

# 하이드로싸이클론을 이용한 해수 양식장 침전 고형물의 제거 효율 평가

서준혁 · 김병기<sup>1</sup> · 박정환<sup>2\*</sup>

국립수산과학원 첨단양식실증센터, <sup>1</sup>강원도립대학교 스마트양식과, <sup>2</sup>부경대학교 수산생명과학부

## Removal Efficiency of Settleable Solids in Seawater Aquaculture Farm Wastewater

Junhyuk Seo, Pyongkih Kim<sup>1</sup> and Jeonghwan Park<sup>2\*</sup>

Advanced Aquaculture Research Center, National Institute of Fisheries Science, Changwon 51688, Republic of Korea

<sup>1</sup>Department of Smart Aquaculture, Gangwon State University, Gangneung 25425, Republic of Korea

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

Flow-through aquaculture systems generate large amounts of wastewater containing compounds such as solids that can settle near aquafarms and cause eutrophication. The settled solids are often reintroduced into flow-through systems, and aquatic animals can be affected by the solids and pathogens associated with these solids. For a sustainable aquaculture operation, adequate wastewater treatment is required. Hydrocyclones are one of the most promising technologies for the removal of solids in aquaculture wastewater. In this study, a model for performance prediction of hydrocyclones was investigated under three different operating conditions: water temperature, solids concentration, and water inlet velocity. The synthetic solids solution was prepared using settled solids from abalone aquaculture farms. The daily solids removal rates of the tested hydrocyclones ranged from 0.18 to 26.0 g solids-m<sup>-3</sup>-day<sup>-1</sup>, and removal efficiency ranged from 5.1 to 34.4%. The inlet water velocity had the greatest effect on solids removal and hydrocyclone efficiencies. The following multiregression model equation was derived from the daily solids removal rate (g solids-m<sup>-3</sup>-day<sup>-1</sup>) results for water temperature (T, °C), solids concentration (SS, mg-L<sup>-1</sup>), and tangential inlet water velocity (TIV, m-sec<sup>-1</sup>): daily solids removal rate:  $f(z)=4.465+0.809TIV-0.375T+0.217SS$  ( $r^2=0.976$ ).

Keywords: Hydrocyclone, Seawater, Effluent, Suspended solids, Removal efficiency

### 서 론

국내 해수 육상양식장은 대부분 유수식 방식으로 운전되고 있으며, 양식생물에 의해 배출된 대사 노폐물을 대량의 배출수와 함께 환경에 방류된다. 국내 육상양식장 배출수 내에는 먹이 찌꺼기, 분 고형물, 용존유기물, 질소성화합물 등 대사산물과 생물 폐사체 등이 포함되어 있어 양식장 유래 노폐물이 인근 연안의 바닥에 쌓이게 되며, 이는 연안의 환경오염 가중 요인으로 작용할 수 있다(Kang et al., 1998; Park et al., 2013). 최근 전 세계적으로도 양식장 배출수에 의한 환경오염을 방지하고 산업의 지속가능성을 높이기 위해 배출수 방류에 대한 규제를 강화하고 있다(Boyd, 2003; Piedrahita, 2003; Ahmad et al., 2021). 국

내의 경우도 양식산업의 경쟁력을 강화하기 위해서 적절한 배출수 저감 기준 제정하고 적용하기 위해 노력하고 있다(MOF, 2018). 다양한 육상양식장 유래 노폐물 중에서 양식생물의 분변 및 먹이에 의해 발생하는 부유 및 침전 고형물은 환경오염의 주요 원인이다. 고형물은 사육 품종, 먹이 종류, 사육 환경 등에 따라 크기, 색상, 밀도 등이 달라지며 효과적으로 수중으로부터 제거하기 위해서는 이러한 특성들을 고려하여 적절한 수처리 장치를 적용해야 한다. 국내의 경우, 유수식 육상양식장으로부터 방류되는 환경오염 방지를 위해 사육시설 면적의 20% 이상 침전시설 또는 동등 이상의 침전효율을 입증할 수 있는 수질 오염방지시설을 설치할 것을 규정하고 있다. 그러나, 대량의 배출수를 방류하는 육상양식장의 경우, 단순 침전 방식으로 고형

\*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.2023.0116>

Korean J Fish Aquat Sci 56(1), 116-123, February 2023

Received 17 January 2023; Revised 20 January 2023; Accepted 25 January 2023

저자 직위: 서준혁(해양수산연구원), 김병기(교수), 박정환\* (부교수)

물의 배출을 저감하는데는 한계가 있다.

하이드로싸이클론(hydrocyclone)은 이러한 고형물을 수정으로부터 분리하기 위해 이용될 수 있는 수처리 장치 중의 하나이다. 하이드로싸이클론은 강력한 원심력을 이용하여 액체 중에 있는 고체 입자를 분리하는 장치로서 일반적으로 경사가 있는 원뿔 형태의 원뿔부 및 원통부, 원수가 유입되는 유입구, 제거된 고형물이 빠져나가는 하부 배출구, 처리가 완료된 물이 배출되는 일류관 및 상부 배출구 등으로 구성된다. 고형물을 포함한 유입수는 외부로부터 하이드로싸이클론 원통부에 대한 접선 방향으로 유입되어 장치 내부에서 강력한 원심력을 유발하는데, 이때 원뿔 중심부에 와류가 발생하여 무거운 입자의 고형물은 중앙 하부에 침전되고 무거운 입자가 분리된 물은 일류관 및 상부 원통부를 거쳐 유출된다(Svarovsky, 1977; Tchobanoglous et al., 1991; Yang et al., 2010; Vega-Garcia et al., 2018). 수류의 회전력에 따라 성능이 크게 향상될 수 있어 별도의 수류를 형성시킬 수 있는 펌프 외에 부가장치나 기계적 부품이 필요하지 않아 설치와 관리가 용이하다는 이점을 가지고 있다(Castilho and Medronho, 2000; Chu et al., 2000; Karr et al., 2000; Vieira and Barrozo, 2014). 또한 대량의 배출수를 상대적으로 작은 크기의 장치를 이용하여 처리할 수 있고, 연속적으로 고형물의 제거가 가능하여 배출수를 처리하기 위한 전처리 여과장치(prefilter)로써 적용할 수 있는 가능성이 높다(Mailapalli et al., 2007; Lee, 2015; Ni et al., 2016).

하이드로싸이클론의 고형물 제거 성능은 고형물의 크기 또는 형태, 장치의 구조, 수리학적 조건 등에 따라 크게 달라질 수 있다(Castilho and Medronho, 2000; Chen et al., 2000; Chu et al., 2002; Zhu et al., 2012; Vieira and Barrozo, 2014; Lee, 2015; Li et al., 2020). 따라서 본 연구에서는 육상양식장으로부터 방류되는 배출수 내 고형물을 제거하는데 이용될 수 있는 하이드로싸이클론의 주요 운전조건에 따른 고형물 제거 특성과 제거 효율을 예측하기 위한 다중회귀모델을 도출하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 실험 장치

하이드로싸이클론에 의한 고형물 제거 효율 측정을 위해 소규모 실험 장치를 제작하였다(Fig. 1). 실험에 사용된 하이드로싸이클론은 고형물 침전 상태와 내부 수류의 움직임의 관찰이 용이하도록 투명 아크릴로 제작하였다. 장치 내 수류 회전력을 높이기 위해 유입수가 실린더형 상부 몸체 부분에 접선 방향으로 유입되도록 구성하였다. 이를 콘형 하부 몸체와 접합하여 유입수와 고형물이 하이드로싸이클론의 하부로 내려갈수록 더 큰 회전력이 발생할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 하이드로싸이클론의 총 길이는 395 mm로, 실린더형 상부 몸체 부분의 직경은 50 mm, 상부 배출구의 직경은 30 mm, 유입구의 직경은 25 mm, 고형물을 배출하는 하부 퇴수구의 직경은 8 mm로 제

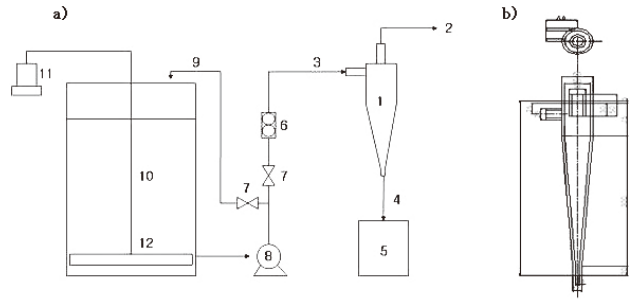


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental system to evaluate the performance of hydrocyclone. a, 1: experimental hydrocyclone, 2: overflow outlet, 3: inlet, 4: underflow, 5: sedimentation chamber, 6: flow meter, 7: valve, 8: pump, 9: by-pass, 10: make-up tank, 11: blower, 12: air-diffuser; b, detail drawing of experimental hydrocyclone.

작하였다.

### 실험유속 도출

하이드로싸이클론은 수직으로 작용하는 중력이 아닌 상대적으로 강력한 방사형 원심력에 의해 운전되는 고형물 제거장치이다. 따라서 유량에 따른 실험조건 설정에 앞서 중력에 의한 침전 속도에 상응하는 하이드로싸이클론 내 침전속도를 구하기 위해 유입수의 최소접선유입유속을 아래와 같이 계산하였다.

### 최소접선유입유속의 계산

하이드로싸이클론 내부로 유입되는 고형물 입자들은 그 크기 또는 직경이 상대적으로 작아 Stoke의 법칙이 적용되므로, 식 (1)과 같이 침전 속도를 정의할 수 있다.

$$u_t = \frac{x^2(\rho_s - \rho_w)g}{18\mu_w} \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

- $x$ : 고형물 입자의 직경(m)
- $u$ : 고형물 입자의 중력에 의한 침전 속도(m·sec<sup>-1</sup>)
- $\rho_s$ : 고형물의 밀도(kg·m<sup>-3</sup>)
- $\rho_w$ : 용매의 밀도(kg·m<sup>-3</sup>)
- $\mu_w$ : 용매의 동점성(m<sup>2</sup>·sec<sup>-1</sup>)
- $g$ : 중력가속도(m·sec<sup>-2</sup>)

하이드로싸이클론은 장치 몸통부의 직경과 유입구 구조에 따라 중력의 약 5-2,500배에 달하는 광범위하고 강한 원심력을 발생시킬 수 있다. 하이드로싸이클론 내부로 유입된 고형물 입자가 수류와 동일하게 운동을 한다고 가정할 경우, 고형물 입자는 하이드로싸이클론 내부에서 원주를 따라서 각속도 운동을 하게 된다. 그리고 입자의 크기, 용매의 밀도 및 동점성, 장치 내부의 원주상의 위치 등에 따라 경계속도(terminal velocity)에 도달하게 된다. 즉, 장치 내부의 고형물 입자는 중력가속도가

아닌 각가속도의 영향을 받으며, 식 (2)와 같이 중력 가속도( $g$ )를 각가속도( $\alpha$ )로 대체할 수 있다.

$$g = \alpha = \omega^2 r \dots\dots\dots \text{식(2)}$$

$\omega$ : 각속도( $\text{rad}\cdot\text{sec}^{-1}$ )  
 $r$ : 반지름(m)

이 때, 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_s = \frac{x^2(\rho_2 - \rho_w)\alpha}{18\mu_w} = \frac{x^2(\rho_2 - \rho_w)\omega^2 r}{18\mu_w} \dots\dots \text{식(3)}$$

$V_s$ : 하이드로싸이클론 내 입자의 침전 속도( $\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ )

원심 가속도는 접선 속도의 함수( $V_t = \omega r$ )이기 때문에, 식 (3)을 식 (4)로 다시 정리할 수 있다.

$$V_s = \frac{x^2(\rho_2 - \rho_w)V_t^2}{18\mu_w \times r} \dots\dots\dots \text{식(4)}$$

$V_t$ : 입자의 접선 속도( $\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ )

이 때, 식 (4)에  $g/g$ 를 곱하여 정리하면 하이드로싸이클론 내의 고형물 입자 침전속도를 식 (5)로 정의할 수 있다.

$$V_s = \left[ \frac{x^2(\rho_2 - \rho_w)g}{18\mu_w} \right] \cdot \frac{V_t^2}{gr} = (u_t) \cdot \frac{V_t^2}{gr} \dots\dots \text{식(5)}$$

따라서 식 (1)과 식 (5)가 같다고 가정하는 경우, 식 (6)이 성립한다.

$$\frac{V_t^2}{gr} = 1 \dots\dots\dots \text{식(6)}$$

식 (6)을 정리하면 중력에 의한 고형물 입자의 침전 속도와 하이드로싸이클론 내부의 원심력에 의한 고형물 침전 속도가 같아지는 최소접선유입유속을 식 (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{t(\min)} = \sqrt{gr} \dots\dots\dots \text{식(7)}$$

$V_{t(\min)}$ : 최소접선유입유속( $\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ )

식 (7)을 기준으로 하이드로싸이클론의 최소접선유입유속을 계산하면, 이는 약  $0.5 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ 으로 나타난다. 해당 값의 약 2.5배, 5배, 7배에 해당하는 접선유입유속인 1.3, 2.6,  $3.7 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ 를 실험유속으로 설정하였다.

**하이드로싸이클론의 성능 평가 실험 방법**

하이드로싸이클론의 고형물 제거 성능 평가를 위해 실험에 앞서 실험을 위해 필요한 침전고형물을 대량으로 수집할 수 있는

pilot 규모의 참전복 순환여과양식시스템의 사육조 내에 침전된 참전복의 분을 수집하였다. 시설의 구성은 약 1.9톤 규모의 폴리프로필렌 사육수조 12조( $4.0 \times 0.8 \times 0.6 \text{ m}$ ), 생물학적 여과조 1조, 포말분리기 1개로 구성되었다. 참전복(각장  $3.4 \pm 0.7 \text{ cm}$ )의 먹이는 미역을 공급하였고, 사육수온은  $16^\circ\text{C}$ 를 유지하였다. 수집된 참전복의 분은 침전 후 상등액을 제거하여 실험 전까지  $-20^\circ\text{C}$ 의 초저온 냉동고에 보관하였다.

수집한 참전복의 분은 1,000 L 수량의 저수조에 총 고형물 농도가 1, 10, 50,  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 가 되도록 투입하였고, 저수조 내에 고형물이 침전되지 않도록 지속적인 폭기로 교반시켜주었다. 고형물 농도별 실험수는 펌프(PU-350M; Wilo, Dortmund, Germany)를 이용하여 저수조로부터 하이드로싸이클론으로 유입시켰다. 장치 내부에서의 회전운동을 통해 비중분리된 고형물은 콘형 하부 몸체 끝부분에 있는 하부 퇴수구를 통해 소량의 물과 함께 유출되었으며, 처리된 물은 상부 배출구를 통해 빠져나갔다. 유입수 배관에 설치된 by-pass와 유량조절계를 이용하여 실험 접선유입유속이 유지되도록 조절하였다. 하부 퇴수구로 배출된 고형물을 포함한 퇴수는 약 100 L의 폴리카보네이트 재질의 침전조에 수집되도록 구성하였다. 실험 수온은 히터 및 냉각기를 이용하여 12, 16,  $20^\circ\text{C}$ 로 조절하였고, 각 실험조건에서 하부 퇴수구를 통해 배출 및 집적되는 고형물의 농도를 측정하여 하이드로싸이클론의 처리수량 당 일간 고형물 제거량(daily solids removal rate), 고형물 제거효율(solids removal efficiency), underflow rate를 아래의 식(8, 9, 10)을 이용하여 각각 계산하였다. 이 때, underflow는 overflow의 반대 개념으로 하이드로싸이클론 하부 퇴수구로 배출되는 배출수를 지칭한다.

$$\begin{aligned} &\text{처리 수량 당 일간 고형물 제거량 (g solids}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}) \\ &= (C_u \times Q_u) \div V_{\text{water}} \dots\dots \text{식(8)} \end{aligned}$$

$C_u$ : Underflow 내의 고형물 농도( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )  
 $Q_u$ : Underflow rate ( $\text{m}^3\cdot\text{day}^{-1}$ )  
 $V_{\text{water}}$ : 일간 처리한 총 수량( $\text{m}^3$ )

$$\begin{aligned} &\text{고형물 제거효율 (\%)} \\ &= \{[(C_i \times Q_i) - (C_u \times Q_u)] \div (C_i \times Q_i)\} \times 100 \dots\dots \text{식(9)} \end{aligned}$$

$C_i$ : 유입수 내 고형물 농도( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )  
 $Q_i$ : 유입수량( $\text{m}^3\cdot\text{day}^{-1}$ )

$$\text{Underflow rate (\%)} = (Q_u \div Q_i) \times 100 \dots\dots \text{식(10)}$$

**통계분석**

Windows용 SPSS 12.0을 이용하여 Three-way ANOVA test를 실시하였으며, Duncan's multiple range test로 평균 간의 유의차( $P < 0.05$ )를 검정하였다. 각 실험 조건에서 유의차가 있는

경우에는 수온, 고형물 농도, 접선유입유속이 하이드로싸이클론의 처리수량 당 일간 고형물 제거량 및 제거효율에 미치는 영향을 다중회귀 분석하여 하이드로싸이클론의 고형물 제거 운전 모델식을 도출하였다.

### 결 과

하이드로싸이클론의 처리 수량 당 일간 고형물 제거량은 수온, 고형물 농도, 접선유입유속 모두에 영향을 받았으며, 고형물에 의한 영향이 가장 크게 나타났다(Table 1). 모든 수온 조건에서 하이드로싸이클론의 처리 수량 당 일간 고형물 제거량은 고형물 농도와 사육수의 접선유입유속의 증가에 따라 함께 증가하였다( $P < 0.05$ ). 각 수온 조건(12, 16, 20°C)에서의 처리수량 당 일간 고형물 제거량은 7.70±7.78, 9.35±9.14, 10.7±10.0 g solids·m<sup>3</sup>·day<sup>-1</sup>로 모든 실험구간의 유의한 차이가 나타났다( $P < 0.05$ ).

고형물 농도에 따른 실험 조건들(1, 10, 50, 100 mg·L<sup>-1</sup>)에서 일간 고형물 제거량은 각각 0.30±0.07, 2.75±0.63, 12.1±2.88, 21.9±2.89 g solids·m<sup>3</sup>·day<sup>-1</sup>로 고형물 농도 증가와 함께 높게 나타났으며 모든 실험구간의 유의한 차이가 나타났다( $P < 0.05$ ).

접선유입유속에 따른 처리 수량 당 일간 고형물 제거량은 접선유입유속이 1.3, 2.6, 3.7 m·sec<sup>-1</sup>일 때 각각 평균 8.40±8.28, 8.98±8.78, 10.37±10.05 g solids·m<sup>3</sup>·day<sup>-1</sup>로 나타났으며, 접선유입유속이 1.3, 2.6 m·sec<sup>-1</sup>인 조건에서는 유의한 차이가 나타나지 않았지만, 3.7 m·sec<sup>-1</sup>에서 유의적으로 높은 고형물 제거량이 나타났다( $P < 0.05$ ).

수온, 고형물 농도, 접선유입유속에 따른 처리 수량 당 일간 고형물 제거량 예측을 위한 다중회귀 분석을 실시하였고 각 변수에 대한 세 가지 선형모델식을 도출하였다(Table 2). 세 가지 모델 중에 세 가지 변수를 모두 포함하는 Model 3의 r<sup>2</sup>과 adj r<sup>2</sup>이 가장 높게 나타났고, Msep는 가장 낮게 나타나 가장 높은 예측 정확도를 나타냈다. 따라서 본 실험조건 내에서 하이드로싸이클론을 운전하는 경우, 처리 수량 당 일간 고형물 제거량(g solids·m<sup>3</sup>·day<sup>-1</sup>) 모델식은 식(11)과 같이 도출되었다.

$$f(z) = 4.465 + 0.809TIV - 0.375T + 0.217SS \dots \dots \text{식(11)}$$

T: 수온(°C)

SS: 고형물 농도(mg·L<sup>-1</sup>)

TIV: 접선유입유속(m·sec<sup>-1</sup>)

하이드로싸이클론의 고형물 제거효율도 수온, 고형물 농도, 접선유입유속 모두에 영향을 받았으나, 일간 고형물 제거량과는 달리 접선유입유속에 의한 영향이 가장 크게 나타났다(Table 3). 수온에 따른 고형물 제거효율은 수온이 상승함에 따라 유의적으로 증가하는 결과가 나타났다( $P < 0.05$ ).

반면 고형물 농도에 따른 고형물 제거효율은 고형물 농도

의 증가에 따라 감소하는 경향이 나타났다. 고형물 농도가 상대적으로 낮은 1, 10 mg·L<sup>-1</sup> 조건과 상대적으로 높은 50, 100 mg·L<sup>-1</sup> 조건 간의 제거효율은 서로 유의적인 차이가 나타났지만( $P < 0.05$ ), 고형물 농도 50 mg·L<sup>-1</sup> 이상 및 미만 실험조건 간에는 유의적인 차이가 나타나지 않아 상대적으로 고형물 농도

Table 1. Solids removal rates (g solids·m<sup>-3</sup>·day<sup>-1</sup>) of experimental hydrocyclone and the result of three-way ANOVA test with temperature (T), solids concentration (SS) and tangential inlet water velocity (TIV)

Solids concentrations (mg·L <sup>-1</sup> )	Tangential inlet water velocity (m·sec <sup>-1</sup> )				
	1.3	2.6	3.7	Pooled mean*	
12°C					
1	0.18	0.24	0.25	0.22±0.04	
10	1.73	2.17	2.30	2.07±0.30	
50	8.68	9.17	10.6	9.49±1.01	
100	17.7	17.9	21.4	19.0±2.05	
Pooled mean	7.08±8.00	7.37±0.00	8.64±9.60	7.70±7.78 <sup>z</sup>	
16°C					
1	0.30	0.28	0.30	0.29±0.01	
10	2.62	2.70	2.88	2.73±0.13	
50	11.0	11.0	14.3	12.1±1.92	
100	20.4	21.8	24.7	22.3±2.23	
Pooled mean	8.56±9.10	8.94±9.71	10.56±11.24	9.35±9.14 <sup>y</sup>	
20°C					
1	0.39	0.37	0.38	0.38±0.01	
10	3.23	3.56	3.58	3.46±0.20	
50	12.0	14.4	17.7	14.7±2.88	
100	22.7	24.2	26.0	24.3±1.68	
Pooled mean	9.56±10.0	10.6±10.8	11.9±12.0	10.7±10.0 <sup>x</sup>	
Total Pooled mean					
1	0.29±0.11	0.30±0.67	0.31±0.66	0.30±0.07 <sup>D</sup>	
10	2.53±0.75	2.81±0.70	2.92±0.64	2.75±0.63 <sup>C</sup>	
50	10.5±1.68	11.5±2.64	14.5±3.53	12.1±2.88 <sup>B</sup>	
100	20.3±2.47	21.3±3.16	24.0±2.40	21.9±2.89 <sup>A</sup>	
Pooled mean	8.40±8.28 <sup>b</sup>	8.98±8.78 <sup>b</sup>	10.37±10.05 <sup>a</sup>	9.25±8.85	
Analysis of variance	Sum of square mean	df	Square mean	F value	P value
T	54.3	2	27.0	13.3	0.000
SS	2,604	3	868	424	0.000
TIV	24.6	2	12.3	6.01	0.007

\*Pooled means±STD for tangential inlet water velocities, solids concentrations or temperatures having the same superscript are not significantly different at  $P < 0.05$  based on Duncan's multiple range test.



가 높은 실험조건에서 유의적으로 낮은 제거효율이 나타났다 ( $P>0.05$ ).

제거효율에 가장 큰 영향을 미친 접선유입유속의 경우, 접선 유입유속의 증가에 따라 고형물 제거효율이 유의적으로 증가하는 결과가 나타났다( $P<0.05$ ).

하이드로싸이클론의 underflow rate 또한 수온, 고형물 농도, 접선유입유속 모두에 영향을 받는 것으로 나타났다(Table 4). 수온에 따른 underflow rate는 수온이 상승함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 수온 12, 16°C 조건과 16, 20°C 조건 간의 underflow rate는 서로 유의적인 차이가 나타나지 않았고 ( $P>0.05$ ), 수온 16°C 이상 및 이하의 실험조건 간에는 유의적인 차이가 나타나 수온이 상승함에 따라 underflow rate는 감소하는 것으로 나타났다( $P<0.05$ ).

고형물 농도에 따른 underflow rate는 고형물 농도가 상승함

Table 2. The results of multi regression model for solids removal rate ( $\text{g solids}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ ) of experimental hydrocyclone with temperature (T), solids concentration (SS) and tangential inlet water velocity (TIV)

Parameter estimation of variables						
Model: $f(z)=\beta_0+\beta_1TIV+\beta_2T+\beta_3SS$						
	Parameter	Estimates of $\beta$	Standard error	t value	P value	
Model 1	$\beta_0$	0.511	0.492	1.039	0.306	
	$\beta_3$	0.217	0.009	24.787	0.000	
Model 2	$\beta_0$	6.514	1.402	4.646	0.000	
	$\beta_2$	-0.375	0.084	-4.462	0.000	
Model 3	$\beta_0$	4.465	1.379	3.24	0.003	
	$\beta_1$	0.809	0.246	3.29	0.002	
	$\beta_2$	-0.375	0.074	-5.08	0.000	
	$\beta_3$	0.217	0.006	35.2	0.000	
Analysis of variance for the model						
		Sum of square	df	square mean	F value	P value
Model 1	Regression	2,596	1	2596	614	0.000
	Error	144	34	4.23		
Model 2	Regression	2,650	2	1325	488	0.000
	Error	86.6	33	2.72		
Model 3	Regression	2,673.10	3	891	426	0.000
	Error	66.60	32	2.09		
Fitness determination of the model						
	$R^2$	adj R2		$MSep$		
Model 1	0.948	0.946		2.056		
Model 2	0.967	0.965		1.648		
Model 3	0.976	0.973		1.447		

에 따라 underflow rate는 유의적으로 증가하는 경향이 나타났다( $P<0.05$ ). 고형물 농도 1, 10, 50  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  조건 간의 underflow rate는 유의적인 차이가 나타나지 않았고, 고형물 농도 50, 100  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 의 실험조건 간에도 유의적인 차이가 나타나지 않았지만 ( $P>0.05$ ), 고형물 농도 100  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  조건은 1, 10  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  조건보

Table 3. Solids removal efficiency (%) of experimental hydrocyclone and the result of three-way ANOVA test with temperatures (T), solids concentrations (SS) and tangential inlet water velocities (TIV)

Solids concentrations ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Tangential inlet water velocities ( $\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ )				
	1.3	2.6	3.7	Pooled mean*	
12°C					
1	5.1	19.3	20.7	15.0±8.6	
10	3.8	16.7	18.8	13.1±8.1	
50	2.0	13.2	17.0	10.7±7.8	
100	1.9	12.6	17.0	10.5±7.8	
Pooled mean	3.2±1.54	15.5±3.14	18.4±1.77	12.3±7.2 <sup>z</sup>	
16°C					
1	17.7	23.3	26.4	22.5±4.4	
10	13.7	22.1	24.8	20.2±5.8	
50	6.6	16.8	24.6	16.0±9.0	
100	2.9	16.5	20.5	13.3±9.2	
Pooled mean	10.2±6.70	19.7±3.53	24.1±2.52	18.0±7.3 <sup>y</sup>	
20°C					
1	28.1	33.2	34.4	31.9±3.35	
10	20.8	31.2	32.0	28.0±6.31	
50	8.2	23.9	31.6	21.2±11.93	
100	5.1	19.0	21.7	15.3±8.91	
Pooled mean	15.5±10.76	26.8±6.57	29.9±5.62	24.5±9.7 <sup>x</sup>	
Total Pooled mean					
1	20.07±11.5	25.3±7.2	27.2±7.0	23.1±8.9 <sup>A</sup>	
10	12.7±8.	23.3±7.3	25.0±6.6	20.4±8.7 <sup>A</sup>	
50	5.0±3.2	18.0±5.4	24.4±7.3	16.0±9.6 <sup>B</sup>	
100	3.3±1.6	16.0±3.2	19.7±2.4	13.0±7.8 <sup>B</sup>	
Pooled mean	9.7±8.5 <sup>c</sup>	20.7±6.5 <sup>b</sup>	24.1±6.0 <sup>a</sup>	18.1±9.3	
Analysis of variance					
	Sum of square	df	Square mean	F value	P value
T	828.78	2	414.39	43.23	0.000
SS	548.65	3	182.88	19.08	0.000
TIV	1,370.41	2	685.20	71.48	0.000

\*Pooled means±STD for tangential inlet water velocities, solids concentrations or temperatures, having the same superscript are not significantly different at  $P<0.05$  based on Duncan's multiple range test.

다 유의적으로 높은 underflow rate가 나타났다( $P<0.05$ ).

접선유입유속에 따른 underflow rate는 접선유입유속이 증가함에 따라 underflow rate가 유의적으로 감소하는 경향이 나타났다(Table 4). 특히 가장 underflow rate가 높은 접선유입유속  $1.3 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$  조건과 가장 낮은  $3.7 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$  조건 간에는 약 3배에 해당하는 underflow rate 차이가 발생했다.

Table 4. Underflow rates (%) of experimental hydrocyclone and the result of three-way ANOVA with temperature (T), solids concentration (SS) and tangential inlet water velocity (TIV)

Solids concentrations ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Tangential inlet water velocities ( $\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ )				
	1.3	2.6	3.7	Pooled mean*	
12°C					
1	13.7	5.8	5.0	8.2±4.8	
10	14.0	6.0	5.1	8.4±4.9	
50	15.7	5.9	5.2	8.9±5.9	
100	16.1	6.1	5.3	9.2±6.0	
Pooled mean	14.9±1.20	5.95±0.13	5.15±0.13	8.7±4.7 <sup>y</sup>	
16°C					
1	14.6	6.2	5.4	8.7±5.1	
10	14.6	6.2	5.4	8.7±5.1	
50	16.5	6.2	5.4	9.4±6.2	
100	18.0	6.3	5.4	9.9±7.0	
Pooled mean	15.9±1.65	6.23±0.05	5.40±0.00	9.2±5.1 <sup>xy</sup>	
20°C					
1	14.6	6.2	5.5	8.8±5.1	
10	14.7	6.4	5.5	8.9±5.1	
50	17.1	6.4	5.5	9.7±6.5	
100	18.5	6.4	5.5	10.1±7.3	
Pooled mean	16.2±1.91	6.35±0.10	5.50±0.00	9.4±5.2 <sup>x</sup>	
Total Pooled mean					
1	14.3±0.5	6.1±0.2	5.3±0.3	8.6±4.3 <sup>B</sup>	
10	14.4±0.4	6.2±0.2	5.3±0.2	8.7±4.4 <sup>B</sup>	
50	16.4±0.7	6.2±0.3	5.4±0.2	9.3±5.4 <sup>AB</sup>	
100	17.5±1.3	6.3±0.2	5.4±0.1	9.7±5.9 <sup>A</sup>	
Pooled mean	15.7±1.6 <sup>a</sup>	6.2±0.2 <sup>b</sup>	5.4±0.2 <sup>c</sup>	9.1±4.8	
Analysis of variance	Sum of square mean	df	Square mean	F value	P value
T	3.19	2	1.59	2.70	0.084
SS	8.46	3	2.82	4.79	0.008
TIV	790.15	2	395	671	0.000

\*Pooled means±STD for tangential inlet water velocities, solids concentrations or temperatures, having the same superscript are not significantly different at  $P<0.05$  based on Duncan's multiple range test.

## 고찰

본 연구 결과, 수온, 고형물 농도, 접선유입유속에 따라 하이드로싸이클론의 고형물 제거효율은 1.9–34.4%로, 운전조건에 따른 차이가 크게 나타났다. 고형물 제거량 및 제거효율은 접선유입유속에 가장 큰 영향을 받아, 접선유입유속이 가장 높았던  $3.7 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$  실험조건에서 제거효율과 제거량이 가장 높았다. 고형물과 함께 처리된 물이 배출되는 비율인 underflow rate 역시  $3.7 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ 의 접선유입유속에서 약 5.0–5.5%로 가장 낮게 나타났다. 동시에 수온과 고형물 농도 차이에 따른 underflow rate의 차이도 상대적으로 적게 나타나 접선유입유속이 증가할수록 고형물의 효과적인 제거가 가능하였다.

이와 유사하게 하이드로싸이클론의 경사각도, 유입수 유량, 고형물의 크기가 고형물 제거효율에 미치는 영향에 대해 조사한 Fan et al. (2015)의 연구에서도 동일한 형태의 하이드로싸이클론에서 유입되는 물의 양이 증가함에 따라 고형물 제거효율이 함께 증가하는 경향을 보인다는 결과를 보고한 바 있다.

하지만 설정된 유입 유량 대비 유출 유량을 측정한 결과, 본 연구의 실험에서 적용된 접선유입유속인 1.3, 2.6,  $3.7 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ 에서 각각 약 5, 12, 20%의 수두손실이 발생하였으며, 이에 따라 접선유입유속의 지속적인 증가는 어려웠다. 하이드로싸이클론은 수직형 장치 내부에 강한 원심력을 가하는 방식으로 수두손실이 크게 발생하였다는 선행연구와 유사한 결과를 보였다 (Pandit et al., 2009; Yurdem et al., 2010; Yu and Kim, 2016). 이는 높은 고형물 제거효율 및 제거량을 위해서는 큰 수두손실을 감안하고 많은 유량과 높은 유속으로 하이드로싸이클론을 운전해야함을 시사한다.

담수어류인 잉어와 틸라피아의 사육시설에서 발생한 고형물을 대상으로  $400\text{--}1,000 \text{ mL}\cdot\text{sec}^{-1}$  ( $0.6\text{--}1.2 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ 의 접선유입유속)의 유량으로 하이드로싸이클론의 제거효율을 조사한 Lee (2004)의 연구결과에 따르면, 잉어와 틸라피아의 분에 대해서 각각 36–60%, 41–63%의 제거효율을 보여 저속 운용임에도 본 연구 결과에 비해 상대적으로 제거효율이 높았다. 이는 해수가 담수에 비해 비중이 높아 고형물과 해수의 비중 차이가 상대적으로 감소하였기 때문으로 사료된다. 하이드로싸이클론은 약  $2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  이상의 무거운 밀도를 가지고 있는  $212 \mu\text{m}$  이하의 입자성 고형물 제거에 적합하게 개발되어 해수와 비중이 유사한 고형물을 제거할 때에는 제거효율이 크게 감소할 수 있다고 하였다 (Hou et al., 1998; Tavares et al., 2002; Lee, 2015). 또한, 본 연구와 Lee (2004)의 경우에는 품종에 따른 고형물 입자의 크기와 밀도도 제거 성능에 영향을 준 것으로 판단되며, 고형물의 입도, 밀도 등에 대한 부가적인 연구가 필요하다.

일반적으로 양식시설에서 발생하는 고형물은 사육수와 비중의 차이가 작아 하이드로싸이클론이 고형물 제거장치로서의 충분한 성능을 발휘하기 위해서는 충분한 수리학적 부하량이 필수적이다. 이에 따른 높은 수두손실을 감안할 때, 하이드로싸

이클론은 양식시스템 내에서 고형물 제거장치로 단독 사용하기 보다는 침전조 등 다른 고형물 제거장치와 병행하여 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 무지개송어 순환여과양식 시스템에 하이드로싸이클론을 적용한 Scott and Allard (1983)의 연구에 따르면, 일간 시설 내 발생하는 총 고형물의 약 56%를 제거하였으며, 생물학적 여과조의 역세 주기를 4일에서 최대 3주까지 연장할 수 있다고 보고하였다. 이 때 마이크로스크린 (micro-screen)과 함께 운전하는 경우에는 고형물 제거효율을 97%까지 높일 수 있다는 결과도 함께 보고된 바 있다. 앞서 언급한 Fan et al. (2015)의 연구에서 또한 고형물의 입자 크기가 커질수록 하이드로싸이클론의 고형물 제거효율이 증가한다는 결과를 보고하였다. 또한 MPPIC (multiphase particle in cell) 기법을 사용한 CFD 시뮬레이션을 통해 일반적인 하이드로싸이클론의 고형물 제거 효율에 대해 조사한 Razmi et al. (2019)의 연구에서도 고형물의 입자 크기가 증가함에 따라 고형물 제거효율이 증가한다는 분석결과를 보고한 바 있다. 본 연구와 선행연구를 토대로 볼 때, 배출되는 고형물의 크기가 다양한 양식시스템에서는 하이드로싸이클론을 이용하여 비교적 입자가 큰 침전 고형물을 제거하는 전처리 여과장치(prefilter)로 이용하고 보조적으로 미세 고형물 제거장치와 함께 사용하는 방안을 고려하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 또한 양식품종에 따른 고형물의 물리적 특성과 고형물 제거 장치 간의 제거 특성을 고려하여 적절한 적용 방식에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

## 사 사

이 논문은 2022년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20200448, 2020년 어업현장의 현안해결지원사업).

## References

- Ahmad A, Abdullah SRS, Hasan HA, Othman AR and Ismail N. 2021. Aquaculture industry: Supply and demand, best practices, effluent and its current issues and treatment technology. *J Environ Manage* 287, 112271. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112271>.
- Boyd C. 2003. Guidelines for aquaculture effluent management at the farm-level. *Aquaculture* 226, 101-112. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00471-X](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00471-X).
- Castilho LR and Medronho RA. 2000. A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema hydrocyclones. *Miner Eng* 13, 183-191. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(99\)00164-8](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(99)00164-8).
- Chen W, Zydek N and Parma F. 2000. Evaluation of hydrocyclone models for practical applications. *Chem Eng J* 80, 295-303. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(00\)00105-2](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(00)00105-2).
- Chu LY, Chen WM and Lee XZ. 2002. Enhancement of hydrocyclone performance by controlling the inside turbulence structure. *Chem Eng Sci* 57, 207-212. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(01\)00364-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00364-5).
- Fan Y, Wang J, Bai Z, Wang J and Wang H. 2015. Experimental investigation of various inlet section angles in mini-hydrocyclones using particle imaging velocimetry. *Sep Purif Technol* 149, 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.04.047>.
- Hou R, Hunt A and Williams RA. 1998. Acoustic monitoring of hydrocyclone performance. *Miner Eng* 11, 1047-1059. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(98\)00092-2](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(98)00092-2).
- 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. *Korean J Fish Sci* 31, 914-919.
- Karr CL, Stanley DA and McWhorter B. 2000. Optimization of hydrocyclone operation using a geno-fuzzy algorithm. *Comput Methods Appl Mech Eng* 186, 517-530. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)00400-4](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00400-4).
- Lee J. 2004. Design and performance of low-pressure hydrocyclone for solid removal in a recirculating aquaculture system. Ph.D. Dissertation, Pukyong National University, Busan, Korea.
- Lee J. 2015. Practical applications of low-pressure hydrocyclone (LPH) for feed waste and fecal solid removal in a recirculating aquaculture system. *Aquac Eng* 69, 37-42. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.08.003>.
- Li F, Liu P, Yang X and Zhang Y. 2020. Numerical simulation on the effects of different inlet pipe structures on the flow field and separation performance in a hydrocyclone. *Powder Technol* 373, 254-266. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.066>.
- Mailapalli DR, Marques PAA and Thomas KJ. 2007. Performance evaluation of hydrocyclone filter for microirrigation. *Eng Agric* 27, 373-382. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000300006>.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2018. A Study on the Establishment of Preventive Aquaculture System for Healthy and Safe Intake of Aquaculture Products. MOF, Sejong, Korea, 160-163.
- Ni L, Tian J, Shen C and Zhao J. 2016. Experimental study of the separation performance of a novel sewage hydrocyclone used in sewage source heat pump. *Appl Therm Eng* 106, 1300-1310. <https://doi.org/10.1016/j.appltherm.2016.06.093>.
- Pandit HP, Shakya NM, Stole H and Garg NK. 2009. Hydraulic and sediment removal performance of a modified hydrocyclone. *Miner Eng* 22, 412-414. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.09.005>.
- 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/10.1016/j.jksme.2013.05.005>.

- doi.org/10.7837/kosomes.2013.19.4.315.
- 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](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00465-4).
- Razmi H, Ghorrizi AS and Mohebbi A. 2019. CFD simulation of an industrial hydrocyclone based on multiphase particle in cell (MPPIC) method. *Sep Purif Technol* 209, 851-862. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.06.073>.
- Scott KR and Allard L. 1983. High-flowrate water recirculation system incorporating a hydrocyclone prefilter for rearing fish. *Prog Fish Cult* 45, 148-153. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1983\)45\[148:HWRSA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1983)45[148:HWRSA]2.0.CO;2).
- Svarovsky L. 1977. *Solids-Liquid Separation*. Butterworths, Oxford, U.K, 333.
- Tchobanoglous G, Metcalf L and Eddy HP. 1991. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. 3rd edition. McGraw-Hill, New York, U.S.A.
- Tavares LM, Souza LLG, Lima JRB and Possa MV. 2002. Modeling classification in small-diameter hydrocyclones under variable rheological conditions. *Miner Eng* 15, 613-622. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00085-7](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00085-7).
- Vieira LGM and Barrozo MAS. 2014. Effect of vortex finder diameter on the performance of a novel hydrocyclone separator. *Miner Eng* 57, 50-56. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.11.014>.
- Verga-Garcia D, Brito-Parada PR and Cilliers JJ. 2018. Optimising small hydrocyclone design using 3D printing and CFD simulations. *Chem Eng J* 350, 654-659. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.016>.
- Yang Qiang, Hua-lin Wang, Yi Liu and Zhi-ming Li. 2010. Solid/liquid separation performance of hydrocyclones with different cone combinations. *Sep Purif Technol* 74, 271-279. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.06.014>.
- Yurdem H, Demir V and Degirmencioglu A. 2010. Development of a mathematical model to predict clean water head losses in hydrocyclone filters in drip irrigation systems using dimensional analysis. *Biosyst Eng* 105, 495-506. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.02.001>.
- Yu J and Kim YC. 2016. Hydrocyclone design and energy requirement for treating storm water runoff from bridge. *Desalination Water Treat* 57, 629-635. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.986826>.
- Zhu G, Liow JL and Neely A. 2012. Computational study of the flow characteristics and separation efficiency in a mini-hydrocyclone. *Chem Eng Res Des* 90, 2135-2147. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2012.05.020>.