

ORIGINAL ARTICLE

## 활성탄 흡착공정에서의 요오드계 트리할로메탄 흡착 특성

손희종\* · 염훈식 · 김경아 · 송미정 · 류동춘

부산광역시 상수도사업본부 수질연구소

### Adsorption Characteristics of Iodo-Trihalomethanes (I-THMs) in Granular Activated Carbon (GAC) Adsorption Process

Hee-Jong Son\*, Hoon-Sik Yoom, Kyung-A Kim, Mi-Jung Song, Dong-Choon Ryu,

Water Quality Institute, Busan Water Authority, Gimhae 621-813, Korea

#### Abstract

This study accessed the adsorption characteristics of the 9 trihalomethanes (THMs) on coal-based granular activated carbon (GAC). The breakthrough appeared first for  $\text{CHCl}_3$  and sequentially for  $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ ,  $\text{CHBr}_3$ ,  $\text{CHCl}_2\text{I}$ ,  $\text{CHBrClI}$ ,  $\text{CHBr}_2\text{I}$ ,  $\text{CHClI}_2$ ,  $\text{CHBrI}_2$ , and  $\text{CHI}_3$ . The maximum adsorption capacity (X/M) for the 9 THMs with apparent breakthrough points ranged from 1,175  $\mu\text{g/g}$  (for  $\text{CHCl}_3$ ) to 11,087  $\mu\text{g/g}$  (for  $\text{CHI}_3$ ). Carbon usage rate (CUR) for  $\text{CHCl}_3$  was 0.149 g/day, 5.5 times higher than for  $\text{CHI}_3$  (0.027 g/day).

**Key words** : Iodo-Trihalomethanes (I-THMs), Disinfection By-Products (DBPs), Granualr Activated Carbon (GAC), Adsorption.

#### 1. 서 론

정수처리 공정에서 소독 및 살균의 목적으로 사용되는 염소는 발암성 및 돌연변이성을 나타내는 다양한 소독부산물들을 생성시킨다. 특히, 트리할로메탄류(trihalo-methanes, THMs)는 할로아세트익에시드류(haloacetic acids, HAAs)나 할로아세토니트릴류(haloacetonitriles, HANs)에 비해 비교적 높은 농도로 생성되며, 이들은 활성탄 흡착이나 생물분해와 같은 정수처리 공정에서 쉽게 제거하기 어려운 물질들이다(Son 등, 2005).

최근에는 요오드계 THMs (I-THMs)에 대한 관심이 고조되고 있다. I-THMs는 요오드 이온( $\text{I}^-$ )이 함유된 물

을 염소 또는 오존처리시 생성이 되며(Bichsel과 von Gunten, 2000; Hua 등, 2006), 염소계나 브롬계 THMs 보다 생체독성과 발암성이 강한 것으로 알려져 있다(Plewa 등, 2004; Richardson 등, 2008). 특히, iodoform 이 함유된 물은 심한 약품취를 유발하여 먹는물에 대한 불신을 초래한다(Hansson 등, 1987). I-THMs의 역취농도 범위는 물질별로 0.03~8.9  $\mu\text{g/L}$  정도로 알려져 있으며, iodoform의 역취농도가 가장 낮아서 미량의 iodoform이 함유된 물에서도 약품취를 유발한다(Cancho 등, 2001).

I-THMs의 생성기작은 수중의 요오드 이온( $\text{I}^-$ )이 염소나 오존과 같은 산화제와 중성 pH 부근에서 반응하면

Received 13 November, 2014; Revised 10 December, 2014;  
Accepted 15 December, 2014

\*Corresponding author : Hee-Jong Son, Water Quality Institute, Busan Water Authority, Gimhae 621-813, Korea  
Phone: ???  
E-mail: ???

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

hypoiodous (HOI)가 생성되며, 생성된 HOI는 수중에 존재하는 천연유기물질(natural organic matter, NOM) 등과 같은 유기물질과 반응하여 I-THMs와 같은 요오드계 소독부산물을 생성한다(Bichsel과 von Gunten, 2000). 특히, I-THMs의 경우는 암모니아성 질소가 존재하는 물에 염소소독을 할 경우 클로라민이 생성되어 I-THMs의 생성농도가 급격히 증가하는 것으로 알려져 있으며(Hua와 Reckhow, 2007; Krasner 등, 2006), 수중의 요오드 이온농도가 0.4 µg/L 이상에서 I-THMs가 발생하는 것으로 보고되었다(Richardson 등, 2008).

최근에는 분석기술의 발달로 인해 수돗물에서의 I-THMs 검출에 대한 연구결과들이 증가하고 있으며, 영국의 수돗물에서 두 종( $\text{CHCl}_2\text{I}$ 와  $\text{CHBrClI}$ )의 I-THMs에 대해 모니터링한 연구결과에서는 하절기에 가장 높은 3.7 µg/L로 검출되었다고 보고하고 있으며(Goslan 등, 2009), 미국의 경우는 I-THMs 6종에 대해 최대 검출농도가 19 µg/L로 보고되었다(Krasner 등, 2006).

THMs류들은 저분자 난분해성 물질들이기 때문에 응집-침전-여과공정과 같은 재래식(conventional) 정수처리공정에서는 제거가 어렵다(Son 등, 2005). 따라서 고도(advanced) 정수처리공정의 일종인 입상활성탄(granular activated carbon, GAC) 흡착이 정수처리 공정에서의 유일한 THMs류들의 제거 메커니즘으로 보고되고 있다(Son 등, 2005).

본 연구에서는 GAC 흡착공정에서 6종의 I-THMs류의 흡착 특성을 평가하기 위해 실험실 스케일의 활성탄 흡착컬럼을 이용하여 정수장과 동일한 수질 및 운전조건

에서 활성탄의 최대흡착량(X/M)과 활성탄 사용율(carbon usage rate, CUR) 등을 구하였으며, 법적으로 규제대상인 4종의 THMs (regulated-THMs, R-THMs)과 6종의 I-THMs와의 흡착 특성도 함께 비교하여 정수장의 활성탄 흡착공정의 설계 및 운전에 기초자료로 활용하고자 하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 실험재료

#### 2.1.1. I-THMs 및 활성탄

실험에 사용된 I-THMs 6종은 iodoform ( $\text{CHI}_3$ ), bromodiiodomethane ( $\text{CHBrI}_2$ ), bromochloriodomethane ( $\text{CHBrClI}$ ), chlorodiiodomethane ( $\text{CHClI}_2$ ), dibromiodomethane ( $\text{CHBr}_2\text{I}$ ) 및 dichloriodomethane ( $\text{CHCl}_2\text{I}$ )은 Orchid Cellmark사(Canada)에서 구입하였다. 또한, 법적으로 규제되는 THMs (regulated THMs, R-THMs)와 I-THMs와의 활성탄에서의 흡착능을 비교·평가하기 위하여 chloroform ( $\text{CHCl}_3$ ), dibromochloromethane ( $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ ) 및 bromoform ( $\text{CHBr}_3$ )을 Sigma-Aldrich사(USA)에서 구입하여 실험에 사용하였다.

I-THMs 6종과 R-THMs 3종의 흡착실험에 사용된 활성탄은 석탄계 재질의 F-400 (Calgon, USA) 신탄을 사용하였다. 실험에 사용된 F-400의 비표면적(specific surface area)은 1070 m<sup>2</sup>/g이었으며, 총 세공용적(total pore volume)은 0.61 cm<sup>3</sup>/g이었다.

**Table 1.** Physico-chemical properties of 9 THMs

Compound	CAS No.	M.W.	log $K_{ow}$
$\text{CHCl}_3$	67-66-3	119.4	1.97 <sup>a</sup>
$\text{CHBr}_2\text{Cl}$	124-48-1	208.3	2.23 <sup>b</sup>
$\text{CHBr}_3$	75-25-2	252.7	2.37 <sup>b</sup>
$\text{CHCl}_2\text{I}$	594-04-7	210.8	2.78 <sup>c</sup>
$\text{CHBrClI}$	34970-00-8	254	2.99 <sup>c</sup>
$\text{CHBr}_2\text{I}$	593-94-2	299.7	3.20 <sup>c</sup>
$\text{CHClI}_2$	638-73-3	302.3	3.31 <sup>c</sup>
$\text{CHBrI}_2$	557-95-9	346.7	3.52 <sup>c</sup>
$\text{CHI}_3$	75-47-8	393.7	3.83 <sup>c</sup>

<sup>a</sup> WHO, 2004; <sup>b</sup> US EPA, 2005; <sup>c</sup> Cancho et al., 2001

**Table 2.** Characteristics of influent water

Parameter	pH (-)	Turbidity (NTU)	DOC (mg/L)	Temp. (°C)
Value	6.7-7.5	0.04~0.08	1.24~1.52	13~24

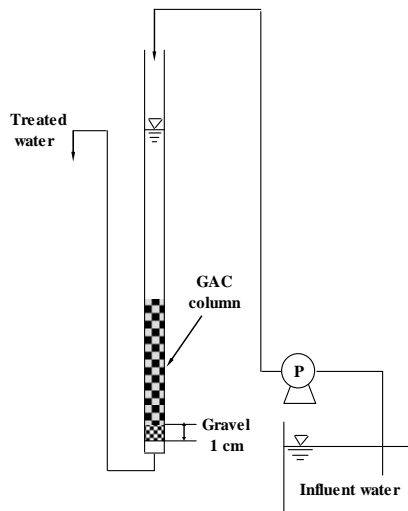
### 2.1.2. 유입수

유입수는 전염소 처리가 배제된 300 m<sup>3</sup>/일 처리규모의 파일롯트 플랜트의 후오존 처리수를 사용하였으며, 후오존 처리수에 9종의 THMs를 각각 80 µg/L의 농도로 희석하여 실험에 사용하였다. 후오존 처리수를 유입수로 사용한 이유는 실제 정수장의 활성탄 흡착지와 동일한 수질 조건을 만들기 위해서이며, 실험기간 동안 유입수로 사용된 후오존 처리수의 성상을 Table 2에 나타내었다.

## 2.2. 실험방법

### 2.2.1. 흡착컬럼의 운전

실험에 사용된 흡착컬럼은 내경 20 mm의 아크릴 재질로 컬럼 내부에 활성탄 신탄을 40 mL 충전한 후 정량 펌프로 흡착컬럼으로 유입되는 유량을 4 mL/min으로 조절하여 공탑 체류시간(empty bed contact time, EBCT)이 10분이 되도록 운전하였다. 또한, 수류흐름은 하향류식으로 운전하였고, 역세척은 주 1회 실시하였다. 흡착컬럼 세트의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다.

**Fig. 1.** Schematic diagram of adsorption column system.

### 2.2.2. I-THMs 분석(Son 등, 2014)

I-THMs 6종을 포함한 9종의 THMs 분석은 headspace (HS) 전처리 장치(7697A headspace sampler, Agilent, USA)가 부착된 GC/ECD (7890A, Agilent, USA)를 사용하였으며, 9종의 THMs 분석을 위한 기본적인 GC/ECD 조건을 Table 3에 나타내었다. 실험에 사용된 GC/ECD에 장착된 컬럼은 HP-5MS (Agilent, 30 m (L) × 0.25 mm (ID) × 0.25 µm (film thickness))를 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 9종의 THMs 파과 특성

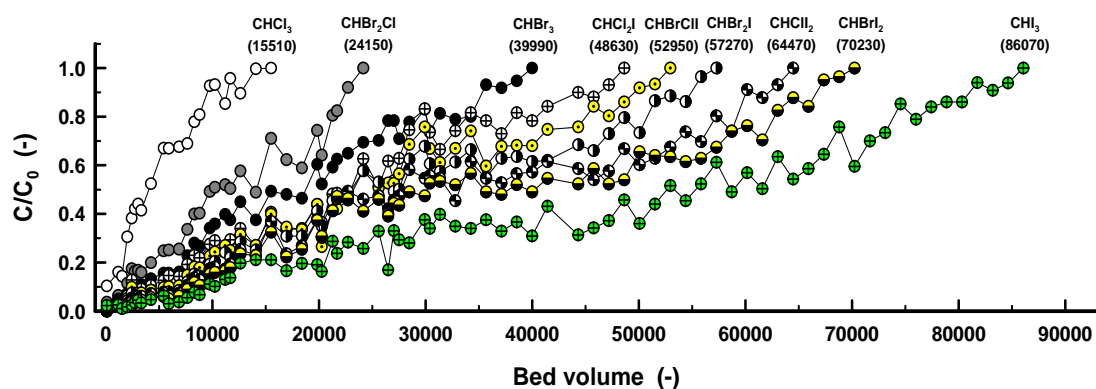
석탄계 재질의 신탄(F-400)에서의 THMs 9에 대한 파과 특성을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 CHCl<sub>3</sub>의 경우는 bed volume (BV) 15510 부근에서 파과(breakthrough)에 도달하였고, 다음으로 CHBr<sub>2</sub>Cl의 파과시점은 BV 24150 부근으로 나타났으며, CHBr<sub>3</sub>가 BV 39990, CHCl<sub>2</sub>I가 BV 48630, CHBrClI가 BV 52950, CHBr<sub>2</sub>I가 BV 57270, CHClI<sub>2</sub>가 BV 64470, CHBrI<sub>2</sub>가 BV 70230 및 CHI<sub>3</sub>가 BV 86070 부근에서 파과에 도달하였다. CHCl<sub>3</sub>, CHBr<sub>3</sub> 및 CHI<sub>3</sub>의 파과에 도달하는 BV (BV<sub>breakthrough</sub>)를 비교해 보면 파과에 도달하는 순서는 CHCl<sub>3</sub>, CHBr<sub>3</sub>, CHI<sub>3</sub> 순으로 나타나 THMs를 구성하는 할로젠족 원소가 요오드일 때가 가장 늦은 BV<sub>breakthrough</sub>를 나타내었으며, 다음으로 브롬, 염소 순으로 나타났다. 또한, 9종의 THMs에 대해 파과에 도달한 운전일수(Bed life)를 Table 4에 나타내었다.

### 3.2. 9종의 THMs 흡착능 평가

석탄계 재질의 GAC 신탄(F-400)에서의 9종의 THMs에 대한 흡착능을 평가하기 위하여 THMs 9종에 대한 파과시점(BV)까지의 유입농도와 유출농도를 이용하여 식 (1)에 나타난 Freundlich 등온흡착식을 이용하여 X/M과 Ce를 구하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었고, 이를 회

**Table 3.** Analytical conditions of the headspace sampler and GC-ECD

Headspace sampler					
Vial size	20 mL (sample volume: 13 mL)				
Oven (vial equilibration) temp.	85 °C (loop temp. = 95 °C, transfer line temp. = 105 °C)				
Vial equilibration time	45 min.				
Shaking mode	100 shakes/min.				
GC-ECD					
Injection volume	Headspace loop volume = 3 mL, (split ratio = 2:1)				
Inlet temp.	250 °C				
Column flow	0.6 mL/min (constant)				
Oven temp.		Rate (°C/min)	Value (°C)	Hold time (min.)	Run time (min.)
	Initial	-	40	2	2
	Ramp 1	10	80	4	10
	Ramp 2	10	100	4	16
	Ramp 3	10	220	1	29
	Ramp 4	50	300	3	33.6
	Post run	-	310	2	35.6

**Fig. 2.** Breakthrough curves of 9 THMs for coal-based GAC.**Table 4.** BV<sub>breakthrough</sub> and bed life for 9 THMs for coal-based GAC

Item	Unit	R-THMs			I-THMs					
		CHCl <sub>3</sub>	CHBrCl <sub>2</sub>	CHBr <sub>3</sub>	CHCl <sub>2</sub> I	CHBrClI	CHBr <sub>2</sub> I	CHClI <sub>2</sub>	CHBrI <sub>2</sub>	CHI <sub>3</sub>
BV <sub>breakthrough</sub>	(-)	15,510	24,150	39,990	48,630	52,950	57,270	64,470	70,230	86,070
Bed life(Y)	(day)	108	168	278	338	368	398	448	488	598

귀분석하여  $k$ 와  $1/n$ 을 구하였다. Fig. 3에는 THMs 9종 중  $\text{CHCl}_3$ ,  $\text{CHBr}_3$ ,  $\text{CHBr}_2\text{I}$  및  $\text{CHI}_3$  종만 나타내었다.

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

$X$  = 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

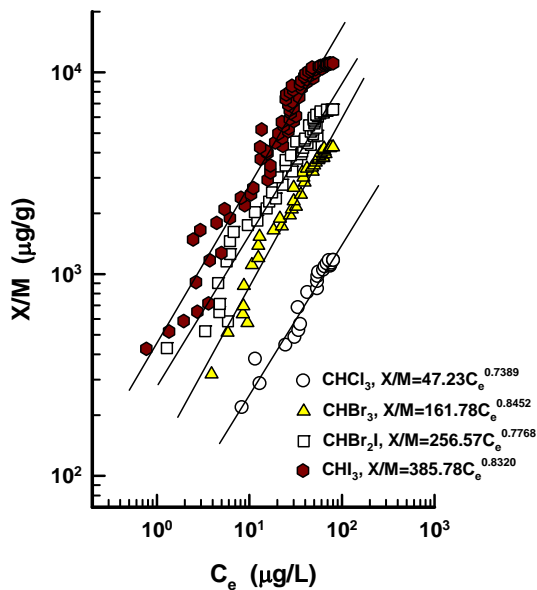


Fig. 3. Adsorption isotherm of 4 THMs for coal-based GAC.

9종의 THMs에 대하여 실험에 사용된 석탄계 신탄의 흡착용량(adsorption capacity)을 평가하기 위하여 Snoeyink 등(1990)이 사용한 활성탄 사용율(carbon usage rate: CUR)과 활성탄 수명(bed life: Y)에 관한 식 (2)와 식 (3)을 사용하였다.

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

$C_e$  = equilibrium concentration ( $\mu\text{g/L}$ )

$C_0$  = 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  $C_0$

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

$V$  = volume of adsorber (L)

$\rho_{GAC}$  = apparent density (g/L)

식 (3)은  $C_e=C_0$ 를 가정할 때 구해지며,  $(q_e)_0$ 를 구하기 위해서 식 (1)에서 구한 9종의 THMs 각각에 대한 석탄계 재질 신탄의  $k$ 와  $1/n$ 을 적용하였다. 일반적으로 평형 흡착실험은 분말활성탄(powder activated carbon, PAC)을 이용하여 batch식으로 수행하지만 이러한 조건은 실제 정수장의 활성탄 흡착조에서 활성탄과 물과의 접촉면적과 흡착시간과 같은 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 연속 흡착칼럼에서의 파라미터를 적용하기 위하여 식 (4)로 변형하였다(Choi 등, 2005).

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

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

$BV_{\text{breakthrough}}$  = bed volumes to breakthrough ([-])

CUR의 계산은 식(2)와 식 (4) 모두 사용이 가능하며,  $(q_e)_0$  또는  $BV_{\text{breakthrough}}$  값은 연속 흡착칼럼 실험에서 파과 직전까지의 결과를 사용하여  $k$ 와  $1/n$ 을 도출하였고, CUR과 bed life는 파과시점의 BV를 이용하여 식 (4)에서 도출하였다. 이렇게 도출된 최대흡착량( $X/M$ ), 활성탄 사용율(CUR),  $k$  및  $1/n$ 과 같은 흡착특성을 파악할 수 있는 지표들을 Table 5에 나타내었다.

석탄계 재질의 신탄에서 9종의 THMs에 대한 최대흡착량( $X/M$ )은  $\text{CHCl}_3$ 가 1,175  $\mu\text{g/g}$ 으로 가장 낮게 나타났으며,  $\text{CHI}_3$ 가 11,087  $\mu\text{g/g}$ 으로 가장 높게 나타났다. 따라서  $\text{CHI}_3$ 의 경우는  $\text{CHCl}_3$ 에 비해 석탄계 재질 활성탄의 단위 g당 흡착량( $X/M$ )이 약 9.4배 정도 높았으

**Table 5.** Adsorption capacity data of 9 THMs for coal-based GACs

Item	Unit	R-THMs			I-THMs					
		CHCl <sub>3</sub>	CHBrCl <sub>2</sub>	CHBr <sub>3</sub>	CHCl <sub>2</sub> I	CHBrClI	CHBr <sub>2</sub> I	CHClI <sub>2</sub>	CHBrI <sub>2</sub>	CHI <sub>3</sub>
Max. adsorption (X/M)	( $\mu\text{g/g}$ )	1,175	2,899	4,263	5,269	5,936	6,546	7,614	8,276	11,087
CUR	(g/day)	0.149	0.095	0.058	0.047	0.044	0.040	0.036	0.033	0.027
k	( $\mu\text{g/g}$ )(L/ $\mu\text{g}$ ) <sup>1/n</sup>	47.23	102.37	161.78	169.66	208.90	256.57	284.14	333.29	385.78
1/n	(-)	0.7389	0.8006	0.8452	0.8261	0.9472	0.7768	0.7884	0.7679	0.8320

며, CHBr<sub>3</sub>에 비해서는 약 2.6배 정도 높은 것으로 조사되었다.

석탄계 재질의 신탄에서 9종의 THMs에 대한 활성탄 사용율(CUR)은 CHCl<sub>3</sub>가 0.149 g/day로 나타났으며, CHI<sub>3</sub>의 경우는 0.027 g/day로 나타났으며, 본 실험에 사용된 흡착컬럼을 10,000 m<sup>3</sup>/day 처리용량 정수장의 활성탄 흡착지로 가정하였을 경우 CHCl<sub>3</sub>가 0.259 톤/일의 CUR을 나타내었으며, CHI<sub>3</sub>의 CUR은 0.047 톤/일로 나타났다.

Table 5에서 볼 수 있듯이 본 실험에 사용된 9종의 THMs의 최대 흡착량(X/M)을 조사한 결과, 앞에서도 언급한 바와 같이 THMs 구성원소들 중 할로젠 원소가 Cl 보다는 Br, Br 보다는 I의 구성비율이 높을수록 최대 흡착량(X/M)이 큰 것으로 나타났다. CHCl<sub>3</sub>, CHBr<sub>3</sub> 및 CHI<sub>3</sub>의 최대 흡착량(X/M)을 비교해 보면 각각 1,175  $\mu\text{g/g}$ , 4,263  $\mu\text{g/g}$  및 11,087  $\mu\text{g/g}$ 으로 나타나 CHBr<sub>3</sub>와 CHI<sub>3</sub>의 최대 흡착량(X/M)은 CHCl<sub>3</sub>에 비해 각각 3.6배 및 9.4배 정도 큰 것으로 조사되었다.

#### 4. 결론

석탄계 재질의 입상활성탄 신탄을 이용하여 9종의 THMs에 대한 연속 흡착컬럼 실험을 수행하여 흡착 특성을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 입상활성탄 흡착공정에서의 THMs 9종의 파과 도달 순서는 CHCl<sub>3</sub>, CHBrCl<sub>2</sub>, CHBr<sub>3</sub>, CHCl<sub>2</sub>I, CHBrClI, CHBr<sub>2</sub>I, CHClI<sub>2</sub>, CHBrI<sub>2</sub>, CHI<sub>3</sub> 순으로 나타났다.

2. THMs 9종의 최대 흡착량(X/M)은 CHCl<sub>3</sub>가 1,175  $\mu\text{g/g}$ 으로 가장 낮게 나타났으며, CHI<sub>3</sub>가 11,087  $\mu\text{g/g}$ 으로 가장 높은 최대 흡착량(X/M)을 나타내었다.

3. 활성탄 사용율(CUR)은 CHCl<sub>3</sub>가 0.149 g/day로 나타나 CHBr<sub>3</sub>와 CHI<sub>3</sub>의 0.058 g/day와 0.027 g/day에

비해 활성탄 사용율이 각각 2.6배 및 5.5배 정도 높은 것으로 나타났다.

#### REFERENCE

- Bichsel, Y., von Gunten, U., 2000, Formation of iodo-trihalomethanes during disinfection and oxidation of iodide containing waters, Environ. Sci. Technol., 34, 2784-2791.
- Cancho, B., Fabrellas, C., Diaz, A., Ventura, F., 2001, Determination of the odor threshold concentrations of iodinated thalomes in drinking water, J. Agric. Food Chem., 49, 1881-1884.
- Choi, K. J., Kim, S. G., Kim, C. W., Kim, S. H., 2005, Effects of activated carbon types and services life on removal of endocrine disrupting chemicals: amitrol, nonylphenol, and bisphenol-A, Chemosphere, 58(11), 1535-1545.
- Goslan, E. H., Krasner, S. W., Bower, M., Rocks, S. A., Holmes, P., Levy, L., Parsons, S. A., 2009, A comparison of disinfection by-products found in chlorinated and chloraminated drinking water in Scotland, Water Res., 43, 4698-4706.
- Hansson, R. C., Henderson, M. J., Jack, P., Taylor, R. D., 1987, Iodoform taste complaints in chloramination, Water Res., 21(10), 1265-1271.
- Hua, G., Reckhow, D. A., 2007, DBP formation during chlorination and chloramination: effect of reaction time, pH, dosage, and temperature, J. AWWA, 100, 82-95.
- Hua, G., Reckhow, D. A., Kim, J., 2006, Effect of bromide and iodide ions on the formation and speciation of disinfection by-products during chlorination, Environ. Sci. Technol., 40, 3050-3056.
- Krasner, S. W., Weinberg, H. S., Richardson, S. D.,

- Pastor, S. J., Chinn, R., Scilimenti, M. J., Onstad, G. D., Thruston, A. D., 2006, Occurrence of new generation of disinfection by-products, *Environ. Sci. Technol.*, 40, 7175-7185.
- Plewa, M. J., Wagner, E. D., Richardson, S. D., Thruston, A. D., Woo, Y. T., McKague, A. B., 2004, Chemical and biological characterization of newly discovered iodoacetic drinking water disinfection by-products, *Environ. Sci. Technol.*, 38, 4713-4722.
- Richardson, S. D., Fasano, F., Ellington, J. J., Crumley, G. F., Buettner, K. M., Evans, J. J., Blount, B. C., Silva, L. K., Waite, T. J., Luther, G. W., McKague, B. A., Miltner, R. J., Wagner, E. D., Plewa, M. J., 2008, Occurrence and mammalian cell toxicity of iodinated disinfection by-products in drinking water, *Environ. Sci. Technol.*, 42, 8330-8338.
- Snoeyink, V. L., 1990, Adsorption of organic compounds, In *Water Quality and Treatment: a Handbook of Community Water Supplies*, 4<sup>th</sup> Ed., Edited by Pontius, F. W., McGraw-Hill Inc., New York, pp. 781-855.
- Son, H. J., Roh, J. S., Kim, S. G., Bae, S. M., Kang, L. S., 2005, Removal characteristics of chlorination disinfection by-products by activated carbons, *J. Kor. Soc. Envir. Eng.*, 27(7), 762-770.
- Son, H. J., Song, M. J., Kim, K. A., Yoom, H. S. Choi, J. T., 2014, Analysis of trace levels of Iodinated trihalomethanes in water using headspace-GC/ECD, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, 36(1), 35-41.
- US EPA, 2005, Drinking Water Criteria Document for Brominated Trihalomethanes, EPA-882-R-05-011, Washing, D.C.
- WHO, 2004, Chloroform, Geneva.