

카드뮴과 아연 노출에 따른 야외종 장수갈따구(*Chironomus plumosus*)의 생태독성학적 반응

김원석¹ · 홍 철² · 박기연³ · 곽인실^{1,3,*}

¹전남대학교 해양기술학부, ²국립환경과학원, ³전남대학교 수산과학연구소

Ecotoxicological Response of Cd and Zn Exposure to a Field Dominant Species, *Chironomus plumosus*. Won-Seok Kim¹ (0000-0003-3368-3891), Cheol Hong² (0000-0002-5444-7743), Kiyun Park³ (0000-0003-2965-6970) and Inh-Sil Kwak^{1,3,*} (0000-0002-1010-3965) (¹Division of Marine Technology, Chonnam National University; ²National Institute Environmental Research, Incheon 22689, Republic of Korea; ³Fisheries Science Institute, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea)

Abstract Heavy metal contamination in freshwater ecosystem has been receiving increased worldwide attention due to their direct or indirect effect on human health and aquatic organisms. In this study, we investigated biological effects such as survival rate, growth rate, emergence rate, sex ratio and mouthpart deformity of *Chironomus plumosus*. The survival rate of *C. plumosus* decreased with the increase in heavy metal concentration as well as exposure time after cadmium (Cd) or zinc (Zn) exposure. The growth rate decreased at days 4 and 7 after Cd exposure and significantly reduced at the relatively high concentration of 50 mg L⁻¹ Cd. The emergence rate was decreased at 50 mg L⁻¹ Cd and 100 mg L⁻¹ Zn. The sex ratio showed imbalance pattern at relatively low concentrations (0.5 and 2 mg L⁻¹ Cd) with high proportion of male and relatively high concentration (100 mg L⁻¹ Zn) with high proportion of female (60%). In addition, mentum deformities were observed at high concentration of Cd and Zn. These results suggest that heavy metal exposure in aquatic ecosystem may affect biological and morphological responses, and aquatic midge *C. plumosus* is a potential indicator for assessment of environmental pollutant such as heavy metals.

Key word: *Chironomus plumosus*, heavy metal, growth, sex ratio, morphological deformity

서 론

중금속은 고도화된 도시화와 산업화로 인해 수계로 유입되는 주요 오염 물질로 수서생물의 성장, 행동, 번식과 생존에 영향을 준다(Rand *et al.*, 2003). 그 중 카드뮴(Cd)은 독성이 높은 중금속의 일종으로 전 세계적으로 널리 분포하며 생물 체내축적 시 신경계 질병과 암을 유발하

는 것으로 알려져 있다(Wasiberg *et al.*, 2003; Henson and Chedrese, 2004). 수계 중 Cd 축적은 대부분 인위적 활동에 의해 발생하며 수중보다 퇴적물에서 높은 축적을 보인다(Jung *et al.*, 2005). 아연(Zn)은 환경 내 풍부하게 존재하는 물질로 생물 체내 다양한 효소 합성 과정에 필요한 요소이다. 그러나, 생물 체내 필요 이상으로 존재하면 치명적인 독성 영향을 주게 된다(Lushchak, 2011). 환경 중 관찰되는 Cd와 Zn 농도 분포는 불가리아의 Chaya 강에서 Cd가 3.9~21 µg g⁻¹, Zn이 2.2~1,473 µg g⁻¹로 보고되었으며 이는 주변에 분포되어 있는 도심과 공장지대로부터 기

Manuscript received 22 July 2019, revised 5 September 2019, revision accepted 5 September 2019

* Corresponding author: Tel: +82-61-659-7148, Fax: +82-61-659-7149, E-mail: inkwak@hotmail.com / iskwak@chonnam.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

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, provide the original work is properly cited.

인한 것으로 보고되었다(Michailova *et al.*, 2015). 또한, 말레이시아의 Permatang Rava 강에서 Zn 농도가 38.83 mg L^{-1} 로 환경 중에서 대부분 높은 농도로 존재한다(AI-Shami *et al.*, 2011). 국내에서는 여수 연등천에서 0.2 mg kg^{-1} Cd, 114.1 mg kg^{-1} Zn, 진주 판문천에서 0.1 mg kg^{-1} Cd, 129.8 mg kg^{-1} Zn이 측정되었다(Kim *et al.*, 2015). 전라남도 목포와 여수 인근 조간대 지역에서는 Cd가 $0.09\sim 0.2 \text{ mg kg}^{-1}$, Zn이 $70.57\sim 131.23 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 높은 농도가 관찰되었다(Park *et al.*, 2019). 국내 중금속 오염평가 기준치는 Cd 0.4 mg kg^{-1} , Zn 363 mg kg^{-1} 로 제시되어져 있다(NIER, 2015).

파리목 깔따구과에 속하는 장수깔따구 (*Chironomus plumosus*)는 알, 유충, 번데기 시기를 저서에서 서식하는 생물적 특징으로 인해 하천의 건강성을 판단하는 지표생물로 이용되고 있다(Tuikka *et al.*, 2011). 최근에는 장수깔따구를 이용하여 중금속과 각종 영양염류에 따른 생물적 교란과 elemental mobilization에 대한 연구(Schaller, 2014), 과불소화합물을 이용하여 퇴적물 침전 독성 시험을 진행한 연구가 보고되었다(Xia *et al.*, 2012). 깔따구과는 중금속, 항생제뿐만 아니라 염분, 온도 등의 이화학적 스트레스 요인에 대해 민감하게 반응하기 때문에 생물 위해성 평가에 적합한 생물로 연구에 이용되고 있다(Park and Kwak, 2014; Kim *et al.*, 2017; Park and Kwak, 2018). 또한, 깔따구과 유충의 하순기절은 서식환경에서 발생하는 인위적 스트레스에 대한 영향을 판단하는 생체지표로 이용된다(Dias *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2009).

*C. riparius*와 장수깔따구를 대상으로 하천에 존재하는 다양한 중금속 노출에 따라 열충격 단백질 70 (heat shock protein 70) 발현을 비교하고 하순기절 기형을 보고하였다(Kim *et al.*, 2015). 또한, 과불소화합물질 노출을 통해 장수깔따구 무게 변화에 대한 연구가 보고되었다(Wen *et al.*, 2016). 분자적 반응으로는 Cd, Cu와 Pb를 *C. riparius*에 노출하여 세포 성장에 관여하는 ribosomal protein S3 유전자가 노출 스트레스에 따라 농도의존적인 발현에 대해 알려졌다(Park and Kwak, 2011). 최근에는 해양 환경 오염에 따른 서식 생물들의 중금속 체내 축적량과 함께 인간의 소비 활동으로 인한 유해성에 대한 연구가 보고되었다(Baki *et al.*, 2018). 그 외에도 어류, 갑각류, 식물 등을 대상으로 한 중금속 스트레스에 대한 연구가 보고 되고 있다(Naddy *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2019).

본 연구에서는 하천 퇴적물 내 높은 농도로 축적되는 Zn과 농축에 대한 생물효과가 큰 Cd의 생태독성학적 반응을 야외종인 장수깔따구를 이용하여 살펴보고자 하였다. 이를 위해 여러 노출 농도 구간에서 장수깔따구의 생존율, 우화

율, 성비와 하순기절 기형을 관찰하였다. 야외에 서식하는 우점종인 장수깔따구를 대상으로 단일 중금속 노출에 따른 생태독성학적 영향을 파악하여 지표생물의 반응을 살펴보는 것은 수환경의 중금속 오염에 대한 생태계 모니터링을 위한 기초적 자료로 활용될 수 있을 것이다.

재료 및 방법

1. 실험 생물

서울의 안양천에서 채집한 장수깔따구는 실험실로 이동 후 항온기 내에서 순치 및 실험을 진행하였다. 사육수로는 M4 배지(Elendt, 1990)를 공급하고, 환경 조성을 위해 모래($< 63 \mu\text{m}$)를 투입하였다. 항온기 내부 조건은 온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 60%, 광도 500 lx, 광주기 명암은 16:8의 조건으로 사육을 진행하고 tetramin (Tetra-Merke, Melle, Germany)을 갈아 매일 $0.5 \mu\text{g day}^{-1}$ 로 공급하였다.

2. 독성 노출 시험 및 조건

노출 물질인 Cd, Zn은 Sigma-Aldrich (St. Louis, Mo, USA)에서 구입하였으며 노출 농도는 LC50(Cd: 177.2 mg L^{-1} , Zn: not detect (NOEC: 200 mg L^{-1}))에 근거하여 Cd는 0.5, 2, 10, 50 mg L^{-1} , Zn은 20, 100, 400, 800 mg L^{-1} 로 농도 설정 후 노출 실험을 진행하였다. 노출 실험을 위해 장수깔따구 4령기 유충을 선별 후, 실험 수조인 300 mL 비커에 각 20마리씩 배치하고 5개의 반복구를 두었다. 1~3번 반복구는 생존율, 성장률, 우화율과 성비를 측정하였으며 4~5번 반복구는 독성 노출에 따른 하순기절 기형을 관찰하였다. 실험 중 개체 간 공식을 막기 위해 tetramin을 소량 공급하였다.

3. 생존율 측정

Cd와 Zn 노출에 따른 직접적인 유해성을 관찰하기 위해 장수깔따구 생존율을 측정하였다. 장수깔따구의 체색이 붉은색으로 보이지 않고 물의 자극에 대해 반응이 없는 경우 치사로 판단하였다.

4. 성장률 측정

독성 노출 기간 동안 장수깔따구의 성장률 변화를 관찰하기 위해 다음과 같은 식을 이용하여 측정하였다.

$$\text{Growth rate (\%)} = [\ln(W_t) - \ln(W_0)]/t$$

G: 상대성장률
 W₀: 시작 시점 평균 무게
 W_t: 최종 시점 평균 무게
 t: 배양기간

5. 하순기절 기형 관찰

장수깥따구의 하순기절 기형 관찰을 위해 Cd와 Zn 노출 7일부터 10일까지 각 농도별 2개체씩 샘플링하여 10% 포르말린에 보관하였다. 보관된 장수깥따구의 몸통과 머리를 분리 후, CMC-10 (Master company, Inc., Wooddale, Illinois)을 이용하여 슬라이드에 고정하였다. 고정된 슬라이드는 현미경(Olympus BX51, Japan)을 통해 관찰하였으며 Dickman *et al.* (1992) 자료를 이용하여 기형을 판단하였다.

6. 통계적 자료분석

Cd와 Zn 노출에 따른 장수깥따구의 생물반응 결과에 대해 유의적 차이를 통계적으로 비교하기 위해 SPSS 12.0KO (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 이용하여 Tukey's test와 분산 분석(ANOVA, $\alpha=0.05$)을 실시하고, 모든 데이터는 평균±분산 값으로 표시하였다.

결과 및 고찰

1. Cd와 Zn에 노출에 따른 장수깥따구 생존율

28일간 Cd와 Zn에 노출된 장수깥따구의 생존율은 전체적으로 노출시간·농도 의존적인 감소를 나타냈다(Fig. 1). 0.5 mg L⁻¹ Cd에 노출된 개체는 Day 7, 95% 생존율을 보였

으며 Day 10, 80%로 감소하였다. Cd 2 mg L⁻¹와 10 mg L⁻¹에 Day 4, 90% 생존율을 보였으나 시간이 지남에 따라 감소하여 각각 70%, 65% 생존율이 관찰되었다.

Day 4, 20과 100 mg L⁻¹ Zn에 노출된 장수깥따구는 80% 생존율을 보여 가장 낮은 생존율을 보였다. 이후, 시간이 지남에 따라 생존율이 감소하여 Day 28, 60% 생존율을 관찰하였다. Day 7, 20과 100 mg L⁻¹ Zn에 노출된 장수깥따구는 100% 생존율을 보인 후, Day 10에 각각 85%, 75%로 감소하며 시간·농도 의존적인 경향이 나타났다. Day 7, 400 mg L⁻¹ Zn은 95% 생존율을 보였으며 Day 10, 65%로 급격한 생존율 감소를 보였다. Day 4, 800 mg L⁻¹ Zn은 95% 생존율을 보였으며, 시간이 지남에 따라 생존율이 감소하여 Day 28, 50% 생존율로 다른 노출군에 비해 낮은 생존율을 나타냈다. 이와 같은 생존율 결과는 Cd와 Zn 노출이 장수깥따구에 독성학적인 영향을 주었으며 깥따구과를 대상으로한 중금속과 EDCs를 비롯한 여러 유해물질 노출 연구에서 관찰된 생존율 감소와 유사한 경향을 보였다(Park *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2017) (Table 1).

2. Cd와 Zn에 노출에 따른 장수깥따구 성장률

Cd와 Zn 노출에 따른 장수깥따구 성장률을 측정한 결과, Cd 노출, Day 4, 농도의존적으로 감소함을 관찰하였다(Fig. 2). 특히, 50 mg L⁻¹ Cd는 0.3 day⁻¹를 보이며 가장 낮은 값을 보였으며 통계적으로 유의한 감소를 보였다($P<0.05$). Day 7, 50 mg L⁻¹ Cd는 통계적으로 유의한 수준으로 낮은 성장률이 관찰되었다. 또한, Day 10, 모든 Cd 노출군이 대조군과 비슷한 성장률을 보이며 노출시간에 따라 장수깥따구 성장률이 감소함을 관찰하였다. Day 4, Zn은 노출군이 대조군에 비해 낮은 성장률을 보였으며 800 mg L⁻¹ Zn에서 0.5 day⁻¹로 노출군 중 가장 낮은 성장률을

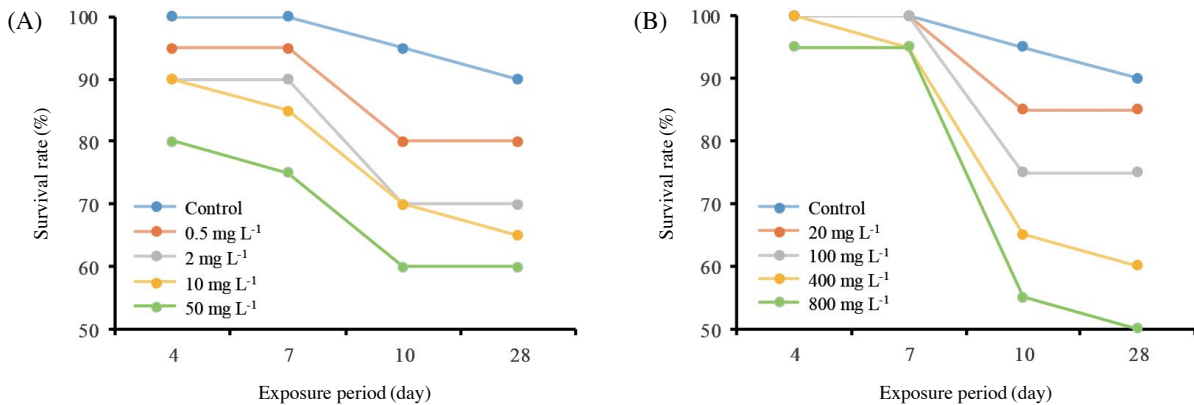
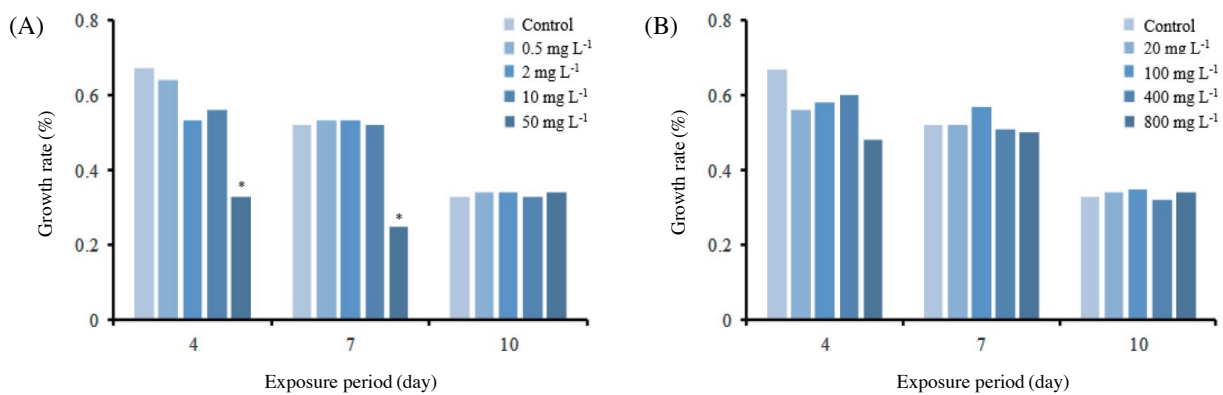
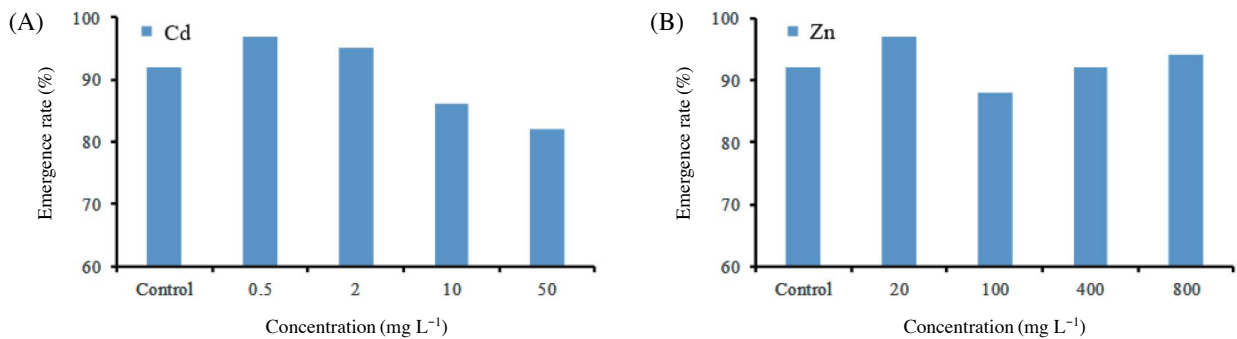


Fig. 1. Cumulative survival rate (%) of *C. plumosus* exposed to different Cd (A) and Zn (B) concentrations (Cd: control, 0.5, 2, 10 and 50 mg L⁻¹, Zn: 20, 100, 400 and 800 mg L⁻¹) for 28 days.

Table 1. Biological response of Cd and Zn exposure organisms in the previous studies.

Species	Concentrations	Exposure period	Biological responses	References	
Cd	<i>Chironomus riparius</i>	0~61 $\mu\text{g g}^{-1}$	10~50 day	Head capsule and body length decrease	Martinez <i>et al.</i> , 2003
		0~1000 $\mu\text{g kg}^{-1}$	0~10 day	Survival rate and body length decrease	Toušová <i>et al.</i> , 2016
		0~0.218 $\mu\text{mol g}^{-1}$	1~8 day	Survival rate and wet weight decrease	Gillis <i>et al.</i> , 2002
		0.1~100000 $\mu\text{g L}^{-1}$	1 day	Survival rate decrease	Bechard <i>et al.</i> , 2008
<i>Danio rerio</i>	5 mg L^{-1}	5 week	Survival rate, body length and weight decrease	Zheng <i>et al.</i> , 2016	
Zn	<i>Chironomus tentans</i>	1,723~5,252 $\mu\text{g g}^{-1}$	48 hour	Mouthpart deformity rate increase	Martinez <i>et al.</i> , 2001
		0.025 mg L^{-1}	0~20 day	Survival rate decrease and emergence time increase	Colombo <i>et al.</i> , 2014
	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	0~1919 $\mu\text{g L}^{-1}$	69 day	Survival rate, body length and weight decrease	Mebane <i>et al.</i> , 2008
	<i>Danio rerio</i>	30 mg L^{-1}	5 week	Lipid accumulation in the liver	Zheng <i>et al.</i> , 2016

**Fig. 2.** Growth rate (%) of *C. plumosus* exposed to different Cd (A) and Zn (B) concentration (Cd: control, 0.5, 2, 10 and 50 mg L^{-1} , Zn: control, 20, 100, 400 and 800 mg L^{-1}) for 4, 7 and 10 days. Significant differences are indicated with the asterisk mark at $P < 0.05$.**Fig. 3.** Emergence rate (%) of *C. plumosus* exposed to different Cd (A) and Zn (B) concentrations (Cd: control, 0.5, 2, 10 and 50 mg L^{-1} , Zn: control, 20, 100, 400 and 800 mg L^{-1}).

나타냈다. Zn Day 7과 Day 10, 전체적으로 대조군과 비슷한 성장률을 보이며 Cd 성장률 결과와 비슷한 경향을 관찰하였다.

3. Cd와 Zn에 노출에 따른 장수갈따구 우화율

Cd와 Zn에 노출된 장수갈따구의 우화율을 측정된 결과,

80% 이상의 우화율을 보였다(Fig. 3). 0.5 mg L^{-1} Cd는 우화율 97%로 대조군보다 높은 우화율을 나타냈고 노출 농도가 증가함에 따라 우화율이 감소하여 50 mg L^{-1} Cd에서 82%로 감소함을 보였다. Zn에 노출된 장수갈따구 우화율은 20 mg L^{-1} Zn에서 97%를 보였으며 100 mg L^{-1} Zn에서 88%로 감소하였다. 이후, 농도 증가에 따라 우화율도 조금 증가하여 대조군과 비슷한 우화율을 나타내었다. 중금속

노출로 인한 스트레스는 서식 생물에게 다양한 독성 영향을 주게 되는데, 이는 생물의 해독작용과 신진대사를 교란시켜 성장 과정에 유해한 영향을 줄 수 있다. 연구에 따르면 중금속 해독과 항산화 작용에 관여하는 metallothionein 유전자 발현이 1, 10 $\mu\text{g L}^{-1}$ Cu에 노출된 *C. riparius*에서 높게 나타나며 중금속 독성에 대해 민감하게 반응함을 보였다 (Park and Kwak, 2012a). 또한, *C. riparius*를 대상으로 고염분노출로 인한 삼투압 스트레스가 성장 저해를 유도함이 보고되었다 (Kim *et al.*, 2017). 24시간 동안 9, 27, 100 $\mu\text{g L}^{-1}$ Cd에 노출된 *C. riparius*에서 생물 성장에 관여하는 alcohol dehydrogenase 유전자 발현은 대조군에 비해 낮은 수준으로 감소하였다 (Park and Kwak, 2011).

4. Cd와 Zn에 노출에 따른 장수갈따구 성비

28일 동안의 Cd와 Zn에 노출실험을 통하여 유충인 장수갈따구가 성충으로 출현한 개체의 성비를 관찰하였다 (Fig. 4). 중금속에 노출되지 않은 대조군에서는 수컷과 암컷이 각각 55:45의 비율을 나타냈다. 0.5 mg L^{-1} Cd는 대조군과 같은 성비를 나타냈고 2 mg L^{-1} Cd는 수컷의 비율이 62%로 다른 노출군에 비해 성비 차이가 높게 나타났다. 10, 50 mg L^{-1} Cd에서는 수컷과 암컷의 비율이 50%로 같은 비율로 나타남을 관찰하였다. 20 mg L^{-1} Zn은 대조군의 성비와

유사한 값을 나타냈으며 100 mg L^{-1} Zn에서는 암컷이 60%로 수컷에 비해 높게 나타났다. 800 mg L^{-1} Zn에 노출된 장수갈따구는 수컷이 암컷보다 20% 높게 나타남을 관찰하였다. 관찰된 성비 불균형은 Cd와 Zn의 노출에 의한 것으로 보여지나 그 성 결정기작에 대해서는 아직 알려진 바가 없어 차후 연구가 이루어져야 할 부분이다. 외부 스트레스는 생물 체내 호르몬 시스템에 직간접적 영향을 주어 성비교란을 유도한다고 보고되어져 있다 (Baumann *et al.*, 2013). 중금속은 생물 체내 유입 후 내분비계에 작용하여 직접적으로 교란하는 대표적인 물질로 많은 연구가 보고되었다 (Rodríguez *et al.*, 2007). 생식계 시스템에 중요한 요소인 vitellogenin 유전자 발현이 0.2~20 $\mu\text{g L}^{-1}$ Cd에 노출된 *C. riparius*에서 통계적으로 유의한 수준으로 높은 발현을 보였음이 보고되었다 (Park and Kwak, 2012b). 중금속 외에도 살충제 (2,4-dichlorophenoxyacetic acid), 내분비계 교란물질 (bisphenol A, 4-nonylphenol), 온도 변화 등의 스트레스 요인들로 인해 갈따구과 생식계 교란이 알려져 있다 (Park and Kwak, 2010; Park *et al.*, 2010; Park and Kwak, 2014).

5. Cd와 Zn에 노출에 따른 장수갈따구 하순기절 기형발생

Cd와 Zn에 노출된 장수갈따구의 형태적인 하순기절 기형을 관찰하였다 (Table 2). 장수갈따구 대조군에서는 하순

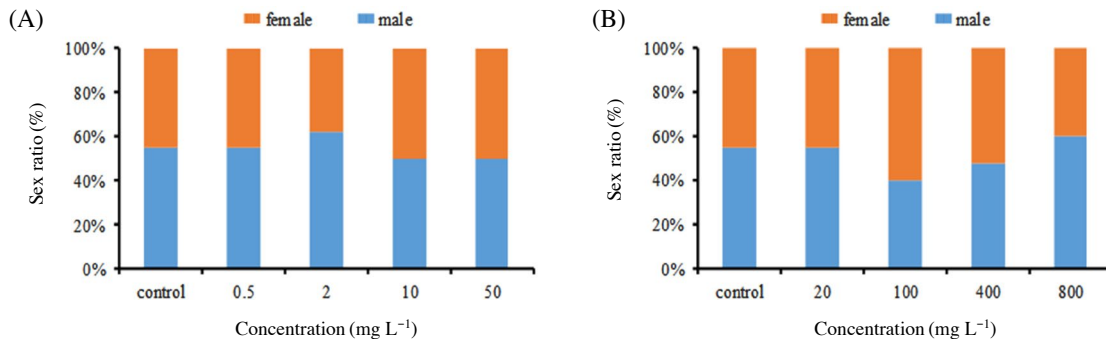


Fig. 4. The sex ratio of emerged individuals (%) of *C. plumosus* exposed to different Cd (A) and Zn (B) concentrations (Cd: control, 0.5, 2, 10 and 50 mg L^{-1} , Zn: control, 20, 100, 400 and 800 mg L^{-1}).

Table 2. The incidence rates (%) of mentum deformity types in *C. plumosus* larvae following exposure the Cd and Zn.

Concentration (mg L^{-1})	Cd		Zn		
	MLT	LT	Concentration (mg L^{-1})	MLT	LT
Control	0.0	0.0	Control	0.0	0.0
0.5	0.0	0.0	20	0.0	0.0
2	6.3	0.0	100	0.0	0.0
10	0.0	0.0	400	0.0	12.5
50	0.0	0.0	800	0.0	0.0

MLT: median lateral teeth, LT: lateral teeth

기질의 기형이 관찰되지 않았으나, Cd와 Zn에 노출된 장수갈따구에서 하순기질의 갈라짐과 유실이 관찰되었다. 갈따구과 구강 기형은 야외 스트레스에 대한 형태적 평가 지표로 이용되며, 정량적인 기형 자료를 바탕으로 빠르고 간단하게 현장에 적용할 수 있는 장점이 있다. 이에 갈따구의 형태적 기형에 대한 중금속, 내분비계 교란물질 등 다양한 스트레스 요인에 대한 연구가 보고되고 있다. 수온에 노출된 *C. columbiensis*에서 하순기절과 날개 기형을 세대별로 관찰한 연구가 보고되었다(Montaño-Campaz *et al.*, 2019). 또한, 염분 10 psu에 96시간 노출된 *C. riparius*에서 하순기질의 갈라짐 및 유실 등의 하순기절 기형이 관찰되었으며(Kim *et al.*, 2017), 내분비계 교란물질의 일종인 DEHP (diethylhexyl phthalate) 1~30 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에 노출된 *C. riparius*에서 하순기절 기형이 관찰되었다(Park and Kwak, 2008). 갈따구과는 생활사 중 대부분을 담수 환경의 저서에서 유충으로 서식하며 주변 환경 변화에 대해 민감하게 반응하여 형태적 변화가 발생하는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 중금속 물질인 Cd, Zn 노출을 통해 장수갈따구의 생존율, 성장율, 우화율, 성비와 하순기절 기형을 관찰하였다. 야외 우점종인 장수갈따구는 노출 농도에 따라 유의한 변화를 보였으며, 하순기절 관찰에서도 물질 노출에 따른 기형을 관찰하였다. 이와 같은 *C. plumosus*의 중금속 노출로 인한 반응은 야외종도 수환경 분석을 위한 생물지표종으로서의 가능성을 보여주었다.

적 요

인간의 인위적 활동으로 인해 발생하는 중금속 중 카드뮴(Cd)과 아연(Zn)은 다양한 경로를 통해 하천으로 유입되어 서식생물에게 유해 영향을 준다. 본 연구에서는 도심 하천에서 우점하는 장수갈따구(*Chironomus plumosus*)를 이용하여 Cd와 Zn 노출에 따른 생태독성학적 반응을 연구하였다. 생활사를 고려하여, 생존율, 성장율, 우화율, 성비와 하순기절 기형을 관찰하였다. 장수갈따구 생존율은 Cd와 Zn 노출에 따라 시간, 농도의존적인 경향을 나타냈다. 성장율은 Cd 노출 후 Day 4와 Day 7, 농도의존적인 감소를 보였으며, 고농도인 50 mg L^{-1} 에서 대조군에 비해 급격한 감소를 나타냈다. 또한, 우화율은 10, 50 mg L^{-1} Cd에서 대조군에 비해 감소함을 관찰하였다. 성비 변화는 100 mg L^{-1} Zn에서 암컷의 비율이 증가했으나 농도가 높아짐에 따라 수컷의 비율이 높아짐을 보이며 성비불균형이 관찰되었다. 게다가, 장수갈따구의 하순기절에서는 대조군에 비해 Cd와 Zn 노출된 장수갈따구에서 기형이 관찰되었다. 이

와 같은 결과는 수생태계로 유입되는 중금속이 하천의 하상저층에 서식하는 저서무척추동물에게 유해한 영향을 주며, 중금속 노출에 따른 생물학적 분석을 위한 현장 지표종으로서의 가능성을 보여주었다.

저자 기여도 개념설정: 광인실, 방법론: 광인실&박기연, 분석: 박기연&김원석, 자료제공: 광인실, 자료관리: 박기연&김원석&홍철, 원고 초안작성: 김원석, 원고교정: 김원석&홍철&박기연&광인실, 원고편집 및 검토: 김원석&박기연&광인실, 과제관리: 광인실, 연구비 수주: 광인실

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음.

연구비 이 논문은 한국연구재단 중점연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임 [NRF-2018-R1A6A1A-03024314]와 [NRF-2016-R1D1A3B-03934515].

REFERENCES

- Al-Shami, S.A., M.R.C. Salmah, A.A. Hassan and M.N.S. Azizah. 2011. Evaluation of mentum deformities of *Chironomus* spp. (Chironomidae: Diptera) larvae using modified toxic score index (MTSI) to assess the environmental stress in Juru River Basin, Penang, Malaysia. *Environmental Monitoring and Assessment* **177**: 233-244.
- Baki, M.A., M.M. Hossain, J. Akter, S.B. Quraishi, M.F.H. Shojib, A.A. Ullah and M.F. Khan. 2018. Concentration of heavy metals in seafood (fishes, shrimp, lobster and crabs) and human health assessment in Saint Martin Island, Bangladesh. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **159**: 153-163.
- Baumann, L., H. Holbech, S. Keiter, K.L. Kinnberg, S. Knörr, T. Nagel and T. Braunbeck. 2013. The maturity index as a tool to facilitate the interpretation of changes in vitellogenin production and sex ratio in the fish sexual development test. *Aquatic Toxicology* **128-129**: 34-42.
- Béchar, K.M., P.L. Gillis and C.M. Wood. 2008. Acute toxicity of waterborne Cd, Cu, Pb, Ni, and Zn to first-instar *Chironomus riparius* larvae. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **54**: 454-459.
- Colombo, V., V.J. Pettigrove, L.A. Golding and A.A. Hoffmann. 2014. Transgenerational effects of parental nutritional status on offspring development time, survival, fecundity, and sensitivity to zinc in *Chironomus tepperi* midges. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **110**: 1-7.
- Dias, V., C. Vasseur and J.M. Bonzom. 2008. Exposure of *Chironomus riparius* larvae to uranium: effects on survival, development time, growth, and mouthpart deformities. *Chemosphere* **71**: 574-581.
- Dickman, M., I. Brindle and M. Benson. 1992. Evidence of te-

- ratogens in sediments of the Niagara River watershed as reflected by chironomid (Diptera: Chironomidae) labial plate deformities. *Journal of Great Lakes Research* **18**: 467-480.
- Elendt, B.P. 1990. Selenium deficiency in Crustacea; an ultrastructural approach to antennal damage in *Aphnia magna* Straus. *Protoplasma* **154**: 25-33.
- Gillis, P.L., L.C. Diener, T.B. Reynoldson and D.G. Dixon. 2002. Cadmium-induced production of a metallothioneinlike protein in *Tubifex tubifex* (Oligochaeta) and *Chironomus riparius* (Diptera): correlation with reproduction and growth. *Environmental Toxicology and Chemistry* **21**: 1836-1844.
- Henson, M.C. and P.J. Chedrese. 2004. Endocrine disruption by cadmium, a common environmental toxicant with paradoxical effects on reproduction. *Experimental Biology and Medicine* **229**: 383-392.
- Jung, H.B., S.T. Yun, B. Mayer, S. Kim, S.S. Park and P.K. Lee. 2005. Transport and sediment-water partitioning of trace metals in acid mine drainage: an example from the abandoned Kwangyang Au-Ag mine area, South Korea. *Environmental Geology* **48**: 437-449.
- Kim, W.S., B.H. Im, C. Hong, S.W. Choi, K. Park and I.S. Kwak. 2017. Gene expression of *Chironomus riparius* heat shock protein 70 and developmental retardation exposure to salinity. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**: 305-313.
- Kim, W.S., R. Kim, K. Park, N. Chamilani and I.S. Kwak. 2015. The molecular biomarker genes expressions of rearing species *Chironomus riparius* and field species *Chironomus plumosus* exposure to heavy metals. *Korean Journal of Ecology and Environment* **48**: 86-94.
- Lushchak, V.I. 2011. Environmentally induced oxidative stress in aquatic animals. *Aquatic Toxicology* **101**: 13-30.
- Martinez, E.A., B.C. Moore, J. Schaumloffel and N. Dasgupta. 2001. Induction of morphological deformities in *Chironomus tentans* exposed to zinc- and lead-spiked sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry* **20**: 2475-2481.
- Martinez, E.A., B.C. Moore, J. Schaumloffel and N. Dasgupta. 2003. Morphological abnormalities in *Chironomus tentans* exposed to cadmium and copper-spiked sediments. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **55**: 204-212.
- Mebane, C.A., D.P. Hennessy and F.S. Dillon. 2008. Developing acute-to-chronic toxicity ratios for lead, cadmium, and zinc using rainbow trout, a mayfly, and a midge. *Water, Air & Soil Pollution* **188**: 41-66.
- Michailova, P., J. Ilkova, A.P. Dean and K.N. White. 2015. Cytogenetic index and functional genome alterations in *Chironomus piger Strenzke* (Diptera, Chironomidae) in the assessment of sediment pollution: a case study of Bulgarian and UK rivers. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **111**: 220-227.
- Ministry of Environment. 2015. Standard for contamination of river and lake sediments. National Institute of Environmental Research No 687.
- Montaño-Campaz, M.L., L. Gomes-Dias, B.E.T. Restrepo and V.H. García-Merchán. 2019. Incidence of deformities and variation in shape of mentum and wing of *Chironomus columbiensis* (Diptera, Chironomidae) as tools to assess aquatic contamination. *Plos One* **14**: e0210348.
- Naddy, R.B., A.S. Cohen and W.A. Stubblefield. 2015. The interactive toxicity of cadmium, copper, and zinc to *Ceriodaphnia dubia* and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Environmental Toxicology and Chemistry* **34**: 809-815.
- Park, K., H.W. Bang, J. Park and I.S. Kwak. 2009. Ecotoxicological multilevel-evaluation of the effects of fenbendazole exposure to *Chironomus riparius* larvae. *Chemosphere* **77**: 359-367.
- Park, K. and I.S. Kwak. 2008. Characterization of heat shock protein 40 and 90 in *Chironomus riparius* larvae: effects of di (2-ethylhexyl) phthalate exposure on gene expressions and mouthpart deformities. *Chemosphere* **74**: 89-95.
- Park, K. and I.S. Kwak. 2010. Molecular effects of endocrine-disrupting chemicals on the *Chironomus riparius* estrogen-related receptor gene. *Chemosphere* **79**: 934-941.
- Park, K. and I.S. Kwak. 2011. Ribosomal protein S3 gene expression of *Chironomus riparius* under cadmium, copper and lead stress. *Journal of Toxicology and Environmental Health Science* **3**: 347-355.
- Park, K. and I.S. Kwak. 2012a. Gene expression of ribosomal protein mRNA in *Chironomus riparius*: effects of endocrine disruptor chemicals and antibiotics. *Comparative Biochemistry and Physiology - Part C: Toxicology & Pharmacology* **156**: 113-120.
- Park, K. and I.S. Kwak. 2012b. Assessment of potential biomarkers, metallothionein and vitellogenin mRNA expression in various chemically exposed benthic *Chironomus riparius* larvae. *Ocean Science Journal* **47**: 435-444.
- Park, K. and I.S. Kwak. 2014. The effect of temperature gradients endocrine signaling and antioxidant gene expression during *Chironomus riparius* development. *Science of the Total Environment* **471**: 1003-1011.
- Park, K. and I.S. Kwak. 2018. Disrupting effects of antibiotic sulfathiazole on developmental process during sensitive life-cycle stage of *Chironomus riparius*. *Chemosphere* **190**: 25-34.
- Park, K., J. Park, J. Kim, I.S. Kwak. 2010. Biological and molecular responses of *Chironomus riparius* (Diptera, Chironomidae) to herbicide 2, 4-D (2, 4-dichlorophenoxyacetic acid). *Comparative Biochemistry and Physiology - Part C: Toxicology & Pharmacology* **151**: 439-446.
- Park, K., T.S. Kwak, W.S. Kim and I.S. Kwak. 2019. Changes in exoskeleton surface roughness and expression of chitinase genes in mud crab *Macrophthalmus japonicus* following heavy metal differences of estuary. *Marine Pollution Bulletin* **138**: 11-18.
- Rand, G.M., P.G. Wells and L.S. McCarty. 2003. Introduction to

- aquatic toxicology, p. 123-167. In: Fundamentals of aquatic toxicology (Rand, G.M., ed.). Taylor and Francis, New York.
- Schaller, J. 2014. Bioturbation/bioirrigation by chironomus plumosus as main factor controlling elemental remobilization from aquatic sediments? *Chemosphere* **107**: 336-343.
- Tuikka, A.I., C. Schmitt, S. Hoss, N. Bandow, P.C. von der Ohe, D. de Zwart, E. de Deckere, G. Streck, S. Mothes, B. van Hattum, A. Kocan, R. Brix, W. Brack, D. Barcelo, A.J. Sormunen and J.V. Kukkonen. 2011. Toxicity assessment of sediments from three European river basins using a sediment contact test battery. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **74**: 123-131.
- Toušová, Z., J. Kuta, D. Hynek, V. Adam, R. Kizek, L. Bláha and K. Hilscherová. 2016. Metallothionein modulation in relation to cadmium bioaccumulation and age-dependent sensitivity of *Chironomus riparius* larvae. *Environmental Science and Pollution Research* **23**: 10504-10513.
- Wasiberg, M., P. Joseph, B. Hale and D. Beyersmann. 2003. Molecular and cellular mechanisms of cadmium carcinogenesis: a review. *Toxicology* **192**: 95-117.
- Wen, W., X. Xia, X. Chen, H. Wang, B. Zhu, H. Li and Y. Li. 2016. Bioconcentration of perfluoroalkyl substances by *Chironomus plumosus* larvae in water with different types of dissolved organic matters. *Environmental Pollution* **213**: 299-307.
- Xia, X., X. Chen, X. Zhao, H. Chen and M. Shen. 2012. Effects of carbon nanotubes, chars, and ash on bioaccumulation of perfluorochemicals by *Chironomus plumosus* larvae in sediment. *Environmental Science & Technology* **46**: 12467-12475.
- Zheng, J.L., S.S. Yuan, C.W. Wu, W.Y. Li. 2016. Chronic waterborne zinc and cadmium exposures induced different responses towards oxidative stress in the liver of zebrafish. *Aquatic Toxicology* **177**: 261-268.
- Rodríguez, E.M., D.A. Medesani and M. Fingerman. 2007. Endocrine disruption in crustaceans due to pollutants: a review. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* **146**: 661-671.