

수변 서식 톡토기 *Yuukianura szeptyckii* (Neanuridae)에 대한 카드뮴과 구리 독성 연구

김하경[†], 신지민[†], 정도현, 정주영, 김용은¹, 위 준¹, 조기종², 이윤식*

부산대학교 생물교육과, ¹고려대학교 오정리질리언스연구원, ²고려대학교 환경생태공학부

Toxicity study of cadmium and copper on riparian collembolan species *Yuukianura szeptyckii* (Neanuridae)

Hageong Kim[†], Jimin Shin[†], Dohyeon Jeong, Juyeong Jeong, Yongeun Kim¹, June Wee¹, Kijong Cho² and Yun-Sik Lee*

Department of Biology Education, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

¹Ojeong Resilience Institute, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

²Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

Contribution to Environmental Biology

- Compared to existing standard species, *Y. szeptyckii* is more sensitive to heavy metals and is a more suitable standard species for evaluating ecotoxicity in high-humidity environments.
- This study uncovers the significant toxicological impact of these metals on *Y. szeptyckii* and thus proposes its use as a bioindicator in riparian ecosystem health assessments.

*Corresponding author

Yun-Sik Lee

Tel. 051-510-2791

E-mail. yunsiklee@pusan.ac.kr

[†] These authors contributed equally to this work.

Received: 5 February 2024

Revised: 14 February 2024

Revision accepted: 6 March 2024

Abstract: The ecosystem provides a diverse array of environmental conditions for organisms, and only those that are capable of successfully adapting to these conditions within their habitats can endure, thrive, and proliferate. Further, the environmental conditions within these habitats can significantly affect the bioavailability of chemicals that are introduced therein, thus resulting in varied adverse impacts on the organisms. The present study aims to evaluate the sensitivity of *Yuukianura szeptyckii* - a species adapted to riparian - to heavy metals following ISO guideline 11276, with the objective of assessing its potential as an indicator species for ecotoxicological evaluations in riparian habitats. The findings revealed that cadmium and copper both had significant toxic effects depending on their concentrations. For cadmium, the LC₅₀ was 280 mg kg⁻¹, EC₅₀ was 66 mg kg⁻¹, and NOEC and LOEC were 25 and 50 mg kg⁻¹, respectively. For copper, the LC₅₀ was 911 mg kg⁻¹, EC₅₀ was 151 mg kg⁻¹, and LOEC was 50 mg kg⁻¹. Comparative analysis with previous results for the international standard species *Folsomia candida* and the domestic standard species *Allonychiurus kimi* indicated that *Y. szeptyckii* exhibited even greater sensitivity to toxicity values. The adverse effects on survival and reproduction were closely associated with the influx concentration of heavy metals in their bodies. Altogether, the results suggest that *Y. szeptyckii* is a sensitive species for ecotoxicological assessments in riparian habitats, thus making it suitable as an indicator species, particularly in riparian ecosystems that are characterized by relatively high humidity conditions.

Keywords: ecotoxicity test, riparian ecosystem, collembolan reproduction test, heavy metal, indicator species

1. 서 론

생태계 내에서의 인위적인 화학물질이 생물에게 미치는 독성 영향은 서식처의 무생물적, 생물적 환경조건에 따라 달라진다(Nogales *et al.* 2011; Lee *et al.* 2021). 현재까지 많은 연구에서 토양 생태계 내의 먹이사슬 내에서 중요한 생태적 역할을 수행하는 지표종들의 생태적 적합도(ecological fitness)를 이용하여 이를 평가해 왔다(Son *et al.* 2017; Lee *et al.* 2018, 2019a, 2019b, 2020, 2021; Wee *et al.* 2021a; Kim *et al.* 2022). 생태독성분야의 지표종들의 경우 체내에 유입되는 독성물질의 양에 따라 자신들의 성장(growth), 생존(survival), 번식(reproduction)에 부정적인 영향을 받으며, 이러한 생활사(life history)에 유의한 영향을 받는 농도를 통하여, 생태계에 악영향을 미칠 수 있는 독성물질의 농도를 토대로 독성값(toxicity value)을 추정한다. 최근의 연구 결과들은 온도, 토양수분, 토성과 같은 무생물적 요소에 의해 독성물질의 생물유효도(bioavailability)가 변하게 됨으로써 농도 기반의 독성값이 크게 변화한다는 것을 제시하고 있다(Henis 1999; Kebede *et al.* 2021). 이러한 결과는 환경의 무생물적 요소가 서식처마다 다양하므로, 다양한 서식처에서 다양한 생태적 독성값을 산출할 필요성이 있음을 보여준다.

International standardize organization (ISO)에서는 1999년도에 톡토기(Collembola)를 이용하여 토양 오염물질에 대한 토양의 질을 평가하는 가이드라인(ISO guideline 11267)을 처음으로 내놓았으며(ISO 1999), 이들은 토양 내 먹이사슬에서 미생물의 포식자, 분해자로서 중요한 생태적 지위를 차지하는 톡토기를 이용한 독성값을 도출하고 이를 통하여 생태계에 악영향을 미칠 수 있는 물질의 농도를 추정하고자 하였다. 이후 2014년 2023년에 두 번의 개정이 되었으며, 장님마디톡토기(*Folsomia candida*)를 표준종으로 시작되어진 이 가이드라인은 현재 13개의 대체 표준종을 포함하여 14개의 종을 이용한 토양생태독성평가를 수행하는 실험 기준과 방법을 제시하고 있다(ISO 2023). 이 표준종들은 모두 각기 다른 지리적분포(geographic distribution)와 생태(ecology)를 가지며 다양한 지역의 독성평가에 사용되고 있다.

유유키톡토기(*Yuukianura szeptykii*)는 ISO guideline 11267이 2023년에 개정되면서 대체 표준종으로 등록되었다(ISO 2023). 이 종은 한국, 일본, 중국에 분포하는 Hemi-daphnic 종으로 주로 물과 맞닿은 수변에서 발견되는 종이

다. 현재까지 전 세계적으로는 장님마디톡토기(*F. candida*)가, 대한민국에서는 김어리톡토기(*Allonychiurus kimi*)가 생태독성평가를 위한 가장 대표적인 종으로 이용되어 왔다(Lee *et al.* 2019a; Wee *et al.* 2021a). 이들을 이용한 생물검정은 오염된 토양의 생태적 독성평가에 민감하여 유용하지만 이들은 수변에 서식하지 않는다. 수변은 토양과 수생태계가 맞닿는 곳으로 이 토양 생태계에서는 보통의 산림이나 농경지와 같은 토양 생태계와 서로 다른 특성이 나타난다(Mohan *et al.* 2022). 수변 생태계는 토양의 고습함을 특징으로 하며, 그 구성과 기능 면에서 독특한 특성을 가지고 있어 기존의 일반적인 생태계 유형인 수생태계와 토양 생태계와는 구분되므로 생태 위험 평가에 대한 맞춤형 접근이 필요하다. *Y. szeptykii*는 곤충성장조절제(insect growth regulator) 계열 살충제의 독성평가에 매우 민감하고 좋은 독성평가종으로 간주되고 있으나 다른 독성물질에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다(Lee *et al.* 2018, 2019a, 2020).

인간 산업활동으로 인한 토양오염은 심각한 환경적, 사회적, 경제적 결과를 가져오는 전 세계적인 주요문제로 대두되고 있다(Singha and Chatterjee 2022). 이와 관련하여 토양 생태계 내의 문제가 되는 독성물질들 중 가장 중요한 물질인 중금속은 물, 토양, 수변 등 환경의 광범위한 범위를 오염시키는데, 생태계의 파괴뿐만 아니라 먹이사슬을 통한 중금속의 축적은 인간에게까지 영향을 미칠 수 있으므로 그 독성을 평가하는 일은 대단히 중요하다(Koptsik and Koptsik 2022). 토양 내 중금속 중 카드뮴, 구리 등의 중금속은 동식물의 구성요소로서 자연적으로는 낮은 농도로 존재하지만, 급격한 산업발전의 영향으로 인해 과도하게 배출되어 생태계에서 그 양이 급증하고 있으며 생태계에 존재하는 생물들에게 악영향을 미치고 있다(Wang *et al.* 2015; Rahim *et al.* 2022).

본 연구의 목적은 일반적인 표준 생태독성 연구에서 사용되는 표준종들과 다른 환경에 서식하는 *Y. szeptykii*가 중금속에 대해 얼마나 민감한지를 조사함으로써 이 종이 수변 환경에서의 중금속 생태독성평가에 적합한 표준 생물로 사용될 수 있는 가능성을 검토하는 것이다. 본 연구에서는 *Y. szeptykii*의 카드뮴과 구리의 독성값을 구하고 이때의 체내 축적량을 제시하였다. 이후 표준종인 *F. candida*와 *A. kimi*와 비교함으로써 수변 환경에서 중금속의 토양 오염의 생태학적 영향을 이해하는 데 기여하고자 한다.

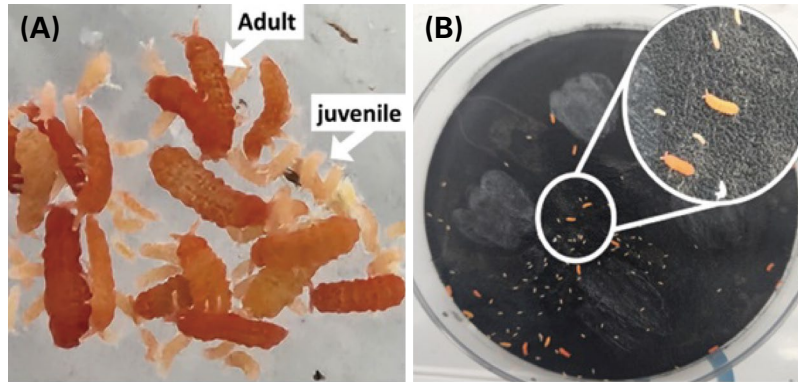


Fig. 1. Pictures of *Yuukianura szeptyckii*. Adults and juveniles of *Y. szeptyckii* on the water (A) and on a plate with charcoal as substrate (B).

2. 재료 및 방법

2.1. 실험생물

실험에 사용된 유유키토기(*Yuukianura szeptyckii*)는 2006년 경기도 안산의 하천변에서 채집된 후(Lee *et al.* 2016), 고려대학교의 생태독성학 실험실에서 누대 사육되어져 왔으며 현재 고려대학교의 생태독성학 실험실과 부산대학교 환경생태학 실험실에서 유지되고 있다(Fig. 1, <https://sites.google.com/view/ee-lab>, yunsiklee@pusan.ac.kr, specimen accession number: PNUCOL002)(Wee *et al.* 2021b). 이 종은 유충일 때 연한 붉은색을 보이다가 성충이 되면 진한 분홍색을 나타내며 성충은 1.5에서 2 mm 크기로 자란다. 사육조건은 Lee *et al.* (2016)의 방법을 적용하여 진행되었다. 간략하게 설명하면, 건조중량 기준 1 mm 크기로 분쇄된 10% Sphagnum peat, 20% kaolinite clay 및 70%의 모래를 균등하게 혼합하여 인공토양을 제조하였다. 토양 산도는 탄산칼슘을 이용하여 6.0 ± 0.5 로 조절하였다(OECD 1984). 제조된 6g의 OECD 인공토양과 0.5 g의 증류수를 넣은 페트리접시(지름 60 mm, 높이 15 mm)에서 사육을 진행하였으며, 먹이로 매주 Brewer's yeast를 제공하였다. 이때, 사육환경은 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 항온기에서 암조건을 유지해 주었다. 실험에 필요한 동일한 연령의 성충을 얻기 위하여, 매주 동일한 시점에 성충이 낳은 알을 따로 선별하여 새로운 배지에 옮겨주었으며, 부화 후 28~30일이 지난 성충을 실험에 이용하였다(Lee *et al.* 2020).

2.2. 시험물질

카드뮴과 구리의 노출을 위해서 Cadmium chloride

hemi (pentahydrate) (Sigma, St. Louis, USA) 및 Copper (II) chloride dihydrate (Sigma, St. Louis, USA)는 실험에 사용된 주요 재료로 사용되었다. 노출은 토양 내에서 60% 수분 보유 용량(water holding capacity, WHC)에서 수행되므로, 최고 농도에 해당하는 stock 용액은 실험의 목표 농도에 맞게 증류수로 희석되었다. 이때 만성독성평가를 위한 토양 내의 카드뮴의 농도가 각각 25, 50, 100, 200, 400 mg kg^{-1} soil dry wt.이며, 구리의 농도는 각각 50, 100, 200, 400, 800 mg kg^{-1} dry wt.가 되도록 제조하였다.

2.3. *Yuukianura szeptyckii*를 이용한 생물검정

*Y. szeptyckii*를 이용한 생물검정은 ISO 11267 가이드 라인을 이용하여 수행되었다(ISO 2023). 시험물질이 대상 성충의 장기간 사망과 산란 수에 미치는 영향을 평가하기 위한 28일 만성독성평가를 진행하였다. 생물검정은 OECD 인공토양에서 이루어졌으며 토양의 구성은 *Y. szeptyckii*의 사육 시 사용된 토양과 동일하다. 토양 30g에 각 농도의 미리 준비된 시험용액을 첨가한 처리군과 3차 증류수만을 첨가한 대조군을 균일하게 섞어 주었으며 이때의 토양의 수분 함량은 토양용수량(WHC)의 60%로 수행되었다. 각 처리군 및 대조군은 모두 5반복으로 준비되었다. 각각의 시험용기마다 20마리의 성충(부화 후 28~30일이 지난) *Y. szeptyckii*를 접종한 후, $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 항온기, 암 조건에서 만성독성평가를 진행하였다. 토양 수분의 함량은 3차 증류수로 매주 보충해 주었으며 먹이로는 Brewer's yeast를 격주마다 제공하였다. 만성독성평가 종료 후 살아 남은 성충과 유충의 수를 계수하였다. 독성테스트 후 살아 남은 성체들을 모아 증류수에 씻은 후 종이필터가 깔린 유

리 접시 위에 24시간 동안 두어 불순물들을 제거하였다. 토포기들을 다시 증류수에 씻은 후 미리 무게를 측정된 유리 병으로 옮겼다. 그리고 70°C의 오븐에서 24시간 동안 두었다. *Y. szeptyckii*의 건조중량을 미세저울을 통해 측정 후 (HR-202; A&D, Japan) 1 mL의 HNO₃ and HClO₄ (7:1 v v⁻¹) 혼합 용액속에 넣고 100°C에서 완전히 증발될 때까지 소화시켰다. 소화 후에 남은 잔여물들을 2% (w w⁻¹) HNO₃에 용해시켜 *Y. szeptyckii* 내부의 카드뮴과 구리의 농도를 ICP-MS (Varian 820-MS; Varian Inc., Australia) 방법을 사용하여 측정하였다(Son *et al.* 2022).

2.4. 통계분석

모든 통계분석은 SAS 소프트웨어 버전 9.3를 사용하여 수행되었으며(SAS Institute 2011) 유의수준 5%에서 검정되었다. 체내중금속농도는 일원분산분석(One-way analysis of variance; PROC ANOVA)으로 비교하였으며 처리의 유의한 영향이 나타날 경우 LSMEAN 옵션을 사용하여 Tukey의 HSD 사후검정이 수행되었다. 성체 사망률의 50%를 일으키는 농도(LC₅₀)는 Probit 분석을 통해 결정되었으며, 유충 생산량의 50% 감소를 일으키는 농도(EC₅₀)는 Haanstra *et al.* (1985)이 제안한 로지스틱 모델에 데이터를 적합시켜 추정되었다. 이 모델은 Eq. 1과 같이 표현된다.

$$y = \frac{c}{[1 + \exp\{b \times (x - a)\}]} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서 y 는 유충 수, x 는 시험 농도의 자연 로그, a 는 EC₅₀의 자연 로그, b 는 기울기 매개 변수이며, c 는 대조군의 자손 생산수이다. 무영향농도(no observed effect concentrations, NOEC) 및 최저영향농도(lowest observed effect concentrations, LOEC)는 분산분석(PROC ANOVA)을 사용하여 분석되었으며, 그 후 Dunnett의 검정을 사용하여 테스트 농도 간의 차이를 분리하였다(Allison and Allison 2005).

3. 결 과

3.1. 카드뮴과 구리의 생물검정결과

카드뮴에 대한 만성독성평가 결과 *Y. szeptyckii*의 성충 생존률과 유충의 생산량에 유의한 영향을 보였다(Fig. 2A, Table 1; $df=5, 24, F=54.65, p<0.0001$ for adult; $df=5, 24, F=125.02, p<0.0001$ for juvenile). 사망률은 200 mg kg⁻¹의 처리 농도에서 대조군과 통계적으로 유의한 차이를 보였으며, LC₅₀ 값은 280 mg kg⁻¹이었다. 유충 생산량은 50 mg kg⁻¹ 이상의 농도에서 대조군과 통계적으로 유의한 차이를 보였으며 EC₅₀ 값은 66 mg kg⁻¹으로 나타났다. NOEC와 LOEC 값은 각각 25 mg kg⁻¹, 50 mg kg⁻¹으로 나타났다(Dunnett's test, $p<0.05$). 구리에 대한 만성독성평가 결과 역시 유의한 영향을 보였다(Fig. 2B, Table 1; $df=5, 24, F=5.09, p=0.004$ for adult; $df=5, 24, F=40.13, p<0.0001$ for juvenile). 사망률은 800 mg kg⁻¹의 처리 농도에서 대조군과 통계적으로 유의한 차이를 보

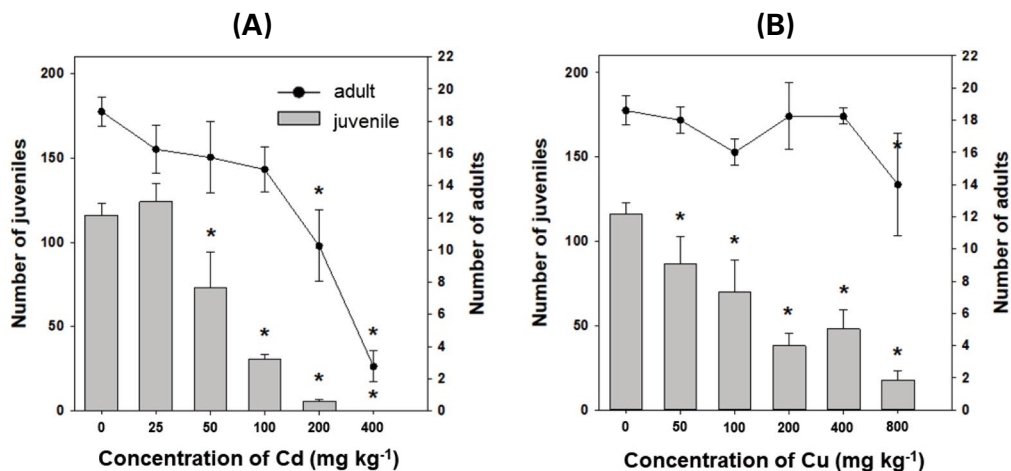


Fig. 2. Numbers of surviving adults (closed circles) and juvenile production (bars) of *Yuukianura szeptyckii*, along with standard deviations, after 28 days of exposure to cadmium (A) and copper (B). Asterisks indicate a significant difference from the control, as determined by Dunnett's test ($p<0.05$).

Table 1. LC₅₀ and EC₅₀ estimates (mg kg⁻¹), along with their 95% confidence limits, for the effects on the survival of *Yuukianura szeptyckii* after 28 days of exposure to different concentrations of cadmium and copper. No observed effect concentrations (NOEC) and lowest observed effect concentrations (LOEC) are each estimated using Dunnett's test at a 5% significance level

	28 days LC ₅₀ (mg kg ⁻¹)	28 days EC ₅₀ (mg kg ⁻¹)	NOEC (mg kg ⁻¹)	LOEC (mg kg ⁻¹)
Cd	280 (172-258)	66 (57-75)	25	50
Cu	911 (- ^a)	151 (109-209)	-	50

^anot available

였다 ($p < 0.05$). LC₅₀ 값은 911 mg kg⁻¹으로 카드뮴에 비해 낮은 독성을 보였다. 번식률은 50 mg kg⁻¹의 처리 농도에서 대조군과 통계적으로 유의한 차이를 보였으며, EC₅₀ 값은 151 mg kg⁻¹으로 나타났다. NOEC는 높은 독성으로 인해 해당 실험에서 계산되지 않았으며, LOEC 값은 50 mg kg⁻¹으로 나타났다(Dunnett's test, $p < 0.05$).

3.2. 체내축적농도

만성독성평가 동안 *Y. szeptyckii*의 내부에 축적된 카드뮴과 구리의 양은 Table 2에 제시되어 있다. 카드뮴의 축적량은 대조군에서는 0.33 mg kg⁻¹이었다. 이후, 200 mg kg⁻¹의 토양 처리 농도까지 유의하게 증가하였으며 ($df=6, 11, F=145.02, p < 0.0001$), 특히 200 mg kg⁻¹의 토양 처리 농도에서 27.47 mg kg⁻¹의 가장 큰 체내축적농도를 보였다. 이는 대조군에 비해 83배 높은 농도이다. 400 mg kg⁻¹ 농도에서는 유의한 체내축적농도의 증가를 보이지 못하였는데 이는 축적이 높은 대부분의 성충 개체의 사망으로 인하여 나타난 결과다. 구리의 체내축적농도는 대조군에서는 7.34 mg kg⁻¹이었다. 이후 농도가 증가함에 따라 꾸준히 유의한 증가를 보였으며 200 mg kg⁻¹의 토양 처리 농도에서부터 대조군과 유의한 차이를 보이기 시작했다 ($df=6, 11, F=175.35, p < 0.0001$). 800 mg kg⁻¹의 토양 처리 농도에서 28.36 mg kg⁻¹의 최대 체내축적농도를 보였으며, 이는 대조군과 비교하였을 때 3배 이상의 축적농도임을 확인할 수 있다.

4. 고 찰

본 연구는 2023년 ISO 가이드라인 11267에 부합하는 중금속 생물검정 방법론을 적용하여, *Y. szeptyckii*의 생태

Table 2. Internal body concentrations in mature *Yuukianura szeptyckii* after 28 days of exposure to cadmium and copper. Each experimental concentration was grouped using Tukey's method. Different letters (a, b, c, d) label the respective groups

Cd		
Concentration (mg kg ⁻¹)	Internal body concentration (mg kg ⁻¹)	Standard deviation
0	0.65 ^a	0.02
25	6.51 ^b	0.02
50	9.88 ^b	0.70
100	15.65 ^c	1.58
200	31.60 ^d	2.63
400	28.07 ^d	1.38
Copper		
Concentration (mg kg ⁻¹)	Internal body concentration (mg kg ⁻¹)	Standard deviation
0	7.34 ^a	0.19
50	8.69 ^{ab}	0.19
100	10.17 ^{ab}	0.46
200	12.10 ^b	1.77
400	24.92 ^c	0.53
800	28.36 ^c	1.37

독성평가를 수행하였다(ISO 2023). 이 연구의 목적은 *Y. szeptyckii*가 카드뮴 및 구리 같은 중금속에 대한 생물검정에 있어서 기존의 표준종에 비해 어떠한 생태독성 반응을 보이는지 평가하는 데에 있었다. *Y. szeptyckii*는 수변 환경에 서식하는 특성을 가지고 있으며, 이는 기존의 산림이나 논 토양에서 서식하는 표준종들과는 다른 생태적 특성을 나타낸다(Lee et al. 2016). 본 연구는 이러한 차이가 생물검정 결과에 어떤 영향을 미칠 수 있는지를 탐구하였다.

독성평가는 성충 및 유충의 생존율과 생산성에 대해 중금속이 미치는 영향을 평가하는 데 중점을 두었다. 연구 결과, 카드뮴과 구리의 농도가 증가함에 따라 *Y. szeptyckii* 내에서의 중금속 축적과 그로 인한 부정적인 영향이 관찰되었다. 이러한 결과는 중금속의 생태독성이 *Y. szeptyckii*의 생태적 적합도에 미치는 영향을 명확하게 시사한다. 더불어, 본 연구는 *Y. szeptyckii*의 민감도를 기존의 ISO guideline 11267에서 사용되는 표준종인 *Folsomia candida*와 *Allonychiurus kimi*와 비교 분석하였다. *A. kimi*의 경우 오랜 시간 동안 중금속에 민감한 종으로 연구되어져 왔으며

Table 3. The LC₅₀ and EC₅₀ values of other standard species, *Folsomia candida* and *Allonychiurus kimi*, exposed to Cd and Cu under various experimental conditions (time-scale, temperature, and endpoint). The range of the 95% confidence interval is shown in parentheses

Test species	Time-scale	Temperature	Endpoint	Toxicity (mg kg ⁻¹)	Reference
Cd					
<i>F. candida</i>	28 days	20°C	mortality, juvenile production	LC ₅₀ = 893, EC ₅₀ = 227	Crommentuijn <i>et al.</i> (1993)
<i>A. kimi</i>	28 days	20 ± 1°C	mortality, juvenile production	LC ₅₀ = 90.1 (28.3–139) EC ₅₀ = 60.0 (50.7–71.3)	Son <i>et al.</i> (2011)
Cu					
<i>F. candida</i>	28 days	20°C	mortality, juvenile production	LC ₅₀ = 2,141 (1,564–2,542) EC ₅₀ = 994 (591–1,208)	Scott-Fordsmand <i>et al.</i> (2000)
<i>A. kimi</i>	28 days	20 ± 1°C	mortality, juvenile production	LC ₅₀ = 1,567.3 (1,351.8–1,974.9) EC ₅₀ = 277 (213–358)	Son <i>et al.</i> (2017)

카드뮴과 구리에 대하여 토양 독성평가종들 중 가장 민감한 종으로 분류되어져 왔다(ISO 2023). *A. kimi*의 경우 카드뮴의 EC₅₀ 값은 60 mg kg⁻¹이며, 구리의 EC₅₀ 값은 277 mg kg⁻¹이다(Table 3). *Y. szeptykii*의 결과와 비교하였을 때 카드뮴은 비슷한 수준으로, 구리는 더욱 민감한 것으로 나타났다. 이 비교에서 *Y. szeptykii*는 카드뮴과 구리에 대해 비슷하거나 더 민감한 반응을 보임으로써, 중금속 생태독성평가에 있어서 새로운 표준종으로서 가능성을 보여주었다. 이러한 결과는 생물검정 방법론의 다양화와 환경 평가의 정확성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 직접적으로 다루지 않았지만, *Y. szeptykii*가 다양한 화학물질에 대한 독성값 데이터를 축적함으로써 중요한 생태학적 가치를 가질 수 있음을 시사한다. 기존의 연구들은 온도, 습도, 토성 및 유기물 함량과 같은 무생물적 요인들이 생물체의 생물유효성에 영향을 미친다고 지적하고 있다(Ashraf *et al.* 2014; Lee *et al.* 2021; Patel *et al.* 2021). 이는 같은 농도의 오염물질이라도 그것이 적용되는 생태계에 따라 영향이 달라질 수 있음을 의미한다. 특히, 토양 내 수분 함량은 생물체의 서식지 적합성에 중요한 영향을 미치는 요소로, 독성에 대한 직접적 혹은 간접적인 영향을 줄 수 있다(Lee *et al.* 2021; Patel *et al.* 2021). 본 연구의 대상인 *Y. szeptykii*는 수변 환경에 서식하는 종으로, 높은 습도에 적응된 종이다(Wee *et al.* 2021b). 본 연구에서는 다른 표준종들이 일반적으로 사용하는 토양용수량(water holding capacity)의 최대값인 60%에서 실험을 수행하였으며, 이러한 환경에서 다른 표

준종보다 민감한 독성값을 보이는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 산림이나 농경지와 같은 일반적인 토양 환경보다 수분 함량이 높은 환경에서 더욱 적합한 지표종으로 사용될 수 있음을 의미한다. 따라서, 이 종을 활용한 독성평가 연구는 특히 수분 함량이 높은 환경에서의 생태독성평가에 있어 매우 의미 있는 결과를 제공할 것으로 예상된다. 이러한 연구는 토양 및 수변 생태계의 건강성 평가 및 관리에 있어 중요한 기여를 할 수 있으며, 환경 보호 및 지속 가능한 생태계 관리를 위한 정책 결정에도 도움이 될 것이다.

5. 결 론

ISO guideline 11267에 따른 본 연구에서는 *Y. szeptykii*를 활용하여 카드뮴과 구리에 대한 만성 생태독성평가를 수행하였다. 연구 결과, *Y. szeptykii*는 카드뮴과 구리에 대해 높은 민감도를 보여 ISO guideline 11267에 명시된 기존 표준종들과 비교해 뛰어난 결과를 나타냈다. 특히 구리에 대해서는 기존 표준종보다 더 민감한 반응을 보였다. *Y. szeptykii*가 주로 수변 환경과 같이 높은 토양 수분 함량을 지닌 조건에서 서식한다는 점을 고려할 때, 이 종은 다양한 수분 조건을 가진 토양 생태계에서 중금속의 생태독성평가에 있어 중요한 역할을 할 수 있음을 시사한다. 이러한 결과는 *Y. szeptykii*를 생태독성평가의 표준종으로 활용하는 데 있어 실질적인 기여를 할 수 있으며, 향후 관련 연구 및 환경 정책 수립에 중요한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

적 요

생태계는 생물에게 매우 다양한 환경조건의 서식처를 제공하며 이 서식처 내에 적응한 생물만이 생존, 성장, 번식하며 해당 서식처에 살아가게 된다. 또한 서식처의 환경조건들은 서식처로 유입한 화학물질의 생물유효도 (bioavailability)에 크게 영향을 미쳐 생물들이 받는 부정적 영향이 서로 다를 수 있다. 본 연구에서는 생태독성평가에 적합한 ISO guideline 11276의 독성평가 표준 중 토양 생태계에 다양한 서식처 조건 중 수변 생태계에서 적응하여 살아가는 *Yuukianura szeptyckii*의 중금속에 대한 평가 민감성을 확인하고 수변 서식처 중금속 생태독성평가 종으로서의 가능성을 확인하는 데 있다. 결과는 카드뮴과 구리 모두 농도에 따른 유의한 독성영향을 보였다. 카드뮴의 경우 LC₅₀은 280 mg kg⁻¹, EC₅₀은 66 mg kg⁻¹, NOEC와 LOEC는 각각 25, 50 mg kg⁻¹으로 나타났으며 구리의 경우에는 LC₅₀은 911 mg kg⁻¹, EC₅₀은 151 mg kg⁻¹, LOEC는 50 mg kg⁻¹으로 나타났다. 기존의 국제표준종인 *Folsomia candida*와 국내표준종인 *Allonychiurus kimi*의 이전 결과와 비교하면 더욱 민감한 독성값을 보였으며, 이러한 생존과 번식에 미치는 부정적 영향은 체내의 중금속의 유입 농도와 밀접한 관련을 보였다. *Y. szeptyckii*는 수분 함량이 높은 토양에서 중금속 생태독성평가에 민감한 종으로 나타났으며, 상대적으로 높은 습도를 보일 가능성이 높은 수변 생태계에 적합한 생태독성평가종으로 사용이 가능할 것으로 생각된다.

CRedit authorship contribution statement

H Kim: Visualization, Writing - Original draft. **J Shin:** Visualization, Writing - Reviewing and editing. **D Jeong:** Data curation, Visualization. **J Jeong:** Investigation. **Y Kim:** Conceptualization, Methodology, Investigation. **J Wee:** Conceptualization, Methodology, Investigation. **K Cho:** Supervision. **YS Lee:** Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Visualization, Writing - Original draft, Writing - Reviewing and editing.

Declaration of Competing Interest

The authors declare no competing interests.

사 사

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Allison JD and TL Allison. 2005. Partition Coefficients for Metals in Surface Water, Soil, and Waste. Reprint: EPA/600/R-05/074. US Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Ashraf MA, MJ Maah and I Yusoff. 2014. Soil contamination, risk assessment and remediation. pp. 3-56. In: Environmental Risk assessment of Soil Contamination (Hernandez Soriano MC, ed.). InTech, Rijeka, Croatia. <https://doi.org/10.5772/57287>
- Crommentuijn T, J Brils and NM VanStraalen. 1993. Influence of cadmium on life-history characteristics of *Folsomia candida* (Willem) in an artificial soil substrate. *Ecotox. Environ. Safe.* 26:216-227. <https://doi.org/10.1006/eesa.1993.1051>
- Haanstra L, P Doelman and JHO Voshaar. 1985. The use of sigmoidal dose response curves in soil ecotoxicological research. *Plant Soil* 84:293-297. <https://doi.org/10.1007/BF02143194>
- Henis Y. 1999. Biotic and abiotic factors involved in bioavailability of pollutants. pp. 197-204. In: Novel Approaches for Bioremediation of Organic Pollution (Fass R, Y Flashner and S Reuveny, eds.). Springer, Boston, Massachusetts. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4749-5_20
- ISO. 1999. Soil Quality: Inhibition of Reproduction of Collembola (*Folsomia candida*) by Soil Pollutants. ISO 11267:1999. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.
- ISO. 2023. Soil Quality: Inhibition of Reproduction of Collembola (*Folsomia candida*) by Soil Contaminants. ISO 11267:2023. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.
- Kebede G, T Tafese, EM Abda, M Kamaraj and F Assefa. 2021. Factors influencing the bacterial bioremediation of hydrocarbon contaminants in the soil: Mechanisms and impacts. *J. Chem.* 2021:1-17. <https://doi.org/10.1155/2021/9823362>
- Kim D, JI Kwak, W Hwang, YH Lee, YS Lee, JI Kim, S Hong, S Hyun and YJ An. 2022. Site-specific ecological risk assessment of metal-contaminated soils based on the TRIAD approach. *J. Hazard. Mater.* 434:128883. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128883>
- Koptsik SV and GN Koptsik. 2022. Assessment of current risks of excessive heavy metal accumulation in soils based on the concept of critical loads: A review. *Eurasian Soil Sci.* 55:627-640. <https://doi.org/10.1134/S1064229322050039>
- Lee YS, J Son, J Wee, Y Kim, DY Kim, JH Kwon and K Cho. 2019a.

- Contributions of egg production and egg hatching to the total toxicity of teflubenzuron in *Yuukianura szeptyckii* (Collembola) in soil toxicity test. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26:26184–26192. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05892-7>
- Lee YS, J Son, J Wee, Y Kim, J Hong and K Cho. 2020. A reconsideration of the safety of fenoxycarb (IGR) in soil environment: The toxicity of fenoxycarb to *Yuukianura szeptyckii* (Collembola). *J. Asia-Pac. Entomol.* 23:214–218. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2019.12.006>
- Lee YS, K Cho and KH Park. 2019b. New record of *Folsomia quadrioculata* (Tullberg, 1871) and redescription of *Folsomia octoculata* (Handschin, 1925) from the forest of South Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 37:1–7. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2019.37.1.001>
- Lee YS, MS Kim, J Wee, HG Min, JG Kim and K Cho. 2021. Effect of bioavailable arsenic fractions on the collembolan community in an old abandoned mine waste. *Environ. Geochem. Health* 43:3953–3966. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00895-1>
- Lee YS, NH Yang, J Son, Y Kim, KH Park and K Cho. 2016. Effects of temperature on development, molting, and population growth of *Yuukianura szeptyckii* Deharveng & Weiner, 1984 (Collembola: Neanuridae). *Appl. Soil Ecol.* 108:325–333. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.09.011>
- Lee YS, SE Lee, J Son, Y Kim, J Wee and K Cho. 2018. Toxicity effects and biomarkers of tebufenozide exposure in *Yuukianura szeptyckii* (Collembola: Neanuridae). *Environ. Geochem. Health.* 40:2773–2784. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0143-7>
- Mohan M, A Chacko, M Rameshan, VG Gopikrishna, VM Kannan, NG Vishnu, SA Sasi and KR Baiju. 2022. Restoring riparian ecosystems during the UN-decade on ecosystem restoration: a global perspective. *Anthropol. Sci.* 1:42–61. <https://doi.org/10.1007/s44177-022-00009-1>
- Nogales B, MP Lanfranconi, JM Piña-Villalonga and R Bosch. 2011. Anthropogenic perturbations in marine microbial communities. *FEMS Microbiol. Rev.* 35:275–298. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2010.00248.x>
- OECD. 1984. OECD Guideline for Testing of Chemicals: Earthworm, Acute Toxicity Test. Test No.207. Organisation for Economic Cooperation and Development. Paris, France. <https://doi.org/10.1787/9789264070042-en>
- Patel KF, SJ Fansler, TP Campbell, B Bond-Lamberty, AP Smith, T RoyChowdhury, LA McCue, T Varga and VL Bailey. 2021. Soil texture and environmental conditions influence the biogeochemical responses of soils to drought and flooding. *Commun. Earth Environ.* 2:127. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00198-4>
- Rahim HU, WA Akbar and JM Alatalo. 2022. A comprehensive literature review on cadmium (Cd) status in the soil environment and its immobilization by biochar-based materials. *Agronomy* 12:877. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040877>
- SAS Institute. 2011. SAS/IML 9.3 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina.
- Scott-Fordsmand JJ, PH Krogh and JM Weeks. 2000. Responses of *Folsomia fimetaria* (Collembola: Isotomidae) to copper under different soil copper contamination histories in relation to risk assessment. *Environ. Toxicol. Chem.* 19:1297–1303. <https://doi.org/10.1002/etc.5620190511>
- Singha S and S Chatterjee. 2022. Soil Pollution by Industrial Effluents, Solid Wastes and Reclamation Strategies by Microorganisms. pp. 471–488. In: *Soil Health and Environmental Sustainability: Application of Geospatial Technology* (Shit PK, PP Adhikary, GS Bhunia and D Sengupta, eds.). Springer. Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09270-1_20
- Son J, YS Lee, SE Lee, KI Shin and K Cho. 2017. Bioavailability and toxicity of copper, manganese, and nickel in *Paronychiurus kimi* (Collembola), and biomarker discovery for their exposure. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 72:142–152. <https://doi.org/10.1007/s00244-016-0328-y>
- Son J, YS Lee, Y Kim and K Cho. 2022. Soil compression influences the avoidance behavior of *Allonychiurus kimi* (Collembola) to cadmium and copper. *Pedosphere* 32:487–494. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60088-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60088-7)
- Son J, YS Lee, Y Kim, SE Lee, JG Kim, S Hyun and K Cho. 2011. Soil compaction as a stressor, and its effect on cadmium toxicity to *Paronychiurus kimi* (Collembola). *Appl. Soil Ecol.* 47:204–209. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.12.005>
- Wang X, D Wei, Y Ma and MJ McLaughlin. 2015. Derivation of soil ecological criteria for copper in Chinese soils. *PLoS One* 10:e0133941. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133941>
- Wee J, YS Lee, Y Kim, YH Lee, SE Lee, S Hyun and K Cho. 2021a. Multigeneration toxicity of Geunsami® (a glyphosate-based herbicide) to *Allonychiurus kimi* (Lee) (Collembola) from sub-individual to population levels. *Environ. Pollut.* 291:118172. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118172>
- Wee J, YS Lee, T Lee, P Kim, J Son, Y Kim and K Cho. 2021b. The complete mitochondrial genome of *Yuukianura szeptyckii* Deharveng & Weiner 1984 (Collembola: Neanuridae). *Mitochondrial DNA B.* 6:925–926. <https://doi.org/10.1080/23802359.2021.1888330>