



上向流式 連續逆洗濾過를 이용한 養魚場 循環水 再利用 (I)

박종호* · 김이오 · 황규덕 · 황금희 · 조규석 · 김동식

충청북도내수면연구소

Treatment of Recycling Wastewater of Aquaculture Using DynaSand Filter (I)

Jong-Ho Park*, Lee-Oh Kim, Gyu-Deok Hwang, Geum-Hee Hwang,
Kyu-Seok Cho and Dong-Sik Kim

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

To improve the efficiency of biological filters used for treating recycled wastewater of aquaculture, the conventional and advanced DynaSand Filters were tested. Applying the fluid mechanics and physical chemistry theories to wastewater treatment plant, the advanced filter focuses on detection of wastewater characteristics and automatic operation of DynaSand Filter to improve backwashing, oxygen transport, turbidity removal and continuous head loss. The Filter removes COD, ammonia, and suspended solids (SS), the major pollutants in aquaculture wastewater. The total volume of the DynaSand Filter is 70 L, while the working volume is 35 L per cycle. The removal efficiency of the advanced DynaSand Filter is 71 % for SS (as against 55 % for the conventional filter), 84 % for ammonia, 85 % for T-P, and 88 % for SRP.

Key words: Aquaculture, Recirculation, DynaSand Filter, SS

서 론

현재까지 우리나라에서 널리 이용되고 있는 어류의 양식방식은 유수식 양식이나 가두리 양식과 같은 개방적 양식 시스템으로서 한번 사용된 용수가 수계로 방출되기 때문에 지속적인 용수공급 문제와 수질오염을 야기시키고 있다. 따라서 최근 양어용수를 재이용하는 순환여과식 양식시스템이 국내외에서 활발하게 연구되고 있다(김 1980; Rogers and Klemetson, 1985; Jewell and Cummings, 1990; Nijhof and Bonverdeur, 1990; 조 1996; 이 등, 1999).

Losordo et al. (1994)은 1992년 미세 고형물 제거를 위

해 포말분리기, 포기과 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 여러 장치를 설치한 양식시스템을 개발하였다. 연구에 사용된 시스템은 고형물 제거를 위해 침전조, 스크린여과기(screen filter)와 입상매체여과기(granular media filter)를 사용하였으며 암모니아를 제거하는 질산화 반응기로 회전식생물여과기(rotating biological contactor, RBC)와 충전층 반응기, 유동층 반응기를 사용하였다. Losordo et al. (1993)은 Ebeling, DeLong 등과 연구를 계속하여 포말분리기(foam fractionator), 상향류식 구

*Corresponding author : jhpark@cb21.net

슬여과기 (up-flow bead filter), 회전식생물여과기만을 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, 생물학적처리장치로 BioSump biological filter를 사용한 순환여과식 양식 시스템을 개발하였다. Reyes and Lawson (1995)은 구슬여과기와 회전식생물여과기, 자외선 살균기를 결합한 순환여과식 양식 시스템을 연구·개발하였다.

순환여과식 양식장을 효율적으로 운영하기 위해서는 양식시 발생하는 오염물질을 효과적으로 제거함으로써 어류가 살아가기 적합한 환경을 제공하여야 한다. 대표적인 오염물질인 암모니아는 주로 어류의 대사 생성물 또는 잔류 사료로부터 생성된 것으로서 일정농도 이상 존재시 어류에 치명적인 피해를 주는 물질로 알려져 있기 때문에 사육조내의 비이온성 암모니아를 미국환경보호청에서는 0.02 mg/L 이하로 유지할 것을 권장하고 있다 (Rogers and Klemetson, 1985). 또한 사육조내의 용존유기물은 종속영양 미생물에 의해 분해되면서 물 속의 용존산소를 소모시키고 질산화를 방해한다.

부유성 고형물질은 어종이나 크기에 따라 영향이 틀리기는 하나 어류에 스트레스를 주어 질병을 유발시키고, 질병에 대한 저항력을 감소시키므로 (Muncy et al., 1979; EIFAC, 1965) 25 mg/L이하로 유지할 것을 권장하고 있다.

현재까지 양어용수의 재이용을 위하여 널리 적용되고 있는 공정은 생물여과 공정으로서 종속영양세균 (heterotrophic bacteria)과 독립영양세균 (autotrophic bacteria)이 여과상에 공존하면서 각각 유기물과 암모니아를 산화 제거시킨다 (Bovendeur et al., 1990). 그러나 생물여과 공정만으로는 난분해성 물질들을 효과적으로 제거할 수 없으며, 종속영양세균에 의한 유기물 산화속도가 독립영양세균에 의한 암모니아 및 아질산의 산화속도보다 상대적으로 빠르기 때문에 질산화가 효과적으로 진행되지 못하여 재이용을 위한 수질을 충분히 만족시키지 못하는 것으로 알려졌다 (Pallers et al., 1988).

따라서 양식장의 순환되는 사육수의 수질을 향상시켜 어류양식에 맞도록 유지하는 기술개발이 선행되어야 한다. 이때, 여과과정을 거친 처리수는 여과과정에 의한 부유성 고형물만 제거되어서는 안되며, 효과적이고 안전한 양식을 위해서는 부유성 고형물뿐만 아니라 병원성 미생물의

제거를 위하여 상향류식 연속역세여과 (DynaSand)에 의한 수처리 연구가 진행중이다 (이, 1999).

일부 선진국에서는 여과지를 다양하게 활용하는 측면에서 여재의 특성을 변화시켜 영양염류 및 바이러스 등을 제거하기 위한 연구가 수행되고 있는 실정이다. 이는 1차 처리수의 여과로도 이용되며, 생물학적 처리 후 영양염류 제거에도 이용되고 있다. 미국 Parkson사에서 개발한 연속여과장치인 DynaSand는 고형물제거 여과기로 사용되며 (Suzin et al., 1994) 여재의 특성을 변화시켜 질소 및 인과 같은 영양염류를 제거하기 위해 적용한 사례도 보고되고 있다 (Hultman, 1994; Juan 1996; Koopman et al., 1990). 또한 정수 및 2차 처리수의 고도처리에도 이용되고 있으며 (Anderson et al., 1990; Weinschrott, 1986) 제련 공장 폐수의 여과에도 적용되고 있다 (Shimokubo, 1993; Suzan, 1994).

본 연구에서는 순환여과식 양식시스템 내의 여과공정의 효율을 향상시키기 위하여 기존의 연속역세여과장치와 본 연구에서 개량된 연속역세여과장치간의 처리효율을 비교하였고, 또한 개량된 연속역세여과장치의 유기물 및 고형성분의 제거효율을 검토하여 연속역세여과장치의 최적처리공정과 운전조건을 도출하는 것을 목적으로 하였다.

재료 및 방법

본 연구에서는 두 부분으로 나누어 실험을 수행하였는데, 1차 실험에서는 기존의 연속역세여과장치 (기존형 여과장치)와 개량된 연속역세여과장치 (개량형 여과장치)간의 처리효율을 비교하였고, 2차 실험에서는 개량형 여과장치의 효율을 검토하였다. 1차 실험에 이용된 기존형 수처리의 기본 공정은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 여과사의 충전 부분과 여과 처리수의 인출 및 역세 후 여과사 분리조로 구성되어 있다. (A)부분이 여과 처리수 및 역세수의 인출부이고, (B)부분이 여과사 충전부분으로 실질적으로 여과가 일어나는 구간이다. 이에 대한 내부에서의 유동은 설계도면에서 보는 바와 같이 이루어진다. 여과사는 내부에 위치한 관을 통해 air lift와 같은 기작에 의해 (A)부분으로 올라간 후 세척된 여과사는 아래 (B)부분에 충전되며, 탈리된 고형물질은 (A)상부에서 weir를 통해 인출된다. 이때 고형물과 여과사의 탈리는 내부에 위치한 관내부에서 이루어진다. 반면, 유입수는 (B)부분 하단에서 상

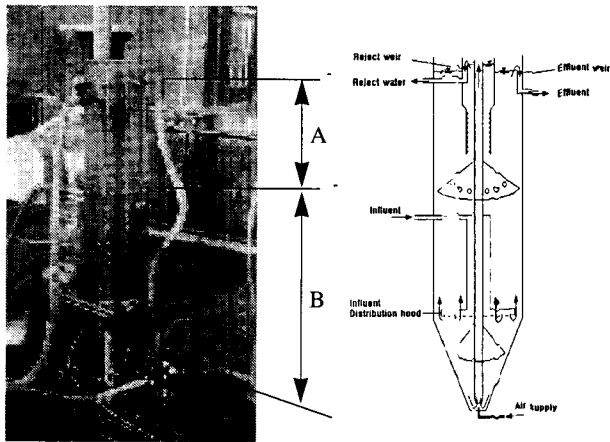


Fig. 1. Schematic diagram of conventional DynaSand Filter.

향류로 이동하며, 포함된 고형물은 하향하는 여과사에 의해 여과되고 여과된 유입 처리수는 (A)부분 상단에서 weir를 통해 유출된다.

그런데 기존형 여과장치의 경우, 역세수의 양이 너무 많고 여과사와 부착된 고형물간의 탈리가 잘 이루어지지 않는 단점을 지니고 있다. 따라서, 본 연구에서는 기존형 여과장치 (Fig. 1)가 갖고 있는 단점을 보완하여 개량형 여과장치를 개발하였는데 (Fig. 2), 설계 도면을 통해 보완된 기능들을 보여주고 있다.

개량형 여과장치가 갖는 기본적인 기능 중 고형물 제거는 여과사를 통해 여과되는 기작은 앞에서 설명한 기존의 여과장치와 같으나, 물리적인 추가 기능으로 hydrocyclone 원리를 응용한 장치를 여과사의 토출구에 장착하여 여과사와 결합되어 있는 고형물의 분리를 증진시키는 기능을 추가하였고, 여과장치의 상부(A)에는 침전조에 경사판을 부착하여 탈리된 고형물의 침전을 유도하는 기능을 추가하였다. 이러한 장치들의 추가는 역세수를 적게 유출시킬 수 있으며, 수두손실을 측정할 수 있는 기능을 추가하여 유입 고형물의 부하량을 점검할 수 있게끔 개량되었다.

본 실험에 이용된 시료는 2가지 종류로서 시료 A는 어류의 사료를 증류수에 24시간 용해시켜 Whattman No. 1으로 여과시킨 후 증류수와 일정비율로 혼합한 뒤 NH_4Cl 을 주입하여 제조한 암모니아/유기물 혼합시료이고, 시료

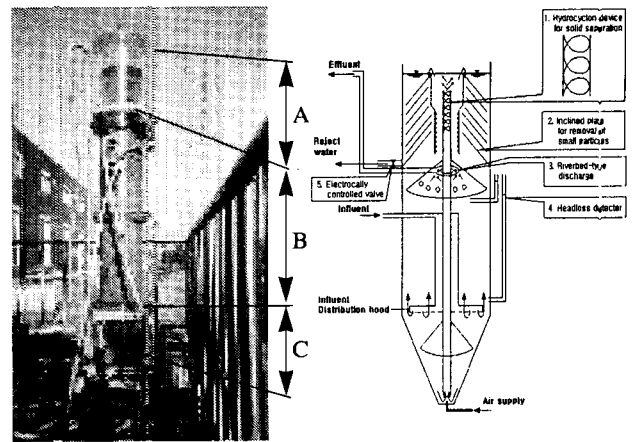


Fig. 2. Schematic diagram of advanced DynaSand Filter and design plot.

B는 실제로 어류를 사육하고 있는 양어장에서부터 채취한 배출수이다.

여과장치의 유입수로 이용된 첫 번째 시료와 두 번째 시료의 성상은 Table 1과 같다. 기존형 여과장치에 사용된 유입수는 Table 1에서 볼 수 있듯이 고형물의 평균농도는 5.3 mg/L 이었으며, 두 번째 시료에서의 고형물 농도는 2.4 mg/L 이었고 유기물의 농도 (COD_{Cr})는 17.2 mg/L 이었다. 질소중 TKN (organic & ammonia)의 농도는 1 mg/L 이하이었으며 nitrite 및 nitrate농도는 10.2 mg/L 이었고 T-P 및 SRP의 농도는 각각 2.6 및 2.4 mg/L 이었다.

실험에서 사용한 여과장치의 크기는 전체 용적이 약 70 L 이고 working volume은 전체 용적의 50%이었다. 주입한 공기의 양은 5 L/min 로 운전하였으며, 유입유량은 3 L/min 이었다. 재질은 아크릴 컬럼으로 여과를 위한 여재로는 완속여과에 이용되는 모래를 산세척 과정 없이 그대로 충전시켜 이용하였다. 연속 역세를 위한 공기주입장치는 1마력의 콤프레셔와 연결시켜 주입하였다. 또한 공기주입장치는 유량 조절이 가능하여 여재의 재생주기(turn over) 조절이 용이하도록 하였다. 실험시 공기주입속도는 $7.2 \text{ m}^3/\text{day}$ 으로 조정하였다. 연속역세여과장치의 운영시 역세 유량은 역세 밸브를 조정하여 유량을 조절할 수 있게 제작하였으며, 본 실험시 역세 유량은 유입 유량의 10%

Table 1. Characteristics of wastewater (unit : mg/L)

Item		COD_{Cr}	COD_{Mn}	BOD_5	SS	TKN	NH_4^+-N	NO_x	T-P	Ortho-P
Wastewater	A	15.7	-	-	5.3	4.3	-	17.4	2.3	-
	B	17.2	8.2	4.4	2.4	< 1	< 1	10.2	2.6	2.4

로 유지시켜 운영하였다. 역세된 배출수는 생물학적 처리 공정으로 다시 반송하였다. 또한 미세입자의 제거를 증진시키기 위해 유입수의 유입시 alum을 0.3~0.5 g/gTSS로 첨가하여 운영하였으며, 분석을 위한 검수는 반응기로부터 직접 300 ml 유리병에 채취하여 냉장보관 후 분석하였다. 암모니아 농도는 네슬러법 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ Distillation Method 4500-N-C, HACH(USA) HP/8453 Spectrophotometer)으로 분석하였고 일정한 시간 간격으로 유입수 및 유출수의 COD, BOD, SS, TN, TP 및 SRP의 분석을 행하여 연속역세여과장치의 처리효율을 검토하였으며, 모든 수질분석은 Standard Methods (APHA, 1989)에 따랐다.

결과 및 고찰

1차 실험 결과

본 연구에서 사용된 연속역세여과장치에서 역세속도를 결정하기 위하여 주입한 공기량에 따른 여재의 순환 속도는 Fig. 3과 같다. 유입 고형물의 부하량에 따른 역세 주기를 자동으로 바꿀 수 있도록 하거나 여과사내 수두손실 감지 장치를 설치하여 유입수 중의 고형물질이 많은 경우 여과사의 역세 주기를 짧게 유지하기 위하여 공기 주입량에 따른 여과사의 순환율을 살펴보았다. 공기 주입량이

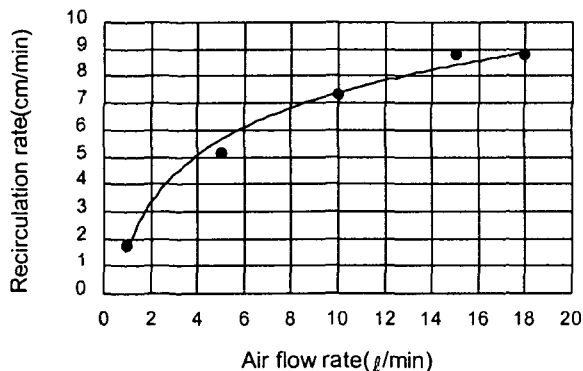


Fig. 3. Relationship between filter recirculation rate and air flow rate ($R^2 = 0.991$).

증가함에 따라 여재 순환율이 증가하는 것을 볼 수 있으며 공기 주입량 5 L/min에서 여재 순환율은 5.0 cm/min이었다. 공기 주입량과 여재의 순환율은 좋은 상관관계를 가지는 것으로 나타났으며 유입되는 고형물의 부하량에 안정적으로 여재를 순환시킬 수 있는 것으로 나타났다.

개량형 여과장치와 기존형 여과장치에 유입되는 고형물 농도와 제거효율은 Fig. 4 및 Table 2와 같다. 유입수의 평균 고형물 농도는 5.8 mg/L이었으며, 처리수의 고형물 평균 농도는 1.8~2.6 mg/L이었다. 이는 허 등 (1995)이 육상수조식 넙치양식장 배출수에서 보고한 결과와 비슷한 값을 보이는 것이다. 그리고 역세수내의 고형물 평균 농도는 개량형이 50.1 mg/L, 기존형이 35.2 mg/L였으며

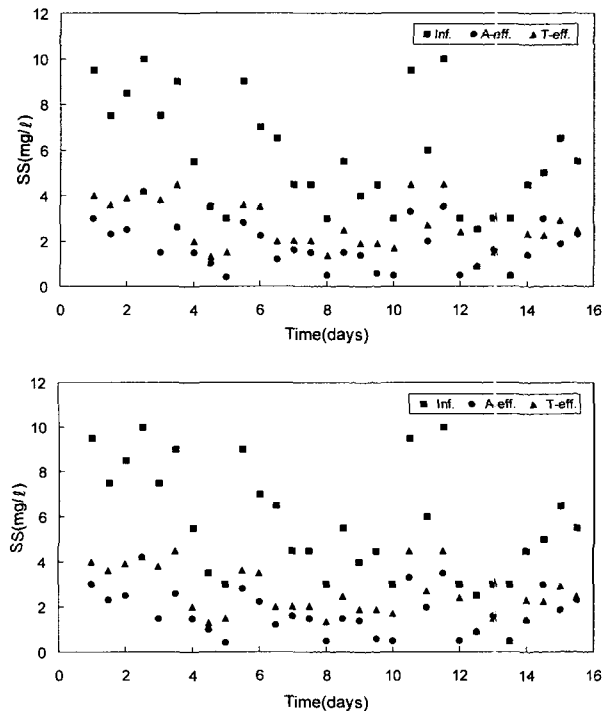


Fig. 4. Temporal variations in SS concentration in advanced and conventional DynaSand filter. (Inf.: influent, A-eff.: Advanced DynaSand effluent, T-eff.: Conventional DynaSand effluent; A-bac: Advanced DynaSand backwash, T-bac: conventional DynaSand backwash)

Table 2. Results of advanced and conventional DynaSand filter

Item	Suspended solid (SS, mg/L)						
	Influent	Advanced DynaSand filter			Conventional DynaSand filter		
		Effluent	Back wash	Removal efficiency (%)	Effluent	Back wash	Removal efficiency (%)
Range	3~10	0.4~3.3	24~79	58~83	0.5~4.5	18~51	43~69
Mean	5.8	1.8	50.1	70.1	2.6	35.2	54.8

이때 사용된 역세수량은 개량형이 유입수의 10%, 기존형이 30%로 개량형 여과장치의 경우가 20% 정도 적었다. 제거효율은 개량형 여과장치에서 70.1%인 반면 기존형 여과장치에서는 54.8%로 개량형이 다소 높게 나타났다. 개량형 여과장치에서 역세척시 높은 농도를 보이는 것은 역세수의 인출을 간헐적, 주기적으로 할 수 있기 때문이었다. 또한, 제거효율면에서도 복류수의 형태로 여과사의 충전부 상부에서 인출하기 때문에 더 효과적이었다. 금번 실험에서 사용된 유입수는 고형물의 농도가 매우 낮기 때문에 제거효율에서 커다란 차이를 보이지 않았지만, 유입 고형물 농도가 높을 경우 개량형 여과장치가 더 효과적일 것으로 생각된다.

2차 실험 결과

유기물 및 SS의 제거

개량형 여과장치를 이용한 고형물의 제거효율을 실험한 결과는 Fig. 5와 같다. 약 200일 이상 운영한 결과 운영 초기 유입수의 고형물 농도가 일정하지 못하여 농도변화가 크게 관찰되었다. 여과장치의 운영이 약 130일 이상에서는 여과장치로 유입되는 시료의 고형물 농도가 안정됨에 따라 유출수의 수질도 매우 안정적이었다. 안정적으로 운영된 기간의 유입수내 고형물 농도는 평균 4.1 mg/L이었고 유출수의 농도는 2.5 mg/L로 약 40%의 제거효율이 관찰되었다.

Fig. 6과 7은 개량형 여과장치의 유입수와 유출수의 COD 및 BOD₅의 농도를 나타내고 있다. 여과장치의 운영이 안정적으로 이루어진 기간 동안 COD_{Cr}의 농도는 평균 17.2 mg/L로 유입되어 11.5 mg/L로 유출됨으로서 제

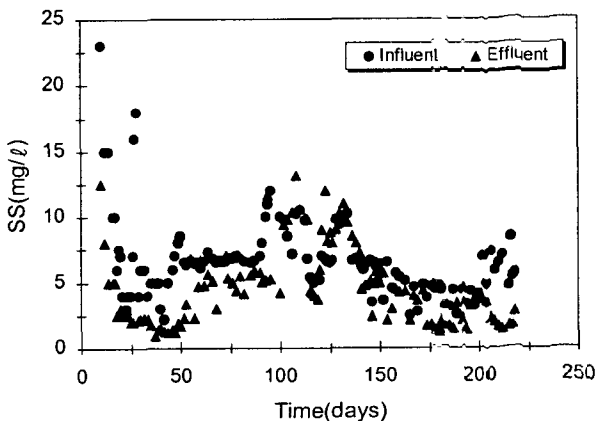


Fig. 5. Temporal variations in influent and effluent SS in advanced DynaSand filter.

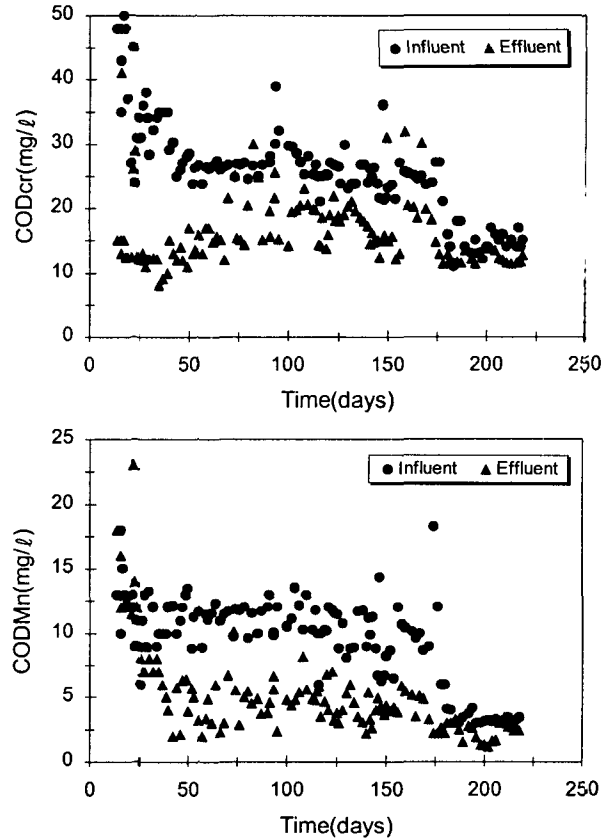


Fig. 6. Temporal variations in influent and effluent COD_{Cr} (upper panel) and COD_{Mn} (lower panel) advanced DynaSand filter.

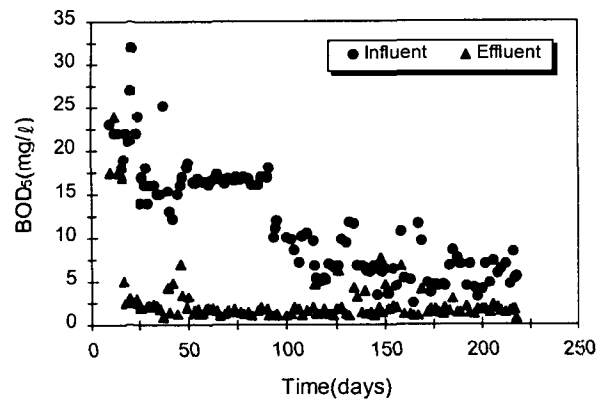


Fig. 7. Temporal variations in influent and effluent BOD₅ in advanced DynaSand filter.

거효율은 약 34%이었다. 또한, COD_{Mn}의 경우 약 8.2 mg/L로 유입되어 6.4 mg/L로 유출됨이 관찰되었다. 또 BOD₅의 농도는 평균 4.4 mg/L로 유입되어 1.1 mg/L로 유출되어 제거효율은 약 70 %를 나타내었다. 이는 유입수의 SS가 4.1 mg/L로 매우 낮고 본 연구의 시료와 같이 미

세 입자가 많이 존재한 경우를 고려할 때 매우 높은 제거 효율로 판단된다. 특히 이번에 개량된 연속역세여과장치는 연속적으로 여재가 재생됨에 따라 여재의 교체가 필요 없었으며, 또한 현장에서 공기 주입에 의한 연속역세가 가능함을 확인할 수 있었다.

질소 및 인의 제거

개량형 여과장치를 이용하여 여과의 최종 공정으로 질소 및 인과 같은 영양염류도 효율적으로 제거하는지 실험하였다. 본 여과장치에서 제거할 수 있는 영양염류는 고형성분에 포함된 질소(유기성 질소) 및 인이다. 그러나 본 실험에서 사용된 시료에는 입자상태의 질소 및 인은 매우 낮은 농도로 존재하고, 질소의 경우는 대부분 질산의 형태로 존재하였다. 유입수 및 유출수의 암모니아 및 질산의 농도는 Fig. 8에 나타낸 바와 같다. 개량형 여과장치를 약 75일 정도 운영하면서 시스템이 안정됨에 따라 일정한 농도의 유출수를 얻을 수 있었다. 즉 유입수 11.8 mg

$\text{NH}_4^+\text{-N/L}$ 가 1.9 mg $\text{NH}_4^+\text{-N/L}$ 로 유출되어 암모니아 제거율은 84%로 나타났다. 이는 조 등(1993)의 실험 결과와 비교할 때 공법은 다르지만 비교적 유사한 수치를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 T-P 및 SRP의 농도를 나타내고 있다. 유입수 중 T-P 및 SRP의 농도는 각각 2.6 mg/L 및 2.4 mg/L로 인의 성분 대부분이 용존성 물질로 존재하였다. 따라서 본 실험에서는 SRP를 제거하기 위하여 유입수가 유입되는 부분에 alum을 첨가하였다. 이때 주입한 alum의 양은 0.5 g alum/gTSS를 기준으로 하였다. 교반은 별도로 행하지 않았으며, 유입수의 관형 혼합이 이루어지도록 유입관에 주입하였다. 여과후 T-P 및 SRP의 농도는 각각 0.4 및 0.3 mg/L로 유출되었다. 제거효율은 각각 85% 및 88%의 제거효율이 관찰되었다. 이는 응집제인 alum이 관형흐름에 첨가되어 응집물을 형성하여 여재 통과시 제거가 이루어진 것으로 판단된다. 따라서 현장 plant에서 여과시 응집제 투입에 따라 인의 제거는 가능하며 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

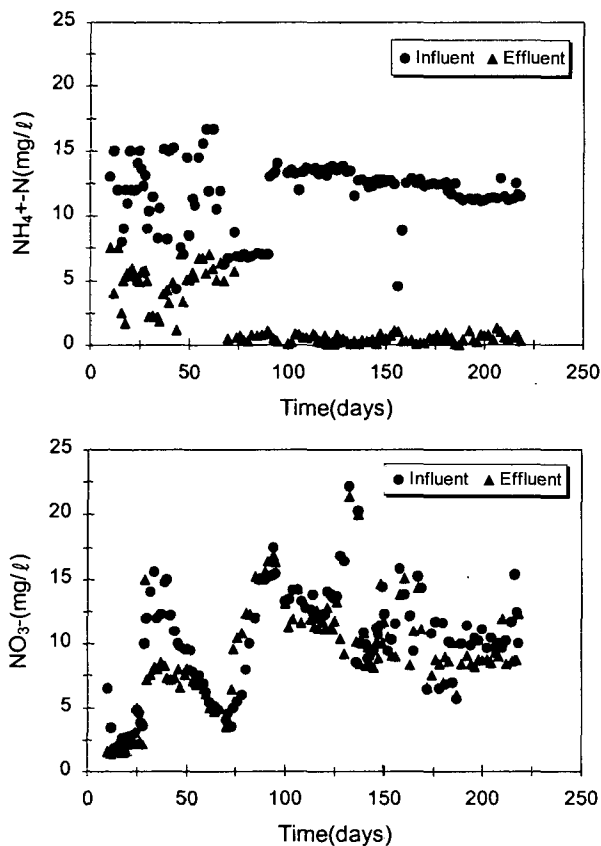


Fig. 8. Temporal variations in ammonia (upper panel) and nitrate (lower panel) in the influent and effluent of an advanced DynaSand filter.

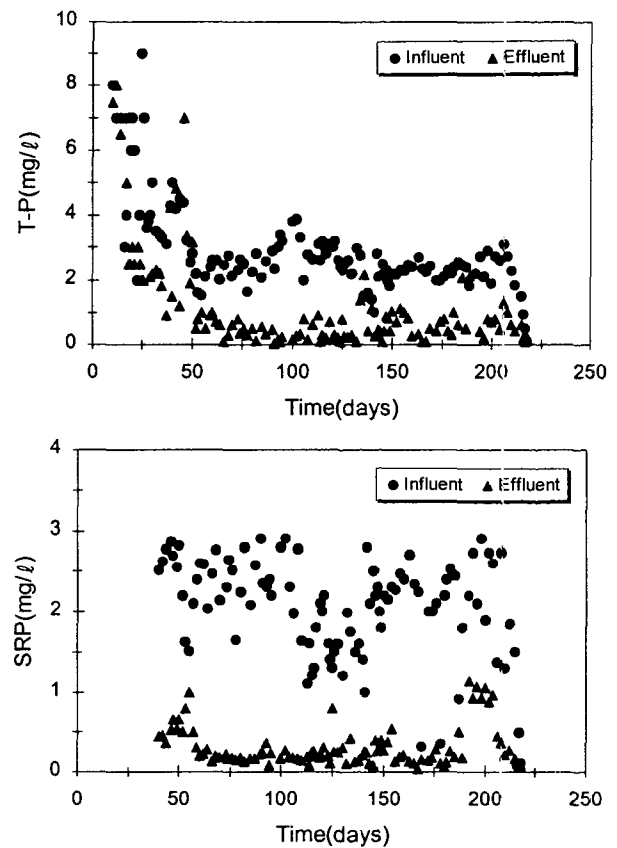


Fig. 9. Temporal variations in influent and effluent T-P (upper panel) and SRP (lower panel) in an advanced DynaSand filter.

요 약

양어용수 재순환을 위한 생물여과상의 처리효율을 향상시키기 위하여 상향류식 연속역세여과장치를 이용하여 다양한 조건하에서 실험하였는데, 기존의 연속역세여과장치와 이를 개량한 연속역세여과장치를 가지고 실험하였다. 개량역세여과장치는 기존에 이용되고 있는 DynaSand 여과장치를 유체역학 및 물리·화학적 개념을 응용한 장치로 개조하여 역세기능의 향상, 산소전달 능력의 향상, 여과 처리수 인출부의 개량에 의한 처리수 탁도제거 기능 향상 및 연속적인 수두손실 감지에 의해 폐수성상에 따른 여과장치운전의 자동화를 도모하는데 중점을 두었고, 또한 여과사의 표면을 특정물질로 코팅함으로써 여과사 표면 전하를 변화시켜 여과능력의 향상과 생물막 형성력의 증대를 꾀하는데 실험의 목적을 두었다. 본 실험에서 사용한 여과장치의 크기는 전체 용적이 약 70 L이고 working volume은 35 L이었다.

이번 연구에서 양어장사육용수 처리를 위해 조사된 개량형 상향류식 연속역세여과장치의 효율은 부유물 제거 효율이 평균 71% 이었고, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, T-P 및 SRP의 제거효율은 84%, 85% 및 88%로 각각 나타나서 그 효과가 인정되었다.

감사의 글

본 연구의 일부는 충청북도 진천관상어 명품화연구비의 지원에 의해 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다. 아울러 본 논문을 면밀히 심사, 지적, 수정하여 주신 한국양식학회 심사위원님들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- EIFAC (European Inland Fisheries Advisory Committee), 1965. Waste quality criteria for European freshwater fish: Report on finely divided solids and inland fisheries. EIFAC, Working party on water quality for European freshwater fish. EIFAC Technical Paper 1: 1-21.
- Jewell, W. J. and R. J. Cummings, 1990. Expanded bed treatment of complete recycle aquaculture system. Wat. Sci. Tech. 22 (1/2): 443-450.
- Nijhof, M. and J. Bonverdeur, 1990. Fixed film nitrification characteristics in sea-water recirculating fish culture system. J. Aquacult., 87: 831-849.
- 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. Natl. Res. Inst. Aquaculture, Suppl. 1: 27-36.
- Muncy, R. J., 1979. Effects of suspended solid and sediment on reproduction and early life of warm-water fishes: a review. EPA-600/3-79-042, National Technical Information Service, Springfield, Virginia. 101: 460-468.
- Pallers, M. H. and W. M., Lewis, 1988. Use of ozone and fluidized-bed biofilter for increased ammonia removal and fish loading rate. The Progressive Fish-Culturist, 50: 141-147.
- Reyes, A.A.D., and T. B. Lawson, 1995. Combination of a bead filter and rotating biological contactor in a recirculating fish culture system. Aquacult. Eng., 15 (1): 27-39.
- Rogers, G. L. and S.L. Klemetson, 1985. Ammonia removal in selected aquaculture water reuse bio-filters. Aquacult. Eng., 4: 135-154.
- 김인배, 1980. 순환여과식사육수 정화 재사용 방법에 의한 pilot 규모의 어류양식시험. 한수지. 13 (4): 187-194.
- 이병현·김현철·김정숙·최 혁, 1999. 삼상유동층 공법을 이용한 양어장 순환수처리. 1999년도 춘계 수산관련학회 공동학술대회 발표요지집, pp. 359-360.
- 조영개·이재관·이현모·양병수, 1993. 순환여과식 해산 어류 양식장의 수처리 공정 최적화 연구. 한국양식학회지. 6 (4): 311-321.
- 조재윤, 1996. 양식공학, 부경대학교출판부. pp. 25-35.
- 허목·강봉래, 1995. 생물막 여과법에 의한 육상 수조식 양식장 배출수의 처리 (II). 대한환경공학회지. 17 (10): 963-972.

(접수: 2001년 10월 29일, 수리: 2002년 2월 26일)