

## 염분과 수온이 참굴의 생존에 미치는 영향

서진영<sup>1</sup>, 김지훈<sup>2</sup>, 정도현<sup>2</sup>, 이민지<sup>1</sup>, 신경순<sup>3</sup>, 백승호<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국해양과학기술원 위해성분석연구센터, <sup>2</sup>한국해양과학기술원 해양시료도서관, <sup>3</sup>한국해양과학기술원 선박평형수연구센터

### Effects of the salinity and temperature on the mortality of *Crassostrea gigas*

Jin-Young Seo<sup>1</sup>, Jihun Kim<sup>2</sup>, Do Hyun Jeong<sup>2</sup>, Minji Lee<sup>1</sup>, Kyoungsoo Shin<sup>3</sup> and Seung Ho Baek<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Risk Assessment Research Center, KIOST, Geoje 53201, Republic of Korea

<sup>2</sup>Library of Marine Samples, KIOST, Geoje 53201, Korea

<sup>3</sup>Ballast Water Research Center, KIOST, Geoje 53201, Republic of Korea

#### ABSTRACT

This study was conducted to measure the survival rate of *Crassostrea gigas* according to the salinity when the water temperature is high. In laboratory, the mortality test was performed on the *C. gigas*, we conducted experiments at water temperature 20, 25, and 30 °C, salinity was tested at intervals 5 psu from 0 to 35 psu. At 20 °C, mortality was only seen at low salinity below 5 psu, on the other hand, above 25 °C, the mortality was 100% at 5 psu, and it was all survived at the above 30 psu. However, at a water temperature of 30 °C or higher, all individuals died regardless of the concentrations of salinity. However, as a result of measuring the clearance rate, it was found that the feeding activity was performed only at 30 psu and 35 psu at 20 °C and 25 °C, respectively. And at 30 °C, it was found that feeding activity was not performed at all concentrations of salinity. It was confirmed that exposure to low-salt water during high water temperature affects the feeding and survival of *C. gigas*.

**Key Words:** Low salinity, High temperature, mortality, *Crassostrea gigas*, Cheonsu Bay

#### 서론

부남호는 간월호와 함께 천수만 상류에 위치하고 있으며, 충청남도 태안군과 서산시 사이에 위치하고 있는 호수이다. 원래는 천수만이었으나, 1980년대 담수 확보 등의 목적으로 서산 방조제를 건설하면서 생긴 인공 호수들이다. 이들 호수 주변에는 상시 유입 가능한 하천이나 강이 없기 때문에 홍수기를 제외하고는 두 호수의 물은 연중 거의 순환되지 않고 있다. 방조제 건설 이전 기수역이었던 현재 부남호 해역은 방조제 건설로

인해 담수역으로 변화였고, 그로 인해 생물상 역시 많은 변화가 초래되었다 (Lee and Jeon, 2010). 또한 방조제 건설 당시 내부에 갇혀 있던 해수가 외해로 배출되지 못하고 현재까지도 저층에 고여 있는 상태이다. 부남호 저층의 해수는 지난 30년간 해수 유통이 없이 저층의 해수, 표층의 담수 층이 분리되어 고여 있으면서, 표층은 녹조가 발생하여 수질오염이 야기되었고, 저층은 빈산소수괴가 형성되어 생물이 전혀 살수 없는 환경이 조성되어 있다 (충청남도, 2019). 또한 현재의 부남호 표층수는 TOC와 COD 기준 모두 6등급으로 오염되어 있으며, 저층에는 염분 함량이 높아 표층수와 저층수 모두 농업용수로도 활용이 어려운 실정이다.

굴은 고착성 (sessile) 표서생물 (epifauna) 이며, 여과식자 (filter-feeder) 이다. 따라서 굴은 환경 및 수질 조건의 변화에 민감하여, 극심한 기상 현상이 생태계에 미치는 영향을 조사할 때 탁월한 감시체가 된다 (Volety *et al.*, 2009). 극심한 경우, 그에 따른 홍수와 일시적인 담수의 방류 등은 해양 생태계에는 장, 단기적으로 심각한 영향을 준다 (Wetz and

Received: June 15, 2021; Revised: June 22, 2021; Accepted: June 28, 2021

Corresponding author: Seung Ho Baek

Tel: +82 (55) 639-8513, e-mail: baeksh@kiost.ac.kr  
1225-3480/24789

This is an Open Access Article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License with permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproducibility in any medium, provided the original work is properly cited.

Yoskowwitz, 2013; Du *et al.*, 2021). 이러한 요인으로 인해 연안 생태계에 영향을 미치게 되는 기간은 수일에서 수년에 이르기 까지 매우 다양하며, 영향은 강도와 내성의 정도에 따라 크게 차이를 보인다 (Du *et al.*, 2021). 서해안의 굴은 남해안의 수하식 양식과는 달리 지주식과 살포식으로 갯벌에서 양식을 한다. 조간대 생물은 매일 반복적으로 대기 중에 노출이 되기 때문에 일반적인 조하대 생물에 비해 염분 및 온도에 대한 내성이 강한 것으로 알려져 있다 (Seo *et al.*, 2018). 하지만 장기간에 걸친 장마와 대량의 담수가 일시적으로 유입될 경우 갯벌 생물은 장기간 저염수에 노출되고, 주로 하계에 집중 강우가 발생되기 때문에 동시에 고온의 환경에 노출된다. 염분 감소와 수온 증가는 성장률, 심박수 및 호흡과 같은 생리학적 기능에 영향을 미칠 수 있다 (Heilmayer *et al.*, 2008). 실제 2020년에는 태안군 안면도 북쪽 참굴 양식장에서 굴의 대량 폐사가 보고되었다. 현재까지 굴의 폐사 원인에 대해서는 명확한 요인이 밝혀지지 않는으나, 오염된 담수호의 방류, 고수 온기에 담수와 강우에 의한 저염분수에 노출 등이 주요 요인으로 거론되고 있다.

굴은 수층 내 식물플랑크톤을 필터하고, 입자성 물질을 제거하며, 어류와 무척추동물에게 먹이, 쉼터 및 서식지를 제공함으로써 생태계에서 중요한 역할을 한다 (Newell and Jordan, 1983; Lenihan *et al.*, 2001). 천수만 주변의 담수호들은 앞서 언급하였듯 호소수 기준으로 매우 오염된 상태 (V-VI 등급)이다. 하계 집중강우 시 담수호들의 방류로 인해 오염된 담수가 천수만으로 유입되고, 어류나 무척추동물과 같은 수산 생물에 영향을 미칠 것으로 사료된다. 또한 갯벌에 서식하고 있는 여과식자이면서 고착성 생물인 굴과 같은 이매패류들의 경우, 담수의 방류로 인해 오염수와 저염수의 영향을 직접적으로 받게 될 것이다.

따라서 본 연구에서는 하계 집중강우 시 (담수 방류 시) 현장 조사를 통해 담수의 방류에 따른 천수만 내 수질 변동 양상에 대해 파악해 보고자 한다. 수온과 염분 등의 변동양상을 통해 담수의 확산 범위를 파악하고, COD 함량을 측정하여 담수호 내 오염물질이 천수만으로 배출되었을 때, 오염도의 증감여부를 판단해 보고자 한다. 또한 실험실 내 실험을 통해, 호소수 기준으로 매우 심각하게 오염된 상태인 부남호의 저층수에 대한 독성 영향평가를 수행해 보고자 한다. 이와 함께, 하계 집중강우기에 저염수 환경에의 노출을 가정하여, 실험실 내에서 고수온, 저염분 상태에서의 참굴의 사망률을 측정해 보고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 환경조사

부남호를 비롯한 천수만 주변 담수호의 방류에 의한 천수만

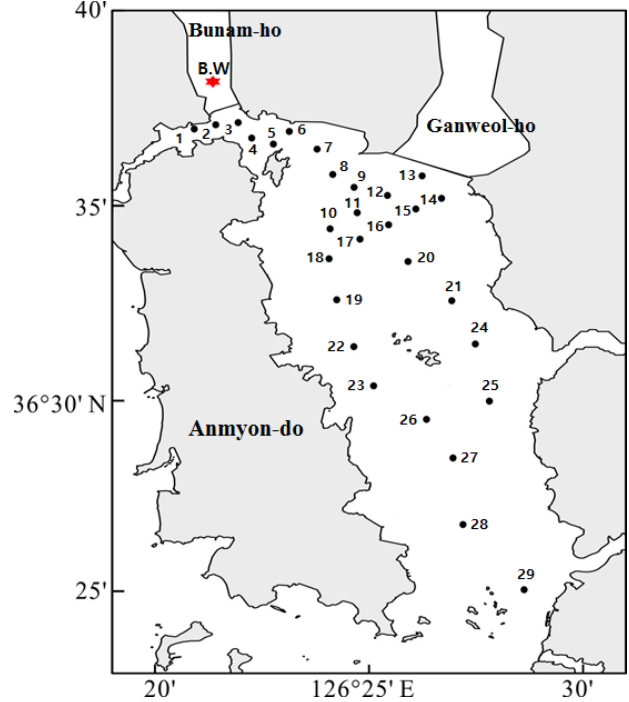


Fig. 1. The sampling sites of oceanographic condition in Cheonsu Bay (B.W: The sampling site of Bottom Water in Bunam Lake)

의 수 환경 변동양상을 파악하기 위해 집중강우기인 2020년 8월에 현장조사를 수행하였다. 조사는 총 3회 수행하였고, 시기에 따라 25개에서 29개 정점에서 수행하였다 (Fig. 1). 1차와 2차 조사는 강우와 방류가 집중되던 시기인 2020년 8월 10일 (Neap-High) 과 8월 16일 (Spring-Low) 에 수행하였고, 3차 조사는 장마가 끝난 후 방류와 강우가 일시적으로 중단되었던 시기인 8월 30일 (Spring-Low) 에 수행하였다. 표층과 저층에서 CTD (OS 316plus) 로 수온, 염분, 용존산소 농도를 측정하였다. 또한 부남호 방류 시 부남호 내 오염수가 천수만으로 방류되는 지를 살펴보기 위해 천수만 내 COD 함량을 조사하였다. COD 측정을 위한 채수 및 분석은 해양환경공정시험법에 따라 수행하였다.

### 2. 참굴 노출실험

실험에는 충남 태안군 안면도의 황도갯벌에 서식하는 참굴 (*Crassostrea gigas*) 을 사용하였다. 참굴은 구입 후 실험실로 이동하여 1주간 수조에서 순치 후 실험에 사용하였다. 실험에 사용한 개체의 크기 및 습중량 확인을 위하여 실험 전 무작위로 추출한 20개의 개체에 대해 크기 (각장, 각고, 각폭) 를 vernier calipers로 측정하였으며, 전자저울로 전중량 (Total weight) 을 측정하였다.

부남호 저층수에 대한 참굴의 영향을 평가하기 위해 부남호

저층수를 2020년 8월에 채수하여 실험에 이용하였다. 저층수는 부남호 내에서 배수갑문에 가장 인접한 해수가 고여 있는 지역의 수심 8m 이상의 수역에서 채집하였고 (Fig. 1), 실험실로 이동 후 실험 전까지 냉암소에서 보관하였다. 실험의 농도는 부남호 저층수 원액 (100%) 을 여과해수로 희석하여, 75%, 50%, 25%, 10%, 그리고 여과해수 (0%, Control) 총 6개의 농도에서 실험을 수행하였다. 2.7L 용량의 원형 수조에서 실험을 수행하였고, 수조 당 5개체씩 참굴을 투입하여 2반복으로 실험을 수행하였다. 실험실 온도 조건 (20°C) 에서 실험을 수행하였고, 실험이 진행되는 48시간 동안 산소공급을 해 주었으며, 먹이는 공급하지 않았다. 실험이 종료 후 살아있는 개체는 다시 여과해수로 옮겨 생존력을 96시간 동안 관찰하였다. 실험이 종료된 이후 100% 저층수에 노출한 개체들은 먹이생물을 공급하여 여과율 (Clearance rate) 을 측정하였다.

두 번째로 고수온기에 저염분 상태가 참굴의 생존률에 미치는 영향을 파악하기 위해, 20°C (Control) 와 2개의 실험구, 25°C, 30°C의 온도 조건에서, 염분 0-35 psu (5 psu 간격) 으로 사망률 실험을 수행하였다. 10L 수조에 굴 10-15 개체를 96hr 동안 노출하여 사망률을 측정하였다. 실험이 진행되는 동안 산소공급은 해 주었고, 먹이생물은 공급하지 않았다. 실험에 사용한 참굴은 실험 수일 전부터 서서히 수온을 올려 온도의 영향을 최소화 하였으며, 노출 조건과 동일한 수온에서 1일 이상 순치 후 실험에 사용하였다.

### 3. 여과율 실험

염분과 수온의 변동에 따른 참굴의 섭식능을 파악하기 위해 사망률 실험과 동일한 수온 (20, 25, 30°C) 및 염분 (0-35 psu, 5 psu 간격) 조건에서 여과율 실험을 수행하였다. 500 ml 용량의 비커에 한 개체씩 참굴을 넣고, 해수 400 ml과 고농도로 배양된 먹이생물 *Isochrysis galbana*를 100 ml 주입하여 두 시간 동안 여과율을 측정하였다. 실험은 농도별로 3반복으로 수행하였다. 여과율 측정에는 Fluorometer (Tuner Designs Model 10-AU) 를 이용하여 엽록소의 양을 측정하였다. 본 연구에서는 Coughlan (1969) 의 여과율 산출식을 이용하였다.

$$FR = V \times \ln(C_0/C_t)/t$$

여기서, FR: 여과율 ( $\text{ml min}^{-1}$ ), V: 실험액의 용량 (ml),  $C_0$ : 초기먹이생물 농도 ( $\text{cells ml}^{-1}$ ),  $C_t$ : 시간 t에서의 먹이생물농도 ( $\text{Cells ml}^{-1}$ ), t: 실험시간 (min). 먹이생물인 *I. galbana*는 한국해양과학기술원 남해연구소의 해양시료도서관에서 분양받아 배양하여 사용하였다.

## 결 과

### 1. 환경조건

2020년 8월에 수행한 현장조사 결과, 1차 조사에서 표층의 염분은 13.7-26.4 psu의 범위를 보였고, 간월호와 부남호에 인접한 천수만 북쪽 해역에서의 염분 농도가 확연히 낮게 나타났으며, 외해로 갈수록 염분이 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 2). 저층의 염분 함량은 18.5-26.9 psu로 표층에 비해서는 높게 나타났으나, 모든 정점에서 30 psu 이하로 강우와 방류의 영향이 저층에도 일부 나타났다. 2차 조사는 장마가 끝날 무렵인 2020년 8월 16일에 수행되었고, 강우량과 방류량은 1차 조사에 비해 감소한 시기였다. 2차 조사에서 표층 염분 함량은 16.5-24.4 psu의 범위를 보였고, 저층은 20.1-26.0 psu의 범위를 보였다. 1차 조사와 염분 분포 범위에서 큰 차이를 보이지 않았으나, 15 psu 내외의 저염분 층의 범위는 1차 조사에 비해 감소하였고, 20 psu 내외의 저염분수는 궁리항 인근 해역까지 분포하는 것으로 나타났다. 저층의 염분 함량은 1차 조사와 큰 차이를 보이지 않았으나, 최저 염분 농도가 1차 조사에 비해 1.5 psu 가량 높게 나타났다.

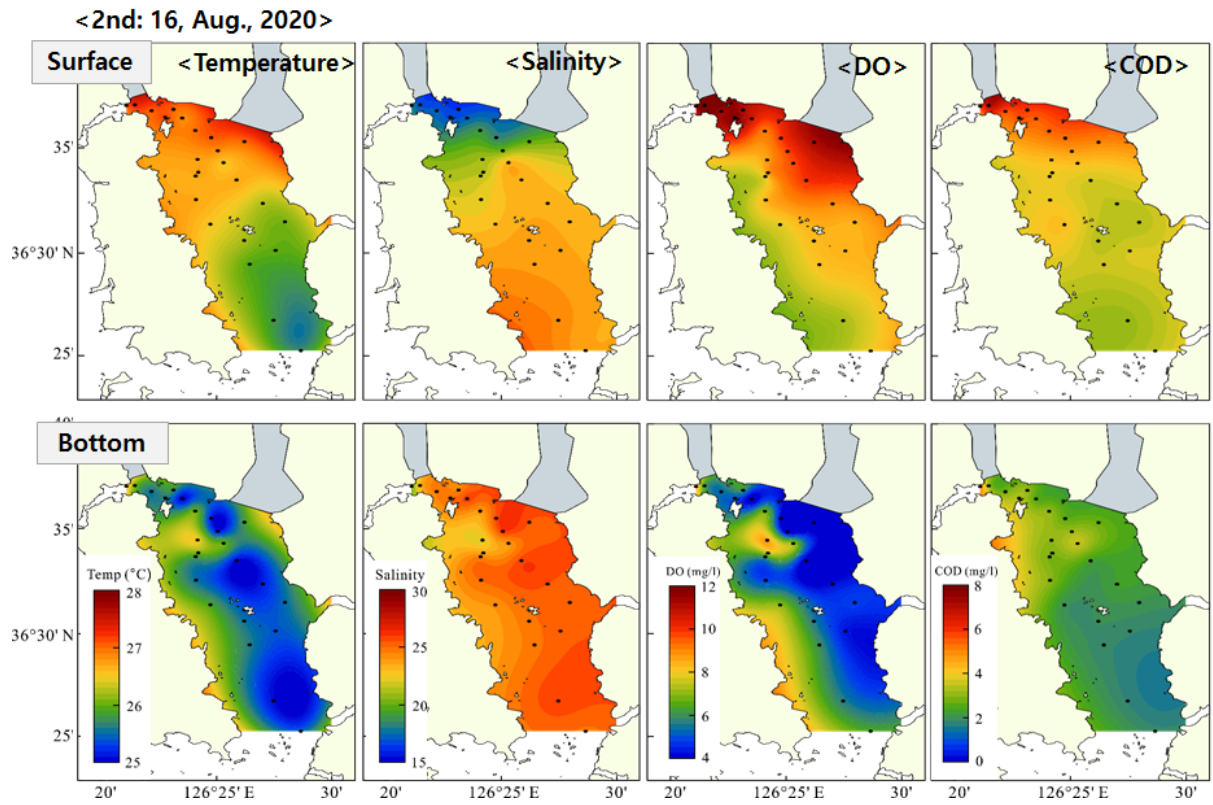
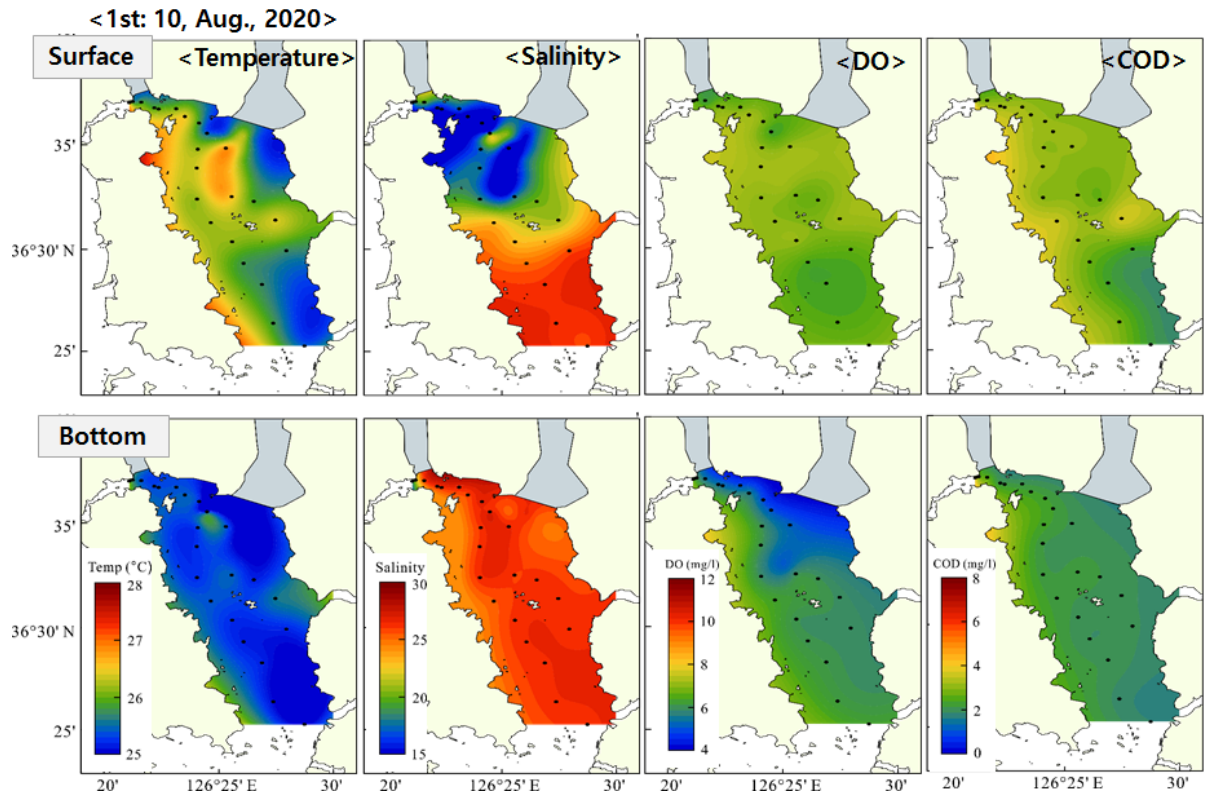
표층수온은 집중 강우가 지속되었던 1차 조사 시기에 25.4-26.8°C로 가장 낮았으며, 강우량과 방류량이 감소한 3차 조사 때 26.9-27.9°C로 가장 높게 나타났다 (Fig. 2). 저층의 수온 역시 1차 조사 시기에 24.7-26.1°C로 가장 낮았고, 3차 조사 때 26.8-27.2°C로 가장 높았다. 표층과 저층의 수온 차는 약 1°C 정도로 나타났다.

COD 함량은 1차 조사에서 표층은 2.7-4.6  $\text{mg L}^{-1}$ 였고, 저층은 2.2-4.6  $\text{mg L}^{-1}$ 의 범위를 보였다. 2차 조사에서는 표층 3.9-8.8  $\text{mg L}^{-1}$ , 저층 2.2-6.3  $\text{mg L}^{-1}$ , 3차 조사에서는 표층 3.3-5.0  $\text{mg L}^{-1}$ , 저층 2.7-4.0  $\text{mg L}^{-1}$ 의 범위를 보였다. 표층과 저층의 COD 함량 차이는 크지 않았으며, 강우량과 방류량의 영향도 크게 나타나지 않았다. 지역적으로 살펴보면, 장마가 잠시 소강상태였던 2차 조사에서 창리와 궁리항 주변해역에서 COD 함량이 8.8  $\text{mg L}^{-1}$ 로 높게 나타났으나, 그 외 지역에서는 4  $\text{mg L}^{-1}$  내외로 나타났다.

용존산소의 농도는 강우량과 방류량이 증가할수록 감소하는 경향을 보여서, 3차 조사시기에 가장 낮았으며, 이 시기 저층의 용존산소 농도는 3.9-6.2  $\text{mg L}^{-1}$ 로 조사 기간 중 가장 낮은 값을 보였다 (Fig. 2). 그 외 조사 시기에도 표층에 비해 저층의 용존산소 농도가 낮게 나타났다.

환경 지표 간 상관관계를 구한 결과, 표층에서는 염분이 감소할수록 수온, COD, Chl. *a* 그리고 DO는 증가하는 경향을 보였다 ( $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ). 저층에서도 염분함량은 수온, COD, DO와 음의 상관관계를 보였다. 천수만 내 COD 함량은 수온과는 양의 상관관계, 염분과는 음의 상관관계를 보여

영분과 수온이 참굴의 생존에 미치는 영향



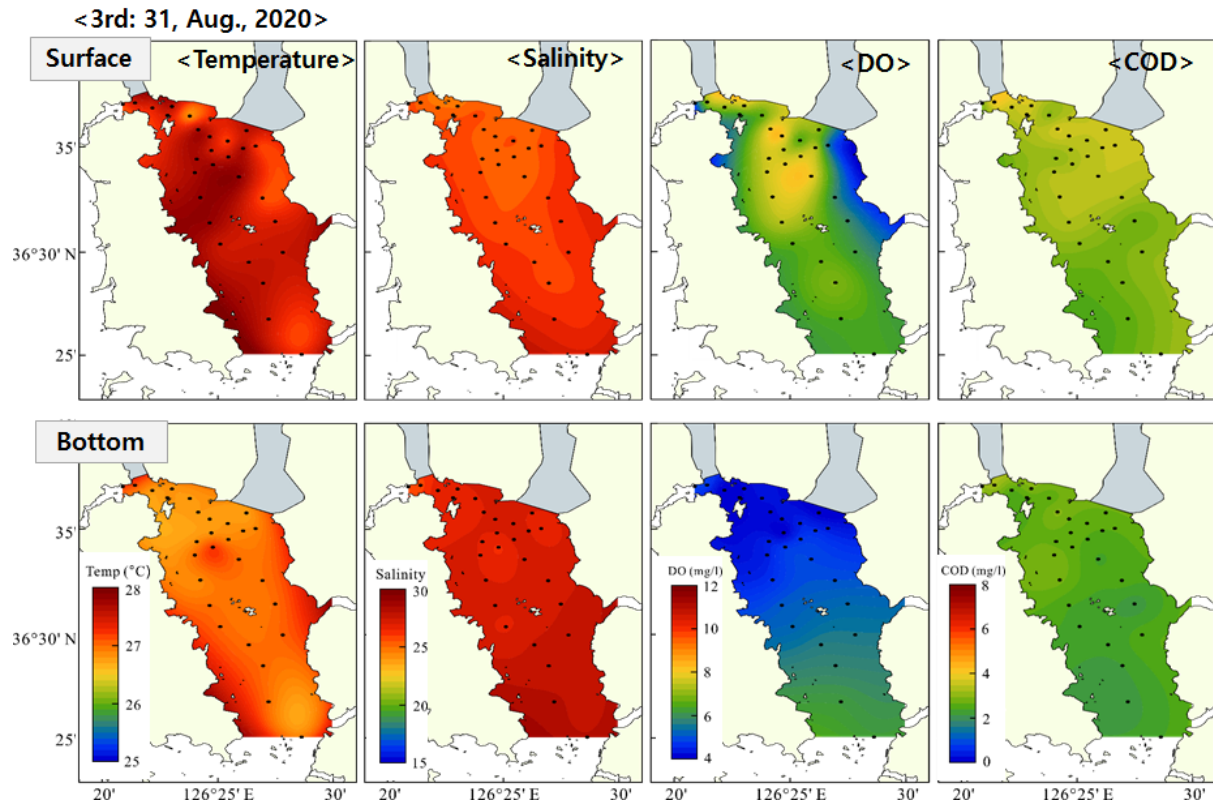


Fig. 2. Spatial distribution patterns of water quality in Cheonsu Bay during discharge period.

서, 담수가 공급될수록 증가하는 것으로 나타났다 (Table 1).

## 2. 참굴 노출실험

실험에 사용한 참굴 (*C. gigas*) 의 평균 크기는 각장 92.91-146.96 mm로 평균 각장크기는  $118.42 \pm 16.11$  mm 였다. 각고는 32.18-73.46 mm, 각폭은 24.76-43.11 mm의

범위를 보였고, 평균은 각각  $41.31 \pm 8.86$  mm,  $32.60 \pm 4.71$  mm 였다. 실험에 사용한 개체의 습중량은 67.93-155.62 g로 평균  $96.08 \pm 26.05$  g 였다.

부남호 저층수의 채집 당시 수온은 22.4°C 였고, 용존산소의 농도는  $0.12 \text{ mg L}^{-1}$ , 염분은 31.97 psu 였다. 채집된 저층수의 용존산소 농도가 매우 낮았기 때문에 실험 시 산소부족의 영향

Table 1. The results of correlation analysis between environmental factors

	Temperature	Salinity	DO	Chl. <i>a</i>	COD
Surface					
Temperature	-	-.462*	.662**	.368	.605**
Salinity		-	-.479*	-.675**	-.564**
DO			-	.273	.487*
Chl. <i>a</i>				-	.596**
COD					-
Bottom					
Temperature	-	-.630**	.121	-	.853**
Salinity		-	-.468*	-	-.891**
DO			-	-	.172
COD				-	-

(\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ )

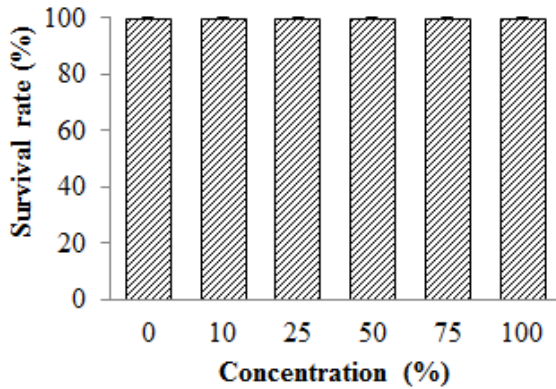


Fig. 3. The survival rate of *Crassostrea gigas* by concentration in the bottom water of Bunam Lake.

을 배제하기 위해 실험기간 동안 산소 공급을 지속적으로 해주었다. 부남호 저층수에 참굴을 노출한 결과, 100% 용액에서 참굴의 사망률은 0%였다 (Fig. 3). 75%, 50%, 25%, 그리고 10% 용액에서도 2개의 실험구에서 모두 사망률은 0%로 나타났다. 부남호 저층수에 노출실험을 수행한 결과, 참굴의 경우 모든 농도에서 대조구와 통계적으로 차이를 보이지 않았다. 또한 부남호 저층수 100% 용액에 노출 후 생존한 참굴 개체를 다시 깨끗한 여과해수로 옮겨 산소 공급을 해 주면서 생존률을 파악한 결과, 96hr 경과 시까지 모두 생존하는 것으로 나타났다. 이처럼 참굴을 부남호 저층수에 노출하였을 때, 참굴의 사망률에 미치는 급성독성 영향은 없는 것으로 나타났다. 하지만 부남호 오염수에 노출 후 여과해수로 다시 옮겨 주어 생존률을 측정된 개체들을 대상으로 여과율 실험을 수행한 결과, 모든 개체에서 여과율이 1 ml L<sup>-1</sup>이하로 나타나 전혀 섭식활동을 하지 않는 것으로 나타났다.

다음으로 고수온기, 저염수가 참굴의 생존에 미치는 영향을 파악하기 위해 수온별로 염분 구배를 달리하여 생존율을 측정해 보았다. 그 결과, 20°C에서는 5 psu에서 15개체 중 5개체가 사망하였고, 0 psu에서는 3개체가 사망하여 사망률은 각각 33%, 20%였다. 하지만 10 psu에서부터 35 psu까지는 사망률이 0%로, 15개체 모두 생존하였다 (Fig. 4). 25°C에서는 30 psu, 35 psu에서는 모든 개체가 생존하였으며, 25 psu에서는 1개체가 사망하여 사망률이 10%였다. 20 psu이하의 염분 농도에서부터 사망률은 급격히 증가하여, 20 psu에서는 사망률이 50%, 15 psu에서는 70%였고, 10 psu에서는 90%, 5 psu에서는 100% 모든 개체가 사망하였다. 0 psu에서는 참굴의 사망률이 70%로 나타났다. 30°C에서는 다른 수온에서는 영향이 없었던 30 psu 이상의 농도에서도 모두 사망하여, 모든 염분 농도에서 사망률이 100%였다. 이처럼 참굴은 20°C 이하의 수온에서는 10 psu의 낮은 염분에서도 사망률이 0%였

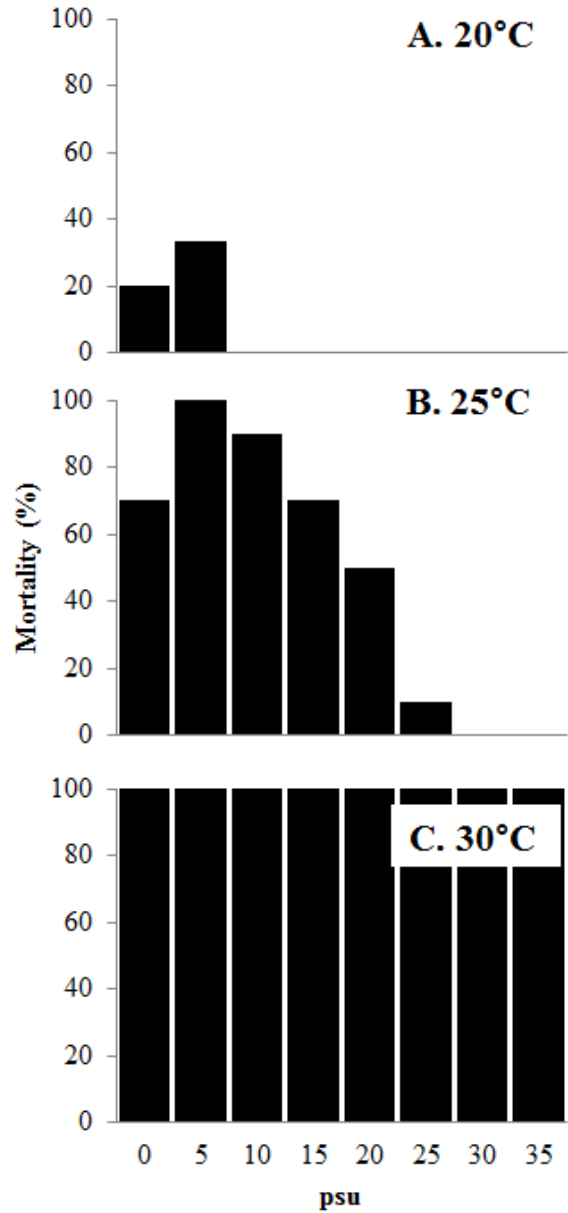


Fig. 4. The mortality of *C. gigas* according to the salinity gradient fluctuations by temperature.

으나, 수온이 증가할수록 염분에 대한 내성도 감소하여, 25°C에서는 20 psu에서도 사망률이 50% 이상으로 사망률이 급증하였고, 30°C이상의 수온에서는 염분에 상관없이 참굴의 내성이 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

### 3. 여과율 실험

여과율 실험은 온도, 염분 실험과 동일 조건에서 수행하였다. 20°C에서 1시간 동안 노출하였을 때, 35 psu에서는 개체

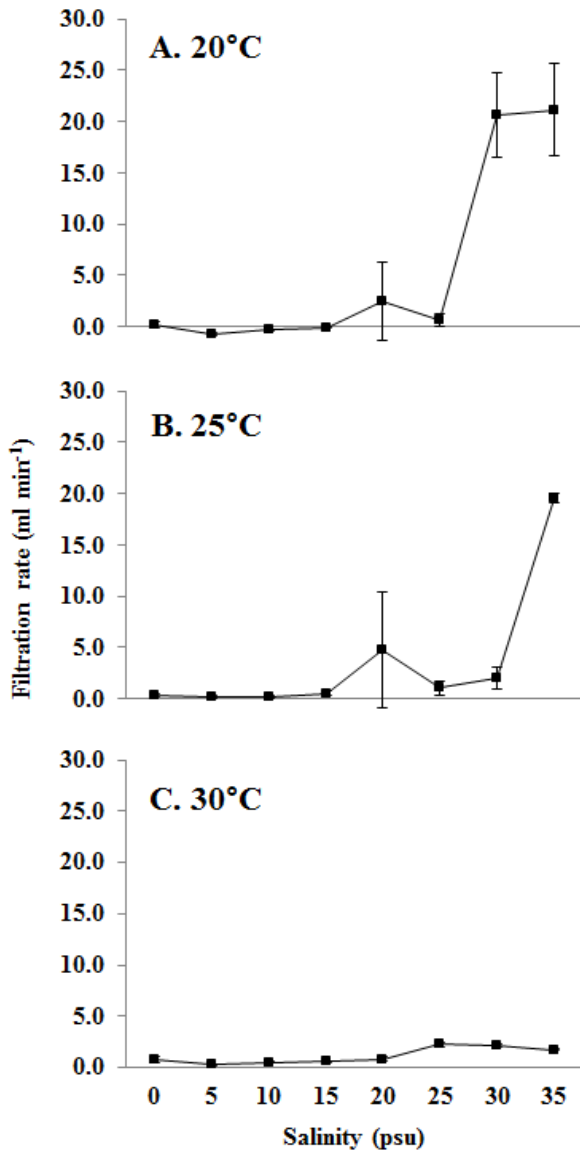


Fig. 5. The clearance rate of *C. gigas* according to the salinity gradient fluctuations by temperature.

간 차이 없이 섭식활동이 진행되었고, 30 psu에서는 개체 간 차이가 다소 있었으나, 섭식활동을 하는 것으로 나타났다 (Fig. 5). 2시간 경과 후, 30 psu와 35 psu에서 여과율이 각각 20.6 ml L<sup>-1</sup>, 21.2 ml L<sup>-1</sup>로 나타나, 두 온도 간 여과율의 차이는 거의 없었으며, 개체 간 차이도 거의 없는 것으로 나타났다. 하지만 25 psu 이하의 염분 농도에서는 2시간 동안 거의 섭식활동이 진행되지 않았고, 20 psu에서만 3개체 중 한 개체의 여과율이 6.9 ml L<sup>-1</sup>로 다른 개체와 다소 차이를 보였다. 그 외 염분 농도에서는 거의 모든 개체가 여과를 하지 않는

것으로 나타났다.

25°C에서는 1시간 경과 후 35 psu에서만 여과율이 24.8 ± 17.4 ml L<sup>-1</sup>로 섭식활동이 관찰되었으나, 개체 간 변이가 큰 것으로 나타났다. 2시간 경과 후, 35 psu에서의 여과율은 19.5 ± 0.5 ml L<sup>-1</sup>로 개체 간 차이 없이 섭식활동이 진행되는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 그 외 염분 농도에서는 2시간 경과 후에도 20 psu에서만 한 개체의 여과율이 4.8 ml L<sup>-1</sup>로 나타났고, 그 외 염분 농도에서는 여과율이 1 ml L<sup>-1</sup> 미만으로 매우 낮아 거의 여과를 하지 않는 것으로 나타났다.

30°C 이상의 수온에서는 25 psu 이상의 농도에서 섭식활동이 일부 관찰되었으나, 여과율이 3 ml L<sup>-1</sup> 이하로 매우 낮았다. 20°C와 25°C에서 수행한 실험에서는 35 psu에서는 모두 활발한 섭식활동이 나타난 반면, 30°C 이상의 수온에서는 35 psu에서도 여과율이 매우 낮았다. 또한 20°C와 25°C에서 진행된 실험에서는 1시간 후 측정된 결과에 비해 2시간 후 측정된 결과에서 개체 간 변이가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 30°C 이상 실험구에서는 시간의 경과에 따른 차이는 나타나지 않았다.

### 고 찰

연안에 서식하는 굴이 대량 폐사하는 물리적 요인으로는 퇴적물 매몰에 의한 질식, 담수유입 감소로 인한 염분 증가, 홍수 등의 일시적 담수 증가로 인한 염분 감소, 극한의 날씨, 서식지 교란, 빈산소수괴 (hypoxia) 등이 있고 (Clyde and Machkenzie, 2007; La Peyre *et al.*, 2013), 생물학적 요인으로는 Herpes, Vibrio 등과 같은 바이러스 감염에 의한 영향 등이 있다 (Cotter *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2021). 2020년 천수만 지역에서 발생한 굴의 집단 폐사는 크게 3가지 요인으로 판단된다. 첫째 천수만 해역 주변에는 부남호를 비롯하여, 간월호, 홍성호, 보령호 등 4개의 하구호가 분포하고 있다. 4개의 하구호 방조제 내측의 수질은 COD와 TOC 기준으로 호소수 최고등급인 VI 등급을 초과하는 매우 심각하게 오염된 수준이었으며, 표층에 비해 저층의 오염도가 심하였다 (충청남도, 2018). 하구호 방류 시 오염된 담수의 확산은 조류의 흐름에 따라 2-3시간 이내에 3-5 km까지 확산되었으며, 장기 방류 시 최대 7일 이상 천수만 내 수질악화가 지속된다 (충청남도, 2018). 본 연구 결과 방류 시 하계 천수만 내 COD 함량은 강우량이 많았던 시기에는 표층 COD 함량이 4.0 mg L<sup>-1</sup> 내외였으나, 이후 강우량이 감소하면서 COD 함량은 평균 5.6 mg L<sup>-1</sup> 이상으로 나타났고, 특히 천수만 내측의 창리와 궁리항 부근 정점에서는 COD 함량이 8.8 mg L<sup>-1</sup>까지 증가하여 상대적으로 높게 나타났다. 실제 2017년 조사 결과에서는 담수호의 방류로 인해 천수만 내 COD 함량이 10 mg L<sup>-1</sup>까지 올라가

일시적으로 수질이 매우 나빠지는 결과를 보였다 (충청남도, 2018). 이처럼 오염도가 높은 담수호의 방류로 인해 천수만 내 COD 함량이 하계에 일시적으로 높아지는 현상이 나타났다. 이러한 증가는 천수만 내 패류를 비롯한 수산생물에 직, 간접적 영향을 미칠 것으로 판단된다. 하지만 본 연구결과에서, 참굴의 경우 48시간 동안 100% 부남호 오염수에 노출되었으나, 사망을 유발하는 급성 독성 영향은 48시간 내 나타나지 않았고, 다만 섭식능 저하와 같은 생리학적 영향이 나타났다. 따라서 장기간 오염수에 노출될 경우 참굴을 비롯한 이매패류의 생리활성에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

두 번째는 지속적인 강우와 방류로 인한 저염분수역의 노출이다. 2020년 충남 서산지역의 장마는 6월 24일부터 8월 16일까지 54일간 지속되었고, 54일 중 32일간 비가 내렸으며, 이 기간 총 강우량은 777.4 mm이다 (기상자료개방포털). 이러한 집중 강우로 인해 서산 B 지구, 부남호의 방류는 7월 16일부터 9월 21일까지 계속되었다. 일시적으로 대량의 담수가 방류될 경우, 염분의 감소가 야기된다. 본 연구에서는 간조 시 갯벌에서의 염분 농도는 측정하지 않았으나, 강우와 방류량이 증가하던 시기에 천수만 내 표층 염분 함량은 13.7 psu로 나타났다, 15 psu 내외의 염분 범위가 죽도 인근 해역까지 확장되었고, 방류량과 강우량이 감소하였던 2차 조사에서도 창리 인근 해역까지 표층 염분 함량이 15 psu 내외로 나타났다. 이 지역은 2020년 굴의 대량 폐사가 발생한 안면도 부근 갯벌지역을 포함하고 있다. 갯벌지역의 특성상 간조 시 강우와 방류의 영향으로 저염수의 영향을 직접적으로 받을 수 있다. 조석의 영향으로 갯벌이 노출되는 시간은 수 시간에 불과하지만, 비강우기에 비해 강우기에는 장시간 지속적으로 저염수에 노출된다. 저염수에 단기간 노출될 경우, 포식자 및 *Perkinsus marinus*와 같은 기생충에 의한 노출이 줄어들어 개체수가 증가하는 경향을 보이기도 한다 (La Peyre *et al.*, 2013; Levinton *et al.*, 2011; Pollack *et al.*, 2011). 하지만 장기간 저염수에 노출될 경우, 패각을 닫고 생활하는 기간이 길어지게 되면서, 체내 독성 화합물이 축적되고 체내 에너지 균형이 무너져서 결국에는 사망에 이르게 된다 (Du *et al.*, 2021). 또한 염분이 낮은 환경 조건에서는 삼투압의 변화에 의한 에너지 소비 증가 (대사율 증가), 에너지 저장 용량 감소에 따른 체력, 생존 및 성장 감소를 야기한다 (Maoxiao *et al.*, 2019; Lannig *et al.*, 2006; Dickinson *et al.*, 2012). 이러한 요인들로 인해 장기간 저염수에 노출될 경우, 굴의 대량 폐사가 야기될 수 있다.

마지막 요인으로는 고온에 의한 노출이다. 2020년 장마는 6월 말부터 8월까지 지속되었다. 하계 고온기에 집중된 강우로 인해, 저염수와 함께 높은 수온 역시 수산생물에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 본 결과에서 집중 강우기인 1차 조사에서도

표층 수온은 25°C 이상이었고, 8월 31일에 조사된 3차 조사에서는 표층 수온이 27.9°C까지 상승하였다. 본 연구결과에서 수온이 20°C 내외일 경우에는 염분 농도 5 psu 이하에서만 개체의 사망이 나타났지만, 수온이 25°C 이상으로 상승하였을 경우, 염분 농도에 상관없이 사망률이 급격히 증가하였다. 2013년 La Peyre 등의 연구에 따르면, 미국의 미시시피강 인근해역에서 홍수가 발생하였을 때에도 하계 (온도 25°C 이상)에는 대량 폐사가 나타난 반면, 춘계 (< 25°C)에서는 낮은 폐사율을 보였다 (La Peyre *et al.*, 2013). 프랑스에서 수행된 연구에서도, 하계 Pacific Oyster (*C. gigas*)을 사망에 이르게 하는 임계 온도는 19-20°C이며, 이 임계 온도를 한번 넘게 되면 굴은 pre-spawning stage로 발달하여, 재생산에 에너지를 모두 소비하게 되어 사망률이 증가한다고 보고하였다 (Samain *et al.*, 2007). 그 외 미국에서 수행된 연구에서도 온도 상승 (16-30°C)은 조직 형태에 해로운 변화를 일으키고, oxyradicals 과잉 생산으로 인한 산화 및 질화 스트레스를 유발하여, 굴에서 세포 사멸을 촉진한다고 보고하였다 (Rahman and Rahman, 2021). 이처럼 저염수에 노출된 굴의 경우 사망률에 미치는 영향은 수온과도 밀접한 관련이 있다.

본 연구는 실제 해역에서의 사망률을 측정하거나, 대량 폐사가 발생한 해역에서 수 환경을 측정하는 것은 아니다. 따라서 조석에 따라 변동하는 자연 상태의 환경을 실험실 내에서 명확하게 대변하기는 어렵다. 하지만 실험실 내 실험을 통해 수온과 염분이 참굴의 사망률에 미치는 영향에 대해서는 파악 가능하였으며, 2020년에 천수만 일대에서 나타난 굴의 대량 폐사는 집중강우와 담수의 방류에 의한 영향인 것으로 판단이 된다. 다만, 부남호 오염수가 참굴의 치사율에 미치는 영향을 평가한 결과, 단기간에 사망에 이르게 할 정도의 독성은 없는 것으로 판단되나, 노출 후 섭식활동을 전혀 하지 않는 등 생리활성의 감소는 관찰되었으므로, 오염수에 대한 영향을 파악하기 위해서는 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

## 결론

본 연구에서는 천수만에서 발생한 참굴의 폐사와 관련하여, 하계 집중 강우기 담수 방류가 참굴의 생존에 미치는 영향을 파악하기 위해, 부남호 오염수에 대한 참굴의 사망률 실험을 수행하였고, 수온 별로 염분농도를 달리하여 참굴의 사망률 실험을 수행하였다. 실험에는 천수만 내 갯벌에 서식하는 참굴을 이용하였고, 20, 25, 30°C에서 염분농도 0-35 psu까지 5 psu 간격으로 사망률을 측정하였다. 그 결과, 부남호 저층 오염수가 참굴의 사망에 이르게 하는 급성 독성 영향은 48시간 동안 나타나지 않았으며, 다만 오염수 노출 후 섭식활동을 하지 않는 등 생리활성에는 영향을 주는 것으로 나타났다. 수온과 염

분의 변동에 따른 사망률 측정 실험에서는 20℃에서는 5 psu 미만에서만 사망률이 20-33%로 나타났고, 25℃에서는 30 psu 이상의 염분 농도에서만 사망률이 0%로 나타났다. 30℃ 이상의 수온에서는 염분 농도에 상관없이 모든 개체가 사망하는 것으로 나타났다. 여과율 실험에서도 20℃에서는 30 psu 이상에서, 25℃에서는 35 psu 에서만 여과를 하는 것으로 나타났고, 30℃이상의 온도에서는 모든 염분 농도에서 섭식활동을 하지 않는 것으로 나타났다. 이처럼 25℃이상의 수온 상태에서 30 psu 이하의 염분 농도는 참굴의 섭식과 생존 모두에 영향을 주는 것으로 나타났다.

## 사 사

본 연구는 '부남호 역간척에 따른 해양환경 영향분석 및 대응방안 마련 연구 (G52000)' 의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Clyde, L. and Machkenzie, J.R.C.L.M. (2007) Causes underlying the historical decline in Eastern oyster (*Crassostrea virginica* Gmelin, 1791) landings. *Journal of Shellfish Research*, **26**: 927-938.
- Cotter, E., Malham, S.K., O'Keefe, S., Lynch, S.A., Latchford J.W., King, J.W., Beaumont, A.R. and Culloty, S.C. (2010) Summer mortality of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, in the Irish Sea: The influence of growth, biochemistry and gametogenesis. *Aquaculture*, **303**: 8-21.
- Coughlan, J. (1969). The estimation of filtering rate from the clearance of suspensions. *Marine Biology*, **2**: 356-358.
- Dickinson, G.H., Ivanina, A.V., Matoo, O.B., Portner, H.O., Lannig, G., Bock, C., Beniash, E. and Sokolova, I.M. (2012) Interactive effects of salinity and elevated CO<sub>2</sub> levels on juvenile eastern oysters, *Crassostrea virginica*. *J. Exp. Biol.*, **215**: 29-43.
- Du J., Park, K., Jensen, C., Dellapenna, T.M., Zhang, W.G. and Shi, Y. (2021) Massive oyster kill in Galveston Bay caused by prolonged low-salinity exposure after Hurricane Harvey. *Science of the Total Environment*, **774**: 145-132.
- Heilmayer, O., Digialleonardo, J., Qian, L. and Roesijadi, G. (2008) Stress tolerance of a subtropical *Crassostrea virginica* population to the combined effects of temperature and salinity. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **79**: 179-185.
- La Peyre, M.K., Eberline, B.S., Soniat, T.M. and La Peyre, J.F. (2013) Differences in extreme low salinity timing and duration differentially affect eastern oyster (*Crassostrea virginica*) size class growth and mortality in Breton Sound, LA. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **135**: 146-157.
- Lannig, G., Flores, J.F. and Sokolova, I.M. (2006) Temperature-dependent stress response in oysters, *Crassostrea virginica*: pollution reduces temperature tolerance in oysters. *Aquat. Toxicol.*, **79**: 278-287.
- Lee, S., Park, C., Lee, D. and Lee, J. (2014) Effects of Freshwater Discharge on Plankton in Cheonsu Bay, Korea During the Rainy Season. 「The Sea」 *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **19**(1): 41-52. (in Korean)
- Lee, C.L. and Jeon, B.I. (2010) Comparison of fish fauna in Lake Ganwol and Lake Bunam watersheds. *Korean J. Limnol.*, **43**(2): 175-182. (in Korean)
- Lenihan, H.S., Peterson, C.H., Byers, J.E., Grabowski, J.H., Thayer, G.W. and Colby, D.R. (2001) Cascading of habitat degradation: oyster reefs invaded by refuge fishes escaping stress. *Ecol. Appl.*, **11**: 764-782.
- Levinton, J., Doall, M., Ralston, D., Starke, A. and Allam, B. (2011) Climate change, precipitation and impacts on an estuarine refuge from disease. *PLoS One.*, **6**(4): e18849.
- Maoxiao, P., Xiaojun, L., Donghong, N., Bo, Y., Tianyi, L., Zhiguo, D. and Jiale, L. (2019) Survival, growth and physiology of marine bivalve (*Sinonovacula constricta*) in long-term low-salt culture. *Sci. Rep.*, **9**: 2819.
- Newell, R.I.E. and Jordan, S.J. (1983) Preferential ingestion of organic material by the American oyster *Crassostrea virginica*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **13**: 47-53.
- Pollack, J.B., Kim, H.-C., Morgan, E.K. and Montagna, P.A. (2011) Role of flood disturbance in natural oyster (*Crassostrea virginica*) population maintenance in an estuary in South Texas, USA. *Estuar. Coasts*, **34**(1): 187-197.
- Rahman, M.S. and Rahman, M.S. (2021) Effects of elevated temperature on prooxidant-antioxidant homeostasis and redox status in the American oyster: Signaling pathways of cellular apoptosis during heat stress. *Environmental Research* (in press)
- Samain, J.-F., Dégremont, L., Soletchnik, P., Haure, J., Bédier, E., Ropert, M., Moal, J., Huvet, A., Bacca, H., Van Wormhoudt, A., Delaporte, M., Costil, K., Pouvreau, S., Lambert, C., Boulo, V., Soudant, P., Nicolas, J.L., Le Roux, F., Renault, T., Gagnaire, B., Geret, F., Boutet, I., Burgeot, T. and Boudry, P. (2007) Genetically based resistance to summer mortality in the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) and its relationship with physiological, immunological characteristics and infection processes. *Aquaculture*, **268**: 227-243.
- Seo, J.Y., Kim, J.H. and Choi, J.W. (2018) A comparative study on the ecological characters of *Corbicula japonica* populations inhabiting at the subtidal estuary of the Seomjin River and the intertidal Eulsuk sand flat of the Nakdong River, Korea. *Korean J. Malacol.*, **34**(3): 135-146. (in Korean)
- Volety, A., Savarese, S., Tolley, S.G., Arnold, W.S., Sime,

- P., Goodman, P., Chamberlain, R.H. and Doering, P.H. (2009) Eastern oysters (*Crassostrea virginica*) as an indicator for restoration of Everglades ecosystems. *Ecol. Indic.*, **9**: S120-S136.
- Wang H., Yang B., Li X., Li Q. and Liu S. (2021) Screening of bacterial pathogens associated with mass summer mortality of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, in China. *Aquaculture Reports*, **20**: 100672
- Wetz, M.S. and Yoskowitz, D.W. (2013) An 'extreme' future for estuaries? Effects of extreme climatic events on estuarine water quality and ecology. *Mar. Pollut. Bull.*, **69**: 7-18.
- 기상자료개방포털 <http://data.kma.go.kr>
- 충청남도, 2018. 2017년 서해안 연안환경측정망 모니터링 연구 용역.
- 충청남도, 2019. 천수만 하구환경 종합관리기본계획 수립 연구 용역.