

## 순환여과식 양식 시스템에서 나일 틸라피아 (*Oreochromis niloticus*)의 사육

서근학<sup>+</sup> · 김병진 · 조재윤\*  
부경대학교 화학공학과, \*부경대학교 양식학과

## Culture of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) in Recirculating Aquaculture System

Kuen-Hack SUH<sup>+</sup>, Byong-Jin KIM and Jae Yoon JO\*  
Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea  
\*Department of Aquaculture, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

The performances of fish culture were evaluated in the integrated recirculating aquaculture system consisting of a double drain type rearing tank (2.5 m<sup>3</sup>), a sedimentation tank, a floating bead filter, a foam separator and a rotating biological contactor. A system was stocked with nile tilapia at an initial rearing densities of 5% (A), 5% (B) and 7% (C) over 30 days. Feed coefficient was 1.62, 1.79 and 1.80 and average daily growth rate was 0.452%, 0.445% and 0.423%, respectively. The level of TAN was maintained below 1 g/m<sup>3</sup> for 5% of initial rearing density and 2~4 g/m<sup>3</sup> for 7%. The dissolved oxygen level (2~4 g/m<sup>3</sup>) was not optimum but should not be inhibitory to fish growth. The total suspended solid was completely removed during overall experimental period.

**Key words:** Recirculating aquaculture system, Nile tilapia, Rotating biological contactor, Total ammonia nitrogen, Dissolved oxygen, Total suspended solid

### 서 론

최근 경제력의 상승과 더불어 어류의 소비가 증가하는 반면 오염물질의 수계 방출로 인한 수질악화로 인하여 연근해 어장의 어류 자원이 고갈되고 있고 원양어업에서도 각국의 수자원 보호정책에 의해 타국의 자국 영해내의 조업을 금지하고 있는 상황이며 부족한 어류 자원은 양식에 의해 보충할 수 밖에 없다.

양식방법을 구분하면 정수식 양식, 유수식 양식, 가두리 양식, 순환여과식 양식으로 나눌 수 있다. 정수식 양식의 경우 우리나라는 좁은 국토면적 때문에 광대한 면적이 필요하여 제한을 받고 있으므로 이 방법에 의해서는 생체량이 적은 종묘생산에는 적합할 것이지만 대량생산을 전제로 하는 식용어 생산은 생각할 수가 없다. 유수식 양식과 가두리양식은 대량 생산에 적합한 방법이지만 고밀도 양식일 경우는 사료공급으로 생성되는 폐기물을 처리해야 한다. 유수식 양식, 가두리양식이 물 공급이 유리한 지역에 위치하여 양식되었으나, 지방시장과 수요자들이 신선한 어종을 원하고 지역적으로 인기있는 어종을 공급하기 위해 새로운 어종의 생산에 기술적인 관심을 갖게 되었다 (김, 1993).

순환여과식 양식은 사육조에서 유출된 폐수를 양어장 밖으로 방출하지 않고 물리적 및 생물학적 여과과정을 통해 오염물질을 제거한 후 재 사용하는 폐쇄적 시스템으로 연속적으로 물을 정화시켜 사용하기 때문에 하루에 전체 순환수의 5% 이하의 물만을 필요로 한다. 따라서 배출되는 오수의 양이 유수식이나 가두리 양

식에 비하여 매우 적어 발생하는 오폐수의 처리에 유리하다. 현재 정부가 추진하고 있는 수자원 환경에 대한 관심으로 미래의 양식은 환경 친화적 방법이 아닌 자연환경에 오폐수를 그대로 배출시키는 방식으로는 존재하기 어려울 것으로 판단된다. 그러므로 앞으로의 양식은 순환 여과식 양식 외의 다른 대안은 없다 (조, 1997).

순환여과식 양식 시스템은 앞에서 언급된 장점에 반하여 좁은 면적에서 어류를 고밀도로 사육함에 따라 많은 양의 오염물이 축적되어 어류의 성장에 큰 피해를 미치는 단점이 있다. 따라서 오염물질을 효과적으로 제어할 수 있는 종합적인 양식시스템이 필요하다. 이에 본 연구자는 공학적 설계방식으로 우리나라의 실정에 적합하고 실용적인 순환 여과식 양식 시스템을 package 형태로 설계하고 제작하였다 (Suh et al., 2001). 그러나 제작된 순환여과식 양식 시스템의 성능을 검증하여야 하며 이는 실제어류를 수용, 비교적 장기간 사육하여 어류의 성장도와 수처리 효율을 측정함으로써 검증할 수 있다. 또한 어류를 사육함에 따라 사육밀도가 변화하게 되며 이에 따라 설계기준보다 더 높은 사육밀도의 어류를 수용하게 될 수도 있으므로 이에 대한 시스템의 대처 능력도 검토해야 한다.

본 연구에서는 package 형태로 설계하고 제작된 pilot scale 순환여과식 양식 시스템의 실제 어류 사육 성능을 판단하고자 하였다. 설계 기준인 5%의 사육 밀도에서 시스템의 안정성을 검토하였다. 또한 7%의 과잉 사육밀도에 대한 시스템의 적용 가능성을 판단하였다. 그리고 어류 사육시 각종 수질인자의 농도 변화를 측정하여 어류 사육에 있어 쾌적한 환경을 유지할 수 있는 시스템 관리 방법을 도출하고자 하였다.

<sup>+</sup>Corresponding author: khsuh@mail.pknu.ac.kr

재료 및 방법

순환 여과식 양식 시스템

본 연구에서 사용한 순환 여과식 양식 시스템은 전보 (Suh et al., 2001)에서 개발한 것으로 장치와 순환수 흐름의 모식도는 Fig. 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 사육조 내의 침강성 고형물은 사육조 하부의 유로를 통해 침전조로 유입시켜 제거하고 사육조 상부에서 유출되는 순환수와 저류조에서 모이도록 하였다. 저류조의 물은 순환 펌프에 의해 저류조 상부에 위치한 floating bead filter로 유입되도록 하였으며 유출수는 질산화 반응기인 회전 원판 반응기를 거쳐 사육조로 순환되도록 하였다. 사육조 내에는 용존 고형물을 제거하기 위한 2개의 포말분리기를 설치하였다. 부족한 용존산소의 보충을 위해 순환 펌프에서 floating bead filter로 공급되는 순환수의 일부분을 사육조로 우회시켜 사육조 표면에 분사하여 대기중의 용존산소가 용해 되도록 하였다. 시스템의 상부에는 태양광에 의한 수온의 급격한 변화와 조류의 번식 등을 방지하기 위해 차양막을 설치하였다.

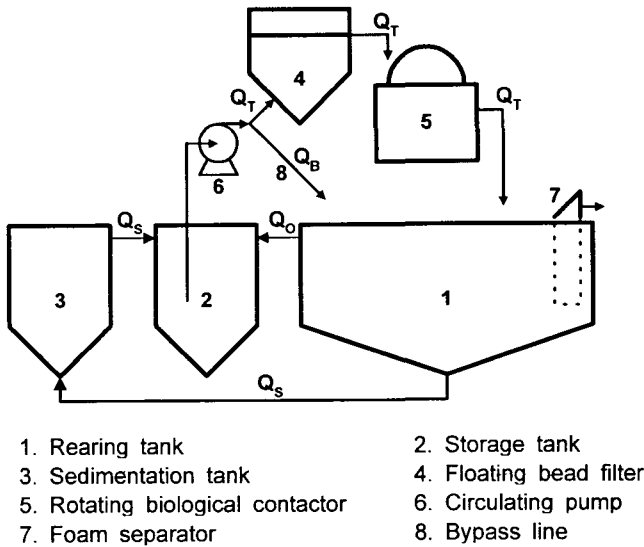


Fig. 1. The schematic diagram of recirculating aquaculture system.

실험어 수용

본 연구를 위해 수용한 실험어는 수질에 대한 내성이 뛰어난 열대성 담수어종인 틸라피아 중 국내 내수면의 주요 양식 대상종인 나일 틸라피아 (*Oreochromis niloticus*)로 부경대학교 양어장에서 사육중인 것을 사용하였다.

사육 밀도는 실험 A와 B에서는 시스템의 설계 용량인 사육조 기준 5% (50 kg fish/m<sup>3</sup> rearing water)로서 실험 A에서는 평균 어체중 499.9 g의 어류를 250마리, 총 125.0 kg 수용하였으며 실험 B는 평균 어체중 471.6 g의 어류를 219마리, 총 125.2 kg 수용하였다. 설계 용량보다 과잉으로 사육한 실험 C는 7% (70 kg fish/m<sup>3</sup> rearing water)의 사육밀도로서 평균 어체중 632.4 g인 어류를 278마리 총 175.8 kg 수용하였다.

어류 사육 및 시스템 관리

Pilot plant의 운전은 매일 오전 9:00시에 첫 사료를 공급하고 침전조 및 플라스틱 bead filter를 청소하여 어류사육을 통하여 발생한 고형물질을 시스템 외부로 제거하고 보충수를 공급하여 시스템의 수위를 유지시켰다. 시스템 점검을 마친 후 약 1시간 경과 후 수질 분석에 필요한 시료를 채취하였다. 보충수의 양은 사육조의 약 10%에 해당하는 0.25 m<sup>3</sup>을 사용하였다. 보충수는 부경대학교 부속 양어장의 순환수를 이용하였으며 실험 기간 중 보충수의 평균 수질은 Table 1과 같았다.

사육조 내의 온도는 25°C로 설정하였으며 각 실험에 있어 순환수의 유량은 Table 2와 같았으며 회전 원판 반응기의 원판 회전 속도는 1 rpm으로 유지하였고, 포말분리기에 공급한 공기의 유량은 3.0 L/min였다.

실험어에 공급한 사료는 부상성 사료로서 그 성상은 Table 3과 같으며 사료공급은 초기 사육밀도를 기준하여 총 어체중의 1%에 해당하는 사료를 1일 3회에 나누어 손으로 던져 공급하였다. 어류가 사료를 섭취하지 않을 경우 사료 급이를 중지하였다.

Table 1. Average water quality of make up water

Component	Concentration
Total ammonia Nitrogen	0.24 g/m <sup>3</sup>
Nitrite Nitrogen	0.16 g/m <sup>3</sup>
Nitrate Nitrogen	3.86 g/m <sup>3</sup>
COD <sub>Cr</sub>	20.00 g/m <sup>3</sup>
pH	7.79
Alkalinity	38.50 g/m <sup>3</sup> as CaCO <sub>3</sub>
Total Suspended Solid	7.00 g/m <sup>3</sup>

Table 2. The flowrate and recycle ratio of recirculating aquaculture system

Experiment	Rearing density (kg/m <sup>3</sup> )	Flow rate (m <sup>3</sup> /hr)				Recycle ratio (day <sup>-1</sup> )		
		QO	QS	QT	QP	QT/V	QP/V	(QT+QP)/V
A	50	1.44	4.84	2.31	3.97	28.15	38.11	60.26
B	50	1.30	4.76	3.69	2.37	35.44	22.75	58.19
C	70	1.61	5.66	3.78	3.49	36.35	33.50	69.85

Table 3. Proximate composition of experimental diet

Component	Composition (%)
Moisture	9.41
Crude protein	37.00
Crude lipid	3.96
Crude ash	8.68

수질 분석

시스템의 수질을 측정하기 위해 시스템 점검을 마친 후 약 1시간 경과 후 수질 분석에 필요한 시료를 채취하였다. 각 수질항목은 standard method (APHA, 1989)에 따라 암모니아성 질소 (total ammonia nitrogen, TAN)는 선택성 이온 전극법 (9512-BN, Orion Co.), 아질산성 질소 (nitrite nitrogen, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)와 질산성 질소 (nitrate nitrogen, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)는 이온 크로마토그래피법 (DX

-120, Dionex Co.), 화학적 산소요구량 (chemical oxygen demand, COD)은 개방 환류법 (open reflux method), 총부유물질 (total suspended solid, TSS)은 진공 여과법, 총 알칼리도 (total alkalinity, TA)는 적정법에 의해 수행하였다. 수소이온농도 (pH)와 용존산소 (dissolved oxygen, DO)는 pH meter (720A, Orion Research Co.)와 DO meter (YSI-55, Yellow Springs Instrument)를 이용하여 분석하였다. 총 무기 질소 (total inorganic nitrogen)의 농도는 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 질산성 질소의 합으로 구하였다.

어류 성장도 측정

실험어는 각 실험을 종료함과 동시에 아미노 안식향산에 마취시켜 총 중량을 측정하여 사료계수 (feed efficiency, FC)와 일간 성장률 (daily growth rate, DGR)을 구하였다. 사료계수와 일간 성장률은 다음과 같이 계산하였다.

$$FC = \frac{\text{feed intake (g)}}{\text{weight gain (g)}}$$

$$DGR (\%) = \left[ \left\{ \frac{W_t}{W_0} \right\}^{1/t} - 1 \right] \times 100$$

여기서  $W_0$ 는 초기 어체량 (g),  $W_t$ 는 최종 어체량 (g),  $t$ 는 사육기간 (days)이다.

결과 및 고찰

어류성장

순환여과식 양식 시스템의 실제 어류 사육 효율을 알아보기 위해 나일 틸라피아 (*Oreochromis niloticus*)를 사육조를 기준하여 5%를 2회, 7%를 1회 수용하여 어류 사육을 수행하였다. 각 실험의 어류 성장결과를 Table 4에 나타내었다.

실험 A와 B에서는 초기 사육밀도 5%로 평균 어체중 499.9 g, 571.6 g의 어류를 각각 125.0 kg, 125.2 kg 수용하여 30일간 사육하였다. 실험 A에서는 29,346 g의 사료를 공급하여 18,125 g의 어체중 증가를 보였으며 실험 B에서는 31,925 g의 사료를 공급하였으며 어체중이 17,330 g 증가하였다. 실험 C에서는 평균 어체중 632.4 g의 어류를 초기 사육밀도 7%로 175.8 kg 수용하여 47,461.3 g의 사료를 공급하여 33일간 사육한 결과 어체중이 26,300 g 증가하였다.

각 실험의 사료계수는 실험 A가 1.62를 나타낸 반면 실험 B와 C는 1.79와 1.80으로 거의 동일하게 나타났다. 초기 사육밀도가 5%로 동일한 실험 A와 B에서 일간 성장률은 각각 0.452%와 0.445%로

큰 차이를 보이지 않았으나 실험 B가 약간 낮게 나타났다. 실험 B의 일간 성장률이 실험 A보다 낮게 나타나는 것은 두 실험에 있어 초기 사육 밀도는 동일하나 평균 어체중은 실험 B가 더 높아 나타나는 현상으로 사료된다. 초기사육 밀도가 7%인 실험 C에서는 0.423%의 일간 성장률을 보여 실험 A와 B에서 어체중의 차이에 의해 나타난 일간 성장률의 변화 보다 더 큰 차이로 감소하였다. 이와 같은 현상은 실험 C에 사용한 어류의 평균 어체중이 가장 무거운 것과 동시에 사육 밀도가 실험 A와 B에 비해 더 높아 나타나는 현상 (Lee et al., 1996; Brown et al., 1995)으로 사료된다.

질소 성분 농도 변화

실험 A, B, C의 사육기간에 나타난 총 암모니아성 질소, 아질산성 질소 및 질산성 질소의 사육조 내부의 농도 변화를 Fig. 2, 3, 4에 각각 나타내었다.

실험 A에서 총 암모니아성 질소의 농도는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 전반적으로 1 g/m<sup>3</sup> 이하의 안정적인 농도를 나타내었다. 사육 5일부터 15일 사이에는 4 g/m<sup>3</sup> 이상의 비교적 높은 농도를 나타내기도 하였다. 이 시기에 총 알칼리도가 20 g as CaCO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>, pH가 7.1 이하로 나타나 암모니아성 질소의 농도가 상승한 것은 알칼리도의 부족으로 질산화 반응이 저해되어 나타난 현상으로 생각되어 이후부터는 부족한 알칼리도를 중탄산나트륨을 이용하여 보충하였다.

아질산성 질소는 농도 변화의 경향이 암모니아성 질소와 거의 동일하게 나타났다. 이러한 현상은 질산화 반응기인 회전원판반응기의 원판에 부착되어 있는 질산화 미생물의 분포 중 아질산염을 질산염으로 산화시키는 *Nitrobacter* sp.의 비율이 암모니아를 아질산염으로 산화시키는 *Nitrosomonas* sp.에 비해 작아 나타나는 현상으로 생각되어진다. 본 실험에 사용된 회전원판반응기는 질산화 미생물을 2%의 어류를 사육하면서 2주간 부착시킨 것으로 *Nitrosomonas* sp.의 부착, 성장이 *Nitrobacter* sp.에 비해 덜 진행된 상태이다. 암모니아 농도가 높을 경우 *Nitrobacter* sp.에 의해 아질산염으로 전산화되는 양이 증가하여도 이를 질산염으로 신속하게 산화시키지 못하여 아질산성 질소의 농도가 암모니아 농도변화에 따라 매우 민감하게 변화하는 것으로 사료된다.

질산성 질소는 사육 초기부터 시간에 따라 선형적으로 증가하다가 10일이 경과하면서부터 55 g/m<sup>3</sup> 정도의 거의 동일한 농도를 나타내었다. 본 연구에서 사용한 사육 시스템의 경우 탈질화 반응기가 없어 암모니아로부터 질산염으로 산화되면 시스템 내에 누적되게 되며 이로 인해 사육초기에 질산성 질소의 농도가 직선적으로 증가하는 것이다. 질산염이 시스템으로부터 제거되는 것은

Table 4. Production characteristics of Nile tilapia reared at three experiments in a recirculating aquaculture system

Experiment	Rearing density (%)	Culture periods (day)	Initial weight		Final weight		Consumed diet (g)	Weight gain (g)	FC <sup>1</sup>	DGR <sup>2</sup> (%)
			Total (kg)	Mean (g)	Total (kg)	Mean (g)				
A	5	30	125.0	499.9	143.1	572.4	29,346	18,125	1.62	0.452
B	5	30	125.2	571.6	143.0	653.1	31,925	17,830	1.79	0.445
C	7	33	175.8	632.4	202.1	727.0	47,461	26,300	1.80	0.423

<sup>1</sup>FC (feed efficiency), <sup>2</sup>DGR (daily growth rate, %)

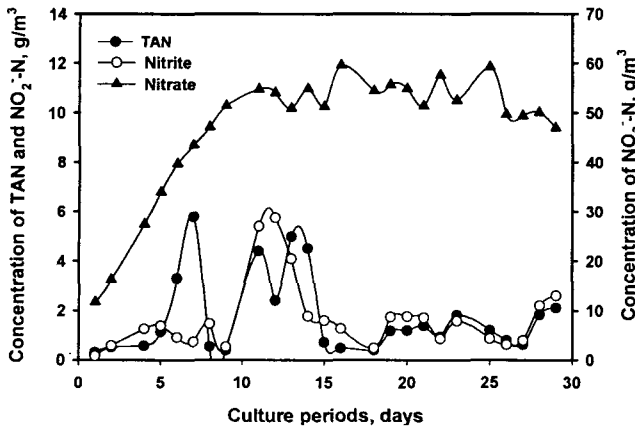


Fig. 2. The concentrations of total ammonia nitrogen, nitrite nitrogen and nitrate nitrogen during the first experiment (initial rearing density: 5%).

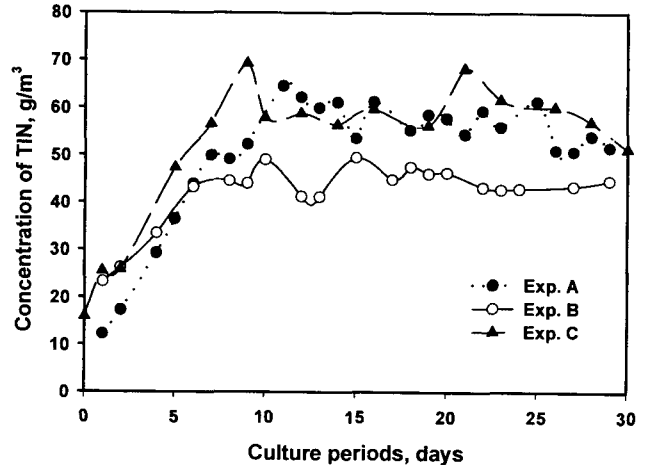


Fig. 5. The concentrations of total inorganic nitrogen during the each experiment (initial rearing density: A and B; 5%, C; 7%).

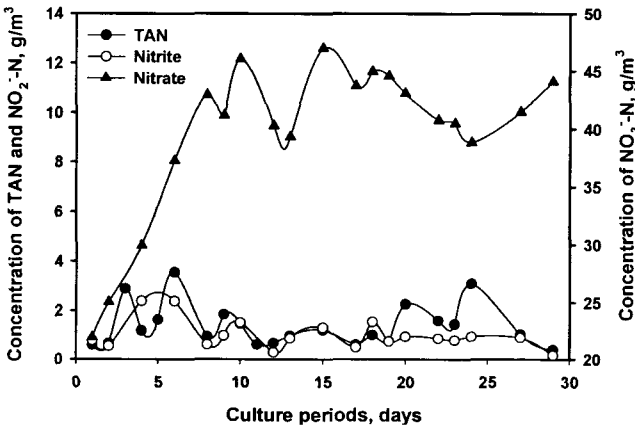


Fig. 3. The concentrations of total ammonia nitrogen, nitrite nitrogen and nitrate nitrogen during the second experiment (initial rearing density: 5%).

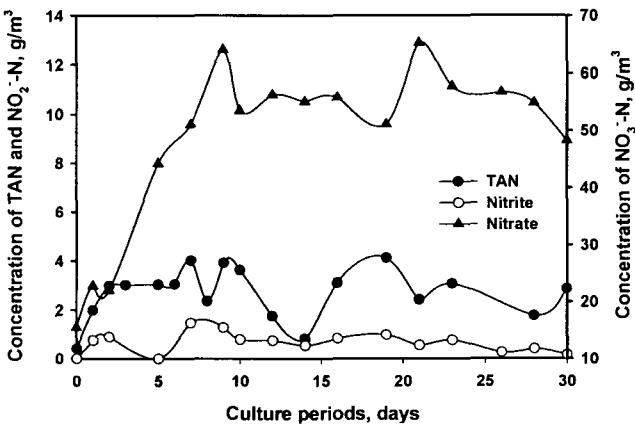


Fig. 4. The concentrations of total ammonia nitrogen, nitrite nitrogen and nitrate nitrogen during the third experiment (initial rearing density: 7%).

매일 침전조 세척과 floating bead filter의 역세척 시 배출되는 순환수에 의해 이루어지며 질산염의 농도가 순환수의 농도에 비해 매우 낮은 보충수에 의해 희석되게 된다. 10일 이후에 거의 일정한 농도로 유지되는 것은 질산염의 일간 발생속도가 시스템 외부로 유출되는 량과 거의 동일하여 나타나는 현상이다.

Fig. 3은 실험 B에서 나타난 총 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 질산성 질소 농도의 변화를 도시한 것이다. 암모니아성 질소의 농도는 실험 초기 알칼리도의 저하로 3 g/m<sup>3</sup> 정도의 농도를 보이기도 하였으나 알칼리도를 주 2회 500 g의 중탄산나트륨의 공급으로 보충한 결과 1 g/m<sup>3</sup> 이하의 농도를 유지할 수 있었다. 어류 사육 개시 후 24일 경에 암모니아성 질소의 농도가 다시 상승하였는데 이때 회전원판반응기의 원판 회전속도가 평균 회전속도인 1 rpm의 절반 정도인 0.5 rpm 정도로 떨어졌다. 원판의 회전속도가 감소할 경우 원판 표면에 미치는 전단응력의 감소로 물질전달 경막의 두께가 두꺼워지게 되고 이에 따라 질산화 효율이 저하되는 현상에 기인한 것으로 생각된다. 원판 회전속도를 다시 1 rpm 정도로 상승시킨 결과 암모니아성 질소의 농도는 1 g/m<sup>3</sup> 정도로 떨어졌다.

아질산성 질소의 농도는 어류사육 후 18일 까지는 실험 A와 같이 암모니아성 질소와 거의 유사한 경향을 보였으나 18일 이후부터는 암모니아성 질소의 농도 변화와 상관없이 0.8 g/m<sup>3</sup> 이하의 거의 균일한 농도를 보였다. 이 시기는 *Nitrobacter* sp.의 부착 성장이 완전해 진 것으로 생각되었으며 질산화 미생물이 전혀 부착되지 않은 회전원판반응기 운전하기 시작한 지 70일 정도가 경과한 상태였다.

질산성 질소의 농도는 실험 A와 유사하게 초기에는 직선적으로 증가하다가 7일이 지나면서 38~42 g/m<sup>3</sup>의 농도 범위에서 유지되는 것으로 나타났다. 이는 실험 A에서 나타난 12일보다는 5일 정도 빠른 결과였다.

Fig. 4는 초기 사육 밀도가 설계사육밀도인 5%에 대해 40%를 증가시켜 초기 사육밀도를 7%로 한 실험 C에서의 사육조 내 각 질소 성분의 농도 변화를 나타낸 것이다. 총 암모니아성 질소의

농도는 초기 2일간 2.7 g/m<sup>3</sup>까지 상승하였으며 실험 전반에 걸쳐 2~4 g/m<sup>3</sup>의 농도를 보여 사육 밀도가 5%로 설계 사육밀도와 동일한 실험 A와 B에 비해 높게 나타났다. 이것으로 보아 본 시스템의 어류 수용 능력은 설계 기준인 5%의 사육밀도는 충분히 만족시키며 설계시 5%에 부가한 27%의 안전 수용량 (Suh et al., 2001)를 초과할 경우에는 어류 사육에 영향을 미칠 수 있는 농도를 나타내는 것으로 나타나 최종 사육 밀도는 설계 사육 밀도에 안전 수용량을 부가한 6.5% 정도의 수준으로 예상하여 어류를 사육해야 할 것으로 사료된다.

아질산성 질소의 농도는 암모니아성 질소의 농도와 거의 동일한 수치를 나타내던 실험 A, B와는 달리 0.6 g/m<sup>3</sup> 정도의 농도를 보여 질산화 반응기의 *Nitrobacter* sp.의 부착 성장이 완전해 진 것을 알 수 있었다.

질산성 질소의 농도는 실험 A, B와 유사하게 초기에는 직선적으로 증가하다가 일정 기간이 지난 후 일정한 농도를 유지하는 것으로 나타났는데 일정한 농도에 도달하는 데 걸린 기간은 7일로 실험 B와 동일하였고 농도는 55 g/m<sup>3</sup> 정도로서 실험 A와 유사하였다.

Fig. 5는 각 실험에 있어 사육기간에 따른 총 무기질소 농도의 변화를 도시한 것이다. 총 무기질소란 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 질산성 질소의 합으로써 단백질 성분 등에 포함된 유기질소 성분이 암모니아로 전환된 후 탈질반응에 의해 질소 가스로 환원되기까지는 무기 질소로 존재하게 되므로 총 무기질소의 생성량은 암모니아성 질소의 생성량과 동일하다고 볼 수 있다. 질산화 반응기의 숙성이 완전하지 않을 경우 총 무기질소를 구성하는 각 성분의 분율이 질산화 반응기의 숙성정도에 따라 큰 변화를 보인다. 그러나 본 연구에서 수행된 실험의 결과 질산화 반응기의 숙성이 거의 완전해져 유기질소 총 무기질소를 구성하는 성분 중 질산성 질소가 차지하는 분율이 암모니아성 질소와 아질산성 질소의 합보다 10배 이상 높아 전체적인 경향은 질산성 질소의 변화와 유사하게 나타났다.

총 무기질소의 평균 농도는 실험 A는 60 g/m<sup>3</sup> 정도의 농도를 나타낸 반면 동일한 사육 밀도인 실험 B의 경우 45 g/m<sup>3</sup> 정도로 실험 A에 비해 15 g/m<sup>3</sup> 정도 낮게 나타났으며 사육 밀도가 7%인 실험 C의 경우 실험 A와 거의 동일한 농도를 보였다.

실험 C의 경우 실험 A 및 B에 비해 더 높은 총 무기질소 농도를 나타내어야 뭍에도 불구하고 초기 실험인 실험 A와 거의 비슷한 농도를 나타내는 것으로 보아 시스템 내에서 무기 질소 중 일부가 질소로 환원되는 탈질 현상이 발생하고 있는 것으로 사료된다.

총 무기 질소의 농도가 일정 기간 후 일정한 농도를 유지하는 것은 순환수의 배출과 보충수의 공급에 의해 발생하는 희석 효과에 의해서 발생하는 현상일 뿐 아니라 시스템 내부에서 탈질 작용 발생하여 나타나는 현상으로 사료된다. 본 연구에 사용된 양식 시스템의 경우 탈질을 위한 수처리 장치는 없으나 사육기간이 길어짐에 따라 순환수를 이송시키는 수송관의 내벽이나 각종 수처리 장치의 벽면에 형성된 생물막이 두꺼워져 생물막 내부에 혐기조건이 형성되어 발생한 것으로 생각된다.

동일한 사육 밀도인 실험 A와 B에서 총 무기질소의 발생량은 거의 동일해야 함에도 불구하고 실험 B에서의 총 무기질소의 농

도가 실험 A보다 낮은 이유는 실험 B에서 나타난 용존산소의 농도가 실험 A에 비해 더 낮아 탈질을 위한 조건형성이 더 용이했기 때문이며 실험 B는 실험 A가 끝난 후 진행된 것으로 실험 A에서 형성된 탈질 미생물이 계속 유지되어 왔을 수 있기 때문으로 사료된다. 실험 B가 끝난 후 진행된 실험 C에서 무기질소의 농도가 실험 B보다 더 높은 이유는 사육 밀도의 증가에 따라 사료 공급량 많고 이에 의해 암모니아 발생량이 더 많기 때문이다.

용존산소 농도 변화

용존산소는 어류의 성장에 직접적으로 영향을 미치는 인자로서 적절한 농도를 유지하는 것은 매우 중요하다. 본 사육시스템에서 용존산소의 공급은 순환수의 순환에 의한 자연적인 폭기와 회전원판반응기의 원판 회전에 의한 폭기, 그리고 펌프에 의해 이송되는 순환수 중 일부분을 사육조로 재순환시켜 수면과의 충돌에 의해 수행되었다. 또한 실험 C에서는 사육 밀도의 증가에 따라 용존산소 요구량이 증가되어 공기 blower와 산기석을 이용하여 사육조 내부에 직접적으로 폭기하였다. 각 실험에서의 사육조 내 용존산소 농도를 Fig. 6에 나타내었다.

전체적으로 사육기간 길어짐에 따라 용존산소 농도가 감소하였는데 이는 어류의 체중이 증가하여 호흡량이 많아졌기 때문으로 생각되어진다. 실험 A에서 나타난 용존산소가 실험 B와 C에 비해 높았는데 이는 실험 A에서 수처리 장치를 통과하지 않고 사육조 수면으로 공급되는 우회량이 가장 많았기 때문이며 이 경우 용존산소는 증가하였으나 수처리 장치로 공급되는 유량이 작아 부유고형물, 유기물 등의 수질 인자가 악화되는 현상을 보였다.

본 연구에 사용한 실험어는 틸라피아로서 비교적 낮은 용존산소에서도 생존이 가능하며 용존산소 부족에 의한 어류 폐사가 발생하지는 않았으나 본 시스템에 고농도의 용존산소를 필요로 하는 어류를 수용하거나 설계 사육밀도인 5% 이상의 어류를 수용하고자 할 경우에는 더 많은 용존산소를 공급할 수 있는 별도의 공급장치를 설치해야 할 것으로 나타났다.

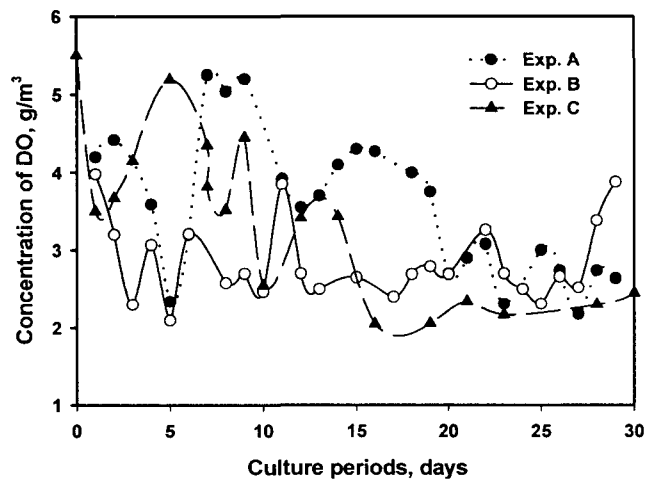


Fig. 6. The concentrations of dissolved oxygen during the each experiment (initial rearing density: A and B; 5%, C; 7%).

부유 고형물 농도 변화

부유성 고형물은 어체의 아가미를 손상시킬 수 있을 뿐만 아니라 질병에 대한 저항력을 약화 (Stickney, 1959; Wickins, 1980)시킬 수 있기 때문에 어류의 생산력에 직접적인 영향을 끼칠 수 있다 (Alabaster and Lloyd, 1982). Muir (1982)는 부유성 고형물은 질산화 반응에 사용되는 biofilter를 막히게 할 수 있으며 고형물에 의해 발생하는 암모니아는 어류에 나쁜 영향 (Liao and Mayo, 1974)을 끼칠 수 있기 때문에 양식장 순환수 중의 고형물의 농도를 낮게 유지하는 것은 매우 중요하다고 하였다.

Fig. 7에 각 실험에서의 총부유물질의 농도 변화를 도시하였다. 실험 A의 경우 4~22 g/m<sup>3</sup> 범위 농도 변화를 나타내었으며 실험 B와 C에서는 실험기간 전반에 걸쳐 부유고형물의 농도는 5~12 g/m<sup>3</sup>의 범위를 보였다.

실험 A에서의 총부유물질 농도가 실험 B, C에 비해 높은 것은 Table 1에 나타낸 바와 같이 순환수의 유량 중 사육조로 재순환되는 비율이 다른 실험에 비해 높아 발생하는 현상이다. 사육조로 재순환되는 순환수는 floating bead filter를 거치지 않고 사육조 상부로 재 순환되어 이 유량이 많을 경우 사육조 내의 부유 고형물이 제거되지 않고 누적되게 되며 floating bead filter를 통과하는 유량이 작아져 제거되는 고형물의 양이 감소하게 된다. 이것으로 보아 펌프로부터 우회하여 수처리 장치를 거치지 않고 사육조로 재순환 되는 유량이 많을 경우 용존산소는 증가하나 고형물의 제거에는 효율적이지 않음을 알 수 있었다.

실험 B와 C에서 나타난 부유물질의 농도는 보충수의 평균 총 부유물질 농도가 7 g/m<sup>3</sup>인 것 과 비교할 때 거의 완벽한 제거율을 보이고 있는 것으로 본 시스템의 고형물 제거 성능은 매우 뛰어난 것으로 판단되었다.

유기물 농도 변화

순환 여과식 양어장에서 용존 유기물은 미접취 사료에서 용출되거나 어분 중 어체 내에서 완전히 분해되지 않은 성분이 물 속에

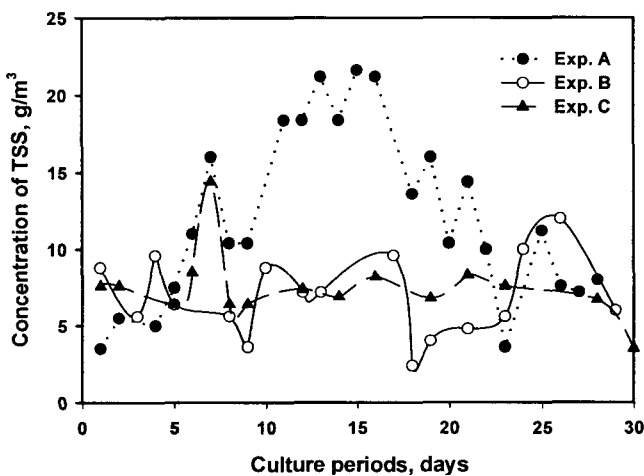


Fig. 7. The concentrations of total suspended during the each experiment (initial rearing density: 5A and 5B; 5%, 7; 7%).

용해되어 발생한다. 용존 유기물의 농도가 높을 경우 타가영양체 미생물의 성장을 촉진시키게 되어 생물학적 처리장치에 우점종화되어 질산화 효율을 저하시키거나 산소요구량을 증가시키는 원인이 된다. 일부 타가영양체 미생물은 병원균으로 어류에게 질병을 유발시키기도 한다 (Albaster and Lloyd, 1982).

본 시스템에 유기물의 제거를 위한 별도의 수처리 장치는 없으나 질산화 반응기의 경우 원판에 부착되는 생물상이 다양하여 질산화 반응 뿐 아니라 유기물도 제거할 수 있다 (Suh et al., 1999).

유기물 농도의 지표로서 COD<sub>Cr</sub>를 측정하여 Fig. 8에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 실험 A의 COD<sub>Cr</sub> 농도는 40~120 g/m<sup>3</sup>의 범위로 실험 B와 C에 비해 상당히 높았으며 그 변화폭도 매우 컸다. 그에 비해 실험 B와 C는 실험 A에 비해 낮으면서도 안정된 농도를 유지하였다. 실험 A에서 나타난 농도가 가장 높고 변화폭이 큰 것은 순환수의 순환 유량 중 수처리 장치를 경유하는 유량이 가장 작아 유기물 제거가 원활히 이루어지지 못하여 나타나는 현상으로 생각되며 수처리 장치를 경유하는 유량이 증가된 실험 B와 C에서는 유기물 제거가 원활히 진행되었기 때문인 것으로 사료된다.

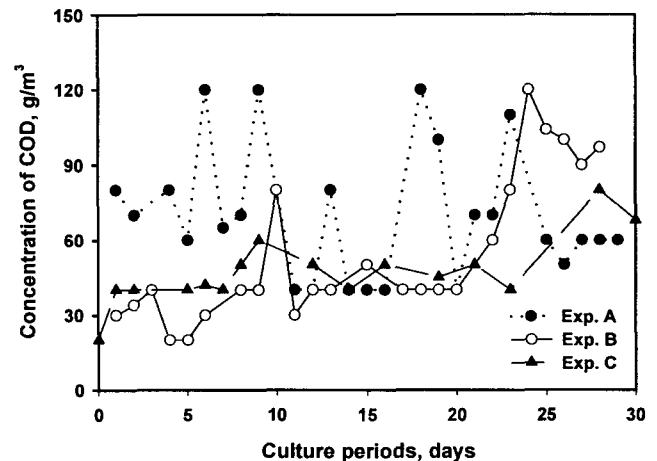


Fig. 8. The concentrations of chemical oxygen demand during the each experiment (initial rearing density: A and B; 5%, C; 7%).

알칼리도 및 수소이온 농도 변화

각 실험기간 동안 나타난 총 알칼리도와 pH의 변화를 Fig. 9와 10에 도시하였다. 알칼리도는 용존산소와 함께 암모니아성 질소의 질산화 과정에서 가장 중요한 인자이다. 질산화에 관여하는 질화세균은 자가영양체로 유기탄소를 탄소원으로 이용할 수 없으므로 세포합성에 무기탄소원으로 알칼리도를 필요로 하고 질산화시 발생하는 수소이온에 의한 pH의 강하를 방지하는데도 이용된다 (Sharma and Ahler, 1977). 암모니아성 질소의 질산화가 진행되면 알칼리도가 소모되어 pH가 저하되며 50 g as CaCO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> 이하의 알칼리도는 질산화를 제한한다 (Gujer and Boller, 1984).

실험 A에서 알칼리도 30 g as CaCO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>, pH 7.8 정도를 유지하였으나 5일이 경과하면서 질산화의 진행에 따라 pH가 급격히

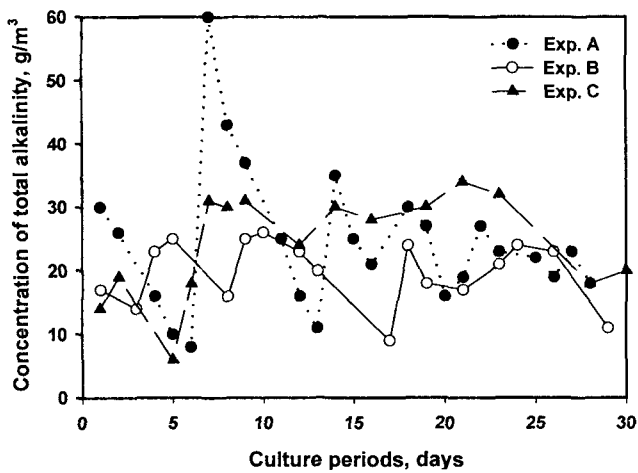


Fig. 9. The concentrations of total alkalinity during the each experiment (initial rearing density: A and B; 5%, C; 7%).

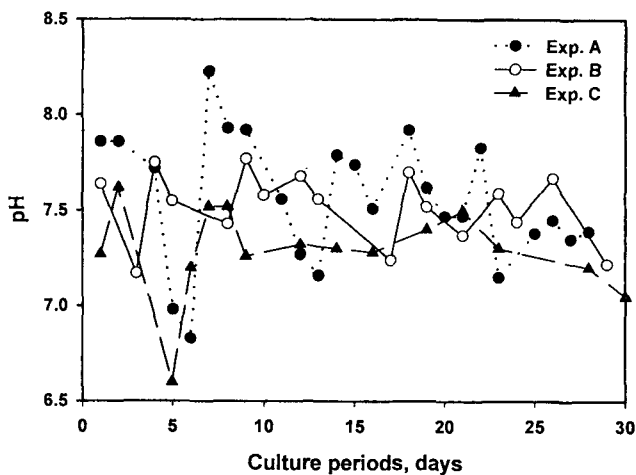


Fig. 10. The changes of pH during the each experiment (initial rearing density: A and B; 5%, C; 7%).

감소하였으며 이 시기에 사육조의 암모니아성 질소의 농도도 Fig. 2에 나타난 바와 같이 급격히 증가하였다. 이것으로 보아 5% 이상의 사육 밀도에서는 pH의 유지와 안정한 질산화 효율의 유지를 위해 일정량의 알칼리도의 주입이 필요한 것으로 나타났으며 실험 A에서 부족한 알칼리도의 보충은 pH가 7.2 이하로 떨어질 때마다 500 g의 중탄산나트륨을 공급하여 보충하였다. 실험 B에서는 실험 초기부터 3일 간격으로 500 g의 중탄산나트륨을 주입한 결과 실험 기간 전반에 걸쳐 20~30 g as CaCO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>의 알칼리도와 7.5 정도의 pH를 유지할 수 있었으며 이로 인해 실험 A에 비해 안정적인 질산화 반응을 유지할 수 있었다.

실험 C에서는 매일 120 g의 중탄산나트륨을 공급하였으며 30 g as CaCO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>의 알칼리도와 7.2 정도의 pH를 실험 기간 전반에 걸쳐 유지할 수 있었다.

총 알칼리도의 농도가 20 g as CaCO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> 이하로 떨어질 경우 사육조의 암모니아 및 아질산의 농도가 급격히 증가하는 것으로

보아 질산화 반응이 억제되었음을 알 수 있었으며 Gujer and Bolter (1984)가 제시한 질산화 저해 알칼리도 한계치보다는 더 낮은 것으로 사료되었다.

본 시스템에서 질산화가 저해되는 알칼리도 농도에서 나타난 pH는 대략 7.2 정도로서 실제 양어장 운영시 알칼리도에 비해 측정이 용이한 pH를 이용하여 알칼리도의 보충을 결정할 수 있을 것으로 생각되었다. 또한 안정적인 알칼리도의 유지를 위해서는 매일 소량의 알칼리도를 보충하는 것이 더 효율적임을 알 수 있었다.

## 요 약

Package 형태로 설계하고 제작된 pilot scale 순환 여과식 양식 시스템의 실제 어류 사육 성능을 판단하고자 하였다. 틸라피아를 설계 기준인 5% (A, B)의 사육 밀도에서 30일간 사육하였고 7% (C)의 과잉 사육밀도에서 33일간 사육하여 어류 성장과 사육조의 각종 수질을 측정하고 시스템의 안정성을 검토하였다.

실험 결과 초기 사육 밀도 5%인 실험 A와 B, 7%의 사육밀도인 실험 C에서 각각 1.62, 1.79, 1.80의 사료계수와 0.452%, 0.445%, 0.423%의 일간 성장률을 보였다.

총 암모니아성 질소의 농도는 설계 기준 사육밀도인 5%로 수용한 실험 A와 B의 경우, 1 g/m<sup>3</sup> 이하로 유지하여 어류 사육에 적합한 것으로 나타났으며 7%로 수용한 실험 C에서는 2~4 g/m<sup>3</sup>의 농도를 나타내어 최대 40% 정도는 초과 수용할 수 있는 것으로 나타났다.

알칼리도의 부족은 질산화 반응을 저해하여 높은 암모니아 및 아질산성 질소의 농도를 유발하였으며 질산화 반응기의 숙성이 완전하지 않을 경우 아질산의 농도가 암모니아 농도와 유사하게 나타났다. 질산화 반응기의 완전한 숙성은 70일 정도 소요되었다.

시스템 내부에서 자연적인 탈질반응이 일부 발생하였고 이와 더불어 보충수의 공급에 따른 희석효과로 설계 사육 밀도보다 높은 7%의 사육 밀도에서도 60 g/m<sup>3</sup> 이하의 질산성 질소 농도를 유지할 수 있어 별도의 탈질 장치는 필요하지 않은 것으로 나타났다.

수처리 장치를 통과하지 않고 사육조 수면으로 공급되는 우회량이 많을 경우 용존산소는 증가하였으나 수처리 장치로 공급되는 유량이 작아 부유 고형물, 유기물 등의 수질 인자가 악화되는 현상을 보였다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부에서 시행한 첨단 기술 개발 사업 연구의 연구비 지원에 의해서 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Albaster, J.S. and R. Lloyd. 1982. Water Quality Criteria for Fresh-water Fish, 2nd ed., Butterworth, London, 361pp.
- APHA. 1989. Standard Methods for the Examination of Water and

- Wastewater. 18th ed. American Public Health Association.
- Brown, P.B., K.A. Wilson, J.E. Wetzel II. and B. Hoen. 1995. Increased densities results in reduced weight gain of crayfish *Orconectes virilis*. *J. World Aquacult. Soc.*, 26, 165~171.
- Gujer, W. and M. Boller. 1984. Operating experience with plastic media tertiary trickling filters for nitrification. *Water Science Technology*, 16, 201.
- Lee, J.K., S.C. Kim and S.M. Lee. 1996. Influence of stocking density on growth, feed efficiency and body composition of juvenile fat cod (*Hexagrammos otakii* Jordan et Starks) in indoor culture system. *J. Aquaculture*, 9, 233~237 (in Korean).
- Liao, P.B. and R.D. Mayo. 1974. Intensified fish culture combine water reconditioning with pollution abatement. *Aquaculture*, 3, 61~85.
- Muir, J.F. 1982. Recirculated System in aquaculture. edited by Muir, J.F. and Reberts, R.J. *Recent Advances in Aquaculture*, Vol. 1. Croom Helm and Westview Press, London, 453pp.
- Sharma, B. and R.C. Ahlert. 1977. Nitrification and nitrogen removal. *Water Research*, 11, 897~925.
- Stickney, R.R. 1979. *Seawater Aquariums, the Captive Environment*, Wiley Interscience, New York, 375pp.
- Suh, K.H., B.J. Kim, S.I. Lim, J.K. Cho, Y.H. Kim and C.S. Oh. 1999. Performance of rotating biological contactor under various hydraulic residence time on the removal of total ammonia nitrogen and COD in a simulated water recirculating system. *J. Korean Fish Soc.*, 32, 180~185 (in Korean).
- Suh, K.H., B.J. Kim and I.G. Jeon. 2001. Design and Development of Integrated Recirculating Aquaculture System. *J. Korean Fish. Soc.*, 34, 70~76 (in Korean).
- Wickins, J.F. 1980. Water Quality Requirements for Intensive Aquaculture: a Review, Symposium on New Developments in the Utilization of Heated Effluents and Recirculation Systems or Intensive Aquaculture. EIFAC, 11th Session, Stavanger, Norway, 28~30 May.
- 김인배. 1993. 어류양식, 신흥출판사, pp. 8~23.
- 조재윤. 1996. 양식공학, 부경대학교출판부, pp. 25~35

---

2001년 7월 20일 접수

2001년 12월 19일 수리