ORIGINAL ARTICLE

석탄계 활성탄별 흡착능 및 경제성 평가

최동훈 · 손희종 · 박진식¹⁾ · 문추연¹⁾ · 류동춘 · 장성호^{2)*} · 권기원 · 김한수³⁾

부산광역시 상수도사업본부 수질연구소, ¹⁾경운대학교 보건바이오학부, ²⁾부산대학교 바이오환경에너지학과,
³⁾부산대학교 식품공학과

Adsorption Efficiency of Coal Based GACs and Evaluation of Economic Efficiency

Dong-Hoon, Choi, Hee-Jong, Son, Jin-Sik¹⁾, Park, Choo-Yeun, Moon¹⁾, Dong-Choon Ryu, Seong-Ho, Jang^{2)*}, Ki-Won, Kwon, Han-Soo Kim³⁾

Water Quality Institute, Water Authority, Busan 614-854, Korea

¹⁾School of Healthcare & Biotechnology, Kyungwoon University, Gumi 730-739, Korea

²⁾Department of Bioenvironmental Energy, Pusan National University, Mirang 627-706, Korea

³⁾Department of Food Science & Technology, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea

Abstract

This is made of domestic and foreign coal activated carbon of five species, physicochemical adsorption efficient about sterilize products and micro harmful substances and is a result of the economic evaluation. The most well-developed micropores bed volume 123,409 of AC-1 activate carbon appeared to be the best next AC-2, AC-3, AC-4, AC-5 followed by activated carbon was investigated. PFOA and PFOS in the BV 96,000 when evaluating foreign types of adsorption activated carbon adsorption capacity was greater when more than PFOA, PFOS showed that the adsorption well. The economic evaluation of activated carbon usage in chloroform (CUR) was most excellent as a AC-1 4.3 g/day, the next AC-2, AC-3, AC-4, AC-5 there are two types of foreign economic order appears to have appeared, but the current domestic market when applying the price AC-1, AC-3, AC-2, AC-4, AC-5 order was investigated.

Key words : Coal activated carbon, Physicochemical adsorption efficient, Adsorption activated carbon adsorption capacity

1. 서론

상수원수의 지속적인 악화와 80년대 후반부터 언론에 보도된 음용수 관련 사고로 국민들의 먹는 물에 대한 불신은 매우 높다. 또한 이러한 사고 뿐만 아니라 전반적인 생활수준의 향상으로 과거와 달리 어떠한 물을 먹고 있는가에 대한 관심이 높아지고 있다. 이

러한 시대에 부응하기 위하여 정부 지자체에서는 대부분의 정수장이 기존의 정수처리공정으로 현재의 수질 기준을 만족시키고 있으나, 보다 깨끗한 물을 생산하기 위하여 강화되는 수질 기준에 적극적으로 대응하기 위하여 1989년 부산 화명정수장의 오존처리 공정을 도입한 이래 1994년 입상활성탄 공정의 도입이 시작되었다.

Received 31 October, 2012; Revised 6 December, 2012;

Accepted 28 January, 2013

*Corresponding author : Seong-Ho Jang, Department of Bioenvironmental Energy, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea
Phone: +82-55-350-5435
E-mail: jangsh@pusan.ac.kr

© 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.

이후 낙동강 지역을 중심으로 발생한 수질 사고의 여파로 환경부에서는 1997년까지 15조 1,169억을 투자하여 수질 개선의 일환으로 고도처리 공정에 대한 연구 및 시설투자를 집중하여 현재까지 이르게 되었다.

최근에는 수중에 존재하는 자연 유기물질의 저감을 통하여 염소 소독 시에 발생하는 소독부산물중 트리할로메탄(THMs)이나 할로아세틱에시드(HAAs)와 같은 소독부산물의 저감이 고도시설의 주 기능으로 알려져 있어 이에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다(Crozes 등, 2005).

또한 경제발전 및 산업의 발달로 인하여 하루에도 수많은 신종 오염물질이 생성되어 상수원수를 위협함에 따라 이에 대한 처리를 위하여 신종 오염물질들에 대한 분석법, 조사실태 및 처리방안에 대한 많은 연구 발표와 관심이 집중되고 있다(Clara 등, 2008; Lien 등, 2008). 현재 이러한 움직임을 주도하는 물질이 과불화 화합물(perfluorinated compounds, PFC)들이다. 과불화 화합물들은 1947년 3M사에서 생산하기 시작하여(Prevedouros 등, 2006), 1951년 DuPont사에서 fluoropolymer의 제조에 사용한 이래로 지난 반세기 동안 전 세계적으로 생산·사용되어 오고 있다(Giesy 등, 2002). 전세계적으로 과불화 화합물들의 생산량 및 사용량에 대한 자료는 보고된 바 없지만, 미국의 경우는 2000년도에 한 해에 5,300톤 정도 생산되어 사용되었다(Renner, 2003; US EPA, 2000). 과불화 화합물들은 매우 안정화된 물질로 난분해성이기 때문에 우리가 생활하는 환경 중에 널리 분포하여 잔존한다고 알려져 있다(Giesy 등, 2001). 국내에서도 전국의 주요하천, 호소 및 퇴적물에서 검출되는 것으로 보고

되고 있다(Sin 등, 2007). 과불화 화합물들은 현재 잔류성 유기오염물질 (persistent organic pollutants, POPs)의 하나로 검토되고 있으며(Loos 등, 2008), 수많은 산업에 사용되고 있는 것에 비하면 환경에 미치는 연구에 대한 문헌이 너무 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 석탄계 활성탄별 상대적인 물리·화학적 흡착능력 평가와 Pilot Plant를 이용하여 염소 소독부산물 및 과불화 화합물에 대한 석탄계 활성탄별 활성탄 사용율(Carbon Usage Rate)을 구하여 실제 시판되고 있는 활성탄 가격과 비교하여 각 활성탄에 대한 경제성을 평가하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

2.1.1. 원수특성

실험에 사용된 원수는 실험플랜트 규모에서 염소처리가 배제된 정수에 순도 99% 이상의 클로로포름을 투입하여 유입되는 성분의 농도를 50 $\mu\text{g/L}$ 가 되도록 하였다. DOC가 잔존하는 물을 활성탄 흡착조에 유입되는 유입수로 사용한 이유는 실제 정수장에서의 활성탄 흡착조 운전조건과 유사하게 만들기 위해서이며, 실험에 사용된 시료수의 특성을 Table 1에 나타내었다.

2.1.2. 입상활성탄 성상

본 실험에서는 석탄계 신탄 외산 2종(AC-1, AC-2) 및 국산 3종(AC-3, AC-4, AC-5)을 사용하였다. 각 회사의 활성탄은 충분히 세척한 후 7일 이상 건조시켜 사용하였고, 그 물성치와 세공용적 분포를 Table 2와 Fig.

Table 1. Characteristics of influent water

Parameters	pH	Turbidity	Alkalinity	DOC	UV ₂₅₄	Temp.
	(-)	(NTU)	(mg/L)	(mg/L)	(cm ⁻¹)	(°C)
Value	6.8~7.2	0.05~0.10	28~49	0.8~1.2	0.008~0.012	4~29

Table 2. The physical characteristics of GACs used in this study

Species	Case	Coal Virgin				
		AC-1	AC-2	AC-3	AC-4	AC-5
Specific surface area	(m ² /g)	1,020	1,025	1,025	1,189	989
Total pore volume	(cc/g)	0.646	0.652	0.648	0.780	0.608

1에 나타내었다. 실험에 사용된 활성탄의 세공용적과 비표면적은 활성탄 세공용적 측정기(AUTOSORB-1 MP, Quantachrome, U.S.A.)로 측정하였다.

석탄계 활성탄 종류별 비표면적과 세공용적을 비교해 보면 국산 AC-4의 경우 비표면적이 $1,189 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 가장 높았고, AC-5가 $989 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 가장 낮았으며, 세공용적의 경우도 AC-4가 0.78 cc/g 으로 가장 컸고, AC-5가 0.6085 cc/g 으로 가장 낮았다.

Fig. 1. The physical characteristics of Coal based GACs.

2.2. 실험방법

2.2.1 Pilot Plant 공정

본 연구에 사용된 Pilot Plant 활성탄여과시설은 아크릴 재질로 내경 7.5 cm, 총길이 200 cm, 층고 100 cm이며, 각각의 pilot - plant 칼럼 세트에 고농도 소독 부산물 조제수가 유입되어 혼합조에서 최종처리수와 혼합된 후 각각의 활성탄 접촉조로 유입되도록 설계하였다.

접촉조의 운전은 EBCT(empty bed contact time)는 10분으로 고정하였고, 활성탄 흡착조의 역세척은 4~5 일 마다 한번씩 실시하였으며, 역세척 방법은 공기압축기를 통한 공세를 5분간 실시하고 활성탄조 하부집

수장치에서 염소가 포함되지 않은 물로 상향류식으로 10분간 수세를 실시하였다.

Fig. 2. Schematic diagram of the pilot system.

2.2.2. 분석방법

활성탄의 Zeta Potential의 분석방법은 각각의 활성탄을 $8 \mu\text{m}$ 의 크기로 분쇄하여 200 ml 증류수로 희석하여 활성탄 농도를 1000 mg/L로 만든 후 Zeta Potential 측정기기(Otsuka Electronics ELSZ2, Japan)를 이용하여 분석하였다. 제타포텐셜 값은 2회 반복 측정치의 평균으로 하였다.

활성탄의 원소조성비는 석탄시료 2.0 mg을 원소 분석기 모델 Flash EA 1112(CE Instruments, UK)를 이용하여 분석하였다. 원소분석을 위한 표준물질은 Acetanilide(C 71.09%, H 6.71%, O 11.84%, N 10.36%, Thermo Electron, USA)였다. 측정 원소조성비 값은 3회 반복 측정치의 평균으로 하였다.

THM 분석은 headspace auto sampler(HP 7694, Hewlett-Packard, U.S.A.)가 부착된 GC/ECD(HP 5890 series II, Hewlett-Packard, U.S.A.)를 사용하였다.

PFCs 2종의 분석은 Agilent 1100 LC/MS series (Agilent, U.S.A.)를 사용하였으며, PFCs 2종의 분리를 위해 Atlantis®dC18 column(2.1mm x 50mm, 8um)을 사용하였다.

분석에 사용된 이동상 용매는 5mM Ammonium Acetate 용액과 100% Acetonitrile 두 가지이며, 대상 물질 11종의 효율적인 분리를 위해 시간에 따른 두 가지 용매의 분율을 달리하였다. 이 외의 자세한 분석조건을 Table 3에 정리하여 나타내었다.

Table 3. Analytical conditions of LC/MSD used in this study

Descriptions	Analytical condition
Mode	API, negative
Mobile phase	A: 5mM Ammonium Acetate in water B: 100% Acetonitrile
Gradient program	0 minute, A/B = 65/35 10 minutes, A/B = 20/80 18 minutes, A/B = 20/80 20 minutes, A/B = 65/35
Flow (mL/min)	0.2

3. 결과 및 고찰

3.1. 화학적 흡착능 평가

3.1.1. 제타포텐셜

활성탄 표면의 제타 포텐셜과 수중의 천연유기물질(NOM)의 흡착작용은 활성탄 표면의 (+)전하와 물속 NOM의 (-)전하일 때 매우 적극적이며, 활성탄 표면 산화물의 작용기와 활성탄 입자표면의 제타전위는 관련성이 매우 크다. 활성탄의 표면전하는 수중의 pH에 따라서 (+), (-)전하로 변하고 이는 반발력이나 인력으로 나타난다고 알려져 있다. 각각의 석탄계 활성탄을 8 μm 의 크기로 분쇄하여 200 mL 증류수로 희석하여 활성탄 농도를 1,000 mg/L로 만든 후 Zeta Potential 측정기기(Otsuka Electronics ELSZ2, Japan)를 이용하여 분석하였고, pH 조정을 위하여 인산 및 가성소다를 사용하였다. 석탄계 활성탄 종류별 pH 변화에 따른 제타 포텐셜을 Fig. 3에 나타내었다. 각각의 활성탄별 제타 포텐셜 측정결과 수중의 pH가 산성에서는 각 제조사별 활성탄의 제타 포텐셜이 (+)전하를 띄었으며, pH가 증가할수록 (-)전하를 띄는 경향을 나타내었다.

pH 7에서는 AC-1 및 AC-2의 제타 포텐셜이 각각 -26.1 mV와 -27.2 mV로서 국산 3종에 비하여 수중의 유기물질을 제거하는 데 유리한 것으로 나타났다.

Fig. 3. Zetapotential of Coal based GACs.

3.1.2. 활성탄 원소분석

최근에는 각각의 석탄계 활성탄의 흡착력을 비표면적과 세공용적과 같은 물리적 특성만으로 파악하려는 경향이 매우 강하였는데 탄화과정 중에서 일어나는 관능기 변화와 같은 화학적 변환 또한 흡착력에 미치는 영향을 무시할 수 없다는 의견이 현재에는 강하게 대두되고 있다. 그래서 석탄계 활성탄별 표면의 화학적인 흡착능 평가를 위하여 원소 분석기를 이용하여 탄소함량 및 산소함량을 측정하였는데 그 결과를 Table 4. 및 Fig. 4에 나타내었다.

활성탄 원소분석결과 AC-2 활성탄의 탄소함량은 93.4%로 가장 높게 나타났고, AC-5가 가장 낮은 81.7%로 나타났는데 이는 활성탄의 경도(hardness)와 상관이 큰 것으로 해석된다.

활성탄의 기본 골격을 이루는 탄소함량이 많으면 많을수록 경도는 강해지기 때문이다.

Table 4. Carbon and Oxygen content of Coal based GACs

Item	Content(%)			
	C	H	N	O
AC-1	92.5	1.2	0.2	4.3
AC-2	93.4	0.1	0.2	4.3
AC-3	85.3	0.8	0.3	5.3
AC-4	84.3	0.6	0.2	4.8
AC-5	81.7	0.9	0.3	6.2

AC-2 활성탄의 탄소함량이 타 활성탄보다 큰 이유는 AC-2 활성탄의 제조방법이 타 활성탄과는 달리 분쇄 후 점결제를 첨착하여 탄화 및 활성화를 거친 성형 활성탄이기 때문인 것으로 추정된다.

Fig. 4. Element contents of Coal based GACs.

각각의 활성탄 원소조성은 활성탄 원료 본래의 원소조성이 가장 큰 영향을 미치지만 두 번째로는 활성탄을 탄화 및 활성화시키는 온도가 및 시간의 영향에 따라 조성비가 바뀔 수 있다. 탄화온도가 증가함에 따라 탄소함량(C-C결합)은 증가하고 산소함량(C-O-H결합)은 감소되는 경향을 나타낸다.

또한, 활성탄의 산소함량을 분석한 결과 외산 2종의 활성탄이 각각 4.3%로 가장 낮게 나타났는데 이는 활성탄 표면에 산성기가 많이 존재하게 되면 활성탄 세공에 존재하는 관능기들의 전하가 (-)전하를 띄어 수중에 NOM과 미량유해물질의 흡착에 불리한 결과를 초래하게 된다. 그래서 수중의 NOM과 미량유해물질의 흡착 제거에는 외산 활성탄인 AC-1 및 AC-2의 화학적인 흡착력이 우수하게 나타났다.

3.2. 클로로포름 파과특성

석탄계 입상활성탄별 Chloroform의 파과곡선을 Fig. 5에 나타내었다. AC-1 신탄은 bed volume 123409에서 가장 늦게 파과(breakthrough)에 도달하였는데 이는 20Å 이하의 미세세공이 가장 잘 발달되었기 때문인 것으로 판단되었고, AC-2 신탄의 경우 파과에 도달한 bed volume은 10929, AC-3 신탄과 AC-4 신탄은 각각 bed volume 10210, 9347에서 파과에 도달하여 운전 초기에 chloroform에 대한 활성탄의 흡착능이 소진되는 것으로 나타났다. AC-5 신탄의 경우

bed volume 6471로서 chloroform과 같은 소독부산물에 대한 흡착능이 가장 낮은 것으로 나타났다.

Fig. 5. Chloroform breakthrough curves.

Chloroform의 파과특성을 Fig. 5에 나타내었는데 이를 가지고 식 (1)에 나타낸 Freundlich 등온흡착식을 이용하여 X/M 과 C_e 를 구하였으며 그 결과를 Table 4에 나타내었고, 이를 회귀분석하여 k 와 $1/n$ 을 구한 후, 최종적으로 파과에 도달하는 bed volume을 k 와 $1/n$ 을 이용하여 시뮬레이션하여 도출하였다.

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

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

3.3. 입상활성탄 수명과 활성탄 사용율

각각의 Chloroform에 대하여 실험에 사용된 활성탄의 흡착용량(adsorption capacity)을 평가하기 위하여 Snoeyink의 연구(Snoeyink 등, 1990)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_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

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

V = volume of adsorber (L)

ρ_{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 각각의 Chloroform과 활성탄 종류별 k 와 $1/n$ 을 적용하였다. 일반적으로 평형 흡착실험은 분말활성탄(powder activated carbon, PAC)을 이용하여 batch식으로 수행하는 것으로 물과의 접촉면적과 흡착시간 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(Choi 등, 2005).

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

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

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

CUR의 계산은 식 (2), (4) 모두 사용이 가능하며, $(q_e)_0$ 또는 $BV_{breakthrough}$ 값은 연속컬럼 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 5에 나타내었다.

활성탄 g당 chloroform에 대한 최대 흡착량(X/M)은 AC-1 활성탄이 가장 높은 것으로 나타났으며, AC-1 활성탄의 최대 흡착량(X/M)이 국산 3종 석탄계 활성탄에 비해 각각 1.4~2.2배 높게 조사되었고, chloroform에 대한 활성탄 사용율(CUR)은 AC-1 활성탄이 1일 4.3 g, 국산 3종 AC-3~5의 활성탄의 경우는 각각 6.6 g 및 8.6 g, 9.4 g의 활성탄을 사용하여야만 제어가 가능한 것으로 조사됨에 따라 AC-1 활성탄의 경우는 다른 활성탄들에 비해 적은 양으로도 chloroform을 제어할 수 있는 것으로 나타났으며, 이는 20 Å 이하의 미세세공이 야자계 활성탄 만큼 많이 발달하였기 때문인 것으로 판단되었다.

각각의 석탄계 활성탄에서의 흡착용량을 나타내는 k 값의 경우 AC-5 활성탄이 178로서 가장 낮게 나타나 chloroform의 활성탄에 의한 제거가 가장 낮은 것으로 조사되었으며, AC-1 활성탄의 경우는 315로서 가장 큰 k 값을 나타내어 활성탄에서의 제거율이 높은 것으로 조사되었다.

3.4. 과불화화합물(PFCs) 파과특성

과불화화합물중 PFOA 및 PFOS는 현재까지의 실험결과 완전하게 파과시점은 아니지만 Bed Volume 96000에서의 흡착능을 평가할 때 PFOA는 외산 AC-1 및 AC-2의 파과율이 18~22%로서 가장 낮게 나타나

Table 5. Adsorption capacity data of chloroform in continuous column adsorption test

Item	Unit	Coal Virgin				
		AC-1	AC-2	AC-3	AC-4	AC-5
Max. adsorption	(ug/g)	1094.3	998.5	763.0	712.6	502.5
BVbreakthrough	(-)	12340	10929	10210	9347	6471
Bed life	(day)	86	76	71	65	45
CUR	(g/day)	4.3	4.9	6.6	8.6	9.4
k	[(ug/g)(L/ug)1/n]	315	301	256	244	178
$1/n$	(-)	0.3003	0.2902	0.2621	0.2599	0.2013

국산 활성탄에 비하여 흡착능이 우수한 것으로 나타났다.

PFOS의 흡착능 역시 Bed Volume 96,000에서의 흡착능을 평가할 때 외산 AC-1 및 AC-2의 파과율이 42~45%로서 가장 낮게 나타나 PFOA와 비슷한 경향을 나타내었다.

본 연구에서 사용한 과불화화합물 중 PFOA 보다 PFOS가 파과에 이르는 Bed Volume이 적은 것은 PFOS의 분자량이 499.1MW로서 PFOA의 분자량 414.1 MW보다 크기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6~7에 PFOA 및 PFOS의 파과곡선을 나타내었다.

Fig. 6. PFOA breakthrough curves.

Fig. 7. PFOS breakthrough curves.

3.5. 입상활성탄의 경제성 평가

현재까지 국내 정수장에 적용된 고도처리공정은 오존/활성탄공정이 가장 일반적으로 운영되고 있으며, 일부 정수장에서 활성탄 단독공정만을 적용하고 있다. 따라서 지금까지의 경제성평가는 이 두 공정의 초기 시설투자비 및 운영비용, 인건비 등을 고려하여 경제성 평가를 수행하여왔다. 본 연구에서는 활성탄의 재생주기와는 별도로 순수하게 석탄계 활성탄의

오염물질에 대한 흡착능력에 국한하여 경제성 평가를 하고자 하였다. Table 6 및 Fig. 8은 각각의 석탄계 활성탄에 대한 활성탄 사용율(g/day)과 활성탄 가격(won/day)을 비교하여 나타내었다.

Table 6. Comparison of Carbon Usage Rate and GACs price

Item	Unit	Coal Virgin				
		AC-1	AC-2	AC-3	AC-4	AC-5
CUR	(g/day)	4.3	4.9	6.6	8.6	9.4
Price	(won/g)	2.32	2.32	1.58	1.58	1.58
Price	(won/day)	9.98	14.15	10.43	13.59	14.85

Fig. 8. Comparison of Carbon Usage Rate and GACs price.

현재 국내에 시판되는 석탄계 활성탄의 가격은 AC-1 및 AC-2의 경우 1,600,000 won/m³로서 국산 활성탄 가격 1,090,000 won/m³보다 약 510,000 won/m³ 비싸게 판매되고 있는 실정이고 석탄계 활성탄의 비중 0.45를 감안할 때 외산의 경우 활성탄 가격은 2.32 won/g으로서 국산 활성탄의 1.58 won/g 보다 0.78 won/g 비싼 것으로 조사 되었다. 향후 활성탄 원자재 가격상승과 환율상승으로 인한 활성탄 가격상승이 수돗물 값 상승으로 이어져 시민들의 부담이 될 수도 있

을 것이다.

Chloroform에 대한 각각의 활성탄 사용율은 AC-1 활성탄이 4.3 g/day로서 가장 우수한 결과를 나타내었고, AC-5 활성탄이 9.4 g/day로서 가장 경제성이 떨어지는 것으로 조사되어 경제성 평가에서는 AC-1 > AC-2 > AC-3 > AC-4 > AC-5 순으로 나타났으나, 석탄계 활성탄 g당 가격과 chloroform에 대한 각각의 활성탄 사용율을 적용하였을 경우 하루에 사용한 활성탄 가격의 경제성을 평가하면 AC-1 > AC-3 > AC-2 > AC-4 > AC-5 순으로 활성탄 사용율만 평가하였을 때와는 다른 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

국산 및 외산 석탄계 재질의 활성탄 5종에 대하여 소독부산물 및 미량유해물질에 대한 물리·화학적인 흡착능 및 경제성 평가를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 석탄계 활성탄 종류별 비표면적과 세공용적을 비교해 보면 국산 AC-4 활성탄의 경우 비표면적이 1189 m²/g으로 가장 높았고, AC-5 활성탄이 989 m²/g으로 가장 낮았으며, 세공용적의 경우도 AC-4 활성탄이 0.78 cc/g으로 가장 컸고, AC-5 활성탄이 0.6085 cc/g으로 가장 낮았다.

2. pH 7에서는 외산인 AC-1 및 AC-2의 제타포텐셜이 각각 -26.1 mV와 -27.2 mV로서 국산 3종에 비하여 수중의 유기물질을 제거하는 데 유리한 것으로 나타났다.

3. 석탄계 활성탄 원소분석결과 외산(AC-1, AC-2)의 산소함량이 4.3%로서 국산 활성탄에 비하여 작게 나타났는데 이는 상대적으로 미량유기물질을 잘 흡착할 수 있다는 결과로 해석되었다.

4. 석탄계 활성탄별 클로로포름 흡착능은 미세세공이 가장 잘 발달된 AC-1 활성탄이 Bed Volume 123409 가장 우수한 것으로 나타났고, 다음으로 AC-2, AC-3, AC-4, AC-5 활성탄 순으로 조사되었다.

5. 과불화물중 PFOA 및 PFOS는 현재까지의 실험결과 완전하게 파괴시점은 아니지만 BV 96,000에서의 흡착능을 평가할때 외산(AC-1, AC-2) 두 종류의 활성탄이 흡착능이 우수한 것으로 조사되었고, 흡착

능은 PFOA가 PFOS보다 더 흡착이 잘 되는 것으로 나타났다.

6. 클로로포름에 대한 경제성 평가 활성탄 사용율(CUR)은 AC-1이 4.3 g/day로서 가장 우수하였으며, 다음으로 AC-2, AC-3, AC-4, AC-5 순으로 나타나 외산 두 종류가 경제성이 있는 것으로 나타났으나, 현재 국내 시판되는 가격을 적용하였을 경우 AC-1, AC-3, AC-2, AC-4, AC-5 순으로 조사되었다.

참 고 문 헌

- Choi, K. J., Kim, S. G., Kim, C. W., Kim, S. H., 2005, Effects of activated carbon types and service life on removal of endocrine disrupting chemicals: amitrol, nonylphenol, and bisphenol-A, *Chemosphere*, 58(11), 1535-1545.
- Clara, M., Scheffknecht, C., Scharf, S., Weiss, S., and Gans, O., 2008, Emissions of perfluorinated alkylated substances (PFAS) from point sources-identification of relevant branches, *Proceedings of 2008 IWA World Water Congress*, Vienna, Austria.
- Crozes, G., White, P., and Marshall M., 2005, Enhanced Coagulation: its Effect on NOM Removal Chemical Cost, *AWWA*, 87(1), 78-89(2005)
- Giesy, J. P. and Kannan, K., 2001, Global distribution of perfluorooctane sulfonate in wildlife, *Environ. Sci. Technol.*, 35, 1339-1342.
- Giesy, J. P., Kannan, K., 2002, Perfluorochemical surfactants in the environment, *Environ. Sci. Technol.*, 36, 146-152.
- Lien, N. P. H., Fujii, S., Tanaka, S., Nozoe, M., Wirojanagud, W., Anton, A., Hai, H. T., Lindstrom, G., Hu, J. Y., Mohamed, M., Tasli, R., Guan, Y., Mizuno, T., and Suwanna, K. B., 2008, International surveys of PFOS (perfluorooctane sulfonate) PFOA (perfluorooctanoate) in surface water and tap water, *Proceedings of 2008 IWA World Water Congress*, Vienna, Austria.
- Loos, R., Locoro, G., Huber, T., Wollgast, J., Christoph, E. H., DeJager, A., Gawlik, B. M., Hanke, G., Umlauf, G., Zaldivar, J. M., 2008, Analysis of perfluorooctanoate (PFOA) and other perfluorinated compounds (PFCs) in the River Po watershed in N-Italy, *Chemosphere*, 71, 306-313.

- Prevedouros, K., Cousins, I. T., Buck, R. C., Korzeniowski, S. H., 2006, Sources, fate and transport of perfluorocarboxylates, *Environ. Sci. Technol.*, 40(1), 32-44.
- Renner, R., 2003, Concerns over common perfluorinated surfactant. *Environ. Sci. Technol.* 37(11), 201-202.
- Sin, M. Y., Son, H. S., Cho, K. D., 2007, Quantitative determination of PFOA and PFOS in the effluents of Sewage Treatment Plants and the surface water of Han River, Seoul using Liquid Chromatography/MS/MS, *Proceeding of KSEE CONFERENCE*, 1187- 1194.
- Snoeyink, V. L., 1990, 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.
- US EPA, 2000, Perfluorooctyl sulfonates: proposed significant new use rule, *Federal Register*, 65, 62319-62333.