

충전층 흡착관내에서 입상활성탄에 의한 페놀류의 제거

윤 영 삼[†]

국립환경연구원 금강수질검사소
(1998년 8월 7일 접수, 1999년 1월 13일 채택)

Removal of Phenols by Granular Activated Carbon in Packed-Bed Adsorption Column

Young Sam Yoon[†]

Kum River Water Quality Research Laboratory, National Institute of Environmental Research
(Received 7 August 1998; accepted 13 January 1999)

요 약

흡착실험과 예측모델 연구를 통해 수용액에서 phenol(Ph), p-chlorophenol(PCP) 및 p-nitrophenol(PNP)의 제거에 있어서 충전층 흡착관의 성능을 조사하였다. 흡착거동에 대한 예측모델식은 유한요소법을 적용 수치모사하였다. 흡착제의 흡착거동은 표면확산 및 세공확산모델을 적용하여 해석하였다. 두 모델 모두 충전층 흡착관의 흡착현상을 예측하는데 적용될 수 있었다. 그러나, 세공확산모델이 표면확산모델보다 실험치(초기농도, 유량, 충전층높이)와의 부합도가 다소 좋았다. 그러므로, 물질전달계수 변화에 대한 충전층 흡착관의 성능 예측을 위해 세공확산모델을 적용 충전층 흡착관의 성능을 조사하였다.

Abstract—Adsorption experimental and predictive model studies were done to investigate the performance of a packed-bed adsorption column for the removal of phenol(Ph), p-chlorophenol(PCP), and p-nitrophenol(PNP) from aqueous solutions. The composed prediction model equations for adsorption behavior were solved by the technique of finite element method. Adsorption behavior of adsorbates are analyzed by introducing surface and pore diffusion models. Both models could be applied to predicting the packed-bed adsorption phenomena. However, the pore diffusion model is slightly better than the surface diffusion model in representing the experimental data(initial concentration, flow rate, and packed-bed length). Therefore, the pore diffusion model was applied to predicting the performance of packed-bed adsorption column according to mass transfer coefficients(film resistance, intraparticle diffusion, and axial dispersion) changes.

Key words: Packed-Bed Adsorption Column, Finite Element Method, Surface and Pore Diffusion Models, Adsorption Phenomena

1. 서 론

산업의 발달은 인류에게 풍요로운 물질문명의 혜택을 주었으나, 각종 환경 오염물질의 발생으로 생태계 파괴, 수질, 대기오염을 유발시켰다. 이러한 환경문제는 오늘날 국내외적으로 시급하게 대처하지 않으면 안될 중요한 과제로 대두되고 있다[1]. 특히 국내의 수자원은 산업폐수의 영향으로 심각하게 오염되어 있으며 수질(폐수 및 지하수 등)에 포함된 유·무기물질은 암을 비롯한 각종 질병과 돌연변이를 일으키는 등 이러한 유해물질들은 자연계 및 동·식물에 대한 피해는 물론 인간에게까지도 직·간접적으로 치명적인 해를 미치므로 이에 대한 제거 공정개발은 화학공학 및 관련분야에서 시급한 과제이나 이들을 제거하기란 용이하지 않다.

각종 폐수의 처리 방법에는 체질, 침강, 부상 등의 1차 처리와 활성오니법, 살수여상, 생물학적 처리 등의 2차 처리 및 미세여과, 이온교환, 역삼투, 흡착 등과 같은 3차 처리가 있다[2]. 이들 방법 중 흡착

에 의한 폐수처리법은 1차 처리와 2차 처리후 저농도의 오염물질을 최종적으로 고도처리하는데 이용된다.

미량의 오염물질을 제거하기 위한 수처리 기술 중의 한 가지 방법은 입상활성탄(granular activated carbon: GAC) 혹은 분말활성탄(powder activated carbon: PAC)을 이용하는 흡착공정으로서[3, 4] 생물학적 처리가 불가능한 비교적 높은 농도의 살충제, 페놀류, 합성세제, 유기염료 등과 같은 폐수의 3차 처리시 필수적인 공정이다. 특히 활성탄과 같이 표면적과 공극률이 큰 흡착제는 분리나 정제공정에 널리 이용되고 있으며, 흡착공정에 대한 연구는 가장 경제적이고 효과적으로 오염원을 제거할 수 있는 충전층 흡착관의 최적설계를 가능하게 한다[5-10].

충전층 흡착관의 설계를 위해서는 충전층 흡착관을 이용하는 실험을 수행하여 공정변수들의 영향을 결정할 수 있는 입자내부의 확산계수, 경막물질전달 계수, 파과곡선(breakthrough curve), 파과시간, 파과곡선모양 및 파과점 등의 중간자료를 구하여[11], pilot plant나 실제 공장설계시 효과적이고 경제적인 평가기준으로 사용할 수 있다[12]. 그러나 충전층 흡착관의 실제 설계나 공정제어를 위한 pilot plant

[†]E-mail: ysyoon_3_sf@hanmail.net

규모의 실험은 대규모 공장설계 및 조작에 적용할 조업조건과 공정 변수들의 거동 및 특성에 대한 수송과 전달현상의 지식이 요구되며 시간과 경비가 많이 소요된다. 따라서 유체-고체계의 조작동력학을 수치모사함으로써 계의 동적거동의 정확한 예측모사에 의해 충전층 흡착관의 성능을 계산하여 최적공정설계를 용이하게 할 수 있다.

유체-고체계 공정내의 수송현상을 대표하는 지배방정식인 수학적 모델식은 열 및 물질이동에 의한 흡착물질의 축 및 반경방향으로의 확산, 선형 또는 비선형의 흡착물질의 고체입자 표면확산, 유체본체에의 대류에 의한 확산, 고체입자와 유체본체간의 전달현상 그리고 고체입자와 흡착관의 기하학적 구조와 흡착기구로 구성된 대류-확산-흡착문제로서 흡착물, 흡착제 및 흡착관에 대한 다수의 매개변수를 포함하므로 충전층 흡착관 설계의 기초자료인 흡착제량, 유량, 충전층 높이 및 관의 직경 등을 결정하기 위해서는 모든 매개변수의 영향을 고려하여야 한다. 따라서 컴퓨터에 의한 예측모델의 모사는 적합한 수학적 모델식을 선택하고 간단한 장치의 bench scale의 실험을 병행하여 최적적합 모사함으로써 예측모델들을 검증하고, 매개변수의 변화에 따른 감응도를 해석함으로써 실제 공장규모의 흡착관 매개변수 결정시 신뢰할 만한 정량적인 값들을 제공하게 된다[3].

특정 흡착계의 흡착공정을 pilot plant 또는 실제 공장규모의 scale-up과정은 bench scale의 충전층 흡착관실험의 결과와 수학적인 모델로부터 최적 매개변수를 추정하고[4,5], 그 변화에 대한 감응도를 조사하는 것이다[5]. 그러므로 충전층 흡착관의 예측모델 구성과 모델의 성능을 예측하는데 적당한 수치해법의 선택이 중요하다. 어떤 특수계의 모델식에 대한 수치해법의 선택은 그 계에 대한 판단기준인 수치해의 안정성과 수렴정도에 의해 결정된다. 유체-고체계의 모사에 사용되어온 수치해법은 Finite Difference Method(FDM)[12], Orthogonal Collocation Method(OCM)[13-16] 또는 Finite Element on Orthogonal Collocation(FEOC)[17, 18] 등이 사용되었다. 열전달, 유체역학 및 고체역학의 응력해석에 주로 사용된 Finite Element Method(FEM)를 최근에 처음으로 충전층 흡착관의 수치모사에 적용하였으며[6], 활성탄 흡착계의 실험과 모사에 응용하였다[5, 19].

본 연구의 흡착대상 물질로는 공업적으로 널리 사용되고 있는 페놀계 화합물로서 이들 화합물은 선형 유기화합물과는 달리 벤젠고리를 갖고 있기 때문에 미생물에 의해 쉽게 분해되지 않으므로 흡착 등과 같은 고도 처리 기술이 요구된다. 본 연구는 이들 페놀계 오염 물질들 중 대표적인 수질오염 물질로 알려진 phenol(Ph), p-chlorophenol(PCP) 및 p-nitrophenol(PNP)을 활성탄을 이용 흡착제거하는 액상 흡착을 통하여 활성탄에 의한 페놀류의 흡착 특성을 조사하고자 충전층 흡착관 실험을 수행하였다. 충전층 흡착관의 흡착 실험결과는 예측모델로 표면확산모델과 세공확산모델을 적용하여 해석하였다[19]. 또한 이들 두 모델식의 해와 실험결과를 비교함으로써 두 모델의 충전층 흡착관의 성능 예측에 대한 적용 가능성을 검토하였다.

2. 수학적 모델

2-1. 흡착평형등온모델

본 연구에서 행한 평형등온 실험결과는 Freundlich모델과 잘 일치하였으므로 Freundlich모델을 흡착계의 평형등온식으로 선정하였다.

$$q_e = KC_e^{1/n} \quad (1)$$

여기서 K와 1/n은 각각 흡착용량과 흡착강도의 지표가 되는 매개변수이다.

식 (1)에서 매개변수인 K와 1/n을 결정하기 위해 평형등온 실험결과와 data fitting할 수 있도록 대수를 취하여 선형화하면,

$$\ln q_e = \ln K + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2)$$

식 (2)가 되어 q_e 와 C_e 에 대해 plot하면 기울기와 절편으로부터 각각 흡착제의 흡착용량값인 K와 흡착강도 $1/n$ 을 구할 수 있는데 n 이 1이면 흡착량은 선형적으로 증가하고 $n \rightarrow \infty$ 인 경우 흡착량이 일정해져서 Langmuir등온선에 접근하는 등 n 의 값에 따라 선형에서부터 Langmuir흡착 등온선까지 다양한 형태로 나타나므로 실험결과를 모사하는데 적합하며 Adamson[20]은 고체상에서 농도 증가시 흡착엔탈피가 대수적으로 감소하는 가정하에서 Langmuir등온식으로부터 Freundlich등온식을 유도하였는데 활성탄 입자와 같이 표면이 균질하지 못한 흡착제 입자를 이용한 단일성분의 수용액 흡착시에는 흡착물이 표면 덮힘률에 따라 지수적으로 감소하는 Freundlich등온식이 Langmuir등온식보다 잘 맞음을 보고하였다. 그러나 이 관계식은 농도가 짙어졌을 때 흡착량이 상한을 갖는 포화 흡착조건 및 저농도 영역에서 Henry의 식에 따라야 된다고 하는 2가지 조건을 충족할 수 없어 열역학적으로 불완전하지만 한정된 농도 범위에서 실험 데이터와 잘 일치한다[21].

2-2. 충전층 흡착관 모델

충전층 흡착관 모델은 유리관에 흡착제를 충전시킨 후, 충전층내로 용액을 통과시키면서 고체-유체를 접촉시키는 조작으로서 충전층내의 다공성 흡착제 입자-용액간의 경막내의 물질전달, 입자적자간을 통하여 흐르는 유체의 흐름에 의한 전달, 흐름방향의 용질의 확산에 의한 전달 그리고 고체입자 내부에서의 표면 및 기공확산에 의한 물질전달로 설명된다. 충전층 흡착관내의 개개의 흡착제 입자들은 축방향의 위치와 시간에 따라 다른 조건의 용액의 농도에 노출되어 있고, 고체입자 내부표면에서의 흡착등온 관계때문에 유체의 농도변화와 고체입자 내부의 농도연역 분포는 상호 의존적이다. 충전층을 통하는 유체를 축방향 분산플러그 흐름의 대류-확산식으로, 그리고 고체입자 내부의 물질수지식을 확산-흡착식으로 기술하여 고-액 계면조건의 flux는 상호의존성의 물질전달을 연속 유지시킨다.

본 연구에서의 흡착계는 단일 성분 흡착계로서 고체입자 내부에서의 물질수지식과 입자주위를 흐르는 용액본체의 물질수지식을 유도하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 유체속도는 일정하다.
- (2) 경막물질전달계수와 고체내부의 확산계수는 일정하다.
- (3) 흡착평형은 Freundlich등온관계이다.
- (4) 충전층을 통한 압력손실은 무시한다.
- (5) 흡착은 등온 조건에서 일어나며 완전 가역공정이다.
- (6) 입자 내부의 물질 전달 기구는 확산 공정으로 묘사할 수 있다.
- (7) 흡착제는 구형이고 등방성이다.
- (8) 운반유체의 흡착량은 무시 가능하다.
- (9) 충전층의 반경방향의 농도는 균일하며 이 방향의 확산을 무시한다. 즉, 농도구배는 단지 흐름 방향에만 존재한다.

충전층내의 유체본체의 물질수지식:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u \frac{\partial C}{\partial z} - \left(\frac{1 - \epsilon_b}{\epsilon_b} \right) \left[\frac{3k_f}{R} (C(z, t) - C_r |_{r=R_p}) \right] \quad (3)$$

경계조건 및 초기조건:

$$D_L \frac{\partial C}{\partial z} = -u (C|_{z=0} - C|_{z=0+}) \quad \text{at } z=0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z=L \quad (5)$$

$$C = C_0 \quad \text{at } z=0, t=0 \quad (6)$$

충전층내의 유체본체의 무차원 물질수지식:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{1}{Pe_m} \Theta \frac{\partial^2 \phi}{\partial \xi^2} - \Theta \frac{\partial \phi}{\partial \xi} - v(\phi - \phi_r^*|_{r=R_p}) \quad (7)$$

무차원 경계조건 및 초기조건:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \xi} = -Pe_m(\phi|_{\xi=0-} - \phi|_{\xi=0+}) \quad \text{at } \xi=0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \xi} = 0 \quad \text{at } \xi=1 \quad (9)$$

$$\phi = 1 \quad \text{at } \xi=0, \tau=0 \quad (10)$$

무차원군:

$$\left[\begin{aligned} \phi &= \frac{C}{C_0}; \phi_r^* = \frac{C_r}{C_0}; \xi = \frac{z}{L}; Pe_m = \frac{uL}{D_L} \\ v &= \left(\frac{1-\epsilon_b}{\epsilon_b} \right) \cdot 3k_f R_p / D_p; \tau = \frac{D_p t}{R_p^2}; \Theta = \frac{R_p^2 u}{D_p L} \end{aligned} \right] \quad (11)$$

그리고 흡착제 입자 내부의 물질수지식은 아래와 같이 표면확산모델과 세공확산모델로 나눌 수 있다.

2-2-1. 표면확산모델

표면확산모델은 물질전달 저항이 흡착제 겉표면의 경막뿐만 아니라 흡착제 내부에도 존재한다고 가정하며, 흡착제의 대부분은 매우 불균일하고 다공성 구조를 가지고 있으나 흡착제를 균일한 고체로 생각하여 일정한 값을 갖는 유효확산계수로써 내부물질 전달저항을 나타내는 모델이다. 여기서 흡착제를 균일한 고체로 가정한다는 것은 고체상의 농도, 흡착제의 밀도 및 표면적은 단지 입자의 반경방향의 위치만의 함수로 생각하는 것이다. 이러한 가정하에 흡착제가 구형입자이고 입자 내부의 확산계수가 일정할 경우 물질수지식은 다음과 같은 무차원식으로 표시된다[22].

$$D_s \left(\frac{\partial^2 q_r}{r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial q_r}{\partial r} \right) = \frac{\partial q_r}{\partial t} \quad (12)$$

경계 및 초기조건,

$$\rho_p D_s \left(\frac{\partial q_r}{\partial r} \right)_s = k_s (C - C_s) \quad \text{at } r=R \quad (13)$$

$$\frac{\partial q_r}{\partial r} = 0 \quad \text{at } r=0 \quad (14)$$

$$q_r = 0 \quad \text{at } t=0 \quad (15)$$

식 (12)에 대한 무차원 물질 수지식:

$$\frac{\partial^2 Y_r^*}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{\varphi} \frac{\partial Y_r^*}{\partial \varphi} - \frac{\partial Y_r^*}{\partial \tau} = 0 \quad (16)$$

무차원 경계 및 초기조건:

$$\frac{\partial Y_r^*}{\partial \varphi} = \beta(\phi - \phi_r^*|_{\varphi=1}) \quad \text{at } \varphi=1 \quad (17)$$

$$\frac{\partial Y_r^*}{\partial \varphi} = 0 \quad \text{at } \varphi=0 \quad (18)$$

$$Y_r^* = 0 \quad \text{at } \tau=0 \quad (19)$$

무차원군:

$$\left[\begin{aligned} Y_r^* &= \frac{q_r}{q_0}; \phi = \frac{C}{C_0}; \phi_r^* = \frac{C_r}{C_0} \\ \varphi &= \frac{r}{R_p}; \tau = \frac{D_s t}{R_p^2}; \beta = \frac{k_f \cdot R_p \cdot C_0}{\rho_p \cdot D_s \cdot q_0} \end{aligned} \right] \quad (20)$$

여기서 $q_0 = KC_0^{1/n}$ 이다.

2-2-2. 세공확산모델

세공확산모델도 표면확산모델과 마찬가지로 물질전달 저항이 흡착제 겉표면의 경막뿐만 아니라, 흡착제 내부에도 존재한다는 가정을 포함하고 있지만 흡착제를 불균일하게 보아 흡착제 내부에 세공이 있으며 흡착상에서 용질분자의 이동과 더불어 흡착제 세공내, 유체상에서 용질의 확산을 고려하는 수송기구이다. 이러한 가정하에 활성탄 기공내부의 용액과 기공표면과의 흡착은 Freundlich평형등은 관계식을 적용하여 물질 수지식을 세워 이 식을 무차원식으로 나타내면 다음과 같다[22].

$$D_p \left(\frac{\partial^2 C_r}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_r}{\partial r} \right) - \rho_p \frac{\partial q_r}{\partial t} = \epsilon_p \frac{\partial C_r}{\partial t} \quad (21)$$

경계 및 초기조건,

$$D_p \left(\frac{\partial C_r}{\partial r} \right)_s = k_s (C - C_s) \quad \text{at } r=R \quad (22)$$

$$\frac{\partial C_r}{\partial r} = 0 \quad \text{at } r=0 \quad (23)$$

$$C_r = 0 \quad \text{at } t=0 \quad (24)$$

q_r 과 C_r 의 관계는 흡착평형등온식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial q_r}{\partial t} = \frac{K}{n} C_r^{(1/n)-1} \frac{\partial C_r}{\partial t} \quad (25)$$

그러므로 식 (21)은

$$D_p \left(\frac{\partial^2 C_r}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_r}{\partial r} \right) = \left(\rho_p \frac{K}{n} C_r^{(1/n)-1} + \epsilon_p \right) \frac{\partial C_r}{\partial t} \quad (26)$$

식 (26)에 대한 무차원 물질 수지식:

$$\frac{\partial^2 \phi_r^*}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{\varphi} \frac{\partial \phi_r^*}{\partial \varphi} - \chi \frac{\partial \phi_r^*}{\partial \tau} = 0 \quad (27)$$

경계조건 및 초기조건:

$$\frac{\partial \phi_r^*}{\partial \varphi} = \beta(\phi - \phi_r^*|_{\varphi=1}) \quad \text{at } \varphi=1 \quad (28)$$

$$\frac{\partial \phi_r^*}{\partial \varphi} = 0 \quad \text{at } \varphi=0 \quad (29)$$

$$\phi_r^* = 0 \quad \text{at } \tau=0 \quad (30)$$

무차원군:

$$\left[\begin{aligned} \phi &= \frac{C}{C_0}; \phi_r^* = \frac{C_r}{C_0}; \varphi = \frac{r}{R_p}; \tau = \frac{D_p t}{R_p^2} \\ \beta &= \frac{k_f \cdot R_p}{D_p}; \chi = \rho_p \frac{K}{n} \phi_r^{*(1/n)-1} \cdot C_0^{(1/n)-1} + \epsilon_p \end{aligned} \right] \quad (31)$$

식 (3)과 (12)(표면확산모델) 또는 식 (3)과 (21)(세공확산모델)을 결합하여 구한 수치해를 출구에서 시간에 대한 농도변화의 실험데이터와 통계적인 시행오차의 원리에 의해 최적적합함으로써 최적치의 매개변수를 구한다.

3. 실험

3-1. 실험재료

본 연구에 사용된 흡착질은 SIGMA사의 특급시약인 phenol, p-chlorophenol 및 p-nitrophenol이다. 입상활성탄은 미국의 Calgon사가 생산한 F-400을 표준체로 -16/+20 메쉬 크기를 택하여 실험을 행하였다. 유연탄을 원료로 하여 제조한 이 활성탄의 물성치는 BET- N_2 표면적 $1,050 \text{ m}^2/\text{g}$, 입자의 밀도 0.39 g/cm^3 , 공극률 0.389 이며 총 기공 부피는 0.995 cc/g 이다.

3-2. 농도분석

본 연구의 모든 실험에서 용액의 농도분석은 직경 0.53 mm , 길이 30 m , 막 두께 $3.00 \mu\text{m}$ 인 fused silica capillary column을 사용하여 VARIAN star 3400CX GC를 사용하여 FID로 분석하였다.

3-3. 흡착평형등온실험

흡착용량을 측정하기 위하여 초기농도($0.5\text{--}5 \text{ mmole/L}$)가 다른 용액을 일정량의 활성탄(-16/+20 mesh : 2 g/L)과 함께 부피가 250 cc 인 일련의 삼각플라스크를 항온조에 넣어 온도를 20°C 로 일정하게 하고, 교반속도를 200 rpm 으로 일정하게 유지하며 용액내에 와류가 발생하지 않도록 조심스럽게 교반하면서 계가 완전 평형에 도달할 때까지 흡착을 진행시켰다. 최종 평형 용액의 농도를 측정하여 용액 중의 용질 농도와 평형에서 고체상에 흡착된 용질의 양을 구하였다.

3-4. 충전층 흡착관 실험

물이나 폐수 중에 용해되어 있는 유기물질을 제거하는데 사용되는 장치는 일반적으로 충전층 흡착관이 사용되고 있다. 충전층 흡착관 실험은 내경 2.54 cm pyrex 유리관내에 진공하에서 건조한 GAC를 충전하여 초기농도, 충전층 높이 및 유량을 변화시켜 가며 조업 조건 변화가 충전층의 파과곡선, 파과점, 경막 물질전달 및 고체입자 내부확산 계수에 미치는 영향을 고찰하였다.

용액의 흐름은 상류방향으로 흘렀으며 유입과 유출 용액을 주기적으로 분석함으로써 파과곡선(breakthrough curve)을 구하였다. 그리고 충전층 흡착제인 입상 활성탄의 세공내부에 공기의 존재는 용질의 흡착저항을 일으키게 됨으로 일정량의 활성탄을 충전하기 전에 유리세공 거름 틀상에 일정량의 활성탄을 넣은 후 12시간 동안 진공상태로 유지한 후 부착된 뷰렛을 통하여 소량의 증류수로 함침시킨 후 파과의 증류수를 걸러낸다. 걸러진 함침 활성탄을 거름종이로 옮겨 입자 표면의 수분을 증발시킨 후 기공안만 증류수로 채워져 있는 활성탄을 흡착관에 충전시켰다. 충전층 세공(ϵ_s)과 충전층 상부 공간에는 물이 존재하지 않은 상태에서 흡착용액을 유입시켰다.

4. 결과 및 고찰

흡착공정의 파과곡선은 실험실적인 규모 또는 중간시험공정의 장치를 이용한 충전층 흡착관의 실험에 의해 측정될 수 있으나 실제 공장 규모로의 대형화하기 위한 설계자료와 성능은 실험결과를 기초로 한 예측모델식에 대한 매개변수와 운전조건의 영향으로 평가될 수 있다.

4-1. 흡착평형등온실험

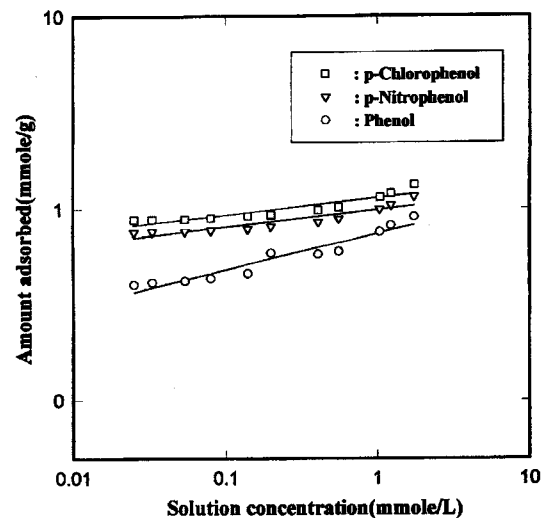


Fig. 1. Adsorption isotherms of phenol, p-chlorophenol and p-nitrophenol on F-400 activated carbon.

(Adsorbent=-16/+20 mesh; 2 g/L , $C_0=0.5\text{--}5.0 \text{ mmole/L}$, Temp= 20°C)

흡착평형등온관계인 Freundlich식 식 (1)의 계수 K 와 $1/n$ 은 세 가지 용질의 활성탄에 의한 등온 실험데이터를 Fig. 1에 식 (2)를 통계적 최적 적합선을 필적시킴으로서 각 등온선의 절편으로부터 흡착 용량의 지표가 되는 K 를, 기울기로부터 흡착질의 농도 의존성을 나타내는 흡착강도의 지표가 되는 $1/n$ 을 구하였다. 활성탄 F-400에 의한 각 흡착물질 Ph, PCP 및 PNP의 K 와 $1/n$ 값을 Table 1에 수록하였다.

페놀류 치환기에 따른 평형흡착량은 PCP, PNP, Ph순서로 감소하고 있으나 흡착량의 농도 의존성을 나타내는 지수항은 PNP, PCP, Ph순서로 증가하였다. 낮은 농도 범위에서는 각 흡착질들의 흡착량의 차가 컸으나 농도가 증가함에 따라 흡착량의 차는 감소하였다. 농도가 증가함에 따라 흡착량의 차가 감소하는 것은 한정된 흡착제의 흡착점 감소로 인해 흡착제의 흡착능력 감소에 기인한 것이다. 또한 PCP와 PNP에 비해 Ph의 흡착량이 낮게 나타나는 것은 Ph의 -OH기와 물의 수소결합이 흡착반응을 억제시키므로써 나타나는 현상이다. 이에 반해 PCP의 -Cl기와 PNP의 -NO₂기는 물과의 수소결합을 형성하는 -OH기의 수소결합 가능성을 방해하기 때문에 Ph에 비해 더 높은 흡착량을 보인다.

4-2. 충전층 흡착관 실험

4-2-1. 매개변수 추정

실제 문제인 특정 흡착제에 의한 특정 흡착물질의 분리와 제거에 사용되는 충전층 흡착관은 이들 계의 bench scale이나 pilot plant의 실험으로부터 scale-up 할 수 있다. Bench scale이나 pilot plant의 실험실 규모의 성능 평가는 시간에 대한 유출액의 농도변화인 파과점과 파과곡선추정으로 평가될 수 있다. 실험실 규모의 장치를 scale-up하여 실제 공장화하는 장치설계는 bench scale 흡착탑에 대해 결

Table 1. Freundlich isotherm constants for single component adsorption

Components	K	1/n
Phenol	1.473	0.332
p-chlorophenol(PCP)	2.376	0.259
p-nitrophenol(PNP)	2.187	0.214

정된 운전조건(용액의 초기 농도, 시간, 온도, 유량 및 압력)하에서 용액 처리량에 의한 충전층의 크기(규격)와 흡착제량을 결정하는 문제이거나 또는 그 반대(역)의 문제일 수도 있다. 흡착관을 기술할 수 있는 수학적인 모델식은 상기 운전조건을 포함하는 장치내의 농도 변화와 농도분포를 구할 수 있는 지배방정식이며, 이 식은 다수의 물리적이고 화학적인 매개변수를 포함하기 때문에 이 매개변수나 계수들은 실험적인 데이터인 농도연역 분포에 대해서 예측모델식을 최적 적합함으로써 결정될 수 있다.

흡착제인 F-400 활성탄 입자의 충전층 흡착관내에서 세 가지의 흡착물질인 Ph, PCP 및 PNP의 흡착성능 예측식은 유체 본체의 물질수지식 (3)과 흡착제 입자내의 물질수지식 (12)(표면확산모델) 또는 식 (21)(세공확산모델)이 함수관계를 가지며, 식 (12)와 (21)은 Freundlich 관계를 포함하고 있으므로 식 (3)과 (12) 또는 식 (3)과 (21)의 결합(상호작용)에 의한 충전층내의 용액의 축방향의 농도연역 분포인 파과곡선을 구하는 문제는 비선형이다.

본 연구에서는 충전층 흡착관의 모델식 (3)에 대한 식 (12) 또는 (21)의 상호의존성 관계를 이용 FEM 수치해법을 적용하여 세 가지 흡착물질인 Ph, PCP 및 PNP에 대한 충전층 흡착관의 흡착공정 성능을 좌우하는 농도연역분포를 구하였다.

FEM의 수치해석에 의한 충전층 흡착관 예측 데이터를 실험 데이터에 최적 적합시키기 위한 시행오차 계산에 필요한 흡착등온관계의

매개변수(K 와 $1/n$), 충전층 흡착관내에서 유체의 축방향의 확산계수(D_L) 및 고체-액체간의 경막물질전달계수(k_f)와 고체 입자 내부의 확산계수(D_p 또는 D_p) 값들은 다음과 같이 결정한다.

(1) K 와 $1/n$ 은 흡착등온관계식에서 구한 Table 1의 값을 사용하였다; (2) 분자 확산계수, D 는 Wilke-Chang의 상관 관계식[23]을 이용하여 계산하였으며, 축방향 분산계수, D_L 은 Wakao와 Funazkri[24]가 제안한 상관관계식을 이용하여 구하였으며, 그때의 값들을 Table 2에 수록하였다; (3) k_f 와 (D_p 또는 D_p)는 고정된 K , $1/n$, D_L 값과 (D_p 또는 D_p)와 k_f 의 변화에 대한 예측 모델의 (D_p 또는 D_p)와 k_f 를 조절 매개변수로 하여 실험치와 계산치가 가장 잘 일치하는 것을 구하여 그때의 최적값을 Table 3에 수록하였다.

4.2-2. 충전층 흡착관에 대한 초기 농도의 영향

흡착공정의 파과곡선은 실험실적인 규모 또는 중간시험 공정의 장치를 이용한 충전층 흡착관의 실험에 의해 측정될 수 있으나 실제 공장규모로의 대형화하기 위한 설계자료와 성능은 실험결과를 기초로 한 예측모델식에 대한 매개변수와 운전조건의 영향으로 평가될 수 있다. Fig. 2-4는 충전층 흡착관의 운전 조건 중 초기농도 변화가 파과곡선에 미치는 영향을 검토한 결과이다. 용질인 Ph, PCP 및 PNP 세 물질 모두 초기농도가 감소함에 따라 파과점을 증가시켰으며, 축방향 분산의 영향이 증가하였다. 흡착등온평형실험을 통해 구한 흡착용량의 지표가 되는 K 값이 가장 큰 PCP가 Ph와 PNP에 비해 더욱 긴 파과점을 가졌다. 특히 Ph의 경우 PCP 및 PNP에 비해 같은 농도를 기준으로 파과점에 있어서 큰 차이를 보였다. 그러나 파과곡선의 기울기는 세 물질 모두 비슷하게 나타났다.

이들 결과는 흡착평형실험결과와 흡착평형등온상수값들의 크기 순서와 일치하는 결과이다. 초기농도 변화에 대한 경막물질전달 계수값의 크기는 Table 3에서와 같이 세 물질 모두 초기 농도가 증가할수록 대체적으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나 입자내부의 세공 확산계수는 초기농도 변화에 대해 일정한 함수 관계를 나타내지는 않았지만, 표면확산 계수의 경우 초기농도 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이는 표면확산 속도는 흡착 물질의 표면 피복도에 비례하므로 용액의 농도가 증가할수록 흡착제 세공내 표면에 흡착된 흡착질의 양이 증가되어 표면확산 계수가 증가하였다.

Fig. 2-4에서와 같이 초기농도 변화에 대해 표면 및 세공확산모델

Table 2. Molecular diffusion and axial dispersion coefficients

Components	Flow rate (cc/s)	Molecular diffusion coefficient, $D \times 10^{10}$ (m ² /s)	Axial dispersion coefficient, $D_L \times 10^6$ (m ² /s)
Ph	0.333	5.57	1.22
	0.167	5.57	0.63
PCP	0.333	4.02	0.92
	0.167	4.02	0.46
PNP	0.333	3.92	0.89
	0.167	3.92	0.44

Table 3. Film mass transfer and pore diffusion coefficients

Components	Initial conc. (mmol/L)	Flow rate (cc/s)	Bed length(m)	$k_f \times 10^6$ (m/s)	$D_p \times 10^{10}$ (m ² /s)	$D_s \times 10^{12}$ (m ² /s)
Ph	1	0.333	0.038	11.34	12.7	1.86
	2	0.333	0.038	15.23	8.80	3.78
	3	0.333	0.038	17.81	11.9	5.48
	4	0.333	0.038	21.50	9.34	6.98
	4	0.167	0.038	5.48	9.34	6.77
	4	0.333	0.065	20.73	9.34	7.12
PCP	1	0.333	0.038	14.24	22.3	4.06
	2	0.333	0.038	15.28	18.4	6.16
	3	0.333	0.038	19.45	20.3	7.18
	4	0.333	0.038	28.28	19.2	9.35
	4	0.333	0.065	27.68	19.2	9.27
	4	0.333	0.095	28.32	19.2	9.37
PNP	4	0.167	0.038	8.98	19.2	9.42
	1	0.333	0.038	12.78	18.7	2.76
	2	0.333	0.038	14.21	16.3	5.34
	3	0.333	0.038	18.92	17.3	6.48
	4	0.333	0.038	25.36	18.4	9.21
	4	0.333	0.065	25.78	18.4	9.16
	4	0.333	0.095	24.89	18.4	9.28
	4	0.167	0.038	7.38	18.4	9.25

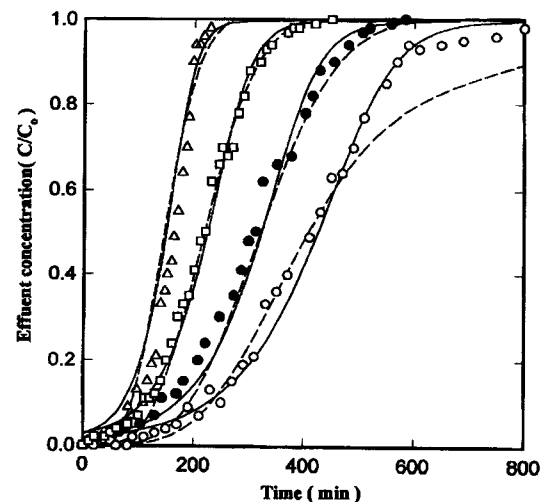


Fig. 2. Description of packed-bed results for initial concentration changes in phenol adsorption.

(volumetric flow rate=20 cc/min, $z=3.8$ cm, —: pore diffusion model, ---: surface diffusion model, ○: 1 mmol/L, ●: 2 mmol/L, □: 3 mmol/L, △: 4 mmol/L)

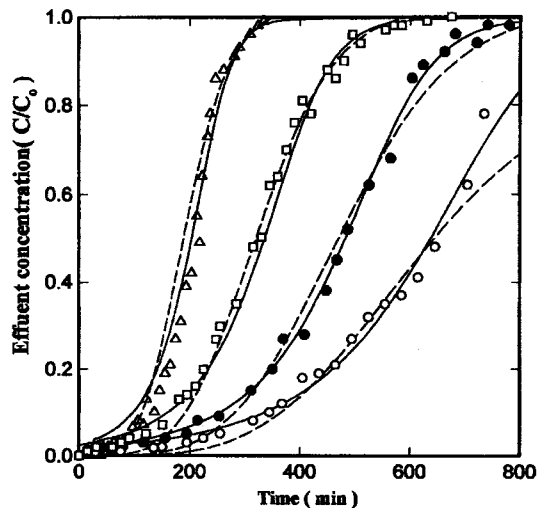


Fig. 3. Description of packed-bed results for initial concentration changes in phenol adsorption.
(volumetric flow rate=20 cc/min, $z=3.8$ cm, ---: surface diffusion model, —: pore diffusion model, ○: 1 mmol/L, ●: 2 mmol/L, □: 3 mmol/L, △: 4 mmol/L)

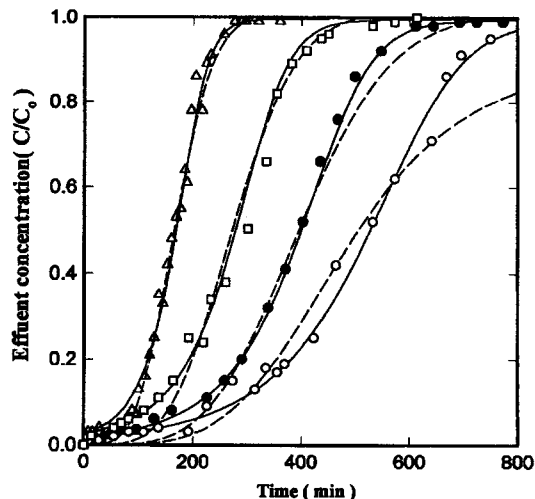


Fig. 4. Description of fixed-bed results for initial concentration changes in p-nitrophenol adsorption.
(volumetric flow rate=20 cc/min, $z=3.8$ cm, —: pore diffusion model, ---: surface diffusion model, ○: 1 mmol/L, ●: 2 mmol/L, □: 3 mmol/L, △: 4 mmol/L)

을 적용 수치모사한 결과는 두 모델 모두 실험치를 비교적 정확히 예측할 수 있었지만, 세공확산모델이 표면확산모델에 비해 실험치와의 부합도가 다소 우수하였다. 특히 낮은 농도 범위에서 세공확산모델이 표면확산모델에 비해 실험치와의 부합도가 더욱 우수하게 나타났다. 이는 농도가 낮을수록 흡착제 세공내에 흡착되는 흡착질의 양이 감소하게 되어, 흡착질의 표면 피복률에 비례하는 표면확산에 비해 세공확산이 전체 흡착거동을 지배하게 되어 나타나는 현상이다. 또한 본 연구의 흡착 장치처럼 충전층의 길이가 짧을 경우 세공확산모델이 표면확산모델에 비해 충전층 흡착관을 모사하는데 더욱 우수한 모델이라는 기존의 문헌[22] 결과와도 일치한다.

4.2.3. 충전층 흡착관에 대한 유량 및 충전층 높이의 영향

기준파과곡선에 대하여 유량 또는 충전층의 높이가 변화하면 파과곡선에 커다란 영향을 미치게 된다. Fig. 5-7은 유량에 의한 유속

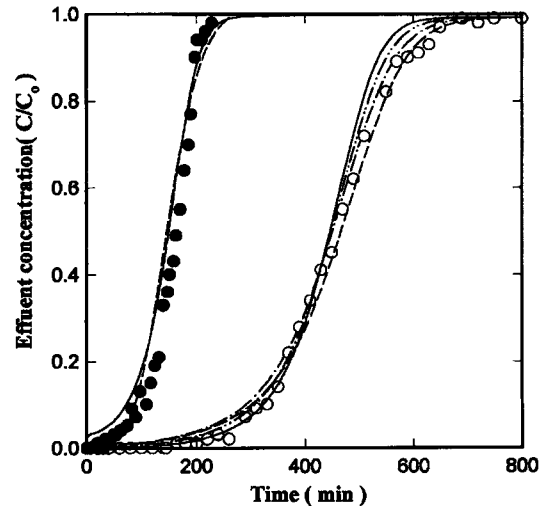


Fig. 5. Description of fixed-bed results for the volumetric flow rate changes in phenol adsorption.
($C_0=4$ mmol/L, $z=3.8$ cm, ○: 10 cc/min, ●: 20 cc/min, ---: surface diffusion model, pore diffusion model: - - - : $k_f=1.14E-3$ m/min, —: $k_f=1.34E-3$ m/min, - · - : $k_f=9.94E-4$ m/min)

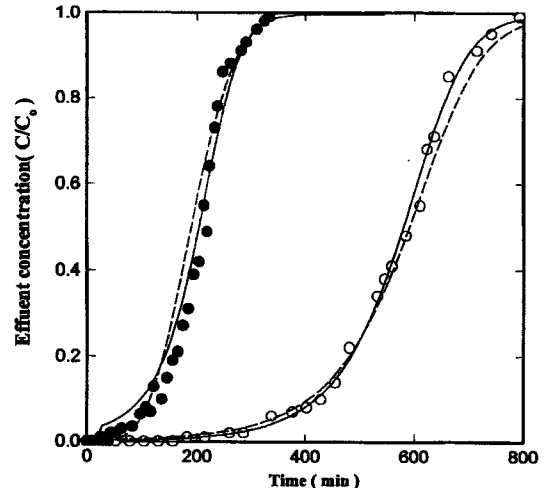


Fig. 6. Description of fixed-bed results for the volumetric flow rate changes in p-chlorophenol adsorption.
($C_0=4$ mmol/L, $z=3.8$ cm, —: pore diffusion model, ---: surface diffusion model, ○: 10 cc/min, ●: 20 cc/min)

의 변화가 충전층 흡착관에 미치는 영향을 검토한 결과이며, Fig. 8-10은 충전량 차이에 따른 충전층 높이의 변화가 파과곡선에 미치는 영향을 나타낸 것이다. Fig. 5는 기준파과곡선 즉, 유량이 20 cc/min 일 때 실험데이터에 최적적합시킨 수치모사의 결과에서 구한 매개변수를 수정없이 그대로 사용하여 유량만 10 cc/min 변화시켰을 때의 실험결과에 수치모사 결과를 비교한 것이다. Fig. 5에서와 같이 수치모사 결과와 실험데이터가 비교적 잘 일치하였고, 유량이 감소함에 따라 k_f 가 다소 감소할 때 실험결과와의 부합도가 더욱 좋았다.

이로부터 유량이 감소하면 경막물질전달계수가 감소함을 예측할 수 있으며 이는 물리적으로 예상한 바와 같다. 또한 유량의 감소는 파과점의 증가를 가져왔다. Fig. 6-7은 PCP와 PNP에 대해 유량을 변화시켜 가며 파과곡선의 모양을 조사하였다. 유량의 감소는 Fig. 5의 Ph의 경우와 같이 파과점의 증가를 가져왔고 경막물질전달계수는 소폭 감소하였다. 이들 세 물질에 대한 충전층 흡착관 실험결과

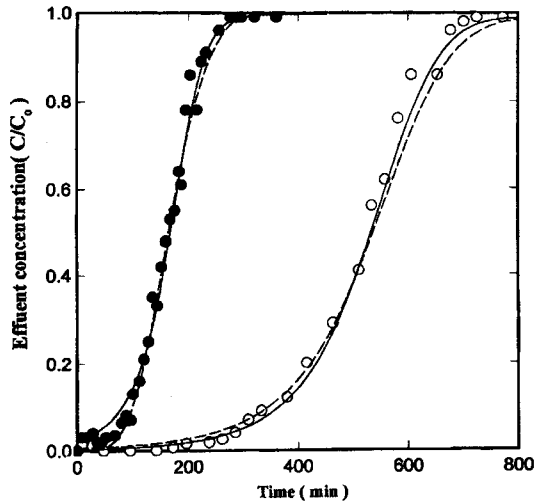


Fig. 7. Description of fixed-bed results for the volumetric flow rate changes in p-nitrophenol adsorption.
($C_0=4$ mmol/L, $z=3.8$ cm, —: pore diffusion model, ---: surface diffusion model, ○: 10 cc/min, ●: 20 cc/min)

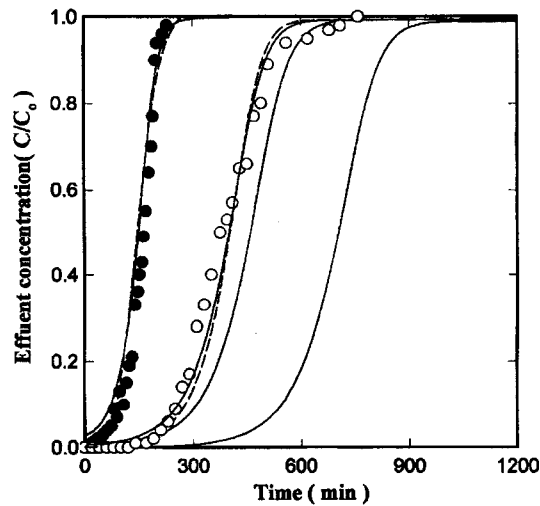


Fig. 8. Description of fixed-bed results for the bed length changes in phenol adsorption.
(20 cc/min, ●: 3.8 cm, ○: 6.5 cm, Predicted(3.8, 6.5, 7.6, 11.4 cm), —: pore diffusion model, ---: surface diffusion model)

에 대한 시행오차법에 의한 최적적합으로부터 구한 경막 물질전달 계수 및 고체입자 내부확산계수값을 Table 3에 수록하였다.

Fig. 8-10은 충전층 높이 변화가 파과곡선에 미치는 영향을 고찰한 것이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 충전층 높이 3.8 cm, 초기농도 4 mmol/L에서 구한 충전층 매개변수값을 수정없이 충전층의 높이만 6.5 cm로 변화시킨 실험결과에 수치모사결과가 잘 부합되었다. 기존 파과곡선에서 충전층의 높이를 1.7, 2, 3배 증가시켰을 때의 파과곡선으로부터 충전층 높이의 증가는 흡착제량의 증가로 파과점의 증가효과를 가지는 반면 파과곡선의 형상은 변화하지 않았다. Fig. 9-10은 PCP와 PNP에 대한 충전층 높이 변화가 충전층 흡착관의 성능에 미치는 영향을 검토하기 위하여 충전층의 높이를 3.8, 6.5 및 9.5 cm로 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 두 물질 모두 충전층의 높이 변화에 파과곡선은 대단히 민감하게 반응하였으며 Ph의 경우와 같이 기존 파과곡선에서 구한 경막물질 전달계수 및 입자내부 확산계수값을 수정없이 사용, 충전층의 높이만을 변화시킨 실험결과에

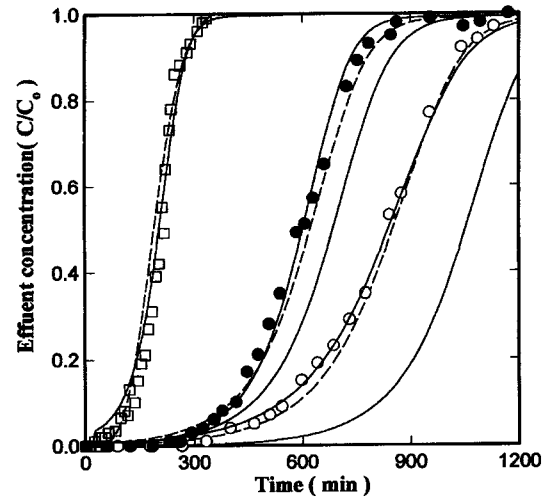


Fig. 9. Description of fixed-bed results for the bed length changes in p-chlorophenol adsorption.
($C_0=4$ mmol/L, volumetric flow rate=20 cc/min, □: 3.8 cm, ●: 6.5 cm, ○: 9.5 cm, Predicted(3.8, 6.5, 7.6, 11.4 cm), ---: surface diffusion model, —: pore diffusion model)

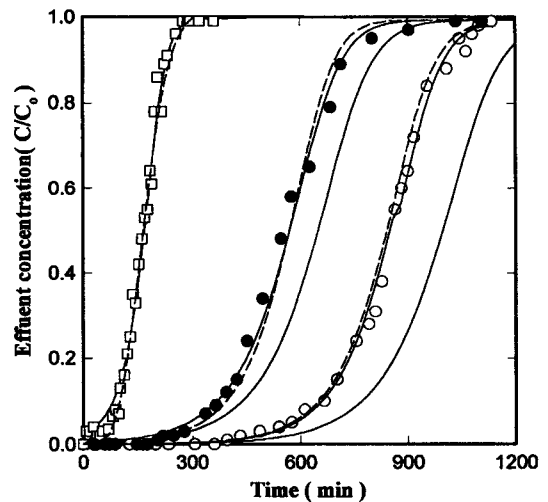


Fig. 10. Description of fixed-bed results for the bed length changes in p-nitrophenol adsorption.
($C_0=4$ mmol/L, volumetric flow rate=20 cc/min, □: 3.8 cm, ●: 6.5 cm, ○: 9.5 cm, Predicted(3.8, 6.5, 7.6, 9.5, 11.4 cm), —: pore diffusion model, ---: surface diffusion model)

수치모사한 결과는 비교적 실험결과를 잘 묘사하였다. 이들 결과로부터 최소한의 조건에 대한 실험결과에 수치모사를 통해 충전층에 대한 미지의 매개변수를 구하여, 실험을 수행하지 않고 최적의 운전 조건을 구하거나 충전층 흡착관의 최적 설계에 직접 응용할 수 있는 가능성을 찾을 수 있었다. 이들 실험결과 역시 세공 및 표면확산모델 모두 실험결과를 비교적 정확히 예측하였다.

4-2-4. 충전층 흡착관에 대한 흡착속도론적 매개변수의 영향

흡착관의 흡착제 입자는 유입 용액의 농도가 고체상의 농도와 평형을 이룰 때까지 본체용액으로부터 용질을 흡착할 수 있다. 유출액의 농도는 활성탄이 포화되어 더 이상 용질을 흡착할 수 없을 때 유입액의 농도와 같게 된다. 입자의 내부와 외부의 물질전달속도가 대단히 빠르고, 플러그 흐름조건인 경우 유출액의 농도분포는 이상적인 파과곡선을 보인다[22]. 입자내부와 축방향 확산계수를 고정시킨

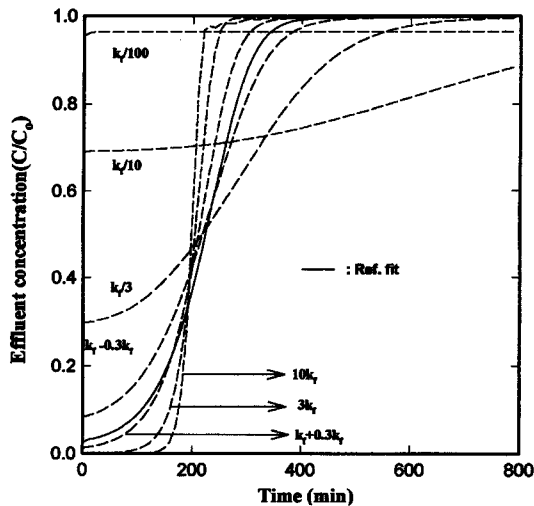


Fig. 11. Effect of the film mass transfer coefficient changes for packed-bed performance.

($K=1.473$, $1/n=0.332$, $D_L=3.34E-8$ m²/min, $D_p=2.14E-10$ m²/min, $k_f=1.34E-3$ m/min)

상태에서 경막물질전달계수, k_f 값의 변화에 대한 파과곡선의 감응도를 Fig. 11에 나타내었다. 중앙의 실선은 기준파과곡선을 나타내며, 기준값으로부터 k_f 를 3배 및 10배 증가시켰을 때 파과곡선은 그림에서 알 수 있듯이 이상적인 파과곡선에 가까워짐을 알 수 있다. 즉 경막 저항이 거의 존재하지 않는 조건에서 활성탄이 일정한 기공내의 유효 흡착점에 용질을 최대한 흡착하고, 최대 흡착 용량을 초과할 경우 세공내의 저항때문에 더 이상의 흡착이 진행되지 않고 유출액의 농도(C/C_0)가 짧은 시간동안 1로 증가함을 알 수 있다. 이와는 반대로 k_f 의 감소는 경막저항에 기인 흡착속도가 감소하며, $k_f/100$ 일 경우 흡착속도가 매우 느려 유입액의 농도와 유출액의 농도가 비슷한 값을 보인다. 이것은 경막저항이 너무 큰 값을 가져 용질이 경막을 통과하는데 많은 시간이 소요되기 때문에 대부분의 유효 흡착점이 존재하는 세공내에 용질이 흡착되는데 긴시간이 소요되기 때문이다. 그러나 평형에 도달하는데 많은 시간이 소요되겠지만 전체 흡착량은 일정함을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 경우 경막저항이 흡착율속인자임을 알 수 있다.

Fig. 12는 경막물질전달계수 및 축방향 확산계수를 일정하게 하고 입자내부의 확산계수를 변화시켜 파과곡선에 미치는 영향을 고찰하였다. 실선은 기준파과곡선을 나타내며, 기준선으로부터 확산계수 값을 30% 증가, 30% 감소 및 3배 감소시켰을 경우 경막물질전달계수와 마찬가지로 기공내의 확산계수 또한 흡착속도에 중요한 영향을 미치는 율속인자임을 알 수 있다[25]. Fig. 11-12의 파과점까지의 충전층 출구농도를 살펴보면 경막물질전달계수가 커질 경우 파과점까지의 출구농도가 0을 나타내고 기공내의 확산계수가 증가할 경우의 파과점까지의 출구농도는 기준곡선의 파과점까지의 출구농도와 일치함을 알 수 있다. 이 결과로부터 파과점까지의 출구농도를 낮게 유지하려면 기공내의 확산계수보다는 경막물질전달계수를 크게 할 수 있게 조작하는 것이 훨씬 효과적이라는 것을 알 수 있다.

4-2-5. 충전층 흡착관에 대한 축방향 확산계수의 영향

축방향 분산에 의한 파과곡선은 일반적으로 상대적인 흡착관의 충전층 높이에 따라 변화되지만 충전층 높이가 길면 확산효과가 무시될 수 있다[12]. 충전층내에서 파과곡선에 대한 용액 중의 용질의 축방향의 확산효과를 Fig. 13에 나타내었으며, 충전층 높이와 용액의 유속이 일정한 기준파과곡선에 대한 D_L 변화의 영향은 Peclet수로서

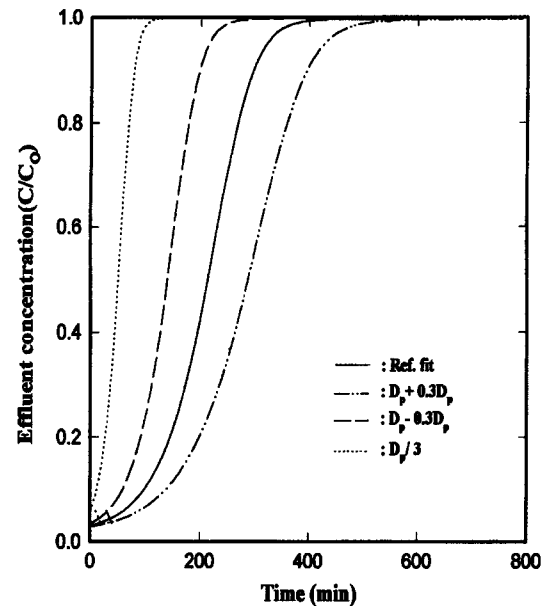


Fig. 12. Effect of the pore diffusivity changes for packed-bed performance.

($K=1.473$, $1/n=0.332$, $D_L=3.34E-8$ m²/min, $D_p=2.14E-10$ m²/min, $k_f=1.34E-3$ m/min)

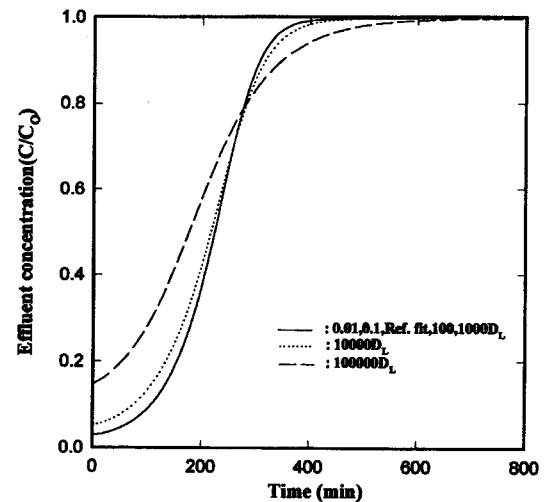


Fig. 13. Effect of the axial diffusivity coefficient changes for packed-bed performance.

($K=1.473$, $1/n=0.332$, $D_L=3.34E-8$ m²/min, $D_p=2.14E-10$ m²/min, $k_f=1.34E-3$ m/min)

설명될 수 있다. 기준파과곡선의 D_L 값을 10배에서 100(확산효과 무시)로 감소시켰을 경우와 100배에서 1000배로 증가시켰을 경우 기준파과곡선으로 중첩되었으며 반면 D_L 를 10000배와 100000배로 증가시켰을 경우 Fig. 13과 같이 나타났다. 그러나 D_L 값의 상당한 크기의 증감에도 파과곡선은 거의 영향을 받지 않는 것은 일반적으로 충전층 흡착관에서 축방향의 확산효과를 무시한 계산과 일치함을 알 수 있다[12, 16]. Fig. 13의 장치조건은 $L/R_p=46$ 으로서 실제 Reynold 수 영역내에서 $Pe_{ax}[(uL)/D_L] \cong L/R_p$ 로 조작하는 상업적인 충전층 흡착관에서 충전층 높이가 흡착제 입자직경의 20배보다 적은 짧은 흡착관의 경우를 제외하면 축방향의 분산 효과는 무시될 수 있다는 기존 연구자들[12-14]의 결과와 같이 축방향 분산 효과는 무시 가능하였다.

5. 결 론

활성탄에 의한 페놀류(phenol, p-chlorophenol, p-nitrophenol)수용액의 단일성분 흡착에 대한 충전층 흡착관의 흡착거동과 성능을 평가하기 위하여 예측모델로 표면확산모델과 세공확산모델을 수치모사하여 두 모델의 비교와 두 모델 중 실험결과와의 부합도가 더 좋은 세공확산모델을 선정하고, 충전층 흡착관에 대한 초기농도, 유량, 충전층높이 등의 충전층 매개 변수를 변화시켜가며 충전층 반응기에 미치는 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 평형등온 실험결과 페놀류-GAC계는 Freundlich등온식이 적합하였으며, Freundlich 흡착등온식으로부터 흡착용량과 흡착강도의 지표가 되는 K와 $1/n$ 을 구하였다.

(2) 충전층 흡착관의 매개변수를 지배방정식의 FEM에 의한 수치모사의 최적적합으로 추정할 수 있었다.

(3) 페놀류의 충전층 흡착관 실험결과, 활성탄에 대한 흡착질의 친화력은 $Ph < PCP < PNP$ 순으로 증가하였다. 이 순서는 흡착량의 농도의존성을 나타내는 Freundlich등온식의 지수항값과는 반대결과를 보였다.

(4) 표면확산모델과 세공확산모델은 둘 다 충전층 흡착관의 흡착거동을 예측할 수 있으며, 세공 확산모델이 표면확산모델보다는 실험치와 부합도가 다소 좋았다.

(5) 특정 용질의 흡착에 사용될 수 있는 흡착제를 흡착평형실험으로부터 선정 및 평가하고, 충전층 흡착관실험으로부터 매개변수를 추정한 후 실제 충전층 흡착관의 설계자료는 예측모델의 수치모사로부터 얻을 수 있다.

(6) 정막물질전달계수의 변화는 전체 흡착량을 변화시키지 않았지만, 입자내 확산계수의 변화는 총 흡착량을 변화시켰다.

(7) 축방향 분산계수는 본 흡착계에서 충전층 흡착관의 성능에 영향을 미치지 않았다.

사용기호

C	: liquid phase concentration [mmol/L]
C_0	: initial liquid phase concentration [mmol/L]
C_e	: equilibrium liquid phase concentration [mmol/L]
C_r	: solid phase concentration at particle radius [mmol/L]
d_p	: average particle diameter [m]
D	: molecular diffusivity [m^2/s]
D_L	: axial dispersion coefficient [m^2/s]
D_p	: pore diffusion coefficient [m^2/s]
D_s	: surface diffusion coefficient [m^2/s]
k_f	: film mass transfer coefficient [m/s]
K	: adsorption equilibrium constant
n	: Freundlich isotherm exponent
Pe_m	: mass Peclet number
q_0	: equilibrium solid phase initial concentration [mmol/g]
q_e	: equilibrium solid phase concentration [mmol/g]
q_r	: equilibrium solid phase concentration at particle radius [mmol/g]
r	: radial coordinate in carbon particle [m]
R	: particle radius [m]
t	: time [s]
u	: interstitial velocity [m/s]
Y_r^*	: dimensionless concentration in particle, q/q_0
z	: axial coordinate [m]

그리스 문자

β	: modified Sherwood number, ref. to Eq. (20)
ϵ_b	: bed porosity
ϵ_p	: particle porosity
κ	: accumulation capacity by Freundlich contribution, ref. to Eq. (31)
Θ	: dimensionless bed length parameter, ref. to Eq. (11)
v	: constant, ref. to Eq. (11)
ξ	: dimensionless bed length, z/L
ρ_p	: density of carbon particle [g/L]
τ	: dimensionless time
Φ	: dimensionless concentration, C/C_0
ϕ_r^*	: internal dimensionless concentration in particle, C_r/C_0
Φ_s	: internal dimensionless concentration at outer surface of particle, C_r/C_0
ϕ	: dimensionless radius of particle, r/R_p

상첨자

*	: particle phase
---	------------------

하첨자

o	: initial or entrance condition
b	: bed
e	: equilibrium
f	: fluid
L	: longitudinal direction
r	: radial

참고문헌

1. Park, W.H.: "Challenges in Chemical Engineering of Korea", Seoul, 132(1997).
2. Do, G. S. and Kim, Y. W.: "Water Treatment Process and Application", Dong Hwa Technology Publishing Co., Seoul(1984).
3. Rook, J. J.: *Water Treatm. Exam.*, **23**, 234(1974).
4. Grukman, A. A.: "Introduction to the Theory of Similarity", Academic Press, New York(1965).
5. Park, P. W., Yun, Y. S., Kweon, O. S., Cho, T. J. and Jeong, Y. O.: *HWAHAK KONGHAK*, **32**, 103(1994).
6. Park, P. W., Kim, I. S., Cho, T. J. and Jeong, Y. O.: *HWAHAK KONGHAK*, **30**, 594(1992).
7. Mills, P. L., Lai, S. S. and Dudukovic, M. P.: *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **24**, 64(1985).
8. Gordon, M. and Murad, J. B.: *Wat. Res.*, **22**, 279(1988).
9. Traegner, U. K. and Suidan, M. T.: *Wat. Res.*, **23**, 267(1989).
10. Annesini, M. C., Gironi, F., Ruzzi, M. and Tomei, C.: *Wat. Res.*, **21**, 567(1987).
11. Grant, R. J. and Manes, M.: *Ind. Eng. Chem. Fund.*, **5**, 490(1966).
12. Crittenden, J. C. and Weber, Jr. W. J.: *J. Environ. Eng. Div. Amer. Soc. Civil Engrs.*, **104**(EE2), 185(1978).
13. Weber, Jr. W. J. and Liu, K. T.: *Chem. Eng. Commun.*, **6**, 49(1980).
14. Raghavan, N. S. and Ruthven, D. M.: *AIChE J.*, **29**, 922(1983).
15. Hand, D., Crittenden, J. C. and Thacker, W. E.: *J. Environ. Eng. Div. Amer. Soc. Civil Engrs.*, **109**(1), 82(1983).
16. Hand, D., Crittenden, J. C. and Thacker, W. E.: *J. Environ. Eng.*

- Div. Amer. Soc. Civil Engrs*, **110**(2), 441(1984).
17. Gardini, L., Servida, A., Morbidelli, M. and Carra, S.: *Comp. Chem. Eng.*, **9**(1), 1(1985).
18. Khana, R. and Seinfeld, J. H.: *Adv. Chem. Eng.*, **13**, 113(1987).
19. Yun, Y. S., Kweon, S. H., Byun, Y. S., Kim, I. S., Park, P. W. and Jeong, Y. O.: *HWAHAK KONGHAK*, **35**, 705(1997).
20. Adamson, A. W.: "Physical Chemistry of Surface", Interscience Pub, Wiley, New York(1982).
21. Chun, H. J.: "Catalysis and Introduction", Seoul, 32(1995).
22. Crittenden, J. C., Sontheimer, H. and Summer, R. S.: "Activated Carbon for Water Treatment", 2nd Eds., DVGW-Forschungsstelle Engler-Bunte-Institute University Karlsruhe, 362(1988).
23. Wilke, C. R. and Chang, P.: *AIChE J.*, **1**, 264(1955).
24. Wakao, N. and Funazkri, T.: *Chem. Eng. Sci.*, **33**, 1375(1978).
25. Weber, W. J. Jr. and Pirbazari, M.: "Treatment of Water by Granular Activated Carbon, Advances in Chemistry Series 202", Amer. Chem. Soc., Washington, D.C.(1983).