

포말분리기를 이용한 해수로부터 양식 폐기물 제거 III. 공탑공기속도 영향

김병진 · 이정훈 · 김성구* · 김용하 · 이경범 · 서근학†

부경대학교 화학공학과, *생물공학과
(2000년 8월 31일 접수, 2000년 12월 13일 채택)

The Removal of Aquacultural Wastes by Foam Separator from Sea Water III. The Effect of Superficial Air Velocity

Byong-Jin Kim, Jung-Hoon Lee, Sung-Koo Kim*, Yong-Ha Kim, Gyeongbeom Yi and Kuen-Hack Suh†

Department of Chemical Engineering, *Department of Biotechnology & Bioengineering,
Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea
(Received 31 August 2000; accepted 13 December 2000)

요 약

공기부상식 포말분리기를 제작하여 해수 속의 단백질, 부유 고형물, 화학적 산소 요구량, 탁도, 암모니아성 질소와 같은 양식 폐기물의 연속 제거운전을 수행하여 공탑공기속도의 변화에 따른 양식 폐기물의 제거 특성을 검토하였으며 포말분리기의 용존산소 공급 능력을 검토하였다. 공탑공기속도의 증가에 따라 단백질의 제거속도와 제거율은 증가하였으나 농축비는 감소하였다. 총 부유 고형물, 탁도, 화학적 산소 요구량의 제거속도와 제거율의 변화는 단백질과 유사하였으며 암모니아성 질소는 stripping 효과에 의해 제거되었다. 본 실험에 사용한 포말분리기는 96% 이상의 높은 용존산소 포화율을 나타내었다.

Abstract – Experimental investigations on the effect of the superficial air velocity(SAV) on the removal of aquacultural waste, such as protein, total suspended solids(TSS), chemical oxygen demand(COD), turbidity and total ammonia nitrogen(TAN) from sea water were carried out by using a foam separator. The foam separator as an aerator was also evaluated for increasing dissolved oxygen concentration. The increase in SAV, increased the removal rate and removal efficiency of protein, but, decreased protein enrichment ratio. The changes of removal rates and efficiencies of TSS, COD and turbidity were similar to proteins. TAN was removed by stripping. Dissolved oxygen(DO) saturation of the effluent from the foam separator was higher than 96.6%.

Key words: Foam Separation, Superficial Air Velocity, Aquacultural Waste, Protein, TSS, COD, Turbidity, TAN, DO

1. 서 론

포말분리공정은 계면 활성 물질의 친수기가 액상으로 소수기가 기체 측으로 배열되어 기-액 계면에 액본체보다 높은 농도로 농축되는 성향을 이용한 분리공정 중의 하나이다. 포말분리공정의 장점은 저농도의 목적성분을 고농도로 회수하는데 매우 효과적이며[1] 타 분리공정에 비해 운전조건이 온화하여 운전이 용이하고 비용이 저렴하다는 것으로[2] 최근에는 수용액 중의 염료제거[3]나 유류내 오염물의 제거[4] 등과 같은 분야에 응용되고 있다.

어류에 의해 발생하는 오염물질 중 단백질 성분은 소수기와 친수기를 함께 가지는 구조적 특성으로 인해 계면활성제 역할을 하여 별도의 계면활성제를 첨가하지 않아도 포말분리를 수행할 수 있도록 해준다[5]. 이를 이용하여 양어장 순환수 중 어류에 유해한 성분의 처리 수단으로써 포말분리법이 많이 연구, 적용되어지고 있으나[6-9] 대부분의 연구는

담수를 대상으로 하고 있으며 우리 나라에서 선호하는 해수를 대상으로 하는 연구는 거의 없는 실정이다.

공탑공기속도는 포말 분리관을 통하여 흐르는 공기 흐름 속도로서 포말 분리관을 통하여 흐르는 공기의 체적유속과 분리관의 단면적의 비로써 나타내어진다[10]. 공탑공기속도는 포말 분리법에서 가장 중요한 운전 인자 중의 하나로 포말분리에 의한 단백질 회수[11], 미생물 회수[12] 등의 연구에서도 주요 운전인자로 연구되어왔다.

본 연구에서는 공기부상식 포말분리기를 제작하여 해수 속의 단백질, 부유 고형물, 화학적 산소 요구량, 탁도, 암모니아성 질소와 같은 양식 폐기물의 연속 제거운전을 수행하여 공탑공기속도에 따른 양식 폐기물의 제거 특성을 검토하였으며 포말분리기의 용존산소 공급 능력을 검토하였다.

2. 실험

2-1. 실험장치

본 연구에서 제작하여 사용한 포말분리 실험장치는 Fig. 1에서 보는

†E-mail: khsuh@mail.pknu.ac.kr

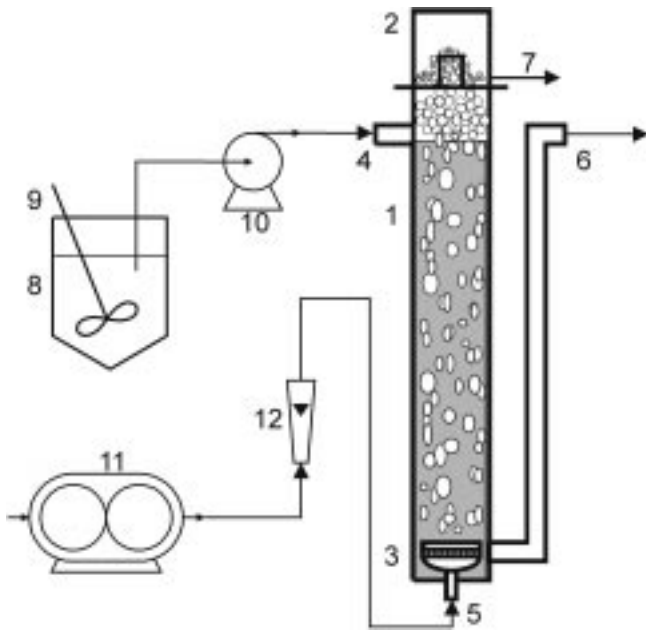


Fig. 1. Schematic diagram for the removal of aquacultural waste from sea water by using foam separator.

- 1. Separation column
- 2. Foam collector
- 3. Air distributor
- 4. Liquid inlet
- 5. Air inlet
- 6. Bulk outlet
- 7. Foam outlet
- 8. Feeding tank
- 9. Mechanical stirrer
- 10. Peristaltic pump
- 11. Air pump
- 12. Rotameter

바와 같이 기포와 용존 유기물이 접촉하는 액본체가 머무르는 separation column과 단백질을 동반한 포말이 폐수와 분리되고 젖은 거품에서 건조한 거품으로 농축되는 foam riser가 일체형인 형태로 내경 5 cm, 높이 50 cm의 acrylic pipe를 사용하여 제작하였으며 액본체의 용적은 1 L 였다.

Foam riser로부터 유출된 포말을 수집하여 일부는 폐수 속으로 재순환시키고 일부는 밖으로 배출시키는 foam collector는 내경 5 cm, 높이 10 cm의 acryl pipe에 내경 2 cm의 삽입관을 통해 포말이 유입되도록 제작하였다. 유입관과 유출관은 2 cm acrylic pipe를 사용하였다.

포말분리기 하부에는 소성된 유리 여과기(G3, pore size: 3-15 μm)를 이용한 공기분산기를 접합시켜 기포가 작고 균일하게 발생하여 포말에 의한 분리효율이 최대가 될 수 있게 하였다. 공기의 공급은 공기펌프를 이용하였으며, 공기 유량은 공기펌프의 needle valve와 유량계의 조절밸브를 이용하여 조절하였다.

실험수는 정량펌프를 이용하여 액층 상부에서 일정한 유량으로 공급하고, 처리수는 하부에서 유출되도록 하였으며 공기는 탑의 하부에서 공급함으로써 향류식 접촉을 유도하였다.

2-2. 실험재료 및 방법

실험수는 실제 양식수와 유사하도록 하기 위하여 해수에 부경대학교 부속 순환여과식 양어장에서 발생한 양식 폐기물을 희석시켜 실험에 사용하였다. 실험수 제조에 사용한 해수는 부산지역 횡집에 공급되는 것으로서 단백질 성분은 검출되지 않았다. 실험수의 수질은 Table 1과 같으며 온도와 pH는 각각 26±1 °C, 7.9±0.1이었다.

실험은 수력학적 체류시간을 2.05 min으로 고정하고 공기를 500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 mL/min으로 변화시켜 공급하였으며 각각의 공탑 공기유속은 0.424, 0.85, 1.27, 1.70, 2.12 cm/sec이었다.

Table 1. Water quality of feeding sea water

Component	Concentration
Salinity	30.00%
Protein	27.61 g/m ³
Total suspended solid	57.33 g/m ³
Turbidity	26.87 NTU
Chemical oxygen demand	18.08 g/m ³
Total ammonia nitrogen	0.72 g/m ³

2-3. 분석방법

실험수 제조에 사용한 포말 농축물의 단백질 농도의 분석은 Lowry's method[13]를 이용하였으며 해수중의 단백질의 농도 분석은 UV₂₈₀ method[14]를 이용하여 수행하였다. 총 부유고형물은 standard method [15]에 따라 GF/C여지로 여과한 후 염소이온이 검출되지 않을 때까지 증류수로 세척하여 분석하였다. 화학적 산소 요구량은 알칼리성 KMnO₄ 법[16]에 따라 시료 채취 즉시 분석하였으며 탁도의 분석은 탁도계 (HACH, 2100AN)를 이용하였다.

총 암모니아성 질소의 분석은 암모니아 이온 선택성 전극(ORION Research Inc., 9512BN)이 부착된 Ion meter(ORION Research Inc., Model 720A)를 이용하여 이온 선택성 전극법[15]에 의해 분석하였다. 용존산소는 용존산소 측정기(YSI Inc. Model 52)를 이용하여 유입수의 농도를 측정 후 유출수의 농도는 30초 간격으로 연속 측정하여 정상상태에서의 평균값을 취하였다. 각 시료의 입도 분포는 100 μm의 aperture를 이용한 입도 분석기(COULTER Electronics, COULTER MULTISIZER II)를 사용하여 측정하였다.

2-4. 자료 계산방법

단백질, 부유 고형물, 화학적 산소 요구량, 탁도, 암모니아성 질소 등의 제거속도는 유입수와 유출수의 각 성분의 농도와 포말 발생량을 측정하여 식 (1)[17]을 이용하여 계산하였다.

$$-r_a = \frac{C_{i,a} \cdot Q_i - C_{o,a} \cdot (Q_i - Q_f)}{V} \tag{1}$$

여기서 -r_a는 각 성분의 제거속도(g/m³ · min 또는 NTU/min), C_{i,a}와 C_{o,a}는 각 성분의 유입수 및 유출수의 농도(g/m³ 또는 NTU)이며 Q_i는 유입수의 유량(m³/min)이며 Q_f는 포말분리기에서 발생되어 유출된 포말의 유량(m³/min)이다. V는 포말분리기의 액본체 용적(m³)이다.

포말분리기의 총괄 용존산소 전달 계수는 식 (2)를 이용하여 구하였다.

$$K_L a = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{(C_{o,DO} - C_{i,DO})}{(C_s,DO - C_{o,DO})} \tag{2}$$

여기서 K_La는 총괄 용존산소 전달 계수(min⁻¹), τ는 수력학적 체류시간(min), C_{i,DO}는 유입수의 용존산소 농도(g/m³), C_{o,DO}는 유출수의 용존산소 농도(g/m³)이며 C_{s,DO}는 용존산소의 포화농도(g/m³)이다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 단백질 제거속도 변화

단백질은 소수기와 친수기를 모두 가지고 있는 구조적 특징으로 인해 기·액 계면에 농축되게 되며[18] 별도의 계면활성제를 첨가하지 않고도 포말분리를 가능하게 해준다[7]. 해산어 양식장에서 단백질은 어류에 공급된 사료 중 어류가 섭취하지 못한 과잉의 사료나 어분에 포함되어 있는 어류가 소화하지 못한 단백질이 순환수에 용출되어 발생한다. 활어 수조의 경우에는 별도의 사료는 공급하지 않으나 수조에 수용된 어류에서 배출되는 어분과 어체 표면의 점액질에 의해 발생한다. 단백질 성분

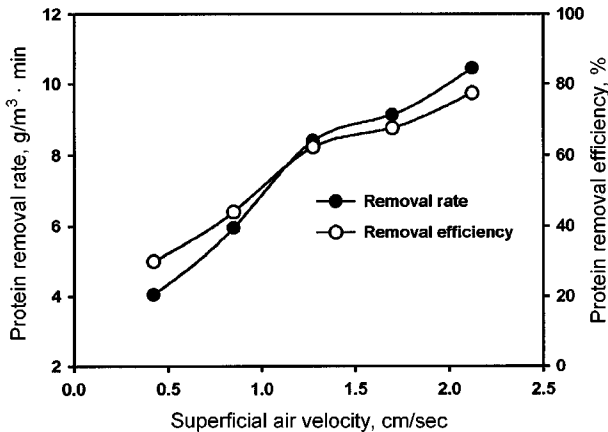


Fig. 2. The changes of protein removal rate and removal efficiency on superficial air velocity.

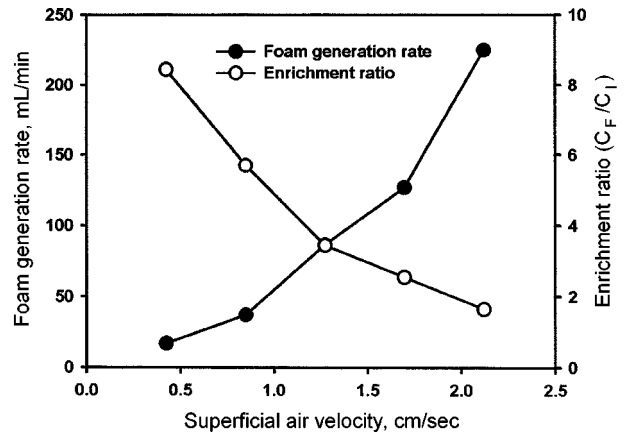


Fig. 3. The changes of foam generation rate and enrichment ratio on superficial air velocity.

은 단백질의 질소 성분은 미생물에 의해 어류에 대한 독성이 높은 암모니아로 분해되며[19] 산소 요구량을 증가시켜 신속한 제거가 요구된다.

Fig. 2는 공탑공기속도가 단백질 제거속도 및 제거율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 공탑공기속도가 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 증가함에 비례하여 단백질의 제거속도와 제거율은 4.04 g/m³ · min, 30.0%에서 10.43 g/m³ · min, 77.3%로 증가하였다. 그러나 공탑공기속도가 5배 증가함에 비해 단백질 제거속도는 2.5배로 증가하는 것으로 보아 공탑공기속도의 증가폭보다 제거속도의 증가폭이 작은 것으로 나타났다.

공탑공기속도가 증가함에 따라 제거속도와 제거율이 동반하여 증가하는 것은 공탑공기속도가 증가함에 따라 기 · 액 계면 면적이 증가하고 이로 인해 흡착되는 단백질의 양이 증가하는 현상[11, 20, 21]에 의한 것으로 생각된다.

공탑공기속도의 증가폭에 비해 단백질 제거속도의 증가폭이 작은 것은 복합적인 원인에 의한 것으로 공탑공기속도의 증가에 따른 기 · 액 계면의 증가에 따라 흡착될 수 있는 흡착되는 단백질의 양이 증가되어 용액 속의 단백질 농도가 감소되므로 이에 따라 포말 기 · 액 면적당 흡착되는 단백질의 양이 감소되는 현상[21]에 의한 것으로 생각된다. 또 공탑공기속도가 증가하면 포말간의 거리가 좁아져 여러 포말이 서로 합쳐되어 포말의 크기가 커지게 되므로 기체량의 증가에 비해 기 · 액 계면의 면적이 비례하여 증가하지 않는 현상[20]에 의한 것으로 사료된다.

Fig. 3은 공탑공기속도의 변화에 따른 포말 생성속도와 유입수의 단백질 농도와 포말의 단백질 농도의 비인 농축비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 것과 같이 포말 생성속도는 공탑공기속도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며 포말 생성속도의 증가폭은 공탑공기속도가 클수록 더 커지는 것으로 나타났다. 그러나 농축비는 공탑공기속도가 증가함에 따라 오히려 감소되는 것으로 나타났다.

공탑공기속도의 증가에 따라 포말의 생성량이 증가하고 농축비가 감소하는 것은 공급되는 공기량의 증가에 따라 포말의 유출 속도가 빨라져서 포말이 농축부에서 동반 액체와 충분히 분리되지 못하여 포말 속의 액체 동반량이 증가하는 현상으로 이로 인해 포말의 농도도 감소하는 것으로 사료된다.

포말분리공정에서 높은 제거속도도 중요하나 공탑공기속도의 증가에 의한 제거속도의 증가는 배출되는 포말량의 증가에 의한 것으로 오염물을 고농도로 제거할 수 없으므로 높은 농축비를 얻는 것도 중요하다. 그러므로 높은 제거속도를 얻고자하여 공탑공기속도를 증가시킬 경우 포말을 충분히 농축할 수 있도록 foam collector의 공간을 증가시켜야 할 것으로 생각된다.

3-2. 총 부유 고형물 제거속도 변화

해수에서 어류에 의해 발생하는 고형물 중 미접취 사료나 어분에 의해 발생하는 총 부유성 고형물은 어체의 아가미에 직접적인 충격을 주거나 용존산소의 전달을 방해하여 질병에 대한 저항력을 약화시킬 수 있기 때문에 어류의 생산력에 직접적인 영향을 끼칠 수 있다[22]. 고형물의 농도가 높을 경우 생물학적 질산화 장치에 biofouling을 유발하여 암모니아 제거 속도를 감소시킬 수도 있고[19], 고형물의 대부분은 유기성 고형물로 단백질 성분을 함유하고 있어 즉시 제거하지 않고 방치할 경우 미생물에 의해 어류에 유해한 암모니아를 발생시키므로[22] 양식장 순환수 중의 고형물의 제거는 매우 중요하다.

Fig. 4는 공탑공기속도가 총 부유 고형물의 제거속도 및 제거율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 공탑공기속도의 증가에 따른 제거속도의 변화는 단백질 제거속도의 변화와 거의 동일한 경향을 나타내었다. 공탑공기속도가 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 증가함에 따라 총 부유 고형물의 제거속도와 제거율은 16.63 g/m³ · min, 59.4%에서 24.39 g/m³ · min, 87.0%로 증가하였다. 총 부유 고형물의 제거속도가 단백질 제거속도와 유사하게 공탑공기속도의 영향을 받는 것은 포말분리를 유발하는 성분이 단백질이고 부유 고형물은 기 · 액 계면에 흡착된 단백질에 이온적으로 흡착되어 제거되는 기작[23]에 연유한 현상에 의해 기 · 액 계면에 흡착되는 단백질의 증가에 비례하여 제거되는 고형물이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 5는 공탑공기속도의 변화에 따른 유출수 농도와 제거속도의 총

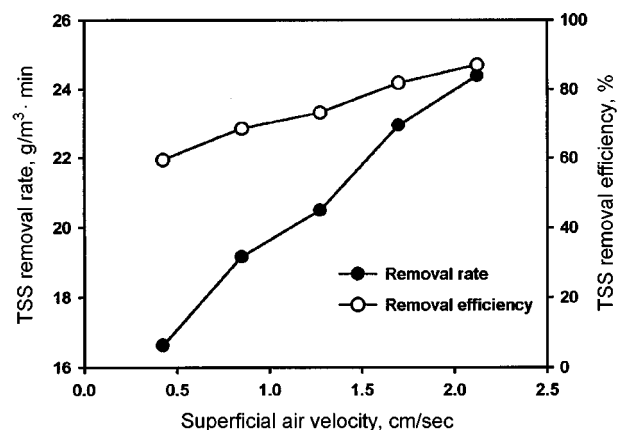


Fig. 4. The changes of TSS removal rate and removal efficiency on superficial air velocity.

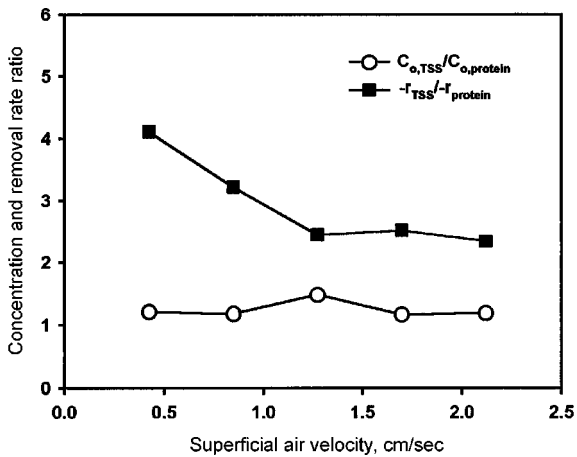


Fig. 5. The concentration ratio of TSS to protein of effluent(C_o) and the removal rate ratio of TSS to protein.

부유 고형물/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유입수의 총 부유 고형물/단백질 농도비는 1.16-1.47의 범위로 거의 일정하게 나타났으며 제거속도의 비는 공탑공기속도가 0.42 cm/sec에서 1.27 cm/sec로 증가함에 따라 4.44에서 2.44로 감소하였으나 그 이상의 공탑공기속도에 대해서는 2.34-2.51의 범위에서 거의 일정한 것으로 나타났다.

유입수의 총 부유 고형물/단백질 농도비는 2.08이었으며 이에 비해 유출수의 농도비가 더 낮게 나타나는 것으로 보아 기·액 계면에 흡착 제거되는 단백질의 단위 질량당 총 부유 고형물의 양이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 공탑공기속도가 증가함에 따라 총 부유 고형물/단백질 제거속도의 비가 감소하는 것은 유입수 속에 존재하는 고형물이 단백질과 결합하여 제거될 수 있는 양 보다 작아서 나타나는 현상으로 단백질 제거속도가 증가할수록 이에 동반하여 제거될 수 있는 고형물의 양이 부족해지기 때문으로 생각되며 보다 많은 고형물이 유입되더라도 충분한 제거가 이루어질 것으로 사료된다.

3.3. 탁도 제거속도 변화

탁도는 물을 흐리게 하는 성분을 총칭하는 것으로 1 μ m 이하의 부유 고형물과 색소성 용존 물질도 모두 포함하며 물의 투명도를 측정하는 척도이며 [24] 양어장에서는 60 g/m³이하의 농도를 권장하고 있다 [25].

Fig. 6은 각각 공탑공기속도의 변화에 따른 탁도 제거속도 및 제거율의 변화를 나타낸 것이며 Fig. 7은 유출수의 탁도/단백질 농도비와 제거속도의 탁도/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 공탑공기속도의 증가에 따른 탁도의 제거율 및 제거속도의 변화는 총 부유 고형물의 제거속도 및 제거율의 변화와 거의 유사한 형태로 나타났다. 특히 공탑공기속도가 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 증가함에 따라 총 부유 고형물의 제거율이 59.4%에서 87.0%로 증가한 것과 거의 유사하게 탁도의 제거율도 60.2%에서 90.3%로 증가하여 거의 동일한 제거율을 나타내는 것으로 나타났다. 이것으로 보아 탁도를 유발하는 물질 중 상당부분을 총 부유 고형물이 차지하는 것으로 생각된다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 유출수의 탁도/단백질 농도비는 공탑공기속도가 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 증가함에 따라 0.55에서 0.41로 감소하는 것으로 나타났으며 제거속도비는 총 부유 고형물의 단백질 제거속도에 대한 비와 비교할 때 50% 정도의 수치를 나타내었다.

3.4. 입도 분포 변화

Fig. 8은 유입수와 각 공탑공기속도의 변화 실험에서 얻어진 유출수의

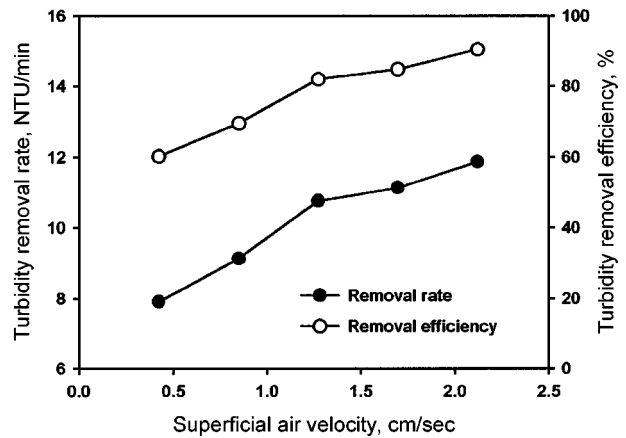


Fig. 6. The changes of turbidity removal rate and removal efficiency on superficial air velocity.

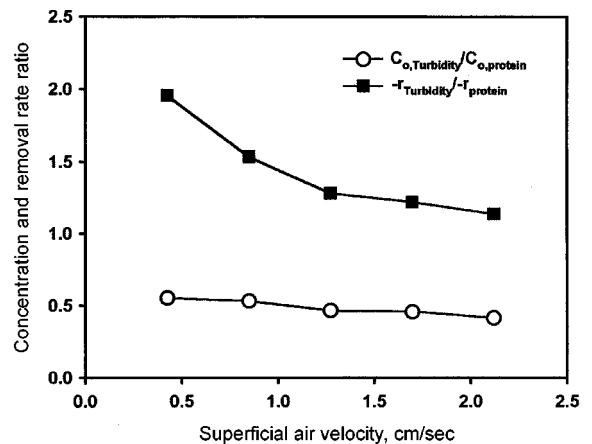


Fig. 7. The concentration ratio of turbidity to protein of effluent(C_o) and the removal rate ratio of turbidity to protein.

입경 직경별 입도 분포(a) 및 누적 입도 분포(b)와 입자 직경별 제거율의 변화(c)를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유입수와 유출수의 입도 분포는 입자 농도의 절대값은 차이가 있으나 그 형태는 거의 동일하게 나타났으며 입자는 0-15 μ m의 범위에서 분포하였으며 2.632 μ m인 입자가 차지하는 비율이 가장 큰 것으로 나타났다.

입자 직경의 변화에 따른 입자의 제거율의 변화는 전체적으로 큰 차이는 없었으나 0.84 cm/sec이상의 공탑공기속도에 대해서는 입경이 클수록, 0.42 cm/sec의 공탑공기속도에 대해서는 입경이 작을수록 제거율이 높은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 공탑공기속도가 0.42 cm/sec일 경우 상승하는 기포에 의해 발생하는 부력이 중력에 의한 침강력보다 작아 무거운 입자의 제거율이 떨어지거나 0.84 cm/sec이상의 공탑공기속도에 대해서는 부력에 의한 영향이 더 크게 작용하여 직경이 큰 입자의 제거율이 증가하는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 공탑공기속도의 변화에 따른 모든 입자의 제거율과 Fig. 8에서 나타난 입도 분포 중 가장 큰 비율을 차지하는 2.632 μ m의 직경을 가지는 입자의 제거율을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 공탑공기속도가 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 증가함에 따라 입자의 제거율도 73.1%에서 93.8%로 증가하였으며 2.632 μ m입자의 제거율은 총 입자의 제거율과 유의적인 차이를 보이지는 않았다. 이것으로 보아 전보 [17]에서 나타난 바와 같이 2.632 μ m의 직경을 가지는 입자를 입자의 제거특성에 있어 전체입자에 대한 대표직경으로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

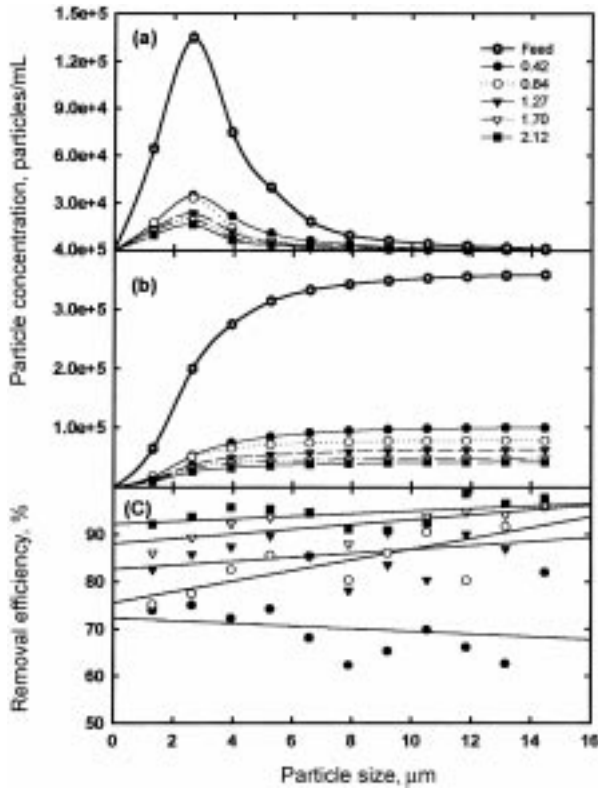


Fig. 8. The changes of the differential particle distributions(a), the cumulative particle distributions(b) and the particle removal efficiency(c) on superficial air velocity.

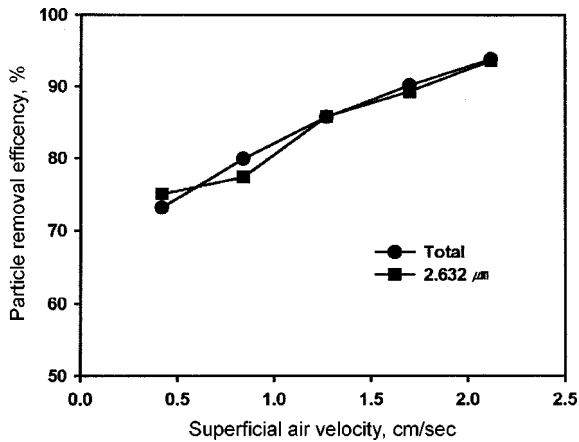


Fig. 9. The changes of particle removal efficiency on superficial air velocity.

3-5. 화학적 산소 요구량 제거속도 변화

미생균 사료에서 용출되거나 어체 내에서 완전히 분해되지 않아 발생하는 용존 유기물은 농도가 높을 경우 타가영양체 미생물의 성장을 촉진시켜 용존산소를 감소시키고 타가영양체 미생물의 일부는 병원균으로 어류에게 질병을 유발시키기도 한다[26].

용존 유기물 농도의 지표로서 화학적 산소 요구량을 측정하여 공탑공기속도의 변화에 따른 포말 분리기의 제거 속도 및 제거율을 Fig. 10에 도시하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 공탑공기속도가 증가함에 따른 화학적 산소 요구량의 제거속도와 제거율의 변화는 앞서 나타난 단백질이나 부유 고형물의 제거 속도와 같이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 단백질이 화학적 산소요구량을 증가시키는 유기물이므로 어류에 의

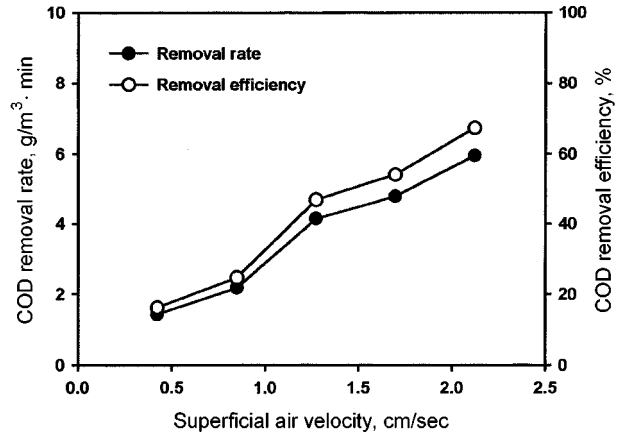


Fig. 10. The changes of COD removal rate and removal efficiency on superficial air velocity.

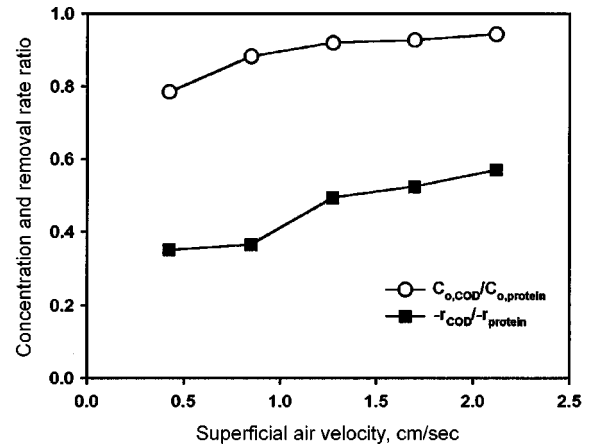


Fig. 11. The concentration ratio of COD to protein of effluent(C_o) and the removal rate ratio of COD to protein.

해 발생하는 부유 고형물의 상당 부분이 유기성 고형물인 것[22]에 의한 현상으로 생각된다.

Fig. 11은 공탑공기속도의 변화에 따른 유출수의 농도와 제거속도의 화학적 산소 요구량/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유출수의 화학적 산소 요구량/단백질 농도비는 공탑공기속도가 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 증가함에 따라 0.79에서 0.95로 증가되었으며 제거속도의 비는 고형물의 경우와는 반대로 0.35에서 0.57로 증가되었다.

유입수의 화학적 산소 요구량/단백질 농도비가 0.66인 것과 비교할 때 유출수의 농도비가 더 높은 것으로 보아 포말분리에 의해 제거되는 유기물의 분율은 단백질에 비해 작으며, 이는 단백질과 고형물 이외의 용존 유기물은 단백질에 비해 흡착력이 약하여 기·액 계면에 많이 흡착되지 못하기 때문으로 생각된다. 화학적 산소 요구량/단백질의 제거속도비가 공탑공기속도가 증가할수록 커지는 것은 단백질에 비해 흡착력이 약하여 흡착되지 못한 용존 유기물이 기·액 계면의 증가에 따라 단백질에 점유되지 않은 계면의 증가로 보다 많이 흡착되었기 때문으로 사료된다.

3-6. 암모니아성 질소 제거속도 변화

공탑공기속도의 변화에 따른 포말 분리기의 암모니아성 질소의 제거속도 및 제거율을 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 보여지는 바와 같이 암모니아성 질소의 제거속도와 제거율은 공탑공기속도가 증가함에

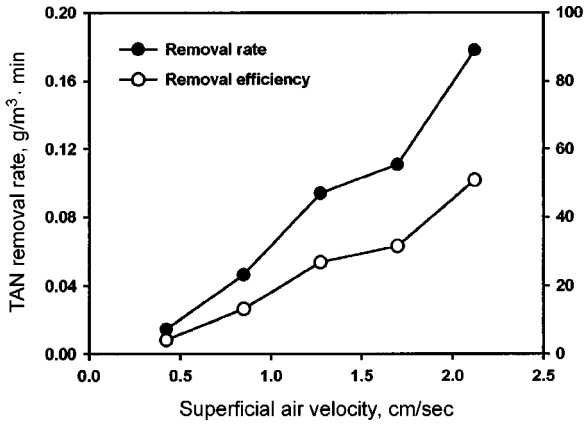


Fig. 12. The changes of TAN removal rate and removal efficiency on superficial air velocity.

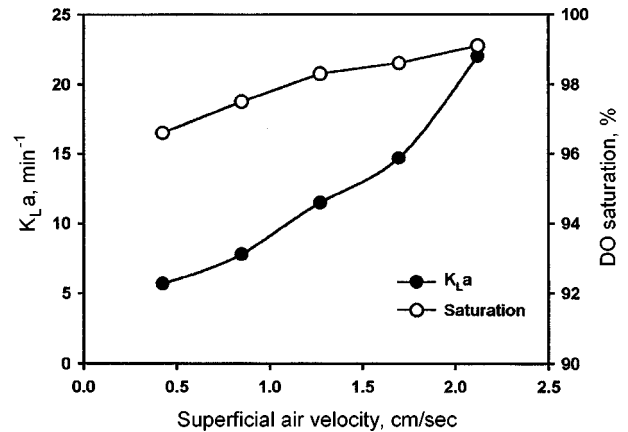


Fig. 14. The changes of overall oxygen mass transfer coefficient and saturation efficiency on superficial air velocity.

따라 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

수중의 암모니아는 비이온성 암모니아(NH₃)와 이온성 암모니아(NH₄⁺) 형태로 평형을 이루고 있으며 온도와 pH에 따라 존재 비율이 달라진다. 포말분리에 의한 암모니아의 제거는 비이온성 암모니아의 경우 stripping 효과에 의해 제거되고[24] 이온성 암모니아의 경우 기·액 계면에 흡착된 계면활성 물질 중 음이온성 물질에 정전기적으로 부착되는 기작[23]에 의해 제거된다. 정전기적 부착에 의한 암모니아 제거는 폐수 내 음이온의 증가가 동반되어야 제거속도가 증가하고, stripping에 의한 암모니아 제거는 기·액 계면의 면적이 비례하게 된다[24]. 본 연구에서 암모니아성 질소가 다른 성분들보다 공탑공기속도의 영향을 크게 받는 것으로 보아 stripping에 의한 암모니아의 제거가 정전기적 부착에 의한 제거보다 더 큰 것으로 사료된다.

Fig. 14는 유출수 농도와 제거속도의 암모니아성 질소/단백질 비의 변화를 나타낸 것으로서 유출수의 암모니아성 질소/단백질 농도비는 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 공탑공기속도가 5배 증가함에 따라 0.036에서 0.056으로 1.5배 정도 증가되었으며 제거속도의 비는 0.004에서 0.017로 3.5배의 큰 폭으로 증가하였다.

제거속도의 암모니아성 질소/단백질 비가 다른 성분들과는 달리 큰 폭으로 증가되는 것은 암모니아의 제거가 단백질의 흡착보다는 stripping에 의해 독립적으로 제거되는 것이 더 많다는 것을 나타내는 증거라고 볼 수 있다.

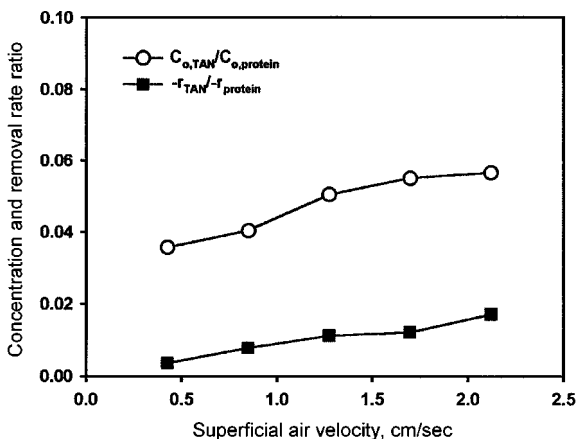


Fig. 13. The concentration ratio of TAN to protein of effluent(C_o) and the removal rate ratio of TAN to protein.

3-7. 용존산소 공급 효율 변화

수중 생물은 생명을 유지하기 위해 충분한 용존산소를 필요로 하며 특히 해산어의 경우 용존산소의 부족에 매우 민감하고 담수어 보다 더 높은 용존산소를 필요로 한다[25]. 따라서 해산어에 대한 용존산소의 공급은 매우 중요하며 포말 분리 장치는 용존산소 공급에도 높은 효율을 나타낸다[6, 7, 26].

Fig. 14는 공탑공기속도의 변화에 따른 유입수와 유출수의 용존산소 농도 변화와 총괄 산소 전달 계수 K_La를 나타낸 것이다. 총괄 산소 전달 계수는 어떤 기·액 접촉장치의 조건을 대표하는 수치로서 그 값이 클수록 산소의 전달효율이 높음을 나타낸다[23].

그림에서 보는 바와 같이 공탑공기속도의 증가에 따른 총괄 산소 전달계수의 변화는 단백질 제거속도, 암모니아 제거속도 등과 거의 유사한 형태로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 공탑공기속도가 증가함에 따라 공급되는 공기와 기·액 계면의 면적이 증가하여 기포 속의 용존산소가 액속으로 더 많이 전달되어 나타나는 현상[27]으로 생각된다.

본 연구의 결과 2.05 min의 짧은 수력학적 체류시간에서 유입수의 용존산소 포화도가 56.5-58.5% 정도로 낮게 공급됨에도 불구하고 유출수가 96.6-99.1%의 높은 용존산소 포화도를 나타내는 것으로 보아 포말 분리 장치는 단백질, 부유고형물과 같은 양식 폐기물을 제거함과 동시에 어류에 꼭 필요한 용존산소를 효율적으로 공급할 수 있는 폭기장치로도 병용될 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 공기부상식 포말분리기를 이용하여 공탑공기속도의 변화에 따른 해수 속의 단백질, 부유 고형물, 화학적 산소 요구량, 탁도, 암모니아성 질소와 같은 양식 폐기물의 연속 제거운전을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 공탑공기속도가 증가함과 비례하여 단백질 제거속도 및 제거율은 증가하였으며 공탑공기속도가 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 증가함에 따라 단백질의 제거속도와 제거율은 4.04 g/m³·min, 30.0%에서 10.43 g/m³·min, 77.3%로 증가하였다.
- (2) 포말 생성속도는 공탑공기속도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으나 유입수의 단백질 농도와 포말의 단백질 농도의 비인 농축비는 감소되는 것으로 나타났다.
- (3) 총 부유 고형물, 탁도, 화학적 산소 요구량의 제거속도 및 제거율의 변화는 단백질 성분과 유사한 경향으로 나타났다.

(4) 입자 직경의 변화에 따른 입자의 제거율의 변화는 0.84 cm/sec 이상의 공탑공기속도에 대해서는 입경이 클수록, 0.42 cm/sec의 공탑공기속도에 대해서는 입경이 작을수록 제거율이 높은 것으로 나타났다. 2.632 μm 의 직경을 가지는 입자를 입자의 제거특성에 있어 전체입자에 대한 대표직경으로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

(5) 암모니아성 질소는 stripping에 의해 제거되었으며 높은 공탑공기속도에서 보다 많은 암모니아가 제거되었다.

(6) 공탑공기속도의 증가에 따라 총괄 산소 전달계수가 증가하였으며 96.6%이상의 높은 포화율을 나타내었다.

결론적으로 본 연구의 결과 해수 속의 양식 폐기물에 존재하는 단백질 성분을 이용하는 포말분리공정은 단백질, 부유고형물과 같은 양식 폐기물을 제거함과 동시에 용존산소 공급장치로도 병용될 수 있었으며 공탑공기속도가 증가할수록 오염물의 제거속도와 용존산소 전달계수가 증가하였다.

사용기호

$-r$: removal rate [$\text{g/m}^3 \cdot \text{min}$ or NTU/min]
Q	: flowrate [L/min]
C	: concentration [g/m^3 or NTU]
$K_L a$: overall mass transfer coefficient [min^{-1}]

그리스 문자

τ	: hydraulic residence time [min]
--------	----------------------------------

하첨자

a	: component
f	: foam state
i	: influent
o	: effluent
s	: saturation state

감 사

본 연구는 해양수산개발원에서 시행한 1999년 수산기술 개발 사업에 의해서 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- Clarke, A. N. and Wilson, D. J.: "Foam Flotation," Marcel Dekker, INC, New York, 53(1972).
- Rubin, E.: in M. P. Freeman and J. Fitz Patrick(Eds.) "Foam Fractionation - Some Recent Studies. In Theory, Practice, and Process Principles for Physical Separations," Proceedings of the Engineering Foundation Conference, Engineering Foundation, New York, USA(1981).
- Lemlich, R.: in R, Lemlich(Ed.) "Adsorptive Bubble Separation Techniques: Principles of Foam Fractionation and Drainage," Academic Press, New York, 33(1972).
- Choi, Y. H., Lee, J. D. and Choi, S. J.: *HWAHAK KONGHAK*, **35**, 63 (1997).
- Cho, D. and Chang, H. N.: *Korean J. Chem. Eng.*, **15**, 445(1998).
- Suh, K. H. and Lee, M. G.: *J. Korean. Fish. Soc.*, **28**, 599(1995).
- Chen, S.: *Aquacultural Engineering*, **13**, 183(1994).
- Suh, K. H., Lee, H. G., Kim, B. J., Cho, M. C., An, S. H. and Cho, J. Y.: *J. Korean Environmental Science*, **7**, 41(1998).
- Weeks, N. C., Timmons, M. B. and Chen, S.: *Aquacultural Engineering*, **11**, 251(1992).
- Suh, K. H., Lee, M. G., Lee, M. S., Kim, B. J., Kim, E. J. and Cho, M. C.: *J. Korean Fish. Soc.*, **30**, 334(1995).
- Brown, A. K., Kaul, A. and Varley, J.: *Biotechnology and Bioengineering*, **62**, 278(1999).
- Suh, K. H., Shim, H. K. and Yun, J. W.: *Kor. J. Biotechnology and Bioengineering*, **11**, 46(1996).
- Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L. and Randall, R. J.: *J. Biotech.*, **193**, 265(1951).
- Bollag, D. M. and Edelstein, S. J.: "Protein Methods," Wiley-Liss, New York, 46(1991).
- APHA, AWWA and WEF: "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater," 18th ed., EPS Group(1992).
- Korean Institute of Industry and Technology: "Standard Methods for the Examination of Environmental Pollution,"(1990).
- Suh, K. H., Kim, B. J., Bong, S. H., Lim, J. H., Kim, Y. H. and Kim, S. K.: *HWAHAK KONGHAK*, **38**, (2000).
- Cho, D. and Cornee, M.: *Korean J. Chem. Eng.*, **16**, 371(1999).
- Wheaton, F. W., Hochheimer, J. N., Kaiser, G. E., Klones, M. J., Libey, G. S. and Easter, C. C.: in M. B. Timmons and T. M. Losordo(Eds.), "Aquaculture Water Reuse System: Engineering Design and Management: Nitrification Filter Principle," Elsevier, Amsterdam, 101(1996).
- Urizee, F. and Narsimhan, G.: *Biotechnology and Bioengineering*, **51**, 384(1996).
- Urizee, F. and Narsimhan, G.: *Separation Science and Technology*, **30**, 847(1995).
- Chen, S., Stechy, D. and Malone, R. F.: in M. B. Timmons and T. M. Losordo(Eds.) "Aquaculture Water Reuse System: Engineering Design and Management: Suspended Solids Control in Recirculating Aquaculture Systems," Elsevier, Amsterdam, 61(1996).
- Chen, S.: Ph. D. Dissertation, Cornell University, Ithaca, New York (1991).
- Tchobanoglous, G. and Schroeder, E. D.: "Water Quality," Addison-Wesley Publishing Company, California, 56(1985).
- Nightingale, J. W.: "Technical Report of Karmer," Chin and Mayo Inc., Washington(1976).
- Suh, K. H. and Lee, M. G.: *J. Korean. Fish. Soc.*, **30**, 239(1995).
- Bailey, J. E. and Ollis, D. F.: "Biochemical Engineering Fundamentals," 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 464(1986).