

## 담수와 해수에서의 포말 생성 특성

신정식 · 김병진<sup>1</sup> · 서근학\*

부경대학교 화학공학과, <sup>1</sup>부산바이오기업지원센터

### Characteristics of Foam Generation in Freshwater and Seawater

Jeong-Sik SHIN, Byong-Jin KIM<sup>1</sup> and Kuen-Hack SUH\*

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

<sup>1</sup>Busan 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 NaHCO<sub>3</sub> concentration in freshwater, and NaHCO<sub>3</sub> 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 미ச்ச취 사료 등에 의해서 발생하는 생물학적 오염물은 사육중인 어류에 나쁜 영향을 야기하고 (Miller and Libey, 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 방법으로 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, 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 것이다 (Brown et al., 1999).

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).

포말 분리공정을 통해 계면활성 성분인 단백질만이 액본체와 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 액본체와 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

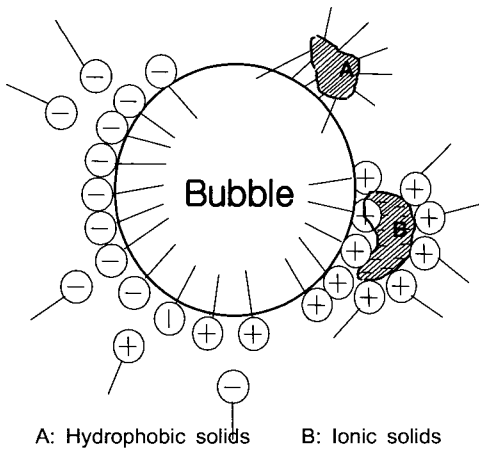


Fig. 1. The polar structure of a bubble and surfactant interface.

공기유속, pH, 염농도 그리고 온도에 대하여, 포말분리관내 생성된 포말층 높이에 대한 연구를 수행하여 포말 분리법을 생물학적 오염물을 제거하기 위한 가장 적합한 형태의 장치 설계 및 제작을 위한 기초 자료를 도출하려 하였다. 그리고 회분식 분리 장치를 이용하여 담수와 해수에서의 총 부유 고형물과 탁도 제거특성에 대하여 연구하였다.

**재료 및 방법**

**실험장치**

본 실험에서 사용된 포말 생성 장치는 Fig. 2(a)와 같이 내경 50 mm, 높이 1,500 mm의 아크릴관을 사용하여 제작하였다. 포말생성관의 액본체 부피는 100 mL였으며 포말생성관 하

부에는 유리 여과기를 이용한 공기 분산기를 설치하여 기포가 균일하게 발생하도록 하였다. 또한 Fig. 2(b)는 회분식 포말 분리 장치를 나타낸 그림으로 내경 50 mm, 높이 500 mm의 아크릴관을 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 준정상상태에서 포말높이의 평균값을 취하였다. 그리고 총 부유 고형물과 탁도의 제거능력을 알아보기 위하여 200 mg/L의 kaolin을 액본체에 혼합하여 회분식 포말 분리 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 사용하였으며 해수실험에서는 인공해수시약 (Colalife, USA)으로 염도를 30 psu로 맞춘 후 사용하였다. 단백질의 농도 분석은 Folin phenol을 이용한 Lowry의 방법 (Lowry et al., 1951)에 의해 수행하였으며 총 부유 고형물의 농도는 GF/C 여과지를 이용한 standard method (APHA et al., 1992)에 따라 진공여과법으로 분석하였다. 탁도는 탁도계 (Model 2100N, Hach Co. Ltd)를 이용하여 측정하였다.

**결과 및 고찰**

**단백질 농도 영향**

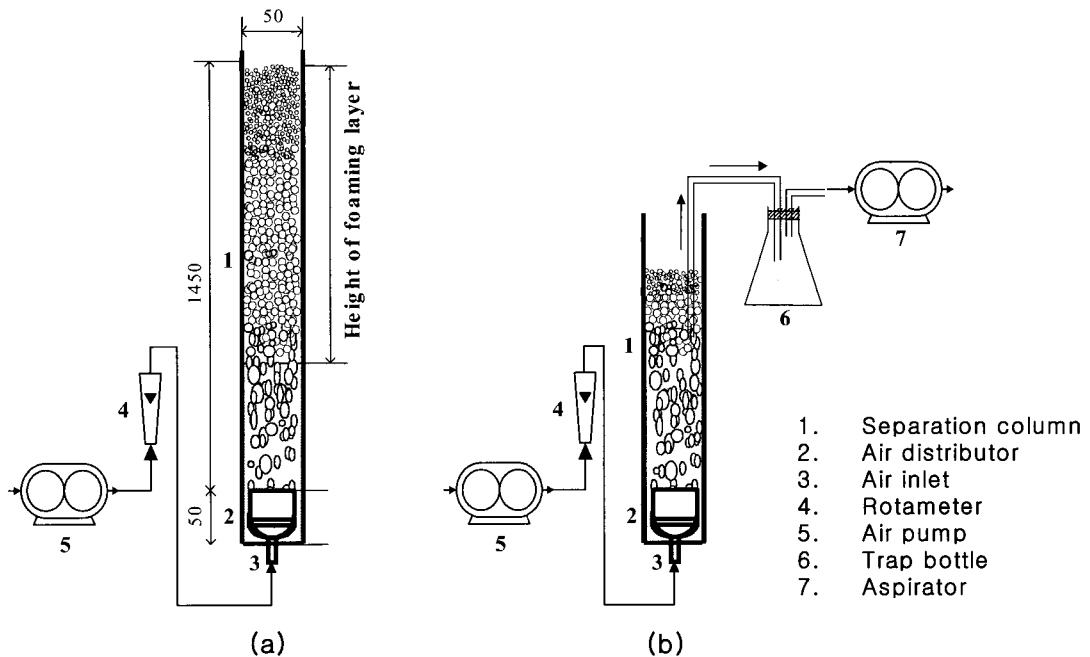


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus. (a) a foam generator, (b) a batch foam separator.

담수와 해수에서 발생하는 생물학적 오염물 중 단백질은 소수기와 친수기를 함께 가지고 있는 구조적 특성으로 인하여 계면활성물질 역할을 할 수 있다. 계면활성물질은 포말생성 능력을 증가시키고 안정된 포말의 생성을 용이하게 한다. 그러므로 용액중의 단백질 농도는 포말생성의 안정성을 결정하는 중요한 인자이다. 본 실험에서는 담수와 해수중에서 단백질 농도를 변화시키면서 단백질 농도에 따른 포말생성 능력을 알아보았다.

Fig. 3은 담수에서 단백질 농도의 변화에 따라 운전시간에 따른 포말 생성 높이를 나타낸 그림이다. 공압 공기유속을 0.84 cm/sec로 하고 공기 분산기의 기공크기가 G3인 유리 여과기를 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 포말높이가 증가하여 안정적인 포말 생성이 이루어지는 시간이 길어진다는 것을 알 수 있었다.

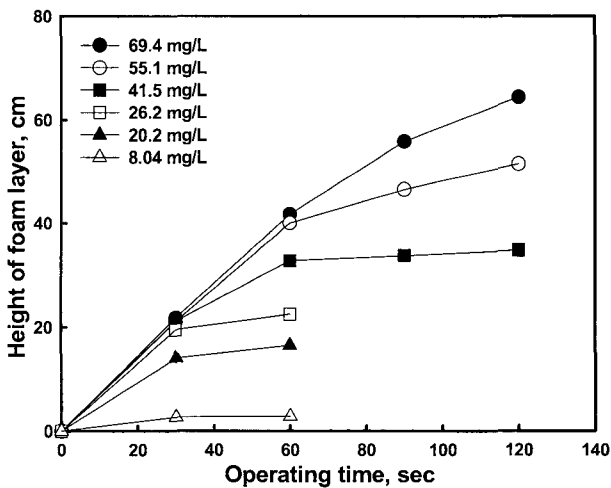


Fig. 3. The change of the height of foam layer with respect to operating time in freshwater.

Fig. 4는 해수에서 단백질 농도가 6.9에서 67.6 mg/L로 변화함에 따라 운전시간에 따른 포말 생성 높이를 나타낸 그림이다. 공압 공기유속을 0.84 cm/sec로 하고 공기 분산기를 기공크기가 G3인 유리 여과기를 설치하여 운전한 결과, 단백질 농도 6.9, 13.2 mg/L는 운전시간 60초만에 최대점에 도달하였으나 30.2, 45.1, 56.2, 67.6 mg/L의 단백질 농도에서는 각각 100초와 120초에서 최대점에 도달하는 것으로 보아 해수에서도 담수에서와 마찬가지로 단백질 농도가 증가할수록 안정적인 포말 생성이 이루어지는 시간이 길어진다는 것을 알 수 있었다. 이는 공압 공기유속이 일정하므로 단위시간당 발생하는 기포의 양이 일정하게 된다. 기포의 직경이 일정하다고 할 때 기포 한 개당 흡착할 수 있는 단백질 양은 한정되어 있으므로 단백질 농도가 증가할수록 기포에 흡착되어야 하는 양

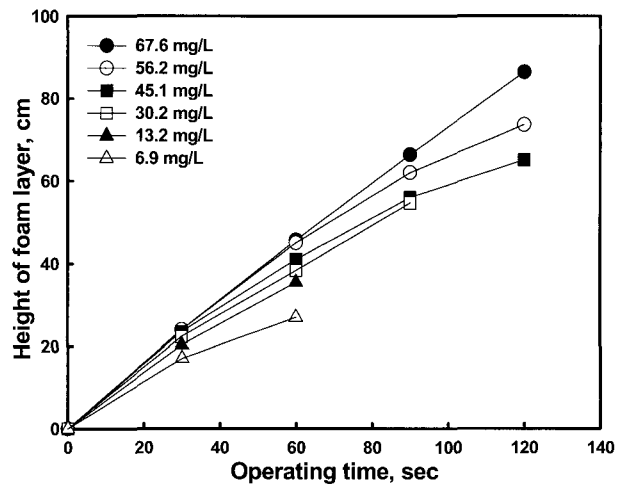


Fig. 4. The change of the height of foam layer with respect to operating time in seawater.

도 증가하므로 이로 인해 보다 많은 기포의 양이 필요하다. 그러므로 안정된 포말 생성이 이루어지는 시간이 길어지는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 담수와 해수에서 단백질 농도 변화에 따른 포말 생성 높이를 나타낸 그림이다. 담수 실험에서 단백질 농도가 8 mg/L에서는 3 cm의 최대 포말생성 높이를 형성하였으나 단백질 농도 69.4 mg/L에서는 65 cm의 최대 포말 생성 높이를 보여, 단백질 농도가 증가함에 따라 최대 포말높이는 비례하여 증가하였다. 또한 해수 실험에서 단백질 농도가 6.9 mg/L에서는 27 cm의 최대 포말 생성 높이를 형성하였으나 단백질 농도 67.6 mg/L에서는 86.3 cm의 최대 포말 생성 높이를 보여 해수도 담수와 마찬가지로 단백질 농도가 증가함에 따라 최대 포말높이는 비례하여 증가하였다. 그러나 단백질 농도가 비슷할 경우 담수에서보다 해수에서 최대 포말생성 높이가 더 큰 것으로 나타났다.

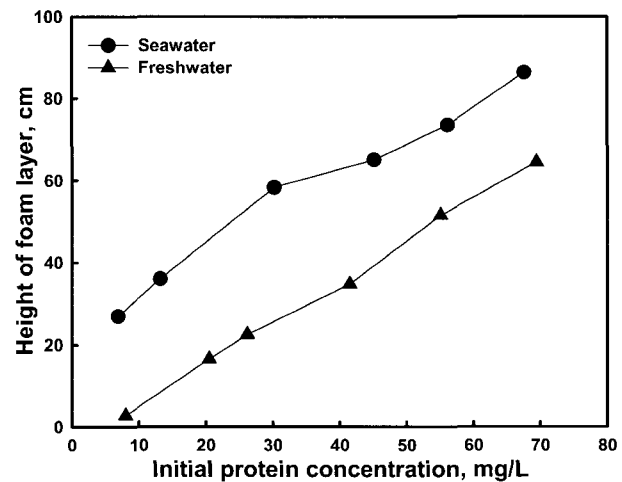


Fig. 5. The change of the height of foam layer with respect to initial protein concentration.

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 체류시간이 증가한다고 하였다. 이로 인해 단백질 농도가 높아질수록 기·액 계면에 흡착되는 단백질의 양이 증가하여 포말이 파쇄되지 않고 많이 발생하여 포말생성 높이의 증가를 보이는 것으로 이는 Morrison et al. (1995)이 보고한 것과 유사한 결과를 보였다. 또한 단백질은 포말 분리기에서 수집기로써의 기능뿐만 아니라 부상기로써의 역할을 동시에 수행할 수 있는데 본 연구에서는 부상기로써의 단백질 역할을 관찰할 때 실험수의 단백질 농도가 증가할수록 최대 포말 생성 높이가 증가하는 것으로 보아 양어장수에서 수거한 포말 농축물이 부상기로써의 능력을 충분히 수행할 수 있을 것으로 판단되어진다.

#### 공기분산기 기공크기 영향

포말분리시 액본체에 공급되는 기포의 크기는 포말분리효율에 큰 영향을 미치고, 기포의 크기는 장치 하부에 설치되어 있는 공기 분산기의 기공크기 의해 결정된다. 유리 여과기는 기공크기에 따라 각각 G1, G2, G3, G4 size로 구분된다. 본 실험에서는 90-150  $\mu\text{m}$ 의 기공크기를 가지는 G1 size, 40-90  $\mu\text{m}$ 의 기공크기를 가지는 G2 size, 15-40  $\mu\text{m}$ 의 기공크기를 가지는 G3 size 및 3-15  $\mu\text{m}$ 의 기공크기를 가지는 G4 size의 유리 여과기를 사용하여 기공크기에 따른 포말생성 능력을 알아보았다.

Fig. 6은 담수와 해수에서 공기 분산기의 기공크기에 따른 포말생성 능력을 나타낸 그림으로써 담수에서는 초기 단백질 농도를 26.2 mg/L로 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.

#### 공탐 공기유속 영향

공탐 공기유속은 포말 분리시 액본체에 공급되는 기포의 양을 결정하고 이는 포말분리에 큰 영향을 미친다. 최근에는 포말분리에 의한 단백질 회수, 미생물 회수 등의 연구에서도 주요 운전인자로 연구되어지고 있다. 본 실험에서는 초기 단백질 농도를 일정하게 하고 공탐 공기유속을 0.40 cm/sec에서 1.27 cm/sec 까지 변화시키면서 담수와 해수에서의 포말생성 능력을 검토하였다.

Fig. 7은 담수와 해수에서 공탐 공기유속의 변화에 따른 포말생성 능력을 나타낸 그림이다. 담수와 해수에서 초기 단백질 농도를 각각 31.9 mg/L, 30.2 mg/L로 하고 공기 분산기로

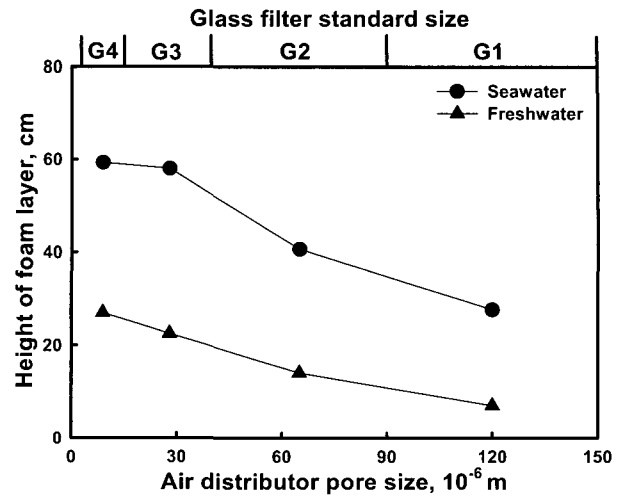


Fig. 6. The change of the height of foam layer with respect to air distributor pore size.

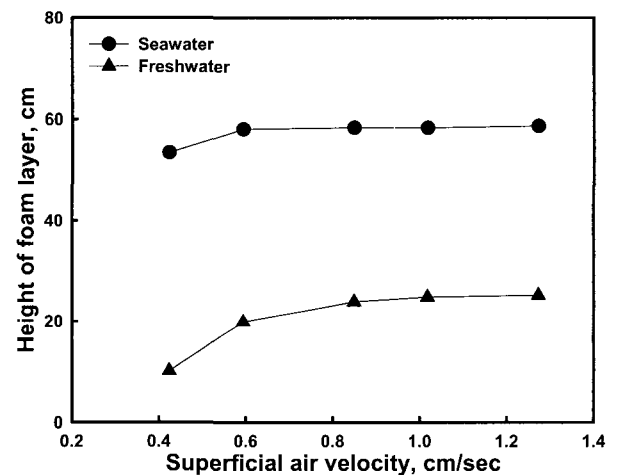


Fig. 7. The change of the height of foam layer with respect to superficial air velocity.

규격이 G3인 유리 여과기를 설치하여 운전한 결과 담수와 해수에서 공탐 공기유속이 증가할수록 최대 포말생성 높이는 증가하다가 담수의 경우에는 0.84 cm/sec 이상의 공탐 공기유속에서 최대 포말생성 높이의 차이가 크지 않았으며, 해수의 경우에는 0.6 cm/sec 이상에서 포말생성 높이의 변화가 거의 없었다. 공탐 공기유속이 증가할수록  $v$  동일한 운전시간에서 발생하는 기포의 양이 증가하고 이에 따라 기·액 계면 면적이 증가한다고 보고하고 있다 (Brown et al., 1999). 기·액 계면 면적의 증가는 기포에 흡착되는 용질의 양을 증가시키므로 이로 인해 포말생성 높이가 증가하는 것으로 사료된다. 또한 담수와 해수에서 공탐 공기유속이 각각 0.84 m/sec, 0.6 cm/sec 이상에서는 더 이상 포말생성 높이가 증가하지 않았는데 이는 포말생성을 위한 실험수의 단백질 농도가 일정하므로 기포에 흡착될 수 있는 계면활성물질의 양도 한정되어 있으므로 일정

공기량 이상을 공급하여도 더 이상 기포에 흡착되지 않아 포말생성 높이가 더 이상 증가하지 않는 것으로 보인다. Chai et al. (1998)의 연구에 의하면 안정된 포말생성을 위한 공탑 공기유속은 0.5 cm/sec에서 2 cm/sec 사이라고 보고하고 있다. 이는 공탑 공기 유속이 0.5 cm/sec 이하에서는 공기가 완전하게 공기 분산기를 빠져 나오지 않기 때문에 포말생성에 어려움이 있고, 공탑 공기유속이 2 cm/sec 이상이 되면 난류가 형성되어 역혼합이 일어나고 기포가 빠르게 탑 상부로 올라가기 때문에 안정된 포말이 생성되지 않기 때문이다.

**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 포말생성 능력도 달라진다고 할 수 있다. 본 실험에서는 담수와 해수에서 초기 단백질 농도를 일정하게 유지한 후 0.1 M HCl과 0.1 M NaOH 수용액을 사용하여 pH를 변화시킨 후 이에 따른 포말생성 능력을 검토하였다.

Fig. 8은 담수와 해수에서 pH변화에 따른 포말생성 높이를 나타낸 그림으로써 담수에서는 초기 단백질 농도를 31.9 mg/L로 하고 G3의 유리 여과기를 설치하여 0.84 cm/sec의 공탑 공기유속으로 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 강염기에

서 포말 높이의 회복세를 보여주었다. 해수에서는 초기 단백질 농도를 30.2 mg/L로 하고 G3의 유리 여과기를 설치하여 0.84 cm/sec의 공탑 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. 그후 최대 포말 생성 높이는 pH 10부근까지 서서히 감소하다가 pH 10 이후부터 포말 생성 높이가 회복되는 것으로 나타났다.

**NaHCO<sub>3</sub> 영향**

생물학적 오염물 중 단백질은 생화학적 분해에 의해 암모니아로 되고, 암모니아는 질산화세균에 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<sub>3</sub> 이고, 따라서 본 실험에서는 초기 단백질 농도를 일정하게 하고 NaHCO<sub>3</sub>의 첨가에 따른 포말생성 능력을 검토하였다.

Fig. 9는 담수와 해수에서 NaHCO<sub>3</sub>의 염 농도 변화에 따른 포말생성 능력을 나타낸 그림이다. 담수에서는 초기 단백질 농도를 31.9 mg/L로 하고 G3의 유리 여과기를 설치하여 0.84 cm/sec의 공탑 공기유속으로 실험한 결과 NaHCO<sub>3</sub> 농도를 7,000 mg/L까지 첨가했을 때 최대 포말생성 높이가 27 cm로 꾸준히 증가하다가 14,000 mg/L를 첨가했을 때에는 포말생성 높이가 45 cm로 급격히 증가하는 것으로 나타났으며, pH는 NaHCO<sub>3</sub>의 농도가 0 mg/L일 경우 7.45에서 14,000 mg/L 일 경우 8.32로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 담수 중에 염 성분의 존재는 포말의 생성을 촉진한다는 것을 알 수 있었다. 해수의 경우 초기 단백질 농도를 30.2 mg/L로 하고 G3의 유리 여과기를 설치하여 0.84 cm/sec의 공탑 공기유속으로 실험한 결과 해수 내 NaHCO<sub>3</sub>의 농도가 0 mg/L 일 때와 14,000

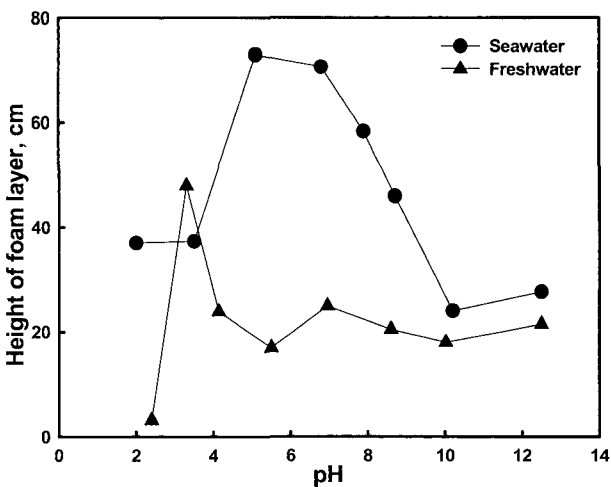


Fig. 8. The change of the height of foam layer with respect to pH.

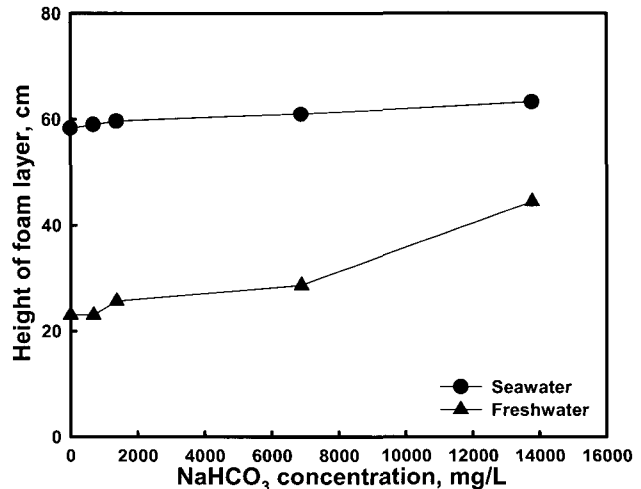


Fig. 9. The change of the height of foam layer with respect to NaHCO<sub>3</sub> concentration.

mg/L 일 때의 최대 포말 생성 높이의 차이는 6 cm에 불과하였는데 이는 해수 중에는 NaCl 등 여러종류의 이온이 용존되어 있으므로 NaHCO<sub>3</sub> 첨가의 영향은 적은 것으로 판단된다. 또한 해수의 경우에는 NaHCO<sub>3</sub> 농도에 따라 pH가 7.88에서 7.99로 변화하는 것으로 나타나 담수에 비해 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

**온도 영향**

Fig. 10은 담수와 해수에서 온도 변화에 따른 포말생성 높이를 나타낸 그림으로써 담수에서는 초기 단백질 농도를 31.9 mg/L로 하고 G3의 유리 여과기를 설치하여 0.84 cm/sec의 공탑 공기유속으로 실험한 결과 5℃로 운전했을 때 가장 낮은 20 cm의 포말 생성 높이를 보여주었으며 온도가 상승할수록 포말 생성 높이가 높아져서 32℃로 운전했을 때 최대 포말 생성 높이가 33 cm로 나타났다. 또한 해수에서는 초기 단백질 농도를 30.2 mg/L로 하고 G3의 유리 여과기를 설치하여 0.84 cm/sec의 공탑 공기유속으로 실험한 결과 5℃로 운전했을 때 가장 낮은 48 cm의 포말 생성 높이를 보여주었으며 온도가 상승할수록 포말 생성 높이가 높아져서 32℃로 운전했을 때 최대 포말 생성 높이가 69 cm로 나타났다. 일반적으로 온도가 증가하면 기체의 부피가 증가하므로 그에 따라 기·액 계면의 면적이 증가하므로 흡착될 수 있는 단백질 양이 증가하여 포말생성 높이가 증가되었다고 판단된다.

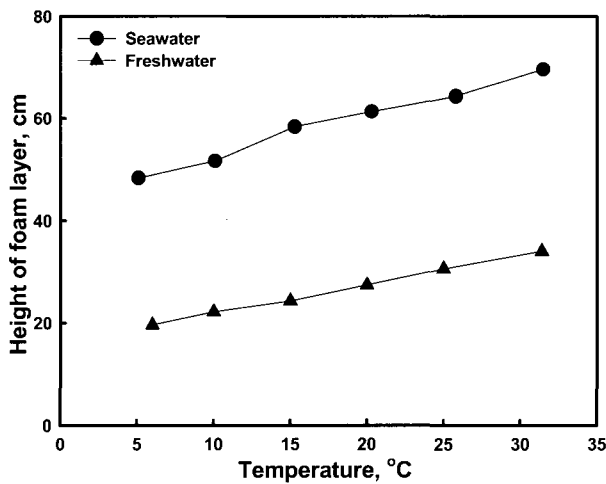


Fig. 10. The change of the height of foam layer with respect to temperature.

**총 부유 고형물 및 탁도 제거 특성**

Fig. 11은 담수와 해수에서 초기 단백질 농도변화에 따른 수중의 총 부유 고형물 (TSS)과 탁도 제거율을 나타낸 그림이다. 담수에서는 초기 단백질 농도를 20.0, 32.4, 42.1, 54.5, 66.4 mg/L 로 조절하였고, 해수에서는 초기 단백질 농도를 15.7, 32.7, 42.7, 53.5, 70.7 mg/L 로 조절하였다. 공기 분산기로 기공크기가 G3인 유리 여과기로 설치하고, 공탑 공기유속을

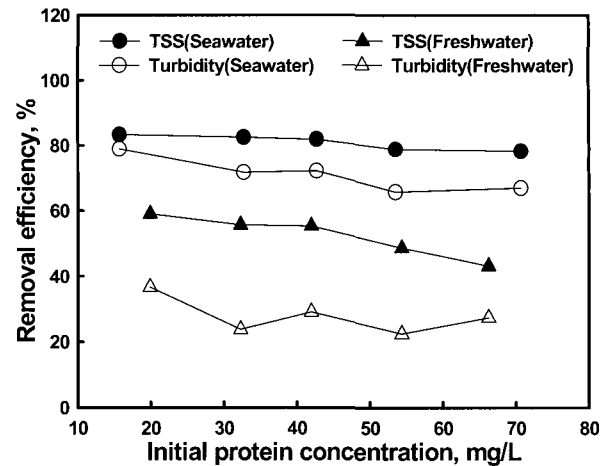


Fig. 11. TSS and turbidity removal efficiency with respect to protein concentration in freshwater and seawater.

0.84 cm/sec로 하였다. 또한 총 부유 고형물로는 kaolin을 200 mg/L의 농도로 하여 실험수에 녹여 사용하였다. 그 결과, 담수에서는 초기 단백질 농도가 높아질수록 총 부유 고형물의 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 부유 고형물의 제거효율은 최대 83.26%에서 78.31%로 감소하였으며 탁도 제거효율은 78.89%에서 65.81%로 감소하였다.

Wong et al. (2001)의 보고에 따르면 포말 분리법에 의한 단백질 제거실험에서 초기 단백질 농도가 증가할수록 표면장력의 변화속도가 느려지고, 이로 인하여 단백질 축적이 어려워진다고 하였으며 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 (Tchobanoglous and Schroeder, 1985). 상기 실험결과에 의하여 포말분리장치는 단백질 및 총부유성고형물 (TSS)을 효과적으로 제거할 수 있는 장치로 사료되었고, Chen et al. (1993)은 포말분리에 의해 총 부유성 고형물의 제거가 효과적이라고 보고하고 있다.

**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 Wastewater. 16th ed.,

- American Public Health Association Inc., New York, pp. 132-133.
- Battacharjee, S., R. Kumar and K.S. Gandhi. 2001. Modeling of protein mixture separation in a batch foam column. *Chem. Eng. Sci.*, 56, 5499-5510.
- Brown, A.K., A. Kaul and J. Varley. 1999. Continuous foaming for protein recovery. *Biotechnol. Bioeng.*, 62(3), 278-290.
- Chai, J., V. Loha, A. Prokop and R.D. Tanner. 1998. Effect of bubble velocity and pH step changes on the foam fractionation of sporamin. *J. Agric. Food Chem.*, 46, 2868-2872.
- Chen, S. 1994. Modeling surfactant removal in foam fraction-I. Theoretical development. *Aqua. Eng.*, 13, 163-181.
- 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.
- Chen, S., M.B. Timmons, J.J. Bisgoni and D.J. Ane-shansley. 1993. Suspended solids removal by foam fractionation. *Prog. Fish Cult.*, 55(2), 69-75.
- Chen, S. 1991. Theoretical and experimental investigation of foam separation applied to aquaculture. Ph.D. Thesis, Cornell University, Ithaca, New York, USA., pp. 231.
- Cho, D. and H.N. Chang. 1999. Separation of oil contaminants by surfactant-aided foam fractionation. *Kor. J. Chem. Eng.*, 15, 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. 13.
- 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. *Aqua. Eng.*, 3, 39-57.
- Morrison, C., L.L. Schramm and E.N. Stasiuk. 1995. A dynamic foam method for the estimation of critical micelle concentration at elevated temperatures and pressures. *Petrol. Sci. Eng.*, 15, 91-100.
- Noble, M. and J. Varley. 1998. Protein recovery using gas-liquid dispersion. *J. Chromatogr.*, B711, 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. 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.
- 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. Eng.*, 39(2), 237-244.
- Suzuki, Y. and T. Maruyama. 2002. Removal of suspended solids by coagulation and foam separation using surface-active protein. *Wat. Res.*, 36, 2195-2204.
- Tchobanoglous, G. and E.D. Schroeder. 1985. *Water Quality*. Addison-Wesley Publishing Company, California, pp. 56.
- Timons, M.B. and S. Chen. 1995. Mathematical model of a foam fractionator used in aquaculture. *J. World Aqua. Soc.*, 26(3), 225-233.
- Wong, C.H., M.M. Hossain and C.E. Davies. 2001. Performance of a continuous foam separation column as a function of process variables. *Bioproc. Biosyst. Eng.*, 24, 73-81.

---

2004년 4월 10일 접수  
2004년 6월 19일 수리