

포말 분리법을 이용한 양어장 순환수 처리

- II. 고형물 제거특징 -

서근학 · 이민규 · 이민수 · 김병진 · 김은정 · 조문철

부경대학교 화학공학과

Treatment of Aquacultural Recirculating Water by Foam Separation

- II. Characteristics of Solid Removal -

Kuen-Hack SUH, Min-Gyu LEE, Min-Soo LEE, Byong-Jin KIM,
Eun-Jung KIM and Moon-Chul CHO

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

The feasibility of foam separation to remove solid produced from fish culture water was investigated. Performance characteristics of foam separator were highly dependent upon the operating parameters which were superficial air velocity, hydraulic retention time (HRT), and foam height. About 50% of the total protein contained in a sample of fish culture water could be removed by foam separator. The removal efficiencies of protein, T-N, TA, and solid components were increased with increasing superficial air velocity and HRT. The combined effects of these operational variables show that removal rates of TVS increase with increasing superficial air velocity and HRT, and decrease as foam height goes up. It could be confirmed that foam separator might offer good perspective for removal of harmful components such as TA and TVS in aquacultural recirculating water.

Key words : foam separation, solid removal, aquacultural recirculating water, aquaculture

서 론

어류를 고밀도로 사육하는 순환식 양식은 어류의 소비가 날로 늘어가고 있는 오늘날의 식생활 문화와 잘 부합할 수 있도록 그 생산력을 증대시킬 수 있는 장점을 지니고 있는 사육 시스템이다. 그러나 순환여과수에 의한 수질의 악화로 인하여 어류의 성장 및 환경에 악영향을 미치므로 적절한 처리 시설을 구비하여 어류의 생존에 적당한 환경을 유지할 수 있도록 하는 것이 매우 중요하다. 고밀도 순환식 양식의 경우 사료 찌꺼기 및 어류의 배설물 등에 의하여 유기질 고형 성분이 급격하게 증가하게 된다. 유기질 고형 성분은 미생물에 의해 분해됨에 따라 어류의 성장에 유해한 NH₃, NO₂⁻를 생성할 뿐만 아니라 용존산소를 소모하게 되어 어류에 악영향을 미치게 되므로 양어장 순환수 내의 사료 찌꺼기 및 어류의 배설물을 신속하게 제거하기 위한 수처리가 절실하게 요구된다.

실제 양어장에서 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,

고형물 부하는 미생물군의 경쟁에 의해 대부분의 질산화 공정에서 암모니아 제거 속도를 감소시킬 수도 있다고 하였다. 또한 고형물에 의해 발생하는 암모니아는 어류에 나쁜 영향 (Liao and Mayo 1974, Spotte, 1979)을 끼칠 수 있기 때문에 양식장 순환수 중의 고형물의 제거는 매우 중요하다.

일반적으로 고형물의 제거 효율은 입자의 크기가 작아질수록 감소하게 되는데, 이러한 특성으로 인하여 순환식 시스템에서는 미세한 비침강성 고형물의 처리가 많은 문제를 야기시키는 원인이 되고 있다. 순환수 내에는 입경이 100 μ m 보다 작은 고형물이 주를 이루며 순환수 처리에 있어 시스템의 처리 능력을 결정하는데 주로 영향을 미치는 것은 입경이 30 μ m 이하의 입자들이다. 순환양식장에서 고형물을 제거하는 방법의 하나로써 침강법이나 세망스크린 등이 이용되고 있다. 침강법에 의해서 제거되는 입자는 100 μ m 이상의 큰 입자들로서 50 μ m 미만의 미세한 고형물은 침강에 의해서는 잘 제거되지 않으며, biofilter를 통과한 후에도 남게 된다고 하였다 (Wang, 1988). 침강 탱크의 경우 많은 부지가 소요되며 또한 고형물 제거율을 높이기 위해서는 탱크의 표면적을 크게 하여 침강을 위한 체류시간을 증가시킬 필요가 있는데 이로 인해 투자 비용이 상승하게 된다. 세망 스크린이나 입상여재를 이용한 고형물 제거 방법은 장비 설

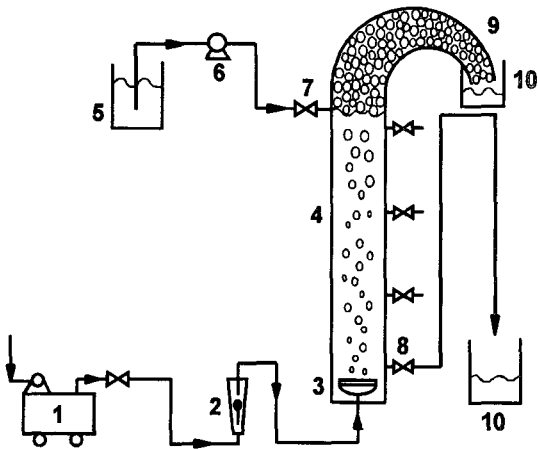


Fig. 1. Schematic diagram of foam separator.
 1. Air pump 6. Feed pump
 2. Air flow meter 7. Micrometer
 3. Distributor 8. Sampling port
 4. Column 9. Foam outlet
 5. Feed tank 10. Beaker

치에 필요한 부지는 비교적 적게 소요되지만 수도 손실이 커지게 된다.

그러나 분산된 공기 기포에 의해 고형물을 제거하는 포말분리법은 에너지 소비가 낮고 제거 효율이 높고 타 공정에 비해 운전 및 유지비가 저렴하여 양어장에 적용하기에 적합한 공정으로 사료된다 (Rubin 1981, Clarke and Wilson, 1983). 포말분리에 의해 제거되는 고체는 주로 직경이 30 μ m 이하인 미세 입자들로서 포말 분리법은 미세 입자들을 제거하는데 매우 효과적이며, 적은 비용으로 효율적인 운전을 할 수 있고 연속 운전이 가능하며 역세척이 필요 없다는 장점을 지니고 있다.

Lomax (1976)는 생물 여과기에 침강 탱크, 포말 분리장치 또는 기계식 여과기를 각각 조합하여 사용한 어류 양식 시스템을 비교한 결과, 비용이나 효율성의 측면에서 볼 때 포말 분리법을 함께 사용한 생물 여과기가 최적의 설계 조합이었다고 하였다고 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, 물속의 박테리아도 제거할 수 있음을 확인하였다.

더구나 순환 양식 시스템에서는 어류의 호흡 및 대사를 위해 산소 공급이 필요한데 이 산소 공급 장치를 포말 장치로 활용 가능하고, 기포관을 병류식 흐름 형태로 운전함으로써 물을 순환시키는 데의 air lift 펌프로써도 활용 가능하기 때문에 포말분리장치는 비교적 설계가 간단하고 타공정에 비해 운전비가 적게 든다. 따라서 동일장치내에 이러한 모든 형태 (폭기, 고형물 제거 및 air lift)의 기능들을 조합한 적절한 장치 설계를 통해 순환 양식 시스템의 총괄 효율을 증가시키고 운전비를 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구의 목적은 양식장수로부터 유기성 폐기물을 제거하게 되면 박테리아 분해와 그로 인한 암모니아가 방출되기 전에 단백질성 물질의 근원을 제거함으로써 암모니아 생산을 줄이고, 양식장수내의 생화학적 산소 요구량 (BOD), 화학적 산소 요구량 (COD)과 총 Kjeldahl 질소 (TKN)의 양을 감소시킬 수 있기 때문에 실제 운전 중인 부경대학교 교내 양어장에서 순환되는 순환수 중에 함유된 유기성 고형물을 제거하는데 있어 포말분리법을 적용할 경우 운전인자 즉, 초기 단백질 농도, 공압 공기 유속 (superficial air velocity), 원료 공급 속도 및 수리학적 체류시간 (HRT), 포말층 높이 등의 영향에 따른 고형물 제거 특성을 조사하였다.

재료 및 방법

본 실험에서 포말분리장치는 시중에 시판되고 있는 내경 3cm, 높이 60cm의 아크릴 관을 구입하여 제작하여 사용하였으며, 원폐수는 컬럼의 상부로부터 유입하고 공기는 하부에서 유입시킴으로써 기포는 상승하고 원료액의 흐름은 아래로 흐르는 하향류식 조작이 되도록 Fig. 1과 같이 구성하였다. 포말분리관내 액본체의 부피는 350 ml로하고 포말분리관 하부에는 glass filter (pore size : G 3)를 접합시켜 기포가 효과적으로 발생될 수 있게 하였다. 공기의 공급은 air pump를 이용하여 공급하였으며, 공기 유량은 유량계로 조절하였다.

실험에 사용한 원폐수는 본교 양어장의 순환수를 사용하였으며, 단백질 등 각 성분 농도의 조절은 양어장에서 생성된 foam condensate를 순환수에 첨가함으로써 조정하였다. 포말분리 운전에 미치는 운전인자 즉, 초기 단백질

Table 1. Solid characteristics in the aquaculture water

(Unit; g/m ³)						
Protein	TKN	TS	TVS	TFS	TSS	TDS
149	37	818	481	337	177	641

질 농도, 공압 공기유속 (superficial air velocity), 수력학적 체류시간 (HRT), 포말층 높이 등을 변화시키면서 실험을 행하였으며, 장치의 운전은 포말 형성 특성의 재현성을 증대시키기 위하여 pH는 7.2, 용액 온도는 22°C로 일정하게 유지하여 조작하였다. 액본체 시료는 포말분리 장치의 하부로부터 5 cm에 위치한 시료 채취구로부터 채취하였으며, 단백질의 농도 분석은 Lowry법 (Lowry et al., 1951)에 의해 기타 고형물 성분들의 농도 분석은 Standard Method (APHA, 1989)에 의해 행하였다.

결과 및 고찰

양어장수중의 단백질과 고형물의 관계

양어장 순환수에서 단백질은 총휘발성 고형물 (TVS)의 주성분 중의 하나이다. 일반적으로 미섭취된 사료, 어류의 배설물 및 미생물 등과 같이 TVS에 기여하는 대부분의 물질들은 단백질 성분을 함유하고 있기 때문에 Table 1에서 보여지는 바와 같이 양어장 순환수내에서 발생하는 단백질 농도 (PC)는 TVS농도와 관계는 $PC=0.31 TVS$ 로 관계지을 수 있었다. 이 결과는 Weeks (1992)의 결과와는 다소 차이를 보였다.

양어장수중의 고형물 특성

총 부유성 고형물 (TSS) 농도는 단위 부피당에 들어 있는 입경이 1 μ m 이상인 고형물의 질량으로 정의된다 (APHA, 1989). 부유성 고형물은 유기물 성분 및 무기물 성분들로 이루어져 있으며, 휘발성 부유 고형물 (VSS)로 표시되는 유기성 성분은 산소의 소비와 함께 biofouling의 문제를 야기시키는 반면에, 무기성 성분 (FSS)은 침전물을 형성하여 어류의 생활 공간에 악영향을 미치게 된다.

Table 1에서 보여지는 바와 같이 양어장 순환수내에서 발생하는 고형물의 형태를 살펴보면 총 고형물 (TS)이 818g/m³였으며, 그 중에서 총 휘발성 고형물 (TVS)이 481g/m³, 총 비휘발성 고형물 (TFS)이 337g/m³로써 무기성 고형물의 함량보다는 유기성 고형물의 함량이 다소 높은 것으로 나타났다. 이는 고기 사료의 주요 성분들 중의 하나인 단백질이 일반적인 규정 성분 중의 30~50%를 차지하는 것을 고려할 때 예측 가능하다. 또한 총 부유성 고형물 (TSS)보다는 용존성 고형물 (TDS)의 농도가 훨씬 높게 나타났는데, 이는 사료 중의 불용성 고형물의 대부분은 침전조에서 제거되고 미세한 부유성 입자 및 용존성 고형물만이 배출되었기 때문으로 생각되었다. 시료중의 휘발성 고형물 (VS), 총 부유성 고형물 (TSS)과 질소 (T-N)사이의 상관 관계는 $TSS=0.37TVS$,

$T-N=0.093TVS$ 로 얻어 졌으며, 이 결과는 Weeks (1992)의 결과와 유사하였다.

계면 활성 성분량 추정

포말 분리가 일어나도록 하는데 필요한 주요 성분은 계면활성제 즉 포집제 (Rubin, 1981)로서, 이들 분자는 적어도 1개의 극성 말단부와 1개의 비극성 말단부를 가지고 있어 물분자는 극성 구조를 가지기 때문에 계면활성제의 비극성 말단부는 소수성이 되고 물의 바깥 부분 즉, 기포에 흡착되게 된다.

양어장에서 사료나 어류에 의해 생성되는 여러 물질들 중에서 단백질은 구조적·특성적으로 계면활성제와 같은 역할을 하는 물질로써, 물/공기 계면에 농축 (MacRitchie, 1978)되게 된다. 이들 단백질 성분 중에서 계면활성성분의 양을 추정해 보기 위하여 Fig. 2에서 보여지는 바와 같이 포말분리 운전 시간에 따른 액본체 내의 단백질

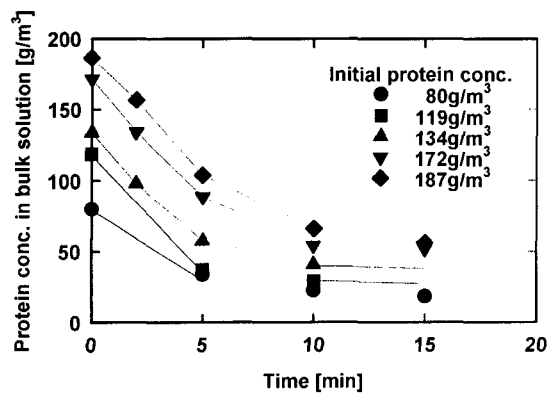


Fig. 2. Changes of protein concentration in the bulk solution on the initial protein concentration (Superficial air velocity : 2 cm/s).

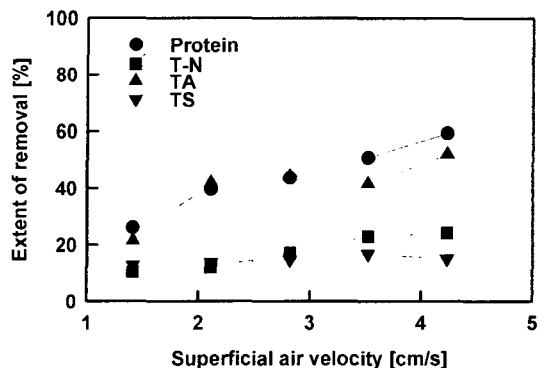


Fig. 3. Changes of removal of each components on superficial air velocity (HRT : 6.7 min, TS : 818 g/m³, protein : 149 /m³, TFS : 337 g/m³).

농도 변화를 살펴보았다. 계면 활성 성분의 비는 초기 단백질의 총 농도에 대한 제거된 단백질의 농도의 비율로 나타낼 수 있으며, 이는 총 단백질 농도에 대한 계면 활성 단백질의 비율을 나타낸다. 그림에서 보여지는 바와 같이 단백질의 대부분은 운전 개시후 10~15분 이내에 제거되었으며, 총 단백질 중의 제거된 단백질 즉 계면 활성 성분의 비는 0.5로써 이는 측정된 양어장수 시료 내에는 총 단백질량의 약 50%정도가 계면 활성 성분임을 의미한다. 이러한 결과는 양어장수내에는 높은 농도의 계면 활성 물질이 함유되어 있음을 의미하며, 이는 양어장수로부터 고형물 제거를 하는데 별도의 계면 활성 물질을 부가하지 않고서도 포말분리법이 적용 가능하다는 것을 시사해 준다.

공탑 공기유속의 영향

포말분리장치에서 고형물 제거 속도는 공탑 공기유속과 밀접한 관계를 가지고 있다. 공탑 기체유속은 포말분리관을 통하여 흐르는 공기 흐름 속도를 표현하는 유용한 방법이다. 공탑 기체유속은 포말 분리관을 통하여 흐르는 공기의 체적유속과 분리관의 단면적의 비로써 나타내어진다.

포말 분리관에 공급하는 공기유속의 변화에 따른 고형물 제거 효율의 영향을 조사하기 위하여 원수의 초기 단백질 농도를 149 g/m³, TS를 818 g/m³, 체류시간 6.7 min로 유지하고, 공탑 공기유속을 1.4, 2.1, 2.8, 3.5 및 4.2 cm/s로 변화시키는데 따른 각 성분들의 제거율을 Fig. 3과 4에 도시하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 공기유속이 증가함에 따라 각 성분들의 제거율은 보다 향상됨을 알 수 있었다. 이는 공탑 공기유속이 증대할수록 기-액계면 면적이 증가하게 되고 그로 인해 흡착되는 성분들의 양이 증가한 것으로 생각된다.

Fig. 3에서 공기유속이 증가함에 따라 각 성분들의 제거 정도는 단백질 및 암모니아 (TA)가 20~60%로 가장 높았으며, T-N과 TS는 그 증가폭이 완만하였다. 또한 고형물의 경우 Fig. 4에서 보여지는 바와 같이 공기유속이 증가함에 따라 TSS가 45~65%로 가장 높았으며, TVS 및 TFS는 10~25%정도의 제거율을 보였으나 TDS는 공기유속의 변화에 따른 영향은 거의 없음을 알 수 있었다. 이로부터 본 장치에 의해서는 TA뿐만 아니라 고형물 중에서도 TSS 제거에 우수한 성능을 보임을 알 수 있었다.

HRT의 영향

포말 분리관에 공급하는 원료 공급 속도 즉 체류시간 변화에 따른 단백질 분리 특성 영향을 조사하기 위하여

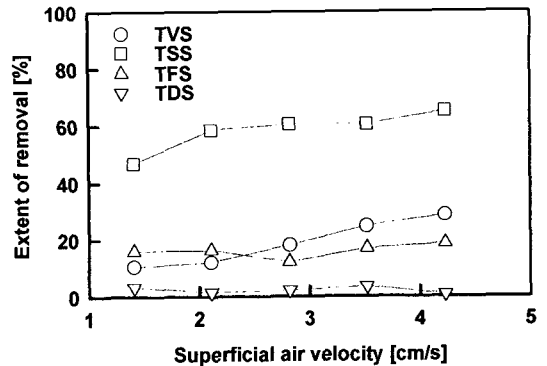


Fig. 4. Changes of solid removal on superficial air velocity (HRT : 6.7 min, TS : 818 g/m³, protein : 149/m³, TFS : 337 g/m³).

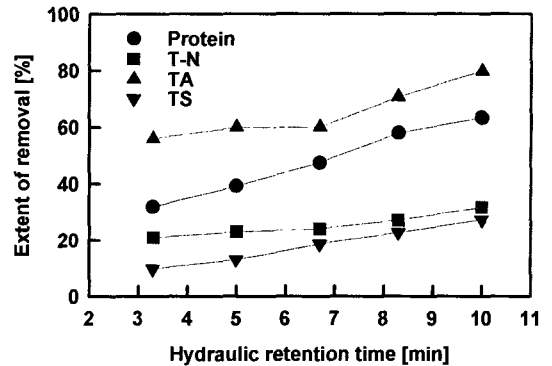


Fig. 5. Changes of removal of each components on hydraulic retention time (SAV : 2.1 cm/s, TS : 798 g/m³, TVS : 468/m³, TFS : 330 g/m³).

공탑 공기유속을 2.1 cm/s로 일정하게 유지하고서 체류시간을 3.3, 5.0, 6.7, 8.3 및 10 min로 변화시키는데 따른 각 성분들의 제거율을 Fig. 5와 6에 나타내었다. Fig. 5에서 보여지는 바와 같이 체류시간이 3.3 min에서 10 min로 길어짐에 TA의 제거율은 60~80%, 단백질의 제거율은 30~60%, T-N의 제거율은 20~25% 그리고 TS의 제거율은 10~20%로써 각 성분들의 제거 효율은 증가하였는데 이는 체류시간이 길어질수록 용액 중의 각 성분들이 기포와 접촉하는 시간이 길어져 흡착 기회가 증가하였기 때문으로 생각된다. Fig. 6은 고형물의 제거 효율을 살펴본 그림으로써 체류시간이 길어질수록 TSS의 제거율이 30~60%로 가장 높은 것으로 나타났으며, 그 다음은 TVS가 20~30%, TDS는 10~20% 순으로 나타났다. 그러나 TFS는 거의 영향이 없었다.

포말층 높이의 영향

포말층 높이가 높아지게 됨에 따라서는 농축물의 생

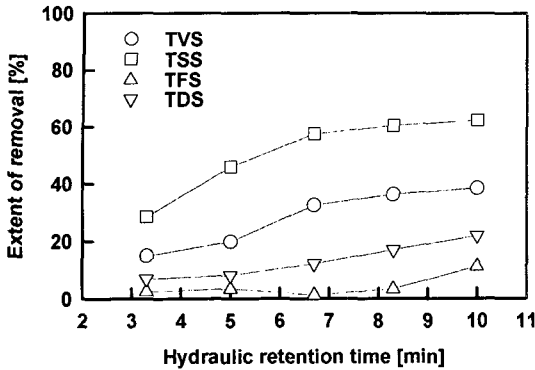


Fig. 6. Changes of solid removal on hydraulic retention time (SAV : 2.1 cm/s, TS : 798 g/m³, TVS : 468/m³, TFS : 330 g/m³).

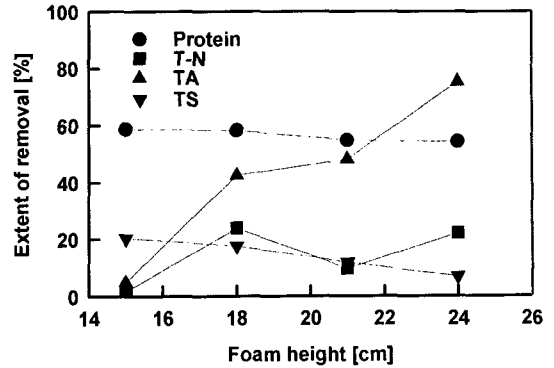


Fig. 7. Changes of removal each component on foam height (SAV : 2.1 cm/s, HRT : 5.0 min, TS : 642/m³, TVS : 303 g/m³, TFS : 339 g/m³).

성량은 작아지게 되고, 물을 배출하는 시간이 길어지게 됨에 따라 농도는 상승하게 되므로 적절한 포말층 높이를 사용하면 양어장수보다는 고형물 농도가 농축된 포말 농축물을 생산할 수 있다. 그러나 포말층 높이가 더욱 높아지게 되면 더욱 농축된 포말 농축물을 생산할 수 있지만 생성량은 극히 적어지게 된다. 따라서 포말층 높이의 변화가 각 성분들의 제거 효율에 미치는 영향을 살펴 보기 위하여 공탑 공기유속을 2.1 cm/sec, 체류시간을 5 min로 유지하고서 포말층 높이를 15, 18, 21 및 24 cm로 변화시킴에 따른 각 성분들의 제거율을 조사한 결과를 Fig. 7과 8에 나타내었다.

본 실험 결과에 의하면 암모니아 제거율은 포말층 높이가 높아짐에 따라 증가하였고 (Fig. 7), TA의 제거율은 Fig. 8에서 보여지는 바와 같이 포말층 높이가 높아짐에 따라서는 감소하였다. 따라서 암모니아의 발생원인 고형물 및 단백질 등이 박테리아의 작용에 의해 암모니아로 전환되기 이전에 포말 분리에 의해 제거할 수 있음을 알 수 있었으며, 이러한 현상은 포말에 동반되어 나가는 액체가 중력에 의해 액본체로 하강하게 되면서 상승하는 공기 기체와는 향류식 접촉을 하게 되는데 포말층의 높이가 증가할수록 이러한 향류식 접촉 기회가 빈번해지기 때문에 생각된다.

요 약

포말 분리법에 의한 양어장 순환수 중의 고형물 제거 특성을 조사하였다. 장치의 효율에 영향을 미치는 주요 인자들은 공탑 공기유속, 체류시간, 그리고 포말층의 높이였다. 측정된 양어장수 시료 내에는 총 단백질량의 약 50% 정도가 계면 활성 성분이었다. 공탑 공기유속, 체류시간이 증가함에 따라 단백질, T-N, TA 및 고형물 성분

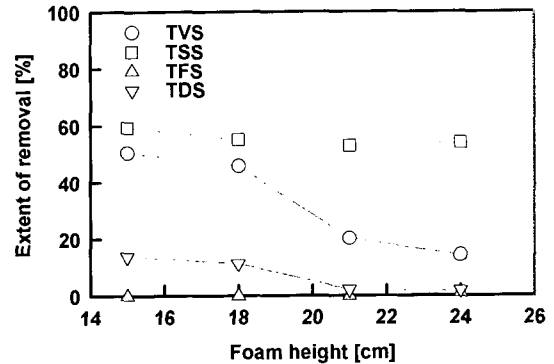


Fig. 8. Changes of solid removal on foam height (SAV : 2.1 cm/s, HRT : 5.0 min, TS : 642/m³, TVS : 303 g/m³, TFS : 339 g/m³).

들의 제거율은 증가하였으며, TVS의 제거율은 공탑 공기유속 및 체류시간 (HRT)이 증가함에 따라 증가하였으나 포말층 높이가 높아짐에 따라서는 감소하였다. 포말 분리장치는 양어장 순환수 중에서 발생하는 어류 성장에 유해한 성분, 특히 TA 및 TVS의 제거에 우수한 성능을 보임을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 지정 우수공학연구센터인 부경대학교 해양산업개발연구소의 96년도 연구비 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

Albaster, J.S. and R. Lloyd. 1982. Water Quality Criteria for Freshwater Fish, 2nd ed., Butterworth, London, 361 pp.

- APHA. 1989. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th ed. American Public Health Association.
- Clarke, A.N. and D.J. Wilson. 1983. Foam Flotation Theory and Applications. Marcel Dekker, New York, 418 pp.
- 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.
- Liao, P.B. and R.D. Mayo. 1974. Intensified Fish Culture Combing Water Reconditioning with Pollution Abatement. *Aquaculture*, 3, 61~85.
- Lomax, K.M. 1976. Nitrification with Water Pretreatment on a Closed Cycle Catfish Culture System. Ph.D. Thesis, University of Maryland, College Park, MD.
- 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.
- MacRitchie, F. 1978. Proteins at interfaces. *Advances in Protein Chemistry*, 28, 283~326.
- 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. 453 pp.
- Rubin, E. 1981. Foam Fractionation-Some Recent Studies edited by Freeman, M.P. and J.A., FitzPatrick. 157~180.
- Spotte, S.H. 1979. Seawater Aquariums, the Captive Environment. Wiley, New York, 413 pp.
- Stickney, R.R. 1979. Seawater Aquariums, the Captive Environment, Wiley, New York, 375 pp.
- Wang, R.F.T. 1988. Laboratory Analysis of Settling Velocity of Wastewater Particles in Separation Using Holography, PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 265 pp.
- 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, Symposium on New Developments in the Utilization of Heated Effluents and Recirculation Systems or Intensive Aquaculture. *EIFAC*, 11th Session, Stavanger, Norway, 28~30 May.

1996년 9월 24일 접수
1997년 5월 3일 수리