts in this experiment with compost and in the investigation of Delhomenie et al. on toluene-adsorption to wet compost.

Key words: Adsorption, Biofilter Media, Ethanol, Process-Lumping Biofilter Model

† To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: khlim@daegu.ac.kr

### 1. 서 론

생물학적 처리공정 중에서 바이오필터란 오염물을 분해할 수 있는 미생물들이 자연적으로 고정화되어 있는 다공성의 충전물들을 습도가 있는 오염된 공기가 통과하는 반응기이다. 바이오필터는 알려진 바와 같이 악취 제거와[1, 11, 20, 28, 32-38] 폐가스에서의 휘발성 유기물 특히 용매 제거에[2-4, 7, 8, 12, 13, 16, 17, 27, 29, 30, 31] 다른 프로세스에 비해 뛰어나다. 흡착능력이 뛰어난 입상 활성탄 미디움은 바이오필터의 오염물 제거효율을 향상시킨다고 보고되어 왔으나[6, 9, 10, 14] Hodge 등[9, 15], Zarook 등[18, 19], Lim[21, 22] 및 Amanullah 등[26]을 제외한 지금까지의 바이오필터모델 연구들은 유기 오염물의 바이오필터 미디움과의 흡착 및 탈착의 바이오필터를 통과하는 폐가스에 대한 오염물 제거 능력에 미치는 영향에 대해서 미진한 실정이다. 또한 혐수성 VOC를 포함한 폐가스 처리에 대한 바이오필터 설계 연구에 치우쳐온 것이 사실이다. 따라서 산업체에서 용제로서 필수적으로 많이 사용되거나 공공시설에서 많이 발생되는 악취와 같은 친수성 VOC의 바이오필터 담체에 대한 흡착의, 바이오필터를 통과하는 친수성 VOC를 함유한 폐가스에 대한 오염물 제거 능력에 미치는 영향에 대한 연구가 절실하고 시급하게 요구된다.

Hodge 등[9, 15]은 생물막과 담체를 유입된 폐가스 내의 유기오염물에 대한 액상/고상의 하나의 흡착/흡수 미디움으로 간주하여, 폐가스 내의 유기오염물 농도와 흡수/흡착 미디움내의 생물학적 분해반응을 1차반응식으로 가정하여 유기오염물 농도 관련 물질수지식을 수치해석적인 방법으로 풀었으나 생물막과 담체, 즉 액상/고상에서 일어나는 여러 현상을 포괄하였기 때문에 폐가스에서 바이오필터의 유기오염물을 제거하는 효율에 대한 담체 흡착 능력의 영향을 설명하지는 못하였다. 한편 Zarook 등[18, 19]은 Shareefdeen 등의 정상상태의 모델을 비정상상태의 모델로서 확장하였는데, 바이오필터의 담체에 대한 흡착은 생물막(액상)을 통해서 일어나지 않고 담체표면과 폐가스, 즉 고상/기상의 계면을 통하여 일어난다고 간주하였고 기상/액상/고상의 물질수지식들을 orthogonal collocation 방법으로 수치 해석적으로 적분하여서 바이오필터의 운전시간에 대한 농도추이 및 길이에 대한 농도 분포를 산출하였다. 그러나 바이오필터 내부로 들어가는 폐가스의 습도는 바이오필터의 적정운전을 위하여 약 99%를 유지해야 되고[20] 바이오필터 담체의 보습량은 무게비로 약 40~60%를 유지해야한다고[24, 25] 보고되고 있는데, 정상적인 바이오필터 운전에서 있어서 바이오필터 담체의 pore 공간은 표면이 생물막으로 덮여있지 않더라도 모세관 응축에 의하여 응축된 액상으로 차여져 있을 것임을 고려할 때에 담체의 흡착은 바이오필터의 초기운전을 제외하고는 고상/기상의 계면이 아니라 고상/액상의 계면을 통해서 일어나는 것이 보다 현실적이다[22]. Amanullah 등[26]은 Zarook 등[25, 26]의 모델을 확장 시켜서 액상/고상의 계면을 통한 흡착을 모델에 추가하였다. 그러나 액상에서 고상으로의 흡착에 대한 구동력을 표현함에 있어서 액상에서의 고상과의 흡착평형농도 대신에 기상에서의 고상과의 흡착평형농도를 적용하였다. 따라서 본질적으로 Zarook 등[18, 19]의 모델에 속한다고 할 수 있다. Lim[21, 22]은 VOC를 포함한 폐가스에 대한 바이오필터의 처리능력에 있어서, 바이오막으로 둘러싸인 담체의 고상/액상의 계면을 통하여 일어나는 담체 흡착효과를 바이오필터 모델에 포함시켜서 담체가 excess한 흡착능력을 가지

고 있을 때와 담체의 흡착능이 제한적일 때의, 수치 해석적 방법으로 해석하는 것이 아닌 대수식으로 해석 가능한 독창적인 프로세스럼핑 모델(Lim의 모델)을 제시하였다. 그러나 이러한 프로세스럼핑 모델(Lim의 모델)의 경우에는 담체에 대한 VOC의 평형 흡착량이 담체의 수차부피 내의 용존 VOC 농도에 선형적으로 비례한다는 가정 하에서 대수식을 유도하였으므로, 실제로 적용을 위해서는 담체 평형 흡착량과 VOC 농도가 선형적인 관계를 유지하는 비교적 작은 농도의 VOC를 함유한 폐가스 처리에 유효하였다. 또한 Lim과 Lee[23]는 바이오필터 모델에 관여된 component를 바이오필름, 기상상(phase), sorption 부피, 흡착으로 구분하여 기 언급한 연구자들이 제시한 정상상태 및 비정상상태의 바이오필터 모델들을 분류하고 설명하였다.

한편 바이오필터 유기담체로서는 compost가, 무기담체로서는 활성탄, 제올라이트 등이 각각 자주 활용되고 있다. Caputo 등[39]은 에탄올 또는 물의 제올라이트를 함유한 응회암(tuff)에 대한 흡착 평형 특성을 조사하였고, Dubinin-Astakhov 모델을 이용하여 에탄올/물에 대한 등온흡착을 모델 예측하였다. El-Sharkawy 등[40]은 다공성 활성탄소에 대한 20~60 °C에서의 에탄올의 등온흡착 평형값을 조사하였다. 김 등[41]은 활성탄소섬유의 propyl amine의 흡착특성을 연구하였다. 우 등[42] 및 손 등[43]은 활성탄소섬유 및 입상활성탄의 다성분 휘발성유기화합물에 대한 흡착특성을 조사하였고, 정 등[44]은 수소, 메탄, 에틸렌의 혼합기체에 대하여, Kim 등[45]는 수용액상에서의 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid와 2,4-Dinitrophenol에 대하여, 각각 입상활성탄의 흡착특성을 실험하였다. Delhomenie 등[46]는 구리황산 수용액으로 젖게 하여 미생물 활성이 제거된 compost로 충전된 바이오필터에서의 흡착시간에 따른 톨루엔을 함유한 기습공기의 과과실험을 수행하여, 바이오필터 출구에서의 톨루엔 농도를 관찰하고 과과곡선을 도출하여서 Ruthven[47]이 제안한 stoichiometric 시간의 개념을 이용하여 톨루엔 흡착량을 산출하고 Freundlich 등온 흡착 평형식에 대입하여 Freundlich 흡착상수들을 구하였다. 또한 Tsui와 Roy[48]는 수용액에서 compost에 대한 atrazine의 흡착을 조사하였다. 본 연구에서는 친수성 VOC로서 에탄올을 선정하고, 바이오필터 유기 및 무기 담체로서 각각 compost와 입상 활성탄을 선정하여, 미생물 활성을 제거하기 위하여 멸균된 물에 젖은 바이오필터 담체의 에탄올 흡착특성을 바이오필터 운전 시와 같은 온도 조건하에서 관찰하고,

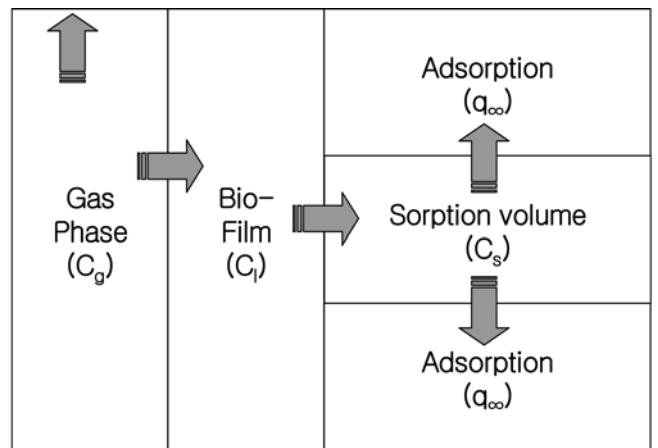


Fig.1. Schematic diagram of four components comprised by process lumping biofilter model(Lim's model).

Fig. 1과 같은 프로세스럼핑 모델(Lim의 모델)이 여러 농도의 친수성 VOC의 경우에도 유효하도록 robust하게 개선하기 위하여 수막으로 둘러싸였다고 가정한 각 멸균된 담체에 대해서 모델적용에 필요한 Freundlich 등온흡착관계식의 흡착상수들을 구하고 상호 비교하였다.

## 2. 실 험

### 2-1. 바이오필터 담체의 특성

바이오필터담체로서 삼천리탄소에서 구입한 입상 활성탄, compost 및 동부피의 입상 활성탄/compost 혼합물을 선정하였다. 바이오필터담체의 겉보기밀도는 1) 평균지름이 2.5 mm인 메스실린더 50 ml부피의 입상 활성탄(BET 비표면적, 1,100 m<sup>2</sup>/g; micro-pore 용적, 0.4~0.6 cc/g; 평균세공반경, 13~20Å) 2) 평균지름이 0.6 mm인 메스실린더 50 ml부피의 compost 및 3) 메스실린더 25 ml부피의 입상 활성탄과 같은 부피에서의 compost를 섞은 혼합물 50 ml의 무게를 재어 입상 활성탄, compost 및 동부피의 입상 활성탄 / compost 혼합물담체의 겉보기밀도를 각각 측정하였다. 또한 바이오필터담체의 moisture 양의 측정은, 바이오필터담체를 ambient 조건 또는 담체 50 ml를 증류수로 젖게 하고 밀폐한 100 ml 비이커에 10일간 유지하였다가, 바이오필터담체 20 g을 채취하여 비이커에 담고 dry oven(Sam Heung vacuum dry oven)안에서 24시간동안 105 °C에서 건조시킨 후 무게를 재어, 건조 전의 담체 무게와 건조후의 담체 무게 차를 건조 전의 무게로 나누어서 함수율을 측정하였다.

한편 젖은 바이오필터담체(입상 활성탄, compost 및 동부피의 입상 활성탄/compost 혼합물) 각각의 50 ml를 각각 용기에 담고 물을 채웠을 때와 안 채웠을 때에 무게차이를 3회 측정하여, 그 평균값으로서 공극율( $\epsilon$ , wet porosity)을 산출하였다. 바이오필터담체 각각의 비표면적은 다음과 같은 방법으로 산출하였다.

단위부피당 표면적, 즉 비표면적(specific surface area)은,

$$a = \frac{A}{V} = \frac{6(1-\epsilon)}{\Phi_s D_p} \quad (1)$$

이고

$$\bar{a} = \sum_i a_i x_i = \sum_i \frac{6(1-\epsilon)x_i}{\Phi_s D_{p_i}} \quad (2)$$

where  $\bar{D}_p$  = 평균입자 지름(평균공칭크기)

$x_i$  = volume fraction

$\phi_{si}$  = 구형도(sphericity)

을 이용하여 산출하였다.

### 2-2. 등온흡착평형 실험방법

1 L의 입상 활성탄을 100 °C의 dry-oven에서 멸균 건조하고 동부피의 compost를 autoclave에서 121 °C의 조건으로 15분간 멸균한 후에 500 ml의 입상 활성탄과 500 ml의 compost를 1 대 1로 균일하게 혼합하였다. 멸균한 입상 활성탄, compost 및 균일하게 혼합된 입상 활성탄과 compost의 혼합물 각각 20 ml를 27개의 40 mL 용량의 갈색 vial 중에서, 각각 9개씩의 vial에 충전하고, 각 vial 내 충전된 담체가 충분히 젖을 때까지 충분한 멸균된 증류수를 각각

의 vial에 첨가하였다. 증류수를 각각의 vial에 첨가한 3시간 후에 입상 활성탄(1조), compost(2조) 및 입상 활성탄/compost 혼합물(3조)이 충전된 각 조의 9개 vial에 에탄올을 각각 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 및 1.0 ml 첨가하였다. 그 후에 30 °C의 incubator에서 10일간 보관하여 vial속에 충전된 담체에 대한 에탄올의 흡착이 평형에 도달하게 하였다. 각 조의 9개 vial에 에탄올을 첨가한 10일 후에 각 vial의 기상에서 100  $\mu$ l gas-tight syringe (Hamilton, USA)로 샘플을 채취하여 에탄올 농도를 측정하였다.

### 2-3. VOC 분석방법

Flame ionization detector(FID)와 Supelco에서 구입한 SUPELCO WAX<sup>TM</sup>-10 fused silica capillary column(30 m×0.53 mm×2.0  $\mu$ m)을 장착한 가스크로마토그래피(Shimadzu, GC-17A AFw Ver.3)를 Scott Specialty Gas에서 주문하여 구입한 표준가스(Supelco, scotty IV Cat. No. 501883)로 calibration을 수행하였다. 에탄올을 함유한 각 vial의 기상에서 100  $\mu$ l gas-tight syringe(Hamilton, USA)로 샘플을 채취하고 가스크로마토그래피의 injector에 주사하여 에탄올 peak가 용출될 때까지의 retention time에서의 에탄올의 농도를 측정하였다. Carrier gas는 질소(99.999%)를 사용하였고 적용한 유량은 4 ml/min이었다. injector, oven(column) 및 detector의 운전온도는 각각 200 °C, 90 °C, 250 °C이었다.

### 2-4. 평형 흡착량 및 Freundlich 흡착상수 산출

등온흡착평형실험에서 2-3 항의 VOC 분석방법에 의하여 각각의 vial에서 에탄올 기상농도를 측정하고 아래의 식에 의하여 각각의 충전된 담체에 평형 흡착된 에탄올 양( $q_{\infty}$ )을 산출하였다.

$$\text{Adsorbed amount of ethanol} \left( \frac{\text{mg ethanol}}{\text{mg adsorbent}} \right) = \frac{\beta \rho_{ethanol} \times 10^3 - \alpha \times 2.05 \left( \frac{273}{T+273} \right) \times 10^{-6} \times \gamma}{\kappa \rho_{solid} \times 10^3} \quad (3)$$

where  $\alpha$ =ethanol concentration in vapor phase(ppm)

$\beta$ =added amount of liquid ethanol(cc)

$\gamma$ =vapor phase volume(cc)

$\kappa$ =solid phase volume(cc)

$\rho_{ethanol}$ =liquid ethanol density(g/cc)

$\rho_{solid}$ =adsorbent density(g/cc)

T=temperature(°C)

한편 위와 같이 구해진 각 조의 평형 흡착된 에탄올 양( $q_{\infty}$ )과 기상의 에탄올농도( $C_g$ )의 상관관계를 구하기 위하여 다음과 같이 수행하였다. 수막의 경우 기상의 에탄올농도( $C_g$ )와 공기/물 분배계수(m 또는  $K_{aw}$ ) 조건으로 평형을 이루고 바이오막의 경우 공기/바이오막 분배계수(m 또는  $K_{ab}$ ) 조건으로 평형을 이루는 담체를 둘러싸고 있는 수막 또는 바이오막의 용존 VOC 농도( $C_l$ ), 또는 바이오막의 용존 VOC 농도( $C_l$ )와 바이오막/물 분배계수( $K_{bw}$ ) 조건으로 평형을 이루는 모세관 응축에 의하여 액상으로 찬 담체 수작부피 내의 용존 VOC 농도( $C_s$ )로 Freundlich 등온 흡착 평형식을 아래의 식 (4) 및 (5)와 같이 표현하였다. 식 (5)에서 Mohseni and Allen[49]이 산출한 것과 같이 공기/바이오막 분배계수( $K_{ab}$ )를 공

기/물 분배계수( $K_{aw}$ )와 바이오막/물 분배계수( $K_{bw}$ )의 비로서 산출하였다.

$$q_{\infty} = K[C_s]^{1/n} = K[C_g/(K_{aw})]^{1/n} \text{ (수막의 경우)} \quad (4)$$

$$q_{\infty} = K[C_s]^{1/n} = K[C_l/K_{bw}]^{1/n} = K[C_g/(K_{ab}K_{bw})]^{1/n} = K[C_g/(K_{aw})]^{1/n} \text{ (바이오막의 경우)} \quad (5)$$

이와 같이 수막의 경우와 바이오막의 경우에 있어서 식 (4) 및 (5)와 같이 동일한 Freundlich 등온 흡착 평형식이 구하여졌다. 따라서 바이오필터 운전과 같이 바이오막이 있는 경우의 바이오필터 담체의 Freundlich 등온 흡착 평형식의 흡착상수를 구하기 위하여, 당 연구의 바이오막이 없고 수막만이 담체를 둘러싸고 있는 흡착 평형실험조건에서 관찰된 흡착 평형실험데이터를 활용하였다. 본 실험데이터를 활용한 회귀분석을 수행하여 입상 활성탄, compost 및 입상 활성탄/compost 혼합물 담체 각각에 대한 에탄올에 대한 Freundlich 등온 흡착 평형식의 흡착상수로서 흡착능( $K$ ) 및 흡착지수( $1/n$ )의 값을 통계적인 방법으로 구하였다.

한편 에탄올에 있어서 공기/물 분배계수( $m$  또는  $K_{aw}$ )는 Staudinger와 Roberts의 문헌데이터에서 유도한 Van't Hoff 식으로 아래와 같이 표현될 수 있다[50].

$$\log K_{aw} = 5.576 - 2757/T(K) \quad (6)$$

식 (6)에 의하여 흡착실험 온도조건인 30 °C(303 K)에서의 에탄올의 공기/물 분배계수( $m$  또는  $K_{aw}$ )는 0.0003으로 산출되어진다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 바이오필터 담체 특성 분석결과

##### 3-1-1. 밀도 및 moisture 양 측정 결과

입상 활성탄, compost 및 동부피의 입상 활성탄/compost 혼합물의 밀도는 각각 0.41 g/cc, 0.37 g/cc 및 0.39 g/cc이었다. 또한 담체를 증류수로 젖게 하고 밀폐한 비이커에 10일 간 유지된 입상 활성탄, compost 및 동부피의 입상 활성탄/compost 혼합물의 함수율은 각각 45%, 62% 및 54%이었다(Ambient 조건 하에서 compost의 moisture 양은 44%이었다).

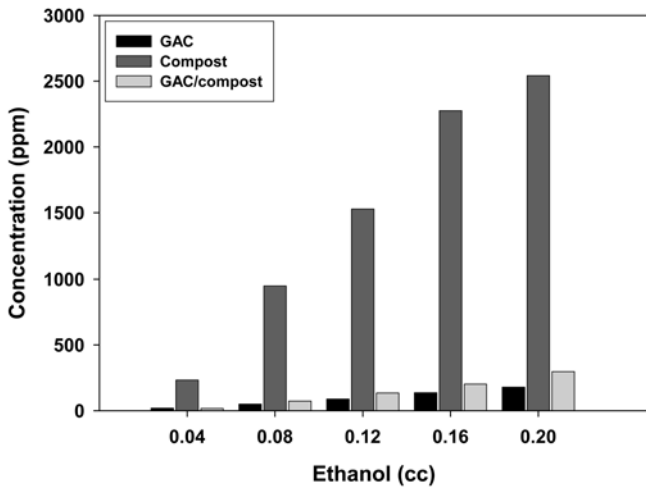


Fig. 2. Ethanol concentration in the vapor phase of vials packed with sterilized GAC, sterilized compost or GAC/compost sterilized mixture according to the amount of ethanol added to each vial.(0.04-0.2 cc).

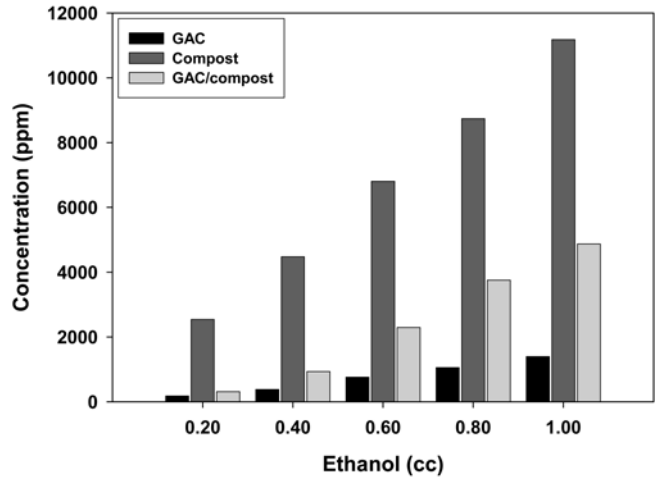


Fig. 3. Ethanol concentration in the vapor phase of vials packed with sterilized GAC, sterilized compost or GAC/compost sterilized mixture according to the amount of ethanol added to each vial. (0.2~1.0 cc).

#### 3-1-2. 담체의 공극율( $\epsilon$ ) 및 비표면적( $a$ ) 산출

입상 활성탄, compost 및 동부피의 입상 활성탄/compost 혼합물의 공극률( $\epsilon$ , wet porosity)은 각각 0.553, 0.702 및 0.602의 값이 산출되었다. 입상 활성탄 및 compost의 구형도( $\Phi_s$ )를 각각 round sand와 같은 0.83 및 1로 간주하였다. 따라서 유효지름이 2.5 mm 인 입상 활성탄의 경우 비표면적이 1292.6 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>을 얻었고; 유효지름이 0.6 mm인 compost의 경우는 비표면적이 2980 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>을 얻었다. 한편 동부피의 입상 활성탄/compost의 경우는 비표면적이 2136.3 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>이었다.

#### 3-2. 흡착평형 실험결과

기상에서의 에탄올농도는 Fig. 2, 3에서와 같이 첨가한 에탄올 양에 따라서 각각의 멸균된 충전물인 입상 활성탄(1조), compost(2조) 및 동부피의 입상 활성탄/compost 혼합물(3조)의 각조마다 선형으로 증가하였다. 같은 양의 에탄올을 vial에 첨가하였을 때에 입상 활성탄은 compost보다 흡착능이 크므로, 충전물이 입상 활성탄의 경우가 compost의 경우보다 기상에서의 에탄올 농도가 매우 낮게 나타났는데 그 값은 compost의 경우의 10% 정도이었다.

#### 3-3. 멸균된 담체의 흡착평형상수

멸균된 담체의 흡착평형 실험에서와 같이 수막으로 덮여진 멸균된 담체에 식 (4)와 같은 Freundlich 등온 흡착평형 식을 적용하고, 구해진 흡착상수들은, 휘발성 유기화합물을 처리하는 바이오필터에서 식 (5)와 같이 동일하게 표현되어지는 바이오막으로 덮여진 바이오필터담체의 흡착특성에 적용할 수 있다.

$$q_{\infty} = K \left( \frac{C_g}{m} \right)^{1/n} \quad (7)$$

where  $m$ =air/water partition coefficient( $K_{aw}$ )

식 (7)의 양변에 log를 취하면 다음과 같은 식 (8)을 얻는다.

$$\log(q_{\infty}) = \log \left( \frac{K}{m^{1/n}} \right) + \frac{1}{n} \log C_g \quad (8)$$

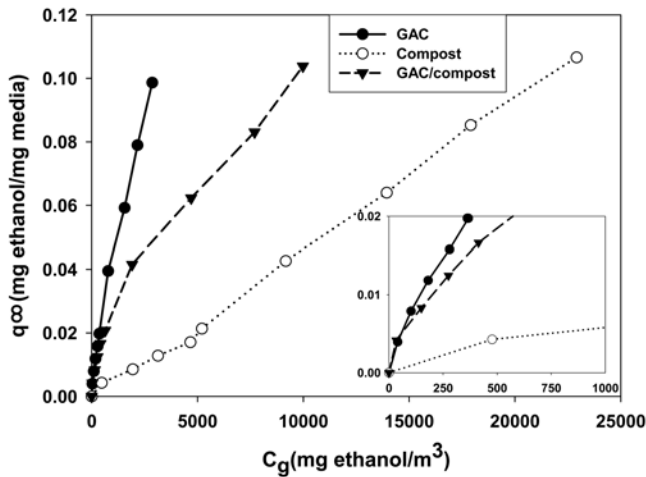


Fig. 4. Adsorbed amount of ethanol in the solid phase of vials packed with sterilized GAC, sterilized compost or GAC/compost sterilized mixture according to the concentration of ethanol in the vapor phase.

따라서 Fig. 2, 3과 같은 멸균된 담체의 흡착평형 실험결과에서 얻은 멸균된 담체에 대한 기상의 에탄올농도와 식 (3)을 이용하여 구한 각각의 충전된 담체에 평형 흡착된 에탄올 양( $q_{\infty}$ )의 상관관계는 Fig. 4와 같이 관찰되었다.

한편 Caputo 등[39]의 실험에 의하면, 제오라이트를 함유한 응회암(tuff)에 대한 에탄올의 20 °C 또는 40 °C의 등온흡착실험의 경우에 약 10 mm Hg(i.e., 2,430 mg-ethanol/m<sup>3</sup>)의 에탄올분압에서 약 1 mol/kg(i.e., 0.05 mg-ethanol/mg-media)의 포화된 에탄올 등온 흡착 평형 값을 보여주었다. Caputo 등[39]의 실험결과와 Fig. 4와 같은 당 연구결과를 비교하여, 약 10 mm Hg(i.e., 2,430 mg-ethanol/m<sup>3</sup>)의 에탄올분압에서 제오라이트를 함유한 응회암(tuff)에 대한 에탄올의 20 °C 또는 40 °C의 등온 흡착 값은, 당 연구에 있어서 담체가 입상 활성탄의 경우의 등온 흡착 값의 약 2/3 정도이고 compost의 경우의 등온 흡착 값의 약 4배이었으나, 동부피의 입상 활성탄/compost 혼합물의 경우와 비슷한 등온 흡착 값을 보였다. 그러나 당 연구에서 담체로 사용한 입상 활성탄, compost 및 동부피의 입상 활성탄/compost 혼합물에 대한 에탄올의 등온 흡착 특성은, Caputo 등[2007][39]의 실험에서 제오라이트를 함유한 응회석(tuff)에 대한 에탄올의 등온흡착 특성이 같은 기상의 에탄올 농도에서 포화된 등온 흡착 평형을 보이는 것과 다르게, Fig. 5에서와 같이 흡착 평형 값과 기상의 에탄올농도의 양변에 로그를 각각 취한 스케일에서 선형 상관관계를 보여서 Freundlich 등온 흡착 평형 모델 특성과 일치하였다. 또한 El-Sharkawy 등[40]은 BET 비표면적이 3,200 m<sup>2</sup>/g이고 평균세공지름이 2 nm인 다공성 활성탄소(i.e., Maxsorb III)의 30 °C에서 약 10 kPa의 기상의 에탄올농도(i.e., 20,000 mg-ethanol/m<sup>3</sup>-media)에서 약 1.2 kg-ethanol/kg-medium의 등온흡착 평형 값에서 포화된다고 보고하였다. 이러한 등온 흡착

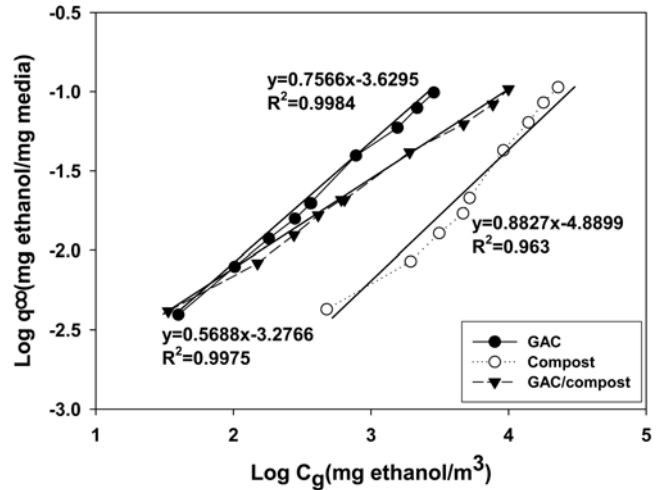


Fig. 5. Adsorbed amount of ethanol in the solid phase of vials packed with sterilized GAC, sterilized compost or GAC/compost sterilized mixture according to the concentration of ethanol in the vapor phase(log plot).

평형 값은 같은 기상의 에탄올농도에서 당 연구에서의 쓰인 입상 활성탄의 경우보다 약 6배였고, 당 연구를 위한 실험에서는 포화된 값이 아니라 기상의 에탄올농도가 증가할수록 계속 커졌다.

한편 Fig. 4와 같은 멸균된 담체에 대한 기상의 에탄올농도와 충전된 담체에 평형 흡착된 에탄올 양( $q_{\infty}$ )에 식 (8)과 같이 각각 log를 취하여 Fig. 5와 같은 선형적인 상관관계를 보임이 관찰되었다. 식 (6)에 의하여 흡착실험 온도조건인 30 °C(303 K)에서의 에탄올의 공기/물 분배계수( $m$  또는  $K_{aw}$ )는 0.0003으로 산출되어지므로, 멸균된 각 담체마다의 Freundlich 흡착상수는 Table 1과 같다.

멸균된 입상 활성탄 담체의 흡착능 상수(K) 값은 멸균된 compost 담체의 흡착능 상수(K) 값보다 약 50배 정도 컸으며, compost에 비하여 매우 큰 입상 활성탄의 흡착능을 보여주고 있다. 멸균된 입상 활성탄/compost의 균일한 혼합담체의 경우 흡착평형실험 결과를 회귀 분석한 결과로서 흡착능 상수(K) 및 흡착지수(1/n)의 값은 전술한 Table 1과 같이 각각  $5.243 \times 10^{-6}$  mg-ethanol/mgmedia/(mg-ethanol/m<sup>3</sup>)<sup>0.568</sup>과 0.5688이었는데, 흡착능 상수(K)의 값은 오히려 멸균한 입상 활성탄의 경우보다 컸으나 흡착지수의 값은 더 작아져서, 결과적으로 Fig. 4의 inset 또는 Fig. 5에서와 같이 기상의 에탄올농도( $C_g$ )가 비교적 저농도인 70 mg-ethanol/m<sup>3</sup> 이하에 있어서는 입상 활성탄 경우와 유사한 평형 흡착량 값을 보이고; 에탄올 농도가 커질수록 입상 활성탄보다 더 작은 평형 흡착량 값을 가지는 흡착거동을 나타내었다. 한편 Delhomenie 등[46]는 구리황산 수용액으로 젖게 하여 미생물활성이 제거된 compost로 충전된 바이오필터에서의 관찰된 동적 흡착평형 특성으로서, 기상의 톨루엔농도가 1 g-toluene/m<sup>3</sup>일 때에 20 µg-toluene/g-media의 흡착량이 선형적으로 관찰되었고 그에 따른 Freundlich 등온흡착평형 식에서의 Freundlich 흡착능 상수 및 흡착지수는 각각 19.4 µg-toluene/g-media

Table 1. Freundlich adsorption isotherm parameters for sterilized packing media

Freundlich adsorption parameter	Sterilized GAC	Sterilized GAC/compost	Sterilized compost
1/n	0.7566	0.5688	0.8827
$K \left( \frac{\text{mg-ethanol/mgmedia}}{(\text{mg-ethanol/m}^3)^{1/n}} \right)$	$5.070 \times 10^{-7}$	$5.243 \times 10^{-6}$	$1.000 \times 10^{-8}$

및 0.92 이라고 보고하였다. 반면에 당 연구에서는, compost의 경우 기상의 에탄올농도가 1 g-ethanol/m<sup>3</sup>일 때에 Delhomenie 등[51]이 보고한 톨루엔 흡착의 경우보다 2500배 정도 큰 약 50 mg-ethanol/g-media의 흡착량이 거의 선형적으로 관찰되었다. 톨루엔에 있어서 공기/물 분배계수(m 또는 K<sub>aw</sub>)는 EPICS-SPME 법[50]에 의하여 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\ln K_{aw} = 11.25 - 3770.4/T(K) \quad (9)$$

식 (9)에 의하여 Delhomenie 등[46]의 흡착실험 온도조건인 22 °C(295 K)에서의 톨루엔의 공기/물 분배계수(m 또는 K<sub>aw</sub>)는 0.2163으로 산출되어진다. 따라서 당 연구에서의 에탄올과 Delhomenie 등[46]의 흡착실험에서의 톨루엔의 공기/물 분배계수(m 또는 K<sub>aw</sub>)의 비의 크기 정도는 약 10<sup>3</sup> 정도로 간주되어질 수 있는데, 이러한 값은 전술한 2,500배와 같이 흡착량 비의 크기 정도와 거의 일치한다. 이와 같이 Delhomenie 등[46]의 흡착실험의 경우, compost 내부의 미세공극 내에 응축된 물에 대한 톨루엔의 용해도가 에탄올에 비해서 아주 작아서 용해된 낮은 톨루엔농도가 상대적으로 낮은 흡착평형에 영향을 주었다고 해석되어진다.

#### 4. 결 론

바이오막, 가스상, sorption 부피 및 흡착의 구성요소로 이루어진 프로세스럼핑 바이오필터모델(Lim의 모델)이 여러 농도의 친수성 VOC의 경우에도 유효하도록 robust하게 개선하기 위하여, 수막으로 둘러싸였다고 가정된 각 멸균된 담체에 대해서 모델적용에 필요한 Freundlich 등온흡착관계식의 흡착상수를 구하였다. 프로세스럼핑 모델 파라미터 중에서 이 모델의 근간을 이루는 바이오필터 미디움과의 흡착과 관련한 중요한 파라미터들은 모델의 목적에 맞는 별도의 실험을 통하여 구하는 것이 필수적이다. 당 연구에서는 바이오필터운전조건과 같은 젖은 담체 및 30 °C를 유지하는 정상상태의 에탄올 등온흡착평형실험을 통하여, 각 담체 내부의 세공에 응축된 물에 용해된 에탄올농도와 등온흡착평형을 이루는 에탄올의 평형 흡착량을 묘사하는 Freundlich 등온흡착모델의 파라미터인 흡착능 상수(K) 및 흡착지수(1/n) 값을 멸균된 입상 활성탄, compost 및 동부피의 입상 활성탄/compost 담체에 대하여 각각 구축하였다. 에탄올에 대하여 구축된 Freundlich 등온흡착모델의 파라미터인 흡착능 상수(K) 및 흡착지수(1/n) 값은 멸균된 입상 활성탄, compost 및 동 부피의 입상 활성탄/compost 담체에 대하여 각각 0.7566과 5.070×10<sup>-7</sup> mg-ethanol/mgmedia/(mg-ethanol/m<sup>3</sup>)<sup>0.7566</sup>, 0.8827과 1.000×10<sup>-8</sup> mg-ethanol/mgmedia/(mg-ethanol/m<sup>3</sup>)<sup>0.8827</sup>, 0.5688과 5.243×10<sup>-6</sup> mg-ethanol/mgmedia/(mg-ethanol/m<sup>3</sup>)<sup>0.5688</sup>이었다. 제오라이트를 함유한 응회암(tuff)에 대한 약 10 mm Hg의 에탄올분압에서 20 °C 또는 40 °C의 등온 흡착 값은, 당 연구에 있어서 동부피의 입상 활성탄/compost 혼합물의 경우와 비슷한 등온 흡착 값을 보였고 입상 활성탄의 경우의 등온 흡착 값의 약 2/3 정도이고 compost의 경우의 등온 흡착 값의 약 4배 이었으며, 주어진 기상의 에탄올 농도범위에서 포화된 흡착 평형 값을 나타내었고, 반면에 당 연구에서는 Freundlich 등온 흡착 평형 모델 특성과 일치하였다. 또한 다공성 활성탄소(i.e., Maxsorb III)의 30 °C에서 약 10 kPa의 기상의 에탄올농도에서 등온 흡착 평형 값은 같은 기상의 에탄올농도에서 당 연구에서의 입상 활성탄의 경우보다 약 6배

인 포화된 흡착평형 값이었으나, 당 연구에서는 기상의 에탄올농도가 증가할수록 계속 커졌다. 반면에 당 연구에서의 compost담체의 경우 기상의 에탄올농도가 1 g-ethanol/m<sup>3</sup>일 때에 Delhomenie 등이 보고한 compost 담체에 대한 톨루엔 흡착의 경우보다 2,500배 정도 큰 약 50 mg-ethanol/g-media의 흡착량이 거의 선형적으로 관찰되었다. 당 연구에서의 에탄올과 Delhomenie 등의 흡착실험에서의 톨루엔의 공기/물 분배계수(m 또는 K<sub>aw</sub>)의 비의 크기 정도는 약 10<sup>3</sup> 정도로 간주되어질 수 있는데, 이러한 값은 전술한 흡착량 비의 크기 정도와 거의 일치하였다. 이와 같이 compost 내부의 미세공극 내에 응축된 물에 대한 톨루엔의 용해도가 에탄올에 비해서 아주 작아서 용해된 낮은 톨루엔농도가 이와 같은 평형흡착거동에 영향을 주었다고 해석된다. 당 연구에서의 미생물활성이 제거된 젖은 담체조건에서 유지되는 바이오필터담체의 등온흡착평형 거동과 Delhomenie 등의 미생물활성이 제거된 젖은 compost로 충전된 바이오필터에서의 관찰된 동적 등온흡착평형 특성 연구는, 흡착되는 물질이 각각 에탄올과 톨루엔으로서 상호 다름에도 불구하고, 젖은 흡착담체 조건이 실험조건에 고려되었다는 점에서 상호 비교할 가치가 있다.

#### 감 사

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-041-D00433).

#### 참고문헌

- Hirai, M., Ohtake, M. and Shoda, M., "Removal Kinetics of Hydrogen Sulfide, Methanethiol and Dimethyl Sulfide by Peat Biofilters," *J. Ferment. Bioeng.* **70**, 334-339(1990).
- Ottengraf, S. P. P., *Exhaust Gas Purification, Biotechnology* (H.J., Rehm, G. Reed, eds) Vol. 8, pp.426-452, VCH, Weinheim, Germany(1986).
- Shareefdeen, Z., Baltzis, B. C., Oh, Y. S. and Bartha, R., "Bio-filtration of Methanol Vapor," *Biotechnol. Bioeng.*, **41**, 512-524 (1993).
- Deshusses, M. A., Hamer, G., and Dunn, I. J., "Behaviour of Bio-filters for Waste Air Biotreatment. 1. Dynamic Model Development," *Environ. Sci. Technol.*, **29**, 1048-1058(1995).
- Speitel, G. E. and Mclay, Jr., D. S., "Biofilm Reactors for Treatment of Gas Streams Containing Chlorinated Solvents," *J. Environ. Eng.*, **119**, 658-678(1993).
- Liu, P. K. T., Gregg, R. L. and Sabol, H. K., "Engineered Biofilter for Removing Organic Contaminants in Air," *Air & Waste*, **44**, 209-303(1994).
- Deshusses, M. A. and Dunn, I. J., *Modelling Experiments on the Kinetics of Mixed-solvent Removal from Waste Gas in a Biofilter*, Proceedings of the 6th European Congress on Biotechnology (L. Alberghina, L. Frontali and P. Sensi eds.), pp.1191-1198, Elsevier Science B. V.(1994).
- Deshusses, M. A. and Hamer, G., "The Removal of Volatile Ketone Mixtures from Air in Biofilters," *Bioprocess Engineering*, **9**, 141-146(1993).
- Hodge, D. S. and Devinsky, J. S., "Biofilter Treatment on Ethanol Vapors," *Environmental Process*, **13**(3), 167-173(1994).

10. Tang, B., Hwang, S. J. and Hwang, S., "Dynamics of Toluene Degradation in Biofilters," *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, **12**(3), 207-219(1995).
11. Eckhart, A., Proceedings of Biological Treatment of Industrial Waste Gases, Dechema, Heidelberg, Germany, Mar. 24-26, 2pp. (1987).
12. Buchner, R., "Auswirkungen Verschiedener Betriebszustände in der Biologischen Abluftreinigung am Beispiel von Biofiltern," Ph. D. Thesis, T. U. Wien, Austria(1989).
13. Leson, G. and Winer, A. M., "Biofiltration: An Innovative Air Pollution Control Technology for VOC Emissions," *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, **41**, 1045-1054(1991).
14. Sorial, G. A., Smith, F. L., Suidan, M. T. and Biswas, P., "Evaluation of Trickle Bed Biofilter Media for Toluene Removal," *Journal of the Air & Waste Management Association*, **45**, 801-810(1995).
15. Hodge, D. S. and Deviny, J. S., "Modeling Removal of Air Contaminants by Biofiltration," *Journal of Environmental Engineering*, **121**(1), 21-32(1995).
16. Deshusses, M. A., "Transient Behaviour of Biofilters: Start-up, Carbon Balances and Interactions Between Pollutants," *Journal of Environmental Engineering*, **123**(6), 563-568(1997).
17. Deshusses, M. A., Hamer, G., and Dunn, I. J., "Transient State Behaviour of Biofilter Removing Mixtures of Vapors of MEK and MIBK From Air," *Biotechnol. Bioengr.*, **49**(5), 587-598(1996).
18. Zarook, S. M. and Baltzis, B. C., "Biofiltration of Toluene Vapor Under Steady State and Transient Conditions: Theory and Experimental Results," *Chemical Engineering Science*, **49**, 4347-4360 (1994).
19. Zarook, S. M., Shaikh, A. A. and Ansar, Z., "Development, Experimental Validation and Dynamic Analysis of A General Transient Biofilter Model," *Chemical Engineering Science*, **52**(5), 759-773(1997).
20. Wani, A. H., Branion, R. M. R. and Lau, A. K., "Biofiltration: A Promising and Cost Effective Control Technology for Odors, VOCs and Air Toxics," *J. Environ. Sci. Health*, **A32**, 2027-2055 (1997).
21. Lim, K. H., "Waste Air Treatment with a Biofilter: for the Case of Excess Adsorption Capacity," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **34**(6), 766-775(2001).
22. Lim, K. H., "Waste Air Treatment with Biofilter: for the Case of Adsorption Capacity Limited," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **34**(6), 776-789(2001).
23. Lim, K. H. and Lee E. J., "Biofilter Modeling for Waste Air Treatment: Comparisons of Inherent Characteristics of Biofilter Models," *Korean J. Chem. Eng.*, **20**(2), 315-327(2003).
24. Lith, "Evaluating Design Options for Biofilters," *J. Air & Waste Mgmt. Assoc.*, **47**, 37-48(1997).
25. Auriá, R., Aycagner, A.-C. and Deviny, J. S., "Influence of Water Content On Degradation Rates for Ethanol in Biofiltration," *J. Air & Waste Mgmt. Assoc.*, **48**, 65-70(1997).
26. Amanullah, Md., Farooq, S. and Viswanathan, S., "Modeling and Simulation of Biofilter," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **37**(7), 2765-2774(1999).
27. Jorio, H. K., Kiared, R., Brezenski, A., Leroux, G. Viel and Heitz, M., "Treatment of Air Polluted with High Concentrations of Toluene and Xylene in a Pilot-scale Biofilter," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **73**, 183-196(1998).
28. Lee, T. J., Kwon, O. Y. and An, S. J., "Removal of Odor Causing Compounds Using Adsorption of Crushed Refused-tire and Phenol Oxidizing Bacteria," *Cryptococcus Terreus A, J. KSEE*, **22**, 1601-1607(2000).
29. Lim, K. H. and Park, S. W., "The Treatment of Waste-air Containing Mixed Solvent Using a Biofilter: 1. Transient Behavior of Biofilter to Reat Waste-air Containing Ethanol," *Korean J. Chem. Eng.*, **21**(6), 1161-1167(2004).
30. Lim, K. H., Park, S. W., Lee, E. J. and Hong, S. H., "Treatment of Mixed Solvent Vapors with Hybrid System Composed of Biofilter and Photo-catalytic Reactor," *Korean J. Chem. Eng.*, **22**(1), 70-79(2005).
31. Lim, K. H. and Park, S. W., "The Treatment of Waste-air Containing Mixed Solvent Using A Biofilter: 2. Treatment of Waste-air Containingf Ethanol and Toluene in a Biofilter," *Korean J. Chem. Eng.*, **22**(2), 228-233(2005).
32. Islander, R. I., Deviny, J. S., Mansfield, F., Postyn, A. and Shin, H., *J. Environ. Eng.* **117**, 751(1990).
33. Oyarzun, P., Arancibia, F., Canales, C. and Aroca, G. E., "Biofiltration of High Concentration of Hydrogen Sulfide Using *Thiobacillus Thioparus*," *Process Biochemistry*, **00**, 1(2003).
34. Cho, K.-S., Ryu, H. W. and Lee, N.Y., "Biological Deodorization of Hydrogen Sulfide Using Porous Lava as a Carrier of *Thiobacillus thioxidans*," *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **90**, 25(2000).
35. Wani, A. H., Branion, M. R. and Lau, A. K., "Effects of Periods of Starvation and Fluctuating Hydrogen Sulfide Concentration on Biofilter Dynamics and Performance," *Journal of Hazardous Materials*, **60**, 287(1998).
36. Chung, Y.-C., Huang, C. and Tseng, C.-P., "Biodegradation of Hydrogen Sulfide by a Laboratory-scale Immobilized *Pseudomonas putida* CH11 Biofilter," *Biotechnology Progress*, **12**, 773(1996a).
37. Chung, Y.-C., Huang, C. and Tseng, C.-P., "Operation Optimization of *Thiobacillus thioparus* CH11 in a Biofilter for Hydrogen Sulfide Removal," *Journal of Biotechnology*, **52**, 31 (1996b).
38. Chung, Y.-C., Huang, C. and Tseng, C.-P., "Biological Elimination of H<sub>2</sub>S and NH<sub>3</sub> from Wastegases by Biofilter Packed with Immobilized Heterotrophic Bacteria," *Chemosphere*, **43**, 1043(2001).
39. Caputo, D., Iucolano, F., Pepe, F. and Colella, C., "Modeling of Water and Ethanol Adsorption Data on a Commercial Zeolite-rich Tuff and Prediction of the Relevant Binary Isotherms," *Microporous and Mesoporous Materials*, **105**, 260-267(2007).
40. El-Sharkway, I. I., Saha, B. B., Koyoma, S., He, J., Ng, K. C. and Yap, C., "Experimental Investigation on Activated Carbon-ethanol Pair for Solar Powered Adsorption Cooling Applications," *Refrigeration*, xxx, 1-7(2008).
41. Kim, B. K., Yang, B. H. and Ryu, S. K., "Propylamine Adsorption Characteristics of Surface-treated Activated Carbon Fibers with Nitric Acid and Sulfuric Acid," *Korean Chem. Eng. Res.*, **42**, 551-557(2004).
42. Woo, K. J., Kim, S. D. and Lee, S. H., "Adsorption Characteristics of Multi-component VOCs Including Poorly Adsorbable Chemicals on Activated Carbonaceous Adsorbents," *Korean Chem. Eng. Res.*, **45**, 277-285(2007).
43. Son, M. S., Kim, S. D., Woo, K. J., Park, H., Seo, M., Lee, S. and Ryu, S. K., "Adsorption Characteristics of Three Components Vol-

- tile Organic Compounds on Activated Carbonaceous Adsorbents," *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**, 669-675(2006).
44. Jeong, B. M., Kang, S. H., Choi, H. W., Lee, C. H., Lee, B. K. and Choi, D. K., "Pure Binary Mixture Gases Adsorption Equilibria of Hydrogen/methane/ethylene on Activated Carbon," *Korean Chem. Eng. Res.*, **43**, 371-379(2005).
45. Kim, S. J., Shim, W. G., Kim, T. Y., Moon, H., Kim, S. J. and Cho, S. Y., "Adsorption Equilibrium Characteristics of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid and 2,4-dinitrophenol on Granular Activated Carbons," *Korean J. Chem. Eng.*, **19**, 967-977(2002).
46. Delhomenie, M.-C., Bibeau, L. and Heitz, M., "A Study of the Impact Size and Adsorption Phenomena in a Compost-based Biological Filter," *Chemical Engineering Science*, **57**, 4999-5010 (2002).
47. Ruthven, D. M., *Principles of Adsorption and Adsorption Process*, Wiley, New York, NY(1984).
48. Tsui, L. and Roy, W. R., "Effect of Compost Age and Composition on the Atrazine Removal from Solution," *Journal of hazardous materials*, **B139**, 79-85(2007).
49. Mohseni, M. and Allen, D. G., "Biofiltration of Mixtures of Hydrophilic and Hydrophobic Volatile Organic Compounds," *Chemical Engineering Science*, **55**, 1545-1558(2000).
50. Staudinger, J. and Roberts, P. V., "A Critical Compilation of Henry's Law Constant Temperature Dependence Relations for Organic Compounds in Dilute Aqueous Solutions," *Chemosphere*, **44**, 561-576 (2001).
51. Görgényi, M., Dewulf, J. and Van Langenhove, H., "Temperature Dependence of Henry's Law Constant in An Extended Temperature Range," *Chemosphere*, **48**, 757-762(2002).