

¹⁴C-radiolabeled MIB와 HSDM을 이용한 최적 PAC 투입량 예측프로그램의 개발

김영일[†] · 배병욱* · 김규형 · 홍현수** · Paul Westerhoff***

(주) 경우크린텍 · *대전대학교 환경생명공학과 · **주) 엔버스 · ***아리조나 주립대 토목환경공학과

(2005년 6월 15일 접수, 2005년 10월 30일 채택)

Development of Optimum PAC Dose Prediction Program using ¹⁴C-radiolabeled MIB and HSDM

Kim, Young Il[†] · Bae, Byung Uk* · Kim, Kyu Hyoung · Hong, Hyun Su** · Paul Westerhoff***

Kyungwoo Cleantech CO., LTD. · *Department of Environmental and Life Engineering, Daejeon University

ENVORS CO., LTD. · *Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State University

ABSTRACT : MIB(methylisoborneol) is an earthy/musty odor compound produced as a second metabolite by cyanobacteria and actinomycetes. MIB is not removed by conventional water treatment(coagulation, sedimentation, filtration) and its presence in tap water, even at low ng/L levels, can result in consumer complaints. PAC(powdered activated carbon) can effectively remove MIB when the correct dose is applied. But, since most operators in water treatment plants apply a PAC dose and then adjust that dose depending on direct observation (odor detection) after treatment, the result is often under-dose or over-dose. In this study, kinetic and isotherm tests using ¹⁴C-radiolabeled MIB were performed to determine coefficients for the HSDM(homogeneous surface diffusion model), including liquid film mass transfer coefficient(K_L) and surface diffusion coefficient (D_s). The HSDM gave a reasonable fit and allowed prediction with the experimental data. Base on the HSDM, the authors developed an optimum PAC dose prediction program using the Excel spreadsheet. When the developed program was applied at two water treatment plants, the PAC dose based on the experience of operators in the water treatment plant was significantly different from that recommended by the newly developed program. If operators are willing to use the optimum PAC dose prediction program, it should solve dosing problems.

Key Words : ¹⁴C-radiolabeled MIB, HSDM(Homogeneous Surface Diffusion Model), Liquid Film Mass Transfer Coefficient, Surface Diffusion Coefficient, PAC(Powdered Activated Carbon)

요약 : 흙냄새 혹은 곰팡이 냄새 등을 야기시키는 MIB는 남조류나 방선균 등에 의해 생성되는 2차 대사산물이다. MIB는 일반적인 정수공정(응집, 침전, 여과)에 의해서는 쉽게 제거가 되지 않을 뿐만 아니라, 수돗물에 수 ng/L정도만 존재하더라도 소비자에게 심미적인 불쾌감을 유발시킬 수 있다. 일반적으로 MIB는 정확한 양의 PAC가 투입될 때 효과적으로 제거될 수 있으나, 대부분 정수장 운전자들은 PAC를 적당히 투입한 다음 처리 후 직접적인 관찰(냄새감지)에 근거하여 투입량을 조절함으로써 과잉투입 혹은 과소투입과 같은 결과를 야기하고 있는 실정이다. 이와 같은 배경을 바탕으로 본 연구에서는 ¹⁴C-radiolabeled MIB를 이용한 등온흡착 및 흡착동역학 실험을 수행하여 HSDM에 필요한 물질전달계수와 표면확산계수를 결정하였다. HSDM은 실제 실험을 잘 모의하였으며, 실험 결과 또한 정확히 예측하였다. HSDM 결과에 근거하여 저자들은 Excel spreadsheet을 이용하여 최적 PAC 투입량 예측프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 실제 2개의 정수장에 적용한 결과 정수장 운전자의 경험에 의해 구해진 실제 PAC 투입량과 새롭게 개발된 프로그램에 의해 구해진 PAC 투입량 사이에 많은 차이를 보였다. 만약 정수장 운전자가 최적 PAC 투입량 예측프로그램을 이용하여 PAC 투입량을 결정한다면, 이 문제는 충분히 해결될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : ¹⁴C-radiolabeled MIB, HSDM, 물질전달계수, 표면확산계수, 분말활성탄

1. 서론

흙냄새 혹은 곰팡이 냄새 등을 야기시키는 MIB(methylisoborneol)는 남조류나 방선균 등에 의해 생성되는 2차 대사산물로서 상수원수에 매우 낮은 농도(일반적으로 수 ng/L)로 존재하더라도 소비자에게 심미적인 불쾌감을 유발시킬 수 있기 때문에 정수장에서 반드시 제거되어야 할 대상이

다.¹⁾ 그러나, MIB는 분자량이 168정도이고 지방족 구조를 가진 반휘발성 물질이기 때문에 일반적인 정수공정(응집-침전-여과)에 의해서는 쉽게 제거되지 않는다.²⁾

MIB와 같은 이취미 유발물질을 제거하기 위해서 정수장에서는 일반적으로 흡착이나 산화공정을 사용하고 있으나, 입상활성탄(granular activated carbon, GAC)나 오존에 비해 비싸지 않고 적용이 용이한 분말활성탄(powdered activated carbon, PAC)을 많이 사용하고 있는 실정이다.²⁾ 그러나 여러 연구자들의 연구에서와 같이 PAC를 이용한 MIB의 제거는 사용된 활성탄의 종류와 원수에 존재하는 천연유기물질(natural organic matter, NOM)의 농도와 특성에 따라 제

[†] Corresponding author
E-mail: yikimenv@empal.com
Tel: 02-832-9955

Fax: 02-834-7989

거효율에 매우 큰 차이를 보이고 있다.^{3~6)} 또한, 이취미 제거를 위해 사용되는 PAC는 대부분 정수장 운전자들의 경험에 기초하여 투입되고 있기 때문에 과잉투입 혹은 과소투입과 같은 결과를 야기하기도 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Simpson 등⁷⁾과 Gillogly 등⁸⁾은 dose-removal curve를 최적 PAC 투입량을 예측하는데 사용하였으며, 그 이후에 Graham 등⁹⁾에 의해서도 동일한 연구가 수행되었다. 최근에 국내에서도 이와 동일한 연구를 수행한 바가 있다.¹⁰⁾ 근래에는 이러한 문제들을 보다 정교한 수치모델들을 이용하여 해결하고 있는데, 대표적인 예가 HSDM(homogeneous surface diffusion model)이다. HSDM은 고정층 흡착제의 흡착속도를 구하기 위해 개발되었으며,^{11~13)} 여러 연구자들에 의해서 PAC를 이용한 MIB의 흡착에도 사용되었다.^{14~16)} 따라서 본 연구에서는 ¹⁴C- radiolabeled MIB와 HSDM을 이용하여 범용 소프트웨어인 Excel에 기초한 최적 PAC 투입량 예측프로그램을 개발하였으며, 개발된 프로그램을 실제 정수장에 적용하여 PAC의 적정 투입여부 등을 평가하였다.

2. 실험방법 및 재료

세 종류의 상수원수와 두 종류의 PAC를 대상으로 등온 흡착 및 흡착동역학실험을 수행하였다. 실험에 사용된 상수원수는 CAP(Central Arizona Project), SR(Salt River), 그리고 VR(Verde River)이었으며, Table 1에 실험에 사용된 원수의 특성을 나타내었다. pH는 pH meter(YSI-60, YSI), DOC는 TOC 분석기(TOC-5050A, Shimadzu), UV₂₅₄는 UV/VIS spectrophotometer(UV/VIS 1601, Shimadzu), 전기전도도(conductivity)는 전기전도도계(YSI-30, YSI)로 측정하였으며, 그리고 SUVA(specific UV absorbance)는 DOC와 UV₂₅₄를 측정된 다음 계산식(UV₂₅₄/DOC×100)을 이용하여 산정하였다.

실험에 사용된 인공원수는 세 종류의 상수원수에 ¹⁴C-radiolabeled MIB(methyl-14C, American Radiolabeled Chemicals Inc., St. Louis, MO, USA)를 각각 spike하여 초기농도가 100 ng/L 범위가 되도록 제조하여 사용하였다. 원수 내 방사능(radioactivity) 수치는 액체섬광계수기(Scintillation Counter, GMI, Beckman LS6500, Albertville, MN, USA)를 이용하여 측정하였으며, 섬광측정을 위해 먼저 섬광용액(ScintiSafe Plus, Fisher Scientific, USA) 17.5 mL와 시료 2.5 mL를 표준측정용기에 넣고 혼합한 다음, 10분 동안 섬광을 계수하였다. 최종적으로 MIB 농도는 미리 작성된 방사능 수치와 MIB 농도와의 검량선을 이용하여 산정하였다.

한편, PAC는 Norit 20B(Norit Americas Inc., Marshall, TX, USA)와 AquaNuchar(MeadWestvaco Corporation, Covington, VA, USA)를 사용하였으며, 105 °C 오븐에서 2시간 동안 건조시킨 다음 초순수에 넣어 slurry 형태(1,000 mg/L)로 실험에 사용하였다(Table 2 참조).

Table 1. Characteristics of raw waters

Raw water	DOC (mg/L)	UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	SUVA (L/mg-m)	Conductivity (mS/m)	pH
CAP	2.79	0.038	1.3	88.6	8.3
SR	3.97	0.056	1.4	177.6	8.4
VR	5.14	0.160	3.1	32.1	8.6

Table 2. Characteristics of PAC used in the kinetic and adsorption isotherm study

Specification ¹⁾	PAC type	
	NORIT 20B	AQUANUCHAR
Manufacturer	NORIT	Mead Westvaco
Source material	Coal	Coal
Moisture, as packed (%)	3.0	8.0
Iodine number (mg/g)	800	900
Molasses number	190	-
Tannin value (mg/L)	-	175~250
Percent passing through #100 mesh (Standard : 99 %)	96	99
Percent passing through #200 mesh (Standard : 95 %)	88	95
Percent passing through #325 mesh (Standard : 90 %)	50	90

¹⁾ All specifications were obtained the reports from the factory

2.1. 등온흡착 실험

세 종류의 상수원수 2 L에 ¹⁴C-radiolabeled MIB를 각각 spike하여 초기농도가 100 ng/L가 되도록 제조한 다음, 여러 개의 40 mL 갈색 바이알에 원수를 나누어 넣었다. PAC를 0~40 mg/L 범위에서 다양한 비율로 갈색 바이알에 투입한 다음, 교반기(Multi-wrist shaker, Lab-Line, Melrose Park, IL, USA)에 넣고 상온에서 100 rpm의 교반속도로 72시간 동안 반응시켰다. 반응이 끝난 다음 PAC에 의한 실험상의 오차를 최소화하기 위하여 시료채취 즉시 GF/F 여지(47 mm, Whatman International Ltd., Maidstone, England)로 여과한 다음, 방사능 수치를 측정하여 MIB 농도를 산정하였다.

2.2. 흡착동역학 실험

흡착동역학 실험은 등온흡착실험에 사용된 인공원수와 동일한 농도의 원수를 여러 개의 갈색 바이알에 넣은 다음, PAC를 각각의 바이알에 0, 5, 10, 그리고 15 mg/L 투입하였다. 교반기를 이용하여 시료를 상온에서 100 rpm의 교반속도로 반응시키면서 반응시간 5~480분 범위에서 시료를 채취하였다. 등온흡착 실험과 마찬가지로 시료채취 즉시 GF/F 여지로 여과한 다음 시료의 방사능 수치를 측정하여 MIB 농도를 산정하였다.

2.3. HSDM의 적용

HSDM은 Crittenden과 Weber가 고정층 흡착제의 흡착속도

를 구하기 위해 개발되었으며,^{11~13)} 그 이후에 여러 연구자들에 의해 PAC에도 적용되었다.^{14~16)} 수학적 모델인 HSDM을 풀기 위해서는 유한 미분이나 유한 요소와 같은 방법을 이용해서 풀었으나, 근래에 와서 여러 연구자들에 의해 복잡한 수치해석 방법 없이 Newton Method와 같은 쉬운 방법을 사용하여 풀 수 있게 되었다.¹⁷⁾

일반적으로 HSDM을 풀기 위해서는 흡착제의 일반적인 특성인 밀도(density, $\rho(g/m^3)$)와 반경(radius, $r(m)$), 그리고 등온흡착 실험에 의해서 구해지는 흡착계수 K와 $1/n$ 값이 필요하게 된다. 이 외에 Levenberg-Marquardt non-linear least-square 알고리즘과 같은 수치 해석적 방법에 의해 구해지는 물질전달계수(liquid film mass transfer coefficient, $K_f(cm/min)$)와 표면확산계수(surface diffusion coefficient, $D_s(cm^2/min)$)가 필요하다. 특히, 물질전달계수와 표면확산계수 값은 등온흡착 실험에 의해 구해지는 흡착계수(K, $1/n$) 값과는 달리 HSDM에 초기 예상 값을 대입하여 구해진 흡착동역학 실험결과와 실제 흡착동역학 실험결과가 유사한 경향을 갖게 될 때까지 물질전달계수와 표면확산계수를 반복적으로 대입하여 최종 값을 선정하게 된다. 결론적으로 6개의 인자가 모두 구해지면 원하는 초기 농도와 PAC 투입량에서 흡착동역학 실험 결과를 얻을 수 있게 된다.

2.4. HSDM을 이용한 최적 PAC 투입량 예측프로그램의 개발 및 적용

HSDM을 이용하여 최적 PAC 투입량을 예측하기 위해서는 등온흡착이나 흡착동역학 실험을 수행해야 하고, HSDM을 풀기 위해서는 복잡한 수치해석 과정을 거쳐야 하기 때문에 현장에 쉽게 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 어느 누구나 쉽게 접할 수 있고 사용이 간단하며, 특히 현장에서 운전자들이 몇 가지 인자들만 넣어주게 되면 동일한 수계를 사용하는 정수장 어디에서든 최적 PAC 투입량을 빠르고 정확하게 예측할 수 있는 하나의 프로토콜을 만들고자 범용 소프트웨어인 "Excel"을 이용하여 최적 PAC 투입량 예측프로그램을 개발하였으며, 이를 동일한 원수를 사용하고 있는 실제 정수장에 적용하여 PAC의 적정 투입 여부를 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 등온흡착 실험

Fig. 1은 세 종류의 원수와 두 종류의 PAC를 대상으로 MIB에 대한 등온흡착 실험을 행한 결과이다. DOC 농도가 가장 낮은 CAP 원수의 흡착상수 K값이 가장 높았으며, 상대적으로 DOC 농도가 높은 VR 원수가 가장 낮았다(Table 3 참조). 이는 원수에 존재하는 NOM의 방해 작용으로 인해 PAC 흡착능이 감소하였기 때문이다.⁶⁾ PAC 입자크기가 작은 Aqua-Nuchar가 Norit 20B에 비해 원수에 관계없이 흡착상수 값이 높게 나왔으며, 두 활성탄간의 흡착능 차이는 DOC 농도가 낮을수록 크게 나타났다(Table 2 참조).⁴⁾

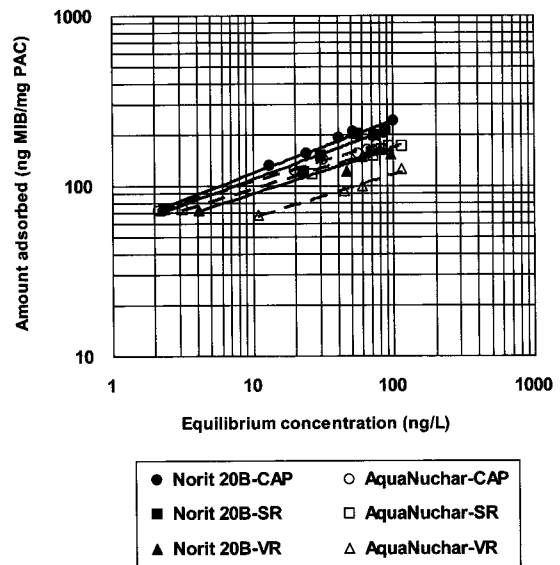


Fig. 1. Adsorption isotherms for MIB onto two PACs in three kinds of raw waters.

3.2. 흡착동역학 실험 및 HSDM의 적용

Fig. 2~4는 실제 흡착동역학 실험을 수행한 결과와 HSDM을 이용하여 fit 및 예측한 결과를 나타낸 것이다. 제거 가능한 MIB는 접촉시간 0.5시간 이내에 대부분 제거되었으며, PAC 투입량이 증가할수록 MIB 제거율은 증가하였다. 등온흡착 결과에서와 마찬가지로 DOC 농도가 낮은 CAP 원수가 VR 원수에 비해 높은 MIB 제거율을 보였으며, PAC 또한 AquaNuchar가 Norit 20B에 비해 우수한 효율을 보였다. PAC 5 mg/L를 투입하여 실제 흡착동역학 실험결과와 HSDM을 이용하여 구해진 흡착동역학 결과가 PAC 및 원수의 종류에 관계없이 일치하였으며, PAC 투입량을 증가(15 mg/L)시켜 예측한 HSDM 결과도 실제 실험결과와 거의 일치하였다. 이는 본 연구에 사용한 HSDM이 실제 실험결과를 정확히 모의한다는 것을 나타내는 직접적인 증거라 할 수 있다.^{14~16)} 참고로 등온흡착 실험에 의해서 구해진 K, $1/n$ 값,

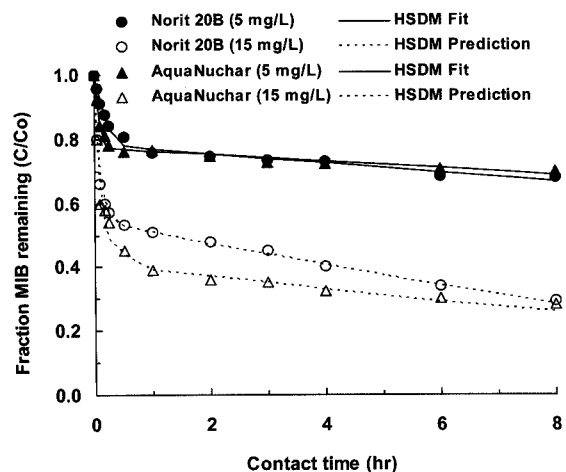


Fig. 2. HSDM fit and prediction of batch kinetic test data for MIB adsorption in CAP water.

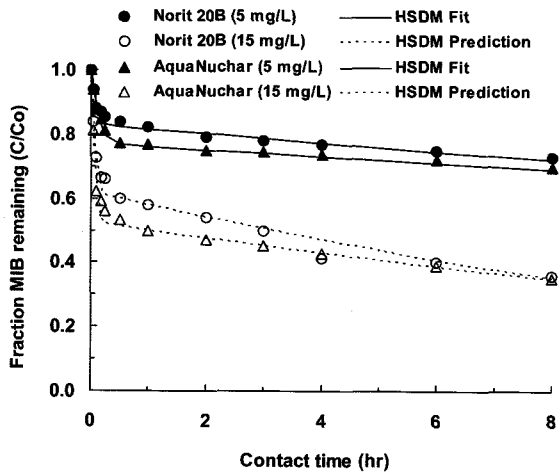


Fig. 3. HSDM fit and prediction of batch kinetic test data for MIB adsorption in SR water.

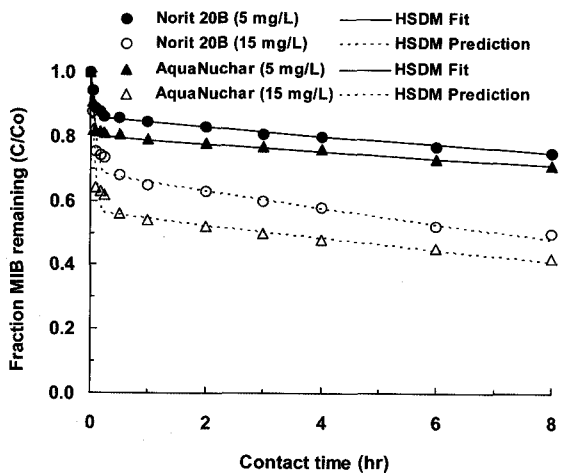


Fig. 4. HSDM fit and prediction of batch kinetic test data for MIB adsorption in VR water.

Table 3. Summary of Freundlich constant and coefficient for HSDM according to PAC brand and raw water

PAC	Raw water	DOC (mg/L)	Freundlich Constant			Coefficient for HSDM	
			K (ng/mg)(L/ng) ^{1/n}	1/n	r ²	K _f ¹⁾	D _s ²⁾
NORIT 20B	CAP	2.79	54.4	0.34	0.99	9.34×10 ¹	2.16×10 ⁻¹¹
	SR	3.97	51.1	0.36	0.96	1.62×10 ²	2.59×10 ⁻¹¹
	VR	5.14	34.9	0.34	0.93	1.80×10 ²	3.22×10 ⁻¹¹
AquaNuchar	CAP	2.79	60.6	0.24	0.99	2.33×10 ²	1.50×10 ⁻¹¹
	SR	3.79	55.3	0.24	0.98	1.46×10 ²	1.81×10 ⁻¹¹
	VR	5.14	36.3	0.25	0.98	3.14×10 ²	1.82×10 ⁻¹¹

1) Liquid film mass transfer coefficient (cm/min)

2) Surface diffusion coefficient (cm²/min)

그리고 HSDM에 최종적으로 사용된 K_f 및 D_s값을 Table 3에 요약 정리하였다.

3.3. HSDM과 “Excel”을 이용한 최적 PAC 투입량 예측프로그램의 개발

Fig. 5는 HSDM을 범용 소프트웨어인 “Excel”에 적용하여 개발된 최적 PAC 투입량 예측프로그램 수행화면을 나타낸 것이다. 그림의 왼쪽을 보면 1~6단계까지 작성하게 되어 있으며, 각 항에 해당되는 값을 넣게 되면 최종적으로 원하는 조건에 맞는 최적 PAC 투입량이 계산되어 맨 아래 6단계에 나타난다(Table 4 참조). 또한, 각 단계에서 작성된 값에 기초하여 PAC 투입량과 처리수의 MIB 농도에 대한 그래프가 자동으로 그려지게 된다.

3.4. 최적 PAC 투입량 예측프로그램의 적용

실제 정수장의 PAC 적정 투입여부를 평가하기 위하여,

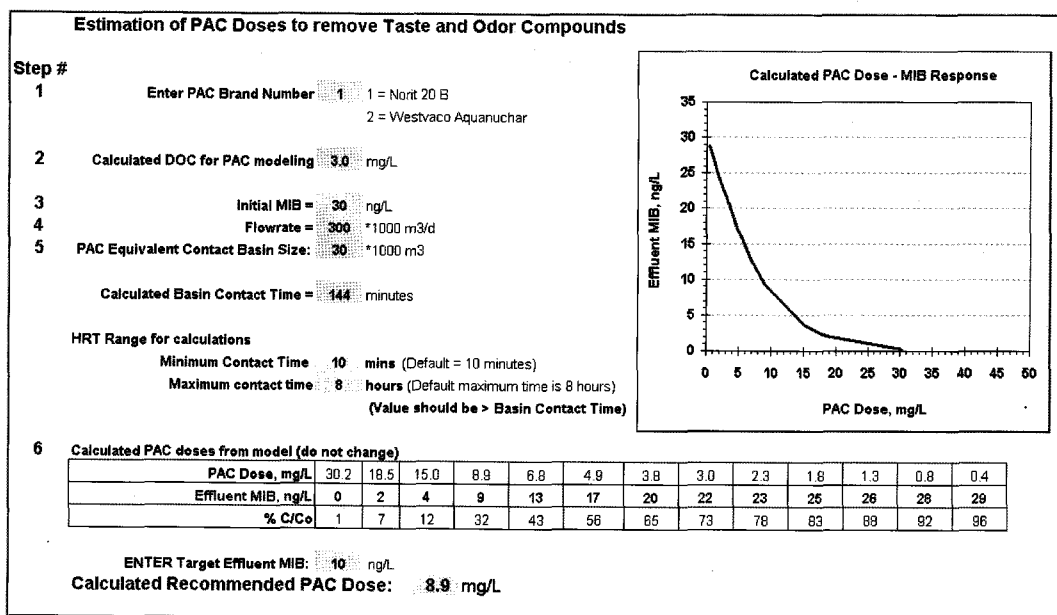


Fig. 5. “Snapshot” of Excel-based PAC model software for predicting PAC dosages for MIB removal.

프로그램 개발을 위해 사용된 원수와 동일한 원수를 사용하고 있는 두 개의 정수장에 본 연구에서 개발한 최적 PAC 투입량 예측프로그램을 적용하였다. 프로그램에 필요한 조건(유량, 활성탄 종류 및 투입량, 원수의 DOC 농도, 그리고 원수 및 처리수의 MIB 농도) 및 정수장의 물리적인 특성(접촉시간 및 용량)등은 정수장 운영자료를 참고하였다. 이러한 인자들을 예측프로그램에 대입하여 구해진 PAC 농도와 실제 정수장에 투입된 PAC 농도를 비교 분석하였다. Fig. 6은 2개의 정수장에서 1년 동안 실제 투입된 PAC 투입량과 예측프로그램에 의해서 구해진 PAC 투입량을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 정수장 운전자의 경험에 의해서 구해진 실제 PAC 투입량은 최적 PAC 투입량 예측프로그램을 이용하여 구해진 PAC 투입량과 많은 차이(과잉투입 혹은 과소투입)를 보였는데, 이는 정수장 운전자가 단지 경험에 의존하여 PAC 투입량을 결정하였기 때문이다. 만약 정수장 운전자가 경험이 아닌 최적 PAC 투입량 예측프로그램을 사용하여 PAC 투입량을 결정한다면, 이러한 문제는 충분히 해결될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4. Description of the data inputs

Step	Description
#1	• Select the PAC brand number (1 = Norit 20B, 2 = AquaNuchar)
#2	• DOC concentration of raw water
#3	• MIB concentration of raw water
#4	• Flow rate of water treatment plant
#5	• Effective volume (e.g. volume of rapid mixing and flocculation basin) for contact with PAC and raw water - HRT is automatically calculated by flow rate and volume
#6	• If the target MIB concentration is input, optimum PAC dose is automatically calculated. Table and figure are also automatically made.

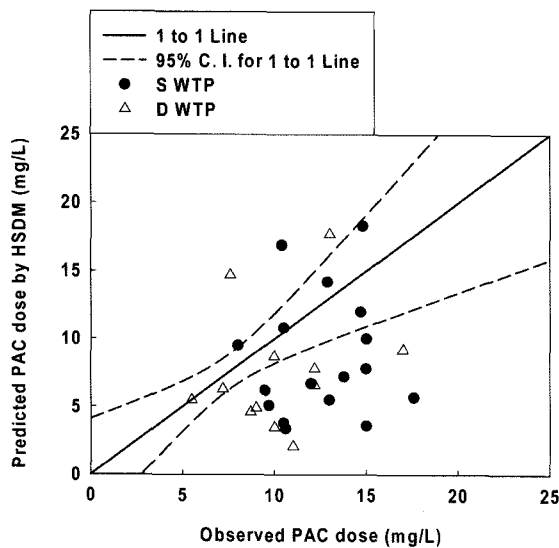


Fig. 6. Evaluation of PAC dosages in the two WTPs using the Excel-based PAC model program.

4. 결론

본 연구에서는 ¹⁴C-radiolabeled MIB와 HSDM을 이용하여 PAC 최적 투입량 예측프로그램을 개발하기 위해 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 등온흡착 실험결과 DOC 농도가 가장 낮은 CAP 원수의 흡착상수 K값이 가장 높은 반면, 상대적으로 DOC 농도가 높은 VR 원수가 가장 낮게 나왔는데, 이는 원수에 존재하는 NOM의 방해작용으로 인해 PAC 흡착능이 감소하였기 때문이다. 한편, PAC 입자크기가 작은 AquaNuchar가 Norit 20B에 비해 원수에 관계없이 흡착상수 값이 높게 나타났으며, 두 활성탄간의 흡착능 차이는 DOC 농도가 낮을수록 크게 나타났다.

2) PAC 흡착동역학 실험결과 제거 가능한 MIB는 접촉시간 0.5시간 이내에 대부분 제거되었으며, PAC 투입량이 증가할수록 MIB 제거율은 증가하였다. 등온흡착 결과에서와 마찬가지로 DOC 농도가 낮은 CAP 원수가 VR 원수에 비해 높은 MIB 제거율을 보였으며, PAC도 AquaNuchar가 Norit 20B에 비해 우수한 효율을 보였다.

3) 실제 흡착동역학 실험결과와 HSDM을 이용하여 구해진 흡착동역학 결과가 PAC 및 원수의 종류에 관계없이 거의 일치하였으며, 이를 바탕으로 PAC 투입량을 증가(15 mg/L)시켜 예측한 HSDM 결과도 실제 실험결과와 정확히 일치하였다.

4) 실제 2개의 정수장에서 1년 동안 정수장 운전자의 경험에 의해서 구해진 실제 PAC 투입량은 최적 PAC 투입량 예측프로그램을 이용하여 구해진 PAC 투입량과 많은 차이(과잉투입 혹은 과소투입)를 보였다. 이는 정수장 운전자가 경험에 의해서 PAC 투입량을 결정하였기 때문이며, 만약 운전자가 경험이 아닌 최적 PAC 투입량 예측프로그램을 사용하여 PAC 투입량을 결정한다면 이러한 문제는 충분히 해결될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 한국학술진흥재단의 박사후 해외연수 지원사업(M01-2004-000-10190-0)에 의하여 연구되었으며, 사업을 지원해 주신 한국학술진흥재단에 감사드립니다.

참고문헌

1. Mallevalle, J. and Suffet, I. H., "Identification and Treatment of Tastes and Odors in Drinking Water," Report of American Water Works Association Research Foundation(1987).
2. Suffet, I. H., Mallevalle, J., and Kawczynski, E., "Advances in Taste and Odor Treatment and Control," Report of American Water Works Association Research

- Foundation(1995).
3. Lalezary, S., Pirbazari, M., and McGuire, M. J., "Evaluating Activated Carbons for Removing Low Concentrations of Taste- and Odor-Producing Organics," *AWWA*, **78**(11), 76~82(1986).
 4. Najm, I. N., Snoeyink, V. L., Suidan, M. T., Lee, C. H., and Richard, Y., "Effect of Particle Size and Background Natural Organics on the Adsorption Efficiency of PAC," *AWWA*, **82**(1), 65~72(1990).
 5. Newcombe, G., Morrison, J., and Hepplewhite, C., "Simultaneous Adsorption of MIB and NOM onto Activated Carbon. I. Characterisation of the System and NOM Adsorption," *Carbon*, **40**, 2135~2146(2002).
 6. Newcombe, G., Morrison, J., Hepplewhite, C., and Knappe, D., "Simultaneous Adsorption of MIB and NOM onto Activated Carbon. II. Competitive Effects," *Carbon*, **40**, 2147~2156(2002).
 7. Simpson, M. R. and MacLeod, B. W., "Using Closed Loop Stripping and Jar Tests to Determine Powdered Activated Carbon Dose Needed for Removal of Geosmin : Manatee County's Experience," in *Proceedings of AWWA WQTC*, Orlando, FL, pp. 1101~1109(1991).
 8. Gillogly, T., Snoeyink, V. L., Newcome, G., and Elarde, J. R., "A Simplified Method to Determine the Powdered Activated Carbon Dose Required to Remove Methylisoborneol," *Water Sci. Technol.*, **40**(6), 59~64 (1999).
 9. Graham, M., Najm, I., Simpson, M., MacLeod, B., Summers, S., and Cummings, L., "Optimization of Powdered Activated Carbon Application for Geosmin and MIB Removal," Report of American Water Works Association Research Foundation(2000).
 10. 배병욱, 김영일, "Geosmin과 2-MIB 제거를 위한 분말활성탄 최적 투입량 결정," *대한환경공학회지*, **25**(8), 955~962(2003).
 11. Crittenden, J. C. and Weber, W. C. Jr., "Predictive Model for Design of Fixed-Bed Adsorbers : Parameter Estimation and Model Development," *Envir. Engr. ASCE*, **104**(2), 185~197(1978).
 12. Crittenden, J. C. and Weber, W. C. Jr., "Predictive Model for Design of Fixed-Bed Adsorbers : Single-Component Model Verification," *Envir. Engr. ASCE*, **104**(3), 433~443(1978).
 13. Crittenden, J. C. and Weber, W. C. Jr., "Model for Design of Multicomponent Adsorption Systems," *Envir. Engr. ASCE*, **104**(6), 1175~1784(1978).
 14. Gillogly, T., Snoeyink, V. L., Elarde, J. R., Wilson, C. M., and Royal, E. P., "¹⁴C-MIB Adsorption on PAC in Natural Water," *AWWA*, **90**(1), 98~108(1998).
 15. Graham, M., Summers, S., Simpson, M., and MacLeod, B., "Modeling Equilibrium Adsorption of 2-Methylisoborneol and Geosmin in Natural Waters," *Water Res.*, **34**(8), 2291~2300(2000).
 16. Cook, D., Newcombe, G., and Sztajn bok, P., "The Application of Powdered Activated Carbon for MIB and Geosmin Removal : Predicting PAC Doses in Four Raw Waters," *Water Res.*, **35**(5), 1325~1333(2001).
 17. Roy, D., Wang, G. T., and Adrin D. D., "A Simplified Solution Technique for carbon Adsorption Model," *Water Res.*, **27**(6), 1033~1041(1993).