

갈따구(*Chironomus riparius*)와 조각갈따구(*Glyptotendipes tokunagai*)에 대한 Buprofezin 급성독성 평가

박경훈, 방준형, 윤창영, 황소정, 김보선, 김주영, Vasamsetti Bala Murali Krishna, 전경미*

Assessment of Acute Toxicity of Buprofezin to *Chironomus riparius* and *Glyptotendipes tokunagai*

Kyeong-Hun Park , Jun-Hyoung Bang , Chang-Young Yoon , Sojeong Hwang , Bo-Seon Kim , Juyeong Kim ,
Bala Murali Krishna Vasamsetti and Kyongmi Chon

농촌진흥청 국립농업과학원 농산물안전성부 독성위해평가과

Toxicity and Risk Assessment Division, Department of Agro-food safety, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

* Correspondence: kmchon6939@korea.kr

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.21>

Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 223-232

Received: October 24, 2024

Revised: October 29, 2024

Accepted: October 30, 2024

Published: November 11, 2024

Online ISSN: 2233-4173

Print ISSN: 1225-3537



Check for
updates

© The Korean Society of Environmental Agriculture 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Buprofezin is a thiadiazine insecticide that functions as an insect growth regulator, exerting its insecticidal effect by inhibiting chitin biosynthesis. In Korea, it is commonly used as a pesticide to control planthoppers, greenhouse whiteflies, and scale insects on various crops. Despite its low water solubility, buprofezin has a high affinity for soil particles and can accumulate in sediments within aquatic environments, posing a potential risk to non-target aquatic species. This study evaluated the acute toxicity of buprofezin on two species: the OECD standard species *Chironomus riparius* and the native species *Glyptotendipes tokunagai*. Acute toxicity tests were conducted following OECD guideline 235, and median lethal concentrations (LC₅₀) were calculated using the US EPA probit analysis software. The results showed a 24-hour LC₅₀ of 1.587-2.560 mg/L and a 48-hour LC₅₀ of 0.471-1.421 mg/L for *C. riparius*, while *G. tokunagai* demonstrated higher sensitivity, with a 24-hour LC₅₀ of 0.679-1.143 mg/L and a 48-hour LC₅₀ of 0.536-0.936 mg/L. These findings suggest that both *C. riparius* and the native *G. tokunagai* are suitable species for assessing pesticide risk in aquatic environments.

Keywords: Acute toxicity, Buprofezin, *Chironomus riparius*, *Glyptotendipes tokunagai*, Risk assessment

서 언

농약은 작물 재배지, 농업 시스템, 도시공원 및 정원과 같은 인위적인 환경에서 널리 사용되고 있다. 농경지를 대상으로 한 연구에 따르면 농약은 생물 다양성에 지속적으로 영향을 미치는 것으로 확인되었다[1]. 농약은 유출수와 지하배수 등을 통해 살포 지역에서 수생환경으로 이동하여 비표적 생물에 접촉하는 것으로 알려

저 있다[2]. 또한, 살포된 농약은 수생환경에 노출될 경우, 퇴적토에 축적되어 저서생물에 부정적인 영향을 끼칠 수 있다.

Buprofezin은 [(Z)-2-tert-butylimino-3-isopropyl-5-phenyl-1,3,5-thiadiazinan-4-one] 치아디아진계 곤충 성장 조절 살충제로 곤충의 외골격을 구성하는 큐티클의 주요성분인 키틴 생합성을 저해하여 살충효과를 발휘한다[3]. Buprofezin은 수생생물에 독성이 있는 것으로 알려져 있으며, buprofezin에 대한 만성 및 아만성 노출은 세포조직의 조직학적 구조와 임상화학적 변화를 초래하여 간과 갑상선에 영향을 끼친다[4]. Buprofezin은 벼, 채소 및 과수 등 다양한 작물에 멸구류, 온실가루이, 깍지벌레 등의 방제 약제로 사용되고 있고, 산성 및 알칼리성 조건에서 모두 안정적이며, 열 안정성 및 광안정성을 가지고 있어 잔류물이 작물과 토양에 매우 오래 남을 수 있다[5]. 또한, 반감기가 길고 농업과 환경에서의 독성 효과에 관한 연구가 제한적이기 때문에 잔류물이 축적되지 않도록 신중하게 관리해야 한다[6]. 이와 같은 농약의 사용은 침출, 비산, 수생태계로 표면유출로 인해 지표적 생물 종에 영향을 끼칠 수 있으며, 다양한 농작물에 살포된 buprofezin의 잔류물이 채소, 과일 및 토양과 수생환경에서 검출되고 있다[7-9]. Buprofezin의 잔류물은 입, 피부, 호흡계를 통해 인체에 쉽게 유입되어 잠재적인 건강 위험을 초래할 수 있다[10].

갈따구(*Chironomus riparius*)는 파리목 갈따구에 속하며 OECD 표준 시험생물로 알려져 있으며, 하천 및 퇴적물에 서식하는 특성으로 인해 저서 환경을 반영할 수 있는 지표생물로 사용되고 있다[11]. 갈따구류는 유충 시기에는 하천수와 퇴적물 사이에서 유영 생활을 하다가 적당한 서식지를 찾으면 퇴적물에 정착하여 저서 생활을 하는 것으로 알려져 있다[12]. 또한, 갈따구류 곤충은 담수 환경에서 가장 풍부한 곤충그룹으로 다른 종의 먹이로 기능하기 때문에 환경적으로 중요한 역할을 하고 있다[13]. 수생 독성학에서 담수 모델 생물 중에서 *C. riparius*는 담수생태계에서 농약의 효과를 평가하기 위해 표준실험실 시험에서 널리 사용되는 생물 종 중 하나이다[14]. *C. riparius*는 수명주기가 짧고, 유충 단계는 퇴적물과 밀접하게 접촉하여 살며 실험실에서 쉽게 사육할 수 있는 장점이 있다[15]. 다만, *C. riparius*는 독성시험에 대한 표준시험 생물이지만, 국내에서는 분포가 제한적으로 수생 생태계의 특성을 반영하는 데 어려움이 있다. 조각갈따구(*Glyptotendipes tokunagai*)는 파리목 갈따구과에 속하며 국내 하천에 널리 분포하는 생물로 유기물이 많은 도심하천에 주로 서식하는 것으로 알려져 있으며, *C. riparius*와 같이 위험평가, 환경 모니터링 등 다양한 환경연구에 활용할 수 있다[16]. *C. riparius* 등을 포함한 갈따구과에 속하는 곤충은 퇴적토에 잔류할 수 있는 농약들의 독성 평가에 사용되고 있으며, 국내에서 특히 토양에 흡착, 잔류 가능성이 큰 농약을 대상으로 독성시험 영향평가 연구가 수행되고 있다[17-19].

작물 재배 및 병해충 방제를 위하여 사용되는 농약은 토양흡착계수(log Kow)가 3 이상인 경우 수계에 노출되면 토양입자에 흡착할 수 있고 퇴적물에 축적될 가능성이 크다[20]. Buprofezin은 무극성화합물로 토양흡착계수가 4.93으로 토양과 퇴적물에 높은 친화성을 가지고 있어 토양입자에 흡착되기 쉬우며, 수생태계에 노출될 경우 퇴적물에 축적되어 수서 생물에게 영향을 끼칠 수 있다[21]. 지금까지, buprofezin에 대한 환경생물의 독성 평가 연구는 물벼룩(*Daphnia magna*), 아프리카메기(*Clarias gariepinus*), 풀잠자리(*Chrysoperla rufilabris*), 이집트 숲모기(*Aedes aegypti*) 유충 등을 대상으로 수행된 바 있다[22-25]. 위와 같이, buprofezin이 농경지에 살포되면 수생생태계에 노출될 가능성이 크고, 수생환경에 축적될 위험이 있지만[26], 국내에서 buprofezin에 대한 수생생물에 관한 독성 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 수계환경 중에 노출될 가능성이 큰 buprofezin을 대상으로 수생생물에 대한 잠재적 효과를 연구하기 위한 자료로 활용하고자 모델 생물인 갈따구와 국내 토착종인 조각 갈따구를 사용하여 급성독성 영향평가를 수행하였다.

재료 및 방법

시험 물질

본 연구에 사용한 buprofezin은 Dr. Ehrenstorfer GmbH (Augsburg, Germany) 순도 99.85% 제품을 구매하였으며, 시험 용매로 사용한 acetone은 Merk (Germany) 순도 99.8% 제품을 구매하여 사용하였다. 갈따구 계대 및 급성독성시험에 사용한 M4 배지는 OECD test guideline 235에 따라 제조하였으며(Table 1), M4 배지 제조에 사용한 시약들은 Sigma-Aldrich (USA) 제품을 사용하였다.

Table 1. Characteristic of M4 medium to culture *Chironomus riparius* and *Glyptotendipes tokunagai*

No.	Stock Solution I (Single substance)	Amount (mg) made up to 1 L of deionised water	To prepare to combined stock solution (II), add the following amount of stock solution I to deionised water	Final concentration in test solutions (mg/L)
1	H ₃ BO ₃	57,190	1.0	2.86
2	MnCl ₂ · 4H ₂ O	7,210	1.0	0.361
3	LiCl	6,120	1.0	0.306
4	RbCl	1,420	1.0	0.071
5	SrCl ₂ · 6H ₂ O	3,040	1.0	0.152
6	NaBr	320	1.0	0.016
7	Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	1,260	1.0	0.063
8	CuCl ₂ · 2H ₂ O	335	1.0	0.017
9	ZnCl ₂	260	1.0	0.013
10	CoCl ₂ · 6H ₂ O	200	1.0	0.010
11	KI	65	1.0	0.0033
12	Na ₂ SeO ₃	43.8	1.0	0.0022
13	NH ₄ VO ₃	11.5	1.0	0.00058
14	Na ₂ FDTA · 2H ₂ O	5,000	20.0	2.5
15	FeSO ₄ · 7H ₂ O	1,991	20.0	1.0

Both Na₂FDTA and FeSO₄ solutions are prepared singly, poured together and autoclaved immediately. Separate stock solutions (I) of individual trace element are first prepared in deionized water of suitable purity. From these different stock solutions (I) a second single stock solution (II) is prepared, which contains all trace elements (combined solution).

No.	Macro-nutrient stock solution (Single substance)	Amount (mg) made up to 1 L of deionised water	Amount of macro stock solutions added to prepare medium M4 (ml/L)	Final concentration in test solution M4 (mg/L)
16	CaCl ₂ · 2H ₂ O	293,800	1.0	293.8
17	MgSO ₄ · 7H ₂ O	246,600	0.5	123.3
18	KCl	58,000	0.1	5.8
19	NaHCO ₃	64,800	1.0	64.8
20	NaSiO ₃ · 9H ₂ O	50,000	0.2	10.0
21	NaNO ₃	2,740	0.1	0.274
22	KH ₂ PO ₄	1,430	0.1	0.143
23	K ₂ HPO ₄	1,840	0.1	0.184

The combined vitamin stock solution is prepared by adding the three vitamins to 1 liter deionised water, as shown below and 0.1 ml of the combined vitamin stock solution are added to the final M4 medium shortly before use.

No.	Combined vitamin stock solution	Amount (mg) made up to 1 L of deionised water	Amount of macro stock solutions added to prepare medium M4 (ml/L)	Final concentration in test solution M4 (mg/L)
24	Thiamine hydrochloride	750	0.1	0.075
25	Cyanocobalamine (B ₁₂)	10	0.1	0.0010
26	Biotine	7.5	0.1	0.00075

The medium is aerated and stabilised.

시험생물 사육 및 환경조건

깔따구 (*Chironomus riparius*)

깔따구(*C. riparius*)는 서울시립대학교에서 분양받아 국립농업과학원의 독성·기능성 연구동 사육실에서 계대 사육 중인 종을 시험생물로 사용하였다. 시험생물은 플라스틱 사각 용기에 모래를 2cm 높이로 깔고, 그 위에 M4 배지를 5cm 높이로 부은 후 사각형 투명 아크릴 사육장(45(L) × 40(W) × 40(H) cm) 안에 사각 용기를 두고, 온도 조건 20±2°C, 광 조건 16시간, 암 조건 8시간 및 조도 500~1,000 Lux 조건으로 사육하였으며, 매일 곱게 갈아 부순 Tetra-min® (Melle, Germany)을 일정량 먹이로

Table 2. Breeding conditions for *C. riparius* and *G. tokunagai*

Parameters	Breeding conditions	
	<i>Chironomus riparius</i>	<i>Glyptotendipes tokunagai</i>
Cage (cm)	45 (L) × 40 (W) × 40 (H)	ø 12 × 14(H)
Temperature (°C)	20±2	25±2
Light-dark cycle	16 h light / 8 h dark	
Quantity of light (lux)	500 ~ 1000	
Feeding	Tetra-min® (Melle, Germany)	

공급하였다(Table 2). 사육 수조의 벽 표면에 붙은 알집을 채집하여 M4 배지가 들어있는 사각 페트리디쉬에서 배양하였으며, 부화 후 2일이 경과한 1령기 유충을 실험에 사용하였다.

조각칼따구(*Glyptotendipes tokunagai*)

조각칼따구(*G. tokunagai*)는 안전성평가연구소에서 분양받아 국립농업과학원의 독성·기능성 연구동 사육실에서 사육 중인 종을 시험생물로 사용하였다. 시험생물은 M4 배지와 모래(< 72 μ m)로 채워진 원통형 유리 수조에서, 온도 25±2°C, 광 조건 16시간, 암 조건 8시간 및 조도 500~1000 Lux 조건으로 사육하였으며, 매일 곱게 갈아 부순 Tetra-min® (Melle, Germany)을 일정량 먹이로 공급하였다(Table 2). 원통형 유리 수조 바닥에 가라앉은 알집을 채집하여 M4 배지가 들어 있는 사각 페트리디쉬에서 배양하였고, 부화 후 5일이 경과한 2령기 유충을 실험에 사용하였다.

급성독성시험

급성독성시험은 OECD guideline 235에 준하여 수행하였다. *C. riparius*는 부화 후 2일 된 1령기 유충을, *G. tokunagai*는 부화 후 5일 된 2령기 유충을 시험에 사용하였다. 시험 용수로 탈염소수를 사용하였으며, 시험구로는 시험물질처리구, 탈염소수 대조구 및 용매 대조구(acetone 100 μ L/L 이하)를 두었다. *C. riparius*와 *G. tokunagai*에 대한 buprofezin 시험농도는 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 mg/L로 설정하였다. 시험 용기는 100 mL 비커를 사용하였으며 시험농도별로 조제된 시험용액을 20 mL 채운 후, 각 처리군마다 4 반복구를 두고 5마리의 시험생물을 노출시켜 지수식으로 실험을 수행하였다(Table 3). 사육수의 교환 없이 시험생물은 24시간과 48시간 동안 관찰하였으며, 시험생물의 치사 여부는 유리막대로 저어주고 15초간 관찰하여 바닥에 가라앉아 움직이지 않거나 탈색된 개체 및 다른 유충의 먹이가 되어 시험 용기에서 사라진 개체를 치사된 것으로 판정하였다. 시험 기간 동안 먹이는 공급하지 않았고 광 조건 16시간, 암 조건 8시간 및 조도 500~1000 Lux로 유지하였으며 *C. riparius*와 *G. tokunagai*의 사육 온도는 각각 20±2°C와 25±2°C로 조절하였다. 시험 시작 후 24시간과 48시간에 유충의 치사 개체 수를 조사하였으며, 미국 EPA Probit analysis program (Ver. 1.5)을 이용하여 반수치사농도를 산출하였다.

Table 3. Test conditions of acute toxicity tests for *C. riparius* and *G. tokunagai*

Parameters	Test conditions	
	<i>Chironomus riparius</i>	<i>Glyptotendipes tokunagai</i>
Temperature (°C)	19.6±0.62	23.9±0.17
DO	7.72±0.21	6.63±0.45
pH	7.86±0.03	7.00±0.19
Life stage	1st instar	2nd instar
Quantity of light (lux)	500 ~ 1000	
Light-dark cycle	16 h light / 8 h dark	
Replication	four	
Test vessel	100 mL (inner 4.5 cm) beaker	
Solution volume (mL)	20	

결과 및 고찰

시험생물의 사육시스템 구축

본 연구에서는 buprofezin에 대한 *C. riparius*와 *G. tokunagai*의 급성독성시험을 수행하기 위하여 시험생물의 사육시스템을 구축하였다. *C. riparius* 사육시설은 Fig. 1(a)과 같이 사각형 투명한 아크릴 사육장 안에 M4 배지가 들어 있는 사각 용기를 배치하였으며, 아크릴 사육장의 양쪽에는 8등분으로 나누어진 실리콘 재질로 입구를 두었으며, 여닫이문을 통해 입구를 개폐할 수 있도록 조절하였다. *G. tokunagai* 사육시설은 두께 5 mm, 지름 12 cm, 높이 14 cm의 내열유리에 입자 크기가 <70 μm 이하 모래를 5 cm 높이로 투입하였으며, Fig. 1(b)와 같이 1.5×1.5 mm 크기의 PE 재질의 망을 씌워 시험생물이 정착할 수 있도록 하였다. 두 시험생물의 안정적인 계대 사육을 위하여 사육장은 1주일에 1회 이상 세척하였으며, 산소공급을 균일하게 하도록 air pump LP-10A (Jeongsu, Korea)를 이용하여 일정량의 산소를 공급하였다. 사육시스템 구축을 통해 *C. riparius*와 *G. tokunagai*를 실험실에서 2022년부터 2024년 11월 현재까지 안정적으로 계대 사육할 수 있었으며, 연중 두 종을 이용하여 농약에 의한 독성 평가가 가능하도록 시험 기반을 마련하였다.

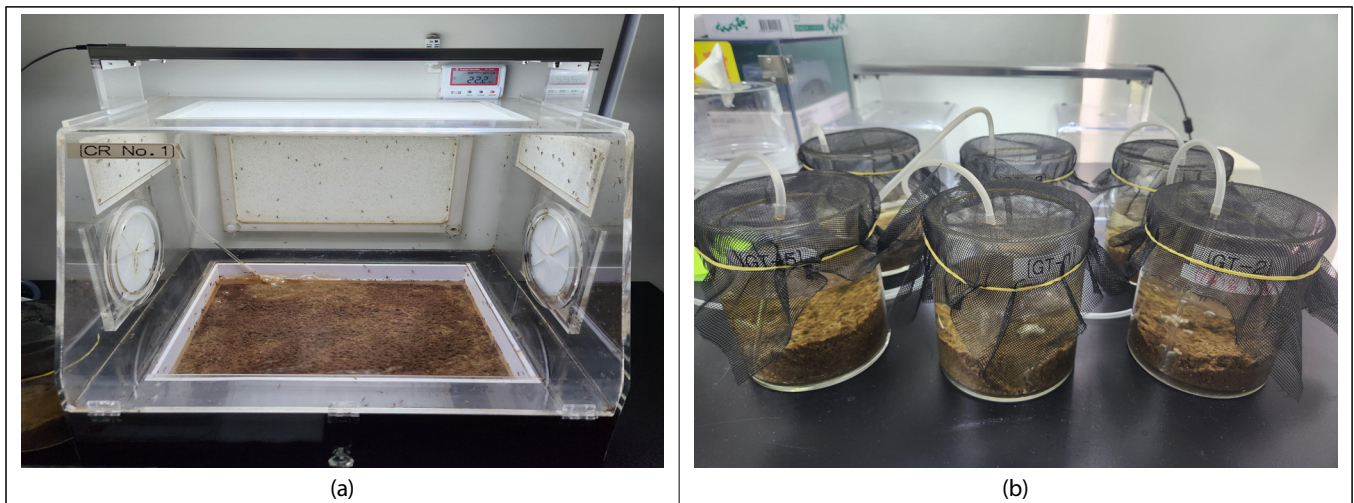


Fig. 1. Breeding device of *C. riparius* (a), *G. tokunagai* (b) used in this experiment.

깎따구(*C. riparius*)에 대한 급성독성시험

Buprofezin 처리 후 *C. riparius*의 움직임을 육안으로 관찰한 결과, 3.2 mg/L의 고농도에서 투입 직후 불규칙한 움직임이 관찰되었고, 24시간 후에는 일부 개체에서 체색이 짙어지고 몸이 움츠러들고 활동성이 급격하게 줄어드는 것이 확인되었으며, 48시간 경과 후에는 0.8 mg/L 농도 이상 처리구에서 체색이 진갈색으로 변하고, 몸이 경직되어 움직임이 없는 개체 수가 증가하는 것으로 관찰되었다(Table 4). 특히, 3.2 mg/L 처리구에서는 24시간 이후에 90% 이상 치사한 개체수가 확인되었으며 48시간 이후에는 모든 개체가 치사하는 것으로 관찰되었으며, 0.8 mg/L 처리구에서 24시간 후에 치사 개체수가 10%였으나, 48시간 이후에는 치사개체수가 50% 이상으로 급격하게 증가하는 양상을 보였다. 토양에 쉽게 흡착하고 잔류가능성이 높은 chlorfluazuron 등 6종의 농약을 대상으로 *C. riparius*에 대한 급성독성시험에서 고농도 처리군에서 시험약제 처리 직후에 몸을 비틀거나 불규칙한 움직임이 관찰되었으며, 24시간 경과 후에는 몸을 구부리거나 활동성이 거의 없어지며, 48시간 경과 후에는 치사개체는 몸이 직선 형태로 되며 체색이 진갈색으로 변하는 것으로 보고되었다[18]. 또한, phenylpyrazole계 살충제 fipronil을 *C. riparius*에 노출하였을 때, 가장 높은 농도인 25.6 $\mu\text{g/L}$ 에서 48시간 후에 시험 개체 수가 모두 치사하는 것으로 확인되었다[27]. Kim et al. (2009)의 연구[17]에 따르면, *C. riparius*를 thiocarbamate계 제초제인 molinate 25 mg/L, 50 mg/L의 농도에 노출하였을 때, 투입 직후 불규칙한 움직임이 관찰되었으며, 24시간 후에는 체색이 검붉은색으로 진해지고 몸이 움츠러 들며 활동성이 거의 없어지는 것으로 보고하였는데, 이러한 연구 결과는 본 실험에서 나타난 시험 종의 반응과 일치하였다.

Table 4. The symptoms and mortality of *C. riparius* in the acute toxicity test for buprofezin

Concentration (mg/L)	No.	Exposure period (hour)			
		24 h		48 h	
		Symptoms	Mortality (%)	Symptoms	Mortality (%)
Control	20	N (18), D (2)	10	N (17) D (3)	15
Solvent control	20	N (19), D (1)	5	N (12), D (8)	40
0.2	20	N (20), D (0)	0	N (17), D (3)	15
0.4	20	N (16), D (4)	20	N (13), D (7)	35
0.8	20	N (18), D (2)	10	N (8), D (12)	60
1.6	20	N (14), D (6)	30	N (9), D (11)	55
3.2	20	N (2), D (18)	90	N (0) D (20)	100

N=Normal, D=Dead

조각갈따구 (*G. tokunagai*)에 대한 급성독성시험

시험약제 처리 후 *G. tokunagai*의 반응을 확인한 결과, 0.8 mg/L 처리구에서 24시간에 50% 이상이 치사되는 것으로 나타났으며, 1.6 mg/L와 3.2 mg/L 처리구에서는 85% 이상 치사되는 것으로 확인되었다. 특히, 48시간 이후에는 1.6 mg/L 이상 처리구에서 90% 이상 치사되는 것으로 나타났다(Table 5). 시험약제에 노출된 *G. tokunagai*의 체색은 검붉은색으로 진해지는 것으로 관찰되어 대조구에서 보여지는 선명한 붉은 체색과 쉽게 구분할 수 있었으며, 24시간 후에는 몸이 경직되고 움직임이 없어지는 것으로 확인되었다. 3.2 mg/L의 고농도 처리군에서 일부 개체가 발견되지 않았는데 이것은 Kim et al. (2009)의 연구 결과[17]와 같이 다른 개체들에게 포식되었을 것으로 판단하였다. 또한, Bang et al. (2023)의 연구[19]에 따르면, 살충제 etofenprox와 fenprothrin을 *G. tokunagai* 2령기 유충에 노출하였을 때, 고농도 처리구에서 체색이 검붉은색으로 진해지며, 움직임이 없어진다고 보고하였는데, 이는 본 연구에서 관찰된 시험 종의 반응과 유사한 것으로 확인되었다.

Table 5. The symptoms and mortality of *G. tokunagai* in the acute toxicity test for buprofezin

Concentration (mg/L)	No.	Exposure period (hour)			
		24 h		48 h	
		Symptoms	Mortality (%)	Symptoms	Mortality (%)
Control	20	N (20), D (0)	0	N (20), D (0)	0
Solvent control	20	N (18), D (2)	10	N (18), D (2)	10
0.2	20	N (19), D (1)	5	N (18), D (2)	10
0.4	20	N (19), D (1)	5	N (19), D (1)	5
0.8	20	N (10), D (10)	50	N (5), D (15)	75
1.6	20	N (3), D (17)	85	N (2), D (18)	90
3.2	20	N (2), D (18)	90	N (0), D (20)	100

N=Normal, D=Dead

Buprofezin에 노출되고 24시간, 48시간 경과 후 처리 농도에 따른 *C. riparius*와 *G. tokunagai*의 치사율을 확인하였다. *C. riparius*에 대한 buprofezin의 급성독성시험 결과, 24시간과 48시간 LC₅₀이 각각 2.089 mg/L, 0.951 mg/L였고, *G. tokunagai*에 대한 buprofezin의 급성독성시험 결과, 24시간과 48시간 LC₅₀이 각각 0.902 mg/L, 0.747 mg/L였다(Table 6). Buprofezin에 대한 두 종의 독성 민감도를 비교하였을 때, 48시간에서 *G. tokunagai*가 *C. riparius*보다 독성 민감도가 약 1.3배가 더 높은 것으로 나타났다. Bang et al. (2023)의 연구[19]에 따르면 두 종에 대한 etofenprox의 독성 민감도는 48시간에서 *C. riparius*가 *G. tokunagai*보다 약 5.8배 더 높은 것으로 나타났으며, fenprothrin의 민감도는 *C. riparius*가 *G. tokunagai*보다 독성 민감도가 약 150배

높은 것으로 조사되었는데, 이러한 결과는 본 연구에서 나타난 두 시험 생물 종의 반응과는 다르게 확인되었다.

Table 6. Acute toxicity of buprofezin for *C. riparius* and *G. tokunagai*

Species	LC ₅₀ (mg/L) (95% C.L. *)		Reference
	24 h	48 h	
<i>Chironomus riparius</i>	2.089 (1.587 ~ 2.560)	0.951 (0.471 ~ 1.421)	Jahan et al. (2011)
<i>Glyptotendipes tokunagai</i>	0.902 (0.679 ~ 1.143)	0.747 (0.536 ~ 0.936)	
<i>Aedes aegypti</i> (larvae)	20.72	0.34	Marimuthu et al. (2013)
<i>Clarias gariepinus</i> (larvae)	5.702 (3.198 ~ 8.898)	4.642 (3.264 ~ 6.287)	
<i>Daphnia magna</i>	-	0.44	Liu et al. (2012)

C.L.: Confidence Limits

지금까지 보고된 buprofezin의 환경생물에 관한 독성 연구 결과를 살펴보면, 물벼룩(*D. magna*)의 48시간 LC₅₀이 0.44 mg/L [22], 이집트숲모기(*A. aegypti*)의 48시간 LC₅₀이 0.34 mg/L [25], 북아프리카동자개(*C. gariepinus*)의 48시간 LC₅₀이 4.642 mg/L [23]로 확인되었다. Buprofezin에 대한 *C. riparius*와 *G. tokunagai*의 48시간 LC₅₀이 각각 0.951 mg/L과 0.714 mg/L로 독성 민감도는 물벼룩과 이집트숲모기보다 낮은 것으로 조사되었다. Buprofezin은 북아프리카동자개에서 5 mg/L 이하의 농도에서 배아 및 유충의 발육에 영향을 끼치며 불규칙한 머리모양, 척추측만증, 심막 출혈 등의 증상을 나타내는 것으로 알려져 있다[23]. 또한, buprofezin은 황산니켈과의 산화 메커니즘을 통해 제브라피시(Zebrafish; *Danio rerio*)에서 배아 독성에 상승작용을 일으키는 것으로 보고되었다[28].

본 연구에서 *C. riparius*는 OECD guideline 235에 따라 1령기 유충을 대상으로 실험하였으나, *G. tokunagai*는 대조군에서 1령기 유충의 치사율이 높게 관찰되어, Bang et al. (2023)의 방법[19]과 같이 2령기 유충을 대상으로 독성시험을 수행하였다. 일반적으로 *Chironomus* 종은 독성 민감도가 발달 단계의 수준이 낮을수록 높아진다고 알려져 있다. *Chironomus* 종에 대한 landane의 령기별 독성 민감도를 조사한 결과, 48시간 LC₅₀ 값이 1령기가 2령기보다 1~3.6배가 높은 것으로 보고한 바 있다[29]. 또한, thiocarbamate계 제초제 molinate에 대한 *C. riparius*의 령기별 독성 평가 결과에 따르면, 1령 유충이 4령 유충보다 독성 민감도가 6.4배 높은 것으로 확인되었다[17]. 이러한 령기에 따른 독성반응의 차이는 생물체가 외래 유입 물질에 대한 성숙 단계별로 나타나는 독성반응 차이 현상으로 볼 수 있다[30].

Buprofezin은 서해와 동중국해 유역의 퇴적물 시료에서 0.003~0.02 mg/kg의 농도로[31], 메콩강 유역의 퇴적물 시료에서 최고 0.521 mg/kg의 농도로[26], 스페인 카탈루냐 지역의 하천수에서 채집한 시료의 14%에서 0.0023~0.0044 ug/L로 검출되었으며[32], 국내에서는 금강, 만경강과 동진강 하천수에서 0.02~0.09 ug/L 수준으로 보고된 바 있다[33]. 이처럼, 농작물에 살포된 buprofezin은 수계환경에 노출되어 하천수 및 퇴적물에 존재하는 것으로 확인되고 있다. 따라서 buprofezin에 대한 수생생물에 대한 영향을 더욱 정확히 파악하기 위하여 저서생물의 영향평가 등이 보완되어야 할 것으로 생각된다.

현재 농약의 수서생물 독성 평가를 위한 표준시험법은 실험실 내에서 사육하기 쉬운 어류(제브라피시, 잉어), 물벼룩을 대상으로 사용하고 있으나, 이들은 강, 호수, 하천 등에 일반적으로 서식하는 수서곤충의 생태적 특성을 반영하지 못하고 있다[17]. *C. riparius*는 OECD guideline 235에 따라 표준시험 종으로 알려졌지만, 국내의 수서 생태계의 특성을 충분히 반영하고 있지 않아 국내 강, 하천 등의 생태계를 반영하는 생물 종의 확대가 필요하다. 또한, 토양 잔류성이 길고 퇴적 가능성이 큰 농약들은 수계환경에 노출되면 퇴적토에 축적되어 수서생물에 영향을 미칠 수 있으므로 수서생물에 미치는 영향을 지속적으로 평가하는 것이 중요하다. 국내에서 *G. tokunagai*는 은 나노 입자의 독성 평가[34] 및 정수장 내 소독제에 이용되는 오존 노출 평가 연구[35]에 활용되어왔다. 본 연구 결과 국내 하천에 서식하는 *G. tokunagai*는 표준시험으로 사용되는 *C. riparius*와 같이 농약의 수서생물 독성 평가에 활용될 수 있는 것으로 확인되었다. 앞으로 농약에 의한 수서생물의 영향을 정확하게 파악하고 국내 농업생태계를 반영할 수 있도록 농약 등록 시 갈따구 종 등의 평가가 확대되어야 할 것으로 생각된다.

결론

Buprofezin은 치아디아진계 곤충성장 조절제 살충제로 키틴 생합성을 저해하여 살충효과를 나타내며, 국내에서 다양한 작물의 멸구류, 온실가루이, 깍지벌레를 방제하는 데 사용되고 있다. Buprofezin은 낮은 수용성에도 불구하고 토양입자에 대한 친화력이 높고 수생환경 내 퇴적물에 축적될 수 있어 비표적 수생생물에 잠재적 위험이 있다. 본 연구는 OECD 표준 시험종인 *Chironomus riparius*와 국내 토착 종인 *Glyptotendipes tokunagai*에 대한 buprofezin의 급성독성을 비교하였다. Buprofezin의 *C. riparius*와 *G. tokunagai*에 대한 급성독성시험은 OECD guideline 235에 준하여 수행하였으며, 반수치사농도는 미국 EPA probit 프로그램을 사용하여 분석하였다. 그 결과 *C. riparius*의 24시간 LC₅₀이 1.587~2.560 mg/L, 48시간 LC₅₀이 1.587~2.560 mg/L로 나타났으며, *G. tokunagai*는 24시간 LC₅₀이 0.679~1.143 mg/L, 48시간 LC₅₀이 0.536~0.936 mg/L로 더 높은 민감도를 보였다. 이러한 결과는 *C. riparius*와 국내 토착 종인 *G. tokunagai* 모두 수생환경에서 농약 위해성 평가를 분석하는 데 활용할 수 있다는 것을 의미한다.

Data Availability: All data are available in the main text or in the Supplementary Information.

Author Contributions: K-H. Park conceived and designed the research; wrote the first manuscript, J-H. B. led the exposure experiment, collected the data; C-Y. Y. and S. H. performed the statistical analysis, prepared the sample; B-S. K. and J. K. prepared reagents, breed test organism; B. M. K. V. revised the manuscript, performed the off-site consequence analysis; K. C. provide critical feedback, finally revised the manuscript, led the research.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This study was funded by a research program (PJ01579703) of Rural Development Administration (RDA), Republic of Korea.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.21>

Correspondence and requests for materials should be addressed to Kyongmi Chon.

Peer review information Korean Journal of Environmental Agriculture thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Reprints and permissions information is available at <http://www.korseaj.org>

References

- Liess M, Schulz R, Liess MHD, Rother B, Kreuzig R (1999) Determination of insecticide contamination in agricultural headwater streams. *Water Research*, 33(1), 239-247. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00174-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00174-2).
- Brown CD, Van Beinum W (2009) Pesticide transport via sub-surface drains in Europe. *Environmental Pollution*, 157(12), 3314-3324. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.06.029>.
- Nauen R, Slaer R, Sparks TC, Elbert A, McCaffery A (2019) IRAC: Insecticide resistance and mode-of-action classification of insecticides. *Modern Crop Protection Compounds*, 3, 995-1012. <https://doi.org/10.1002/9783527699261.ch28>.
- European Food Safety Authority (EFSA) (2008) Conclusion regarding the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance buprofezin. *EFSA Journal*, 6(7), 1-77. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2008.128r>.
- Tomlin CD (2009) *The Pesticide Manual: A World Compendium*, 15th edition. British Crop Protection Council (BCPC), Alton, Hampshire, UK.
- Kanungo D, Solecki R (2011) Pesticide residues in food toxicological evaluations. In *Joint Meeting of the FAO panel of Experts on Pesticide Residues in Food and the Environment and the WHO Core Assessment Group on Pesticide Residues*, 2, 3-92.
- Ibrahim MS, Al-Magboul KM, Kanal MM (2001) Voltammetric determination of the insecticide buprofezin in soil and water. *Analytica Chimica Acta*, 432(1), 21-26. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)01352-0](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)01352-0).

8. Sun XC, Xun JF, Dong GL (2009) Pesticide residues exceeding about 24 kinds of exports vegetables of China. *Agricultural Science*, 25(8), 262-265.
9. Valverde-Garcia A, Gonzalez-Pradas E, Aguilera-del Real A (1993) Analysis of buprofezin residues in vegetables. Application to the degradation study on eggplant grown in a greenhouse. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 41(12), 2319-2323. <https://doi.org/10.1021/jf00036a019>.
10. Ji X, Ku T, Zhu N, Ning X, Wei W, Li G, Sang N (2016) Potential hepatic toxicity of buprofezin at sublethal concentrations: ROS-mediated conversion of energy metabolism. *Journal of Hazardous Materials*, 320, 176-186. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.027>.
11. Ibrahim H, Kheir R, Helmi S, Lewis J, Crane M (1998) Effects organophosphorus, carbamate, pyrethroid and organochlorine pesticides and a heavy metal on survival and cholinesterase activity of *Chironomus riparius* Meigen. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 60(3), 448-455.
13. Ristola T (2000) Assessment of sediment toxicity using the midge, *Chironomus riparius* (Diptera: Chironomidae). University of Joensuu, Finland.
13. Armitage PD, Cranston PS, Pinder LCV (1995) *The Chironomidae: Biology and Ecology of Non-biting Midges*. Chapman Hall, London, UK.
14. Pérez J, Monteiro MS, Quintaneiro C, Soares AM, Loureiro S (2013) Characterization of cholinesterases in *Chironomus riparius* and the effects of three herbicides on chlorpyrifos toxicity, *Aquatic Toxicology*, 144, 296-306. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2013.10.014>.
15. Faria MS, Nogueira AJA, Soares AMVM (2007) The use of *Chironomus riparius* larvae to assess effects of pesticides from rice fields in adjacent freshwater ecosystems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 67(2), 218-226. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2006.11.018>.
16. Baek MJ, Yoon TJ, Bae YJ (2012) Development of *Glyptotendipes tokunagai* (Diptera: Chironomidae) under different temperature conditions. *Environmental Entomology*, 41(4), 950-958. <https://doi.org/10.1603/EN11286>.
17. Kim BS, Park YK, Hong SS, Yang YJ, Park KH, Jeong MH, Kim SR, Park KH, Yeh WH et al. (2009) Comparison of acute toxicity of molinate on two aquatic insect, *Chironomus riparius* and *Cloeon dipterum* in different larval stages. *Korean Journal of Pesticide Science*, 13(4), 256-261.
18. Park JE, Hwang EJ, Chang HR (2017) Sediment toxicity assessment of pesticides using *Chironomus riparius* acute and chronic effect. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 36(2), 80-86. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2017.36.2.18>.
19. Bang JH, Yoon CY, Cheon K, Kim BS, Kim J, Oh JA, Na YE (2023) Comparison of acute toxicity of etofenprox and fenprothrin to *Chironomus riparius* and *Glyptotendipes tokunagai*. *Korean Journal of Pesticide Science*, 27(2), 102-109. <https://doi.org/10.7585/kjps.2023.27.2.102>.
20. Zhou JL, Rowland SL (1997) Evaluation of the interactions between hydrophobic organic pollutants and suspended particles in estuarine waters, *Water Research*, 31(7), 1708-1718. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00323-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00323-5).
21. MacBean C (2012). *The Pesticide Manual*. 16th Edition, British Crop Protection Council (BCPC), Alton, Hampshire, UK.
22. Liu Y, Qi S, Zhang W, Li X, Qiu L, Wang C (2012). Acute and chronic toxicity of buprofezin on *Daphnia magna* and the recovery evaluation. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 89, 966-969. <https://doi.org/10.1007/s00128-012-0802-9>.
23. Marimuthu K, Muthu N, Xavier R, Arockiaraj J, Rahman MA, Subramaniam S (2013) Toxicity of buprofezin on the survival of embryo and larvae of African catfish, *Clarias gariepinus* Bloch). *PloS One*, 8(10), e75545. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075545>.
24. Liu X, Chen TY (2000) Effects of the chitin synthesis inhibitor buprofezin on survival and development of immatures of *Chrysoperla rufilabris* (Neuroptera: Chrysopidae). *Journal of Economic Entomology*, 93(2), 234-239. <https://doi.org/10.1603/0022-0493-93.2.234>.
25. Janhan N, Razaq J, Jan A (2011) Laboratory evaluation of chitin synthesis inhibitors (Diffubenzuron and Buprofezin) against *Aedes aegypti* Larvae from lahore, Pakistan. *Pakistan Journal of Zoology*, 43(6), 1079-1084.
26. Van Toan P, Sebesvari Z, Blasing M, Rosendahl I, Renaud FG (2013) Pesticide management and their residues in sediment and surface and drinking water in the Mekong Delta, Vietnam. *Science of the Total Environment*, 452, 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.026>.
27. Monteiro HR, Pestana JL, Novais SC, Leston S, Ramos F, Soares AM, Devreese B, Leomos MF (2019) Assessment of fipronil toxicity to the freshwater midge *Chironomus riparius*: Molecular, biochemical, and organismal responses. *Aquatic Toxicology*, 216, 105292. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.105292>.
28. Ku T, Yan W, Jia W, Yun Y, Zhu N, Li G, Sang N (2015) Characterization of synergistic embryotoxicity of nickel and buprofezin in zebrafish. *Environmental Science and Technology*, 49(7), 4600-4608. <https://doi.org/10.1021/es506293t>.
29. Weltje L, Ruli H, Heimbach F, Wheeler J, Vervliet-Scheebaum M, Hamer M (2010) The chironomid acute toxicity test: Development of a new test system. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 6(2), 301-307. https://doi.org/10.1897/IEAM_2009-069.1.
30. Hodgson E, Smart RC (2001) *Introduction to Biochemical Toxicology*. 3rd edition, John Wiley & Sons, New York, NY, USA.
31. Wang L, Zheng M, Xu H, Hua Y, Liu A, Li Y, Chen X (2022) Fate and ecological risks of current-use pesticides in seawater and sediment of the Yellow Sea and East China Sea. *Environmental Research*, 207, 112673. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112673>.
32. Masiá A, Campo J, Navarro-Ortega A, Barceló D, Picó Y (2015) Pesticide monitoring in the basin of Llobregat River (Catalonia, Spain) and comparison with historical data. *Science of the Total Environment*, 503, 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06>.

095.

33. Kim C, Lee H, Ihm Y, Son K (2017) Temporal patterns of pesticide residues in the Keum, Mangyung and Dongjin rivers in 2002. Korean Journal of Environmental Agriculture, 36(4), 230-240. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2017.36.4.38>.
34. Choi S, Kim S, Bae YJ, Park JW, Jung J (2015) Size-dependent toxicity of silver nanoparticles to *Glyptotendipes tokunagai*. Environmental Health and Toxicology, 30, e2015003. <https://doi.org/10.5620/eh.t.e2015003>.
35. Kim WS, Choi B, Kim MK, Chae SH, Kwak IS (2020) Expression of heat shock protein 70 gene and body color changes in non-biting midge larvae (*Glyptotendipes tokunagai*) effected by O₃ treatment. Korean Journal of Ecology and Environment, 53(4), 324-330. <https://doi.org/10.11614/KSL.2020.53.4.324>.