

# 생물활성탄 유동상의 수리학적 특성과 체류시간의 영향

우달식 · 김선일 · 남상호

건국대학교 환경공학과

## The Effect on HRT and Hydraulic Characteristics of Biological Activated Carbon Fluidized Bed.

Dal-Sik Woo · Sun-il Kim · Sang-Ho Nam

*Department of Environmental Engineering, Kon-Kuk University*

### Abstract

As the quality of raw water deteriorates, a number of additional treatment techniques have been developed and adapted to water treatment for producing a safe and aesthetically satisfactory drinking water. So, BACFB process as pretreatment in water supply is to be effective to remove dissolved organics.

This study performed to find out the effects of HRT and hydraulic characteristics on BACFB reactors in water supply. The flow type in reactor was a high dispersion with complete mixing. As superficial velocity was increased, bed expansion was closed to theoretical values. It was considered that below 30 min HRT could operated to ensure the removal of dissolved organics.

### I. 서론

생물활성탄 유동상법은 원수를 상향류로 흐르게 하고, 적당한 유동상 팽창율로 입상활성탄을 부유시키는 것이다. 고정상법은 원수에 현탁물질이 함유하게 되면 짧은 시간에 여상이 폐색되기 때문에 역세척을 빈번히 행하여야 하며, 그렇지 않으면 현탁물질을 별도로 제거해야 한다. 글래스 비드나 안스라사이트의 경우와 같이 표면이 미끄러운 것은 역세척으로 인해 표면에 부착된 생물막이 대부분 탈리되 역세척 후에 미생물에 의한 정화능은 거의 없어진다.<sup>1)</sup>

생물활성탄 유동상법은 활성탄에 부착된 미생물에 의한

제거효과 뿐만아니라 활성탄을 유동시킴으로써 운전중 두꺼워진 생물막으로부터 탈리된 생물플록이 배출되지 않고 반응조내에서 부유하면서 플록내에서 생물중식이 일어나므로 부유미생물에 의한 제거효과도 다소 거둘 수 있다. 처리시간을 단축할 수 있으므로 전체적으로는 소규모로 할 수 있어 설치면적을 줄일 수 있고, 겨울철 수온 저하시에도 다른 전처리공정에 비해 제거율의 저하도 비교적 적다.<sup>2)</sup> 또한 생물활성탄 여과법의 단점인 막힘현상이나 손실수두가 요구되지 않으며 용존성 유기물, 암모니아성 질소, 맛·냄새 유발물질 등의 제거효과가 우수하여 오염이 진행된 하천수나 부영양화된 호수에 극히 유용한 방법이다.<sup>3,4)</sup>

본 연구는 생물활성탄 유동상을 상수원수의 생물학적 전처리 공정으로 적용하기 위해 반응조의 수리학적 특성에 대한 이론적 고찰과 실험을 통해 이론값과 실측값을 비교 검토하였다. 한편 지금까지의 연구<sup>3,5)</sup>는 체류시간을 2시간으로 했으며, 이는 전체 공정에서 차지하는 부지가 커질 수 있기 때문에 체류시간에 의한 영향도 고찰하였다.

## II. 이론적 고찰

### 1. 흐름특성

Levenspiel<sup>6)</sup>은 반응조의 흐름특성을 평가하기 위해 분산모델(Dispersion model)을 제시하였다. 액체의 흐름형태는 plug flow와 완전혼합흐름으로 분류하며, 이를 위해서는 분산수(Dispersion number)를 이용하며, 이는 어느 구간간의 흐름에 있어서 다음 식에 의해서 분산수(D/UL)를 구할 수 있다.

$$\sigma^2 = 2/Pe - 2/Pe^2 (1 - e^{-Pe}) \quad (1)$$

$$Pe = UL/D$$

여기서,  $\sigma^2$  : 분산(Normalized variance),

D : 분산계수(cm<sup>2</sup>/sec),

U : 유속(cm/sec),

L : 관길이(cm),

Pe : Peclet number

일반적으로 분산수가 0에 근접하면 :L 유체의 흐름은 plug flow로 간주하고, 분산수가 0.002이면 작은 분산, 0.025이면 중간정도의 분산, 0.2이면 큰 분산, ∞이면 완전혼합이라 할 수 있다.

### 2. 유입유속에 따른 유동상 팽창율과 공극율

유동상 반응조의 운용과 설계에 있어서 입자의 유동현상에 대한 규명은 유동상 팽창율, 공극율등과 같은 중요 설계 인자에 관한 정보를 제공할 수 있다. 유동이 시작하기 전 고정상에 상향류를 가하면 유체는 고정상의 공극을 통과하여 흐르게 되며, 일정 유속 이상이 되면 고정상이 팽창하여 유동하게 된다. 유동상태는 충전재의 밀도, 크기, 형상, 물의 점도와 밀도, 유속, 반응조의 크기 및 형상 등 매개변수에 따라 변화한다. 유동상 반응조내에서 입자의 유동현상과 이들 변수들을 상호연관시켜 양적관계로 나타내는 이론적, 실험적 상관계수가 다수 제안되었으나,<sup>7)</sup> 반응조내에서 다수 입자의 유동형태를 직접 명화

히 규명한다는 것은 매우 어려운 문제이다. 따라서 이들의 상관관계를 도출하는 것은 일반적으로 단일입자의 유동형태를 실험적으로 정의하고 여기에 다수 입자에 대한 보정계수를 적용함으로써 다수입자의 유동현상으로 확장시켜 나가는 접근방법을 이용하고 있다. 이러한 접근방법을 도입하기 위해서는 다음과 같은 가정이 요구된다.

- (1) 유체의 흐름은 1차원적 수직흐름이며,
- (2) 반응조에서는 비압축성 균등분산이 이루어지고,
- (3) 입자의 직경에 비해 반응조의 직경이 상당히 크므로 반응조 벽면의 마찰은 무시할 수 있다.

이 가정은 Lapidus 등<sup>8,9)</sup>이 실험을 통해 적절한 가정임을 입증한 바 있다. 유동상에서 단독입자에 작용하는 중력과 상승류에 의한 저항력은 입자의 형태가 구형이라고 가정하면 다음식과 같이 평형을 이룬다.

$$\frac{\pi d_s^3}{6} \cdot g \cdot (\rho_s - \rho) = C_D \cdot \frac{\pi d_s^2}{4} \cdot \frac{\rho v_s^2}{2} \quad (2)$$

여기서, g : 중력 가속도

$C_D$  : 저항계수

$d_s$  : 입자의 직경

$\rho_s$  : 입자의 밀도

$\rho$  : 물의 밀도

$v_s$  : 단독입자의 침강속도

또한, 반응조내에 충전한 여재를 무시했을 때의 반응조내 상승유속(Superficial velocity)을  $U_0$ 라 하면  $U_0$ 는 여재의 공극율  $\epsilon$ 와 침강속도  $v_s$ 의 함수이다.<sup>7)</sup>

$$U_0 = v_s \epsilon^n = Q_T/A = (Q_r + Q)/A \quad (3)$$

여기서,  $Q_r$  : 순환유량

Q : 유입유량

A : 유동상 단면적

$\epsilon$  : 공극율

n : 보정계수

여기서  $v_s$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

Re < 1인 경우 (Stokes 법칙) :

$$v_s = (\rho_s - \rho)(g \cdot d_s^2)/18\mu \quad (4)$$

1 ≤ Re < 500인 경우 (Allen 법칙) :

$$v_s = (4/225)((\rho_s - \rho)^2 g^2 / \rho \mu)^{1/3} \cdot d_s \quad (5)$$

500 ≤ Re < 10<sup>4</sup> 인 경우 (Newton 법칙) :

$$v_s = \sqrt{3(\rho_s - \rho)d_s \cdot g/\rho} \quad (6)$$

식(3)의 n은 보정계수로서 Reynolds number가 1 ~ 200의 범위에서 실험적 상관관계를 이용하여 (7)의 식으로

나타낼 수 있다.<sup>10)</sup>

$$n = (4.45 + 18d_s/D) Re^{-0.1} \quad (7)$$

여기서, D : 반응조의 직경

Re : Reynolds number (=  $v_s d_s \rho / \mu$ )

$\mu$  : 폐수의 점성

활성탄, 모래 등과 같은 입자의 침강속도는 입자의 형상에 따라 저항계수가 다르다. Schiller<sup>10)</sup>은 Reynolds number와 식(2)를 결합하여 다음 식을 얻었다.

$$C_D Re^2 = (4/3)(d_s^3 \cdot \rho \cdot g(\rho_s - \rho)) / \mu^2 \quad (8)$$

Olson<sup>11)</sup>은 Reynolds number가 100보다 작은 경우 저항계수가 다음 식으로 표현될 수 있음을 밝혔다.

$$C_D = (24/Re)(1 + 3Re/16)^{1.2} \quad (9)$$

또는

$$C_D Re^2 = 24Re(1 + 3Re/16)^{1.2} \quad (10)$$

따라서 식(8)로부터  $C_D Re^2$ 을 구할 수 있으며 식(10)으로부터 시행착오법(Trial and error method)에 의해 Re 값을 구할 수 있다. 계산된 Re값에 따라 식(4)부터 (6)을 이용하여 입자의 최종 침강속도  $v_s$ 를 구하고, 식(7)을 이용하여 보정계수 n을 구할 수 있다. 그러므로 공탐속도  $U_0$ 와 공극율  $\epsilon$ 은 이들 변수중 1개 변수를 실험함으로써 식(3)으로부터 구할 수 있다.

### III. 실험장치 및 방법

#### 1. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험실 규모의 생물활성탄 유동상 반응조의 공정도는 Fig. 1과 같다. 반응조는 두께 1cm의 아크릴원통을 재질로 내경 5cm, 높이 200cm의 본체와 순환조, 유출부를 포함한 총유�효용적 6ℓ로 4개를 제작하였다. 반응조 본체와 순환조 사이의 연결부위는 이전의 연구<sup>12,13)</sup>를 보완 수정하여 15도 경사를 둠으로써 미세 분말 활성탄의 침적 및 미생물 부착 등으로 인한 실험오차를 최대한 줄일 수 있도록 하였다. 유출부에 침전조의 역할을 할 수 있도록 칸막이를 설치하였다. 반응조내 용존산소를 충분히 유지시키기 위해 순환조에 산기석을 설치하였다. 원수는 정량주입펌프(Master flex pump, Model 7518-00)를 이용하여 순환조로 유입시켰다. 여재의 유동과 유체의 순환 역할을 동시에 할 수 있도록 Magnet pump(IWAKI, MD-15R-200N)를 이용하였다. 실험에 사용된 활성탄은 NORIT사 제품의 이탄계 정형입상활성탄(NORIT ROW 0.8 SUPRA)이며, 그 특성은 Table 1과

같다.

#### 2. 실험방법

실험에 사용된 대상원수는 한강수계인 영동대교 상류 지점에서 채수하였다. 반응조의 팽창율은 활성탄 주입시의 초기 높이를 기준으로 40%로 운전하였다. 유입유속은 50mℓ/min이었으며 유체의 흐름은 상향류로 하였다.

##### 2.1. 반응조의 수리학적 모델평가

생물활성탄 유동상 반응조의 수리학적 특성을 평가하기 위해 반응조내의 흐름형태와 유입유속에 따른 유동상의 팽창과 공극율의 변화를 평가하였다. 먼저 흐름특성을 평가하기 위한 실험은 추적물질인 4M KCl용액을 순환조 유입구에 순간주입한 뒤, 반응조의 측면하부로 부터 40cm간격으로 설치된 4개의 sampling port를 통해서 5분 간격으로 동시에 시료를 채취하였다. 시료는 전기전도도를 측정된 뒤 chloride의 농도로 환산하여 분산(Variance)을 구하여 반응조내의 흐름특성을 평가하였다. 실험조건은 활성탄을 400g 충전시키고 팽창율을 10, 30, 40, 75% 변화시킬 때 각각의 충전높이는 Table 2와 같으며, 체류시간은 0.25, 0.5, 1, 2시간으로 하였다.

유입유속의 변화에 따른 반응조의 팽창과 공극의 변화를 관찰하기 위한 실험은 활성탄 400g을 충전시키고, 활성탄이 반응조내에서 유동하기 시작하여 월류하기 전까지 순환유량을 변화시키면서 유동상반응조의 변화를 육안으로 관찰하여 이론값과 비교·검토하였다.

Table 1. Physical properties of Norit row 0.8 supra activated carbon

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	1100
Total pore volume	cm <sup>3</sup> /g	1.0
Dechlorination halving value	cm	4
Ball pan hardness	%	94
Specific surface area	m <sup>2</sup> /g	1200

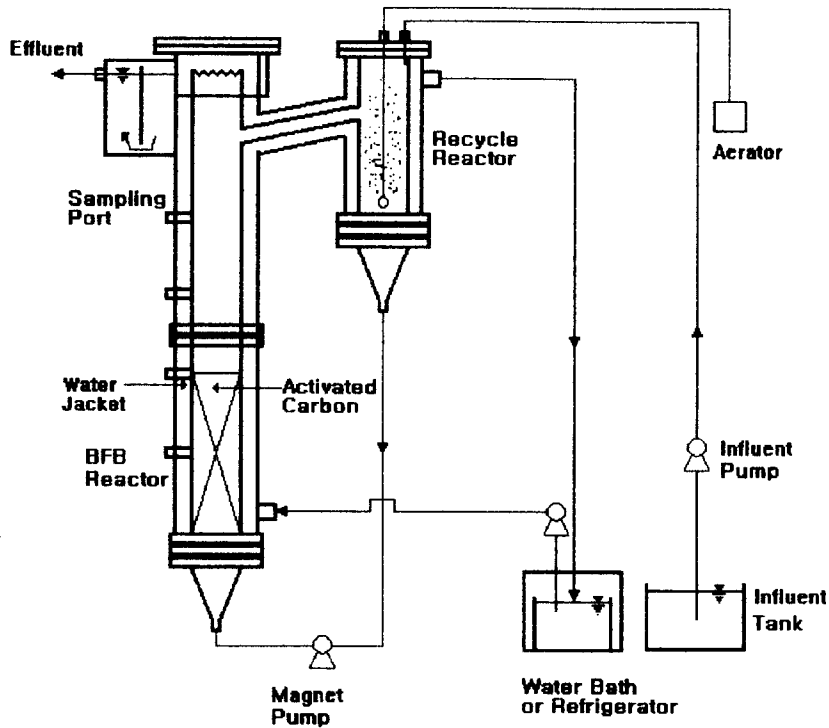


Fig. 1. Schematic diagram of BACFB reactors on the laboratory scale.

2.2. 체류시간에 의한 영향

수리학적 체류시간에 따른 영향을 검토하기 위해 4개의 생물활성탄 유동상 반응조에 활성탄을 각각 400g씩 충전하고, 유동상 팽창율은 40%, 온도는 실험실 실내온도인 18 ~ 22°C에서 실험하였다. 수리학적 체류시간(HRT)은 Table 3과 같이 0.25, 0.5, 1, 2시간으로 각각 운전한 후 유기물 항목인 DOC와 UV<sub>254</sub>의 제거특성을 고찰한

후 최적의 체류시간을 평가하였다. DOC의 분석은 연속적의선방법을 기초로한 TOC analyzer(Shimadzu model TOC-5000)에 의한 비휘발성 유기탄소(Non-purging organic carbon, NPOC)로 측정하였다. UV<sub>254</sub> 흡광도는 0.45μm여지로 여과한 후 UV/Vis spectrophotometer(Shimadzu model UV-1601)을 이용하여 파장 254nm에서 자외선 흡광도를 측정하였다.

Table 2. Bed depth of BACFB reactors with different expansion ratio.

Carbon weight (g)	Expansion ratio (%)	Bed depth (cm)
400	10	55.0
400	30	65.0
400	40	70.0
400	75	87.5

Table 3. Hydraulic retention time in BACFB Reactors.

Reactor	Carbon weight (g)	Hydraulic retention time (min)	Bed depth in 40% expansion ratio (cm)
R1	400	15	70.0
R2	400	30	70.0
R3	400	60	70.0
R4	400	120	70.0

#### IV. 결과 및 고찰

##### 1. 반응조의 수리학적 모델

###### 1.1. 흐름특성

본 연구에서는 생물활성탄 유동상 반응조의 흐름특성을 평가하기 위해 Levenspiel<sup>6)</sup>이 제시한 분산 모델을 이용하였다.

생물활성탄 유동상 반응조의 운전조건으로 유동상 팽창율은 10, 30, 40, 75%로, 체류시간은 0.25, 0.5, 1, 2시간으로 하고, 반응조 측면에 40cm 간격으로 설치된 4개의 sampling port에서 시료를 채취하여 분산수를 구하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4에서 보듯이 반응조의 위치에 따라 분산수는 차이가 있었다. 즉, 여재가 충전되어 있거나 또는 여재의 바로 위에 위치한 port 1(40cm), port 2(80cm)는 여재가 채워지지 않은 port 3(120cm), port 4(160cm)에 비해서 분산수가 크게 나타났다. 이러한 현상을 규명하기 위해서 여재를 빼내고 팽창율 40%, 15분의 체류시간에서 구한 분산수는 port 1 0.24, port 2 0.47, port 3, 0.80, port 4 1.57로 반응조 상부로 갈수록 분산수는 커지는 것을 확인하였다. 따라서 여재가 채워진 반응조 하부에서 분산수가 커지는 것은 여재의 상호 충돌현상으로 인한 mixing rate와 난류가 커졌기 때문으로 생각된다. 또한 유동상 팽창율이 증가함에 따라 분산수는 증가하였으며, 체류시간에 따른 분산수는 뚜렷한 특징을 찾을 수 없었다. 따라서 본 연구에서 사용된 생물활성탄 유동상 반응조는 완전혼합류에 가까운 높은 분산의 형태임을 확인하였다.

###### 1.2. 유입유속에 따른 유동상 반응조의 팽창과 공극의 변화

생물활성탄 유동상 반응조에서 유입유속에 따른 활성탄의 거동은 반응조의 크기 등을 결정하는데 중요한 설계인자로서 활용될 수 있다. 본 실험에 사용된 Norit 활성탄(평균 입경 0.5mm, 밀도 1.6g/cm<sup>3</sup>)을 400g 충전한 후, 유입유속을 최초 유동속도에서 활성탄이 월류하기 전까지의 범위로 변화시키면서 육안으로 관측하였으며 이론값과 비교하였다.

유입유속의 증가에 따른 활성탄이 팽창과 공극의 변화를 이론적으로 산정하기 위해서는 식 (3) ~ 식 (10)을 이용하였으며, 산정결과와 육안관측결과를 Fig. 2와 같다.

Table 4. Dispersion number in BACFB Reactors.

HRT (hr)	Expansion ratio(%)	Port1 (40cm)	Port2 (80cm)	Port3 (120cm)	Port4 (160cm)
0.25	10	0.76	0.62	0.47	0.56
	30	0.86	0.87	0.55	0.53
	40	1.22	1.05	0.55	0.85
0.5	10	0.98	1.05	0.83	0.78
	30	1.01	1.08	0.88	0.84
	40	0.96	1.07	0.92	0.83
1	10	1.09	1.11	0.96	0.86
	30	0.84	0.89	0.60	0.52
	40	0.85	1.03	0.92	0.69
2	10	0.92	1.06	1.04	1.05
	30	0.92	1.06	1.04	1.05
	40	0.92	1.06	1.04	1.05
1	10	1.03	1.14	1.06	0.99
	30	0.93	1.09	0.88	0.44
	40	0.93	1.09	0.88	0.44
2	10	0.99	1.07	0.96	0.38
	30	0.99	1.07	0.96	0.38
	40	1.09	1.17	0.95	0.61
1	10	1.11	1.22	1.04	0.64
	30	1.11	1.22	1.04	0.64
	40	1.11	1.22	1.04	0.64

육안관측에 따르면, 유입유속이 0.08cm/sec에서 최초 유동화되기 시작하였으나, 이론값에 의하면 0.027cm/sec에서 유동시작되었다. 유입유속의 증가에 따라 서서히 이론값과 일치하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

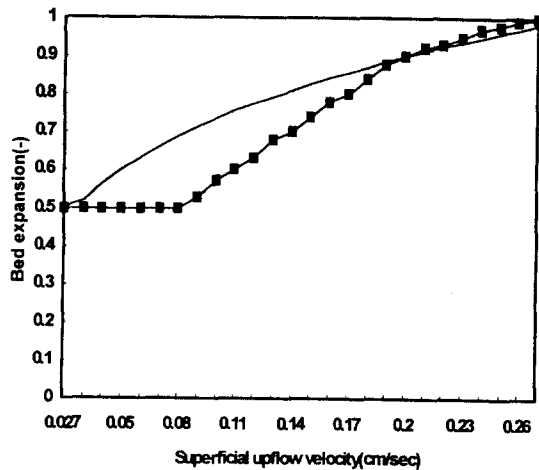


Fig. 2. Effect of superficial velocity on the bed expansion.

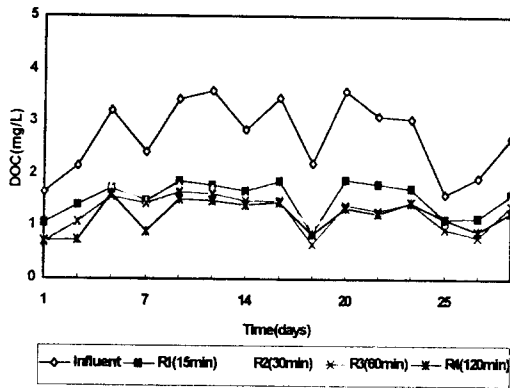


Fig. 3. Variations of DOC concentration with HRT.

2. 체류시간에 의한 영향

기존의 상수원수 전처리로 이용되는 공정들이 그동안 2시간으로 많이 운전하였는데,<sup>3,5,12,13)</sup> 이는 실제적으로 부지 확보가 곤란한 국내 여건에 비추어서 상당히 부담이 되고 있으므로 수리학적 체류시간(Hydraulic retention time, HRT)의 단축은 공정의 적용에 매우 필수적이라 할 수 있다.

정상상태에서 약 1달동안 체류시간에 따른 생물활성탄 유동상 반응조의 유출수 DOC, UV<sub>254</sub>의 변화는 Fig. 3, Fig. 4에, 평균제거율을 Fig. 5에 나타내었다.

유입수의 평균 DOC농도가 2.73mg/l이며 각 반응조 R1(15min), R2(30min), R3(60min), R4(120min)에서 유출수의 평균 DOC농도는 각각 1.54, 1.35, 1.27, 1.21mg/l을 나타내었다. 체류시간 15분, 30분, 1시간, 2시간일때의 제거율은 43.5, 50.6, 53.6, 55.8%로 나타나 체류시간이 증가함에 따라 DOC의 제거율도 증가하는 추세를 보였다. UV<sub>254</sub>

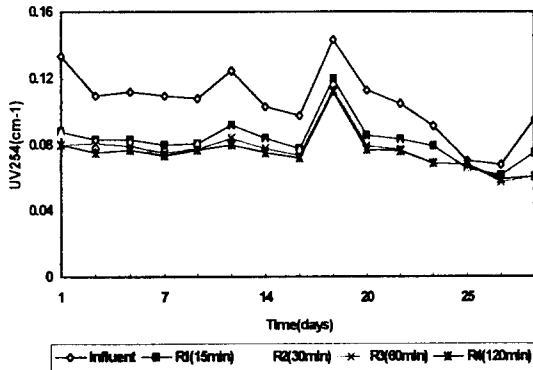


Fig. 4. Variations of UV<sub>254</sub> with HRT.

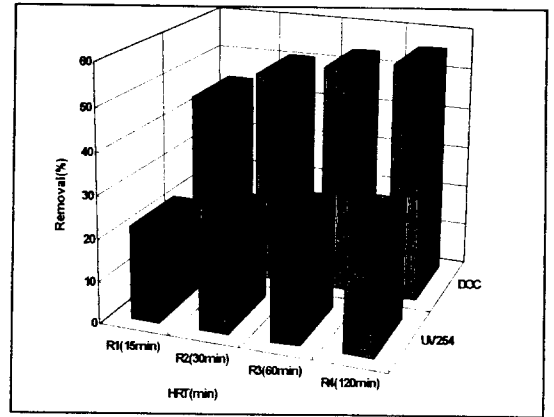


Fig. 5. Removal efficiency of DOC and UV<sub>254</sub> with HRT.

의 감소량도 DOC의 경우와 마찬가지로 체류시간이 증가함에 따라 21.8, 25.0, 27.1, 28.6%로 증가하였다. 체류시간에 따른 DOC와 UV<sub>254</sub> 제거율은 전체적으로 각각 12.3%, 6.8%정도밖에 차이를 보이지 않았다. 따라서 그동안 생물활성탄 유동상법의 체류시간을 2시간으로 운전하였던 것에서 15분이하로 줄여도 가능하다는 것을 확인하였다.

V. 결 론

본 연구는 생물활성탄 유동상법에 의한 상수원수의 전처리공정의 최적화를 위해 반응조의 수리학적 특성 및 체류시간에 대한 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 생물활성탄 유동상반응조의 흐름특성을 평가한 결과, 완전혼합류에 가까운 높은 분산의 형태이었으며, 유입 유속의 증가에 따라 유동상 팽창비는 서서히 이룬값과 일치하였다.
2. 기존 생물학적 전처리공정의 체류시간은 대부분 2시간으로 운전하였으나 본연구에서는 15분까지 줄여도 유기물 제거효과는 크게 감소하지 않았다. 따라서 생물활성탄 유동상의 체류시간은 15분으로 운전이 가능하였다.

참 고 문 헌

1. 佐藤敦久 : 水處理, 第1版, 技報堂出版, 東京, 1993.
2. 小島貞男 : 上水處理における省資源, 省 エネルギーの課題および展望, 用水と廢水, 33(4), 3-9, 1991.
3. 小島貞男, 篠原哲夫 : 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.
4. 藤木昭義, 安樂幸一 : 相模川原水の生物活性炭流動床による處理, 用水と廢水, 35(8), 50-56, 1993.
5. 倉持仁一 : 茨城縣における水道水の高度淨水處理の實際, 公害と對策, 25(3), 14-18, 1989.
6. Levenspiel, O. : Chemical Reaction Engineering, 2nd Edition, Willy, N. Y., 1972.
7. Stathis, T. C. : Fluidized Bed for Biological Wastewater Treatment, J. Environ. Eng. Div., ASCE, 227-241, 1980.
8. Lapidus, L. and Elgin, J. C. : American Institute of Chemical Engineers Journal, 3, 63, 1957.
9. Lapidus, L., Quin J. A., and Elgin, J. C. : American Institute of Chemical Engineers Journal, 7, 260, 1961.
10. Schiller, L. : Fallversuche mit Kugeln und Scheiben, Handbuch der Experimental-Physik, Vol. IV/2, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1932.
11. Olson, R. : Essentials of Engineering Fluid Mechanics, International Textbook Co., Scranton, Pa., 1966.
12. 우달식, 남상호 : 생물처리를 이용한 상수원수의 전처리공정에 관한 연구, 한국환경위생학회지, 22(4), 69-76, 1996.
13. 우달식, 곽필재, 남상호 : 생물활성탄 유동상법에서 충전량과 전오존처리가 생물처리효율에 미치는 영향, 대한위생학회지, 12(1), 69-75, 1997.