

순환 여과식 양식 시스템의 설계 및 개발

서근학* · 김병진 · 전임기*
부경대학교 화학공학과, *국립수산진흥원 양식개발과

Design and Development of Integrated Recirculating Aquaculture System

Kuen-Hack SUH⁺, Byong-Jin KIM and Im Gi JEON*
Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea
*Aquaculture Division, National Fisheries Research and Development Institute, Kijang-gun, Pusan 626-900, Korea

An integrated recirculating aquaculture system suitable to our country's situation was designed and developed. The integrated recirculating aquaculture system consisting of a double drain type rearing tank of the 2.5 m³, a sedimentation tank for removal of settleable solids, a floating bead filter for the removal of suspended solids, a foam separator for removal of fine particles and a rotating biological contactor for the nitrification was designed and manufactured. The integrated recirculating aquaculture system was stocked with Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) at 2% rearing density for 2 weeks. Feed coefficient was 1.4 and average daily growth rate was 0.64% in the system for 2 weeks.

Key words: recirculating aquaculture system, rearing tank, sedimentation tank, floating bead filter, foam separator, rotating biological contactor

서 론

순환 여과식 양식은 연속적으로 물을 정화시켜 사용하기 때문에 하루에 전체 순환수의 10% 이하의 물만을 보충수로 필요로 한다. 따라서 배출되는 오수의 양이 유수식이나 가두리 양식에 비하여 아주 적기 때문에 오폐수 처리에 아주 유리하다. 현재 정부가 추진하고 있는 수자원 환경에 대한 관심으로 미래의 양식은 환경친화적 방법이 아닌 자연환경에 오폐수를 그대로 배출시키는 방식으로는 존재하기 어려울 것으로 판단된다. 그러므로 내륙에 있어서 앞으로의 양식은 순환 여과식 외의 다른 대안은 없다 (조, 1996).

순환 여과식 양식 시스템은 초기에는 경험에 의해 설치 운영되었으나 고밀도로 어류를 사육함에 따라 어류사육에 큰 피해를 주는 오염물질의 효율적인 제거를 위하여 점차 화학공학, 토목공학 등을 연구하던 공학자들의 참여가 증가하고 있으며 현재 미국 및 유럽을 중심으로 여러 나라에서 연구·개발되고 있다.

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 양식 시스템을 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)는 Ebeling, DeLong 등과 연구를 계속하여 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 1994년 ECO-TRAPS를 설치한 ECOTANKS를 사육조로 하고 고형물 제거를 위해 drum screen filter, 생물학적 처리장치로 BioSump biological filter를 사용한 순환여과식 양식 시스템을 개발하였다. Reyes and Lawson (1995)은 bead filter와 RBC, 자외선 살균기를 결합한 순환 여과식 양식 시스템을 연구·개발하였다.

우리나라의 순환 여과식 양식은 1973년 부산수산대학교 (현 부경대학교)의 어류 양식 실험실 내에서의 간이 순환여과식 장치로서 각종 어류의 성장을 조사한 것이 시초이며, 1979년에 약 600 m³의 시험 규모의 순환 여과 사육장치가 부경대학교 양어장에 시설되어 순환 여과식 양식에 대한 본격적인 연구가 진행되었다 (조, 1996).

그러나 이들 연구는 순환 여과식 양식시스템의 연구는 대부분 어류나 수처리 장치 하나에만 관심을 두었으며 실제 양식환경에 적합하고 적용성이 높은 전체적인 시스템 개발에 관한 연구는 IBK 시스템이 유일하다 (김, 1997).

순환 여과식 양식 시스템을 하나의 package 형태로 개발할 경우 기존의 양식 시스템이 신축 또는 증축할 때마다 새로이 설계하고 시운전을 행하는 것과 달리 동일한 시스템을 규격화하여 공급함으로써 설계나 시운전의 절차가 필요없어 초기 비용이 절감된다. 또한 수요가 증가할수록 생산단가가 낮아져서 매우 경제적으로 발전할 수 있다.

본 연구에서는 현재까지 알려진 순환여과식 양식장에 대한 자료를 검토하여 순환 여과식 양어장의 순환수 처리시설을 설계하고 이를 효율적으로 조합하여 순환 여과식 양식 시스템을 개발하여 package 형태로 설계하고 제작하였다.

* Corresponding author: khsuh@mail.pknu.ac.kr

재료 및 방법

1. 시스템 설계 및 제작

순환여과식 양식 시스템의 설계 및 제작은 어류의 성장에 가장 큰 영향을 미치는 오염물은 고형물과 암모니아성 질소 (Timmons, 1994)의 처리에 중점을 두고 진행하였다. 사육조에서 발생하는 고형물 중 100 µm 이상의 비교적 큰 침강성이 큰 입자는 침전조, 30 µm 이상의 부유물질은 floating bead filter, 30 µm 이하의 미세입자와 용존 고형물은 포말분리기를 이용하여 제거할 수 있도록 설계하였으며 암모니아성 질소의 제거를 위한 질산화 반응기는 회전원판 반응기를 선정하였다. 용존산소의 공급은 순환수의 순환에 의한 자연적인 포기를 주로 하여 어류 밀도 증가시 부족한 용존산소는 산기석에 의한 포기를 하도록 하였다. Fig. 1에 시스템의 전체 흐름을 나타내었다.

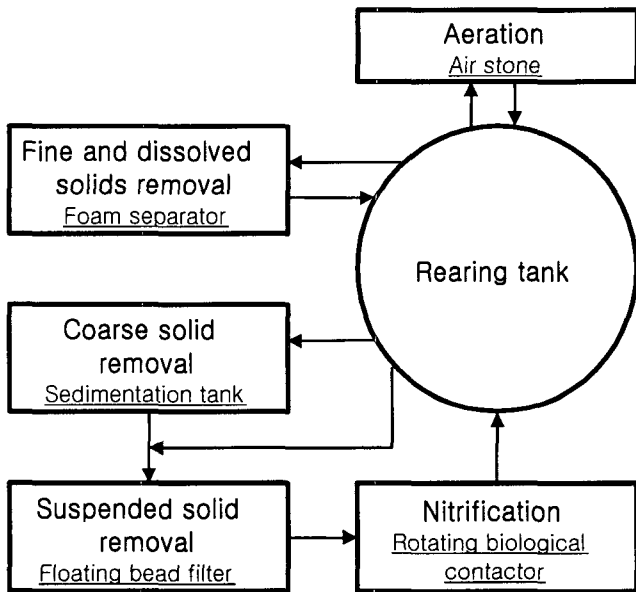


Fig. 1. Required unit processes in recirculating aquaculture system.

2. 시험어 수용

본 연구를 통해 개발된 시스템의 시험운전을 위해 수용한 실험어는 수질에 대한 내성이 뛰어난 열대성 담수어종인 틸라피아 중국내 내수면의 주요 양식 대상 종인 나일틸라피아 (*Oreochromis niloticus*)로 부경대학교 양어장에서 사육중인 평균 어체중 393 g의 어류를 127마리 수용하였다. 어류의 총 중량은 49.9 kg이었으며 사육밀도는 2%였다.

3. 시스템 관리

Pilot plant의 운전은 매일 오전 9:00시에 첫사료를 공급하고 침전조 및 플라스틱 bead filter를 청소하여 어류사육을 통하여 발생한 고형물질을 제거하고 보충수를 공급하여 시스템의 수위를 유지시켰다. 이러한 시스템 점검을 마친 후 약 1시간 경과 후 수질

분석에 필요한 시료를 채취하였다. 보충수는 사육조 체적의 약 10%에 해당하는 0.25 m³의 물을 사용하였다. 이때 사용한 보충수는 부경대학교 부속 양어장의 순환수를 이용하였으며 수질은 Table 1과 같다. 어류 성장 실험을 위한 사료는 침전사료를 이용하였고, 사료공급은 어체중에 대하여 약 1%에 해당하는 사료를 1일 3회에 공급하였다. 공급한 사료의 조성은 Table 2와 같다. 양식 순환수의 순환량은 3.75 m³/hr 였으며 온도는 25°C로 설정하였다.

Table 1. Analytical item and method

Items	Method
Total Ammonia Nitrogen	Selective electrode method (Orion 95-12BN)
COD _{cr}	Open reflex method
Suspended Solid	Vacuum filtration method
pH	pH meter (Orion 720A)
Dissolved Oxygen	DO meter (YSI 55)

Table 2. Composition of feed

Component	Composition
Moisture	13.81 %
Crude protein	38.36 %
Crude lipid	4.22 %
Crude ash	8.42 %

4. 분석방법

시스템의 수질을 측정하기 위해 암모니아성 질소 (total ammonia nitrogen, TAN), 화학적 산소 요구량 (chemical oxygen demand, COD), 수소이온농도 (pH), 총부유물질 (total suspended solid, TSS), 용존산소 (dissolved oxygen, DO)에 대한 수질분석을 수행하였다. 각 수질 항목별 분석 방법은 Table 1에 나타내었다.

결과 및 고찰

1. 사육조

본 연구에서 제작한 사육조는 침강성이 높은 고형물은 하부에서 침전조로 유입시키고 침강성이 낮은 부유성 고형물은 사육조 상부의 유출구를 통해 저류조로 유입시켜 침전조에 가해지는 수력학적 부하를 감소시킬 수 있는 double drain 형태의 원형수조 (김, 1996)를 설계·제작하였다. 사육조의 형태는 Fig. 2와 같으며 FRP (fiberglass reinforced plastics)재질로서 직경 2000 mm, 총 높이 1000 mm의 원형수조이며 수용적은 2.5 m³이다. 사육조 하부의 배출구는 40 mm PVC 관을 사용하였으며 상부 배출구는 100 mm PVC관을 사용하였다. 사육조 하부의 경사도 (B/A)는 침강성 고형물을 제거하는 데 매우 중요하며 일반적으로 소형, 원형 수조의 경우 15%이며 아주 깊은 사일로와 같은 수조에서는 30%의 경사도가 필요하다 (김, 1996). 본 연구에서 제작한 사육조는 소형 수조보다는 조금 큰 20%로 설계하였다. 사육조 상부에는 시스템의 누수로 인한 수위 하강시 이를 감지하여 펌프를 정지시켜 사육조

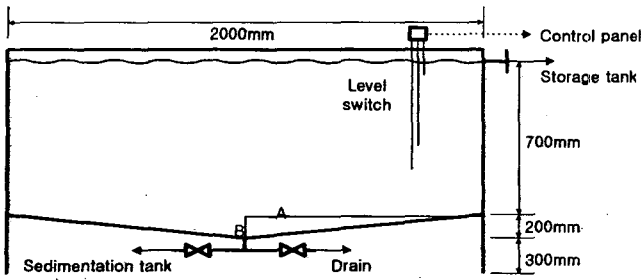


Fig. 2. Drawing of rearing tank.

내의 수위를 보전할 수 있도록 level switch를 설치하였으며 정상 수위보다 10 cm 이상 하강시 pump를 멈추도록 설치하였다.

2. 침전조

사육조 하부로부터 배출되는 100 μm 이상의 침전성이 큰 고형물을 제거시키기 위하여 Fig. 3과 같은 형태의 침전조를 설치하였다. 사육조 하부의 고형물 성분이 많은 순환수가 빠른 유속으로 침전조 하부로부터 유입되어 침전조의 내부 원통관을 통해 상부로 유출되어 외부 원통관을 통해 하강하면서 유입되는 속도에 비해

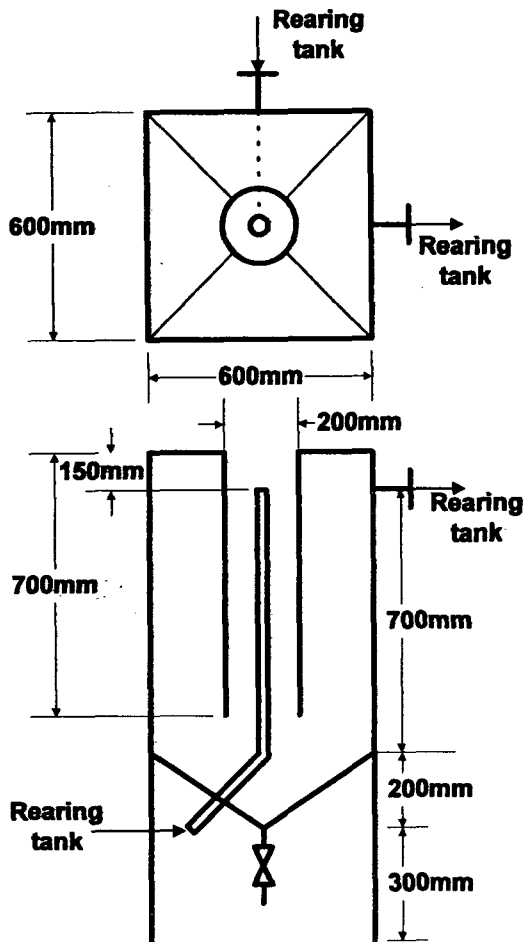


Fig. 3. Top view and front view of sedimentation tank.

상대적으로 감소된 유속에 의해 비중이 큰 고형물은 침전조 하부에 모이고 고형물이 제거된 순환수는 상부의 유출구를 통해 배출될 수 있도록 하였다.

100 μm 이상의 고형물을 제거하기 위한 침전조의 단면적은 다음의 Stoke's 식 (McCabe, 1993)을 이용하여 구하였다.

$$V_s = \frac{g(\rho_p - \rho)D_p^2}{18\mu}$$

여기서 V_s 는 입자의 침강속도 (m/sec), g 는 중력가속도 (9.8 m/sec²), ρ_p 는 고형물의 밀도 (kg/m³), ρ 는 유체의 밀도 (kg/m³), D_p 는 고형물의 입경 (m), μ 는 유체의 점도 (kg/m·sec)이다.

입자의 침강에 필요한 단면적은 유량을 입자의 침강 속도로 나눈 것과 같으므로 Stoke's 식을 이용하면 다음과 같다.

$$A = \frac{Q}{V_s} = Q \times \frac{18\mu}{g(\rho_p - \rho)D_p^2}$$

여기서 A 는 침전조의 단면적 (m²)이며 Q 는 유량 (m³/sec)이다.

침전조에서 제거하고자 하는 고형물의 최소 입경은 100 μm (100 × 10⁻⁶ m)이므로 이를 기준으로 하여 상기 식을 이용하여 침전조의 단면적을 구하였다. 고형물의 밀도는 1190 kg/m³ (Chen et al., 1994)으로 가정하였으며 유량은 순환수의 순환이 1일 36회전 (3.75 m³/hr)이라고 가정하고 침전조로 유입되는 순환수의 양은 전체 순환수의 30%인 1.125 m³/hr를 사용하였다. 시스템의 운전 온도인 25°C에서 물의 밀도와 점도는 각각 999 kg/m³, 0.9 kg/m·sec이고 중력가속도는 9.8 m/sec²이다. 계산을 통해 얻어진 침전조의 단면적은 0.267 m²이었으며 35% 정도의 여유를 두어 0.36 m²으로 설계하여 제작하였다.

$$\begin{aligned} A_{ideal} &= Q \times \frac{18\mu}{g(\rho_p - \rho)D_p^2} \\ &= 1.125 \text{ m}^3/\text{hr} \times \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ sec}} \\ &\quad \times \frac{18 \times 0.9 \text{ kg/m} \cdot \text{sec}}{9.8 \text{ m/sec} \times (1190 - 999) \text{ kg/m}^3 \times (100 \times 10^{-6} \text{ m})^2} \\ &= 0.267 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{design} &= A_{ideal} \times (1 + \text{safety}) \\ &= 0.267 \text{ m}^2 \times (1 + 0.35) = 0.36 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

3. 입상 여재 여과기

입상 여재 여과기 (granular media filter)는 모래나 plastic bead와 같은 입상 여재를 이용하여 순환수 중의 고형물을 걸러내는 장치로 20 μm 이상의 입자를 제거할 수 있다 (Chen et al., 1994). 입상 여재 여과기 중 floating bead filter는 직경 2~5 mm의 물보다 비중이 낮은 polyethylene bead를 이용하여 상향류로 흐르는 순환수의 고형물을 제거하는 장치로서 sand filter와 같이 입경이 작은 매질을 사용하는 고형물 제거장치에 비해 수두손실이 작아 0.5~1.5 m³/m²/min의 높은 filtration flux를 보이는 장점을 지닌다 (Wheaton et al., 1996). 그 형태는 제거한 고형물을 bead로부터 제거하는 방법에 의해 분류되며 공기주입 방식 (air injection),

수류분사방식 (water jetting), 기계식 교반방식 (mechanical agitation) 등이 있으며 bead filter를 이용하여 고형물을 제거할 경우 역세척시 소요되는 순환수의 양이 sand filter에 비해 1~5% 밖에 되지 않아 매우 효과적이다. 또한 floating bead filter는 bead 표면에 부착된 미생물에 의한 질산화로 암모니아성 질소의 제거효과도 나타낸다는 보고도 있다 (Hargrove et al., 1996; Wheaton et al., 1996).

본 연구에서는 침전조에서 제거되지 못하는 부유 고형물을 제거하는 장치로서 미국 Aquatic eco-system Inc.의 floating bead filter (ABF-1)를 설치하였다. 그 형태는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 공기주입 방식이며 처리 용량은 4 m³/hr이다. 하루로부터 유입된 순환수는 비중이 0.83으로 물보다 가벼운 직경 3~4 mm의 polyethylene bead층에서 고형물이 걸러지게 되고 역세척시에는 순환수의 공급을 중단하고 1~2분간 하부에서 공기를 공급 bead를 교반시켜 bead 층의 고형물을 분리한다. Bead 층에서 분리된 고형물을 3분간 정지시킨 후 하부의 배출관으로 유출시킨다.

4. 질산화장치

본 시스템의 질산화 장치는 회전원판식 반응기를 선정하였다. 회전 원판 반응기는 단위 표면적당 여과 효율이 우수하고 원판이 회전하면서 대기 중의 공기와 접촉하면서 산소를 수중에 용해시킬 수 있으며 (Miller and Libey, 1984) 수두가 낮아 운전 경비가 절감되고 원판의 회전에 의한 전단력으로 원판 표면에 느슨하게 부착된 생물막이 탈리되어 활성 높은 생물막의 유지가 가능하며, 한번 활성화되면 급작스런 충격에 대해서도 활성이 쉽게 떨어지지 않는 장점이 있다 (Libey, 1992).

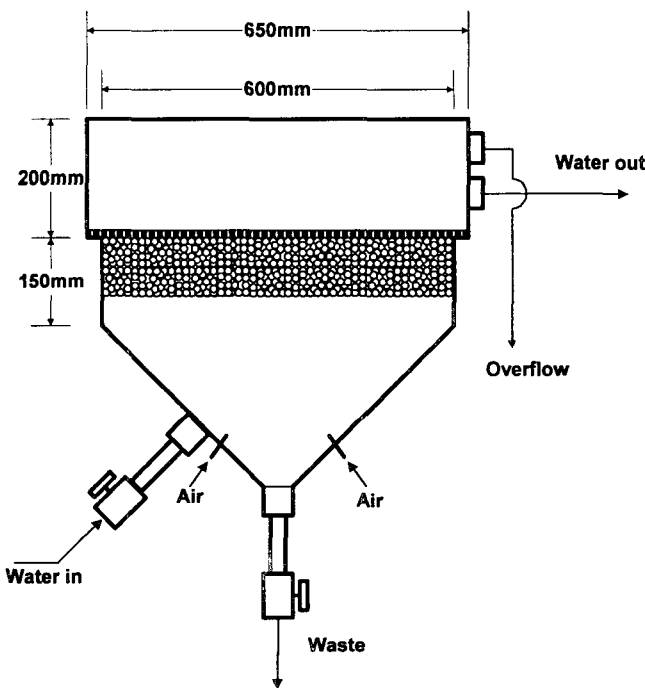


Fig. 4. Front view of granular media filter.

회전원판식 반응기의 설계에 있어 가장 중요한 것은 시스템에서 발생하는 암모니아성 질소의 양과 시스템의 순환수의 유량이다. 시스템에서 발생하는 암모니아의 양은 어류 사육밀도와 사료 공급량에 의해 결정된다. 어류의 사육밀도를 5% (50 kg fish/m³ rearing tank), 1일 사료 공급량을 어체중의 1% (0.01 kg feed/kg fish) 라고 가정하면 본 연구에서 설계한 2.5 m³의 수조에 공급되는 사료의 양은 일간 1.25 kg이다.

Rearing Density: 5%

$$2.5 \text{ m}^3 \text{ rearing tank} \times 0.05 \frac{\text{kg Fish}}{\text{m}^3 \text{ Rearing tank}} = 125 \text{ kg Fish}$$

Feed level: 1.0%/day

$$125 \text{ kg Fish} \times 0.01 \frac{\text{kg Feed}}{\text{kg Fish}} = 1.25 \text{ kg Feed/day}$$

일간 공급되는 사료에서 발생하는 암모니아성 질소의 분율을 3% 라고 가정 (Liao and Mayo, 1974; Speece, 1973) 하여 다음과 같이 계산하면 암모니아의 발생속도는 37.5 g TAN/m³/day이다.

TAN product: 3% of feed

$$1.25 \frac{\text{kg Feed}}{\text{day}} \times 0.03 \frac{\text{kg TAN}}{\text{kg Feed}} = 0.0375 \text{ kg TAN/day}$$

$$= 37.5 \text{ g TAN/day}$$

일반적으로 알려진 회전원판식 반응기의 암모니아 제거속도는 100 g TAN/m³ reactor/day이므로 (Suh et al., 1999), 이론적인 회전원판식 반응기의 용적은 0.375 m³이다. 여기에 27% 정도의 세이프티를 더하여 0.475 m³을 본 시스템의 회전원판식 반응기의 부피로 설계하였다.

$$V_{\text{ideal}} = P / (-r_{\text{ideal}})$$

$$= \frac{37.5 \text{ g TAN/day}}{100 \text{ g TAN/m}^3/\text{day}} = 0.375 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{design}} = V_{\text{ideal}} \times (1 + \text{safety})$$

$$= 0.375 \text{ m}^3 \times (1 + 0.27) = 0.475 \text{ m}^3$$

본 연구에서 제작한 회전원판반응기는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 1200 mm×900 mm×450 mm의 규모로 PVC plate를 이용하여 제작하였으며 액층의 부피는 0.475 m³이다. 원판은 직경 68 cm의 corrugated skylight plate 100장을 사용하였으며 표면적은 72.6 m² 이었다. 원판의 회전은 유입수를 원판 상부에서 살수하여 순환수가 낙하하는 수력에 의해 회전하도록 하여 별도의 구동장치가 필요 없도록 하였다.

5. 포말분리장치

포말분리에 의해 제거되는 고체는 주로 직경이 30 μm 이하인 미세 입자와 용존 고형물로서 포말 분리법은 미세 입자들을 제거하는데 매우 효과적이며, 적은 비용으로 효율적인 운전을 할 수 있고 연속 운전이 가능하며 역세척이 필요 없다는 장점을 지니고 있다 (Clarke and Wilson, 1983; Rubin, 1981).

Lomax (1976)는 생물 여과기에 침강 탱크, 포말 분리 장치 또는 기계식 여과기를 각각 조합하여 사용한 어류 양식 시스템을 비교

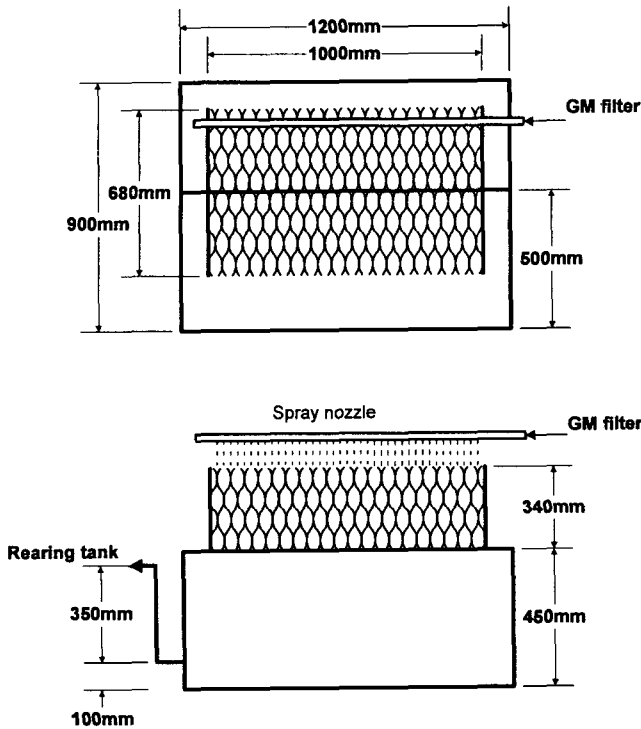


Fig. 5. Top view and front view of rotating biological contactor.

한 결과, 비용이나 효율성의 측면에서 볼 때 포말 분리법을 함께 사용한 생물 여과기가 최적의 설계 조합이었다고 하였으며, Dwivedy (1975)는 포말 선별법에 의해 굴양식장 폐수에서 부유성 유기물과 용존성 유기물을 제거할 수 있었다고 하였다. 또한 포말 분리법에 의해 유기산이 제거되게 됨에 따라 양식장수의 pH를 일정하게 유지하는 데 도움이 되었으며, 물 속의 박테리아도 제거할 수 있음을 확인하였다.

침전조와 입상 여재 여과기에서 제거되지 않는 30 μm 이하인 미세 입자와 용존 고형물의 제거를 위해 포말분리기를 설계 제작하였다. 본 연구에서 사용한 포말분리기는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 내경 15cm의 플라스틱 원통관으로 이루어져 있으며 하부의 air stone에서 발생되는 기포에 의해 순환수가 동반 상승하면서 내부 순환을 이루는 병류 공기 구동식 (co-current air driven type)으로 제작하였다. 포말관 내에서 생성된 기포는 수면 상부에서 농축되어 유출구를 통해 배출되며 기포와 동반 상승한 순환수는 수주의 유출구를 통해 배출된다.

6. 시스템 제작

본 연구를 통해 설계 제작된 사육조와 수처리 장치를 조합하여 기존의 양어장과는 달리 수처리 시스템을 한 곳에 집약시킨 순환 여과 양식 시스템을 제작하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 사육조와 수처리 시스템 사이의 유로를 가장 짧게 설계하여 관리, 운전이 용이하도록 하였으며 수처리 시스템 중 floating bead filter와 RBC는 침전조와 저류조 상부에 2층 구조로 설치하여 전체 시스템이 차지하는 면적을 최대한 줄일 수 있도록 하였다. 또한 시스템

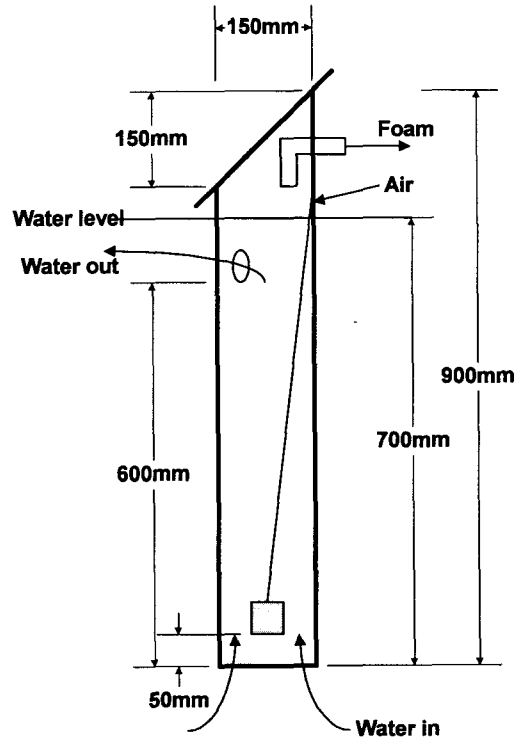


Fig. 6. Front view of co-current air driven type foam separator.

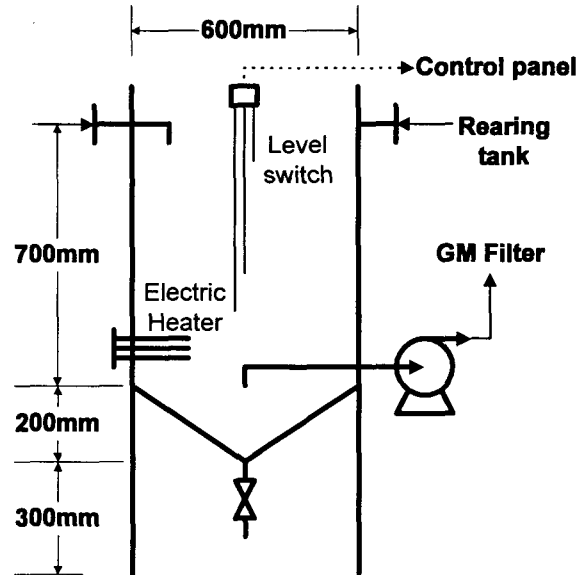


Fig. 7. Front view of storage tank.

전체에 걸쳐 순환수는 1대의 펌프만을 이용하여 이동되며 bead filter의 세척과 포말분리기에 공기를 공급하는 blower는 사육조내 용존산소가 떨어질 경우 포기를 할 수 있도록 여분의 유출구를 설치하였다. 순환펌프 (DOLL S.A., Model Sprint)는 토출량 7 m³/hr, 전양정 13m인 것을 설치하였으며 blower (A-Sung Machinery Co.)는 토출압력 400 mmHg, 토출량 1.5 m²/min인 것을 설치하였다.

어류에 의해 오염된 사육조 내의 순환수 중 침강성 고형물은 사육조 하부의 유로를 통해 침전조로 유입시켜 제거하고 사육조 상부에서 유출되는 순환수와 저류조에서 모이도록 하였다. 저류조는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 사육조 용적의 1/5인 0.25 m³의 규모로 외형은 침전조와 동일하게 제작하였다. 저류조 상부에는 순환수의 증발, 누수 등에 의해 사육조 수위가 낮아지거나 용수가 부족하게 되어 펌프의 공회전이 발생할 경우를 대비하여 항상 일정 용량의 순환수를 보유할 수 있도록 수위계를 설치하여 저류조 수위가 일정수위 이하로 떨어지면 펌프의 작동을 멈추고 일정 수위 이상이 되었을 때 다시 펌프를 작동하도록 하였다. 저류조 하부에는 시스템 전체의 일정한 수온을 유지하기 위해 3 kW의 용량을 가지는 전기 heater를 설치하였다. Heater는 온도 감지기와 조절기를 사용하여 설정된 온도보다 수온이 떨어지면 자동으로 작동되며 설정 온도가 되면 작동을 멈추도록 하였다.

수위의 하강이나 단전 등에 의해 펌프가 작동을 멈추는 등의 시스템 이상이 발생할 경우 관리자에게 신속하게 알리기 위해 auto dialer를 설치하였다. Auto dialer는 시스템에 이상이 발생할 경우 전화를 이용하여 입력된 전화번호로 신호를 보내어 관리자를 호출하는 시스템으로 기존의 경보기와는 달리 무선호출이 가능하며 관리자가 외부에 있더라도 연락을 받을 수 있는 장점이 있다.

저류조의 물은 순환 펌프에 의해 저류조 상부에 위치한 floating bead filter로 유입되도록 하였다. Bead filter를 거쳐 고형물이 제거된 순환수는 질산화 반응기인 회전 원판 반응기로 유입되며 회전원판 반응기를 거친 물은 사육조로 순환된다. 처리수가 사육조로 유입될 때 산소 포기 효율을 높일 수 있도록 유출구와 수면이 45°의 각도를 유지하도록 하였으며 사육조 내 수류를 형성시키기

위하여 유출구의 위치는 사육조의 벽면에 위치하도록 하였다. 사육조 내에는 2개의 포말분리기를 설치하였다.

7. 시스템 운전

본 연구를 통해 개발된 순환여과식 양식 시스템의 실제 어류 사육 효율을 알아보기 위해 나일 텔라피아 (*Oreochromis niloticus*)를 수용하여 어류 사육을 수행하였다. 본 어류 사육 실험에서는 시스템의 점검과 질산화 반응기인 회전 원판 접촉반응기 (rotating biological contactor)의 원판에 질산화 미생물의 부착을 위하여 순환여과식 양식시스템에서는 낮은 사육 밀도인 2%로 어류를 입식하여 총 14일간 수행하였으며 실험기간 동안 어류의 폐사는 없었다.

어류 투입 초기에는 어류가 사료를 섭취하지 않아 암모니아성 질소의 농도가 낮았으나 어류가 시스템에 적응하여 사료를 먹기 시작한 2일 후부터 사육조의 암모니아성 질소농도가 증가하기 시작하여 4일이 경과한 후에는 13.6 g/m³까지 증가하였으나 시스템 운전 6일 경과 후부터 감소하여 8일이 경과하면서 부터는 0.3 g/m³의 농도를 보였다.

Table 3에 본 연구에 사용한 시스템 보충수와 시스템 운전 후 8일부터 14일까지 나타난 사육조 내의 암모니아성 질소, 화학적 산소 요구량, pH, 총 부유물질 및 용존산소의 평균 농도를 나타내었다. 암모니아성 질소의 평균 농도는 0.348 g/m³로서 매우 낮게 나타났으며 화학적 산소 요구량과 총 부유물질의 농도는 유입수와 거의 유사하게 나타났으며 용존산소의 평균 농도는 4.31 g/m³ 정도를 유지하여 본 연구에서 설계한 시스템이 매우 효율적임을 알 수 있었다.

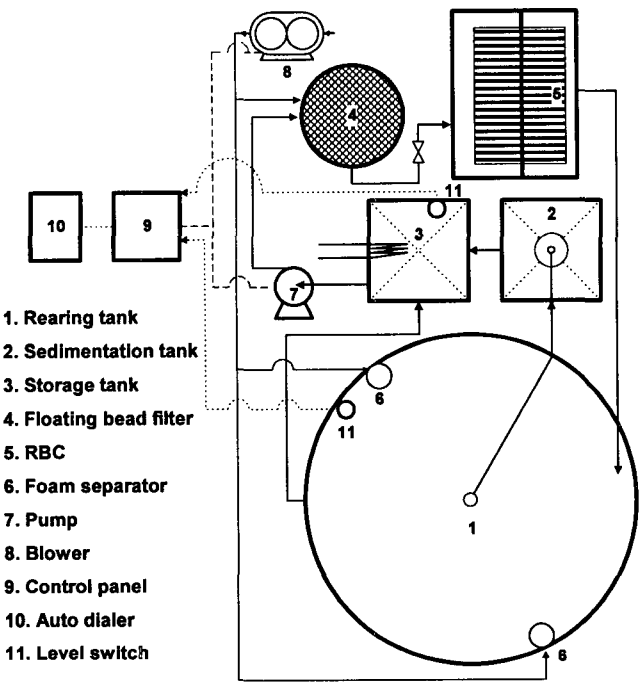


Fig. 8. Schematic diagram of integrated recirculating aquaculture system.

Table 3. Water quality of supply water and recirculating water in rearing tank

	Supply water	Recirculating water		
		Average	Maximum	Minimum
TAN (g/m ³)	0.24	0.348	0.393	0.306
COD (g/m ³)	20.0	19.5	30.4	10.0
pH (-)	7.79	7.25	7.52	7.01
TSS (g/m ³)	7.0	7.5	10.5	6.0
DO (g/m ³)	-	4.31	5.01	3.74

어류의 성장은 Table 4에 나타난 바와 같이 어류의 평균 체중은 392.8 g에서 429.4 g으로 성장하였으며 실험기간 중 공급된 총 사료량은 6485.7 g으로 사료계수는 1.4이었으며 일간 성장률은 0.64%로 나타났다.

요 약

우리나라의 실정에 적합하고 실용적인 순환 여과식 양식 시스템을 개발하여 package 형태로 개발하기 위하여 2.5 m³ 규모의 double drain 형태의 사육조와 침강성 고형물질을 제거하기 위한 침전조, 부유성 고형물의 제거를 위한 floating bead filter, 용존고

Table 4. Average of body weight, feed coefficient (FC) and daily growth rate (DGR) of Nile tilapia

Experiment period (days)		14
Initial weight (g)	Total weight	49,890.00
	Average weight	392.80
Final weight (g)	Total weight	54,530.00
	Average weight	429.40
Consumed diet (g)		6,485.70
Weight gain (g)		4,640.00
¹ FC		1.40
² DGR		0.64

¹FC (feed coefficient) = feed intake/wet weight gain

²DGR (daily growth rate, %) = $[(W_t/W_0)^{1/t} - 1] \times 100$

W_t = final weight, W₀ = initial weight, t = culture period (day)

형물을 제거하기 위한 포말 분리기와 암모니아성 질소를 제거하기 위한 회전 원판 반응기를 조합한 순환 여과식 양식 시스템을 설계하고 제작하였다.

본 시스템에 평균 어체중 392.8g의 나일 틸라피아 173마리를 수용하여 일간 보충수를 사육조 용적의 10%를 사용하여 14일간 어류사육을 실시한 결과 사육조의 수질을 보충수와 거의 동일한 수질로 유지할 수 있었으며 사료계수 1.4, 일간 성장률 0.64를 얻을 수 있었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- Chen, S., D. Stechey and R.F. Malone. 1994. Suspended solids control in recirculating aquaculture system, edited by Timmons, M.B. and T.M. Losordo. Aquaculture Water Reuse System: Engineering design and management, Elsevier, Amsterdam. pp. 61~100.
- Clarke, A.N. and D.J. Wilson. 1983. Foam Flotation Theory and Applications. Marcel Dekker, New York, 418 pp.
- Delos Reyes, A.A. and T.B. Lawson. 1995. Combination of a bead filter and rotating biological contactor in a recirculating fish culture system. Aquacultural Engineering, 15(1), 27~39.
- Dwivedy, R.C. 1975. Removal of dissolved organics through foam fractionation in closed cycle systems for oyster production. Paper No. 73~561. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Mich.
- Hargrove, L.L., P.W. Westerman and T.M. Losordo. 1996. Nitrification in three-stage and single-stage floating bead filters in laboratory-scale recirculating aquaculture system. Aquacultural Engineering, 15, 67~80.
- Liao, P.B. and R.D. Mayo. 1974. Intensified fish culture combine water reconditioning with pollution abatement, Aquaculture, 3, 61~85.
- Libey, G.S. 1992. Maximum nitrification with rotating biological contactors (RBCs). Proceeding of the workshop on design of high density recirculating aquaculture systems. pp 40~48. Louisiana State Univ. Baton Rouge, Louisiana. Sept. 25~27.
- Lomax, K.M. 1976. Nitrification with water pretreatment on a closed cycle catfish culture system. Ph.D. Thesis, University of Maryland, College Park, MD.
- 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.
- 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.
- Losordo, T.M., P.W. Westerman and S.K. Liehr. 1994. Water treatment and wastewater generation in intensive recirculating fish production systems. Bull. Natl. Res. Inst. Aquaculture, Suppl. 1, 27~36.
- McCabe, W.M., J.C. Smith and P. Harriott. 1993. Unit operation of chemical engineering, 5th ed., McGraw-Hill, Inc., New York. 146 pp.
- Miller, G.E. and G.S. Libey. 1984. Evaluation of a trickling biofilter in a recirculating aquaculture system containing channel catfish. Aquacultural Engineering, 3, 39~57.
- Rubin, E. 1981. Foam fractionation-some recent studies, edited by Freeman, M.P. and J.A., FitzPatrick. 157~180.
- Speece, R.E. 1973. Trout metabolism characteristics and the rational design of nitrification facilities for water reuse in hatcheries, Trans. Amer. Fish. Soc., 102, 323~334.
- 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).
- Timmons, M.B. 1994. System carrying capacity and flow estimation, edited by Timmons, M.B. and T.M. Losordo Aquaculture Water Reuse System: Engineering design and management. Elsevier, Amsterdam. pp. 4.
- Wheaton, F.W., J.N. Hochheimer, G.E. Kaser, M.J. Krones, G.S. Libey and C.C. Easter. 1996. Nitrification filter principles, edited by Timmons, M.B. and T.M. Losordo Aquaculture Water Reuse System: Engineering design and management. Elsevier, Amsterdam. pp. 111~112.
- 김인배. 1996. 순환여과식 양식산업의 개발. 수산양식, 81, 181~186.
- 김인배. 1997. 순환여과식 양어시설의 발전방향, 순환여과식 육상 양어장의 설계 및 관리에 관한 세미나. 부경대학교 해양산업개발연구소 · 농림수산기술 관리센터, pp. 1~27.
- 조재윤. 1996. 양식공학, 부경대학교출판부. pp. 25~35.

2000년 11월 19일 접수

2001년 1월 27일 수리