

해수 포말분리공정의 해석 및 모델

허현철 · 서재관 · 박은주 · 김성구
부경대학교 해양산업개발연구소, 부경대학교 생물공학과

Modeling of Foam Separator for Sea Water Treatment

Hyun-Chul HUR, Jae-Koan SEO, Eun-ju PARK, and Sung-Koo KIM
Research Center for Ocean Industrial Development (RCOID), and Department of
Biotechnology and Bioengineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

Experiments were conducted to evaluate a experimental model developed for the protein removal by foam separation. The foam separator was operated in well-mixed tank which would be considered as a completely mixed condition. The feasibility of foam separation to remove protein from sea water was investigated. Protein removal characteristics of the foam separator were obtained by batch experiments. To find the effect of the operating parameter to protein removal rate, the foam separation was carried with variation of initial protein concentration and superficial air velocity.

The result indicated that the protein removal efficiency was increased with increasing protein concentration and superficial air velocity.

The relationship between operation parameters and protein removal rate were evaluated by non-linear regression as the form of exponential function. Using both relationships, the simplified model was determined. The simplified foam separator operation model was verified by the batch operation. The simulation results showed a good relationship with the experimental data.

Key words: foam separation, protein removal, modeling, sea water treatment

서 론

고밀도 어류 양식장에서 발생하는 유기질 고형 성분은 주로 단백질로 구성되어 있으며, 수중에 존재할 경우 어류의 생장 및 양식수 환경에 악영향을 미치게 된다. 포말분리는 수중에 존재하는 용존성 물질과 입상 오염물질을 기포에 부착시켜 분리 및 농축을 통한 수처리 공정으로서 (Chen, 1994; Weeks et al., 1992), 양식폐수의 처리에서도 유용한 공정으로 많은 연구가 수행되어 왔다 (Wheaton, 1977; Spotte, 1979; Huguenin and Colt, 1989).

포말분리에 의해 제거되는 물질은 계면 활성을 가지는 단백질이 대부분이며, 이들은 물-공기 계면에 계면 활성 분자가 농축되는 성향을 가지고 있다 (Rubin, 1981). 이러한 양식에 적용된 포말분리의 분리기작을 해석하는 모델에 대한 여러 연구가 수행되었다 (Dwivedy, 1973; Lawson, 1978; Weeks et al., 1992). 또한 최근에 bulk 용액에서 부상하는 기포로의 대류확산에 의한 질량전달을 이론적으로 해석한 모델이 개발되었다 (Chen et al., 1994). Chen (1994)은 이러한 이론적 해석을 바탕으로 수행한 실험을 통하여 포말분리장치에 의한 계면활성물질의 제거속도가 계면활성제의 농도, 공담공기유속 (superficial air velocity)으로 표현되는 폭기량, 기포의 크기, 기포의 부상 속도 등과 같은 몇가지 운전인자의 함수라고 하였다.

그러나 이러한 모델들은 포말 기포 각각에 대한 고려에서부터 시작하므로 정확한 자료가 필요하고, 또한 그 자료를 구하기 위한 측정에 정밀성이 요구된다. 이러한 기본적인 모델인자의 측정은 상당한 어려움이 있으며, 작은 오차가 전체 모델에 상당한 영향을 미치게 된다. 그러므로 이러한 어려움을 해소하기 위해 지금까지의 이론적 분석해를 바탕으로 한 모델이 아닌 현장 실험에서 수월하게 구할 수 있는 반응속도식을 이용하여 경험적인 모델을

구성할 필요가 있다. 이러한 모델의 정립을 통하여 현장에서 보다 간단히 적용될 수 있고, 또한 장치 설계에도 상당한 도움을 줄 수 있을 것이다.

본 연구에서는 우선 해수 중에서 어류에 유해한 성분인 단백질의 제거에 포말분리법을 이용하였을 경우 단백질의 농도 및 공담공기유속 (superficial air velocity)에 따른 단백질의 제거 특성이 어떻게 나타나는가를 조사하고, 이와 같은 포말분리 장치의 운전 효율에 영향을 미치는 운전인자에 대한 고찰을 통하여 실험적인 모델식을 정립하고 이렇게 정립된 모델식을 이용하여 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 실제 데이터와 비교 검증하였다.

재료 및 방법

1. 포말분리 실험장치

본 논문에서 사용된 포말분리 장치는 Fig. 1과 같이 구성되어있으며, 실험실에서 직접 제작하였다. 포말분리 장치는 시중에서 판매되는 아크릴 판을 이용하여 제작하였으며, 포말 분리장치 내의 액본체 부피는 3 L, 그 단면적은 10×10 cm²이다. 원폐수는 50 L 용량의 수조에 저장하였으며, 수조는 포말분리 운전 기간 동안 완전 혼합 상태로 교반하였다. 포말분리 장치 내로의 공기의 주입은 air pump를 사용하여 폭기시켰으며, 공기유량의 변화로서 공담공기유속의 변화를 주었다. 또한 칼럼 하부에 산기석을 설치하여 일정한 공기 방울 크기로 칼럼내를 통과할 수 있도록 설계하였다. 그리고 칼럼의 상부에 포말을 농축할 수 있도록 경사판을 설치하여 생성된 포말이 일차적으로 농축되도록 하였다. 포말분리장치의 좌측부분에는 칼럼내의 물의 순환을 위하여 따로 수조 내로 관을 설치하여 물의 순환을 유도하였다. 또한 이 관을 통하여 포말이 유

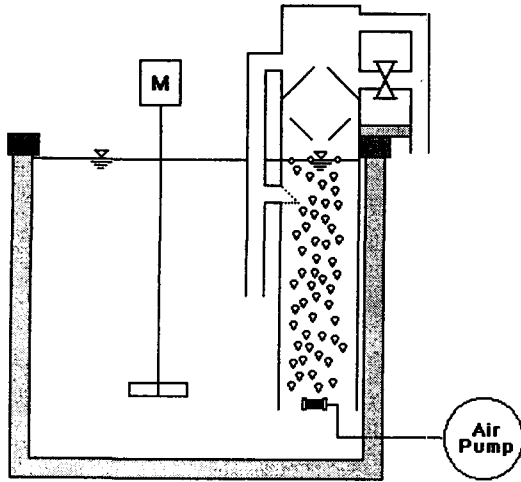


Fig. 1. Schematic diagram of foam separator.

출되지 않도록 관을 45°로 비스듬하게 절단하였으며, 혹시 발생할 지 모를 수조내로의 포말의 유출을 방지하기 위하여 관의 상단부를 다시 칼럼의 상단부와 연결시켰다.

2. 분석방법

실험에 사용한 폐수는 해수를 직접 취수하여 난백(卵白) 단백질을 이용하여 제조한 합성폐수를 이용하였다. 시료는 각 측정 시간마다 수조수를 분취하여 분석하였다. 본 실험에서는 단백질분석을 위하여 UV280 method (Bollag and Edelstein, 1991)를 이용하여 측정하였으며, 공압공기유속은 산기석 내로 유입되는 공기량을 포말분리장치의 단면적으로 나누어 구하였다.

결과 및 고찰

1. 단백질 농도에 따른 제거특성

포말분리를 이용한 단백질의 제거에 있어서 단백질의 농도는 제거속도에 상당한 영향을 준다. 따라서 이러한 단백질의 농도와 제거속도와의 상관관계를 구하기 위하여 단백질의 초기농도를 450 mg/L에서 820 mg/L의 범위로 변화시켜가면서 운전 시간의 경과에 따른 해수 중에 남아 있는 단백질의 농도의 변화를 측정하여 Fig. 2에 나타내었다.

본 실험은 포말층높이와 공압공기유속을 각각 26 cm와 0.65 cm/sec로 일정하게 유지하여 장치를 운전하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 초기 단백질 농도의 변화에 따른 단백질 제거속도는 초기 단백질 농도가 450 mg/L에서 820 mg/L로 높아짐에 따라 13.5~73.0 mg/L-hr로 증가하는 것을 알 수가 있다.

각각의 초기 단백질 농도에서의 제거속도는 Table 1에 나타내었다.

Table 1의 자료를 이용하여 단백질 농도에 따른 포말분리 장치에 의한 단백질 제거속도의 변화를 Fig. 3에 도시하였다.

Chen (1994)은 단백질의 농도와 제거속도와의 상관관계가 일차 직선의 선형적인 상관관계를 가진다고 보고한 바 있다. 그러나 본 논문에서는 사용한 포말분리 장치 구조의 차이, 폭기량의 차이

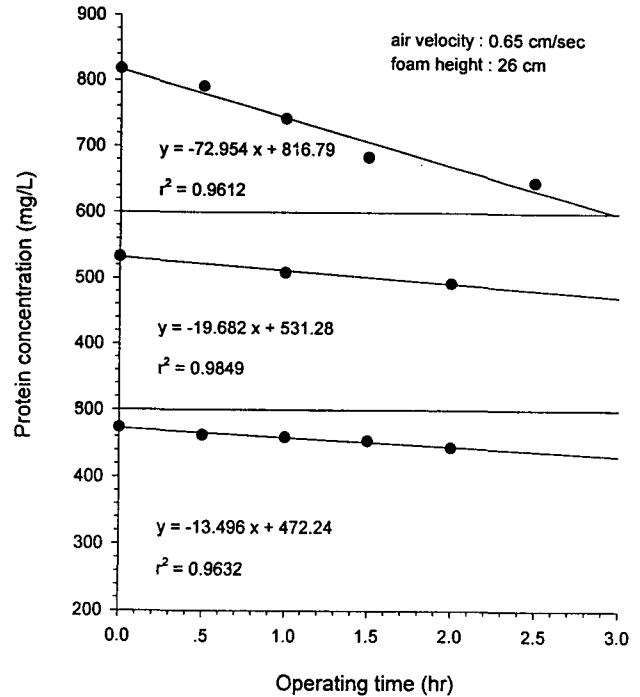


Fig. 2. Removal of protein by foam separation at different protein concentrations. (at superficial air velocity, 0.65 cm/sec and foam height, 26 cm)

Table 1. Protein removal rate at different protein concentrations

Protein concentration (mg/L)	Removal rate (mg/L-hr)
817	73.0
531	19.7
472	13.5

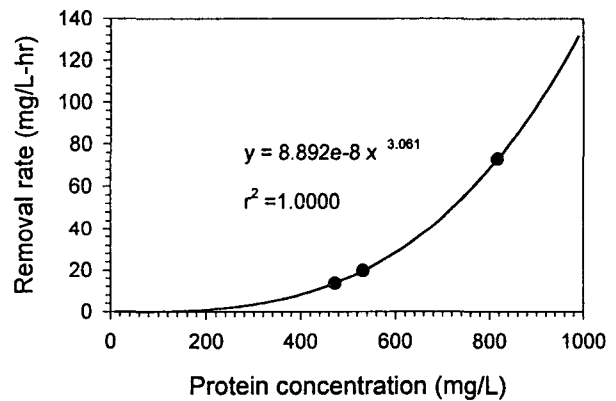


Fig. 3. Protein removal rate at different protein concentration and nonlinear regression of the data.

등으로 인해 제거속도의 변화가 Chen (1994)의 결과와 다르게 나타났으며, 본 논문에서는 단백질 농도뿐 아니라 다른 여러 운전인자의 영향을 함께 고려하기 위해 이러한 자료를 일차의 직선식이 아닌 지수식의 형태로 회귀분석을 수행하여 다음의 지수식을 구하였다.

$$\frac{(dC)_{0.65}}{dt} = 8.892 \times 10^{-8} \times C_0^{3.061} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, $(dC)_{0.65}/dt$ 는 공탑공기유속 0.65 cm/sec에서의 시간경과에 따른 단백질 농도의 변화량을 나타내며, C_0 는 수중에 존재하는 초기 단백질의 농도 (mg/L)이고, dt 는 경과시간 (hr)이다.

이러한 지수식은 단백질의 농도변화에 따른 제거속도의 변화를 나타내는 것이다. 이 지수식과 실제 자료와의 상관성을 나타내는 결정계수가 1.000으로서 자료의 회귀분석의 상관성이 아주 높은 것으로 나타났다. 그러나 본 회귀분석의 경우 수중에 존재하는 단백질의 농도가 아주 높을 경우 지수함수의 특성에 의해 그 제거속도가 실제보다 훨씬 높게 나타나게 되는 단점이 있으며, 따라서 본 회귀분석을 적용할 때에는 본 논문에서 수행한 농도범위를 벗어나지 않는 범위에서 가능할 것이다.

2. 공탑공기유속에 따른 제거특성

포말분리 공정에서 단백질의 제거속도는 공탑공기유속과 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서, 포말분리관에 공급하는 공기유속의 변화에 따른 단백질 분리 특성, 영향 등을 조사하기 위하여 원수의 초기 단백질 농도를 450~500 mg/L로 일정하게 유지하고 포말분리 장치 내로 유입되는 공기유속을 0.65 cm/sec, 0.72 cm/sec, 1.08 cm/sec, 1.24 cm/sec, 1.90 cm/sec로 각각 변화시키면서 단백질의 분리특성을 조사하였다. 각 실험에서의 포말분리 공정 운전시간 경과에 따른 해수 중에 남아 있는 단백질의 농도는 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 포말분리 공정의 공기유속이 증가함에 따라서 단백질 제거 효율을 또한 증가하고 있음을 알 수 있다. 일정한 초기 단백질 농도 (450~500 mg/L)에서의 단백질 제거속도의 변화는 Table 2에 나타낸 바와 같이 공탑공기유속이 0.65 cm/sec일 때 단백질 제거속도가 13.5 mg/L-h이였으나, 공탑공기유속이 증가함에 따라 증가하였으며, 공탑공기유속이 1.9 cm/sec일 때, 52.0 mg/L-hr의 단백질 제거속도를 나타내었다.

Table 2에서 상대제거속도 (relative removal rate)는 공탑공기유속의 증가에 따라 단백질의 제거속도가 증가하는 정도를 나타내는 수치를 표현한 값으로서 Eq. 2와 같이 각각의 공탑공기유속에서의 제거속도를 공탑공기유속이 0.65 cm/sec일 때의 단백질 제거속도로 나누어 구하였다.

$$R = \frac{(dC)_u}{dt} / \frac{(dC)_{0.65}}{dt} = \frac{(dC)_u}{(dC)_{0.65}} \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서, R 은 상대제거속도 (무차원), u 는 포말분리 장치 내로 폭기되는 공기의 상향유속 즉 공탑공기유속 (cm/sec)을 나타내고, $(dC)_u$ 는 공탑공기유속 u cm/sec일 때의 단위 시간동안의 단백질 농도 변화량이고, $(dC)_{0.65}$ 는 공탑공기유속 0.65 cm/sec일 때의 단백질 농도 변화량을 나타낸다. 각각의 공탑공기유속에서의 상대제거속도의 변화를 Fig. 5에 도시하여 나타내었다.

Fig. 5에 나타나 있는 곡선은 이러한 자료를 지수함수로 비선형 회귀분석을 하여 구한 것으로 Fig. 5에 나타나 있는 지수식은

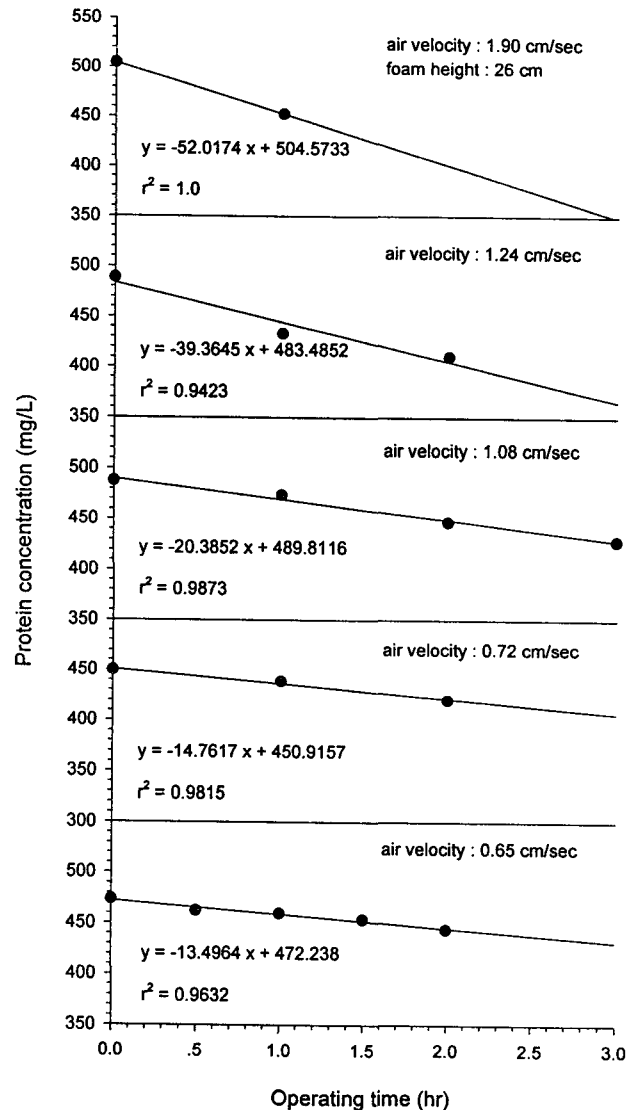


Fig. 4. Removal of proteins by foam separation at different aeration rates. (at foam height of 26 cm)

Table 2. Protein removal rates and reative removal rates at different aeration rates

Superficial (cm/sec)	Removal rate (mg/L-hr)	Relative removal rate
0.65	13.5	1.00
0.72	14.8	1.09
1.08	20.4	1.51
1.24	39.4	2.92
1.9	52.0	3.85

공탑공기유속의 변화에 따른 상대제거속도의 변화를 나타내는 것이다. 이 식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$R = 1.767 \times u^{1.258} \quad (\text{Eq. 3})$$

Fig. 5에서 비선형 회귀분석의 결과와 실제 자료와의 상관성을

나타내는 결정계수 R^2 값이 0.9083으로 상관성이 높은 것으로 나타났다. 그러나 이러한 회귀분석 결과에서도 앞의 농도에 따른 제거 속도와 마찬가지로 아주 높은 공탑공기유속 하에서는 실제보다 높은 제거속도값을 나타내게 된다는 오차를 내포하고 있으며, 따라서 이러한 회귀분석결과를 적용하려면 본 논문에서 수행한 범위 내에서 적용이 가능할 것이다.

3. 포말분리 공정 모델

단백질의 농도변화와 공탑공기유속의 변화에 따른 해수중의 단백질의 제거속도의 변화 측정결과는 다음의 두 가지 식으로 나타낼 수 있었다.

단백질 농도의 변화에 따른 단백질 제거속도의 변화는 Eq. 1로 나타내었다.

$$\frac{(dC)}{dt} = 8.892 \times 10^{-8} \times C_0^{3.061} \quad (\text{Eq. 1})$$

또한 공탑공기유속의 변화 즉 폭기량의 변화에 따른 단백질 제거속도의 변화는 Eq. 3과 같이 구하였다.

$$R = 1.767 \times u^{1.258} \quad (\text{Eq. 3})$$

위의 두 식을 조합하여 초기 단백질 농도 및 공탑공기유속의 영향을 고려한 하나의 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} f(C_0, u) &= \frac{(dC)_{0.65}}{dt} \times R \\ &= \frac{(dC)_{0.65}}{dt} \times \frac{(dC)_u}{(dC)_{0.65}} = \frac{(dC)_u}{dt} \\ &= 1.5712 \times 10^{-7} \times C_0^{3.061} \times u^{1.258} \\ \therefore f(C_0, u) &= 1.5712 \times 10^{-7} \times C_0^{3.061} \times u^{1.258} \quad (\text{Eq. 4}) \end{aligned}$$

이 식에서 $f(C_0, u)$ 는 초기 단백질 농도 C_0 mg/L이고, 공탑공

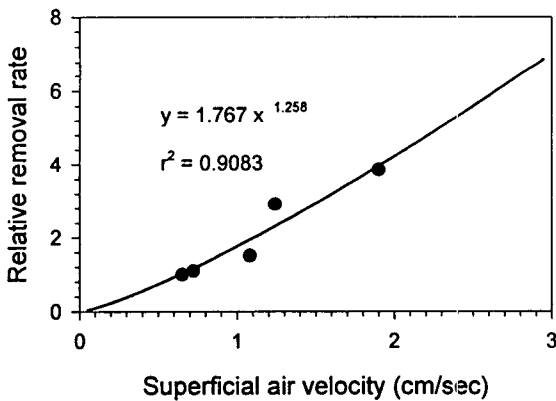


Fig. 5. Protein removal rates at different aeration rates and nonlinear regression of the data.

기유속 u cm/sec일 때에 dt 시간 경과동안 제거되는 단백질의 양을 나타내고 있다. 이 식을 이용하여 초기 단백질 농도와 공탑공기유속의 변화에 따른 포말분리 장치의 단백질 제거공정을 시뮬레이션 하여 Fig. 6에 도시하였다.

Fig. 6은 초기 단백질 농도와 공탑공기유속을 각각 473 mg/L, 521 mg/L, 818 mg/L와 0.65 cm/sec, 1.08 cm/sec로 변화를 주어 실험한 세 가지 경우의 실험 결과치와 본 논문에서 도출한 모델식을 이용하여 각각의 경우에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과치를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 6에서 점으로 표시된 것이 실제 실험 결과치이며, 선으로 도시된 것이 식 3을 단위 시간 0.1 hr로 운전 시작시간부터 3시간동안의 단백질 농도를 유한차분법으로 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 시간에 따른 해수 중의 단백질 농도는 시뮬레이션한 수치와 실제 실험치를 비교하였을 때, 고농도의 단백질 제거 결과에서 다소 차이가 있으나, 대부분의 실제 측정치 값이 시뮬레이션한 값과 거의 일치하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 modeling한 식 3을 이용하여 해수 포말분리공정에서 단백질 제거 속도 및 농도를 예측할 수 있으리라 판단된다.

요 약

포말분리 장치를 이용한 해수 중의 단백질 제거 특성을 조사한 결과, 단백질 농도가 높을 수록 또한 폭기량이 높을수록 단백질의 제거속도는 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 각각의 제거특성을 통계학적으로 비선형 회귀분석하여 각각의 인자의 변화에 따른 단백질 농도의 변화를 다음의 식으로 나타낼 수 있었다.

$$f(C_0, u) = 1.5712 \times 10^{-7} \times C_0^{3.061} \times u^{1.258}$$

위 식을 이용하여 유한차분법으로 시뮬레이션을 수행한 결과 실제 포말분리 운전에서 나타난 결과와 상관성이 아주 높은 결과를 얻을 수 있었다.

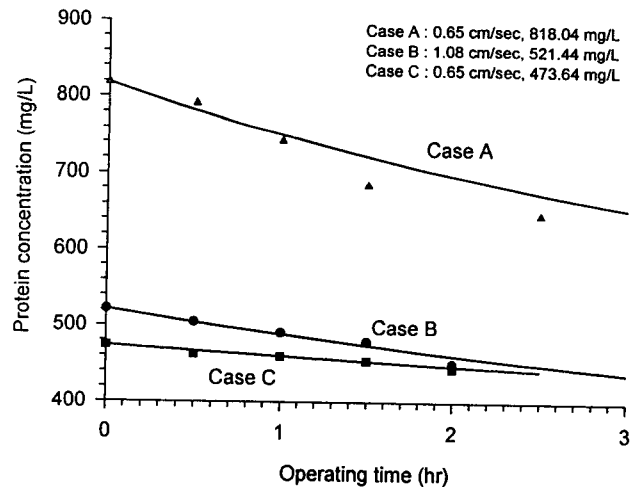


Fig. 6. Result of the simulation of foam separation.

사 사

본 논문은 98년도 해양수산부 수산특정연구사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Bollag, D.M. and S.J. Edelman. 1991. Protein methods. Wiley-Liss, New York, USA., 46pp.
- Chen, S., M.B. Timmons, J.J. Bisogni, and D.J. Aneshansley. 1994. Modeling surfactant removal in foam fractionation : I - theoretical development. *Aquacultural Eng.* 13 (3) 163~181.
- Chen, S. 1994. Modeling surfactant removal in foam fractionation : II - experimental investigations. *Aquacultural Eng.* 13. 183~200.
- Dwivedy, R.C. 1973. Removal of dissolved organics through foam fractionation in closed cycle systems for oyster production (Paper No. 73~561). *An. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI, USA.*
- Huguenin, J.E. and J. Colt, 1989. Design and operating guide for aquacultural seawater systems, Elsevier, 264pp.
- Lawson, T.B. 1978. Venturi design parameters for air injection into a foam fractionation system. PhD dissertation. The University of Maryland, College Park, MA, USA.
- 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., 750pp.
- Spotte, S.H. 1979. Seawater aquariums, the captive environment. Wiley, New York. USA., 238pp
- 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. *Aquacultural Eng.*, 11, 251~265.
- Wheaton, F.W. 1977. *Aquacultural Engineering*, Wiley, New York, USA., 708pp.

1998년 9월 2일 접수

1999년 2월 22일 수리