

카드뮴과 구리에 노출된 풍년새우의 생태독성

박기연, 이동주¹, 이창훈², 원두희³, 이원철¹, 곽인실^{*}

전남대학교 해양기술학부, ¹한양대학교 생명과학과,

²(주)네오엔비즈 부설 환경안전연구소,

³(주)생태조사단 부설 두희자연환경연구소

Studies on Endpoints of Toxicological Evaluation of Heavy Metals in *Brachinella kugenumaensis*

Kiyun Park, Dong Ju Lee¹, Chang-Hoon Lee², Du-Hee Won³,
Wonchoel Lee¹ and Inn-Sil Kwak^{*}

Department of Fisheries and Ocean Science, Chonnam National University,
San 96-1, Dundeok-dong, Yeosu, Jeonnam 550-749, Republic of Korea

¹Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-791,
Republic of Korea

²NeoEnBiz Co., Deawoo Technopark A-1306, Dodang-dong, Bucheon,
Gyeonggi-do 420-806, Republic of Korea

³Korea Ecosystem Service Co., Geumcheon-gu, Gasan-dong 550-1,
Seoul 153-803, Republic of Korea

ABSTRACT

Heavy metal contaminants on the aquatic environment are of interest because they can have severe effects on economy and public health. Recently, the studies for monitoring of heavy metals try to do on aquatic system to assess safety and health of ecosystem by heavy metals. Thus, biological responses were investigated on Korean fairy shrimp *Branchinella kugenumaensis* exposed to cadmium (Cd) or copper (Cu) for long-periods (30 days). The survival rate decreased significantly ($p < 0.05$) on *B. kugenumaensis* exposed to Cd and Cu at all concentrations. Especially, the highest decrease was observed at the relatively high concentration of Cd and Cu ($p < 0.01$) and the response by Cd exposure was at dose-dependent. The growth rates were also decreased significantly ($p < 0.05$) on *B. kugenumaensis* exposed to Cd and Cu for at all concentrations. Then, the reproduction rate, numbering cyst, was decreased significantly ($p < 0.01$) on *B. kugenumaensis* after Cd or Cu exposures. Long exposure of the relatively high concentration Cd and Cu can have severe effects on the reproduction, while exposures of Cd and Cu can not have effects on sex ratios of *B. kugenumaensis*. Additionally, asymmetric telson deformity was only observed after Cd exposure. Therefore, these results suggest that *B. kugenumaensis* is a sensitive bio-

※ To whom correspondence should be addressed.

Tel: +82-61-659-3193, Fax: +82-61-659-3199

E-mail: iskwak@chonnam.ac.kr, inkwak@hotmail.com

indicator of heavy metal exposure and these biological responses of *B. kugenumaensis* give important information for long-term monitoring on aquatic ecosystem.

Key words : *Branchinella kugenumaensis*, cadmium, copper, survival, growth, reproduction, morphology deformity

서 론

중금속류가 환경에 유의한 수준 이상으로 지표수를 통해 방출되었을 때, 수서환경이나 환경보전에 심각한 영향을 미칠 수 있다는 연구는 오랜 동안 이루어졌고 현재까지도 주요한 관심을 받고 있으며, 인간의 건강성을 넘어서 생태계의 안전성에 대한 관심이 증가되면서 이에 대한 기준들이 요구되는 시점에 이르렀다. 중금속과 같은 환경오염원들은 신경생리학적, 생화학적, 행동에 걸친 매개 변수들을 변화시킴으로 인해 많은 수서 생물들에게 심각한 위협을 초래하게 한다(Scott and Sloman, 2004). 자연적 혹은 인위적으로 유입된 중금속류는 수서생태계의 퇴적물에 쌓이게 되고 이러한 서식지는 저서성 생물군집에 위협을 초래하게 되었다(Muntau and Baudo, 1992; Besser *et al.*, 2001; Cheng, 2003). 게다가 카드뮴, 구리, 납, 니켈 등의 중금속류는 종종 지하수 오염원으로 발견되고 있다(Clements and Kiffney, 1994). 수서 중은 퇴적물로부터 이러한 중금속류를 흡수하고 체내 축적하게 되지만 중금속류는 쉽게 분해되거나 방출되지 않으므로 결과적으로 상위 영양 단계에 있는 생물체에까지 영향을 미치게 된다(Reynoldson, 1987; Landrum and Robbins, 1990; Eimers *et al.*, 2001). 그러므로 중금속에 대한 수서 생물체에서의 독성반응을 이해하는 것은 수질의 모니터링을 위해 매우 중요하다.

중금속류 중 카드뮴(Cd)은 환경오염원으로서 가장 연구가 많이 이루어진 물질 중 하나로(Aoki *et al.*, 1984), 매우 독성이 강하며 유전자의 전사과정이나 생체막의 수송과 같은 생리적인 과정의 전반에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Maroni *et al.*, 1986). 공기나 음식을 통한 카드뮴의 노출은 신장관의 기능장애나(Korenekova *et al.*, 2002) 생식능력의 이상을 초래할 수 있다(Massanyi *et al.*, 1996; Lukac *et al.*, 2003; Henson and Chedrese, 2004).

구리에 의한 오염은 광산이나 농업적인 침출수의 형태로 수계로 유입되는 경로가 일반적이다. 비록 구리는 아연의 흡수, 혈액생성, 발효 등과 같은 생물학적 기능을 도와주는 필수 요소이지만(Skalicka *et al.*, 2005), 가장 독성이 강한 중금속류 중의 하나이다(To'th *et al.*, 1996). 수서 생물체의 기관은 구리를 축적하고(Rojik *et al.*, 1983; B'alint *et al.*, 1997), 축적된 구리는 프리 라디칼을 형성하는 산화환원 반응을 이끌 수 있으며 이는 궁극적으로 형태적 변이나 특정 생리적 과정을 변화시킬 수 있다.

풍년새우는 절지동물문, 새각강, 무갑목에 속하며 1895년도에 일본에서 분류학적 연구를 시작으로 알려지게 되었다(Ishikawa, 1895). 풍년새우류는 전세계에 약 200여 종이 알려져 있고(Schram, 1986; Dodson and Frey, 1991) 그 중에 *Branchinella kugenumaensis*는 한국, 일본, 중국, 인도 등 아시아 지역에서 서식하는 것이 보고되었으며 분류, 생태, 발생, 분포에 관한 다양한 연구가 진행되어왔다(Yoon and Kim, 1992; Yoon, 1993). 국내 풍년새우의 서식 지역은 유기농법으로 벼를 재배하는 논에서 주로 발견되며, 내구란(Cyst)을 생산하여 불안정한 서식 환경에서는 종의 출현이 제한되는 특성을 가지고 있다(윤, 1998). 풍년새우와 유사종인 유럽산 *Strep-tocephalus*는 형태, 유전, 생식, 성장, 먹이 및 배양 조건에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다(Brendonck, 1991; Brendonck, 1993; Ali and Brendonck, 1995; Ali and Dumont, 2002; Belk and Rogers, 2002). 하지만 국내산 풍년새우에 대한 연구는 형태 및 분포에 관한 연구가 일부 있으며(윤, 1998) 생태독성 및 유해화합물질에 따른 생물반응 연구는 전무한 실정이다. 풍년새우를 이용한 독성시험법은 현재 널리 사용하고 있는 물벼룩(*Daphnia magna*), 알테미아(*Artemia salina*)를 이용한 생태독성시험법과 마찬가지로 시험운용이 비교적 간단하고 빠른 시간 내에 생태독성발현의 정도를 알 수 있다. 풍년새우와 같은 속의 태국풍년새우(*Branchinella thai-*

landensis)는 생활사, 분류 및 중요생산에 관한 연구가 진행되어 왔으며, 알테미아의 경우에는 이미 생태독성시험법에 관한 표준화 지침서가 있으므로, 이를 바탕으로 다양한 연구가 진행되어 왔다(USEPA, 1992; Landis and Yu, 1995).

본 연구에서는 국내산 풍년새우를 이용하여 중금속인 카드뮴과 구리의 장기적 노출에 따른 생태독성 영향을 조사하였다. 또한 생태독성 종말점으로 생존율, 성장률, 생식율, 성비, 형태적 기형발생 등 을 측정하여 중금속에 대한 영향을 파악하였다.

재료 및 방법

1. 실험 대상생물

풍년새우의 내구란은 문경시 문경읍 유기농법으로 벼를 재배하는 논에서 토양과 같이 채집하였다. 내구란이 포함된 토양은 실험실에서 300- μ m 표준체를 이용하여 굵은 입자와 불순물을 제거하였다. 통과한 퇴적물은 다시 200- μ m 표준체를 이용하여 미세한 입자를 제거하였으며, 내구란이 포함된 입자 크기(200~300- μ m)를 준비하였다. 내구란을 부화시키기 위해서 1-L Polyethylene 용기에 내구란이 포함된 토양을 넣고, 배양액은 합성수(synthetic freshwater)를 제조하여 넣어주었다(USEPA, 2002b). 부화조건은 온도 25°C, 명암주기는 24시간 연속조명으로 설정하였다. 내구란에서 부화한 유생은 3일간 배양하였으며, 단종 배양을 위해서 퇴적물이 들어 있지 않은 깨끗한 수조에 넣고 성체가 될 때까지 배양하였다. 배양에 사용한 먹이는 열대어사료인 TetraMin (Tetra-Werke, Melle, Germany)과 효모(Yeast) 그리고 농축클로렐라(*Chlorella* sp.)를 적절한 비율로 혼합한 조제사료를 이용하였다. 풍년새우는 내구란에서 부화하여 성체에 이르기까지 완전히 생존한 개체는 그 확률이 1.3% 이하인 것으로 보고(윤, 1998)되었으나 본 연구에서 사용한 조제사료는 풍년새우가 성체까지 생존할 확률을 80% 이상 높였으며 최대 60일 이상까지 생존하는 것을 볼 수 있었다. 풍년새우 성체로부터 생산되는 내구란은 200- μ m 표준체를 이용하여 수거하고 25°C 조건에서 건조시켰다. 실험시 내구란을 부화시켜 사용하였으며 풍년새우의 배양 및 독성 실험에 사용

Table 1. Acute toxicities of *Branchinella kugenumaensis* by heavy metal exposures

| Chemicals | Exposure time | NOEC | LOEC | LC50 |
|-----------|---------------|--------|------|------|
| Cadmium | 24 hr | 0.31 | 0.61 | 0.52 |
| Copper | 24 hr | < 0.02 | 0.02 | 0.04 |

한 배양액은 모두 합성수를 이용하였다.

2. 중금속 노출조건

중금속은 카드뮴(Cadmium chloride, CAS No. 10108-64-2, Sigma[®])과 구리(Copper (II) chloride dihydrate, CAS No. 10125-13-0, SAMCHUN[®])를 사용하였다. 중금속은 CdCl₂와 CuCl₂·2H₂O를 각각 100 mg씩 3차 증류수 100 mL에 녹여 1,000 mg/L로 제조하였으며, 이렇게 제조된 중금속은 순수한 카드뮴의 농도로 환산하면 약 613 mg/L가 되고, 구리는 약 254 mg/L가 된다.

풍년새우를 이용한 노출실험은 Maria *et al.* (1993)에서 제시된 표준 시험방법을 이용하였다. 실험조건은 온도 25°C, 명암주기(16:8), 노출용기는 250 mL 유리비이커를 사용하였으며, 배양수는 USEPA (2002)에서 제시하는 합성수를 200 mL 넣어주었다. 실험은 3번 반복하였으며 풍년새우 연령 4일째 되는 생물 중에 움직임이 활발하고 크기가 동일한 생물을 선별하여 각 반복구 당 20마리씩 투입하였다. 풍년새우 유생은 부화 후 72시간째에 자연 사망률이 높기 때문에 4일째 연령이 되는 생물을 사용하였다. 노출기간 동안 매일 생존여부를 관찰하였으며 먹이는 조제사료를 풍년새우 유생 1마리당 0.02 mL 공급하였다. 풍년새우 성장속도에 따라 노출용기의 부피를 500 mL로 늘려주었으며 먹이도 2배인 0.04 mL를 투여하였다.

30일 노출평가에서 각 물질별 농도는 24시간 단기노출평가 실험결과(Table 1)를 바탕으로 설정하였으며 Cd와 Cu를 위한 농도는 0.1, 0.3, 1, 3 μ g L⁻¹ 등의 4가지 농도범위로 실험하였다.

3. 생존율, 성장률, 생식율 및 성비 분석

중금속 Cd나 Cu 노출에 따른 생물학적 영향을 조사하기 위해 각각의 실험 농도당 부화 후 4일째 되는 20마리의 풍년새우 유생을 대상으로, 30일 동

안 각각의 농도에서 노출한 풍년새우를 분석에 이용하였다. 생물이 움직이지 않거나 파손된 경우에는 사망한 것으로 판단하였으며 매일 생존개체수를 관찰하여 생존율을 계산하였다. 또한 풍년새우의 성장률은 생물길이를 측정하여 산출하였다. 생물길이 측정방법은 30 cm 자 위에 풍년새우를 놓고 사진을 찍은 후에 이미지 프로그램 UTHSCSA Image Tool (ver. 2.0)으로 풍년새우 길이를 비교하였다. 이미지 프로그램을 이용한 길이 측정방법은 풍년새우 머리부터 항문까지 곡선으로 길이를 측정하였다.

풍년새우의 생식율은 내구란의 수로 계산하였는데, 30일 동안 중금속에 노출되는 동안 매일 내구란의 수를 계수하였다. 내구란은 대조구의 경우 노출 후 13일부터 회수하였으며 실험구의 경우 17일부터 회수가 가능하였다. 실험수 교환은 3일에 1회 교체하였으며, 이때 내구란 회수 및 암컷과 수컷의 비율을 확인하였다.

4. 형태적 기형분석

풍년새우의 형태적 기형은 30일 동안 0.3, 0.1, 1, 3 µg L⁻¹ Cd 혹은 Cu에 노출시킨 후 조사하였다. 30일 동안 각각의 중금속에 노출된 풍년새우 유충은

70% 에탄올에 고정시켜서 보관하였다. 해부를 할 때는 lactophenol 한 방울을 슬라이드 위에 떨어뜨린 후, 대상 표본 한 개체를 골라 슬라이드 위의 mounting medium 위로 조심스럽게 옮긴 후 해부핀을 이용하여 실시하였고, 슬라이드 제작은 Microscope slides 위에 glycerol을 한 방울 떨어뜨린 후 개체의 배 부분과 유영지의 관찰을 위하여 모든 부속지를 평평하게 편 후에 Microscope slides와 Coverslips (18 × 18 mm)을 이용해 Sandwich method로 마운팅하였다. 각 개체의 부속지의 변이를 관찰 때에는 OLYMPUS BX510 광학현미경(배율 100~1,000X)으로 관찰하였다. 풍년새우에서의 기형은 주로 유영지와 꼬리부분인 caudal seta와 telson에서 많이 나타나고, 기형의 정도에 따라 부풀어 오름, 미발달, 비대칭 구조, 융합 그리고 위치 등에 따라 구분하였다.

5. 통계적 자료분석

30일 동안의 생존율 결과에 대하여 분산분석(ANOVA, 유의수준 α=0.05)을 실시하였고(Zar, 1984), 각 실험구와 대조구 간 생존율의 유의한 차이를 비교하기 위해 SPSS 12.0KO (SPSS Inc., Chi-

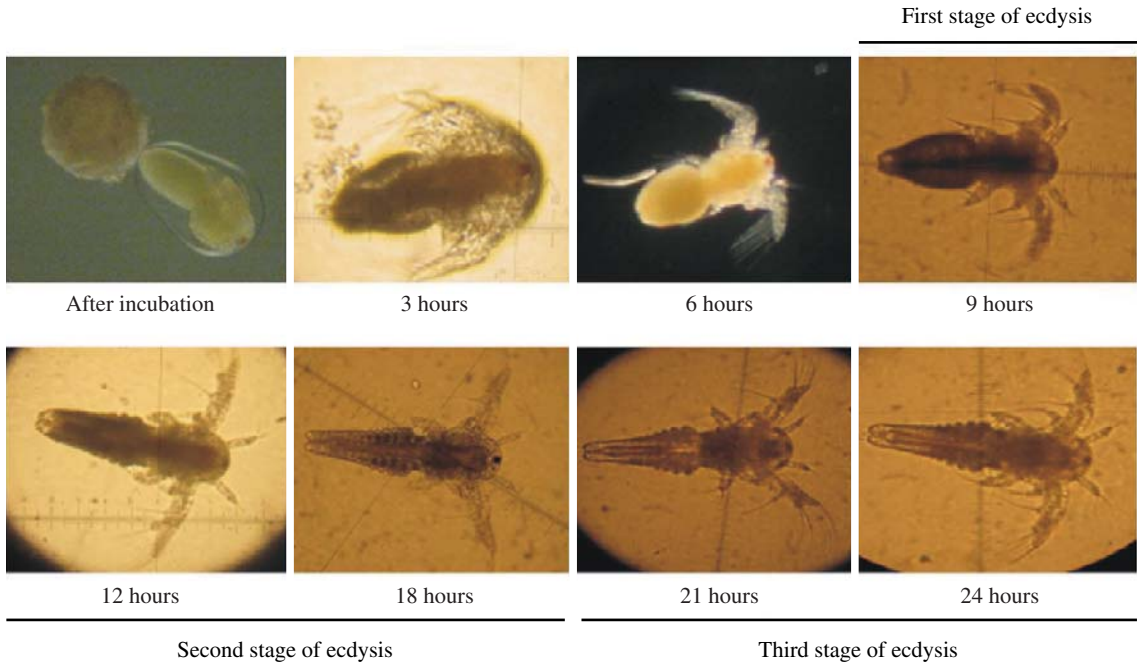


Fig. 1. The stage of development with time on Branchinella kugenumaensis.

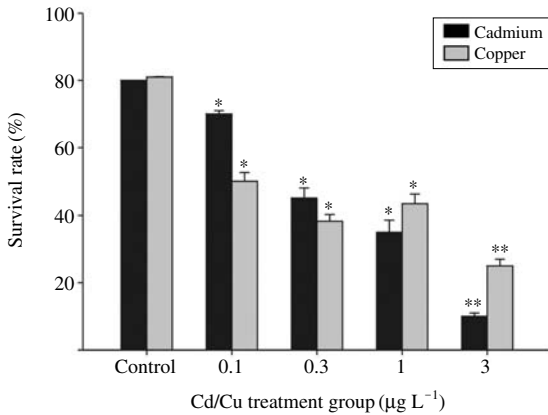


Fig. 2. The survival rates of *Branchinella kugenumaensis* exposed to heavy metals for 30 days. The experiment was performed in triplicate and the data shown represent the mean \pm standard error of the mean. Differences between heavy metal treated and non-treated samples (control) were considered to be significant at * $p < 0.05$. **indicates $p < 0.01$.

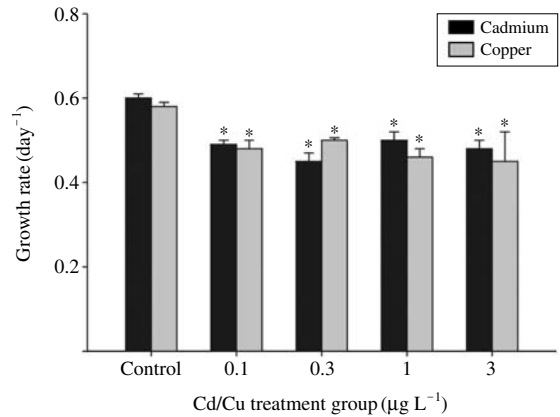


Fig. 3. The growth rates of *Branchinella kugenumaensis* exposed to heavy metals for 30 days. The experiment was performed in triplicate and the data shown represent the mean \pm standard error of the mean. Differences between heavy metal treated and non-treated samples (control) were considered to be significant at * $p < 0.05$ (all data).

cago, IL, USA)를 이용하여 Tukey's multiple range test로 분석하였다. $p < 0.05$ 를 통계적으로 유의수준으로 검정하였다.

결 과

1. 지표종으로서의 풍년새우의 특징

독성에 대한 생물지표 후보종으로서 풍년새우를 이용하기 위해 먼저 풍년새우의 전반적인 특성을 조사하였다. 국내산 풍년새우는 절지동물문, 새각강, 무갑목, 풍년새우과에 속하는 생물로 담수에서 서식하며 주로 유기농법으로 벼를 재배하는 농경지에서 발견되어지고 있다. 5월부터 8월까지 서식하면서 내구란(Cyst)을 생성하는데 이 내구란은 눈에 물이 건조되고 다음 해인 5월에 다시 물을 대면 부화를 하는 특성이 있다. 내구란은 물과 적정온도, 서식환경, 빛 등의 항목이 갖추어지면 부화를 하는 것으로 알려져 있으며 내구란의 크기는 약 220 μm 내외이고 부화 후 3일이면 2mm까지 자라며 약 10일 정도면 완전히 성숙되어 알(내구란)을 낳는다. 내구란에서 부화한 풍년새우 유생은 초기에 여러 번의 탈피과정을 거치면서 성장하였다. 초기 성장

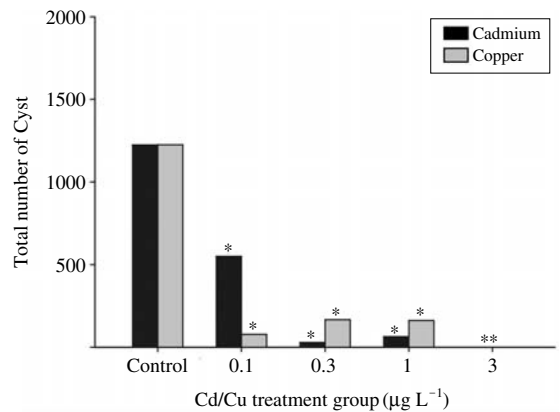


Fig. 4. The reproduction rates of *Branchinella kugenumaensis* exposed to heavy metals for 30 days. The experiment was performed in triplicate and the data shown represent the mean \pm standard error of the mean. Differences between heavy metal treated and non-treated samples (control) were considered to be significant at * $p < 0.01$ (all data).

률은 매우 빠르게 진행되며 부화 후 24시간 전에 약 3번의 탈피과정이 있다. 풍년새우 유생은 내구란에서 순차적으로 부화를 시작하며 처음 부화한 개체와 나중에 부화한 개체 간의 차이가 크게 나



Fig. 5. Asymmetric telson deformity observed to *Branchinella kugenumaensis* exposed to heavy metals.

므로 성장률과 같은 생물지표 실험을 위해 부화 후 탈피 2~3단계 (Instar stage)에 도달하는 데까지 소요되는 시간을 조사하였다. 그 결과 탈피 2~3단계에 해당되는 시간은 12~24시간인 것으로 나타났고 (Fig. 1) 부화 후 4일째 연령이 되는 풍년새우 유생이 개체변이가 가장 적게 나타남을 확인할 수 있었다.

2. 중금속 장기노출에 따른 풍년새우의 생태독성

중금속 Cd나 Cu에 30일 동안 노출시킨 국내산 풍년새우에서 생존율, 성장률, 생식율, 성비, 형태적 기형발생을 등을 조사하였다. 0.1, 0.3, 1, 3 $\mu\text{g L}^{-1}$ Cd에 각각 30일 동안 노출된 후 풍년새우의 생존율은 농도 의존적으로 급격하게 감소되는 것을 확인할 수 있었다 ($p < 0.05$) (Fig. 2). 특히 상대적으로 높은 농도인 3 $\mu\text{g L}^{-1}$ Cd에 노출된 풍년새우의 경우는 대조군에 비해 70% 이상 생존율이 감소함을 관찰할 수 있었다 ($p < 0.01$). Cu에 노출된 풍년새우의 경우에도 모든 농도에서 생존율이 통계적 유의 수준으로 감소함을 확인하였고 역시 고농도에서 가장 민감하게 생존율이 저해되었다 (Fig. 2). 중금속 노출에 의해 풍년새우 성장률의 변이도 확인되었다. 농도 의존적이지는 않지만 Cd와 Cu의 모든 농도에서 성장률이 통계적 유의수준으로 저해됨을 관찰하였다 (Fig. 3).

내구란의 수로 관찰한 풍년새우의 생식율은 중

금속 노출에 대해 매우 민감하게 반응하였다. 대조군에 비해 Cd와 Cu에 30일간 노출된 풍년새우에서 내구란이 상대적으로 매우 적게 생성됨을 확인하였다 (Fig. 4). 특히 Cd와 Cu 고농도 노출시에는 내구란이 거의 형성되지 않는 현상이 나타났다. 그러므로 중금속 노출에 따라 풍년새우의 생식율이 민감하게 영향을 받는 것으로 확인되었다. 풍년새우의 성비의 경우 Cd나 Cu 등의 중금속 노출에 대해 대조군과 차이가 없이 수컷보다 암컷의 비율이 조금 더 높을 것으로 관찰되었다.

중금속 노출에 따른 풍년새우의 기형은 주로 유영지와 꼬리부분인 caudal seta와 telson에서 많이 나타났다 (Fig. 5). 기형의 정도에 따라 부풀어 오름, 미발달, 비대칭 구조, 융합 그리고 위치 등에 따라 구분하였다. Cu 노출한 후의 풍년새우에서는 형태적 기형이 관찰되지 않았지만 Cd 노출된 풍년새우에서는 형태적 기형이 관찰되었다. Telson의 비대칭이나 부풀어 오르는 형태의 기형이 Cd 노출에 의해 발현되었으며 (4.8%) 이는 노출되지 않은 대조군에서는 전혀 관찰되지 않았으나, 형태적 기형은 농도 의존적으로 나타나지는 않았다.

고 찰

본 연구에서는 독성에 대한 생물 지표종으로서의 국내산 풍년새우의 활용을 위한 생태적인 특징 조사 및 중금속 노출에 대한 생태독성 영향을 조사

하였다. 풍년새우는 생활사가 짧고 배양이 간단하며 중금속과 같은 독성에 민감하므로 표준독성시험종으로 매우 유리한 특징 조건을 보여주었다. 또한 Cd나 Cu 등의 중금속 노출에 대한 단기 독성이 매우 낮은 농도에서 민감하게 반응하였다. 24시간 동안의 Cd 노출에 대한 풍년새우의 LC₅₀는 0.52 µg L⁻¹였고, Cu의 경우에는 0.04 µg L⁻¹였다(Table 1). 급성독성에 대해서는 Cd보다 Cu 노출에 대해 더 민감하게 반응하는 것으로 관찰되었으나, 형태적 기형발생의 결과에서는 Cu보다 Cd가 더 영향을 주는 것으로 나타났다. 즉, Cu 노출에서는 관찰되지 않았던 telson의 기형이 Cd 노출 후에는 비대칭적 telson 기형형태가 관찰되었다(Fig. 5). 본 연구를 통하여, 중금속류에 장기간 노출된 국내산 풍년새우가 다양한 생태독성 종말점을 제시할 수 있음을 보여주었다. 요약하면, 생존율의 감소, 성장률의 저해, 생식율의 급격한 감소, 꼬리의 telson에서의 형태적 기형발생이 상대적으로 낮은 0.1 µg L⁻¹ 농도에서 민감하게 나타났다. 특히 생존율의 농도 의존적인 급격한 감소나 내구란 수의 감소로 인한 생식의 실패는 생태계 내 풍년새우 군집자체의 문제뿐 아니라 이를 먹이로 하는 고등 영양단계의 생물종까지 폭넓게 영향을 미칠 수 있음을 고려하여야 한다. 또한 Cd 노출에 의한 형태적 기형은 장기노출에 따른 분자 유전자의 변이가 결과적으로 외형적 변이로 나타남을 고려하는 측면에서 분자지표로서 풍년새우 유전자들과 그 변이에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

본 연구를 통한 국내산 풍년새우의 생태독성에 대한 결과는 수생태계 모니터링을 위한 기반자료로, 그리고 중금속 노출에 따른 수서 생물종의 생물적 기형발생을 이해하는 데 매우 중요한 자료가 될 것이다. 나아가, 독성 평가를 위한 생물시험종으로서의 국내산 풍년새우의 활용 가능성을 진단하고자 하였다.

요 약

수생태계에서 중금속 오염은 경제적, 환경보건적으로나 매우 중요한 문제이다. 최근 중금속에 의한 생태계의 안전과 건강성에 대한 우려가 대두되고, 이를 모니터링하고자 하는 시도가 이루어지는

실정이다. 이에 국내산 무갑류인 풍년새우(*Branchinella kugenumaensis*)를 대상으로 카드뮴(Cd)과 구리(Cu)의 장기간 노출에 따른 생물학적 반응을 파악하고자 하였다. 장기간(30일) 동안 Cd와 Cu에 노출된 풍년새우에서 생존율이 모든 농도에서 통계적 유의수준으로 급격히 감소하였다($p < 0.05$). 특히 상대적으로 고농도의 Cd와 Cu 노출된 개체들이 크게 감소한 것으로 나타났고($p < 0.01$), Cd 노출의 경우 농도 의존적으로 반응이 나타났다. 풍년새우의 성장률 또한 두 중금속 노출 후 모든 농도에서 감소되는 것을 확인하였다. 풍년새우의 내구란 수로 관찰한 생식율은 Cd와 Cu 노출 후 급격히 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 나아가, 장기적인 중금속 고농도 노출에서 풍년새우의 생식이 심각하게 저해되는 반면에, 풍년새우의 성비에는 영향이 크지 않았다. Cd 노출 후에 풍년새우에서 비대칭적인 telson 형태기형이 관찰되었으나 이러한 기형형태는 대조군에서는 전혀 발견되지 않았다. 결론적으로, 본 연구를 통해 Cd와 Cu의 중금속 장기노출에 의해 풍년새우의 생물학적 반응지표들의 변화를 확인하였다. 장기적인 노출실험 결과, 풍년새우는 중금속 노출에 대해 민감한 지표종일 뿐만 아니라 장기적인 수생태계의 모니터링을 위한 기반 자료로 중요한 가치가 있을 것으로 고려되어졌다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 차세대 핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)으로 지원받은 과제입니다.

참 고 문 헌

- 윤성명. 한국산 대형새각류(갑각 상강, 새각 강)의 분류 및 생태에 관한 연구. 한국과학재단 연구보고서, 한국과학재단 1998; pp. 34.
- Ali AJ and Brendonck L. Evaluation of agro-industrial wastes as diets for culture of the fairy shrimp *Streptocephalus proboscideus*, *Hydrobiologia* 1995; 298: 167-173.
- Ali AJ and Dumont HJ. Rice bran as a diet for culturing *Streptocephalus proboscideus* (Crustacea: Anostraca), *Hydrobiologia* 2002; 486: 249-254.

- Aoki Y, Suzuki KT and Kubota K. Accumulation of cadmium and induction of its binding protein in the digestive tract of fleshfly (*Sarcophaga peregrina*) larvae. *Comp Biochem Physiol* 1984; 77: 279-282.
- Bálint T, Ferenczy J, Kátai F, Kiss I, Kráczler L, Kufcsák O, Láng G, Polyhos C, Szabó I, Szegletes T and Nemcsók J. Similarities and differences between the massive eel (*Anguilla anguilla* L.) devastations that occurred in lake Balaton in 1991 and 1995. *Ecotox Environ Saf* 1997; 37: 17-23.
- Belk D and Rogers DC. A confusing trio of *Branchinecta* (Crustacea: Anostraca) from the western North America with a description of a new species. *Hydrobiologia* 2002; 486: 49-55.
- Besser JM, Brumbaugh WG, May TW, Church SE and Kimball BA. Bioavailability of metals in stream food webs and hazards to brook trout (*Salvelinus fontinalis*) in the upper Animas River watershed, Colorado. *Arch Environ Contam Toxicol* 2001; 40: 48-59.
- Brendonck L. Contributions to the study of the reproductive biology of *Streptocephalus proboscideus* (Anostraca, Streptocephalidae). *Crustaceana* 1991; 60: 145-162.
- Brendonck L. Feeding in the fairy shrimp *Streptocephalus proboscideus* (Frauenfeld) (Branchiopoda: Anostraca). II. Influence of environmental conditions on feeding rate. *Journal of Crustacean Biology* 1993; 13: 245-255.
- Cheng S. Effects of heavy metals on plants and resistance mechanisms. *Chines Acad Sci* 2003; 10: 256-264.
- Clements WH and Kiffney PM. Integrated laboratory and field approach for assessing impacts of heavy metals at the Arkansas River, Colorado. *Environ Toxicol Chem* 1994; 13: 397-404.
- Dodson SI and Frey DG. Cladocera and other Branchiopoda. In: Thorp JH and Covich AP (eds.). *Ecological and classification of North American freshwater invertebrates*. Academic Press, Inc., 1991.
- Eimers RD, Evans RD and Welbourn PM. Cadmium accumulation in the freshwater isopod *Asellus racovitzai*: the relative importance of solute and particulate sources at trace concentrations. *Environ Pollut* 2001; 111: 247-258.
- Henson MC and Chedrese PJ. Endocrine disruption by cadmium, a common environmental toxicant with paradoxical effects on reproduction. *Exp Biol Med* 2004; 229: 383-392.
- Ishikawa C. Phyllopod Crustacea of Japan. *Zool Mag (Tokyo)* 1895; 7: pp. 154.
- Korenekova B, Skalicka M and Nad P. Cadmium exposure of cattle after long-term emission from polluted area. *Trace Elem Electrolytes* 2002; 19: 97-99.
- Landrum RF and Robbins JA. Bioavailability of sediment-associated contaminants to benthic invertebrates. In: Bando R, Giesy J and Muntau H (eds). *Sediments chemistry and toxicity of in-place pollutants*, Lewis Publishers, Boston, 1990; pp. 237-263.
- Landis WG and Yu MH. *Introduction to environmental toxicology: Impacts of chemicals upon ecological systems*. Lewis Publ. CRC Press, Inc., London, 1995.
- Lukac N, Massanyi P, Toman R and Trandzik J. Effect of cadmium on spermatozoa motility. *Sovremena Poljoprivreda* 3-4, 2003; 215-217.
- Maria DC, Brendonck L and Persoone G. Cyst-based toxicity tests. III. Development and standardization of an acute toxicity test with the freshwater anostracan crustacean streptocephalus proboscideus, 1993.
- Maroni G, Lastowski-Perry D, Otto E and Watson D. Effects of heavy metals on *Drosophila* larvae and a metallothionein cDNA. *Environ Health Perspect* 1986; 65: 108-116.
- Massanyi P, Lukac N and Trandzik J. In vitro inhibition of the motility of bovine spermatozoa by cadmium chloride. *J Environ Sci Health Part A* 1996; 31: 52-55.
- Muntau H and Baudo R. Sources of cadmium, its distribution and turnover in the freshwater environment. In: Nordberg G, Herber RFM and Alessio L (eds.). *Cadmium in the human environment: toxicity and carcinogenicity*. New York: International Agency for Research on Cancer, 1992; pp. 133-148.
- Reynoldson TB. The role of environmental factors in the ecology of tubificid oligochaetes-an experimental study. *Holarct Ecol* 1987; 10: 241-248.
- Rojik I, Nemcsók J and Boross L. Morphological and biochemical studies on liver, kidney and gill of fishes affected by pesticides. *Acta Biol Hun* 1983; 34: 81-92.
- Schram FR. *Crustacea*. Oxford Univ. Press, New York, 1986.
- Scott GR and Sloman KA. The effects of environmental pollutants on complex fish behaviour: integrating behavioural and physiological indicators of toxicity. *Aquat Toxicol* 2004; 68: 369-392.
- Skalicka M, Korenekova B and Nad P. Copper in livestock from polluted area. *Bull Environ Contam Toxicol* 2005; 74: 740-744.
- Toth L, Juha'sz M, Varga T, Csikkel-Szolnoki A and Nemcsók J. Some effect of CuSO₄ on carp. *J Environ Sci Health B* 1996; 31: 627-635.
- USEPA. *Pollution reports on lanson chemical*. U.S. Environmental Protection Agency, Emergency and Enforcement Response Branch, Chicago, IL., 1992.
- USEPA. *Methods for measuring the acute toxicity of efflu-*

ents and receiving waters to freshwater and marine organisms. Fifth Edition October, 2002.

Yoon SM. The Systematics and Molecular Evolution of the Korean *Branchiopods* (Crustacea, Branchiopoda), PhD thesis, Seoul National Univ., 1993; pp. 364.

Yoon SM and Kim W. A taxonomic study on the recent conchostracans of *Spinicaudata* (Crustacea, Branchiopoda) from Korea, Korean J Zool 1992; 35: 474-483.

Zar JH. Biostatistical analysis. 2nd edition. Prentice-Hall International Inc. Engelwood Cliffs, NJ., 1984; pp. 718.