

Sequencing Batch Reactor (SBR)를 이용한 질산화와 탈질산화

박종호* · 이원호¹ · 조규석 · 황규덕
충청북도내수면연구소, ¹충주대학교 건설도시공학과

Nitrification and Denitrification by Using a Sequencing Batch Reactor System

Jong-Ho PARK*, Won-Ho LEE¹, Kyu-Seok CHO, Gyu-Deok HWANG

Department of Inland Fisheries Research Institute, Chung Cheong Buk-Do, Chung-ju, 380-250, Korea

¹Department of Construction & Urban Engineering, Chung Ju National University, Chung-ju, 380-702, Korea

Sequencing Batch Reactor (SBR) was operated under various experimental conditions to improve the efficiency of biological filters used for the treatment of recycled wastewater from aquaculture. This SBR system was operated for removing COD, ammonia and suspended solid that were the major pollutants in aquaculture wastewater. Aerobic and anoxic conditions after FILL mode were applied intermittently for effective removal of nitrogen. SETTLE and DRAW modes were followed by the complete aerobic and anoxic REACT mode. The total volume of the SBR was 75 liters, while the working volume in a cycle was 35 liters. When the final operating strategy of the SBR was FILL/REACT/SETTLE/DRAW of 0.5/10/1/0.5 hr, the removal efficiencies of TCOD_{Cr}, NH₄⁺-N, and T-N were 94, 98, and 89%, respectively.

Key words: SBR, Nitrification, Denitrification, Aerobic phase, Anoxic phase

서론

현재까지 우리 나라에서 널리 이용되고 있는 어류의 양식 방식은 유수식 양식이나 가두리 양식과 같은 개방적 양식 시스템으로서 한번 사용된 용수가 수계로 방출되기 때문에 지속적인 용수공급 문제와 수질오염을 야기시키고 있다. 따라서 최근 양어용수를 재이용하는 순환 여과식 양식 시스템이 국내외에서 활발하게 연구되고 있다 (Kim, 1980; Rogers and Klemetson, 1985; Jewell and Cummings, 1990; Nijhof and Bonverdeur, 1990, De Los Reyes et al., 1996; Honeyfield and Watten, 1996; Cho 1996; Hall 1999; Lee et al., 1999; Simonel et al., 2002).

Losordo et al. (1994)은 1992년 미세 고형물 제거를 위해 포말분리기, 포기와 용존산소 공급을 위해 산기석을 충전한 하향류 접촉조, 이산화탄소를 제거하기 위하여 산기석 충전층 접촉기를 설치하고 순환여과식 양어장의 가장 큰 문제중의 하나인 고형물과 암모니아성 질소의 제거를 위한 여러장치를 설치한 양식시스템을 개발하였다. 연구에 사용된 system은 고형물 제거를 위해 침전조, 여과망 여과기 (screen filter)와 입상매체 여과기 (granular media filter)를 사용하였으며 암모니아를 제거하는 질산화 반응기로 회전원판 접촉기 (rotating biological contactor, RBC)와 충전층 반응기, 유동층 반응기를 사용하였다. Losordo et al. (1993)은 포말분리기 (foam fractionator), 상향류 bead filter (up-flow bead filter), 회전원판 접촉기 (RBC)만을 수처리 시스템으로 채택한 매우 단순화된 양식 시스템인 Model Aquaculture Recirculating System

(MARS)을 개발하였다. Losordo (1995)는 ECOTRAPS를 설치한 ECOTANKS를 사육조로 하고 고형물 제거를 위해 drum screen filter, 생물학적처리장치로 BioSump biological filter를 사용한 순환여과식 양식 시스템을 개발하였다. Reyes and Lawson (1995)은 bead filter와 자외선 살균기를 결합한 순환여과식 양식 시스템을 연구·개발하였다.

한편 한 반응조에서 유입과 유출 및 반응과 침전을 동시에 할 수 있는 시스템에 대한 연구가 개발되었는데 Irvine et al. (1970)에 의하면 Sequencing Batch Reactor (SBR) 시스템은 한 조내에서 운전조건을 용이하게 변화시킬 수 있어 질소 및 인을 제거하는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 이외도 SBR은 침전조가 필요 없고, 균등조 역할을 하며, 반응시간을 조절하여 임의로 처리수 수질을 일정한 수준으로 유지할 수 있다는 장점 등이 있으므로 수처리에 폭넓게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

순환 여과식 양식장을 효율적으로 운영하기 위해서는 양식 시 발생하는 오염물질을 효과적으로 제거함으로써 어류가 살아가기 적합한 환경을 제공하여야 한다. 대표적인 오염물질인 암모니아는 주로 어류의 대사 생성물 또는 잔류사료로부터 생성된 것으로서 일정농도 이상 존재시 어류에 치명적인 피해를 주는 물질로 알려져 있기 때문에 사육조내의 비이온성 암모니아를 미국환경보호청에서는 0.02 mg/L 이하로 유지하도록 권장하고 있다 (Rogers and Klemetson, 1985). 또한 사육조내의 용존유기물은 타가영양성 미생물에 의해 분해되면서 물 속의 용존산소를 소모시키고 질산화에 억제 작용을 한다.

*Corresponding author: jhpark@cb21.net

부유성 고형물질은 어종이나 크기에 따라 영향이 틀리기는 하나 어류에 스트레스를 주어 질병을 유발시키고, 질병에 대한 저항력을 감소시키므로 (Herbert and Merckens, 1961) 25 mg/L 이하로 유지할 것을 권장하고 있다.

폐수 중 질소는 용존산소의 고갈, 수서생물의 독성피해, 공중보건의 피해 등을 야기시키며, 인과 함께 호소 및 하천으로 유입시 조류 (algae)의 성장을 촉진시켜 수체에서 부영양화를 가속화시키는 주원인 물질이다 (Painter, 1970). 수중식물이나 조류의 과다 성장은 외관상 깨끗하지 못하며, 악취 유발, 병원성 세균의 번식 및 사후 저질토에서의 생분해시 용존산소를 고갈시켜 어류와 같은 수생생물에 악영향을 줄 수 있다. 수용하천 (receiving water)에서 유기물이 생물학적으로 분해시 용존산소를 소모하는 것과 마찬가지로 암모니아성 질소는 아질산염 및 질산염으로 산화되는 질산화 과정에서 용존산소를 소모한다. 따라서 질소의 유출은 유기물과 마찬가지로 수질보전에 매우 중요한 의미를 갖는다.

질소 순환과정은 질소고정 (nitrogen fixation), 암모니아화 (ammonification), 질산화반응 (nitrification), 탈질반응 (denitrification), 동화작용 (assimilation) 등으로 이루어져 있으며 (Anderson, 1981; Atlas and Bartha, 1989; Barnes and Bliss, 1983; Grady and Lim, 1980) 이중 질소고정, 질산화반응, 탈질반응의 대부분은 세균에 의해 진행된다 (Patiquin and Knowles, 1972; Carpenter, 1983; Capone and Carpenter, 1983; Seitzinger and Garber, 1987; Dommergues et al., 1978; Smith and Duff, 1988). 질소순환에 관한 연구는 그 구성화합물 형태의 다양성뿐만 아니라 각 단계에 있어서 다양한 미생물이 관여하여 나타나는 복잡성 때문에 그 연구가 다른 주요 원소에 비하여 미흡한 실정이다 (Anderson, 1981). Burns와 Hardy (1975)는 지구 생태계에서의 질소 흐름을 정량적으로 계산하였다. 연간 고정되는 질소의 양은 육지에서 135,000,000 ton, 바다에서 40,000,000 ton 기타 화학비료 공정들을 통하여 35,000,000 ton 등으로 이들은 질소순환의 산화과정, 동화작용 등을 거쳐서 최종적으로 탈질화과정을 통하여 다시 질소가스로 환원된다.

생태계 질산화반응은 주로 화학합성 독립영양세균 (chemoautotrophic bacteria)에 의한 것으로 알려져 있다 (Kelly, 1971; Kaplan, 1983). 질산화균의 성장에 필요한 에너지는 암모니아를 아질산염으로 산화시키거나 혹은 아질산염을 질산염으로 산화시켜 얻는다. 이 두 반응중 전자인 경우는 크게 Nitrosomonas가 관여되며, 후자인 경우는 Nitrobacter가 관여한다고 보고되고 있다.

생물학적 처리 방법은 경제성, 유지관리 및 유해성 등의 관점에서 볼 때 타 수처리 방법에 비하여 여러 가지 장점을 내포하고 있지만, 오염물질의 제거기작이 복잡하고 여러 환경인자들이 운전효율에 결정적인 영향을 미치므로 공정설계 및 운전관리가 어렵다는 단점도 지니고 있다.

본 연구에서는 순환여과 양식 시설에 있어 소규모 양어가의

경제적인 부담을 최소화하며 양어장 순환수를 효과적으로 처리할 수 있는 장치를 연구하기 위해 사육수 배출수 및 합성시료를 원수로 사용하여 처리성 실험을 수행하였으며, 질소 및 인의 제거효율을 평가하여 본 SBR 시스템의 질산화와 탈질산화 및 처리능을 평가하였다.

재료 및 방법

실험재료

실험에 사용한 SBR은 원통형으로 total volume이 75 L이고, working volume이 35 L로서 아크릴로 제작하였다. 각각의 SBR내에 baffle을 설치하여 혼합을 원활하게 하였고, 반응조 하부에 산기관을 설치하여 공기를 주입해 주었고, 폐수의 배출을 위해 유입전자밸브를 사용하였으며, sludge retention time (SRT)를 조절하기 위하여 폐슬러지를 배출하게끔 해주었다 (Fig. 1).

실험 방법

실험에 사용된 원수는 C연구소 내 양어장 사육수 배출수와 외부 기질이 자연스럽게 혼합된 합성시료이다. 시료는 매일 오전 10시에 채취하여 6시간 침전시킨 후 상등액을 이용하였다. 유입원수중 외부기질은 Zhu and Chen (1999)이 실험한 방법 (Table 1)을 따랐으며, COD 조절을 위해 글루코스를 첨가하였고 기타의 다른 성분은 조정하지 않고 원래의 배출수를 그대로 사용하였다. 본 연구에서 유입수로 이용한 하수의 특성을 Table 2에 나타내었다.

인근 도시하수처리장에서 Mixed Liquor Suspended Solid (MLSS)가 2,000 mg/L인 활성슬러지를 채취하여 SBR에 식중하였고, 폐수의 처리효율과 처리량을 관찰하였다. 초기 SBR 운영방법은 1일 1 cycle로 하였으며, 반응시간은 1.5시간 호기, 0.5시간 무산소 조건인 간헐폭기방식으로 16시간을 운영하였다. 다음은 처리능력을 높이기 위하여 반응시간을 10시간으로 줄이고, 1시간 호기, 1시간 무산소 조건인 간헐폭기 방식으로 1일 2 cycle 운전하였다 (서인석, 1995). 기타

Table 1. Composition of synthetic substrate

Ingredients	Mass (g) ^a
NH ₄ Cl	1,377
NaHCO ₃	3,500
MgSO ₄ ·7H ₂ O	36
Na ₂ HPO ₄	159
KH ₂ PO ₄	153
FeCl ₃ ·6H ₂ O	5

^a100 g of the synthetic mixture contain 8.64 g NH₃. Concentration of stock solution varied between 400 and 800 g synthetic substrate per 20 L; 5 L of stock solution were continuously introduced to 500 L feed tank over the course of 24 h.

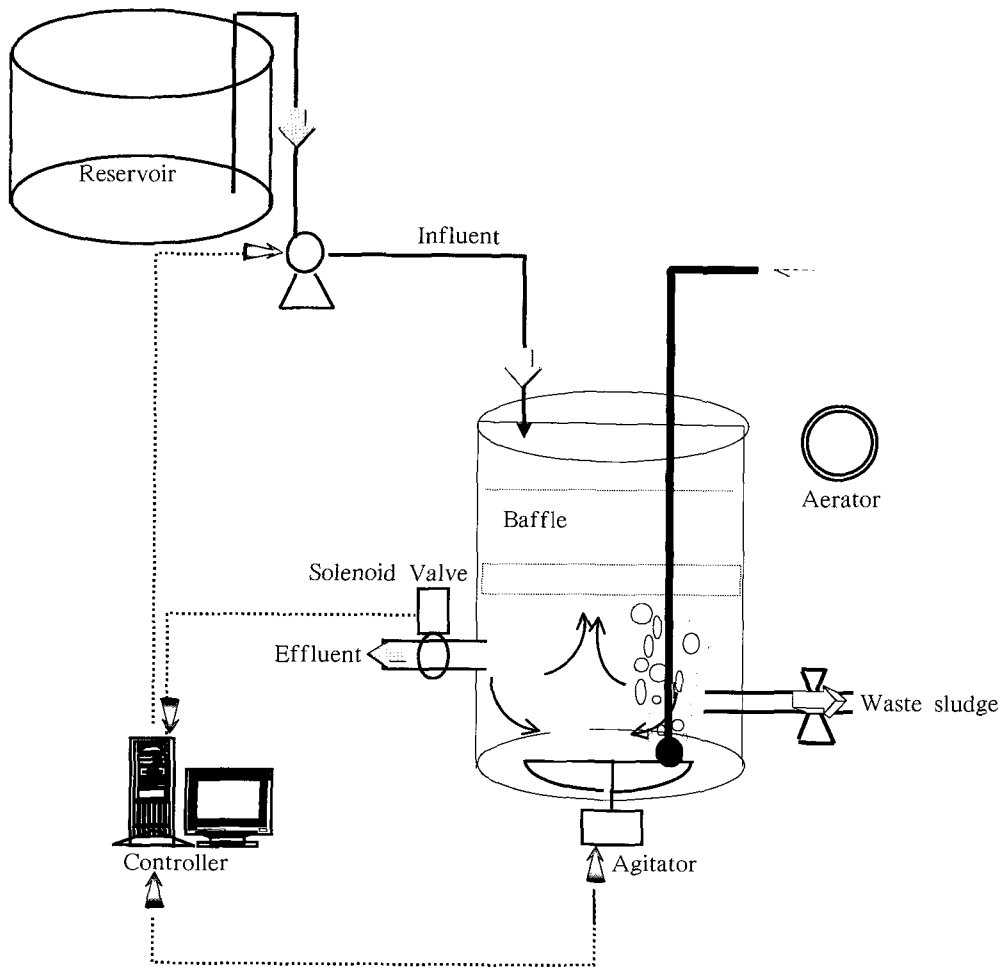


Fig. 1. Schematic diagram of SBR system.

Table 2. Characteristics of synthetic wastewater (1 cycle: 12 hr)

Parameters	Concentration, mg/L
Total suspended solids	60 - 70
Volatile suspended solids	35 - 40
Total chemical oxygen demand	150 - 220
Soluble chemical oxygen demand	100 - 130
Total Kjeldahl nitrogen	25 - 50
NH ₄ ⁺ -N	10 - 40
Total Phosphorus (T-P)	4 - 6
PO ₄ ³⁻ -P	3 - 5
Nitrate (NO ₃ ⁻ -N)	1.2 - 2.0
Nitrite (NO ₂ ⁻ -N)	0
pH	7.0 - 7.2
Alkalinity (as CaCO ₃)	130 - 150

유입은 30분, 침전은 60분, 배출은 30분으로 설정하고 운전하였다. 측정항목으로는 Total suspended solids (TSS), Total

chemical oxygen demand (TCOD_{Cr}), Soluble chemical oxygen demand (SCOD_{Cr}), Total Kjeldahl nitrogen (TKN), Ammonia nitrogen (NH₄⁺-N), Total phosphorus (T-P), Ortho phosphate (PO₄³⁻-P) 등이 있으며, 측정방법은 Standard Methods (APHA et al., 1989)에 준하여 분석하였다. Table 3에는 시료 분석에 사용한 실험방법을 나타내었다.

결과 및 고찰

SBR 시스템의 미생물 농도

SBR의 운전은 초기 50일까지는 1 cycle을 24시간으로 하였으며, 글루코스를 첨가하여 양식장 배출수의 COD 농도에 비해 높게 TCOD_{Cr}가 150-220 mg/L, SCOD_{Cr}가 100-130 mg/L 정도로 하였다. Summerefelt (1993)에 의하면 용존 유기물은 타가 영양성(heterotroph)미생물의 성장을 촉진시키며, 순환여과 시스템의 전체 산소요구량을 증가시키고 여과조에 질산화작용을 방해하며 또한, 일부 타가 영양 미생물은 어류에게 유해성 질병을 유발시키기도 한다고 보고하였다. 본 연구에서 적용한

Table 3. Analytical methods and instruments

Item	Experimental method	Instrument
NH ₄ ⁺ -N	Ammonia-Selective Electrode method	Orion Model 720A
NO ₂ ⁻ -N	UV absorption method	HP 8424
NO ₃ ⁻ -N	UV absorption method	HP 8424
pH	pH meter	Orion 290A
Dissolved oxygen	DO meter	YSI 52
Alkalinity	Titration method	-
Suspended solids	Vacuum filtration	Glass fiber filters
Chemical oxygen demand	Open reflux method	-

SBR시스템을 운영한 결과 COD 제거가 90% 이상 제거 되므로 COD 증가에 따른 어병 발생에 대한 문제점은 경미한 것으로 사료된다. SBR은 50일 이후부터는 1 cycle을 12시간으로 하여 운전하였다. SRT를 15일로 설정하여 약 120여일 동안 운전하였다. Fig. 2는 SBR 운영기간동안 MLVSS (Mixed Liquor Volatile Suspended Solid)와 MLSS (Mixed Liquor Suspended Solid)의 농도변화를 나타낸 것이다. 미생물의 농도 (MLSS)는 초기에 서서히 증가하여 약 2,500 mg/L을 유지하였다. 이때 MLVSS/MLSS의 비는 평균 0.83으로 나타났다.

Fig. 3은 유입 및 유출수내 부유물질 농도 (SS)를 나타낸 것이다. 유입수내 SS농도는 약 60-70 mg/L 정도였으며, 유출수내 SS농도는 슬러지 침전성이 불량했던 초기 일부 기간을 제외하면 약 2 mg/L 로 양호하였다. Sludge Volume Index (SVI)는 평균 50 정도를 유지하여 침전성이 매우 양호하였다. SBR에서의 SS제거율은 매우 높았으나 유출수내 색도성분은 제거되지 않고 대부분 잔류하는 것으로 나타났다. SBR의 특성상 침전기간중 반응조내에 유체의 흐름이 전혀 없기 침전효율이 높고, SBR 자체가 활성슬러지의 팽화현상을 효과적으로 제어할 수 있다는 것을 입증해 주고 있다 (Park, 1995; 때문에 Jun, 1993). 그러나 상등액의 배출기간에 SBR내 일부의 침전슬

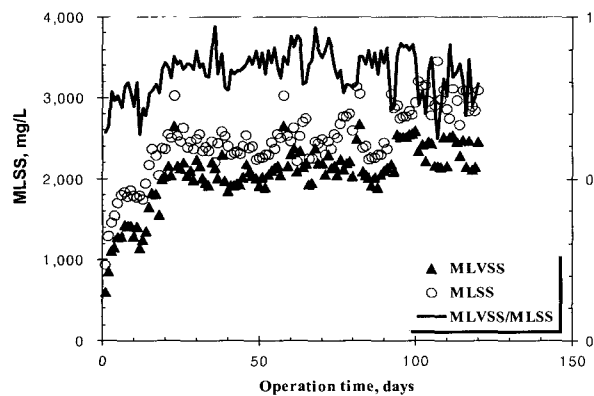


Fig. 2. MLSS and MLVSS of the SBR system during 120 days operation.

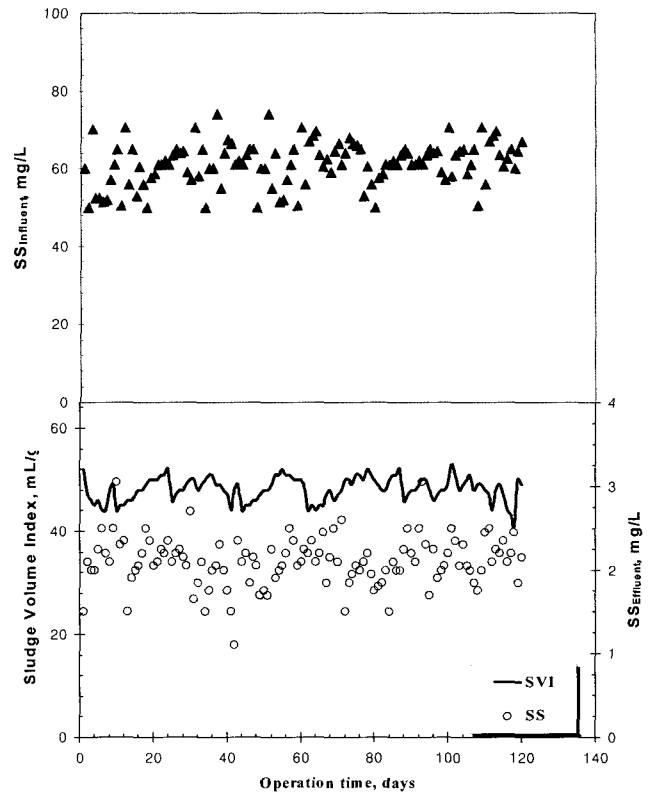


Fig. 3. Suspended solid and sludge volume index in influent and effluent of the SBR during 120 days operation.

러지가 함께 배출되는 문제가 발생하여 배출장치 (decanting system)의 보안이 필요한 것으로 나타났다.

SBR 반응조내 용존산소(DO) 및 pH 변화

호기성 기간에는 DO의 농도가 최고 4 mg/L 이상, 무산소 기간에는 농도가 0.1 mg/L 이하가 되도록 조정하여 COD는 물론 질산화와 탈질이 효과적으로 진행되도록 하였다. 1시간 호기, 1시간 무산소 조건으로 운전하였을 때 SBR의 DO농도의 변화는 Fig. 4와 같다. DO는 간헐폭기 cycle이 증가할수록 증감의 속도가 약간씩 빨라지는 경향을 보이고 있다. 이는 cycle이 반복될수록 SBR내 오염물질이 정화되어 산소의 소비량이 점차 감소하기 때문이라 생각되며, 마지막 cycle이 끝나는 호기반응 후에는 DO농도가 6 mg/L까지 상승하는 것으로 관측되었다. 반응조내의 pH는 7.7-8.0의 범위로 거의 변화가 없는 것으로 나타났으나, 반응초기에는 호기성 조건에서 약간 증가하며, 무산소 조건에서 약간 감소하는 경향을 보였다. 이는 호기성 조건에서 질산화가 일어나 수소이온농도가 높아졌다가 무산소 조건에서는 탈질이 일어나 수소이온농도가 감소한 것으로 사료된다.

SBR의 COD 제거특성

호기 및 무산소 시간을 각각 1.5시간/0.5시간, 1시간/1시간으로 운영했을 때 SBR내 TCODcr와 SCODcr 농도 변화는 Fig. 5와 같다. 한 cycle을 24시간으로 했던 전반기에는 유입수

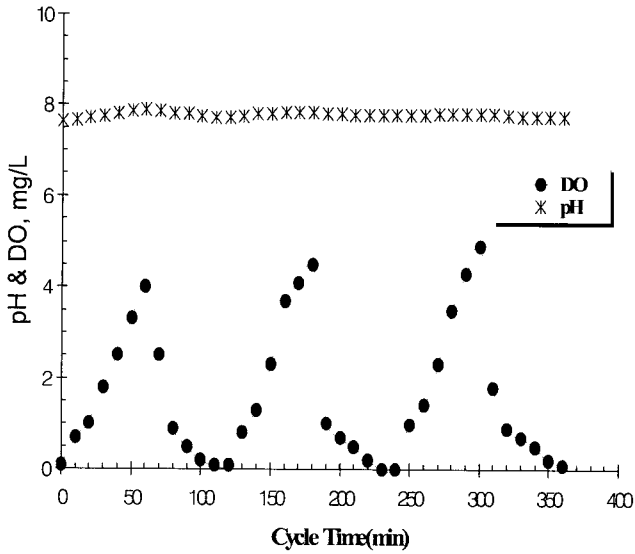


Fig. 4. pH and DO profile in SBR system after 80 day operation at 25°C.

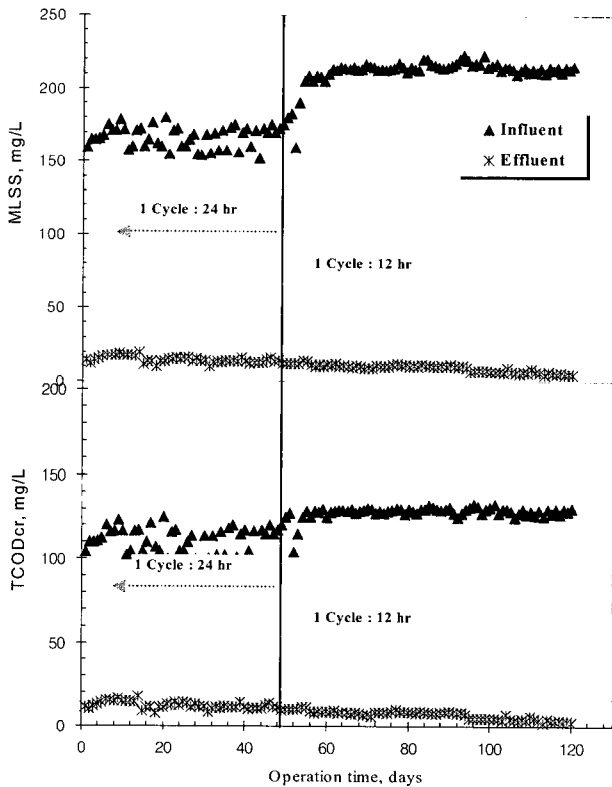


Fig. 5. Influent and effluent MLSS and TCOD in the SBR system during 120 days operation.

COD를 조절하는 과정에서 농도의 변화가 있었으나, 한 cycle을 12시간으로 운영하였던 후반기에는 대체로 일정한 COD 농도를 유지할 수 있었다. 유출수의 TCODcr농도는 유입수의 농도변화나 운전조건의 변화와 무관하게 12 mg/L로 대체로

일정한 것으로 나타났으나, 한 cycle을 12시간으로 운전할 경우 24시간에 비하여 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 유입수 TCODcr의 증가와 cycle 시간의 감소로 인한 것으로 사료되나 결론적으로 볼 때, 하루 2 cycle을 운전해도 폐수의 유기물질을 효과적으로 제거할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 유출수내 색도 등은 효과적으로 제거되지 않은 것으로 보아 유출수에 남아 있는 유기물질은 주로 색도를 띤 난분해성인 것으로 생각된다. 이것은 어류에게 공급되는 사료에 항생제를 경구투여 하였거나, 어류질병발생시 어류약육에 의해 배출된 것으로 사료되며, 유출수의 COD농도를 추가적으로 낮추기 위해서는 물리화화학적 처리공정을 도입해야 할 것으로 사료된다.

질소성분의 거동

암모니아의 산화로 인해 생성되는 질산성 질소와 아질산성 질소는 순환여과 시설에서 어류생육에 큰 영향은 없으나, SBR 시스템의 질산화 특성을 위해서 필요한 요소이다. 약 120일간의 운영기간동안 유출수의 질소성분의 농도는 Fig. 6과 같았다. 이때에 유입수의 평균 TKN 및 NH₄⁺-N의 농도는 운전초기를 제외하고는 각각 40-50 및 25-30 mg/L 로 거의 일정하게 유지

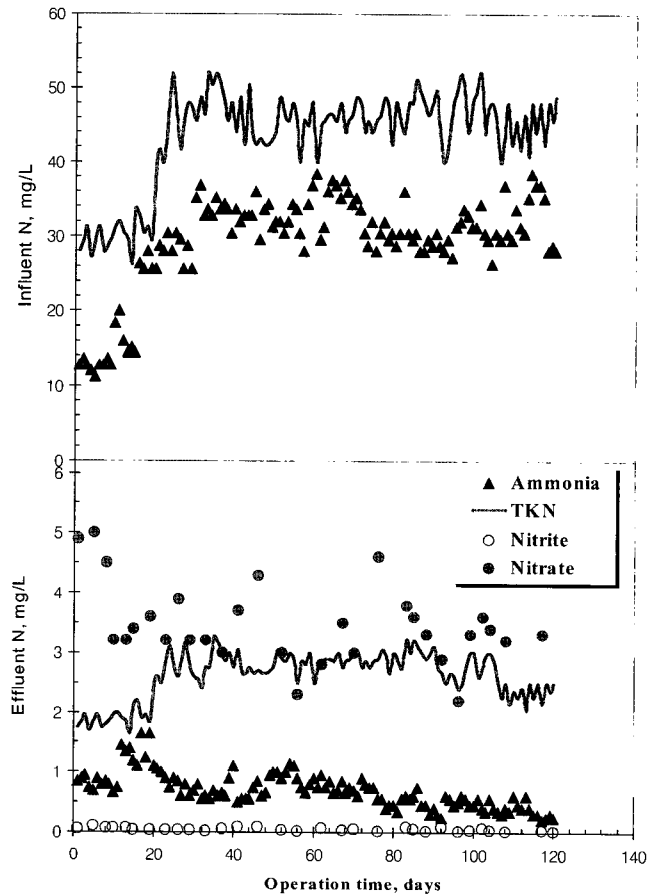


Fig. 6. Influent and effluent nitrogen species in the SBR system during 120 days operation.

해 주었다. 반응후 유출수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 0.7 mg/L 이하 이었고, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 1.4 mg/L 정도로 나타나 질산화는 거의 완벽하게 진행되었고, 많은 양의 질산기가 탈질된 것으로 나타났다. 유출수내 TKN은 주로 SS성분에 의한 유기질소 성분인것으로 추정되며, 암모니아성 질소만의 제거효율을 보면 약 98%로 높게 나타났다.

반응조에서 폭기시간을 조정하여 호기 및 무산소 시간을 각각 1.5시간/0.5시간, 1시간/1시간으로 조정하였을 때 반응조 내에서 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도변화는 Fig. 7과 같았다. 호기성 조건에서는 질산화가 일어나므로 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 가 증가하다가, 무산소조건에서는 탈질화로 인하여 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 가 감소하였다. 아질산성 질소는 질산화 단계의 중간생성물로 SBR시스템의 효율에 따라 처리수의 농도가 다소 변화하는 것을 알 수 있었다. 처리수의 아질산성 질소 농도는 0.1 mg/L 이하로 안정하게 유지되는 것으로 나타났다. Nijhof and Bonverdeur(1990)에 의하면 해수에서 질산화는 담수에서 질산화보다 질산화율이 느리지만, 해수에서 질산화도 담수와 같이 완벽하게 일어난다고 보고하였다.

간폭시간 주기를 호기 1.5시간, 무산소 0.5시간으로 했다가 각각 1시간으로 했을 때 유출수의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도변화는 유사한 것으로 나타났으나 후자일 때 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ peak 값이 낮아 최종적으로 유출되는 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 약간 낮은 것으로 나타났다. 질산

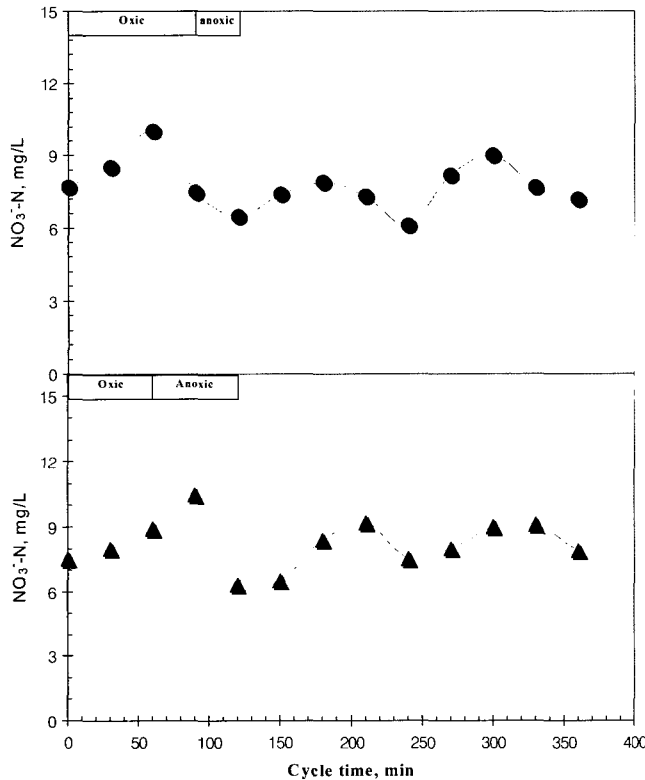


Fig. 7. Changes of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ during the oxic and anoxic REACT period in the SBR system (oxic/anoxic: 1.5 hr/0.5 hr (upper), 1 hr/1 hr (below)).

화 및 탈질화는 어느정도 이상의 반응시간이 확보되면 총 반응시간보다는 호기/무산소시간 및 그 조합에 따라 더 영향을 받는 것으로 생각된다. 효과적인 탈질화를 위해서는 SBR내의 ORP와 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도 및 SCOD농도를 측정하여 간헐폭기 주기를 결정해 주어야 할 것으로 사료되며, 이 분야에 대한 보다 구체적인 이론연구가 요구된다.

SBR의 COD 및 질소 제거효율 평가

SBR의 운영기간중 유출수에서의 COD 농도는 안정적으로 나타났다. 본 시스템에서 50일 이후의 비교적 안정된 기간중의 TCODcr 평균 제거효율은 평균 94% 이었으며, SCODcr의 제거효율도 93%로 비교적 높게 나타났다(Table 4).

Table 4. Average of the SBR system during 120 days operation

Parameters	Influent	SBR effluent	
	mg/L	mg/L	Removal efficiency, %
TCODcr	193	12	94.0
SCODcr	121	9	92.6
TKN	44	2.6	94.0
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	29	0.7	97.7
T-N	52	6.0	88.5
T-P	4	3.2	20.0
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	3.5	2.9	17.1

유출수내 TKN의 농도는 평균 2.6 mg/L 로 제거효율은 94% 이었고, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 0.7 mg/L로 제거효율이 98%로 질산화 반응이 잘 일어남을 알 수 있다. 유출수에서의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도는 평균 3.5 mg/L 로 나타나 상당부분이 탈질된 것을 알 수 있으며, T-N 제거율이 89%에 이르고 있다. 이는 유입원수의 COD가 높아 간헐폭기 방식으로 운전되는 SBR내에서 산화되지 않고 남아 있던 COD를 무산소조건에서 탈질에 필요한 탄소원으로 활용했기 때문인 것으로 사료된다.

T-P나 Ortho-P의 제거효율은 각각 20%와 17%로 낮게 나타났다. 이는 본 연구목적상 인을 제거하기 위한 운전조건을 고려하지 않았기 때문이며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각한다. SBR 시스템을 이용하여 양어장 배출수 및 순환수를 처리할 경우 물을 효과적으로 재이용할 수 있으며, 또한 부영양화의 원인이 되는 영양염류를 효과적으로 처리할 수 있어 환경보전에도 좋은 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

AHPA, AWWA and WPCF. 1989. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th ed. American Public Health Association, 1532 pp.
 Anderson, J.M. 1981. Ecology for environmental science: Biosphere, ecosystem and man. J. Willey & Sons Press, NY, USA. pp. 25-35.

- Atlas, R. and Bartha. 1989. Detection of coliforms in water by polymerase chain reaction (PCR) and gene probe methods. Abstr. Annu. Meet. Am. Soc. Microbial., pp. 89, 460-468. 160-168.
- Kelly, D.P. 1971. Autotrophy: Concepts of lithotrophic bacteria and their organic metabolisms. Ann. Rev. Microbial., 25, 177-209.
- Kim, I.B. 1980. Pilot scale fish production in water recycling system. J. Kor. Fish. Soc., 13(4), 187-194. (in Korean)
- Lee, B.H., H.C. Kim and J.S. Kim. 1999. Water treatment recirculating aquaculture culture system by using three phase fluidized bed reactor. 1999. Spring Joint Meeting of the Kor. Soc. on Fish. Sci., pp. 359-360.
- Losordo, T.M. 1995. An evaluation of the EcoFish/NCSU tank system technology for use in the intensive production of *Tilapia* using water reuse technology. Technical Report. North Carolina State University, pp. 102-150.
- Losordo, T.M., J.M. Ebeling and D.P. DeLong. 1993. Engineering design and performance of a model aquaculture recirculating system (MARS) for secondary school aquaculture education programs. Technical Report. North Carolina State University, pp. 61-100.
- Losordo, T.M., P.W. Westerman and S.K. Liehr. 1994. Water treatment and wastewater generation in intensive recirculating fish production systems. Bull. Nat'l. Res. Inst. Aquaculture, Suppl., 1, 27-36.
- Nijhof, M. and J. Bonverdeur. 1990. Fixed film nitrification characteristics in sea-water recirculating fish culture system. J. Aquacult, 87, 831-849.
- Painter, H.A. 1970. A review of literature on inorganic nitrogen metabolism in microorganism. Wat. Res., 4, 493-450.
- Park, J.H. 1995. Effect of fermented swine wastes on biological nutrient removal in sequencing batch reactor. MS Thesis, Chungbuk Univ., pp. 55-65. (in Korean)
- Partiquin, D.G. and R. Knowles. 1972. Nitrogen fixation in the rhizosphere of marine angiosperm. Mar. Biol., 16, 49-58.
- Rogers, G.L. and S.L. Klemetson. 1985. Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilters. Aquacult. Eng., 4, 135-154.
- Seitzinger, S.P. and J.H. Garber. 1987. Nitrogen fixation of the acetylene reduction assay in coastal marine sediments. Mar. Ecol. Prog. Ser., 37, 65-73.
- Seo, I.S. 1995. Nutrient removal in swine wastewater using intermittently aerated sludge system. Ph.D. Thesis, Chungbuk Univ., pp. 70-90. (in Korean)
- Simonel I.S., D.B. Gregory, J.W. Barnaby and L.B. Brian. 2002. Factors influencing the nitrification efficiency of fluidized bed filter with a plastic bead medium, Aquacult. Eng., 26, 41-59.
- Smith, R.L. and J.H. Duff. 1988. Denitrification in a sand and gravel aquifer. Appl. Environ. Microbial., 54(5), 1071-1078.
- Summerfelt, S.T. 1993. Low-head, roughing filters for enhancing recycle water treatment for aquaculture, Ph.D. Thesis, Iowa State University, 52-60.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1975. Process design manual for nitrogen control., Office of Technology Transfer, Washington, D.C. October, pp. 40-50.
- Zhu, S. and S. Chen. 1999. An experimental study on nitrification biofilm performances using a series reactor system. Aquacult. Eng., 20, 245-259.

2002년 11월 5일 접수

2003년 6월 10일 수리