

다양한 재질의 활성탄을 이용한 GAC 공정에서의 브로메이트 제거 특성

The Removal Characteristics of Bromate using Various Materials in GAC Process

손희종[†] · 최영익* · 정철우** · 박진식*** · 장성호****

Hee-Jong Son[†] · Young-Ik Choi* · Chul-Woo Jung** · Jin-Sik Park*** · Seong-Ho Jang****

부산광역시 상수도사업본부 수질연구소 · *동아대학교 환경공학과 · **울산산업진흥TP 전략산업기획단
경운대학교 보건환경학과 · *부산대학교 지역환경시스템공학과

Water Quality Institute, Water Authority, Busan · *Department of Environmental Engineering, Dong-A University

**Ulsan Regional Innovation Agency, Ulsan Industry Promotion Techno Park

***Department of Health and Environment, Kyung Woon University ·

****Department of Environment System Engineering, Busan University

(2009년 6월 10일 접수, 2009년 8월 7일 채택)

ABSTRACT : This research was performed by means of several different virgin granular activated carbons (GAC) made of each coal, coconut and wood, and the GACs were investigated for an adsorption performance of bromate in a continuous adsorption column. Breakthrough behavior was investigated that the breakthrough points of the virgin two coals-, coconut- and wood-based GACs were observed as 9252 bed volume (BV), 6821 BV, 5291 BV and 2431 BV, respectively. The experimental results of adsorption capacity (X/M) for bromate showed that two coal- based GACs were highest (1334.5 and 798.2 $\mu\text{g/g}$), the coconut-based GAC was intermediate (668.6 $\mu\text{g/g}$) and the wood-based GAC was lowest (156.8 $\mu\text{g/g}$). The X/M of the coal-based GACs was 2~8.5 times higher than the X/M of the coconut-based and wood-based GACs. The results of carbon usage rates (CURs) for the virgin two coal-, coconut- and wood-based GACs were shown as 0.19, 0.25, 0.33 and 0.71 g/day respectively. The adsorption capacity, k values, were also investigated by means of the GACs for bromate. The k values of two coal-, coconut- and wood- based GACs for bromate were found to be 121.3, 76.7, 43.3 and 14.6 respectively. This results suggested that using the virgin GAC made of coal was the best selection for removal of bromate in the water treatment for an advanced treatment.

Key words : Bromate, Granular Activated Carbon, Reduction, Functional Group

요약 : 본 연구에서는 다양한 재질의 입상활성탄들을 이용하여 연속흡착실험에서 BrO_3^- 의 파과특성을 조사하였다. 활성탄 재질별 파과시점은 석탄계 재질의 활성탄들이 가장 늦게 파과에 도달하였으며, 다음으로 야자계와 목탄계 재질의 활성탄으로 나타났다. 활성탄 g당 BrO_3^- 에 대한 최대 흡착량(X/M)은 석탄계 재질의 활성탄들이 각각 1334.5 $\mu\text{g/g}$ 및 798.2 $\mu\text{g/g}$ 으로 가장 컸으며, 야자계 668.6 $\mu\text{g/g}$, 목탄계 156.8 $\mu\text{g/g}$ 으로 나타났고, 석탄계 활성탄들이 야자계와 목탄계에 비하여 최대 흡착량이 약 2.0배~8.5배 정도 큰 것으로 조사되었다. BrO_3^- 에 대한 CUR은 석탄계 재질의 활성탄들이 각각 0.19 g/day과 0.25 g/day, 야자계와 목탄계가 각각 0.33 g/day과 0.71 g/day로 나타났다. 활성탄의 흡착용량을 나타내는 k 값의 경우 석탄계 재질의 활성탄들이 각각 121.3과 76.7로 나타나 야자계와 목탄계의 43.3과 14.6에 비하여 석탄계 활성탄들이 월등히 높은 k값을 나타내어 다른 재질의 활성탄에 비하여 BrO_3^- 흡착용량이 큰 것으로 조사되었다.

주제어 : 입상활성탄, 브로메이트, 환원, 관능기

1. 서론

정수처리 공정에서 병원성 미생물의 살균 및 오염물질의 산화제로 사용되는 오존은 수중에 bromide (Br^-)이 존재할 경우 분자오존 및 OH 라디칼과 복잡한 반응 메커니즘을 거쳐 bromate (BrO_3^-)를 생성한다.^{1~3)}

미국 EPA (Environmental Protection Agency)에서는 BrO_3^- 를 인체에 암을 유발할 가능성이 있는 물질로 분류하고

있으며,⁴⁾ 최대 허용기준(maximum contaminant level, MCL)은 10 $\mu\text{g/L}$ 로 규제하고 있다.⁵⁾ 국내에서는 규제를 가지고 있지 않다.

정수처리 공정에서의 BrO_3^- 제거를 위해 다양한 물리, 화학적 및 생물학적 처리방법들이 연구되었다. Fe^0 (zero-valent iron)와 Fe^{2+} 을 이용한 BrO_3^- 의 환원 제거,^{6,7)} 활성탄에 의한 흡착 및 환원 제거,^{8~11)} 이온교환수지를 이용한 제거,^{12,13)} 역삼투막을 이용한 제거,¹⁴⁾ UV 및 electron beam 조사에 의한 제거법

[†] Corresponding author : E-mail : menuturk@hanmail.net Tel : 051-669-4625 Fax : 051-669-4609

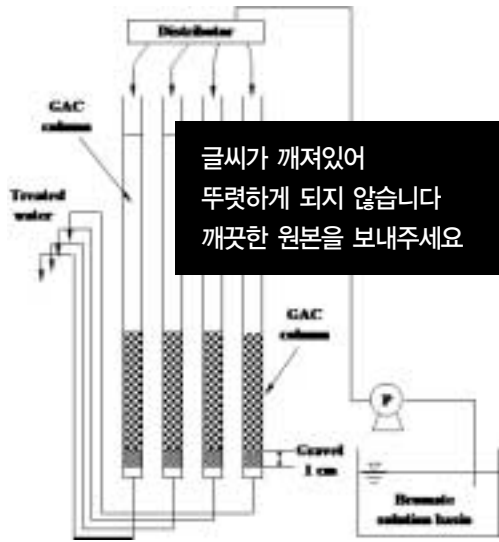


Fig. 1. Schematic diagram of GAC columns.

15,16) 등에 대한 연구가 진행되었다. 하지만 대부분의 처리방법들은 높은 운전비와 시설유지비, 2차 오염문제 및 복잡한 처리 공정 등과 같은 문제점으로 인해 정수장과 같은 상업적인 규모로는 적용하기에 한계가 있다. 따라서 비교적 구조가 간단하고, 운전이 용이한 흡착공정이 매력적인 공정으로 여겨진다.^{17,18)}

입상활성탄(granular activated carbon, GAC) 흡착공정은 정수처리에서 미량유해물질 제거에 매우 효율적인 공정이다.¹⁸⁾ GAC 흡착공정을 이용한 BrO_3^- 제거에 관한 연구는 이전부터 많이 연구되어 왔으며¹⁹⁾, GAC에서의 BrO_3^- 제거 메카니즘은 흡착과 환원이며, 환원에 의한 제거기작은 BrO_3^- 가 활성탄 표면에서 hypobromite (BrO^-)로 환원되고, 최종적으로는 bromide (Br^-)로 환원되어 제거되어진다.⁸⁾

본 연구에서는 낙동강 원수를 처리하는 고도정수처리 공정의 후오존 처리수에 BrO_3^- 를 일정농도로 투입하여 석탄계, 야자계 및 목탄계 재질의 활성탄 신탄을 이용하여 GAC 공정에서의 BrO_3^- 의 제거능을 평가하여 GAC 공정을 운전하는데 필요한 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

2.1.1. 유입수

GAC 컬럼의 유입수는 낙동강 하류 매리지역의 원수를 1일 300 m^3 처리하는 파일롯트 플랜트 후오존 처리수에 순도 99%의 KBrO_3 (Sigma-aldrich, U.S.A.)를 사용하여 유입수의 BrO_3^- 농도를 20 $\mu\text{g}/\text{L}$ 로 하여 실험에 사용하였다. GAC 컬럼의

유입수로 사용된 후오존 처리수의 성상을 Table 1에 나타내었다.

2.1.2. 입상활성탄

본 실험에 사용한 GAC 신탄들은 석탄계 재질(coal-based)의 활성탄인 F400 (Calgon, U.S.A.)과 국내에서 제조된 석탄계 1급 활성탄(Singi, Korea), 야자계 재질(coconut-based)의 1급 활성탄(Samchully, Korea) 및 목탄계 재질(wood-based)의 활성탄(pica, Picabiol, France)이다. 실험에 들어가기 전에 GAC 신탄들을 증류수로 충분히 세척하여 미탄들과 이물질들을 제거한 후 실온에서 7일간 건조시킨 후 105℃의 건조기에서 3일간 건조시켜 실험에 사용하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. GAC 공정의 운전

본 실험에 사용된 GAC 컬럼은 내경 20 mm의 아크릴 재질이며, GAC용 컬럼 4개가 하나의 세트로 구성되어 있다. 컬럼에는 활성탄을 각각 30 mL 씩 충전하여 정량펌프를 사용하여 각각의 컬럼으로 유입되는 유량을 3 mL/min으로 조절하여 EBCT (empty bed contact time)가 10분이 되도록 설계하였다. 컬럼은 하향류식으로 운전하였고, 역세척은 주 1회 실시하였으며, 공세는 실시하지 않았다. GAC용 흡착컬럼의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다.

2.2.2. 분석

BrO_3^- 는 0.2 μm 멤브레인 필터(Sartorius, Germany)로 여과한 여액을 ion chromatograph (DX320, Dionex, U.S.A.)를 사용하여 분석하였다.

활성탄의 세공용적과 비표면적은 활성탄 세공용적 측정기 (AUTOSORB-1 MP, Quantachrome, U.S.A.)로 측정하였으며, 활성탄이 표면이 가지는 zeta potential이 0이 되는 pH를 나타내는 pH_{zpc} 는 다양한 pH에서의 zeta potential을 zeta potential analyzer (ELS Z, Otsuka electronics, Japan)로 측정하여 구하였으며, 산·염기 관능기 분석은 1 g의 활성탄을 2개의 100 mL 삼각 플라스크에 투입하고 0.05 N NaOH와 0.05 N HCl 용액 40 mL를 각각의 삼각 플라스크에 투입하여 밀봉한 후 24시간 동안 진탕기에서 진탕시켜 활성탄을 제거하고 중화시키는데 들어간 양을 측정하여 구하였다.²⁰⁾ 활성탄 표면의 산소 함량은 CHNS-O elemental analyzer (EA3000,

Table 1. Characteristics of GAC influent waters

Parameter	pH (-)	Turbidity (NTU)	DOC (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	Temp. (°C)
Value	6.9~7.5	0.04~0.08	1.22~1.47	86~102	15~22

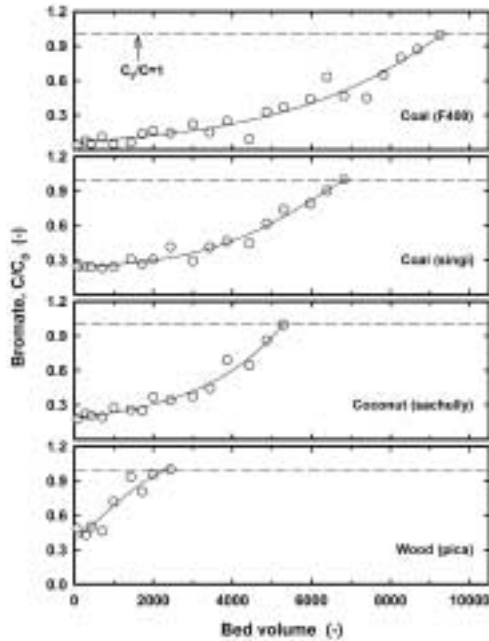


Fig. 2. BrO_3^- breakthrough curves for various GACs.

EuroVector, Italy)를 이용하여 분석하였다.

실험에 사용된 입상활성탄 신탄들의 물리적인 특성들을 Table 2에 나타내었다. 실험에 사용된 활성탄의 세공용적과 비표면적은 활성탄 세공용적 측정기(AUTOSORB-1 MP, Quantachrome, U.S.A.)로 측정하였다. GAC 신탄들의 비표면적과 세공용적을 비교해보면 목탄계인 pica가 가장 높았고, 비표면적의 경우 석탄계인 singi가 가장 낮은 것으로 나타났으며, 세공용적의 경우는 야자계인 samchully가 가장 낮게 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 다양한 재질의 GAC에서의 BrO_3^- 파과특성

석탄계, 야자계 및 목탄계 재질의 GAC를 이용한 컬럼 연속 흡착실험에서 BrO_3^- 의 파과특성을 조사한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 활성탄 재질별 파과특성은 석탄계 활성탄인 F400과 singi가 파과에 도달한 bed volume (BV)이 각각 9252와 6821로 나타나 가장 늦은 파과시점을 나타내었으며, 다음으로 야자계 활성탄인 samchully가 파과에 도달한 BV ($\text{BV}_{\text{breakthrough}}$)가 5291로 나타났으며, 목탄계 재질의 활성탄인 pica의 경우는 $\text{BV}_{\text{breakthrough}}$ 가 2431로 나타나 가장 빠른 파과특성을 나타내었다.

GAC에서 BrO_3^- 의 제거는 활성탄 표면에 존재하는 관능기들에 의해 BrO_3^- 가 Br^- 로 화학적인 환원반응⁸⁾에 의해 제거되는 메카니즘이다. 따라서 BrO_3^- 에 대한 흡착능이 높다는

것은 활성탄 표면에 화학적인 활성을 가진 관능기의 양이 많다는 것을 의미한다. 따라서 실험에 사용된 각각의 활성탄 표면이 가진 화학적인 특성을 Table 3에 나타내었다.

Table 3에 나타낸바와 같이 여러 재질의 활성탄 표면의 산소 함유량은 석탄계 활성탄들이 4.1%와 4.3%로 비교적 낮게 나타났으며, 목탄계인 pica의 경우는 10.9%로 석탄계나 야자계 활성탄들에 비해 2배 이상 높게 나타났다. Studebaker²¹⁾와 Huang²²⁾은 활성탄 표면의 산소 함유량이 낮을수록 활성탄 표면은 (+) 전하를 띄어 음이온 교환능이 증가한다고 보고하였다. 또한, Graham²³⁾은 활성탄 표면에서 이온교환에 의해 (-) 이온의 농도가 증가할수록 활성탄 표면의 acidity도 증가한다고 보고하였다. 이것은 수중의 (-) 이온과 활성탄 표면에 존재하는 산성 관능기들(acid groups)과의 정전기적인 상호작용에서 서로 호의적인 관계가 아니라는 것을 나타낸다. Siddiqui 등⁸⁾의 연구에서도 등전점(isoelectric point)을 나타내는 pH (pH_{zpc})와 염기성 관능기들(basic groups)과 BrO_3^- 와의 흡착능/환원능을 조사한 결과 pH_{zpc} 값이 클수록 그리고 염기성 관능기들의 함량이 많을수록 BrO_3^- 에 대한 흡착능/환원능이 높은 것으로 보고하고 있다. 따라서 pH_{zpc} 및 관능기의 종류와 함량 같은 활성탄의 표면화학적 특성이 BrO_3^- 제거에 있어서 매우 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다.

Yamada²⁴⁾는 GAC를 이용한 BrO_3^- 의 제거에 있어서 BrO_3^- 가 GAC에 먼저 흡착이 된 다음, Br^- 로 환원되기 때문에 활성탄 표면의 흡착능을 가지는 활성점(active site)에서 수중의 DOC 및 (-) 이온들과 BrO_3^- 가 경쟁관계에 있다고 보고하였다. 따라서 GAC의 세공용적과 비표면적 같은 물리적인 특성들도 GAC에서의 BrO_3^- 의 제거에 영향을 미치는 인자로 볼 수 있다.

GAC 신탄은 BrO_3^- 환원능과 제한된 이온교환이 가능한 흡착능이 있다. 그러나 사용탄의 경우는 BrO_3^- 에 대해 매우 적

Table 2. The physical characteristics of virgin GACs

Item	GAC material			
	Coal F400	Coal Singi	Coconut Samchully	Wood pica
Specific surface area (m^2/g)	1100	1150	1260	1610
Total pore volume (cm^3/g)	0.639	0.655	0.527	1.12

Table 3. The surface properties of virgin GACs

Item	GAC material			
	Coal F400	Coal Singi	Coconut Samchully	Wood pica
Oxygen content (%)	4.1	4.3	4.9	10.9
pH_{zpc}^* (-)	7.0	6.7	6.4	4.1
Acid groups (meq/g)	0.22	0.25	0.29	0.79
Basic groups (meq/g)	0.59	0.42	0.37	0.19

pH_{zpc}^* is pH of the isoelectric point (zeta potential = 0)

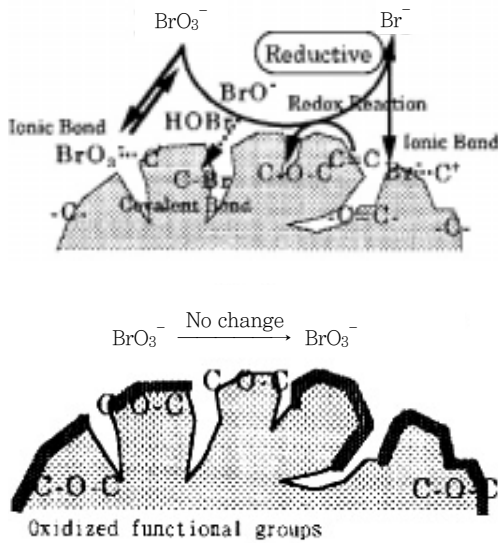
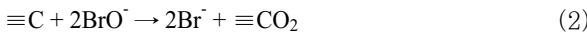
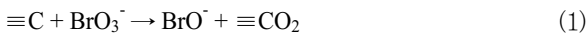


Fig. 3. The surface properties of virgin GACs

은 환원능과 흡착능을 가지고 있다. 이것은 활성탄 표면의 functional groups과 이온물질 사이의 화학적 흡착에 기인한 것이다. GAC에서 BrO_3^- 의 환원 메카니즘은 chlorite (ClO_2^-)에서 chloride (Cl_2)로 환원되는 메카니즘과 유사하다.²⁵⁾

Siddiqui 등²⁶⁾이 제시한 활성탄 표면에서의 BrO_3^- 의 환원 메카니즘을 식 (1)과 (2)에 나타내었다.



$\equiv\text{C}$ 는 활성탄 표면을 나타내고, $\equiv\text{CO}_2$ 는 활성탄 표면이 산화된 것을 나타낸다. 따라서 활성탄 표면에 존재하는 관능기(functional group)의 농도가 높을수록 BrO_3^- 의 제거에 유리하다. GAC 신탄과 사용탄에서의 BrO_3^- 와의 활성탄 표면과의 화학적 반응인 식 (1)과 (2)에 나타낸 내용을 자세하게 도식화한 것을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3a에 나타낸 신탄과 BrO_3^- 와의 화학적인 반응에서 BrO_3^- 는 hypobromite (BrO^-)로 환원되고, 결국 GAC 표면에서 bromide (Br^-)로 환원된다. Fig. 3b에 나타낸 사용탄의 경우는 활성탄 표면에 있는 관능기들이 산화되어 BrO_3^- 에 대한 환원능을 상실한 상태이다.

3.2. 다양한 재질의 GAC에서의 BrO_3^- 흡착능 평가

다양한 재질의 활성탄 신탄들에서의 BrO_3^- 흡착능을 평가하기 위하여 각각의 활성탄 재질별 신탄들의 파과시점(BV)까지의 유입농도와 유출농도를 가지고, 식 (3)에 나타낸 Freundlich 등온흡착식을 이용하여 X/M과 C_e 를 구하여 그 결과를 Fig. 4에 나타내었고, 이를 회귀분석하여 k와 1/n을 구하였다.

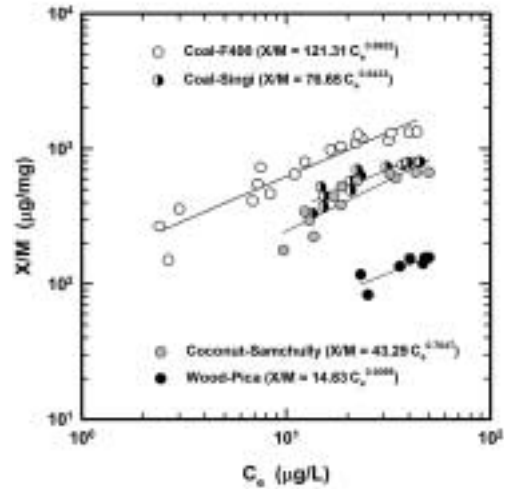


Fig. 4. Adsorption isotherm of BrO_3^- for various GACs.

$$X/M = k \cdot C_e^{1/n} \quad (3)$$

X/M = maximum adsorption ($\mu\text{g/g}$)

X = the amount of solute adsorbed (μg)

M = the weight of adsorbent (g)

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

k, 1/n = constants characteristic of the system

BrO_3^- 에 대한 다양한 재질의 활성탄 신탄들의 흡착용량(adsorption capacity)을 평가하기 위해 Snoeyink의 연구²⁷⁾에서의 활성탄 사용율(carbon usage rate: CUR)과 활성탄 수명(bed life: Y)을 구하기 위해 사용한 식 (4)와 식 (5)을 연속컬럼에서의 파라미터를 적용할 수 있는 식 (6)로 변형시켜 CUR과 bed life를 구하였다.²⁸⁾ 일반적으로 평형 흡착 실험은 분말활성탄을 이용하여 batch식으로 수행하는 것이지만 이러한 조건은 실제 정수장의 활성탄 접촉조의 접촉면적과 흡착시간과 같은 조건이 많이 바뀐 상태로 모든 활성탄이 평형상태를 이루지 않는 실제 정수장에서 batch 실험에서 도출된 값을 적용하는 것은 큰 의미가 없다.

$$CUP = \frac{(C_0 - C_1)F}{(q_e)_0} \quad (4)$$

CUR = carbon usage rate (g/day)

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

$$Y(\text{day}) = (V) \cdot \rho_{GAC} \frac{(q_e)_0}{(C_0 - C_1)F} = \frac{(V) \cdot \rho_{GAC}}{CUP} \quad (5)$$

Y = Bed life (day), V = volume of adsorber (L)

ρ_{GAC} = apparent density (g/L)

$$CUR(\text{g/day}) = \frac{\rho_{GAC} \cdot F}{BV_{breakthrough}} \quad (6)$$

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

$BV_{breakthrough}$: bed volumes to breakthrough (-)

식 (3)~식 (6)을 이용하여 도출된 k, 1/n, CUR 및 bed life 와 같은 흡착특성을 파악할 수 있는 지표들을 Table 4에 나타 내었다. 활성탄 g당 BrO_3^- 에 대한 최대 흡착량(X/M)은 석탄 계 활성탄인 F400이 1,334.5 $\mu\text{g/g}$ 로 가장 높게 나타났으며, 다음으로 같은 석탄계인 singi가 798.2 $\mu\text{g/g}$, 야자계인 samchully가 668.6 $\mu\text{g/g}$, 목탄계인 pica가 156.8 $\mu\text{g/g}$ 로 가장 낮게 나타났으며, 석탄계 활성탄인 F400이 석탄계 singi, 야자계 samchully 및 목탄계 pica에 비하여 최대 흡착 량이 약 1.7배, 2.0배 및 8.5배 정도 큰 것으로 조사되었다.

CUR의 경우 석탄계인 F400과 singi의 경우는 BrO_3^- 의 제 거를 위해 1일 0.19 g과 0.25 g의 활성탄을 사용하여야만 BrO_3^- 의 제거가 가능한 것으로 조사되었고, 야자계인 samchully와 목탄계인 pica의 경우는 1일 0.33 g과 0.71 g의 활성탄을 사용하여야 BrO_3^- 의 제거가 가능한 것으로 나타나 석탄계 활성탄의 경우는 다른 재질의 활성탄들에 비해 적은 양 으로도 제거할 수 있는 것으로 나타났다. 활성탄의 흡착용량을 나타내는 k값의 경우 석탄계 F400과 singi는 각각 121.3과 76.7로 나타나 야자계 samchully와 목탄계 pica의 43.3과 14.6에 비하여 석탄계 활성탄들이 월등히 높은 k값을 나타내 어 다른 재질의 활성탄에 비하여 BrO_3^- 흡착용량이 큰 것으로 조사되었다. 석탄계 재질의 활성탄이 다른 재질의 활성탄들에 비해 BrO_3^- 의 흡착용량이 크게 나타난 것은 pH_{zpc} 와 염기성

관능기들의 함량이 다른 재질의 활성탄 보다 높아 활성탄 표면 에서의 BrO_3^- 환원능이 높기 때문이며, 이것은 활성탄 원료의 재질 특성에서 기인한 것으로 판단된다.

4. 결론

다양한 재질의 GAC 신탄을 이용한 GAC 흡착공정에서 BrO_3^- 의 흡착특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 활성탄 재질별 연속흡착실험에서 BrO_3^- 의 파과특성을 조사한 결과, 활성탄 재질별 파과시점은 석탄계 활성탄 들이 가장 늦게 파과에 도달하였으며, 다음으로 야자계 와 목탄계 활성탄으로 나타났다.
2. 활성탄 g당 BrO_3^- 에 대한 최대 흡착량(X/M)은 석탄계 재질의 활성탄들이 각각 1334.5 $\mu\text{g/g}$ 및 798.2 $\mu\text{g/g}$ 로 가장 컸으며, 야자계 668.6 $\mu\text{g/g}$, 목탄계 156.8 $\mu\text{g/g}$ 으로 나타났고, 석탄계 활성탄들이 야자계와 목탄계에 비하여 최대 흡착량이 약 2.0배~8.5배 정도 큰 것으로 조사되었다.
3. BrO_3^- 에 대한 CUR은 석탄계 재질의 활성탄들이 각각 0.19 g/day과 0.25 g/day, 야자계와 목탄계가 각각 0.33 g/day과 0.71 g/day로 나타나 석탄계 활성탄의 경우는 다른 재질의 활성탄들에 비해 적은 양으로도 적 은 양으로 제거할 수 있는 것으로 나타났다.
4. 활성탄의 흡착용량을 나타내는 k값의 경우 석탄계 재질 의 활성탄들이 각각 121.3과 76.7로 나타나 야자계와 목 탄계의 43.3과 14.6에 비하여 석탄계 활성탄들이 월등 히 높은 k값을 나타내어 다른 재질의 활성탄에 비하여 BrO_3^- 흡착용량이 큰 것으로 조사되었다.

KSEE

Table 4. Adsorption capacity data of BrO_3^- for continuous column adsorption test

Item	Unit	Coal	Coconut	Wood	
		F400	singi	samchully	pica
X/M	($\mu\text{g/g}$)	1,334.5	798.2	668.6	156.8
$BV_{breakthrough}$	(-)	9252	6821	5291	2431
Bed life	(day)	66	49	39	19
CUR	(g/day)	0.19	0.25	0.33	0.71
k	[$(\mu\text{g/g})(\text{L}/\mu\text{g})^{1/n}$]	121.31	76.65	43.29	14.63
1/n	(-)	0.6922	0.6433	0.7647	0.6099

참고문헌

1. Haag, W. R., and Hoigné, J., "Ozonation of bromide containing waters: kinetics of formation of hypobromous acid and bromate," *Environ. Sci. Technol.*, **17**, 261~267(1983).
2. Weinberg, H. S., Glaze, W. H., Krasner, S. W., and Schimenti, M. J., "Formation and removal of aldehydes in plants that use ozonation," *J. Am Water Works Assoc.*, **85**(5), 72~85(1993).
3. von Gunten, U., and Hoigné, J., "Bromate formation during

- ozonation of bromide containing waters: Interaction of ozone and hydroxyl radical reactions," *Environ. Sci. Technol.*, **28**, 1234~1242(1994).
4. US EPA, "Guidelines for carcinogen risk assessment," US EPA, Federal Register **51**, 33992~34003(1986).
 5. US EPA, "Alternative disinfectants and oxidants," Guidance Manual, 3.1~3.52(1999).
 6. Xie, L., and Shang, C., "The effects of operational parameters and common anions on the reactivity of zero-valent iron in bromate reduction," *Chemosphere*, **66**, 1652~1659(2007).
 7. Gordon, G., Gauw, R. D., Emmert, G. L., Walters, B. D., and Bubnis, B., "Chemical reduction methods for bromate ion removal," *J. Am Water Works Assoc.*, **94**, 91~98(2002).
 8. Siddiqui, M., Zhai, W., Amy, G., and Mysore, C., "Bromate ion removal by activated carbon," *Water Res.*, **30**, 1651~1660(1996).
 9. Bao, M. L., Griffini, O., Santianni, D., Barbieri, K., Burrini, D., and Pantani, F., "Removal of bromate ion from water using granular activated carbon," *Water Res.*, **33**, 2959~2970(1999).
 10. Kirisits, M. J., Snoeyink, V. L., and Kruihof, J. C., "The reduction of bromate by granular activated carbon," *Water Res.*, **34**(17), 4250~4260(2000).
 11. Huang, W. J., and Cheng, Y. L., "Effect of characteristics of activated carbon on removal of bromate," *Sep. Sci. Technol.*, **59**, 101~107(2008).
 12. Singer, P. C., and Bilyk, K., "Enhanced coagulation using a magnetic ion-exchange resin," *Water Res.*, **36**, 4009~4022(2002).
 13. Johnson, C. J., and Singer, P. C., "Impact of a magnetic ion-exchange resin on ozone demand and bromate formation during drinking water treatment," *Water Res.*, **38**, 3738~3750(2004).
 14. van der Hoek, J. P., Rijnbende, D. O., Lokin, C. J. A., Bonnè, P. A. C., Loonen, M. T., Hofman, J. A. M. H., "Electrodialysis as an alternative for reverse osmosis in an integrated membrane system," *Desalination*, **117**, 159~172(1998).
 15. Peldszus, S., Andrews, S. A., Souza, R., Smith, F., Douglas, I., Bolton, J., and Huck, P. M., "Effect of medium-pressure UV irradiation on bromate concentrations in drinking water, a pilot-scale study," *Water Res.*, **38**, 211~217(2004).
 16. Siddiqui, M., Amy, G., Cooper, W. J., Kurucz, C. N., Waite, T. D., and Nickelsen, M. G., "Bromate ion removal by HEEB irradiation," *J. Am Water Works Assoc.*, **88**(5), 90~101(1996).
 17. Faust, S. D., and Aly, O. M., *Adsorption Process for Water Treatment*, Butterworths Publishers, Stoneham, (1987).
 18. Bansal, R. C., and Goyal, M., *Activated Carbon Adsorption*, CRC press, (2005).
 19. Marhaba, T. F., and Medlar, S. J., "Treatment/removal of bromate and bromide ions using GAC and RO," Proceedings of *Am Water Works Assoc. Water Qual. Technol. Conf.*, Miami, Florida (1993).
 20. Barton, S. S., Evans, M. J. B., Halliop, E., and MacDonald, J. A. F., "Acidic and basic sites on the surface of porous carbon," *Carbon*, **35**, 1361~1366(1997).
 21. Studebaker, M. L., "The chemistry of carbon black and reinforcement," *Rubber Chem. Technol.*, **30**, 1400~1483(1957).
 22. Huang, C. P., "Chemical interactions between inorganics and activated carbon," *Carbon Adsorption Handbook*, Cheremisinoff, P. N., and Ellerbusch, F., (Eds) pp. 281~329, Ann Arbor Science Publishers, Inc, Ann Arbor, Miami, (1978).
 23. Graham, D., "The separate effects of pore size and surface acidity upon the adsorbent capacities of activated carbons," *J. Phys. Chem.*, **59**(8), 896~900(1955).
 24. Yamada, H., "By-products of ozonation of low bromide waters and reduction of the by-products by activated carbon," *Proceedings of 11th IOA*, (1993).
 25. Gonce, N., and Voudrais, E. A., "Removal of chlorite and chlorate ions from water using granular activated carbon," *Water Res.*, **28**, 1059~1069(1994).
 26. Asami, M., Aizawa, T., Morioka, T., Nishijima, W., Tabata, A., and Magara, Y., "Bromate removal during transition from new granular activated carbon (GAC) to biological activated carbon (BAC)," *Water Res.*, **33**, 2797~2804(1999).
 27. 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, 781~855(1990).
 28. 손희종, 노재순, 김상구, 배석문, 강임석, "활성탄 공정에서의 염소 소독부산물 제거특성," *대한환경공학회지*, **27**(7), 762~770(2005).