

해수 환경에서 포말분리기 운전 조건에 따른 고형물 제거 특성

서준혁 · 이재만 · 김봉재 · 김병기¹ · 김유희¹ · 박정환^{2*}

부경대학교 수산생물학과, ¹강원도립대학교 스마트양식과, ²부경대학교 수산생명과학부

Suspended Solids Removal Performance of a Foam Fractionator with Different Operating Conditions in Seawater

Junhyuk Seo, Jaeman Lee, Bongjae Kim, Pyongkih Kim¹, Youhee Kim¹ and Jeonghwan Park^{2*}

Department of Fisheries Biology, The Graduate School, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

¹Department of Smart Aquaculture, Gangwon State University, Gangneung 25425, Republic of Korea

²Division of Fisheries Life Sciences, College of fisheries science, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

This study investigated the removal performance of a foam fractionator under seawater conditions. The foam fractionator was tested using a 3×3×3 factorial design for operating conditions by combining different solids concentrations (SS; 1, 5, and 10 mg·L⁻¹), surface air velocities (SAV; 1.1, 1.5, and 2.1 cm·sec⁻¹), and hydraulic residence times (HRT; 1, 3, and 6 min) at 16°C. Performance parameters such as daily solids removal rate and efficiency were measured, and a multi-regression model equation was developed accordingly. The daily solids removal rate and removal efficiency varied with the experimental conditions and ranged from 0.14–2.33 g-solids·m⁻³·air·day⁻¹ and 8.9–96.7 %, respectively. Overall, the daily solids removal rate increased with increasing SS and SAV and decreasing HRT, whereas the removal efficiency increased with increasing SAV and HRT and decreasing SS. The daily solids removal rate (g-solids·m⁻³·air·day⁻¹) of the foam fractionator for SAV (cm·sec⁻¹), SS (mg·L⁻¹) and HRT (min) were described by the following multi-regression model: Daily solids removal rate [f(z)]=-0.118+0.422SAV+0.094HRT+0.141SS (r²=0.873).

Keywords: Foam fractionator, Suspended solids, Removal efficiency, Surficial air velocity, Hydraulic retention time

서 론

일반적으로 순환여과양식시스템에서 침전이 가능한 상대적으로 큰 고형물들은 중력식 고형물 제거법 또는 물리적 고형물 제거장치들을 이용하여 제거하는 것이 비교적 쉬우나, 입자가 매우 작은 부유 고형물과 용존 상태의 유기물을 제거하는 것은 쉽지 않아 시스템 내에 축적되는 경향이 있다(Timmons et al., 1995; Schumann and Brinker, 2020). 상이하게 구성된 세 가지 순환여과양식시스템에서의 고형물 분포 특성을 조사한 Chen et al. (1993)은 약 95%의 고형물 입자의 크기가 20 μm 미만으로, 매우 작은 입자들이 주로 분포하고 있음을 보고한 바 있다. 이러한 미세한 부유 고형물은 순환여과양식시스템에서 양식생물의 스트레스 증가와 폐사 등의 주요 원인이 될 수 있다

(Timmons et al., 1987; Cripps and Bergheim, 2000; Awata et al., 2011). 이와 관련하여 Magor (1988)는 44 mg·L⁻¹의 부유 고형물의 농도에서 어류의 아가미 손상이 발생했음을 보고한 바 있고, 이 밖에도 여러 연구자들이 부유 고형물이 아가미 손상과 어류의 건강 상태에 직접적인 영향을 준다고 보고하였다(Stickney, 1979; Chapman et al., 1987; Bilotta and Brazier, 2008). 과도한 부유 고형물의 증가는 양식생물에 대한 직접적 영향 외에도 생물학적 여과조의 효율을 감소시키거나 암모니아성 질소 및 화학적 산소 요구량 등을 증가시킬 수 있다(Zhu and Chen, 2001). 순환여과양식시스템에서 부유 고형물의 허용 농도에 대한 명확한 기준은 없으나, 일반적으로 15 mg·L⁻¹ 이하의 농도를 유지하는 것을 권장한다(FIFAC, 1980; Reinemann, 1987; Timmons et al., 1987).

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 629. 5911 Fax: +82. 51. 629. 5908

E-mail address: parkj@pknu.ac.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2022.0328>

Korean J Fish Aquat Sci 55(3), 328-337, June 2022

Received 24 February 2022; Revised 9 May 2022; Accepted 16 June 2022

저자 직위: 서준혁(대학원생), 이재만(연구원), 김봉재(학부생), 김병기(교수), 김유희(연구원), 박정환(부교수)

순환여과양식시스템에서 고형물을 제거하기 위한 방법은 크게 중력을 이용한 침전법과 미세한 망이나 입자성 매질을 이용한 물리적 여과법이 있다(Cripps and Bergheim, 2000; Palacios and Timmons, 2001). 침전조는 가장 전통적인 고형물 제거법으로 100 μm 이상의 고형물들을 제거하는데 효과적이지만, 상대적으로 침전 속도가 매우 느린 부유 고형물의 제거에는 실용적이지 못하다(Rudolfs and Balmat, 1952; Johnson and Chen, 2006). 물리적 여과법은 고형물 제거를 위해 사육수를 미세한 망에 통과시키거나 미세 공극을 형성하는 매질을 이용하는 방법으로 드럼형 여과기, 디스크형 여과기, 고속/완속 모래여과기, 구조토 여과기, 비트여과기 등이 이에 해당한다(McMillan et al., 2003; Couturier et al., 2009; Khater et al., 2011). 하지만 물리적 여과 방법은 일반적으로 장치가 상당히 고가이며 잦은 역세 과정이 필요하여 상대적으로 높은 유지관리 비용과 노력이 필요한 경우가 있다(Chen and Malone, 1991; Pfeiffer et al., 2008). 또한, 양식시스템에서 발생하는 부유 고형물은 형태 변형성과 비정형성을 가지기 때문에 물리적 여과 과정 이후에도 망목 또는 여과 매질의 공극을 통과하는 미세한 부유 고형물이 사육수 내 지속적으로 축적되는 문제가 발생한다(Fernandes et al., 2014).

포말분리기는 에어블로워 등을 이용하여 수중에 공기를 분사하여 발생된 기포의 계면에 부유 고형물 및 용존 유기물을 흡착시켜 분리하는 방법이다. 이는 부유 및 용존 고형물을 제거하는 가장 효율적이고 경제성이 높은 방법 중 하나로 알려져 있다(Suh et al., 2002; Suzuki and Maruyama, 2002; Brambilla et al., 2008). Lomax (1976)는 다양한 조합의 순환여과양식시스템을 조사한 결과, 비용과 효율 측면에 있어 포말분리기와 생물학적 여과조의 조합이 가장 경제적이고 우수한 설계 방법이라고 보고하였다. 또한, 포말분리기는 순환여과양식시스템에서 pH 조절과 수중의 가스 압력 조절을 위해 필수적인 탈기 장치로써 역할도 수행할 수 있다(Chen et al., 1993). Dwivedy (1973)는 굴을 양식하는 시설에서 포말분리기가 고형물 제거와 함께 pH를 조절하는데 효과적이었다고 보고한 바 있으며, Timmons (1994) 또한 포말분리기가 수중의 유기산 및 박테리아 제거에 관여하여 pH를 유지하는데 도움이 된다고 보고한 바 있다. 그 외에도 포말분리기는 복잡한 기계적 장치 없이 설치할 수 있는 설치의 편의성, 운영의 연속성, 불필요한 역세척, 쉬운 스케일업, 낮은 에너지 소비 등의 여러 장점들을 가지고 있어 양식시스템에 적용이 용이하다(Valdes-Krieg et al., 1975; Huang et al., 2018). 특히 해수는 담수에 비해 물의 점도와 염의 농도가 높아 수중에서 공기방울이 상대적으로 작게 분사될 수 있으며, 이로 인해 담수 조건보다 포말분리기의 효율이 개선될 수 있다.

포말분리기의 성능에 영향을 주는 요인들은 수리학적체류시간, 공기방울의 크기, 내부 압력, 공기 유량, 분사기의 설치 깊이, 온도, column의 형태 등으로 매우 광범위하다(Spotte, 1979; Nakabayashi et al., 2011; Yan et al., 2011; Jia et al., 2021). 하

지만 Huguenin and Colt (1989)는 실제 적용할 수 있는 포말분리기의 고형물 제거 성능 또는 포말분리 과정과 관련된 제거 고형물의 물리적 특성 파악·정량화 등에 대한 자료가 부족하다고 논한 바 있으며, Guilherme et al. (2020) 또한 순환여과양식시스템에서의 포말분리기 적용 최적화를 위한 추가 응용 연구의 필요성을 언급하였다.

본 실험에서는 해수조건에서 공기상승속도, 유입 고형물 농도, 수리학적체류시간에 따른 포말분리기 고형물 제거효율을 평가하고, 순환여과양식시스템 내에서의 포말분리기 설계인자와 운전조건을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

포말분리기

포말분리기의 고형물 제거 특성 조사를 위하여, 직경 20 cm, 높이 150 cm의 아크릴 재질의 파이프로 구성된 내부 수용적 40.1 L의 포말분리기를 제작하였다(Fig. 1). 아래로부터 주입되는 공기와 접촉시간을 최대화하기 위해 사육수는 장치의 상부로부터 유입되어 하부로 빠져나가기도록 하였다(count-current형). 장치로부터 만들어진 포말이 사육수 표면으로부터 분리되어 나와 집적될 수 있도록 포말분리기 장치 바닥으로부터 120 cm 높이에 별도의 포말 수집조를 부착하였다. 배출구와 유입구는 직경 60 mm의 PVC (polyvinyl chloride) 관을 이용하여 바닥 부분과 바닥으로부터 110 cm 높이에 각각 설치하였고, overflow의 구경은 직경 50 mm가 되도록 설치하였다. 처리된 사육수가 분사기에서 발생하는 공기로 인해 배출이 방해받지 않도록 바닥으로부터 14.5 cm 높이에 거치판을 설치하여 분사기를 고정하였다. 이때 분사기는 직경 25 mm의 유니온호스를 사용하여 포말분리기 내부에 주입되는 공기가 고르게 분사되도록 하였다. 에어블로워(HP-80; Hiblow, Takatsuki, Japan)를 이용하여 공기를 주입하였고 공기 유량계와 압력조절기를 이용하여 공급 유량으로 실험 공기상승속도를 조절하였다.

실험시설 및 방법

실험시설은 3.0 m³ 용량의 FRP (fiber-reinforced plastic) 저수조, 포말분리기, 양수펌프, 에어블로워로 구성하였다(Fig. 1). 3.0 m³ 저수조에 해수를 채운 뒤 pilot 규모 전복 순환여과양식시스템의 포말분리기로부터 수집한 포말을 투여하고 고형물 제거실험을 실시하였다. 포말을 수집한 pilot 규모 전복 순환여과양식시스템은 4.0×0.8×0.6 m (약 1.9 m³) 크기의 사육수조 12개, 1.8×3.5×2.0 m 크기의 생물학적 여과조 1개, 직경 500 mm, 높이 2.5 m의 count-current형 포말분리기 1개로 구성되었다. 평균 각장 42.8 mm의 참전복(*Haliotis discus hannai*) 치패 약 10,000마리를 사육 수온 16°C에서 수용하여 미역을 먹이로 공급하면서 사육하였다.

이때 각 실험조건에 대해 동일한 농도의 고형물을 공급하기

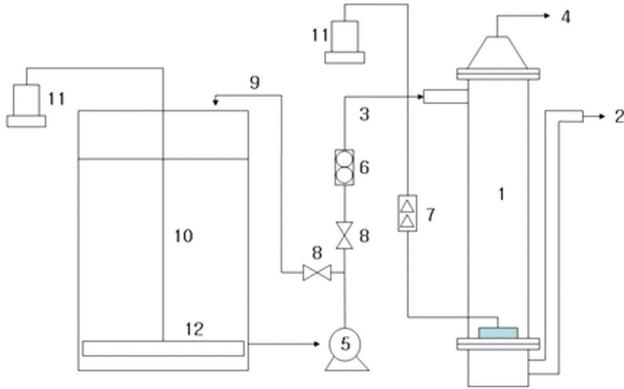


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental system to test performance of foam-fractionator. 1, Foam-fractionator; 2, Water outlet; 3, Water inlet; 4, Overflow; 5, Pump; 6, Water flow meter; 7, Air flow meter; 8, Valve; 9, By-pass; 10, Head tank; 11, Air blower; 12, Air distributor.

위해 포말을 매일 수집하여 20 L의 polyethylene 용기에 넣어 -20°C에 냉동 보관하였고, 실험에 이용할 충분한 양이 확보되었을 때, 이를 모두 균일한 농도로 만들어 실험 시작 전까지 -20°C에 냉동 보관하였다.

균일화된 포말을 저수조에 투입한 뒤, 양수펌프를 이용하여 실험 사육수를 포말분리기로 유입시켰다. 유입수 배관에 by-pass와 유량계를 설치하였고, 이를 이용하여 수리학적체류시간을 유입수량으로 조절하였다. By-pass를 통해 배출되는 실험 사육수는 저수조로 재순환되도록 하였고 포말분리기를 통과한 처리수는 배출되었다. 에어블로워의 공기 유입관에도 by-pass와 유량계(model RMA; Dwyer Instruments Inc., Michigan City, IN, USA)를 설치하여 포말분리기 내의 공기상승속도를 공기유입수량으로 조절하였다. 저수조 내 투입 고형물의 원활한 혼합 및 침전을 위해 컬럼(column) 형태의 저수조를 사용하였고, 수조 바닥에는 분사가 없이 에어호스만을 설치하여 굵은 공기방울이 발생되도록 하여 주입공기에 의한 고형물 제거 효과가 나타나지 않도록 실험사육수를 유동하였다.

모든 실험은 히터와 냉각기를 이용하여 수온을 16°C로 조절하였고 pH는 8.02-8.05 범위내에서 실시하였다. 고형물 농도 1, 5, 10 mg·L⁻¹에서 수리학적체류시간이 1, 3, 6분이 되도록 조절하였고 각 수리학적체류시간에 대해 1.1, 1.5, 2.1 cm·sec⁻¹의 공기상승속도에서 공기 주입량 당 일간 고형물 제거량(g solids·m³·day⁻¹), 고형물 제거효율(%), overflow rate (%)를 평가하였다.

시료 채수 및 포말분리기 성능 평가

각 실험 조건에서 실험조건에 대한 정상운전상태를 만들기 위해 10분간 예비운전을 실시한 뒤 60분간 운전하면서 시료를 채수하였다. 수질 분석을 위해 운전 종료 직전 유입수 내 고형물 농도를 측정하고, 운전 종료 후 집적된 포말을 수집하였다. 포

말은 200 mL 증류수에 2 mL의 소포제(Silicon Emersion type; Hyokwang E&C, Hwaseong, Korea)를 첨가 및 살포하여 형성된 파포하고 마이크로 피펫과 메스실린더를 이용하여 수집하였다. 이를 이용하여 포말분리기의 주입 공기량 당 일간 고형물 제거량, 고형물 제거효율, overflow rate를 아래의 식(1, 2, 3)에 따라 계산하였다.

$$\text{주입 공기량 당 일간 고형물 제거량(g solids m}^{-3}\text{·day}^{-1}\text{)} = (C_o \times Q_o) \div V_{\text{air}} \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

- C_o, overflow 내 고형물 농도(g·m⁻³)
- Q_o, overflow rate (m³·day⁻¹)
- V_{air}, 일간 주입한 총 공기량(m³)

$$\text{고형물 제거효율(\%)} = \{[(C_i \times Q_i) - (C_o \times Q_o)] \div (C_i \times Q_i)\} \times 100 \dots\dots \text{식(2)}$$

- C_i, 유입수 내 고형물 농도(g·m⁻³)
- Q_i, overflow rate (m³·day⁻¹)
- Q_o, 유입수량(m³·day⁻¹)

$$\text{Overflow rate (\%)} = (Q_o \div Q_i) \times 100 \dots\dots\dots \text{식(3)}$$

통계분석

Window용 SPSS 12.0을 이용하였고, 수온과 각장에 대한 three-way ANOVA test를 통해 고형물 농도, 공기상승속도, 수리학적체류시간이 포말분리기의 고형물 제거 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 그리고 Duncan's multiple range test로 평균간의 유의차를 검정하였다(P<0.05).

각 실험조건에서 유의한 차이가 있을 경우에는 고형물 농도, 공기상승속도, 수리학적체류시간, 포말분리기의 주입 공기량 당 일간 고형물 제거량에 미치는 영향을 다중회귀 분석하여 최적 예측 모델식을 도출하였다.

결 과

포말분리기의 공기 주입량 당 일간 고형물 제거량은 고형물 농도, 수리학적체류시간, 공기상승속도 모두에 영향을 받았으며(Table 1), 특히 고형물 농도의 영향이 가장 컸다. 모든 고형물 농도에서 일간 고형물 제거량은 유의한 차이가 나타났다(P<0.05). 수리학적체류시간의 경우, 3과 6분의 수리학적체류시간에서 일간 고형물 제거량은 유의한 차이가 나타나지 않았다(P>0.05). 하지만 1분에서 일간 고형물 제거량은 3과 6분의 경우보다 유의하게 높게 나타났다(P<0.05). 공기상승속도에 따른 일간 고형물 제거량에서는 1.10과 1.50 cm·sec⁻¹의 공기상승속도에서의 일간 고형물 제거량 사이에는 유의한 차이가 나타나지 않았다(P>0.05). 하지만 2.10 cm·sec⁻¹의 공기상승속도에

서는 1.10과 1.50 cm·sec⁻¹의 공기상승속도에서의 일간 고형물 제거량에 비해 유의적으로 높은 값이 도출되었다(P<0.05)

포말분리기의 공기 주입량 당 일간 고형물 제거량을 예측하기 위한 다중회귀직선모델식을 도출하였고 이를 Table 2에 나타내었다. 세 가지 모델식 중 고형물 농도, 공기상승속도, 수리학적체류시간의 변수를 모두 포함하는 model 3이 r²와 adj r²가 가장 높고, Msep가 가장 낮아 모델 적합도가 가장 우수하였다.

이에 따라 수온 16°C, 고형물 농도가 1-10 mg·L⁻¹, 수리학적 체류시간 1-6분, 공기상승속도 1.1-2.1 cm·sec⁻¹에서 운전한 포말분리기의 공기 주입량 당 일간 고형물 제거량(g solids·m³·day⁻¹)에 대한 모델식은 식 (4)과 같다.

$$f(z) = -0.118 + 0.422SAV + 0.094HRT + 0.141SS \dots \text{식(4)}$$

SAV, 공기상승속도
cm·sec⁻¹/HRT, 수리학적체류시간
min/SS, 용존고형물, mg·L⁻¹

포말분리기의 고형물 제거효율도 일간 고형물 제거량과 같이 고형물 농도, 수리학적체류시간, 공기상승속도 모두에 의해 영향을 받았으며, 공기상승속도와 수리학적체류시간에 의한 영

향은 유사하였고 고형물 농도에 의한 영향이 가장 적었다(Table 3). 고형물 농도 1과 5 mg·L⁻¹에서는 유의한 차이가 나타나지 않았고, 10 mg·L⁻¹에서 유의하게 낮게 나타났다(P<0.05). 수리학적체류시간이 1분에서 6분으로 증가하면서 일간 고형물 제거량이 감소한 반면, 고형물 제거효율은 유의하게 높아지는 경향을 보였다(P<0.05). 공기상승속도에 따른 고형물 제거효율 일간 고형물 제거량과 같이 증가하는 경향이 나타났다(P<0.05).

포말분리기의 overflow rate는 고형물의 농도가 높아지고 공기상승속도가 빨라지는 것에 따라 점차적으로 증가하였으나, 수리학적체류시간 변화에 의한 유의한 차이는 나타나지 않았다(Table 4, P>0.05). 고형물 농도 1과 5 mg·L⁻¹, 그리고 5와 10 mg·L⁻¹에서 overflow rate는 평균 간의 유의한 차이가 나타나지 않았으나(P>0.05), 10 mg·L⁻¹에서 overflow rate는 1 mg·L⁻¹보다유의하게 높은 값이 나타났다(P<0.05). 포말분리기의 overflow rate에 상대적으로 가장 큰 영향을 준 공기상승속도의 경우에는 공기상승속도가 빨라지면서 overflow rate가 급격하게 상승하였다. 1.10과 1.50 cm·sec⁻¹의 공기상승속도에서 overflow rate는 평균 간 유의한 차이가 없었지만(P>0.05), 2.10 cm·sec⁻¹에서는 유의하게 높은 overflow rate가 나타났다(P<0.05). 수리학적체류시간에 따른 overflow rate에 대한 유의

Table 1. Solids removal rates (g solids·m⁻³·day⁻¹) of foam-fractionator and the result of three-way ANOVA for with hydraulic retention time (HRT), solids concentration (SS) and superficial air velocity (SAV)

		1 min	3 min	6 min	Pooled mean [*]	
1 mg·L ⁻¹	1.10 cm·sec ⁻¹	0.34	0.15	0.14	0.21±0.11	
	1.50 cm·sec ⁻¹	0.56	0.25	0.16	0.32±0.21	
	2.10 cm·sec ⁻¹	0.59	0.26	0.16	0.33±0.23	
	Pooled mean	0.50±0.13	0.22±0.06	0.15±0.01	0.29±0.17 ^x	
5 mg·L ⁻¹	1.10 cm·sec ⁻¹	1.16	0.81	0.75	0.91±0.22	
	1.50 cm·sec ⁻¹	1.35	0.98	0.78	1.04±0.29	
	2.10 cm·sec ⁻¹	1.69	1.46	0.78	1.31±0.47	
	Pooled mean	1.40±0.26	1.08±0.34	0.77±0.01	1.08±0.35 ^y	
10 mg·L ⁻¹	1.10 cm·sec ⁻¹	1.73	1.15	1.02	1.30±0.38	
	1.50 cm·sec ⁻¹	1.79	1.10	1.32	1.40±0.35	
	2.10 cm·sec ⁻¹	2.33	1.76	1.99	2.02±0.29	
	Pooled mean	1.95±0.33	1.34±0.37	1.44±0.50	1.58±0.45 ^z	
Total pooled mean	1.10 cm·sec ⁻¹	1.08±0.70	0.70±0.51	0.64±0.45	0.81±0.53 ^a	
	1.50 cm·sec ⁻¹	1.23±0.63	0.78±0.46	0.75±0.58	0.92±0.54 ^a	
	2.10 cm·sec ⁻¹	1.53±0.88	1.16±0.80	0.98±0.93	1.22±0.79 ^b	
	Total	1.28±0.67 ^B	0.88±0.56 ^A	0.79±0.61 ^A	0.98±0.63	
		Sum of square mean	df	Square mean	F value	P value
Analysis of variance	SS	7.59	2	3.80	99.96	0.000
	HRT	1.25	2	0.62	16.42	0.000
	SAV	0.83	2	0.41	10.91	0.001

^{*}Pooled means±STD having the same superscript are not significantly different at P<0.05 based on Duncan's multiple range test.

한 차이는 나타나지 않았다($P>0.05$).

고 찰

포말분리기의 공기 주입량 당 일간 고형물 제거량과 제거효율은 공기상승속도, 수리학적체류시간, 고형물 농도 모두에서 영향을 받았다. 특히 포말분리기의 공기 주입량 당 일간 고형물 제거량은 고형물 농도에 의해 가장 큰 영향을 받은 것으로 나타났다. 반면 고형물 제거효율의 경우는 공기상승속도에 가장 큰 영향을 받았고, 고형물 농도에 의한 영향은 미미하였다. 고형물 농도의 경우에는 농도값이 증가하면서 포말분리기의 공기 주입량 당 일간 고형물 제거량은 증가하였고 제거효율은 감소하였다. 수리학적체류시간 2.34분, 공기상승속도 $0.85 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ 에서 단백질의 농도 변화에 따른 고형물 제거효율을 조사한 Kim (2002)의 연구에서도, 포말분리기로 유입되는 단백질의 농도가 증가하면서 고형물 제거효율은 감소하나 제거량은 증가하는 경향이 나타났다. 이는 유입단백질의 양과 농도에 비례하게 고형물의 농도가 증가하여 액체와 공기 간 계면과 접촉할 수 있는 단백질 및 고형물의 양이 많아지면서 계면에 흡착되는 단백질과 고형물의 양도 증가하기 때문으로 생각된다. 이와는 대조적으

로 유입 고형물 농도의 증가에 따라 제거효율이 감소하는 것은 유입 고형물 농도가 증가하면서 공기와 액체의 계면에 흡착 제거될 수 있는 고형물 양이 포화 농도에 이르러 고형물 양의 증가에 대해 제거되는 고형물의 양적인 비율이 감소하기 때문으로 판단된다(Urizee and Narsimhan, 1996; Suh et al., 2000a).

수리학적체류시간의 경우에는 1분에서 6분으로 증가하면서 공기 주입량 당 일간 고형물 제거량은 감소하였으나 제거효율은 증가하였다. 수리학적체류시간의 증가는 수중에서 고형물과 공기방울이 접촉하는 시간이 길어지게 되므로 고형물 제거효율은 증가하게 된다(Spotte, 1979; Rubin, 1981; Brown et al., 1999; Kim et al., 2004). 그러나 반대로 고형물 제거량의 경우는 수리학적체류시간이 감소하면서 증가하였는데, 이것은 수리학적체류시간이 감소하게 되면 유량이 증가하게 되고 이에 따라 유입되는 고형물의 양이 증가하면서 공기와 액체의 계면과 접촉하는 양이 많아지기 때문으로 생각된다(Chai et al., 1998; Merz et al., 2011). 수리학적체류시간 변화에 따른 일간 고형물 제거량과 제거효율의 변화를 조사한 Kim (2002)과 Peng (2003)의 연구결과에서도 이러한 경향이 나타났다.

공기상승속도에 따른 고형물 제거량과 제거효율의 경우에는 공기상승속도가 증가함에 따라 고형물 제거량과 제거효율 모

Table 2. The results of multi regression model for solids removal rate ($\text{g solids}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$) of foam-fractionator with hydraulic retention time (HRT), solids concentration (SS) and superficial air velocity (SAV)

		Model [$f(z)$]= $\beta_0 + \beta_1\text{SAV} + \beta_2\text{HRT} + \beta_3\text{SS}$					
		Parameter	Estimates of β	Standard error	t value	P value	
Parameter estimation of variables	Model 1	β_0	0.231	0.120	1.922	0.066	
		β_3	0.141	0.019	7.627	0.000	
	Model 2	β_0	0.543	0.137	3.952	0.001	
		β_2	-0.094	0.028	-3.355	0.003	
		β_3	0.141	0.016	9.057	0.000	
	Model 3	β_0	-0.118	0.208	-0.569	0.575	
		β_1	0.422	0.112	3.758	0.001	
		β_2	0.094	0.022	-4.173	0.000	
			β_3	0.141	0.013	11.264	0.000
		Sum of square mean	df	square mean	F value	P value	
Analysis of variance for the model	Model 1	Regression	7.29	1	7.29	58.165	0.000
		Error	3.13	25	0.13		
	Model 2	Regression	8.29	2	4.15	46.641	0.000
		Error	2.13	24	0.09		
	Model 3	Regression	9.10	3	3.03	52.808	0.000
		Error	1.32	23	0.06		
		R ²		adj R ²		MSEP	
Fitness determination of the model	Model 1		0.699		0.687	0.354	
	Model 2		0.795		0.778	0.298	
	Model 3		0.873		0.857	0.240	

두 증가하였다. 이는 Peng (2003)의 실험결과와 유사한 결과로, 고형물 제거량과 제거효율 모두 공기상승속도가 증가함에 따라 직선적으로 증가하였다. 일반적으로 공기상승속도의 증가로 인해 같은 시간에 더 많은 양의 공기가 주입되면서 공기와 액체의 계면이 더 넓어지게 된다. 이에 따라 공기와 액체의 계면에 고형물이 흡착될 수 있는 기회가 증가하기 때문으로 생각된다. 담수와 해수 조건에서 포말분리기의 성능을 평가한 Suh et al. (1997)와 유당 내 단백질 분리를 위한 포말분리기 효율을 평가한 Mukhopadhyay et al. (2010)도 이와 동일한 경향을 보고한 바 있다. Kim (2002)은 단백질 농도, 공기상승속도, 수리학적체류시간에 대해 포말분리기의 고형물 제거량을 조사하였는데, 고형물 제거량은 3-55 g·m⁻³·min⁻¹의 범위로 나타났다. 본 실험에서는 고형물 제거량을 공기 주입량으로 나누어 주입 공기량에 대한 고형물 제거량으로 계산하였다. 따라서 각기 다른 계산방식과 실험 조건으로 인해 직접적인 비교는 어렵지만, 이를 Kim (2002)의 계산 방식으로 환산할 때의 고형물 제거량은 0.6-20.5 g·m⁻³·min⁻¹에 해당한다. 또한 Peng (2003)의 실험 결과에서도 공기상승속도와 수리학적체류시간에 따라 11.8-23.6 g·m⁻³·min⁻¹의 고형물 제거량이 보고되어, Kim (2002)과 Peng (2003)의 결과는 본 실험 결과에 비해 상대적으로 높은 고형물

제거량을 나타내었다. 이는 Kim (2002)과 Peng (2003)의 실험이 본 실험에 비해 상대적으로 높은 유입 고형물 농도에서 이루어졌기 때문으로 생각된다. 특히 Kim (2002)의 연구는 액용적이 1 L인 소형 포말분리기를 이용하여 실험하였는데, 일반적으로 포말분리기의 단면적이 작을수록 더 높은 효율을 나타낸다고 하였다(Kown, 1971; Martin et al., 2010).

Overflow rate는 고형물의 농도와 공기상승속도가 증가함에 따라 상승하였다. 수리학적체류시간에 의한 영향은 거의 없는 것으로 나타났지만, 공기상승속도에 의해 가장 큰 영향을 받았다. 하지만 모든 고형물 농도에서 수리학적체류시간이 가장 짧은 1분에서 3분으로 증가할 때 overflow rate가 감소하였다가, 가장 긴 6분으로 증가하면서 다시 증가하는 형태의 증감 경향을 보였다. 수확한 포말 내 고형물의 농도의 결과에서도 수리학적체류시간이 3분일 때 상대적으로 가장 높은 수확 고형물 농도가 나타났다. 따라서 수리학적체류시간이 3분일 때 가장 적은 overflow rate가 나타났으며 가장 많은 고형물을 수확할 수 있었다.

포말은 공기와 액체 간의 계면활성 물질에 의해 공기중에서도 형태를 유지한다. 유입되는 단백질 또는 고형물 농도가 증가하게 되면, 공기와 액체 계면에 흡착되는 단백질 또는 고형물의

Table 3. Solids removal efficiency (%) of foam-fractionator and the result of three-way ANOVA with hydraulic retention times (HRT), solids concentrations (SS) and superficial air velocities (SAV)

		1 min	3 min	6 min	Pooled mean ^a	
1 mg·L ⁻¹	1.10 cm·sec ⁻¹	17.8	24.0	43.2	28.3±13.2	
	1.50 cm·sec ⁻¹	39.6	54.3	66.9	53.6±13.7	
	2.10 cm·sec ⁻¹	60.2	79.3	96.7	78.73±183	
	Pooled mean	39.2±21.2	52.5±27.7	68.9±26.8	53.6±25.5 ^y	
5 mg·L ⁻¹	1.10 cm·sec ⁻¹	12.0	25.3	47.0	28.0±17.7	
	1.50 cm·sec ⁻¹	18.9	42.0	47.0	42.3±23.8	
	2.10 cm·sec ⁻¹	32.5	90.4	96.0	73.2±35.4	
	Pooled mean	21.1±10.4	52.6±33.8	70.0±25.0	47.9±30.5 ^y	
10 mg·L ⁻¹	1.10 cm·sec ⁻¹	8.9	17.8	31.6	19.4±11.4	
	1.50 cm·sec ⁻¹	12.0	23.4	56.5	30.6±23.1	
	2.10 cm·sec ⁻¹	20.4	52.3	59.0	43.9±20.6	
	Pooled mean	13.8±6.0	31.2±8.5	49.3±15.2	31.3±19.6 ^x	
Total pooled mean	1.10 cm·sec ⁻¹	12.9±4.5	22.4±4.0	40.6±8.0	25.3±13.2 ^a	
	1.50 cm·sec ⁻¹	23.5±14.4	39.9±15.6	63.3±5.9	42.2±20.50 ^b	
	2.10 cm·sec ⁻¹	37.7±20.4	74.0±19.6	84.1±21.7	65.3±27.7 ^c	
	Total	24.7±16.6 ^A	45.4±26.0 ^B	62.7±22.3 ^C	44.3±26.4	
		Sum of square mean	df	Square mean	F value	P value
Analysis of variance	SS	2,403	2	1,202	12.2	0.000
	HRT	6,501	2	3,251	33.1	0.000
	SAV	7,248	2	3,624	36.9	0.000

^aPooled means±STD having the same superscript are not significantly different at P<0.05 based on Duncan's multiple range test.

Table 4. Overflow rate (%) of foam-fractionator and the result of three-way ANOVA with hydraulic retention times (HRT), solids concentrations (SS) and superficial air velocities (SAV)

		1 min	3 min	6 min	Pooled mean [*]	
1 mg·L ⁻¹	1.10 cm·sec ⁻¹	0.004	0.003	0.009	0.005±0.003	
	1.50 cm·sec ⁻¹	0.028	0.027	0.040	0.032±0.007	
	2.10 cm·sec ⁻¹	0.382	0.092	0.310	0.261±0.151	
	Pooled mean	0.138±0.212	0.041±0.046	0.120±0.166	0.099±0.144 ^x	
5 mg·L ⁻¹	1.10 cm·sec ⁻¹	0.043	0.039	0.081	0.055±0.023	
	1.50 cm·sec ⁻¹	0.494	0.222	0.299	0.338±0.140	
	2.10 cm·sec ⁻¹	3.103	1.467	3.991	1.457±2.197	
	Pooled mean	1.214±1.652	0.576±0.777	1.457±2.197	1.082±1.482 ^{xy}	
10 mg·L ⁻¹	1.10 cm·sec ⁻¹	0.070	0.081	0.104	0.085±0.017	
	1.50 cm·sec ⁻¹	0.806	0.261	0.527	0.531±0.273	
	2.10 cm·sec ⁻¹	4.332	1.556	6.011	4.966±0.912	
	Pooled mean	1.736±2.278	1.633±2.53	2.214±3.295	1.861±2.385 ^y	
Total pooled mean	1.10 cm·sec ⁻¹	0.039±0.033	0.041±0.039	0.065±0.050	0.048±0.038 ^a	
	1.50 cm·sec ⁻¹	0.443±0.391	0.170±0.125	0.288±0.244	0.300±0.267 ^a	
	2.10 cm·sec ⁻¹	2.606±2.021	2.038±2.286	3.438±2.891	2.694±2.188 ^b	
	Total	1.029±1.58 ^A	0.750±1.500 ^A	1.264±2.190 ^A	1.014±1.724	
	Sum of square mean	df	Square mean	F value	P value	
Analysis of variance	SS	14.0	2	7.01	5.92	0.010
	HRT	1.19	2	0.60	0.50	0.612
	SAV	38.4	2	19.2	16.2	0.000

^{*}Pooled means±STD having the same superscript are not significantly different at P<0.05 based on Duncan's multiple range test.

양이 증가하면서 포말이 쉽게 파괴되지 않아, 다량의 overflow rate를 형성하는 것으로 생각된다(Martin et al., 2010; Merz et al., 2011).

공기상승속도가 증가함에 따라 gas holdup도 함께 증가하였다(Table 5). 이는 포말분리기 내 공기상승속도가 증가하면서 주입되는 공기의 양이 증가하고, 포말분리기 내 용액의 비중이 낮아지면서 공기의 상승압이 강해지므로 수면이 상승하기 때문이다(Neethling et al., 2002; Peng, 2003; Martin et al., 2010). 이에 따라 포말이 빠져나가는 수면의 높이가 감소하게 되므로, overflow rate는 공기상승속도의 상승과 함께 증가하는 것으로 생각된다. 또한 overflow rate와 gas holdup이 수리학적체류시간에는 큰 영향을 받지 않은 반면, 공기상승속도에 의해 대부분의 영향을 받았다. Chen (1991)과 Csordas and Wang (2004)도 gas holdup이 포말분리기로 유입되는 유량보다 공기상승속도와 연관성이 높다 논한 바 있다.

본 연구에서는 포말분리기의 성능에 영향을 미치는 주요 운전 요인인 고형물 농도, 수리학적체류시간, 공기상승속도에 따른 포말분리기의 일간 고형물 제거 특성을 조사하였다. 이를 통해 포말분리기의 고형물 제거량 예측모델을 도출하였으며, 이를 이용하여 포말분리기의 적절한 설계와 운전을 위한 기초 자료로 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 포말분리기의 고형물 제

거 성능은 pH, 온도, 물의 계면활성제 농도, 공기와 물의 비율, 고형물의 입도 등과 같이 다양한 물리화학적 요인들에 의해 매우 복합적으로 영향을 받는다(Huguenin and Colt, 1989; Timmons et al., 1995; Cripps and Bergheim, 2000; Brambilla et al., 2008; Bharadwaj and Gupta, 2021). 따라서 보다 정확하

Table 5. Changes of gas holdup (cm) of foam-fractionator with hydraulic retention time (HRT), solids concentration (SS) and superficial air velocity (SAV)

HRT (min)	SS (mg·L ⁻¹)	SAV (cm·sec ⁻¹)		
		1.1	1.5	2.1
1	1	2.4	3.8	6.1
	5	3.5	5.2	7.5
	10	3.5	5.5	8.0
	1	-	1.7	3.7
3	5	1.3	2.9	4.6
	10	1.0	2.5	4.0
	1	-	1.3	3.1
6	5	-	2.7	4.3
	10	0.5	2.2	3.8

계 성능을 예측하고 현장 적용성을 높이기 위해서는 보다 다양한 환경 조건에 대한 연구와 데이터의 축적이 필요할 것으로 생각된다.

References

- Awata S, Tsuruta T, Yada T and Iguchi K. 2011. Effects of suspended sediment on cortisol levels in wild and cultured strains of ayu *Plecoglossus altivelis*. *Aquaculture* 314, 115-121. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.01.024>.
- Bharadwaj TK and Gupta KN. 2021. Dye isolation in a foam fractionation column: Optimization of process parameters. *Mater Today Proc* 57, 1442-1447. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.412>.
- Bilotta GS and Brazier RE. 2008. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Res* 42, 2849-2861. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.03.018>.
- Brambilla F, Antonini M, Ceccuzzi P, Terova G and Saroglia M. 2008. Foam fractionation efficiency in particulate matter and heterotrophic bacteria removal from a recirculating sea-bass (*Dicentrarchus labrax*) system. *Aquac Eng* 39, 37-42. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.05.004>.
- Brown AK, Kaul A and Varley J. 1999. Continuous foaming for protein recovery. *Biotechnol Bioeng* 62, 278-290. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19990205\)62:3<278::AID-BIT4>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19990205)62:3<278::AID-BIT4>3.0.CO;2-D).
- Chai J, Loha V, Prokop A and Tanner RD. 1998. Effect of bubble velocity and pH step changes on the foam fractionation of Spaoramint. *J Agric Food Chem* 46, 2868-2872. <https://doi.org/10.1021/jf970929b>.
- Chapman PM, Popham JD, Griffin J, Leslie D and Michaelson J. 1987. Differentiation of physical from chemical toxicity in solids waste fish bioassay. *Wat Air Soil Poll* 33, 295-308. <https://doi.org/10.1007/BF00294198>.
- Chen S. 1991. Theoretical and experimental investigation of form separation applied to aquaculture. Ph.D. Dissertation. Cornell University, Ithaca, NY, U.S.A.
- Chen S and Malone RF. 1991. Suspended solids control in recirculating aquacultural systems. In: *Proceedings from the Aquaculture Symposium*, Cornell University, Ithaca, NY, U.S.A., 175-186.
- Chen S, Coffin DE and Malone RF. 1993. Production, characteristics, and modeling of aquacultural sludge from a recirculating aquacultural system using a granular media biofilter. In: *Techniques for Modern Aquaculture*. Wang J. ed. St Joseph, MI, U.S.A., 16-25.
- Couturier M, Trofimenkoff T, Buil JU and Conroy J. 2009. Solids removal at a recirculating salmon-smolt farm. *Aquac Eng* 41, 71-77. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2009.05.001>.
- Cripps SJ and Berghheim A. 2000. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquac Eng* 22, 33-56. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(00\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(00)00031-5).
- Csordas A and Wang JK. 2004. An integrated photobioreactor and foam fractionation unit for the growth and harvest of *Chaetoceros* spp. in open systems. *Aquac Eng* 30, 15-30. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2003.07.001>.
- Dwivedy RC. 1973. Removal of dissolved organics through foam fractionation in closed cycle systems for oyster production. *ASAE Paper*, St. Joseph, MI, U.S.A., 73-561.
- Fernandes PM, Pedersen LF and Pedersen PB. 2014. Daily micro particle distribution of an experimental recirculating aquaculture system-A case study. *Aquac Eng* 60, 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.03.007>.
- FIFAC (le Festival International du Film documentaire Amazonie Caraïbes). 1980. Symposium on New Developments in the Utilization of Heated Effluent and Recirculation Systems for Intensive Aquaculture. FIFAC 11th Session, Stavanger, Norway.
- Guilherme MF, Gregersen KJJ and Pedersen LF. 2020. Effects of foam fractionation and chemical disinfection on the removal of different microalgae cultures. *Aquac Res* 51, 3274-3283. <https://doi.org/10.1111/are.14663>.
- Huang D, Liu W, Xu Y, Wu Z, Zheng H, Hu N, Lu K and Jia L. 2018. Desalination for enhancing the recovery of creatine from its wastewater by foam fractionation. *J Mol Liq* 255, 447-453. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.005>.
- Huguenin JE and Colt J. 1989. Design and operating guide for aquaculture seawater systems. Elsevier, Amsterdam, Netherlands., 264.
- Jia L, Liu W, Cao J, Wu Z and Yang C. 2021. Foam fractionation for effective removal of *Pseudomonas aeruginosa* from water body: Strengthening foam drainage by artificially inducing foam evolution. *J Environ Manage* 291, 112628. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112628>.
- Johnson W and Chen S. 2006. Performance evaluation of radial/vertical flow clarification applied to recirculating aquaculture systems. *Aquac Res* 34, 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.05.001>.
- Khater ESG, Ali SA, Bahnasawy AD and Awad MA. 2011. Solids removal in a recirculating aquaculture system. *Misr J Agric Eng* 28, 1178-1196. <http://doi.org/10.21608/MJAE.2011.102635>.
- Kim BJ. 2002. The foam separation process for the removal of contaminant in seawater. Ph. D. Dissertation, Pukyong National University, Busan, Korea.
- Kim BJ, Shin JS, Jeong HS, Na IG, Lee MS and Suh KH. 2004. Effect of hydraulic residence time on the removal of wastes in seawater aquarium using a foam separator. *Korean J Fish Aqua Scie* 37, 58-90. <https://doi.org/10.5657/kfas.2004.37.2.085>.
- Kown BT. 1971. The effects of column height and diameter on the effectiveness of a continuous bubble fractionation system. *Water Res* 5, 93-102. <https://doi.org/10.1016/0043->

- 1354(71)90124-2.
- Lomax KM. 1976. Nitrification with water pretreatment on a closed cycle catfish system. Ph. D. Dissertation, University of Maryland, College Park, MD, U.S.A.
- Magor BG. 1988. Gill histopathology of juvenile *Oncorhynchus kisutch* exposed to suspended wood debris. *Can J Zool* 66, 2164-2169. <https://doi.org/10.1139/z88-323>.
- Martin PJ, Dutton HM, Winterburn JB, Baker S and Russell AB. 2010. Foam fractionation with reflux. *Chem Eng Sci* 65, 3825-3835. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.03.025>.
- McMillan JD, Wheaton FW, Hochheimer JN and Soares J. 2003. Pumping effect on particle sizes in a recirculating aquaculture system. *Aquac Eng* 27, 53-59. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(02\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(02)00038-9).
- Merz J, Zorn H, Burghoff B and Schembecker G. 2011. Purification of a fungal cutinase by adsorptive bubble separation: A statistical approach. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp* 382, 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.12.007>.
- Mukhopadhyay G, Khanam J and Nanda A. 2010. Protein removal from whey waste by foam fractionation in a batch process. *Sep Sci Technol* 45, 1331-1339. <https://doi.org/10.1080/01496391003697382>.
- Nakabayashi T, Takakusagi Y, Iwabata K and Sakaguchi K. 2011. Foam fractionation of protein: Correlation of protein adsorption onto bubbles with a pH-induced conformational transition. *Anal Biochem* 419, 173-179. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2011.08.019>.
- Neethling SJ, Lee HT and Cilliers JJ. 2002. A foam drainage equation generalized for all liquid contents. *J Phys Condens Matter* 14, 331. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/14/3/304>.
- Palacios GL and Timmons MB. 2001. Determining design parameters for recovery of aquaculture wastewater using sand beds. *Aquac Eng* 24, 289-299. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(01\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(01)00070-X).
- Peng L. 2003. Design, Management and performance of a laboratory scale seawater recirculating system for Korean rockfish *Sebastes schlegeli* culture. Ph. D. Dissertation, Pukyong National University, Busan, Korea.
- Pfeiffer TJ, Osborn A and Davis M. 2008. Particle sieve analysis for determining solids removal efficiency of water treatment components in a recirculating aquaculture system. *Aquac Eng* 39, 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.05.003>.
- Reinemann DJ. 1987. A theoretical and experimental study of air lift pumping and aeration with reference to aquaculture applications. Ph.D. Dissertation, Cornell University, Ithaca, NY, U.S.A.
- Rubin E. 1981. Foam fractionation - some recent studies. Theory, practice and process principles for physical separations. In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference. Freeman MP and Fitz Patrick J, eds. Oxford Brookes University, Oxford, U.K., 750.
- Rudolfs W and Balmat JL. 1952. Colloids in sewage. I. Separation of sewage colloids with the aid of the electron microscope. Wiley, Hoboken, NJ, U.S.A., 247-256.
- Schumann M and Brinker A. 2020. Understanding and managing suspended solids in intensive salmonid aquaculture: a review. *Rev Aquac* 12, 2109-2139. <https://doi.org/10.1111/raq.12425>.
- Spotte S. 1979. Fish and invertebrate culture: Water management in closed systems, 2nd edition. Wiley, Hoboken, NJ, U.S.A., 46-50.
- Stickney RR. 1979. Principles of warmwater aquaculture. John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, U.S.A., 413.
- Suh KH, Kim BJ, Bong SH, Lee JH, Kim YH and Kim SK. 2000a. The removal of aquacultural wastes by foam separator from sea water. I. The effect of initial protein concentration. *J Korean Inst Chem Eng* 38, 745-752.
- Suh KH, Kim BJ, Kim YH, Lee SH, Suh CS, Cheon JK and Jo JY. 2002. Performance of parallel current air driven type foam separator in a pilot-scale recirculating aquaculture system. *Korean J Fish Aquat Sci* 35, 140-145. <https://doi.org/10.5657/kfas.2002.35.2.140>.
- Suh KH, Lee MG, Lee MS, Kim BJ, Kim EJ and Cho MC. 1997. Treatment of aquaculture recirculating water by foam separation-II. Characteristics of solids removal. *J Korean Fish Soc* 30, 334-339.
- Suzuki Y and Maruyama T. 2002. Removal of suspended solids by coagulation and foam separation using surface-active protein. *Water Res* 36, 2195-2204. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00439-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00439-0).
- Timmons MB. 1994. Aquaculture water reuse system: Engineering design and management. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 247-279.
- Timmons MB and Chen S and Weeks NC. 1995. Mathematical model of a foam fractionator used in aquaculture. *J World Aquac Soc* 26, 225-233. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1995.tb00250.x>.
- Timmons MB, Youngs WD, Regenstein JM, German GA, Bowser PR and Bisogni CA. 1987. A system approach to the development of an integrated trout industry for New York State. Final report presented to the New York State department of agriculture and markets, Cornell University, Ithaca, NY, U.S.A.
- Urizee F and Narsimhan G. 1996. Effects of kinetics of adsorption and coalescence on continuous foam concentration of proteins: Comparison of experimental results with model predictions. *Biotechnol Bioeng* 51, 384-398. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19960820\)51:4%3C384::AID-BIT2%3E3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19960820)51:4%3C384::AID-BIT2%3E3.0.CO;2-E).
- Valdes-Krieg E, King CJ and Sephton HH. 1975. Removal of surfactants and particulate matter from sea water desalination blowdown brines by foam fractionation. *Desalination*

16, 39-53. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)84091-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)84091-6).

Yan J, Wu ZL, Zhao YL and Jiang CS. 2011. Separation of tea saponin by two-stage foam fractionation. *Sep Purif Technol* 80, 300-305. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.05.010>.

Zhu S and Chen S. 2001. Effects of organic carbon on nitrification rate in fixed film biofilters. *Aquac Eng* 25, 1-11. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(01\)00071-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(01)00071-1).