

향류 공기 구동식, 고속 폭기식 및 벤튜리식 포말분리기에 의한 양어장수의 단백질 및 부유 고형물의 제거 특성

서근학 · 김병진 · 김성구*
부경대학교 화학공학과, *생물공학과

Characteristics of Proteins and Total Suspended Solids Removal by Counter Current Air Driven Type, High Speed Aeration Type and Venturi Type Foam Separator in Aquacultural Water

Kuen-Hack SUH, Byong-Jin KIM and Sung-Koo KIM*

*Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea
khsuh@mail.pknu.ac.kr, biorx@mail.pknu.ac.kr*

**Department of Biotechnology and Bioengineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea
skkim@dolphin.pknu.ac.kr*

Experimental investigations on the removal of protein, total suspended solids and turbidity from aquacultural water were carried out by using three types of foam separator: counter current air driven type foam separator (CCADFS), high speed aeration type foam separator (HSAFS) and venturi type foam separator (VFS). The decrease of flow rate by CCADFS, HSAFS and VFS were 0.4, 66.1, 77.2 %, respectively. Protein removal rates by three types foam separator were decreased with the increased hydraulic residence time (HRT). Below 0.32 minute and 0.21 minute of hydraulic residence times, protein removal rate of HSAFS and VFS was higher than that of CCADFS, respectively. Protein removal rate of VFS was lower than that of HSAFS at any HRT. As increasing the HRT, protein removal efficiency of CCADFS was increased, but that of HSAFS and VFS were decreased. The changes of removal rates and efficiencies of total suspended solid and turbidity were similar to proteins.

Key words: Foam separator, Counter current air driven, High speed aeration, Venturi, Protein, Total suspended solids, Turbidity, Hydraulic residence time

서 론

양어장에서 미세취 사료 및 어류의 배설물에 의해 주로 발생하는 단백질 성분과 유기성 고형물은 어류에 피해를 줄 수 있다. 단백질 성분은 미생물에 의해 분해되면서 어류에 유해한 암모니아 및 아질산으로 전환되므로 미생물에 의해 분해되기 전에 신속하고 효과적으로 제거하면 어류에 유해한 성분의 발생을 억제할 수 있다. 부유성 고형물은 어체의 아가미를 손상시키며 질병에 대한 저항력을 약화시킬 수 있기 때문에 (Wickins, 1980; Stickney, 1979) 어류 생산에 직접적인 영향을 끼칠 수 있다 (Albaster and Lloyd, 1982). 또한 부유성 고형물은 질산화 반응에 사용되는 생물학적 처리장치를 막하게 할 수 있으며, 고형물 부하가 높아지면 질산화 공정의 암모니아 제거 속도를 감소시킬 수도 있다 (Muir, 1982).

일반적으로 수처리시 고형물의 제거 효율은 입자의 크기가 작아질 수록 감소하게 되는데, 이러한 이유로 인하여 순환식 여과시스템에서는 미세한 비침강성 고형물의 처리가 많은 문제를 야기하는 원인이 되고 있다. 순환 양식장에서 고형물을 제거하는 방법의 하나로써 침강법이나 세망스크린 등이 이용되고 있으나 침강법에 의해서 제거되는 입자는 100 μm 이상의 큰 입자들로써 50 μm 미만의 미세한 고형물은 침강에 의해서는 잘 제거되지 않으며, 생물학적 처리장치를 통과한 후에도 남게 된다 (Wang, 1988). 또한 세망 스크린이나 입상여제를 이용하는 방법은 장비 설치에 필요한 부지는 비교적 적게 소요되지만 수두 손실이 커지게 된다

(Chen et al. 1996).

분산된 공기 기포에 의해 고형물을 제거하는 포말분리법은 에너지 소비가 낮고 제거 효율이 높고 타공정에 비해 운전 및 유지비가 저렴하여 양어장 및 활어수조에 적용하기에 적합한 공정이다 (Chen, 1994; Suh et al., 1997). 포말분리에 의해 제거되는 고체는 주로 직경이 30 μm 이하인 미세 입자와 용존 고형물로서 포말 분리법은 미세 입자들을 제거하는데 매우 효과적이며 (Chen, 1991), 적은 비용으로 효율적인 운전을 할 수 있고 연속 운전이 가능하며 역세척이 필요 없다는 장점을 지니고 있다 (Clarke and Wilson, 1983; Rubin, 1981).

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, Dwivedy (1975)는 포말 선별법에 의해 굴양식장 폐수에서 부유성 유기물과 용존성 유기물을 제거할 수 있었다고 하였다.

현재 사용되고 있는 포말분리장치는 공기의 공급방식과 유체와 공기의 접촉방향에 따라 향류 공기구동식 (counter current air driven type, CCAD), 고속 폭기식 (high speed aeration type, HSA), 벤튜리식 (venturi type) 등이 있으나 현재까지 우리나라에서 연구되고 있는 포말분리 장치는 공기구동 방식이 전부이다.

공기구동식 포말분리기는 액체는 상부에서 하부로 유입시키고 공기는 공기분산기를 통해 액체 속으로 하부에서 상부로 공급하여

접촉시키는 방식으로 가장 많이 연구되고 광범위하게 사용되고 있는 형태이다.

고속 폭기식 포말분리기는 순환수를 *ejector*에 유입시켜 공기를 흡입, 삽입관을 통해 포말분리기의 하부로 분사시켜 생성되는 기포를 이용하는 방식으로 별도의 공기 펌프가 필요 없으며 순환수의 유량이 많은 경우 더 많은 기포가 생성되어 높은 단백질 제거 효율과 용존산소 공급 효율을 기대할 수 있다.

벤트리식 포말분리기는 액체 유입구에 모세관 노즐이 설치된 *venturi*를 설치하여 순환수 유입시 발생하는 제트기류에 의해 공기를 흡입, 포말분리관 내에 기포를 생성시켜 단백질을 제거하는 방식으로 별도의 공기 펌프를 필요로 하지 않으면서도 높은 단백질 제거효율과 용존산소 폭기 효율을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 고속 폭기식 및 벤트리식 포말분리 장치와 기존에 연구되어온 향류 공기구동식의 포말분리기와의 특성 비교를 위하여 세가지 형태의 포말분리 장치를 동일한 용량으로 제작, 운전하여 양어장수에 함유된 단백질과 부유 고형물을 제거 특성을 알아보자 하였다.

재료 및 방법

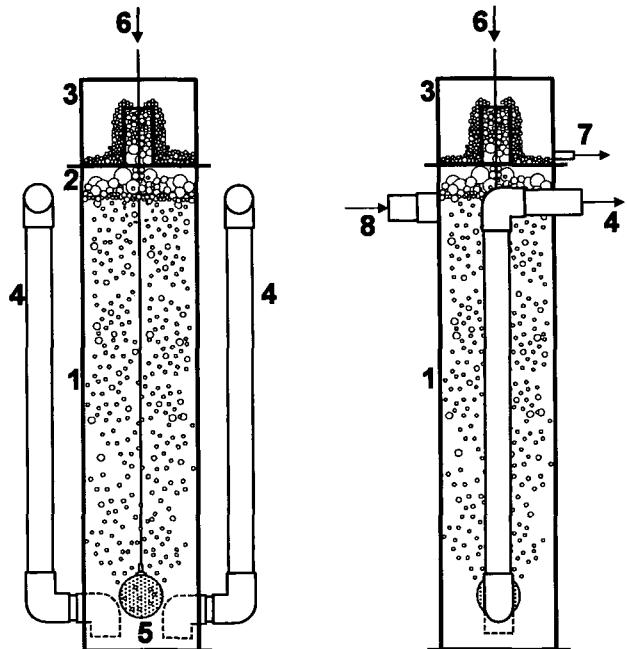
향류 공기 구동식 포말분리기

포말분리 장치는 일반적으로 separation column, foam riser tube, collection cup으로 구성된다. Separation column은 폐수와 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 collection cup 까지의 부분이다. 마지막으로 collection cup은 riser tube로부터 유출된 포말을 수집하여 일부는 폐수 속으로 재순환시키고 일부는 밖으로 배출시키는 부분이다.

본 연구에서 사용한 향류 공기 구동식 포말분리 장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같은 형태로 separation column과 foam riser tube는 일체형으로 내경 10 cm 높이 50 cm의 아크릴 파이프를 사용하여 제작하였으며 액체 용적은 3 L 였다. Collection cup은 내경 10 cm, 높이 10 cm의 아크릴 파이프에 내경 2 cm의 삽입관을 통해 포말이 유입되도록 제작하였고 유입관과 유출관은 1 inch PVC pipe를 사용하였다. 기포를 발생시키는 공기분산기는 직경이 3 cm인 air stone을 사용하였으며 공기는 air pump를 이용하여 5 L/min의 유량으로 주입하였다.

고속 폭기식 포말분리기

본 연구에서 사용한 고속 폭기식 포말분리기는 Fig. 2와 같은 형태로 공기구동식 포말분리기와 동일한 규격으로 제작하였다. 액체의 유입과 동시에 공기를 흡입할 수 있도록 포말분리기 상부에 *ejector*를 설치하였으며 흡입된 공기와 양어장수가 포말 분리기 하부까지 내려 갈 수 있도록 내경 2 cm의 삽입관을 설치하였다. 포말분리기 하부에는 삽입관에서 분출된 기포가 장치 외부로 유출되지 않도록 하기 위하여 방해판을 설치하였다.



Front View

Side View

- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1. Separation Column | 2. Foam Riser Tube |
| 3. Collection Cup | 4. Water Outlet |
| 5. Air Distributor | 6. Air Inlet |
| 7. Foam Outlet | 8. Water Inlet |

Fig. 1. Schematic diagram of counter current type foam separator.

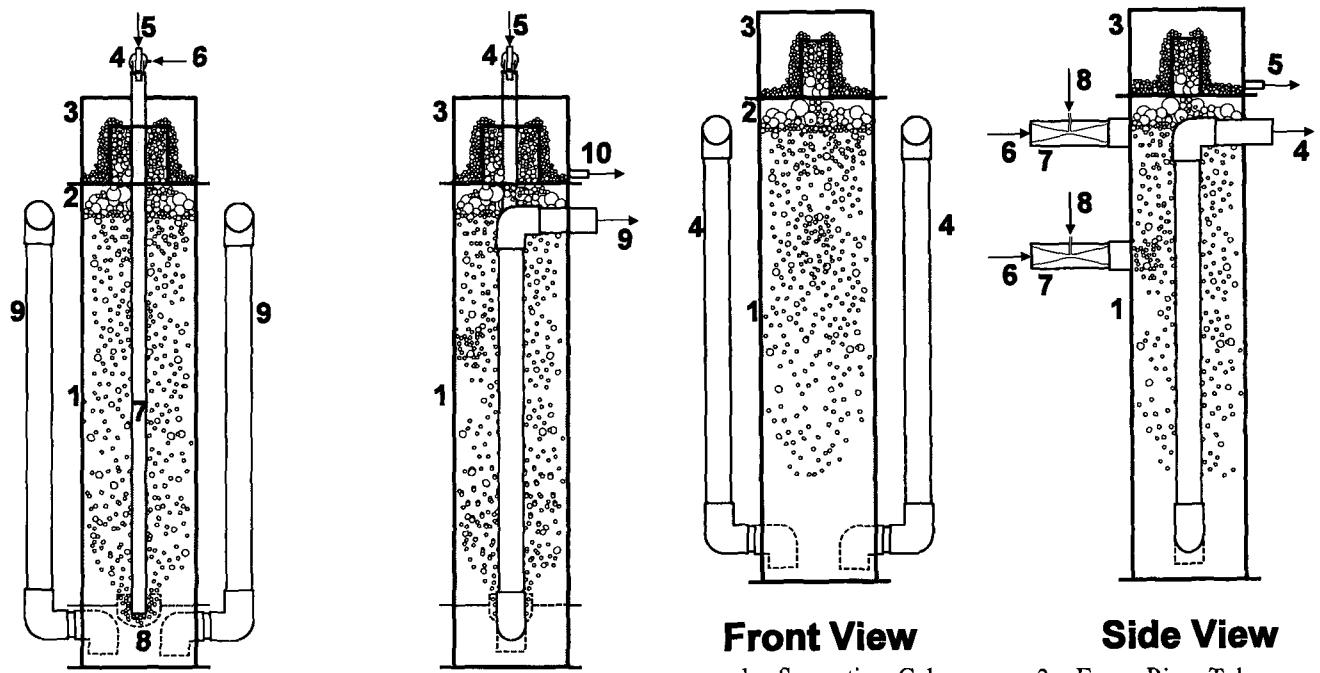
벤트리식 포말분리기

본 연구에서 사용한 벤트리식 포말분리기는 Fig. 3과 같은 형태로 규격은 공기구동식 포말분리기와 동일하게 제작하였으며 포말 분리기 측면에 공기 유입 노즐이 설치된 벤트리를 2개 설치하여 양어장수가 유입됨과 동시에 공기를 흡입할 수 있도록 하였다. 벤트리는 직경 2.5 cm, 길이 10 cm의 아크릴 봉을 가공하여 사용하였다. 상·하부 벤트리를 통과하는 양어장수의 유량은 동일하게 조절하였다.

실험방법

본 연구에서 사용한 실험장치의 모식도는 Fig. 4와 같다. 양어장수의 공급은 원심펌프를 이용하였으며 동일한 유량으로 공급하기 위하여 공급 탱크의 수두를 일정하게 조절하였다. 수력학적 체류시간 (hydraulic residence time)의 조절은 밸브를 이용하였으며 유량의 측정은 rotameter를 이용하였다.

실험에 사용한 양어장 순환수는 부경대학교 부속 양어장의 순환수를 이용하였으며 초기 단백질 농도는 양어장에서 발생한 포말 농축물을 양어장 순환수에 첨가하여 35 g/m³으로 조절하여 사용하였다. 단백질의 농도 분석은 Lowry법 (1951)에 의해 수행하였으며 총 부유 고형물의 농도는 standard method (APHA, 1989)에 의해 수행하였다. 탁도는 탁도계 (Model 2100N, HACH Co. LTD)를 이용하여 측정하였다.

**Front View****Side View**

- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1. Separation Column | 2. Foam Riser Tube |
| 3. Collection Cup | 4. Ejector |
| 5. Water Inlet | 6. Air Inlet |
| 7. Draft Tube | 8. Baffle |
| 9. Water Outlet | 10. Foam Outlet |

Fig. 2. Schematic diagram of high speed aeration type foam separator.

자료 계산방법

단백질, 부유 고형물, 탁도의 제거속도와 제거율은 유입수와 유출수의 각 성분의 농도와 유량을 측정하여 각각 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

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

$$R \%_a = \frac{C_{i,a} - C_{o,a}}{C_{i,a}} \times 100 \quad (2)$$

여기서 $-r_a$ 는 각 성분의 제거속도 (g/L/day 또는 NTU/day), $R \%_a$ 는 각 성분의 제거율 (%), $C_{i,a}$ 와 $C_{o,a}$ 는 각 성분의 유입수 및 유출수의 농도 (g/L 또는 NTU)이며 $Q_{i,a}$ 와 $Q_{o,a}$ 는 실험수의 유입수 및 유출수의 유량 (L/day)이며 V 는 포말분리기의 액본체 용적 (L)이다.

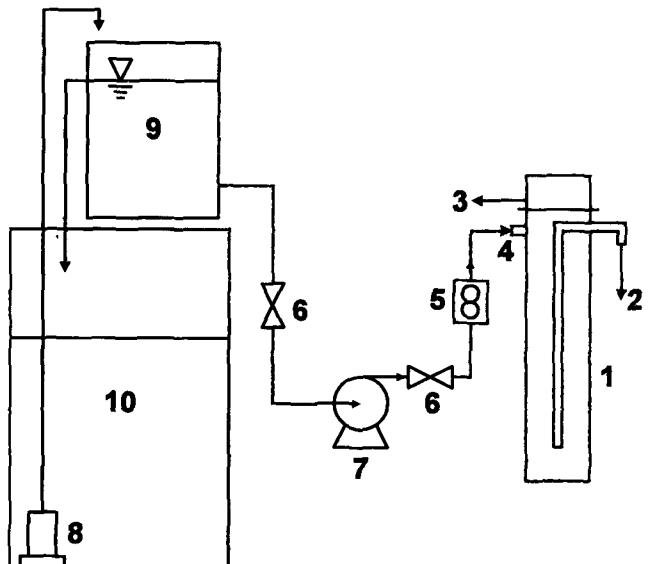
결과 및 고찰

포말 분리장치의 운전 특성

Front View **Side View**

- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1. Separation Column | 2. Foam Riser Tube |
| 3. Collection Cup | 4. Water Outlet |
| 5. Foam Outlet | 6. Water Inlet |
| 7. Venturi | 8. Air Inlet |

Fig. 3. Schematic diagram of venturi type foam separator.



- | | |
|---------------------|-------------------|
| 1. Foam Separator | 2. Water Outlet |
| 3. Foam Outlet | 4. Water Inlet |
| 5. Rotameter | 6. Valve |
| 7. Centrifugal Pump | 8. Submerged Pump |
| 9. Feeding Tank | 10. Storage Tank |

Fig. 4. Schematic diagram of experimental unit.

공기구동식 포말분리기는 기포를 외부의 공기펌프에서 주입된 공기에 의해 발생시키므로 유입 유량과는 거의 무관하게 기포를 발생시킬 수 있다. 그러나 고속 폭기식과 벤튜리식 포말분리장치는 양어장 수가 장치로 유입시 대기중의 공기를 동반 흡입하여 기포를 발생시키므로 유입 유량에 따라 발생하는 기포의 유량이 변화하게 된다. 포말분리가 수행될 수 있는 수력학적 체류시간을 측정해 본 결과 공기구동식 포말분리기는 거의 모든 유량에 대해서도 장치를 운전할 수 있었으나 고속 폭기식 포말분리기는 0.38 분, 벤튜리식 포말분리기는 0.23 분 이하의 수력학적 체류시간에서 포말분리가 수행될 수 있었다. 이후의 실험은 공기 구동식 포말분리기는 0.13~4.0 분, 고속 폭기식 포말분리기는 0.19~0.38 분, 벤튜리식 포말분리기는 0.13~0.23 분의 수력학적 체류시간의 범위에서 수행하였다.

포말분리 장치를 현장에 적용함에 있어 제거효율도 중요하지만 운전비용은 더 중요하다고 할 수 있다. 포말분리 장치의 운전에 있어 경비가 소요되는 부분은 장치에 양어장 수를 공급하는 액송펌프의 운전과 공기 주입시 소요되는 공기 공급장치의 운전에 소요되는 동력이 있다. 공기 구동방식 외의 두 가지 장치는 공기 공급을 별도의 장치 없이 양어장 수의 공급과 동시에 수행되므로 액송펌프에 의한 운전 경비의 차이를 측정하기 위해 양어장 순환수가 각 포말분리장치를 통과함에 따라 발생하는 압력손실을 측정하고 하였다. Fig. 5는 동일한 원심 펌프를 이용하여, 동일 유량을 각 포말분리장치를 통과 시켰을 때 발생하는 유량의 변화를 도시한 것이다. 이 때 나타나는 유량의 변화는 장치에서 발생하는 압력손실에 의한 것으로서 손실된 압력은 운전 경비를 증가시킨다 (McCabe et al., 1993).

그럼에서 보는 바와 같이 공기구동식 포말분리기의 경우 아무런 장치도 없는 빈 원통관과 거의 동일한 유량을 보여 압력손실이 거의 없음을 알 수 있었으나 벤튜리식 포말분리기는 유입된 유량의 33.9% 만이 통과되는 것으로 나타나 66.1% 정도의 압력 손실이 발생하는 것으로 생각되었다. 고속 폭기식 포말분리기는 벤튜리식 포말분리기보다 더 낮은 23.3% 만의 압력이 회복되는 것으로 나

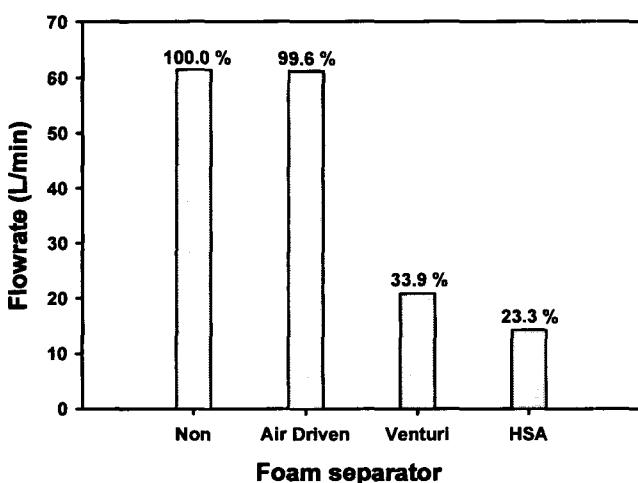


Fig. 5. Flowrate by three types of foam separator.

타나 이들 포말 분리 장치를 운전하기 위해서는 높은 압력 손실을 보전할 수 있는 고압의 펌프를 사용해야 할 것으로 생각되었다.

각 포말분리 장치의 장치 특성과 운전 특성은 Table 1에 비교, 요약하여 나타내었다.

Table 1. Comparison of three types of foam separator

Type Characters	Counter current air driven type	High speed aeration type	Venturi type
Liquid pump	needed (low pressure)	needed (high pressure)	needed (high pressure)
Air pump	needed	no needed	no needed
Head loss	-	77%	66%
Operating HRT	any flowrate available	<0.38 min (9.17 L/min)	<0.23 min (15.2 L/min)

단백질 제거 특성

양어장에서 단백질 성분은 미접취 사료나 어류의 배설물에 포함되어 있는 단백질이 순환수에 용출되어 발생하며 단백질의 질소 성분은 미생물에 의해 암모니아로 분해되기 때문에 신속한 제거가 필요하다 (Wheaton et al., 1986). 단백질은 소수기와 친수기를 모두 가지고 있어 (Cho and Cornee, 1999) 별도의 계면활성제를 첨가하지 않고도 포말분리를 가능하게 해준다 (Suh and Lee, 1995).

포말분리장치의 단백질 제거 효율을 알아보기 위하여 세 가지 포말분리 장치를 이용하여 양어장 순환수를 연속적으로 공급하면서 수력학적 체류시간 (hydraulic residence time)을 변화시킴에 따른 제거속도 및 제거율의 변화를 측정하여 그 결과를 Fig. 6과 7에 각각 나타내었다.

제거속도란 일정체적의 포말분리 장치가 일정시간동안 제거할 수 있는 물질의 양을 나타내는 것이고 제거율은 유입수 농도와 순환수가 포말분리 장치를 통과할 때 감소된 농도의 비를 나타내는 것이다. 제거속도와 제거율은 모두 포말분리장치의 성능을 판

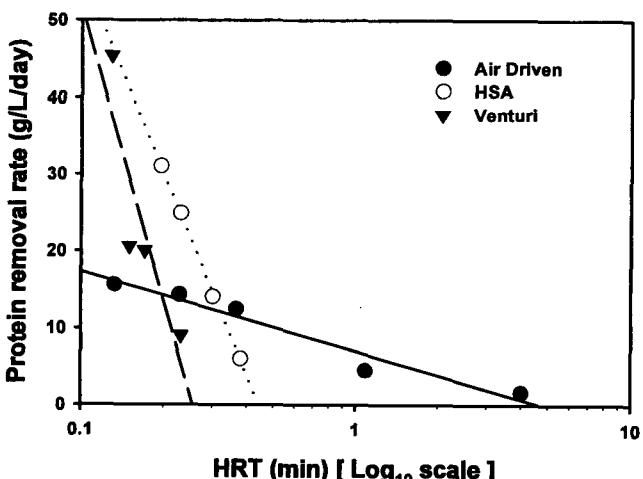


Fig. 6. Changes of protein removal rate on hydraulic residence time.

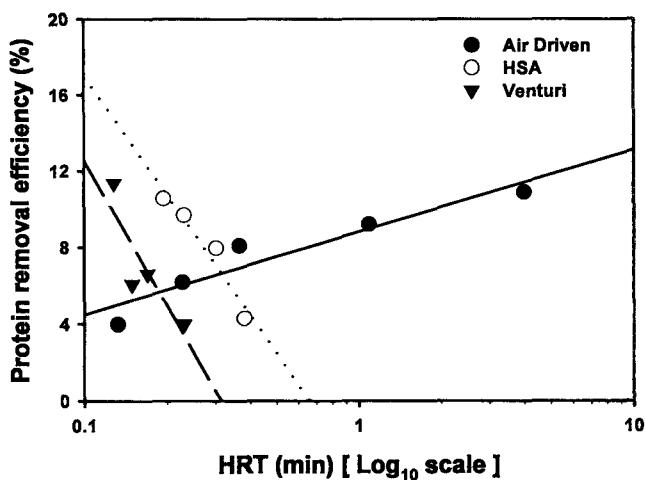


Fig. 7. Changes of protein removal efficiency on hydraulic residence time.

단하는 기준이 되나 제거율은 유입수와 유출수의 농도비에 의해 서만 결정되므로 장치를 통과하는 유량의 변화에 대한 고려사항이 없어 얼마나 많은 양의 오염물질을 제거하는가 하는 정량적 평가는 제거속도를 통해서 판단할 수 있다.

순환 여과식 양어장이나 활어 수조의 순환수를 처리하는 목적은 사육조 내 오염물질의 농도를 낮게 유지하는 것이다. 순환 여과식 양어장의 수처리 공정은 일반적인 폐수처리 공정과는 달리 수처리 공정에서 배출된 유출수가 사육조를 거쳐 다시 수처리 장치로 유입되는 재순환 공정이다 (Losordo and Westers, 1996). 재순환 공정의 경우 반응기를 한번 통과할 때의 제거율도 중요하지만 1회의 흐름을 통해 제거된 암모니아성 질소의 제거율이 작다고 하더라도 유출수를 재순환시키면 원하는 제거율을 얻을 수 있으므로 반응기 1회 통과시 높은 제거율을 유지하는 것보다는 제거속도를 높게 유지하는 것이 더 중요하다 (Levenspiel, 1972). 그러므로 제거 속도가 최대일 때 반응기의 성능이 최대라고 볼 수 있다.

그럼에서 나타난 바와 같이 단백질 제거속도는 유량이 감소하여 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 단백질 제거속도는 지수적으로 감소하는 경향을 보였다. 공기 구동식 포말분리기의 경우 수력학적 체류시간이 0.13 분에서 4.01 분으로 증가함에 따라 단백질 제거속도는 15.6 g/L/day에서 1.6 g/L/day로 감소하였으나 제거율은 4.0%에서 10.9%로 증가하는 것으로 나타났다. 고속 폭기식 포말분리기와 벤츄리식 포말분리기는 수력학적 체류시간이 각각 0.19 분에서 0.38 분, 0.13 분에서 0.23 분으로 증가함에 따라 단백질 제거속도가 31.1 g/L/day에서 6.0 g/L/day, 45.4 g/L/day에서 5.2 g/L/day로 감소하여 공기 구동식 포말분리기와 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 단백질 제거율은 각각의 수력학적 체류시간의 증가에 대해 고속 폭기식 포말분리기는 10.6%에서 4.3%, 벤츄리식 포말분리기는 11.4%에서 2.3%로 감소하여 공기 구동식 포말 분리기와는 반대의 현상을 나타내었다.

0.32 분 이하의 수력학적 체류시간에서는 고속 폭기식 포말분리기가 공기 구동식보다 더 높은 제거 속도를 보였으며 벤츄리식

포말분리기는 0.21 분 이하의 수력학적 체류시간에서 공기구동식보다 높은 제거속도를 나타내었다. 그러나 벤츄리식 포말 분리기는 고속 폭기식 포말분리기에 비해 전반적으로 낮은 제거속도를 나타내었다.

공기 구동식 포말분리기의 단백질 제거율이 체류시간이 길어짐에 따라 단백질 제거율이 증가하는 현상은 체류시간이 길수록 기포와 단백질이 접촉하는 시간이 길어져서 흡착기회가 증가하는 현상 (Suh et al., 1998)에 의한 것으로 생각된다. 고속 폭기식 포말분리기와 벤츄리식 포말분리기의 경우 공기 구동식 포말분리기와 달리 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 제거율이 감소하는 것은 공기 구동식 포말분리기의 경우 공기를 외부에서 강제적으로 유입시키므로 수력학적 체류시간에 무관하게 공기의 유입량이 일정하나 고속 폭기식 포말분리기와 벤츄리식 포말분리기는 유입 액량이 감소함에 따라 유입되는 공기량도 감소하게 되므로 발생하는 기포의 수가 감소하여 제거율이 낮아지는 것으로 생각된다.

단백질 제거속도가 수력학적 체류시간이 감소할수록 증가되는 것은 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 현상으로 사료된다.

공기 구동식 포말분리기의 경우 유량의 증가에 따른 단백질 농도의 증가에 의한 효과도 제거속도를 증가시키는 요인으로 생각된다. 수력학적 체류시간이 감소하여 유량이 증가할 경우 앞서 설명한 바와 같이 제거율이 감소하므로 포말분리기 내의 단백질 농도가 상승하게 되어 나타나는 현상으로 기·액 계면의 단백질 흡착속도는 Langmuir 등온 흡착식을 따르므로 (Rubin, 1981) 단백질 농도가 증가할 경우 기·액 계면으로의 흡착속도가 증가하게 되는 것이다. 고속 폭기식 포말분리기와 벤츄리식 포말분리기의 경우 수력학적 체류시간의 감소에 따라 단백질 제거율이 감소하여 포말분리 장치내의 단백질 농도가 더 낮아지므로 단백질 농도의 증가에 의한 제거속도의 증가는 없다고 생각된다. 그러나 이 두 형태의 포말분리기는 수력학적 체류시간의 감소에 따라 유입 공기량이 증가하여 발생하는 기·액 계면의 증가에 의한 영향이 더 크게 작용하여 제거속도가 크게 증가되는 것으로 사료된다.

총 부유 고형물 제거 특성

총 부유성 고형물은 입경이 1 μm 이상인 고형물로서 (APHA, 1989) 어류 양식에서는 어종이나 어류의 성장정도에 따라 차이는 있으나 25~80 g/m³ 이하의 농도가 권장되고 있다 (Roger and Klementson, 1985). 부유성 고형물은 유기물 성분 및 무기물 성분들로 이루어져 있으며, 휘발성 부유 고형물로 표시되는 유기성 성분은 산소의 소비와 함께 biofouling의 문제를 야기하는 반면에, 무기성 성분은 침전물을 형성하여 어류의 생활 공간에 악영향을 미치게 된다 (Suh et al., 1997).

Fig. 8, 9는 수력학적 체류시간의 변화에 따른 총 부유 고형물의 제거속도와 제거율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 수력학적 체류시간의 변화에 따른 각 포말분리 장치의

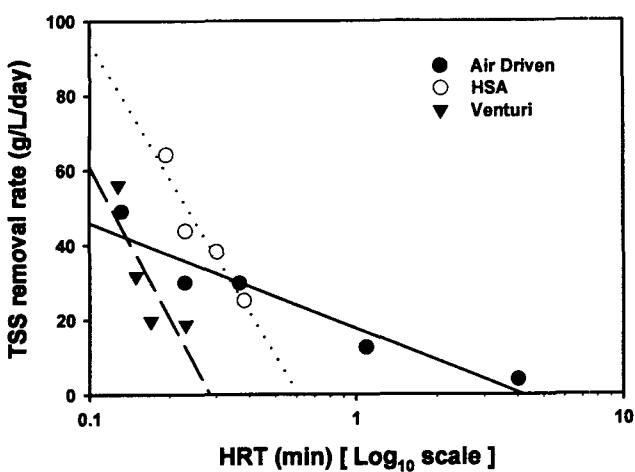


Fig. 8. Changes of TSS removal rate on hydraulic residence time.

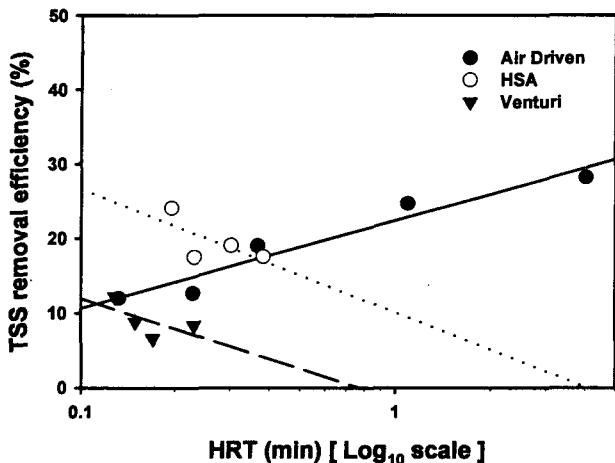


Fig. 9. Changes of TSS removal efficiency on hydraulic residence time.

총 부유 고형물의 제거속도와 제거율의 변화는 단백질 제거속도와 제거율의 변화와 유사하게 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 단백질 제거속도는 지수적으로 감소하는 경향을 보였다. 공기 구동식 포말분리기의 경우 수력학적 체류시간이 0.13 분에서 4.01 분으로 증가함에 따라 총 부유 고형물의 제거속도는 49.0 g/L/day에서 4.0 g/L/day로 감소하였으며 고속 폭기식 포말분리기와 벤트리식 포말분리기는 0.19~0.38 분, 0.13~0.23 분의 수력학적 체류시간의 증가에 대해 64.2~25.2 g/L/day, 56.0~18.8 g/L/day로 감소하였다.

고속 폭기식 포말분리기가 공기 구동식보다 더 높은 제거 속도를 나타낸 수력학적 체류시간은 0.33 분 정도로서 단백질에서 나타난 것과 거의 동일하였으나 벤트리식 포말분리기가 공기구동식 보다 높은 제거속도를 나타내는 수력학적 체류시간은 0.11 분으로 나타났다.

이와 같이 총 부유 고형물의 제거율과 제거속도의 변화가 단백질의 경우와 유사하게 나타나는 것은 총 부유 고형물이 제거되는 것이 단백질이 기·액 계면에 흡착될 때 동반 흡착되어 제거되는 제거작자 (Chen, 1991)에 의한 현상이라고 생각된다.

총 부유 고형물의 제거율은 공기 구동식 포말분리기의 경우 단백질 제거율이 4.0~10.9%의 범위에서 총 부유 고형물은 12.0~28.2%의 제거율을 나타내어 약 3배 정도 높은 비율을 보였으며 고속 폭기식은 4.3~10.6%의 단백질 제거율에 대해 17.5~24.1%의 총 부유 고형물의 제거율 2~4배 정도 높은 비율을 나타낸 반면 벤트리식 포말분리기는 2.3~11.4%의 단백질 제거율에 대해 6.6~12.2%의 총 부유 고형물 제거율을 나타내어 저유속인 경우에는 총 부유고형물/단백질 비율이 다른 두 포말분리기와 유사하였으나 고유속으로 갈수록 단백질제거에 대한 총 부유 고형물의 제거효율은 떨어지는 것으로 나타났다.

탁도 제거 특성

탁도는 물을 흐리게 하는 성분을 총칭하는 것으로 1 μm 이하의 부유 고형물과 색소성 용존 물질도 모두 포함하는 것으로 물의 투명도를 측정하는 척도이며 (Tchobanoglous and Schroeder, 1985) 양어장에서는 60 g/m³ 이하의 농도를 권장하고 있다 (Nightingale, 1976).

Fig. 10과 11에 각 포말분리 장치의 수력학적 체류시간의 변화에 따른 탁도 제거속도와 제거율의 변화를 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 수력학적 체류시간의 변화에 따른 제거속도와 제거율의 전체적인 변화는 단백질 및 총 부유 고형물의 제거속도와 제거율의 변화와 유사하게 나타났다. 이는 탁도를 유발하는 물질 중 상당부분을 총 부유 고형물이 차지하므로 (Tchobanoglous and Schroeder, 1985) 총 부유 고형물이 단백질에 동반하여 제거됨으로 인한 현상으로 생각된다.

Fig. 10에서 나타난 바와 같이 공기 구동식 포말분리기의 경우 수력학적 체류시간이 0.13 분에서 4.01 분으로 증가함에 따른 탁도의 제거속도는 19.9 NTU/day에서 1.13 NTU/day로 감소하였으며 고속 폭기식 포말분리기와 수력학적 체류시간이 0.19 분에서 0.38 분으로 증가함에 따라 18.3 NTU/day에서 4.7 NTU/day로 감소하였다. 벤트리식 포말분리기의 탁도 제거속도는 0.13 분에서 0.23 분으로 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 17.7 NTU/day에서 2.5 NTU/day로 감소하였다.

고속 폭기식 포말분리기가 공기 구동식보다 더 높은 제거 속도를 나타낸 수력학적 체류시간은 0.21 분 정도였으며 벤트리식 포말분리기가 공기 구동식보다 높은 제거속도를 나타내는 수력학적 체류시간은 0.11 분으로 나타났다. 또한 짧은 수력학적 체류시간에서 나타난 공기 구동식 포말분리기의 탁도 제거속도는 고속 폭기식과 벤트리식 포말분리기와 비교하여 거의 유사한 값을 나타내었다.

공기 구동식 포말분리기의 경우 0.13~1.09 분의 수력학적 체류시간의 범위에서 탁도의 제거율이 11.5~19.6%의 범위를 나타내어 총 부유 고형물의 제거율이 12.0~24.7%의 범위를 나타낸 것에 비해 0.5~5.1% 정도의 낮은 제거율을 보였다. 고속 폭기식 포말

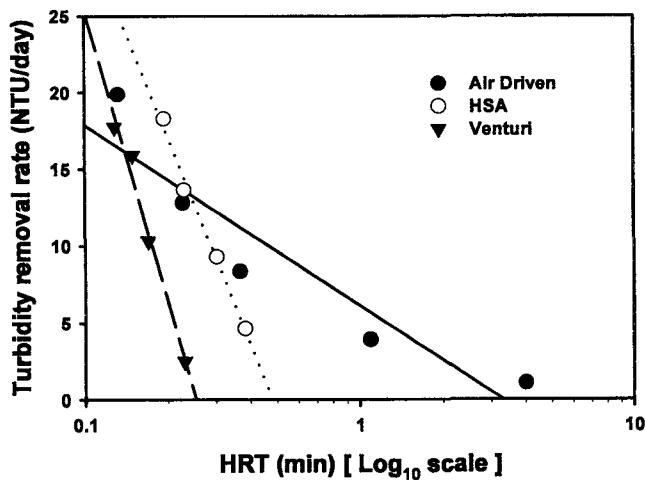


Fig. 10. Changes of turbidity removal rate on hydraulic residence time.

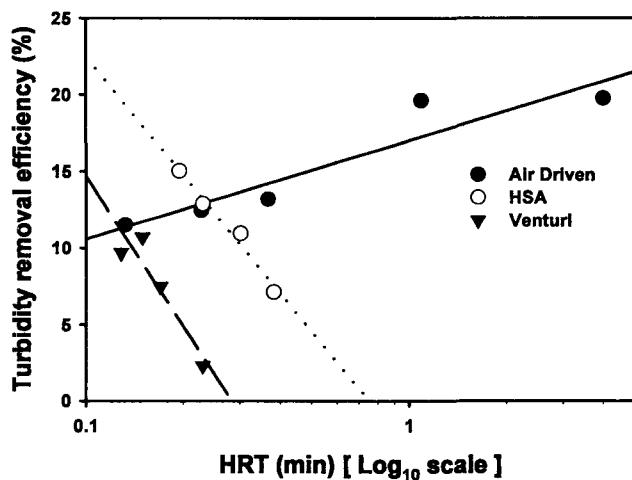


Fig. 11. Changes of turbidity removal efficiency on hydraulic residence time.

분리기는 7.1~15.0%의 탁도 제거율을 나타내어 총 부유 고형물의 제거율에 비해 각각 10% 정도 낮은 것으로 나타났으며 벤чу리식 포말분리기의 탁도 제거율은 2.3~10.7%의 범위로써 총 부유 고형물의 제거율에 비해 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것으로 보아 공기 구동식 포말분리기와 벤чу리식 포말분리기는 1 μm 이상의 총 부유 고형물 뿐 아니라 그 이하의 입자나 용존 물질도 잘 제거하나 고속 폭기식 포말분리기는 총 부유 고형물보다 작은 입자는 포말에 충분히 흡착시키지 못하는 것으로 사료된다.

요 약

공기 구동식, 고속 폭기식 및 벤чу리식 포말분리 장치를 동일한 용량으로 제작하여 양어장 순환수 중의 단백질, 총 부유 고형물 및 탁도를 제거하는데 있어 각 포말 분리장치의 운전 특성을 알아보-

고자 하였다.

공기 구동식 포말분리기의 유량감소가 거의 없었으나 벤чу리식 포말분리기는 66.1% 정도의 유량감소가 발생하였으며 고속 폭기식 포말분리기는 77.2%의 유량감소가 발생하였다.

공기 구동식, 고속 폭기식 및 벤чу리식 포말분리 장치의 단백질 제거속도는 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 지수적으로 감소하였다. 0.32 분 이상의 수력학적 체류시간에서는 공기 구동식 포말분리장치의 제거속도와 제거율이 가장 높게 나타났으며 그 이하의 수력학적 체류시간에 대해서는 고속 폭기식 포말분리 장치의 제거속도와 제거율이 가장 높은 것으로 나타났다.

수력학적 체류시간의 변화에 따른 총 부유 고형물과 탁도의 제거속도와 제거율의 변화는 단백질 제거속도 및 제거율의 변화와 거의 비슷하였으며 벤чу리식 포말분리기는 짧은 수력학적 체류시간에서는 총 부유고형물의 제거 효율이 다른 두 포말분리기에 비해 떨어지는 것으로 나타났다. 탁도의 제거는 공기 구동식 포말분리기가 가장 우수한 것으로 나타났다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- Albaster, J.S. and R. Lloyd. 1982. Water quality criteria for freshwater fish, 2nd ed., Butterworth, London, 361pp.
- APHA. 1989. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed. American Public Health Association.
- Chen, S. 1991. Theoretical and experimental investigation of foam separation applied to aquaculture, Ph. D. Thesis, Cornell Univ., USA.
- Chen, S. 1994. Modeling surfactant removal in foam fraction I. Aquacultural Engineering, 13, 163~181.
- Chen, S., D. Stechy and R.F. Malone. 1996. Suspended solids control in recirculating aquaculture systems. ed. by Timmons, M.B. and T.M. Losordo Aquaculture water reuse system: Engineering design and management, Elsevier, Amsterdam, pp. 61~100.
- Cho, D. and M. Cornee. 1999. Adsorptive behavior of a globular protein with a monoglyceride monolayer spread on the aqueous surface. Korean J. Chem. Eng., 16(3), 371~376.
- Clarke, A.N. and D.J. Wilson. 1983. Foam flotation theory and applications. Marcel Dekker, New York, 418pp.
- Dwivedy, R.C. 1975. Removal of dissolved organics through foam fractionation in closed cycle systems for oyster production. Paper No.73~561, American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Mich.
- Levenspiel, O. 1972. Chemical reaction engineering, 2nd ed., Jone Wiley & Sons, New York, pp. 144~148.
- Lomax, K.M. 1976. Nitrification with water pretreatment on a closed cycle catfish culture system. Ph. D. Thesis, University of Maryland, College Park, MD. USA.

- Losordo, T.M. and H. Westers. 1996. System carrying capacity and flow estimation. edited by Timmons, M.B. and T.M. Losordo Aquaculture water reuse system: Engineering design and management, Elsevier, Amsterdam, pp.14.
- Lowry, O.H., NJ. Rosebrough, A.L. Farr and R.J. Randall. 1951. Protein measurement with folin phenol reagent. J. Biotech., 193, 265~275.
- McCabe, W.L., J.C. Smith and P. Harriott. 1993. Unit operations of chemical engineering. Fifth ed., McGraw-Hill, Inc., New York, pp.190~191.
- Muir, J.F. 1982. Recirculated system in aquaculture. edited by Muir, J.F. and Reborts, R.J. *Recent Advances in Aquaculture, Vol. 1*. Croom Helm and Westview Press, London, 453pp.
- Nightingale, J.W. 1976. Technical report of karmer, Chin and Mayo Inc., Seattle, Washington.
- Roger, G.L and S.L. Clementon. 1985. Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilters. Aquaculture Engineering, 4, 135~154.
- Rubin, E. 1981. Foam fractionation-some recent studies. edited by Freeman, M.P. and J.A., FitzPatrick. 157~180.
- Stickney, R.R. 1979. Seawater aquariums, the captive environment. Wiley Interscience, New York, 375pp.
- Suh, K.H. and M.G. Lee. 1995. Treatment of aquacultural recirculating water by foam separation-I. Characteristics of protein separation. J. Korean. Fish. Soc., 28(5), 599~606 (in Korean).
- Suh, K.H., H.G. Lee, B.J. Kim. M.C. Cho, S.H. An and J.Y. Cho. 1998. Protein removal by foam separation in aquaculture. J. Korean Environmental Science, 7(1), 41~45 (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. Korean. 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.
- Wang, R-F.t. 1988. Laboratory analysis of settling velocity of wastewater particles in separation using holography. Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 265pp.
- Wheaton, F.W., J.N. Hochheimer, G.E. Kaiser, M.J. Klones, G.S. Libey and C.C. Easter. 1996. Nitrification filter principle. edited by Timmons, M.B. and T.M. Losordo Aquaculture water reuse system: Engineering design and management, Elsevier, Amsterdam, pp. 101~126.
- Wickins, J.F. 1980. Water quality requirements for intensive aquaculture: a review. Symposium on New Developments in the Utilization of Heated Effluents and Recirculation Systems or Intensive Aquaculture. EIFAC, 11th Session, Stavanger, Norway, 28~30 May.

2000년 1월 29일 접수

2000년 5월 6일 수리