

## 활성탄을 첨가한 연속 회분식 반응조(SBR) 운전에 미치는 중금속 및 phenol의 영향

이상훈 · 임지훈 · 박철환 · 김상용\* · 박진용\*\* · 이용면\*\*\* · 이진원†

광운대학교 공과대학 화학공학과

\*한국생산기술연구원

\*\*한림대학교 환경학과

\*\*\* (주)오성 엔비테크

(1998년 10월 27일 접수, 1999년 10월 26일 채택)

## Effects of Heavy Metals and Phenol on the Operation of Sequencing Batch Reactor Added Activated Carbon

Sanghoon Lee, Jihun Lim, Chulhwan Park, Sangyong Kim\*, Jinyong Park\*\*,  
Yongmyun Lee\*\*\* and Jinwon Lee†

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

\*Korea Institute of Industrial Technology

\*\*Department of Environmental Engineering, Hallym University

\*\*\*Osung Envi-Tech Company

(Received 27 October 1998; accepted 26 October 1999)

### 요 약

본 연구에서는 연속 회분식 반응조(sequencing batch reactor, SBR)에 활성탄을 첨가한 공정을 대상으로 삼았다. 활성탄이 첨가된 연속 회분식 반응조의 유기물 제거와 중금속이나 난분해성 물질이 미치는 영향을 파악하고자, 3종류의 입상 활성탄을 대상으로 실험을 하였다. SCOD(soluble chemical oxygen demand) 감소 효율에 대하여 살펴보았으며, 흡착 등온식(adsorption isotherm)에 의한 이론적 흡착량(adsorbed loading)과 실제 감소량(apparent loading)의 비교로 생물학적 활성(biological activity)의 시너지 효과(synergistic effects)를 확인하였다. 활성탄-연속 회분식 반응조 공정은 연속 회분식 반응조만을 운전하였을 때보다 약 16%의 처리 효율이 증가하였는데, Freundlich 흡착 등온식에 의한 이론적 흡착량과 실제 감소된 SCOD량을 비교함으로써, 활성탄 첨가 공정의 처리 효율 증가가 단지 활성탄 흡착량만이 아니고, 생물학적 활성의 시너지 효과가 있음을 증명하였다. 중금속이나 난분해성 물질이 유입되었을 경우의 연속 회분식 반응조에 있어서의 저해(inhibition) 현상을 살펴보았으며, 활성탄을 첨가하였을 때 이러한 저해 영향을 감소시키는 효과를 정량적으로 측정하였다. Pb, Cd, Cr, phenol을 저해제(inhibitor)로서 실험하였는데, Pb가 10 mg/L인 생활하수에 활성탄(PK1-3)을 500 mg/L로 주입하였을 경우에는 주입하지 않은 경우보다 처리율이 32.6% 증가되었고, Cd의 경우는 27.2%, Cr의 경우는 22.3%, phenol의 경우는 9.4%의 처리효율이 각각 증가되었다.

**Abstract** – The process of sequencing batch reactor(SBR) added the activated carbon were studied. To investigate the influence of the activated carbon on the treatment of organic materials and the effects of heavy metals on the process, three different kinds of granular activated carbons(GAC) were tested. The decrease of SCOD(soluble chemical oxygen demand) was measured at the different concentrations of the activated carbon. Synergistic effects of GAC on the biological activity in the SBR were confirmed from the data comparing adsorbed loadings with apparent loadings. When SBR was operated with GAC, the efficiency of wastewater treatment increased 16%. By comparing the adsorbed amount of SCOD estimated from Freundlich isotherm and the decrease of apparent loading, biological synergistic effect was confirmed. The inhibition of SBR performance from heavy metals or toxic chemicals could be reduced when GAC was added into the SBR process. Pb, Cd, Cr, and phenol were tested as typical inhibitors. When 10 mg/L inhibitor was introduced into the SBR process which includes 500 mg/L GAC, the efficiency was increased as 32.6%, 27.2%, 22.3%, and 9.4%, respectively.

Key words: Sequencing Batch Reactor(SBR), Activated Carbon, Heavy Metal, Soluble Chemical Oxygen Demand(SCOD), Wastewater

†E-mail: jwlee@daisy.kwangwoon.ac.kr

## 1. 서 론

우리가 당면한 수질 환경문제는 폐수의 양을 줄이는 것 뿐만 아니라, 나날이 강화되는 규범에 맞는 처리 공정을 개발하고 효율을 높이는 것이다. 오늘날 산업이 고도로 발전하면서, 여러 가지 유기물들이 대량으로 배출되어지고 있는 실정이다. 이러한 유기물들의 처리를 위해서는 이들 물질의 확인 및 농도에 대한 정보와, 공공보건과 환경에 대한 영향, 그리고 제거하기 위하여 적용 가능한 처리방법 등에 대한 검토가 필요하다[1-4]. 여기에, 우리 나라처럼 국토가 좁고, 점차 늘어나는 생활하수나 산업폐수를 처리하기 위해서는 대규모 처리시설의 확충이나 연구도 중요하지만, 소규모 시설에 대한 연구도 매우 중요하다고 할 수 있다. 소규모 처리장에서는 규모와 지역실정 및 발생 오폐수의 성상에 부합되는 적절한 신공정 및 장치가 개발되어 적용되는 것이 합리적이고 경제적인 것이며, 이러한 소규모 처리 대상지역에 대하여 현재 여러 종류의 폐수처리 방법이 광범위하게 연구되고 있으며, 더욱더 효율적인 방법들을 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 폐수처리 방법 중 하나인 연속 회분식 반응조에 활성탄을 첨가한 처리 공정을 대상으로 삼았다. 활성탄을 이용한 폐수처리 공정은 크게 화학적 단위 공정(chemical unit process)으로 볼 수 있으며, 연속 회분식 반응조를 이용한 폐수처리 공정은 생물학적 단위 공정(biological unit process)으로 볼 수 있다. 연속 회분식 반응조는 다른 활성 슬러지 법과 달리 한 개의 반응조 안에서 반응, 폭기, 침전 등이 모두 수행되기에, 연속 흐름식 공정과는 달리 부가적 장치나 반응조 등이 필요없다. 따라서, 우리 나라와 같이 좁은 국토를 가진 지역적 상황에 적합하다고 할 수 있겠다. 또한, 연속 회분식 반응조를 다단계로 설치할 경우 연속 흐름식 공정과 같이 폐수를 연속적으로 처리할 수 있으므로, 많은 유량을 처리할 때에도 가능하다[5-8]. 연속 회분식 반응조와 같은 활성 슬러지 공법에서의 유기물 제거는 슬러지의 활성 자리(active sites)에 빠르게 유기물이 흡착되는 흡착 공정과 이보다는 느리게 일어나는 미생물의 대사(metabolic assimilation)과정에 의해서 설명되어질 수 있으며, 난분해성이나 독성물질, 또는 중금속 등이 유기물질과 함께 반응조에 유입되면, 이러한 생물학적 처리 공정에 저해와 독성(toxicity), 경쟁(competition)의 영향이 나타난다[9-13]. 일반적으로 침전물로서 존재하는 중금속은 pH의 변화에 의해서 용해될 수 있는데, 이는 생물학적 처리 효과를 감소시키고, 시안, 휴믹산(humic acid)과 같은 특정 유기 화합물의 생물학적 분해는 용해성 복합물로부터 독성 중금속을 용출시키고, 이 역시 생물학적 활성에 영향을 미치며, 구리, 아연, 니켈, 납, 카드뮴, 크롬과 같은 중금속은 미생물 효소(enzyme)와 반응하여 물질대사의 속도를 저하시키고, 이러한 중금속 자체가 저해와 독성의 영향을 나타낸다. 또한, 중금속은 슬러지의 활성 자리에 유기물과 강력히 경쟁하여 유기물 흡착을 방해하고, 미생물에 의한 SCOD 감소 효율에도 많은 영향을 끼치므로, 연속 회분식 반응조 운전에 있어서 더 많은 수리학적 체류 시간(hydraulic retention time, HRT)을 요구하거나, 폐수원으로부터의 제거, 또는 전처리 공정 등 부가적 공정을 필요로 하게 한다[14-16].

활성탄 첨가 공정은 중금속이 활성탄에 있는 많은 활성 자리에 유기물 보다 먼저 흡착되기 때문에, 이러한 중금속 영향을 감소시킬 수 있다. 그러므로, 활성탄의 흡착 능력은 폐수에 존재하는 유기물 흡착 뿐만 아니라, 난분해성이나 독성 화합물, 중금속 등을 흡착함으로써 미생물 활성의 저해효과를 감소시켜 반응조의 유기물 감소 효율을 높일 수 있다. 또한, 미생물도 활성탄 표면에 흡착됨으로서, 갑작스러운 유기물 부하에 보다 더 안정적으로 대처할 수 있고, 슬러지의 침전을 용이하게 함으로서 침전 공정에 소요되는 시간을 절약하여, 반응조 운전 주기를 감소시킬 수 있는 부가적 효과도 얻을 수 있다. 일반적

으로 입상 활성탄(granular activated carbon, GAC)이 분말 활성탄(powdered activated carbon, PAC)보다 침전 효율이 더 좋으며, 활성탄 재생 또한 분말 활성탄보다 더 용이하다[17].

연속 회분식 반응조에서의 난분해성 물질에 대한 연구로는, German과 Romulo[18]가 연속 회분식 반응조에서의 유기물 감소와 난분해성 물질인 phenol 화합물의 생물학적 분해에 대한 연구를 하였으며, 중금속의 영향에 대하여는 Chua와 Hua[19]가 연속 회분식 반응조를 이용한 유기물 감소에 있어서, 중금속이 미치는 영향에 대해 연구하였다. 또한, Sublette 등[20]은 PAC 공정에 대한 연구에서, 생물학적 활성과 활성탄 흡착이 서로 시너지 효과를 가져오며, 이러한 시너지 효과는 바로 생물학적 활성의 자극(stimulation of biological activity)과 활성탄의 생물학적 재생(bioregeneration)이라고 하였다. 또한, Márquez와 Costa[21]도 PAC 공정에서 활성탄의 흡착 공정은 유기물 흡착과 미생물 흡착이 둘 다 이루어지므로, 이러한 공정은 유기물 제거에 있어서 시너지 효과를 가져오며, 이러한 흡착 공정은 주로 폐수내의 유기물, 중금속 그리고 난분해성 물질 등의 제거에 사용되어지고 있다고 하였다.

본 연구에서도 활성탄과 연속 회분식 반응조를 이용하여 폐수 처리 실험을 수행하였다. 먼저 주요 대상 공정인 연속 회분식 반응조에 3 종류의 다른 입상 활성탄을 부유상으로 첨가했을 때의 처리효율, 두 번째로 연속 회분식 반응조만을 운전하였을 때와 활성탄을 첨가했을 때의 SCOD 감소 차에 의한 실제 감소량과 활성탄 흡착 등온식에 의한 이론적 흡착량을 비교함으로써, 활성탄 첨가 공정의 시너지 효과를 조사하였으며, 마지막으로 중금속이나 페놀과 같은 난분해성 유기물이 반응조 내에 유입되었을 때, 생물학적 분해에 미치는 저해 영향과 활성탄 첨가로 인한, 저해 영향 감소에 대해서 연구하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 활성탄-연속 회분식 반응조의 SCOD 처리 효율 실험

사용된 시료는 구리시 인근의 장자 연못 생활 하수를 사용하였다. 용존 유기물의 양은 SCOD로 측정하였고, 이를 측정하기 위한 전처리 과정으로서 1.2  $\mu\text{m}$ 의 공극 크기를 갖는 유리 섬유 여과지(Whatman GF/C)로 1차 여과를 한 뒤, 0.2  $\mu\text{m}$  membrane filter로 2차 여과를 하였다. 분석은  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 을 이용하여, Standard Methods의 방법[22]을 따랐으며, 사용된 활성탄은 각각 PK1-3, GAC 1240, 그리고 ROW 0.8 SUPRA로서 이것들은 모두 NORIT사(Netherlands)의 입상 활성탄이며, 오성 엔비테크(주)가 현재 우리 나라에서 판매하고 있는 제품들이다. 활성탄의 물성표는 Table 1에 나타내었다. 활성탄 주입은 0 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L, 200 mg/L, 그리고 500 mg/L의 농도로 주입하였으며, 본 실험에 쓰인 반응조는 지름이 0.15 m, 높이 0.3 m의 원기둥 모양으로서 전체 부피가 약 5.3 L이다. 여기에 4 L의 폐수를 채워주어서 실험을 하였다. 반응조 내의 온도는 항온장치를 이용하여 30  $^{\circ}\text{C}$ 를 유지하여 주었으며, 교반 속도는 230 rpm으로 조정해주었고, 충분한 산소 공급을 위하여 폭기를 해주었다. 사용된 반응조는 모두 5개이며, 재현성 실험을 통해서 모든 반응조가 서로 비슷한 처리율을 보이는 것을 확인하였다. 반응조의 구조에 대한 그림은 Fig. 1에 나타내었다.

### 2-2. 활성탄 흡착 평형 등은 실험

사용된 활성탄은 각각 PK1-3, GAC 1240 그리고 ROW 0.8 SUPRA의 입상 활성탄으로서, 온도에 따른 흡착 속도 차이를 배제하기 위하여, 25  $^{\circ}\text{C}$ 의 항온조 내에서 실험하였다. 입상 활성탄의 세공 내부에 존재하는 공기는 유기물의 흡착 저항을 증가시키므로, 공기를 제거하기 위하여 진조한 활성탄을 미리 청량하여 일정량의 증류수(100 ml)

Table 1. Specifications of activated carbons tested in the experiments

	PK1-3	GAC 1240	ROW 0.8 SUPRA
Molasses number	500	min. 230	350
Total pore volume(cm <sup>3</sup> /g)	1.2	0.85	1.0
Moisture(as packed, %)	2	max. 2	2
Apparent bulk density(g/L)	max. 315	500	min. 350
Iodine adsorption(mg/L)	800	-	1100
Ash content(%)	7	-	8
Density backwashed and drained(g/L)	230	440	335

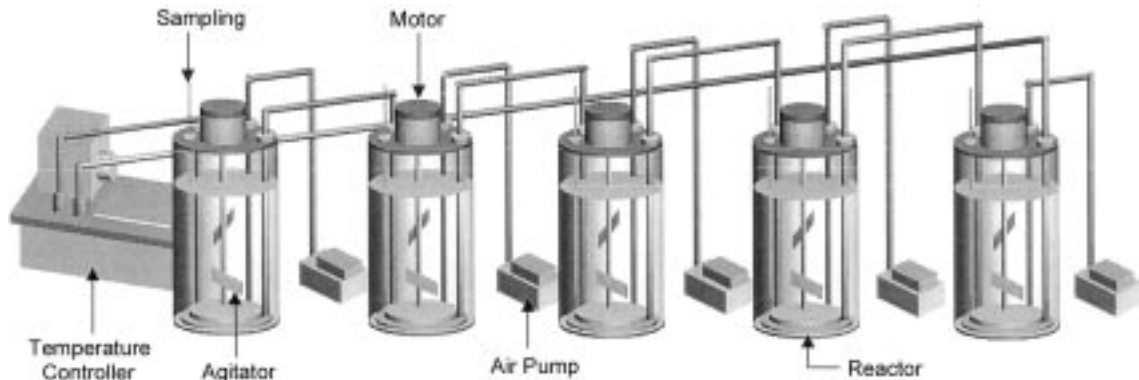


Fig. 1. Sequencing batch reactors used in this research.

에 활성탄을 담가두었다가 사용하였다. 흡착된 흡착질의 농도 분석은 SCOD를 이용하여 분석하였으며, 사용되어진 폐수는 미생물에 의한 SCOD 감소를 배제하기 위하여, 120 °C에서 20분간 살균한 후 사용되었다. 활성탄과 폐수를 250 ml의 삼각 플라스크에 주입하여, 완전 평형을 위하여 24시간동안, 와류가 생성되지 않도록 150 rpm으로 교반시켜주면서 실험하였다. 흡착 등온식을 구하기 위해서는 활성탄의 농도 변화에 따른 폐수의 농도 변화를 측정해야 하므로, 50 mg/L에서 1,000 mg/L까지 활성탄 농도 변화에 따른 폐수의 SCOD 농도를 측정하였다. 실험의 오차한계와 data distribution을 감안하여 활성탄의 농도 변화는 100 mg/L 단위로 변화시켰으며, 구해진 데이터의 fitting을 위해서는 GRAPHER라는 프로그램을 사용하였다. 흡착 실험 후, 얻어진 데이터를 적용하기 위한 흡착 등온식은 수치리에 많이 쓰이는 Freundlich의 흡착 등온식을 사용하였다[11].

### 2-3. 활성탄을 이용한 중금속 및 난분해성 유기물의 저해 영향 감소 실험

반응조 안에 중금속이나 난분해성 물질들의 유입으로 인한 유기물 처리 효율 감소를 알아보기 위하여, 중금속과 난분해성 물질과 같은 저해제를 첨가하였을 때, 반응조의 처리 효율에 대하여 실험하였다. 본 실험에 사용되어진 5개의 반응조는 앞의 활성탄-연속 회분식 반응조의 SCOD 측정 실험에 사용되어진 반응조와 같고, 반응조 안의 운전 조건 또한 동일하다. 사용되어진 중금속으로는 Pb, Cd, 그리고 Cr이며, 난분해성 물질로는 phenol을 사용하였으며, 활성탄은 흡착 등온식에 의하여 흡착능이 좋은 것으로 확인된 PK1-3을 사용하였다. 모두 5개의 반응조를 운전하였으며, 각각의 중금속과 phenol에 대하여, 첫 번째 반응조는 저해제나 활성탄을 전혀 넣지 않고 운전함으로써 순수한 연속 회분식 반응조의 분해능을 살펴보았으며, 다른 2개의 반응조에는 저해제를 10 mg/L, 30 mg/L씩 주입함으로써, 저해제 농도에 대한 영향을 살펴보았다. 나머지 두 개의 반응조에는 저해제 10 mg/L와 활성탄 500 mg/L, 저해제 30 mg/L와 활성탄 500 mg/L를 주입하

여, 각각의 반응조 내의 SCOD 감소에 대한 저해 영향과 활성탄에 의한 저해 영향 감소에 대하여 살펴보았다.

### 3. 결과 및 고찰

연속 회분식 반응조에 3종류의 입상 활성탄을 부유상으로 첨가하여 SCOD 감소에 대한 실험을 하였다. 시료 내에 존재하는 미생물에 의한 SCOD 분해 실험을 하였으며, 활성탄 종류에 따른 처리효율을 알아보았다.

Fig. 2는 활성탄의 주입농도를 결정하기 위한 OD값을 측정한 그림으로서, 구리시 장자 연못의 최대 흡수 파장으로 실험된 480 nm에서 측정한 활성탄 농도별 OD값이다. Fig. 2를 살펴보면, 400-600 nm 구간과 1,400 nm 구간이 최소의 OD값을 보이는 것을 알 수 있다. 활성탄의 최소 주입량, 2차적 환경 오염과 경제적 비용 등을 고려하여 약 500 mg/L를 본 실험에서의 표준 주입 농도로 결정하였다.

Fig. 3은 입상 활성탄인 PK1-3을 반응조 안에 부유상으로 주입하였을 때, 7일 동안의 SCOD 감소를 보여주고 있다. 활성탄 주입 농도는 0 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L, 200 mg/L, 그리고 500 mg/L으로서, 연속 회분식 반응조만을 운전하였을 때(0 mg/L)는 약 56.5%, 50 mg/L로 주입할 때는 약 56.5%, 100 mg/L은 65.9%, 200 mg/L은 64.7%, 그리고, 500 mg/L를 주입하였을 때는 약 70.6%의 SCOD가 감소되었으며, 이것은 활성탄량이 증가할수록 SCOD 처리 효율이 더 높아진다는 것을 의미한다. 이러한 이유는 연속 회분식 반응조만을 운전하였을 때는 단지 미생물에 의한 생물학적 처리 공정만으로 유기물이 감소되지만, 연속 회분식 반응조에 활성탄을 첨가하는 공정은 생물학적 처리 공정에 흡착 공정이 부가되었기 때문에 처리 효율이 더욱 증가된다고 사료된다. 이렇게 PK1-3을 500 mg/L의 농도로 반응조 안에 주입시켰을 때, 연속 회분식 반응조만을 운전하였을 때보다도 약 14.1%의 처리 효율 증가를 보였다.

Fig. 4는 입상 활성탄인 GAC 1240을 주입하였을 때의 SCOD 감

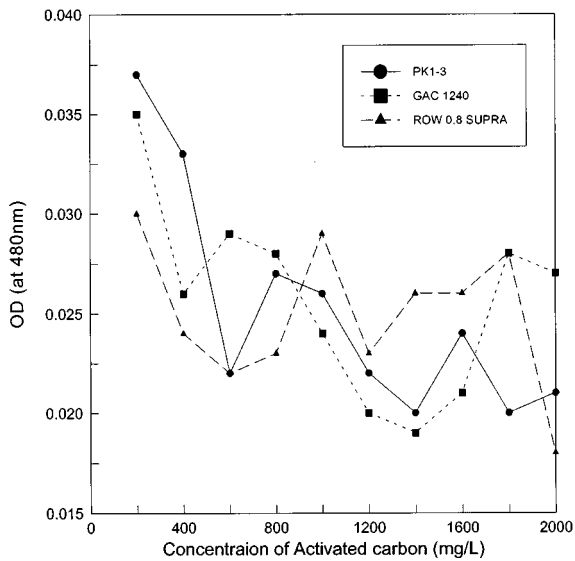


Fig. 2. Color removal from wastewater by activated carbon at 480 nm wavelength.

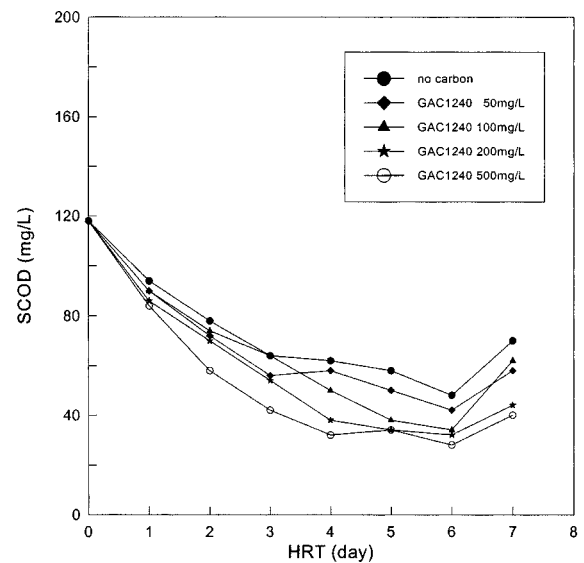


Fig. 4. SBR treatment with activated carbon GAC 1240.

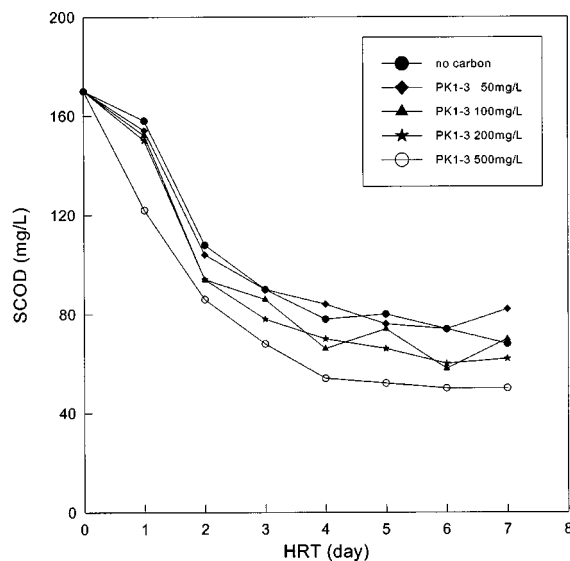


Fig. 3. SBR treatment with activated carbon PK1-3.

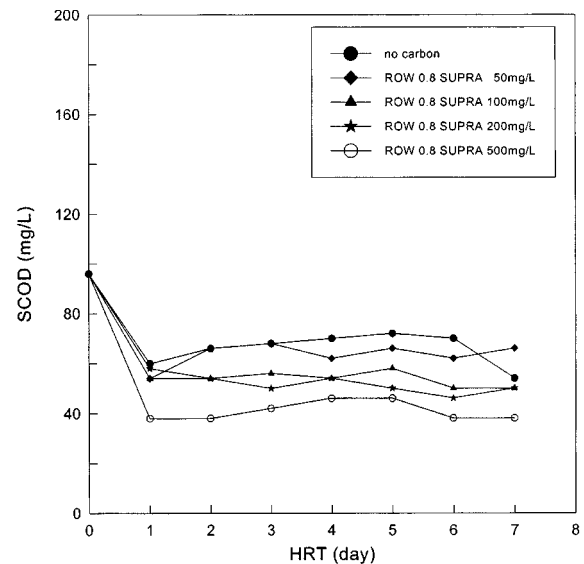


Fig. 5. SBR treatment with activated carbon ROW 0.8 SUPRA.

소를 보여주고 있다. 연속 회분식 반응조만을 운전하였을 때는 59.3%의 처리효율을 보여주고 있으며, 활성탄 주입 농도가 50 mg/L일 때는 64.4%, 100 mg/L일 때는 71.2%, 200 mg/L일 때는 72.9%, 그리고 500 mg/L를 주입하였을 때는 76.3%의 처리 효율을 보여주고 있다. 여기서도 활성탄량이 증가될수록 처리 효율이 더욱 증가되는 것을 볼 수 있다. GAC 1240을 500 mg/L의 농도로 첨가하였을 때는 연속 회분식 반응기만을 운전하였을 때보다도 SCOD 감소 효율이 약 17%정도 증가되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5도 입상 활성탄인 ROW 0.8 SUPRA를 주입하였을 시의 SCOD 감소를 보여주고 있다. 연속 회분식 반응기만을 운전하였을 때에는 43.8%, 50 mg/L를 첨가하였을 때는 35.4%, 100 mg/L일 때는 47.9%, 200 mg/L일 때는 52.1%, 500 mg/L일 때는 60.4%의 처리효율을 보여주고 있으며, 활성탄량이 증가됨에 따라 처리 효율이 더 좋아졌다. ROW 0.8 SUPRA를 500 mg/L의 농도로 주입하였을 때는 연속 회분식 반응기만을 운전하였을 때보다도 약 16.6%의 SCOD 처리 효율이

증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3-5에서 활성탄 주입으로 인한 SCOD 처리 효율 증가가 단지 활성탄 흡착만으로 인한 SCOD 처리 효율 증가인지, 아니면 활성탄 첨가 공정과 연속 회분식 반응조와의 결합에 의한 생물학적 활성의 증가와 같은 시너지 효과가 있는지를 확인하기 위하여, 이론적 흡착량과 실제 감소량을 비교하였다. 이론적 흡착량은 흡착 등온식에 의하여 구해질 수 있으며, 실제 감소량은 연속 회분식 반응조만을 운전하였을 때의 SCOD와 활성탄-연속 회분식 반응조를 운전하였을 때의 SCOD 차로 구해질 수 있다. 이를 위하여 먼저 활성탄 흡착 등온식을 구하였으며, Fig. 6에 나타내었다. 활성탄 흡착 등온식은 비교적 수 처리에 적합하다고 알려진 Freundlich 흡착 등온식을 사용하였으며, 각각의 활성탄에 대한 흡착 등온식의 상수값은 Table 2에 나타내었다. Table 2에서,  $K_f$ (L/g)는 활성탄의 흡착능(capacity)을 나타내는데, 이 값이 클수록 흡착능이 더 좋은 것으로 알려져 있으며,  $1/n$ (unitless)값은 활성탄 표면의 이형률(heterogeneity factor) 또는 흡착 강도의 지표로서 적정 범위는 0-1 정도이고, 0으로 가까이 갈수록 활성탄 표면

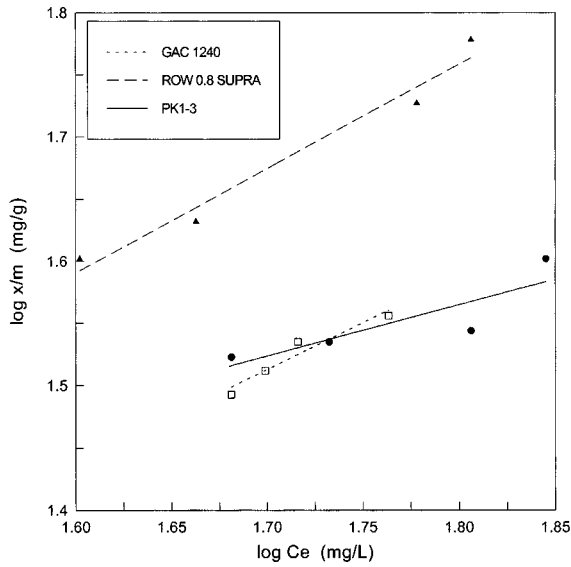


Fig. 6. Freundlich isotherm curves for activated carbons.

Table 2. Coefficients of freundlich adsorption isotherm calculated from the adsorption data

	PK1-3	GAC 1240	ROW 0.8 SUPRA
1/n	0.4126	0.7532	0.8387
$K_f$	6.6418	1.7076	1.7734

이 더욱더 이형(heterogeneous)인 것을 나타낸다. 흡착 등온식에 의하면 PK1-3이 좋은 흡착능을 가진 것으로 나타났다. 이러한 활성탄 흡착 등온식을 이용하여, 7일 동안의 흡착된 SCOD 양과 반응조 내에서 감소된 SCOD 양을 비교하여, 활성탄 흡착과 미생물에 의한 생물학적 분해에 대해서 알아보았다. 24시간마다 측정 한 이유는 Freundlich 등온식을 구할 때 24시간을 반응시간으로 가정하였으므로, 24시간 단위로 폐수의 SCOD 농도 변화를 측정하였다. PK1-3에 대해서는 Fig. 7, GAC 1240에 대해서는 Fig. 8, 그리고 ROW 0.8 SUPRA에 대해서는 Fig. 9에 각각 나타내었다.

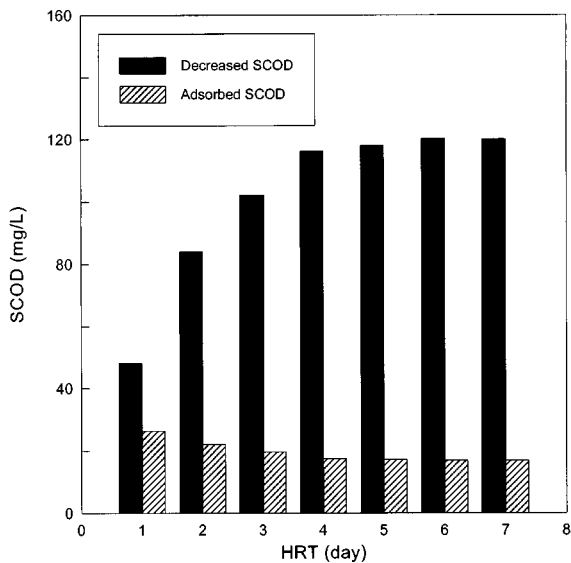


Fig. 7. SCOD decreased and adsorbed during SBR treatment with activated carbon PK1-3(500 mg/L).

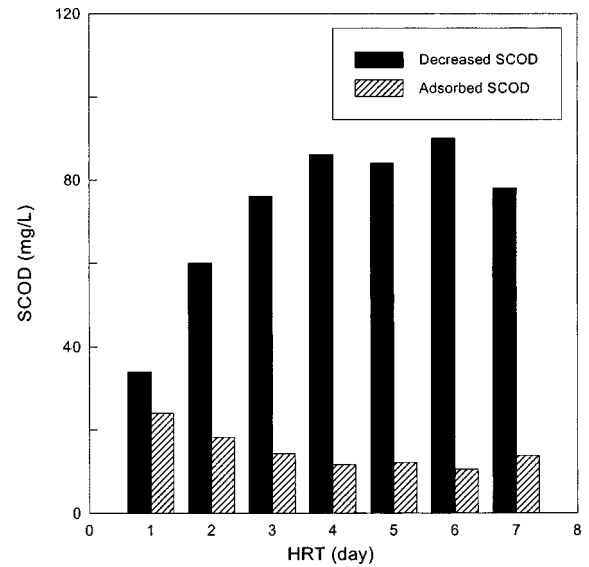


Fig. 8. SCOD decreased and adsorbed during SBR treatment with activated carbon GAC 1240(500 mg/L).

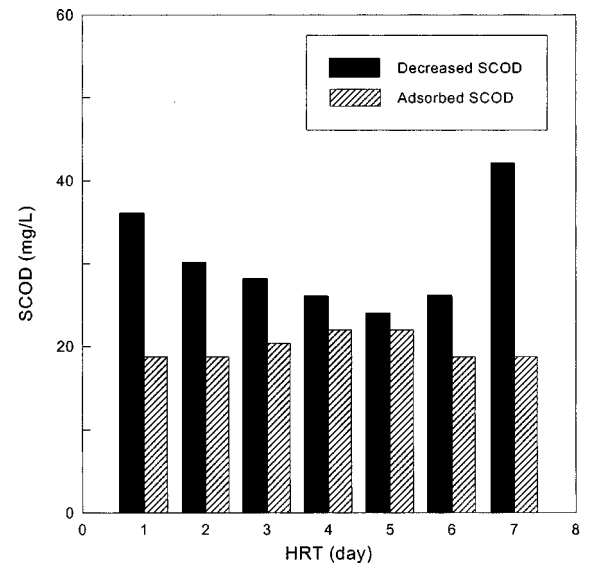


Fig. 9. SCOD decreased and adsorbed during SBR treatment with activated carbon ROW 0.8 SUPRA(500 mg/L).

Fig. 7-9는 7일 동안의 반응조 내의 SCOD 감소량 변화와 Freundlich 흡착 등온식을 이용하여 구한 7일 동안의 활성탄에 흡착된 SCOD 양의 변화를 보여주고 있다. 운전 초기에는 미생물에 의한 생물학적 분해보다 활성탄 흡착이 더 빨리 일어나기 때문에, SCOD 감소량 중 흡착에 의한 양이 큰 부분을 차지하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것에 대해서는 흡착능력이 좋은 것으로 실험된 PK1-3의 Fig. 2에서 명백히 알 수 있다. 운전 1일째에 연속 회분식 반응조만을 운전하였을 때, 즉 생물학적 분해에 의한 SCOD 감소는 12 mg/L에 불과하지만, 활성탄 500 mg/L를 주입한 반응조의 SCOD 감소는 48 mg/L였다. 이는 운전 초기에 미생물이 폐수에 적응하기 위한 지연기(lag phase) 과정에 있으므로 SCOD 감소를 12 mg/L 밖에 못하지만, 활성탄 흡착에 의한 감소량은 36 mg/L으로서, 활성탄 흡착이 미생물에 의한 생물학적 분해보다 약 3배정도 많이 일어났음을 알 수 있다. 이러한 사실은 생물학적 처리 공정 시, 문제점인 미생물이 새로운 환경에 적응

하기 위한 지연기 동안에 SCOD 감소에 도움을 줄 수 있을 거라고 사료된다.

Fig. 7-9를 보면, 시간이 지날수록 활성탄에 흡착되는 흡착량은 감소하지만, 처리되는 SCOD량은 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 시간이 지날수록 미생물에 의한 SCOD 처리가 증가되며, 반응조 내의 SCOD 감소로, 폐수내의 SCOD 농도와 활성탄 표면에 흡착된 SCOD 농도 사이에 평형을 이루기 위하여 흡착된 SCOD가 다시 탈착되기 때문일 것이다. 따라서, 활성탄-연속 회분식 반응조 공정은 운전 초기의 갑작스런 과도한 유기물 유입에도 불구하고 흡착 공정으로 인하여 운전 주기를 변화시키지 않고 배출 허용 기준을 만족시킬 수 있는 공정의 안정성, 미생물의 생물학적 분해로 인한 SCOD 농도 감소, 그리고 폐수의 유기물 농도 평형을 위한 탈착 속도 증가로 생물학적 재생 효과도 얻을 수 있다. 이러한 생물학적 재생, 즉 활성탄의 활성 자리의 증가는 다시 생물학적 분해 효율을 높일 수 있고, 생물학적 분해 효율의 증가는 다시 활성탄의 활성 자리의 증가로 이어지므로, 활성탄 첨가 공정과 연속 회분식 반응조는 각각 단순한 독립된 공정의 조합이 아니라, 서로 시너지 효과를 나타내는 공정이라고 할 수 있겠다. Table 3은 Fig. 3-5의 자료를 기초로 하여, 활성탄을 주입하였을 때의 각각의 처리효율에서 연속 회분식 반응조만 운전하였을 때의 처리효율을 빼므로써 계산되었으며, 활성탄 첨가로 인한 시너지 효과의 결과인, 증가된 SCOD 처리효율을 각각의 활성탄 농도 별로 나타내었다. Table 3에서 PK1-3의 경우, 연속 회분식 반응기만을 운전하였을 때보다도 활성탄 PK1-3을 100 mg/L의 농도로 주입하였을 때 약 9.4%, 200 mg/L의 농도로 주입하였을 때는 약 8.2%, 그리고 500 mg/L로 주입하였을 때는 14.1%의 처리효율이 증가되는 것을 알 수 있다. 이것은 활성탄 첨가 공정에서의 SCOD 감소가 단지 흡착량만이 아니라, 생물학적 활성증가의 시너지 효과에 의한 유기물 분해를 증가인 것으로 사료된다. Fig. 6에서는 PK1-3이 살균된 폐수에서 이론적으로 가장 흡착능(화학적-물리적 흡착만을 의미함)이 좋은 활성탄으로 나타났지만, 실제폐수를 가지고서 실험한 결과인 Table 3에서는 GAC1240이 다른 활성탄에 비해 미생물의 생물학적 시너지 효과에 의한 처리효율 증가가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 비록 활성탄이 화학적, 물리적 흡착능이 우수하더라도, 생물학적 시너지 효과에 있어서는 다른 결과를 가져올 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 이론적으로 비록 우수한 활성탄일지라도 폐수 처리에 실제로 적용할 때에는 실험실 규모나 pilot scale의 검증 단계를 거침으로서, 이론적 흡착능과 생물학적 시너지 효과를 종합하여 활성탄을 선택해야 할 것이다. 본 실험에 사용되어진 활성탄들은 Fig. 6과 Table 3을 종합해 볼 때, 서로 비슷한 처리 효능을 나타낼 수 있다.

Fig. 10-12까지는 이러한 활성탄-연속 회분식 반응기 공정에 중금속 등이 유입되었을 경우의 유기물 분해 효율에 대한 실험결과이다. 사용되어진 활성탄은 흡착 등온식에 의해 흡착 성능이 좋은 것으로 밝혀진 PK1-3이다. Fig. 10은 Pb를 첨가하였을 때이고, Fig. 11은 Cd를 첨가하였을 때, 그리고 Fig. 12는 Cr 첨가하였을 때의 실험결과이다. Fig. 10부터 12에서 공통적으로 볼 수 있듯이 Pb, Cd, Cr의 농도가 10 mg/L의 경우에 있어서 처리 효율이 각각 26.1%, 36.4%, 43.8%로서

Table 3. SBR treatment efficiency enhanced by adding granular activated carbons(%)

	PK1-3	GAC 1240	ROW 0.8 SUPRA
50 mg/L	-	5.1	-
100 mg/L	9.4	11.9	4.1
200 mg/L	8.2	13.6	8.3
500 mg/L	14.1	17.0	16.6

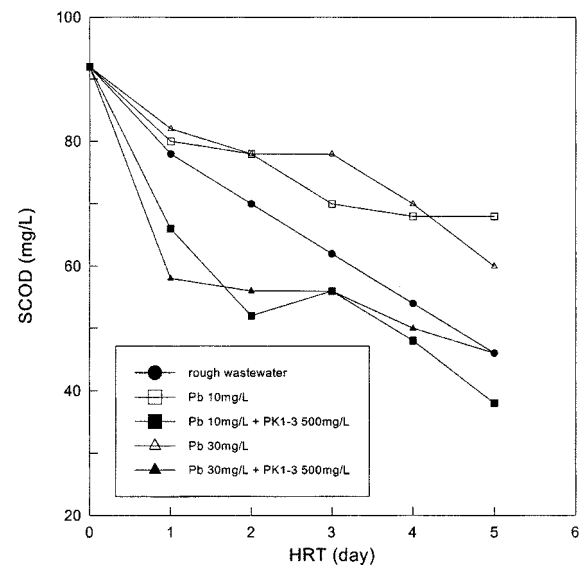


Fig. 10. SBR treatment with activated carbon PK1-3 and Pb.

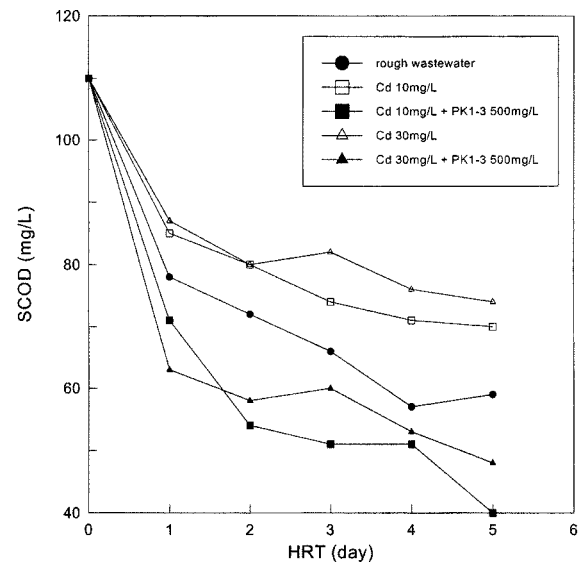


Fig. 11. SBR treatment with activated carbon PK1-3 and Cd.

연속 회분식 반응조만을 운전하였을 때의 50%, 46.4%, 54.5%보다도 더 떨어짐을 볼 수 있는데, 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 유기물보다 중금속이 슬러지에 먼저 흡착되거나 또는 중금속 이온들이 미생물의 대사과정에 저해제로 쓰인 것임을 나타낸다. 여기에, 활성탄을 500 mg/L로 주입하였을 경우에 처리 효율이 각각 58.7%, 63.6%, 66.1%로 저해 효과가 제거될 뿐만 아니라, SCOD 처리 효율이 증가되었음을 볼 수 있다. 이는 활성탄 주입으로 인한 활성 자리의 증가로 인한 유기물 흡착과 활성탄의 중금속 흡착으로 인한 저해제의 감소로 유기물 분해 효율이 증가되었기 때문일 것이다. 또, 난분해성 물질인 phenol에 대한 유기물 분해 효율은 Fig. 13에 나와 있다. 중금속과 마찬가지로 phenol을 10 mg/L 주입하였을 경우에 29.8%로서 미생물의 유기물 분해 효율을 저해하는 물질임을 알 수 있었으며, 활성탄 PK1-3을 500 mg/L로 주입하였을 때의 처리효율이 39.2%로서 저해효과가 제거됨을 볼 수 있었다. 이는 활성탄-연속 회분식 반응조가 유기물 제거에도 효율적이지만, 중금속이나 phenol과 같은 저해제의 흡착에도 역시 효과적임을 나타내는 결과라 할 수 있겠다.

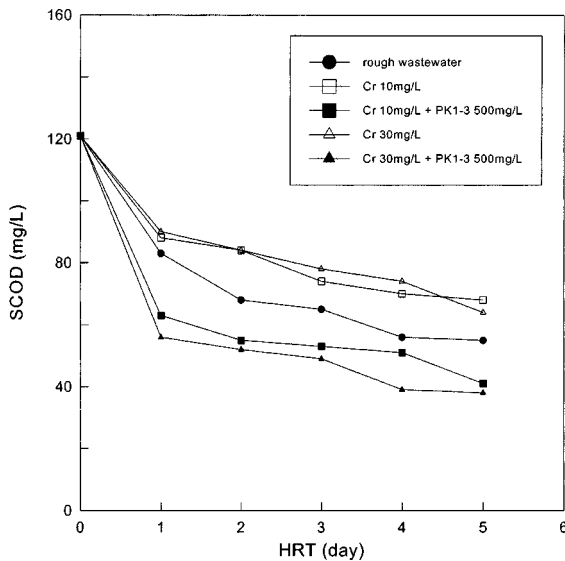


Fig. 12. SBR treatment with activated carbon PK1-3 and Cr.

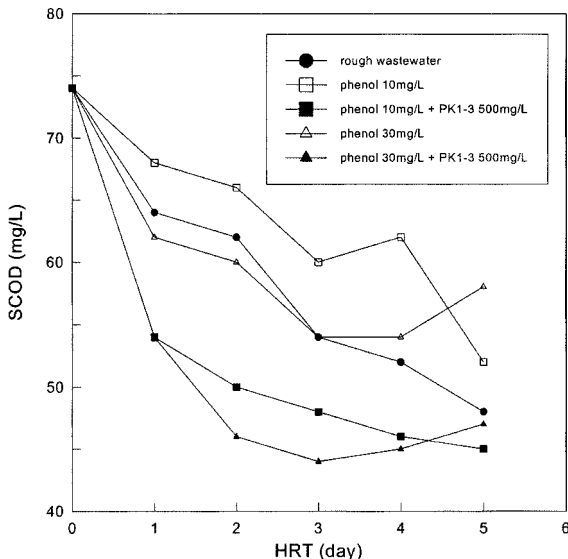


Fig. 13. SBR treatment with activated carbon PK1-3 and phenol.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 생물학적 처리를 위하여 연속 회분식 반응기를 사용하였으며, 이에 활성탄을 첨가한 활성탄-연속 회분식 반응기에 대한 연구를 하였다. 사용되어진 활성탄은 모두 입상활성탄인 PK1-3, GAC 1240, 그리고 ROW 0.8 SUPRA이다. 입상 활성탄의 장점인 사용의 편리함, 취급의 간편성, 재생의 용이성과 더불어, 활성탄을 반응조에 직접 투입함으로써 얻을 수 있는 갑작스러운 유기물 부하에 대한 공정의 안정성과 중금속이나 난분해성 물질 등의 미생물 활성 저해제의 유입으로 인한 반응조의 효율 저하에 대비하기 위하여 부유상으로 첨가하였다.

PK1-3을 500 mg/L의 농도로 반응조에 주입하였을 때에 약 14.1%, GAC 1240을 500 mg/L로 주입하였을 때는 약 17.0%, ROW 0.8 SUPRA를 500 mg/L로 주입하였을 때는 16.6%의 유기물 처리 효율이 증가됨을 알 수 있었다. 이러한 유기물 처리 효율 증가가 단지 흡착량에 의한 증가가 아니라, 활성탄의 주입으로 인한 미생물 활성을 증가시

키는 시너지 효과란 것을 알 수 있었으며, 또한 폐수와 활성탄 표면의 농도 평형으로 인한 탈착 속도의 증가로 활성탄의 생물학적 재생 효과도 간접적으로 확인할 수 있었다. 사용되어진 3종류의 입상 활성탄 모두에서 이러한 시너지 효과와 생물학적 재생 영향을 살펴볼 수 있었다. 또, Pb, Cd, Cr 같은 중금속이나 phenol과 같은 난분해성 물질이 반응조내에 주입되었을 경우, 처리효율이 각각 26.1%, 36.4%, 43.8%, 29.8%로 미생물 활성에 저해제로 사용되어지는 것을 확인하였으며, 이러한 저해 효과를 제거하기 위하여 활성탄을 500 mg/L로 주입하였을 경우에는 각각 처리효율이 58.7%, 63.6%, 66.1%, 39.2%로 저해 효과가 제거됨을 살펴볼 수 있었다. 입상 활성탄을 연속 회분식 반응조에 주입하는 공정의 운전 초기에는 활성탄 흡착으로 인한 SCOD 감소가 크며, 이후 미생물에 의한 SCOD 감소가 이루어짐으로서 유기물 제거 효율에 큰 효과가 있음을 관찰할 수 있었고, 저해물질에 대해서도 강한 공정의 안정성을 가지는 것으로 연구되었다.

#### 감 사

이 논문은 1999년도 광운대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

#### 참고문헌

- Schroeder, E. D. and George, T.: "Water and Wastewater Treatment," Addison Wesley, Reading, MA(1990).
- George, T. and Frankline, L. B.: "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse," McGraw-Hill, Inc.(1991).
- Water Pollution Control Federation: "Wastewater Treatment Plant Design, Draft Manual of Practice," 1988.
- Eckenfelder, W. W.: "Industrial Water Pollution Control," McGraw-Hill, New York(1989).
- Arora, M. L., Barth, E. F. and Umphres, M. B.: "Technology Evaluation of Sequencing Batch Reactor," *J. of WPCF*, **57**(8), (1985).
- Udeme, J. N.: "Kinetic Modeling of the Anaerobic Sequencing Batch Reactor(ASBR)," Iowa State University, Iowa, 50011(1993).
- U. S. Environmental Protection Agency: "Sequencing Batch Reactors," EPA, Cincinnati, OH(1986).
- Subramaniam, K., Greenfield, P. F., Ho, K. M., Johns, M. R. and Keller, J.: "Efficient Biological Nutrient Removal in High Strength Wastewater using Combined Anaerobic-Sequencing Batch Reactor Treatment," *Wat. Sci. Technol.*, **30**, 315(1994).
- Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J. C. and Arvin, E.: "Wastewater Treatment-biological and Chemical Process," Springer(1995).
- U. S. Environmental Protection Agency: "Process Design Manual for Carbon Adsorption," EPA, Cincinnati, OH(1973).
- McKay, G.: "Use of Adsorbents for the Removal of Pollutants from Wastewaters," CRC Press Inc.(1996).
- Yu, H. Q., Gu, G. W. and Song, L. P.: "The Effect of the Fill Mode on the Performance of Sequencing Batch Reactors Treating Various Wastewater," *Bioresource Technol.*, **58**, 49(1996).
- Artan, N., Akkaya, M. and Artan, S. R.: "Experiences with the SBR Treatment of Industrial Wastewaters," First IAWQ Specialized Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, 3/18(1996).
- Philip, A. H., Robert, L. I. and Kenneth, M. C.: "Biological Treatment of Hazardous Waste in Sequencing Batch Reactors," *J. of WPCF*, **57**, 1163(1985).
- Kolb, F. R. and Wilderer, P. A.: "Activated Carbon Sequencing Batch

- Biofilm Reactor to Treat Industrial Wastewater,' First IAWQ Specialized Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, 3/18 (1996).
16. Ketchum, L. H.: "Design and Physical Features of SBR Reactors," First IAWQ Specialized Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, 3/18(1996).
  17. Xiaojian, Z., Zhansheng, W. and Xiasheng, G.: "Simple Combination of Biodegradation and Carbon Adsorption-The Mechanism of the Biological Activated Carbon Process," *Water Res.*, **25**, 165(1991).
  18. German, B. and Romulo, F.: "Phenolic Compounds Biodegradation Using an SBR System Packed with a Porous Volcanic Support," IAWQ, 3/18(1996).
  19. Chua, H. and Hua, F. L.: "Effects of a Heavy Metal(zinc) on Organic Adsorption Capacity and Organic Removal in Activated Sludge," *Biochem. & Biotechnol.*, **57**, 5(1996).
  20. Sublette, K. L., Snider, E. H. and Sylvester, N. D.: "A Review of the Mechanism of Powdered Activated Carbon Enhancement of Activated Sludge Treatment," *Water Res.*, **16**, 1075(1982).
  21. Márquez, M. C. and Costa, C.: "Biomass Concentration in PACT Process," Elsevier, Great Britain(1996).
  22. Andrew, D. E., Lenore, S. C. and Arnold, E. G.: "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater," APHA(1995).