J. Korean Fish. Soc. 35(2), 140~145 한수지, 35(2), 140~145, 2002

Pilot-scale 순환여과식 양식장에서 병류 공기구동식 포말분리장치의 성능

서근학⁺ · 김병진 · 김용하 · 이석희 · 서차수 · 천재기 · 조재윤*
부경대학교 화학공학부, *부경대학교 양식학과

Performance of Parallel Current Air Driven Type Foam Separator in a Pilot-Scale Recirculating Aquaculture System

Kuen-Hack SUH⁺, Byong-Jin KIM, Yong-Ha KIM, Seok-Hee LEE
Cha-Soo SUH, Jae-Kee CHEON and Jea-Yoon JO*
Division of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
**Department of Aquaculture, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

The performances of a parallel current air driven type foam separator were evaluated in the pilot-scale recirculating aquaculture system. The system was stocked with Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) at an initial rearing densities of 2%, 5% and 7% of water volume of rearing tank and reared for 15, 30, 35 days, respectively. The condensated volume of effluent foam was increasing with increased rearing density. As increasing rearing density from 2% to 7%, the protein concentration in rearing tank was increased from 16.6 g/m³ to 21.9 g/m³ and the removal amount of protein through foam separator as increased from 0.99 g/day to 2.5 g/day. But protein concentration ratio in the foam was decreased from 3.2 to 1.9. Changes of the removal amount and the concentration ratios of total suspended solid (TSS) and chemical oxygen demand (COD_{Cr}) were similar to proteins. The highest concentration ratios of TSS and COD_{Cr} were 10.2 and 8.4 at 2% of rearing density.

Key words: Foam separator, Recirculating aquaculture system, Protein, Total suspended solid, Chemical oxygen demand, Concentrated ratio, Removal amount

서 론

최근 들어 식생활 문화의 변화에 따른 어류의 대량 소비 추세에 따라 어류를 고밀도로 사육할 수 있는 순환여과식 사육시스템의 연구개발이 활발하게 이루어지고 있다. 순환여과식 양식은 어류를 효과적으로 대량 생산할 수 있는 반면 어류의 배설물과 미섭취 사료 등에 의해서 암모니아, 아질산 및 유기질 고형 성분 등이 발생하여 사육중인 어류에 나쁜 영향을 야기하게 된다 (Wickins, 1990).

배설물과 미섭취 사료는 대부분 유기성 고형물로 어류의 아가미에 끼여 질병을 유발시키며 (Stickney, 1959; Wickins, 1980) 미생물에 의해 분해되면서 어류에 유해한 암모니아나 아질산으로 전환되어 어류에 유해하다. 그러므로 미생물에 의해 분해되기 전에 신속하고 효과적으로 제거하여야 한다.

최근 양어장 순환수 중의 부유 고형물이나 단백질성분의 처리 수단으로써 포말분리법이 이용되어지고 있다 (Chen, 1994; Weeks et al., 1992; Suh and Lee, 1995). 포말분리법은 입자상 물질이나 용존 물질을 상승하는 기포에 부착시켜 분리시키는 방법으로써, 포말분리 공정에서 제거되는 물질들은 대개가 계면 활성 물질들로 계면 활성 물질의 친수기가 액측으로 소수기가 기체측으로 배열되어 기·액 계면에 액 본체보다 높은 농도로 농축되는 성향을 가지고 있다 (Jenkins et al., 1972; Rubin, 1981). 양어장 순환수 중의 단백질성분은 소수기와 친수기를 모두 가지고 있어 기·액 계면에 잘 농축되므로 양어장 순환수의 경우 별도의 계면활성제를 첨가하지 않아도 효율적인 단백질의 제거가 가능하고 그와 더불어 주위의 계면활성이 없는 물질도 동반하여 제거시킬 수 있다.

포말분리 장치는 구조가 간단하고 운전이 용이하며 에너지 소비가 낮아 관리 및 유지비가 저렴하므로 양어장에 적용하기에 적합한 공정이다. 포말분리에 의해 제거되는 고체는 주로 직경이 30 μm 이하인 미세 입자들로서 포말분리법은 미세 입자들을 제거하는데 매우 효과적이며, 적은 비용으로 효율적인 운전을 할 수 있고 연속 운전이 가능하며 역세척이 필요 없다는 장점도 지니고 있다.

현재 개발되어 있는 포말분리장치는 공기의 공급방식과 유체과 공기의 접촉방향에 따라 여러 가지가 있다. 공기의 공급방식에 따라 공기구동식 (air driven type), 벤튜리식 (veturi type), 고속폭기식 (high speed aeration type) 등이 있으며 이중 공기구동식 포말분리기가 동력손실이 가장 적고 비교적 효율도 높다 (Suh et al., 2001). 공기펌프에 의해 발생된 공기를 공기분산기를 통해 액체 속으로 공급하는 air driven type의 경우 공기와 액체의 접촉방향에 따라 향류 접촉식 (counter current type)과 병류 접촉식 (parallel current type)이 있다.

향류 접촉식은 액체를 포말분리기 상부로 공급하여 하부로 배출시키고, 공기는 하부에서 발생시켜 기·액을 상향·하향으로 접촉시키는 방식으로 가장 광범위하게 사용되고 있는 형태이다 (Suh and Lee, 1995; Chen, 1991; Kim et al., 2001). 병류접촉식은 포말분리 장치를 수중에 설치하여 상승하는 공기에 의해 액체를

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

동반 상승시키는 방식으로 별도의 액송 펌프가 필요하지 않아 향류 접촉식에 비해 유지관리가 용이한 장점이 있어 양어장에 대한 적용가능성이 높다.

본 연구는 포말분리기의 실제 양어장에서의 양어장 순환수 처리 효율을 검토하기 위해 pilot-scale의 순환여과식 양어장에 병류 공기구동식 포말분리기를 설치하여 실제 어류를 사육하는 양어장에서의 단백질, 부유 고형물 및 화학적 산소 요구량의 농도 변화와 농축비 등에 대해 연구하였다.

재료 및 방법

Pilot-scale 순환여과식 양식 시스템

본 연구에 이용한 순환여과식 양식 시스템은 Suh et al. (2001)이 개발한 것으로 그 모식도는 Fig. 1과 같다. 시스템은 2.5 ton 규모의 사육조와 0.5 ton 규모의 침전조, 0.5 ton 규모의 저류조, 침전조에서 제거되지 못한 고형물 제거를 위한 0.05 ton 규모의 floating bead filter와 질산화 반응기인 수용적 0.45 ton 규모의 회전원판 반응기로 구성되었으며 전체 시스템의 총 수량은 4.5 ton 이었다.

순환수는 한 대의 펌프를 이용하여 순환시켰으며 포말분리기와 bead filter에 필요한 공기는 blower를 이용하여 공급하였다. 시스템에 수용한 어류는 열대성 담수어종인 틸라피아 중 국내 내수면의 주요 양식 대상 종인 나일 틸라피아 (*Oreochromis niloticus*)였다.

포말분리기

본 연구에 사용한 포말분리기는 직경 15 cm, 높이 90 cm의 플라스틱 원통관으로 제작되었으며 그 형태는 Fig. 2와 같다. 순환수의 유입과 유출은 별도의 액송펌프를 사용하지 않도록 포말분리기 하부의 공기분산기에서 공급되는 공기에 의해 포말분리기 하부의 순환수가 유입되어 상부의 출구로 배출되는 형태인 상향 병류식으로 제작하였다.

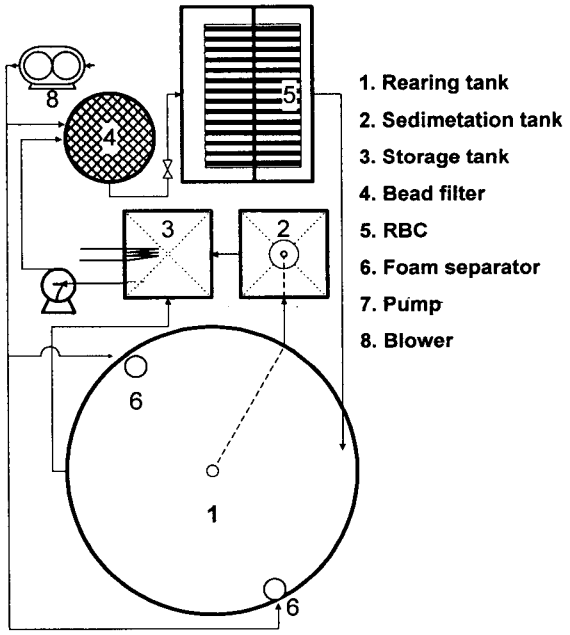

Fig. 1. Schematic diagram of a pilot scale recirculating aquaculture system used for this study.

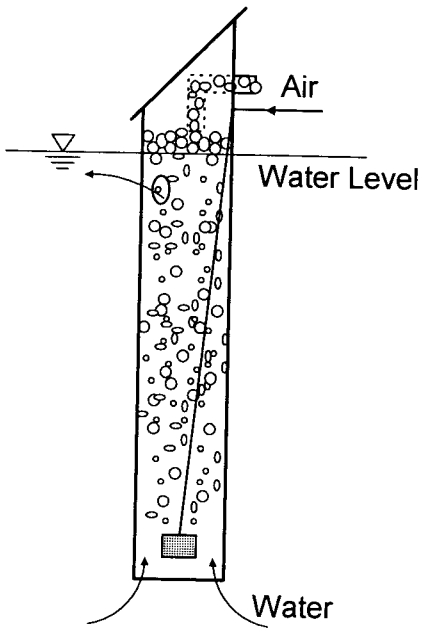

Fig. 2. Schematic diagram of foam separator used for this study.

포말분리기 상부에는 포말이 충분히 농축되어 배출될 수 있도록 액면 위로 4 cm의 공간을 두었으며 포말 배출관의 직경은 2 cm이었다. 공기의 공급은 blower를 사용하였고 공급 공기량은 3.0 L/min 이었으며 이는 공탑 공기속도로 0.28 cm/sec였다. 포말분리기는 동일한 두 개의 장치를 사육조 내부 벽면에 부착시켜 운전하였다.

어류사육 및 시스템 관리

Pilot plant의 운전은 매일 오전 9시에 첫 사료를 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 수질분석에 필요한 시료를 채취하였다. 보충수는 사육조의 약 10%에 해당하는 0.25 m^3의 물을 사용하였다. 이때 사용한 보충수는 부경대학교 부속 양어장의 순환수를 이용하였다. 사료공급은 어류 입식시 측정한 어체의 체중에 대하여 약 1%에 해당하는 사료를 1일 4~5시간 간격으로 3~4회에 걸쳐 공급하였다. 순환수의 온도는 25℃로 일정하게 유지하였다.

1차 실험은 사육조에 대해 2%의 사육밀도로 15일간 수행하였으며 2차 실험은 5%의 사육밀도로 30일간, 3차 실험은 7%의 사육밀도로 35일간 수행하였다.

시료 채취 및 분석

포말분리장치의 수처리 효율을 측정하기 위해 단백질, 총 부유

고형물 (TSS), 화학적 산소 요구량 (COD_{Cr}) 등에 대한 수질분석을 수행하였다. 수질 분석을 위한 시료채취는 첫사료 투입후 1시간 이후인 오전 10시에 행하였다.

사육조는 수면으로부터 30 cm 하부에서 채취하여 충분히 혼합 후 이용하였으며 포말 농축액은 전일부터 24시간 동안 배출된 포말 농축액을 별도의 용기에 모아 충분히 혼합 후 채취하여 1일간 배출된 포말의 평균 시료로서 분석에 이용하였다.

단백질의 분석은 Lowry's method (Lowry et al., 1951)를 이용하였으며 화학적 산소 요구량과 총 부유 고형물의 분석은 standard method (APHA, 1992)에 의해 분석하였다.

결과 및 고찰

포말분리기의 양어장 적용가능성

포말분리기의 실제 어류를 사육하는 양어장에서 나타내는 효율을 측정하기 위하여 pilot-scale의 순환여과식 양어장에서 어류를 2, 5, 7%의 밀도로 사육하면서 사육조 내의 수질과 포말분리기에 의해 배출된 포말농축액의 수질을 분석하였다.

Fig. 3은 전체 실험 기간 중 얻어진 COD, TSS, 단백질의 사육조 농도 (CT)와 포말 농축액 농도 (CF)의 상관 관계를 도시한 것이다. 두 농도 사이에서 얻어지는 기울기는 각 성분이 포말로 농축된 비율 (CF/CT)을 나타내는 것으로 그 값이 클수록 포말분리기에 의한 제거효율이 높음을 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이 TSS가 4.48로 가장 높았으며 COD는 2.82, 단백질은 2.02의 농축비를 나타내었다. Dwivedy (1975)는 포말 분리에 의한 굴양식장 폐수에서 부유성 유기물과 용존성 유기물을 제거할 수 있다고 하였다. 이는 본 연구의 결과가 부유 고형물과 단백질의 2~4.5배 정도로 농축하여 배출하는 것으로 보아 실제 양어장에의 포말분리기 적용이 적합한 것으로 사료된다.

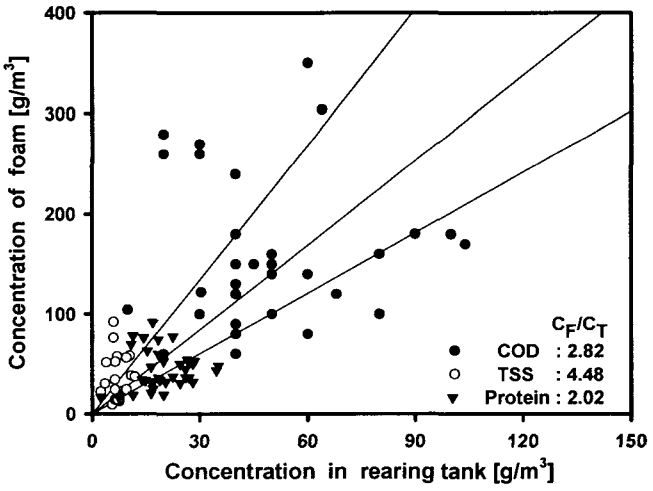

Fig. 3. Concentrated ratios of COD, TSS and protein by foam separator in a pilot scale recirculating aquaculture system.

포말 농축액 유출 특성

전체 실험기간에서 사육조의 각 수질인자의 농도는 사육기간, 사육밀도, 수처리 장치의 효율, 사료 투입량 등에 따라 변화를 보였다. 사육기간이 길어짐에 따라 각 수질인자가 순환수에 농축되어 사육조의 각 수질인자의 농도는 증가하는 경향을 보였고 포말 농축액의 유출량도 증가하였으며 어류 입식 직후에는 사육조 내의 단백질 농도가 낮아 포말이 형성되지 않았다. Fig. 4는 실험을 행한 각 사육 밀도의 변화에 따른 포말 농축액의 양과 TSS, COD, 단백질의 사육조 내 농도의 평균값을 도시한 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 사육밀도가 증가함에 따라 각 수질인자의 농도가 증가하였으며 포말 농축액의 유출량도 증가하였다. 사육밀도의 증가에 따라 수질인자의 농도가 증가하는 것은 투입 사료량이 증가하여 순환수에 미섭취사료나 어분 등이 증가함에 따른 현상이다. 포말 농축액의 유출량이 사육밀도의 증가함에 따라 증가하는 현상은 수질 인자 중 계면활성제 역할을 하는 단백질의 농도가 증가하여 포말의 발생량이 많아져서 포말 농축액의 유출량도 선형적으로 증가하는 것으로 사료된다. 순환수의 오염도가 높을 경우 포말 농축액이 많이 생성되는 것은 포말 분리기를 수처리 장치 뿐 아니라 포말 농축액의 발생량으로 수질의 오염도를 예측하는 장치로도 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

단백질 제거특성

단백질은 미섭취 사료나 어분 중 어체에 흡수되지 못한 사료성분에서 용출되어 발생한다. 단백질의 구성은 대부분 C, H, O이나 소량의 N과 P를 함유하고 있어 순환수 중의 미생물에 의해 분해되면서 어류에 유해한 암모니아를 발생시키므로 신속히 제거하

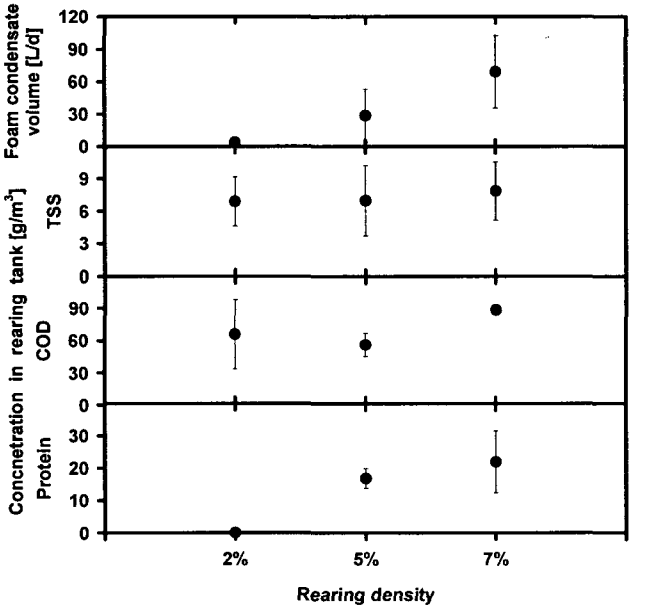

Fig. 4. Changes of foam condensate volume and concentration of COD, TSS and protein of rearing water on three different rearing densities, 2%, 5% and 7% of water volume of rearing tank.

여야 한다 (Wheaton et al., 1996). Fig. 5는 사육 밀도의 변화에 따른 단백질의 일간 제거량, 농축비, 사육조와 포말 농축액의 농도를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 사육밀도가 5%에서 7%로 높아짐에 따라 사육조의 단백질 농도는 16.6 g/m^{3}에서 21.9 g/m^{3}으로 증가하였으며 일간 제거량은 0.99 g/day에서 2.5 g/day로 증가하였으나 포말의 단백질 농도는 50.6 g/m^{3}에서 36.6 g/m^{3}으로 감소하여 농축비는 3.2에서 1.9로 감소하였다.

사육밀도가 높아짐에 따라 농축비가 감소하는 현상은 Fig. 5에서 보여진 것과 같이 단백질 농도가 증가함에 따라 포말의 생성량이 증가한 것에 기인한 현상으로 포말의 생성량이 많아 포말분리기 내에서 형성된 포말이 충분히 농축되기 전에 장치 외부로 유출되어 농축비는 낮아지지만 외부로 유출되는 단백질의 총량은 증가하여 일간 제거량은 증가하는 것으로 사료된다.

부유 고형물 제거특성

순환여과식 양어장 순환수의 부유 고형물은 어류의 아가미에 손상을 주어 어류의 폐사를 유발하게 되므로 신속한 제거가 요구되나 입자의 직경이 30 μm 이하로 침강속도가 매우 작아 침전조를 통해 제거하기 위해서는 긴 체류시간을 요구하여 비효율적이다 (Chen et al., 1996; Suh et al., 1997; Suh et al., 2000).

Fig. 6은 사육 밀도의 변화에 따른 총 부유 고형물의 일간 제거량, 농축비, 사육조와 포말 농축액의 농도를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 사육조 내 총 부유 고형물의 농도는 사육밀도의 증가에 따라 약간 증가하였으나 그 차이는 크지 않았다. 반면 사육밀도의 변화에 따른 총 부유 고형물의 일간 제거량, 농축비와

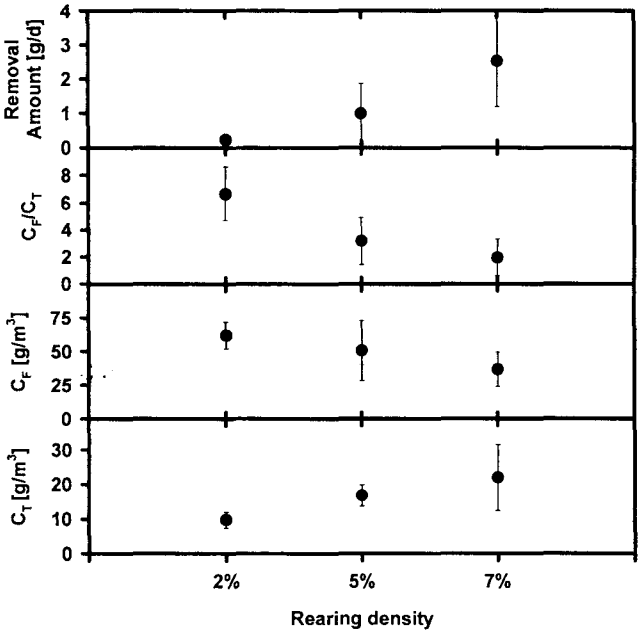

Fig. 5. Changes of protein concentration of rearing tank (CT) and foam (CF), concentrated ratio (CF/CT) and removal amount on three different rearing densities, 2%, 5% and 7% of water volume of rearing tank.

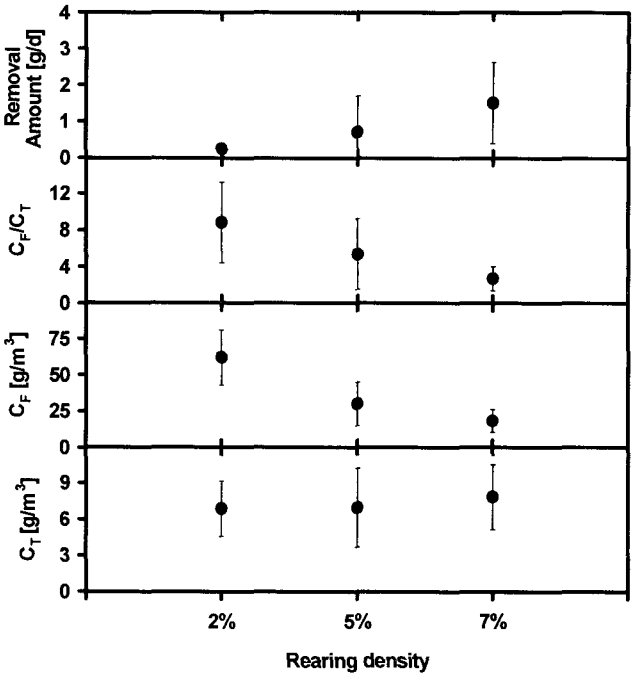

Fig. 6. Changes of TSS concentration of rearing tank (CT) and foam (CF), concentrated ratio (CF/CT) and removal amount on three different rearing densities, 2%, 5% and 7% of water volume of rearing tank.

포말 농축액의 농도의 변화는 단백질 제거특성과 그 형태가 유사하였다. 이는 총 부유 고형물이 제거되는 것은 단백질이 기·액 계면에 흡착될 때 동반 흡착되어 제거되는 제거기작에 의한 현상 (Chen, 1991)에 의해 수행되는 것이므로 부유 고형물의 제거 특성이 단백질의 제거특성과 유사하게 나타나는 것으로 사료된다.

총 부유 고형물의 일간 제거량은 사육밀도 2%일 경우 0.2 g/d, 5%에서는 0.8 g/d, 7%에서는 1.5 g/d로 사육밀도와 비례하여 증가하였으며 농축비는 2%의 사육 밀도에서 10.2의 매우 높은 값을 나타내어 부유 고형물의 제거에 포말분리기가 효율적임을 알 수 있었다.

유기물 제거특성

Fig. 7은 사육 밀도의 변화에 따른 화학적 산소요구량 (COD_{Cr})의 일간 제거량, 농축비, 사육조와 포말 농축액의 농도의 변화를 도시한 것이다. 화학적 산소 요구량은 수중의 유기물 함량을 나타내는 지표로써 호기성 미생물의 번식을 유발시켜 병원성 미생물을 증식시키는 원인이 된다 (Wheaton et al., 1996).

그림에서 보는바와 같이 화학적 산소요구량의 변화에 있어서 부유 고형물 제거 특성에 있어서의 Fig. 6과 비슷한 경향을 보이고 있으며 일간 제거량과 농도의 경우 총 부유 고형물의 5배 정도로서 유사성을 보였다. 화학적 산소요구량의 일간 제거량은 사육밀도 2%일 경우 1.6 g/d, 5%에서는 4.2 g/d, 7%에서는 7.0 g/d로 나타났다.

화학적 산소 요구량의 포말분리기에 의한 농축비는 2%의 사육밀도에서 8.5로서 30 g/m^{3}의 농도를 가지는 사육조 내 순환수를

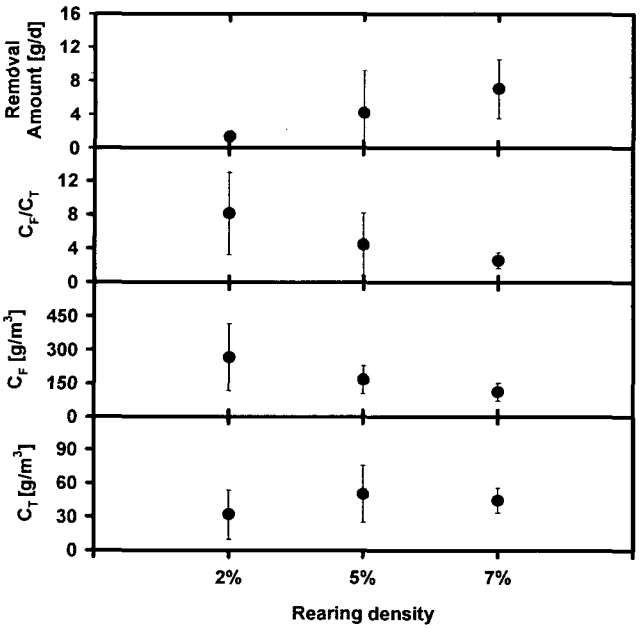

Fig. 7. Changes of COD_{Cr} concentration of rearing tank (CT) and foam (CF), concentrated ratio (CF/CT) and removal amount on three different rearing densities, 2%, 5% and 7% of water volume of rearing tank.

255 g/m^{3}의 농도로 농축시켜 제거할 수 있어 그 효율이 뛰어남을 알 수 있었다. 7%의 사육밀도에서 포말 배출량이 증가하여 농축비가 감소하였으나 농축비가 3.5 이상으로 비교적 잘 농축할 수 있는 것으로 나타났다.

요 약

본 연구는 사육조 용적 2.5 m^3 규모의 pilot-scale 순환여과식 양어장에 나일 틸라피아를 2, 5, 7%의 밀도로 사육하면서 사육조 내의 수질과 포말분리기에 의해 배출된 포말농축액의 수질을 분석하여 병류 공기구동식 포말분리기의 실제 어류를 사육하는 양어장에서 나타내는 효율을 측정하고자 하였다.

사육밀도가 증가함에 따라 단백질, 총 부유 고형물, 화학적 산소요구량 등 각 수질 인자의 농도가 증가하였으며 포말 농축액의 유출량도 증가하였다.

사육조의 단백질 농도는 사육밀도가 5%에서 7%로 높아짐에 따라 16.6 g/m^{3}에서 21.9 g/m^{3}으로 증가하였으며 일간 제거량은 0.99 g/day에서 2.5 g/day로 증가하였으나 포말의 단백질 농도는 50.6 g/m^{3}에서 36.6 g/m^{3}으로 감소하여 농축비는 3.2에서 1.9로 감소하였다.

사육밀도의 변화에 따른 총 부유 고형물과 화학적 산소 요구량의 일간 제거량, 농축비와 포말 농축액의 농도의 변화는 단백질 제거특성과 그 형태가 유사하였다. 총 부유 고형물의 일간 제거량은 사육밀도 2%일 경우 0.2 g/d, 5%에서는 0.8 g/d, 7%에서는 1.5 g/d로 사육밀도와 비례하여 증가하였으며 화학적 산소요구량의 일간 제거량은 사육밀도 2%일 경우 1.6 g/d, 5%에서는 4.2 g/d, 7%에서는 7 g/d로 나타났다.

총 부유 고형물과 화학적 산소 요구량의 농축비와 제거량은 단백질과 비슷한 경향을 보였으며 총 부유 고형물과 화학적 산소 요구량의 농축비의 경우 2%의 사육 밀도에서 각각 10.2, 8.4의 가장 높은 값을 나타내어 포말분리기가 양어장 순환수 처리에 효율적임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부에서 시행한 수산특정 연구개발과제의 연구비 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

APHA. 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th ed. American Public Health Association.

Chen, S. 1991. Theorical and Experimental Investigation of Foam Separation Applied to Aquaculture, Ph. D. Thesis, Cornell Univ., USA.

Chen, S. 1994. Modeling surfactant removal in foam fraction I, II. Aquacultural Engineering, 13, 163~181.

Chen, S., D. Stechy and R.F. Malone. 1996. Suspended solids control in recirculating aquaculture systems. In *Aquaculture Water Reuse System: Engineering Design and Management*, Timmons, M.B. and T.M. Losordo, ed. Elsevier, Amsterdam, pp. 61~100.

Dwivedy, R.C. 1975. Removal of dissolved organics through foam fractionation in closed cycle systems for oyster production. American Society of Agricultural Engineers, 73~561.

Kim, B.J., J.H. Lee, S.K. Kim, Y.H. Kim, G. Yi and K.H. Suh. 2001. The removal of aquacultural wastes by foam separator from sea water - III. The effect of superficial air velocity, HWAHAK KONGHAK, 39, 123~129 (in Korean with English abstract).

Jenkins, D., J. Scherfig and S.W. Eckhoff. 1972. Application of adsorptive bubble separation techniques to wastewater treatment. In *Adsorptive Bubble Separation Techniques*, R. Lemlich, ed. Academic Press, New York, pp. 219~248.

Lowry, O.H., N.J. Rosebrough, A.L. Farr and R.J. Randall. 1951. Protein measurement with folin phenol reagent. J. Biotech., 193, 265~275.

Rubin, E. 1981. Foam fractionation-some recent studies. In *Theory, Practice, and Process Principles for Physical Separations*, Proceedings of the Engimeering Foundation Conference, M.P. Freeman and J. FitzPatrick, ed. Engineering Foundation, New York, USA., pp. 750.

Stickney, R.R. 1979. Seawater Aquariums, the Captive Environment, Wiley Interscience, New York, 375pp.

Suh, K.H. and M.G. Lee. 1995. Treatment of aquacultural recirculating water by foam separation - I. Characteristics of protein separation. J. Korean. Fish. Soc., 28, 599~606 (in Korean with English abstract).

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. Korean. Fish. Soc., 30, 334~339 (in Korean with English abstract).

Suh, K.H., B.J. Kim and S.K. Kim. 2000. Characteristics of proteins and total suspended solids removal by counter current air driven type, high speed aeration type and venturi type foam separator. J. Korean. Fish. Soc., 33), 205~212 (in Korean with English abstract).

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 with English abstract).

Wheaton, F.W., J.N. Hochheimer, G.E. Kaiser, M.J. Klones, G.S. Libey and C.C. Easter. 1996. Nitrification filter principle, In *Aquaculture Water Reuse System: Engineering Design and Management*, M.B. Timmons and T.M. Losordo, eds. Elsevier, Amsterdam, pp. 101~126.

Weeks, N.C., M.B. Timmons and S. Chen. 1992. Feasibility of using foam fractionation for the removal of dissolved and suspended solids from fish culture water. Aquacultural Engineering, 11, 251~265.

Wickins, J.F. 1980. Water quality requirements for intensive aquaculture: A review. In *Symposium on New Developments in the Utilization of Heated Effluents and Recirculation Systems or Intensive Aquaculture*. EIFAC, 11th Session, Stavanger, Norway, 28~30 May.

2001년 8월 16일 접수
2002년 3월 14일 수리