

固定層 活性炭에 의한 Trihalomethane의 除去

Trihalomethane Removal by a Fixed Bed Carbon Adsorber

鄭	泰	鶴*
Chung,	Tai	Hak
鄭	載	澈**
Chung,	Jae	Chul

Abstract

Trihalomethane removal efficiency by a fixed bed carbon adsorber was a subject of this study. Along with laboratory scale column operations, a simple adsorption model was developed to predict removal efficiency. The adsorption model includes an overall mass transfer coefficient, K and Freundlich adsorption constants, K_F and n . Simulation results showed that increasing K and K_F or decreasing n would take more loading and prolong run time of the adsorption bed.

Typical S-shaped breakthrough curves were obtained from the experiments. The operational results at 20°C and 25°C indicated that a moderate difference in water temperature would not affect the treatment efficiency significantly. The adsorption constants determined from the column operation and the model simulation were reasonably close to those obtained from the isotherm test. It may be concluded that trihalomethane can be removed successfully by a fixed bed carbon adsorber.

要 旨

本 研究에서는 淨水處理過程에서 生成되는 trihalomethane 을 除去하는 方法으로 活性炭으로 充填된 固定層에 의한 吸着에 關하여 理論的인 간단한 模型을 제시하고 模型의 simulation 을 통하여 얻은 結果와 固定層 吸着實驗을 통해서 얻은 結果를 比較, 分析하였다.

固定層吸着模型의 simulation 結果로 吸着效果에 큰 영향을 미치는 因子인 物質傳達係數 K 와 Freundlich 의 吸着係數인 K_F 와 n 의 變化에 따른 전체적인 效率變化를 算定하였다. 處理效率은 K 와 K_F 가 증가할수록 그리고 n 이 감소할수록 有利한 것으로 나타났다.

實驗結果로부터 얻은 breakthrough curve 는 典型的인 S字形으로 나타났으며 break point 를 100 $\mu\text{g}/\text{l}$ 로 定할 경우 活性炭 단위무게當 吸着量은 6.3 mg/g 으로 等溫吸着實驗에서 얻은 結果보다 훨씬 높았다. 또한 5°C 程度의 水溫差異는 處理效率에 뚜렷한 영향을 끼치지 못했다. 固定層運轉結果와 잘 부합되는 simulation 으로부터 얻은 K_F 와 n 은 等溫吸着實驗에서 얻은 값과 약간의 차이를 나타냈다.

* 正會員·서울대학교 工科大学 土木工學科 助教授

** 서울대학교 大學院

1. 序 論

最近에 이르러 급격한 都市化 및 工業化現象에 따라 上水源의 汚染은 점차 심각해지고 있다. 原水의 汚染에서도 특히 微量의 有機物質에 의한 水質低下가 사람의 건강에 직접적인 影響을 끼칠 수 있어 水質管理上의 커다란 問題로 대두되고 있다. Trihalomethane (THM)은 水源에 자연적으로 發生한 有機物이나 廢水에 포함되어 水源에 流入된 有機物이 淨水處理 過程中 염소 처리과정에서 변형되어 處理水에 나타나는 發癌性物質로서 종래의 水質問題와는 다른 性格을 갖고 있다. 鹽素注入에 의한 殺菌處理가 가장 널리 보급되어 있고 效果의이므로 飲料水에 포함된 THM의 除去를 위하여 既存의 淨水處理方法을 變更하는 데는 技術的, 經濟的, 時間的인 制約이 크게 따른다.

飲料水에 存在하는 THM을 除去하기 위하여 THM의 原因物質 (precursor)을 除去하는 方法, 鹽素 이외의 다른 消毒劑를 使用하는 方法, 生成된 THM을 除去하는 方法을 생각할 수 있으며 여러 가지 制約條件 때문에 最善의 方法을 提示하기는 어려운 實情이다. 本 研究에서는 活性炭을 이용하여 生成된 THM을 除去하는 方法에 대하여 考察하기로 한다.

活性炭에 의한 THM 吸着은 favorable adsorption으로 이의 實用 可能性은 여러 研究에서 提示되었으므로^(1,2,3), 또한 前報⁽⁴⁾에 THM의 吸着能力에 관한 特性이 發表된 바 있다. 活性炭을 淨水處理 혹은 廢水處理에 利用하는 方法으로 THM을 含有한 물에 活性炭을 注入하여 浮遊狀態로 接觸시켜 除去하는 方法과 活性炭을 充填한 濾過床에 通過시켜 THM을 除去하는 方法이 있다. 浮遊狀態로 活性炭을 使用하는 경우에는 活性炭의 回收와 再使用이 어려워 주로 粉末狀態의 活性炭을 利用하는 경우와 小規模 處理場의 경우, 혹은 일시적인 活性炭 處理가 必要한 경우에 흔히 쓰이고 있다. 粒子狀의 活性炭으로 充填된 濾過床을 利用하는 方法은 연속적인 處理가 필요하거나 規模가 작지 않은 處理場에 適用하는데 效果의이며 活性炭의 回收가 容易하여 再生後 再使用이 可能한 利點이 있다.

本 研究에서는 粒子狀態 活性炭의 固定層을 利用하여 THM을 除去할 때의 處理效果를 實驗的으로 밝히고 活性炭 固定層에 의한 吸着模型을 導入하여 實驗結果와 比較, 分析하기로 한다.

2. 理論的 考察

(1) 固定層 吸着模型

固定層 活性炭을 利用하여 水中의 不純物을 吸着除去하는 process에 관한 理論的인 研究가 여러 研究者^(5,6,7)에 의해 發表된 바 있으나 이들 模型은 論理的인 反面에 算定이 不可能하거나 근란한 係數를 여러개 포함하고 있어 실제의 問題에 模型의 適用이 어려운 短點이 있다. 本 研究에서는 固定層에 의한 吸着過程을 보다 간단한 形態의 數式으로 表現하여 실제의 問題에 쉽게 利用할 수 있도록 模型을 定立한다.

活性炭의 吸着能力을 나타내는 式은 여러 가지 알려져 있으나 THM의 경우 Freundlich 式이 넓은 濃度範圍에 걸쳐 잘 들어 맞는 것이 實驗을 통하여 밝혀진 바 있으므로⁽⁴⁾ 本 研究에서는 吸着能力과 平衡濃度는 다음과 같이 Freundlich 式을 使用하여 表示하였다.

$$q_e = K_F \cdot C^{1/n} \quad (1)$$

위의 式에서 q_e = 平衡狀態에서 活性炭 單位 무게 당 吸着量

C = 平衡濃度

K_F, n = 常數

위의 關係式을 利用하여 column 內部 任意的 位置에서의 吸着量(q)의 變化는 다음과 같이 表示된다.

$$\frac{\partial q}{\partial t} = K(K_F C^{1/n} - q) \quad (2)$$

위의 式에서 K 는 overall mass transfer coefficient (day^{-1})이고 t 는 時間을 나타낸다.

흐름方向에 따라 깊이를 z 라 할 때 液體相 (liquid phase)에 대하여 物質收支式을 세우면 다음과 같다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{Q}{\varepsilon A} \left(-\frac{\partial c}{\partial z} \right) - K \cdot \rho_s \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \times (K_F C^{1/n} - q) \quad (3)$$

위의 式에서

Q = 流量 (cm^3/day)

ε = 固定層의 空隙率

A = 固定層의 斷面積(cm^2)

ρ_s = 活性炭의 粒보기 密度(g/cm^3)

流入水の 濃度を C_0 라 할 때 위의 두式에 대한 初期條件과 境界條件은 다음과 같이 表示된다.

$$q(z, t=0) = 0 \quad (4)$$

$$c(z, t=0) = 0 \quad (5)$$

$$c(z=0, t) = c_0 \quad (6)$$

앞에서 얻은 偏微分方程式에 일반성을 부여하기 위하여 다음과 같이 無次元量을 定義하여 變形하도록 한다.

$$q_0 = K_F \cdot C_0^{1/n} \quad (7)$$

$$t_d = A \cdot d / Q \quad (8)$$

$$\bar{q} = q / q_0 \quad (9)$$

$$\bar{c} = c / c_0 \quad (10)$$

$$\bar{t} = t / t_d \quad (11)$$

$$\bar{z} = z / d \quad (12)$$

위의 式에서 d 는 固定層의 높이를 나타낸다.

위의 定義를 利用하여 式 (2)와 (3)을 變形하면 다음과 같이 表示된다.

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial \bar{t}} = K_1 \bar{c}^{1/n} - K_1 \bar{q} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{t}} = -K_2 \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{z}} - K_3 \bar{c}^{1/n} + K_3 \bar{q} \quad (14)$$

위의 式에서 K_1, K_2 및 K_3 는 無次元量으로서 다음과 같다.

$$K_1 = K \cdot t_d \quad (15)$$

$$K_2 = 1/\varepsilon \quad (16)$$

$$K_3 = \frac{K \cdot \rho_s \cdot t_d \cdot q_0}{C_0} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \quad (17)$$

최종적으로 얻어진 式 (13)과 (14)를 \bar{z} 와 \bar{t} 를 微細等分한 후 implicit method를 適用하여 數值解析法에 의해 풀면 任意의 時間 t 와 任意의 깊이 z 에 대하여 濃度 c 와 吸着量 q 를 구할 수 있다.

(2) 模型의 解析

前節에서 導入된 模型에 포함된 大部分의 係數는 活性炭 固定層의 物理的 特性을 나타내는 값으로 直接測定이 가능한 것이고 活性炭의 吸着特性을 나타내는 K_F 와 n 은 等溫吸着實驗을 통하여 찾아 낼 수 있다. 그러나 전체적인 物質 傳達係數인 K 는 lump parameter로서 固定層內에서의 流體의 흐름상태, 그리고 活性炭과 THM의 物理化學的 特性에 따라 定해지는 常數로서 實測 data와의 相關關係를 통해 구해야 한다. 本節에서는 模型에 關여하는 parameter 중 가장 影響을 크게 미치는 因子인 K_F, n 및 K 의 影響을 simulation에 의해 考察하기로 한다.

Overall mass transfer coefficient인 K 는 film transfer coefficient, K_F 와 內部擴散係數, D_p 에 의해 좌우되며 이들 因子의 影響을 精確히 把握하기 위해서는 보다 많은 研究가 必要한 것으로

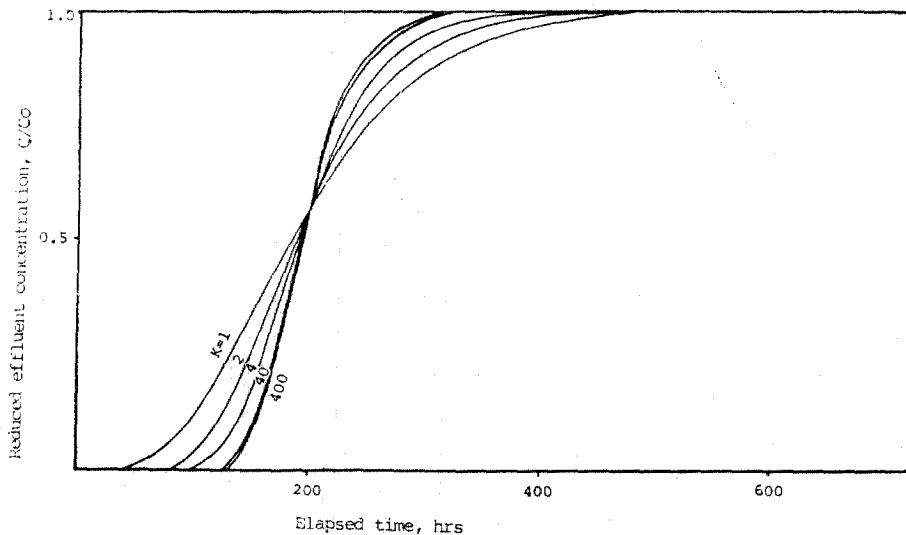


그림 1. Effect of K ($K_F=0.04, n=1.3108$)

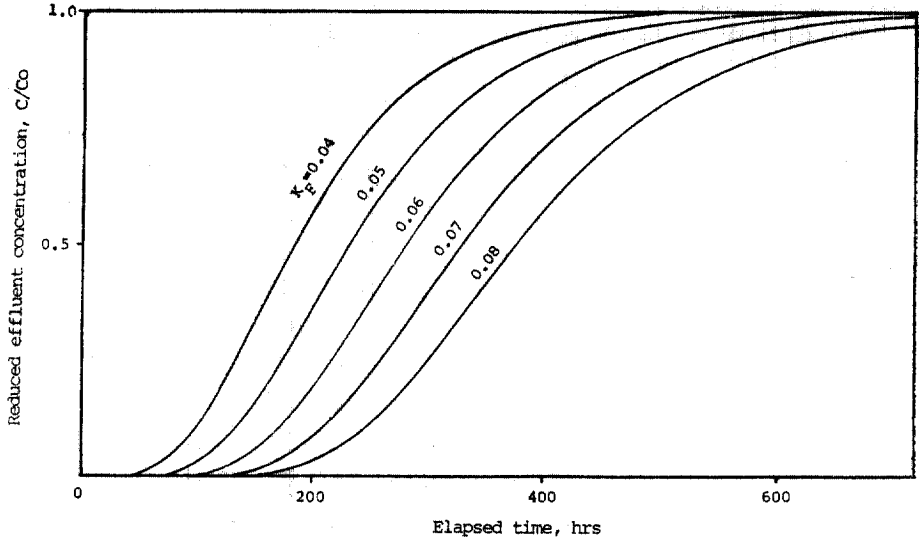


그림 2. Effect of K_F ($K=1.0$, $n=1.3108$)

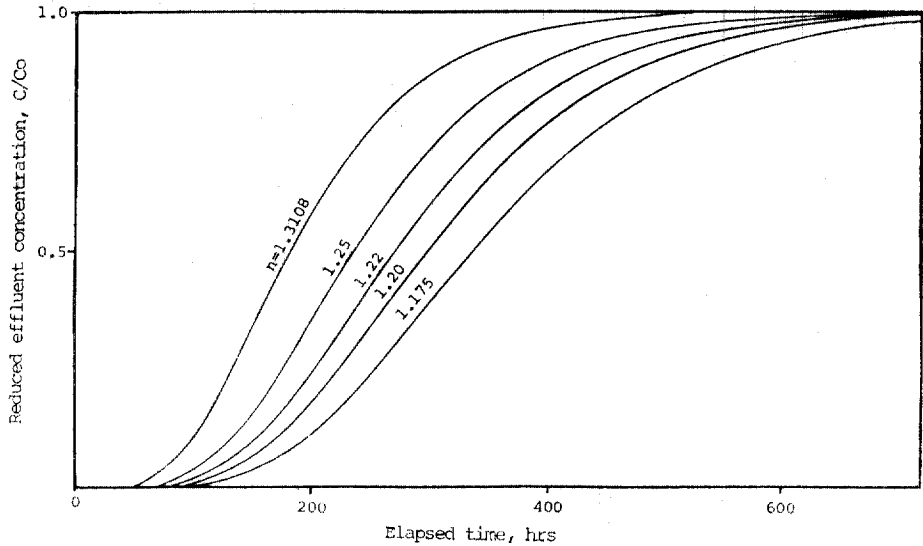


그림 3. Effect of n ($K=1.0$, $K_F=0.04$)

생각된다. 그림 1에 K_F 와 n 을 고정시키고 K 값을 $1\sim 400 \text{ day}^{-1}$ 로 변화시켰을 때의 시간에 따른 流出水의 濃度變化(breakthrough curve)를 表示하였다. K_F 와 n 은 前報⁽⁴⁾에서 發表한 값을 使用하였고 simulation에 使用된 기타 資料는 實驗에 使用된 data와 同一한 값을 使用하였다. 그림에 나타난 바와 같이 K 의 增加나 減少는 活性炭層의 最終吸着能力(ultimate adsorpt-

ion capacity)에는 거의 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다. 그림에서 曲線위의 面積(area over the curve)은 活性炭에 의해 吸着된 THM의 總量을 나타내며 K 의 變化에 相關없이 일정한 값을 나타내고 있다. K 가 클 경우 活性炭으로의 物質傳達速度가 빠르게 되어 初期運轉狀態에서 流出水의 THM 濃度가 서서히 增加함을 알 수 있다. 하지만 일단 流出水에 THM이 나타나기

시작하면 THM 濃度는 빠른 速度로 增加하여 流入水의 濃度에 接近하게 된다. 固定層活性炭에 의한 處理에서 break point가 대체로 낮은 濃度(例: 100 ppb THM, $c/c_0=0.115$)에 정해지므로 K_F 를 增加시키므로서 負荷量을 增加시킬 수 있게 되어 活性炭再生까지의 여과지속시간을 增加시킬 수 있어 有利해진다.

K_F 는 活性炭의 吸着特性을 나타내는 常數로서 K_F 의 增加는 直線의으로 吸着量(q_e)을 增加시키게 된다. 그림 2에 K_F 의 變化에 따른 breakthrough curve가 나타나 있다. 模型의 simulation에 使用된 係數는 前과 同一하고 K 는 1.0 day^{-1} 를 使用하였다. 그림에 나타난 바와 같이 K 의 變化는 breakthrough curve를 平行移動시킨 것과 같은 效果를 나타내고 있다. 즉 K_F 가 커짐에 따라 活性炭의 吸着能이 增大되어 流出水의 THM이 늦게 나타나는 것을 알 수 있으며 curve의 形態는 거의 相似形임을 알 수 있다

活性炭의 吸着特性을 나타내는 常數 n 의 영향은 K_F 의 영향과 類似하다. 濃도가 1 이상인 경우 n 의 增加는 q_e 의 減少를 초래하나 1 이하인 경우에는 q_e 를 增加시키는 效果가 있다. 그림 3은 n 의 영향을 나타낸 것으로 初期運轉段階를 除外하고는 THM의 濃도가 1 이상이므로 n 의 增加는 吸着量의 減少를 초래하여 빠른 時間내에 流出水에 THM이 나타나고 또한 빨리 活性炭의 吸着能力이 消盡되는 結果를 알 수 있다. curve의 形態는 K_F 의 경우와 마찬가지로 거의 相似形의 S形 曲線이라 할 수 있다. 따라서 K_F 가 클수록 n 이 작을수록 break point에 도달하는 時間이 길어져 有利하다 할 수 있다.

3. 實驗材料 및 方法

(1) 活性炭

實驗에 使用한 活性炭은 10번체를 通過하고 20번체에 남는 크기(10×20)의 粒狀活性炭으로 平均直徑(geometric mean diameter)은 1.3 mm 이고 實測結果 比表面積(specific surface area)은 $624 \text{ m}^2/\text{g}$ 이었다. 粒子表面에 붙어있는 작은 粉末은 증류수로 씻어내고 103°C 에서 乾燥시켜 使用하였으며 粒子의 겉보기 密度(ρ_s)는 $0.712 \text{ g}/\text{cm}^3$ 이었다.

(2) THM의 分析

THM은 前報⁽⁴⁾에서 설명한 바와 같이 電子捕獲型檢出器(electron capture detector, ECD)가 부착된 Gas Chromatograph(GC)를 使用하여 分析하였다. 分析의 精度를 높이기 위하여 *n*-pentane을 溶媒로 하여 THM을 抽出한 후 GC에 注入하여 測定하였다. 實驗條件下에서 chloroform의 流出時間은 約 1.2分이었으며 試料分析時마다 試料과 동등한 前處理를 거친 chloroform 標準溶液을 함께 分析하여 檢量線을 作成하여 이로부터 試料의 chloroform 濃度를 定量하였다.

(3) 實驗方法

本 研究에서 使用한 實驗裝置가 그림 4에 表示되어 있다. 流入水 저장용으로 200 l 容量의 plastic 容器를 使用하였으며 THM의 揮發을 막기 위해 뚜껑을 덮어 주었다. 流入水는 定量注入 pump를 使用하여 流量을 $159 \text{ ml}/\text{min}$ 程度로 맞추었고 column의 上端에 注入하였다. 活性炭으로 채워진 column은 內徑 4 cm인 아크릴 원통으로 活性炭層의 높이는 40 cm이었으며 充填된 活性炭의 量은 237 g이고 固定層內의 空隙率은 0.34이었다. 固定層內의 흐름 狀態는 重力式的

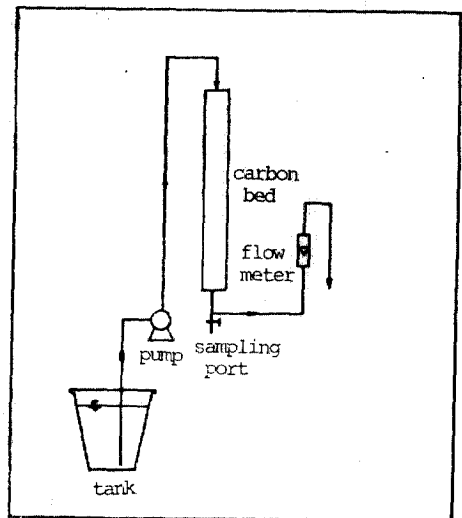


그림 4. column adsorption apparatus

연속흐름으로 分散(dispersion)이 있는 plug flow로 취급할 수 있다. 試料은 column의 流入部와 流出部에서 1日 2回 以上の 빈도로 採取하였으

며 채취한 試料는 즉시 *n*-pentane 으로 抽出한 후 冷暗所에 보관하여 48時間 以內에 分析하였다.

實驗室의 水道水 中에 포함된 THM의 濃度는 $40 \mu\text{g/l}$ 가량으로 流入水의 THM 濃度의 均等化를 기하기 위해 內徑 20 cm, 높이 60 cm의 별도의 活性炭層을 準備하여 이를 통과한 水道水

에 chloroform 을 일정량 注入하여 流入水를 調整하였다. 流入水는 1日 2回 調整하여 使用하였으며 流入水의 pH는 1N H_2SO_4 혹은 1N NaOH 를 使用하여 7.20 으로 調整하였다. 流入水의 溫度調節을 위한 특별한 裝置는 하지 않았으며 溫度를 수시로 測定한 結果 實驗期間中에 대체로 $20^\circ \sim 25^\circ\text{C}$ 를 維持하였다.

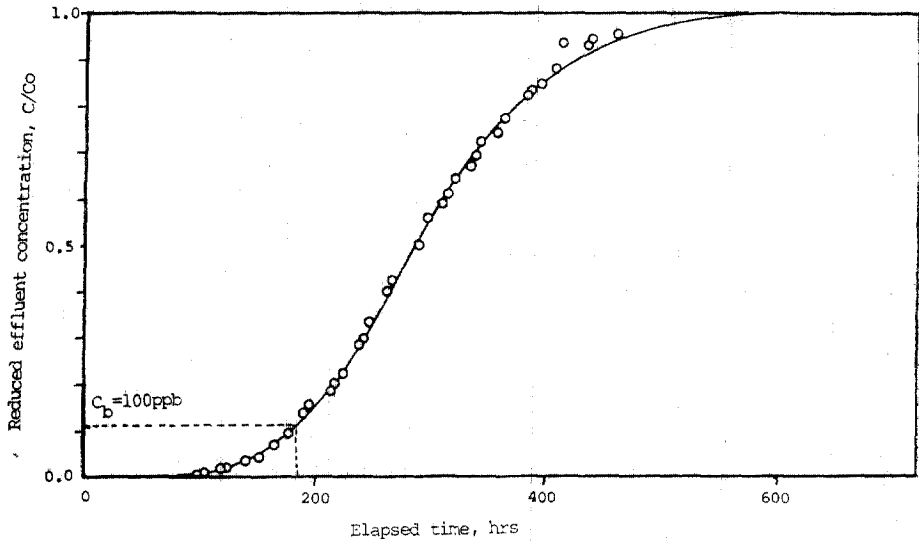


그림 5. Breakthrough curve at 25°C

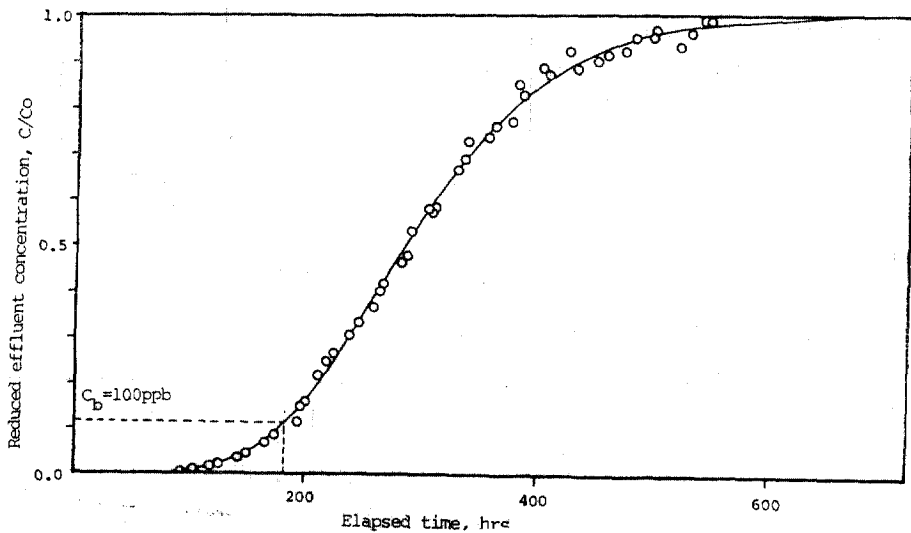


그림 6. Breakthrough curve at 20°C

4. 結果 및 討論

固定層 吸着의 結果는 여과지속시간에 따른 流出水의 濃度變化를 表示하는 breakthrough curve 로 나타낼 수 있으며 이를 통하여 安全한 流出水를 얻을 수 있는 適正 負荷量과 다음번 再生까지의 여과지속시간(filter runs) 등을 찾아 낼 수 있다. 本章에서는 實驗結果를 提示하고 이를 模型의 結果值와 함께 比較, 分析하기로 한다.

活性炭 column 의 通過流量은 159 ml/min 로서 column 의 斷面積當 負荷量은 126.5 l/m²/min 이었고 平均接觸時間은 empty bed 에서 3.16 분이었고, 固定層의 空隙率을 감안할 때 1.07 분이였다. 流入水의 THM 濃度는 첫번째 實驗에서 872 μg/l 程度이었으며 水溫은 24~28°C (平均 25°C)를 維持하였다. 두번째 실험에서는 流入水의 THM 濃度가 856 μg/l 이었고 水溫은 19~22°C (平均 20°C)를 維持하였다.

그림 5와 그림 6에는 平均水溫이 各各 25°C, 20°C 일 때의 breakthrough curve 가 나타나 있다. 그림에서 실선은 觀測 data 를 가장 잘 滿足시키는 smooth curve 로서 모두 典型的인 S 字形으로 나타나고 있다. 또한 break point (C_b)를 美國의 飲料水 水質基準에서 定한 100

ppb 로 잡으면 두 경우 모두 約 190 時間 後에 일어나는 것을 알 수 있으며 이때까지 通過한 流量은 約 1.8 m³ 이고 除去된 THM 의 總量은 約 1.48 g 으로 活性炭 1g 當 吸着量은 6.26mg 이 된다. 이러한 物質收支 關係가 그림 7에 理解하기 쉽게 表示되어 있다. 190 時間까지의 運轉에서 나타난 單位 무게 당 吸着量이 等溫吸着 實驗에서 얻은 平衡濃度 100 ppb 에서의 平衡吸着量인 1.35 mg 보다 훨씬 높은 吸着量을 나타 낼 수 있다. 이는 固定層 전체에 걸쳐 活性炭과 接하는 濃도가 100 ppb 보다 훨씬 크기 때문인 것으로 思料된다. 또한 그림에서 알 수 있듯이 約 300 時間 運轉 以後부터는 吸着量 增加率이 점차 완만해지다가 450 時間 以後에는 거의 吸着量의 增加가 없어 約 550 時間 運轉下에서 最大吸着量이 9.6 mg/g 으로 나타났다.

溫度가 約 20°C 와 25°C 인 두 경우에 있어서 結果를 比較해 보면 別다른 差異가 없는 것을 알 수 있다. 等溫吸着實驗⁽⁴⁾에서는 溫度變化에 따라 뚜렷한 吸着量의 變化가 나타났지만 活性炭 column 을 利用한 吸着에서는 5°C 程度의 溫度變化는 거의 影響을 끼치지 않음을 알 수 있다. column 式 運轉에 있어서 약간의 溫度變化가 全體吸着效果에 큰 影響을 끼치지 않는 것은 Weber 等⁽⁵⁾의 研究結果에서도 찾아볼 수 있다.

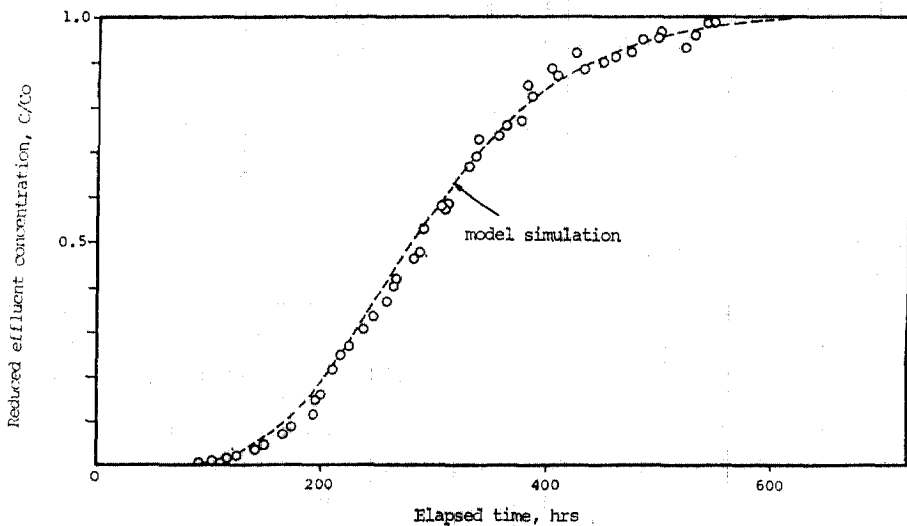


그림 7. Comparison of experimental data with simulation results in a column operation at 20°C

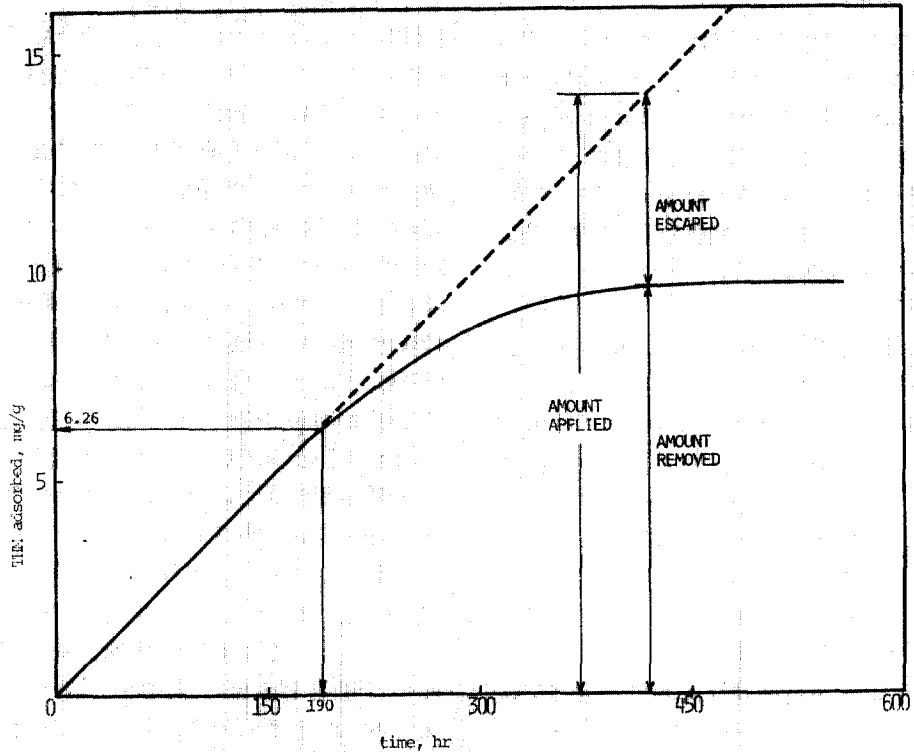


그림 8. Mass balance of THM in column operation

앞에서提示한 固定層吸着模型의 simulation 結果와 實驗結果를 比較하여 볼 때 觀測 data를 가장 잘 만족시키는 係數의 組合은 K 가 1.5 day^{-1} 이고 K_F 와 n 이 각각 0.35, 1.1866인 것으로 나타났다. 前報⁽⁴⁾에서 發表한 바와 같이 上記條件에서 等溫吸着實驗의 結果는 K_F 와 n 이 각각 0.040, 1.3108이므로 둘 사이에는 약간의 差異가 있음을 알 수 있다. 그림 9에는 實驗結果를 가장 잘 만족시키는 等溫吸着式($q_e = 0.035 C^{1/1.1866}$)이 점선으로 나타나 있고 또한 前報⁽⁴⁾에서 實驗結果를 토대로 얻은 等溫吸着式($q_e = 0.040 C^{1/1.3108}$)이 실선으로 表示되어 있다. 實驗結果가 等溫吸着式을 정확히 따르는 않으나 큰 差異가 나지 않음을 알 수 있다. 等溫吸着實驗이 平衡濃度가 約 $150 \mu\text{g/l}$ 까지의 data를 토대로 얻어진 것이므로 本 研究에서 고려하는 濃度範圍($0 \sim 856 \mu\text{g/l}$)에 延長 適用하는 데는 약간의 無理가 따르는 것으로 思料된다. 보다 높은 濃度範圍에서의 等溫吸着實驗結果가 얻어지면

模型의 效用性에 대하여 적절한 判斷을 내릴 수 있을 것이다.

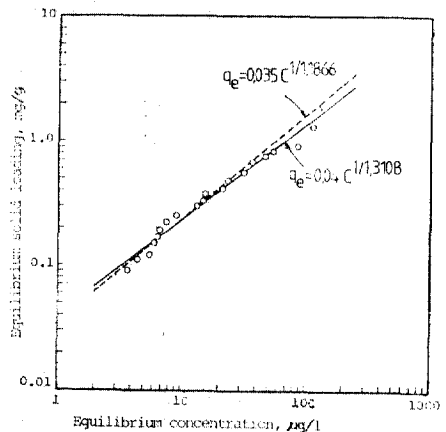


그림 9. The isotherm equation determined from the equilibrium adsorption data and from the column operation.

5. 結論

本 研究에서는 固定層의 粒狀 活性炭을 利用

하여 THM을 除去하는 處理效率에 관하여 理論的인 模型과 實驗室에서 얻은 結果를 通하여 考察하였으며 다음과 같은 結論을 내릴 수 있다.

1. 固定層 吸着模型에서 物質傳達係數 K 는 全體吸着能力에는 영향을 미치지 않으나 K 의 增加는 breakthrough 現象을 지연시키는 效果가 있는 것으로 나타났다. 또한 吸着特性을 나타내는 係數인 K_F 와 n 은 curve를 좌우로 移動시키는 效果를 나타낸다. 즉 K_F 의 增加 혹은 n 의 減少는 全體吸着能力을 增加시키므로 固定層의 運轉時間을 增大시키게 된다.

2. 連續流의 固定層 吸着實驗에서 breakthrough curve는 모두 典型的인 S字形으로 나타났으며 break point를 $100 \mu\text{g}/\text{l}$ 로 정할 경우 活性炭 單位 무게당 THM의 吸着量은 $6.3 \text{ mg}/\text{g}$ 으로 나타났으며 流出水의 濃度가 增加함에 따라 서서히 增加하여 流入水 濃度에 接近할 때 最大值인 $9.6 \text{ mg}/\text{g}$ 에 이르게 된다. 또한 實驗條件下에서 流出水의 THM이 $100 \mu\text{g}/\text{l}$ 를 초과하지 않는 最大運轉時間은 約 190時間으로 나타났다.

3. 20°C 와 25°C 에서 얻은 實驗結果를 比較할 때 약간의 水溫變化는 固定層 吸着에서 處理效率에 거의 영향을 미치지 못한다.

4. 實驗結果와 부합되는 K, K_F 및 n 값을 模型의 simulation과 比較하여 구한 結果 각각 1.5 day^{-1} , 0.035, 1.1866으로 나타났으며 K_F 와 n 값은 20°C 의 等溫吸着實驗 結果와 類似하나 약간의 差異를 나타내고 있다. 이 差異는 平衡濃度가 $135 \mu\text{g}/\text{l}$ 以下에서 얻은 等溫吸着實驗結果를 토대로 決定한 K_F 와 n 을 $856 \mu\text{g}/$

l 까지 延長適用함으로써 얻어진 것으로 思料된다.

謝 辭

本 研究는 1982年度 韓國科學財團의 一部 研究費 支援으로 遂行되었으므로 이에 辭意를 表함.

參 考 文 獻

1. Craig Vogt and Stig Regli, "Controlling Trihalomethanes while Attaining Disinfection" *AWWA*, Vol. 73, pp.33-40, 1981.
2. C.A. Blanck, "Trihalomethane Reduction in Operating Water Treatment Plants", *AWWA*, Vol. 71, pp.525-528, 1979.
3. M.J. McGuire and I.H. Suffet, "Adsorption of Organic from Domestic Water Supplies", *AWWA*, Vol. 70, pp.621-636, 1978.
4. 鄭泰鶴, 鄭載澈, "活性炭을 利用한 Trihalomethane의 除去에 관한 研究", 大韓土木學會 論文集, 第3卷 第1號, pp.73~79, 1983.
5. W.J. Weber, Jr. and J.C. Morris "Kinetics of Adsorption in Columns of Fluidized Media", *WPCF*, Vol. 37, No. 4, pp.425-443, 1965.
6. J.C. Crittenden and W.J. Weber, Jr., "Predictive Model for Design of Fixed-Bed Adsorbers; Parameter Estimation and Model Development", *Jour. of Env. Div., ASCE*, Vol. 104, No. EE2, pp. 185-197, 1978.
7. R.G. Peel and A. Benedeck, "Dual Rate Kinetic Model of Fixed Bed Adsorber", *Jour. of Env. Div., ASCE*, Vol. 106, No. EE4, pp.797-813, 1980.

(接受 : 1983. 3. 2)