

## 중금속(As, Cr, Pb)이 해산 규조류(*Skeletonema costatum*)의 개체군 성장률에 미치는 영향

이주욱<sup>1</sup> · 류향미<sup>2</sup> · 허승<sup>1</sup> · 장수정<sup>1</sup> · 이기원<sup>3</sup> · 황운기<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>국립수산과학원 서해수산연구소 자원환경과 해양생태위해평가센터

<sup>2</sup>태안군 수산업기술센터

<sup>3</sup>한화 해양생물연구센터

## Effect of Heavy Metals (As, Cr, Pb) on the Population Growth Rates of Marine Diatom, *Skeletonema costatum*

Ju-Wook Lee<sup>1</sup>, Hyang-Mi Ryu<sup>2</sup>, Seung Heo<sup>1</sup>, Soo-Jung Jang<sup>1</sup>, Ki-won Lee<sup>3</sup>, Un-Ki Hwang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>National Fisheries Research & Development Institute, West Sea Fisheries Research Institute, Marine Ecological Risk Assessment Center, Incheon 22383, Korea

<sup>2</sup>Taeon the marine products industry center, Taeon-gun 32144, Korea

<sup>3</sup>Hanwha Marine biology Research Center, Seoul 07345, Korea

### Corresponding Author

Un-Ki Hwang

National Fisheries Research &

Development Institute, West Sea

Fisheries Research Institute, Marine

Ecological Risk Assessment Center,

Incheon 22383, Korea

E-mail : vngi1@korea.kr

Received : April 03, 2017

Revised : April 06, 2017

Accepted : April 26, 2017

본 연구에서는 해산 규조류(*Skeletonema costatum*)의 개체군성장률( $r$ )을 사용하여 중금속 3종(As, Cr, Pb)의 독성영향 평가를 실시하였다. *S. costatum*을 As (0, 0.32, 0.63, 1.25, 2.50 및 5.00 mg L<sup>-1</sup>), Cr (0, 0.16, 0.32, 0.63, 1.25 및 2.50 mg L<sup>-1</sup>) 및 Pb (0, 1.25, 2.50, 5.00, 10.00 및 20.00 mg L<sup>-1</sup>)에 96시간 노출한 이후에  $r$  값을 측정하였다. 대조구에서  $r$ 은 0.04보다 높았으며 As 농도 0.63, Cr 농도 0.63 및 Pb 농도 10.00 mg L<sup>-1</sup> 이상에서  $r$ 이 대조구 대비 유의하게 감소하였고 중금속 농도가 증가할수록 농도 의존적으로 감소되는 경향을 나타냈다. EC<sub>50</sub>(반수영향농도)을 이용한 중금속의 독성세기는 Cr>As>Pb 순서를 나타냈으며, EC<sub>50</sub> 각각 0.80, 2.57 및 13.88 mg L<sup>-1</sup>으로 나타났으며, 최소영향농도(LOEC)는 각각 0.63, 0.63 및 10.00 mg L<sup>-1</sup>으로 나타났다. LOEC를 기준으로 해양환경에서 Cr, As, Pb 농도가 0.63, 0.63 및 10.00 mg L<sup>-1</sup> 이상이 되었을 때, *S. costatum*에게 독성 영향이 나타날 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구를 통해 *S. costatum*의  $r$ 은 해양생태계 내에서 생산자 역할을 하는 생물에 대한 중금속의 독성평가를 위하여 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

In this study, we evaluated the toxic effects of heavy metals (As, Cr and Pb) on the population growth rate ( $r$ ) of the marine diatom, *Skeletonema costatum*. The  $r$  of the species was determined after 96 h (4 days) exposure to As (0, 0.31, 0.63, 1.25, 2.50 and 5.00 mg L<sup>-1</sup>), Cr (0, 0.16, 0.31, 0.63, 1.25 and 2.50 mg L<sup>-1</sup>) and Pb (0, 1.25, 2.50, 5.00, 10.00 and 20.00 mg L<sup>-1</sup>). It was observed that  $r$  in the control (absence of As, Cr and Pb) were greater than 0.04, however suddenly decreased with increased heavy metal concentrations. As, Cr and Pb reduced  $r$  in a dose-dependent manner and a significant reduction were occurred at concentration of greater than 0.31, 0.31 and 5.00 mg L<sup>-1</sup>, respectively. Based on the toxicity, the heavy metal were ranked as Cr>As>Pb, with EC<sub>50</sub> (50% effective concentration) values of 0.80, 2.57 and 13.88 mg L<sup>-1</sup>, respectively. The lowest-observed-effective-concentration (LOEC) of  $r$  in exposed to As, Cr and Pb were 0.63, 0.63 and 10.00 mg L<sup>-1</sup>, respectively. Precisely, a concentration of greater than 0.63 mg L<sup>-1</sup> of As, 0.63 mg L<sup>-1</sup> of Cr and 10.00 mg L<sup>-1</sup> of Pb in marine ecosystems induced toxic effect on the  $r$  of *S. costatum*. Based on our results, we suggested that the  $r$  of *S. costatum* might be a useful bio-indicator for the toxicity assessment of heavy metals on the producer in marine ecosystems.

**Keywords:** *Skeletonema costatum*(해산규조류), Heavy metal(중금속), Population growth rate(개체군성장률), Toxicity(독성)

## 서론

해양오염의 대부분은 육상 기인으로 조사되고 있으며, 우리나라의 경우도 해양오염원이 대부분이 육지에서 발생되고 있다(Cho, 2002). 이러한 오염물질 중에서 중금속은 산업 및 도시화로 사용량이 나날이 증가하고 있으며, 생물의 신경생리 및 생화학적 행동에 걸쳐 다양한 변화를 야기시켜서 수서 생물들에게 심각한 위험을 초래한다(Scott and Sloman, 2004). 수서 생물은 중금속을 흡수하고 체내에 축적하게 되지만, 중금속은 쉽게 분해되거나 배출되지 않기 때문에 환경과 생물체 내에 계속적으로 축적되어 상위 영양 단계에 있는 생물에게까지 영향을 미친다(Eimers et al., 2001).

중금속 중에서 비소(Arsenic; As)는 지표면에서 흔히 발견되는 원소로서 자연 상태에서 바람이나 화산 활동 등에 의해 노출될 수 있지만 광업, 제련, 화력발전, 농약 등 인간의 산업 활동으로 인해 다량의 비소가 환경으로 유입되고 있다(Irving et al., 2008). 대부분 식수를 통하여 인간이 섭취함으로써 비소 독성이 나타나는 것으로 알려져 있으며(Petrusevski et al., 2007), 아시아(Bhattacharyya et al., 2003; Xia and Liu 2004) 및 유럽 일부 지역(Lewis et al., 1999; Caceres et al., 2005)에서 검출되었다. 크롬(Chromium; Cr)은 용접, 도금, 소각장, 사업장 폐수, 식품에 의한 섭취 등에 의해 노출되며, 구토, 복통, 고사, 호흡곤란, 피부염 등을 유발하며 가장 문제되는 것은 발암성이다(Yoo, 2008). 크롬에 의한 암세포 분화(Liu et al., 2001), 뇌세포의 노화 촉진(Marina et al., 2000), 임신 전 크롬에 폭로된 rat의 교배 및 수정지수 감소와 배아의 성장 및 골격 이상이 보고되었다(Kanojia et al., 1996, 1998). 납(lead; Pb)은 우리 주위에서 흔히 발견되고 사용되는 산업 활동에 필수적인 금속이다. 납은 취급하는 사업장 근로자들에게 중독을 유발하였을 뿐만 아니라, 납이 함유된 연료의 사용 및 산업공해로부터 대기 중으로 유출된 납으로 인해 일반인들의 납 노출 증가를 초래하여 사회적 문제를 일으켰다(ASTDR, 2007). 납은 축전지 제조업, 도금업, 플라스틱 제품, 페인트, 용접, 납 땀 등에 사용되며, 신경계통 질환, 생식기 질환, 혈액 질환 등 다양한 직업병을 유발하고 있어 산업안전보건분야에서도 건강관리 지침을 마련하여 건강장해를 예방 및 관리하고 있다(Kim, 2004). 납에 의한 혈중 콜레스테롤 농도 증가(Kojima et al., 2002), 기억력 감퇴 및 인지능력 손상(Lyn, 2006), 빈혈을 유발(Basha et al., 2012)하며, 정자 수의 감소로 남성의 생식 기능 저하(Landrigan et al., 2000) 등 납 독성 연구가 보고되었다.

이러한 중금속의 위해성을 평가하기 위해서는 실내 실험을 통해 해양생태계를 고려한 단일 중금속의 안전농도와 더불어 오염물질의 혼합독성에 대한 생태독성 자료가 충분히 제시되어야 한다. 최근, 우리나라도 이화학적 분석방법의 단점을 보완하고자 중금속 등과 같은 오염물질에 대한 생물반응을 조사하여 해양생태계에 서식하는 다양한 생물에게 미치는 영향을 판단하고 있다(Han, 2008; Hwang, 2012a, 2012b, 2014, 2016). 인류가 바다로부터

섭취하는 수산생물의 대부분은 해양생태계 내에서 소비자 역할을 담당하고 있지만, 이들 소비자의 먹이원으로 이용되는 식물플랑크톤과 같은 생물의 중금속 영향을 평가하는 것은 인류의 보건과도 깊은 관계가 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 해양생태계의 생산자를 대표하며, 국제표준화기구(ISO, 1995)에서 시험생물 중으로 인정하는 *Skeletonema costatum*의 개체군 성장률( $\mu$ )을 이용하여 단일 중금속(As, Cr, Pb)의 독성 영향과 더불어 무영양농도(No Observed Effective Concentration, NOEC), 최소영양농도(Lowest Observed Effective Concentration, LOEC) 및 반수영양농도(50% Effective Concentration)를 제시하고자 하였다. 이들 결과는 향후에 중금속 혼합독성 영향평가를 위한 기초자료 및 *S. costatum*와 같이 해양생태계 내에서 생산자 역할을 담당하는 식물플랑크톤에 대한 중금속의 위해성 평가에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

## 재료 및 방법

### 1. 시험생물

실험에 이용된 식물플랑크톤은 해산규조류인 *Skeletonema costatum*이며, 한국해양미세조류은행(Korean Marine Microalgae Culture Center, KMMCC)에서 분양받아 항온실에서 6개월 이상 계대 배양하였다. 배양온도는  $20.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 를 유지하였으며, 조도는 형광등을 이용하여 3,000~4,000 Lux, 광주기 10 Light:14 Dark를 유지하였고, f/2 배지를 이용하였다.

### 2. 중금속 농도조성

실험에 사용한 중금속 표준용액은 As (Arsenic standard solution 1,000 mg L<sup>-1</sup>, JUNSEI), Cr (Chromium standard solution 1,000 mg L<sup>-1</sup>, JUNSEI) 및 Pb (Lead standard solution 1,000 mg L<sup>-1</sup>, JUNSEI)를 이용하였다. *S. costatum*의 개체군 성장률에 미치는 중금속의 영향을 살펴보기 위하여, 중금속 표준용액을 여과된 자연해수로 희석하여 사용하였다. 중금속 실험농도는 예비 실험을 통하여 As는 0, 0.31, 0.63, 1.25, 2.50 및 5.00 mg L<sup>-1</sup>, Cr은 0, 0.16, 0.31, 0.63, 1.25 및 2.50 mg L<sup>-1</sup>, Pb은 0, 1.25, 2.50, 5.00, 10.00 및 20.00 mg L<sup>-1</sup>로 설정하였다.

### 3. 배양조건

50 ml 시험관에 시험용액을 각 농도별로 30 ml씩 분주하였다. 시험농도는 대조구를 포함하여 6구간이며, 각 시험구별 3반복을 실시하였다. 식물플랑크톤의 정량 분석을 위해서 SR chamber를 이용하여 Inverted microscope (Olympus IX70)으로 계수하였으며, 시험용액에 초기 세포농도가 약 150,000 cell ml<sup>-1</sup>이 되도록 접종 후 f/2 배지를 넣었다. 조도는 3,000~4,000 Lux, 배양온도는 20.0

**Table 1.** Experimental culture condition of *S. costatum*

Test parameter	Condition
Culture type	Static non-renewal 96 h toxicity test
Photoperiod	Ambient light condition and 10L:14D period
Light intensity	3000~4000 Lux
Temperature	20.0±1.0°C
Salinity	30.0±1.0
pH	8.0±0.2
Chamber volume	50 ml test tube
Solution	Filter (0.45 µm) and sterilized seawater
Solution change	None
Test solution volume	30 ml
Culture medium	f/2
Initial cell density	150,000 cells ml <sup>-1</sup>
Experiment period	96 h
Acceptability criterion	>0.04 population growth rate by the hour

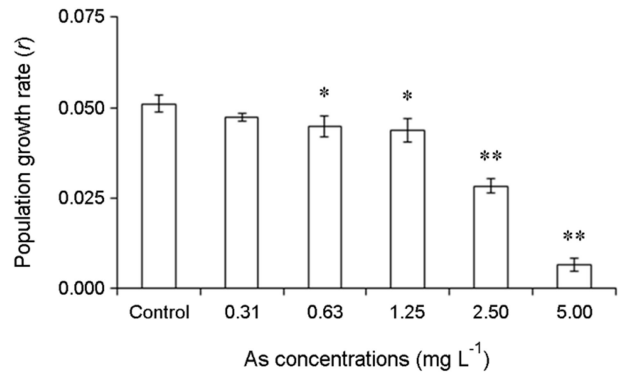
±1.0°C를 유지하였고, 그 이외의 실험조건은 Table 1에 나타내었다. 24시간 간격으로 각 시험관의 형광량을 측정하였고, 실험시작 96시간 후 실험을 종료하고 최종 형광량을 측정하였다.

#### 4. 개체군 성장률 측정

*S. costatum*의  $r$ 을 측정하기 위해 Fluorometer (Turner Designs Model 10-AU, USA)를 이용하여 형광량을 측정하였다. 식물플랑크톤의 개체군 성장률(specific population growth rate)은 형광량을 이용한 클로로필 농도를 회귀방정식(형광량=세포밀도)을 이용하여 세포밀도로 환산한 후  $r=(\ln N_t - \ln N_0)/t$  ( $r$ =개체군 성장률,  $N_t$ =실험종료 후의 세포밀도,  $N_0$ =초기세포밀도,  $t$ =배양시간)의 식으로 개체군 성장률을 계산하였다. 또한, 염록소 농도와 세포밀도간의 회귀방정식을 구하기 위하여(단순선적회귀-simple linear regression) 세포밀도는  $\log_{10}$ 으로, 형광량에 의한 염록소 농도는 double square root 변형으로 자료를 정규 분포화 하였다.

#### 5. 통계학적 분석

대조구와 실험구의 유의성 검정은 Student's  $t$ -test로 비교하였으



**Fig. 1.** Change of population growth rates in the *S. costatum* exposed to As. Vertical bars represent the means ± SD for three times. \* $p < 0.05$  and \*\* $p < 0.01$  for control.

며  $p$ 가 0.05 이하인 것을 유의한 것으로 판단하였다. 중금속 독성 실험에 대한 end-points는 대조구의 개체군 성장률 대비 50% 감소하는 농도인 EC<sub>50</sub>과 95% 신뢰구간(95% Confidence Limit, 95% CI)을 probit 통계법을 이용하여 분석하였다. 또한, 반수영향농도(NOEC)와 최소영향농도(LOEC)는 Dunnett's test를 사용하여 분석하였다.

## 결 과

### 1. 중금속이 *S. costatum* 개체군 성장률에 미치는 영향

중금속 3종(As, Cr, Pb)이 *S. costatum*의 개체군 성장률( $r$ )에 미치는 영향은 Fig. 1~3에 나타냈으며, 대조구의  $r$ 은 시험생물의 건강 및 성장 상태를 확인하기 위하여 국제표준화 기구(ISO)에 인정하는 0.04 이상으로 시험에 적합하였다.

As 농도가 증가할수록 *S. costatum*의  $r$ 은 농도 의존적으로 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 1). 최소농도인 0.31 mg L<sup>-1</sup>에서 0.047±0.001로 대조구와 비교하여 유의적인 차이는 나타나지 않았으나, 0.63 mg L<sup>-1</sup>에서 0.045±0.003으로 유의적( $p < 0.05$ )으로 감소하여 최고 농도인 5.00 mg L<sup>-1</sup>에서 0.007±0.002로 개체군 성장률이 급격히 감소하였다(Fig. 1). Cr의 경우도 0.63 mg L<sup>-1</sup>에서는 0.042±0.001로 대조구와 유의적( $p < 0.01$ )인 감소를 나타냈으며, 1.25 mg L<sup>-1</sup>에서는 0.008±0.002로, 2.50 mg L<sup>-1</sup>에서는  $r$ 을 확인할 수 없었다(Fig. 2). Pb의 경우는  $r$ 이 시험농도 1.25, 2.50 및 5.00 mg L<sup>-1</sup>까지는 영향이 없는 것으로 나타났으나, 10.00 mg L<sup>-1</sup>에서 0.050±0.002로 유의적( $p < 0.05$ )으로 감소하였고 20.00 mg L<sup>-1</sup>에서는 0.009±0.003으로 급격히 감소하였다( $p < 0.01$ ) (Fig. 3).

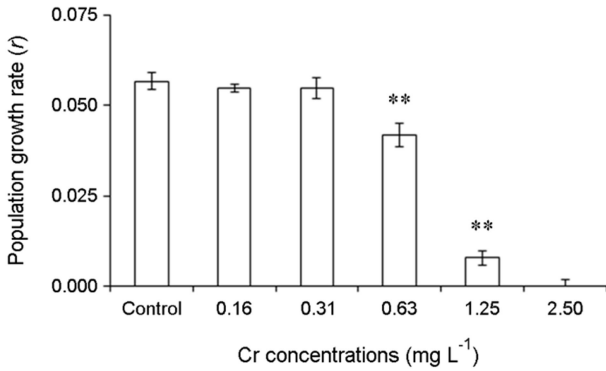


Fig. 2. Change of population growth rates in the *S. costatum* exposed to Cr. Vertical bars represent the means ± SD for three times. \*\**p*<0.01 for control.

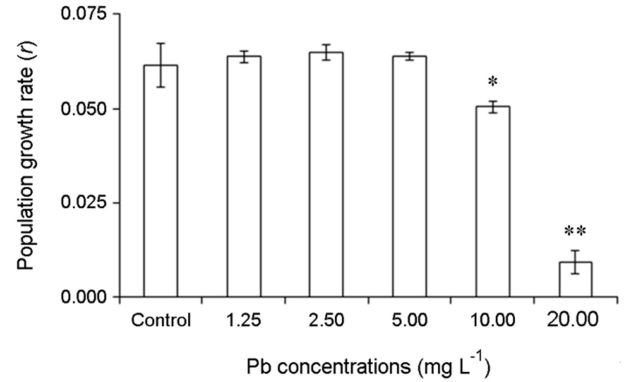


Fig. 3. Change of population growth rates in the *S. costatum* exposed to Pb. Vertical bars represent the means ± SD for three times. \**p*<0.05 and \*\**p*<0.01 for control.

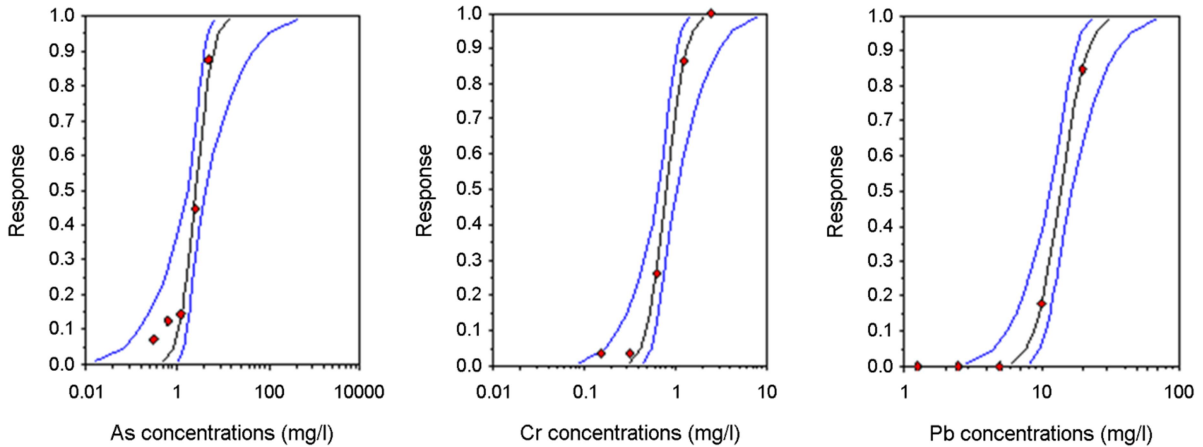


Fig. 4. Concentration-response by As, Cr, Pb treatment using the population growth rate of marine diatom, *S. costatum*.

## 2. *S. costatum* 개체군 성장률을 이용한 중금속 독성평가

*S. costatum*의 개체군 성장률(*r*)은 중금속(As, Cr, Pb) 농도가 증가할수록 반응이 급격히 증가하는 농도 의존적인 양상을 나타냈고 농도반응 관계식은 표준 독성반응으로 잘 알려진 Sigmoid 형태를 나타내었다(Fig. 4).

중금속이 *S. costatum*의 *r*에 미치는 결과를 바탕으로, 독성값을 제시하였다(Table 2). As에 대한 *S. costatum*의 반수영향농도(NOEC)와 최소영향농도(LOEC)는 각각 0.31, 0.63 mg L<sup>-1</sup>, 반수영향농도(EC<sub>50</sub>)는 2.57 mg L<sup>-1</sup>를 나타냈고, EC<sub>50</sub>에 대한 95% 신뢰범위(CI)는 1.69~4.05 mg L<sup>-1</sup>를 나타냈다. Cr에 대한 NOEC와 LOEC는 각각 0.31, 0.63 mg L<sup>-1</sup>, EC<sub>50</sub>은 0.80 mg L<sup>-1</sup>를 나타냈으며 95% CI는

0.65~1.03 mg L<sup>-1</sup>를 나타냈다. Pb에 대한 NOEC와 LOEC는 각각 5.00, 10.00 mg L<sup>-1</sup>, EC<sub>50</sub>은 13.88 mg L<sup>-1</sup>를 나타냈으며 95% CI는 11.58~16.81 mg L<sup>-1</sup>를 나타냈다. EC<sub>50</sub>으로 중금속의 독성 영향 정도를 나타내면 Cr>As>Pb 순으로 독성이 강한 것으로 나타났다.

## 고찰

해양환경을 평가하기 위하여 연안역에서 가장 많이 이용되는 조사방법인 화학적 분석은 특정 오염물질을 정량할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 기준치와의 비교를 통해서 오염 정도를 평가한다(Bidwell et al., 1998). 하지만, 육상에서 사용되는 물질이 2만 여종이며, 매년 새롭게 개발되는 물질만도 4천 여종에 이르는 것으로 알려지고 있어(Hwang, 2014, 2016; Lee, 2016), 연안역으로 유

**Table 2.** Toxicity evaluation using population growth rate in the *S. costatum* exposed to 3 heavy metals (As, Cr and Pb)

Items	As (mg L <sup>-1</sup> )	Cr (mg L <sup>-1</sup> )	Pb (mg L <sup>-1</sup> )
NOEC	0.31	0.31	5.00
LOEC	0.63	0.63	10.00
EC <sub>50</sub>	2.57	0.80	13.88
95% CI	1.69~4.05	0.65~1.03	11.58~16.81

NOEC: No observed effective concentration, LOEC: Lowest observed effective concentration, EC<sub>50</sub>: 50% Effective concentration, 95% CI: 95% Confidence limit

입되는 오염물질을 분석하여 정량화 한다는 것은 현실적으로 어려울 뿐만 아니라 새롭게 개발되는 물질에 대한 기준치를 결정하는 것도 대단히 어려운 일이다. 또한, 단일 오염물질이 생물에게 미치는 직접적인 영향과 더불어 연안역에서 상존하는 수 많은 오염물질의 상호작용에 의해 나타나는 독성의 상승(synergism), 부가(addition) 및 길항(antagonism) 작용을 판단할 수 없다는 한계가 있다(Ahlf et al., 2002; Chu and Chow, 2002). 이러한 화학적 분석방법의 단점을 보완하기 위해서는 생물 영향을 파악하여 오염 정도를 판단할 수 있는 생태독성 시험방법을 활용하는 것이 대단히 중요한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 나타낸 중금속 3종에 대한 단일오염물질의 영향 정도는, 중금속 혼합독성 평가를 위한 기초자료로 활용될 것이고, *S. costatum*의 개체군 성장률( $r$ )은 오염물질에 대한 영향평가와 더불어 연안역의 해수 및 퇴적물 오염 정도를 평가하는 시험방법으로 활용하고자 한다. 현재 미국 환경보호청(USEPA) 등에서 연안으로 유입되는 산업폐수와 도시하수에 대한 WET (Whole effluent toxicity) Test를 적용하기 위해 생태독성 시험법이 활발하게 이용되고 있고 우리나라 또한 담수생태계 내 산업폐수의 위해성을 평가하기 위해 담수산 물벼룩(*Daphnia magna*)을 이용한 생태독성 시험법이 제도적으로 활용되고 있지만, 생태독성을 이용한 해양환경 평가는 제도적으로 마련되어 있지 않다. 따라서 이·화학적 분석방법과 더불어 생태독성을 이용한 WET Test가 제도화되어 함께 수행되어야 할 것으로 판단된다(Hwang et al., 2012a, 2014). 시험생물인 *S. costatum*는 우리나라 전 연안역에 분포하는 종으로써 해양생태계 내에서 기초생산자를 대표하며(Rand and Petrocelli, 1985; Burton, 1992) 상시 배양시스템을 통해 연중 시험생물을 상시 공급할 수 있고 세대교번이 빠르게 일어나 급성 및 만성독성 모두 시험이 가능하다(Rao and Mohanchand, 1990; ISO, 1995; Weideborg et al., 1997)는 장점을 지니고 있다.

본 연구결과 *S. costatum*의  $r$ 은 As와 Cr의 경우 0.63 mg L<sup>-1</sup>, Pb는 10.00 mg L<sup>-1</sup>부터 유의적으로 감소하기 시작하여 농도가 증가할수록 감소하는 농도 의존성이 강하게 나타났으며, 중금속 3종

의 EC<sub>50</sub>을 이용하여 *S. costatum*의  $r$  미치는 독성세기는 Cr>As>Pb의 순서였다. 동물플랑크톤의 윤충류 종류의 *Philodina roseola* (Shafer and Pipes, 1973), *Brachionus plicatilis* (Snell et al., 1991; Lee et al., 2016), *Brachionus calyciflorus* (Snell and Persoone, 1989; Snell et al., 1991)와 넙치 *Paralichthys olivaceus* (Hwang et al., 2012b)에서도 As와 Cr가 Pb 보다 독성이 큰 것으로 *S. costatum*의 결과와 유사하게 나타났다. 하지만, 말뚝성게(*Hemientrotus pulcherrimus*)는 동성의 세기가 Cu>As>Zn>Pb>Cr>Co>Cd 순으로써 Pb가 Cr 보다 독성이 민감한 것으로 나타나(Hwang et al., 2013), 생물 종에 따라 중금속 독성의 민감도는 차이가 있는 것으로 판단된다.

As와 Cr이 *S. costatum*에서 Pb에 비해 독성이 영향이 크게 나타나며 LOEC의 0.63 mg L<sup>-1</sup>의 농도로 Pb (10.00 mg L<sup>-1</sup>)에 비해 매우 낮은 것으로 나타났다. As는 제초제나 살충제를 구성하는 주요 성분으로써(Irving et al., 2008) *S. costatum*을 포함한 대부분의 생물에서 독성이 높게 나타나며 특히 *S. costatum*과 같은 광합성을 하는 생물이 As에 노출되었을 경우 단기간에 <sup>14</sup>C의 uptake를 방해하여 C의 흡수와 광합성 능력을 억제시키고 개체군 성장률을 감소시키는 것으로 보고되었다(Sanders, 1979). Cr은 2가, 3가, 6가의 화합물이 가장 보편적으로 알려져 있고 그 중 6가 Cr의 경우 그 자체로 높은 독성을 가지고 있다. *S. costatum*과 같은 부등편모조류(heterokot)에 속하는 규조류인 *Thalassiosira pseudonana*에 대한 연구에 따르면, 6가 Cr이 산화되어 생성된 chromate는 세포 내 필수 분자를 파괴함으로써 독성을 나타내고 3가 Cr은 세포 내 필수 효소와 결합하여 효소의 기능을 억제시켜 성장을 저해할 수 있다고 보고되었다(Riedel, 1985).

최근 우리나라 남, 서해 12지역(인천, 평택, 목포, 해창만, 광양, 통영, 행암만, 감만, 부산남항, 부산북항, 온산 및 장생포)항구의 표면 퇴적물에서 중금속 오염 정도를 조사한 결과 As와 Pb는 각각 3.9~60.1 mg L<sup>-1</sup>와 20.2~386 mg L<sup>-1</sup>의 농도로 장생포가 가장 높았고(Choi et al., 2012), Cr의 경우는 11~401 mg L<sup>-1</sup>로 부산 남항이 가장 높은 것으로 나타났다. 연구결과 *S. costatum*의  $r$ 이 영향을 받기 시작하는 LOEC는 As와 Cr은 0.63 mg L<sup>-1</sup> 및 Pb는 10.00 mg L<sup>-1</sup>로써 As와 Cr은 항구의 표층 퇴적물의 평균 농도보다 매우 낮은 농도이기 때문에 항구 및 오염지역의 퇴적물 속에 존재하는 다양한 오염물질의 상호작용을 평가하기 위한 생물로서 *S. costatum*은 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

본 연구는 사전 예비 실험을 통하여 농도구간을 설정하였으나, As과 Cr의 NOEC와 LOEC가 각각 0.31 mg L<sup>-1</sup>와 0.63 mg L<sup>-1</sup>로 동일 값을 나타내 좀 더 다양한 농도구간 설정에 따라 이들 값을 비교할 필요가 있을 것으로 판단되나, 본 연구결과에서 나타낸 NOEC와 LOEC는 향후에 WET test를 위한 기초자료로, EC<sub>50</sub>은 각각의 오염물질에 대한 독성 민감도 비교에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 2016년도 국립수산과학원 경상과제(R2017031) 연구비 지원으로 국립수산과학원 서해수산연구소 해양생태위해평가센터에서 수행하였다.

## 참고문헌

- Ahlf W, Holler H, Neumann-Hense H, Ricking M. 2002. A guidance for the assessment and evaluation of sediment quality: A german approach based on ecotoxicological and chemical measurements. *J Soils Sediment* 2: 37-42.
- ASTDR. 2007. Toxicological profile for lead. U.S. Department of Health & Human Services Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
- Basha DC, Basha SS, Reddy GR. 2012. Lead-induced cardiac and hematological alterations in aging Wistar male rats: alleviating effects of nutrient metal mixture. *Biogerontology* 13: 359-368.
- Bhattacharyya R, Chatterjee D, Nath B, Jana J, Jacks G, Vahter M. 2003. High arsenic groundwater: Mobilization, metabolism and mitigation-an overview in the Bengal Delta Plain. *Mol Cell Biochem* 253: 347-355.
- Bidwell JR, Wheeler KW, Burrige TR. 1998. Toxicant effects on the zoospore stage of the marine macroalga *cklonia radiata*. *Mar Ecol Prog Ser* 163: 259-265.
- Burton GA. 1992. Sediment Toxicity Assessment. Lewis Publishers Inc. Chelsea., 457pp.
- Caceres DD, Pino P, Montesinos N, Atalah E, Amigo H, Loomis D. 2005. Exposure to inorganic arsenic in drinking water and total urinary arsenic concentration in a Chilean population. *Environ Res* 98: 151-159.
- Cho DO. 2002. Marine fishery. Korea Marine Institute. 6: 6-13.
- Choi KY, Kim SH, Hong GH, Chon HT. 2012. Distributions of heavy metals in the sediments of South Korean harbors. *Environ Geochem Health* 34: 71-82.
- Chu KW, Chow KL. 2002. Synergistic toxicity of multiple heavy metal is revealed by a biological assay using a nematode and its transgenic derivative. *Aquat Toxicol* 61: 53-64.
- Eimers MC, Evans RD, Welbourn PM. 2001. Cadmium accumulation in the freshwater isopod *Asellus racovitzai*: the relative importance of solute and particulate sources at trace concentrations. *Environmental Pollution* 111: 247-253.
- Feldman KL, Armstrong DA, Dumbauld BR, Dewitt TH, Doty DC. 2000. Oysters, crabs, and burrowing shrimp: review of an environmental conflict over aquatic resources and pesticide use in Washington State's (USA) coastal estuaries. *Estuaries* 23: 141-176.
- Fleeger JW, Carman KR, Nisbet RM. 2003. Indirect effects of contaminants in aquatic ecosystems. *The Science of the Total Environment* 317: 207-233.
- Fulladosa E, Murat JC, Martinez M, Villaescusa I. 2005. Patterns of metals and arsenic poisoning in *Vibrio fischeri* bacteria. *Chemosphere* 60: 43-48.
- Han TJ, Han YS, Park GS, Lee SM. 2008. Development marine ecotoxicological standard methods for *Ulva* sporulation test. *Kor J Soc Ocean* 13: 121-128.
- Hwang UK, Seung H, Park JS, Kang HS. 2012a. Effects of lead and zinc on the fertilization and embryo development of the sea urchin (*Hemicentrotus pulcherrimus*). *Korean J Environ Biol* 30: 128-135.
- Hwang UK, Ryu HM, Kim SG, Park SY, Kang HS. 2012b. Acute Toxicity of Heavy Metal (Cd, Cu, Zn) on the Hatching Rates of Fertilized Eggs in the Olive Flounder (*Paralichthys olivaceus*). *Korean J Environ Biol* 30: 136-142.
- Hwang UK, Ryu HM, Yu J, Kang HS. 2013. Toxic effects of arsenic and chromium on the fertilization and embryo development rates in the sea urchin (*Hemicentrotus pulcherrimus*). *Korea J Environ Biol* 31: 69-77.
- Hwang UK, Ryu HM, Lee JW, Lee SM, Kang HS. 2014. Toxic Effects of Heavy Metal (Cd, Cu, Zn) on Population Growth Rate of the Marine Diatom (*Skeletonema costatum*). *Korea J Environ Biol* 32: 243-249.
- Hwang UK, Ryu HM, Heo S, Chang SJ, Lee KW, Lee JW. 2016. Effect of heavy metals on the survival and population growth rates of marine rotifer, *Brachionus plicatilis*. *Korea J Environ Biol* 34: 353-360.
- Kanojia RK, Junaid M, Murthy RC. 1996. Chromium induced teratogenicity in female rat. *Toxicology Letters* 89: 207-213.
- Kanojia RK, Junaid M, Murthy RC. 1998. Embryo and fetotoxicity of hexavalent chromium: a long-term study. *Toxicology Letters* 95: 165-172.
- Kim DS. 2004. Health management guidelines for lead-exposed workers. Korea Occupational Safety & Health Agency.
- Kojima M, Nemoto K, Murai U, Yoshimura N, Ayabe Y, Degawa M. 2002. Altered gene expression of hepatic lanosterol 14-demethylase (CYP51) in lead nitratetreated rats. *Arch Toxicol* 76: 398-403.
- Lee JW, Ryu HM, Heo S, Hwang UK. 2016. Toxicity assessment of heavy metals (As, Cr and Pb) using the rates of survival and population growth in marine rotifer, *Brachionus plicatilis*.

- Korea J Environ Biol 34: 193-200.
- Marina T, Polo JM, Llesuy S. 2000. Chromium (VI) induces oxidative stress in the mouse brain. *Toxicology* 150: 137-146.
- Irving EC, Lowell RB, Culp JM, Liber K, Xie Q, Kerrich R. 2008. Effects of arsenic speciation and low dissolved oxygen condition on the toxicity of arsenic to a lotic mayfly. *Environ Toxicol Chem* 27: 583-590.
- ISO. 1995. Water quality-marine algal growth inhibition test with *Skeletonema costatum* and *Phaeodactylum tricornutum*. The International Organization for Standardization. ISO 10253., 7pp.
- Landrigan PJ, Boffetta P, Apostoli P. 2000. The reproductive toxicity and carcinogenicity of lead: a critical review. *Am J Ind Med* 38: 231-243.
- Lewis DR, Southwick JW, Ouellet-Hellstrom R, Rench J, Calderon RL. 1999. Drinking water arsenic in Utah: A Cohort Mortality Study. *Environ Health Perspect* 107: 359-365.
- Liu K, Husler J, Ye J, Leonard SS, Cutler D, Chen F, Wang S, Ziang Z, Ding M, Wang L, Shi X. 2001. On the mechanism of Cr (VI)-induced carcinogenesis: dose dependence of uptake and cellular responses. *Mol Cell Biochem* 222: 221-229.
- Lyn P. 2006. Lead Toxicity, A Review of the Literature. Part I: Exposure, Evaluation, and Treatment. *Alternative Medicine Review* 11: 2-22.
- Rand GM, Petrocelli SR. 1985. *Fundamentals of Aquatic toxicology*, Gemisphere Publishing Corporation. Washington.
- Rao MU, Mohanchand V. 1990. Toxicity of zinc smelter wastes to some marine diatoms. *Indian J Mar Sci* 19: 181-186.
- Riedel GF. 1985. The Relationship between chromium (VI) uptake, sulfate uptake, and chromium (VI) toxicity in the estuarine diatom *Thalassiosira pseudonana*. *Aquatic Toxicology* 7: 191-204.
- Sanders JG. 1979. Effects of arsenic speciation and phosphate concentration on arsenic inhibition of *Skeletonema costatum* (Bacillariophyceae). *J Phycol* 15: 424-428.
- Scott GR, Sloman KA. 2004. The effects of environmental pollutants on complex fish behaviour: integrating behavioural and physiological indicators of toxicity. *Aquatic Toxicology* 68: 369-392.
- Schaefer ED, Pipes WO. 1973. Temperature and the toxicity of chromate and arsenate to the rotifer *Philodina roseola*. *War Res* 7: 1781-1790.
- Snell TW, Persoone G. 1989. Acute toxicity bioassays using rotifers. I. A test for brackish and marine environments with *Brachionus plicatilis*. *Aquat Toxicol* 14: 65-80.
- Snell TW, Moffat BD, Janssen CR, Persoone G. 1991. Acute toxicity tests using rotifers. III. Effects of temperature, strain and exposure time on the sensitivity of *Brachionus plicatilis*. *Ecotoxicol Toxicol Wat Qual* 6: 63-75.
- Petrusevski B, Sharma S, Schippers JC, Shordt K. 2007. Arsenic in drinking water. IRC International Water and Sanitation Centre.
- Weideborg M, Vik EA, Ofjord GD, Kjonno O. 1997. Comparison of three marine screening tests and four Oslo and Paris commission procedures to evaluate toxicity of offshore chemicals. *Environ Toxicol Chem* 16: 384-389.
- Weis JS, Smith G, Zhou T, Santiago-Bass C, Weis P. 2001. Effects of Contaminants on Behavior: Biochemical Mechanisms and ecological Consequences. *Bioscience* 51: 209-217.
- Xia Y, Liu J. 2004. An overview on chronic arsenism via drinking water in PR China. *Toxicology* 198: 25-29.
- Yoo DG. 2008. Chromium exposure of resident who lived nearby porcelain cement factory. Kwandong University.