

## 포말 분리법에 의한 양어장의 단백질 제거

서근학·이희근·김병진·조문철·안수현\*·조재윤\*\*  
부경대학교 화학공학과·(주)동일반도·부경대학교 양식학과  
(1997년 9월 20일 접수)

## Protein Removal by Foam Separation in Aquaculture

Kuen-Hack Suh, Hwae-Geon Lee, Byong-Jin Kim, Moon-Chul Cho,  
Soo-Hyen An\*, and Jae-Yoon Jo\*\*

Dept. of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan, 608-737, Korea  
\*Dongil-Bando Company LTD,

\*\*Dept. of Aquaculture, Pukyong National University, Pusan, 608-737, Korea  
(Manuscript received 20 September 1997)

The feasibility of foam separation to remove protein in aquacultural recirculating water was investigated. From the results of batch foam separation on protein removal, superficial air velocity and initial protein concentration in bulk solution were found to be important operational factors in determining removal rates of protein. The protein removal rate by batch foam separation was proportionally increased with the superficial air velocity.

Performance characteristics of continuous foam separator were highly dependent upon the operating parameters of superficial air velocity, hydraulic retention time(HRT) and foam height. Removal efficiency of protein increases with increasing superficial air velocity and HRT, and independent on foam height. As DO concentration was increased with superficial air velocity, foam separator is also used for oxygen addition. It could be confirmed that foam separator might offer better perspective for protein removal in aquacultural recirculating water

Key words : foam separation, protein separation, aquaculture, oxygen addition

### 1. 서론

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. 배설물과 미섭취 사료 중 단백질 성분은 미생물에 의해 분해되면서 어류에 유해한 암모니아나 아질산으로 전환되므로 미생물에 의해 분해되기 전에 신속하고 효과적으로 제거하면 어류에 유해한 성분의 발생을 억제할 수 있다. 최근 양어장 순환수 중 어류에 유해한 단백질 성분의 처리 수단으로써 포말분리법이 검토되어지고 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 기체측

으로 배열되어 기-액 계면에 액 본체보다 높은 농도로 농축되는 성향을 가지고 있다(Lemlich, 1972; Rubin, 1981).

David and Moffatt(1979)는 계면 활성 물질과 반대 의 전하를 가지는 용존 이온들은 기-액 계면에 흡착된 계면 활성 물질과의 전기적 인력으로 기포에 흡착되어 기포와 같이 상승 분리된다고 하였으며, Pinfold(1972)와 Schnepf 등(1959)에 의해 계면 활성이 없는 물질도 계면 활성 물질과 결합시키면 계면에서의 정전기적 인력 또는 착화합물 형성에 의해 효과적인 분리가 가능하다는 것이 고찰되었다.

Lomax(1976)는 생물 여과기에 침강 탱크, 포말 분리 장치 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

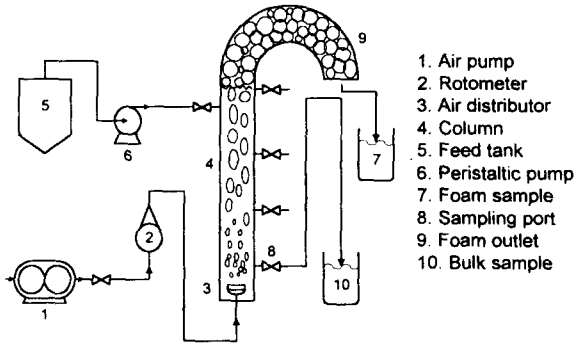


Fig. 1. Schematic diagram of foam separation.

따라 양식장수의 pH를 일정하게 유지하는 데 도움이 되었으며, 물 속의 박테리아도 제거할 수 있음을 확인하였다.

일반적으로 단백질의 경우 소수기와 친수기를 모두 가지고 있어 기-액계면에 잘 농축되므로 양어장 순환수의 경우 별도의 계면활성제를 첨가하지 않아도 효율적인 단백질의 제거가 가능하고 그와 더불어 주위의 계면활성이 없는 물질도 동반하여 제거시킬 수 있을 것으로 기대된다. 일반적으로 분리기술들은 목적성분의 농도가 희박해질수록 분리효율이 현저히 감소하는 반면 포말분리법은 목적성분의 농도가 희박할 때도 분리효율이 높을 뿐 아니라 제거속도도 매우 빠른 장점을 지닌다.

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 펌프로서도 활용 가능하기 때문에 포말분리장치는 비교적 설계가 간단하고 타공정에 비해 운전비가 적게 든다. 동일장치내에 단백질성분 제거, 폭기 air lift pump 등 여러 기능들을 조합한 적절한 장치 설계를 통해 순환 양식 시스템의 총괄 효율을 증가시키고 운전비를 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구의 목적은 실제 운전중인 양어장의 순환수에 함유된 단백질을 제거하는데 있어 포말분리법의 적용가능성을 알아 보고자 하는 것으로서 회분식 포말분리시 단백질성분 농도 및 공탑공기속도의 영향 등에 따른 단백질의 분리특성을 연구하고, 연속공정으로 운전하면서 운전 전에 영향을 미치는 인자인 공탑공기속도, 수리학적 체류시간, 포말층의 높이에 따른 영향을 고찰하여 최적의 운전 조건을 구하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 실험에서 사용된 포말분리장치는 Fig. 1의 형태로 내경 3cm, 높이 75cm의 아크릴관을 이용하여 제작하였다. 포말분리관의 액본체 부피는 350ml이었고 포말분리관 하부에는 유리여과기를 이용한 공기분산기를 집합시켜 기포가 작고 균일하게 발생하여 포말에 의한 분리능이 최대가 될 수 있게 하였다. 공기의 공급은 air pump를 이용하여 공급하였으며, 공기 유량은 유량계의 조절밸브를 이용하여 조절하였다. 원수는 액층 상부에

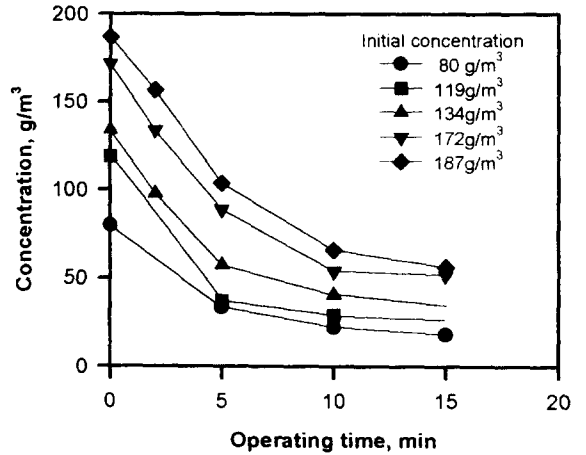


Fig. 2. Time course of protein concentration in the bulk solution on initial protein concentration.

공급하고, 처리수는 하부에서 유출 되도록 하였으며 공기는 포말분리관의 하부에서 공급함으로써 향류식 집축을 시켰다.

포말분리 운전 전에 미치는 운전인자를 알아보기 위하여 초기 단백질 농도, 공탑 공기유속(superficial air velocity), 포말층 높이등을 변화시키면서 회분식실험을 행하였으며, 이를 통해 얻어진 운전인자를 사용하여 연속적인 포말분리를 행하면서 수리학적 체류시간(hydraulic residence time), 공탑 공기유속, 포말층 높이 등이 연속 운전 전에 미치는 영향을 조사하였다. 장치 운전시 포말 형성 특성의 재현성을 증대시키기 위하여 pH는 7.2, 용액 온도는 22°C로 일정하게 유지하였다.

초기 단백질 농도의 영향을 알아보기 위한 실험은 부경대학교 양어장에서 생성된 foam condensate를 양어장의 순환수에 첨가하여 단백질 농도를 80 - 190g/m<sup>3</sup>으로 조절하여 행하였으며 포말층 높이의 영향에 따른 분리특성 실험에서는 포말장치 상부의 U자형관을 제거하고 길이 30cm인 직관을 연결하여 액면에서 높이가 15cm인 지점으로부터 상부로 3cm 간격으로 포말유출구를 4개 설치하여 실험에 이용하였다. 액본체 시료는 하부의 5cm 높이에 위치한 시료 채취구를 액본체 높이까지 튜브로 연결하여 액본체 높이와 동일한 위치에서 시료를 채취하여 분석하였다. 단백질의 농도 분석은 Lowry법(1951)에 의해 행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 회분식 포말분리

양어장에서 사료나 어류에 의해 생성되는 여러 물질들 중에서 단백질은 구조적·특성적으로 계면활성제와 같은 역할을 하는 물질로써, 기-액 계면에 농축되게 된다. 이들 단백질 성분 중에서 계면활성성분의 양을 추정해 보기 위하여 Fig. 2와 Fig. 3에서 보여지는 바와 같이 회분식으로 포말분리 운전 시간에 따른 액본체 내의 단백질 농도 변화와 단백질의 제거율의 변화를 살펴

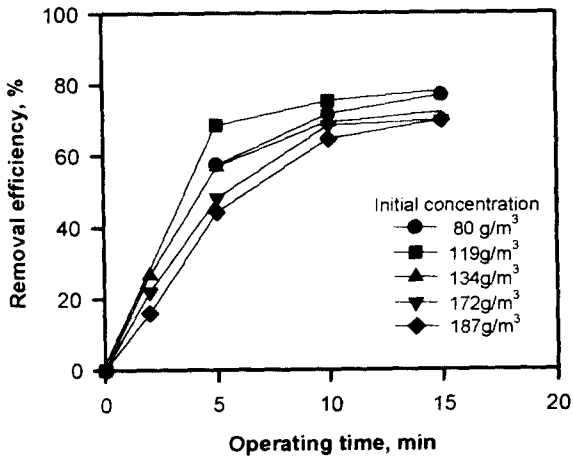


Fig. 3. Time course of protein removal efficiency in the bulk solution on initial protein concentration.

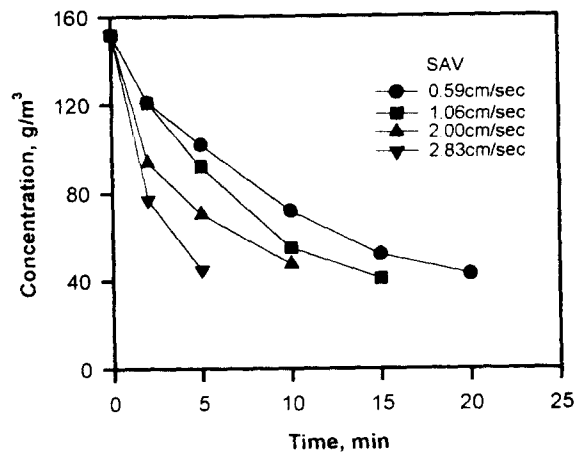


Fig. 4. Time course of protein concentration on superficial air velocity.

았다. 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 단백질의 비는 65 - 80%였다. 이러한 결과는 양어장수내에는 높은 농도의 계면 활성 물질이 함유되어 있음을 의미하며, 이는 양어장수로부터 단백질을 제거를 하는데 별도의 계면 활성 물질을 부가하지 않고서도 포말분리법이 적용 가능하다.

단백질의 제거량은 초기단백질의 농도가 높아질수록 증가하였으나 제거율은 Fig. 3에서 보여지는 바와 같이 초기 농도가 높아질수록 감소하였는데 이는 공급공기를 일정량으로 유지할 경우 발생하는 기포의 표면적이 일정하여 제거될 수 있는 단백질의 양이 한정되어 있으므로 초기농도가 높아 질수록 제거되는 총량은 증가하나

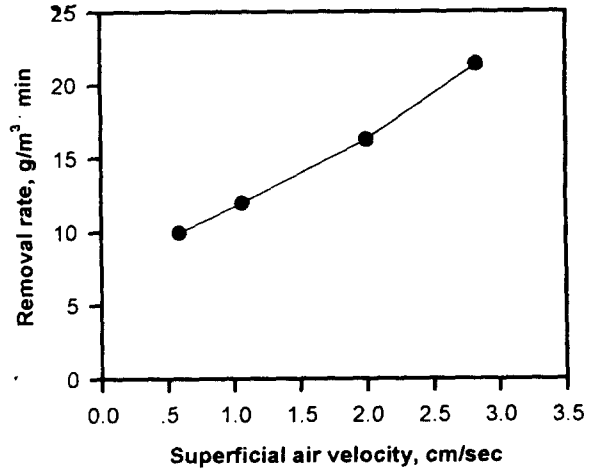


Fig. 5. Change of protein removal rate on superficial air velocity.

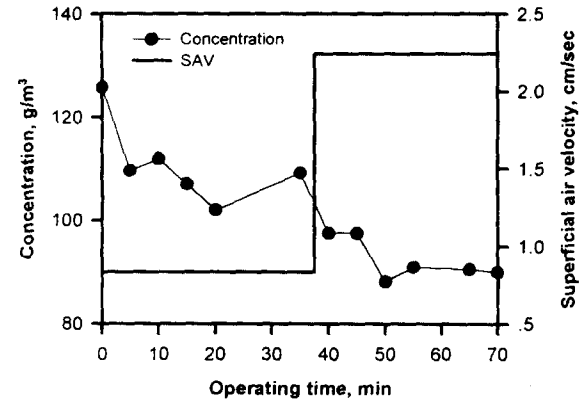


Fig. 6. Protein concentration profiles with treatment time at different SAV.

액본체 단백질 농도에 대해 제거되는 분율은 감소하는 것으로 사료된다.

포말 분리관에 공급하는 공기유속의 변화에 따른 단백질 제거 효율의 영향을 조사하기 위하여 원수의 초기 단백질 농도를 149g/m³로 유지하고, 공탑 공기유속을 0.59, 1.06, 2.00 및 2.83cm/s로 변화시키는데 따른 액본체 단백질의 농도변화와 제거율의 변화를 Fig. 4에 도시하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 공기유속이 증가함에 따라 단백질이 제거되는 데 걸리는 시간이 짧아져서 동일시간에서의 제거율은 보다 향상됨을 알 수 있었다. 이는 공탑 공기유속이 증대할수록 기-액 계면의 면적이 증가하게 되어 액본체 단백질이 기체와 접촉할 수 있는 기회가 증대되고 그로 인해 흡착에 걸리는 시간이 짧아지므로 동일시간대에서 제거되는 성분들의 양이 증가한 것으로 생각된다.

Fig.5는 공기유속의 변화에 따라 5분이내의 단백질 초기 제거속도를 도시한 것으로 그림에서 보여지는 바와 같이 단백질 제거속도는 공기유속에 관해 일차적으로 따름을 알 수 있었다. 이는 공기 유속의 증가는 기-액

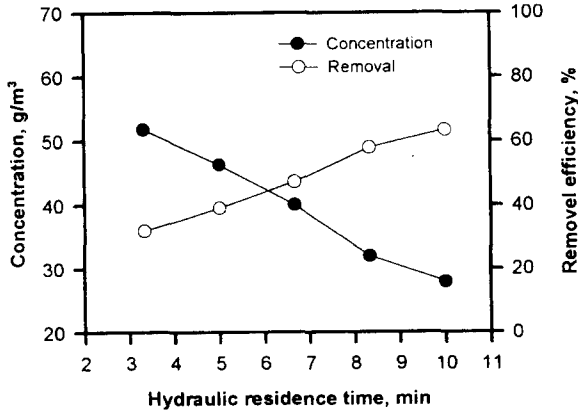


Fig. 7. Changes of protein concentration and removal efficiency on HRT.

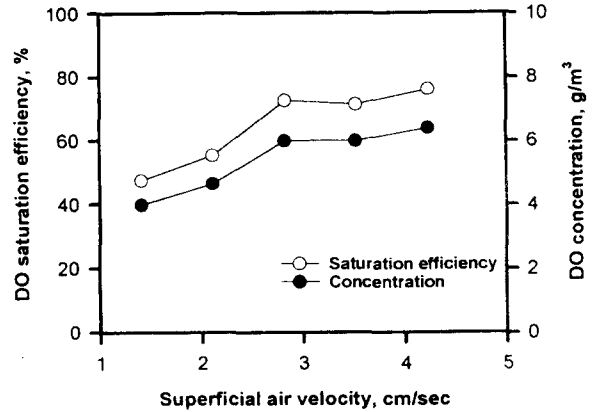


Fig. 9. Effect of SAV on effluent DO saturation efficiency and concentration.

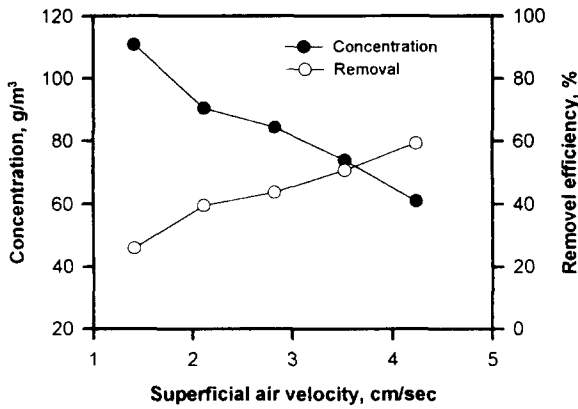


Fig. 8. Changes of protein concentration and removal efficiency on SAV.

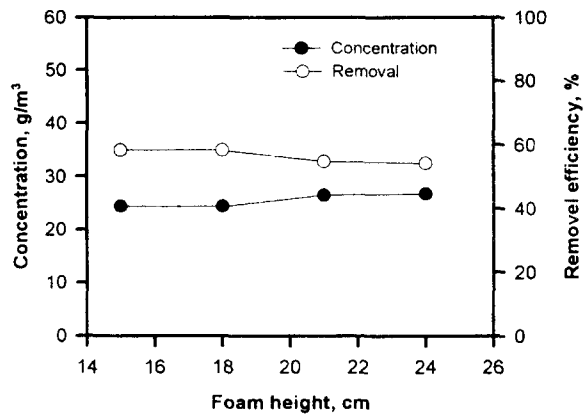


Fig. 10. Changes of protein concentration and removal efficiency on foam height.

계면적의 증가와 비례함을 의미하는 것으로 생각된다.

### 3.2 연속식 포말분리

양어장 순환수의 연속식 포말분리 장치의 운전시 단백질의 제거속도는 일반적으로 체류시간, 공기공탑속도, 포말층 높이등에 영향을 받는다. 연속 운전시 정상상태에 도달하는 시간을 검토하기 위하여 단백질의 농도가 139g/m<sup>3</sup>인 양어장 폐수를 연속공급하면서 유출수의 농도를 측정하였다. Fig. 6에서보여지는 바와 같이 양어장수가 유입되면서 20분 정도 경과후에 어느정도 안정한 값을 나타 내었으며 또 공기공탑속도의 변화가 있는 후에도 20분 이내에 준정상상태에 도달하였다. 이후 실험에서는 운전시작 20분 경과후에 5분 간격으로 시료를 2번 채취하여 평균분석값을 구하여 실험자료로 이용하였다.

포말분리관 내에서 양어장수의 체류시간 변화에 따른 단백질 분리의 특성 변화를 조사하기위하여 공기 공탑속도를 2.1cm/sec, 초기단백질 농도를 149g/m<sup>3</sup>로 일정하게 유지하면서 체류시간을 3.3, 5.0, 6.7, 8.3 및 10분으로 변화시키면서 실험을 행하였다. Fig. 7은 체류시간의 변화에 따른 단백질의 농도와 제거율의 변화

를 나타내었다. Fig. 7에서 보여지는바와 같이 체류시간의 증가에 따라 농도가 단백질 농도는 105g/m<sup>3</sup>에서 60g/m<sup>3</sup>, 제거율은 30%에서 60%로 변화하였다. 체류시간이 길어짐에 따라 제거율이 증가하는 것은 체류시간이 길수록 기포와 접촉하는 시간이 길어져서 흡착기회가 증가했기 때문으로 생각된다.

Fig. 8은 연속적으로 포말분리를 수행하면서 공기공탑속도의 영향을 검토한 것으로 양어장수의 포말분리관 내부에서의 체류시간을 3.3분, 원폐수의 단백질 농도를 149g/m<sup>3</sup>로 유지하여 공기 공탑속도를 1.4, 2.1, 2.8, 3.5cm/sec로 변화시키면서 연속운전을 수행하여 얻어진 결과를 도시한 그림으로 공기공탑속도가 1.4cm/sec부터 3.5cm/sec로 변화함에 따라 액본체의 단백질 농도는 112에서 60g/m<sup>3</sup>으로 낮아졌으며 이에따라 제거율은 45%에서 60%로 증가하였다. 공기공탑속도가 증가함에 액본체 농도가 낮아지는 것은 회분식 실험에서와 같이 공기 유량의 증대로 인한 기-액 접촉 면적의 증대의 결과로 보여진다.

순환 양식 시스템에서는 어류의 호흡 및 대사를 위해 산소 공급이 필요한데 이 산소 공급 장치를 포말 장치로

도 활용 가능하고, 포말관을 병류식 흐름 형태로 운전함으로써 물을 순환시키는데 air lift 펌프로써도 활용이 가능하다. 포말장치가 장치 내의 순환수의 용존 산소에 얼마나 영향을 미치는지 알아보기 위해 공급액의 용존 산소 농도가 3.20 g/m<sup>3</sup>인 경우 포말분리 실험을 수행하며 출구에서 용존 산소 변화를 Fig. 9에 도시하였다. 그림에서와 같이 공기공급속도가 증가할수록 순환수 내의 용존 산소도 증가하는 현상을 나타내어 포말분리기는 매우 효과적인 산소 공급 장치로도 이용되어질 수 있음을 알 수 있었다.

일반적으로 포말분리에 있어서 포말층의 높이가 높아짐에 따라 농축물의 생성량은 작아지게 되고, 물을 배출하는 시간이 길어짐에 따라 농축물의 농도는 상승하게 되므로 적절한 포말층 높이를 사용하면 보다 높은 제거율을 얻을 수 있다. 그러나 포말층의 높이가 너무 높게 되면 포말 농축물의 양이 너무 적어지게 되어 제거량은 오히려 줄어들게 된다. 따라서 포말층 높이의 영향을 살펴보기 위하여 공압 공기 유속을 2.1cm/sec, 체류시간을 5분으로 유지하면서 포말층 높이를 15, 18, 21, 24cm로 변화시킴에 따른 단백질의 액본체내 농도변화와 제거율의 변화를 조사한 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 본 실험의 결과에 의하면 단백질의 제거효율은 포말층 높이가 15 - 24cm일 때 포말층 높이의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

회분식 포말분리관에 양어장 순환수를 충전하여 양어장 순환수로 부터의 단백질 분리 실험을 수행한 결과 액본체 단백질의 약 65% 이상이 10분이내에 제거되었으며 공압공기유속의 증가에 따라 단백질 제거율도 높아졌다.

연속식 포말분리관에서 양어장 순환수를 공급하며 단백질 제거 실험을 수행하며 체류시간, 공기공급속도 및 포말층 높이 등의 영향에 따른 분리 특성을 조사한 결과 체류시간 및 공압공기 유속이 증가할수록 단백질 제거율은 증가하였으나, 포말층 높이의 영향은 없었다. 순환수내의 용존산소 농도는 공기공급속도가 증가할수록 용존산소 농도는 증가하여 포말분리기는 양어장 순환수의 공기공급장치로도 활용될 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학 재단 지정 우수공학연구센터인 부경대학교 해양산업개발연구소의 97년도 연구비 지원

에 의해서 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 서근학 · 이민규, 1995. 포말분리법을 이용한 양어장 순환수처리. 한국수산학회지, 28(5) : 599~606.
- Chen, Shulin. 1994. Modeling surfactant removal in foam fraction I, II. Aquacultural Engineering, 13 : 163~181.
- David, J.W., K.R. Moffatt, 1979. Electrical aspects of adsorbing colloid flotation. Sepa. Sci., Technol., 14(4) : 319~332.
- Dwivedy, R.C. 1973. Removal of dissolved organics through foam fractionation in closed cycle systems for oyster production(Paper No. 73-561). Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI, USA.
- Lemlich, R. 1972. Adsorptive bubble separation techniques, Academic Press, New York, pp. 219~248.
- 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.
- Pinfold, T.A., 1972. Ion flotation in adsorptive bubble separation techniques. Academic Press, New York, : 53~73.
- Rubin, E., 1981. Foam fractionation-some recent studies. In theory, practice, and process principles for physical separations, Proceedings of the Engineering Foundation Conference, ed. M. P. Freeman and J. FitzPatrick. Engineering Foundation, New York, USA., pp. 750.
- Schnepf, R.W. 1959. Foam fractionation. Chem. Eng. Progr., 54 : 42~46.
- 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.