

포말분리기를 이용한 해수로부터 양식 폐기물 제거

II. 수력학적 체류시간 영향

서근학[†] · 김병진 · 김성구* · 김용하 · 이경범 · 임준혁

부경대학교 화학공학과, *생물공학과
(2000년 3월 10일 접수, 2001년 1월 9일 채택)

The Removal of Aquacultural Wastes by Foam Separator from Sea Water

II. The Effect of Hydraulic Residence Time

Kuen-Hack Suh[†], Byong-Jin Kim, Sung-Koo Kim*, Yong-Ha Kim, Gyeongbeom Yi and Jun-Heok Lim

Department of Chemical Engineering, *Department of Biotechnology & Bioengineering,
Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea
(Received 10 March 2000; accepted 9 January 2001)

요 약

공기부상식 포말분리기를 제작하여 해수 속의 단백질, 부유 고형물, 화학적 산소 요구량, 탁도, 암모니아성 질소와 같은 양식 폐기물의 연속 제거운전을 수행하여 수력학적 체류시간의 변화에 따른 양식 폐기물의 제거 특성을 검토하였으며 포말분리기의 용존산소 공급 능력을 검토하였다. 수력학적 체류시간의 증가에 따라 단백질 및 각 양식폐기물의 제거율은 증가하였다. 최고의 단백질 제거속도를 얻기 위한 수력학적 체류시간은 0.48분이었으며 이때의 단백질 제거속도는 $10.25 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 이었다. 수력학적 체류시간의 변화에 따른 총 부유 고형물, 화학적 산소 요구량과 탁도의 제거속도 변화는 단백질과 유사한 경향을 나타내었으며 최고의 단백질 제거속도를 얻기 위한 수력학적 체류시간에서 총괄 용존산소 전달계수도 가장 높은 것으로 나타났다.

Abstract – Experimental investigations on the effect of the hydraulic residence time(HRT) for 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 foam separator. The foam separator as an aerator was also evaluated for increasing dissolved oxygen concentration. The increase in hydraulic residence time increased the removal efficiencies of aquacultural waste. Optimum hydraulic residence time was 0.48 min and the highest protein removal rate was $10.25 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$. The changes of removal rates and efficiencies of TSS, COD and turbidity were similar to proteins. The hydraulic residence time for highest overall oxygen mass transfer coefficient was the optimum condition for the highest protein removal rate.

Key words: Foam Separation, Hydraulic Residence Time, Aquacultural Waste, Protein, TSS, COD, Turbidity, TAN, DO

1. 서 론

최근 어류의 소비량이 증가함에 따라 어류양식 산업과 활어의 유통산업이 성장하고 있다. 어류 양식업의 경우 어류를 고밀도로 사육함에 따라 사육조에서 발생하는 오염물질의 양도 많아 어류의 대량 폐사를 유발하기도 한다[1]. 또한 횡집의 경우 해수의 수급이 용이하지 않은 내륙지방의 경우 활어수조 내 해수의 오염도가 높아 어류의 폐사가 발생하며, 이로 인해 국민건강에 영향을 미친다. 그러므로 양어장이나 활어수조 내에서 발생하는 오염물질의 효과적이고 신속한 제거가 요구된다.

어류의 생장에 영향을 미치는 양식 폐기물은 단백질, 부유 고형물, 유기물, 암모니아 등이 있으며 이와 같은 양식 폐기물은 미접취 사료나 어

류의 대사에 관계하여 발생한다[2]. 양식 폐기물의 제거 장치는 기존의 수처리 장치를 응용하여 사용하고 있으나 장치의 설치 및 운전비용이 커서 생산성을 감소시키는 원인이 된다. 양식 폐기물의 경제적이고 효율적인 처리장치로 포말분리법이 많이 연구되어지고 있다[3-4].

포말분리법은 계면활성 물질의 친수기가 액층으로 소수기가 기체층으로 배열되어 기액 계면에 액본체보다 높은 농도로 농축되는 성향을 이용하여 용액 내에 존재하는 입자상 물질이나 용존 물질을 용액 내에서 상승하는 기포에 부착시켜 분리시키는 방법으로 고압 또는 고온 등의 운전조건을 필요로 하지 않아 매우 경제적인 공정이다[5-6]. 또한 대부분의 분리공정이 목적 성분이 저농도일 경우 회수율이 급격히 감소함에 비해 포말분리법은 저농도에서도 목적 성분을 고농도로 농축하여 회수할 수 있는 장점을 가지므로 최근에는 수용액 중의 염료제거[7]나 유류 오염물 분리[8]와 같은 분야에 응용되고 있다.

[†]E-mail: khsuh@mail.pknu.ac.kr

타공정의 포말분리법이 목적성분의 효율적 분리를 위해 별도의 계면활성제를 첨가하는 것과 달리 양어장 순환수의 경우 미접취 사료나 어분에 포함된 단백질 성분은 소수기와 친수기를 함께 가지는 구조적 특성으로 인해 계면활성제 역할을 하므로 포말분리를 더 용이하게 수행할 수 있다[9-11].

현재까지 진행되어온 양어장수 포말분리공정에 대한 연구는 대부분 담수 양어장수에 대한 연구로서 우리 나라에서 선호되는 해산어 양식이나 활어수조에 필요한 해수에 대한 연구는 전무한 상황이다.

본 연구에서는 해수 속의 단백질, 부유 고형물, 화학적 산소 요구량, 탁도, 암모니아성 질소와 같은 양식 폐기물의 연속 포말분리운전을 수행하여 연속 포말분리공정에 가장 큰 영향을 미치는 운전 인자인 수력학적 체류시간의 변화에 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 바와 같이 separation column과 foam riser가 일체형인 형태로 내경 5 cm, 높이 50 cm의 아크릴관을 사용하여 제작하였으며 액본체의 용적은 1 L였다. Foam collector는 내경 5 cm, 높이 10 cm의 아크릴관에 내경 2 cm의 삽입관을 통해 포말이 유입되도록 제작하였다. 유입관과 유출관은 2 cm 아크릴관을 사용하였다.

포말분리기 하부에는 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 정량 펌프를 이용하여 액층 상부에서 일정한 유량으로 공급하고, 처리수는 하부에서 유출 되도록 하였으며 공기는 탑의 하부에서 공급함으로써 향류식 접촉을 유도하였다.

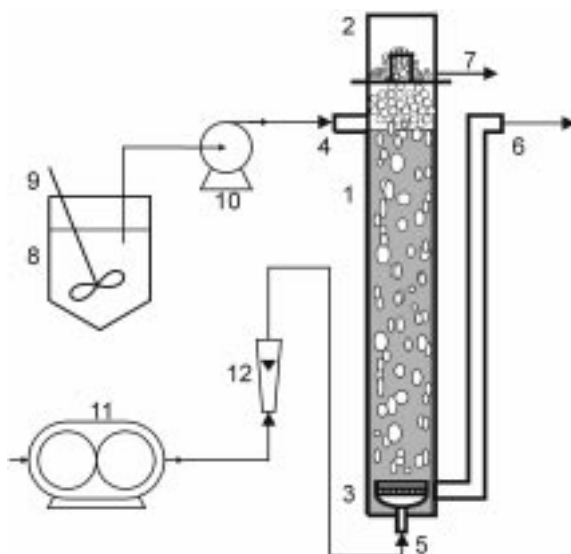


Fig. 1. Schematic diagram for the removal of aquacultural waste from sea water by using foam separator.

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

Table 1. Water quality of feeding sea water

Component	Concentration
Salinity	30.00‰
Protein	16.18 g/m ³
Total suspended solid	35.00 g/m ³
Turbidity	17.86 NTU
Chemical oxygen demand	15.35 g/m ³
Total ammonia nitrogen	0.41 g/m ³

2-2. 실험재료 및 방법

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

공급 공기유속은 0.85 cm/sec로 고정하여 수력학적 체류시간을 8.76, 3.48, 1.40, 0.77, 0.48, 0.28 min으로 변화시켜 실험하였다.

2-3. 분석방법

실험수의 유량은 메스실린더를 이용하여 실측하였고 포말생성속도는 연속운전이 정상상태에 도달한 후 포말분리기에서 유출되는 포말을 수집하여 소포제(信越化學, KM-72)를 첨가 포말을 파쇄한 후 그 양을 측정하여 구하였다. 단백질의 농도 분석은 포말 농축물은 Lowry's method [12]를 이용하였으며 해수는 UV280 method [13]를 이용하여 수행하였다. 총 부유고형물은 standard method [14]에 따라 GF/C여지로 여과한 후 염소이온이 검출되지 않을 때까지 증류수로 세척하여 분석하였다. 화학적 산소 요구량은 알칼리성 KMnO₄법 [15]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 [14]에 의해 분석하였다. 용존산소는 용존산소 측정기(YSI Inc. Model 52)를 이용하여 유입수의 농도를 측정 한 후 유출수의 농도는 30초 간격으로 연속 측정하여 정상상태에서의 평균값을 취하였다. 각 시료의 입도 분포는 100 μm 의 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) [16]을 이용하여 계산하였다.

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

여기서 $-r_a$ 는 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_i 는 유입수의 유량(m³/min)이며 Q_f 는 포말분리기에서 발생되어 유출된 포말의 유량(m³/min)이다. V는 포말분리기의 액본체 용적(m³)이다.

포말분리기의 총괄 용존산소 전달 계수는 식 (4)를 이용하여 구하였다. 포말분리기 내에서 용존산소의 흡수속도는 다음과 같다 [17].

$$r_{DO} = K_L a (C_{s,DO} - C_{o,DO}) \quad (2)$$

여기서 r_{DO} 는 용존산소 흡수속도(g/m³/min), $K_L a$ 는 총괄 용존산소 전달 계수(min⁻¹), $C_{s,DO}$ 는 용존산소의 포화농도(g/m³)이며 $C_{o,DO}$ 는 유출

수의 용존산소 농도(g/m^3)이다.

포말분리의 용존산소 흡수속도는 액체 채적당 증가되는 용존산소의 양과 동일하므로 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$r_{DO} = \frac{(C_{o,DO} - C_{i,DO}) \cdot Q_i}{V} \quad (3)$$

여기서 $C_{o,DO}$ 는 유출수의 용존산소 농도(g/m^3)이다.

식 (2)와 (3)을 등식으로 두고 총괄 용존산소 전달 계수로 정리하면 다음과 같다.

$$K_L a = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{(C_{o,DO} - C_{i,DO})}{(C_{s,DO} - C_{o,DO})} \quad (4)$$

여기서 τ 는 V/Q_i 로서 수력학적 체류시간(min)이다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 정상상태 도달시간

포말분리 장치의 연속 운전시 정상상태에 도달하는 시간을 검토하기 위하여 실험수를 공탐 공기유속 0.85 cm/sec , 수력학적 체류시간을 0.77 min 으로 하여 연속공급하면서 단백질, 총 부유 고형물, 탁도, 화학적 산소 요구량, 총 암모니아성 질소의 유입수 농도에 대한 유출수의 농도비와 용존산소의 포화도를 측정하여 유출 시간과 운전시간(t)과 수력학적 체류시간(τ)의 비인 무차원 시간 단위의 변화에 따라 Fig. 2에 나타내었다.

그림에서 보여지는 바와 같이 계면활성제 역할을 하는 단백질의 경우 운전 개시후 1 min이 경과하면서부터 정상상태 값의 84%에 도달하였고 수력학적 체류시간의 2.6배에 상당하는 시간인 2 min 후부터는 거의 정상상태에 도달한 결과를 나타내었다. Suh 등[9]은 포말분리법을 이용한 담수 양어장수의 단백질제거 실험을 통해 2.1 min의 수력학적 체류시간에서 수력학적 체류시간의 약 9.5배인 20분의 시간이 경과한 후 유출수의 단백질 농도가 정상상태에 도달하였다고 하였다. 이를 본 연구의 결과와 비교하여 볼 때 기·액 계면에서의 단백질의 흡착은 담수보다는 해수에서 더 빠르게 진행된다고 사료된다.

입자상 물질인 총 부유 고형물과 탁도는 공기가 공급되어 기포가 발생되기 시작한 후 시간의 경과에 따라 거의 직선적으로 감소하여 총 부

유 고형물은 수력학적 체류시간의 5.2배인 4 min, 탁도는 수력학적 체류시간의 2.6배인 2 min 후에 각각 정상상태에 도달하는 것으로 나타났다. 화학적 산소 요구량 및 총 암모니아성 질소는 단백질이나 탁도가 정상상태에 도달하는 시간의 2배 가량인 4 min이 경과하면서 거의 일정한 값을 나타내었다. 이는 수력학적 체류시간의 5.2배였다.

입자상 물질이나 화학적 산소 요구량, 총 암모니아성 질소의 제거가 단백질에 비해 정상상태에 늦게 도달되는 것으로 보아 이들 성분의 흡착속도가 단백질의 흡착속도에 비해 느리기 때문이다. 이러한 현상은 단백질 성분은 기·액 계면에 직접적으로 흡착되지만 다른 성분은 기·액 계면에 직접적으로 흡착되기보다는 단백질 성분과 결합되어 제거되는 기작[4]에 의한 것이라고 생각된다.

용존 산소 포화도는 운전시간이 경과함에 따라 증가하여 3 min의 운전시간 이후부터는 거의 일정한 값을 나타내어 포말 분리기 내 기·액 계면의 용존산소 전달속도는 수력학적 체류시간의 3.9배에 해당하는 시간이 경과한 후 평형에 도달함을 알 수 있었다.

전체적으로 수력학적 체류시간의 5배 이상의 시간이 경과한 후부터는 정상상태에 도달하였으므로 이후 실험에서는 운전 시작 후 수력학적 체류시간의 5배가 경과한 후부터 1회에 2개의 시료를 수력학적 체류시간의 2배 간격으로 3회 채취하여 평균 분석값을 실험자료로 이용하였다.

3-2. 단백질 제거속도 변화

단백질 성분은 어류에 대한 독성이 높은 암모니아를 발생시키고 산소 요구량을 증가시켜 신속한 제거가 요구되는 성분으로[18] 소수기와 친수기를 모두 가지고 있는 구조적 특징[19]으로 인해 계면활성제 역할을 수행하므로 별도의 계면활성제를 첨가하지 않는 본 연구에서 가장 중요한 성분이다.

Fig. 3은 수력학적 체류시간이 단백질 제거속도 및 제거율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 체류시간의 증가에 따라 단백질의 제거율이 증가하는 것으로 나타났으며 그 증가율이 서서히 감소하는 형태를 나타내었다. 단백질 제거속도는 수력학적 체류시간이 0.28 min에서 0.48 min으로 증가함에 따라 $7.17 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 에서 $10.25 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 으로 증가하였으나 그 이상의 수력학적 체류시간부터는 제거속도가 감소하여 단백질 제거율이 증가하는 것과는 반대의 현상을 나타내었다.

수력학적 체류시간의 증가에 따라 단백질의 제거율이 증가하는 현상은 체류시간이 증가하면 유입된 단백질이 포말분리 장치 내에서 머무는 시간이 증가하므로 포말분리기 내에서 기포와의 접촉시간이 증가하여 나타난 현상으로 사료된다. 체류시간의 증가에 따라 제거율이 증가

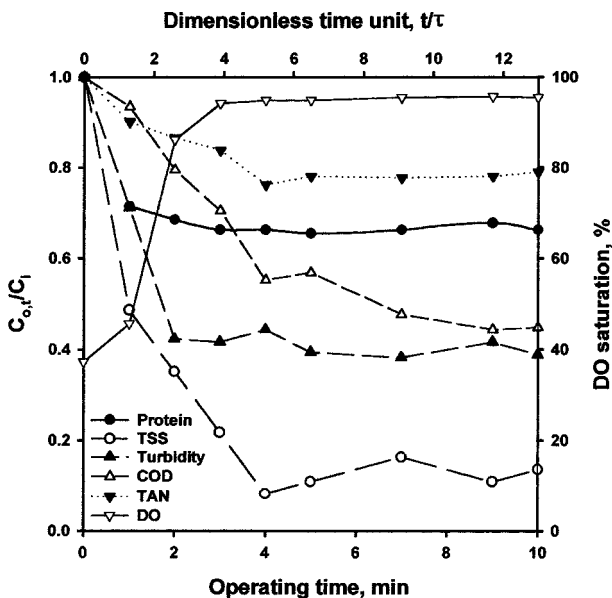


Fig. 2. Time courses of the concentration ratio of effluent to influent of protein, TSS, turbidity, COD and TAN and DO saturation.

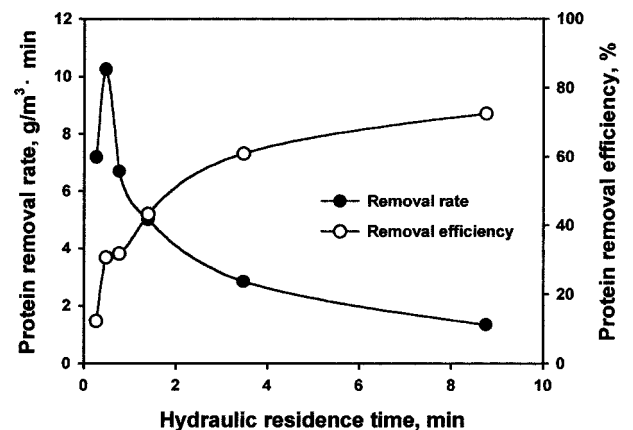


Fig. 3. The changes of protein removal rate and removal efficiency on hydraulic residence time.

하는 변화폭이 감소하는 것은 기·액 계면의 면적은 한정되어 있어 발생하는 현상으로 짧은 체류시간의 범위에서는 단백질이 흡착되어 있지 않은 기·액 계면의 면적이 충분하여 체류시간이 증가함에 따라 미흡착 단백질의 흡착이 용이하게 진행되나 체류시간이 길어질수록 단백질이 흡착될 수 있는 기·액 계면의 면적이 감소하게 되므로 미흡착 단백질이 경쟁적으로 활성 계면에 흡착되기 때문에 사료된다.

단백질 제거속도가 수력학적 체류시간이 감소할수록 증가되는 것은 두 가지 현상에 의한 것으로 생각된다. 첫 번째는 접촉기회의 증가에 의한 것으로서 유량의 증가에 따라 유입되는 단백질의 양이 증가하므로 기·액 계면과 접촉할 수 있는 단백질의 양이 증가하므로 흡착되는 단백질의 양도 증가하여 단백질 제거속도가 증가되는 현상이다. 다른 하나는 유량의 증가에 따른 단백질 농도의 증가에 의한 효과로서 수력학적 체류시간이 감소하여 유량이 증가할 경우 앞서 설명한 바와 같이 제거율이 감소하므로 포말분리기 내의 단백질 농도가 상승하게 되어 나타나는 현상이다. 전보에서 나타난 바와 같이 포말분리기의 단백질 제거속도는 Langmuir 등은 흡착식을 따르므로 단백질 농도가 증가할 경우 기·액 계면으로의 흡착속도가 증가하게 되는 것이다.

0.48 min 이하의 체류시간에서는 제거속도가 감소하는 것은 수력학적 체류시간이 매우 짧아질 경우 단백질이 기·액 계면으로의 물질 전달 속도 보다 액체흐름 속도가 더 커져 단백질이 기·액 계면에 흡착될 수 있는 접촉 시간을 유지하지 못하기 때문이라고 생각된다.

Fig. 4는 수력학적 체류시간의 변화에 따른 포말 생성속도와 유입 유량에 대한 포말 생성 속도의 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보 여지는 것과 같이 포말 생성속도는 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며 0.48 min 이상의 수력학적 체류시간에서는 포말 생성 속도의 변화 폭이 감소하여 거의 일정한 값을 나타내었다. 반면 유입 유량에 대한 포말 생성 속도의 비는 1.4 min의 수력학적 체류시간에서 가장 큰 값을 나타내었다.

수력학적 체류시간의 감소에 의한 포말 생성 속도가 증가하는 것은 수력학적 체류시간이 감소함에 따라 단백질 농도가 증가하여 포말의 발생량이 증가하는 현상과 포말내 액체 체류량의 증가에 의한 현상[20]에 기인한 것으로 생각된다.

3.3. 총 부유 고형물 제거속도 변화

미립취 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[21]. 고형물의 농도가 높을 경우 생물학적 질산화 공정에서 암모니아 제거 속도를 감소시킬 수도 있고 고형물의 분해에 의해

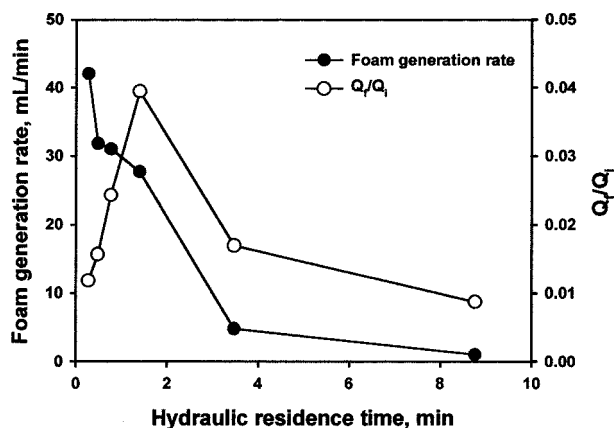


Fig. 4. The changes of foam generation rate and the ratio of foam generation rate to liquid flowrate on initial protein concentration.

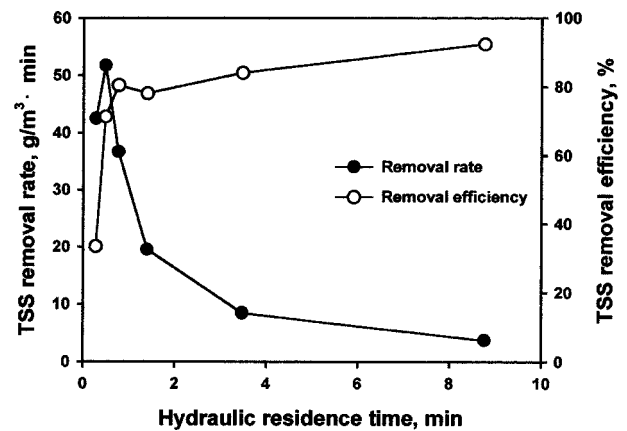


Fig. 5. The changes of TSS removal rate and removal efficiency on hydraulic residence time.

발생되는 암모니아는 어류에 나쁜 영향[2]을 끼칠 수 있기 때문에 양식장 순환수 중의 고형물의 제거는 매우 중요하다.

Fig. 5는 수력학적 체류시간이 총 부유 고형물의 제거속도 및 제거율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 체류시간의 변화에 따른 제거속도의 변화는 단백질 제거속도의 변화와 거의 동일한 경향을 나타내었으며 최대 제거속도는 0.48 min에서 나타난 51.8 g/m³ · min이었다.

총 부유 고형물의 제거율은 수력학적 체류시간이 0.77 min으로 증가함에 따라 33%에서 80%로 급격히 증가하였으나 그 이상의 수력학적 체류시간에서는 80-92%의 범위로 크게 증가하지는 않았다. 총 부유 고형물의 제거속도가 단백질 제거속도와 유사하게 수력학적 체류시간의 영향을 받는 것은 포말분리를 유발하는 성분이 단백질이고 부유 고형물은 기·액 계면에 흡착된 단백질에 이온적으로 흡착되어 제거되는 기작[22]에 연유한 현상으로 사료된다.

Fig. 6은 수력학적 체류시간의 변화에 따른 유출수 농도와 제거속도의 총 부유 고형물/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유출수의 총 부유 고형물/단백질 농도비는 거의 일정하게 나타났으며 제거속도의 비는 0.48 min이상의 수력학적 체류시간에서는 0.6-0.9의 범위에서 거의 일정한 것으로 나타났으며 제거속도의 비는 수력학적 체류시간의 증가에 따라 5.9-2.8의 범위에서 감소하는 것으로 나타났다.

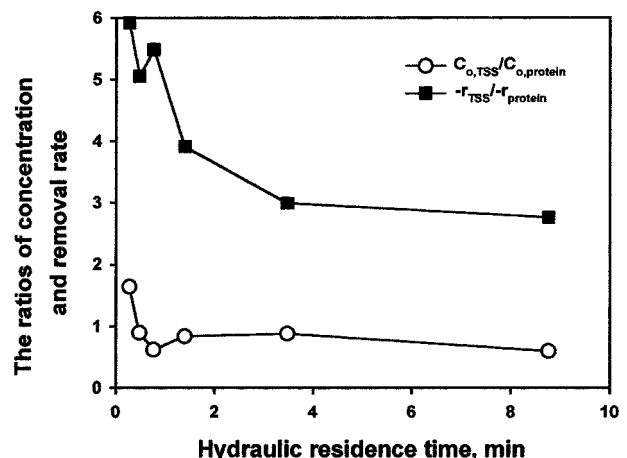


Fig. 6. The concentration ratio of TSS to protein of effluent (C_0) and the removal rate ratio of TSS to protein.

유입수의 총 부유 고형물/단백질 농도비가 약 2.2인 것에 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 있었으며 0.28 min의 짧은 수력학적 체류시간에서 농도비가 증가하는 것은 액체 흐름속도의 증가가 단백질과 고형물의 간의 결합력보다 커서 나타난 현상으로 사료된다.

3-4. 탁도 제거속도 변화

Fig. 7과 8은 각각 수력학적 체류시간의 변화에 따른 탁도 제거속도 및 제거율의 변화와 유출수의 농도와 제거속도에 대한 탁도/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 수력학적 체류시간의 증가에 따른 탁도의 제거율 및 제거속도의 변화는 총 부유 고형물의 제거속도 및 제거율의 변화와 거의 유사한 형태로 나타났다. 이러한 현상은 탁도를 유발하는 물질 중 상당부분을 총 부유 고형물이 차지하므로 [22] 많은 분율을 차지하는 총 부유 고형물이 제거되는 것과 유사한 양상으로 탁도의 제거가 이루어지는 것으로 생각된다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 유출수의 탁도/단백질 농도비는 0.57 정도로 나타났으며 유입수의 농도비가 1.1인 것과 비교할 때 단백질에 비해 50%정도 더 많은 양이 제거되는 것으로 생각된다. 제거속도비는 총 부유 고형물의 단백질 제거속도에 대한 비와 비교할 때 50% 정도의 수치를 나타내었다. 총 부유 고형물의 경우 1 μm 이상의 입경을 가지는 고형물인 것과 달리 탁도는 1 μm 이하의 부유 고형물과 색소성 용존 물

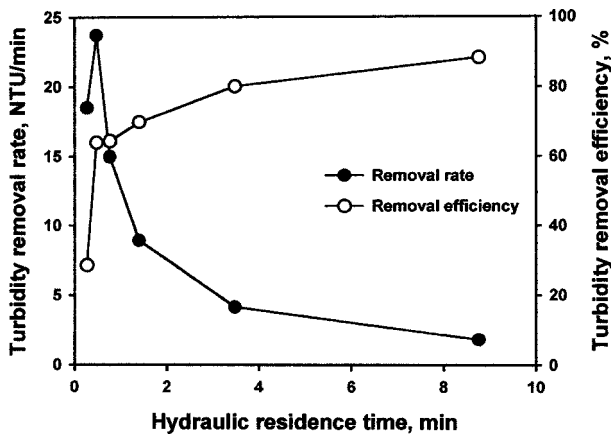


Fig. 7. The changes of turbidity removal rate and removal efficiency on hydraulic residence time.

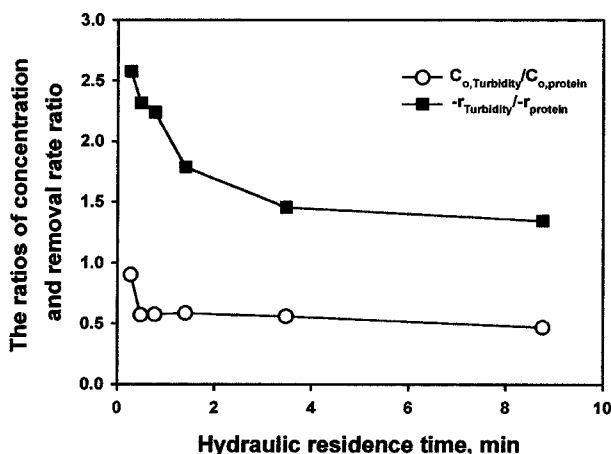


Fig. 8. The concentration ratio of turbidity to protein of effluent(C_o) and the removal rate ratio of turbidity to protein.

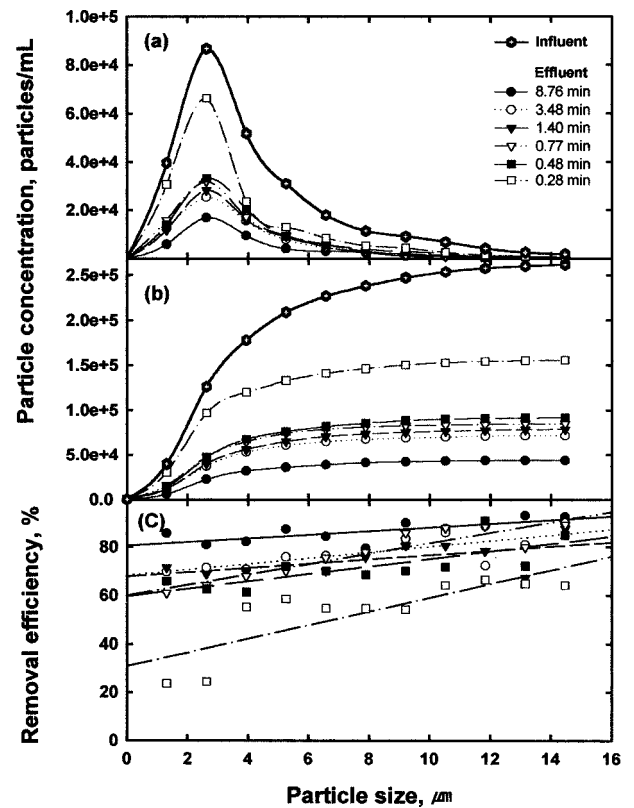


Fig. 9. The changes of the differential particle distributions (a), the cumulative particle distributions (b) and the particle removal efficiency (c) on particle size.

질도 모두 포함하는 것을 생각할 때 총 부유 고형물보다 작은 미소입자가 잘 제거되지 않는 것으로 생각된다.

3-5. 입도 분포 변화

Fig. 9는 유입수와 각 수력학적 체류시간에서 얻어진 유출수의 입자 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 μm 의 범위에서 분포하였으며 2.632 μm 인 입자가 차지하는 분율이 가장 큰 것으로 나타났다.

입자 직경의 변화에 따른 입자의 제거율의 변화는 전체적으로 입경이 클수록 제거율이 높은 것으로 나타났으며 이러한 현상은 중력에 의한 침강력보다 상승하는 기포에 의해 발생하는 부력에 대한 영향에 더 크게 작용하여 발생하는 현상으로 사료된다.

Fig. 10은 수력학적 체류시간의 변화에 따른 입자의 총 제거율과 Fig. 9의 입도 분포 중 가장 큰 분율을 차지하는 2.632 μm 입자의 제거율을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 0.48-8.77 min의 수력학적 체류시간의 범위에서는 체류시간의 증가에 따라 입자의 제거율이 서서히 증가하고 2.632 μm 입자의 제거율은 총 입자의 제거율에 비해 3%정도 작게 나타났으나 그 절대값은 큰 차이를 보이지 않았다. 0.28 min의 수력학적 체류시간에서는 입자의 제거율이 매우 낮은 것으로 나타났으며 2.632 μm 입자의 제거율은 전체 입자의 제거율에 비해 18%정도 더 낮은 것으로 나타났다.

3-6. 화학적 산소 요구량 제거속도 변화

미ச்ச취 사료에서 용출되거나 여체 내에서 완전히 분해되지 않아 발생

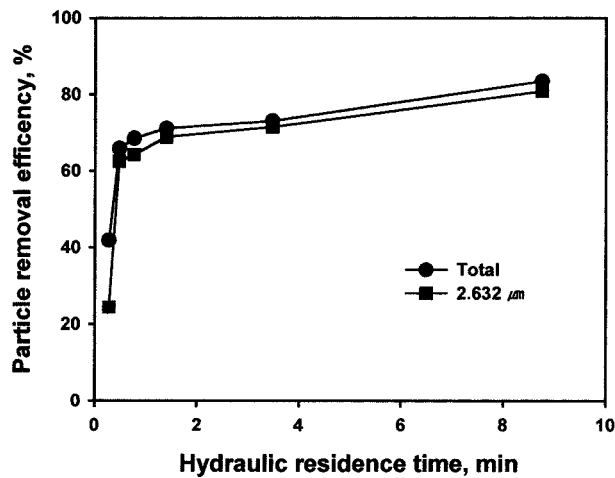


Fig. 10. The changes of particle removal efficiency on hydraulic residence time.

하는 용존 유기물은 타가영양체 미생물의 성장을 촉진시켜 어류에게 질병을 유발하거나 생물학적 질산화 반응기의 효율을 저하시키는 원인이 된다[18].

용존 유기물 농도의 지표로서 화학적 산소 요구량을 측정하여 수력학적 체류시간의 변화에 따른 포말 분리기의 제거 속도 및 제거율을 Fig. 11에 도시하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 화학적 산소 요구량의 제거속도는 앞서 나타난 단백질 또는 부유 고형물의 제거 속도와 같이 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며 화학적 산소 요구량의 최대 제거속도는 $13.7 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 이었다. 화학적 산소 요구량의 제거율은 수력학적 체류시간이 0.28 min에서 0.48 min으로 증가함에 따라 11.7%에서 43.0%로 급격히 증가한 후 0.48 이상의 수력학적 체류시간에 대해서는 선형적으로 증가하여 8.77 min의 체류시간에서 84.6%의 제거율을 나타내었다.

Fig. 12는 수력학적 체류시간의 변화에 따른 유출수의 농도와 제거속도의 화학적 산소 요구량/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유입수의 화학적 산소 요구량/단백질 농도비와 제거속도비는 수력학적 체류시간의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

3-7. 암모니아성 질소 제거속도 변화

수력학적 체류시간의 변화에 따른 포말 분리기의 암모니아성 질소의 제거 속도 및 제거율을 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13에서 보여지는 바

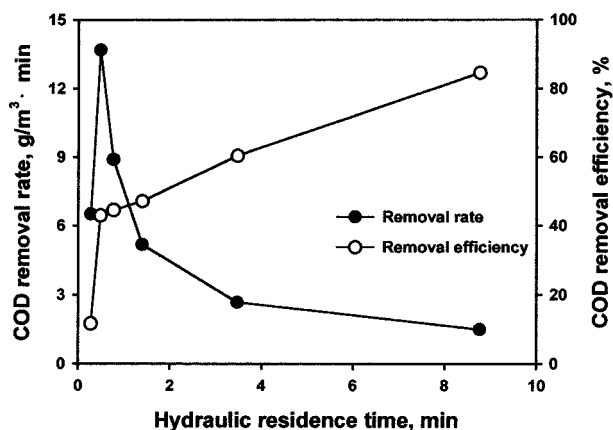


Fig. 11. The changes of COD removal rate and removal efficiency on hydraulic residence time.

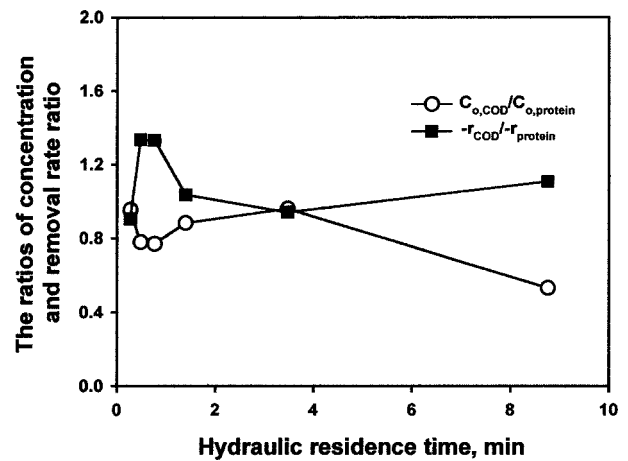


Fig. 12. The concentration ratio of COD to protein of effluent(C_0) and the removal rate ratio of COD to protein.

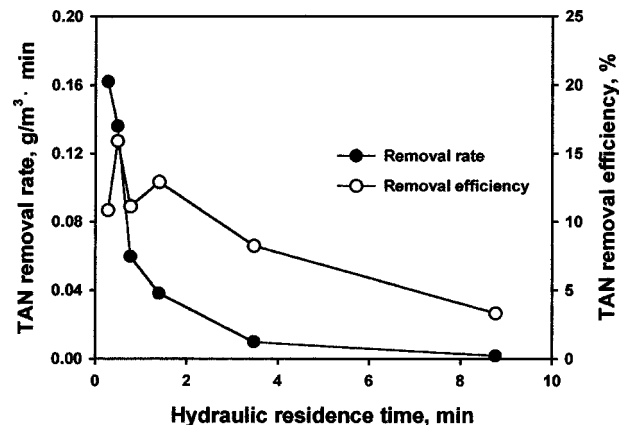


Fig. 13. The changes of TAN removal rate and removal efficiency on hydraulic residence time.

와 같이 암모니아성 질소의 제거속도는 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타나 유량이 많을수록 제거속도가 큰 것으로 나타났으며 제거율은 0.48 min의 수력학적 체류시간에서 가장 높은 것으로 나타났다.

암모니아성 질소의 경우 다른 성분들과는 달리 0.28 min의 짧은 수력학적 체류시간에서도 제거속도가 감소하지 않고 오히려 더 증가하는 것은 stripping 효과에 의해 암모니아가 제거되는 기작에 의한 것으로 기·액 접촉기회의 증가에 의해 제거되는 암모니아의 양이 증가되는 것으로 생각된다.

Fig. 14는 유출수 농도와 제거속도의 암모니아성 질소/단백질 비의 변화를 나타낸 것으로서 수력학적 체류시간의 증가에 따라 유출수의 암모니아성 질소/단백질 농도비는 증가하였으며 제거속도의 비는 점차 감소하는 것으로 나타났다.

3-8. 용존산소 공급 효율 변화

Fig. 15는 수력학적 체류시간의 변화에 따른 유입수와 유출수의 용존 산소 농도 변화와 총괄 산소 전달 계수 $K_L a$ 를 나타낸 것이다. 총괄 산소 전달 계수는 어떤 기·액 접촉장치의 조건을 대표하는 수치로서 그 값이 클수록 산소의 전달효율이 높음을 나타낸다[16].

그림에서 보는 바와 같이 또한 수력학적 체류시간의 변화에 따른 총괄 산소 전달계수의 변화는 단백질 제거속도와 거의 유사한 형태로 변화하는 것으로 나타났다. 단백질 제거는 단백질 성분이 액측으로부터

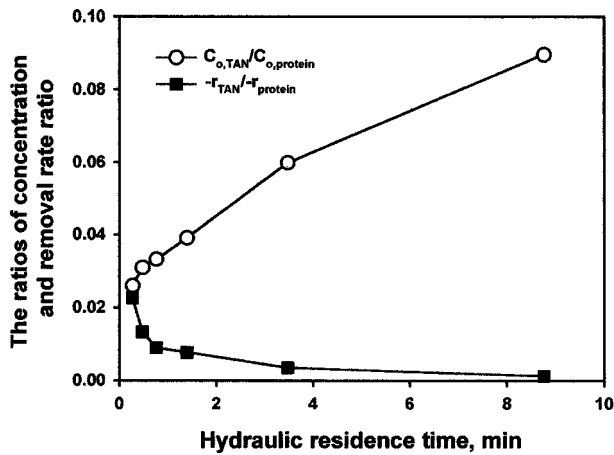


Fig. 14. The concentration ratio of TAN to protein of effluent(C_o) and the removal rate ratio of TAN to protein.

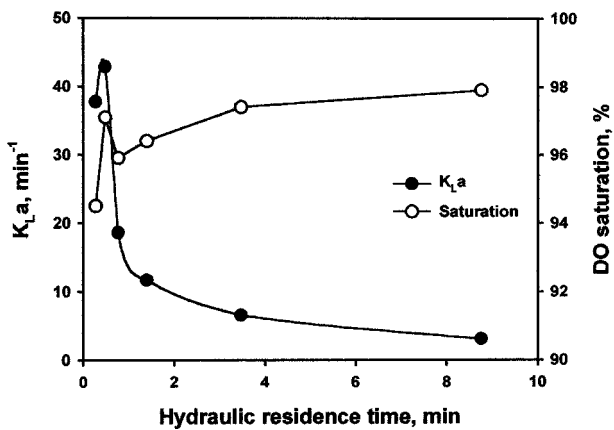


Fig. 15. The changes of overall oxygen mass transfer coefficient and saturation efficiency on initial protein concentration.

기·액 계면에 흡착되는 현상에 의해 이루어지고[4] 용존산소의 전달은 기포 내측에서 액측으로의 흡수에 의해 이루어지므로[17] 이 두 현상은 모두 기·액 계면의 면적의 증가에 의해 촉진될 수 있다. 따라서 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 기·액 계면이 증가하고 접촉이 효율적으로 수행되어, 단백질 제거속도가 증가함과 동시에 기포 속의 용존산소가 액측으로 더 많이 전달될 수 있는 것으로 생각된다. 이것으로 보아 높은 K_La 를 유지할 수 있는 운전 조건에서 기·액의 접촉이 효율적으로 수행되므로 단백질 및 부유 고형물의 제거 속도도 높게 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

유입수의 용존산소 포화도가 37.2-40.8% 정도로 매우 낮게 공급됨에도 유출수의 용존산소 포화도가 체류시간의 변화에 큰 영향을 받지 않고 94.5-97.9% 6.5-6.7 g/m^3 의 범위를 나타내는 것으로 보아 포말분리 장치는 단백질, 부유 고형물과 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 수력학적 체류시간의 변화에 따른 해수 속의 단백질, 부유 고형물, 화학적 산소 요구량, 탁도, 암모니아성 질소와 같은 양식 폐기물의 연속 제거운전을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 연속 포말분리 공정이 정상상태에 도달하는 시간에 대해 검토한 결과 단백질 성분은 수력학적 체류시간의 2.6배가 경과한 후 정상상태에 도달하였으며 전체적으로 정상상태에 도달하는데 소요된 시간은 수력학적 체류시간의 5.2배였다.

(2) 단백질 제거속도는 수력학적 체류시간이 0.28 min에서 0.48 min으로 증가함에 따라 7.17 $\text{g/m}^3 \cdot \text{min}$ 에서 10.25 $\text{g/m}^3 \cdot \text{min}$ 으로 증가하였으나 그 이상의 수력학적 체류시간부터는 제거속도가 감소하였다.

(3) 총 부유 고형물, 화학적 산소 요구량의 제거속도 및 제거율의 변화는 단백질 성분과 유사한 경향으로 나타났으며 최대 제거속도는 각각 51.8, 13.7 $\text{g/m}^3 \cdot \text{min}$ 이었다.

(4) 단백질, 총 부유 고형물, 탁도, 화학적 산소 요구량의 제거율은 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 증가하였다.

(5) 암모니아성 질소의 제거속도는 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 감소하였으며 제거율은 0.48 min의 수력학적 체류시간에서 가장 높은 것으로 나타났다.

(6) 수력학적 체류시간의 변화에 따른 총괄 산소 전달계수의 변화는 단백질 제거속도와 거의 유사한 형태로 변화하는 것으로 나타났다.

결론적으로 본 연구의 결과 해수 속의 양식 폐기물에 존재하는 단백질 성분을 이용하는 포말분리공정은 단백질, 부유 고형물과 같은 양식 폐기물을 제거함과 동시에 어류에 꼭 필요한 용존산소를 효율적으로 공급할 수 있는 폭기장치로도 병용될 수 있어 매우 효율적인 것으로 판단되었다.

감 사

본 연구는 해양수산개발원에서 시행한 99년 수산기술 개발 사업에 의해서 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

사용기호

- $-r$: removal rate [$\text{g/m}^3 \cdot \text{min}$ or NTU/min]
- r_{DO} : dissolved oxygen absorption rate [$\text{g/m}^3 \cdot \text{min}$]
- Q : flowrate [L/min]
- C : concentration [g/m^3 or NTU]
- K_La : 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

참고문헌

1. Rijn, J. V.: *Aquaculture*, **39**, 181(1996).
2. Chin, K. K., Ong, S. L. and Foo, S. C.: *Wat. Sci. Tech.*, **27**, 141(1993).
3. Suh, K. H. and Lee, M. G.: *J. Korean. Fish. Soc.*, **28**, 599(1995).
4. Chen, S.: *Aquacultural Engineering*, **13**, 183(1994).
5. Rubin, E.: in M. P. Freeman and J. Fitz Patrick(Eds.) "Foam fractionation - some recent studies. In Theory, Practice, and Process Principles

- ples for Physical Separations, Proceedings of the Engineering Foundation Conference,' Engineering Foundation, New York, USA(1981).
6. Lemlich, R.: in R. Lemlich(Ed.) "Adsorptive Bubble Separation Techniques: Principles of Foam Fractionation and Drainage," Academic Press, New York, 33(1972).
 7. Choi, Y. H., Lee, J. D. and Choi, S. J.: *HWAHAK KONGHAK*, **35**, 63(1997).
 8. Cho, D. and Chang, H. N.: *Korean J. Chem. Eng.*, **15**, 445(1998).
 9. 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).
 10. Weeks, N. C., Timmons, M. B. and Chen, S.: *Aquacultural Engineering*, **11**, 251(1992).
 11. Suh, K. H. and Lee, M. G.: *J. Korean. Fish. Soc.*, **30**, 239(1995).
 12. Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L. and Randall, R. J.: *J. Biotech.*, **193**, 265(1951).
 13. Bollag, D. M. and Edelstein, S. J.: "Protein Methods," Wiley-Liss, New York, 46(1991).
 14. APHA, AWWA and WEF: "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater," 18th ed., EPS Group(1992).
 15. Korean Institute of Industry and Technology: "Standard Methods for the Examination of Environmental Pollution,"(1990).
 16. Suh, K. H., Kim, B. J., Bong, S. H., Lim, J. H., Kim, Y. H. and Kim, S. K.: *HWAHAK KONGHAK*, **38**, 745(2000).
 17. Bailey, J. E. and Ollis, D. F.: "Biochemical Engineering Fundamentals," 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 464(1986).
 18. 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).
 19. Cho, D. and Cornee, M.: *Korean J. Chem. Eng.*, **16**, 371(1999).
 20. Brown, A. K., Kaul, A. and Varley, J.: *Biotechnology and Bioengineering*, **62**, 278(1999).
 21. 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).
 22. Chen, S.: Ph.D. Dissertation, Cornell University, Ithaca, New York(1991).
 23. Tchobanoglous, G. and Schroeder, E. D.: "Water Quality," Addison-Wesley Publishing Company, California, 56(1985).