

활성탄 고정층에 대한 Tharonil의 흡착특성에 관한 연구

이종집[†] · 유용호^{*}

천안공업대학 신소재응용화학학과 · *마산대학 ISO시스템과
(2001. 6. 15. 접수 / 2001. 9. 22. 채택)

Study on Adsorption Characteristics of Tharonil on Activated Carbon Fixed Bed

Jong-Jig Lee[†] · Yong-Ho Yu^{*}

Department of Advanced Materials Chemical Technology, Cheonan National Technical College

^{*}Department of International Standard Organization System, Masan College

(Received June 15, 2001 / Accepted September 22, 2001)

Abstract : To obtain the breakthrough characteristics for the design of fixed bed adsorption plant, adsorption experiment on granular activated carbon was performed with tharonil in the fixed bed. The pore diffusivity and surface diffusivity of tharonil estimated by the concentration-time curve and adsorption isotherm were $D_s=2.825 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$, $D_p=1.26 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, respectively. From comparison of the pore diffusivity and surface diffusivity, it was found that surface diffusion was controlling step for intraparticle diffusion. The breakthrough curve predicted by constant pattern-linear driving force model were shown to agree with the experimental results. The surface diffusivity and film mass transfer coefficient had no effect on the theoretical breakthrough curve but the adsorption isotherm had fairly influence on it. Appearance time of breakthrough curve is faster with the increase flow rate and inflow concentration of liquid. The utility of granular activated carbon is enhanced with the increase of bed height and with the decrease of inflow rate.

Key Words : adsorption, activated carbon, fixed bed

Nomenclature

a_v ; Specific particle area per particle volume, cm^2/cm^3
 C ; Fluid phase concentration, mg/l
 C_B, C_E ; Fluid phase concentration at break point, exhaustion point, mg/l
 D_{AB} ; Molecular diffusivity, cm^2/s
 K_f ; Overall mass transfer coefficient, cm/s
 $(K_f)_m$; Averaged overall mass transfer coefficient, cm/s
 k_f ; Fluid film mass transfer coefficient, cm/s
 k_s ; Intraparticle mass transfer coefficient, $\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$
 M_w ; Molecular weight, g

q ; Amount adsorbed, mg/g
 r_p ; Particle radius, cm
 r ; Radial position within particle, cm
 t ; time, h
 t_B, t_E ; Break time, exhaustion time, h
 T ; Temperature, K
 u ; Superficial velocity, cm/min
 V_m ; Molar volume of solute at normal boiling point, $\text{cm}^3/\text{g-mol}$
 v_a ; Transfer rate of the adsorption zone, cm/s
 Z ; Bed height, cm
 Z_a ; Adsorption zone length, cm

Greek Letters

$\varepsilon, \varepsilon_b$; Voidfraction of particle, fixed bed
 η_{AP} ; Utility factor, t_B/t_s

[†]To whom correspondence should be addressed.
jjlee@cntc.ac.kr

μ : Viscosity of fluid, $g/cm \cdot s$
 ρ_b : Bulk density of fixed bed, g/cm^3

1. 서 론

고정층 흡착탑은 설비가 간소하여 장치의 운전, 보수, 관리 등이 용이하며 탈착조작에 의해 흡착제의 반복사용 및 자원회수 등을 할 수 있는 장점이 있어서 실제로 폐하수의 처리에 많이 사용되는 장치이다. 이와 같은 흡착탑을 설계하기 위해서는 회분식 흡착속도실험에 의해 산출된 입자내 확산계수와 흡착등온선으로부터 격변곡선을 예측할 수 있는 고정층 흡착모델을 고찰해야 함에도 불구하고 고정층 흡착탑의 설계에 필요한 자료는 보고된 것이 적은 실정이다.

본 연구에서는 농업과 원예분야에서 자주 이용되는 대표적인 유기인계 농약성분의 하나로 치사량(LD₅₀) 440mg/kg의 유해한 독성물질인 tharonil¹⁾(dimethyl 2,2,2-trichloro-1-hydroxyethyl phosphate)을 입상 활성탄을 충전한 고정층 흡착탑으로 흡착제거하는 실험을 통하여 유입속도, 고정층의 충전높이 등의 장치 인자와 함께 흡착등온선, 입자내 표면확산계수, 경막물질이동계수 등과 같은 흡착특성인자들이 고정층 흡착시의 격변곡선(breakthrough curve)에 미치는 영향을 정형농도분포-선형추진력 근사법(constant pattern-linear driving force model, 이하 CP-LDF model로 표기)에 의해 시뮬레이션하여 수치해석으로 예측한 결과와 실험값을 비교해 봄으로써 격변곡선에 영향을 주는 흡착 변수를 구명하여 고정층 흡착탑의 효율적인 설계 및 운전에 필요한 기초자료를 얻고자 하였다.

2. 이 론

2.1. 흡착평형

일정온도에서 흡착량과 평형농도의 관계를 나타낸 것이 흡착등온식이다. 여기서는 액상흡착에 주로 적용되며 간편하게 사용할 수 있도록 다음과 같이 선형화한 Freundlich의 흡착등온식을 사용하였다.

$$\text{Freundlich} : \ln q = \ln k + \beta \ln C \quad (1)$$

2.2. 무차원 기초방정식

일반적으로 세공내의 자유용액중의 흡착질의 양

은 세공벽에 흡착된 양에 비해 훨씬 적으므로 구형 입자의 미소구간에 대한 입자내부 및 입자중심에 대한 물질수지식은 다음과 같은 무차원식으로 나타낼 수 있다.²⁾

2.2.1. 세공확산이 속도지배인 경우(P-D model)

$$\text{입자내부} : \rho_s \frac{\partial q}{\partial T_p} = \left[\frac{2}{R} \frac{\partial C}{\partial R} + \left(\frac{\partial^2 C}{\partial R^2} \right) \right]_{R=0} \quad (2)$$

$$\text{입자중심} : \rho_s \left(\frac{\partial q}{\partial T_p} \right)_{R=0} = \frac{6}{dR} \left(\frac{\partial q}{\partial R} \right)_{R=dR/2} \quad (3)$$

2.2.2. 표면확산이 속도지배인 경우(S-D model)

$$\text{입자내부} : \frac{\partial q}{\partial T_s} = \left[\frac{2}{R} \frac{\partial q}{\partial R} + \left(\frac{\partial^2 q}{\partial R^2} \right) \right]_{R=0} \quad (4)$$

$$\text{입자중심} : \left(\frac{\partial q}{\partial T_s} \right)_{R=0} = \frac{6}{dR} \left(\frac{\partial q}{\partial R} \right)_{R=dR/2} \quad (5)$$

이때 무차원변수들은 다음과 같이 정의된다.

$$T_p = D_p t / r_p^2 \quad (6)$$

$$T_s = D_s t / r_p^2 \quad (7)$$

$$R = r / r_p \quad (8)$$

초기조건과 경계조건을 이용하여 수치해석을 하면 흡착거동을 예측할 수 있는데 본 연구에서는 Crank-Nicolson의 유한차분법³⁾을 사용하여 (2)~(5)식을 차분화하고 Gauss-Siedel 법⁴⁾으로 수치해석에 의한 용액농도의 경시변화곡선을 구한 다음 이 곡선들을 실험값들과 동일농도에 대해 관련시키면 (6)과 (7)식의 무차원 변수로부터 세공확산계수, D_p 와 표면확산계수, D_s 를 구할 수 있다.

2.3. 고정층 흡착과정⁵⁾

2.3.1. 기초방정식

고정층흡착 및 경막확산에 대한 물질수지식은 다음과 같다.

$$u \frac{\partial C}{\partial z} + \varepsilon_b \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial q}{\partial t} = \varepsilon_b D_b \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (9)$$

$$\rho_b \frac{dq}{dt} = k_f a_v (C - C_i) \quad (10)$$

여기서 k_f 는 경막물질이동계수로 다음과 같은 Carberry의 식⁶⁾을 이용하여 구한다.

$$J_D = 1.15 \epsilon_b^{0.5} Re^{-0.5} \quad [range : Re/\epsilon_b \leq 1000] \quad (11)$$

$$J_D = \left(\frac{k_f}{u}\right) \left(\frac{\mu}{\rho D_{AB}}\right)^{2/3} \quad (12)$$

이때 분자확산계수 D_{AB} 은 Wilke-Chang의 식⁷⁾으로 구할 수 있다.

$$D_{AB} = 7.4 \times 10^{-10} \frac{2.6 M_w^{1/2} T}{\mu V_m^{0.6}} \quad (13)$$

2.3.2. 정형농도분포 및 선형추진력의 근사(CP-LDF model)

고정층의 높이가 어느 정도 이상이 되면 격변곡선의 모양이 일정해지는 정형농도분포(constant pattern)를 하는데 이때 흡착대의 이동속도는 다음과 같이 근사시킬 수 있다.

$$v_a \approx \frac{uC_o}{\rho_b q_o} \quad (14)$$

일반적으로 흡착속도는 흡착량의 차를 추진력으로 하여 나타내는 선형추진력(linear driving force)을 이용하여 다음과 같은 비교적 간단한 근사식으로 쓸 수 있다.

$$\rho_b \frac{dq}{dt} = \eta k_s a_v (q_i - q) \quad (15)$$

여기서 k_s 는 입자내 물질이동계수로 입자내 확산계수와 관련이 있다.

2.3.3. 평균 총괄물질이동계수

유체경막을 통한 물질이동속도는 유체경막 및 입자내 물질이동에 대한 총괄흡착속도와 같다.

$$k_f a_v (C - C_i) = \eta k_s a_v (q_i - q) \quad (16)$$

그런데 입자표면에서의 농도와 흡착량을 알아내기가 어렵기 때문에 흡착량과 평형인 용액의 농도 C^*

를 도입하여 $(C - C^*)$ 를 추진력으로 한 흡착속도로 나타내면 (16)식은

$$\rho_b \frac{dq}{dt} = K_f a_v (C - C^*) \quad (17)$$

이 된다. 여기서 K_f 는 총괄물질이동계수인데 흡착평형관계가 곡선인 경우 K_f 값은 농도에 따라 각각 다른 값을 갖게 되므로 흡착대내의 격변농도, C_B 와 포화농도, C_E 사이의 K_f 값들에 대한 평균값인 평균총괄물질이동계수, $(K_f)_m$ 를 사용한다.

2.3.4. 격변시간과 격변곡선

식(17)의 K_f 를 평균값인 $(K_f)_m$ 으로 치환한 다음 C_B 와 C_E 사이에서 적분하면 다음과 같다.

$$t_E - t_B = \frac{\rho_b q_o}{(K_f)_m a_v \cdot C_o} \int_{C_B}^{C_E} \frac{dC}{(C - C^*)} \quad (18)$$

격변시간(breakt time)을 구하기 위해서는 고정층 입구로부터 정형농도분포가 형성되는 시간을 알아야 하는데 Michaels는 잔존흡착용량분율 f 를 도입하여 이것을 계산하였다.

$$t_B = \frac{\rho_b q_o}{uC_o} \left(z - \frac{fu}{(K_f)_m a_v} \int_{C_B}^{C_E} \frac{dC}{(C - C^*)} \right) \quad (19)$$

식(19)를 $t = t_B$, $C = C_B$ 와 같은 경계조건을 사용하여 적분한 후 C 와 t 의 관계를 도시하면 격변곡선(break-through curve)을 얻을 수 있다.

$$t = t_B + \frac{\rho_b q_o}{k_f a_v C_o} \int_{C_B}^C \frac{dC}{(C - C_i)} \quad (20)$$

3. 실험

3.1. 활성탄 시료

본 실험에 사용된 활성탄은 야자껍질계 입상활성탄으로 70°C의 물로 충분히 세척한 후 110°C에서 항량건조하여 사용하였으며 그 물성은 Table 1과 같다. 시료활성탄의 세공분포는 Fig. 1과 같이 1nm 부근의 micropore와 1000nm 부근의 macropore가 주로 발달된 목질계 활성탄의 특징인 2차원적 구조를 가지고 있다.

Table 1. Physical properties of activated carbon

Property	Value
Particle size	1.19mm
Bulk density	0.867g/cm ³
True density	1.84g/cm ³
Specific surface area	1280m ² /g
Pore volume	0.70cm ³ /g

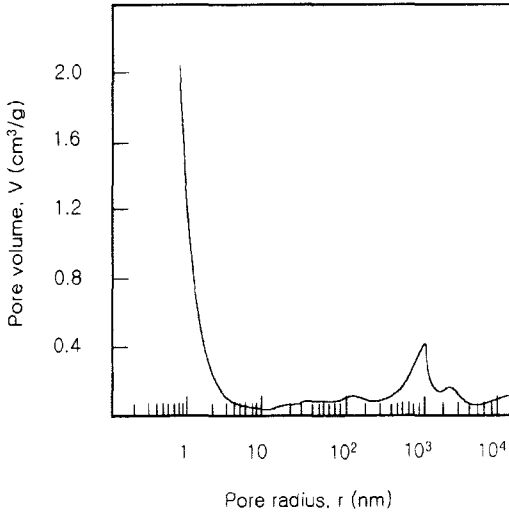


Fig. 1. The pore volume distribution of activated carbon

3.2. 시약 및 분석방법

본 실험에 사용한 시약은 한국농약의 tharonil이며 용액 중에서의 농도는 Ion chromatography(Dionex Co. 2002i system)을 통하여 고유파장 232nm에서 흡광광도법으로 정량분석하였다. 또한 활성탄의 비표면적과 세공분포는 BET 비표면적 측정장치(Micromeritics instrument Co. ASAP 2010)를 이용하여 측정하였다. 105±5°C에서 충분히 건조한 시료를 0.1g 평량한 후, 시료관(sample tube)에 넣고 전처리 포트에 장착한 다음, 온도를 300°C로 유지시키면서 8~12시간 동안 50µmHg 이하의 압력에서 배기하여, 세공내의 미량의 수분 및 공기를 제거하였다. 완전히 배기된 시료의 정확한 무게를 평량한 다음, 분석 포트로 옮겨 액체질소온도(77K)에서 상대압력을 변화시켰을 때, 흡착 및 탈착되는 질소의 양으로부터 등온선을 구하고, 세공분포를 조사하였으며, 상대압력 0.2 이하에서 8point를 선택한 후, plot하여 BET식에 의한 비표면적을 측정하였다.

3.3. 실험방법

3.3.1. 등온흡착 실험

초기농도 1000mg/l의 시료용액 100ml에 침지한 시료활성탄을 5-200mg(건량기준) 범위에서 양을 다르게 첨가한 후 20±0.5°C에서 24시간 항온 진탕하여 여과 분리한 여액 중의 농도를 분석한 결과로부터 흡착등온선을 구하였다.

3.3.2. 고정층흡착실험

내경 8mm의 유리관에 침지한 활성탄을 일정높이(10cm, 15cm, 20cm, 30cm, 40cm)로 충전한 다음 소정의 초기농도 (50mg/l, 100mg/l, 150mg/l)의 시료용액을 관 하부로부터 유입하였다. 시료용액의 유출속도는 Micro tube pump(Rikakikai Co. MP-3)를 사용하여 2cm³/min, 3cm³/min, 4cm³/min, 6cm³/min으로 조정하였으며 Fraction collector (Toyo. Co. SF-100K)로 10cm³씩 분취한 유출용액의 농도를 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 흡착계수 및 입자내 확산계수

입자내 확산계수의 계산 및 고정층 흡착과정의 해석에는 흡착등온선의 상수값들이 필요하다. 평형 흡착실험으로부터 얻은 실험결과를 선형화하여 나타낸 것이 Fig. 2이며, 이 그림으로부터 최소자승법을 사용하여 구한 Freundlich식의 상수값들은 k=58.0, β=0.322로 흡착등온선의 기울기를 나타내는 β값이 0.5 이하이므로 활성탄에 의한 tharonil의 흡착이 효과적임을 알 수 있다.⁸⁾ 또 이 값들을 이용하여 (6),

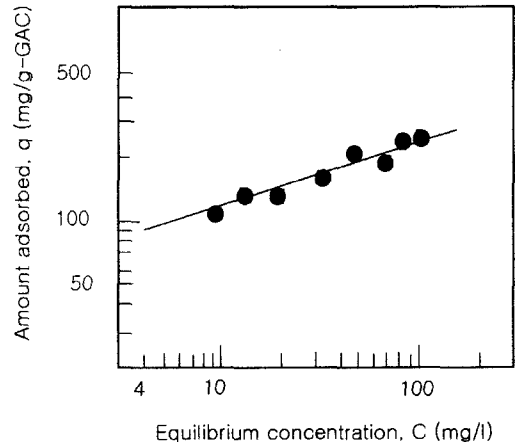


Fig. 2. Linearized Freundlich isotherm for tharonil adsorption

(7)식으로 구한 입자내확산계수는 표면확산 계수 $D_s = 2.825 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$, 세공확산계수가 $D_p = 1.26 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 였다.

4.2. 흡착등온선의 영향

활성탄의 흡착특성 또는 유기물의 흡착특성을 비교평가하기 위해서 흡착등온선을 이용하지만 또한 경막물질이동계수나 입자내 확산계수의 속도변수를 구하기 위해서도 흡착등온선이 이용되며 이때에는 그 오차가 이들 속도변수의 산정치에 영향을 미친다. 흡착등온선의 오차원인에 대해서는 평형도달의 확인이 불충분하거나 흡착-탈착 실험으로부터 구한 흡착등온선의 흡착이력현상이 존재하여 완전한 가역성이 성립하지 않기 때문이라고 하였다.⁹⁾ 또한 농도측정이나 활성탄 평량시의 오차도 무시하지 못하여 CP-LDF법에 의하여 격변곡선을 예측할 때에는 실험정도의 오차한계($\pm 10\%$)를 고려해 주어야 한다.

평형흡착실험에서 얻어진 실험치를 기준으로 고정층에서 격변곡선을 예측할 경우 흡착등온선의 오차가 격변곡선에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 이 그림들을 보면 $\pm 10\%$ 의 오차를 고려한 흡착등온선으로 CP-LDF법에 의한 격변곡선들과 실제격변곡선을 비교한 결과 평형흡착량의 산정오차는 격변곡선의 출현시기에 곧바로 반영됨을 알 수 있었다. 본 연구에서는 격변곡선이 비교적 잘 일치할 때의 흡착등온선을 결정하여 이때의 흡착등온선에 대한 자료를 가지고 다른 인자들의 영향을 조사하기 위한 격변곡선을 예측하는데 사용함으로써 인자들의 영향을 정확하게 평가하고자 하였다.

4.3. 경막물질이동계수의 영향

고정층 흡착의 격변곡선을 구하기 위하여 경막물

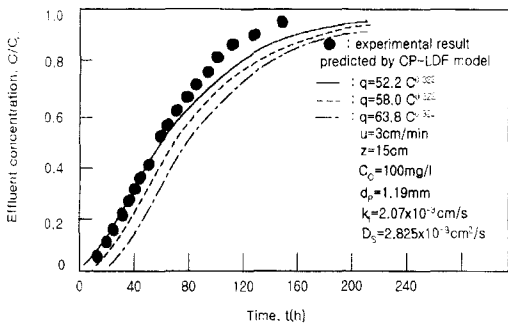


Fig. 3. Effect of adsorption isotherms for breakthrough curve of tharonil

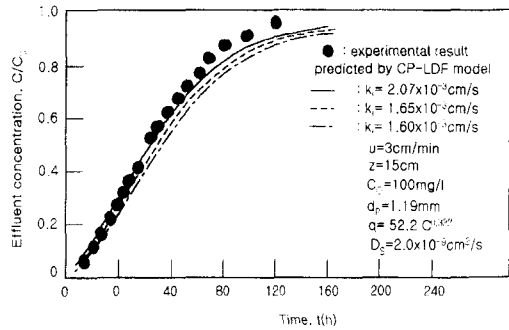


Fig. 4. Effect of fluid film mass transfer coefficient for breakthrough curve of tharonil

질이동계수를 (11)~(13)식의 물질이동인자로부터 산출한다. 경막물질이동계수는 산출과정에서 분자확산계수의 추정치에 10~20%의 오차를 가지고 있기 때문에 어떤 상관식을 이용하여도 오차가 있게 된다.¹⁰⁾

Fig. 4는 경막물질이동계수값이 격변곡선에 미치는 영향을 나타내었다. 이 결과 경막물질이동계수값에 따라 격변곡선은 큰 차이가 없이 실제격변곡선과 비교적 잘 일치함을 알 수 있으므로 경막물질이동계수의 차이는 격변곡선에 그다지 영향을 미치지 않는다는 것을 보여준다.

4.4. 입자내 확산계수의 영향

평형흡착실험으로부터 계산한 입자내 확산계수값은 표면확산계수가 $D_s = 2.825 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$, 세공확산계수가 $D_p = 1.26 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 였다. 따라서 입자내확산의 율속단계는 표면확산임을 알 수 있다.

일반적으로 표면확산계수값은 $\pm 10\%$ 정도의 오차를 가지고 있다. 이 오차범위를 고려한 표면확산계수를 가정하여 CP-LDF법으로 예측한 고정층 흡착의 격변곡선과 실제격변곡선을 비교한 결과를 Fig. 5

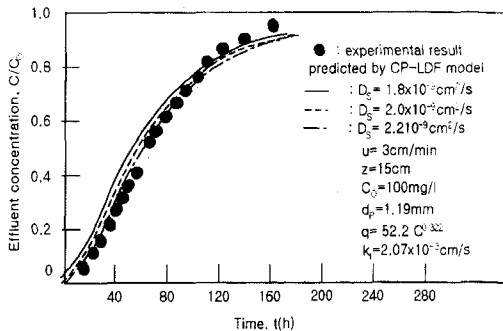


Fig. 5. Effect of surface diffusivities for breakthrough curve of tharonil

에 도시하였다. 그림을 보면 표면확산계수의 추정오차는 격변곡선의 예측에 그다지 큰 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

4.5. 초기농도의 영향

Fig. 6은 초기농도변화에 대한 격변곡선의 영향을 도시하였다. 이 그림으로부터 초기농도가 클수록 흡착질의 격변곡선출현시간이 빨라지며 흡착대가 짧은 것을 알 수 있다. 이것은 농도가 클수록 활성탄의 흡착속도 증가로 인하여 흡착이 빨리 진행되어 평형에 도달하는 시간이 단축되기 때문이라고 생각된다.

4.6. 층 높이의 영향

Fig. 7에 활성탄의 충전높이를 10cm, 15cm, 20cm, 30cm 및 40cm로 변화시키면서, 고정층 실험을 행하여 얻은 실험치를 CP-LDF법에 의해 예측한 격변곡선과 비교하여 도시하였다. 이 결과 실험격변곡선과 CP-LDF법으로 해 예측한 격변곡선이 C/C_0 가 0.6일 때까지는 비교적 잘 일치하나 유출농도비가 0.6-0.9의 범위에서는 다소 편차를 나타내었다.

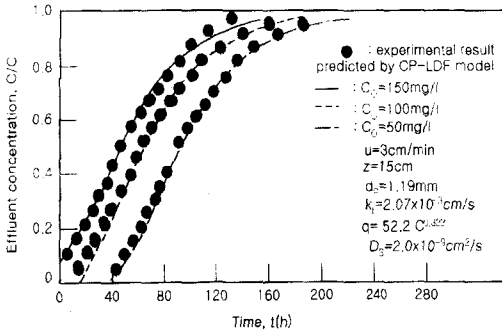


Fig. 6. Effect of initial concentrations for breakthrough curve of tharonil

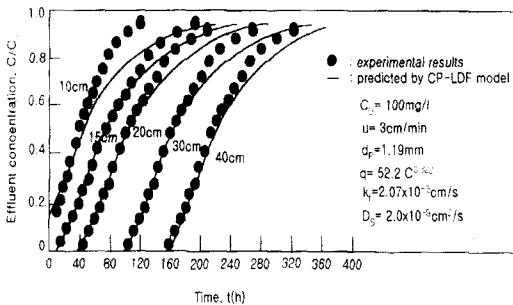


Fig. 7. Effect of bed heights for breakthrough curve of tharonil

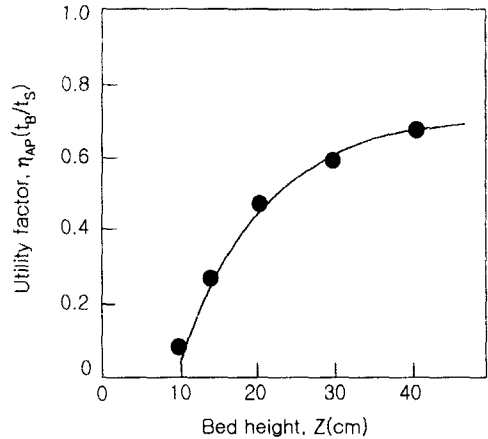


Fig. 8. Relation between utility factor and bed height for tharonil

고정층 흡착에 의한 활성탄의 이용효율은 유출농도가 기준치 C 에 도달한 시간 t_B 에서 고정층 전체의 흡착량, Q_B 와 포화흡착량, Q_s 의 비로서 정의된다.

$$\eta_{AP} = \frac{Q_B}{Q_s} \left[\approx \frac{t_B}{t_s} = \frac{t_B}{\rho_b \cdot Z \cdot q_0 / u \cdot C_0} \right] \quad (21)$$

Fig. 7의 격변곡선으로부터 과과점에 도달하는 격변농도비가 $C/C_0=0.1$ 일 때 활성탄 이용효율(η_{AP})를 계산하여, 이용효율과 층높이의 관계를 Fig. 8에 나타내었다.

그림을 보면 층높이가 길어지고 흡착질의 평형흡착량이 클수록 활성탄의 이용효율은 증가하며 본 실험의 경우에는 $Z=30\text{cm}$ 이상에서는 60~70% 정도의 양호한 이용효율을 얻을 수 있었다. 그러나 층높이가 30cm 이하에서의 이용효율은 급격한 감소를 보이므로, 경제적인 조업을 위해서는 30cm 이상의 층높이로 결정하는 것이 타당하다고 생각된다.

4.7. 유속의 영향

Fig. 9는 층높이 15cm로 고정하고, 유입속도를 2~6cm/min로 변화시키면서 실험한 실험치와 CP-LDF법으로 예측된 격변곡선을 도시한 결과 비교적 잘 일치됨을 나타내었다. 이 그림으로부터 유속이 증가하면 흡착질의 유출시간이 짧아지며 유출농도가 급격히 증가한 후 tailing 현상이 나타나는데 이것은 유속이 빨라지면 흡착탑내에서 유체의 잔류시간이 짧아지므로, 흡착질이 충분히 흡착되지 못하고 유출되는 현상으로 생각된다.

Fig. 10은 활성탄의 이용효율이 최적인 층높이(30

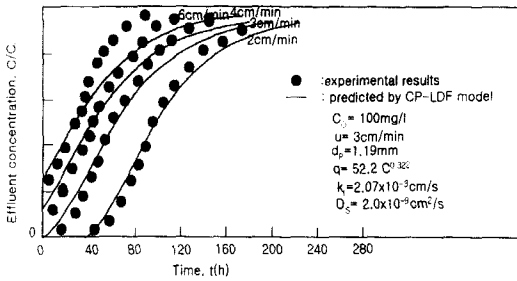


Fig. 9. Effect of fluid flow rates for breakthrough curve of tharonil

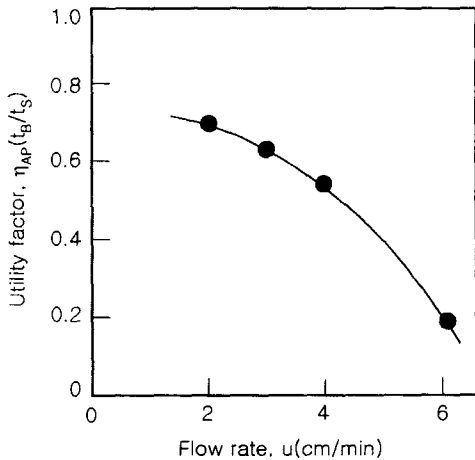


Fig. 10. Relation between utility factor and fluid flow rate for tharonil

cm)에서 격변농도비가 $C/C_0=0.1$ 에서의 활성탄 이용 효율과 유입속도와의 관계를 나타낸 것으로 유속을 크게 하면 경막물질이동계수값은 증가하지만 고정층 내에서의 체류시간이 감소하므로 유속이 증가함에 따라 활성탄 이용효율이 저하하는 것을 알 수 있다.

따라서 층의 높이, 유속 및 이용효율의 관계는 아주 밀접한 관계를 가지므로 조업조건에 따라 신중히 결정해야 할 조업인자로 판단되어 진다.

전체적으로 판단하여 볼 때 격변곡선에 대해 영향을 미치는 인자는 각각 독립적으로 작용하기도 하지만 서로가 복합적으로 작용하여 동시에 영향을 미치기도 하므로 이들 변수에 대한 상호관계를 충분히 고려해야 할 필요가 있을 것으로 판단된다. 따라서 이점에 대하여는 차후의 연구과제로 채택하여 검토할 계획이다.

5. 결론

유독한 농약성분인 tharonil을 대상으로 고정층 흡착실험을 통하여 CP-LDF법에 의해 예측한 격변곡선과 실측격변곡선이 비교적 잘 일치함을 나타내었다. 또한 고정층 흡착탑의 설계시 격변곡선의 계산에 필요한 여러 변수(흡착등온선, 경막물질이동계수, 표면확산계수)의 산정오차가 격변곡선의 계산결과에 미치는 영향을 검토한 결과 흡착등온선의 산정오차는 상당한 영향을 미치는 것을 알았으며 경막물질이동계수와 표면확산계수의 산정오차는 큰 영향을 미치지 않았다.

고정층 격변곡선에 대한 유속과 초기농도의 영향을 검토한 결과 유속이 빠를수록, 초기농도가 클수록 격변곡선의 출현시간이 빨라지며 흡착대는 짧아짐을 알았다.

고정층 흡착조작에서 격변농도비(C/C_0)가 0.1일 때 일정한 유입속도에서 고정층 높이에 따른 활성탄의 이용효율은 두 상의 접촉시간을 고려하여 어느 범위에서는 층높이가 높을수록 증가하였으며 유입속도 변화에 따른 이용효율은 유입속도가 증가할수록 감소됨을 알았다.

참고문헌

- 1) 文星明, 化學藥品大辭典, p. 2332, 學園出版社, 1987.
- 2) Suzuki, M., Adsorption Engineering, pp. 95~120 Elsevier, 1990.
- 3) Crank, J., The Mathematics of Diffusion, Clarendon Press, p. 922, 1966.
- 4) Kreyzig, E., Advanced Engineering Mathematics, p. 922, John Wiley & Sons, 1998.
- 5) 北川睦夫 著, 金勇權 譯, 活性炭水處理技術과 管理, p. 99, 신광문화사, 1995.
- 6) Carberry, J. J., J. AICHE., 6, 460, 1960.
- 7) Wilke, R., Chang, P., J. AICHE., 1, 264, 1955.
- 8) 北川睦夫 著, 金勇權 譯, Op.Cit. p. 66.
- 9) Ruthven, D. M., Principles of Adsorption & Adsorption Process, pp. 125~140, John Wiley & Sons, 1984.
- 10) Peel, R. G., Benedek., Environ. Sci. & Tech., 14, 66, 1980.