

요시마쯔갈따구와 리파리갈따구(파리목: 갈따구과)의 중금속에 대한 급성독성 및 유영능력 비교

유동헌¹ · 손진오 · 모형호 · 배연재² · 조기종*

고려대학교 생명환경과학대학 환경생태공학부, ¹주식회사 경농
²서울여자대학교 자연과학대학 생물학과

Comparing Acute and Swimming Endpoints to Evaluate the Response of Two Freshwater Midge Species, *Chironomus yoshimatsui* and *Chironomus riparius* to Heavy Metals

DongHun Yoo¹, Jino Son, Hyoung-ho Mo, Yeon Jae Bae² and Kijong Cho*

Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

¹Kyung Nong Corporation, 1337-4, Seocho-Gu, Seocho-Dong, Seoul 137-860, Korea

²Department of Biology, Seoul Women's University, Seoul 139-774, Korea

Abstract - The relative sensitivity of two freshwater non-biting midges, *Chironomus yoshimatsui* Martin and Sublette and *C. riparius* Meigan, was examined for lead, cadmium, and mercury in water-only exposures. Two endpoints were compared to assess toxicity 48 h and 96 h after exposure: Acute toxicity (50% lethal concentration: LC₅₀) and behavioral toxicity (50% effective concentration: EC₅₀). For the behavioral toxicity, reduction of swimming performance of two midge species in the treated conditions was compared to that in the untreated control. The sensitivities differed depending on the species and heavy metals, although some trends emerged. LC₅₀ values in *C. yoshimatsui* to cadmium and lead were always higher than those in *C. riparius* with increasing toxicity, regardless of the exposure times. The opposite was true for the mercury treatment. Similar trends were observed in the EC₅₀ values. The EC₅₀ values were always lower than the LC₅₀ values in all the treatment cases (midge species, heavy metals, and exposure times). These results indicate that the two midge species respond to the heavy metals differently: *C. riparius* is sensitive to cadmium and lead and *C. yoshimatsui* to mercury. Behavioral toxicity such as swimming performance can be an effective endpoint for assessing heavy metal toxicity in water.

Key words : *Chironomus yoshimatsui*, *Chironomus riparius*, bioindicator, heavy metals, acute toxicity, behavioral toxicity

서 론

수서 생태계는 물질의 이동과 변환이 급속하게 일어나는 환경으로 수계로 유입된 중금속이 수서 생태계에

* Corresponding author: Kijong Cho, Tel. 02-3290-3064, Fax. 02-925-1970, E-mail. kjcho@korea.ac.kr

미치는 영향을 정확히 규명하는 것은 매우 어려운 과제이다. 수서 생태계로 유입된 중금속들은 치사, 발육 및 생식 장애 등과 같이 직접적인 피해를 끼치기도 하며, 체내 축적(bioaccumulation)을 통해 다른 동물이나 인간에게 전달된다. 중금속 중에서 생태계에 악영향을 끼치는 대표적인 것으로 납, 카드뮴, 수은 등이 알려져 있다. 미국(US EPA 1994)이나 유럽(OECD 2001)의 경우 이러한 중금속을 주요 환경오염물질에 포함시켜 자연생태계의 유입 방지 및 처리제거에 역점을 두고 있으며, 환경 영향을 평가하기 위한 지속적인 모니터링을 실시하고 있다.

오염물질이 하천생태계에 미치는 영향을 평가하는 방법으로서 오염된 수질 및 저니(sediment)를 이화학적으로 분석하여 평가하는 방법과 지표생물을 이용한 생물학적 평가 방법이 있다. 이화학적 평가는 대상 오염물질을 단기간에 정량적으로 평가할 수 있다는 장점이 있는 반면, 생물학적 평가는 실제 하천에 서식하는 생물을 조사함으로써 오염물질이 하천생태계에 미치는 생물학적 영향을 장기적이고 종합적으로 평가할 수 있다는 장점이 부각되어 생물학적 평가 방법이 다각도로 개발되어 왔다. 중금속에 대한 생물체의 반응(사망 혹은 행동양상의 차이 등)은 생물 종류에 따라 서로 다르게 나타날 수 있으며, 또한 오염물질의 종류와 농도에 따라서도 특이적으로 나타난다(Milani *et al.* 2003).

오염물질에 대한 생물체의 급성 치사 독성 평가는 해당 오염 물질의 독성을 규명하기 위한 기초 자료로 활용할 수 있고(US EPA 1994), 단기간에 그 결과를 얻을 수 있으며, 비교적 분석이 간단하다. 한편, 생물의 행동변화를 기준으로 한 행동 독성 평가는 생물의 행동 변화가 일반적으로 사망 이전에 나타나기 때문에 사망을 기준으로 한 급성 독성보다 민감한 결과를 얻을 수 있다. 노출 경로를 단순화 시킨 수중 노출 시험은 그 시스템이 단순하기 때문에 처리가 용이하다는 장점이 있으며, 또한 저니 독성 시험을 수행하기 이전에 수중 노출 시험을 수행함으로써 이후 저니에 존재하는 복잡한 노출 시스템에서의 독성효과와 얼마나 차이가 나는지를 비교할 수 있는 기초 자료로 활용 가능하다.

Eisler (2000)에 따르면 카드뮴의 경우 제련소 부근이나 도시 공업단지에서 특히 그 농도가 높게 나타나며, 여러 생물체 중 담수 생물체가 가장 민감한 반응을 나타내는 것으로 보고하였다. 또한 납은 수서 생물체에게 헤모글로빈의 구성을 저해하고, 혈액의 화학 반응에 장애를 주는 등 조혈 기관에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 수은에 의한 독성 효과는 그 반응 기작이 명확히 밝혀지지 않았으나, 일반적으로 무기수은보다는 유기수은, 특히 메틸수은이 실험 생물종에게 더욱 강한 독

성을 나타내는 것으로 알려져 있다.

깔따구(non-biting midges)는 파리목(Diptera), 깔따구과(Chironomidae)에 속하며, 담수생태계의 단일 생물군으로서 가장 종류가 다양하고 개체수가 풍부한 생물로 알려져 있다. 이들은 특히 오염된 도시하천에 우점종으로 나타난다. 또한 깔따구는 근래에 들어 분류학자나 생태학자 뿐만 아니라 분자생물학자, 유전학자 그리고 특히 독성학자들에게 널리 사용되고 있는 실험 대상 동물이다. 리파리깔따구(*Chironomus riparius* Meigan)는 외국에서 표준 독성 실험에 널리 사용되는 실험동물로서 오염물질에 대한 독성 평가에 지속적으로 이용되어 여러 독성평가의 결과 비교가 용이하다는 장점이 있다(US EPA 1994; OECD 2001). 하지만, 현재까지 리파리깔따구는 한국에 서식하고 있는지 확인되지 않고 있으므로(한국곤충학회·한국응용곤충학회 1994) 이들의 독성 결과를 국내 수서 생태계의 평가에 직접적으로 적용하기는 어려운 실정이다. 따라서 국내의 수서 독성평가에 이용될 수 있는 토착 지표 생물종의 개발이 시급한 실정이다. 국내의 수서 독성평가에 이용될 수 있는 잠재적인 생물종으로 요시마쯔깔따구(*Chironomus yoshimatsui* Martin and Sublette)가 알려져 있다(한국곤충학회·한국응용곤충학회 1994). 요시마쯔깔따구는 OECD 가이드라인에서 독성 실험에 사용될 수 있는 깔따구과(Chironomidae)의 한 종으로 보고되었으며(OECD 2001), 또한 국내 하천에 광범위하게 분포하고 있는 것으로 알려져 있다(Yoon and Chun 1992). 일본에서 Yamamura *et al.* (1983)과 Sumi *et al.* (1984)이 요시마쯔깔따구를 이용하여 카드뮴 독성 관련 생화학 실험을 수행 한 바 있지만, 국내에서는 아직까지 이종의 사육 방법 및 표준화 된 독성 실험 방법이 정립되어 있지 않다.

본 연구의 목적은 국내의 하천에 서식하는 토착 수서 무척추동물인 요시마쯔깔따구를 이용하여 주요 중금속 오염 물질인 납, 카드뮴, 수은에 대한 독성 반응을 국제 표준 실험종인 리파리깔따구와 비교하여 요시마쯔깔따구의 국내 생물지표 종으로서의 타당성을 검증하는데 있다. 이를 위하여 단순한 수중 노출 시스템을 이용하여 상기 중금속에 대한 독성 반응을 급성독성과 행동독성으로 나누어 비교실험을 수행하였다.

재료 및 방법

1. 실험 생물 사육조건

서울시 동북부에 위치한 중랑천 하류에서 채집한 요시마쯔깔따구의 알과 유충을 OECD 가이드라인(OECD

Table 1. Preparation of synthetic freshwater using reagent grade chemicals

Reagent added (mg L ⁻¹)		Final water quality	
NaHCO ₃	192.0	pH	7.6~8.0
CaSO ₄ ·2H ₂ O	120.0	Hardness (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	160~180
MgSO ₄	120.0	Alkalinity (as mg L ⁻¹ CaCO ₃)	110~120
KCl	8.0	Dissolved oxygen (mg L ⁻¹)	7.7~7.9

2001)에서 제시된 표준 사육 방법을 이용하여 실험실 내에서 사육하여 독성 실험에 이용하였다. 실험 생물의 사육 및 독성 실험에 이용된 배양액은 US EPA (1994)에서 제시한 배양액 (synthetic freshwater) 조성 중 경수 (hard water)에 해당하는 조성에 따라 제조하여 사용하였다 (Table 1). 사육은 온도 20±1°C, 상대습도 70%, 광도 500 lx 및 광주기 (16:8)로 조절된 항온기 내에서 이루어졌으며, 독성실험도 동일한 조건에서 수행하였다. 깔따구 먹이로는 Tetramin® (TetraWerke, Melle, Germany)을 매일 유충당 0.5 mg을 공급하였다.

요시마쓰깔따구와의 대조 실험에 이용된 리파리깔따구는 농업과학기술원 생태독성학 실험실에서 분양 받아 요시마쓰깔따구와 같은 조건으로 실험실 내에서 누대 사육해서 얻은 3령충을 이용하였다.

2. 조사 중금속 및 노출방법

본 실험에 사용된 중금속 오염물질은 납 (PbCl₂, Merck, Germany, purity >98%), 카드뮴 (CdCl₂ · 2½H₂O, Merck, Germany, purity >98%) 그리고 수은 (HgCl₂, Merck, Germany, purity >99.5%)이었다. 각 실험 약제는 Milli-Q water (Millipore, Bedford, USA)에 중금속을 용해시킨 표준용액 (CdCl₂ · 2½H₂O; 6000 mg L⁻¹, PbCl₂; 4000 mg L⁻¹, HgCl₂; 100 mg L⁻¹)을 준비하여 이용하였다.

중금속 독성평가에 이용된 깔따구는 배양액에서 사육된 개체군으로써 부화한지 7일된 크기가 균일한 3령충이었다. 오염물질에 노출시키기 전에 실험에 사용할 용기와 동일한 크기인 250 mL 유리비커에 100 mL의 배양액을 넣고 24시간 동안 깔따구의 적응기간을 부여한 후 건강한 개체만을 선별하여 독성평가에 이용하였다. 행동독성을 평가하기 위해 급성독성 실험과 동일한 농도구간에서 부화한지 7일된 동일령의 충분한 수량의 깔따구를 각 처리농도 당 48시간 및 96시간 동안 노출시킨 후, 생존한 깔따구를 30마리씩 선별하여 행동독성 평가에 이용하였다.

각 중금속 당 6개 농도(대조구 포함)를 조제 후, 1시간 동안 용액을 안정화시킨 후, 미세붓 (camel's hair

brush)을 이용하여 깔따구를 각 처리용액에 투입하였다. 이때, 대조구는 배양액과 Milli-Q water를 혼합하여 조제하였다. 대조구와 처리구에 이용된 배양액을 유리비커에 채우기 전에 공기를 충분히 공급하여(용존산소량 5~7 mg L⁻¹ 수준) 노출 기간 중 산소가 결핍되지 않도록 하였고, 독성실험시 노출 기간 동안 먹이 공급은 없었으며, 배양액을 교체하지 않는 조건 (static condition)에서 수행하였다. 또한 수분 증발을 최소화하기 위해 유리비커 윗부분에 플라스틱 덮개를 씌워주었다.

각 중금속 처리 농도당 요시마쓰깔따구 및 리파리깔따구 3령충을 10마리씩 투입하였으며 이를 3회 반복으로 수행하였다. 독성평가는 노출 48시간 및 96시간 후 급성독성(사망률) 및 행동독성(유영능력)으로 나누어 평가하였다. 깔따구의 사망은 가는 유리봉으로 자극하였을 때 몸의 움직임이 전혀 없는 경우로써 3회 반복 평가하였다. 유영능력 평가는 유충을 미세붓을 이용하여 처리용액 상층부(높이 3 cm)로 옮겨준 후 자유유영을 시켜 평가하였다. 자유유영시 몸을 S자 형태로 만들면서 용액 하층부로 유영하여 내려오는 개체를 정상적인 개체로 판단하였으며, 몸을 S자 형태로 만들지 못하거나 스스로 힘으로 유영없이 아래로 이동하는 개체는 중금속에 의해 영향을 받은 개체로 간주하였다. 이를 개체당 3회씩 반복 평가하여, 3회 모두 정상적인 유영을 하는 개체만을 정상적인 개체로 판단하였다.

3. 급성 독성 및 행동 독성 결과 분석

카드뮴, 납 및 수은에 대한 급성 독성 분석은 POLO-PC 프로그램을 이용한 반수치사농도 (LC₅₀) (LeOra Software 1987)를 이용하였다. 각 중금속 처리구 및 깔따구 종간 LC₅₀의 비교는 95%신뢰구간 값을 비교하여 평가하였다. 만약 두 LC₅₀값의 신뢰구간이 일부라도 겹치면 두 LC₅₀값은 동일한 것으로 간주하였다 (Robertson and Preisler 1991).

행동 독성 분석은 Haanstra *et al.* (1985)이 제시한 아래 공식을 이용하여 반수영향농도 (EC₅₀)값을 추정하였다.

$$Y = \frac{C}{1 + e^{(b(X-a))}} \quad (1)$$

여기서 Y는 각 처리 농도별 유영능력 (%)을 나타내며, C는 대조군에서의 유영능력 (%)이며, a는 EC₅₀ (mg L⁻¹)을 로그로 환산한 값이며, b는 기울기를 나타낸다. X는 처리 농도 (mg L⁻¹)를 로그로 환산한 값이다. 각 변수들은 비선형회귀식 (PROC NLIN, SAS Institute 1995)을 이

용하여 처리 중금속별로 추정하였다. 처리간 EC_{50} 값의 비교는 추정된 모수 a 의 95% 신뢰구간을 이용하였다.

결 과

1. 요시마쯔갈따구와 리파리갈따구의 급성 독성 비교

요시마쯔갈따구와 리파리갈따구의 중금속에 대한 LC_{50} 값은 납, 카드뮴, 수은 순으로 높았다(Table 2). 납과 카드뮴의 경우 처리 시간에 상관없이 요시마쯔갈따구의 LC_{50} 값이 리파리갈따구보다 항상 높았다. 납과 카드뮴 48시간 및 96시간 처리에서 요시마쯔갈따구와 리파리갈따구의 LC_{50} 비율은 48시간의 경우 각각 0.26과 0.63이었으며 96시간의 경우 0.36과 0.84이었다(Fig. 1A). 수은 처리구에서는 납과 카드뮴과는 반대로 요시마쯔갈따구의 LC_{50} 값이 리파리갈따구보다 항상 낮았으며 그 비율은 48시간 처리에서 4.49, 96시간 처리에서는 8.03이었

다. 이는 두 종의 갈따구가 중금속에 대한 급성독성 반응이 매우 상이함을 보여주는 결과이다.

노출시간에 따른 급성독성은 처리 시간에 상관없이 수은에서 가장 높았으며 다음으로는 카드뮴과 납 순서로 낮은 결과를 보였다(Table 2). 노출기간이 48시간에서 96시간으로 증가하면 급성독성이 모두 증가하였는데, 요시마쯔갈따구에 대한 급성독성이 리파리갈따구에 비해 더 높게 증가하였다. 납과 카드뮴 처리의 경우 처리 시간 증가에 따른 독성 증가율은 두 갈따구 중 모두 1.45에서 2.97범위에서 증가하였으나, 수은에서의 증가율은 요시마쯔갈따구(12.01)가 리파리갈따구(6.77)의 약 2배 이상이었다. 이 결과는 리파리갈따구에 비해 요시마쯔갈따구에 대한 수은의 독성이 노출기간에 특히 민감함을 나타내고 있다.

2. 요시마쯔갈따구와 리파리갈따구의 행동 독성 비교

요시마쯔갈따구와 리파리갈따구의 중금속에 대한 행

Table 2. Acute toxicity (LC_{50} expressed as $mg L^{-1}$) with its 95% confidence intervals of the two midge species, *Chironomus yoshimatsui* and *C. riparius*, upon exposures to lead, cadmium and mercury for 48 h and 96 h

Metal	<i>Chironomus yoshimatsui</i>			<i>Chironomus riparius</i>		
	LC_{50} , 48 h	LC_{50} , 96 h	Ratio ^a	LC_{50} , 48 h	LC_{50} , 96 h	Ratio
Lead	4433.7 (3850.9~5134.8)	2154.7 (1763.2~2539.3)	2.06	1147.0 (898.4~1695.6)	792.2 (662.8~910.7)	1.45
Cadmium	737.9 (675.1~823.9)	250.9 (178.6~379.1)	2.94	465.1 (323.2~603.2)	210.1 (143.8~265.2)	2.21
Mercury	3.63 (3.0~4.6)	0.30 (0.2~0.4)	12.10	16.3 (9.7~55.5)	2.4 (1.5~9.2)	6.77

^aRatio = LC_{50} at 48 h/ LC_{50} at 96 h.

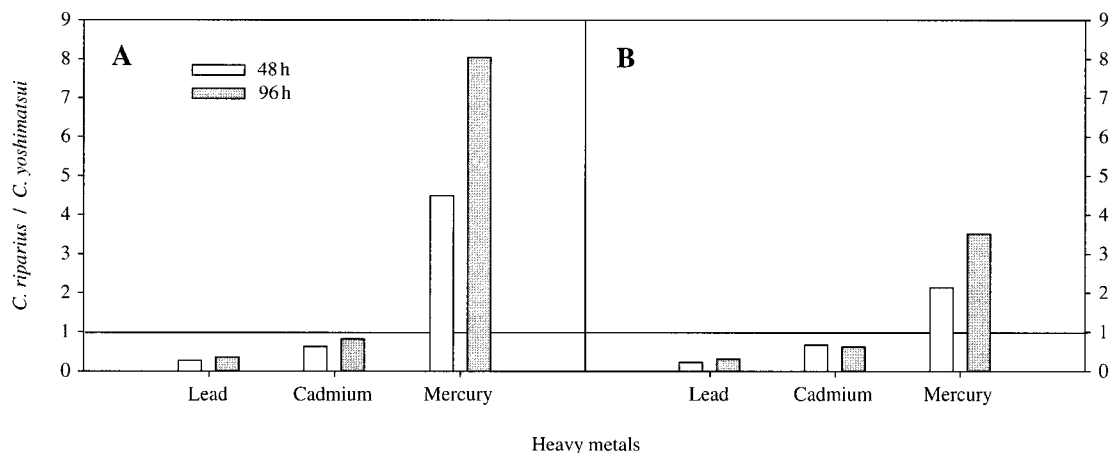


Fig. 1. Relative difference in sensitivities of acute (A; LC_{50}) and behavioral (B; EC_{50}) toxicities between *Chironomus yoshimatsui* and *C. riparius* 48 h and 96 h after exposure to lead, cadmium and mercury in water. The values greater than 1 denote that *C. yoshimatsui* is more sensitive than *C. riparius* to heavy metals.

Table 3. Behavioral toxicity^a (EC_{50} expressed as $mg L^{-1}$) with its 95% confidence intervals of the two midge species, *Chironomus yoshimatsui* and *C. riparius*, upon exposures to lead, cadmium and mercury for 48 h and 96 h

Metal	<i>Chironomus yoshimatsui</i>			<i>Chironomus riparius</i>		
	EC_{50} , 48 h	EC_{50} , 96 h	Ratio ^b	EC_{50} , 48 h	EC_{50} , 96 h	Ratio
Lead	3755.7 (3489.4~4042.4)	1895.1 (1711.5~2098.4)	1.98	686.2 (515.3~913.8)	612.4 (499.5~750.8)	1.12
Cadmium	447.1 (393.1~508.5)	201.2 (153.7~263.4)	2.22	304.0 (176.5~523.5)	130.4 (108.6~156.5)	2.33
Mercury	2.9 (2.7~3.3)	0.2 (0.1~0.2)	17.59	6.4 (9.7~8.3)	0.6 (0.2~1.1)	10.88

^aBehavioral toxicity of each species was assessed based on the response of swimming activity to various concentrations of heavy metals.

^bRatio = EC_{50} at 48 h/ EC_{50} at 96 h.

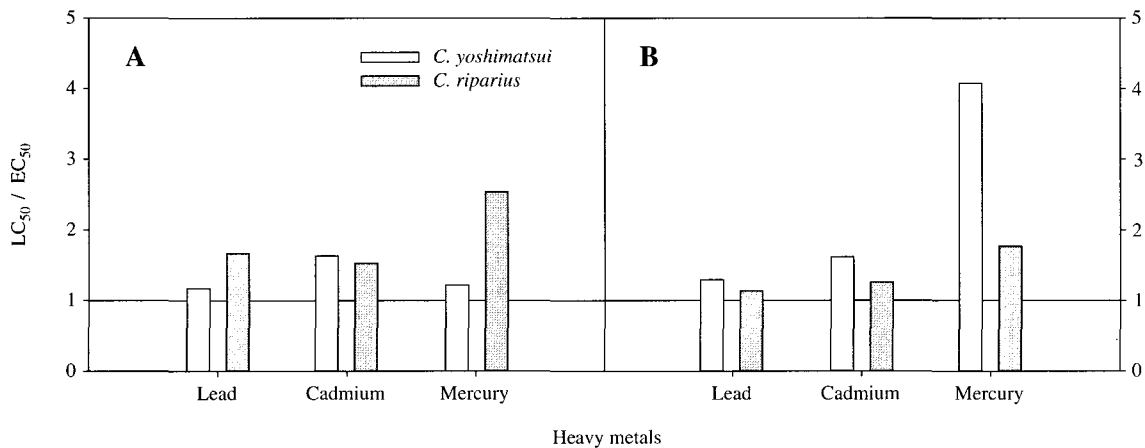


Fig. 2. Relative comparison of LC_{50} s and EC_{50} s between *Chironomus yoshimatsui* and *C. riparius* 48 h (A) and 96 h (B) after exposed to lead, cadmium and mercury in water. The values greater than 1 denote that EC_{50} s are more sensitive than LC_{50} s to heavy metals.

동독성은 농도에 따른 유영능력 차이를 이용하여 EC_{50} 값을 공식 (1)을 이용하여 분석하였다. 여기서 EC_{50} 값의 의미는 무처리구에 비하여 깔따구의 유영능력이 50% 감소되는 농도를 의미한다. Table 2에 제시한 급성독성과 유사하게 EC_{50} 값은 두 깔따구 종 모두 납, 카드뮴, 수은의 순서로 높았다 (Table 3). 중금속처리에 따른 두 종의 유영능력 저하는 납과 카드뮴에서는 리파리깔따구가 요시마쯔깔따구보다 낮은 농도에서 저해를 받았지만, 수은 처리구에서는 반대의 결과가 관찰되었다 (Fig. 2B). 노출 기간에 따른 납과 카드뮴이 행동독성에 미치는 영향도 급성독성과 유사하였으나, 수은의 경우 요시마쯔깔따구 (17.59배)의 증가율이 리파리깔따구 (10.88배)보다 높았다 (Table 3).

3. 중금속에 대한 급성 독성과 행동 독성의 차이

급성 독성을 나타내는 LC_{50} 값과 행동 독성을 나타내는 EC_{50} 값의 비율을 통해 endpoint에 따른 독성 평가의

차이를 살펴보았다 (Fig. 2). 각 중금속에 48시간 및 96시간 노출 후 LC_{50} 값과 EC_{50} 값의 비율이 모두 1보다 크게 나타난 것으로 보아 사망률 보다는 유영 능력의 감소를 endpoint로 설정하였을 때 더욱 민감한 독성 평가 결과를 얻을 수 있었다. 48시간 노출 후 나타나는 LC_{50} 값과 EC_{50} 값의 비율은 납과 수은에서 리파리깔따구가 더 크게 나타났으나, 96시간 노출 후 나타나는 LC_{50} 값과 EC_{50} 값의 비율은 세 가지 중금속 모두 요시마쯔깔따구가 더 큰 것으로 나타났다. 또한 세 가지 중금속 중 수은에서 LC_{50} 값과 EC_{50} 값의 비율이 가장 큰 것으로 나타났다.

고 찰

요시마쯔깔따구와 리파리깔따구는 모두 깔따구속 (*Chironomus*)에 속하므로 유연관계가 가까운 종으로서 OECD 가이드라인에서도 이 두 종이 모두 독성 실험에 추천되는 중임에도 불구하고 (OECD 2001) 중금속에 대

한 급성독성 및 유영능력의 반응은 매우 상이하였다 (Table 2와 3). 국내의 도시하천에 우점종인 요시마쯔갈따꾸는 실내 누대 사육종인 리파리갈따꾸보다 낚과 카드뮴에 대한 민감도가 낮았지만 수은의 경우는 민감도가 상대적으로 높았다. 이러한 차이를 보이는 이유로는 이들의 서식처가 지니는 특성과 두 종의 생리기작의 차이로 설명할 수 있을 것이다.

요시마쯔갈따꾸는 각종 오염물질이 지속적으로 유입되는 중랑천에서 (환경부 2003) 최근 채집하여 실내 사육을 시작한 종으로 오염물질에 대한 내성이 리파리갈따꾸에 비해 상대적으로 높을 수 있다. 2003년 환경부 수질현황에 따르면 중랑천 하천수에서 미량의 카드뮴만 (0.005 ppm)만 검출된 것으로 보고하였지만 (환경부 2003), 국내 여러 하천의 퇴적물내에는 일정 수준으로 중금속이 존재하는 것으로 보고되었다 (홍과 김 1996; 권 등 1997; 한 등 1997). 따라서 퇴적물과 하천수의 경계에 서식하고 있는 갈따꾸와 같은 저서 무척추동물은 지속적으로 중금속에 노출되어 있다고 생각할 수 있다. Groenendijk *et al.* (1999)에 따르면 중금속에 오염된 하천에 지속적으로 서식하고 있는 리파리갈따꾸 개체군은 오염되지 않은 하천의 개체군에 비해 탈피 기간 중에 축적되어 있던 금속을 제거하는 효율이 더욱 뛰어난 것으로 알려져 있다. 또한 Postma *et al.* (1996)에 의해 중금속에 적응한 리파리갈따꾸 개체군이 중금속에 오염되지 않은 개체군에 비해 카드뮴의 체내 배출 효율이 증가된다는 사실이 확인된 바 있다. 따라서 본 실험에서 리파리갈따꾸에 비해 요시마쯔갈따꾸의 카드뮴과 납에 대한 급성 독성이 더욱 둔감하게 나타난 이유는 요시마쯔갈따꾸를 채집한 장소인 중랑천 일대가 중금속을 포함한 각종 오염물질에 의해 지속적으로 영향을 받고 있기 때문에 이곳에 장기간 서식하고 있던 요시마쯔갈따꾸 개체군이 급성 독성 실험에서도 중금속의 노출에 더욱 둔감하게 반응했으리라는 가설을 세워볼 수 있었다. 이를 구명하기 위해서, 향후 생리 지표수준에서의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

수은에 대한 급성독성 및 행동독성은 요시마쯔갈따꾸가 리파리갈따꾸에 비해 더욱 민감하여 이를 서식처의 차이로 설명하기는 어렵다. 그러나 Milani *et al.* (2003)이 언급한 바와 같이 중금속 오염물질에 대한 생물체의 반응(사망 혹은 행동양상의 차이 등)은 실험동물에 따라, 오염물질의 종류에 따라 서로 다르게 나타날 수 있으므로 본 실험에 이용된 요시마쯔갈따꾸 개체군은 어떠한 생리적 및 유전적인 연유로 수은의 독성기작에 대하여 내성을 지니지 못했기 때문이라고 추정된다.

요시마쯔갈따꾸를 포함한 갈따꾸과의 많은 종에 관한

포괄적이고 다양한 자료들이 Miall (1895)에 의해 정리된 바 있으며, 최근에 와서는 Oliver (1971), Pinder (1986), 그리고 Armitage *et al.* (1995)에 의해 정리되었다. Taylor *et al.* (1993)에 의하면, 수서 생태계에서 중요한 기능적 역할을 하며 다양한 특징을 가지고 있는 갈따꾸과의 여러 종들 가운데 리파리갈따꾸가 실험실 내에서의 독성 실험에 용이한 특징을 지니는 종임을 시사한 바 있다. 하지만 본 실험에서 조사된 두 종의 갈따꾸의 LC₅₀값과 EC₅₀값을 환경부 중금속 수질오염 허용기준 (카드뮴 0.01 ppm, 납 0.1 ppm, 수은은 검출되어서는 안 됨, 환경부 2003)과 비교하면 갈따꾸 종의 중금속에 대한 민감도가 매우 낮아 중금속 오염조사를 위한 생물 지표종으로의 직접적인 이용은 어려운 실정이다. 갈따꾸의 독성물질에 대한 LC₅₀값은 조사자와 조사방법에 따라 매우 상이한 결과가 제시되었다. Williams *et al.* (1985)은 3령 리파리갈따꾸의 카드뮴에 대한 LC₅₀값은 300 ppm (유수상태, 96시간 노출, 12°C)으로 제시하여 본 연구결과와 유사하였으나, Milani *et al.* (2003)은 1령충 리파리갈따꾸의 카드뮴에 대한 독성을 0.02 ppm (정수상태, 96시간 노출, 23°C)로 제시하여 매우 상이하였다. Milani *et al.* (2003)은 무척추동물을 이용한 생물검정은 조사종의 연령 및 상태, 생물가용성 (bioavailability)에 미치는 여러 가지 요인 등의 차이로 인해 중간 직접적인 LC₅₀값의 비교는 어렵다고 보고하였다. 이러한 연구결과는 갈따꾸를 생물지표종으로 이용하기 위하여서 중금속 농도에 민감한 endpoint설정이 매우 중요한 과제를 시사하고 있다.

리파리갈따꾸의 경우 세대기간이 짧고 생식력이 뛰어나다는 특징 이외에 비교적 오랜 기간 실험실 내에서의 사육방법이 정립되어 실험실 내의 환경에 적응해 온 개체군이기 때문에 실험동물로 사용함에 있어서 어려움이 적다. 반면, 본 실험에 사용된 요시마쯔갈따꾸의 경우 실험실 내의 환경에 적응할 충분한 순화과정을 거치지 못했다는 점은 이들을 이용하여 독성 평가를 수행함에 있어서 한계를 지닌다. 즉, 충분한 순화 과정을 거치지 못한 개체군을 직접 특정 오염원에 대한 독성 평가에 이용한다면, 독성 평가에 영향을 줄 수 있는 환경 요인을 완벽히 배제했다고 할 수 없을 것이다. 따라서 국내 토착 수서 무척추동물을 실험동물로 이용하고자 할 때에는 무엇보다 먼저 실험실 내의 사육 방법을 정립시키고, 실험실 내의 환경에 적응할 수 있는 충분한 순화 기간을 거쳐야만 할 것이다.

본 실험에서 간단한 수중 노출 시험을 통해 얻은 세 가지 중금속에 대한 요시마쯔갈따꾸의 급성독성 및 행동독성 값은 차후에 저니와 물이 함께 존재하는 시스템

(sediment-water system)에서 중금속의 독성이 얼마나 차이가 나는지 비교해 볼 수 있는 기초 자료로 쓰일 수 있을 것이다. 또한 차후에 분자, 생화학적 및 개체군 수준에서 중금속이 요시마쯔갈따구의 발육, 산란 및 부화 등에 미치는 영향을 평가하고자 할 때에도 그 기초 자료로 쓰일 수 있을 것이다.

사 사

리파리갈따구를 분양해 주신 농업과학기술원 생태독성학 실험실 여러분께 감사의 뜻을 전합니다. 본 연구는 환경부 차세대핵심환경기술개발사업 “환경오염에 대한 생태영향 평가 적합 생물지표 개발” 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

적 요

한국산 요시마쯔갈따구(*Chironomus yoshimatsui*)의 세 가지 중금속(납, 카드뮴, 수은)에 대한 급성독성 및 행동독성을 외국 표준 실험 종인 리파리갈따구(*C. riparius*)와 비교하였다. 48시간 및 96시간 동안 수중 노출(water-only exposure)을 시킨 후 두 가지 실험종의 반수치사농도(LC₅₀) 및 갈따구의 유영 능력 감소에 영향을 주는 농도(EC₅₀)를 바탕으로 두 실험 종간의 차이를 살펴 보았다. 카드뮴과 납에 대하여는 요시마쯔갈따구가 리파리갈따구에 비해 둔감한 반응을 보였으며, 수은에 대하여는 요시마쯔갈따구가 더 민감한 반응을 나타냈다. 모든 실험에서 LC₅₀값과 EC₅₀값의 비율이 1보다 높게 나와 사망률보다는 유영 능력을 기준으로 실시한 급성독성 평가가 더욱 민감한 결과를 얻었다. 노출 기간에 따른 급성독성 차이를 살펴본 결과 노출 기간이 길수록 급성독성 및 행동독성도 높게 나타났다.

참 고 문 헌

권영택, 이찬원, 안병영, 윤지훈. 1997. 준설해역 오염방지를 위한 하천 퇴적물의 오염 특성 규명. 대한환경공학회 춘계발표회 논문집.

한영희, 이진환, 이순길. 1997. 한강하류의 환경학적 연구 III. 퇴적물. 한국육수학회. 39:299-305.

한국곤충학회 · 한국응용곤충학회. 1994. 한국곤충명집. 건국대학교 출판부. pp. 744

홍대일, 김성국, 1996. 금호강 퇴적물의 유독성 오염물질의

거동 특성. 환경과학논집. 낙동강환경연구소. 1:171-182.

Armitage PD, PS Cranston and LCV Pinder. 1995. The Chironomidae: the Biology and Ecology of non-Biting Midges. Chapman and Hall, London.

Eisler R. 2000. Handbook of Chemical Risk Assessment: Health Hazards to Humans, Plants, and Animals. Vol. 1-Metals. Lewis Publishers. Florida.

Groenendijk D, MHS Kraak and W Admiraal. 1999. Efficient shedding of accumulated metals during metamorphosis in metal-adapted populations of the midge *Chironomus riparius*. Environ. Toxicol. Chem. 18:1225-1231.

Haanstra L, P Doleman and JH Oude Voshaar. 1985. The use of sigmoidal response curves in soil ecotoxicological research. Plant soil 84:293-297.

LeOra Software. 1987. POLO-PC: A users guide to Probit or Logit analysis. LeOra Software, Berkeley, California.

Miall LC. 1895. The natural history of aquatic insects. Macmillan and Co. London. pp. 122-152.

Milani D, TB Reynoldson, U Borgmann and J Kolasa. 2003. The relative sensitivity of four benthic invertebrates to metals in spiked-sediment exposures and application to contaminated field sediment. Environ. Toxicol. Chem. 22:845-854.

OECD. 2001. OECD guidelines for testing of chemicals-proposal for a new guideline. 219: Sediment-Water chironomid toxicity test using spiked water.

Oliver DR. 1971. Life history of the Chironomidae. Annu. Rev. Entomol. 16:211-230.

Pinder LCV. 1986. Biology of freshwater Chironomidae. Annu. Rev. Entomol. 31:1-23.

Postma JF, P van Nugteren and MB Buckert-de Jong. 1996. Increased cadmium excretion in metal-adapted populations of the midge *Chironomus riparius* (Diptera). Environ. Toxicol. Chem. 15:332-339.

Robertson JL and HK Preisler. 1991. Pesticide bioassays with arthropods. CRC Press. Florida.

SAS Institute. 1995. SAS user's guide. SAS Institute. NC.

Sumi Y, T Suzuki, M Yamamura, S Hatakeyama, Y Sugaya and KT Suzuki. 1984. Histochemical staining of cadmium taken up by the midge larva, *Chironomus yoshimatsui* (Diptera, Chironomidae). Comp. Biochem. Physiol. A. 79:353-357.

Taylor EJ, SJ Blackwell, SJ Maund and D Pascoe. 1993. Effect of lindane on the life cycle of a freshwater macroinvertebrate *Chironomus riparius* Meigen (Insecta: Diptera). Arch. Environ. Contam. Toxicol. 24:145-150.

US Environmental Protection Agency. 1994. Short-term methods For estimating the chronic toxicity of effluents and receiving water to freshwater organisms. 3rd Edition. EPA/600/4-19/002. pp. 31-34.

- Williams KA, DWJ Green and D Pascoe. 1985. Studies on the acute toxicity of pollutants to freshwater macroinvertebrates. 1. Cadmium. Arch. Hydrobiol. 102:461-471.
- Yamamura M, KT Suzuki, S Hatakeyama and K Kubota. 1983. Tolerance to cadmium and cadmium-binding proteins induced in the midge larva, *Chironomus yoshimatsui* (Diptera, Chironomidae). Comp. Biochem. Physiol. C. 75: 21-24.
- Yoon IB and DJ Chun. 1992. Systematics of the genus *Chironomus* (Diptera: Chironomidae) in Korea. Entomol. Res. Bull. 18:1-14.

Manuscript Received: April 21, 2004

Revision Accepted: April 22, 2005

Responsible Editorial Member: Inn-Sil Kwak
(Hanyang Univ.)