

國產活性炭의 有機化合物吸着特性(I)

李秉瑄・河紀成・金柱奉*

釜山工業大學 化學工學科

*東亞大學校 化學工學科

(1988년 3월 14일 접수, 1988년 10월 9일 채택)

Adsorption Characteristics of Organic Substances by Korean Activated Carbon

B.-S. Lee, K.-S. Ha, and J.-B. Kim*

Dept. of Chem. Eng., Pusan National Institute of Technology

*Dept. of Chem. Eng., Dong-A University

(Received 14 March 1988; accepted 9 October 1988)

요 약

國產活性炭을 사용하여 수처리를 중심으로 現場설계에 있어서 기초자료획득을 위한 基礎研究의 一環으로, 活性炭에 대한 基礎物性 調査를 行함과 아울러 Phenol, ONP, MNP, PNP의 有機化合物을 中心으로 吸着特性에 對한 實驗을 行하였다. 본 실험을 통하여 吸着塔 設計에 있어서의 基礎 data인 吸着 平衡關係는 Freundlich의 흡착등온식에 의해 정리되었으며 이때 n 값은 4.0—6.8 범위이었다. 그리고 각 유기물의 粒子內 擴散係數를 이론적 해석과 실험을 통하여 算出하여 본 결과 有效表面擴散係數의 값은 293 K의 경우 $0.36-1.2 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 의 範圍로 活性化에너지는 7.1—8.3 kcal/mol의 範圍임이 밝혀졌다.

Abstract—To obtain the basic engineering data such as equilibrium relationship and intraparticle diffusion coefficients for the design of activated carbon treatment plant, adsorption test of Korean activated carbon was performed with phenol, ONP, MNP and PNP. Through this experiment adsorption equilibrium relation was correlated by Freundlich equation and its n values were ranged from 4.0 to 6.8. Also the intraparticle diffusion coefficients were determined from adsorption rate measurement in a stirred tank. The effective diffusion coefficients of phenol and three nitrophenol isomer were in the range of $0.36-1.2 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ at 293K and the activation energy for diffusion was evaluated as 7.1—8.3 kcal/mol.

1. 序 論

最近 河川이나 湖沼 等の 水域에 있어서 水質汚濁이 큰 社會問題로 擡頭되고 있으며, 現在 行하여 지고 있는 水處理의 活性汚泥法과 같은 2次處理法으로는 이 問題가 根本적으로 解決되지 않기 때문에 3次處理 혹은 高次處理의 必要性이 크게 要求되고 있는 實情이다. 高

次處理法으로서의 오존에 의한 酸化處理法, 活性炭 等に 의한 吸着處理法, 膜에 의한 分離法 등 여러가지의 處理法이 開發되고 있으나 이들 여러가지의 方法中에서 活性炭에 의한 吸着法은 가장 有効한 處理法의 하나로서 크게 注目을 받고 있으며 이에 관한 많은 研究結果가 報告되고 있다[1, 2].

한편 國內에 있어서 活性炭은 製糖工業, 酒精工業을

中心으로 特定分野에 局限되어 利用되어 왔고 이들 소
요량의 大部分은 外國으로부터의 輸入品에 依存하여 왔
다고 볼 수 있다. 最近 國產 粉末 및 粒狀活性炭의 製
造市販과 더불어 그 利用도가 大氣汚染 防止 및 水處理
分野로 크게 增加되고 있다. 한편 上水源의 汚染深化
現狀과 함께, 上水道 淨水工程에서 特定 有機物
除去를 目的으로 한 粒狀 혹은 粉末活性炭을 使用하는
것은 이미 外國에서는 普遍化되고 있으며 國內에서도
淨水工程中에 粉末 혹은 粒狀活性炭을 使用하는 淨水場
이 釜山을 비롯하여 점차 增加되고 있는 趨勢에 있다
[3].

그러나 活性炭을 使用하는 現場에서는 合理的인 設計
資料에 의한 處理條件의 選定이라기 보다는 經驗의으로
運轉되고 있어 이에 대한 體系의인 研究가 必要하다고
하겠다. 한편 國產活性炭에 對한 吸着特性 및 그 適用
성에 대한 研究檢討는 짧은 製作者 등으로 인해 아직
충분히 이루어졌다고는 말하기 어려운 실정이다. 本 研
究에서는 國產活性炭의 합리적인 現場適用을 위한 基礎
研究의 一環으로, 活性炭에 대한 基礎物性중에서 중요
한 비표면적, 세공분포, 세공용적에 대한 調査를 行함
과 아울러 phenol系 有機化合物을 中心으로 吸着特性
에 對한 實驗을 行하여 吸着塔 設計에 있어서의 基礎
data인 吸着 平衡關係를 각 온도별로 결정하고, 각 유
기물의 흡착속도를 입자내의 확산속도로 가정하여 粒
子內 擴散係數에 대한 이론계산과 회분흡착조내에서의
속도실험을 통하여 입자내 유효확산계수를 算出하였다.

2. 實 驗

2-1. 細孔分布, 細孔容積 및 比表面積 測定

試料 活性炭 0.25g을 石英 spring式 重量吸着裝置에
장입하여 150℃에서 3시간 脫氣시킨 후, -193℃에 있
어서 窒素平衡吸着량을 測定하고 이 結果로부터
Dollimore 法에 의한 細孔徑分布, 細孔容積 및 比表面
積을 computer 계산에 의해 算出하였다. 이와같이 하
여 얻어진 細孔分布 曲線을 Fig. 1에 나타내었다.

2-2. 吸着平衡 및 吸着速度 測定

2-2-1. 試料

活性炭은 야자껍질을 原料로 하여 水蒸氣賦活法에 의
해 製成된 新起化學(株)의 製品이며 그 物性を Table
1에 나타내었다. 試料活性炭은 平衡關係 測定用과 速度
測定用으로 區分하여 平衡測定에는 48/60 mesh의 活性

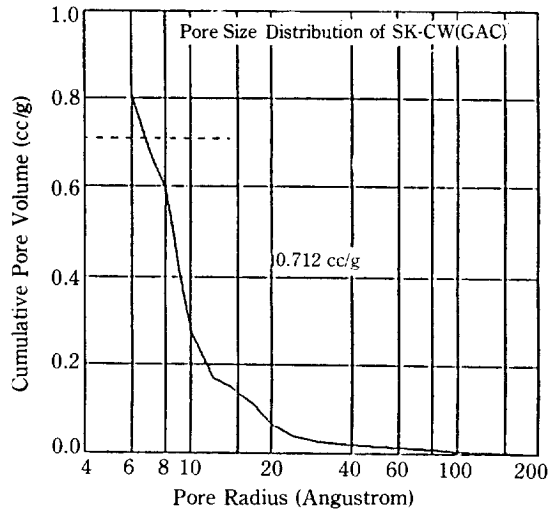


Fig. 1. Pore size distribution curve of sample ac-
tivated carbon.

炭을, 그리고 速度測定에는 24/32 mesh의 活性炭을 각
각 使用하였다. 분급된 試料活性炭을 蒸留水에 넣어 약
1시간 끓인 후에 충분히 세척하고 110℃의 乾燥器에서
恒量乾燥시킨 후 dessicator 속에서 保管하여 이후의
실험에 使用하였다. 本 實驗에 使用한 有機試藥은 全部
日本 Wako製 試藥特級을 使用하였다.

2-2-2. 吸着平衡 實驗

粒狀活性炭에 의한 水溶液相에서 有機物の 吸着平衡
은 回分實驗에 의해 測定하였다. 앞에서 설명한대로 준
비된 試料活性炭 48/60 mesh를 所定量 flask에 秤取하
고, 所定濃度の Phenol, PNP, ONP, MNP 水溶液
一定量を 活性炭 試料가 들어있는 flask에 넣고 283
K, 293 K, 303 K, 313 K의 恒溫槽에서 各各 約 10
日間 진탕시켜 平衡에 도달시킨 후 液相에서의 有機物
의 濃度變化로부터 活性炭 粒子內의 有機物の 흡착濃도
를 다음 式에 의하여 구하였다.

$$q_e = V_t (C_o - C_e) / W_s \quad (1)$$

여기서 q_e 는 平衡에 있어서의 活性炭 粒子內의 有機

Table 1. Properties of activated carbon

Origin	Coconut shell base SK-WC (GAC)
Activation method	Steam
Particle density	0.48g/cc
Surface area	1400m ² /g
Pore volume	0.71 cc/g
Most probable micropore radius	8-10Å

물의 농도(mg/g), V_L 는 액량(l), C_0 는 유기물의 초기 농도(mg/l), C_e 는 평형시의 액상에 있어서의 유기물의 농도(mg/l), W_s 는 활성탄의 투입량(g)을 나타낸다. 각 유기물의 초기농도는 100~30 mg/l의 범위에서 행하였다. 각 유기물의定量法으로서 일본 Shimadzu製 UV를 사용하여, Phenol은 269nm, ONP는 278 nm, PNP는 316nm, MNP는 330nm에서 각각測定하였다.

2-2-3. 흡착속도測定

활성탄에 의한 유기물의 흡착속도測定에 사용한反應槽는 Fig. 2에 나타난 Pyrex製 回轉形固液接觸反應器로서攪拌을促進시키기 위하여 방해판이 4枚 설치되어 있다. 교반날개는 Stainless鋼을 사용하여製作된試料 holder로서, 여기에上記에서 준비된粒狀活性炭試料 24/32 mesh의 것을裝入하였다. 이렇게 함으로서固液間의接觸을促進시킬 뿐만 아니고, 摩耗에 의한粒子徑의變化를 막을 수가 있다.

2l의 flask 안에는 각 유기물 소정濃도의溶液을 1~2l를 넣고 283 K, 293 K, 303 K, 313 K의 恒溫槽中에 넣어 均一한溫度가 되게 한 후, 試料가 들어있는 sample holder를 내려 溶液 속에 넣고, 교반날개를

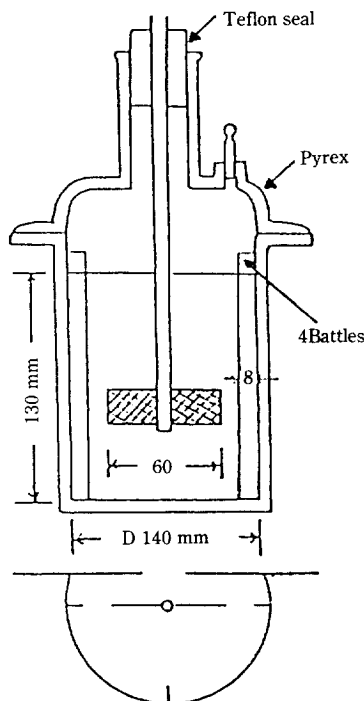


Fig. 2. Schematic illustration of batch adsorption reactor.

회전시켜 吸着反應을 開始하였다. 回轉速度는 豫備實驗의 結果에서 粒子外部의 表面境界膜에 있어서의 物質移動抵抗이 無視된다고 考慮되어 지는 400 rpm을 採用하였다. 反應槽內의 溶液은 反應開始로부터 一定時間間隔으로 1cc씩 sampling하여 各 유기물의 濃도를 分析하였다. 同一 初濃도에 대하여 活性炭 試料量을 2個로 變化시켜 經時變化를 測定하고, 液相에 있어서의 濃度變化가 보이지 않는 곳에서 測定을 完了하였다.

3. 結果解析

3-1. 物性測定結果

細孔徑分布와 細孔容積은 窒素가스吸着等溫線에 의하여 求해졌다. 窒素가스吸着法에 의해 細孔徑分布 計算에는 Anderson 法[4], Wheeler 法[5], Inkely 法[6] 등 여러 方法이 있으나, 여기서는 毛管凝縮과 多分子層 吸着에 基礎를 둔 Dollimore 法을 使用하였다. 이 方法은 窒素가스吸着에 의한 細孔徑分布의 計算은 細孔充填이 毛管凝縮과 多分子層 吸着에 의해 일어난다는 가정下에서 行하였다. 卽, 相對壓力 P/P_s 의 微小變化에 의해 細孔의 窒素가스에 의한 充填容量의 變化量 ΔV 는 毛管凝縮에 의한 吸着容量의 變化量 ΔV_c 와, 多分子層 吸着容量의 變化量 ΔV_m 의 合으로 주어진다.

$$\Delta V = \Delta V_c + \Delta V_m \quad (2)$$

細孔形狀을 圓筒形으로 考慮, 毛管凝縮에는 Kelvin 式을, 多分子層 吸着에는 Halsey 式을 使用하는 것이 Dollimore 方法[7]이다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 粒子內 細孔半徑의 크기는 8~20Å의 것이 支配的임을 알 수 있으며 이는 多種의 有機물이 存在하는 水溶液에서 吸着處理用으로 適合함을 나타낸다. 세공용적도 함께 계산한 결과 0.712 cc/g로 나타났다. 한편 活性炭의 賦活도를 나타내는 比表面積은 1400m²/g으로서 一般的으로 活性炭의 比表面積이 1000~1600m²/g의 범위임을 고려할 때 賦活도가 비교적 높은 것으로 나타났다.

3-2. 平衡關係

활성탄 흡착조작에서 활성탄 투입량에 대한 平衡濃度와의 關係는 Fig. 3에 도시된 바와 같으며 이 관계에서 활성탄의 양이나 초기농도를 변화시키면 平衡關係를 실험에 의해 결정하는 것이 가능하다. 本實驗에 使用한 phenol과 nitrophenol계의 3종의 이성체에 대한 흡착

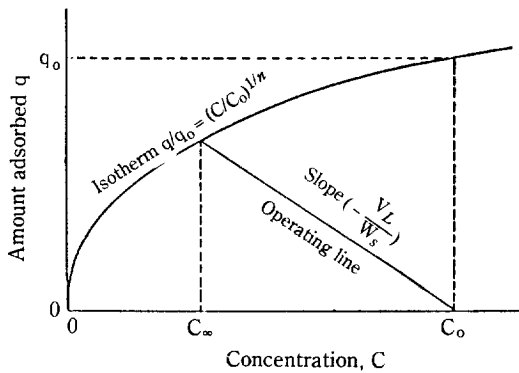


Fig. 3. Operating line in Freundlich isotherm system.

평형관계를 측정결과 다음의 Freundlich형의 흡착 등온식으로 정리됨을 알았다. 즉,

$$q = kC^{1/n} \quad (3)$$

여기서 q 를 단위活性炭 當의 흡착량(mg/g), C 는 평형농도(mg/l)이며 k 와 n 은 상수이다. 이 식을 대수로 취하면

$$\log q = \log k + 1/n \log C \quad (4)$$

이며 여기서 q 와 C 를 log-log 그래프에 plot하면 직선 관계가 얻어지고, 이 직선의 기울기에서 k 값과 n 값을 결정할 수 있다. 동일 기울기에 있어서 k 의 값이 클수록 흡착량은 크고, 또 $1/n$ 의 값이 0.1-0.5사이를 나타낼 때 바람직한 흡착평형관계에 있다고 할 수 있다 [8]. 實驗에서 얻어진 10°C에서의 Phenol, ONP, MNP, PNP의 평형관계 data를 log-log plot한 결과 Fig. 4에 나타난 바와 같이 거의 직선의 관계가 얻어졌다. 따라서 각 화합물과 온도변화에 대한 평형관계 측정 결과에서 (3)식을 관계를 이용하여 n 값과 k 값을算出하여 Table 2에 나타내었다.

3-3. 속도관계

平衡關係가 앞절에서 얻어진 바와 같이 非線型이므로 各有機物의 平衡關係式에 대하여 完全混合形 回分吸着

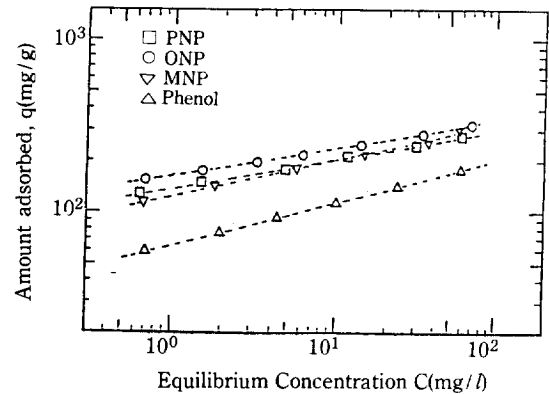


Fig. 4. Adsorption isotherms of phenol, ONP, MNP and PNP on Korean activated carbon SK-CW from aqueous solution measured at 283K.

槽內에서 시간에 따른 농도變化曲線を 理論적으로 解析하여 決定하였다.

基礎式을 誘導하기 위하여 다음과 같은 假定을 導入하였다[9].

- 1) 活性炭은 半徑 R 을 가지는 球形의 粒子이다.
 - 2) 粒子内部擴散은 表面擴散으로 나타낸다.
 - 3) 吸着點에서의 吸着反應은 細孔內의 擴散速度에 비하여 대단히 빠르며, 各 點에서의 吸着平衡은 成立한다.
 - 4) 粒子表面에서의 物質移動의 抵抗은 無視된다.
- 위의 假定으로부터 粒子內의 擴散移動 基礎方程式은 다음 식과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D_s \left[\frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial q}{\partial r} \right] \quad (5)$$

境界條件과 初期條件은 다음 식으로 나타낼 수 있으며

$$\begin{aligned} \text{B. C. } r=R \quad D_s \frac{\partial q}{\partial r} &= \frac{V_t}{S} \frac{\partial C}{\partial t} \\ r=0 \quad \frac{\partial q}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Table 2. Constants of Freundlich type equation, $q = kC^{1/n}$

Subs.	Temp.(K)		283		293		303		313	
	k	n	k	n	k	n	k	n	k	n
Phenol	67.2	3.87	61.0	3.95	53.0	4.07	45.1	3.98		
ONP	167.0	6.81	150.0	6.97	129.0	6.69	110.0	6.80		
MNP	133.0	4.71	128.0	4.63	115	4.72	106.6	4.81		
PNP	143.0	5.36	135.0	5.43	127.4	5.49	118.0	5.55		

$$I. C. \quad t=0 \quad q=0, \quad C=C_0. \quad (7)$$

粒子表面에서의 吸着平衡關係는 위의 實驗에서 밝혀진 바와 같이 (3)式으로 주어졌다.

여기서 V_L 은 液量, W_s 는 吸着劑 重量, C_0 는 水溶液中の 有機物의 初期濃度이며 q_0 는 C_0 에서의 吸着量, C 는 回分槽內의 有機物의 濃度이고, 液相境膜의 物質移動抵抗은 無視하므로 粒子의 表面에서의 濃度와 동일하다.

液相濃도와 平衡吸着量과의 關係를 나타내는 操作線은 (1)式으로 주어지며 이 關係를 Fig. 3에 나타내었다.

또 有機物의 平均吸着量은 다음 式으로 주어진다.

$$\bar{q} = 3 \int_0^R q r^2 dr / R^3 \quad (8)$$

以上の (5)에서부터 (7)까지의 식을 無次元化하여 여기에 實驗에서 얻어진 平衡關係式을 適用시켜 Saul'yev의 2點 平均法에 의해 上記 方程式을 풀었다 [10]. 數值計算에 의해 粒子內의 吸着濃도가 計算되고, 이 分布를 式 (8)의 關係를 使用하여 Simpson 法에

의해 平均吸着量을 計算하였다[10]. 數值計算에 의해 얻어진 各 有機物의 吸着에 있어서 回分槽內의 濃度變化 理論曲線을 각각의 平衡濃도에 대하여 Fig. 5(a), (b), (c), (d)에 실선과 점선으로 나타내었다. 무차원 시간, $\tau_s=1$ 에 해당하는 실제시간 t 를 curve fitting에 의하여 결정하여 확산계수를 다음 (9)식에 의해 결정하였다[11].

$$\tau_s = D_s \cdot t / R^2 \quad (9)$$

4. 考 察

4-1. 平衡關係

Fig. 4에 283 K에서 測定하여 얻은 Phenol, ONP, MNP, PNP에 대한 吸着等溫線을 나타내었다. Phenol에 비하여 NO_2 -가 導入된 nitrophenol쪽이 活性炭에 의한 吸着量이 2배 정도 높음을 알 수 있다. 활성탄에 의한 흡착량은 汚濁物質의 종류에 따라서 상당히 달라지고 있으며 같은 nitrophenol계의 화합물이라

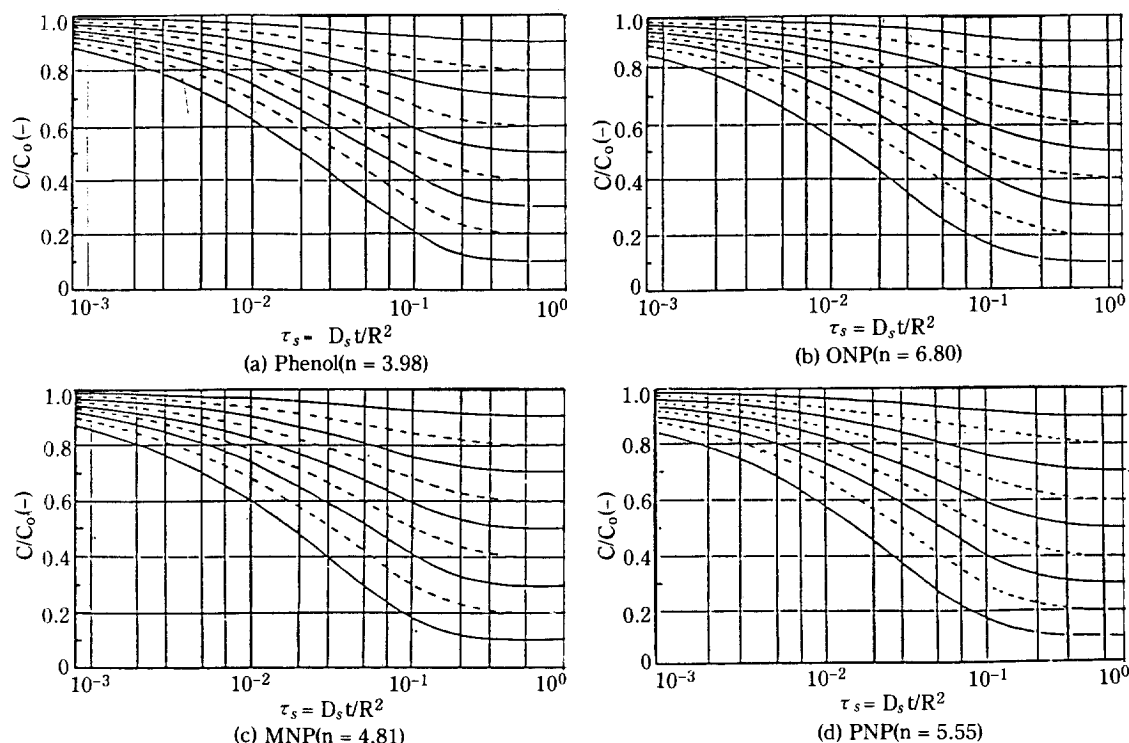


Fig. 5. Theoretical diagram for time-concentration ratio in a finite bath adsorption for Freundlich isotherm and dominant surface diffusion.

(a) Phenol ($n = 3.98$), (b) ONP ($n = 6.80$), (c) MNP ($n = 4.81$), (d) PNP ($n = 5.55$)

할지라도 NO_2^- 기의 위치에 따라 흡착량이 상이함을 나타내고 있다. 이와같은 현상은 아직 현상론적으로 고찰되고 있을 뿐 정확한 이유는 아직 밝혀지고 있지 않다.

溫도를 10°C , 20°C , 30°C , 40°C 에서 각 화합물의 흡착等溫線을 回分實驗에 의해 $0.5\text{--}100\text{ mg/l}$ 범위에서測定하여 Freundlich 상수 n 과 k 값을 Table 2에 나타내었는데, 이 결과에 의하면 溫度가 10°C 上昇함에 따라서 吸着量이 약 20% 정도 減少함을 나타내고 있다. 이와같은 현상은 活性炭에 의한 상기의 有機物の 吸着이 發熱反應임에 起因하는 것으로 고려되어 진다. Table 2에 나타난 바와 같이 n 값은 有機物の 種類에 따라서 약간의 차이는 있으나 4.0–6.8 사이의 값을 나타내고 있다. 그리고 측정온도의 증가에 따라서 흡착량은 감소되지만 n 값은 거의 일정하게 나타났다. 이는 온도의 변화에 따라서도 흡착의 근본적인 패턴은 큰 변화가 없는 것으로 보여진다[12]. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 저농도의 경우 활성탄으로 경제적인 분리가 가능한 바람직한 平衡關係를 나타내고 있음을 알 수 있다.

本實驗에서 얻어진 phenol系 有機物の 吸着量은 다른 活性炭의 吸着試驗의 結果와 比較하여 보면 그 吸着

量에 있어서 큰 차이는 보이지 아니하였다. 예로서 phenol의 吸着量을 平衡濃度 10 mg/l 을 基準으로하여 比較하여 보면 本實驗에서는 110 mg/g 이었으나 Calgon社의 活性炭의 結果値는 100 mg/g 임이 報告[13]되고 있다. 따라서 本實驗에 使用한 國產活性炭의 試料는 相當한 吸着容量을 가지고 있음을 알 수 있다.

4-2. 粒子內擴散係數

粒子內擴散係數를 결정하는 方法에는 고전적인 Wicke-Kallenbach 法, Chromatography 法, Uptake Rate 法 등이 있다[14]. 이들 방법중에서 본 실험에서 채택한 Uptake Rate 법은 실험방법의 간편성과 편미분방정식을 간편하게 수치계산에 의해 풀 수 있는 계산기의 발달로 인하여 널리 이용되고 있다[14].

各 有機物の 吸着에 있어서 有機物の 初期濃度 100 mg/l , 粒子크기 24/32 mesh의 活性炭을 사용하여 回分槽內의 濃度變化를 實測한 上記 實驗結果를 Fig. 6(a), (b), (c), (d)에 나타내었다. 實驗誤差를 줄이기 위하여 동일 초기농도에 대하여 시료의 양을 2종류로 변환시켜 농도변화곡선을 추적한 결과를 각각의 그림에 2개의 점선으로 표시하였다. 이 結果를 Fig. 5(a), (b), (c), (d)의 理論曲線과의 curve fitting

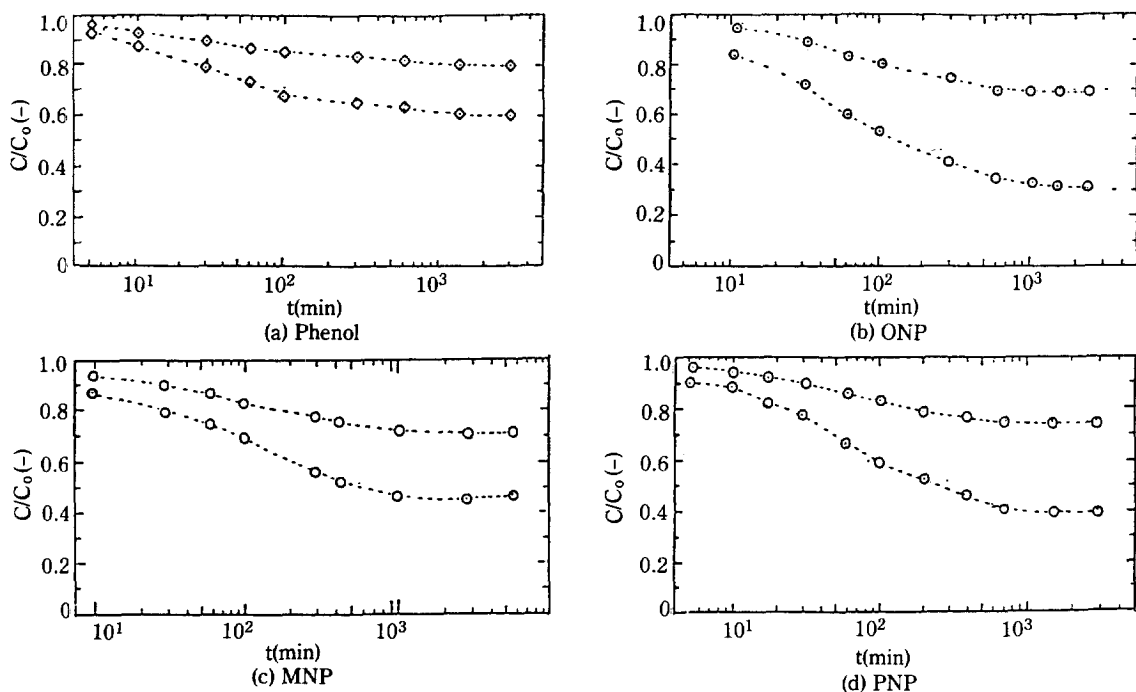


Fig. 6. Typical experimental plots of C/C_0 versus $\log t$.

(a) Phenol, (b) ONP, (c) MNP, (d) PNP

Table 3. Calculation results of effective surface diffusion coefficients of phenol, ONP, MNP and PNP in Korean activated carbon [m^2/sec]

Subs.\Temp.[K]	283	293	303	313	Ea[kcal/mol]
Phenol	7.5×10^{-13}	1.2×10^{-12}	2.0×10^{-12}	3.0×10^{-12}	8.1
ONP	3.8×10^{-13}	5.6×10^{-13}	9.4×10^{-13}	1.3×10^{-12}	7.3
MNP	2.5×10^{-13}	3.6×10^{-12}	5.0×10^{-12}	7.2×10^{-13}	7.1
PNP	4.3×10^{-13}	6.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}	1.5×10^{-12}	8.3

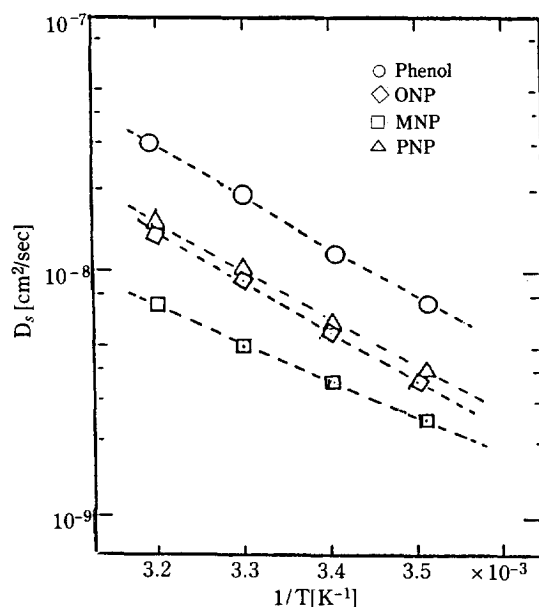
Table 4. Surface diffusion coefficients of phenol and PNP in various activated carbon

Subs.	Temp.(K)	Carbon	C[mg/l]	Diff. Coe.[m^2/s]	REF.
Phenol	283	coconut	30-100	2.9×10^{-12}	[15]
	303	Takeda		4.3×10^{-12}	
	323	HGR513		1.1×10^{-11}	
Phenol	293	Filtrisorb(F-400)	50	5.3×10^{-12}	[16]
PNP	293	CAL		1.4×10^{-12}	[17]

에 의해 無次元 時間과 實測時間을 求하여 式 (9)로부터 各 有機物의 溫度에 따른 粒子內 有效表面擴散係數를 算出하였다. 그 結果를 Table 3에 나타내었다. 各 有機物의 擴散係數는 化合物의 種類에 따라서 若干의 차이를 보였으며 이들중 phenol의 실험을 행한 $10^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$ 의 범위에서 가장 큰 값을 나타내었다. 이는 다른 3가지 化合物과 比較하여 볼 때 化合物의 構造가 보다 簡單하여 粒子內 擴散時 擴散抵抗이 적은 것으로 解析된다. Phenol을 除外한 나머지 3種의 nitrophenol의 異性體의 擴散係數는 비슷한 정도를 나타내고 있다. 유효표면확산계수는 온도가 283 K에서 313 K로 증가됨에 따라서 약 3-4배 정도 증가되었다.

이들 結果를 다른 種類의 活性炭에 있어서의 報告된 表面擴散係數를 比較한 結果를 Table 4에 나타내었다. 여기서 算出된 擴散係數의 값을 既報告된 文獻値와 比較하여 보면 Suzuki 등[15]이 coconut shell을 原料로 水蒸氣 賦活한 Takeda 活性炭을 이용하여 phenol에 對하여 30°C 에서 測定한 값 $4.3 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 과 꼭 일치하지는 않지만 비슷한 정도의 값을 나타내고 있다. 따라서 本 實驗에서 使用한 國產活性炭의 試料는 外國產과 比較하여 볼 때 그 吸着特性에 있어서 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

溫度에 따른 表面擴散係數를 Arrhenius plot한 結果를 Fig. 7에 나타내었다. 測定溫度範圍는 $10^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$ 까지 變化시켰는데 거의 直線으로 나타낼 수 있으므로, 이 直線의 기울기로부터 各 有機物의 擴散係數의 活性化에너지를 計算하여 7.1-8.3 kcal/mol을 얻었다.

**Fig. 7. Arrhenius plot of surface diffusion coefficients of phenol, ONP, MNP and PNP.**

5. 結 論

國產活性炭을 使用하여 有機物의 吸着操作을 行할 경우에 있어서의 基礎 data를 얻기 위해 Phenol, ONP, MNP, PNP를 吸着質로 하여 吸着實驗을 行하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 吸着物質의 吸着量과 平衡濃度 사이에는 Freund-

lich의 平衡關係式

$$\log q = \log k + 1/n \log C$$

이 成立함을 알았다.

2. Freundlich 常數 k 와 n 값은 같은 分子量을 가진 物質이라도 官能基의 位置에 따라서 差異가 있었으며, k 의 경우는 phenol을 包含하여 293 K에서 61–135 mg/g이고, n 의 경우는 4.0–6.8의 範圍이어서 “favorable” 吸着平衡關係임이 밝혀졌다.

3. 吸着溫度의 影響을 調査한 結果 283 K에서 313 K의 사이에서 物質에 따라 차이는 있었으나 대개 10°C 增加함에 따라서 5% 정도의 吸着量의 減少가 있었다.

4. 吸着平衡關係가 非線型關係임을 考慮하여 數値解析에 의한 回分槽內에서의 濃度變化理論曲線을 作成하고 實驗結果와 curve fitting에 의한 吸着物質의 有効表面擴散係數를 算出하였다.

5. 有効表面擴散係數의 값은 293 K의 경우 0.36 – $1.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 範圍였으며 온도가 283 K에서 313 K로 증가함에 따라서 3~4배로 증가되었으며 이때 活性化에너지는 7.1–8.3 kcal/mol의 範圍임이 밝혀졌다.

NOMENCLATURE

C	: concentration in the bath, mg/l
C_0	: initial concentration, mg/l
C_e	: equilibrium concentration in the bath, mg/l
D_s	: effective surface diffusion coefficient, m^2/s
E_a	: activation energy, kcal/mol
k	: constant in Freundlich equation
n	: constant in Freundlich equation
q	: average amount adsorbed, mg/g
q_0	: amount adsorbed, mg/g
q_e	: equilibrium concentration in the particle, mg/g
r, R	: particle radius, m
S	: surface area of particle, m^2
t	: time, s
V_L	: contact liquid volume, l
W_s	: sample weight, g

$$\tau_s : D_s t / R^2$$

Abbreviation

ONP : ortho-nitrophenol
MNP : meta-nitrophenol
PNP : para-nitrophenol

REFERENCES

1. Takeuchi, Y., Wasai, T., and Suganaka, S.: *J. Chem. Eng. Japan*, **22**, 458 (1978).
2. Jonas, L.A. and Sansone, E.B.: *Environ. Sci. & Tech.*, **15**, 1367 (1981).
3. 김귀석: 水道, **43**, 20 (1988).
4. Anderson, T.S.: *Z. Phys. Chem.*, **33**, 191 (1914).
5. Wheeler, A.: “Catalysis III Chap. II”, Reinhold Publishing Coop. (1955).
6. Cranton, R.W. and Inkely, F.A.: *Adv. in Catalysis* 9, 143 (1957).
7. Dollimore, D. and Heal, G.R.: *J. Appl. Chem.*, **14**, 109 (1964).
8. 柳井 弘: “吸着劑·吸着操作の設計”, 技報堂, 111 (1982).
9. Suzuki, M. and Kawazoe, K.: *J. Chem. Eng. Japan*, **7**, 347 (1974).
10. Lin-Liu, S.: *Chem. Eng. Sci.*, **22**, 871 (1967).
11. Suzuki, M.: *Kagaku Kogaku*, **41**, 291 (1977).
12. Suzuki, M. and Fujii, T.: *AIChE*, **28**, 380 (1982).
13. Kagaku Benram: *S. Chem. Eng., Japan*, 857 (1978).
14. Ruthven, D.M.: “Principles of Adsorption and Adsorption Processes”, John Wiley & Sons, New York, NY (1984).
15. Suzuki, M. and Kawazoe, K.: *J. Chem. Eng. Japan*, **8**, 379 (1975).
16. Peel, R.G. and Benedek, A.: *ASCE, EE4*, **8**, (1980).
17. Miura, K., Kurahashi, H., Inokuchi, Y., and Hashimoto, K.: *J. Chem. Eng. Japan*, **12**, 281 (1979).