

ORIGINAL ARTICLE

## 활성탄을 충전한 고정층에서 페놀 흡착에 따른 파과곡선과 물질전달저항 해석

유해나 · 감상규<sup>1)</sup> · 이민규\*

부경대학교 화학공학과, <sup>1)</sup>제주대학교 환경공학과

### Analysis of Breakthrough Curves and Mass Transfer Resistance for Phenol Adsorption in a Fixed-bed Process Packed with Activated Carbon

Hae-na You, Sang-Kyu Kam<sup>1)</sup>, Min-Gyu Lee\*

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

<sup>1)</sup>Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

#### Abstract

Adsorption of phenol on activated carbon in a fixed bed was studied. The effects of fixed-bed length, superficial velocity (flow rate) and particle size of adsorbent on fixed-bed performance were investigated. Some characteristic parameters such as the breakthrough time ( $t_{0.05}$ ), saturation time ( $t_{0.95}$ ), length of mass transfer zone ( $L_{MTZ}$ ), adsorptive capacity ( $W$ ), and adsorption rate constant ( $K_a$ ) were derived from the breakthrough curves. Adsorbent particle sizes significantly affected the shape of the breakthrough curve. Larger particle sizes resulted in an earlier breakthrough, a longer  $L_{MTZ}$  and a lower adsorption rate. Superficial velocity was a critical factor for the external mass transfer during fixed-bed adsorption process. The external mass transfer resistance was dominant as increasing superficial velocity.

**Key words** : Activated carbon, Adsorption, Breakthrough curve, Fixed-bed, Mass transfer resistance, Phenol

#### 1. 서론

페놀은 석탄의 전환공정, 석유 정제공정, 섬유, 의약품, 제초제 및 살충제등과 같은 다양한 산업에서 폐수로 배출되고 있다(Lua와 Jia, 2009). 페놀이 하천에 유입되게 되면 낮은 농도에서도 불쾌한 맛과 악취를 일으키며(Aksu와 Gönen, 2004), 인체에 침투할 경우 적혈구의 세포막을 손상시켜 산소의 전달을 방해하는 하인스 소체(Heinz Body)가 생성되는 것으로 보고되

고 있다. 또한 페놀의 생물학적 분해 시 용존 산소를 요구하므로 하천수의 용존 산소를 고갈시켜 수질에 악영향을 초래한다(Kang 등, 2007).

페놀과 같은 독성 유기물을 함유한 폐수를 처리하기 위해 생물학적 분해(EI-Naas 등, 2010), 용매추출(Greminger 등, 1982), 흡착제를 이용한 농축제거(Özkaya, 2006) 혹은 고도산화처리방법(Ahmed 등, 2010) 등이 이용되고 있다. 그러나 생물학적 분해의 경우에 미생물의 배양이 어렵고 부지가 많이 소요되

Received 9 May, 2013; Revised 2 August, 2013;

Accepted 7 August, 2013

\*Corresponding author : Min-Gyu Lee, Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea  
Phone: +82-51-629-6435  
E-mail: mglee@pknu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

며, 용매추출의 경우는 공정이 복잡할 뿐만 아니라 지속적으로 화학물질인 용매를 투입해야 하고 유기용매의 유출에 의해 환경적인 문제를 야기할 수 있다(Kobayashi 등, 2010). 또한, 고도산화처리법을 이용하는 경우에는 공정의 설계 및 운영에 막대한 비용이 소모된다. 이에 비해서 공정이 간편하고, 경제적이며, 친환경적인 흡착공정이 폐놀을 함유한 폐수의 처리에 널리 사용되고 있다(Wang 등, 2007).

흡착공정에서 흡착제로 많이 사용되고 있는 활성탄은 넓은 비표면적과 큰 기공 부피, 다공성을 가지고 있기 때문에 유기 화합물을 제거하는데 효과적인 것으로 알려져 있어, 최근 활성탄을 이용한 폐놀 제거에 관한 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되고 있다(Ahmaruzzaman 등, 2008; Alhamed, 2009; Bestamin, 2006). Girods 등(2009)은 목재폐자재로 활성화한 활성탄을 이용하여 폐놀의 회분식 흡착연구를 수행하였고, Özkaya(2006)은 활성탄을 사용하여 폐놀의 흡착 평형실험을 실시하여 다양한 흡착등온식을 적용하는 연구를 실시하였으며, Mohddin 등(2009)의 연구에서는 코코넛 껍질을 활성화한 활성탄을 사용하여 폐놀의 흡착등온실험 및 속도해석을 하였다. Alhamed(2009)은 활성탄을 사용하여 폐놀의 연속식 실험을 통해 활성탄의 입자크기, 폐놀의 농도, 유량에 따른 파과 곡선의 형태를 살펴보고 파과곡선에 속도모형을 적용하였다. Sulaymon과 Ahmed (2008)은 활성탄을 이용하여 고정층에서의 폐놀화합물들의 경쟁흡착을 연구하였다. Lua와 Jia(2009)는 활성탄을 가지고 회분식 흡착 평형 연구와 고정층에서 폐놀의 흡착거동을 속도모형을 이용하여 실험데이터와 비교하는 연구를 행하였다. 이와같이 흡착에 의한 폐놀 제거 연구는 크게 회분식 연구와 연속식 흡착연구로 나뉘어져 진행되고 있다. 회분식 흡착연구는 주로 흡착속도와 흡착등온모델해석에 대하여 이루어지고 있으며, 연속식 연구는 주로 유량 및 농도에 따른 파과특성해석에 대하여 이루어지고 있다. 하지만 폐놀의 고정층 흡착연구에서 물질전달저항 특성에 대하여 고찰한 연구는 거의 찾아볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 활성탄을 충전한 고정층 흡착 시스템을 사용하여 폐놀의 흡착연구를 수행하고 공탑속도(유량)의 영향, 초기농도의 영향, 고정층의

높이에 따른 영향을 살펴보았다. 또한 고정 흡착층의 흡착 성능과 관계되는 흡착층의 흡착 능력, 물질전달(MTZ) 길이, 층 활용도(bed utilization) 등을 조사하고 공탑속도와 층높이를 달리할 경우에 흡착 속도와 물질전달저항에 대하여 검토하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 실험에서 사용한 흡착제는 국내 S화학으로부터 구매한 석탄계 활성탄이며, 이를 분쇄하여 0.425 ~ 0.250 mm, 0.250 ~ 0.180 mm 그리고 0.180 ~ 0.150 mm로 체 분리한 다음에 증류수로 수차례 세척한 후 85°C의 건조기에서 24 hr 건조한 뒤 데시게이터에 보관하여 사용하였다. 흡착질로는 폐놀(Junsei, GR)을 사용하였으며, 1000 mg/L의 stock solution을 제조하여 실험에 사용하였다.

고정층 흡착의 실험 장치의 구성은 Fig. 1과 같으며, 직경 10.0 mm, 길이 10 cm의 유리 컬럼에 일정량의 활성탄을 채우고 상향류식으로 실험을 실시하였다. 페리스탈틱펌프(Masterflex®, USA)를 사용하여 일정 농도의 폐놀용액을 일정 공탑속도로 조절하여 컬럼에 유입시켰으며, 컬럼 상단으로부터 유출되는 용액을 채취하였다. 채취한 시료는 UV-vis 흡수분광광도계(Mini-1240, Shimadzu)를 사용하여 파장 270 nm에서 폐놀농도를 분석하였다.

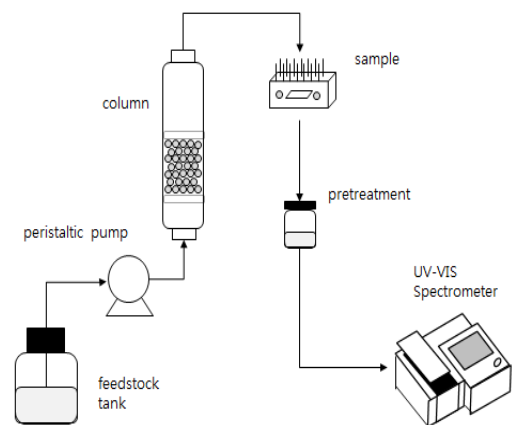


Fig. 1. Schematic diagram of the fixed-bed adsorption system.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 농도의 영향

Fig. 2는 폐놀의 유입유량을 20 ml/min(공탐속도 25.46 cm/min)로 일정하게 하고 폐놀의 유입 농도를 80, 120 및 150 mg/L로 변화시키면서 얻은 파과곡선들을 나타낸 것이다. 파과곡선으로부터 얻을 수 있는 중요한 정보는 고정 흡착층의 흡착 성능과 관계되는 흡착층의 흡착 능력, MTZ 길이, 층 활용도 등이 있으며, 아래와 같이 정의할 수 있다.

고정층에서 처리한 용액의 양인 유출부피( $V_{eff}$ )는 다음과 같이 정의된다(Aksu 등, 2004).

$$V_{eff} = Q t_{total} \quad (1)$$

여기서  $t_{total}$ 은 전체 운전시간(min),  $Q$ 는 유량(ml/min)이다.

컬럼에서 흡착된 폐놀의 흡착량( $q_{total}$ )은 다음과 같이 정의된다(Aksu 등, 2004).

$$q_{total} = \frac{Q}{1000} \int_{t=0}^{t=t_{total}} C_0 dt \quad (2)$$

여기서  $C_0$ 는 유입농도(mg/L)이다.

컬럼에 유입된 폐놀의 총량( $m_{total}$ )은 다음과 같이 정의된다(Hasan 등, 2010).

$$m_{total} = \frac{C_0 V_{eff}}{1000} \quad (3)$$

폐놀의 총 제거율( $R_{total}$ )은 다음과 같이 정의된다(Hasan 등, 2010).

$$R_{total} = \frac{q_{total}}{m_{total}} \times 100 \quad (4)$$

폐놀의 평형 흡착량( $q_e$ )는 다음과 같이 정의된다(Aksu 등, 2004).

$$q_e = \frac{q_{total}}{X} \quad (5)$$

여기서  $X$ 는 컬럼에 충전된 흡착제의 양(g)이다.

MTZ 길이( $Z_m$ )는 아래와 같이 정의된다(Futalan 등, 2011).

$$Z_m = Z \left( 1 - \frac{t_{0.05}}{t_{0.95}} \right) \quad (6)$$

여기서  $Z$ 는 컬럼 길이(cm),  $t_{0.05}$ 는 파과시간(min),  $t_{0.95}$ 는 포화시간(min)을 나타낸다.

고정층 흡착장치의 층 활용도( $f$ )는 아래와 같이 정의된다.

$$f = \left( 1 - \frac{0.5 \times MTZ}{bed\ height} \right) \times 100 \quad (7)$$

Fig. 2의 파과곡선으로부터 파과시간과 포화시간을 구하고, 식 (1)~식 (7)에서 흡착량과 제거율 등의 변수들을 구하여 Table 1에 나타내었다. 표에서 보듯이 폐놀 유입 농도가 150 mg/L일 경우에는 52 min 후에 파과( $C/C_0 = 0.05$ )가 나타났으나, 유입 농도가 80 mg/L일 경우에는 74 min 후에 파과가 나타났다. 즉, 유입 농도가 낮아질수록 파과곡선은 뒤쳐져 나타났다. 유입농도가 80, 120 및 150 mg/L로 증가함에 따라 유출 부피는 각각 5200 ml, 4200 ml 및 3600 ml로 감소하였으며, 파과시간은 각각 74 min, 61 min 및 52 min로 감소하였다. 이는 유입농도가 증가함에 따라 흡착 구동력인 농도차가 커져 컬럼내 흡착제의 활성 점들이 더 빨리 포화되기 때문으로 생각된다. 유입농도가 증가함에 따라 흡착량도 증가하였다. 그러나 유입농도가 증가함에 따라 컬럼을 통과하는 폐놀의 총량이 증가하게 되므로 총 제거율은 57.6%에서 49.1%로 감소하였다. 최대 흡착량은 유입 폐놀 농도가 150 mg/L인 경우에 176.1 mg/g로 얻어졌다. 폐놀의 유입 농도가 증가할수록 흡착량이 증가하는 이유는 유입농도가 증가할수록 흡착 구동력인 농도차가 커져 높은 흡착량이 얻어지는 것으로 설명된다. 또 흡착량이 증가함에 따라 층 활용도도 증가하여 농도 150 mg/L에서 68.84%로 계산되었다.

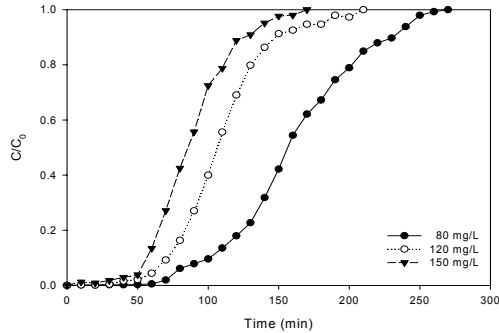


Fig. 2. Breakthrough curves for different inlet phenol concentrations (bed height : 2 cm, superficial velocity : 25.46 cm/min, particle size : 0.43 ~0.25 mm).

3.2. 공탑속도의 영향

Fig. 3은 폐놀의 유입농도를 80 mg/L로 일정하게 하고 공탑속도를 12.73~38.19 cm/min(유량 10~30 ml/min)로 변화시키면서 운전하여 얻은 파과곡선들을 나타낸 것이다. 파과곡선으로부터 구한 공탑속도 변화에 따른 파과시간, 흡착량 및 제거율을 Table 2에 나타내었다. 공탑속도가 증가할수록 파과가 빨리 일어나 파과시간은 191, 74 및 31.1 min으로 감소하였다. 이는 공탑속도가 증가할수록 물질전달영역은 증가하여 빠르게 포화되므로 공탑속도가 높을수록 빠르게 포화되는 것으로 생각된다. 공탑속도가 증가함에 따라 폐놀이 흡착제와 접촉하는 시간이 짧아져 폐놀

의 제거율은 66.9~40.3%로 감소하였으며, 흡착량도 152.9~150.0 mg/g으로 감소하였다. Ahmad와 Hameed (2010)도 아조염료를 대상으로 한 고정층 흡착실험에서 이와 유사한 결과를 얻었으며, 이는 공탑속도가 증가할수록 컬럼내의 용액의 체류시간이 짧아져 흡착제 기공내부로 용액중의 폐놀이 확산되어 들어가 흡착평형에 도달하기 전에 배출되기 때문으로 설명하였다. 층 활용도는 공탑속도가 12.73~38.19 cm/min으로 증가함에 따라 73.29~58.56%로 감소하였다. 이는 공탑속도가 증가할수록 고정층에서 물질전달영역이 증가하여 층 활용도는 감소되는 것으로 사료된다.

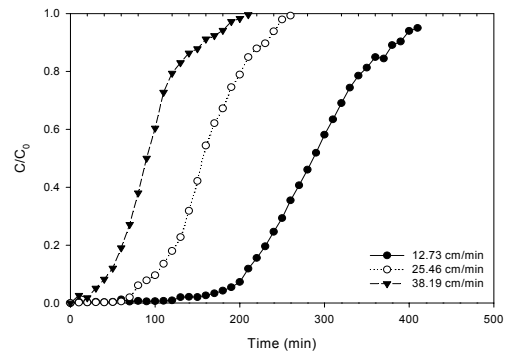


Fig. 3. Breakthrough curves for different superficial velocities (inlet phenol concentration : 80 mg/L, bed height : 2 cm, particle size : 0.43 ~0.25 mm).

Table 1. Characteristic parameters obtained from breakthrough curves for different inlet phenol concentrations

Superficial velocity, u (cm/min)	Initial concentration, C₀ (mg/L)	Bed height, Z (cm)	Particle size (mm)	Break-through time, t₀.₀₅ (min)	Stoichiometric breakthrough time, t₀.₅ (min)	Saturation time, t₀.₉₅ (min)	Effluent volume, V <sub>eff</sub> (ml)	Total amount removed, m <sub>total</sub> (mg)	Total removal, R <sub>total</sub> (%)	Length of MTZ, L <sub>MTZ</sub> (cm)	Adsorption capacity, q <sub>c</sub> (mg/g)	Bed utilization, f (%)
25.46	80	2	0.43~0.25	74	157	241	5200	396.9	57.6	1.39	152.4	65.35
25.46	120	2	0.43~0.25	61	106	175	4200	482.7	51.8	1.30	166.7	67.43
25.46	150	2	0.43~0.25	52	85	138	3600	531.1	49.1	1.25	176.1	68.84

Table 2. Characteristic parameters obtained from breakthrough curves for different superficial velocities

Superficial velocity, u (cm/min)	Initial concentration, C₀ (mg/L)	Bed height, Z (cm)	Particle size (mm)	Break-through time, t₀.₀₅ (min)	Stoichiometric breakthrough time, t₀.₅ (min)	Saturation time, t₀.₉₅ (min)	Effluent volume, V <sub>eff</sub> (ml)	Total amount removed, m <sub>total</sub> (mg)	Total removal, R <sub>total</sub> (%)	Length of MTZ, L <sub>MTZ</sub> (cm)	Adsorption capacity, q <sub>c</sub> (mg/g)	Bed utilization, f (%)
12.73	80	2	0.43~0.25	191	287	410	4300	342.8	66.9	1.07	152.9	73.29
25.46	80	2	0.43~0.25	74	157	241	5200	396.9	57.6	1.39	152.4	65.35
38.19	80	2	0.43~0.25	31.1	90	181	6600	557.4	40.3	1.66	150.0	58.56

3.3. 층높이의 영향

Fig. 4는 페놀의 유입농도를 80 mg/L, 공탑속도를 38.19 cm/min(유량 30 ml/min)로 일정하게 하고 층높이를 1.0~3.0 cm로 변화시키면서 운전하여 얻은 파과곡선들을 나타낸 것이다. 파과곡선으로부터 구한 파과시간, 흡착량 및 제거율을 Table 3에 나타내었다. 층높이가 증가함에 따라 파과시간과 흡착량이 모두 증가하였는데, 이는 층높이가 증가함에 따라 흡착제의 표면적이 증가하게 되고, 그로 인해 흡착점들이 더 많아지기 때문으로 설명된다. 그리고 파과시간이 증가함에 따라 페놀과 활성탄 사이의 접촉시간이 증가하기 때문에 페놀의 제거량과 제거율은 증가하는 것으로 생각된다. 층 활용도는 컬럼 길이가 1.0~3.0 cm로 증가함에 따라 51.88~67.12%로 증가하는데, 이는 컬럼 길이가 증가함에 따라 상대적으로 컬럼에서의 물질전달영역이 감소하여 층 활용도가 증가한 것으로 사료된다.

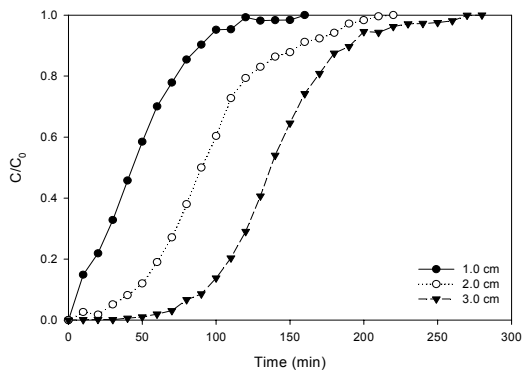


Fig. 4. Breakthrough curves for different bed heights (inlet phenol concentration : 80 mg/L, superficial velocity : 38.19 cm/min, particle size : 0.43~0.25 mm).

3.4. 입자크기의 영향

Fig. 5는 페놀의 유입농도는 80 mg/L, 공탑속도는

25.46 cm/min(유량 20 ml/min)로 일정하게 하고서 활성탄의 입자크기를 0.43~0.25 mm, 0.25~0.18 mm 및 0.18~0.15 mm로 달리하여 운전한 경우에 얻은 파과곡선들을 나타낸 것이다. 파과곡선으로부터 구한 파과시간, 흡착량 및 제거율을 Table 4에 나타내었다. Fig. 5에서 보이듯이 흡착제의 입자 크기가 작아질수록 파과곡선의 경사가 가파른 모습을 보이며 파과시간은 증가하였다. 입자 크기가 감소함에 따라 물질전달 길이는 감소하였다. 입자크기가 증가함에 따라 막저항과 내부 확산길이가 증가하여 물질전달이 천천히 이루어지며, 활성탄의 입자가 작아질수록 확산이 빠르게 이루어져 물질전달 길이가 짧아지는 것으로 생각된다(Guo와 Lua, 2003). 또한, 입자크기가 감소함에 따라 흡착량은 129.0~128.8 mg/g으로 큰 차이는 없으나 파과 시간은 34~66 min으로 크게 개선되었다. 이는 입자 크기가 작아질수록 비표면적이 커질 뿐 아니라 흡착경로가 짧아지기 때문에 흡착질이 흡착제 입자내로 더 빨리 더 깊게 침투할 수 있게 되기 때문으로 사료된다. 그러나 작은 입자를 충전하는 경우에는

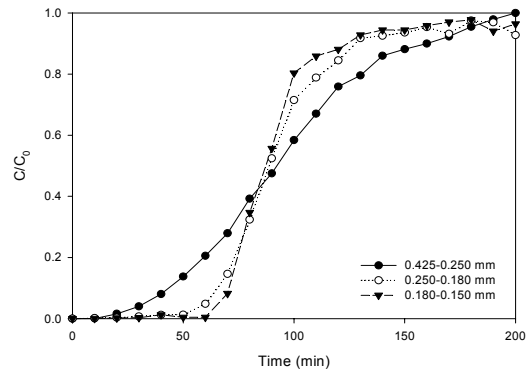


Fig. 5. Breakthrough curves for different particle sizes (inlet phenol concentration : 80 mg/L, bed height : 1.5 cm, superficial velocity : 25.46 cm/min).

Table 3. Characteristic parameters obtained from breakthrough curves for different bed heights

Superficial velocity, u (cm/min)	Initial concentration, C <sub>0</sub> (mg/L)	Bed height, Z (cm)	Particle size (mm)	Break-through time, t <sub>0.05</sub> (min)	Stoichiometric breakthrough time, t <sub>0.5</sub> (min)	Saturation time, t <sub>0.95</sub> (min)	Effluent volume, V <sub>eff</sub> (ml)	Total amount removed, m <sub>total</sub> (mg)	Total removal, R <sub>total</sub> (%)	Length of MTZ, L <sub>MTZ</sub> (cm)	Adsorption capacity, q <sub>e</sub> (mg/g)	Bed utilization, f (%)
38.19	80	1	0.43~0.25	3.9	44.4	104	4800	376.5	29.3	0.96	146.8	51.88
38.19	80	2	0.43~0.25	31.1	90	181	6600	557.4	40.3	1.66	150	58.56
38.19	80	3	0.43~0.25	74.3	133	217	8400	687.6	49.9	1.97	152.6	67.12

**Table 4.** Characteristic parameters obtained from breakthrough curves for different particle sizes

Superficial velocity, $u$	Initial concentration, $C_o$	Bed height, $Z$	Particle size (mm)	Break-through time, $t_{0.05}$	Stoichiometric breakthrough time, $t_{0.5}$	Saturation time, $t_{0.95}$	Effluent volume, $V_{eff}$	Total amount removed, $m_{total}$	Total removal, $R_{total}$	Length of MTZ, $L_{MTZ}$	Adsorption capacity, $q_e$	Bed utilization, $f$
(cm/min)	(mg/L)	(cm)	(mm)	(min)	(min)	(min)	(ml)	(mg)	(%)	(cm)	(mg/g)	(%)
25.46	80	1.5	0.43~0.25	34	94	180	4000	303.10	47.9	1.62	129.0	59.44
25.46	80	1.5	0.25~0.18	58	87	158	4000	303.10	47.80	1.27	128.8	68.35
25.46	80	1.5	0.18~0.15	66	88	146	4000	310.43	46.7	1.10	128.8	72.60

흡착장치를 설계시 압력강하도 고려해야 할 것이다.

**3.5. 물질전달 고찰**

Bohart-Adams 모델식은 흡착속도가 흡착제의 잔여 용량과 흡착되는 흡착질의 농도에 비례한다고 가정하는 것으로 다음 식과 같이 표현된다(Bohart와 Adams, 1920).

$$\ln\left(\frac{C_o}{C} - 1\right) = k_{AB} N_o \frac{Z}{u} - k_{AB} C_o t \tag{8}$$

여기서  $k_{AB}$ 는 속도상수(L/mg · min),  $C_o$ 는 농도(mg/L),  $u$ 는 공탑속도(cm/min),  $Z$ 는 층높이(cm),  $t$ 는 시간(min),  $N_o$ 는 흡착용량(mg/L)이다.

식 (8)을 파과점( $C/C_o=0.05$ )에 대해 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{0.05} = \frac{\rho_b W Z}{C_o u} - \frac{\rho_b W}{C_o K} \ln\left(\frac{C_o - C_{0.05}}{C_{0.05}}\right) \tag{9}$$

여기서  $C_{0.05}$ 는 파과 농도(mg/L),  $W$ 는 컬럼에서 흡착량(mg/g),  $\rho_b$ 는 고정층의 벌크 밀도(g/cm<sup>3</sup>), 그리고  $K$ 는 속도상수(1/min)이다.

식 (9)를 간단히 하면 아래와 같이 된다.

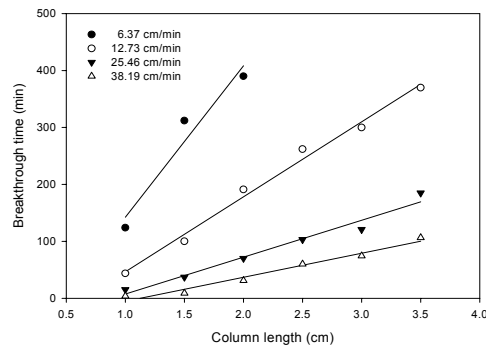
$$t_{0.05} = A Z + B \tag{10}$$

여기서  $A = \frac{\rho_b W}{C_o u}$  이며,  $B = -\frac{\rho_b W}{C_o K} \ln\left(\frac{C_o - C_{0.05}}{C_{0.05}}\right)$  이다.

**Table 5.** Effects of superficial velocity on the characteristic parameters

Superficial velocity, $u$ (cm/min)	A in eq (10)	B in eq (10)	Breakthrough time, $\tau_{0.05}$ (min)			Adsorption capacity, $W$ (mg/g)	Adsorption rate constant, $K$ (1/min)	$r^2$
			$Z=1$ cm	$Z=2$ cm	$Z=3$ cm			
6.37	266	-123.67	124	390	-	141.96	40.34	0.9460
12.73	131.57	-84.919	43.7	191	300	140.32	58.07	0.9898
25.46	64.743	-57.138	15.3	74	120.8	138.1	84.94	0.9691
38.19	42.16	-47.393	3.9	31.1	74.3	134.89	100.03	0.9711

Fig. 6은 공탑속도와 층높이를 달리한 경우에 얻어진 파과곡선들로부터 파과시간들을 구하여 나타낸 것이다. 그림에서 기울기와 절편을 구하고, 이로부터 흡착량과 속도상수 등의 변수들을 구하여 Table 5에 나타내었다. 표에서 보듯이 공탑속도가 6.37 cm/min(유량 5 ml/min)에서 38.19 cm/min(유량 30 ml/min)로 증가함에 따라 기울기값은 266에서 42.16로 감소하였으며, 흡착량은 141.96~134.89 mg/g으로 감소하였다. 즉, 공탑속도가 증가함에 따라 활성탄과 흡착질의 접촉하는 시간이 감소하게 되고 그에 따라 흡착량도 감소하는 것으로 생각된다. 그러나 흡착 속도상수는 공탑속도가 증가함에 따라 40.34/min에서 100.03/min로 증가하였다.



**Fig. 6.** Plots of breakthrough time vs. bed height for different superficial velocities.

일반적으로 총괄 물질전달저항은 액본체 저항( $1/\beta u$ ), 유체막 저항( $1/K_f$ ) 그리고 내부 입자 확산저항( $1/K_i$ )의 합으로 표현된다. 여기서 유체막 저항( $1/K_f$ )와 내부 입자 확산저항( $1/K_i$ )을 비외부 물질전달저항( $1/K_n$ )이라고 한다면  $1/K$ (총괄 물질전달저항)는 외부 물질전달저항인 액본체 저항( $1/\beta u$ )과 비외부물질전달저항( $1/K_n$ )의 합으로 나타낼 수 있다(Guo와 Lua, 2003).

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\beta u} + \frac{1}{K_f} + \frac{1}{K_i} = \frac{1}{\beta u} + \frac{1}{K_n} \quad (11)$$

Fig. 7은 Table 5의 자료를 이용하여  $1/K$ (총괄 물질전달저항)과 공탑속도의 역수( $1/u$ )를 도시한 그림이다. 그래프로부터 구한 기울기와 절편을 식 (11)에 대입하여 아래의 식이 얻어졌다.

$$\frac{1}{K} = 0.1125 \frac{1}{u} + 7.5 \times 10^{-3} \quad (12)$$

Table 6은 공탑속도의 변화에 따른 총괄 물질전달저항, 외부 물질전달저항 및 비외부 물질전달저항의 변화를 나타낸 것이다. 공탑속도가 6.37 cm/min(유량 5 ml/min)일때 총괄 물질저항 중에서 외부 물질전달저항 즉, 액본체 저항이 차지하는 비율은 0.697로, 외부 물질전달저항이 상대적으로 많은 부분을 차지한다는 것을 의미한다. 공탑속도가 6.37~38.19 cm/min로 증가함에 따라 외부 물질전달저항이 차지하는 비율은 각각 0.697~0.250으로 감소하지만 내부 입자확산저항과 같은 비외부 물질전달저항의 영향은 0.303~0.750으로 점차 지배적으로 되었다.

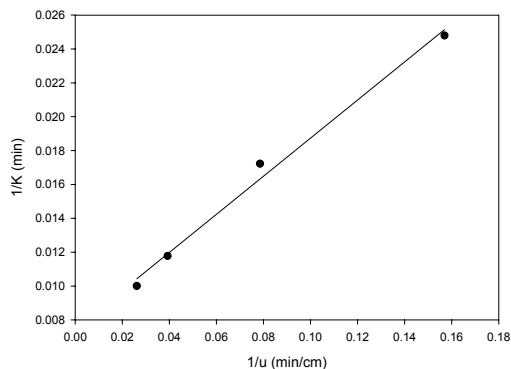


Fig. 7. Plot of  $1/K$  vs  $1/u$ .

Table 6. Effects of superficial velocity on the mass transfer resistance

Superficial velocity, u (cm/min)	Bulk fluid resistance $1/\beta u$	Non-external resistance $1/K_n$	Overall mass transfer resistance $1/K$
6.37	0.697	0.303	1.000
12.73	0.601	0.399	1.000
25.46	0.363	0.637	1.000
38.19	0.250	0.750	1.000

#### 4. 결론

고정층 컬럼에서 활성탄을 이용한 페놀의 흡착실험을 수행하여 유입농도, 공탑속도, 고정층의 길이 그리고 흡착제 입자의 크기가 고정층 흡착컬럼의 성능에 미치는 영향을 검토하였다. 유입농도가 증가함에 따라 MTZ 길이는 감소하였으며, 층 활용도는 증가하였다. 공탑속도가 증가함에 따라 파과 시간과 포화 시간이 뒤쳐져 나타났으며, MTZ 길이는 증가하였다. 층 높이가 증가함에 따라 파과 시간과 포화 시간이 증가하였으며, 층 활용도는 증가하였다. 활성탄의 입자 크기가 증가함에 따라 흡착량은 큰 차이는 없으나 파과 시간은 감소하였으며, MTZ 길이는 증가하였다. 공탑속도가 6.37 cm/min에서 38.19 cm/min으로 증가함에 따라 흡착량은 141.96 mg/g에서 134.89 mg/g으로 감소하였으며, 흡착 속도상수는 40.34/min에서 100.03/min로 증가하였다. 또한 공탑속도가 6.37 cm/min에서 38.19 cm/min으로 증가함에 따라 외부 물질전달저항과 내부 물질전달저항의 비는 0.303에서 0.750로 증가하여 내부 물질저항이 지배적임을 확인하였다.

#### 참고 문헌

- Ahmad, A. A., Hameed, B. H., 2010, Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste, *J. Hazard. Mater.*, 175, 298-303.
- Ahmed, S., Rasul, M. G., Martens, W. N., Brown, R., Hashib, M. A., 2010, Heterogeneous photocatalytic degradation of phenols in wastewater: a review on current status and developments, *Desalination*, 261, 3-18.

- Ahmaruzzaman, M. D., 2008, Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: A review. *Adv. Colloid. Interface. Sci.*, 143, 48-67.
- Alhamed, Y. A., 2009, Adsorption kinetics and performance of packed bed adsorber for phenol removal using activated carbon from dates' stones, *J. Hazard. Mater.*, 170, 763-770.
- Aksu, Z., Gönen, F., 2004, Biosorption of phenol by immobilized activated sludge in a continuous packed bed: prediction of breakthrough curves, *Process Biochem.*, 39, 599-613.
- Bohart, G. S., Adams, E. Q., 1920, Some aspects of the behavior of charcoal with respect to chlorine. *J. Am. Chem. Soc.*, 42, 523-544.
- El-Naas, M. H., Sulaiman, A. Z., Souzan, M., 2010, Continuous biodegradation of phenol in a spouted bed bioreactor, *Chem. Eng.*, 160, 565-570.
- Futalan, C. M. Kan, C. C., Dalida, M. L., Pascua, C., Wan, M. W., 2011, Fixed-bed column studies on the removal of copper using chitosan immobilized on bentonite, *Carbohydr. Polym.*, 83, 697-704.
- Girods, P., Dufour, A., Fierro, V., Rogaume, Y., Rogaume, C., Zoulaliana, A., Celzard, A., 2009, Activated carbons prepared from wood particleboard wastes: Characterisation and phenol adsorption capacities, *J. Hazard. Mater.*, 166, 491-501.
- Greminger, D. C., Burns, G. P., Lynn, S., Hanson, D. N., King, C. J., 1982, Solvent extraction of phenols from water, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 21, 51-54.
- Guo, J., Lua, A. C., 2003, Adsorption of sulphur dioxide onto activated carbon prepared from oil-palm shells with and without pre-impregnation, *Separ. Purif. Tech.*, 30, 265-273.
- Hasana, S. H., Srivastava, P., Talat, M., 2010, Biosorption of lead using immobilized *Aeromonas hydrophila* biomass in up flow column system: Factorial design for process optimization, *J. Hazardous Mater.*, 177, 312-322.
- Kang, K. C., Kim, J. W., Kwon, S. H., Kim, S. S., Baik, M. H. Choi, J. W., 2007, Adsorption of phenol on metal treated by granular activated carbon (in Korean), *Analytical. Sci. Tech.*, 20, 193-197.
- Kobayashi, T., Yoshimoto, M., Nakao, K., 2010, Preparation and characterization of immobilized chelate extractant in PVA gel beads for an efficient recovery of copper(II) in aqueous solution, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49, 11652-11660.
- Lua, A. C., Jia, Q., 2009, Adsorption of phenol by oil-alm-shell activated carbons in a fixed bed, *Chem. Eng. J.*, 150, 455-461.
- Mohddin, A. T., Hameed, B. H., Ahmad, A. L., 2009, Batch adsorption of phenol onto physiochemical-activated coconut shell, *J. Hazard. Mater.*, 16, 1522-1529.
- Özkaya, B., 2006, Adsorption and desorption of phenol on activated carbon and a comparison of isotherm models, *J. Hazard. Mater.*, B129, 158-163.
- Sulaymon, A. H., Ahmed, K. W., 2008, Competitive adsorption of furfural and phenolic compounds onto activated carbon in fixed bed column, *Environ. Sci. Technol.*, 42, 392-397.
- Wang, S. L., Tzoua, Y. M., Lua Y. H., Sheng, G., 2007, Removal of 3-chlorophenol from water using rice-straw-based carbon, *J. Hazard. Mater.*, 147, 313-318.