KFAS 한국수산과학회지 Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences
한수지 55(1), 10-16, 2022

Original Article
Korean J Fish Aquat Sci 55(1),10-16,2022

# 고분자 응집제를 이용한 반순환여과양식시스템의 배출수 내 고형물 응집 효율 및 입도 분포

서준혁 · 운성천 · 김지수 · 박정환*

부경대학교 수산생물학과

# Flocculation Efficiency and Particle Distribution of Total Suspended Solids in the Effluent from Semi-recirculating Aquaculture Systems Treated with Polymers

Junhyuk Seo, Sungchun Woon, Jisoo Kim and Jeonghwan Park*

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

Interest in effluent treatment is currently increasing and the use of polymetric coagulants is considered as a pretreatment of physical filtration prior to effluent discharge to increase solids recovery. A jar test evaluated effluent treatment efficiency of polymeric coagulants for semi-recirculating aquaculture systems. The particle coagulation efficiency and distribution were evaluated at different polymer dosages in freshwater and seawater effluents. The polymer was added at 0.005-0.08 mL/g of total suspended solids (TSS) in the effluents. TSS in the supernatant after coagulation decreased with increasing polymer dose in the freshwater, while showing no corresponding changes with dose in the seawater. However, in all treatments for both effluents, the removal efficiency was above 90%, regardless of the dose in the tested range. Both the De Brouckere Mean Diameter (DBMD) and volumetric median diameter (VMD) were all above 100 μm in the freshwater effluent. In the seawater effluent, the particle size appeared to be larger than that in freshwater, ranging from 400-1,000 μm for both DBMD and VMD. Considering that the typical pore size of physical filtration in aquaculture is between 60 and 200 μm, the use of polymers is expected to improve the practicality of physical filtration for efficient treatment.

Keywords: Semi recirculating aquaculture systems, Suspended solids, Effluent, Polymer, Particle distribution

## 서 론

전세계적으로 양식 산업이 발달하고 생산량이 증가함에 따라 환경 오염에 대한 우려 또한 높아지고 있다. 특히 양식장에서 발생하는 어류의 배설물이나 사료 찌꺼기 등의 배출이 주요 환경오염원으로 인식되어 양식장 배출수에 대한 규제가 확대되고 있는 실정이다(Boyd, 2003; Piedrahita, 2003; Ahmad et al., 2021). 이러한 양식장 배출수 관련 문제는 국내 수산양식업에서도 주요 현안문제 중 하나로 부각되고 있다. 특히 연안에서 물을 연속적으로 취수하여 양식하는 유수식 양식장들에서 배출되는 배출수로 인해 연안 오염이 가속화되고 있다. 이로 인해 환경오염, 잦은 질병 발생, 양식 수산물에 대한 부정적 인식 확산 등의 여러 문제들이 발생하고 있다(Kang et al., 1998; Lee et al., 2002; Park et al., 2013). 국내에서도 이러한 상황을 고려하여 양식장 배출수 내 부영양화 물질의 배출에 대한 적절한 기준을 마련하고 적용하기 위한 방안을 모색하고 있다(MOF, 2018).

이러한 환경 문제들에 대한 대안으로서 순환여과양식시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 순환여과양식시스템은 다양한 수처리 장치들을 이용하여 지속적으로 사육수를 재사용하며 환경독립적으로 운영할 수 있고, 상대적으로 물의 사용이 적다는 이점이 있다(Martins et al., 2010; Badiola et al., 2012). 연안에 양식 노폐물이 모두 배출되는 형태의 가두리 또는 지속적으로 막대한 양의 배출수가 발생하는 유수식과 달리 배출수의 양이 상대적으로 적기 때문에 배출수의 처리가 용이하다. 순환여과

*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 Licens (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.2022.0010
Korean J Fish Aquat Sci 55(1), 10-16, February 2022
Received 18 January 2022; Revised 7 February 2022; Accepted 10 February 2022
저자 직위: 서준혁(대학원생), 운성천(대학원생), 김지수(학부생), 박정환(부교수)

양식시스템에는 일반적으로 드럼스크린필터, 입자 충진식 여과기, 중력식 침전지, 포말분리기 등 고형물을 제거하는 물리적인 공정이 포함된다. 시스템 외부로 빠져나오는 최종 배출수 처리 공정에서는 이와 같은 1차 물리적 수처리 공정에서 발생한 고형물이 환경으로 방출되는 것을 방지하는 재포집 공정이 필요하다. 이 과정을 통해서 순환여과양식시스템은 최종적으로 환경 친화성을 확보할 수 있다. 주로 시스템 내에서 이용하는 물리적 제거 공정과 유사한 방식들을 이용하거나 합성 또는 천연 응집제를 이용하여 고형물을 화학적으로 응집 제거하는 방식 등이 대표적이다. 그러나 상대적으로 배출수의 양이 적은 순환여과양식시스템이라 하더라도 배출수 내 고형물 농도는 축산 또는 도시 폐수에 비해 상당히 희석되어 있고 물리적 또는 화학적 방법 단독으로는 충분한 고형물의 제거를 기대하기 어렵다. 따라서 화학적 응집을 통해 최종 배출수 내 고형물 입자를 확대한 후 물리적 여과 과정의 효율을 향상시키는 방식이 주로 많이 이용된다(Sharrer et al., 2009; Sher et al., 2013).

이 때 사용되는 고분자 응집제인 폴리머는 크게 음이온성, 비이온성, 양이온성으로 나뉘며 비이온성의 아크릴아마이드(acrylamide)를 중합하여 제조한 비이온성 폴리머를 기본으로 한다. 이를 가수분해하거나 음이온성 단량체와 공중합하여 음이온성 폴리머를 제조한다. 양이온성 폴리머의 경우에도 비이온성의 아크릴아마이드와 양이온성 단량체를 공중합하여 제조한다(Park et al., 2010). 일반적으로 음이온성 폴리머는 무기 현탁물질의 응집 및 침전 촉진을 위해 주로 이용된다. 비이온성 폴리머는 광산, 금속제련 폐수의 응집 및 침전, 양이온성 폴리머는 각종 도시하수, 산업폐수 유기오니의 응집 및 탈수 촉진을 위해 주로 이용된다.

폴리머 응집제는 배출수의 양 또는 배출수 내 고형물 농도 등에 따라 상이하게 투입하는데, 폴리머 응집제의 투입량은 고형물 응집 효율과 배출수 처리 공정의 운영 비용에도 영향을 미친다(Ebeling et al., 2005; Rishel et al., 2006). 또한 응집된 고형물 입자의 형태 및 크기는 고형물 cake의 형성 및 탈수 효율에 직접적인 영향을 미친다(Cripps, 1995; True et al., 2004). 즉, 처리수 내 고형물의 크기와 성상, 목적으로 하는 응집 고형물의 크기, 응집 처리 후 물리적 처리의 종류에 따라 적정 폴리머 응집제 투입량을 결정하여야 한다. 양식산업에 있어서 이러한 배출수 처리 및 폴리머 응집제의 적정 이용량에 대한 자료가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 양식장 배출수 내 고형물을 저감하고 친환경 양식을 수행하기 위한 기초 자료로서 현행 담수 및 해수 양식장 배출수에 대한 합성 폴리머 응집제의 투입량에 따른 고형물 응집 효율과 응집 후 고형물의 분포 특성을 평가하였다.

## 재료 및 방법

### 평가 시료 제조

본연구에서는 담수와 해수에서 합성 폴리머 응집제의 처리 농도별 고형물 응집 효율과 입자 분포 특성을 평가하기 위해, 담수 및 해수에서 운영되고 있는 양식 시스템의 배출수를 이용하였다. 담수 양식장의 경우, 반순환여과식으로 운영되는 경상북도 상주 소재 무지개송어 양식장(전체 수량, 약 3,300톤)의 최종 배출수를 이용하였다. 해수의 경우에는 경상남도 고성군 소재 부경대학교 수산과학기술센터에서 운전하고 있는 파일럿 규모의 넙치 반순환여과양식시스템(전체 수량, 약 25톤)에서 배출되는 최종 배출수를 실험에 이용하였다. 두 시스템의 내부 순환율은 모두 일간 약 18-24회전이었으며, 일간 새물의 교환율은 전체 시스템 수량 대비 약 1회전으로 운영되었다. 따라서 전체 시스템 수량 대비 약 1회전에 해당되는 배출수가 연속적으로 방출되고 있었으며, 각각의 배출수를 채수하여 실험에 필요한 농축 시료을 제조하였다. 농축 시료는 담수 및 해수 양식 시스템에서 채수한 시료 내의 고형물 입자에 대한 영향을 최소화하기 위해 중력에 의한 침전법으로만 침전시킨 후 아래 침전물만을 채취하여 제조하였으며, 제조된 농축 시료는 4°C에서 냉장보관하였다. 이 때 각각의 농축 시료는 '해양환경공정시험기준'에 따라 총 부유고형물(total suspended solids, TSS)를 측정하였다. 채수된 배출수의 기타 수질 요인에 대한 분석값을 Table 1에 나타내었다.

### 폴리머 응집제 및 처리 농도

본 실험에서는 배출수 내 고형물의 응집을 위해 액상형의 양이온 합성 폴리머 응집제를 이용하였으며, 해수와 담수 특성에 따라 상이한 폴리머가 이용됨에 따라 각 시료에 적합한 제품을 선정하였다. 폴리머 응집제는 무지개송어 양식장에서 발생한 배출수를 대상으로 하는 담수용 폴리머 응집제의 경우에는 에멀젼형 고분자 응집제(FLOPAM C-840TBD; SNF Korea, Seoul, Korea)를 사용하였다. 넙치 양식장의 배출수를 대상으로 하는 해수용 폴리머 응집제는 에멀젼형 고분자 응집제(ZetagTM 9186FS; Solenis, Wilmington, DE, USA)를 사용하였다.

각각의 배출수를 250 mL 삼각플라스크에 분주하였고, 이 때 앞서 논한 바와 같이 미리 제조하여 냉장보관한 농축 시료와 3차 증류수를 이용하여 각 삼각플라스크 내 TSS의 양이 1 g이 되도록 조정하였다. 이 1 g의 TSS를 포함한 250 mL의 시료에 담

Table 1. pH, total ammonia nitrogen (TAN), nitrite nitrogen ($NO_2^-$-N), nitrate nitrogen ($NO_3^-$-N), turbidity of sampled effluents from semi-recirculating aquaculture systems (Mean±SE)

| Parameter | Freshwater | Seawater |
|---|---|---|
| pH | 7.94±0.06 | 7.87±0.05 |
| TAN (mg/L) | 0.23±0.01 | 0.02±0.01 |
| $NO_2^-$-N (mg/L) | 0.15±0.02 | 0.08±0.03 |
| $NO_3^-$-N ((mg/L) | 40.67±15.70 | 12.00±4.36 |
| Turbidity (NTU) | 6.67±1.15 | 0.01±0.00 |

수용 및 해수용 폴리머 응집제를 각각 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08 mL씩 혼합하였다. 이 때 실험구의 설정은 폴리머 제조 업체에서 제시하고 있는 정보를 기준으로 설정하였고(SNF Korea), 모든 실험은 3회 반복실험으로 실시되었다.

### 고형물 응집 효율 및 입도 분포 평가

각각의 처리 농도에서 폴리머 응집제가 투입된 시료는 5분간 자력교반기를 이용해 교반하여 충분히 혼합한 뒤, 10분간 응집된 고형물을 침전시켰다(Fig. 1). 10분이 경과한 후 처리 시료의 상등액 50 mL를 채취하여 '해양환경공정시험기준'에 따라 TSS 측정을 실시하였고, 폴리머에 의한 상등액 내 고형물 저감 수준을 아래의 관계식에 따라 평가하였다.

상등액 내 고형물 감소율(%)
=[1–{4,000–(상등액 내 TSS 값)}/4000]×100 …… 식(1)

폴리머 응집제 처리에 따른 고형물의 응집 양상을 평가하기 위해 교반이 종료되는 즉시 침전시키지 않은 시료 50 mL를 채취하였고, 이 시료를 입도분석기(Mastersizer 3000; Malvern Panalytical, Malvern, UK)을 이용하여 전체 고형물의 입도를 분석하였다. 분석한 고형물의 입도 자료를 이용하여 고형물 입자의 용적을 기준으로 각각 평균 직경을 산출한 De Brouckere mean diameter (DBMD; 고형물 입자의 용적 평균값, μm)와 고형물 입자 직경의 중간값(50%)인 volume median diameter (VMD; 고형물 입자의 용적 중심값, μm) 값을 아래의 식들을 통해 계산하였다.

$$\text{De Brouckere Mean Diameter (DBMD, μm)} = \frac{\sum_i^n D_i^3}{\sum_i^n D_i^2} \cdots\cdots \text{식(2)}$$

$$\text{Volume Median Diameter (VMD, μm)} = \left(\frac{n+1}{2}\right)^{th} \cdots\cdots \text{식(3)}$$

### 통계 분석

통계 처리는 SPSS 27 통계프로그램을 이용하여 실시하였다. One way ANOVA test를 실시하여 통하여 결과값들 간의 유의성 분석을 실시하였다. 이 때, 등분산성 검정을 위해 Levene 검정을 실시했다. 등분산일 경우에는 Tukey's HSD test로, 등분산이 아닐 경우에는 Games-Howell's multiple range test로 결과값의 평균값 간의 유의성을 검정하였다.

## 결 과

### 처리 시료의 상등액 내 고형물 농도 변화

담수 및 해수 시료에 대해 각 폴리머 응집제를 처리한 후 상등액 내 고형물 농도 변화를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었고, 응집 효율 결과를 Table 2에 나타내었다. 담수 시료의 경우에는 폴리머 응집제 주입량이 많아짐에 따라 TSS가 유의하게 감소하는 경향이었으나($P>0.05$) 해수 시료의 경우에는 실험구 간의 유의한 차이가 나타나지 않았다($P<0.05$). 응집 효율의 경우에는 담수와 해수 시료 모두 전체 실험구에서 90% 이상의 높은 응집 효율이 나타났다.

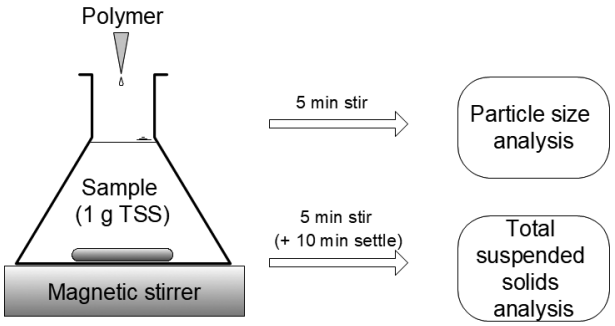


Fig. 1. The schematic diagram of the optimal polymer treatment rate evaluation test.

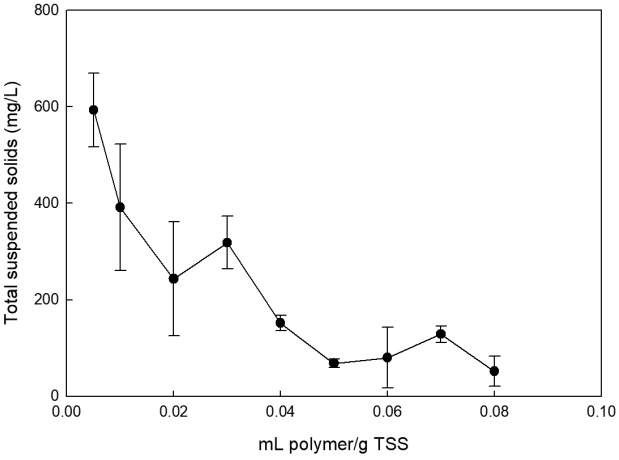


Fig. 2. Changes of total suspended solids concentrations in the effluents from the freshwater semi-recirculating aquaculture system with different polymer dosing rates (Mean±SE).

### 폴리머 응집제 처리 배출수 내 고형물 입도 분포

담수 및 해수 시료의 입도분석 결과는 Table 3와 Table 4에 나타내었다. 담수 시료의 경우에는 DBMD와 VMD의 모든 항목에서 실험구 간의 유의한 차이가 없었다($P>0.05$). 해수 시료의 경우, DBMD 항목에 대해서는 실험구 간에 유의한 차이가 있었고, 0.02 mL/g TSS의 폴리머 주입량에서 1031±97 μm로 가장 높은 값이 나타났다($P<0.05$). VMD 항목에서도 실험구 간에 유의한 차이가 있었고, 담수의 경우와 같이 0.02 mL/g TSS

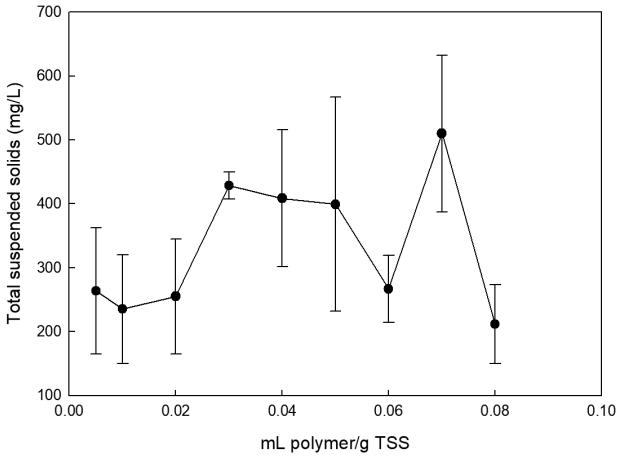


Fig. 3. Changes of total suspended solids concentrations in the effluents from the seawater semi-recirculating aquaculture system with different polymer dosing rates (Mean±SE).

의 폴리머 응집제 주입량에서 891±98 μm으로 가장 높은 값이 나타났다(P<0.05).

## 고 찰

순환여과양식시스템의 경우는 물을 지속적으로 재이용하므로 배출수의 양이 상대적으로 매우 적고 고형물이 농축되어 있어 상대적으로 배출수 내 유기 고형물을 처리하는 것이 용이하다. 일반적으로 배출수 내 고형물을 여과하기 위하여 배출수가 최종적으로 환경으로 방류되기 전 침전조, 드럼스크린필터, 입자 충진식 여과기, Geotextile bag filter 등을 통해 물리적 여과를 하는 방법이 많이 이용된다(Cripps and Bergheim, 2000; Pfeiffer et al., 2008). 그러나 양식장 배출수는 여전히 상당히 높은 수준으로 희석되어 있고 고형물은 함수율이 높아, 물리적 여과만으로는 배출수 내 고형물을 효과적으로 제거하기 어렵다. 이에 물리적 여과 과정 전 단계에 폴리머 응집제를 이용하여 배출수 내 고형물의 크기를 확대함으로써, 물리적 여과 효율을 높이는 노력들이 이루어지고 있다(Ebeling et al., 2006; Sharrer et al., 2010; Boxman et al., 2015). 적절한 폴리머 응집제의 이용과 물리적 여과를 이용하는 배출수 처리 공정은 고형물 집적 및 탈수 뿐만 아니라, 배출수 내의 인(phosphorus), 유기 탄소, 질소성 화합물 등의 저감효과도 얻을 수 있다는 이점이 있다(Schwartz et al., 2004; Sharrer et al., 2010).

대부분의 물리적 여과는 여과 매질의 망목이나 공극의 크기를 줄임으로써 더 작은 크기의 고형물을 제거할 수 있다. 그러나 망목 및 공극의 크기를 줄이게 되면 물리적 여과 장치의 규모가 상대적으로 커지고 경비가 상승할 수 있다(Pfeiffer et al., 2008; Dolan et al., 2013). 잦은 막힘 현상으로 유지관리에도 더 많은 노력이 필요하다는 단점이 있다. 따라서 배출수와 폴리머 응집제를 혼합함으로써 배출수 내 고형물 입자를 확대할 수 있어 상대적으로 작은 규모의 드럼스크린필터, 벨트필터, 입자 충진식 여과기를 이용하여서 높은 고형물 집적 효율을 나타낼 수 있다(Ebeling et al., 2006; Sharrer et al., 2010). 특히 최근에는 공정 운영의 간편성 및 효율성 측면에서 Geotextile bag filter를 이용한 최종 배출수 처리 공정을 많이 채택하고 있다(Gibson et al., 2020). Geotextile bag filter는  일반적으로 함수비가 높은 폐기물 및 폐수를 탈수하는 목적으로 이용된다. Geotextile bag filter는 플라스틱 섬유 재질의 bag 형태를 한 필터로, 필터 표면의 미세한 공극을 통해 배출수 내의 물만 외부로 침출되는 원리를 이용한다. 함수율이 굉장히 높은 양식 배출수의 특성과 양식장 규모에 따라 필터의 규모 및 형태를 쉽게 변경할 수 있다. 또한 물리적 여과기에 비해 경비면에서도 유리한 측면이 있어 최

Table 2. Flocculation efficiencies (%) of total suspended solids in the effluents from semi-recirculating aquaculture systems with different dosing rates of polymers (Mean±SE)

| Polymer dose (mL/g TSS) | Removal efficiency (%) | |
|---|---|---|
| | Freshwater | Seawater |
| 0.005 | 40.7±0.1[a] | 73.7±0.2 |
| 0.01 | 60.8±0.2[ab] | 76.5±0.1 |
| 0.02 | 75.7±0.2[ab] | 74.5±0.2 |
| 0.03 | 68.2±0.1[b] | 57.2±0.0 |
| 0.04 | 84.8±0.0[b] | 59.1±0.2 |
| 0.05 | 93.2±0.0[b] | 60.1±0.3 |
| 0.06 | 92.0±0.1[b] | 73.3±0.1 |
| 0.07 | 87.2±0.0[b] | 49.0±0.2 |
| 0.08 | 94.8±0.1[b] | 78.8±0.1 |
| P value | 0.001 | 0.368 |

Table 3. De Brouckere mean diameter (DBMD) and volume media diameter (VMD) in the effluents from freshwater semi-recirculating aquaculture systems with different dosing rates of polymers (Mean±SE)

| Polymer dose (mL/g TSS) | Particle size (μm) | |
|---|---|---|
| | DBMD | VMD |
| 0.005 | 191±20 | 93.1±7.5 |
| 0.01 | 136±21 | 59.9±9.4 |
| 0.02 | 160±25 | 72.6±14.0 |
| 0.03 | 137±16 | 60.9±6.3 |
| 0.04 | 196±28 | 105±27 |
| 0.05 | 157±6 | 74.2±4.1 |
| 0.06 | 150±9 | 74.3±6.1 |
| 0.07 | 203±42 | 114±34 |
| 0.08 | 190±33 | 101±31 |
| P value | 0.382 | 0.418 |

근 양식 배출수 처리 공정에 많이 이용되고 있으며, 대부분 고형물 포집 및 탈수 효율의 극대화를 위해 응집제와 함께 사용된다(Sharrer et al., 2009; Guerdat et al., 2013; Gibson et al., 2020).

폴리머 응집제를 이용함으로써 최종 배출수의 물리적 여과 효율을 높일 수 있는 장점은 있으나, 최종 배출수 처리 공정의 경제적인 적용 방안을 마련하는 것이 중요하다. 따라서 물리적 여과기에서 제거하고자 하는 고형물의 목표 크기와 목표 크기로 고형물을 응집할 수 있는 적정 폴리머 응집제의 이용 기준을 마련하는 것이 필요하다. 순환여과양식시스템의 최종 배출수 처리를 위해서 물리적 여과기를 이용할 경우, 물리적 여과기의 망목 또는 공극은 일반적으로 약 100 μm 이상 되는 고형물 입자를 제거하는 것을 목표로 한다. 따라서 응집제의 혼합 농도도 배출수 내 대부분의 고형물의 입자 크기가 100 μm 이상이 되도록 결정되는 것이 바람직하다.

실험에서 담수 시료의 경우에는 폴리머 응집제 주입량이 많아지면서 고형물 응집 효율이 개선되는 경향을 보였지만 그 차이는 극히 미미한 수준이었다. 입도분석 결과, DBMD 항목에 대해서는 모든 실험구의 평균 직경이 100 μm를 초과하는 것으로 나타났다. VMD 항목의 경우, 0.04, 0.07, 0.08 mL/g TSS의 폴리머 응집제 주입량에서 평균 입자 직경이 100 μm를 초과하는 것으로 나타났지만 가장 낮은 0.005 mL/g TSS의 폴리머 응집제 주입량에서도 실험구 내 반복구 중 평균 입자의 직경이 100 μm를 초과하는 경우가 발생하였다. 해수 시료의 경우, 0.08 mL/g TSS의 폴리머 응집제 처리구간에서 고형물 응집 효율이 가장 높게 나타났지만, 전체 실험구에서 60% 이상의 높은 응집 효율을 보였으며 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 입도분석 결과에서는 DBMD 항목에서는 입자들의 평균 직경이 약 500-1,000 μm의 범위로 상대적으로 크게 나타났다. 뿐만 아니라 VMD 항목 또한 약 400-900 μm 범위 내로 나타났다. 이와 같이 동일한 농도의 폴리머 응집제를 처리하였음에도 해수 시료에서 응집입자가 상대적으로 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Debye-Hückel 이론에 따르면 전해질에 존재하는 이온의 활동도는 이온 농도의 증가에 따라 감소하게 된다. 이때, 양이온으로부터 가장 먼 거리에 있는 음이온까지의 거리를 Debye length라 부르게 되는데, 이는 입자 간의 거리를 나타내는 지표 중 하나로 이용된다. 이온강도와 Debye length 간의 상관관계는 아래의 두 식을 만족한다.

$$l \propto 1/\sqrt{I} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{식(4)}$$

$l$, Debye length, $I$, 이온강도

$$I = \frac{1}{2}\sum \propto c_j z_j^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{식(5)}$$

$c_j$, 이온농도, $z_j^2$, 이온전하

즉, 이온강도가 높으면 입자간 거리가 감소하게 되고 정전기적 인력이 증가하여 입자간충돌이 이루어질 때 서로 붙을 확률이 높아진다는 것을 의미한다. 따라서 상대적으로 이온의 농도 및 강도가 높은 해수 시료에서 보다 높은 응집효율을 보였을 것으로 사료된다(Kim and Bae, 1999; Muthukumar, 2002). 또한 본 연구에서 설정한 폴리머 응집제 주입량의 10배 이상으로 과량 첨가하는 경우에는 담수 및 해수 시료 전체가 뿌옇게 변하는 현상이 발생했는데, 이는 입자 표면 전체가 과도한 양의 폴리머 응집제로 코팅되어 다른 입자와 합쳐질 수 없게 되거나 충돌효과가 감소하는 현상으로 사료된다(Moon, 2001; Ebeling et al., 2006). 이는 상대적으로 고농도 폴리머 주입량의 해수 시료에서의 상등액의 TSS 분석에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

폴리머 응집제를 고형물 제거 장치와 함께 사용할 때의 적정 주입량을 선정하기 위해서는 고형물 제거 장치의 망목 및 공극에 대한 고려가 필수적이다. 앞서 논한 바와 같이 일반적으로 양식장 배출수 처리 공정에 이용되는 Geotextile bag filter의 공극은 100 μm 전후이다. 따라서 배출수 처리 공정에 Geotextile bag filter를 사용할 경우, 담수용 폴리머 응집제는 약 0.01 mL/g TSS의 폴리머 응집제 주입량에서도 60% 이상의 높은 응집 효율을 보이며 응집 고형물의 크기 역시 공정에 충분히 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 해수 시료의 경우에는 가장 폴리머 응집제 주입량이 적었던 0.005 mL/g TSS의 폴리머 응집제 주입량에서도 입도분석 항목 전체에 대해 평균 입자 직경이 약 400 μm를 초과한 것으로 나타났다. 해수용 폴리머 응집제의 경우에는 0.005 mL/g TSS의 폴리머 응집제 주입량으로도 충분히 Geotextile bag filter를 이용한 배출수 처리 공정에 적용이 가능하며 70% 이상의 높은 응집 효율을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 일반적으로 공극의 크기가 60-200 μm인 망을 사용하는 드럼스크린필터와 벨트필터의 경우에도 0.005 mL/g TSS의 폴리머 응집제 주입량을 적용할 때 시설 규모의 조정 및 고형물

Table 4. De Brouckere mean diameter (DBMD) and volume media diameter (VMD) in the effluents from seawater semi-recirculating aquaculture systems with different dosing rates of polymers (Mean±SE)

| Polymer dose (mL/g TSS) | Particle size (μm) | |
|---|---|---|
| | DBMD | VMD |
| 0.005 | 597±67$^{b}$ | 436±52$^{b}$ |
| 0.01 | 701±40$^{ab}$ | 578±27$^{ab}$ |
| 0.02 | 1031±97$^{a}$ | 891±98$^{a}$ |
| 0.03 | 776±28$^{ab}$ | 644±29$^{ab}$ |
| 0.04 | 736±66$^{ab}$ | 629±28$^{ab}$ |
| 0.05 | 741±129$^{ab}$ | 662±106$^{ab}$ |
| 0.06 | 577±40$^{b}$ | 467±35$^{b}$ |
| 0.07 | 858±164$^{ab}$ | 704±159$^{ab}$ |
| 0.08 | 621±22$^{ab}$ | 482±12$^{b}$ |
| P value | 0.035 | 0.014 |

분리 효율 증대가 가능할 것으로 판단되며, 이는 양식 시설의 경제성 측면에서 이점으로 작용할 수 있다(Cripps and Bergheim, 2000; Dolan et al., 2013). 또한 양식 시스템에서의 폴리머 응집제는 최종 폐수 처리 공정에 이용되기 때문에 양식 생물과의 접촉 가능성은 극히 낮지만, 적용하려는 폴리머 응집제의 생물 독성을 고려하여 최종 폐수 처리 공정을 설계하는 것이 요구될 것이다(Busi et al., 2016).

하지만 폴리머 응집제의 형태, 성분, 응집 원리 등이 다양하며, 적용 시설 간의 운영 요인 및 환경의 차이가 있기 때문에 양식장 배출수 처리공정에 적용을 위한 적정 폴리머 응집제 사용 조건 도출을 위해서는 보다 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다

## 사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## References

Boyd CE. 2003. Guidelines for aquaculture effluent management at the farm-level. Aquaculture 266, 101-112. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00471-X.

Badiola M, Mendiola D and Bostock J. 2012. Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. Aquac Eng 51, 26-35. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.07.004.

Boxman SE, Kruglick A, McCarthy B, Brennan NP, Nystrom M, Ergas SJ, Hanson T, Main KL and Trotz MA. 2015. Performance evaluation of a commercial land-based integrated multi-trophic aquaculture system using constructed wetlands and geotextile bags for solids treatment. Aquac Eng 69, 23-36. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.09.001.

Busi S, Karuganti S, Rajkumari J, Paramanandham P and Pattnaik S. 2016. Sludge settling and algal flocculating activity of extracellular polymeric substance (EPS) derived from *bacillus cereus* SK. Water Environ J 31, 97-104. https://doi.org/10.1111/wej.12215.

Cripps SJ. 1995. Serial particle size fractionation and characterization of an aquacultural effluent. Aquaculture 133, 323-339. https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)00021-S.

Cripps SJ and Bergheim 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.

Dolan E, Murphy N and O'Hehir M. 2013. Factors influencing optimal micro-screen drum filter selection for recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 56, 42-50. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.04.005.

Ebeling JM, Rishel KL and Sibrell PL. 2005. Screening and evaluation of polymers as flocculation aids for the treatment of aquacultural effluents. Aquac Eng 33, 235-249. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.02.001.

Ebeling JM, Welsh CF and Rishel KL. 2006. Performance evaluation of an inclined belt filter using coagulation/flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from microscreen backwash effluent. Aquac Eng 35, 61-77. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.006.

Guerdat TC, Losordo TM, DeLong DP and Jones RD. 2013. An evaluation of solid waste capture from recirculating aquaculture systems using a geotextile bag system with flocculant-aid. Aquac Eng 54, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.10.001.

Gibson TF, Watanabe WO, Losordo TM, Whitehead RF and Carroll PM. 2020. Evaluation of chemical polymers as coagulation aids to remove suspended solids from marine finfish recirculating aquaculture system discharge using a geotextile bag. Aquac Eng 90, 102065. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102065.

Kang JC, Park SI and Kim SG. 1998 . The development of filter for environmental improvement in land based seawater fish farm II. Purification efficacy of inlet and outlet seawater by filter. J Korean Fish Soc 31, 914-919.

Kim JY and Bae YC. 1999. Phase behaviors of solid polymer electrolytes: applicability of an extended Debye-Hückel theory. Polymer 40, 1979-1984. https://doi.org/10.1016/S0032-3861(98)00415-7.

Lee YD, Kim CY and Kang MP. 2002. A study on the water quality characteristics of aquacultural effluents by electrolysis. J Kor Technol Soc Wat Was Wat Treat 10, 41-49.

MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2018. A study on the development of a preventive aquaculture system for healthy and safe consumption of aquatic products. MOF, Sejong, Korea, 160-163.

Moon CS. 2001. The flocculation characteriestics of the particles in aqueous solutions by cationic polyelectrolytes. M.S. Thesis, Jeju National University, Jeju, Korea.

Muthukumar M. 2002. Phase diagram of polyelectrolyte solutions: Weak polymer effect. Macromolecules 35, 9142-9145. https://doi.org/10.1021/ma021456z.

Martins CIM, Eding EH, Verdegem MCJ, Heinsbroek LTN, Schneider O, Blancheton JP, d'Orbcastel ER and Verreth JAJ. 2010. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. Aquac Eng 43, 83-93. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002.

Piedrahita RH. 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. Aquaculture 226, 35-44. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00465-4.

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.
Park CH, Jeon HS, Han OH, Kim BG, Baek SH and Kim HS. 2010. Flotation for recycling of a waste water filtered from molybdenite tailings. J Miner Soc Korea 23, 235-242.
Park SE, Koh HJ, Cha HK, Chang DS and Koo JH. 2013. Coastal eutrophication caused by effluent from aquaculture ponds in Jeju. J Korean Soc Mar Environ Saf 19, 315-326. https://doi.org/10.7837/kosomes.2013.19.4.315.
Rishel KL and Ebeling JM. 2006. Screening and evaluation of alum and polymer combinations as coagulation/flocculation aids to treat effluents from intensive aquaculture systems. J World Aquac Soc 37, 191-199. https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2006.00026.x.
Schwartz MF, Ebeling JM and Summerfelt ST. 2004. Geotextile tubes for aquaculture waste management. Proceedings of the Fifth International Conference on Recirculating Aquaculture, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, U.S.A.
Sharrer MJ, Rishel KL and Summerfelt ST. 2009. Evaluation of geotextile filtration applying coagulant and flocculant amendments for aquaculture biosolids dewatering and phosphorus removal. Aquac Eng 40, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.10.001.
Sharrer M, Rishel KL, Taylor A, Vinci BJ and Summerfelt ST. 2010. The cost and effectiveness of solids thickening technologies for treating backwash and recovering nutrients from intensive aquaculture systems. Bioresour Technol 101, 6630-6641. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.101.
Sher F, Malik A and Liu H. 2013. Industrial polymer effluent treatment by chemical coagulation and flocculation. J Environ Chem Eng 1, 684-689. https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.07.003.
True B, Johnson W and Chen S. 2004. Reducing phosphorus discharge from flow-through aquaculture I: facility and effluent characterization. Aquac Eng 32, 129-144. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.08.001.