

유연성 섬유사 여과기를 이용한 순환여과식 양식장의 부유고형물 제거

최광수

경상대학교 해양환경공학과/해양산업연구소

Removal of Suspended Solids Using a Flexible Fiber Filter in a Recirculating Aquaculture System

Kwang Soo CHOI

Department of Marine Environmental Engineering/Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

The suitability of a flexible fiber filter for removing suspended solid (SS) in a recirculating aquaculture system was evaluated. This study focused on variation in the performance with a change in filtering time, influent water quality, and filtering mode duration. The particle distribution diagram of the filter effluent showed that the number of particles bigger than 5-8 μm decreased dramatically, and the removal efficiency exceeded 80%. Although the removal efficiencies of SS and chemical oxygen demand (COD) were dependent on the quality of the influent, the SS and COD concentrations of the effluent were not affected by the influent concentrations. This was despite the deterioration of water quality after feeding in the rearing tank. The performance of the filter was not affected by the filtering mode duration, feeding conditions, or filtering time. The SS concentration and turbidity of the recirculating-type rearing tank were 30% and 50% lower, respectively, than of the a non-recirculating-type rearing tank under the same operating conditions. The flexible fiber filter was applicable to a recirculating aquaculture system that uses plenty of seawater, based on its low filtering resistance ($2 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$), high flux ($330 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{hr}$), and high fine particle removal efficiency (80%, 5-8 μm).

Key Words: Recirculating aquaculture system, flexible fiber filter, Backwash, Particle distribution, Suspended solids

서 론

순환여과식 양식장에서 발생하는 오염물은 미접취 사료와 대사작용 중 소화하지 못한 영양분, 어분, 뇨 등으로서 이를 지속적으로 제거하지 못할 경우 시스템 내에 축적되어 어류의 생장에 지장을 초래함은 물론 대량 폐사를 유발하기도 한다 (Simon and Bergheim, 2000). 이중 고형성분은 미생물에 의해 분해됨에 따라 어류의 성장에 유해한 NH_4^+-N , NO_2^--N 를 생성할 뿐만 아니라 용존산소를 소모하게 되어 어류에 악영향을 미치게 된다 (Suh et al., 1997). 또한 어체의 아가미를 손상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 질병에 대한 저항력을 약화시킬 수 있기 때문에 어류의 생산력에 직접적인 영향을 끼칠 수 있다 (Alabaster and Lloyd, 1982).

이러한 유기성 고형물질을 제거하기 위한 순환수 처리 공법으로 활성슬러지공법, 살수여상공법, 침지여상공법, 회전원판공법, 수경법 및 유동층공법 등이 이용되어 왔다. Clarke and Wilson (1983)은 저렴한 유지관리비용으로 30 μm 이하의 미세 입자들을 제거할 수 있는 포말분리법을 개발하였고 Losordo et al. (1994)은 포말분리기와 하향류 접촉조, 산기조 합한 다양한 형태의 순환여과 시스템을 개발하였다. 또한 석층전층 접촉기, 상향류 bead filter, 회전원판 접촉기 등을

Delos and Lawson (1995)은 bead filter와 RBC, 자외선 살균기를 결합한 순환여과식 양식시스템을 개발하기도 하였다.

본 연구에서는 $2 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 이하의 낮은 여과저항과 $330 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{hr}$ 의 높은 여과속도로 5 μm 이하의 입자들을 제거할 수 있는 상향류식 다층여과장치인 유연성 섬유사 필터 모듈(flexible fiber filter module)을 이용하여 육상 수조식 양식장의 순환여과 시스템을 구성하였다. 유연성 섬유사 여과기는 그동안 지표수 처리를 통한 음용수 생산과 하폐수 처리장의 고도처리 등에 적용되어 타당성이 확인된 바 있다 (Lee et al., 2006; Im et al., 2006). 비록 어류 성장에 치명적인 비이온성 암모니아를 제거할 수는 없지만, 하루에 7-8회 해수를 순환시키는 넙치 양식장과 같이 처리수량이 매우 큰 양식장에서 유기성 고형물을 효과적으로 제거할 수 있는 장치로서 적용 가능성은 매우 높다.

본 연구는 유연성 섬유사 필터를 이용한 순환여과 시스템의 기본적인 운전특성을 파악하고, 여과시간과 급이조건, 여과모드 지속시간 등에 따른 여과수의 수질변화를 확인함으로써 시스템의 타당성을 평가하였다.

재료 및 방법

여과장치의 구성 및 운전조건

*Corresponding author: kschoi@gsnu.ac.kr

유연성 섬유사 필터는 (주)나노엔텍에서 제작한 3FM Filtration System을 이용하였으며, 구성은 Fig. 1과 같다. 여재로 사용한 유연성 섬유사의 한쪽 끝은 여과장치 하부의 '용 공기 분배구를 겸비한 여재 고정용 플랜지'의 여재 고정구에 고정하고, 다른 한쪽은 고정하지 않고 유연성이 유지되도록 한 상태로 여과장치의 관로 부재에 수직방향으로 충전되어 있다. 여과장치의 하부에 역세척용 공기 공급관, 좌측 하부에 원수 공급관과 역세척수 공급관, 여과장치 상부에 역세척수 배출관, 그리고 상부 우측에는 여과수 배출관이 설치되어 있다. 각 공급관 및 배출관에는 자동밸브가 부착되어 있다. 여과 및 역세 공정은 모두 control pannel과 PLC에 의해 제어, 조절되었다. 각 공정에서 공기 및 물의 흐름 방향은 공압식 유입/유출 전동밸브에 의해 조절되며, 역세 공정에서는 블로워와 역세 펌프를 이용하여 공기와 물을 공급하여 여과사내의 흡착 이물질을 탈리시키게 하였다.

여과기는 수직형으로서 상향류로 운전되며 높이 3,000 mm, 직경 400 mm, 무게 700 kg이고 여과유량은 최대 1,000 m³/day, 여과기내 flux는 7,600 m³/m²/day이었다. 여과기 내부의 유속은 최대유량 (1,000 m³/day) 기준 10.97 cm/s, 유입구 유속은 64.78 cm/s이었다. 여과기에 사용된 섬유사는 재질이 나일론으로서 유효직경 기준 공극율은 45%, 단사직경기준 공극율은 84%이었다. 충전밀도는 85.0 kg/m³이었으며 분리입경은 5 μm로 설계되었다 (Table 1).

여과모드 운전기간은 1 내지 2시간, 역세척 시간은 3분 10초, 역세척수 발생량은 여과수량의 1%로 설계·운전되었으며,

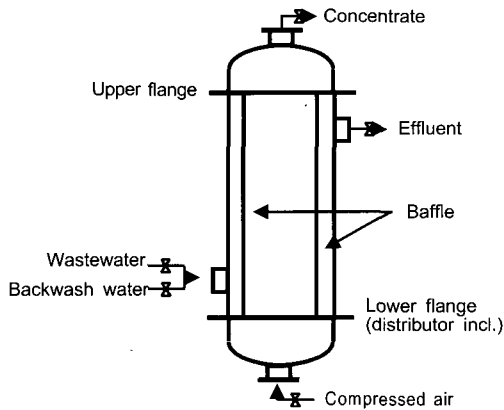


Fig. 1. Schematic diagram of a flexible fiber filter.

역세척은 공기와 물을 이용하여 번갈아 진행되었다. 공기와 물을 이용한 역세척은 각각 30초 동안 3회 반복되었으며 마지막 단계의 물 역세척은 40초간 진행되었다. 3회의 반복 역세척을 거친 다음 15초간의 대기시간을 둔 다음 다시 여과모드를 시작하도록 설계되었다.

육상 수조식 양식장의 순환여과시스템 구성

본 연구에서는 넙치를 사육하는 육상양식장에 유연성 섬유사 여과기를 이용한 순환여과시스템을 구성하였다. 사육조는 성어조의 경우 유효용적 77 m³이며 하루에 해수를 7-8회 순환 시킴으로써 일순환 유량은 조당 540-620 m³/day이다. 성어 사육조는 평균 무게 240-270 g, 길이 28 cm인 성어를 각각 6,000-7,000 마리씩 사육하고 있다. 치어조는 EP 사료 (합성사료)를 1일 4-6회 공급하고, 성어조는 MP 사료 (생사료)를 1일 1-2회 급이하였다.

유연성 섬유사 필터 모듈을 이용한 육상 수조식 양식 시스템에서는 유수식으로 운전되는 2기의 성어 사육조 유출수와 9기의 치어 사육조 유출수가 합쳐지는 지점에서 물을 펌핑하여 여과기에 주입하였으며, 여과수는 1기의 성어 사육조에 주입하여 순환조로 운전하였다. 유수조와 순환조는 어류 개체 수, 급이조건, 해수 유입량 등 모두 동일한 조건에서 운전되었다. 겨울철에 해수 수온이 7-8℃로 떨어지는 가운데 치어 사육조의 경우에는 14℃ 정도로 가온하여 해수를 공급하므로 그 유출수를 여과하여 순환사육조로 공급함으로써 순환사육조의 수온을 높일 수 있는 효과를 고려하였다.

실험 및 분석방법

유연성 섬유사 필터 모듈을 이용한 여과기의 고형물질 제거 성능을 확인하고 운전모드 진행 시간에 따른 여과특성을 평가하기 위하여 여과시작 후 5분, 10분, 30분, 1시간, 1시간 50분에 각각 시료를 채취하여 COD, TSS, VSS, 입도분포, 탁도를 분석하였다. COD는 알칼리성 KMnO₄법 (MOMAF, 1998), 총부유고형물 (TSS)과 휘발성 부유고형물 (VSS)은 진공 여과법으로 분석하였고, 입도 분포와 탁도는 각각 입도분석기 (Art Instruments, Inc., WQA 2000)과 탁도계 (HF Scientific, DRT-15CE)를 이용하여 측정하였다.

이때 순환 사육조로 유입되는 순환여과수와 해수의 혼합비율은 7:3으로 유지하였다. 그리고 사육조에 사료를 공급하는 시간에 따라 여과기 유입수의 수질이 큰 변화를 보이므로 이에 따른 여과특성을 조사하기 위하여 급이 전 5-10분, 급이

Table 1. Design values and operating conditions of a flexible fiber filter

Items	Values	Items	Values
Packing density	85 kg/m ³	Backwash flow rate	10 m ³ /day
Number of fiber	101,728	Flow rate	1,000 m ³ /day
Number of filament	68	Inlet velocity	64.78 cm/s
Inner diameter	400 mm	Average flux	330 m ³ /m ² /hr
Porosity (fiber dia.)	84%	Filtering duration time	2 hrs, 1 hr
Porosity (filament dia.)	45%	Backwash	3 min 10 sec
Distribution pore dia.	8 mm	Linear velocity of backwash air	223 m ³ /m ² /min
Distribution pore pitch	10 mm	Linear velocity of backwash water	3 m ³ /m ² /min

후 10-20분, 25-35분, 40분, 50분, 80분에 각각 시료를 채취하여 동일한 실험을 수행하였다. 이때 시료 채취가 모두 여과모드 진행 중에 이루어지도록 여과기의 운전시간을 조절하였다. 또한 유연성 섬유사 필터 모듈을 이용한 순환여과시스템의 성능을 확인하기 위하여 시스템의 전 지역에 걸쳐 시료를 채취하여 분석하였다. 해수, 여과기 유입수, 여과기 유출수, 순환 사육조 유출수, 유수 사육조 유출수, 치어조 유출수 등을 채취하여 비교하였다.

결과 및 고찰

여과 시간에 따른 순환수 여과 특성

유연성 섬유사 여과기 유출수의 입도분포를 분석한 결과 입경 5 μm 이상의 입자는 80% 이상의 높은 제거율을 보인 반면, 5 μm 이하의 입자들은 상대적으로 낮은 제거율을 보였다 (Fig. 2). 2-5 μm 의 입경을 제외하면, 여과시간대별 여과기 유출수의 입도 분포 특성은 큰 차이를 보이지 않았다. 이것은 유연성 유입수중의 입도 특성에 따라 제거효율은 달라지지만 유출수의 입도 특성은 유입수의 입도 구성에 의해 크게 좌우되지 않음을 보여주는 것이라 판단된다.

5회 반복된 실험에서 역세척 후 여과모드가 시작된 뒤 각각 5분, 10분, 30분, 1시간, 1시간 50분이 지난 후 유출수의 SS 평균농도를 살펴보면, 운전시간에 따라 큰 차이 없이 5.9-8.1 mg/L의 범위를 보였다. 또한 평균 SS 제거효율은 20.1-47.1% 범위에 있었으며, 여과기의 운전모드 지속시간에 따라 수질이 나빠지지는 않았다. 따라서 본 실험에서 설정한 여과시간 2시간 동안에는 입자 제거성능은 안정적으로 유지될 수 있다고 판단되었다 (Fig. 3).

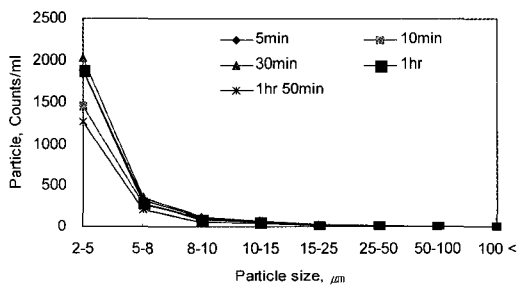


Fig. 2. Particle distributions in the effluent at each filtering time (filtering mode 2 hrs).

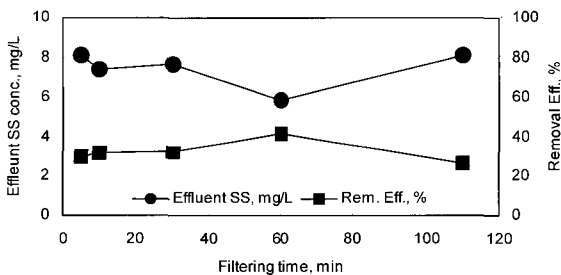


Fig. 3. Temporal variations of effluent SS concentration and removal efficiency.

COD의 제거 효율은 여과시간에 따라 크게 변화하였지만, 유출수의 COD 농도는 여과시간에 따라 크게 변화하지 않음으로써 순환여과식 양식시스템의 안정적인 수질관리에 적합한 특성을 보였다 (Fig. 4). 이것은 섬유사 여과기의 운전특성상 유입수의 농도에 상관없이 안정적인 유출수질을 확보할 수 있다는 것을 의미한다. 안정적인 유출수 COD 농도와 달리 COD 제거 효율이 크게 변동한 것은 유입수의 농도에 영향을 받기 때문인 것으로 보인다. 이것은 Table 2에서 보는 바와 같이, 유입수와 유출수의 COD 농도 사이의 상관관계가 매우 낮고 일관성도 없는 반면, COD 제거효율과 유입수 COD 농도 사이의 상관관계가 매우 높은 것을 통해서도 확인될 수 있다.

위의 결과를 토대로 유연성 섬유사 필터 모듈의 여과모드 운전시간에 따른 COD 제거 특성을 살펴보면, 평균 COD 제거 효율은 Table 3에서 보는 바와 같이 최저 38.7%, 최고 69.2%로 나타났으며, 유입수의 COD 농도가 1.6 mg/L에서 6.1 mg/L까지 변동하는 가운데에서도 유출수의 COD 농도가 1.2 mg/L 이하의 매우 양호한 결과를 보였다.

유입수질 변화에 따른 순환수 여과 특성

앞의 실험에서 여과기 운전 시간의 경과에 따른 입자 제거 특성의 변화가 크게 나타나지 않았기 때문에, 현장 적용 시 시간의 진행에 따른 여과성능의 변화는 무시할 수 있을 것으로 판단되었다. 이어서 유입수질의 변화에 따른 여과기의 부유물질 제거특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 먼저 여과모드 운전시간을 2시간으로 설정하여 급이 5-10분전의 가장 깨끗한 상태의 수질과 급이 후 미섭취 사료가 일부 유출되는 10-20분 경과 시점, 그리고 미섭취 사료와 어류의 배설물이 가장 많이 배출되는 25-35분경의 수질, 40분과 50분, 마지막으로 중간정도의 수질을 보일 것으로 예측할 수 있는 급이

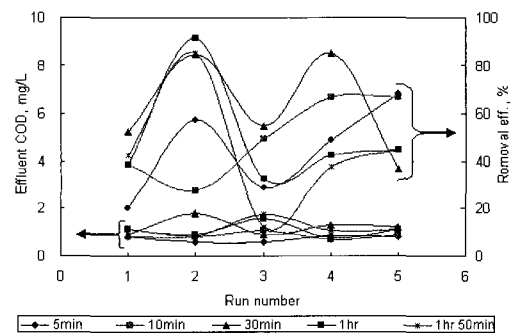


Fig. 4. COD removal efficiency and effluent COD concentration at each filtering time.

Table 2. Correlation coefficients between influent COD and effluent COD, and influent COD and removal efficiency at each filtering time

Time	5 min	10 min	30 min	1 hr	1 hr 50 min
Influent COD -effluent COD	0.51	0.16	0.89	-0.26	-0.35
Influent COD -removal efficiency	0.88	0.87	0.92	0.96	0.83

Table 3. COD concentrations and removal efficiencies at each run

Run number	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5
Influent COD (mg/L)	1.6	6.1	1.8	3.1	2.2
Effluent COD (mg/L)	0.9	1.0	1.2	0.9	1.0
Removal efficiency (%)	38.7	69.2	35.3	56.2	52.3

후 1시간 20분 경과 시점에서의 수질을 대표수질로 선정하여 반복실험을 수행하였다. 이때 섬유사 여과기의 유입수 수질을 다양하게 변화시키기 위하여 순환사육조로 유입되는 순환여과수와 해수의 혼합비율을 각각 7:3과 5:5로 변화시키고, 또한 여과모드 운전기간을 1시간으로 변경하여 동일한 실험을 수행하였다.

유입수의 SS 농도는 유출수의 입도분포에 영향을 주지 않았는데, Fig. 5에서 입자 크기가 2-5 μm 인 입자들의 개수와 유입수의 SS 농도의 상관관계를 확인하였을 때 명확하게 알 수 있다.

유입수 수질변화에 따른 유연성 섬유사 필터모듈 여과기의 부유물질 제거효율은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 8.5-79.7%의 범위를 보였으며, 유입수의 농도가 높아질수록 제거효율도 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다. 여과기의 용적당 부유물질 제거속도 (removal rate) 또한 유입수 농도가 높아질수록 높은 값을 보였으며, 저농도에서는 2 $\text{gSS}/\text{m}^3/\text{min}$ 안팎의 값을 보였지만, 35 mg/L 이상의 고농도에서는 평균 11 $\text{gSS}/\text{m}^3/\text{min}$ 의 높은 제거속도를 보였다. COD의 경우에도 유입수 농도가 증가할수록 제거효율과 제거속도 또한 증가하는 경향을 보였다. SS에 비해 COD의 제거효율은 큰 폭의 변화를 보였으며, 여과기 용적당 COD 제거속도는 0.04-1.5 $\text{gCOD}/\text{m}^3/\text{min}$ 의 범위에 있었다 (Fig. 7).

다양한 유입수질 조건 하에서 여과기 유입수의 VSS 함량과 유출수의 VSS 함량을 비교해보면, 유출수의 VSS 함량이 높은 것을 알 수 있다 (Fig. 8). 이것은 큰 입경의 부유고형물질이 제거되고 상대적으로 작은 입경의 고형물질이 남아있는 유출수의 휘발성부유고형물 함량이 높다는 것을 의미한다. 즉, 큰 입자에 비해 작은 입자의 경우 휘발성부유고형물 함량이 높다.

여러 연구자들에 의해 제시된 순환여과시스템 운전 자료와 본 연구의 결과를 비교하면, 유연성 섬유사 여과기를 이용한 순환여과시스템의 SS, COD 제거성능은 매우 양호한 것으로 나타났다 (Table 4). 특히 부유물질의 제거성능은 다른 공정에 비해 매우 탁월한 제거속도를 보여준다. 제거효율의 면에서는 EMMC와 자성분리시스템이 가장 우수한 성능을 보이고, 제거속도의 면에서는 RBC가 우수한 성능을 보인다. 그러나 부유물질과 유기물의 제거에 관한 종합적인 데이터의 부족으로 절대적인 성능 비교는 어려울 것으로 판단된다.

양식장 각 지점별 수질 변화

본 연구에서 실험한 순환여과양식 시스템의 전 지점에 걸쳐

수질을 분석하여 수질 항목별로 분포를 파악하고 각각의 제거 효율을 검토하였다. 조사지점은 순환식 사육조 유출수 (Recirculating tank), 유수식 사육조 유출수 (Flowing out tank), 치어조 유출수 (Fry rearing tank), 이들이 합쳐진 순환여과기 유입수 (Influent), 여과기 유출수 (Effluent), 해수 (Seawater)를 대상으로 하였다.

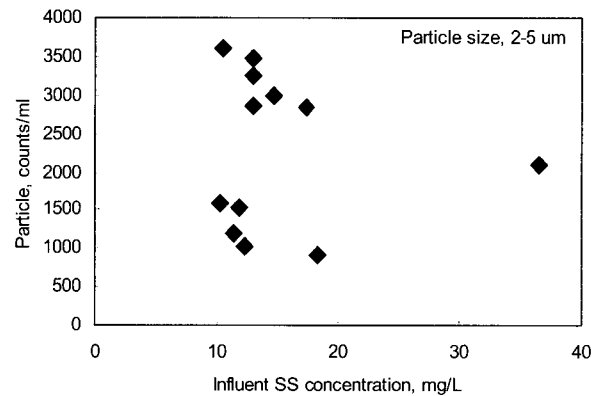


Fig. 5. Change of the particle distribution under various influent SS concentration.

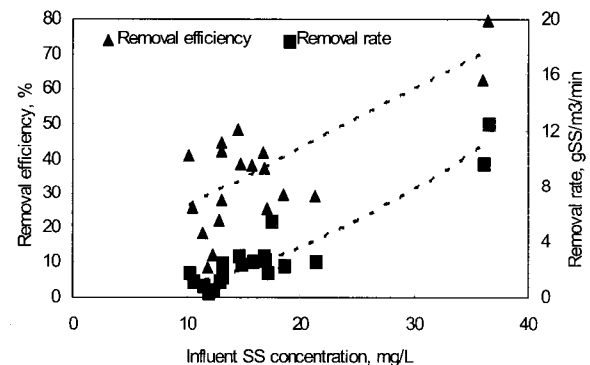


Fig. 6. The removal efficiencies and removal rates under various influent SS concentrations.

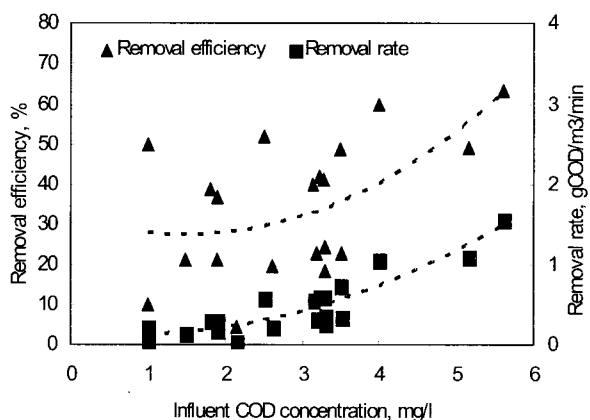


Fig. 7. The removal efficiencies and removal rates under various influent COD concentrations.

Table 4 SS and COD removal data from various processes that applied to recirculating aquaculture system

Processes	SS			COD		
	Conc., g/m ³	Rem. eff., %	Rem. rate, g/m ³ /d	Conc., g/m ³	Rem. eff., %	Rem. rate, g/m ³ /d
EMMC (Jung and Kim, 2004)	-	-	-	-	90-95	-
Floating Bead (Kim et al., 2003)	0.4-3.6	17.7-22	39.5-43.0	-	-	-
Foam Separator ¹⁾ (Suh et al, 2002b)	7-8	-	0.13-1	30-50	-	1.1-4.7
RBC (Suh et al, 2002a)	-	-	-	-	14.5-29.1	1700-4000
Magnetic Separation (Kim et al., 1999)	-	82-95	-	-	-	-
Flexible Fiber Filter (This research)	6-8	8.5-79.7	2,800-16,800 ²⁾	0.9-1.2	35.3-69.2	56-2,105 ²⁾

1) Data are based on the concentrations in the rearing tanks.

2) Data are based on the real operating time except backwashing time.

입도분포를 살펴보면 8 μm 이상에서는 전체적으로 입자 수가 급격하게 감소하였다. 치어조 유출수의 입자 수가 가장 높게 나타났고, 여과기 유출수가 가장 낮은 값을 보였다. 그리고 입도 분포에 따른 섬유사 여과기의 제거효율을 살펴보면, 8-10 μm 이상의 입경에서는 80% 이상의 제거효율을 보였다 (Fig. 9). 각 지점별 SS 농도 분포를 살펴보면, 치어조의 유출수

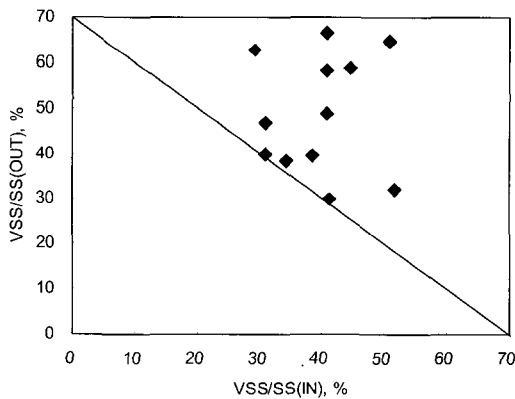


Fig. 8. Relationship between VSS contents in influent and effluent.

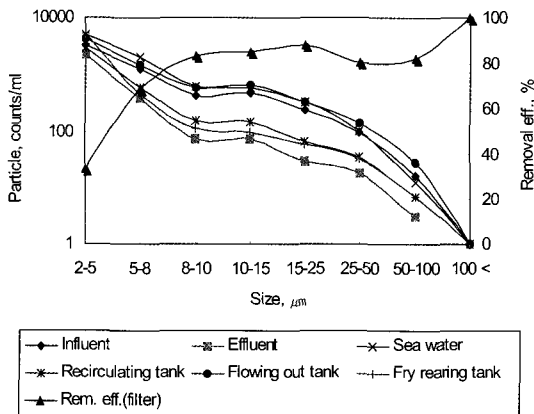


Fig. 9. Particle distributions at each sampling points and particle removal efficiencies.

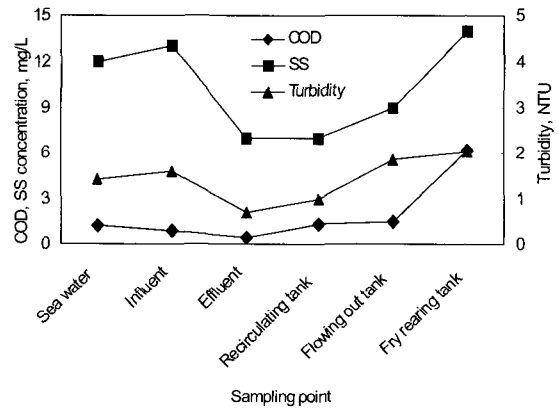


Fig. 10. The COD and SS concentrations and turbidities at each sampling point.

가 14.0 mg/L로 가장 높게 나타났으며, 유수조, 순환조가 각각 9.0 mg/L, 7.0 mg/L의 값을 보였다 (Fig. 10). 이들 세 가지 유출수가 합쳐진 여과기 유입수는 치어조의 영향을 크게 받아 13.0 mg/L로 나타났고, 유출수는 7.0 mg/L로 나타났다. COD 농도 분포를 보면 치어조가 6.2 mg/L로 다른 지점에 비해 매우 높게 나타났고 나머지 지점에서는 큰 차이 없이 비슷하게 나타났다. 각 지점별 탁도 분포를 살펴보면, SS 농도 분포와 매우 유사한 경향을 보여주어 SS 농도와 탁도의 상의성이 매우 높음을 알 수 있었다. 유입수의 탁도가 1.62 NTU, 여과유출수의 탁도가 0.7 NTU로서 56.8%의 탁도제거율을 보였다.

사 사

본 논문은 한국과학재단 지정 부산대학교 환경기술산업개발 연구센터의 지원 (과제번호 R12-1996-009008-0)과 경상대학교 해양산업연구소의 부분적인 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Alabaster, J.S. and R. Lloyd. 1982. Water Quality Criteria

- for Freshwater Fish. 2nd ed. Butterworth, London, pp. 361.
- Clarke, A.N. and D.J. Wilson. 1983. Foam Flotation Theory and Applications. Marcel Dekker, New York, 418pp.
- Delos Reyes, A.A. and T.B. Lawson. 1995. Combination of a bead filter and rotating biological contactor in a recirculating fish culture system. *Aquacult. Engineer.*, 15, 27-39.
- Im, J.H., H.K. Kim, J.J. Lee, T.S. Moon, M.K. Jeong, H.J. Woo and C.W. Kim. 2006. The effect of treatment performance of fiber filter under various packing-density and filtration velocity. *J. Kor. Soc. Env. Eng.*, 28, 216-222.
- Jung, B.G. and B.H. Kim. 2004. Feasibility study of applying EMMC process to recirculation water treatment system in high density seawater aquaculture farm through laboratory scale reactor operation. *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Engineer.*, 7, 116-121.
- Kim, B.J., S.K. Kim and K.H. Suh. 2003. Removal of suspended solids and nitrification by floating bead filter in recirculating quaculture system. *J. Kor. Fish. Soc.*, 36, 163-169.
- Kim, Y.H., R.M. Yeo, K.H. Suh, H.G. Kim, U.C. Chung and S.H. Kim. 1999. Removal of suspended solids in aquacultural recirculating water by magnetic fluid separation. *J. Kor. Fish. Soc.*, 32, 649-653.
- Lee, J. J., M. K. Jeong, J. H. Im, R. BenAim, S. H. Lee, J. E. Oh, H. J. Woo and C. W. Kim. 2006. Enhancing flexible fiber filter (3FM) performance using in-line coagulation. *Water Sci. Technol.*, 53, 59-66.
- Losordo, T.M., P. Westerman and S.K. Liehr. 1994. Water treatment and wastewater generation in intensive recirculating fish production systems. *Bull. Natl. Res. Inst. Aquacult., Suppl.*, 1, 27-36.
- MOMAF (Ministry of maritime affairs and fisheries). 1998. Marine environmental methods. Ministry of maritime affairs and fisheries, Seoul, 33-34.
- Simon, J.C. and A. Bergheim. 2000. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacult. Engineer.*, 22, 33-56.
- Suh, K.H., B.J. Kim, J.H. Lee, Y.H. Kim, S.H. Lee, S.K. Kim and J.Y. Jo. 2002a. Water treatment and oxygen transfer by rotating biological contactor in pilot-scale recirculating aquaculture system. *J. Kor. Fish. Soc.* 35, 469-475.
- Suh, K.H., B.J. Kim, Y.H. Kim and S.H. Lee. 2002b. Performance of parallel current air driven type foam separator in a pilot-scale recirculating aquaculture system. *J. Kor. Fish. Soc.*, 35, 140-145.
- Suh, K.H., M.G. Lee, M.S. Lee, B.J. Kim, E.J. Kim and M.C. Cho. 1997. Treatment of aquacultural recirculating water by foam separation - II. Characteristics of solid removal. *J. Kor. Fish. Soc.*, 30, 334-339

2007년 2월 14일 접수

2007년 4월 27일 수리