

활성탄에 의한 Trihalomethane의 흡착

김 현 · 박흥철 · 문 희†

전남대학교 공과대학 공업화학과
(1995년 4월 19일 접수, 1995년 7월 21일 채택)

Adsorption of Trihalomethane on Activated Carbon

Hyun Kim, Heung Chul Park and Hee Moon†

Department of Chemical Technology, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

(Received 19 April 1995; accepted 21 July 1995)

요 약

음용수를 염소 소독 처리함으로써 생겨나는 Trihalomethane(THM)을 제거하기 위한 방법으로 활성탄에 의한 흡착을 다루었다. 단일 성분의 흡착 평형은 Freundlich식으로 나타내었으며, 2성분 평형량은 이상 흡착 용액 이론(ideal adsorbed solution theory)으로 계산하였다. 입자 내부에서의 확산 계수는 회분식 실험을 통하여 구하였다. 고정층 흡착 장치에서 THM의 흡착 거동은 표면 확산 기구에 기초를 둔 LDFA(linear driving force approximation)를 이용하여 만족스럽게 묘사되었다.

Abstract—Adsorption of Trihalomethanes(THM) on activated carbon was studied as a removal technique for THM formed during the chlorination process of drinking water. Adsorption equilibrium data of single species were represented by Freundlich equation and binary adsorption equilibria were calculated by the ideal adsorbed solution theory(IAS). Intraparticle diffusion coefficients were obtained from batch experiments. The adsorption behavior of THM in a fixed bed adsorber was satisfactorily simulated by the linear driving force approximation(LDFA) based on surface diffusion mechanism.

1. 서 론

Trihalomethane(THM)은 methane 분자에서 수소 원자 대신에 3개의 halogen 원자가 치환된 구조로서 음료수 중의 THM은 chloroform이 그 대부분을 차지하고 있다[1, 2]. 자연수를 정화하여 음용수를 만들 때 살균을 목적으로 염소 처리를 실시하고 있으며, 그 과정에서 자연수 중에 존재하는 각종 유기물과 염소가 반응하여 인체에 해로운 THM이 생성된다[3, 4]. 1975년에 실시된 미국 환경청의 조사에 의하면 수도수 중에 상당량의 THM이 함유되어 있음을 알 수 있다[5]. 또한, 미국의 국립 암 연구소에서는 동물 실험을 통하여, THM

이 발암성 및 돌연변이 유발 가능성이 있음을 밝혔다. 이에 따라 1979년에 미국 환경청은 수도수 중의 THM 허용 농도를 0.1 ppm으로 규제하였다[6]. 일본에서도 THM에 대한 중요성을 인식하여, 1981년에 수도수 중의 총 THM농도를 0.1 ppm 이하로 허용하고 전국적인 감시망을 구성하여 연 1회 이상 검사를 실시하고 있다[7]. 일반적으로, THM 성분 중 CHCl_3 는 발암성 물질로, CHBrCl_2 , CHBr_2Cl , CHBr_3 는 돌연변이성 물질로 보고되고 있다.

수도수에 함유되어 있는 THM의 농도를 감소시키기 위하여 몇 가지 방법이 제안되어 있다[8]. 먼저 수 중에서 THM을 생성시키지 않는 오존, 이산화염소 등의

소독제를 이용하는 것이다. 오존으로 처리하는 경우에는 THM이 생성되지는 않으나 잔류 소독 효과가 없고 인체에 유독한 epoxide류가 생성될 수 있으며, 비용이 많이 드는 단점이 있다. 그리고 이산화염소로 처리하는 경우는 그 자체의 독성뿐만 아니라 부생되는 아염소산 이온 및 염소산이온이 갑상선 호르몬 분비에 이상을 가져오며 빈혈을 유발하는 것으로 판명되어 오히려 THM보다 더욱 해로운 물질로 생각된다[5]. 다른 방법으로는 염소 처리 이전에 THM 전구 물질인 humic acid를 미리 제거하는 전처리 방법이다. 전구 물질을 제거하기 위한 방법으로는 이온 교환, 오존 또는 오존-자외선에 의한 분해 및 활성탄 흡착 등을 들 수 있다. 그러나 이러한 전처리 과정은 처리량이 많아 비용이 많이 소요되며 완전한 처리가 불가능한 단점이 있다 [9].

현재까지 연구된 바에 의하면 음용수의 염소 처리 과정에서 발생하는 THM의 제거방법으로는 입상 활성탄 필터를 사용한 흡착법이 가장 경제적이고 효율적이라고 알려져 있다[9, 10]. 본 연구에서는 THM/활성탄 흡착계의 흡착 평형, 흡착 속도 및 흡착 장치 내에서 THM의 거동이 다루어 진다. 흡착 평형은 간단한 Freundlich 식과 이상 흡착 용액 이론(IAST)에 의하여 나타내며 확산 계수는 회분식 실험을 통하여[11-13] 구하여 진다. 고정층 흡착 장치 내에서 THM의 거동은 표면 확산 기구에 기초를 둔 LDFA모델[14]에 의하여 설명하고자 한다.

2. 사용된 흡착 모델

2-1. 회분식 흡착

흡착제 내부에서 각 흡착 물질의 확산 과정을 표면 확산이 지배한다고 가정하면, 구형 입자의 경우 다음과 같은 물질 수지식을 세울 수가 있다[11-13].

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t} = \frac{D_{si}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial Q_i}{\partial r} \right) \quad (1)$$

여기서 D_{si} 는 유효 표면 확산 계수이다. 이 미분 방정식의 초기 및 경계 조건은 다음과 같다.

$$Q_i = Q_i^0 \text{ at } t=0 \text{ for } 0 < r < r_p \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial r} = 0 \text{ at } r=0 \text{ for } t \geq 0 \quad (3)$$

$$\rho_p D_{si} \left(\frac{\partial Q_i}{\partial r} \right) = k_{sf} (C_i - C_{si}) \text{ at } r=r_p \text{ for } t \geq 0 \quad (4)$$

여기서 Q_i^0 는 초기 흡착량이며 깨끗한 흡착제를 사

용한 경우에는 그 값이 0이다. k_{sf} 는 용액-입자간 물질 전달 계수이며 ρ_p 는 흡착제의 입자 밀도이다. C_{si} 는 흡착제의 외벽에서 흡착 농도(Q_{si})와 평형을 이루는 액상의 농도이며 두 농도는 흡착 등온식으로 관련되어진다. 식 (4)는 흡착제의 외벽에서 연속 조건 즉 액상측에서 물질 전달량(우항)이 흡착제 내부로의 확산 전달량(좌항)과 일치한다는 것을 의미한다. Q_{si} 는 C_{si} 와 다음과 같은 흡착 평형 관계가 성립한다.

$$Q_{si} = f(C_{s1}, C_{s2}, \dots, C_{sN}) \quad (5)$$

본 논문에서는 다성분 흡착 관계를 이상 흡착 용액 이론(IAST)으로 나타낸다[15, 16].

한편, 흡착조 내에서 총괄 물질 수지식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V \frac{dC}{dt} + w \frac{d\bar{Q}}{dt} = 0 \quad (6)$$

$$C_i = C_{i0} \text{ at } t=0 \quad (7)$$

여기서 V 는 흡착조 내 용액의 용적이며 w 는 흡착제의 질량이다. \bar{Q} 는 입자 내부에서의 평균 흡착 농도로 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{Q}(t) = \left(\frac{3}{r_p^3} \right) \int_0^{r_p} Q_i(r, t) r^2 dr \quad (8)$$

2-2. 고정층 흡착

흡착층을 통한 유속이 일정하고 축방향 분산이 무시될 수 있다고 가정하면 각 성분의 물질 수지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v \frac{\partial C_i}{\partial z} + \rho_b \frac{\partial \bar{Q}_i}{\partial \theta} = 0 \quad (9)$$

$$C_i = 0, Q_i = 0, z > 0, \theta < 0 \quad (10)$$

$$C_i = C_{i0}, Q_i = 0, z = 0, \theta > 0 \quad (11)$$

여기서 v 는 겉보기 유속, ρ_b 는 흡착제의 충전 밀도이다. \bar{Q}_i 는 식 (8)에 의하여 구해진다. θ 는 보정된 시간으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = t - \epsilon_b \frac{z}{v} \quad (12)$$

흡착층이 짧거나 유속이 큰 경우에는 보정 시간은 실제 시간과 거의 같게 된다. ϵ_b 는 충전층의 기공도이다.

고정층 흡착 계산을 단순화하기 위하여 LDFA를 이용하면[14], 입자내부에서 수지식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[17].

Table 1. Physical properties of GAC

Properties	Values	Unit
Surface area	1031	[m ² /g]
Particle radius	0.339-0.916	[mm]
Particle density	846	[kg/m ³]
Bed density	417	[kg/m ³]
Bed porosity	0.507	[-]

$$\frac{\partial \bar{Q}_i}{\partial \theta} = \frac{3k_{fi}}{r_p \rho_b} (C_i - C_{si}) = k_{si} (\bar{Q}_i - Q_{si}) \quad (13)$$

고정층에서 유체-입자간 물질 전달 계수는 농도 파과 곡선을 이용하여 실험적으로 구할 수 있으나, 구형의 입자인 경우 Ranz and Marshall 식에 의하여 비교적 정확하게 추산할 수 있다[17].

$$2k_f r_p / D_m = 2.0 + 0.6 Sc^{1/3} Re^{1/2} \quad (14)$$

여기서 D_m 은 분자 확산 계수이고 Sc 및 Re 는 각각 Schmidt 및 Reynolds 수를 말한다. 입자내부에서 parabolic profile을 가정하면 k_s 는 입자내부에서의 표면 확산 계수와 다음과 같은 관계가 있다[14].

$$k_{si} = 15 D_{si} / r_p^2 \quad (15)$$

3. 실험 방법

3-1. 활성탄 및 흡착 물질

본 실험에 사용된 활성탄은 (주)유니온 카본에서 제공한 액상용 입상 활성탄을 사용하였다. 그리고, 활성탄을 실험에 사용하기 전에 입자 크기별로 분류하였다. 그리고, 활성탄 표면에 붙어 있는 먼지와 불순물 등을 제거하기 위해 증류수로 깨끗이 씻어내고 100℃ 이상의 온도에서 끓인 후, 이를 일주일 정도 건조기에 넣어 건조시킨 뒤 desicator에 보관하여 사용하였다. 활성탄의 물리적 성질은 Table 1에 나타내었다.

3-2. THM의 분석

실험을 통하여 얻은 시료를 GC로 분석하기 전에 전처리 과정을 밟게 되는데, 여기에는 대표적으로 purge and trap법, 액-액 추출법, adsorption and elution법, 직접주입법 등 4가지 방법[10]이 있다. 이 중에서 액-액 추출법은 매우 간단한 전처리 과정으로 다른 방법에 비해 시간이 절약되고 회수율이 높기 때문에 많은 수의 시료를 routine하게 분석할 때 특히 유용하다. 본 실험에서는 액-액 추출법을 이용한 전처리 과정을 밟았으며 분석은 ECD가 장착된 GC로 행하였다.

3-3. 흡착 평형 실험

활성탄에 대한 THM의 흡착 등온식을 구하기 위하여 평형 실험을 하였다. 150 ml 용량의 삼각 플라스크에 chloroform과 bromoform의 초기 농도가 0.1-60 ppm인 용액을 일정 간격으로 제조하여 이 중 100 ml를 취하고 여기에 20/30 mesh인 활성탄 100 mg을 넣은 후 테프론 테이프로 완전히 밀봉하였다. 각 용액들을 항온($T=25^\circ\text{C}$)이 유지되는 교반기에서 일주일 동안 흔들어 주며 흡착시킨 후, 용액 중의 잔류하는 chloroform과 bromoform 농도를 GC로 분석하여 활성탄의 단위 무게당 평형 흡착량을 구하였다.

3-4. 회분식 흡착 실험

활성탄에 대한 THM의 흡착 속도를 구하기 위하여 회분식 흡착 실험을 하였다. 회분식 실험 장치는 Carberry형 흡착조를 사용하였고 용액의 혼합을 원활히 하기 위하여 4개의 baffle을 설치하였다[11]. Chloroform과 bromoform의 초기 농도가 각각 다른 시료수 2l를 준비하여 용량 3l 반응조에 넣는다. 그 후에 mesh size가 각각 20/30, 16/20, 12/16, 8/12인 활성탄을 chloroform 용액에는 500 mg, bromoform 용액에는 200 mg을 4개의 cage에 충전하였으며, 이를 항온조에 장치하여 수온을 25℃로 유지시키면서 400 rpm 이상으로 교반시켰다. 처음 1시간 동안은 매 10분마다 그 이후로 3시간까지는 30분마다 그 이후로는 1시간마다 시료를 채취하여 잔류 chloroform과 bromoform의 농도를 GC로 분석하였다.

3-5. 고정층 흡착 실험

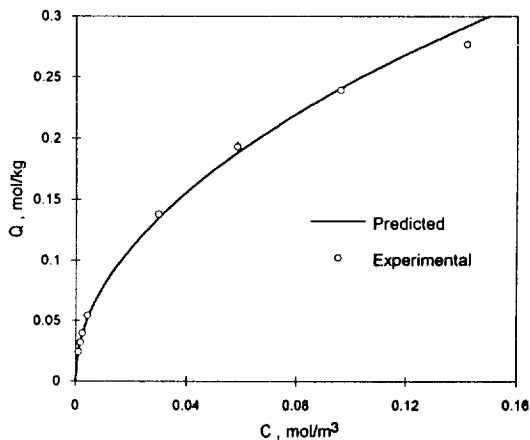
단일 및 2성분 고정층 흡착 실험에서 저장용기에는 농도가 10 ppm인 chloroform, bromoform 용액 그리고 chloroform 5 ppm과 bromoform 5 ppm이 섞인 용액을 준비하여 놓았고, 이 용액은 peristaltic pump에 의하여 일정한 수두가 유지되는 head tank에 공급되었으며 일정한 유속 $1.69 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$ 로 흘러보냈다. 유속은 주어진 시간동안 유출된 용적을 측정하여 구하였고 실험은 하향류로 유입시켰다. 흡착관에는 mesh size가 16/20인 활성탄 1.0 g을 충전하였다. 실험은 먼저 실험에 사용될 유속으로 증류수를 흘러보낸 후 준비된 용액으로 바꾸어 실험 초기에 일어나는 혼란을 방지하였다. 실험기간 중 흡착층의 온도는 25℃로 유지시켰다. 그리고 일정한 시간 간격으로 흡착관의 출구에서 시료를 채취하여 GC로 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 흡착 등온식

Table 2. Freundlich parameters and percent errors for chloroform and bromoform at 25°C

Parameters	Chloroform	Bromoform
k	0.767	3.35
n	2.02	2.05
E(%)	3.33	5.04

Fig. 1. Single-species isotherm of CHCl_3 at 25°C.

단일 성분의 흡착 평형은 Freundlich 흡착 등온식으로 나타내었다.

$$Q = kC^{1/n} \quad (16)$$

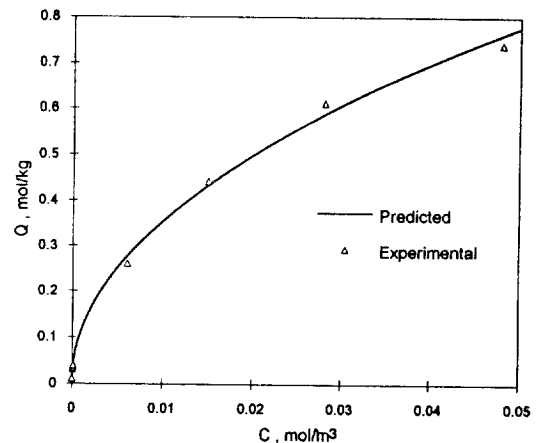
흡착 등온식의 파라미터는 실험 data를 이용하여 최소 자승법으로 구하였고, 그 결과는 Table 2에 나타내었다. 이 흡착등온식은 THM용액의 잔류 농도와 활성탄 표면에서의 농도가 평형에 이르렀을 때 활성탄이 흡착한 흡착량과 THM용액 농도사이의 관계를 나타낸 것이다.

실험치 및 계산치의 평균 오차는 다음식으로부터 구하였다.

$$E(\%) = \frac{100}{N} \sum_{k=1}^N \frac{|Q_{exp} - Q_{pre}|}{Q_{exp}} \quad (17)$$

Table 2의 결과에 의하면 단일 성분의 흡착 data가 Freundlich식에 의하여 잘 표현되고 있음을 알 수 있다. Fig. 1 및 2는 각각 chloroform과 bromoform의 등온선을 나타낸 것이다.

Table 2에서 보는 바와 같이 흡착 강도(adsorption strength)를 알아볼 수 있는 chloroform과 bromoform의 $1/n$ 값은 각각 0.495, 0.488로 1보다 적어 favorable 것으로 나타났으며, 사용한 활성탄에 대해서는 chloroform보다 bromoform이 높은 흡착 강도를 갖고 있었다.

Fig. 2. Single-species isotherm of CHBr_3 at 25°C.

4-2. 회분식 흡착

활성탄과 같은 다공성 물질에 의한 흡착은 대체로 3 단계 즉 외부 물질 전달, 내부확산, 세공 표면에서의 흡착순으로 이루어지며 이 중에서 속도가 가장 느린 경우가 전체의 흡착 속도를 지배하게 된다. 그러나 대부분의 경우 세공 표면에서의 물리 흡착은 매우 빨리 진행되기 때문에 무시하는 수가 많아 외부 물질 전달 및 입자 내부의 확산을 고려하게 된다.

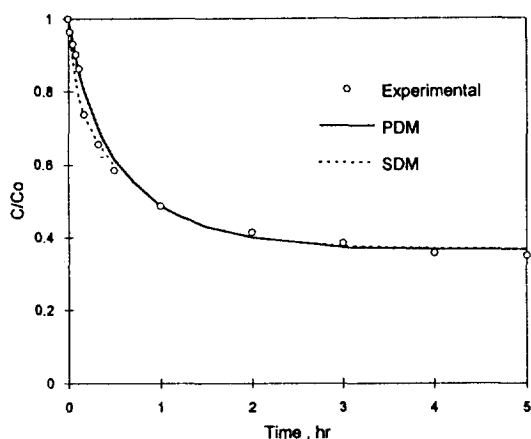
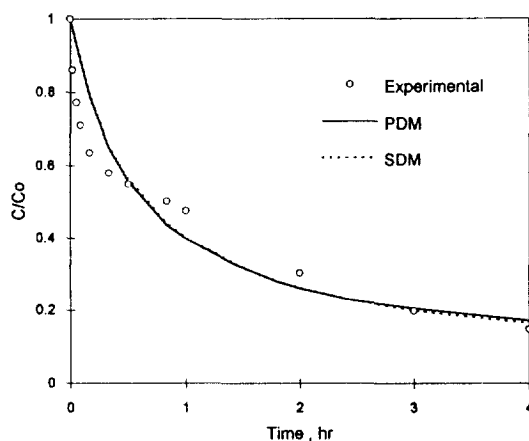
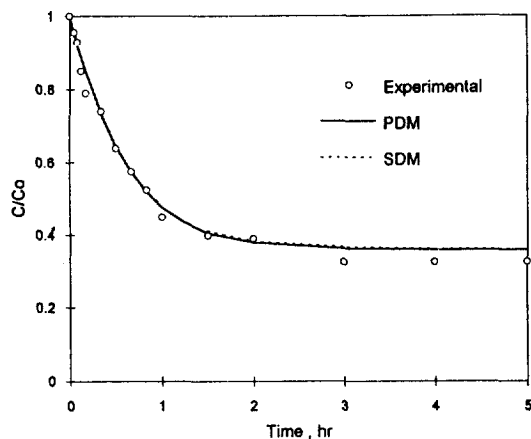
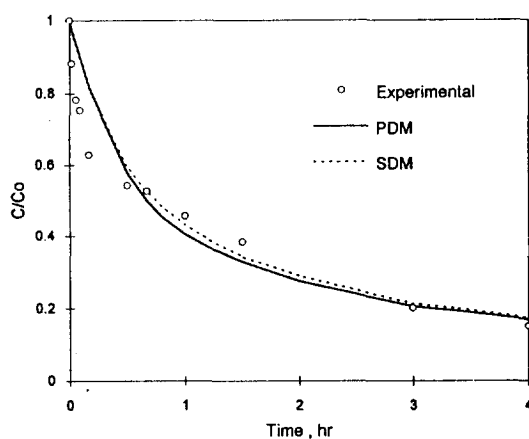
일반적으로 흡착제 외벽에서 격막 물질 전달 저항은 확산 저항에 비하여 무시될 수 있으나, 정량적인 해석을 위하여는 그 크기를 결정하여야 할 필요가 있다. 문헌에 의하면 회분식 흡착조 내에서 입자-용액간 물질 전달 계수를 구할 수 있는 상관식이 다수 제시되어 있다[18, 19]. 본 실험에서는 흡착개시 후 약 300초 이내의 초기 농도 변화로부터 격막 물질 전달 계수를 구하였다[11]. 구하여진 물질 전달 계수의 값들은 Table 3에 수록하였다.

확산 계수를 결정하는 방법은 여러 가지가 제시되어 있으나, 일반적인 방법이 확산 모델에 의해 계산된 농도 곡선과 실험에 의해 구한 농도 곡선을 비교하여 결정하는 것이다. 따라서 이렇게 구하여진 확산 계수는 흡착계가 갖는 고유한 확산 계수라기 보다는 여러 가지 요인 즉, 입자내부에서 물질의 이동에 관여하는 세공 확산, 표면 확산 및 공간적인 효과를 총망라한 종합적인 저항을 나타내는 유효 확산 계수가 된다[11, 13]. 본 연구에서는 세공 확산(pore diffusion) 또는 표면 확산(surface diffusion)을 가정하여 유효 확산 계수를 구하였고, Table 3에 그 결과를 수록하였다.

Fig. 3-6은 입자별로 실험한 회분식 실험결과 중 대표적인 것 4개를 세공 확산 모델과 표면 확산 모델을

Table 3. Film mass transfer coefficients and effective diffusion coefficients estimated

Species	\bar{r}_p [m $\times 10^{-3}$]	$k_f \times 10^4$ [m/s]	$D_p \times 10^7$ [m ² /s]	$D_s \times 10^{11}$ [m ² /s]	$(D_s/r_p^2) \times 10^5$ [τ_s , 1/s]
Chloroform*	0.916	1.80	3.83	4.94	5.89
	0.59	2.31	3.25	4.69	13.29
	0.459	2.78	0.386	0.856	4.06
	0.339	3.03	0.144	0.38	3.31
Bromoform**	0.916	9.54	1.99	0.403	0.480
	0.594	9.07	0.800	0.162	0.459
	0.459	7.62	0.500	0.135	0.641
	0.339	7.58	0.177	0.0571	0.497

*w/V=0.25 kg/m³, **w/V=0.1 kg/m³Fig. 3. Single-species batch adsorption of CHCl₃ with $C_0 = 0.0352$ mol/m³(mesh 16/20).Fig. 5. Single-species batch adsorption of CHBr₃ with $C_0 = 0.0167$ mol/m³(mesh 16/20).Fig. 4. Single-species batch adsorption of CHCl₃ with $C_0 = 0.0335$ mol/m³(mesh 12/16).Fig. 6. Single-species batch adsorption of CHBr₃ with $C_0 = 0.0124$ mol/m³(mesh 12/16).

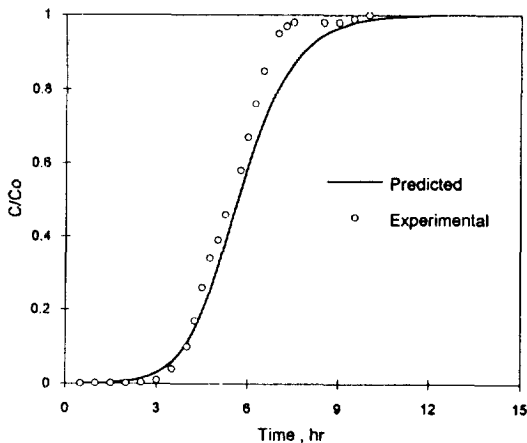


Fig. 7. Single-species breakthrough curve of chloroform($C_0 = 0.0838 \text{ mol/m}^3$, $v = 1.69 \times 10^{-3} \text{ m/s}$).

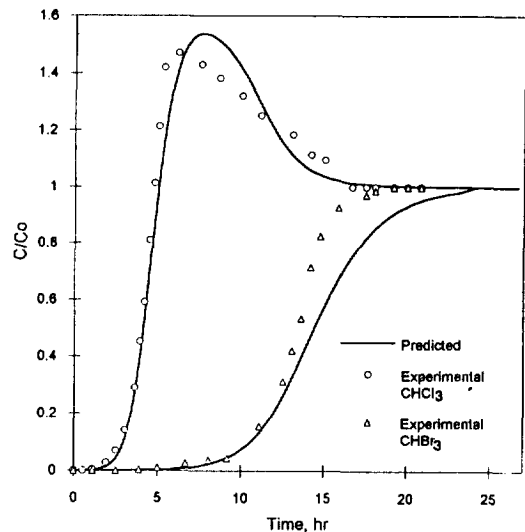


Fig. 9. Binary breakthrough curve of chloroform(1)/bromoform(2) system($C_{10} = 0.0418$, $C_{20} = 0.0198 \text{ mol/m}^3$, $v = 1.69 \times 10^{-3} \text{ m/s}$).

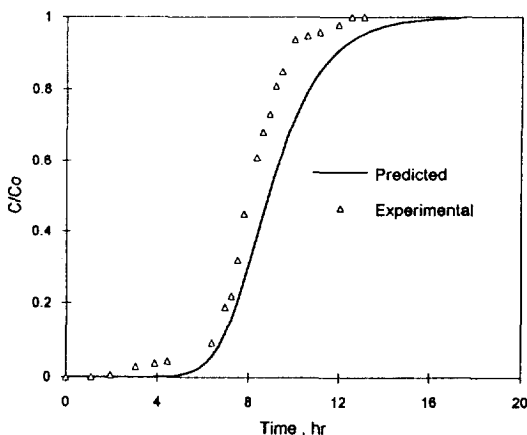


Fig. 8. Single-species breakthrough curve of bromoform($C_0 = 0.0396 \text{ mol/m}^3$, $v = 1.69 \times 10^{-3} \text{ m/s}$).

이용하여 구한 예측치와 비교한 것이다. 결과는 확산 기구에 관계없이 그림상에서 거의 일치하고 있으나, 표면 확산 모델에 의한 계산이 실험치에 더 근사함을 보여주고 있다. 결과에 의하면 활성탄의 입자 크기가 증가할수록 D_p 와 D_s 값도 증가함을 보이고 있으나 물리적인 의미를 부여하기는 어렵다. 그러나 흡착 과정의 시간 정수(τ_s)는 chloroform의 경우 $\bar{\tau}_p = 0.59$ 를 제외하고 입자의 크기와 관계없이 비슷하였다. 이것은 흡착 속도가 흡착제의 크기에 거의 무관하다는 것을 의미하며 macropore가 발달된 이중 구조 흡착제에서 나타나는 현상이다.

4-3. 고정층 흡착

활성탄 흡착에 의한 THM의 제거는 실제로 고정층 장치가 이용되고 있다. 이것은 흡착 물질과 흡착제와의 친화도의 차이에 의하여 비교적 급격한 파과 곡선을 얻을 수 있기 때문이다. 따라서, 고정층 내에서 흡착 물질의 거동을 살피기 위하여는 각 성분들의 파과 곡선을 실험적으로 구하여야 함은 물론 모사 연구도 필요하게 된다[17]. 흡착제의 수명 및 재생 시기의 결정은 흡착 장치의 설계에 중요한 문제이기 때문이다. 흡착 물질의 파과 곡선은 흡착 평형, 물질 이동 및 장치 내의 유체역학적 상황에 따라 변하게 된다. 일반적인 결과에 따르면 흡착관이 길거나 유속이 매우 느린 경우에는 흡착 평형 관계가 파과 곡선을 지배하는 것으로 알려져 있고 favorable한 흡착의 경우 거의 계단형의 파과가 이루어진다[20]. 그러나, 흡착관이 짧거나 유속이 빠른 경우 즉 흡착층 내의 체류 시간이 짧은 경우는 물질 이동의 영향이 상대적으로 크게 나타난다. 따라서 흡착 분리를 위한 파과 곡선을 모사하는 경우는 흡착 평형 관계 및 물질 이동 현상을 함께 고려하는 것이 바람직하다[14, 21].

LDFA에 의한 단일 및 2성분의 파과 곡선을 Fig. 7-9에 나타내었다. 2성분 파과 곡선은 흡착 친화도가 낮은 chloroform은 유입된 초기 농도보다 출구 농도가 커지는 overshoot현상을 보이는데, 이것은 흡착층 내에서 물질 간의 상호 작용, 즉 흡착 평형에 의하여 나타나는 일반적인 현상이다[14, 21].

실험을 통하여 얻어진 단일 및 2성분계의 파과 곡선은

LDFA 모델에 의하여 비교적 잘 묘사되었다. 따라서 LDFA는 입자내부의 확산 과정을 단순한 물질 전달식으로 대체시킨 것이지만 THM의 고정층 흡착 장치의 설계와 해석에 응용될 수 있을 것이다.

5. 결 론

(1) Chloroform과 bromoform의 흡착 평형은 Freundlich식으로 잘 표현되었다.

(2) 활성탄의 입자별로 실시한 회분식 실험에서 물질 전달 계수(k_f)를 구한 결과 chloroform의 값은 $1.80-3.03 \times 10^{-4}$ 의 범위안의, bromoform은 $7.58-9.54 \times 10^{-4}$ m/sec 범위의 값을 보였다.

(3) 활성탄의 입자의 크기가 증가할수록 세공 확산 계수와 표면 확산 계수의 값이 증가하였다. 그러나 흡착 과정의 시간 상수는 거의 일정하였다. 이것은 흡착 속도가 흡착제의 크기와 무관하다는 것을 의미하며 활성탄의 세공 구조에 기인한 것으로 판단된다.

(4) 고정층에서의 THM의 흡착 거동은 LDFA(linear driving force approximation)모델로 잘 설명할 수 있었다.

사용기호

- a : surface area of sorbent particles [m^2]
- C : concentration in the fluid phase [mol/m^3]
- D_p : effective pore diffusion coefficient [m^2/sec]
- D_s : effective surface diffusion coefficient [m^2/sec]
- E : average percent deviation
- f : function or isotherm defined by Eq. (5)
- k_f : film mass transfer coefficient [m/sec]
- k : Freundlich coefficient
- n : Freundlich exponent
- Q : amount adsorbed [mol/kg]
- r : radial distance [m]
- r_p : particle radius [m]
- T : temperature
- t : time [min or hr]
- V : volume of solution [m^3]
- w : weight of sorbents [kg]
- v : superficial flowrate [m/s]
- z : axial distance [m]

그리스 문자

- ϵ_b : bed porosity
- θ : modified time [min or hr]
- ρ_p : particle density [kg/m^3]

약자

- LDFA : linear driving force approximation
- PDM : pore diffusion model
- SDM : surface diffusion model

참고문헌

1. Richard, J. B.: *Environ. Sci. Technol.*, **16**, 554(1982).
2. Young, T. C. and Singer, P. S.: *J. AWWA*, **71**, 87(1979).
3. Chung, T. H. and Choi, S. I.: 대한토목학회 논문집, **4**, 25(1984).
4. Rook, J. J.: *Water Treatment and Exam.*, **23**, 234(1974).
5. Tardiff, R. G.: *J. AWWA*, **69**, 658(1979).
6. Veenstra, J. N. and Schnoor, J. L.: *J. AWWA*, **72**, 583(1980).
7. 相澤貴子 : 日本水道協會雜誌, **557**, 25(1981).
8. Schreiber, J. S.: *J. AWWA*, **73**, 154(1981).
9. Weber, W. J. Jr.: "Physicochemical Process for Water Quality Control", Chap. 5, Wiley Interscience, New York, 413(1972).
10. Chung, T. H. and Chung, J. C.: 대한토목학회 논문집, **3**, 73(1983).
11. Moon, H. and Lee, W. K.: *J. Colloid Interface Sci.*, **96**, 162(1983).
12. Dittl, P., Coughlin, R. W. and Jere, E. H.: *J. Colloid Interface Sci.*, **63**, 410(1978).
13. Moon, H., Park, H. C. and Lee, W. K.: *Korean J. Chem. Eng.*, **7**, 25(1990).
14. Moon, H. and Lee, W. K.: *Chem. Eng. Sci.*, **41**, 1995(1986).
15. Myers, A. L. and Prausnitz, J. M.: *AIChE J.*, **11**, 121(1965).
16. Moon, H. and Tien, C.: *Ind. Eng. Chem. Research*, **26**, 2042(1987).
17. Ruthven, D. M.: "Principles of Adsorption and Adsorption Processes", John Wiley and Sons, New York(1984).
18. Teshima, H. and Ohashi, Y.: *J. Chem. Eng. Japan*, **10**, 70(1977).
19. Misic, D. M., Sudo, Y., Suzuki, M. and Kawazoe, K.: *J. Chem. Eng. Japan*, **15**, 67(1982).
20. Moon, H. and Tien, C.: *AIChE Sym. Series* **264**, **84**, 94(1988).
21. Moon, H., Lee, J. W. and Park, H. C.: *Korean J. Chem. Eng.*, **9**, 225(1992).