

## 활성탄 재질과 사용연수에 따른 Geosmin과 MIB 흡착특성

이화자 · 손희중<sup>†</sup> · 이철우\* · 배상대\*\* · 강임석\*\*\*

부산광역시 상수도사업본부 수질연구소 · \*효림산업 · \*\*신라대학교 환경공학과 · \*\*\*부경대학교 환경공학과

(2007년 1월 4일 접수, 2007년 3월 22일 채택)

### Effects of Activated Carbon Types and Service Life on Removal of Odorous Compounds: Geosmin and 2-MIB

Hwa-Ja Lee · Hee-Jong Son<sup>†</sup> · Chul-Woo Lee\* · Sang-Dae Bae\*\* · Lim-Seok Kang\*\*\*

Water Quality Research Institute, Waterworks Headquarter, Busan · \*Hyorim Industries Inc

\*\*Department of Environmental Engineering, Silla University · \*\*\*Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

**ABSTRACT :** Adsorption performance of odorous compounds such as geosmin and 2-MIB on granular activated carbon were evaluated in this study. The coal-based activated carbon was found more effective than other carbons in adsorption of geosmin and 2-MIB. The wood-based virgin activated carbon was less effective than coconut- and coal-based carbon in adsorption nevertheless having larger pore volume and specific surface area than others carbons. The maximum adsorption capacity(X/M) of coal-based activated carbon for geosmin and 2-MIB was 1.2~1.9 and 2.1~2.6 times larger than coconut- and wood-based virgin activated carbon, respectively. Carbon usage rate (CUR) of coal-, coconut- and wood-based virgin activated carbons for geosmin and 2-MIB were 1.72 and 1.44 g/day, 1.72 and 2.05 g/day and 2.12 and 1.90 g/day, respectively. In the evaluation of adsorption isotherm of geosmin and 2-MIB for coal-, coconut- and wood-based virgin activated carbons, k value of 2-MIB was lower than geosmin, It means 2-MIB is more difficult to remove by activated carbon adsorption than geosmin. The relationship of max. adsorption versus total pore volume of coconut- and wood-based virgin and used activated carbon for geosmin and 2-MIB were  $y = 264,459 \times -79,047 (R^2 = 0.95)$ ,  $y = 319,650 \times -101,762 (R^2 = 0.93)$ .

**Key Words :** Activated Carbon Type, Service Life, Geosmin, 2-MIB, Adsorption, Continuous Column Adsorption Test

**요약 :** 활성탄 재질별 geosmin과 2-MIB의 최대 흡착량은 석탄계 재질의 활성탄이 가장 우수한 것으로 나타났고, 다음으로 야자계, 목탄계 활성탄 순으로 나타났으며, geosmin과 2-MIB에 대한 석탄계 활성탄의 최대 흡착량(X/M)은 신탄의 경우 야자계와 목탄계 활성탄에 비해 각각 1.2~1.9배 및 2.1~2.6배 정도 높은 것으로 조사되었다. 또한, 3.1년 사용탄의 경우는 석탄계와 목탄계 재질의 활성탄에서 높게 나타났으며, 5.9년 사용탄의 경우는 목탄계 재질의 활성탄이 석탄계 재질의 활성탄보다도 높게 나타났다. 활성탄에서의 흡착용량을 나타내는 k값의 경우 활성탄 재질별, 사용연수별 geosmin과 2-MIB에 대해 전체적으로 geosmin이 크게 나타나고 있어 활성탄 흡착공정에서 2-MIB 보다 제거가 용이한 것으로 조사되었다. 활성탄 사용율(CUR)은 석탄계 재질의 활성탄이 geosmin과 2-MIB에 대해 1.72 g/day 및 1.44 g/day, 야자계나 목탄계 활성탄의 경우는 각각 1.72와 2.05 g/day 및 2.12와 1.90 g/day의 활성탄을 사용하여야만 제거가 가능한 것으로 조사되었으며, 또한, 3.1년과 5.9년 사용탄의 경우는 목탄계 재질의 활성탄이 geosmin과 2-MIB에 대해 각각 3.13과 4.57 g/day 및 2.87과 4.14 g/day로 나타나 다른 재질의 활성탄들에 비해 적은 양으로도 geosmin과 2-MIB를 제어할 수 있는 것으로 나타났다. 석탄계와 야자계 재질의 신탄, 3.1년 및 5.9년 사용탄들에 대해 geosmin과 2-MIB의 최대 흡착량(ng/g)과 비표면적(m<sup>2</sup>/g) 및 총 세공용적(cm<sup>3</sup>/g)에 대한 상관성 조사결과, 최대 흡착량은 비표면적 보다는 총 세공용적이 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났으며, 최대 흡착량과 총 세공용적의 상관식은 geosmin의 경우는  $y = 264,459 \times -79,047 (R^2 = 0.95)$ , 2-MIB는  $y = 319,650 \times -101,762 (R^2 = 0.93)$ 으로 나타났다.

**주제어 :** 활성탄 재질, 사용연수, Geosmin, 2-MIB, 흡착, 연속 컬럼흡착 실험

## 1. 서론

수돗물 중에 존재하는 이취미 물질은 인체에 직접적인 위해성을 나타내지는 않으나 수돗물에 대한 불신을 초래하여 미국 등 선진국에서도 정수처리 공정에서 이취미 물질의 제

거에 많은 투자와 관심을 기울이고 있다.<sup>1,2)</sup> 하천수나 호수수에는 다양한 이취미 물질들이 함유되어 있지만 민원 발생 빈도와 수돗물 불신에 영향을 미치는 비중으로 보면 geosmin과 2-methylisoborneol(2-MIB)가 가장 대표적이라 할 수 있다. Geosmin과 2-MIB는 남조류나 방선균의 대사산물로 수돗물에서 매우 낮은 농도로 검출된다.<sup>1,3,4)</sup> 이들 물질의 역치농도(threshold concentration)는 개인별로 차이는 있으나 6~10 ng/L<sup>5,6)</sup> 정도로 알려져 있어 수돗물에 매우 낮은 농도로 함유되어 있어도 민원을 유발한다. 이들 이취미 물질들은 응

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: menuturk@hanmail.net

Tel: 055-323-4718

Fax: 055-323-4719

집, 침전 및 여과와 같은 재래(conventional) 정수처리공정에서는 제거능이 아주 낮은 것으로 보고되고 있다.<sup>1,7,8)</sup> 따라서 정수처리 공정에서 geosmin이나 2-MIB를 제거하기 위해서는 오존처리와 같은 산화공정이나 활성탄을 이용한 흡착공정을 이용한다.

활성탄 처리에 의한 geosmin이나 2-MIB의 제거는 주로 분말활성탄(particle activated carbon: PAC)이나 입상활성탄(granular activated carbon: GAC) 공정을 이용한다. PAC 공정은 투입이 간편하며, 유지관리가 용이한 장점 때문에 많은 정수장에서 이용되고 있다.

PAC를 이용한 이전의 연구에서는 PAC를 이용하여 등은 흡착 실험을 통한 geosmin이나 2-MIB의 흡착특성을 평가,<sup>9,10)</sup> PAC 표면의 화학적인 구조가 2-MIB의 제거율에 미치는 영향<sup>11,12)</sup> 및 수중의 천연유기물질(natural organic matter: NOM)이 geosmin이나 2-MIB 제거에 미치는 영향<sup>13)</sup>과 같은 많은 연구가 이루어졌다. 그러나 PAC 공정은 주로 정수처리 공정의 전단에서 투입하기 때문에 수중에 후단 공정에 비해 상대적으로 고농도의 유기탄소들이 존재하며, 따라서 수중에 ng/L 수준으로 존재하는 geosmin이나 2-MIB는 PAC 표면의 흡착점(adsorption site)들에 흡착되기가 유기탄소들에 비하여 상대적으로 불리하다. 또한, 정수처리 공정의 전단에서 주입되는 염소와 같은 산화제들도 PAC의 흡착능을 저하시킨다고 보고<sup>14,15)</sup>하고 있어 geosmin이나 2-MIB의 처리효율에 비해 상대적으로 처리단가가 고가이다.

국내에서 GAC 공정은 정수처리 공정의 후단에 위치하여 소독부산물 전구물질, 소독부산물 및 미량유해물질 제거용으로 이용되고 있다.<sup>16)</sup> 외국의 연구에서 이취물질 제거용으로 GAC 공정이 PAC 공정에 비해 경제적이고 처리수질 면에서도 훨씬 효과적이라고 보고하고 있다.<sup>17)</sup>

본 연구에서는 GAC 공정에서의 geosmin과 2-MIB의 제거 특성을 살펴보기 위하여 석탄계, 야자계 및 목탄계 재질의 활성탄을 신탄, 3년 및 5년 사용탄으로 사용연수별로 분류하여 각각에 대한 geosmin과 2-MIB의 흡착특성을 조사하여 이취물질 제거를 위한 GAC 공정의 기초 운전자료로 사용하고자 하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 실험 재료

#### 2.1.1. 유입수 성상

**Table 1.** Characteristics of influent water

Parameters	pH	Turbidity	Alkalinity	DOC	UV <sub>254</sub>	Temp.
	(-)	(NTU)	(mg/L)	(mg/L)	(cm <sup>-1</sup> )	(°C)
Value	7.0~7.3	0.04~0.08	31~47	0.9~1.1	0.008~0.012	4~29

유입수는 염소처리 공정이 배제된 최종처리수에 순도 99% 이상인 geosmin과 2-MIB(sigma-aldrich社)를 투입하여 유입되는 각각의 성분 농도가 500 ng/L가 되도록 하였다. 증류수가 아닌 수중에 DOC가 잔존하는 물을 유입수로 사용한 이유는 실제로 정수장에서의 활성탄 흡착조의 운전조건과 유사하게 만들기 위해서이며, 실험에 사용된 시료수의 특성을 Table 1에 나타내었다. 최종처리수의 성상은 DOC 농도가 0.9~1.1 mg/L, UV<sub>254</sub>는 0.008~0.012 cm<sup>-1</sup>로 조사되어 낙동강 원수를 정수처리하는 정수장의 활성탄 접촉속 유입수의 특성과 거의 유사하였다.

#### 2.1.2. 입상활성탄 성상

본 실험에서는 석탄계 재질(coal-based)의 활성탄(F400, Calgon), 야자계 재질(coconut-based)의 활성탄(1급, Samchully), 목탄계 재질(wood-based)의 활성탄(pica, Picabiol)을 사용연수별로 신탄 3년 및 5년 사용탄으로 선별하여 실험에 사용하였으며, 사용탄들은 낙동강 원수를 처리하는 1일 300톤 처리규모의 pilot-plant에서 사용중인 활성탄을 이용하였다. 활성탄 신탄 및 사용탄들은 실험에 들어가기 전에 증류수로 충분히 세척하여 미탄들과 이물질들을 제거한 후 실온에서 7일간 건조시킨 다음 105°C의 건조기에서 3일간 건조시켜 실험에 사용하였다. 실험에 사용된 활성탄의 세공용적과 비표면적은 활성탄 세공용적 측정기(AUTOSORB-1 MP, Quantachrome, U.S.A.)로 측정하였고, 그 밖의 일반적인 물성치 실험은 KSI 규격<sup>18)</sup>과 수처리제 기준<sup>19)</sup>에 준하여 분석하였다. Table 2에 각 활성탄들의 물성치를 나타내었으며, Fig. 1에는 활성탄 재질별 신탄에서의 세공용적 분포를 나타내었다. 신탄들의 비표면적 및 세공용적을 비교해보면 목탄계(pica)가 비표면적 1,610 m<sup>2</sup>/g으로 가장 높았고, 석탄계(F-400)가 1,050 m<sup>2</sup>/g으로 가장 낮았으며, 세공용적은 목탄계가 1.12 cm<sup>3</sup>/g으로 가장 큰 세공용적을 가졌고, 야자계(samchully)가 0.527 cm<sup>3</sup>/g으로 가장 적었다. 신탄들의 세공용적 분포는 목탄계(wood)가 20 Å 이하의 미세세공(micro pore)이 가장 높았고, 석탄계 활성탄이 가장 낮은 것으로 나타났다. 이에 반해 800 Å 정도까지의 중간세공(meso pore)의 분포를 보면 석탄계

**Table 2.** The physical characteristics of virgin and used activated carbons

Species	Case	Coal (calgon F-400)			Coconut (samchully)		Wood (pica)		
		virgin	3.1 yr	5.9 yr	virgin	3.1 yr	virgin	3.1 yr	5.9 yr
Bed volume used	(-)	0(0) <sup>a</sup>	89,600(3.1)	170,000(5.9)	0(0)	89,600(3.1)	0(0)	89,600(3.1)	170,000(5.9)
Apparent density	(g/L)	400	420	440	360	360	230	250	265
Specific surface area	(m <sup>2</sup> /g)	1,100	655	372	1,260	524	1,610	295	212
Total pore volume	(cm <sup>3</sup> /g)	0.639	0.412	0.349	0.527	0.328	1.12	0.191	0.131

<sup>a</sup> Values in parentheses indicate the operation year for which carbon was used

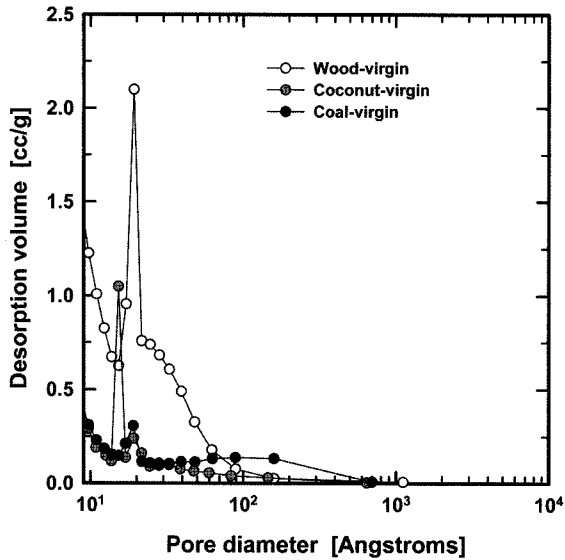


Fig. 1. Distributions of desorption volume with pore size for virgin activated carbons.

활성탄이 가장 높았으며, 야자계 활성탄이 가장 낮은 세공(pore) 분포를 나타내었다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 입상활성탄 연속 흡착

입상활성탄 연속 흡착실험은 미생물에 의한 생물분해(bio-degradation)를 방지하기 위해 4℃로 냉장보관된 geosmin과 2-MIB 희석액 조에서 정량펌프를 사용하여 32 mL/min으로 분배조(distributor)로 이송한 후 직경 20 mm인 8개의 투명 아크릴 활성탄 흡착조로 4 mL/min씩 균등하게 분배되도록 하였다. 컬럼 내 활성탄을 30 mL씩 충전하여 EBCT가 7.5 분이 되도록 조절하였고, 활성탄 흡착조는 하향류 방식으로 운전하였으며, Fig. 2에 개략적인 연속 컬럼 흡착조를 나타내었다. 활성탄 흡착조의 역세척은 2~3일에 한번 씩 하였고, 역세척 방법은 활성탄 컬럼 하부로 역세수(처리수)를 공급하여 활성탄 층이 50% 정도 팽창되도록 하였으며, 공세는 실시하지 않았다.

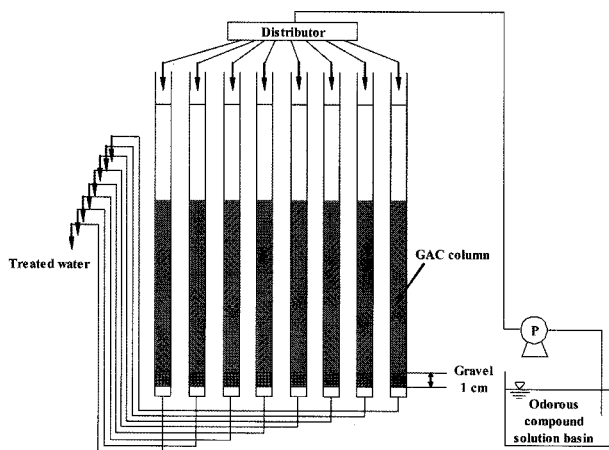


Fig. 2. Schematic diagram of continuous adsorption column.

Table 3. Analytical Conditions of the GC/MSD

GC(6890N, Agilent, U.S.A.)
- Column : HP-5MS, 30 m(L) × 0.25 mm(ID) × 0.25 μm(film thickness)
- Oven Temp. : Initial Temp. 50℃, Hold 1.6 min,
- 1st rate 20℃ to 100℃, 2nd rate 10℃ to 140℃,
3rd rate 5℃ to 160℃
MSD(5973N, Agilent, U.S.A.)
- SIM mode
- Selected ion : geosmin(111, 112, 125), 2-MIB(95, 108), IBMP
(124, 151), IPMP(137, 152), TCA(195, 210)

2.3. 분석방법

Polydimethylsiloxane(PDMS)이 코팅되어 있는 교반막대(Twister™, Gerstel, Germany)에 이취 물질을 흡착시켜 수중에서 분리하는 교반막대 흡착추출법(stir bar sorptive extraction: SBSE)을 전처리 방법으로 사용하였으며,<sup>20~22</sup> 분석은 GC/MSD로 하였다. 이취물질 전처리는 시료수 10 mL를 20 mL vial에 취한 후 길이 10 mm, 두께 3.2 mm인 교반막대(Twister)를 투입하여 1200 rpm으로 90분 동안 회전시키면서 시료수에 함유된 이취 물질을 흡착 추출한 후 수분이 제거되고 이취미 물질이 흡착되어 있는 교반막대를 auto sampler가 부착되어 있는 TDS-2 system(Gerstel, Germany)을 이용하여 280℃까지 열을 가하여 5분 동안 이취미 물질을 탈착시켰다. 탈착된 이취 물질은 GC 도입부(injector)에 설치되어 있는 CIS4 PTV(Gerstel, Germany)에서 액체질소에 의해 -120℃로 응축되어 있다가 일시에 GC/MSD로 주입되어 분석된다. GC/MSD의 분석조건을 Table 3에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 활성탄 재질별 geosmin과 2-MIB 파과특성

입상활성탄 재질별 geosmin과 2-MIB에 대한 파과곡선을 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 운전기간 동안 석탄계와 야자계 신탄에서는 파과에 도달하지 않아 bed volume(BV) 34,948까지의 유입농도와 유출농도를 가지고, 식 (1)에 나타낸 Freundlich 등온흡착식을 이용하여 X/M과 Ce를 구하였으며, 이를 회귀분석하여 k와 1/n을 구한 후, 최종적으로 파과에 도달하는 BV를 k와 1/n을 이용하여 시뮬레이션하여 도출하였다.

Fig. 3에 나타낸 geosmin의 경우 파과에 도달하는 BV는 석탄계 재질의 신탄, 3.1 및 5.9년 사용탄들이 각각 65,512(예측), 30,345 및 14,669로 나타났으며, 야자계 재질에서는 신탄 59,162(예측), 3.1년 사용탄 22,148로 나타났고, 목탄계 재질의 신탄, 3.1년 및 5.9년 사용탄에서는 각각 31,352, 22,580 및 16,683으로 조사되어 신탄과 사용탄들에서 파과에 도달하는 BV에는 많은 차이가 있음을 알 수 있었다.

Fig. 4에 나타낸 2-MIB의 경우 전체적으로 파과곡선의 형태는 geosmin의 파과곡선과 유사하게 나타나고 있고, 파과에 도달하는 BV는 석탄계 재질의 신탄, 3.1 및 5.9년 사용탄들이 각각 78,188(예측), 32,216 및 18,121로 나타났으며, 야자계 재질에서는 신탄 49,537(예측), 3.1년 사용탄 25,169로 나타났고, 목탄계 재질의 신탄, 3.1년 및 5.9년 사용탄에서는 각

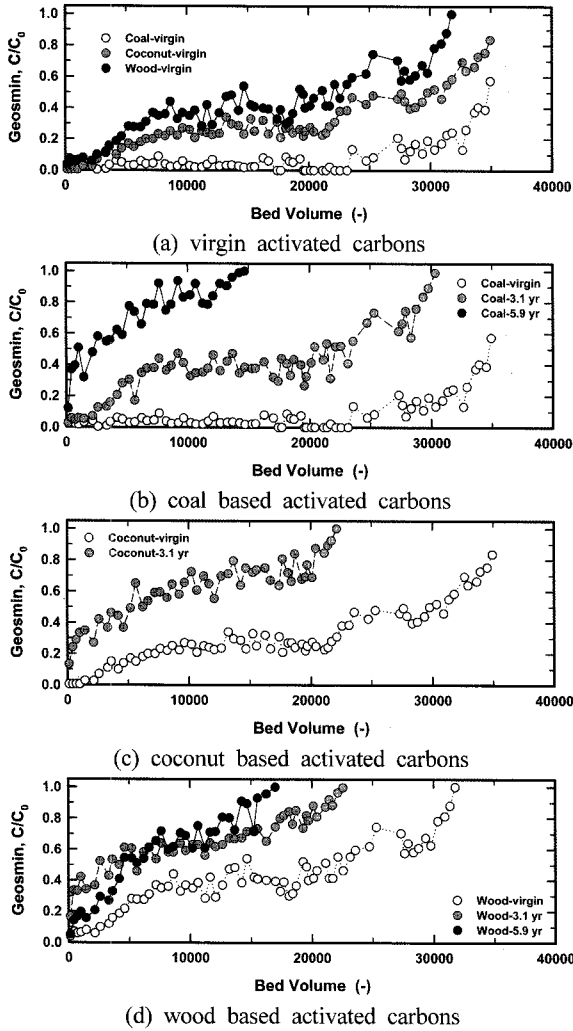


Fig. 3. Geosmin breakthrough curves for different GACs.

각 34,229, 24,593 및 18,409로 조사되어 신탄과 사용탄들에서 파과에 도달하는 BV에는 많은 차이가 있음을 알 수 있었다.

$$X/M = k \cdot C_e^{1/n} \quad (1)$$

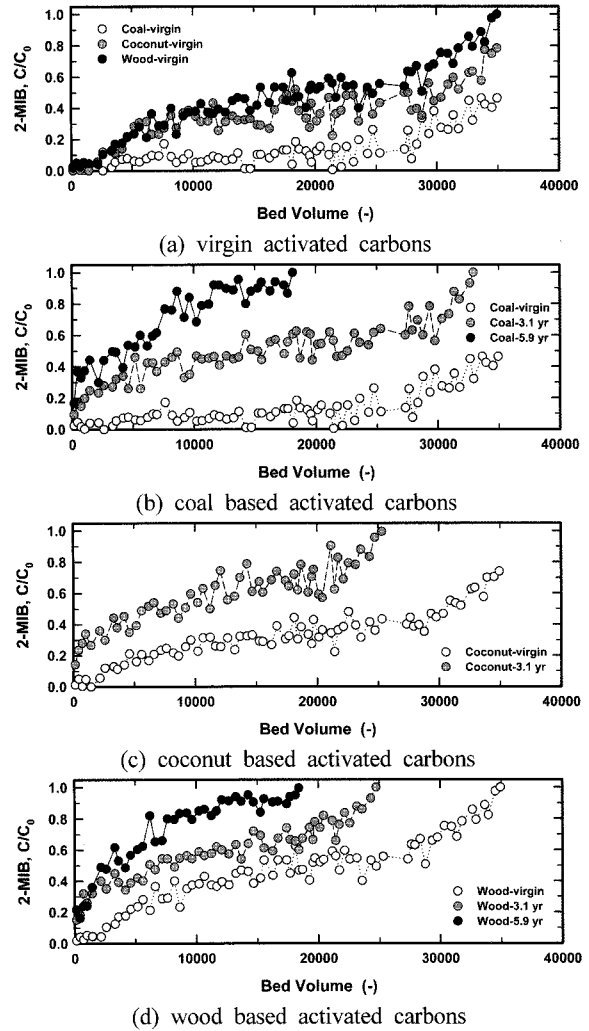


Fig. 4. 2-MIB breakthrough curves for different GACs.

X = the amount of solute adsorbed( $\mu\text{g}$ )  
 M = the weight of adsorbent(g)  
 $C_e$  = the solute equilibrium concentration( $\mu\text{g/L}$ )  
 k,  $1/n$  = constants characteristic of the system

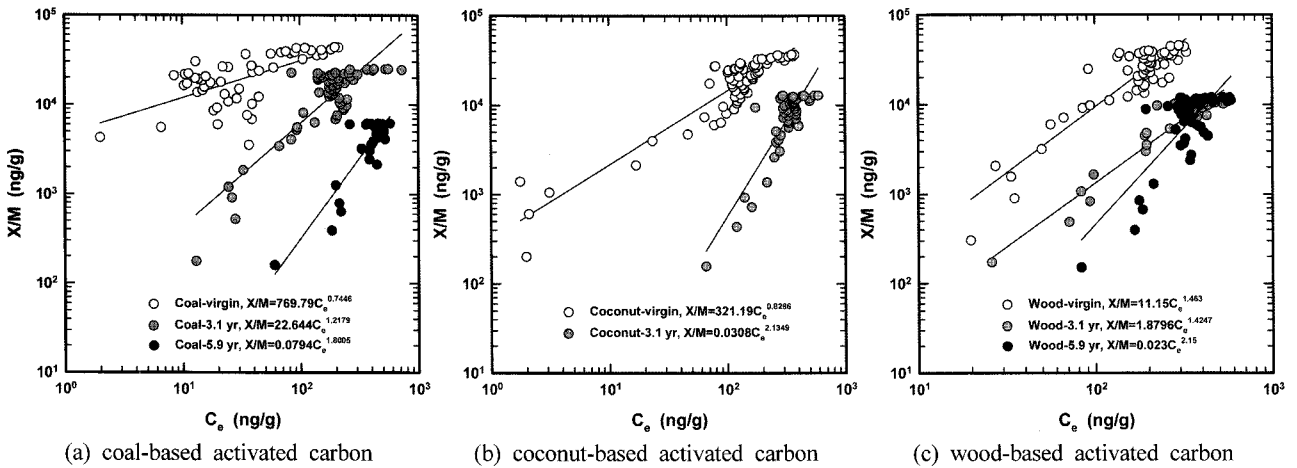


Fig. 5. Adsorption isotherm of geosmin for various GACs.

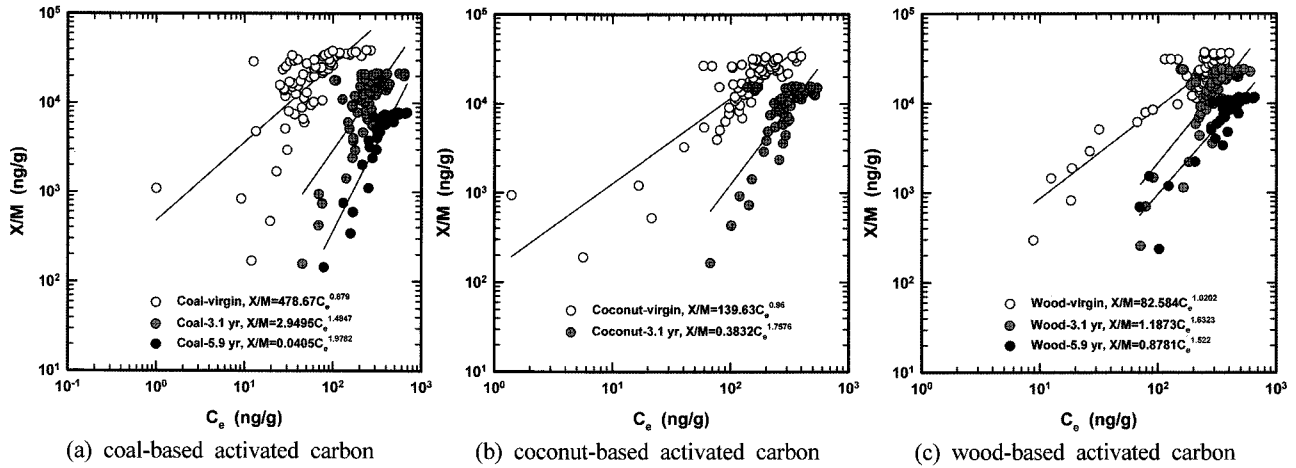


Fig. 6. Adsorption isotherm of 2-MIB for various GACs.

3.2. 임상활성탄 수명과 활성탄 사용율

Geosmin과 2-MIB에 대하여 실험에 사용된 활성탄의 흡착 용량(adsorption capacity)을 평가하기 위하여 Snoeyink의 연구<sup>23)</sup>에서 사용한 활성탄 사용율(carbon usage rate: CUR)과 활성탄 수명(bed life: Y)에 관한 식 (2), 식 (3)을 사용하였다.

$$CUR(g/day) = \frac{(C_0 - C_1)F}{(q_e)_0} \quad (2)$$

- $C_0$  = influent concentration( $\mu\text{g/L}$ )
- $C_1$  = desired effluent concentration( $\mu\text{g/L}$ )
- $F$  = volumetric flowrate of contaminated liquid treated (L/day)
- $(q_e)_0$  = amount adsorbed per unit mass of carbon at  $C_0$

$$Y(day) = (V) \cdot \rho_{GAC} \frac{(q_e)_0}{(C_0 - C_1)F} = \frac{(V) \cdot \rho_{GAC} CUR}{CUR} \quad (3)$$

- $V$  : volume of adsorber(L)
- $\rho_{GAC}$  : apparent density( $\text{g/L}$ )

식 (3)은  $C_e = C_0$ 를 가정할 때 구해지며,  $(q_e)_0$ 를 구하기 위해서 식 (1)에서 구한 geosmin과 2-MIB 각각에 대한 활성탄 종류별  $k$ 와  $1/n$ 을 적용하였다. 일반적으로 평형 흡착 실험은 분말활성탄(powder activated carbon, PAC)을 이용하여 batch식으로 수행하는 것으로 물과의 접촉면적과 흡착 시간 등의 흡착조건이 크게 바뀐 상태이고, 또한 모든 활성탄이 평형상태를 이루지 않는 실제 정수장에서 그 값의 적용은 큰 차이가 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 식 (2)를 연속칼럼에서의 파라미터를 적용하기 위하여 식 (4)로 변형하였다.<sup>24)</sup>

$$CUR(g/day) = \frac{\rho_{GAC} \cdot F}{BV_{breakthrough}} \quad (4)$$

$F$  = volumetric flowrate of contaminated liquid treated (L/day)

$BV_{breakthrough}$  : bed volumes to breakthrough [-]

UR의 계산은 식 (2), (4) 모두 사용이 가능하며,  $(q_e)_0$  또는  $BV_{breakthrough}$  값은 연속칼럼 흡착실험에서 파과 직전까지의 결과를 사용하여  $k$ 와  $1/n$ 을 도출하였고, CUR과 bed life는 파과시점의 bed volume을 이용하여 식 (4)에서 도출하였다. 또한, 파과가 일어나지 않은 활성탄의 경우는 실험 시점까지의 결과를 식 (1)에 적용하여  $k$ 와  $1/n$ , 그리고 파과시점의 bed volume을 도출하였고, 이를 식 (4)에 적용시켜 CUR과 bed life를 구하였다. 이렇게 도출된  $k$ ,  $1/n$ , CUR 및 bed life와 같은 흡착특성을 파악할 수 있는 지표들을 Table 4와 5에 나타내었다.

활성탄 g당 geosmin과 2-MIB에 대한 최대 흡착량( $X/M$ )은 석탄계 활성탄이 가장 높은 것으로 나타났으며, 다음으로 야자계와 목탄계 순으로 나타났다. 석탄계 재질 신탄의 최대 흡착량( $X/M$ )에 대한 야자계와 목탄계 재질 신탄의 최대 흡착량( $X/M$ )은 에 비해 geosmin이 각각 1.2~1.9배 정도 높은 것으로 나타났으며, 2-MIB의 경우는 2.1~2.6배 정도 높게 조사되었다. 또한, 3.1년 사용탄의 경우는 석탄계와 목탄계 재질의 활성탄에서 높게 나타났으며, 야자계 활성탄이 가장 낮게 나타났으며, 5.9년 사용탄의 경우는 목탄계 재질의 활성탄이 석탄계 재질의 활성탄보다도 높게 나타났다.

활성탄 사용율(CUR)은 석탄계 재질의 활성탄이 geosmin과 2-MIB에 대해 1.72 g/day 및 1.44 g/day, 야자계나 목탄계 활성탄의 경우는 각각 1.72와 2.05 g/day 및 2.12와 1.90 g/day의 활성탄을 사용하여야만 제거가 가능한 것으로 조사되었으며, 또한, 3.1년과 5.9년 사용탄의 경우는 목탄계 재질의 활성탄이 geosmin과 2-MIB에 대해 각각 3.13과 4.57 g/day 및 2.87과 4.14 g/day로 나타나 다른 재질의 활성탄들에 비해 적은 양으로도 geosmin과 2-MIB를 제어할 수 있는 것으로 나타났다.

활성탄에서의 흡착용량을 나타내는  $k$ 값의 경우 활성탄 재질별, 사용연수별 geosmin과 2-MIB에 대해 전체적으로 geosmin

이 크게 나타나고 있어 활성탄 흡착공정에서 2-MIB 보다 제거가 용이한 것으로 조사되었다. Chen 등<sup>25)</sup>은 분말활성탄을 이용한 등온흡착 실험을 통하여 활성탄 재질별 2-MIB의 흡착특성을 조사한 결과에서 석탄계 재질의 활성탄이 가장 우수한 흡착능을 가지며, 다음으로 야자계, 목탄계 순으로 보고하고 있어 컬럼을 이용하여 연속 흡착실험을 한 본 연구결과와 일치한다.

목탄계 재질의 신탄의 경우는 실험에 사용된 활성탄들 중에서 세공용적과 비표면적이 가장 높게 나타났으나 geosmin과 2-MIB에 대한 흡착능은 다른 재질의 신탄에 비해 낮게 나타났다. 이는 수중의 유기물질이 가지는 전하(charge)와 활성탄 세공의 표면전하와 밀접한 관련이 있는 것으로 Bjelopavlic 등<sup>26)</sup>은 목탄계 재질인 pica의 경우 수중의 pH가 4 부근에서는 활성탄 세공의 표면전하가 0 부근으로 나타나지만 수중의 pH가 증가할수록 활성탄이 가지는 음전하가 더욱 커진다고 보고하고 있으며, 야자계나 석탄계 활성탄의 경우는 수중의 pH가 산성에서는 양전하를 띠며, pH가 증가할수록 표면전하의 감소폭이 목탄계 활성탄 보다는 작아 pH 7 부근에서는 표면전하가 0 부근으로 되기 때문으로 보고하였다. 따라서, geosmin과 2-MIB 같은 유기물질들은 중성부근의 pH에서는 음전하를 띠고 있어 목탄계 재질의 활성탄에서는 활성탄 표면전하와의 수중 유기물질과의 반발력으로 인하여 흡착능이 매우 낮게 나타나는 것으로 판단되었다.

목탄계 활성탄에서의 이러한 결과는 세공을 만드는 활성화(activation) 단계에서 야자계나 석탄계 활성탄의 경우는 보통 열적 활성화(thermally activation) 단계를 거치지만 pica와 같은 목탄계 활성탄의 경우는 NaOH 또는 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 등의 탈수

보조제(dehydrating agent)를 사용하는 화학적 활성화(chemically activation) 단계를 거치는 것으로 알려져 있다.<sup>27,28)</sup> 탈수보조제는 tar의 생성을 방지하고, 활성화 온도를 낮추며, 세공의 붕괴를 방지하는 역할을 한다.<sup>29)</sup> Pendleton 등<sup>12)</sup>은 화학적 활성화 단계를 거치는 목탄계 재질의 활성탄은 열적으로 활성화시킨 활성탄에 비하여 활성탄 세공표면에 산소 관능기(oxygen(acidic) functional group) 함량이 증가하여 세공표면이 다른 활성탄들에 비해 친수성화가 일어나 2-MIB의 제거율이 낮아진다고 보고하고 있다.

그러나, 사용탄에서는 목탄계 재질의 활성탄이 다른 재질의 활성탄 보다 오히려 최대 흡착량(X/M)이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한, 목탄계 사용탄의 경우 석탄계나 야자계 재질 사용탄 보다 비표면적과 세공용적 데이터가 훨씬 낮은 값을 나타내었다. 이러한 이유로는 목탄계 신탄의 세공표면의 산소 관능기가 활성탄 사용연수의 증가로 세공표면에서 산화되어 활성탄 표면의 소수성화가 일어나 야기된 결과로 보여지며, 여기에 대한 구체적인 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

목탄계 활성탄을 제외한 석탄계와 야자계 재질의 신탄, 3.1년 및 5.9년 사용탄들에 대해 geosmin과 2-MIB의 최대 흡착량(ng/g)과 비표면적(m<sup>2</sup>/g) 및 총 세공용적(cm<sup>3</sup>/g)에 대한 상관관계를 조사한 것을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 최대 흡착량과의 상관성은 비표면적 보다는 총 세공용적이 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났다.

최대 흡착량과 총 세공용적의 상관식은 geosmin의 경우는 식 (5), 2-MIB는 식 (6)에 나타내었다. 따라서 석탄계나 야자

**Table 4.** Adsorption capacity data of geosmin in continuous column adsorption test

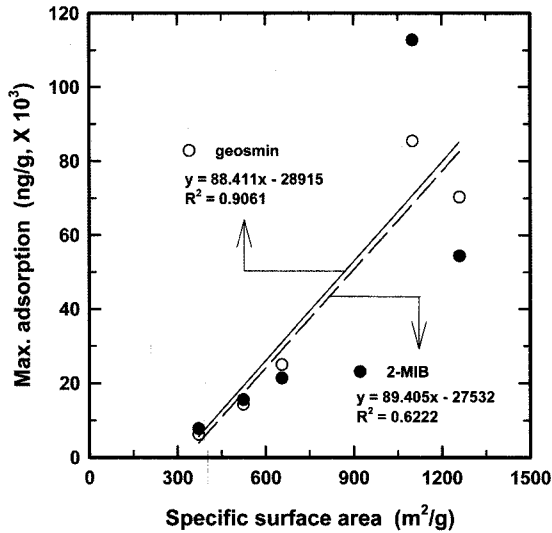
Item	Unit	Coal			Coconut		Wood		
		virgin	3.1 yr	5.9 yr	virgin	3.1 yr	virgin	3.1 yr	5.9 yr
Max. adsorption(X/M)	(ng/g)	85400*	25000	6200	70300*	14300	46100	20800	18300
BV <sub>breakthrough</sub>	(-)	65512*	30345	14669	59162*	22148	31352	22580	16683
Bed life(Y)	(day)	456*	206	102	411*	154	213	157	116
CUR	(g/day)	1.72*	4.00	8.47	1.72*	4.59	2.12	3.13	4.57
k	[(ng/g)(L/ng) <sup>1/n</sup> ]	769.79	22.644	0.0794	321.19	0.0308	11.15	1.8796	0.023
1/n	(-)	0.7446	1.2179	1.8005	0.8286	2.1349	1.463	1.4247	2.15

\* Predicted data

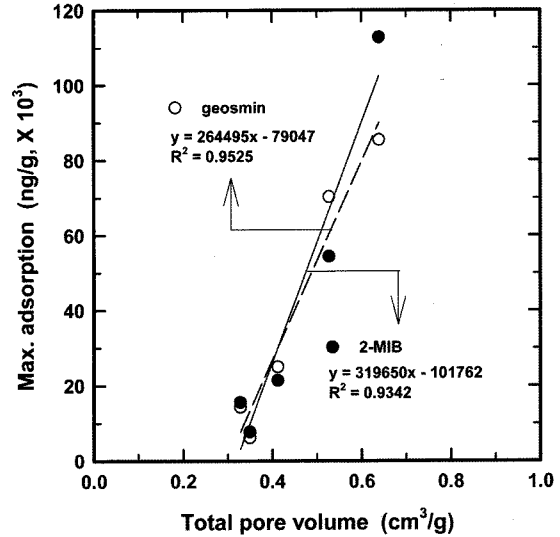
**Table 5.** Adsorption capacity data of 2-MIB in continuous column adsorption test

Item	Unit	Coal			Coconut		Wood		
		virgin	3.1 yr	5.9 yr	virgin	3.1 yr	virgin	3.1 yr	5.9 yr
Max. adsorption(X/M)	(ng/g)	112800*	21400	7800	54400*	15600	43100	23900	11700
BV <sub>breakthrough</sub>	(-)	78188*	32216	18121	49537*	25169	34229	24593	18409
Bed life(Y)	(day)	544*	228	126	345*	175	238	171	128
CUR	(g/day)	1.44*	3.62	6.85	2.05*	4.04	1.90	2.87	4.14
k	[(ng/g)(L/ng) <sup>1/n</sup> ]	478.67	2.9495	0.0405	139.63	0.3832	82.584	1.1873	0.8781
1/n	(-)	0.879	1.4847	1.9782	0.96	1.7576	1.0202	1.6323	1.522

\* Predicted data



(a) Max. adsorption vs. specific surface area



(b) Max. adsorption vs. total pore volume

Fig. 7. Max. adsorption versus surface area and total pore volume R<sup>2</sup> correlations for virgin and used coal- and coconut-based GACs.

계 재질의 활성탄 신탄이나 사용탄의 총 세공용적 값을 이용하여 geosmin과 2-MIB에 대한 최대 흡착량을 간접적으로 계산할 수 있다.

$$y = 264,459 \times -79,047 (R^2 = 0.95) \quad (5)$$

$$y = 319,650 \times -101,762 (R^2 = 0.93) \quad (6)$$

#### 4. 결론

활성탄 재질별, 사용연수별 geosmin과 2-MIB 흡착 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 활성탄 재질별 geosmin과 2-MIB의 최대 흡착량은 석탄계 재질의 활성탄이 가장 우수한 것으로 나타났고, 다음으로 야자계, 목탄계 활성탄 순으로 나타났으며, geosmin과 2-MIB에 대한 석탄계 활성탄의 최대 흡착량(X/M)은 신탄의 경우 야자계와 목탄계 활성탄에 비해 각각 1.2~1.9배 및 2.1~2.6배 정도 높은 것으로 조사되었다. 또한, 3.1년 사용탄의 경우는 석탄계와 목탄계 재질의 활성탄에서 높게 나타났으며, 5.9년 사용탄의 경우는 목탄계 재질의 활성탄이 석탄계 재질의 활성탄보다도 높게 나타났다.

2) 활성탄에서의 흡착용량을 나타내는 k값의 경우 활성탄 재질별, 사용연수별 geosmin과 2-MIB에 대해 전체적으로 geosmin이 크게 나타나고 있어 활성탄 흡착공정에서 2-MIB보다 제거가 용이한 것으로 조사되었다.

3) 활성탄 사용율(CUR)은 석탄계 재질의 활성탄이 geosmin과 2-MIB에 대해 1.72 g/day 및 1.44 g/day, 야자계나 목탄계 활성탄의 경우는 각각 1.72와 2.05 g/day 및 2.12와 1.90 g/day의 활성탄을 사용하여야만 제어가 가능한 것으로 조사되었으며, 또한, 3.1년과 5.9년 사용탄의 경우는 목탄계 재

질의 활성탄이 geosmin과 2-MIB에 대해 각각 3.13과 4.57 g/day 및 2.87과 4.14 g/day로 나타나 다른 재질의 활성탄들에 비해 적은 양으로도 geosmin과 2-MIB를 제어할 수 있는 것으로 나타났다.

4) 석탄계와 야자계 재질의 신탄, 3.1년 및 5.9년 사용탄들에 대해 geosmin과 2-MIB의 최대 흡착량(ng/g)과 비표면적(m<sup>2</sup>/g) 및 총 세공용적(cm<sup>3</sup>/g)에 대한 상관성 조사결과, 최대 흡착량은 비표면적 보다는 총 세공용적이 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났으며, 최대 흡착량과 총 세공용적의 상관성은 geosmin의 경우는  $y = 264,459 \times -79,047 (R^2 = 0.95)$ , 2-MIB는  $y = 319,650 \times -101,762 (R^2 = 0.93)$ 으로 나타났다.

#### 참고문헌

- Suffet, I. H., Mallevalle, J. and Kawczynski, E., *Advances in Taste-and-Order Treatment and Control*, AWWARF, Denver, Colorado(1995).
- Suffet, I. H., Corado, A., Chou, D., McGuire, M. J., and Butterworth, S., "AWWA taste and odor survey," *J. AWWA.*, **88**, 168~180(1996).
- Gerber, N. N. and LeChavalier, H. A., "Geosmin, an earthy-smelling substance isolated from actinomycetes," *Appl. Microbiol.*, **13**, 935(1965).
- Rosen, A. A., Mashni, C. I. and Safferman, R. S., "Recent developments in the chemistry of odor in water: the cause of earthy/musty odor," *Water Treat. Exam.*, **19**, 106(1970).
- Meng, A. K. and Suffet, I. H., "A procedure for correlation of chemical and sensory data in drinking water samples by principal component factor analysis," *Environ. Sci. Technol.*, **31**, 337~345(1997).

6. Rashash, D. M. C., Dietrich, A. M., and Hoehn, R. C., "FPA of selected odorous compounds," *J. AWWA.*, **89**, 131~141(1997).
7. Lalezary, S., Pirbazari, M., and McGuire, M. J., "Evaluating activated carbons for removing low concentrations of taste-producing and odor-producing organics," *J. AWWA.*, **78**(11), 76~82(1986).
8. Wnorowski, A. U., "Tastes and odors in the aquatic environment: a review," *Water SA.*, **18**(3), 203~214(1992).
9. 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).
10. Gillogly, T., Snoeyink, V. L., Elarde, J. R., Wilson, C. M., and Royal, E. P., "14C-MIB adsorption on PAC in natural water," *J. AWWA.*, **90**(1), 98~108(1998).
11. Considine, R., Denoyel, R., Pendleton, P., Schumann, R., and Wong, S. H., "The influence of surface chemistry on activated carbon adsorption of 2-methylisoborneol from aqueous solution," *Colloids Surfaces A.*, **179**(2~3), 271~280(2001).
12. Pendleton, P., Wong, S. H., Schumann, R., Levay, G., Denoyel, R., and Rouquero, J., "Properties of activated carbon controlling 2-Methylisoborneol adsorption," *Carbon.*, **35**(8), 1141~1149(1997).
13. Newcombe, G., Drikas, M., and Hayes, R., "Influence of characterised natural organic material on activated carbon adsorption: II. Effect on pore volume distribution and adsorption of 2-methylisoborneol," *Water Res.*, **31**(5), 1065~1073(1997).
14. Lalezary-Craig, S., Pirbazari, M., Dale, M. S., Tanaka, T. S., and McGuire, M. J., "Optimizing the removal of geosmin and 2-methylisoborneol by powdered activated carbon," *J. AWWA.*, **80**(3), 73~80(1988).
15. Gillogly, T., Snoeyink, V. L., Holthouse, A., Wilson, C. M., and Royal, E. P., "Effect of chlorine on PAC's ability to adsorb MIB," *J. AWWA.*, **90**(2), 107~114(1998).
16. 손희중, 노재순, 김상구, 배석문, 강임석, "활성탄 공정에서의 염소 소독부산물 제거특성," *대한환경공학회지.*, **27**(7), 762~770(2005).
17. Pirbazari, M., Ravindran, V., Badriyha, B. N., Craig, S., and McGuire, M. J., "GAC adsorber design protocol for the removal of off-flavors," *Water Res.*, **27**(7), 1153~1166(1993).
18. 한국표준협회, KS 활성탄 시험방법, KS M 1802(1998).
19. 환경부, 수처리제의 기준과 규격 및 표시기준, 환경부 고시 제1999-173호(1999).
20. Benanou, D., Acobas, F., Roubin, M. R., David, F., and Sandra, P., "Analysis of off-flavors in the aquatic environment by stir bar sorptive extraction-thermal desorption-capillary GC/MS olfactometry," *Anal. Bioanal. Chem.*, **376**, 69~77(2003).
21. Sandra, P., Tienport, B., Vercammen, J., Tredoux, A., Sandra, T., and David, F., "Stir bar sorptive extraction applied to the determination of dicarboximide fungicides in wine," *J. Chromatography A.*, **928**, 117~126(2001).
22. Benjits, T., Vercammen, J., Dams, R., Lambert, W., and Sandra, P., "Stir bar sorptive extraction-thermal desorption-capillary gas chromatography-mass spectrometry applied to the analysis of polychlorinated biphenyls in human sperm," *J. Chromatography B.*, **755**, 137~142(2001).
23. Snoeyink, V. L., Adsorption of organic compounds, In *Water Quality and Treatment: a Handbook of Community Water Supplies*, 4th Ed., Edited by Pontius, F. W., McGraw-Hill Inc., New York, pp. 781~855(1990).
24. Choi, K. J., Kim, S. G., Kim, C. W., and Kim, S. H., "Effects of activated carbon types and service life on removal of endocrine disrupting chemicals: amitrol, nonylphenol, and bisphenol-A," *Chemosphere.*, **58**(11), 1535~1545(2005).
25. Chen, G., Dussert, B. W., and Suffet, I. H., "Evaluation of granular activated carbons for removal of methylisoborneol to below odor threshold concentration in drinking water," *Water Res.*, **31**(5), 1155~1163(1997).
26. Bjelopavlic, M., Newcombe, G., and Hayes, R., "Adsorption of NOM onto activated carbon: effect of surface charge, ion strength and pore volume distribution," *J. Colloid and Interface Science.*, **210**, 271~280(1999).
27. Solum, M. S., Pugmire, R. J., Jagtoyen, M., and Derbyshire, F., "Evolution of carbon structure in chemically activated wood," *Carbon.*, **33**(9), 1247~1254(1995).
28. Torregrosa, R. and Martin-Martinez, J. M., "Activation of lignocellulosic materials: a comparison between chemical, physical and combined activation in terms of porous structure," *Fuel.*, **70**, 1173(1991).
29. Wigman, T., "Industrial aspects of production and use of activated carbons," *Carbon.*, **27**(1), 13(1989).