

강인한 바이오필터설계를 위한 바이오필터모델: 2. 동적 바이오필터모델

이은주 · 송혜진 · 임광희[†]

대구대학교 화학공학과
712-714 경상북도 경산시 진량읍 내리리 15
(2011년 12월 15일 접수, 2012년 1월 12일 채택)

Biofilter Model for Robust Biofilter Design: 2. Dynamic Biofilter Model

Eun Ju Lee, Hae Jin Song and Kwang-Hee Lim[†]

Department of Chemical Engineering, Daegu University, 15 Naerri-ri, Jillyang-eup, Gyongsan-si, Gyeongbuk 712-714, Korea
(Received 15 December 2011; accepted 12 January 2012)

요 약

바이오필터에서 폐가스에 포함된 유기오염물을 제거하는 효율에 대한 미디움 흡착능력의 영향을 포괄하는 강인한 동적 바이오필터 모델링을 수행하였다. 특히 비정상상태의 운전 조건 하에서도 바이오필터에 의해 처리된 폐가스 내의 유기오염물 농도를 구하기 위한 바이오막, 가스상, 수착(sorption) 부피 및 흡착상의 네가지 모델요소로 구성된 독창적인 모델인 개선된 프로세스럼핑 모델을 제시하였다. 이전의 프로세스럼핑모델에서는 담체에 대한 VOC의 평형 흡착량이 담체의 수착부피 내의 용존 VOC 농도에 선형적으로 비례한다는 가정 하에서 식을 유도하였으므로, 폐가스 처리에 적용이 제한적이었다. 따라서 실제 적용을 위해서 Freundlich 식과 같은 흡착관계식을 프로세스럼핑 모델에 접합하여 모든 농도의 VOC의 경우에 유효한 강인한 프로세스럼핑 모델을 구축하였다. 프로세스럼핑 모델 파라미터 중에서 바이오필터 미디움의 흡착과 관련한 파라미터 값들을 선행논문의 동적 흡착칼럼실험 및 문헌을 통하여 구하였다. 또한 에탄올을 포함한 폐가스처리를 위한 비정상상태의 바이오필터실험을 수행하였고, 그 실험결과와 여러 가지 Thiele modulus(ϕ) 값을 가지는 동적 바이오필터모델링 예측 값과 비교하였다. 이때에 구하여진 Thiele modulus(ϕ) 값은 0.03에 근접하였다.

Abstract – A dynamic biofilter model was suggested to integrate the effect of biofilter-medium adsorption capacity on the removal efficiency of volatile organic compound (VOC) contained in waste air. In particular, the suggested biofilter model is composed of four components such as biofilm, gas phase, sorption volume and adsorption phase and is capable of predicting the unsteady behavior of biofilter-operation. The process-lumping model previously suggested was limited in the application for the treatment of waste air since it was derived under the assumption that the adsorbed amount of VOC equilibrated with biofilter-media would be proportional to the concentration of dissolved VOC in the sorption volume of biofilter-media. Therefore a Freundlich adsorption isotherm was integrated into a robust biofilter process-lumping model applicable to a wide range of VOC concentration. The values of model parameters related to biofilter-medium adsorption were obtained from the dynamic adsorption column experiments in the preceding article and literature survey. Furthermore a separate biofilter experiment was conducted to treat waste air containing ethanol and the experimental result was compared with the model predictions with various values of Thiele modulus (ϕ). The obtained value of Thiele modulus (ϕ) was close to 0.03.

Key words: Dynamic Biofilter Model, Robust Biofilter Design, Thiele Modulus, Biofilter Medium

1. 서 론

흡착능력이 뛰어난 입상 활성탄 미디움은 바이오필터의 오염물 제거효율을 향상시킨다고 보고되어 왔으나[1-4], Hodge et al.[2,5] 및 Zarook et al.[6,7]을 제외한 지금까지의 모든 연구들은 유기 오염물의 바이오필터 미디움과의 흡착 및 탈착의 바이오필터를 통과

하는 폐가스에 대한 오염물 제거 능력에 미치는 영향에 대해서는 미진한 실정이다. Lim[8,9]은 VOC를 포함한 폐가스에 대한 바이오필터의 처리능력에 있어서 미디움의 흡착효과를 바이오필터 모델에 포함시켜서 미디움이 과잉한 흡착능력을 가지고 있을 때와 미디움의 흡착능이 제한적일 때의 각각의 바이오필터모델로서 프로세스럼핑 모델을 제시하였다. 또한 Lim and Lee[10]는 바이오필터 모델에 관련된 component를 바이오막, 가스상(phase), sorption 부피, 흡착상으로 구분하여 선행 연구자들이 제시한 정상상태 및 비정상상태

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

의 바이오필터 모델들을 분류하고 설명하였다. 그러나 담체에 대한 VOC의 흡착량이 담체의 수작부피 내의 용존 VOC 농도에 선형적으로 비례한다는 가정 하에서 식을 유도하였으므로, 폐가스 처리에 적용이 제한적이었다.

이 연구의 궁극적 목표는 바이오필터의 공극율이 중요한 인자가 되는 변형된 기공 네트워크모델 또는 Ergun식의 견지에서 바이오필터 압력강하모델을 구축하는 것이다. 바이오필터의 공극율은 바이오막의 기질농도의 함수인 미생물 성장률과 크게 연관성이 있으므로, 강인한 바이오필터모델은 바이오필터 압력강하모델 구축에 있어서 필수적이다. 이 연구에서는 프로세스럼핑모델에 일반적인 Freundlich 흡착 isotherm과 같은 흡착관계식을 접합하여 강인한 바이오필터모델을 위한 개선을 수행하였다. 프로세스럼핑 모델 파라미터 중에서 바이오필터 미디움과의 흡착과 관련한 파라미터들은 선행된 논문[11]의 에탄올을 함유한 폐가스처리를 수행하는 비정상상태의 연속 흡착칼럼실험결과를 활용하여 구하였다. 또한 폐가스처리 바이오필터의 동적거동을 예측하고, 비정상상태에서 에탄올을 함유한 폐가스를 처리하는 바이오필터의 실험값과 비교 및 평가하였다.

2. 바이오필터 실험

2-1. 바이오필터 실험 장치 및 설계

바이오필터 실험을 위하여 아크릴을 소재로 한 2개의 관을(지름: 5 cm, 길이 25 cm) 직렬로 연결한 바이오필터를 하향류 방식으로 운전하기 위하여 제작하였다. 바이오필터의 출구에는 샘플링 포트를 설치하여 바이오필터에 의한 폐가스처리 분석을 수행하였다. 바이오필터담체를 바이오필터 상부관 및 하부관에 22 cm의 높이로 각각 채워 넣어서 바이오필터의 총 유효높이는 44 cm로 하였다. 바이오필터 담체로서는, 평균지름(D_p)이 3 mm인 입상 활성탄(GAC)과 0.6 mm인 퇴비의 각각을 같은 부피로 혼합한 담체를 사용하였다. 바이오필터 실험에서 담체의 일부분을 유기담체(퇴비)로 하여 미생물에 필요한 영양소를 자체 공급하였고, 바이오필터의 윗부분에서 peristaltic pump(Masterflex)를 이용하여 바이오필터 내의 담체의 pH와 수분 유지를 위하여 미생물 배양액과 같은 buffer solution을 바이오필터 위에서 밀도로 약 2 mL/hr로 공급되게 하였다. Blower(Young Nam Yasunnaga, 토출압력: 0.12 kg/cm², 최대유량: 43 L/min)에서 공급되는 공기는 항온수조(제일과학, J-PW B2)에 의하여 약 40~50 °C로 유지되는 humidifier 칼럼 3개를 통과하여 상대습도가 95~99%를 유지하며, 이 공급공기가 heating band에 의하여 약 140 °C 정도로 가열된 관을 통과할 때에 에탄올을 syringe pump(KD Scientific, Model: KDS200)를 이용하여 다양하게 조절된 양을 이 관에 주입하여 에탄올이 함유된 폐가스를 제조하여 하향류 방식으로 바이오필터 위에서 주입하였다. 압축혼합공기를 이송하는 관은 Tygon 관으로 사용하였고 에탄올이 syringe pump로 주입되는 이후부터는 Viton 관을 사용하여 인공 폐가스를 바이오필터 내부로 공급하였다. 바이오필터는 heating band로서 감아서 반응기의 온도 유지(35~40 °C)를 하였고 반응기를 포함한 각 장치의 fitting은 Swagelok fitting으로 사용하였다.

2-2. 미생물 접종

Pseudomonas putida(KTTC1768)를 분양받아서 다음과 같은 방법으로 배양하였다. Nutrient broth(Merk사) 8 g을 pH 7인 증류수 1

Table 1. Compositions of medium

Salt stock solution		Mineral solution	
NaHPO ₄	70 g/L	CaCl ₂ ·2H ₂ O	0.37 g/250 ml
KH ₂ PO ₄	30 g/L	MgSO ₄ ·7H ₂ O	6.16 g/250 ml
NaCl	50 g/L		
NH ₄ Cl	10 g/L		

L에 녹인 다음에 멸균기에서 121 °C에서 15 분간 멸균시킨 후에 clean bench 안에서 petri-dish 안에 있는 미생물을 백금으로 긁어서 Table 1과 같이 조제한 medium에 떨어뜨려서 shaking incubator에 넣은 후에 26 °C에서 200 rpm의 조건으로 배양하였다. 이때에 optical density를 spectrophotometer를 사용하여 600 nm의 파장에서 3 시간마다 측정하여 흡광도가 0.8 이상일 때에 에탄올을 함유한 폐가스처리용 바이오필터 담체에 접종하였다.

2-3. VOC 분석방법

에탄올 농도는 다음과 같은 방법으로 분석되었다. Flame ionization detector(FID)와 Supelco에서 구입한 SUPELCO WAX™-10 fused silica capillary column(30 m×0.53 mm×2.0 μm)을 장착한 가스크로마토그래피(Shimadzu, GC-17A AFw Ver.3)를 RIGAS에서 구입한 에탄올 표준가스(99.8 ppmv)로 calibration을 수행하였다. 샘플링 포트에서 250 μL gas-tight-syringe로(Hamilton, USA) 에탄올가스 100 μL를 뽑아내어서 가스크로마토그래피의 injector에 주사하여 에탄올 peak가 유출될 때까지의 retention time에서 에탄올의 농도를 측정하였다. Carrier gas는 질소(99.999%)를 사용하였고 적용한 유량은 4 mL/min이었다. Injector, oven(column) 및 detector의 운전온도는 각각 200, 90, 250 °C 이었다. 한편 에탄올의 생물학적 분해에 의하여 생성되는 이산화탄소 농도는 가스분석기(Siemens, Ultramat23)로 측정하였다.

2-4. pH, 밀도측정

담체의 pH는 샘플링 포트에서 샘플을 10 g씩 채취하여 비이커에 담고 3차 증류수 50 mL로 교반 후 상등액 부분을 pH meter(Istek 720P)로 측정하였다. 한편 미생물담체의 밀도는 메스실린더 25 mL의 활성탄과 같은 부피의 퇴비를 섞은 혼합물을 50 mL의 비이커에서 무게를 재어 50 mL 부피당 혼합물(활성탄 : 퇴비=1:1)의 질량으로 밀도를 측정하였다.

2-5. 바이오필터 실험 및 운전

에탄올에 대한 분해능력이 있는 *Pseudomonas putida*를 미생물담체에 접종하고 바이오필터 반응기에 충전한 후에 에탄올을 함유한 폐가스의 처리를 수행하였다. 바이오필터를 약 30 °C에서 유지시키고, 에탄올 농도가 2,180 ppmv(4469 mg-ethanol/m³)인 폐가스를 0.5 L/min의 유량으로 바이오필터로 공급하였다. 에탄올의 유입부하가 158.26 g-ethanol/m³/h의 조건으로 바이오필터를 10일 동안 운전하였다.

3. 바이오필터 모델링

3-1. 바이오필터 모델

바이오필터 모델링을 하는 데 있어 다음 사항들을 가정하였다.

1) 가스상에서의 물질전달 저항은 바이오막의 액상에서의 저항과 비교할 때 아주 작다.

2) 바이오막의 두께는 충전된 미디움의 지름에 비하여 아주 작아서 바이오막은 평면으로 간주되어 질 수 있다.

3) 바이오막과 미디움 내로의 오염물 전달은 확산에 의한다.

4) 가스상과 바이오막, 경계 면은 평형상태에 있다.

5) 바이오필터 내에서 오염물질을 제외한 다른 제한적인 반응물은 없다.

6) 바이오필터에서 오염물의 분해에 일차반응 동력학 모델이 적용된다.

7) 일정한 동역학적인 상수를 적용하기 위하여 바이오막에서의 바이오 질량의 증가는 없이 일정하게 유지된다.

8) 바이오 질량의 분포는 바이오필터 내에 균일하게 분포되어 있다.

9) 바이오막 밑의 미디움 표면 및 내부에서 유기오염물의 흡착 및 탈착 이외의 다른 촉매 반응은 일어나지 않는다.

10) 페가스 내의 유기오염물은 바이오막 내부의 확산계수인 effective diffusivity, D_e 를 가지고 흡수된 유기오염물들을 분해하는 바이오막을 통과하고 미디움의 표면 또는 내부로 확산하자마자 흡착된다. 다공성 미디움 내부에서의 확산에서 표면확산이 pore 확산보다 훨씬 우월하다[12-14].

11) 바이오필터는 플러그 흐름 반응기로서 간주된다.

Fig. 1은 전술된 가정에서처럼 바이오막이 평면으로 간주되었을 때의 동적 바이오필터 모델의 개략도이다.

바이오필터모델의 구성요소 당 물질수지 식은 다음과 같다.

1) 바이오막:

$$\frac{\partial C_l}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C_l}{\partial x^2} - k C_l \quad (1)$$

$$\text{where } C_l(t, x=0) = \frac{C_g(t, h)}{m} \quad (2)$$

2) 수착부피:

$$\frac{V_{sorption} dC_s}{dt} = -D_e \frac{\partial C_l(t, x=1)}{\partial x} a - k_a(1-\varepsilon)C_s \quad (3)$$

$$\text{where } C_l(t, x=1) = K_{bw} C_s(t) \quad (4)$$

3) 가스상:

$$\varepsilon \frac{\partial C_g}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial C_g}{\partial h} = -Na \quad (5)$$

$$\text{where } N = -D_e \frac{\partial C_l}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (6)$$

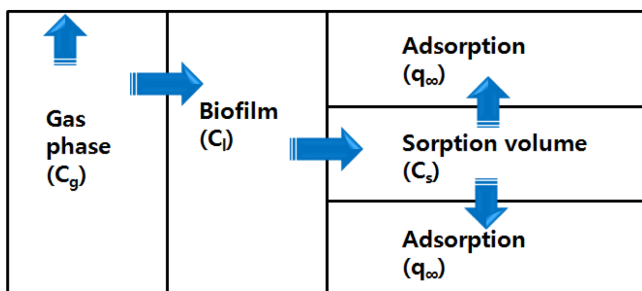


Fig. 1. Schematic diagram of dynamic biofilter model.

4) 흡착상:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -D_e \frac{\partial C_l}{\partial x} \Big|_{x=l} a (V/w) \quad (7)$$

바이오필터모델의 구성요소 중 수착부피에서는, 흡착 후에 표면확산이 이루어지고 표면확산이 pore 확산보다 훨씬 우세하므로[12-14] 식 (3)에서의 흡착속도 항은 표면확산 process를 lumping하고 있다. 유기오염물의 입상 활성탄이 미디움일 때 표면확산의 확산계수인 D_s 는 약 $10^{-15} \text{ m}^2/\text{sec}$ [12-14]이며 바이오막 내부에서의 확산계수 D_e 는 약 $10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$ 으로서 표면확산에 비하여 훨씬 빠른 확산과정으로서, 표면확산이 이루어지자마자 곧 바이오막과 미디움의 계면에서 확산되어 들어오는 유사정상상태로 가정할 수 있다. 이와 같은 전술된 가정을 통하여 바이오막과 미디움사이의 경계 면에서의 경계조건이 다음과 같이 성립이 된다.

$$\frac{\partial C_l}{\partial x}(t, x=1) = -\alpha C_l(t, x=1) \quad \text{where } \alpha = \frac{k_a(1-\varepsilon)}{K_{bw} D_e a} \quad (8)$$

바이오막의 물질수지인 식 (1)은 유사정상상태로 간주될 수가 있다. 그 이유는 바이오막의 두께를 $100 \mu\text{m}$ 로 간주하였을 때에 유기오염 물질이 바이오막을 통과하는데 걸리는 시간의 크기는, $\frac{l^2}{D_e} = (10^{-4} \text{ m})^2 / (10^{-9} \text{ m}^2/\text{s})$ 의 개략적 추산에서 약 10 s 정도인데, 이는 가스상 및 흡착상의 거동보다 매우 빠르기 때문이다. 식 (8)의 경계조건은 바이오필터모델의 구성요소 중, 바이오막의 경계조건을 제공한다. 따라서 유사정상상태인 식 (1)의 해는 다음과 같다.

$$\frac{C_l}{C_g/m} = \frac{\cosh\{\phi(1-\sigma)\} + \frac{\alpha}{\phi/l} \sinh\{\phi(1-\sigma)\}}{\cosh\phi + \frac{\alpha}{\phi/l} \sinh\phi} \quad (9)$$

한편 일반적으로 흡착이 진행됨에 따라서 담체의 흡착능력은 제한되므로, clouding효과를 적용하여 k_a 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$k_a = k'a' \left(1 - \frac{q}{q_\infty}\right) \quad (10)$$

식 (8)에 식 (10)을 대입하면 식 (11)을 구한다.

$$\alpha = \Lambda \left(1 - \frac{q}{q_\infty}\right) \quad \text{where } \Lambda = \frac{k'a'(1-\varepsilon)}{K_{bw} D_e a} \quad (11)$$

모델 단순화를 위하여 평형흡착량 [q_∞] Freundlich 식에 따른다고 가정하면 q_∞ 는 $K[C_l(\sigma=1)]^{1/n}$ 의 값으로 치환할 수가 있으므로 식 (11)에 대입하여 식 (12)을 얻는다.

$$q = \left(1 - \frac{\alpha}{\Lambda}\right) K \left[\frac{\frac{C_g}{m}}{\left(\cosh\phi + \frac{\alpha}{\phi/l} \sinh\phi\right)} \right]^{1/n} \quad (12)$$

이에 따라 바이오필터모델의 구성요소 중, 가스상 및 흡착상의 두 개의 구성요소에 대한 물질수지 식과 하나의 매개변수(α) 관계식으로 이루어진 바이오필터모델의 지배식은 다음과 같다.

1) 가스상:

$$\varepsilon \frac{\partial C_g}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial C_g}{\partial h} = -Na \quad (5)$$

$$\text{where } N = \frac{D_e C_g \phi \sinh \phi + \frac{\alpha}{\phi/l} \cosh \phi}{\cosh \phi + \frac{\alpha}{\phi/l} \sinh \phi} \quad (13)$$

2) 흡착상:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\frac{C_g D_e a (V/w) \alpha}{m}}{\left(\cosh \phi + \frac{\alpha}{\phi/l} \sinh \phi \right)} \quad (14)$$

3) 매개변수(α) 관계식:

$$q = \left(1 - \frac{\alpha}{\Lambda} \right) K \left[\frac{\frac{C_g}{m}}{\left(\cosh \phi + \frac{\alpha}{\phi/l} \sinh \phi \right)} \right]^{1/n} \quad (12)$$

3-2. 수치해석에 의한 적분해법

프로세스럼핑 바이오필터 동적모델은 전술한 바와 같이 식 (5), 식 (12)와 (14)의 지배식으로 구성된다. 이 지배식들을 동시 적분하기 위하여 Compaq Visual Fortran Standard Edition(Version 6.6)를 Fortran compiler로 사용하고, 수학 및 통계 IMSL Fortran 90MP Library(Ver. 4.01)를 link시켜서 바이오필터의 동적거동을 모델링 및 모델 예측하였다.

3-3. 바이오필터 동적모델의 파라미터

3-3-1. 분배계수 산출

Mohseni와 Allen[15]은 VOC를 함유한 폐가스 처리의 모델링에 있어서 공기/물의 분배계수 대신에 공기/biofilm의 분배계수를 적용하는 것이 바이오막의 친유성 특성을 나타내기 위하여 적합하다고 제시하였다. 한편 Mackay[16]는 유기탄소/물의 분배계수(K_{oc})는 octanol/물의 분배계수(K_{ow})와 $K_{oc} = 0.41 K_{ow}$ 의 관계식이 있다고 보고하였고, 바이오막과 같은 침전물과 물 사이의 분배계수(K_{bw})는 유기탄소량($y = \frac{\text{mass}_{\text{organic carbon}}}{\text{mass}_{\text{biofilm}}}$)과 아래와 같은 선형관계를 가지고 있다고 제안하였다.

$$K_{bw} = (\rho_b/1000) y K_{oc} \quad \text{where } \rho_b = \text{density of biofilm (kg/m}^3\text{)}$$

그러면 공기/바이오막의 분배계수(m)는 공기/물의 분배계수(K_{aw})와 바이오막/물의 분배계수(K_{bw})의 비에서 아래와 같이 구할 수가 있다.

$$m = \frac{K_{aw}}{K_{bw}} = \frac{K_{aw}}{(\rho_b/1000) y K_{oc}} = \frac{1000 K_{aw}}{\rho_b y K_{oc}} = \frac{1000 K_{aw}}{\rho_b y (0.41 K_{ow})}$$

where $\rho_b \approx 1,100 \text{ kg/m}^3$ and $y \approx 0.025$

에탄올의 K_{ow} 값은 다음과 같이 산출되어진다[17].

$$\begin{aligned} \log K_{ow} &= 0.229 + \sum n_i f_i + \sum n_j c_j \\ &= 0.229 + 0.5473 + 0.4911 - 1.4086 \\ &= -0.1412 \end{aligned}$$

한편 K_{aw} 값(Henry' Law constant)은 에탄올의 경우에 structural group 의 group contribution에 의하여 측정된 값은 0.0001462이었다[18].

따라서 에탄올의 공기/바이오막의 분배계수(m) 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

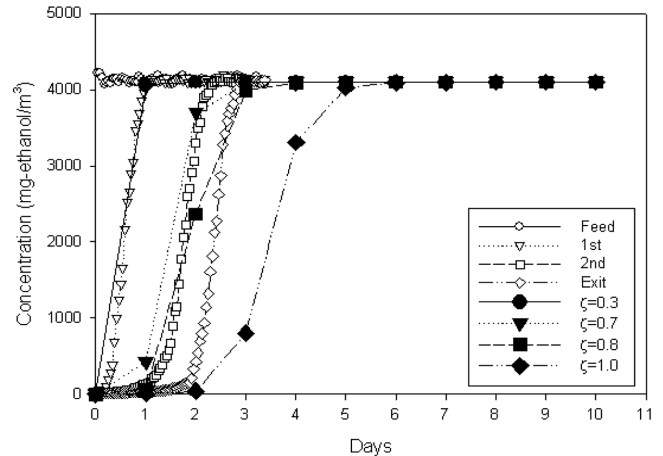


Fig. 2. Adsorption model-fit (black) vs. time evolutions of ethanol concentrations (blank) at each sampling port of adsorption column fed with waste air (2 L/min) containing ethanol of 4100 mg ethanol/m³ (or 2000 ppmv): a. 1st ($\zeta=0.3$); b. 2nd ($\zeta=0.8$); c. Exit ($\zeta=1.0$).

$$m = \frac{1000 K_{aw}}{(1100)(0.025)(0.41) K_{ow}} = \frac{1000(0.0001462)}{(1100)(0.025)(0.41)(0.7224)}$$

따라서 공기/biofilm의 분배계수(m) 값은 0.01795로 산출되어진다.

3-3-2. Freundlich adsorption isotherm의 흡착상수, 흡착지수 및 프로세스럼핑 계수(Λ)의 산출

멸균된 담체의 정적흡착평형실험 결과로서, 바이오필터에 충전된 GAC/compost의 균일한 혼합물의 경우 흡착상수(K) 및 흡착지수($1/n$)의 값은 각각 $5.243 \times 10^{-6} \frac{\text{mg-ethanol/mg media}}{(\text{mg-ethanol/m}^3)^{0.5688}}$ 과 0.5688이었다[19]. 또한 멸균된 담체로 충전된 흡착칼럼에서 에탄올 1,000 및 2,000 ppmv가 함유된 폐가스의 동적흡착처리실험[11]에서 에탄올 2,000 ppmv가 함유된 경우에 에탄올농도의 5% 값을 보이는 과과시간과 흡착칼럼이 포화되어 평형에 이르는 시간을 모델예측 값과 비교 (Fig. 2)하여 모델-fit 프로세스럼핑 계수(Λ) 값과 동적흡착조건에서의 조정된 Freundlich isotherm의 흡착상수를 Table 2와 같이 구하였다. 이렇게 구하여진 모델-fit 파라미터 값을 이용하여 에탄올 1,000 ppmv가 함유된 폐가스의 경우를 Fig. 3과 같이 모델예측하고, 그 예측결과를 멸균된 담체로 충전된 흡착칼럼에서 에탄올 1,000 ppmv가 함유된 폐가스의 동적흡착처리실험값[11]과 비교하였다.

3-4. 바이오필터 모델예측

Thiele modulus, ϕ 를 제외한 바이오필터모델-fit 파라미터를 Table

Table 2. Values of biofilter model-fit parameters and experimental parameters

K	$1.5 \times 10^{-5} \frac{\text{mg-ethanol/mg media}}{(\text{mg-ethanol/m}^3)^{0.5688}}$ [model-fit value]
1/n	0.5688 [18]
Λ	2500/m [model-fit value]
D_e	$10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ [11,12]
a	$2136 \text{ m}^2/\text{m}^3$
u	0.004244 m/s (based on 0.5 L/min of air feeding rate)
H	0.44 m
l	10^{-4} m [20]
V/w	$2.69 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{mg}$
m	0.01795 [this study]

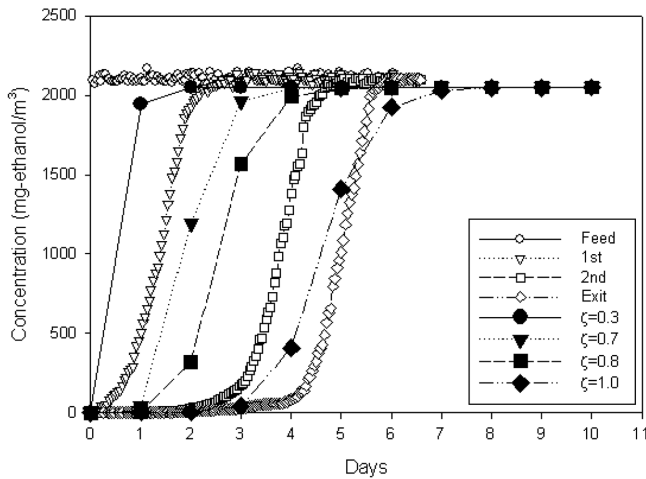


Fig. 3. Adsorption model prediction (black) vs. time evolutions of ethanol concentrations (blank) at each sampling port of adsorption column fed with waste air (2 L/min) containing ethanol of 2050 mg ethanol/m³ (or 1000 ppmv): a. 1st ($\zeta=0.3$); b. 2nd ($\zeta=0.8$); c. Exit ($\zeta=1.0$).

2와 같이 구하였다. 유입폐가스의 에탄올 농도가 2,180 ppmv(4469 mg-ethanol/m³)이고, 처리유량이 0.5 L/min인 바이오필터실험조건과 같은 바이오필터모델 공정조건으로, Table 2와 같은 모델-fit 파라미터를 동적 바이오필터모델 식에 대입하고, 0.01부터 0.05까지의 Thiele modulus, ϕ 의 각각의 값에서 시간에 따른 폐가스의 에탄올 처리농도추이를 Fig. 4a-4e와 같이 구하여 동적 바이오필터 모델 예측을 수행하였다.

4. 바이오필터 실험결과 및 동적 바이오필터모델 예측 비교

4-1. 바이오필터의 담체 분석결과

4-1-1. 밀도 측정 결과

활성탄과 compost를 1:1로 섞은 50 mL 혼합물의 밀도는 0.38이었다.

4-1-2. pH 측정결과

바이오필터 반응기 미생물 담체의 pH는 6.80으로 거의 중성 pH를 보였다.

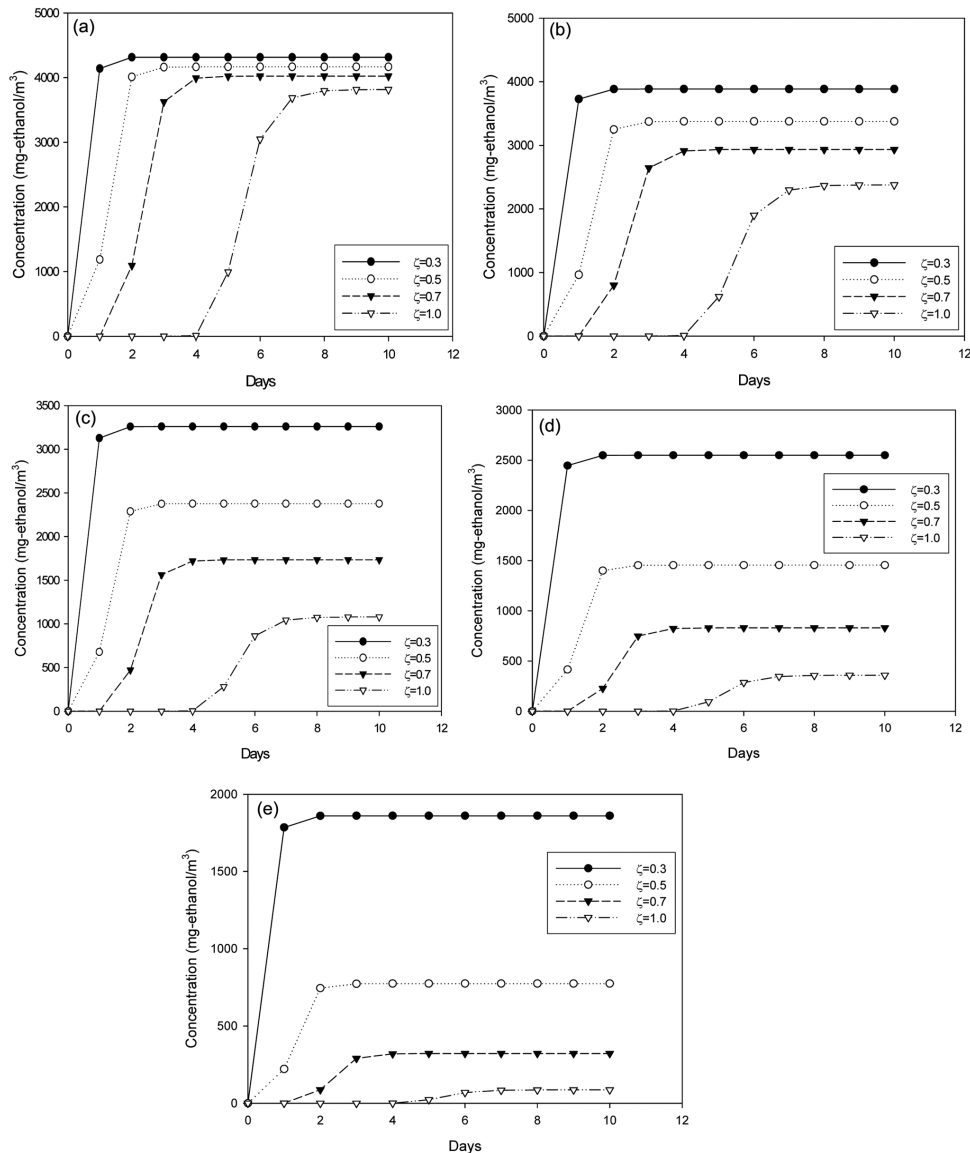


Fig. 4. Dynamic biofilter-model prediction at $\zeta=0.3, 0.5, 0.7$ and 1.0 with the value of f : a) 0.01; b) 0.02; c) 0.03; d) 0.04; e) 0.05.

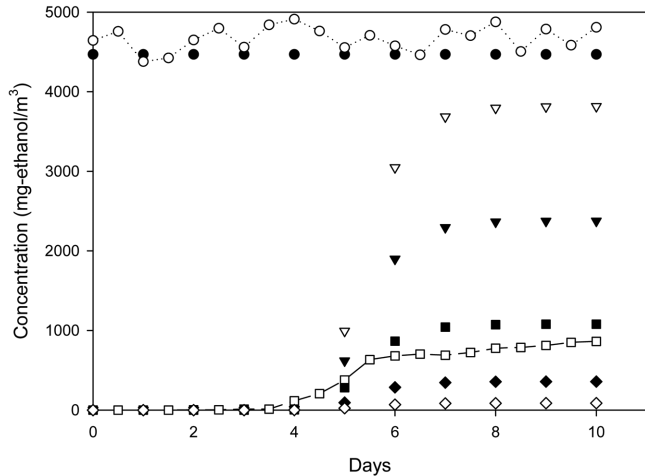


Fig. 5. Transient behavior of biofilter-treated ethanol concentration at the exit of biofilter (□) fed with the waste air containing ethanol (○) and biofilter-model predictions with the model-fit parameter values in Table 2 and fed-ethanol concentration of 2,180 ppmv (4469 mg-ethanol/m³): $\phi=0.01$ (▽); $\phi=0.02$ (▼); $\phi=0.03$ (■); $\phi=0.04$ (◆); $\phi=0.05$ (◇).

4.2. 바이오필터실험결과와 동적 바이오필터모델 예측 비교

유입폐가스의 에탄올 농도가 2,180 ppmv(4,469 mg-ethanol/m³) 이고, 처리유량이 0.5 L/min인 바이오필터실험에서, 바이오필터 반응기의 가동 후 1일부터 10일까지의 바이오필터 출구에서 바이오필터를 통과한 폐가스의 에탄올 농도를 나타내는 바이오필터 실험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 또한 Table 2와 같은 모델-fit 파라미터를 동적 바이오필터모델 식에 대입하고, 0.01부터 0.05까지 Thiele modulus, ϕ 의 각각의 값의 경우에 바이오필터 출구에서 시간에 따른 처리폐가스의 에탄올 농도추이를 Fig. 5와 같이 모델에 예측하였다. 이러한 동적 바이오필터모델 예측과 바이오필터실험 결과를 비교하였고 바이오필터실험 결과와 근접한 바이오필터의 동적 거동을 보이는 모델 예측으로부터 Thiele modulus, ϕ 의 값은 0.03에 근접함을 확인하였다.

5. 결 론

바이오필터에서 폐가스에 포함된 유기오염물을 제거하는 효율에 대한 미디움 흡착능력의 영향을 포괄하는 강인한 바이오필터 모델링을 수행하였는데, 이 바이오필터모델은 바이오막, 가스상(phase), 수착(sorption) 부피 및 흡착상으로 구성되었다. 특히 비정상상태의 운전 조건 하에서도 바이오필터에 의해 처리된 폐가스 내의 유기오염물 농도를 구하기 위한 독창적인 모델인 개선된 프로세스럼핑 모델을 제시하였다. 이전의 프로세스럼핑모델에서는 담체에 대한 VOC의 평형 흡착량이 담체의 수착부피 내의 용존 VOC 농도에 선형적으로 비례한다는 가정 하에서 식을 유도하였으므로, 폐가스 처리에 적용이 제한적이었다. 따라서 실제 적용을 위해서 Freundlich 식과 같은 흡착관계식을 프로세스럼핑 모델에 접합하여 모든 농도의 VOC의 경우에 유효한 강인한 프로세스럼핑모델을 구축하였다. 프로세스럼핑 모델 파라미터 중에서 바이오필터 미디움의 흡착과 관련한 파라미터 값들을 선행논문의 동적 흡착칼럼실험 및 문헌을 통하여 구하였다. 또한 에탄올을 포함한 폐가스처리를 위한 비정상

상태의 바이오필터실험을 수행하여 구해진 실험데이터와 동적 바이오필터모델링 예측 값과 비교하여 Thiele modulus(ϕ) 값을 구하였는데, Thiele modulus(ϕ) 값은 0.03에 근접하였다.

감 사

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성 사업으로 수행된 연구결과입니다.

사용기호

a	: interfacial area per unit of volume [m ² /m ³]
a'	: adsorption area per unit volume of medium [m ² /m ³]
C_g	: concentration in a gas phase [mg/m ³]
C_{go}	: inlet concentration in a gas phase [mg/m ³]
C_l	: concentration in a liquid phase of a biofilm [mg/m ³]
C_s	: concentration averaged in a liquid phase of sorption volume [mg/m ³]
D_e	: effective diffusivity in a biofilm [m ² /sec]
D_s	: coefficient of surface diffusion [m ² /sec]
H	: biofilter bed height [m]
h	: height coordinate of biofilter bed [m]
k	: reaction rate constant of first order [sec ⁻¹]
$K, \frac{1}{n}$: Freundlich isotherm constant [$\frac{\text{mg-ethanol/mg media}}{(\text{mg-ethanol/m}^3)^{1/n}}$]
k_a	: adsorption constant [sec ⁻¹]
k	: intrinsic adsorption constant [m/sec]
l	: biofilm thickness [m]
m	: distribution coefficient
N	: diffusive flux at the interface between gas phase and liquid phase [mg/m ² -sec]
q	: adsorbed substrate mass per unit media mass [mg/mg media]
q_∞	: adsorbed substrate mass per unit media mass in equilibrium with that dissolved in the biofilm ($\sigma=1$) [mg/mg media]
u	: approach velocity of waste gas stream [m/sec]
V	: bed volume [m ³]
$V_{sorption}$: sorption volume [m ³]
w	: mass of medium [mg media]
x	: depth coordinate of biofilm [m]
α	: ratio of $k_a(1-\epsilon)$ to $K_{bw} D_e a$ [m ⁻¹]
ϵ	: bed porosity
ϕ	: Thiele number for first-order reaction (i.e., $l \sqrt{\frac{k}{D_e}}$)
Λ	: α of a clean medium
ζ	: dimensionless height coordinate of a biofilter bed
σ	: dimensionless depth coordinate of biofilm (i.e., $\frac{x}{l}$)

참고문헌

1. 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).
2. Hodge, D. S. and Devinny, J. S., "Biofilter Treatment on Ethanol Vapors," *Environmental Process*, **13**(3), 167-173(1994).

3. Tang, B., Hwang, S. J. and Hwang, S., "Dynamics of Toluene Degradation in Biofilters," *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, **12**(3), 207-219(1995).
4. Sorial, G. A., Smith, F. L., Suidan, M. T. and Biswas, P., "Evaluation of Trickle Bed Biofilter Media for Toluene Removal," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **45**, 801-810 (1995).
5. Hodge, D. S. and Devinny, J. S., "Modeling Removal of Air Contaminants by Biofiltration," *J. Environm. Eng.*, **121**(1), 21-32 (1995).
6. Zarook, S. M. and Balzis, B. C., "Biofiltration of Toluene Vapor Under Steady State and Transient Conditions: Theory and Experimental Results," *Chemical Engineering Science*, **49**, 4347-4360 (1994).
7. Zarook, S. M., A.A. Shaikh, and Ansar, Z., "Development, Experimental Validation and Dynamic Analysis of a General Transient Biofilter Model," *Chem. Eng. Sci.*, **52**(5), 759-773(1997).
8. Lim, K. H., "Waste Air Treatment with a Biofilter: for the Case of Excess Adsorption Capacity," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **34**(6), 766-775(2001).
9. Lim, K. H., "Waste Air Treatment with Biofilter: for the Case Of Adsorption Capacity Limited," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **34**(6), 776-789(2001).
10. 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).
11. Lee, E. J., Seo, K. S., Jeon, W.-S. and Lim, K.-H., "Biofilter Model for Robust Biofilter Design: 1. Adsorption Behavior of the Media of Biofilter," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONG-HAK)*, **50**(1), 149-154(2012).
12. Speitel, G. E., Jr., Dovantzis, K. and Digiano, F. A., "Mathematical Modeling of Bioregeneration in GAC Columns," *J. Environm. Eng.*, **113**(1), 32-48(1987).
13. Speitel, G. E., Jr. and Digiano, F. A., "The Bioregeneration of GAC Used to Treat Micropollutants," *J. Am. Water Works Assoc.*, **79**(1), 64-73(1987).
14. Hand, D. W., Crittenden, J. C. and Thacker, W. E., "User-oriented Batch Reactor Solutions to the Homogeneous Surface Diffusion Model," *J. Environm. Eng.*, **109**(1), 82-101(1983).
15. Mohseni, M. and Allen, D. G., "Biofiltration of Mixtures of Hydrophilic and Hydrophobic Volatile Organic Compounds," *Chem. Eng. Sci.*, **55**, 1545-1558(2000).
16. Mackey, D., Multimedia environmental models : The fugacity approach, Lewis publishers, Chelsea, MI, U.S.A.(1991).
17. Meylan, W. M. and Howard, P. H., "Atom/Fragment Contribution Method for Estimating Octanol-Water Partition Coefficients," *J. Pharm. Sci.*, **84**, 83-92(1995).
18. Meylan, W. M. and Howard, P. H., "Bond Contribution Method for Estimating Henry's Law Constants," *Environ. Toxicol. Chem.*, **10**, 1283-1291(1991).
19. Lee, E. J. and Lim, K.-H., "Evaluation of Adsorption Characteristics of the Media of Biofilter Design," *Korean Chem. Eng. Res.*, **46**(5), 994-1001(2008).
20. Shareefdeen, Z., Baltzis, B. C., Oh, Y. S. and Bartha, R., "Biofiltration of Methanol Vapor," *Biotechnol. Bioeng.*, **41**, 512-524 (1993).