

순환여과양식 시스템 기반 인공 조제 배출수의 고분자 응집제 및 오존 처리 후 수질 변화

운성천 · 김지훈 · 임도형 · 박정환[†]
국립부경대학교(학생) · [†]국립부경대학교(교수)

Water Quality Changes in Artificial Effluent after Polymer Flocculant and Ozonation Treatment in Freshwater Recirculating Aquaculture System

Sungchun WOON · Jihoon KIM · Dohyung LIM · Jeonghwan PARK[†]
Pukyong National University(student) · [†]Pukyong National University(professor)

Abstract

As the demand for environmentally friendly aquaculture systems increases, it is essential to establish effective treatment methods for wastewater produced. Accordingly, an evaluation was conducted on the water quality changes resulting from the treatment of wastewater from recirculating aquaculture systems using polymeric flocculants and ozone. The flocculant was introduced into the wastewater at concentrations of 2-10 $\mu\text{L/g}$ TSS, followed by ozone treatment of the supernatant after flocculant treatment at ozone loads of 12.5-300 $\text{mg O}_3/\text{g TSS}$. The study observed differences in particulate matter and water quality concentrations based on the levels of flocculant treatment, with the most effective treatment noted at a condition of 4 $\mu\text{L/g}$ TSS of the flocculant. Moreover, the size of particulate matter in the treated wastewater was mostly above 100 μm , indicating significant potential to enhance the performance of physical filtration systems, especially when considering the typical pore size of such systems. The ozone treatment showed the most efficient results under conditions of 37.5 $\text{mg O}_3/\text{g TSS}$, suggesting that a combined approach of filtration using polymeric coagulants and geotextile bags, along with ozone treatment, could be applied as an eco-friendly means of wastewater treatment, minimizing pollution loads to the external environment.

Key words : Recirculating aquaculture systems, Total suspended solids, Wastewater, Polymer, Ozone

I. 서론

종래의 수산생물 양식은 양식생물의 노폐물과 잔류 사료 등의 유기물을 다량 배출하여 환경을 오염시키는 원인이 되고 있다(Boyd, 2003; Cho et al., 2019). 전 세계적으로 양식장 배출수의 배출 허용 기준을 강화하고 있으며, 국내에서도 양식

장 배출수에 대한 적절한 방류 기준을 마련하고 적용하려는 노력이 계속되고 있다(Ministry of Environments, 2004; Ministry of Oceans and Fisheries, 2005). 이에 환경 오염 우려가 적으면서도 양식장 배출수 관리가 쉬운 외부 환경과 독립된 양식시스템의 필요성이 대두되고 있다(Van, 2013; Seo and Park, 2022; Seo et al., 2022; Park

[†] Corresponding author : 051-629-5911, parkj@pknu.ac.kr

* 이 논문은 2021년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2021-KS211452, 어업현장의 현안해결 지원사업).

et al., 2023).

최근에는 국내에서도 순환여과양식 시스템의 활발한 연구 및 운용이 이루어지고 있으며(Bang et al., 2005; Seo et al., 2022; Park et al., 2023), 순환여과양식 시스템은 수질 제어와 배출수 처리가 상대적으로 쉬워 생산성 향상과 환경 오염 문제를 해결하는 대안이 될 수 있다(Midilli et al., 2012; Ray, 2012; Qu et al., 2017). 이러한 특징은 친환경적인 양식시스템에 대한 수요와 맞물려 점차 확산될 전망이다. 이 양식시스템은 양식 과정에서 발생하는 총부유고형물(Total suspended solid, TSS), 총암모니아성 질소(Total ammonia nitrogen, TAN), 아질산성 질소(Nitrite nitrogen, NO₂-N) 그리고 질산성 질소(Nitrate nitrogen, NO₃-N) 등과 같은 환경 부하 요인을 저감하기 위한 수처리 방안을 적용하여야 한다(Chen et al., 2006; Turcios et al., 2014).

양식장 배출수의 처리에는 망목이 작은 필터 또는 입자가 고운 물질로 채워진 입자 충전 여과기 등으로 일정 크기 이상의 고형물을 걸러내는 필터 형태의 여과, 중력으로 물질을 가라앉히는 침전지 여과, 물질을 응집시키는 응집제와 이를 걸러내고 물을 침출하는 geotextile filter 여과 등과 같은 물리적 공정이 이용된다. 이 가운데 합성 섬유로 제작되는 geotextile filter는 함수율이 높은 고형물의 탈수에 이용된다는 점과, 양식장의 구조와 규모에 따라 제작할 필터의 구조 및 규모 변경이 쉽다는 특징 때문에 양식장의 최종 배출수 처리에 이용되고 있다(Sharrer et al., 2009).

또한 UV, 염소, 오존으로 물질을 산화 및 분해하는 화학적 방법도 수처리 과정에 이용된다(Kristiansen et al., 1996; Bae et al., 1999; Cripps and Begheim, 2000; Ebeling et al., 2005; Kocer et al., 2018; Teitge et al., 2020). 이외에도 양식장 배출수를 식물 재배에 활용해 용존 물질을 제거하여 재차 양식장에서 이용하는 아쿠아포닉스 시스템이 있으며(Pantenella et al., 2010), 이는 효율적

인 작물 생산 방안으로도 활용할 수 있다(Oladimeji et al., 2020).

다양한 수처리 방안의 성능에 대해서는 여러 연구가 실시된 바 있으나(Lang et al., 2020; Lim et al., 2021; Aguilar et al., 2022), 응집제 및 geotextile filter에 대한 적정 처리 조건을 도출하기 위한 연구 사례는 부족한 실정이다. 응집제의 적정 처리량 도출은 양식장 현장의 응집제 소비량을 최소화할 수 있어 경제적인 효율화가 가능하며, 응집제 처리량은 수중 고형물의 처리 효율에도 영향을 미치므로 응집제의 적정 처리 조건을 도출하여야 한다(Ebeling et al., 2005).

또한 순환여과양식 시스템에서 발생하는 배출수의 여과 과정에 geotextile filter 등과 같은 물리적 여과 장치를 사용할 경우 일반적으로 크기가 약 100 µm 이상인 고형물 입자의 제거를 목표로 하고 있으며(Seo et al., 2022), 따라서 배출수 중의 고형물 입자 크기가 100 µm 이상이 되도록 하는 응집제 처리 조건을 함께 만족하는 것이 바람직하다.

한편 양식 배출수 중의 미세 고형물과 용존물질은 물리적 여과만으로는 완전히 제거 분해할 수 없으므로 수질 개선을 위해서는 추가적인 수처리 과정이 필요하다. 오존은 강력한 산화제로서 양식 배출수 중의 미세한 고형물을 분해할 수 있으며(Zhang et al., 2009), TAN, 아질산성 질소, 질산성 질소 등의 화합물을 산화시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다(Sun et al., 1997; Krumins et al., 2001). 그러나 과도한 오존 처리는 수중 미세물질의 재응집을 유발하여 탁도를 상승시키고 유기물 제거 효율이 하락하며, 비용 효율도 저하될 수 있다(Currie et al., 2003). 따라서 배출수의 수질 조건에 따른 필요 최소한의 오존 처리 조건을 파악하기 위한 실험 평가가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 고분자 응집제 및 geotextile bag을 이용한 담수어류 순환여과양식 시스템의 1차 처리 및 오존을 이용하는 2차 처리를 실시하고,

고형물 입도 및 수질 변화를 바탕으로 가장 효율적인 처리 조건의 조합을 도출하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 시료

본 연구에서는 응집실험을 통한 최적 응집제 처리량 및 오존의 최적 처리 조건을 평가하였다. 실험에서는 응집제의 최적 처리 농도와 오존 처리량을 평가하기 위한 시료로 반순환여과양식 시스템을 운영하는 경상북도 상주의 무지개송어 양식장 양식 폐수가 배출되는 침전조에 장기간에 걸쳐 침전된 진흙 성상의 농축 슬러지를 채취하였다. 고농축 슬러지는 증류수를 첨가하여 액상화한 후 망목 2 mm 크기의 체로 이물질을 제거하였고, ‘Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater’에 따라 총부유고형물(Total suspended solid, TSS)을 측정하여 농축 슬러지의 농도를 파악하였다(Rice, 2012). 농축 슬러지 농도를 파악한 후에는 증류수를 투입하여 액상화한 250 mL/g TSS 농도의 인공 배출수 시료를 제조하였다.

2. 응집제 및 처리 조건

본 실험에서 사용하는 응집제로는 폴리아크릴아마이드를 원료로 하는 Solenis 社의 에멀전 형태의 양이온 고분자 폴리머(ZetagTM 9168FS, Delaware, USA)를 사용하였다. 시료는 삼각 플라스크에 250 mL씩 분주하였고, 시료와 폴리머의 혼합은 비말 방지를 위하여 입구를 마개로 막은 후 자력교반기(MSH-20A, DAIHAN Scientific, Kangwon, Republic of Korea)로 실시하였으며, 마그네틱 바의 회전수를 물의 회전수로 가정하고 90 RPM의 속도로 회전시켜 처리하였다.

본 실험에서 사용된 폴리머는 점도가 매우 높아 정량 투입이 어려워, 폴리머를 100배로 희석하여 사용하였다. 폴리머는 시료 250 mL 당 0,

90, 180, 270, 360, 450 ppm(희석 전 폴리머 기준 0, 2, 4, 6, 8, 10 uL)씩 마이크로 피펫을 이용하여 삼각 플라스크 내에 정량 투입하였다. 모든 실험구의 혼합 처리 시간은 최소 실험구에서 육안으로 더 이상의 응집 고형물 크기 변화가 관찰되지 않은 5분으로 고정하였다. 혼합 직후의 시료는 고형물 입도, 침전 후 상등액은 기타 수질 분석에 활용하였다. 폴리머의 최적 처리 조건은 geotextile bag을 이용한 여과를 고려해 고형물의 농도 및 입도 변화를 중심으로 판단하였다.

3. 오존 및 처리 조건

본 과정에서는 폴리머와 혼합 후 망목 크기가 약 100 μm 인 geotextile bag으로 여과한 배출수를 시료로 사용하였다. 오존 처리 용기로는 증류수용 하구병을 이용하였고, 차아염소산나트륨으로 소독 후 사용하였다. 시료는 하구병에 2리터씩 수용한 후 (TSS 총량: 8 g/bottle), 최대 100 mg/hr 로 오존을 생성하는 오존발생기(Weipro ET-100, Youngcheng aquarium, China) 및 고압 에어스톤으로 처리하였다. 오존발생기는 기기로 유입되는 기체의 오염 방지를 위해 디스크 필터를 장착하였고, 각 시료를 100, 300, 600, 1200, 2400 mg의 오존으로 처리하였다. 이 때 TSS 1 g 당 가해지는 오존 부하량은 <Table 1>과 같다.

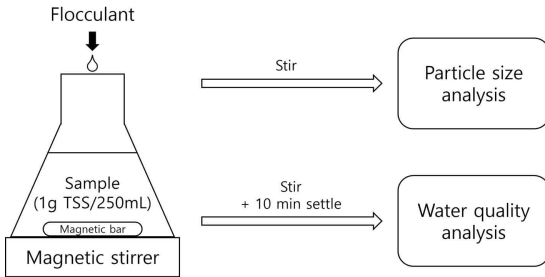
<Table 1> Demographic characteristics of the respondents

Ozonation time (hr)	Total treatment volume (mg O ₃)	Ozone loading dose (mg O ₃ /g TSS)
1	100	12.5
3	300	37.5
6	600	75
12	1,200	150
24	2,400	300

4. 고형물 응집 및 입도 변화 평가

시료 중 고형물의 응집제 처리 실험 과정에서

폴리머와 혼합 처리한 직후의 시료 및 10분간 침전 후의 상등액 시료를 각각 50 mL씩 채취하였다([Fig. 1]).



[Fig. 1] The diagram of a sample collection process for solids particle sizes and water quality analysis of recirculating aquaculture system effluent in jar test.

혼합 직후의 시료는 입도분석기(Mastersizer 3000, Malvern Panalytical, Malvern, United Kingdom)를 이용하여 고형물 입도를 분석하였다.

입도 분포는 $Dv(50)$ 으로 표기되는 입자 직경의 중간값(Volume median diameter, VMD)으로 평가하였다.

혼합 처리 후 10분간 침전시켜 형성한 상등액은 TSS를 측정하여 폴리머 처리량에 따른 고형물의 응집 제거 수준을 평가하였다.

5. 수질 측정

시료의 상등액을 대상으로 TSS, 탁도, 총유기탄소(Total organic carbon, TOC), TAN, NO_2-N , NO_3-N , 총인(Total phosphorous, TP) 등의 항목을 측정하였다.

탁도는 분광광도계(DR900, HACH, Loveland, Colorado, USA)를 이용한 흡광광도법(HACH Method 8237)으로 측정하였다. TAN, NO_2-N , NO_3-N 는 분광광도계를 이용하여 각각 살리실레이트법(HACH Method 8155)과 디아조화법(HACH Method 8507), 그리고 카드뮴을 이용하는 환원발색법(HACH Method 8039)으로 측정하였다. TP

는 산분해법(HACH Method 8190)으로 처리한 시료를 분광광도계로 측정하였다.

TOC는 총탄소(Total carbon, TC)와 총무기탄소(Total inorganic carbon, TIC) 농도의 차로부터 TOC를 산출하는 총유기탄소분석기(TOC-L, Shimadzu, Kyoto, Japan)로 측정하였다.

6. 통계 분석

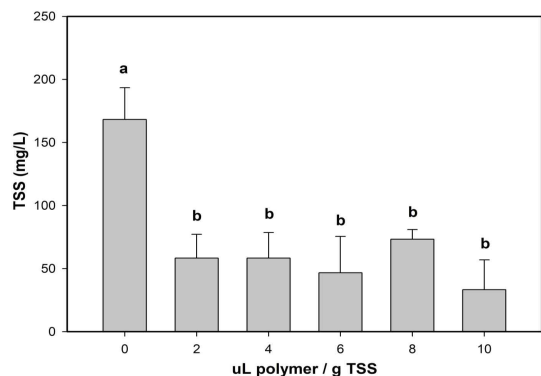
실험에서 구한 측정 데이터는 통계 분석 프로그램(IBM SPSS Statistics 25.0, IBM, Illinois, USA)을 이용하여 분석하였다.

폴리머 및 오존 처리량에 따른 수질 변화의 분석에는 One way ANOVA test를 적용하여 유의성을 분석하였다. 등분산성 검정에는 Levene 검정을 적용하였고, 등분산을 가정할 경우는 Tukey's HSD test, 등분산을 가정하지 않는 경우는 Games-Howell's multiple range test를 적용하여 수질 측정 결과값의 유의성을 검증하였다.

III. 연구 결과

1. 응집제 처리에 따른 배출수 수질 변화

응집실험에서의 폴리머 처리량에 따른 시료 중 TSS의 농도 변화를 [Fig. 2]에 나타내었다. TSS



[Fig. 2] Changes in total suspended solids concentrations in the wastewater with polymer dosages ($P < 0.05$).

농도는 대조구에 비해 모든 실험구에서 유의하게 낮았다($P < 0.05$). 가장 낮은 폴리머 투입구에서도 대조구에 비해 유의하게 낮았으며($P < 0.05$), 실험구 간에는 유의하게 차이가 없었다($P > 0.05$).

폴리머 투입량에 따른 시료 중의 기타 수질 요인의 농도 변화를 <Table 2>에 나타내었다. 수질 요인 가운데 탁도, TOC, TAN 등의 항목은 폴리머 처리량이 증가함에 따라 유의하게 감소하였다($P < 0.05$). 탁도는 폴리머를 투입하지 않은 대조구에 비해 최소 폴리머 투입 실험구부터 큰 폭으로 개선되었고 모든 실험구가 대조구보다 유의하게 낮았다($P < 0.05$). TOC 농도도 최소 폴리머 투입 실험구가 대조구에 비해 유의하게 낮았으며, 폴리머 처리량이 증가할수록 농도가 감소하였다($P < 0.05$). TAN 농도는 폴리머 투입에 따른 개선 효과는 나타났으나, 폴리머 처리량이 증가하여도 추가적인 농도 개선 효과는 없었다.

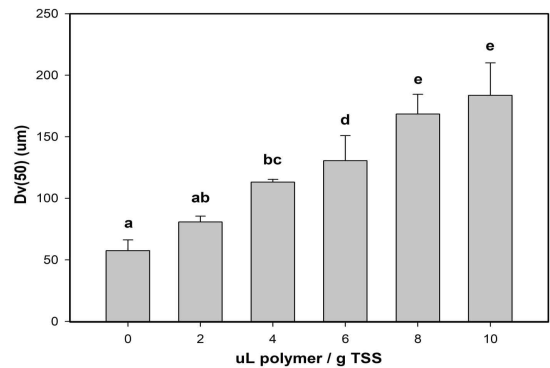
TP 농도는 폴리머 투입량이 증가하면서 감소하는 경향이었으나 대조구와 실험구 간에 유의하게 차이가 없었다. $\text{NO}_2\text{-N}$ 와 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도는 폴리머 처리량에 따른 농도 변화가 크게 없었으며 대조구와 모든 실험구 간에 유의하게 차이가 없었다($P > 0.05$).

폴리머 처리량에 따른 고형물 평균 입도 변화를 [Fig. 3]에 나타내었다. 평균 직경을 기준으로 하는 $D_v(50)$ 은 폴리머를 4 $\mu\text{L/g}$ TSS 이상으로 처리했을 때 100 μm 를 초과하였다.

따라서 용존 물질 처리를 위한 적정 폴리머 처리량은 각각 수질 항목마다 다르게 나타났으나, 수중의 고형물 입자를 직경 100 μm 이상 응집하기 위한 적정 폴리머 처리량은 4 $\mu\text{L/g}$ TSS이었으며, 이후의 실험 과정에 이를 적용하였다.

2. 오존 처리에 따른 배출수 수질 변화

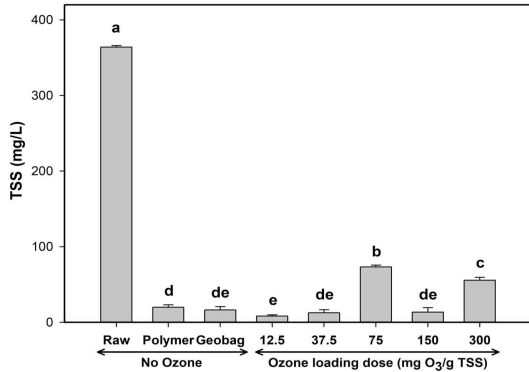
인공 시료에 4 $\mu\text{L/g}$ TSS의 폴리머를 처리하고 geotextile bag을 통과시킨 시료를 오존 처리한 후 각 시료 내 고형물 농도 변화를 [Fig. 4]에 나타내었다. 폴리머 및 geotextile bag으로 여과한 시료와 오존 처리 시료 모두 낮은 TSS 농도를 유지하였으며, 오존 처리의 경우 12.5 mg O_3/g TSS 조건에서도 TSS 농도는 매우 낮은 수준을 유지하였다.



[Fig. 3] Changes in $D_v(50)$ particle size of solids in the artificial wastewater with polymer flocculant dosage ($P < 0.05$).

<Table 2> Water quality changes in artificial wastewater with the polymer flocculant dosage

Polymer ($\mu\text{L/g}$ TSS)	Turbidity (FAU)	TOC (mg/L)	TP (mg/L)	TAN (mg/L)	Nitrite (mg/L)	Nitrate (mg/L)
0	84.0±6.56 ^a	130±5 ^a	25.7±11.9	20.7±1.2 ^a	0.19±0.01	15.0±1.7
2	22.7±3.1 ^c	102±2 ^b	28.3±6.1	15.3±0.6 ^b	0.14±0.01	10.7±2.1
4	39.7±6.7 ^b	95.1±1.8 ^c	23.3±2.5	13.3±1.5 ^b	0.17±0.04	13.0±6.6
6	27.7±2.1 ^c	84.6±8.4 ^d	17.3±4.0	15.0±1.7 ^b	0.14±0.03	9.0±1.0
8	28.3±3.8 ^c	72.4±4.2 ^c	19.3±0.6	17.3±0.6 ^{ab}	0.16±0.04	17.0±9.2
10	7.33±1.53 ^d	73.6±8.0 ^f	18.0±7.8	14.3±4.0 ^b	0.31±0.34	11.3±1.2
P-value	0.000	0.000	0.229	0.008	0.714	0.388



[Fig. 4] Changes in total suspended solid concentration in the wastewater with each water treatment procedure.

폴리머와 geotextile bag으로 여과한 시료 및 오존 처리를 마친 시료의 기타 수질 변화는 <Table 3>에 나타내었다. 오존 처리 시료의 각 수질은 TP를 제외한 모든 항목에서 유의한 변화가 있었다($P < 0.05$). TP는 농도는 대조구와 실험구 간에 유의하게 차이가 없었다($P > 0.05$). 탁도는 75 mg O₃/g TSS 이상의 오존 부하량에서 급격히 상승하였다. TOC는 오존 처리 후 농도가 크게 증가하였는데, 오존 부하량에 따른 일정한 증감의 경향은 나타나지 않았다. TAN 농도는 폴리머 투입과 geotextile bag을 거치면서 크게 낮아졌으며, 오존 부하량이 증가하면서 유의하게 감소하였다($P <$

0.05). NO₂-N 농도도 폴리머 투입과 geotextile bag을 거치면서 크게 감소하였으며, 높은 오존 부하량에서 유의하게 낮았다($P < 0.05$). NO₃-N 농도는 폴리머 투입과 geotextile bag을 통과하면서 크게 감소하였으나, 오존 투입에 따른 일정한 증감의 경향이 없었다.

IV. 결론

양식 배출수에 폴리머를 처리하는 것은 물리적 여과장치만으로는 여과하기 힘든 미세한 고형물을 응집, 확대하여 침전 또는 여과 효율을 향상하는 데 목적이 있다(Ebeling et al., 2006). 본 실험에서는 폴리머를 처리하였을 때 고형물의 입도가 증가하였을 뿐만 아니라 명료한 고형물 응집 제거 효과를 볼 수 있었고, 기타 다른 수질 요인의 농도도 함께 개선되는 것을 확인하였다. 응집제 사용에 따른 용존 물질 농도 저감 효과는 Aguilar et al.(2002) 및 Zhu et al.(2018) 등의 문헌에서도 시사된 바 있다. 결과가 이와 유사한 경향을 보인 본 실험에서 사용된 폴리아크릴아마이드로 구성된 폴리머 응집제도 고형물의 응집 제거 뿐만 아니라 수중의 용존 물질 농도 저감을 목적으로 적용이 가능한 것으로 판단된다. 또한 수중에 응집 침전되는 고형물 중에는 다량의

<Table 3> Water quality changes in artificial wastewater with the polymer flocculant dosage, geotextile bag, and ozonation process

Treatment condition	Turbidity (FAU)	TOC (mg/L)	TP (mg/L)	TAN (mg/L)	Nitrite (mg/L)	Nitrate (mg/L)
Raw water	20.5±1.1 ^a	72.4±2.4 ^a	49.3±3.5	75.7±1.5 ^a	0.50±0.00 ^a	29.1±1.1 ^a
Polymer	15.3±3.5 ^c	52.9±7.0 ^a	52.7±0.6	14.8±0.5 ^b	0.07±0.01 ^b	3.03±0.15 ^b
Geotextile bag	13.3±2.1 ^c	62.1±5.9 ^a	54.7±1.5	16.7±0.29 ^c	0.06±0.02 ^b	2.50±0.17 ^b
12.5 mg O ₃ /g TSS	17.7±1.2 ^c	407±26 ^b	48.7±1.5	14.1±0.1 ^d	0.05±0.01 ^b	4.93±0.21 ^c
37.5 mg O ₃ /g TSS	14.7±5.5 ^c	265±36 ^c	51.3±0.6	13.7±0.6 ^d	0.01±0.00 ^c	3.93±0.06 ^d
75 mg O ₃ /g TSS	83.0±6.2 ^b	937±5 ^d	52.7±7.0	14.3±0.6 ^d	0.01±0.00 ^c	29.6±0.6 ^c
150 mg O ₃ /g TSS	26.7±0.6 ^c	479±4 ^e	53.0±3.6	10.4±0.3 ^e	0.01±0.00 ^c	8.87±0.21 ^f
300 mg O ₃ /g TSS	86.7±5.5 ^b	607±50 ^{de}	54.7±2.1	11.0±0.2 ^e	0.01±0.00 ^c	41.9±2.4 ^g
P-value	0.000	0.000	0.268	0.000	0.000	0.000

유기물, 질소화합물, 인 등이 함유되는데(Seo et al., 2014), 본 실험에서 사용된 폴리머가 다른 응집제를 사용한 문헌과 마찬가지로 용존 물질 농도를 저감하는 효과를 보인 점을 고려하였을 때, 폴리아크릴아마이드를 응집제로 이용하는 경우에도 다량의 용존 물질은 고형물과 함께 응집 침전되는 것으로 판단된다. 다만 배출수와 폴리머의 과도한 혼합 처리는 응집된 고형물의 분해를 일으킬 수 있으며, 이 과정에서 고형물 중으로 포집되었던 용존 물질의 재용출이 발생할 가능성이 있으므로 담수 조건에서의 폴리아크릴아마이드 계열의 폴리머 응집제의 적절한 혼합 시간 등의 조건 도출이 필요할 것으로 사료된다. 한편 폴리아크릴아마이드 계열 폴리머 응집제의 유기물 및 유기태 질소 제거 효율은 수중에 존재하는 Fe과 Zn의 몰 비율, OH와 Fe의 몰 비율, 그리고 처리되는 폴리머의 양에 의해서 변화한다고 하였다(Zhu et al., 2018). 따라서 배출수 중의 미네랄 농도의 측정을 동반하는 추가 검증이 필요할 것으로 사료된다.

본 실험에서는 농축 슬러지를 원료로 균일한 TSS 농도의 인공 배출수를 제조하여 응집 및 오존 처리 실험을 실시하였다. 그러나 실제 어류를 사육하는 현장에서는 여러 가지 변수가 있는데, 실제 RAS를 운용 과정에서는 미세 고형물과 용존 물질이 지속 축적된다(Hayter et al., 2016). 특히 어류에게 사료를 급이한 후에는 어류의 분변이 수중으로 방출되면서 일시적으로 TSS 농도가 크게 상승하며(Alam and Al-Hafedh, 2006), 드럼스크린필터 등의 물리적 여과장치의 역세척 과정이 축적 고형물과 사료 찌꺼기 등을 배출수 경로로 방출하면서 시간에 따라 고형물량이 변화한다(국립수산과학원, 2015). 이러한 차이점은 본 응집실험과 실제 양식장에서의 실증단계에서 일정 수준의 차이를 형성할 것으로 사료된다.

본 연구의 응집실험에서는 폴리머로 처리한 시료를 geotextile bag에 단순 여과하여 수질을 분석하였다. 산업 현장에서는 다량의 물을 geotextile

bag에 통과시키거나 펌프 등을 이용하여 높은 수압으로 geotextile bag을 통과시키며, 이를 연속적으로 가동함으로써 geotextile bag 내부에는 고형물의 지속적인 축적이 발생하게 된다. 따라서 실증 실험 시에는 양식 시스템에 포함된 geotextile bag의 이용에 따른 필터 막힘 문제 등에 의해 실제보다 낮은 수처리 성능이 도출될 우려가 있으며, 실증 실험에 앞서 geotextile filter의 적절한 교체 시기 도출을 위한 선실험 과정에 동반되어야 할 것으로 사료된다.

본 실험의 오존 처리 과정에서는 일정량 이상으로 오존을 처리한 시료에서는 오히려 일부 수질 농도가 상승하는 결과가 나타났다. TSS와 탁도 모두 오존 처리 후 측정값이 매우 낮은 수준을 유지하였으나, 75 mg O₃/g TSS 이상의 오존 부하 조건에서 측정값이 상승하는 경향을 나타냈다. 오존은 수중의 유기물과 무기물을 산화시키는 작용을 이용하여 고형물을 분해하는데 이용할 수 있는 한편, 미세 물질 표면의 전하적 특성을 변화시켜 응집이 일어나기 쉬운 상태로 만들 수 있다. 본 실험의 경우, 75 mg O₃/g TSS 이상의 오존 부하를 가하는 조건에서는 분해된 미세 고형물 입자들에 전하가 과잉 공급된 오존과 반응하여 응집이 발생하여 악화된 것으로 고려된다(Lee and Kim, 1998).

TAN, NO₂-N, NO₃-N은 오존 처리에 따른 농도 감소 효과가 작았는데, 오존은 pH에 따라 무기태 질소에 대한 직접 산화작용의 효율이 변화하는 특징이 있으며(Sun et al., 1997), 실험 당시의 시료의 pH 조건이 무기태 질소의 산화 효율에 영향을 미쳤을 것으로 추측된다. 따라서 향후 오존을 이용한 배출수의 수처리 과정에 pH가 미치는 영향을 확인하기 위한 적정 pH 조건을 도출하기 위한 실험을 통한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

한편 연구 실험 과정에서는 질소화합물 가운데 TAN, 아질산성 질소, 질산성 질소 등을 측정하였다. 본 실험에서의 TAN 측정값은 어류에게 매우

유독한 암모니아성 질소(NH₃-N)를 포함하는 농도로, NH₃-N는 TAN 농도, 수온 그리고 pH 값을 이용한 산출이 가능하다. 또한 총질소(Total Nitrogen, TN)을 함께 측정함으로써 수중 TAN, 아질산성 질소, 질산성 질소 외의 기타 질소화합물의 간접적인 농도 파악이 가능하다. 따라서 본 실험 결과를 바탕으로 하는 실증 실험이 이루어질 경우, 시료 채취 현장의 수온 및 pH 측정 등을 병행함으로써 배출수 중에 포함되는 암모니아성 질소 및 수질 오염원이 될 수 있는 기타 질소화합물의 농도 파악이 동반되어야 할 것으로 판단된다.

일련의 실험 과정에서 폴리머와 geotextile bag으로 고형물 및 용존 물질을 1차 여과한 배출수에 오존을 처리하였을 때, TSS는 최소 실험구에서도 충분한 효과를 볼 수 있었다. 또한 대다수의 용존 물질은 37.5 mg O₃/g TSS의 오존 부하 조건에서 매우 낮거나 가장 낮은 수준의 농도가 측정되었다. 따라서 일련의 수질 처리 결과를 종합하였을 때, 농도 45000 ppm의 액상 폴리머를 기준으로 4 µL/g TSS의 처리량이 적합하며, 응집 여과 후의 배출수에 대한 후속 조치로 오존을 처리할 경우 37.5 mg O₃/g TSS의 오존 부하를 가하는 것이 적합한 것으로 판단되었다. 본 실험에서 도출된 폴리머 및 오존 처리 조건과 양식어류의 섭취 사료 1 kg 당 약 250 g 가량이 어류의 분변으로 배출되는 점을 종합적으로 고려하였을 때(Chen et al., 1994; Park, 2005), 사료 급이량 1 kg 당 필요한 폴리머 처리 및 오존 부하 조건은 각각 1 mL/kg feed와 9.38 g O₃/kg feed가 적합할 것으로 사료된다. 한편 산업 현장에서는 오존 사용 시 액상 계면제 공급 방식의 큰 형태 용해기나 산소용해기를 이용하여 액체에 오존을 투입하는 경우가 많은데, 본 실험 과정에서는 소규모의 오존발생기 및 에어스톤으로 배출수를 처리하였다. 수중으로의 오존 용해율과 물질의 산화 분해 효율은 직접적인 관계를 보이는데(Shishida et al., 1999), 이를 고려하

였을 때 양식장의 시설을 기반으로 한 실증 실험에서의 오존 처리 수처리 효율은 본 실험에서 도출된 결과보다 향상될 가능성이 있을 것으로 추측된다. 따라서 실제 어업현장에서 적용되어야 하는 오존 처리 농도 또한 낮아지는 등의 오차가 발생할 가능성이 있을 것으로 추측된다. 또한 본 연구에서는 증류수와 일정 비율로 희석한 양식장 침전조의 고농축 슬러지를 실험에 사용하였는데, 양식장에서 실시간으로 발생하는 배출수를 처리하였을 때와 비교 시 수처리 효율에 차이가 발생할 수 있는 한계점이 있다. 이에 본 연구 결과를 바탕으로 한 양식장 현장의 상시 발생 배출수를 대상으로 한 실증 연구 수행이 필요하다.

본 연구는 단일 성분의 폴리머와 오존 처리를 조합한 수처리 결과를 분석한 것으로, 향후 다른 성상의 응집제 및 수처리 수단의 조합과 본 연구 결과를 비교 검증함으로써 순환여과양식 시스템의 운용에 도움이 될 것으로 판단된다.

References

- Aguilar MI, Saez J, Llorens M, Soler A and Ortuno J.F(2002). Nutrient removal and sludge production in the coagulation-flocculation process. *Water research* 36(11), 2910~2919.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00508-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00508-5)
- Aguilar AP, Zhrebker A, Rubekina A, Shirshin E, Simonsen MA, Kolarevic J and Mikkelsen Ø(2022). Impact of ozone treatment on dissolved organic matter in land-based recirculating aquaculture systems studied by Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry. *Science of the Total Environment* 843, 157009.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157009>
- Alam A and Al-Hafedh Y(2006). Diurnal dynamics of water quality parameters in an aquaculture system based on recirculating green water technology. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* 10(2).
<https://doi.org/10.4314/jasem.v10i2.43651>
- Bae JH and Lee DS(1999). Acute Toxicity of

- Chlorine Dioxide to Cultured-flounder(*Paralichthys olivaceus*) and Its Bactericidal Efficacy. *Korean Journal of laboratory animal research* 15(1), 87~91
- Bang JD, Choi YS and Seo HC(2005). Culture of the Olive Flounder, *Paralichthys olivaceus* in a Marine Recirculating System. *Journal of fish pathology* 18(1), 91~97.
- 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](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00471-X)
- Chen S, Stechey D and Malone RF(1994). Suspended solids control in recirculating aquaculture systems. *Developments in aquaculture and fisheries science*(27), 61~100.
[https://doi.org/10.1016/0044-8486\(93\)90440-A](https://doi.org/10.1016/0044-8486(93)90440-A)
- Chen S, Ling J and Blancheton JP(2006). Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. *Aquacultural Engineering* 34(3), 179~197.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.09.004>
- Cho YR, Kim HS, Kim SK, Hur YB and Kim JH(2019). Bio-floc technology application in olive flounder, *Paralichthys olivaceus* aquaculture according to the difference of closed recirculating systems. *Korean Journal of Environmental Biology* 37(2), 129~135.
<https://doi.org/10.11626/KJEB.2019.37.2.129>
- Cripps SJ and Bergheim A(2000). Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural engineering* 22(1-2), 33~56.
[https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(00\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(00)00031-5)
- Currie M, Graham N, Hall T and Lambert S(2003). The effect of bicarbonate on ozone-enhanced particle removal in water treatment. *OZONE SCIENCE & ENGINEERING* 25(4), 285~293.
<https://doi.org/10.1080/01919510390481603>
- Ebeling JM, Rishel KL and Philip LS(2005). Screening and evaluation of polymers as flocculation aids for the treatment of aquaculture effluents. *Aquacultural engineering* 33(4), 235~249.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.02.001>
- Ebeling JM, Welsh CF, 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. *Aquacultural engineering* 35(1), 61~77.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.006>
- Kocer MAT, Pak F, Aktaş Ö, Oruç H and Uysal R(2018). Rotary drum filter effectiveness in suspended solids removal from trout farm discharges-A case report. *Aquaculture studies* 18(1), 51~56.
http://doi.org/10.4194/2618-6381-v18_1_06
- Kristiansen R and Cripps SJ(1996). Treatment of fish farm wastewater using sand filtration. *American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America* 25(3), 545~551.
<https://doi.org/10.2134/jeq1996.00472425002500030020x>
- Krumins V, Ebeling J and Wheaton F(2001). Part-day ozonation for nitrogen and organic carbon control in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 24(3), 231~241.
[https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(01\)00061-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(01)00061-9)
- Lang Z, Zhou M, Zhang Q, Yin X and Li Y(2020). Comprehensive treatment of marine aquaculture wastewater by a cost-effective flow-through electro-oxidation process. *Science of the Total Environment* 722, 137812.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137812>
- Lee YD and Kim CY(1998). Water Quality Improvement of Golf Ponds by Ozone Dose. *Bulletin of the Marine Science Institute* 22, 185~191.
- Lim YS, Ganesan P, Varman M, Hamad FA and Krishnasamy S(2021). Effects of microbubble aeration on water quality and growth performance of *Litopenaeus vannamei* in biofloc system. *Aquacultural Engineering* 93, 102159.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102159>
- Midilli A, Kucuk H, and Dincer I(2012). Environmental and Sustainability Aspects of a Recirculating Aquaculture System. *Environmental progress & Sustainable energy* 31, 483~649.
<https://doi.org/10.1002/ep.10580>
- Ministry of Environment(2004). Guidelines for Setting and Managing Water Quality Standards for Aquaculture Facility Effluents. 1~23.

- Ministry of Oceans and Fisheries(2005). Treatment of effluent from inland flow-through aquaculture system. 1~163.
- Oladimeji AS, Olufeagba SO, Ayuba VO, Solomon SG and Okomoda VT(2020). Effects of different hydroponics growth media on water quality and plant yield in a Catfish-pumpkin Aquaponics system. *Journal of King Saud University-Science* 32(1), 60~66.
<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.02.001>
- Pantanella E, Cardarelli M, Colla G, Rea E. and Marcucci A(2010). Aquaponics vs. hydroponics: production and quality of lettuce crop. In XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium 927, 887~893.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.109>
- Park KH, Choi JS, Lee YH and Park JH(2023). Evaluation of the optimal dissolved oxygen level for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in the recirculating aquaculture system. *The Journal of Korean Society of Fisheries and Ocean Technology* 59(4), 387~398.
<https://doi.org/10.3796/KSFOT.2023.59.4.387>
- Park JH(2005). Feces Production Rate of Abalone (*Haliotis discus hannai*) fed *Undavia pinnatifida*. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 38(6), 353~358.
<https://doi.org/10.5657/kfas.2005.38.6.353>
- Qu J, Zhang Q, Jia C, Liu P and Yang M(2017). The study of recirculating aquaculture system in pond and its purification effect. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 67, 012028.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/67/1/012028>
- Ray A(2012). Biofloc Technology for Super-Intensive Shrimp Culture. *Biofloc Technology-a practical guide book*, 2nd edition, 167~188.
- Rice EW(2012). Standard methods for the examination of water and wastewater. (10). Laura B and American Public Health Association, eds. American public health association, Washington DC, U.S.A.
- Seo JM, Cho YB, Choi YM, Park CH(2014). A Feasibility Study on Optimization System of Coagulant Dosing for Total Phosphorous Treatment. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 36(7), 483~491.
<https://doi.org/10.4491/KSEE.2014.36.7.483>
- Seo JH and Park JH(2022). Does Stocking Density Affect Growth Performance and Hematological Parameters of Juvenile Olive Flounder *Paralichthys olivaceus* in a Recirculating Aquaculture System?. *Animals* 13(1), 44.
<https://doi.org/10.3390/ani13010044>
- Seo JH, Woon SC, Kim JS and Park JH(2022). Flocculation Efficiency and Particle Distribution of Total Suspended Solids in the Effluent from Semi-recirculating Aquaculture Systems Treated with Polymers. *The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science* 55(1), 10~16.
<http://doi.org/10.5657/KFAS.2022.0010>
- Sharrer MJ and Summerfelt S(2009). Evaluation of geotextile filtration applying coagulant and flocculant amendments for aquaculture biosolids dewatering and phosphorus removal. *Aquacultural Engineering* 40(1), 1~10.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.10.001>
- Shishida K, Echigo S, Yamada H, Matsui S(1999). Study on the development of the High performance ozone/hydrogen peroxide water treatment system for TOC removal: the effect of the operational parameters. *Journal of Japan Society on Water Environment* 22(3), 199~205.
<https://doi.org/10.2965/jswe.22.199>
- Sun CO, Woo DS and Nam SH(1997). Removal Characteristics of Iron, Manganese and Organics in Ground Water Using Ozonation. *Journal of environmental and Sanitary engineering* 12(2), 43~49.
- Teitge F, Pepler C, Steinhagen D and Jung-Schroers V(2020). Water disinfection by ozonation has advantages over UV irradiation in a brackish water recirculation aquaculture system for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Journal of fish diseases* 43(10), 1259~1285.
<https://doi.org/10.1111/jfd.13238>
- Turcios AE and Jutta P(2014). Sustainable Treatment of Aquaculture Effluents-What Can We Learn from the Past for the Future?. *Sustainability* 6(2), 836~856.
<https://doi.org/10.3390/su6020836>

Van RJ(2013). Waste treatment in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 53, 49~56.

<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.010>

Zhang G, Yang J, Liu H and Zhang J(2009). Sludge ozonation: disintegration, supernatant changes and mechanisms. *Bioresource technology* 100(3), 1505~1509.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.08.041>

Zhu G, Liu J and Bian Y(2018). Evaluation of cationic polyacrylamide-based hybrid coagulation

for the removal of dissolved organic nitrogen. *Environmental Science and Pollution Research* 25(15), 14447~14459.

<https://doi.org/10.1007/s11356-018-1630-1>

-
- Received : 23 January, 2024
 - Revised : 28 February, 2024
 - Accepted : 07 March, 2024