

포말 농축물에 의한 포말 생성의 영향인자

서근학* · 신정식 · 이주화
부경대학교 화학공학과

The Effective Factors of a Foam Generation Using Foam Condensate

Kuen-Hack SUH*, Jeong-Sik SHIN and Ju-Hwa LEE

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

We performed the experiment to determine the effective factors, such as the initial concentration of protein, pore size of air distributor, SAV (superficial air velocity), pH, salts and temperature related to foaming characteristics. The foam height in a foam generator was increased with the increase of the initial protein concentration and the decrease of pore size. As SAV was increased, the foam height was increased, and the optimum SAV was 0.84 cm/sec. The foam height was highest in the acid region and it was increased with the increase of salt concentration of NaCl and NaHCO₃. The removal efficiencies of TSS (total suspended solid) and turbidity decreased with the increase of the initial protein concentration in the batch foam separator.

Key words: Foam generator, Foam separator, Protein, Suspended solid

서 론

포말 분리법은 용액중의 희박한 농도의 용존물질이나 고형 물질을 용액과 분리하는 기술 중의 하나이다. 대부분의 분리 공정이 목적 성분이 저농도일 경우 회수율이 급격히 감소하는 것에 비하여 포말분리법은 저농도에서도 목적 성분을 고농도로 농축하여 회수할 수 있는 장점을 가지므로 최근에는 수용액 중의 염료제거나 유류 오염물 분리 및 폐수처리 등 용존 물질이나 고형물질을 제거하는 공정에 응용되고 있다 (Clarke and Wilson, 1983).

포말 분리공정은 용액 내에 존재하는 계면 활성 물질과 생물학적 오염물을 장치 외부로부터 유입된 공기가 분산되어 발생시키는 기포에 흡착시켜 시스템 외부로 제거하는 공정이다. 계면 활성 물질이 기·액 계면 (gas-liquid surface)에 흡착되는 것은 친수기 (hydrophilic side chain)와 소수기 (hydrophobic side chain)를 동시에 가진 계면 활성 물질이 포함되어 있는 용액 내에 기포를 발생시킬 경우, 초기에는 소수기가 기체 쪽을 향하여 이동하다가 시간이 지나감에 따라 기·액 계면에 나란히 배열되고, 액분체 (bulk)의 농도가 증가함에 따라 기·액 계면에 흡착되는 용질의 분자수가 점점 더 증가하여, 평형 상태에서는 그 계면이 완전 포화되어 표면과잉농도에 이르는 현상에 의한 것으로 (Brown et al., 1999), 이를 효과적으로 수행하기 위해서는 기포 생성이 안정적이어야 하며 이에 대한 영향인자로서 계면 활성제의 농도, pH 및 염 농도 등이 있다 (Noble and Varley, 1998).

양식장 및 활어수조 내 어류 성장 환경에서 발생하는 생물학적 오염물중 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, Suh et al. 2001).

포말분리법을 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 et al. (1996)은 포말 분리법에 양식장수의 부유성 물질을 매우 효과적으로 제거할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 포말분리의 효과적인 수행을 위하여 포말생성이 안정적이어야 하므로 포말생성에 영향을 미치는 인자인 단백질 농도, 공기분산기의 기공크기, 공압공기유속, pH, 염농도 그리고 온도 영향에 대한 연구를 수행하여 포말분리 장치 설계 및 제작을 위한 기초자료를 도출하려 하였다. 그리고 회분식 포말분리 장치를 이용하여 수중의 총 부유 고형물 제거특성에 대해 연구하였다.

재료 및 방법

실험장치

본 실험에서 사용된 포말 생성 장치는 Fig. 1(a)와 같이 내경 50 mm, 높이 1500 mm의 아크릴관을 사용하여 제작하였다. 분리관의 액분체 부피는 100 mL였으며 포말분리관 하부에는

*Corresponding author: khsuh@pknu.ac.kr

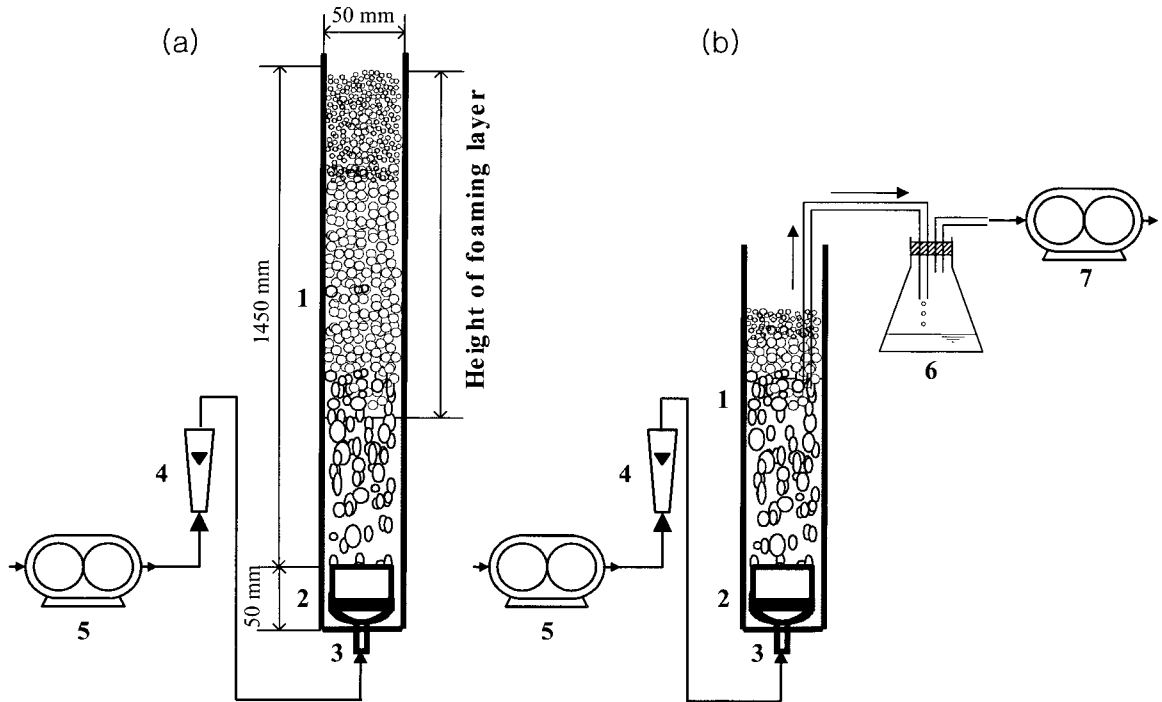


Fig. 1 The schematic diagram of experimental apparatus. (a) foam generator, (b) batch foam separator. 1, Separation column; 2, Air distributor; 3, Air inlet; 4, Rotameter; 5, Air pump; 6, Trap bottle; 7, Aspirator.

유리 여과기를 이용한 공기 분산기를 설치하여 기포가 균일하게 발생하도록 하였다. 또한 Fig. 1(b)는 회분식 포말 분리 장치를 나타낸 그림으로 내경 50 mm, 높이 500 mm의 아크릴 판을 사용하여 제작하였으며 액본체 부피는 200 mL였다.

공기 공급은 공기펌프를 이용하여 공급하였으며, 공기 유량은 유량계의 조절밸브를 이용하여 조절하였다. 각 실험조건에서의 최대 포말 생성 높이는 회분식으로 3회 운전하여 준 정상상태에서 포말높이의 평균값을 취하였다. 그리고 총 부유고형물과 탁도의 제거능력을 알아보기 위하여 200 mg/L의 kaolin을 액본체에 혼합하여 회분식 포말분리 실험을 수행하였으며 공기 분산기로 유리여과기 (G3)를 설치하였고 형성된 포말을 수집하기 위하여 아스피레이터를 설치하였다.

실험 재료 및 분석 방법

실험수의 포말 생성을 위한 단백질은 부경대학교 부속양어장에서 발생하는 포말 농축물 (foam condensate)을 수거하여 증류수로 희석시켜 사용하였다. 단백질의 농도 분석은 Lowry의 방법 (Lowry et al., 1951)에 의해 수행하였으며 총 부유고형물의 농도는 Standard method (APHA et al., 1992)에 따라 진공여과법으로 분석하였다. 탁도는 탁도계 (Model 2100N, Hach Co. Ltd)를 이용하여 측정하였다.

결과 및 고찰

초기 단백질 농도 변화에 따른 포말 생성 능력

생물학적 오염물 중 단백질은 소수기와 친수기를 함께 가지

고 있는 구조적 특성으로 인하여 계면활성제 역할을 하며 포말생성 능력을 증가시키고 안정된 포말의 생성을 용이하게 한다. 그러므로 용액중의 단백질 농도는 포말생성의 안정성을 결정하는 중요한 인자이다. 본 실험에서 양어장수의 포말 농축물을 이용하여 용액중의 단백질 농도를 변화시켜 포말생성 능력을 알아보았다.

Fig. 2는 실험수의 단백질 농도의 변화에 따라 운전시간에 따른 포말 생성 높이와 각 단백질 농도 변화에 따른 최대 포말 생성 높이를 나타낸 그림이다. 공탐공기유속을 0.84 cm/sec로 하고 공기 분산기의 기공크기가 G3인 유리여과기를 설치하여 운전한 결과, 단백질 농도 8.0, 20.5, 26.2 mg/L는 운전시간 60초만에 최대점에 도달하였으나 41.5, 55.1, 69.4 mg/L의 단백질 농도에서는 120초에서 최대점에 도달하는 것으로 보아 단백질 농도가 증가할수록 안정적인 포말 생성이 이루어지는 시간이 길어진다는 것을 알 수 있었다. Fig. 3은 초기 단백질 농도 변화에 따른 최대 포말 생성 높이를 나타낸 그림이다. 단백질 농도가 8 mg/L에서는 3 cm의 최대 포말 생성 높이를 형성하였으나 단백질 농도 69.4 mg/L에서는 65 cm의 최대 포말 생성 높이를 보여, 초기 단백질 농도가 증가함에 따라 최대 포말높이는 비례하여 증가하였다.

포말은 기·액 계면에 흡착된 계면활성 물질에 의해 대기 중에서도 그 형태가 깨어지지 않고 유지되는 것으로 (Cho and Chang, 1999), Brown et al. (1999)이 보고한 것에 따르면 유입 단백질 농도의 증가로 인하여 포말 내의 단백질 체류시

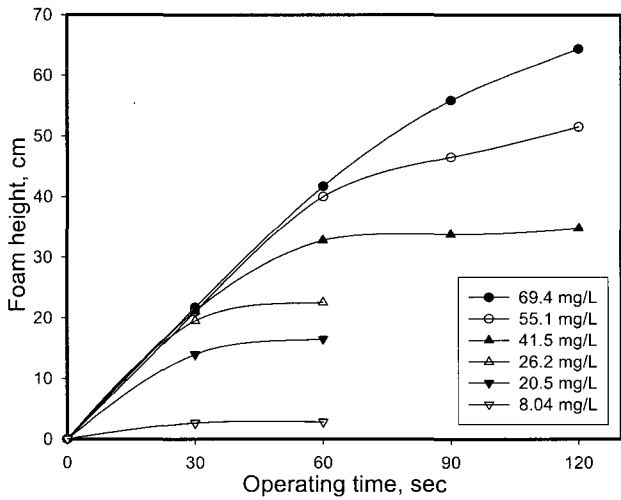


Fig. 2. The change of the foam height according to the operating time for different initial protein concentration.

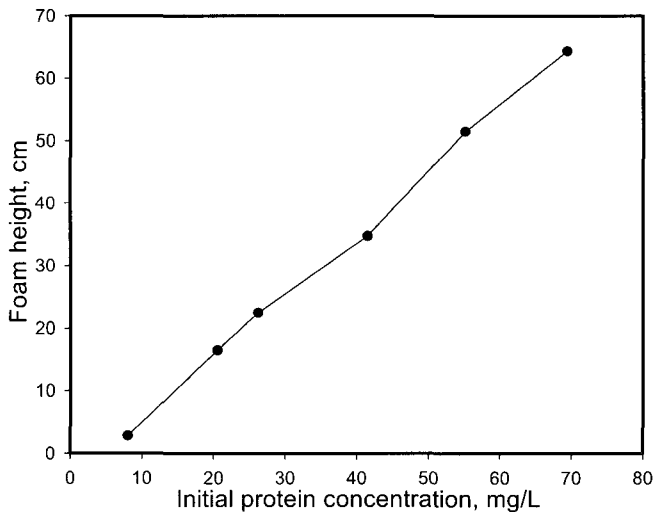


Fig. 3. The comparison of the foam height for the initial protein concentration.

간이 증가한다고 하였다. 이로 인해 초기 단백질 농도가 높아질수록 기·액 계면에 흡착되는 단백질의 양이 증가하여 포말이 파쇄되지 않고 많이 발생하여 포말 생성 높이의 증가를 보이는 것으로 사료된다.

또한 단백질은 포말 분리기에서 수집기로써의 기능뿐만 아니라 부상기로써의 역할을 동시에 수행할 수 있는데 본 연구에서는 부상기로써의 단백질 역할을 관찰할 때 실험수의 초기 단백질 농도가 증가할수록 최대 포말 생성 높이가 증가하는 것으로 보아 양어장수에서 수거한 포말 농축물이 부상기로써의 능력을 충분히 수행할 수 있을 것으로 판단되어진다.

기공크기 변화에 따른 포말 생성 능력

포말분리장치에 공급되는 기포의 크기는 포말분리효율에 큰 영향을 미친다. 공급되는 기포의 크기는 포말분리 장치

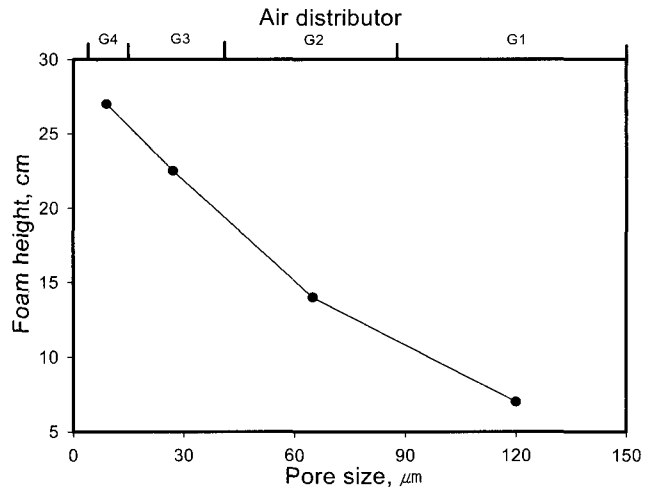


Fig. 4 The comparison of the foam height for the pore size.

하부에서 기포를 발생시키는 공기 분산기의 기공크기에 의해 결정될 수 있다. 실험은 90-150 μm의 기공크기를 가지는 G1 size, 40-90 μm의 기공크기를 가지는 G2 size, 3-15 μm의 기공크기를 가지는 G4 size의 유리 여과기를 이용하였다.

Fig. 4는 기공크기에 따른 포말 생성 영향을 나타낸 그림으로써 단백질 농도를 26.2 mg/L로 하고 공탑공기유속을 0.84 cm/sec로 하여 유리 여과기의 기공크기를 G1에서 G4까지 조절하여 실험한 결과 기공크기가 작아질수록 최대 포말 생성 높이가 높아지는 것을 알 수 있었다. 이는 공기 분산기의 기공이 작아질수록 발생하는 기포의 직경이 작아 동일한 공기 유속에 대해 보다 넓은 기·액 계면의 면적을 유도할 수 있는 것으로 사료된다. 그러나 공기 분산기의 기공을 작게 만들기 위해서는 보다 많은 비용이 필요하게 되므로 장치의 제작비용이 증가할 수 있다.

기공 크기가 G1에서 G4로 작아질수록 운전시간은 최대 90초로 증가하였으며 G3와 G4의 경우 운전시간 60초까지는 동일한 포말생성을 보였으나 G3로 운전했을 때 60초 이후에는 포말 생성이 이루어지지 않았다.

공탑 공기유속 변화에 따른 포말 생성 능력

공탑 공기 유속은 포말 분리법에 있어서 중요한 운전 인자 중의 하나로 포말분리에 의한 단백질 회수 (Brown et al., 1999), 미생물 회수 (Suh et al., 1996) 등의 연구에서도 주요 운전인자로 연구되어지고 있다.

Fig. 5는 공탑 공기유속 변화에 따른 포말 생성 높이의 영향을 알아본 그림으로써 단백질 농도를 31.9 mg/L로 하고 G3의 유리 여과기를 설치하여 운전한 결과 공탑 공기유속이 증가할수록 최대 포말 생성 높이도 증가하였다. 이는 공탑 공기유속이 증가할수록 기·액 계면 면적이 증가하고 (Brown et al., 1999) 이로 인해 수중의 단백질과의 접촉면의 증가로 단백질의 부상기로써 역할을 충분히 수행할 수 있는 것으로 사료된다. 그러나 0.84 cm/sec 이상의 공탑 공기유속에서는 최대 포말

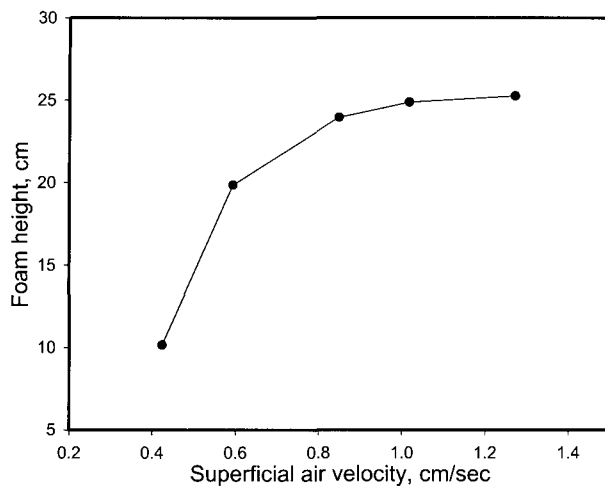


Fig. 5. The comparison of the foam height for the superficial air velocity.

생성 높이의 차이가 크지 않았다. 이는 포말 생성을 위한 실험수의 단백질 농도가 일정하여 공기 공급량이 포화상태에 도달한 것으로 판단되어진다. 그러므로 0.84 cm/sec 이상으로 운전시 운전비의 상승효과를 보임으로써 최적 공탑 공기유속의 운전조건은 0.84 cm/sec로 보여진다.

pH 변화에 따른 포말 생성 능력

생물학적 오염물인 단백질은 pH의 변화에 따라 소수기와 친수기가 용매에 노출되는 입체적 구조가 변하여, 포말생성능력을 변화시킨다. 본 실험에서는 단백질 일정농도가 첨가된 용액에 pH를 변화시키며 포말생성능력을 검토하였다.

Fig. 6은 pH 변화에 따른 포말 생성높이를 나타낸 그림으로써 단백질 농도를 31.9 mg/L로 하고 G3의 유리 여과기를 설치하여 0.84 cm/sec의 공탑공기유속으로 실험한 결과 pH 3.5에서 47 cm의 가장 높은 최대 포말 생성 높이를 보여주었다. 그러나 pH 4.5-5 사이에서 17 cm로 가장 낮은 포말 생성 높이를 보였는데 이는 Suzuki and Maruyama (2002)의 보고에서 단백질의 등전점이 pH 4.6 부근에서 나타나며 가장 낮은 포말 분리 효과를 보인다고 한 것과 비슷한 결과를 보이고 있다. 또한 중성인 pH 7 부근에서 다시 활성을 찾아 최대 포말 생성 높이가 25 cm로 상승하였으나 pH 10의 염기성에서 포말 높이가 감소하다가 강염기에서 포말 높이의 회복세를 보여주었다.

염농도 변화에 따른 포말 생성 능력

해수의 경우 담수에 비하여 NaCl의 농도가 매우 높으며 NaHCO₃와 같은 여러 염 등이 존재한다. 본 연구에서는 단백질 농도를 일정하게 하고 염의 첨가에 따른 포말생성능력을 검토하였다.

Fig. 7은 NaCl과 NaHCO₃의 염 농도 변화에 따른 포말 생성 높이를 알아본 그림이다. 단백질 농도를 31.9 mg/L로 하고 G3의 유리 여과기를 설치하여 0.84 cm/sec의 공탑공기유속으로 실험한 결과 NaCl을 첨가했을 때 5,000 mg/L까지는 포말

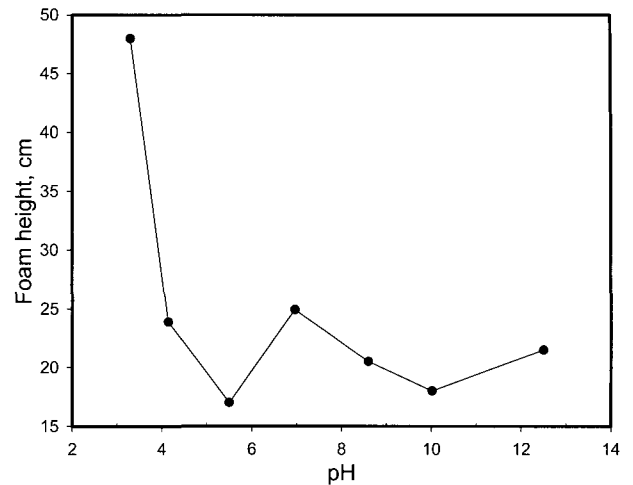


Fig. 6. The comparison of the foam height for pH.

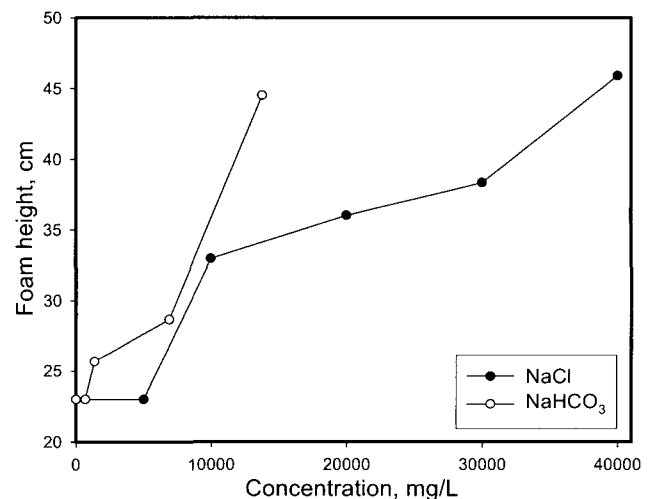


Fig. 7. The comparison of the foam height for NaCl and NaHCO₃ concentration.

생성 높이의 차이가 없었으나 10,000 mg/L을 첨가하였을 때 포말 생성 높이가 33 cm까지 급격히 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한 NaHCO₃를 첨가한 실험에서는 7,000 mg/L까지 첨가했을 때 최대 포말 생성 높이가 27 cm로 꾸준히 증가하다가 14,000 mg/L를 첨가했을 때에는 포말 생성 높이가 45 cm로 급격히 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이를 비교했을 때 NaCl보다 NaHCO₃를 첨가하였을 때 포말 생성에 대한 영향을 더 많이 받는다는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 수중에 염 성분의 존재는 포말의 생성을 촉진한다는 것을 알 수 있었으며 포말 분리를 해수에 적용할 경우 보다 높은 포말 생성 효과를 나타낼 것으로 판단되어진다.

온도 변화에 따른 포말 생성 능력

Fig. 8은 온도 변화에 따른 포말 생성 높이를 나타낸 그림으로써 단백질 농도를 31.9 mg/L로 하고 G3의 유리 여과기를 설치

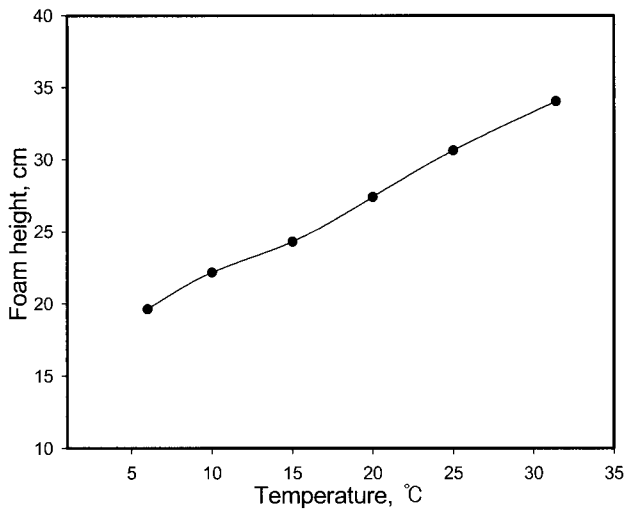


Fig. 8. The comparison of the foam height for temperature.

하여 0.84 cm/sec의 공탑공기유속으로 실험한 결과 5°C로 운전했을 때 가장 낮은 20 cm의 포말 생성 높이를 보여주었으며 온도가 상승할수록 포말 생성 높이가 높아져서 32°C로 운전했을 때 최대 포말 생성 높이가 33 cm로 나타났다. 그러나 다른 포말 생성 영향 인자와 비교했을 때 온도에 따른 포말 생성 높이의 변화가 가장 작은 영향을 보이는 것을 알 수 있었다.

총 부유 고형물 및 탁도 제거 특성

Fig. 9는 초기 단백질 농도변화에 따른 수중의 총 부유 고형물과 탁도 제거를 알아본 그림이다. 공기 분산기를 G3의 유리 여과기로 설치하고 0.84 cm/sec의 공탑 공기유속으로 운전하여 수중의 초기 단백질 농도를 20.0, 32.4, 42.1, 54.5, 66.4 mg/L로 조절하였다. 또한 총 부유 고형물로는 kaolin을 200 mg/L의 농도로 하여 실험수에 녹여 수행하였다. 그 결과, 초기 단백질 농도가 높아질수록 총 부유 고형물의 제거

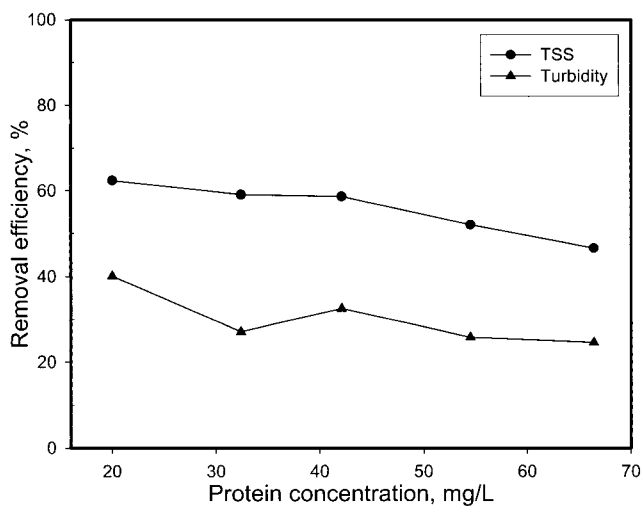


Fig. 9. Total suspended solid and turbidity removal efficiency with respect to protein concentration.

효율은 최대 62.42%에서 46.57%로 감소하였으며 탁도 제거 효율은 40.06%에서 24.60%로 감소하였다. 포말 분리법에 의한 단백질 제거실험에서 초기 단백질 농도가 증가할수록 표면장력의 변화속도가 느려지고 이로 인하여 단백질 축적이 어려워진다 (Wong et al., 2001). 총 부유 고형물이 제거되는 것이 단백질이 기·액 계면에 흡착될 때 동반 흡착되어 제거되는 제거기작 (Chen, 1994)에 의한 현상이므로 본 연구에서의 총 부유 고형물 제거효율 감소가 일어난다고 사료된다. 또한 탁도 제거효율이 총 부유 고형물의 제거효율과 유사한 경향을 보이는 것은 총 부유 고형물이 탁도를 유발하는 주요 인자이기 때문인 것으로 사료된다

사 사

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

참 고 문 헌

APHA, AWWA and WPCF. 1992. Standard Method for the Examination of Water and Wasterwater. 16th ed. American Public Health Association, pp. 132-133

Bhattacharjee, S., R. Kumar and K. Gandhi. 2001. Modeling of protein mixture separation in a batch foam column. Chem. Engineer. Sci., 56, 5499-5510.

Brown, A.K., Kaul, A and J. Varley. 1999. Continuous foaming for protein recovery, Biotechnol. Bioeng., 62(3), 278-290.

Chen, S. 1994. Modeling surfactant removal in foam fractionation: II Experimental investigations, Aquacult. Engineer., 13, 183-199.

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. 1999. Separation of oil Contaminants by surfactant-aided foam fractionation, Kor. J. Chem. Engineer., 15, 445-448.

Clarke, A.N. and D.J. Wilson. 1983. Foam Flotation Theory and Applications. Marcel Dekker, New York, pp. 418.

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 folin phenol reagent. J. Biotech., 193, 265-275.

Noble, M. and J. Varley. 1998. Protein recovery using

- gas-liquid dispersion, *J. Chromatogr.*, 711, 31-43.
- Saleh, Z.S. and M.M. Hossain. 2001. A study of the separation of proteins from multicomponent mixtures by a semi-batch foaming process. *Chem. Engineer. Process*, 40, 371-378.
- Suh, K.H., B.J. Kim and S.K. Kim. 2001. The removal of aquacultural waste by foam separator from sea water. *J. Kor. Inst. Chem. Engineer.*, 39(2), 237-244.
- Suh, K.H., H.K. Shim and J.W. Yun. 1996. Continuous foam separation of yeast cells. *Kor. J. Biotechnol. Bioengineer.*, 11, pp. 46.
- Suzuki, Y. and T. Maruyama. 2002. Removal of suspended solids by coagulation and foam separation using surface-active protein. *Water Res.*, 36, 2195-2203.
- Wong, C.H., M.M. Hossain and C.E. Davies. 2001. Performance of a continuous foam separation column as a function of process variables, *Biopro. and Biosys. Engineer.*, 24, 73-81.

2003년 3월 8일 접수
2003년 10월 11일 수리