

## 활성탄 재생이 자연유기물질의 흡착에 미치는 영향

# Effect of Reactivation of Activated Carbon on Adsorption of Natural Organic Matter

홍성호\* · 최주솔

Seongho Hong\* · Jusol Choi

충실대학교 환경·화학공학과

(2007년 2월 21일 논문 접수: 2007년 6월 5일 최종 수정논문 채택)

### Abstract

There is no certain definition about advanced drinking water treatment but it is generally known as activated carbon process, membrane process or ozone process which can remove non-conventional pollutants such as taste and odor compounds, and micro-pollutants. There are more than 20 processes related to activated carbon as adsorber or biological activated carbon in Korea. The saturated carbon by pollutants can be reused by reactivation. However, the effect of reactivation on activated carbon is not well understood in terms of changing physical properties of carbon to adsorption capacity of natural organic matter (NOM). In this study, the effects of reactivation on physical properties of activated carbon were investigated by isotherm and breakthrough of NOM. Ash content was increased from 8% to 13.3%. Iodine number is commonly used as an indicator for performance of reactivation. The iodine number was decreased about 20% after reactivating twice. The degree of reactivation can be evaluated by not only iodine number but also apparent density.

**Key words:** adsorption, GAC, reactivation, NOM

**주제어:** 흡착, 입상활성탄, 재생, 자연유기물질

## 1. 서 론

고도정수처리에 대한 정확한 정의 없으나 통상적으로 기존정수처리공정에 의하여 완전히 제거되지 않

는 맛·냄새 유발물질, 미량유기오염물질, 암모니아성 질소, 트리할로메탄 전구물질, 음이온 계면활성제, 자연유기물질 등을 제거하기 위하여 생물활성탄, 오존, 입상활성탄 흡착, 그리고 막여과 등의 공정을 단위 또는 조합하여 운전하는 것을 의미한다. 일반적

\*Corresponding author Tel.: +82-2-820-0628, Fax: +82-2-812-5378, E-mail: shong@ssu.ac.kr (Hong, S.H)

**Table 1.** Characteristics of sand filtered water

Properties	Alkalinity (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	pH	Turbidity(NTU)	DOC(mg/L)	UV <sub>254</sub> (/cm)	UV <sub>272</sub> (/cm)
Sand filtered water	42	7.49	0.1	1.68	0.0154	0.0115

으로 고도정수처리공정은 기존정수처리공정에 추가하여 운영하게 되는데 이는 고도정수처리에서 제거하고자하는 물질이 기존정수처리공정에서 제거하고자하는 대상물질이 다르고 기존정수처리공정의 최적화에 의하여 고도정수처리공정을 보다 효율적으로 운영할 수 있기 때문이다.

고도정수처리시설의 일환으로 도입된 입상활성탄 단독공정 또는 오존과 입상활성탄(생물활성탄)에서는 활성탄의 장기간 사용에 따라 흡착 성능을 상실하여 원하는 수질을 맞추지 못하는 경우에 활성탄을 신탄으로 교체하거나 재생하여야만 한다. 일부 지방자치단체에서는 자체 재생설비를 이용하여 입상 활성탄을 재생하여 사용하고 있고, 일부에서는 외부용역을 통하여 입상 활성탄을 재생하여 사용하고 있다. 또한, 신설예정인 정수장에서도 설계 시부터 입상 활성탄 재생을 염두에 두고 재생설비 도입을 검토하고 있다. 대표적인 예로 국내에서는 부산시 덕산정수장이 총 54지의 여과지에 약 8,500톤의 입상 활성탄이 충전되어 있고 6ton/day 용량의 재생로 2기를 운영하고 있다. 동 정수장은 입상 활성탄을 약 3년 주기로 재생하고 있다.

미국의 신시내티 정수장은 총 12지의 입상 활성탄 여과지에 약 3,200톤의 입상활성탄이 충전되어 있고, 20ton/day의 재생로를 보유하고 있다. 동 정수장에서는 입상활성탄 흡착지의 처리수의 총 유기탄소 농도가 1.0mg/L 이전에 재생하고 있다. 몇몇 연구자들이 입상활성탄의 재생 효율에 대하여 연구 논문을 발표하고 있다. 3회이상 입상활성탄을 재생하여도 자연유기물질의 제거 효율에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보고하고 있으며, 재생에 의하여 macropore가 발달함에 따라서 거대분자인 자연유기물질의 제거에 유리할 수 있다(Westrick 등, 1997). 이와 유사한 결과도 국내에서 보고되어 있다(나영신 등, 2001). 입상활성탄의 재생 후에 재생의 정도를 파악할 수 있는 인자로는 요오드가, 겉보기밀도(apparent density)와 micropore의 변화 등이 있으나, 이들 인자 중 합성유기물질이나 자연유기물질의 흡착에 어떠한 인자가 가

장 영향을 미치는지 그리고 인자들과의 상관관계와 정확성에 대해서는 충분한 검증이 이루어지지 않았다.

따라서 본 논문에서는 흡착등온식을 이용하여 신탄과 재생탄의 흡착특성과 연속공정을 통한 유기물질의 파괴특성을 비교 평가하여 입상활성탄의 물리적 변화가 자연유기물질 흡착에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1. 원수

자연유기물질의 제거 효율을 비교하기 위하여 실험에 사용한 원수는 서울특별시 K정수장의 모래여과수를 채수하여 사용하였으며, 원수의 특성은 **Table 1**에 정리하였다.

### 2.2. 입상 활성탄

석탄계 입상 활성탄은 미국산 석탄계 입상 활성탄 F-400(Calgon Carbon Corp. Pittsburgh, USA) 신탄 및 1회와 2회 재생탄을 사용하였다. 재생되기 전에 각각 약 3년 정도 생물활성탄으로 운전되었다. 생물활성탄의 운전 조건은 전오전 주입율은 원수의 용존유기탄소(dissolved organic carbon: DOC) 대비로 0.2에서 0.5mgO<sub>3</sub>/mgDOC으로 7분의 접촉시간으로 운전되었다. 생물활성탄 공정의 공담접촉시간(empty bed contact time: EBCT)은 10분, 선속도는 15m/hr 그리고 역세척 주기는 계절에 따라 4일에서 9일 간격으로 하였다. 각 활성탄의 물리적 특성은 **Table 2**에 정리하였다. 활성탄은 열재생 되었으며, 열재생시 조건은

**Table 2.** Comparison of reactivated carbons with virgin carbon

Properties \	GAC	신탄	1회 재생탄	2회 재생탄
Iodine No.(mg/g)		1000	900	810
Ash. weight(%)		8	12	13.3
Hardness No.		90	98	97.5
Apparent Density(g/ml)		0.48	0.50	0.49

건조, 탄화 및 활성화를 거쳐 재생하였으며, 체류시간은 2.5시간, 주입 증기량은 1.2kg H<sub>2</sub>O/kg GAC으로 최종 온도는 900°C로 재생하였다.

### 2.3. 회분식 등온흡착실험

입상 활성탄을 이용하여 자연유기물질 (natural organic matter: NOM)에 대한 흡착등온식을 얻기 위하여 일정한 초기농도에서 활성탄의 양을 변화시키는 'Bottle point isotherm technique'을 사용하였다. 평형에 도달하는 시간은 입자크기의 제곱에 반비례하므로 평형에 도달하는 시간을 단축하기 위하여 막자사발을 사용하여 모든 입상 활성탄을 100×200 US Standard Mesh (average dp = 0.11mm)로 분쇄하여 사용하였다. 활성탄의 양은 ±0.5mg의 오차 범위 내에서 측정된 후에 각각 330mL의 시료병에 투입하였다. 시료병은 내부의 유기물질을 제거하기 위하여 0.1N 염산으로 세척 후 초순수로 다시 세척한 다음에 105°C 건조기에서 하루 이상 건조 후 이용하였다. 시료와 접촉되는 부분에는 테프론으로 코팅된 Lids를 사용하였다. 1회의 흡착등온실험마다 서로 다른 양의 활성탄을 투입하여 사용하였다. 모든 시료병은 미생물에 의한 영향을 최소화하기 위하여 빛을 차단시켰다. DOC와 UV<sub>254</sub>의 초기농도 변화를 측정하기 위하여 활성탄을 함유하지 않은 2개의 시료병을 준비하였다. 일반적으로 자연유기물질의 흡착에서 평형에 도달하는 기간은 7일이면 충분하다고 알려져 있다. 모든 시료병은 Tumbler에서 약 10rpm의 속도로 7일간 교반 하였다. 7일 후에 시료병들을 Tumbler에서 이탈시킨 후 수중에 존재하는 활성탄 입자를 제거하기 위하여 0.45µm Millipore membrane으로 여과하였다. 이렇게 얻어진 시료는 즉시 분석하거나, 만약 즉시 분석이 불가능할 때에는 4°C의 냉장고에서 분석할 때까지 보관되었다.

### 2.4. Mini-column Test

세공내로의 확산이 입자크기와 무관한 경우 (constant diffusivity, CD),

$$EBCT_{SC}/EBCT_{LC} = (dsc/dLC)^{2-x} = tsc/t_{LC} \quad (\text{단 } X=0) \quad (3-1)$$

에서 X=0이 된다. 본 식에서 아래첨자 LC는 실제

**Table 3.** Operating conditions of Mini-Column

Parameter	Value
Scaling factor(SF)	96
Size of activated carbon for large column	1.1mm
Size of activated carbon for small column	0.112mm
Column length	5.6cm
Column diameter	3mm
Flow rate	2.54mL/min

흡착지에서 사용된 활성탄의 입경을 나타내고, 아래첨자 SC는 mini-column에서 사용된 활성탄의 입경을 나타낸다.

위 (3-1)식에서 mini-column을 사용하는 경우에는 확산계수와 입자크기와는 무관하다는 가정 하에 CD를 사용하였다. Mini-column을 이용하여 이에 따른 EBCT<sub>sc</sub>, length, 유량, 유속, 시료량 등을 산정하기 위해서는 세공내로의 확산이 입자크기와 무관하다는 전제하에 X=0으로 본다.

#### 〈Mini-Column EBCT〉

$$EBCT_{sc} = (dsc/dLC)^2 * EBCT_{LC} \text{ 이므로}$$

$$EBCT_{LC} = 15\text{min일 때,}$$

$$EBCT_{sc} = 15\text{min} * 0.01036 \div 0.1554\text{min}$$

Mini-column의 자세한 운전 조건을 **Table 3**에 정리하였다.

### 2.5. 분석항목 및 방법

원수로 사용된 모래여과수에 대하여 pH, 탁도, DOC, UV<sub>254</sub>(Ultra Violet at 254nm)를 분석하였고, pH 분석은 pH meter model 420A(ORION)을 이용하였고, 탁도 분석은 Turbidity meter Model 2100A(HACH)을 이용하였고, UV<sub>254</sub>는 Specord 200 (Analytik Jena AG, Germany)을 이용하였다. 각각의 활성탄으로 처리된 원수에 대하여 분석된 항목은 DOC와 UV<sub>254</sub>이다.

#### 2.5.1. 용존유기탄소

DOC의 측정은 시료를 입경이 0.45µm membrane 여과한 후, Multi N/C 3000 (Analytik Jena AG, Germany)을 이용하여 NPOC(Non Purgeable Organic Carbon)방법을 사용하여 분석을 하였다. DOC의 표

준시료로는 Potassium Hydrogen Phthalate(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(COOK)(COOH)), Nacalai Tesoue, Japan)가 사용되었으며 산화방식은 combustion 방식이며, 검출은 NDIR(Non dispersive Infrared detector) 방식이다.

### 2.5.2. 표면적

신탄과 재생탄의 표면적과 흡착능의 상관관계를 고찰하고자 ASAP 2010(Micromeritics, USA)를 이용하여 표면적을 분석하였다. BET이론에 근거하여 비표면적을 재는 기기는 Static, Dynamic Flow 방법을 쓰는 두 가지 기기로 대별되며 본 연구에서는 Static 방법을 이용한 기기를 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 재생에 따른 활성탄의 물리적 특성 변화

Table 2에서는 신탄과 재생탄의 물리적 특성변화를 나타낸 것이다. 이에 따른 결과를 살펴보면 요오드가 신탄과 비교하여 1회 재생 후에는 약 100 mg/g이 감소하였고, 2회 재생에 의해서는 190mg/g이 감소하였다. 또한 재생 후 Ash의 함량 및 경도는 증가하는 것으로 나타났으나, 겔보기밀도는 오차 범위에서 증가하는 것으로 나타났다. 재생에 따른 표면적과 미세공극의 변화를 Table 4에 나타내었다. 미세공극이 1회 재생에 의하여 약 19% 정도 감소함에 따라 전체적인 비표면적의 감소는 약 8%로 나타났으며, 2회 재생에 의해서는 미세공극의 약 30%가 감소함에 따라 비표면적은 15% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 또한 미세공극의 면적이 감소함에 따라서 전체 표면적에서 차지하는 미세공극의 면적도 감소하는 것으로 나타났고 재생에 따라서 미세공극의 부피도 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 실질적으로 비표면적의 변화는 재생에 따라 감소하는 것으로 나타났으며 이는 Table 4에 나타난 바와 같이 재생에 따른 미세공극의 감소가 원인인 것으로 생각된다.

활성탄의 재생에 따른 물리적 특성 변화에 대한 자료가 그리 많지는 않으나, 미국 정수장 중에서 가장 활성탄을 많이 사용하고 있고, 자체 재생을 수행하고 있으며, 재생과 관련하여 많은 경험을 가지고 있는 쉐시내티 정수장의 자료는 Table 5와 같다. 쉐시내티 정수장에서는 본 실험에서 사용된 활성탄과 동일한

Table 4. Comparison of surface area and micro-pore area before and after reactivation

	신탄	1회 재생탄	2회 재생탄
Surface area(m <sup>2</sup> /g)	1005.7	925.2	858.5
Micro-pore area(m <sup>2</sup> /g)	817.0	663.8	576.0
Micro-pore area(%)	81.2	71.7	67.1
Micro-pore volume(cm <sup>3</sup> /g)	0.408	0.320	0.276

Table 5. Comparison of reactivated carbon properties with virgin carbon for Cincinnati water works

Properties \ GAC	신탄	재생탄
Iodine No.(mg/g)	1080	883
Ash. weight(%)	6	11
Hardness No.	-	-
Apparent Density(g/ml)	0.50	0.39

제품을 사용하고 있으며, 활성탄 흡착지의 운영은 생물활성탄이 아닌 물리적 흡착지로 운영하고 있고 약 6개월마다 재생하고 있다. 신탄과 재생탄에서 쉐시내티 정수장과 본 실험결과의 물리적 특성을 고찰한 결과 쉐시내티 정수장의 경우 요오드가의 감소와 Ash의 양이 증가하였다는 점에서 본 실험결과와 상당한 유사성을 나타내었다. 그러나 겔보기밀도에서 쉐시내티 정수장의 경우 감소하였으며 본 실험에서는 오차 범위에서 증가하는 것으로 나타났다.

국내에서 활성탄을 도입하여 운영하고 있는 P시의 H 정수장에서 운영하고 있는 생물활성탄지에서 약 4년 6개월 사용되었던 야자계의 활성탄에 대한 재생 자료는 Table 6과 같다. 야자계 활성탄과 석탄계 활성탄을 직접적으로 비교하는 것이 큰 의미가 없을 수는 있으나 재생에 따른 활성탄의 물리적 특성 변화에서는 공극의 변화나 요오드가의 변화 등에서는 의미가 있다고 생각한다. 본 정수장에서 사용된 활성탄의 경우에는 야자계 활성탄이므로 요오드가가 석탄계에 비하여 높게 나타났으며, 재생에 의하여 약 200mg/g이 감소하는 것으로 나타났다. 재생에 의하여 Ash의 양은 증가하였고, 경도와 겔보기밀도는 감소하는 것으로 나타났다. 재생활성탄의 물리적 변화측면에서 비교해볼 때 H 정수장과 쉐시내티 정수장의 재생탄의 물리적 특성변화는 유사한 특성을 나타내었다. 그러나 본 연구에서는 재생에 따라 겔보기밀도가 오차 범위에서 증가하는 것으로 나타나 커다란 차이가 없

**Table 6.** Comparison of reactivated carbon properties with virgin carbon for H water plant in P City

Properties \ GAC	신탄	재생탄
Iodine No.(mg/g)	1,200	1,010
Ash weight(%)	6	11
Hardness No.	99	94.1
Apparent Density(g/ml)	0.47	0.44

었다. 위의 결과와 다소 상이한 특성을 나타내었다.

**3. 2. 재생탄에서 자연유기물질의 흡착 특성**

신탄과 재생탄에서 활성탄의 흡착능을 평가하기 위하여 초기농도를 일정하게 유지한 흡착등온식을 적용하여 평가한 결과 **Table 7**과 같은 결과를 얻었다. 신탄이나 재생탄에서 모두 흡착이 되지 않는 물질이 약 0.25mg/L로 총 농도에서 차지하는 비율이 15%내외로 나타났다. 흡착되지 않는 물질은 활성탄 흡착지의 운영 시에 흡착지의 층고가 아무리 길어도 제거되지 않는 물질로 초기과과를 나타내는 물질이다. 신탄에서는 흡착이 잘되는 물질로 구분할 수 있는 K값이 52인 물질의 경우에 가장 높은 부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 하지만 재생탄에서는 미미하나마 K값도 감소하는 것으로 나타났으며 2회 재생탄의 경우에는 흡착이 잘되는 물질이 거의 없는 것으로 나타났다. 흡착등온 실험에서 나타난 결과를 통하여 활성탄을 비교한다면 신탄과 재생탄의 흡착능의 차이가

있으며 자연유기물질의 파과에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

**Fig. 1**은 본 실험에서 사용된 F-400 신탄, 1회 재생탄 그리고 2회 재생탄의 DOC 파과 실험 결과를 나타내었다. 신탄과 재생탄 모두에서 약 20~25%의 초기과과를 나타내었으며 이는 흡착등온실험에서 얻어진 15%보다 약 5내지 10%가 높는데 이는 회분식과 연속식의 차이에서 생기는 차이로 생각된다. 파과가 진행됨에 따라서 신탄, 1회 재생탄 그리고 2회 재생탄의 순으로 완만한 기울기의 파과특성을 나타내었다. DOC 제거율 50% 지점을 기준으로 파과 점을 살펴보면 신탄이 약 125일, 1회 재생탄, 2회 재생탄이 약 75일로 나타났으며 재생의 횟수와 파과 특성 간에는 커다란 차이가 나타나지 않았다. 하지만 활성탄 물리적 특성에 있어서 재생탄의 경우에는 신탄과 재생탄에서 요오드가의 변화가 1회 재생 시에 약 100mg/g씩 감소하는 것으로 나타났으며 결보기밀도는 약 0.48g/cm<sup>3</sup>에서 0.5g/cm<sup>3</sup>으로 커다란 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한 1회 재생 시와 2회 재생 시 요오드가의 변화 차이는 90mg/g으로 나타났으나 요오드가와 재생횟수에 따른 파과특성 차이는 크게 나타나지 않았다.

**Fig. 2**에서는 썬시내티 정수장에서 수행된 자연유기물질의 파과 특성을 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 신탄과 재생탄에서 자연유기물질의 파과 특성이 상당히 유사한 것으로 나타났으며 약 운전일

**Table 7.** Comparison of Freundlich K values and initial concentration for each fraction of virgin and reactivated carbon

F400 - Virgin		Optimized K (error = 2.53%)			
Raw water	K <sub>f</sub> values	0	3	28	52
C <sub>0</sub> = 1.62	C <sub>1,0</sub> (mg/L)	0.26	0.11	0.60	0.66
(mg/L)	C <sub>1,0</sub> (%)	15.81	6.79	36.89	40.51
F400 - React.1		Optimized K (error = 1.89%)			
Raw water	K <sub>f</sub> values	0	5	13	46
C <sub>0</sub> = 1.62	C <sub>1,0</sub> (mg/L)	0.23	0.20	0.47	0.71
(mg/L)	C <sub>1,0</sub> (%)	14.49	12.64	29.11	43.76
F400 - React. 2		Optimized K (error = 2.16 %)			
Raw water	K <sub>f</sub> values	0	7	32	48
C <sub>0</sub> = 1.62	C <sub>1,0</sub> (mg/L)	0.27	0.24	1.10	0
(mg/L)	C <sub>1,0</sub> (%)	16.92	15.09	67.77	0.22

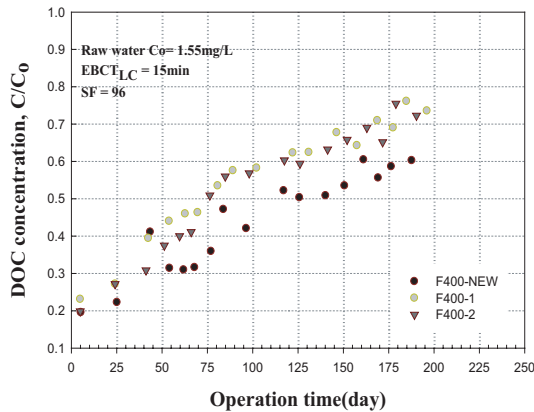


Fig. 1. Comparison of breakthrough pattern for virgin and reactivated carbon.

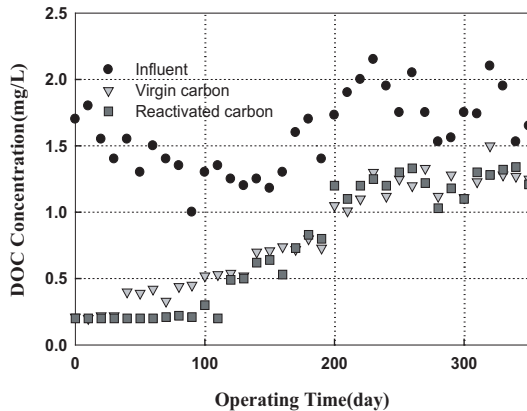


Fig. 2. Comparison of breakthrough pattern for virgin and reactivated carbon at Cincinnati water works.

수가 150일까지는 재생탄에서 자연유기물질의 제거가 우수한 것으로 나타났다. 파과 특성이 유사하게 나타났음에도 불구하고 실제 활성탄의 물리적인 특성은 요오드가의 경우에 약 200mg/g이 감소하였고, 걸보기밀도의 경우에는 0.5에서 0.39g/ml로 감소하였다. 따라서 일반적으로 알려져 있는 높은 요오드가와 자연유기물질의 파과와는 상관관계가 그리 높지 않았으나, 걸보기밀도의 감소와는 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

P사에서 운영 중인 H 정수장에서 수행된 결과에서는 pilot 결과와 실제 공정에서의 결과를 제시하고 있는데, pilot의 결과에서는 초기에 재생탄에서 약 10%의 우수한 제거를 나타내고 파과의 후반부로 갈수록

커다란 차이가 없다고 보고하고 있으며, 실제 공정에서는 생물활성탄으로 운영되는 것을 감안하여 재생탄에서 약 3개월 이상 긴 흡착능력을 가지고 양호한 수질을 생산할 수 있다고 보고하고 있다. 하지만 실제 흡착뿐만이 아니라 생물분해가 관여하기 때문에 실제 흡착에 의한 것을 정량적으로 평가하기는 어려우나 재생에 따라서 활성탄의 흡착능력이 급격히 감소하지 않는 것을 나타내고 있다. 또한 H정수장에서 재생에 의해 요오드가가 약 200mg/g 정도 감소하는 것으로 보고하고 있고, 걸보기밀도도 0.47에서 0.44g/ml로 감소한다고 보고하고 있다(나영신 등, 2001).

#### 4. 결론

본 실험에서는 활성탄의 재생에 따라 발생하는 활성탄의 물리적 변화가 소독부산물의 생성에 직접적인 영향을 미치는 자연유기물질의 제거에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하였다. 신탄과 1회 재생탄 그리고 2회 재생탄을 비교하였는데 신탄과 비교하여 2회 재생에 의하여 요오드가가 약 200mg/g 감소하는 것으로 나타났다. 또한 걸보기밀도는 0.48에서 0.49g/ml로 오차 범위에서 증가하여 변화가 없었으며, ash의 양은 증가하는 것으로 나타났다.

흡착등온식에 나타난 신탄과 재생탄의 흡착능 차이가 파과 특성에서도 유사하게 나타나 재생탄의 파과 특성을 평가하는데 흡착능을 사용할 수 있을 것으로 생각된다. 현재 재생탄의 재생 정도의 지표로 일반적으로 사용되고 있는 요오드가와 자연유기물질의 파과 특성과의 관계는 요오드가 감소에 따른 파과 특성 차이는 크게 나타나지 않았다. 따라서 자연유기물질의 파과와의 상관성 측면에서 볼 때 요오드가와 더불어 걸보기밀도도 재생 정도의 지표로 사용될 수 있다고 생각한다. 또한 재생 후에 활성탄의 흡착능은 재생전의 사용 연한, 운영방법, 그리고 재생 방법에 따라 크게 차이가 나므로, 이를 실 공정에 적용하여 파과를 예측하기 위해서는 활성탄 흡착능이나 mini-column 실험등을 통하여 검증할 필요가 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 숭실대학교 교내연구비의 지원으로 수

행되었습니다.

### 참고문헌

1. 나영신, 류동춘, 김상구, 배은영, 송미정, 손희종, 이상준 (2001), 생물활성탄 공정에서 신탄과 재생탄의 수처리특성, *대한환경공학회지*, **23**(6), pp. 1001~1012
2. 윤호석, 도화석, 한개희, 권택규, 김명시, 권순국, (2004) 정수처리공정에서 신탄과 재생탄의 유기물질 제거효과, *춘계학술발표회 논문집*, 대한상하수도학회
3. Moore B.C., Cannon F., Westrick J.A., Metz D.H, Shrive C.A., DeMarco J., Hartman D.J. (2001), Changes in GAC pore structure during full scale water treatment at Cincinnati: a comparison between virgin and thermally reactivated GAC, *Carbon*, **39**, 789-807
4. Crittenden, J.C., Luft P., Hand D.W., Oravitz J.L., Looper S.W., Metin A. (1985), Prediction of multicomponent adsorption using ideal adsorbed solution theory, *Environmental Science & Technology*, **19**, pp. 1037-1045
5. Newcombe, G., Drikas D, Hayes R. (1997) Influence of Characterized Natural Organic material on Activated Carbon Adsorption, *Water Resources*, **31**(5), pp. 1065-1073
6. Hong S. (1995) Activated carbon adsorption of organic matter: backwashing, Desorption and attenuation, Ph, D dissertation, University of Cincinnati, Ohio
7. Westrick J.A, Shrive C.A., DeMarco J., Metz D.H, Pohlman R.C. (1997) A Full-Scale comparison of Virgin GAC to Reactivated GAC, AWWA-WQTC, Nov. 9-12, Denver, CO.