

해수활어수조의 포말분리시 단백질 농도의 영향

서근학* · 신정식 · 이창근 · 이석희 · 천재기 · 조재윤¹

부경대학교 화학공학과, ¹부경대학교 양식학과

Effect of Protein Concentration on Foam Separation in a Seawater Aquarium

Kuen-Hack SUH*, Jeong-Sik SHIN, Chang-Kuen LEE, Seok-Hee LEE, Jae-Kee CHEON and Jae-Yoon JO¹

Division of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
Department of Aquaculture, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Effect of initial protein concentration on the protein removal rate was assessed for seawater aquarium using a foam separator. Protein removal rate was increased and removal efficiency was decreased with the increase of initial protein concentration. Enrichment ratio was decreased and foam generation rate was increased with the increase of initial protein concentration. Total suspended solids (TSS) removal rate was increased with the increase of initial protein concentration, and TSS removal efficiency was decreased with the increase of initial protein concentration. Turbidity removal rate and removal efficiency were increased with the increase of initial protein concentration.

Key words: Foam separation, Aquarium, Protein, Seawater

서론

활어수조의 가장 중요한 기능은 활어가 소비될 때까지 폐사하지 않고 보존할 수 있는 기능이다. 활어수조에서 어류가 폐사하게 되는 이유는 수질오염, 용존산소 부족, 병원균의 발생 등이다. 이들 원인 중 가장 큰 문제는 수질오염이며 이와 더불어 원활하지 못한 산소 공급이 어류의 생존기간을 단축시키는 주요 원인이 된다. 활어수조의 수질오염 원인은 사료 찌꺼기나 어류의 배설물 등에 의하여 용수 내에 생물학적 오염물이 증가하기 때문이며 생물학적 오염물로는 부유 고형물, 단백질, 용존 유기물, 암모니아 등이 있다 (Miller and Libey, 1984).

최근 수중의 어류에 유해한 성분을 동시에 처리할 수 있는 방법으로 연구되어지고 있는 포말 분리법 (Timmon and Chen, 1995)은 장치의 구조가 간단하면서 어류에 유해한 부유 고형물, 용존 유기물 등을 동시에 제거할 수 있을 뿐만 아니라 용존산소도 공급할 수 있어 활어수조에 대한 적용 가능성이 매우 높다.

활어수조 내 어류 성장 환경에서 발생하는 생물학적 오염물 중 단백질 성분은 소수기와 친수기를 함께 가지는 구조적 특성으로 인해 계면활성제 역할을 할 수 있다. 따라서 포말분리를 양식장, 활어수조 등과 같이 어류 등에 의한 생물학적 오염물을 발생하는 공정에 적용할 경우 별도의 계면활성제를 첨가하지 않아도 포말분리를 가능하게 해줄 수 있어 매우 적합한 공정으로 생각된다 (Bhattacharjee et al., 2001; Saleh and Hossain, 2001).

포말 분리법을 이용하여 수중의 생물학적 오염물을 제거하는 공정에 대한 연구는 외국의 경우 순환여과식 양식장 등에 적용시키는 연구가 진행되어 왔다. 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 하였으며, Chen (1996)은 포말 분리법에 양식장수의 부유성 물질을 매우 효과적으로 제거할 수 있음을 확인하였다.

우리나라의 경우, 외국에 비하여 이에 대한 연구가 부족하며 최근에는 Suh and Lee (1995)에 의해 포말 분리법에 의한 양어장 순환수 처리에 관한 연구가 진행되었는데 포말 분리법에 의한 담수 중의 고형물 제거 특성을 조사한 결과 장치의 효율에 영향을 미치는 주요 인자들은 공압 공기유속, 체류시간, 그리고 포말층의 높이였으며 측정된 양어장수 시료 내에는 총 단백질량의 약 50% 정도가 계면활성 성분으로 포말분리의 적용가능성이 매우 높은 것으로 보고하고 있다.

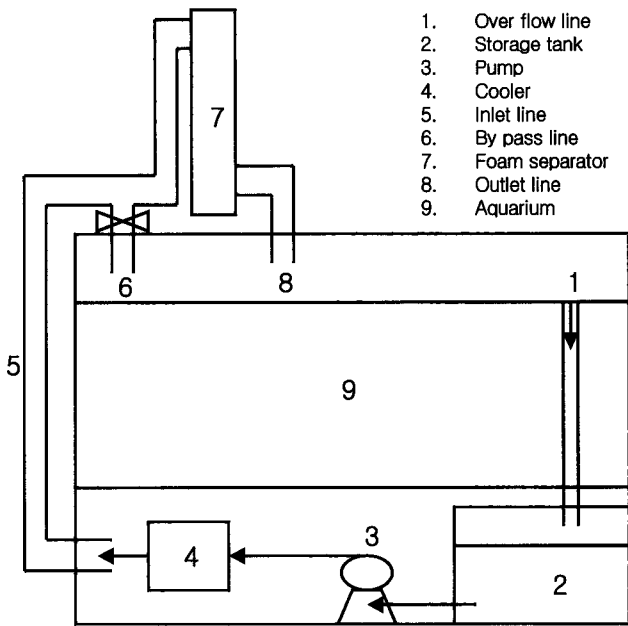
본 연구에서는 포말분리장치를 활어수조에 설치하여 활어수조내의 단백질, 총부유성 고형물 등의 오염물 제거속도를 구하여, 이를 토대로 실제 활어수조에 설치할 수 있는 포말분리 장치의 개발에 필요한 초기 단백질 농도 변화에 따른 단백질 및 총부유성 고형물의 제거 특성을 연구하였다.

재료 및 방법

실험장치 및 운전조건

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 활어수조를 나타낸 것이다.

*Corresponding author: khsuh@pknu.ac.kr



- 1. Over flow line
- 2. Storage tank
- 3. Pump
- 4. Cooler
- 5. Inlet line
- 6. By pass line
- 7. Foam separator
- 8. Outlet line
- 9. Aquarium

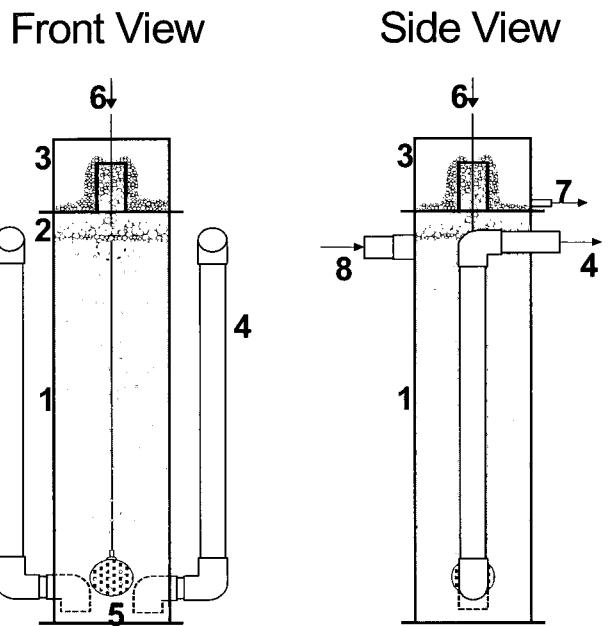
Fig. 1. The schematic diagram of a foam separator aquarium system.

수조 내의 물은 유출구를 통해 장치 하부의 저수조로 유입되고, 저수조의 물은 재순환 펌프에 의해 냉각기를 거쳐 유입구를 통해 다시 수조 내로 유입된다. 이때 수조 내의 물은 냉각기에 의해 항상 $15 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 유지된다. 활어수조의 규격은 가로 115 cm, 세로 70 cm, 높이 110이었고, 수조의 저수용량은 350 L이었다. 재순환 펌프의 순환량은 1000 L/hr이었으며, 순환수의 유입구 쪽에 by pass line 과 활어수조 내의 생물학적 오염물 제거를 위해 포말분리장치를 설치하였다. 또한 by pass line 쪽에 밸브를 설치하여, 포말분리장치의 유입량을 조절 할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 포말분리장치로서 내경 10 cm, 높이 50 cm의 아크릴 관을 사용하여 제작하였으며, 액본체 부피는 3 L이었다. 또한 장치하부에 유리 여과기를 이용한 공기 분산기를 설치하여 기포가 균일하게 발생하도록 하였다. 포말분리장치의 수력학적 체류시간은 by pass line 에 설치된 밸브를 조절하여 0.5분이 되도록 하였으며, 공압 공기유속은 1.5 cm/sec로 조절하였다.

실험 재료 및 분석 방법

수조용수는 담수를 인공해수시약 (Colalife, USA)으로 염도를 30‰로 맞춘 후 사용하였으며, 수조의 단백질 농도는 부경대학교 부속 양어장에서 수거된 포말농축물을 첨가하여 조절하였다. 단백질의 농도 분석은 Lowry의 방법 (Lowry et al., 1951)에 의해 수행하였으며 총 부유 고형물의 농도는 standard method (APHA et al., 1992)에 따라 진공여과법으로 분석하였다. 탁도는 탁도계 (Model 2100N, Hach Co. Ltd.)를 이용하여 측정하였다.



- 1. Separation column
- 2. Foam riser tube
- 3. Collection cup
- 4. Water outlet
- 5. Air distributor
- 6. Air inlet
- 7. Foam outlet
- 8. Water inlet

Fig. 2. The schematic diagram of foam separator.

자료 계산방법

제거속도 계산

포말분리장치에 의한 수조내의 단백질, 총부유성 고형물, 탁도 등의 제거속도는 포말분리장치의 제거속도와 같으므로 각 성분의 제거속도는 포말분리장치의 유입수와 유출수의 농도를 측정하여 계산하였다.

각 성분의 제거속도는 포말에 의해 제거되는 양과 동일하므로 다음과 같다.

$$-r_a = \frac{Q_f C_{f,a}}{V} \tag{1}$$

여기서 $-r_a$ 는 각 성분의 제거속도 (g/L·day 또는 NTU/day), Q_f 는 발생된 포말의 유량 (L/day), $C_{f,a}$ 는 각 성분의 포말 농도 (g/L 또는 NTU), V 는 포말분리장치의 액본체 부피 (L)이다.

포말에 의해 제거되는 각 성분의 양은 유입수와 유출수에 포함된 각 성분의 양의 차와 같으므로 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-r_a = \frac{C_{i,a} \cdot Q_i - C_{o,a} \cdot Q_o}{V} \tag{2}$$

여기서 $C_{i,a}$ 와 $C_{o,a}$ 는 각 성분의 유입수 및 유출수의 농도 (g/L 또는 NTU)이며 Q_i 와 Q_o 는 유입수와 유출수의 유량

(L/day)이다.

또한 유출수의 유량은 유입수의 유량에서 포말로 생성되는 유량의 차와 같으므로 식 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-r_a = \frac{C_{i,a} \cdot Q_i - C_{o,a} \cdot (Q_i - Q_f)}{V} \quad (3)$$

제거율 계산

포말분리장치에 의한 수조내 각 성분의 제거율은 유입수와 유출수의 농도를 측정하여 다음과 같이 계산하였다.

$$R_e [\%] = \frac{C_{i,a} - C_{o,a}}{C_{i,a}} \times 100$$

결과 및 고찰

활어수조에서 어류에 의해 생성되는 생물학적 오염물 중 단백질은 소수기와 친수기를 동시에 가지는 구조적인 특성으로 인해 계면활성제 역할을 할 수 있으며, 포말분리 과정에서 기·액 계면에 농축된다. 따라서 활어수조의 초기단백질 농도는 포말분리 공정에서 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 포말분리장치를 이용하여 생물학적 오염물 제거시 수조 내의 초기 단백질 농도를 변화시켜 초기 단백질 농도에 따른 수조 내 생물학적 오염물 제거 특성을 검토하기 위하여 시간에 따른 단백질, 총부유성 고형물, 탁도, pH, 온도 등의 변화를 측정하였다.

단백질 제거 특성

Fig. 3은 포말분리 운전 시간에 따른 수조 내의 단백질 농도 변화를 나타낸 그림이다. 수조 내의 초기 단백질 농도가 높을수록 단백질 농도가 제거되는 데 더 많은 시간이 소모되었는데, 이는 활어수조 내의 단백질 농도가 증가하면, 이에 따라

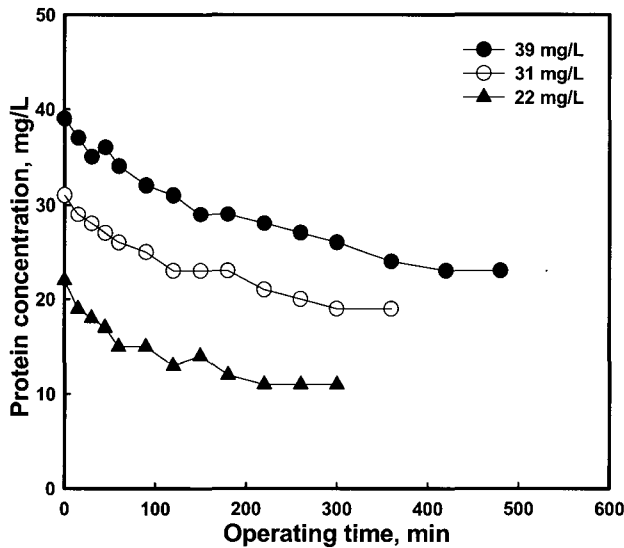


Fig. 3. The change of protein concentration with operating time in the aquarium.

포말분리장치로 유입되는 초기 단백질 농도도 증가하게 된다. 포말분리장치로 유입되는 공기량이 일정할 경우 기포주위에 흡착되어 제거되는 단백질 양은 일정하므로 결과적으로 수조 내의 단백질 농도가 제거되는 데 더 많은 시간이 걸리는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 수조 내의 초기 단백질 농도에 따른 포말분리장치의 평균 단백질 제거속도와 평균 제거율을 나타낸 그림이다. 수조 내의 초기 단백질 농도가 22, 31, 39 mg/L로 증가함에 따라 평균 단백질 제거속도는 각각 9.53, 10.99, 12.14 g/L·day로 증가하는 것으로 나타났으며, 평균 단백질 제거율은 각각 22.9, 15.3, 13.2%로 감소하는 것으로 나타났다. 수조 내의 초기 단백질 농도가 증가할 경우 이에 따라 포말분리장치 내로 유입되는 초기 단백질 농도도 증가하게 된다. 일반적으로 포말분리장치 내로 유입되는 초기 단백질 농도가 증가할수록 단백질 제거 속도는 증가하게 되는데 (Kim, 2002), 이로 인해 활어수조 내의 단백질 제거속도도 증가한 것으로 판단된다. 또한 수조 내의 초기 단백질 농도의 증가에 따라 단백질 제거율이 감소하는 것은 초기 단백질 농도가 증가하여도 기포에 흡착될 수 있는 단백질이 양은 포화농도 이상 증가하지 않으므로 (Urizee and Narsimhan, 1996) 초기 단백질 농도에 대한 제거되는 단백질 농도의 비가 감소하게 되어 결과적으로는 단백질 제거율이 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

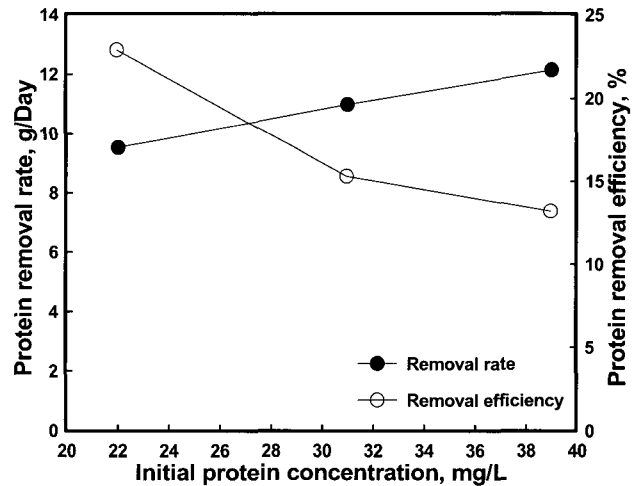


Fig. 4. The change of protein removal rate and removal efficiency with respect to initial protein concentration.

Fig. 5는 수조 내의 초기 단백질 농도에 따른 포말 농축물에 대한 액분체 농도의 비인 농축비와 포말 생성 속도를 나타낸 그림이다. 초기 단백질 농도가 증가함에 따라 농축비는 감소했으나, 포말 생성 속도는 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 농축비와 포말 생성 속도는 서로 반대의 경향을 띠는 것을 알 수 있었다. 이처럼 농축비와 포말 생성 속도가 서로 반대의 경향을 띠는 이유는 포말 분리시 단백질은 기포에 흡착되어 포말의 형태로 제거가 되는데, 이 때 포말은 기·액 계면에서

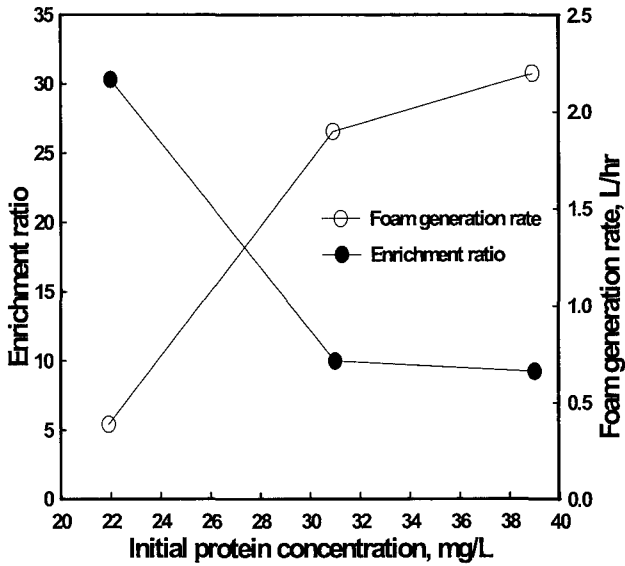


Fig. 5. The change of enrichment ratio and foam generation rate with respect to initial protein concentration.

농축이 된다. 그러나 포말 생성 속도가 빠를 경우 기·액 계면에서 농축이 일어나기 어려우므로 이로 인해 농축비는 떨어지게 된다. 또한 초기 단백질 농도의 증가에 따라 포말 생성 속도가 증가하는 이유는 포말은 기·액 계면에 흡착된 계면활성물질에 의해 대기 중에서도 그 형태가 깨어지지 않고 유지되는 것으로 (Cho and Chang, 1998) 초기 단백질의 농도가 높아질수록 기·액 계면에 흡착되는 단백질의 양이 증가하여 포말이 파괴되지 않고 많이 발생한 것으로 판단된다.

총부유성 고형물 제거 특성

Fig. 6은 포말분리 운전 시간에 따른 수조 내의 총부유성 고형물의 농도 변화를 나타낸 그림이다. 총부유성 고형물의 농도 변화는 단백질의 농도 변화와 유사한 것으로 나타났는데, 이는 총부유성 고형물을 유발하는 주요물질이 포말 농축물이고, 이러한 포말 농축물은 또한 단백질과 관련이 있기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7은 수조 내의 초기 단백질 농도에 따른 포말분리장치의 총부유성 고형물의 평균 제거속도와 평균 제거율을 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 것과 같이 수조 내의 초기 단백질 농도가 22, 31, 39 mg/L로 증가함에 따라 총부유성 고형물의 평균 제거속도는 27.2, 33.9, 40.8 g/L·day로 증가하였으며, 평균 제거율은 26.2, 24.3, 19.2%로 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 양어장순환수에 대한 포말분리 연구를 수행한 Suh et al. (2000)의 연구 결과보다 총부유성 고형물의 제거속도와 제거율이 다소 낮게 나왔는데, 이는 Suh et al. (2000)의 연구에서보다 초기 단백질 농도 범위가 낮기 때문인 것으로 판단된다. 총부유성 고형물의 제거 속도와 제거율은 단백질 제거 속도와 제거율과 거의 비슷한 경향을 나타내었으나, 총부유성 고형물의 평균 제거 속도와 평균 제거율은 단백질의

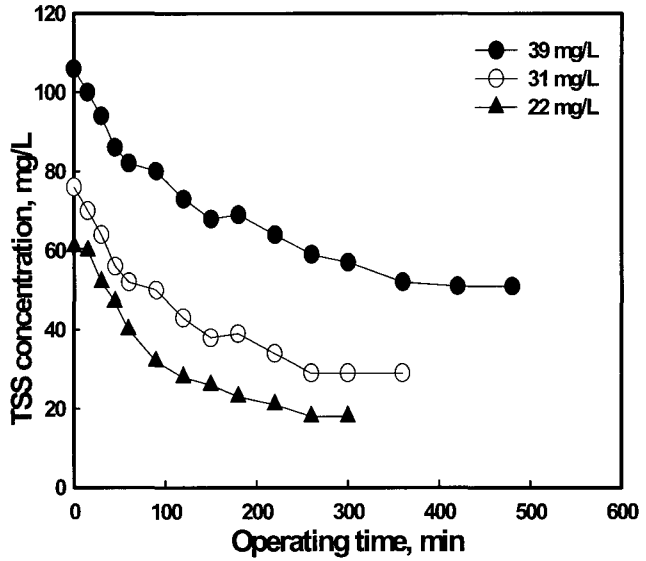


Fig. 6. The change of TSS concentration with operating time in the aquarium.

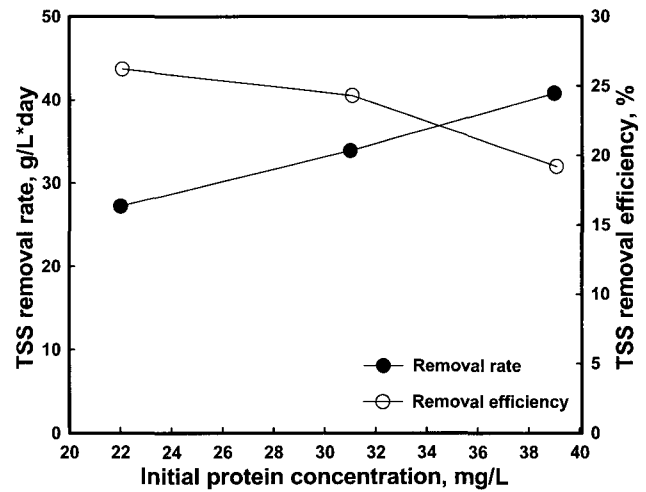


Fig. 7. The change of TSS removal rate and removal efficiency with respect to initial protein concentration.

평균 제거속도나 평균 제거율보다는 높은 것으로 나타났다. 따라서 포말분리장치에 의해 단백질보다는 총부유성 고형물이 더 효과적으로 제거된다는 것을 알 수 있었다.

탁도 제거 특성

Fig. 8은 포말분리 운전 시간에 따른 수조 내의 탁도 변화를 나타낸 그림이다. 탁도의 변화는 단백질과 총부유성 고형물 농도의 변화와 거의 유사하게 나타났으며, 이는 탁도를 유발하는 물질이 단백질과 총부유성 고형물과 관련이 있기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 9는 수조 내 초기 단백질 농도에 따른 포말분리장치의 탁도 평균 제거속도와 평균 제거율을 나타낸 그림이다. 수조

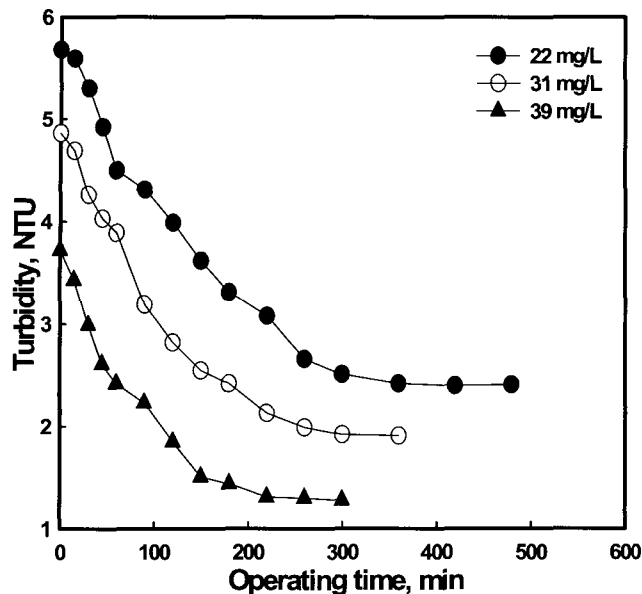


Fig. 8. The change of turbidity with operating time in the aquarium.

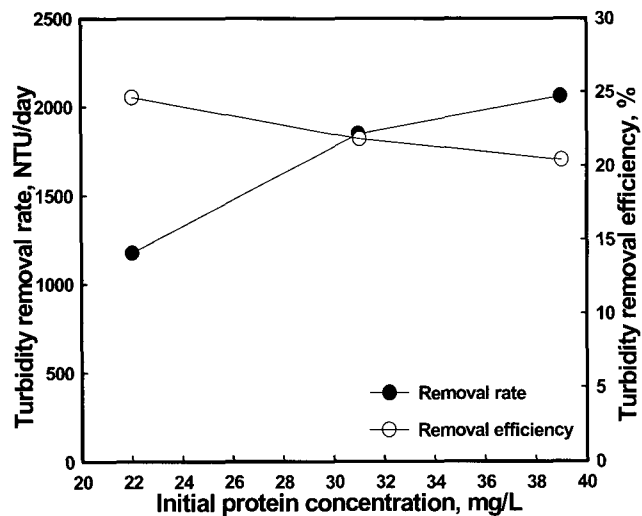


Fig. 9. The change of turbidity removal rate and removal efficiency with respect to initial protein concentration.

내 초기 단백질 농도가 22, 31, 39 mg/L로 증가함에 따라 탁도의 평균 제거속도는 1175, 1847, 2060 NTU/day로 증가하였으며, 탁도의 평균 제거율은 24.6, 21.8, 20.4%로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 해수에 대한 포말분리 연구를 수행한 Kim (2002)의 연구에서 보다 비교적 낮은 수치로 Kim (2002)의 연구에서보다 초기 단백질 농도 범위가 낮기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이 외에도 수조의 초기 단백질 농도에 따른 pH와 온도 변화도 측정하였는데, 초기 단백질 농도에 따른 수조 내의 평균 pH는 8.3 정도로 거의 변화가 없었으며, 수조

내 온도는 평균 15.1°C로 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 한국과학재단의 기초과학연구사업 (과제번호: R01-2002-000-00042-0)에 의하여 수행된 결과의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- APHA, AWWA and WPCF. 1992. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 16th ed., American Public Health Association Inc., New York, pp. 132-133.
- Bhattacharjee, S., R. Kumar and K.S. Gandhi. 2001. Modeling of protein mixture separation in a batch foam column, Chem. Eng. Sci., 56, 5499-5510.
- 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 eds., Elsevier, Amsterdam, pp. 61-100.
- Cho, D. and H. N. Chang. 1998. Separation of oil contaminants by surfactant-aided foam fractionation, Kor. J. Chem. Eng., 15(4), 445-448.
- Kim, B.J. 2002. The Foam Separation Process for the removal of contaminant in seawater. Ph.D. Thesis, Pukyong National University, Busan, Korea., pp. 147. (in Korean)
- Lomax, K.M. 1976. Nitrification with water pretreatment on a closed cycle catfish culture system. Ph.D. Thesis, University of Maryland, College Park, MD. USA.
- Lowry, O.H., N.J. Rosebrough, A.L. Farr and R.J. Randall. 1951. Protein measurement with the Folin phenol reagent, J. Biol. Chem. 193, 265-275.
- Miller, G.E. and G.S. Libey. 1984. Evaluation of a trickling biofilter in a recirculating aquaculture system containing channel catfish. Aquacult. Eng., 3, 39-57.
- Saleh, Z.S. and M.M. Hossain. 2001. A study of the separation of pro bteins from multicomponent mixtures by a semi-batch foaming process, Chem. Eng. Process., 40, 371-378.
- Suh, K.H. and M.G. Lee. 1995. Treatment of aquacultural recirculating water by foam separation - I. Characteristics of protein separation, J. Kor. Fish. Soc., 28(5), 599-606. (in Korean)
- Suh, K.H., B.J. Kim, S.H. Bong, J.H. Lim, Y.H. Kim and S.K. Kim. 2000. The removal of aquacultural wastes by foam separator from sea water - I. The effect

- of initial protein concentration, Hwahak Konghak 38(5), 745-752. (in Korean)
- Timons, M.B. and S. Chen. 1995. Mathematical model of a foam fractionator used in aquaculture, J. World Aquacult. Soc., 26(3), 225-233.
- Uraizee, F. and G. Narsimhan. 1996. Effects of kinetics of adsorption and coalescence on continuous foam concentration of protein: comparison of experimental results with model predictions, Biotech. Bioeng., 51(4), 384-398.
-
- 2003년 12월 6일 접수
2004년 1월 30일 수리