

포말분리공정의 운전인자 변화에 따른 수처리 특성

허현철 · 김성구†

부경대학교 생물공학과

Water Treatment Characteristics by Foam Separator According to Operation Parameters

Hyun-Chul Hur and Sung-Koo Kim

Department of Biotechnology and Bioengineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

Abstract

A study was conducted to evaluate a protein removal characteristics 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 fresh and sea water was investigated. Protein removal characteristics of the foam separator were obtained by batch reactor operations. To find the effect of the operating parameter to protein removal rate, the foam separation was carried with variation of initial protein concentration and foam height. The results indicated that the protein removal efficiency was increased with increasing protein concentration and decreased with increasing foam height. The relationship between protein concentration and protein removal rate was evaluated by linear regression.

Key words : foam separation, protein removal, water treatment

서 론

포말분리는 용존물질과 입자상 오염물질의 분리 및 농축 공정으로 양식폐수의 처리 공정으로 많은 연구가 수행되어 왔다^{1,2,3)}. 순환여과식 양식장에서서 사료 찌꺼기 및 어류의 배설물 등으로 인해 발생하는 유기질 고형 성분은 어류의 성장 및 환경에 악영향을 미치게 된다. 이러한 유기질 고형 성분은 주로 단백질로 구성되어 있으며, 미생물에 의해 분해되어 어류의 성장에 유해한 NH_3 , NO_2^- 를 생성할 뿐 아니라 용존산소를 소모하게 된다.

포말분리는 수중에 존재하는 입자상 물질이나 용존성 오염물질을 기포에 부착시켜 분리시키는 방법이다^{4,5)}. 포말분리에 의해 제거되는 물질은 계면 활성을 가지는 단백질이 대부분이며, 이들은 물-공기 계면에 계면 활성 분자가 농축되는 성향을 가지고 있다⁶⁾. 또한 포말분리는 입경이 30 μm 이하의 미세입자 제거에 매우 효과적이며, 에너지 소비가 낮고 타공정에 비해 운전 및 유지비가 저렴하여 연속 운전이 가능하고 역세척이 필요 없다는 장점을 지니고 있다⁷⁾. 또한 포말분리 장치를 통하여 양어장에 산소를 공급할 수도 있고 물을 순환시키는 air lift pump로서도 활용이 가

† Corresponding author

능하다.

양식분야에 있어서 포말분리에 의한 오염물질의 제거 특성을 설명하기 위한 모델에 대한 여러 연구가 수행된 바 있다^{5,6,9}. 최근에, bulk 용액에서 부상하는 기포로의 대류 확산에 의한 질량전달을 해석한 모델이 개발되었다⁴. 또한 Chen¹⁰은 이러한 이론적 해석을 바탕으로 수행한 실험을 통하여 포말분리장치에 의한 계면활성물질의 제거속도가 계면활성제의 농도, 공탑공기유속(superficial air velocity)으로 표현되는 폭기량, 기포의 크기, 기포의 부상 속도 등과 같은 몇가지 운전인자의 함수라고 보고하였다. 또한 Chen¹¹은 단백질이 포말분리에 있어서 가장 주된 계면활성 물질이고, Lowry's method¹²로 측정되는 총 단백질의 11%가 표면활성을 가진다고 보고하였다.

본 연구에서는 해수 및 담수 양어장수 중에 존재하는 어류에 유해한 성분인 단백질의 제거에 포말분리법을 이용하였을 경우 단백질의 제거효율에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위해 단백질의 농도 및 포말층 높이 등에 따른 운전 특성이 어떻게 나타나는가를 조사하였다.

재료 및 방법

1. 포말분리 실험장치

본 논문에 사용한 포말분리 실험장치는 Fig. 1과 같이 구성되어있으며, 시중에서 판매되는 아크릴관을 이용하여 실험실에서 직접 제작하였다. 포말 분리장치 내의 액분체 부피는 3 L, 단면적은 10×10 cm²이다. 원폐수는 50 L 용량의 수조에 저장하였으며, 수조는 포말분리 운전 기간 동안 완전혼합 상태로 교반하였다. 포말분리 장치 내로의 공기의 주입은 air pump를 사용하여 폭기시켰으며, 공기유량에 여러 단계를 주었다. 또한 칼럼 하부에 산기석을 설치하여 일정한 공기 방울 크기로 칼럼 내를 통과할 수 있도록 설계하였다. 그리고 생성된 포말이 아무런 농축없이 칼럼 상부를 통과하여 유출되는 것을 방지하고 생성된 포말 틈 사이로 모세관 현상에 의하여 포말이 아닌 물방물들이 포말과 함께 유출되는 현상을 방지하기 위하여 칼럼 상부에 포말을 농축할 수 있도록 경사판을 설치하여 생성된 포말이 일차적으로 농축이 이루어지도록 하였다. 포말분리장치의 좌측부분에는 칼럼내의 물의 순환을 위하여 따로 수조 내로 관을 설치하여 물의 순환을 유도하였다. 또한 이 관을 통하여 포말이 유출되지

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

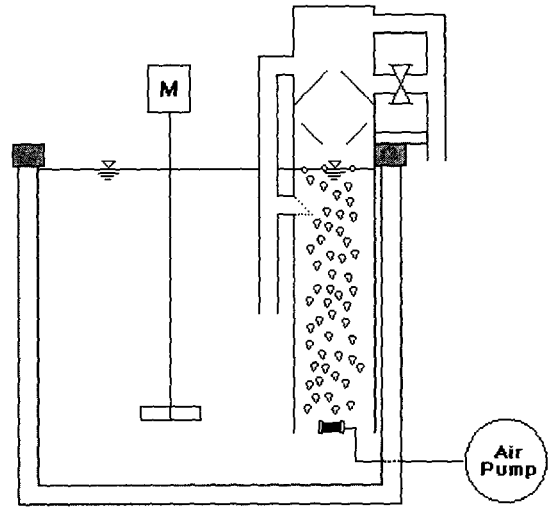


Fig. 1. Schematic diagram of foam separator.

2. 분석방법

실험에 사용한 폐수는 담수 및 해수를 직접 취수하여 난백 단백질을 이용하여 제조한 합성폐수를 이용하였다. 시료는 각 측정시간마다 수조수를 분취하여 분석하였으며, 본 실험에서 단백질 농도의 측정은 해수의 경우 UV spectrophotometer를 이용하여 파장 280 nm에서 측정하는 UV 280 method¹³로 측정하였으며, 담수의 경우 Lowry's method¹²를 이용하였다.

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 포말층높이와 공탑공기유속을 일정하게 유지한 상태에서 서로 다른 초기 단백질 농도로 포말분리 실험을 수행하였다. 각 실험에서 측정된 시간의 경과에 따른 단백질 농도의 변화는 Fig. 2에 나타내었다.

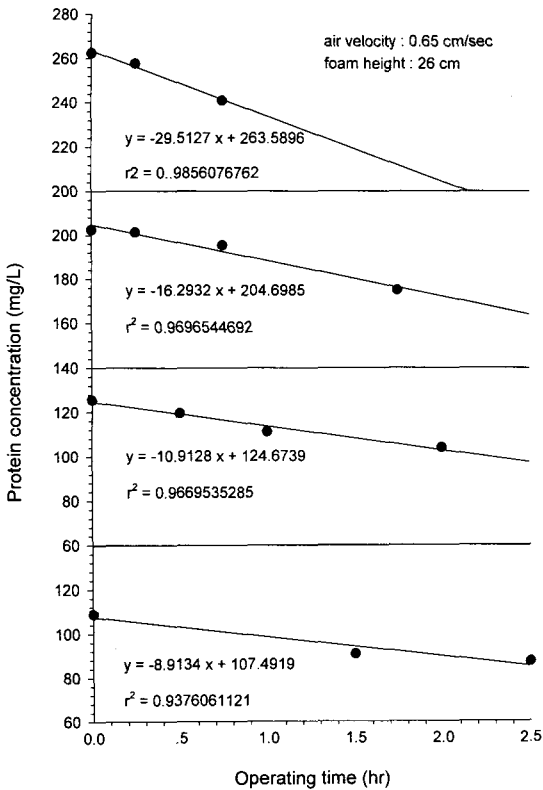


Fig. 2. Removal of protein by foam separation at different protein concentrations. (at superficial air velocity, 0.65 cm/sec and foam height, 26 cm)

Fig. 2에 나타난 실험결과는 포말층 높이 26 cm, 공탑 공기유속 0.65 cm/sec로 일정하게 유지한 상태에서 초기 단백질 농도를 108~262 mg/L로 변화를 주었을 때, 시간의 경과에 따른 단백질 농도의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 초기 농도가 높을 수록 단백질 제거속도 또한 8.9~29.5 mg/L-hr로 증가하는 것을 알 수가 있다.

이러한 각각의 초기 단백질 농도에서의 제거속도는 Table 1에 나타나 있다.

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

Chen¹⁰⁾은 단백질의 농도와 제거속도와의 상관관계를 구

Table 1. Protein removal rate at different protein concentration

Protein concentration (mg/L)	Removal rate (mg/L-hr)
263.6	29.5
204.7	16.3
124.7	10.9
107.5	8.9

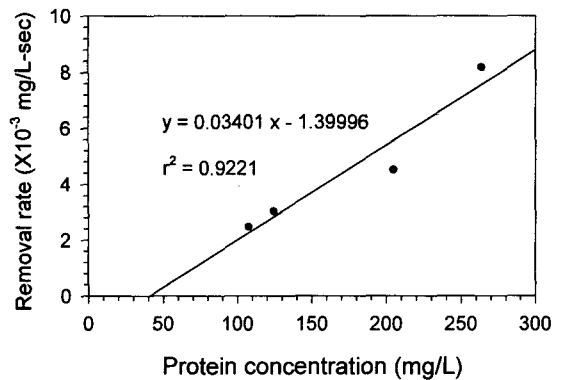


Fig. 3. Protein removal rate at different protein concentration and linear regression of the data.

하기 위해 공탑공기유속 2.3 cm/sec에서 100~200 mg/L로 초기 단백질 농도를 변화시켜가면서 운전 초기의 단백질 제거속도의 변화를 측정하였으며, 그 결과 운전초기 5분 동안의 단백질 제거속도가 단백질의 농도와 선형적인 상관관계를 있음을 확인하고 그 관계식을 Eq. 1과 같이 나타내 바 있다.

$$\frac{dC}{dt} = 9.2 \times 10^{-3} C_0 - 78.3 \times 10^{-3} \quad (\text{Ed. 1})$$

여기서, C_0 는 수중에 존재하는 초기 단백질 농도(mg/L)이고, dt 는 경과시간(sec)이다.

그러나 본 논문에서는 사용한 포말분리 장치 구조의 차이, 폭기량의 차이 등으로 인해 제거속도의 변화가 Chen¹⁰⁾의 결과와는 달리 Eq. 2와 같이 나타났다.

$$\frac{dC}{dt} = 0.0304 \times 10^{-3} C_0 - 1.4 \times 10^{-3} \quad (\text{Eq. 2})$$

Eq. 2에 나타난 기울기 값은 단백질의 농도변화에 따른 제거속도의 변화를 나타내는 것으로, Chen¹⁰⁾의 경우와 비교하여 볼 때에 그 값이 상대적으로 작게 나타났다. 이것은 Chen¹⁰⁾의 경우 공탑공기유속 2.3 cm/sec로서 본 실험에서는 이보다 낮은 0.65 cm/sec로 운전함에 따른 영향으로 판단된다. 그러나 선형 회귀분석에 의한 식과 실제 자료와의 상관성을 정도를 나타내는 지표인 결정계수 값은 0.92 21로서 높은 수치를 나타내고 있어, 이러한 선형 회귀분석 결과가 통계적으로 높은 상관성을 가지고 있음을 나타내고 있다.

2. 포말층높이에 따른 제거특성

포말분리장치의 운전에 있어서 포말층높이가 높아짐에 따라서 유출수는 농축되어 농도가 높아지고, 농축된 유출수의 양은 작아지게 된다. 포말층높이에 따른 단백질의 제거속도 변화를 측정하기 위하여 포말층높이를 각각 26 cm와 36 cm로 단계를 주어 실험을 수행하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 공탑공기유속 0.72 cm/sec, 1.90 cm/sec에서의 포말층높이의 변화에 따른 제거속도의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4는 공탑공기유속 즉 폭기량이 낮은 경우이고, Fig. 5는 폭기량이 높은 경우의 포말층높이의 차이에 따른 단백질 제거속도의 변화를 나타낸 그래프이다.

Fig. 4의 경우 낮은 공탑공기유속(0.72 cm/sec)에서 포

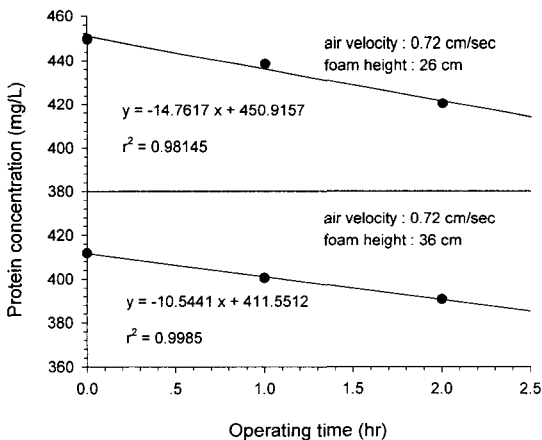


Fig. 4. Removal of protein by foam separation at different foam height. (at superficial air velocity, 0.72 cm/sec)

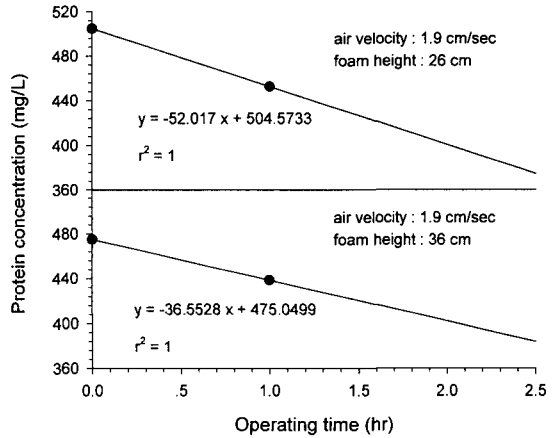


Fig. 5. Removal of protein by foam separation at different foam height. (at superficial air velocity, 1.90 cm/sec)

말층높이에 따른 단백질의 제거특성을 보여주는 것으로 포말층의 높이가 26 cm에서 36cm로 높아짐에 따라 단백질의 제거속도가 낮아짐을 보여주고 있다. 이와 마찬가지로 Fig. 5의 높은 공탑공기유속(1.90 cm/sec)에서의 실험에서도 포말층높이가 높아질수록 단백질 제거속도가 감소하는 같은 경향을 나타내고있음을 알 수 있다. 이러한 제거속도의 감소율은 Fig. 6과 Table 2에 나타내었다.

Table 2에 나타나 있듯이 각각의 공기유속에서의 포말층높이가 10 cm 증가할 때 단백질 제거속도가 낮은 포말층에서의 제거속도 보다 약 30 %가 감소함을 알 수가 있었다. 이러한 결과로 미루어 공탑공기유속에 관계없이 포말층

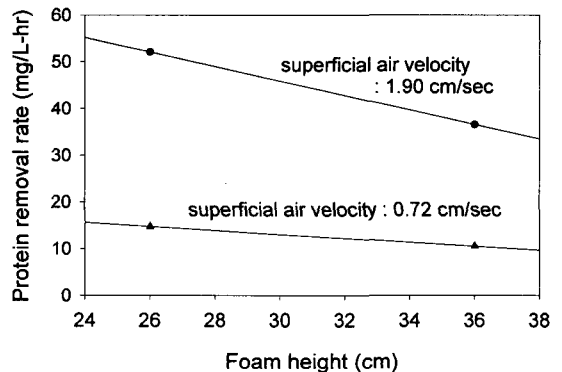


Fig. 6. Protein removal rate at different foam height.

Table 2. Protein removal rate at different foam height

Superficial air velocity (cm/sec)	포말층 높이 (cm)	제거속도 (mg/L-hr)	제거속도 감소율 (%)
0.72	26	14.8	28.6
	36	10.5	
1.90	26	52.0	29.8
	36	36.6	

의 높이가 높아질수록 단백질의 제거속도의 감소정도가 일정하게 나타남을 알 수가 있었다.

요 약

포말분리 장치를 이용한 해수 중의 단백질 제거 특성을 조사한 결과, 단백질 농도가 높을 수록 그리고 포말층높이가 낮을수록 단백질의 제거속도는 증가하는 것으로 나타났다.

단백질의 농도에 따른 제거속도의 변화는 단백질의 농도가 높을수록 그 제거 속도 또한 증가하는 것으로 나타났으며, 본 논문의 폭기량 0.65 cm/sec로 운전한 실험 결과에서 단백질 농도와 제거속도와의 관계가 다음과 같이 나타났다.

$$\frac{dC}{dt} = 0.0304 \times 10^{-3} C_0 - 1.4 \times 10^{-3}$$

또한 포말층높이의 변화에 대해서도 포말층의 높이가 클 수록 그 제거속도는 감소하는 것으로 나타났다. 이때에 폭기량이 많을수록 단백질의 제거속도 또한 크게 나타났으며, 포말층높이의 증가에 따른 제거속도의 감소 정도 또한 폭기량이 많을수록 크게 나타났다. 그러나 상대적인 수치에 따르면, 폭기량에 상관없이 포말층 높이가 10 cm 증가함에 따라 낮은 포말층 높이에서의 제거속도의 대략 30 % 정도가 감소하는 것으로 나타나 상대적인 감소율의 비는 일정한 것으로 나타났다.

사 사

본 논문은 부경대학교 해양식량자원개발특성화사업단의 지원에 의해 수행되었으며, 또한 부경대학교 해양식량자원

개발특성화사업단 전임연구원 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Huguenin, J. E. and Colt, J. *Design and operating guide for aquacultural seawater systems*, 264pp., Elsevier, (1989).
- Spotte, S. H. *Seawater aquariums, the captive environment*. 238pp. Wiley, New York. USA., (1979).
- Wheaton, F. W. *Aquacultural Engineering*. 708pp., Wiley, New York, USA., (1977).
- Chen, S., Timmons, M. B., Bisogni, J. J. and Aneshansley, D. J. Modeling surfactant removal in foam fractionation : I - theoretical development. *Aquacultural Eng.* 13(3), 163-181, (1994).
- Weeks, N. C., Timmons, M. B. and Chen, S. Feasibility of using foam fractionation for the removal of dissolved and suspended solids from fish culture. *Aquacultural Eng.*, 11, 251-265. (1992).
- Rubin, E. Foam fractionation-some recent studies in theory, practice and process principles for physical separations. 750pp., ed. M. P. Freeman and J. A. FitzPatrick. *Proceedings of the Engineering Foundation Conference*, Engineering Foundation, New York, USA., (1981)
- 서근학, 이민규, 이민수, 김병진, 김은정, 조문철. 포말 분리법을 이용한 양어장 순환수 처리 - II. 고형물 제거특징 -. *한국수산학회지*, 30(3), 334-339, (1997).
- Dwivedy, R. C. 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*, (1973).
- Lawson, T. B. Venturi design parameters for air injection into a foam fractionation system. PhD dissertation, The University of Maryland, College Park, MA, USA., (1978).
- Chen, S. Modeling surfactant removal in foam fractionation : II - experimental investigations. *Aquacultural Eng.* 13, 183-200, (1994).
- Chen, S. Theoretical and experimental investigation of foam separation applied to aquaculture. PhD dissertation, Cornell University, Ithaca, New York, USA., (1991).
- Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L. and Randall, R. J. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biochem.*, 193, 265-275, (1951).
- Bollag, D. M. and Edelstein, S. J. *Protein methods*. 46 pp., Wiley-Liss, New York, USA., (1991).