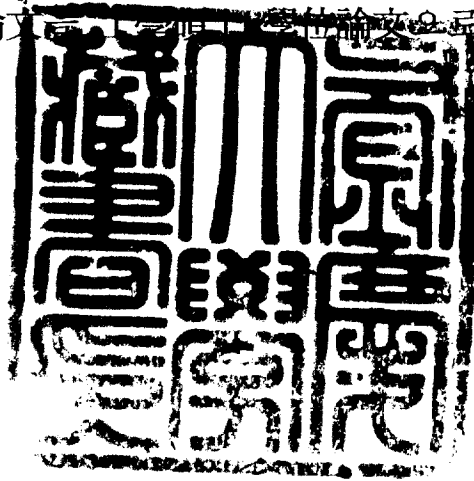


工學碩士 學位論文

담수와 해수에서의 포말 생성 특성

指導教授 徐 根 學

이 論文을 釜慶大學校 化學工學科 申廷植 先生의 指導下에 於て 學位論文으로 提出함



2005年 2月

釜慶大學校 大學院

化學工學科

申 廷 植

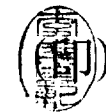
申廷植의 工學碩士 學位論文을 認准함

2004年 12月 日

主 審 工學博士 金 容 河



委 員 工學博士 李 慶 範



委 員 工學博士 徐 根 學



Characteristics of Foam Generation in Freshwater and Seawater

Jeong-Sik Shin

*Department of Chemical Engineering, Graduate School
Pukyong National University*

Abstract

The water in aquarium is contaminated by waste produced by fish. The biological contaminants such as protein, suspended solids, dissolved organic matter and ammonia were a major cause of contamination in aquarium. The biological contaminants can be removed by foam separation process. Stable foam generation is important for an effective foam separation process.

In this study, the characteristics of foam generation in freshwater and seawater were assessed by using a foam generator. We also studied the removal efficiencies of suspended solids and turbidity in freshwater and seawater by using a batch foam separator.

Both in freshwater and in seawater, the height of the foam layer increased with increasing initial protein concentrations. The maximum height of the foam layer in freshwater and seawater were 65 cm and 86.3 cm, respectively. The height of the foam layer in seawater was higher than the height of the foam layer in freshwater at the similar protein concentration.

The height of the foam layer increased with decreasing the pore size of the air distributor. And the optimum superficial air velocities (SAV) in freshwater and seawater were 0.84 cm/sec and 0.6 cm/sec, respectively.

The height of the foam layer was the highest at pH 3 in freshwater and in the region of pH 5-7 in seawater. The height of the foam layer increased with increasing NaHCO_3 concentration in freshwater, however, NaHCO_3 concentration had little effect in seawater.

Removal efficiencies of total suspended solid (TSS) and turbidity decreased with increasing initial protein concentrations in a batch foam separator both in freshwater and in seawater.

목 차

목 차	i
그림 목차(List of figure)	iii
1. 서 론	1
2. 재료 및 방법	9
2.1. 실험장치	9
2.2. 실험과정	12
2.3. 실험재료 및 분석방법	12
2.4. 제거율 계산	13
3. 결과 및 고찰	14
3.1. 포말의 생성과 농축	14
3.2. 단백질 농도 영향	17
3.3. 공기 분산기 기공크기 영향	23
3.4. 공탑 공기유속 영향	25
3.5. pH 영향	28
3.6. NaHCO_3 영향	30

3.7. 온도 영향	32
3.8. 총 부유물질 및 탁도 제거 특성	34
4. 결 론	36
참고문헌	38
Appendix A. 연구목록	43
Appendix B. 게재논문 표지	45

List of figure

Fig. 1. The activity characteristics of surface active materials in the liquid phase.	3
Fig. 2. The theory of foam separation.	4
Fig. 3. The adsorption of ionic material and suspended solids at the bubble interface.	5
Fig. 4. Wastes generation by fish in aquaculture system or aquarium.	8
Fig. 5. The experimental apparatus for a batch foam generation.	10
Fig. 6. The experimental apparatus for a batch foam separation.	11
Fig. 7. The comparison of wet foam and dry foam.	15
Fig. 8. The foam generation in a batch foam generator.	16
Fig. 9. The change of the height of foam layer with respect to operating time in freshwater.	18
Fig. 10. The change of the height of foam layer with respect to operating time in seawater.	20
Fig. 11. The change of the maximum height of foam layer with respect to initial protein concentration.	22
Fig. 12. The change of the maximum height of foam layer with respect to air distributor pore size.	24

Fig. 13. The change of the maximum height of foam layer with respect to superficial air velocity.	27
Fig. 14. The change of the maximum height of foam layer with respect to pH.	29
Fig. 15. The change of the maximum height of foam layer with respect to NaHCO_3 concentration.	31
Fig. 16. The change of the maximum height of foam layer with respect to temperature	33
Fig. 17. TSS and turbidity removal efficiency with respect to protein concentration in freshwater and seawater	35

1. 서 론

최근 생활수준의 향상에 따른 어류의 수요가 증대되고 이에 따라 어류 양식 산업과 활어의 유통산업이 성장하고 있다. 그러나 어류양식의 경우 어류의 고밀도 사육에 의한 생물학적 오염물 증가로 인해 어류가 대량 폐사하기도 하고[1], 활어업소의 경우 활어에 의한 수조 내 오염물의 증가와 용존 산소의 감소로 인해 활어가 오랫동안 살지 못하고 죽는 문제점이 야기된다[2]. 이에 활어업소에서는 활어수조의 용수를 3-4일에 한번씩 교체하여 사용하고 있으나 최근 들어 해안이나 호소 또는 지하수의 오염으로 인해 활어업소에서는 더 이상 안정적인 용수의 공급을 기대하기 어렵게 되었다.

수중에서 어류에 의해 발생하는 생물학적 오염물로는 부유물질, 단백질, 용존 유기물, 암모니아 등이 있다. 이 중 단백질은 미생물에 의한 생물학적 분해에 의해 암모니아로 전환되어 용존산소를 감소시키고, 부유물질은 어류의 아가미에 달라붙어 어류의 호흡에 직접적인 영향을 미치게 되므로 신속히 제거할 필요가 있다[3].

이에 따라 국내·외에서 활어수조의 활어를 오래 보존하기 위하여 감압 장치를 이용한 활어수조 내 용존산소의 제어[4], 고정화 미생물을 이용한 수 처리 장치[5], 스크린 필터와 자외선을 이용한 수 처리 장치[6] 등 많은 연구가 진행되어 왔으나, 수 처리 장치의 초기 설치비용이 크고 운전 조건이 명확하게 규명되지 못하여, 최근까지 실제 활어수조에 대한 적용 가능성 및 검토가 이루어지지 못하고 있다. 따라서 실제 활어업소에 적용하기 위한 설치 및 운전이 간편하고 수 처리 효율이 높은 경제적인 시스템의 개발이 시급한 실정이다.

최근 수중의 생물학적 오염물 제거 방법으로 연구되고 있는 포말 분리

공정은[3, 7-8] 장치의 구조가 간단하면서 어류에 유해한 단백질, 부유물질, 용존 유기물 등을 동시에 제거할 수 있을 뿐만 아니라 용존산소도 공급할 수 있어 활어수조에 적용하기가 용이하다[9-10].

Fig. 1은 수중환경에서 계면활성물질의 활동 특성에 대해 나타낸 것이다. 계면활성물질은 친수성기와 소수성기를 동시에 가지고 있는데 이러한 계면활성물질이 액 중에 존재할 경우 초기에는 소수성기가 기·액 계면을 향하여 이동하고 시간이 지남에 따라 기·액 계면에 나란히 배열되어 기·액 계면이 계면활성물질에 완전히 포화되어 표면 과잉농도에 이르게 된다[11]. 포말 분리는 이러한 계면활성물질의 성질을 이용한 방법으로서 Fig. 2에서 보는 바와 같이 계면활성물질이 들어있는 액 본체 내에 기포를 발생시킬 경우 계면활성물질의 소수성기가 기포 표면에 흡착이 되어 액 본체 상부로 이동을 하고 시간이 지남에 따라 수면이 계면활성물질에 의해 포화에 이르게 되면 포말(Foam; 거품)이 생성되어 시스템 외부로 제거가 된다[12]. 따라서 포말 분리가 수행되기 위해서는 계면활성물질과 포말의 생성이 중요하다고 할 수 있다.

포말 분리를 통해 계면활성물질뿐만 아니라 계면활성이 없는 이온성분이나 부유물질의 제거도 가능하다. 이는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 계면활성물질이 기·액 계면에 흡착이 되고, 이 때 계면활성물질과 반대의 전하를 가지는 이온성분이나 부유물질도 전기적 인력에 의해 기·액 계면에 동반되어 흡착되므로[13], 이와 같은 현상을 이용하여 계면활성이 없는 용존 이온성분이나 부유물질을 액 본체와 분리할 수 있다[14].

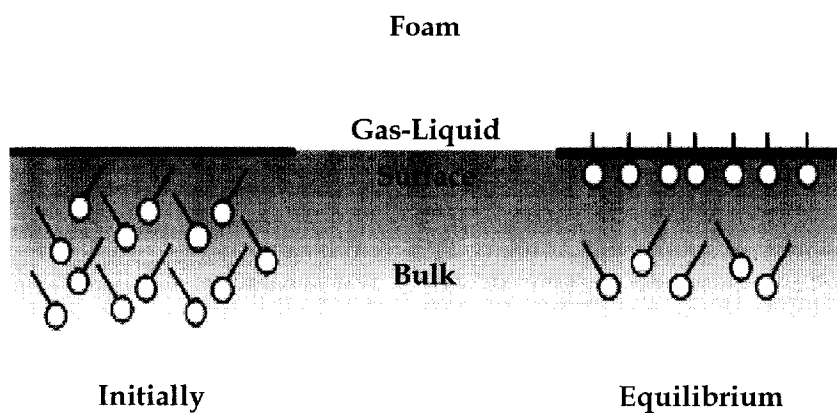


Fig. 1. The activity characteristics of surface active materials in the liquid phase.

Surface active material

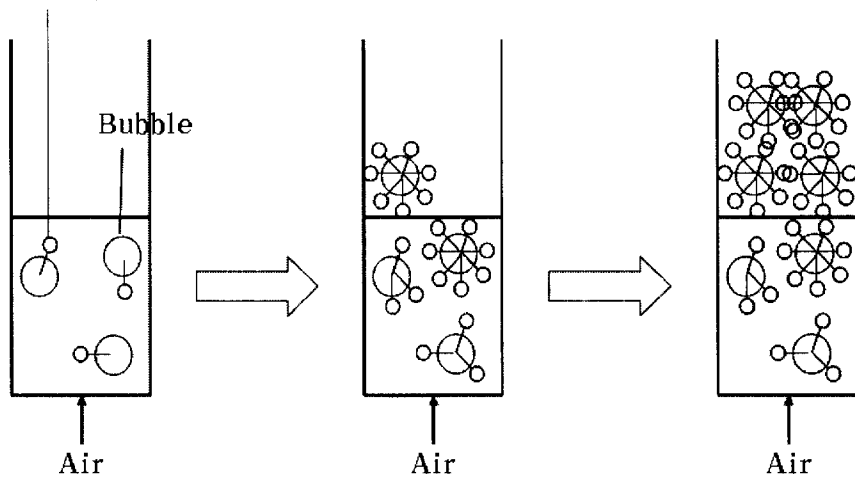


Fig. 2. The theory of foam separation.

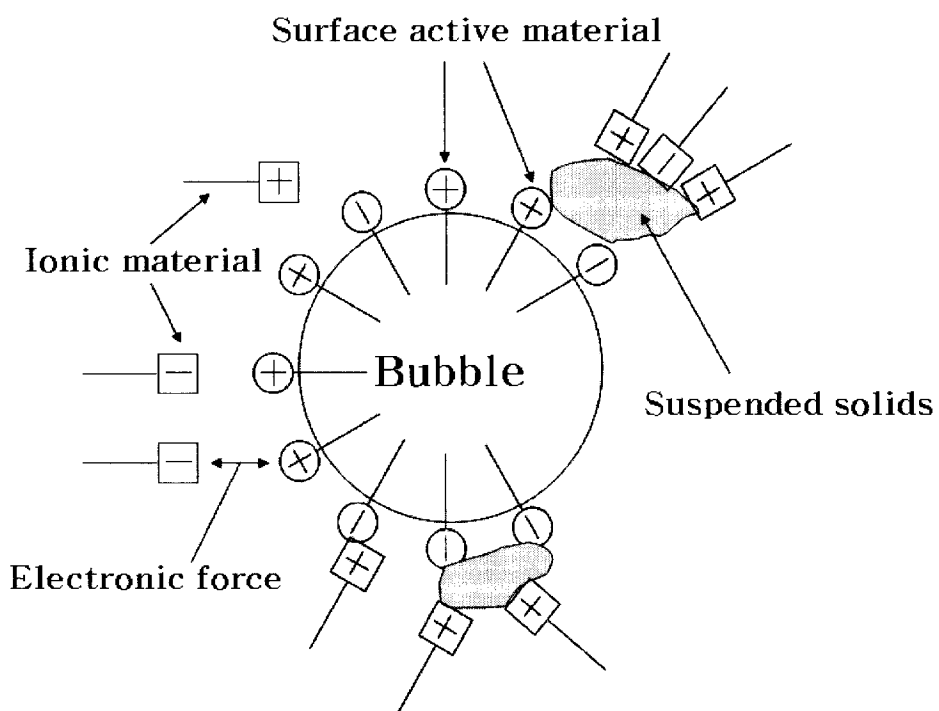


Fig. 3. The adsorption of ionic material and suspended solids at the bubble interface.

Fig. 4는 양식장 및 활어수조 내 어류 성장 환경에서 오염물이 발생하는 과정을 나타낸 것이다. 미 섭취된 사료와 어류의 배설물 등은 유기성 고형물의 형태로 존재하는데, 이 중 단백질 성분은 호기조건에서 생물학적 분해에 의해 암모니아로 바뀌게 된다. 수중에 암모니아가 존재할 경우 어류에 치명적인 영향을 미치므로 단백질 성분이 암모니아로 전환되기 이전에 신속히 제거해야할 필요가 있다. 그런데 단백질 성분은 그 구조적 특성이 계면활성물질 역할을 할 수 있다. 따라서 포말 분리 공정을 양식장, 활어수조 등과 같이 어류 등에 의한 생물학적 오염물 제거 공정에 적용할 경우 별도의 계면활성물질을 첨가하지 않아도 포말 분리를 가능하게 해줄 수 있어 매우 적합한 공정으로 생각된다[15-16].

포말 분리를 이용하여 수중의 생물학적 오염물을 제거하는 공정에 대한 연구는 외국의 경우 순환여과식 양식장 등에 적용시키는 연구가 진행되어 왔다. Suzuki 등[17]은 순환여과식 양식장에 포말 분리 공정을 적용시킨 결과 오염물을 매우 효과적으로 제거할 수 있었다고 보고 하였으며, Chen 등[3]은 포말 분리 공정이 양식장수의 부유물질을 매우 효과적으로 제거할 수 있음을 확인하였다. 우리나라의 경우, 외국에 비하여 이에 대한 연구가 부족하며 최근에는 Suh 등[18], Kim 등[5]에 의해 포말 분리 공정에 의한 양어장 순환수 처리에 관한 연구가 진행되고 있다.

포말 분리가 효과적으로 수행되기 위해서는 안정된 포말의 생성이 가장 중요하다. 여기서 안정된 포말의 생성이란 포말이 어느 정도 생성되는가와 생성된 포말이 어느 정도 지속되는가? 즉, 양적인 개념과 질적인 개념을 동시에 포함하는 말이라 할 수 있다. 수중에서 포말 생성 및 안정성에 영향을 미치는 인자로는 계면활성물질 농도, pH 및 염 농도 등이 있다[19].

본 연구에서는 담수와 해수 중에서 포말 생성에 영향을 미치는 인자인 계면활성물질(단백질) 농도, 공기 분산기의 기공크기, 공탑 공기유속, pH, 염 농도 그리고 온도에 대하여, 포말 생성 관 내 생성된 포말층 높이를 측정하여 포말 생성의 안정성에 대해 알아보고 이를 토대로 담수와 해수에서의 포말 생성 특성에 대해 검토하였다. 그리고 회분식 포말 분리 장치를 이용하여 담수와 해수에서의 총 부유물질 (Total suspended solids, TSS)과 탁도의 제거 특성에 대하여 연구하였다.

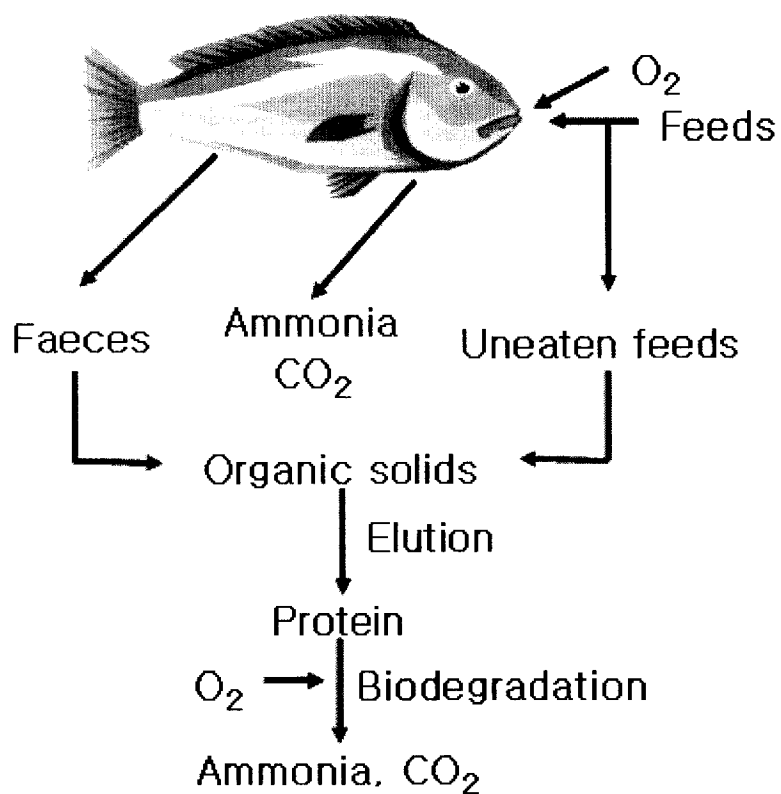


Fig. 4. Wastes generation by fish in aquaculture system or aquarium.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치

Fig. 5는 포말 생성 측정 실험을 위해 본 연구에서 사용한 실험장치로서 포말 생성 장치는 내경 50 mm, 높이 1500 mm의 아크릴 관을 사용하여 제작하였다. 또한 장치 외부에는 줄자를 설치하여 포말 층 높이의 측정을 용이하도록 하였으며, 장치 하부에는 유리여과기를 이용한 공기 분산기를 설치하여 기포가 균일하게 발생하도록 하였다. 공기는 공기펌프를 이용하여 공급하였으며, 공급되는 공기의 양은 유량계(Dwyer Instrument Ltd.)의 조절 밸브를 이용하여 조절하였다.

Fig. 6은 총 부유물질과 탁도의 제거 특성을 알아보기 위해 본 연구에서 사용한 실험장치로서 포말 분리 장치는 내경 50 mm, 높이 500 mm의 아크릴 관을 사용하여 제작하였다. 공기의 공급과 공기 유량의 측정은 포말 생성 실험과 동일하였으며, 생성된 포말의 회수를 위해 아스피레이터를 설치하였다.

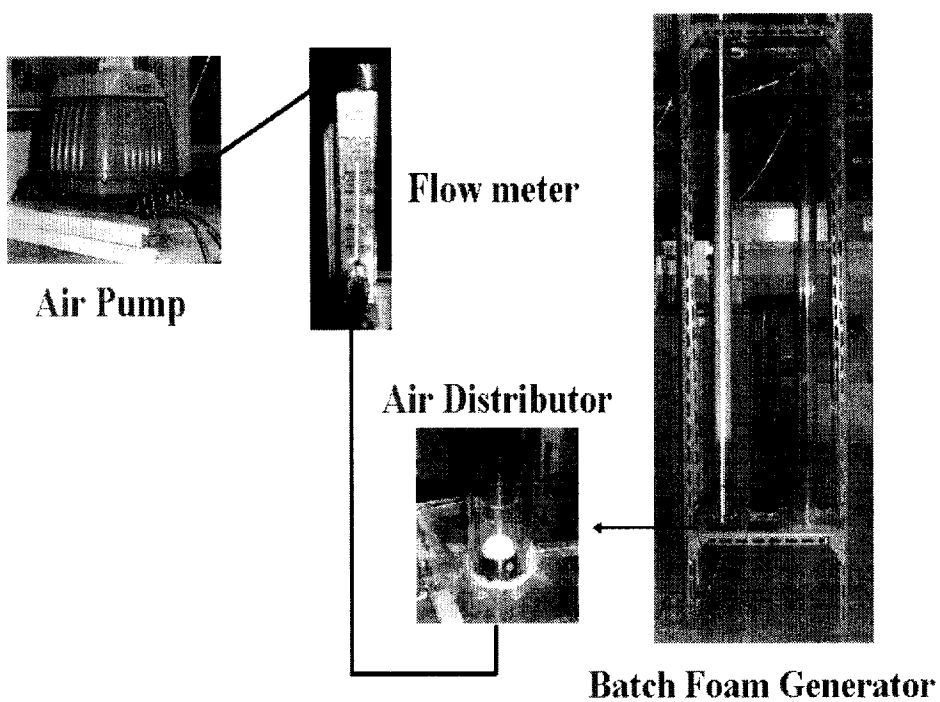


Fig. 5. The experimental apparatus for a batch foam generation.

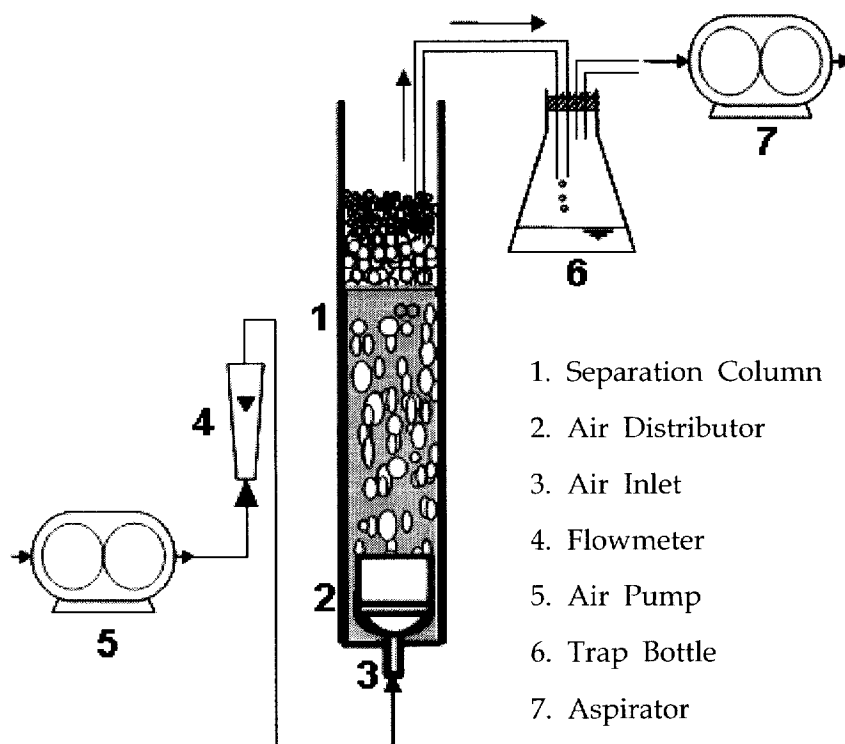


Fig. 6. The experimental apparatus for a batch foam separation.

2.2. 실험과정

2.2.1. 포말 생성 실험

Fig. 5의 포말 생성 장치에 실험 수 100mL를 넣은 후 공기를 공급시키면 포말이 생성되어 포말층 높이가 증가한다. 어느 정도 시간이 흐르면 올라가는 포말과 내려오는 포말이 서로 만나 포말 층은 일정한 높이를 유지하게 되는데, 이 상태를 준 정상상태라 한다. 준 정상상태에서의 포말층 높이는 포말의 생성 양과 생성된 포말의 지속성을 나타내는 간접적 지표로 사용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 포말 생성의 안정성을 알아보기 위해 각 조건에서 회분식으로 3회 운전하여 준 정상상태에서의 포말 층 생성 높이를 측정하여 평균값을 데이터화 하였다.

2.2.2. 포말 분리 실험

Fig. 6의 포말 분리 장치에 카울린이 200 g/m^3 의 농도로 녹아 있는 실험 수 200 mL를 넣은 후 공기를 공급하면 포말이 생성되면서 카울린이 제거된다. 포말이 생성되면 아스피레이터를 작동시켜 포말을 장치 외부로 뽑아낸다. 포말 분리 전·후 실험수의 부유물질과 탁도를 측정하여 제거율을 계산하였다.

2.3. 실험재료 및 분석방법

본 연구에서는 담수와 해수로 나누어 실험을 행하였다. 담수의 경우에는 단백질이 들어있지 않은 수돗물을 사용하였으며, 해수의 경우에는 담수에 인공해수시약(Colalife, USA)을 첨가하여 염도를 30 PSU로 맞춘 후 사용하였다. 포말 생성에 필요한 단백질 성분은 부경대학교 부속 양어장에서 포말

농축물을 수거하여 사용하였다.

단백질의 농도 분석은 Folin phenol을 이용한 Lowry의 방법[20] 과 UV-280 methods[21]에 의해 수행하였다. 총 부유물질의 농도는 유리섬유여과지(GF/C)를 이용하여 standard method[22]에 따라 분석하였으며, 탁도는 탁도계(Model 2100N, Hach Co. Ltd)를 이용하여 측정하였다.

2.4. 제거율 계산

포말 분리 장치에 의한 부유물질(카올린)의 제거 실험에서 총 부유물질과 탁도의 제거율은 포말 분리 수행 전·후의 실험수를 채수하여 다음과 같이 계산 하였다.

$$R (\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

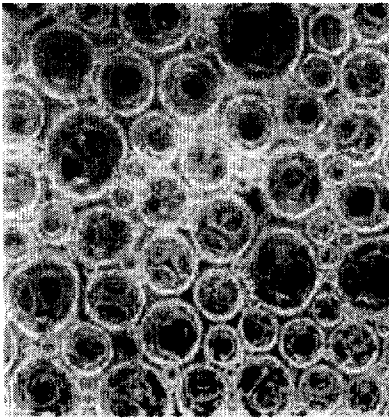
여기서, R : 총 부유물질 혹은 탁도의 제거율 [%]

C_i, C_f : 포말 분리 전·후의 총 부유물질 혹은 탁도의 농도
[g/m³, NTU]

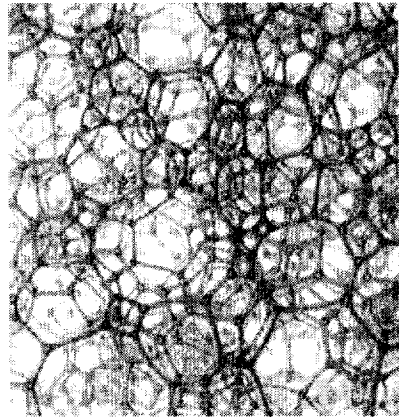
3. 결과 및 고찰

3.1 포말(Foam; 거품)의 생성과 농축

포말이 생성되는 과정은 계면활성물질이 액 본체 내에서 부상하는 기포에 흡착되는 과정과 액 본체 상부에 포말이 모여 농축되는 과정으로 이루어진다. 계면활성물질이 들어있는 액 본체 내에 기포를 발생시키면 초기에는 포말이 액 본체 상부에 모이게 되는데 이 때의 포말은 Fig. 7. (a)와 같은 습윤한 포말로서 구형의 형태로 이루어져 있다. 액 본체 상부가 포말에 의해 포화에 이르게 되면 Fig. 8에서 보는 바와 같이 포말이 상승하게 된다. 어느 정도의 시간이 경과하면 올라가는 포말과 내려오는 포말이 서로 만나서 포말 층은 일정한 높이를 유지하게 된다. 이 상태를 준 정상상태라 한다. 포말 층이 준 정상상태에 이르게 되면 생성된 포말은 Fig. 7. (b)와 같이 12면체의 건조 포말로 바뀌게 되는데, 완전한 건조 포말은 계면활성물질만으로 구성되어 있어서 매우 높은 농축 효과를 가진다.



(a) Wet foam



(b) Dry foam

Fig. 7. The comparison of wet foam and dry foam.

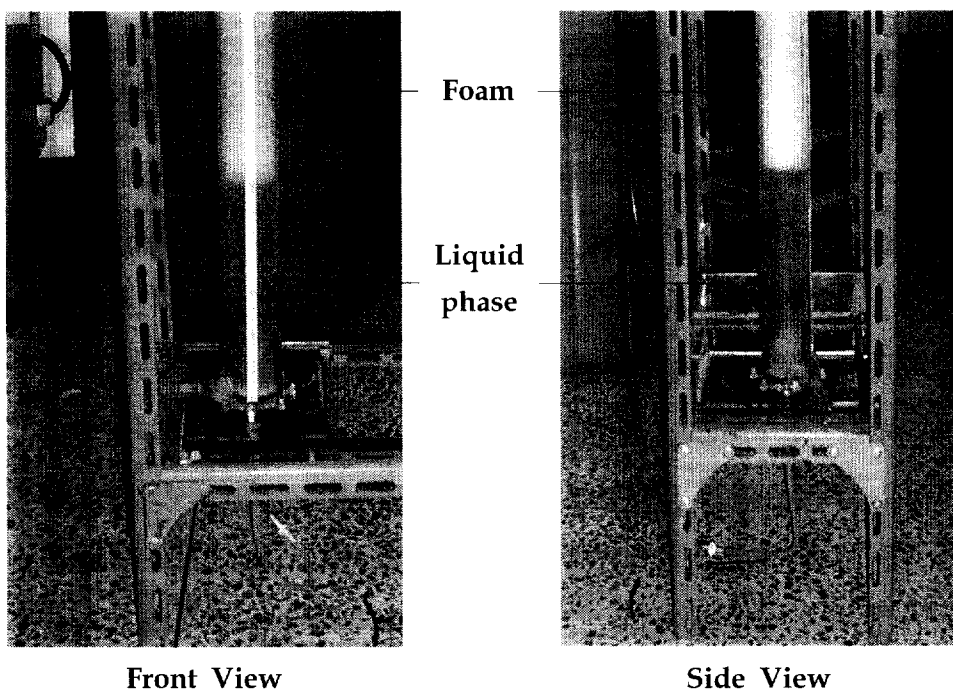


Fig. 8. The foam generation in a batch foam generator.

3.2. 단백질 농도 영향

담수와 해수에서 발생하는 생물학적 오염물 중 단백질은 소수기와 친수기를 함께 가지고 있는 구조적 특성으로 인하여 계면활성물질 역할을 할 수 있다. 계면활성물질은 포말 생성 능력을 증가시키고 안정된 포말의 생성을 용이하게 한다. 그러므로 용액 중의 단백질 농도는 포말 생성의 안정성을 결정하는 중요인자이다. 본 실험에서는 담수와 해수 중에서 단백질 농도를 변화시키면서 단백질 농도에 따른 포말 생성 능력을 알아보았다.

Fig. 9는 담수에서 단백질 농도의 변화에 따라 운전시간에 따른 포말 층 생성 높이의 변화를 나타낸 그림이다. 공탐 공기유속을 0.84 cm/sec로 하고 공기 분산기로 기공크기가 G3인 유리 여과기를 설치하여 운전한 결과, 단백질 농도 8.0, 20.5, 26.2 g/m³에서는 운전시간 60초 만에 최대높이에 도달하였으나 41.5, 55.1, 69.4 g/m³의 단백질 농도에서는 90초와 120초에서 최대높이에 도달하는 것으로 나타났다. 이로 보아 계면활성물질(단백질)의 농도가 증가할수록 포말 층 생성 높이가 증가하여 안정화되는데 보다 긴 시간이 필요한 것을 알 수 있었다.

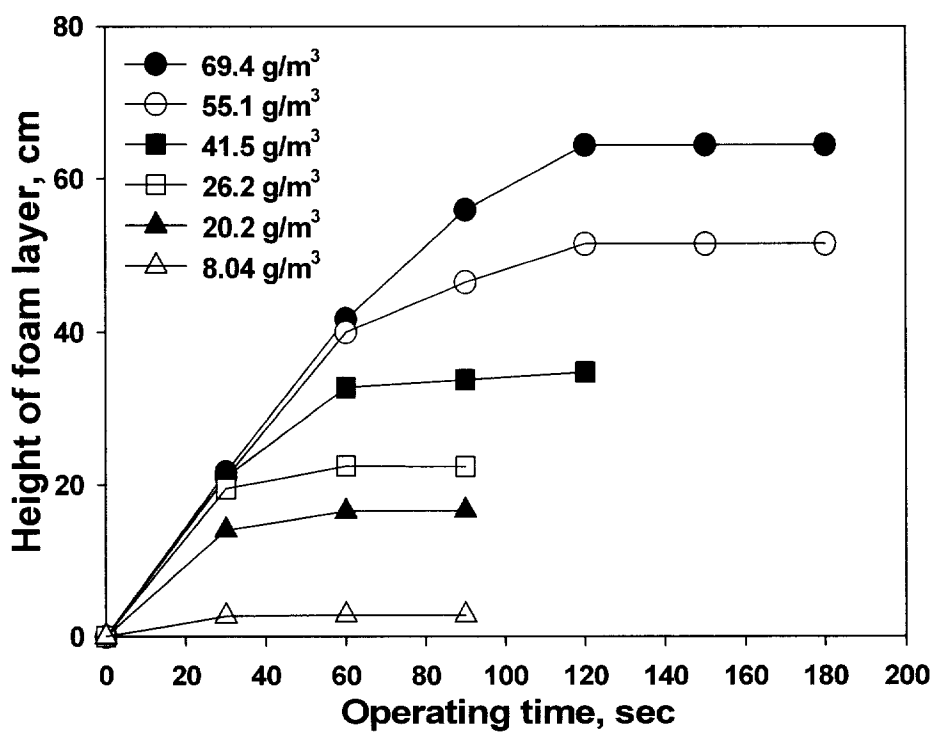


Fig. 9. The change of the height of foam layer with respect to operating time in freshwater.

Fig. 10은 해수에서 단백질 농도가 6.9 g/m^3 에서 67.6 g/m^3 로 증가함에 따라 운전시간에 따른 포말 층 생성 높이의 변화를 나타낸 것이다. 공탑 공기유속을 0.84 cm/sec 로 하고 공기 분산기를 기공크기가 G3인 유리 여과기를 설치하여 운전한 결과, 단백질 농도 6.9 g/m^3 , 13.2 g/m^3 에서는 운전시작 60초 만에 최대높이에 도달하였으나 그 이상의 단백질 농도에서는 각각 90초와 120초에서 최대높이에 도달하는 것으로 나타났다. 따라서 해수에서도 담수에서도 마찬가지로 단백질 농도가 증가할수록 포말이 생성되어 안정화 되는데 보다 긴 시간이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

단백질 농도 변화 실험에서는 공탑 공기유속을 0.84 cm/sec 로 고정하여 실험하였는데, 공탑 공기유속이 일정할 경우 동일한 시간에서 발생하는 기포의 양이 일정하게 된다. 발생하는 기포의 직경이 일정하다고 할 때 기포 한 개당 흡착할 수 있는 계면활성물질의 양은 한정되어 있다. 따라서 단백질 농도가 증가할 경우 기포에 흡착할 수 있는 계면활성물질의 양도 증가하게 되고 이로 인해 보다 많은 기포의 양을 필요로 하게 되므로 포말이 생성되어 안정화 되는데 보다 긴 시간이 걸리는 것으로 사료된다.

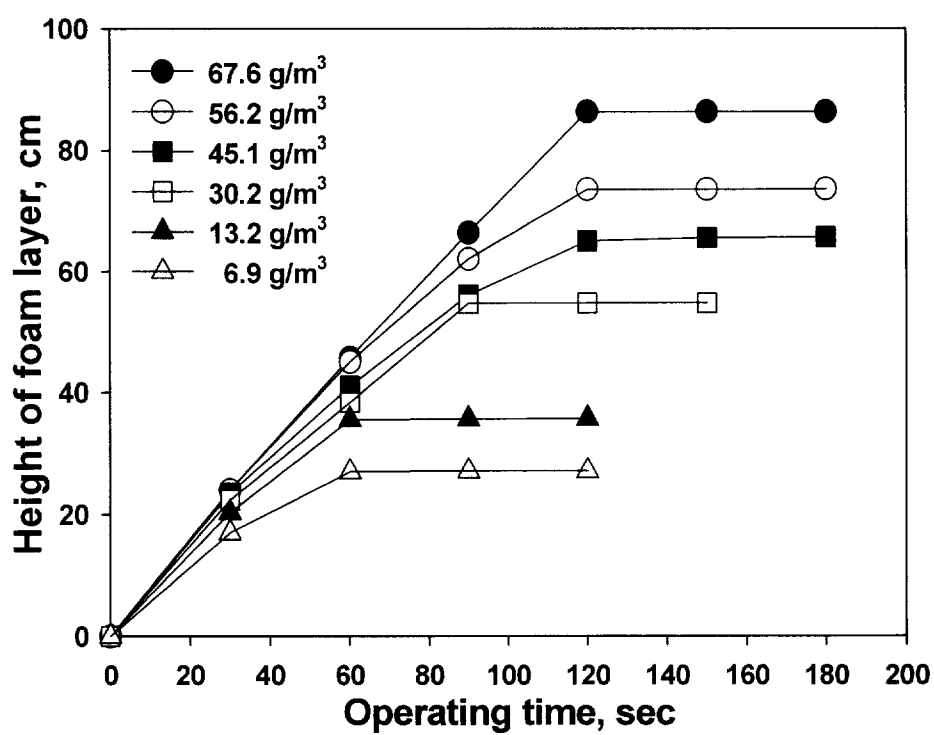


Fig. 10. The change of the height of foam layer with respect to operating time in seawater.

Fig. 11은 담수와 해수에서 초기 단백질 농도 변화에 따른 최대 포말 층 생성 높이의 변화를 나타낸 것이다. 담수에서는 초기 단백질 농도가 8 g/m^3 에서 69.4 g/m^3 로 증가할 경우 최대 포말 층 생성 높이는 3 cm에서 65 cm로 증가하는 것으로 나타났다. 해수의 경우에는 초기 단백질 농도가 6.9 g/m^3 에서 67.6 g/m^3 로 증가함에 따라 최대 포말 층 생성 높이는 27 cm에서 86 cm로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 담수와 해수에서 초기 단백질 농도가 증가할수록 최대 포말 층 생성 높이는 거의 직선적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 단백질 농도가 비슷할 경우 담수에서보다 해수에서 포말 층은 더 높게 형성되는 것으로 나타났다. 이로 보아 담수에서 보다 해수에서 포말 분리가 더 효과적으로 수행될 수 있음을 알 수 있었다. 또한 초기 단백질 농도가 약 10 g/m^3 일 경우에는 담수와 해수에서의 최대 포말 층 생성 높이의 차이는 약 9배에 달했으나, 초기 단백질 농도가 70 g/m^3 일 경우에는 그 높이의 차이는 약 1.5배에 달했다. 따라서 초기 단백질 농도가 증가할수록 담수와 해수에서의 포말 층 생성 높이의 차이는 줄어드는 것을 알 수 있었다.

포말은 기·액 계면에 흡착된 계면활성물질에 의해 대기 중에서도 그 형태가 깨어지지 않고 유지되는 것으로[23], Brown 등[11]이 보고한 것에 따르면 유입 단백질 농도의 증가로 인하여 포말 내의 단백질 체류시간이 증가한다고 하였다. 이로 인해 단백질 농도가 높아질수록 기·액 계면에 흡착되는 단백질의 양이 증가하여 포말이 파쇄되지 않고 많이 발생하여 포말 생성 높이의 증가를 보이는 것으로 이는 Morrison 등[24]이 보고한 것과 유사한 결과를 보였다.

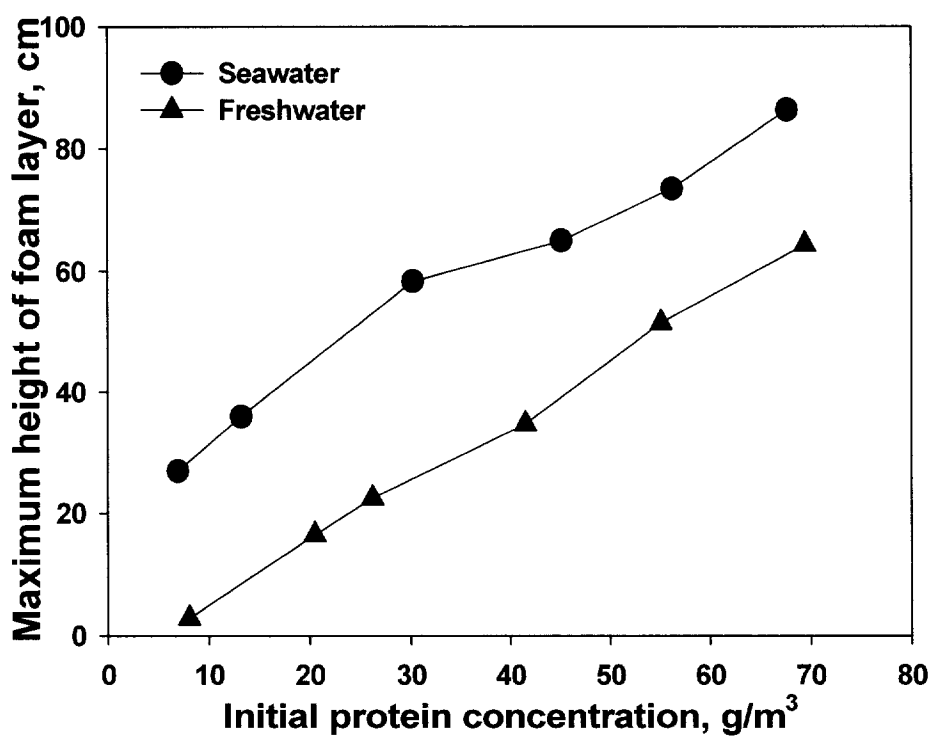


Fig. 11. The change of the maximum height of foam layer with respect to initial protein concentration.

3.3. 공기 분산기 기공크기 영향

포말 분리 시 액 본체에 공급되는 기포의 크기는 포말 분리 효율에 큰 영향을 미치고, 기포의 크기는 장치 하부에 설치되어 있는 공기 분산기의 기공크기 의해 결정된다. 본 연구에서 공기분산기로 사용된 유리 여과기의 경우 기공크기에 따라 각각 G1, G2, G3, G4 size로 구분된다. 본 실험에서는 90-150 μm 의 기공크기를 가지는 G1 size, 40-90 μm 의 기공크기를 가지는 G2 size, 15-40 μm 의 기공크기를 가지는 G3 size 및 3-15 μm 의 기공크기를 가지는 G4 size의 유리 여과기를 사용하여 기공크기에 따른 포말 생성 능력을 알아보았다.

Fig. 12는 담수와 해수에서 공기 분산기의 기공크기에 따른 최대 포말 층 생성 높이의 변화를 나타낸 그림으로써 담수와 해수에서 초기 단백질 농도를 각각 31.9 g/m³, 30.2 g/m³으로 하고 공탐 공기유속을 0.84 cm/sec로 하여 공기 분산기를 기공크기가 각각 G1, G2, G3, G4인 유리 여과기를 사용하여 실험한 결과 담수와 해수에서 모두 기공크기가 작아질수록 최대 포말 생성 높이가 높아지는 것으로 나타났다. 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.

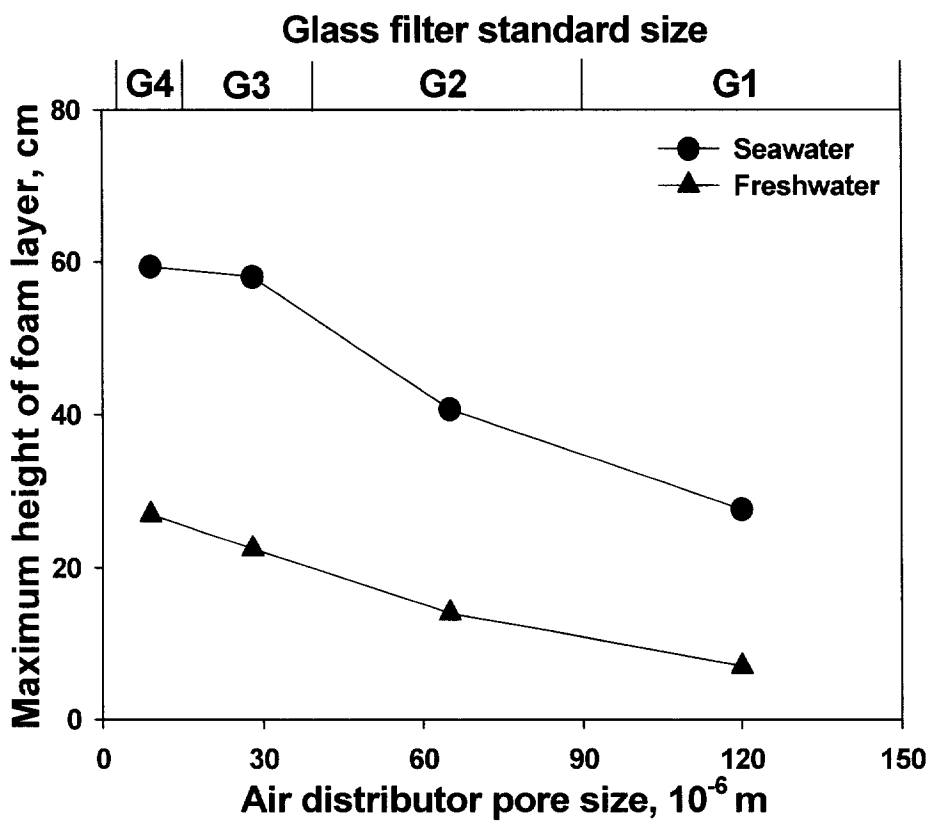


Fig. 12. The change of the maximum height of foam layer with respect to air distributor pore size.

3.4. 공탑 공기유속 영향

공탑 공기유속은 포말 분리 시 액 본체에 공급되는 기포의 양을 결정하고 이는 포말 분리에 큰 영향을 미친다. 최근에는 포말 분리에 의한 단백질 회수, 미생물 회수 등의 연구에서도 주요 운전 인자로 연구되어지고 있다. 본 실험에서는 초기 단백질 농도를 일정하게 하고 공탑 공기유속을 0.40 cm/sec에서 1.27 cm/sec 까지 변화시키면서 담수와 해수에서의 포말 생성 능력을 검토하였다.

Fig. 13은 담수와 해수에서 공탑 공기유속의 변화에 따른 최대 포말 층 생성 높이의 변화를 나타낸 그림이다. 담수와 해수에서 초기 단백질 농도를 각각 31.9 g/m^3 , 30.2 g/m^3 으로 하고 공기 분산기로 규격이 G3인 유리 여과기를 설치하여 운전한 결과 담수와 해수에서 공탑 공기유속이 증가할수록 최대 포말 생성 높이는 증가하다가 담수의 경우에는 0.84 cm/sec 이상의 공탑 공기유속에서 최대 포말 생성 높이의 차이가 크지 않았으며, 해수의 경우에는 0.6 cm/sec 이상에서 포말 생성 높이의 변화가 거의 없었다. 공탑 공기유속이 증가할수록 동일한 운전시간에서 발생하는 기포의 양이 증가하고 이에 따라 기·액 계면 면적이 증가한다고 보고하고 있다[11]. 기·액 계면 면적의 증가는 기포에 흡착되는 용질의 양을 증가시키므로 이로 인해 포말 생성 높이가 증가하는 것으로 사료된다. 또한 담수와 해수에서 공탑 공기유속이 각각 0.84 cm/sec, 0.6 cm/sec 이상에서는 더 이상 포말 생성 높이가 증가하지 않았는데 이는 포말 생성을 위한 실험수의 단백질 농도가 일정하므로 기포에 흡착될 수 있는 계면활성물질의 양도 한정되어 있으므로 일정 공기량 이상을 공급하여도 더 이상 기포에 흡착되지 않아 포말 생성 높이가 더 이상 증가하지 않는 것으로 보인다.

Chai 등[25]의 연구에 의하면 안정된 포말 생성을 위한 공탑 공기유속은 0.5 cm/sec에서 2 cm/sec 사이라고 보고하고 있다. 이는 공탑 공기유속이 0.5 cm/sec 이하에서는 공기가 완전하게 공기 분산기를 빠져 나오지 않기 때문에 포말 생성에 어려움이 있고, 공탑 공기유속이 2 cm/sec 이상이 되면 난류가 형성되어 역혼합이 일어나고 기포가 빠르게 탑 상부로 올라가 안정된 포말이 생성되지 않기 때문이다.

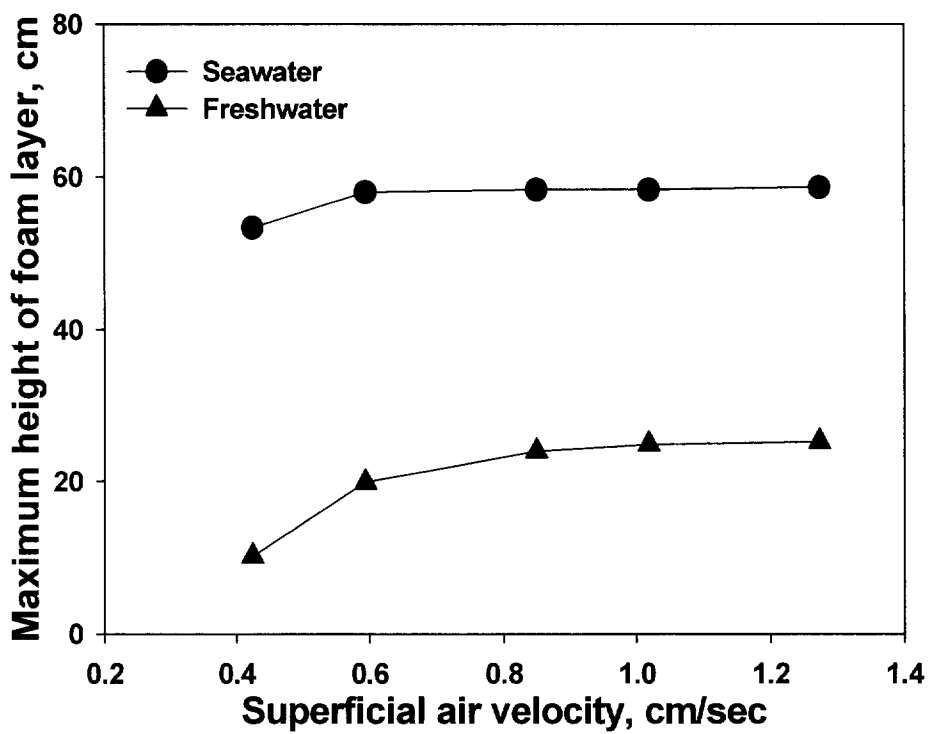


Fig. 13. The change of the maximum height of foam layer with respect to superficial air velocity.

3.5. pH 영향

생물학적 오염물인 단백질은 양쪽성 전해질이고, 양쪽성 전해질에서 분자의 전하는 pH에 의해서 가장 뚜렷하게 변화한다. 따라서 이들 용액의 전기이동현상에서 용질입자 또는 분자의 이동도는 pH와 관계가 있으며, 또한 분자의 이동도는 기포에 흡착되는 양과 관계가 있으므로 이에 따라 포말 생성 능력도 달라진다고 할 수 있다. 본 실험에서는 담수와 해수에서 초기 단백질 농도를 일정하게 유지하고, 0.1 M HCl과 0.1 M NaOH 수용액을 사용하여 pH를 변화시킨 후 이에 따른 포말 생성 능력을 검토하였다.

Fig. 14는 담수와 해수에서 pH 변화에 따른 최대 포말 층 생성 높이의 변화를 나타낸 그림이다. 담수에서는 초기 단백질 농도를 31.9 g/m^3 으로 하고 G3의 유리 여과기를 설치하여 0.84 cm/sec의 공탐 공기유속으로 실험한 결과 pH 3.5에서 47 cm의 최대 포말 생성 높이를 보여주었다. 그러나 pH 4.5-5사이에서 17 cm로 가장 낮은 포말 생성 높이를 보였는데 이는 Suzuki and Maruyama [10]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. 해수에서는 초기 단백질 농도를 30.2 g/m^3 으로 하고 G3의 유리 여과기를 설치하여 0.84 cm/sec의 공탐 공기유속으로 실험한 결과 pH 2-3.5 부근에서는 최대 포말 생성 높이가 36 cm로 거의 비슷하게 나타났으나 pH 5부근에서 최대 포말 생성 높이는 74 cm로 갑자기 증가하였다. 그 후 최대 포말 생성 높이는 pH 10부근 까지 서서히 감소하다가 pH 10 이후부터 포말 생성 높이가 회복되는 것으로 나타났다.

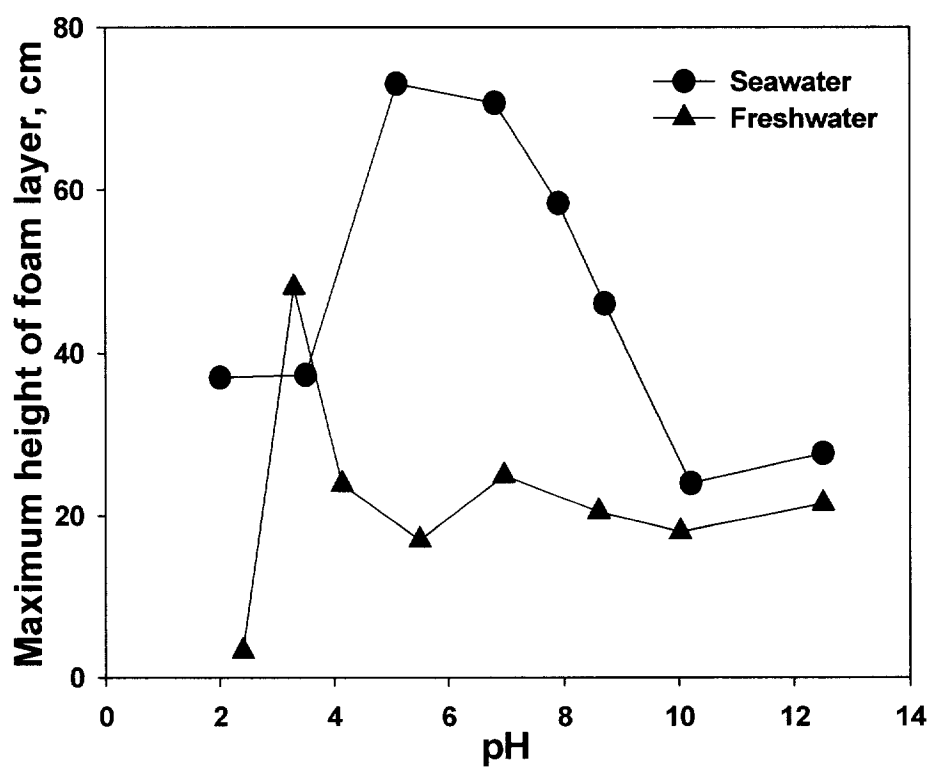


Fig. 14. The change of the maximum height of foam layer with respect to pH.

3.6. NaHCO_3 영향

생물학적 오염물 중 단백질은 생화학적 분해에 의해 암모니아로 되고, 암모니아는 질산화 미생물에 의해서 아질산염과 질산염으로 산화된다. 수중에 아질산염과 질산염이 존재할 경우 용액은 산성으로 변하므로 어류가 살기에 적당한 환경을 만들기 위해서는 염기를 첨가하여 액성을 중성으로 바꿀 필요가 있다. 이 때 자주 쓰이는 염기가 NaHCO_3 이고, 따라서 본 실험에서는 초기 단백질 농도를 일정하게 하고 NaHCO_3 의 첨가에 따른 포말 생성 능력을 검토하였다.

Fig. 15는 담수와 해수에서 NaHCO_3 농도 변화에 따른 최대 포말 층 생성 높이의 변화를 나타낸 그림이다. 담수에서는 초기 단백질 농도를 31.9 g/m^3 으로 하고 G3의 유리 여과기를 설치하여 0.84 cm/sec 의 공탑 공기유속으로 실험한 결과 NaHCO_3 농도를 7000 g/m^3 까지 첨가했을 때 최대 포말 층 생성 높이가 27 cm 로 꾸준히 증가하다가 14000 g/m^3 을 첨가했을 때에는 포말 생성 높이가 45 cm 로 급격히 증가하는 것으로 나타났다. pH는 NaHCO_3 의 농도가 0 g/m^3 일 경우 7.45에서 14000 g/m^3 일 경우 8.32로 증가하는 것으로 나타났다. 해수의 경우 초기 단백질 농도를 30.2 g/m^3 으로 하고 G3의 유리 여과기를 설치하여 0.84 cm/sec 의 공탑 공기유속으로 실험한 결과 최대 포말 층 생성 높이의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 이처럼 해수의 경우 담수에서보다 NaHCO_3 의 영향이 상대적으로 낮게 나타나는 이유는 해수 중에는 NaCl 등 여러 종류의 이온이 용존 되어 있으므로 이와 같은 물질의 영향을 더 많이 받는 것으로 사료된다. 또한 해수의 경우에는 NaHCO_3 농도에 따라 pH가 7.88에서 7.99로 변화하는 것으로 나타나 담수에 비해 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

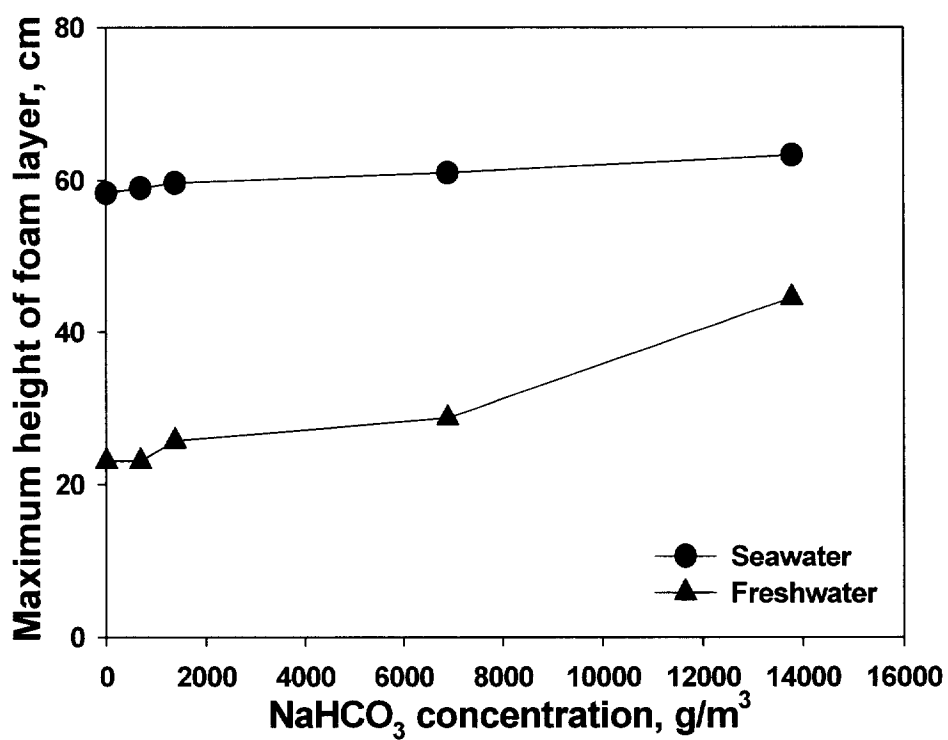


Fig. 15. The change of the maximum height of foam layer with respect to NaHCO_3 concentration.

3.7. 온도 영향

Fig. 16은 담수와 해수에서 온도 변화에 따른 최대 포말 층 생성 높이의 변화를 나타낸 그림이다. 담수에서는 초기 단백질 농도를 31.9 g/m^3 으로 하고 G3의 유리 여과기를 설치하여 0.84 cm/sec 의 공탑 공기유속으로 실험한 결과 5°C 로 운전했을 때 가장 낮은 20 cm 의 포말 생성 높이를 보여주었으며 온도가 상승할수록 포말 생성 높이가 높아져서 32°C 로 운전했을 때 최대 포말 생성 높이가 33 cm 로 나타났다. 또한 해수에서는 초기 단백질 농도를 30.2 g/m^3 으로 하고 G3의 유리 여과기를 설치하여 0.84 cm/sec 의 공탑 공기유속으로 실험한 결과 5°C 로 운전했을 때 가장 낮은 48 cm 의 포말 생성 높이를 보여주었으며 온도가 상승할수록 포말 생성 높이가 높아져서 32°C 로 운전했을 때 최대 포말 생성 높이가 69 cm 로 나타났다. 일반적으로 온도가 증가하면 기체의 부피가 증가하므로 그에 따라 기·액 계면의 면적이 증가하므로 흡착될 수 있는 단백질 양이 증가하여 포말 생성 높이가 증가되었다고 판단된다.

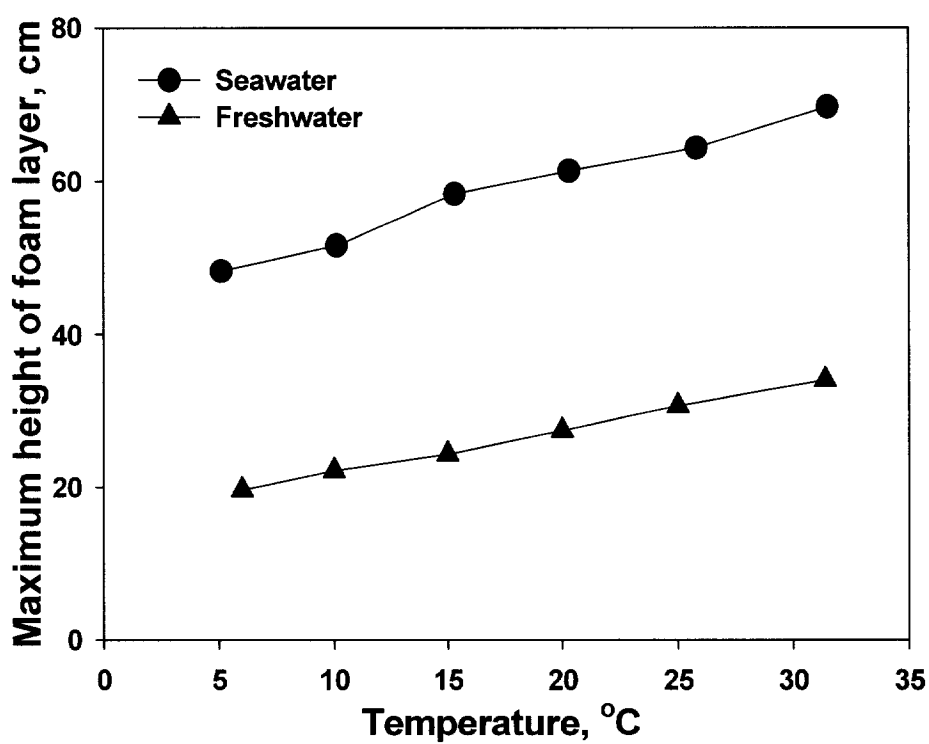


Fig. 16. The change of the maximum height of foam layer with respect to temperature.

3.8. 총 부유물질 및 탁도 제거 특성

Fig. 17은 담수와 해수에서 초기 단백질 농도 변화에 따른 수중의 총 부유물질(TSS)과 탁도 제거율을 나타낸 그림이다. 담수에서는 초기 단백질 농도를 20.0, 32.4, 42.1, 54.5, 66.4 g/m³으로 조절하였고, 해수에서는 초기 단백질 농도를 15.7, 32.7, 42.7, 53.5, 70.7 g/m³으로 조절하였다. 공기 분산기로 기공크기가 G3인 유리 여과기로 설치하고, 공탐 공기유속을 0.84 cm/sec로 하였다. 또한 부유물질로는 카올린을 200 g/m³의 농도로 하여 실험수에 녹여 사용하였다.

담수에서는 초기 단백질 농도가 높아질수록 총 부유물질의 제거효율은 최대 62.42 %에서 46.57 %로 감소하였으며 탁도 제거효율은 40.06 %에서 24.60 %로 감소하였다. 또한 해수에서는 초기 단백질 농도가 높아질수록 총 부유물질의 제거효율은 최대 83.26 %에서 78.31 %로 감소하였으며 탁도 제거효율은 78.89 %에서 65.81 %로 감소하였다. Wong 등[26]의 보고에 따르면 포말 분리법에 의한 단백질 제거 실험에서 초기 단백질 농도가 증가할수록 표면장력의 변화속도가 느려지고, 이로 인하여 단백질 축적이 어려워진다고 하였으며 총 부유물질이 제거되는 것이 단백질이 기·액 계면에 흡착될 때 동반 흡착되어 제거되는 제거기작[27]에 의한 현상이므로 본 연구에서의 총 부유물질 제거효율 감소가 일어난다고 사료된다. 또한 탁도 제거효율이 총 부유 고형물의 제거효율과 유사한 경향을 보이는 것은 총 부유물질이 탁도를 유발하는 주요 인자이기 때문인 것으로 사료된다[28]. 상기 실험결과에 의하여 포말 분리장치는 단백질 및 총 부유물질을 효과적으로 제거할 수 있는 장치로 사료되었고, Chen 등[29]은 포말 분리에 의해 총 부유물질의 제거가 효과적이라고 보고하고 있다.

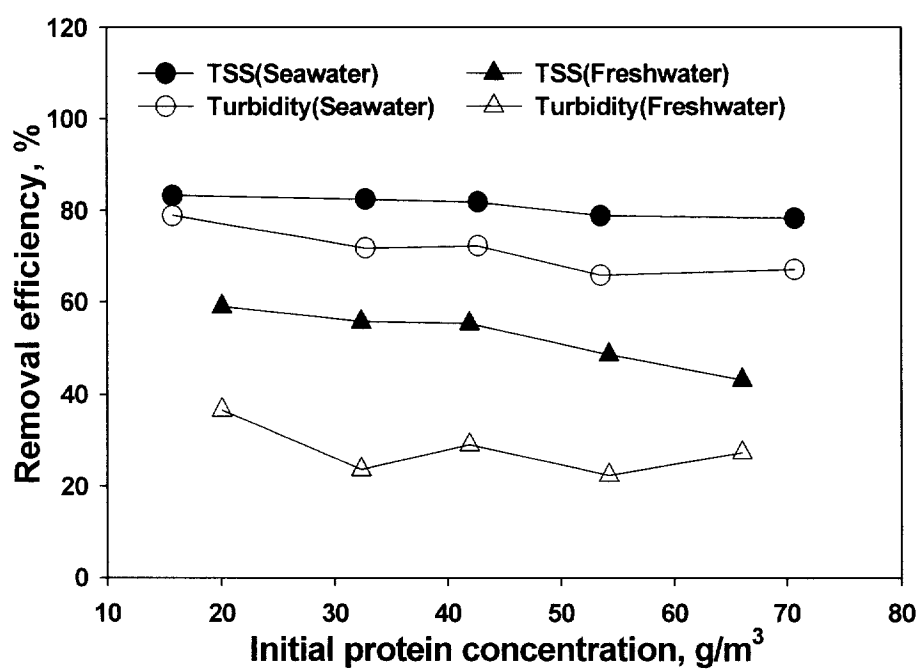


Fig. 17. TSS and turbidity removal efficiency with respect to protein concentration in freshwater and seawater.

4. 결 론

본 연구의 최종 목적은 포말 분리 장치를 이용하여 활어수조내의 어류에 의해 발생하는 단백질, 부유물질, 암모니아, 용존 유기물과 같은 생물학적 오염물을 효율적으로 제거함과 동시에 용존산소를 효과적으로 공급하여 활어를 장기간 생존시킬 수 있는 활어수조 시스템을 개발하고 이를 최적화하는 것이다.

포말 분리가 효과적으로 수행되기 위해서는 안정적인 포말 생성이 중요하다. 본 논문에서는 포말 생성에 영향을 미치는 인자인 계면활성물질(단백질), 공기 분산기 기공크기, 공탑 공기유속, pH, NaHCO_3 , 온도 등에 대해 담수와 해수에서의 포말 생성 특성에 대해 연구하였다.

담수와 해수에서 계면활성물질 농도, 즉 단백질 농도가 증가할수록 포말 생성 높이는 증가하는 것으로 나타났다. 또한 공기 분산기의 기공 크기가 작아질수록 포말 생성 높이는 증가하였다.

담수와 해수에서 공탑 공기유속이 증가할수록 포말 생성 높이가 증가하였다. 그러나 담수의 경우 공탑 공기유속 0.84 cm/sec 이상에서는 포말 생성 높이가 거의 비슷했으며, 해수의 경우 공탑 공기유속 0.6 cm/sec 이상에서 포말 생성 높이가 거의 일정하게 유지되었다. 공탑 공기유속이 증가하면 운전비용이 증가하기 때문에 담수와 해수에서 공탑 공기유속의 최적 조건은 각각 0.84 cm/sec와 0.6 cm/sec 이었다.

양식장에서는 pH를 조절하기 위해 주로 NaHCO_3 를 사용하게 되는 데 NaHCO_3 농도에 대한 영향에서는 담수에서의 NaHCO_3 성분 존재가 포말 생성을 촉진한다는 것을 알 수 있었으며 해수에서는 담수에서보다 그 영향이 적은 것으로 나타났다.

담수의 경우 pH 3에서 최대 포말 생성 높이를 보였으며, 해수의 경우에는 pH 5-7 일 때 최대 포말 생성 높이를 보였다. 또한 온도가 증가할수록 담수와 해수에서 포말 생성 높이는 증가하는 것으로 나타났다.

담수와 해수에서 총 부유물질과 탁도의 제거효율은 초기 단백질 농도가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Rijn, J. V. "The potential for integrated biological treatment system in recirculating fish culture", *Aquaculture*, 139, pp. 181-201 (1996).
2. Van der Geest, H. G., Soppe, W. J., Greve, G. D., Kroon, A. and Kraak, M. H. S., "Combined effects of lowered oxygen and toxicants (copper and diazinon) on the mayfly ephoron virgo", *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21(2), pp. 431-436 (2002).
3. Chen, S., Stechy, D. and Malone, R. F., "Suspended Solids Control in Recirculating Aquaculture Systems", In: *Aquaculture water reuse system: Engineering design and management*, Timmons, M. B. and Losordo, T. M. eds., Elsevier, Amsterdam, pp. 61-100 (1996).
4. Landman, M. J. and van den Heuvel, M. R. "An improved system for the control of dissolved oxygen in freshwater aquaria", *Water Research*, 37, pp. 4337-4342 (2003).
5. Kim, S. K., Jeong, I. Y., Seo, J. K. and Kim, M. R., "Evaluation of characteristics of nitrification and denitrification process for the development of recirculating aquarium system", 2000 Autumn Joint Meeting of the Korean Societies on Fisheries Science, pp. 150-151 (2000).
6. Park, S. I., Kim, S. K. and Kang, J. C., "The development of filter for environmental improvement in land based seawater fish farm 3. Purification efficiency of rearing seawater by screen filter and

- ultraviolet", *Journal of the Korean Fisheries Society*, 32(4), pp. 501-506 (1999).
7. Timons, M. B. and Chen, S., "Mathematical model of a foam fractionator used in aquaculture", *Journal of World Aquaculture Society*, 26(3), pp. 225-233 (1995).
 8. Suh, K. H. and Lee, M. G., "Treatment of Aquacultural Recirculating Water by Foam Separation - I. Characteristics of Protein Separation", *Journal of the Korean Fisheries Society*, 28(5), pp. 599-606 (1995).
 9. Saleh, Z. S. and Hossain, M. M., "A study of the separation of proteins from multicomponent mixtures by a semi-batch foaming process", *Chemical Engineering and Processing*, 40, pp. 371-378 (2001).
 10. Suzuki, Y. and Maruyama, T., "Removal of suspended solids by coagulation and foam separation using surface-active protein", *Water Research*, 36, pp. 2195-2204 (2002).
 11. Brown, A. K., Kaul, A. and Varley, J., "Continuous foaming for protein recovery", *Biotechnology and Biochemical Engineering*, 62(3), pp. 278-290 (1999).
 12. Boonyasuwat, S., Chavadej, S., Malakul, P. and Scamehorn, J. F., "Anionic and cationic surfactant recovery from water using a multistage foam fractionator", *Chemical Engineering Journal*, 93, pp. 241-252 (2003)
 13. Kim, B. J., "The foam separation process for the removal of

- contaminant in seawater", Ph.D. Thesis, Pukyong National University, Busan, Korea, pp. 13 (2002).
14. Chen, S., "Theoretical and experimental investigation of foam separation applied to aquaculture", Ph.D. Thesis, Cornell University, Ithaca, New York, USA., pp. 231 (1991).
 15. Battacharjee, S., Kumar, R. and Gandhi, K. S., "Modeling of protein mixture separation in a batch foam column", *Chemical Engineering Science.*, 56, pp. 5499-5510 (2001).
 16. Suh, K. H., Kim, B. J. and Kim, S. K., "The removal of aquacultural waste by foam separator from sea water", *Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers*, 39(2), 237-244 (2001).
 17. Suzuki Y., Maruyama, T., Numata, H., Sato, H. and Asakawa, M., "Performance of a closed recirculating system with foam separation, nitrification and denitrification units for intensive culture of eel: towards zero emission", *Aquaculture Engineering*, 29, pp. 165-182 (2003).
 18. Suh, K. H., Lee, M. K. Lee, M. S., Kim, B. J., Kim, Y. J. and Jo, M. C., "Treatment of Aquacultural Recirculating Water by Foam Separation - II. Characteristics of Solid Removal", *Journal of the Korean Fisheries Society*, 30(3), pp. 334-339 (1997).
 19. Noble, M. and Varley, J., "Protein recovery using gas-liquid dispersion", *Journal of Chromatography B*, 711, pp. 31-43 (1998).

20. Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L. and Randall, R. J., "Protein measurement with the Folin phenol reagent", *Journal of Biotechnology*, 193, pp. 265-275 (1951).
21. Bollag, D. M., Rozycki, M. D. and Edelstein, S. J., "Protein Methods", 2nd ed., Wiley-Liss Inc., New York, pp. 58-61 (1996).
22. APHA, AWWA and WPCF, "Standard Method for the Examination of Water and Wastewater", 16th ed., American Public Health Association Inc., New York, pp. 132-133 (1992).
23. Cho, D. and Chang, H. N., "Separation of oil contaminants by surfactant-aided foam fractionation", *The Korean Journal of Chemical Engineering*, 15, pp. 445-448 (1999).
24. Morrison, C., Schramm, L. L. and Stasiuk, E. N., "A dynamic foam method for the estimation of critical micelle concentration at elevated temperatures and pressures", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 15, pp. 91-100 (1996).
25. Chai, J., Loha, V., Prokop, A. and Tanner, R. D., "Effect of bubble velocity and pH step changes on the foam fractionation of sporamin", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46, pp. 2868-2872 (1998).
26. Wong, C. H., Hossain, M. M. and Davies, C. E., "Performance of a continuous foam separation column as a function of process variables", *Bioprocess and Biosystem Engineering*, 24, pp. 73-81 (2001).

27. Chen, S., "Modeling surfactant removal in foam fraction- I. Theoretical development", *Aquacultural Engineering*, 13, pp. 163-181 (1994).
28. Tchobanoglous, G. and Schroeder, E. D., "Water Quality", Addison-Wesley Publishing Company, California, pp. 56 (1985).
29. Chen, S., Timmons, M. B., Bisgoni, J. J. and Aneshansley, D. J., "Suspended solids removal by foam fractionation", *The Progressive Fish Culturist*, 55(2), pp. 69-75 (1993).

Appendix A. 연구목록

1. 국내 학술지 게재 및 투고

1) 게재

- (1) 포말 농축물에 의한 포말 생성의 영향인자
<서근학, 신정식, 이주화/ 한국수산학회지/2003.10/36(5)/509-514>
- (2) 해수활어수조의 포말 분리시 단백질 농도의 영향
<서근학, 신정식, 이창근, 이석희, 천재기, 조재윤/ 한국수산학회지/ 2004.02/37(1)/18-23>
- (3) 활어수조에서 포말분리에 의한 오염물 제거시 수력학적체류시간 영향
<김병진, 신정식, 정호수, 나인걸, 이민수, 서근학/ 한국수산학회지/ 2004.04/37(2)/85-90>
- (4) 담수와 해수에서의 포말 생성 특성
<신정식, 김병진, 서근학/ 한국수산학회지/2004.06/37(3)/179-185>

2) 투고

- (1) 해수활어수조에서 붕장어와 넙치에 의한 오염물 발생
<서근학, 신정식, 조재윤/ 한국수산학회지/ 게재수락>
- (2) 활어수조에서 넙치 사육 시 포말분리장치를 이용한 오염물 제거
<신정식, 이창근, 정호수, 이민수, 이진경, 서근학/ 한국수산학회지/ 게재수락>

2. 국제 학술회의 발표

- (1) Characteristics of protein and TSS removal by counter current air driven type, high speed aeration type and venturi type foam separator in aquacultural water
<Kuen-Hack Suh and Jeong-Sik Shin/ International symposium on advanced engineering/13-15, November, 2003/Busan, Korea/323-326>

(2) Removal of protein and TSS by a foam separator

<Jeong-Sik Shin, Chang-Kuen Lee, Ho-Su Jeong, Jin-Kyung Lee and Kuen-Hack Suh/2004 Korea, Japan and Taiwan Chemical Engineering Conference/2-4, November, 2004/BEXCO, Busan, Korea/65-66>

3. 국내 학술회의 발표

(1) 담수에서의 안정적인 포말 분리를 위한 포말생성 영향 인자

<신정식, 이주화, 서근학/생물공학회/2003. 04. 11-12/부경대학교/331-333>

(2) 해수의 포말생성 영향 인자 고찰

<이주화, 신정식, 서근학/생물공학회/2003. 04. 11-12/부경대학교/371-373>

(3) 해수에서 포말생성 영향 인자

<신정식, 이주화, 서근학/화학공학회/2003. 04. 25-26/순천대학교/97>

(4) 담수에서 포말생성 영향 인자

<신정식, 이주화, 서근학/화학공학회/2003. 04. 25-26/순천대학교/97>

(5) 포말 분리를 위한 포말생성 특성 고찰

<신정식, 서근학, 이창근/화학공학회/2003. 10. 24-25/한양대학교/120>

(6) 활어수조의 포말 분리 - 단백질 농도 영향

<신정식, 정호수, 서근학/화학공학회/2004. 04. 23-24/공주대학교/61>

(7) 활어수조의 포말 분리 - 수력학적 체류시간 영향

<이창근, 신정식, 서근학/화학공학회/2004. 04. 23-24/공주대학교/64>

(8) 담수와 해수에서의 포말생성 특성

<서근학, 신정식, 이창근, 정호수, 이진경/수산물관련 공동 학회/2004. 05. 13-14/부산전시컨벤션센터(BEXCO), 185-186>

Appendix B. 게재논문 표지

J. Kor. Fish. Soc. 36(5), 509-514

한수지, 36(5), 509-514, 2003

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 회박한 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, 액본체 (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 영향인자로써 계면 활성제의 농도, pH 및 입 농도 등이 있다 (Noble and Varley, 1998).

양식장 및 활어수조 내 어류 배설 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, 공탁공기유속, pH, 염농도 그리고 온도 영향에 대한 연구를 수행하여 포말분리 장치 설계 및 제작을 위한 기초자료를 도출하려 하였다. 그리고 회박성 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 액본체 부피는 100 mL였으며 포말분리관 하부에는

*Corresponding author: khsuh@pknu.ac.kr

해수활어수조의 포말분리시 단백질 농도의 영향

서근환* · 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

서 론

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 방법으로써 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 생각 된다 (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

활어수조에서 포말분리에 의한 오염물 제거시 수력학적 체류시간 영향

김병진 · 신정식¹ · 정호수¹ · 나인걸¹ · 이민수¹ · 서근학^{*}
부산바이오기업지원센터, ¹부경대학교 화학공학과

Effect of Hydraulic Residence Time on the Removal of Wastes in a Seawater Aquarium using a Foam Separator

Byong-Jin KIM, Jeong-Sik SHIN¹, Ho-Su JEONG¹, In-Geol NA¹,
Min-Su LEE¹ and Kuen-Hack SUH^{1*}

Busan Bio Industry Support Center (BISC), Busan 608-739, Korea

¹Division of Applied Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

The effect of the hydraulic residence time (HRT) for the removal of aquarium waste, such as protein, total suspended solids (TSS) and turbidity were investigated by using a foam separator. Protein, TSS and turbidity removal efficiencies were increased with the increase of hydraulic residence time. The optimum hydraulic residence time was 0.5 min, and the highest protein and TSS removal rates were 14.4 g/L·day and 38.9 g/L·day, respectively. The tendency of turbidity removal rate and efficiency was similar to that of protein.

Key words: Foam separation, Aquarium, Hydraulic residence time

서 론

최근 생활수준의 향상에 따른 어류의 수요가 증대되고 이에 따라 어류양식 산업과 활어의 유통산업이 성장하고 있다. 그러나 어류양식의 경우 어류의 고밀도 사육에 의한 생물학적 오염물 증가로 인해 어류가 대량 폐사하기도 하고 (Rijn, 1996), 활어업소의 경우 활어에 의한 수조내의 오염물 증가와 용존 산소의 감소로 인해 활어가 오랫동안 살지 못하고 죽는 문제점이 야기 된다 (Van der Geest et al., 2002). 이에 활어업소에서는 활어수조의 용수분 3-4일에 한번씩 교체하여 사용하고 있으나 최근 들어 해안이나 호소수 또는 지하수의 오염으로 인해 활어업소에서는 더 이상 안정적인 용수의 공급을 기대하기 어렵게 되었다.

양식장이나 활어수조 내에서 발생하는 생물학적 오염물은 단백질, 부유성고형물, 유기물, 암모니아 등이 있다. 이중 단백질은 미생물에 의한 생물학적 분해에 의해 암모니아로 전환 되어 용존산소를 감소시키고, 부유성고형물은 어류의 아가미에 달라붙어 어류의 호흡에 직접적인 영향을 미치게 되므로 신속히 제거할 필요가 있다 (Chen et al., 1996). 이에 따라 국내외에서 활어수조내의 활어를 오래 보존하기 위하여 감압장치를 이용한 수조 내 용존산소의 제어 (Landman and van den Heuvel, 2003), 고정화 미생물을 이용한 수 처리 장치 (Kim et al., 2000), 스크린 필터와 자외선을 이용한 수 처리 장치 (Park et al., 1999) 등에 대한 연구가 진행되어 왔으나, 수 처리 장치의 초기 설치비용이 크고 운전 조건이 명확하게 규명되지 못하여, 최근까지 실제 활어수조에 대한 적용성 및

검토가 이루어지지 못하고 있다. 따라서 실제 활어업소에 적용하기 위한 설치 및 운전이 간편하고 수 처리 효율이 높은 경제적인 시스템의 개발이 시급한 실정이다.

최근 수중의 생물학적 오염물 제거 방법으로 연구되고 있는 포말분리법은 장치의 구조가 간단하면서 어류에 유해한 단백질, 부유성고형물, 용존 유기물 등을 동시에 제거할 수 있을 뿐만 아니라 용존산소도 공급할 수 있어 활어수조에 적용하기가 용이하다 (Saleh and Hossain, 2001; Suzuki, 2002). 특히 활어수조에서 어류에 의해 발생하는 생물학적 오염물 중 단백질 성분은 계면활성제 역할을 할 수 있다 (Phillips et al., 1995). 따라서 포말분리를 활어수조와 같은 어류에 의한 생물학적 오염물 제거 공정에 적용할 경우 별도의 계면활성제를 첨가하지 않아도 되기 때문에 매우 적합한 공정이라 할 수 있다 (Bhattacharjee et al., 2001).

포말분리법을 이용하여 수중의 생물학적 오염물을 제거하는 공정에 대한 연구는 외국의 경우 순환여과식 양식장 등에 적용시키는 연구가 진행되어 왔다. Suzuki et al. (2003)은 순환여과식 양식장에 포말분리공정을 적용시킨 결과 오염물을 매우 효과적으로 제거할 수 있었다고 보고 하였으며, Chen et al. (1996)은 포말분리법이 양식장수의 부유성 물질을 매우 효과적으로 제거할 수 있음을 확인하였다.

우리나라의 경우, 외국에 비하여 이에 대한 연구가 부족하며 최근에는 Suh (1997), Kim (2000) 등에 의해 포말분리법에 의한 양어장 순환수 처리에 관한 연구가 진행되고 있다. 이에 본 연구에서는 포말분리장치를 활어수조 설치하여 포말분리 장치에 의한 활어수조내의 단백질, 부유성고형물 등의 오염물

*Corresponding author: khsuh@pknu.ac.kr

담수와 해수에서의 포말 생성 특성

신정식 · 김병진¹ · 서근학*

부경대학교 화학공학과, ¹부산바이오산업지원센터

Characteristics of Foam Generation in Freshwater and Seawater

Jeong-Sik SHIN, Byong-Jin KIM¹ and Kuen-Hack SUH*

Division of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
¹Busan Bio Industry Support Center (BISC), Busan 608-737, Korea

The characteristics of foam generation were assessed for freshwater and seawater using a foam generator. Both in freshwater and seawater, the height of the foam layer increased with initial protein concentrations. The height of the foam layer also increased with pore size of the air distributor. The optimum superficial air velocities (SAV) in freshwater and seawater were 0.84 cm/sec and 0.6 cm/sec, respectively. The height of the foam layer was the highest in pH 3 in freshwater and in the region of pH 5-7 in seawater. The height of the foam layer increased with NaHCO₃ concentration in freshwater, and NaHCO₃ concentration had little effect in seawater. Removal efficiencies of total suspended solid (TSS) and turbidity decreased with an increase of initial protein concentrations in a batch foam separator both in freshwater and seawater.

Key words: Foam generation, Protein, Suspended solid, Freshwater, Seawater

서 론

어류의 대사 작용과 미생취 사료 등에 의해서 발생하는 생물학적 오염물은 사육중인 어류에 나쁜 영향을 야기하고 (Miller and Libby, 1984), 부영양화를 촉진하여 적조를 유발할 가능성이 매우 높아 가능한 신속하게 제거되어야 한다. 수중에서 어류에 의해 발생하는 생물학적 오염물로는 부유 고형물, 단백질, 용존 유기물, 암모니아 등이 있다.

이와 같은 생물학적 오염물을 제거하는 방법으로는 부유고형물 및 단백질의 경우 침전법이나 여과법에, 용존 유기물이나 암모니아성 질소는 생물학적 여과조에 의해 제거되고 있으나 장치의 구조가 복잡하고 운전 경비가 많이 소요되는 단점이 있다. 이에 따라 최근 양어장 순환수 중 어류에 유해한 성분을 동시에 처리할 수 있는 방법으로써 포말분리법이 연구되어지고 있다 (Chen et al., 1996; Timons and Chen, 1995; Suh and Lee 1995).

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 것이다 (Brown et al., 1999).

양식장 및 활어수조 내 어류 생산 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).

포말 분리공정을 통해 계면활성 성분인 단백질을 액분체와 분리되는 것이 아니라 계면활성이 없는 이온 성분이나 고형물의 제거도 가능하다. 이는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 계면 활성 물질과 반대의 전하를 가진 이온성분이나 고형물이 기·액 계면에 흡착된 계면 활성 물질과 전기적 결합을 하여 포말에 동반되어 흡착되므로 (Kim, 2002), 이와 같은 현상을 이용하여 계면 활성이 없는 용존 이온성분이나 고형물을 액분체와 분리할 수 있다 (Chen, 1991). 이와 같은 원리로 포말분리를 생물학적 오염물의 제거에 적용시킬 경우 포말분리에 의해 부유 고형물과 용존 유기물, 암모니아 이온 등의 성분을 동시에 제거할 수 있다.

포말 분리가 효과적으로 수행되기 위하여서는 안정된 포말의 생성이 가장 중요하다. 수중에서 포말생성 및 안정성에 영향을 미치는 인자로는 계면활성제 농도, pH 및 염농도 등이 있다 (Noble and Varley, 1998).

본 실험에서는 담수와 해수 중에서 포말 생성에 영향을 미치는 인자인 단백질 농도, 공기분산기의 기공크기, 공압

*Corresponding author: khsuh@pknu.ac.kr

감사의 글

밖에서는 캐롤 소리와 구세군의 종소리가 들려오고 있습니다. 어느덧 2004년 한 해도 다 지나가는 것 같습니다. 제가 초등학교에 입학하여 대학원을 졸업하는 지금까지 벌써 20여년의 시간이 흘렀습니다.

학창시절을 마무리하는 결실로 이 졸업논문을 쓰는 데 있어서 부족한 저를 무사히 졸업할 수 있도록 지도해주신 서근학 교수님과 이 논문을 심사해주신 김용하 교수님, 이경범 교수님께도 감사의 마음을 전합니다. 또한 학부 시절과 대학원 시절 저에게 가르침을 주셨던 화학공학과의 모든 교수님들께도 감사의 마음을 전합니다.

졸업을 하는 데 가장 많은 도움을 주었던 창근이와 후배이지만 인생의 선배인 호수 행님, 회사에 다니면서도 늘 열심히(?) 공부하는 진경이, 그리고 우리 방 막동이 상욱이에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 항상 우리 생물반응공학연구실을 아끼고 사랑하는 여러 선배님들께 감사의 마음을 함께 전합니다. 졸업을 하기까지 행정적, 재정적(?) 지원을 해주었던 학과사무실 박샘(명균이 행님)과 김샘(진희)에게도 감사의 마음을 전합니다.

지난 2년간 같이 동고동락(?)하며, 때로는 에탄올이 인체에 미치는 영향에 대해 밤새 몸으로 느끼면서 연구했던 대학원 동기인 김영우, 오창욱 행님, 이용화 행님(이상은 싸울까봐 가나다순으로 적음)도 졸업하느라 고생했다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 전국에 흩어져 각자의 자리에서 열심히

일하고 있을 나의 친구들 - 배재욱 행님, 강동혁 행님, 윤민식 행님, 강치곤, 구형준, 김영민, 박재형, 안성준, 안영결, 이계한, 전진훈, 하문호 등 (우리나라는 동방예의지국이기 때문에 연장자순, 그 외에는 가나다순, 여기 이름이 없는 사람은 미안하다, 팔자려니 생각해라) - 에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 마지막으로 알게 모르게 도움을 많이 주었던 귀여운(?) 후배 정은선에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다(나중에 술 사준다고 했음 ^^).

어머님 그리고 내 동생

28년 동안 뒤에서 묵묵히 저의 뒷바라지를 해주시고, 항상 저를 믿어주셨던 어머님, 그리고 늘 부족한 용돈을 쪼개어 주던 형 같은 동생 민식에게 이 못난 아들과 형의 학위논문을 올립니다.

어머니 그리고 민식아 사랑한다 !!!

2004년 12월 마지막 날 **신 정 식** 올림