

## 낙동강 수계에서의 Perchlorate 검출 및 활성탄 공정에 의한 제거특성

손희종<sup>†</sup> · 정철우\*

부산광역시 상수도사업본부 수질연구소 · \*울산산업진흥TP 전략산업기획단

(2007년 3월 5일 접수, 2007년 4월 4일 채택)

### Detection of Perchlorate in Nakdong River and Removal Characteristics of Perchlorate by Granular Activated Carbon Process

Hee-Jong Son<sup>†</sup> · Chul-Woo Jung\*

Water Quality Research Institute, Waterworks Headquarter, Busan

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

**ABSTRACT** : This study was done to investigate perchlorate contamination in Nakdong river. The perchlorate was detected in Nakdong river and ranged from ND to 82.1 µg/L. The highest concentration was observed in Wheguan. The perchlorate concentration was decreased with the down stream of Nakdong river. Three different virgin activated carbons made of each coal(Calgon), coconut(Samchully) and wood(Picabiol) based activated carbon(AC) were tested for an adsorption performance of perchlorate in a continuous adsorption column. Breakthrough behavior was investigated that the breakthrough points of coal, coconut and wood based AC as 2,300 bed volumn(BV), 719 BV and 288 BV respectively. Adsorption capacity(X/M) of coal, coconut and wood based AC was observed. The experimental results of adsorption capacity showed that coal based AC was highest(768.2 µg/g), coconut based AC was intermediate(299 µg/g) and wood based AC was lowest(99.2 µg/g). Moreover, carbon usage rates(CURs) for coal, coconut and wood based AC had been shown as 0.71 g/day, 2.16 g/day and 3.45 g/day respectively. The constant characteristic of the system, k of coal, coconut and wood based ACs were found to be 307.2, 102.5 and 94.2, respectively.

**Key Words** : Perchlorate, Nakdong River, Activated Carbon, Adsorption

**요약** : 2006년 6월부터 12월까지 낙동강 본류 및 주요 지천들에서의 perchlorate 검출현황을 조사한 결과, 2006년 6월에 구미 하류인 왜관에서 82.1 µg/L가 검출되었으며, 고령에서 34.1 µg/L, 대암 18.3 µg/L, 적포 12.6 µg/L, 남지 13.6 µg/L 및 부산시 상수 취수원인 물금에서 7.6 µg/L가 검출되었다. 이런 결과는 구미와 왜관 사이에 perchlorate 오염원이 존재하는 것을 의미하며, 하류로 갈수록 perchlorate 검출농도가 낮아졌다. 또한, 2006년 7월부터 12월까지 채수한 낙동강 본류 및 지천 시료에서는 perchlorate가 전혀 검출되지 않아 2006년 6월에 일시적으로 perchlorate가 구미와 왜관 사이의 본류에서 유출된 것으로 나타났다. 활성탄 공정에서의 perchlorate 제거 특성을 조사한 결과, 3.1년 사용탄에서는 활성탄 재질별로 거의 흡착능이 없었으며, 석탄계 및 야자계 재질의 활성탄 신탄에서는 운전초기에는 흡착 제거되어지나, 목탄계 활성탄에서는 신탄에서도 제거능이 낮았으며, 석탄계 신탄은 BV 2,300 정도에서 파과에 도달하였고, 야자계와 목탄계 신탄의 파과시점은 BV 719와 288 정도로 나타났다. 또한, 활성탄 g당 perchlorate에 대한 최대 흡착량(X/M)은 석탄계 활성탄이 768.2 µg/g으로 가장 높았으며, 다음으로 야자계 299 µg/g, 목탄계 99.2 µg/g로 나타났다. CUR의 경우 석탄계 활성탄은 0.71 g/일, 야자계와 목탄계 활성탄은 2.16 g/일과 3.45 g/일로 나타났다. 석탄계, 야자계 및 목탄계 활성탄의 k값은 각각 307.2, 102.5 및 94.2로 나타났다.

**주제어** : 과염소산, 낙동강, 활성탄, 흡착

## 1. 서론

Perchlorate(ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>)는 염소 산화물의 일종으로 물에 잘 녹으며, 환경적으로 안정한 음이온인 비유기 내분비계저해물질로 환경호르몬의 일종이다.<sup>1,2)</sup> Perchlorate는 환경 중에 다양한 염의 형태로 존재하고 있어 자연적으로 발생할 수 있고,<sup>3)</sup> 인위적으로는 제지, 펄프 산업, 제조제, 살충제, 윤활유, 전기도금, 에나멜 생산, 고무제조, 페인트 생산 및 로켓 추진제 등

으로 사용하기 위해 나트륨, 칼륨, 암모늄염의 형태로 생산된다.<sup>4)</sup> 이처럼 다양한 발생원으로부터 환경으로 유출된 perchlorate가 인체에 유입될 경우, 갑상선의 요오드 섭취를 방해하여 갑상선 호르몬의 생산을 방해하고, 갑상선 암을 유발할 수도 있으며,<sup>5)</sup> 특히 어린이나 태아의 뇌 발달을 저해하는 등 인체 독성을 나타내는 것으로 알려져 있다.<sup>6,7)</sup> 따라서 미국 환경청(US EPA)에서는 먹는물에서의 perchlorate 허용 농도를 24.5 µg/L로 규정하고 있으나,<sup>8)</sup> 각 주에서는 보다 엄격한 가이드라인을 정해 perchlorate를 관리하고 있으며, 캘리포니아 주의 경우 먹는물에서의 한계 농도(action level)를 4 µg/L로, 공공 건강을 위한 목표치(draft public health goal)를 6

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: menuturk@hanmail.net

Tel: 055-323-4718

Fax: 055-323-4719

µg/L로 정해 두고 있다.<sup>3)</sup>

외국에서는 몇 년 전부터 perchlorate에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, US EPA에서 각 주의 지하수, 지표수, 토양 등에서의 perchlorate 오염 정도와 오염원을 조사하였다. 조사 결과, 심각하게 오염된 지하수의 경우 최대 10,000 µg/L를 상회하였고, 주요 오염원은 로켓 및 로켓 추진체 관련 산업, perchlorate 제조 산업 등에서 고농도의 perchlorate 오염을 야기하였고, 공공 상하수도에서도 perchlorate가 검출되었다고 보고하였다.<sup>8)</sup> 최근에는 perchlorate의 인위적인 발생원뿐만 아니라 자연적인 발생원을 밝히기 위한 연구도 수행 중에 있으며,<sup>9)</sup> perchlorate의 처리에는 전기분해 및 이온교환과 같은 물리·화학적 처리가 널리 사용되고 있으며, 최근에는 생물학적 환원을 통한 처리가 연구되고 있다.<sup>10,11)</sup>

국내에서는 아직 perchlorate 오염사태에 대해 구체적으로 조사한 연구는 없는 실정이며, 다만 김 등의 연구조사<sup>12)</sup>에서 낙동강 본류 및 몇몇 지류에 대해 단기간에 거친 조사결과만 있을 뿐이다.

본 시료채수 대상 하천인 낙동강은 영남권 전역을 유역권으로 하여 남해로 유입되며, 길이 525.15 km, 유역면적 23,717 km<sup>2</sup>로 우리나라 전 국토의 24.1%를 차지하고 있다. 낙동강 유역에는 대구, 경북, 경남, 부산 등 8개의 광역시도와 54개의 시, 군, 구가 위치하고 있어 이들 유역주민 8,609천명에게 식수원을 공급하는 상수원이다.<sup>13)</sup> 특히, 낙동강 하류지역에 존재하는 부산의 경우, 낙동강은 식수원으로써 93%를 차지하고 있어 낙동강 수질은 영남권 유역 주민들의 건강과 직결되어 있는 중요한 요소이다. 낙동강 유역에는 상, 하류에 걸쳐 92개소의 공단이 있고, perchlorate의 발생원이라고 알려져 있는 군부대와 제지, 펄프 공장 등이 상당수 존재하고 있어 perchlorate에 의한 오염 가능성이 존재하는 곳이다.

따라서 본 연구에서는 영남권 주민들의 상수원수로 이용되고 있는 낙동강 본류 및 지류들에 대해 2006년 6월부터 12월까지 월별로 분석한 낙동강에서 perchlorate 분포 특성을 비교하였으며, 또한, 낙동강에서 perchlorate가 유출시 고도정수처리 공정의 활성탄 흡착공정에서의 perchlorate의 제거능도 함께 검토하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. Perchlorate 분석

Perchlorate 분석은 ion chromatograph(DX-320, Dionex, U.S.A.)를 사용하여 Ion Pak AS 16 컬럼과 AG 16 guard 컬럼을 사용하여 US EPA method 314에 근거하여 분석하였다. Perchlorate 표준용액은 Aldrich사의 sodium perchlorate 98%를 사용하여 100 mg/L의 농도로 조제한 것을 5~200 µg/L로 검량선을 작성하였다. Eluent는 50 mM KOH를 사용하였으며 유량은 1.2 mL/min으로 하였다. 본 분석조건에서 perchlorate 검출한계는 4 µg/L였다.

### 2.2. 하천수

본 연구에서는 2006년 6월 이후로 매달 낙동강 수계를 따

1 - 14 : Main stream  
15 - 23 : Tributary

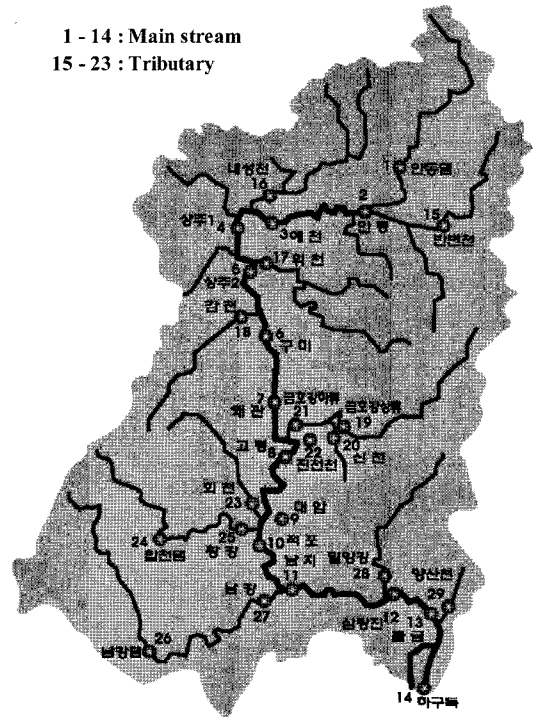


Fig. 1. Location map of sampling site in the Nakdong River.

라 하천수를 샘플링하여 perchlorate 오염 가능성을 조사하였다. 낙동강 상류에서 하류까지 본류와 지천을 포함하여 총 29개 지점을 채수하였으며, 자세한 시료채수 지점은 Fig. 1에 나타내었다.

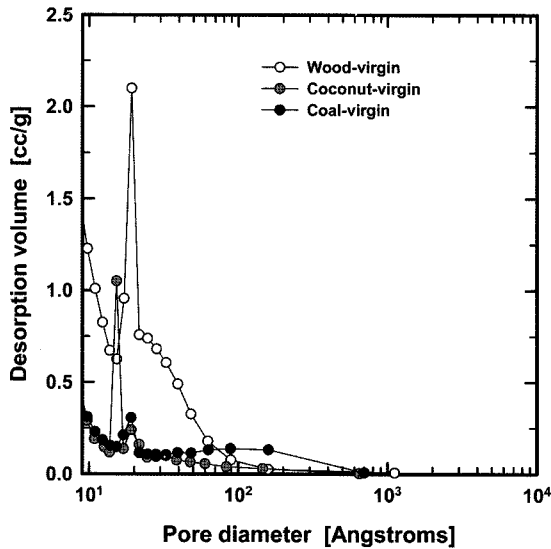
### 2.3. 입상활성탄

본 실험에서는 석탄계 재질(coal)의 활성탄(F400, Calgon), 야자계 재질(coconut)의 활성탄(1급, Samchully), 목탄계 재질(wood)의 활성탄(pica, Picabiol)을 사용연수별로 신탄, 3년 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 세척한 후 105℃의 건조기에서 7일 동안 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 KS 규격<sup>14)</sup>에 준하여 분석하였다. Table 1에 각 활성탄들의 물성치를 나타내었다. 신탄들의 비표면적 및 세공용적을 비교해보면 목탄계(pica)가 비표면적 1,610 m<sup>2</sup>/g으로 가장 높았고, 석탄계(F-400)가 1,100 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 활성탄이 가장 높았으며, 야자계 활성탄이 가장 낮은 세공(pore) 분포를 나타내었다(Fig. 2).

**Table 1.** The physical characteristics of virgin and used activated carbons

Species	Case	Coal(calgon F-400)		Coconut(samchully)		Wood(pica)	
		virgin	3.1 yr	virgin	3.1 yr	virgin	3.1 yr
Bed volume used	(-)	0(0) <sup>a</sup>	89600(3.1)	0(0)	89600(3.1)	0(0)	89600(3.1)
Apparent density	(g/L)	400	420	360	360	230	250
Specific surface area	(m <sup>2</sup> /g)	1100	655	1260	524	1610	295
Total pore volume	(cm <sup>3</sup> /g)	0.639	0.412	0.527	0.328	1.12	0.191

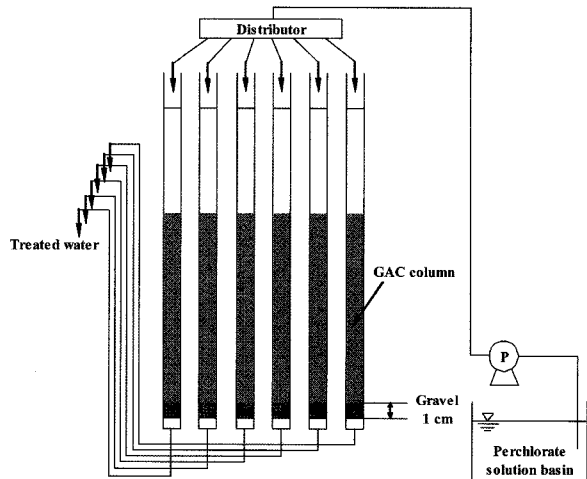
<sup>a</sup> Values in parentheses indicate the operation year for which carbon was used



**Fig. 2.** Distributions of desorption volume with pore size for virgin activated carbons.

**2.2.1. 입상활성탄 연속 흡착 실험**

입상활성탄 연속 흡착실험은 perchlorate 희석액 조에서 50 µg/L 농도인 perchlorate 용액을 정량펌프를 사용하여 18 mL/min으로 분배조(distributor)로 이송한 후 직경 20 mm인 8개의 투명 아크릴 활성탄 흡착조로 3 mL/min 씩 균등하게 분배되도록 하였다. 컬럼 내 활성탄을 30 mL씩 충전하여 EBCT가 10분이 되도록 조절하였고, 활성탄 흡착조는 하향류 방



**Fig. 3.** Schematic diagram of continuous adsorption column.

식으로 운전하였으며, Fig. 3에 개략적인 연속 컬럼 흡착조를 나타내었다. 활성탄 흡착조의 역세척은 2~3일에 한번 씩 하였고, 역세척 방법은 활성탄 컬럼 하부로 처리수를 공급하여 활성탄 층이 50% 정도 팽창되도록 하였으며, 공세는 실시하지 않았다.

**Table 2.** The perchlorate concentration in Nakdong river from June to December(2006).

(unit : µg/L)

No.	Site	Sampling date						
		Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
1	Andongdam	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
2	Andong	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
3	Yaechun	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
4	Sangjoo 1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
5	Sangjoo 2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
6	Gumi	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
7	Wheguan	82.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
8	Koryung	34.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
9	Daeam	18.3	ND	ND	ND	ND	ND	ND
10	Jeokpo	12.6	ND	ND	ND	ND	ND	ND
11	Namji	13.6	ND	ND	ND	ND	ND	ND
12	Samrangjin	5.0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
13	Mulgum	7.6	ND	ND	ND	ND	ND	ND
14	Haguduk	10.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
15	Banbyunchun	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
16	Naesungchun	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
17	Wechun	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
18	Gamchun	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
19	Upper kumho river	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
20	Sinchun	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
21	Down kumho river	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
22	Jinchunchun	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
23	Hoechun	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
24	Hapchundam	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
25	Hwang river	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
26	Nam river dam	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
27	Nam river	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
28	Milyang river	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
29	Yangsanchun	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 낙동강 수계에서 perchlorate 검출

2006년 6월부터 12월까지 낙동강 본류 및 주요 지천들에서의 perchlorate 검출현황을 조사한 것을 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 볼 수 있듯이 2006년 6월에 구미 하류인 왜관에서 82.1 µg/L가 검출되었으며, 고령에서 34.1 µg/L, 대암 18.3 µg/L, 적포 12.6 µg/L, 남지 13.6 µg/L 및 부산시 상수 취수원인 불금에서 7.6 µg/L가 검출되었다. 이런 결과는 구미와 왜관 사이에 perchlorate 오염원이 존재하는 것을 의미하며, 하류로 갈수록 perchlorate 검출농도가 낮아지는 것은 perchlorate에 오염되지 않은 지천들에서 원수가 유입, 희석되어 나타난 결과이다. 또한, 2006년 7월부터 12월까지 채수한 낙동강 본류 및 지천 시료에서는 perchlorate가 전혀 검출되지 않아 2006년 6월에 일시적으로 perchlorate가 구미와 왜관 사이의 본류에서 유출된 것으로 나타났다.

#### 3.2. Pilot-plant 연속 흡착실험

활성탄 재질별 신탄 및 사용탄에서의 perchlorate에 대한 연속 흡착특성을 평가하기 위하여 bed volume(BV) 2,500 정도까지 컬럼 실험을 수행한 결과를 Fig. 4(a)와 (b)에 나타내었다. Fig. 4(a)에 나타난 활성탄 재질별 사용탄에서의 흡착능 평가결과에서는 3.1년 사용한 활성탄에서는 perchlorate에 대한 흡착능은 거의 없는 것으로 평가되었으며, bed volume 2,500 이전에 모두 파과점에 도달하는 것으로 나타났다.

Fig. 4(b)에는 활성탄 재질별로 신탄에서의 perchlorate에 대한 파과곡선을 나타낸 것으로 석탄계 신탄(coal-virgin)은 BV 2,300 정도에서 파과(breakthrough)에 도달하였고, 야자계 신탄(coconut-virgin)과 목탄계 신탄(wood-virgin)의 경우는 BV 720과 290 정도에서 파과에 도달하여 3가지 재질의 활성탄

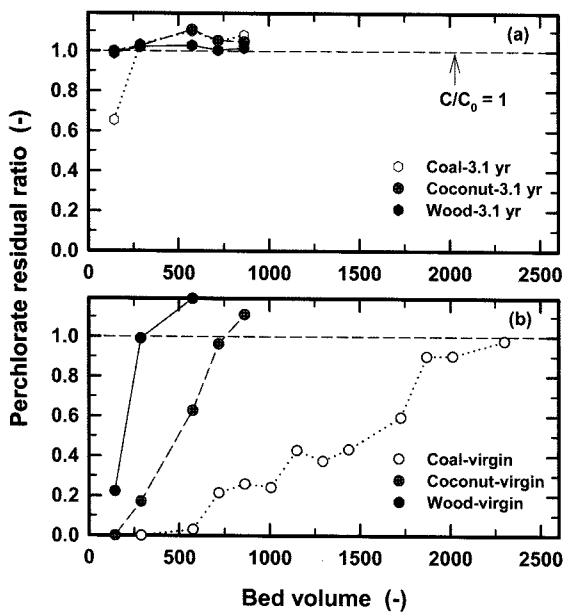


Fig. 4. Adsorption of perchlorate by coal-, coconut- and wood-based used- and virgin-GACs.

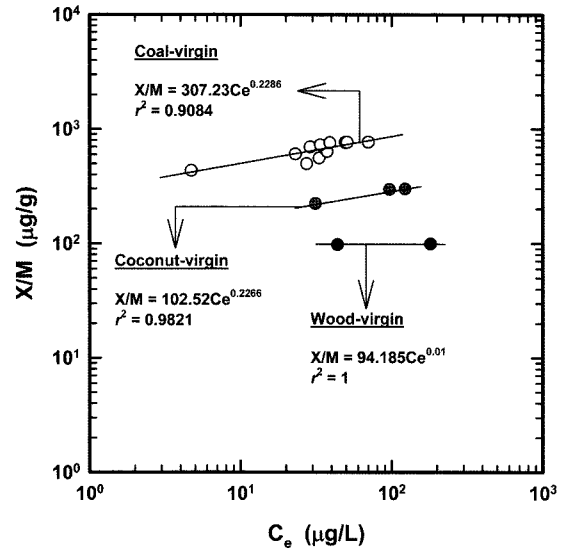


Fig. 5. Adsorption isotherm of perchlorate for coal-, coconut- and wood-based virgin GACs.

모두 운전 초기에 perchlorate에 대한 활성탄의 흡착능이 소진되는 것으로 나타났다.

활성탄 신탄에서의 perchlorate 흡착능을 평가하기 위하여 각각의 활성탄 재질별 신탄들의 파과시점(BV)까지의 유입농도와 유출농도를 가지고, 식 (1)에 나타난 Freundlich 등온흡착식을 이용하여 X/M과 C<sub>e</sub>를 구하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었고, 이를 회귀분석하여 k와 1/n을 구하였다.

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

- X = the amount of solute adsorbed(µg)
- M = the weight of adsorbent(g)
- C<sub>e</sub> = the solute equilibrium concentration(µg/L)
- k, 1/n = constants characteristic of the system

#### 3.3. 입상활성탄 수명과 활성탄 사용율

Perchlorate에 대한 활성탄 신탄들의 흡착용량(adsorption capacity)을 평가하기 위해 Snoeyink의 연구<sup>15)</sup>에서 활성탄 사용율(carbon usage rate: CUR)과 활성탄 수명(bed life: Y)을 구하기 위해 사용한 식 (2)와 식 (3)을 연속컬럼에서의 파라미터를 적용할 수 있는 식 (4)로 변형시켜 CUR과 bed life를 구하였다.<sup>16)</sup> 일반적으로 평형 흡착실험은 분말활성탄(powder activated carbon, PAC)을 이용하여 batch식으로 수행하는 것이나 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 의미가 없다.

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

- C<sub>0</sub> = influent concentration(µg/L)
- C<sub>1</sub> = desired effluent concentration(µg/L)

F = volumetric flowrate of contaminated liquid treated (L/day)  
 (q<sub>e</sub>)<sub>0</sub> = amount adsorbed per unit mass of carbon at C<sub>0</sub>

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

V = volume of adsorber(L)  
 ρ<sub>GAC</sub> = apparent density(g/L)

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

F = volumetric flowrate of contaminated liquid treated (L/day)  
 BV<sub>breakthrough</sub> : bed volumes to breakthrough [-]

식 (1)~(4)를 이용하여 도출된 k, 1/n, CUR 및 bed life와 같은 흡착특성을 파악할 수 있는 지표들을 Table 3에 나타내었다. 활성탄 g당 perchlorate에 대한 최대 흡착량(X/M)은 석탄계 활성탄이 768.2 μg/g으로 가장 높게 나타났으며, 다음으로 야자계 299 μg/g, 목탄계 99.2 μg/g으로 나타났으며, 석탄계 활성탄이 야자계와 목탄계 활성탄에 비하여 최대 흡착량이 약 2.6배와 7.7배 정도 큰 것으로 조사되었다.

CUR의 경우 석탄계 활성탄은 perchlorate의 제거를 위해 1일 0.71 g, 야자계나 목탄계 활성탄의 경우는 2.16 g 및 3.45 g의 활성탄을 사용하여야만 제거가 가능한 것으로 조사됨에 따라 석탄계 활성탄의 경우는 다른 재질의 활성탄들에 비해 적은 양으로도 perchlorate를 제어할 수 있는 것으로 나타났다. 활성탄의 흡착용량을 나타내는 k값의 경우 석탄계 재질의 활성탄이 307.2, 야자계 및 목탄계 재질의 활성탄의 경우는 각각 102.5와 94.2로 나타나 석탄계 활성탄이 월등히 높은 k값을 나타내어 실험에 사용된 다른 재질의 활성탄에 비하여 perchlorate 흡착용량이 큰 것으로 조사되었다.

### 4. 결론

2006년 6월부터 12월까지 낙동강 본류 및 주요 지천들에서의 perchlorate 검출현황을 조사한 결과, 2006년 6월에 구

**Table 3.** Adsorption capacity data of 1,4-dioxane in continuous column adsorption test

Item	Unit	coal (new)	coconut (new)	wood (new)
Max. adsorption(X/M)	(μg/g)	768.2	299.0	99.2
BV <sub>breakthrough</sub>	(-)	2301	719	288
Bed life(Y)	(day)	17	25	2
CUR	(g/day)	0.71	2.16	3.45
k	[(μg/g)(L/μg) <sup>1/n</sup> ]	307.2	102.5	94.2
1/n	(-)	0.2286	0.2266	0.01

미 하류인 왜관에서 82.1 μg/L가 검출되었으며, 고령에서 34.1 μg/L, 대암 18.3 μg/L, 적포 12.6 μg/L, 남지 13.6 μg/L 및 부산시 상수 취수원인 물금에서 7.6 μg/L가 검출되었다. 이런 결과는 구미와 왜관 사이에 perchlorate 오염원이 존재하는 것을 의미하며, 하류로 갈수록 perchlorate 검출농도가 낮아졌다. 또한, 2006년 7월부터 12월까지 채수한 낙동강 본류 및 지천 시료에서는 perchlorate가 전혀 검출되지 않아 2006년 6월에 일시적으로 perchlorate가 구미와 왜관 사이의 본류에서 유출된 것으로 나타났다.

활성탄 공정에서의 perchlorate 제거 특성을 조사한 결과, 3.1년 사용탄에서는 활성탄 재질별로 거의 흡착능이 없었으며, 석탄계 및 야자계 재질의 활성탄 신탄에서는 운전초기에는 흡착 제거되어지나, 목탄계 활성탄에서는 신탄에서도 제거능이 낮았으며, 석탄계 신탄은 BV 2,300 정도에서 파과에 도달하였고, 야자계와 목탄계 신탄의 파과시점은 BV 719와 288 정도로 나타났다. 또한, 활성탄 g당 perchlorate에 대한 최대 흡착량(X/M)은 석탄계 활성탄이 768.2 μg/g으로 가장 높았으며, 다음으로 야자계 299 μg/g, 목탄계 99.2 μg/g로 나타났다. CUR의 경우 석탄계 활성탄은 0.71 g/일, 야자계와 목탄계 활성탄은 2.16 g/일과 3.45 g/일로 나타났다. 석탄계, 야자계 및 목탄계 활성탄의 k값은 각각 307.2, 102.5 및 94.2로 나타났다.

### 참고 문헌

- Jackson, E., John, J., "Determination of perchlorate at parts-per-billion levels in plants by ion chromatography," *J. Chromatography A*, **898**(2), 193~199(2000).
- Philip, N. S., Lu, Y., Scott, T., McMurry., Todd, A. A., "Perchlorate in water, soil, vegetation and redents collected from the Las Vegas Wash, Nevada, USA," *Environ. Pollution*, **132**(1), 121~127(2004).
- Tikkanen, M. W., "Development of a drinking water regulation for perchlorate in California," *Analytical Chimica Acta*, **567**(1), 20~25(2006).
- 홍재화, 장명수, 이일수, 배재호, "MBR을 이용한 perchlorate 및 nitrate의 제거," 2004년 대한환경공학회 학술연구발표회 논문집, 경성대학교, pp. 1116~1122(2004).
- Jason, V. D., Andrea, B. K., Purnendu, K. D., "Sample processing method for the determination of perchlorate milk," *Analytical Chimica Acta*, **567**(1), 73~78(2006).
- Li, F. X., Squartsoff, L., Lamm, S. H., "Prevalence of thyroid disease in Nevada counties with respect to perchlorate in drinking water," *J. Occup. Environ. Med.*, **43**(7), 630~634(2001).
- Andrea, B. K., "Environment perchlorate: why it matters," *Analytical Chimica Acta*, **567**(1), 4~12(2006).
- U.S. Environmental Protection Agency(EPA) Home Page. <http://www.epa.gov>(2006).
- Kang, N. G., Todd, A. A., and Jackson, A. W., "Photo-

- chemical formation of perchlorate from aqueous oxychlorine anion," *Analytical Chimica Acta*, **567**(1), 48~56(2006).
10. Michaelidou, U., Achenbach, L. A., and Coates, J. D., "Isolation and characterization of two novel(per)chlorate-reducing bacteria from swine waste lagoons," in Proceedings of the 218th National Meeting of the American Chemical Society as part of the Environmental Division Symposium: Perchlorate in the Environment, the American Chemical Society, Louisiana, pp. 171~182(1999).
  11. Kim, K. J. and Logan, B. E., "Microbial reduction of perchlorate in pure and mixed culture packed-bed bioreactors," *Water Res.*, **35**(13), 3071~3076(2001).
  12. 김화빈, 오정은, 이승윤, 조재원, Shane Snyder, "낙동강 수계 및 수돗물에서의 Perchlorate( $\text{ClO}_4^-$ ) 분석," 대한환경공학회지, **28**(7), 776~781(2006).
  13. 국립환경과학원 낙동강 물환경연구소, "산업폐수의 미량 유해물질 최적관리 방안에 관한 연구," 낙동강수계 2005년도 환경기초 조사사업, pp. 15~27(2005).
  14. 한국표준협회, KS 활성탄 시험방법, KS M 1802(1998).
  15. 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).
  16. 손희종, 노재순, 김상구, 배석문, 강임석, "활성탄 공정에서의 염소 소독부산물 제거특성," 대한환경공학회지, **27**(7), 762~770(2005).