

## 既存 淨水處理方法으로 除去가 어려운 有機物에 對한 實驗的 研究

우달식 · 남상호  
건국대학교 환경공학과

## Retrospect on Refractories in Water Treatment

Dal-Sik Woo and Sang-Ho Nam

Department of Environmental Engineering, Kon-Kuk University

### ABSTRACT

As a basic experiment to develop biological pretreatment process in water treatment, the experiments on biodegradability and isothermal adsorption of activated carbon were performed on refractories such as humic acid,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , phenol and ABS which caused the problems in drinking water treatment. Also, the treatabilities on humic acid were examined in the continuous flow type reactors.

The removal efficiencies of humic acid,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , phenol and ABS in the biodegradable experiments for 5 days were 20.1%, 73.4%, 91.7% and 97.5%, respectively.

In the isothermal adsorption test of refractories on activated carbon to be used as a media in the continuous flow type reactors, ABS and phenol are adsorbed easily, but humic acid and  $\text{NH}_3\text{-N}$  are difficult to be done.

The removal efficiencies of humic acid in granular activated carbon(GAC) reactor were about 7-8% higher than in biological activated carbon(BAC) reactor. The removal efficiencies of humic acid in biological fluidized bed(BFB) reactor were about 30% in GAC media, but were almost zero in sea sand media.

**Keywords :** Biological pretreatment process, biodegradability, isothermal adsorption, humic acid, biological fluidized bed

### I. 서 론

농본사회의 특성을 지녔던 1960년대 초까지만 해도 도시와 농촌은 자연발생적인 취락으로 발전되어 있었고, 영농방식도 유기농법, 즉 퇴비사용이 주였으므로 하천의 수질은 상·중·하류 모두 희석과 자정 작용에 의하여 자연상태를 유지할 수가 있었다. 그러나 산업화로 영농방식은 급비와 농약을 이용하게 되었고, 하천수계의 중·하류 수역은 도시화 및 산업화로 토지이용이 활발하게 되어 상류 수역에 비하여 수질이 더욱 열악하게 되었다.

기존의 정수공정은 상수원수중 부유 현탁물질의 제거 및 병원성 미생물의 소독이 주목적이었으나, 최근에는 암모니아성 질소, 페놀, 합성세제, humic 물질 등과 같은 제거가 곤란한 물질들이 증가함으

로써 기존의 침전·여과·소독공정만으로는 음용수의 목표수질을 얻기 위한 정수처리가 거의 불가능하게 되었다.<sup>1,2)</sup>

이러한 문제점을 해결하기 위하여 기존의 정수공정에 활성탄 시설, 오존처리 시설 및 생물학적처리 시설을 조합하는 고도정수처리에 대한 연구가 국내 외에서 많이 이루어져 왔다.<sup>3,5)</sup>

고도정수처리 기술의 하나인 생물처리는 기존의 정수공정으로는 효과적으로 제어하기 어려운 물질들을 제거하는데 극히 유효한 방법이며, 이를 정수처리의 전처리기술로 도입한다면 매우 유용한 공정으로 이용될 수 있을 것이다.<sup>6,9)</sup>

본 연구는 상수원수의 생물학적 전처리 공정개발을 위한 기초 자료를 얻기 위해 기존 정수처리방법으로 제거가 어려운 물질인 humic acid, 암모니

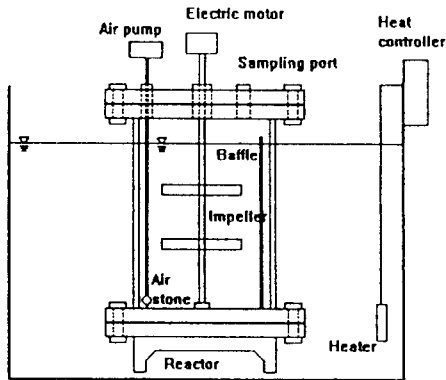


Fig. 1. Schematic diagram of biodegradable reactor.

아성 질소, 합성세제 및 케놀에 대한 생분해도 실험, 연속유형실험(BAC, GAC 및 BFB)에 사용된 활성탄의 흡착실험, 연속유형실험에서 humic acid의 처리특성에 관하여 연구하였다.

## II. 실험방법

### 1. 생분해도 실험

#### 1) 실험장치

본 연구에 사용된 회분식 생분해도 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 반응조는 내경 18 cm, 높이 25 cm인 아크릴 원통을 이용하여 유효용적 5l로 4개의 반응조를 제작하였다. 반응조 하부에 산기석을 설치하여 산소를 공급하였으며, 모터에 연결된 paddle를 이용하여 40 rpm으로 교반시켰고, 단락류 형성을 방지하기 위해 반응조 측면에 정류판(baffle)을 설치하였고, 항온수조에 자동온도조절장치를 설치하여  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 온도를 유지시켰다.

#### 2) 대상물질 제조 및 분석방법

Humic acid는 일본의 동경화성공업(주)의 humic acid (nitrohumic acid) 1.0g에 0.1M NaOH를 조금씩 가하여 용해한 다음, 증류수 100 ml로 희석한 후 HCl를 첨가하여 pH 7~8로 조정하여, 증류수로 전량이 1l가 되게 하여 1,000 mg/l의 표준용액으로 제조하여 사용하였다. Humic acid의 농도를 정량하기 위해서는 UV-VIS Spectrophotometer(Shimadzu, Model No. UV-240, Japan)를 사용하여 UV 254 nm에서 흡광도를 측정하였다.

암모니아성 질소, 합성세제, 케놀은 각각  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (Hayashi Pure Chemical Industries, Ltd. 제품), Dodecylbenzenesulfonic acid(BDH Chemicals의 1

Table 1. Analytical methods of water quality

Items	Analytical methods
Temperature	Alcohol thermometer
pH	Digital pH meter(CORNING Ion Analyzer 250)
DO	Membrane electrode method(YSI Model 57)
Turbidity	Nephelometric method(HACH Model 2100A Turbidimeter)
Alkalinity	Titration method
BOD	Standard method(18th)
$\text{NH}_3\text{-N}$	Indophenol method
Humic acid	UV-VIS spectrophotometer(Shimadzu, Model No. UV-240)
Phenol	Standard method(18th)
ABS	Methylene blue method
SS & VSS	Standard method(18th)

급 시약),  $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$  (Yakuri Pure Chemical Co. 제품)를 사용하여 대상물질로 이용하였다. 모든 분석방법은 Table 1과 같이 미국의 표준수질조사방법<sup>10)</sup>과 수질오염공정시험법<sup>11)</sup>에 의해 수행하였다.

#### 3) 실험방법

한국공업규격의 합성세제 생분해 시험방법<sup>12)</sup>에 따르면 가정하수로부터 채취한 활성오니를 이용하여 진탕배양기(150 rpm의 교반,  $25 \pm 3^\circ\text{C}$ )에 100 ml당 1 ml의 비율로 접종하여 72시간 순화 배양하여 초기, 7일 및 8일 후에 시료를 채취하여 정량법에 의한 생분해도 실험을 하도록 규정되어 있으나, 그 방법은 미생물의 농도, 미생물의 종류 등이 불명확하여 수치리에 미치는 영향을 정확히 파악할 수 없다.

본 실험은 별도의 미생물 식종없이 한강수계인 영동대교 상류지점에서 매일 채수한 상수원수를 사용하였다. 반응조에 원수를 5l까지 채우고 원수내에 존재하는 미생물의 증식과 순응을 위하여 60 rpm으로 교반하였다. 충분한 용존산소를 유지하기 위하여 반응조하부에 산기석을 설치하여 폭기를 행하였다. 30분간 원수를 주입한 후, 22시간 교반과 폭기를 행하였고, 1시간 정지하여 침전시킨 후, 30분간 상침수 3l를 유출시키고 다시 5l까지 원수를 채웠다. 미생물의 성장을 위하여 glucose 5 mg/l와 부식도 추출물 소량을 유입과 동시에 첨가하였다. 약 1달간의 순응기간을 거쳐 MLVSS농도가 정상상태가 된 것을 확인한 후, humic acid, 암모니아성 질소, 케놀, 합성세제를 저농도부터 주입하여 미생물이 적응할 수 있도록 하였다. 대상물질에 완전히 적응이 된 후, 대상물질을 반응조에 투입하여 5일간의 분해과정과

미생물의 변화 등을 검토하였다.

**2. 활성탄 흡착 실험**

1) 실험재료

본 실험에 사용된 활성탄은 이탄(peat)계의 정형 입상 활성탄으로 NORIT사 제품(NORIT ROW 0.8 SUPRA)을 사용하였으며, 특성은 Table 2와 같다.

2) 실험방법

활성탄의 흡착능을 시험하기 위하여 bottled point법<sup>13)</sup>을 이용하여 일련의 흡착실험을 하였다. 입상 활성탄은 2차 증류수에 24시간 담가두고 105°C의 온도에서 24시간 건조한 후 분쇄하여 270 mesh(0.053 mm)의 체를 통과한 미세한 가루를 사용하였다. 진탕 항온조의 온도는 20±0.5°C를 유지하였다. 각 대상물질의 농도를 100 mg/l로 한 후 100 ml씩을 미리 준비한 5개의 삼각플라스크에 넣고

진탕기에 고정시켰다. 활성탄 0.05 g, 0.10 g, 0.15 g, 0.20 g, 0.25 g을 각각의 삼각플라스크에 넣고 마개를 한후 24시간 진탕하였다. 진탕후 내용물을 GFC여과지로 흡인 여과하여 대상시료의 농도를 측정하였다. 평형농도를 구한 후 Freundlich식을 이용하여 대상물질의 흡착능을 고찰하였다.

**3. 연속유형 실험**

1) 실험장치

(1) BAC 및 GAC법

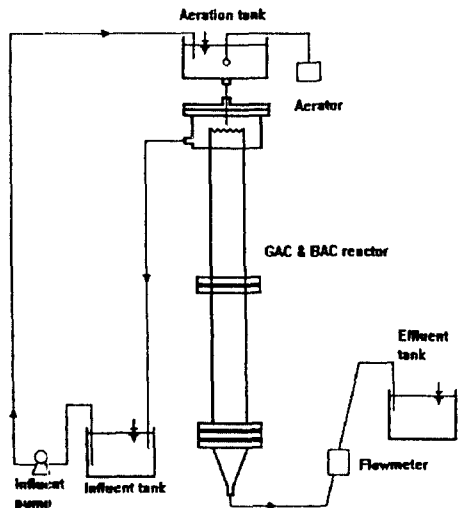
본 실험에서 사용한 생물활성탄(Biological Activated Carbon: BAC)과 입상활성탄(Granular Activated Carbon: GAC)반응조의 구조는 Fig. 2와 같다. 반응조는 두께 5 mm의 무색투명한 원통형 아크릴 관으로 내경 50 mm, 높이 1,000 mm의 크기로 2개의 반응조를 제작하였다. 반응조에는 Table 3과 같이 하부에서부터 자갈, 모래, 활성탄의 순서로 여재(media)를 충전시켰다. 자갈과 모래는 실제 정수장에서 이용되고 있는 것을, 활성탄은 Table 1의 Norit사 제품을 사용하였다. 원수의 유입은 정량주입펌프(Master flex pump model 7518-00)를 이용하였으며,

**Table 2.** Properties of NORIT ROW 0.8 SUPRA

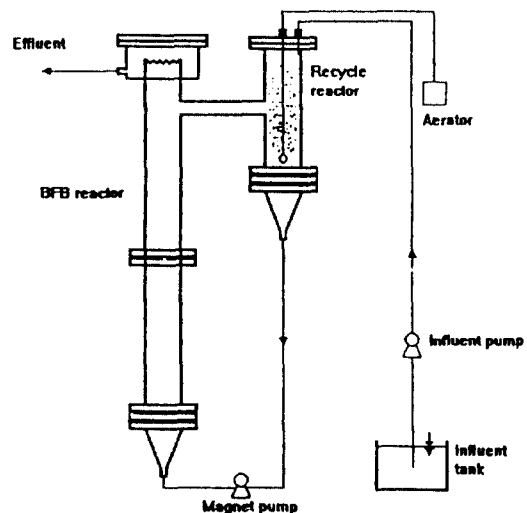
Classification	Unit	Value
Apparent density	g/l	380
Density backwashed drained	g/l	335
Moisture (as packed)	%	2
Ash content	%	8
Phenol adsorption	%	6
Iodine adsorption	mg/g	1,100
Total pore volume	cm <sup>3</sup> /g	1.0
Dechlorination halving value	cm	4
Ball pan hardness	%	94

**Table 3.** Media in column

Media	Depth
GAC(NORIT ROW 0.8 SUPRA)	40 cm
Sand (0.84~1.41 mm)	13 cm
Gravel (2.0~5.0 mm)	10 cm



**Fig. 2.** Schematic flow diagram of BAC & GAC reactor.



**Fig. 3.** Schematic flow diagram of BFB reactor.

**Table 4.** Composition of Nutrients

Components	Concentration(mg/l)
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	21.75
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	8.5
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	44.6
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	22.5
CaCl <sub>2</sub>	27.5
FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.25
NH <sub>4</sub> Cl	1.7
pH	7.2

체류시간은 15분으로 설정하였으며, 52.3 ml/min의 유량으로 하향류가 되게 하였다. 반응조 상부에 폭 기조를 만들어 반응조로 유입되는 원수의 용존산소가 충분하도록 하였다.

#### (2) 생물학적 유동상법

생물학적 유동상(Biological Fluidized Bed: BFB) 반응조는 Fig. 3과 같이 두께 5 mm의 무색투명한 원통형 아크릴관을 재질로 하여 내경 50 mm, 높이 1,000 mm의 크기로 2개의 반응조를 제작하였다. 반응조 상부에 순화조를 설치하였다. 원수는 정량주입펌프(Master flex pump model 7518-00)를 사용하여 순환조로 유입시켰다. 여재는 NORIT사의 활성탄과 흡착능력이 전혀 없는 해사(Shinyo Pure Chemicals Co. 제품)를 사용하였다. 여재의 유동과 유체의 순환 역할을 동시에 할 수 있도록 Magnet Pump(IWAKI, MD-6A)를 이용하였다. 체류시간은 15분, 여층의 팽창률은 20%(충전높이 40 cm, 팽창높이 48 cm), 유량은 62.8 ml/min으로 설정하였으며 유체의 흐름은 상향류로 조절하였다. 충분한 산소를 유지시키기 위해 순환조에 산기석을 설치하였다.

#### 2) 실험방법

##### (1) BAC 및 GAC법

유입원수는 수돗물을 활성탄 여과탑에 통과시켜 잔류염소를 제거한 후 Table 4와 같이 영양염을 첨가하고, 기본정수처리계통에서 제거가 어려운 물질의 지표로 이용될 수 있는 humic acid의 농도를 3 mg/l로 제조한 인공원수를 사용했다.

BAC반응조는 회분식 반응조에서 약 3개월간 humic acid에 순응된 미생물을 부착·성장시켰다. GAC반응조는 미생물의 영향을 배제하기 위하여 유입원수에 살균제인 차아염소산칼슘(Ca(OCl)<sub>2</sub>) 3 mg/l를 주입하였다.

##### (2) 생물학적 유동상법

생물학적 유동상법의 여재를 선정하기 위해 활성탄과 해사에 BAC반응조와 같은 방법으로 미생물을

**Table 5.** The quality of raw water

Items	Min	Max	Mean
Water temp.(C)	6.5	24.5	16.9
pH	6.9	7.8	7.3
DO(mg/l)	7.5	12.2	9.2
Turbidity(NTU)	5.6	37.2	17.6
Alkalinity(mg/l)	27.0	45.2	35.2
BOD(mg/l)	1.8	3.0	2.1
NH <sub>3</sub> -N(mg/l)	0.02	0.21	0.09
Humic acid(mg/l)	0.32	1.23	0.74
Phenol(mg/l)	0.003	0.008	0.005
ABS(mg/l)	0.030	0.231	0.088

접종시켰다. 유입원수는 BAC와 GAC법에 이용된 인공원수를 사용하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 한강원수의 수질

생분해도 실험과 연속유형 실험의 미생물 순응에 사용된 원수는 한강수계인 영동대교 상류지점에서 채수하였다. 실험기간중 원수의 수질은 Table 5와 같다.

BOD는 평균 2.1 mg/l로서 하천 수질환경기준 II등급이었다. NH<sub>3</sub>-N의 농도는 0.02~0.21 mg/l의 변화가 있었으며, 염소처리시 THM생성전구물질인 humic acid는 평균 0.74 mg/l이었고, phenol은 평균 0.005 mg/l, 합성세제는 평균 0.088 mg/l로 나타났다.

#### 2. 생분해도 실험

회분식 반응조에서 기존의 정수공정으로는 잘 제거되지 않는 humic acid, 암모니아성 질소, 합성세제, 페놀에 대한 생분해도 실험을 행하였다. 1차적으로 미생물의 배양은 한강 원수를 사용하여 약 30일간 회분식 반응조내에서 순응시켜 30~50 mg/l의 미생물군을 형성시켰다. 그 미생물에 특징 기질(대상물질)을 주입하였을 때 초기에 MLVSS는 전반적으로 감소하는 경향을 보였으나, 점차 미생물 농도는 일정한 상태에 이르렀다. 정상상태하에서 대상물질을 저농도로부터 점차 농도를 높여 실제 한강원수에서 나타날 수 있는 농도보다 비교적 높은 값이라고 생각되는 humic acid 3.0 mg/l, 암모니아성 질소 3.0 mg/l, 합성세제 5.0 mg/l, 페놀 0.1 mg/l로 주입시켜 순응시켰다. 정상상태하에서 대상물질에 대한 5일 동안의 분해과정으로 인한 제거율, MLVSS의 변화, pH의 변화를 관찰한 결과를 Fig. 4~Fig. 6에 나타

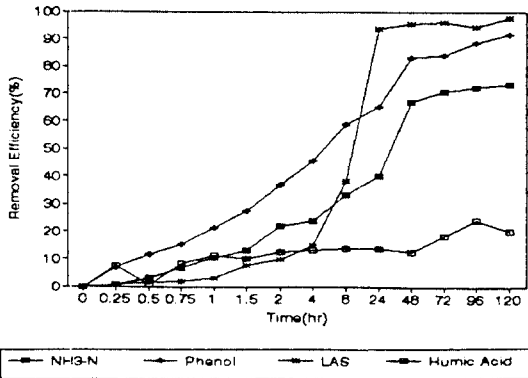


Fig. 4. Removal efficiencies with time.

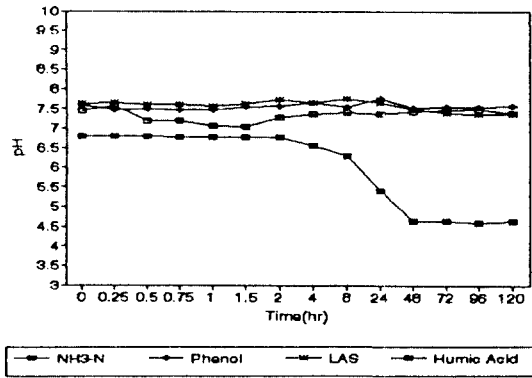


Fig. 6. Variation of pH with time.

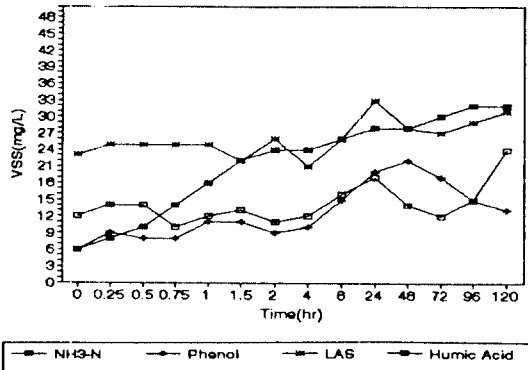


Fig. 5. Variation of MLVSS with time.

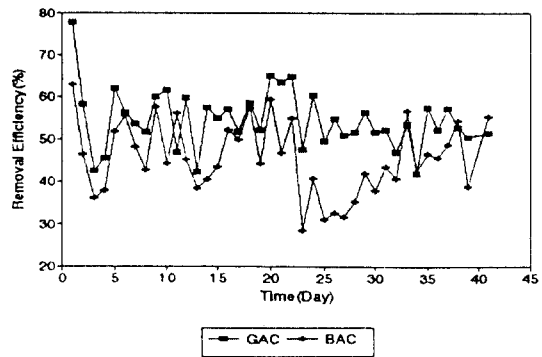


Fig. 7. Removal efficiencies of humic acid in BAC & GAC reactor.

내었다.

5일후 각 대상물질의 제거율은 humic acid, 암모니아성 질소, 페놀, 합성세제가 각각 20.1%, 73.4%, 91.7%, 97.5%로 나타났다. 합성세제는 24시간이 지난 후 이미 90% 이상 제거되어 미생물에 의해 거의 분해가 이루어진 반면, humic acid는 5일 후에도 20% 정도 분해되어 미생물에 의한 분해를 거의 기대할 수 없었다.

분해기간 중 MLVSS변화는 합성세제, phenol, humic acid의 경우 시간에 따라 조금씩 증가하는 경향을 보였으나, 암모니아성 질소의 경우는 급격한 증가 추세를 보였다. 이는 질산화가 진행되면서 암모니아성 질소의 일부가 동화작용을 통해 세포중식에 이용되었기 때문인 것으로 생각된다.

합성세제, phenol, humic acid의 시간에 따른 pH변화는 7.35에서 7.63으로 거의 변화가 없었으나, 암모니아성 질소는 초기 6.79에서 5일후 4.63으로 급격히 낮아졌다. 이는 질산화 박테리아에 의한 질

산화과정에서 NH<sub>3</sub>-N이 산화되면서 H<sup>+</sup>이 생성되므로 pH의 감소가 일어난 것으로 생각된다.

### 3. 활성탄 흡착실험

본 실험에서는 합성세제, phenol, 암모니아성 질소, humic acid를 대상물질로 선정하여 연속류형 실험에 사용할 활성탄의 흡착실험을 하였다. 실험에 사용한 활성탄은 NORIT사 제품(NORIT ROW 0.8 SUPRA)의 이탄계 정형 입상 활성탄이었다. 실험 결과 각 대상물질 모두 Freundlich model의 일반적인 형태를 대체로 취하고 있음을 확인하였다. Freundlich 식을 적용하여 각 대상물질의 1/n값 및 K값을 구하고 이를 기준으로 흡착가능성을 판단하였다.

일반적으로 K값이 클수록 흡착가능성이 크고, 1/n이 0.1~0.5범위일 때 흡착이 쉽고 2 이상이면 흡착이 어려운 것으로 보고되고 있다.<sup>14-16)</sup> 대상물질에 대한 K값과 1/n값은 Table 6과 같다.

**Table 6.** Adsorption parameter K and 1/n for objective substances

Objective substances	K	1/n
ABS	0.125	0.231
Phenol	0.038	0.33
NH <sub>3</sub> -N	$5.73 \times 10^{-4}$	3.019
Humic acid	$1.64 \times 10^{-5}$	3.646

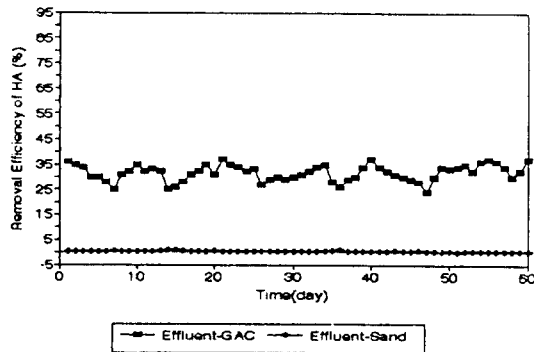
**Fig. 8.** Removal efficiencies of humic acid in BFB reactor.

Table 6에 나타난 바와 같이 합성세제와 페놀은 흡착이 용이한 것으로 나타났으나, NH<sub>3</sub>-N와 humic acid는 흡착제거가 어려운 물질인 것을 알 수 있었다. 일반적으로 자연수중에 존재하는 수백에서 수만의 분자량을 가진 humic물질은 흡착에 의해 잘 제거되지 않는다는 것으로 알려져 있다.<sup>17)</sup> 이는 본 연구에서 humic acid가 흡착제거되기 어려운 물질이라는 결과와 잘 일치하고 있다.

#### 4. BAC 및 GAC법에서 humic acid의 제거특성

BAC반응조는 회분식 반응조에서 humic acid에 약 3개월간 순응된 미생물을 접종시켰으며 인공원수를 주입시켜 약 1달간의 순응기간을 거친 후 humic acid의 제거율을 살펴보았다. GAC반응조는 미생물을 접종시키지 않고 인공원수를 곧 바로 주입시켜 흡착제거만을 볼 수 있도록 하였다.

Fig. 8은 BAC와 GAC반응조에서 humic acid의 제거율을 나타낸 것이다. GAC반응조가 BAC반응조보다 약 7~8% 높은 제거율을 보였다. 이것은 BAC반응조는 미생물에 의한 흡착 방해작용이 일어난 것으로 예상되며, 동시에 미생물에 의한 분해 작용도 잘 이루어지지 않았기 때문으로 생각된다. BAC 및 GAC반응조에서 제거된 humic acid는 분

자량의 크기가 작은 것만 흡착·제거되고, 나머지 분자량이 큰 부분은 그대로 유출되어 흡착 및 생물학적 분해가 거의 이루어 지지 않은 것으로 사료된다.

#### 5. 생물학적 유동상법의 여재 선정

생물학적 유동상법의 여재를 선정하기 위해 활성탄과 해사를 여재로 이용한 humic acid의 제거율을 Fig. 8에 나타내었다. 활성탄을 여재로 사용한 반응조에서 평균 30% 정도의 제거율을 보인 반면, 해사를 사용한 반응조에서는 거의 제거가 되지 않았다. 이는 활성탄을 여재로 사용한 경우 활성탄의 거친 표면에 humic acid가 흡착·제거된 반면, 해사는 표면이 매끄러워 미생물의 막 형성이 어려워 흡착 및 생물학적 분해가 이루어지지 않았기 때문으로 생각된다.

### IV. 결 론

상수원수의 생물학적 전처리공정 개발을 위한 기초실험으로서 기존 정수처리방법으로는 제거가 어려운 물질인 humic acid, phenol, NH<sub>3</sub>-N, ABS에 대한 생분해도 및 활성탄 흡착능 실험, 연속유형실험(BAC, GAC 및 BFB)에서 humic acid의 처리특성에 대한 실험을 행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 5일간의 생분해도 실험결과, humic acid, 암모니아성 질소, 페놀, 합성세제의 제거율은 각각 20.1%, 73.4%, 91.7%, 97.5%로 나타났다.
- ② 생분해 기간의 pH 변화는 humic acid, 합성세제, 페놀이 7.35에서 7.63으로 거의 변화가 없었으나, 암모니아성 질소는 초기 6.79에서 5일후 4.63으로 상당히 낮아졌다.
- ③ 각 대상물질에 대한 등온흡착실험은 모두 Freundlich model의 일반적인 형태를 나타내었다. Freundlich 등온흡착식을 적용하여 1/n 값 및 K값을 구한 결과, 합성세제와 페놀은 흡착이 용이하였으며, humic acid와 NH<sub>3</sub>-N는 흡착·제거가 비교적 어려운 것으로 나타났다.
- ④ GAC법은 humic acid의 제거율에 있어서 BAC법보다 약 7~8% 높은 제거율을 나타내었다.
- ⑤ 생물학적 유동상법에서 humic acid의 제거율을 검토한 결과, 활성탄을 여재로 사용한 반응조에서 평균 30% 정도의 제거율을 보인 반면, 해사를 여재로 사용한 반응조에서는 거

의 재거가 이루어지지 않았다.

### 참고문헌

- 1) 原田正光 外：水道原水の生物處理性能に關する現場實驗. 日本水道協會誌, **57(6)**, 37-45, 1988.
- 2) 佐藤敦久：水處理. 第1版. 技報堂出版. 東京, 1993.
- 3) 환경처, 과기처：고도정수처리 기술개발. G-7프로젝트 제2차년도 보고서, 1994.
- 4) Hsuan-Hsien Yeh, Hsien-Cheng Kao : Testing a coke biofilter for the pre-treatment of polluted surface water in Taiwan. J.AWWA, **85(5)**, 96-102, 1993.
- 5) 金周水：生物活性炭による水道原水の高度處理に關する研究. 東北大學校 博士學位論文. 1995.
- 6) M. Takasaki, H. Kim, A. Sato, M. Okada and R. Sudo : The submerged biofilm process as a pre-treatment for polluted raw water for tap water supply. *Wat. Sci. Tech.*, **22(1/2)**, 137-148, 1990.
- 7) 小島貞男 外：流動床生物膜處理による河川水のアンモニア除去實驗. 用水と廢水, **35(8)**, 20-30, 1993.
- 8) 藤木昭義 外：相模川原水の生物活性炭流動床法による處理. 用水と廢水, **35(8)**, 50-56, 1993.
- 9) 丹保憲仁：淨水處理における新しい技術. 用水と廢水, **27(10)**, 3-10, 1985.
- 10) APHA, AWWA, WPCF : Standard methods for the examination of water and waste-water. 18th ed., Washington. D.C., 1992.
- 11) 환경처：수질오염 폐기물 공정시험방법. 동화기술, 1993.
- 12) 공업진흥청：합성세제의 생분해도 시험방법. 1991.
- 13) Suidan, M. T. : Environmental engineering unit operations and unit process laboratory manual. Association of Environmental Engineering Professors. 4th. 1988.
- 14) 柳井弘：活性炭讀本. 日刊工業新聞社, 東京, 1978.
- 15) 日本水道協會：高度淨水施設技術資料(活性炭處理施設). 1988.
- 16) American Water Works Association : Water Quality and Treatment, 4th, Mcgraw-Hill, Inc., New York, 1990.
- 17) 조광명：정수처리를 위한 흡착의 이론과 응용. 수도, **54(2)**, 83-95. 1991.