

포말 분리법을 이용한 양어장 순환수 처리

- I. Protein 분리특성 -

서근학 · 이민규

부산수산대학교 화학공학과

Treatment of Aquacultural Recirculating Water by Foam Separation

- I. Characteristics of Protein Separation -

Kuen-Hack SUH and Min-Gyu LEE

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

The feasibility of foam separation to remove protein produced from fish culture water was investigated. By assuming foam separation column as a single well-mixed pool, a simplified model for foam separator conditions was also studied under the batch operation. The model indicated that the protein removal could be described as a first-order reaction whose rate increases with both superficial air velocity and protein concentration in the bulk solution. From the results of an experimental study on the effects of superficial air velocity, the protein concentration, temperature, and pH on protein removal, the superficial air velocity and initial protein concentration in bulk solution were found to be important operational factors. Other experimental results indicated that foam separator operated under batch conditions would be considered as a completely mixed reactor. The protein removal rate by foam separation process was increased proportionally with the superficial air velocity, and the adsorptive removal rate of protein was found to obey Langmuir adsorption formula. The proposed simplified model was verified with the experimental data obtained from this study. Under the experimental range used, both temperature and pH did not affect the protein removal.

Key words : foam separation, protein separation, aquacultural recirculating water, aquaculture

서 론

효과적인 어류의 대량생산을 위하여 고밀도 양식법이 최근에 활발하게 연구 및 상업화되고 있으나 순환여과수에 의한 수질의 악화로 인하여 어류의 성장 및 환경에 악영향을 미치므로 적절한 처리시설을 구비하여 어류의 생존에 적당한 환경을 유지할 수 있도록 하는 것이 매우 중요하다. 특히, 담수어의 고밀도 순환식 양식의 경우 사료 찌꺼기 및 어류의 배설물(주로 단백질성) 등에 의하여 유기질 고형성분이 급격하게 증가하게 된다. 유기질 고형성분(주로 단백질성)은 미생물에 의해 분해됨으로써 어류의 성장에 유해

한 NH_3 , NO_2^- 를 생성할 뿐아니라 용존산소를 소모하게 되어 어류에 악영향을 미치게 되므로 양어장 순환수 내의 사료 찌꺼기나 어류의 배설물을 신속하게 제거하기 위한 수처리가 절실하게 요구되어 진다. 이에 양어장 순환수 처리의 수단으로서 포말분리법이 최근 검토되고 있다 (Lemlich, 1972; Pinfeld, 1970).

포말분리법은 입자상 물질이나 용존물질을 상승하는 기포에 부착시켜 분리시키는 방법으로써, 포말분리공정에서 제거되는 물질들은 대개가 계면활성물질들로서 이들은 물-공기 계면에 계면활성분자가 농축되는 성향을 가지고 있다 (Rubin, 1981). 이는 계면활성물질의 기-액 계면에서의 흡착특성을 이용하는 것

으로 용액 내로 도입된 분산기포가 용액으로부터 포말층으로 계면활성물질이 제거하게 되는 것이며, 계면활성물질이 기포표면에 흡착하는 현상은 친수기(hydrophilic side chain)가 액측으로 소수기(hydrophobic side chain)가 기체 측으로 배열되어 액본체(bulk liquid) 농도가 증가함에 따라 기체 표면에 흡착되는 용질의 분자수가 점차 증가하여 그 표면이 완전포화되어 표면과잉농도에 이르는 것이다(Davies and Rideal, 1962). David and Moffatt(1979)는 계면활성물질과 반대의 전하를 가지는 용존이온들은 기-액계면에 흡착된 계면활성물질과의 전기적 인력으로 기포에 흡착되어 기포와 같이 상승 분리된다고 하였으며, Pinfeld(1972)와 Schnepf 등(1959)에 의해 계면활성이 없는 물질도 계면활성물질과 결합시키면 계면에서의 정전기적 인력 또는 착화합물 형성에 의해 효과적인 분리가 가능하다는 것이 고찰되었다.

일반적으로 여러 분리기술들은 대체로 목적성분의 농도가 희박할수록 분리효율이 현저히 감소하나 포말분리법은 목적성분의 농도가 희박할 경우에 분리효율이 높을 뿐 아니라, 또한 폐수중의 미량성분의 분리 제거 및 회수시 처리의 신속성, 장치 및 조작의 간편성, 경제성 등에 비추어 볼 때 매우 효과적인 방법으로 기대된다. 이에 관한 연구로서는 Kato and Kusunoki(1977)는 계면활성물질을 이용한 기포-포말 흡착분리연구에서 용액으로부터 기-액계면으로 계면활성물질의 흡착이 일어날 때 흡착속도는 기포흡착분리에서 중요인자가 됨을 보고하였고, 이외에도 포말층 회수탑에 관한 연구(Karger et. al., 1966), 포집제로서 NaDBS를 이용한 Cd이온의 연속포말분리(Kobayashi, 1975), 포말흡착분리에 있어서 Cd, Ni 및 Cu 이온간의 선택성에 대한 농도의 영향(Huang and Talbot, 1973), 공업폐수중의 Pb와 Cd의 포말분리(Ferguson and Hinkle, 1974), Cd, Cu이온의 포말분리제거에 있어서 계면활성제의 Chelation효과(Okamoto and Chou, 1976) 등 여러 연구가 보고된 바 있다.

용액 내에 존재하는 미량 성분(유기물 단백질 및 무기물 단백질)을 제거하기 위한 효과적인 방법 중의 하나로써 포말 분리법은 양어장 순환수의 처리에 있어서도 유용한 처리공정으로 최근 많은 관심을 불러일으키고 있을 뿐만 아니라(Wheaton, 1977; Spotte, 1979; Huguenin and Colt, 1989), Dwivedy(1973)은

굴양식장에서 포말분리법에 의해 용존성 유기물질이나 현탁성 유기물질 등을 제거할 수 있었다고 하였으며, 유기산을 제거함으로써 양식장의 pH조절에 도움이 되고 물 속의 bacteria를 제거할 수 있었다고 하였다. 또한 포말분리법에 의해 미세한 현탁성 고형물이나 과잉의 영양 물질들을 성공적으로 제거할 수 있다고한 보고(Weeks et. al., 1992)도 있으며, 미생물을 분리 및 농축하여 재 사용하는 데도 포말 분리가 활발하게 연구(Parthasarathy and Kumar, 1988; Viehweg and Schügerl, 1983; Bahr and Schügerl, 1992; Suh and Nam, 1993)되어지고 있다.

본 연구의 목적은 실제 운전 중인 양어장에서 순환되는 순환수 중에 함유된 유기성분의 주성분인 단백질을 제거하는데 있어 포말분리법의 적용 가능성을 조사하고자 하는 것으로써 초기 단백질 농도, 공탑 공기유속(superficial air velocity), 온도 및 pH 등의 영향에 따른 단백질의 분리특성을 조사하였다. 또한, 제시된 이론식을 실험결과와 비교함으로써 이론식의 타당성을 검토하였다.

재료 및 방법

본 실험에서 사용된 포말분리장치는 Fig. 1과 같이 단순한 기포탑으로 이루어져 있으며, 내경 3cm, 높이 60cm의 아크릴 관을 사용하여 제작하였다. 포말분리관 내 액본체의 부피는 350 ml이었다. 포말분리관 하부

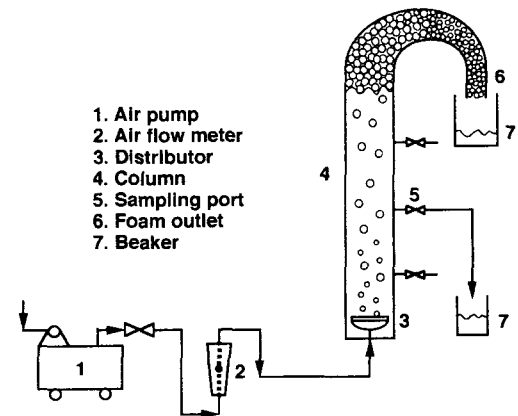


Fig. 1. Apparatus for foam separation.

I. Protein 분리특성

에는 glass filter (pore size : G3)를 접합시켜 기포가 효과적으로 발생될 수 있게 하였다. 공기의 공급은 air pump를 이용하여 공급하였으며, 공기유량은 유량계로 조절하였다. 원수는 탱의 상부로부터 공급하고, 공기는 탱의 하부에서 공급함으로써 향류식 접촉을 시켰다.

실험은 본교 양어장에서 생성된 foam condensate를 순환수에 첨가함으로써 단백질 농도를 조정된 원수를 이용하여 회분식 실험을 행하였으며, 운전개시 후 0, 2, 5, 10, 20 및 30 min 간격으로 시료를 채취하였다. 시료는 포말분리장치의 하부로부터 15 cm에 위치한 시료 채취구로부터 채취하였다. 또한 포말분리장치의 높이에 따른 단백질농도 구배를 검토하기 위하여 시료채취구의 위치를 달리하여 실험을 행하였다.

포말 형성 특성의 재현성을 증대시키기 위하여 원수의 pH와 온도 영향 실험을 제외하고 pH는 7.2, 용액 온도는 22°C로 일정하게 유지하였다. 포말 시료는 일정 시간간격으로 모았으며, 동시에 액체 시료는 액본체 배출구에서 1 ml씩 채취하여 단백질 농도를 분석하였다. 단백질의 농도분석은 Lowry법 (Lowry et al., 1951)에 의해 행하였다.

이 론

포말분리에 의해 액본상으로 부터 계면활성 단백질 을 제거할 때 포말분리관의 축상 혼합은 충분히 빠르게 일어남으로써 포말분리관을 하나의 완전 혼합 pool로 생각할 수 있다. 기포가 주위 액체와 평형에 있다고 한다면, 액층을 통하여 상승하는 일정한 반경 크기의 기포 하나에 동반되어 제거되는 단백질의 변화속도를 구할 수 있다. 액본상으로 부터 기포로의 물질전달 속도는 기포에 동반되는 단백질의 실제량과 표면상에서 기포에 동반될 수 있는 단백질 최대량과의 차에 비례하게 될 것이다. 만약 기포에의 단백질 흡착이 Langmuir 흡착식을 따른다고 한다면 물질전달속도는 다음과 같이 나타 낼 수 있다 (Clarke and Wilson, 1983).

$$4\pi r_b^2 \frac{d\Gamma}{dt} = 4\pi r_b^2 k \left[\frac{aC}{1+bC} - \Gamma \right] \quad (1)$$

여기서, a와 b는 각각 cm 및 cm³/mg의 단위를 갖는 상수이며, t는 시간(s), Γ 는 표면의 단백질 농도(mg/cm²), r_b 는 기포반경(cm), k는 물질전달계수(s⁻¹)이고, C는 액본체중의 단백질 농도(mg/cm³)이다.

이를 다시 정리하면

$$\frac{d\Gamma}{dt} + k\Gamma = \frac{akC}{1+bC} \quad (2)$$

만약 기포가 액상층을 통하여 상승하는 시간동안 액본상의 단백질농도가 일정하다고 가정하고서 $\Gamma(0)=0$ 조건하에서 위식을 풀면

$$\Gamma(t) = \frac{aC}{1+bC} [1 - \exp(-kt)] \quad (3)$$

와 같이되므로 기포 하나에 의해 제거되는 단백질의 량은 다음과 같이 된다.

$$m_b = 4\pi r_b^2 \frac{aC}{1+bC} [1 - \exp(-kt)] \quad (4)$$

여기서, m_b 는 기포 하나에 의해 제거되는 단백질의 량(mg)이다.

또한, 생성되는 기포의 총갯수는 $N_b = 3Q_a / (4\pi r_b^3)$ 이므로 따라서 포말분리관으로 부터 단백질 제거 속도는 다음과 같이 된다.

$$V_w \frac{dC}{dt} = -N_b (4\pi r_b^2) \frac{aC}{1+bC} [1 - \exp(-kt)] \quad (5)$$

여기서, Q_a 는 공기유량(cm³/s)이며, V_w 는 액의 부피(cm³)이다.

이를 다시 정리하면

$$\frac{dC}{dt} = - \frac{3Q_a}{V_w r_b} \frac{aC}{1+bC} [1 - \exp(-kt)] \quad (6)$$

와 같이 되며, 이를 변수분리법에 의해 해를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\ln \frac{C}{C_0} = b(C_0 - C) - \frac{3a}{V_w r_b} \cdot Q_a \cdot t [1 - \exp(-kt)]$$

$$= b(C_0 - C) - \frac{3a\pi D^2}{4V_w r_b} \cdot u \cdot t [1 - \exp(-kt)] \quad (7)$$

여기서, u (cm/s)는 공탑 공기유속(superficial air velocity)으로써 직경 D (cm)인 포말분리관에서 공기유량을 알면 $u=4Q_a/(\pi D^2)$ 와 같이 구해진다.

결과 및 고찰

액본체 단백질농도의 영향

양어장 순환수의 회분식 포말분리장치의 운전시 단백질 제거속도는 일반적으로 공탑 공기유속, 초기 단백질 농도 등에 영향을 받는다. 따라서, 먼저 액본체 용액 내의 단백질 초기 농도와 단백질 제거속도간의 관계를 구하기 위하여 단백질의 초기농도를 달리 하면서 시간에 따른 단백질 농도변화를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와 같이 초기 단백질 농도변화에 따른 포말분리관의 단백질 농도의 거동은 비슷한 경향을 나타내었다.

Fig. 3은 포말 분리관내 용액의 초기 단백질 농도를 변화시켰을 때 시간에 따른 액본체 단백질의 제거율을 살펴본 그림으로써 그림에서 보여지는 바와 같이 초기농도가 증가할수록 액본체 단백질의 제거율은 감소하였으며, 약 10min 이내에 액본체 단백질의 약 65% 이상이 제거됨을 알 수 있었다. 이는 일정한 공기유량의 경우 기포 표면적이 일정하게 되어 제거될 수 있는 단백질량이 한정되어 있으므로 초기농도가 높아질수록 상대적으로 제거율은 감소하는 것으로 생각되어진다. 또한, 실험을 통하여 액본체 중의 단백질은 포말분리에 의해 포말층(foamate)으로 농축되어 제거되는 것을 알 수 있었으며, 이때 포말층 및 액본체의 농도비는 약 10~20으로써 효과적으로 농축되어 포말분리법이 양어장 순환수중의 유기성분 특히, 단백질을 제거하는데 있어 매우 효과적인 방법으로 사료되었다.

Fig. 4는 액본체 중의 단백질의 초기농도를 변화시키며 따른 액본체 단백질의 포말분리 개시후 5min 동안의 제거속도를 살펴본 그림으로써 그림에서 보여지는 바와 같이 일정 초기농도 이하의 조건에서는 증

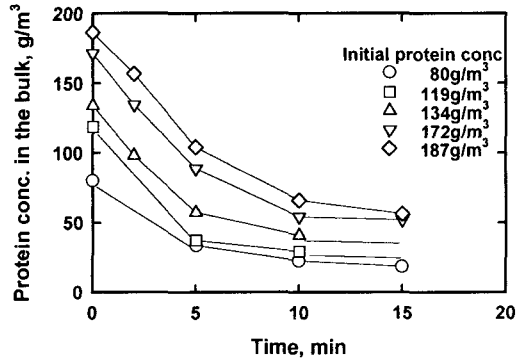


Fig. 2. Time courses of protein concentration in the bulk solution on initial protein concentration (Superficial air velocity: 2 cm/s).

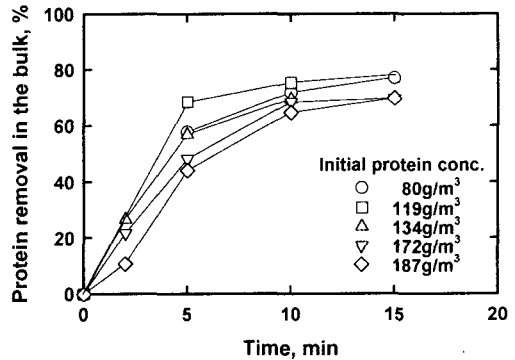


Fig. 3. The extent of protein removal on initial protein concentration (Superficial air velocity: 2 cm/s).

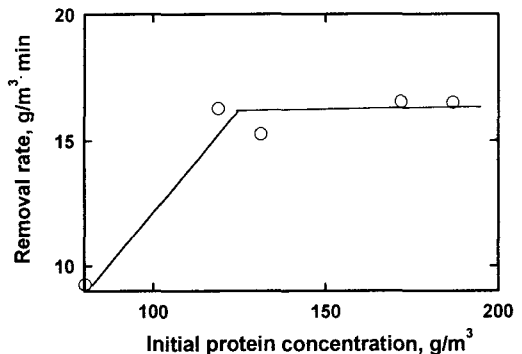


Fig. 4. Changes in protein removal rate on initial protein concentration (Superficial air velocity: 2 cm/s).

가하다가 농도가 더욱 증가하면 일정한 극한치에 가까워짐을 알 수 있었다. 이와 같은 경향을 나타내는

것은 공기유속이 일정할 경우 단백질이 부착될 수 있는 기포 표면적은 한정되므로 기포에 의해 포화제거될 수 있는 양 이상의 과량의 초기농도 경우에는 더 이상 제거속도는 증가하지 않음을 나타내는 것으로 즉, 포말의 기-액 계면에 최대로 흡착된 단백질 표면에 또 다른 단백질이 흡착되는 것을 방해하기 때문에 포말의 표면적의 최대 면적만큼 흡착되어 단백질 농도가 증가하더라도 단백질 제거속도는 거의 일정하게 유지되는 경향을 나타낸다고 사료된다. 또한, 이러한 형태의 그림은 포말분리에 의한 단백질 제거속도는 Langmuir 흡착등온식과 유사한 형태로 표현될 수 있음을 시사해준다.

공탑 공기유속의 영향

포말분리장치에서 단백질 제거속도는 공탑 공기유속과 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서, 포말 분리관에 공급하는 공기유속 변화에 따른 단백질 분리 특성 영향을 조사하기 위하여 원수의 초기 단백질농도를 150g/m^3 으로 유지하고, 공기유속을 0.59cm/s , 1.06cm/s , 2.00cm/s 및 2.83cm/s 로 변화시키는데 따른 액본체 단백질 제거율을 Fig. 5에 도시하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 공탑 공기유속이 증대할수록 증가된 기-액계면 면적에 의하여 흡착되는 단백질 량이 증대하여 단백질 제거율은 증가하였으며, 공기유속이 높아질수록 액본체 중의 단백질 농도는 더욱 급격히 감소하였다. 실험을 통하여 공기유속의 변화에 따른 포말층에서의 단백질 농도 변화는 공기유속의 변화에 대해 거의 비슷한 거동을 보임을 알 수 있었으며, 공기유속이 증가함에 따라 액본체중에 함유된 단백질의 제거량이 증가하기 때문에 액위는 감소하는 결과를 보였다.

Fig. 6은 공기유속의 변화에 따라 5 min 이내의 단백질 초기 제거속도를 살펴본 그림으로써 그림에서 보여지는 바와 같이 좋은 직선관계를 나타내어 포말 분리관에서 단백질제거 속도는 공기유속에 관해 일차식을 따름을 알 수 있었다. 이는 공기유속의 증가는 기-액 계면적의 증가와 비례함을 의미하는 것으로 생각된다.

이론식의 검토

포말분리장치의 특성을 살펴보기 위하여 포말분리

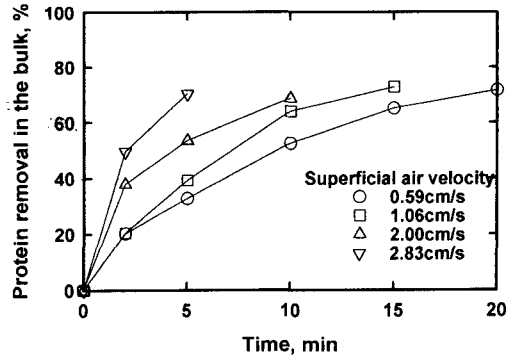


Fig. 5. The extent of protein removal in the bulk solution on superficial air velocity.

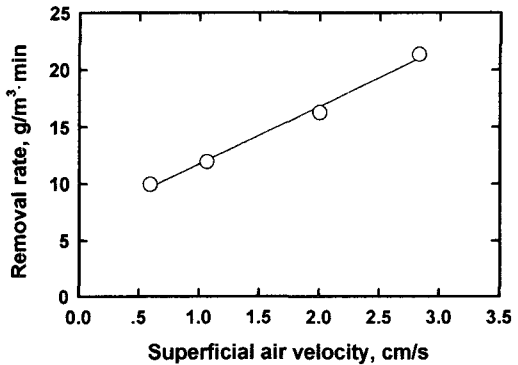


Fig. 6. Changes of protein removal rate on superficial air velocity.

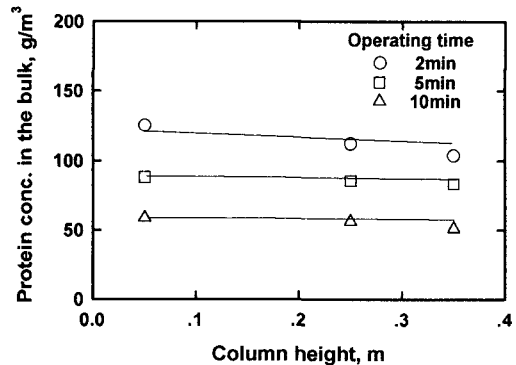


Fig. 7. Protein concentration changes along column height.

관의 높이에 따른 단백질농도 구배를 조사한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와 같이 포말분리관의 높이가 달라짐에 따라 단백질 농도는 거의 차이를 보이지 않았으며, 포말분리장치는 완전 혼합반응기로 간주할 수 있음을 알 수 있었다.

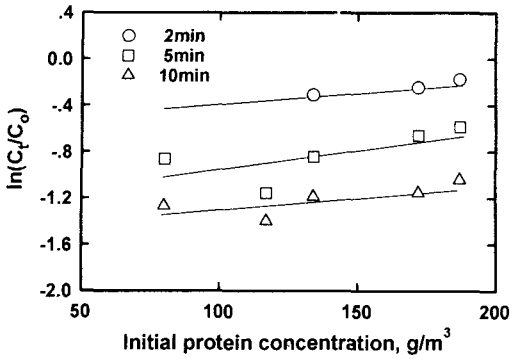


Fig. 8. Log (protein concentration ratio) versus initial protein concentration.

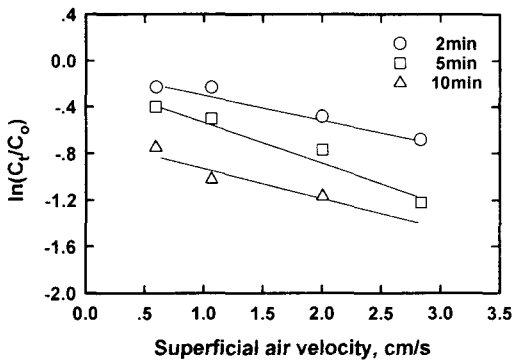


Fig. 9. Log (protein concentration ratio) versus superficial air velocity.

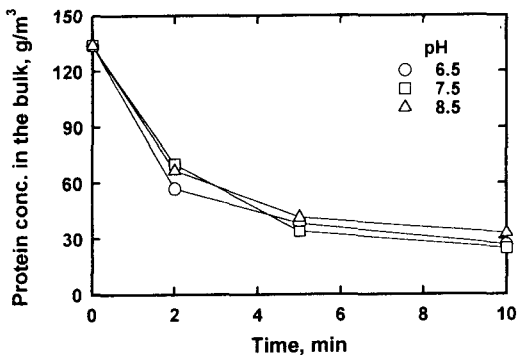


Fig. 10. Protein concentration in the bulk solution with varying pH.

식(7)에서 보면 특정 운전시간에 있어서의 단백질 농도(C_t)에 대한 액본체 중의 초기 단백질 농도(C_0)의 비의 로그값은 단백질 농도 및 공탑 공기유속과 밀접한 관계가 있음을 나타내고 있다. 제시한 이론

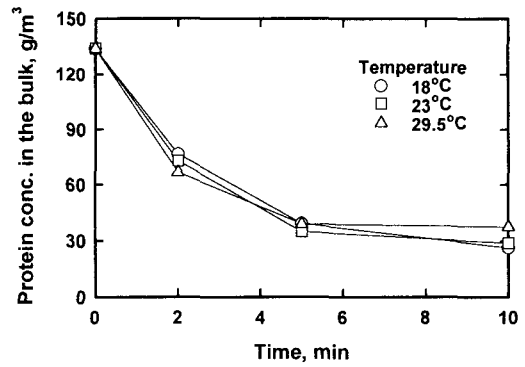


Fig. 11. Protein concentration in the bulk solution on temperature.

식의 검증을 위해 공기유속 및 액본체내의 초기 단백질 농도를 달리하면서 포말분리실험을 행하여 일정시간후의 단백질 농도에 대한 초기 단백질 농도비의 로그값을 각각 Fig. 8 및 9에 도시하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 특정 운전시간에 있어서의 단백질 농도에 대한 액본체 중의 초기 단백질 농도비의 로그값은 단백질 농도 및 공탑 공기유속과 좋은 직선관계를 나타내어 1차식을 따르는 것으로 사료되며, 이론식이 타당한 것으로 생각되었다.

pH 및 온도의 영향

양어장내의 순환수는 운전조건에 따라 pH 및 수온이 변할 수 있다. 그러나 이들 변화도 물고기가 생존할 수 있는 범위 내에서 변화된다. 포말 분리관내 용액의 pH 변화에 따른 단백질 분리 특성을 조사하기 위하여 1N-NaOH와 1N-HCl 용액으로 단백질 용액의 pH를 6.5, 7.5 및 8.5로 되게 하여 포말 분리 실험을 수행하였다. Fig. 10에서 보여지는 바와 같이 본 실험 조건에서는 6.5~8.5 범위의 pH 변화에 대해서 유사한 거동을 보임으로써 pH의 영향이 거의 없는 것으로 생각되었다.

온도 변화에 따른 단백질 분리 특성 영향을 연구하기 위하여 용액의 온도를 18°C, 23°C 및 29.5°C로 변화시키는데 따른 액본체의 단백질 농도 거동을 Fig. 11에 도시하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 온도변화의 경우도 본 실험조건 범위 내에서는 거의 유사한 거동을 보여 단백질 제거에 있어 온도의 영향은 그다지 크지 않는 것으로 생각되었다.

요 약

포말 분리관에 단백질 용액을 일정하게 공급하여 분리 실험을 수행하며 초기 단백질 농도, 공탑 공기 유속, 온도와 pH 등의 영향에 따른 포말 분리관의 단백질 분리특성을 연구한 결과, 액본체 단백질의 약 65% 이상이 약 10 min 이내에 제거되는 효과적인 분리특성을 나타내어 포말분리법은 양어장 순환수중의 주된 유기성분인 단백질을 분리하기 위한 매우 효과적인 방법이었다. 액본체 중의 단백질의 초기농도가 증가함에 따라 단백질 제거속도는 일정 농도 이하의 조건에서는 직선적으로 증가하다가 일정한 값을 유지하여 단백질 제거속도는 Langmuir 흡착형태를 나타내었으며, 제거속도는 공탑 공기유속에 대해서는 직선관계를 보였다. 본 실험조건 범위 내에서는 단백질 제거에 있어 온도 및 pH의 영향은 그다지 크지 않은 것으로 나타났으며, 실험결과를 검토한 결과 이론식은 타당하였다.

사 사

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

참 고 문 헌

Bahr, K. H. and K. Schügerl. 1992. Recovery of yeast cultivation medium by continuous floatation and its dependence on cultivation conditions. *Chem. Eng. Sci.*, 47(1), 11~20.
 Clarke, A. N. and D. J. Wilson. 1983. *Foam floatation, Theory and Application*. Marcell Dekker, 418 pp.
 David, J. W., K. R. Moffatt. 1979. Electrical aspects of adsorbing colloid floatation. *Sepa. Sci. Technol.*, 14(4), 319~332.
 Davies, J. T., E. K. Rideal. 1962. *Interfacial pheno-*

mena. Academic Press, New York, pp. 480
 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*.
 Ferguson B. B. and C. Hinkle. 1974. Foam separation of lead (II) and cadmium (II) from waste waters. *Sepa. Sci.*, 9(2), 125~145.
 Huang R. C. H. and F. D. Talbot. 1973. The removal of copper, cadmium, and lead ions from dilute aqueous solutions using foam fractionation. *Canadian J. Chem. Eng.*, 51, 709~713.
 Huguenin, J. E. and J. Colt. 1989. *Design and operating guide for aquacultural seawater systems*, Elsevier, 264 pp.
 Karger B. L., R. P. Poncha and M. M. Miller. 1966. Foam fractionation under total reflux. *Anal. Chem.*, 38(6), 764~767.
 Kato K. and L. Kusunoki. 1977. Adsorption rate of surfactant ion in foam separation technique. *J. Chem. Eng. Japan.*, 10(1), 20~25.
 Kobayashi K. 1975. Studies of the removal of Cd²⁺ ions by adsorbing particle floatation. *Bull. Chem. Soc. Japan.*, 4(86), 1750~1754.
 Lemlich, R. 1972. *Adsorptive bubble separation techniques*, Academic Press, New York, pp. 219~248.
 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.
 Okamoto Y. and E. J. Chou. 1976. Chelation effects of surfactant in foam separation. *Sepa. Sci.*, 11(1), 79~87.
 Parthasarathy, S. and R. Kumar. 1988. Foam separation of microbial cells. *Biotechnol. Bioeng.*, 32, 174~183.
 Pinfeld, T. A. 1970. Adsorptive bubble separation methods. *Sepa. Sci.*, 5(4), 379~384.
 Pinfeld, T. A. 1972. Ion floatation 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., 750 pp.
- Schnepf, R. W. 1959. Foam fractionation. Chem. Eng. Progr., 54, 42~46.
- Spotte, S. H. 1979. Seawater Aquariums, the Captive Environment. Wiley, New York, USA., 238 pp.
- Suh, K. H. and K. D. Nam. 1993. Foam separation of yeast cells. Kor. J. Biotechnol. Bioeng., 8(3), 282~286 (in Korean).
- Viehweg, H. and K. Schügerl. 1983. Cell recovery by continuous flotation. Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol., 17, 96~102.
- 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. Aquacul. Eng., 11, 251~265.
- Wheaton, F. W. 1977. Aquacultural Engineering. Wiley, New York, USA, 708 pp.
-
- 1995년 8월 12일 접수
1995년 9월 13일 수리