

## 해수의 포말분리시 공기분산기 기공크기 영향

서근학\* · 김병진<sup>1</sup> · 이정훈 · 임준혁 · 이경범 · 김용하 · 조재윤<sup>2</sup>  
 부경대학교 화학공학과, <sup>1</sup>부산바이오기업지원센터, <sup>2</sup>양식학과

### Effect of Air Distributor Pore Size in Foam Separator of Sea Water

Kuen-Hack SUH\*, Byong-Jin KIM<sup>1</sup>, Jung-Hoon LEE, Jun-Heok LIM,  
 Gyeongbeom YI, Yong-Ha KIM and Jae Yoon JO<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup>Busan Bio-Industry Support Center, Busan Technopark, Busan 608-737, Korea

<sup>2</sup>Department of Aquaculture, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Effect of the air distributor pore size 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 was investigated by using foam separator. With the increase of pore size of air distributor, removal rates and efficiency of protein decreased. Removal rate by commercial air stone was in the range between the removal rates by G2 and G4 sintered glass discs. Within the range of pore size distributor from G1 to G4, the removal efficiency of protein were ranged from 21 to 42%. The changes of removal rates and efficiencies of TSS, COD and turbidity were similar to proteins. TAN was removed by stripping. The pore size of air distributor for a higher overall oxygen mass transfer coefficient and saturation efficiency provided the condition for higher protein removal rate. Also the foam separator could be used as an aerator.

Key words: Foam separation, Air distributor, Pore size, Aquacultural waste, Protein

#### 서 론

양어장이나 활어 수조 내에서 발생하는 오염물질 중 어류의 생장에 영향을 미치는 성분으로 단백질, 부유 고형물, 유기물, 암모니아 등이 있으며 그 중 단백질은 생물학적 분해에 의해 암모니아를 발생시키고 용존산소를 감소시키는 물질이며 (Chin et al., 1993) 부유 고형물은 어류의 아가미에 직접적인 충격을 미치는 오염물질로서 신속한 제거가 필요하다 (Chen et al., 1996).

포말 분리법은 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 (Clarke and Wilson, 1983; Rubin, 1981). 포말분리 공정에서 제거되는 물질들은 대개가 계면활성 물질들로 계면활성 물질의 친수기가 액측으로, 소수기가 기체측으로 배열되어 기·액 계면에 액분체보다 높은 농도 농축되는 성향을 가지고 있어, 목적성분을 고농도로 회수하는데 매우 효과적인 방법으로 최근에는 수용액 중의 염료 제거 (Choi et al., 1997)나 유류 오염물 분리 (Cho and Chang, 1998) 등에 응용되고 있다.

양어장 순환수 속의 단백질 성분은 소수기와 친수기를 함께 가지는 구조적 특성으로 인해 계면활성제 역할을 하여

별도의 계면활성제를 첨가하지 않아도 포말분리를 수행할 수 있도록 해주며 최근 양어장 순환수 중 어류에 유해한 성분의 처리 수단으로서 포말분리법이 많이 연구되어지고 있다 (Weeks et al., 1992; Chen, 1994; Suh and Lee, 1995; Suh et al., 1997) 현재까지 진행되어 온 양어장수에 대한 포말분리법은 대부분 담수에 국한되어 왔으며 우리나라에서 선호되는 해산어 양식이나 활어수조에 필요한 해수에 대한 연구는 전무한 상황이다.

포말분리장치에 공급되는 기포의 크기는 포말분리효율에 큰 영향을 미친다. 공급되는 기포의 크기는 포말분리 장치 하부에서 기포를 발생시키는 공기분산기의 기공크기와 공기 유속에 의해 결정된다. 공기분산기의 기공이 작을수록 발생하는 기포의 직경이 작아 동일한 공기 유속에 대해 보다 넓은 기·액 계면의 면적을 유도할 수 있다. 그러나 공기분산기의 기공을 작게 만들기 위해서는 보다 많은 비용이 필요하게 되므로 장치의 제작비용이 증가된다.

본 연구에서는 포말분리 공정을 해수에 적용할 경우 공기분산기의 기공크기가 포말 분리의 효율에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 이를 위해서 공기부상식 포말분리기를 제작하여 해수 속의 단백질, 부유 고형물, 화학적 산소 요구량, 탁도, 암모니아성 질소와 같은 양식 폐기물의 연속 제거운전을 수행하여 공기분산기의 기공크기의 변화에 따른 양식 폐기물의 제거 특성을 검토하였으며 포말분리기의 용존산소 공급 능력을 검토하였다.

\*Corresponding author: khsuh@mail.pknu.ac.kr

재료 및 방법

실험장치

본 연구의 포말분리 실험장치의 모식도는 Fig. 1과 같다. 포말분리 장치는 일반적으로 separation column, foam riser, foam collector로 구성된다. Separation column은 기포와 용존 유기물이 접촉하는 부분으로 유체가 차지하는 부분이며 foam riser tube는 단백질을 동반한 포말 (protein laden foam)이 폐수와 분리되고 젖은 거품 (wet foam)에서 건조한 거품 (dried foam)으로 건조되는 부분으로 액위부터 foam collector 까지의 부분이다. 마지막으로 foam collector는 riser tube로부터 유출된 포말을 수집하여 일부는 폐수 속으로 재순환시키고 일부는 밖으로 배출시키는 부분이다.

본 연구에서 제작하여 사용한 포말분리 장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 separation column과 foam riser가 일체형인 형태로 내경 5 cm 높이 50 cm의 acrylic pipe를 사용하여 제작하였으며 액본체의 용적은 1 L였다. 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 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.

실험재료 및 방법

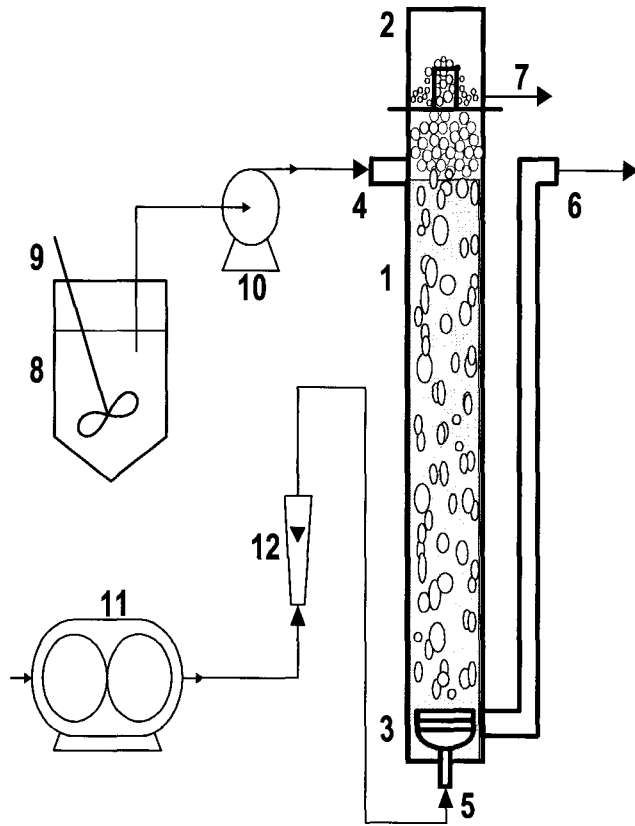
실험에 사용한 해수는 부산지역 횃집에 공급되는 것으로서 단백질 성분은 검출되지 않았다. 실험수는 실제 양식수와 유사하도록 하기 위하여 상기 해수에 부경대학교 부속 순환여과식 양어장에서 발생한 양식 폐기물을 희석시켜 실험에 사용하였다.

실험수의 수질은 Table 1과 같으며 온도와 pH는 각각  $26 \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $7.9 \pm 0.1$ 이었다.

실험은 90-150  $\mu\text{m}$ 의 기공크기를 가지는 G1 size, 40-90  $\mu\text{m}$ 의 기공크기를 가지는 G2 size, 3-15  $\mu\text{m}$ 의 기공크기를 가지는 G4 size의 유리 여과기와 기공크기를 알 수 없는 시판용 직경 3 cm의 산기석을 공기 분산기로 사용하여 수력학적 체류시간 2.05 min, 공탑 공기유속 0.85 cm/sec의 조건으로 행하면서 정상상태 도달 후 5분 간격으로 3회, 각 2개의 시료를 채취하여 분석한 후 평균값을 자료로 사용하였다.

분석방법

단백질의 농도 분석은 포말 농축물은 Lowry's method (Lowry et al., 1951)를 이용하였으며 해수는 UV<sub>280</sub> method (Bollag and Edelstein, 1991)를 이용하여 수행하였다. 총 부



- 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

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

Table 1. Water quality of feeding sea water

| Component              | Concentration          |
|------------------------|------------------------|
| Salinity               | 30.00‰                 |
| Protein                | 27.61 g/m <sup>3</sup> |
| Total Suspended Solid  | 57.33 g/m <sup>3</sup> |
| Turbidity              | 26.87 NTU              |
| Chemical Oxygen Demand | 10.08 g/m <sup>3</sup> |
| Total Ammonia Nitrogen | 0.72 g/m <sup>3</sup>  |

유고형물은 standard method (APHA et al., 1989)에 따라 GF/C여지로 여과한 후 염소이온이 검출되지 않을 때까지 증류수로 세척하여 분석하였다. 화학적 산소 요구량은 알칼리성 KMnO<sub>4</sub>법 (KIIT, 1990)에 의해 시료 채취 즉시 분석하였으며 탁도의 분석은 turbidimeter (HACH, 2100AN)를 이용하였다. 총 암모니아성 질소의 분석은 NH<sub>3</sub> ion selective

electrode (Orion Research Inc., 9512BN)가 부착된 Ion meter (Orion Research Inc., Model 720A)를 이용하여 이온선택성 전극법 (APHA, 1989)에 의해 분석하였다. 용존산소는 DO meter (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  $\mu\text{m}$ 의 aperture를 이용한 입도 분석기 (Coulter Electronics, Coulter Multisizer II)를 사용하여 측정하였다.

### 자료 계산

단백질, 부유 고형물, 화학적 산소 요구량, 탁도, 암모니아성 질소 등의 제거속도는 유입수와 유출수의 각 성분의 농도와 포말 발생량을 측정하여 계산하였다.

각 성분의 제거속도는 포말에 의해 제거되는 양과 동일하므로 다음과 같다.

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

여기서  $-r_a$ 는 각 성분의 제거속도 ( $\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{min}$  또는  $\text{NTU}/\text{min}$ ),  $Q_f$ 는 발생된 포말의 유량 ( $\text{m}^3/\text{min}$ ),  $C_{f,a}$ 는 각 성분의 포말층 농도 ( $\text{g}/\text{m}^3$  또는  $\text{NTU}$ )이며  $V$ 는 포말분리기의 액분체 용적 ( $\text{m}^3$ )이다.

포말에 의해 제거된 각 성분의 양은 물질 수지식에 의해 유입수와 유출수에 포함된 양의 차와 동일하므로 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$-r_a = \frac{C_{i,a} \cdot Q_i - C_{o,a} \cdot Q_o}{V} \quad (2)$$

여기서  $C_{i,a}$ 와  $C_{o,a}$ 는 각 성분의 유입수 및 유출수의 농도 ( $\text{g}/\text{m}^3$  또는  $\text{NTU}$ )이며  $Q_i$ 와  $Q_o$ 는 실험수의 유입수 및 유출수의 유량 ( $\text{m}^3/\text{min}$ )이다.

유출수의 유량은 유입수 유량과 포말 유량의 차와 같으므로 식 (2)는 식 (3)으로 정리된다.

$$-r_a = \frac{C_{i,a} \cdot Q_i - C_{o,a} \cdot (Q_i - Q_f)}{V} \quad (3)$$

포말분리기의 총괄 용존산소 전달 계수는 식 (6)을 이용하여 구하였다. 포말분리기 내에서 용존산소의 흡수속도는 다음과 같다 (Bailey and Ollis, 1986).

$$r_{DO} = K_L a (C_{s,DO} - C_{o,DO}) \quad (4)$$

여기서  $r_{DO}$ 는 용존산소 흡수속도 ( $\text{g}/\text{m}^3/\text{min}$ ),  $K_L a$ 는 총괄 용존산소 전달 계수 ( $\text{min}^{-1}$ ),  $C_{s,DO}$ 는 용존산소의 포화농도 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )이며  $C_{o,DO}$ 는 유출수의 용존산소 농도 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )이다.

포말분리기의 용존산소 흡수속도는 액체 체적당 증가되는 용존산소의 양과 동일하므로 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$r_{DO} = \frac{(C_{o,DO} - C_{i,DO}) \cdot Q_i}{V} \quad (5)$$

여기서  $C_{o,DO}$ 는 유출수의 용존산소 농도 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )이다. 식 (4)와 (5)를 등식으로 두고 총괄 용존산소 전달 계수로

정리하면 다음과 같다.

$$K_L a = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{(C_{o,DO} - C_{i,DO})}{(C_{s,DO} - C_{o,DO})} \quad (6)$$

여기서  $\tau$ 는  $V/Q_i$ 로서 수리학적 체류시간 (min)이다.

## 결과 및 고찰

### 단백질 제거속도 변화

단백질은 소수기와 친수기를 모두 가지고 있는 구조적 특징으로 인해 기·액 계면에 농축되게 되며 (Cho and Cornee, 1999) 별도의 계면활성제를 첨가하지 않고도 포말분리를 가능하게 해준다 (Suh and Lee, 1995). 해산어 양식장에서 단백질은 어류에 공급된 사료 중 어류가 섭취하지 못한 과잉의 사료나 어분에 포함되어 있는 어류가 소화하지 못한 단백질이 순환수에 용출되어 발생한다. 활어수조의 경우에는 별도의 사료는 공급하지 않으나 수조에 수용된 어류에서 배출되는 어분과 어체 표면의 점액질에 의해 발생한다. 단백질 성분은 단백질의 질소 성분은 미생물에 의해 어류에 대한 독성이 높은 암모니아로 분해되며 (Wheaton et al., 1996) 산소 요구량을 증가시켜 신속한 제거가 요구된다.

Fig. 2는 공기분산기로 G4, G2, G1 규격의 유리여과기를 사용한 것과 시중에서 시판되고 있는 직경 3 cm의 산기석을 사용하여 나타난 단백질의 제거속도 및 제거율을 비교하여 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기공의 크기가 가장 작은 G4의 경우  $5.62 \text{ g}/\text{m}^3 \cdot \text{min}$ 의 단백질 제거속도와 41.6%의 단백질 제거율을 나타내어 가장 높은 값을 나타내었으며 공기분산기의 기공크기가 증가함에 반비례하여 단백질의 제거속도와 제거율은 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 공기분산기가 G4에서 G2로 변화할 경우에 비해 G2에서 G1로 변화할 경우의 단백질 제거속도와 제거율의 감소폭은 매우 적은 것으로 나타났다. 산기석의 경우  $4.1 \text{ g}/\text{m}^3 \cdot \text{min}$ , 30.7%의 제거속도와 제거율로 G4보다는 떨어지나 G2보다는 높은 효율을 보였다.

공기분산기의 기공크기가 증가함에 따라 제거속도와 제거율이 동반하여 감소하는 것은 공기분산기의 기공크기가 증가함에 따라 분산기에서 발생하는 기포의 직경이 커지게 되는 현상 (Bailey and Ollis, 1986)에 의한 것으로 동일한 기체 유량에 대해 발생하는 기·액 계면 면적이 감소하여 흡착되는 단백질의 양이 감소하기 때문으로 생각된다. 공기분산기가 G2에서 G1으로 변화할 경우 단백질 제거속도와 제거율의 감소되는 비율이 작아지는 것은 공기분산기의 기공크기가 일정 크기 이상으로 증가하면 공기분산기에서 발생하는 기포의 크기가 크게 다르지 않기 때문으로 사료된다.

Fig. 3은 공기분산기 종류의 변화에 따른 포말 생성속도와 유입수의 단백질 농도와 포말의 단백질 농도의 비인 농축비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 것과 같이 포말 생성속도는 공기분산기의 기공크기가 증가함에 따라 감

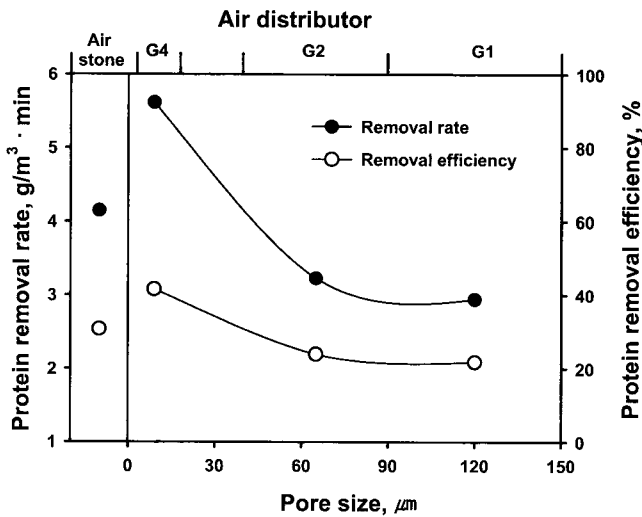


Fig. 2. The changes of protein removal rate and removal efficiency on the pore size of air distributor.

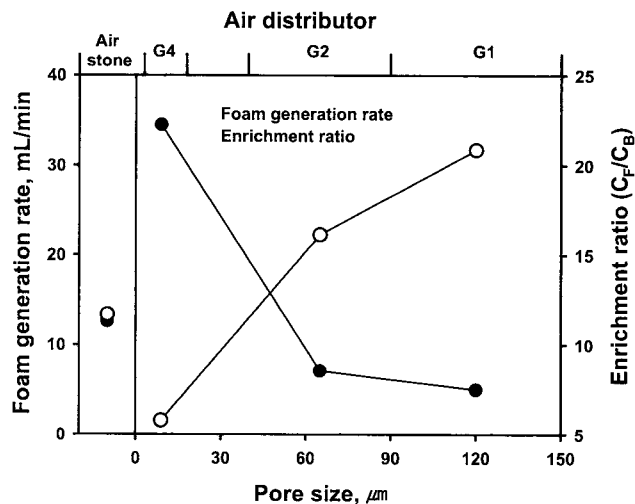


Fig. 3. The changes of foam generation rate and enrichment ratio on the pore size of air distributor.

소하는 것으로 나타났으며 포말 생성속도의 감소폭은 공기 분산기의 기공크기가 클수록 더 커지는 것으로 나타났다. 그러나 농축비는 공기분산기의 기공크기가 증가함에 따라 오히려 증가되는 것으로 나타났다.

공기분산기의 기공크기가 작을 수록 포말 생성 속도가 증가하는 것은 이 경우 발생하는 기포의 크기가 작아 동일한 기체 유량에 대해 기·액 계면이 증가하는 현상에 기인한 것으로 생각된다. 기공크기의 증가에 따라 농축비가 증가되는 것은 포말분리기 내에 존재하는 단백질의 양이 일정함에도 발생하는 기·액 계면의 면적이 감소함에 따라 동일 기·액 면적에 더 많은 단백질이 흡착되기 때문 (Urizee and Narsimhan, 1995)으로 생각된다.

총 부유 고형물 제거속도 변화

해수에서 어류에 의해 발생하는 고형물 중 미섭취 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 (Chen et al., 1996). 고형물의 농도가 높을 경우 생물학적 질산화 장치에 biofouling을 유발하여 암모니아 제거 속도를 감소시킬 수도 있고 (Wheaton et al., 1996), 고형물의 대부분은 유기성 고형물로 단백질 성분을 함유하고 있어 즉시 제거하지 않고 방치할 경우 미생물에 의해 어류에 유해한 암모니아를 발생시키므로 (Chen et al., 1996) 양식장 순환수 중의 고형물의 제거는 매우 중요하다.

Fig. 4는 공기분산기의 기공크기가 총 부유 고형물의 제거 속도 및 제거율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 공기분산기의 기공크기의 변화에 따른 제거 속도의 변화는 단백질 제거속도의 변화와 거의 동일한 경향을 나타내었다. 공기분산기가 G4일 경우 총 부유 고형물의 제거속도와 제거율은 18.86 g/m³·min, 67.3%로 가장 높은 것으로 나타났다. 총 부유 고형물의 제거속도가 단백질 제거속도와 유사하게 기공크기의 영향을 받는 것은 포말분리를 유발하는 성분이 단백질이고 부유 고형물은 기·액 계면에 흡착된 단백질에 이온적으로 흡착되어 제거되는 기작 (Chen, 1991)에 연유한 현상에 의해 기·액 계면에 흡착되는 단백질의 증가에 비례하여 제거되는 고형물이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 5는 공기분산기의 기공크기의 변화에 따른 유출수 농도와 제거속도의 총 부유 고형물/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유출수의 총 부유 고형물/단백질 농도비는 1.16-1.38의 범위에서 공기분산기의 기공크기의 증가에 따라 약간 상승하는 것으로 나타났으며 제거 속도의 비는 G4의 경우 3.36이었으나 그 외의 공기분산기에

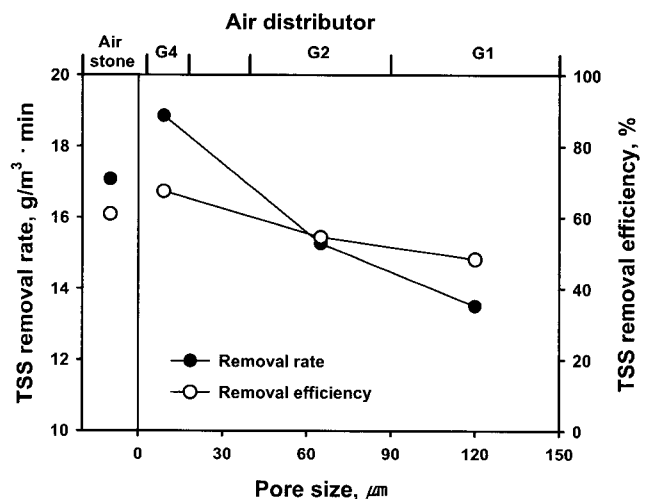


Fig. 4. The changes of TSS removal rate and removal efficiency on air distributor pore size.

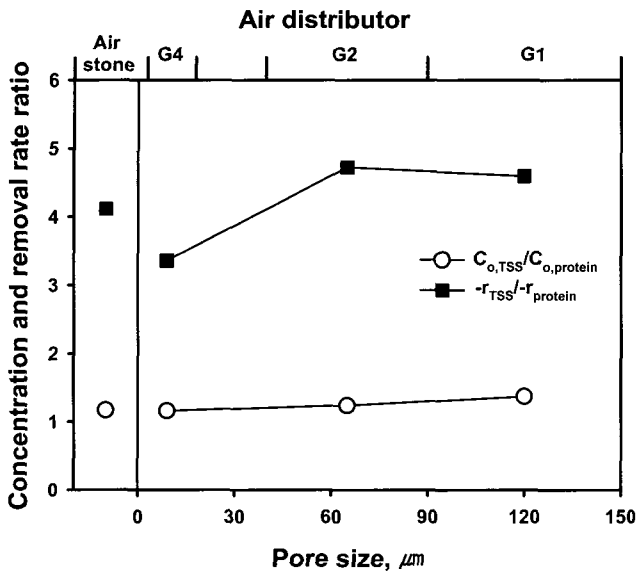


Fig. 5. The concentration ratio of TSS to protein of effluent (Co) and the removal rate ratio of TSS to protein.

서는 4.60-4.73으로 비교적 높게 나타났다.

유입수의 총 부유 고형물/단백질 농도비는 2.08이었으며 이에 비해 유출수의 농도비가 더 낮게 나타나는 것으로 보아 가.액 계면에 흡착 제거되는 단백질의 단위 질량당 총 부유 고형물의 양이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 공기분산기의 기공크기가 작을 때 총 부유 고형물/단백질 제거속도의 비가 작게 나타나는 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.

탁도 제거속도 변화

탁도는 물을 흐리게 하는 성분을 총칭하는 것으로 1 μm 이하의 부유 고형물과 색소성 용존 물질도 모두 포함하며 물의 투명도를 측정하는 척도이며 (Tchobanoglous and Schroeder, 1985) 양어장에서는 60 g/m<sup>3</sup> 이하의 농도를 권장하고 있다 (Nightingale, 1976).

Fig. 6과 7은 각각 유입 단백질 농도의 증가에 따른 탁도 제거속도 및 제거율의 변화와 유입수와 유출수의 농도, 제거속도에 대한 탁도/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 공기분산기의 기공크기의 변화에 따른 탁도의 제거율 및 제거속도의 변화는 총 부유 고형물의 제거속도 및 제거율의 변화와 거의 유사한 형태로 변화하였으며 공기분산기가 G4일 경우 총 부유 고형물의 제거속도와 제거율은 7.4 NTU/min, 66.4%로 가장 높게 나타났다. 이는 포말분리기를 이용할 경우 2.05 분의 짧은 수력학적 체류시간에도 해수중의 탁도를 1분에 7.4 NTU

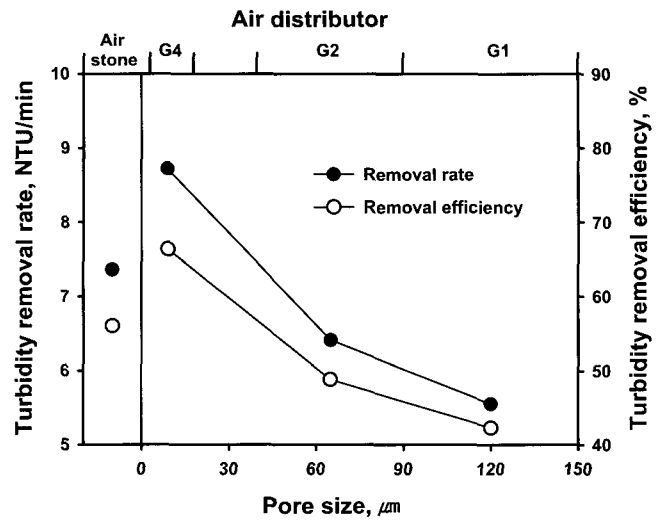


Fig. 6. The changes of turbidity removal rate and removal efficiency on air distributor pore size.

감소시킬 수 있음을 의미한다.

유입수와 유출수의 탁도/단백질 농도비와 제거속도 비는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 총 부유 고형물에서 나타난 결과와 거의 유사한 형태로 나타났다. 이러한 현상은 탁도를 유발하는 물질 중 상당부분을 총 부유 고형물이 차지하므로 (Tchobanoglous and Schroeder, 1985), 탁도 유발 물질 중 많은 분율을 차지하는 총 부유 고형물의 제거와 유사한 양상으로 탁도의 제거가 이루어지는 것으로 생각된다. 또 이것으로 보아 해산어 양식장의 용수에 대해서 농도 분석에 많은 시간이 소요되는 총 부유 물질에 대해 분석시간이 짧은 방법이 간단한 탁도가 간접 지표로 사용될 수 있을 것으

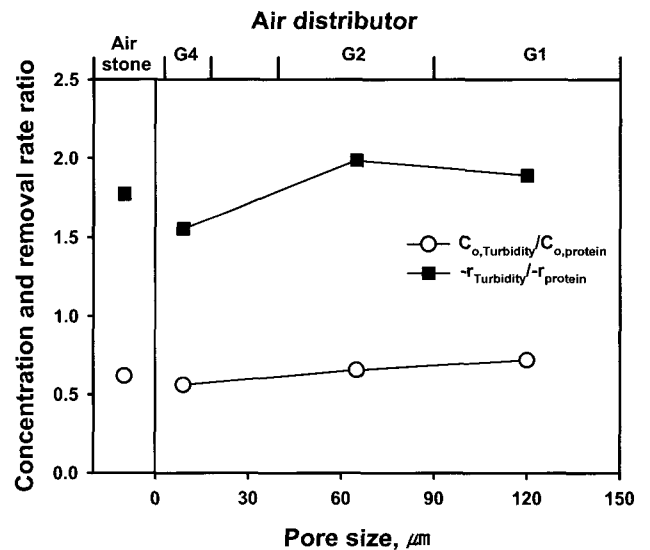


Fig. 7. The concentration ratio of turbidity to protein of effluent (Co) and the removal rate ratio of turbidity to protein.

로 생각된다.

**입도 분포 변화**

Fig. 8은 유입수와 각 공기분산기 종류의 변화에 따른 실험에서 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  $\mu\text{m}$ 의 범위에서 분포하였으며 2.632  $\mu\text{m}$ 인 입자가 차지하는 분율이 가장 큰 것으로 나타났다.

공기분산기의 기공크기 변화에 따른 입자의 제거는 앞서의 총 부유 고형물이나 탁도의 제거에서 나타난 결과와 같이 기공크기가 작을수록 더 많은 입자를 제거함을 보였다. 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. 9는 공기분산기의 기공크기의 변화에 따른 입자의 총

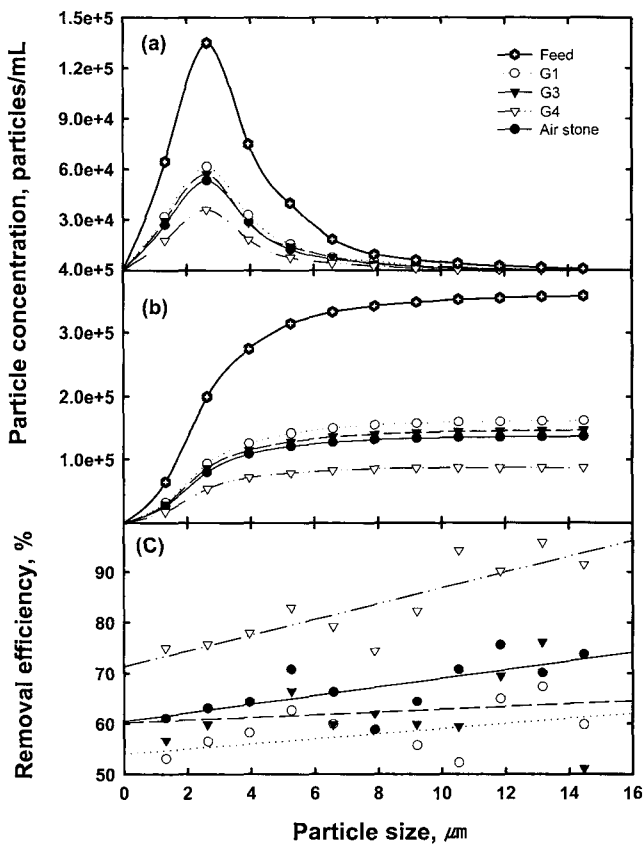


Fig. 8. The changes of the differential particle distributions (a), the cumulative particle distributions (b) and the particle removal efficiency (c) on air distributor pore size.

제거율과 Fig. 9의 입도 분포 중 가장 큰 분율을 차지하는 2.632  $\mu\text{m}$  입자와 제거율을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 공기분산기가 G4일 경우 75% 이상의 입자 제거율을 보였으나 그 이상의 기공크기에 대해서는 10% 이상 급격히 하락하는 것으로 나타났다. 또 전체 범위에 있어 총 입자의 제거율과 2.632  $\mu\text{m}$  입자와 제거율은 2% 이내의 적은 차이를 나타내어 2.632  $\mu\text{m}$  입자를 입자의 제거특성에 있어 전체입자에 대한 대표직경으로 사용할 수 있을 것으로 사료되었다.

**화학적 산소 요구량 제거속도 변화**

미섭취 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 유발하기도 한다 (이, 1996).

용존 유기물 농도의 지표로서 화학적 산소 요구량을 측정하여 공기분산기의 기공크기의 변화에 따른 포말 분리기의 제거 속도 및 제거율을 Fig. 10에 도시하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 기공크기 증가함에 따른 화학적 산소 요구량의 제거속도와 제거율의 변화는 앞서 나타난 단백질이나 부유 고형물의 제거 속도와 같이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 단백질이 화학적 산소요구량을 증가시키는 유기물이고 어류에 의해 발생하는 부유 고형물의 상당 부분이 유기성 고형물인 것 (Chen et al., 1996)에 의한 현상으로 생각된다.

Fig. 11은 공기분산기의 기공크기의 변화에 따른 유출수의 농도와 제거속도의 화학적 산소 요구량/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유출수의 화학적 산소 요구량/단백질 농도비와 제거속도의 비는 공기분산기의 기공크기가 증가할수록 감소되었다. 유입수의 화학적 산소 요구

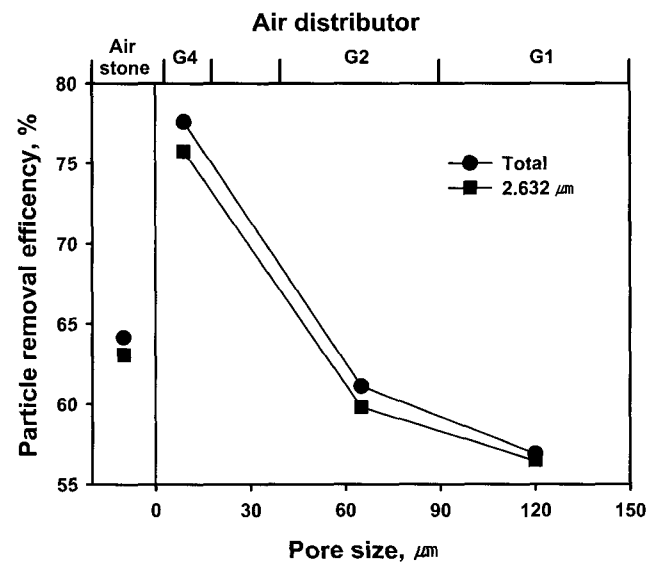


Fig. 9. The changes of particle removal efficiency on air distributor pore size.

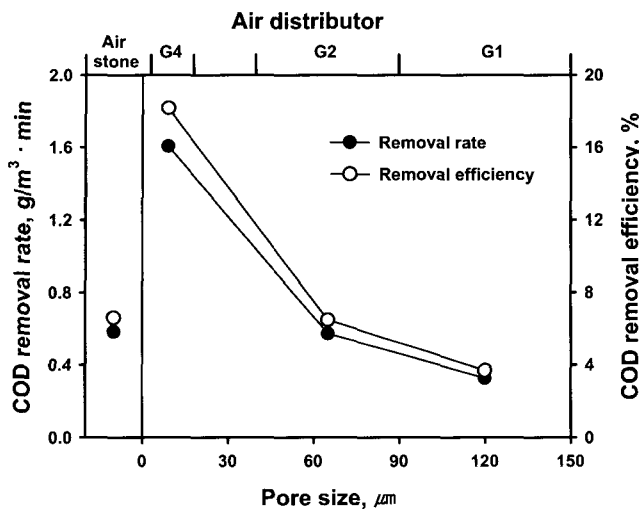


Fig. 10. The changes of COD removal rate and removal efficiency on air distributor pore size.

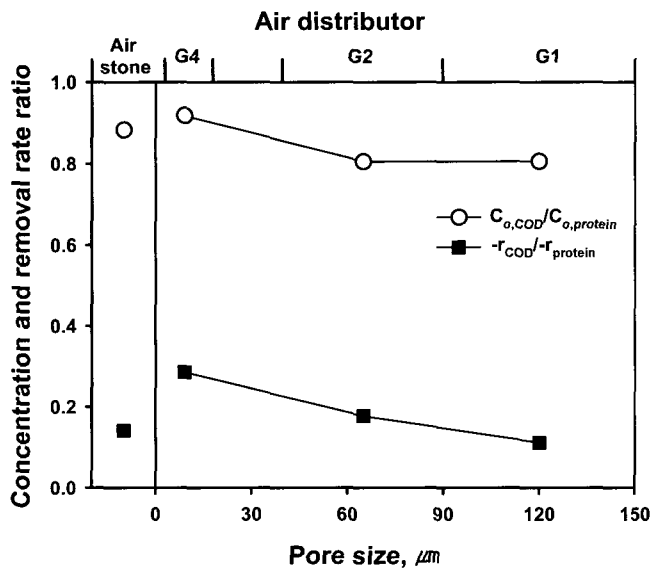


Fig. 11. The concentration ratio of COD to protein of effluent ( $C_o$ ) and the removal rate ratio of COD to protein.

량/단백질 농도비가 0.66인 것과 비교할 때 유출수의 농도비는 0.81-0.92로 더 높아져 유기물의 제거도 효율적으로 수행됨을 알 수 있었다. 화학적 산소 요구량/단백질의 제거속도 비가 공기분산기의 기공크기가 작을수록 더 큰 것은 단백질에 비해 흡착력이 약하여 흡착되지 못한 용존 유기물이 기·액 계면의 증가에 따라 단백질에 점유되지 않은 계면의 증가로 보다 많이 흡착되었기 때문으로 사료된다.

**암모니아성 질소 제거속도 변화**

공기분산기의 기공크기의 변화에 따른 포말 분리기의 암모니아성 질소의 제거 속도 및 제거율의 변화를 Fig. 12에

나타내었다. Fig. 12에서 보여지는 바와 같이 암모니아성 질소의 제거속도와 제거율도 공기분산기의 기공크기가 작을수록 더 높은 것으로 나타났다.

암모니아성 질소가 포말분리에 의해 제거되는 것은 stripping 효과와 이온적 흡착에 의해 수행된다. 수중의 암모니아는 비이온성 암모니아 ( $NH_3$ )와 이온성 암모니아 ( $NH_4^+$ ) 형태로 평형을 이루고 있으며 온도와 pH에 따라 존재 비율이 달라진다. 포말분리에 의한 암모니아의 제거는 비이온성 암모니아의 경우 stripping 효과에 의해 제거되고 (Tchobanoglous and Schroeder, 1985) 이온성 암모니아의 경우 기·액 계면에 흡착된 계면활성 물질 중 음이온성 물질에 정전기적으로 부착되는 기작 (Chen, 1991)에 의해 제거된다. 정전기적 부착에 의한 암모니아 제거는 폐수 내 음이온의 증가가 동반되어야 제거속도가 증가하고, stripping에 의한 암모니아 제거는 기·액 계면의 면적에 비례하게 된다 (Tchobanoglous and Schroeder, 1985). 본 연구에서 암모니아 제거가 단백질이나 다른 부유 고형물의 제거와 유사한 형태를 보이는 것은 기·액 계면의 면적에 의존하는 결과이며 이것으로 보아 stripping 효과에 의한 암모니아가 제거되는 것으로 생각된다.

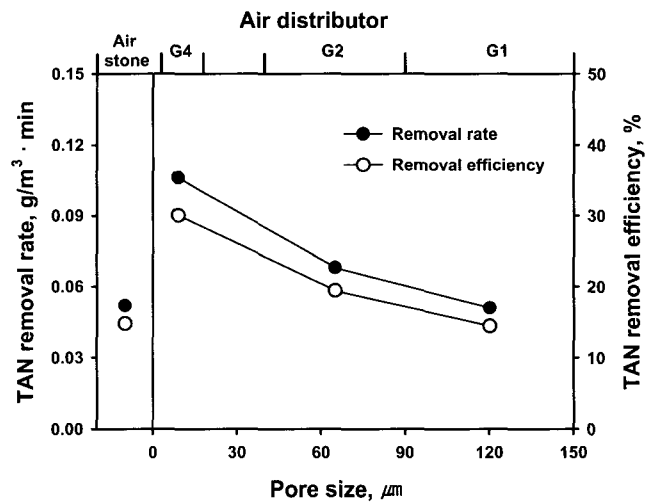


Fig. 12. The changes of TAN removal rate and removal efficiency on air distributor pore size.

Fig. 13은 유출수 농도와 제거속도의 암모니아성 질소/단백질 비의 변화를 나타낸 것으로서 유출수의 암모니아성 질소/단백질 농도비는 0.028-0.032로서 유입수가 0.026인 것에 비해 큰 차이가 없었으며 공기분산기의 기공크기의 변화에 따른 변화도 거의 없는 것으로 나타났으며 제거속도의 비도 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것으로 보아 암모니아의 제거는 단백질 제거와 비례하여 이루어지는 것으로 생각된다.

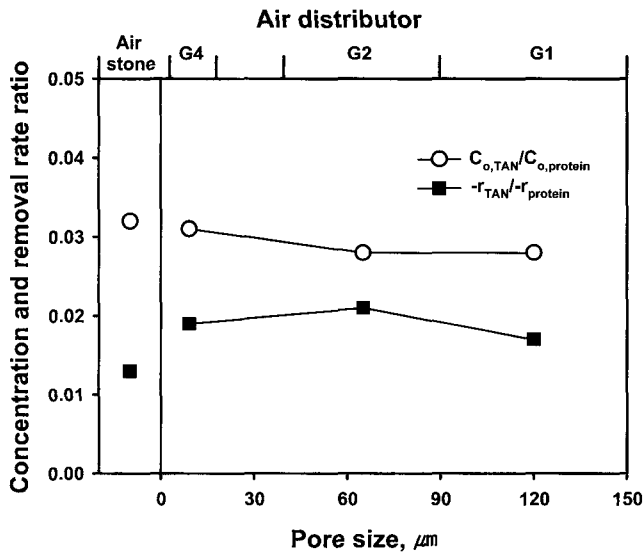


Fig. 13. The concentration ratio of TAN to protein of effluent ( $C_o$ ) and the removal rate ratio of TAN to protein.

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 (Nightingale, 1976). 따라서 해산어에 대한 용존산소의 공급은 매우 중요하며 포말 분리 장치는 용존산소 공급에도 높은 효율을 나타낸다 (Suh and Lee, 1995; Chen, 1994).

Fig. 14는 공기분산기의 기공크기의 변화에 따른 유입수와 유출수의 용존산소 농도 변화와 총괄 산소 전달 계수,  $K_La$ 를 나타낸 것이다. 총괄 산소 전달 계수는 어떤 기·액 접촉장치의 조건을 대표하는 수치로서 그 값이 클수록 산소의 전달 효율이 높음을 나타낸다 (Bailey and Ollis, 1986).

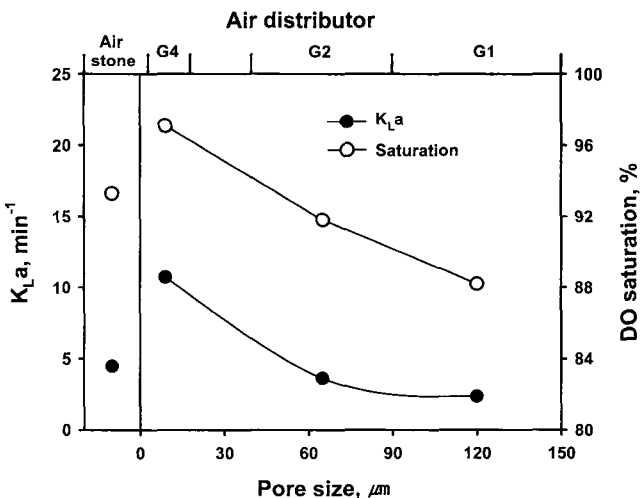


Fig. 14. The changes of overall oxygen mass transfer coefficient and saturation efficiency on air distributor pore size.

그림에서 보는 바와 같이 공기분산기의 기공크기의 증가에 따른 총괄 산소 전달계수의 변화는 단백질 제거속도, 암모니아 제거속도 등과 거의 유사한 형태로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 공기분산기의 기공크기가 작을수록 기·액 계면의 면적이 증가하여 기포 속의 용존산소가 액측으로 더 많이 흡수되어 나타나는 현상 (Bailey and Ollis, 1986)으로 생각된다. 또 이것으로 보아 포말분리기의 운전 효율은 기·액 계면의 효율적인 발생에 가장 크게 의존하며 오염물 제거가 효율적으로 수행되는 조건은 용존산소 전달용존산소의 흡수효율이 높은 조건과 유사하다고 생각된다.

본 연구의 결과 2.05 min의 짧은 수력학적 체류시간에서 유입수의 용존산소 포화도가 31.2-33.5% 정도로 낮게 공급됨에도 불구하고 유출수가 88.2-97.1%의 높은 용존산소 포화도를 나타내는 것으로 보아 포말분리 장치는 단백질, 부유고형물과 같은 양식 폐기물을 제거함과 동시에 어류에 꼭 필요한 용존산소를 효율적으로 공급할 수 있는 폭기장치로도 병용될 수 있음을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2002-000-00042-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

APHA, AWWA and WPCF. 1989. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th ed. American Public Health Association, 1532 pp.

Bailey, J.E. and D.F. Ollis, 1986. Biochemical Engineering Fundamentals, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 464 pp.

Bollag, D.M. and S.J. Edelman. 1991. Protein Methods, Wiley-Liss, New York, 46 pp.

Chen, S. 1991. Theoretical and Experimental Investigation of Foam Separation Applied to Aquaculture, Ph. D. Thesis, Cornell Univ., USA., 231 pp.

Chen, S. 1994. Modeling surfactant removal in foam fraction I. Aquacul. Eng., 13, 163-181.

Chen, S., D. Stechy and R.F. Malone. 1996. Suspended solids control in recirculating aquaculture systems, edited by Timmons, M.B. and T.M. Losordo Aquaculture water reuse system: Engineering design and management, Elsevier, Amsterdam, pp. 61-100.

Chin, K.K., S.L. Ong and S.C. Foo. 1993. A water treatment and recycling system for intensive fish farming, Wat. Sci. Tech., 27, 141-148.

Cho, D. and M. Cornee. 1999. Adsorptive behavior of a globular protein with a monoglyceride monolayer spread on the aqueous surface. Kor. J. Chem. Eng., 16(3), 371-376.

Cho, D. and H.N. Chang. 1998. Separation of oil contaminants



- by surfactantaided foam fractionation, Kor. J. Chem. Eng., 15(4), 445-448.
- Choi, Y.H., J.D. Lee and S.J. Choi. 1997. Removal of Direct blue from Aquwous Solution by the foam separation techniques of ion and adsorbing colloid flotation, Hwahak Konghak, 35(1), 63-68. (in Korean)
- Clarke, A.N. and D.J. Wilson. 1983. *Foam Flotation Theory and Applications*. Marcel Dekker, New York, 418 pp.
- KIIT (Korean Institute of Industry and Technology). 1990. *Standard Methods for the Examination of Environmental Pollution*, 250 pp. (in Korean).
- Lowry, O.H., N.J. Rosebrough, A.L. Farr and R.J. Randall. 1951. Protein measurement with folin phenol reagent. *J. Biotech.*, 193, 265-275.
- Nightingale, J.W. 1976. Technical Report of Karmer, Chin and Mayo Inc., Seattle, Washington
- Rijn, J.V. 1996. The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture, *Aquaculture*, 139, 181-201.
- Rubin, E. 1981. Foam Fractionation - some recent studies. In: *Theory, Practice, and Process Principles for Physical Separations*. Engineering Foundation, New York, pp. 157-180.
- 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. (in Korean)
- Suh, K.H., M.G. Lee, M.S. Lee, B.J. Kim, E.J. Kim and M.C. Cho. 1997. Treatment of aquacultural recirculating water by foam separation - II. Characteristics of solid removal, *J. Kor. Fish. Soc.*, 30(3), 334-339. (in Korean)
- Tchobanoglous, G. and E.D. Schroeder. 1985. *Water Quality*, Addison-Wesley Publishing Company, California, pp. 56-57.
- Urizee, F. and G. Narsimhan. 1995. A model for continuous foam concentration of proteins: Effect of kinetics of adsorption of proteins and coalescence of foam, *Sep. Sci. and Tech.*, 30(6), 847-881.
- Weeks, N.C., M.B. Timmons and S. Chen. 1992. Feasibility of using foam fractionation for the removal of dissolved and suspended solids from fish culture water. *Aquacul. Eng.*, 11, 251-265.
- Wheaton, F.W., J.N. Hochheimer, G.E. Kaiser, M.J. Klones, G.S. Libey and C.C. Easter. 1996. Nitrification filter principle. In: *Aquaculture water reuse system : Engineering design and management*, Elsevier, Amsterdam, pp. 101-126

---

2002년 11월 30일 접수  
2003년 6월 7일 수리