한국생물공학회지 제22권 제4호
Korean J. Biotechnol. Bioeng.
Vol. 22, No. 4, 191-196(2007)

Pilot 규모의 상향류식 충전탑 반응기를 이용한 생활오수의 유기물 및 질소, 인 처리에 관한 연구

선 용 호
상지대학교 환경공학과
(접수 : 2007. 7. 9., 게재승인 : 2007. 8. 14.)

A Study on Removal of Organics, Nitrogen and Phosphorus of Domestic Wastewater in Pilot-Scale Upflow Packed Bed Column Reactor

Yong-Ho Seon
Department of Environmental Engineering, Sangji University, Wonju, Kangwon-Do 220-702, Korea
(Received : 2007. 7. 9., Accepted : 2007. 8. 14.)

This study used biofilm process, which needs simple operation, maintenance and smaller facility area than conventional activated sludge process with the small plant operation, in the treatment of increasing sewage with the rapid industrial growth. The reactor used in this study consists of one anaerobic and one aerobic chamber filled with waste ceramic and waste vinyl as media and the treated sewage was from restaurant source. The experiment was scaled up from lab. to pilot scale and lasted for about 100 days. We focused on the removal efficiency of organics, nitrogen and phosphorus with constant HRT and continuous aeration. The removal efficiency of BOD_5 and SS were 94.33% and 87.77% respectively, which was a satisfaction level. However the removal efficiency of COD_{Cr} was 81.46% somewhat below the desired level of 90%, and that of T-N and T-P showed 71.92% and 21.10% respectively, that was below the expected value. The removal efficiency of COD_{Cr} and T-N in the pilot scale was about 10% low compared with the lab.-scale.

Key Words : Pilot-scale, biofilm process, domestic wastewater, media, organics, nitrogen, phosphorus

서 론

현대인의 일상생활에 있어서 물은 생명유지를 위한 필수적인 자원 중의 하나인 동시에 경제, 산업 활동을 유지하도록 도움이 되는 물질이다. 1960년대 이후 계속된 경제개발계획으로 산업의 급속한 발전을 이루면서 국민 생활수준의 향상을 이끌었지만 인구의 대도시 집중현상과 물수요의 급증으로 인하여 각종 폐수와 생활하수, 새로운 합성물질 등이 배출되어 심각한 수질오염을 초래하면서 심각한 사회문제로 대두되었다(1). 또한 급격히 늘어난 하수의 발생량에 비하여 용량이 턱없이 부족한 하수종말처리시설과 마을하수도에 의해 미처리된 하수가 하천을 오염시키고 있다. 또한 기존 하수관리의 정비 미흡 및 관리 소홀로 수질오염이 더욱 가중되어가고 있다(2).

현재 국내 생활하수의 유기물 제거에 가장 많이 이용되고 있는 방법은 생물학적 처리법으로 부착식과 부유식으로 크게 나눌 수 있으며 국내 하수종말처리장에서는 대부분 90% 이상이 부유식 미생물법 중 하나인 활성슬러지 공법을 쓰고 있다. 최근에는 부착식 미생물법에 많은 관심과 연구가 진행 중인데, 그 이유는 고농도의 미생물은 활성슬러지 공법에서 유지되기가 어렵고, 슬러지 팽화현상이 자주 나타나며, 유기물 부하에 대한 대처능력이 떨어지고, 넓은 부지가 필요하고, 폐슬러지가 다량 발생하기 때문이다. 이에 반해 대표적인 부착식 방법인 생물막법은 담체를 이용해 미생물을 부착시킨 다음 담체 표면에 생성된 생물막을 이용하여 여기서 생긴 미생물에 의해 주도적으로 폐수 내 오염물질을 처리하는 방식으로 슬러지 연령이 길고, 슬러지의 자기산화가 촉진되어 폐슬러지의 발생량이 적어

† Corresponding Author : Department of Environmental Engineering, Sangji University, Wonju, Kangwon-Do 220-702, Korea
Tel : +82-33-730-0445, Fax : +82-33-730-0403
E-mail : yhseon@sangji.ac.kr

지며, 다양한 미생물 종의 군집을 형성하여 온도나 pH 변동과 유기물 부하 및 난분해성 물질의 유입에 대한 대처 능력이 뛰어나고 슬러지 팽화 현상으로 인한 슬러지 부상 등과 같은 문제점을 줄일 수 있는 장점이 있다(3). 또한 생물막법은 각종 미생물이 담체 상에 부착되어 있기 때문에 침전조에 의한 고액분리나 슬러지 반송 등이 필요 없고, 질산화균과 같이 비증식 속도가 느린 미생물이 부착되기 쉬운 특성을 지니고 있으며, 저농도의 유기성 폐수에도 적용할 수 있는 장점이 있다(4). 그러나 인의 제거가 곤란하며 생물막이 두꺼워지면 처리효율이 떨어지게 되는 등의 단점도 지니고 있다. 이 공법은 1900년대 초기에 살수여상이 개발되어 사용된 것이 그 시초이며(5) 생물막을 이용한 질소 제거법으로는 주로 혐기성여상과 호기성 생물막법인 접촉포기법이나 생물여과법 등을 조합시켜 포기조 유출수를 혐기성 여상으로 재순환시키는 방법을 이용하고 있으나, 최근에는 효율적인 탈질을 위하여 황탈질법, 전기분해의 수소 공급을 통한 탈질법, 포괄고정화법, 자기조립법 등을 활용하는 방식도 사용되고 있다(6).

미생물의 담체 상 부착은 즉각적으로 일어나거나 비가역적으로 확고하게 일어나며, 그 과정은 젖은 담체 표면으로 유기물 흡착, 폐수로부터 젖은 담체 표면으로 미생물 이동, 표면에 미생물 부착, 부착된 미생물의 대사 작용 및 성장, 폐수의 전단력에 의한 생물막의 탈리로 구성되어 있다(7).

생물막은 입자표면에 부착되어 있는 미생물 세포와 기타 여러 가지 생성물로 구성되는데, 일반적으로 생물막 공정에서 기능상 담체가 가져야 할 조건은 대형 포기조에서 정상적인 유동상태 유지, 유동정지 시 담체 간의 부착 방지 또는 재유동 시 바닥 침전으로 인한 유동 곤란상태 방지, 큰 비표면적에 의한 미생물의 부착농도 증가, 포기 반응조 내 지나친 와류형성 시 소량의 부착된 생물막의 탈리 현상유지, 반응기 구조 및 포기 방법에 관계없는 높은 적응성 등이다. 또한 담체의 물리적 최적 조건은 큰 다공성의 거친 표면적, 넓은 단위 부피당 표면적, 화학적, 생물학적 및 물리적으로 안정, 우수한 기계적 강도 및 내구성, 중금속과 같은 독성물질의 불용출, 저렴한 가격, 안정된 공급, 제작이 용이 등이다. 특히, 표면 거칠기는 초기 생물막 형성기간에 큰 영향을 미치는데, 표면이 거칠수록 부착에 이용될 수 있는 표면적이 넓어져 미생물이 부착하는 속도가 빠르게 되고, 여기서 나타나는 틈은 탈리의 주된 원인중의 하나인 전단력으로부터 보호되므로 담체 최적 조건의 중요한 요소이다(8).

국내 하수처리장 및 마을하수도의 대부분은 유기물의 제거만을 목적으로 하는 재래식의 활성슬러지 공법으로, 현재의 오·폐수 처리는 단순히 유기물의 제거 뿐만 아니라 질소와 인, 즉 영양염류를 제거하는 고도처리를 요구하고 있어 그 수정은 불가피한 실정이다. 질소와 인 같은 물질들은 부영양화를 일으키는 중요한 원인이기 때문에 단순한 오·폐수의 유기물의 처리가 아닌 질소와 인의 제거가 필수적으로 수반되어진 공법을 필요로 하게 되었다. 국가에서는 이를 위해 댐 상류 지역을 우선으로 하수종말처리장 및 마을하수도를 신설 또는 개선 중에 있으며 중소규모 처리시설은 부착식 공법이 많이 사용되고 있으나 처리 효율에 대한 신뢰성 있는 검증은 미진한 실정이다.

본 연구는 반응기 내부에 일반폐기물을 재활용한 폐토기와 폐비닐을 담체로 사용하여 반응기 내부에 혐기성과 호기성의 공존 상태를 이루도록 하였고, 연구를 위하여 사용된 생활오수로는 S대학교 식당에서 나오는 고농도 오수를 유입수로 이용하였다. 그리고 반응기는 기존에 많이 활용되던 장방형 형태의 생물막법보다 넓은 사용 부지를 줄이고 침전조를 없애는 역할까지 함께 할 수 있는 입상 형태의 탑으로 만들어 유기물 제거 뿐 아니라 질소 및 인을 제거하는 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

실험재료 및 장치

본 연구에 이용된 충전탑은 Fig. 1에 나타내었으며 충전탑은 철제 원형탑으로 높이는 하단의 원뿔 부분 높이를 포함하여 3.5 m (제외시 3 m)에 지름 1.5 m의 크기로 구성되어있다. 용적은 약 5.6 ton (= 5.6 m^3)이며 담체 충진율은 약 55.5%이다. 탑의 내부 구조를 살펴보면, 하부에 담체로 폐토기를 사용하여 혐기성조를 구성하였고, 상부에 담체로 폐비닐을 이용하여 호기성조를 구성하였으며 또한 하부와 상부사이에 ring blower pump를 이용하여 동시에 공기를 주입하여 식당하수의 유기물 및 질소, 인을 처리하였다. 최하단부에는 밸브를 하나 더 설치하여 역세척에 용이하도록 꾸몄다. 또한 처리 과정을 살펴보기 위하여 혐기조에서 호기조 사이에 3개의 밸브를 추가 설치하였다.

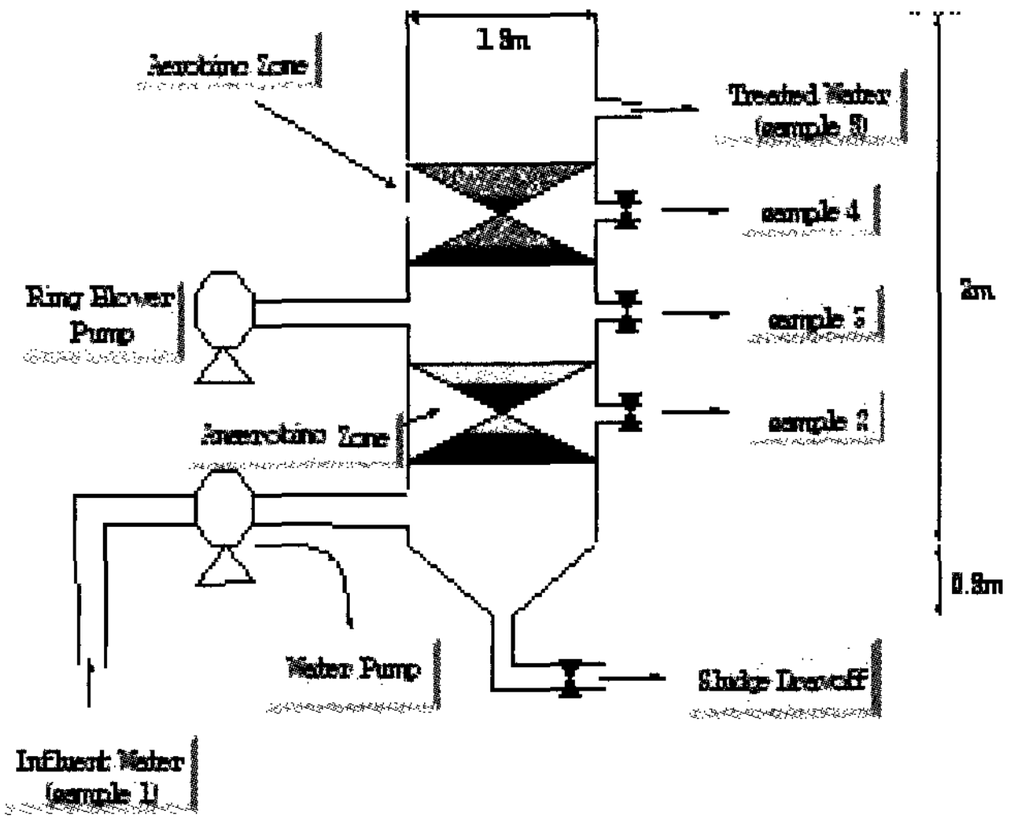

Figure 1. Schematic diagram of pilot-Scale upflow packed bed column reactor.

실험방법

본 실험에 사용한 원수는 S대학교 식당에서 나오는 생활하수를 사용하였으며 이 생활하수는 수중펌프를 이용하여 5 m^3/day 유량으로 충전탑 내부로 유입되고, 하단부에서부터 상단부로 옮겨가며 하수가 처리되도록 하였다. 이에

따른 HRT (수력학적 체류 시간)는 약 14 hr이다.

본 실험에 이용된 수질 분석법은 수질오염공정시험방법(KSM)(9)과 EPA Standard Method(10)를 이용하였으며 구체적인 방법과 사용기기는 Table 1과 같다. 본 실험은 Microsoft Excel PC용 Press Sheet를 이용하여 자료를 수집하고 분석하여 해석하였다. 반응기의 효과적인 처리를 위한 역세척은 약 2달을 기준으로 하여 100여 일의 실험 기간 동안 실시하여 주었고, 원활한 운전과 처리를 고려하여 역세 후 7일의 시간을 두고 실험을 재개하였다. 반응기의 내부나 펌프 등에 손상을 입어 실험이 불가피한 경우에도 역세척 후, 시간을 동일하게 두고 실험을 재개하였다.

Table 1. Analytical methods and equipment used in experiment

Parameter	Analytical Method	Equipment
pH	KSM	Orion 290A
Temp	KSM	Orion 290A
DO	KSM	YSI 55
COD_{Cr}	EPA Standard Method (Closed reflux method)	Shimadzu UV-1601
BOD_5	KSM	YSI Model 58
SS	KSM	Vacuum pump
T-N	KSM	Shimadzu UV-1601
T-P	EPA Reference Method	Shimadzu UV-1601

결과 및 고찰

pH

pH는 미생물의 증식에 많은 영향을 미치는 수질 항목으로 유기물의 제거 및 탈질에 관여한다. Fig. 2는 시간에 따른 유입수 및 유출수의 pH 변화를 나타내는 것이다. pH의 변화는 유입수의 경우 평균 6.98이었고, 배출수의 경우는 6.95로 나타나 pH가 미생물의 성장에 영향을 주는 pH의 범위인 6.5~7.5를 크게 벗어나지 않는 것으로 나타났다. 유입수와 배출수는 각각 비교적 작은 변화를 보여 식당하수의 pH는 거의 규칙적이었다. 배출수의 pH가 7 이상으로 증가하는 이유는 질산염에서 질소가스로의 변환도중 알칼리도가 생성되어 pH가 상승되는 이유로 탈질이 잘 이루어져 생긴 현상으로 보여진다. 또한 pH가 비교적 많이 떨어진 pH 6에 근접하더라도 처리효율에는 큰 영향을 주지는 않는 것으로 나타났다(11).

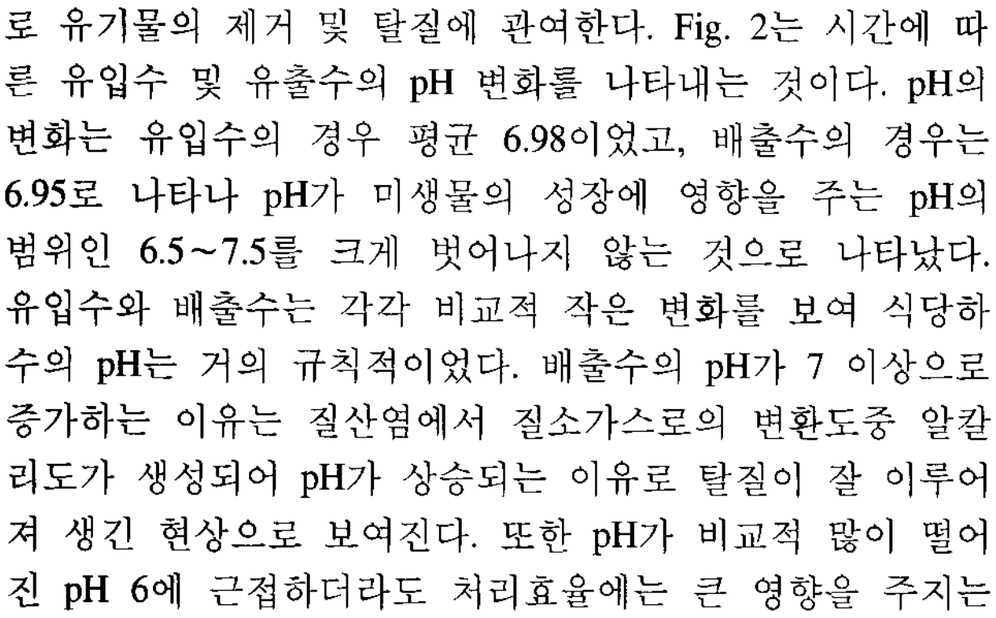

Figure 2. Changes of pH.

수온, 용존산소 농도 (DO 농도)

수온은 유기물 제거 및 탈질에 밀접하게 관계된 인자로 Fig. 3은 유입수 및 배출수의 수온 변화를 나타내는 그래프이다. 유입수와 배출수 평균수온은 각각 26.3℃와 24.9℃로 유입수와 배출수의 평균 수온차가 1.4℃로 크게 차이가 나지 않았으며, 미생물성장 최적온도인 25~40℃에 포함되어 있어 미생물의 성장에는 아주 좋은 수온의 조건으로 처리 효율에 영향을 준 것으로 나타났다. 그러나 유입수간의 수온 차는 비교적 고른 분포를 보였지만 배출수 간에는 10℃ 이상의 큰 차이를 보였는데, 이것은 배출수가 유입수보다 외부에 노출되어 영향을 주어 차이를 보인 것으로 예측된다. 하수의 수온이 비교적 높게 측정된 것은 하계 중 반응기의 외부배치로 인한 요인으로 보여 진다.

호기조에서 DO 농도가 0.5 mg/L 이하로 떨어지면 유기물 제거에 심각한 영향을 주고, 2 mg/L 이하로 떨어지면 질산화작용에 커다란 영향을 주므로 이보다 높은 DO를 유지해야 한다. 본 연구는 유입수를 제외하고 원활한 유기물 및 질소 제거에 적합할 수 있게 2~6 mg/L 정도의 농도 범위를 유지하였다.

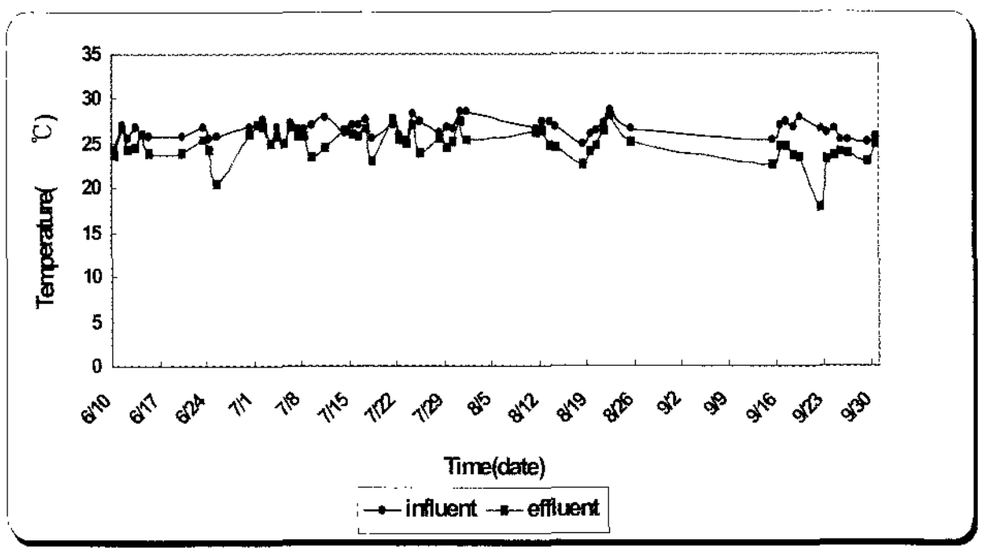

Figure 3. Changes of temperature.

화학적 산소요구량 (COD_{Cr})

화학적 산소요구량은 수중의 산화 가능한 물질이 산화제에 의해 화학적으로 산화하는데 필요한 산소량을 나타낸 것으로 BOD와 더불어 폐수의 유기물 함유도를 측정하기 위한 중요한 척도이다. 특히 산화제로 중크롬산칼륨을 사용하는 것을 COD 크롬법이라 하며 COD_{Cr}로 명기한다. Fig. 4는 시간에 따른 유입수 및 배출수의 COD_{Cr} 농도와 제거율의 변화를 나타낸 것이다. 생물막을 이용한 처리에 있어서 하수내의 유기물을 확실히 제거하기 위해서는 담체에 미생물이 확실히 부착되어 자리를 잡고 생물막을 형성하여야 한다. 초기에 배출수의 농도가 높게 형성되어 초기 COD_{Cr}의 제거율이 낮은 이유는 반응기를 설치하여 운전을 실시한지 얼마 안된 초기 값으로 반응기 내에서 필요로 하는 미생물의 부착이 아직 제대로 이루어지지 않은 상태 때문으로 추정된다. 전체적으로 보면, 일정 HRT에서 유입수의 평균 농도는 301.01 mg/L이고, 배출수의 평균 농도는 47.22 mg/L이며, 제거율 평균은 81.46%이었다.

Fig. 5는 COD_{Cr}의 부하량에 따른 제거량과 제거율을 나타낸 그림이다. COD의 부하량이 2 kgCOD/㎥/day 전후에서는 대부분 80% 이하의 낮은 처리효율을 보였으나, 3 kgCOD/㎥

/day 이상에서부터는 90% 이상의 좋은 처리효율을 나타냈다. 또한 4 kgCOD/㎥/day 부근에서도 90% 정도의 높은 처리효율을 보인 것으로 보아 더 높은 COD 부하량에서도 처리가 가능함을 보였다.

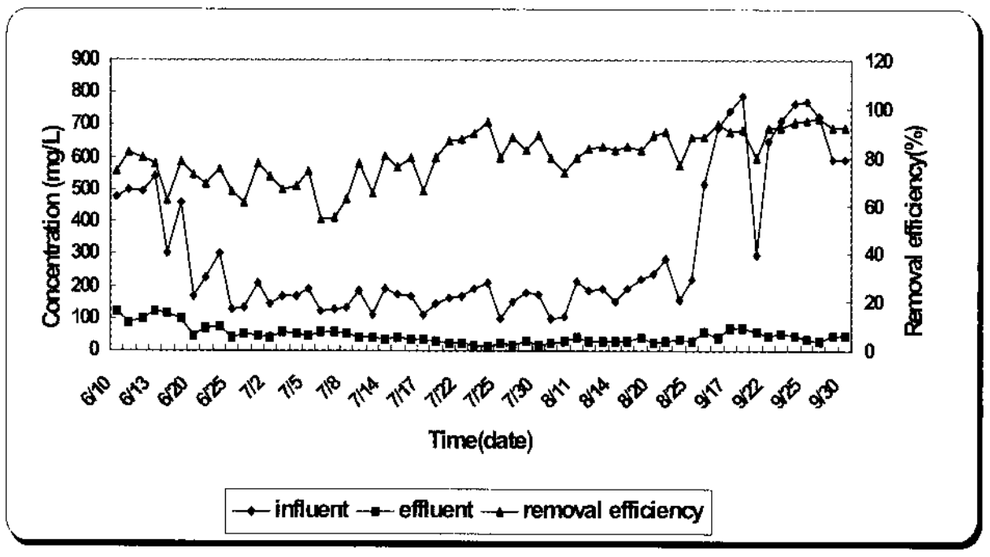

Figure 4. Changes and removal efficiency of COD_{Cr} concentration.

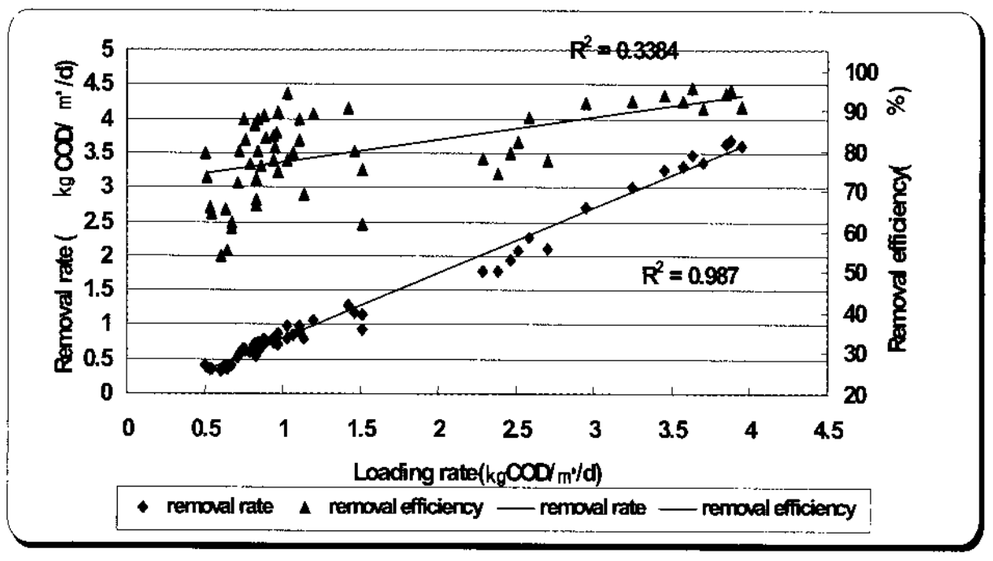

Figure 5. Removal rate and removal efficiency with COD_{Cr} loading rate.

생물화학적 산소요구량 (BOD_5)

생물화학적 산소요구량은 미생물에 의해 유기물을 산화시키는데 필요한 산소량으로 유기물 오염을 나타내는 지표로서 가장 광범위하게 이용되는 것이 BOD_5이며 BOD_5가 높으면 유기물에 의해 오염도가 높음을 의미한다. Fig. 6은 시간에 따른 유입수 및 배출수의 BOD_5 농도와 제거율을 나타낸 것으로 유입수의 농도가 큰 범위의 차이를 나타내고 있는 이유는 학기 중과 방학 중 학교식당을 이용하는 학생들의 수의 급격한 차이에 기인하는 것이며, 7월과 8월에 유입수의 농도가 낮은 것은 방학과 관련이 있은 것으로 판단된다. 하지만 유입수의 큰 농도 차이에 관계없이 생물막법을 이용한 충전탑은 현재 국내에서 많이 이용되고 있는 활성슬러지 공법보다 훨씬 더 높은 처리효율을 보였다. 일정 HRT에서 유입수의 평균 BOD_5 농도는 106.04 mg/L이고, 배출수의 평균 BOD_5 농도는 5.44 mg/L로, BOD_5 평균 제거율은 94.33%로 높은 BOD_5 제거율을 보여주었다.

Fig. 7은 BOD_5의 부하량에 따른 제거량과 제거율을 나타낸 그림으로, 1 kgBOD/㎥/day를 기준으로 비교하여 보았을 때 1 kgBOD/㎥/day 이상에서 더 높은 처리효율을 보이는 것을 알 수 있었지만 BOD의 경우는 전체적으로 낮은 부하량에서도 처리가 양호한 편이었다. 또한 2 kgBOD/㎥/day 부근에서도 처리효율이 90% 이상으로 높으므로 그 이상의 농도에서도 처리가 가능하다는 것을 알 수 있었다.

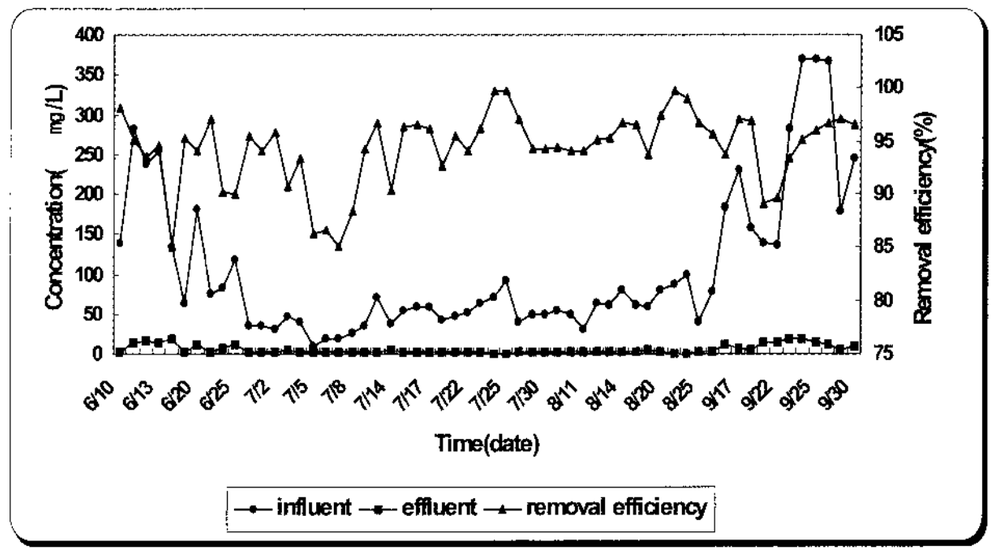

Figure 6. Changes and Removal Efficiency of BOD_5 Concentration.

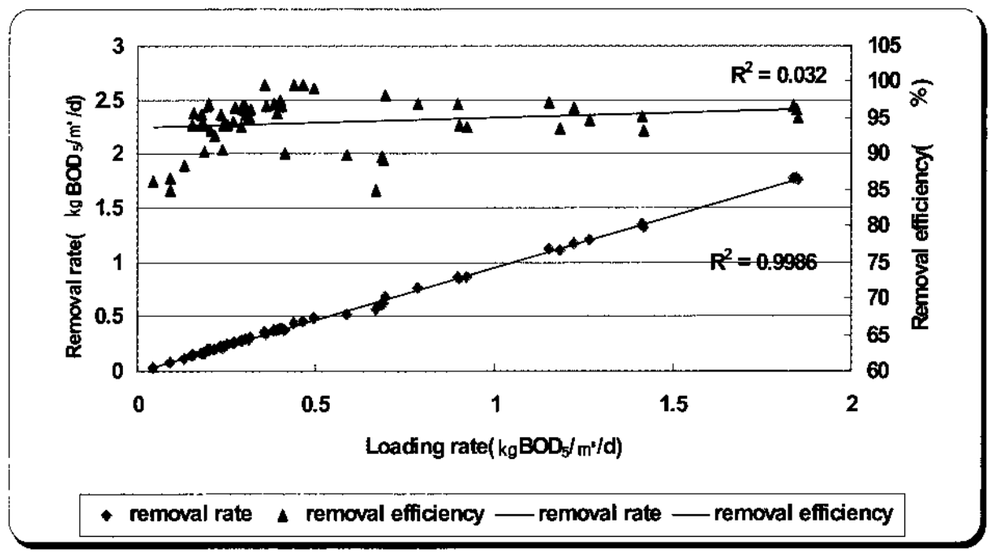

Figure 7. Removal rate and removal efficiency with BOD_5 loading rate.

부유물질 (SS)

부유물질은 0.1 μm 이상의 입자로써 BOD 및 COD와 같이 오염지표의 하나이지만, 빛의 투과율과의 관계에서도 중요한 항목이다. SS 농도가 증가하면 빛의 투과율이 낮아지고 수중 동식물의 생육에 악 영향을 미친다. 또한 수중에서 분해되어 BOD의 증가의 원인이 되기도 한다. Fig. 8은 시간에 따른 유입수 및 배출수의 SS 농도와 제거율을 나타낸 그림으로, 배출수의 초기 농도 값이 높은 이유는 앞에서 언급한 바와 같이 아직 반응기의 내부의 미생물들이 자리를 잡지 못한 운전 초기상태에서 단순히 상승한 값으로 이후로는 매우 안정적인 처리율을 보였다. 개강 이후의 학생들의 학교 식당 이용의 급격한 증가로 유입수가 높은 농도를 보임에도 불구하고 매우 안정적인 처리를 보여주었다. 일정 HRT에서 유입수의 평균 농도는 106.43 mg/L이고, 배출수의 평균 농도는 12.3 mg/L이며, 제거율 평균은 87.77%로 높은 SS 제거율을 보여준다.

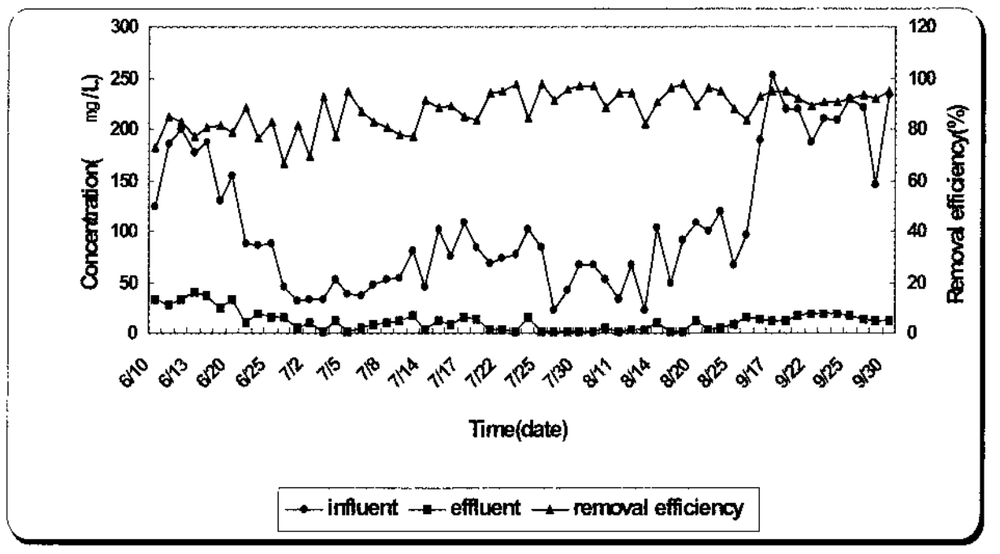

Figure 8. Changes and removal efficiency of SS concentration.

총질소 (T-N)

질소는 미생물과 식물의 성장에 필수적인 원소이나 하천이나 호소에서는 부영양화를 일으키는 원인 물질로 이의 처리는 필요하다. Fig. 9는 유입수 및 배출수의 T-N 농도와 제거율을 나타낸 것으로 배출수의 최고 농도는 미생물 부착에 따른 생물막 형성기간으로 보이는 초기였고, 그 이후로는 거의 일정한 배출수 농도를 보이다가 개강 이후로 유입수의 농도가 높아짐에 따라 배출수의 농도도 함께 높아지는 현상을 나타내었다. 이로 인해 현재의 반응기내의 담체는 T-N 제거에 다소 한계를 보이고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 충진율의 차이로 보이는데, Lab.-Scale에 들어간 담체 충진율이 66.5% 이었던 데에 반해 Pilot-Scale에서는 55.5% 정도로 질산화균 등의 미생물이 비교적 적어져 생물막의 형성에 영향을 주었기 때문으로 추정된다. 이것은 Lab.-Scale에서 80% 이상이었던 제거율이 Pilot-Scale에서 70% 정도로 떨어지게 된 요인 중의 하나로 분석된다. 유입수의 평균 농도는 39.47 mg/L이고, 배출수의 평균 농도는 11.19 mg/L이며, 제거율의 평균은 71.92%이었다.

Fig. 10은 T-N의 부하량에 따른 제거량과 제거율의 변화량을 나타낸 것으로 부하량의 증가에 따라 제거량이 거의 일정하여, 반응기에서의 부하량에 대한 일정 적응력을 보여주었다. 하지만 T-N은 0.1 kgN/㎥/day부터 부하량이 증가함에 따라 처리효율이 서서히 감소되고 0.2 kgN/㎥/day 이상에서는 70% 이하로 떨어진 처리효율을 나타냈다.

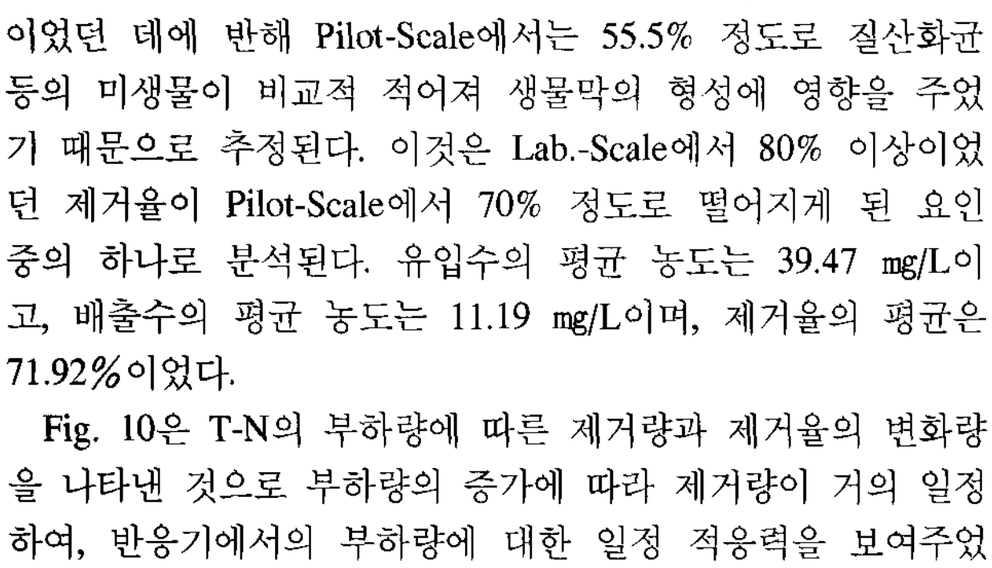

Figure 9. Changes and removal efficiency of T-N concentration.

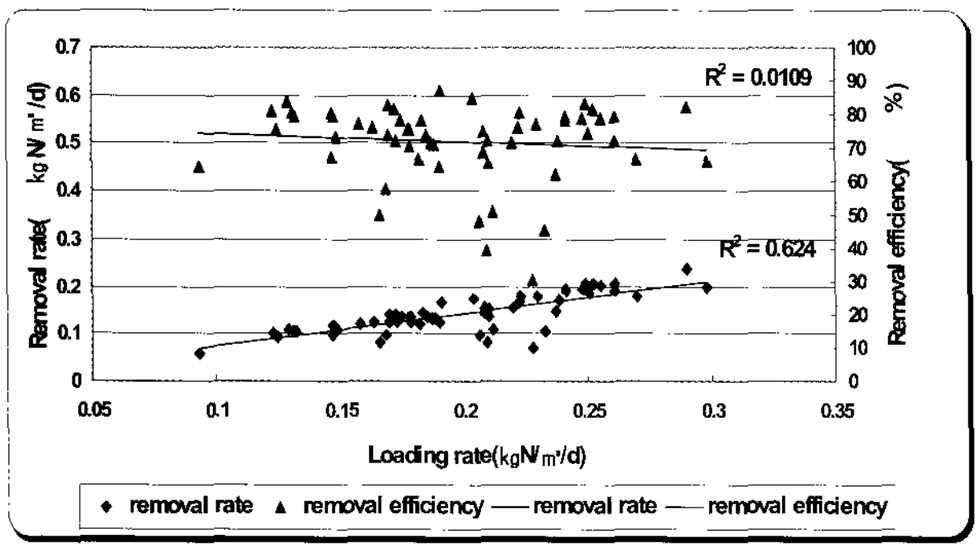

Figure 10. Removal rate and removal efficiency with T-N loading rate.

총인 (T-P)

인은 질소와 더불어 하천이나 호소의 부영양화을 일으키는 원인물질로 규제의 대상이 되고 있다. Fig. 11은 유입수 및 배출수의 T-P 농도와 제거율을 나타낸 것으로 유입수의 평균 농도는 7.7 mg/L, 배출수는 6.01 mg/L이며, 제거율 평균은 21.10%이었다. T-P의 제거 효율이 떨어지는 이유로는 인제거의 영향인자 중 질산염의 존재 때문으로 보인다(12). 과폭기로 인한 질산화가 이루어지면서 질산염이 혐기성조로 유입되어 혐기성조의 질소는 잘 제거되는 반면에 탈질화로 인하여 인산염 축적박테리아의 대사에 영향을 주어 저장되어질 폴리인산염이 없어져 인 제거에 필요한 미생물을 고갈시켜 영향을 준 것이다. 생물막법을 이용한 공정은 T-P의 제거가 어려운 문제로 알려져 있지만, 본 반응기는 충전탑형 변법을 적용한 생물막법이었지만 바탕은 생물막법으로 역시 T-P의 제거에는 난점을 보였다. 따라서 T-P의 제거를 위해 추가적인 방법이나, 생물막법 이외에 다른 방법을 병행해야 보다 높은 처리효율을 기대할 것으로 보인다.

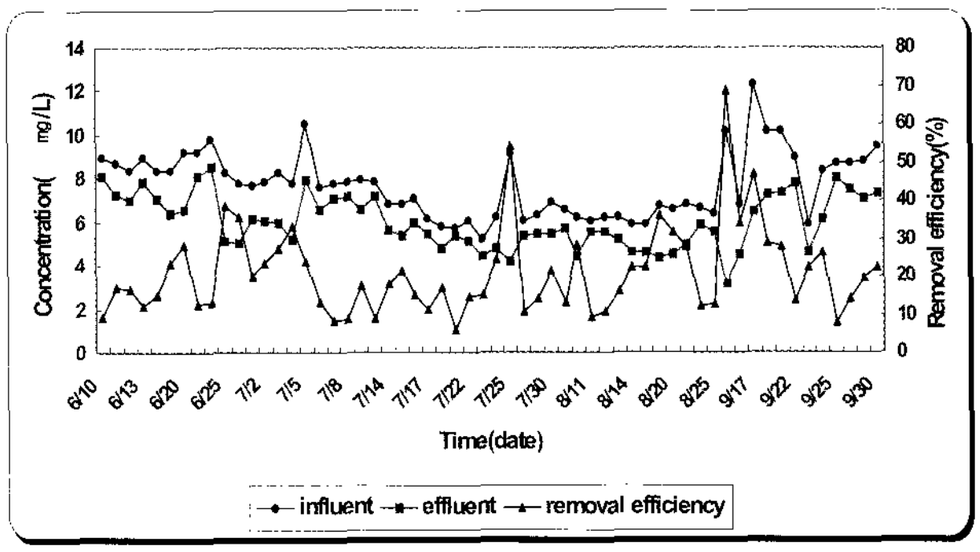

Figure 11. Changes and removal efficiency of T-P concentration.

요 약

본 연구는 급속한 산업 발전으로 인해 일어난 많은 수질오염 문제 중 생활하수의 처리방법에 관심을 기울여 생물막 공법을 이용하였는데, 이는 소규모 오폐수 처리장치에서 운전과 유지가 간단하고 활성슬러지 공정보다 넓은 부지를 필요로 하지 않기 때문이다. 생물막 공법 중 생물여상법의 변법을 적용한 Pilot 규모의 상향류식 충전탑형 반응기로 내부의 담체로는 폐토기와 폐비닐을 넣어 혐기조와 호기조를 구성하였고, 생활 오수로는 식당 오수를 이용하여 Lab.-Scale 실험 후 Pilot-Scale로 Scale-up하여 100여 일 간에 걸쳐 실험을 수행하였다.

실험은 연속 포기시 일정 HRT에서 유기물과 질소, 인 제거율을 살펴보았다. 실험결과 BOD_5와 SS의 평균 제거율은 각각 94.33%와 87.77%로 높은 제거율을 보였으나, COD_{Cr}은 81.46%로 목표제거율 90% 이상에 미치지 못하였고, T-N과 T-P도 각각 71.92%와 21.10%로 예상보다 약간 낮았다. 특히 COD_{Cr}와 T-N의 제거율은 지난 Lab.-Scale 때보다 약 10% 정도의 감소를 하여 Pilot-Scale에 내외적인 문제가 작용한 것으로 보였다.

감 사

이 논문은 2005년도 상지대학교 교내 연구비 지원에 의한 것으로 이에 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. Seon, Y. H. (2006), A Study on Utilization of Effluent Treated by Double Process Using Fixed-media and Sand Filter Coated by Nano Silver for Wastewater Reclamation and Reusing System, *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* **21**(4), 317-323.
2. Kwon, T. Y., C. G Yoon, and K. W. J. (2006), Development of high-hydrophilic Biofilter for Decentralized Regions and Rural Communities, *J. Korean Society on Water Quality* **22**(4), 678-686.
3. Jang, A, H., S. Kim, and I. S. Kim (2000), Effect of Nitrate and Nitrite Load on Denitrification Reaction in Anoxic Biofilm Reactor, *J. KSEE.* **22**(9), 1617-1625.
4. Hur, S. H. (2003), The Removal Technique of Nitrogen and Phosphorus of Sewage Using CN-Biocontact, *J. Environ. Hitechno.* **11**(11), 102-109.
5. Metcalf & Eddy (2003), Wastewater Engineering : Treatment and Reuse, 4th ed., pp887-930, McGraw-Hill, New York.
6. Yoon, C. H., M. S. Kim, and S. H. Kim (2006), Characteristics of Biological Nitrogen Removal for Low C/N Ratio Municipal Wastewater Using Methanol as an External Carbon Source in A_2O Fluidized Media Process, *J. KSEE.* **28**(6), 687-692.
7. Arvin, E. and P. Harremoes (1990), Concepts and Models for Biofilm Reactor Performance, *Wat. Sci. Tech.* **22**(10), 171-192.
8. Jung, Y. J., K. S. Min, J. K. Lee, and K. H. Lim (2003), Evaluation of Sewage Treatment with Surface Modified Waste-Tire Media Using Batch Activated Sludge System, *J. KSEE.* **25**(6), 682-687.
9. Ministry of Environment (2002), Korean Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, p.691, Dong Hwa Technology Publishing Co., Seoul.
10. APHA (1998), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed., p.5-17, American Public Health Association, Washington DC.
11. Wett, B. and W. Rauch (2003), The Role of Inorganic Carbon Limitation in Biological Nitrogen Removal of Extremely Ammonia Concentrated Wastewater, *Wat. Res.* **37**, 1100-1110.
12. You, S. J., C. F. Ouyang, S. F. Lin, S. H. Chuang, and C. L. Hsu (2001), Anoxic Biological Phosphorus Uptake/Release with High/Low Intracellular Polymers, *J. Environ. Eng.* **127**(9), 838-843.