

유기물 생흡착 현상에 관한 기초연구

이동훈 · 이두진* · 김승진** · 정진욱*** · 배우근**†

건화엔지니어링

*한국수자원공사 수자원연구원

**한양대학교 토목환경공학과

***애리조나 주립대학교 Biodesign Institute

Characteristics of Carbon Source Biosorption

Dong-Hoon Lee · Doo-Jin Lee* · Seung-Jin Kim** · Jinwook Chung*** · Wookeun Bae**†

KUNHWA ENGINEERING CO. LTD.

*Korea Water Resources Corporation

**Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

***The Biodesign Institute at Arizona State University

(Received 28 July 2005, Accepted 22 September 2005)

Abstract

Biosorption technology was used to remove hazardous materials from wastewater, herbicide, heavy metals, and radioactive compounds, based on binding capacities of various biological materials. Biosorption process can be explained by two steps; the first step is that target contaminants is in contact with microorganisms and the second is that the adsorbed target contaminants is infiltrated with inner cell through metabolically mediated or physico-chemical pathways of uptake. Until recently, no information is available to explain the definitive mechanism of biosorption. The purpose of this study is to evaluate biosorption capabilities of organic matters using activated sludge and to investigate affecting factors upon biosorption. Over 49% of organic matter could be removed by positive biosorption reaction under anoxic condition within 10 minutes. The biosorption capacities were constant at around 50 mg-COD/mg-MLSS for all batch experiments. As starvation time increased under aerobic or anaerobic conditions, biosorption capacity increased since higher stressed microorganisms by starvation was more brisk. Starvation stress of microorganisms was higher at aerobic condition than anaerobic one. As temperature increased or easily biodegradable carbon sources were used, biosorption capacities increased. Consequently, biosorption can be estimated by biological -adsorbed capability of the bacterial cell-wall and we can achieve the cost-effective and non -residual denitrification with applying biosorption to the bio-reduction of nitrate.

keywords : Biosorption, Carbon sources, Denitrification

1. 서론

하·폐수의 생물학적 유기물제거 방법은 재래식 활성슬러지법(conventional activated sludge process)이 대표적이며, 이는 미생물이 유기물을 흡착, 흡수한 후 생물학적 대사 즉, 이화작용을 통하여 에너지를 얻고 새로운 개체를 형성함으로써 유기물을 제거하는 원리이다. 이러한 원리를 응용하여 그동안 다양한 하·폐수 처리공정이 개발되었으며, 최근에는 유기물뿐만 아니라 영양염류(질소, 인)까지 제거할 수 있는 공정들이 개발되어 널리 적용되고 있다. 특히 생흡착에 관한 연구는 오래 전부터 여러 연구자들이 관심을 가져왔으며, 생흡착 현상은 유입수내에 존재하는 부유입자, 콜로이드 유기물, 용존성 유기물

등이 미생물과 접촉하면서 빠른 시간 내에 미생물 플러크 표면에 흡착되거나 내부로 흡수되는 것으로 알려져 있다.

생흡착을 가장 먼저 응용한 공정은 호기성 생흡착 공정(aerobic biosorption process)으로 1951년에 Ullrich와 Smith에 의해 처음 개발되었고, 활성슬러지를 흡착제(adsorbent)로 사용하였다(Ullrich et al., 1957; Sawyer, 1960). 1953년에는 Mortenson이 폐수처리를 위한 혐기성 생흡착 공정(anaerobic biosorption process)에 대한 특허를 얻었으며, Schroeffer 등(1959a, 1959b)은 “The rapid adsorption-sludge regeneration process”라 불리는 공정에서 anaerobic biomass를 adsorbent로 사용하여, 반응시간 30분 이내에 빠르게 유기물이 제거되는 현상을 보고하였다. (Rumana et al., 1995). Majone 등(2001)은 처리과정 전체의 COD mass balance 분석을 통하여 기질제거현상을 해석하였는데, 이 중 성장(growth), 유지(maintenance), 내부저장(storage), 탈질(deni-

† To whom correspondence should be addressed.
wkbae@hanyang.ac.kr

trification) 등에 필요한 양 이외에도 미지의 소모량이 발생하는 것을 보고한 바 있다. 생흡착 공정은 특히 산업폐수 내 유해물질 즉, 독성유기물, 중금속, 방사선물질 등을 제거하기 위하여 다양하게 이용되었다. (Tsezos et al., 1989; Kasan et al., 1989; Bell et al., 1987; Morper, 1986; Tsezos et al., 1986). 이처럼 생흡착을 이용한 공정이 널리 개발되고 있음에도 불구하고, 생흡착 현상과 미생물의 능동적 대사사이의 기전규명이 명확하지 않고, 빠르게 흡수되는 (rapidly sorption) 기질의 저장과 재이용에 대한 연구는 역시 부족한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 미생물이 기질과 접촉하는 단계에서 30분 이내에 빠르게 기질을 소모하면서 기질제거속도에 변곡점이 발생하는 지점까지의 기질제거현상을 생흡착으로 정의하였다. 생흡착이 미생물의 능동적인 대사 작용인지를 평가하기 위하여 생흡착을 물리화학적 흡착(physico-chemical sorption)과 생물학적 흡착(net-biosorption)으로 분리하였고, 기전 해석을 위하여 플럭 부하(floc-loading), 접촉시간, 기아조건(starvation time) 및 시간, 온도, 기질종류 등 생흡착의 영향인자에 대해서도 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 연속처리공정 실험

실험실 규모의 혐기-간헐포기 공정은 혐기조 (1 L), 간헐포기조 (4 L), 침전조로 구성되어 있으며, 고형물 체류시간 (solids retention time, SRT)은 20일, 수리학적 체류시간 (hydraulic retention time, HRT)은 5시간 (혐기조 1시간, 간헐포기조 4시간), 포기/비포기 시간은 각각 30분으로 운전하였다.

혐기-간헐포기 연속반응기에 주입된 합성폐수는 McClintock 등(1988)의 연구 자료를 참고하여 도시하수의 평균수질을 기준으로 Table 1과 같이 제조하였으며, 질소원으로는 $(NH_4)_2SO_4$ 와 Bacto peptone을 사용하였고 탄소원은 glucose를 사용하였다. 혐기-간헐포기 공정은 약 350일의 운전 기간동안 유기물(COD_{cr})과 암모니아성 질소(NH_4^+-N)의 평균 제거효율이 각각 97.4%, 95.9%로 매우 안정적인 결과를 보여주었다.

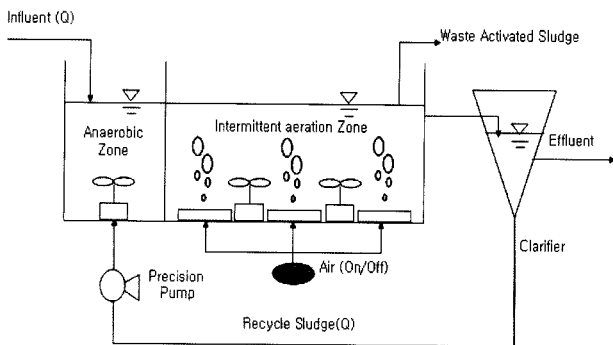


Fig. 1. Schematic diagram of the intermittent aeration reactor.

Table 1. Composition of synthetic wastewater

Compound	Concentration(mg/L)
Bacto-peptone	147.0
Glucose	128.4
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	50.0
$MnSO_4 \cdot H_2O$	5.0
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	2.2
KCl	7.0
$(NH_4)_2SO_4$	98.7
K_2HPO_4	39.3
$NaHCO_3$	600.0
$CaCl_2$	3.8

2.2. 회분식 실험

회분식 실험은 둥근바닥 플라스크 반응기를 제작하여 사용하였으며, 항온수조를 이용하여 수온은 $20 \pm 2^\circ C$ 로 일정하게 유지하였다(Fig. 2참조). 회분식 실험에서 슬러지 농도(mixed liquid suspended solids, MLSS)는 3,000~3,400 mg/L로 유지하였고, 탄소원으로 glucose를 이용하여 초기 COD_{cr} 농도는 300~330 mg/L가 되도록 조제하였다. 회분식 반응기가 혐기성상태가 되도록 질소가스를 주입하여 공기를 배제시킨 후 실험을 수행하였고, 시료 채취시마다 질소가스를 주입하였다. 슬러지와 기질은 부피비 1:1(500 mL / 500 mL)로 혼합하였고, 혼합 후 회분식 반응기내의 MLSS와 COD_{cr} 는 각각 $1,700 \pm 100$ mg/L와 160 ± 5 mg/L가 되도록 하였다.

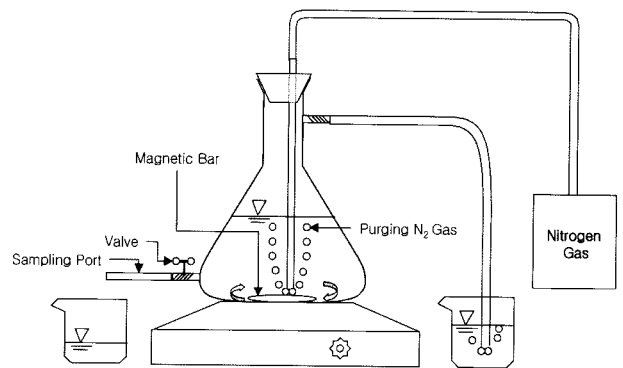


Fig. 2. Schematic diagram of batch reactor.

2.2.1. Net-biosorption 특성평가

고온고압(Autoclave, 1.5 kgf/cm^2 , $120^\circ C$, 36분)으로 멸균시킨 슬러지를 이용한 흡착실험을 통하여 physico-chemical sorption 부분을 분리하고, 동일한 실험조건에서 활성슬러지가 흡착하는 것은 physico-chemical sorption과 net-bio sorption이 합쳐진 것으로 가정하여 미생물의 활성에 의한 능동적인 기질 흡착특성을 분석하였다.

2.2.2. Adenosine Tri-Phosphate(ATP) 분석

ATP는 생물의 에너지대사에서 매우 중요한 역할을 하는 물질이다. 본 연구에서는 활성슬러지와 멸균슬러지의 ATP를 측정함으로써, 멸균슬러지의 생물학적 활성이 정지되었음을 간접적으로 평가하고자 하였다. ATP의 측정은 ATP

bioluminescence assay kit(Roche Molecular Biochemical, HS II)를 사용하여 측정하였다.

2.2.3. Biosorption의 영향인자

① 플럭 부하(Floc-loading)

플럭부하에 따른 생흡착량의 변화를 측정하기 위하여 단위 고행물당 유기물 흡착량(Δ g-COD/g-MLSS)을 평가하였다. 접촉시간은 10분으로 고정하였고 초기 COD_{cr} 농도는 50~500 mg/L까지 변화시켰다.

② 접촉시간

슬러지와 기질의 접촉시간에 따른 흡착량 변화를 분석하기 위하여 수행되었으며, 혐기조건에서 기질과 슬러지의 접촉시간은 10~70분 범위로 조정하였다.

③ 기아시간 및 조건

기아시간은 연속처리공정의 최종 침전지에서 슬러지가 침전, 반송되는 사이의 기간, 즉 추가적인 기질주입이 없는 상태에서 기질과 다시 접촉할 때까지의 시간을 고려한 것으로, 0.5시간~24시간 동안 기질부족 상태에 노출시킨 후 순간적으로 기질을 주입하여 생흡착 반응을 살펴보았다. 기아조건을 혐기와 호기상태로 각각 유지하여 기아조건이 미생물의 기질부족 stress에 미치는 영향을 비교하였고, 일정 시간 starvation 상태를 유지한 후 순간적으로 기질을 주입하여 10분간 혼합시킨 흡착능을 평가하였다.

④ Temperature

온도에 따른 생흡착의 영향을 평가하기 위하여 반응조의 온도를 항온수조를 이용하여 10, 20°C에서 각각 생흡착량의 변화를 비교하였다.

⑤ 유기물 종류에 따른 영향

유기물 종류에 따른 생흡착 특성을 분석하기 위해서 사용한 유기물로는 아세트산(acetic acid), 글루코즈(glucose), 전분(starch) 및 생하수를 대상으로 실험을 수행하였으며, 혐기-간헐포기조의 슬러지와 경기도 A시의 하수처리장의 슬러지를 대상으로 비교 실험을 수행하였다.

2.3. 분석방법

회분식 실험에서는 시료를 glass-fiber filter(1 μ m)로 고액 분리한 후 여액을 분석하였다. 암모니아성 질소(NH₄⁺-N), 질산성질소(NO₃⁻-N), 아질산성질소(NO₂⁻-N) 그리고 인산염(PO₄³⁻-P)의 분석은 이온 크로마토 그래피(Ionchromatography, DX-500, Dionex)를 이용하였으며 COD_{cr}, 휘발성 부유고형물(Volatile suspended solids, VSS)은 Standard methods(APHA, 1998)에 준하여 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 연속처리공정에서 생흡착현상 평가

혐기-간헐포기 공정에서 혐기조와 간헐포기조내의 포기시간과 비포기시간의 흐름에 따라 COD_{cr}, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N 및 PO₄³⁻-P 농도를 분석하였다(Fig. 3 참조). 혐기조 내에서 유기물의 거동은 혐기조로 유입되는 반송슬러지에 의해 희석되고, 인 축적미생물(Phosphate accumulating organisms, PAOs)에 의한 섭취, NO₃⁻-N의 탈질 등에 의하여 소모된다. 혐기조 내의 COD_{cr} 물질수지는 반송슬러지 희석 후 유입되는 COD_{cr} 농도, 인축적미생물에 의해 섭취되는 COD_{cr} 농도 그리고 탈질에 의해 소모된 COD_{cr} 농도 등을 고려하여 다음과 같이 제시할 수 있다.

① 혐기조에서의 COD_{cr} mass-balance

$$V \frac{dS}{dt} = (\text{rate of } COD_{in}) - (\text{rate of } COD_{out}) - \sum (\text{rate of } COD_{consumption})$$

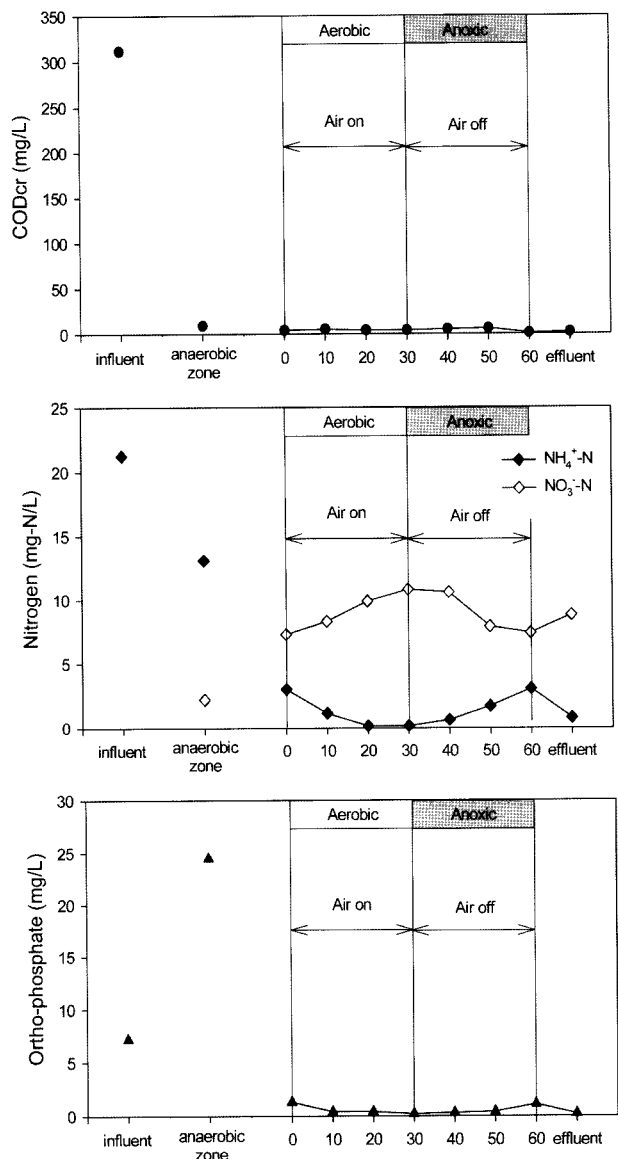


Fig. 3. Profiles of concentration in anaerobic- intermittent aeration process.

혐기조가 정상상태라면, $V \frac{dS}{dt} = 0$ 이 되므로, 유기물에 대한 물질수지식은 다음과 같아진다.

$$0 = (Q \cdot COD_i + Q \cdot COD_r) \quad \text{input} \\ - (2Q \cdot COD_e) \quad \text{output} \\ - 3.2 \times (P\text{-release rate, mg P/time}) \quad \text{consumption} \\ - 3.7 \times (\text{denitrification rate, mg N/time}) \\ - \text{biosorption rate}$$

여기서, COD_i = Influent soluble COD (311.5mg/L)
 COD_r = Recycle sludge soluble COD (=0.0mg/L)
 COD_e = Effluent soluble COD (9.0mg/L)

COD/P-release 값은 U.S.EPA(1987)에서 제시한 3.2 g/g을 사용하였고, 탈질에 필요한 COD량(COD/NO_3^- -N)은 U.S.EPA (1993)에서 제시한 3.7 g/g을 사용하였다.

② P-release rate

$$0 = \text{rate of } P_{in} - \text{rate of } P_{out} + P_{release \text{ rate}} \\ = (Q \cdot 7.2 \text{ mg/L} + Q \cdot 0.2 \text{ mg/L}) \\ - 2Q \cdot 24.5 \text{ mg/L} + P_{release \text{ rate}}$$

여기서, 혐기조의 PO_4^{3-} -P 농도는 24.5 mg/L
 반송슬러지의 PO_4^{3-} -P 농도는 0.2 mg/L
 유입수의 PO_4^{3-} -P 농도는 7.2 mg/L

$\therefore P_{release \text{ rate}} = 41.6Q$

③ Denitrification rate

$$0 = (NO_3^- - N)_{in} - (NO_3^- - N)_{out} - \text{Denitrification rate} \\ = (0 \cdot Q + 8.8 \text{ mg/L} \cdot Q) - 2Q \cdot 2.2 \text{ mg/L}$$

여기서, 혐기조의 NO_3^- -N 농도는 2.2 mg/L
 반송슬러지의 NO_3^- -N 농도는 8.8 mg/L
 유입수의 NO_3^- -N 농도는 0 mg/L

$\therefore \text{Denitrification rate} = 4.4Q$

④ Biosorption rate

$$0 = COD_i \cdot Q - 2Q \cdot COD_e - 3.2 \times 41.6Q \\ - 3.7 \times 4.4Q - \text{biosorption rate} \\ \text{Biosorption rate} = 311.5Q - 18Q - 133.12Q - 16.28Q \\ \therefore \text{Biosorption rate} = 144.1Q \\ = 144.1 \text{ mg/L} \times 36.0 \text{ L/d} \\ = 5,187.6 \text{ mg/d} \\ (144.1/311.5 \times 100 = 46.2\% \text{ biosorption})$$

Table 2. Size distribution of activated sludge and autoclaved sludge

Item	Activated sludge		Autoclaved sludge	
	Mean	Std. Dev.	Mean	Std. Dev.
Area (mm ²)	0.670	0.362	0.652	0.348
Diameter (mm)	0.886	0.252	0.826	0.251
Perimeter (mm)	2.884	0.882	2.849	0.874

물질수지 분석을 통하여 회석, 인방출, 탈질 등에 의해 소모된 유기물을 고려하더라도 유입 COD_{cr} 의 46.2%가 생 흡착으로 제거됨을 알 수 있었다.

3.2. Net-biosorption 특성평가

3.2.1. 멸균/활성슬러지의 물리·화학적, 생물학적 흡착특성 비교

흡착실험에 앞서 혐기-간헐포기 슬러지(active cell)와 멸균슬러지(dead cell)에 대한 입도분석을 통하여 흡착조건외 물리적 특성을 비교하였다. Table 2에 나타낸 바와 같이 평균입경과 표면적이 거의 유사하게 나타나 두 실험대상 슬러지에서 유효입경과 면적에 따른 흡착의 차이는 없는 것으로 판단되었다.

또한 ATP 측정을 통하여 활성슬러지와 멸균슬러지에 대한 활성도를 평가한 결과는 활성슬러지는 약 1.2 mg-ATP/g-VSS로 검출된 반면, 멸균슬러지는 ATP가 검출되지 않았다(Table 3 참조). 이는 멸균슬러지의 경우 미생물의 활성이 없는 것으로 판단된다.

Table 3. ATP content in activated sludge and autoclaved sludge

Item	Activated sludge	Autoclaved sludge
ATP(mg/L)	4.4	0
MLVSS(mg/L)	3,700	3,020
ATP/MLVSS(mg/g)	1.2	0

3.2.2. 순 생흡착(Net-biosorption)

활성슬러지(혐기-간헐포기)와 멸균슬러지를 이용한 회분식 흡착 실험결과는 Fig. 4와 같다. 생흡착은 10분내에 거의 완료되었고, 멸균된 슬러지의 경우 10분동안 슬러지당 제거된 COD_{cr} 비($\Delta COD_{cr}/MLSS$)는 27.7 mg/g으로 나타났으며 유기물은 29.1%가 제거되었다. 반면 활성슬

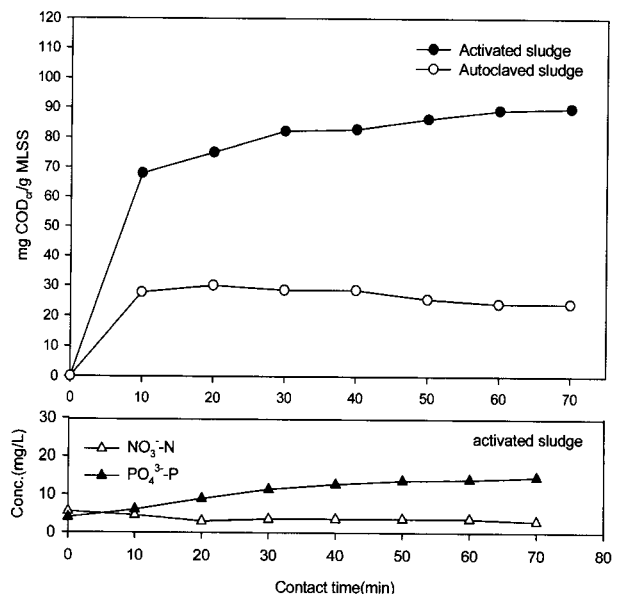


Fig. 4. Comparison of biosorption and physico-chemical sorption.

러지의 경우 $\Delta\text{COD}_{\text{cr}}/\text{MLSS}$ 는 68.0 mg/g으로 유기물의 70.1%가 제거되었다. 활성슬러지를 이용한 회분식 실험에서 10분동안 NO_3^--N 1 mg/L가 탈질되고 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 2.2 mg/L가 방출되었는데, 앞서 인용한 문헌(EPA, 1987, 1993)에 의해 탈질과 인방출에 소모되는 COD_{cr} 량은 10.74 mg/L로 추정된다. 따라서 활성슬러지의 유기물 흡착과정에서 물리화학적 흡착과 탈질, 인방출에 소모된 COD_{cr} 량을 제외하면, 흡착된 유기물량 중 49.9%(57.8 mg/L)가 미생물의 능동적인 대사에 의해 제거된 것으로 판단할 수 있다.

3.3. 생흡착의 영향인자

3.3.1. 플럭 부하(Floc-loading)

유기물부하 변화에 따른 흡착가능량을 평가하기 위해 기질농도를 증가시키면서 제거되는 유기물량을 평가하였다. 기질농도가 증가할수록 생흡착량은 증가하였으며 floc-loading 230 mg- $\text{COD}_{\text{cr}}/\text{g-MLSS}$ 에서 흡착능이 약 50 mg- $\text{COD}_{\text{cr}}/\text{g-MLSS}$ 에 도달하였다(Fig. 5참조). 그 후 흡착증가가 둔화되므로 50 mg- $\text{COD}_{\text{cr}}/\text{g-MLSS}$ 는 본 슬러지의 흡착 한계농도로 볼 수 있으며, 이는 무산소 조건에서 미생물의 대사가 제한된 조건에서 흡착제로써 미생물의 표면에 흡착, 흡수될 수 있는 한계부하를 의미한다고 할 수 있다.

Eikelboom (1982)은 23개의 하수처리장 슬러지를 이용하여 10분간의 생흡착량을 분석한 결과, 18 개의 슬러지에서 생흡착량이 50 mg- $\text{COD}_{\text{cr}}/\text{g-MLSS}$ 미만이었으며, Pujol과 Canler(1992)의 연구에서도 동일한 실험을 수행한 결과 40 mg- $\text{COD}_{\text{cr}}/\text{g-MLSS}$ 정도의 흡착능을 보고한 바 있다.

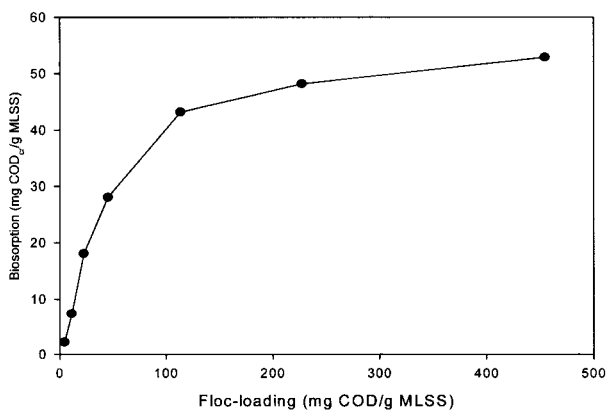


Fig. 5. Biosorption capacity with substrate loading.

3.3.2. 접촉시간

슬러지와 유기물의 접촉시간에 따른 흡착량 변화를 분석하기 위해서 접촉시간을 10~70분으로 점진적으로 늘린 결과, 10분만에 70.1%가 제거되었고, 84.7%의 유기물이 30분 이내에 제거되었다(Fig. 6참조). 유기물과 슬러지가 혐기조건에서 접촉되는 과정에서 30분 이내에 대부분의 흡착이 완료됨을 알 수 있었다. 이 결과로 생흡착을 이용한 유기물의 제거가 짧은시간내에 처리가 가능할 것으로 판단된다.

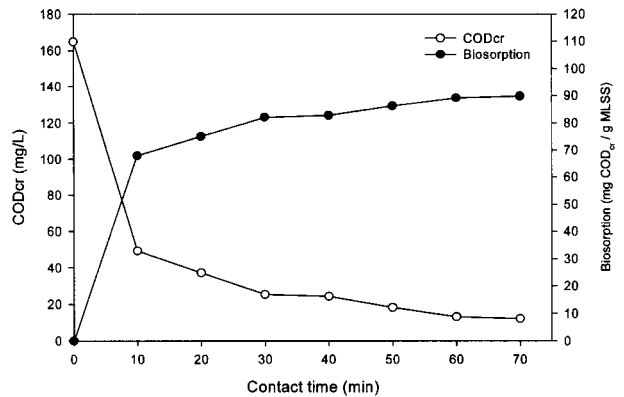


Fig. 6. Biosorption with contact time.

3.3.3. 기아조건 및 시간

앞선 실험결과(Fig. 4)에서 10분간 제거된 유기물의 49.9%가 활성미생물에 의해 능동적으로 소비된 것임을 감안한다면, 미생물의 영양상태가 흡착제거량에 영향을 미칠 수 있을 것이라는 가설이 가능하다. 이러한 가설을 검증하기 위하여 본 실험에서는 빈영양(혹은 기아) stress와 빈영양 조건(혐기, 호기)에 따른 흡착특성을 비교, 분석하였다. Fig. 7과 같이 30분 동안 혐기조건으로 기질이 부족한 상태(기아상태)를 유지한 경우에는 47.2 mg- $\text{COD}_{\text{cr}}/\text{g-MLSS}$ 이 흡착되었고 기아시간이 6시간으로 증가함에 따라 59.9 mg- $\text{COD}_{\text{cr}}/\text{g-MLSS}$ 이 흡착되는 것으로 나타났다. 이는 기아시간이 길어짐에 따라 미생물의 빈영양 stress가 더 커지게 되고, 이후에 기질이 충분한 조건에 노출되면 더욱 많은 흡착 및 흡수대사가 일어나는 것으로 판단할 수 있다. 8시간 이후에서는 오히려 흡착량이 감소하는데, 이는, starvation이 한계에 이르러 미생물의 활성 저하나 내생호흡에 의한 decay가 일어난 것으로 추측되며, 보다 정확한 해석을 위하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

호기조건에서는 30분 기아시간에서 57.4 mg- $\text{COD}_{\text{cr}}/\text{g-MLSS}$ 가 흡착되었으며, 6시간에는 63.9 mg- $\text{COD}_{\text{cr}}/\text{g-MLSS}$ 로 호기조건이 혐기조건에 비해 전반적으로 높은 흡착능을 나타내었다. 호기조건에서도 기아시간이 8시간 이후부터 흡착유기물량이 감소하는 것으로 나타났다.

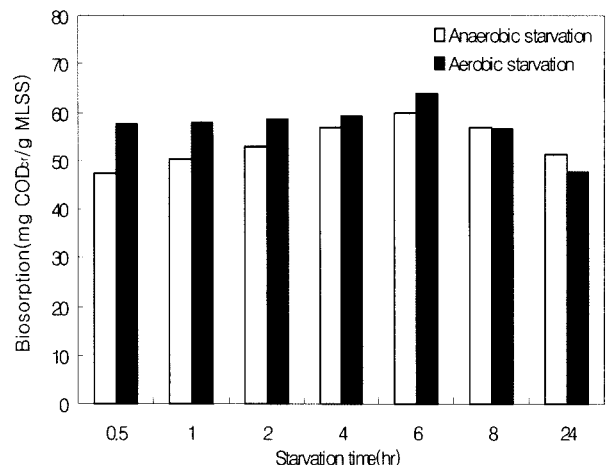


Fig. 7. Biosorption with different starvation conditions.

본 실험은 일반적인 연속처리 시스템에서 활성슬러지가 주반응조를 유통하여 최종 침전조에서 체류하는 시간이 2-4시간 정도임을 감안한 실험이며, 침전지에서 반송된 슬러지가 유입수와 혼합되는 경우, 단기간의 흡착, 특히 생흡착에 의해 40~49%(27~34 mg-COD_{Cr}/g-MLSS)의 유기물이 제거될 수 있음을 보여준 결과이다.

3.3.4. 온도

미생물의 활성은 온도에 의해 영향을 받고, 이는 미생물의 생흡착에도 영향을 미칠 것으로 예상된다. Fig. 8에서와 같이 10°C와 20°C에서 각각 33.0 mg-COD_{Cr}/g-MLSS 및 40.9 mg-COD_{Cr}/g-MLSS로 나타났으며 유기물 제거율은 각각 70%와 90%였다. 선행 연구에서 규명되었듯이 생흡착의 상당부분이 미생물의 능동적인 대사에 의하여 일어나므로 온도상승에 의한 미생물의 활성 증가에 의하여 생흡착능이 증대된 것으로 판단된다.

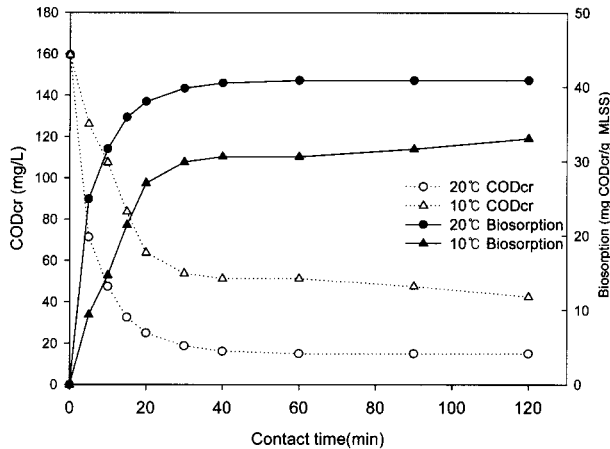


Fig. 8. Biosorption capacity with temperature.

3.3.5. 기질종류에 따른 영향

미생물에 의해 기질이 제거되는 과정은 기질에 대한 미생물의 순응과 기질의 생분해성이 크게 영향을 미친다. 본 실험에서는 생분해도(biodegradability)가 다른 기질 즉, 빠르게 분해되는(readily biodegradable) 아세트산, 글루코스,

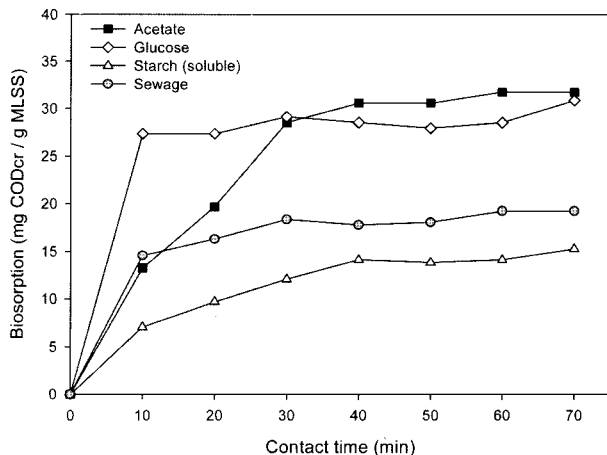


Fig. 9. Biosorption capacity with different carbon sources.

중간정도의 생하수, 느리게 반응하는(slow biodegradable) 전분을 대상으로 생흡착 특성을 비교하였다. Fig. 9에서와 같이 접촉초기에 아세트산과 글루코스가 급격하게 제거되고 생하수, 전분 순으로 흡착량의 차이를 나타내었는데 이는 생분해도가 높은 기질이 미생물의 능동적인 대사에 의하여 더 많이 생흡착되는 것을 알 수 있다. 글루코스의 경우 아세트산에 비해 초기 흡착량이 더 크게 나타났는데, 이는 대상 슬러지가 합성하수의 유기물 성분인 글루코스에 순응되어 있기 때문에 높은 제거율을 보인 것으로 추측된다.

4. 결론

본 논문에서는 미생물이 유기물을 능동적으로 흡착할 수 있는 능력을 평가하고, 생흡착의 영향인자에 대하여 살펴보았다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 연속으로 운전되는 혐기-간헐포기 공정의 선단 혐기조에서 유입 COD_{Cr}의 46.6%가 생흡착에 의해 제거되는 것으로 나타났다.
- 2) 회분식 실험을 통하여 활성슬러지의 유기물 흡착과정에서 물리화학적 흡착량을 분리하여 분석한 결과, 흡착된 유기물량 중 49.9%가 미생물의 능동적인 대사에 의해 제거되는 것으로 나타났다.
- 3) 생흡착에 영향을 미치는 여러 가지 인자들에 대한 실험 결과, 흡착 한계 농도는 약 50 mg-COD_{Cr}/g-MLSS 였으며, 유기물과 슬러지 접촉시간에 따른 영향에서는 접촉 시간 10분만에 유기물의 70.1%가 제거되었고, 84.7%의 유기물이 30분 이내에 급격하게 제거되는 것으로 나타났다. 이용 가능한 기질주입이 없는 조건에 노출된 상태에서 기아시간이 증가함에 따라 10분만에 제거되는 생흡착량이 점차 증가하였으며, 기아상태가 호기조건인 경우 더 많은 생흡착이 발생하였다. 온도가 증가함에 따라 생흡착량이 증가하였으며, 유기물의 종류에 따른 생흡착 실험에서는 기질의 생분해도가 높을수록 더 많이 흡착되었고 기질의 순응여부도 초기흡착반응에 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 한국과학재단목적기초연구(R01-2001-000-00437-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

APHA, AWWA and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Ed., Washington, D.C. (1998).

Bell, J. P. and Tsezos, M., Removal of Hazardous Organic Pollutants by Biomass Adsorption, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **59**(4), pp. 191-198 (1987).

Eikelboom, D. H., *Bulking of Activated Sludge: Preventive and*

- Remedial Methods - Biosorption and Prevention of Bulking Sludge by Means of High Floc Loading*, (Edited by Chambers, B. and Tomlinson, E. J.), Ellis Horwood, pp. 90-105 (1982).
- Kasan, C. H. and Baecker, A. A. W., An Assessment of Toxic Metal Biosorption by Activated Sludge from the Treatment of Coalgasification Effluent of a Petrochemical Plant, *Wat. Res.*, **23**(7), pp. 795-800 (1989).
- Morper, M., *Anaerobic Sludge - A Powerful Low-cost Sorbent for Heavy Metals. Immobilization of Ions by Biosorption*, H. Eccles and S. Hunt. (Eds.). Eillis Horwood Ltd., Chichester, U.K. (1986).
- Majone, M., Beccari, M., Dionisi, D., Levantesi, C. and Renzi, V., Role of Storage Phenomena on Removal of Different Substrates during Pre-denitrification, *Wat. Sci. Tech.*, **43**(3), pp. 151-158 (2001).
- McClintock, S. A., Sherrard, J. H., Novak, J. T. and Randall, C. W., Nitrate Versus Oxygen Respiration in the Activated Sludge Process, *J. Water pollut. Control Fed.*, **60**, p. 342 (1998).
- Pujol, R. and Boutin, P., Control of Activated Sludge Bulking from the Lab to the Plant, *Wat. Sci. Tech.*, **21**(3), pp. 717-726 (1989).
- Rumana, R. and Richard, R. D., Laboratory Studies on the Anaerobic Biosorption Process, *Water Environ. Res.*, **67**(5), pp. 1104-1110 (1995).
- Sawyer, C. N., Activated Sludge Modifications, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **32**(3), pp. 232-240 (1960).
- Schroepfer, G. J. and Ziemke, N. R., Development of the Anaerobic Contact Process, I. Pilot Plant Investigations and Economics, *Sew. Ind. Wastes*, **31**(2), pp. 164-172 (1959a).
- Schroepfer, G. J. and Ziemke, N. R., Development of the Anaerobic Contact Process, II. Ancillary Investigations and Special Experiments, *Sew. Ind. Wastes*, **31**(6), pp. 697-717 (1959b).
- Tsezos, M. and Bell, J. P., Comparison of the Biosorption and Desorption of Hazardous Organic Pollutants by Live and Dead Biomass, *Wat. Res.*, **23**(5), pp. 561-568 (1989).
- Tsezos, M. and Seto, W., The Adsorption of Chloroethanes by Microbial Biomass, *Wat. Res.*, **20**(7), pp. 851-858 (1986).
- U. S. EPA, *Design Manual. Phosphorus Removal*, EPA/625/I-87-001 Environmental Protection Agency, Washington, D. C. (1993).
- U. S. EPA, *Manual Nitrogen Control*, EPA/625/R-93/010, Environmental Protection Agency, Washington, D. C. (1993).
- Ullich, A. H. and Smith, M. W., Operation Experience with Activated Sludge-biosorption at Austin, Texas. *Sew. Ind. Wastes*, **29**(4), pp. 400-408 (1957).